UZUN ÖMÜRLÜ VE YÜKSEK VERİMLİ RÜZGÂR TÜRBİN KANATLARI İÇİN YAPISAL SAĞLIK GÖRÜNTÜLEME ENTEGRASYONUNA UYGUN KENDİ KENDİNİ ONARABİLEN, AKILLI, SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT VE SANDVİÇ YAPILAR GELİŞTİRİLMESİ

GÖNENÇ DURAN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZUN ÖMÜRLÜ VE YÜKSEK VERİMLİ RÜZGÂR TÜRBİN KANATLARI İÇİN YAPISAL SAĞLIK GÖRÜNTÜLEME ENTEGRASYONUNA UYGUN KENDİ KENDİNİ ONARABİLEN, AKILLI, SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT VE SANDVİÇ YAPILAR GELİŞTİRİLMESİ

Gönenç DURAN
ORCID ID: 0000-0001-8545-7621

Prof. Dr. Murat YAZICI
(Danışman)
ORCID ID: 0000-0002-8720-7594

DOKTORA TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Doktora Tezi

UZUN ÖMÜRLÜ VE YÜKSEK VERİMLİ RÜZGÂR TÜRBİN KANATLARI İÇİN YAPISAL SAĞLIK GÖRÜNTÜLEME ENTEGRASYONUNA UYGUN KENDİ KENDİNİ ONARABİLEN, AKILLI, SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT VE SANDVİÇ YAPILAR GELİŞTİRİLMESİ

Gönenç DURAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Bu çalışmada, insan damar yapısı ve iyileştirme mekanizmasından ilham alınarak rüzgâr türbin kanatlarının kullanım ömrünü artıran kendi kendini onaran yeni bir kompozit sandviç yapı geliştirilmiştir. Sandviç çekirdeğinin her bölgesi çok hafif, nano boyutlu fiber kanallara sahiptir. Sandviç yapının damarları olan bu sürekli kanallar, iyileştirici ajan olarak kullanılan siyanoakrilatın, hasarlı ve mikro çatlaklı bölgelere aktarımını sağlamıştır. Üretimi insan sağlığına uygun polietersülfon hammaddeli nano fiber kanallar, cidarları dıştan içe daralan mikron gözenekli membran yapısına sahiptir. Bu özellik, mikro çatlak bölgelere iyileştirici ajanın iletimini artırmıştır. Kompozit sandviç çekirdeği matrisinde iyileştirici ajan polimerizasyonu için geri dönüştürülmüş karbon fiber lif tozları yeni bir aktivatör olarak kullanılmıştır. Bu damarlı yapı sayesinde iyileştirici ajan hızlıca hasarlı bölgeye nüfuz edip karbon fiber lif tozları ile anlık kürlenmiştir. Bu bağlamda, akut hasar iyileşmesi sayesinde mikro çatlakların yüksek verimli, rekonstrüktif onarımı gerçekleşmiştir. Hasarlı numunelerin otonom onarım verimliliği darbe deneyleri ile değerlendirilmiştir. Çok tekrarlı darbe deneylerinin aritmetik ortalaması alınmış olup hasar yoğunluğuna göre yaklaşık otonom onarım yüzdesi minimum %6,4 maksimum %92 ve iyileşme verimliliği (η) %62-88 arasında hesaplanmıştır. Ayrıca kompozit yapı içerisine eklenen FBG (Fiber Bragg Izgara) sensör ile anlık; gerinim ve termal ölçüm yapılmıştır. Termal görüntüleme ve dijital görüntü korelasyonu (DIC) yöntemleri kullanılmıştır. Tahribatsız muayene yöntemlerinden mikro hassasiyetli lazer tarama ile metrolojik ölçümler ve tomografik görüntüler (3D X-Işını) ile iyileşme yetenekleri incelenmiş olup deniz üstü ve karasal rüzgâr türbin kanatlarında bakım ve onarım maliyetini düşürücü, çevrim yaşamını iyileştirici ve çok tekrarlı hasarları otonom onaran bir çözüm sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kendi Kendini Onaran Malzemeler, Fiber Nano Kanal, Karbon Fiber Tozu, Siyanoakrilat, Polietersülfon, Rüzgâr Türbin Kanatları, Sandviç, Kompozit, Karasal Rüzgâr Türbini, Denizüstü Rüzgâr Türbini, FBG sensör, DIC, X-Işını, Tomografi, Metroloji
2024, xiv + 182 sayfa.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DEVELOPMENT OF SELF-HEALING, SMART, CONTINUOUS FIBER REINFORCED COMPOSITE AND SANDWICH STRUCTURES SUITABLE FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING INTEGRATION FOR LONG-LASTING AND HIGH-EFFICIENCY WIND TURBINE BLADES

Gönenç DURAN

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

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

In this study, inspired by human vascular structure and healing mechanism, a new self-healing composite sandwich structure has been developed to increase the lifetime of wind turbine blades. Each region of the sandwich core has very lightweight, nano-sized fiber channels. These continuous channels, which are the veins of the sandwich structure, enabled the transfer of cyanoacrylate, which is used as a healing agent, to the damaged and microcracked areas. Polyether sulfone raw material nano-fiber channels, the production of which is suitable for human health, have a micron porous membrane structure with walls narrowing from outside to inside. This features the enhanced delivery of the healing agent to the micro-cracked areas. Recycled carbon fiber powders were used as a new activator for curing agent polymerization in the composite sandwich core matrix. Thanks to this vascular structure, the healing agent rapidly penetrated into the damaged area and cured instantly with carbon fiber powders. In this context, a highly efficient, reconstructive repair of microcracks was achieved through acute damage healing. Impact tests evaluated the autonomous repair efficiency of the damaged samples. The arithmetic mean of the multi-repetitive impact tests was taken and the approximate autonomous repair percentage according to the damage intensity was calculated as minimum 6.4%, maximum 92% and recovery efficiency (η) between 62-88%. In addition, instantaneous strain and thermal measurements were performed with the FBG (Fiber Bragg Gratings) sensor added into the composite structure. Thermal imaging and digital image correlation (DIC) methods were used. Non-destructive testing methods, metrological measurements with micro precision laser scanning and tomographic images (3D X-Ray) and healing capabilities have been examined, and a solution that reduces maintenance and repair costs, improves cycle life and autonomously repairs multi-repetitive damages in offshore and onshore wind turbine blades have been presented.

Keywords: Self-Healing Materials, Hollow Fiber, Carbon Fiber Powder, Cyanoacrylate, Polyether sulfone, Wind Turbine Blades, Sandwich, Composite, Onshore Wind Turbine, Offshore Wind Turbine, FBG sensor, DIC, X-Ray, Tomography, Metrology
2024, xiv + 182 pages.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması sürecinde maddi ve manevi katkılarını esirgemeyen, bana bu süreçte her zaman yanımda olan emektar aileme canı gönülden minnetimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü eğitimi boyunca bizleri akademik olarak yetiştiren ve her türlü desteğini her zaman yanımızda hissettiğimiz kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Murat Yazıcı'ya, bilgi ve tecrübelerini paylaşan kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Erhan Pulat'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Barış Erkuş'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca manevi desteklerinden ötürü mesai arkadaşlarım Harun Güçlü, Muhammed Dönmez ve Emir Eminoğlu'na ve de kıymetli Bursa Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü hocalarıma ve değerli lisans öğrencilerime ve lisansüstü arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmada destekleri olan, Zeiss Global'den Benedikt Krist'e, Zeiss Türkiye'den Mesut Gödek ve Özgür Aka'ya, Cadem Metrology'den Rıdvan Başay ve Hasan Karaman'a, Ermaksan ve Eon Photonics'den Yusuf Bayrak, Gökhan Tuna ve Olcay Aydın'a, Galata Wind Enerji'den Ahmet Aytaç'a, Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği'nden Emre Dalgıç'a ve Hexagon şirketinden Tuğberk Akdeniz ve kıymetli dostum Emre İbram'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması Yükseköğretim Kurumu YÖK 100/2000 programı ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından TEYDEB 1505-5220011, BİDEB 2211-A ve 2250 programları kapsamında desteklenmiştir. YÖK'e ve TÜBİTAK'a tezime verdiği destekten dolayı teşekkür ederim.

Gönenç DURAN
29/02/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ iii
İÇİNDEKİLER iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ÇİZELGELER DİZİNİ xiv
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 4
2.1. Yenilenebilir Temiz Enerji 4
2.2. Rüzgâr Enerjisinde Türkiye 4
2.3. Rüzgâr Türbinleri 7
2.3.1. Dünya'da Rüzgâr Türbinleri 10
2.3.2. Rüzgâr Türbin Bileşenleri 12
2.3.3. Rüzgâr Türbinlerinin Çalışma Prensibi 14
2.4. Deniz üstü (Offshore) Rüzgâr Türbinleri 14
2.5. Rüzgâr Türbin Kanatları 17
2.5.1. Rüzgâr Türbin Kanat Tasarımı 19
2.5.2. Rüzgâr Türbin Kanadı Yapı Anatomisi 23
2.5.3. Rüzgâr Türbin Kanat Üretimi ve Kompozit Malzemeler 26
2.6. Rüzgâr Türbin Kanat Hasarları 40
2.7. Rüzgâr Türbin Kanatlarında Bakım ve Onarım 46
2.8. Kendi Kendini Onaran Malzemeler 48
2.8.1. Mikrovasküler Kanallar ile Otonom İyileşme 52
2.8.2. Mikrovasküler İyileştirme için İçi Boş Nano Lif Kullanımı 55
2.9. Rüzgâr Türbini Kanat Test Yöntemleri 57
2.9.1. Rüzgâr Türbin Kanatlarında Tahribatsız Muayene Yöntemleri 60
2.10. Literatür Araştırması 63
3. MATERYAL VE YÖNTEM 90
3.1. Ön Hazırlık ve Geliştirme Aşaması 90
3.1.1. İyileştirici Ajan 92
3.1.2. Aktivatör Seçimi 94
3.1.3. İçi Boş Fiber Nano Kanallar 99
3.2. Kompozit Sandviç Üretimi 101
3.3. Kompozit Sandviç Yapı İyileştirme Sistemi 104
3.4. Darbe Deneyleri 105
3.5. Mikroskobik Muayene 110
3.6. Termal Görüntüleme 111
3.7. DIC Testi 112
3.8. Metrolojik Deformasyon Ölçüm Testi 113
3.9. FBG Sensör Kullanımı 114
3.10. 3D X-Işını Tomografik Görüntüleme 117
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 118
4.1. Darbe Deney Testleri 118
4.2. FBG Sensör Testi 123
4.3. DIC Tekniği Testi 125
4.4. Mikroskobik Muayene 129

4.5. Termal Muayene ve Ölçüm Değerleri.....134
4.6. 3D X-Işını Tomografi ile Tahribatsız Muayene.....141
4.7. Metrolojik 3D Tarama ile Tahribatsız Muayene.....144
5. SONUÇ 160
KAYNAKLAR 163
ÖZGEÇMİŞ 182

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
cP	Viskozite birimi (m^2/sn)
μm	Mikron
$\dot{\varepsilon}$	Şekil değiştirme hızı
ε	Gerinim
t	Süre
L	Malzeme boyu
V	Malzeme deformasyon hızı
η	İyileşme verimliliği
f	İlgilenilen özellik
ΔT	Sıcaklık değişikliği
Bm	Spektral sinyal genişliği
dBm	Sinyal gücü
sn	Saniye
με	Mikro gerinim

Kısaltmalar	**Açıklama**
3D	3 Boyutlu
AE	Akustik emisyon
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
AgNPs	Gümüş nanopartikülü
CA	Siyanoakrilat
CE	Selüloz esteri
CFp	Karbon fiber elyafları tozu
CFRP	Karbon fiber takviyeli polimer kompozit
$CH_2=C(CN)_{CO2R}$	Siyanoakrilat
CN	Nitroselüloz
CNT	Karbon nanotüp
CS	Çekirdek kesme arıza modu
CT	Bilgisayarlı tomografi
$CuBr_2$	2-Metilimidazol
DCB	Çift konsol kiriş
DCB	İnterlaminar kırılma tokluğu Mod-I testi
DCPD	Dicyclopentadien
DIC	Dijital görüntü korelasyonu
DOF	Serbestlik derecesi
DRT	Deniz üstü rüzgâr türbini
DÜRED	Deniz üstü Rüzgâr Enerjisi Derneği
EMA	Etilen-metil akrilat
ENF	Uç çentik eğilme
EPP	Enjekt-Pompa-Baskı Efekti
ESEM	Çevresel taramalı elektron mikroskobu

FBG	Fiber bragg ızgara sensör
FORJ	Fiber optik döner mafsal
FWT	Yüzer tip deniz üstü rüzgâr türbinleri
GMA	Glisidil metakrilat
GRFP	Cam elyaf takviyeli polimer kompozit
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
Hn	Hasar Sonrası İyileştirilmiş (Healed) Numunesi
HRHn	Hasar Sonrası İyileştirilmiş ve Daha Sonra Tekrar Hasara Uğratılmış Deney Numunesi
INN	Tersine çevrilebilir sinir ağları
İHA	İnsansız hava araçları
MAC	Modal güvence kriteri
MAH	Maleik anhidrit
MWCNT	Çok duvarlı karbon nanotüpler
NDT	Tahribatsız muayene yöntemleri
Nn	Hasar sonrası İyileştirilmemiş (NoHealed) Numunesi
OSA	Optik spektrum analizörleri
OSNR	Optik sinyalin gürültüye oranını
PA	Poliamid
PAN	Poliakrilonitril
PCL	Termoplastik polikaprolakton
PDMS	Polidimetilsiloksan
PE	Polietilen
PES	Polietersülfon
PI	Poliimid
PLA	Polilaktit
PNC	Polimer nanokompozit
PP	Poliprofilen
PPRC	Polipropilen random kopolimerler
PS	Rüzgâr türbin kanadı basınç yüzeyi
PS	Polisülfon
PTFE	Politetrafloroetilen
PVA	Polivinil alkol
PVC	Polivinilklorür
PVDF	Poliviniliden florür
RES	Rüzgâr enerji ile elektrik üretim santralleri
RT	Rüzgâr türbini
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SHCB	Split Hopkinson Sıkıştırma Bar
SLDV	3D taramalı lazer doppler vibrometre
SMP	Şekil hafızalı polimerler
SS	Rüzgâr türbin kanadı emme yüzeyi
TET	Tetrahedral içi boş bağ birimleri
TGA	Termogravimetik
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜREB	Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği

UMİMAG	Uygulamalı Mekanik ve İleri Malzeme Araştırma Grubu
UPV	Ultrasonik darbe hızı
UT	Ultrasonik test
UV	Ultraviyole
Vn	Saf (Virgin) Hasarsız Deney Numunesi
XCT	X-ışını bilgisayarlı tomografi
YERT	Yatay eksenli rüzgâr türbinleri
YÖK	Yükseköğretim Kurulu

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Ülkemizde rüzgâr enerjisi kümülatif santral kurumları gücü.....	5
Şekil 2.2.	Ülkemizdeki RES'lerin elektrik üretimindeki payı……..	6
Şekil 2.3.	RES'lerin illere göre dağılımı……..	6
Şekil 2.4.	Deniz üstü Rüzgâr türbinleri……..	7
Şekil 2.5.	Sol tarafta: YERT Siemens 2,3 MW rüzgâr türbini, 69 m yüksekliği, Rødsand, Danimarka'da yer almaktadır. Sağ tarafta: DERT Éole 4 MW rüzgâr türbini, yüksekliği 110 m, Quebec, Kanada'da yer almaktadır. Sol Fotoğraf: Christian Bak, Sağ Fotoğraf: Paul Gipe……..	8
Şekil 2.6.	Rüzgâr türbinlerinin temel bileşenleri……..	12
Şekil 2.7.	Spar şamandıra alt yapısına sahip Siemens 6.0 MW yüzer açık deniz üstü Rüzgâr türbini fotoğrafı: NREL…….....	15
Şekil 2.8.	Deniz üstü rüzgâr türbinlerinde çeşitli kurulum alt yapısı.....	16
Şekil 2.9.	Rüzgâr türbin kanat bölümleri…….....	17
Şekil 2.10.	Tipik bir kanadın şekli ve enine kesitleri……..	18
Şekil 2.11.	Tipik bir kanadın ana yapı elemanlarını gösteren kanat kesiti.....	18
Şekil 2.12.	Rüzgâr akışının kanatlara uyguladığı kuvvetler……...	19
Şekil 2.13.	Rüzgâr türbin çiftliğinin kurulacağı rüzgâr saha özelliklerinin belirlenmesi……..	20
Şekil 2.14.	Ansys SpaceClaim ile rüzgâr türbini kanat geometrisi eskizi.....	21
Şekil 2.15.	Sharp 3D programı ile rüzgâr türbini kanat tasarımı.....	22
Şekil 2.16.	Ashes programı ile deniz üstü rüzgâr türbini dijital ikizi	22
Şekil 2.17.	Qblade ile yüzer platformlu deniz üstü Rüzgâr türbini model simülasyonu……..	22
Şekil 2.18.	Rüzgâr türbin kanadı yapı anatomisi…….....	23
Şekil 2.19.	Birbirine yapıştırılan iki aerodinamik kanat paneli……...	24
Şekil 2.20.	Birbirine yapıştırılan iki aerodinamik kanat paneli 2.....	24
Şekil 2.21.	Genel kanat enine kesiti örneği sandviç çekirdek, yapıştırıcılar, yüzey profil kaplamaları görünümü……..	25
Şekil 2.22.	Kompozit sandviç yapıda kanat shear webleri……..	25
Şekil 2.23.	Spar cabs türleri……	26
Şekil 2.24.	Rüzgâr türbin kompozit kanat kökü…….....	27
Şekil 2.25.	Günümüz rüzgâr türbin kanatlarında kompozit yapılar.....	27
Şekil 2.26.	Kompozit kanat üretiminin genel adımları…….....	28
Şekil 2.27.	Büyük ölçekli rüzgâr türbin kanadı üretim prosesi video kesiti...	29
Şekil 2.28.	Lif şekilleri ve dağılımları…….....	34
Şekil 2.29.	Kompozit rüzgâr türbin kanat kumaşlarında kullanılan bazı lif türleri…….....	34
Şekil 2.30.	Kompozit sandviç yapı…….....	35
Şekil 2.31.	Yük taşıyan rüzgâr türbin kanadı yapısı…….....	41
Şekil 2.32.	Rüzgâr türbin kanatlarında endüstriyel muayeneler sonucunda tespit edilen potansiyel hasar ve kusurlar…….....	42
Şekil 2.33.	Rüzgâr türbin kanat bölgelerinde potansiyel hasar ve kusurlar….	42

Şekil 2.34.	Rüzgâr türbini kanadı arıza modları……..	44
Şekil 2.35.	Rüzgâr türbin kanat hasarında restoratif örtü tamir teknolojisi eğitim videosu kesiti…….	47
Şekil 2.36.	Çeşitli rekonstrüktif kanat onarım yöntemleri……...	48
Şekil 2.37.	Sırasıyla X-Stiffener ve Floor destek onarımlı bir çalışır türbin kanadı görseli……	48
Şekil 2.38.	Kendi kendini iyileştirme mekanizmaları…….....	49
Şekil 2.39.	a) İnsan damar yapısından yola çıkarak b) tasarlanan c) vasküler kanal uygulamaları……	53
Şekil 2.40.	Reaktif iyileştirici ajanlı mikrodamarlı yapı içeren polimer kompozitlerde otonom onarım sistemi (a) tek komponentli ve (b) çift komponentli……	54
Şekil 2.41.	Otonom malzemelerde mikrodamar teknolojisi……	54
Şekil 2.42.	Cidar membranlı farklı içi boş termoplastik liflerin SEM görüntüsü……...	56
Şekil 2.43.	1985'ten 2020'ye değişen türbinler ve kanatları……	58
Şekil 2.44.	Anlık VR simülasyon kaplamalı tam ölçekli kanat testi……	59
Şekil 2.45.	Rüzgâr türbin kanatlarında test ölçeklendirilmesi…….	59
Şekil 2.46.	Rüzgâr türbin kanatlarında hasar ve kusur tespit muayene yöntemleri…….	60
Şekil 2.47.	Türbin kanatlarında kullanılan bazı NDT yöntemleri.....	61
Şekil 2.48.	Rüzgâr türbin kanatlarında olası kusurların özet gösterimi.....	87
Şekil 3.1.	Hasar sonrası enerji üretim faaliyeti duran rüzgâr türbin kanadı onarım prosesi……...	91
Şekil 3.2.	Otonom iyileştirilmiş türbin kanat kesitinin demo görüntüsü.....	91
Şekil 3.3.	Etil-2 siyanoakrilat ve sodyum bikarbonat reaksiyonu…….....	92
Şekil 3.4.	İyileştirici ajan ile matrisin uyum mekanizması……	93
Şekil 3.5.	a) Mavi ve b) neon parlayan yeşil renkli iyileştirici ajan……	94
Şekil 3.6.	Toz aktivatör numuneleri……..	95
Şekil 3.7.	Makroskobik kesme, iyileşme sistemi……...	96
Şekil 3.8.	Makroskobik kesme için test çeşitli aktivatörlü matrisler.....	96
Şekil 3.9.	Makroskobik kesme iyileşme sistemi deney düzeneği.....	96
Şekil 3.10.	a) % 7 CFp kullanılarak b) manyetik ve c) mekanik karışımla matris hazırlığı……..	97
Şekil 3.11.	Takviye %7 CFp matris görüntüsü……	99
Şekil 3.12.	Sandviç yapı çekirdeğini oluşturan yoğun oranlı içi boş fiber nano kanalların fiziksel özellikleri……	99
Şekil 3.13.	İçi boş fiber nano mikrovasküler kanallar…….....	99
Şekil 3.14.	Kendi kendini onaran sandviç yapı gösterimi……...	102
Şekil 3.15.	Fiber nano kanallara sahip sandviç çekirdeğinin detaylı görünümü……..	102
Şekil 3.16.	Kendi kendini onaran fiber nano kanallara sahip sandviç çekirdeği mikroskobik görüntüsü…….	103
Şekil 3.17.	3 Boyutlu sandviç yapı simülasyon modeli…….....	103
Şekil 3.18.	3 Boyutlu sandviç yapı çekirdeği simülasyon modeli……	103
Şekil 3.19.	Kompozit sandviç yapı iyileştirme sistemi…….....	104
Şekil 3.20.	Darbe deney düzeneği şematik görünümü…….....	105

Şekil 3.21. Darbe deney düzeneği……... 106
Şekil 3.22. Kendi kendini iyileştirme sistemine sahip silindirik sandviç yapı numuneleri……. 107
Şekil 3.23. Kendini iyileştirme sistemi deney prosesi……..... 110
Şekil 3.24. ISM PM200S dijital mikroskop cihazı ve ISM PRO bilgisayar yazılımı kullanılarak mikroskobik inceleme……... 111
Şekil 3.25. Termal görüntüleme iyileşme ısıl değişim sıcaklık ve süre takibi.. 111
Şekil 3.26. Sıcaklık takibi raporlama görüntüsü…….. 112
Şekil 3.27. DIC testi darbe deney düzeneği……. 112
Şekil 3.28. Zeiss Gom yazılımı kullanılarak DIC raporlama görüntüsü..... 113
Şekil 3.29. Metrolojik Lazer tarama ile deformasyon ölçümleri……. 113
Şekil 3.30. Metrolojik Lazer tarama ile deformasyon ölçümleri raporlama görüntüleri……..... 114
Şekil 3.31. FBG sensör çalışma prensibi……..... 114
Şekil 3.32. Eon Photonics tarafından üretilen FBG sensör……. 115
Şekil 3.33. Kompozit sandviç yapı içerisine gömülü FBG sensör deney numunesi……... 116
Şekil 3.34. Zeiss Metrotom 3D X-Işını Tomografi cihazı……. 117
Şekil 3.35. Hasarsız, hasarlı ve iyileştirme sonrası 3D X-Işını Tomografik görüntüleme……... 117
Şekil 3.36. 3D X-Işını Tomografik görüntüleri incelemesi…….. 117
Şekil 4.1. Darbe deneyleri video kesitleri…….. 118
Şekil 4.2. Darbe deneyleri çarpma davranışı 1…….. 119
Şekil 4.3. Darbe deneyleri çarpma davranışı 2……..... 119
Şekil 4.4. Deney numunesinin kırılma anı……. 120
Şekil 4.5. YMC 9800 dinamik sinyal toplama ve analiz sistemi veri kaydı.. 120
Şekil 4.6. İyileştirilmiş ve iyileşme uygulanmamış deney numunesi karşılaştırma……..... 121
Şekil 4.7. Otonom onarım ve onarım uygulanmayan deney numuneleri tepki kuvveti karşılaştırılması…… 121
Şekil 4.8. Başlangıç onarımları ve son seviye onarım sonrası tepki kuvvet farklıkları grafiği……... 122
Şekil 4.9. Çok tekrarlı, hasar sonrası onarım sistemi uygulanan deney numunesi tepki kuvveti grafiği…….. 122
Şekil 4.10. İyileştirme sistemi ile artan hasar dayanım grafikleri..... 123
Şekil 4.11. Kullanılan FBG fiber sensörün dalga boyu ve intensity ilişkisi.... 123
Şekil 4.12. 20^{o}C'de kullanılan FBG sensör 'den iletilen sinyal gücü..... 124
Şekil 4.13. Deney numunesi, FBG sensör ile gerinim ölçümü 1..... 124
Şekil 4.14. Deney numunesi, FBG sensör ile gerinim ölçümü 2..... 125
Şekil 4.15. Darbe testi ile oluşan yer değiştirme renk haritası ve noktasal değerleri……..... 126
Şekil 4.16. Darbe testi ile oluşan noktasal yer değiştirme grafiği..... 126
Şekil 4.17. Darbe testi ile oluşan gerinim renk haritası ve noktasal değerleri.. 127
Şekil 4.18. Darbe testi ile oluşan noktasal yer değiştirme grafiği..... 127
Şekil 4.19. Darbe testi öncesi yer değiştirme renk haritası ve noktasal değerler grafiği…….. 128

Şekil 4.20. Darbe anında yer değiştirme renk haritası ve noktasal değerler grafiği……..... 128
Şekil 4.21. Darbe testi sonrası yer değiştirme renk haritası ve noktasal değerler grafiği…….. 128
Şekil 4.22. Sandviç çekirdeği yatay kesiti (solda) ve dikey kesiti (sağda)..... 129
Şekil 4.23. Hasar sonrası deney numunesi mikroskobik kesit alanı..... 129
Şekil 4.24. Mavi pigmentasyon ile renklendirilmiş iyileştirici ajan taşıyan fiber nano kanalların çalışma mekanizması……..... 130
Şekil 4.25. İyileştirici ajan taşıyan fiber nano kanallara CFp tutunması..... 130
Şekil 4.26. İyileştirici ajanların nano kanalardan hasara taşınımı ve çekirdek onarımı……..... 131
Şekil 4.27. Darbe deneyi sonrası oluşan hasar modlarının, iyileştirici ajan ile çatlak onarımı…… 131
Şekil 4.28. Delinme kaynaklı oluşan enkaz, aşınma ve boşluğun onarılması.. 132
Şekil 4.29. Sandviç yapının eğilme hasar modlarının iyileştirici ajan ile onarımı ve muayenesi……..... 132
Şekil 4.30. Neon ışıklı pigmentasyon ile renklendirilmiş iyileştirici ajan ile çatlak birleşiminin onarımı……..... 133
Şekil 4.31. Hasar sonrası iyileşme sistemi termal görüntüleme ve ölçüm renk haritası……..... 134
Şekil 4.32. Hasar sonrası iyileşme sistemi termal görüntüleme..... 135
Şekil 4.33. Hasar sonrası iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması süresi boyunca değişen ısıl görüntüleme takibi……..... 135
Şekil 4.34. FBG sensör ile iyileşme sıcaklığı takibi……..... 136
Şekil 4.35. FBG sensör ile 5 tekrarlı onarmada sıcaklık takibi..... 136
Şekil 4.36. Darbe çenenin temas ettiği bölgede oluşan mikro çatlaklarının iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması esnasında gerçekleşen termal görüntüleme…… 137
Şekil 4.37. Merkezi orta şiddet darbe ile otonom onarım esnasında gerçekleşen termal görüntüleme……..... 138
Şekil 4.38. Merkezi, yüksek şiddet darbe ile otonom onarım esnasında gerçekleşen termal görüntüleme…… 138
Şekil 4.39. İyileşme tamamlanmadan yüksek şiddetli darbe anında kompozit yapıda, kırılma esnasında termal görüntüsü……..... 139
Şekil 4.40. Hasarlı bölgede, fiber nano kanal içerisinden geçen iyileştirici ajanın hasarlı bölgeye sızması ile oluşan polimerizasyon reaksiyonunun termal görüntüleri……..... 139
Şekil 4.41. İyileştirici ajanın, kompozit yapıda bulunan karbon fiber tozları ile polimerizasyon reaksiyonunun termal renk haritası..... 140
Şekil 4.42. Darbe deneylerinde çoklu iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması süresi boyunca değişen renk haritası……..... 140
Şekil 4.43. Anlık otonom makro çatlak onarımı, deney üzerinde termal görüntüsü..... 141
Şekil 4.44. Hasarlı ve otonom iyileşen bölgelerin tomografik görüntüleri..... 142
Şekil 4.45. Hasarlı bölgenin onarılmış dikey kesitli tomografik görüntüsü..... 143
Şekil 4.46. Üretim kaynaklı mikro hava boşlularının etkisini içeren bir tomografik görüntü…… 143

Şekil 4.47. Kompozit sandviç yapıda iyileştirici ajanın volümetrik değişim etkisinin tomografik görüntüsü…….. 144
Şekil 4.48. 3D lazer tarama ile ilk hasarlı (b) ve iyileşme sonrası tekrar hasarlı (b) metrolojik deney numune kesitleri……... 144
Şekil 4.49. a) Vn, b) Hn ve c) HRHn deney numunelerinin metrolojik tarama görüntüleri……. 145
Şekil 4.50. Hn deney numunesinin lazer metrolojik tarama ile şekil değiştirme renk diyagramı……..... 145
Şekil 4.51. İlk kez darbe testine maruz kalmış numunenin hasar görüntü ve ölçüm değerleri…….. 146
Şekil 4.52. Hn deney numunesi hasarsız bölgelerinin ölçüm değerleri şematik gösterimi…….. 147
Şekil 4.53. Hn deney numunesin sırasıyla a) dikey ve b) yatay kesitleri..... 147
Şekil 4.54. Vn, Hn, HRHn deney numunelerinin noktasal birleştirme ile şekil değişikliği diyagramı……..... 148
Şekil 4.55. Dikey kesiti alınan Hn deney numunesi noktasal şekil değiştirme diyagramı……... 148
Şekil 4.56. Yatay kesiti alınan Hn deney numunesi şekil değiştirme diyagramı……... 149
Şekil 4.57. Dikey kesiti alınan Hn deney numunesi şekil değiştirme metrolojik renk diyagramı……..... 150
Şekil 4.58. Yatay kesiti alınan Hn deney numunesi şekil değiştirme metrolojik renk diyagramı……..... 151
Şekil 4.59. Hn numunesinin maksimum çökme bölgesinden, ayrılma ilk başlangıç noktasına uzaklığı……..... 152
Şekil 4.60. İyileşme sonrası tekrar darbe testine maruz kalmış HRHn numunesinin lazer tarama ile hasar görüntü ve ölçüm değerleri.... 152
Şekil 4.61. Yatay kesiti alınan HRHn deney numunesi şekil değiştirme diyagramı……... 153
Şekil 4.62. Yatay kesiti alınan HRHn deney numunesi şekil değişikliği metrolojik farkı…….. 154
Şekil 4.63. Dikey kesit, HRHn deney numunesi şekil değiştirme metrolojik renk haritası……... 155
Şekil 4.64. Yatay kesiti alınan HRHn deney numunesi şekil değiştirme metrolojik renk haritası……..... 156
Şekil 4.65. Otonom onarımlı mikrovasküler kanallara sahip Rüzgâr türbin kanat modelinin 3D kesit modeli…….. 157
Şekil 4.66. Uygulanan çok tekrarlı yükler ile stres altında çatlakların ilerlemesine bağlı otonom onarımlı ve onarım yapılmayan sandviç yapı kıyaslaması ……..... 158

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Dünyada Rüzgâr enerjisi kurulu güç……..	11
Çizelge 2.2.	Çeşitli malzemelerde hasar mekanizmalarını otonom iyileştirme metotları…….	50
Çizelge 2.3.	İyileşme tür ve yöntemlerine göre literatür araştırma örnekleri kategorisi…….	51
Çizelge 3.1.	Siyanoakrilat teknik özellikleri…….....	93
Çizelge 3.2.	Karbon fiber tozu mekanik özellikleri……..	97
Çizelge 3.3.	Matris epoksi reçinesinin özellikleri…….	98
Çizelge 3.4.	PES hammaddesinin özellikleri…….....	100
Çizelge 3.5.	Örgü fiber karbon mekanik özellikleri……...	101
Çizelge 4.1.	Hasar sonrası iyileşme sistemi termal ölçüm değerleri…….....	134
Çizelge 4.2.	Hasar sonrası iyileşme sistemi termal ölçüm değerleri 2….....	135
Çizelge 4.3.	Darbe çenenin temas ettiği bölgede oluşan mikro çatlaklarının iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması esnasında gerçekleşen sıcaklık ölçüm değerleri…….	137
Çizelge 4.4.	Merkezi orta şiddet darbe ile otonom onarım esnasında sıcaklık ölçüm değerleri…….	138
Çizelge 4.5.	Merkezi, yüksek şiddet darbe ile otonom onarım esnasında sıcaklık ölçüm değerleri…….	139
Çizelge 4.6.	İlk hasar sonrası noktasal şekil değiştirme ölçüm tablosu.....	146
Çizelge 4.7.	Hn deney numunesi hasarsız bölgelerinin ölçüm değerleri tablosu…….	147
Çizelge 4.8.	Dikey kesiti alınan Hn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm tablosu…….	149
Çizelge 4.9.	Yatay kesiti alınan Hn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm tablosu…….	149
Çizelge 4.10.	Dikey kesiti alınan Hn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm değerleri tablosu……...	150
Çizelge 4.11.	Yatay kesiti alınan Hn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm değerleri tablosu……...	151
Çizelge 4.12.	İyileşme sonrası tekrar darbe testine maruz kalmış HRHn noktasal şekil değiştirme ölçüm tablosu……...	153
Çizelge 4.13.	Yatay kesiti alınan HRHn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm tablosu…….	154
Çizelge 4.14.	Yatay kesiti alınan HRHn deney numunesi noktasal şekil değişikliği farkı ölçüm tablosu…….	154
Çizelge 4.15.	Dikey kesiti alınan HRHn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm değerleri tablosu……...	155
Çizelge 4.16.	Yatay kesiti alınan HRHn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm değerleri tablosu……...	156

1. GİRİŞ

Dünyada hızla gelişen ve sürdürülebilir enerji kaynağı olarak deniz üstü rüzgâr türbinlerinin (DRT) üretilip kullanılmasında ülkemiz yüksek potansiyeli ile önemli bir endüstriye adım atıyor. Yüksek verimlilikte rüzgâr enerjisinden faydalanma, uygun rüzgâr yoğunluğuna sahip saha ve stratejik öneme sahip deniz üstü rüzgâr türbinleri yakın gelecekte önemli bir sürdürülebilir kalkınma sağlayacağı açıktır.

Türbin kanatların aerodinamik özellikleri, rüzgâr türbinlerin dinamik etkileri, yapısal bütünlüğü, halatlama, yüzer sistemlerle hibrit enerji hasadı, deniz temizleme gibi pek çok trend ve ticarileştirilebilir rüzgâr enerjisi konularında araştırmacılar, sürekli iyileştirme çalışmaları yapmaktadır.

Dünyada, yakın gelecekteki enerji sorunlarına karşı dış bağımlığı azaltıcı enerji sistemleri arayışı ve çalışmalar ile ülkemizin deniz sahasının büyüklüğü rüzgâr kalitesi nedeniyle mevcut potansiyelin keşfi söz konusudur. Bu durum, DRT çok yüksek bütçeli yatırımlarla karasal sistemlerde olduğu gibi pazarı paylama etkisi oluşturmaktadır. Bu bağlamda oluşacak enerji kısıtlarına karşı adımlarla ülkemizin yeni endüstrisinde bilgi, tecrübe ve uzmanlık acil kazanımlar gerekmektedir.

Günümüzün “son kullanıcı” yatırımcıların ve işletmecilerin türbin ve kanat satış sonrası, yüksek bakım ücretleri maliyeti de söz konusudur. Çevrim süresi yaklaşık 20 yıl olan kanatlar ömrü dolmadan oluşan hasarların ve bakımların getirdiği maliyet ile yeni ve daha uzun kanat satın alınmaya yönlendirilecektir. Bu süreç döngüsü büyük sermaye ve maliyete dönüşeceği bilindiğinden, yerli yeni yatırımcılarda git gide cazipliği yitirebilmektedir. Daha da önemlisi DRT ile düşük maliyetli ve uzun ömürlü kanatlara geçiş ciddi önem arz etmektedir. Mevcut karasal rüzgâr türbin kanatlarının termoset geri dönüşümsüz oluşu yakın gelecekte hem ekonomik hem de çevresel sorunlara yol açacaktır. Termoset malzeme bir kez kürlendiğinde, reçine kürünün geri dönüştürülmesi oldukça uzun sürer. Amortisman ya da çevrim süresi tamamlandığında büyük ölçekli çöpler olacaktır.

Yığınla çöp sorunu oluşacak hatta bu büyük çöp lojistiğinin maliyetinden dolayı diğer ülkelerde olduğu gibi ekolojik denge sorunun bilinmesine karşı acil önlemler ve çözümler aranacak belki de karaya gömülecektir. Yeşil uyumu, karbon ayak izi, sıfır atığa yakınlaşma gibi yeni sorunlar oluşmaya devam edecektir. DRT endüstrisi ile sürdürülebilir kanat kullanımına geçiş sağlanırsa bu sayede geri dönüşümlü hammadde kullanımı oluşur ve ülkemizde termoplastik teknolojisinin, üretimin yöntemlerinin geliştirilmesini başarabiliriz.

Deniz üstü rüzgâr türbinlerin çok yönlü ve oyunun kurallarını yeniden yazabilen önemli bir stratejik gücü söz konusudur. Çünkü türbinlerle birlikte istasyon olarak kullanımı söz konusu olacaktır. Deniz üstü ve deniz altı sınır kapısı oluşturma güvenlik sahası ve olağan dışı deniz trafiği durumlarına karşı radar haritalandırma insansız muhabere ve enerji noktası ve insansız hava araçları (İHA) üssü vb. buz dağının gösterilmeyen yüzü gibi güç sağlayacak etkileri olacaktır.

Deniz üstü ve karasal enerji üreteçleri olan rüzgâr türbinlerinde kanat hasarlarının önlenmesi sistemin optimal çalışması ve de bakım maliyetlerini düşürücü gelişmeler ciddi önem arz etmektedir. Uzun ömürlü türbinlerin üretilmesi kamusal kalkınmaya önemli katkı sağlayacaktır. Bu teknolojideki son gelişmeler dikkatlice takip edilip detaylı literatür taraması yapılarak interdisipliner analitik yaklaşıma ihtiyaç vardır. Kamusal alan ve yatırım bütünlüğü ile endüstriyel adımlarda gerçeğe yakınlaşan simülasyonlar, çevrim verileri ve hata izleme-kontrolü gibi yüksek tecrübe gerektiren akademik bir yaklaşım söz konusudur. Deniz üstünde kullanılan teknolojilerin yerli bir deneyim için karasal türbin senaryolarından deniz ve demirleme sistemlerinden faydalanmak yetersiz kalmakla birlikte “know-how” sağlamayacaktır. Ülkemizde akademik gelişmelerin ve çalışmaların artması deniz üstü rüzgâr türbin endüstrisindeki yoğun çabaların verimli olması için yerli bir güçlü ivme katacaktır.

Aynı zamanda bölgemizin yeni endüstri pazarında ülkemiz, teknoloji üretip satma gayesindedir. DRT’ler, otomobil gibi büyük bir endüstri niteliğindedir. Küresel bölgemizde yeni endüstriyel pazar oluşumu, rüzgâr türbinlerinin gelişimi ile gemi inşaat, deniz lojistik, kablolama ve kontrol sistemleri dış pazarlamada ülkemiz; denizcilik

uygulamalarında bir etki sağlayabilecek düzeydedir. Deniz üssü rüzgâr, hidrojen ve dalga etkilerinden hibrit enerji istasyonlarına, yeni uzmanlık konularında nitelikli bilirkişi insan kaynağı gelişmesine de olanak sunacaktır.

Bu çalışma, özellikle DRT ve karasal rüzgâr türbin kanatları, İHA kanat yapısı için geliştirilmiş kendi kendini onarabilecek tendonlara sahip, hasar sonrası oluşan mukavim kayıpları ve aerodinamik sapmayı iyileştirecek üretim prosesini azaltıp ve bakım-onarım maliyetini düşürecek daha rijit yeni bir otonom onarım mekanizmalı fiber takviyeli kompozit panel, sandviç ve kanat yapılanması ile ilgilidir. Bu bağlamda mühendislik çözümlerinde kullanılan sandviç malzeme çekirdekleri, kendi kendini iyileştiren malzemeler ve mekanizmaları ile oluşturulmuş kompozit sandviç yapılarla ilgilidir. Özellikle havacılık, otomotiv ve denizcilik sektörlerinde hasar sonrası çatlak kapatmayı delinme sonucu sızıntı durdurma ve güçlendirmeyi maksimum seviyeye çıkarmak için geliştirilmiştir. Özetle bu çalışma, yeni bir sandviç çok kanallı çekirdek yapılanması ile ilgili olup çekirdeğin nano kanallı iyileşme mekanizmalarını ile karakterize edildiğinden anlık mikro tamir sistemini içermektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Yenilenebilir Temiz Enerji

Temiz ve yenilenebilir enerji, sürekli olarak yenilenen ve çevre üzerinde zararlı bir etkisi olmayan doğal kaynaklardan elde edilen bir enerji biçimini ifade eder. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, jeotermal, hidro, biyokütle, hidrojen, dalga ve rüzgâr gibi temiz enerji türlerini kapsamaktadır. Fosil yakıtların aksine, bu kaynaklar enerji ihtiyacımızı karşılamak için tükenmez sürdürülebilir ve düşük karbon emisyonlu alternatifler sunmaktadır. Temiz enerji, iklim değişikliği, enerji bağımsızlığı ve ekonomik ilerleme gibi kritik konuları ele alma vaadini taşımaktadır (Duran vd., 2023; Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Raporu, 2023). Temiz enerji, küresel ısınma, enerji güvenliği ve kalkınma gibi önemli sorunlara çözüm olabilecek potansiyele sahiptir (BestforEnergy,2023; Semtrio, 2023). Yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji üretimim yaklaşımının ekonomik büyüme, enerji verimliliği, enerji politikaları ve Türkiye'nin enerji görünümü üzerindeki etkilerini her geçen gün artmaktadır. (Türkiye Kalkınma Amaçları, 2023).

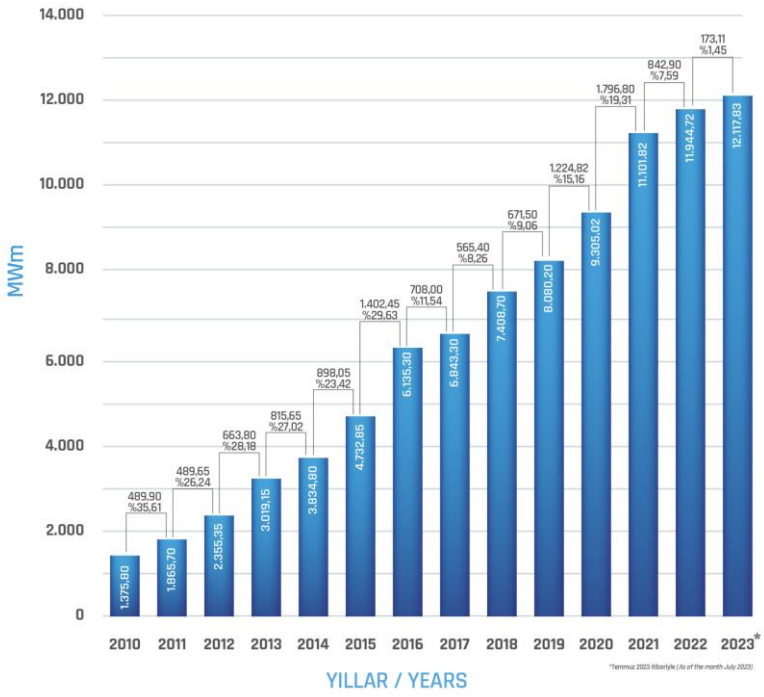
Temiz enerji kaynakları ise emisyonları ile sera gazı salınımına ve hava kirliliğine yol açmayan doğamıza karşı zararsız kaynaklardır. Yenilenebilir ve temiz enerji, hem iklim değişikliği ile mücadele etmek hem de enerji güvenliği sağlamak için önemlidir. Birçok ülke, yenilenebilir ve temiz enerjiye yatırım yaparak emisyonlarını azaltmayı ve net sıfır emisyon hedefine ulaşmayı amaçlamaktadır (Taşbaşı, 2023; Zorlu Enerji, 2023; Küresel Amaçlar, 2023, Getmidas, 2022).

2.2. Rüzgâr Enerjisinde Türkiye

Ülkemizde iklim hedefleri yenilenerek çok daha güçlenmiştir. Yenilenebilir ve temiz enerji üretimi, tedariği ve de kullanımının yaygınlaştırılmasında pek çok çeşitli önemli projeler, destekler ve teşvikler sunmaktadır. Bu bağlamda ülkemizde yüksek enerji potansiyele sahip ve her geçen gün büyüyen rüzgârdan elektrik üretimi yer almaktadır (Pwc, 2023, Aydoğdu, 2021, Koç ve Kaya, 2015, Demirgil ve Birol, 2020, Ökten, 2023, 12. Kalkınma planı, 2023).

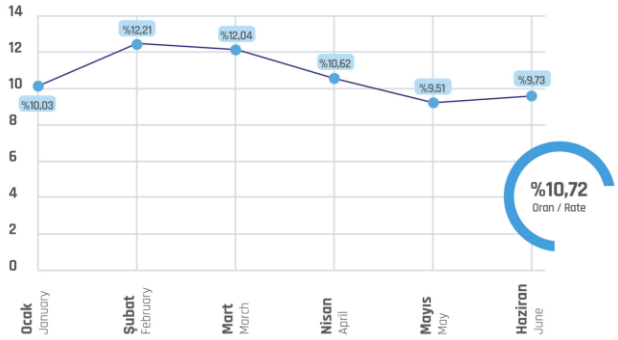
Rüzgâr enerji üretim santralleri (RES) ve rüzgâr türbinleri kurulum sahaları ile işlenip bu potansiyel son kullanıcı olan bizlere ulaşıp temiz enerjiden elektrik kullanımı sağlamaktadır.

Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB)'in yayınladığı Aralık 2023 almanağına göre 11.944 MWm toplam güce sahip 274 adet aktif rüzgâr enerji santralleri, bu santrallerde 4.198 kurulu rüzgâr türbinleri ve 920 MWm inşa halindeki 33 adet yeni santraller yer almaktadır (TÜREB, 2023). TÜREB'in yayınladığı Temmuz 2023 Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu'nda yer alan rüzgâr enerjisi kümülatif santral kurumları gücü grafiği Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu, 2023, Türeb Rapor, 2023).



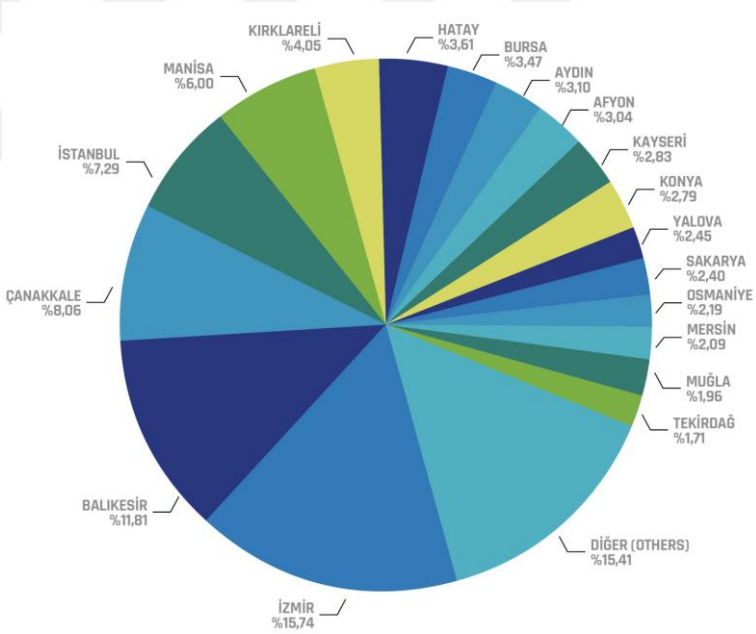
Şekil 2.1. Ülkemizde rüzgâr enerjisi kümülatif santral kurumları gücü (TÜREB Rapor, 2023).

Bu bağlamda elektrik üretiminin Ocak 2023 – Aralık 2023 tarihleri arasında %11,1'i rüzgâr enerji santrallerinden sağlanmaktadır. Şekil 2.2'de ülkemizdeki RES'lerin elektrik üretimindeki payı yer almaktadır. Mevsimsel ve iklimsel farklılıklarında etkili olduğu 2023 yılının ilk 6 ayına göre %4 artış ile her geçen gün gelişen santrallerden verimlilik giderek artmaktadır (TÜREB Rapor, 2023).



Şekil 2.2. Ülkemizdeki RES'lerin elektrik üretimindeki payı (TÜREB Rapor,2023)

Önemli vizyona sahip yaklaşımlarla 12. Kalkınma Planlamasında yer alan deniz üstü ve karasal rüzgâr türbinlerinin günümüz verilerine göre büyüme gösteren işletmedeki RES'lerin illere göre dağılımı Şekil 2.3'te gösterilmiştir (TÜREB Rapor, 2023).



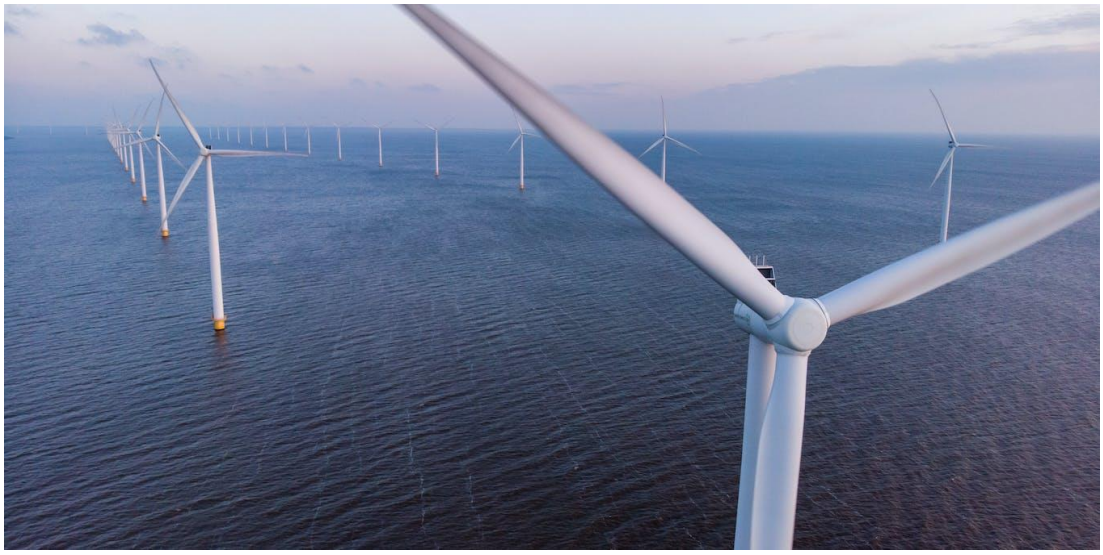
DİĞER %					
Bilecik	1,40	Uşak	0,45	Malatya	0,10
Kırşehir	1,39	Van	0,44	Bitlis	0,04
Sivas	1,28	Eskişehir	0,44	Karaman	0,03
Amasya	1,16	Çankırı	0,42		
Tokat	1,16	Bingöl	0,41		
Kahramanmaraş	1,00	Bayburt	0,36		
Kocaeli	0,86	Kırıkkale	0,36		
Edirne	0,80	Sinop	0,35		
Denizli	0,62	Adana	0,28		
Gaziantep	0,54	Ağrı	0,23		
Isparta	0,51	Adıyaman	0,23		
Samsun	0,46	Ordu	0,10		

Şekil 2.3. RES'lerin illere göre dağılımı (TÜREB Rapor, 2023).

Bu bağlamda yapılan doktora çalışma konusu öncelikli alanlarda yer alması nedeniyle; giriş kısmında elektrik üretiminde rüzgâr enerjisinin ülkemizdeki rolünün ön araştırması ile rüzgârdan enerji üretiminin sürdürülebilirlik ve enerji bağımsızlığı adına olası ve mevcut mühendisliğin geliştirilmesi ve dar boğaz sorunlarının azaltılması akademik ve bilimsel yaklaşımla iyileştirilmesi açıktır. Kapsamlı araştırmalar sonucunda rüzgâr türbinlerinin yüksek sürekli enerji üretimi için kanatların ömrü ve olası kusurları irdelenip çevrim süresinin artırılması için türbin kanatlarının iyileştirilmesi temel motivasyonum olmuştur. Hedef alınan problem tespitinin netleştirilmesi ve rüzgârdan, türbin kanatlarının enerji üretim prosesine kadar endüstriyel ve literatür kaynak araştırmaları ve kuramsal temel bilgiler bu çalışmanın ikinci bölümünü oluşturmaktadır.

2.3. Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr, doğal bir hava hareketi olup yenilenebilir, temiz ve ekonomik bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr türbinleri (Şekil 2.4), rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren güç üretme sistemleridir. Temel çalışma prensibi, rüzgârın türbin kanatlarına çarparak onları döndürmesidir. Rüzgârın enerjisi, türbinin rotoruna aktarılır ve buradan dönen hareket, bir jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür (Liton vd., 2018).



Şekil 2.4. Deniz üstü rüzgâr türbinleri (Hogg and Fokke, 2023)

Rüzgâr türbinleri, tarihte birçok farklı amaç için kullanılmıştır. İlk rüzgâr türbinleri, 7. yüzyılda Pers'te tahıl öğütmek veya su çekmek için kullanılan dikey eksenli yel değirmenleriydi. Daha sonra Avrupa'da yatay eksenli yel değirmenleri, un, kâğıt, tekstil ve diğer ürünlerin üretiminde yaygınlaştı. 19. Yüzyılda rüzgâr türbinleri, elektrik üretmek için kullanılmaya başlandı. İlk elektrik üreten rüzgâr türbini, 1887 yılında İskoç mühendis James Blyth tarafından yapıldı (“Rüzgâr Türbinleri”, 2023).

Rüzgâr türbinleri, çeşitli özelliklere göre sınıflandırılabilir. Bunlardan bazıları şunlardır: Dönme eksenine göre: Rüzgâr türbinleri, dönme eksenlerinin yatay veya dikey olmasına göre Şekil 2.5 örnekleri gibi ikiye ayrılır. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT), en yaygın kullanılan türdür. Bu türbinler, rüzgârın yönüne göre yönlendirilebilir ve yüksek verimlilik sağlar. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT), rüzgârın yönüne bağlı olmadan çalışabilir ve daha az bakım gerektirir. Ancak, bu türbinler, daha düşük verimlilik ve daha fazla gürültü üretir (Alpkunt, 2021, Broṇdsted vd.,2023).



Şekil 2.5. Sol tarafta: YERT Siemens 2,3 MW rüzgâr türbini, 69 m yüksekliği, Rødsand, Danimarka'da yer almaktadır. Sağ tarafta: DERT Éole 4 MW rüzgâr türbini, yüksekliği 110 m, Quebec, Kanada'da yer almaktadır. Sol Fotoğraf: Christian Bak, Sağ Fotoğraf: Paul Gipe (Christian, 2023)

Devrine göre: Rüzgâr türbinleri, devir sayılarına göre yüksek, orta veya düşük devirli olarak sınıflandırılabilir. Yüksek devirli rüzgâr türbinleri, daha fazla elektrik üretir ancak daha fazla gürültü ve titreşim yaratır. Orta devirli rüzgâr türbinleri, daha az gürültü ve titreşim üretir ancak daha fazla mekanik aşınmaya maruz kalır. Düşük devirli rüzgâr türbinleri, daha az elektrik üretir ancak daha az gürültü, titreşim ve aşınma yaratır (Liton vd., 2018).

Gücüne göre: Rüzgâr türbinleri, ürettikleri elektrik gücüne göre küçük, orta veya büyük ölçekli olarak sınıflandırılabilir. Küçük ölçekli rüzgâr türbinleri, genellikle 100 kW'ın altında güç üretir ve ev, çiftlik, okul gibi yerlerde kullanılır. Orta ölçekli rüzgâr türbinleri, 100 kW ile 1 MW arasında güç üretir ve ticari, endüstriyel veya toplumsal amaçlar için kullanılır. Büyük ölçekli rüzgâr türbinleri, 1 MW'dan fazla güç üretir ve rüzgâr çiftlikleri veya rüzgâr santralleri gibi büyük ölçekli projelerde kullanılır (“Rüzgâr Türbinleri”, 2023).

Kanat sayısı: Rüzgâr türbinlerinde kullanılan kanatların sayısına göre tek, iki, üç veya daha fazla kanatlı olarak sınıflandırılabilir. Tek kanatlı rüzgâr türbinleri, en basit ve en ucuz türdür ancak dengesiz çalışır ve düşük verimlilik sağlar. İki kanatlı rüzgâr türbinleri, daha dengeli ve daha verimli çalışır ancak daha fazla gürültü ve titreşim yaratır. Üç kanatlı rüzgâr türbinleri, en yaygın kullanılan türdür. Bu türbinler, en dengeli, en verimli ve en sessiz çalışır. Çok kanatlı rüzgâr türbinleri, daha fazla tork üretir ancak daha düşük devirde çalışır ve daha fazla bakım gerektirir (Alpkunt, 2021).

Rüzgâr etkisine göre: Rüzgâr türbinleri, rüzgârın kanatlara etki etme şekline göre sürükleme veya kaldırma tipi olarak sınıflandırılabilir. Sürükleme tipi rüzgâr türbinleri, rüzgârın kanatları itmesiyle çalışır. Bu türbinler, basit ve ucuzdur ancak düşük verimlilik sağlar. Kaldırma tipi rüzgâr türbinleri, rüzgârın kanatları kaldırmasıyla çalışır. Bu türbinler, karmaşık ve pahalıdır ancak yüksek verimlilik sağlar (Broṇdsted vd., 2023).

Dişli özelliklerine göre: Rüzgâr türbinleri, dişli kutusu kullanıp kullanmadıklarına göre dişli veya dişlisiz olarak sınıflandırılabilir. Dişli rüzgâr türbinleri, rotorun dönme hızını artırmak için dişli kutusu kullanır. Bu türbinler, daha fazla elektrik üretir ancak daha fazla ağırlık, maliyet ve bakım gerektirir. Dişlisiz rüzgâr türbinleri, dişli kutusu kullanmadan doğrudan tahrikli jeneratör kullanır. Bu türbinler, daha az elektrik üretir ancak daha az ağırlık, maliyet ve bakım gerektirir (Elibüyük ve Üçgül, 2014).

Kurulum konumuna göre: Rüzgâr türbinleri, kuruldukları yerlere göre kara veya deniz tipi olarak sınıflandırılabilir. Kara tipi rüzgâr türbinleri, kara üzerinde veya yakınında kurulur.

Bu türbinler, daha kolay ve daha ucuz kurulur ancak daha düşük rüzgâr hızlarına maruz kalır. Deniz tipi rüzgâr türbinleri, deniz üzerinde veya yakınında kurulur. Bu türbinler, daha zor ve daha pahalı kurulur ancak daha yüksek rüzgâr hızlarına maruz kalır (Altun, 2004).

Rüzgâr türbinleri, bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunlardan bazıları ise malum rüzgâr ve rüzgâr enerjisi, aralıklı ve %100 doğru olarak tahmin edilemez bir kaynak türüdür. Rüzgârın hızı ve yönü sürekli değişir ve mevsimsel etkilere bağlıdır. Bu nedenle, rüzgâr türbinleri, sürekli ve istikrarlı bir elektrik üretimi sağlayamaz. Rüzgâr enerjisinin, diğer enerji kaynakları veya depolama sistemleri ile entegre edilmesi gereklidir. (Rao, 2019).

Rüzgâr türbinleri, estetik, gürültü ve en önemlisi gölge etkisi gibi çevresel ve sosyal sorunlara neden olabilir (A. Aytaç, Galata Wind, kişisel görüşme, 17 Haziran 2022). Rüzgâr türbinleri, manzarayı bozabilir, kuş ve yarasaların ölümüne yol açabilir, insanların sağlığını ve yaşam kalitesini etkileyebilir. Bu nedenle, rüzgâr türbinleri kurulumları için en doğru bir fizibilite saha çalışması kaçınılmazdır (Tchakoua vd., 2013, Qiau ve Lu, 2015, Liton vd., 2018).

2.3.1. Dünya'da Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr enerjisi, Dünyanın potansiyel birçok ülkesinde kullanılmaktadır. Bazı ülkeler, rüzgâr enerjisine daha fazla yatırım yaparak elektrik ihtiyaçlarının önemli bir bölümünü bu kaynaktan karşılamaktadır. Dünyada 2022 ve 2023 verilerine göre rüzgâr enerjisi kullanımında önde gelen ülkelerden bazıları şunlardır:

Çin, dünyanın en fazla rüzgâr enerjisi kurulu gücüne sahip ülkesidir. 2022 yılı itibariyle, Çin'in rüzgâr enerjisi kurulu gücü 328.973 MW'dir. Bu, dünyanın toplam rüzgâr enerjisi kurulu gücünün %40'ından fazlasına denk gelmektedir. Çin, rüzgâr enerjisi ile hem kara hem de deniz üzerinde elektrik üretmektedir. Çin'in rüzgâr enerjisi ile karşıladığı elektrik ihtiyacı %5,5'tir.

Amerika Birleşik Devletleri, dünyanın ikinci en fazla rüzgâr enerjisi kurulu gücüne sahip ülkesidir. 2022 yılı itibariyle, Amerika Birleşik Devletleri'nin rüzgâr enerjisi kurulu gücü 132.738 MW'dir. Bu, dünyanın toplam rüzgâr enerjisi kurulu gücünün %16'sına denk gelmektedir. Amerika Birleşik Devletleri, rüzgâr enerjisi ile sadece kara üzerinde elektrik üretmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nin rüzgâr enerjisi ile karşıladığı elektrik ihtiyacı %8,4'tür.

Almanya, dünyanın üçüncü en fazla rüzgâr enerjisi kurulu gücüne sahip ülkesidir. 2022 yılı itibariyle, Almanya'nın rüzgâr enerjisi kurulu gücü 63.760 MW'dir. Bu, dünyanın toplam rüzgâr enerjisi kurulu gücünün %7,9'una denk gelmektedir. Almanya, rüzgâr enerjisi ile hem kara hem de deniz üzerinde elektrik üretmektedir. Almanya'nın rüzgâr enerjisi ile karşıladığı elektrik ihtiyacı %23,4'tür. Çizelge 2.1'de listelenen ve dünyada rüzgâr enerjisi kullanımında diğer önemli ülkelerden bazıları ise Hindistan, İspanya, Birleşik Krallık, Brezilya, Fransa, Kanada, İsveç, İtalya ve Türkiye'dir (Enerji Atlası, 2023, Wind IEA, 2023).

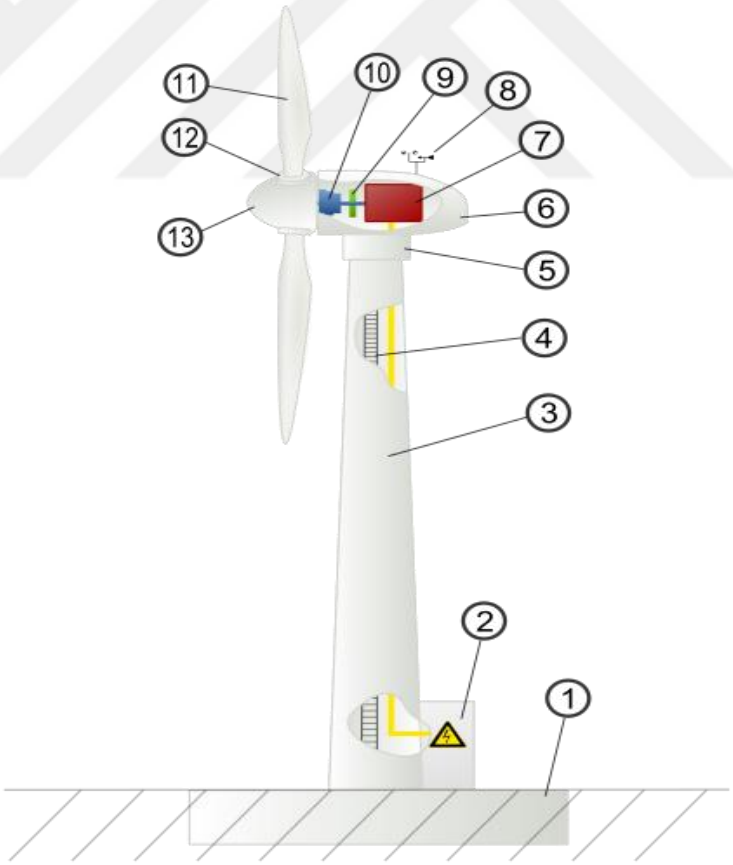
Çizelge 2.1. Dünyada rüzgâr enerjisi kurulu güç (Enerji Atlası, 2023).

ÜLKELERE GÖRE DÜNYADA RÜZGAR SANTRALİ KURULU GÜCÜ LİSTESİ			
S.	**Ülke**	**Güncelleme**	**Kurulu Güç (MW)**
1	Çin	Ocak 2022	328.973
2	Amerika Birleşik Devletleri	Ocak 2022	132.738
3	Almanya	Ocak 2022	63.760
4	Hindistan	Ocak 2022	40.067
5	İspanya	Ocak 2022	27.497
6	Birleşik Krallık	Ocak 2022	27.130
7	Brezilya	Ocak 2022	21.161
8	Fransa	Ocak 2022	18.676
9	Kanada	Ocak 2022	14.304
10	İsveç	Ocak 2022	12.080
11	İtalya	Ocak 2022	11.276
12	**Türkiye**	**Haziran 2022**	**10.886**
13	Avusturalya	Ocak 2022	8.951
14	Hollanda	Ocak 2022	7.801
15	Meksika	Ocak 2022	7.692
16	Danimarka	Ocak 2022	7.014
17	Polonya	Ocak 2022	6.958
18	Portekiz	Ocak 2022	5.248
19	Belçika	Ocak 2022	4.780
20	Norveç	Ocak 2022	4.650
21	Japonya	Ocak 2022	4.471
22	Yunanistan	Ocak 2022	4.457
23	İrlanda	Ocak 2022	4.332
24	Vietnam	Ocak 2022	4.118
25	Avusturya	Ocak 2022	3.524
26	Romanya	Aralık 2016	3.028
27	Güney Afrika	Aralık 2020	2.636

Rüzgâr enerjisi, dünyanın enerji ihtiyacını karşılamada çok kıymetli bir rol oynamaktadır. Rüzgâr enerjisi ile fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmakta sera gazı emisyonlarını düşürmekte istihdam yaratmakta ve ekonomik kalkınmaya katkı sağlamaktadır. Rüzgâr enerjisi, teknolojik gelişmeler, politik destek, sosyal talep ve çevresel fayda ile gelecekte de büyümeye devam edecektir (Ekolojist, 2017; Enerji Atlası, 2023).

2.3.2. Rüzgâr Türbin Bileşenleri

Şekil 2. 6'da numaralandırılan rüzgâr türbin bileşenleri şunlardır:1- Temel, 2- Elektrik şebekesi bağlantısı, 3- Kule, 4- Merdiven, 5- Rüzgâra doğru yönlendirme kontrolü (Sapma kontrolü), 6-Makina yuvası (Nacelle), 7- Generatör, 8- Anemometre, 9- Elektrikli veya Mekanik Fren, 10- Şanzıman, 11- Rotor kanadı, 12- Kanat hatve kontrolü, 13- Rotorun göbeği (Hub).



Şekil 2.6. Rüzgâr türbinlerinin temel bileşenleri ("Rüzgâr türbin tasarımı", 2023).

• Kanatlar (rotor): Rüzgârı yakalayıp, şaftın dönmesini sağlayan bölümdür. Kanatlar, uçak kanadı gibi aerodinamik bir tasarıma sahiptir ve rüzgârın basınç farkını kullanarak dönme kuvveti oluşturur.

• Düşük hızlı şaft: Rotor ile birlikte dönen ve bir dişli mekanizması kullanılarak yüksek hızlı şaftı döndürmektedir. Düşük hızlı şaft, dakikada 30-60 devir arasında dönmektedir. Düşük hızlı şaftın dönüşünü yüksek hızlı şafta aktarır. Dişli kutusu, rüzgâr türbininin verimini artırmak için gereklidir, çünkü generatörün yüksek hızda dönmesi gerekir. Dişli kutusu, planet dişli, helisel dişli veya hidrolik dişli gibi farklı tiplerde olabilir.

• Yüksek hızlı şaft: Düşük hızlı şaft dönüşünü optimum hızda generatöre aktarır. Yüksek hızlı şaft, dakikada 1000-1800 devir arasında döner.

• Generatör: Yüksek hızlı şaftın dönüşünü veyahut elektromanyetik indüksiyonu kullanarak elektrik bu bölümde üretilir. Rüzgâr türbinlerinde doğru akım, senkron veya asenkron jeneratörler kullanılabilir.

• Anemometre: Rüzgâr hızını ölçüp; olağan bilgiyi kontrolöre iletir. Kontrolör, rüzgâr hızına göre türbinin çalışmasını ayarlar.

• Kanat hatve kontrolü: Kanatların açısını ayarlar ve böylece rüzgârın etkisini optimize eder. Kanat hatve kontrolü, türbinin güç çıkışını ve yükünü kontrol etmek için kullanılır. Kanat hatve kontrolü, pasif, aktif veya hibrit olabilir.

• Sapma sürücüsü ve motoru: Rüzgâr yönü ölçüm bilgisine göre türbinin rüzgâra dik olmasını sağlar. Sapma sürücüsü ve motoru, türbinin verimini artırır. Sapma sürücüsü ve motoru, elektrikli, hidrolik veya pnömatik olabilir.

• Fren sistemi: Rüzgâr türbinlerinin çalışma güvenliğini için etkili bir frenleme sistemi kullanılır. Fren sistemi, maksimum hız limitinin aşıldığı veya acil durumların

olduğu durumlarda türbini durdurur. Fren sistemi mekanik, elektrikli veya hidrolik olabilir.

- Kule: Türbinin kanatlarını, generatörünü ve diğer bileşenlerini yerden güvenli bir yükseklikte taşır. Kuleler, çelik, beton veya kafes yapılı olabilir (Rao, 2019; "Rüzgâr türbin tasarımı", 2023).

