DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT RÜZGAR TÜRBİN KANADI TASARIMI VE ANALİZİ

Ferhat ÖZMEN

Şubat, 2024
İZMİR

KOMPOZİT RÜZGAR TÜRBİN KANADI TASARIMI VE ANALİZİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği, Anabilim Dalı Mekanik Programı

Ferhat ÖZMEN

Şubat, 2024
İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

FERHAT ÖZMEN tarafından **PROF.DR. RAMAZAN KARAKUZU** yönetiminde hazırlanan **"KOMPOZİT RÜZGAR TÜRBİN KANADI TASARIMI VE ANALİZİ"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU

Danışman

Prof. Dr. Yusuf ARMAN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Buket OKUTAN BABA

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Engin bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, teşvik eden, imkan veren ve her koşulda desteğini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU'ya sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmamıza katkılarından dolayı Doç. Dr. Philipp Ulrich HASELBACH, Dr. Emre ERBİL ve Dr. Can MUYAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Hexagon MI, BİAS Mühendislik (Türkiye) ve özellikle BİAS Mühendislik Genel Müdür Yardımcısı Sayın Ender KOÇ'a ve Kıdemli Yapısal Analiz Mühendisi Sayın Erman YAYLAĞAN'a MSC Apex/Nastran ve MSC Marc/Mentat Sonlu Elemanlar yazılımını sağladıklarından ve çalışmamıza katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Son olarak desteklerini daima arkamda hissettiğim aileme teşekkür ederim.

Ferhat ÖZMEN

KOMPOZİT RÜZGAR TÜRBİN KANADI TASARIMI VE ANALİZİ

ÖZ

Bu çalışmada, rüzgar türbini kanatlarının spar kepleri üzerinde delaminasyona sebep olan durumların ne tür koşullar altında ve nasıl başladığı incelenmiştir. Çalışma iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, farklı cam elyaf dizilimine sahip laminatlardan oluşturulmuş RÜZGEM 5-m rüzgar türbini kanadının spar keplerinde, yapışkan ayrılma hasarının ve hasar modlarının incelenmesi yapılmıştır. İkinci bölümde ise tamamen tek yönlü cam elyaftan oluşturulmuş DTU 10 MW rüzgar türbini kanadının spar kepi üzerinde, burkulma modlarının delaminasyona nasıl yol açtığı araştırılmıştır.

Her iki kanat türü de MSC Apex/Nastran ve MSC Marc/Mentat üzerinden analiz edilmiş ve daha önceden yapılmış olan makale çalışmalarından elde edilen verilerle doğrulanmıştır. MSC Cradle ile kanatlardaki basınç dağılımları akış analizleriyle simüle edilmiş ve elde edilen verilerle yapısal analiz sonuçları desteklenmiştir.

Hasar analizi incelemesinde, Puck kriteri ve CZM yöntemlerine ek olarak çatlak başlatıcı ve VCCT yöntemleri de eklenmiş ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Delaminasyon oluşması beklenen bölgelerde lokal burkulma modlarına incelenerek yapısal dayanıma etkileri araştırılmıştır. Bası gerilmelerinin ve toplam şekil değiştirme enerjisi yoğunluğunun çatlak oluşumuna etkisi ile asal gerilmelerin modelde oluşan deformasyona olan etkileri incelenmiştir. Çatlak varlığının, delaminasyona ve yapısal yıkıma etkileri hakkında önemli bulgular paylaşılmıştır. Kontak ilişkisinde yapışkan kırılma özelliğinin (Gluebreaking) varlığının simülasyon sonuçlarına olumlu etkisi tespit edilmiştir. CZM yöntemi yerine VCCT yönteminin tercih edilmesinin avantajları da açıklanmıştır.

Anahtar kelimeler: Spar kep, sonlu elemanlar metodu, yapısal yıkım, delaminasyon, çatlak, burkulma, Puck kriteri, Sanal Çatlak Kapama Tekniği (VCCT) ve Yapışkan Bölge Modeli (CZM)

COMPOSITE WIND TURBINE BLADE DESIGN AND ANALYSIS

ABSTRACT

In this study, the conditions that cause delamination on the spar caps of wind turbine blades and how they start were examined. The study consists of two parts. In the first part, adhesive debonding and failure modes were examined in the spar caps of the RÜZGEM 5-m wind turbine blade, which was constructed from laminates with different glass fiber orientation. In the second part, it was investigated how buckling modes cause delamination on the spar cap of the DTU 10 MW wind turbine blade, which is made entirely of uni-directional glass fiber.

Both wind turbine blade types were analyzed on MSC Apex/Nastran and MSC Marc/Mentat and validated with data from previous article studies. With MSC Cradle, pressure distributions on the blade were simulated with flow analysis and structural analysis results were supported with the obtained data.

In the damage analysis examination, in addition to the Puck criterion and CZM methods, crack initiator and VCCT methods were added and examined comparatively. The effects on structural strength were investigated by examining local buckling modes in areas where delamination was expected to occur. The effects of compressive stresses and total strain energy density on crack formation and the effects of principal stresses on the deformation in the model were examined. Important findings have been shared about the effects of the presence of cracks on delamination and structural collapse. The positive impact of the presence of the adhesive breaking feature (Gluebreaking) in contact relationships on simulation results has been identified. Additionally, the advantages of preferring the VCCT method over the CZM method have been explained.

Keywords: Spar cap, finite element method, structural collapse, delamination, crack, buckling, Puck criterion, Virtual Crack Closure Technique (VCCT) and Cohesive Zone Model (CZM)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT v
ŞEKİLLER LİSTESİ x
TABLOLAR LİSTESİ xvi

BÖLÜM BİR-GİRİŞ 1

1.1 Rüzgar Türbinleri ve Kanat Yapısı: Tasarım, Gelişmeler ve Sorunlar 1

BÖLÜM İKİ-RÜZGÂR TÜRBİNİ KANATLARINDAKİ KOMPOZİT YAPILARIN YERLİLİK, GERİ DÖNÜŞÜM VE DAYANIMLARI AÇISINDAN FİZİBİLİTESİ 2

2.1 Yenilenebilir Enerji Sektörünün Bugünü ve Gelecekteki Gelişimi 4
2.2 Türkiye'deki Yenilenebilir Enerji Sektörü ve Enerjide Yerlilik 6
2.3 Türkiye'deki Rüzgâr Enerjisi Sektörü ve Yerlilik 10
2.4 Rüzgâr Türbini Kanatlarının Üretimi ve Yerliliği 15
2.5 Rüzgâr Türbini Kanadı Malzemelerinin Geri Dönüşümü 18
2.5.1 Geri Dönüşüm Yöntemlerinin Yapısal Açıdan İncelenmesi 28
2.5.1.1 Mekanik Geri Dönüşüm 29
2.5.1.2 Termal Geri Dönüşüm 30
2.5.1.3 Piroliz 31
2.5.1.4 Akışkan Yataklı Geri Dönüşüm 31
2.5.1.5 Mikrodalga Piroliz 32
2.5.1.6 Kimyasal Geri Dönüşüm 33
2.5.1.7 Hibrit Geri Dönüşüm 34
2.5.2 Geri Dönüşüm Yöntemlerini Değerlendirme 35

2.5.3 Örnek Alınabilecek Uluslararası Ar-Ge Projeleri 46
2.6 Sonuçlar 49

BÖLÜM ÜÇ- RÜZGÂR TÜRBİNİ KANATLARI 51

3.1 Giriş 51
3.2 Kanat Tasarımına Genel Bakış 52
3.2.1 Genel Yükler 53
3.2.2 Lokal Gerilme ve Gerinimler 55
3.2.3 Sehim ve Deformasyon 57
3.3 Kanat Yapısı 57
3.3.1 Aerodinamik Kabuk 59
3.3.2 Yekpare Spar Ağları 60
3.3.3 Spar ve Spar Kepleri 61
3.3.4 Yapışkan tabakalar 62
3.4 Burkulma ve Bası Dayanımı 63
3.5 Burkulma Kaynaklı Delaminasyon 64
3.6 Tasarım İlkeleri ve Hasar Mekanizmaları 66
3.6.1 Spar Keplerde Hasar Mekanizmaları 67
3.6.1.1 Spar Keplerde Rüzgar Yüklerinden Kaynaklanan Hasar 68
3.6.1.2 Enine Kesit Kayma Kaynaklı Hasar 70
3.6.1.3 Yorulma Hasarı 71
3.6.2 Hashin ve Puck Hasar Kriteri 74
3.6.3. Kırılma Mekaniği 76
3.6.3.1. Karma Mod 76
3.6.3.2. Delaminasyon 79
3.6.4 Yapışkan Bölgelerin Modellenmesi 80
3.6.4.1 Yapışkan (Kohezif) Bölge Modeli 81
3.6.4.2 VCCT Yaklaşımı 83

BÖLÜM DÖRT-MALZEME 84

BÖLÜM BEŞ-YÖNTEM 88

5.1 RÜZGEM 5-m Rüzgar Türbini Kanadının CFD Analizleri 89
5.2 Modal Analiz 93
5.2.1 Yerdeğiştirme Ötelemesi 93
5.2.2 Eleman Gerinim Enerjisi 94
5.2.3 Model Oluşturma ve Eleman Seçimi 94
5.3 Statik Analiz 96
5.1.1 Puck Hasar Kriteri 97
5.1.2 Aşamalı Seçici Direngenlik Bozulmasının Uygulanması 98
5.2 Delaminasyon Komutu 101
5.2.1 Gerilme Kriteri 103
5.2.2 Kırılma Endeksi 104
5.2.2.1 Yapışkan Kırılması (Glue Breaking) 104
5.2.3 Arayüz Elemanları 106
5.2.3.1 Modellemelerde Kullanılan Eleman Tipleri 107
5.3 Hasarlı Bölgeyi Modelleme Yöntemleri 109
5.3.1 Yapışkan (Kohezif) Bölge Modeli 109
5.3.2 VCCT Yöntemi 110
5.3.3 Çatlak Başlatıcı (*Crack Initiator*) Yöntemi 112
5.4 Delaminasyon Başlatıcısı Burkulma Modlarını İnceleme Yöntemleri 114
5.4.1 Sonlu Elemanlar Yaklaşımı ve Sınır Koşulları 115

BÖLÜM ALTI-SONUÇLAR 118

6.1. CFD Analiz Sonuçları 118
6.2 Modal Analiz 119
6.2.1 Serbest Titreşimli Modal Analiz 119
6.2.2 Sabit-Serbest Titreşimli Modal Analiz 123
6.3 Statik Analiz Sonuçları 128
6.3.1 Puck Hasar Kriteri 130
6.3.1.1 Seçici Kademeli Bozunma 132

6.3.2. Kırılma Mekaniği ve Delaminasyon 134
6.3.2.1 Gerilme Kriteri 134
6.3.2.1 Kırılma İndeksi 136
6.3.2.2 Yapışkan Kırılması 137
6.3.2.3 Yapışkan (Kohezif) Bölge Modeli Sonuçları 137
6.3.2.4 VCCT ile Çatlak Yayılımı 142
6.4 Burkulma Analizi Sonuçları 148
6.4.1 Yük Altındaki Kanat Modelinin Yapısal Davranışları 148
6.4.2 Hasar İndeksleri 151
6.4.3 Burkulma Modları 153
6.4.4 Kanatlarda Oluşan Hasara Asal Gerilmelerin Etkisi 155
6.5 Çatlak Başlatıcı Yöntemi 157
6.6 Değerlendirme 163

KAYNAKLAR 166

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Enerji kaynak oranları 9
Şekil 2.2 Türkiye'de rüzgar santrallerinin elektrik üretimindeki payı 13
Şekil 2.3 Türkiye'deki rüzgar enerjisi santralleri için kümülatif kurulum 14
Şekil 2.4 Üretimin kaynaklara göre dağılımı 14
Şekil 2.5 2050'de ülkelere göre beklenen türbin kanadı atığı oranları 20
Şekil 2.6 Rüzgâr enerjisi endüstrisinden beklenen kompozit malzeme atığı 21
Şekil 2.7 Tahmin edilen küresel kompozit atık hacmi 23
Şekil 2.8 Türbin yaşları ve kapasiteleri 24
Şekil 2.9 Türkiye'de ömrünü tamamlaması beklenen kanat sayıları 25
Şekil 3.1 Yük taşıyan kabuk yapısına sahip kanat tasarımı 52
Şekil 3.2 Rotor kanadı yükünün doğası 54
Şekil 3.3 Şekil Stabilitesi tasarım adımları 54
Şekil 3.4 Kanat kesitinde deformasyon türleri 55
Şekil 3.5 Kanat iç yapısı ve yapışkan bağlayıcılar 56
Şekil 3.6 Kanat kesiti ve elemanları 58
Şekil 3.7 Kompozit yüzey katmanlarına sahip sandviç malzeme kesiti 60
Şekil 3.8 Spar ağları ve yapışma bölgeleri 61
Şekil 3.9 Kutu kirişler ve spar ağı 61
Şekil 3.10 Kanat şeklini oluşturan ve koruyan yapılar 62
Şekil 3.11 Yapışkan bağlar ve olası hasar türleri 63
Şekil 3.12 Spar kep ve yapışkan bağlar 64
Şekil 3.13 Kanat kabuğunda yük dağılımı ve katman ayrılması 65
Şekil 3.14 Hasar mekanizmaları 66
Şekil 3.15 Doğrusal olmama durumunda hasar mekanizmaları 68
Şekil 3.16 (a) Kesitte kayma bozulması (b)Burulma ve kayma kombinasyonu 69
Şekil 3.17 Delaminasyon kaynaklı spar keplerde yerel veya global burkulma 69
Şekil 3.18 Yük taşıyan spar kep laminatının tabakalar arası kayma kopması 70
Şekil 3.19 Arka kenar panellerinin soyulma gerilmeleri 71

Şekil 3.20 Spar keplerde Tip 1, Tip 4 ve Tip 5 72
Şekil 3.21 Spar keplerde Tip 3, Tip 4 ve Tip 5 72
Şekil 3.22 Kırılma modları 76
Şekil 3.23 Karma mod testi (Mod I/Mod II) 77
Şekil 3.24 Çekiş-yerdeğiştirme grafikleri (Mod I/Mod II) 79
Şekil 3.25 Kohezif hasar durumu 81
Şekil 4.1 RÜZGEM Turon Modeli 85
Şekil 4.2 Üretici tarafından belirtilen malzeme özellikleri 85
Şekil 4.3 DTU 10MW kanat bölgelerinin kompozit yerleşimi 86
Şekil 5.1 3D ve 10D mesafelerinin gösterimi 88
Şekil 5.2 Hesaplama hacmi bölgeleri 88
Şekil 5.3 Hesaplama hacmi sonlu eleman modeli ve ağ hassasiyet çalışması 89
Şekil 5.4 Sınır koşulu kalınlığının hesaplanması 90
Şekil 5.5 Katman sayısı ve ilk katman kalınlığı girdileri 90
Şekil 5.6 RÜZGEM 5-m rüzgar türbini kanadı 93
Şekil 5.7 RÜZGEM 5-m rüzgar türbini kanadının spar kepleri 93
Şekil 5.8 Kanat yapısındaki yapışkan kontak durumu 94
Şekil 5.9 Puck kriterleri 99
Şekil 5.10 Hasar endekslerini çıktı olarak alma 99
Şekil 5.11 Delaminasyon türü ve özellikleri 101
Şekil 5.12 Arayüz malzeme özelliklerine göre yapışkan temas kırılması 103
Şekil 5.13 Spar kepte yapışkan kontak durumu 104
Şekil 5.14 Eleman 75 ve 149 ile yerel koordinat sistemi 106
Şekil 5.15 Eleman türü 188'nün bağlantı ve yerel koordinat sistemi 107
Şekil 5.16 Arayüz elemanı olarak Eleman 188 107
Şekil 5.17 Yapıştırıcı modelinin şeması 108
Şekil 5.18 Çatlak oluşturma ve ilerleme özellikleri 109
Şekil 5.19 VCCT yöntemi özellikleri 110
Şekil 5.20 Çatlak bölgesi seçimi ve Şablon Çatlak oluşturma 112
Şekil 5.21 RÜZGEM 5-m rüzgar türbini kanadının çatlak ilerlemesi özellikleri 112
Şekil 5.22 DTU 10 MW rüzgar türbini kanadı 113
Şekil 5.23 DTU 10 MW rüzgar türbini kanadının spar kepi için kesilen bölümü 114

Şekil 5.24 DTU 10MW rüzgar türbininin kanat bölümü kabuk modeli 114
Şekil 5.25 Alt modele göre ağ iyileştirmesi yapılmış kanat bölümü 115
Şekil 5.26 DTU 10MW rüzgar türbini kanadının sınır koşuları ve RBE2 115
Şekil 5.27 Implicit çözücü ile burkulma çözüm metodunda Lanczos kullanımı 116
Şekil 5.28 Pertübasyon hassasiyeti 116
Şekil 6.1 Alçak basınç kabuğu basınç dağılımı 117
Şekil 6.2 Yüksek basınç kabuğu basınç dağılımı 118
Şekil 6.3 5-m modelinin MSC Patran ve MSC Apex karşılaştırması 119
Şekil 6.4 1. düzlem dışı eğilme (11.20 Hz) MSC Patran/Nastran 119
Şekil 6.5 1. düzlem dışı eğilme (10.4 Hz) MSC Apex/Nastran 119
Şekil 6.6 2. düzlem dışı eğilme (30.28 Hz) MSC Patran/Nastran 120
Şekil 6.7 2. düzlem dışı eğilme (29.3Hz) – MSC Apex/Nastran 120
Şekil 6.8 2. düzlem dışı eğilme (47.5 Hz) - MSC Patran/Nastran 120
Şekil 6.9 2. düzlem dışı eğilme (43.5 Hz) - MSC Apex/Nastran 121
Şekil 6.10 3. düzlem dışı eğilme (57.18 Hz) MSC Patran/Nastran 121
Şekil 6.11 3. düzlem dışı eğilme (56.9Hz) MSC Apex/Nastran 121
Şekil 6.12 1. burulma (68.44 Hz) MSC Patran/Nastran 122
Şekil 6.13 1. burulma (69.2 Hz) MSC Apex/Nastran 123
Şekil 6.14 5-m modelinin MSC Patran ve MSC Apex karşılaştırması 123
Şekil 6.15 1. düzlem dışı eğilme (5.09 Hz)-MSC Patran/Nastran 123
Şekil 6.16 1. düzlem dışı eğilme (4.76Hz)-MSC Apex/Nastran 123
Şekil 6.17 2. düzlem dışı eğilme ve 1. düzlem içi eğilme çifti(13.8 Hz) 124
Şekil 6.18 2. düzlem dışı eğilme ve 1. düzlem içi eğilme çifti(13.5 Hz) 124
Şekil 6.19 2. düzlem dışı eğilme (17,71 Hz) MSC Patran/Nastran 125
Şekil 6.20 2. düzlem dışı eğilme (17.5Hz) - MSC Apex/Nastran 125
Şekil 6.21 3. düzlem dışı eğilme [37.44 Hz] MSC Patran/Nastran 126
Şekil 6.22 3. düzlem dışı eğilme (37.1 Hz)-MSC Apex/Nastran 126
Şekil 6.23 2. düzlem içi eğilme ve 1. burulma çifti (52.17Hz) 127
Şekil 6.24 2. düzlem içi eğilme ve 1. burulma çifti (50.7Hz) 127
Şekil 6.25 En yüksek deplasman değeri kanat ucu 128
Şekil 6.26 En yüksek deplasman değeri kanat ucu- MSC Marc/Mentat 128
Şekil 6.27 Yandan görünüş - MSC Marc/Mentat 128

Şekil 6.28 Spar kep gerilme dağılımı 129
Şekil 6.29 Fiber yönündeki ortalama gerilme dağılımları 129
Şekil 6.30 Yüksek basınç yüzeyi için eşdeğer von Misses gerilmesi 130
Şekil 6.31 Spar yüzeyleri için eşdeğer gerilme dağılımı..... 130
Şekil 6.32 Alçak basınç yüzeyleri için eşdeğer gerilme dağılımı 131
Şekil 6.33 Spar kep civarında artış- 2. hasar indeksi 4. katman..... 131
Şekil 6.34 Spar kep civarında artış- 2. hasar indeksi 6. Katman..... 132
Şekil 6.35 Spar kep civarında artış-3. hasar indeksi 3.katman..... 132
Şekil 6.36 Spar kep civarında artış-3. hasar indeksi 1.katman..... 133
Şekil 6.37 Gerilmenin yoğunlaştığı kısımlar 134
Şekil 6.38 Yapıştırıcı yüzeyindeki ayrılma hasarı 134
Şekil 6.39 Yapıştırıcı yüzeyindeki ayrılma hasarının oluşumu 135
Şekil 6.40 Yapıştırıcı yüzeyindeki ayrılma nihai hasarının dağılımı 135
Şekil 6.41 Yapıştırıcı ayrılmasının yapısal yıkıma etkisinin olmaması..... 136
Şekil 6.42 Ayrılma hasarı bölgesinde Glue Breaking kontak durumu..... 136
Şekil 6.43 Eşdeğer von Misses gerilmesi..... 137
Şekil 6.44 Normal gerilme 137
Şekil 6.45 Kayma gerilmesi 138
Şekil 6.46 Minimum ve maksimum asal gerilmeler 138
Şekil 6.47 Eşdeğer von Misses gerilmesi..... 139
Şekil 6.48 Normal gerilme 140
Şekil 6.49 Kayma gerilmesi 140
Şekil 6.50 Minimum ve maksimum asal gerilmeler 141
Şekil 6.51 Eşdeğer von Misses gerilmesi..... 142
Şekil 6.52 Normal gerilme 142
Şekil 6.53 Kayma gerilmesi 143
Şekil 6.54 Minimum ve maksimum asal gerilmeler 143
Şekil 6.55 Eşdeğer von Misses gerilmesi..... 144
Şekil 6.56 Normal gerilme 144
Şekil 6.57 Kayma gerilmesi 145
Şekil 6.58 Minimum ve maksimum asal gerilmeler 145
Şekil 6.59 Hasar beklenen yapışkan bölgede gerilme dağılımı 146

