



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBON ELYAF TAKVİYELİ PETEK YAPILI SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ÇEKİRDEK MALZEMENİN TÜRÜ ve
KALINLIĞININ ETKİSİ**

Burak GÜL

Doç. Dr. Rukiye ERTAN

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bursa – 2018

TEZ ONAYI

Burak GÜL tarafından hazırlanan “Karbon elyaf takviyeli petek yapılı sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerine çekirdek malzemenin türü ve kalınlığının etkisi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Rukiye ERTAN

Üye : Doç. Dr. Rukiye ERTAN
Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı



İmza

Üye : Doç. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL
Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı



İmza

Üye : Doç. Dr. Onur SARAY
Bursa Teknik Üniversitesi
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



İmza

Yukarıdaki sorucuyu onaylarım



Prof. Dr. Ali BAYRAM

Enstitü Müdürü

21.12.2018

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.././....

Burak GÜL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARBON ELYAF TAKVİYELİ PETEK YAPILI SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ÇEKİRDEK MALZEMENİN TÜRÜ ve KALINLIĞININ ETKİSİ

Burak GÜL

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Rukiye ERTAN

Sandviç kompozitler ağırlıklarına oranla yüksek eğilme ve kayma mukavemetine sahiptirler. Bu sebeple havacılık, uzay, denizcilik, otomotiv, inşaat gibi endüstrilerde yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada; ilk olarak elle yatırma yöntemi ile karbon fiber yüzey plakaları üretilmiştir. Sandviç üretiminde karbon fiber termoset kompozit plakalar yüzey malzemesi olarak, alüminyum, polipropilen ve nomex petek yapılar ise çekirdek malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu sandviçler çekirdeğin 5 mm ve 20 mm kalınlığı ile üretilmişlerdir. Bu şekilde 6 farklı cins eğilme numunesi elde edilmiştir. Üç nokta eğilme testleri oda sıcaklığında (23°C) ve şartlandırma kabini içerisinde sıvı nitrojen sıcaklığında -40°C’de gerçekleştirilmiştir. Çekirdek malzeme cinsinin, kalınlığının ve ortam sıcaklığının eğilme direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneyler sonunda elde edilen mekanik özellikler grafik ve tablolar ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ek olarak kırıkların, optik mikroskop altında incelemesi yapılmış olup, sandviçlerin kırılma davranışları araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Sandviç kompozit, Karbon fiber, Balpeteği çekirdek, Eğilme direnci, Kriyojenik sıcaklık

2018, xiv + 144 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

EFFECT of TYPE and THICKNESS of CORE MATERIAL on MECHANICAL PROPERTIES of CARBON FIBER REINFORCED HONEYCOMB SANDWICH COMPOSITES

Burak GÜL

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Rukiye ERTAN

Sandwich composites have high bending and shear strength compared to their weight. For this reason, they are used as building materials in the aerospace, marine, automotive and construction industries.

In this study; first, carbon fiber surface plates were produced by hand lay-up method. Carbon fiber thermoset composites were used as the surface material, aluminum, polypropylene and nomex honeycombs as core material in the production of sandwiches. These sandwiches were produced both 5 mm and 20 mm core thickness. In this way, 6 different type of bending samples were obtained. Three point bending tests were performed at room temperature (23°C) and liquid nitrogen temperature in the conditioning chamber at -40°C. The effects of the type and thickness of core material and test temperature on the bending resistance were investigated. At the end of the experiment, obtained mechanical properties were presented in comparative charts and tables. In addition, fractures were also examined under optic microscope and with this method fracture behaviors were investigated.

Key words: Sandwich composite, Carbon fiber, Honeycomb core, Bending strength, Cryogenic temperature

2018, xiv + 144 pages.

TEŞEKKÜR

Hayatımda aldığım her kararında beni maddi ve manevi bir şekilde destekleyen aileme, yüksek lisans eğitimim boyunca bilgisiyle, deneyimiyle hep yol gösterici olmuş değerli danışmanım Doç. Dr. Rukiye ERTAN'a, tez çalışmamın bir sanayi-üniversite projesine dönüşmesinde kilit rol oynamış Dr. İsmail DURGUN'a, üretim aşamasında tüm destek ve yardımları için Doç. Dr. Abdil KUŞ'a, değişim öğrencisi olarak gittiğim Politecnico di Torino'daki eşdeğer tez danışmanım Associate Professor Graziano UBERTALLI'ye ve özellikle buradaki çalışmalarında yardımları için asistanı ve Phd öğrencisi Muhammad Kashif BANGASH'a ve son olarak da bu tez çalışmasında sağladığı tüm imkanlar için TOFAŞ TÜRK OTOMOBİL FABRİKALARI A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Burak GÜL

.././....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Kompozit Malzemeler.....	19
2.1.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları.....	22
2.1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	25
2.1.3. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları.....	29
2.1.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	35
2.1.5. Kompozit Malzemelerin Bileşenleri.....	39
2.2. Sandviç kompozitler.....	42
2.2.1. Sandviç Kompozitlerin Avantajları ve Dezavantajları.....	44
2.2.2. Sandviç Kompozitlerin Uygulama Alanları.....	46
2.2.3. Sandviç Kompozitlerin Bileşenleri.....	48
2.2.4. Petek Yapılı Sandviç Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	56
2.2.5. Petek Yapılı Sandviç Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	57
2.2.6. Petek Yapılı Sandviç Kompozitlerin Hasar Türleri.....	62
2.2.7. Sandviç Kompozitlere Dış Ortam Etkisi.....	66
2.2.8. Sandviç Kompozitlerin Mekanik Testleri.....	67
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	74
3.1. Testlerde Kullanılan Yüzey Malzemeleri.....	74
3.1.1. Karbon Elyaf Yüzey Plakalarının Üretim Planı.....	75
3.1.2. Karbon Elyaf Yüzey Plakalarının Üretimi.....	77
3.2. Testlerde Kullanılan Çekirdek Malzemeler.....	79
3.2.1. Polipropilen Çekirdek.....	80
3.2.2. Nomex Çekirdek.....	81
3.2.3. Alüminyum Çekirdek.....	81
3.3. Sandviç Kompozitlerin Birleştirme İşlemi.....	82
3.4. Sandviç Kompozitlerin Üç Nokta Eğme Deneyleri.....	86
3.5. Test Sonrası Numunelerin Optik Mikroskop Altında İncelenmesi.....	89
4. BULGULAR.....	91
4.1. Oda Sıcaklığında Yapılan Deney Sonuçları.....	91
4.1.1. Nomex Çekirdekli Sandviç Malzeme Sonuçları.....	91
4.1.2. PP Çekirdekli Sandviç Malzeme Sonuçları.....	94
4.1.3. Al Çekirdekli Sandviç Malzeme Sonuçları.....	97
4.2. -40°C’de Yapılan Deney Sonuçları.....	100
4.2.1. Nomex Çekirdekli Sandviç Malzeme Sonuçları.....	100
4.2.2. PP Çekirdekli Sandviç Malzeme Sonuçları.....	103
4.2.3. Al Çekirdekli Sandviç Malzeme Sonuçları.....	106

4.3. Deney Sonuçlarının Karşılaştırması.....	109
4.3.1. Çekirdek Malzeme Cinsine Göre Karşılaştırma.....	109
4.3.2. Çekirdek Malzeme Kalınlığına Göre Karşılaştırma.....	111
4.3.3. Sıcaklık Farkına Göre Karşılaştırma.....	114
4.4. Deney Sonunda Numunelerin Detay Görüntüleri.....	117
4.5. Deney Sonunda Numunelerin Optik Mikroskop Altında İncelenmesi.....	121
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	133
KAYNAKLAR.....	139
ÖZGEÇMİŞ.....	144



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
b	Sandviç genişliği (mm)
c	Çekirdek kalınlığı (mm)
D	Bükülme direnci ($N.m^2$)
d	Sandviç yapı toplam kalınlığı (mm), Sehim(mm)
E	Eğilme modülü (MPa)
Fi	Yüzeyi eğmek için gerekli yük(N)
Fo	Ortalama yük(N)
h	Yüzey kalınlığı (mm)
l	İki destek noktası arası mesafe (m), Numune boyu (m)
m	Malzemelerin Şekil Değiştirme Hızı Duyarlılığı
P	Yük miktarı (N)
Pmax	Maksimum yük miktarı (N)
Ro	Yükleme Kayışı Yarı Kalınlığı ve Flanş Çapı Toplamı (mm)
Ri	Gövde çapı(mm)
T	Ortalama Soyulma Torku (N)
Tg	Camsı Geçiş Sıcaklığı
t	Yüzey kalınlığı (mm)
w	Panel Genişliği (mm)
Δf	Sehim değişimi (mm)
Δp	Akma noktası (N)
$\Delta \delta$	Toplam sehim miktarı (m)
σ	Eğilme dayanımı (MPa), Yüzey stresi (MPa), Dayanım (MPa)
τ	Çekirdek kayma gerilmesi (MPa), Kayma gerilmesi(MPa)

Kısaltmalar	Açıklama
Al	Alüminyum
ASTM	ASTM International
CTP	Cam Takviyeli Polyester
GMT	Preslenebilir Takviyeli Termoplastikler
PAN	Poliakrilonitril
PBT	Polybutylene Terephthalate (Polibütilen Tereftalat)
PEEK	Polietereterketon
PP	Polipropilen
PPS	Polifenilen Sülfür
RTM	Reçine Transfer Metodu
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
SMC	Sheet Moulding Composites (Sac Kalıplama Kompozitleri)
UV	Ultraviolet (Morötesi ışın)
OM	Optic microscope (Optik mikroskop)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Farklı sıcaklıklarda yapılan test sonuçlarının grafiği.....	4
Şekil 2.2.	Farklı sıcaklıklarda karbon elyaf ile yapılan testlerin grafiği.....	5
Şekil 2.3.	Farklı sıcaklık ve yönlerde yapılan eğilme testlerinin grafiği.....	7
Şekil 2.4.	Test sonrası numuneler.....	7
Şekil 2.5.	Numuneler üzerindeki hasar tipleri.....	8
Şekil 2.6.	Üç nokta eğme sonucu kırık oluşum bölgeleri bölgeleri.....	9
Şekil 2.7.	Farklı sıcaklıklarda yapılan üç nokta eğme testi sonuçları.....	9
Şekil 2.8.	Farklı sıcaklıklarda yapılan eğilme testi sonuçları.....	10
Şekil 2.9.	Farklı sıcaklıklarda yapılan eğilme testi sonuçları.....	11
Şekil 2.10.	Farklı sıcaklıklarda yapılan eğilme testleri ve sertlik değerleri.....	12
Şekil 2.11.	Farklı çekirdek yükseklikleriyle yapılan deney sonuçları.....	13
Şekil 2.12.	Sandviç üzerindeki gerilme bölgeleri a)üst yüzey b)çekirdek c)alt yüzey..	14
Şekil 2.13.	Farklı sıcaklıklarda yapılan üç nokta eğme testi sonuçları.....	15
Şekil 2.14.	Farklı core kalınlıkları ve ara yüzey sayısının dayanım ile ilişkisi.....	16
Şekil 2.15.	Farklı core kalınlıklarıyla dayanım ilişkisi.....	16
Şekil 2.16.	Farklı core kalınlıklarıyla kayma gerilmesi ilişkisi.....	17
Şekil 2.17.	Üç nokta eğme testine sıcaklık etkisi	18
Şekil 2.18.	Farklı core kalınlıklarıyla yapılan deney sonuçlarına göre dayanım ve sertlik değerleri.....	18
Şekil 2.19.	Basit kompozit modeli.....	19
Şekil 2.20.	Malzemelerin Young modülü/yoğunluk oranı karşılaştırması.....	21
Şekil 2.21.	Malzemelerin Dayanım/yoğunluk oranı karşılaştırması.....	21
Şekil 2.22.	Farklı mühendislik malzemelerinin genel özelliklerinin karşılaştırması....	23
Şekil 2.23.	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	25
Şekil 2.24.	Matris malzemesine göre kompozitlerin sınıflandırılması.....	27
Şekil 2.25.	Kompozit malzemedan üretilen crash test bariyerleri.....	30
Şekil 2.26.	BMW 7 araç gövdesinde karbon fiber kullanımı.....	31
Şekil 2.27.	BMW 7 gövdesinde kullanılan karbon fiber örnekleri.....	32
Şekil 2.28.	Kompozit malzeme kullanımına örnek araçlar	32
Şekil 2.29.	Kompozit kullanımına örnek Ferrari Formula 1 aracı.....	33
Şekil 2.30.	Otomotiv ve ulaşımda kompozit kullanımına örnekler.....	33
Şekil 2.31.	Otomotiv alanında karbon elyaf kullanımına örnekler.....	34
Şekil 2.32.	Toz metalürjisi metodu	35
Şekil 2.33.	Püskürtme yöntemi	37
Şekil 2.34.	Profil çekme yöntemi.....	37
Şekil 2.35.	Elyaf sarma yöntemi.....	38
Şekil 2.36.	Reçine transfer kalıplama yöntemi.....	38
Şekil 2.37.	Vakum torbalama yöntemi.....	39
Şekil 2.38.	Bazı takviye malzemelerin gerilim-uzama grafiği.....	40
Şekil 2.39.	Farklı oryantasyonda karbon kumaş tipleri.....	42
Şekil 2.40.	Elyafın mekanik özelliklerinin Al ve Çelik ile karşılaştırması.....	42
Şekil 2.41.	Sandviç kompozit yapısı.....	43
Şekil 2.42.	Aynı ağırlığa sahip farklı kesit alanlı yapıların rijitliği.....	44

Şekil 2.43.	Çeşitli balpeteği yapıları sandviç kompozit uygulamaları.....	46
Şekil 2.44.	Otomobilde bazı potansiyel sandviç kompozit uygulama bölgeleri.....	47
Şekil 2.45.	Karbon elyaf kumaşı ve mikroskop altında kırılmış elyaf görünümü.....	50
Şekil 2.46	Çekirdek yapısına göre sandviç kompozitler (a) Kıvrımlı (b) Köpük (c) Kafes (d) Balpeteği çekirdekler.....	51
Şekil 2.47.	Farklı sandviç çekirdek malzemelerinin maliyet-performans grafiği.....	51
Şekil 2.48.	Sandviç malzeme ve I giriş karşılaştırması.....	52
Şekil 2.49.	Uzatarak şekil verme yöntemiyle petek yapı üretimi.....	53
Şekil 2.50.	Kıvrılarak şekil verme yöntemiyle petek yapı üretimi.....	53
Şekil 2.51.	İdeal gerilme-uzama grafiği.....	54
Şekil 2.52.	Balpeteği çekirdekli sandviç kullanıma örnekler.....	57
Şekil 2.53.	Farklı cinsteki çekirdek malzemelere sahip sandviç malzemeler.....	58
Şekil 2.54.	Balpetek çekirdekli sandviç kompozit için yükleme modeli.....	59
Şekil 2.55.	Sandviç kompozitler için Stress-Strain grafiği.....	59
Şekil 2.56.	Sandviç kompozitlerin üç nokta eğilme altında etkilendiği kuvvetler.....	60
Şekil 2.57.	Sandviç kompozitler için başlıca hasar türleri.....	63
Şekil 2.58.	Balpeteği sandviçlerin hasar türleri.....	63
Şekil 2.59.	Balpeteği sandviçlerin yükleme problemleri ve sebepleri.....	64
Şekil 2.60.	Temel kırılma modları; a) tabakalar içi, b)tabakalar arası, c)tabakaları kesen.....	65
Şekil 2.61.	Çatlak ilerleme modları.....	65
Şekil 2.62.	Sıcaklığın sandviç kompozitin eğilme üzerindeki etkisi.....	66
Şekil 2.63.	Dört nokta eğilme testi.....	68
Şekil 2.64.	Üç nokta eğilme testi.....	69
Şekil 2.65.	Düz yüzey gerilim testi.....	70
Şekil 2.66.	Düz yüzey basma testi.....	70
Şekil 2.67.	Yan basma testi.....	71
Şekil 2.68.	Soyma testi.....	72
Şekil 3.1.	Kullanılan karbon fiber kumaş.....	75
Şekil 3.2.	Yüzey plakalarının numune boyut ve sayılarına göre üretim planı.....	75
Şekil 3.3.	Üretimi planlanan sandviç kompozitin bileşenleri.....	76
Şekil 3.4.	Üretime hazır halde ve planlanan boyutlarda kesilmiş karbon fiber kumaşlar.....	77
Şekil 3.5.	Epoksi ve sertleştiricinin hesaplanan oranda ağırlıkça karışımı.....	78
Şekil 3.6.	Karbon fiber yüzey plakalarının elle yatırma yöntemi ile üretimi.....	78
Şekil 3.7.	Karbon fiber plakaların numune boyutlarında kesilmesi işlemi.....	79
Şekil 3.8.	Kullanılan çekirdek malzemeler.....	79
Şekil 3.9.	PP çekirdek.....	80
Şekil 3.10.	Test standartlarına uygun boyutlarda kesilmiş Nomex çekirdekler.....	81
Şekil 3.11.	Test standartlarına uygun boyutlarda kesilmiş Al çekirdekler.....	82
Şekil 3.12.	Numune hazırlamada balpeteği konfigürasyonu.....	83
Şekil 3.13.	Birleştirme işlemine hazır halde yüzey ve çekirdek malzemeleri.....	83
Şekil 3.14.	Sandviç malzemenin birleştirme işleminde kullanılan yapıştırıcı ve sertleştirici.....	84
Şekil 3.15.	Birleştirilensandviç numunelerinin ağırlık altında oda sıcaklığında kürlenme aşaması.....	84
Şekil 3.16.	Hazırlanan 3 nokta eğilme ve impact numuneleri.....	85
Şekil 3.17.	Gruplandırılmış ve numaralandırılmış 3 nokta eğilme test numuneleri.....	85

Şekil 3.18. Sıfırın altındaki sıcaklıklarda yapılan 3 nokta eğme test düzeneği ve şartlandırma odası.....	86
Şekil 3.19. Test Cihazı Bilgileri ve Test Parametreleri.....	87
Şekil 3.20. 5mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç kompozit numunesinin 3 nokta eğilme testi.....	88
Şekil 3.21. Farklı cins çekirdek ve kalınlıklardaki test numunelerinin 3 nokta eğilme testi.....	88
Şekil 3.22. Şartlandırma odası içerisinde -40°C ortamda gerçekleştirilen 3 nokta eğilme testi.....	89
Şekil 3.23. Mikro boyutta görüntü elde etmek için kullanılan 3 farklı optik mikroskop.....	90
Şekil 4.1. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviçlerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	91
Şekil 4.2. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri.....	92
Şekil 4.3. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri.....	92
Şekil 4.4. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	93
Şekil 4.5. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri.....	93
Şekil 4.6. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri.....	94
Şekil 4.7. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	94
Şekil 4.8. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri.....	95
Şekil 4.9. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri.....	95
Şekil 4.10. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	96
Şekil 4.11. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri.....	96
Şekil 4.12. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri.....	97
Şekil 4.13. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	97
Şekil 4.14. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri.....	98
Şekil 4.15. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri.....	98
Şekil 4.16. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	99
Şekil 4.17. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri.....	99
Şekil 4.18. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri.....	100

Şekil 4.19.	-40°C’de 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	100
Şekil 4.20.	-40°C’de 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri.....	101
Şekil 4.21.	-40°C’de 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri.....	101
Şekil 4.22.	-40°C’de 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	102
Şekil 4.23.	-40°C’de 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri.....	102
Şekil 4.24.	-40°C’de 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri.....	103
Şekil 4.25.	-40°C’de 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	103
Şekil 4.26.	-40°C’de 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri.....	104
Şekil 4.27.	-40°C’de 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri.....	104
Şekil 4.28.	-40°C’de 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	105
Şekil 4.29.	-40°C’de 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri.....	105
Şekil 4.30.	-40°C’de 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri.....	106
Şekil 4.31.	-40°C’de 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	106
Şekil 4.32.	-40°C’de 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri.....	107
Şekil 4.33.	-40°C’de 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri.....	107
Şekil 4.34.	-40°C’de 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	108
Şekil 4.35.	-40°C’de 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri.....	108
Şekil 4.36.	-40°C’de 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri.....	109
Şekil 4.37.	Oda sıcaklığında 5 mm kalınlığa sahip farklı cins çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	109
Şekil 4.38.	Oda sıcaklığında 20 mm kalınlığa sahip farklı cins çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	110
Şekil 4.39.	-40°C’de 5 mm kalınlığa sahip farklı cins çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	110
Şekil 4.40.	-40°C’de 20 mm kalınlığa sahip farklı cins çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	111
Şekil 4.41.	Oda sıcaklığında farklı kalınlığa sahip Nomex çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	111
Şekil 4.42.	Oda sıcaklığında farklı kalınlığa sahip PP çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	112

Şekil 4.43. Oda sıcaklığında farklı kalınlığa sahip Al çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	112
Şekil 4.44. -40°C’de farklı kalınlığa sahip Nomex çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	113
Şekil 4.45. -40°C’de farklı kalınlığa sahip PP çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	113
Şekil 4.46. -40°C’de farklı kalınlığa sahip Al çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	114
Şekil 4.47. Farklı sıcaklıklarda 5 mm kalınlığa sahip Nomex çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	114
Şekil 4.48. Farklı sıcaklıklarda 20 mm kalınlığa sahip Nomex çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	115
Şekil 4.49. Farklı sıcaklıklarda 5 mm kalınlığa sahip PP çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	115
Şekil 4.50. Farklı sıcaklıklarda 20 mm kalınlığa sahip PP çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	116
Şekil 4.51. Farklı sıcaklıklarda 5 mm kalınlığa sahip Al çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	116
Şekil 4.52. Farklı sıcaklıklarda 20 mm kalınlığa sahip Al çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği.....	117
Şekil 4.53. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi.....	117
Şekil 4.54. -40°C’de 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi.....	118
Şekil 4.55. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi.....	118
Şekil 4.56. -40°C’de 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi.....	118
Şekil 4.57. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi.....	119
Şekil 4.58. -40°C’de 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi.....	119
Şekil 4.59. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi.....	119
Şekil 4.60. -40°C’de 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi.....	120
Şekil 4.61. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi.....	120
Şekil 4.62. -40°C’de 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi.....	120
Şekil 4.63. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi.....	121
Şekil 4.64. -40°C’de 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi.....	121
Şekil 4.65. Al 20 mm çekirdek kalınlığına sahip numunelerin OM-1 ve OM-2’den elde edilen görüntüleri.....	122
Şekil 4.66. Al 5 mm çekirdek kalınlığına sahip numunelerin OM-1 ve OM-2’den elde edilen görüntüleri.....	122

Şekil 4.67. Nomex 20 mm çekirdek kalınlığına sahip numunelerin OM-1 ve OM-2'den elde edilen görüntüleri.....	123
Şekil 4.68. Nomex 5 mm çekirdek kalınlığına sahip numunelerin OM-1 ve OM-2'den elde edilen görüntüleri.....	124
Şekil 4.69. PP 20 mm çekirdek kalınlığına sahip numunelerin OM-1 ve OM-2'den elde edilen görüntüleri.....	125
Şekil 4.70. PP 5 mm çekirdek kalınlığına sahip numunelerin OM-1 ve OM-2'den elde edilen görüntüleri.....	125
Şekil 4.71. Al 5 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3'den elde edilen görüntüleri.....	126
Şekil 4.72. Nomex 5 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3'den elde edilen görüntüleri.....	127
Şekil 4.73. PP 5 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3'den elde edilen görüntüleri.....	127
Şekil 4.74. Al 5 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3'den elde edilen yüzey görüntüleri.....	128
Şekil 4.75. Nomex 5 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3'den alınan yüzey görüntüleri.....	129
Şekil 4.76. PP 5 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3'den alınan yüzey görüntüleri.....	129
Şekil 4.77. Al 20 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3 ile alınan fiber-matris görüntüleri.....	131
Şekil 5.1. Test sonuçlarına göre hesaplanan rijitlik değerleri.....	136

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Farklı sıcaklıklarda cam elyaf ile yapılan test sonuçları.....	4
Çizelge 2.2. Farklı sıcaklıklarda karbon elyaf ile yapılan test sonuçları.....	5
Çizelge 2.3. Malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	23
Çizelge 2.4. Kompozit malzemelerin kullanım alanları grafiği	30
Çizelge 2.5. Bazı elyaf ve geleneksel malzemelerin mekanik özellikleri.....	41
Çizelge 2.6. Balpeteği sandviç kompozitlerin mekaniksel avantajları.....	45
Çizelge 3.1. Karbon fiber kumaşın özellikleri.....	74
Çizelge 3.2. PP çekirdeğin özellikleri.....	81
Çizelge 3.3. Nomex çekirdek özellikleri.....	81
Çizelge 3.4. Al çekirdek özellikleri.....	82
Çizelge 5.1. Sonuçların karşılaştırması.....	133
Çizelge 5.2. Akma değerlerine göre çekirdek malzemelerin karşılaştırması	134

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihi göz önüne alındığında, yaşanan çağ ve devirleri (Taş devri, Bronz çağı, Demir çağı) kategorize etmek için o dönemlerde kullanılan malzemelerle isimlendirmeler yapıldığını görmekteyiz. Yaşadığımız çağ için gelecek nesiller tarafından yine böyle isimlendirilmeler yapılacağını düşünersek çelik çağı ve ardından kompozit çağı isimlerinin kullanılacağını söylemek çok zor değildir.

Teknolojinin ilerlemesiyle, tasarımda beklenen performans özelliklerinin her geçen gün artması, yeni malzeme arayışlarını beraberinde getirmiştir. Tek bir malzeme ile ihtiyaç duyulan özellikleri elde etme konusundaki doğal sınırlar, birden fazla malzemenin yapay yollarla birleşimiyle giderilmeye çalışılmıştır. En az iki farklı malzemenin heterojen bir şekilde birleşimi ile oluşturulan yeni malzemeye kompozit malzeme denir.

Sandviç kompozitler, kompozit malzemelerin bir alt dalı olup iki ince yüzey malzemesi arasına daha kalın hafif bir çekirdek malzeme ile kat kat yerleştirilip üretimi ile elde edilir. Sandviç malzemeler bileşenlerinin özelliklerine, kalınlıklarına, birleştirilme şekillerine göre farklı mekanik özellikler gösterebilir. Sandviç malzemelerin tasarımında, farklı uygulamalar için değişik alt ve üst yüzey tabakası ve farklı çekirdek malzeme seçimleri yapılarak optimal tasarımların bulunması büyük avantajlarından biri olarak gösterilebilir.

Kompozit sandviç malzemelerin kullanımı havacılık, denizcilik, uzay, otomotiv gibi büyük sektörlerde yüksek eğilme ve kayma mukavemeti sağlaması, sertlik özellikleri, korozyon direnci ve en önemlisi düşük ağırlıkları ve dolayısıyla CO₂ emisyonlarını düşürmesi sebebiyle artarak devam etmektedir. Özellikle otomotiv endüstrisinde malzemelerin mukavemet değerlerinin korunup daha hafif araçlar üretip hedeflenen CO₂ salınım değerlerine ulaşmak amacıyla sandviç kompozitlerin geliştirilmesi için önemli çalışmalar yapılmaktadır. Balpeteği çekirdekli karbon fiber takviyeli sandviçlerin denizcilik ve havacılık sektöründe oldukça geniş yer bulduğunu düşünersek maliyetlerin düşürülmesi üretim yöntemlerinin seri üretime daha uygun hale getirilmesiyle otomotiv sektörünün de geleceğinin temel malzemelerinden biri olacağını rahatlıkla söyleyebiliriz. (Deng 2007)

Dünyanın ekolojik dengesinin korunması konusunun ise önemi her geçen gün gittikçe artmaktadır. Yüksek performans özelliklerine sahip kompozit malzemelerin ise dünyanın ekolojik dengesine katkıda bulunacağı ve mevcutta kullanılan birçok geleneksel malzemenin yerini yakın bir gelecekte alması tahmin edilmektedir.

Günümüzde özellikle eğilme direncinin önemli olduğu uygulamalarda sandviç kompozitler sıklıkla kullanılmaktadır. Sandviç kompozitlerde, eğilme yükleri yüzey malzemeleri tarafından, kayma yükleri ise hafif çekirdek malzemesi tarafından taşınır. Yüzey malzemelerinin birincil amacı atalet momentini muhafaza etmek olduğundan, düşük yoğunluklu çekirdek malzemeye göre gerilme ve sıkıştırma altında daha sert ve güçlüdür. Düşük yoğunluklu çekirdek malzeme kullanımının sonucu, sandviç paneller, eğimli yüklemeler altında yüksek spesifik mekanik özelliklere sahiptirler. Eğimli yükler altında yüzey malzemeleri, biri gerilme diğeri sıkıştırma kuvveti taşımak üzere birlikte hareket ederler. Diğeryandan çekirdek malzemesi de çapraz yüklere karşı direnç oluşturup global ve lokal burkulmaları önler. Aynı zamanda yapının stabilizasyonunu sağlar. (Nguyen 2005, Glenn ve Hyer 2005).

Farklı çekirdek tipleri ve yüzey malzemeleri ile üretilen sandviç kompozitlerin mekanik davranışlarının tespit edilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Fiber takviyeli sandviç kompozitler ise sandviç malzemeler içerisinde çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak kırılma davranışları ve mekanizması, malzemenin fiber, reçine ve çekirdeğin heterojen bir karışımı niteliğinde olmasından dolayı metallere göre çok daha karmaşıktır. Kompozit malzeme mekanizması, sadece farklı özelliklerdeki bileşiklerinden etkilenmez. Aynı zamanda yapının kompozisyonu da çok büyük bir önem arz eder. Sabit bir yük altında bile, yapının karmaşıklığından dolayı kırılma mekanizması basit malzemelere göre çok daha karmaşık cevap vermektedir.

Sandviç kompozitlerin mekanik özellikleri ve özellikle kayma direnci sıcaklık farklarından da çok etkilenir. Düşük sıcaklıklarda mikroçatlaklar malzeme özellikleri üzerinde kritik öneme sahiptir. Özellikle sızdırmazlık istenen uygulamalarda sızıntı yaratıp olası problemlerin kök nedeni olmaya açıktırlar. (Kichhannagari 2004)

Yapılan çalışmaların çoğu malzemelerin oda sıcaklığındaki özelliklerinin belirlenmesi üzerinedir. Sıcaklık farkının bir parametre olarak alındığı çalışmalar literatürde mevcut

olsa da yapılan çalışmaların çoğu yüksek sıcaklıklardaki malzeme davranışıyla ilgilidir. Düşük sıcaklıklar için yapılan çalışmaların sayısı yetersiz olmakla beraber özellikle bu konuda yapılan tez çalışmaları ise yok denecek kadar azdır.

Bu tez çalışmasında elle yatırma yöntemi kullanılarak üretilen karbon fiber takviyeli balpeteği çekirdek yapılı sandviç kompozitlerin, eğilme davranışı üzerinde, çekirdek malzeme cinsi, çekirdek malzeme kalınlığı, ve ortam sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. Bu kıyaslamayı da yapabilmek amacıyla 5 mm ve 20 mm kalınlığa sahip Nomex, alüminyum ve polipropilen balpetek yapılı çekirdeğe sahip sandviç numunelerinin, oda sıcaklığında ve -40°C’de üç nokta eğme deneyi ile mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Araştırılan parametreler ile ilgili karşılaştırmalar yapılmıştır. Aynı zamanda numunelerin, optik mikroskop ile incelemesi de yapılmış olup kırılma davranışları makro ve mikro boyutta incelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

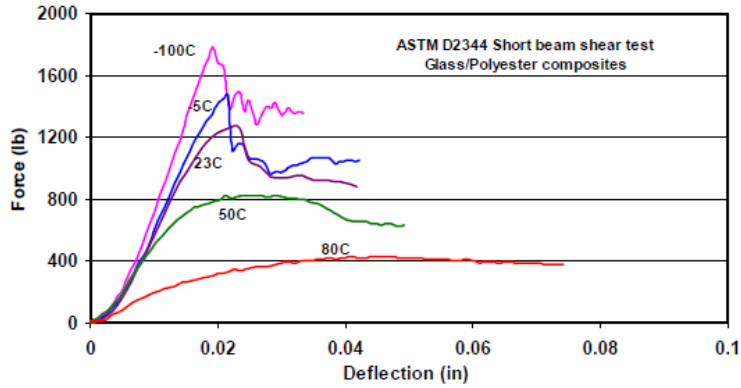
Paik ve ark. (1999) yaptıkları çalışmalarında alüminyum balpeteği çekirdekli sandviç malzemelerin dayanımını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Yapılan 3 nokta eğme testleri sonucunda çekirdek yüksekliği arttıkça ve hücre genişliği azaldıkça mukavemetin arttığı sonucuna varmışlardır. Aynı zamanda balpeteği hücrelerinin et kalınlığı artışıyla da plastik deformasyonun daha geç başladığını gözlemlemiştir.

Kichhannagari (2004) yaptığı tez çalışmasında soğuk ortamın cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler üzerindeki etkisini incelemiştir. Cam elyaf ile elde ettikleri sonuçları çizelge 2.1.'deki gibi paylaşmışlardır.

Çizelge 2.1. Farklı sıcaklıklarda cam elyaf ile yapılan test sonuçları (Kichhannagari 2004)

Temp (°C)	No. of samples	Shear strength S_H (psi)	Deflection at peak load (in)	Standard deviation	% Standard deviation
-100	6	10510.8	0.020	349.7	3.327
-5	6	9014.6	0.021	365.9	4.059
23	6	8309.8	0.022	288.0	3.466
50	6	4926.2	0.031	195.0	3.959
80	6	2721.8	0.051	96.2	3.536

Cam elyaf için yaptığı testlerde kayma direncinin sıcaklık artışıyla beraber ciddi oranda düştüğünü gözlemlemiştir. Aynı zamanda şekil 2.2'den düşük sıcaklıklardaki keskin tepe noktalarından malzemenin daha kırılğan bir yapıya sahip olduğunu söylemek mümkündür.



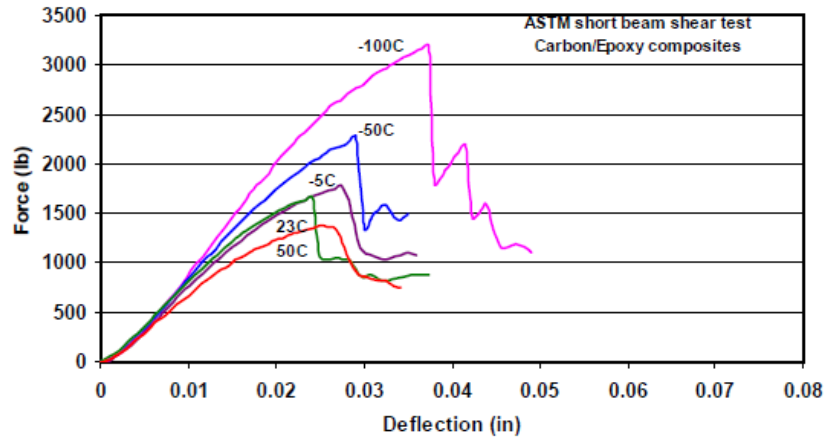
Şekil 2.1. Farklı sıcaklıklarda cam elyaf ile yapılan testlerin grafiği (Kichhannagari 2004)

Karbon elyaf ile elde ettikleri sonuçları ise çizelge 2.2.'deki gibi paylaşmışlardır.

Çizelge 2.2. Farklı sıcaklıklarda karbon elyaf ile yapılan test sonuçları (Kichhannagari 2004)

Temp (°C)	No. of samples	Shear strength S_H (psi)	Deflection at peak load (in)	Standard deviation	% Standard deviation
-100	5	23633	0.046	783.87	3.317
-50	5	17733	0.035	1578.64	8.902
-5	5	14525	0.032	161.06	1.109
23	5	11286	0.029	3247.29	28.774
50	5	11280	0.030	107.41	0.952

Şekil 2.2.'den karbon elyaf takviyeli kompozitlerle yaptığı deneylerde de benzer sonuçlar elde etmenin dışında, karbonun cam elyafa göre çok daha dayanıklı olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 2.2. Farklı sıcaklıklarda karbon elyaf ile yapılan testlerin grafiği (Kichhannagari 2004)

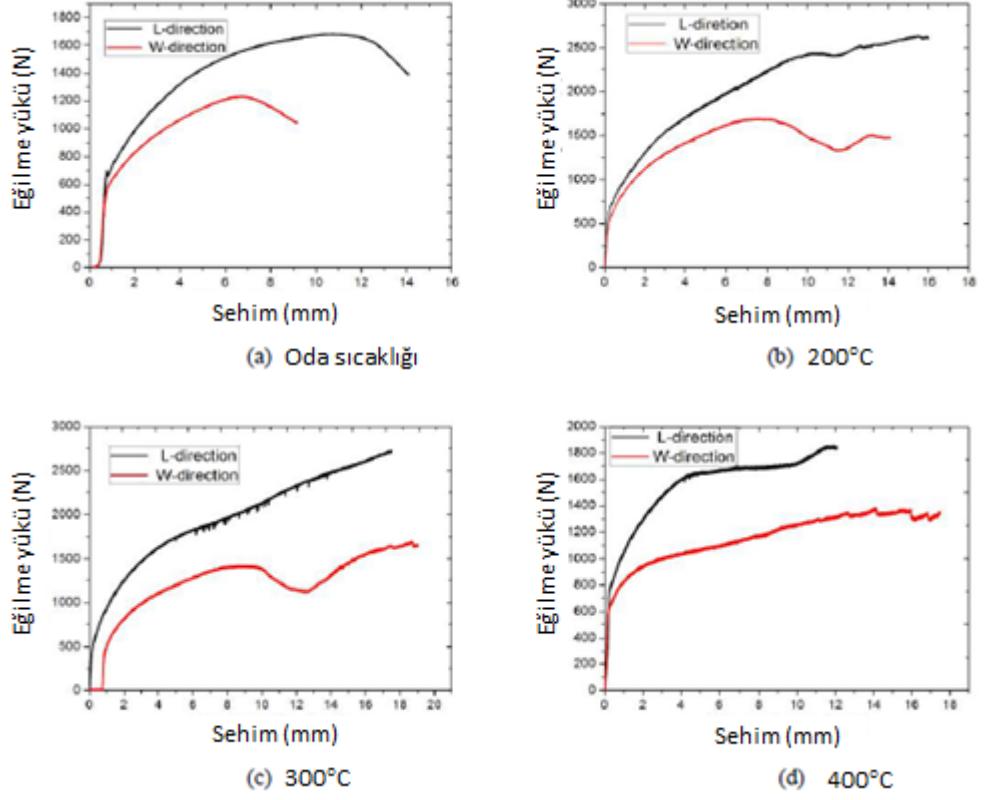
Ayrıca yüksek sıcaklıklardaki davranışın cam elyaftaki kadar vahim bir hal almadığını ve malzemenin hala bir kırılma davranışı gösterdiğini tespit etmiştir. Yaptığı bu çalışmada kompozitlerin kesme direncinin sıcaklık ile ters orantılı değiştiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda karbon epoksi kompozitlerin cam polyester kompozitlerden daha dirençli olduğu da belirtmiştir. Çalışmanın sonucunda düşük sıcaklıkların kompozitin dayanımını genel olarak arttırdığını fakat farklı malzemelerin (matris ve fiber) farklı genleşme davranışından dolayı mikro çatlak oluşumuna da sebebiyet verdiğini akustik emisyon tekniği ile gözlemlemiştir.

Soni (2006) çekirdeği köpük karbon epoksi ve cam epoksinin düşük sıcaklıkları da içine alan geniş bir sıcaklık aralığındaki eğilme davranışı üzerine çalışmışlardır. 22°C ve -60°C sıcaklık aralığında çekirdek kaymalarını, mukavemet üzerinde baskın sebep olarak bulmuşlar. Düşük sıcaklıklarda, ilgili oda sıcaklığı davranışıyla karşılaştırıldığında, çekirdeğin kayma direnci üzerinde önemli artışlar gözlenmiştir.

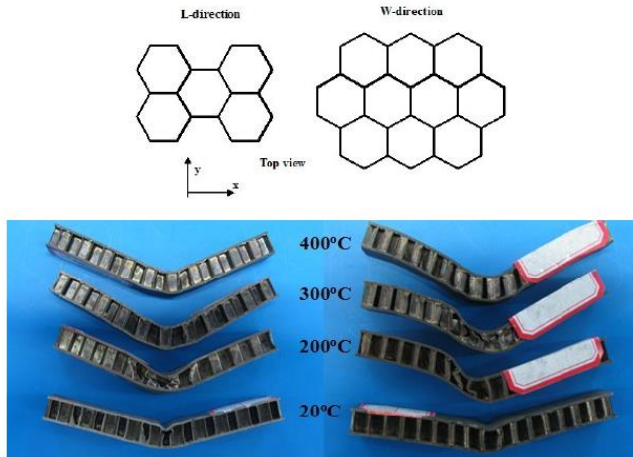
Kowalska ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada balpeteği çekirdekli yapıların eğme davranışlarını üç nokta ve dört nokta eğme deneyleri ile incelemişlerdir. Sayısal analiz ile kurdukları model ile oluşan hasar mekanizmasını incelemişler ve yapıya uygulanan çökme miktarı arttıkça kuvvet değerlerinde artış gözlemlemişlerdir.

Samirkumar ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada köpük çekirdekli karbon fiber ve cam takviyeli sandviç plakaların 22°C, 0°C, -30°C ve -60°C'deki eğilme yorulma davranışını incelemişlerdir. Sıcaklık farkının malzemenin hasar davranışına bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Eğilme yorulma ömrünün karbon fiber takviyeli sandviç plakalarda -60°C'de oda sıcaklığına göre 100 kata kadar arttığı, cam elyaf takviyeli panelde ise 20-40 kat arttığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda -60°C'de kırılma aniden gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Lu ve ark. (2009) çelik balpeteği çekirdekli sandviç kompozitlerin oda sıcaklığında, 200, 300 ve 400°C'de eğilme davranışını araştırmışlardır. Balpeteği yapının hücre yönünde eğilme üzerindeki etkisi ayrıca araştırılmıştır. Şekil 2.3.'e göre sonuçlar, max deformasyon kuvvetinin L-yönünde üretilen çekirdekli sandviçlerde görüldüğünü ortaya koymaktadır. Sıcaklık artışıyla malzeme mukavemeti düşerken plastik deformasyon miktarı artmaktadır.



Şekil 2.3. Farklı sıcaklık ve yönlerde yapılan eğilme testlerinin grafiği (Lu ve ark. 2009)
 Sıcaklık artışıyla sünekleşen bazı numunelerde kırılma davranışı olmasa bile büyük miktarda deformasyona uğramıştır.(Şekil 2.4.)

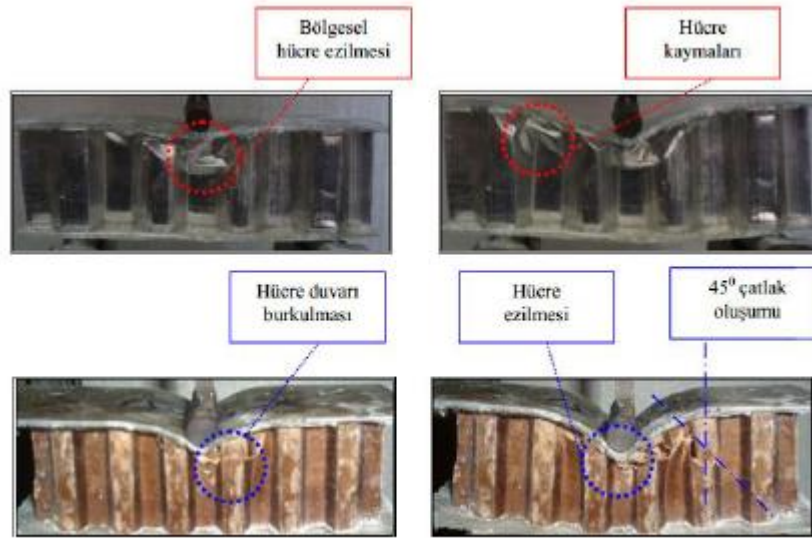


Şekil 2.4. Test sonrası numuneler (Lu ve ark. 2010)

Belouettar ve ark. (2009) farklı yoğunluklarda armid fiber ve alüminyum çekirdekli sandviçlerin statik ve yorulma eğilme davranışını dört nokta eğilme testiyle incelemiştir. Çekirdek yoğunluğu ve hücre diziliminin mukavemete etkisi

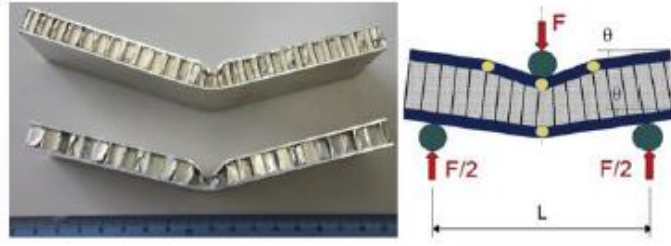
araştırılmıştır. Al çekirdek yoğunluğu %33 arttığında mukavemetin %50 civarında arttığını ancak aramid fiberde ise aynı mukavemet artışı yaklaşık %67 yoğunluk artışıyla elde edilmiştir. Aynı zamanda L-konfigrasyonundaki çekirdek diziliminin genel anlamda mukavemeti arttırdığını tespit etmişlerdir.

Solmaz ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada altıgen petek hücre çekirdekli kompozitlerin eğilme davranışını incelemişlerdir. Sandviç kompozitlerde yüzey malzemesi polyester/cam fiberden üretilmiş olup çekirdek olarak ise kağıt ve alüminyum kullanmışlardır. Kağıt hücreli plakaların eğilme direncinin alüminyum hücrelilere göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Al çekirdekli numunelerde yük uygulanan bölgelerde bölgesel çekirdek ezilmesi ve kayma hasarları meydana gelirken, kağıt çekirdekli numunelerde ise bu hasarlara ek kısmı yüzey/çekirdek ayrılması ve bölgesel çatlaklar gözlemlenmiştir. Hasar tipi şekil 2.5'te görülebilir. Hücre yoğunluğunun artmasıyla da hücre kayma rijitliği ve panellerin eğme dayanımında artış olduğu görülmüştür.



Şekil 2.5. Numuneler üzerindeki hasar tipleri (Solmaz ve ark. 2012)

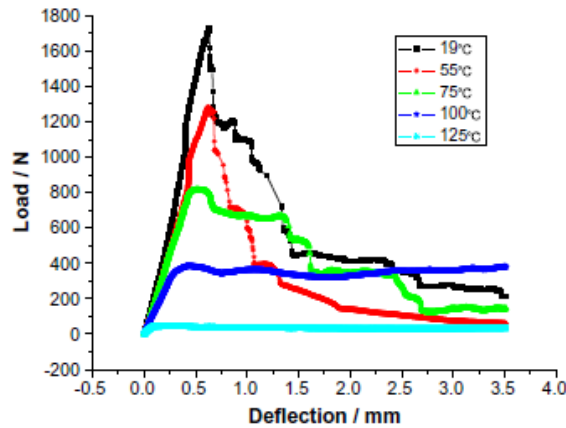
Crupi ve ark. (2012) yaptıkları deneylerde alüminyum petek yapılı sandviç malzemelerin darbe ve eğilme davranışını araştırmışlardır. Şekil 2.6.'da sarı noktalar ile gösterilen bölgelerden malzemenin kırılmaya başladığını ve çatlakın uygulanan yüklerle beraber yüzeye yayıldığını tespit etmişlerdir.



Şekil 2.6. Üç nokta eğme sonucu kırık oluşum bölgeleri bölgeleri (Crupi ve ark. 2012)

Ayrıca farklı hücre boyutlarına sahip iki alüminyum bal peteği sandviç yapının statik büküm ve düşük hızlı darbe tepkisinin analizini gerçekleştirmişler. Statik büküm testlerini, destek genişliği mesafesine ve petek hücresi boyutuna bağlı olarak aynı nominal boyuta sahip numuneler ile gerçekleştirip çeşitli eğilme durumlarını gözlemlemişlerdir. Deneysel gözlemleri basitleştirilmiş eğilme modelleri ile açıklamışlardır. Bunun sonucunda öngörülen ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. Düşük hızlı darbe testlerini de alüminyum petek sandviç tipolojileri üzerinde gerçekleştirmişler ve enerji denge modeline dayanan teorik bir yaklaşımı, etkilerini araştırmak için kullanmışlardır.

Li ve ark. (2012) 3 boyutlu örgü cam elyaf kompozitlerin eğilme davranışı üzerinde sıcaklığın etkisini araştırmışlar. Testler 5 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Test sonucu numuneler elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Sıcaklık artışıyla mukavetin önemli miktarda düştüğü gözlemlenmiştir. Oda sıcaklığında fiber kırılmasıyla kırılgan bir davranış sergileyen kompozit sıcaklık artışıyla daha yumuşak ve plastik davranış göstermiştir.(Şekil 2.7.)

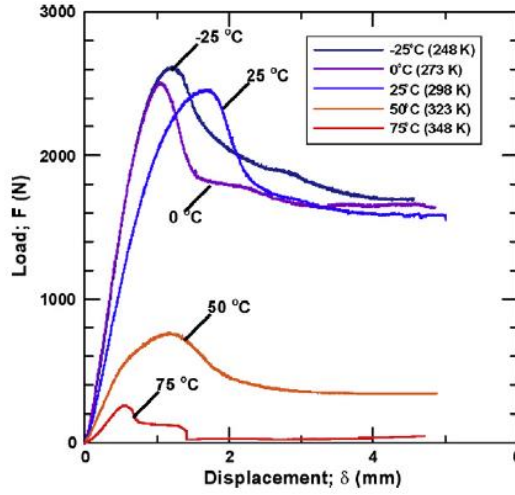


Şekil 2.7. Farklı sıcaklıklarda yapılan üç nokta eğme testi sonuçları (Li ve ark. 2012)

Gpoichand ve ark. (2013) bakırdan üretilen altıgen petek çekirdekli sandviç malzemenin eğilme davranışını üç nokta eğme deneyi ve SEA ile incelemişlerdir. Hücre kalınlığı artışıyla eğilme direncinde artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Jen ve ark. (2013) Alüminyum balpeteği yapıları sandviç kompozitlerin -25°C ile 75°C arasında eğilme davranışını 4 nokta eğilme testleriyle incelemişlerdir. Sonuçlar sıcaklık artışıyla yorulma direncinin ve mukavemetin düştüğünü göstermektedir.

Şekil 2.8.'den de anlaşılacağı üzere oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklık değerlerinde eğilme mukavemeti çok hızlı düşmekte, daha düşük sıcaklıklarda ise çok yavaş artmaktadır.