2.3.3. Rüzgâr Türbinlerinin Çalışma Prensibi

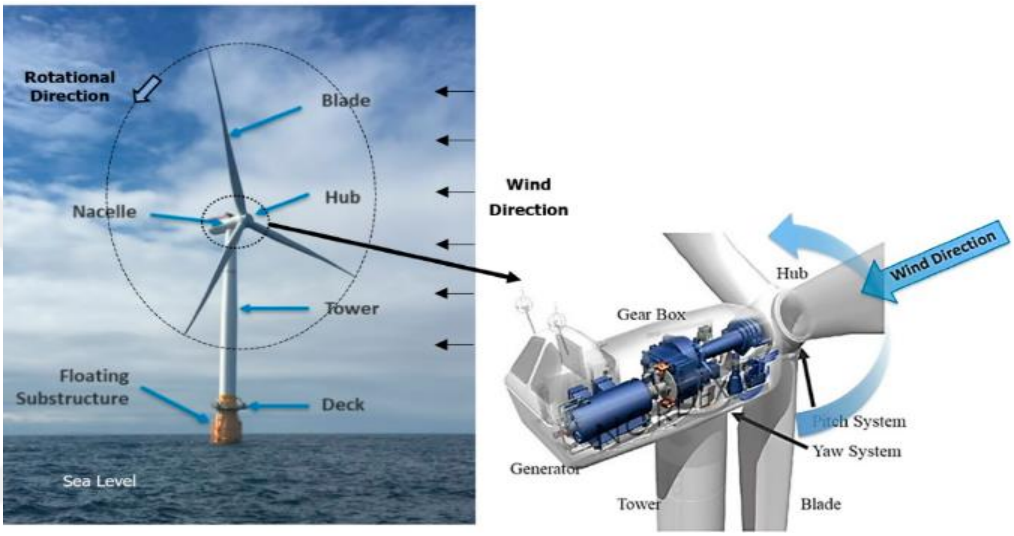
Rüzgâr türbinlerinin çalışma prensibine göre rüzgâr, türbinin kanatlarını döndürür. Bu da düşük hızlı şaftı döndürür. Düşük hızlı şaft ise dişli sistemi sayesinde yüksek hızlı şaftı döndürür. Bu da generatörü çalıştırır. Generatör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu sayede elektrik enerjisi, şebekeye ve/veya depolama sistemlerine aktarılır. Kısacası bu silsileye göre rüzgâr türbinlerinin temel çalışma prensibi, rüzgârdan alınan kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye dönüştürür. Hemen ardından elektrik enerjisine dönüşümü sağlanır. Bu işlem, rüzgâr türbininin yukarda bahsedilen bileşenleri tarafından gerçekleştirilir.

Rüzgâr türbini seçimi, birçok faktör ve kriterlere bağlıdır. Öncelikle, rüzgâr türbinini kurmak istenilen yerin rüzgâr potansiyelini, arazi yapısını, ulaşılabilirliğini ve izin gerekliliklerini araştırılması gerekir. Rüzgâr potansiyeli, rüzgâr türbininin verimliliğini ve elektrik üretimini belirleyen en önemli faktördür. Rüzgâr hızı ve yönü, rüzgâr türbininin boyutu, kapasitesi, kanat sayısı, kanat açısı, dönme eksenine göre seçilmelidir. Ayrıca rüzgâr türbininin maliyeti, üretim kalitesi, nakliye ve kurulum ücretleri, bakım ve onarım gereksinimleri gibi faktörleri ve çeşitli kriterlerde önemle dikkate alınmaktadır (Elektrikinfo, 2024; Yedekçioğlu, 2020, Alpkunt, 2021; Çevik, 2019; Elibüyük ve Üçgül, 2014; Lesics, 2015).

2.4. Deniz üstü (Offshore) Rüzgâr Türbinleri

Offshore yani deniz üstü rüzgâr türbinleri Şekil 2.7. ve Şekil 2.8'de gösterilen, denizdeki rüzgâr enerjisinden yararlanmak için tasarlanmış özel yapılardır.

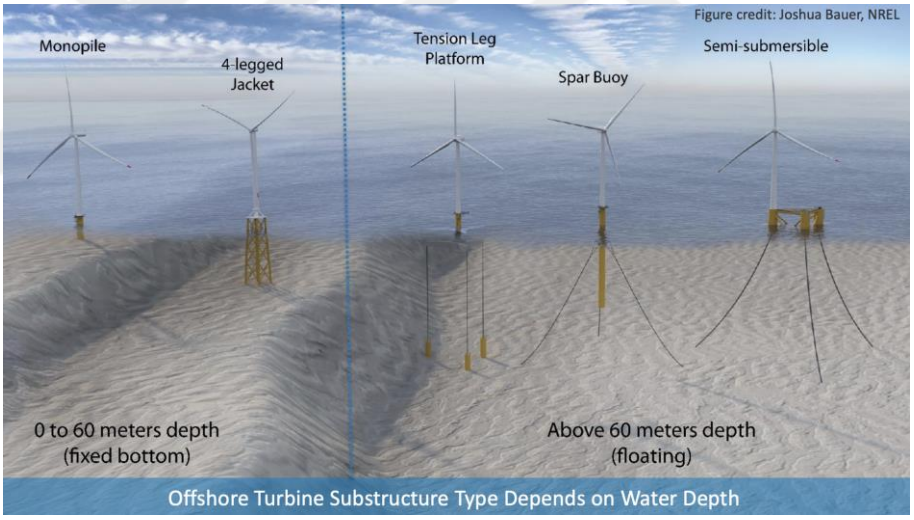
Offshore rüzgâr türbinleri, kara üzerindeki rüzgâr türbinlerine göre daha yüksek ve daha sürekli rüzgâr hızlarına sahip oldukları için daha fazla elektrik üretebilirler. Offshore rüzgâr türbinleri, deniz dibine sabitlenmiş veya yüzen bir platform üzerine monte edilmiş olabilirler. Offshore rüzgâr türbinleri, yenilenebilir enerji kaynağı olarak çevre dostu olmalarının yanı sıra deniz ekosistemine ve insan faaliyetlerine de bazı etkileri olabilirler. Bu etkiler, rüzgâr türbinlerinin yerleştirildiği bölge, tasarım, işletim ve bakım gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir (Asim vd., 2022; Li vd., 2022).



Şekil 2.7. Spar şamandıra alt yapısına sahip Siemens 6.0 MW Yüzer Açık Deniz Rüzgâr Türbini Fotoğraf: NREL (Musial, 2020)

Offshore rüzgâr türbinleri, denizdeki yüksek ve sürekli rüzgâr hızları nedeniyle kıyıdakilere göre önemli ölçüde daha fazla enerji üretebilir. Offshore rüzgâr türbinlerinin enerji üretimi, türbinin boyutu, tipi, konumu, derinliği, rüzgârın hızı, gücü ve yönü gibi birçok faktöre bağlıdır. Ortalama olarak offshore rüzgâr türbinleri 2 ila 8 MW arasında bir güce sahiptir. Bazı yeni nesil offshore rüzgâr türbinleri ise 10 MW veya daha fazla güç üretebilir (Sika company, 2023) Örneğin, dünyanın en büyük offshore rüzgâr türbini olan Haliade-X, 12 MW güç üretebilir ve yılda 67 GWh elektrik sağlayabilir (Euronews, 2021). Denizüstü Rüzgâr Enerjisi Derneği (DÜRED) verilere göre Türkiye'de ise ilk offshore rüzgâr enerjisi projesi olan İzmir Aliağa'daki santral, 30 MW güç üretecek ve yılda 120 GWh elektrik sağlayacaktır (Durak, 2021). Offshore rüzgâr türbinlerinin enerji üretimi, aynı zamanda rüzgârın sürekliliği ve istikrarı ile de ilgilidir.

Denizde rüzgâr, karadaki rüzgâra göre daha az dalgalanma gösterir ve daha uzun süre devam eder. Bu da offshore rüzgâr türbinlerinin kapasite faktörünü artırır. Kapasite faktörü, bir türbinin gerçekleştirdiği enerji üretiminin, teorik olarak mümkün olan maksimum enerji üretimine oranıdır. Offshore rüzgâr türbinlerinin kapasite faktörü, %40 ila %60 arasında değişir. Karadaki rüzgâr türbinlerinin kapasite faktörü ise %20 ila %40 arasındadır (Prüftechnik, 2024; Temiz Enerji, 2022). Bu da offshore rüzgâr türbinlerinin, karadakilere göre daha verimli olduğunu göstermektedir. (Pérez vd., 2023). Offshore rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerjisi sektöründe önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ancak, bu teknolojinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için bazı zorluklar da bulunmaktadır. Bunlar arasında, yüksek kurulum ve bakım maliyetleri, çevresel etkiler, izin süreçleri, altyapı eksikliği ve teknik sorunlar sayılabilir. Bu zorlukların aşılması için, devlet, özel sektör ve akademik kurumlar arasında iş birliği yapılması gerekmektedir (Asim vd., 2022; Musial, 2021; Yılmaz vd., 2021).



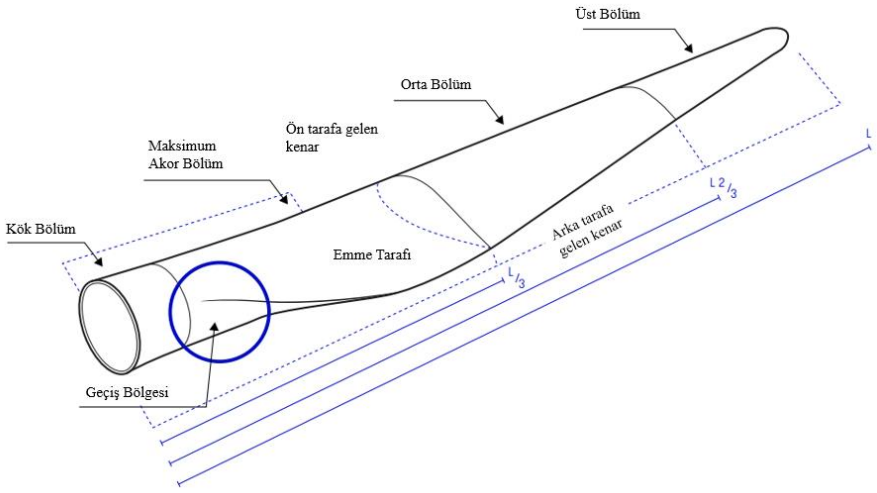
Şekil 2.8. Deniz üstü rüzgâr türbinlerinde çeşitli kurulum alt yapısı (Musial, 2021)

Deniz üstü rüzgâr türbinleri, karasal rüzgâr türbinlerine göre artırılmış önemli faydaları bulunmaktadır. DRT yapılarının daha yüksek kanat boyu kullanımına olanak sağlamaktadır. Enerji üretimini artırdığı gibi, daha düşük enerji üretim maliyetine olanak sağlar. Çevresel etkiler senaryosu ve karasal türbülans yoğunluğu daha az olmakla birlikte, daha fazla enerji üretimi sağlayabilecek rüzgâr sıklığı mevcuttur.

Karasal rüzgâr türbinleri yapısına benzer nitelikleri olan deniz üstü rüzgâr türbinlerinde bu benzer yapının farklılığı ise kurulum zorluğu ve deniz üstü yüzer destekleme sistemleridir (Bhattacharya, 2019).

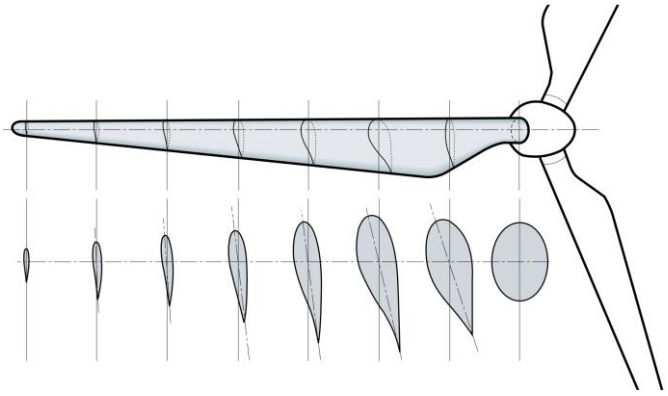
2.5. Rüzgâr Türbin Kanatları

Bir rüzgâr türbini kanadı Şekil 2.9, 2.10 ve 2.11'de gösterildiği gibi farklı bölümlere ve airfoil kesitlerine ayrılmıştır. Kanatlar rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren önemli bir rotor bileşenidir.

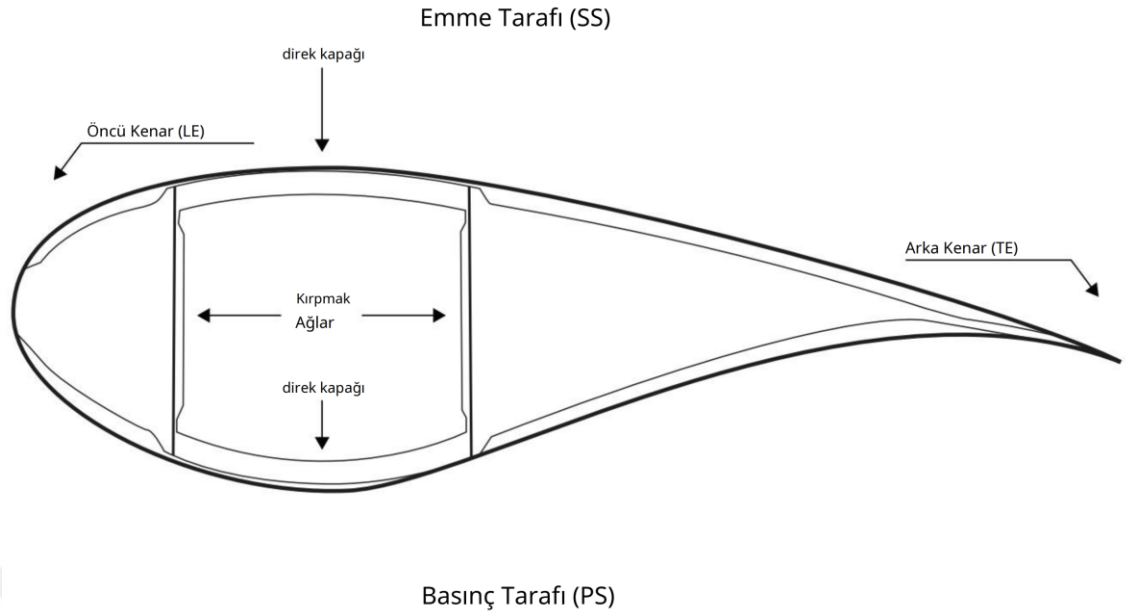


Şekil 2.9. Rüzgâr türbin kanat bölümleri (Bladena, 2023)

Rüzgâr türbin kanatlarının ve dilimlerinin (airfoil) tasarımı, malzemesi, sayısı ve bakımı, rüzgâr türbinlerinin enerji verimliliği, dayanıklılık, maliyet ve gürültü seviyesini etkiler (Bayram, 2015).



Şekil 2.10. Tipik bir kanadın şekli ve enine kesitleri (Wind power plants, 2023)

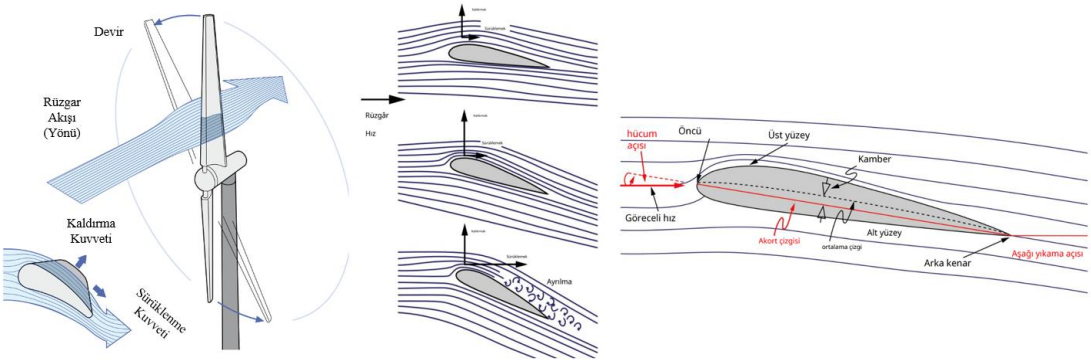


Şekil 2.11. Tipik bir kanadın ana yapı elemanlarını gösteren kanat kesiti (Bladena, 2023)

Rüzgârın kanatlarla etkileşimi sonucunda ortaya çıkan etkileri, rüzgâr türbin kanatlarının aerodinamik kuvvetleridir. Şekil 2.12'de uçak kanatlarında olduğu gibi basınç farkının yüzeyde yarattığı rüzgârın türbin kanadına aerodinamik kaldırma adı verilen bir kuvvet uygular. Bu kuvvetler kanatların şekli, boyutu, açısı, hızı ve rüzgârın yönü, hızı, yoğunluğu ve türbülansı gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Aerodinamik kuvvetler, iki temel bileşene ayrılabilir:

Sürükleme kuvveti, kanatların yüzeyine paralel olarak rüzgârın uyguladığı kuvvettir. Sürükleme kuvveti, kanatların hareketini yavaşlatır ve enerji kaybına neden olur. Sürükleme kuvveti, kanatların yüzey pürüzlülüğü, rüzgârın viskozitesi ve kanatların bağıl rüzgâr hızı ile doğru orantılıdır.

Kaldırma kuvveti, kanatların yüzeyine dik olarak rüzgârın uyguladığı kuvvettir. Kaldırma kuvveti, kanatların dönmesini sağlar ve enerji üretimine katkıda bulunur. Kaldırma kuvveti, kanatların aerodinamik profili, rüzgârın yoğunluğu ve kanatların bağıl rüzgâr hızının karesi ile doğru orantılıdır (Wind power plants, 2023).



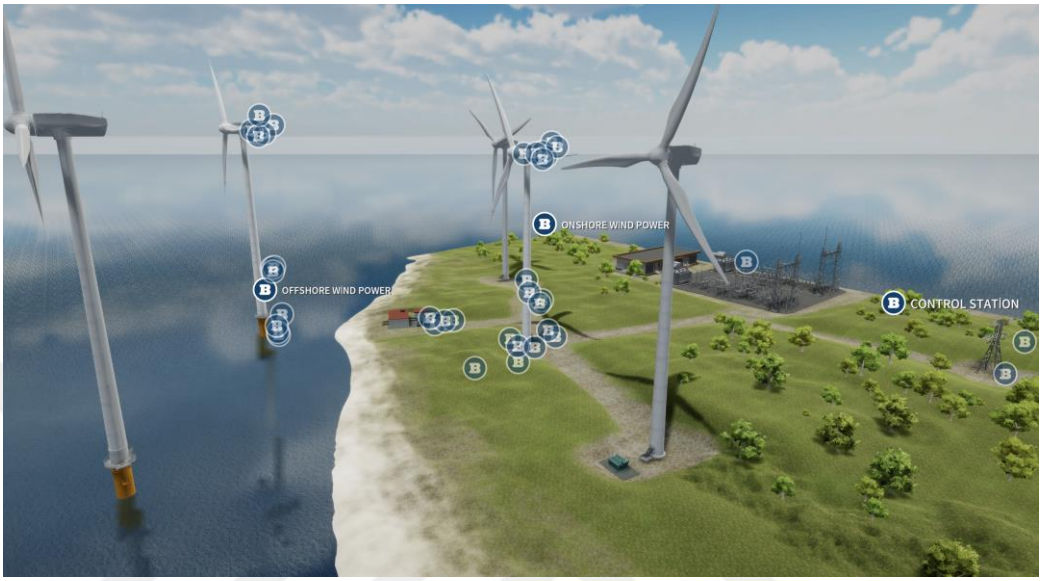
Şekil 2.12. Rüzgâr akışının kanatlara uyguladığı kuvvetler (Wind power plants, 2023; Bladena, 2023)

Aerodinamik kuvvetler, rüzgâr türbininin enerji verimliliği, dayanıklılık, maliyet ve gürültü seviyesini etkiler. Aerodinamik kuvvetleri optimize etmek için kanatların tasarımı, malzemesi, sayısı, uzunluğu, genişliği, kalınlığı, eğimi, yeri ve burulma açısı gibi parametreler önemlidir. Aerodinamik kuvvetleri hesaplamak ve analiz etmek için çeşitli matematiksel modeller, bilgisayar programları ve deneysel yöntemler kullanılabilir ("Rüzgâr türbin tasarımı", 2023; Sarıgül, 2016, Ceylan, 2022). 2D hava profili (airfoil) uçuş terimleri terminolojisine göre bir akışta kanat profilinin varlığı, hava akışının bükülmesine neden olur. Hava parçacıkları, kanat profili tarafından indüklenen basınç nedeniyle aşağı doğru zorlandığından akıştan kanat profiline eşit büyüklükte bir reaksiyon kuvveti olacaktır. Bu kaldırma kuvveti olarak ifade edilir. Bu bağlamda artan hücum açıları için kaldırma kuvveti de ayrılmanın meydana geldiği bir noktaya kadar artar; bu da kaldırmayı azaltır ve sürükleme kuvvetini artırır. Bir türbinin arkasında, kanadın uç, kök ve firar taraflarında girdap oluşabilir (Bladena, 2023; Zahle vd., 2009; Machefaux, 2015).

2.5.1. Rüzgâr Türbin Kanat Tasarımı

Rüzgâr türbin kanat tasarımı, rüzgâr enerjisi sektörünün önemli bir alanıdır. Rüzgâr türbin kanat tasarımı, rüzgâr türbininin verimliliğini, dayanımını güvenliğini, maliyetini ve çevresel etkisini etkiler. Rüzgâr türbin kanat tasarımı, kanatların aerodinamik şekli, malzemesi, sayısı, uzunluğu, genişliği, kalınlığı, eğimi, yeri ve burulma açısı gibi birçok parametreyi içerir.

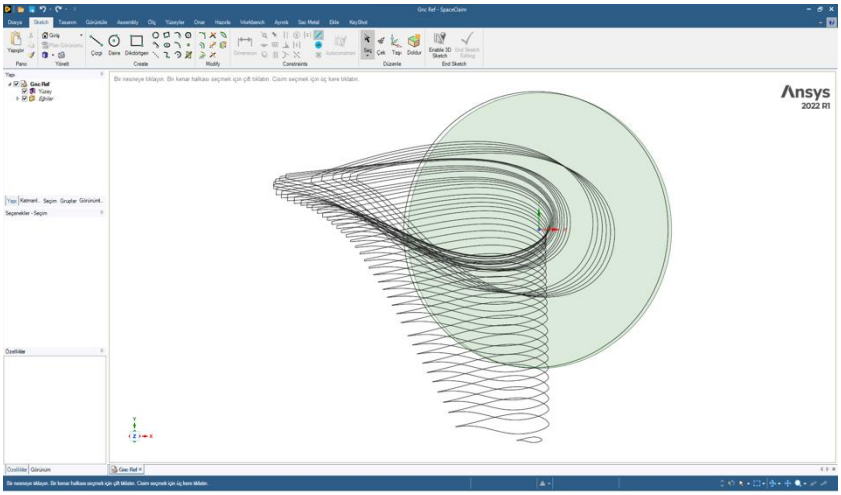
Rüzgâr türbin kanat tasarımı rüzgârın hızına, yönüne, yoğunluğuna ve türbülansa göre değişim gösterir. Aşağıda rüzgâr türbin kanat tasarımı etkileyen faktörler sıralanmıştır. Rüzgâr türbininin kurulacağı yerin rüzgâr özelliklerini belirlenmesi Şekil 2.13'te rüzgâr hızı, yönü, yoğunluğu ve türbülans gibi faktörler rüzgâr türbininin performansını etkiler.



Şekil 2.13. Rüzgâr türbin çiftliğinin kurulacağı rüzgâr saha özelliklerinin belirlenmesi (Belzona, 2023)

Rüzgâr türbininin tipini, boyutunu ve güç seçimi: Rüzgâr türbininin rotor çapı, kanat sayısı, kanat uzunluğu ve kanat genişliği gibi boyutları, rüzgâr türbininin gücünü belirler. Rüzgâr türbininin kanat airfoil profil seçimi: Kanat profilleri, kanatların kesit şekilleridir. Kanat profilleri, kanatların aerodinamik kuvvetlerini, sürtünmesini, basıncını ve sürüklenmesini etkiler. Kanat profilleri, NACA, Joukowski, Eppler gibi farklı tiplerde olabilir.

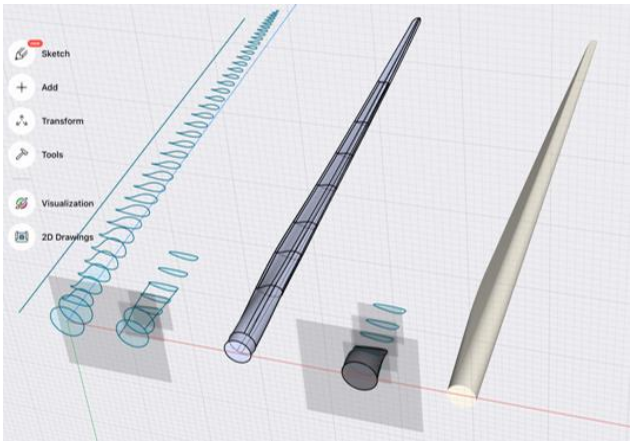
Rüzgâr türbininin kanat geometrisinin belirlenmesi: Şekil 2.14'te Kanat geometrisi, kanatların uzunluğu, genişliği, kalınlığı, eğimi, yeri ve burulma açısı gibi parametreleri içerir. Kanat geometrisi, kanatların dönme hızını, torkunu, gürültüsünü ve titreşimini etkiler.



Şekil 2.14. Ansys SpaceClaim ile rüzgâr türbini kanat geometrisi eskizi

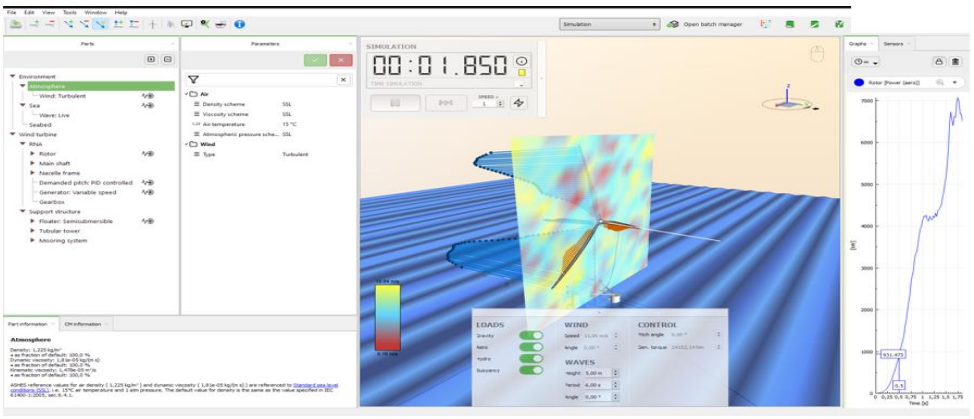
Rüzgâr türbininin kanat malzemesinin seçimi: Kanat malzemesi, kanatların ağırlığını, mukavemetini, rijitliğini, esnekliğini ve dayanımını etkiler. Kanat malzemesi, kompozit, metal, balsa, ahşap, plastik veya hibrit olabilir. Kompozit malzemeler, hafif, sağlam, dayanıklı ve ucuz olmaları nedeniyle tercih edilmektedir.

Rüzgâr türbininin kanat modeli (Şekil 2.15) Kanat tasarımını modellemek için SİEMENS NX, SHARP 3D, SOLIDWORKS, ANSYS, MATLAB gibi programlar kullanılabilir. Kanat tasarımını modellemek kanatların şeklini, boyutlarını, profillerini ve malzemesini görselleştirmek için yararlıdır.



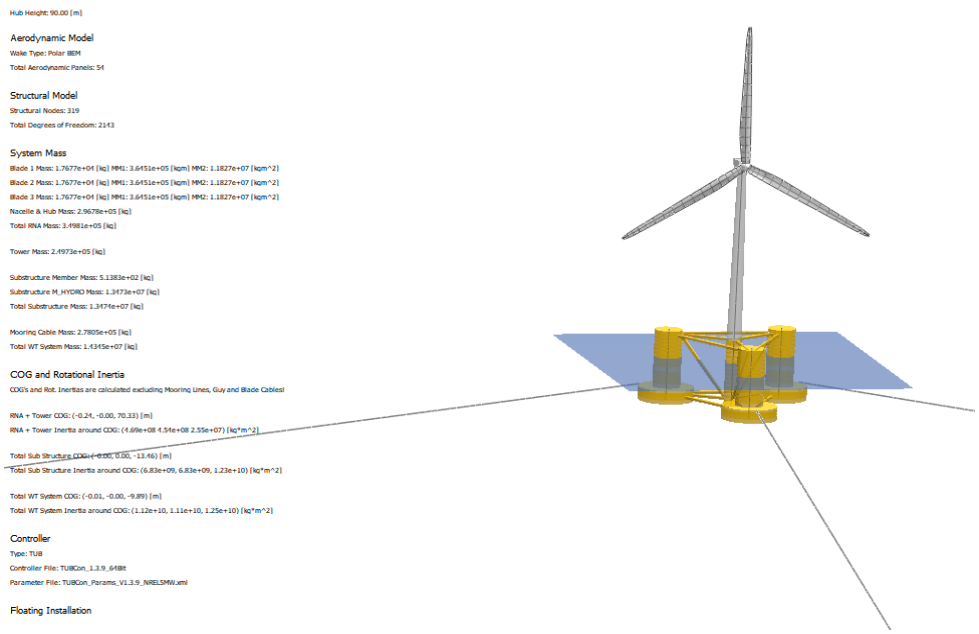
Şekil 2.15. Sharp 3D programı ile rüzgâr türbini kanat tasarımı

Rüzgâr türbininin kanat tasarım ve çevrim analizi: Kanat tasarımını analiz etmek için Şekil 2.16 ve 2.17'de gösterilen Ashes, ANSYS, Fluent, CFD, Qblade gibi programlar kullanılabilir.



Şekil 2.16. Ashes programı ile deniz üstü rüzgâr türbini dijital ikizi

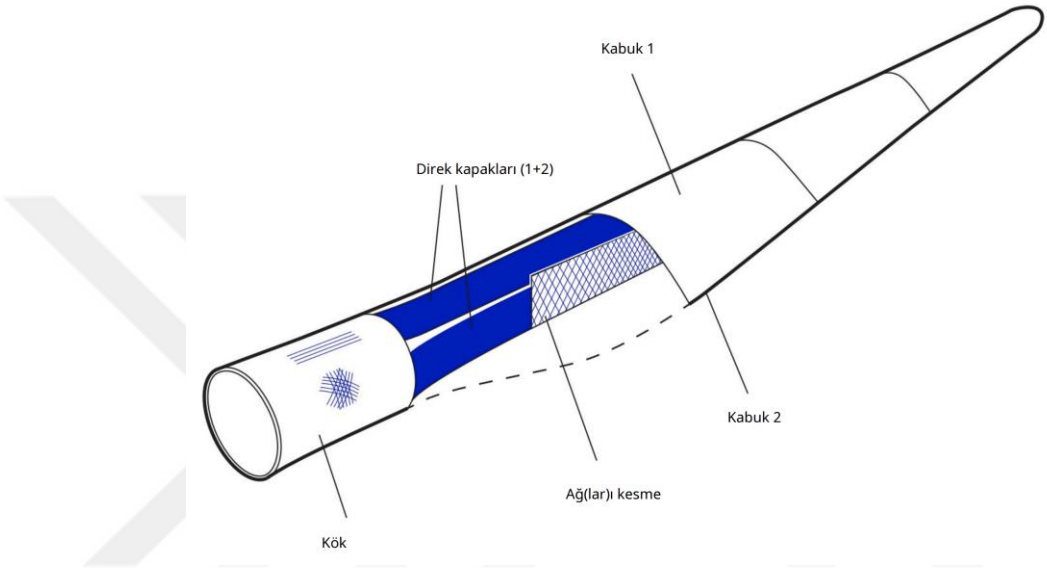
Kanat tasarımını analizi kanatların aerodinamik performansını, yapısal davranışını, stres ve deformasyon durumunu, modal ve harmonik karakteristiklerini, optimizasyon potansiyelini ve ekonomik fizibilitesini değerlendirmek için gereklidir (Broṇdsted, 2023).



Şekil 2.17. Qblade ile yüzer platformlu deniz üstü rüzgâr türbini model simülasyonu

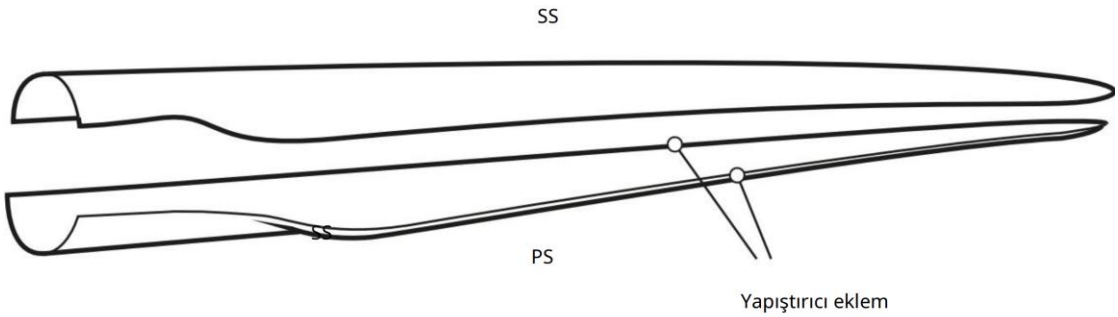
2.5.2. Rüzgâr Türbin Kanadı Yapı Anatomisi

Rüzgâr türbin kanadı, Şekil 2.18'de gösterilen her biri belirli bir işlevi yerine getiren 4 ana parça ile ifade edilebilir. Bunlar yüzey (Surface) bölümünde kabuk elemanlar olan yüzey panelleri (Shells), iç kısımda direk kapakları (Spar Caps), kesme ağı (Shear Webs) ve kök (Root) kısımlarından oluşur.



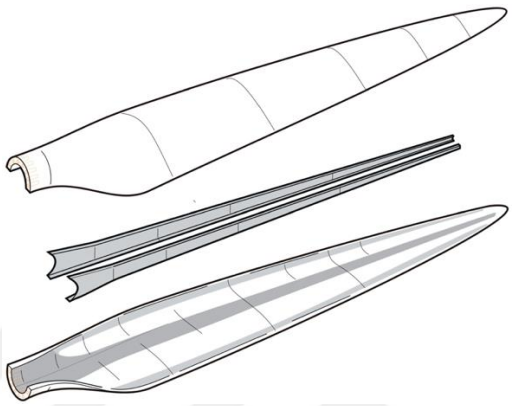
Şekil 2.18. Rüzgâr türbin kanadı yapı anatomisi (Bladena, 2023)

Shells yani Şekil 2.19'da gösterilen yüzey panelleri, emme yüzeyi tarafı (SS) ve basınç tarafı (PS) yüzeyleri, hava kesimi ile oluşan kaldırma kuvvetini direk kapaklarına aktaran büyük aerodinamik panellerdir.



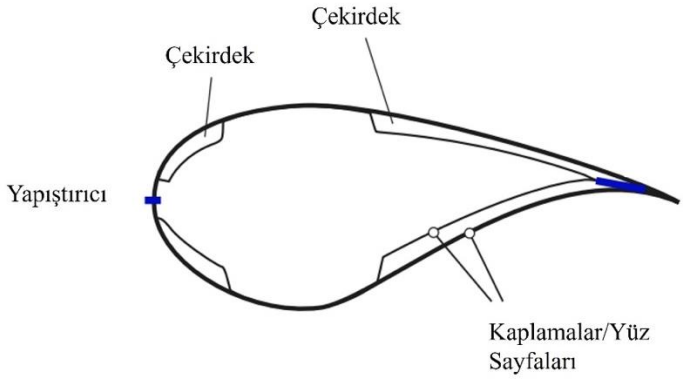
Şekil 2.19. Birbirine yapıştırılan iki aerodinamik kanat paneli (Bladena, 2023)

Genel olarak iki parça kanat profil kalıbında üretilen rüzgâr türbin kanatları ön ve arka kenarları boyunca birbirlerine ve spar kapaklarına yapışkan bir şekilde bağlanırlar. Şekil 2.20'de iki aero shell ve iki kesme ağının birleştirilmesi ve bağlanması yoluyla bir rüzgâr türbini rotor kanadının imalatının şemaları gri renk, birincil yük taşıyan kompozitler shear webler gösterilmiştir (Mishnaevsky vd., 2017).



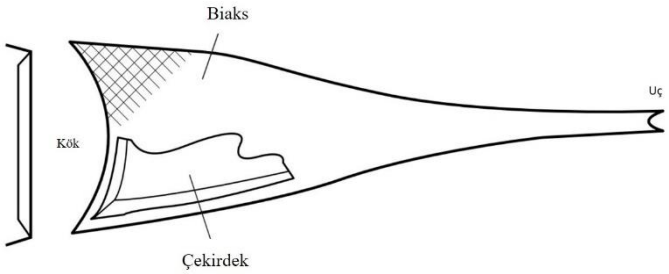
Şekil 2.20. Birbirine yapıştırılan iki aerodinamik kanat paneli 2 (Mishnaevsky vd., 2017)

Yüzey kabuk kaplamaları, düşük kalınlıkta, genellikle 0, +45 ve -45°'de 2 ile 54 kat triaks kumaş malzeme ile üretilmiş, hafif cam elyaf ve/veya karbon elyaf ve benzeri kaplamalardır. Bu kaplamalar bir sandviç çekirdek (PVC, PET, balsa vb.) yapılar kullanılarak stabilize edilmeleri gerekir. Bu kompozit yapılar kanat anatomisi gereği çekirdek olmadan bükülürler ve bu bağlamda gerekli kanat profilini koruyamazlar. Şekil 2.21'de genel kanat enine kesiti örneği gösterilmiştir.



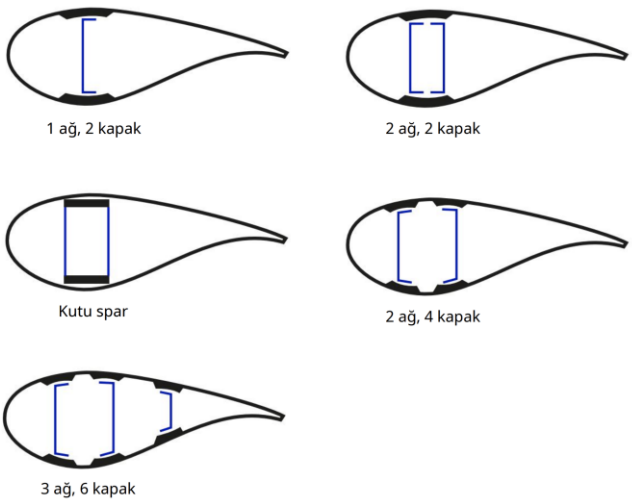
Şekil 2.21. Genel kanat enine kesiti örneğinde sandviç çekirdek, yapıştırıcılar ve yüzey profil kaplamalarının görünümü (Bladena, 2023)

Shear webs -kesme ağları- kanat profili içerisinde yer alan (Şekil 2.22) tasarımı ve üretimi en basit parçalardan biridir. Birincil işlevi, PS ve SS'leri birbirinden uzak tutarak kanadın bir kiriş gibi davranmasını sağlar. Bu bağlamda kanadın genel rijitliğini korur (Bladena, 2023).



Şekil 2.22. Kompozit sandviç yapıda kanat shear webleri (Bladena, 2023)

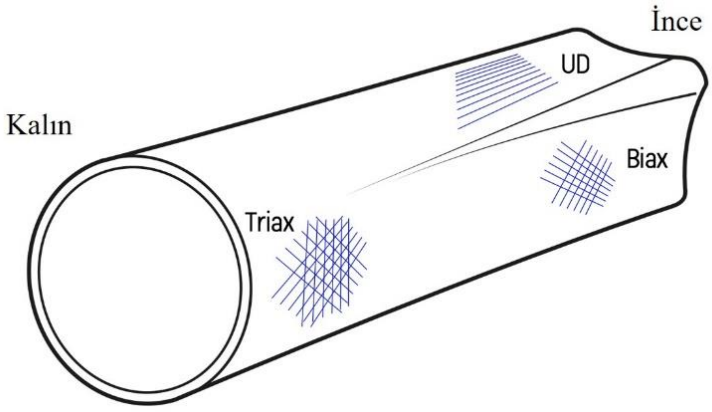
Shear weblerin görevi, sadece kesme yüklerini taşımak ve ezilmelerini ve/veya burkulmalarını önlemektir. Yapı tipik olarak düşük yoğunluklu bir sandviç çekirdeği bünyesinde bulundurur. Kompozit paneli her iki tarafında 2 ile 8 kat ±45 ° biaks kumaşlı cam vb. elyaf takviyesi ile üretilir. Uzunluğa ve tasarım seçeneklerine bağlı olarak kanatlarda bir, iki veya üç webs olabilir. Bazen, kabuklara veya spar başlıklarına yük aktarımını kolaylaştırmak için kaplamaların birbirleriyle birleştiği bir geçiş olan feetler veya flanşlar içermektedirler. Spar Caps, direk kapakları Şekil 2.23'te gösterilmiştir. Kanadın kanat yönündeki rijitliğini artırmaktadır ve kesme yüklerini ağlardan köke taşımaktır (Bladena, 2023).



Şekil 2.23. Spar Cabs türleri (Bladena, 2023)

Spar Caps esas olarak kesme işleminde çalışır. İlk işlevi aerodinamik profilden gelen tüm yükleri gerilimde olan PS yüzeyi, sıkıştırmada olan SS yüzeyindeki yükleri, uçtan köke olarak ve bunları silindirik kök yapısına aktarmaktır. Uzun, dar ve ince bileşenler olup kök ucunda kalın, uç kısımlarda incedir. Çoğunlukla tek yönlü elyaflardan (liflerden) 0°'de ve maksimum %20'ye kadar eksen dışı malzemeden yapılırlar. Bu kompozit yapı, kanadı bükülme, burulma ve diğer indüklenen yüklere karşı daha korunaklı yapmaktadır.

Root'un -kökün- birincil işlevi, kanadın bükülme momentinin kök yatağına zarar vermeden aktarımını sağlamaktır. Bu durumda genellikle UD kapaklarında taşınan yüklerin önce kök tüpüne, ardından kökü yatağa bağlayan metalik eklentilere aşamalı olarak yeniden yönlendirilmesiyle elde edilmektedir. Metalik ekler genellikle hubtan ve kanat uzunluğunun %10 ila 20'si kadar uzanır. Kök genel olarak 0°'de sınırlı miktarda lif ve ± 45°'de çoğul lif içeren kalın bir laminanttan oluşur. Şekil 2.24'te gösterilen kompozit kökte zayıflık yapan, cıvataların yerleştirilmesi için ekstra kalınlığa ihtiyaç duyulduğundan et kalınlığı ve elyaf türleri kullanılan metalik eklere göre değişmektedir (Bladena, 2023).

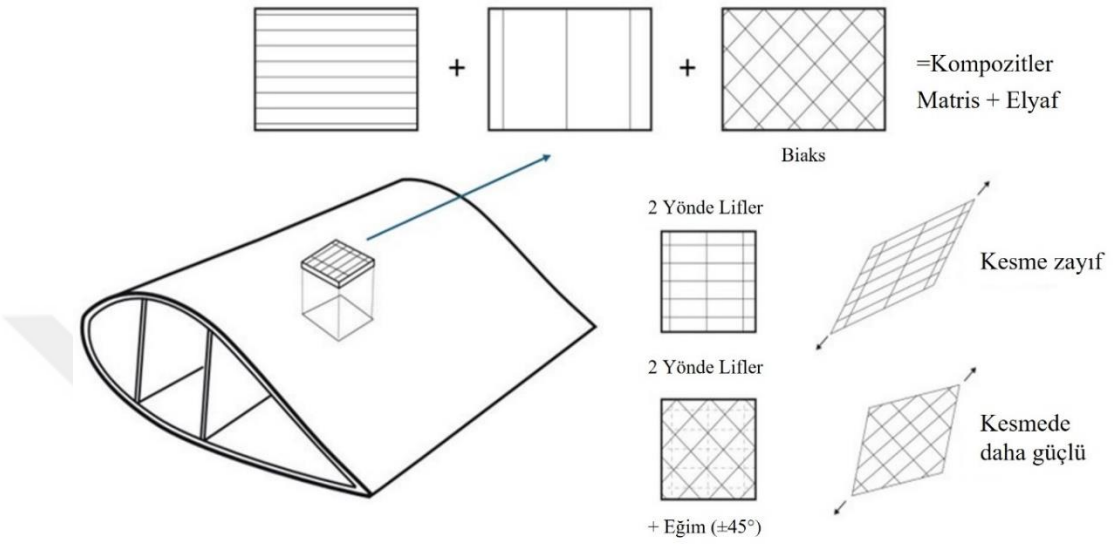


Şekil 2.24 Rüzgâr türbin kompozit kanat kökü (Bladena, 2023)

2.5.3. Rüzgâr Türbin Kanat Üretimi ve Kompozit Malzemeler

Kanatların malzemesi, rüzgâr türbininin performansını, dayanıklılığını, maliyetini ve çevresel etkisini etkileyen önemli bir faktördür. Kanatların ağırlığını, mukavemetini, rijitliğini, esnekliğini ve dayanımını belirler. Kanat malzemesi, rüzgârın kuvvetine, sıcaklığına, nemine ve korozyonuna karşı dirençli olmalıdır.

Rüzgâr türbin kanatlarının malzemesi, kompozit, metal, ahşap, plastik veya hibrit olabilir. Günümüz kanatlarında (Şekil 2.25) kompozit malzemeler, hafif, sağlam, dayanıklı ve ucuz olmaları nedeniyle tercih edilmektedir.

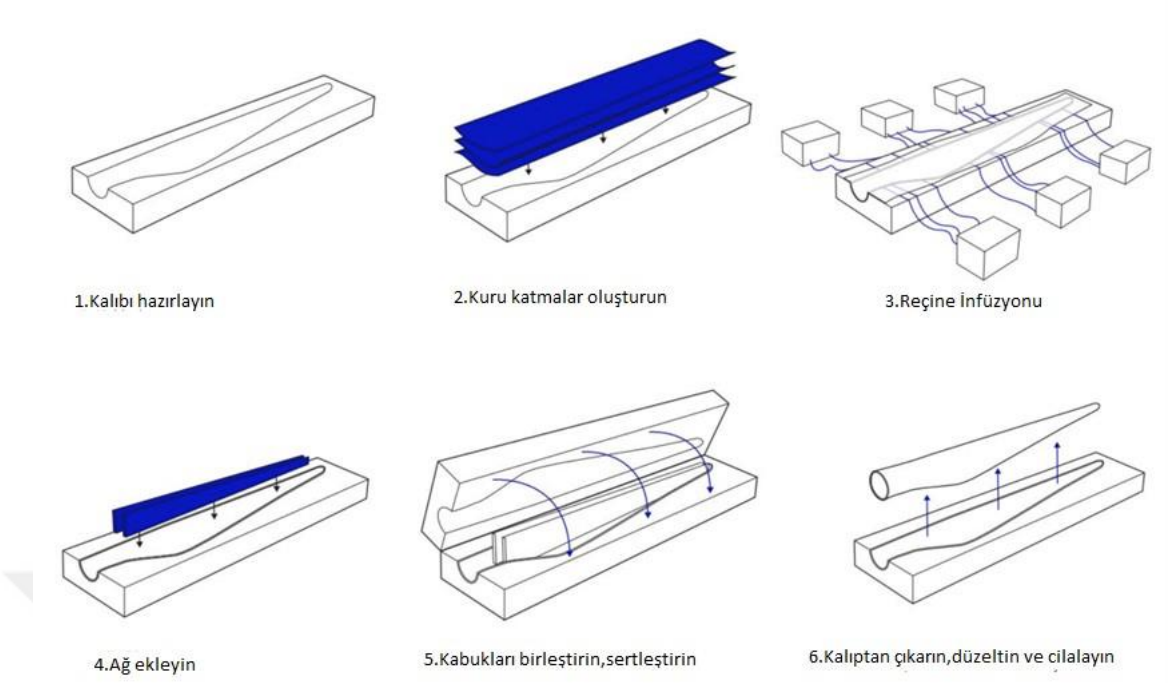


Şekil 2.25. Günümüz rüzgâr türbin kanatlarında kompozit yapılar (Bladena, 2023)

Kompozitler, anizotropik (yöne bağımlı malzeme özelliklerine sahip) bir malzeme oluşturan bir termoset ya da termoplastik matris ile bağlanmış birkaç takviye elemanı barındıran katmanlı malzemelerdir.

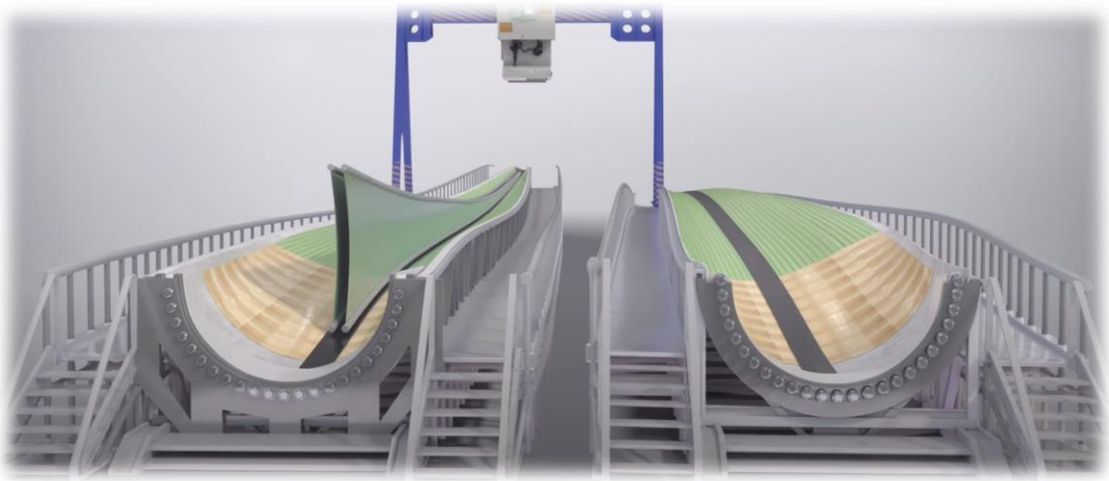
Kanatların mukavemet ve rijitliği malzemedeki yöne bağlı olarak değişim gösterir. Bu durum kompozit malzemelerde liflerin birçok farklı şekilde düzenlenebilir olmasından kaynaklanmaktadır. Yön farkları, ikincil yön (enine) yüklerden küçük bir etki ve aynı zamanda daha az lif nedeniyle düşük bir mukavemet yaşadığı için analizi daha karmaşık hale gelmektedir (Bladena, 2023).

Rüzgâr türbin kompozit kanatların geleneksel üretim adımları Şekil 2.26'da gösterilmiştir.



Şekil 2.26. Kompozit kanat üretiminin genel adımları (Bladena, 2023).

Şekil 2.27'de büyük ölçekli rüzgâr türbin kanadı üretim prosesi videosunun frame görüntüsü yer almaktadır. İki dış kalıba yatırılmış ve dizilmiş kumaşlardan kompozit yapılarak ve daha sonra iki farklı kalıptan birbirine üst üste bindirilip yapıştırılarak kanatlar üretilir (Lm Wind Power, 2022).



Şekil 2.27. Büyük Ölçekli Rüzgâr Türbin Kanadı üretim prosesi video kesiti (Lm Wind Power, 2022).

Kompozit malzemeler, birbirinden farklı kimyasal veya fiziksel özelliklere sahip; iki veya daha fazla bileşen malzemelerden oluşan ve bir araya geldiğinde yeni özellikler kazanan malzeme türleridir. Kompozit malzemeler genellikle bir matris ve bir takviye malzemesinden oluşur. Matris, takviye malzemesini bir arada tutar ve destekler. Takviye malzemesi ise kompozitin mukavemetini ve sertliğini artırır. Kompozit malzemelerin avantajları arasında yüksek mukavemet, hafiflik, kimyasal direnç, korozyona karşı dayanıklılık, tasarım esnekliği ve şekil verilebilirlik sayılabilir. Kompozit malzemelerin kullanım alanları ise havacılık, uzay, otomotiv, inşaat, kimya, denizcilik, sağlık, savunma, elektrik-elektronik ve rüzgâr enerjisi gibi pek çok sektörü kapsar (Elektrikde, 2020; Erlas, 2023; Aran, 2021; Rangappa vd., 2022).

2.5.3.1. Kompozit malzemeler

Genel ifade ile kompozit malzemeler, farklı bileşen malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan yeni malzemelerdir. Kompozit malzemelerin üretimi için kullanılan yöntemler malzemenin türüne, şekline, özelliklerine ve kullanım alanına göre değişebilir. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri iki ana gruba ayrılabilir: açık kalıplama yöntemleri ve kapalı kalıplama yöntemleridir.

Açık kalıplama yöntemleri, kalıp yüzeyine elyaf kumaşlarının yatırılması ve üzerine reçine püskürtülmesi veya emdirilmesi şeklinde gerçekleştirilir. Bu yöntemler düşük maliyetli, basit ve esnek üretim sağlar. Ancak işçilik gerektirir, yüzey kalitesi düşük olabilir ve çevresel unsurlardan etkilenebilir. Açık kalıplama yöntemleri arasında elle yatırma, püskürtme, elyaf sarma gibi yöntemler vardır.

Kapalı kalıplama yöntemleri, kalıp içerisine reçine ve elyafın enjekte edilmesi veya sıkıştırılması şeklinde gerçekleştirilir. Bu yöntemler, yüksek kaliteli, tekrarlanabilir ve otomatik üretim sağlar. Ancak kalıp maliyeti yüksek, üretim hızı düşük ve karmaşık şekillerde üretim zor olabilir. Kapalı kalıplama yöntemleri arasında profil çekme, reçine transfer kalıplama, sıkıştırma kalıplama, vakum torbalama, enjeksiyon kalıplama, savurma döküm gibi yöntemlerde bulunmaktadır (Çolakoğlu, 2023; Sina, 2020; Kürşad, 2020; Hexagon, 2023).

2.5.3.2. Kompozit rüzgâr türbini kanat kullanım avantaj ve dezavantajları

Hafiflik: Kompozit malzemeler, metal veya ahşap malzemelere göre daha hafiftir. Bu, rüzgâr türbininin dönme hızını, torkunu ve enerji verimliliğini artırır. Ayrıca, rüzgâr türbininin taşıma, montaj ve bakım maliyetlerini azaltır.

Sağlamlık: Kompozit malzemeler, metal veya ahşap malzemelere göre daha sağlamdır. Bu, rüzgâr türbininin rüzgârın kuvvetine, sıcaklığına, nemine ve korozyonuna karşı daha dayanıklı olmasını sağlar. Ayrıca, rüzgâr türbininin ömrünü uzatır ve arızaları önler.

Uyarlama: Kompozit malzemeler, metal veya ahşap malzemelere göre daha kolay şekillendirilebilir ve uyarlanabilir. Bu, rüzgâr türbininin kanatlarının aerodinamik şeklini, profillerini ve geometrisini optimize etmeyi mümkün kılar. Ayrıca rüzgâr türbininin rüzgârın hızına, yönüne, yoğunluğuna ve türbülansa göre değişebilmesini sağlar.

Ucuzluk: Kompozit malzemeler, metal veya ahşap malzemelere göre daha ucuzdur. Bu, rüzgâr türbininin üretim, işletim ve bakım maliyetlerini düşürür. Ayrıca rüzgâr türbininin ekonomik fizibilitesini artırır.

Özetle; Kompozit malzemelerin avantajları şunlardır:

- Yüksek mukavemet, sertlik ve dayanıklılık sağlarlar.
- Hafif ve esnek olurlar.
- Isı, nem, korozyon ve aşınmaya karşı dirençli olurlar.
- Tasarım ve şekil verme esnekliği sunarlar.
- Düşük maliyetli ve ekonomik olurlar.

Kırılganlık: Kompozit malzemeler, metal veya ahşap malzemelere göre daha kırılgandır. Bu, rüzgâr türbininin kanatlarının çatlama, delinme, kırılma veya kopma gibi hasarlara karşı daha hassas olmasına neden olur. Ayrıca rüzgâr türbininin güvenliğini ve stabilizesini tehlikeye atar.

Zorluk: Kompozit malzemeler, metal veya ahşap malzemelere göre daha zor üretilir, monte edilir ve onarılır. Bu, rüzgâr türbininin kalite kontrolü, testi, izlenmesi ve bakımı için daha fazla zaman, ekipman ve uzmanlık gerektirir. Ayrıca rüzgâr türbininin karmaşıklığını ve zorluğunu artırır.

Çevresellik: Termoset kompozit malzemeler, metal veya ahşap malzemelere göre daha az çevre dostudur. Bu, rüzgâr türbininin kanatlarının üretimi, kullanımı ve atılması sırasında daha fazla enerji, su, kimyasal madde ve atık üretilmesine sebep olur. Ayrıca, rüzgâr türbininin çevresel etkisini ve sürdürülebilirliğini azaltır (Çolakoğlu, 2023; Sezen, 2015; Erdil, 2023; Metalurjik, 2022).

Özetle; Kompozit malzemelerin dezavantajları ise şunlardır:

- Üretim maliyeti yüksek olabilir.
- Hasar tespiti ve onarımı zor olabilir.
- Değişik doğrultularda değişik mekanik özelliklere sahiptir.
- Metallere yapışmazlar.
- Kürlenmeden kullanılamazlar.

Rüzgâr türbini kanat üretim sürecinde kompozit malzeme seçimine çok dikkat edildiği aşikârdır. Bu seçimler kanadın maksimum potansiyelini ortaya çıkarmanın anahtarıdır. Pek çok soru karması oluşabilir. Karbon fiber uygulama için en uygun malzeme mi? Doğal lifler kullanabilir mi? Hangi reçine matris kullanmalı? Bu matrisin herhangi bir katkı maddesi veya dolgu maddesi olmalı mı? Ne tür elyaf kalitesine ihtiyaç var? Potansiyelleri en üst düzeye çıkarmak için kanadı nasıl güçlendirebilirim? Geometri de sınırlayıcı bir faktör olur mu? Üretim sürecine otoklav kullanılırsa ne olur? gibi sayısız bağımlı ve bağımsız, kurgulu sorular araştırmayı daha da geliştirmektedir. Geniş kompozit malzeme yelpazesi içinde sayısız alternatif vardır. Önceden emprenye edilmiş malzemeler kullanarak reçinenin lifler içinde homojen ve hassas bir şekilde yayılımı sağlanmalıdır. Bu bağlamda nihai kanatta daha fazla mukavemet ve daha iyi yapısal performans sağlarlar. Bu durumun avantajlarından bazıları şunlardır:

Artan verimlilik ve üretkenlik: Reçinenin liflerde homojen dağılımı sayesinde reçine miktarı ve kürlenme süresi optimize edilebilir.

Artan mukavemet ve sertlik: Reçinenin liflere hassas bir şekilde emdirilmesi yalnızca gerekli miktarda reçine kullanılarak üretilen kanatların mukavemetini ve rijitliğini artırmaya yardımcı olur. Bu, daha yüksek yüklere dayanabilen daha dayanıklı kanat anlamına gelmektedir

Çok yönlülük ve uyarlanabilirlik: Önceden emprenye edilmiş malzemeler, her projenin özel gereksinimlerine uyum sağlayabilir. Gerekli mukavemete, sertliğe ve ağırlığa göre farklı özelliklerde elyaf ve reçineler seçilmektedir (Mishnaevsky vd., 2017; Kaya ve Koç, 2015; Harper & Clifford, 2022).

2.5.3.3. Kompozit kanat matrisi

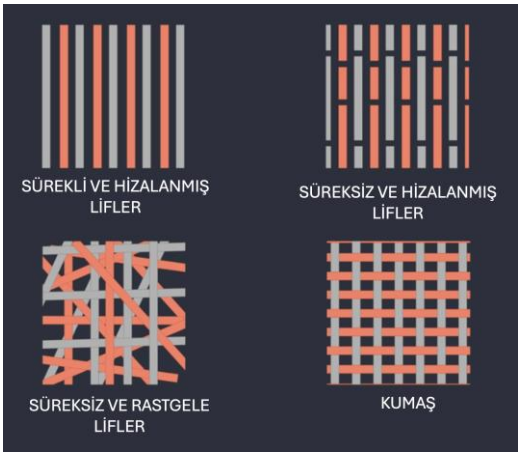
Kompozit kanat üretimde yüksek oranla termoset polimer matrisler kullanılmaktadır. Reaktif termoplastik reçine ile çalışmalar gelişim göstermektedir. Termoset polimer matrisler ısıtıldığında sertleşen ve soğutulduğunda yumuşamayan polimerlerdir. Epoksi, polyester ve vinilester gibi çeşitli termoset türleri vardır. Termosetler, liflerle iyi yapışma, yüksek kimyasal direnç, düşük nem emme ve yüksek ısıl kararlılık gibi avantajlara sahiptir. Ancak termosetler uzun kürleme süresi, düşük darbe dayanımı, zor geri dönüşüm sürecine ve yüksek çevresel etkiye de sahiptir. Termoplastikler ise ısıtıldığında yumuşayan ve soğutulduğunda sertleşen polimerlerdir. Polipropilen, polietilen, polikarbonat ve naylon gibi çeşitli termoplastik türleri vardır. Termoplastikler, kısa kürleme süresi, yüksek darbe dayanımı, kolay geri dönüşüm ve düşük çevresel etkiye sahiptir. Ancak termoplastikler liflerle düşük yapışma, düşük kimyasal direnç, yüksek nem emme ve düşük ısıl kararlılığa da sahiptir (Shah vd., 2022; Murray, vd., 2019).

Matris türleri, kanat kompozitlerinin performansını ve özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Matris türleri, kompozitlerin mekanik, termal, nem, yorulma, çatlak ve hasar davranışlarını belirler.

Matris türleri, kompozitlerin maliyetini, ağırlığını, sertliğini, dayanımını ve geri dönüşümünü de etkiler. Matris türleri, kanatların tasarımı, optimizasyonu ve bakımı için uygun seçilmelidir (Çolakoğlu, 2023).

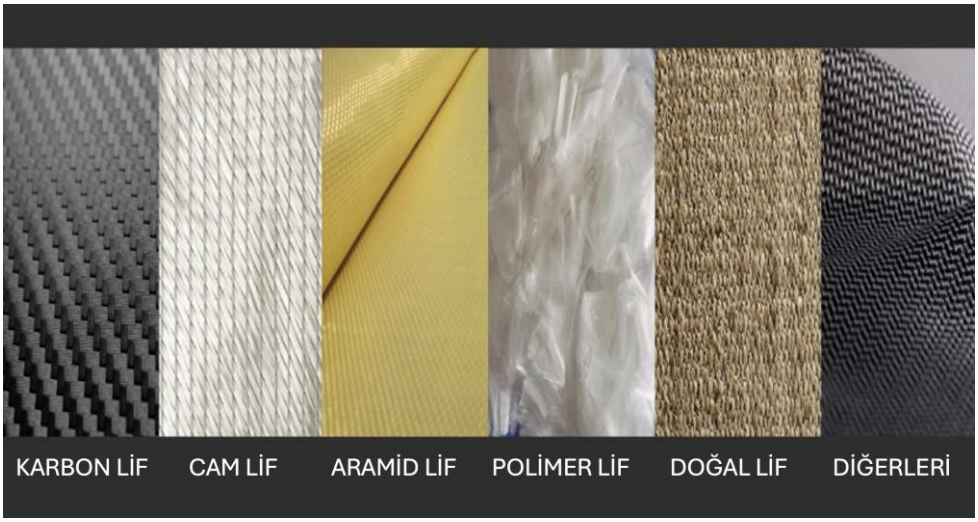
2.5.3.4. Kompozit kanat lifleri

Lifli (Fiber-Elyaf) malzemeler, kompozit yapının mukavemetini ve rijitliğini sağlayıp yük taşıyan kompozit yapının matris malzemeleri ise lifli malzemeleri bir arada tutan ve yük aktaran polimer malzemelerdir (Vij, 2022). Rüzgâr türbini kanat üretiminde seçilen lif türleri, kanat kompozitlerinin performansını ve özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Lif türleri, kompozitlerin mekanik, termal, nem, yorulma, çatlak ve hasar davranışlarını belirler. Lif türleri, kompozitlerin maliyetini, ağırlığını, sertliğini, dayanımını ve geri dönüşümünü de etkiler. Lif türleri, kanatların tasarımı, optimizasyonu ve bakımı için uygun seçilmesi gerektiğinden istenilen koşullara optimum sonuç vermelidir. Lifler, kompozitlerin sertliğini ve dayanımını belirleyen ana bileşendir (Jones, 2022; Elsa, 2023). Şekil 2.28'de kompozit yapılarda kullanılan lif şekilleri ve dağılımları yer almaktadır.



Şekil 2.28. Lif şekilleri ve dağılımları (Mohamad, 2023)

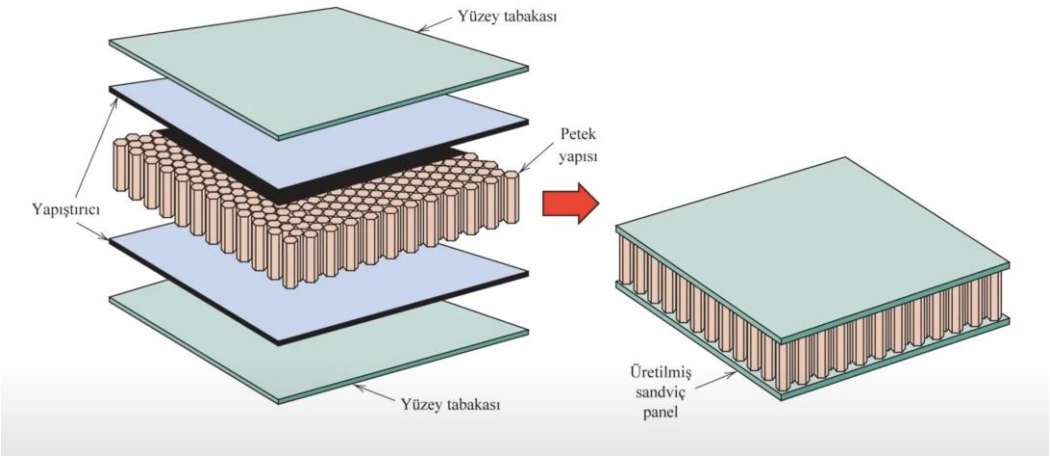
Cam, karbon, aramid, bazalt ve doğal lifler gibi çeşitli lif türleri vardır. Hiyerarşik, hibrit kompozitler farklı lif türlerinin bir arada kullanılmasıyla elde edilen kompozitlerdir (Mohamad, 2023). Bu bağlamdan yola çıkarak rüzgâr türbin kanatlarında kullanılan bazı lif türleri içeren kompozit kumaşlar Şekil 2.29'da gösterilmiştir.



Şekil 2.29. Kompozit rüzgâr türbin kanat kumaşlarında kullanılan bazı lif türleri (Mohamad, 2023)

2.5.3.5. Kompozit Sandviç Yapılar

Kompozit sandviç malzemeler, iki katman arasında hafif ve sert bir çekirdek malzeme bulunan yapısal malzemelerdir. Çekirdek malzeme, katmanlara yüksek bükülme dayanımı sağlarken katmanlar ise çekirdeği sıkıştırma ve gerilme kuvvetlerine karşı korur (Güler ve Ulay, 2010). Kompozit sandviç malzemeler (Şekil 2.30), ağırlık, mukavemet, sönümleme, ısı ve ses yalıtımı gibi özellikleri nedeniyle uçak, uydu, denizcilik, otomotiv, rüzgâr türbini ve mimari gibi birçok alanda kullanılmaktadır.



Şekil 2.30. Kompozit sandviç yapı (Gelişimci Mühendis, 2020)

Kompozit sandviç malzemelerin üretiminde çekirdek malzeme olarak köpük, bal peteği, ahşap veya metal gibi farklı malzemeler kullanılabilir. Katman malzeme olarak ise cam, karbon, aramid veya metal elyaf takviyeli polimerler, metal veya seramik gibi malzemeler tercih edilebilir. Kompozit sandviç malzemelerin performansı; çekirdek ve katman malzemelerin özellikleri, geometrisi, kalınlığı ve bağlantı şekline bağlıdır (Güler ve Ulay, 2010).

Kompozit sandviç malzemelerin test edilmesi bu malzemelerin kalitesini, dayanıklılığını ve güvenilirliğini belirlemek için önemlidir. Kompozit sandviç malzemelerin test edilmesinde bükülme, çekme, sıkıştırma, delinme, kesme, yorulma, darbe, ısıl genleşme, ısı iletkenliği, nem emme, alev geciktirme gibi farklı parametreler ölçülebilir (Malzeme test, 2023). Kompozit sandviç malzemelerin test edilmesi için uluslararası standartlar ve yöntemler mevcuttur.

Kompozit sandviç malzemelerin avantajları şunlardır:

- Geleneksel malzemelere göre yüksek mukavemet ve çok daha hafif,
- Yüksek enerji sönümleme, eğilme dayanımı, yorulma dayanımı ve yanma direnci gibi mekanik ve termal özelliklere sahip,
- Korozyona ve rutubete karşı dirençli olmalarıdır.
- Karmaşık şekillerde veya büyük parçalar halinde üretiminin mümkün olmasıdır.
- Kolay taşınabilir, yalıtımlı, geri dönüşümlü ve ekolojik olabilirler.

Kompozit sandviç malzemelerin dezavantajları şunlardır:

- Üretim maliyetlerinin yüksek,
- Hasar tespiti ve tamirinin zor olmasıdır.
- İmalat zorluğu ve karmaşıklığı olabilir.
- Anizotropiktir.

Bu dezavantajlar, kompozit sandviç malzemelerin kullanımını sınırlayabilir veya mühendislik tasarımlarında dikkate alınması gereken faktörler olabilir (Ayrılmış vd., 2015; Aslan vd., 2018).

2.5.3.6. Kompozit sandviç çekirdek

Kompozit sandviç malzemelerin üretiminde kullanılan farklı çekirdek ve katman malzemelerinden oluşmaktadır. Bu malzemeler, sandviç yapının ortasında yer alır ve katman malzemelerine yüksek bükülme dayanımı sağlar. Çekirdek malzemeleri, hafif, sert, düşük yoğunluklu, yüksek sönümleme, iyi ısı ve ses yalıtımı gibi özelliklere sahip olmalıdır. Çekirdek malzemeleri olarak köpük, bal peteği, ahşap veya metal gibi farklı malzemelerden oluşabilir. Bu türler aşağıda açıklanmıştır.

Köpük: Polimer farklı malzemelerden üretilebilir. Düşük yoğunluklu, yüksek sönümleme, iyi ısı ve ses yalıtımı, kolay şekillendirme ve işleme gibi avantajlara sahiptir. Ancak köpük düşük mukavemet, düşük sertlik, düşük yangın dayanımı, yüksek su emme, düşük ısıl kararlılık gibi dezavantajlara da sahip olabilir.

Bal peteği (Honeycomb): Altıgen veya diğer biçimsel hücrelerden oluşan bir yapıdır. Polimer, alüminyum, paslanmaz çelik, titanyum, kâğıt, karton, cam elyafı, karbon elyafı gibi farklı malzemelerden üretilebilir. Yapı isterlerine ve malzeme özelliklerine göre yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek sönümleme, düşük yoğunluk, düşük ısı ve ses iletimi, yüksek ısıl kararlılık gibi avantajlara sahiptir. Ancak bal peteği yüksek maliyet, zor imalat, zor tamir, yüksek su emme, düşük yangın dayanımı gibi dezavantajlarda olabilir.

Ahşap: Bitki gövde ve dallarından elde edilen doğal bir malzemedir. Balsa, okume, kavak, çam, meşe, kayın, ceviz gibi farklı türlerde bulunabilir. Düşük yoğunluklu, yüksek sönümleme, iyi ısı ve ses yalıtımı, kolay şekillendirme ve işleme, geri dönüşümlü ve ekolojik gibi avantajlara sahiptir. Ancak ahşap düşük mukavemet, düşük sertlik, düşük ısıl kararlılık, yüksek su emme, korozyona ve böceklere karşı hassas, düşük yangın dayanımı gibi dezavantajları olabilir.

Metal: Metal, demir, alüminyum, bakır, çinko, magnezyum, titanyum gibi elementlerden veya alaşımlarından oluşan bir malzemedir.

Yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek ısıl kararlılık, korozyona ve yangına karşı dayanıklılık, geri dönüşümlü ve ekolojik gibi avantajlara sahiptir. Ancak metal yüksek yoğunluklu, düşük sönümleme, yüksek ısı ve ses iletimi, yüksek maliyet, zor şekillendirme ve işleme gibi dezavantajlara da sahiptir (Çolakoğlu, 2023).