Şekil 6.60 Hasar beklenen yapışkan bölgede toplam gerinim enerjisi..... 146
Şekil 6.61 Burkulma beklenen bölgede gerilmenin yüksek olması 147
Şekil 6.62 Y yönünde yerdeğişimi 148
Şekil 6.63 Kritik bölgede normal gerilme..... 149
Şekil 6.64 Kritik bölgede σ_{22} değerleri..... 149
Şekil 6.65 Kritik bölgede maksimum asal kayma gerilmeler 150
Şekil 6.66 Kritik bölgede maksimum asal gerilmeler..... 150
Şekil 6.67 1. hasar indeksi ve Tip 1 151
Şekil 6.68 2. hasar indeksi ve Tip 4 151
Şekil 6.69 4. hasar indeksi ve matris bası modları..... 152
Şekil 6.70 Sabit çatlak büyümesi ile yerel kep açma burkulması modu..... 152
Şekil 6.71 Yerel burkulma modu 153
Şekil 6.73 Spar kepte yerel burkulma modu 153
Şekil 6.74 Yerel burkulma modunda yüksek gerinimler 154
Şekil 6.75 σ_{11}'in lokal burkulmaya etkisi..... 155
Şekil 6.76 Malzemenin 1 yönü boyunca daha yüksek bir çekiye maruz kalması.... 155
Şekil 6.77 Lokal burulma kaynaklı delaminasyonda gerilme yoğunlaşması..... 156
Şekil 6.78 Malzemenin 2 yönü boyunca yüksek bir basıya maruz kalması..... 156
Şekil 6.79 Çatlak oluşumu görülmemesi ve bası gerilmeleri..... 157
Şekil 6.80 Toplam şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu ve çatlak başlangıcı 157
Şekil 6.81 Toplam şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu ve çatlak başlangıcı 158
Şekil 6.82 Çatlak büyümesi gerçekleşmemesi 158
Şekil 6.83 Toplam şekil değiştirme enerjisi yoğunluğunun maksimum olması 159
Şekil 6.84 Seçilen düğümde çatlak oluşumu..... 159
Şekil 6.85 Çatlakta oluşan eşdeğer von Misses gerilmesi..... 160
Şekil 6.86 1. hasar indeksi 160
Şekil 6.87 2. hasar indeksi 161
Şekil 6.88 4. hasar indeksi 161
Şekil 6.89 6. hasar indeksi 162

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Dünya çapında küresel enerji üretiminde yenilenebilir enerji 4
Tablo 2.2 Yıllara göre dünyada toplam rüzgârdan üretilen elektrik miktarı..... 5
Tablo 2.3 Dünya çapında rüzgâr enerjisi gücü..... 6
Tablo 2.4 AB'deki rüzgâr enerjisi sektörü..... 6
Tablo 2.5 Türkiye elektrik enerjisi..... 7
Tablo 2.6 Türkiye ulusal enerji planı 2035 – 2053 dönemi öngörüleri 8
Tablo 2.7 Birincil kaynaklara göre santral adetleri ve kurulu güç..... 8
Tablo 2.8 Elektrik kurulu gücü 10
Tablo 2.9 Devreye alınan yeni kapasite 10
Tablo 2.10 Elektrik üretimi türü 10
Tablo 2.11 Elektrik üretiminde kaynakların payı 10
Tablo 2.12 Ülke başına beklenen yeni kurulumlar 2023-2027..... 11
Tablo 2.13 Türkiye'deki rüzgâr enerjisi sektörü..... 11
Tablo 2.14 Türkiye'nin rüzgâr enerjisine dayalı kurulu güç gelişimi..... 12
Tablo 2.15 Rüzgâr Enerjisi 2023 14
Tablo 2.16 Ülkemizde yerlilik durumu..... 16
Tablo 2.17 Yerli rüzgâr enerji sektörümüzle ilgili bazı sayısal veriler durumu 17
Tablo 2.18 Rüzgâr türbini kanatları 19
Tablo 2.19 ABD' de yıllara göre enerji maliyeti 20
Tablo 2.20 IEA'nın raporuna 2019 Dünya toplam enerji kurulu gücü..... 22
Tablo 2.21 Atık miktarı..... 25
Tablo 2.22 Mekanik geri dönüşüm literatürü..... 30
Tablo 2.23 Termal geri dönüşüm literatürü 32
Tablo 2.24 Kimyasal geri dönüşüm literatürü..... 34
Tablo 2.25 Hibrit geri dönüşüm literatürü 35
Tablo 2.26 Geri kazanılan malzemenin mekanik özellikleri 37
Tablo 2.28 Elyafların karşılaştırılması..... 39
Table 2.29 Elyaf türlerinin karşılaştırılması..... 39
Tablo 2.30 Elyaf tipine göre takviye karşılaştırması 40

Tablo 2.31 Rüzgar türbini kanatlarındaki malzemelerin fiziksel özellikleri..... 40
Tablo 2.32 Geri dönüştürülmüş işlenmemişe kıyasla korunan mukavemeti 40
Tablo 2.33 İşlenmemiş ve yeniden işlenmiş farklı karışımlarının elastik modülleri..41
Tablo 2.34 Pirolize edilmiş ve işlenmemiş lifler mekanik özellikleri 42
Tablo 2.35 Karbon liflerinin çekme dayanımı 42
Tablo 2.36 CFRC'nin pirolizinden geri kazanılan tek lifin mekanik özellikleri 43
Tablo 2.37 İşlenmemiş ve geri dönüştürülmüş cam elyafların çekme testi 43
Tablo 2.38 Kompozitlerinin kimyasal geri dönüşümü mekanik özellikleri..... 43
Tablo 2.40 İşlenmemiş ve üç CF geri kazanım prosesinin mekanik özellikleri 44
Tablo 2.41 Geri dönüştürülmüş karbon elyaf, mukavemetini koruma yöntemleri 44
Tablo 2.42 EoL seçeneklerinden elde edilen gerilme mukavemeti 45
Tablo 2.43 Elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin çekme dayanımı 45
Tablo 2.44 Geri kazanılmış GFRP ve CFRP'nin mekanik özellikleri..... 45
Tablo 2.45 GF ve CF'lerin maliyeti için tahmini değerler 45
Tablo 4.1 Malzeme özellikleri ve mukavemet değerleri..... 83
Tablo 4.2 Kohezif bölge arayüz özellikleri..... 84
Tablo 6.1 Kohezif hasar durumu..... 137
Tablo 6.2 Kohezif hasar durumu..... 139
Tablo 6.3 VCCT hasar durumu..... 141
Tablo 6.4 VCCT hasar durumu..... 144

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Rüzgar Türbinleri ve Kanat Yapısı: Tasarım, Gelişmeler ve Sorunlar

1980'lerde ticari olarak kullanılmaya başlanan rüzgar türbinlerinin boyutları önemli ölçüde büyümüştür. Normal ölçeklendirme yasalarına göre, rüzgar türbini kanatlarının ağırlığı, uzunluklarının küpü kadar artmalıdır. Rüzgar türbini kanatları daha büyük boyutlara ulaştıkça, yerçekimi ve atalet yüklerinin etkisi aerodinamik yüklere göre daha önemli hale geldi. Bu nedenle, ağırlık azaltma ihtiyacı giderek daha da fazla önem kazanmaktadır. Teknolojik gelişmeyle birlikte, rüzgar türbini üreticilerinin standartları yükselmiş ve kanatların tasarımı, malzemesi ve üretim şekli önem kazanmıştır. Rüzgar türbini kanatlarının türbin verimliliğinde büyük bir etkisi olduğu kabul edilmektedir ve bu nedenle mühendislik ve teknoloji alanında önemli yatırımlar yapılmaktadır (Global Wind Energy Council, 2022).

Rüzgar enerjisi, yeşil bir enerji kaynağı ve dünya çapında en hızlı büyüyen enerji sektörü olarak kabul edilir. Dünya çapında kurulu yaklaşık 600 GW rüzgar enerjisi kapasitesi ile rüzgar enerjisi üretimi, küresel elektrik üretiminin yaklaşık %5'ini karşılamaktadır. Rüzgâr enerjisi sektörü küresel olarak büyümekte olup son 10 yılda kapasitesi neredeyse dört kat artmıştır. 2020 yılında, toplam 93 GW kapasiteli yeni rüzgâr türbinleri eklenerek büyük bir büyüme kaydedilmiştir. Çin ve ABD gibi büyük rüzgâr enerjisi piyasaları, dünyada kurulan rüzgâr türbinlerinin büyük bir kısmını inşa ederek rekor bir büyüme yaşamıştır. Diğer ülkelerde ise daha mütevazı bir büyüme görülmüştür (Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporları, 2023).

Malzeme teknolojisindeki hızlı gelişmeler sayesinde rüzgar türbini maliyeti, mekanik ekipman dayanıklılığı, malzeme direnci, ağırlık ve estetik gibi birçok hususta önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Rüzgar türbini tasarımında, kanatlar en çok dayanıklılık ihtiyacına sahip unsurlardır. Yüksek rüzgar hızlarına maruz kalan rüzgar

türbini yapılarında özellikle kanatlar, mukavemet sorunlarıyla karşılaşabilir ve bu sorunlar kanatlarda deformasyona veya kırılmaya yol açabilir.

Kanatların hafif olması için ideal olarak iç yapı boş olmalıdır ve kanatlarda yükün önemli bir kısmını kabuk yapısı taşır. Bu sebeple, kabuk yapılarının işlevlerini tam olarak yerine getirebilmeleri için güçlendirilmeleri elzemdir. Kabuğu güçlendirmek için sparlar ve ribler kullanılır. Sparlar, açıklıklar boyunca uzanan ve yükleri taşıyan ve kabuk direngenliğini artıran kiriş yapılarıdır. Birden fazla spar olabilir, ancak genellikle bir veya iki olur. Spar kep, kanadın ön kenarı boyunca uzanan kalın, I şeklinde bir kiriştir. Rüzgârın neden olduğu eğilme kuvvetlerine direnmekten sorumlu olan, kanadın birincil yük taşıyan elemanıdır. Spar kepler tipik olarak, her yönde mukavemet ve direngenlik sağlamak üzere fiberlerin farklı yönlere yönlendirildiği çok sayıda kompozit malzeme katmanından yapılır.

Delaminasyon (katmanlara ayrılma) kanatlarda yaşanan en kritik sorunlardan biridir ve rüzgar türbini kanatlarında delaminasyon öncelikle spar kep kısmında başlar çünkü bu kısım, kanat üzerinde en fazla gerilmeye maruz kalan kısımdır. Spar kepler, kanatların aerodinamik performansını ve yapısal bütünlüğünü sağlayan en önemli parçalardan biridir. Bu kısım, kanatların rüzgardan aldığı kuvveti doğrudan absorbe eder ve kanatların sapmasını ve titreşimini kontrol eder. Kanatların rüzgardan aldığı kuvvet, spar kep katmanların birbirinden ayrılmasına neden olabilir (Broṇdsted, Nijssen ve Goutianos, 2023).

BÖLÜM İKİ

RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADI VE DESTEK ELEMANLARINDAKİ KOMPOZİT YAPILARIN YERLİLİK, GERİ DÖNÜŞÜM VE DAYANIMLARININ FİZİBİLİTESİ

Rüzgar enerjisi, önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır ve 2050 yılına kadar önemli ölçüde gelişeceği tahmin edilmektedir. 2001 yılında, küresel çapta toplamda 24 gigawatt (GW) rüzgar enerjisi kurulumu yapılmışken 2021 itibariyle bu rakam 837 GW'a yükselerek neredeyse 35 katına ulaşmıştır (Global Wind Energy Council, 2022). Ayrıca gelişmekte olan ülkeler arasında yer alan Türkiye gibi ülkelerde rüzgar enerjisi, artan enerji talebini karşılama sürecinde önemli bir rol oynamıştır. Türkiye'de 2008 yılında sadece 0,4 GW rüzgar enerjisi kapasitesi bulunurken, bu miktar 10 yılda neredeyse 20 kat artarak 2018'de 7,4 GW'a yükselmiştir (Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporları, 2023). Bu olumlu tabloya rağmen, 2016'dan sonra kurulum hızının yavaşladığı da gözlemlenmektedir. Son dönemde, küresel çapta enerji kaynaklarının arzında oluşan darboğaz ve fiyat artışları sonrası ortaya çıkan enerji krizi, yerli enerji kaynaklarının kıymetini artırırken küresel iklim değişikliği de enerjinin temiz, yenilenebilir olarak üretilmesini gerekli kılmaktadır. Dünyada yenilenebilir enerjiye artan ilgi, rüzgâr türbini kanadı üretiminde üs konumunda olan Türkiye'nin ihracattaki gücünü arttırmıştır. Geçen yıl, 2022 yılında, Avrupa'da kurulan rüzgar türbinlerindeki kanatların yaklaşık 3'te 1'i Türkiye'de üretilmiştir (Anadolu Ajansı, 2023) .

Uluslararası Enerji Ajansı, rüzgâr üretiminin 2030 yılına kadar 3317 terawattsaat (TWhs) veya daha fazlasına ulaşacağını tahmin etmektedir (Psomopoulos, C. S., Kalkanis, K., Kaminaris, S., Ioannidis, G. C., ve Pachos, P., 2019). Avrupa'da, 2030 yılına kadar rüzgâr enerjisi üretiminin Avrupa Birliği (AB) ülkelerinin enerji talebinin yüzde 30'unu karşılaması ve bu oranın önümüzdeki on yıllarda daha da artması beklenmektedir. Bununla birlikte, yoğun rüzgâr enerjisi kullanımı, ömrünü tamamlamış veya hizmet dışı kalmış rüzgâr türbinlerindeki kanatların atık olarak birikmesine neden olmuş ve bu da büyük çevre sorunlarına yol açmıştır (Joustra, Flipsen ve Balkenende, 2021). Son yıllarda AB'de her yıl yaklaşık 3800 rüzgâr türbini kanadı sökülmeye

başlandı. ABD'de ise 2021 yılından itibaren her yıl yaklaşık 8000 rüzgâr türbin kanadı kaldırılmıştır ve bu eğilimin 2025 yılına kadar devam edeceği öngörülmektedir (Rathore ve Panwar, 2023).

2.1. Küresel Ölçekte Yenilenebilir Enerji Sektörünün Dünü, Bugünü ve Gelecekteki Gelişimi

Rüzgâr enerjisi, yeşil bir enerji kaynağı ve dünya çapında en hızlı büyüyen enerji sektörü olarak kabul edilir. Çin ve ABD gibi büyük rüzgâr enerjisi piyasaları, dünyada kurulan rüzgâr türbinlerinin büyük bir kısmını inşa ederek rekor bir büyüme yaşamıştır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın yenilenebilir enerji piyasası güncellemesi, yenilenebilir enerjide büyümenin 2024'de devam edeceğini ve dünyanın toplam yenilenebilir elektrik kapasitesinin Çin ve ABD'nin toplam güç üretimine eşit olan 4500 GW'a yükseleceğini ifade etmektedir. Çin, yenilenebilir enerjide lider konumunu sağlamlaştırmayı sürdürmektedir ve Çin'deki yeni yatırımlar, hem 2023, hem de 2024'te küresel yenilenebilir enerji kapasitesinin tek başına yaklaşık %55'ini oluşturacağı tahmin edilmektedir; bunun yanı sıra diğer ülkelerde ise daha mütevazı bir büyüme görülmüştür. Elektrik Piyasası 2023 Raporu'na göre, geçen yıl küresel enerji krizi ve olağandışı hava koşulları nedeniyle %2'ye gerileyen dünya elektrik talebindeki büyümenin önümüzdeki üç yıl içinde ortalama %3 büyümesi beklenmektedir. IEA analizine göre yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerji, 2025 yılına kadar küresel elektrik talebindeki büyümenin neredeyse tamamını kapsayacaktır (Tablo 2.1). Tablolardaki sayısal değerler yaklaşık olarak verilmiştir. IEA'nın Dünya Enerji Görünümü raporuna göre 2019 dünya toplam enerji kurulu gücü 7484 GW ve bunun %36'sı yenilenebilir enerjiden 2707 GW elde edilmektedir. Yenilebilir enerjide, rüzgâr kurulu gücünün payı 623 GW ile %8 olmuştur. 2019 yılında dünyada toplam rüzgârdan üretilen elektrik 1423 TWh olmuştur (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023) (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Dünya çapında küresel enerji üretiminde yenilenebilir enerji

Yıl	Durum - Gelişme (Electricity Market Report, 2023)	Oran
2022	Küresel enerji üretimindeki payı	%29
2025	Küresel enerji üretimindeki tahmini payı	%35
2050	Küresel enerji üretimindeki tahmini payı	%85

Küresel rüzgâr enerjisi kurulu gücü, geçen yıl itibarıyla ilave edilen 78 GW'la toplam 906 GW'a ulaşmıştır. 2023 içinde bu kapasitenin 1 TW seviyesine ulaşmasını bekleyen tahminler olsa da 2025'e kadar bu değere ulaşılamayacağını ifade eden tahminler daha fazladır. İklim değişikliği ile mücadele ve enerji güvenliğini artırma çalışmaları kapsamında enerji yoğun sektörlerde fosil yakıtlardan arınmak isteyen ülkelerin katkısıyla küresel rüzgâr enerjisi kurulu kapasitesinin bu yıl 1 TW seviyesine ulaşması beklenmektedir. Geçen yıl küresel rüzgâr kapasitesinin önceki yıla göre %9 artmasıyla kapasite 1 TW'a yaklaşırken, kurulu güç artışındaki ivmenin devam etmesiyle 2023-2027 döneminde toplam 680 GW'ın daha küresel enerji sistemine dâhil edileceği öngörülmektedir (Tablo 2.2) (Temizenerji.org, 2023).

Tablo 2.2 Dünyada toplam rüzgârdan üretilen elektrik miktarı (IEA Dünya Enerji raporu, 2019)

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar
2019	Toplamda rüzgârdan üretilen elektrik miktarı	1423 TWh
2025	Toplamda rüzgârdan üretilen tahmini elektrik miktarı	2394 TWh
2030	Toplamda rüzgârdan üretilen tahmini elektrik miktarı	3361 TWh
2040	Toplamda rüzgârdan üretilen tahmini elektrik miktarı	5441 TWh

Piyasa koşulları, yatırım ortamı, ülkelerin yenilenebilir enerji politikalarında attığı olumlu adımlarla 2 TW'lık kurulu güce 7 yıl sonra ulaşılabileceği öngörülürken, her yıl büyüme oranının ise ortalama %10 olacağı tahmin edilmektedir (Temizenerji.org, 2023). Bu değer bazı tahminlere göre ise 2040'a kadar dahi ulaşılamayacaktır (IEA Dünya Enerji raporu, 2019) (Tablo 2.3).

WindEurope Yıllık İstatistik Raporu, Avrupa'da rüzgâr enerjisi açısından önümüzdeki beş yıllık görünümü de içeren rapor, AB'nin tüm ihtiyaçlarına ve 2030 hedeflerine karşın rüzgâr kurulu gücündeki artışın yeterli olmadığını ortaya koymaktadır. Zorlu ekonomik ortam ve tedarik zinciri zorluklarına rağmen 2022 yılı, bir önceki yıla göre %4'lük bir artışla Avrupa'daki kurulumlar için rekor bir yıl oldu. Buna rağmen, kurulum miktarı, 2022 yılı için gerçekçi beklenti senaryosunun %12 altında kaldı ve bu durum, AB'nin iklim ve çevre hedeflerini karşılamak için gereken oranların oldukça altında kaldığını göstermektedir.

Tablo 2.3 Dünya çapında rüzgâr enerjisi gücü (Murdy, 2022 vd., WindEurope İstatistik Raporu, 2023 ve IEA Dünya Enerji raporu, 2022)

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar - Oran
2019	Toplam kurulu güç kapasite durumu	623 GW
2010-2020	Rüzgâr sektörünün küresel olarak büyümesi	4 kat artış
2020	CO_2 emisyonunu dengeleme miktarı	1,1 milyar ton CO_2
2020	Küresel elektrik üretimindeki payı	%5 (Amantayeva vd., 2022)
2020	Toplam kurulu güç kapasite durumu	744 GW (Garcia vd., 2022)
2021	Toplam kurulu güç kapasite durumu	828GW
2022	Toplam kurulu güç kapasite durumu	906 GW
2023	Toplam kurulu güç kapasite durumu	1TW
2027	Toplam kurulu güç kapasite durumu	1680GW
2030	Toplam kurulu güç kapasite durumu	2TW
2025	Toplam kurulu güç kapasite durumu	978 GW
2030	Toplam kurulu güç kapasite durumu	1299 GW
2040	Toplam kurulu güç kapasite durumu	1914 GW
2050	Küresel elektrik üretimindeki tahmini payı	%30 (Amantayevavd., 2022)

AB'nin 2023-2027 yılları arasında yılda ortalama 20 GW yeni rüzgâr çiftliği kurmasının beklendiği de hesaba katılırsa (Tablo 2.4), ortaya çıkan sonuçlara göre AB, 2030 hedeflerine ulaşabilmek için yılda ortalama 30 GW'ın üzerinde yeni rüzgâr santrali inşa etmek zorundadır (WindEurope Yıllık İstatistik Raporu, 2023).

Tablo 2.4 AB'deki rüzgâr enerjisi sektörü (WindEurope Yıllık İstatistik Raporu, 2023)

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar - Oran
2021	Yeni rüzgâr kurulumlarının kara oranı	%87
2022	Yeni rüzgâr kapasitesi miktarı	19,1 GW
2022	Yeni rüzgâr kapasitesi miktarı -Karada	16,7 GW
2022	Yeni rüzgâr kapasitesi miktarı -Denizde	2,5 GW
2022	Toplam rüzgâr kapasitesi	255 GW
2022	Rüzgâr enerjisi üretimi	489 TWh
2022	Elektrik talebi	2830 TWh
2023-2027	Yeni rüzgâr çiftliklerinin tahmini enerji katkısı	129 GW
2023-2027	Yeni rüzgâr çiftliklerinin karadaki payı	%75
2023-2027	Yeni rüzgâr çiftliklerin tahmini yıllık ortalama enerji katkısı	20 GW
2030	Küresel elektrik üretimindeki tahmini payı	%30

2.2.Türkiye'deki Yenilenebilir Enerji Sektörü ve Enerjide Yerlilik

Türkiye'de 2020 yılından 2035 yılına kadar elektrik enerjisi bilgileri Tablo 2.5'de verilmiştir. 2020 yılında kurulu güç içinde %52,0 olan yenilenebilir enerji kaynaklarının

payı 2035 yılına kadar %64,7'ye ulaşması hedeflenmiştir (Türkiye Elektrik İstatistikleri, 2023). 2000-2020 döneminde yıllık ortalama %3,1 oranında artış göstermiş olan birincil enerji tüketimi, 2020-2035 döneminde %2,2 düzeyinde artması beklenmektedir (IEA Dünya Enerji raporu, 2019).