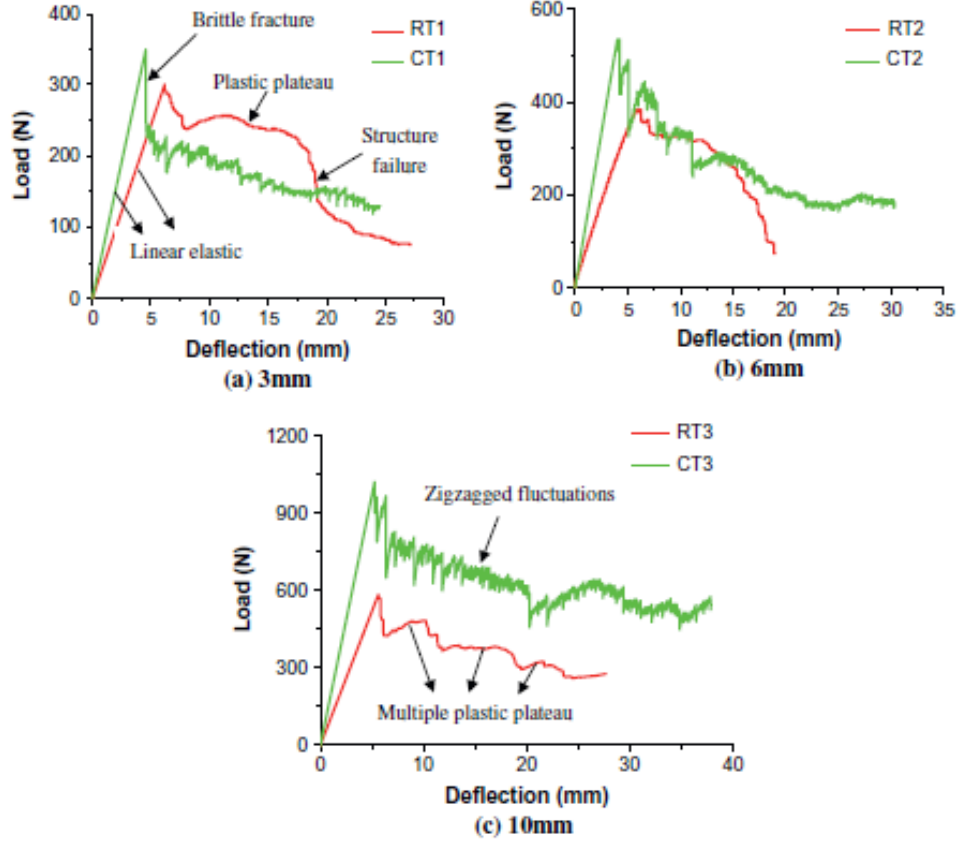


Şekil 2.8. Farklı sıcaklıklarda yapılan eğilme testi sonuçları (Jen ve ark. 2013)

Aynı zamanda düşük sıcaklıklarda hasar ezilmelerle meydana gelirken, 50°C ve 75°C 'de epoksinin özelliklerinin etkilenmesinden dolayı çekirdek-yüzey ayrılması gözlemlenmiştir.

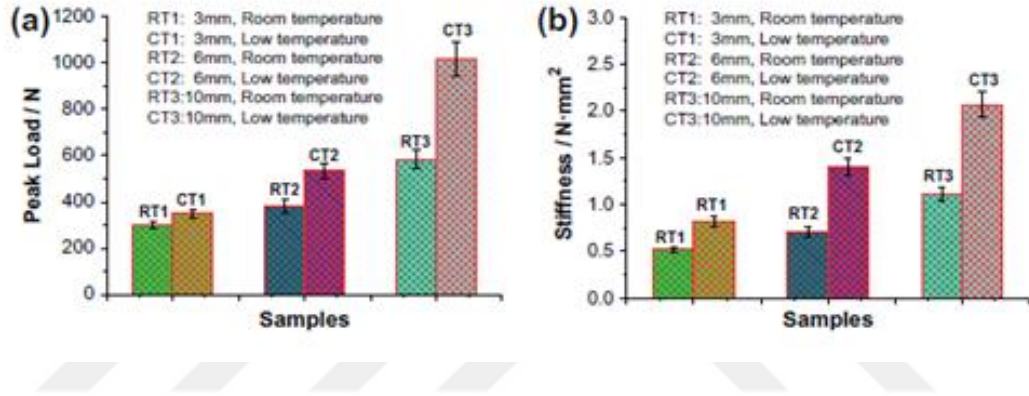
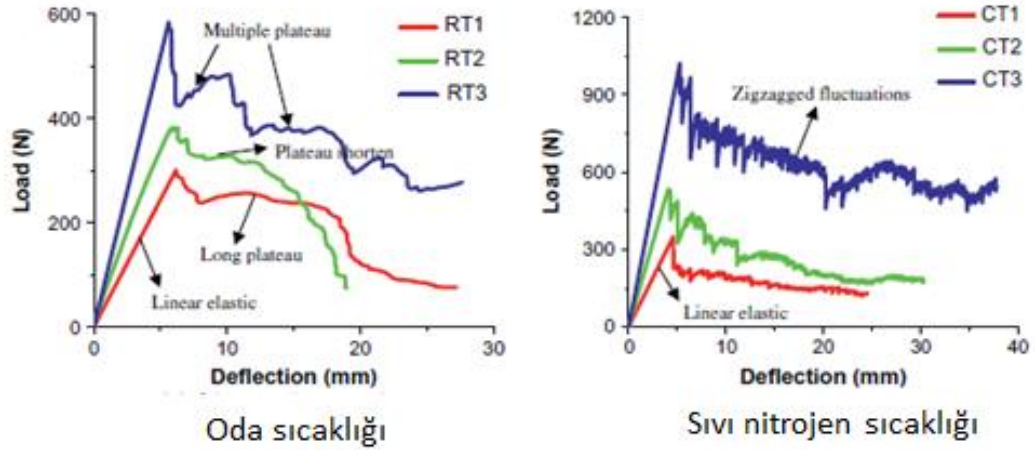
Li ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada sandviç kompozitlerin oda sıcaklığında ve sıvı nitrojen ile yaklaşık -196°C sıcaklıktaki eğilme davranışını deneysel ve SEM ile incelemişlerdir. Sonuçlar soğuk ortamın, oda sıcaklığına göre malzemenin eğilme dayanımı üzerinde ciddi bir artış yarattığını göstermiştir. Aynı testleri farklı çekirdek kalınlıkları ile de gerçekleştirmiş olup, bu parametrenin de malzeme özellikleri üzerindeki değişimini ortaya koymuşlardır. Oda sıcaklığında genel olarak 3 tip kırılma davranışı gözlemlenmişken sıvı nitrojen altında basma yüzeyinden başlayarak alt

yüzeyle doğru ilerleyen bir kırılma davranışı tespit edilmiştir. Aynı zamanda soğuk ortamda ara yüzey yapışma özelliğinin daha da arttığını ve kırılmanın daha belirgin olduğunu gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.9. Farklı sıcaklıklarda yapılan eğilme testi sonuçları (Li ve ark. 2013)

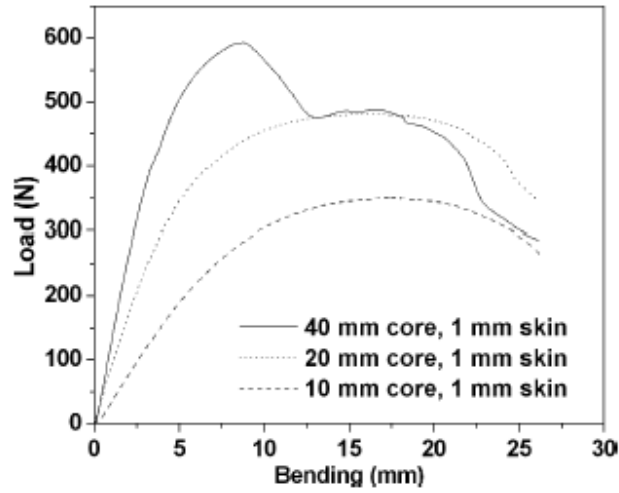
Oda sıcaklığında ,eğri pik noktasından sonra kademeli ve yumuşak geçişlerle düşmektedir. Fakat sıvı nitrojen altında ani ve önemli ölçüde düşüşler grafik üzerinde zigzag hareketleriyle karşımıza çıkmaktadır. Bunun ana sebebi sıvı nitrojen sıcaklığında matrisin katılaşmasıdır. Şekil 2.9.'dan de anlaşılacağı üzere çekirdek kalınlığı arttıkça malzeme dayanımının da arttığı aynı zamanda farklı sıcaklıklarda yapılan deney sonuçları arasındaki farkın da arttığı gözlemlenmektedir.



Şekil 2.10. Farklı sıcaklıklarda yapılan eğilme testleri ve sertlik değerleri (Li ve ark. 2013)

Şekil 2.10.'daki ilk iki grafik incelendiğinde çekirdek kalınlığının artışıyla beraber atalet momentinin arttığını, bunun da grafiğin lineer bölümündeki eğimin artışının ana sebebi olduğu doğrulanmıştır. Sıvı nitrojen sıcaklığı malzemenin mukavemetini iyileştirmekle birlikte malzemeyi daha da kırılgan yapmaktadır. Ancak yine de mukavemet artışında çekirdek malzeme kalınlığı ana parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

Arbaoui ve ark. (2014) Polipropilen çekirdek kalınlığının ve ara tabakalar yardımıyla birden fazla çekirdeğe sahip cam elyaf takviyeli sandviç kompozitlerin eğilme davranışını teorik olarak ve deneysel olarak incelemişlerdir.



Core thickness [mm]	10	20	40
Load [N]	350	480	594
Facing stress [MPa]	68,20	49	31
Core shear stress [MPa]	0,45	0,33	0,21
Bending stiffness [N.mm ²]	213,75 10 ⁵	527 10 ⁵	855 10 ⁵
Shear stiffness [N]	3388	6174	11767

Şekil 2.11. Farklı çekirdek yükseklikleriyle yapılan deney sonuçları (Arbaoui ve ark. 2014)

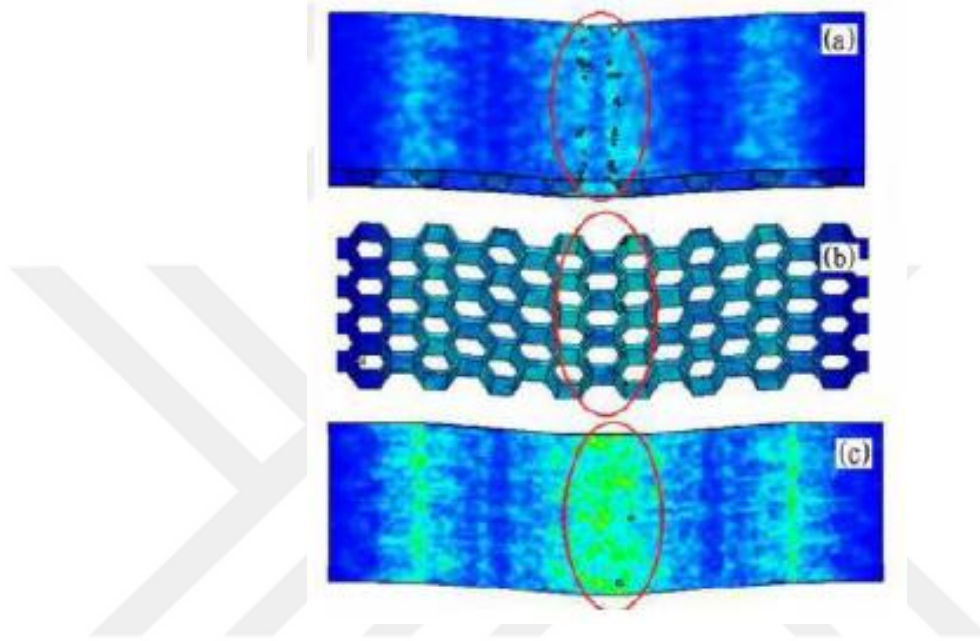
Şekil 2.11.' den de anlaşılacağı üzere çekirdek kalınlığı düştükçe eğrinin lineer bölgedeki eğimi de düşmektedir. Çekirdek kayması ve çekirdek-yüzey ayrılması başlıca hasar mekanizması olarak tespit edilmiştir.

Ayrıca çekirdek kalınlığı 40mm'den 10mm'ye düştüğünde kayma modülünün de yaklaşık olarak %36 düştüğünü hesaplamışlardır.

Nirupama ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada yüzey malzemesi, çekirdek, çekirdek yüksekliği, çekirdek şekli, numune boyutu gibi parametreler ile Taguchi L16 deney tasarımı ile sandviçlerde eğilme davranışını deneysel ve SEA ile araştırmışlardır. Bu çalışma ile malzeme optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir.

Lu ve ark. (2015) karbon fiber epoksiden üretilen balpeteği yapıların eğilme davranışını deneysel ve SEA ile incelemişlerdir. Analiz sonucunda meydana gelen hasarlar ve ezilmeler şekil 2.12.'deki gibidir. Sayısal analiz sonucunda yükün uygulandığı

yüzeydeki gerilimin çekirdek ve alt yüzeye göre çok daha büyük olduğunu ve normal şartlarda deformasyonun üst yüzeyde çatlak veya üst yüzey ile çekirdek malzeme ayrılması ile başladığını tespit etmişlerdir. Aynı zamanda yaptıkları karşılaştırmalı analizlere göre Al çekirdekli sandviç plakanın Nomex çekirdekli plakaya göre yaklaşık 2.5 kat daha dayanıklı olduğunu gözlemlemişlerdir.



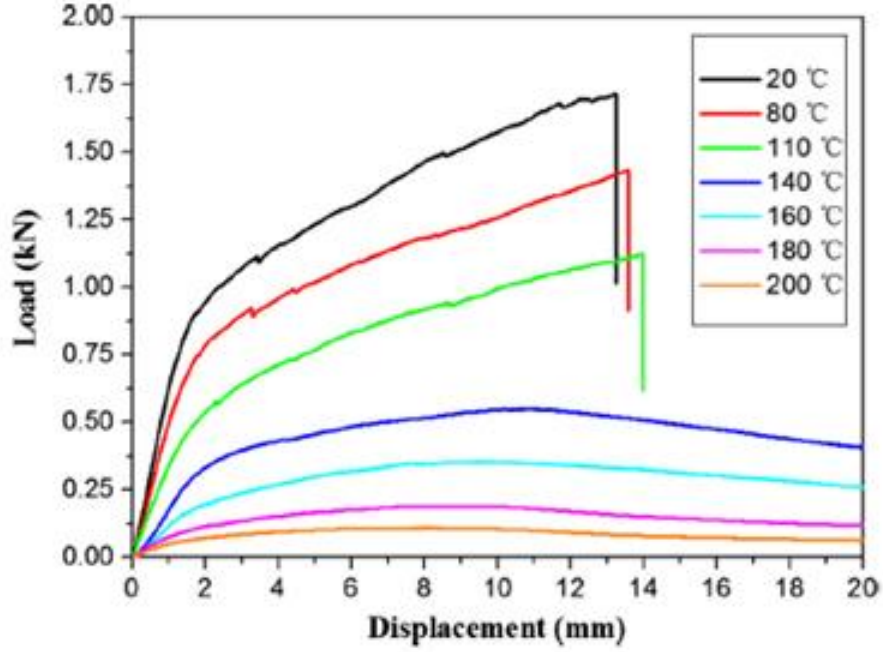
Şekil 2.12. Sandviç üzerindeki gerilme bölgeleri a)üst yüzey b)çekirdek c)alt yüzey (Lu ve ark. 2015)

Akkuş ve ark. (2015) Al balpeteği yapıları sandviçlerin eğilme davranışını hücre genişliği ve yüksekliği parametreleri ile incelemişlerdir. Üç nokta eğme deneyleri sonuçlarına göre hücre yüksekliği arttıkça eğilme kuvvetinde artma olduğu gözlemlenmiştir. Hücre genişliği arttıkça da eğilme kuvvetinde düşüş olduğu tespit edilmiştir.

Hawileh ve ark. (2015) 25°C ile 300°C sıcaklık aralığında karbon, cam birbirinin hibrid karşımından oluşan plakaların mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Sıcaklık artışıyla beraber gözlemlenen mekanik özelliklerdeki düşüş sadece karbon ve cam plakalarda hibrid plakaya göre çok daha fazla olmuştur.

Liu ve ark. (2015) yaptığı çalışmada kafes çekirdekli sandviç kompozitlerin farklı sıcaklıklardaki mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Test sıcaklıkları sırasıyla 20°C, 80°C, 110°C, 140°C, 160°C, 180°C ve 200°C'dir. Kullanılan epoksi yapıştırıcının

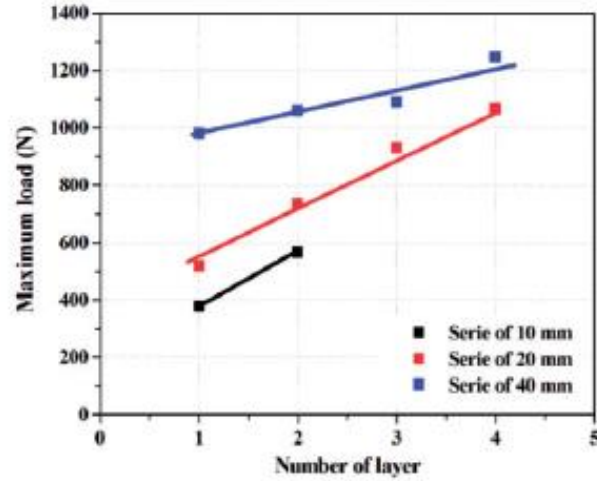
camsı geçiş sıcaklığı 140°C olup sonuçlar 140°C altı ve üstü olarak iki bölümde incelenebilir. 140°C altı sıcaklıklarda sadece node bölgelerinde kırılma meydana gelirken, 140°C üzerinde hem node bölgelerinde kırılma hem de yüzeylerde mikro çatlaklar gözlemlenmiştir.



Şekil 2.13. Farklı sıcaklıklarda yapılan üç nokta eğme testi sonuçları (Liu ve ark. 2015)

Ayrıca şekil 2.13.'ten görüldüğü gibi camsı geçiş sıcaklığı altında ani kırılmalar ile yük boşalırken camsı geçiş sıcaklığı üzerinde ani kırılmalar yaşanmamıştır.

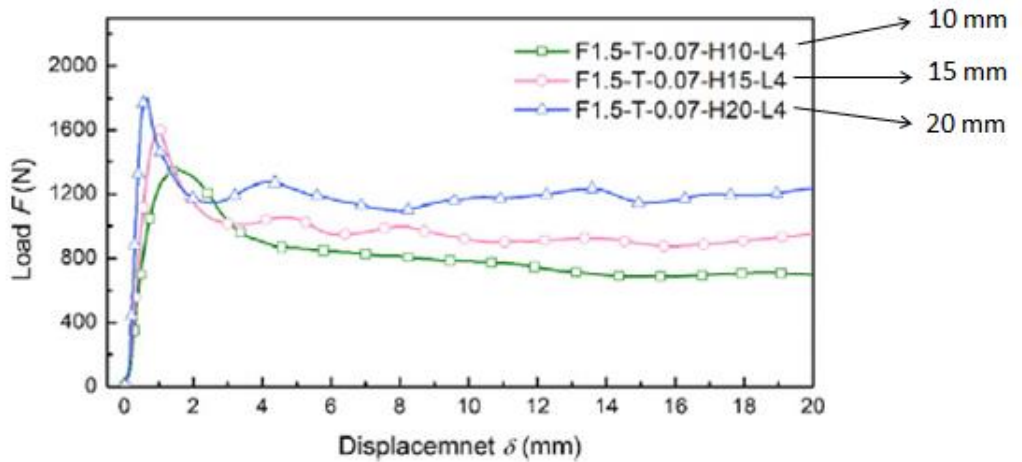
Arbaoui ve ark. (2016) Polipropilen balpeteği çekirdekli cam elyaf takviyeli sandviç kompozitlerin eğilme davranışını dört nokta eğme testiyle ve nümerik analizle incelemiştir. 10 mm 20 mm ve 40 mm kalınlığa sahip core malzeme ile testler gerçekleştirilmiş olup, bu kalınlıklar birbirinden farklı kombinasyonlar ile birden fazla çekirdeğe sahip numuneler ortaya çıkacak şekilde elde edilmiştir.



Şekil 2.14. Farklı core kalınlıkları ve ara yüzey sayısının dayanım ile ilişkisi (Arbaoui ve ark. 2016)

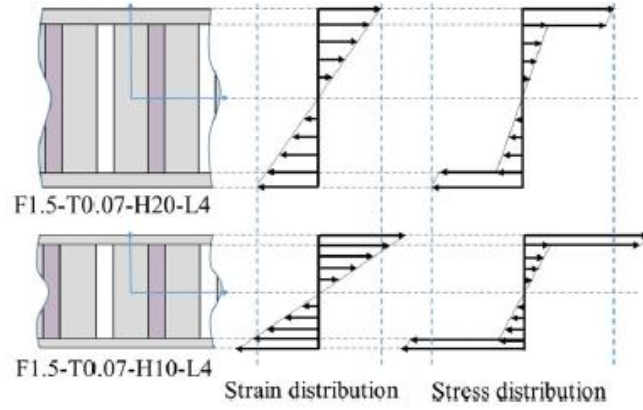
Core kalınlığı artışının ve arayüzey ve birden fazla çekirdek ile üretilen sandviçler kullanarak yapılan deney sonuçlarının özeti olan grafik şekil 2.14.'te verilmiştir. Sonuçlar birden fazla arayüzey ile çekirdek malzeme kullanmanın mekanik özellikler üzerindeki pozitif etkisini ortaya koymaktadır.

Sun ve ark. (2017) alüminyum balpetekli sandviçlerin eğilme davranışını incelemiştir. Sonuçlar eğilme yükü altında özellikle hasar mekanizmasının yapısal parametrelerden yüksek oranda etkilendiğini göstermektedir.



Şekil 2.15. Farklı core kalınlıklarıyla dayanım ilişkisi (Sun ve ark. 2017)

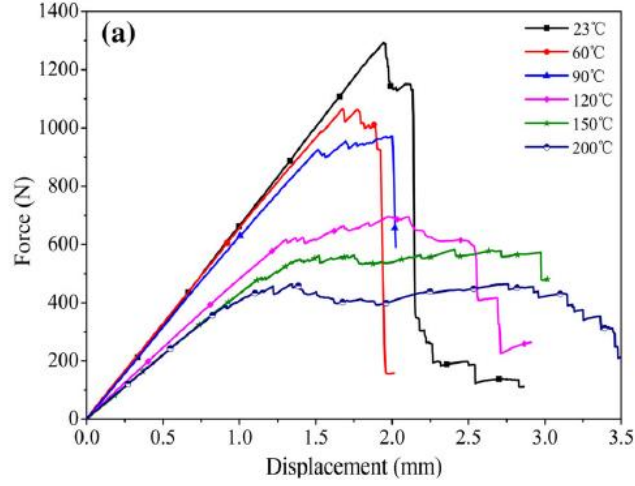
Şekil 2.15’de farklı çekirdek kalınlıklarıyla yapılan testlerden elde edilen sonuçlar görülmektedir. Çekirdek kalınlığı artışıyla mukavette de artış elde edilmektedir. Eğilme direnci, atalet momentinin değişmesinden dolayı çekirdek yüksekliğinden oldukça etkilenmektedir.



Şekil 2.16. Farklı core kalınlıklarıyla kayma gerilmesi ilişkisi (Sun ve ark. 2017)

Şekil 2.16.’da aynı yük altında 20 mm ve 10 mm çekirdek kalınlığı ile test edilen numunelerin teorik olarak gerilim ve gerilim dağılımı verilmiştir. Aynı yük altında daha düşük kalınlığa sahip sandviç kompozitte daha fazla gerilme olduğunu görmekteyiz. Bu nedenle, 10 mm kalınlığındaki sandviç plaka daha kalın plakalara göre daha düşük burkulma kritik yüküne sahiptir. Ayrıca bu çalışmada Spesifik enerji absorpsiyon oranının balpeteği yapının yapısal parametrelerinden oldukça etkilendiği, ancak yüzey malzemelerin kalınlığından çok fazla etkilenmediği tespit edilmiştir. Çekirdek malzeme ile yapılan güçlendirmeler spesifik enerji absorpsiyon oranının artışı yanında getirmektedir. Ayrıca mekanik özellikler üzerinde en etkili olan parametrenin de balpeteği hücre boyutları olduğu belirlenmiştir.

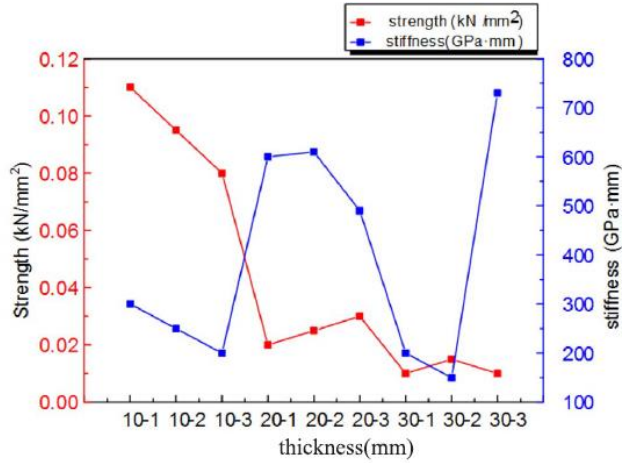
Wang ve ark. (2017) dokuma kumaş takviyeli karbon ve cam elyaf termoplastik kompozitlerin eğilme davranışını farklı sıcaklık aralıklarında incelemiştir. Sıcaklık artışıyla bending stiffness karbon ve cam elyaf için sırasıyla %36 ve %34 civarında, eğilme direnci ise % 68 ve %61 düşmüştür. Hasar tipi sıcaklık artışıyla plastikliğin artmasıyla gevrek kırılmalardan sünek kırılmalara dönüşmüştür.



Şekil 2.17. Üç nokta eğme testine sıcaklık etkisi (Wang ve ark. 2017)

Camsı geçiş sıcaklığının altında eğriler lineer artmakta daha sonra ani bir şekilde kırılıp düşüşe geçmektedir. Bu sıcaklığın üzerinde ise eğriler bol miktarda zigzag çizip daha yumuşak bir düşüş profili çizmektedir. (Şekil 2.17.)

Wang ve ark. (2018) karbon fiber takviyeli alüminyum çekirdekli sandviç yapıların çekirdek kalınlığı ve yoğunluğunun mekanik özelliklere etkisini üç nokta eğme testi ile incelemiştir. Çekirdek kalınlığının eğilmeye etkisi şekil 2.18.'deki gibidir.



Şekil 2.18. Farklı core kalınlıklarıyla yapılan deney sonuçlarına göre dayanım ve sertlik değerleri (Wang ve ark. 2018)

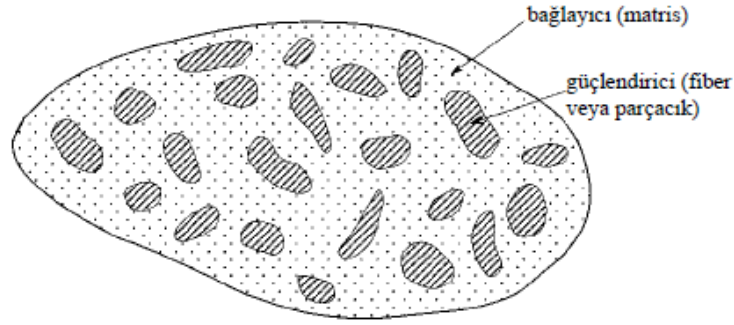
Malzeme özelliklerinin, optimum değer yakalanana kadar çekirdek kalınlığı artışıyla iyileştirilebileceğini tespit etmiştir.

2.1. Kompozit Malzemeler

Farklı şekil ve kimyasal bileşimlere sahip, birbirleri içerisinde çözülmemeyen en az iki farklı malzemenin doğru yöntemlerle makro seviyede bir araya getirilmesiyle oluşan ve kendini meydana getiren malzemelerden farklı, daha üstün özelliklere sahip elde edilen heterojen yeni malzemelere kompozit malzemeler denir.

Kompozit malzemeler heterojen iki ayrı fazdan oluşur ve aynı zamanda bu fazlar arasında da ara yüzey oluşumu mevcuttur.

Takviye malzemesi kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir.



Şekil 2.19. Basit kompozit modeli (Berthelot 1999)

Günümüzün mühendislik ihtiyaçlarına bazı uygulamalarda geleneksel malzemeler tek başına cevap verememektedir. İstenen özellikleri sağlamak için farklı malzemelerin avantajlarını bir araya getirip yeni malzemeler oluşturmak gerekmektedir. Kompozit malzemeler bu noktada cazip alternatifler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Kompozit malzemeler 2. Dünya Savaşı yıllarında yeni ve daha üstün malzeme arayışlarıyla 1940'lı yıllarda bir mühendislik konusu olarak değerlendirilmeye başlansa da aslında çok eski yıllara dayanan bir geçmişi vardır. En eski örneği çamur içerisine katılan saman, dal, sap ile oluşturulan "kerpiç" adı ile bildiğimiz malzemedir. Kompozitlerin günümüzde en yaygın rastlanılan bir diğer örneği ise betondur. Çimento ve kum matrisi içerisine çelik çubuklar takviye edilir. Başka bir örnek ise "fiberglas" olarak bilinen polyester esaslı reçinelere cam elyaf takviye edilmesiyle üretilen

malzemelerdir. Cam takviyeli polyster ise sağlamlığı ve hafifliği ile günümüzde en çok karşılaşılan bir diğer kompozit malzemedir. Üretilen tüm kompozit malzemelerin yaklaşık %85'ini oluşturur ve genellikle tekne gövdeleri, spor araçlar, paneller ve araç gövdelerinde örnekleriyle karşılaşıma çıkmaktadır. (Bolat 2011, Arıcasoy 2006)

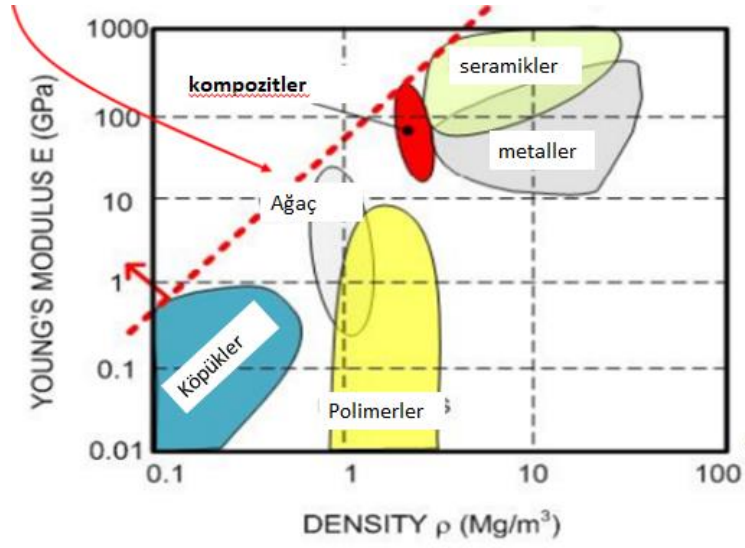
Moleküler düzeyde birleştirilen malzeme ve alaşımlar mikroskopik ortamda homojen olduklarından kompozit malzeme sayılmazlar. Örneğin; elik içerisindeki krom ve vanadyum moleküler olarak homojen bir karışım oluştururlar ve kompozit olarak sınıflandırılmazlar. Fakat diğer bir yandan karbür uçlu takımlar, yumuşak kobalt metal matris içine sert karbürlerin yerleştirilmesi ile elde edildiği için parçacıklı kompozit olarak sınıflandırılabilir. (Türkmen 2012)

1946'dan sonra tüm dünyada ticari boyuta gelen, ilk uygulamalardan bu yana hem takviye malzemelerinde hem de matris malzemelerde bir çok yeniliklere gidilerek yeni kombinasyonlar uygulanması sonucu daha yüksek performans değerlerine sahip olan ve çok hızlı bir gelişme göstererek bu gelişmeyi hızla sürdürmeye devam eden bir malzeme niteliğinde olan "kompozit malzemeler" ağdaş bir malzeme olma niteliğini de aşmış, geleceğin malzemesi olma niteliğine ulaşmış bulunmaktadır.

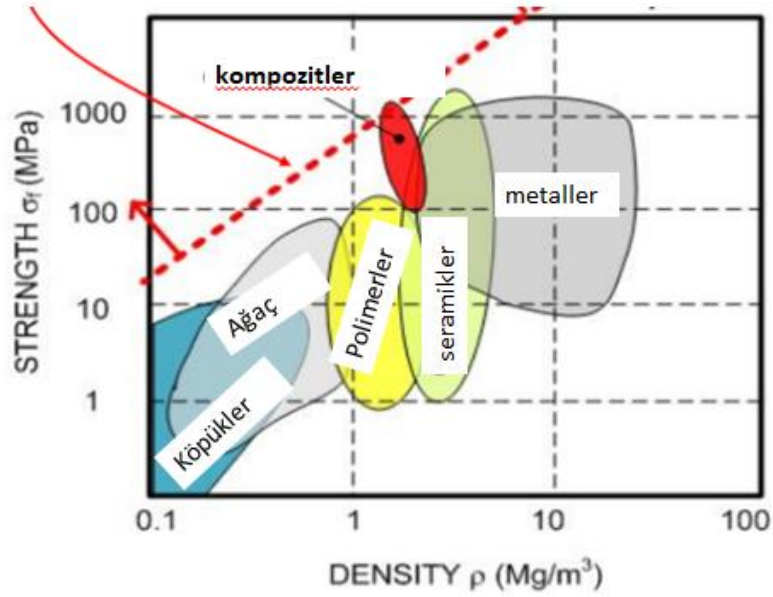
1970'li yıllarda metal matrisli kompozitler geliştirilmiştir. Havacılık sektöründe ilk olarak ağrılıka %2 oranla Boeing 707 uçağında, daha sonra %10 oranla Boeing 777'de kullanılmıştır. Bu oran daha sonra %65 değerine kadar artmıştır. (Korkut 2017)

Kompozit yapıyı oluşturan bileşenler, kompozit malzemenin mekanik özellikleri başta olmak üzere fiziksel ve kimyasal tüm özelliklerini belirler. Günümüzde ileri kompozitler için, üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip elyaflar kullanılmaktadır. Bu yeni malzemeler yüksek dayanıma, elastik modülüne ve tokluğa sahiptirler. (Arıcasoy 2006)

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri açısından genel olarak diğer geleneksel malzemeler içerisindeki yerini, Şekil 2.20.'de yoğunluğa göre young modülü grafiğinde ve Şekil 2.21.'de yoğunluğa göre dayanım grafiğinde karşılaştırmalı olarak görebiliriz.



Şekil 2.20. Malzemelerin Young modülü/yoğunluk oranı karşılaştırması (Aymerich 2012)



Şekil 2.21. Malzemelerin Dayanım/yoğunluk oranı karşılaştırması (Aymerich 2012)

Kompozit malzeme tasarımıdaki birincil amaç, bir araya getirilen yapıların avantajlarının ön plana çıkarılıp daha iyi özelliklere sahip yeni malzemelerin geliştirilmesidir.

Kompozit bir anlamda malzeme karışımı olsa da, çözünen ve çözen bileşenlerden oluşmaz. Bileşenler arası atom alışverişi olmamakla birlikte bileşenler birbirlerini

kimyasal olarak etkilemezler. Malzemeler birbiri içerisinde çözünürse ve atom seviyesinde bir karışım meydana gelirse bu tür malzemeler kompozit olarak değil alaşım olarak adlandırılır. Ancak karışım nanometre seviyesindeki partiküller düzeyinde olur ise bu tip kompozitlere nano kompozitler denir.

Kompozit malzemeler yakın gelecekte bir çok endüstri için vazgeçilmez olacağından şimdiden geri dönüşüm uygulamaları için bile çalışmalar yapılmaktadır. Öyle ki, iki büyük uçak üreticisi Boeing ve Airbus modelleri olan 787 ve A350'nin üretiminde yılda 1 milyon lb karbon fiber kullanılmaktadır. Eğer bu uçaklar için tüm tedarik zinciri de dahil edilirse rakam yılda 4 milyon lb'ye çıkmaktadır. Otomotiv endüstrisi de göz önüne alındığında kompozit malzemelerin geridönüşüm uygulamaları kaçınılmaz olacaktır.(Sloan 2016)

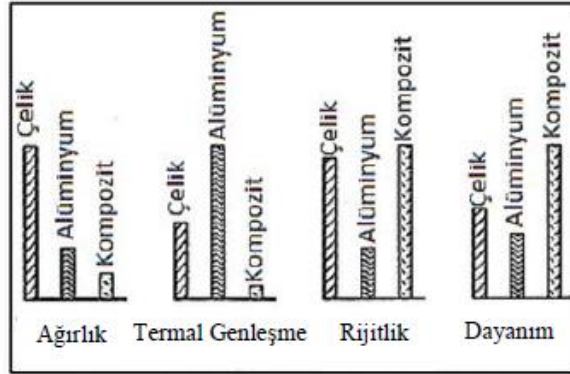
2.2.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemeleri geleneksel malzemelere göre farklı kılan bir çok özelliği mevcuttur. Avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yüksek dayanım (Elastisite modülü/yoğunluk ve çekme dayanımı/yoğunluk oranının diğer mühendislik malzemelerinden yüksek olması)
- Yüksek yorulma dayanımı (Metal ve benzeri mühendislik malzemelerine göre daha yüksek yorulma dayanımına sahip olması)
- Yüksek darbe ve çentik darbe dayanımı
- Yüksek aşınma direnci
- Yüksek sıcaklık kapasitesi
- Yüksek rijitlik
- Yüksek korozyon direnci
- Yüksek termal ve ısı iletkenliği
- Düşük ağırlık (Kompozitten üretilen bir kiriş, aynı kesit alanına sahip çelikten üretilmiş olanının ortalama olarak ağırlığının %25'ine denk gelmektedir.)
- İyi derecede elektrik, ısı ve ses yalıtımı
- Çevre ve doğa şartlarına dayanma yeteneği ve uzun ömürlü kullanım imkanı
- Sünek olmalarından dolayı titreşim sönümleme

- Daha az bağlantı elemanı kullanılması sayesinde yapısal zayıflıkların diğer malzemelere göre çok daha düşük olması
- Bakım maliyetleri düşüktür
- Gelişmiş dış yüzey görünümü sağlar

Kompozitlerin özelliklerinin diğer malzemelerle karşılaştırması şekil 2.22’de verilmiştir.



Şekil 2.22. Farklı mühendislik malzemelerinin genel özelliklerinin karşılaştırması (Türkmen 2012)

Yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemelerinin mekanik özellikleri karşılaştırması ise çizelge 2.3’te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Türkmen 2012)

Malzeme Cinsi	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastik Modülü (GPa)	Özgül Çekme Dayanımı (G/ρ)	Özgül Modülü (E/ρ)	Uzama Miktarı (%)
Alüminyum	2,8	84	71	30	25	-
Al-2024	2,8	247	89	88	25	8-20
Al Alaşımı	2,8	600	71	210	25	-
Titanyum	4,51	700	117	192	21,1	20
Ni Alaşımı	8,18	450-1200	204	147	24,9	26-45
Ahşap	0,7	110	13	157	19	-
Alaşımız Çelik	7,86	460	210	60	27	20
Düşük Alaşımız Çelik	7,8	600	207	80-250	26,5	20-30
Dökme Demir	-	275	138	-	-	0,6
Pirinç (%30 Zn)	8,5	550	100	60	12	-
Karbon/Epoksi (%60)	1,62	1400	220	865	135	0,8
Kevlar/Epoksi	1,38	1310	83	950	60	-
Cam/Epoksi (%60)	1,66	1510	165	910	99	-
Cam/Polyester (%50)	1,9	750	38	390	19,8	1,8
Karbon/Epoksi (Y:D)	1,5	1650	140	1100	93	-
Cam/Polyester	1,55	110	9	72	5,7	2
Al/50%B	2,7	1130	207	420	77	-
Cu/50%T	14,13	1207	262	90	18	-

Elyaf takviyeli kompozitlerin kırılma uzamaları metallere daha düşüktür. Ancak kompozitlerin avantajı birim ağırlık modülü, özgül dayanım/yoğunluk gibi oranlar incelendiğinde ortaya çıkar.

Tüm bu avantajların bir arada toplandığı bir malzemeye pratik anlamda ihtiyaç yoktur. Fakat daha önceden özellikleri bilinen bileşenler ile oluşturulan kompozitlerin yoğunluk, elastik modülleri, çekme dayanımları gibi bazı değerler önceden hesaplanabilir. Bunun için; uygun matris-takviye elemanı seçimi, uygun üretim yöntemi, bileşenlerin kendi mekanik özellikleri gibi faktörler göz önüne alınırsa istenen özellikleri elde etmek mümkündür.

Kompozit içerisinde matris tarafından yükün takviye elemana doğru bir şekilde iletilmesi ara yüzey bağının kuvvetiyle doğrudan ilişkilidir. Ara yüzey bağının kuvveti ise birincil olarak bileşenlerin uyumuna bağlıdır. Bunun yanında üretim yöntemi, takviye elemanların matris içerisindeki dağılımı önemli bir etkidir. Kompozitler karma malzemeler olduğu için optimum matris-takviye eleman çifti seçimi çok kritik öneme sahiptir. (Türkmen 2012)

Kompozit malzemelerin tüm bu avantajlarının yanında bir çok dezavantajı da mevcuttur. Bunlar;

- Üretiminin zor bir süreç olması
- Isı ve neme karşı duyarlı olması (Kompoziti oluşturan bileşenler olumlu ya da olumsuz tüm özellikleri ana malzemeye yansıtır. Örneğin matris ısı ve neme karşı duyarlıysa, yapının da ısı ve neme karşı duyarlı olmasını beklenir.)
- Hammaddesinin pahalı olması
- Geri dönüşümünün metalik malzemelere göre daha zor olması. (Oldukça pahalı bir yöntemdir.)
- Kırılma uzamasının düşük oluşu
- Üretim metoduna göre eğer malzeme içerisinde hava zerreciği oluşmuşsa bunların yorulma dayanımını düşürmesi
- Değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler göstermesi
- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerlerinin farklılıklar göstermesi

- Delik delme, kesme türü operasyonların liflerde açılmaya neden olmasından dolayı hassas imalata uygun olmamaları'dır.

Ayrıca tüm özelliklerine rağmen kompozitlerin tam anlamıyla metallerin yerine geçememesinin sebeplerini de 3 başlık altında toplayabiliriz;

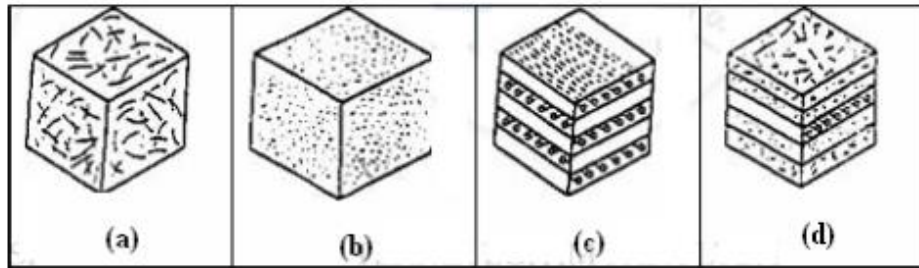
- Bazı uygulamalarda ihtiyaç duyulan düzeyde ısıl ve mekaniksel özellikleri günümüz kompozit teknolojisi, titanyum ve çelik gibi metaller kadar üst düzeyde sağlayamaması,
- Bazı karmaşık parçaların üretiminin çok yüksek maliyetlere sebep olması ve hala metaller ile yarışabilecek düzeye gelememesi,
- Yeni geliştirilen matrislerle beraber kullanılan elyafların tüm özelliklerinin metaller kadar iyi bilinmemesi ve öngörülemedir.

2.1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Çok farklı malzemelerin birleştirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelerin sınıflandırmasını yapmak oldukça güç olsa da yapının bileşenlerinin formuna göre ve matris malzemesine göre ayrı birer sınıflandırma yapmak mümkündür.

2.1.2.1. Bileşenlerin Formuna Göre Kompozitlerin Sınıflandırması

Bileşenlerin formuna göre kompozitler dört ana başlık altında sınıflandırılabilir;



Şekil 2.23. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Bolat 2011)

A. Elyafli kompozitler

A.1. Sürekli

A.2. Süreksiz

B. Parçacıklı kompozitler

- B.1. İri parçacıklı
- B.2. Saçınma yoluyla dayanım artışı
- C. Yapısal kompozitler
 - C.1. Tabakalı kompozitler
 - C.2. Sandviç kompozitler
- D. Karma kompozitler

Elyafli kompozitler, ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetine direkt etki eden bir parametredir. Birbirine paralel yerleştirilen elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda mukavemet düşüktür. İki boyutlu olarak yerleştirilmiş elyaf takviyelerle ise her iki yönde de eşit mukavemet sağlanır. Elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından oldukça önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranı ile matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı doğru orantılı olarak değişmektedir. Elyaf yapının hatasız olması ve elyaf matris arasındaki bağ da mukavemet açısından çok önemlidir. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise elyaflarla temas azalacaktır.

Parçacıklı kompozitler, matris içerisinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde dağılması ile elde edilen izotrop bir yapıdır. Malzemenin mukavemeti parçacık sertliğine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Plastik matris içerisinde dağılmış halde bulunan metal parçacıklar ile oluşturulan malzemeler örnek olarak gösterilebilir. Metal parçacıklar ısı ve elektriksel iletkenlik sağlar. Başka bir örnek uçak motor parçalarının üretiminde kullanılan metal matris içinde seramik parçacık içeren sert ve yüksek sıcaklık dayanımına sahip malzemeler için verilebilir. İri parçacık ve saçınımla dayanımı arttırılmış kompozitler arasındaki ayırım takviye veya dayanım arttırma mekanizmalarına göre yapılır. İri parçacık kompozitlerin çoğunda parçacık fazı matristen daha sert ve rijittir. Böylece matrisin hareketini engeller. Mekanik özelliklerin arttırılma veya iyileştirme miktarı, matris parçacık ara yüzeyindeki bağın dayanımına bağlıdır. Saçınımla dayanımı arttırılmış kompozitlerde parçacıklar normalde çok daha küçük olup, çapları 0,01 ile 0,1 μm arasındadır. Dayanım arttırma çökeltme sertleşmesi yönteminin aynısıdır. Burada, matris uygulanan kuvvetin önemli bir kısmını taşıırken, küçük saçınmış parçacıklar dislokasyon hareketini yavaşlatır veya engeller.

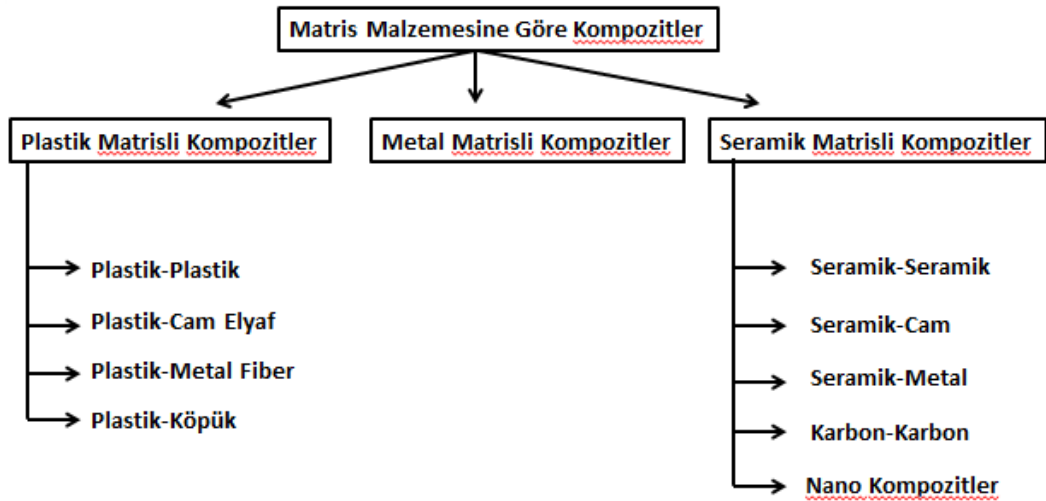
Yapısal kompozitlerin bir alt dalı olan tabakalı kompozitler, en eski ve yaygın kullanıma sahip olan kompozit cinsidir. Farklı yönlerde elyaf katmanların birleşimi ile yüksek mukavemetli, ısıya ve neme dayanıklı yeni malzemeler elde edilir. Uçak kanat ve kuyruk üzerinde yüzey kaplama malzemesi olarak çok fazla kullanılmaktadır.

Başka bir alt dal olan sandviç kompozitler ise, izolasyon özelliğine sahip olan düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemet artırıcı levhaların yapıştırılmasıyla elde edilir.

Karma kompozitler, aynı yapıda iki veya daha fazla elyaf çeşidi bulunan kompozit yapılarıdır. Yeni malzemelerin geliştirilmesine oldukça açık bir alandır. Örnek olarak, Grafit düşük tokluğa sahip, pahalı ancak basma mukavemeti yüksek bir elyaf olmasına rağmen daha ucuz, tok ve basma mukavemeti düşük kevlar ile birleştirilmesiyle oluşan kompozitin tokluğu grafitten çok daha iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemeti ise oldukça yüksek yeni bir kompozit malzemedir.

2.1.2.2. Matris Malzemesine Göre Kompozitlerin Sınıflandırması

Plastik, metal ve seramik matrisli olmak üzere 3 grupta incelenebilir.(Şekil 2.24)



Şekil 2.24. Matris malzemesine göre kompozitlerin sınıflandırılması

Plastik-Plastik kompozit çiftinde takviye plastik yük taşıyıcı özellikteyken, matris olarak kullanılan plastik esneklik verici ya da darbe emici olarak istenen amaca uygun plastiğin kullanılmasıyla oluşturulur.

Plastik-Cam elyaf kompozitler, termoset veya termoplastik plastikten oluşan matris ile cam liflerinden oluşmaktadır.

Plastik-Metal fiber kompozitler, oldukça hafif ve yüksek dayanım özelliklerine sahiptir. Metal fiberler ile (alüminyum, çelik, bakır) polipropilen, polietilen plastiklerinin takviyesi ile elde edilir. Özellikle darbe emici uygulamalarda iyi bir verim ile karşımıza çıkmaktadır.

Plastik-Köpük kompozitlerde, plastik fiber görevi görmekte iken köpük matris olarak karşımıza çıkmaktadır. Köpük boşluklu yapısı sayesinde çok düşük ağırlığa sahip olup sert, kırılğan, yumuşak olabilmektedir.

Metal matrisli kompozitler, metal ve metal alaşımlarının yüksek sıcaklıkta kırılğan özellik göstermesine rağmen, yüksek sıcaklıklarda oldukça yüksek dayanım göstermektedirler.

Seramik matrisli kompozitler, yüksek sıcaklıklara karşı iyi bir dayanım göstermekle birlikte, elektrikselsel olarak da çok iyi yalıtkanlardır.

Seramik-Seramik kompozitler, Çini örenğinde olduğu gibi iki farklı seramik fazından meydana gelirler.

Seramik-Cam kompozitler, çok yaygın bir kullanıma sahip porselen bu gruba örnek olarak gösterilebilir.

Seramik-Metal kompozitler, Çok fazlı bir yapıya sahip bir kompozit grubudur.

Karbon-Karbon kompozitler, Saf karbon partiküllerinin karbon esaslı bağlayıcı ile karışımından elde edilir. Malzemenin tamamı karbon olmakla birlikte biri dolgu diğeri bağlayıcı görevi görmektedir.