2.5.3.7. Kompozit Sandviç çekirdek katman malzemeleri

Bu malzemeler sandviç yapının dışında yer alır ve çekirdek malzemeyi sıkıştırma ve gerilme kuvvetlerine karşı korur. Katman malzemeleri yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek ısıl kararlılık, düşük yoğunluk, düşük su emme, korozyona ve yangına karşı dayanıklı gibi özelliklere sahip olmalıdır. Katman malzemeleri olarak cam, karbon, aramid veya metal elyaf takviyeli polimerler, metal veya seramik gibi farklı malzemelerden oluşabilir. Bu türler aşağıda açıklanmıştır:

Elyaf takviyeli polimerler: Elyaf takviyeli polimerler, polimer matris içerisine elyaf takviyesi yapılarak üretilen kompozit malzemelerdir. Elyaf takviyeli polimerler, cam, karbon, aramid, bor, naylon, polyester, polipropilen gibi farklı elyaf ve polimer türlerinden üretilebilir. Elyaf takviyeli polimerler yüksek mukavemet, yüksek sertlik, düşük yoğunluk, düşük su emme, korozyona ve yangına karşı dayanıklı, kolay şekillendirme ve işleme, geri dönüşümlü ve ekolojik gibi avantajlara sahiptir. Ancak elyaf takviyeli polimerler yüksek maliyet, zor imalat, zor tamir, düşük ısıl kararlılık, değişik doğrultularda değişik mekanik özelliklere sahip olma gibi dezavantajlara da sahiptir.

Seramik: Kaolin, kil, feldspat, kuvars, silika, alümina, zirkonya, karbür, nitrit, borit gibi inorganik malzemelerden oluşan bir malzemedir. Seramik, yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek ısıl kararlılık, korozyona ve yangına karşı dayanıklı, düşük yoğunluklu, düşük su emme, düşük ısı ve ses iletimi gibi avantajlara sahiptir. Ancak seramik yüksek maliyet, zor imalat, zor tamir, kırılganlık, anizotropik olma gibi dezavantajlara da sahiptir (Gopalakrishnan ve Rajapakse, 2017).

2.5.3.8. Çekirdek ve katman malzemelerinin özellikler birleşimi

Çekirdek ve katman malzemelerinin özellikleri kompozit sandviç malzemelerin tasarımı ve performansı üzerinde etkilidir. Bu malzemelerin özelliklerini birleştirmek için, çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemlerden bazıları şunlardır:

Laminasyon: Bu yöntemde katman malzemeleri, çekirdek malzemenin iki yüzüne yapıştırılır. Böylece katman ve çekirdek malzemeleri arasında güçlü bir bağ oluşur. Laminasyon, ısı, basınç veya vakum uygulanarak yapılabilir.

Köpürtme: Bu yöntemde çekirdek malzemesi olarak köpük kullanılır. Köpük, katman malzemelerinin arasına enjekte edilir ve genleşerek katman malzemeleri ile yapışır. Böylece katman ve köpük malzemeleri arasında güçlü bir bağ oluşur. Köpürtme, kimyasal veya fiziksel yöntemlerle yapılabilir.

Enjeksiyon: Bu yöntemde çekirdek malzemesi olarak bal peteği kullanılabilir. Bal peteği, katman malzemelerinin arasına yerleştirilir ve boşlukları polimer matriks ile doldurulur. Böylece katman ve bal peteği malzemeleri arasında güçlü bir bağ oluşur. Enjeksiyon, vakum veya basınç uygulanarak yapılabilir.

Kaynak: Bu yöntemde çekirdek ve katman malzemeleri olarak metal kullanılır. Metal malzemeler, ısı veya elektrik akımı uygulanarak birbirine kaynatılır. Böylece metal malzemeler arasında güçlü bir bağ oluşur. Kaynak, gaz, elektrik veya lazer kullanılarak yapılabilir.

Bu yöntemler, kompozit sandviç malzemelerin üretiminde kullanılan yaygın yöntemlerdir. Bunların dışında diğer yöntemler de mevcuttur. Çekirdek ve katman malzemelerinin özelliklerini birleştirmek için malzemelerin uyumluluğu, maliyeti, kalitesi, dayanıklılığı ve güvenilirliği gibi faktörler dikkate alınarak üretim gerçekleştirilir (Yazıcı M., 2023; Ma ve Ekil, 2021).

2.5.3.9. Kompozit sandviç endüstrisi

Kompozit sandviç malzemeler, birçok sektörde ve endüstride farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Bu sektörlerden bazıları aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır:

Havacılık: Kompozit sandviç malzemeler, uçak, helikopter, uydu, roket gibi hava araçlarının gövde, kanat, kuyruk, kaporta, kabin, koltuk gibi parçalarında kullanılmaktadır. Bu malzemeler, hava araçlarının ağırlığını azaltırken mukavemet, sönümleme, ısı ve ses yalıtımı gibi özellikleri artırdığından çok önemli katkı sağlamıştır.

Otomotiv: otomobil, kamyon, otobüs, motosiklet gibi kara araçlarının karoseri, kapı, tavan, bagaj, koltuk, direksiyon, gösterge paneli gibi parçalarında kullanılmaktadır. Bu malzemeler, kara araçlarının ağırlığını azaltırken mukavemet, ısı ve ses yalıtımı, sönümleme, yakıt verimliliği, emisyon azaltma gibi özellikleri artırmaktadır.

Denizcilik: Kompozit sandviç malzemeler, yat, tekne, gemi, denizaltı, sualtı aracı gibi su araçlarının gövde, güverte, kabin, koltuk, direksiyon, gösterge paneli gibi parçalarında kullanılmaktadır. Bu malzemeler, araçların ağırlığını azaltırken sönümleme, mukavemet, yalıtım, korozyon direnci, su geçirmezlik gibi özellikleri iyileştirir.

Enerji: Rüzgâr türbinleri, güneş paneli, hidroelektrik santrali, nükleer santral gibi enerji üretim sistemlerinin kanat, çerçeve, kule, kapak, boru gibi parçalarında kullanılmaktadır. Bu malzemeler, enerji üretim sistemlerinin yapı dinamiklerini iyileştirmektedirler ve aynı zamanda mukavemet, korozyon direnci, ısıl kararlılık gibi özellikleri artırmaktadır.

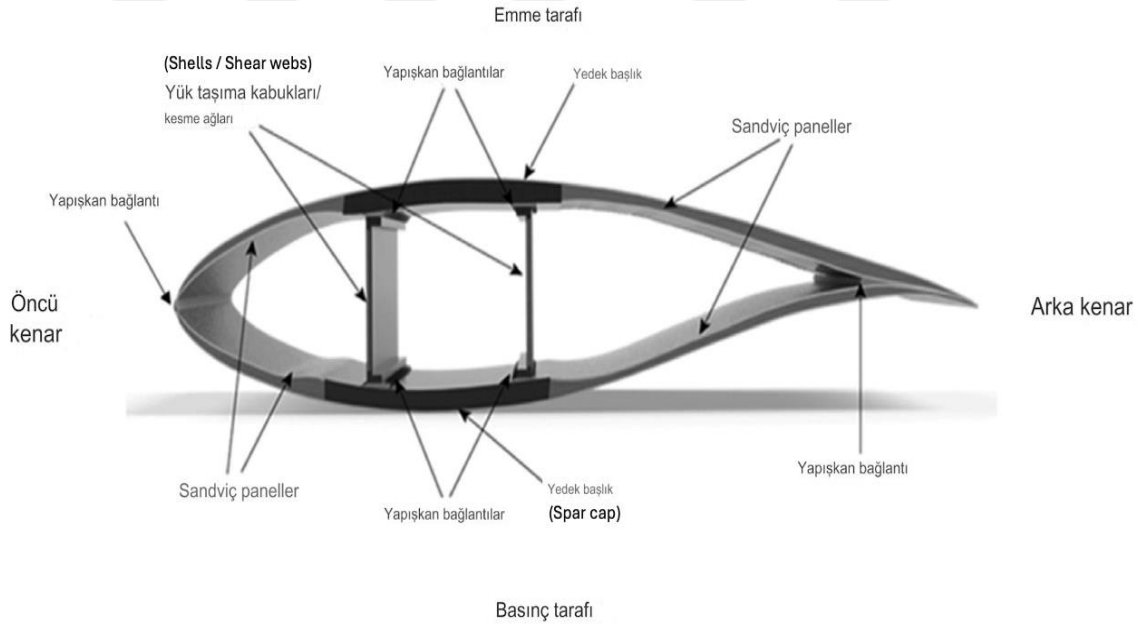
İnşaat: Bina, köprü, tünel, stadyum, havalimanı gibi yapıların duvar, çatı, zemin, kapı, pencere, kolon, kiriş, kubbe gibi parçalarında kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yapıların üsteki açıklamalarına ek olarak yangın dayanımı, deprem dayanımı gibi özellikleri de artırmaktadır.

Kompozit sandviç malzemelerin kullanıldığı diğer sektörler ise spor malzemeleri, ev eşyaları, mobilyalar, medikal malzemeler, savunma, uzay, elektronik, tekstil,

ambalajlama gibi alanlardır. Bu sektörlerde de kompozit sandviç malzemeler, farklı özelliklerdeki malzemelerin bir araya getirilmesiyle elde edilen avantajlardan yararlanmaktadır (Gopalakrishnan ve Rajapakse, 2018).

2.6. Rüzgâr Türbin Kanat Hasarları

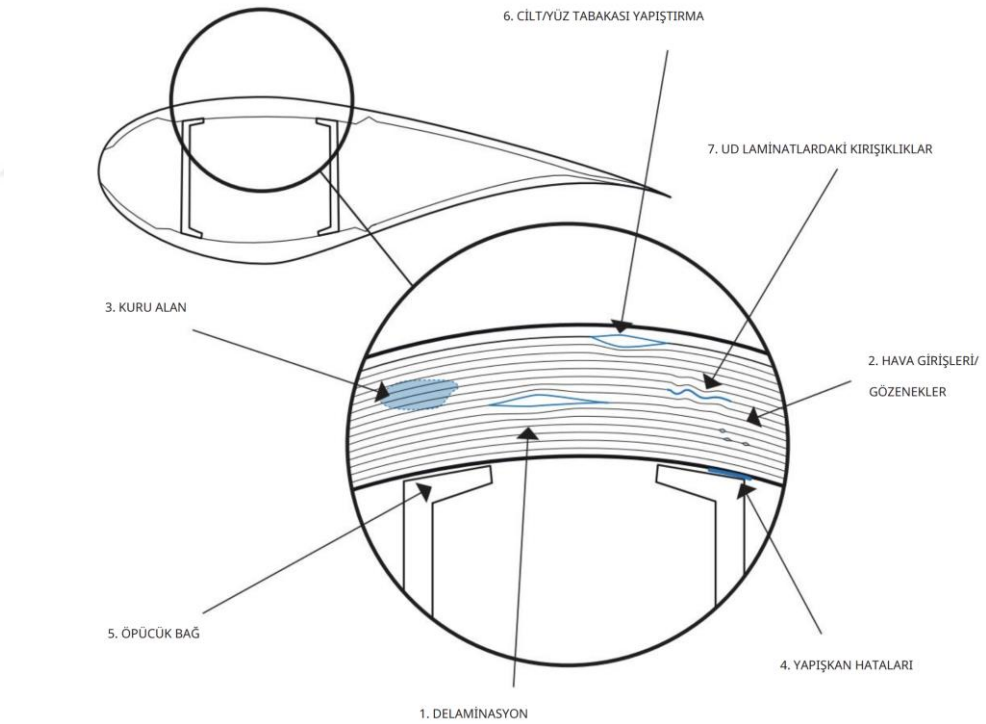
Bükülmüş ve konik kiriş gibi davranan rüzgâr türbin kanatları, rüzgârın etkisiyle çok yüksek bir kuvvetlere maruz kalır. Bu nedenle, kanatların üretim, montaj ve işletim sırasında hasar görmesi veya çatlaması mümkündür. Rüzgâr türbini kanat hasarları rüzgâr türbinlerinin performansını düşürebilir, üretim kaybına yol açabilir veya ciddi kazalara neden olabilir. Bu bağlamda rüzgâr enerjisi sektörünün karşılaştığı önemli bir sorundur. Bu sorunu çözmek için kanatların tasarımını, malzemesini, sayısını ve bakımını iyileştirmek ve hasarları zamanında tespit etmek ve önlemek için etkili yöntemler geliştirmek gerekmektedir (Kaya ve Koç, 2015; Bayram, 2015). Şekil 2.31'de Bir rüzgâr türbin kanadının yapısı gösterilmektedir.



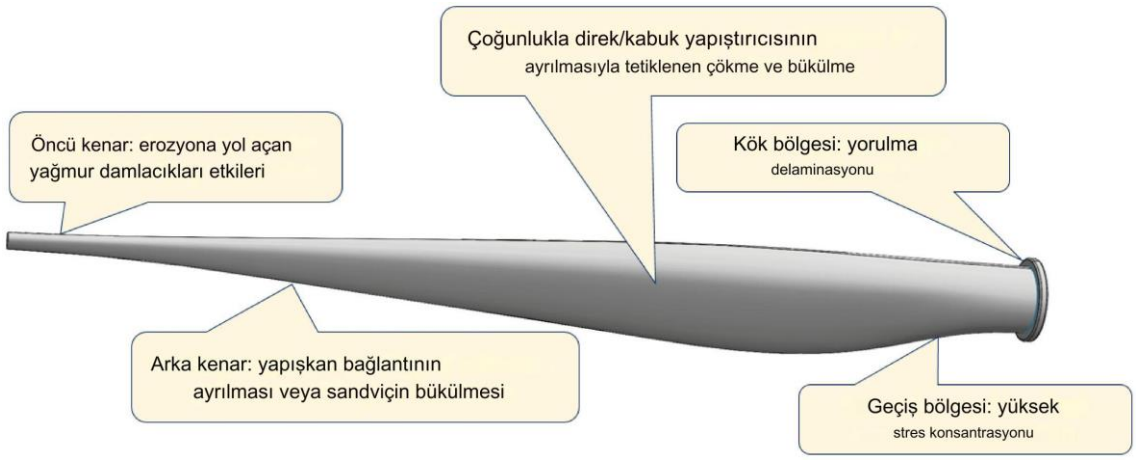
Şekil 2.31. Yük taşıyan rüzgâr türbin kanadı yapısı (Jensen and Branner, 2023).

Rüzgâr türbini rotor kanatlarının servis ömrünü üretim yöntemi ve kalitesi belirlemektedir.

Rotor kanatlarının üretim süreci, kompozit malzemelerde yorulma ömrünü ve olası hasarları büyük ölçüde etkileyen koşullara neden olmaktadır. Bu koşullar, reçine karışımının homojenliğindeki yerel değişiklikleri, reçine kabarcıklarındaki yerel değişiklikleri, yerel elyaf eğriliğini ve elyafın yanlış hizalanmasını ve yerel artık gerilimleri içermektedir. Bu koşullar tüm kompozit imalat süreçlerinde değişkendir ve tasarım sürecinde dikkate alınmalıdır. Tam olarak aynı üretim sürecinin tamamen aynı üretim koşulları ve malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğine bakılmaksızın bir kompozit numune, daha önce üretilmiş bir kompozit numuneyle hiçbir zaman aynı olmayacaktır. Kanat önceden büküldüğünde kalıp kapatıldığında PS genellikle kör bir nokta haline gelir. Bu, PS bağlı bağlantılarda üretim hatası riskini artırır (Olabi vd., 2021; Bladena, 2023; Walker, 2013). Şekil 2.32 ve Şekil 2.33'te türbin kanatlarında endüstriyel muayeneler sonucunda tespit edilen potansiyel hasar ve kusurlar gösterilmiştir ve sırasıyla açıklanmıştır.



Şekil 2.32. Rüzgâr türbin kanatlarında endüstriyel muayeneler sonucunda tespit edilen potansiyel hasar ve kusurlar (Bladena, 2023)



Şekil 2.33. Rüzgâr türbin kanat bölgelerinde potansiyel hasar ve kusurlar (Mishnaevsky, 2022)

1. Delaminasyon: Katmanlar/ayrılmış iki elyaf laminat arasında kaynaşma uyum eksikliği kaynaklı kusurlar interlaminer hatasına neden olarak laminatın bükülmesini ve katmanlar arası bozulmalar meydana gelmektedir.

2. Hava kalıntıları/Gözenekler: Üretim yöntemi ve esnası kaynaklı matriste makro ve mikro ölçekli hava boşlukları, kirlilikler ve yabancı madde kaynaklı kusurlar,

3. Kuru alanlar: Üretim esnasında yeterli emilim yapılamaması kaynaklı reçine eksikliği kusurları,

4. Yapıştırıcı kusurları: Yetersiz miktarda yapıştırıcı, kusurlu ve kabarcıklı yapıştırma, düşük özellikli yapıştırıcılar ve/veya doğru yerleştirilmemiş yapıştırma prosesi,

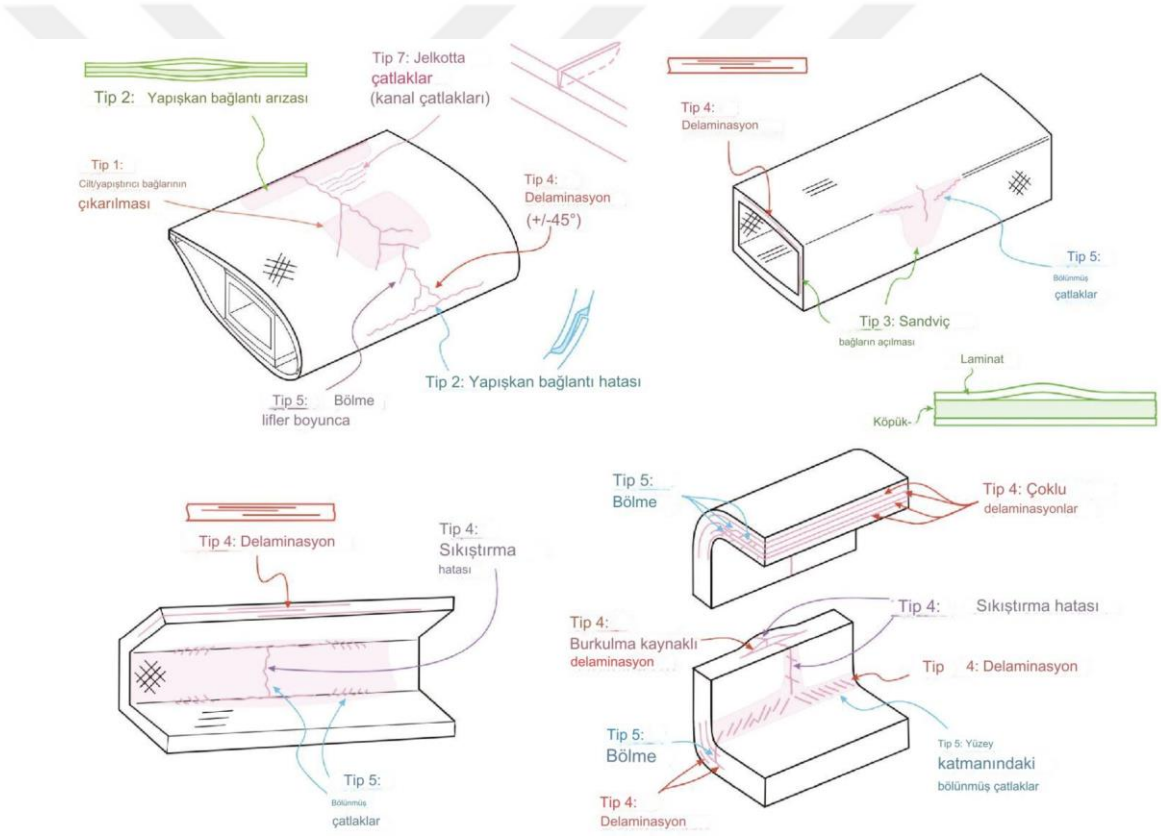
5. Öpücük bağı (Kissing Band): Yapışmanın çok az veya hiç olmaması kaynaklı kusurlar. Bu kusuru oluşan çatlamayı tespit etmek kanat sabitken neredeyse hiç fark edilmedikleri için çok zor olabilmektedir. Otomatik UT (Ultrasonik test), tespit için önerilen bir yöntemdir.

6. Deri/yüzey tabakası ayrışması (debonding (yapışkan ayrılması)): Bir sandviç malzeme üzerinde dış veya iç yüzeyin çekirdekten ayrılması sonucu oluşan arayüzlerde ayrılma kusurları,

7. Cam/karbon fiber laminantlarda kırışıklıklar: Kürleme öncesinde veya sırasında liflerin yanlış hizalanması ve dalgalanması sonucu oluşan üretim kusurları,

8. Yıldırım Reseptör Sisteminin yerleştirilmesi ve bütünlüğü: Reseptörler ve dahili konektör arızaları, hizalama ve konumlandırma sorunları (Bladena, 2023).

Üretilen bu kanat yapıları, üretim teknik ve mutlak hatası gereği kullanım ve çevrim esnasında kolay hasarlanmaya ve yüksek maliyetli onarımlara neden olmaktadır (Mishnaevsky vd., 2017). Şekil 2.34'te gösterilen hasar modları aşağıda maddeler halinde açılanmıştır:



Şekil 2.34. Rüzgâr türbini kanadı arıza modları (Sørensen vd., 2004)

Reçine çatlaması ve arayüz bozulması: Düşük enerjili darbelerde lifler ve matris arasındaki bağlantı zayıflar ve çatlaklar oluşur. Bu, delaminasyona yol açabilmektedir.

Yapıştırma bölgeleri: Kanat panellerin birleşimlerinde kanat iç desteklerin ek yerlerinde kanat çevrim kaynaklı dinamiklerin etkisinde oluşan soyulmalar, aşınmalar ve çatlaklar meydana gelmektedir.

Lif kırılması: Yüksek enerjili darbelerde lifler gerilme veya sıkıştırma nedeniyle kopabilir. Bu, malzemenin mukavemetini ve rijitliğini azaltır.

Reçine sisteminin kırılma tokluğu: Reçine sistemi ne kadar kırılgansa darbe altında kırılması o kadar kolaydır. Reçine sisteminin kırılma tokluğu arttıkça delaminasyon riski de artar.

Lif türü ve yönelimi: Farklı lif türleri ve yönelimleri, katmanlar arasında uyumsuzluk yaratabilir. Bu da çatlak yayılmasına ve kayma gerilmelerine neden olabilir. Bu fenomenler, malzemenin özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkar. Bu çatlaklar malzeme arayüzünde ilerleyerek delaminasyona neden olabilir.

Rüzgâr türbinleri, bakım, kuş çarpması, yıldırım, erozyon, buzlanma gibi çeşitli etkenlere bağlı olarak darbe hasarına maruz kalabilir. Darbe hızına göre düşük hızlı darbelerde kinetik enerji elastik olarak depolanır ve emilir. Yüksek hızlı darbelerde ise kinetik enerji plastik deformasyona ve malzeme hasarına dönüşür (Waldbjørn vd. 2023; Broṇdsted and Nijssen, 2023). Bu hasarlar, kanatların delaminasyonu, kırılması, çatlaması, aşınması, titreşimi, dengesizliği, aerodinamik asimetri, torklanma darbeleri, ortalama torkun azalması, karmaşık kayıplar, performans düşüklüğü ve sarım aşırı ısınması gibi sonuçlara yol açabilmektedir. Bu hasarlar, rüzgâr türbininin verimliliğini, güvenilirliğini ve bu bağlamda ömrünü etkiler. Bu nedenle rüzgâr türbinlerinin düzenli olarak denetlenmesi ve onarılması gerekmektedir (Branner ve Ghadirian, 2014; Olabi vd., 2021).

Özetle, rüzgâr türbini hasar modları olarak çevrim boyunca türbin kanatları yük ve stres etkisi altında burulma (torsion), buckling, bending, twisting, merkezkaç ve yerçekimi yükleri nedeni stres kaynaklı yük ve eğilme nedenli eksenel gerinimler ve kesme gerinimleri, yorulma kaynaklı mikro çatlaklar, soyulma gerilimleri (bondlines peeling), titreşimler, flutter kararsızlıklar ve iç yapıda bulunan shear web ayrılması yer almaktadır

(Broṇdsted and Nijssen, 2023). Rüzgâr türbin kanat hasarlarını önlemek için kanatların tasarımını, malzemesini, sayısını ve bakımını iyileştirmek ve hasarları zamanında tespit etmek ve önlemek için etkili yöntemler geliştirmek ve önceden aşağıda belirlenen parametreleri üretimden önce dikkat edilmesi gerekmektedir:

Kanatların tasarımı: Kanatların aerodinamik şekli, rüzgârın etkisini azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak için optimize edilmelidir. Kanatların uzunluğu, genişliği, kalınlığı, eğimi ve yeri gibi parametreler, rüzgâr türbininin performansını etkiler. Kanatların tasarımı, rüzgârın hızına, yönüne, yoğunluğuna ve türbülansa göre değişebilmelidir.

Kanatların malzemesi: Kanatların malzemesi, rüzgârın kuvvetine, sıcaklığına, nemine ve korozyonuna dayanıklı olmalıdır. Kanatların malzemesi, kanatların ağırlığını, mukavemetini, rijitliğini, esnekliğini ve dayanımını etkiler. Kanatların malzemesi, kompozit, metal, ahşap, plastik veya hibrit olabilir. Kompozit malzemeler, hafif, sağlam, dayanıklı ve ucuz olmaları nedeniyle tercih edilmektedir.

Kanatların sayısı: Kanatların sayısı, rüzgâr türbininin dönme hızını, torkunu, gürültüsünü ve titreşimini etkiler. Kanatların sayısı iki, üç, dört veya daha fazla olabilir. Üç kanatlı rotor, en iyi verime sahip olduğu genellikle kullanılmaktadır. İki kanatlı rotor daha hızlı döner, ancak daha fazla gürültü ve titreşim üretir. Dört veya daha fazla kanatlı rotor, daha yavaş döner, ancak daha fazla tork ve stabilite sağlar.

Kanatların bakımı: Kanatların bakımı, rüzgâr türbininin ömrünü uzatmak ve arızaları önlemek için önemlidir. Kanatların bakımı, düzenli olarak temizlenmesi, yağlanması, kontrol edilmesi ve onarılması gerektiğini içerir. Kanatların bakımı, rüzgâr türbininin durumunu izlemek ve hasarları tespit etmek için çeşitli yöntemler kullanılarak yapılabilir Kanatların bakımı, rüzgâr türbininin verimliliğini, güvenliğini ve maliyetini etkilemektedir (Mishnaevsky, 2021; Mishnaevsky, 2022; Broṇdsted and Nijssen, 2023; Bladena, 2023).

2.7. Rüzgâr Türbin Kanatlarında Bakım ve Onarım

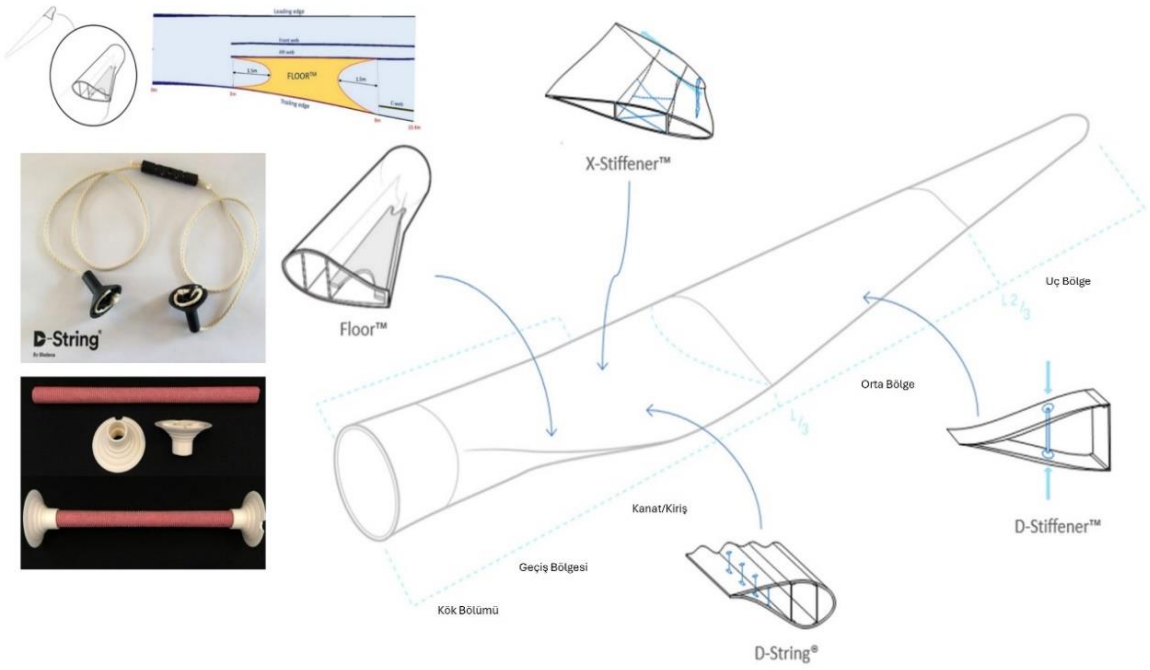
Rüzgâr türbini kanatlarının onarımı, kompozit yama, yapıştırıcı, kaplama ve ana kompozit yapılar dahil olmak üzere çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Kanat onarılırken yapıştırıcıda veya örtü kusurlar kanat üzerinde olumsuz etki yaratabilir. Uygulamada esnek yapıştırıcıların ana laminant yapılarda artan gerilmelere yol açtığı gözlemlenmektedir. Yapıştırıcıdaki boşlukların mevcudiyeti yerel gerilme yoğunlaşmasına yol açmakta ve böylece kanatların onarım sonrası güvenilirliğini azaltabilmektedir. Genellikle Şekil 2.35'te eğitim videosundaki örtü tamir teknolojisi uygulanır, hasarlı bölge kaldırılır, yüzey taşlanır, hazırlanır ve hasarlı laminantın üzerine yama yapıştırılır. Bu tür çalışmalar çoğu zaman şantiyede hatta açık denizde zorlu koşullar ve zaman baskısı altında gerçekleştirilir (Gupta vd., 2019). Kanat onarımı pahalıdır ve kalite önemlidir, bir teknisyenin ayrıntılı bilgi sahibi olması gerekir, işinin parametrelerinin nasıl olduğu bilgisi onarım sonrası güvenilirliğini etkiler (Mischnaewski ve Mishnaevsky, 2020).



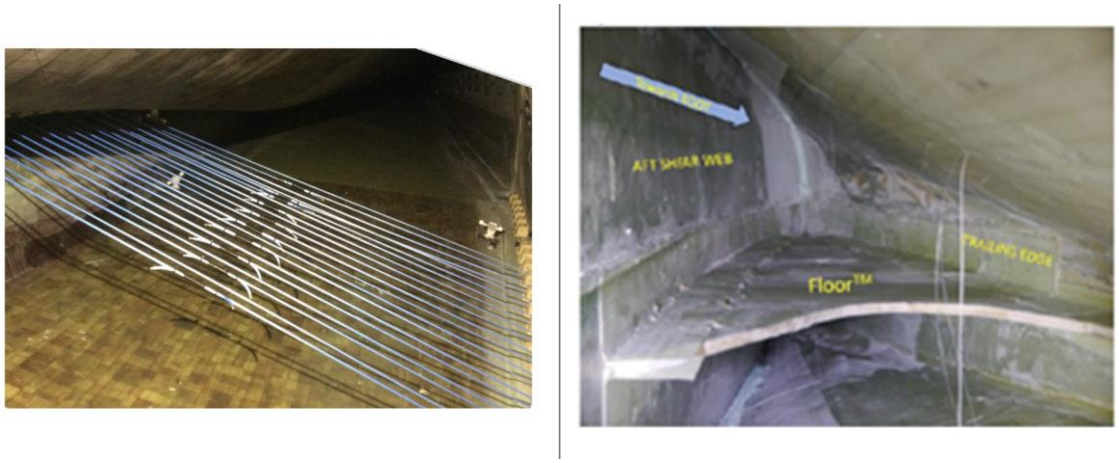
Şekil 2.35. Rüzgâr türbin kanat hasarında restoratif örtü tamir teknolojisi eğitim videosu kesiti (Mishnaevsky ve Mischnaewski, 2020; LM, 2020)

Ayrıca yapıştırıcıdaki kusur ve boşlukların rüzgâr türbini kanatlarının onarım sonrası ömrü ve enerji maliyetleri üzerindeki rolü analiz edilmektedir. Sürekli hasar mekaniği yaklaşımı kullanılarak yapıştırıcılardaki boşlukların rüzgâr türbini kanatlarının onarım sonrası ömrünü büyük ölçüde azalttığı gösterilmektedir.

Küçük ve büyük onarımların karşılaştırılmasında rüzgâr türbini kanatlarının küçük onarımları, yüzey erozyonu, çatlaklar ve küçük ayrışmalar gibi yapısal olmayan hasarları içermektedir. Büyük onarımlar ise lif kırılması gibi yapısal hasarları içermektedir. Küçük onarımların yıllık arızalanma oranı, büyük onarımların 40 katıdır. Küçük onarımların yıllık maliyeti, büyük onarımların 12 katıdır. Küçük onarımların toplam duruş süresi, büyük onarımların 2,4 katıdır. Bu nedenle küçük onarımların zararı oldukça yüksektir. Küçük onarımların azaltılması için yeni çok katmanlı koruyucu kaplamalar, rüzgâr türbini hızının güvenli modda kontrolü ve kaplamalarda polimer ve metalik elemanların birleştirilmesi gibi çeşitli yöntemler önerilmektedir. Onarım işlemleri, rüzgâr enerjisinin seviyelendirilmiş maliyetine çok önemli bir katkıya neden olmaktadır. Onarım süresini kısaltan ve onarım kalitesini artıran teknolojiler, maliyetleri azaltmaya yardımcı olabilir (Mishnaevsky ve Thonsem 2020). Ayrıca Şekil 2.36 ve 2.37'de gösterilen çeşitli restoratif ve rekonstrüktif kanat onarım yöntemler de bulunmaktadır (Bladena Solutions, 2023).



Şekil 2.36. Çeşitli rekonstrüktif kanat onarım yöntemleri (Jensen ve Branner 2023)



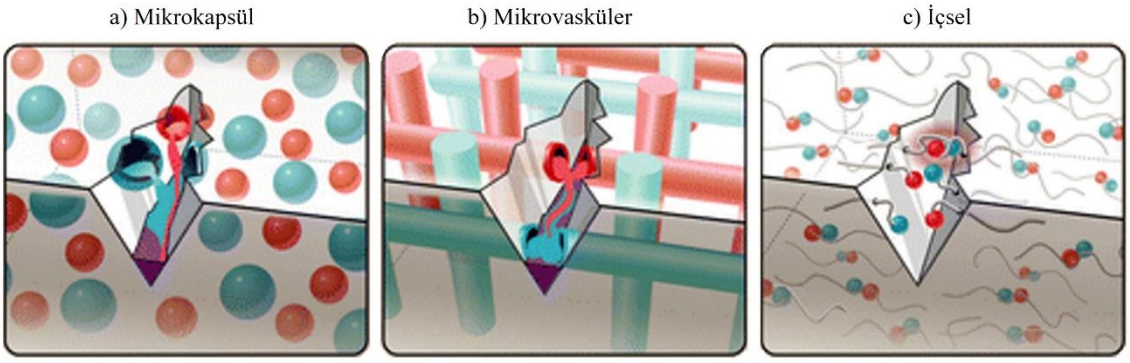
Şekil 2.37. Sırasıyla X-Stiffener ve Floor destek onarımlı bir çalışır türbin kanadı görseli (Jensen ve Branner, 2023)

2.8. Kendi Kendini Onaran Malzemeler

Self-Healing yani kendi kendini iyileştirme kavramı hasar, aşınma ve/veya yıpranma gören malzemelerin otonom iyileşme yeteneğidir. Bu özellik, özellikle bakımın zor olduğu veya arızaların büyük mali kayıplara neden olduğu durumlarda büyük değer arz etmektedir. Rüzgâr türbini kanatları, kendini iyileştirme teknolojisinden yararlanabilecek bir uygulama alanıdır (Saadeh vd., 2023).

Kendi kendine iyileşme özelliklerine sahip malzemelerin mekanizmalarına bağlı olarak farklı sistemli kendini iyileştiren materyaller bulunmaktadır. Bunlar; Şekil 2.38'de gösterilen kapsüler, içsel ve vasküler sistemler olarak adlandırılmaktadır (Özer vd. 2022; Patrick vd., 2017).

Kendini iyileştiren polimerler ve kompozitler, çatlak veya delik gibi hasarları otomatik olarak onarabilen malzemelerdir. Kendini iyileştirme mekanizmaları, kapsülleme, içsel kanallar, şekil hafızalı alaşımlar, reaktif polimerler ve biyolojik sistemler gibi çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir (Amano 2022).



Şekil 2.38. Kendi kendini iyileştirme mekanizmaları (Blaiszik vd., 2010)

Rüzgâr türbin kanatları, havacılık, inşaat, otomotiv, elektronik gibi çeşitli potansiyel nitelikli endüstriyel uygulamalar söz konusudur. Sağlık hizmetlerinde kendi kendini iyileştiren malzemeler, doğal iyileşme sürecini taklit edebilen yapay dokular, organlar, implantlar ve ilaç dağıtım sistemleri oluşturmak için kullanılabilmektedir (Jadoun, 2023).

Elektronikte mekanik strese, termal şoka ve çevresel bozulmaya dayanabilen esnek, gerilebilir ve giyilebilir cihazlar oluşturmak için kullanılabilir (Pernigoni vd, 2021) Bu malzemeler, hasar gördükten sonra bile işlevselliklerini ve performanslarını koruyabilen optik fiberler, antenler ve sensörler oluşturmak için telekomünikasyon kullanılabilir (Tahir vd., 2020).

Ulaşım sektöründe ise akut onarım sağlamakla birlikte bakım maliyetlerini azaltabilen, hizmet ömrünü uzatabilen ve güvenliği artırabilen otomobillerde, gemiler, uçaklar ve uzay araçlarında kullanılabilir (Mohan vd., 2017). Altyapı kullanımında önemli yer edinen kendi kendini iyileştiren malzemeler kullanılmaktadır. Çatlakları, sızıntıları durduran korozyonu önleyebilen veya iyileştirebilen binalar, köprüler, yollar ve boru hatlarına uygunluk sağlamaktadır (SoftRobotics, 2024). Bunlar kendi kendini iyileştiren malzemelerin olası ve potansiyel uygulamalarından sadece bazılarıdır. Otonom iyileşen malzemelerin yenilikçi çözümler ve faydalar sağlayabileceği daha birçok alan mevcuttur (Islam ve Bhat, 2021). Çizelge 2.2.'de literatürde yer alan malzemeler için kendi kendini iyileştirme metodolojileri gösterilmiştir (Lucas vd., 2016; Jiang vd, 2023).

Çizelge 2.2. Çeşitli malzemelerde hasar mekanizmalarını otonom iyileştirme metotları (Lucas vd., 2016).

Malzeme	Hasar Mekanizması	Onarım
Polimer	Jilet/Neşter Kesimi	İçsel Şifa
	Kopma ile çekme testi	Supramoleküler ağlar
	Balistik etki	
	Kırılma Tokluğu	
	Kesme Testi	
	Jilet/Neşter Kesimi	Sıcaklıkla tetiklenen supramoleküler ağlar
Polimerik Kaplama	Korozyonlu mikro kesme	Moleküler interdifüzyon (çözücü) kapsüllenmiş ajan
	Çekme testleri(yapışma)	
	Üç veya dört noktalı bükme	
	Mikro Çizikler	
Somut	Bükme ile kontrollü çatlak başlangıcı	Mikrokapsüllenmiş ajanın aktivasyonu
	Sıkıştırma	
Seramik	Girinti ile çatlak başlangıcı	Sıcaklıkla tetiklenen oksidasyon reaksiyonu
	Synchrotron mekanik testi	
	Çekme Kuvveti	
	Üç top üzerinde çift eksenli top	
	Yüksek Sıcaklık Stresi	
	Üç veya dört noktalı bükme	
Seramik Kaplama	Girinti ile çatla başlangıcı	Sıcaklıkla tetiklenen oksidasyon reaksiyonu
	Yüksek Sıcaklık Stresi	
	Üç veya dört noktalı bükme	
Kompozit	Liflerin çatlak kaynaklı kopması	Mikrovasküler ağlar tarafından salınan iyileştirici ajan
	Kırılma Tokluğu	
	Yorulma Yüklemesi	
	Delaminasyon	
	Girintinin etkisi	
	Dört noktalı bükme	
	Çentikli Eğilme	

Otonom onarımlı malzemelerin kullanımında bazı sınırlamalar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları iyileştirici ajanın uyumu, viskoz yapısı ve sektörel bulunabilirliği sınırlı olabilir. Kapsül uygulamalarda olduğu gibi hasar onarımı yetersiz veya tek seferlik bir iyileşme vasfı gösterebilir (Jiang vd, 2023). İyileşme süresi değişkenliği kaynaklı bazı uygulamalarda efektif olmayabilir ve çok uzun veya çok değişken olabilir. Bu da malzemenin performansını ve güvenliğini onarmak yerine zedeleyebilir. İyileştirme sonrasında kozmetik onarım olsa da yapısal onarım verimliliği özellikle ileri ve kompleks hasarlar için malzemenin saf özelliklerini geri kazanımı için yeterli olmayabilmektedir. Onarım sistemi ışık, sıcaklık, ısı takviyesi ve basınç uygulaması gibi dışardan tetiklemeler veyahut ekstra enerji uygulamak gerektirebilir, bu durumlarda kurgunun maliyetini ve

karmaşıklığını artırabilir. Onarım süresi boyunca malzemenin rijitliğini, ürün kalitesini ve mukavimliğini düşürebilecek kimyasal reaksiyonlar, kütle kayıpları ve kontaminasyon gibi istenmeyen yan etkiler meydana gelebilir. Bu aksiyonlar kendi kendini iyileştiren otonom onarım malzemelerin karşılaştığı yaygın zorluk ve belirli kısıtlamalardan bazılarıdır. Bu duruma karşılık, sürdürülebilirlik adına araştırmacılar bu engellerin üstesinden gelmek ve kendi kendini iyileştiren malzemelerin performansını ve uygulanabilirliğini artırmak için sürekli çalışmalar yapılmaktadır (Pernigoni vd, 2021; Islam ve Bhat, 2021; Jiang vd, 2023, Jadoun, 2023). Çizelge 2.3'te iyileşme tür ve yöntemlerine göre bazı literatür araştırma örnekleri yer almaktadır (Jiang vd, 2023).

Çizelge 2.3. İyileşme tür ve yöntemlerine göre literatür araştırma örnekleri kategorisi (Jiang vd, 2023)

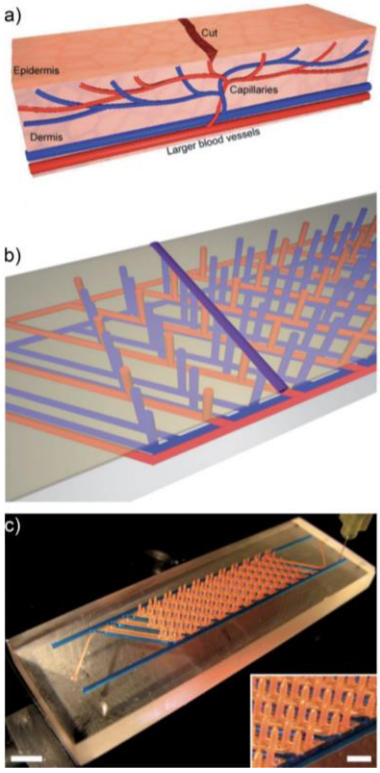
	Dışsal Şifa			İçsel Şifa				
	Mikrokapsül	**Mikrovasküler**	**Nanopartiküller**	**Diels-Kızılağaç Reaksiyonu**	**Disülfit**	**Hidrojen Bağları**	**İyonik Etkileşimler**	**Koordinasyon**
Kaynaşmış biriktirme modellemesi (FDM)		O'Harra ve ark. (2020)	Peng ve ark. (2021)	Bi ve ark. (2022) Zhou ve ark. (2020)		O'Harra ve ark. (2020) Bi ve ark. (2022) Zuo ve ark. (2021)	O'Harra ve ark. (2020)	Zuo ve ark. (2021) Lai ve ark. (2018)
Doğrudan mürekkeple yazma (DIW)			Kuang ve ark. (2018)	Zhang ve ark. (2019) Yuan ve ark. (2020)		Wang ve ark. (2021)	Wang ve ark. (2021)	
Stereolitografi (SLA)	Sanders ve ark. (2019)			Durand-Silva ve ark. (2021)			Liu ve ark. (2020)	
Dijital ışık işleme (DLP)		Kuang ve ark. (2018)	Zhang ve ark. (2019)		Li ve ark. (2019) Miao ve ark. (2022) Zhang ve ark. (2022)	Zhang ve ark. (2022) Caprioli ve ark. (2021)	Zhang ve ark. (2022)	

Bununla birlikte, kendi kendini iyileştiren malzemelerin kullanımıyla birlikte artacağı düşünülen ilgili bazı çevresel kaygılar da bulunmaktadır. Bunlardan bazıları iyileştirici ajan kullanılan bakteriler ve yapıların çevreye toksik, alerjen ve zararlı maddelerin salınması sorunları, otonom malzemelerin üretimi ve işlenmesi sırasında mevcut yapılara kıyasla enerji israfı ve sera gazı emisyonları, kendiliğinden iyileşen malzemelerin ve iyileştirici ajanların biyolojik bozulması, geri dönüşümü ve doğal sirkülasyon üzerindeki potansiyel etkilerinin araştırılması da dikkat çekmektedir. Bu bağlamda kendi kendini iyileştiren malzemelerin, otonom onarım koşullarında hayatsal ve çevresel faydalarını ve olası risklerini, etkilerini değerlendirmek ve biyolojik olarak parçalanabilen veya yenilenebilir malzemelerden kullanımı ile iyileştirici madde ve otonom onarımlı

malzemelerin sentez ve üretim yöntemlerini optimize etmek ve son olarak yaşam döngüleri gibi olumsuz etkilerini en aza indirecek stratejiler geliştirmek büyük önem taşımaktadır (Shah, 2022; Rincon, 2022).

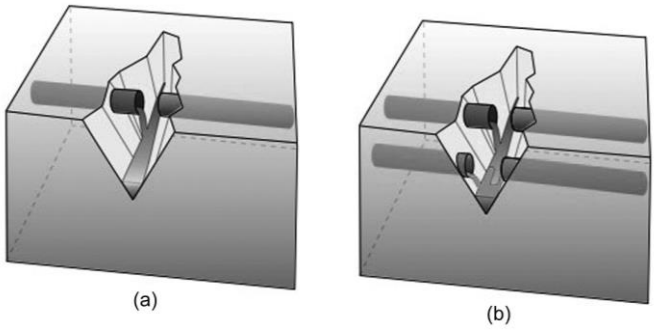
2.8.1. Mikrovasküler Kanallar ile Otonom İyileşme

Mikrovasküler/mikrodamarlı kendi kendini iyileştiren malzemeler ve polimerik kompozitler, içi boş iç ağlar içinde dolaşan akışkan iyileştirici ajan kullanılarak yapılarındaki hasarı otonom olarak onarabilen bir tür akıllı malzemelerdir. Bu malzemeler besin sağlayan ve atık ürünleri uzaklaştıran karmaşık mikrovasküler ağlara ve kan damarlarına sahip insan vücudu gibi biyolojik sistemlerden esinlenmiştir. (Şekil 2.39). Bu kanallar hasarlı bölgelere iyileştirici maddeler iletir ve malzemenin işlevselliğini geri kazandırma yeteneğine sahiptir. Mikrovasküler kendi kendini iyileştiren malzemeler enerji üreteçleri, havacılık, otomotiv, medikal, elektronik ve inşaat gibi çeşitli alanlardaki dayanıklılığını ve performansını artırabilecek çoklu, tekrarlanabilir ve verimli iyileşme olayları elde etme potansiyeline sahiptir (Toohey vd., 2007).



Şekil 2.39. a) İnsan damar yapısından yola çıkarak b) tasarlanan c) vasküler kanal uygulamaları (Hansen vd., 2009)

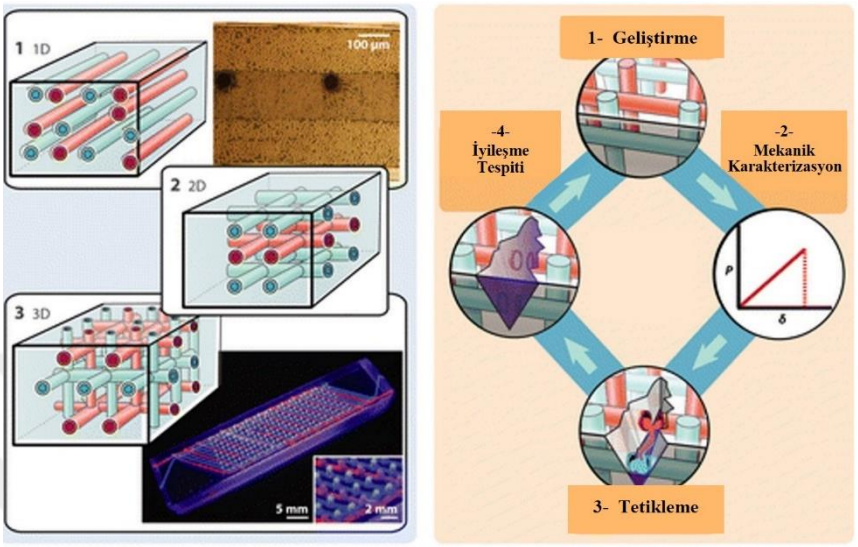
Mikro damarlı kendi kendini iyileştiren malzemeleri sentezleme yöntemlerinden bazıları doğrudan işleme, yumuşak litografi, lazer ablasyonu ve iç içe geçen ağları içerir. Bu yöntemler, farklı şekil ve boyutlarda vasküler kanalların yanı sıra epoksi, disiklopentadien veya dinamik çapraz bağlayıcı polimerler gibi farklı türde iyileştirici maddeler oluşturabilir. İyileşme mekanizması; hasarın, iyileştirici ajanın ve iyileşme sürecini harekete geçiren aktivatör (katalizör)'ün türüne bağlı olarak tetiklenir. Kanalların hasar anında cidarları çatladığında iyileştirici ajanların hasarlı bölgeye sızmasını sağlatır, burada matris yapısında bulunan toz aktivatör ya da diğer kanallardan gelen sertleştirici 2. komponentle (re-aktif) reaksiyona girerek (Şekil 2.40) malzemenin özelliklerini geri kazandıran yeni bir çapraz bağ oluştururlar. Kanalların tıkanmadığı ve iyileştirici ajanlar tamamen tükenmediği sürece bu işlemler birçok kez tekrarlama ve onarma yeteneğine sahip olabilirler (White, 2024; Hansen vd., 2009).



Şekil 2.40. Reaktif iyileştirici ajanlı mikro damarlı yapı içeren polimer kompozitlerde otonom onarım sistemi (a) tek komponentli ve (b) çift komponentli (Lucas vd., 2016)

Mikrovasküler kanallar aracılığı ile onarımlarda (Şekil 2.41) iyileşme süresi, mikro çatlağın boyutu, konumu ve derinliği, iyileştirici ajanın akış hızı, viskozitesi, polimerizasyon ve reaksiyon kinetiği gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bazı çalışmalara göre iyileşme süresi deneysel koşullara bağlı olarak anlık, birkaç dakika ile birkaç saat arasında değişebilmektedir. Sistemin basıncını veya sıcaklığını artırarak iyileşme süresi azaltılabilir, bu durumda iyileştirici ajanın akmasını ve reaksiyon hızını artırabilir. Bununla birlikte iyileşme hızı ve iyileşme verimliliğinin yanı sıra onarılan malzemenin mekanik geri kazanımında kayıplar meydana gelebilir.

Bu bağlamda yapı ister ve koşullarına göre iyileşme vasfı ve verimliliği yöntemin performansına ve dayanıklılığına bağlı olarak değişebilmektedir (Jadoun, 2023, Toohey vd., 2009, Ma vd., 2018, Patrick vd, 2012; Lucas vd., 2016).



Şekil 2.41. Otonom malzemelerde mikrodamar teknolojisi (Blaiszik vd., 2010)
Literatürde mikrovasküler onarımlarla ilgili pek çok çalışmalar ve araştırmalar mevcuttur.

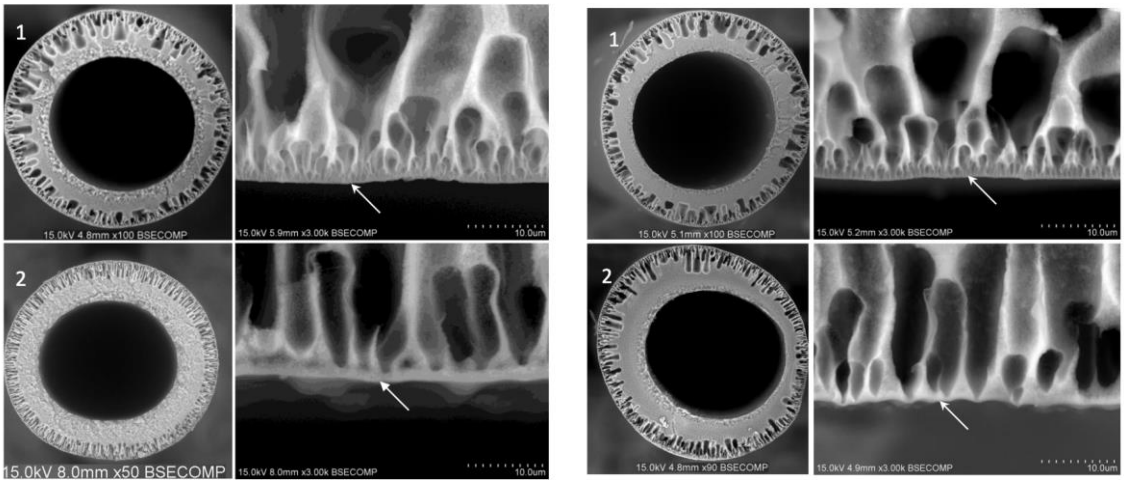
Hansen vd. kompleks mikrovasküler ağlara sahip kendi kendini iyileştiren malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu üzerine çalışma yapmıştır. Çalışmada iki ayrı iyileştirici ajan ve reaktif ağı kullanarak farklı konumlardaki birden fazla çatlağı iyileştirme kabiliyetini incelenmiştir (Hansen vd., 2009). Vintila ve arkadaşları çalışmalarında polimerik kompozit malzemeler hakkında mikrovasküler otonom onarım yaklaşımı ile poliakrilonitril (PAN) liflerine iyileştirici ajan olarak disiklopentadien (DCPD) yerleştirerek koaksiyel elektrospinning yoluyla bir nanolif ağı sentezlenmiş olup ayrıca nanolif ağının kendi otonom onarım kabiliyetini deneysel olarak incelemişlerdir (Vintila vd., 2022). Toohey vd. organik mürekkeplerin doğrudan-yazma montajı yoluyla mikrovasküler ağların tasarımını ve üretimini anlatmışlar ve metatez polimerizasyon (ROMP) reaksiyonuna sahip bir model epoksi sistemi kullanılarak malzemelerin kendi kendini iyileştirme verimliliğini irdelemişlerdir (Toohey vd., 2007). Ma vd., otonom onarımlı polimer kompozit malzemelerde mikrodamar oluşturma yöntemleri, iyileştirici ajan türleri, kendi kendini iyileştirme mekanizmaları ile aynı zamanda bu alandaki zorluklar ve beklentilerin gelişimi hakkında bir araştırma yapmışlardır (Ma vd., 2023).

2.8.2. Mikrovasküler İyileştirme için İçi Boş Nano Lif Kullanımı

İçi boş lifler, içi boş bir çekirdeğe ve gözenekli, delikli veyahut membranlı cidarlara sahip bir tür yapay kanallardır. Su arıtma, gaz ayırma, hücre kültürü, tıp ve doku medikal mühendisliği gibi çeşitli uygulamalar için kullanılmaktadır. İçi boş lifleri üretiminde eriyik eğirme, kuru eğirme, ıslak eğirme ve elektro eğirme gibi farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler bir polimer çözeltisinin, bir iğne ve bir halkaya sahip bir cihaz olan bir spinneretten ekstrüde edilmesi ile oluşur. Polimer, spinneretten çıkarken içi boş bir elyaf halinde katı hal almaktadır. Bu lifler, tek ve çok katmanlı, çok oyuklu ve dallı gibi farklı şekil ve yapılara sahip olmaktadır.

İçi boş liflerin gözenek boyutu, gözenek dağılımı ve membranlı cidar kalınlığı gibi özellikleri, eğirme boyutları, çözelti bileşimi, sıcaklık ve eğirme hızı gibi üretim parametreleri ayarlanıp kontrol edilerek çeşitli varyasyonlar ve türleri üretilmektedir. İçi boş lifler, düşük basınçlama, yüksek geçirgenlik, yüksek yüzey alanı ve esneklik gibi diğer membran türlerine göre birçok avantaja sahiptir. İçi boş lifler gaz ayırma, hücre kültürü, içi boş lifler su arıtma ve medikalde yapay tüp dokular olarak kullanılabilirler (‘İçi boş fiber’, 2024; Tian vd., 2021; Liu vd, 2021).

İçi boş elyaf kanallar için kullanılan en yaygın polimer malzemeler: Polivinilklorür (PVC), Selüloz asetat, Nitroselüloz (CN), Selüloz esterleri (CE), Poliakrilonitril (PAN), Poliamid (PA), Poliimid (PI), Polisülfon (PS), Polietersülfon (PES), Polietilen (PE) Polipropilen (PP), Politetrafloroetilen (PTFE), Poliviniliden florür (PVDF), Polidimetilsiloksan (PDMS) gibi polimer hammaddeler ile üretilmektedir. Bu polimerlerin kullanımı farklı özelliklere ve uygulamalara göre değişmektedir. PTFE kimyasal direnci ve hidrofobik yapı özelliğine PVDF ise mekanik mukavemet ve biyouyumluluk karakteristiğine sahiptir (Tian vd., 2021; Murphy ve Bird, 2023). Şekil 2.42’de çeşitli içi boş fiberlerin SEM görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2.42. Cidar membranlı farklı içi boş termoplastik liflerin SEM görüntüsü (Gao, 2017)

2.8.2.1 Polisülfon (PS) ve Polietersülfon (PES)

Bu polimerler termal stabiliteye, kimyasal dirence ve mekanik mukavemete sahip yüksek performanslı termoplastiklerdir. Ayrıca 180°C gibi yüksek sıcaklıklara dayanabilen ve 225°C'lik yüksek bir camsı geçiş sıcaklığına sahip olup şeffaf polimer malzemelerdir. Bu termoplastik malzemeler aynı zamanda alev geciktirici ve düşük duman yayıcılardır (Kushlani, 2023).

PS ve PES'in mühendislik ve dayanıklılık özellikleri incelendiğinde ise PS 70 MPa çekme mukavemetine, PES 90 MPa gerilme mukavemetine sahiptir. PS 2,4 GPa, PES 2,8 GPa eğilme modülüne sahiptir. PS 15 kJ/m^2 darbe dayanımına, PES ise 35 kJ/m^2 darbe dayanımına sahiptir. Su emilimi incelendiğinde: PS %0,3 su emme oranına sahipken PES'de bu oran %0,4'tür. PS ve PES çoğu asit, baz, alkol ve hidrokarbonlara karşı kimyasal dirençlidir fakat güçlü oksitleyici maddeler, aromatik ve klorlu çözücüler ve ketonlar ile zarar görebilir. Bu bağlamda PS ve PES, elektrikli ve elektronik malzemelerde otomotiv parçalarında, havacılıkta, uzay bileşenleri, tıbbi cihazlar ve ev aletleri gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Termoform, enjeksiyon kalıplama, şişirme kalıplama ve ekstrüzyon gibi çeşitli geleneksel yöntemlerle işlenebilmektedirler (Ida, 2014, Manaher, 2023).

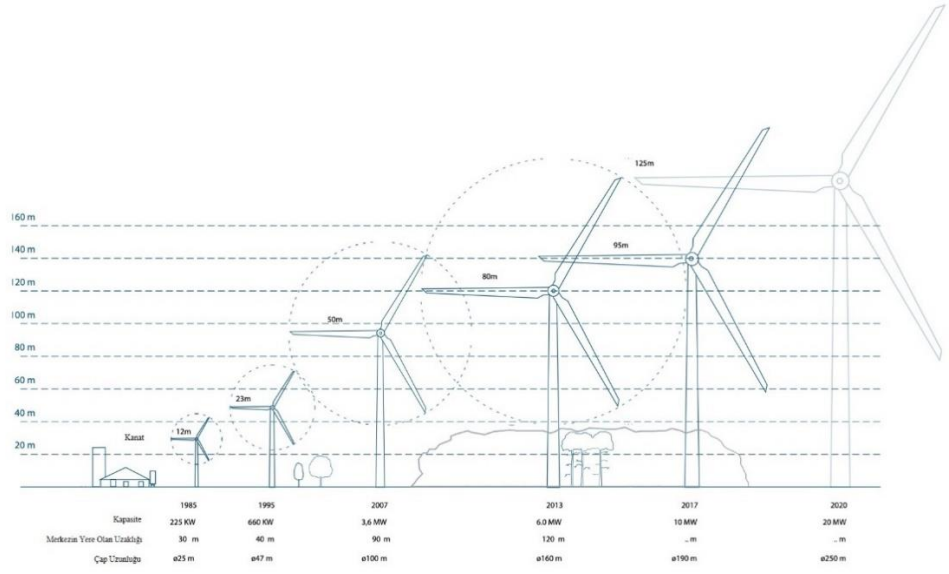
Ayrıca PS 0,22 W/mK, PES 0,25 W/mK termal iletkenliğe sahiptir. PS 55 x 10-6 $°C^{-1}$ termal genleşme katsayısına sahipken PES 52 x 10-6 $°C^{-1}$ termal genleşme katsayısına sahiptir. PS'nin dielektrik sabiti 3,5 iken PES'in 3,7'dir. PS 18 kV/mm, PES 16 kV/mm dielektrik dayanımına sahiptir. Son olarak PS 41 mN/m, PES 46 mN/m yüzey enerjisine sahiptir. PS ve PES'in ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters ozmos için kullanımı en uygun malzemeler arasında yer almaktadır (Wen vd.,2022; Kushlani, 2023; Feng & Chung, 2021).

2.9. Rüzgâr Türbini Kanat Test Yöntemleri

Rüzgâr enerjisi alanında rüzgâr türbini kanatlarının doğru modellenmesi, güvenilirliklerinin sağlanması için bir köşe taşıdır. Belirli bir test kümesinde değerlendirilerek sırasıyla temel bazda malzeme, türbin kanatlarının alt bileşeni, belirli bir kesitte alt yapısının, bire bir ölçekli kanat ve son olarak saha operasyonları testleri ile değerlendirilir.

Hassas modelleme sadece kanadın kullanım ömrü ve operasyonel güvenilirliğinde önemli bir rol oynamakla kalmaz aynı zamanda sertifikasyon yönergeleri tarafından belirlenen sınırları zorlayarak kanat tasarımlarında devrim yaratma potansiyeline de sahiptir. Bu, malzeme ağırlığında, maliyetlerde önemli bir azalmaya ve diğer türbin bileşenlerinin tasarımı üzerinde olumlu bir dalgalanma etkisine yol açabilir (Castelos, 2023).

Yıllar boyunca kanat uzunluğu değişimi gösterilen Şekil 2.43'te enerji üreteçlerin gelişimi ve elektrik üretimi kanat boyutu ve uzunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Kanat boyutu arttıkça kanatçıklarla ilgili hem risk ve fırsat hem de bunların yatırımı öncelik haline gelmektedir. Bununla birlikte işletme deneyimi ve dolayısıyla gerçekleşen işletme maliyeti sınırlı olduğundan söz konusu kanadın performansının izlenmesi ve analiz edilmesi dolayısıyla kanatlarla ilgili riskin önceden simüle edilmiş, aktif ve bilinçli bir şekilde yönetilmesi büyük önem arz etmektedir (Bladena 2023).



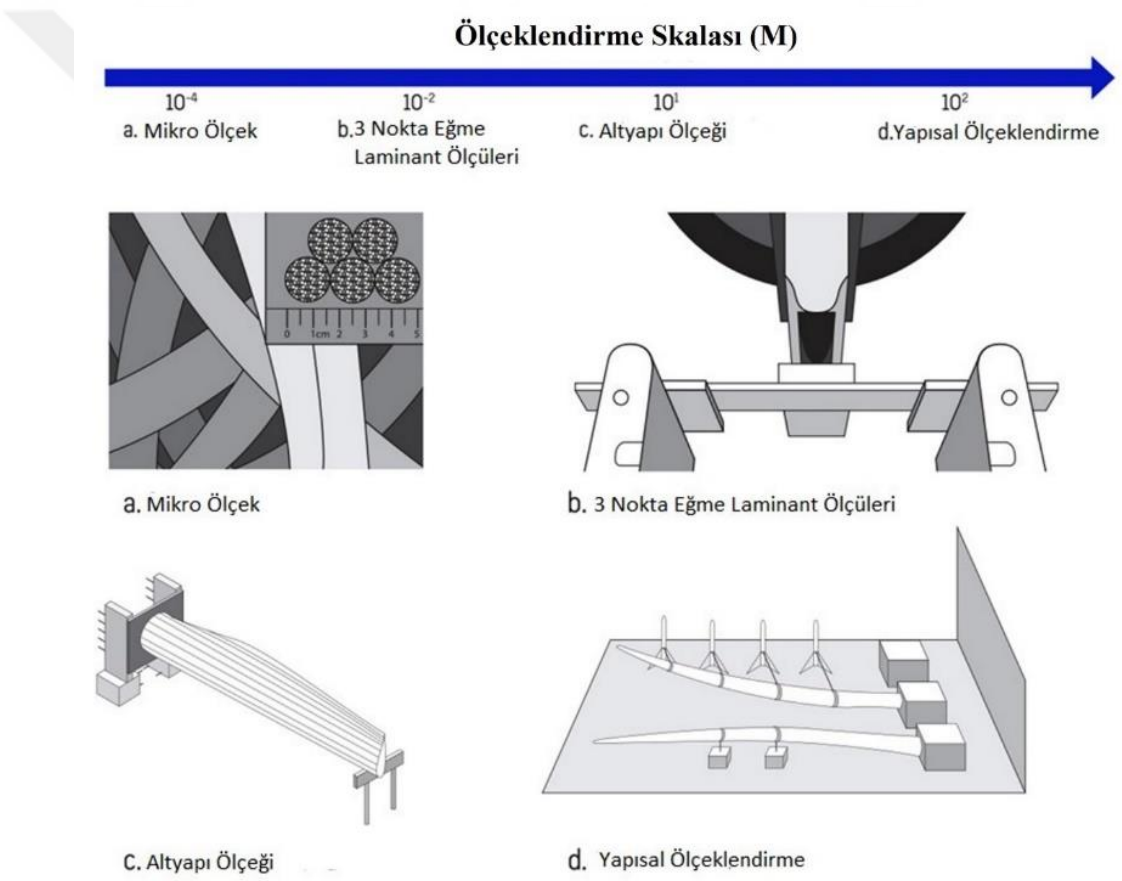
Şekil 2.43. 1985'ten 2020'ye değişen türbinler ve kanatları (Bladena, 2023)

Kanat modellemesinin gelişiminde kesit modellerden sonlu elemanlı katı modellere kadar rüzgâr türbini kanat modelleme yolculuğu sürekli ilerlemeler katetmiştir. Her modelleme yaklaşımı, sektörde yeni ölçütler belirleyerek doğruluk ve hesaplama verimliliği arasında bir denge kurmayı amaçlamaktadır. Doğru ve dijital ikiz nitelikli bir yapısal tasarım ve simülasyon araçları ile hızlı çözümler sunulabilir. Parametrelendirilmiş bir kanat modelleme metodolojisi ile kapsamlı bir doğrulama sürecinden geçerek kanadın doğru bir küresel yapısal davranışını taklit edilmesi yani simüle edilmesi (Şekil 2.44) gerçek bir dijital ikizle başarı göstermedir. Tam ölçekli kanat testi sırasında gözlemlenen yapısal davranışı doğru bir şekilde yansıtılması gerekmektedir (Castelos vd., 2022).



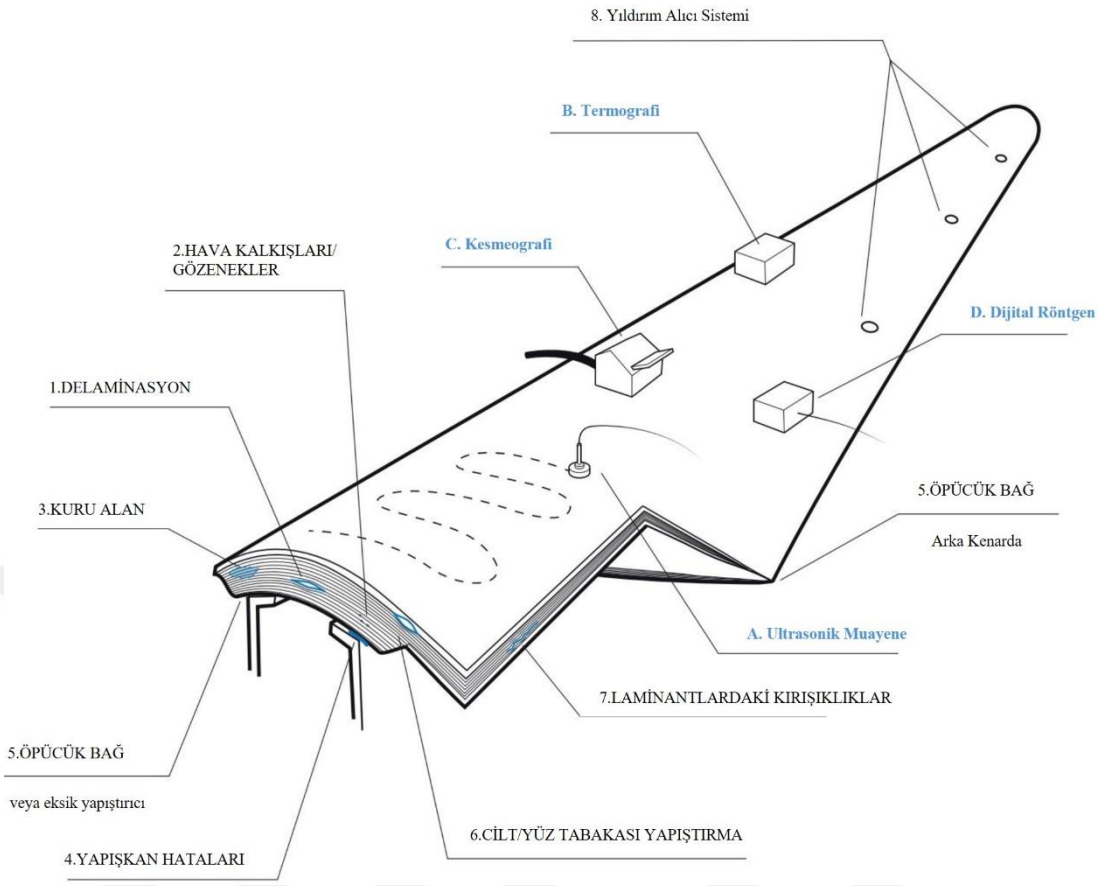
Şekil 2.44. Anlık VR simülasyon kaplamalı tam ölçekli kanat testi (Castelos, 2023)

Rotor kanatlarında malzemelerinin yorulma davranışındaki belirsizlikler nedeniyle kanat tasarımını desteklemek için testler yapılması gerekmektedir. Farklı test seviyeleri ve standartlar mevcut olup bu kapsamda yalnızca malzeme ve tam ölçekli seviyelerde test yapılması zorunludur. Sadece dik ve flap yükleri için tam ölçekli düzeyde test yapılması zorunludur. Bu yükleme, gerçek saha yüklerini temsil etmez. Bu nedenle birleşik yükler ve diğer hasar modları test seviyeleri dahil edilmelidir. Testler mikroskobik ölçeklerden yapısal ölçeklere kadar uzunluk ölçeklerinde Şekil 2.45'teki gibi tanımlanır. Bu şekilde a, mikro ölçekli görüntüleri b, 3 nokta eğme laminant ölçümünü, c, altyapı ölçeğini, d ise birebir yapısal ölçeklendirme ile test uzunluk ölçeklendirmesini temsil eder.