Tablo 2.5 Türkiye elektrik enerjisi (IEA'nın göre Dünya Enerji Görünümü raporu, 2019)

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar - Oran
2000-2020	Birincil enerji tüketimi yıllık ortalama artış oranı	%3,1
2020	Elektrik kurulu gücü	95,9 GW
2020	Kurulu güç içinde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%52,0
2020	Kişi başı birincil enerji tüketimi	2,1 tep/kişi
2020	Enerji tüketimi içindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%16,7
2020	Yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%42,4
2020	Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%11,7
2022	Bir önceki yıla göre Türkiye elektrik tüketimi oranı değişimi	-%1,2
2022	Türkiye elektrik enerjisi tüketim miktarı	328,9 TWh
2022	Bir önceki yıla göre Türkiye elektrik üretimi oranı değişimi	-%2,5
2022	Türkiye elektrik enerjisi üretim miktarı değişimi	326,2 TWh
Mayıs 2023	Elektrik kurulu gücü	104.672 MW
Mayıs 2023	Elektrik enerjisi üretim santrali sayısı (Lisanssız santraller dâhil)	12.057
2025	Tahmini Türkiye elektrik enerjisi tüketim miktarı	380,2 TWh
2030	Tahmini Türkiye elektrik enerjisi tüketim miktarı	455,3 TWh
2035	Tahmini Türkiye elektrik enerjisi tüketim miktarı	510,5 TWh
2035	Tahmini elektrik kurulu gücü	189,7 GW
2035	Tahmini kurulu güç içinde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%64,7
2035	Tahmini birincil enerji tüketimi yıllık ortalama artış oranı	%2,2
2035	Tahmini elektrik üretiminde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%34,2-%54,7
2035	Tahmini elektrik kurulu gücünde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%43,5-%64,7
2035	Tahmini birincil enerji tüketimi içindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%23,7
2050	Tahmini birincil enerji tüketimi içindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%50
2053	Tahmini yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%69,1
2053	Tahmini elektrik üretiminde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%61,4

Tablodaki değerler, IEA ve Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) gibi kuruluşların öngörüleri ve AB'nin 2050 yılı Referans Senaryo çalışmasındaki yenilenebilir enerji kaynaklarının payıyla uyum göstermektedir (IEA Dünya Enerji raporu, 2019) (WindEurope Yıllık İstatistik Raporu, 2023). Türkiye ile ilgili değerler Enerji Bakanlığı tarafından belirlenmiştir. Türkiye'nin 2035-2053 yılları arası için ulusal enerji planı Tablo 2.6'da verilmiştir.

Nükleer enerji ise 2035 yılına kadar %5,9'luk ve 2053'te ise %29,3'lük paya ulaşmaktadır. 2020 yılında %83,3 olan fosil kaynakların payı 2035 yılına kadar %70,4 olarak gerçekleşmektedir (Türkiye Elektrik İstatistikleri, 2023). Kömürün payı %21,4'e inerken, petrol %26,5, doğalgaz %22,5'e gerilemektedir (IEA Dünya Enerji raporu, 2019).

Tablo 2.6 Türkiye ulusal enerji planı 2035 – 2053 dönemi öngörüleri (Türkiye Ulusal Enerji Planı 2023)

Yıl	Durum – Gelişme	Oran
2035-2053	Tahmini birincil enerji arzında yerli kaynakların payı	%87
2035-2053	Tahmini birincil enerji arzında yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%50
2035-2053	Tahmini birincil enerji tüketiminde fosil kaynakların payı	- %20,8
2035-2053	Tahmini elektrik tüketimi yıllık ortalama değişimi	+ %5,2
2035-2053	Tahmini yenilenebilir enerji kaynaklarının payının elektrik kurulu gücü	%83,8
2035-2053	Tahmini yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimi payı	%69,3
2035-2053	Tahmini nihai enerji tüketiminde elektrik enerjisinin payı	%55,6

2035 yılında elektrik kurulu gücü için beklenen değerler (WindEurope Yıllık İstatistik Raporu, 2023)

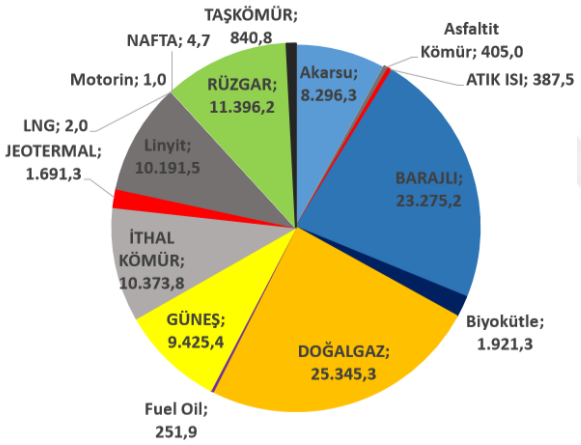
- Rüzgar enerjisinde 29,6 GW'a,
- Güneş enerjisinde 52,9 GW'a,
- Nükleer enerjide 7,2 GW'a
- Toplamda 189,7 GW'a,

Kaynaklara göre kurulu güç-2022 ve oranları Tablo 2.7 ve Şekil 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.7 Birincil kaynaklara göre santral adetleri ve kurulu güç (Türkiye Elektrik İstatistikleri, 2023)

Birincil kaynak	Santral adedi	Kurulu güç (MW)
Rüzgâr	358	11.396,2
Jeotermal	63	1.691,3
Güneş	9.353	9.425,4
Biyokütle	384	1.921,3
Barajlı	141	23.275,2
Akarsu	610	8.296,3
Atık ısı	94	387,5
Doğalgaz	345	25.345,3
Taş kömür	4	840,8
…		
TOPLAM	11.427	103.809,3

2022 yılında elektrik üretimimizin, %34,6'sı kömürden, %22,2'si doğal gazdan, %20,6'sı hidrolik enerjiden, %10,8'i rüzgârdan, %4,7'si güneşten, %3,3'ü jeotermal enerjiden ve %3,7'si diğer kaynaklardan elde edilmiştir. 2023 yılı mayıs ayı sonu itibarıyla ülkemiz kurulu gücü 104.672 MW'a ulaşmıştır (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023). 2023 yılı mayıs ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı; %30,2'si hidrolik enerji, %24,2'ü doğal gaz, %20,8'i kömür, %11'i rüzgâr, %9,6'i güneş, %1,6'sı jeotermal ve %2,5'i ise diğer kaynaklar şeklindedir. Ayrıca ülkemizde elektrik enerjisi üretim santrali sayısı, 2023 yılı mayıs ayı sonu itibarıyla 12.057'e (lisanssız santraller dâhil) yükselmiştir (Tablo 2.5). Mevcut santrallerin 751 adedi hidroelektrik, 67 adedi kömür, 361 adedi rüzgâr, 63 adedi jeotermal, 346 adedi doğal gaz, 9.979 adedi güneş, 490 adedi ise diğer kaynaklı santrallerdir (Türkiye Ulusal Enerji Planı 2023).



Şekil 2.1 Enerji kaynak oranları (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023)

Rüzgar ve güneş gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam elektrik üretimi içindeki paylarının yükseltilmesi planlanmıştır (Tablo 2.8-2.11). Bu doğrultuda 2035 yılında kurulu güç, rüzgar enerjisinde 29,6 GW (24,6 GW kara, 5 GW deniz) düzeyine geleceği tahmin edilmektedir (Li, Mogollón, Tukker ve Steubing, 2022). Diğer yenilenebilir enerji kaynakları için kurulu güç hidroelektrik santrallerde 35,1 GW, jeotermal ve biyokütle enerji santrallerinde toplam 5,1 GW seviyesine yükselmektedir. Rüzgâr enerjisi kurulu gücü 29,6 GW'a ulaşmaktadır. Söz konusu kurulu güç artışının, büyük çoğunluğu güneş ve rüzgâr enerjisi olmak üzere, %74,3'ü yenilenebilir enerji

kaynaklarından oluşmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisi için yıllık yeni kapasite gereksinimi sırasıyla ortalama 3,1 ve 1,4 GW'tır (Türkiye Elektrik İstatistikleri, 2023) (Tablo 2.6).

2.3. Türkiye'deki Rüzgâr Enerjisi Sektörü ve Yerlilik

Türkiye, son yıllarda yapılan yatırımlarla rüzgâr enerjisi sektöründe büyük ilerleme kaydetmiştir. 2020 yılında, Avrupa'da beşinci sırada yer almıştır. Sektör hızlı bir büyüme trendi göstermektedir ve 41 inşa halindeki santral bulunmaktadır, bu santrallerin kurulu gücü 1.872 MW'ı bulmaktadır ulaşmıştır (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023).

Tablo 2.8 Elektrik Kurulu Gücü (GW)

Kaynak/Yıl	2025	2030	2035
Rüzgar	13,1	18,1	29,6
Kömür	21,1	22,8	24,3
Gaz	24,2	30,3	35,5
Nükleer	2,4	4,8	7,2
Hidrolik	33,0	35,1	35,1
Güneş	17,9	32,9	52,9
Diğer	4,5	5,1	5,1
Toplam	116,2	149,1	189,7

Tablo 2.9 Devreye Alınan Yeni Kapasite (GW)

Kaynak/Yıl	2025	2030	2035
Rüzgar	4,3	5,0	11,6
Güneş	11,0	15,0	20,0
Diğerleri	2,4	2,7	0,0
Nükleer	2,4	2,4	2,4
Termik	1,5	9,2	7,0
Toplam	21,6	34,3	41,0

Ege ve Marmara bölgeleri, mevcut kurulu güç ve yıllık elektrik üretimi açısından öne çıkan bölgelerdir. İzmir, Balıkesir, Çanakkale ve Manisa gibi iller, toplam kurulu gücün %47.9'unu oluşturmaktadır (Türkiye Elektrik İstatistikleri, 2023). 2022'de kurulan rüzgâr türbini sayısı 227'dir ve bu türbinlerin ortalama güçleri 3,8MW'dır.

Tablo 2.10 Elektrik Üretimi Türü (TWh)

Kaynak/Yıl	2025	2030	2035
Rüzgar	38,3	53,7	90,1
Termik	196,4	201,2	173,7
Nükleer	18,6	37,2	55,8
Hidrolik	81,9	87,9	87,9
Güneş	28,3	52,2	84,0
Diğer	16,7	20,5	16,2
Toplam	380,2	452,7	507,7

Tablo 2.11 Elektrik Üretiminde Kaynakların Payı (%)

Kaynak/Yıl	2025	2030	2035
Rüzgar	10,1	11,9	17,7
Termik	51,7	44,5	34,2
Nükleer	4,9	8,2	11,1
Hidrolik	21,5	19,4	17,3
Güneş	7,4	11,5	16,5
Diğer	4,4	4,5	3,2
Toplam	100,0	100,0	100,0

Türkiye'nin 2023 ile 2027 yılları arasında tamamı karada olmak üzere 8,15 GW kurması beklenmektedir (WindEurope Yıllık İstatistik Raporu, 2023) (Tablo 2.12). Türkiye, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Bölgesi YEKA ihale programı kapsamında 20 projeye yayılmış 850 MW'lık rüzgar enerjisi kapasitesi için destek aldı. Türkiye'de gerçekleştirilen YEKA RES-3 Rüzgâr Enerjisi Santrali projesi, 850 megavat (MW) kapasiteli bir rüzgâr enerjisi santrali inşa etmek ve elektrik enerjisi üretimini artırmaktır (Tablo 2.13). YEKA RES-3 projesi, ihale tipi olarak belirli bir teknoloji olan rüzgâr enerjisi kullanımına dayalıdır (WindEurope Yıllık İstatistik Raporu, 2023). Proje, "Tarife Garantisi" adı verilen bir destek mekanizmasıyla rüzgar enerjisi santrali işletmecilerine, ürettikleri enerji birimleri başına belirli bir tarife üzerinden uzun bir süre boyunca enerji satma garantisi sunar. (Türkiye Elektrik İstatistikleri, 2023) (Tablo 2.14).

Tablo 2.12 Ülke başına beklenen yeni kurulumlar 2023-2027 (WindEurope Yıllık İstatistik Raporu, 2023)

Konum/Yıl	2024		2025		2026		2027	
EU-27(MW)	Kara	Deniz	Kara	Deniz	Kara	Deniz	Kara	Deniz
Türkiye	1,350	-	1,600	-	1,900	-	2,300	-
Tüm Avrupa	17,750	4,370	18,920	4,710	20,950	8,430	23,290	11,560

Tablo 2.13 Türkiye'deki rüzgâr enerjisi sektörü (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023)

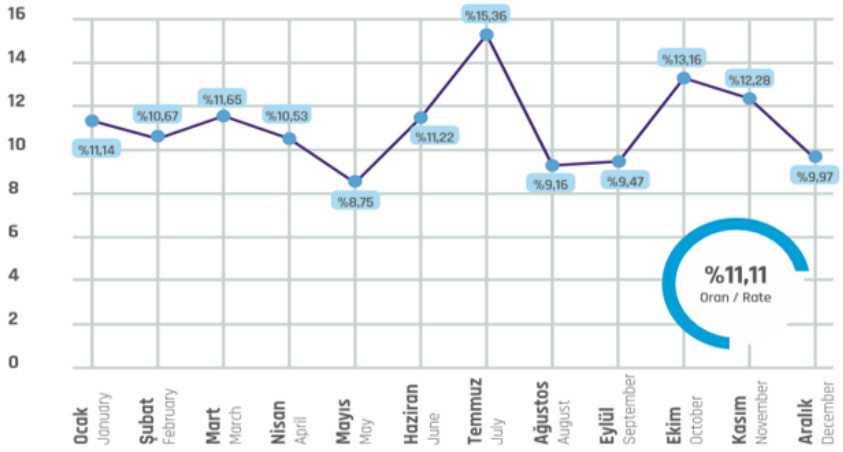
Yıl	Durum - Gelişme	Miktar- Oran
2020	Toplam enerji kurulu gücü	95891 MW
2020	Yerli kaynaklı toplam enerji kurulu gücü	69170 MW
2020	Yenilenebilir enerji kaynaklı enerji kurulu gücü	49582 MW
2020	Rüzgar toplam kurulu gücü	8832 MW
2020	Küresel elektrik üretimindeki payı	%8
2020	Yatırım miktarı	1.6 milyar avro
Mayıs 2021	Rüzgar toplam kurulu gücü	9305 MW
Mayıs 2021	Rüzgâr tesisi miktarı	239 santral
Mayıs 2021	Rüzgar türbini sayısı	3,591 türbin
Mayıs 2021	Rüzgâr türbini kanadı sayısı	10,773 kanat
Kasım 2022'e	Toplam kurulu güç	103541,20 MW
Kasım 2022	Toplam kurulu güç artışı	58,80 MW
Kasım 2022'den	Artış sonrası toplam kurulu güç	11.365,60 MW
Kasım 2022'den	Toplam gücün payı	%10,98
2022	Elektrik üretimimiz rüzgâr enerjisinin payı	%10,8
2022	Kurulan türbin sayısı	227
Mart 2022	Toplam kurulu güç	10.851,84 MW
Mart 2023	Toplam kurulu güç	11.426,32MW
Mart 2022	Toplam kurulu güç oranı	%10,82
Mart 2023	Toplam kurulu güç oranı	%10,95
Mart 2022	Toplam üretim miktarı	9068868 MWh
Mart 2023	Toplam üretim miktarı	8700844 MWh

Mart 2022	Toplam üretim oranı	%10,95
Mart 2023	Toplam üretim oranı	%11,20
Mayıs 2023	Elektrik üretimimiz rüzgâr enerjisinin payı	%11
Mayıs 2023	Elektrik enerjisi üretim santrali sayısı (Lisanssız santraller dâhil)	12.057
Mayıs 2023	Elektrik enerjisi üretim santrali sayısı rüzgâr tesisi	361

Tablo 2.14: Türkiye'nin rüzgâr enerjisine dayalı kurulu güç gelişimi (Türkiye Ulusal Enerji Planı, 2023)

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar - Oran
2017-2022	Elektrik üretiminde yerli kaynakların payı	%45'ten %58'e
2017-2022	Elektrik kurulu gücünde rüzgar kurulu gücü	8,8 GW → 29,6 GW
2017-2022	Elektrik kurulu gücünde deniz üstü rüzgar kurulu gücü	0'dan 5 GW
2017-2022	Enerji kaynaklarında yenilenebilir kaynakların payı	%42,4 → %54,8
2017-2022	Yenilenebilir kurulu gücünün payı	%52,0 → %64,7
2017-2022	Yenilenebilir kaynaklarda yerli kaynakların payı*	%56,9 → %65,0
2020	Elektrik kurulu gücünü	95.891 MW
2020	Rüzgar enerjisine dayalı elektrik kurulu gücümüz	8.832 MW
2020	Devreye alınan kurulu gücün yerlilik oranı	%63,5
2020	Devreye alınan kurulu gücün yenilenebilir kaynaklar oranı	%51,7
2022	Elektrik kurulu gücünü	187.000 MW
2022	Rüzgar enerjisine dayalı elektrik kurulu gücümüz	10.976 MW
2022	Rüzgâr enerjisinin toplam kurulu güç içerisindeki oranı	% 10,81
2022	Devreye alınan kurulu gücün yerlilik oranı	86%
2022	Devreye alınan kurulu gücün yenilenebilir kaynaklar oranı	81%
2022	Mevcut rüzgar ve güneş kurulu gücünün devreye alınma oranı	52%
2022	Rüzgarın ve güneşin günlük elektrik üretimdeki payı	95.891 MW
2022	Elektrik kurulu gücünde yenilenebilir kurulu gücünün payı	8.832 MW
2022	Birincil enerji tüketimi; yenilenebilir kaynakların payı	%63,5

YEKA'ların yavaş yavaş bu sorunu çözmeleriyle birlikte ülkemizde rüzgâr santrallerinin elektrik üretimindeki payının daha da artması beklenmektedir (Şekil 22) (Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporları, 2023).

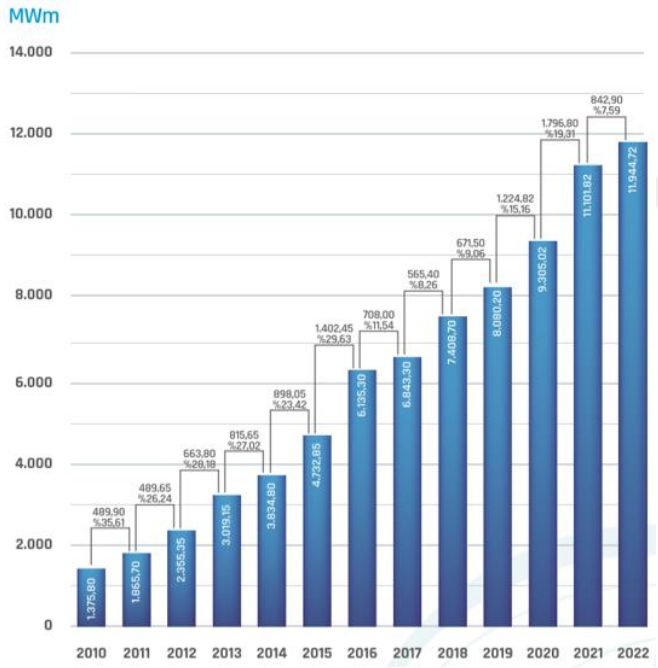


Şekil 2.2 Türkiye'de 2022 yılında rüzgar santrallerinin elektrik üretimindeki payı (Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporları, 2023)

Türkiye'nin rüzgâr gücü Covid-19'un başlangıcından beri 3.274 MW, 2021 yılında ise 1.774 MW artış ile 11000 MW seviyesine ulaştı (Şekil 2.3). İnşa halinde ise 2000 MW'lık bölümü YEKA projelerinden olmak üzere, toplamda 5000 MW'lık proje bulunmaktadır. Bunlara ilave olarak da 2000 MW düzeyinde hibrit projenin çalışmaları yürütülmektedir. TÜREB öngörüsüne göre bu proje stokunun yaklaşık 3000 MW'lık bölümü gelecek iki yıl içinde devreye girebilecek ve 4-5 yıl içinde devreye girecek projelerin toplam yatırım tutarı ise 3 milyar dolara ulaşacaktır (Yeşilekonomi.com, 2023).

Türkiye'de şu anda ön lisansı alınmış ve önümüzdeki aylarda ön lisansını almayı bekleyen yaklaşık 25 bin MW'lık yeni rüzgar kapasitesi mevcuttur ve bu kapasitenin 3 yıl içerisinde proje geliştirme süreçlerini tamamlayarak önümüzdeki yıllarda devreye girmeye başlayacağı öngörülmektedir. Türkiye, kapasite artışlarıyla 2026 sonrası için de ciddi bir sıçrama yaşayabilir (Enerjidünyası.com, 2023). Türkiye, 2030 yılına kadar 18,1 GW ve 2035 yılına kadar da 29,6 GW rüzgar enerjisi hedefi belirlemiştir. Karada ve denizde olmak üzere bir ayrım yoktur, ancak 2030 yılına kadar kurulacak rüzgâr santrali kapasitesinin tamamının karada olması beklenmektedir. 18,1 GW hedefi, Türkiye'yi 2030 rüzgâr enerjisi hedefleri için Avrupa'nın ilk 10 ülkesi arasına sokmaktadır (WindEurope Yıllık İstatistik Raporu, 2023).

2023'te ilk dört aydaki artış 658 MW oldu. Türkiye'nin birincil kaynaklara dayalı elektrik üretim kapasitesi Nisan ayı sonu itibarıyla 104,524 MW'a yükseldi. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) verilerine göre bu gücün 658 MW'lık bölümü 2023'ün ilk dört aylık döneminde devreye girdi (Tablo 2.14). Güneş enerjisi yatırımları 445 MW ile bu dönemde devreye giren güç içinde en büyük paya sahip olurken, ikinci sırada 74 MW ile biyokütle yatırımları, üçüncü sırada ise 60 MW ile rüzgâr enerjisi yatırımları geldi. Nisan ayı sonu itibarıyla hidroelektrik santrallerinin kurulu gücü 31.588 MW'a, rüzgâr enerjisi santrallerinin gücü 11.456 MW'a, güneş enerjisi santrallerinin gücü ise 9.931 MW'a yükseldi (Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporları, 2023) (Tablo 2.15). Şubat 2023 kurulu güç verilerine göre toplam kurulu gücümüz 104.140,43 MW oldu ve rüzgâr kurulu gücü 11.404,96 MW ile toplam gücün %10,95'ini oluşturmaktadır (Türkiye Ulusal Enerji Planı, 2023).