Nano kompozitler, %10'dan az miktarda nano boyutlu mineral içeren kompozit grubudur. Bu kompozitlerin üretiminde ergimiş metal karıştırması, toz metalürjisi ve mekanik alaşımlama kullanılır. (Türkmen 2012)

2.1.3. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

Kompozit malzemeler günümüzde çok geniş kullanım alanına sahiptir. Ağırlık avantajlarından dolayı yüksek mukavemet istenen yerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple de en geniş kullanım alanını ulaşım sektöründe bulmuştur. (Özer 2015)

Kompozit malzemelerin sıkça kullanıldığı uygulama alanları ve malzemeleri çizelge 3.4'te paylaşılmıştır.

Çizelge 2.4. Kompozit malzemelerin kullanım alanları (Türkmen 2010)

Endüstrisi	Uygulama Alanları	Kullanılan Kompozit Malzemeler
Uçak	Uçak kanatları ve gövdesi, helikopter pervaneleri, iniş ve çıkış kapıları, payandalar döşeme kirişleri, çerçeveler, vantilatör ve türbin kanatları	B/Al, SiC _w /Al, Gr/Al, B/Al, cam/epoksi, C/epoksi, B/epoksi, K/epoksi, süper alaşımlar
Helikopter	Transmisyon kutusu, kiriş destek yapıtları, itici çubuklar, iniş takımları, rotor kanatları arkası	Al ₂ O ₃ /Mg, Gr/Al, Gr/Mg, B/Al, Al ₂ O ₃ /Al, SiC _w /Al, B/A, SiC/Al
Uzay	Uzay yapıtları, antenleri, robot kolları	B/Al, B/Mg, Gr/Mg
Otomotiv	Gövde parçaları, tampon ve çamurluklar, ön ve arka paneller, aks mili, yaylar, itme çubukları ve piston kolları	Kevlar/epoksi, SiC _p /Al, SiC _w /Al, B/Al
Gemi	Gemi teknesi, gemi güvertesi	Kevlar/epoksi, Karbon/epoksi
Kimya	Borular, basınçlı kaplar ve tanklar	Cam/epoksi, Karbon/epoksi
Spor	Oltalar, golf kültüpleri, yüzme havuzları, tenis raketleri bisiklet ve motosiklet gövdesi	Gr/Al, B/Al, C/epoksi, B/epoksi, SiC _w /Al, B/Al, Gr/Al, SiC/Al
Elektrik	Motor fırçaları, kablo ve aktü plakaları	Gr/Cu, Gr/Pb, Al ₂ O ₃ /Pb
Tekstil	Mekikler	B/Al, C/Al, SiC/Al
Tıp	Röntgen masaları, protezler ve tekerlekli sandalyeler	B/Al, SiC/Al
Uçak-Uzay	Uçak frenleri, roket memeleri, türbin pervaneleri, roket çıkış sistemleri	Karbon/karbon kompozit
Diğer Alanlar	Makine yatakları	C/Pb, Al ₂ O ₃ /Pb

Sandviç kompozitler otomotiv endüstrisinde direkt olarak kullanıldığı gibi indirekt olarak da kullanılabilir. (Şekil 2.25.) Örneğin; yüksek şok emme kabiliyetleri ile crash test bariyerlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. (Aydıncak 2007)



Şekil 2.25. Kompozit malzemedен üretilen crash test bariyerleri (Aydıncak 2007)

Otomotiv endüstrisi için günümüzün en büyük problemi araçlarda emisyon azaltma zorunluluğudur. Gün geçtikçe katılaşan uluslararası yasalar ve çevre problemleri otomotiv üreticilerini bu konuda çok daha fazla yatırım ve araştırma yapmaya yöneltmiştir. Emisyonu direkt etkileyen birincil faktör ise ağırlıktır.

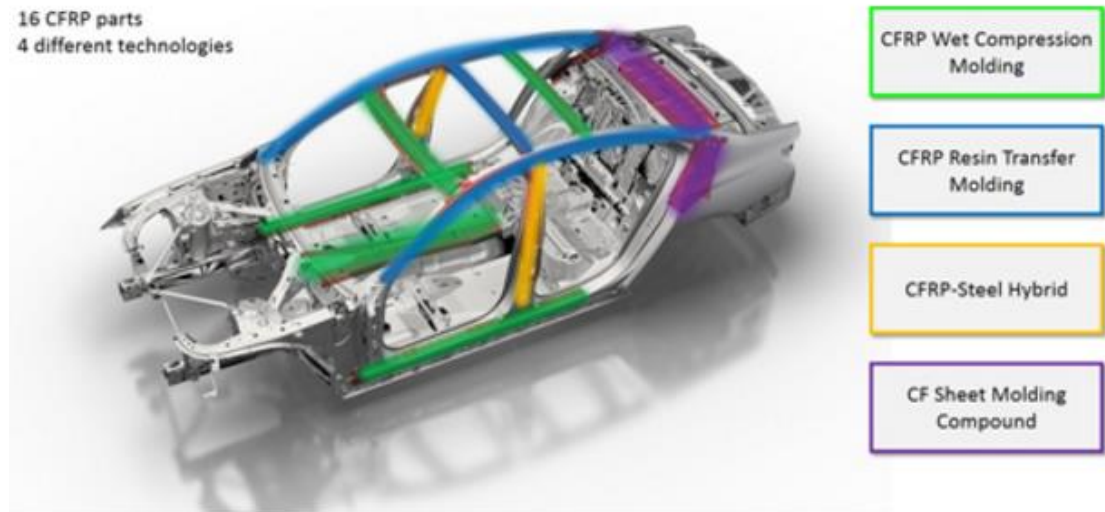
Daha hafif otomobil üretimi, enerji tasarrufu, çevre faktörü gibi konular göze alındığında sürdürülebilir bir gelişim için birincil metoddur. En etkili ağırlık azaltma yöntemi ise alternatif, hafif, verimli malzemeler kullanmaktır. Kompozit malzemeler ise yüksek dayanımları ve düşük ağırlıklarıyla aynı zamanda kimyasal kararlılıklarıyla idealdir. (Wang 2018)

Ağırlık azaltma konusunda da kompozit malzemeler, metalik malzemelere göre çok önemli bir alternatif sunmaktadır. Otomotivde termoset kompozitler yoğun olarak kullanılsa da geri dönüşüm avantajı, kolay şekil alma ve yüksek özgül mukavemet değerleri nedeniyle termoplastik malzemeler de oldukça sık kullanılmaktadır. Otomotivde bazı kullanım alanlarına örnek olarak;

- Cam Sileceği; %30 Cam+PBT
- Filtre Kutusu; Mercedes, %35 Cam+Poliamid
- Pedallar; %40 Cam+Poliamid
- Dikiz Aynası; %30 Cam+ABS

- Far G6vdesi; BMW, %30 Cam+PBT
- Hava Giriş Manifoldu; BMW, Ford, Mercedes, %30 Cam+Poliamid
- Otomobil Gösterge Paneli; GMT
- Otomobil Spoiler; CTP
- Otomobil Yan G6vde İskeleti; Ford, CTP
- Otomobil kaporta; Corvette, SMC, CTP gösterilebilir. (Arıcasoy 2006)

Güncel bir örnek olarak; BMW 7 serisi gösterilebilir. Farklı malzemelerin kombinasyonunun kullanılması ile lüks sınıf otomobillerde başlıca rakibi Mercedes S serisine göre 130 kg daha hafif bir tasarım elde edilmiştir. Kullanılan parçaların sadece %3'ünde karbon fiber takviyeli kompozitler kullanarak 40 kg kadar ağırlık kazancı sağlanmıştır(Şekil 2.26 ve şekil 2.27) . BMW'nin dinamik verimlilik olarak tanımladığı yakıt tüketimi ve emisyonları azaltıcı bu çalışmalarını küçük bir otomobilden beklenen yakıt tüketimi değerlerine lüks sınıf bir sedan araçta da ulaşılabileceğini göstermiştir. (Gardiner 2016)



Şekil 2.26. BMW 7 araç gövdesinde karbon fiber kullanımı (Gardiner 2016)



Şekil 2.27. BMW 7 gövdesinde kullanılan karbon fiber örnekleri (Gardiner 2016)

Günümüz araçlarının genellikle gövdeleri metal tabanlı, araç içi parçaları plastik tabanlı malzemelerden oluşur. Mekanik özelliklerin dışında düşük ağırlıklı gövde enerji ihtiyacını düşürmektedir. Fakat metal gövde parçalarının et kalınlığı düştükçe aynı zamanda güvenlik faktörü de azalır. Bu duruma alternatif olabilecek durumda olan özellikle karbon elyaf takviyeli sandviç kompozit gibi malzemeler şuan için yüksek maliyetleri nedeniyle bazı spor araçların gövde ve şasi parçalarında yoğunlukla kullanılmaktadır(Şekil 2.28.). Ancak maliyetlerin gün geçtikçe düşürülmesiyle orta segment araçlarda bile kullanımının önü açıktır. (Sukmaji 2017)



Şekil 2.28. Kompozit malzeme kullanımına örnek araçlar (Ertan 2016)



Şekil 2.29. Kompozit kullanımına örnek Ferrari Formula 1 aracı (Ertan 2016)

Şekil 2.29.'daki Ferrari Formula 1 aracının tüm gövde yapısı elle yatırma yöntemi ile üretilen Epoksi C fiberin daha sonra otoklav yöntemi ile şekillendirilmesiyle üretilmiştir.

Ulaşım ve otomotivde kompozitlerin örnek uygulamaları şekil 2.30. ve şekil 2.31'de paylaşılmıştır.



Şekil 2.30. Otomotiv ve ulaşımda kompozit kullanımına örnekler (Ertan 2016)



Şekil 2.31. Otomotiv alanında karbon elyaf kullanımına örnekler

Havacılıkta kompozitler, genel olarak epoksi matris içinde sürekli elyaf takviyeli malzemeler ile kullanılmaktadır. Uçaklar gövde ağırlık kontrolü, uzun hizmet ömrü, mesafe, seyir sürati irtifa gibi performans gereksinimlerini karşılayacak şekilde dizayn edilirler. Diğer tüm koşulların eşit olduğu durumlarda, ağırlığı en az tutulan dizayn kriteri en uygun olacaktır. Buna göre uygun özelliklere sahip hafif metaller en iyi verimi sağlayacaktır. Kompozit malzemeler bu amaçla kullanılabilecek uygun bir malzeme grubunu oluşturmaktadır.

Elektronik endüstrisinde ise kompozit malzemeler izolasyon özelliği sayesinde üretim malzemesi olarak kullanılmaktadır. (Yağcı 2007)

Kompozitler üstün korozyon direnci sayesinde denizcilik alanında da ön plana çıkmıştır. Su ile temas eden yüzeylerde kullanımı oldukça yaygındır. Hafifliği sayesinde de deniz araçlarının daha rahat hareket edebilmesi ve yakıt tasarrufu gibi avantajları vardır. (Mazumdar 2002).

Kompozit malzemeler, inşaat sektörü için ise özellikle yalıtım amaçlı bina kaplama malzemesi olarak yaygın kullanıma sahip olsa da lavabo, küvet, kapı gibi parçaların üretiminde de sıklıkla kullanılır. İnşaat sektöründeki kullanım alanlarına örnek olarak; Köprü Tabanı, tırabzanı, yürüme yolları, taşıyıcı konstrüksiyon, bina balkon korkuluğu, kapı, bina kaplama panelleri, küvet, lavabo, sokak lambası(CTP), taşıyıcı

konstrüksiyon, yüzme havuzu, kapı saçağı, yer karoları(SMC) verilebilir(Arıcasoy 2006).

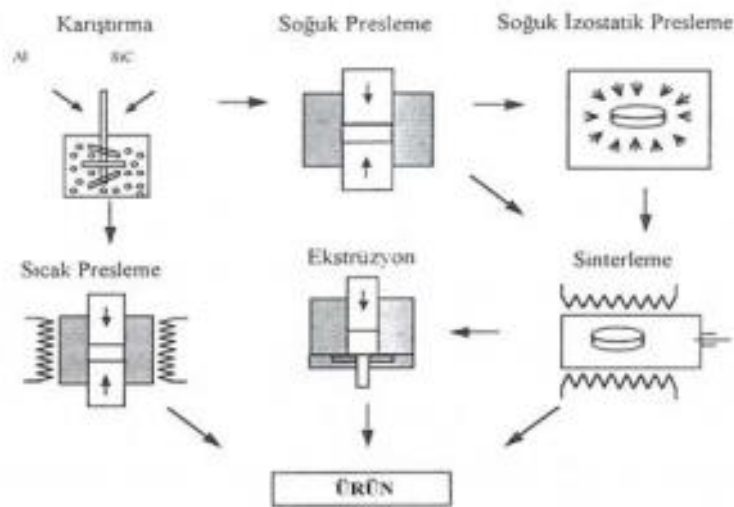
Mutfak aletleri, süs eşyaları, masa dolap gibi birçok ev aletlerinde kompozit malzemeler kullanılır.

Sağlık alanında ise örnek olarak tekerlekli sandalye; Cam veya Karbon Elyaf takviyeli Polyester, Tıbbi Tetkik Cihazları Dış Muhafazaları; CTP gibi kompozit malzemelerden üretilir. Diş kaplamaları için de kompozitlerden yararlanır.

2.1.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit üretiminde ihtiyaç duyulan özellikleri karşılamak adına geliştirilmiş birçok üretim yöntemi mevcuttur. Doğru yöntemin kullanımı ürün kalitesi açısından kritik önem taşımaktadır. Bu yöntemler, metalik ve elyaf matrisli olarak iki şekilde sınıflandırılabilir.

Metal matrisli kompozitlerde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri toz metalürjisi ile üretim yöntemidir. Bu teknikle partikül formundaki takviye elemanı ile toz haldeki metal kullanılarak kompozit oluşturulur. Silisyum karbür, grafit, titanyum ve bakır takviye olarak çok sık kullanılır. Karışım kalıbın içine boşaltılır ve basınç altında sıkıştırılır. Eğer karışım soğuk preslendiyse bu işlemin ardından bir de sinterleme işlemi yapılır.(Şekil 2.32.)



Şekil 2.32. Toz metalürjisi metodu (Akdoğan 2008)

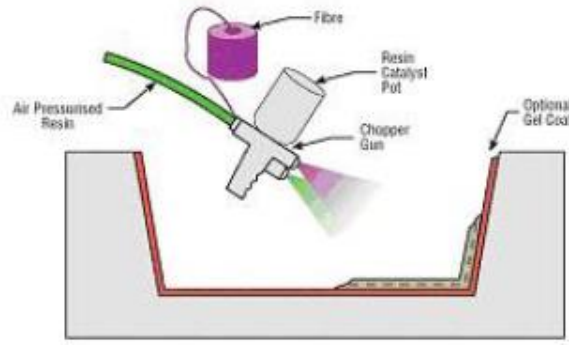
Sıvı metal emdirme yöntemi, alüminyum, gümüş, magnezyum ve bakır gibi metal matrisler kullanılır. Seri üretime uygun olmakla beraber %45 oranında elyaf hacmine sahip kompozitlerin üretimine uygundur. (Özer 2015)

Elektroliz metodu, katot olarak kullanılan mandrel üzerindeki elyaflara metal matris çökeltme ile yapılır. Daha sonra pres altında elyaflar birleştirilir. Yüksek elyaf hacim oranına sahip kompozitlerin eldesi mümkündür. (Özer 2015)

Bir diğer yöntem olan sıcak presleme metodu, 80-170°C sıcaklık arasında ve 0,5-15 Mpa basınç altında presleme ile uygulanır. Presleme esnasında bağlayıcı kalıp içerisine püskürtülür. Sıcaklık ve basınç kompozitin boyutlarına ve reçine sıcaklığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Seri üretime uygun olmakla beraber 1 saatte 30 adet ürün çıkarmak mümkündür. Alüminyum, titanyum ve magnezyum bu yöntemde matris olarak kullanılmaktadır. (Özer 2015)

Elyaf matrisli kompozitlerin üretimi için ise; elle yatırma yöntemi, kullanılan en kolay yöntemdir. Genellikle kumaş halindeki elyaf daha önce hazırlanan kalıp içerisine yerleştirilip reçine fırça yardımıyla elyaf üzerinde boşluk kalmayacak şekilde sürülür. Bu yöntem için en uygun reçineler polyester ve epoksidir. Reçinenin kalıba yapışmaması için de elyaf ve kalıp arasına ayırıcı (jelkot) sürme işlemi uygulanır. Bu işlemde reçinenin elyaf kumaşına iyi nüfuz etmesi çok önemlidir. Mekanik özellikleri etkileyecek hava kabarcıkları oluşumu ve yoğun işçilik gereksinimi yöntemin önemli dezavantajlarıdır. Ancak düşük sayıdaki üretimler için pratiktir.

Püskürtme yöntemi , yöntem olarak elle yatırmaya benzese de bu yöntemde sadece kırılmış elyaflar kullanılır. Kırılmış elyaflar kalıp içerisine sertleştirici ilaveli reçine ile bir tabanca yardımı ile püskürtülür(Şekil 2.33).. Bu yöntemin uygulanma hızı önemlidir. Püskürtme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile hava kabarcıklarından arındırılması ile işlem tamamlanır. Bu yöntem büyük ve kompleks parçaların üretimi için uygun bir yöntemdir.



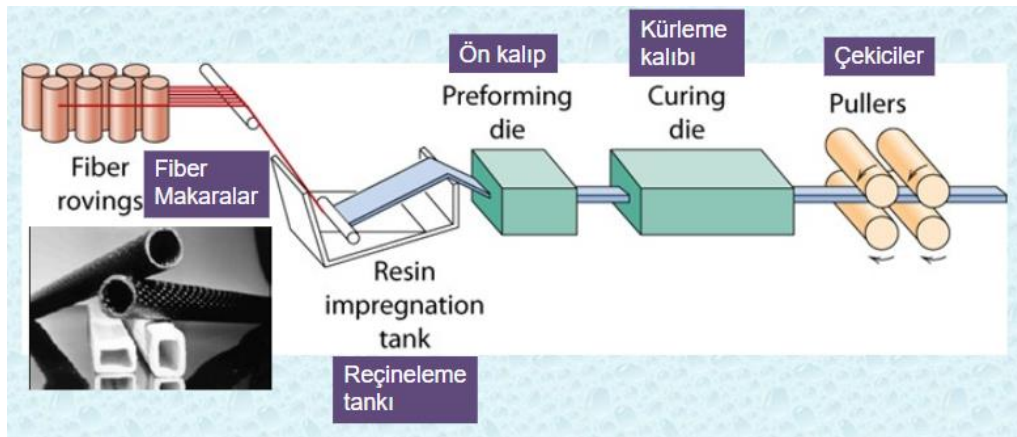
Püskürtme Yöntemi



Püskürtme Tabancası

Şekil 2.33. Püskürtme yöntemi (Arıcasoy 2006)

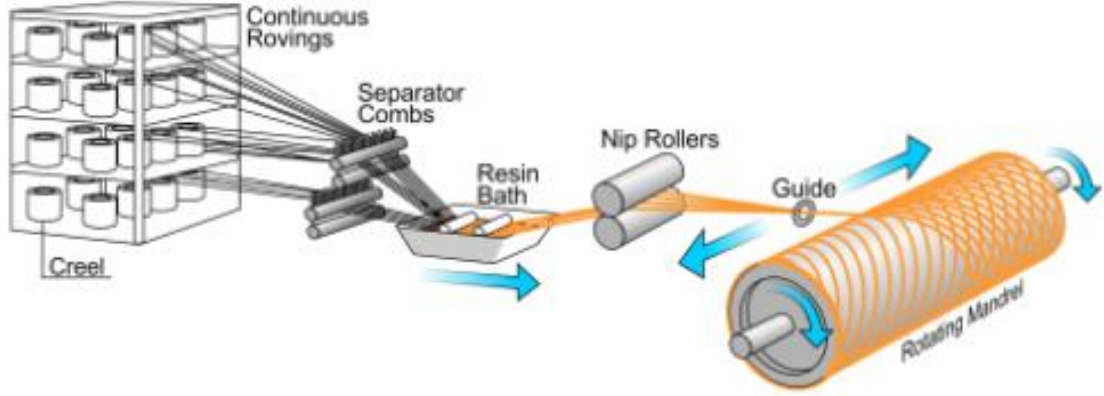
Profil çekme yöntemi , pultrüzyon işlemi sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretilebildiği düşük maliyetli seri üretim yöntemidir. Pull ve Extrusion kelimelerinden türetilmiştir. Sisteme beslenen sürekli takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra 120-150°C'ye ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçilerek sertleşmesi sağlanır. Kalıplar genellikle krom kaplanmış parlak çelikten yapılmaktadır. Sürekli elyaf kullanılmasından dolayı takviye yönünde çok yüksek mekanik mukavemet elde edilir. Enine yükleri karşılayabilmek için özel dokumalar kullanmak gerekmektedir. Genellikle boru şeklinde ürünler için uygun bir yöntemdir(Şekil 2.34).



Şekil 2.34. Profil çekme yöntemi (Anonim 2017c)

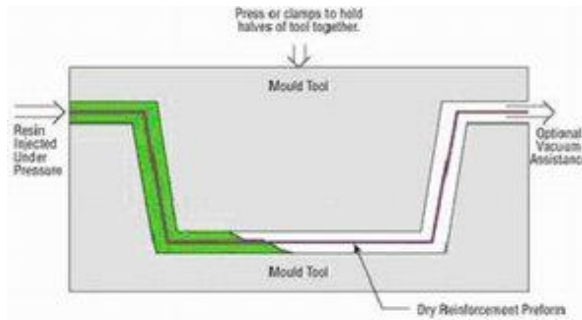
Elyaf sarma yöntemi ile özel şekil ve biçimdeki parçalar seri bir şekilde üretilebilir. Sürekli elyaf lifleri reçine havuzundan geçtikten sonra dönen bir kalıp üzerine sarılır. Liflerin farklı açılarda sarılmasıyla farklı mekanik özellikler elde edilebilir. Ürün kalıp

üzerinde sertleştikten sonra döner kalıp ayrılır. Bu üretim metodu ile genellikle silindirik şekilde, araç şaftları, su tankları, yat direkleri gibi ürünler üretilir(Şekil 2.35).



Şekil 2.35. Elyaf sarma yöntemi (Anonim 2017e)

Reçine transfer kalıplama yönteminde üretilen parçalar uzun ömürlü olmakla birlikte hızlı bir yöntemdir. İki parçalı kalıp kullanımı gerekmektedir. RTM ile iki yüzeyi de düzgün parçalar için elde edilir. Takviye olarak genellikle kuru keçe, kumaş ve bunların birlikte kullanıldığı örneklerle karşılaşmak mümkündür. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Enjeksiyon işlemi en yüksek 80°C'ye kadar ısıtılmış kalıplarda uygulanır(Şekil 2.36). Bu işlem ile içerideki havanın dışarı çıkması sağlanır ve gözeneksiz bir ürün elde edilir. Karmaşık parçaların üretimi için oldukça uygundur.

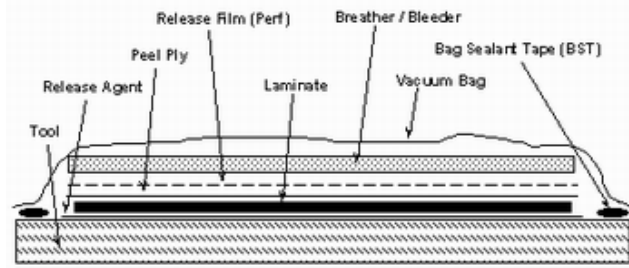


Şekil 2.36. Reçine transfer kalıplama yöntemi (Arıcasoy 2006)

Hazır kalıplama yöntemi, cam elyaf , reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren kompozit malzemelerin sıcak pres kalıplarında ürüne dönüştürülmesi işlemidir. Karmaşık şekilde parçalar için uygun oluşu, metal parçaların yapının içerisine gömülebilme şansı, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajlara sahiptir. Ürünün iki yüzü de kalıp ile şekillendirilir. Diğer yöntemlerle elde edilmesi zor delik gibi şekillerin eldesi

bu yöntemle oldukça kolaydır. Yüksek kalıp maliyeti, büyük parçaların üretiminin işletme maliyetinin yüksek oluşu gibi dezavantajları da vardır.

Vakum torbalama yönteminde ise kompozit malzeme kalıba yerleştirilir ardından üzeri bir vakum torbası ile örtülür. İçeriye reçine verilirken aynı zamanda hava tamamen çekilir. Daha sonra tüm yapı fırına verilerek kürleşme işlemine bırakılır(Şekil 2.37).



Şekil 2.37. Vakum torbalama yöntemi (Arıcasoy 2006)

2.1.5. Kompozit Malzemelerin Bileşenleri

Kompozit malzemelerin takviye ve matris olmak üzere 2 ana elemanı bulunmaktadır.

Matris malzemeler sürekli fazı oluştururlar. İki önemli ana görevleri vardır. Malzemeye gelen yükü fiberlere yani takviye malzemelere iletmek ve takviye malzemeyi, dış etkilerden korumaktır. Aynı zamanda fiberleri bir arada tutmak da matrisin bir diğer görevidir.

Kompozitlerin temel yapısı, yükü taşıyan yüksek elastik modüllü fiberlerin, taşıyıcıya göre daha düşük elastik modülüne sahip matris içerisinde birleştirilmiş halidir. Yani matris, plastikliği daha fazla olan bir malzemedir elde edilir.

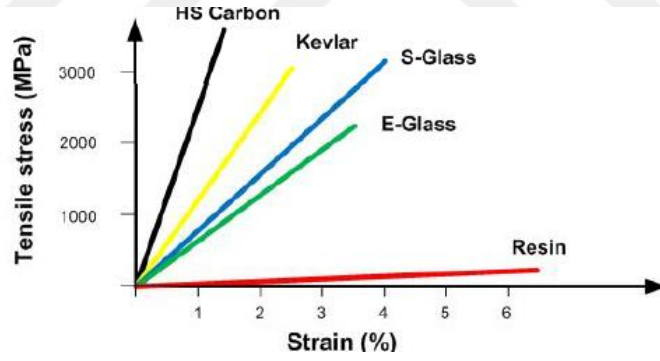
Termoset veya Termoplastik polimerler yoğun olarak kullanılır. Termoplastik grubunda yaygın olarak polipropilen ve poliamid kullanımı (%68,3 oranında) görülmektedir. (Arıcasoy 2006)

Matrisin ana görevi fiberleri desteklemek ve uygulanan yükü fiberlere transfer ederek fiberleri mevcut pozisyonunda bir arada tutmaktır. (Hexcel 2013)

Takviye malzemeleri ise genellikle elyaflar ve parçacıklar olarak iki grupta incelenir. Ancak genellikle yapının yüksek mukavemetli olması istendiğinden takviye malzemesi olarak elyaflar kullanılır. Başlıca elyaf türleri;

- Cam elyaf
- Karbon elyaf
- Aramid elyaf (Kevlar)
- Bor elyaf
- Silisyum karbür elyaf
- Polietilen elyaf
- Polyamid elyaf
- Polyester elyaf
- Seramik elyaf
- Alümina elyaf

Başlıca elyaf türlerinin mukavemet karşılaştırması şekil 2.38.'de verilmiştir.



Şekil 2.38. Bazı takviye malzemelerin gerilim-uzama grafiği (Aymerich 2012)

Çizelge 2.5. Bazı elyaf ve geleneksel malzemelerin mekanik özellikleri (Ercan 2006)

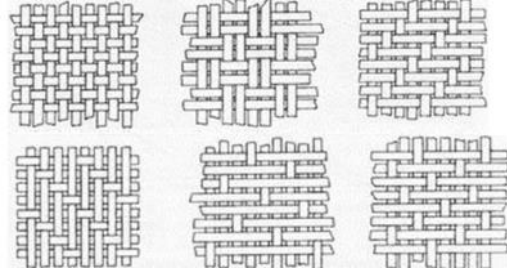
Malzeme	Yoğunluk (gr/cc)	Çekme Dayancı (MPa)	Özgül Çekme Dayancı (MPa)	Çekme Modülü (MPa)	Özgül Modül $\frac{E}{\rho}$
Çelik	7,8	999	131.10^3	200.10^3	3,3
Titanyum	4,5	923	207.10^3	110.10^3	3,5
Alüminyum	2,8	462	165.10^3	69.10^3	3,5
Fiberglas	2,5	1694	675.10^3	69.10^3	4,0
Karbon fiber	1,9	1570	826.10^3	379.10^3	29
Kevlar	1,4	2652	1895.10^3	131.10^3	14

Cam elyaflar , neme karşı duyarlı olmasının dışında ucuzluğu, yüksek mukaveti, esnekliği, ucuz kalıp yatırımı ve işleme kolaylığı ile birçok alanda karşımıza çıkmaktadır. Camın ana maddesi olan SiO₂'ye farklı oksitlerin eklenmesi ile değişik kimyasal ve mekanik özelliklerde cam elyafı üretimi yapılmaktadır.

En sık karşılaşılan cam elyafları; E-glass, S-glass, C-glass ve Quart'dır. E-glass; Yüksek elektriksel iletkenlik ve yüksek mukavemet istenen yerlerde kullanılır. S-glass; Yüksek dayanıma sahip ve mekanik özellikleri açısından E-glass camdan üstündür. C-glass; Kimyasal stabilite nin önemli olduğu ortamlarda kullanılır. Quartz'ın ise en önemli özelliği düşük dielektrik özellikleri istenen haberleşme araçlarında kullanılabilmesidir. (Ercan 2006)

Karbon elyaflar, takviye elemanı olarak ileri kompozitlerde en sık karşılaşılan elyaf türüdür. Karbon elyaf, diğer elyaf türlerine göre en yüksek mukavemet, tokluk ve en düşük ağırlığa sahip elyaf türüdür. Oda sıcaklığı koşullarında yorulma direnci ile yük altında deformasyon miktarı düşüktür.

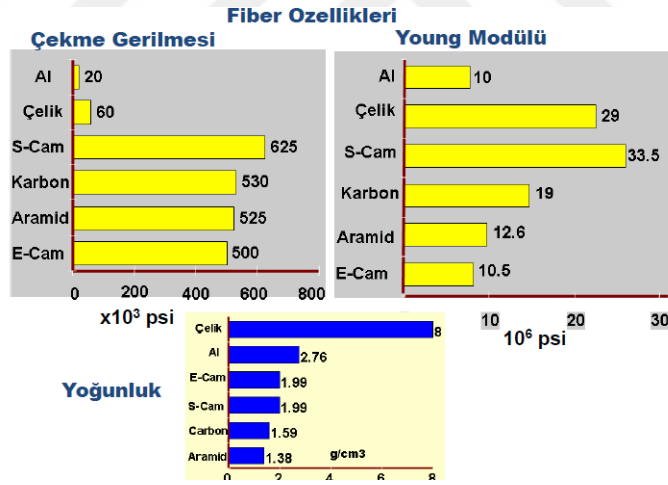
Elyaflar kendi boyları doğrultusunda kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiğinden farklı yönlerde istenen özelliklere sahip malzeme tasarımı için karbon liflerinin kumaş üzerindeki oryantasyonunun da malzeme özellikleri üzerindeki etkisi oldukça büyüktür(Şekil 2.39).



Şekil 2.39. Farklı oryantasyonda karbon kumaş tipleri

Organik fiberler arasından ise en yaygın kullanım armidler (kevlar)'dir. Karbon fiber ve fiberglasa göre daha az kırılındır. Bu sebeple sınırlı ısı genleşme gerektiren yerlerde üstün malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak kesme, delme gibi işlemlerde liflendiğinden imalat esnasında zorluklarla karşılaşmak mümkündür. (Ercan 2006)

Elyafların, en sık kullanılan mühendislik malzemeleri olan alüminyum ve çelikle olan mekaniksel karşılaştırmaları şekil 2.40.'ta verilmiştir.

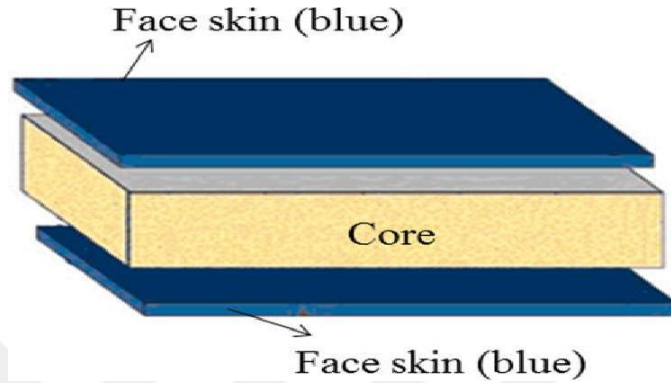


Şekil 2.40. Elyafların mekanik özelliklerinin Al ve Çelik ile karşılaştırması

2.2.Sandviç Kompozitler

Sandviç malzemeler gelişmiş kompozit uygulamaları içerisinde en önemli kompozit çeşitlerinden biridir. Sandviç yapılar, mukavemeti ve elastisite modülü düşük hafif bir çekirdek malzemeden ve iki adet mukavemeti yüksek (yüksek elastisite modülü) ve nispeten daha ağır yüzey malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilir.(Hara 2012)

Çekirdek malzemenin asıl amacı takviye yüzey malzemeleri arasındaki mesafeyi korumaktır. Bu mesafe sandviçin kesit alanına ait atalet momentinin ve bükülme rijitliğinin istenen yüksek değerlere ulaşmasını sağlamaktadır. Yani sandviç yapı için en önemli özellikler; yüksek mukavemetli yüzeyler, düşük yoğunluklu çekirdek ve rijit bir yapışma bağlantısıdır. (Tortoç 2009)



Şekil 2.41. Sandviç kompozit yapısı (Konka ve ark. 2012)

Sandviç paneller şekil 2.41.'deki gibi, 2 adet ince ve yüksek performanslı fiber takviyeli yüzey tabakası ve çok hafif bir çekirdek malzeme olmak üzere en az 3 ayrı tabakanın birleşimi ile oluşturulur. (Deng 2007)

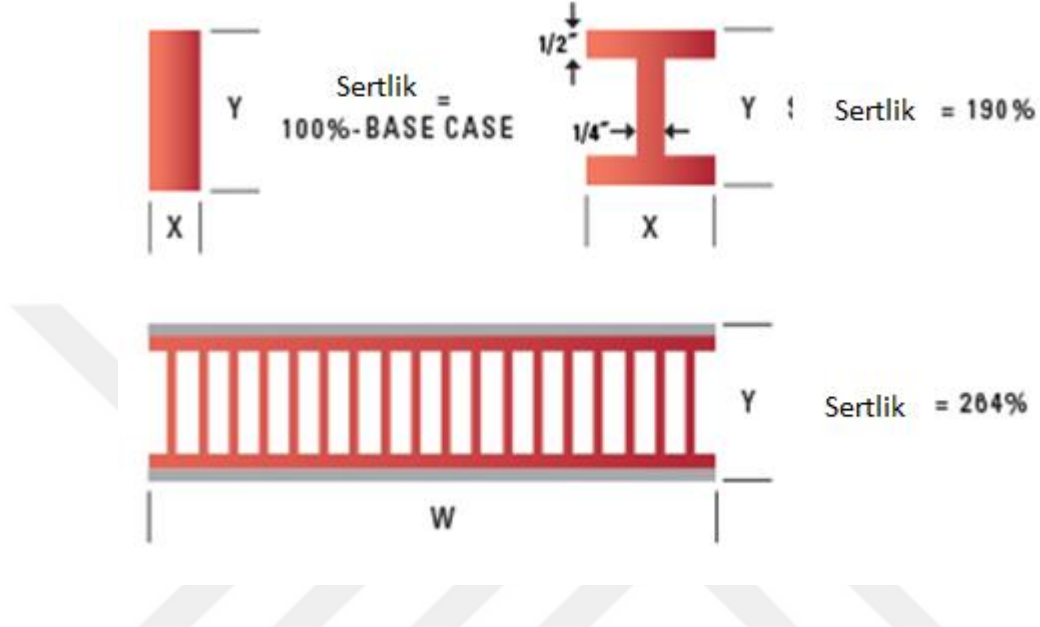
Genellikle çekirdek malzemesi zayıf mukavemete sahip ve çok hafif balpeteği, köpük, polimer gibi yapılardan oluşur. Takviye yüzey bileşenleri ise sert ve güçlü metal ya da fiber takviyeli malzemelerden meydana gelir. (Zhao 2014)

Sandviç yapılar eğilme yükü taşıma konusunda yüzey malzemelerin eğilme mukavemetini desteklemesi, yanal kuvvetleri tolere etmesi ve yapının burkulmaya karşı stabilizasyonunu sağlaması sayesinde oldukça verimli yapılardır. (Daniel 2008)

Yüzey tabakaları ve çekirdek malzeme arasındaki yük transferi yapışkan ara yüzey tabakası sayesinde gerçekleşir. Ara yüzey tabakasının iki ayrı faza nüfuziyeti de yapının stabilizasyonu ve bütünlüğü açısından kritik öneme sahiptir. Yapışkan ara yüzey davranışı reçine tipi ve kompozit üretim metoduyla direkt olarak ilişkilidir. (Gibson 1999)

2.2.1. Sandviç Kompozitlerin Avantajları ve Dezavantajları

Çekirdek elemanlar tek başlarına genellikle çok düşük dayanıma sahip olsa da, yüksek kalınlığı ve kullanılan yüzey malzemeleri ile birlikte özgül ağırlığına göre çok yüksek eğilme dayanımı göstermektedir.



Şekil 2.42. Aynı ağırlığa sahip farklı kesit alanlı yapıların rijitliği (Anonim 2017b)

Şekil 2.42.' ye göre aynı ağırlığa sahip ve aynı malzemeden üretilen farklı şekil ve yapılardaki malzemelerin eğilme rijitlikleri kıyaslandığında balpetek yapılı sandviç kompozitin referans alınan dikdörtgen kesit'e göre %264 daha rijit olduğu tespit edilmiştir. (Anonim 2017b)

Sandviç kompozit yapıların kullanımı dünya çapında bir çok alanda artarak devam etmektedir. Özellikle balpeteği çekirdekli karbon fiber takviyeli yapılar, havacılık, denizcilik gibi alanlarda ağırlığına göre yüksek eğilme direnci, yüksek burkulma direnci, düşük yanal deformasyon ve yüksek doğal frekans gibi diğer kompozitlere göre üstün olduğu özellikleri sayesinde çok tercih edilmektedir. (Daniel ve ark. 2009, Wu ve ark. 2014)

Balpeteği kalınlığı artışıyla muhtemel mukavemet değişimi çizelge 2.6.'daki gibidir.

Çizelge 2.6. Balpeteği sandviç kompozitlerin mekaniksel avantajları (Campbell 2010)

	Katı malzeme (Tek parça)	Petek kalınlığı t	Petek kalınlığı 3t
Rijitlik	1	7	37
Dayanım	1	3.5	9.2
Ağırlık	1	1.03	1.06

Sandviç kompozitlerin en önemli avantajları;

- Çok hafif olmaları
- Yüksek eğilme dayanımı
- Yüksek termal izolasyon karakteristiği
- Özelliklerinin istenen uygulamalara göre ayarlanabilir olması
- Çekirdek ve takviye elemanları için alternatif çokluğu
- Düşük yoğunluklu malzeme kullanımı ve ağırlıktan kazanç
- Arttırılmış yorulma ömrü
- Daha iyi stabilite
- Yüksek hasar toleransı
- Geri dönüşüm imkanları
- Titreşim sönümlenme performansı
- İyi bir ısı ve ses yalıtım malzemesi olması
- Su ve neme dayanımı
- Yüksek hızda akışa karşı direnci ile yarış arabalarında, hava taşıtlarında kullanım avantajı
- Yüksek şok direnci ve UV dayanımı

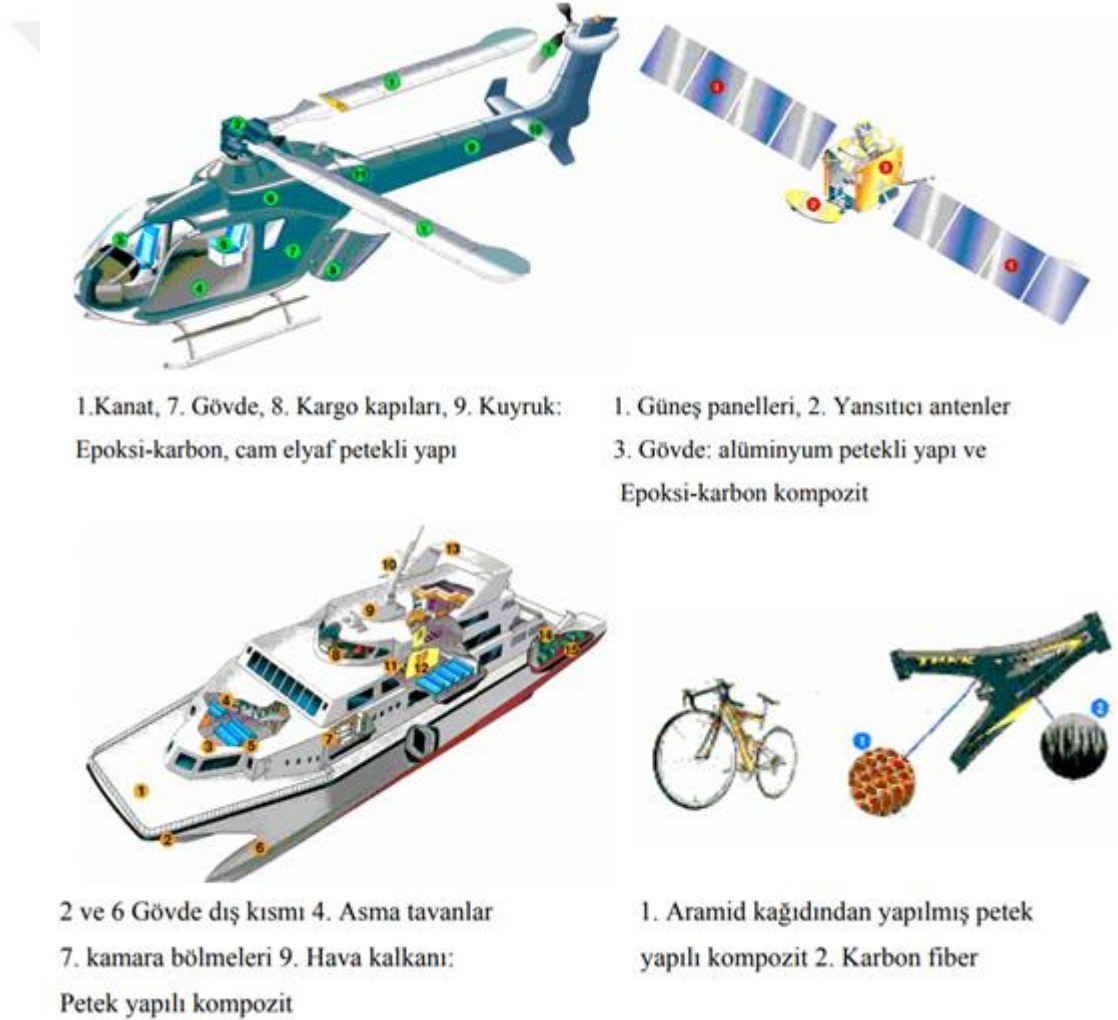
Dezavantajları ise;

- Sandviç kompozit uygulamalarının diğer kompozitlere göre daha kalın olması
- Geleneksel malzemelere göre pahalı olması
- Malzemenin işlenmesinin zor ve pahalı olması

- Birleştirme işlemi zorluğu
- Hasar durumunda tamirlerinin zorluğu

2.2.2. Sandviç Kompozitlerin Uygulama Alanları

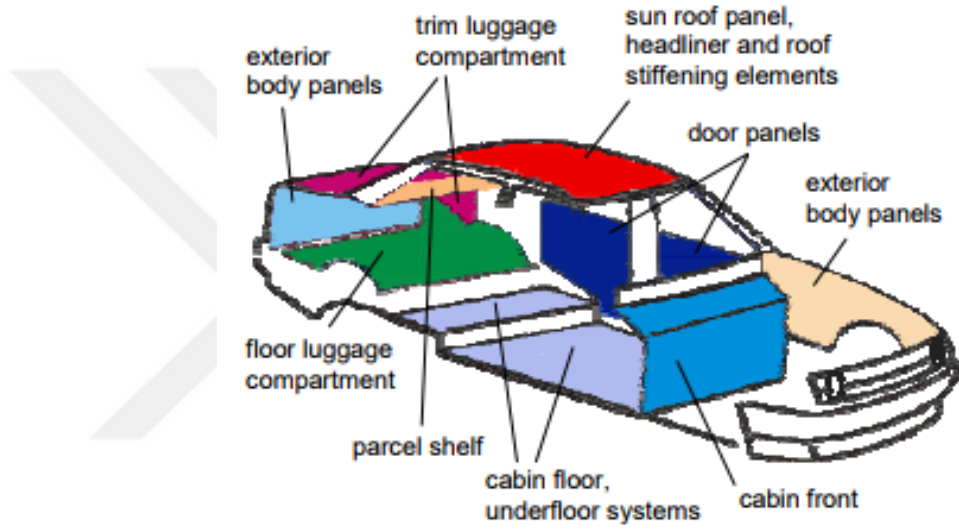
Denizcilik alanında özellikle korozyon direnci sayesinde kullanım imkanı bulan sandviç kompozitler havacılık ve uzay sektöründe hafiflik ve rijitlik özellikleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Uçaklarda başlıca gövde kaplamaları, kanat ve kuyruk parçaları, helikopter pervanesi gibi parçalar sandviç konstrüksiyon teknolojisi ile üretilmektedir(Şekil 4.43).



Şekil 2.43. Çeşitli balpeteği yapılarındaki sandviç kompozit uygulamaları

Bisiklet kaburgası gibi ana gövde parçalarında, rüzgar türbini pervanesi gibi kritik öneme sahip uygulamalarda, bir çok alet ve makine üretiminde yapı malzemesi olarak kullanım alanları genişlemektedir.

Son yıllarda spor otomobiller başta olmak üzere bir çok binek otomobil tavan, direk, gövde uygulamalarında balpeteği sandviç kullanımı da giderek artmaktadır(Şekil 2.44). Kapı trimleri, tavan kaplamalar, arka konsol, gövde zemin panelleri, kapı panelleri, vibrasyon sönümleyici parçalar, koltuk arkası, ara bölme, şapkalık gibi parçalarda ve bölgelerde uygulama örnekleri mevcuttur. (Pflung 2002)



Şekil 2.44. Otomobilde bazı potansiyel sandviç kompozit uygulama bölgeleri (Pflung 2002)

Günümüzde özellikle PP balpeteği çekirdekli sandviç kullanımı otomotiv endüstrisinde poliüretan köpük'e göre geri dönüşüm avantajları sayesinde önemli alternatif malzemelerden biri haline gelmiştir. Aynı zamanda neme karşı dayanımıyla PP, Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı ile Nomex balpeteği yapıların kullanımı otomotiv sektöründe giderek artmaktadır. (Pflung 2002)

Üst segment araçlarda aracın iskeletinin temelini oluşturan şasi için bile özellikle Al petek yapılı sandviç kompozit uygulamalarını Jaguar XJ220, Dome F105, Koenigsegg Agera gibi örneklerde görmek mümkündür. Gelişen üretim teknolojileri ve maliyetlerin

düşürülmesiyle aracın temel yapı elemanlarında kullanımı daha alt segment araçlarda da mümkün olacaktır.

Sandviç yapılar içerisinde petek yapılar, enerji sönümlenme, radyo dalgası kalkanı, güneş panelleri, hava akımı doğrultucusu gibi farklı kullanım alanlarında da üstün özellikleriyle kendine yer bulmuştur.

2.2.3. Sandviç Kompozitlerin Bileşenleri

Sandviç malzemeler, yüksek dayanımlı en az iki yüzey ve bir hafif çekirdek malzemeden oluşurlar.

Yüzey yani takviye elemanlar, sandviç yapının alt ve üst yüzeylerinde kayma direnci elde etmek amacıyla kullanılırlar. Genellikle uygulamalarda aynı malzemeler alt ve üst yüzey olarak tercih edilir. Bunun sebebi de farklı genleşme oranlarına sahip malzemelerin kullanımının yaratacağı olumsuz etkiyi ortadan kaldırmaktır. (Akkuş 2015)

Yüzey takviye malzemelerinin öncelikli görevleri; Yüksek sertlik, yüksek eğilme rijitliği yüksek gerilme(tensile) ve yüksek sıkıştırma(compressive) direnci, darbe direnci, yüzey işleme gerekliliğinin ortadan kaldırılması ve kimyasal, UV, sıcaklık gibi dış etkilere karşı koruma gibi özellikleri yapıya kazandırmasıdır. Genellikle metalik ve metal olmayan (elyaf) malzemelerden üretilir. (Hara 2012)

Elyaf çeşitleri ile ilgili karşılaştırmalı bilgiler bir önceki ‘‘Kompozit Malzemelerin Bileşenleri’’ adlı bölümde verildiğinden, bu bölümde sadece tez çalışmasında kullanılan karbon elyaflar hakkında bilgi verilecektir.

Karbon lifleri, ilk olarak karbonun çok iyi bir iletken olduğu bilinmesinden dolayı üretilmiştir. Karbon elyaflara çok yüksek ısı işlem uygulandığında elyaflar karbonlaşırlar ve bu elyaflara grafit elyafı denir. Günümüzde ise bu fark ortadan kalkmaktadır. Artık karbon elyafı da grafit elyafı da aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon elyafı epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir. Karbon fiber üreticileri devamlı bir gelişim içerisinde çalışmalarından dolayı karbon elyaflarının çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon elyafları piyasada iki biçimde bulunmaktadır;

Sürekli Elyaf, dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda, ve prepreglarda kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler.

Kırılmış elyaf, genellikle enjeksiyon kalıplamada ve basınçlı kalıplarda makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılırlar. Elde edilen ürünler mükemmel korozyon ve yorgunluk dayanımının yanı sıra yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine de sahiptirler.

Karbon elyaf çoğunlukla zift ve PAN (Poliakrilonitril)'den elde edilir. Zift tabanlı elyaf, daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Başlıca karbon elyaf üretim aşamaları aşağıdaki gibidir;

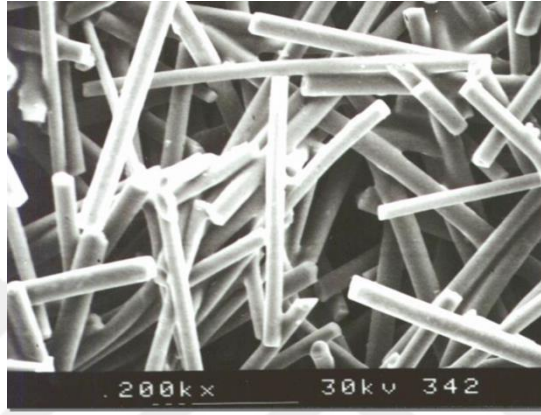
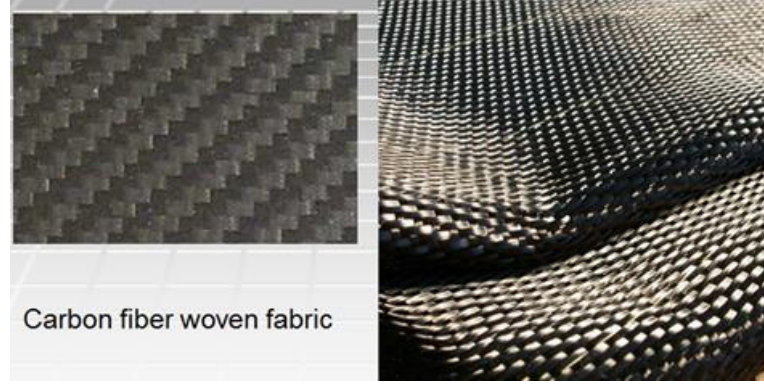
Oksidasyon aşamasında elyaf, hava ortamında 300 derecede ısıtılır. Bu işlem, elyaftan H'nin ayrılmasını daha uçucu olan O'nin eklenmesini sağlar. Ardından karbonizasyon aşaması için elyaf kesilerek graphite teknelerine konur. Polimer, merdiven yapısından kararlı bir halka yapısına dönüşür. Bu işlem sırasında elyafın rengi beyazdan kahverengiye, ardından siyah olur.