Şekil 2.45. Rüzgâr türbin kanatlarında test ölçeklendirilmesi (Bladena 2023)

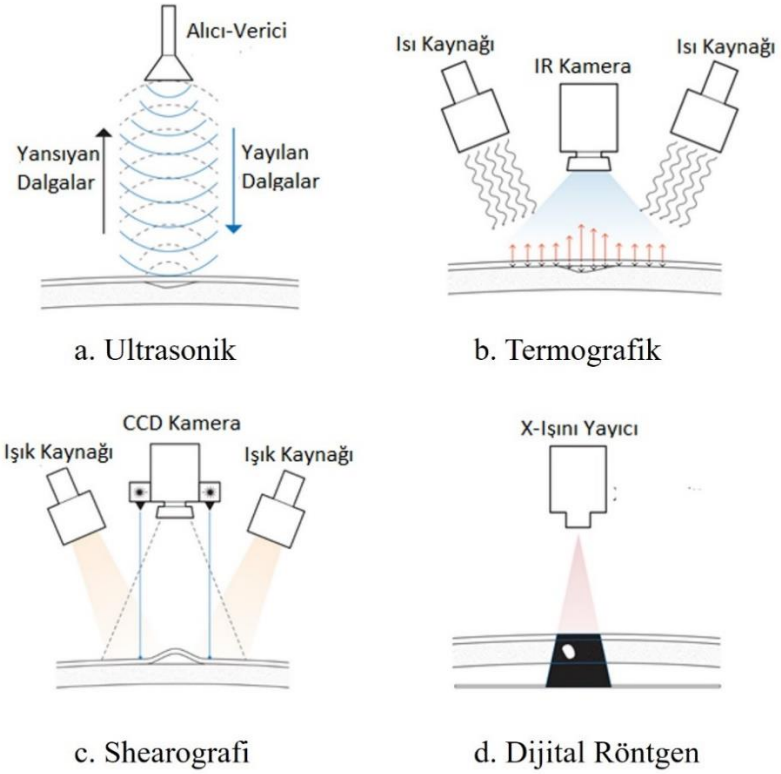
Rüzgâr türbin kanatlarındaki kusurların tespiti için Şekil 2.46'da gösterilen tahribatsız muayene yöntemleri aşağıdaki açıklamalar ile maddeler halinde sıralanmıştır.



Şekil 2.46. Rüzgâr türbin kanatlarında hasar ve kusur tespit muayene yöntemleri (Bladena, 2023)

2.9.1. Rüzgâr Türbin Kanatlarında Tahribatsız Muayene Yöntemleri

NDT (Nondestructive testing) tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak kanadın kusur tespiti için yeni bir hasar verilmeden test edilmesini sağlayan test yöntemlerini içermektedir. NDT, malzemelerdeki kusurları hasara yol açmadan tespit etmek için kullanılan çeşitli yöntemleri kapsar. Bu yöntemler arasında görsel test, akustik emisyon, radyografik test, manyetik parçacık testi, ultrasonik test, penetrant testi, ve girdap akımı bulunur. Üretim esnasında, ürün kullanım esnasında ve bakım onarımda çeşitli malzemelerde korozyon, çatlak, et kalınlığındaki değişiklikler gibi kusurları tespit etmek için kullanılırlar. Kullanılan spesifik yöntem malzemenin özelliklerine ve yapısına bağlıdır (Kong vd., 2023, Duernberger vd., 2023, Silva, vd., 2023 Xie vd. 2023). Şekil 2.47'de türbin kanatlarında kullanılan bazı NDT yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 2.47. Türbin kanatlarında kullanılan bazı NDT yöntemleri (Bladena, 2023)

Görsel muayene: Kanatların yüzeyindeki hasarları, çatlakları, delaminasyonları (tabakaların ayrılması) veya erozyonları tespit etmek için kullanılan en basit ve ucuz yöntemdir. Kanatlar, çıplak gözle veya optik cihazlarla incelenir. Görsel muayene, hasarın büyüklüğü, şekli ve konumu hakkında bilgi verir. Ancak yüzey altındaki hasarları tespit etmek için yeterli değildir.

Akustik emisyon: Kanatların yorulma testi sırasında oluşan hasarları izlemek için kullanılan bir yöntemdir. Kanatlar, yük altında iken hasar meydana geldiğinde yayılan ses dalgalarını algılayan sensörlerle donatılır. Akustik emisyon, hasarın kaynağı, şiddeti ve mekanizması hakkında bilgi verir. Ancak arka plan gürültüsü, sensör sayısı ve konumu gibi faktörler sonuçları etkileyebilir (Dai vd., 2022).

Ultrasonik test: Kanatların yüzey altındaki hasarlarını tespit etmek için kullanılan bir yöntemdir. Kanatlar, yüksek frekanslı ses dalgaları gönderen ve yansıyan dalgaları alan problarla taranır. Ultrasonik test, hasarın derinliği, boyutu ve şekli hakkında bilgi verir.

Ancak kanatların karmaşık geometrisi, probların teması ve kalibrasyonu gibi faktörler testi zorlaştırabilir.

Termografi: Kanatların yüzey altındaki hasarlarını tespit etmek için kullanılan bir yöntemdir. Kanatlar, termal değişkenli ısıtılan veya soğutulan bir ortama maruz bırakılır ve yüzey sıcaklığı termal kamera ile ölçülür. Termografi, hasarın varlığı, konumu ve boyutu hakkında bilgi verir. Ancak ortam sıcaklığı, kanat malzemesi ve yüzey kaplaması gibi faktörler sonuçları etkileyebilir.

Shearografi (Kesme İncelemesi): Tahribatsız muayenesi ile yapısal şekil değişikliğinde ve kusur tespitinde farklı malzemelerin kalitesi hakkında bilgi sağlamak için ışık veya ses dalgaları kullanılan tutarlı bir yöntemdir (Chaki ve Krawczak, 2022).

DIC (Dijital görüntü korelasyonu): Kanatların yüzey deformasyonlarını ve gerilmelerini ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Kanatlar yük altında iken yüzeylerine yapıştırılan rastgele desenli bir yapışkan bantla kaplanır ve iki kamerayla görüntülenir. Dijital görüntü korelasyonu, kanatların yer değiştirmesi, gerinmesi ve eğilmesi hakkında bilgi verir. Ancak görüntü kalitesi, desen seçimi ve kamera açısı gibi faktörler sonuçları etkileyebilir (Shields vd., 2024; Xie vd., 2023).

FBG sensörler: FBG, ışığın belirli dalga boylarını yansıtan ve diğerlerini ileten bir tür optik cihaz olan Fiber Bragg Grating'in kısaltmasıdır. FBG sensörlerinin bu özelliği sıcaklık, gerinim, basınç, titreşim gibi çeşitli fiziksel parametreleri ölçmek için kullanır. FBG sensörleri geleneksel sensörlere göre yüksek doğruluk, hızlı tepki, uzun dayanıklılık, elektromanyetik girişime karşı bağışıklık ve çoklama özelliği gibi birçok avantaja sahiptir. FBG sensörleri yapısal sağlık izleme, güç sistemleri, havacılık, biyomedikal ve telekomünikasyon gibi çeşitli mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Wu vd, 2022; Wiedlebacher, 2022; Gabbar ve Elsayed, 2021; Wen vd., 2020; Eon Photonics, 2024).

3D X-ışını Bilgisayarlı Tomografi: Endüstriyel bilgisayarlı tomografi sistemi ile ölçüm ve inceleme tek bir X-ışını taraması ile başarıyla gerçekleştirebilir.

X-ışınlı dedektörler kullanılarak yüksek çözünürlüğe sahip 3D hacim veri kümelerinde küçük kusurların algılanmasına olanak sağlayan voksel üretir. Kanattaki kusur geometrileri, büzülme delikleri veya iç yapılar ve montajlar hassas bir şekilde analiz edilebilir. En küçük kusurlar bile bireysel kesit görüntüleri aracılığıyla görünür hale gelir ve çeşitli kriterlere göre otomatik olarak değerlendirilebilir (Zeiss, 2023; Shields vd., 2024).

Metrolojik 3D Tarama: Metroloji, mikro ölçekli laser tarama ile yüzey mükemmeliyetini değerlendiren bir ölçüm çalışmasıdır. Metrolojik 3D Tarama ölçüm birimlerinin tanımlanmasını bu ölçüm birimlerinin uygulamada gerçekleştirilmesini ve ölçümlerin referans standartlara göre izlenebilirliğini sağlar. Üç boyutlu lazer taramanın gelecek nesil teknolojisini oluşturur. Yüksek kaliteli, doğruluklu ölçüm olanağı sağlar. Metrolojinin yapısal sağlık izleme, güç sistemleri, havacılık, biyomedikal ve telekomünikasyon gibi çeşitli mühendislik alanlarında birçok uygulamalarda hızla yaygınlaşarak kullanılmaktadır (Xeometry, 2021, Hexagon, 2023).

Test yöntemleri, kanat kompozitlerinin performansını ve güvenilirliğini değerlendirmek için önemlidir. Test yöntemleri, kanatların tasarımı, optimizasyonu ve bakımı için gerekli verileri sağlar. Test yöntemleri, kanatların hasar toleransı, hasar tespiti ve hasar onarımı gibi konularda karar verilmesine yardımcı olur. Test yöntemleri, kanatların ömrünü uzatmak ve maliyetlerini azaltmak için kullanılır.

2.10. Literatür Araştırması

Mishnaevsky vd. (2017), yaptıkları çalışmada rüzgâr türbininin kanatları için kompozit malzemelerin bir genel bakışını sunmaktadır. Kompozit yapılarda yükler ve gereksinimler için bu makalede rüzgâr türbini kanatlarının tasarımı, üretimi ve hasarları hakkında detaylı açıklamalar bulunmaktadır. Kanatlar, iki yüzey (emme ve basınç tarafı) ve bunları birleştiren ve sertleştiren bir veya birkaç iç web veya kutu kirişten oluşmaktadır. Kanatlar, rüzgâr basıncı, yerçekimi kuvvetleri ve tork yükü gibi çeşitli yüklere maruz kalmaktadır. Kanatların boyutu arttıkça ağırlık, esneklik ve yorulma ömrü gibi faktörler önem kazanmaktadır. Kanatlar, ıslak el yatırma, reçine infüzyonu, prepreg,

otomatik bant serme gibi çeşitli yöntemlerle üretilebilmektedir. Kanatlar, yıldırım çarpması, darbe, erozyon, buzlanma gibi hasarlara karşı korunaklı hale getirilmelidir. Kanatlar için kompozit malzemelerinde lifler, matrisler ve boyutlandırmalar hakkında açıklamalar yer alır. Lifler, kompozitlerin sertliğini ve dayanımını belirleyen ana bileşendir. Cam, karbon, aramid, bazalt ve doğal lifler gibi çeşitli lif türleri vardır. Hiyerarşik kompozitler, farklı lif türlerinin bir arada kullanılmasıyla elde edilen kompozitlerdir. Matrisler, lifleri bir arada tutan ve yük aktaran polimerik malzemelerdir. Termosetler ve termoplastikler gibi çeşitli matris türleri vardır. Nano mühendislikli polimerler ve kompozitler, matrise karbon nanotüp, nanokil veya grafen gibi nano takviyeler eklenerek elde edilen kompozitlerdir. Boyutlandırmalar, liflerin yüzeyine uygulanan kaplamalardır. Liflerin korunmasını ve matrisle yapışmasını sağladığı ifade edilmektedir.

Kanatlar için kompozit malzemelerin testi ve modellemesi de bu çalışmada yer almaktadır. Kanatlar, yapısal testlere tabi tutulur ve çeşitli hasar modları tespit edilir. Hasar modları, yapıştırıcı katmanların, laminantların, sandviç yapıların veya yüzey kaplamalarının kırılması, ayrılması, delaminasyonu veya çatlaması şeklinde olabilir. Hasar modlarının tespiti ve değerlendirilmesi için çeşitli yöntemler kullanılır. Örneğin görsel muayene, akustik emisyon, ultrasonik test, termografi veya dijital görüntü korelasyonu bu yöntemler bulunmaktadır. Ayrıca kompozit malzemelerin mekanik davranışlarını ve hasar mekanizmalarını anlamak için çeşitli mikro ve makro mekanik modeller geliştirilir ve uygulanır. Bu modeller, kompozit malzemelerin tasarımı ve optimizasyonu için yararlı araçlar olduğu açıkça ifade edilir. Bu çalışmada kanat kompozitlerinin mekanik, termal, nem, yorulma, çatlak ve hasar davranışlarının nasıl test edildiği ve modellendiği hakkında bilgi vermektedir. Çeşitli test yöntemleri, standartları ve protokolleri tanıtılmaktadır. Ayrıca kompozitlerin mikro, mezo ve makro ölçeklerde sayısal modelleri ve simülasyonları anlatılmaktadır. Kompozitlerin performansını ve güvenilirliğini tahmin etmek için çok ölçekli ve çok disiplinli yaklaşımların önemi vurgulanmaktadır.

Şahin ve arkadaşları (2023), çalışması polimer ve kompozit yapılarda malzemenin kendi kendine iyileşme yöntemleri hakkındadır. Kendi kendine iyileşen malzemelerin tanımı ve

kavramları açıklanmıştır. Kendi kendine iyileşen malzemeler, biyolojik sistemlerden esinlenerek belirlenmiş ölçekli hasarları bir dışsal müdahale olmadan bağımsız onarım yapan akıllı malzemelerdir. Kendi kendine iyileşmenin başarılı olması için lokalizasyon, zamansallık, hareketlilik ve mekanizma gibi kavramlar önemi vurgulanmıştır. Kendi kendine iyileşen malzemelerin sınıflandırılması açıklamıştır. Kendi kendine iyileşen malzemeler, iyileşme davranışlarına göre otonom (dışsal) ve otonom olmayan (içsel) olarak iki ana gruba ayrılır. Otonom iyileşme harici iyileştirme bileşenlerinin matrise ilavesiyle gerçekleştirilir. Otonom olmayan iyileşme malzemenin içsel davranışı uyarmak için sadece çevresel koşulları değişimi ile malzemelerin onarılabileceği ifade edilmiştir. Termoset malzemelerde ve termoplastik malzemelerde kendi kendine iyileşme yöntemleri de bu çalışmada detaylı olarak açıklamıştır. Bu malzemelerin otonom onarımları için kendi kendini iyileştirmesi hem moleküler boyutlarının hem de yapısal yaklaşımların araştırılmaya devam ettiğini fakat araştırma trend ilgisinin son dönemlerde termoset yapılı sistemlerde otonom onarımlara kaydığı belirtilmektedir. Termoplastik ve termoset malzemeler için otonom onarımın moleküler, yapısal, mikrokapsülasyon ve mikrovasküler gibi farklı metotlarla gerçekleştirildiği açıklanarak enerji depolama ve havacılık ve uzay mühendisliğinde potansiyel uygulamalara sahip olduğu paylaşılmıştır. Bu sistemlerin dayanıklılığını, güvenilirliğini ve güvenliğini artırabildiği ifade edilmiştir.

Li ve arkadaşları (2024), çalışmasında polimer zincirlerinin birbirine karışmasının elastomerin mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini anlatmaktadır. Polimer zincirlerinin daha fazla karışması elastomerin daha güçlü olmasını sağladığını ancak kendi kendini iyileştirme yeteneğini biraz azalttığı ifade edilmiştir. Ayrıca elastomeri gererek ve kurutarak, daha fazla karışık polimerlere farklı bir şekil verilebilmektedir. Bu durum, elastomer hem daha güçlü hem de daha hızlı iyileşebilir. Bu elastomer, ısıtıldığında ve soğutulduğunda çok fazla ağırlık taşıyabilen ve esneyebilen bir yapay kas gibi davranabilir. Polimer dolaşıklığın derecesi ile 4,4 MPa olan mukavemet değeri 9,1 MPa'ya çıktığını ayrıca elastomer, 18 saniyelik bir iyileşme sürecinden sonra 2,30 MPa'lık bir mukavemet gösterirken iyileşme verimliliği %4,86 olduğu açıklanmıştır. Bu malzemenin ısıtıldığında ve soğutulduğunda kendi ağırlığının 28 katına kadar bir yükü geri kazanabilirken on katı bir gerilime maruz kaldığı ifade edilmiştir.

Yuhan vd. (2024), çalışmasında fiber ile güçlendirilmiş kompozitlerde matris ve arayüz hasarını aynı anda kendi kendine onarabilen bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem, epokside tamir ajanı içeren çift bileşenli mikrokapsüllerin matrise dağıtılması ve Ag gümüş nanoparçacıklarının (AgNPs) karbon liflerinin yüzeyine kimyasal olmayan bir yöntemle kaplanmasıyla dışsal ve içsel kendi kendine iyileştirme mekanizmalarını birleştirmektedir. Mikrokapsüller hasar gördüğünde matrisin kendi kendine iyileştirilmesi tetiklenir ve istenen seviyede eşzamanlı iyileştirme performansı sağlanır. Ayrıca fazla miktarda sülfhidril, liflerdeki AgNP'ler ile koordinasyon bağı kurarak arayüzün kendi kendine iyileştirilmesine katkıda bulunduğu ifade edilmiştir. Önemli olarak kendi kendine iyileştirme işlemi, epoksi reçine ve merkaptan tamir ajanının yüksek ısı üretmesi nedeniyle kızılötesi termal görüntüleme teknolojisi ile yerinde ve gerçek zamanlı olarak izlenebildiği gözlemlenmiştir.

Chen ve Griffith (2023), deneysel ve sayısal yöntemler ile bir rüzgâr türbini kanadının 3D taramalı lazer doppler vibrometre (SLDV) kullanarak tam alan deplasman ve gerilim karakterizasyonu incelemiştir. Bu çalışmada, bir kompozit yapı olan 4.2 metrelik bir rüzgâr türbini kanadı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları, kanadın sonlu elemanlar modeli ile karşılaştırılmış ve yüksek düzeyde bir uyum göstermiştir. Bu çalışma, rüzgâr türbini kanadı tasarımcılarına kanadın yapısal performansını ve güvenilirliğini değerlendirmek için yeni deneysel araçlar olan DIC ve 3D Lazer taramanın uygunluğu sağladığı belirtilmiştir. Çalışmada rüzgâr türbini kanadı 4.2 metre uzunluğunda, kompozit malzemeden yapılmış, değişken kord, bükülme, ön eğilme ve süpürme geometrisine sahip bir kanattır. Kanadın mod frekansları, sönümleme ve mod şekilleri önceden belirlenmiştir. Üç bağımsız SLDV kafa uçları ile Doppler ilkesine dayanan temas gerektirmeyen bir optik titreşim ölçüm cihazı kullanılmıştır. Her bir kafa, yapı üzerindeki anlık hızı lazer ışını yönünde yakalar. Üç hız, küresel koordinat sisteminde üç ortogonal yer değiştirme olarak dönüştürülür. Yer değiştirme alanından, üç düğümlü üçgen elemanlar kullanılarak gerinim tahmin edilir. Test kurulumunda Kanadın kökü, kanadı dikey olarak tutan bir test platformuna dört cıvata ile sıkıca bağlanmıştır. Bir modal sarsıcı, kanadı uyarırken 3D SLDV, kanadın yüzeyindeki 823 tarama noktasında yer değiştirmesi ölçülmüştür. Test platformu, kanadın sınır koşullarını taklit etmek için bir konsol kirişi gibi davranmasını sağladığı ifade edilmiştir.

Test-model korelasyonu ile ölçülen yer değiştirme ve gerinim değerleri, kanadın kompozit sonlu eleman modelinden tahmin edilen sonuçlarla görsel ve nicel olarak karşılaştırılmıştır. Modal Güvence Kriteri (MAC), iki şekil arasındaki benzerliği nicelendirmek için kullanılmıştır. Ölçülen ve sayısal olarak tahmin edilen korelasyon sonuçları, yer değiştirme ve gerinimler arasında yüksek derecede benzerlik olduğunu ve kanat üzerindeki gerilme dağılımında, kanadın orta bölümündeki yüksek gerilmeyi analiz edilerek bu gerilmenin nedeni süpürme şekli, kanadın bükülmesi ve spar başlığı kalınlığının azaltılması olabileceği açıklanmıştır. Spar başlığı tasarımına göre spar başlığını kanadın ana yük taşıyıcı ve takviye elemanı olarak tanımlamakta ve kalınlığının kanat uzunluğu boyunca nasıl değiştiğini göstermektedir. 2 katlı spar cap bölgesinin genişletilmesinin hedef bölgedeki gerinimi azaltacağını önerilmiştir. Saha değerlendirmesinde kanat dinamiği ve yorulma özelliklerinin, kanat sağlığı ve güvenliğinin ve tasarım değişikliği kılavuzunun anlaşılması için tam alan gerinim ölçümü değerlerinde olması doğruluğu artırdığını ve hata payını azalttığını açıkça gösterildiği ifade edilmiştir.

Su vd. (2019), Bu çalışmada, bitüm kaplamalı kendini iyileştiren kompozitlerde iyileştirici ajan taşıyan kendi içi boş liflerin davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Tek yaş eğirme tekniğiyle üretilen poliviniliden florür (PVDF) içi boş lifler, bitüm matrisli kompozit örneklerde dağıtılmıştır. İçi boş liflerin yüzey ve çekirdek mikro yapısı, çevresel taramalı elektron mikroskobu (ESEM) ile karakterize edilmiştir. Lif kabuklarında bulunan mikro gözenekler, iyileştirici ajanın akabileceği yolları sağlamıştır. X-ışını bilgisayarlı tomografi (XCT) analizi, bu liflerin bitüm içinde homojen bir şekilde dağıldığını iletilmiştir. Üç boyutlu XCT (3D-XCT) görüntüleri, içi boş liflerin bitüm içinde hem dikey hem de yatay yönlere yayıldığını göstermiştir. Termogravimetik analiz (TGA) ve tekrarlanan bir termal döngü deneyi, içi boş liflerin bitüm içinde stabil kaldığını doğrulanmıştır. Lifler ve bitüm arasında herhangi bir ayrışma gözlenmemiştir. İçi boş liflerden salınan iyileştirici ajan içi boş lif sayesinde bitüm, kompozitin kırılma noktasından eşit bir şekilde salınmıştır. Bitümlü içi boş liflerin kırılma görüntüleri de 3D-XCT yapıları ile değerlendirilmiştir. Ayrıca iyileştirici ajanın içi boş liflerden iz bırakarak hareket ettiği bir floresan mikroskobu ile izlenmiştir. İçi boş bir lifin mikro gözeneklerinden geçerek sızma gerçekleşmiştir.

Bu durumlar, içi boş liflerin hem kırılma noktalarında kendi kendini iyileştirme hem de bitüm yaşlandıkça kendi kendini gençleştirme işlemlerini başlatabileceği anlamına geldiği ifade edilmiştir. Bu sonuç, iyileştirici ajan içeren içi boş liflerin, bitümün kendi kendini iyileştirme ve kendi kendini gençleştirme yeteneğini geliştirmek için uygun bir strateji olduğunu gösterdiği açıklanmıştır.

Cuvellier vd. (2017), yaptıkları çalışmada vasküler yapılı bir ağ kullanarak termosetlerin dayanıklılığını ve güvenilirliğini artırmak için kendi kendini iyileştirme yöntemi geliştirmişlerdir. Malzemenin yapısal karakterinin yeteneklerinin geri kazanımı için iyileştirici ajanların uygun bir şekilde seçilmesinin önemi vurgulanmıştır. Mekanik özelliklerinin interfüzyon deneylerinde epoksi ile difüzyon vitrifikasyon ile engellenmeden önce nasıl reaksiyona girdiğini araştırmışlardır. Swelling testleri, araştırmada kullanılan iyileştirici ajanların büyük bir kısmının yüzeyindeki matrise nüfuz ettiğini ve onu genişlettiğini açıklanmıştır. Bu, çatlakların kapatılmasına ve iyileşme sistemi ile matris arasındaki bağın güçlendirilmesine yardımcı olduğunu ve son olarak eğilme testleri, tamamen kürlenmiş iyileşme sisteminin camsı geçiş sıcaklığı ne kadar yüksekse iyileşme yeteneğinin de o kadar iyi olabileceğini açıklamışlardır.

Bekas vd. (2017), çalışmalarında çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT) vasküler yapılı kendini onaran fiber takviyeli kompozitler için düşük viskoziteli bir epoksi iyileştirici ajanın nano ölçekli bir takviye fazı olarak kullanımını araştırmışlardır. İyileştirici ajan onarım değerlendirilmesi için üç farklı ağırlıkta MWCNT ile test edilmiştir. Reolojik davranışının belirgin dinamik viskozite ölçümleri ile değerlendirmişlerdir. Nanokompozitler, çift konsol kiriş (DCB) yöntemi kullanılarak bir damar ağına sahip cam elyaf takviyeli kompozit (GFRP) numunelerine aşılanmıştır. Nano geliştirilmiş iyileşme ajanının kullanımı iyileşme verimliliğini yaklaşık %190 oranında artırdığını ve bu sonucu, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak karşılaştırmalı bir çalışma ile doğrulanan ek enerji tüketim mekanizmaları getirilerek gerçekleştirildiği vurgulanmıştır.

Lee vd. (2018), derleme çalışmasında, damar sisteminin cildi ve kemiği iyileştirme yeteneği gibi insan vücudundaki doğal malzemelerin iyileştirme işlevlerini taklit eden

tasarlanmış kendi kendini iyileştiren malzemelerdeki son gelişmeler ele almışlardır. Bu makalede vaskülatür benzeri yapılara sahip kendi kendini iyileştiren malzemelerin üretim yöntemleri irdelenmiştir. Elektrospinning, ko-elektrospinning, emülsiyon spinning ve solüsyon üfleme, koaksiyel solüsyon üfleme ve emülsiyon üfleme dahil olmak üzere kullanılan üretim yöntemleri açıklanmakta ve içi boş liflerin kullanıldığı diğer yöntemlerden bahsedilmektedir. Disiklopentadien ve Grubbs katalizörleri, poli(dimetilsiloksan) ve bisfenol A bazlı epoksi reçineleri gibi çeşitli restoratif materyaller ve ajanlar irdelenerek kendi kendini iyileştirmenin fiziksel ve kimyasal yönlerini incelemek için kullanılan teknikler ifade edilmiştir. Bu derlemede kullanılan yöntemlerin vasküler kanallardan iyileştirici ajanın salınımını doğrulamayı ve bu bağlamda meydana gelen iyileşmeyi test edilmesini ve hasarlı malzemeye iyileştirici ajan dolgusu tarafından üretilen morfolojik değişiklikleri analiz etmenin önemi vurgulanmıştır.

Nardi vd. (2023), 3 boyutlu mikrovasküler ağların geliştirilmesi bunların beton yapıların kendi kendini iyileştirmesine yardımcı olabilme yeteneklerini araştırmışlardır. 3D baskılı polilaktit (PLA) tetrahedral içi boş bağ birimleri (TET), çeşitli yaralanmaları iyileştirmek için dahili olarak depolanan tek bileşenli iyileştirici ajanları serbest bırakan bir deney düzeneği kurmuşlardır. Beton TET sistemlerinin iyileştirici etkilerini artırmak ve tek bileşenli iyileştirici ajanların kısa raf ömrünün üstesinden gelmek için TET tasarımında değişiklikler yapılmıştır. İki bileşenli ilaçların depolanması için koaksiyel içi boş şerit TETler geliştirilmiştir. Epoksi çeşidi sikloalifatik epoksi reçineler ve sertleştiriciler kullanımında sodyum silikat dahil olmak üzere tek başına veya nanosilika veya nanolime çözeltileri ile kombinasyon halinde çeşitli ajanlar araştırılmıştır. Bu geliştirilen şertilerde, iki bileşenli iyileştiricileri erken karıştırma ve katılaşma olmadan verimli bir şekilde depolayabilme yeteneği kazandırmışlardır. Deneylerde çatlak genişliği 0,35 mm olduğunda TET'ler yırtılabilmiş ve iyileştirici ajanları sızma için serbest bırakabilmiştir. Bir hasar iyileştirme döngüsünden sonra, mukavemet ve sertlikte önemli ölçüde iyileşme sağlanmıştır. Sodyum silikat ve nano-kireç içeren TET'ler maksimum mukavemet geri kazanımını %25 olduğunu gösterirken, sodyum silikat bazlı iyileştirici ajanların diğer kombinasyonlarının çoğu yaklaşık %40 sertlik geri kazanım ile bu deneysel kanal

tasarımlarının sınırlı hacimde iyileştirici ajan ilavesi ile mukavemet ve sertliğin geri kazanılmasını sağlayan etkili bir sistem olduğunu söylemişlerdir.

Wan vd. (2023), çalışmasında eklemeli olarak üretilen vasküler ağlar, otonom olarak kendi kendini iyileştiren çimento bazlı kompozitlerde önemli bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamışlardır. Çeşitli onarım süreçlerine uyum sağladıklarını ve bununla birlikte damar duvarının varlığı, iyileştirici ajanı serbest bırakmak için zamanında yırtılmazsa iyileşme verimliliğini etkileyebildiğini ifade etmişlerdir. Bu nedenle vasküler malzeme tasarımı önemini araştırmışlardır. Bu çalışmada vasküler ağlar üretmek üzere çözünür polivinil alkol (PVA) filamentleri kullanılmıştır. Ağ balmumu ile kaplanmış, çimento harcına gömülmüş ve sertleştikten sonra çıkarılmış ve geride içi boş kanallardan oluşan bir ağ bırakılmıştır. Baskı yönünün yapı çözünürlüğünü etkilediği hipotezini test etmek için vasküler ağlar çeşitli şekillerde iki ve üç boyutlu basılmış ve test edilmiştir. Bu çalışmada, iyileşme verimliliğini değerlendirmek için dört noktalı bir bükme testi ve geçirgenlik testi yapılmıştır. Çatlak numunelere birden fazla onarım döngüsü uygulanmış olup sonuçlar dikey olarak basılmış mum kaplı PVA boruların iyi çözünme davranışı sergilediğini gösterdiği ifade edilmiştir. Vasküler ağın varlığı, beklendiği gibi numunelerin başlangıçtaki bükülme mukavemetini azaltmıştır. İyileştirme ajanı olarak epoksi reçinenin kullanılması yüksek iyileştirme verimliliği sergileyen mükemmel mekanik ve su geçirmez onarımlarla sonuçlanmıştır. İyileşme süresi arttıkça çatlayan numunelerin suya dayanıklılığı azalmaya devam ettiği ve içerisinde entegre 3 boyutlu vasküler ağlar içeren numunelerin 2 boyutlu vasküler ağlar içerenlerden daha fazla iyileşme potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir.

Shields vd. (2024), Bu çalışmada kendi kendini onaran beton prizmaların damar ağlarını üretmek için çeşitli katmanlı imalat yöntemleri ve ağ duvarı malzemeleri kullanılmıştır. Çalışmada sonuçları analiz etmek için akustik emisyon (AE), ultrasonik darbe hızı (UPV), dijital görüntü korelasyonu (DIC) ve X-ışını Bilgisayarlı tomografi (CT) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Muayenesini yapılan iyileşme salınım mekanizmaları arasında sıvıyı gözeneklerden taşıyan sünek gözenekli ağlar ve basınç altında yırtılıp sıvıyı serbest bırakan kırılgan ağlar yer almıştır. Sünek gözenekli ağın çimentolu matristen ayrıldığı DIC ve AE doğrulanmıştır.

Poliüretan kullanan tüm ağlar için hasarın ilerleyişi ve iyileşmesi, %56'ya varan yük artışları ve %91'e varan sertlik artışı gerçekleşmiştir.

Minnebo ve ark. (2017), kendiliğinden iyileşen betonun nasıl onardığını ve hangi malzemelerin kullanıldığını araştıran bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada kendiliğinden iyileşen beton, çelik donatıyı korumak için çatlakları kapatması için geliştirilmiştir. Bu beton için 3D baskılı bir parça ve tüp kanallar tasarlanmıştır. Tüpler farklı malzemelerden yapılabildiği ifade edilerek bu sistemin betonun birkaç kez iyileşmesini sağladığı ifade edilmiştir. Çelik donatılı beton çatlayabilir ve paslanabilmektedir. Kendiliğinden iyileşen beton, bu sorunu çözmede yüksek verime sahip olduğunu, beton çatlarsa çelik yapı donatının zamanla zarar gördüğünü ve kendiliğinden iyileşen beton, bunu önlediği açıklanmıştır. Tüp kanallarda polimetilmetakrilat, nişasta, inorganik fosfat çimentosu ve alümina dahil olmak üzere çeşitli malzemeler kullanılmıştır. Geliştirilen bu vasküler sistemle kendi kendini iyileştirme ve çoklu kendi kendini iyileştirmenin mümkün olduğu üç nokta bükme ve dört nokta bükme testleriyle denenerek başarı ile sonuçlandığını iletmişlerdir.

Mishnaevsky L. (2023), bu seçkin çalışmasında rüzgâr türbini kanatlarının onarımı ve geri dönüşümü için yeni nesil malzemelerin teknolojilerini gözden geçirmiştir. Çalışmasında rüzgâr enerjisinin yeşil geçiş için önemini ve rüzgâr türbini kanatlarının sürdürülebilirliği önündeki zorlukları vurgulanmıştır. Mevcut kanat kompozitlerinin geri dönüştürülmesi zor olduğu ve 2050 yılına kadar 43 milyon ton atık üreteceği belirtilmektedir. Bu nedenle yeni geri dönüştürülebilir malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu malzemeler arasında termoplastikler, biyokompozitler, vitrimerler ve yeniden işlenebilir termosetler sayılmaktadır ve derinlemesine bu malzemelerin onarım teknolojileri de araştırılmıştır. Mevcut rüzgâr türbinlerinin onarımı ve geri dönüşümü için kullanılan yöntemleri ve teknolojileri de açıklanmıştır. Onarımların üretim sonrası ve saha onarımı olarak iki durumda gerçekleştirilmektedir. Onarım adımları, hasar tespiti, hasarlı bölgelerin çıkarılması, yama veya diğer onarım parçalarının hazırlanması, yüzey hazırlığı, yapıştırıcı yerleştirme, onarım parçalarının tutturulması, yapıştırıcının kürlenmesi ve onarım sonrası muayeneden oluşmaktadır. Onarım parçaları, yüzey erozyonu için kabuk veya bant, derin yapısal hasar için yama veya örtüm olabilir.

Yapıştırıcılar, üretanlar, epoksiler ve metakrilatlar gibi çeşitli gruplara aittir. Kürlenme, el yapımı laminasyon, termal ve ultraviyole kürlenme ve infüzyon gibi çeşitli teknolojilerle gerçekleştirilebilir. Geri dönüşüm, yeniden kullanım ve yenileme, mekanik geri dönüşüm, geri parçalama ve termal veya kimyasal ayrışma gibi çeşitli teknolojileri içermektedir. Geri dönüştürülmüş kompozitler ve geri kazanılan lifler, beton üretimi, duvar boyaları, paneller vb. gibi ikincil uygulamalarda kullanılabilir. Ancak geri dönüşüm ürünleri genellikle heterojendir ve geri kazanılan lifler genellikle daha düşük kalitededir. Geri dönüşümün çıktısı, genellikle yeni ürünlerden daha pahalıdır. Bu nedenle geri dönüşümlü olan yeni kompozit malzemeler geliştirmek için çok sayıda çözüm önerilmektedir. Çalışmada kullanılan vitrimer matrisli kompozitlerin ısı ve basınç uygulayarak tamir edilebilen ve 2-merkaptoetanol ile çözünebilen yeniden şekillendirilebilir termosetlerdir ve yapıştırıcı filmlerle yapıştırma veya ultrasonik kaynakla birleştirme de mümkün olduğu ifade edilmiştir. Swancor EzCiclo epoksinin mevcut epoksi reçineye benzer ve ticari sertleştirici ile kürlenir. CleaVER teknolojisi ile geri dönüştürülebilir ve oligomerler ve monomerler elde edilebilir. Polüretan bazlı kanatlar ise geri dönüştürülebilirlik amacıyla değil, daha kısa ve kolay üretim süreci ve polüretan özelliklerinin daha iyi kontrol edilebilmesi nedeniyle geliştirilmiştir. Polüretan kompozitlerin geri dönüşümü, mevcut epoksi kompozitlerin geri dönüşümüne benzer zorluklar içerir. Tamir için yapıştırma yöntemi kullanılır. Son olarak ahşap vb. bazlı kompozitlerde ise lamine kaplama kereste, bambu veya doğal lif bazlı kompozitlerden oluşturulmuştur. Parçalar genellikle yeniden kullanılabilir veya enerji üretimi için yakılabilir ve tamir için yapıştırma yöntemi kullanıldığı araştırma çalışmasında ifade edilmiştir.

Saeda vd. (2016), çalışmasının mikrokanal gömülü karbon-epoksi kompozitler üretmek için yeni bir işlem yaklaşımı olduğu iddia edilmiştir. Bu çalışmada havacılık kompozit yapılarının performansını ve güvenilirliğini artırmak için biyolojik mikrodamar sistemlerinden ilham alan kompozitlerde mikrokanal ağı oluşturmanın önemini vurgulanmıştır. Mikrokanalların kompozit laminantın yüzeyinde çıkarılabilir plastik teller kullanılarak ilk adım kompozit kalıplama sırasında oluşturulduğu ve daha sonra bu mikrokanalların düşük erime sıcaklığına sahip yumuşak balmumu ile doldurulduğu ve ikinci adım kompozit kalıplama sırasında diğer kompozit laminant ile birleştirildiği iki

adımlı bir kompozit kalıplama yaklaşımı önermişlerdir. Diğer bir yaklaşım ile düz, s-eğrili ve spiral yollara sahip farklı çaplarda mikrokanallar gömülü karbon-epoksi kompozitler üretmişlerdir. Bu mikrokanal yapıları, yapısal sağlık izleme, kendi kendine iyileşme, hafif ısı değiştirici, biyolojik ve kimyasal mikroreaktörler gibi çeşitli alanlarda kullanılabilirliği ifade edilmiştir. Son olarak kompozit birleştirme verimliliğini ve yapısal performansını değerlendirmek için saf ve düz karbon-epoksi kompozitler üzerinde kısa kiriş kayma ve eğilme testleri gerçekleştirdiklerini bildirmektedir. Test sonuçlarının iki tip karbon-epoksi kompozit arasında ihmal edilebilir bir fark olduğunu ve soyulma örtüsünün iki kompozit laminantı yeterli bağlanma mukavemeti ile birleştirmek için iyi bir yüzey dokusu sağladığını açıklamışlardır.

Gupta vd. (2019), çalışmasında iyileştirici madde olarak manyetik poliamid-6 nanokompozit film kullanarak elyaf takviyeli termoplastik kompozitin iyileştirilmesi için yeni bir yöntem önermektedir. Açık deniz uygulamalarında termoplastik kompozit kullanmanın yangına dayanıklılık, hasar toleransı, kaynaklanabilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajları bulunduğu ifade edilmiştir. Termoplastik kompozitlerde ani hasarlara ve güvenlik tehlikelerine yol açabilen mikro ölçekli çatlakları tespit etmenin ve onarmanın zorlukları bulunduğundan bu çalışma araştırılmıştır. Üç adım içeren önerilen kendi kendini iyileştirme sürecinde polimer nanokompozit sentezi sonrası film ısıtıldığında akışkanlaşan ve çatlakları dolduran bir epoksi reçine içermiştir. GFRP katmanlı kompozit numune hazırlanması ve numunenin kendi kendini iyileştirmesi ve test edilmesi yer almıştır. Polimer nanokompozit (PNC) filmi eriterek ve kompozitteki mikro çatlakları doldurarak iyileşme sürecini tetiklemek için mikrodalga veya manyetik uyaranların kullanılmıştır. Kendi kendini iyileştirme ile hasarsız gerilme mukavemetinin %84'ünü geri kazandırarak iyileştirebildiğini ve yapı ömrünü %175'e kadar artırabildiği iddia edilmiştir. Ve bu söylenen yöntemin açık deniz uygulamaları için potansiyel ortaya koyduğu ifade edilmiştir.

Bekem (2013), doktora çalışmasında termoplastik malzemeler üzerine çalışmıştır. Bu matrise sahip kompozitler yüksek tokluk, yüksek raf ömrü ve geri dönüşüm gibi avantajlarına rağmen termoset matrisli kompozitler kadar yaygın ticari kullanıma ulaşması gerektiği ifade edilmiştir.

Genellikle termoplastik kompozitlerin çoğu kısa cam elyaflardan (genel ağırlıkça %10-40) ve polietilen, polyester, polikarbonat, polipropilen, naylon vb. düşük maliyete sahip polimer matrislerden yapılmaktadır. Bu ürünler genel olarak doğranmış cam elyafı ve polimerin bir ekstrüder ile karıştırılması ve ardından elde edilen kompozit peletlerin enjeksiyonla kalıplanmasıyla üretilir. Daha uzun elyaflı (10-13 mm) pelet ürünler ve cam termoplastik kompozit levha ürünler de endüstiyel kullanımları mevcuttur. Bu ürünler, elyafların özelliklerini daha iyi ilettikleri için daha yüksek yapısal performansa sahiptir. Ancak bu ürünleri üretmek için kullanılan üretim süreçleri ve aksiyonları standart harmanlama ile kıyasla daha fazla maliyeti vardır. Gramaj başına 1,20 ila 3,00 dolar arasında değiştiği ifade edilmiştir. Sürekli elyaf termoplastik kompozitler ve cam elyafı olmayan ürünler (karbon, aramid ve diğerleri gibi) için pazar, yüksek üretim maliyetleri nedeniyle çok sınırlıdır. Son yıllarda cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit sistemlerin kullanımı yarı yapısal ve mühendislik uygulamalarında artan bir büyüme göstermiştir. Bu termoplastik matrisli kompozit sistemler, kolay işlenmenin yanı sıra yüksek tokluk ve sınırsız raf ömrü avantajlarına sahiptir. Buna ek olarak geri dönüşümü gelişmiş uygulamalar için güçlü bir itici güç olarak kabul edildiği ifade edilmiştir. Bu çalışmada farklı uyumlaştırıcıların ve oranlarının cam ve bazalt elyaflarla güçlendirilmiş yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve polipropilen random kopolimerler (PPRC) kompozitlerinin mekanik performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elyaf demetlerinin matris tarafından ıslatılmasını iyileştirmek için yüksek akışlı çeşitli uyumlaştırıcıların kullanılmıştır. Deneysel sonuçların teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu ile fiber-matris yapışmasının ve arayüzey yapısının gözlemlenmesi yer almıştır. Bu sonuçlarda farklı tip ve sayıda uyumlaştırıcı katmana sahip aramid elyaf takviyeli HDPE kompozitlerin, T-soyma, kayma bindirme ve çekme testi sonuçları değerlendirilmiştir. 4 kat etilen-metil akrilat-glisidil metakrilat (EMA-GMA) ve sonrasında maleik anhidrit (MAH) içeren kompozitler en yüksek T-soyulma mukavemetini göstererek iyi bir elyaf-matris uyum sağladığını ve SEM görüntüleri, yapışkan ve kohezif hasarlar gibi farklı hasar modları incelenmiştir. Dört kat EMA-GMA içeren kompozitler en yüksek kayma bindirme mukavemetini göstermiş sonrasında ise dört kat MAH içeren kompozitler yer almıştır. Karışım gruplarında uyumlaştırıcı içeriği azaldıkça kayma bindirme mukavemeti azalmıştır.

SEM görüntülerinde başarısız sonucun MAH için elyaf-kompatibilizatör arayüzünde ve EMA-GMA için kompatibilizatör tabakası içinde meydana geldiğini gösterilmiştir. Dört kat EMA-GMA içeren kompozitler en yüksek çekme mukavemetini gösterirken ardından dört kat MAH içeren kompozitler yer almıştır. Karışım gruplarında uyumlaştırıcı içeriği azaldıkça çekme mukavemeti de azalmıştır. SEM görüntüleri ile elyaf-matris yapışmasının EMA-GMA için MAH'a göre daha iyi olduğunu gösterilmiştir.

Paulo vd. (2021), kompozit sandviç silindirik kabukların darbe tepkisini incelemişlerdir. Karbon kompozit silindirik kabuklar ile mantar çekirdekli kompozit sandviç silindirik kabuklar arasındaki statik ve darbe performans farkını araştırmışlardır. El yatırma yöntemiyle farklı sayıda katman ve lif içeren silindirik kabuklar üretilmiştir. Serbest destekli kenarlara sahip üç nokta eğme statik ve darbe testleri, numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kalınlığın statik özellikler ve darbe performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. İnce kabuklar daha fazla hasar gördüğünü fakat kalın kabuklar daha fazla enerji emdiği ifade edilmiştir. Bir diğer bulgularda kalınlık ve hibridizasyonun kompozit silindirik kabukların statik ve darbe özellikleri üzerindeki etkisinden bahsetmektedir. Kalın kabukların, daha ince kabuklara göre daha yüksek tepe yükü, sertlik ve darbe dayanımına, ancak daha düşük yer değiştirme ve elastik geri kazanıma sahip olduğunu iletmişlerdir. Sandviç yapıda çekirdek olarak mantar kullanımın etkisi açıklanmıştır. Mantar çekirdekli sandviç kabuklar, geleneksel kabuklara göre daha düşük tepe yükü ve rijitliğe sahiptir. Bunun aksine mantar çekirdekli sandviç kabuklar, geleneksel kabuklara göre daha yüksek yer değiştirme ve elastik toparlanma göstermiştir Mantarın ayrıca kabukların darbe eşiğini ve hasar toleransını arttırdığı açıklanmıştır. Hibridizasyon etkisi olarak da kevlar elyaflı sandviç kompozit kabukların, sadece karbon elyaflı sandviç kabuklara göre daha düşük tepe yükü ve sertliğe sahiptir ve de daha yüksek yer değiştirme ve elastik toparlanma göstermiştir. Kevlar fiberler, yüksek mukavemetleri ve fibril dayanımı nedeniyle kabukların darbe performansını da artırmıştır. Son olarak mantar çekirdeğin kullanılması geleneksel kompozit kabuğa göre geri kazanılan enerjide yaklaşık %44,8'lik bir artış sağladığı ve karbon kabuğun kevlar ile değiştirilmesi ise geri kazanılan enerjide yaklaşık %20,8'lik bir iyileşme getirdiği yer almıştır. Kompozit sandviç silindirik kabukların, mantar çekirdeği ve kevlar lifleri içeren optimize edilmiş

bir katman dizilimi ile darbe yüklerine maruz kaldıklarında birçok endüstriyel uygulamadan faydalanabileceği önerisinde bulunulmuştur.

Zhu vd. (2016), çalışmasında kendiliğinden iyileşen cam elyaf / epoksi kompozitler için bir kendiliğinden basınçlandırılmış iyileştirme sisteminin kullanımı araştırılmıştır. Tasarlanan kendiliğinden basınçlandırılmış iyileştirme sisteminde iyileştirici ajanı içeren polipropilen (PP) tüp kanallar kullanılmıştır. Tüplerdeki köpürtücü ajan, tüpleri mühürlendikten sonra gazlaştırarak iç basıncı artırır. Kompozit hasar gördüğünde iyileştirici ajan yüksek basınçla serbest bırakılır ve daha geniş çatlak düzlemlerine yayılmasını sağlamışlardır. İyileştirme verimliliği incelenerek tüp aralığı, köpürtücü ajan miktarı, köpürtme süresi, iyileştirme süresi ve oda sıcaklığında depolama süresi gibi parametrelere bağlı olduğu ifade edilmiştir. Bu faktörlerin bir optimum sistemli olmasını ve iyileştirici ajanın kullanımını en üst düzeye çıkarması gerektiği açıklanmıştır.

Wen vd. (2020), çalışmasında Fiber Bragg Grating (FBG) sensörler ve Fiber Optik Döner Mafsal (FORJ) dalga havzasında yüzen rüzgâr türbinlerinin (FWT) model testleri için bir kanat yükü algılama sistemi geliştirmişlerdir. FBG-FORJ sistemi ile donatılmış bir model rüzgâr türbini ve kademeli kısa bir spar tipi bir FWT olan deneysel rüzgâr türbini kullanışlardır. Kanat yüklerini yakalamak için iyi performans ve hassasiyet gösteren FBG-FORJ sisteminin ön kalibrasyonu ve validasyonu araştırılmıştır. Rotor hızı, itici rüzgâr, akıntı ve düzenli ve düzensiz dalgalar gibi farklı çevresel ve operasyonel koşullar altında kanat yükleme özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, yerçekimi, merkezkaç kuvveti, aerodinamik yükler ile dalga ve akıntı uyarımlarının FWT kanat yükleri üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Yüzen rüzgâr türbini kanat yükleri için, dalga havuzu testlerinde FBG sensörleri kullanarak kanat yüklerini izlemenin sonuçları sunulmuştur. FBG sensörleri, kanatlardaki gerilme sinyallerini ölçmek için kullanılmıştır. Kanatların farklı çalışma koşulları ve düzensiz dalgalarda kanat yüklerinin frekans cevaplarını analiz edilmiştir. Sonuçlarda direkt olarak kanat yüklerinin dalga frekansı, rüzgâr frekansı ve kanat geçiş frekansı gibi çeşitli frekans bileşenleri ile bütünleşik sinyaller kaydedilmiştir. Bu sinyal oluşturucu yüklerin etkisinde deniz akıntısı, rüzgâr hızı, dalga yüksekliği, dalga periyodu, kanat açısı, yalpa açısı ve yalpa hızı yer almıştır. Bu bağlamda kanat yüklerinin büyüklüğü, dağılımı ve frekans bileşenleri üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

Sonuç olarak yüzen deniz üstü rüzgâr türbinleri kanatlarında oluşan çoklu kanat yüklerinin azaltılması için kanat çevrim açısı kontrolü önerilmiştir.

Wu ve arkadaşları (2022), Bu makalede, yüksek hassasiyete sahip bir yapı ve fiber bragg ızgarası sensörünün kullanıldığı bir yapısal tasarım ve boru basıncı tespiti için bir uygulama sunulmaktadır. Bu çalışmanın nedeni ise boru hatları genellikle yüksek basınç altında çalıştığı dolayısıyla sızıntı kazalarının son derece tehlikeli olduğunu ve boru hatlarının güvenliğini sağlamaya katkı sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmada, FBG sensörüne dayanan yüksek hassasiyete sahip bir yapısal tasarım önerilmektedir. Tasarım boru hattının basınç değişikliklerini hassas bir şekilde algılamak için kullanılmıştır. Yapı, FBG sensörünü içeren bir çelik boru ve bir çelik plakadan oluşmaktadır. Plaka, borunun dışına kaynaklanmıştır. Boru içindeki basınç değişimi plakada gerilme oluşturacağından dolayı FBG sensörünün bragg dalga boyunu değiştireceği veriler işlenmiştir. Çalışmanın deneysel kurulumunda ise yapı, bir hidrolik presin altına yerleştirilmiştir. Pres, plakaya farklı kuvvetler uygulayarak FBG sensörünün dalga boyu, bir optik spektrum analizörü ile ölçülmüştür. Basıncıda bir basınç sensörü ile kaydedilmiştir. Bu çalışma ile, FBG tabanlı yüksek hassasiyetli bir yapı ve boru hattı basıncının müdahalesiz tespitinde uygulanabilirliğini, yapı düzeneği bir ditrigon gerinim ışını, bir boru kelepçesi ve iç basıncın neden olduğu boru hattı duvarındaki gerinimi yükseltebilen ve ölçebilen bir FBG sensörden oluşu ve yapının teorik analizleri, sayısal simülasyonları ve deneysel testleri sunulduğundan dolayı önem kazanmıştır. Çalışmanın deneysel sonuçlarına göre, yapının 5.44'lük bir gerinim yükseltme katsayısına ve 136.0 pm/MPa'lık bir hassasiyete ulaşabildiğini ve küçük boyut, uygun kurulum ve müdahaleci olmayan ölçüm avantajlarına sahip olduğunu göstermişlerdir. Yapının basınç duyarlılığı, tasarlanan yapı ve borunun dış duvarı için iki farklı yöntemle hesaplanmıştır. Her iki yöntemde yapının basınç duyarlılığını önemli ölçüde artırdığını, yapının basınç duyarlılığı borunun dış duvarınınkinden yaklaşık 10 kat daha yüksek olduğu ifade edilmiştir.

Zhu 2019, çalışmasında karbon fiber paketlere gömülü fiber optik sensörler kullanarak rüzgâr türbini kanatlarındaki gerinimi ölçmek için yeni bir yöntem sunmuşlardır. Çalışma bu yöntemin geleneksel gerinim ölçerlere göre daha doğru ve güvenilir olduğunu iddia etme motivasyonu ile tetiklenmiştir.

Çalışmada rüzgâr türbini kanatlarının yapısal sağlığını izlemek için karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) içine yerleştirilmiş FBG sensörleri kullanılmıştır. Üretilen CFRP'ler, 56,85 m uzunluğundaki kompozit bir rüzgâr kanadı üzerinde 16 gün boyunca, tüm kanada uygulanan alternatif yüklerle çekme ve basma gerinimi ile gerçek alan yorulma testinde deneysel testlere tabii tutulmuştur. Deneysel sonuçların, CFRP ile paketlenmiş FBG sensörlerinin zaman içinde herhangi bir bozulma olmaksızın hassas dinamik gerinim ölçümleri sağladığını ifade edilmiştir.

Xie vd. (2023), çalışmasında rüzgâr türbinlerinin kalitesi ve güvenliği için önemli bir sorun olan yüksek mukavemetli Rüzgâr türbini cıvatası gevşemesinin dijital görüntü korelasyonu temelli bir yöntemle nasıl tespit edilebileceğini aktarılmıştır. DIC yönteminin prensibine göre deney kurgulanmış olup, cıvatanın yüzeyindeki benekli desenlerin gri değer eşleşmesine dayanarak, cıvatanın gevşeme açısını ve ön yük kaybını hesaplamak için matematiksel ilişkiler kurmuşlardır. Rüzgâr türbini cıvatası, farklı gevşeme açılarıyla döndürülerek test edilmiştir. DIC algoritması, cıvatanın yüzeyindeki tam alan yer değiştirme dağılımlarını hesaplamak için kullanılmıştır. Sonuçlar, DIC tabanlı yöntemin cıvatanın gevşeme açısını %95'ten fazla bir doğrulukla tespit edebildiği ve ön yük kaybını da nicel olarak değerlendirebildiği gösterilmiştir. Çalışma sonucunda uygulanan yöntemin, rüzgâr türbini cıvatalarının gevşemesini tespit etmek için temas gerektirmeyen, düşük maliyetli bir yöntem olduğu belirtilmiştir.

Castelos (2023), doktora çalışmasında rüzgâr türbini kanatlarının yapısal modellerinin tersine çevrilebilir sinir ağları (INN) kullanılarak oluşturmuştur. Çalışmasında rüzgâr türbini kanatlarının parametre sapmalarını ve belirsizliklerini hesaplamak için INN yöntemine odaklanmıştır. Tam ölçekli bir kanat testine dayalı olarak doğrulanmış bir parametrik model üreteci kullanarak, INN'nin fiziksel olarak bilgilendirilmiş bir eğitimini gerçekleştirmiş ve INN'yi fiziksel modelin bir sürüsü olarak kullanmıştır. Farklı sadakat seviyelerine sahip fiziksel modeller kullanılarak yapılan çeşitli çalışmalarla, INN'nin önemli model parametrelerinin aposteriori dağılımını doğru bir şekilde tahmin ettiğini gösterdiği iddia edilmiştir. Fakat kısıtlı gerçek deneysel verilere dayalı olarak uygulanan yöntem, kısıtlı ve toleranslı tahminler üretmiştir. Sezgisel optimizasyon yöntemi kullanılmıştır.

Bunlar, gradyan bilgisi veya kesin algoritmalar kullanmadan bir probleme iyi bir çözüm arayan yöntemlerdir. Analitik veya sayısal olarak çözülmesi zor olan karmaşık, doğrusal olmayan veya konveks olmayan problemler için kullanışlıdırlar. Bazı örnekler benzetimli tavlama, doğrudan arama ve evrimsel algoritmalardır. Bir rüzgâr türbini kanadı gibi gerçek bir yapının gözlemlenen tepkisine uyması için yapısal bir modelin parametrelerini gerçek veya gerçeğe yakın ayarlanması gerekmektedir. Bu simülatif model, hasarın belirlenmesine, tasarımın iyileştirilmesine veya izlemenin geliştirilmesine yardımcı olabilirliği takip edilmiştir. Sonuçlarda, simülasyonun deneyden yaklaşık %13 daha düşük doğru sonuçlar verdiğini ve bu durumun, kanadın z ekseni boyunca dönme davranışındaki önemli farklılıklardan kaynaklandığı ifade edilmiştir. Düzeltme tahmini ile bu sapmalar %11'e ve %10,4'e düşürülmüştür. Kanat yük durumları içinde simülasyon ve deney arasında %5'in altında sapmalar elde edilmiştir. Bu, simülasyonun kanadın bükülmesini doğru bir şekilde tahmin ettiğini ifade edilmiştir. Son olarak statik burulma testleri, türbin sertifikasyon süreçlerinde nadiren uygulandığından çok az veri mevcut olduğu ifade edilmiştir. Bu bağlamda bu testin simülasyon verilerinin deney prosesi yerine daha fazla burulmayı doğru tahmin ettiği ifade edilmiştir.

Dai vd. (2022), FBG sensörleri ile algılama tekniği kullanılarak açık deniz platformlarında çatlak uzama genişliğini izleyebilen bir sensörün tasarımı ve deneysel çalışma yapmışlardır. FBG sensörler ile çatlak açılma deplasmanını (COD) kirişin sapmasına dönüştürmek için eşit mukavemetli bir kiriş kullanır, bu da kirişe monte edilen FBG sensörünün dalga boyunu etkilediğinden dolayı deney düzeneğini kurmuşlardır. Sensör, 0-5 mm tasarım aralığında iyi bir doğrusallığa, tekrarlanabilirliğe ve 0,4 nm/mm hassasiyete sahiptir. Sensör ayrıca ışının her iki tarafında iki FBG sensörü kullanarak kendi kendine sıcaklık telafisi sağlayabilmiştir. Sensör, prefabrike çatlaklara sahip bir açık deniz platformunun yerel bir modeline uygulanmıştır. Sensör çatlak başlangıcını tespit edebilmekte ve çekme, itme ve döngüsel yükler gibi farklı yükleme koşulları altında ölçebilmektedir. Deneysel sonuçlar sonlu elemanlar analizi ile tutarlıdır ve sensörün açık deniz platformu çatlak izleme potansiyelini gösterilmiştir. Ayrıca akustik emisyon tekniği temel alınarak 16 Mn eksantrik çubukta düşük döngülü yorulma çatlak yayılmasını uygulanmıştır. Bu çubuk, yüksek mukavemetli, düşük alaşımlı bir çelikten imal edilmiştir.

Eksantrik çubuk, çapı farklı olan iki silindirik çubuğun birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu yapının çubukta çatlak başlatma ve yayılma için uygun bir gerilme konsantrasyonu sağladığı ifade edilmiştir. Akustik emisyon tekniği ile çatlak yayılması sırasında malzemeden yayılan elastik dalgaları ölçen bir yöntem olarak kullanılmıştır. Çatlak uzunluğu, çatlak açılma modu gerilme yoğunluk faktörü ve çatlak büyüme hızı gibi parametrelerin belirlenmesi sağlanılmıştır. 16 Mn eksantrik çubukta düşük döngülü yorulma testleri gerçekleştirmiş ve AE sinyalleri kaydetmişlerdir. AE sinyallerinin frekans spektrumu, zaman parametreleri ve kümülatif sayısı analiz edilmiştir. AE parametreleri ile yorulmada çatlak uzunluğu arasında bir korelasyon bulunmuştur ve AE parametreleri ile çatlak büyüme hızı arasında da bir ilişki olduğu gösterilmiştir. AE tekniğinin, çatlak büyüme mekanizmasını anlamak ve çatlak yayılma davranışını tahmin etmek için de kullanılabileceğini önermişlerdir.

Olabi vd. (2021), çalışmasında rüzgâr Türbini Bileşenlerinin arıza modları üzerine bir inceleme yapmışlardır. Rüzgâr enerjisi sistemlerinin performansı ve ömrü için çok önemli olan rüzgâr türbini kanatlarının farklı malzemelerini, üretim yöntemlerini ve hasar mekanizmalarını incelenmiştir. Çalışmada türbin kanatları, nasel ve kule gibi bir rüzgâr türbininin ana bileşenlerini ve bunların ilgili işlevlerini ve tasarım kriterlerini açıklanmıştır. Ayrıca rüzgâr türbini kanatları için kullanılan doğal lifler, karbon ve cam lifleri, bazalt lifleri, hibrit kompozitler ve nano-mühendislik ürünü kompozitler gibi çeşitli malzeme türleri ve bunların avantajları, dezavantajları ve uygulamaları ele alınmıştır. Çalışmada statik ve döngüsel yükleme altında kompozit rüzgâr türbini kanatlarını etkileyen reçine çatlaması, elyaf kırılması, delaminasyon ve darbe hasarı gibi farklı arıza modlarını ve mekanizmalarını analiz edilmiştir.

Muhammedi vd. (2020), üç komponentli iyileştirici ajan içeren mikrovasküler kanallara sahip cam elyaf/epoksi kompozitlerin kendi kendini iyileştirme kabiliyeti üzerine bir çalışma yapmışlardır. Mikrovasküler kanallar, kompozit katmanlar arasına poliamid tellerin yerleştirilmesi ve çıkarılmasıyla oluşturulmuştur. İyileştirici epoksi reçine, maleik anhidrit sertleştirici ve yüksek sıcaklıklarda reaksiyona girebilen ve kürlenebilen $CuBr_2$(2-Metilimidazol) hızlandırıcıdan oluşmuş ve de iyileştirici ajan hacim oranının ve iyileşme süresinin kompozitlerin çekme ve eğilme özellikleri üzerindeki etkileri

araştırılmıştır. Sonuçlar, kompozitlerin iyileştikten sonra ilk mukavemetlerinin önemli bir yüzdesini geri kazanabildiğini ve iyileşme verimliliğinin iyileştirici miktarına ve iyileşme süresine bağlı olduğunu gösterilmiştir.

Jony vd. (2022), çalışmasında termoset CFRP kompozitin interlaminar kesme kırığı iyileşmesi için çok fazlı termoplastik iyileştirici maddeler kullanarak hasarlı karbon fiber takviyeli polimer kompozitin kırılma tokluğunu geri kazanmak için bir yöntem sunmuşlardır. Yapıda biyo-mimetik ısı ile aktive olan içsel iyileşme araştırılmıştır. İyileşme süreci delaminasyon boşluğunu kapatmak için gömülü şekil hafızalı polimerlerin (SMP) ve mikro veya makro çatlakları onarmak için erimiş termoplastik polikaprolakton'un (PCL) etkinleştirilmesini içermektedir. Uç çentik eğilme (ENF) testi ile yarı statik yükleme altında işlenmemiş ve iyileştirilmiş CFRP numunelerinin kayma kırılma tokluğunu ölçmek için uygulanmıştır. Ayrıca çatlak uzunluğunu ve kırılma enerjisini hesaplamak için uygunluk kalibrasyon yöntemi de içermektedir. İyileştirme verimliliği ve fraktografik analizler ile de ilk iyileşme döngüsünde işlenmemiş kırılma tokluğunun maksimum %88,39'unun ve sonraki döngülerde %70'ten fazlasının iyileştiğini bildirilmiştir. Ayrıca taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop ile kırılma morfolojisi ve mekanizmalarını gözlemlenmiştir. Termoplastik iyileştiricilerin kırılma yüzeyi üzerindeki etkisi test edilmiştir. 5 farklı iyileştirme döngüsü için tekrarlanabilir kesme kırılması iyileştirmesinin gözlendiği, iyileştirme verimliliğinin Mod II kırılma tokluğu açısından nicelleştirildiği ve maksimum iyileştirmenin ilk iyileştirme döngüsünde saf tokluğun %88,39 ± 16,41'i olarak gözlendiği açıklanmıştır. Çatlak büyüme davranışının karşılaştırılması da yapılmıştır. Saf ve iyileştirilmiş numuneler için karşılaştırmalı çatlak büyüme davranışını ve çatlak yayılma hızı açısından incelemiştir. İyileştirme döngülerinde saf çatlak büyüme hızına kıyasla çatlak yayılma hızının daha düşük ve nispeten sabit olduğu bulunmuştur. Saf döngülerde R − eğrisinin artış eğimi, iyileştirilmiş durumlardan daha düşük olup hem çatlak büyüme hızı hem de R − eğrisi eğimi, iyileştirme döngüleri sırasında daha kararlı bir çatlak büyümesi gösterdiği ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda çift fazlı iyileştiricilerin kullanımının Mod I ve Mod II delaminasyonlarını azaltmak ve kırılma özelliklerini tekrarlanabilir bir şekilde geri kazanmak için etkili bir yaklaşım sağladığını güçlü bir şekilde gösterdiğini belirtilmiştir.

Ştefanov ve ark. (2023), çalışmada kompozitten kompozite yapıştırma için kullanılan elastomer takviyeli bir etil siyanoakrilat yapıştırıcının mod I kırılma enerjisi ölçülmüştür. Yapıştırıcı formülasyonunda bulunan zayıf asit konsantrasyonunun yapıştırıcı kırılma davranışı üzerindeki etkisi, gerçek zamanlı ve hızlandırılmış yaşlandırılmış yapıştırıcı partileri için incelenmiştir. Çalışmada hem normal süreçte hem de hızlandırılmış yaşlandırma formülasyonlarında zayıf bağlayıcı asitlerin konsantrasyonunun arttığını ve polimerizasyon oranının azaldığını açıklanmıştır. Elastomerlerin kırılma morfolojisi ve faz ayrımı da bağlayıcıdaki zayıf asitlerin konsantrasyonu tarafından belirlenmiştir. Tokluk, daha yavaş kürlenme hızları pahasına elde edilmiştir. Yapışkan bağlantılarda 110 °C'ye kadar ısıl işlemin elastomer faz ayrımı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Isıl işlemden sonra ve daha yüksek zayıf asit konsantrasyonlarında, kohezif başarısızlık ve kompozit delaminasyon meydana geldiği ifade edilmiştir.

Mamalis vd. (2019), çalışmasında polimer matris ile karbon fiberler arasındaki arayüzey bağ mukavemeti konusuna odaklanmışlardır. Tek yönlü kompozitler üretmek için toz epoksi reçine ile üç farklı boyutlandırma maddesi içeren karbon fiberler kullanılmıştır. Toz epoksi reçine işleme, daha fazla zaman alan vakum infüzyon tekniğine kıyasla otoklav dışında hızlı ve uygun maliyetli kompozitler üretmek için bir yöntem olarak araştırılmıştır. Bu çalışmada, ısı ile aktive olan epoksi tozu, rüzgâr türbini kanatları gibi yenilenebilir enerji endüstrisinde ihtiyaç duyulan kalın kompozit parçalar için düşük maliyetli, sadece vakum torbalı prepreglerde reçine sistemi olarak kullanılmaktadır. Elyaflar ve matris arasındaki ara yüzey bağının önemi ve bunun üretilen kompozitlerin nihai mekanik özellikleri üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Karbon fiberler üzerindeki haşılın yüzey özellikleri atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve Raman spektroskopisi kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, elyaf yüzeyindeki haşıl miktarının yüzey pürüzlülüğü ve kaplaması ile ayrılmaz bir şekilde bağlantılı olduğunu göstermektedir. Bu da elyaf-matris arayüzünde meydana gelen mekanik ve kimyasal kenetlenmeyi etkilediği ifade edilmiştir. Kompozitlerin mekanik özellikleri çekme, eğilme ve laminarlar arası kırılma tokluğu testleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Optik ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapılan frakografi analizi de deney kompozitlerinin kırılma yüzeylerini analiz etmek için kullanılmıştır.

İnterlaminar kırılma tokluğu testi (DCB Mod-I), arayüzey yapışmasındaki farklılıkların kompozitin kırılma mukavemetini değiştirebileceğini gösterilmiştir.

Waldbjørn vd. (2023), bir 34m rüzgâr türbini kanat bölümünün yapısal bütünlüğünü değerlendirmek için büyük ölçekli bir yorgunluk testi hakkında bir makaledir. SSP Technology tarafından tasarlanmış ve üretilmiş 34m uzunluğunda bir rüzgâr türbini kanadının iç 15mlik bölümünü inceler. Kanat, çift eğrili arkadan kenar sandviç panelleri içeren bir kutu çubuk yapısına sahiptir. Kanadın arkadan kenar basınç ve emiş tarafı sandviç panellerini birleştiren tek sıralı yapıştırıcı hattında çatlak oluşumunu önlemek için 4m mesafede bir üçüncü shear web takılmıştır. Kayma perdesi, çekirdek malzemesi ile kaplanmış bi-aksiyel cam elyafından oluşan bir sandviç yapısına sahiptir. Kök bölümü, arkadan kenar panellerinde breathing/pumping deformasyonlarını tetikleyen bir yük konfigürasyonu ile çok eksenli bir test düzeneğinde yorulma testine tabi tutulmuştur. Yük konfigürasyonu, 100kN kenar yükü ve 100kNm burulma momenti içerir. Test, yaklaşık 280.000 yük döngüsünde gerçekleşmiştir. Kayma perdesinin yapısal davranışı, gerinim ölçerler, tel potansiyometre ve dijital görüntü korelasyonu (DIC) ile izlenmiştir. Sonuçlar, kayma perdesinin ve yapıştırıcı hattının hasar görmediğini göstermiştir. Testi hızlandırmak için, kayma perdesi ve bitişik sandviç paneller arasındaki hatta bir hasar başlatılması planlandığı ifade edilmiştir.

Matt vd. (2017), çalışmalarında rüzgâr türbini kanatlarının mikro ölçekli damarlı kanallar kullanılarak kendi kendine iyileştirilmesi üzerine odaklanmışlardır. Çalışma motivasyonu rüzgâr türbini kanatlarında ani rüzgâr darbeleri nedeniyle oluşan yüksek bükülme gerilmeleri önemli bir hasar nedeni oluşudur. Kendi kendine iyileştirme, hasarları otomatik olarak iyileştirerek felaket sonuçlara karşı bir güvenlik önlemi sağlayacağından dolayı bu çalışmanın yapıldığı ifade edilmiştir. Biyomimetik, damarlı kanal tipi kendi kendine iyileştirme, cam elyaf takviyeli termoset polimer matris kompozit malzemede uygulanmıştır. Mikro ölçekli borosilikat tüp kanallar, epoksi tipi polimer matrise iyileştirici ajan sağlamak için kullanılmış ve iyileşme sağlanılmıştır. Tüp kanal içeren kompozit malzemede gerilme mukavemetinde %25 azalma ve üç nokta eğilme mukavemetinde ise %9 azalma meydana gelmiştir. Üç nokta eğilme testleri öncesinde ve sonrasında düz numuneler üzerinde kendi kendine iyileştirme gerçekleştirilmiştir.

Testler sırasında kompozit numunelerdeki tüp kırılması ve iyileştirici ajanın akması gerçek zamanlı olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca bir prototip rüzgâr türbini de kendi kendine iyileştirme özelliğine sahip kompozit türbin kanatları üretilmiştir. Vasküler kanal tipi kendi kendine iyileştirme yöntemi ile dokuma cam elyaf takviyeli polimer matris kompozit malzemede otonom kendi kendine iyileştirilmesi gösterilmiştir. Bu yöntem, rüzgâr türbini kanatlarında hasar riskine karşı ek bir güvenlik mekanizması potansiyeli içermiştir. Yapıda, tüpler kendiliğinden iyileşme ajanını taşımak için kompozit içine entegredir. Tüplü kompozit yapı numunelerinin saf kompozit yapının çekme mukavemeti ve eğilme gerilmesi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Tüplerin kompozit içindeki konumu, kompozit yapının mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemiştir. Tüplerin merkezi katman olarak yerleştirildiği numune 3'te en yüksek çekme mukavemetine ve eğilme gerilmesine sahip olduğu ifade edilmiştir. Son olarak kendiliğinden iyileşme performansı karşılaştırılmıştır. İyileşme ajanı ve katalizör içeren kompozit deney numuneleri üç nokta eğme testi sonucunda kendiliğinden iyileşme performansını içermektedir. Kendiliğinden iyileşme ajanı, tüplerden çatlaklara akarak kompozit yapının iyileşmesini sağladığından tüplerin son katman olarak yerleştirildiği numune 5'in, yaklaşık %84 en yüksek iyileşme oranına sahip olduğu açıklanmıştır.