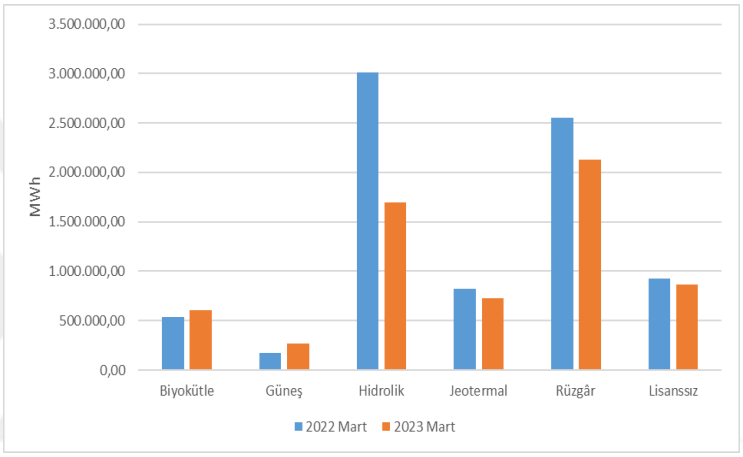
Şekil 2.3 Türkiye'deki rüzgar enerjisi santralleri için kümülatif kurulum (Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporları, 2023)

2023 Nisan Ayı Kurulu Güç Raporunda Öne Çıkan Bazı Bilgiler: EPİAŞ tarafından yayınlanan Nisan 2023 Elektrik Piyasaları Aylık Raporu'na göre, Türkiye'nin elektrikte kurulu gücü 104.487 MW'a ulaştı ve elektrik üretimi Mart ayına göre 2.412 MWh azalarak 23.562 MWh olarak gerçekleşti (Şekil 2.4). Elektrik üretim santrallerinin

kurulu güçleri kaynak bazında incelendiğinde, ilk sırada 50.729 MW ile doğal gaz yer aldı. Ardından 46.560 MW ile hidroelektrik, 22.878 MW ile rüzgâr yer aldı.

Tablo 2.15 Rüzgâr Enerjisi 2023 (Türkiye Elektrik İstatistikleri, 2023)

Ay	Rüzgâr(MWh)	Toplam (MWh)
Ocak	2,694,713	26,832,115
Şubat	2,874,773	24,135,320
Mart	3,033,850	25,937,221
Nisan	2,364,822	24,001,889



Şekil 2.4 YEKDEM kapsamındaki üretimin kaynaklara göre dağılımı (MWh) (Türkiye Elektrik İstatistikleri, 2023)

2.4 Rüzgâr Türbini Kanatlarının Üretimi ve Yerliliği

Rüzgâr türbini kanatları; kalıp, cam veya karbon elyaf iplikleri ile dokunmuş çok eksenli kumaşlar (yüzey kaplama malzemesi), dolgu malzemesi (köpük, balsa ağacı vb.) , reçine (epoksi veya polyester esaslı), sertleştirici kimyasal maddeler, paratoner sistemi, rotor göbek bloğu bağlantı elemanları vb. birçok girdiden oluşur. 2000'li yıllardan sonra Türkiye'de rüzgâr enerjisi sektörünün başlangıç yıllarında genel olarak hammadde tedariki ithal girdiydi. 2010'dan sonra ciddi enerji ve sanayi politikaları desteğiyle 10 sene içerisinde önemli yatırımlar gerçekleştirildi (Tablo 2.16). Rüzgâr enerjisi, Türkiye'de elektrik üretim kapasitesinin yaklaşık yüzde 11'ine ulaşarak önemli bir paya sahip hale geldi. Ülkede toplamda 11.400 megavatı aşan rüzgar enerjisi kapasitesi, 47 farklı ilde bulunan santrallerden oluşmaktadır. Rüzgar enerjisi

sektöründe, 1754,9 megavat ile en büyük kurulu güce sahip il olan İzmir, aynı zamanda ekipman üretimi alanında da öne çıkmaktadır. İzmir, 3 farklı firmaya ait 4 kanat üretim tesisi ile bu alanda öncü konumdadır. Kentte yaklaşık 22 yıldır devam eden kanat üretimi, 6.000'in üzerinde doğrudan istihdam yaratmaktadır. Bu üretim faaliyeti, 700 milyon doların üzerinde ciro ve 500 milyon doları aşan ihracat geliri sağlamaktadır. İzmir'de yılda yaklaşık 4.000 kanat üretilmektedir ve üretimin yüzde 75'ten fazlası yurtdışına ihraç edilmektedir (Anadolu Ajansı, 2023).

Hem dünyada hem ülkemizde, verilerle de ifade edilmiş olan artan enerji ihtiyacının karşılanması noktasında, ülkemizde yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum derecede faydalanmak için devlet politikalarıyla önemli girişimlerde bulunulmaktadır. Öngörülebilir bir piyasa yapısının sağlanması ve enerjimizin milli ve yerli teknolojilerle üretilmesi için Milli Enerji ve Maden politikası çerçevesinde yatırımlar tüm hızıyla devam etmektedir. Bununla ilgili olarak; 10/05/2005 tarihinde 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin bir kanun yayımlanarak tüm yenilenebilir kaynaklar için üst sınır bedel üzerinden alım garantisi getirilmiştir. 2011 yerli aksam yönetmeliği; 'Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Enerjisi Üreten Tesislerde Kullanılan Yerli Aksamın Desteklenmesi Hakkında Yönetmelik' başlığıyla yayımlanmıştır (Türkiye Ulusal Enerji Planı 2023).

Tablo 2.16 Ülkemizde yerlilik durumu (Türkiye Ulusal Enerji Planı 2023)

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar - Oran
2020	Rüzgârdan elde edilen enerjiye devlet desteği	7,3 USD-cent/kWh
2020	Yerli aksamlı tesislerde elde edilen enerjiye devlet desteği	9,40 USD cent /kWh
2022	RES kurulumunda yerlilik oranı	%60
2022	Rüzgar enerjisi ekipman üreticisi	16 üretici firma

Ülkemizin enerji üretiminde yerli kaynak kullanımını artırmak, enerjide dışa bağımlılığını azaltmak, cari açığın azaltılmasına yardımcı olmak ve yerli üretim kabiliyeti geliştirilerek kullanılan ekipmanları da ülke içerisinde üretmek amaçlanmıştır. Bu desteklerle birlikte jeneratörü, kanadı, kuleyi ve bağlantı elemanlarını üretir duruma gelinmiştir. 2013'ten 2020 yılına kadar 16 üretici firma rüzgar ekipman üreticisi olarak hizmet vermekte ve ihracat gerçekleştirmektedir. YEKDEM ödemelerin de çoğu, rüzgar

enerjisi kapsamındadır ve türbinler için bakanlık tarafından belirlenmiş asgari puanlar bulunmaktadır. Asgari puan şartıyla elde edilen bu yerlileşme oranında yaşanabilecek düşüşlerin önüne geçilmesi ve asgari kazanımların korunması istendi. RES asgari puan şartı toplamda 35'tir (Tablo 2.17). Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından Resmî Gazete'de yayımlanan tebliğ ile projelere destek sağlanması için rüzgâr enerjisinde ise lisanssız yatırımlarda kullanılacak kanat, jeneratör ve türbinlerin yerli üretim olması şartı getirildi. Tebliğ ile ilgili kararın "Teşvik belgesi kapsamında değerlendirilmeyen harcamalar" başlıklı 8'inci maddesi şu şekildedir; f) Lisanssız faaliyet kapsamında ve bağlantı anlaşmasındaki sözleşme gücü ile sınırlı olmak kaydıyla rüzgâr enerjisine dayalı elektrik üretimi yatırımları kapsamında yurt dışından temin edilecek kanat, jeneratör ve türbinler (Türkiye Ulusal Enerji Planı 2023).

Tablo 2.17 Yerli rüzgâr enerji sektörümüzün sayısal durumu (Türkiye Ulusal Enerji Planı 2023)

Yıl	Durum- Gelişme	Miktar - Oran	
2020	Rüzgâr türbini kanat üretici firma sayısı	4 adet	
2020	Firmaların kanat üretim kapasitesileri	3500 üzeri adet/yıl	
2020	Kanatlarda yasal yerli katkı oranını	%65 (yerli malı belgesi kapsamında)	
2020	Kanatlarda yerlilik	%52 - % 80	RES asgari puan şartı
2020	Kanatların maliyet içerisindeki payları	% 22	10
2020	Kulenin maliyet içerisindeki payları	%26	10
2020	Bağlantı elemanları maliyet içerisindeki payları	%1	
2020	Jeneratör maliyet içerisindeki payları	%3,5	15

Yerli olarak cam ve karbon elyaf üretimiyle beraber 2020'de kanatların üretiminde yerli girdi şartı konulmuştur. 2021 yılında rüzgâr enerjisi sektörünün yalnızca elektrik üretimi alanında değil, türbin ve ekipman üretimi gibi alanlarda da Türkiye ekonomisine önemli katkı sağlamamış ve halihazırda sektörün sağladığı toplam istihdam 25 bin çalışana ulaşmıştır. Bununla birlikte sektör doğurduğu üretimin %80'lik bölümünü ihraç ederek Türkiye ekonomisine yıllık 1,5 milyar Avroluk önemli bir katkı sağlamıştır (Yeşilekonomi.com, 2023). Sektörün üretimi 1GW üzerinde olup ihracat payı da büyüktür ve gittikçe üretim kapasitesi daha da büyümektedir.

Türkiye'deki kompozit sektörü, orta ve büyük ölçekli 180 şirket ile kısmen kompozit işi yapan 700-800 şirketin yanı sıra yaklaşık 12.500 çalışanıyla katma değeri yüksek ürünler üreten bir sektör konumundadır. Türkiye'deki kompozit malzeme pazarı 1,5

milyar Avro değerinde ve 280.000 tonluk bir hacme ulaşmış durumdadır. Sektör, Türkiye'de Avrupa ve dünya genelindeki büyüme oranının üzerinde, yaklaşık %8-12 aralığında büyümeye devam etmektedir. Türkiye'nin kompozit sektöründe kişi başına düşen tüketim miktarı, dünya ortalamasının altında olduğunu göstermektedir. Dünyada kişi başına düşen tüketim miktarı 4-10 kg arasında değişirken, Türkiye'de bu miktar 3,0 kg'dir. Türkiye'deki kompozit malzeme fiyatları, dünya ortalamasının altında yer almaktadır. Dünya genelinde ortalama fiyat seviyesi 6,9 €/kg iken, Türkiye'de bu seviye 5,3 €/kg'dir (11. Kalkınma Planı Kimya Sanayii Çalışma Grubu Raporu, 2018) (Kompozit Hammadde Raporu, 2020).

Kompozit endüstrisinde en sık kullanılan takviye malzemeleri cam elyafı (% 87) ve karbon elyafı (% 11) olup, bu malzemelerin üretimi ülkemizde gerçekleştirilmektedir. Türkiye'de üretilen cam elyaf miktarı ülkenin ihtiyacını karşılamamaktadır. 2019 yılında kullanılan cam elyaf miktarı 90.000 ton iken yerli üretim bu miktarın yarısını karşılamaktadır. Kalan ihtiyaç ithalat yoluyla karşılanmaktadır. Talepteki artışlar nedeniyle yerli üretimin artması gerekmektedir. Karbon elyaf üretiminde ise pandemi döneminde uzay ve havacılık sektöründeki talep azalırken rüzgâr santrallerine olan talep artmıştır. Bu durum karbon elyaf tedarikinde sıkıntıya neden olmuştur (Kompozit Hammadde Raporu, 2023).

Reçine türleri arasında ise doymamış polyester reçinesi ve vinil ester reçine üretimi yerli kaynaklarımız tarafından karşılanırken, epoksi reçineler ve termoplastik reçineler ithal edilmektedir. Kompozit üreticilerinin ihtiyaç duyduğu kimyasal hammaddelerin tamamı ithal edilmesine rağmen, ülkemizde üretilen takviye malzemeleri ve reçinelerin ihracatı teknik tekstiller ve bitmiş ürünlerle dış ticarette denge sağlanmaktadır. Türkiye'de reçine üretimi için kurulu kapasite 310.000 ton, 2019 yılında ise toplam üretim 150.000 tondur. Firmaların %80'i yurtiçine, %20'si yurtdışına satış yapmaktadır. Bu kapasite Avrupa Birliği'nin tüm reçine ihtiyacını karşılayabilecek potansiyele sahiptir (Kompozit Hammadde Raporu, 2023).

2.5 Rüzgâr Türbini Kanadı Malzemelerinin Geri Dönüşüm Açısından İncelenmesi

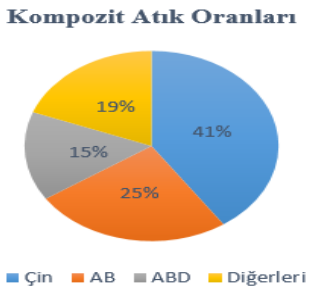
Kompozit malzemelerin büyük rüzgâr türbinlerinde kullanılması, enerji üretim maliyetini düşürmüştür (Uysal, 2008). Rüzgâr türbinlerinin kurulumundaki artış nedeniyle türbin kanadı kaynaklı kompozit atık miktarının gelecekte önemli ölçüde artması beklenmektedir çünkü türbinin metal parçaları kolayca geri dönüştürülebilirse de elyaf takviyeli polimer kompozit esaslı parçaları ise geri dönüşüm zorlukları oluşturup kompozit atık miktarını artırır. Ayrıca türbin kanadı atıkları genellikle atık depolama sahalarına gönderilmekte ve ekonomik değer kazandırılamamaktadır (Amantayeva vd., 2022). Avrupa'da 34.000'den fazla türbin 15 yaşından daha eski durumdadır. ABD'de ise her yıl yaklaşık 8.000 rüzgâr türbini kanadı kaldırılmaktadır ve bu eğilimin 2025'e kadar devam etmesi beklenmektedir; AB'de ise yılda yaklaşık 3.800 kanat kaldırılmaktadır (Jensenve Skelton, 2018). Türkiye'de ise 239 santralde 3.591 rüzgâr türbini bulunmaktadır ve her bir türbinde 3 kanat olduğu düşünülürse toplamda 10.773 kanat mevcuttur. Rüzgâr türbini kanadında kullanılan kompozit malzeme miktarı MW başına 12-15 ton arasında değişmektedir (Tablo 2.18) (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023). Avrupa'da yıllık toplam cam elyaf takviyeli termoset kompozit atık miktarının 2025 yılında 683 kton'a ulaşması beklenmektedir (Uysal, 2008). Bu toplamın yaklaşık %10'unu (66 kton), rüzgar türbini atığı oluşturacağı düşünülmektedir (ETIPWind blade recycling, 2019)

Tablo 2.18 Rüzgâr türbini kanatları (Jensenve Skelton, 2018)

Yıl	Ülke	Durum - Gelişme	Miktar– Oran
2018'den itibaren	ABD	Yıllık kaldırılan rüzgâr türbini kanadı sayısı	8.000
2018'den itibaren	AB	Yıllık kaldırılan rüzgâr türbini kanadı sayısı	3.800
2019	Küresel ölçek	Kompozit atık miktarı (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023)	185.000 ton
2025	AB	Tahmini yıllık kompozit atık miktarı	66.000 ton
2033'den itibaren	Küresel ölçek	Tahmini yıllık kompozit atık miktarı	200.000 ton
2039 yılında	Küresel ölçek	Tahmini kompozit atık miktarı (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023)	8,8 milyon ton
2050 yılına kadar	Küresel ölçek	Tahmini toplam kompozit atık miktarı (Liu ve Barlow, 2017)	43,4 milyon ton
2050'den itibaren	Küresel ölçek	Tahmini yıllık kompozit atık miktarı	2 milyon ton
2050 yılında	AB	Tahmini kompozit atık miktarı	325 kton
2050 yılında	AB	Tahmini kompozit atık miktarı	495 kton

2050 yılına kadar	ABD	Tahmini birikmiş kompozit atık miktarı	2,2 milyon ton
2050 yılına kadar	ABD	Tahmini toplam kompozit atık miktarı	3,3 milyon ton
2050 yılına kadar	Kanada	Tahmini toplam kompozit atık miktarı	275 kton

Amerika Birleşik Devletleri'nde, 2050 yılına kadar birikmiş atık miktarının 2,2 Mt olacağı (Şekil 2.5) ve üretimden kaynaklanan atıklar, hasar nedeniyle kanat değiştirme ve yeniden çalıştırma dikkate alındığında artan maliyetlerle bunun 3,3 Mt'a çıkacağı tahmin edilmektedir (Tablo 2.19). Teksas'ın en fazla atığı (450 ktonun üzerinde) biriktireceği tahmin edilmektedir, ardından New York, California ve Iowa gelmektedir (Cooperman, Eberle ve Lantz, 2021). Kanada'da ise 2050 yılına kadar kümülatif atık miktarının 275 kton olduğu tahmin edilirken, Ontario (111 kton) ve Quebec'in (80 kton) en fazla atığı biriktireceği tahmin edilmektedir (Heng, Meng ve McKechnie, 2021) (Tablo 2.20).



Şekil 2.5 2050'de ülkelere göre beklenen türbin kanadı atığı oranları (Lichtenegger vd., 2020)

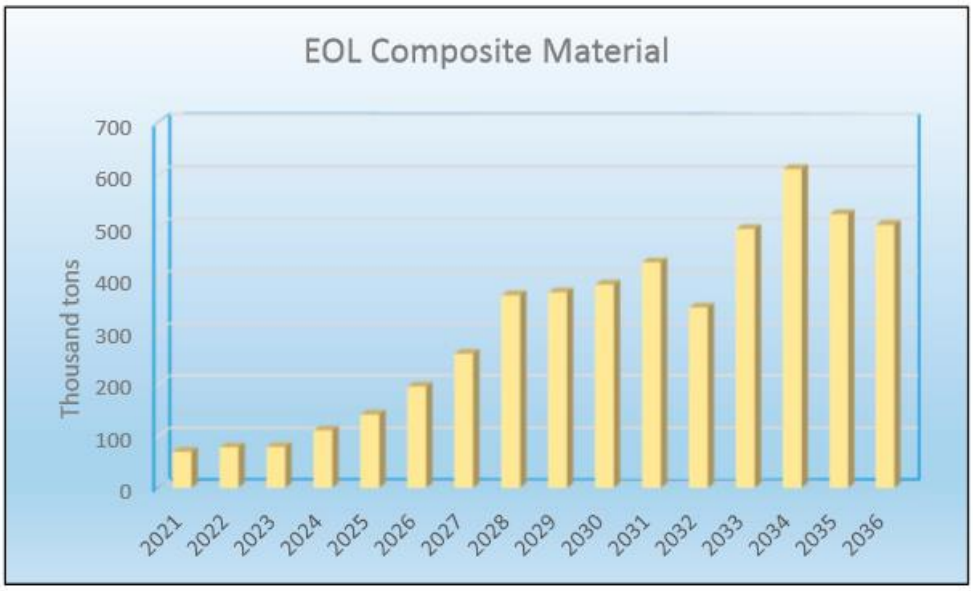
Tablo 2.19 ABD' de yıllara göre enerji maliyeti (Murdy, Hughes ve Barnes, 2022)

Yıl	kWh maliyet değeri
1980 - 2000	40 ABD sent
2000 - 2010	3,5-4 ABD sent
2020 -	2,25 ABD sent

Kompozit atık birikimi, yılda biriken yaklaşık 62.000 ton kullanılmamış ömür sonu (EoL) ve karbon fiber takviyeli polimerlerin üretim atığı ile yeni kompozitlere olan talebi aşmaktadır (Amaechi vd., 2019). Havacılık ve rüzgar enerjisi sektörleri bu israfa önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Yalnızca havacılık sektöründe, geri dönüştürülmediği takdirde 23.360 ton EoL karbon fiber takviyeli kompozitlerin 2035 yılına kadar birikeceği tahmin edilmektedir ve rüzgar enerjisi sektörü de özellikle cam elyaf hususunda önemli bir ivmeyle onu takip etmektedir (Şekil 2.6). 2050 yılına kadar ise her iki sektörden Kuzey Amerika, Avrupa ve Asya'dan önemli miktarlarda birikmiş

karbon fiber takviyeli kompozit atığı beklenmektedir (Cooperman, Eberle ve Lantz, 2021).

Kompozitlerin kullanımı yaygınlaştıkça, çeşitli uygulamalardan her yıl karbon ve cam elyafları içeren büyük miktarlarda kompozit atık birikmektedir. Çevreye zarar vermeyen, uygun maliyetli geri dönüşüm yöntemleri bulmak çok önemlidir (Lefeuvre, Garnier ve Jacquemin, 2017). Türbin kanadı atıkları genellikle atık depolama sahalarına gönderilmekte ve ekonomik değer kazandırılamamaktadır. Rüzgâr türbinlerinin hızlı kurulumu nedeniyle türbin kanadı kaynaklı kompozit atık miktarının gelecekte önemli ölçüde artması beklenmektedir. 2000'li yıllarda kurulan birçok rüzgar türbini, 2020 ile 2030 yılları arasında kullanım ömürlerinin sonuna ulaşacak ve bu da çok sayıda türbinin hizmet dışı bırakılmasına neden olacaktır (Karuppannan Gopalraj ve Kärki, 2020).



Şekil 2.6 Rüzgâr enerjisi endüstrisinden 2036 yılına kadar beklenen kompozit malzeme atığı hacmi (Psomopoulos vd., 2019)

2030 yılına kadar yenilenebilir enerji sektöründen yaklaşık 500.000 ton karbon ve cam elyaf kompozit atığın var olacağı tahmin edilmektedir. Son on yılda, karbon ve cam elyaf termoset kompozitlerin geri dönüşüm yöntemleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Tablo 2.20). Bu çalışmalar mekanik, termal ve kimyasal geri dönüşüm tekniklerine odaklanmış ve her yöntemin ekonomik ve çevresel etkilerini değerlendirmiştir. Rüzgar türbini kanatlarında kullanılan Fiber Takviyeli Polimer (FRP) kompozit malzemelerin atık yönetimi ve Kullanım Ömrü Sonu (EoL) ile ilgili ciddi

sorunlar olduğu tespit edilmiştir. Bu malzemelerin biyolojik olarak parçalanamaz olması, çevresel etkileri ve toplum üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle birçok ülkede endişe yaratmaktadır (Larsen, 2009).

Cam fiber takviyeli kompozitler (GFRC), rüzgâr türbini kanatlarında birincil malzeme olarak tanımlanmaktadır (Rathore ve Panwar, 2023). Bu nedenle, Fiber Takviyeli Polimer atıklarını yönetmek için tercih edilen yöntem, döngüsel ekonomi bağlamında onları yeniden kullanmaktır. Cam fiber takviyeli kompozitler, rüzgâr türbini kanatlarında birincil malzeme olarak tanımlanmaktadır. 2000 yılındaki kurulu kapasiteye göre, cam fiber takviyeli kompozitlerin kullanımı 50.000 ton idi. 2010 yılında, keskin bir artışla 130.000 tona çıktı ve miktar giderek artmaktadır. Bugün rüzgâr enerjisi kanatlarında GFRC kullanımı 150.000 ton civarındadır (WindEurope–Cefic–EuCIA Wind Turbine Blade Circularity) (Tablo 2.20).