Karbonizasyon aşaması, elyafların yanıcı olmayan atmosferde 3000° C'ye kadar ısıtılmasıyla liflerin 100% karbonlaşma sağlanması aşamasıdır. Karbonizasyon işleminde uygulanan sıcaklık üretilen elyafın sınıfını belirler.

Yüzey İyileştirmesi, karbonun yüzeyinin temizlenmesi ve elyafın kompozit malzemenin reçinesine daha iyi yapışabilmesi için elektrolitik banyoya yatırılır.

Kaplama işlemi; elyafı sonraki işlemlerden (prepreg gibi) korumak için yapılan nötr bir sonlandırma işlemidir. Elyaf reçine ile kaplanır. Genellikle bu kaplama işlemi için epoksi kullanılır. Kompozit malzemedeki kullanılacak olan reçine ile elyaf arasında bir arayüz görevi görür.

Karbon elyafının tüm diğer elyaflara göre en önemli avantajı yüksek modülüs özelliğidir. Karbon elyafı bilinen tüm malzemelerle eşit ağırlıklı olarak karşılaştırıldığında en sert malzemedir. (Arıcasoy 2006)



Şekil 2.45. Karbon elyaf kumaşı ve mikroskop altında kırılmış elyaf görünümü

Karbon fiberler düşük yoğunluklu, yüksek elastik modül ve mukavemete sahiptirler. Aynı zamanda ortalama sayılabilecek bir maliyetle elde etmek mümkündür. Fiber çapları 5-8 mikrometre arasında değişmektedir. Bu rakam insan saç teli çapından daha küçüktür(Şekil 2.45).

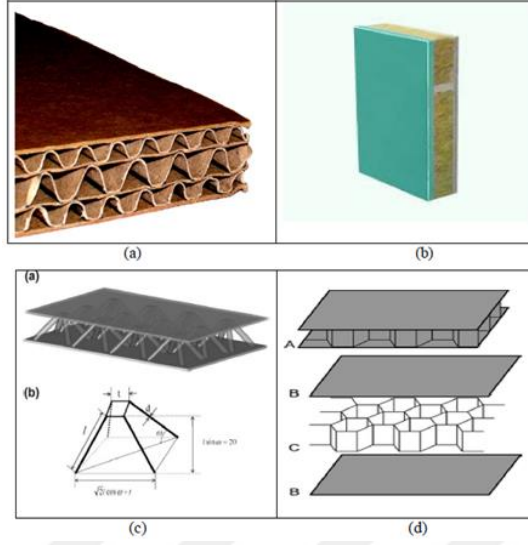
Çekirdek(Core) malzemeler, sandviç yapının kayma direncini oluşturur. Genellikle çekirdek malzeme çok düşük dayanıma sahip ancak yüzey malzemelere göre kalın yapısı ve düşük yoğunluğuyla yapıya yüksek eğilme direnci kazandırır.

Core malzemenin genel özellikleri; düşük yoğunluk, yüksek kayma modülü ve direnci olmakla beraber yapıyı bir arada tutmak ve termal, akustik ve ısı izolasyon sağlamak gibi görevleri de vardır. (Hara 2012)

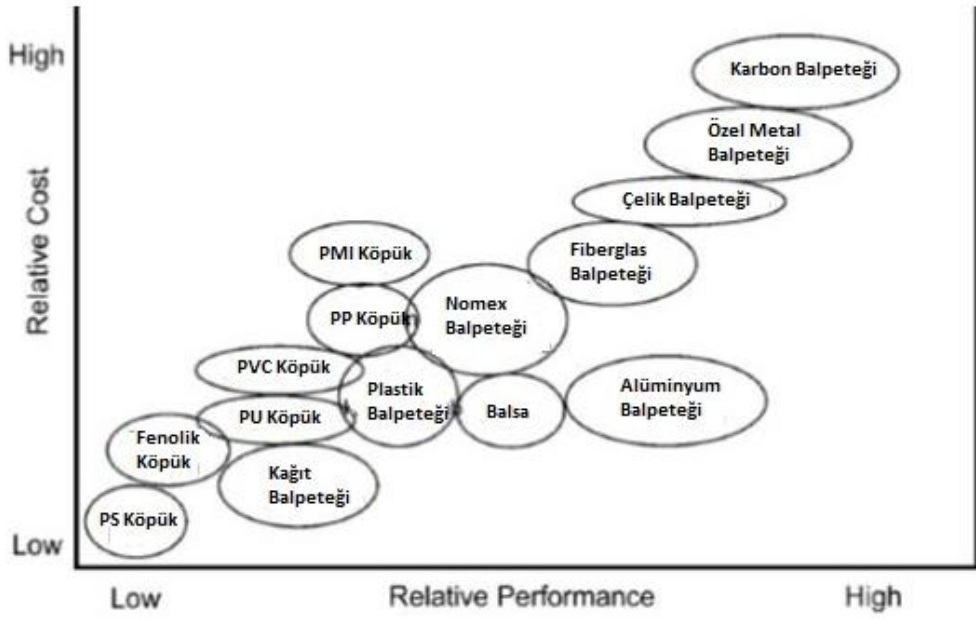
Core malzemeler 4 farklı grupta inceleyebiliriz(Şekil 2.46);

- a) Kıvrımlı (oluklu) malzemeler
- b) Köpük ya da katı malzemeler

- c) Kafes çekirdekler
- d) Balpeteği çekirdekler



Şekil 2.46. Çekirdek yapısına göre sandviç kompozitler (a) Kıvrımlı (b) Köpük (c) Kafes (d) Balpeteği çekirdekler (Shamary 2014)

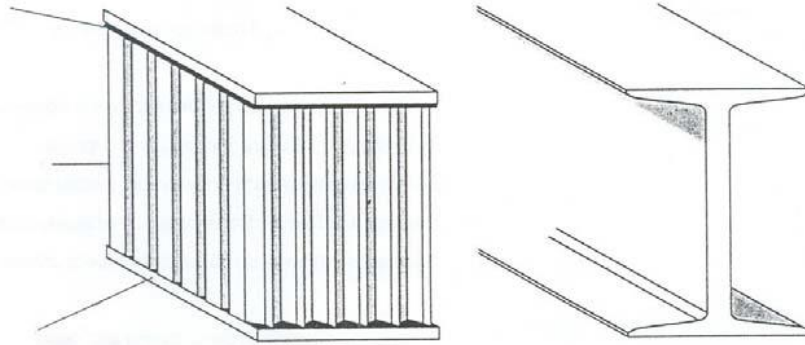


Şekil 2.47. Farklı sandviç çekirdek malzemelerinin maliyet-performans grafiği (Campbell, 2010)

Çekirdek için uygun malzeme ve yapının belirlenmesi, istenen özelliklerde bir sandviç kompozit tasarlamak için kritik bir parametredir. Farklı çekirdek tipleri için karşılaştırmalı maliyet tablosu şekil 2.47.'de verilmiştir.

Bu yapılan tez çalışmasında kullanılan çekirdek malzeme, balpeteği olduğu için çekirdek tipleri arasından balpeteği çekirdekler üzerine kaynak araştırması genişletilmiştir. Balpeteği yapılar, malzeme endüstrisi içerisinde doğadaki örneklerinden esinlenerek üretilen ve kompozit endüstrisinin en önemli buluşlarından biridir. Diğer malzemelere göre çok düşük ağırlık, ve düşük maliyet gibi avantajları vardır.

Petek yapılı çekirdekler, özellikle darbe sonucu ortaya çıkan enerjiyi absorbe etme gereksinimi yüksek olan bölgelerde kullanılır. Örneğin; trenlerin ön kısımlarında veya otomobil şaselerinde kullanılıp kaza anında ortaya çıkan enerjiyi absorbe ederek araç içerisinde bir yaşam hücresi oluştururmaya yardımcı olup yolcuların hayatını kurtarma, yaralanmalarını azaltmada pasif güvenlik sistemi olarak karşımıza çıkabilir. Diğer bir yandan eğilmeye karşı yüksek dirence sahip olması da kullanım alanını genişletmektedir.



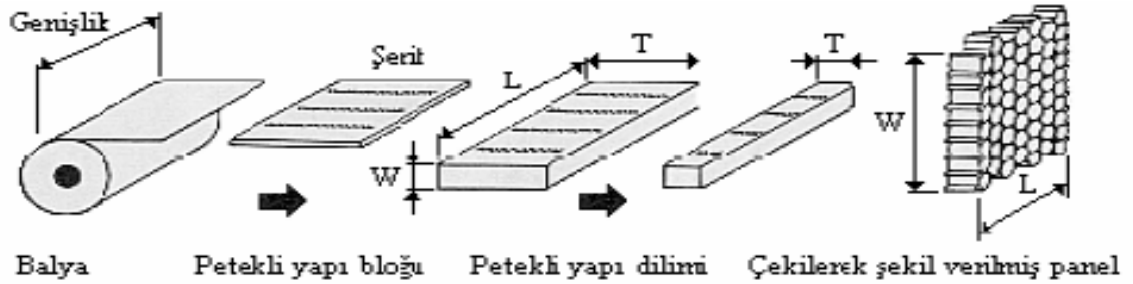
Şekil 2.48. Sandviç malzeme ve I kiriş karşılaştırması (Bakem 2011)

Sandviç yapının sağladığı konstrüksiyon rijitliğini anlamak için şekil 2.48.'deki iki farklı yapı karşılaştırması yapılırsa, I kirişi kuvvet altında, basma ve çekme gerilmesine mağruz kalır. Balpeteği yapıda ise, hücreler I kirişinin gövdesinin görevini üstlenmektedir. Petek hücreleri kesme kuvvetine karşı koyar ve yapının dayanımını arttırır. Aynı zamanda hücreler yüzey üzerine düzenli ve kuvvetlendirilmiş destek

sağlamaktadır. Kullanılan yapıştırıcı ise yapıyı bir arada tutarak yüksek burulma ve eğilme direncine sahip kompozit yapıları oluşturur. (Bakem 2011)

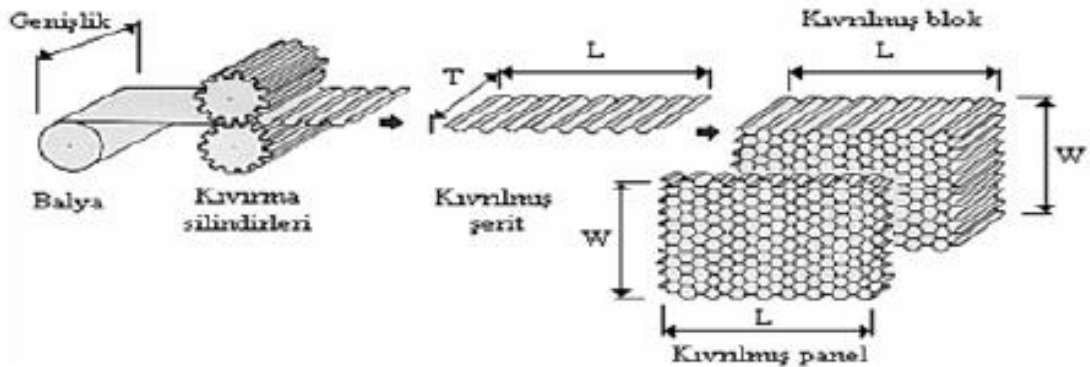
Petek malzeme üretiminde en yaygın kullanılan iki yöntem; kıvrılarak şekil verme ve uzatma yöntemi'dir.

Uzatarak şekil verme yöntemi metal dışı petek yapı imalatında kullanılır ve bu yöntemde peteği oluşturan levhalar kesilip yapıştırıcı ile üst üste dizilmesi ile oluşturulur. Ardından yapının sıcak pres altında işlenmesi ile süreç son bulur(Şekil 2.49).



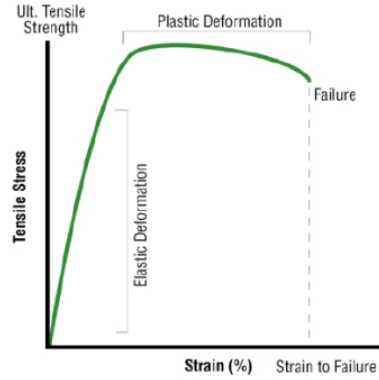
Şekil 2.49. Uzatarak şekil verme yöntemiyle petek yapı üretimi (Bolat 2011)

Kıvrılarak şekil verme yönteminde ise et kalınlığı nispeten daha fazla olan malzemeler kullanılır. Şerit levhalar istenen şekli verecek silindirlere geçirilerek kıvrılır. Ardından yapıştırıcı uygulanıp kıvrılmış levhalar üst üste dizilir. Son olarak ise belirli sıcaklıkta bekletilerek üretim tamamlanır(Şekil 2.50).



Şekil 2.50. Kıvrılarak şekil verme yöntemiyle petek yapı üretimi (Bolat 2011)

Sandviç malzemeler için bir diğere önemli eleman ise reçinedir. Şekil 2.51.'de ideal bir reçine gerilme-birim uzama diyagramı görölmektedir. Göröldüğü gibi plastik deformasyon bölgesi de vardır ve hasar gevrek kırılma şeklinde gerçekleşmemektedir. Kompozit malzemeden beklenen performansın elde edilebilmesi için matris malzeme en az fiber malzemesi kadar elastik deformasyon kabiliyetine sahip olmalıdır.



Şekil 2.51. İdeal gerilme-uzama grafiğı

Kırılma tokluğu bir malzemenin çalak ilerlemesine gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Kompozitlerde bunu ölçmek zordur. Ancak, gerilme-birim uzama eğrisinin kendisi de malzemenin tokluğu hakkında fikirler verir. Genellikle bir reçinenin hasar uzaması arttıkça tokluğunun arttığı söylenebilir. Aksi durumda reçineler gevrek karakter gösterirler ve kolayca kırılırlar. Bu nedenle fiberlerin uzama kabiliyetlerine uyumlu reçine seçimi çok önemlidir.

Bağlayıcı olarak kullanılan polimerler (reçineler), termoset ve termoplastik olarak ikiye ayrılır;

Termoset reçine, esnek olmayan ve tekrar eritilip kullanılamaz molekül zincirleri(çapraz bağlar) içerir. En yaygın kullanılan termoset reçine tipleri;

- Polyester
- Vinly ester
- Fenolik
- Poliüretan
- Epoxy

Sıvı epoksi sertleştirici ile birlikte kullanılır. Sertleştirici ekledikten sonra çapraz bağların 3 boyutta büyüdüğü görülmektedir. Söz konusu karışım esnasında reçine ile sertleştirici malzemeler arasında geri dönüşümü olmayan kimyasal reaksiyonlar ve bağlar meydana gelir. Katılaştıran termosetler ısı ile bir daha sıvı hale dönüşmezler. Buna karşılık belli bir sıcaklık değerlerinin üzerine çıkıldığında mekanik özellikleri önemli ölçüde değişmektedir. Bu sıcaklık Cam Geçiş Sıcaklığı (Glass Transition Temperature, Tg) olarak bilinmektedir ve kullanılan reçine türüne, pişirme derecesine ve doğru bir karışım elde edilip edilmediğine bağlı olarak değişmektedir. Tg'den büyük sıcaklıklarda, reçine rijitliği (Elastisite modülü) ve sonuç olarak bası ve kayma mukavemeti keskin bir şekilde düşüş gösterir. Son olarak epoksi katılarak sandviç yapıyı bir arada tutmaktadır. Cam veya karbon elyafı ile epoksi kombinasyonu mükemmel mekanik dayanıklılığa sahiptir. Bu yüzden uzay ve havacılık teknolojilerinde, otomotiv, medikal, denizcilik ve inşaat alanında çok kullanılır. Avantajları iyi mekanik özellikler, suya dayanım, ıslakken 140°C kuruyken 220°C'ye kadar ısı dayanımı ve sertleşme sırasında düşük oranda çekme; dezavantajları ise yüksek maliyet, cilde aşırı zararlı ve doğru karışımın hayati bir önemi olmasıdır. 3 tip epoksi vardır;

-Sıvı

-Katı

-Yarı katı

Günümüzde mevcut termoset reçineler arasında en yüksek performansa sahip olan reçine epoxy'lerdir. Epoksi reçine suya ve aside karşı oldukça dayanıklıdır. Epoksi reçineler parça üzerinde oluşan çatlak tamirinde de kullanılır. Çatlak oluşan bölgeye ilerlemesi önlenmek amacıyla uygulanabilir. Böylelikle parçada süreklilik sağlanmış ve çatlaktaki gerilim yoğunlaşmadan önlenmiş olur. (Bozkurt2014)

Epoksi reçinenin avantaj ve dezavantajları;

- Pişirme/katılma sırasında gösterdikleri düşük çekme (büzüşme) oranları
- Epoxy reçineler kolayca ve hızlı bir şekilde kullanılan sertleştiricilerin özelliklerine bağlı olarak 5°C- 150°C aralığında pişirilebilirler(curing).
- Elyaf yapılarda yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.

- Yüksek aşınma direncine sahiptirler.
- Yüksek elektrik izolasyonu
- Uçucu değildirler ve kimyasal dirençleri yüksektir.
- Düşük ve yüksek sıcaklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler.
- Polyesterle karıştırıldığında pahalıdırlar. (Anonim 2017d)

Termoplastik reçine çapraz bağlara sahip değildir. Dolayısıyla geri dönüştürülebilir. Termoset reçine ile arasındaki en büyük fark budur. Termosetlere göre işlem zamanı daha kısadır. En sık kullanılan termoplastik reçineler;

- Naylon
- Polipropilen (PP)
- Polietereterketon (PEEK)
- Polifenilen sülfür (PPS)

2.2.4. Petek Yapılı Sandviç Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Petek yapılı sandviçlerin üretiminde genel olarak aşağıdaki 3 method kullanılır;

- Sıcak pres yöntemi
- Vakum yöntemi
- Kalıp yöntemiyle üretim

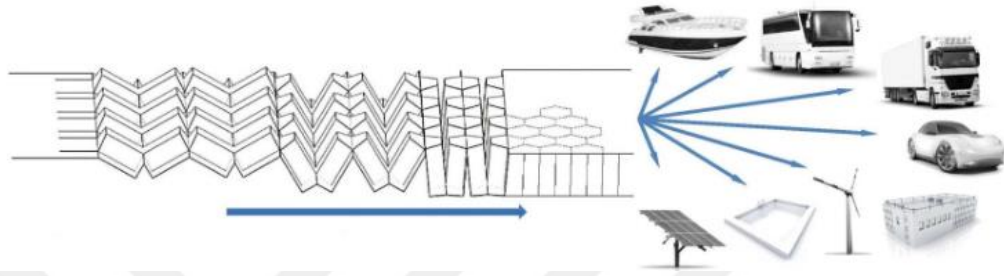
Sıcak pres yöntemi düzgün yüzeyli parçalar için uygundur. Tek seferde sonuç alınır. Metal ve preprag yüzeylerde kullanılır. Yüzey tabakaları basınç altında ısıtılır ve ara tabakadaki yapıştırıcı sayesinde birleşme işlemi tamamlanır.

Vakum yöntemi karmaşık parçaların üretimi için uygun bir yöntemdir. Vakum torbası kullanılarak negatif basınç altında parçaya istenen şekil kalıp üzerinde verilir.

Kalıp yöntemi ise genellikle tek bir malzemeyi yüksek toleransta üretmek için kullanılır. Sıcaklık ve basınç ayarı yapmak mümkündür. Ancak ısıtma imkanı yoksa veya malzeme çok büyük ise normal şartlarda soğuk pres ile yapıştırma da sağlanabilir. (Engin 2011)

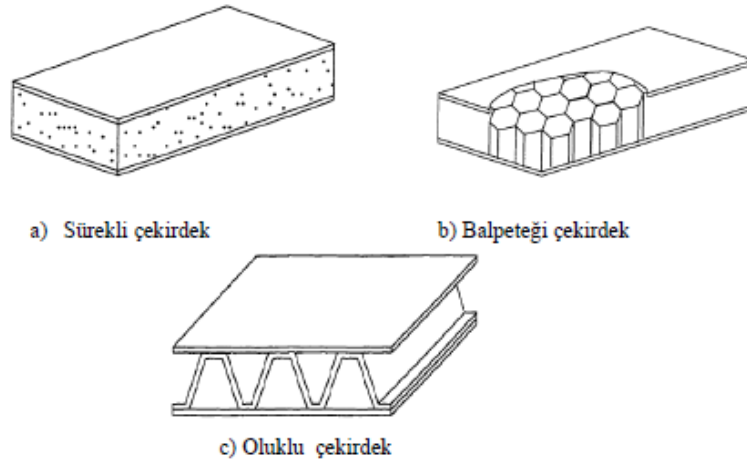
2.2.5. Sandviç Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Kompozitlerin mekanik davranışın etkileyen en önemli malzeme parametrelerinden biri elyafların kompozit içerisindeki dağılışıdır. Elyaf kompozit içerisinde kuvvet yönüne paralel, dik ya da kuvvet yönünden bağımsız dağılmış halde bulunabilirler. Bu üç durum içerisinde liflerin kuvvete paralel olduğu durumda diğer durumlara göre çok daha yüksek çekme dayanımı değerlerine ulaşmak mümkündür.



Şekil 2.52. Balpeteği çekirdekli sandviç kullanıma örnekler (Anonim 2017f)

Balpetek yapılı sandviç kompozitler özellikle yüksek eğilme ve burkulma dayanımları sayesinde son yıllarda birçok mühendislik çalışmasında karşımıza çıkmaktadır. Farklı uygulamalarda yüzey tabakaları ile çekirdeğin farklı malzeme ve geometrik yapılardan seçilmesiyle optimum tasarımların elde edilebilmesi sandviç yapıların en önemli özelliklerindedir(Şekil 2.53). Yüzey malzemeleri genellikle alüminyum, paslanmaz çelik, karbon/epoksi, camelyaf/epoksi, ahşap esaslı malzemeler, çekirdek için ise alüminyum, aramid veya plastik malzemeler(polipropilen) kullanılmaktadır.



Şekil 2.53. Farklı cinste çekirdek malzemelere sahip sandviç malzemeler (Bitzer 1997)

Sandviç kompozitlerin bazı karaktersitik özellikleri aşağıdaki gibidir;

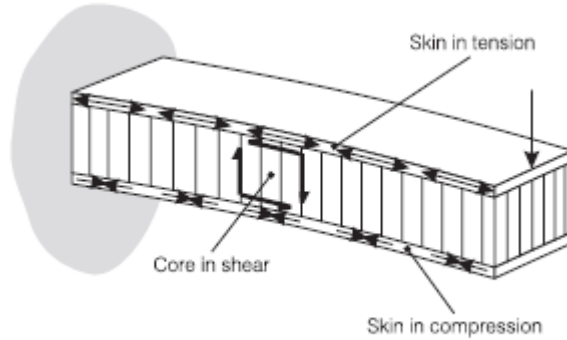
- Düşük yoğunluk (Temel olarak çok düşük yoğunluklu çekirdek malzeme kullanımı sayesinde elde edilir.)

-Eğilme dayanımı (Kalın çekirdek malzeme ile ince ama dayanımı yüksek yüzey malzemelerin birleşimi ile oluşan yapının eğilme rijitliği çok yüksektir.)

-Çekme ve basma dayanımı (Sandviç malzemenin et kalınlığı boyunca olan dayanım özellikleri çekirdeğe, yatay yönlerdeki dayanım özellikleri takviye malzemelere bağlıdır.)

-Hasarı toleransı (Çok düşük dirence sahip esnek çekirdek malzeme kullanımı yapının hasar dayanımını yüksek oranda artırır.)

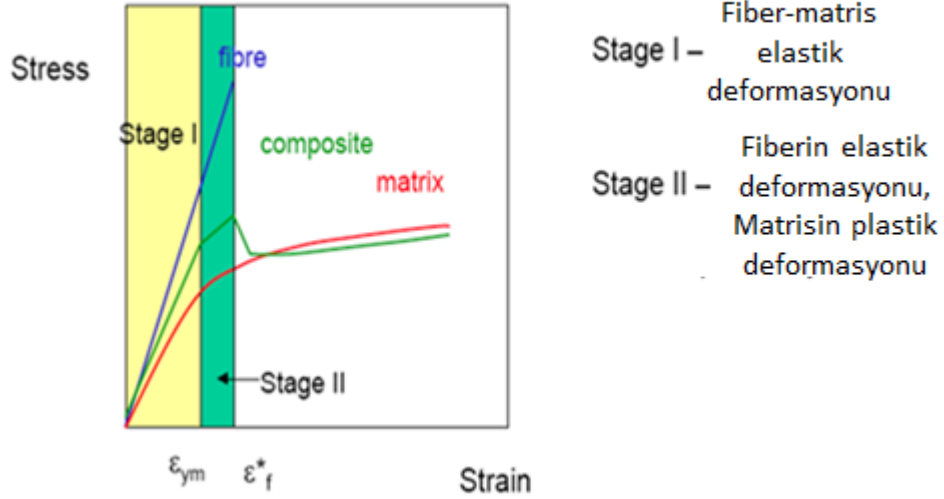
Sandviç yapıyı ankastre kiriş olarak düşünürsek; kirişin bir ucundan kuvvet uyguladığımızda, kuvvet uygulanan uçta eğilme momenti, kiriş boyunca kesme kuvveti, üst tabakada çekme, alt tabakada ise basma gerilmesi yaratır. Petek hücre iki tabaka arasında kuvvet sönümleyici görev üstlenirken, kuvveti transfer ederek yapının homojen çalışmasını sağlar(Şekil 2.54).



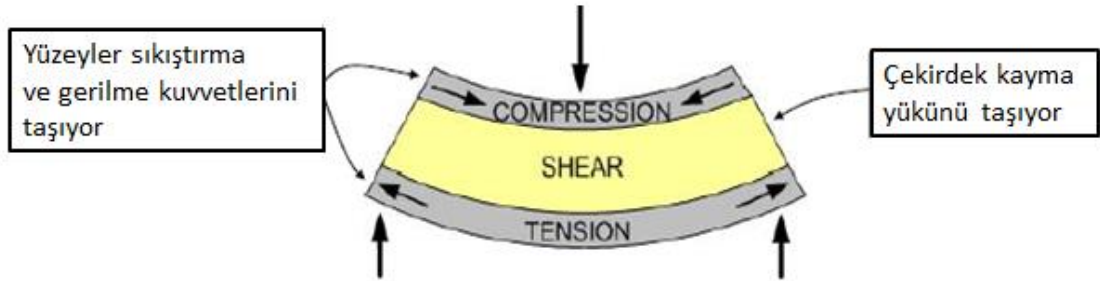
Şekil 2.54. Balpetek çekirdekli sandviç kompozit için yükleme modeli (Hexcel 2000)

Sehim, yapı üzerinde eğilme ve kesme bölümlerinden oluşur. Eğilme sapması, yüzeylerin çekme ve eğilme modüllerine bağlıdır. Kesme sapması, petek yapının kayma modülüne bağlıdır. Toplam deformasyon ise; eğilme ve kayma deformasyonlarının toplamı kadardır. (Ercan 2006)

Şekil 2.55. incelendiğinde fiberin dayanım noktasından sonra kırılmaya başladığını. ancak deformasyonun, matrisin dayanmaya devam etmesiyle kademeli bir şekilde karşımıza çıktığını söylemek mümkündür.



Şekil 2.55. Sandviç kompozitler için Stress-Strain grafiği (Aymerich 2012)



Şekil 2.56. Sandviç kompozitlerin üç nokta eğilme altında etkilendiği kuvvetler (Aymerich 2012)

Genel olarak malzemelerde kırılma olayı ise sünek ve gevrek kırılma olarak iki şekilde incelenmektedir.

Sünek kırılmada çatlak oluşumu ve ilermesi plastik deformasyon ile birlikte gerçekleşir. Yavaş gerçekleşen bu kırılma olayında kırık bölgeleri mat ve lifli bir görünüm sergilemektedir.

Gevrek kırılmada ise çatlak oluşumu ve ilerlemesi çok hızlı gerçekleşir. Kırık ilerlemesi plastik deformasyondan bağımsız meydana gelebilir. Kırık bölgesi parlak ve taneli bir görünüm sergiler. Gevrek kırılmanın başlıca nedenleri; çentik etkisi, darbe veya düşük sıcaklıklar olabilir. Önceden tespitinin mümkün olmaması ve çok hızlı gerçekleşmesi nedeniyle en tehlikeli kırılma tipi olarak görülmektedir. (Tortoç 2009)

Literatürde eğilme sertliği(Bending stiffness) ya da bükülme direnci olarak da geçen değer, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir. (Li 2013 ve Kus 2016)

$$D = \frac{l^3}{48} \left(\frac{\Delta p}{\Delta \delta} \right) \quad (4.1)$$

D: Bükülme direnci ($N.m^2$)

l: İki destek noktası arası mesafe (m)

Δp : Akma noktası (N)

$\Delta \delta$: Toplam sehim miktarı (m)

Eğilme modülü(Bending modulus) ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir. (Li 2012)

$$E = \frac{l^3 \cdot \Delta p}{4b \cdot \Delta f \cdot h^3} \quad (4.2)$$

E: Eğilme modülü (MPa)

Δp : Yük değişimi (N)

Δf : Sehim değişimi (mm)

l: İki destek noktası arası mesafe (mm)

b: Sandviç genişliği (mm)

h: Yüzey kalınlığı (mm)

Eğilme dayanımını(Bending strenght) hesaplamak için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir.
(Li 2012 ve Kus 2016)

$$\sigma = \frac{3.P.l}{2.b.h^2} \quad (4.3)$$

- σ : Eğilme dayanımı (MPa)
P: Yük miktarı (N)
l: İki destek noktası arası mesafe (mm)
b: Sandviç genişliği (mm)
h: Yüzey kalınlığı (mm)

Çekirdek kayma gerilmesi aşağıdaki bağlantı sayesinde elde edilebilir. (ASTM 2006)

$$\tau = \frac{P}{(d+c).b} \quad (4.4)$$

- τ : Çekirdek kayma gerilmesi (MPa)
P: Yük miktarı (N)
d: Sandviç yapı toplam kalınlığı (mm)
c: Çekirdek kalınlığı (mm)
b: Sandviç genişliği (mm)

Kullanılan test standardına göre yüzey stresi ise aşağıdaki formülasyon ile elde edilebilir. (ASTM 2006)

$$\sigma = \frac{P_{max} .S}{2t.(d+c).b} \quad (4.5)$$

- σ : Yüzey stresi (MPa)
Pmax: Maksimum yük miktarı (N)
S: Sandviç boyu (mm)
t: Yüzey kalınlığı (mm)
d: Sandviç yapı toplam kalınlığı (mm)
c: Çekirdek kalınlığı (mm)
b: Sandviç genişliği (mm)

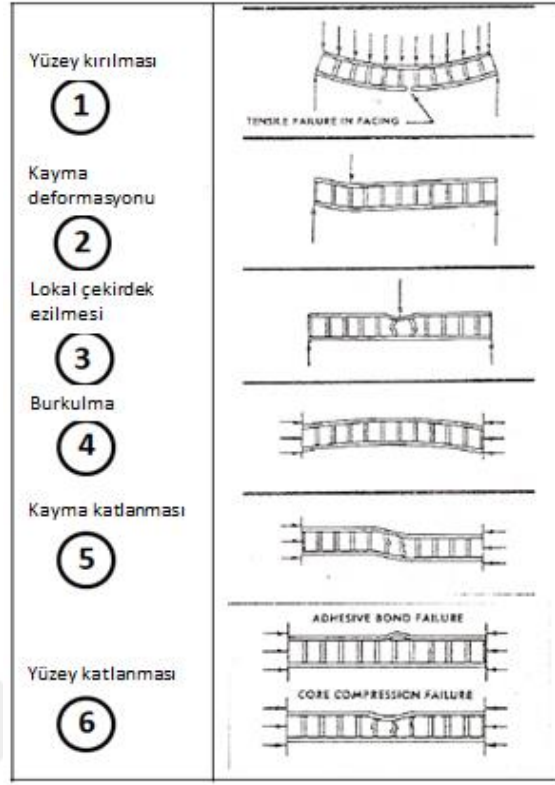
2.2.6. Balpetek Yapılı Sandviç Kompozitlerde Hasar Türleri

Sandviç yapı tasarımında yükleme durumuna bağlı olarak oluşabilecek hasar durumlarının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Başlıca hasar türlerini aşağıdaki gibi gruplayabiliriz.



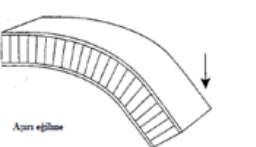
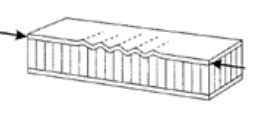

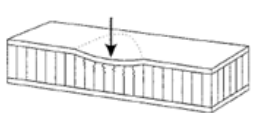
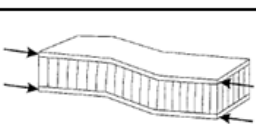
Başlıca hasar tipleri aşağıdaki gibidir;

1. Yüzey kırılması
2. Enine kesme kırılması
3. Lokal çekirdek kırılması
4. Genel burkulma
5. Kayma sıkışması
6. Yüzey kırışması




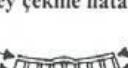
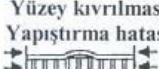
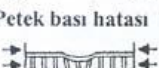
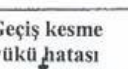

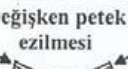
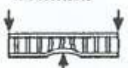
Bu hasar tipleri tablo halinde şekil 2.57.'de paylaşılmıştır.



Şekil 2.57. Sandviç kompozitler için başlıca hasar türleri (Aydıncak 2007)

	Dayanç hatası		Yüzey ezilmesi modeli
	Balpeteği kompozitlerin rijitliği		Hücreler arası kırılma
	Balpeteği kompozitin burkulması		Bölgesel basınçla oluşabilecek hata
	Balpeteği kompozitte kesme kıvrımlarının oluşumu		

Şekil 2.58. Balpeteği sandviçlerin hasar türleri (Hexcel 2000)

Durum	Sebepler	Durum	Sebepler
Genel kıvrılma 	Yetersiz panel kalınlığı yetersiz petek kesme mukavemeti	Yüzey hatası 	İlk hata bası ve çeki yüklerinden yüzeylerde, yetersiz panel kalınlığından, yüzey mukavemeti veya tabakalar arası ayrılmadan meydana gelebilir
Kesme ondülasyonu 	Genel kıvrılma sonucu düşük petek kesme modülü veya yapıştırıcı kesme mukavemetinden	Yüzey çekme hatası 	
Yüzey kıvrılması Yapıştırma hatası  Petek bası hatası 	Peteğin relative yanıl bası mukavemeti, bası ve ters çekme mukavemetinden dolayı yüzeyler içeri veya dışarı kıvrılabilir	Geçiş kesme yükü hatası 	
Hücreler arası kıvrılma yüzeyler petek hücrelerin kıvrılmasından kvrılır 	İnce yüzey veya geniş petek hücrelerinden oluşabilir. Bu sebeple diğer yakın hücrelerde kıvrıma uğrayabilir.	Değişken petek ezilmesi 	Yetersiz petek yanıl bası mukavemeti veya aşırı panel defleksiyonu (değişimi)
		Bölgesel petek ezilmesi 	Düşük petek bası mukavemeti

Şekil 2.59. Balpeteği sandviçlerin yükleme problemleri ve sebepleri (Ercan 2006)

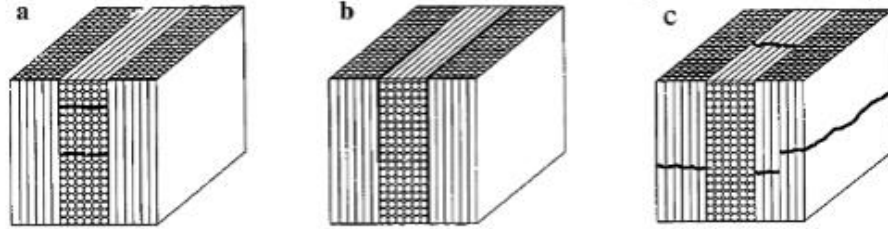
Kompozitler için başlıca hasar türleri yüzey malzemesi için; Fiber kırılması, matris kırılması, fiber-matris ayrılması, delaminasyon, burkulma'dır. Sandviç kompozitler için ise; çekirdek-yüzey ayrılması ve çekirdek deformasyonudur. (Aymerich 2012) Bu hasar tipleri ve sebepleri şekil 2.58 ve şekil 2.59'da paylaşılmıştır.

Delaminasyon ise bir diğer sıklıkla karşılaşılan hasar tipidir. Kompoziti oluşturan tabakaların ayrılması olarak tanımlanabilir. Tabakalı kompozit malzemelerde tabakalar arasındaki mukavemetin düşük olması sebebiyle en çok karşılaşılan hasar tipidir. Malzemede rijitlik kaybı ve malzeme ömrünün kısalması gibi sonuçlar ortaya çıkarabileceğinden önemli bir çalışma konusudur.

Malzeme içerisindeki veya yüzey kenarlarındaki darbeden kaynaklanan etkiler, geometrik ve malzeme süreksizlik bölgelerindeki gerilme yığılması, kompozit parçaya gelen basma yükleri ile burkulmanın gerçekleşmesi, imalattan kaynaklanan kusurlar ile taşıma, montaj ve servis ömrü sırasında gerçekleşebilecek darbeler delaminasyonun sebepleri arasında sayılabilmektedir. Basma yükü altındaki plakalarda delaminasyona uğramış tabakalar burkulabilmektedir ve burkulma ile delaminasyon etkisinin

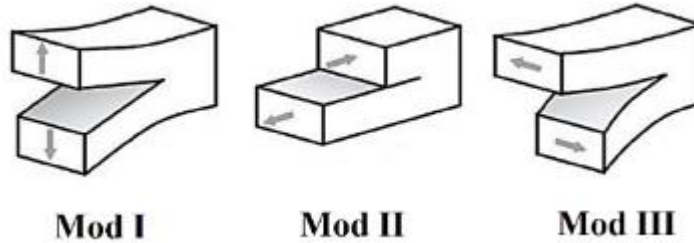
ilişkisinden ötürü çatlak büyüebilmektedir. Delaminasyonun varlığı burkulma yükünü ve tabakaların basma yükü altındaki dayanımını ciddi bir şekilde düşürebilmektedir. Yanal yüklemelerde de burkulmadan ötürü delaminasyon gözlemlenebilmektedir(Şekil 2.60).

Delaminasyon, hava ve nemin açılan boşluklardan içeri girmesine ya da diğer hasar modlarını tetikleyerek hasarın büyümesine sebep olabilmektedir. Delaminasyon hasarı tabakalar arasında gerçekleştiğinden çalışma koşulları altında parça üzerinde delaminasyon kontrolü yapmak oldukça güçtür. Bu sebeple güvenilir ve verimli çalışan bir matematiksel modelin ortaya koyulması delaminasyon hasarına karşı dayanıklı tasarımların yapılabilmesi açısından oldukça önemlidir.



Şekil 2.60. Temel kırılma modları; a) tabakalar içi, b) tabakalar arası, c) tabakaları kesen (Korkut 2017)

Delaminasyon yüklemeleri normal ve kayma doğrultularında gerçekleşir. Çekme gerilmesi mod I, kayma gerilmesi ise mod II ve mod III delaminasyon modlarında görülür(Şekil 2.61).



Şekil 2.61. Çatlak ilerleme modları (Korkut 2017)

Mod I yüklemelerde çatlak yüzeylerinin yer değiştirmesi çatlak yüzeyine diktir ve açılma (çekme) olarak adlandırılmaktadır. Mod II ve Mod III yüklemelerinde çatlak

yüzeylerinin yer değiştirmesi çatlak düzleminde ve sırasıyla kesme ve yırtılma yüklemesi olarak adlandırılmaktadır.

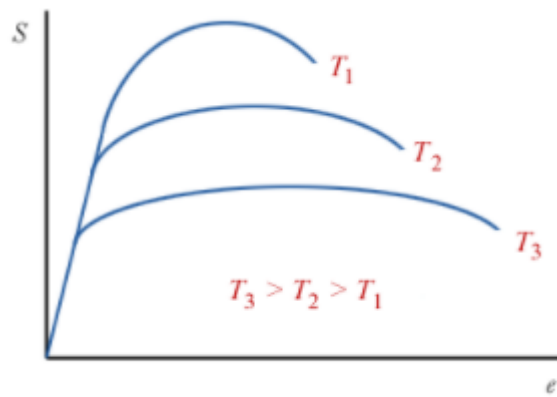
Çok sayıda çalışmanın ve yayının ortaya koyulmasına rağmen kompozit malzemelerdeki delaminasyon hasarı günümüzde hala yeteri kadar anlaşılabilmiş değildir. (Korkut 2017)

2.2.7. Kompozitlerde Dış Ortam Etkisi

Kompozitlerin sayısız avantajının yanında bazı geliştirilmesi gereken özellikleri de vardır. Kompozit malzemelere dış ortam etkisi nispeten geleneksel malzemelere göre daha yüksektir.

Malzemelerin kullanım alanına göre yüksek veya düşük sıcaklıkta ortamlara dayanım göstermesi beklenebilir. Genellikle organik matris malzemeler yüksek sıcaklığa karşı hasas olmakla beraber sıcak ortama uzun süre maruz bırakıldığında matris malzeme buharlaşabilir. Bu durum matrisin bütünlüğünü etkilediğinden malzemenin mukavemet ve tokluğunun azalmasına sebep olur.

Genel olarak malzemelerin Şekil değiştirme hızı duyarlılığı (m) olarak adlandırılan bir katsayıya sahip olduğu ve bu katsayının özellikle yüksek sıcaklıklardaki Şekil değişimlerinde önem kazandığını söylemek mümkündür. Malzemenin tane yapısının yeniden kristalleşebileceği sıcaklık aralıkları yüksek sıcaklık olarak değerlendirilebilir.



Şekil 2.62. Sıcaklığın sandviç kompozitin eğilme üzerindeki etkisi (Anonim 2017a)

Şekil 2.62.'deki grafik aynı malzemeye ait farklı sıcaklıklarda çekilmiş gerilim-gerinim eğrisini göstermektedir. Sıcaklık artışıyla beraber m katsayısının da artması ile malzeme hem sünekleşir hem de mukavemetini kaybeder. Yüksek sıcaklıklarda malzemelerin şekil değişimi daha kolay olsa da bu durum sürünme gibi sorunlara yol açabilmektedir.(Anonim 2017a)

Düşük sıcaklıklarda ise en önemli malzeme özellikleri dayanım, sertlik ve termal karakter olarak karşımıza çıkmaktadır. Malzemelerin fiziksel özellikleri sıfırın altında düşük sıcaklıklarda normalde karşılaşılanlardan oldukça farklıdır.(Kichhannagari 2004)

Ayrıca çoğu malzeme düşük sıcaklık etkisi ile büzülür. Soğuğun etkisi malzemedeki malzemeye değişiklik göstermektedir. Bu etkiyi küçükten büyüğe sırasıyla cam, metal, plastik malzemeler olarak gruplandırabiliriz. Plastik malzemelere düşük sıcaklığın etkisi metal malzemelere göre çok daha büyük olmakta ve malzemeyi çok daha dayanıklı fakat kırılabilir yapmaktadır. (Anonim 2010a)

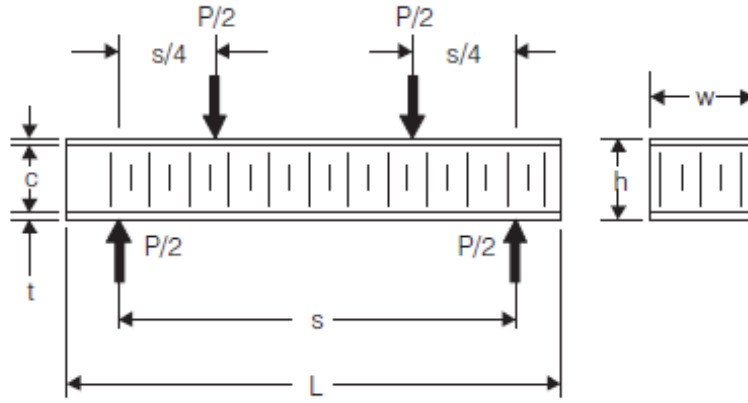
Bazı kompozitlerin su ile teması sonucu malzeme emilim özelliği gösterir. Bu durum malzemenin tokluk ve mekanik özelliklerinde düşüş meydana getirir. (Taşkiran 2010)

2.2.8. Sandviç Kompozitlerin Mekanik Testleri

Sandviç yapıların mekanik performansını belirlemek için bazı test methodları mevcuttur. Bunlar başlıca;

- uzun kiriş eğilme testi
- kısa kiriş kayma testi
- düz yüzey gerilim testi
- düz yüzey basma
- yan basma testi
- soyma testi

Uzun kiriş eğilme testleri genellikle 20 inch'ten daha uzun numularla dört nokta eğme deneyi ile yapılır. Eğilme direnci, Eğilme modülü bu yolla hesaplanabilir. Ortalama yüzey stresi ve modülü de teorik hesap ile elde edilebilir(Şekil 2.63).



Şekil 2.63. Dört nokta eğilme testi (Hexcel 2007)

$$\sigma = \frac{P.s}{8.(h-t).w.t} \quad (4.6)$$

$$E = \frac{11.P.s^3}{384.d.w.t.(h-t)^2} \quad (4.7)$$

- σ : Yüzey stresi(MPa)
- E: Yüzey modülü(MPa)
- P: Uygulanan yük(N)
- t: Yüzey kalınlığı(mm)
- d: Orta noktadaki çökme miktarı(mm)
- c: Çekirdek kalınlığı(mm)
- w: Panel genişliği(mm)
- h: Panel kalınlığı(mm)
- l: Panel uzunluğu(mm)
- s: İki destek arası uzaklık(mm)

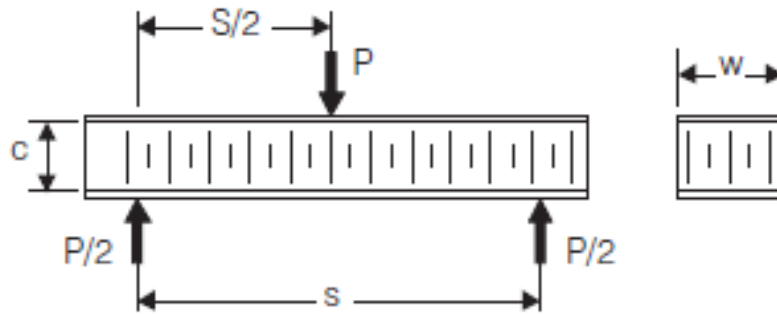
Sandviç üzerine uygulanan yanal kuvvetler iç çatlaklara ve delaminasyonlara sebep olabilmektedir. Bu noktadan sonra parçadaki çatlak ve delaminasyonlar düzlemsel basma yükleri altında burkulmalara ya da mukavemet düşüşüne sebep olabilir. Bu

sebeple tabakalar arası kırılma tokluğunun belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biri üç nokta eğme testleridir. (Korkut 2017)

Kısa kiriş kayma testi 4 inch ve üzeri boya sahip numuneler ile yapılmaktadır. Üç nokta eğme testleriyle ortalama kayma stresi (çekirdek kayma direnci) teorik yolla hesaplanabilir(Şekil 2.64).

$$\tau = \frac{P}{2.c.w} \quad (4.8)$$

- τ : Kayma gerilmesi(MPa)
P: Toplam yük(N)
c: Çekirdek kalınlığı(mm)
w: Panel genişliği(mm)

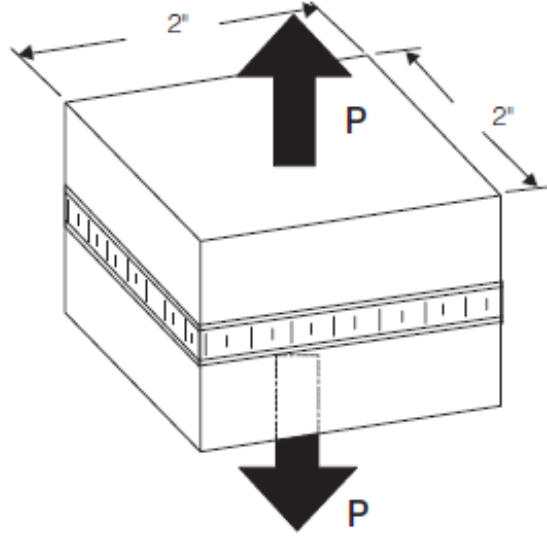


Şekil 2.64. Üç nokta eğilme testi (Hexcel 2007)

Düz yüzey gerilim testi, çekirdek gerilim direncini ya da yüzey-çekirdek yapışma direncini ölçmek için kullanılabilir. Genellikle 2x2 inch'lik test numuneleri kullanılır. Ortalama sandviç düz yüzey gerilim direnci aşağıdaki formülasyon yardımı ile bulunabilir(Şekil 2.65).

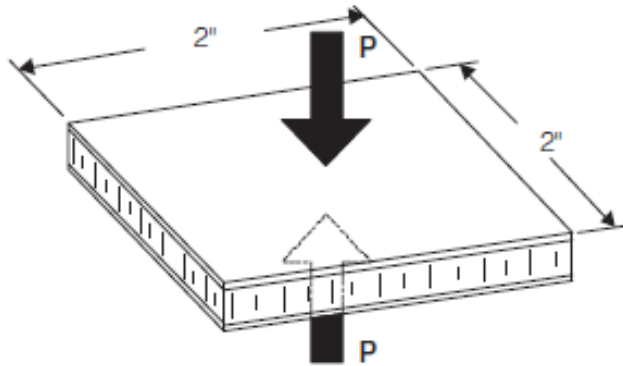
$$\sigma = \frac{P}{l.w} \quad (4.9)$$

- σ : Dayanım (MPa)
P: Yük(N)
l: Numune uzunluğu(mm)
w: Numune genişliği(mm)



Şekil 2.65. Düz yüzey gerilim testi (Hexcel 2007)

Düz yüzey basma testi, çekirdek basma direncini ölçmek için yapılmaktadır. 2x2 inch'lik paneller ile test gerçekleştirilir. Yük-sehim eğrisinden elde edilen değerler ile aşağıdaki eŐitlikler yardımıyla çekirdek basma direnci ve basma modülü hesaplanabilir(Şekil 2.66).