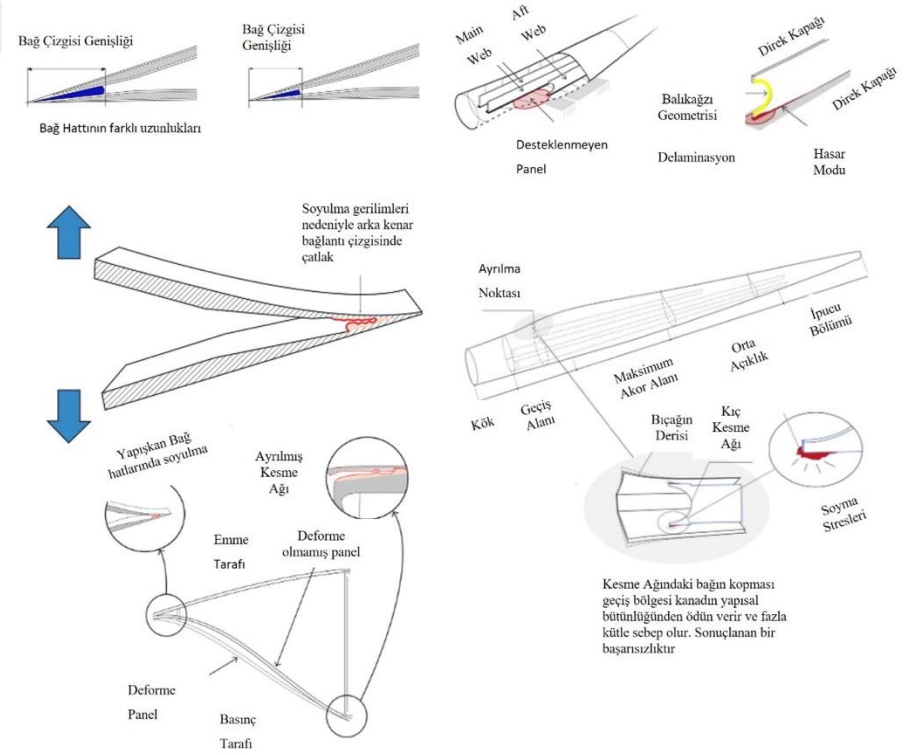
Amano vd. (2022), çalışmasında cam elyaf takviyeli polimer malzemelerin kendini iyileştirme özelliklerini geliştirmek için yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu çalışmada, 3D baskı teknolojisi kullanılarak kompozit tabakasına damarlı bir ağ basılmıştır. Bu damarlı ağ kendini iyileştirme ajanı olan dicyclopentadiene (DCPD) ile doldurulmuş ve plastik bir tabaka ile kapatılmıştır. Bu tabaka kompozit yapının içine gömülmüştür. Ayrıca DCPD'nin polimerleşmesini sağlayan Grubbs katalizörü, basılmış tabakaya ve kompozit yapının dış katmanlara dağıtılmıştır. Kendini iyileştirme performansı incelenmiş olup otonom onarım özellikli kompozit numuneleri, üç nokta eğme testlerine tabii tutulmuştur. Numuneler, kırıldıktan sonra 50 °C'de ısıtılarak ve katalizör ile reaksiyon sağlanarak yapı iyileştirilmiştir. İyileştirme oranı, iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş numunelerin maksimum eğilme gerilmeleri arasındaki yüzdesel oranla hesaplanmıştır. Basılmış tabakada katalizör bulunan altıgen ağlı numune, %202.89'luk maksimum ortalama iyileştirme oranına ulaşmıştır. Bu numune ile, kendini iyileştirme ajanının depolanması ve taşınmasını optimize ettiğini ve katalizör kullanımını azalttığı ifade edilmiştir.

Saadeh vd. (2023), cam elyaf takviyeli epoksi nanokompozitlerin kendini iyileştirme özelliklerini ve rüzgâr türbini kanatları için uygulanabilirliğini deneysel araştırmışlardır. Çalışmalarında dicyclopentadiene (DCPD) ve ilk nesil ve yavaş olan Grubbs katalizör kullanılarak kendi kendini iyileştiren özellikler cam elyaf takviyeli polimer kompozitlere kazandırılmıştır. DCPD, hasar oluştuğunda katalizörle reaksiyona girerek poli-DCPD (PDCPD) polimeri oluşturularak hasar sonrası oluşan çatlakların doldurulması sağlanılmıştır. Kendini iyileştiren ajan olan DCPD'yi taşımak için kompozit tabakasına 3D baskı yöntemiyle altıgen bir damarlı ağ sistemi basılmıştır. Bu sistem DCPD'nin örnek boyunca etkin bir şekilde dağılmasını sağladığını bir önceki çalışmalarında ifade edilmiştir.Bu çalışmada ek olarak kendi kendini iyileştirme kabiliyetini artırmak için, epoksi matrise karbon nanotüp (CNT) katkısı eklenmiştir. CNT'lerin, polimer reçinenin elastik modülünü, mukavemetini ve kırılma tokluğunu artırarak çatlak başlangıcını ve yayılmasını baskıladığı ifade edilmiştir. Numuneler iyileşmeden önce ve sonra üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. CNT'ler içeren örnekler, CNT içermeyen örneklere göre yaklaşık 10 kat daha yüksek bir esneklik gerilimine sahip olmuştur. Ayrıca, iyileşme yüzdesi ortalama olarak yaklaşık %196 ile yaklaşık 2 katına çıkmıştır. Bu sonuçlar, CNT'lerin kendini iyileştiren kompozitlerin performansını önemli ölçüde iyileştirdiği vurgulanmıştır.

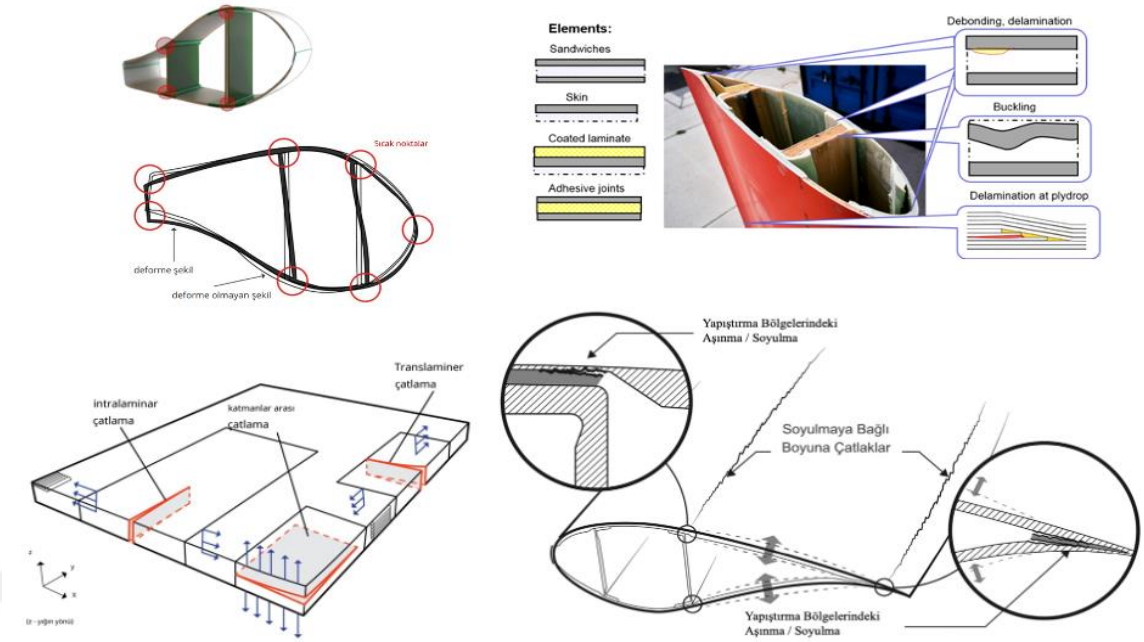
Yapılan çalışmalar gösteriyor ki rüzgâr türbinlerinde enerji üretiminde kesintisiz sürdürülebilirliğinin sağlanması önümüzdeki yakın gelecekte kurulacak yeni rüzgâr türbinleri için önemli bir gereklilik olacaktır. Bu verimliliğin başında rüzgâr türbin kanatlarının kullanım performansı ile ilişkilidir. Rüzgâr türbini kanatları, karmaşık kompozit yapılar olduğundan her bir kanat üretim ve malzeme kaynaklı belirsizlikler nedeniyle tasarım modellerinden sapmalar gösterebilmektedir. Bu sapmalar kanatların güvenilirliğini ve performansını ciddi bir önemle etkilemektedir. Bu bağlamda bağımsız enerji üretiminde dar boğaz oluşturmaktadır. Rüzgâr türbin kanatları, enerji servis süresi boyunca aşırı mekanik ve fiziksel aerodinamik yüklemelere maruz kalarak hasar görebilir, bu durum da yüksek maliyetli bakım ve onarım ihtiyacını beraberinde getireceği açıktır. Rüzgâr türbin kanatlarının saha çevrimlerinin başlangıç aşamalarında meydana gelen (Kashtalyan ve Soutis, 2000, Potluri vd., 2012, Herrmann vd., 2022) mikro ölçekli kusurlar ve çatlaklar, kritik mikron ölçekli sorunlara dönüşebilir.

Bu nedenle, bu tür kusurların mümkün olduğunca erken tespit edilmesi ve onarılması, kanatların enerji üretimi açısından hayati bir öneme sahiptir. (Hu ve Soutis, 2000, Soutis vd., 1999, Caminero vd., 2013). Mikron ölçekli ayrılmaların ve çatlamaların tespiti zor olmakla birlikte düzenli otonom malzemeler ile iyileştirmeler yapılırsa enerji üretkenliği önemli ölçüde artırabilir (Gupta vd., 2019). Ayrıca bu durum güvenilirliği arttırarak ani kritik yapısal sorunlardan kaçınmayı sağlayacaktır. Küçük ölçekli, içsel ve yapısal onarımlar yüksek maliyeti ve kanatların dış katmanındaki kozmetik kusurların ve erozyon aşınmalarından çok daha ciddi aerodinamik stabilizasyonu etkilediğinden kanatların her bölgesinde yapısal iyileştirmeler gerekmektedir (Miao vd, 2022, Haselbach vd., 2022).

Çevrim sırasında oluşan tüm yüklere bağlı olası hasarların, soyulma (ayrılma) gerilmelerinin, yapışma bölgelerindeki ayrılmaların ve gerilmelere bağlı rüzgâr türbin tüm çatlakların özet görüntüsü Şekil 2.48'de yer almaktadır (Jensen ve Branner, 2023; Brondsted vd., 2023). Bu bölgelerde otonom onarımlı kendi kendini onaran malzemeler ile bir mekanizma kurulması gerekliliği açıkça göstermiştir.



Şekil 2.48. Rüzgâr türbin kanatlarında olası kusurların özet gösterimi (Bladena, 2023; Jensen ve Branner, 2023; Mishnaevsky, 2022)



Şekil 2.48. Rüzgâr türbin kanatlarında olası kusurların özet gösterimi (Bladena, 2023; Jensen ve Branner, 2023; Mishnaevsky, 2022) devamı

Yorulma kaynaklı ve hasar sonrası kendi kendine iyileşme özelliği kazandırmaya yönelik çalışmalarda yerel mikrokapsüllü malzemelerin sadece bulunduğu bölgede hasarlara karşılık iyileşme sistemi devreye girmektedir (Patrick vd., 2017, Özer vd., 2021). Tek kullanımlı ve yerel verimlilikte olup stabil iyileşme vasfı dezavantajlı olmaktadır. Diğer bir ifade ile mikrokapsül esaslı çözümlerde hasar gören yerde meydana gelen mevcut mikrokapsül kırılmaları sonucu, hasar çatlağına iyileşme ajanlarının sızarak o bölgede iyileşme meydana gelir. Olası ve muhtemel aynı bölgedeki hasarlarda yeniden iyileşmeye fırsatının bu nedenle olmamasıdır. Vasküler kanallı sistemlerde de genel olarak kullanılan kanal yapısı, kanalların ozmotik karakteri, malzeme ile ara yüzey malzeme uyumu, tekrar ve çoklu kullanım sınırları değişiklik göstermektedir (Sennewald vd., 2014, Mashkoor vd., 2022). Mevcut kanal yapılarda cidar sorunları ve kanalların tıkanması, hasar noktasına ulaşım, yavaş iyileştirme süreleri ve tekrar kullanabilme vasıfları gibi zorluklar bulunmaktadır. Ayrıca dışardan enjekte olan re-aktif iyileştirici ajanın iki komponentli (sıvı iyileştirme ajanı ve sıvı aktivatör) akışkanlar kullanılarak ayrı ayrı kanallar ile yapı içerisinde iyileşmeler de yapılmaktadır. İki komponentli kullanımı ile hasar nüfuzu riski ve akışkan sorunları, iyileşme verimliliğini düşürmektedir.

Ayrıca tek komponentli iyileştirici ajan kullanımında yapı içerisine katılan toz aktivatörlerin homojenlik sorunları ve genel malzeme yapısının mukavemetini düşürdüğü bilinmektedir (Blaiszik vd., 2010, Bing, 2023, Lucas vd., 2016). Bu bağlamda yukarıda anlatılan bu olumsuzluklar ve mevcut çözümlerin konu hakkındaki noksanlıkları nedeniyle ilgili alanda geliştirme çalışmalarına devam edilmesi gerekli kılınmıştır .Bu çalışmada, iyileştirici ajan olarak siyonoakrilat (CA) ile aktivatör olarak kullanımı literatürde rastlanılmayan yeni bir aktivatör önerisi olan fiber üretimi kaplama sırasında kullanılan reçine sayesinde nano partiküllü karbon fiber elyaf (lif) tozlarına aktivatör niteliği kazanmış olup; yapı içerisinde kullanımı ile geleneksel toz aktivatör kaynaklı mukavim kayıplar en aza indirilmiştir. Ayrıca mikrovasküler kanalların tıkanması,işlevselliğini arttıran kanal cidarları içten dışa daralan süngerimsi membran yapı kullanılarak çatlağı ve hasar sonrası sızma yeteneği iyileştirilmiştir.(Duran vd., 2023). Son olarak bölgesel ve yerel mikrovasküler kanal kullanımı yerine çekirdeği PES termoplastiğinden üretilen nano ölçekli içi boş elyaflardan oluşan yeni bir, hafif ve mukavim, otonom onarımlı sandviç yapı üretilmiştir.

Bu çalışmada Rüzgâr türbin kanatlarında yapısal yenilik ile kendi kendini iyileştirme vasfı önerilmiştir. Kanatların kompozit sandviç yapılarında, destek parçalarının ve yapıştırma bölgelerindeki içi boş nano kanallara sahip elyafların kullanılmasıyla birlikte kanatların uzunluğu arttıkça zorlaşan geleneksel kanat üretim yönteminin aksine yeni bir sandviç yapı ve iyileştirme sistemi önerilmiştir. Bu çalışma ile iki buluşun ulusal ve uluslararası patent başvuruları yapılmıştır (Duran ve Yazıcı, 2023; Yazıcı ve Duran, 2023).

Bu doktora çalışmasının motivasyonu,yakın gelecekte ülkemizde kullanılacak deniz üstü rüzgâr türbinleri ve günümüz karasal türbin kanatları için mevcut kanat onarım yöntemlerinden farklı olarak yeni nesil malzemeler ile kendi kendini onarma yeteneği kazandırması olacaktır. Türbin kanatlarının ömrü boyunca mutlak kusurları ile hasar görmüş malzemelerinin otonom onarılma mekanizmasını içermektedir. Kendini iyileştiren malzemeler ile Rüzgâr türbini kanatlarının bakım, onarım ve enerji telafi maliyetlerini azalttığı ve kanatların ömrünü arttıracak bir yapı önerilmiştir.

Kendi kendini onarma mekanizmasına sahip sandviç yapının iyileştirme vasfı ve dinamik darbe testleri yapılarak yüksek verimli onarım ve dayanıklılık sağlanılmıştır. Yapının hasar sonrası iç yapısının muayenesi için mikroskobik ve X-Işını tomografi görüntüleri incelenmiştir. Sandviç yapının üretiminde eklenen yeni nesil FBG fiber sensörler ile test verileri kaydedilmiştir. Ayrıca testler sırasında DIC kameralar kullanılmıştır. Hasar öncesi ve sonrası mikro ölçekli lazer taramalar yapılarak metrolojik iyileştirmeler incelenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında kullanılan materyal ve yöntemler bu bölümde yer almıştır. Bu bölümde rüzgâr türbin kanatlarının kritik mikro çatlama bölgelerinin anlık olarak iyileşmesi için mikro ve makro boyutta kendi kendine iyileşme vasfına sahip sandviç yapı gelişimi anlatılmıştır. Literatürde yer almayan rüzgâr türbin kanatlarında otonom onarımlı bu sandviç yapının üretim sistemi ile mikro boyuttaki hasarları ve tamiri zor mikro çatlak başlangıçlarının otonom onarıma uygun yapısı ile anlık olarak iyileştirdiği yer almaktadır.

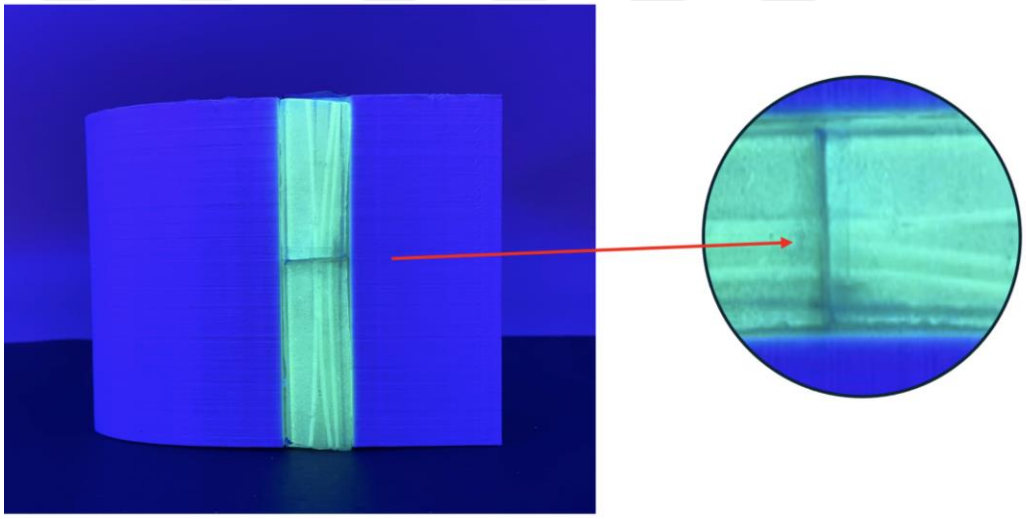
Bu bölümde mikrovasküler kanal yapısına sahip içi boş fiber elyaf takviyeli kompozit ön çalışması ve ön çalışmalar sonucunda üretimi gerçekleştiren çekirdek yapısını oluşturan çok yoğun nano mikrovasküler kanallara sahip sandviç yapının üretimi ve bu sandviç yapının iyileştirme sistemi yer almaktadır. Bursa Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümünün imkân sağladığı çalışma ortamında ve kurucusunun Prof. Dr. Murat Yazıcı olduğu UMİMAG laboratuvarlarında testler yapılmıştır. Darbe testi deney düzeneği ile yapıya hasar verilip mikro çatlakların iyileştirilmesi sonucu yeniden hasara uğratılarak kıyaslamalar yapılmıştır. YÖK 100/2000, TÜBİTAK 2211-A, 2250 ve Prof. Dr. Murat Yazıcı'nın proje yürütücülüğünde TÜBİTAK TEYDEB 1505-5220011 numaralı projeler ile finanse edilen malzemeler kullanılarak üretim yapılmıştır. Ayrıca Ermaksan Eon Photonics ile FBG sensörler ile de bu testler yapılarak yapıdaki iyileşmenin kürlenme takibi ve gerinimleri ölçülmüştür. Bursa Cadem Metrology ile darbe testinin DIC kaydı alınmıştır. Hexagon Türkiye ile hasar sonrası yapının metrolojik şekil değişiklikleri değerlendirilmiştir. Son olarak Zeiss Türkiye ile 3D X-Işını Tomografik tahribatsız muayene yapılarak yapının tomografik görüntüleri incelenmiştir.

3.1. Ön Hazırlık ve Geliştirme Aşaması

Çalışmanın ilk aşamasında bir rüzgâr türbinleri çiftliği olan Bursa Galata Wind sahası incelenmiş türbin kanatların Bölüm 2'de anlatılan hasar sonrası endüstriyel aksiyonlar irdelenmiştir. Şekil 3.1'de gösterilen yıldırım sonrası üretimi durmuş bir türbinin onarım özel aksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Hasar sonrası enerji üretim faaliyeti duran rüzgâr türbin kanadı onarım prosesi (Swaray, 2023)

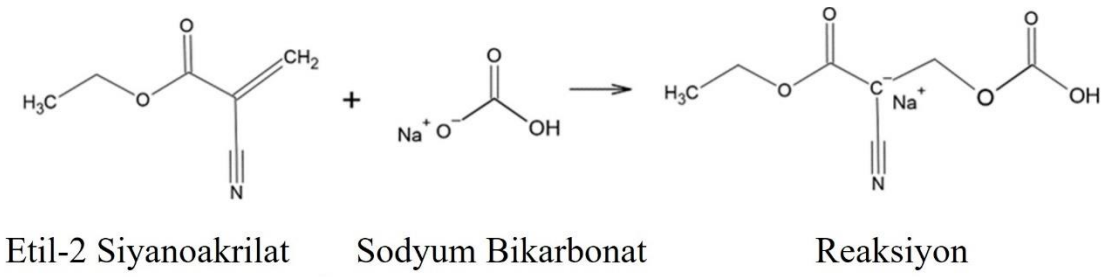


Şekil 3.2. Otonom iyileştirilmiş türbin kanat kesitinin demo görüntüsü

Hasar sonrası oluşan çatlağın kendi kendine ve endirekt iyileşmiş demo görüntüsü bu çalışmanın hedef motivasyonu olmuştur. Gerçekçi tamirlerin ve otonom onarmaların yapılması için kullanılan malzemelerin karakteristiği, kanat yapı özelliklerine uygun; mikrovasküler kanalların, iyileştirici ajanın kullanılabilirliği ve takviye elemanların sistemler araştırmalar ve denemeler sonucunda malzemelerin seçimi yapılar üretim yapılmıştır.

3.1.1. İyileştirici Ajan

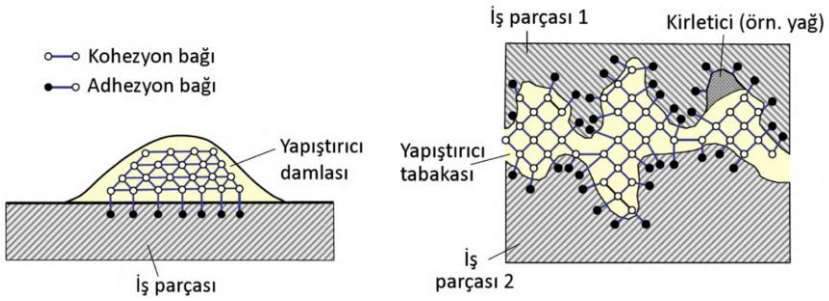
Bu çalışmada endüstriyel uygulaması yüksek, maliyeti düşük, sıvı olarak satılan ve Şekil 3.3'te kimyasal formülü olan $CH_2=C(CN)_{CO2R}$ olan siyanoakrilat (CA) yapıştırıcılar kullanılmıştır. Polar yapısında CH moleküler grubu, CN nitrili ve CN altı ester grubunu ifade etmektedir ('Siyanoakrilat', 2023).



Şekil 3.3. Etil-2 siyanoakrilat ve sodyum bikarbonat reaksiyonu (Duffy vd., 2018, Özer, 2021)

Bir aktivatör ya da yüzey bağıl nemine maruz kaldığında hızlı anyonik polimerizasyon ile (kürlenme) yapışma ve anlık sertleşme (fast-setting) gerçekleştirmektedir. İyileştirici ajanın karakterizasyonunda polimerizasyonun ilerlemesi zincir transferi ve sonlandırma adımlarının etkisi bununla birlikte monomer ve radikal inisiyatörleri, polimerizasyon kinetiği ve reaktivite yüksekliklerine göre kullanılan bir bir vinil monomer grubudur. Polimerizasyon kinetiği, reaksiyonun ilerleyişini zamanla izleyerek belirlendiğinden bu bağlamda kinetiği etkileyen faktörler arasında sıcaklık, aktivatör oranı, monomer konsantrasyonu gibi (Duffy vd., 2018, Fink, 2013, Klemarczyk ve Guthrie,2010) parametreler dikkate alınarak toz aktivatör ve iyileştirici ajan seçimi yapılmıştır.

Mikro çatlakları iyileştirecek siyanoakrilat ve aktivatörlü matris ile adhezyon bağı oluşturmaktadır. Matriste hasar ve çatlaklarda sızma sonucu kürlenmiş siyanoakrilatlı matris yapısının mukavim kayıpları, adhezyon ve kohezyon kuvvetlerine bağlı olarak değişim göstermektedir (Temiz, 2023). Bu uyum mekanizması Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. İyileştirici ajan ile matrisin uyum mekanizması (Temiz, 2023)

Yüksek sıcaklıklara çıktıkça (çalışma sıcaklığı 80-120°C arttıkça) siyanoakrilatların dayanımı azalır ve mukavemetlerini kaybederler. Bu nedenle, yüksek sıcaklığa maruz kalmalara uyum sağlamamaktadırlar, fakat günümüz şartlarında çalışma sıcaklığı 450°C'ye ulaşabilen yeni nesil endüstriyel siyanoakrilatlar geliştirilerek bu sorun ortadan kaldırılmıştır (Temiz, 2023). Bu çalışmada kullanılan Winkel Pro siyanoakrilatın teknik özellikleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Siyanoakrilat teknik özellikleri (Winkel, 2023)

Teknik Özellikler (sertleşmeden önce)

Kimyasal baz:	Etil siyanoakrilat	
Renk:	Şeffaf	
Yoğunluk:	1,06 g/ml	(DIN 53217)

Viskozite: 2-3 mPa.s (Brookfield; @25°C; 50 sp, 50 rpm)

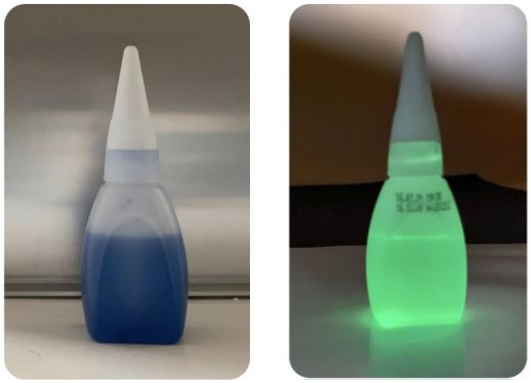
Teknik Özellikler (sertleştikten sonra)

Gerilme kesme mukavemeti:	15-25 N/m²
Çalışma sıcaklık aralığı:	-10°C ile +40°C arası
Sıcaklık dayanımı:	-40°C ile +125°C arası
Çözünürlük:	DMF, aseton, asetonitril

Mukavemet: ≥ 200 kg/cm² (ASTM D1002-10)
Kürleşme Süresi: 2-4 sn (KK-T028)

Temel fiziksel ve kimyasal özellikler hakkında bilgi	
Fiziksel hali	: Sıvı
Renk	: Renksiz
Koku	: Rahatsız edici
Koku eşiği	: Mevcut veri yok
pH	: Mevcut veri yok
Bağıl buharlaşma hızı (bütil asetat=1)	: Mevcut veri yok
Erime noktası	: Uygulanmaz
Donma noktası	: Mevcut veri yok
Kaynama noktası	: 150 °C
Parlama noktası	: 87 °C
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	: 500 °C
Ayrışma sıcaklığı	: Mevcut veri yok
Alevlenirlik (katı, gaz)	: Uygulanmaz
Buhar basıncı	: Mevcut veri yok
20 °C'de bağıl buhar yoğunluğu	: Mevcut veri yok
Bağıl yoğunluk	: Mevcut veri yok
Yoğunluk	: 1.05 g/ml
Çözünürlük	: Suda çözünemez, asetonda çözünür.
Dağılım katsayısı n-oktanol/su (Log Pow)	: 1.42 log P(o/w) (Ethyl 2-cyanoacrylate)

Siyanoakrilatlar, asidik özellikte ve çok düşük akışkanlığa (<10 cP) sahip yapışkan maddelerdir (Gardner vd, 2014). Bu akışkanlık sayesinde 100 mikronun altındaki çatlaklarda kendiliğinden tamir olanağı sunarlar (Van ve Belie, 2013, Özer, 2021). Bu bağlamda uygun siyanoakrilat kullanımı ile hem mikro çatlak sızmasını hem de nano kanallar aracılığı ile bu hasarlı bölgeye transferi sağlanır. Deney düzeneğinde makro fiziksel iyileşme bölgelerinin mikroskobik muayenesi için renksiz siyanoakrilat sıvıları neon ve mavi renk pigmentasyon ile Şekil 3.5'te gösterildiği gibi renklendirilmiştir.



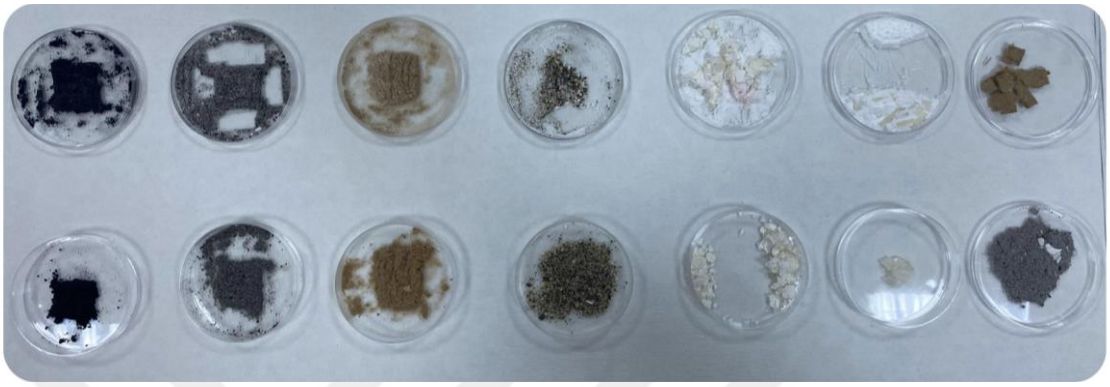
Şekil 3.5. a) Mavi ve b) neon parlayan yeşil renkli iyileştirici ajan

3.1.2. Aktivatör Seçimi

İyileştirici ajanın matris yapı içerisinde anlık olarak kürlenmesi için toz olarak eklenen aktivatör seçimi önem arz etmiştir. Geleneksel olarak sodyum bi karbonat (150 mikron boyutunda) anlık iyileşmede ara yüzey uyumsuzluğuna ve mukavim kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle ön çalışmalarda adhezyon bağı kuvvetlendirecek ve toz metalürjisi dikkate alınarak mukavim kayıpları azaltıcı aktivatör seçim çalışması yapılmıştır.

Siyanoakrilatlar, baz katalizörüne bağlı olarak anyonik yolla polimerize olur. Zayıf bazların bulunduğu ortamda etil-2-siyanoakrilatlar hızlıca anyonik polimerizasyona girer. Bu reaksiyon, moleküllerin çapraz bağlanması ve yüksek ısı üretmesiyle gerçekleşir. Bu ısı, yaranın iyileşme süreci, yeri ve niteliği hakkında ipuçları verir.

Siyanoakrilat monomeri, yüzeyde çok az miktarda bulunan zayıf bazik veya nükleofilik maddelerle aktive olur. Anyonik reaksiyon çift bağın açılmasıyla başlar. Reaksiyonun sonucunda moleküller çapraz bağlı bir yapı oluşturur (Özer, 2021). Şekil 3.6'da doğal ve kimyasal tozların aktivatör olarak kullanımı gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Toz aktivatör numuneleri

Bu kapsamlı ön araştırma ve deneysel çalışmalar literatürde farklı aktivatörlerin kıyaslama amacını güderek:

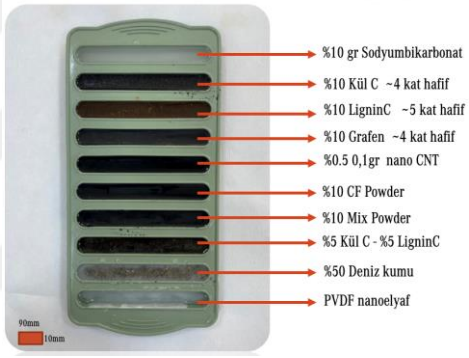
- Aynı aktivatörün mikron boyutu ile kıyaslama,
- Reaksiyon ultra hızlı anlık başlama,
- Kürlenme tamamlama süresi ve miktar/süre ilişkisi,
- Yüksek ekzotermik reaksiyon gözlemi,
- Hızlı soğuma (Reaksiyon tamamlanma) etkisi,
- Toz boyutu zerrecik mikron, cinder yapı, lilif yapı nano,
- Mutlak mukavim bağ kurma arayışı,
- Farklı özgül ağırlık parçacık/partikül dağılım gözlemi,
- Yüzey emicilik, tutunma çökme gözlemi,
- Dıştan içe merkezi kürlenme

gibi parametreler dikkate alınarak kanaldan mikro çatlağa uygun akma süresinden kürlenme sıcaklığına ve mukavim kayıplara karşı ön deneysel araştırma yapılmıştır. Şekil 3.7'de Razor blade/scalpel cut (makroskobik kesme) testleri için epoksi ile belirli oranlarda karıştırılmış örnek numuneler (Şekil 3.8) hazırlanmıştır.



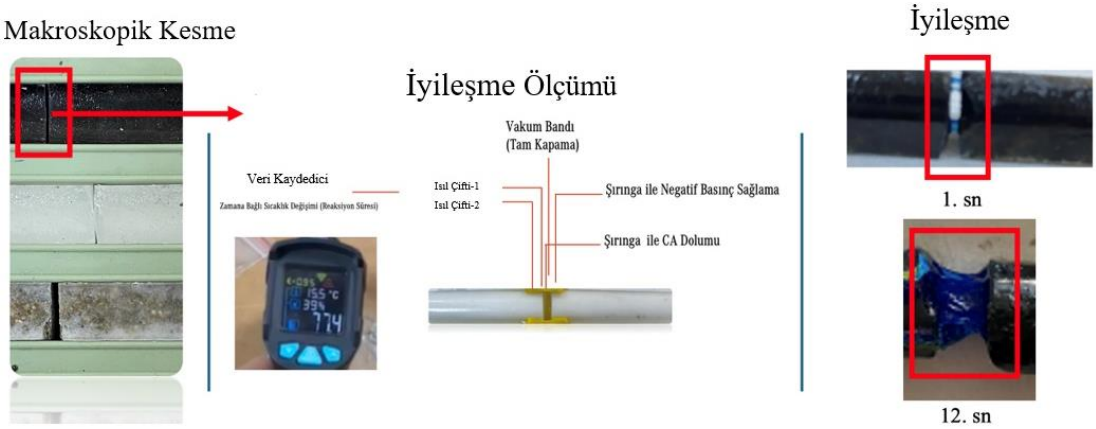
Şekil 3.7. Makroskobik kesme, iyileşme sistemi (Lucas vd., 2016)

Polimerlerde kendi kendini iyileştirme yüzey enerjisi (yüzeyin geçmişine ve değişimine bağlı) ve kırılan zincirlerin miktarı (her iki yüzeyde de) ile yakından ilgilidir. Ayrıca çatlak boyutu yüzey şeklini ve morfolojisini etkiler. Bu nedenle kullanım esnasında meydana gelen mikro çatlaklar, bir jilet kesimi ile karşılaştırılamayacak kadar önemli kriterlere sahiptir. Aktivatör seçiminde makro gözlemleme için bu basit test uygulanmıştır (Cordier vd., 2008, Yamaguchi vd., 2007).



Şekil 3.8. Makroskobik kesme için test çeşitli aktivatörlü matrisler

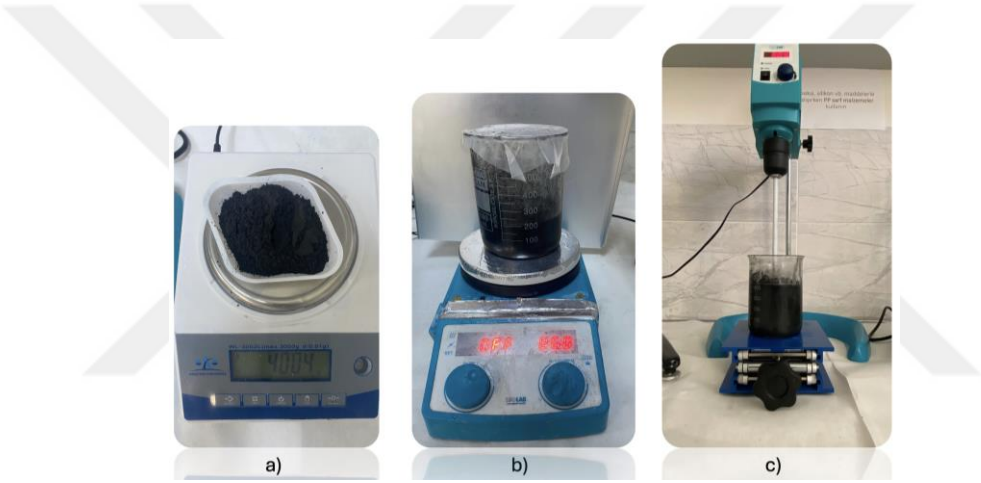
Hazırlanan epoksi ve toz aktivatör karışımlı matrisler gösterilen yöntem ile iyileşme deney düzeneği ve iyileşme Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Makroskobik kesme iyileşme sistemi deney düzeneği

- **Aktivatör olarak Matriste Karbon Fiber Toz Kullanımı**

Yapılan ön çalışmalar sonucunda üretilecek matris (Şekil 3.10) yapısında aktivatör olarak %7 karbon fiber tozu (CFp) kullanılmıştır. Karbon fiber üretiminde boyutlandırma(sizing) işleminde çeşitli reçineler kullanılmaktadır. Karbon fiber boyutlandırma işlemi kaplama reçineleri yaygın olarak endüstriyel pazarda kullanılmaktadır. Bu kaplama reçineleri epoksi, felonik, selüloz bazlı, polyester ve vinil ester olabilir. Kaplama reçinesinin siyanoakrilat ile çapraz bağ yapması sonucu anlık olarak kürlenmeyi başlatması çalışmanın önemli bir bulgusu olmuştur. Çizelge 3.2'de kullanılan CFp'nin mekanik özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.10. a) %7 CFp kullanılarak b) manyetik ve c) mekanik karışımla matris hazırlığı

Çizelge 3.2. Karbon fiber tozu mekanik özellikleri (Dost, 2023)

Karbon Fiber Tozu Mekanik Özellikleri	
Karbon Safsızlık	Min. %95
Tanecik Boyutu	10 - 100µm (mikron)
Özgül Ağırlık	1,78 – 1,87 g/m^3
Tek Filaman direnci	22 µΩm (870 µΩin)
Filament çapı	7 µm
Kütle yoğunluğu	380 g/l
Gerilme direnci	3.0 GPa (435ksi)
Gerilme modülü	200 GPa (29Msi)
Kopma uzaması	%1,5

Karbon fiber tozu, karbon liflerinin mikron uzunluklarda öğütülmesiyle elde edilen bir toz halidir. Epoksi, poliüretan ve polyester gibi reçinelerde kullanıldığında mekanik özelliklerini (çekme ve elastisite) artırır. Ayrıca çok düşük ısıl genleşme gösterdiği için kompozit veya döküm parçalarda çekme gerilmelerini azaltır (Dost, 2023, KP, 2023). Matris yapısında kullanılan epoksinin özellikleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

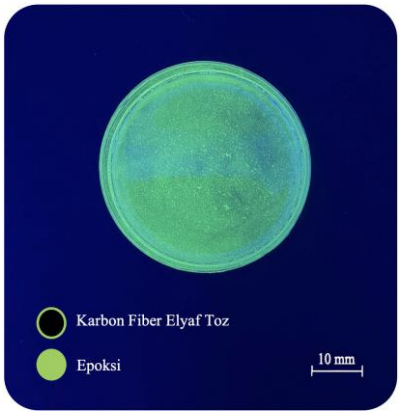
Çizelge 3.3. Matris epoksi reçinesinin özellikleri (Dost 2, 2023)

Epoksi reçinesinin özellikleri	
Yoğunluk	1,13 g/cm^3
Viskozite	700 mPas
Bükülme mukavemeti	140 N/mm^2
Esneklik modülü	3,2-3,5 kN/mm^2
Gerilme direnci	80 N/mm^2
Basınç dayanımı	80-100 N/mm^2
Hasar gücü	50 KJ/m^2
23°C'de su emilimi	0,2-0,5 % 7günde
Ters eğilme gerilmeleri altında yorulma mukavemeti DRL Brunsw	%10 > 1 x 10^6 %90 > 2 x 10^6
Kopma uzaması	%5 - %6,5

Termoset ve termoplastik malzemelerin üretiminde ideal bir katkı maddesidir. %5 ila %10 reçine takviyesi önerilen ensdüstriyel karbon fiber toz katkısının faydaları şunlardır:

- İyileştirici ajan aktivatörü olarak kullanılmıştır.
- Mekanik özellikleri iyileştirir.
- Dayanıklılığı ve sağlamlığı artırır.
- Anti-elektrostatiktir. Elektriksel iletkenliği sağlar.
- Burkulma ve yorulma direncini yükseltir (Dost, 2023, KP, 2023).

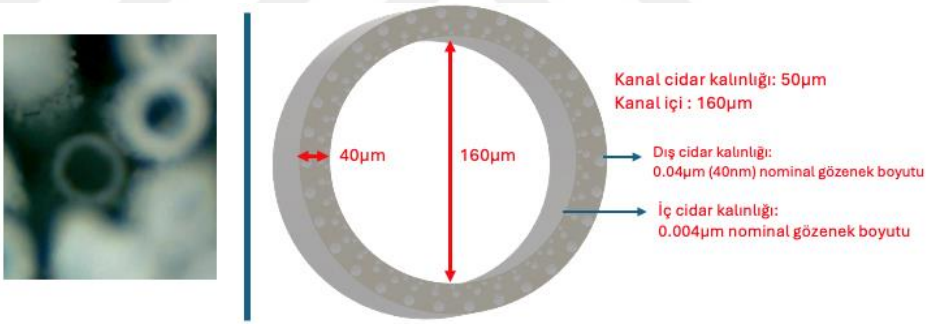
Şekil 3.11'de yaklaşık 0,1 bar ile numune kabına aktarılmış, %7 CFp epoksi matris karışımı gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Takviye %7 CFp matris görüntüsü

3.1.3. İçi Boş Fiber Nano Kanallar

İçi boş fiber nano kanallar (Şekil 3.12 ve Şekil 3.13) kendi kendini iyileştirme mekanizmasında kullanılmak için mikrovasküler yapıları hakkında detaylı incelemeler yapılmıştır. Ayrıca bu kanallar alev geciktirme özelliğine sahiptir.



Şekil 3.12. Sandviç yapı çekirdeğini oluşturan yoğun oranlı içi boş fiber nano kanalların fiziksel özellikleri



Şekil 3.13. İçi boş fiber nano mikrovasküler kanallar

Bölüm 2'de anlatılan hammaddelerin ve özelliklerine göre üretilen kanallar farklı özellikler taşıdığından kompozit sandviç yapıda mekanik ve otonom isterlere doğru yanıtlar veren kanal seçimi için araştırmalar yapılmıştır.

Bu araştırma ve ön denemeler sonucunda hammaddesi PES ve PS olan dora, nipro vb. üretilen geri dönüşüm bekleyen içi boş fiber nano kanallar da uygunluk sağlamıştır. PES ve PS hidrofobik yapısı nedeniyle su barındırmazlar, -100 ve 200°C'de uygulamalarda kullanılabilir. Ters ozmoza uygun, termal kararlığı yüksektir. Ayrıca kanal cidarlarının dıştan içe daralan membran yapısı bulunur. Elektrikli ekipman, medikal teknolojilerinde, otomobil parçalarında kullanılan bir hammaddedir (Madhu, 2022). Çizelge 3.4'te içi boş fiber nano kanalların hammaddesi PES'in özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. PES hammaddesinin özellikleri (Polymerdatabase, 2022)

23 °C'de Mekanik Özellikler	**Birim**	**Değer Aralığı**
Çekme Dayanımı, 23 C'de Verim	MPa	
Çekme Dayanımı, 23 C'de Kopma	MPa	83-85
Uzama,Verim	%	6.May
Uzama,Kopma	%	25-80
23 C'de Çekme Modülü	MPa	2600
Eğilme Dayanımı,Verim	MPa	129-130
Eğilme Modülü	MPa	2550-2900
Basınç Dayanımı	MPa	100-109
İzod Çentikli	J/m	85
İzod Çentiksiz	Kj/m²	ara yok
Termo-Fiziksel Özellikler	**Birim**	**Değer Aralığı**
Erime Noktası	°C	227-238
Yoğunluk	g-mL-1	13.516
Termal Genleşme Katsayısı x 10-5	cm/(cm°C)	4.9-5.7
Isı Sapma Sıcaklığı,0.5 Mpa	°C	210-220
Isı Sapma Sıcaklığı,1.8 Mpa	°C	203-204
Termal İletkenlik	W/Mk	0.18-0.24
Rockwell Sertliği, R Ölçeği	yok	R120-R127
Elektriksel Özellikler	**Birim**	**Değer Aralığı**
Hacim Direnci	Ohm-cm	
Dielektrik Gücü	V/mm x 104	1.5
Dielektrik Sabiti 1 MHz	yok	3.54
Dağılım Faktörü 1 MHz	yok	0.0003-0.0006

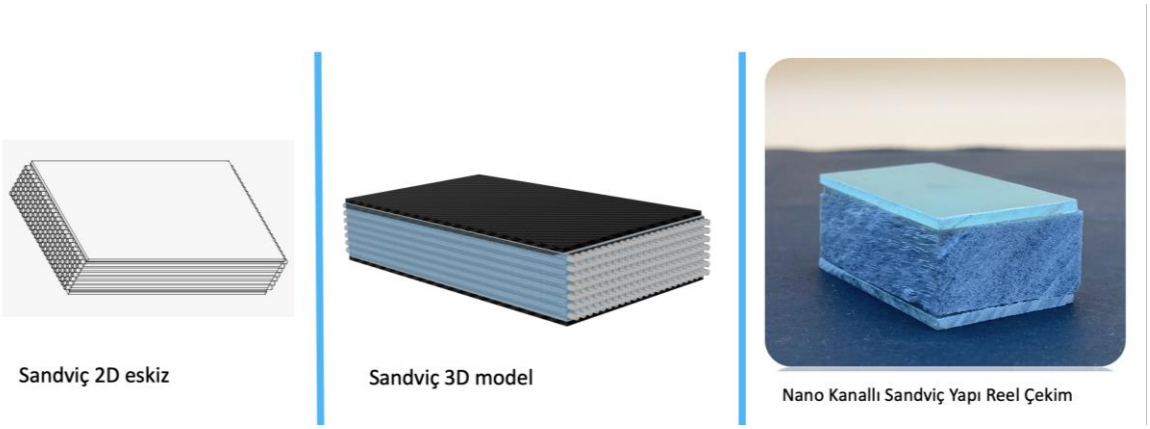
3.2. Kompozit Sandviç Üretimi

Çalışmada Rüzgâr türbin kanatlarının twist (eğimli-burkumlu) yapısından dolayı yapıştırma eklem ve bağlantı bölgelerindeki muayene ile tespiti ve onarımı zor olan bölgelerini iyileştirmek amaçlı üretilen sandviç yapının darbe testlerinde silindirik kompozit sandviç yapı kullanılmıştır. Kanal cidarları bir arada olan 280mm uzunluğunda bir silindirik yapıda 1.8 m^2 uzunlukta 200 mikron fiber kalınlığında içi boş fiber kanalların cidarlarını bir arada tutan %7'lik 80-150 mikron boyutlarında ve 7 mikron kalınlığında karbon fiber toz ile epoksi reçinesi ve sertleştici manyetik karıştırıcı ile karıştırılmış matris yapısı ile fiber kanallar bir arada olup sandviç yapının çekirdeğini oluşturmuştur. Kompozit üretiminde Rüzgâr türbin kanat rijitliğine yaklaşım amacıyla yoğunluğu yaklaşık 1,76 g/cm^3 olan sleeve 3K örgü karbon fiber (Çizelge 3.5) kullanılarak sandviç çekirdeği yüzeyi sleeve (örgü) fiber kumaş ile kaplanarak vakum infüzyon yöntemi ile sandviç yapı oluşturulmuştur (Dost 3, 2023; Kord, 2023).

Çizelge 3.5. Örgü fiber karbon mekanik özellikleri (Toray, 2023)

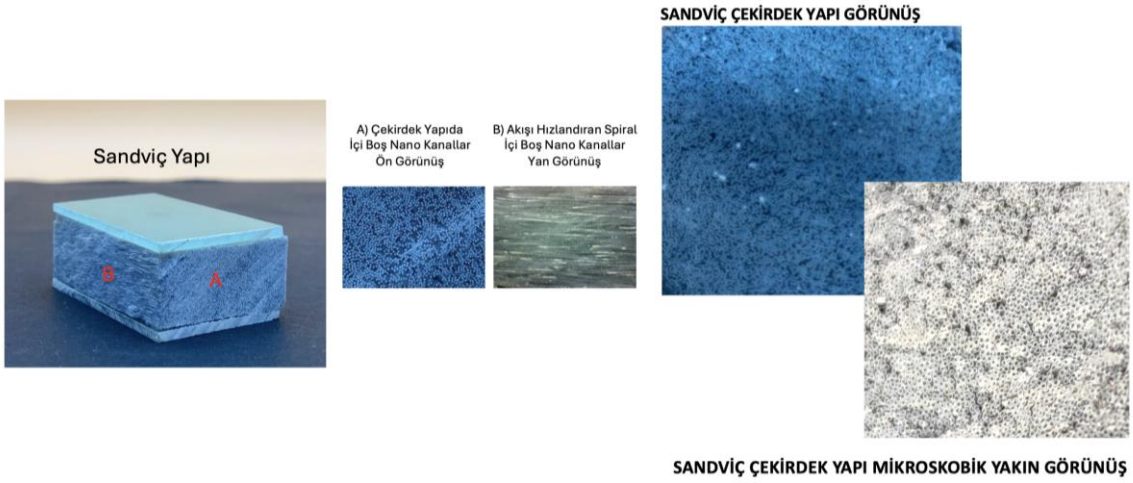
Karbon Fiber Tozu Mekanik Özellikleri	
Yoğunluk	1,76 g/cm^3
Yield	198 g/1000 m
Özısı	0.19 Kal/g.°C
Elektrik Direnci	1.7 x 10^{-3} Ω.cm
CTE	-0,41 $\alpha 10^{-6}$/°C
Termal İletkenlik	0,025 Kal/cm.s. °C
Filament çapı	7 µm
Kesit alanı	0,11 mm^2
Gerilme direnci	3530 MPa (360 kgf/mm^2)
Gerilme modülü	230 GPa (23.5 $10^3 kgf/mm^2$)
Kopma uzaması	%1,5
Basınç Dayanımı (komp.)	1760 MPa
Eğilme modülü	125 GPa
ILSS	110 MPa

Şekil 3.14’te kendi kendini onaran sandviç yapısı gösterilmiştir.



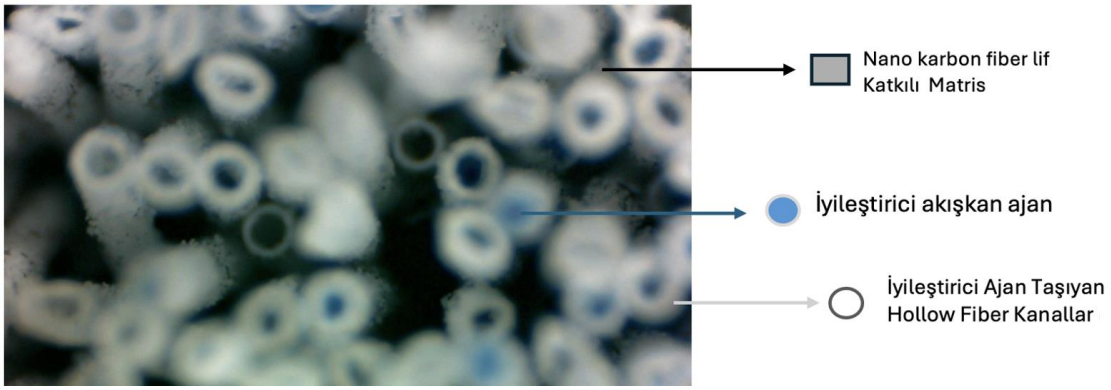
Şekil 3.14. Kendi kendini onaran sandviç yapı gösterimi

Şekil 3.15’te kendi kendini onaran sandviç yapının fiber nano kanallara sahip sandviç çekirdeğinin detaylı görünümü yer almaktadır.



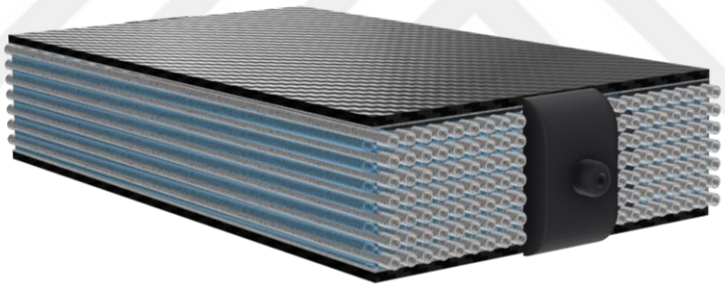
Şekil 3.15. Fiber nano kanallara sahip sandviç çekirdeğinin detaylı görünümü

Şekil 3.16’da kendi kendini onaran fiber nano kanallara sahip sandviç çekirdeğinin mikroskobik görüntüsü yer almaktadır.

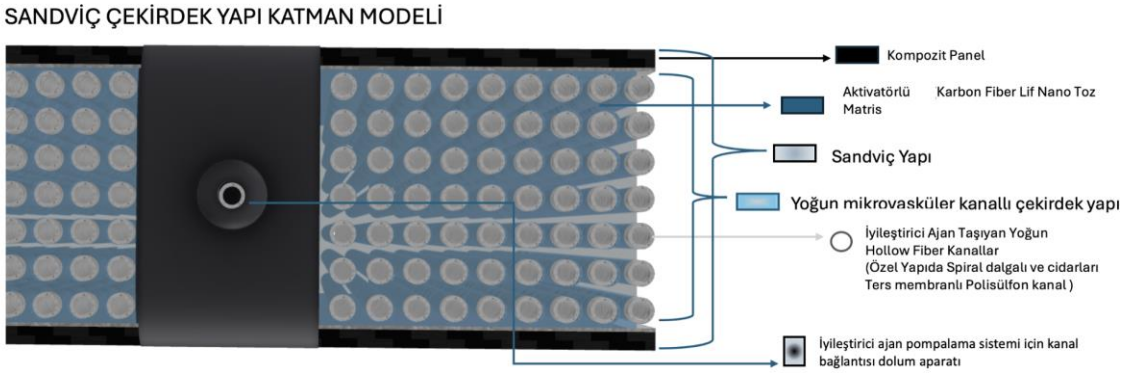


Şekil 3.16. Kendi kendini onaran fiber nano kanallara sahip sandviç çekirdeği mikroskobik görüntüsü

Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de boyutlu simülasyon modeli bulunan otonom onarım mekanizmasına sahip sandviç yapı gösterilmiştir.



Şekil 3.17. 3 Boyutlu sandviç yapı simülasyon modeli

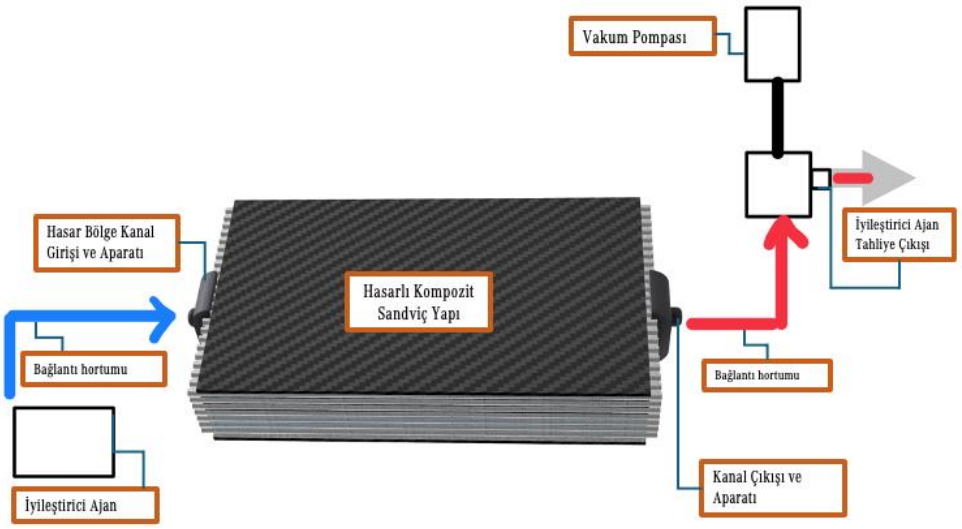


Şekil 3.18. 3 Boyutlu sandviç yapı çekirdeği simülasyon modeli

3.3. Kompozit Sandviç Yapı İyileştirme Sistemi

Darbe testleri ile hasar gören sandviç yapı kullanılan kanat bölgesine göre bir iyileştirme sistem mekanizması içermektedir. İyileştirme düzeneğinde (Şekil 3.19) iyileştirici ajan bağlantı hortumu ve kanal giriş aparatı ile besleme yapılmaktadır. Çıkış aparatı ve bağlantı hortumu kullanılarak sandviç yapı vakum pompasına bağlanmıştır. Düşük basınçta vakum pompası çalıştırılarak iyileştirici ajan belirli bir hızda sandviç yapı kanallarından giriş yaparak mikro çatlak sızmalarının ardından kanallar tıkanmadan vakum pompasının bağlı olduğu yöne doğru akmaya devam etmiştir.

Kanalların yapısı sayesinde âtıl duruma düşmeyen iyileştirici ajan tahliye edilerek tekrar kullanımı sağlanmıştır. Bu sistem, iyileştirici ajanların ömrü ve koşulları dikkate alınarak, tahrip olmayan kanalların tıkanmaması sonucunda çoklu iyileştirme ve onarımın gerçekleştirilebilmesi amacıyla kurulmuştur.



Şekil 3.19. Kompozit Sandviç Yapı İyileştirme Sistemi

Ayrıca vakum pompasının çıkışta kullanılmasının avantajları söz konusu olmuştur:

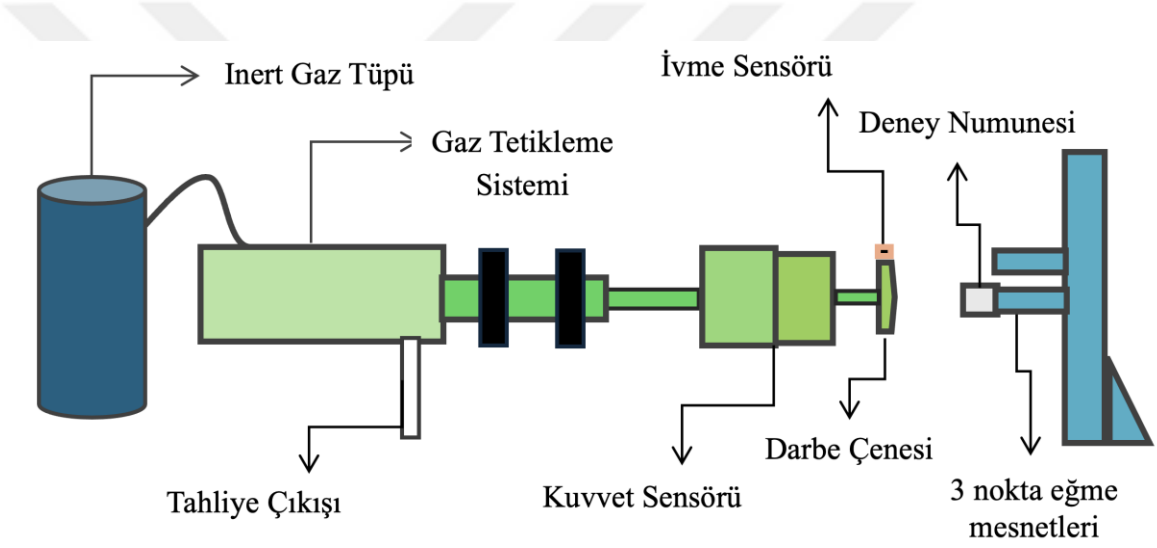
- Enjektör vb. ile iyileştirici ajan akışı sağlanılması EPP (Enject-Pump-Press) Effect oluşumunu engellemiştir. Bu etkiler enjektör ve iğnesi kanal içerisinde bağıl nem ve basınç ile iyileştirici ajanın viskoz yapısının bozarak kristalize yapıya dönüştürdüğünden dolayı kullanılmamıştır.

- Bu sistem ile iyileştirici ajanın direkt sandviç yapı içerisinde kürlenmeye başlamasını sağlamıştır.

- Sürdürülebilir ve tekrar edebilir bir iyileştirme sistemi olmuştur.

3.4. Darbe Deneyleri

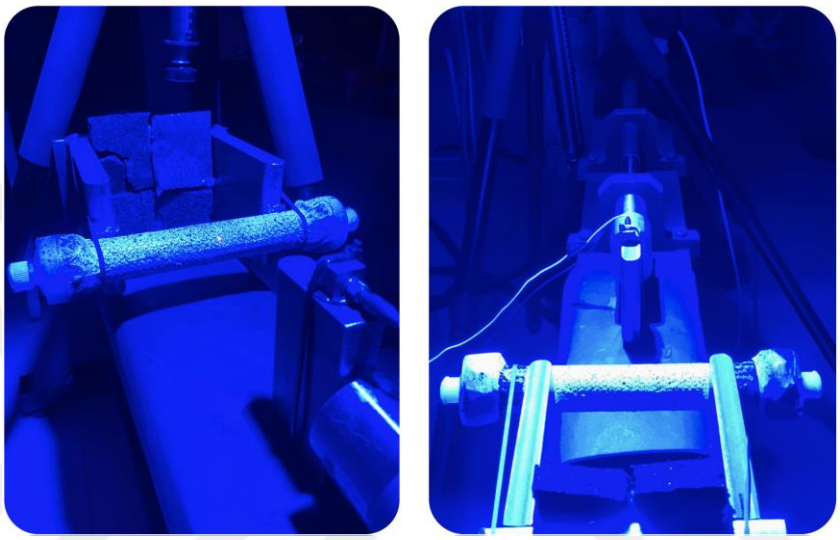
Silindirik sandviç yapı numunelerinde hasar sonrası iyileşme verimliliğin hesaplanması için hasar deneyleri yapılmıştır. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Darbe deney düzeneği şematik görünümü

Hasar deneyleri için impact (darbe), dinamik sıkıştırma ve eğme testleri modifiye edilmiş deney düzeneğinde (Şekil 3.21) kullanılmıştır. Bu testler Split Hopkinson Sıkıştırma Bar (SHCB) sisteminin gaz tabancası ve darbe çenesi kullanarak oluşturulan test düzeneğinde YMC 9800 dinamik sinyal toplama ve analiz sistemi kullanılarak Bursa Uludağ Üniversitesi, Uygulamalı Mekanik ve İleri Malzeme Araştırma Grubu (UMİMAG) laboratuvarında testler gerçekleştirilmiştir.

Bu test düzeneği yüksek hızlı yükleme altında malzemelerin mekanik özelliklerini ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada SHCB test düzeneği 3-nokta eğme deneyi aparatları eklenerek modifiye edilmiştir. Test cihazının çenesi ile kompozit silindirik sandviç numunelere darbe uygulanmıştır. Çok çeşitli yükleme kaynakları için gerinim oranı aralığı sınıflandırılmasında yapılan ölçümlere göre gerinim hızı $10^2 s^{-1}$ belirlenmiştir.



Şekil 3.21. Darbe deney düzeneği

Bu bölümde kendi kendine iyileşebilen sandviç yapıların yüksek hızlı darbe yükleri altındaki iyileşme mertebesinin incelenmesi için bu testler yapılmıştır. Hasar testi bir çarpma çenesinin numuneye belirli bir hızla çarpmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde çene ucu, silindirik sandviç numunenin orta noktasına temas ederek eğilme kuvvetini iletmek için kullanılmıştır. Çene ucu numunenin kesitine uygun şekilde seçilmiştir. Bu test yöntemi malzemelerin yüksek şekil değiştirme hızlarına karşı davranışını, dayanımını ve çarpma sonrası oluşan hasar mekanizmalarını belirlemek için kullanılmıştır. Numuneye maksimum 6,8 m/s hızla çarptırılmıştır. Gerçekleşen çarpma bir deney numunesi üzerinde yaklaşık şekil değiştirme hızı belirlenmiştir. Üç aşamalı bu deneyler üç tekrarlı olarak yapılmış olup ölçülen değerlerin ve benzerliğin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Şekil değiştirme hızı ($\dot{\varepsilon}$) bir malzemenin birim zamanda ne kadar gerindiğini gösteren bir parametredir. Denklem 3.1 şekil değiştirme hızının nasıl hesaplandığını göstermektedir.

(3.1)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Gerinimin (ε)'nin zamana (t) göre türevi olarak Şekil değiştirme hızı ($\dot{\varepsilon}$) ifade edilmiştir. Denklem 3.2' de sadeleşmiş ifadesi yer almaktadır.

(3.2)

$$\varepsilon = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{L_0}\frac{dL}{dt} = \frac{V}{L_0}$$

V malzemenin deformasyon hızını, L_0 malzemenin ilk boyunu ve L ise malzemenin son boyunu ifade eder. Sandviç yapının çekirdek yapısını oluşturan mikrovasküler kanallar, darbe yüküne maruz kaldıklarında kırılabilir, cidarlarının membran yapısı bozulabilir veya ezilebilir. Kanal içlerinden aktarılan iyileştirici ajan mikro çatlaklara ve hasarlı bölgelere sızar. İyileştirici ajan matris içerisinde bulunan aktivatör CFp tozları ile anlık kürlenerek sandviç yapısını otonom tamir eder (Özer, 2021, Türkoğlu, 2020). Bu bağlamda kendi kendine iyileşme sağlanır. Kürlenmesi tamamlanan iyileşmiş deney numunelerine tekrar darbe yüklemesi yapılarak değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 3.22. Kendi kendini iyileştirme sistemine sahip silindirik sandviç yapı numuneleri

İyileşmenin Ölçülmesi

Polimer malzemelerin hasar görmesi durumunda iyileşmelerini sağlayan farklı yöntemler ve benzeşimler bulunmaktadır. Bu yöntemler, her malzeme ve hasar türü için farklılık gösterdiğinden iyileşmenin ne kadar başarılı olduğunu ölçmek ve karşılaştırmak karmaşıklıklar içermektedir. Bir malzemenin kırılma tokluğunu ölçmek için kullanılan bir yöntem açıklanmıştır. Enerji salınım oranı bir çatlak oluşumu veya büyümesi sırasında sistemin kaybettiği enerji miktarını gösteren bir parametredir. Bu parametre kırılma mekaniği teorisinde önemli bir rol oynar. Enerji salınım oranı G ile gösterilir ve birim alan başına düşen enerji kaybı olarak tanımlanır. Oluşan ilk çatlak için enerji salınım oranı şu formülle denklem 3.3'e göre hesaplanır:

(3.3)

$$G = C_3 t_1 \left\langle \sigma_{xx,m0}^{(1)} \right\rangle^2 \lim_{D \to 0} Y(D)$$

Bu formülde $\lim_{D \to 0} Y(D)$ ve C_3 çatlak yoğunluğunun (D) bir fonksiyonu olarak değişken mekanik analizi ile bulunur. Ortalama başlangıç mekanik gerilmesi, $\left\langle \sigma_{xx,m0}^{(1)} \right\rangle$ deneysel veriler kullanılarak kiriş teorisi ile hesaplanır. Kırılma tokluğu ise hem saf hem de iyileştirme testlerinde kırılma oluştuğunda uygulanan yüke orantılı olarak hesaplanır. Enerji salınım oranı, kırılma tokluğunun hesaplanmasında kullanılır. Mod I kırılma tokluğu, K_{IC}, enerji salınım oranı ile şu şekilde (Denklem 3.4) ilişkilidir:

(3.4)

$$K_{\mathrm{Ic}} = \sqrt{EG}$$

Bir malzemenin kırılmaya karşı ne kadar dayanıklı olduğu K_{IC} ile gösterilen düzlem gerinim kırılma tokluğu ile belirlenir. Bir malzeme veya teknik için iyileşme kapasitesi iyileşmeden önceki ve sonraki kırılma tokluğu arasındaki farka bakılarak ölçülür. İyileşme verimliliği (η) denklem 3.5'e göre şöyle hesaplanır (Murphy ve Wudl, 2010):

(3.5)

$$\eta = \frac{K_{IC}^{Healed}}{K_{IC}^{Virgin}} X \ 100$$

İyileşme verimliliği formülünde pay kısmı iyileşmiş (healed) numunenin kırılma tokluğunu, payda kısmı ise saf (virgin) numunenin kırılma tokluğunu ifade eder. Aynı zamanda gerinim enerjisi salınım oranının bir oranı olarak da iyileştirme verimlilikleri ifade edilebilir. Denklem 3.3 ve 3.4'ten kırılma tokluğunun uygulanan yüke orantılı olduğu ve iyileştirme verimliliği hesabını şu şekilde indirgediği (denklem 3.6) görülür (Murphy ve Wudl, 2010, Mauldin ve Kessler, 2010)

(3.6)

$$\eta = \frac{P_{\text{healed}}}{P_{\text{virgin}}}$$

(3.7)

$$\eta = \frac{fHealed - fDamaged}{fVirgin - fDamaged}$$

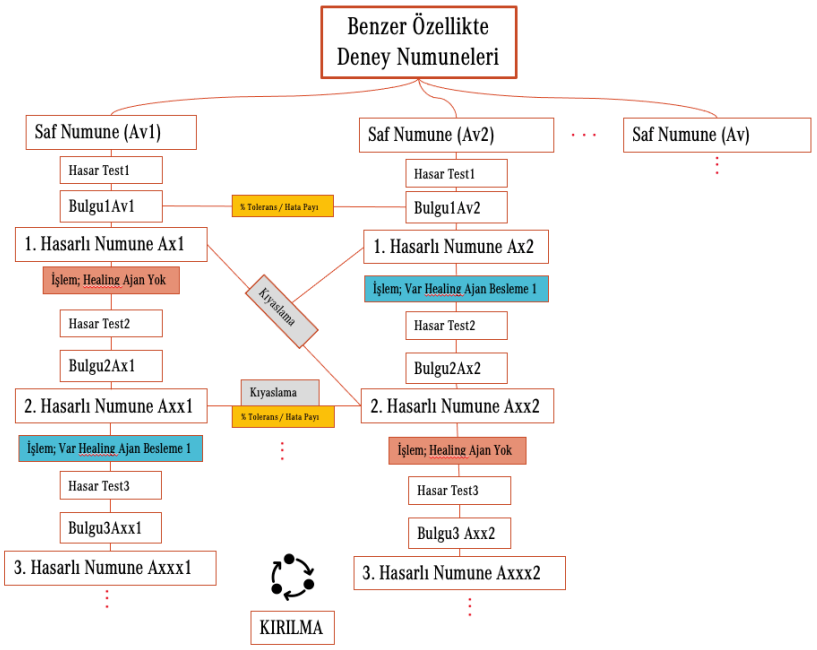
İyileşme verimliliği (η) formülünde (denklem 3.7) *f,* ilgilenilen özellik olup hasar hacmi ve iyileşme hızının hasar oranına oranı açısından literatürden elde edilen tahminlere dayanarak mevcut kendi kendini iyileştirme genel bir yaklaşımı olmuştur (Blaiszik vd., 2010; White, 2001).

Deneyler sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin altında kalan alan absorbe edilen enerjiyi hesaplamak için kullanılır. Alan hesabı için sayısal çoklu entegrasyon yöntemleri denklem 3.8 uygulanabilir (Toohey, 2009; Kim ve Nairn, 2000; Nairn ve Kim, 1992; Anderson, 1995; Follansbee vd., 1985).