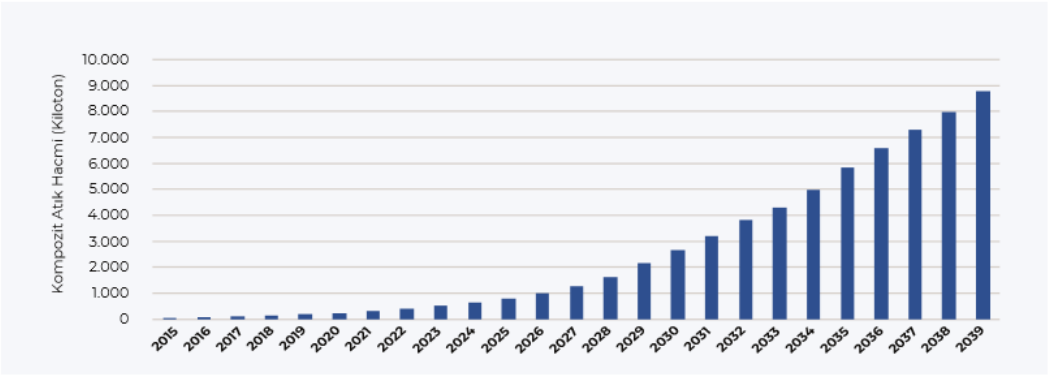
2017 yılında ve sonrasında, özellikle rüzgâr enerjisinde kısa ömürlü uygulamalar için endüstriyel üretim hurdası ve ömrünü tamamlamış (EoL) karbon elyaflı kompozitler dramatik bir şekilde arttı. Uygun geri dönüşüm yöntemleri benimsenmezse, yalnızca uçak ve rüzgar türbini endüstrilerinden kaynaklanan yıllık CFRP (Karbon fiber takviyeli kompozit) atık birikiminin 2050 yılına kadar 840.300 tona ulaşacağı tahmin edilmektedir - bu, 34 tam stadyuma eşdeğerdir (Rani vd., 2021).

Tablo 2.20 IEA'nın raporuna 2019 Dünya toplam enerji kurulu gücü

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar
2017	Plastik atık üretimi (Liu ve Barlow, 2017)	348 milyon ton
2050		1,4 milyar ton
2024 - 2034	Kompozit atık miktarı (Joustra, Flipsen ve Balkenende, 2021)	200.000 ton
2019	Rüzgâr enerjisi endüstrisinden kaynaklanan kompozit atık miktarı(İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023)	185 bin ton
2039		8,8 milyon ton
2000	Cam fiber takviyeli kompozitlerin rüzgâr türbini kanatlarındaki kullanım miktarı (Naqvi vd., 2018)	50.000 ton
2010		130.000 ton
2020		150.000 ton

Kanat malzemesi atıklarının kullanımı 2020'de 1.000.000 tondan 2030'da 2.000.000 tona çıkması, bir başka deyişle, son on yıl içinde iki katına kadar çıkması beklenmektedir. Bu EoL atıklarının dörtte birinin Avrupa'da olacağı tahmin

edilmektedir ve küresel çapta geri dönüşüm daha da acil bir mesele haline gelmiştir (Amaechi vd., 2019). Günümüzde rüzgar türbinlerinin toplam ağırlığının yaklaşık %85 ila 90'ı geri dönüştürülebilirdir. Şu anda küresel çapta rüzgar enerjisi sektöründe yaklaşık olarak 2,5 milyon ton kompozit malzeme kullanılmaktadır. WindEurope'a göre, 2025 yılına kadar hizmetten çıkarılması planlanan yaklaşık 14.000 kanat (yaklaşık 40.000–60.000 ton) olacaktır. Bu eski kanatların geri dönüştürülmesi rüzgâr endüstrisi için en önemli önceliktir (Lefeuvre, Garnier ve Jacquemin, 2017) (Şekil 2.7).

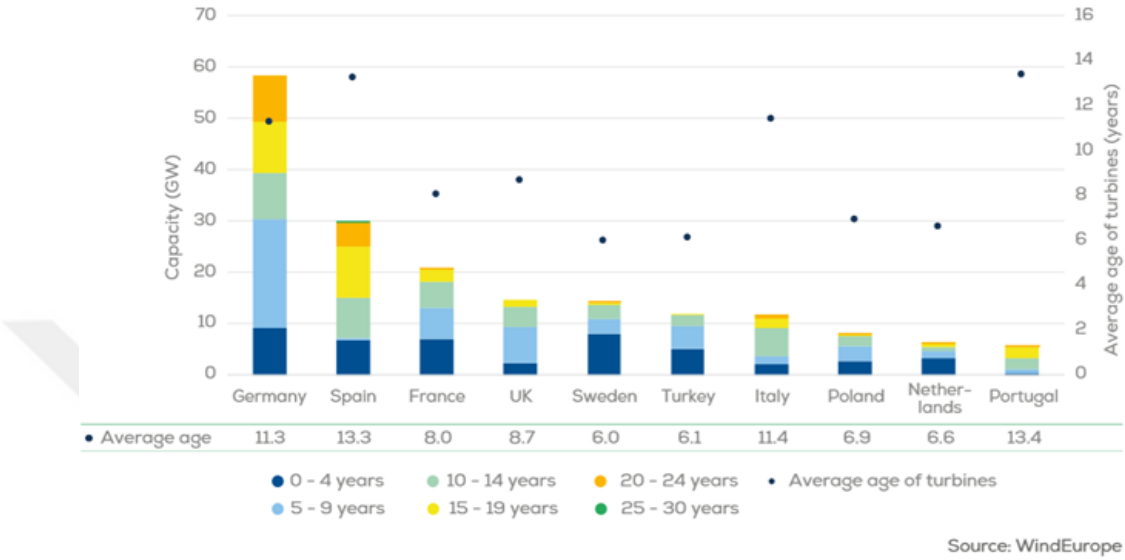


Kaynak: FutureBridge, 2020

Şekil 2.7 Rüzgâr enerjisi endüstrisinden kaynaklanacağı tahmin edilen küresel kompozit atık hacmi (Lefeuvre, Garnier ve Jacquemin, 2017)

Bunun yanı sıra, pandemiden sonra da uçakların parçalanması sayısındaki artış atık kompozit miktarı daha da artmıştır. Karbon ayak izini büyüten atık oluşumunu ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için geri dönüşüm ve CE (döngüsel ekonomi) modellerine olan ihtiyaç daha da artmıştır. Sonuç olarak, AB'nin 2025'ten itibaren atık depolama yasağını yürürlüğe sokmaya karar vermiştir (Liang vd., 2017) . Avrupa'nın önce rüzgâr türbini kanadı atığı sorunuyla yüzleşmesi beklenmektedir. Toplanma bölgesi açısından Avrupa'daki atıkların çoğu Almanya'da, diğer önemli miktarları ise İspanya, Finlandiya, İsveç, Fransa, Birleşik Krallık, İtalya ve Romanya bölgelerinde toplanması beklenmektedir (Lichtenegger vd., 2020). Avrupa'nın karadaki rüzgar çiftliklerinin çoğu planlanan işletim ömürlerinin sonuna yaklaşmaktadır. Şu anda, Avrupa'nın mevcut rüzgar santrallerinin 14 GW'lık kapasitesi 20 yılı aşkın bir süredir çalışmaktadır ve 2030 yılına gelindiğinde ise 78 GW'lık bir kapasite 20 yıldan daha uzun bir süre çalışmış olacaktır. Ortalama olarak, Danimarka, İspanya ve Portekiz en

eski rüzgar filolarına sahiptir. Almanya, 15 yıldan daha eski, 17 GW ile potansiyel olarak yeniden güçlendirilebilecek en büyük kurulu güce sahiptir (WindEurope Yıllık İstatistik Raporu, 2023) (Şekil 2.8).

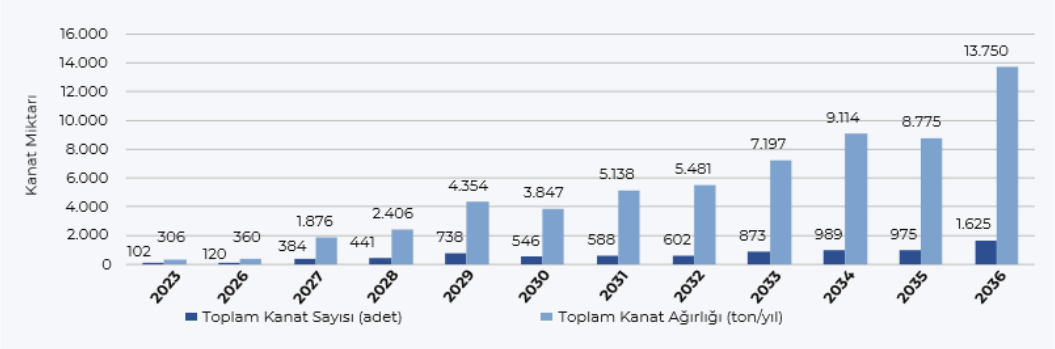


Şekil 2.8 Türbin yaşları ve kapasiteleri (Rathore ve Panwar, 2023)

Türkiye'de 3.591 rüzgâr türbini ve toplamda yaklaşık 10.773 kanat mevcut bulunmaktadır. Rüzgâr kanadında kullanılan kompozit malzeme miktarı MW başına 12-15 ton arasında değişmektedir. Türkiye'de ömrünü tamamlayacak rüzgar türbini kanatlarının özellikleri hakkında bilgi eksikliği bulunmasından kesin bir ağırlık tahmininde bulunmak zordur. Türkiye'de 0,5 MW ila 4,5 MW arasında 29 farklı kapasitede rüzgar türbini bulunmakta ve 2020 ile 2039 yılları arasında kullanımdan kaldırılacak olan 11 farklı rüzgar türbini üreticisinin ürünleri bulunmaktadır. 2020 ile 2039 arasında kullanımdan kaldırılacak türbin kanatlarının %79'unun 3,1 MW'den daha düşük kapasiteli olduğunu tespit edilmiştir. Bu durum, gelecekte 5 MW'lık tipik bir rüzgar türbini boyutunun benimsendiği bir dönemde, tek bir türbinden daha fazla rüzgar türbini kanadı israfı olabileceğini de belirtmektedir. Ayrıca tüm kullanımdan kaldırılacak kanatların %33'ünün 2 MW ila 2,5 MW büyüklüğündeki rüzgar türbinlerinden kaynaklanacağı anlaşılmaktadır (Öztürk ve Karipoğlu, 2023).

Türkiye'deki rüzgâr enerji santralleri son 15 yılda artış göstermiştir ve önümüzdeki 5 yıl içinde pek çok santral 20 yaşını dolduracaktır (Şekil 2.9). Bu durum, rüzgâr türbin

kanadı atıklarının miktarının önemli ölçüde artmasına neden olacaktır. Bu atıkların çoğunluğu İzmir, Balıkesir, Manisa, Çanakkale, Afyon ve Aydın gibi illerde yoğunlaşacaktır. Rüzgâr türbinlerinin geri dönüşüm talebi, İzmir ve çevresinde en yüksek olacaktır. Rüzgâr türbin kanatları kompozit malzemelerden yapıldığı için, diğer sektörlerden çıkan kompozit atıklar da rüzgâr türbinleriyle birlikte geri dönüştürülebilir. İzmir ve çevresindeki cam takviyeli polimer atıkları, Türkiye'deki toplam cam takviyeli polimer atıklarının yaklaşık %15'ini oluşturmaktadır ve bu atıkların da işleme gireceği öngörülmektedir. Türkiye'de toplam 12.500 ton atığın %50'si İzmir ve çevresinde depolanmaktadır ve bu atıkların olası bir tesiste işlenebileceği düşünülmektedir (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023) (Tablo 2.21).



Şekil 2.9 2023-2036 yılları arasında Türkiye'de ömrünü tamamlaması beklenen kanat sayıları (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023)

Tablo 2.21 Atık miktarı (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023)

Ülke - Şehir	Yıl	Durum - Gelişme	Miktar - Oran
Türkiye	2020 - 2030	Ömrünü tamamlamış türbin kanadının yıllık miktarı	5.000 ton
Türkiye	2030 - 2035	Ömrünü tamamlamış türbin kanadının yıllık miktarı	13.750 ton
İzmir	2020	Üretim atığı depolama miktarı	4.000 ton
İzmir	2020 - 2035	Tahmini üretim atığı depolama miktarının artışı	%10

2023 yılında gerçekleştirilen bir yerli akademik çalışmanın sonuçlarına göre, rüzgar türbini kanadı atığı yönetiminde ülkemiz için en etkili alternatiflerin belirlenmesine dair önemli bulgular elde edilmiştir. Bu çalışma, rüzgar türbini kanadı atık parçalarının farklı kullanım seçeneklerine göre önceliklerini değerlendirmiştir. Sonuçlar, atık parçalarının beton malzemelerde kullanılmasının ortalama olarak en yüksek öncelikli ağırlığa sahip olduğunu ve bunu düzenli depolamanın takip ettiğini göstermektedir. Atık malzemenin enerjiye dönüştürülmesi ise en az tercih edilen seçenek olarak öne çıkmıştır. Düzenli

depolamanın düşük yatırım harcaması ve teknik uygulanabilirlik açısından daha üstün olduğunu, dolgu malzemesi olarak kullanımın ise karlılık, sera gazı emisyonları, arazi gereksinimi ve erişilebilirlik kriterlerini daha ağırlıklı olarak etkilediğini ifade etmiştir. Ayrıca atıktan enerji üretimi alternatifinin yeni istihdam yaratma kapasitesi açısından diğer alternatiflere göre daha büyük bir ağırlığa sahip olduğu, geri dönüşüm seçeneğinin ise sera gazı emisyonları, su/toprak kirliliği ve sosyal kabul kriterleri açısından en olumlu şekilde değerlendirildiği belirtilmiştir (Öztürk ve Karipoğlu, 2023).

Şu anda rüzgar türbini kanatlarının yapımında kullanılan üç ana malzeme olarak polimer köpük malzemesi, cam elyaf ve karbon elyaf esaslı kompozitlerdir. Köpük malzemesi (polyester, PET vb) yakılarak imha edilebilirken, diğer iki elyaf esaslı kompozit genellikle atık sahasında depolanarak veya parçalanarak bertaraf edilir. Kanatların yakılması ise birçok dezavantajı olan bir enerji geri kazanım yöntemidir. Doğası gereği cam elyafları yanıcı değildir, baca gazı temizleme sistemleri üzerinde olumsuz etkiye sahiptir ve yanma sürecinden kaynaklanan büyük miktardaki kalıntının işlem sonunda da ayrıca bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden yakılma işlemi yapılacaksa kanatlar kesilip parçalandıktan sonra çimento fırınlarında da yakılabilir. Mekanik olarak geri dönüştürülmüş elyafları betona dâhil edilmesi de betonun yapısal bütünlüğünü artırır (Öztürk ve Karipoğlu, 2023).

Rüzgâr türbini kanadı atıkları, küresel ölçekte de genellikle düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmektedir. Ancak çevreye verilen zarar ve düzenli depolama maliyetinin sürekli artması nedeniyle atık depolama, bunları bertaraf etmenin iyi bir yolu değildir. Ayrıca uzunluğu 80 m'yi aşan kırma ve depolama kanatları büyük miktarda arazi gerektirir. Atık geri dönüşüm sektörü, rüzgâr türbin kanadı atıklarının yönetimi için önemli bir çözüm olabilir. Türkiye'de geri dönüşüm tesisleri kağıt, plastik ve cam gibi atıkları geri dönüştürmektedir; fakat kanat atıkları için henüz bir geri dönüşüm tesisi bulunmamaktadır. Avrupa'da ise rüzgâr türbini kanatlarını geri dönüştürmek için farklı teknolojiler bulunmaktadır; ancak bu teknolojiler ticari ölçekte mevcut değildir ve fiyat-performans açısından halen uygun bir çözüm de sunmamaktadır. Bazı ülkelerde rüzgâr türbini kanatları çimento tesislerinde hammadde veya yakıt olarak kullanılmakta veya cam elyafı geri kazanmak için çalışmalar

yapılmaktadır. Diğer uygulamalar arasında ise türbin kanatlarının farklı ürünlere dönüştürülmesi veya yapısal amaçlarla kullanılması yer almaktadır (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023). Özellikle rüzgar kanatlarından elde edilen cam elyaflar, mevcut mekanik veya ısıl işlem teknolojileri kullanılarak potansiyel olarak geri dönüştürülebilir ancak buna engelleyici olan bazı faktörler vardır.

Geri dönüşümü yönlendiren önemli faktörlerden biri de yönetmelikler ve standartlardır ve son dönemde bu konuda değiştirilmesi gereken hususlar üzerine tartışılmaktadır. Geri dönüşümün yaygınlaşması için esas engelin, ömrünü tamamlamış kanatların epoksi bileşenlerinin atık sahalarına konulmasına hâlâ izin verilmesi olduğu düşünülmektedir. Yapılan araştırmalara göre, çok ucuz bir yöntem olması sebebiyle düzenli depolama, sürdürülebilirliği önceliğine alamayan şirketler için bu hususta ilk tercihleri olmaya devam etmektedir; bu rağmen, en basit şekilde ifade edilecek olursa bir kanadı çimento fırınında kullanmak, atık sahasına koymaktan çok daha iyidir. Bu sebeple Avrupa'daki rüzgar endüstrisi, 2025'ten itibaren düzenli depolama yasağı getirmeyi taahhüt etmiştir. Bununla birlikte, bazı ülkelerde kompozitlerin atık depolaması için oldukça yüksek vergiler getirilmiştir. Örneğin Birleşik Krallık'ta atık depolamanın 2018-2019 yılı fiyatı ton başına yaklaşık 90 avro gibi nispeten yüksek bir maliyeti vardır veya Almanya gibi diğer ülkelerde rüzgar türbini kanatlarının çöpe atılması tamamen yasaklanmıştır. Avrupa ülkeleri arasında, ekonomik koşullar, endüstriyel yapılar ve çevresel düzenlemelerdeki farklılıkları yansıtan çok çeşitli atık depolama maliyetleri ve politikalarının bulunduğunu belirtmek gerekir (JECcomposite.com 2023).

Bir diğer zorluk ise atıkların ayrıştırılmasıdır. Bu husus geri dönüşüm endüstrisini yönlendirecek olan yolun temelidir ve güvenilir bir tedarik zincirine ihtiyaç duyar. Bunun için güçlü mevzuatların ve kompozit üretimi yapan diğer endüstrilerin de düzenli depolama yasağı taahhüt etmeleri önemlidir. Tutarlı bir atık malzeme tedariki için yapılan bileşik atık kodu çalışmalarının sayısı daha da artırılmalıdır. Gelecek yıllarda takip edilecek yön, rüzgar kanatlarının atık malzemelerini işlemek için uygun teknolojileri ve döngüsel ekonomi yollarını araştırmak ve maliyeti en aza indirmeye

odaklanarak gerekli tedarik zinciri ağlarını tasarlamak olacaktır (JECcomposite.com 2023).

Yerlileşme ve Millileşme açısından ithalata dayalı hammaddelerle zorluk yaşayan kimya, plastik ve kompozit sektörlerinin bu zorlukları azaltmak için yeni petrokimya tesislerinin veya kimya ihtisas bölgelerinin devreye girmesi gerekmektedir. Tedarik zorluğu yaşanan cam elyaf takviye malzemesinin yerli kaynaklardan temini için gereken çabalar gösterilmeli ve kompozit sektörünün takviye malzemeleri konusunda sıkıntı yaşamaması sağlanmalıdır. Yerlilik oranı, Türkiye'deki kompozit sektörü için de önemli bir gösterge olarak kullanılabilir. Kompozit sektöründe, küresel açıdan hammadde arzında daralma, malzeme fiyatlarının yükselmesine ve girdi maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Hammadde fiyatları özellikle epoksi reçine fiyatlarında Euro bazında %40'a varan artışlar, sertleştirici fiyatlarında ise %30'a varan artışlar yaşanmıştır. Petrol Fiyatları 2020'nin Aralık ayından bu yana iki katına çıkmıştır ve ithal edilen ham maddenin maliyetini artırmaktadır. Petrokimya ürünlerine bağımlılık nedeniyle bu sektör, petrokimya ürünlerine yapılan zamlardan etkilenmektedir. Yerli kompozit sektörünün ihtiyaçlarına en uygun, çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir geri dönüşüm yöntemi geliştirilmesi, sektörün büyümesine ve rekabet gücünün artmasına katkı sağlayacaktır (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023).

2.5.1 Geri Dönüşüm Yöntemlerinin Yapısal Açıdan İncelenmesi

Geri Dönüşüm Teknolojileri olarak geri dönüşüm, yeniden kullanım, hizmetten çıkarma veya depolama gibi farklı EoL işlemlerine yol açar. En son Avrupa Birliği (AB) direktiflerine göre, rüzgar türbini kanatlarından elde edilen kompozit atığın geri dönüştürülmesi veya yeniden kullanılması çevresel olarak en çok tercih edilen seçenekken, düzenli depolama en az tercih edilen seçenek olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle, rüzgar türbinlerinin kullanım ömürlerini ele almak için sürdürülebilir geri dönüşüm yaklaşımlarına veya alternatif rüzgar türbini kanatları malzemelerine ihtiyaç vardır (WindEurope Yıllık İstatistik Raporu, 2023). Kompozit atıklar için çeşitli sürdürülebilir geri dönüşüm teknikleri: mekanik geri dönüşüm (örn. kırma, öğütme, parçalama ve öğütme), kimyasal geri dönüşüm (örn. solvoliz, glikoliz ve hidroliz),

termal geri dönüşüm (örn. termoliz, piroliz ve akışkan yataklı işlemler) ve hibrit geri dönüşüm teknikleri (mikrodalga destekli kimyasal geri dönüşüm gibi) yer alır. Bununla birlikte, geri dönüşüm teknolojilerinin çoğu, karbon fiberin geri dönüşümüne ve yeniden kullanımına odaklanmıştır; fiber esaslı kompozitler için en yaygın geri dönüşüm yöntemi, mekanik olarak geri dönüştürmedir (Wang vd., 2023).

2.5.1.1 Mekanik Geri Dönüşüm

Mekanik geri dönüşümü, ince malzemeler halinde öğütülen küçük parçalar elde etmek için rüzgar türbini kanatlarının ezilmesini veya parçalanmasını içerir. Bu işlem, kompozit atığı ezme, parçalama ve öğütme yoluyla tipik olarak birkaç santimetre büyüklüğünde lifli malzemeleri ve ince tozları, özellikle reçine içeriği bakımından zengin olanları küçük parçalara ayırmak için kullanılır. Ortaya çıkan malzeme, yeni plastik ürünler veya çimento üretimi için dolgu maddesi, takviye veya hammadde olarak kullanılabilir (Oliveux, Dandy ve Leeke, 2015). Bu geri dönüşüm tekniği uygun maliyetlidir, diğer geri dönüşüm yöntemlerine kıyasla minimum enerji gerektirir ve kanat atıklarıyla ilişkili çevresel riskleri etkili bir şekilde azaltır (Krauklis vd., 2021) (Tablo 2.22).