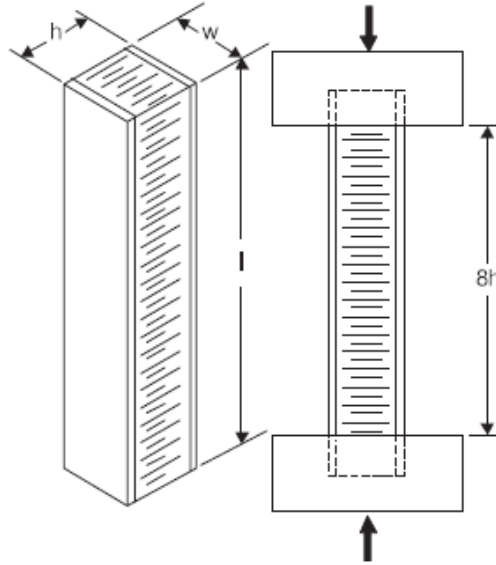


Şekil 2.66. Düz yüzey basma testi (Hexcel 2007)

$$E = \frac{P.c}{d.l.w} \quad (4.10)$$

- E: Eğilme modülü(MPa)
P: Yük(N)
d: Sehim(mm)
w: Numune genişliği(mm)
c: Çekirdek kalınlığı(mm)
l: Numune boyu(mm)

Yan basma testi, sandviç yapının yüzeylerinin yük taşıma kapasitesini ölçmek için kullanılır. Burkulma, kayma, yüzey ayrılması, ezilmesi gibi hasar mekanizmaları gerçekleşebilir. Numuneler en az 2 inch genişliğe sahip ve numune boyu ise kalınlığının en az 8 katı olmak zorundadır. Ortalama yanıl basma dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanabilir(Şekil 2.66).



Şekil 2.67. Yan basma testi (Hexcel 2007)

$$\sigma = \frac{P}{2.t.w} \quad (4.11)$$

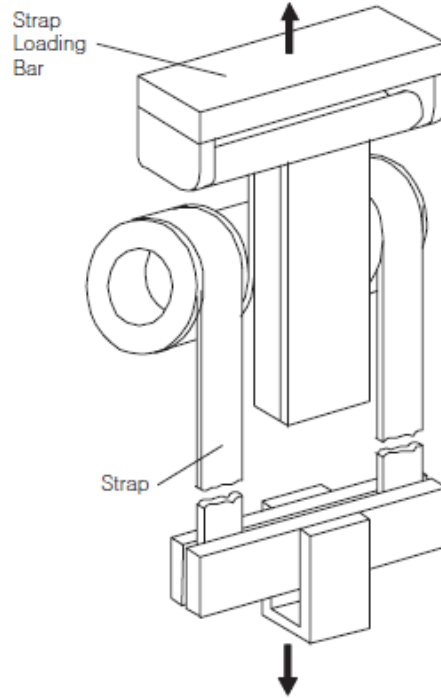
σ : Dayanım(MPa)

P: Yük(N)

t: Yüzey kalınlığı(mm)

w: Numune genişliği(mm)

Soyma testi, yüzey-çekirdek ara yüzeyin yapışma dayanımını ölçmek amacıyla yapılır. Numune boyu en az 10 inch genişlik ise 3 inch olmalıdır. Ortalama soyulma torku aşağıdaki gibi hesaplanabilir(şekil 2.67).



şekil 2.68. Soyma testi (Hexcel 2007)

$$T = \frac{(R_o - R_i).(F_o - F_i)}{w} \quad (4.12)$$

- T: Ortalama soyulma torku(N)
Ro: Sarılı yükleme kayışının yarısının kalınlığı ve flanş çapı toplamı(mm)
Ri: Gövde apı(mm)
Fo: Ortalama yük(N)
Fi: Yüzeyi eğmek için gerekli yük(N)
w: Numune genişliği(mm)



3. MATERYAL ve YÖNTEM

Yapılan çalışmada farklı cins ve kalınlıkta çekirdek malzemelerle üretilen sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerinin elde edilip karşılaştırılması amaçlanmıştır. Takviye malzemesi olarak karbon elyaf (Twill Karbon kumaş 220 gr/m^2), çekirdek malzemesi olarak da polipropilen, Nomex ve alüminyum balpeteği kullanılmıştır. Karbon elyaflar için üretim metodu olarak başta vakum torbalama yöntemi ile denemeler yapılmıştır. Ancak daha sonra bu işlemin üretim sürecini çok uzatacağından ve üretilecek takviye malzemelerin formlu yüzeye sahip olmamasından dolayı optimum üretim yönteminin elle yatırma yöntemi olduğuna karar verilmiştir. Üretilen kompozit plakalardan ASTM standartlarında üç nokta eğme numuneleri için $30 \times 130 \text{ mm}$ boyutlarında takviye malzemesi hazırlanmıştır.

3.1. Testlerde Kullanılan Yüzey Malzemeleri

Karbon elyaf takviyeli sandviç kompozit malzemelerin kullanımı havacılık, denizcilik, uzay, otomotiv gibi büyük sektörlerde özellikle özgül mukavemetlerinin yüksek oluşu, form verilebilme kabiliyeti ve geri dönüşüm oranıyla giderek artmaktadır. Farklı tip çekirdek malzemeler kullanım yerine göre değişiklik gösterip, karbon elyaf yüzey malzemesi de yüksek kaliteli yüzey özellikleriyle ön plana çıkmaktadır.

Karbon elyaf kumaş, Twill kumaş özelliğine sahip olup 220 gr/m^2 özgül ağırlığındadır. Örgüsü 90° çaprazlama olduğundan, her yüzey için çift kat kullanılan kumaş, fiber yönünden bağımsız olarak üretilmiştir. Kullanılan karbon fiber kumaşın özellikleri çizelge 3.1.'de, fotoğrafları da şekil 3.1'de paylaşılmıştır.

Çizelge 3.1. Karbon fiber kumaşın özellikleri

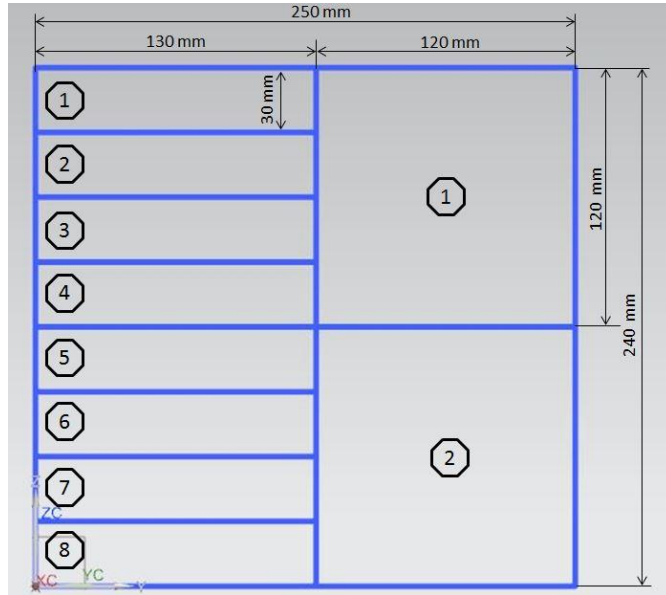
Fabric Code	Fabric	Width(mm)	Weight(g/m ²)	Weave
CCT-220	3K-3K Carbon Fabric	1000	220	2x2 Twill



Şekil 3.1. Kullanılan karbon fiber kumaş

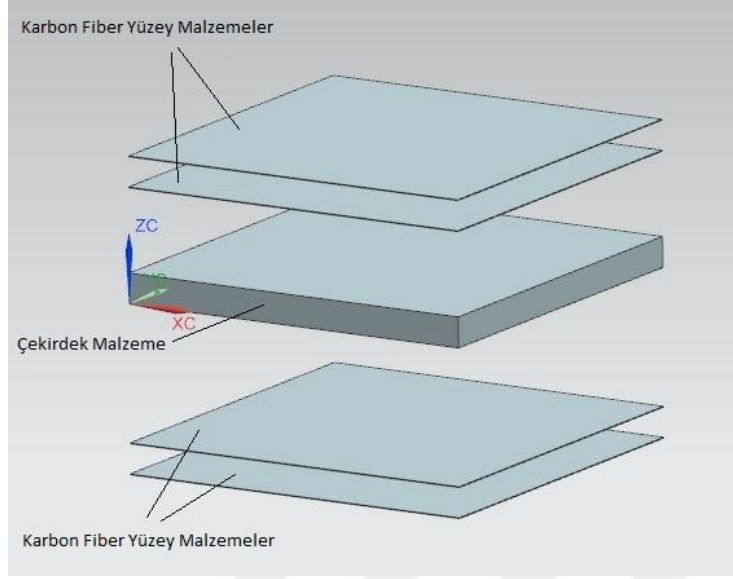
3.1.1. Karbon Elyaf Yüzey Plakalarının Üretim Planı

Testler için 3 farklı tip çekirdek malzemenin 2 farklı kalınlığı için; yani 6 farklı sandviç kompozit üretimi planlanmıştır. Her bir farklı malzemeden şekil 5.2.'deki gibi 4 adet üç nokta eğme numunesi (alt ve üst yüzey olmak üzere 8 adet yüzey) ve 2 adet de impact test numunesi çıkacak şekilde bir üretim planı yapılmıştır.



Şekil 3.2. Yüzey plakalarının numune boyut ve sayılarına göre üretim planı

Şekil 3.3.'deki gibi alt ve üst yüzey için ikişer kat yüzey malzemesi üretimi öngörülmüştür.



Şekil 3.3. Üretimi planlanan sandviç kompozitin bileşenleri

Yüzey plakalarının üretim aşamasında toplam 6 adet karbon fiber plaka üretimi planlanmıştır. Epoxy miktarı, ürün katalog bilgisine uygun olarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

1 kat kumaş ağırlığı;

$0,5m \times 0,25m = 0,125m^2$ (daha sonra alt ve üst yüzeyleri oluşturacak şekilde tam ortadan kesilerek 240x250mm boyutlarına getirilmiştir.)

Her yüzey için 2 kat kumaş üretildiğinden;

$$0,125m^2 \times 2 = 0,250m^2$$

1 adet karbon fiber plaka üretimi için gerekli reçine ağırlığı hesabı;

$$0,250m^2 \times 200g/m^2 = 50g$$

$50g \pm 10 = 60g$ Toplam reçine miktarı

Ağırlıkça karışım oranı 100:25 olduğundan, toplam ağırlığın %25'i hardener olacak şekilde;

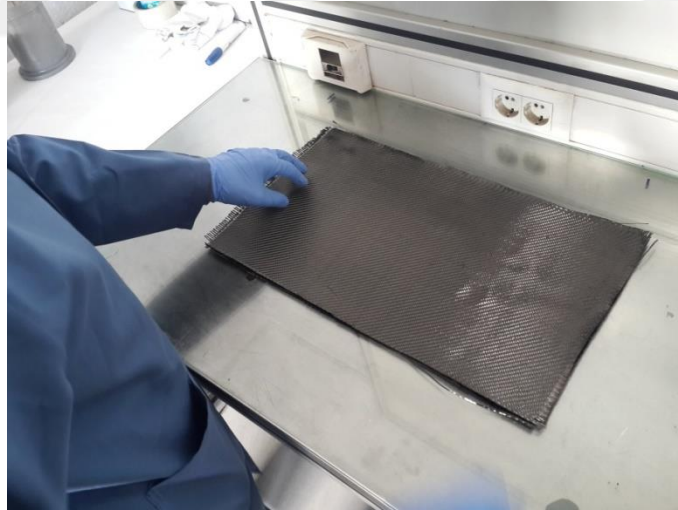
$$60g \times 0.25 = 15g \text{ Sertleştirici miktarı}$$

$60g - 15g = 45g$ Epoxy miktarı olarak hesaplanmıştır.

3.1.2. Karbon Elyaf Yüzey Plakalarının Üretimi

Bu çalışmada, karbon elyaf plakaların, önce vakum torbalama yöntemi ile üretimi denenmiştir. Ancak bu yöntem genellikle formlu parçalar için bir kalıp içerisinde uygulanmaktadır. Asıl amacı ise yüzey üzerinde hava boşluğu bırakmamaktır. Üretilecek olan numuneler herhangi bir forma sahip olmayan test numuneleri olduğu ve üretim sürecini kayda değer şekilde kısaltacağından plakaların elle yatırma yöntemi ile üretimine karar verilmiş olup daha sonra numunelerin tamamı bu yöntem ile üretilmiştir.

Üretim aşaması Uludağ Üniversitesi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Karbon fiber plaka üretimi düz cam bir masa üzerinde yapılmıştır. Ayırıcı yüzey oluşturmak ve plaka yüzey kalitesini arttırmak için XTEND 1080 Release ayırıcı kullanılmış her plaka üretimi öncesi kullanma talimatına göre 5'er dakika aralıklarla 3 kez cam masa üzerine uygulanmıştır. Daha sonra üretim planına göre hazırlanan karbon fiber kumaşlar 2 kat üst üste olacak şekilde cam masa üzerine yerleştirilip elle yatırma yöntemi ile üretimine başlanmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Üretime hazır halde ve planlanan boyutlarda kesilmiş karbon fiber kumaşlar

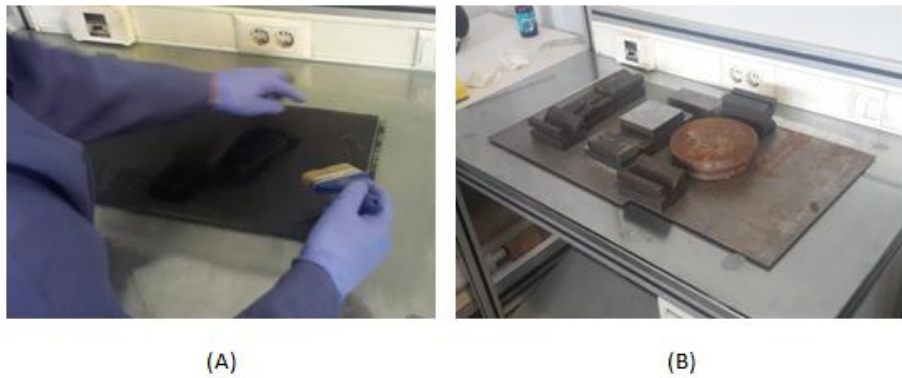
Epoksi karışım miktarı, kullanılan kumaş miktarına göre hesaplanıp dijital hassas terazide tartılmış ve üretime hazır hale getirilmiştir. ASTM standartlarında hazırlanacak olan 3 nokta eğme numuneleri Şekil 3.5.'te görülen MGS L160 Reçine ve MGS H160 Sertleştirici ile katalog bilgisinden alınan “toplam ağırlığın %25'i kadar sertleştirici”

kullanmak şartıyla karışım oluşturulup fırça yardımı ile kumaş üzerinde hiç boşluk kalmayacak şekilde karbon fiberlere uygulanmıştır.



Şekil 3.5. Epoksi ve sertleştiricinin hesaplanan oranda ağırlıkça karışımı

Epoksi sürme işleminden sonra plakaların üzeri sac metal ile kapatılıp üzerine ağırlık koyularak basınç altında oda sıcaklığında 24 saat kadar kürlenmeye bırakılmıştır. 24 saat sonunda plaka sertleşmiş halde alınmış ve masa diğer plakaların üretimine hazırlanmıştır. Bu süreç planlanan şekilde toplam 6 adet karbon fiber yüzey plakası elde edene kadar tekrarlanmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Karbon fiber yüzey plakalarının elle yatırma yöntemi ile üretimi

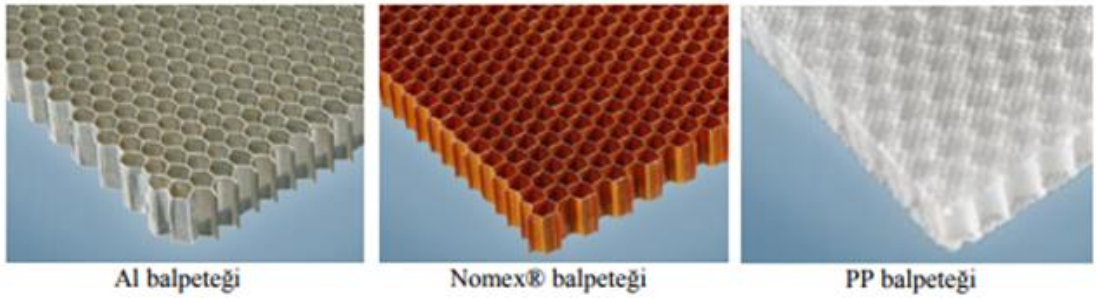
Son olarak hazırlanan plakalar şekil 5.7.'deki sac kesme makinesinde test standartlarına uygun numune boyutlarında daha önce planlandığı şekilde kesilmiştir.



Şekil 3.7. Karbon fiber plakaların numune boyutlarında kesilmesi işlemi

3.2. Testlerde Kullanılan Çekirdek Malzemeler

Sandviç kompozit üretiminde çekirdek malzeme olarak karşımıza birçok seçenek çıksa da malzeme seçiminde yüksek dayanım ve hafiflik göz önüne alınarak seçim yapılmalıdır. Balpeteği yapıların da düşük yoğunluklu malzemelerden üretilmesinin sebebi budur. Metal malzeme olarak Al yoğun bir şekilde kullanılır. Metal dışı malzemelerden ise polipropilen (PP) ve Nomex (karton) kullanımı oldukça yoğundur. Bu malzemeler içerisinde PP görece olarak düşük dayanım ve düşük ergime sıcaklığı sebebiyle daha çok denizcilik uygulamalarında karşımıza çıkmaktadır. Al ve aramid esaslı olan Nomex, yüksek dayanım, tokluk, korozyon direnci, ve yorulma direnci ile otomotiv ve havacılık sektörlerinde daha yoğun kullanılmaktadır.



Şekil 3.8. Kullanılan çekirdek malzemeler

Bu çalışmada da 3 farklı core tipi (Al, Nomex, PP) seçilmiş olup bu malzemelerin 2 farklı kalınlığıyla (5mm, 20mm) üretilen numunler ile testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8). Üç farklı çekirdek malzeme de maket bıçağı kullanılarak hassas bir şekilde ASTM standartlarına uygun test numune boyutlarına bölünmüştür. (ASTM 2006)

3.2.1. Polipropilen Çekirdek

Polipropilen honeycomb, genelde yapıları hafifletmek için kompozit panel imalatında kullanılan bir nüve malzemedir. Genel özellikleri;

- Hafif olmaları,
- Korozyona dayanıklı olmaları,
- Yüksek basınç ve eğilme mukavemeti olması,
- Ses ve ısı yalıtım özelliğinin yüksek olması,
- Kimyasallara, neme, deniz suyuna, mantar ve bakterilere ve ayrıca atmosferik koşullara dayanımının yüksek olması,
- Darbe dayanımının yüksek olmasıdır.

Ancak metal balpetekleri gibi mekanik hafızası yüksek olmadığından şekil verildiğinde aldığı formu korurlar. Panelin efektif bir şekilde yapılabilmesi için yapının her iki tarafına $30\text{gr}/\text{m}^2$ polyester tül yapıştırılmaktadır (Şekil 3.9). Polipropilen balpeteği aynı zamanda aşındırıcı gaz emisyonlarını azaltmak amacıyla filtrelerde de kullanılır.



Şekil 3.9. PP çekirdek

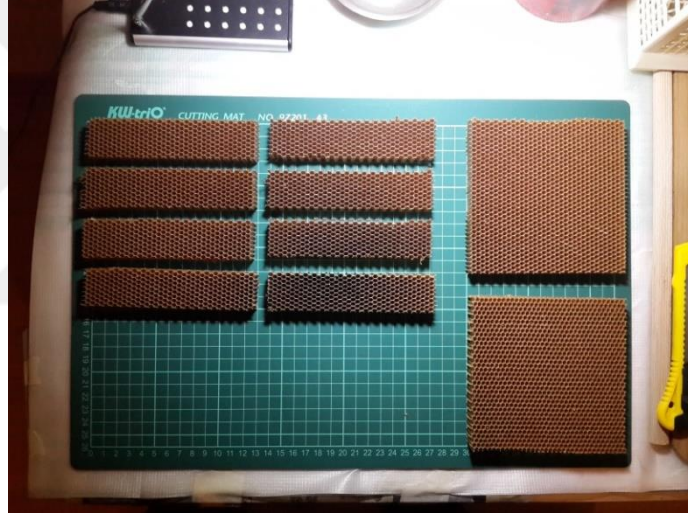
PP çekirdeğin boyutsal ve mekanik özellikleri çizelge 3.2.'deki gibidir.

Çizelge 3.2. PP çekirdeğin özellikleri

Hücre Tipi	Hücre Çapı	Yoğunluk	Basma Mukavemeti	Kayma Mukavemeti
	mm	kg/m ³	MPa	MPa
PP	8	80-90	2	0.55

3.2.2. Nomex Çekirdek

Nomex petek yapısı, ısıya dirençli bir fenolik reçine emdirilmiş aramid elyaf kağıdı ile üretilen son derece hafif, yüksek mukavemetli ve metal olmayan bir üründür. Bu çekirdek malzeme, üstün elektrik yalıtımına sahiptir. Aramid kağıdı, tekne gövdelerinde, otomobil yarış araçlarında ve askeri alanlarda sıklıkla kullanılır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Test standartlarına uygun boyutlarda kesilmiş Nomex çekirdekler

Nomex çekirdeğin boyutsal ve mekanik özellikleri çizelge 3.3.'teki gibidir.

Çizelge 3.3. Nomex çekirdek özellikleri

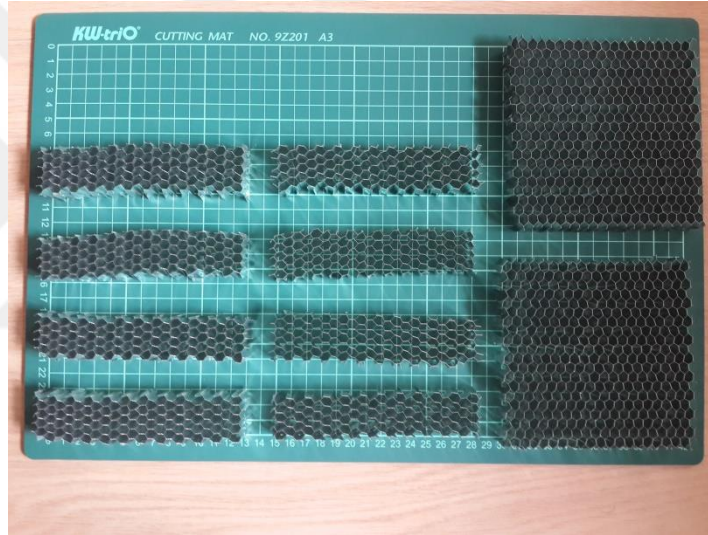
Hücre Tipi	Hücre Çapı	Yoğunluk	Basma Mukavemeti	Kayma Mukavemeti	
				L-direction	W-direction
	mm	kg/m ³	MPa	MPa	MPa
Nomex	9,6	48	1,8	1,15	0,66

5.2.3. Alüminyum Çekirdek

Alüminyum bal peteği paneller ağırlık avantajı , basma ve kayma direnci, sıcaklığa ve korozyona karşı dayanıklılığı ve geri dönüşüm imkanlarıyla ön plana çıkmaktadırlar (Şekil 3.11).

Alüminyum balpeteği sandviç kompozitlerde zemin, çatı, kapı gibi uygulamaların da yanı sıra otomotiv endüstrisi başta olmak üzere bir çok alanda optimum dayanıklılık/ağırlık oranı sayesinde karşımıza çıkmaktadır. Aynı zamanda enerji sönümlenme gerektiren uygulamalarda da örnekleri mevcuttur. Başlıca avantajları;

- Hafiflik olması,
- Yüzey toleransının yüksek olması,
- Sıcaklığa ve yanmaya karşı dirençli olması,
- Kimyasal direncinin yüksek olması,
- Sandviç haliyle yüksek sertlik değerlerine sahip olması,
- Basma, kayma ve korozyon dayanımının yüksek olması'dır.



Şekil 3.11. Test standartlarına uygun boyutlarda kesilmiş Al çekirdekler
Alüminyum çekirdeğin boyutsal ve mekanik özellikleri çizelge 3.4.'deki gibidir.

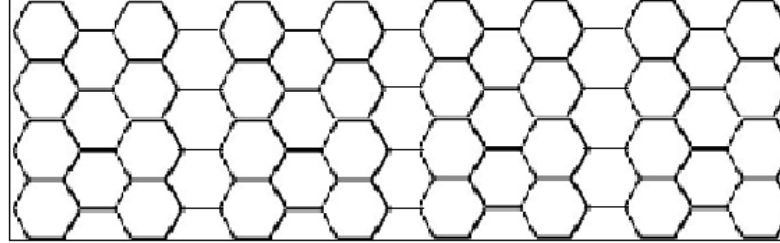
Çizelge 3.4. Al çekirdek özellikleri

Hücre Tipi	Hücre Çapı mm	Yoğunluk kg/m ³	Basma Mukavemeti MPa	Kayma Mukavemeti	
				L-direction MPa	W-direction MPa
Al	9,52	40	1,2	1,1	0,65

3.3. Sandviç Kompozitlerin Birleştirilme İşlemi

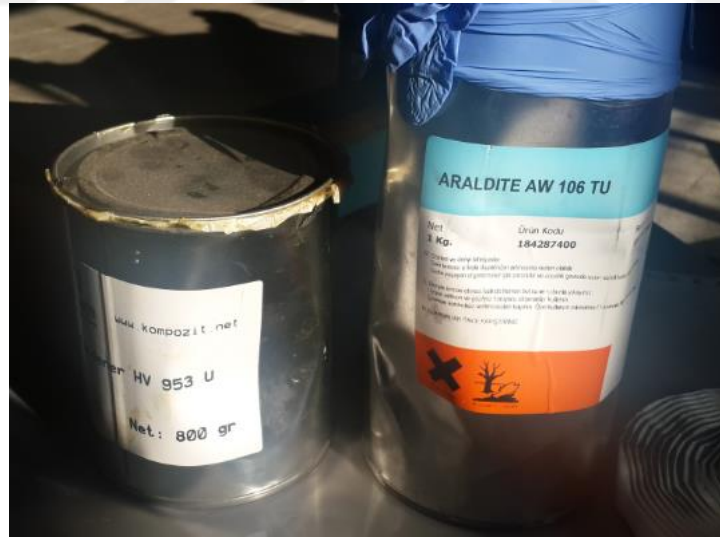
ASTM test standartlarına uygun boyutlarda hazırlanan karbon fiber yüzey plakaları ile çekirdek malzemelerinin birleştirilip sandviç kompozit oluşturma işleminde yapıştırıcı

olarak ARALDITE AW 106 TU ve HV 953 U hardener katalog bilgisi dahilinde ‘‘yapıştırıcı ağırlığının %80’i kadar sertleştirici’’ kullanacak şekilde karışım oluşturulup her plaka için 25 g yapıştırıcı ve 20 g sertleştirici karışımı şekil 3.13.’teki gibi kullanılmıştır. (Anonim 2000)



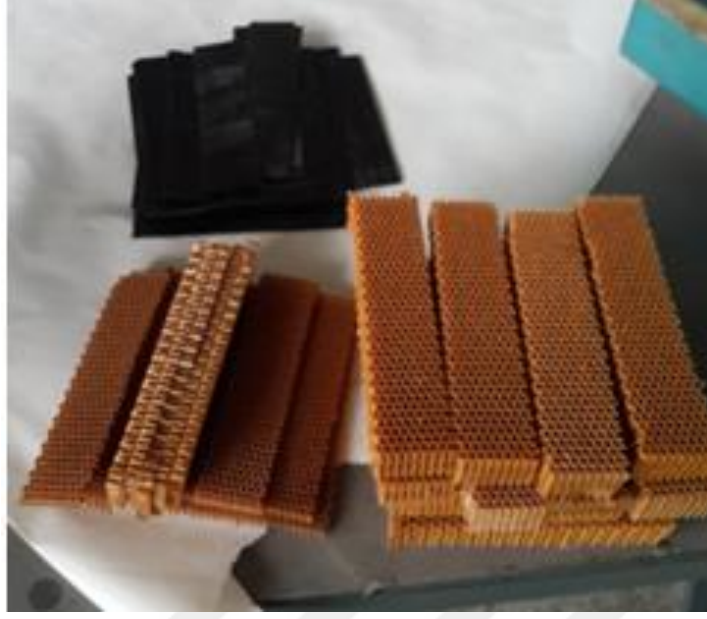
Şekil 3.12. Numune hazırlamada balpeteği konfigürasyonu

Yapıştırma işlemi, çekirdek malzemenin hücre yönü şekil 5.12’deki konfigürasyona göre (L-direction) gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.13. Sandviç malzemenin birleştirme işleminde kullanılan yapıştırıcı ve sertleştirici

Birleştirme öncesi hazırlanan karbon fiber yüzeyler ve balpeteği çekirdek malzemeler şekil 3.14.’te paylaşılmıştır.



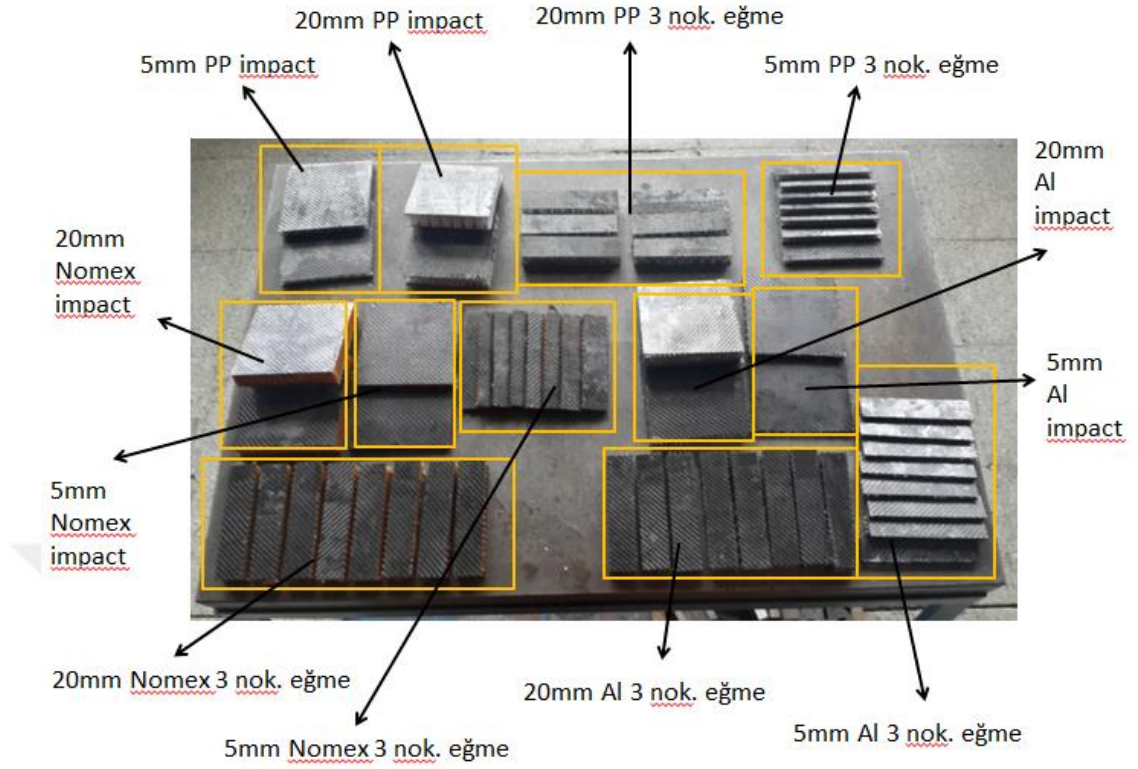
Şekil 3.14. Birleştirme işlemine hazır halde yüzey ve çekirdek malzemeleri

Yüzey ve çekirdek arasına karışım uygulandıktan sonra birleştirme işlemi elle yapılmış daha sonra oda sıcaklığında kürleşmeye bırakılmıştır. Karbon elyaf yüzey üretiminde olduğu gibi basınç altında oda sıcaklığında 24 saat süreyle kürlenmeye bırakılmış ve malzemenin tam birleşmesi sağlanmıştır (Şekil 3.15).

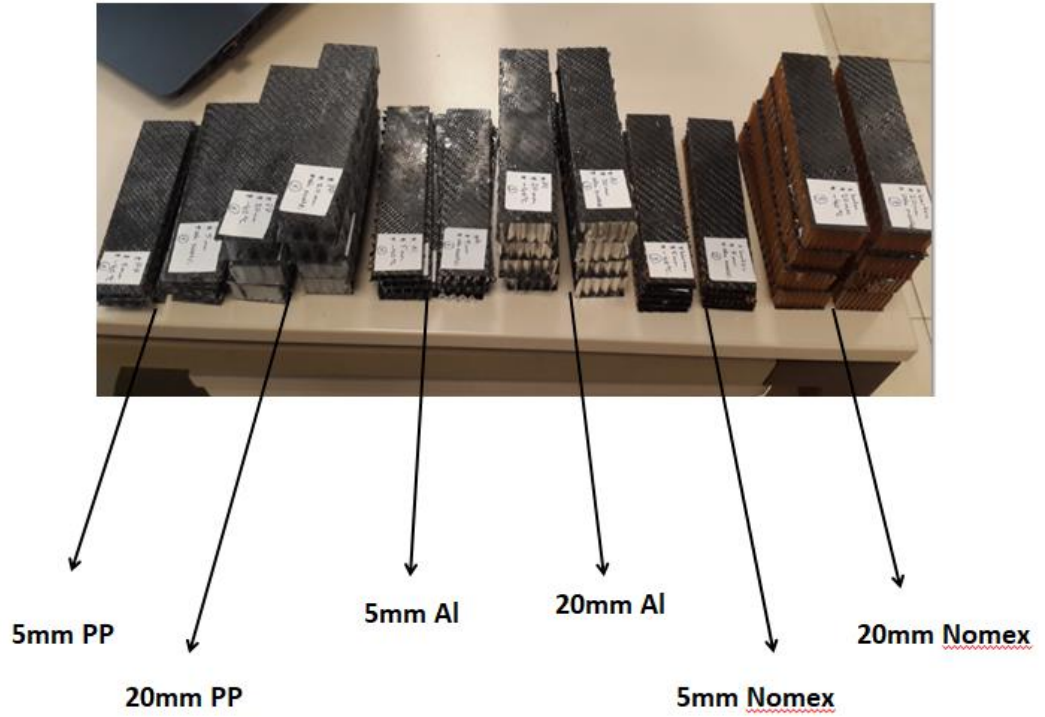


Şekil 3.15. Birleştirilensandviç numunelerinin ağırlık altında oda sıcaklığında kürlenme aşaması

Bu işlem de 3 farklı malzeme ve 2 farklı kalınlık için toplam 6 kere tekrar edilmiş olup numuneler testlere hazır hale getirilmiştir. Kürleşme sonrası hazır hale gelen test numunelerinin gruplandırılmış haliyle fotoğrafları şekil 3.16 ve şekil 3.17'deki gibidir.



Şekil 3.16. Hazırlanan 3 nokta eğilme ve impact numuneleri



Şekil 3.17. Gruplandırılmış ve numaralandırılmış 3 nokta eğilme test numuneleri

3.4. Üç Nokta Eğilme Deneyleri

Şekillendirme işlemleri arasında, bükme, uygulama için en yaygın işlemlerden biridir. Ayrıca eğme testleri (bending test) sayesinde malzemenin akma dayanımı ve yük altındaki davranışı hakkında önemli malzeme bilgileri toplamak mümkündür.

Eğilme deneyi ile maksimum sehim, eğilme momenti, elastisite modülü gibi malzemenin mekanik özelliklerini anlamak konusunda kritik öneme sahip değerler elde edilir.

Üç nokta eğilme deneyleri, karbon elyaf takviyeli, iki farklı kalınlığa (5mm ve 20mm) sahip alüminyum, polipropilen ve nomex-karton çekirdekli kompozit plakaların oda sıcaklığında ve -40°C 'de eğilme esnasında göstermiş oldukları dayanımı gözlemlemek ve karşılaştırmak amacıyla yapılmıştır.

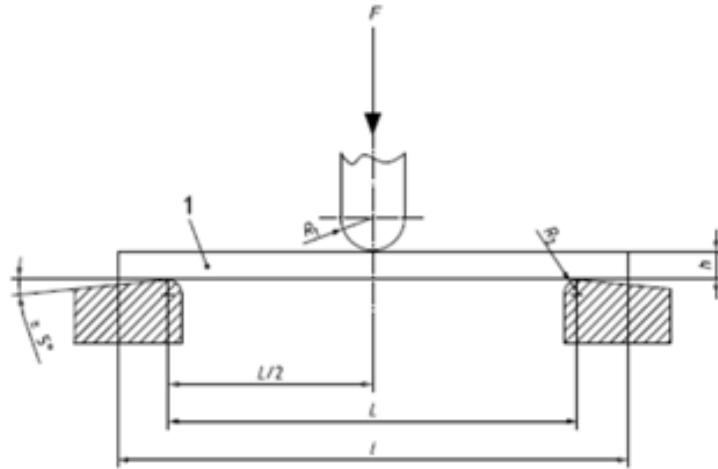
Deneyler, TOFAŞ-ARGE test merkezinde Zwick/Roell çok amaçlı test cihazı ile ASTM C393 standartlarına göre numuneler kırılana kadar ve maximum 30 mm çökme miktarı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.(ASTM 2006) Testler, sıcaklık ayarının yapılabildiği bir test odasında oda sıcaklığında ve sıvı nitrojen sayesinde -40°C 'ye şartlandırılan ortamda yapılmıştır. Deney düzeneği şekil 3.18'de verilmiştir. Sandviç malzeme numunelerinin boyutları 5x30x130 mm ve 20x30x130mm'dir.



Şekil 3.18. Sıfırın altındaki sıcaklıklarda yapılan 3 nokta eğme test düzeneği ve şartlandırma odası

Numuneler, 100 mm mesnet aralığına sahip test cihazına yerleştirilmiş olup, 5 mm kafa yarıçapına sahip yük kolu tam ortadan etkiyecek şekilde teste hazır hale getirilmiştir. (Şekil 3.19). Her bir farklı parametre için deneylerde 4'er adet deney numunesi kullanılmış olup statik 3 nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen test sonuçlarına göre yapılan 4 deneyin yük-deplasman eğrileri içerisinde tüm numuneleri ortalama olarak temsil edebilecek eğri seçilip karşılaştırmalı grafikler bu eğriler ile oluşturulmuştur.

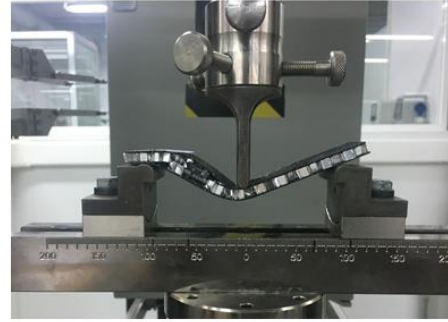
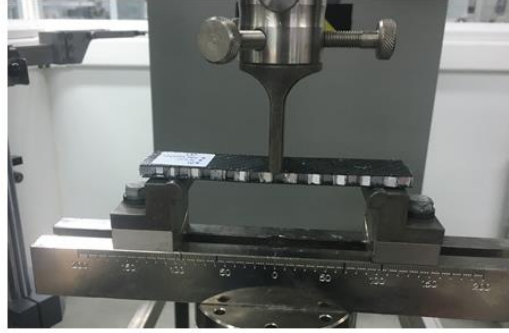
Cihaz Modeli:	Z010
Cihaz Tipi:	BT1-FR010TE.A50
Yazılım Versiyon:	B269052.00 / 374404 (Version=3.3)
Azot Tankı Bilgileri:	126 L / 10 Bar / -196 C°
Pre-Load	2 N
E-Modülü ölçme hızı	1mm/dakika
Test hızı	2mm/dakika
mesnetler arası uzaklık (L)	100 mm
R1	6 mm



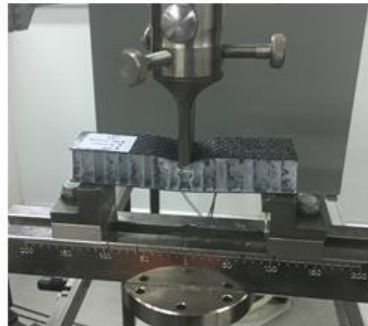
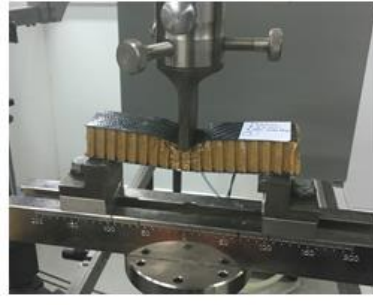
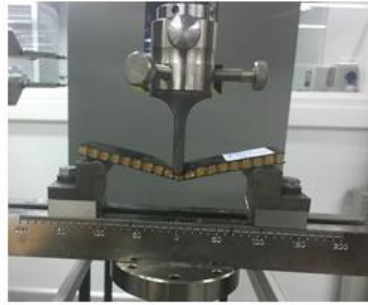
Şekil 3.19. Test Cihazı Bilgileri ve Test Parametreleri

ASTM C393'e göre gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyleri sonuçları ile çekirdek kayma stresi, yüzey eğilme direnci, eğilme modülü gibi değerler, deney sonuçlarından elde edilen grafikler yardımıyla ilgili formülasyonlar ile hesaplanmıştır (ASTM 2006)

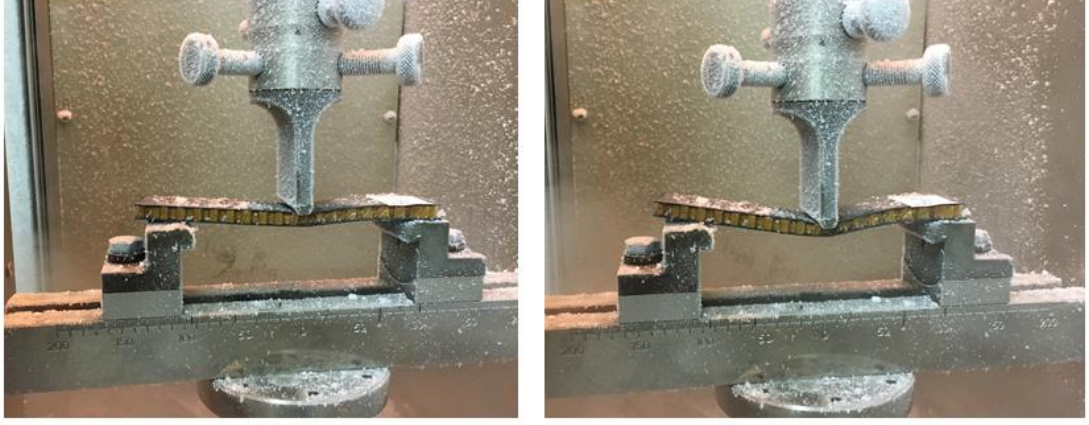
Oda sıcaklığında yapılan 3 nokta eğme deneylerinin test sırasındaki fotoğrafları şekil 3.20 ve şekil 3.21.'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.20. 5mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç kompozit numunesinin 3 nokta eğilme testi



Şekil 3.21. Farklı cins çekirdek ve kalınlıklardaki test numunelerinin 3 nokta eğilme testi



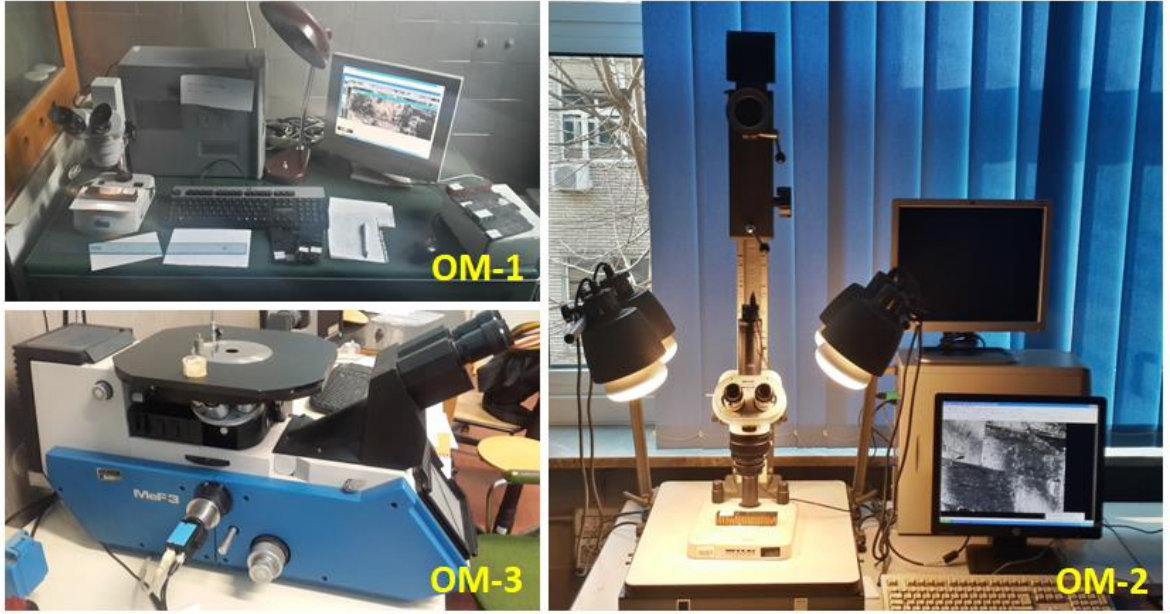
Şekil 3.22. Şartlandırma odası içerisinde -40°C ortamda gerçekleştirilen 3 nokta eğilme testi

Şartlandırma kabini içerisinde sıvı nitrojen altında -40°C 'de yapılan deney fotoğrafları ise şekil 3.22.'deki gibidir.

Yük-deplasman grafikleri, her parametre için birden fazla numune ile yapılan testlerden elde edilmiştir. Eğriler birbiriyle kıyaslanıp, sonuçları en iyi temsil edebilecek olan numuneye ait eğri ile araştırmaya devam edilmiş olup, karşılaştırmalı grafikler bu eğriler ile oluşturulmuştur. Mikroskop incelemeleri de sadece bu numuneler ile gerçekleştirilmiştir.

3.5. Test Sonrası Numunelerin Optik Mikroskop Altında İncelenmesi

Test sonrası elde edilen grafikler, her bir parametre için, test edilen numune sayısı ile birlikte, ayrı ayrı oluşturulup incelenmiştir. Sonuçları en iyi temsil edebilecek numune seçilip karşılaştırmalı grafik ve tablolar bu numunelerin sonuçlarıyla elde edilmiştir. Aynı zamanda bu seçilmiş olan numunelerin, kırık morfolojisini anlayabilmek ve karbon fiber- epoksi arayüzünün mikro boyutta incelemesini yapmak amacıyla optik mikroskop ile analizi yapılmıştır. Analizler, İtalya'da, Politecnico di Torino'nun optik mikroskop laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tüm analizler için, 3 farklı optik mikroskop ile çalışma yapılmış olup, incelenen bölgeler için en iyi sonucu veren görüntüler çalışma sonucu olarak paylaşılmıştır.



Şekil 3.23. Mikro boyutta görüntü elde etmek için kullanılan 3 farklı optik mikroskop

Kullanılan mikroskopların marka ve modelleri aşağıdaki gibidir;

- OM-1 : Motic DM-143-FBGG
- OM-2 : Wild/Leica M420
- OM-3 : Reichert-Jung MeF3

Özellikle; epoksi özelliklerini değiştirdiği için test sıcaklığı, alt yüzeydeki gerilme miktarını önemli miktarda değiştirdiği için de çekirdek kalınlığı parametrelerinin mikro yapıdaki etkisi araştırılmıştır.

4. BULGULAR

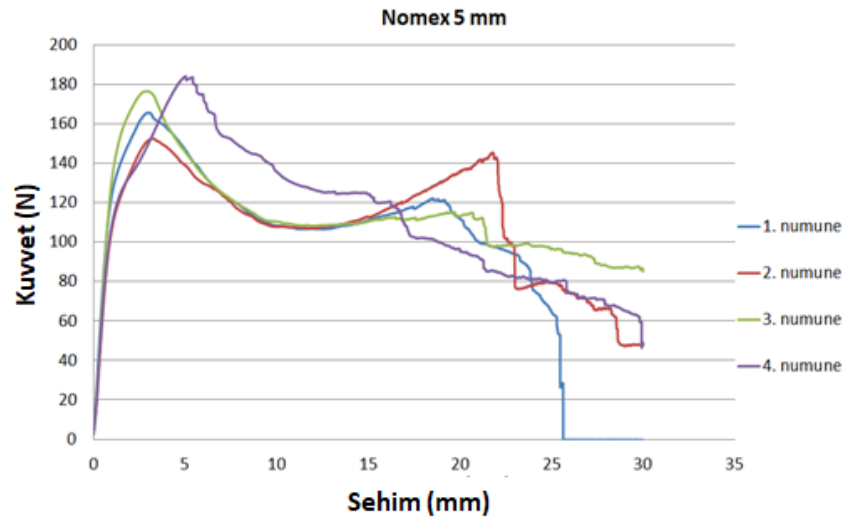
Nomex, Polipropilen ve Alüminyum çekirdek malzemeden üretilen sandviç kompozitlerin üç nokta eğme testleri oda sıcaklığında (23°C) ve -40°C'de gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonrası malzemelerin deformasyon bölgeleri ve deformasyon şekilleri incelenmiştir. Test sırasında yük-sehim miktarları anlık olarak ölçülmüş ve grafik haline getirilmiştir. Test sonuçlarını en ideal oranda temsil edebilecek olan numuneye ait eğri karşılaştırmalı grafikler için seçilip kullanılmıştır. Aynı zamanda mikroskop ile mikro yapı incelemeleri bu numuneler ile yapılmıştır.

4.1. Oda Sıcaklığında Yapılan Deney Sonuçları

3 nokta eğme testleri ilk olarak normal şartlar altında, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, çekirdek malzeme cinsine ve çekirdek kalınlığına göre aşağıdaki gibi verilmiştir.

4.1.1. Nomex Çekirdekli Sandviç Malzeme Sonuçları

Şekil 4.1. incelendiğinde test edilen dört numunenin de özellikle elastik bölgede benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Sadece 1 numaralı numune 25 mm sehimden sonra tamamen kırılmıştır. Ortalama olarak sonuçları temsil edecek eğri olarak 3 numaralı numuneye ait eğri seçilmiştir.