(3.8)

$$I = \int_c^d \int_a^b f(x,y)\,dxdy \cong \int_c^d \left(\sum_{i=1}^{n} f(x_i,y)\,.\,\Delta x \right) dy = \int_c^d g(y)\,dy = \sum_{j=1}^{m} g(y_j)$$

Deney şartlarına göre beş veya üç tekrarlı testler yapılarak Şekil 3.23'te gösterilen kendi kendini iyileştirme sistemine sahip silindirik sandviç yapı numuneleri deney prosesi yer almaktadır.

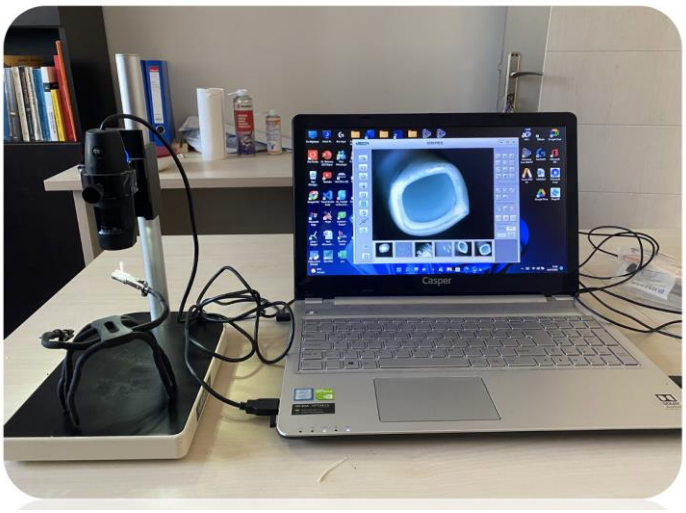


Şekil 3.23. Kendini iyileştirme sistemi deney prosesi

Ayrıca deney test sistematiğinin birkaç avantajı oluşmuştur. Sandviç yapı kırılmadan önce mikrovasküler kanalların kaç hasara kadar tıkanmadan işlev sağladığı, kaç hasar mertebesine kadar iyileşmeye devam edilebileceği, iyileşme ve proses verimliliğinde bulgu yakınsama, toleranslandırma ve deney test işlemlerinde akredite yaklaşım sergileyebilir gibi varsayımlar söz konusu olmuştur.

3.5. Mikroskobik Muayene

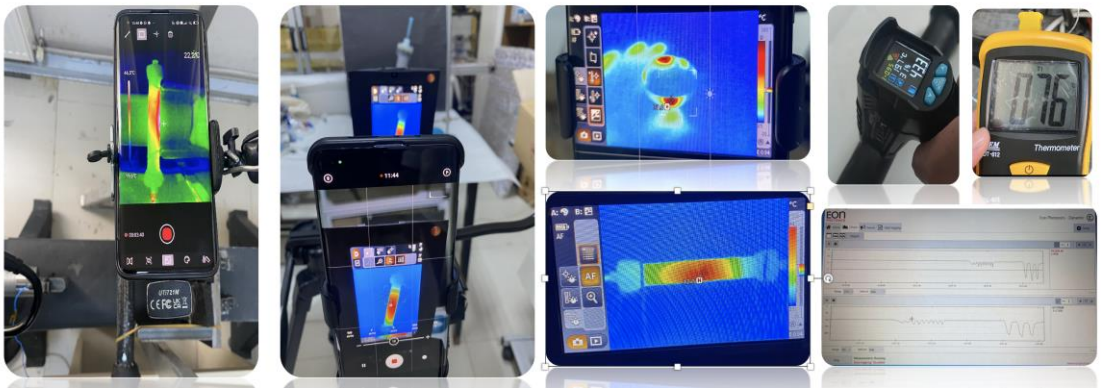
Çok tekrarlı darbe yüklemesi, hasar testlerinden sonra otonom onarım yapılan malzemenin hasar mertebeleri, iyileştirme mekanizmaları ve numunenin kesit görünümü incelenmiştir. Üretilen sandviç yapının hasar öncesi – sonrası ve mikrovasküler kanalların iyileşme vasfı görüntülemesi için Şekil 3.24'te gösterilen ISM PM200S dijital mikroskop cihazı ve ISM PRO bilgisayar yazılımı kullanılarak mikroskobik muayene yapılmıştır.



Şekil 3.24. ISM PM200S dijital mikroskop cihazı ve ISM PRO bilgisayar yazılımı kullanılarak mikroskobik inceleme

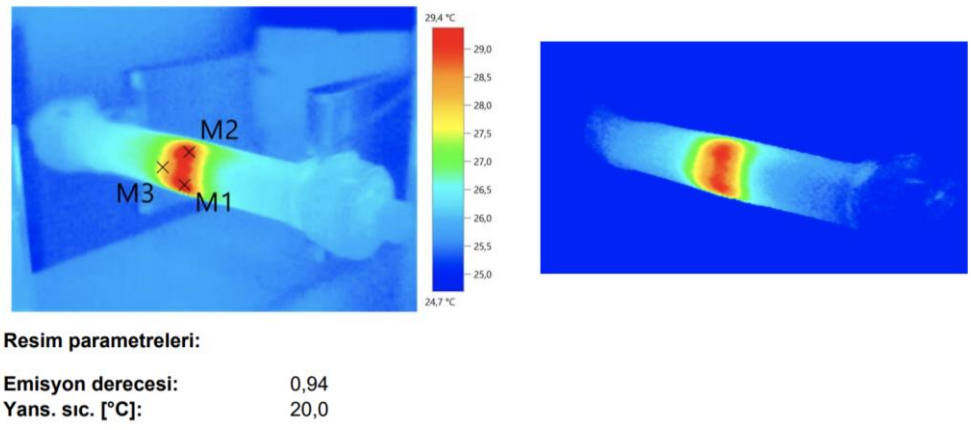
3.6. Termal Görüntüleme

Kendi kendini iyileştiren malzemelerde en kolay kürlenme takibi sıcaklık artışı ile kontrol edilebilmektedir. İyileştirici ajan hasar görmüş çekirdek yapısının kanallarında ezilme, kopma, kırılma ya da ters basınç altında mikro çatlaklara sızma gerçekleşmiştir. Testo t885 ve UNI-T UTi721M marka mobil termal kameraları ve Mestek IR01C infrared termometresi, Eon Photonics marka FBG fiber sensör ve Cem Dt-612 termometresi 100K ohm NTC termistör ısıl çiftler ile matris içerisindeki aktivatör tozları ile reaksiyona giren iyileştirici ajanın anlık kürlenmesi ile ısı enerjisinin açığa çıkması sonucu anlık iyileşmenin ısıl ve süreç takibi (Şekil 3.25) yapılmıştır.



Şekil 3.25. Termal görüntüleme ile iyileşme ısıl değişim sıcaklık ve süre takibi

Darbe deneylerinde yapısal iyileşme kontrolünde kürlenme sıcaklık takibi Testo IRsoft, UNI-T aplikasyonu ve Eon Photonics FBG yazılımları kullanılarak (Şekil 3.26) rapor edilmiştir.



Şekil 3.26. Sıcaklık takibi raporlama görüntüsü

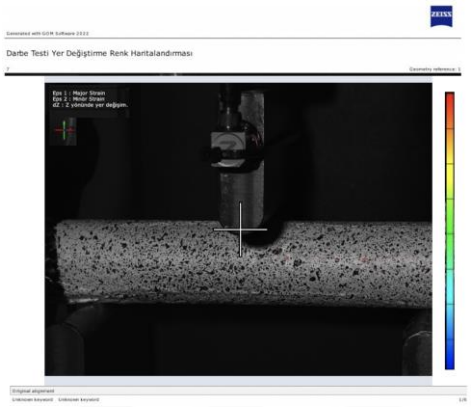
3.7. DIC Testi

Kompozit sandviç yapının darbe deneyleri sırası oluşan deformasyonlar aynı zamanda dijital görüntü korelasyonu yapılarak (Şekil 3.27) Bursa CADEM Metrology'de Gom Aramis SRX DIC cihaz ve yazılımları ile anlık tahribatsız deformasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.27. DIC testi darbe deney düzeneği

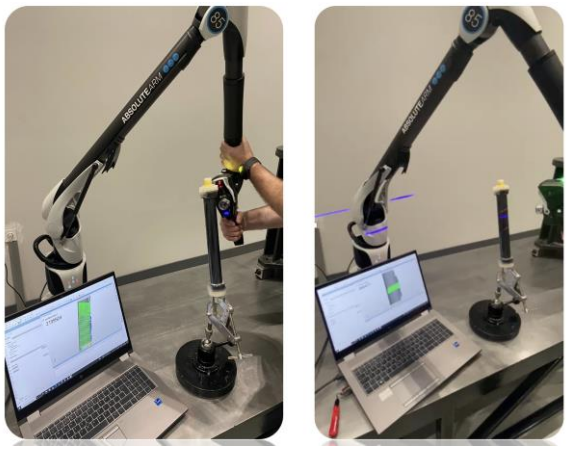
Darbe deneyleri esnasında yapılan DIC testlerin deformasyon görüntülemesi ve strain(gerinim)değerleri Zeiss Gom yazılımı kullanılarak rapor edilmiştir (Şekil 3.28).



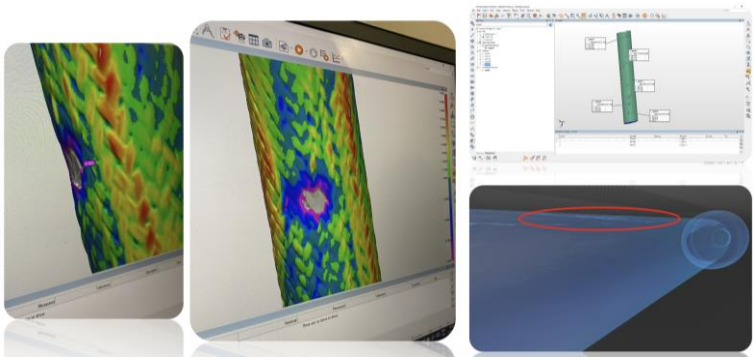
Şekil 3.28. Zeiss Gom yazılımı kullanılarak DIC raporlama görüntüsü

3.8. Metrolojik Deformasyon Ölçüm Testi

Kompozit sandviç yapının darbe deneyleri sırası oluşan iyileştirme öncesi hasarsız numunenin sıralı ve çoklu iyileştirmeler sonrası kompozit sandviç yapı üzerindeki deformasyonların yapısal analizleri için imalat ve hasar sonrası kalite kontrol ölçümleri ve yüzey yapısal sağlık kontrolünde GD&T uygulama ve toleranslandırma için 10mikron hassasiyette metrolojik tahribatsız yüzey lazer taraması (Şekil 3.29) Hexagon Türkiye tarafından Absolute lazer tarama cihaz ve PolyWorks yazılımları (Şekil 3.30) ile anlık deformasyon ölçümleri gerçekleştirip rapor edilmiştir.



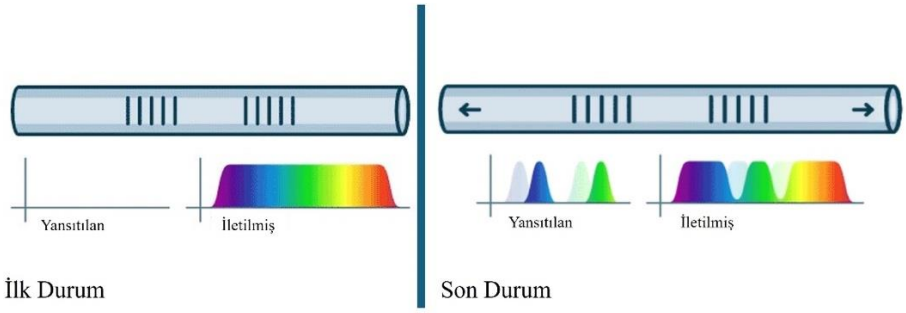
Şekil 3.29. Metrolojik Lazer tarama ile deformasyon ölçümleri



Şekil 3.30. Metrolojik Lazer tarama ile deformasyon ölçümleri raporlama görüntüleri

3.9. FBG Sensör Kullanımı

FBG sensörler yani fiber bragg ızgaralar, gelen ışığın yalnızca belli bir dalga boyunu (bragg dalga boyu) geri yansıtıp diğerlerini geçirmeleriyle çalışan optik filtrelerdir (Şekil 3.31). Geri yansıyan dalga boyu, FBG'nin yapısına bağlıdır ve değişik fiziksel etkilere duyarlıdır. Bu sayede FBG'ler gerinim, sıcaklık, titreşim, ivme gibi parametreleri ölçmek için sensör olarak kullanılabilirler (Vicente vd., 2023, Wen vd., 2020, Kefal, 2019).



Şekil 3.31. FBG sensör çalışma prensibi (Eon Photonics, 2023).

Ermaksan Eon Photonics tarafından üretilen FBG sensör (Şekil 3.32) ve ölçüm cihazları, tek modlu standart fiber optik kabloların belli bir kısmında UV ışını ile fiber 9 mikrometre çekirdeğinde düzenli 1-10 mm uzunluğunda bir ızgara oluşturularak hazırlanmaktadır. Bu ızgara, gelen ışıktan sadece bir dalga boyunu (bragg dalga boyu) geri yansıtır. Geri yansıyan dalga boyu, FBG'nin yapısına bağlıdır ve değişik fiziksel etkilere duyarlıdır. Bu şekilde, FBG'ler gerinim, sıcaklık, titreşim, ivme gibi parametreleri ölçmek için sensör olarak kullanılabilirler (Eon Photonics, 2023).



Şekil 3.32. Eon Photonics tarafından üretilen FBG sensör

FBG sensörler, gelişen yüksek teknoloji sayesindeki özelliklerle akıllı malzeme olarak kompozitlere gömülerek yeni nesil uzay ve hava araçlarının (uçak, iha, rüzgâr türbini, helikopter, roket, uydu vb.) uçuş sırasındaki durumlarını izlemek ve kontrol etmek için kullanılmaktadır (Ermaksan, 2023).

FBG'ler, sıcaklık değişikliğine duyarlı olan optik elemanlardır. Sıcaklık arttıkça veya azaldıkça bragg dalga boyu da değişir. Bu özellik sayesinde FBG'ler sıcaklık sensörü olarak kullanılabilirler. Sıcaklık değişikliği (ΔT) ile dalga boyu kayması arasındaki ilişki (denklem 3.9) gösterilir (Altinkaynak, 2018, Zhao ve Liao, 2004):

(3.9)

$$\Delta\lambda_{BT} = (\alpha + \xi)\Delta T$$

ξ: fiber termo-optik katsayısı

α: fiber termal uzama katsayısı

Q faktörü (denklem 3.10), alıcının kalitesini belirleyen bir parametredir ve OSNR ile ilişkilidir. OSNR (Optical Signal to Noise Ratio), optik sinyalin gürültüye oranını ifade eden önemli bir parametre olup Q faktörü ne kadar yüksekse, alıcı o kadar iyi çalışır ve hat o kadar az gürültü içerir (Altinkaynak, 2018).

(3.10)

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

Bu formülde I_1 ve σ_1, Gauss darbesinin ortalama ve standart sapmasını, I_0 ve σ_0 ise Gauss gürültüsünün ortalama ve standart sapmasını gösterir. OSNR'nin hesaplanması ve Q-faktörü ile ilişkisi denklem 3.11'deki gibidir (3.11)

$$Q_{db} = 20\log\sqrt{\text{OSNR}}\sqrt{\frac{B_0}{Bc}}$$

Denklemdeki B_0, foto detektörün ışığı elektrik sinyaline dönüştürdüğü optik bant genişliğini, B_c ise alıcı filtresinin elektrik sinyalini işlediği elektriksel bant genişliğini ifade etmektedir (denklem 3.12). Bu durumda,

(3.12)

$$\text{Q} = \text{OSNR} + 10\log\frac{B_0}{Bc}$$

Denklem 3.12'den yola çıkarak Q-faktörü, OSNR ile doğru orantılı bir parametredir. Gürültü seviyesi, optik spektrum analizörleri (OSA) veya örnekleme osiloskopları ile ölçülür ve bu ölçümler Bm (ölçülen spektral genişlik) adı verilen bir değere bağlıdır. Bm, OSA'nın ölçüm aralığını belirler ve tipik olarak 0.1 nm veya 12.5GHz civarındadır (Altinkaynak, 2018). Deney düzeneğinde (Şekil 3.33) nano kanallardan geçebilen bir 100 mikron incelikte sensörler kullanılmıştır. FBG sensör aynı zamanda sandviç çekirdeği ve sleeve (örgü) kompozit arasına monte edilerek sandviç üretimi yapılmıştır. Kürlenme, sıcaklık, gerinim (strain) değerleri Eon phonics yazılımı ile kaydedilmiştir



Şekil 3.33. Kompozit sandviç yapı içerisine gömülü FBG sensör deney numunesi

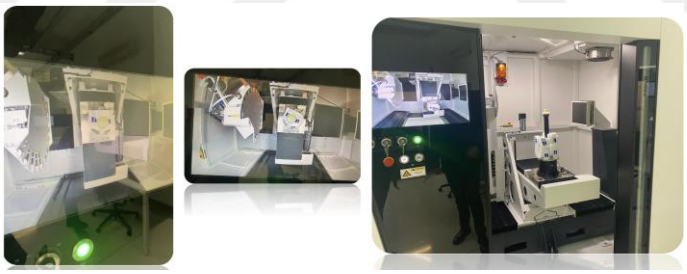
3.10. 3D X-Işını Tomografik Görüntüleme

Tahribatsız yapısal sağlık kontrolü, volümetrik iç yapısı görüntülemede Zeiss Metrotom (Şekil 3.34) cihazı ile yüksek son teknoloji endüstriyel 5-50 mikron hassasiyette 3D tomografi çekimleri yapılmıştır.



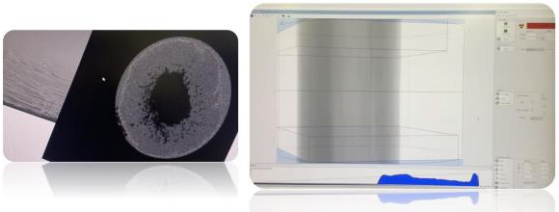
Şekil 3.34. Zeiss Metrotom 3D X-Işını cihazı

Sandviç iç yapısının hasarsız ve otonom onarım uygulamalarından sonra iyileşmiş iç yapısının incelenmesi (Şekil 3.35) 3D X-Işını tomografik görüntüleme ile yapılmıştır.



Şekil 3.35. Hasarsız, hasarlı ve iyileştirme sonrası 3D X-Işını Tomografik görüntüleme

Kompozit sandviç iç yapısının hasarsız, hasar sonrası ve otonom onarılmış iç yapısının incelenme Zeiss Gom Inspect ile (Şekil 3.36) raporlanmıştır.



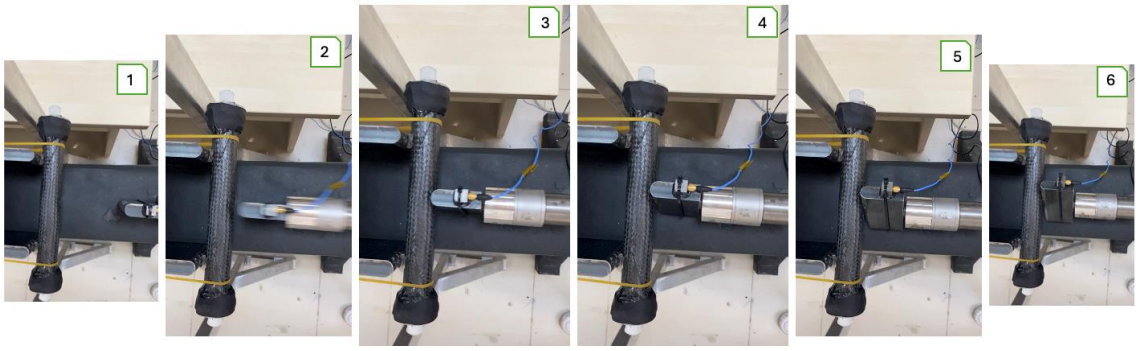
Şekil 3.36. 3D X-Işını Tomografik görüntüleri incelemesi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Rüzgâr türbin kanatlarının çevrim esnasında yüklemelere, dış basınca, üretim ve yapısal kaynaklı kusurlara maruz kalan çapraz katmanlı kompozit kanat panelleri burkulma, bükülme, darbe ve delinme davranışları ile etkilenmektedir. Burkulma, kalınlık ve lif hizalaması, çapraz katmanlı halkaların ve silindirik kabukların burkulma dayanımını etkilemektedir. Hibrit laminant kompozitler, cam ve karbon elyaf kombinasyonlarıyla farklı bükülme özellikleri göstermektedir. Düşük hızlı darbelerde kompozitlerin ayrılma eşiği yüklerini ve enerji emilimini belirlemiş ve yüksek hızlı darbelerde ise kompozit plakaların balistik limitini ve delinme modlarını etkilemiştir (Bladena, 2022, Jensen ve Branner, 2023). Bu bölümde mikrovasküler kanallara sahip otonom onarımlı silindirik sandviç yapının çarpma davranışları darbe deneyleri ile incelenmiştir. Çarpma hasarı, iyileşme oranları ve kırılma şekilleri mikroskobik muayene ve tahribatsız test yöntemleriyle değerlendirilmiştir.

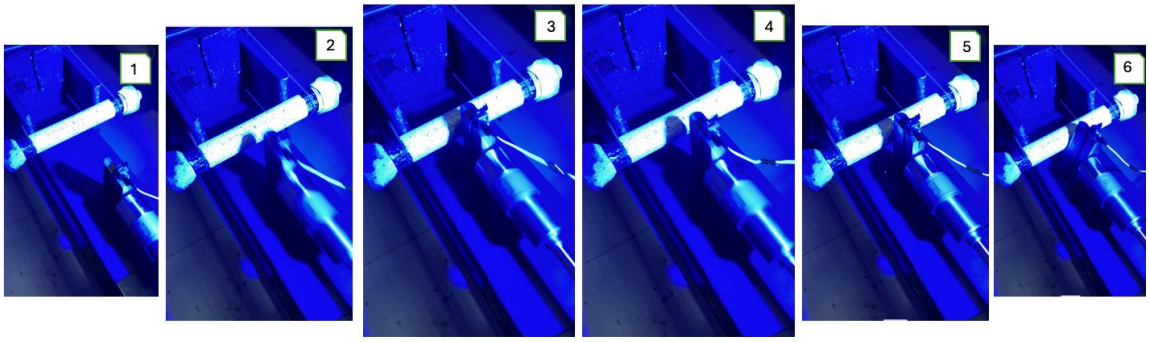
4.1. Darbe Deney Testleri

Darbe deneyleri ağır çekim kayıtlarında video kesitlerinin incelendiğinde Şekil 4.1'de gösterilen saf numunelerin ilk hasarlarda SHCB düzeneğinden fırlatılan darbe çenesine karşın deney numunesi çarpma anında ve hemen sonrasında rijit davranıp darbe çenesinin sağa doğru yatımına neden olmuştur. Fakat bu durum tüm deneylerde aynı olmamıştır.



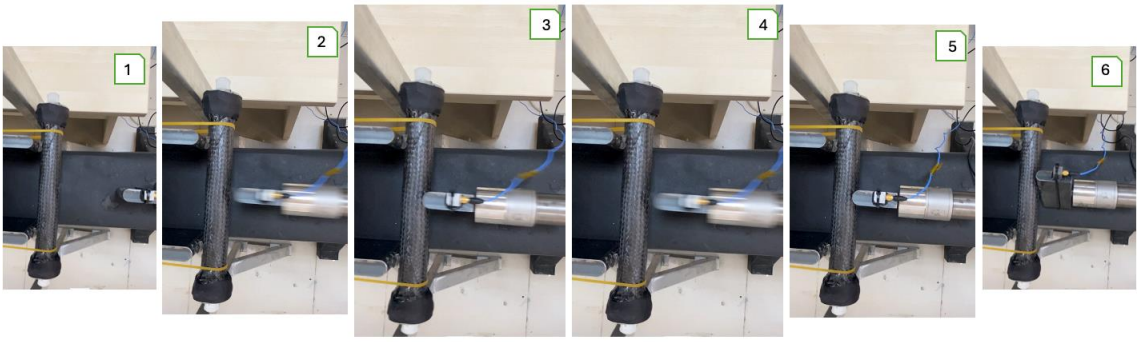
Şekil 4.1. Darbe deneyleri video kesitleri

Deney numunelerin testlerinde yukarıda bahsedilen durum farkı, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te açıkça gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Darbe deneyleri çarpma davranışı 1

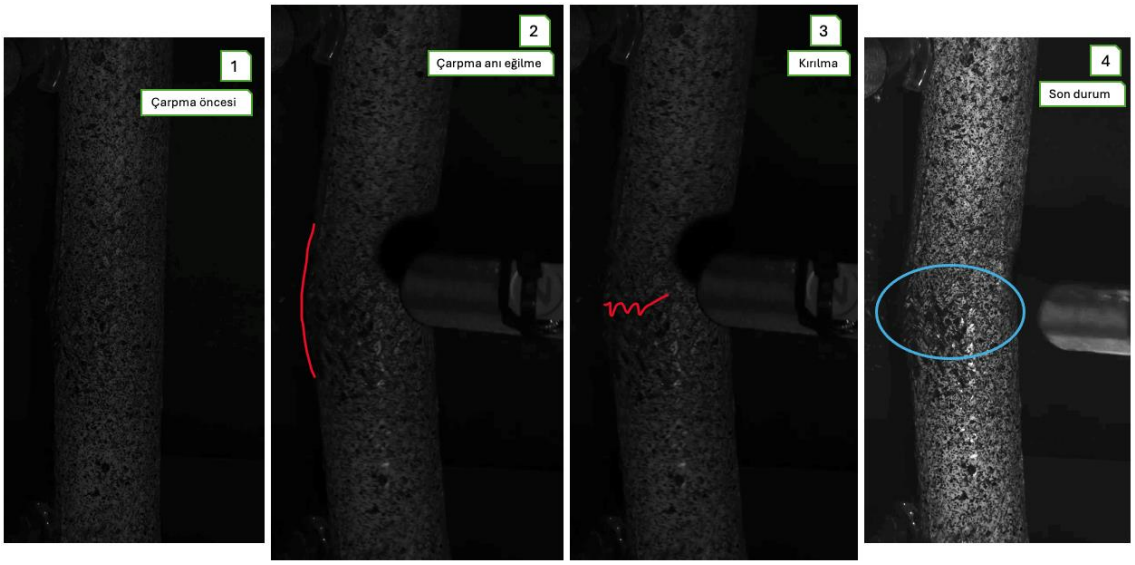
Dinamik darbe çenesinin çarpma anı esnasında oluşan ve numunelerin tepki kuvveti ile şekil değişimi Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'lerin video kesit fotoğraflarının 3. adımında gösterilmiştir. Bu an içerisinde 4. adımdaki gibi bir geri çekme yapıp 5. adımda tekrar numuneye şiddetle çarpma gerçekleşmiştir. 6. adımda ise darbe çenesinin sağa doğru yatışı '/' gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3. Darbe deneyleri çarpma davranışı 2

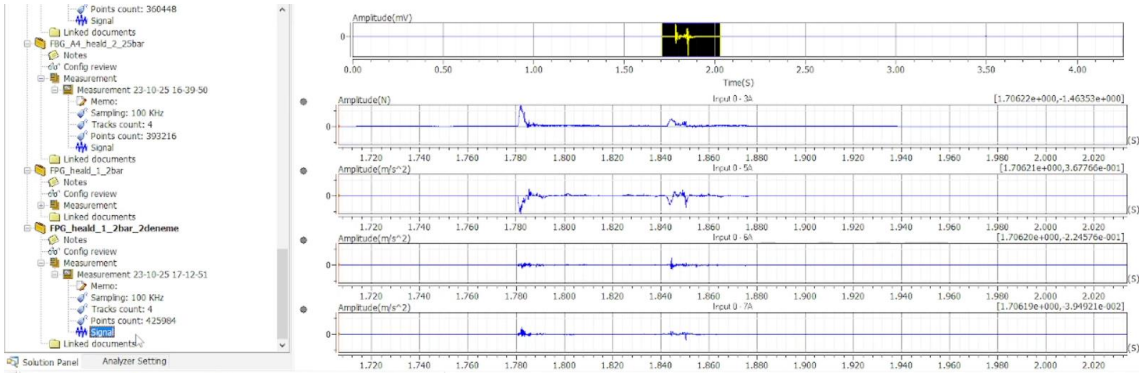
Silindirik kompozit sandviç yapı çekirdeği köpük gibi davranış sergilemesi, kompozit ile ayrılma (debonding) meydana gelmesi, sabitlenmeyen lastik ile dengede tutturulan serbest deney numune konumlandırılması iyileştirme sonrası iyileştirici ajanın debonding bölgelerinde kürlenip onarıldıktan sonra yapılan darbe deneylerinde oluşan deney numunelerinin tepki kuvvetini bu bahsedilen varyasyonların etkileri oluşmuştur.

Şekil 4.4'te yorulma ömrünü tamamlamış çatlak birleşmelerinin meydana geldiği kırılma anı gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Deney numunesinin kırılma anı

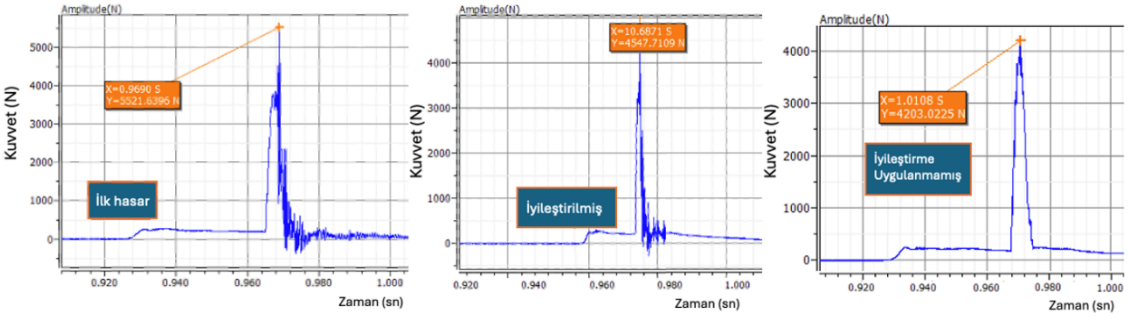
Şekil 4.5'te darbe testleri yük sensörü ve ivme sensör verileri YMC 9800 dinamik sinyal toplama ve analiz sisteminden alınan veriler işlenerek test sonuçları kaydedilmiştir. Yoğunlukları yaklaşık 300 kg/m^3 olan deney numunelerinin, tekrarlanan deneylerde aritmetik ortalaması alınmış olup darbe şiddetine göre yaklaşık otonom onarım yüzdesi minimum %6,4 maksimum %92 ve iyileşme verimliliği (η) %62-88 arasında hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. YMC 9800 dinamik sinyal toplama ve analiz sistemi veri kaydı

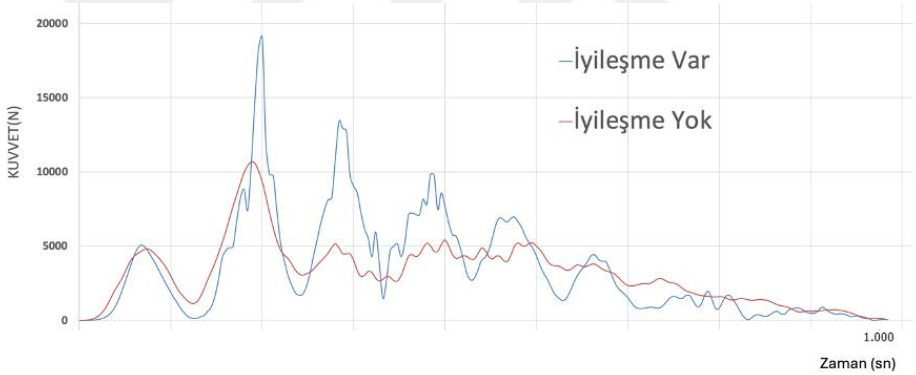
Şekil 4.6'da gösterilen saf (virgin) deney numunesine ilk hasar verilmiş olup iyileştirilmiş ve ardından tekrar hasara uğratılmıştır. Diğer eşlenik numuneye ise ilk hasar verilip iyileşme uygulanmadan tekrar hasar verilmiştir. İki virgin numune %99,85'lik bir

benzerlik tepki kuvvetine sahip olup iyileştirme ile iyileştirme uygulanmamış deney numunesi karşılaştırılmıştır.



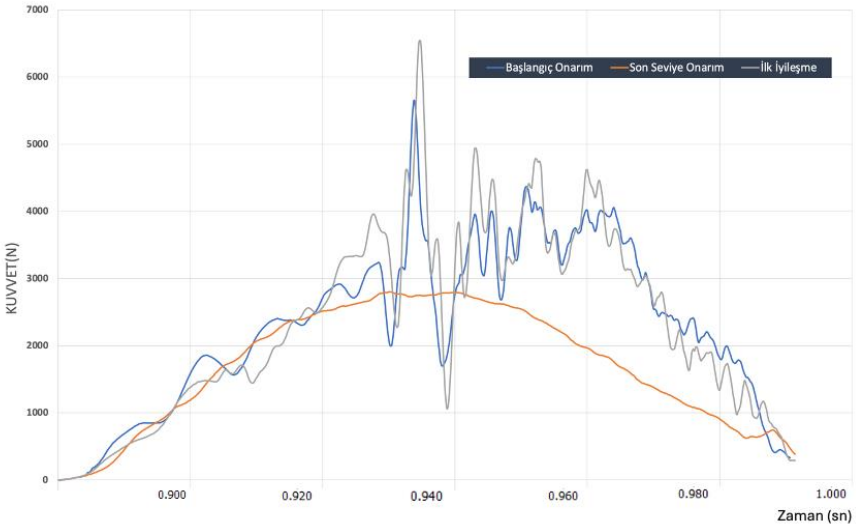
Şekil 4.6. İyileştirilmiş ve iyileşme uygulanmamış deney numunesi karşılaştırma

Şekil 4.7'de yaklaşık %99,45'lik bir eşlenik oranı olan deney numunelerinin hasar sonrası iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş tepki kuvvetleri karşılaştırılmıştır.



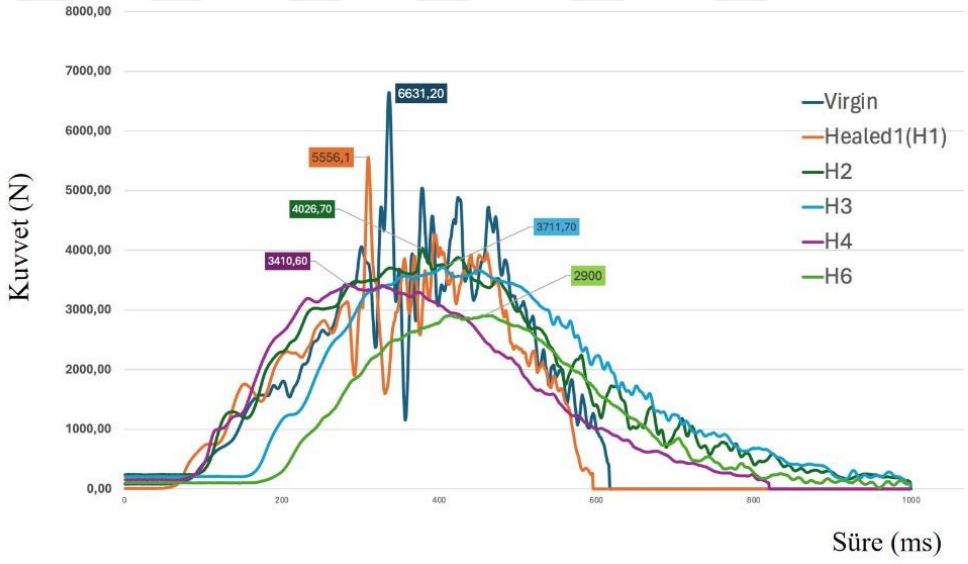
Şekil 4.7. Otonom onarımlı ve onarım uygulanmayan deney numuneleri tepki kuvveti karşılaştırılması

Şekil 4.8'de deney numunelerinin hasar sonrası ilk iyileşme ve başlangıç onarımları grafiği ve çatlak birleşimi ve ayrılma (debonding) onarımı ile iyileştirici ajan ile değişen tepki kuvveti grafiği karşılaştırılmıştır.



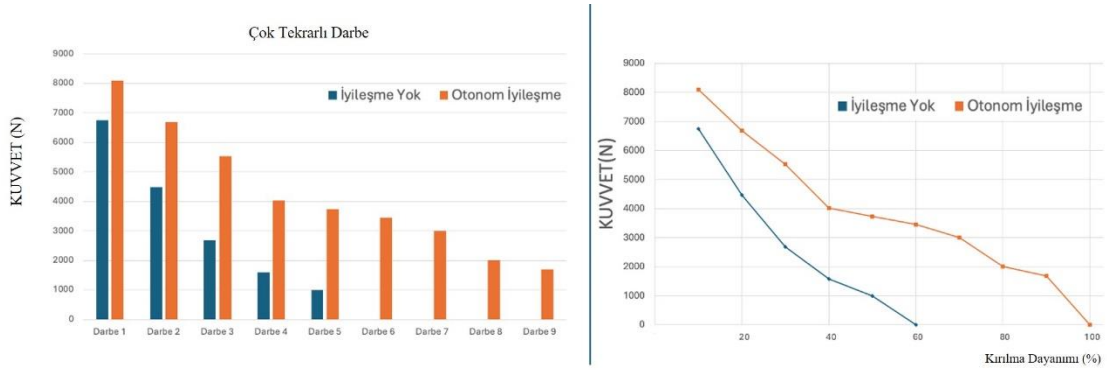
Şekil 4.8. Başlangıç onarımları ve son seviye onarım sonrası tepki kuvvet farklıkları grafiği

Şekil 4.9'da her hasar sonrası onarım sistemi uygulanan deney numunesi tepki kuvveti grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Çok tekrarlı, hasar sonrası onarım sistemi uygulanan deney numunesi tepki kuvveti grafiği

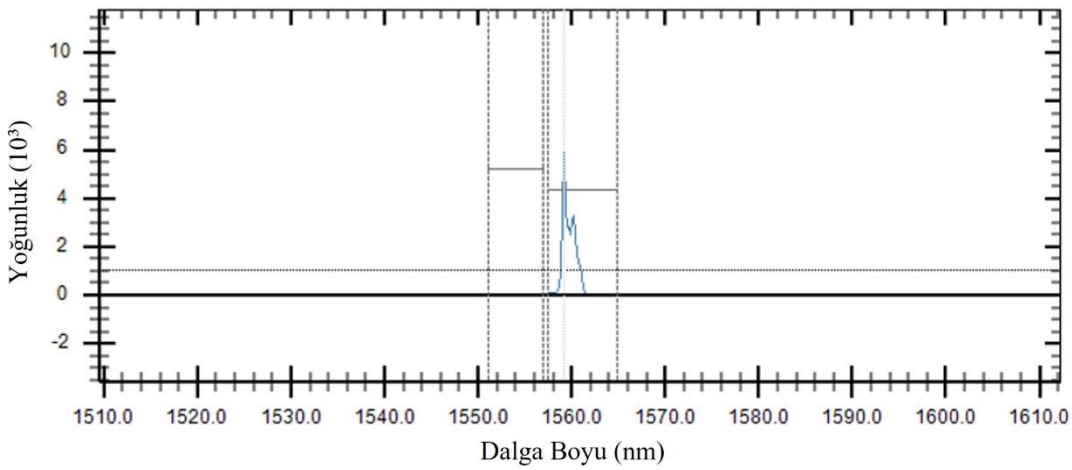
Şekil 4.10'da %99,6'lık eşlenik deney numunelerinin iyileştirme verimliliği yaklaşık %43,14 olup otonom onarım sistemi ile artan yorulma ömrü grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.10. İyileştirme sistemi ile artan hasar dayanım grafikleri

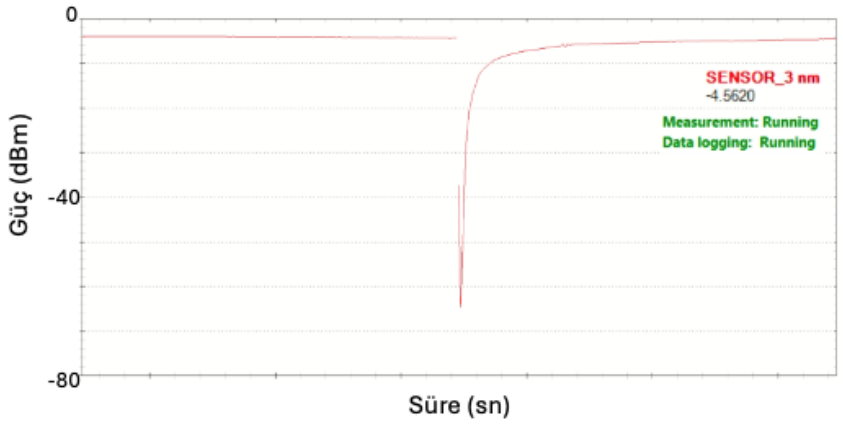
4.2. FBG Sensör Testi

Eon photonics FBG sensörleri ile yapılan darbe testlerinde 5nm'lik bir dalga boyu kayması gerçekleşmiş olup bu değer oldukça küçük ve ölçüm tolerans aralığında olmuştur. Darbe deney testlerinin uygulandığı laboratuvar sıcaklığı neredeyse sabit olduğundan ΔT'nin 0 olduğu varsayılmıştır. 1550 nm dalga boyları için (Şekil 4.11) dalga boyunun sıcaklığa duyarlılığı sırasıyla yaklaşık 10 pm/°C olarak tespit edilmiştir.



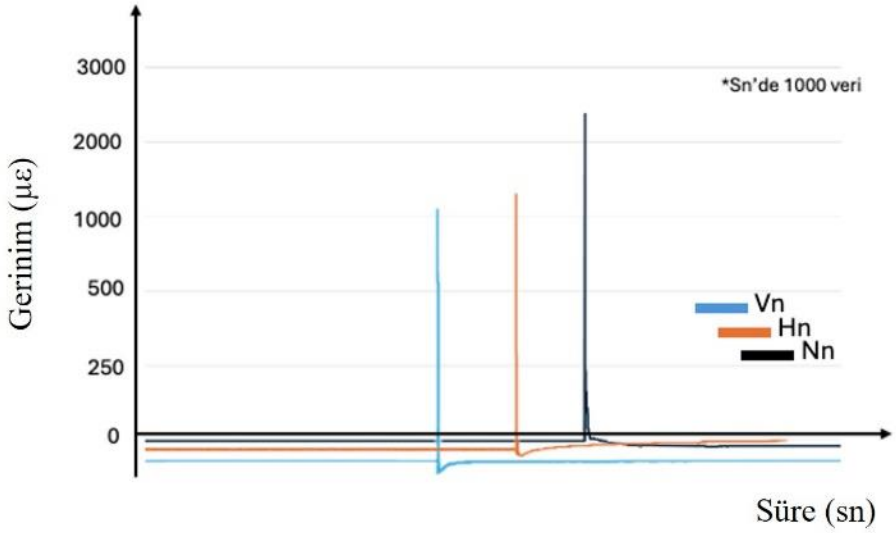
Şekil 4.11. Kullanılan FBG fiber sensörün dalga boyu ve yoğunluk ilişkisi

Testler, sandviç yapıya, darbe çenesinin temas ettiği noktadan merkeze olan uzaklığa eşit ve merkez noktasından yukarı yönlü 90^o dik olarak örgü kompozit ile sandviç çekirdeği arasına konumlandırılan FBG sensör ile yapılmıştır. 20^{o}C'de iletilen sinyal gücü Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



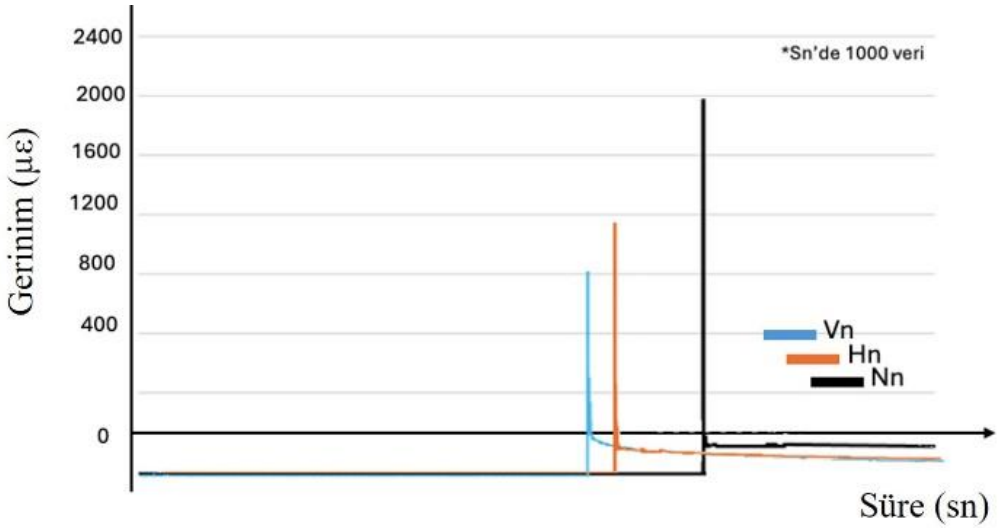
Şekil 4.12. 20°C'de kullanılan FBG sensörden iletilen sinyal gücü

FBG sensörler ile yapılan darbe testlerinde saniyede 1000 veri kaydedilerek yaklaşık 126000 verinin işlenmesi sonucunda bu takip yapılmıştır. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te mavi renkteki με birimli gerinim grafiği (Vn) saf hasarsız numunenin, turuncu renkteki grafik hasar sonrası iyileştirilmiş numunenin (Hn) siyah turuncu renkteki grafik ise hasar sonrası iyileştirilmemiş numunenin (Nn) aritmetik ortalaması alınan gerinim değerlerini temsil etmiştir.



Şekil 4.13. Deney numunesi, FBG sensör ile gerinim ölçümü 1

Şekil 4.13'te FBG sensörün konumlandırılan bölgesinden alınan gerinim değerleri Vn için 1273με, Hn için 1437με ve Nn için ise 2189με gerinim değerleri belirtilmiştir. Şekil 4.14'te gösterilen darbe deneyi sonuçlarına göre Vn, 807 με Hn, 1091με ve Nn ise 1908με'dir.



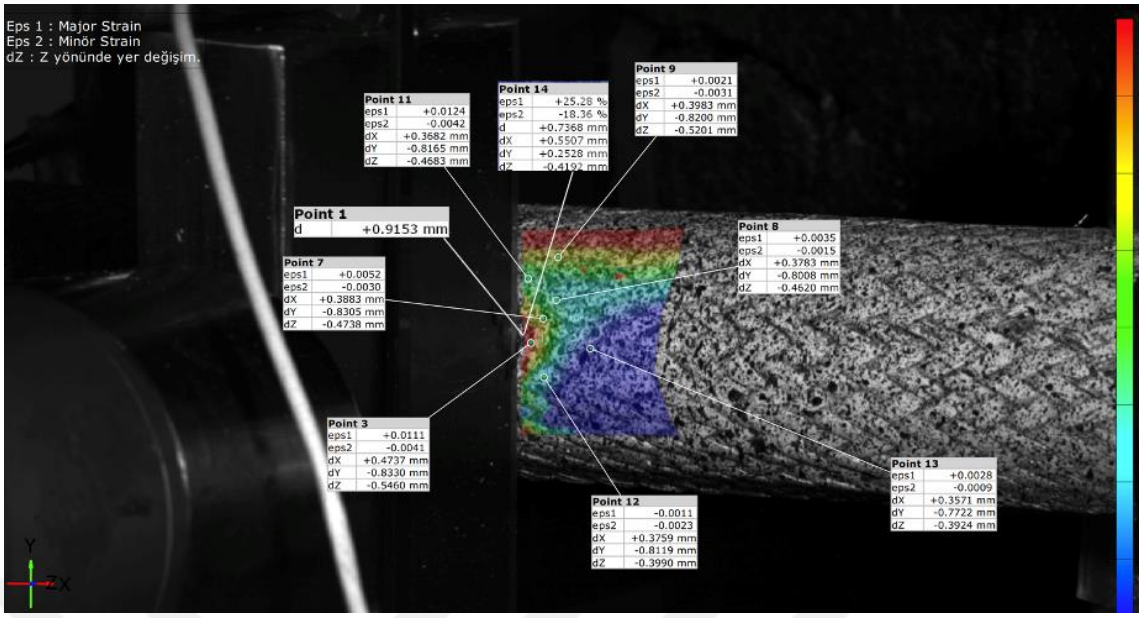
Şekil 4.14. Deney numunesi, FBG sensör ile gerinim ölçümü 2

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te FBG sensörlerden alınan verilere göre gerinim değerleri gösterilmiştir. 0'un altında kalan başlangıç FBG sensörlerdeki dalga boyu ve yoğunluk (intensity) ilişkisine göre yaklaşık 5nm dalga boyu kaymasından kaynaklanıp tolerans aralığında yer almıştır.

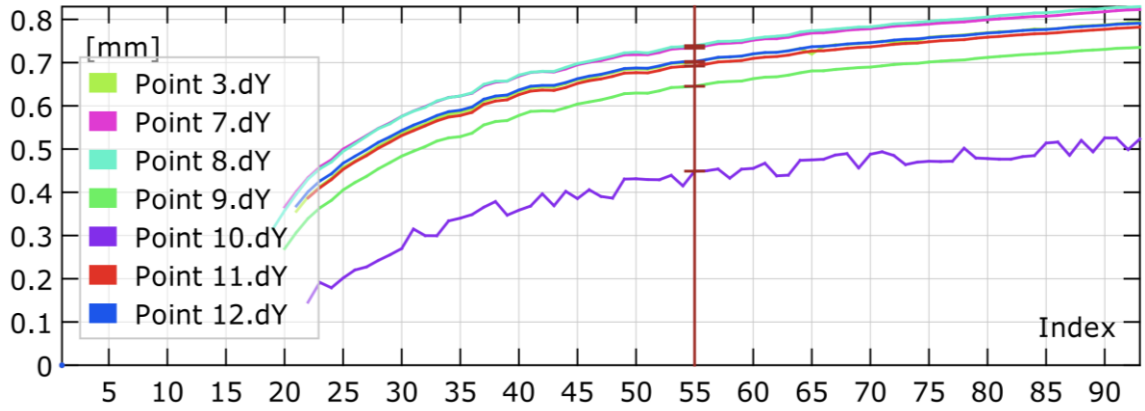
Tekrarlı darbe testleri sonucunda, birincil deney numunesi testlerinde ortalama iyileşme verimliliği %42,37 iken, ikincil deney numunesi testlerinde iyileşme verimliliği %65,6 olarak hesaplanmıştır.

4.3. DIC Tekniği Testi

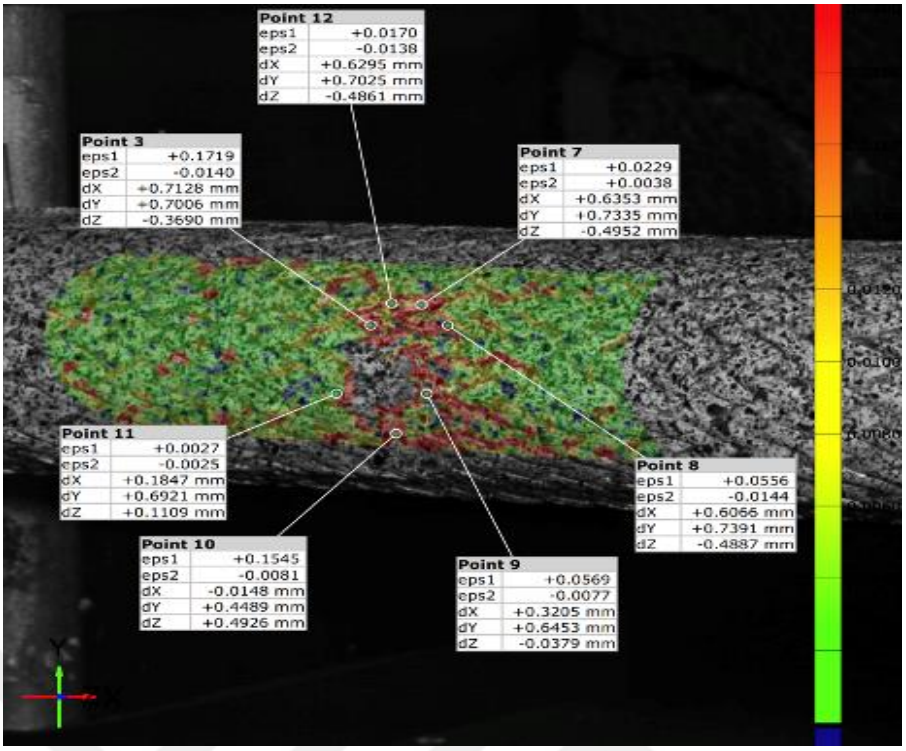
DIC tekniği ile ölçümler Cadem Metrology firması tarafından Aramis 12M ve Gom Test Controller kameraları kullanılarak darbe testlerinin çekimleri yapılmıştır. Şekil 4.15'ten Şekil 4.18'e kadar darbe testi ile oluşan yer değiştirme ve gerinim renk haritası ve grafiği gösterilmiştir.



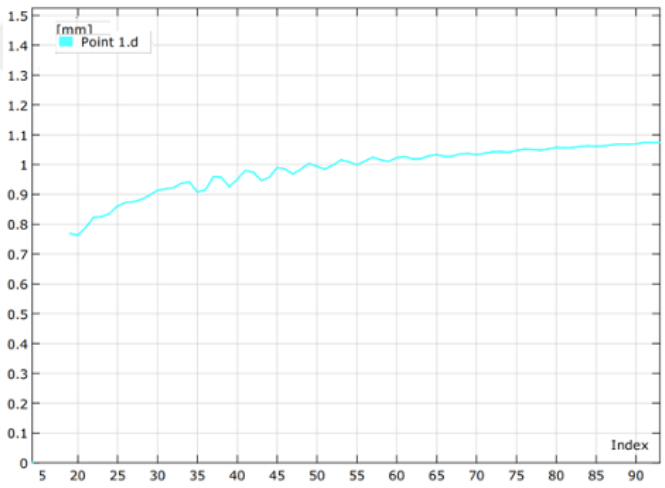
Şekil 4.15. Darbe testi ile oluşan yer değiştirme renk haritası ve noktasal değerleri



Şekil 4.16. Darbe testi ile oluşan noktasal yer değiştirme grafiği

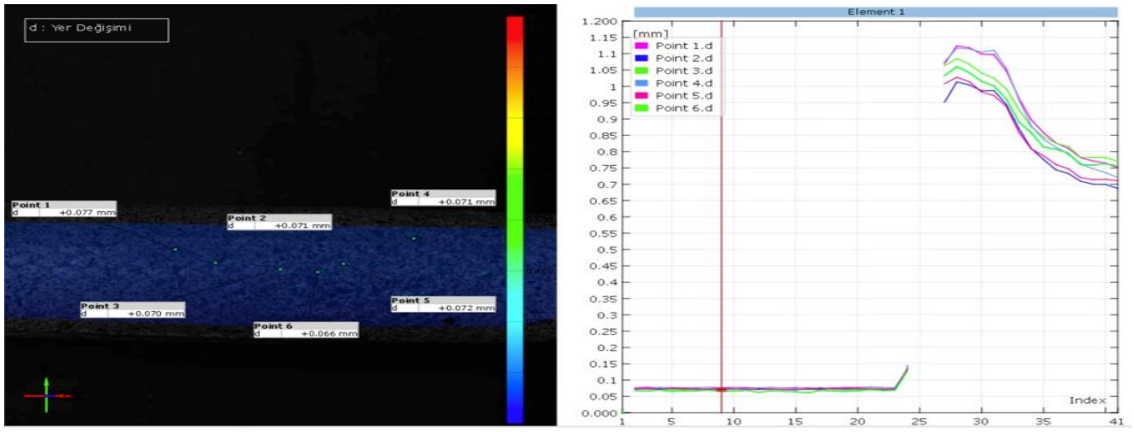


Şekil 4.17. Darbe testi ile oluşan gerinim renk haritası ve noktasal değerleri

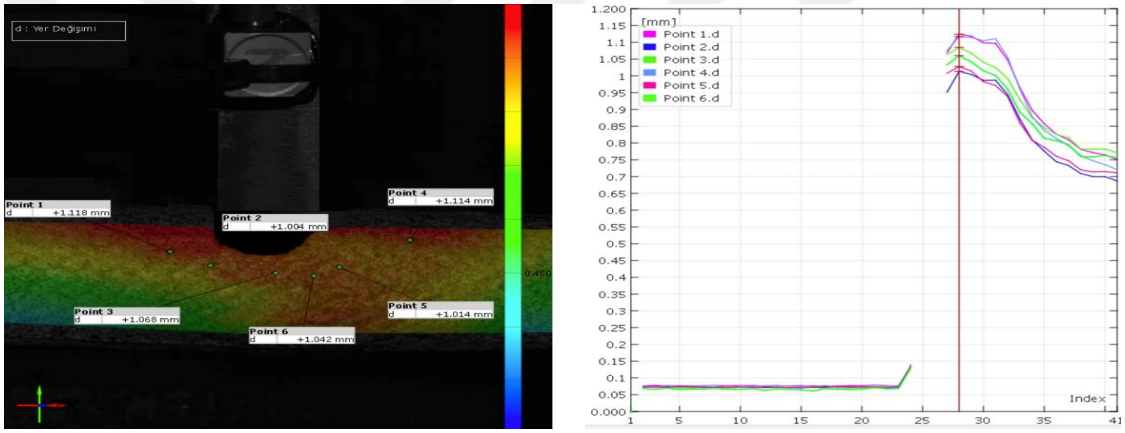


Şekil 4.18. Darbe testi ile oluşan noktasal yer değiştirme grafiği

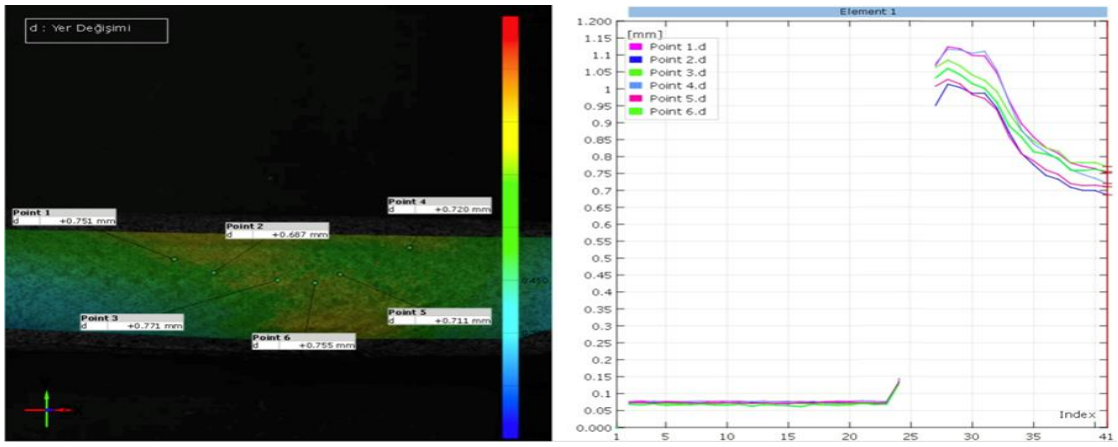
Dinamik darbe testinde 3 nokta eğme düzeneğinde mesnete sabitlenmeyen numune 6DOF serbestlik derecesinde olduğu için 3 koordinatta hareket etmekte numunenin titreşim ve salınım kaynaklı görüntüde gürültü nitelikli yer değiştirmeler, majör ve minör gerinimler oluşmaktadır. Ayrıca darbe testine dik açıyla yapılan DIC üst görünüşler Şekil 4.19-4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Darbe testi öncesi yer değiştirme renk haritası ve noktasal değerler grafiği



Şekil 4.20. Darbe anında yer değiştirme renk haritası ve noktasal değerler grafiği

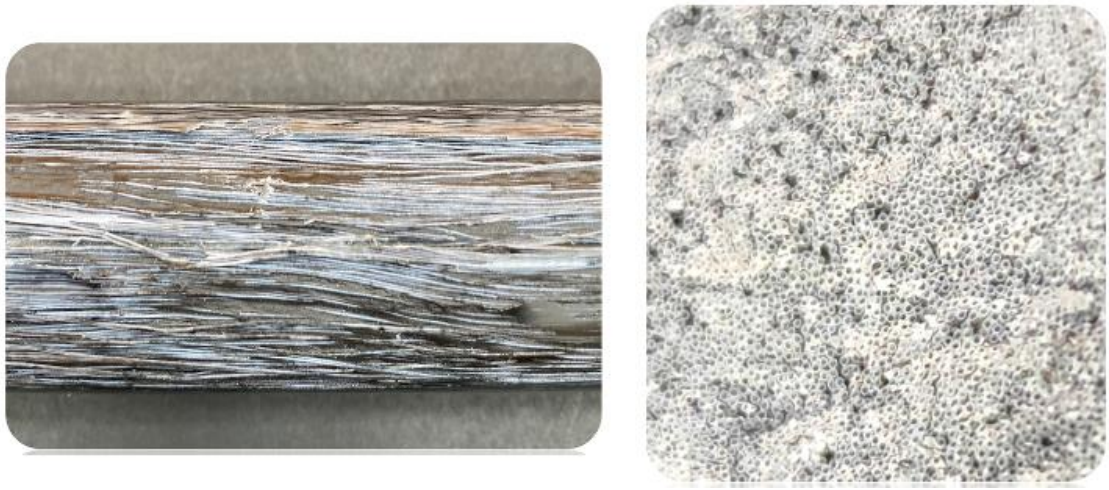


Şekil 4.21. Darbe testi sonrası yer değiştirme renk haritası ve noktasal değerler grafiği

Bu bağlamda darbe testinden sonra kompozit malzemenin kalıcı hasar ve şekil değiştirmesinin derinlikli parametrik ölçümü için 3D lazer tarama kullanılmıştır.

4.4. Mikroskobik Muayene

Şekil 4.22'de kırpılmış karbon fiber toz katkılı epoksi matris ile hazırlanan sandviç çekirdeğinin yatay ve nano kanalların belirgin şekilde görüldüğü dikey kesiti gösterilmiştir. Sürekli nano fiber kanallara sahip kompozit sayesinde viskoelastik, darbe ve çevresel davranış açısından avantaj sağlamıştır. Şekil 4.23'te kesiti alınan deney numuneler yaklaşık 150x büyütülerek mikroskobik muayenesi, hasar ve iyileşme gözlemi yapılmıştır.

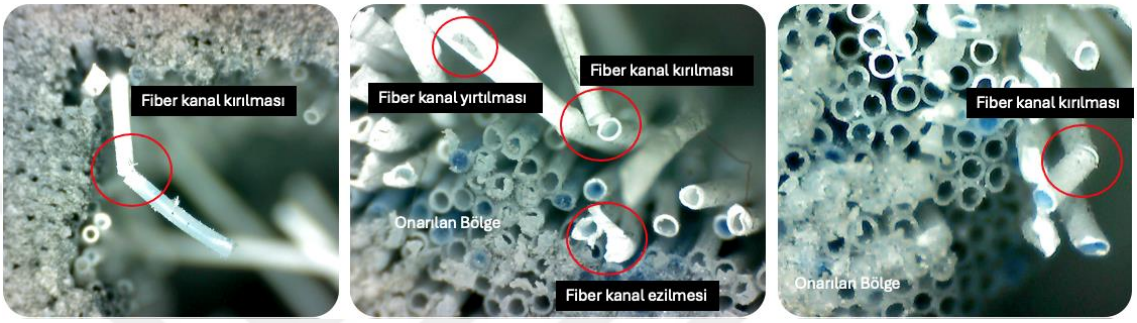


Şekil 4.22. Sandviç çekirdeği yatay kesiti (solda) ve dikey kesiti (sağda)



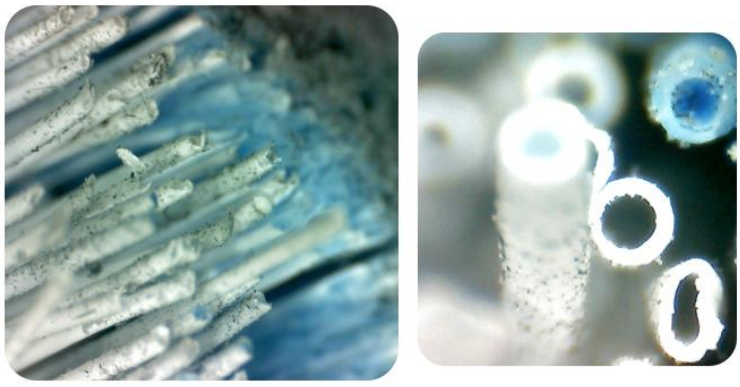
Şekil 4.23. Hasar sonrası deney numunesinin mikroskobik kesit alanı

Şekil 4.22'de görülen kompozit sandviç yapısında, iyileştirici ajan taşıyan membranlı cidarlara sahip nano kanallı fiber elyaflar, hasarlı bölgede meydana gelen kırılma, kopma, yırtılma ve ezilme gibi durumlarla karşılaşıldığında sızma ve/veya akma gerçekleştirerek (Şekil 4.24), çatlak bölgelerini anlık olarak doldurarak anında iyileştirme ve onarım sağlamıştır. Bu durum ozmos membran yapısındaki kanalların iyileştirme vasfını göstermiştir.



Şekil 4.24. Mavi pigmentasyon ile renklendirilmiş iyileştirici ajan taşıyan fiber nano kanalların çalışma mekanizması

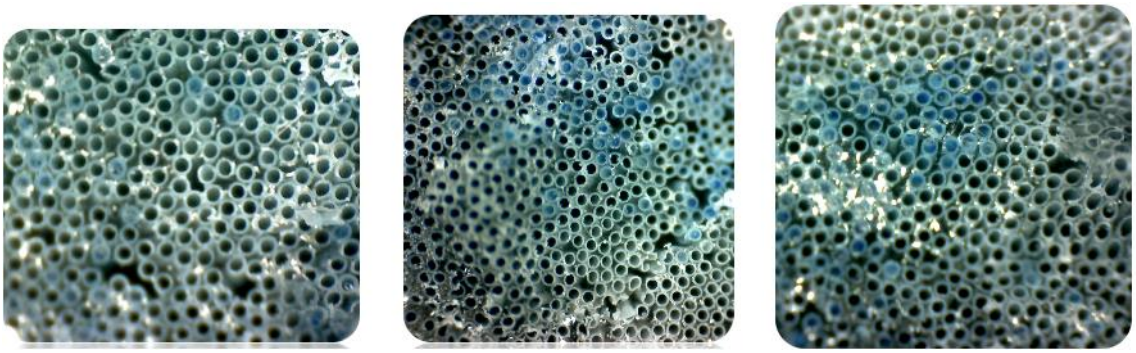
Çekirdek yapısı üretiminde matris reçinesine eklenen karbon fiber tozları sandviç yapısının genel itibari ile dayanıklılık özelliğini artırmakla birlikte matris kürlenmesi öncesi ayrıca karbon fiber tozlarının nano fiber kanalların dış cidarlarına tutunmasını (Şekil 4.25) da sağlamıştır.



Şekil 4.25. İyileştirici ajan taşıyan fiber nano kanallara CFp tutunması

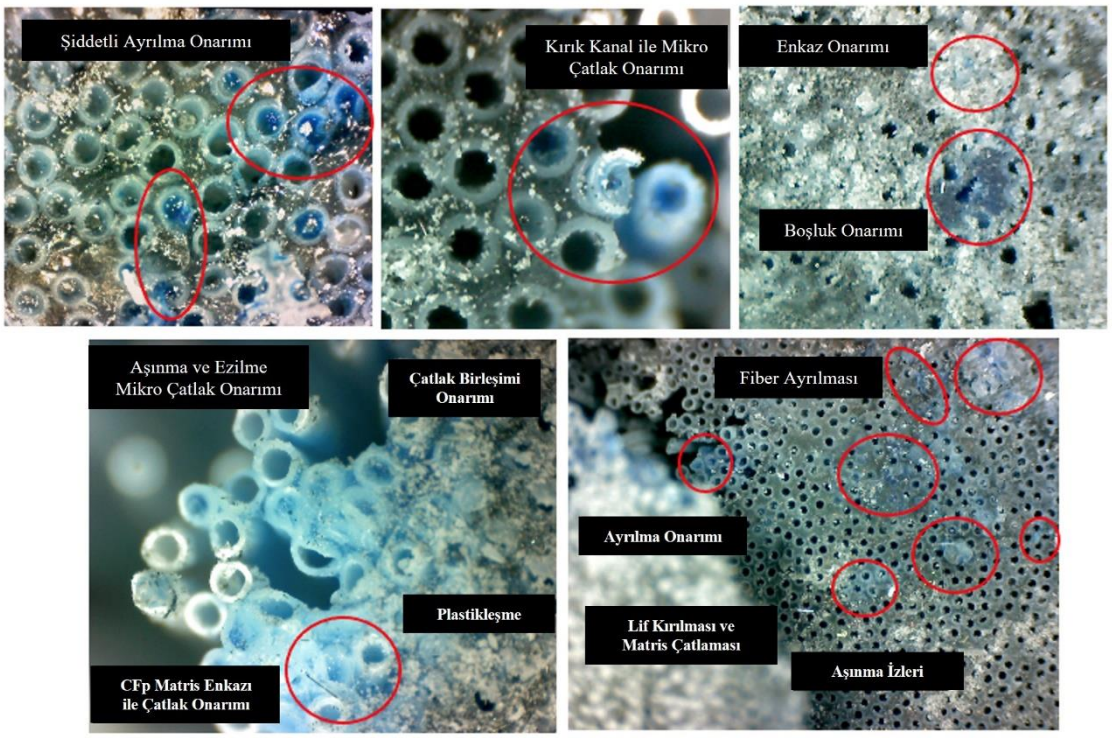
Polimer kaplamalı düşük mikronlu karbon fiber lif tozları tam bir kürlenmeyi garantilemeye yetecek kadar hızlandırıcı etki sağlamıştır. Ayrıca bu yapı iyileştirici ajana

daha fazla akma süresi sağlatarak mikro çatlaklara sızmasını kolaylaştırmış ve aynı zamanda kalıcı hasar görmeyen kanalın çok tekrarlı kullanımı da sağlamıştır (Şekil 4.26).



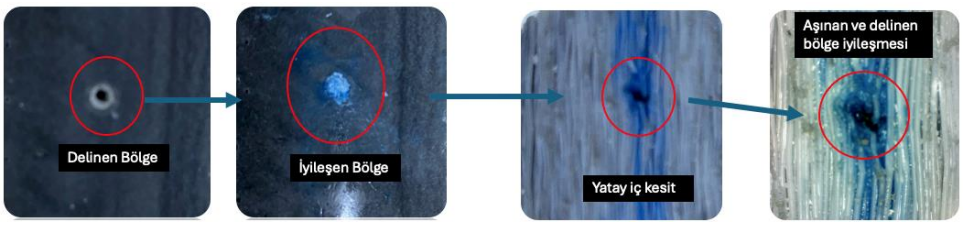
Şekil 4.26. İyileştirici ajanların nano kanalardan hasara taşınımı ve çekirdek onarımı

Hasar sonrası derin yorulma çatlaklarının ve hasar modlarının, iyileştirici ajan ile çatlak bölgelerinde kürleme ile onarımı Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



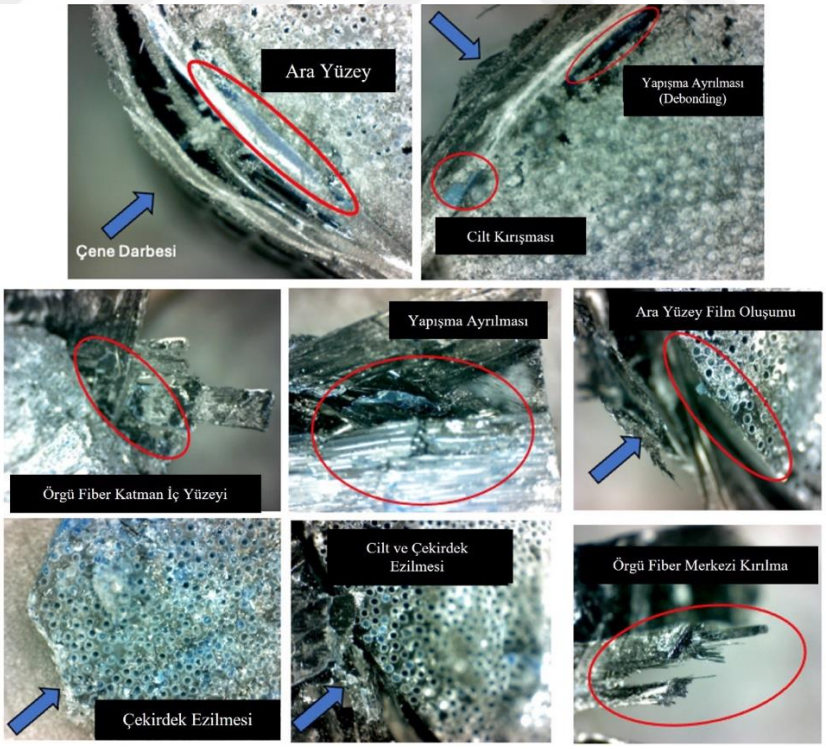
Şekil 4.27. Darbe deneyi sonrası oluşan hasar modlarının iyileştirici ajan ile çatlak onarımı

Sandviç çekirdeğine ayrıca Şekil 4.28'de gösterildiği gibi 3 mm çapında 100mm derinliğinde bir delinme hasarı uygulanmıştır. İyileştirici ajanın, kanallar içerisinden geçerek delinme kaynaklı oluşan enkaz, aşınma ve boşluğun kürlenerek iyileştirilmesi çekirdeğin yatay iç kesiti alınarak gösterilmiştir.