İlk çalışmalar arasında yer alan Palmer ve ark. (2009)'nın geri dönüştürülmüş cam elyafı ve termosetlerin birleştirilmesi konusunda yaptıkları çalışmada %10 konsantrasyondaki kalın elyafların özenli bir şekilde ayrılmasıyla, hamur kalıplama bileşiği (DMC) darbe dayanımını arttığını ancak eğilme dayanımını orijinal malzemenin %3-8 kadar azaldığını görmüşlerdir (Palmer, 2009). Ayrıca Ribero ve ark.(2015)'ın yaptıkları çalışmada GFRP'nin, özellikle ortalama 950 μm çapında ve ortalama 8 mm uzunluğunda kaba atık liflerin kullanılmasıyla polimer betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiği kanıtlanmıştır. Sonuç olarak, %8'lik kum ikamesinin optimal konsantrasyonu üzerine, basınç dayanımında %15,3'lük bir artışa ve eğilme dayanımında %5'lik bir artışa neden olduğu bulunmuştur (Ribeiro vd., 2015). Son çalışmalarla beraber, çimento fırınlarında mekanik olarak öğütülmüş CTP kullanılarak organik maddeler enerji kaynağı olarak, inorganik kısımlar ise dolgu malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Çimento üretimi 1450℃ sıcaklığa ihtiyaç duyar ve cam elyaf

termoset reaksiyonun gerçekleştiği yerde ek enerji sağlayarak diğer yakıtlara olan ihtiyacı azaltır (Fonte ve Xydis, 2021).

Tablo 2.22 Mekanik geri dönüşüm literatürü

Çalışmaların Yazarları	Yıl	Malzeme/Metot	Geri Dönüştürülmüş Fiberlerin Test Sonuçları
Mamanpush vd.	2018	Cam elyaf /farklı elek boyutlarına sahip bir çekiçli öğütücüyle	Maks. elastiklik modülü: 5,254 GPa
Sonuç: Elek boyutlarının optimize edilmesiyle mekanik geri dönüşümün uygunluğu ve sonucunda yüksek elastik modüllü cam elyaf elde etme			
Rahimizadeh vd.	2020	Cam elyaf	Elastik modül=3,35GPa
Sonuç: Elastik modül: %16'lık bir iyileşme; Nihai mukavemet: %10'luk bir iyileşme, yeniden kullanım imkanı			
Haider vd.	2021	Cam fiber takviyeli laminat/elekli bir çekiçli öğütücüyle	Maks. eğilme tokluğu: 1,12 J Mukavemet: 4,8 MPa
Sonuç: Geleneksel kum esaslı bileşenlere bir alternatif olarak inşaat malzemelerinde kullanım imkânı			
Moslehi vd.	2021	Cam elyaf / polilaktik asit matrisle	Maks. elastiklik modülü: 4,7 GPa Dayanım: 75 MPa
Sonuç: Kanatlardaki cam elyafın mekanik geri dönüşüm parçalanması ve kimyasal işlemlerle iyileştirme			
Tahir vd.	2021	Cam elyaf	Maks. çekme dayanımı:1132,2 MPa Elastik modül: 81,2 GPa
Sonuç: 3D baskılı numunelerin modülünü önemli ölçüde iyileştirme ve olumsuz çevresel etkiyi azaltma			

2.5.1.2 Termal Geri Dönüşüm

Termal geri dönüşüm yöntemleri, kompozit atığın katı ve gaz ürünlere ayrışmasına yol açan epoksi reçinelerin yakılmasını içerir(Zhang vd., 2017), bir başka deyişle, polimer matrisi parçalamak ve lifleri geri kazanmak için atık malzemenin yüksek sıcaklıklara ısıtılmasını içerir (Wang vd., 2019). Karbon fiberler yüksek sıcaklık dirençleri nedeniyle termal geri dönüşüm için daha uygundur, cam fiberler ise termal işlemler sırasında önemli bir mukavemet kaybı (%50-%90) yaşama eğilimindedir (Sommer, Becker ve Walther vd., 2022). Geri kazanılan cam elyaflar, şimdilik, işlenmemiş elyaflara kıyasla daha pahalı ve daha düşük kalitededir, bu durum termal geri dönüştürülmüş cam elyafların tekrar kullanımını genel olarak imalat sektöründe dolgu malzemesi olarak sınırlandırır (Thomason, Jenkins ve Yang, 2016). Buna ek olarak, termal geri dönüşüm sırasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi gibi cam elyaf yüzeyindeki oluşan hasarın, elyaf mukavemetinin bozulmasında önemli olduğu kabul

edilmektedir. Bu hasarlı tabakanın hidroflorik asit kullanılarak termal olarak zayıflamış cam elyafların gerilme mukavemetini önemli ölçüde artırabileceği görülmüştür (Yang vd., 2015). Benzer şekilde termal olarak geri dönüştürülmüş cam elyaflarının mukavemetinin %75'inin sıcak NaOH çözeltisi ile işlenerek geri kazanılabileceğini tespit etmiştir (Thomason vd., 2016).

Genel olarak, termal geri dönüşüm prosesleri, elyafların karbon fiber ve cam fiber takviyeli kompozitlerden geri kazanılması için potansiyel çözümler sunar; ancak yüksek mekanik özelliklere sahip sürekli fiberler elde etme ve fiber yüzeyinde kömür oluşumunun etkilerini en aza indirme konusunda zorluklar devam etmektedir.

2.5.1.3 Piroliz

Piroliz bir katalizör varlığında 300 °C ila 700 °C arasında değişen sıcaklıklarda oksijen yokluğunda malzemenin ısıtılmasını içeren bir termal bozunma işlemidir ve kompozitlerde polimer matrisinin elyaflardan ayrılmasına izin verir. Bu işlem, piroliz ve oksidasyonu içeren iki aşamalı bir yöntemle liflerin geri kazanılmasına olanak tanır (Naqvi vd., 2018). Bu geri kazanılmış liflerden elde edilen kısa lifli kompozitler, işlenmemiş lifli kompozitlerle rekabet edebilir (Oliveux, Dandy ve Leeke 2015). Piroliz tesisleri, "Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik" kapsamında yakma tesisleri olarak tanımlanmaktadır. Bu tesisler belirlenen kurallara uymakla yükümlüdür; ancak piroliz ve diğer kimyasal geri dönüşüm teknolojilerinin iklim değişikliğine etkisi, yakma işleminden önemli ölçüde daha düşüktür (İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası, 2023). Buna rağmen düzenli depolamanın daha ucuz bir seçenek olması bu teknolojinin yaygınlaşmasını zorlaştırabilir (Bashir vd., 2022).

2.5.1.4 Akışkan Yataklı Geri Dönüşüm

Rüzgar türbini kanat kompozit atıklarını 450°C ila 550°C arasında değişen yüksek sıcaklıklarda ve hava ısı akışı yoluyla kompozit matrisi ayrıştırmak için akışkanlaştırıcı gaz olarak havayı kullanan başka bir termal işlemdir(Rahimizadeh vd., 2020). Geri dönüştürülmüş elyafların mukavemeti, genellikle geri kazanılmış cam fiberlerin/ karbon

fiberlerin mukavemetinin yalnızca %60-70'ini sergileyen, işlenmemiş elyaflara kıyasla genellikle daha düşüktür. Bu geri dönüştürülmüş ürünler, üst düzey uygulamalar için kompozitlerin geliştirilmesinde hala yeniden kullanılabilir (Åkesson vd., 2012). Bu yöntem kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve 450 °C'de geri dönüştürülmüş cam elyafının mukavemet kaybının yaklaşık %25 olduğu, geri dönüştürülmüş karbon fiberin 550 °C'de ise mukavemet kaybının yaklaşık %50 olduğu bulunmuştur (Yip, Pickering ve Rudd, 2022). Ayrıca Pickering ve diğerleri (2000)'nın yaptıkları bir çalışma 22 lifli (609 g) 2770 g SMC hurdasını işleyen akışkan yataklı bir yataktan geri kazanılan ürünlerin %24'ü dolgu maddesi ve %10'u organik madde sonuç olarak 66 lif saflığına sahip 411 g lif ürünü (6,7 mm'den küçük) verdiğini gösterdi.

2.5.1.5 Mikrodalga Piroliz

Fiberi, reçine matrisinden ayırmada kompoziti 300-600℃'ye kadar ısıtarak mikrodalga radyasyonunu kullanan bir termal geri dönüşüm işlemidir. Liflerdeki hasarı nispeten azaltır ve nispeten düşük enerji tüketimi ile daha kısa işlem süreleri sunar(Chen, Wang ve Ni, 2019). Araştırmacılar, karbon elyaf takviyeli polimeri çok modlu mikrodalga rezonans boşluklar kullanarak başarılı bir şekilde ayrıştırdılar ve mükemmel mekanik özelliklere sahip temiz ve pürüzsüz yüzeyli geri dönüştürülmüş karbon fiberler elde ettiler (Lester vd., 2004) (Tablo 2.23).

Tablo 2.23 Termal geri dönüşüm literatürü

Çalışmaların Yazarları	**Yıl**	**Malzeme/Metot**	**Geri Dönüştürülmüş Fiberlerin Test Sonuçları**
Pender ve Yang	2020	Cam fiber/ akışkan yataklı geri dönüşüm	Maksimum ara yüzey kayma mukavemeti: 15 MPa
Sonuç: Sodyum hidroksit (NaOH) ile işlemenin, geri dönüştürülmüş cam fiberlerin dayanım özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmesi			
Baturkin vd.	2021	Cam fiber/ piroliz: 600 ºC	Bası mukavemeti: 29 MPa Eğilme mukavemeti: 6,5 MPa
Sonuç: Geri dönüştürülmüş cam fiberlerin beton üretimine katkı sağlaması ve kullanım potansiyelini gösterme			
Smolen ve diğerleri	2022	Karbon fiber/ piroliz: 500-600 ºC	Eğilme mukavemeti: 274 MPa (%35 daha yüksek)
Sonuç: Pirolizin, karbon fiberlerin mekanik özelliklerini koruması ve kompozit panellerde gelişmiş performans sergilemesi			

2.5.1.6 Kimyasal Geri Dönüşüm

Kompozit malzemelerden lifleri geri kazanmak için kimyasal depolimerizasyon veya çözündürme maddelerinin kullanımını içeren bir süreçtir. Hem liflerin hem de matrislerin geri kazanılmasına izin verir. Kimyasal geri dönüşüm işlemi, süper kritik sıvı arıtma ve solvoliz gibi teknikleri kullanır. Yine de diğer geri dönüşüm işlemlerine kıyasla yüksek enerji gereksinimleri nedeniyle kimyasal geri dönüşüm, endüstriyel ölçekte yaygın olarak uygulanmaz (Mattsson vd., 2020).

Solvoliz işlemleri, termal geri dönüşüm işlemlerine kıyasla daha düşük işlem sıcaklıklarına sahiptir ve lifler üzerinde kömür oluşumunu önleyebilir. Bununla birlikte, solvoliz işlemleri, özellikle yüksek sıcaklık ve basınçlarda maliyetli olabilir. Ömrünü tamamlamış rüzgar türbini kanatları için solvoliz işlemlerinin ticari uygulamaları belirlenmemiştir ve elyaf takviyeli polimer kompozitler için işlemin endüstriyel ölçekte kullanımı henüz gerçekleştirilmemiştir (Oliveux, Dandy ve Leeke 2015). Solvoliz geri dönüşüm yöntemleri, geri kazanılan liflerin mekanik mukavemeti ve termal kararlılığı gibi özelliklerini etkileyebilir.

Son çalışmalarda solvent olarak süperkritik su ile solvoliz kullanarak cam ve hidrokarbonun ömür sonu (EoL) ele alınarak rüzgar türbini kanatlarının geri dönüştürülmesi incelendi. İşlem, 250 °C ile 370 °C arasındaki sıcaklıklarda ve 100 ile 170 bar arasındaki basınçlarda ve ayrıca katalizör ve katkı maddelerinin kullanılmasını içerir(Mattsson vd., 2020). Kritik koşullar kullanılarak solvoliz, karbon fiber takviyeli kompozit atıklarından karbon liflerinin geri kazanılması için alternatif bir yöntem olarak önerilmiştir ve polimer matrisi parçalamak ve lifleri geri kazanmak için yüksek sıcaklık ve basınçta bir solvent kullanmayı içerir (Sokoli, Simonsen, ve Søgaard, 2017)
(Tablo 2.24).

Son dönemdeki kritik çalışmalardan biri de Dr Hadigheh ve diğerleri (2022), malzemelerin belirli bir basınç ve sıcaklık altında bir solvent uygulamasıyla parçalanabildiği bir yöntem olan solvolizin, yüksek net kâr sağlarken karbon fiberi geri kazanabileceğini bulmasıdır. Bu çalışmada, solvoliz ve elektrokimyasal yöntemlerin de,

düzenli depolama ve yakmaya göre atmosfere önemli ölçüde daha düşük CO_2 emisyonlarına yol açtığı gösterildi. Kinetik analiz çalışmaları önceden işlenmiş karbon fiber takviyeli kompozitin ek bir reaksiyon aşamasından geçtiğini ve işlenmemiş karbon fiber takviyeli kompozite kıyasla daha düşük sıcaklıklarda daha etkili bir parçalanma sağladığını ortaya koyuldu. Solvoliz ön işleminin sadece daha fazla parçalanmayı kolaylaştırmakla kalmayıp aynı zamanda geri dönüşüm esnasındaki ısı tüketimini azaltarak liflerin mekanik özelliklerini koruduğu da ortaya koymuştur.

Tablo 2.24 Kimyasal geri dönüşüm literatürü

Çalışmaların Yazarları	**Yıl**	**Malzeme/Metot**	**Geri Dönüştürülmüş Fiberlerin Test Sonuçları**
Mattsson ve diğerleri	2020	Cam fiber/Solvoliz	—
Sonuç: Geri dönüştürülmüş cam fiberlerin hammadde olarak kullanılabilme imkânı ve döngüsel ekonomiye katkıda bulunabilme			
Ma ve diğerleri	2021	Karbon fiber/ kimyasal geri dönüşüm	Maksimum gerilme mukavemeti:330 MPa Elastiklik modülü: 34 GPa
Sonuç: Yüksek performanslı kompozitlerin üretimi, kapalı döngü geri dönüşüm sürecinin yüksek verimliliğini inceleme, geri dönüştürülmüş karbon fiberlerin mekanik özelliklerini koruması ve yeniden kullanımı			
Nie ve diğerleri	2015	Karbon fiber/ erimiş potasyum hidroksitle	Çekme dayanımı:1,2 GPa Elastik modül: 70 GPa
Sonuç: Bu yöntemle elde edilen liflerin mekanik özelliklerin işlenmemiş karbon liflerinden daha düşük olduğu			
Wang ve dğierleri	2015	Cam fiber/ kimyasal geri dönüşüm	—
Sonuç: Mukavemet ve elastik modülünün, işlenmemiş cam elyaflarına kıyasla yaklaşık %20 oranında azalması			

Ön işlem görmüş karbon fiber takviyeli kompozitten elde edilen geri dönüştürülmüş lifler, orijinal güçlerinin yüzde 90'ını muhafaza ederek, sadece termal bozunma yoluyla elde edilen liflerin dayanımını yüzde 10 oranında aştığı bulunmuştur. Bu yöntemi, hibrit yaklaşımlar ile bisiklet çerçevesinden ve uçak hurdasından elde edilmiş karbon fiber takviyeli kompoziti başarıyla geri dönüştürerek ispatladılar. Bu sonuçlar yalnızca kimyasal ön işlemin etkinliğini teyit etmekle kalmayıp, aynı zamanda geri dönüştürülmüş karbon fiberlerin gelişmiş mekanik özelliklerini koruduğunu ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, oksidasyonla birleştirilmiş katalitik piroliz ve piroliz gibi termal geri dönüşüm yöntemleri de yüksek ekonomik getiri sağladığı görülmüştür (JECcomposites.com, 2023).

2.5.1.7 Hibrit Geri Dönüşüm

Modern geri dönüşüm teknolojileri, ömrünü tamamlamış kompozit atıkların etkin kullanımı için uygulanabilir ve sürdürülebilir seçenekler sunar. Bununla birlikte, rüzgar türbini kanadı kompozit bileşimine göre yüzey kusurları, fiber uzunluğu, ekipman maliyetleri ve proses uygunluğu gibi zorluklar hala mevcuttur (Abbate vd., 2022) (Tablo 2.25).

Son dönemin en dikkat çekici çalışmalarından biri de Busschen ve diğerleri (2021), karbon elyaflarda sıklıkla kullanılan pultrüzyon ve işleme yöntemini cam elyaf üzerinde deneyerek termoset kompozit atıkların yeni uygulamalar için yeniden değerlendirilmesine yönelik yeni bir metodoloji geliştirmeleridir. Metodları, geleneksel bir pultrüzyon prosesine dayanmaktadır, işlenmemiş cam elyaf fitiller bir reçine banyosundan ve belirli bir parça halinde kalıplanmak üzere bir kalıptan çekilmektedir. Araştırmacılara göre bu yöntem, orijinal, geri dönüştürülmüş malzemelerin mekanik mukavemetini, direngenliğini ve suya dayanıklılığını yeni parçaya aktarmıştır. Sonuçta ortaya çıkan parçaların yeterince yüksek bir L/D oranına [uzunluk-çap oranı] sahip takviye görevi görebilen yeni bir ürün elde edilmiştir. Araştırmacılar, ekstrüzyon-pultrüzyon tekniği için ağırlıkça %70'e kadar geri dönüştürülmüş kompozitin, %30'u işlenmemiş malzeme ile kullanılabileceğini belirtmektedir (Compositeworld.com, 2022).

Tablo 2.25 Hibrit geri dönüşüm literatürü

Çalışmaların Yazarları	**Yıl**	**Malzeme/Metot**	**Geri Dönüştürülmüş Fiberlerin Test Sonuçları**
Cousins ve diğerleri	2019	Cam elyaf /mekanik ve termal geri dönüşüm: enjeksiyonla kalıplama	Maks. elastik modülü: 12 GPa Çekme dayanımı: 150 MPa
Sonuç: Geri dönüştürülmüş cam fiberlerin %50'sinin ve geri kazanılmış reçinenin %90'ının sırasıyla 0,28 $/kg ve 2,50 $/kg fiyatlardan süreçlerin potansiyel ekonomik uygulanabilirliği gösterimi			
Rani ve diğerleri	2022	Cam elyaf/mikrodalga destekli bir kimyasal geri dönüşüm	Maks. çekme mukavemeti: 3025 MPa Elastiklik modülü:77.86 GPa
Sonuç: Geri dönüştürülmüş cam elyafların mekanik özelliklerini iyileşmesi ve rüzgar türbini kanadı atıklarının kullanım ömrü sonu (EoL) geri dönüşümü için uygun bulunması			

2.5.2 Geri Dönüşüm Yöntemlerini Değerlendirme

Rüzgâr türbini kanatları ve naseller genellikle kompozit malzemelerden yapılır ve rüzgâr türbini kanatlarının yaklaşık %85 ila %90'ı geri dönüştürülebilir (Wang, Liu ve Kolios, 2016). Bununla birlikte, rüzgâr türbini kanatların %100 geri dönüştürülmesini sağlamak, özellikle epoksi gibi termoset reçinelerin yeniden eritilmesi ve yeniden kalıplanmasıyla ilgili olarak çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Bu reçineler, erimeye ve yeniden kalıplanmaya karşı dirençleri nedeniyle zorluklar yaratır (Du vd., 2020). Ayrıca elyaf üretimi, kumaş oluşturma ve reçine üretimi dâhil olmak üzere 1 kg kompozit malzeme üretmek için gereken enerjinin 111,88 MJ/kg olduğu tahmin edilmektedir. Bununla beraber geri dönüştürülmüş kompozit malzemelerin kullanımı düşünüldüğünde, dolgu malzemesinin yerini aldığı bileşenlerden 19 MJ/kg tasarruf sağladığı tahmin edilmektedir (Song, Youn ve Gutowski, 2009).

Farklı geri dönüşüm tekniklerinin değişen enerji gereksinimleri vardır ve bazı yöntemler, belirli fiber malzeme türleri için diğerlerinden daha uygundur. Diğer yapısal malzemelerle karşılaştırıldığında, karbon elyaf yüksek bir gömülü enerjiye sahiptir, yani üretim için önemli miktarda enerji gerektirir. Karbon fiberinin üretim enerjisi 183-286 MJ/kg olarak hesaplanırken, cam elyafı ve paslanmaz çelik için sırasıyla 13-32 MJ/kg ve 110-210 MJ/kg arasında değişmektedir(Shuaib ve Mativenga, 2016). Buradan yola çıkarak örnek verilirse, solvoliz, işlenmemiş cam fiber üretim enerji talebine (13-32 MJ/kg) kıyasla daha yüksek bir işleme enerji gereksinimine (21-91 MJ/kg) sahiptir, bu da solvolizi cam fiber geri dönüşümü için daha az uygun hale getirir. Piroliz ise daha düşük bir enerji gereksinimine (2,8 MJ/kg) sahiptir ve net enerji geri kazanımıyla sonuçlanabilir (Pimenta ve Pinho, 2011)

Cam elyafın öğütülmesi, karbon elyaf için gereken enerjinin yaklaşık %50'sini gerektirir. Çoğu türbin rotorunun, boyutları 12 m'den 80 m uzunluğa kadar değişen ve bugün bazıları daha da büyük olan üç kanadı vardır. Bu rotor kanatlarının birçoğu yakında EoL öğelerine dönüşecektir (Liu, Meng ve Barlow, 2019). Kompozit geri dönüşüm yöntemlerinde yer alan enerji talebi, en yüksekten en düşüğe sıralanarak aşağıdaki gibidir: Kimyasal geri dönüşüm (21–91 MJ/kg); Piroliz (24–30 MJ/kg);

Mikrodalga Piroliz (5–10 MJ/kg); Mekanik geri dönüşüm (0,1–4,8 MJ/kg) (Kouparitsas vd., 2002). Çekme mukavemetini %50'nin üzerinde tutmak için en iyi yöntem piroliz gibi görünmektedir, E-modülü %100'dür ve uzun lifler sunar (Tablo 2.26). Bununla birlikte solvoliz en iyi yöntem olabilir, ancak çok fazla veri mevcut değildir. Akışkan yatak ve piroliz, oksidasyon ve temizleme işlemlerinin bir sonucu olarak bu hususta daha geride kalır (Shuaib ve Mativenga, 2016).