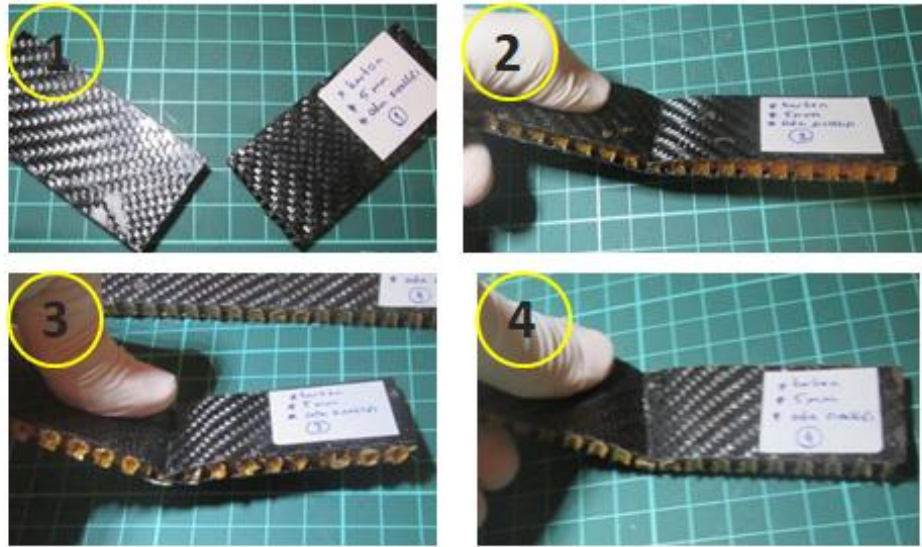


Şekil 4.1. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviçlerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

Numunelerin ise test sonrası fotoğrafları şekil 4.2. ve şekil 4.3.'te paylaşılmıştır.

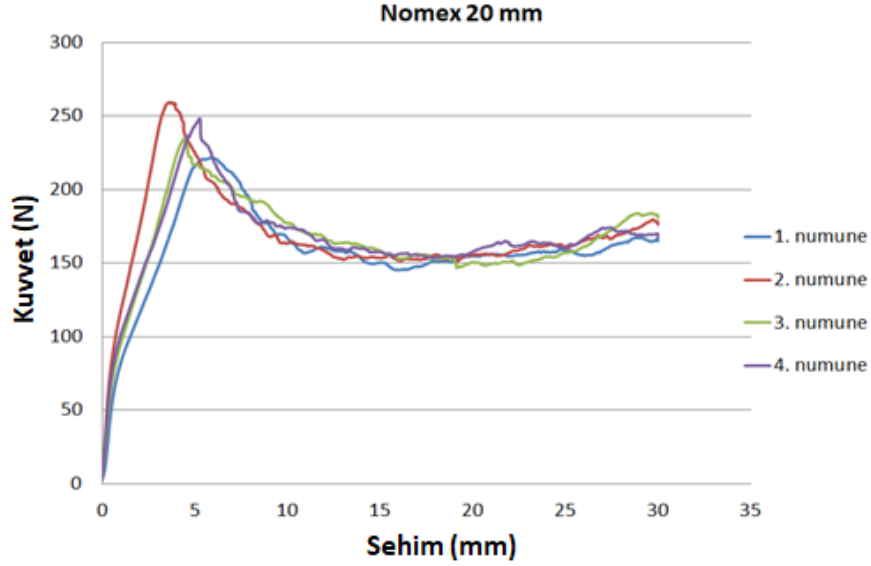


Şekil 4.2. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri



Şekil 4.3. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri

20 mm Nomex çekirdek ile yapılan deneyler sonucunda dört numunenin de benzer sonuçlar verdiğini söylemek mümkündür(Şekil 4.4).

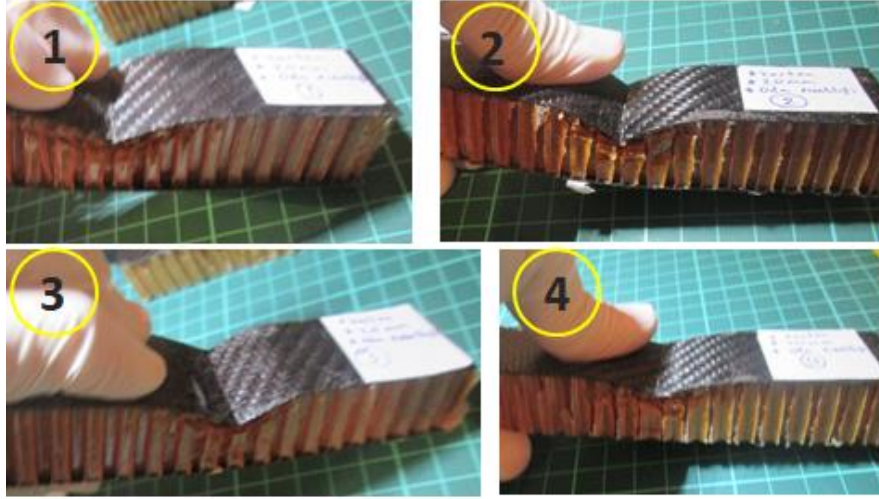


Şekil 4.4. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

Malzemenin deformasyon davranışı dört numune için de beklenildiği şekilde gerçekleşmiştir. Burada sonuçları ortalama olarak en iyi temsil edebilecek eğri olarak 4 numaralı numuneye ait eğri seçilmiştir. Numunelerin test sonrası fotoğrafları şekil 4.5. ve şekil 4.6.'da paylaşılmıştır.



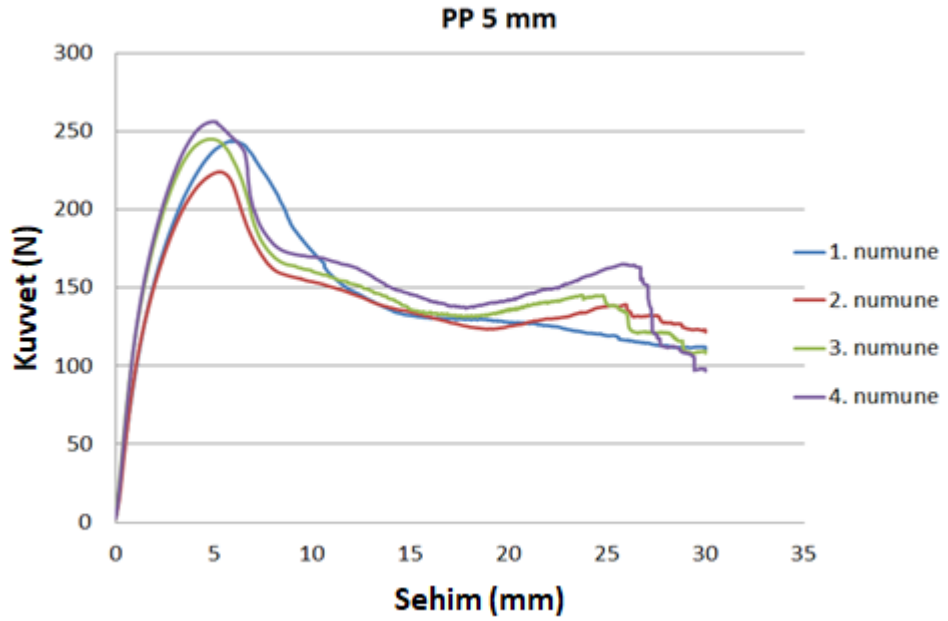
Şekil 4.5. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri



Şekil 4.6. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri

4.1.2. PP Çekirdekli Sandviç Malzeme Sonuçları

5 mm PP çekirdek ile yapılan deney sonuçlarının da uyumlu çıktığını söylemek mümkündür(Şekil 4.7).

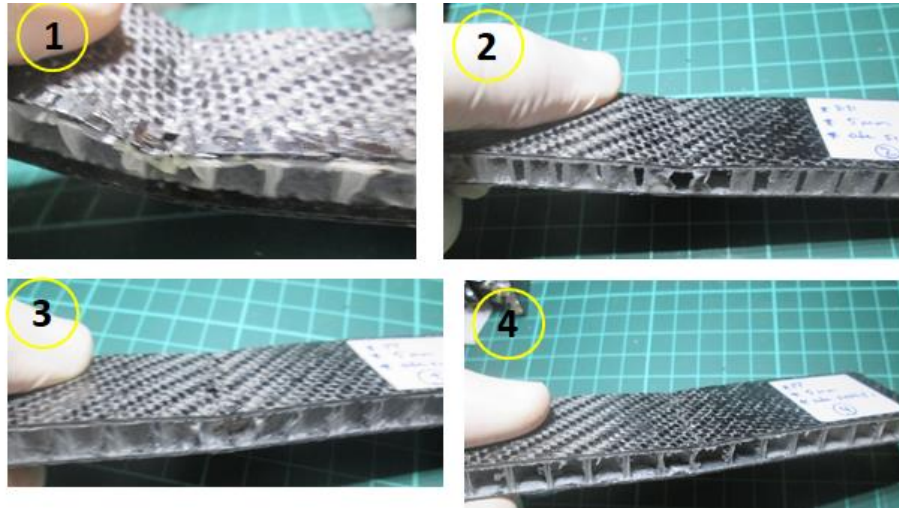


Şekil 4.7. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

3 numaralı numuneye ait eğri PP 5 mm parametresini temsil edecek eğri olarak seçilmiştir. Malzemelerin deformasyon davranışı beklenen şekilde gerçekleşmiştir. Numunelerin test sonrası fotoğrafları şekil 4.8. ve şekil 4.9.'da paylaşılmıştır.

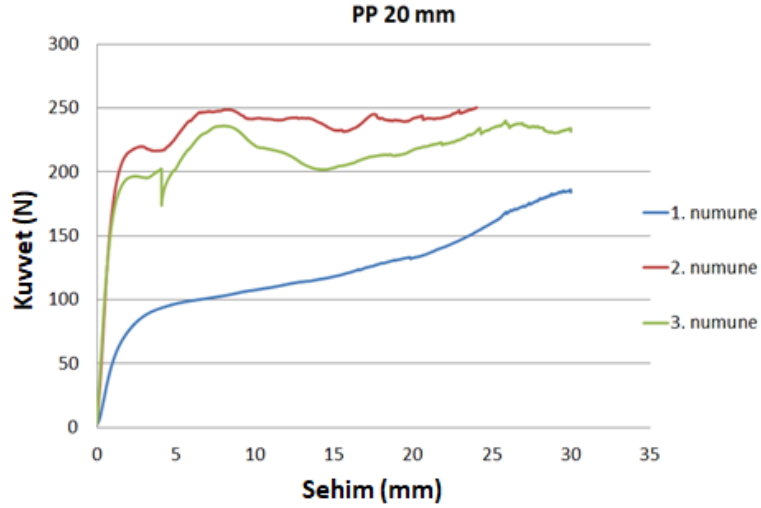


Şekil 4.8. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri



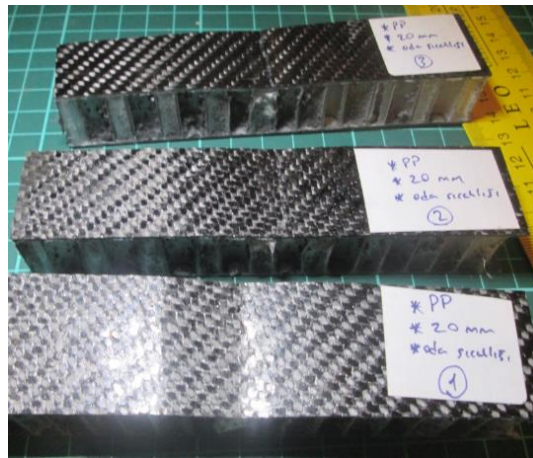
Şekil 4.9. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri

20 mm kalınlıkta PP çekirdek ile yapılan deneyler 3 farklı numune ile gerçekleştirilmiştir. 1 numaralı numunenin diğer numunelere göre daha sünek davranış gösterdiğini söylemek mümkündür(Şekil 4.10).

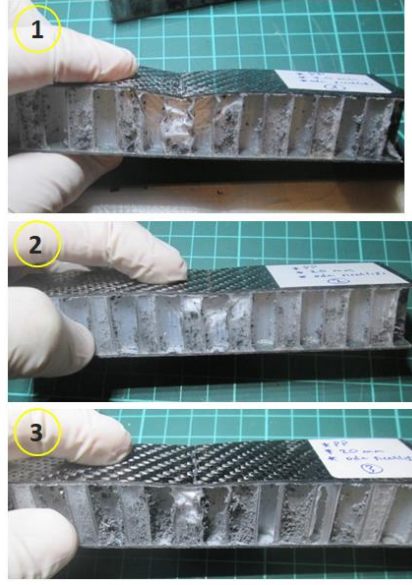


Şekil 4.10. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

Sandviç kompozitin tam olarak birleşmemesinden dolayı bir anlamda sadece PP çekirdeğin mukavemet davranışı test edilmiştir. Bu durum numunelerin deformasyon farkından da anlaşılabilir. Bu sebeple 1 numaralı numuneye ait sonuçlar göz ardı edilmiştir. PP davranışını temsilen 2 numaralı numuneye ait eğri seçilmiştir. Numunelerin test sonrası fotoğrafları şekil 4.11. ve şekil 4.12.'de paylaşılmıştır.



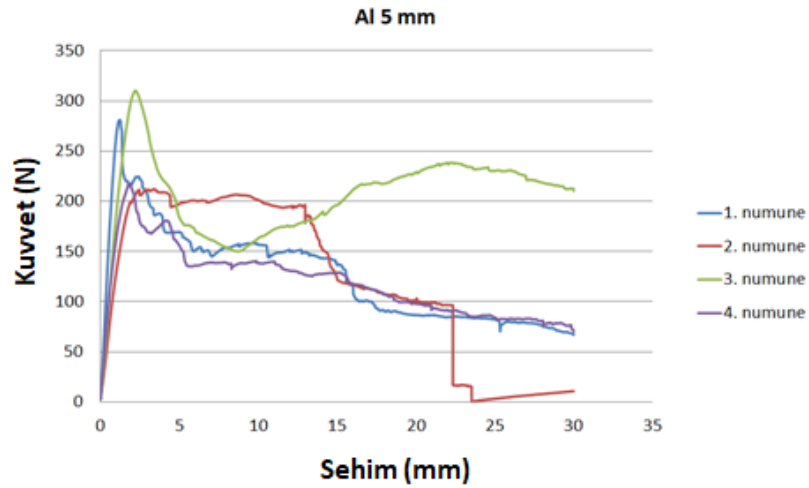
Şekil 4.11. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri



Şekil 4.12. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri

4.1.3. Al Çekirdekli Sandviç Malzeme Sonuçları

5 mm kalınlığında Al çekirdek için 4 farklı numune ile deneyler yapılmıştır. Bu deneyde sadece 3 numaralı numune beklenen kırılma davranışını sergilemiş ve deforme olmuştur. Bu sebeple temsili eğri olarak 3 numaralı numunenin eğrisi seçilmiştir(Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

2 numaralı numunede üst yüzey plakası kırılıp tamamen çekirdekten ayrılmıştır. 1 ve 4 numaralı numunelerde ise yine çekirdek ile yüzey malzeme ayrılması gözlenmiştir. Numunelerin test sonrası fotoğrafları ise şekil 4.14. ve şekil 4.15.'te paylaşılmıştır.

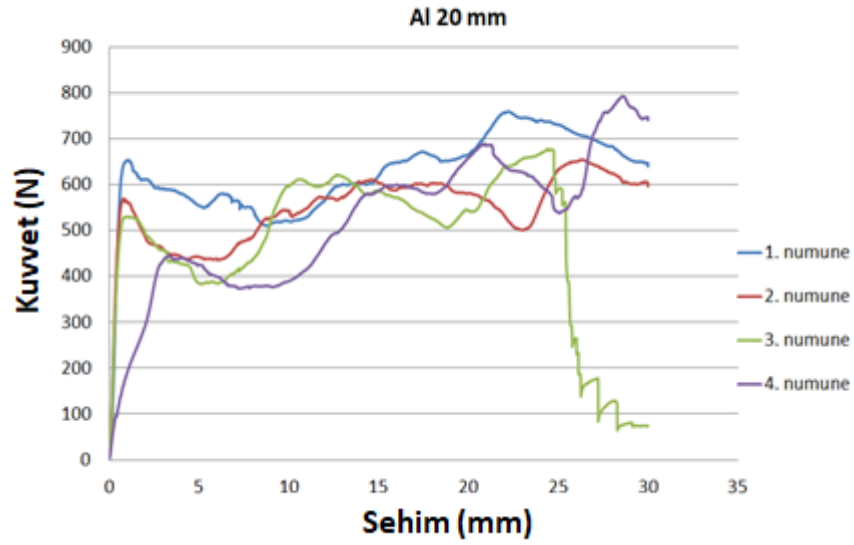


Şekil 4.14. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri



Şekil 4.15. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri

20 mm kalınlıkta Al çekirdek için oda sıcaklığında dört numune ile testler yapılmıştır. 4 numaralı numunenin elastik bölgedeki davranışı diğer numunelere göre gerçek dışı bir davranış sergilediğini söylemek mümkündür(Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

Bu çekirdek malzeme ile yapılan test sonuçlarını en iyi temsil eden eğri olarak 2 numaralı numunenin eğrisi seçilmiştir. Numunelerin test sonrası fotoğrafları ise şekil 4.17. ve şekil 4.18.'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.17. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri



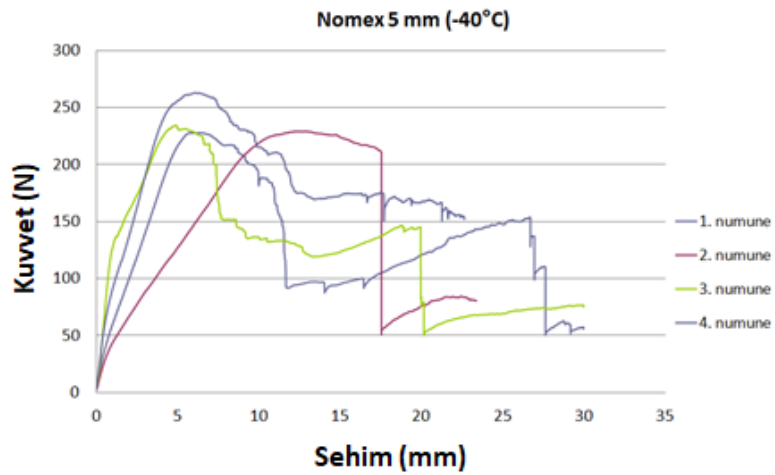
Şekil 4.18. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri

4.2. -40 C°'de Yapılan Deney Sonuçları

3 nokta eğme testleri daha sonra, sıvı nitrojen altında, şartlandırma odasında -40°C'de gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, çekirdek malzeme cinsine ve çekirdek kalınlığına göre aşağıdaki gibi verilmiştir.

4.2.1. Nomex Çekirdekli Sandviç Malzeme Sonuçları

5 mm kalınlıkta Nomex çekirdek için -40°C'de dört numune ile testler yapılmıştır. Numuneler elastik bölgede farklı davranış gösterse de test sonuçlarını temsil edebilecek eğri olarak 1 numaralı numune seçilmiştir(Şekil 4.19).



Şekil 4.19. -40°C'de 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

Numunelerin test sonrası fotoğrafları ise şekil 4.20. ve şekil 4.21.'de paylaşılmıştır.

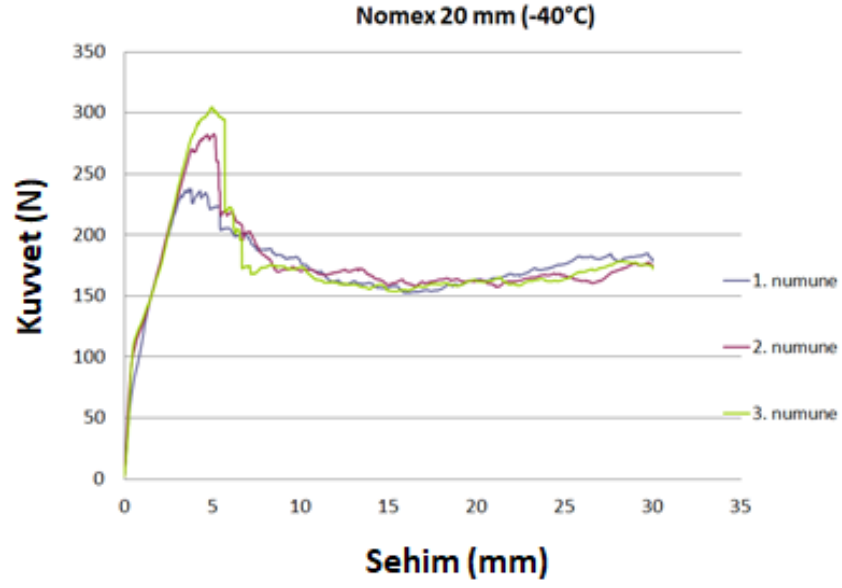


Şekil 4.20. -40°C’de 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünümleri



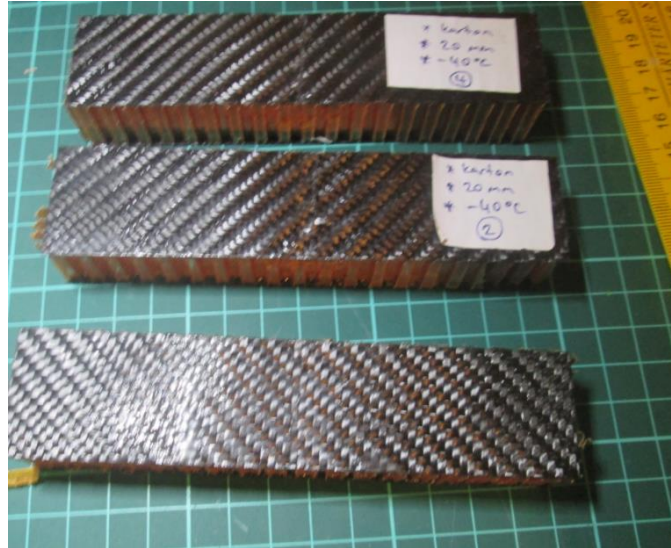
Şekil 4.21. -40°C’de 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünümleri

-40°C’de 20 mm Nomex çekirdekli numunelerden elde edilen sonuçlar şekil 4.22.’deki gibidir.

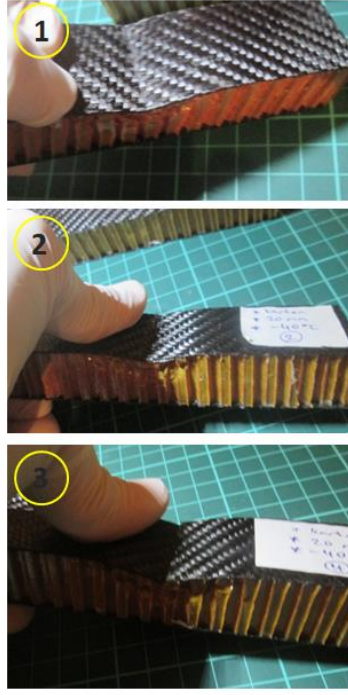


Şekil 4.22. -40°C’de 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

1 numaralı numunenin dayanımı nispeten düşük çıksa da sonuçların uyumlu olduğu söylenebilir. 2 numaralı numune, sonuçları temsilen seçilmiştir. Numunelerin test sonrası fotoğrafları ise şekil 4.23. ve şekil 4.24.’te paylaşılmıştır.



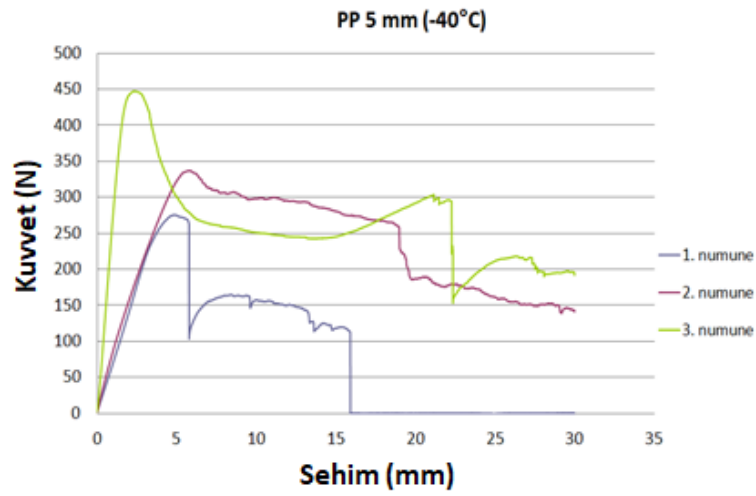
Şekil 4.23. -40°C’de 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünüşleri



Şekil 4.24. -40°C’de 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünümleri

4.2.2. PP Çekirdekli Sandviç Malzeme Sonuçları

-40°C’de 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli 3 adet numune üç nokta eğme testine tabii tutulmuştur. 3 numaralı numune diğer iki numuneye göre olağan dışı davranış göstermiştir(Şekil 4.25).

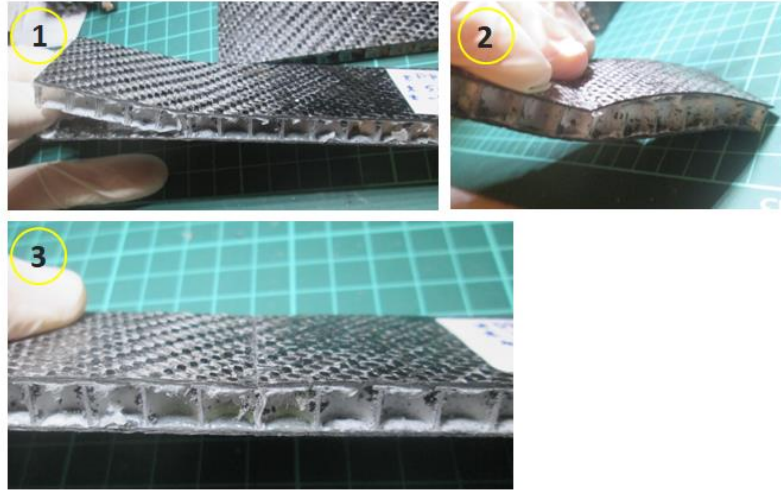


Şekil 4.25. -40°C’de 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

Bu fark, temel olarak üretim aşamasında malzeme yapışmasından kaynaklanmaktadır. Beklenen şekilde kırılma ve deformasyon davranışı gösterdiğinden 2 numaralı numune çalışmanın devamı için seçilmiştir. Numunelerin test sonrası fotoğrafları ise şekil 4.26. ve şekil 4.27.'de paylaşılmıştır.

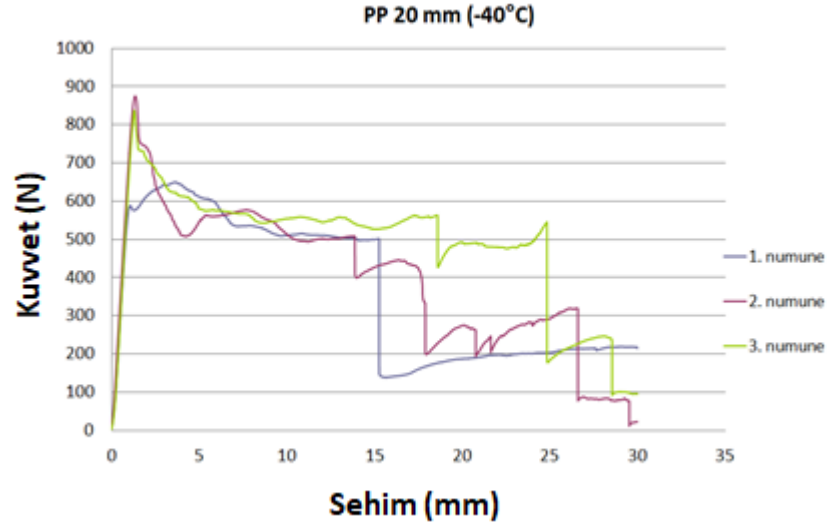


Şekil 4.26. -40°C'de 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünümleri



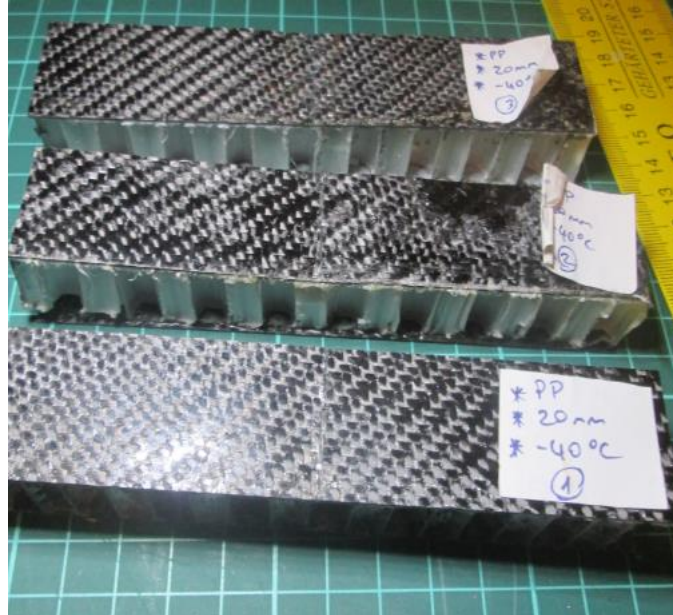
Şekil 4.27. -40°C'de 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünümleri

-40°C’de 20 mm kalınlıkta 3 adet PP çekirdekli numune ile üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiştir. 2 numaralı numune diğer numuneleri temsilen seçilmiştir(Şekil 4.28).

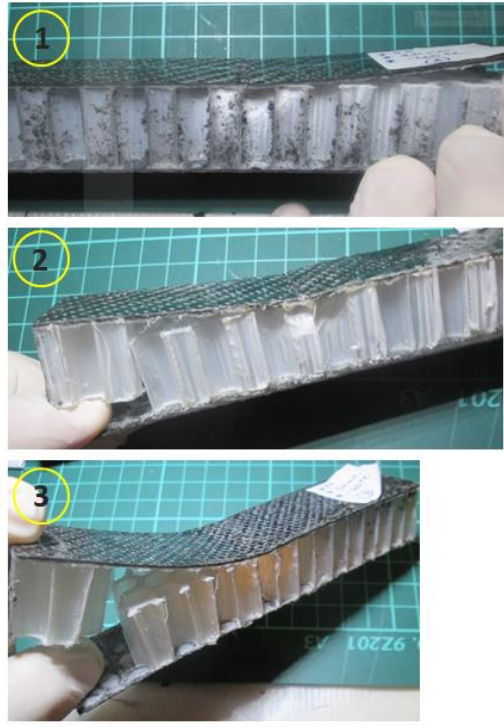


Şekil 4.28. -40°C’de 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

Numunelerin test sonrası fotoğrafları şekil 4.29. ve şekil 4.30.’da paylaşılmıştır.



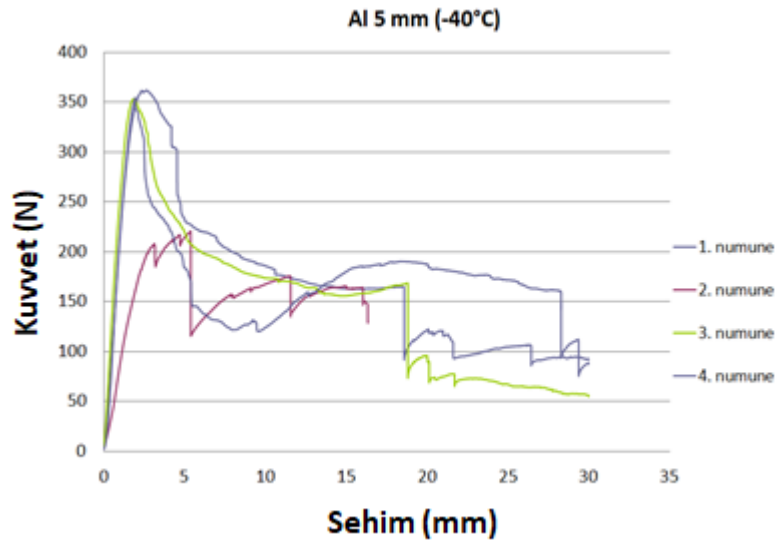
Şekil 4.29. -40°C’de 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünümleri



Şekil 4.30. -40°C’de 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri

4.2.3. Al Çekirdekli Sandviç Malzeme Sonuçları

40°C’de 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli 4 numune test edilmiştir(Şekil 4.31).

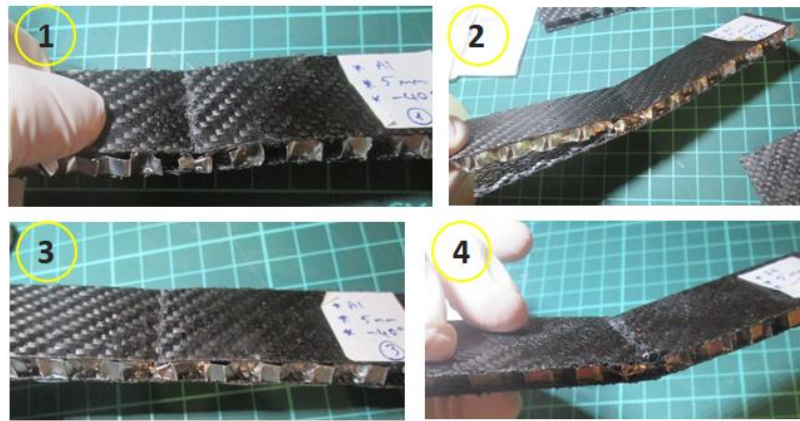


Şekil 4.31. -40°C’de 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

Sadece 2 numaralı numunenin diğerlerinden farklı ve çok daha zayıf bir davranış sergilediğini söyleyebiliriz. Şekil 4.32 ve şekil 4.33'ten de anlaşılacağı gibi bu direnç kaybının ana sebebi yüzey-çekirdek yapışma problemi yaşanması ve test esnasında iki bileşenin ayrılmasıdır. 3 numaralı numune ise test sonuçlarını temsilen seçilmiştir.

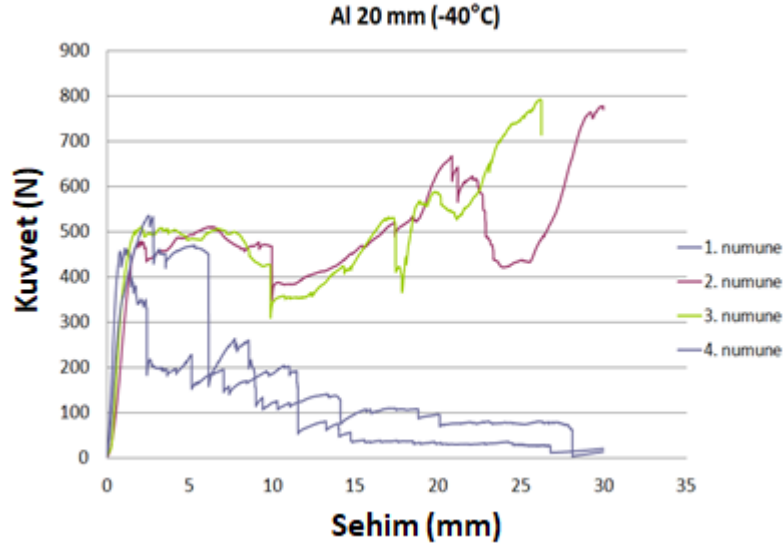


Şekil 4.32. -40°C'de 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünümleri



Şekil 4.33. -40°C'de 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünümleri

20 mm Al çekirdek ile -40°C 'de dört adet numune ile deneyler gerçekleştirilmiştir. 1-4 numaralı numunelerin 2-3 numaralı numunelere göre plastik bölgede farklı bir davranış gösterdiğini grafikten söylemek mümkündür(Şekil 4.34).

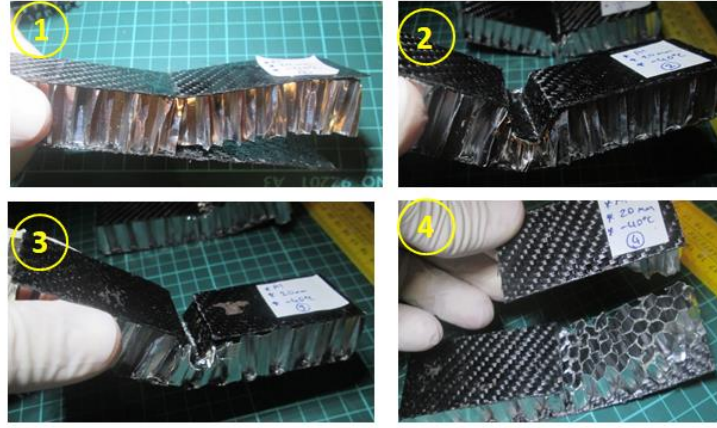


Şekil 4.34. -40°C 'de 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

Ancak 1 ve 4 numaralı numuneler incelenirse yüzey ve çekirdeğin ayrıldığını görebiliriz(Şekil 4.35) . Hatta 4. numunenin yüzeyi tamamen çekirdekten ayrılıp kopmuştur(Şekil 4.36). Bunun yanı sıra 2 ve 3 numaralı numuneler ise beklenen deformasyon davranışını göstermiş olmakla beraber sonuçları da uyumludur. 3 numaralı numune eğrisi bu şartlarda yapılan deneyi temsil etmek üzere seçilmiştir.



Şekil 4.35. -40°C 'de 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası görünümleri



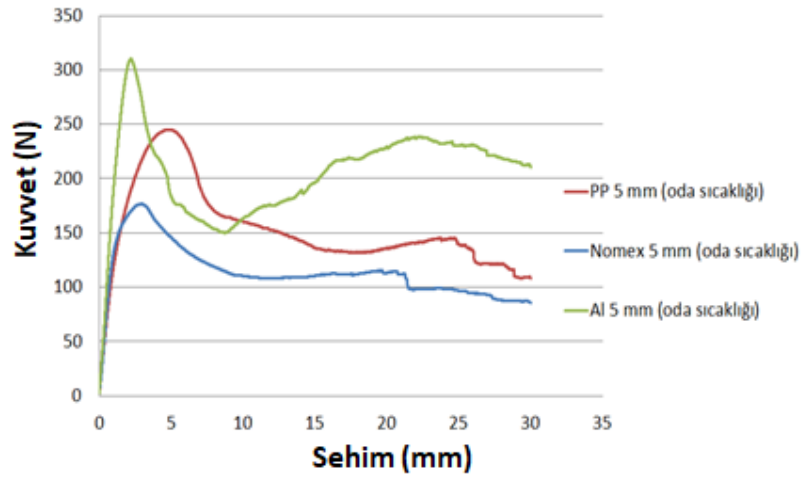
Şekil 4.36. -40°C’de 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli sandviç numunelerinin üç nokta eğilme testi sonrası numune numarasına göre görünüşleri

4.3. Deney Sonuçlarının Karşılaştırması

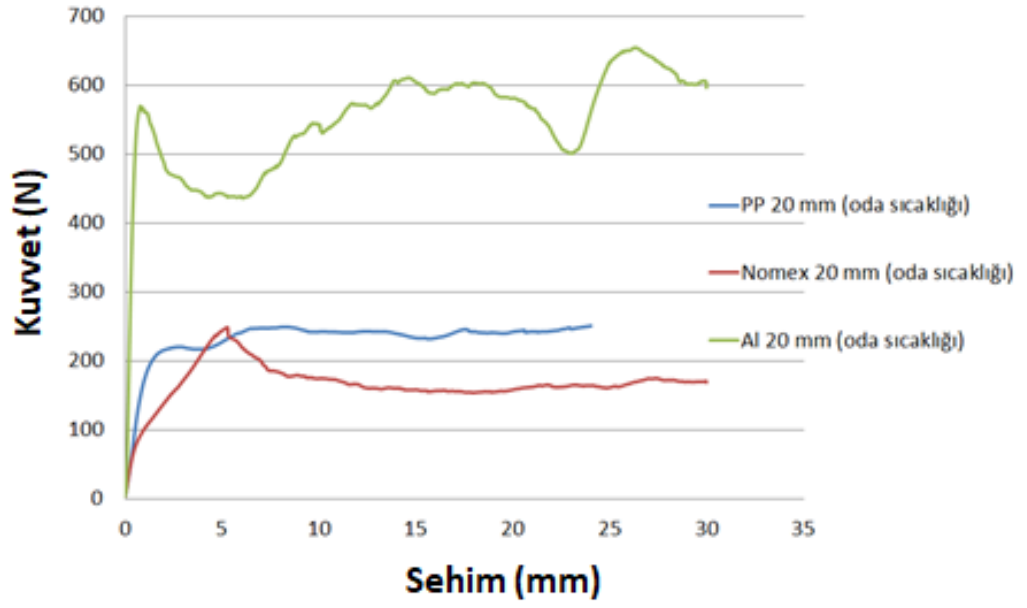
Yapılan tüm deneylerde temel olarak 3 farklı parametrenin yaratacağı fark araştırılmıştır. Bu parametreler çekirdek cinsi, çekirdek kalınlığı ve ortam sıcaklığı’dır. Karşılaştırmalı grafikler diğer parametreleri sabit tutarak aşağıda verilmiştir.

4.3.1. Çekirdek Malzeme Cinsine Göre Karşılaştırma

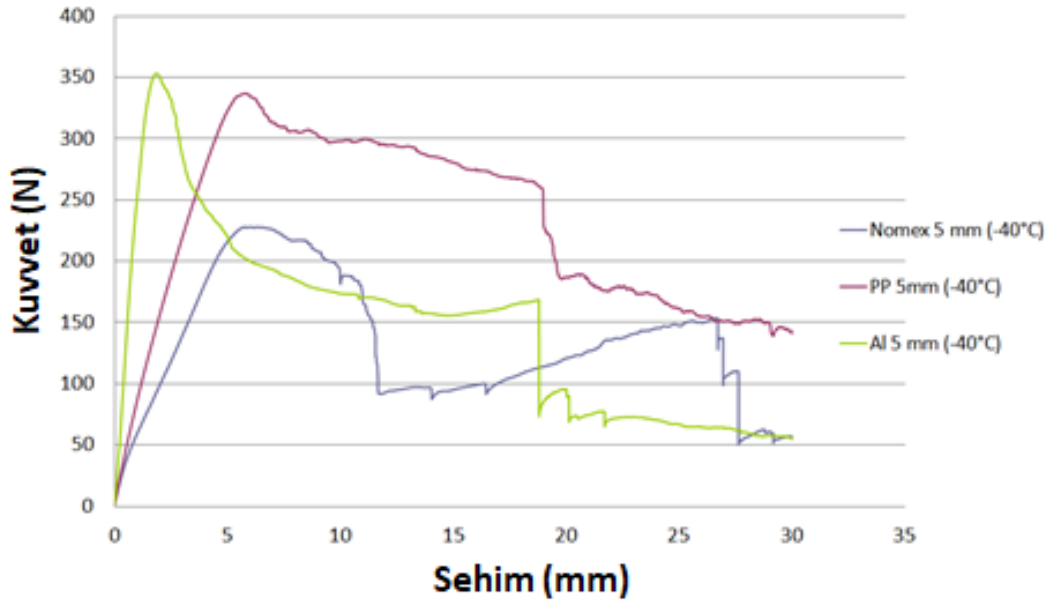
Her parametreye ait sonuçları temsil eden numunelerin grafikleri, sıcaklık ve çekirdek kalınlığı parametreleri sabit tutularak çekirdek cinsine göre karşılaştırmalı olarak şekil 4.37, şekil 4.38, şekil 4.39. ve şekil 4.40’ta verilmiştir.



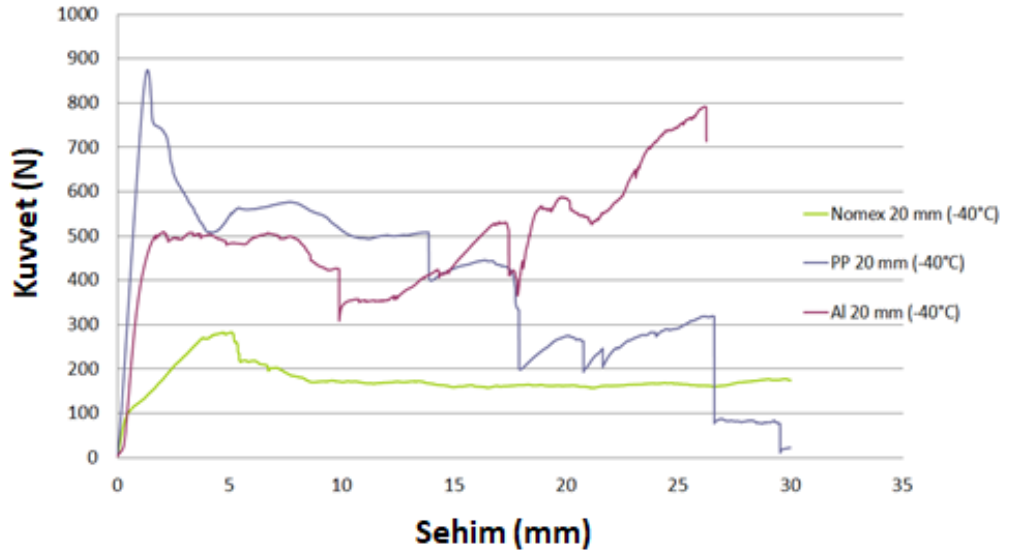
Şekil 4.37. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlığa sahip farklı cins çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 4.38. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlığa sahip farklı cins çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği



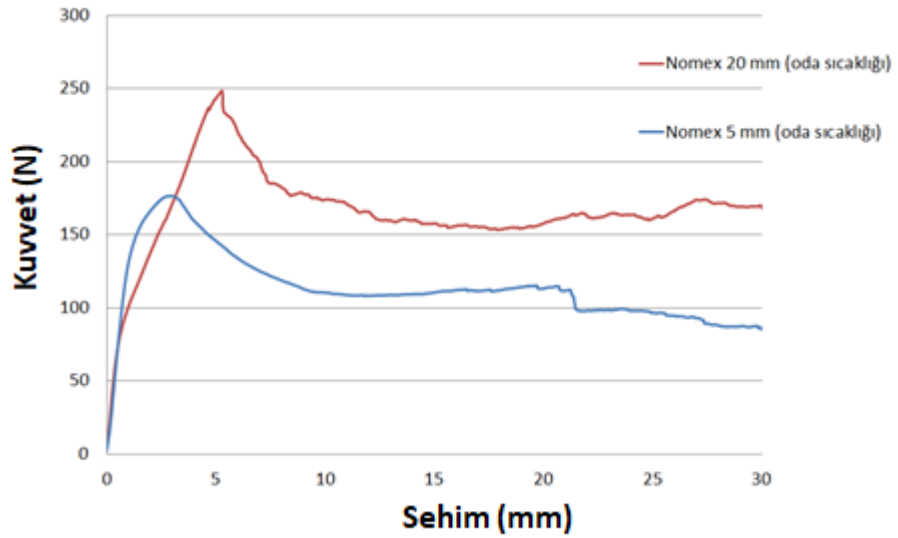
Şekil 4.39. -40°C’de 5 mm kalınlığa sahip farklı cins çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği



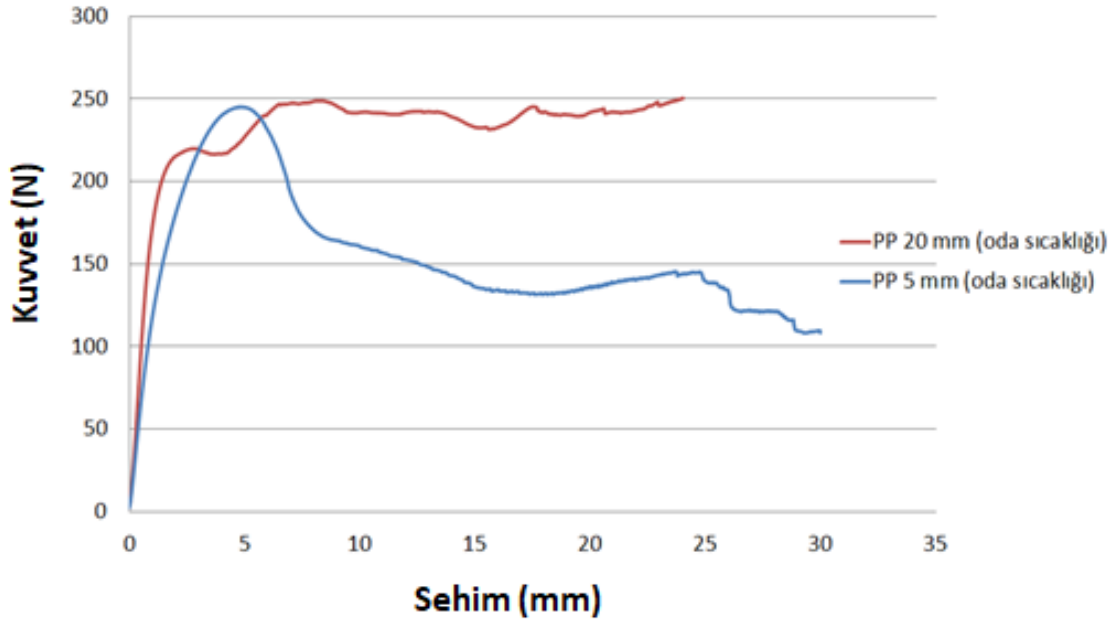
Şekil 4.40. -40°C'de 20 mm kalınlığa sahip farklı cins çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

4.3.2. Çekirdek Malzeme Kalınlığına Göre Karşılaştırm

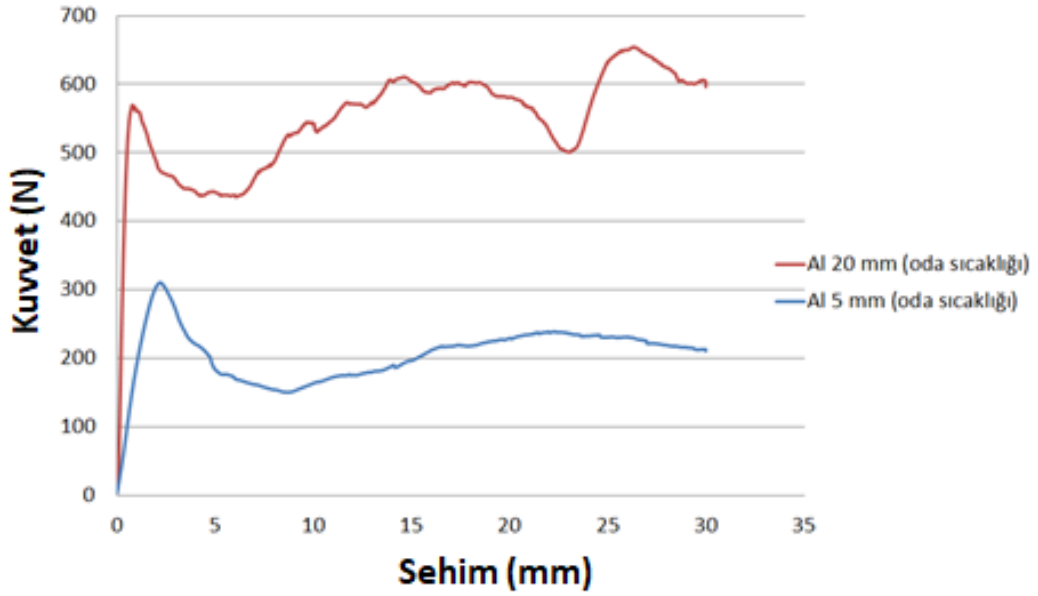
Her parametreye ait sonuçları temsil eden numunelerin grafikleri, sıcaklık ve çekirdek cinsi parametreleri sabit tutularak çekirdek kalınlığına göre karşılaştırmalı olarak şekil 4.41, şekil 4.42, şekil 4.43. ve şekil 4.44, şekil 4.45 ve şekil 4.46'da verilmiştir.