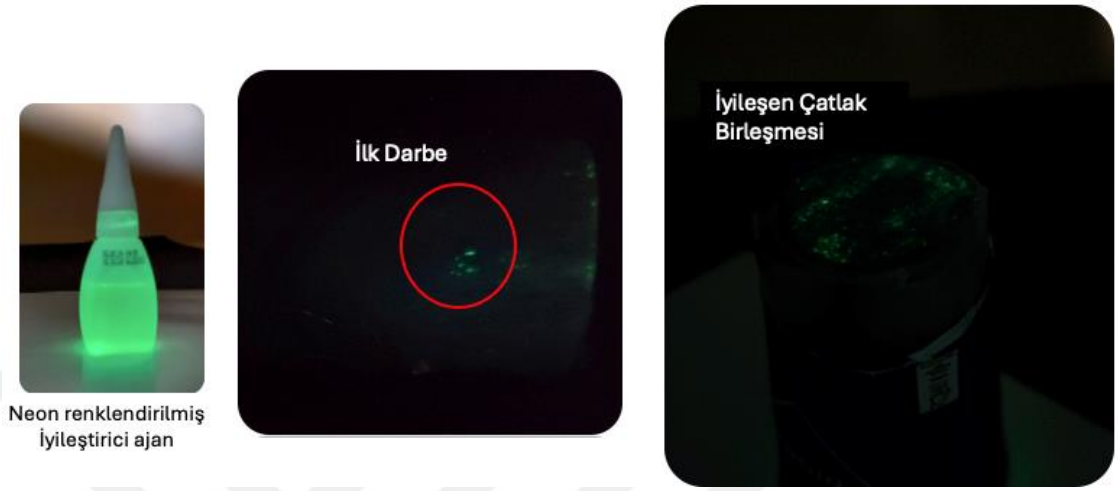
Şekil 4.28. Delinme kaynaklı oluşan enkaz, aşınma ve boşluğun onarılması

Şekil 4.29'da çene darbelerine maruz kalan silindirik sandviç numune hasar modlarının sandviç çekirdeğinde nano kanalların çalışma koşullarına bağlı olarak iyileştirici ajan ile onarımı gösterilmektedir. Eğilme mukavemeti değişkenliklerinde bu yüzeylerde oluşan hasar modları ile farklılıklar gösterilmektedir.



Şekil 4.29. Sandviç yapının eğilme hasar modlarının iyileştirici ajan ile onarımı ve muayenesi

Şekil 4.30’da neon pigmentasyon ile renklendirilmiş karanlık ortamda parlayan iyileştirici ajanın sandviç çekirdeğinde oluşan çoklu darbe sonrası çatlak birleşme yerlerinin iyileştirici ajan ile onarılan bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 4.30. Neon ışıklı pigmentasyon ile renklendirilmiş iyileştirici ajan ile çatlak birleşiminin onarımı

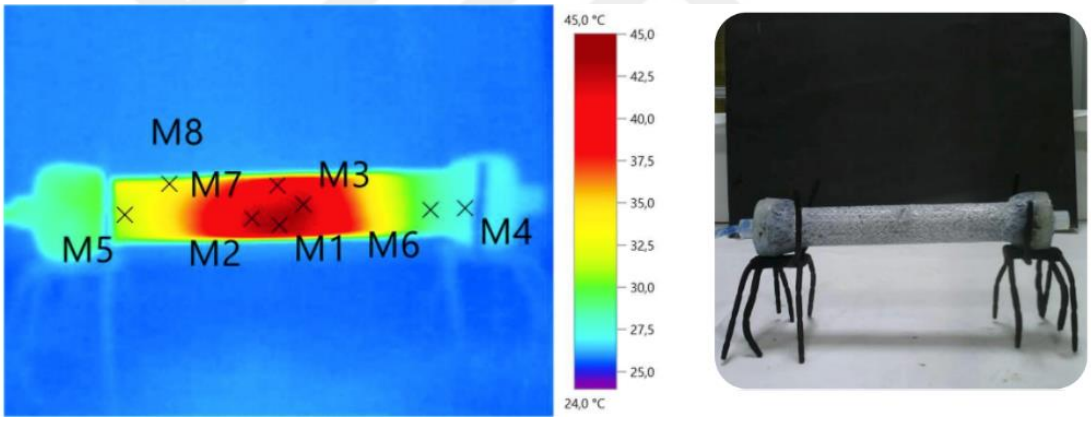
Ayrıca Bölüm 3’te bahsedilen hasar onarma iyileştirme sisteminde kullanılan enjektör sistemi bir basınç ile pompalanması etkilerinden uzak tutularak kürlenme oluşumunu engellemek için vakum sistemi kullanılmıştır. Bu etkiler, enjektör mekanizması ve iğnesi kanal içerisinde bağıl nem ile CA viskoz yapısını bozarak kristalize yapıya dönüşümünü engellemiştir. Bu düşük basınç kullanımlı (yaklaşık 0.1bar) iyileştirme vakum sistemi sürdürülebilir ve çok tekrarlı bir sistem olmuştur.

Nano kanallarla sahip çekirdek yapı iki yönlü iyileştirme sistemine uygundur. Yani hasar sonrası bir yönden iyileştirici ajan aktarımı ile hasarlı bölgede tahribata uğrayan kanal, mikro hasarlı bölgeye sızma veya akma vasfını iyileştirme görevini yerine getirmiştir. Bu kanalların tahliye çıkışı yönünden iyileştirme sistemi girişi gibi kullanılarak iyileştirici ajanın çekirdeğe tekrar aktarımını yapabilir.

Sandviç çekirdeği çok yoğun fiber kanallardan oluşumu sayesinde hasarsız nano kanalların tıkanmadan hasarlarda ve mikro çatlaklarda kullanılabilmesine olanak sağlamıştır.

4.5. Termal Muayene ve Ölçüm Değerleri

Termal ölçümlerle ile iyileşme tespitinde iyileştirici ajanın hasarlı sandviç yapısına eklenerek kürlenme esnasında açığı çıkan ısı ile yüzey sıcaklığının zamanla değişimini termal kameralar ile kaydedilmiştir. Bu incelemeler, EN 13187'ye göre, Testo T885 ve UNI-T UTi721M termal görüntüleme cihazları kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca sandviç yapı içerisine gömülü Eon Photonics FBG sensör ile de takip yapılmıştır. Hasarlı bölgelerin iyileşmesinde ısı iletimi ve termal yansıması termogramlarda görülmüştür. Termal görüntüleme parametrelerinde M1, M2 vb. işaretler ölçüm noktalarını temsil etmektedir. Termal görüntüleme parametrelerinde kalibre edilen test koşulları ise ısıl emisyon derece katsayısı 0.94, yansıyan sıcaklık 20°C olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda Çizelge 4.1 ve Şekil 4.31'de iyileşmeye tabii tutulan silindirik sandviç kompozit yapı deney düzeneği ve ısıl haritası gösterilmiştir.

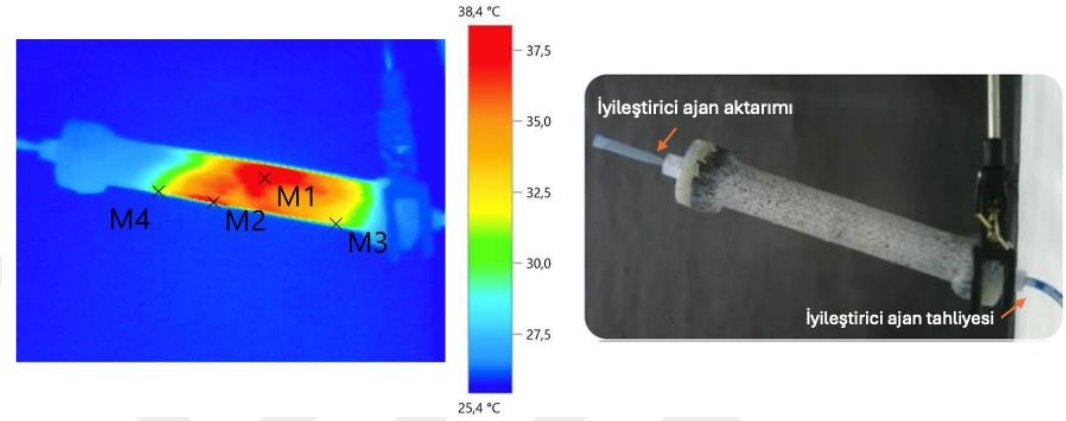


Şekil 4.31. Hasar sonrası iyileşme sistemi termal görüntüleme ve ölçüm renk haritası

Çizelge 4.1. Hasar sonrası iyileşme sistemi termal ölçüm değerleri

Ölçüm Nesneleri	Sıcaklık [°C]
M1	43,3
M2	42,2
M3	42,8
M4	27,3
M5	31,6
M6	28,8
M7	39,5
M8	33,0

Şekil 4.31'de hasar sonrası çatlak olarak bölgelerde iyileştirici ajanın ilavesi matris içerisinde bulunan karbon fiber tozları ile aktive olmuş ve kürlenme ile polimerizasyon meydana gelmiştir. Bu nedenle enerji olarak ısının açığa çıkması sıcaklık artışına neden olmuştur. Şekil 4.32 ve Çizelge 4.2'de ise yatay eğimle iyileşme ajanı aktarılan hasar sonrası diğer bir deney numunesi gösterilmiştir.

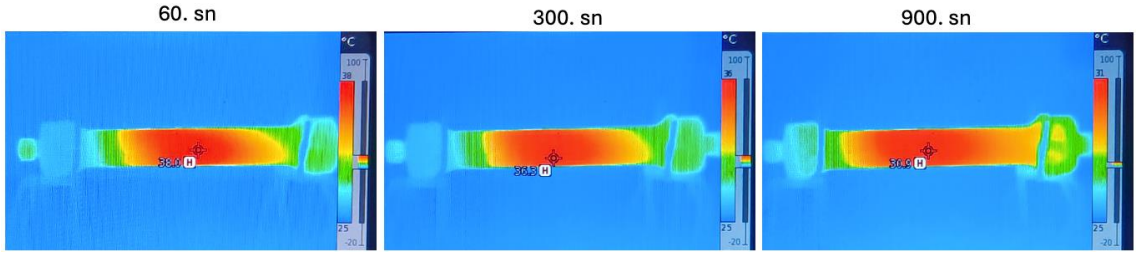


Şekil 4.32. Hasar sonrası iyileşme sisteminin termal görüntülemesi

Çizelge 4.2. Hasar sonrası iyileşme sistemi termal ölçüm değerleri 2

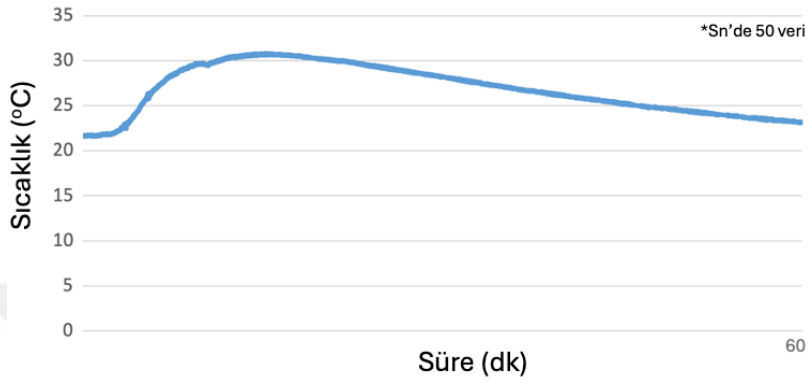
Ölçüm Nesneleri	Sıcaklık [°C]
M1	38,0
M2	37,4
M3	31,2
M4	30,7

Şekil 4.33'te çarpma deney düzeneğinde darbe çenesine maruz kalan kompozit yapıda, çenenin temas ettiği bölgede oluşan mikro çatlaklarının iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması süresi boyunca değişen ısıl görüntüleme takibi gösterilmiştir.

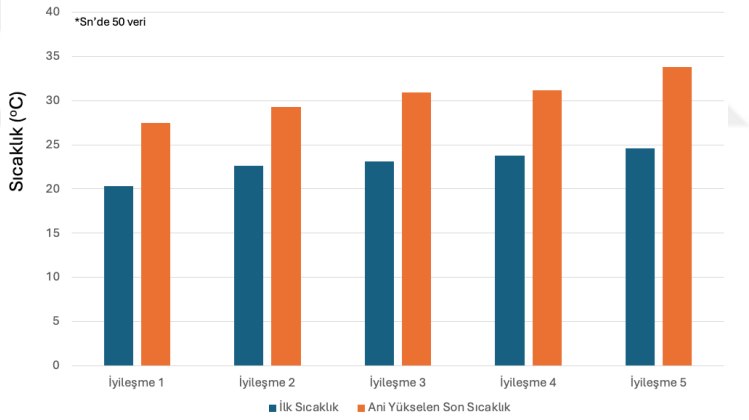


Şekil 4.33. Hasar sonrası iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması süresi boyunca değişen ısıl görüntüleme takibi

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te çarpma deneylerinde çoklu darbe çenesine maruz kalan kompozit yapıda oluşan mikro çatlaklarının iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması süresi boyunca değişen FBG sensöründen alınan sıcaklık verileri ile değişim grafikleri gösterilmiştir.



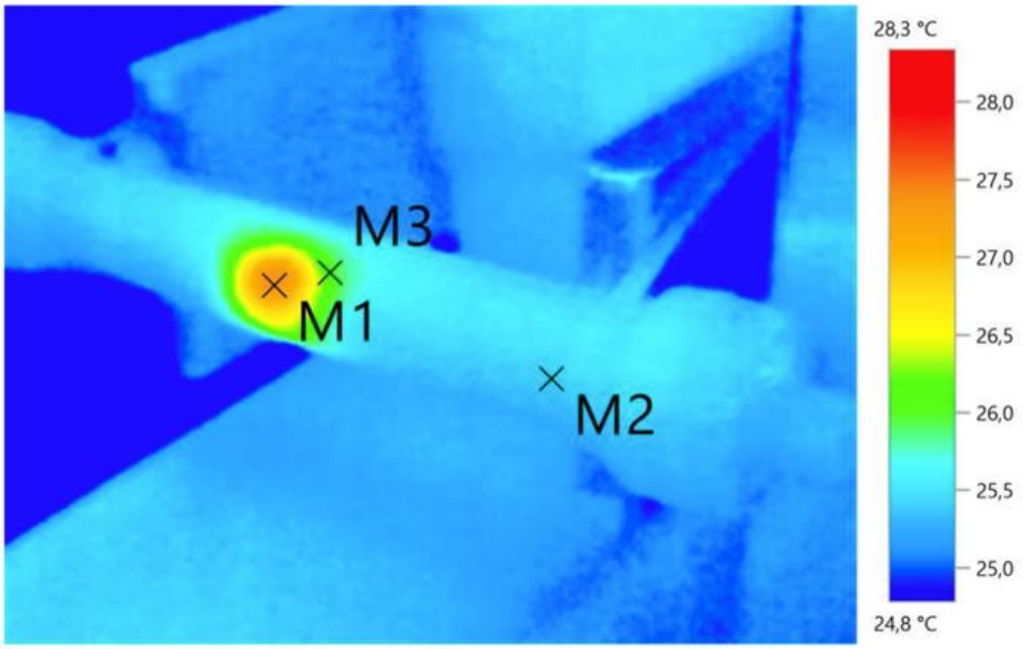
Şekil 4.34. FBG sensör ile iyileşme sıcaklığı takibi



Şekil 4.35. FBG sensör ile 5 tekrarlı onarmada sıcaklık takibi

Bu sıcaklık takipleri, sandviç yapıya darbe çenesinin temas ettiği noktadan merkeze olan uzaklığa eşit ve merkez noktasından yukarı yönlü 90^{o} dik olarak örgü (sleeve) kompozit ile sandviç çekirdeği arasına konumlandırılan FBG sensör ile yapılmıştır. FBG sensör ile iyileşme kaynaklı kürlenme sonucu açığa çıkan ısının 60 dakika sonunda oda sıcaklığa indiği görülmüştür. FBG sensörler ile 60 dakika boyunca saniyede 50 veri kaydedilerek yaklaşık 158800 verinin işlenmesi sonucunda bu takip yapılmıştır.

Şekil 4.36 ve Çizelge 4.3'te düşük şiddette çarpma deney düzeneğinde darbe çenesine maruz kalan kompozit yapıda çenenin temas ettiği bölgede oluşan mikro çatlaklarının iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması esnasında gerçekleşen ısıl görüntüleme ve ölçüm değerleri gösterilmiştir.

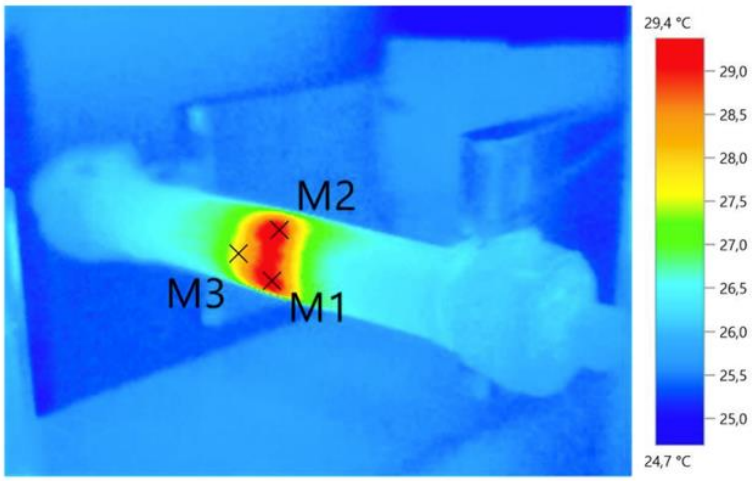


Şekil 4.36. Darbe çenenin temas ettiği bölgede oluşan mikro çatlaklarının iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması esnasında gerçekleşen termal görüntüleme

Çizelge 4.3. Darbe çenenin temas ettiği bölgede oluşan mikro çatlaklarının iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması esnasında gerçekleşen sıcaklık ölçüm değerleri

Ölçüm Nesneleri	Sıcaklık [°C]
M1	29,3
M2	29,1
M3	27,9

Şekil 4.37 ve Çizelge 4.4'te orta şiddette çarpma deney düzeneğinde darbe çenesine maruz kalan kompozit yapıda çenenin temas ettiği bölgede oluşan mikro çatlaklarının iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması esnasında gerçekleşen ısıl görüntüleme ve ölçüm değerleri gösterilmiştir.

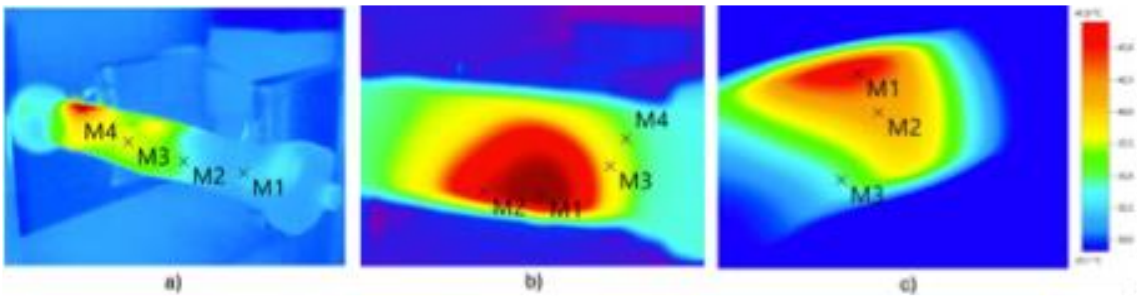


Şekil 4.37. Merkezi orta şiddet darbe ile otonom onarım esnasında gerçekleşen termal görüntüleme

Çizelge 4.4. Merkezi orta şiddet darbe ile otonom onarım esnasında sıcaklık ölçüm değerleri

Ölçüm Nesneleri	Sıcaklık [°C]
M1	29,3
M2	29,1
M3	27,9

Şekil 4.38 ve Çizelge 4.5'te ise çoklu yüksek şiddette çarpma deney düzeneğinde orta noktada darbe çenesine maruz kalan kompozit sandviç yapıda yapının çeşitli bölgelerinde oluşan mikro çatlakların ve çatlak birleşimlerinin iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması esnasında gerçekleşen ısıl görüntüler ve ölçüm değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.38. Merkezi, yüksek şiddet darbe ile otonom onarım esnasında gerçekleşen termal görüntüleme

Çizelge 4.5. Merkezi, yüksek şiddet darbe ile otonom onarım esnasında sıcaklık ölçüm değerleri

a)

Ölçüm Nesneleri	Sıcaklık [°C]
M1	30,2
M2	32,6
M3	36,3
M4	44,5

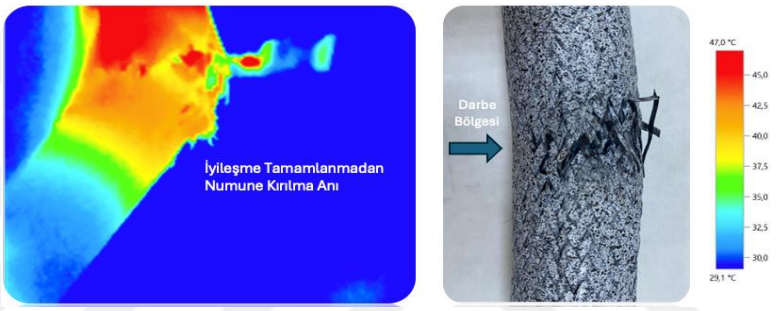
b)

Ölçüm Nesneleri	Sıcaklık [°C]
M1	47,0
M2	43,1
M3	35,3
M4	31,6

c)

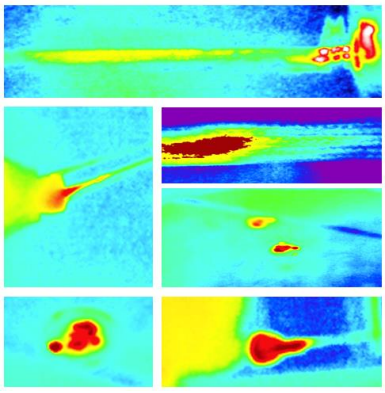
Ölçüm Nesneleri	Sıcaklık [°C]
M1	46,2
M2	41,3
M3	34,3

Şekil 4.39'da iyileşme tamamlanmadan ve/veya yeterli oranda iyileşme gerçekleşmeyen yüksek şiddetli darbe anında kompozit yapıda çekirdek kesme (core shear - CS) hasar modunda kırılma esnasında gerçekleşen termal görüntülenmesi gösterilmiştir.



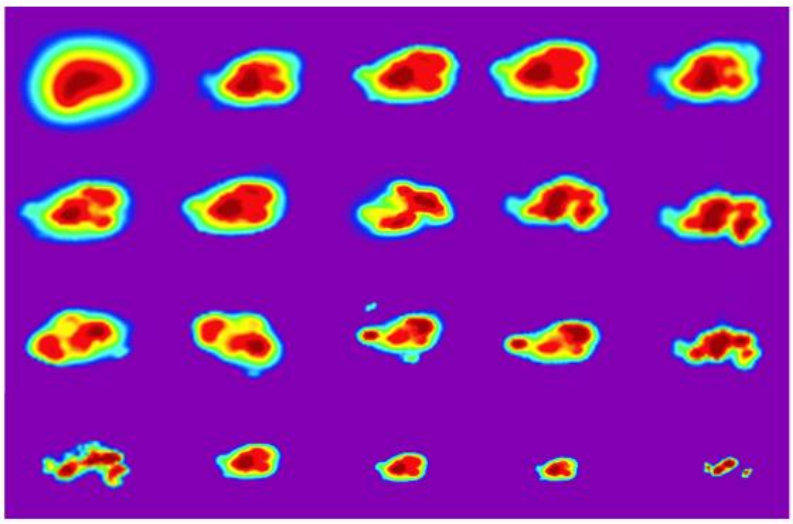
Şekil 4.39. İyileşme tamamlanmadan yüksek şiddetli darbe anında kompozit yapıda kırılma esnasında termal görüntüsü

Şekil 4.40'ta hasarlı bölgede fiber nano kanal içerisinden geçen iyileştirici ajanın hasarlı bölgeye sızması ile polimerizasyon reaksiyonunun meydana gelmesi sonucu sıcaklık artışının termal görüntüleri yer almıştır.



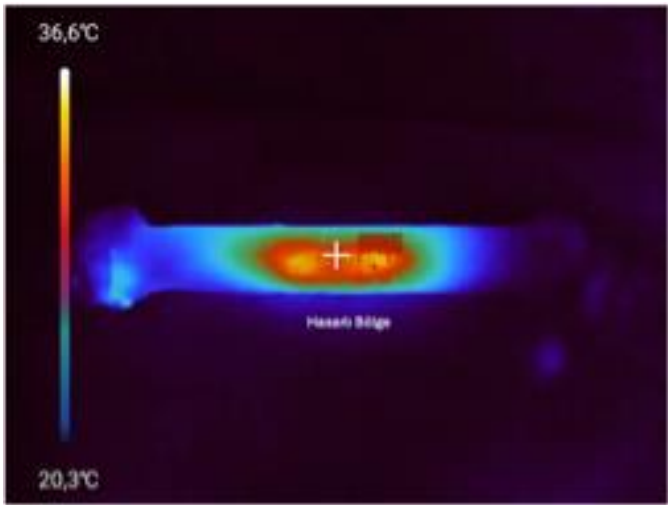
Şekil 4.40. Hasarlı bölgede fiber nano kanal içerisinden geçen iyileştirici ajanın hasarlı bölgeye sızması ile oluşan polimerizasyon reaksiyonunun termal görüntüleri

Şekil 4.41'de iyileştirici ajanın kompozit yapıda bulunan karbon fiber tozları ile polimerizasyonunda meydana gelen sıcaklık değişiminin termal renk haritası gösterilmiştir.



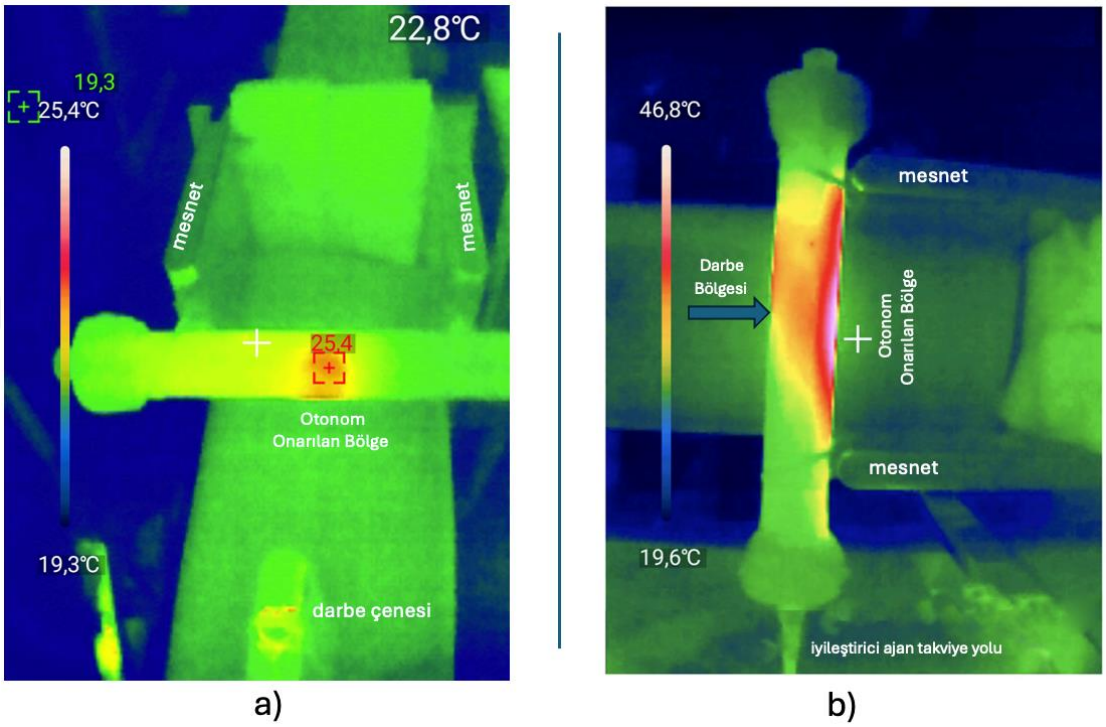
Şekil 4.41. İyileştirici ajanın kompozit yapıda bulunan karbon fiber tozları ile polimerizasyon reaksiyonunun termal renk haritası

Şekil 4.42'de çoklu darbe deneylerinde 5. kez iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması süresi boyunca değişen renk haritası gösterilmiştir.



Şekil 4.42. Darbe deneylerinde çoklu iyileştirici ajan takviyesi ile onarılması süresi boyunca değişen renk haritası

Şekil 4.43'te ise kırılma dayanımı azalmış sandviç yapının darbe çenesine maruz kaldığı bölümün arkasında çatlak birleşimleri sonucu Şekil 9'daki gibi kırılma meydana gelmeden oluşan makro çatlakların iyileşmesinin 3. nokta darbe deney düzeneği üzerinde termal görüntüsü gösterilmiştir.



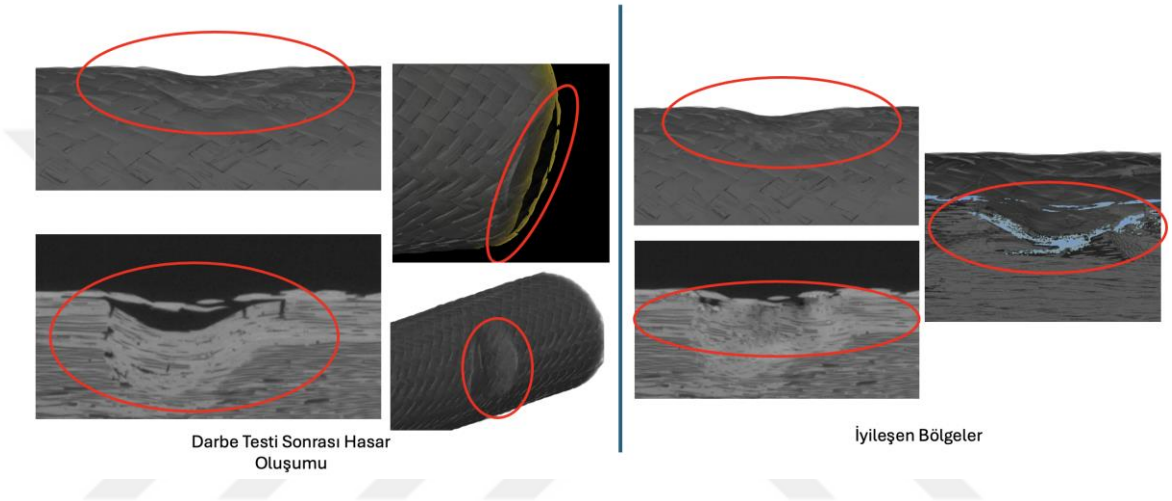
Şekil 4.43. Anlık otonom makro çatlak onarımı, deney üzerinde termal görüntüsü

Siyanoakrilatın aktivatör ile kürlenmesinde yüksek ekzotermik reaksiyon oluşmuştur. Bu durumda saf siyanoakrilatın termal iletkenliğini CFp ile iyileştirilmiştir. Çok düşük viskoz siyanoakrilat kullanımı ile iyileşmeden önce karbon lif tozlarını tamamen emmesini sağlamıştır (Teoh vd., 2018).

4.6. 3D X-Işını Tomografi ile Tahribatsız Muayene

Tahribatsız değerlendirme sonuçlarına göre darbe testinde oluşan mikro çatlakların termal kameralar ile kontrolü ve lazer tarama ile yüzey kalıca şekil değiştirmelerin etkisi detaylı incelenmiştir. Bu aşamadan sonra termal ve yüzeysel lazer tarama hasarın ciddiyetinde yetersiz kalmıştır. Darbe enerjisi arttıkça hasar daha derinleşmiştir.

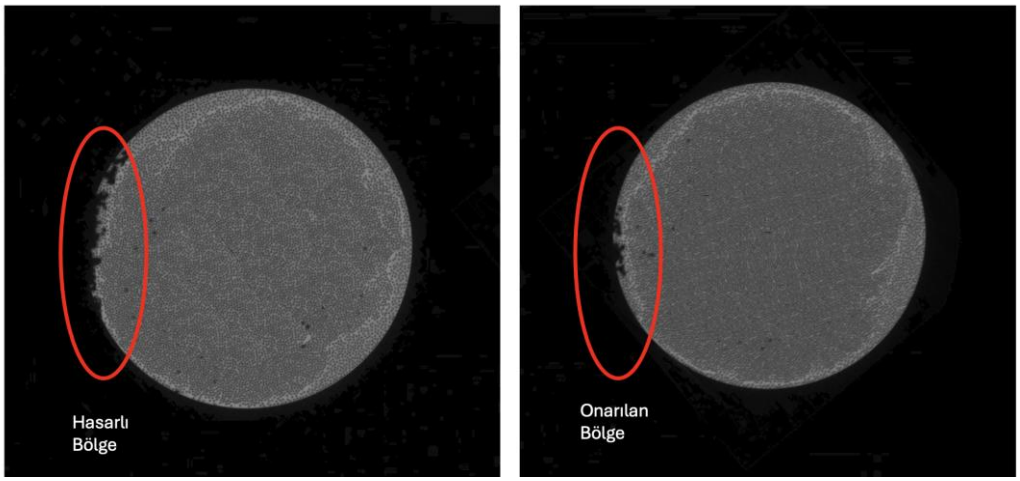
Güçlü hasar tahminleri X-Işını tomografi ile tespit edebilir. Hacimsel hasarları ve iyileşmeleri tespit etmekte önemli bir test yöntemi olmuştur (Gautam vd., 2023). Tahribatsız yapısal sağlık kontrolü, volümetrik iç yapısı görüntülemede Zeiss Türkiye laboratuvarında Zeiss Metrotom cihazı ile 3D X-Işını tomografi çekimleri yapılmıştır. Şekil 4.44'te darbe testi sonrası darbe çenesi temas bölgesindeki ayrılması (debonding) hasarı ve çatlak oluşumu ve iyileştirme sistemi uygulandıktan sonra iyileşen bölgelerin tomografik görüntüleri ve hasar şiddetine göre oluşan şekil değiştirmenin çekirdeğe nasıl ve hangi şekilde bir absorban etkisi olduğu yer almıştır.



Şekil 4.44. Hasarlı ve otonom iyileşen bölgelerin tomografik görüntüleri

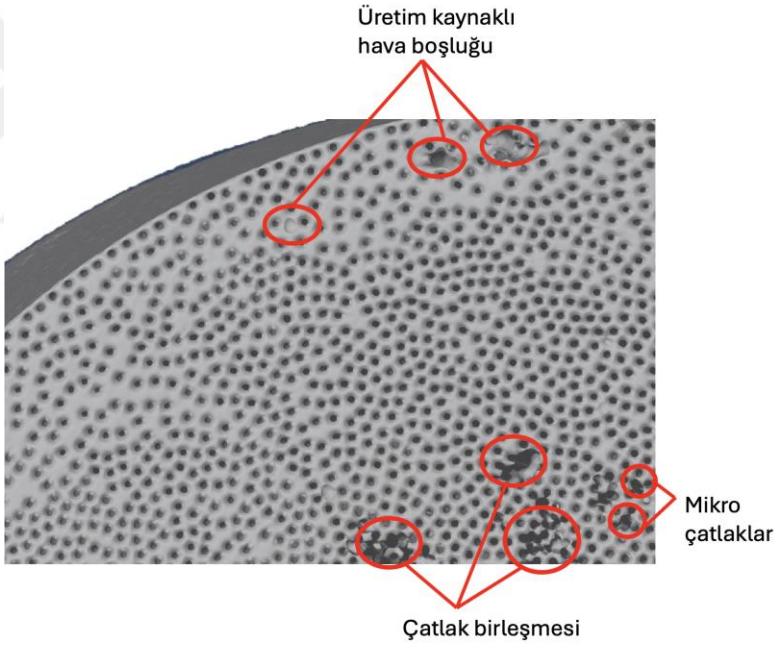
Bu yöntem numuneye X-ışınları göndererek ve geçen ışınların yoğunluğunu bir düz panel dedektörü ile kaydederek çalışır. Hasarlı bölgeler, X-ışınlarının soğurulması veya saçılması farklı olduğu için radyografik görüntülerde görülebilir. Bu yöntem delaminasyon, girinti ve lif kırılması gibi farklı hasar modlarını tespit etmek için farklı yeteneklere sahiptir (Papa vd., 2022). Ayrıca matris ve takviye malzemelerinin seçiminin hasar duyarlılığı ve enerji emilimi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Bu çalışma mikrovasküler kanallara sahip otonom onarımlı kompozitlerin ve sandviç yapıların darbe performansını iyileştirmek için yararlı bilgiler sağlamıştır.

Şekil 4.45'te dikey kesiti alınan tomografik görüntüde hasarlı bölgenin onarılmış görüntüsü eklenmiştir.



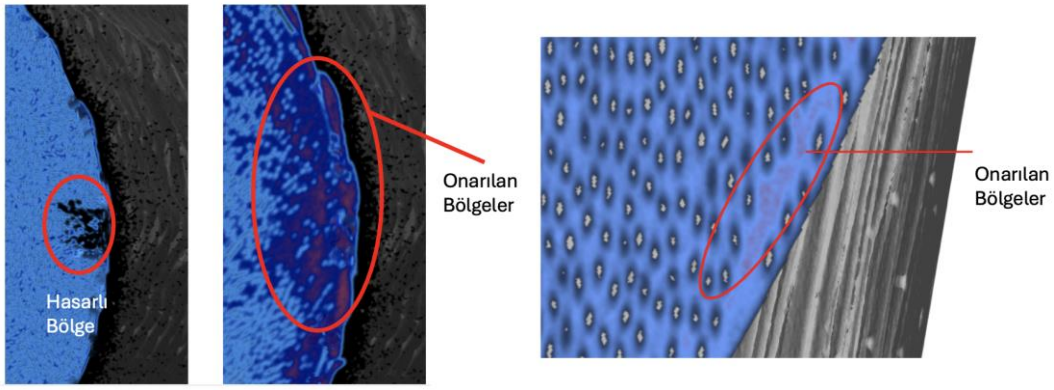
Şekil 4.45. Hasarlı bölgenin onarılmış dikey kesitli tomografik görüntüsü

Şekil 4.46'de ise üretim kaynaklı kusurlardan olan hava boşlukları ve hasar sonrası mikro çatlakları oluşturup ardından çatlak birleşmesini içeren bir tomografik kesit yer almıştır.



Şekil 4.46. Üretim kaynaklı mikro hava boşlularının etkisini içeren bir tomografik görüntü

Şekil 4.47'de hasarlı bölgenin tomografik görüntüsü ve kompozit sandviç yapıya iyileşme ajanı ilavesi ile hasarlı bölgede kürlenen iyileştirici ajanın volümetrik değişim etkisinin tomografik görüntüsü yer almıştır.

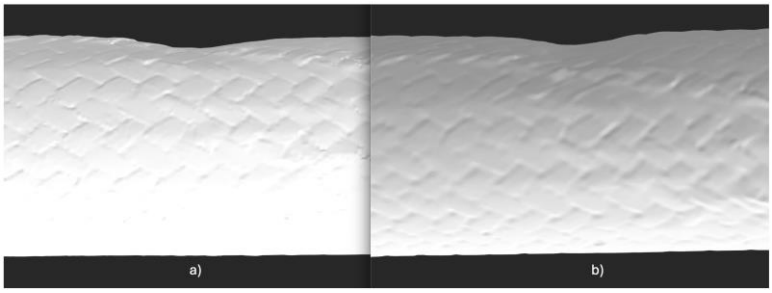


Şekil 4.47. Kompozit sandviç yapıda iyileştirici ajanın volümetrik değişim etkisinin tomografik görüntüsü

Mikro çatlakları tetikleyen nano boşlukların da tespiti düşük hacimsel hasarın X-Işını ile ölçülmesi yüksek maliyet içerebilmektedir. Nano kanalların fiber tozların ve iyileştirici ajan arasında X-Işını hacimsel ölçüm hassasiyeti kaynaklı hangisinin hangisi olduğunun belirlenmesi ve çözünürlük ve volümetrik ayrım kaynaklı tespiti geleneksel mikroskobik muayene olmadan referanslandırılması zorlaşabilmektedir (Khan vd., 2020, Padhan vd. 2020).

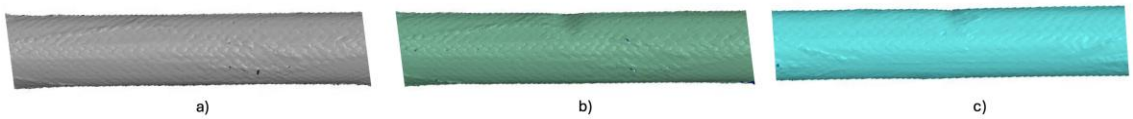
4.7. Metrolojik 3D Tarama ile Tahribatsız Muayene

Deney numunelerin metrolojik ölçümleri (Şekil 4.48) Hexagon Absulute 3D lazer tarama ile Hexagon Türkiye Metrolojik Laboratuvarında yapılmış olup darbe hasarının etkisinin 3D boyutlu yüzey ölçümüne olanak sağlamıştır.



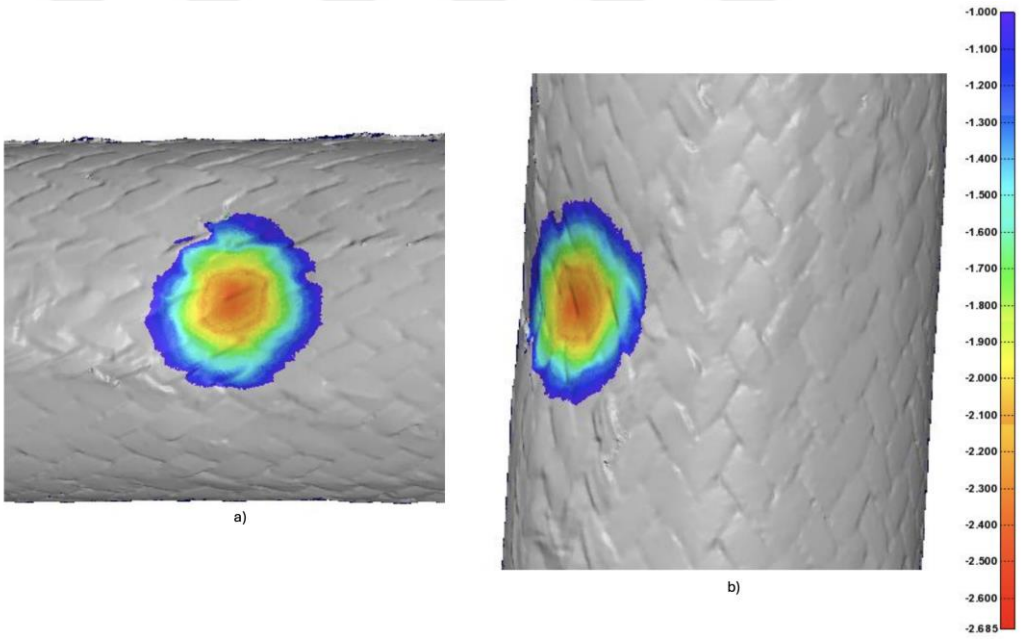
Şekil 4.48. 3D lazer tarama ile ilk hasarlı (b) ve iyileşme sonrası tekrar hasarlı (b) metrolojik deney numune kesitleri

Şekil 4.49'da gri renkteki numune hasarsız numunenin (Vn) 3D modeli, yeşil renkteki hasarlı numune (Hn) turkuaz renkteki ise hasar sonrası iyileştirilmiş ve daha sonra tekrar hasara uğratılmış numunenin (HRHn) lazer tarama görüntüleridir. Bu bölümde eklenen grafik renkleri de bu numuneleri temsil etmiştir.



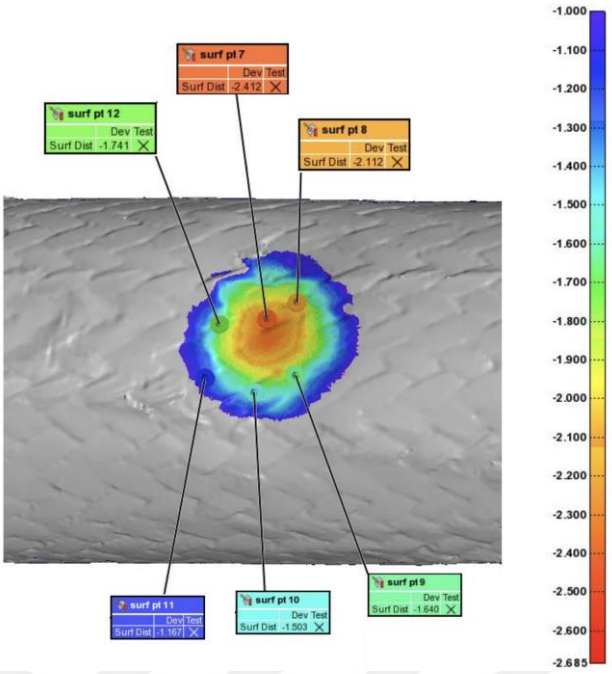
Şekil 4.49. a) Vn, b) Hn ve c) HRHn deney numunelerinin metrolojik tarama görüntüleri

Şekil 4.50'de ilk kez darbe testine maruz kalmış deney numunesinin (Hn) şekil değiştirme renk diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 4.50. Hn deney numunesinin lazer metrolojik tarama ile şekil değiştirme renk diyagramı

Şekil 4.50'de renk diyagramı gösterilen Hn deney numunesine darbe çenesinin çarpması sonucu oluşan hasarlar renk diyagramında şekil değiştirme ölçüm değerlerine renklendirilmiştir. Bu hasarın ölçüm renk aralığındaki bazı noktalardaki çökmeler Şekil 4.51 ve Çizelge 4.6'da şematik olarak gösterilmiştir.

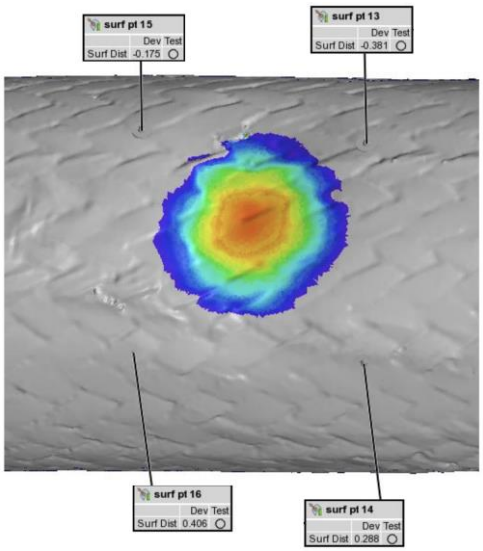


Şekil 4.51. İlk kez darbe testine maruz kalmış numunenin hasar görüntü ve ölçüm değerleri

Çizelge 4.6. İlk hasar sonrası noktasal şekil değiştirme ölçüm tablosu

Nokta Adı	Kontrol	Ölçüm (mm)
surf pt 7	Yüzey Mesafesi	-2.412
surf pt 8	Yüzey Mesafesi	-2.112
surf pt 9	Yüzey Mesafesi	-1.640
surf pt 10	Yüzey Mesafesi	-1.503
surf pt 11	Yüzey Mesafesi	-1.167
surf pt 12	Yüzey Mesafesi	-1.741

Çizelge 4.6'da gösterilen darbe çenesinin hasar etkisine göre en yüksek 2,457 mm'lik çökme meydana gelmiştir. Kompozit Sleeve yapısı (örgü yapı) ve et kalınlığı nedeniyle sandviç çekirdek hasarı düşük çıkmıştır. Malzemede debonding ve mikro çatlak hasarları başlamıştır. Şekil 4.52 ve Çizelge 4.7'de toleranslandırma adına matris ile emdirilmiş bi-aksial örgü kompozit sandviç çekirdek kaplamanın yüzey taraması ölçüm değerleri gösterilmiştir.

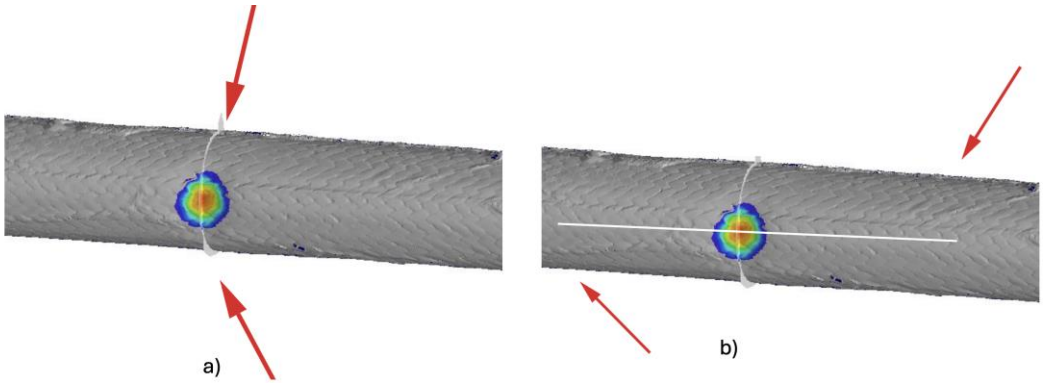


Şekil 4.52. Hn deney numunesi hasarsız bölgelerinin ölçüm değerleri şematik gösterimi

Çizelge 4.7. Hn deney numunesi hasarsız bölgelerinin ölçüm değerleri tablosu

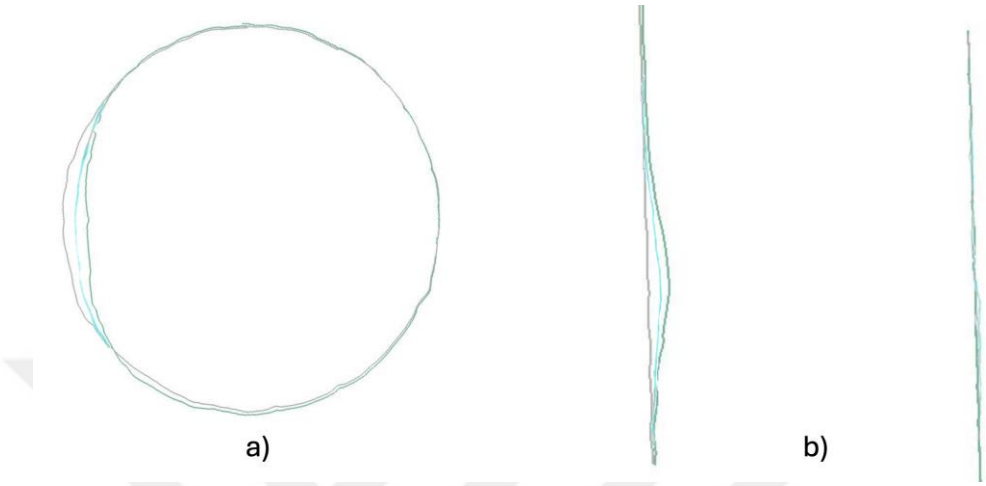
Nokta Adı	Kontrol	Ölçüm (mm)
surf pt 13	Yüzey Mesafesi	-0.381
surf pt 14	Yüzey Mesafesi	0.288
surf pt 15	Yüzey Mesafesi	-0.175
surf pt 16	Yüzey Mesafesi	0.406

Şekil 4.53'te hasar öncesi saf Vn deney numunesi ile kıyaslamak için, Hn deney numunesi lazer taramasının renk haritası, renk diyagramı ve ölçüm değişkenlikleri parametreleri için dikey ve yatay kesitler alınmıştır ve aynı zamanda bu işlem HRHn deney numunesi için de uygulanmıştır.



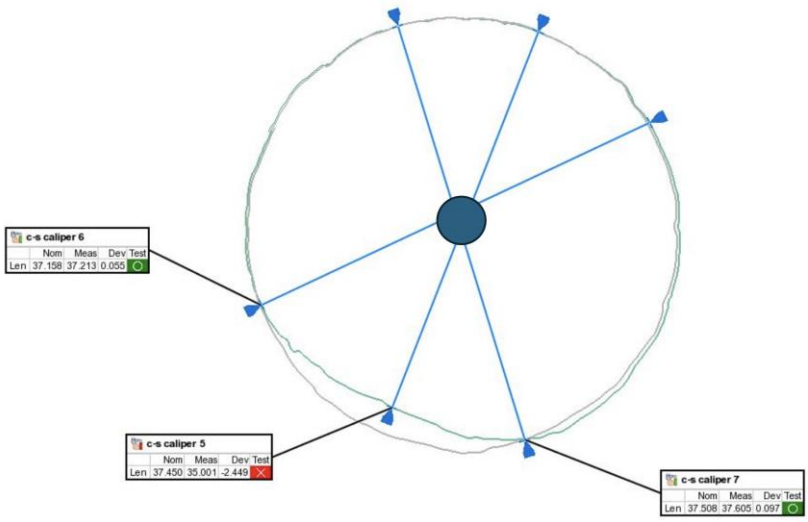
Şekil 4.53. Hn deney numunesin sırasıyla a) dikey ve b) yatay kesitleri

Şekil 4.54'te deney numunelerinin renk temsilleri gösterilmiş olup Şekil 5'te ise noktasal taramalar ile şekil değişikliği tespit edilen Vn, Hn, HRHn deney numunelerinin a) dikey ve b) yatay kesitleri alınmıştır.



Şekil 4.54. Vn, Hn, HRHn deney numunelerinin noktasal birleştirme ile şekil değişikliği diyagramı

Şekil 4.55 ve Çizelge 4.8'de Hn deney numunesinin hasar sonrası lazer tarama metrolojik ölçümü ile hasar maksimum çökme noktasından merkezlenerek dikey kesiti alınan numunenin ezilme kaynaklı şekil değiştirme ölçüm diyagramı yer almıştır.

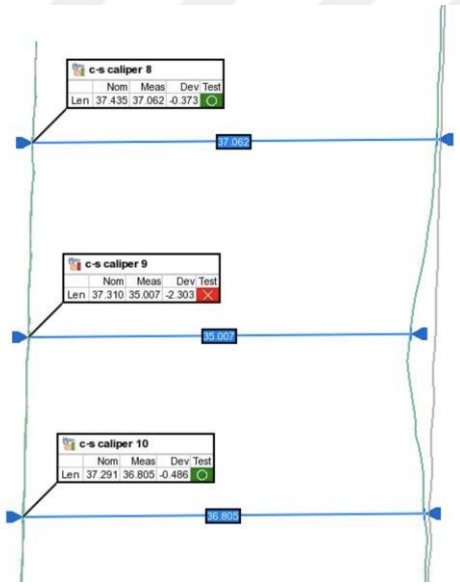


Şekil 4.55. Dikey kesiti alınan Hn deney numunesi noktasal şekil değiştirme diyagramı

Çizelge 4.8. Dikey kesiti alınan Hn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm tablosu

Nokta Adı	Kontrol	İlk Ölçüm (mm)	2. ÖIçüm (mm)	Fark (mm)
c-s caliper 5	Uzunluk	37.450	35.001	-2.449
c-s caliper 6	Uzunluk	37.158	37.213	0.055
c-s caliper 7	Uzunluk	37.508	37.605	0.097

Maksimum çökme, darbe çenesinin merkezi orta noktasından olup 2,449 mm'lik şekil değiştirme meydana gelmiştir. Debonding başlangıç noktaları yaklaşık ölçümleri de bir ucundan 0,055mm diğer bölgesinden %76'lık bir farkla 0.097 mm'lik ayrılma ile hasar almıştır. Şekil 4.56 ve Çizelge 4.9'da ise Hn deney numunesinin hasar sonrası metrolojik ölçümü ile hasar maksimum çökme noktasından merkezlenerek yatay kesiti alınan numunenin ezilme kaynaklı şekil değiştirme ölçüm diyagramı yer almıştır.

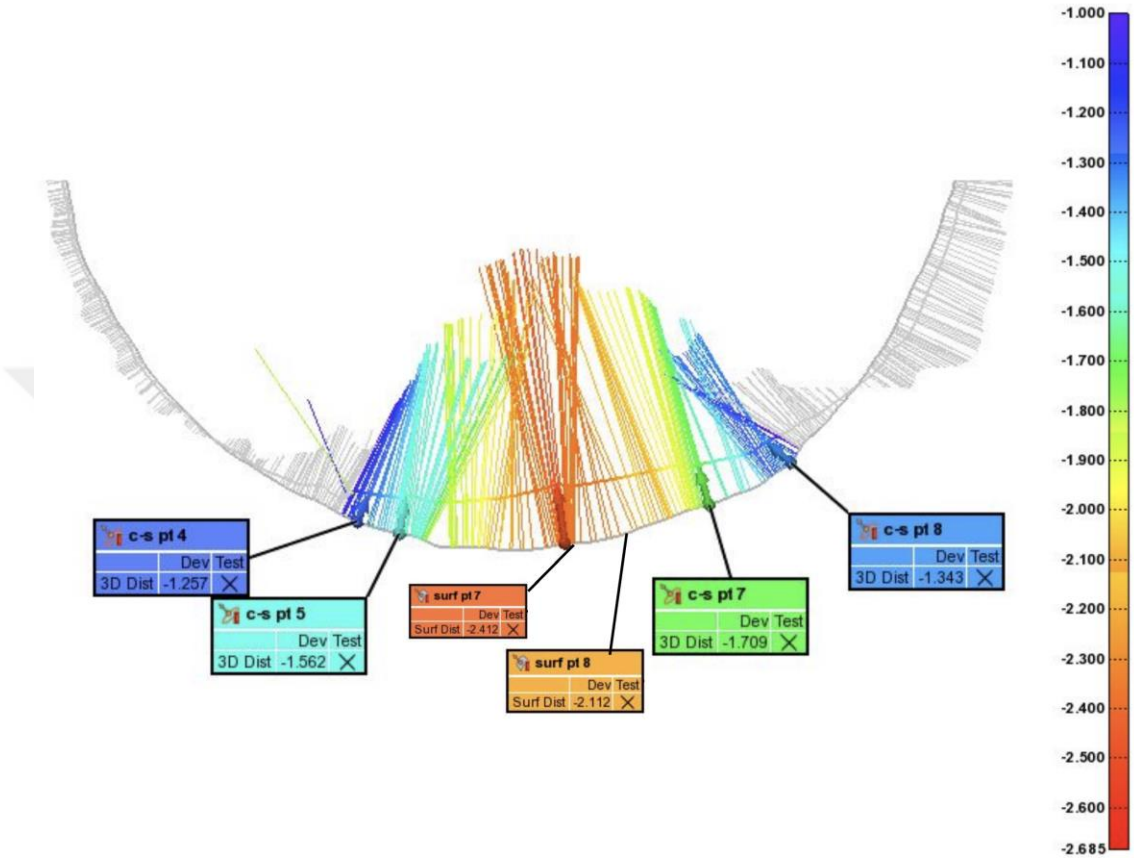


Şekil 4.56. Yatay kesiti alınan Hn deney numunesi şekil değiştirme diyagramı

Çizelge 4.9. Yatay kesiti alınan Hn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm tablosu

Nokta Adı	Kontrol	İlk Ölçüm (mm)	2. Ölçüm (mm)	Fark (mm)
c-s caliper 8	Uzunluk	37.435	37.062	-0.373
c-s caliper 9	Uzunluk	37.310	35.007	-2.303
c-s caliper 9	Uzunluk	37.291	36.805	-0.486

Şekil 4.57 ve Çizelge 4.10'da Hn deney numunesinin hasar sonrası dikey kesiti alınan numunenin ezilme kaynaklı şekil değiştirme ölçüm değerleri ve renk diyagramı gösterilmiştir.

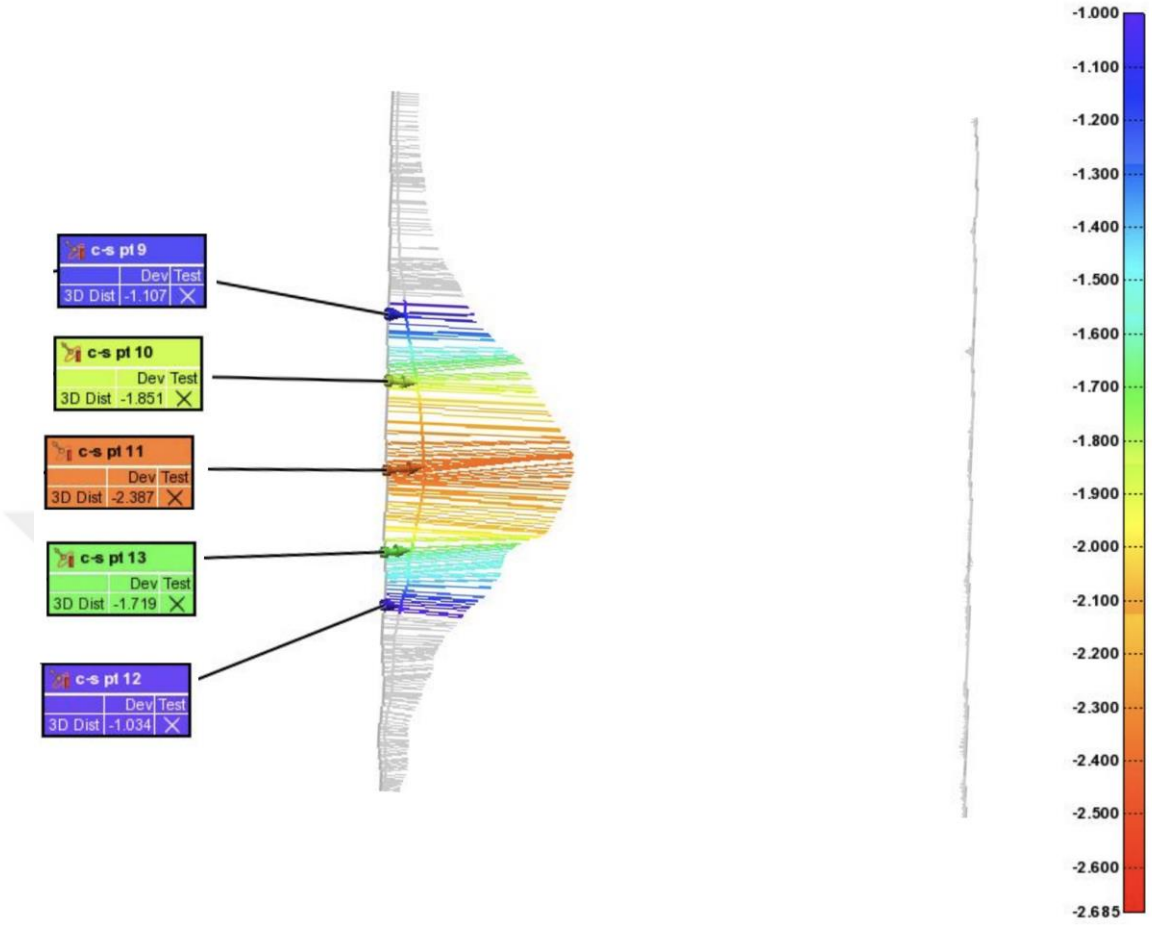


Şekil 4.57. Dikey kesiti alınan Hn deney numunesi şekil değiştirme metrolojik renk diyagramı

Çizelge 4.10. Dikey kesiti alınan Hn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm değerleri tablosu

Nokta Adı	Kontrol	Ölçüm (mm)
c-s pt 4	3D Mesafe	-1.257
c-s pt 5	3D Mesafe	-1.562
c-s pt 6	3D Mesafe	-2.457
c-s pt 7	3D Mesafe	-1.709
c-s pt 8	3D Mesafe	-1.343

Şekil 4.58 ve Çizelge 4.11'de ise Hn deney numunesinin hasar sonrası yatay kesiti alınan numunenin ezilme kaynaklı renkli metrolojik diyagramı ve bu diyagramdaki seçili noktaların şekil değiştirme ölçüm değerleri gösterilmiştir.

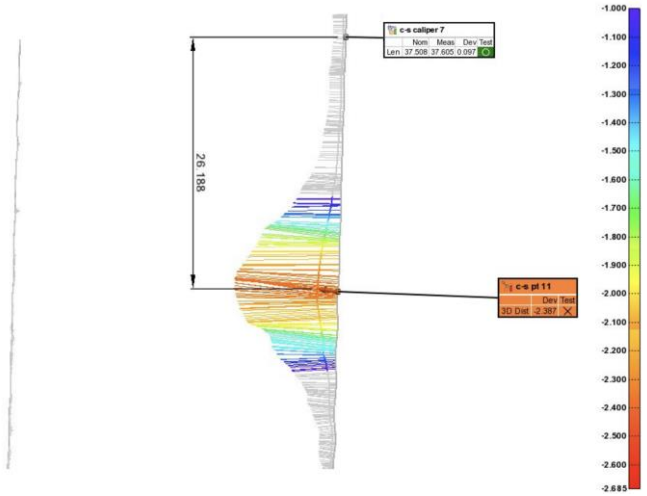


Şekil 4.58. Yatay kesiti alınan Hn deney numunesi şekil değiştirme metrolojik renk diyagramı

Çizelge 4.11. Yatay kesiti alınan Hn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm değerleri tablosu

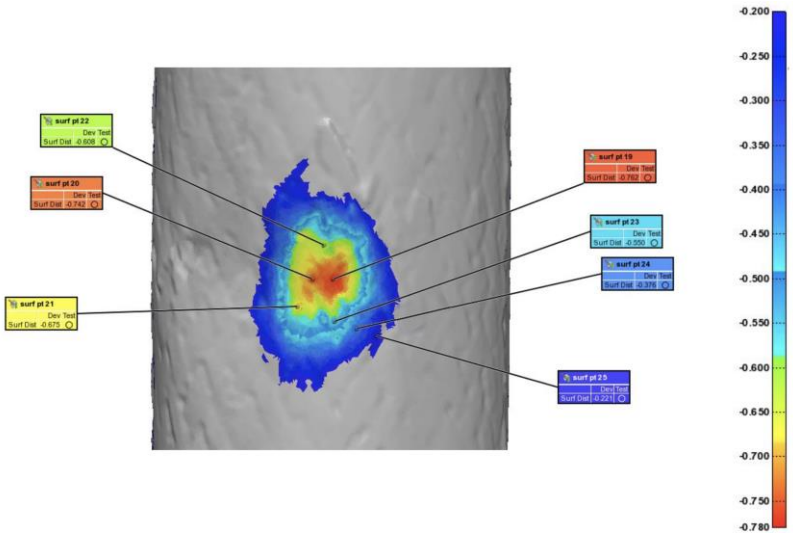
Nokta Adı	Kontrol	Ölçüm (mm)
c-s pt 9	3D Mesafe	-1.107
c-s pt 10	3D Mesafe	-1.851
c-s pt 11	3D Mesafe	-2.387
c-s pt 12	3D Mesafe	-1.304
c-s pt 13	3D Mesafe	-1.719

Şekil 4.59'da Hn numunesinin maksimum çökme bölgesinden, maksimum debonding ilk başlangıç noktası olan mesafenin (26,188mm) ölçüm diyagramı yer almıştır.



Şekil 4.59. Hn numunesinin maksimum çökme bölgesinden, ayrılma ilk başlangıç noktasına uzaklığı

Darbe çenesine ilk kez maruz kalan Vn numunesinin kompozit yüzeylerinde elde edilen sonuçlar yukarıda gösterilmiştir. Hasarsız, hasarlı ve iyileştirme ajan ile iyileştirilmiş yani debonding ve delaminasyon (tabakaların ayrılması) boşluklarına sızan iyileştirme ajanının kürlenme sonrası Hn deney numunesi tekrar hasara maruz bırakılmıştır. Bu hasarlar silsilesi sonrası Şekil 5.'te kıyaslaması yapılan deney numunelerinin noktasal şekil değişimleri gösterilmişti. İyileşme sonrası tekrar hasara maruz bırakılıp metrolojik testleri yapılan HRHn deney numunesinin (Şekil 4.60 ve Çizelge 4.12) renk ve ölçü metrolojik diyagramları bu bölümde yer almıştır.



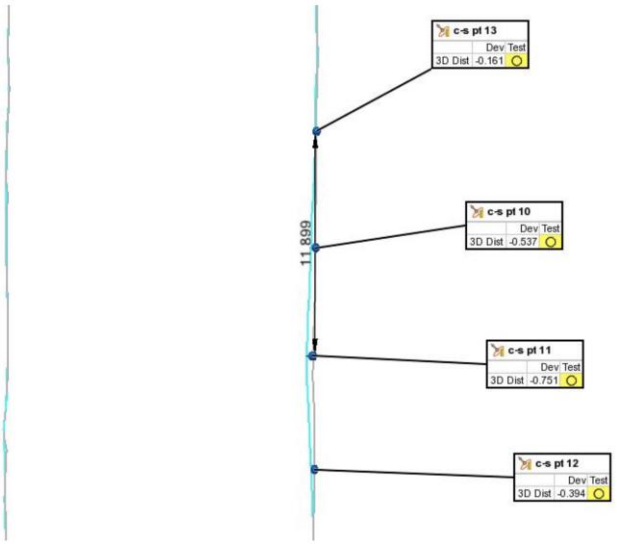
Şekil 4.60. İyileşme sonrası tekrar darbe testine maruz kalmış HRHn numunesinin lazer tarama ile hasar görüntü ve ölçüm değerleri

Çizelge 4.12. İyileşme sonrası tekrar darbe testine maruz kalmış HRHn noktasal şekil değiştirme ölçüm tablosu

Nokta Adı	Kontrol	Ölçüm (mm)
surf pt 19	Yüzey Mesafesi	-0.762
surf pt 20	Yüzey Mesafesi	0.742
surf pt 21	Yüzey Mesafesi	-0.675
surf pt 22	Yüzey Mesafesi	-0.608
surf pt 23	Yüzey Mesafesi	-0.550
surf pt 24	Yüzey Mesafesi	-0.376
surf pt 25	Yüzey Mesafesi	-0.221

Çizelge 4.12'de gösterilen darbe çenesinin hasar etkisine göre en yüksek 0.762 mm'lik çökme meydana gelmiştir. Sandviç malzemede debonding boşluklarının iyileştirme ajanı ve CFp tozları ile iyileşmesi ve mikro çatlak hasarlarının yüksek verimli onarılması sonucu daha düşük çıkmıştır.

HRHn numunesinin maksimum çökme bölgesinden maksimum debonding ilk başlangıç noktası olan mesafenin yaklaşık (11,899mm) ölçüm diyagramı Şekil 4.61'de yer almıştır. Ayrıca Şekil 4.61 ve Çizelge 4.13'te HRHn deney numunesinin iyileşme sonrası tekrarlanan hasarın metrolojik ölçümü ile hasar maksimum çökme bölgesinden yatay kesiti alınan numunenin şekil değiştirme ölçüm diyagramı gösterilmiştir.