Teknoloji Hazırlık Düzeyleri (TRL'ler), farklı teknolojilerin olgunluğunu değerlendirmek ve aralarında tutarlı karşılaştırmalar yapmak için kullanılan sistematik bir ölçüm sistemidir. Teknolojilerin ilerlemesine ilişkin öngörüler sağlar ve ilk fikir üretiminden ticarileştirmeye kadar teknolojinin olgunluğunu değerlendirmek için çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Ayrıca teknoloji geliştirmenin farklı aşamalarında gerekli olan yetenekleri ve kaynakları anlamak için de uyarlanabilir (Rybicka, Tiwari ve Leeke, 2016). Kompozit geri dönüşüm yöntemleri bu açıdan değerlendirildiğinde mekanik geri dönüşüm en yüksek notu alır (Mankins, 1995) (Tablo 2.27).

Tablo 2.26 Geri kazanılan malzemenin işlenmemiş malzemeyle karşılaştırıldığında mekanik özellikleri

Çalışmaların Yazarları	Metot	Çekme Dayanımı (Yüzdelik)	E- Modülü (Yüzdelik)	Uzunluk (mm)
Palmer vd. (2009)	Mekanik	%70	%90	0,1-6
Pickering vd. (2000)	Akışkan Yataklı	%50	%100	5-10
Cunliffe vd. (2003)	Piroliz	%52	%100	10-15
Oliveux vd. (2012)	Solvoliz	%75	-	-

Tablo 2.27 Kullanılan farklı geri dönüşüm teknolojilerinin TRL ve atık yönetimi puanları (Khalid, Arif, Hossain ve Umer, 2023)

Geri Dönüşüm Metodu	TRL	Atık Yönetim Puanları
Mekanik	9	Düşük
Piroliz	7	Düşük/ Orta
Mikrodalga Pirolizi	4	Yüksek
Akışkan Yataklı İşlemler	4 / 5	Orta
Solvoliz	5 / 6	Düşük
TRL Teknolojiye Hazırlık Seviyesi NASA tarafından tanımlanmış	1- 4	Laboratuvar Ölçeği
	5-7	Pilot Ölçek
	8-9	Ticari/Endüstriyel Ölçek

Malzeme maliyeti açısından değerlendirirsek karbon fiberin (~20 $/kg) nominal fiyatına karşın E-cam elyafının (~2 $/kg) nominal fiyatıyla basit bir fiyat karşılaştırması yapmak hangi malzemenin geri dönüşümünün daha değerli olduğu sorusuna tam olarak cevap veremez; çünkü cam elyafı, modern fiber pazarının yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır ve bu durumu çözmek için de farklı teknolojilere ihtiyaç duyulduğu açıktır. Türkiye için ise hangi yöntemin daha uygun olduğu konusu, yerli sanayinin ve talebinin özelliklerini göz önünde bulundurmayı gerektirir. Özel sektörün mevcut odak noktası, potansiyel olarak süreç maliyetinin diğer geri dönüşüm yöntemlerine göre 3-4 kat daha düşük olması gerçeğiyle bağlantılı olarak öğütme üzerinedir. Geri dönüşüm sürecini sürdürmek için beklenen minimum değer, mekanik öğütme için ton başına 90 €, akışkan yatak için ton başına 610 € ve piroliz için ton başına 540 €'dur. Piroliz ve akışkan yatağın aksine öğütme çok daha basit bir işlemdir. Çekme mukavemetini %30 oranında azaltmasına rağmen geleneksel üretimde ve çimento yapımında fayda sağlayabilir. Özel şirketler geri kazanılan malzemeyi hâlihazırda mobilya, ses bariyerleri, çatı kaplamaları ve çimento yapımında kullanmaktadır. Proses maliyetini karşılayacak minimum değer ton başına 90 € olup, özellikle çimento fırınlarında kullanım göz önüne alındığında, atık depolamayla rekabet edilebilir hale gelmektedir (Thomason vd., 2016).

2.5.3 Mukavemet Açısından Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Elyafların ve Geri Dönüştürülmüş Elyafların İncelenmesi

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan geri dönüştürülmüş elyaflar, çevresel sürdürülebilirlik açısından önem taşır. Bu elyaflar, cam veya karbon elyafından elde edilen atık malzemelerin geri kazanılmasıyla üretilir. Geri dönüştürülmüş elyafların kullanımı, doğal kaynakların korunmasına yardımcı olur ve atık miktarını azaltır. Elyaf malzemelerin ve geri dönüştürülmüş elyafların incelenmesi, mukavemet, esneklik, dayanıklılık ve diğer önemli fiziksel özelliklerin belirlenmesini içerir. Bu incelemeler, rüzgâr türbinlerinin tasarımı ve performansı için önemli veriler sağlar. Gukendran vd. (2022) yaptığı çalışmada klasik işlenmemiş elyaflar üzerinden E -Cam elyaf, UTS değeriyle en yüksek mukavemet gösterir, Kevlar elyaf ve Karbon Epoksi elyaf ise daha

düşük mukavemete sahiptir. E-cam elyaf daha yüksek akma dayanımına ve en düşük Poisson oranına sahiptir (Tablo 28).

Tablo 2.28 Elyafların karşılaştırılması (Fantin vd., 2023)

Malzeme	E-Cam Fiber	Kevlar Elyaf	Karbon Epoksi
Özkütle (kg/mm^3)	2,57E-6	1,4E-6	1,6E-6
UTS (MPa)	3448	3000	600
Akma Dayanımı (MPa)	2050	-	94,78
Elastik Modül (GPa)	72	112	70
Poisson Oranı	0,2	0,36	0,3
% Kopma Uzaması	4,8	2,4	4,6

E-cam elyaf en yüksek kırılma uzamasına sahiptir, ardından Epoksi Karbon elyaf ve Kevlar elyaf gelir. Yük altında toplam deformasyon miktarları Kevlar elyaf ve E-Cam elyaf benzerken, Karbon Epoksi elyaf ise daha düşüktür. E-cam elyaf, en yüksek maksimum kayma gerilmesine en yüksek gerinim enerjisine sahiptir, ardından Kevlar elyaf ve Karbon Epoksi elyaf gelir. Sonuç olarak enerji emilimi önemli olan yüksek mukavemet gerektiren bir uygulama için E-Cam elyaf tercih edilebilirken, hafiflik ön planda olan tokluk ve darbe dayanımı gerektiren bir uygulama için Kevlar elyaf tercih edilebilir (Tablo 29).

Table 2.29 Elyaf türlerinin karşılaştırılması (Fantin vd., 2023)

Malzeme	E-Cam Elyaf		Kevlar Elyaf		Karbon Epoksi	
	Maks	Min	Maks	Min	Maks	Min
Toplam deformasyon(m)	0,002843	0	0,002831	0	0,001807	0
Eşdeğer (Von-Mises) gerilme (Pa)	1,5131e8	1324,7	10,9737e8	17,273	9,6602e8	21,267
Maksimum Kayma Gerilmesi (Pa)	8,7139e8	756,84	6,7563e8	9792,7	5,576e8	11,722
Gerinim Enerjisi (J)	0,087977	2,1517e-12	0,073113	2,9614e-9	0,05568	2,6767e-9

Kevlar, rüzgar kanadı sektöründe çok az çalışmada şimdilik yer edinse de Aramid ve Technora elyaf ile ilgili çalışmalara da başlanmıştır (Tablo 2.30).

Tablo 2.30 Rüzgar türbini kanatlarında kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri (Fantin vd., 2023)

Özellikler	Aramid	Technora	E-Cam	S-Cam	Yapısal Çelik	Alüminyum Alaşım 6061
Özkütle (kg/m^3)	1470	1390	2540	2540	7850	2700
Elastik Modulüs, E_x (GPa)	72,2	28,6	31	35,8	200	69
Elastik Modulüs, E_y (GPa)	72,2	28,6	31	35,8		
Elastik Modulüs, E_z (GPa)	3,35	3,35	3,35	3,35		
Poisson oranı, ν_{xy}	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,32
Poisson oranı, ν_{yz}	0,4	0,4	0,4	0,4		
Poisson oranı, ν_{zx}	0,32	0,32	0,32	0,32		

Kevlar ve cam elyaf kanat teknolojileri için yapısal açıdan uygundur yine de kevların maliyetli oluşu fiyat/performansı düşürmektedir (Tablo 2.31).

Tablo 2.31 Elyaf tipine göre takviye karşılaştırması, yani cam, karbon, bazalt, aramid ve bunların pazar payı, maliyet aralığı ve mekanik özellikleri (Krauklis vd., 2021)

Elyaf Tip*	Pazar Payı [%]	Maliyet Aralığı [$/kg]	Çekme Dayanımı [GPa]	Elastik Modülü [GPa]
E-Cam	~%70	1,3–2,6	3,45–3,5	72,5–73,5
E-CR-Cam		1,2–3	2–3,625	72,5–83
AR-Cam		2,5–3	1,7–3,5	72–175
C-Cam		1–2,5	3,3	69
A-Cam		2–3	3,3	72
S/S-2-Cam		16–26	4,6–4,9	86–89
R-Cam		16–26	4,4	86
PAN Tipi Karbon	~%12	15–120	1,8–7,0	230–540
HS Karbon		20–120	3,31–5	228–248
IM Karbon		25–120	4.1–6	265–320
HM Karbon		25–120	1,52–2,41	393–483
UHM Karbon		30–120	2,24	724
Bazalt	~%11	5	4,84	89
Aramid/Kevlar	~%7	15–30	2,6–3,4	55–127

Geri dönüşüm metotları da piyasaya hâkim olan cam elyaflar üzerinden daha çok geliştirilmekte ve mekanik ve termal yöntemlerden fiyat/ performans açısından daha başarılı sonuçlar alınmaktadır (Tablo 2.32) (Krauklis vd., 2021).

Tablo 2.32 Geri dönüştürülmüş GF, işlenmemiş GF' ye kıyasla korunan gerilme mukavemeti

EoL Seçeneklerine göre Korunan Çekme Dayanımı	İşlenmemiş Elyafa Göre Geri Dönüştürülmüş Elyaf [%]
Mekanik	~%78
Akışkan yataklı proses	~%50
Piroliz	~%52
Kimyasal	~%58

Bir başka cam elyaf çalışmasında ise geri dönüşüm oranlarının etkisi incelenmiş ve mekanik geri dönüşüm miktarlarının da belli bir seviyeden (%50) sonra malzeme özelliklerini önemli ölçüde değiştirmeye başladığı görülmüştür (Tablo 2.33). Pirolizin geri kazanılan lifleri önemli ölçüde bozabilmesine rağmen, ortalama uzunluğu 20 mm olan öğütülmüş liflerin, işlenmemiş liflerinkiyle karşılaştırılabilecek karakteristik mukavemete sahip olduğu gösterilmiştir.

Tablo 2.33 İşlenmemiş ve yeniden işlenmiş PA66 GF 35'in farklı karışımlarının elastik modülleri ve dayanımları (Bernasconi, Rossin and Armannii, 2007)

Malzeme durumu	Elastik modül (MPa)	Dayanım (MPa)	Gerinim (%)
İşlenmemiş	10.840	187,4	2,87
%25 yeniden öğütme	10.750	185,3	2,85
%50 yeniden öğütme	10.730	180,5	3,00
%100 yeniden öğütme	10.270	165,5	3,04

PA66 GF 35: poliamid 66 ağırlıkça %35 oranında E-cam elyafı içermektedir.

Elyaf yüzey kaplamasının ILSS (arayüzey kayma mukavemeti) üzerindeki etkisi, öğütülmüş elyaflar ve PLA (polilaktik asit) arasında sırasıyla pirolize edilmiş ve işlenmemiş elyaflardan %14 ve %26 daha güçlü olan bir arayüz gösteren sonuçlarla incelenmiştir (Rahimizadeh vd., 2020) (Tablo 2.34).

Tablo 2.34 Pirolize edilmiş ve işlenmemiş lifler mekanik özellikleri (Rahimizadeh vd., 2020)

Özellik	Ortalama Dayanım (MPa)			Ortalama Direngenlik (GPa)		
Ölçü uzunluğu (mm)	20	40	60	20	40	60
Öğütülmüş lifler	1990 ± 568	1678 ± 580	876 ± 377	76 ± 13	74 ± 12	74 ± 11
Pirolize edilmiş lifler	976 ± 260	806 ± 217	679 ± 122	84 ± 12	89 ± 10	91 ± 22
İşlenmemiş lifler	2485 ± 508	2073 ± 251	1965 ± 353	71 ± 7	74 ± 9	77 ± 8

Geri dönüştürülmüş fiberlerde elde edilen sonuçlar, karşılık gelen uzunluklarda kesilmiş orijinal karbon elyaflarla karşılaştırıldı. Karbon fiberler üzerinde yapılan testler, kullanılan piroliz işleminin fiber yüzeyinde matrisin yaklaşık %2'sini bıraktığını ve fiberlerin gerilme direncinin yeni karbon fiberlere kıyasla yaklaşık %20 oranında düştüğünü göstermektedir. Araştırma sonuçları, düz kompozit plakaların üretiminde geri dönüştürülmüş karbon liflerinin kullanımının güvenilir olduğunu ve bunların mekanik özelliklerinin, karşılık gelen orijinal karbon liflerinden yapılmış plakalardan önemli ölçüde farklı olmadığını göstermektedir (Smoleń vd., 2022) (Tablo 2.35).

Tablo 2.35 Karbon liflerinin çekme dayanımı (Smoleń vd., 2022)

Malzeme Türü	Çekme dayanımı (MPa)									
Orijinal karbon fiber	2274	2317	2069	2088	2391	2353	2357	2147	2419	2268
Pirolize karbon fiber	2039	2044	2164	1898	1711	1829	1090	1881	1924	1842

Pirolitik fiberlere (274 MPa) sahip kompozit paneller, orijinal yeni karbon fiberlere (203 MPa) sahip benzer şekilde üretilen panellere göre %35'e kadar daha yüksek eğilme mukavemeti gösterir; bu, panellerin yaya köprüleri için elemanların üretiminde kullanılabileceği anlamına gelir. Orijinal karbon liflerinin çekme dayanımı 2268 +/-133 MPa iken, pirolitik karbon liflerinin çekme dayanımı 1842 +/-312 MPa'dır (Smoleń vd., 2022). Bu çalışmada, rüzgar türbini kanatları ve otomotiv levha kalıplama bileşiği (SMC) iki sıcaklık adımlı pirolize tabi tutuldu. Bu çok adımlı süreç, tek bir yüksek sıcaklık adımlı pirolizde, geri kazanılan E-cam elyafının gerilme mukavemetinde %19'a varan oranlarda ve kırılmaya kadar uzamada %43'e varan iyileştirmeler sağladı. Bu kazanımlara rağmen, piroliz öncesi elyaf ölçümleri, önceden var olan hasarın, herhangi bir son işlem olmaksızın pirolizden geri kazanılabilen cam elyafının kalitesini doğası gereği sınırlayabileceğini göstermektedir (Tablo 2.36) (Ginder ve Ozcan, 2019).

Tablo 2.36 CFRC'nin pirolizinden geri kazanılan tek lifin mekanik özellikleri (Naqvi vd., 2018)

		Piroliz sürecinden geri kazanılan tek lifin özellikleri			
Referans	Elyaf	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastik Modül (MPa)	Kopmada uzama (%)	Çap (mm)
Nahil and Williams (2011)	CF	2340- 3270	230– 233	2.34– 3.27	—
	CF	910–1250	182– 233	0.91– 1.25	—
Greco ve ark.(2013)	CF	—	%8 azalış	—	6.2
Stoeffler ve ark. (2013)	CF	%680–720 artış	%680 artış	%20–35 artış	6.5
Lopez ark. (2013)	CF	2537–2544	210–220	—	6.70-7.00

Geri dönüşüm metotlarının yanı sıra kanatlarda en çok kullanılan cam (GF) ve karbon elyafların (CF) malzeme özelliklerinden kaynaklanan etkilerde vardır ve karşılaştırmaları önemlidir. Piroliz metodu üzerinden her iki malzeme türünü kıyaslarsak bu daha net bir şekilde görülebilir (Tablo 2.36).

Geri dönüşümü en elverişli olan cam elyafları kırılmaya karşı dayanım açısından çekme testi ile incelemek işlevsel çıktılar verir (Tablo 2.37). İşlenmemiş elyaf daha yüksek çekme mukavemeti ve elastik modülüne sahipken, geri dönüştürülmüş elyaf bu özelliklerde daha düşüktür; ancak, uzunluk arttıkça her iki elyafta da çekme mukavemeti ve elastik modülünde artış meydana gelmektedir.

Tablo 2.37 İşlenmemiş ve geri dönüştürülmüş cam elyafların çekme testi (Ma vd., 2021)

	Ölçü uzunluğu (mm)		
	5	10	15
İşlenmemiş elyaf			
Çekme mukavemeti (GPa)	2,08+/-0,59	2,09+/-0.56	2,1+/-0,61
Elastik modülü (GPa)	69,2+/-13.5	70,35+/-9.89	71,1+/-13.5
Geri dönüştürülmüş elyaf			
Çekme mukavemeti (GPa)	1,72+/-0,59	1,64+/-0,48	1,48+/-0,46
Elastik modülü (GPa)	66,6+/-14,1	64,9+/-11,8	65,2+/-10,3

Karbon elyafın geri dönüşümü, fiyat/performans açısından ve malzeme özelliklerinin korunması bakımından Aramid elyaflara göre daha elverişli bir durumdadır. Geri dönüştürülmüş karbon fiber, çekme mukavemeti, elastik modül ve kopma gerinimi açısından işlenmemiş karbon fiber ile benzer özelliklere sahiptir. Korunmuş özellik oranları da %96-97 aralığında yüksek bir koruma sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, geri dönüştürülmüş CF, çevresel sürdürülebilirlik açısından daha tercih edilebilir bir seçenek olabilir (Tablo 2.38).

Tablo 2.38: Karbon fiber/epoksi reçine kompozitlerinin kimyasal geri dönüşümünden önce ve sonra mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Nie vd., 2015)

Özellik	İşlenmemiş CF	Geri dönüştürülmüş CF	Korunmuş özellik oranı [%]
Çekme mukavemeti (GPa)	4,07 ± 0,73	3,89 ± 0,75	96
Elastik modül (GPa)	179,27 ± 12,5	173,79 ± 15	97
Kopma gerinimi (%)	2,36 ± 0,45	2,28 ± 0,45	97

Geri dönüşüm yöntemlerine bağlı olarak elde edilen karbon fiber özellikleri biraz farklılık göstermektedir. Akışkan yatak yöntemiyle geri dönüştürülmüş CF, diğer yöntemlere göre daha düşük dayanıma sahipken, kimyasal yöntemle geri dönüştürülmüş CF, işlenmemiş CF ile aynı dayanıma sahiptir. Piroliz yöntemi ise minimal farklarla geri dönüştürülmüş CF' yi işlenmemiş CF' ye yaklaştırmaktadır (Tablo 2.39).

Tablo 2.39 RCF'lerin ve işlenmemiş karbon fiberlerin dayanımı (Wang vd., 2015)

Geri Dönüşüm Metotları	Çekme Dayanımı (GPa)	
	İşlenmemiş karbon fiber	Geri dönüştürülmüş karbon fiber
Piroliz	3,6	3,7
Akışkan yatak	4,8	3,2
Kimyasal	5,2	5,2

RCF: geri dönüştürülmüş karbon fiber

İşlenmemiş karbon fiber genellikle diğer geri kazanım prosesleri altında elde edilen CF' lere kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti ve Weibull şekil parametresine sahiptir. Ancak, geri kazanım prosesleriyle elde edilen CF'lerin mekanik özellikleri hala önemli bir seviyede olup, belirli uygulamalarda kullanılabilirliklerini sürdürebilirler (Tablo 2.40). Buna ek olarak, Akışkan yataklı süreç ve kimyasal geri dönüşüm yöntemleri daha yüksek koruma oranlarına sahipken, diğer yöntemlerde koruma oranları daha değişken olabilmektedir (Tablo 2.41).

Tablo 2.40 İşlenmemiş ve üç CF geri kazanım prosesinin mekanik özellikleri (Wang vd., 2015)

Özellikler	İşlenmemiş	Akışkan yatak	Mikrodalga	Kimyasal (scPrOH)
Çekme mukavemeti (MPa)	4090	3050	3260	3900
Weibull şekil parametresi	8,4	5,4	7,6	8,6
Çekme modülü (GPa)	242	243	210	230

Tablo 2.41 Geri dönüştürülmüş karbon elyaf, esas olarak işlenmemiş karbon elyafa kıyasla gerilme mukavemetini koruma yöntemleri ve oranları (Abbate vd., 2022)

Geri Dönüşüm Metotları	Korunan Çekme Dayanımı İşlenmemiş Elyafa Göre Geri Dönüştürülmüş Elyaf [%]
Mekanik	~%50
Akışkan yataklı süreç	~%75
Piroliz	%36–93; tipik olarak, ~%80 veya daha az
Mikrodalga Destekli Piroliz	~%80
Kimyasal	%90–98; tipik olarak, ~%95 veya daha az

Piroliz ve mikrodalga piroliz yöntemleri, cam elyafın mekanik özelliklerini daha yüksek oranda koruyabilirken, akışkan yataklı ve solvoliz yöntemleri biraz daha düşük koruma sağlar. Mikrodalga piroliz ve akışkan yataklı yöntemler, karbon elyafın mekanik özelliklerini daha yüksek oranda koruyabilirken, piroliz ve solvoliz yöntemleri biraz daha düşük koruma sağlar. Genel olarak, mikrodalga piroliz yöntemi her iki elyafta da en iyi mekanik özellik korumasını sağlamaktadır (Tablo 2.42).

Tablo 2.42 Yeni elyaflara kıyasla farklı EoL seçeneklerinden elde edilen gerilme mukavemeti (Abbate vd., 2022)

Yöntem	Mekanik	Piroliz	Mikrodalga piroliz	Akışkan yataklı	Solvoliz
Cam Elyaf	%78	%52	%52	%50	%58
Karbon Elyaf	%50	%78	%80	%75	%95

İşlenmemiş elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin genellikle daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir (Tablo 2.43).

Tablo 2.43 Elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin çekme dayanımı (Cousins vd., 2019)

	Çekme mukavemeti (MPa)	
	Geri dönüştürülmüş	İşlenmemiş
PP/cam	25	24
İyonomer/aramid	14	12,5
İyonomer/karbon	13	20,5

PP: polipropilen

Geri kazanılmış CFRP'nin mekanik özellikleri, işlenmemiş GFRP'nin seri üretimi ile karşılaştırıldığında genellikle daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğunu gösterir. Çekme modülü benzer seviyelerde olup, çekme uzaması geri dönüştürülmüş CFRP lehine bir avantaj sağlar (Tablo 2.44).

Tablo 2.44 Geri kazanılmış GFRP ve CFRP'nin mekanik özellikleri (Rani vd., 2022)

	Geri dönüştürülmüş CFRP	İşlenmemiş GFRP'nin seri üretimi
Çekme mukavemeti (MPa)	89,7	63,8
Çekme modülü (GPa)	5,5	5,7
Çekme uzaması	4,0	3,7

CFRP: karbon fiberle güçlendirilmiş plastik; GFRP: cam elyaf takviyeli plastik.