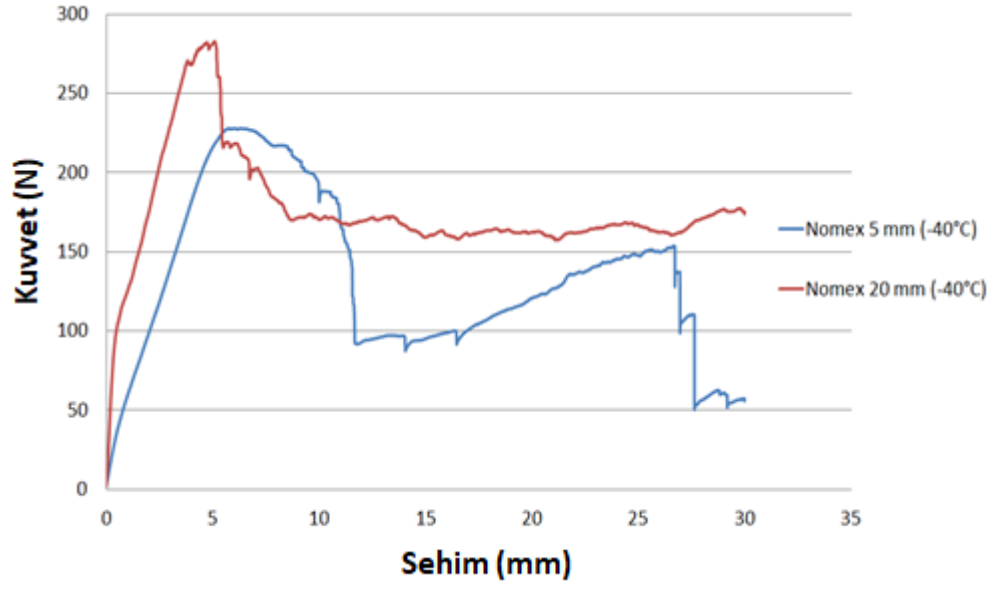
Şekil 4.41. Oda sıcaklığında farklı kalınlığa sahip Nomex çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği



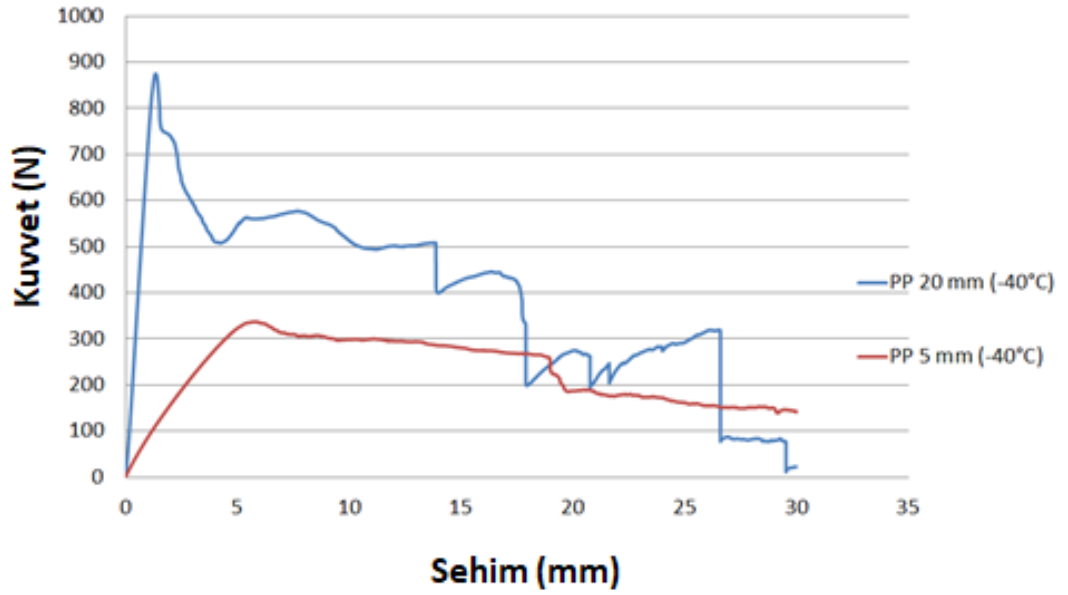
Şekil 4.42. Oda sıcaklığında farklı kalınlığa sahip PP çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği



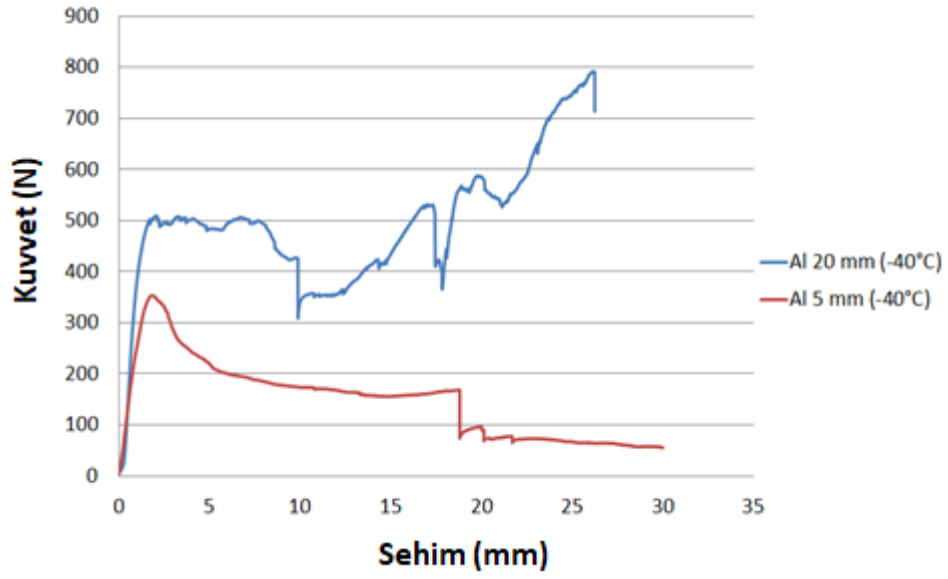
Şekil 4.43. Oda sıcaklığında farklı kalınlığa sahip Al çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 4.44. -40°C’de farklı kalınlığa sahip Nomex çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği



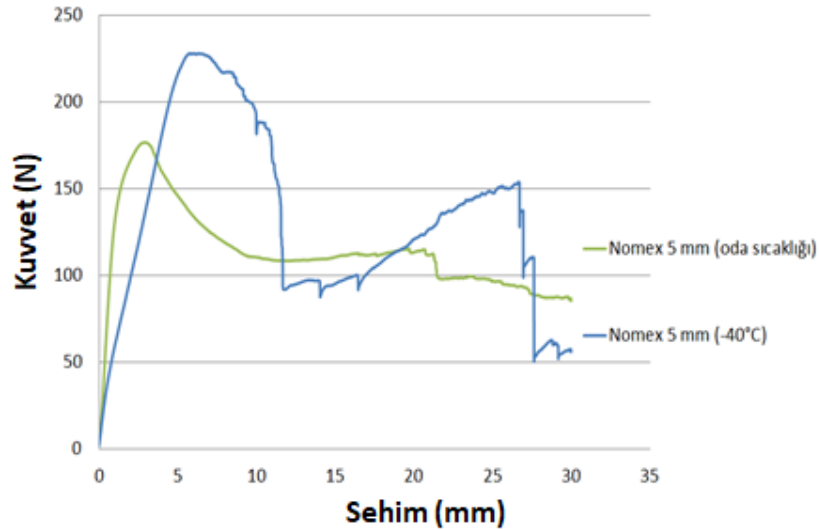
Şekil 4.45. -40°C’de farklı kalınlığa sahip PP çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği



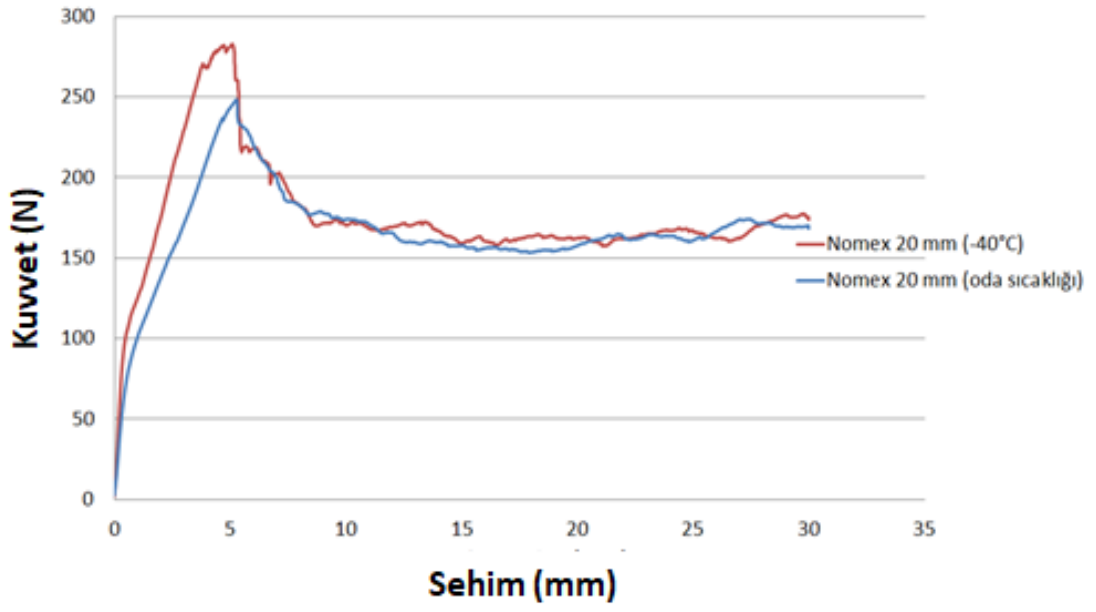
Şekil 4.46. -40°C'de farklı kalınlığa sahip Al çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

4.3.3. Sıcaklık Farkına Göre Karşılaştırma

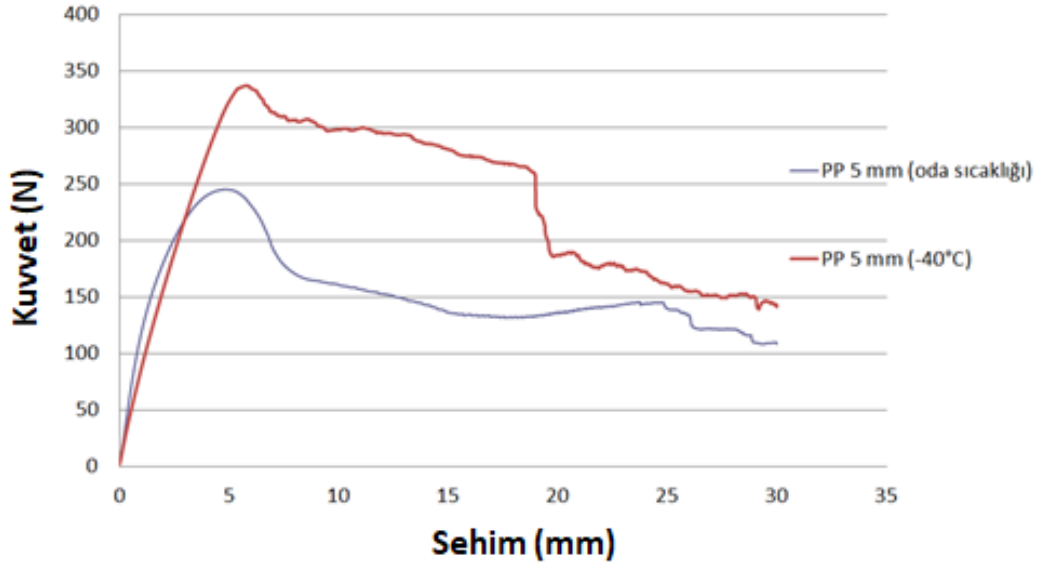
Her parametreye ait sonuçları temsil eden numunelerin grafikleri, çekirdek cinsi ve çekirdek kalınlığı parametreleri sabit tutularak test sıcaklığına göre karşılaştırmalı olarak şekil 4.47, şekil 4.48, şekil 4.49, şekil 4.50, şekil 4.51. ve şekil 4.52.'de verilmiştir.



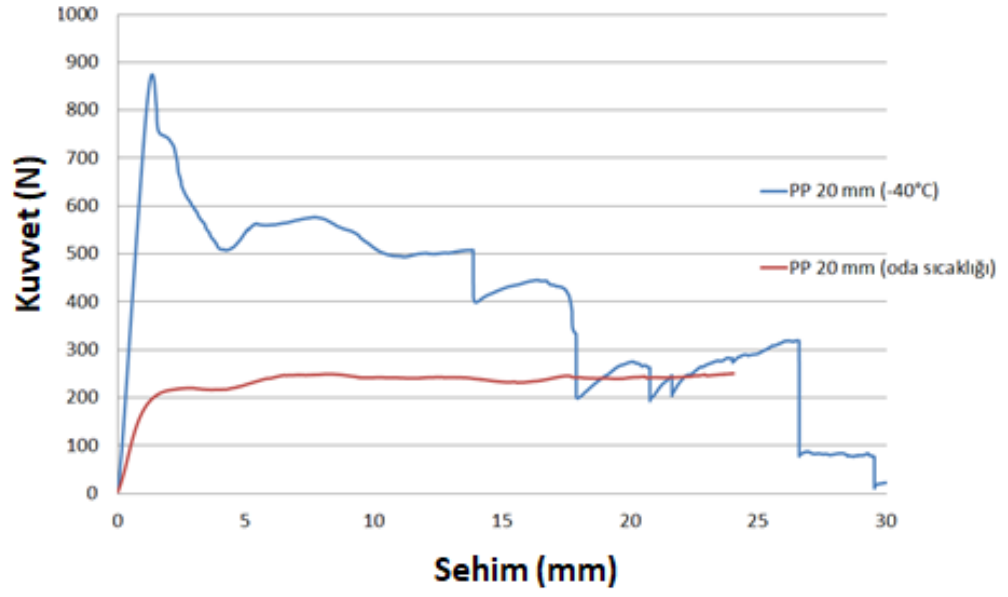
Şekil 4.47. Farklı sıcaklıklarda 5 mm kalınlığa sahip Nomex çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği



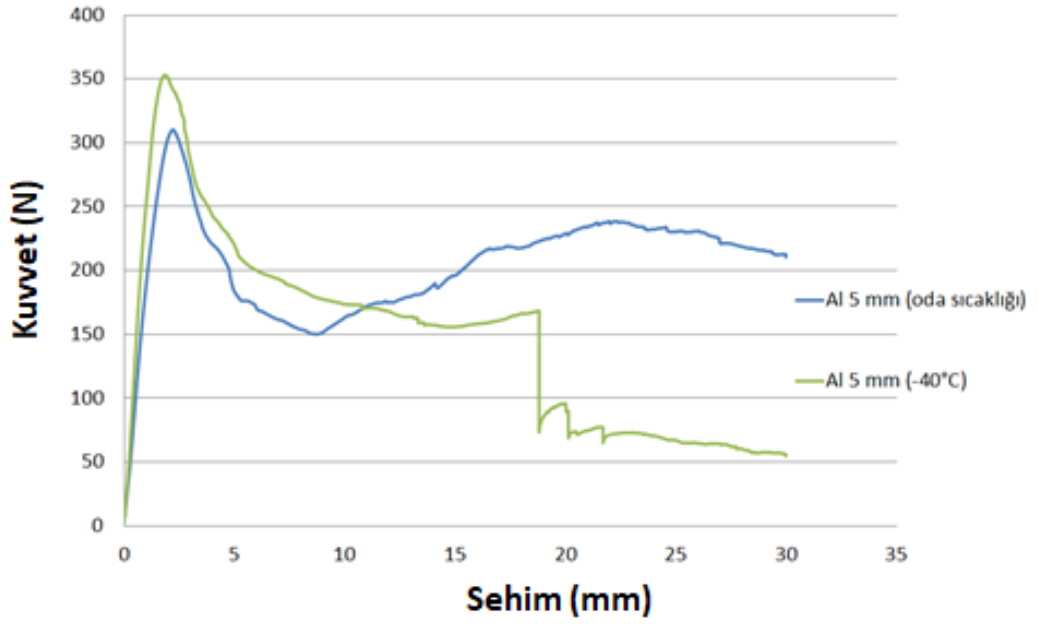
Şekil 4.48. Farklı sıcaklıklarda 20 mm kalınlığa sahip Nomex çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği



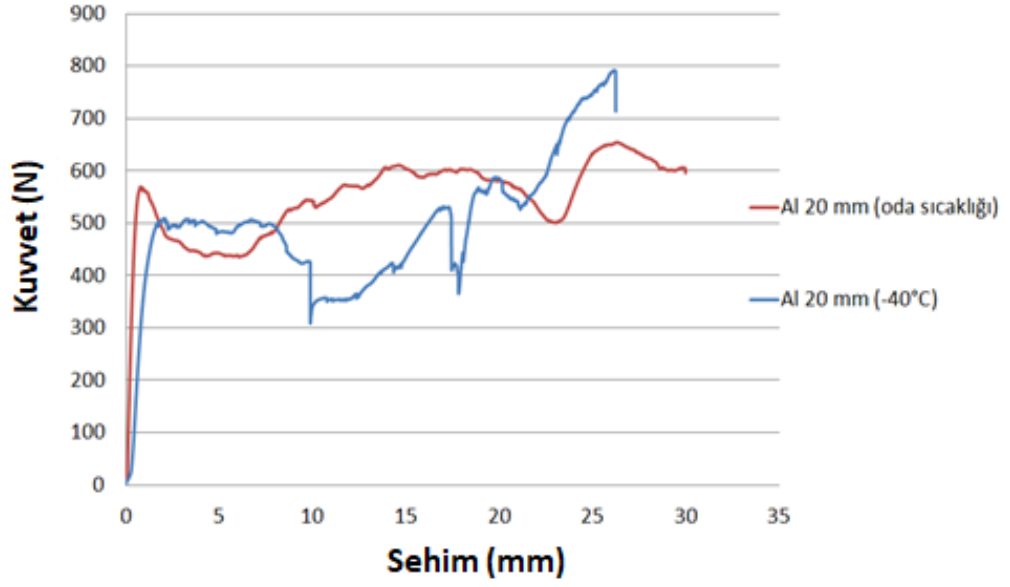
Şekil 4.49. Farklı sıcaklıklarda 5 mm kalınlığa sahip PP çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 4.50. Farklı sıcaklıklarda 20 mm kalınlığa sahip PP çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği



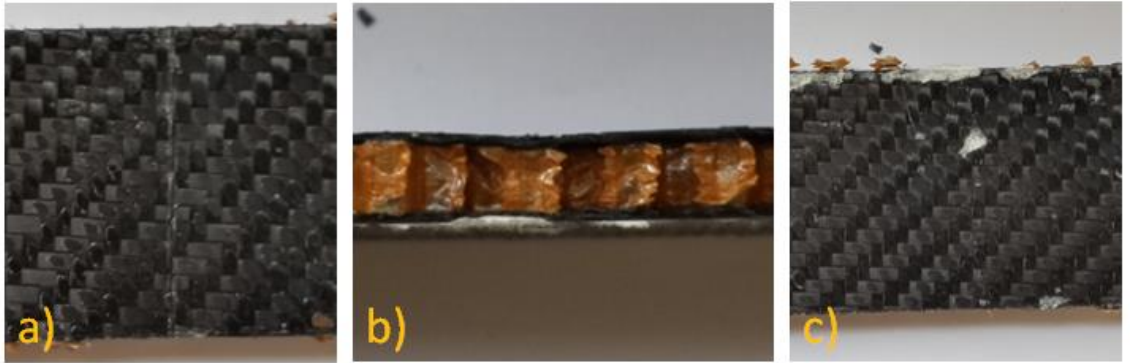
Şekil 4.51. Farklı sıcaklıklarda 5 mm kalınlığa sahip Al çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği



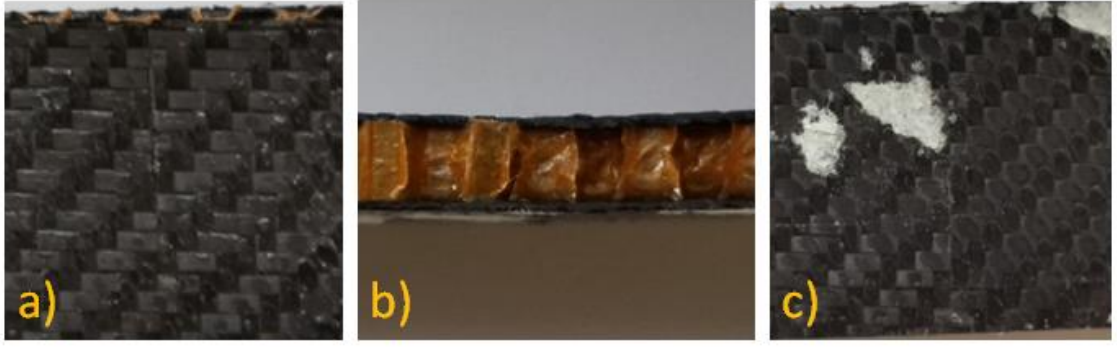
Şekil 4.52. Farklı sıcaklıklarda 20 mm kalınlığa sahip Al çekirdekli sandviç numunelerin üç nokta eğilme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği

4.4. Deney Sonunda Numunelerin Detay Görüntüleri

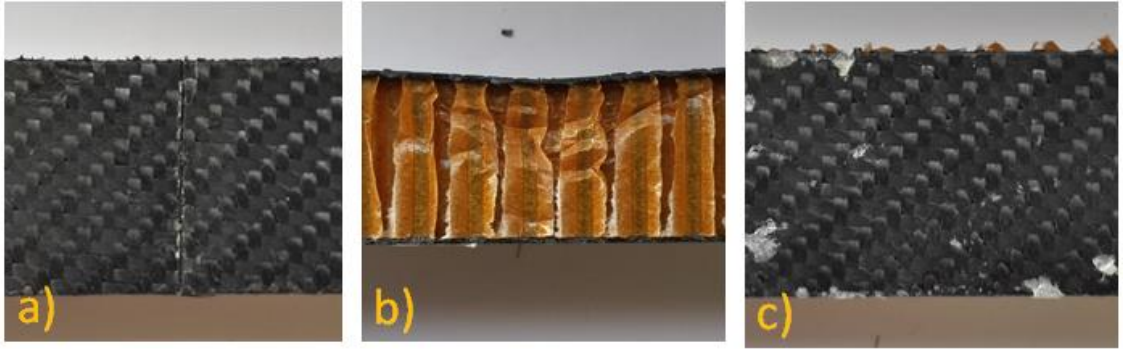
Deney sonrası numunelerin hasar bölgelerinin ve 3 önemli yüzeyinin (basma, yan ve gerilim) görüntüleri bu bölüm içerisinde şekiller ile paylaşılmıştır. Nomex çekirdekli numuneler ile yapılan deneyler sonrası numune görüntüleri şekil 4.53, şekil 4.54, şekil 4.55. ve şekil 4.56'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.53. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi



Şekil 4.54. -40°C’de 5 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi

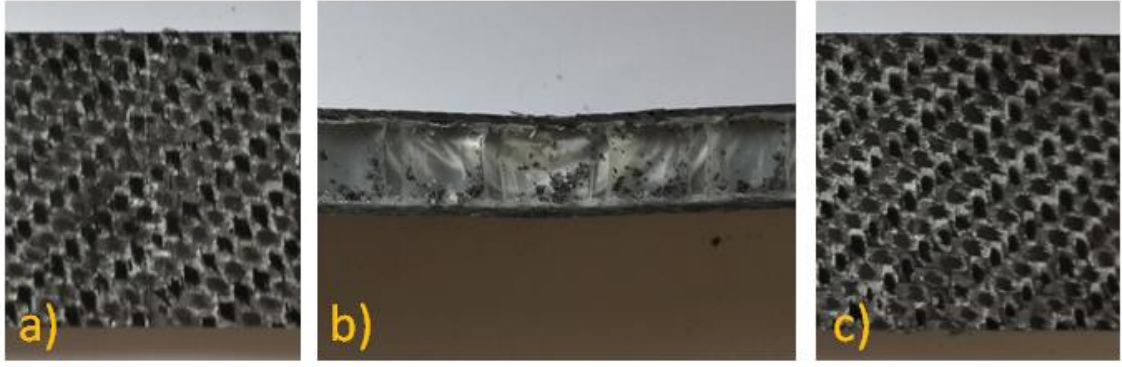


Şekil 4.55. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi

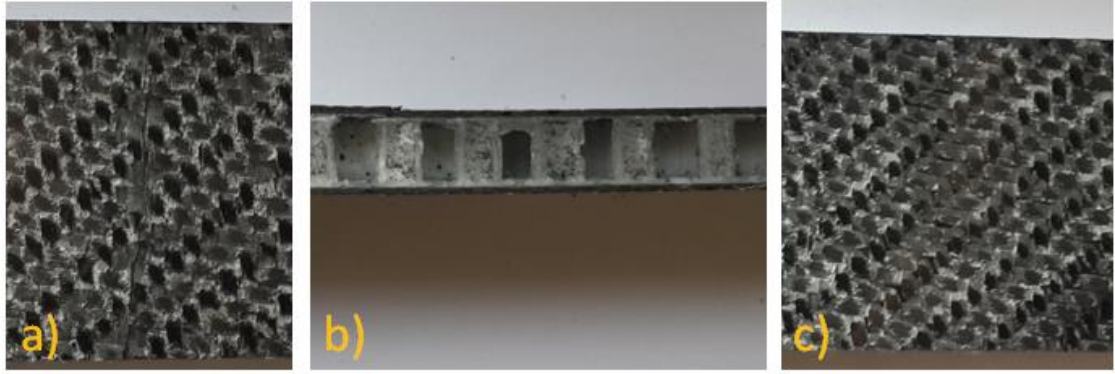


Şekil 4.56. -40°C’de 20 mm kalınlıkta Nomex çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi

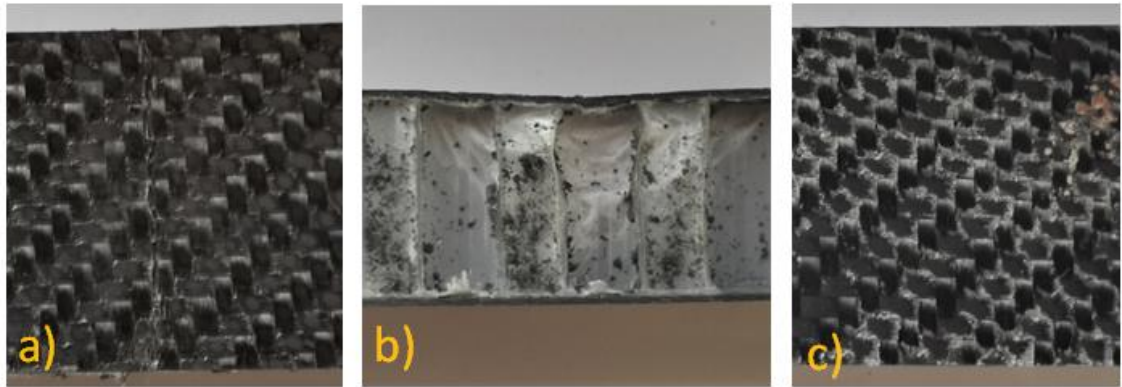
PP çekirdekli numuneler ile yapılan deneyler sonrası numune görüntüleri şekil 4.57, şekil 4.58, şekil 4.59. ve şekil 4.60’da paylaşılmıştır.



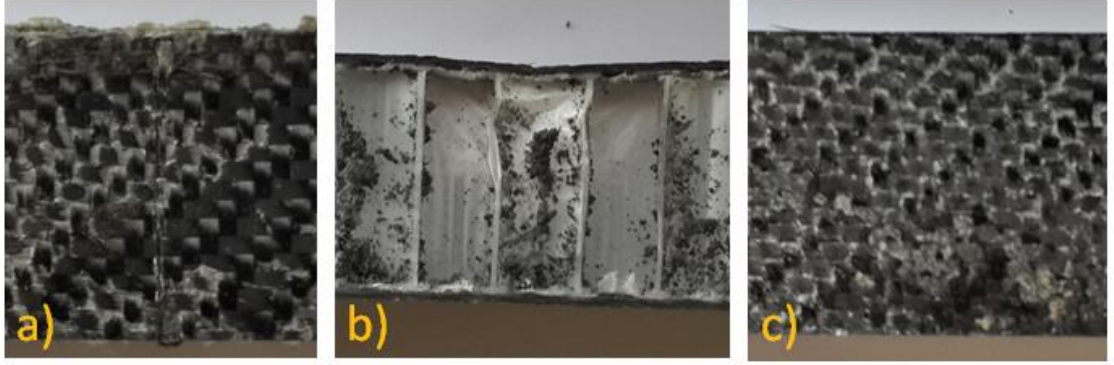
Şekil 4.57. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi



Şekil 4.58. -40°C'de 5 mm kalınlıkta PP çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi



Şekil 4.59. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi

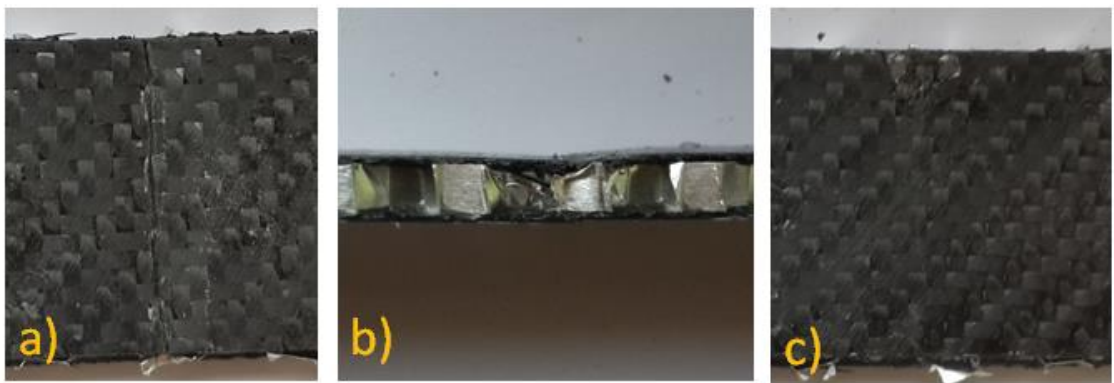


Şekil 4.60. -40°C’de 20 mm kalınlıkta PP çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi

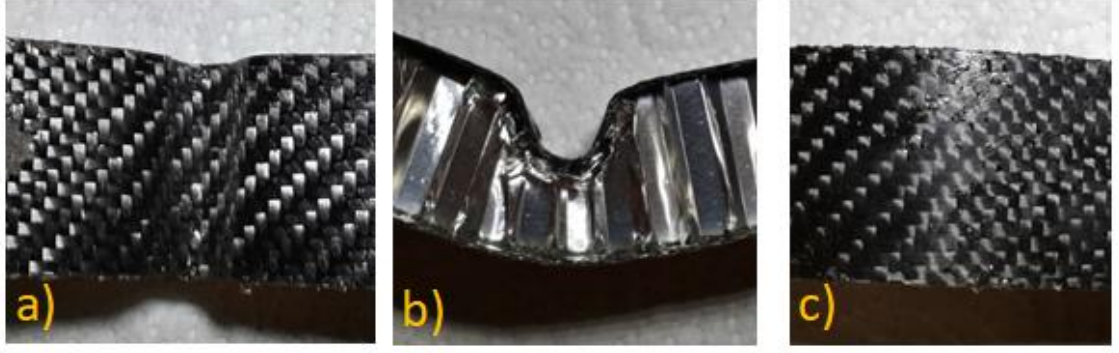
Al çekirdekli numuneler ile yapılan deneyler sonrası numune görüntüleri şekil 4.61, şekil 4.62, şekil 4.63. ve şekil 4.64’te paylaşılmıştır.



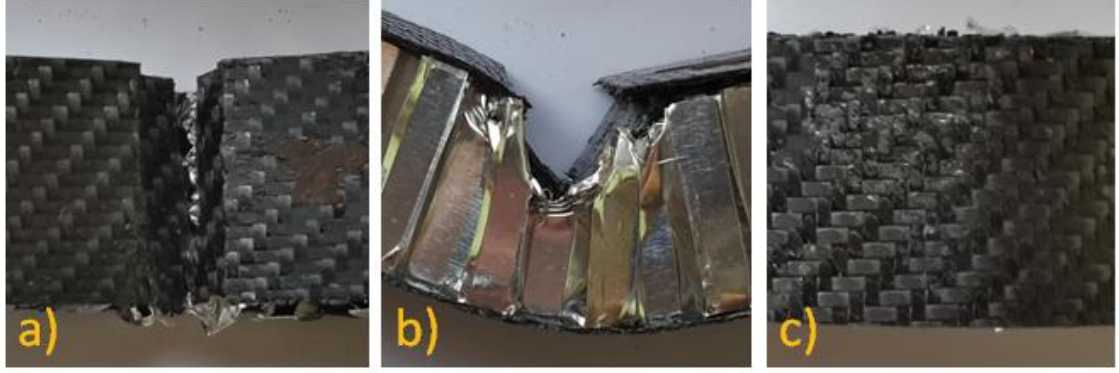
Şekil 4.61. Oda sıcaklığında 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi



Şekil 4.62. -40°C’de 5 mm kalınlıkta Al çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi



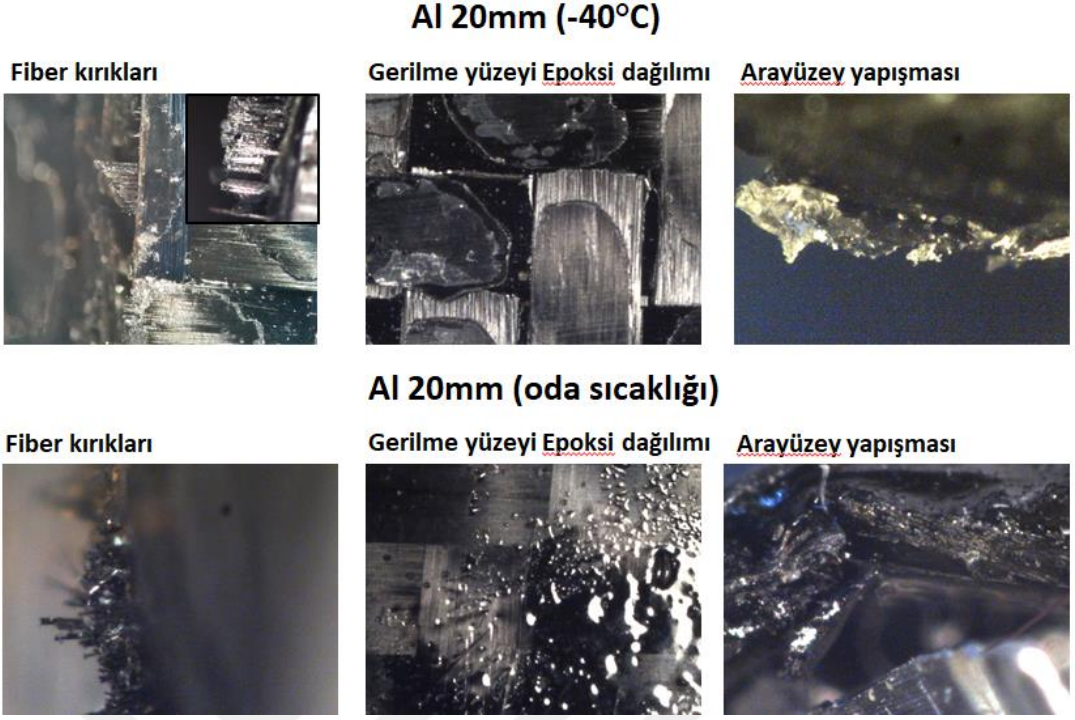
Şekil 4.63. Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi



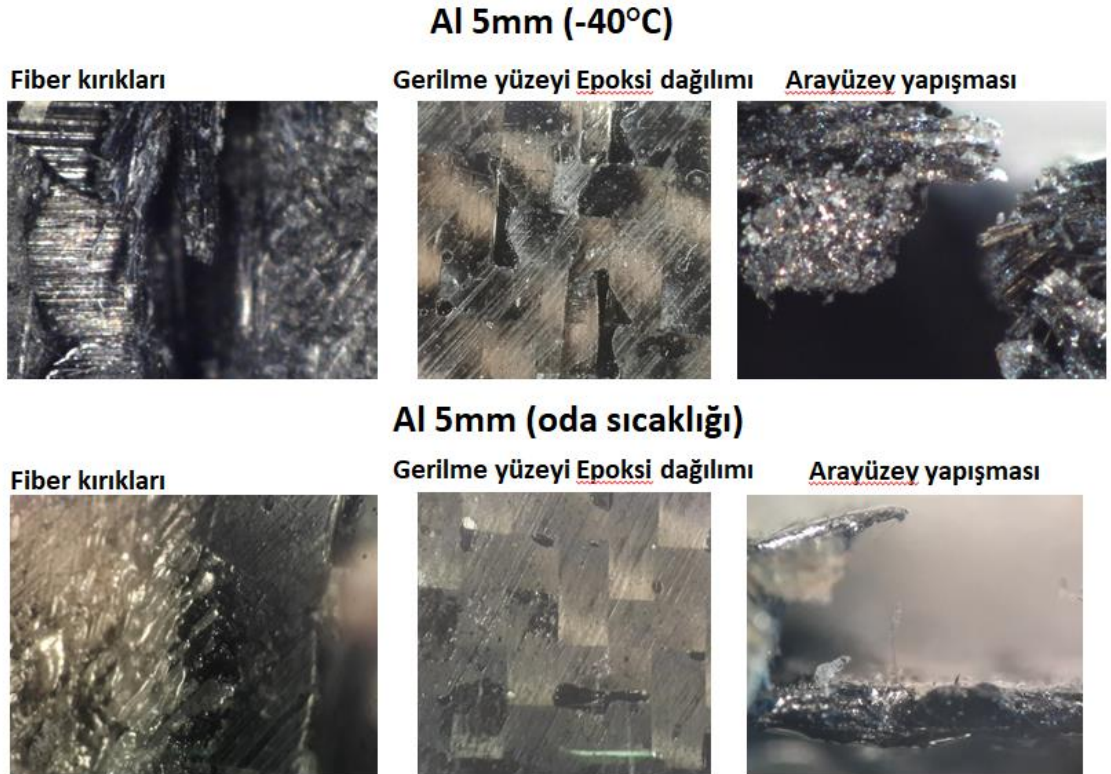
Şekil 4.64. -40°C’de 20 mm kalınlıkta Al çekirdekli numunenin yük uygulama bölgesi görüntüleri; a) basma yüzeyi b) yan yüzey c) gerilim yüzeyi

4.5. Deney Sonunda Numunelerin Optik Mikroskop Altında İncelenmesi

Deneyle sonrası numunelerin detaylı yüzey ve çatlak bölgeleri görüntüleri OM-1 ve OM-2 ile elde edilip paylaşılmıştır. Çekirdek malzeme - karbon fiber arayüzünün yapışması bu mikroskoplardan elde edilen görüntülerle incelenmiştir. Daha sonra, fiber ve epoksi arayüzünün özellikle farklı sıcaklıklardaki değişimi, ve fiberlerin kırılma bölgeleri detay görüntüleri de OM-3 ile elde edilmiştir. Sıcaklık etkisi, çekirdek malzeme cinsi ve kalınlığıyla değişen gerilmelerin etkisi ve malzemelerin kırılma davranışı mikro yapıda da incelenmiş ve tartışılmıştır.



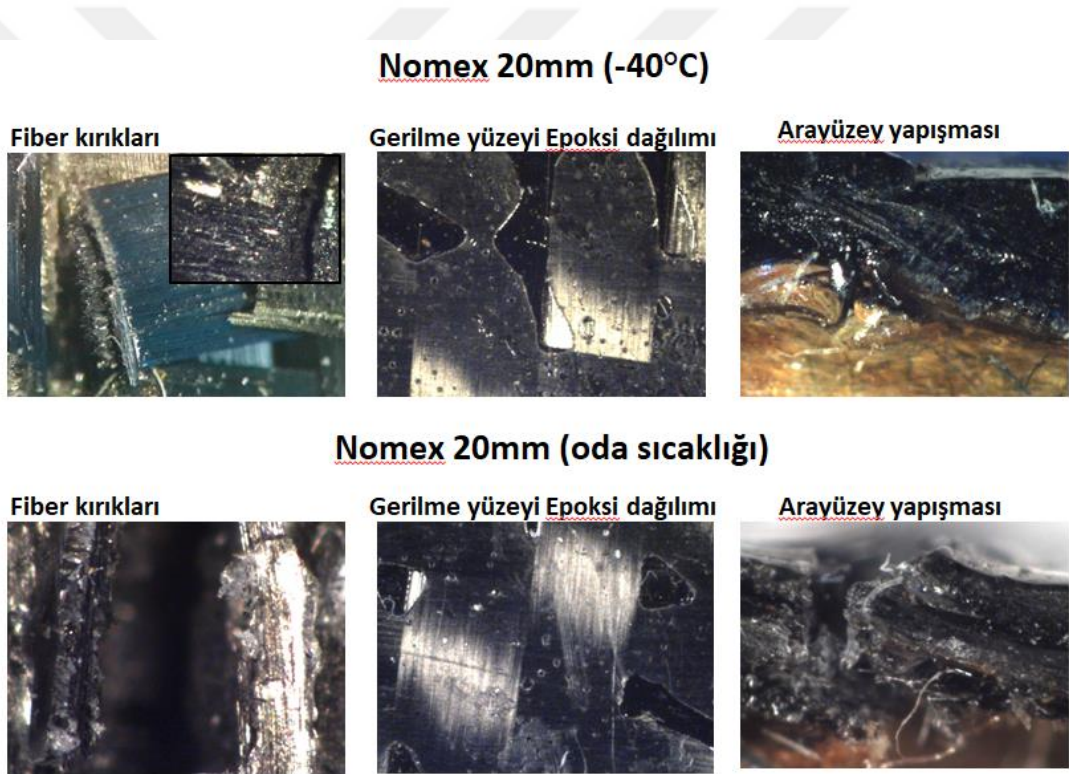
Şekil 4.65. Al 20 mm çekirdek kalınlığına sahip numunelerin OM-1 ve OM-2'den elde edilen görüntüleri



Şekil 4.66. Al 5 mm çekirdek kalınlığına sahip numunelerin OM-1 ve OM-2'den elde edilen görüntüleri

Çekirdek tipi, yüksekliği ve test sıcaklığı parametrelerinden hasar boyutunun ve davranışının da etkilendiğini söylemek mümkündür.

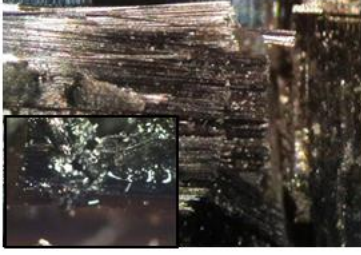
Gözle ve OM-1, OM-2 ile yapılan kırılma davranışı üzerindeki incelemeler sonucuna göre; Al çekirdekli sandviçlerde deformasyon miktarının her şartta diğer numunelere göre çok daha fazla olduğu söylenebilir. Hasar davranışı tipi, sıcaklık farkından ve numune kalınlığından görsel olarak bile oldukça fazla etkilenmiştir. Yüzey-çekirdek ayrılması, ara yüzey bağının kopup karbon fiberin tamamen kırılıp kopması, yük bölgesinde büyük miktarda çökme, ezilme ve kırılma gibi kırılma davranışları tespit edilmiştir(Şekil 4.65 ve şekil 4.66). Çekirdek kalınlığı artışıyla deformasyon miktarı çok daha fazla artmıştır.



Şekil 4.67. Nomex 20 mm çekirdek kalınlığına sahip numunelerin OM-1 ve OM-2'den elde edilen görüntüleri

Nomex 5mm (-40°C)

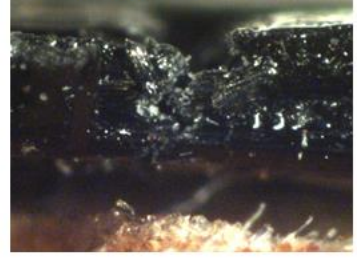
Fiber kırıkları



Gerilme yüzeyi Epoksi dağılımı

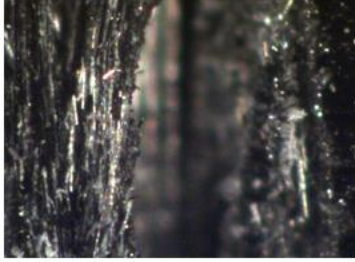


Arayüzey yapışması



Nomex 5mm (oda sıcaklığı)

Fiber kırıkları



Gerilme yüzeyi Epoksi dağılımı



Arayüzey yapışması

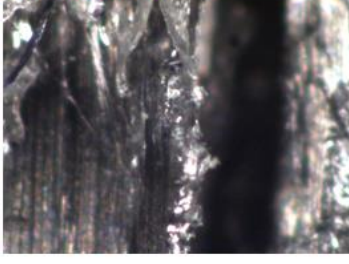


Şekil 4.68. Nomex 5 mm çekirdek kalınlığına sahip numunelerin OM-1 ve OM-2'den elde edilen görüntüleri

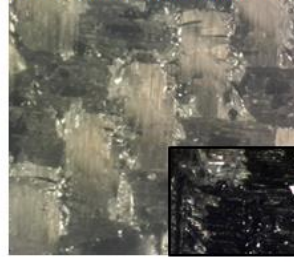
Nomex çekirdekli sandviçlerde kırılma davranışının test sıcaklığından ve numune kalınlığından çok fazla etkilenmediği söylenebilir. Kalınlık artışıyla sadece kalıcı deformasyon miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Bunun dışında yük uygulanan yüzeyde büyük miktarda ezilme ve kırılmalar mevcuttur. Şekil 4.67. ve şekil 4.68.'den -40°C'de epoksinin yüzey üzerinde bölge bölge toplandığı ve matris üzerinde boşluklar yarattığı söylenebilir.

PP 20mm (-40°C)

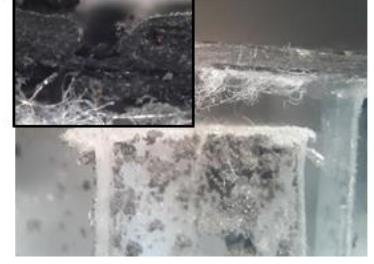
Fiber kırıkları



Gerilme yüzeyi Epoksi dağılımı



Arayüzey yapışması

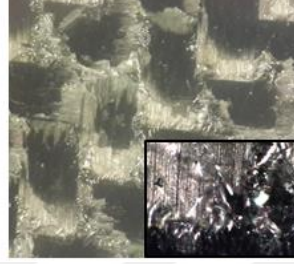


PP 20mm (oda sıcaklığı)

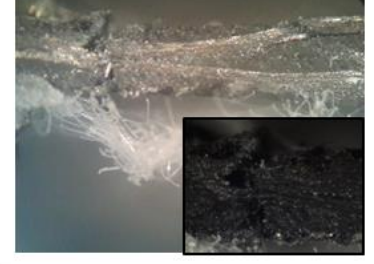
Fiber kırıkları



Gerilme yüzeyi Epoksi dağılımı



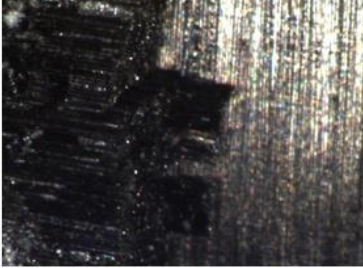
Arayüzey yapışması



Şekil 4.69. PP 20 mm çekirdek kalınlığına sahip numunelerin OM-1 ve OM-2'den elde edilen görüntüleri

PP 5mm (-40°C)

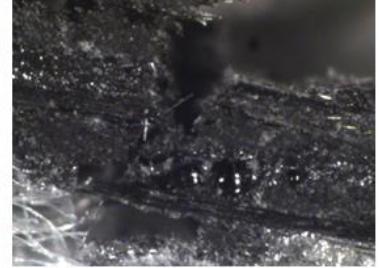
Fiber kırıkları



Gerilme yüzeyi Epoksi dağılımı

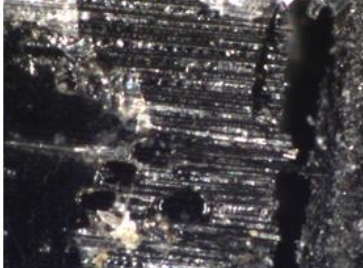


Arayüzey yapışması



PP 5mm (oda sıcaklığı)

Fiber kırıkları



Gerilme yüzeyi Epoksi dağılımı



Arayüzey yapışması

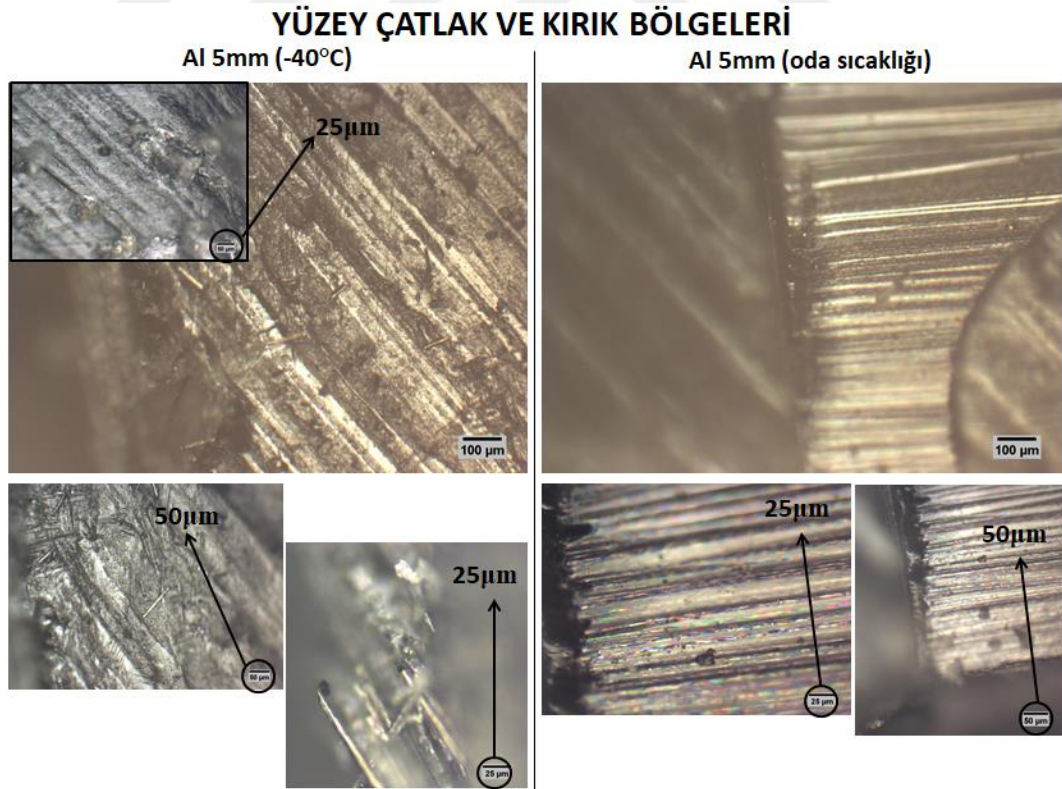


Şekil 4.70. PP 5 mm çekirdek kalınlığına sahip numunelerin OM-1 ve OM-2'den elde edilen görüntüleri

PP çekirdekli sandviçler için; özellikle sıcaklık düşüşüyle hasar davranışının çok değiştiği açıkça görülmektedir. Oda sıcaklığında yük uygulanan yüzeyde kırık ve ezilme şeklinde gerçekleşen deformasyon düşük sıcaklıklarda ara yüzey kırılması ile yüzey-çekirdek ayrılması ve çekirdek kırılması şeklinde gerçekleşmiştir. Kalınlık artışıyla birlikte de deformasyonun arttığı söylenebilir. Şekil 4.69 ve şekil 4.70'den -40°C 'de kırılma bölgesi genişliğinin oda sıcaklığına göre iki çekirdek kalınlığı için de daha büyük olduğu görülebilir.