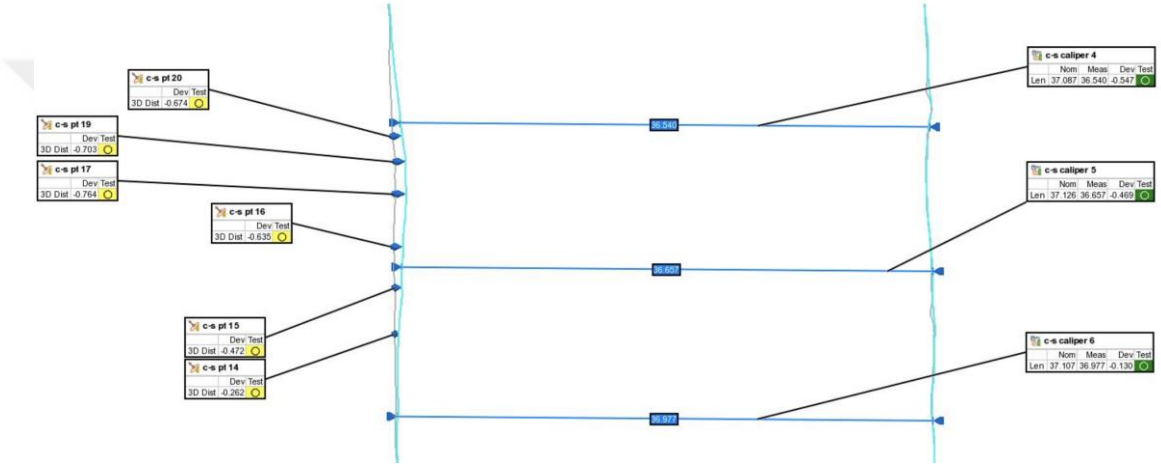


Şekil 4.61. Yatay kesiti alınan HRHn deney numunesi şekil değiştirme diyagramı

Çizelge 4.13. Yatay kesiti alınan HRHn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm tablosu

Nokta Adı	Kontrol	Ölçüm (mm)
c-s pt 10	3D Mesafe	-0.537
c-s pt 11	3D Mesafe	-0.751
c-s pt 12	3D Mesafe	-0.394
c-s pt 13	3D Mesafe	-0.161

Şekil 4.62 ve Çizelge 4.14'te ise HRHn deney numunesinin yatay kesiti alınan numunenin ezilme kaynaklı şekil değiştirmesi ölçüm diyagramı yer almıştır.

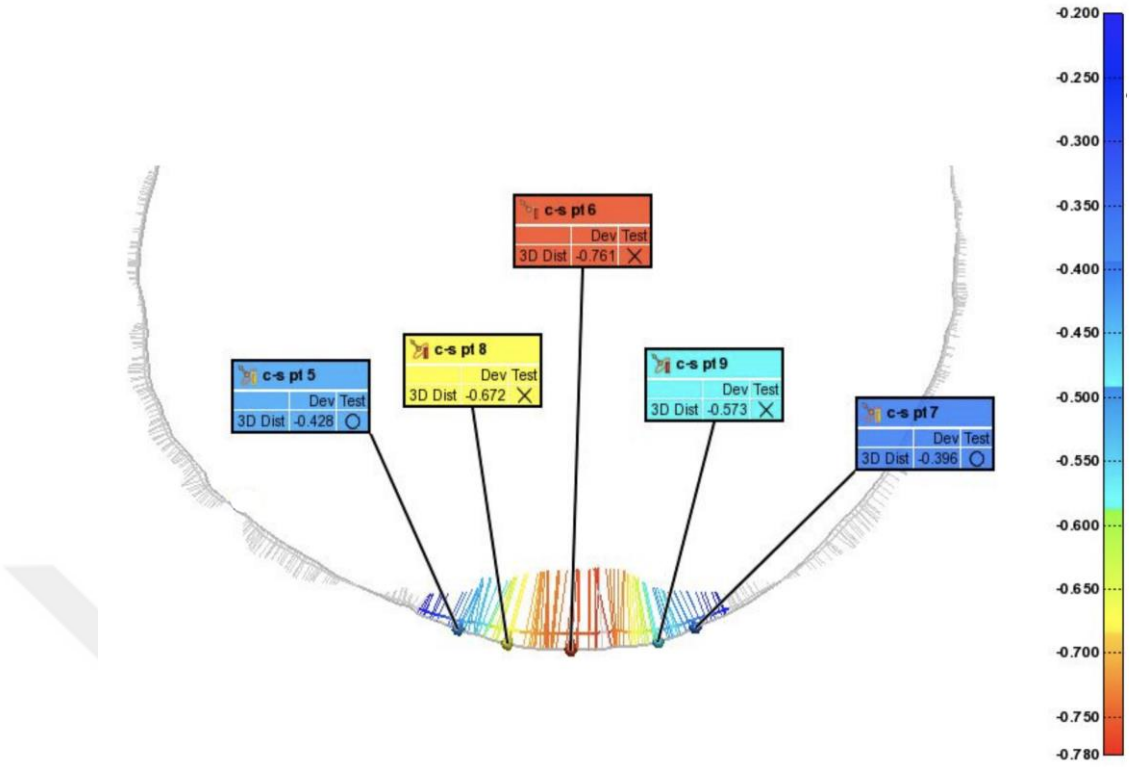


Şekil 4.62. Yatay kesiti alınan HRHn deney numunesi şekil değişikliği metrolojik farkı

Çizelge 4.14. Yatay kesiti alınan HRHn deney numunesi noktasal şekil değişikliği farkı ölçüm tablosu

Nokta Adı	Kontrol	İlk Ölçüm (mm)	2. Ölçüm (mm)	Fark (mm)
c-s caliper 4	Uzunluk	37.087	36.540	-0.547
c-s caliper 5	Uzunluk	37.126	36.657	-0.469
c-s caliper 6	Uzunluk	37.107	36.977	-0.130

Şekil 4.63 ve Çizelge 4.15'te HRHn deney numunesinin hasar sonrası dikey kesiti alınan numunenin şekil değiştirme ölçüm değerleri ve renk haritası gösterilmiştir.

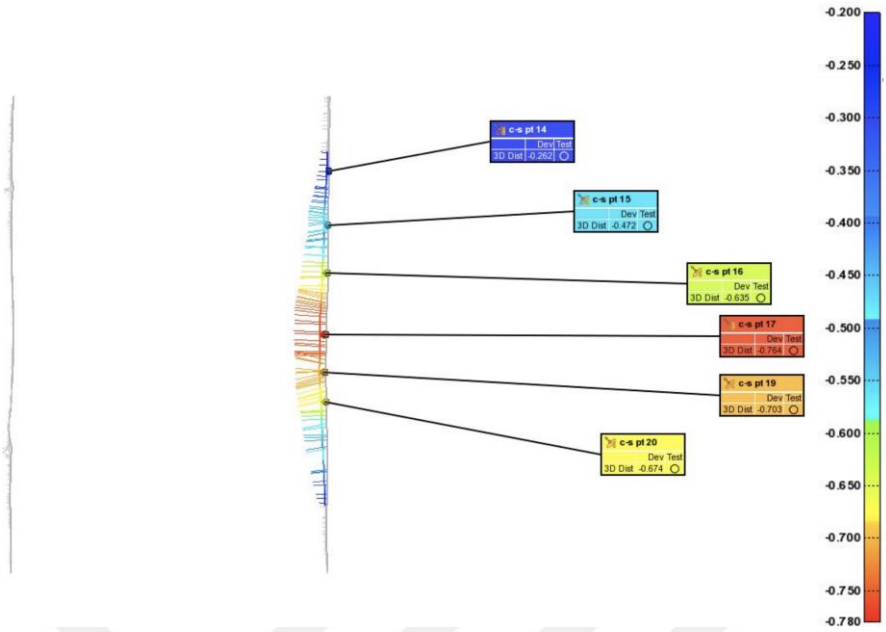


Şekil 4.63. Dikey kesit, HRHn deney numunesi şekil değiştirme metrolojik renk haritası

Çizelge 4.15. Dikey kesiti alınan HRHn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm değerleri tablosu

Nokta Adı	Kontrol	Ölçüm (mm)
c-s pt 5	3D Mesafe	-0.428
c-s pt 6	3D Mesafe	-0.761
c-s pt 7	3D Mesafe	-0.396
c-s pt 8	3D Mesafe	-0.672
c-s pt 9	3D Mesafe	-0.573

Son olarak Şekil 4.64 ve Çizelge 4.16'da ise yatay kesiti alınan HRHn deney numunesinin metrolojik renk haritası ve bu diyagramdaki seçili noktaların şekil değiştirme ölçüm değerleri gösterilmiştir.

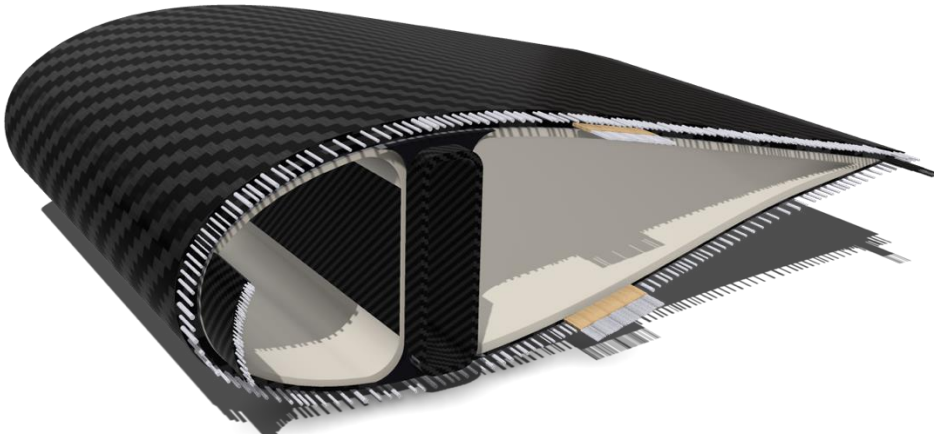


Şekil 4.64. Yatay kesiti alınan HRHn deney numunesi şekil değiştirme metrolojik renk haritası

Çizelge 4.16. Yatay kesiti alınan HRHn deney numunesi noktasal şekil değiştirme ölçüm değerleri tablosu

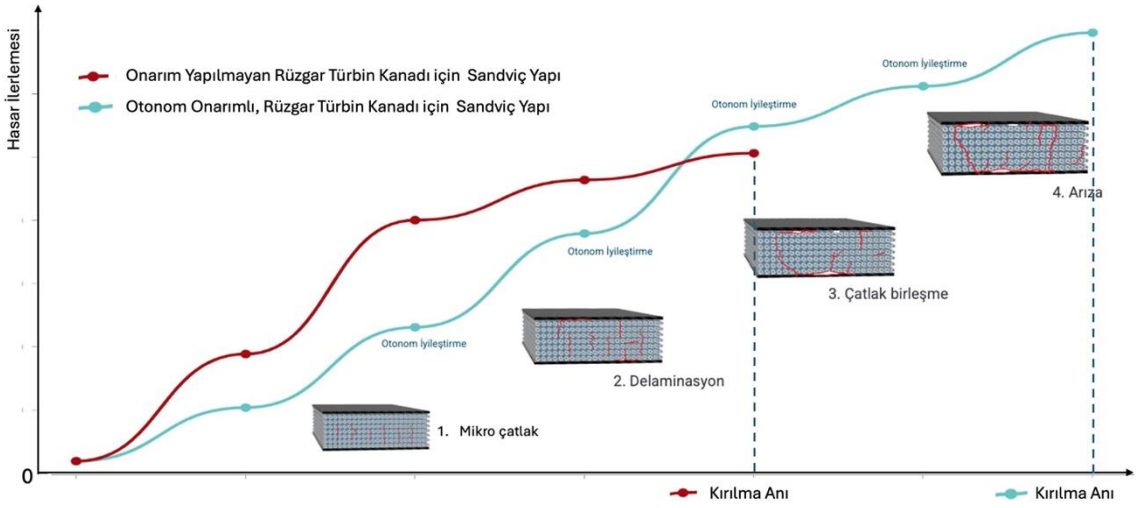
Nokta Adı	Kontrol	Ölçüm (mm)
c-s pt 14	3D Mesafe	-0.262
c-s pt 15	3D Mesafe	-0.472
c-s pt 16	3D Mesafe	-0.635
c-s pt 17	3D Mesafe	-0.764
c-s pt 19	3D Mesafe	-0.703
c-s pt 20	3D Mesafe	-0.674

Genel olarak malzemeler birçok şekilde davranabilir ancak rüzgâr türbini kanatları için en önemlisi elastik davranıştır. Rüzgâr türbini kanatları, büyük burkulma ve çevrim yükleri nedeniyle gerinim artışı ile stres altında olan olduğundan, yapı geçiş bölgeleri, maksimum kord bölgesi, yapıştırıcılar ve yapıştırma alanları gibi yerlerde spar caps sandviç kırıkları, sandviç cilt soyulmaları ve shear webs mikro çatlak yayılmaları gibi ciddi hasarlar alabilir (Jensen and Branner, 2023). Bu hasarları önlemek için otonom onarımlı kendi kendini iyileştirebilen yüksek potansiyele sahip kompozit sandviç bir yapı geliştirilmiştir. Şekil 4.65'te otonom onarımlı mikrovasküler kanallara sahip rüzgâr türbin kanat modelinin 3D kesit modeli gösterilmiştir.



Şekil 4.65. Otonom onarımlı mikrovasküler kanallara sahip rüzgâr türbin kanat modelinin 3D kesit modeli

Kanat yapısının statik ve yorulma mukavemetinin değerlendirilmesi yapı muayenesinde temel mühendislik unsurudur. Tekrarlanan yüklere maruz kalan kanat, yorulma nedeniyle mikro çatlakları ilerlettirerek kırılma meydana gelebilir. Bir rüzgâr türbini kanadındaki yük çevrimi sayısı çok fazladır. Yorgunluk sorunları panellerdeki bükülme nedeniyle zamanla yüzey ayrılmasına neden olacak şekilde soyulma gerilimlerinin yüksek olduğu bağlantı hatlarında sıklıkla ortaya çıkacaktır. Laminantın bükülmesi tabakalar arası bozulmaya yol açacaktır. Ayrıca rüzgâr türbini kanat kenarlarına etki eden fazladan ek kuvvetlere bağlı yüklemeler (dönme sırasında oluşan kuvvetler, kanat üzerinde biriken buzun ağırlığı, vb.) ve artan soyulma gerilmeleri yüzünden kanadın burkulmaya dayanıklılığının azalmasına neden olmaktadır (Bladena, 2023; Mishnaevsky, 2022; Brondsted vd., 2023). Bu durumlarda kanatların çevrim esnasında öncül arızalara yol açabilmektedir. Bu bağlamda otonom onarımlı kendi kendine iyileştiren malzemeler kullanılarak bu sorunları azaltacak ve kanat ömrünü artıracak mekanizmalar kullanılabilir. Şekil 4.66'da otonom onarım rüzgâr türbin kanat kullanımı ile artacak tahmini rüzgâr türbin kanatlarının çevrim ömrünün grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.66. Uygulanan çok tekrarlı yükler ile stres altında çatlakların ilerlemesine bağlı otonom onarımlı ve onarım yapılmayan sandviç yapı kıyaslaması

Mikrovasküler kanallara sahip otonom onarımlı silindirik sandviç yapının darbe hasarını, iyileşme oranlarını ve kırılma modlarını görmek ve ölçmek için çeşitli tahribatsız değerlendirme yöntemlerinden termografi, DIC, 3D lazer tarama ve X-Işını tomografik ölçümler kullanılmıştır. Bu yöntemler çatlaklar, çukurlar ve gizli kusurlar gibi hasarın derinliğini ve şeklini göstermiştir. Bu teknikler, numunelerin içindeki delaminasyonları, girintileri ve zor fark edilen hasarları ve iyileştirmeleri ortaya çıkarmıştır.

Tahribatsız testler, deney numunelerinin düşük enerjili yüklemelere karşı daha dirençli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, numunelerin yüzeylerinde yoğunluk gösteren ve artan enerjilerde daha sonra debonding, delaminasyon ve elyaf kopması gibi çarpma hasarlarına direnç gösteren iyileştirilmiş bölgelerin belirlenmesine olanak tanımaktadır.

Çarpma davranışı karşılaştırıldığında çekirdek yapı enerji absorbesi ve çarpma hasarına karşı daha hızlı yanıt vermiş olup yüksek çarpma enerjilerinde daha derin girinti oluşmasına rağmen çatlak birleşmesinin yavaşlattığını ve iyileşmelerin devam ettiği görülmüştür. Yapı, daha iyi bir gerilim aktarımı ile ilgili olarak daha yüksek yük maksimumları ve daha yüksek enerji emilimi sağlanmıştır.

Rüzgâr türbinlerinde yüksek verimli, otonom iyileşme ve yorulma olaylarına dayanıklı parçalar üretmek için uygun malzemeler olmuştur. Ana yarar, kendi kendini iyileştiren nano kanal yapılı sürekli fiberlere sahip sandviç tasarımı sayesinde uzun ömürlü türbin kanatları ve düşük üretim maliyeti kapsayıcı olmuştur. Ayrıca ömrü bittiğinde atık sorununu çözmeye yardımcı olduğu vurgulanmıştır.

5. SONUÇ

Bu çalışma, rüzgâr türbin kompozit kanat yapısı ve sandviç malzemeler ile ilgili olarak Bölüm 2'de belirtilen ihtiyaçları karşılayan, var olan eksikliklere katkı getiren ve ek bazı yararlar sağlayan bir çalışma olmuştur. Ayrıca bu çalışma mühendislik alanında kullanılan sandviç malzeme çekirdekleri ve kendi kendine tamir edebilen malzemeler ve iyileştirme mekanizmasını içeren kompozit sandviç yapılarla ilgili çözüm sunmuştur.

Büyük burkulma ve döngü yüklerinin etkisiyle rüzgâr türbini kanatları, yapı geçiş bölgelerinde, maksimum kord alanında, yapıştırıcılarda ve yapıştırma bölgelerinde, spar caps çatlakları, sandviç cilt ayrılmaları ve shear webs mikro çatlak ilerlemesi kaynaklı ayrılmalar gibi önemli hasarlara karşı geliştirilen otonom onarım yeteneğine sahip, kendi kendini iyileştiren bir kompozit sandviç yapısıyla güçlendirilmiştir.

Biyolojik damar yapılardan esinlenerek geliştirilen, uzun ömürlü, geri dönüştürülebilir, içi boş nano kanal fiberlerden oluşan tamir edici iyileştirici akışkanları hasar gören alanlara taşıyabilen ve yeniden şekillendirilebilir farklı biçimlerde hafif ve kompozit sandviç malzeme çekirdeği oluşturulmuştur. Özellikle Rüzgâr türbini kanat endüstrisi, havacılık, denizcilik, otomotiv ve diğer sektörlerde kullanılmak üzere tasarlanan bu kompozit sandviç yapı, mikro çatlakları iyileştirebilme, hasar anında ve sonrasında çatlak onarabilme, delinme kaynaklı sızıntıyı önleme özellikleriyle birlikte acil durumlarda güçlendirmeyi en üst düzeye çıkarmak amacıyla üretilmiştir.

Bu sandviç yapının çok kanallı çekirdek yapısı, çekirdeğin tamir mekanizmalarıyla tanımlandığından aynı zamanda anlık mikro tamir sistemini de içerir. Bilinen tekniklerden farklı olarak kompozit sandviç yapı, kendi kendini iyileştirebilen sık nano kanallardan oluşan çekirdeğe sahiptir. Tek komponentli iyileştirici ajanın, bu mikrovasküler kanallar aracılığı ile hasarlı bölgeye enjekte edilmesini sağlar.

İyileştirme mekanizması çekirdekte nano kanalları bir arada tutan matris yapısında nano toz halinde bulunan yeni bir aktivatöre ile iyileştirme ajanının polimerleştirme başlatıcısı olarak çalışmasını sağlar.

Mevcut genel olarak bilinen toz başlatıcılar yüksek mukavemet kayıplarına neden olmaktadır. Bu durumdan farklı olarak sandviç çekirdek matris yapısında bulunan ve her bölgeye yayılan dayanıklılığı artıran kendi kendini iyileştirme sistemlerinde literatürde rastlanılmayan yeni bir aktivatör bu çalışmada fark edilmiştir. Endüstriyel karbon fiber kaplama reçetesi mevcut ve tedariği kolay olan mikro ve nano boyutlu karbon fiber tozlar aktivatör olarak kullanılmıştır. Bu sayede hasarlı bölgedeki iyileştirme ajanının anlık çapraz bağ oluşumu (kürlenme) gerçekleşmiştir. Karbon fiber lif tozları, mekanik dayanımı belli bir oranda yükseltirken iyileştirici madde kanaldan çıkıp yüzeye geldiğinde hızlıca rijitliğini sağlar. Böylece fiber toz desteği ile iyileştirici madde ve matris arasındaki uyum artmıştır.

Çekirdeği oluşturan nano kanalların cidarları, dıştan içe doğru daralan gözenekli bir membran şeklindedir. Bu sayede hasar durumunda nano kanallara sıkıştırılan iyileştirici madde, kanallar ezilse, kırılsa, çatlasa veya kopsa bile mikro çatlaklara, hasarlı ve boşluklu alanlara, hızla ulaşmaktadır. Bu sandviç yapının ve nano kanallı çekirdekten oluşması kompozit malzemelerin hasar gördüğünde doğrudan onarılmasını imkân sağlamaktadır.

Bu çalışma ile özetle, rüzgâr türbinleri kanatlarında, kendini tekrar tekrar iyileştirebilen ve yüksek enerji emme kapasitesine sahip bir sandviç çekirdek yapısı oluşturulmuştur. Bu bağlamda çoklu nano kanallı hafif bir çekirdek yapısı ve kendi kendini iyileştirme sistemi bu çalışmada özetle maddeler halinde aşağıdaki özelliklerle sonuçlandırılmıştır:

- Çok tekrarlı darbe deneylerinin aritmetik ortalaması alınmış olup hasar yoğunluğuna göre yaklaşık otonom onarım yüzdesi minimum %6,4 maksimum %92 ve iyileşme verimliliği (η) %62-88 arasında hesaplanmıştır.
- İçi boş fiber kanallar, hasarlı alanlara ve sızıntılara uygun, nano boyutta olup polisülfon ve polietersülfon termoplastik türevleri kullanılmıştır.
- Bu nano kanalların üretimde insan sağlığı için zararlı olan kimyasal bileşen bisfenol A bulunmamaktadır.
- Ayrıca kanalların alev geciktirme yeteneği mevcuttur.

- Kanalların cidarları, tersinir membran özelliğindedir. Duvar kalınlığı içe doğru azalır. Bu, kanalda akışın tıkanmadan devam etmesini ve hasarlı alanlara sızıntının kolay olmasını sağlar.
- Bu sayede içi boş ve gözenekli kanallar, duvar yapısı ve hasar boşluklarına ulaşma yeteneği ile hasara hızlı tepki veren bir geçirgenlik sunar.
- Kendi kendini iyileştirme de genellikle toz aktivatör katkılı yöntemler düşük mukavemet özelliklerine sahiptir. Bu nedenle yeni bir toz aktivatör olabilen karbon fiber tozları kullanılmıştır.
- Karbon fiber üretiminin boyutlandırma (sizing) kaplaması sayesinde, karbon fiber tozları ile iyileştirici madde ile kürlenmiş ve hasar sonrası oluşan mekanik kayıpları indirgemiştir.
- Bu teknolojik malzemeler ile sıkı sıkı yerleştirilmiş nano kanalların, karbon fiber toz katkılı bir matrisle bir arada olması sağlanmış bu bağlamda yeni bir sandviç çekirdek yapı oluşturulmuştur.
- Bu özellikler kapsamında nano kanalların tıkanma problemi çok azdır ve yoğun kanalların nano boyutu sayesinde hasarlı bölgelere ulaşım ve iyileşmenin her yerde olması sağlanmıştır.
- Sandviç çekirdek yapı ile güçlendirilmeye uygun, sızıntı ve hasara karşı hemen tepki veren tekrar ve çoklu kullanıma sahip bir yapı formu olmuştur.
- Rüzgâr türbin kanatlarının kullanım ömrünü artıran tamir maliyeti ve bakım süreçlerini azaltan kendi kendini iyileştiren malzemeler ile rüzgâr türbini kanatların otonom onarmaya uygunluğu gösterilmiştir.

Ülkemiz de kısa bir süre içerisinde, deniz üstü rüzgâr türbinleri ve endüstrisi yer alacaktır. Bu bağlamda artan üretim ve bakım maliyetlerine karşılık, rüzgâr türbin kanat yapılarında iyileştirme vasfı ile mikro hasarların önlenerek onarım maliyetinin düşürüleceği bu çalışma ile ifade edilmiştir. Yüksek performans kompozit uygulamaları gerektiren rüzgâr türbin kanat yapılarında verimlilik ve ömür artırıcı uygunluk sağlayacağı ve de kendi kendini onaran kanatlar için sandviç yapılar bu çalışma ile numerik ve deneysel verilerle önerilmiştir.

KAYNAKLAR

Aytaç, A., Galata Wind, kişisel görüşme, (17 Haziran 2022). https://www.linkedin.com/posts/gonencduran

Alpkunt, B., (2021, Haziran 3). Rüzgâr Türbini Ne İşe Yarar ve Nasıl Çalışır? https://evrenatlasi.com/ruzgar-turbini-ne-ise-yarar-ve-nasil-calisir/

Altinkaynak, S., (2018). WDM hattı üzerinde FBG sensörü tabanlı performans uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enst., Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Altun, O., (2004). Türkiye koşulları için rüzgâr türbini seçimi. http://dspace.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/9925

Amano, R. S., Lewinski, G., & Shen, R. (2022). Imprinted Glass Fiber-Reinforced Polymer Vascular Networks for Creating Self-Healing Wind Turbine Blades. Journal of Energy Resources Technology, 144(6), 062107. https://doi.org/10.1115/1.4052772

Analysis of adhesively bonded repairs in composites: damage detection and prognosis

Anderson, T., L., (1995). Fracture mechanics fundamentals and applications, 2nd edn. CRC, New York, NY.

Aran, A., (2023, Kasım 25). Kompozit Malzemeler, Ders notu, Makine Fakültesi, İTÜ.

Asim T, Islam SZ, Hemmati A, Khalid MSU. A Review of Recent Advancements in Offshore Wind Turbine Technology. Energies. 2022; 15(2):579. https://doi.org/10.3390/en15020579

Aslan, M., Güler, O., & Alver, Ü. (2018). Farklı yüzey ve çekirdek malzemelerine sahip sandviç panel kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24(6), 1062-1068.

Aydoğdu, Ç. (2021). Yenilenebilir Enerji Sektöründe ve Enerji Verimliliğinde Kamusal Destekler ve Türkiye'de Yansımaları. Akademik İzdüşüm Dergisi, 6(1), 52-74.

Ayrilmis, N., Kaymakci, A., & Güleç, T. (2015). Potential use of decayed wood in production of wood plastic composite. Industrial Crops and Products, 74, 279-284.

Bayram, H., (2015, 23 Kasım). Rüzgâr Türbini: Hasarları Zamanında Tespit Edin, https://www.trotec-blog.com/tr/tkl/ruzgar-turbini-hasarlari-zamaninda-tespit-edin/

Bekas, D. G., Baltzis, D., & Paipetis, A. S. (2017). Nano-reinforced polymeric healing agents for vascular self-repairing composites. Materials & Design, 116, 538-544.

Bekem A., (2013). Elyaf takviyeli, termoplastik matrisli kompozit malzeme üretimi ve karakterizasyonu (Doctoral dissertation).

http://dspace.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/13315

Belzona, (2023). Wind Power Map, Mobile App., https://apps.apple.com/gb/app/wind-power-map/id1510611317

BestforEnergy, (2023, 30 Aralık). Temiz Enerji, https://www.bestforenergy.org/temiz-enerji-i-1845

Bhattacharya, S. (2019). Design of foundations for offshore wind turbines. John Wiley & Sons. ISBN:1119128153, 9781119128151

Bing, (2023, Aralık). Artificial intelligence-based interactive research and learning, MS, Copilot app.

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Raporu, (2023, 30 Aralık). https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

Bladena Solutions, (2024, Ocak 5). https://www.bladena.com/d-stringreg.html

Bladena, (2023). Wind Turbine Blades Handbook, Kirtxthomsen, Edition 2022, ISBN: 978-87-971709-0-8

Blaiszik, B.J., S.L.B. Kramer, S.C. Olugebefola, J.S. Moore, N.R. Sottos, S.R. White, (2010). Self-Healing Polymers and Composites, Annual Review of Materials Research 40:1, 179-211. https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104532

Branner, K. And Ghadirian, A. Database about blade faults. DTU Wind Energy. (DTU Wind Energy E; No. 0067). 2014. Available online: https://core.ac.uk/download/pdf/43253602.pdf

Broṇdsted, P., Nijssen, R. P., & Goutianos, S. (Eds.). (2023). Advances in wind turbine blade design and materials. Woodhead Publishing.

Caminero, M. A., Pavlopoulou, S., Lopez-Pedrosa, M., Nicolaisson, B. G., Pinna, C., & Soutis, C. (2013). Analysis of adhesively bonded repairs in composites: Damage detection and prognosis. Composite Structures, 95, 500-517. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.07.028

Castelos, P., Haller, B., & Balzani, C. (2022). Validation of a modeling methodology for wind turbine rotor blades based on a full-scale blade test. Wind Energy Science, 7(1), 105-127. https://doi.org/10.5194/wes-7-105-2022

Castelos, P., N., (2023, 26 Eylül). Exploring Advanced Blade Modeling Techniques with MoCA In Linkedin, https://www.linkedin.com/pulse/exploring-advanced-blade-modeling-techniques-moca-noever-castelos/?utm_source=share&utm_medium=member_ios&utm_campaign=share_via

Castelos, P., N., (2023). Updating structural wind turbine blade models via invertible neural networks. Doktora Tezi. Dissertations of the Institute for Wind Energy Systems.
Ceylan, E., (2022, Nisan 13). Rüzgâr Türbinlerinin Üç Kanatlı Tasarlanmasının Dahiyane Sebebi, https://www.webtekno.com/ruzgar-turbinleri-neden-uc-kanatli-h122520.html

Chaki, S.; Krawczak, P. Non-Destructive Health Monitoring of Structural Polymer Composites: Trends and Perspectives in the Digital Era. Materials 2022, 15, 7838. https://doi.org/10.3390/ma15217838

Chen, Y., & Griffith, D. T. (2023). Experimental and numerical full-field displacement and strain characterization of wind turbine blade using a 3D Scanning Laser Doppler Vibrometer. Optics & Laser Technology, 158, 108869.

Christian B, (2023). Aerodynamic design of wind turbine rotors, Editor(s): Povl Brøndsted, Rogier Nijssen, Stergios Goutianos, In Woodhead Publishing Series in Energy, Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials (Second Edition), Woodhead Publishing, Pages 79-128, ISBN 9780081030073, https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103007-3.00001-X.

Cordier P, Tournilhac F, Soulié-Ziakovic C, et al. (2008). Self-healing and thermoreversible rubber from supramolecular assembly. Nature 451(7181): 977–980.

Cuvellier, A., Torre-Muruzabal, A., Van Assche, G., De Clerck, K., & Rahier, H. (2017). Selection of healing agents for a vascular self-healing application. Polymer Testing, 62, 302-310.

Çevik, R., (2019). Rüzgâr Türbinleri Nasıl Çalışır? https://www.elektrikport.com/makale-detay/ruzgar-turbinleri-nasil-calisir/22357#ad-image-0

Çolakoğlu, L., (2023, Ekim 4). Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri, https://levtems.com/kompozit-malzemelerin-uretim-yontemleri/

Dai, T. T., Jia, Z. G., Ren, L., & Li, Y. T. (2022). Design and experimental study on FBG-based crack extension monitoring sensor. Optical Fiber Technology, 71, 102946. https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102946

Demirgil, B., & Birol, Y. E. (2020). Yenilenebilir Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Türkiye İçin Bir Toda-Yamamoto Nedensellik Analizi. Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 21(1), 68-83. https://doi.org/10.37880/cumuiibf.671591

Dost K., (2023, Ocak 7). Karbon Fiber Tozu, TDS, Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. Ltd. Sti, https://www.kompozit.net/karbon-elyaf-tozu-100-400-micron-1-kg

Dost K. 2, (2023, 8 Ocak). Epoksi Reçine TDS, Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. Ltd. Sti, https://www.dostkimya.com/tr/urunler/epoksi-sistemler//mgs-laminasyon-epoksi-recine-l160

Dost K. 3, (2023, 10 Ocak). Karbon Fiber Hortum, TDS, Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. Ltd. Sti, https://www.kompozit.net/karbon-fiber-hortum-70-350-5m2

Duernberger, E., MacLeod, C., & Lines, D. (2023). Fibre volume fraction screening of pultruded carbon fibre reinforced polymer panels based on analysis of anisotropic ultrasonic sound velocity. Composites Part B: Engineering, 254, 110577.

Duffy, C., Zetterlund, P.B., Aldabbagh, F., (2018). Radical Polymerization of Alkyl 2-Cyanoacrylates. Molecules, 23, 465. https://doi.org/10.3390/molecules23020465

Durak, M., (2021, 19 Nisan). Denizüstü Rüzgâr Enerjisi Derneği: "Türkiye'nin offshore rüzgâr enerjisi potansiyeli 75 GW", Temiz Enerji Haber Portalı, https://temizenerji.org/2021/04/19/denizustu-ruzgar-enerjisi-dernegi-turkiyenin-offshore-ruzgar-enerjisi-potansiyeli-75-gw/

Duran G. ve Yazıcı, M., (2023). Yeni Bir Kanat Yapılanması, PCT/TR2023/051574, Turkish Patent and Trademark Office.

Duran, G., Can., Y. ve Yazıcı, M., (2023). Self-Healing Composite Materials with a Novel Microvascular Approach", The International Conference on Mechanical, Materials and Renewable Energy (ICMMRE), World Research Society, 27 -28 April, 2023, Ghent, Belgium. WRS-MMREGHEN-270423-002.

Duran, G., Dönmez, M., and İlkılıç, C., (2023). An Investigation on Engine Performance and Emissions of Using Microalgae and Microalgae-Ethanol Blends. J. of Thermal Science and Technology, 43(1), 107-118. https://doi.org/10.47480/isibted.1290750

Ekolojist, (2017, 9 Ağustos). Dünyada Rüzgâr Enerjisi Kullanımı, https://ekolojist.net/dunyada-ruzgar-enerjisi-kullanimi/

Elektrikde, (2020, 19 Ağustos). Kompozit Malzeme Nedir? Kullanımı ve Örnekleri, https://www.elektrikde.com/kompozit-malzeme-nedir-kullanimi-ve-ornekleri/

Elektrikinfo, (2024, 1 Ocak). Rüzgâr Türbini Çalışma Prensibi: Türbin Çeşitlerine Göre, https://elektrikinfo.com/ruzgar-turbini-calisma-prensibi/

Elibüyük, U., & Üçgül, İ. (2014). Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri Ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri. Yekarum, 2(3).

Elsa L., (2023). Concerned about the BMW battery pack for electric cars, i3 and its brothers. https://www.lifepo4- battery.com/News/BMW-I3-BATTERY.html

Enerji Atlası, (2023 Aralık). Ülkelere Göre Dünyada Rüzgâr Santrali Kurulu Gücü Listesi, https://www.enerjiatlasi.com/ulkelere-gore-ruzgar-enerjisi.html

Eon Photonics, (2023, 5 Mart). FBG Sensör, https://www.eonphotonics.com/tr-TR/Urun/FBG_TR
Eon Photonics, (2024, 6 Ocak). FBG Sensors, https://www.eonphotonics.com/en-US/Urun/FBG

Erdil A., (2023, 23 Ağustos), Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri ve Kullanımı, https://blog.tekyaz.com/kompozit-malzemelerin-genel-ozellikleri-ve-kullanimi/

Erlas, (2023, 24 Kasım). Kompozit Malzemeler, https://erlas.com.tr/fiberglass-endustriyel-urun-imalati/kompozit-nedir

Ermaksan, (2023, 5 Mart). FBG Sensör, https://www.ermaksan.com.tr/tr-TR/urunler/optoelektronik/fbg-sensor

Euronews, (2021, 9 Haziran). Climate Now, https://tr.euronews.com/green/2021/06/09/avrupa-n-n-offshore-ruzgar-enerjisi-sektoru-yukseliste

Feng, Y., & Chung, T. S. (2021). Hollow Fiber Membranes: Fabrication and Applications. Elsevier. https://www.sciencedirect.com/book/9780128218761/hollow-fiber-membranes?via=ihub=

Fink, J., K., (2013). Chapter 13—Cyanoacrylates. In Reactive Polymers Fundamentals and Applications, 2nd ed.; Fink, J.K., Ed.; Elsevier: London, UK; pp. 317–330. ISBN 978-1-4557-3149-7.

Follansbee, P. S., Armstrong, P. E., Hockett, J. E., Dudder, G. B., & Erlich, D. C. (1985). High strain rate compression testing. ASM Handbook., 8, 190-207.

Gabbar, H., & Abueldahab, Y. (2021). Application of Fiber Bragg Grating (FBG) Sensing Technologies in Power System. IEEE Smart Grid Newsletter Compendium.

Gao, Y. (2017). Correlated effect of air gap and PVP concentration on the structure and performance of PVDF ultrafiltration hollow fiber membrane. Journal of Membrane Science and Research, 3(2), 78-83.

Gardner, D., Jefferson, A., Hoffman, A., & Lark, R. (2014). Simulation of the capillary flow of an autonomic healing agent in discrete cracks in cementitious materials. Cement and Concrete Research, 58, 35–44. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.01.005

Gautam, G., Singh, K. K., & Mohan, S. (2023). Correlating topographical characteristics of relaxed layer to tribology in Cu-Gr-TiC composite system. Surface Topography: Metrology and Properties, 11(1), 015015. DOI 10.1088/2051-672X/acc045

Gelişimci Mühendis. (2020, 2 Kasım). Tabakalı Kompozit Malzemeler- Sandviç Yapılar. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=-rhLWOHeMQM

Getmidas, (2022, 14 Aralık). Yenilenebilir Enerji Nedir? Yenilenebilir Enerji Kaynakları Nelerdir? https://www.getmidas.com/blog/yenilenebilir-enerji-nedir-ve-yenilenebilir-enerji-kaynaklari-nelerdir/

Gopalakrishnan, S., & Rajapakse, Y. (Eds.). (2017). Blast mitigation strategies in marine composite and sandwich structures. Springer.

Gupta, R., Huo, D., White, M., Jha, V., Stenning, G. B., & Pancholi, K. (2019). Novel method of healing the fibre reinforced thermoplastic composite: A potential model for offshore applications. Composites communications, 16, 67-78.

Güler, C., & Ulay, G. (2010). Köpüklü kompozit (sandviç) levhaların bazı teknolojik özellikleri. SDÜ Orman Fakültesi Dergisi, Seri: A, 2, 88-96. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/195733

Hansen, C. J., Wu, W., Toohey, K. S., Sottos, N. R., White, S. R., & Lewis, J. A. (2009). Self-healing materials with interpenetrating microvascular networks. Advanced Materials, 21(41), 4143-4147.

Harper, L., & Clifford, M. (Eds.). (2022). Design and Manufacture of Structural Composites. Woodhead Publishing. ISBN: 978-0-12-819161-3 (online)

Haselbach, P. U., Chen, X., & Berring, P. (2022). Place smart, load hard-structural reinforcement of the trailing edge regions of a wind turbine blade strengthening the buckling resistance. Composite Structures, 300, 116068. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116068

Herrmann, L., Lars P. Mikkelsen, Brian N. Legarth, Christian F. Niordson, The influence of the fiber–matrix microstructure on the energy release rate of off-axis tunnel cracks in laminates, Composites Part B: Engineering, Volume 247, 2022, 110338, ISSN 1359-8368, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110338.

Hexagon, (2023, 23 Ekim). Kompozit Malzeme Nedir? https://hexagon.com/tr/resources/resource-library/what-are-composite-materials

Hexagon, (2023, 20 Nisan). Metrology, https://hexagon.com/products/absolute-scanner-as1-portable-measuring-arms/absolute-scanner-modular

Hogg, S., Fokke B., (2023, Ocak 3). Wind turbines are already skyscraper-sized – is there any limit to how big they will get? , The Conversation, https://theconversation.com/wind-turbines-are-already-skyscraper-sized-is-there-any-limit-to-how-big-they-will-get-196131

Hu, F. Z., Soutis, C., (2000). Strength prediction of patch-repaired CFRP laminates loaded in compression Compos. Sci. Technol., 60 (7), pp. 1103-1114. https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00011-7

Ida, S. (2014). PES (Poly(ether sulfone)), Polysulfone. In: Kobayashi, S., Müllen, K. (eds) Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9_238-1

Islam, S., & Bhat, G. (2021). Progress and challenges in self-healing composite materials. Materials Advances, 2(6), 1896-1926.

İçi boş fiber. (2024, 6 Ocak). In Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Hollow_fiber_membrane

Jadoun, S. (2023). Synthesis, Mechanism, and Applications of Self-healing Materials. Biomedical Materials & Devices, 1-16.

Jensen, F. ve M., Branner, K., (2023), Introduction to wind turbine blade design, In Advances in wind turbine blade design and materials (pp. 3-53). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103007-3.00009-4

Jiang, Y., Ng, E.L.L.; Han, D.X.; Yan, Y.; Chan, S.Y.; Wang, J.; Chan, B.Q.Y. Self-Healing Polymeric Materials and Composites for Additive Manufacturing. Polymers 2023, 15, 4206. https://doi.org/10.3390/polym15214206

Jones, P., 2022, How much do electric car batteries cost? https://motorandwheels.com/how-much-do-electric-car-batteries-cost/

Jony, B., Mulani, S. B., & Roy, S. (2022). Interlaminar shear fracture healing of thermoset CFRP composite using multiphase thermoplastic healing agents. Composite Structures, 279, 114807.

Kalkınma planı 12., (2023, Aralık). https://onikinciplan.sbb.gov.tr/

Kashtalyan, M., Soutis, C., (2000). The effect of delaminations induced by transverse cracks and splits on stiffness properties of composite laminates Compos. Appl. Sci. Manuf., 31 (2) (2000), pp. 107-119. https://doi.org/10.1016/S1359-835X(99)00066-4

Kaya, K., & Koç, E. (2015). Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kanat Profil Tasarımı ve Üretim Esasları. Engineer & The Machinery Magazine, (670). https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1099969

Kefal, A., (2019). An efficient curved inverse-shell element for shape sensing and structural health monitoring of cylindrical marine structures. Ocean Engineering, 188, 106262.

Khan M. H., Li B., Tan K. T., (2020). Impact Performance and Bending Behavior of Carbon-Fiber Foam-Core Sandwich Composite Structures in Cold Arctic Temperature. Journal of Composites Science, 4(3):133. https://doi.org/10.3390/jcs4030133

Kim, S. R, Nairn, J. A., (2000). Fracture mechanics analysis of coating/ substrate systems part II: experiments in bending. Eng Fract Mech 65:595–607. doi:10.1016/S0013-7944(99)00142-3 35.

Klemarczyk, P., & Guthrie, J. (2010). Advances in anaerobic and cyanoacrylate adhesives. In Advances in structural adhesive bonding (pp. 96-131). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1533/9781845698058.1.96

Koç, E., & Kaya, K. (2015). Enerji Kaynakları–Yenilenebilir Enerji Durumu. Mühendis ve Makina, 56(668), 36-47.

Kong, K., Dyer, K., Payne, C., Hamerton, I., & Weaver, P. M. (2023). Progress and trends in damage detection methods, maintenance, and data-driven monitoring of wind turbine blades–A review. Renewable Energy Focus, 44, 390-412.

Kord, (2023, 10 Ocak). Örgü karbon fiber Sleeve, TDS. https://www.composite.kord.com.tr/technologies

KP, (2023, 7 Ocak). Karbon Fiber Tozu, TDS, KP Kompozit Pazarı A.Ş, https://www.kompozitpazari.com/urun/m80-3-ogutulmus-karbon-elyaf-80-mikron

Kushlani, K., (2023, 2 Ocak). Polyethersulfone (PESU): Features, Strengths and Limitations – Omnexus, https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethersulfone-pes-thermoplastic

Küresel Amaçlar, (2023, 11 Kasım). https://www.kureselamaclar.org/

Kürşad, (2020, 29 Eylül). Kompozit Malzemelerin Özellikleri ve Sınıflandırılması, https://arkipedia.net/kompozit-malzemelerin-ozellikleri-ve-siniflandirilmasi/

Lee, M. W., An, S., Yoon, S. S., & Yarin, A. L. (2018). Advances in self-healing materials based on vascular networks with mechanical self-repair characteristics. Advances in Colloid and Interface Science, 252, 21-37.

Lesics. (2015, 29 Temmuz). How do Wind Turbines work? YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=qSWm_nprfqE

Li J, Li Z, Jiang Y, Tang Y. Typhoon Resistance Analysis of Offshore Wind Turbines: A Review. Atmosphere. 2022; 13(3):451. https://doi.org/10.3390/atmos13030451

Li, Y., Feng, X., Sui, C., Xu, J., Zhao, W., & Yan, S. (2024). Highly entangled elastomer with ultra-fast self-healing capability and high mechanical strength. Chemical Engineering Journal, 479, 147689.

Liton, H. M., Abu-Siada A, Muyeen S. M., Methods for Advanced Wind Turbine Condition Monitoring and Early Diagnosis: A Literature Review. Energies. 2018; 11(5):1309. https://doi.org/10.3390/en11051309

Liu, F., Cheng, Y., Tan, J., Li, J., Cheng, H., Hu, H., ... & Liu, M. (2021). Carbon nanomaterials with hollow structures: a mini-review. Frontiers in Chemistry, 9, 668336.

Lm Wind Power. (2022, 15 Mart). How to build a wind turbine blade. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=WxIhGxET7N8

LM, (2020, 16 Ağustos). Structural (scarf) repair of wind turbine blades Computational modelling. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=FpoykplLgZE

Lucas S. S, von Tapavicza M., Schmidt A., M, Bertling J., Nellesen A., (2016).Study of quantification methods in self-healing ceramics, polymers and concrete: A route towards standardization. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2016;27(19):2577-2598. doi:10.1177/1045389X16641205

Ma, W. & Elkin, R. (2021). Sandwich Structural Composites: Theory and Practice. CRC Press.

Ma, Y., Du, X., & Hu, R. (2018). Development of self-healing composite materials with microvascular networks. Polym Mater Sci Eng, 34, 166-172. https://pmse.scu.edu.cn/gfzclkxygc/article/abstract/20180130

Machefaux, E. (2015). Multiple Turbine Wakes. DTU Wind Energy. DTU Wind Energy PhD No. 0043(EN).

Madhu M., (2022, 3 Ekim). What is the Difference Between Polysulfone and Polyethersulfone, https://www.differencebetween.com/what-is-the-difference-between-polysulfone-and-polyethersulfone/

Malzeme test, (2023, 2 Eylül), Kompozit Sandviç Panel Testleri, https://malzemetest.com/kompozit-sandvic-panel-testleri-hizmetlerimiz.html

Mamalis, D., Murray, J. J., McClements, J., Tsikritsis, D., Koutsos, V., McCarthy, E. D., & Brádaigh, C. M. Ó. (2019). Novel carbon-fibre powder-epoxy composites: Interface phenomena and interlaminar fracture behaviour. Composites Part B: Engineering, 174, 107012.

Manaher, M., (2023, 4 Ocak), Polyethersulfone vs Polysulfone: Meaning And Differences, https://thecontentauthority.com/blog/polyethersulfone-vs-polysulfone

Mashkoor, F., Lee, S. J., Yi, H., Noh, S. M. ve Jeong, C. (2022). Self-Healing Materials for Electronics Applications. International Journal of Molecular Sciences, 23(2), 622. doi:10.3390/ijms23020622

Matt, A. K. K., Beyhaghi, S., Amano, R. S., and Guo, J. (2017). "Self-Healing of Wind Turbine Blades Using Microscale Vascular Vessels." ASME. J. Energy Resour. Technol. September 2017; 139(5): 051208. https://doi.org/10.1115/1.4036052

Mauldin, T. C., & Kessler, M. (2010). Self-healing polymers and composites. International materials reviews., 55(6), 317-346.

Metalurjik, (2022, 2 Nisan). Kompozit Malzemelerde Kullanılan Elyaf (Fiber) Çeşitleri ve Özellikleri, https://www.metalurjik.com/kategori/kompozitler

Miao, X. Y., Chen, X., Lu, R., & Eder, M. A. (2022). Multi-site crack initiation in local details of composite adhesive joints. Composites Part B: Engineering, 242, 110055. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110055

Minnebo P, Thierens G, De Valck G, Van Tittelboom K, De Belie N, Van Hemelrijck D, Tsangouri E. A Novel Design of Autonomously Healed Concrete: Towards a Vascular Healing Network. Materials. 2017; 10(1):49. https://doi.org/10.3390/ma10010049,

Mischnaewski III, L., & Mishnaevsky Jr, L. (2020). Structural repair of wind turbine blades: Computational model for the evaluation of the effect of adhesive properties. Wind Energy, 24(4), 402-408. https://doi.org/10.1002/we.2575

Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M.; Sørensen, B.F., (2017). Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. Materials, 10, 1285. https://doi.org/10.3390/ma10111285

Mishnaevsky Jr, L., Thomsen, K., (2020). Costs of repair of wind turbine blades: Influence of technology aspects. Wind Energy, 23(12), 2247-2255. https://doi.org/10.1002/we.2552

Mishnaevsky, L., (2021). Sustainable End-of-Life Management of Wind Turbine Blades: Overview of Current and Coming Solutions. Materials, 14, 1124. https://doi.org/10.3390/ma14051124

Mishnaevsky, L., Jr., (2022). Root Causes and Mechanisms of Failure of Wind Turbine Blades: Overview. Materials, 15, 2959. https://doi.org/10.3390/ma15092959

Mishnaevsky Jr. L., (2023). How to Repair the Next Generation of Wind Turbine Blades. Energies, 16,23:7694. https://doi.org/10.3390/en16237694

Mohamad M., (2023). The Native Lab Free course on Introduction to Composites, Webinar on YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=3Lt87LKaZUU
Mohamad M., (2023, 9 Aralık). The Native Lab Free course on Introduction to Composites. https://www.thenativelab.academy/courses/introduction-to-composites

Mohammadi, M. A., Eslami-Farsani, R., & Ebrahimnezhad-Khaljiri, H. (2020). Experimental investigation of the healing properties of the microvascular channels-based

self-healing glass fibers/epoxy composites containing the three-part healant. Polymer Testing, 91, 106862.

Mohan, R., P., Yargattimath, T., Karmungi, S., Varier, V., M., (2017). Study of Self-Healing Materials and Their Applications, International Journal of Innovative Science and Research Technology, Volume 2, Issue 10, October– 2017, ISSN No: - 2456 –2165. https://ijisrt.com/wp-content/uploads/2017/11/Study-of-Self-Healing-Materials-and-Their-Applications-2.pdf

Murphy L. R. and Bird D., (2023). "Azimuthal confinement: the missing ingredient in understanding confinement loss in antiresonant, hollow-core fibers," Optica 10, 854-870.

Murphy, E. B., Wudl, F., (2010). The world of smart healable materials, Progress in Polymer Science, Volume 35, Issues 1–2, Pages 223-251, ISSN 0079-6700, https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.10.006.

Murray, R. E., Jenne, S., Snowberg, D., Berry, D., & Cousins, D. (2019). Techno-economic analysis of a megawatt-scale thermoplastic resin wind turbine blade. Renewable Energy, 131, 111-119. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.032

Musial, W. (2020). Overview of Floating Offshore Wind. Proceedings of the Webinar Hosted by National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 26.

Musial, W. (2021, 12 Mart). Overview of Floating Offshore Wind, presantion, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA. https://www.supergen-ore.net/uploads/Talk_01_Walt_Musial.pdf

Nairn J. A, Kim S. R., (1992). A fracture mechanics analysis of multiple cracking in coatings. Eng Fract Mech 421:195–208. doi:10.1016/0013-7944(92)90291-L 36.

Nardi, C., Gardner, D., Cristofori, D., Ronchin, L., Vavasori, A., & Jefferson, T. (2023). Advanced 3D printed mini-vascular network for self-healing concrete. Materials & Design, 230, 111939.

Olabi A. G, Wilberforce T, Elsaid K, Sayed ET, Salameh T, Abdelkareem MA, Baroutaji A. A Review on Failure Modes of Wind Turbine Components. Energies. 2021; 14(17):5241. https://doi.org/10.3390/en14175241

Ökten, M. (2023). Yüzüncü Kuruluş Yılında Türkiye'nin Enerji Görünümü, Hedefleri ve Gelecek Projeksiyonu. Türk Mühendislik Araştırma Ve Eğitimi Dergisi, 2(1), 52-60.

Özer, H. (2021). Kendi Kendine İyileşebilen Sandviç Yapıların Balistik Hasar Davranışı ve İyileşme Performansı, Doktora Tezi Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.

Özer, H., Kuzu, E., Ozada, C., Unal, M., Yazıcı, M., 2021. The self-healing sandwich panel: Production of epoxy based self-healing capsules, self-healable sandwich panel development, and experimental measurement of self-healing performance. Constructıon And Buıldıng Materials, vol.310. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125303

Özer, H., Kuzu, E., Özada, Ç., Ünal, M., Kasım, H., Yazıcı, M., 2022. A sandwich panel that autonomously repairs sudden large holes and defects for tankers and pipelines carrying hazardous matter. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, vol.236, no.10, 2002-2016. https://doi.org/10.1177/14644207221092581

Padhan, M., Marathe, U., & Bijwe, J. (2020). Surface topography modification, Film transfer and Wear mechanism for fibre reinforced polymer composites—An Overview. Surface Topography: Metrology and Properties, 8(4), 043002. DOI 10.1088/2051-672X/abbcb6

Papa, I., Manco, E., Epasto, G., Lopresto, V., & Squillace, A. (2022). Impact behaviour and non destructive evaluation of 3D printed reinforced composites. Composite Structures, 281, 115112. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115112

Patrick, J. F., Sottos, N. R., & White, S. R. (2012). Microvascular based self-healing polymeric foam. Polymer, 53(19), 4231-4240.

Patrick, J.; Krull, B.; Garg, M.; Mangun, C.; Moore, J.; Sottos, N.; White, S. Robust sacrificial polymer templates for 3D interconnected microvasculature in fiber-reinforced composites. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 2017, 100, 361–370. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.05.022

Paulo R. N. B., Coelho CACP, Navalho FVP. Impact Response of Composite Sandwich Cylindrical Shells. Applied Sciences. 2021; 11(22):10958. https://doi.org/10.3390/app112210958

Pérez, V., M., Sotelo-Boyás, R., de Guadalupe González-Huerta, R., & Bañuelos-Ruedas, F. (2023). Feasibility analysis of green hydrogen production from oceanic energy. Heliyon.

Pernigoni, L., Lafont, U., & Grande, A. M. (2021). Self-healing materials for space applications: overview of present development and major limitations. CEAS Space Journal, 13(3), 341-352.

Polymerdatabase, (2022 Eylül). PES hammaddesinin özellikleri, https://polymerdatabase.com/Commercial%20Polymers/PES.html

Potluri, P., Hogg, P., M. Arshad, D. Jetavat, P. Jamshidi, (2012). Influence of fibre architecture on impact damage tolerance in 3D woven composites DOI 10.1007/s10443-012-9256-9

Prüftechnik, (2024, 3 Ocak). Rüzgâr Türbini Güvenilirliği, https://www.pruftechnik.com/tr-TR/Bran%C5%9Flar/Bran%C5%9Flar/Wind-energy/

Pwc, (2023, 23 Kasım). Yenilenebilir Enerji Nedir?, https://www.pwc.com.tr/yenilenebilir-enerji-nedir

Qiao, W., & Lu, D. (2015). A survey on wind turbine condition monitoring and fault diagnosis, Components and subsystems. IEEE transactions on industrial electronics, 62(10), 6536-6545.

Rangappa, S. M., Parameswaranpillai, J., Siengchin, S., & Thomas, S. (Eds.). (2022). Handbook of Epoxy/fiber Composites. Springer Nature.

Rao, K. R., (2019). Wind energy: Technical considerations–contents. In Wind Energy for Power Generation: Meeting the Challenge of Practical Implementation (pp. 1-426). Springer International Publishing.

Rincon, P., (2022). Time to heal: The materials that repair themselves, https://www.bbc.com/news/science-environment-19781862

Rüzgâr türbin tasarımı. (2023, 18 Mart). In Wikipedia, https://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzg%C3%A2r_t%C3%BCrbini_tasar%C4%B1m%C4%B1

Rüzgâr türbini aerodinamiği. (2023, 19 Mart). In Wikipedia, https://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzgar_t%C3%BCrbini_aerodinami%C4%9Fi

Rüzgâr Türbinleri. (2023, 8 Mart). In Wikipedia, https://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzg%C3%A2r_t%C3%BCrbini

Saadeh, W. H., Qandil, M. D., & Amano, R. S. (2023). Imprinted Glass Fiber-Reinforced Epoxy Nanocomposites Vascular Self-Healing Wind Turbine Blade. Journal of Energy Resources Technology, 145(2), 022102. https://doi.org/10.1115/1.4054827

Saeed, M. U., Li, B., Chen, Z., & Khan, Z. M. (2016). A novel processing approach to produce microchannel embedded carbon-epoxy composites. Journal of Manufacturing Processes, 22, 26-33.

Sarıgül, T., (2016, 8 Ağustos). Rüzgâr Türbinlerinde Neden Genellikle Üç Kanat Bulunur?, https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/ruzgar-turbinlerinde-neden-genellikle-uc-kanat-bulunur

Semtrio, (2023). Temiz Enerji Nedir? https://www.semtrio.com/blog/temiz-enerji-nedir
Sennewald, C., Kaina, D. Weck, A., Gruhl, M. Thieme, G. Hoffmann, et al., (2014). Metal sandwiches and metal-matrix-composites based on 3D woven wire structures for hybrid lightweight construction, Adv Eng Mater, 16, pp. 1234-1242.

Sezen, S., Duman, S., Kaplan, O., Ünsan, Y., & Korkut, E. (2015). Deniz Sektöründe Kullanılan Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Basit Bir Deney Düzeneği. Gidb Dergi, (03), 41-62. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1044893

Shah SZH, Megat-Yusoff PSM, Karuppanan S, Choudhry RS, Sajid Z. Off-Axis and On-Axis Performance of Novel Acrylic Thermoplastic (Elium®) 3D Fibre-Reinforced Composites under Flexure Load. Polymers. 2022; 14(11):2225. https://doi.org/10.3390/polym14112225

Shah, A., (2022, 3 Mart). Can Concrete Heal Its Own Cracks Without Losing Its Strength? https://viterbischool.usc.edu/news/2022/03/can-concrete-heal-its-own-cracks-without-losing-its-strength/

Shields, Y., Tsangouri, E., Riordan, C., De Nardi, C., Godinho, J. R. A., Ooms, T., ... & Van Tittelboom, K. (2024). Non-destructive evaluation of ductile-porous versus brittle 3D printed vascular networks in self-healing concrete. Cement and Concrete Composites, 145, 105333.

Shields, Y., Tsangouri, E., Riordan, C., De Nardi, C., Godinho, J. R. A., Ooms, T., ... & Van Tittelboom, K. (2024). Non-destructive evaluation of ductile-porous versus brittle 3D printed vascular networks in self-healing concrete. Cement and Concrete Composites, 145, 105333.

Sika company, (2023). Off-Shore Rüzgâr Enerjisi, https://tur.sika.com/tr/enduestri/yenilenebilir-enerji/ruezgar-enerjisi/offshore-ruezgar.html

Silva, M. I., Malitckii, E., Santos, T. G., & Vilaça, P. (2023). Review of conventional and advanced non-destructive testing techniques for detection and characterization of small-scale defects. Progress in Materials Science, 101155.

Sina, (2020, 4 Kasım). Kompozit Üretim Yöntemleri, https://www.ceyrekmuhendis.com/kompozit-uretim-yontemleri/

Siyanoakrilat, (2023, 1 Ocak). In Britannica. https://www.britannica.com/science/cyanoacrylate

SoftRobotics, (2024, 7 Ocak). Current applications of self-healing materials, https://softroboticstoolkit.com/book/current-applications-self-healing-materials

Sørensen, B.F.; Jørgensen, E.; Debel, C.P.; Jensen, F.M.; Jensen, H.M.; Jacobsen, T.K.; Halling, K. Improved Design of Large Wind Turbine Blade of Fiber Composites Based on Studies of Scale Effects (Phase 1); Summary Report; Risø-R-1390(EN); Riso National Laboratory: Roskilde, Denmark, 2004; 36p.

Soutis, C., Duan, D., Goutas P., (1999). Compressive behaviour of CFRP laminates repaired with adhesively bonded external patches, Compos. Struct., 45 (4), pp. 289-301 https://doi.org/10.1016/S0263-8223(99)00033-1

Su, J. F., Zhang, X. L., Guo, Y. D., Wang, X. F., Li, F. L., Fang, Y., ... & Han, N. X. (2019). Experimental observation of the vascular self-healing hollow fibers containing rejuvenator states in bitumen. Construction and Building Materials, 201, 715-727.

Swaray V. A., (2023, 3 Eylül). Linkedin profile posting, https://www.linkedin.com/posts/amara-v-swaray-661503123_repaireable-reliable-experienced-activity-7089741005905612801-Q2vc?utm_source=share&utm_medium=member_desktop

Şahin, K., E., Boztoprak, Y., & Yazıcı, M. Polimer ve Polimer Kompozit Yapılarda Kendi Kendine İyileşme Yöntemleri. https://www.researchgate.net/profile/Murat-Yazici-3/publication/374906058_Polimer_ve_Polimer_Kompozit_Yapilarda_Kendi_Kendine_Iyilesme_Yontemleri/links/6543b696bb8314438dbf0a49/Polimer-ve-Polimer-Kompozit-Yapilarda-Kendi-Kendine-Iyilesme-Yoentemleri.pdf

Ştefanov, T., Ryan, B., Javaid, U., Cardiff, P., Ivanković, A., & Murphy, N. (2023). Fracture toughness of composite-to-composite joints of an elastomer-toughened ethyl cyanoacrylate adhesive for real-time aged batches and an accelerated aged adhesive batch. Thin-Walled Structures, 188, 110808.

Tahir, M. N., Ocheje, M. U., Wojtkiewicz, K., & Rondeau-Gagné, S., (2020). Self-Healing Materials: Design and Applications. https://doi.org/10.1515/9783110537734-003

Taşbaşı D., (2023, 15 Aralık). Rüzgârda yıl sonu hedefi:12 bin 500 MW, https://temizenerji.org/2023/12/15/ruzgarda-yil-sonu-hedefi12-bin-500-mw/

Tchakoua, P., Wamkeue, R., Tameghe, T. A., & Ekemb, G. (2013, June). A review of concepts and methods for wind turbines condition monitoring. In 2013 world congress on computer and information technology (WCCIT) (pp. 1-9). IEEE. doi: 10.1109/WCCIT.2013.6618706

Temiz Enerji, (2022, 1 Kasım). Türkiye'de rüzgâr enerjisi elektrik üretimine katkı sağlamaya devam ediyor, https://temizenerji.org/2022/11/01/turkiyede-ruzgar-enerjisi-elektrik-uretimine-katki-saglamaya-devam-ediyor/

Teoh, H. C., Yaacob, K. A., Saad, A. A., 2018, Enhancement of thermal and electrical conductivities of cyanoacrylate by addition of carbon based nanofillers. J Mater Sci: Mater Electron 29, 9861–9870. https://doi.org/10.1007/s10854-018-9027-y

Tian, Y., Wang, Z., & Wang, L. (2021). Hollow fibers: from fabrication to applications. Chemical Communications, 57(73), 9166-9177.

Toohey, K. S., Sottos, N. R., & White, S. R. (2009). Characterization of microvascular-based self-healing coatings. Experimental Mechanics, 49, 707-717.

Toohey, K. S., Sottos, N. R., Lewis, J. A., Moore, J. S., & White, S. R. (2007). Self-healing materials with microvascular networks. Nature materials, 6(8), 581-585. http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nmat1934

Toray, (2023, 8 Mart). Örgü karbon fiber Sleeve, TDS. https://www.castrocompositesshop.com/en/fibre-reinforcements/2385-25-gm-3k-carbon-braided-sleeve-diameter-45-mm-8431252542567.html

Türeb Rapor, (2023, Temmuz). Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu, https://tureb.com.tr//yayinlar/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporlari/5

Türeb, (2023 Aralık 8). https://tureb.com.tr//yatirimci-rehberi

Türkiye Kalkınma Amaçları, (2023, Aralık). https://turkiye.un.org/tr/sdgs/7

Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu, (2023, Temmuz). https://tureb.com.tr/haber/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-temmuz-2023/298

Türkoğlu, İ. K. (2020). 3 Boyutlu Eklemeli Üretim Yöntemiyle Üretilmiş Termoplastik Esaslı Ökzetik Çekirdek Geometrili Sandviç Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Davranışının Incelenmesi, Doctoral dissertation, Bursa Uludag University

Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials-a review. In Materials, Vol. 6, Issue 6. https://doi.org/10.3390/ma6062182

Vedat, V., (2023, 25 Kasım). Yapıştırma Bağlantıları, Ders notu, Makine Fakültesi, İTÜ.

Vicente, J. M., González-Gallego, M., Ramírez, F. T., Frövel, M., & Cela, J. L. (2023). Study of the transverse strain effect on the Fiber Bragg Grating Sensor (FBGS) response with polyimide coating under experimental biaxial tests. Composite Structures, 326, 117621. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117621

Vij, R. K., (2022). Top 5 reasons why electric vehicles are the future of driving in 2022. https://www.outlookindia.com/business/top-5-reasons-why-electric[1]vehicles-are-the-future-of-driving-in-2022-news-201722

Vintila, I.S.; Ghitman, J.; Iovu, H.; Paraschiv, A.; Cucuruz, A.; Mihai, D.; Popa, I.F. A., (2022) Microvascular System Self-Healing Approach on Polymeric Composite Materials. Polymers 2022, 14, 2798. https://doi.org/10.3390/polym14142798

Waldbjørn, J. P., Berggreen, C., Ahmed, S., & Nagy, T. (2023, November). Large-scale fatigue testing of a retrofitted 3rd shear web in a 34m wind turbine blade section. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1293, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.

Walker, K., 2013 Renewable Energy Embraces Graphene: Improved Wind Turbine Technology. Available online: http://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=455

Wan, Z., Zhang, Y., Xu, Y., & Šavija, B. (2023). Self-healing cementitious composites with a hollow vascular network created using 3D-printed sacrificial templates. Engineering Structures, 289, 116282.

Wen, B., Li, Z., Jiang, Z., Tian, X., Dong, X., & Peng, Z. (2020). Blade loading performance of a floating wind turbine in wave basin model tests. Ocean Engineering, 199, 107061. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107061

Wen, B., Tian, X., Jiang, Z., Li, Z., Dong, X., & Peng, Z. (2020). Monitoring blade loads for a floating wind turbine in wave basin model tests using Fiber Bragg Grating sensors: A feasibility study. Marine Structures, 71, 102729. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102729

Wen, X., He, C., Hai, Y., Ma, R., Sun, J., Yang, X., ... & Chen, J. (2022). Fabrication of an antifouling PES ultrafiltration membrane via blending SPSF. RSC advances, 12(3), 1460-1470.

White R. G., (2024, 4 Ocak). Microvascular Healing, The White Research Group is part of the Autonomous Materials Research Group at the Beckman Institute for Advanced Science and Technology at the University of Illinois at Urbana-Champaign. http://whitegroup.beckman.illinois.edu/research/self-healing-materials/microvascular-healing/

White, S., Sottos, N., Geubelle, P. et al. (2001). Autonomic healing of polymer composites. Nature 409, 794–797. https://doi.org/10.1038/35057232

Wiedlebacher, K., (2022, 21 Kasım). FBG Sensors: A New Era in Sensor Technology, https://www.articlesfactory.com/articles/technology/fbg-sensors-a-new-era-in-sensor-technology.html

Wind IEA, (2023, Aralık). The international Energy, https://www.iea.org/energy-system/renewables/wind

Wind power plants, (2023, 15 Kasım). Technical Application Papers No.13, ABB Library https://library.e.abb.com/public/92faf0c1913f5651c1257937002f88e8/1SDC007112G0201.pdf

Winkel, (2023, 7 Ocak). Siyanoakrilat teknik özellikleri, TDS, https://www.winkel.com.tr/

Wu, L., Lu, S., Zhang, H., Shu, Q., & Xiao, W. (2022). An FBG-based high-sensitivity structure and its application in non-intrusive detection of pipeline. Measurement, 199, 111498. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111498.

Wu, L., Lu, S., Zhang, H., Shu, Q., & Xiao, W. (2022). An FBG-based high-sensitivity structure and its application in non-intrusive detection of pipeline. Measurement, 199, 111498.

Xeometry, (2021, 2 Kasım). What is Metrology and How is it Used in Manufacturing?, https://www.xometry.com/resources/blog/metrology/

Xie, W. G., Zhou, P., Chen, L. Y., Gu, G. Q., Wang, Y. Q., & Chen, Y. T. (2023). Non-Destructıve Detectıon Of Hıgh-Strength Wınd Turbıne Bolt Looseness Usıng Dıgıtal Image Correlatıon, Metrol. Meas. Syst., Vol. 30, No. 4 DOI: 10.24425/mms.2023.147948

Yamaguchi M, Ono S, Terano M (2007). Self-repairing property of polymer network with dangling chains, Materials Letters 61(6): 1396–1399.

Yazıcı, M. ve Duran, G., (2023). Otonom İyileşme Mekanizmasına Sahip Çok Kanallı Nano Fiber Elyaflı Yeni Bir Kompozit Sandvic Malzeme Yapısı ve Kendi Kendini İyileştirme Sistemi, PCT/TR2023/051588, Turkish Patent and Trademark Office.

Yazıcı, M., (2023, 25 Kasım). Kompozit Malzemeler, Ders notu, Mühendislik Fakültesi, BUÜ.

Yedekçioğlu, Ç., (2020, 24 Ocak). Rüzgâr Türbini ve Kısımları Nelerdir?, https://muhendisgelisim.com/ruzgar-turbini-ve-kisimlari/

Yılmaz, M., Tortumluoğlu, M. İ., & Doğan, M., (2021). Açık Deniz Rüzgâr Türbini Tasarımı İçin Bir Yaklaşım Ve Ülkemiz Bozcaada Sahillerinde Örnek Uygulaması. 6. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, 23-24 Eylül 2021, İzmir.
http://www.ruzgarsempozyumu.org/wp-content/uploads/2021/09/2011-003.pdf

Yuan, W., Zhang, Z., Li, Y., Huang, Y., Zhong, Z., & Hu, Z. (2024). Self-healing and in-situ real-time damage-reporting fiber-reinforced composite. Composites Science and Technology, 245, 110344.

Zahle, F., Sørensen, N. N., & Johansen, J. (2009). Wind turbine rotor-tower interaction using an incompressible overset grid method. Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology, 12(6), 594-619.
Zeiss, (2023, 19 Mayıs). 3D X-Ray Measurements for Quality Assurance, Zeiss Metrotom Tomography.
https://www.zeiss.com/metrology

Zhao, Y. Liao, Y., (2004). "Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors", Optics and Lasers in Engineering, 41, 1-18, 2004.

Zhu, P., Wu, J., Huang, M., Feng, X., Deng, H., Xie, H., & Soto, M. A. (2019). Alternating strain response of fibre Bragg grating sensors embedded into carbon fibre composites for wind blade health monitoring. In Seventh European workshop on optical fibre sensors, Vol. 11199, pp. 81-84), SPIE.

Zhu, Y., Ye, X. J., Rong, M. Z., & Zhang, M. Q. (2016). Self-healing glass fiber/epoxy composites with polypropylene tubes containing self-pressurized epoxy and mercaptan healing agents. Composites Science and Technology, 135, 146-152.

Zorlu Enerji, (2023, 16 Aralık). Sürdürülebilir Enerji Nedir? Temiz Enerji Kaynakları Nelerdir? https://www.zorlu.com.tr/akillihayat2030/yazilar/surdurulebilir-enerji-nedir-temiz-enerji-kaynaklari-nelerdir