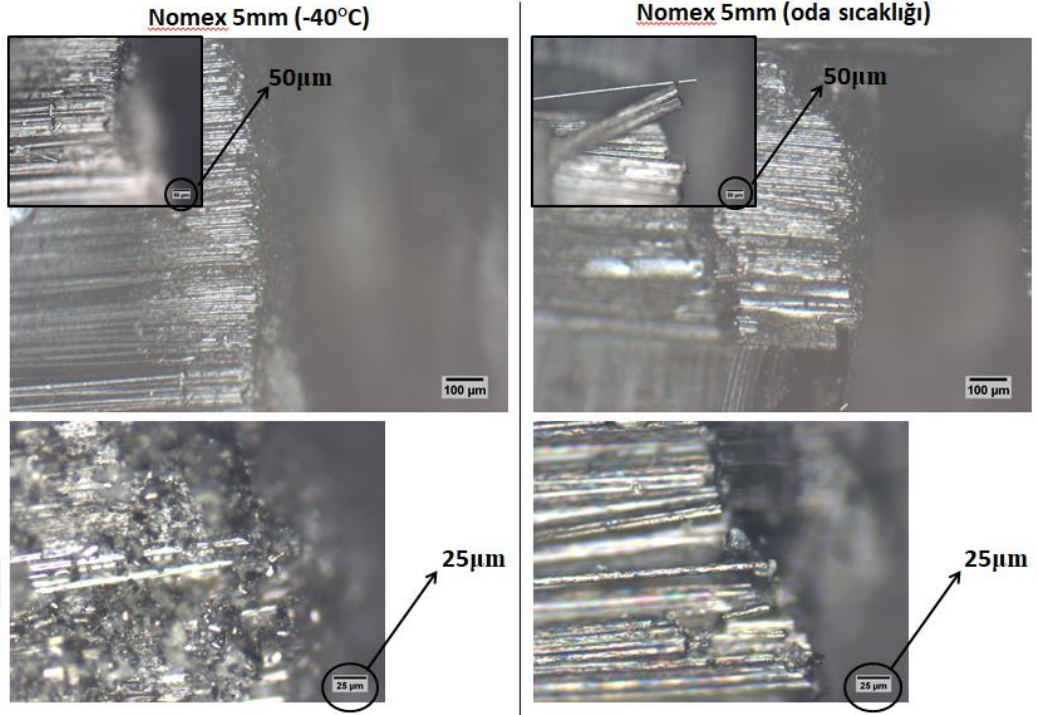
Arayüzey yapışması görüntülerinden de anlaşılacağı üzere, -40°C 'de kırılma üst yüzeyden alt tabakalara doğru ilerlemiş, ani, düzensiz ve geniş kırık bölgeleri oluşturmuştur. Oda sıcaklığında ise alt tabakaların nispeten sağlam kaldığı ve kırılmaların daha sünek gerçekleştiği görülmektedir.

PP çekirdekli sandviçlerin gerilme yüzeylerinde ise mağruz kaldığı yüksek gerilmeler sebebiyle matris-fiber arayüzünde mikro çatlaklar ve gerilmeler dolayısı ile matriste dislokasyonlar fiber birleşim bölgelerinde rahatlıkla görülebilir.



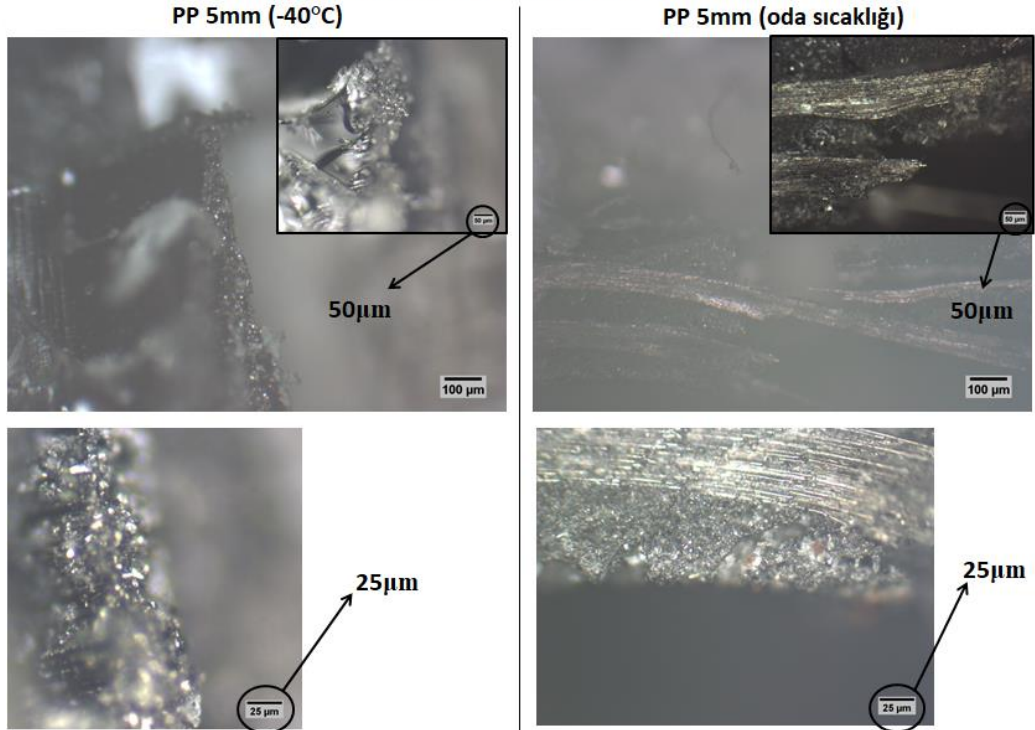
Şekil 4.71. Al 5 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3'den elde edilen görüntüleri

YÜZEY ÇATLAK VE KIRIK BÖLGELERİ



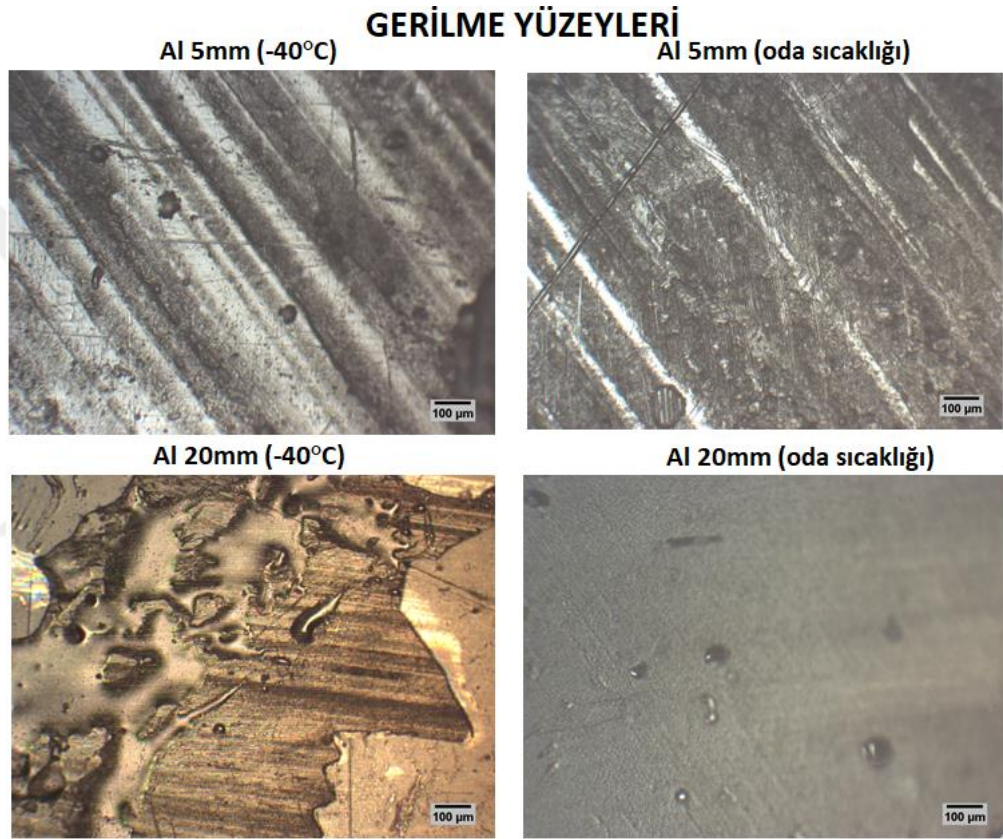
Şekil 4.72. Nomex 5 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3'den elde edilen görüntüleri

YÜZEY ÇATLAK VE KIRIK BÖLGELERİ



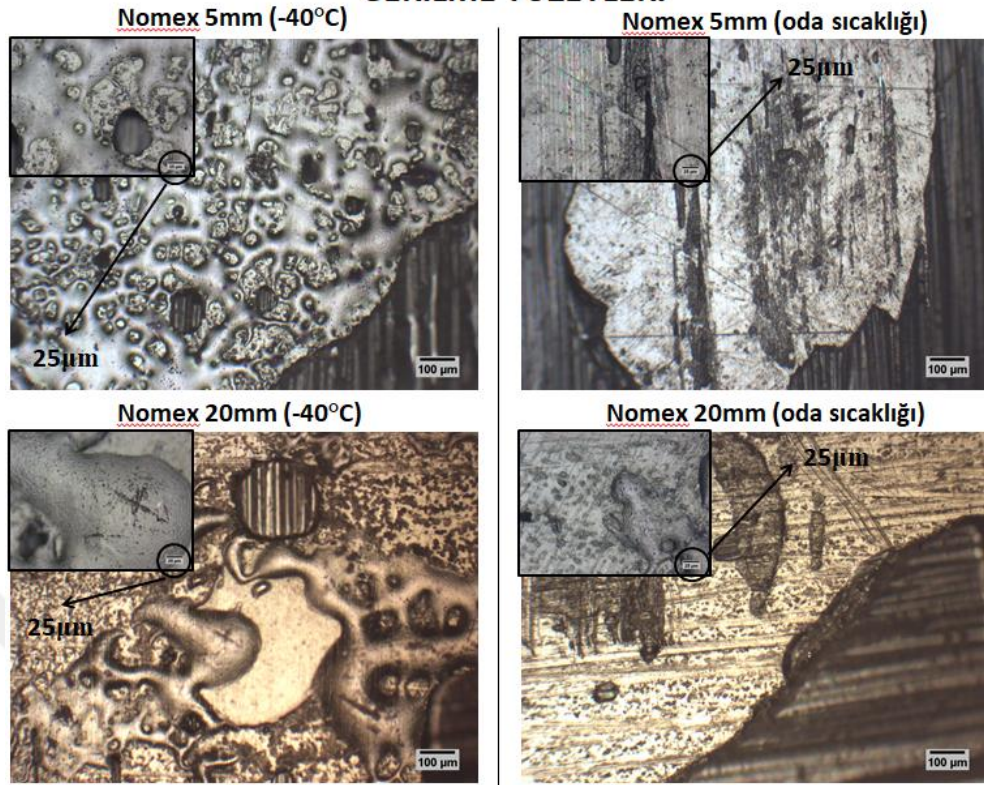
Şekil 4.73. PP 5 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3'den elde edilen görüntüleri

Şekil 4.71, şekil 4.72 ve şekil 4.73'te OM-3 ile elde edilen fiberlerin kırılma bölgeleri görüntüleri, sıcaklık farkı açısından incelenirse; oda sıcaklığında matrisin fiberler arasında daha düzenli dağıldığı, kırılmanın daha düzenli gerçekleştiği söylenebilir. Ancak -40°C 'de matris üzerinde termal streslerden, yüksek gerilme değerlerinden de kaynaklı olmak üzere mikro çatlaklar ve dislokasyonlar daha fazladır. Aynı zamanda matrisin kristalleşip katılaştığı, mukavemeti arttırıp fiberleri daha iyi koruduğu, ancak daha düzensiz ve ani bir kırılmaya sebep olduğu görülmektedir.



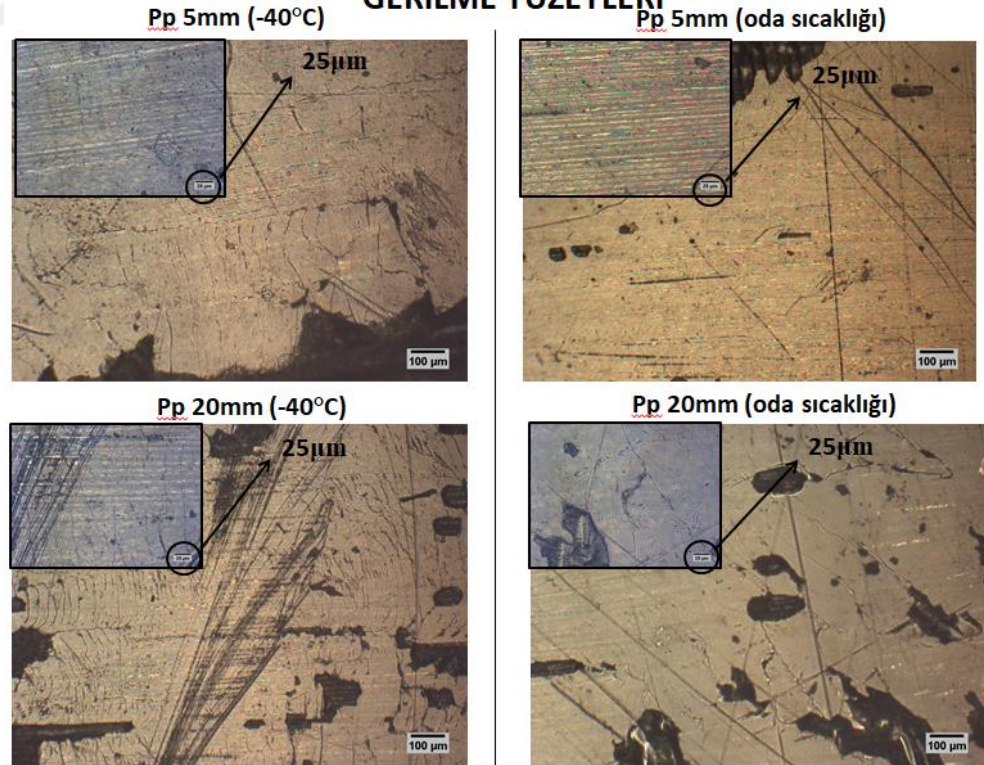
Şekil 4.74. Al 5 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3'den elde edilen yüzey görüntüleri

GERİLME YÜZEYLERİ



Şekil 4.75. Nomex 5 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3'den alınan yüzey görüntüleri

GERİLME YÜZEYLERİ



Şekil 4.76. PP 5 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3'den alınan yüzey görüntüleri

Şekil 4.74, şekil 4.75 ve şekil 4.76'dan çekirdek kalınlığı artışı ile beraber matris üzerindeki mikro çatlakların ve kırıkların da artan gerilme değerleri ile beraber arttığını ve büyüğünü söylemek mümkündür.

5 mm kalınlıktaki numuneler için başlangıçta genel olarak mikroskobik kırıklar ve çatlaklar oluşmuş ancak yapı tam anlamıyla kırılmamıştır. Daha sonra matris kırılmasıyla yük düşüşü başlamış ve yüzey çekirdeğin içine doğru bir girinti şeklinde ezilme gerçekleşmiştir. Ardından çekirdeğin plastik olarak ezilmesi başlamıştır. Ancak düşük yükseklığe sahip çekirdeklerin burkulması daha zordur. Yüzeyler ve çekirdek arası dislokasyon oluşumları da meydana gelmiştir. Mikroskop gözlemleriyle, düşük çekirdek yüksekliğine sahip kompozitlerin ana hasar mekanizmasının, basma ve gerilme yüzeyi üzerinde elyaf kırılması, elyaf-matris arayüz bağlanmaması, matris kırılması ve plastik deformasyon şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

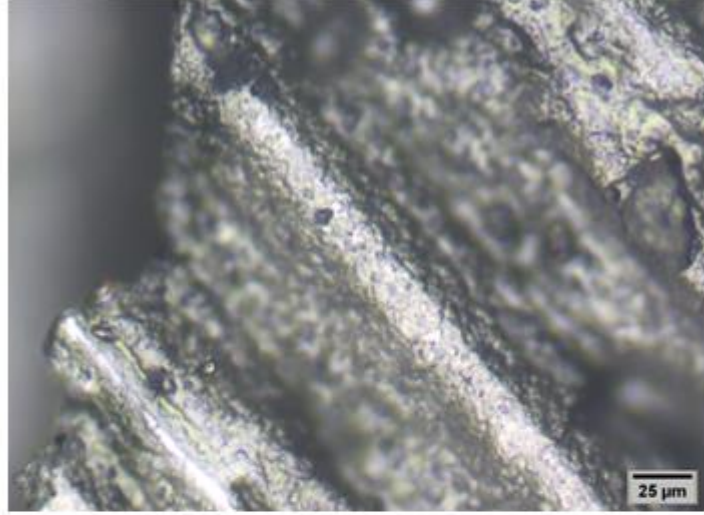
Oda sıcaklığında 20 mm kalınlıkta çekirdeğe sahip numuneler ile yapılan çalışmalarda yüksek ezilme miktarından ve çekirdek yüksekliğinden kaynaklı burkulmalardan dolayı yapışma yüzeylerinde ayrılma gözlemlenmiştir. Gözle yapılan muayeneye göre PP çekirdekli numunelerin burkulmaya daha çok direnç gösterdiği ve üzerlerinde daha az miktarda kalıcı deformasyon izi kaldığını söylemek mümkündür. Mikroskop gözlemlerinden anlaşılmaktadır ki yüksek çekirdek kalınlığına sahip kompozitlerde kırılma, matrisin kırılması ve elyaf ayrılması ile ortaya çıkmaktadır. Bu olayı yüzey ve çekirdek ayrılması da takip eder.

-40°C için ilk bakışta test sıcaklığı değişimiyle kırılma davranışının da değiştiği söylenebilir. sıvı azot sıcaklığında matris, tüm basma yüzeyi boyunca küçük parçalara ayrılır. Mikroskop gözlemleri, sıvı azot sıcaklığında katılma nedeniyle lif ve matris arasındaki arayüzey yapışmanın arttığını ve yüksek arayüz bağlamasının liflere daha az zarar verdiğini göstermektedir. Diğer yandan, matris de daha kırılğan davranış göstermekte ve ani kırılma ile önemli ölçüde kayma deformasyonu üretmektedir. Kırılmanın da oda sıcaklığına göre çok daha belirgin gerçekleştiği söylenebilir.

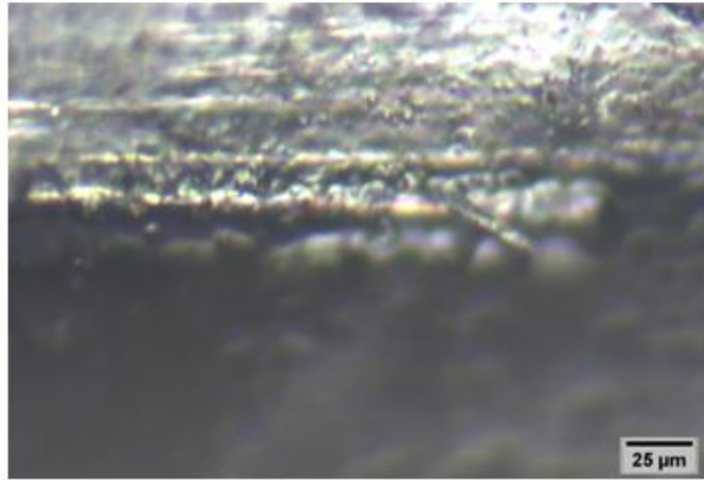
Çoğu reçine ile üretilen malzeme sıcaklık düşüşüyle beraber daha dayanıklı ve sert özellik gösterirler. Ancak düşük sıcaklık, aynı zamanda termal stresle beraber mikro çatlaklar yaratabilmektedir.

Bu sebeple sıvı nitrojen sıcaklığında eğilme yükü uygulandığında grafik önemli ölçüde artış gösterir. İlk başta lokal çatlak ve çentikler, basma yüzeyinde yük uygulama bölgesinde matris kırılması ve azalması ile oluşur. Ancak yüzey kırılmadan yükü taşıma davranışını sürdürür. Aynı zamanda, matrisin daha da kırılganlaşmasıyla beraber matris üzerinde mikro çatlaklar, lifler ve matris arasındaki termal streslerin uyuşmaması nedeniyle kolayca oluşur. Ancak sıvı azot sıcaklığında aynı zamanda elyaflar ile matris arasındaki arayüz iyi bağlanmıştır, bu da çatlakların yayılmasını etkili bir şekilde engeller. Bu durumda, basma yüzeyi ve çekirdek, kompozitin yüksek mekanik performansını sağlayan ana taşıyıcı gövdedir.

Al 20mm (oda sıcaklığı)



Al 20mm (-40°C)



Şekil 4.77. Al 20 mm kalınlıktaki numunelerin OM-3 ile alınan fiber-matris görüntüleri

Şekil 4.77’de 20 mm kalınlığına sahip Al çekirdekli sandviçin 40°C ve oda sıcaklığındaki fiber matris arayüzü görülmektedir. Oda sıcaklığında matris, fiber üzerinde daha yaygın bir görünüm sergilemesine rağmen fiberler arası bağı -40°C’deki kadar güçlü sağlayamamıştır. Sıvı azot sıcaklığında, matris fiberler üzerinde toplaşıp kristalleşme davranışı göstermiştir. Bu sayede fiberler birlikte hareket etmektedir. Fiberler arası bağ ise daha sağlam olmakla birlikte çok daha kırılmandır.

Sıvı azot sıcaklığında basma yüzeyinin ve çekirdek liflerinin mukavemeti kompozitlerin hasar davranışını domine etmektedir. Tüm deformasyon, basma yüzeyinin dış katmanlarından ani bir şekilde başlayıp iç çekirdek katmanlarına yayılan kademeli ve hızlı bir süreç olarak karşımıza çıkmaktadır.



5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Yapılan testlerden elde edilen verilere göre hesaplanan sonuçlar aşağıdaki gibi çizelge 5.1’de verilmiştir;

Çizelge 5.1. Sonuçların karşılaştırması

2	2	2	3	3	2	3	3	2	4	1	3	Numune numarası
PP				Al				Nomex				Çekirdek
20 mm		5 mm		20 mm		5 mm		20 mm		5 mm		Çekirdek kalınlığı
(-40°C)	(23°C)	(-40°C)	(23°C)	(-40°C)	(23°C)	(-40°C)	(23°C)	(-40°C)	(23°C)	(-40°C)	(23°C)	Test sıcaklığı
311	77,9	120	64	179	204	125	110	95,7	88,3	80,8	62,6	Eğilme dayanımı (Bending Strength) (MPa)
1,33	0,38	0,51	0,27	0,89	0,83	0,54	0,47	0,43	0,38	0,35	0,27	Eğilme rijitliği (Bending Stiffness) (N.m ²)
874	219	336	180	503	573	352	310	269	248	227	176	Akma dayanımı (N)
9,47	2,96	22,4	16,7	8,48	6,13	43,4	38,4	2,99	2,62	26,4	20,6	σ_{max} (Max stress) (MPa)
0,72	0,18	1,1	0,59	0,42	0,47	1,15	1,01	0,22	0,21	0,74	0,57	Çekirdek Kayma Gerilmesi (MPa)
47,2	11,8	64,9	34,7	27,2	30,9	67,9	59,8	14,5	13,3	43,8	34	Yüzey Stresi (Yüzey eğilme direnci) (MPa)
1,36	2,81	5,73	1,83	3,58	1,3	1,82	2,23	3,99	5,29	5,76	2,92	Sehim (Elastik Bölge) (mm)
80	80	80	80	40	40	40	40	48	48	48	48	Çekirdek yoğunluğu ($\frac{kg}{m^3}$)

- Sonuçlar, sıcaklığın, çekirdek malzeme tipinin ve kalınlığının eğilme mukavemeti üzerinde çok büyük etkisi olduğunu göstermektedir.
- Sonuçlar, yük-deplasman eğrilerinin, plastik bölgeye geçişe kadar lineer elastik özelliğini hem oda sıcaklığında hem -40°C 'da açıkça göstermektedir.
- Sonuçlar incelendiğinde, çekirdek kalınlığı artışıyla beraber atalet momentinin arttığını, bunun da grafiğin lineer bölümündeki eğimin artışının ana sebebi olduğu doğrulanmıştır.
- Sıcaklık farkı parametresine karşı en büyük davranış değişimi, çekirdek malzemesi PP olan numunelerde gözlemlenmiştir. Sonuçlar arasındaki farkın diğer çekirdek malzemelerle kıyaslandığında çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Al petek yapıda diğer çekirdek malzemelere göre hasar davranışında önemli farklar gözlemlenmiştir. Yük uygulanan bölgede bölgesel hücre ezilmeleri tespit edilmiş olup bu ezilme miktarının çekirdek kalınlığı ile beraber arttığı belirlenmiştir.
- Düşük sıcaklıklarda tüm sandviç malzemeler daha kırılgan, oda sıcaklığında ise daha sünek davranış sergilemiştir. Kırılmanın -40°C 'de aniden gerçekleştiği, grafikler üzerindeki ani düşüşler ile gözlemlenmiştir.
- Çizelge 5.2'ye göre oda sıcaklığında 5 mm çekirdek kalınlığıyla yapılan deneylerde mukavemet sıralaması büyükten küçüğe Al, PP, Nomex çekirdek şeklinde olmuştur.

Çizelge 5.2. Akma değerlerine göre çekirdek malzemelerin karşılaştırması

	5 mm (23°C)	5 mm (-40°C)	20 mm (23°C)	20 mm (-40°C)
Yüksek	Al	Al	Al	PP
Orta	PP	PP	Nomex	Al
Düşük	Nomex	Nomex	PP	Nomex

- Çekirdek kalınlığı 20 mm'ye çıktığında sıralama Al, Nomex, PP şeklinde gerçekleşmiştir. Nomex çekirdeğin oda sıcaklığında PP çekirdeğe göre kalınlık

artışından olumlu anlamda daha fazla etkilendiğini söylemek mümkündür. Test sıcaklığı -40°C 'ye düşürüldüğünde ise çekirdek kalınlığı 5 mm olan sandviçler için sıralama yine Al, PP, Nomex şeklinde gerçekleşmiştir. Ancak bu sıcaklıkta kalınlık 20 mm olduğunda PP çekirdekli numunenin akma değeri de oda sıcaklığına göre yaklaşık 2,5 kat artmıştır.

- Çizelge 5.2. aynı zamanda sıcaklık farkı açısından da incelenirse; düşük çekirdek kalınlığına (5 mm) sahip numuneler için sıcaklık düşüşünün mukavemet sıralamasını etkilemediğini söyleyebiliriz. Yine de sıcaklık düşüşüyle Al çekirdekli sandviçte %14, Nomex çekirdekli sandviçte %29, PP çekirdekli sandviçte %38 civarında mukavemet artışı kaydedilmiştir. Ancak çekirdek kalınlığı 20 mm'ye çıktığında yani yüksek kalınlığa sahip sandviçler için sıcaklık farkının akma üzerindeki değişiminin çok daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Dayanım sıralaması oda sıcaklığında Al, Nomex, PP şeklindeyken -40°C 'de PP, Al, Nomex şeklinde değişmiştir. Nomex çekirdek için artış %9 civarında olurken PP çekirdekli sandviçteki artış yaklaşık %300 civarındadır.

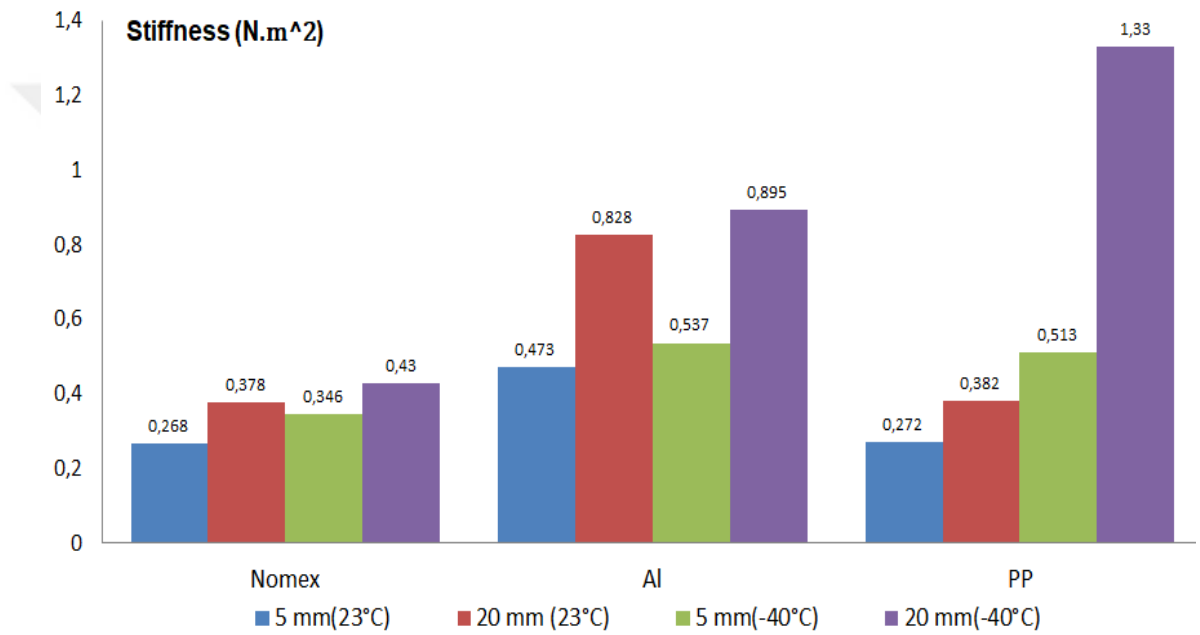
- Özetle PP çekirdekli sandviç kompozitin -40°C 'deki mukavemet artış değerleri diğer çekirdek tiplerine göre baskın olarak karşımıza çıkmaktadır. Test sonuçlarına göre oda sıcaklığı-soğuk ortam arasındaki kompozitin göstermesi beklenen davranış farkını en iyi PP çekirdekli malzemede görmekteyiz.

- Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından -40°C 'ye düştüğünde mukavemet artışındaki farkın bir başka nedeni epoksi tabanlı kompozitlerin polyester tabanlı kompozitlere göre sıcaklık farkından daha fazla etkilenmesidir.

- Oda sıcaklığında genel olarak malzemelerin yük-deplasman eğrileri pik noktasından sonra kademeli ve yumuşak geçişlerle düşmektedir. Fakat sıvı nitrojen sıcaklığında ani ve önemli ölçüde düşüşler ve grafik üzerinde zig zag hareketleri karşımıza çıkmaktadır. Bu durum, farklı hasar tiplerinin meydana geldiğini göstermektedir. Bunun ana sebebi sıvı nitrojen sıcaklığında matrisin katılaşmasıdır. Bu sayede ara yüzey yapışması ciddi derecede iyileşmesine rağmen kırılma davranışı çok daha belirgin olmuştur. Yüksek ara yüzey birleşmesi sayesinde de fiberler daha az hasar görmektedir. Öte yandan, katı davranışı gösteren fiber ile farklı genişleme davranışına sahip matris, çatlaklar yaratıp önemli miktarda kayma deformasyonu oluşturmuştur.

- Sıvı nitrojen sıcaklığı malzemenin mukavemetini önemli oranda iyileştirmekle birlikte malzemeyi daha da kırılgan yapmaktadır. Eğrilerde ani düşüşler gözlemlenmektedir. Ancak yine de mukavemet artışında çekirdek malzeme kalınlığı ana parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun ana sebebi de çekirdek malzeme ile kalınlığı artan kompozit sandviçin, atalet momentinin de artmasıdır.

- Oda sıcaklığı için; 5 mm kalınlıklı parçalarda genellikle tek ve uzun bir plastik şekil değiştirme bölgesiyle karşılaşılırken, 20 mm kalınlıklı parçalarda birden fazla plastik şekil değiştirme bölgesi tespit edilmiştir.



Şekil 5.1. Test sonuçlarına göre hesaplanan sertlik değerleri

Denklem (4.1)'e göre hesaplanan karşılaştırmalı eğilme sertliği grafiği şekil 5.1.'deki gibidir.

- Düşük sıcaklıklarda eğilme direncinin ve sertlik artışının ana sebebi, reçine matrisi içerisindeki polimer zincirlerinin hareketliliğinin azalması ve polimer matris moleküllerinin sıvı nitrojen sıcaklığında daha da sıkıştırılması gerçeğidir.

- Kayma direnci karbon fiber için sıcaklık düşüşüyle artmıştır.

- Kalınlık artışıyla beraber aynı malzemenin oda sıcaklığında ve -40°C 'deki sertlik değerleri arasındaki fark giderek büyümektedir. Yani fark 5 mm için o kadar da büyük değilken 20 mm için oldukça büyüktür.
- Üç nokta eğme testlerine göre çekirdek kalınlığı arttıkça çekirdek kayma gerilmesinde ve yüzey plakalarının eğme gerilmesinde bir düşüş gözlemlenmiştir.
- Test sonrası numunelerin gözle ve mikroskop ile muayenesi yapılmış olup, hasar tipi ve davranışı tespit edilmeye çalışılmıştır. Çekirdek kalınlığı ile hasar miktarı ve tipinin değiştiği gözlemlenmiştir.
- Sıvı nitrojen altında bütün hasar oluşumlarının basma yüzeyinin tam ortasında kırılma bir şekilde meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca, üst yüzey üzerinde matris daha küçük parçalara ayrılacak şekilde kırılmıştır. Yan çekim görüntülerinden de görüleceği üzere fiber sıkışmış ve kayma altında kırılmıştır. Mikroskop çalışmalarına göre ise, fiber-matris ara yüzeyinin katılma sayesinde daha az hasar gördüğünü söylemek mümkündür.
- Gözle yapılan kırılma davranışı üzerindeki incelemeler sonucuna göre Nomex çekirdekli sandviçlerde kırılma davranışının test sıcaklığından ve numune kalınlığından çok fazla etkilenmediği söylenebilir. Kalınlık artışıyla sadece kalıcı deformasyon miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Bunun dışında yük uygulanan yüzeyde büyük miktarda ezilme ve kırılmalar mevcuttur. PP çekirdekli sandviçler için; özellikle sıcaklık düşüşüyle hasar davranışının çok değiştiği açıkça görülmektedir. Oda sıcaklığında yük uygulanan yüzeyde kırık ve ezilme şeklinde gerçekleşen deformasyon düşük sıcaklıklarda ara yüzey kırılması ile yüzey-çekirdek ayrılması ve çekirdek kırılması şeklinde gerçekleşmiştir. Kalınlık artışıyla birlikte de deformasyonun arttığı söylenebilir. Al çekirdekli sandviçler için ise; deformasyon miktarının her şartta diğer numunelere göre çok daha fazla olduğu söylenebilir. Hasar davranışı tipi sıcaklık farkından ve numune kalınlığından görsel olarak çok fazla etkilenmese de yüzey-çekirdek ayrılması, ara yüzey bağının kopup karbon fiberin tamamen kırılıp kopması, yük bölgesinde büyük miktarda çökme, ezilme ve kırılma gibi kırılma davranışları tespit edilmiştir. Çekirdek kalınlığı artışıyla deformasyon miktarı çok daha fazla artmıştır.

- Makro ve mikro ölçekte yapılan morfoloji incelemeleri kompozitlerin hasar modellerinin çekirdek yüksekliği ve test sıcaklığına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Çekirdek yüksekliğinin artmasıyla komşu çekirdek lifleri arasındaki etkileşim kuvveti nedeniyle oda ve sıvı azot sıcaklıklarında kompozitlerin hasar boyutları önemli ölçüde azalmıştır. Oda sıcaklığında, hasar tipi, yüz plakalarının penetrasyon kırığı, çekirdek liflerinin yırtılması, çekilmesi ve matrisin çatlaması şeklinde gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, sıvı nitrojen sıcaklığında matris, kırılma davranışı üzerinde önemli rol oynar. Malzemenin kırılma özelliği daha belirgin hale gelmesine rağmen daha az lif kırılması gözlenmiştir.

- Çekirdek kalınlığının artışıyla beraber atalet momentinin arttığını, bunun da grafiğin lineer bölümündeki eğimin artışının ana sebebi olduğu doğrulanmıştır.

- Çekirdek kaymaları, mukavemet üzerinde baskın sebep olarak ortaya çıkmıştır. Düşük sıcaklıklarda, ilgili oda sıcaklığı davranışıyla karşılaştırıldığında, çekirdeğin kayma direnci üzerinde önemli artışlar gözlenmiştir.

- -40°C'de sandviç kırımlar son derece katı davranış sergilemişlerdir. Ek olarak, kırılma tip çekirdek kesme zorlaması ile gelen kırılma ile birlikte mukavemet değerlerinde önemli ölçüde artışlar meydana gelmiştir. Bu da, küçük çatlaklar ile herhangi bir uyarı vermeden ani kırılma davranışını açıklamaktadır. Dolayısıyla, düşük sıcaklıktaki çalışma koşulları için, bu yapılarıdaki kırılma ve hasar olaylarını izlemek ve herhangi bir güvenlik önlemi almak oldukça zordur.

- Çekirdek hücre çapında ufak da olsa farklılıklar olduğu için bu durum karşılaştırmalı sonuçlara etki etmiş olabilir.

- Yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçların, benzer literatür çalışmalarıyla uyumlu olduğu tespit edilip, bu çalışmalar doğrulanmıştır.

- Bu tez çalışmasının, karbon fiber takviyeli balpeteği çekirdekli sandviç kompozitlerin normal şartlarda ve soğuk ortamlardaki eğilme ve kırılma davranışının incelenmesi konusunda ve yapılacak tasarımlar için kullanılacak malzeme tipi ve boyutu gibi seçimlerde yardımcı olması düşünülmekte, bu konuda gerçekleştirilecek akademik ve ARGE çalışmaları için de bir referans niteliği taşıması amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2000.** Araldite AW106/HV953U two component epoxy paste adhesive. Huntsman Advanced Materials. Basel.
- Anonim, 2010.** Figure of Merit(FOM) for structural support materials. USPAS Cryogenics Short Course Boston, 18 Jan 2010, Boston, USA.
- Anonim, 2017a.** Sıcaklığın akma üzerindeki etkisi. Mühendishane-Malzeme Mühendisliği Akademisi. <https://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi/sicakligin-akma-uzerindeki-etkisi/>(Erişim tarihi:29.11.2017)
- Anonim, 2017b.** Understanding Honeycomb Panels. Plascore. <https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-panels/>(Erişim tarihi:13.12.2017)
- Anonim, 2017c.** Kompozitler-Polimerler-Seramikler-Nanomalzemeler. <http://slideplayer.biz.tr/slide/11475148/>(Erişim tarihi:30.10.2017).
- Anonim, 2017d.** Kompozit hakkında. Esa Kimya Metal Sanayi. <http://www.esa.com.tr/kompozit-hakkinda/>(Erişim tarihi:30.10.2017).
- Anonim, 2017e.** Filament winding. Nuplex Industries. <http://www.nuplex.com/composites/processes/filament-winding/>(Erişim tarihi:31.10.2017).
- Anonim, 2017f.** The low cost value chain of integrated sandwich panel and part production. <http://www.econcore.com/en/services/process-engineering/>(Erişim tarihi:04.11.2017).
- Akdoğan, A. 2008.** Metal matrisli kompozitler ve üretim yöntemleri. [http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/MMK_son\(31.10.2017\).](http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/MMK_son(31.10.2017).)
- Akkuş, H., Düzcüklüoğlu, H., Şahin, Ö.S. 2015.** Alüminyum bal peteği yapılarında oluşan eğilme kuvvetlerinin çoklu regresyon ile incelenmesi. *CBÜ Fen Bil. Dergisi*, 11(2):217-223.
- Arbaoui, J., Schmitt, Y., Pierrot, J.L., Royer, F.X. 2014.** Effect of core thickness and intermediate layers on mechanical properties of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich structures. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2014(59):11-16.
- Arbaoui, J., Moustabchir, H., Pruncu, C.I., Schmitt, Y. 2016.** Modeling and experimental analysis of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich composites under four-point bending. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2016(00): 1–19.
- Arıcasoy, O. 2006.** Kompozit Sektör Raporu. İstanbul Ticaret Odası. İstanbul.
- ASTM Standard C393. 2006.** Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure. ASTM International. West Conshohocken, PA.
- Aydıncak, İ. 2007.** Investigation of design and analyses principles of honeycomb structures. *MSc Thesis*. Middle East Technical University The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Aymerich, F. 2012.** Composite materials for wind turbine blades: Issues and challenges. Department of Mechanical, Chemical and Materials Engineering, University of Cagliari, 2012 Cagliari Italy.

- Bekem, A., Ercan, H., Doğu, M., Ünal, A. 2011.** Uçak Sanayiinde Kullanılan Balpeteği Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 Mayıs 2011, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Belouettar, S., Abbadi, A., Azari, Z., Belouettar, R., Freres, P. 2009.** Experimental investigation of static and fatigue behaviour of composites honeycomb materials using four point bending tests. *Composite Structures*, 2009(87):265–273.
- Berthelot, J.M. 1999.** Composite Materials Mechanical Behavior and Structural Analysis. Springer-Verlag Publishers, New York, USA, 646 pp.
- Bitzer, T.N. 1997.** Honeycomb Technology: Materials, design, manufacturing, applications and testing. Chapman & Hall. London, 233pp.
- Bolat, F. Ç. 2011.** Bal peteği sandviç kompozit yapıların dinamik analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, AÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bozkurt, S. 2014.** Sandviç kompozitlerin mekanik performansının deneysel olarak incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Campbell, F.C. 2010.** Structural Composite Materials. ASM International, USA, 630pp.
- Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E. 2012.** Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2012(43):6-15.
- Daniel I.M. 2008.** The influence of core properties on failure of composite sandwich Beams. Proceedings of the 8th international conference on sandwich structures (ICSS8), 6–8 May 2008. Porto, Portugal.
- Daniel I.M., Gdoutos, E.E., Rajapakse, Y.D.S. 2009.** Major accomplishments in composite materials and sandwich structures. Springer, Netherlands, 818 pp.
- Deng F. 2007.** Acoustic emission applications to composite sandwich structures at room and low temperatures. *Phd Thesis. Mechanical Engineering Department of Wayne State University. USA.*
- Engin, Z. B. 2011.** Balpeteği sandviç kompozitlerin darbe davranışının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, AÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Ercan, H. 2006.** Uçak sanayiinde kullanılan balpeteği kompozitlerin mekanik davranışlarının incelenmesi. *Doktora Tezi*. YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Ertan, R. 2016.** Polimer malzemeler ders notları. UÜ Otomotiv mühendisliği bölümü.
- Gardiner, G. 2016.** Is the BMW 7 Series the future of autocomposites?. CompositesWorld. <http://www.compositesworld.com/articles/is-the-bmw-7-series-the-future-of-autocomposites> (Erişim tarihi: 05.12.16).
- Glenn, C.E., Hyer, M.W. 2005.** Bending behavior of low-cost sandwich plates. *Composites: Part* , 2005(36):1449–1465.
- Gibson, L.J., Ashby, M.F. 1999.** Cellular solids: structure and properties-2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 532 pp.
- Gpoichand, A., Mohanrao, R., Sankar, N. V. S., Balaji, G.R., Kumar, P.S. 2013.** Design and analysis of copper honeycomb sandwich structure. *International Journal of Engineering and Advanced Technology(IJEAT)*, 2(4):635-638.

- Hara, D. 2012.** Investigation of the use of sandwich materials in automotive body structures. *MSc Thesis*. Middle East Technical University The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Hawileh, R.A., Obeidah, A.A., Abdalla, J.A., Tamimi, A.A. 2015.** Temperature effect on the mechanical properties of carbon, glass and carbon–glass FRP laminates. *Construction and Building Materials*, 2015(75):342–348.
- Hexcel Composites, 2000.** “Honeycomb sandwich design technology”
- Hexcel Composites, 2007.** “Mechanical Testing of Sandwich Panels”
- Hexcel Composites, 2013.** “Prepreg Technology”
- Jen, Y.M., Lin, H.B. 2013.** Temperature-dependent monotonic and fatigue bending strengths of adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich beams. *Materials and Design*, 2013(45):393–406.
- Kichhannagari, S. 2004.** Effects of Extreme Low Temperature on Composite Materials. *MSc Thesis*, The Department of Mechanical Engineering, Jawaharlal Nehru Technological University, India.
- Konka, H. P., Wahab, M. A., Lian, K. 2012.** On mechanical properties of composite sandwich structures with embedded piezoelectric fiber composite sensors. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 134(1)
- Korkut, S. 2017.** Statik ve dinamik yükler altında kompozit plakaların hasar durumlarına karşı davranışlarının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kowalska, M.C., Garstecki, A., Pozorski, Z. 2008.** Methods of experimental determination of soft core parameters in sandwich panels. *8th International Conference on Sandwich Structures(ICSS 8)*. 463-473.
- Kus, A., Durgun, I., Ertan, R. 2016.** Experimental study on the flexural properties of 3D integrated woven spacer composites at room and subzero temperatures. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2016(00):1-14.
- Li, D., Fang, D., Zhang, G., Hu, H. 2012.** Effect of temperature on bending properties and failure mechanism of three-dimensional braided composite. *Materials and Design*, 2012(41):167-170.
- Li, D., Zhao, C., Jiang, L., Jiang, N., 2013.** Experimental study on the bending properties and failure mechanism of 3D integrated woven spacer composites at room and cryogenic temperature.. *Composite Structures*, 2014(111):56-65.
- Liu, J., Xiang, L., Kan, T. 2015.** The effect of temperature on the bending properties and failure mechanism of composite truss core sandwich structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015(79): 146-154.
- Lu, J., Zou, G.P. 2009.** Experimental investigation of static and thermal mechanical bending fatigue strength of steel honeycomb sandwich beams. Fourth International Conference on Experimental Mechanics, 18-20 November 2009, Singapore.
- Lu, C., Zhao, M., Jie, L., Wang, J., Gao, Y., Cui, X., Chen, P. 2015.** Stress Distribution on Composite Honeycomb Sandwich Structure Suffered from Bending Load. *Procedia Engineering*, 2015(99):405-412.
- Mazumdar, S.K. 2002.** Composites manufacturing, materials, product, and process engineering. CRC Press, New York, USA, 416 pp.

- Nguyen, M.Q., Jacombs, S.S., Thomson, R.S., Hachenberg, D., Scott, M.L. 2005.** Simulation of impact on sandwich structures. *Composite Structures*, 2005(67):217-227.
- Nirupama, G., Reddy, V. D., Krishnaiah, G. 2014.** Design and fabrication of spot welded corrugated panel under three point bending by FEM. *Procedia Engineering*, 2014(97):1282-1292.
- Özer, H. 2015.** Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Paik, J.K., Thayamballi, A.K., Kim, G.S. 1999.** The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-Walled Structures*, 35(3):205-231.
- Pflug, J., Xinyu, F., Lavalaye, J., Verpoest, I., Bratfish, P., Vandepitte, D. 2002.** Continuously produced honeycomb sandwich materials for automotive applications. *Society of Automotive Engineers 2002 World Congress*, 4-7 March 2002, Michigan, USA.
- Samirkumar, M.S., Ronald, F.G., Emmanuel, O.A. 2008.** The influence of subzero temperatures on fatigue behavior of composite sandwich structures. *Composites Science and Technology*, 2009(69):829-838.
- Shamary, A.K.J.A. 2014.** Investigation of energy absorption capacity of sandwich composites subjected to the impact loadings. *MSc Thesis*. DEÜ Graduate School of Natural and Applied Sciences. İzmir.
- Sloan, J. 2016.** Composites recycling becomes a necessity. *CompositesWorld*. <http://www.compositesworld.com/articles/composites-recycling-becomes-a-necessity> (Erişim tarihi: 05.12.16).
- Solmaz, M.Y., Kaman, M.O., Turan, K., Turgut, A. 2010.** Petek yapılı kompozit levhaların eğilme davranışlarının incelenmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(1):1-11.
- Soni, S. 2006.** Characterization of fatigue damage in composite sandwich hull materials at low temperatures. *MSc Thesis*, Department of Mechanical Engineering, Wayne State University, USA.
- Sukmaji, I.C., Wijang, W.R., Andri, S., Bambang, K., Teguh. 2016.** Application of sandwich honeycomb carbon/glass fiber-honeycomb composite in the floor component of electric car. *International Conference on Engineering, Science and Nanotechnology 2016 (ICESNANO 2016). 3-5 August 2016, Solo, Indonesia*.
- Sun, G., Huo, X., Chena, D., Li, Q. 2017.** Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels under bending and in-panel compression. *Materials and Design*, 2017(133): 154–168.
- Taşkıran, C. 2010.** Tabakalı kompozit levhaların sıcaklığa bağlı düşük enerjili darbe davranışının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, GÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tortoç, A. 2009.** Balsa/ PVC sandviç yapılarda kırılma tokluğu etkisinin nümerik çalışması. *Y.Lisans Tezi*, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Türkmen, İ. 2012.** Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, CBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.

Wang, S., Zhou, Z., Zhang, J., Fang, G., Wang, Y. 2017. Effect of temperature on bending behavior of woven fabric-reinforced PPS-based composites. *Journal of Material Science* 2017(52): 13966–13976.

Wang, J., Shia, C., Yanga, N., Suna, H., Liub, Y., Song, B. 2018. Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composite sandwich structures with aluminum honeycomb cores for vehicle body. *Composite Structures*, 2018(184):1189–1196.

Wu, Z., Xiao, J., Zengand, J. 2014. Compression performance of integrated 3D composite sandwich structures. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2014(16): 5–21.

Yağcı, E. 2007. Tabakalı kompozit ince plakların plak düzlemine dik yükleme etkisi altındaki eğilme analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, ÇÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Zhao, C., Li, D., Ge, T., Jiang, L., Jiang, N. 2014. Experimental study on the compression properties and failure mechanism of 3D integrated woven spacer composites. *Materials Design*, (56): 50–59.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Burak GÜL
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 06.08.1992
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Şükrü Şankaya Anadolu Lisesi, 2010
Lisans : Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü (2010-2014)
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı (2014-2018)

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl : Biltim – Tofaş Arge 2015 (Şubat-Aralık)
Car Studio Yarış Design 2016-2017 (Ekim-Nisan)

İletişim (e-posta) : burakgul92@gmail.com