Geri dönüştürülmüş GF ve CF üretimi, işlenmemişlere göre daha düşük enerji tüketir. Genel olarak, geri dönüştürülmüş GF ve CF, işlenmemişlere kıyasla daha düşük maliyetlere sahiptir (Tablo 2.45).

Tablo 2.45 GF ve CF'lerin maliyeti için tahmini değerler (Rani vd., 2022)

Elyaf türü	Üretim enerjisi (MJ/kg)	Fiyat ($/kg)
İşlenmemiş cam fiber	20–40	3,3-11
Geri dönüştürülmüş cam fiber	10–30	2,2-6,6
İşlenmemiş karbon fiber	198–594	31–63
Geri dönüştürülmüş karbon fiber	10,8–36	17–25

Yukarıdaki tablolardan da görülebileceği gibi, geri kazanım prosesleriyle elde edilen mekanik özelliklerin hala önemli bir seviyede korunmuş olması, geri dönüşüm yöntemlerinin elyafların mekanik özellikleri korunması hususunda yüksek bir koruma sağladığını göstermektedir ve bu koruma geri dönüştürülmüş elyafların çeşitli uygulamalarda kullanılabilme potansiyellerini yükseltir. Seçim yaparken, belirli bir uygulamanın gereksinimlerine ve önceliklerine dayanan faktörlerin dikkate alınması önemlidir. Bu nedenle, geri dönüştürülmüş elyaflar, çevresel sürdürülebilirlik açısından daha tercih edilebilir bir seçenek olabilir. Öte yandan, GFRP ve CFRP için en uygun geri dönüşüm ve geri kazanım seçimi, yatırım, proses maliyetleri, teknolojilerin getirileri ve dönüştürülen malzemelerin karakteristik özellikleri gibi birçok hususa bağlı olduğu için bu seçimin standardize edilmesi oldukça zordur. Maliyetler ile sonuç arasında her zaman bir denge olmalı; ekonomik ve ekolojik olarak mantıklı olmak zorundadır. Geri dönüşüm sürecine çok daha fazla enerji koyarsanız, ekolojik açıdan da hiçbir anlamı yoktur. Bu nedenle, politik düzenlemelere ve ikincil pazar gelişimine bağlı olarak geri dönüşüm ve geri kazanım altyapılarını ve teknolojilerini değerlendirmek için hem küresel hem de ülkemize özgü yapılandırılmış bir analiz gereklidir (Compositeworld.com, 2022).

2.5.3 Örnek Alınabilecek Uluslararası Ar-Ge Projeleri

ZEBRA projesi, Fransa merkezlidir ve rüzgâr türbini kanatları için hem kimyasal hem de mekanik geri dönüşüm yöntemlerini içerir. ZEBRA projesinin kilit yönlerinden biri, geri dönüştürülebilir bir malzeme olan termoplastik reçinesinin kullanılmasıdır. Rüzgâr türbini kanatların yapımında termoplastik reçine kullanılarak, %100 geri dönüşüm oranına ulaşma potansiyeli artırılır. ZEBRA projesinin bir parçası olarak termoplastik reçinesinden yapılmış 6,2 metrelik bir kanat geliştirildi. Bu kanat tamamen geri dönüştürülebilir ve yüksek performanslı cam elyafları içerir (ZEBRA project- JEC Group, 2023).

AIMPLAS (Plastik Teknoloji Enstitüsü) ve EROS grubu, İspanya merkezlidir ve hem mekanik hem de kimyasal geri dönüşüm operasyonlarını optimize etmek için çalışmaktadır. Proje hangi yöntemin uçucu organik bileşiklerden arındırılmış en saf

elyafı üretebileceğini belirlemek için mevcut geri dönüşüm yöntemlerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır ve atık malzemelerin verimli kullanımını destekleyen ve çevresel etkiyi azaltmayı amaçlayan döngüsel ekonomi modeliyle uyumludur (AIMPLAS - Technological Institute of Plastics, 2023).

Danimarka merkezli CETEC projesi, rüzgar türbini kanatlarından epoksi reçinelerin solvoliz ile ıslahına odaklanmıştır. Projenin ana hedefi, malzemeyi yalnızca yeniden kullanım için geri kazanmak değil, aynı zamanda yeni rüzgar kanatlarının üretimi için rüzgar endüstrisine yeniden entegre etmektir. CETEC projesi, solvolizi kullanarak, rüzgar türbini kanatlarında bulunan epoksi reçinelerini etkili bir şekilde parçalayabilen ve kullanılabilir bir biçimde geri kazanabilen bir çözüm geliştirmeyi hedefleyen projelerini, 2022 baharı itibariyle konsept kanıtlama aşamasına ulaştırdı ve ticarileştirilmeye hazır durumdadır. Solvoliz çözümleri, termoset kompozitlere dayanan diğer sektörler üzerinde de önemli bir potansiyele sahiptir (CETEC, 2023).

Birleşik Krallık'taki Ulusal Kompozit Merkezi liderliğindeki SUSWIND projesi, alternatif malzemelerin ve üretim süreçlerinin çevresel etkilerini değerlendirmeye yönelik modeller geliştirmenin yanı sıra rüzgar türbini kanatları için yeni döngüsel tasarım yöntemlerini keşfetmeyi içermektedir. Döngüsel tasarım ilkelerini uygulayarak amaç, rüzgar türbini kanatlarının ve malzemelerinin yeniden tasarlanmasını, yeniden kullanılmasını ve geri dönüştürülmesini en üst düzeye çıkarmaktır (SUSWIND, 2023)

Almanya merkezli bir şirket projelerinde, rüzgar türbin kanatları için kimyasal geri dönüşüm yöntemleri üzerinde çalışmaktadır. Amaçları, ömürlerinin sonunda rüzgar türbini kanatlarının tüm bileşenlerinin tamamen geri kazanılmasını sağlamaktır. Geri dönüşüm süreci için potansiyel çözümler olarak umut vadeden drop-in yedek reçinelerin kullanımını araştırılmaktadır. Bu reçineler, rüzgar türbini kanatlarda kullanılan orijinal reçinenin yerine geçebilir ve kanat bileşenlerinin geri dönüşümünü ve ıslahını kolaylaştırabilir (Revolutionary Recyclable Blades, 2022)

Güney Kore merkezli CATACK-H projesi, karbon fiber takviyeli polimer parçalardaki epoksi bazlı reçineleri parçalamak için solventler kullanarak rüzgar türbini

kanatlarının kimyasal geri dönüşümü ile ilgilenmektedir. Bu işlem, kıyılmış veya öğütülmüş lif ürünleri olarak yeniden kullanılabilen liflerin geri kazanılmasına izin verir. Firma, kürlenmiş prepreg'ler ve kullanım ömrü sona ermiş karbon fiber takviyeli kompozit parçaları gibi "daha direngen" malzemeler için toplu işlem yapabilen ikinci bir hattın kurulumuyla geri dönüşüm operasyonlarını hızla büyütmeyi planlanmaktadır (CATACK-H, 2022).

ABD merkezli bir firmanın projesinde, rüzgar türbini kanatları dahil olmak üzere yılda 50.000 ton geri dönüşüm kapasitesine sahiptir. Piroliz süreci sayesinde, rüzgar türbini kanatları da dahil olmak üzere farklı EoL atık akışlarından %99,9 gibi etkileyici bir geri dönüştürülmüş cam elyafı (GF) saflığı elde etti. Bu yüksek saflık seviyesi, geri dönüştürülmüş cam elyafların yeniden eritilmesi için fırsatlar yaratarak, bunların işlenmemiş cam fiberlere dahil edilmesine izin verir. Malzeme döngüsünün bu şekilde kapanması, yeni cam fiber üretimine olan ihtiyacı azaltarak ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını en üst düzeye çıkararak döngüsel bir ekonomiyi teşvik eder (Carbon Rivers, 2022).

ABD'deki IACMI (Gelişmiş Kompozit İmalatı ve İnovasyonu Enstitüsü) grubu, termoplastik epoksilerin geri dönüşümü üzerine çalışır. Geleneksel termoset reçinelerin aksine, geri dönüşüm, ısı ve asetik asit gibi hafif bir asit çözeltisinin uygulanması yoluyla gerçekleşebilir. Bu kimyasal geri dönüşüm yöntemi, fiber takviye ve reçine matrisleri gibi kompozitlerdeki bileşenlerin ayrılmasına izin verir. Termoplastik epoksi reçinenin çözülmesiyle, lifler geri kazanılabilir ve çeşitli uygulamalarda yeniden kullanılabilir. Bu işlem, liflerin mekanik özelliklerinin bozulmasını içerebilen geleneksel mekanik geri dönüşüm yöntemlerine bir alternatif sunar ve kompozit endüstrisinde döngüsel ekonomi ilkelerini destekler (IACMI - The Composites Institute, 2022).

2.6 Sonuçlar

İzmir Kalkınma Ajansı'nın yayımlamış olduğu Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası 2023 çalışması geri dönüşüm konusunda önemli hedefler

belirleyen bir rapordur. Bu rapor kısaca rüzgâr türbini kanadı geri dönüşüm tesisi kurulması, yenilikçi fikirlerin hayata geçirilmesi, Ar-Ge çalışmalarının geliştirilmesi hedeflerini içerir. Bu bildiri, bu raporda konulan hedefleri, güncel mühendislik çalışmaları ve akademik literatür verileri ışığında ele alarak, hem yerli sanayimiz hem de yerli teknik bilgi birikimimiz için tutarlı ve önemli olduğuna ışık tutmuştur. Geri dönüşüm teknolojilerine sahip tesislerin kurulmasının doğuracağı istihdamın, döviz tasarrufunun ve teknik bilginin ülkemiz için faydalı olacağı aşikârdır. Buna ek olarak, bu bildiride incelenen çalışmalar, epoksi bazlı kompozit malzemeleri, potansiyel olarak rüzgar enerjisi ve diğer endüstrileri de kapsayan daha geniş bir döngüsel ekonomi için bir hammadde kaynağı haline gelebilme durumunu da ortaya koymaktadır.

Türkiye'de 2020 yılı sonunda kurulu rüzgâr santrallerinin gücü toplamda 9,3 GW'a ulaşmıştır. Önümüzdeki 5 yıl içinde bu rakamın 1,5 katına çıkması beklenmektedir. 2020 yılında Türkiye'de yaklaşık 40 bin ton rüzgâr türbin kanadı üretilmiştir. Bu alanda faaliyet gösteren 4 firmada 5.300 kişi doğrudan istihdam edilmektedir. Paylaşılan ve incelenen veriler sayesinde hem küresel hem de yerli rüzgâr enerjisi sektörünün büyümesinin büyük bir ivme kazandığı görülebilmektedir. Türkiye'de kullanım ömürleri bitmek üzere olan kanat sayısı fazlalığı ileride kompozit kaynaklı bir çevre kirliliğine sebep olacaktır. Son yıllardaki kompozit birikimindeki artış bize yaşanması çok muhtemel büyük bir çevre krizinin adımlarını göstermektedir. Enerji konusunun milliliği gibi kompozit üretimi ve geri dönüşümü de milli bir mesele olarak görülüp yerlileşme içine alınmalıdır. Dünya çapında yaşanacak olan büyük çevre krizi için hazırlıklar yapılmalı ve yerli çözümler geliştirilmelidir. Yerlilik oranı, Türkiye'deki kompozit sektörü için de önemli bir gösterge olarak kullanılabilir. Şu anda rüzgar türbin kanatlarında yerlilik oranı ülkemizde %50 seviyesindedir; ancak, bu oranı daha da zorlayıcı bir şekilde %65'e çıkarmak mümkündür. Göz ardı edilemeyecek husus, yerli üretimin her zaman ucuz olmayacağı gerçeğidir; ama yerli üretimi artırarak ve yerli pazarı destekleyerek Türk sanayisinin rekabet gücünü artırılabilir.

Bu bildiride, hem sayısal veriler hem de akademik çalışmalarla kompozit sektöründeki geri dönüşüm meselesinin yerlileşme politikalarının bir parçası olarak ele alınması gerektiği önemle vurgulanmaktadır. Türk sanayisi için ihracat kapasitesini

artırmak önemli bir hedef olduğundan, bu konu da beraberinde büyük bir önem taşımaktadır. Sadece yerli pazarın ve talebin ötesine geçmek değil, aynı zamanda sürdürülebilir bir yapı oluşturmak için kompozit atıkların geri dönüşümü, milli sanayi politikasının bir parçası haline getirilmelidir. Bu kapsamda, planlı bir politika oluşturulması gerekmektedir. Net hedefler belirlenmeli ve bu hedefler hem kısa hem de uzun vadeli olarak gerçekçi ve zorlayıcı olmalıdır. Bu hedeflerin belgelendirilmesi ve dökümantasyonu da önemlidir. Ayrıca uluslararası standartlara uyum sağlamak ve küresel hedefleri göz önünde bulundurmak da önemli bir adımdır.

Geri dönüşüm yöntemleri ve geri dönüştürülen malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi, ciddi bir Ar-Ge konusu haline gelmiştir. Bu alandaki Ar-Ge çalışmaları, çevresel sürdürülebilirliği artırmayı ve atık miktarını azaltarak kaynakları verimli bir şekilde kullanmayı hedeflemektedir. Son zamanlarda, yerli girdi şartının oluşturulması fikri ortaya atılmıştır ve bu kapsamda, belirlenen parçaların yurt içinde imal edilmesine zorunluluk getirilebilir. Bu önlem, yerli üretimi teşvik ederek yerel ekonomiyi güçlendirmeyi ve iş imkânlarını artırmayı amaçlamaktadır. Enerji bağımsızlığı, rekabetçi sürdürülebilir piyasa ve küresel başarı için uzun vadeli kamu teşvikleri, iş birlikçi ekosistem ve uluslararası standartlarda fiyat/performans faktörleri büyük önem taşımaktadır. Ar-Ge teşvikleri sayesinde rekabetçi bir sektörde esneklik sağlanabilir, zamandan kazanç elde edilebilir ve israf kayda değer oranda azaltılabilir.

Geri dönüşüm ile ilgili bu bildiride incelenen hususların yerlileşme politikasının bir parçası olması ve beraber gelişmesi elzemdir. Yapısal açıdan incelendiğinde geri dönüştürülmüş malzemelerin dayanımının güvenilir olacağını ve çok yönlü fayda getirecek olan geri dönüşüm tesislerinin istihdam sağlayacağını bilmek gerekir. Ekonomik tasarruf açısından ithal ürünlerin dahi geri dönüşümü ve ülkemizdeki yerli üretimleri, bu sektörün sürdürebilirliğini sağlayacaktır ve sağlıklı bir çevre ve enerji bağımsızlığı hususlarında sektörü dışa bağımlılıktan kurtaracaktır. Sonuç olarak, kompozit sektöründeki geri dönüşüm meselesi yerlileşme ve iktisadi hürriyet politikaları kapsamında ele alınmalıdır. Dahası, uluslararası standartlara uyumlu yerli üretimin artırılması ile Türk sanayisi ihracat kapasitesini artırabilir ve küresel düzeyde daha da rekabet edebilir hale getirilebilir.

BÖLÜM ÜÇ

RÜZGÂR TÜRBİNİ KANATLARI

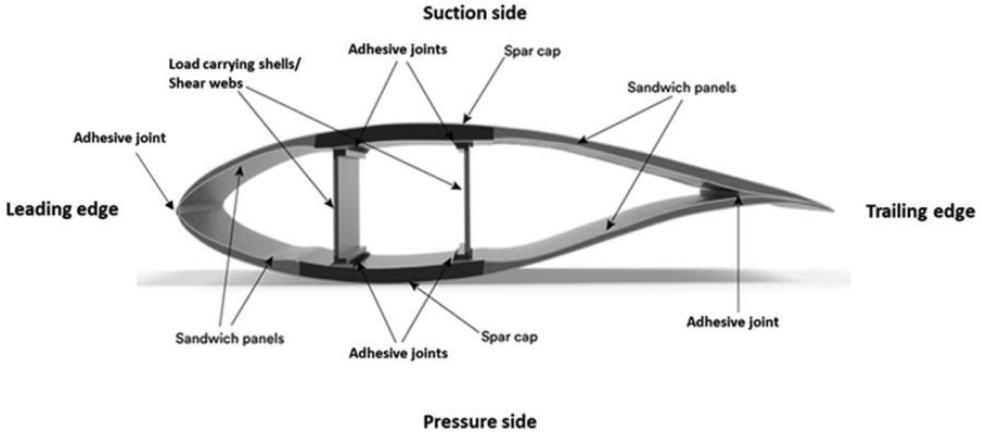
3.1 Giriş

Rüzgar türbini kanatlarını zorlayan yükler, rüzgar kuvveti ve rotorun dönmesinden kaynaklanan atalet kuvvetleridir. Bu kuvvetler, kule ve kanatlarda eğilme gerilmeleri ve normal gerilmeler oluşturur. Eğer bu gerilmeler kullanılan malzemenin güvenli sınırlarını aşarsa, kırılmalar meydana gelir. Bu nedenle, rüzgar türbini yapımında bu faktörlerin dikkate alınması ve uygun önlemlerin alınması son derece önemlidir.

Güncel çalışmalarda burkulma ve malzeme hasarı gibi geleneksel hasar mekanizmalarının kanat tasarımını belirlemek için yetersiz olduğunu ortaya çıktı ve bu nedenle diğer hasar mekanizmaları dikkate alınmalıdır. Böyle bir mekanizma, tam ölçekli testlerde gözlemlenen ancak standart sertifikasyon testlerinin kapsamına girmeyen enine kesit kaymasıdır. Diğer bir önemli mekanizma, günümüzde rüzgar türbini kanatlarında yaşanan yapışkan bağlantı hasarlarıyla bağlantılı olan, yük taşıyan spar kep laminatının doğrusal olmayan düzlem dışı deformasyonudur (Chen, 2018).

3.2 Kanat Tasarımına Genel Bakış

Rüzgar türbini kanatlarının tasarımı, aerodinamik ve yapısal hususlar arasında bir denge bulmayı içerir. Tipik olarak, kanadın dışı, yani üçte ikisinin tasarımını aerodinamik yönetirken, yapısal faktörler kanadın iç, yani üçte biri, için daha önemlidir. Yapısal olarak, genellikle kanatlar içi boş bir yapıya sahiptir ve kayma yüklerini aktarmak için bir veya daha fazla yapısal ağ ile birbirine bağlanan iki kabuktan (emme ve basınç tarafları) oluşur. Daha eski kanat tasarımları bir yük taşıma kutusu kirişine sahipken daha yeni tasarımlar ise bir, iki veya üç ağlı ve spar kepli yük taşıma kabukları kullanılmaktadır (Şekil 3.1) (Broṇdsted, Nijssen ve Goutianos, 2023).



Şekil 3.1 Yük taşıyan kabuk yapısına sahip kanat tasarımı (Broṇdsted, Nijssen ve Goutianos, 2023)

Genel olarak, yükler bir rotor kanadına veya rüzgar türbinine etki eden toplam kuvvetler ve momentler olarak ele alınırken, bu global kuvvetler ve momentler yapıda gerilmelere, gerinimlere, deplasmanlara ve hatta deformasyonlara yol açar.

3.2.1 Genel Yükler

Kanat yüklerini tartışırken, odak noktası öncelikle kanattan göbek/ana mil tertibatına aktarılan yükler olan genel yüklerdir. Her elemanın enine kesiti, sırasıyla içeri akış yönüne dik ve paralel yönlendirilmiş aerodinamik kaldırma ve sürükleme kuvvetleri oluşturur. Ek olarak, kanat elemanları yerçekimi ve ivme etkileri nedeniyle atalet kuvvetleri ve momentler oluşturan kütlelere sahiptir. Ağırlık merkezinin konumu, kayma merkezi ve aerodinamik merkez gibi her bir elemanın yapısal özellikleri, kanadın yunuslama ekseni ile hizalanmadığında burulma momentlerine neden olabilir.

Her kanat elemanı, düzlem içi itme kuvveti, düzlem dışı itme kuvveti ve burulma momentleri dahil olmak üzere radyal konumunda kesitsel yüklere katkıda bulunur. Bu kesitsel yükler, kanat ekseni boyunca hat kuvvetleri veya moment dağılımları ile temsil edilebilir. Kanat açıklığı boyunca bu yüklerin entegre edilmesi, kanat kök bölümündeki genel eğilme ve burulma yüklerini verir.

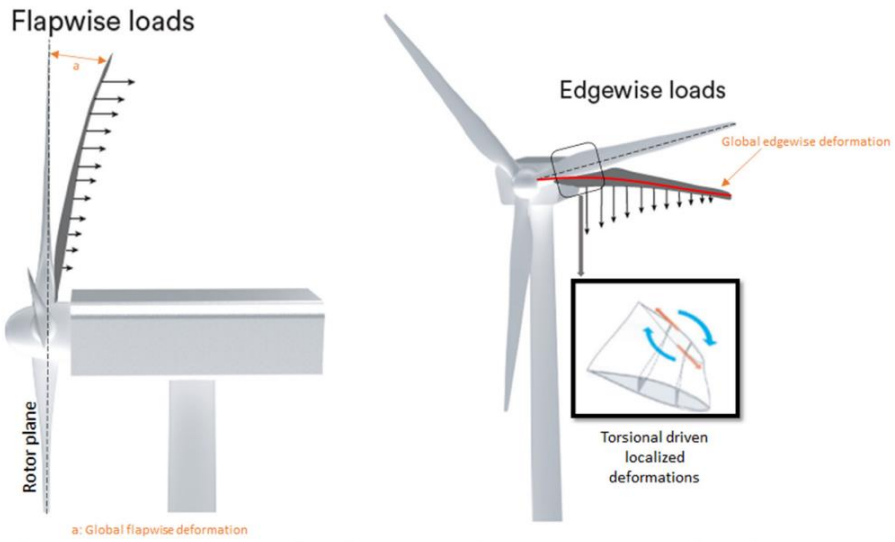
Rotor itme kuvveti, daha büyük yüksekliklerde daha yüksek rüzgar hızı nedeniyle tipik olarak rotor merkezinin yukarısındaki bir mesafede etki eder ve bu durumda rotor

düzleminde bir eğim momenti ve karşılık gelen sapma momenti oluşturur. Tahrik torku, itme kuvveti ve jiroskopik eğim ve yalpalama momentleri ana mile iletilir ve bu da şanzıman, jeneratör takozları ve rotor yatakları aracılığıyla iletilir. İtme kuvveti ve rotor momentleri, rotor yatakları tarafından emilir, nasel yatağından kuleye iletilir ve son olarak devrilme, yanal ve burulma momentleri olarak temele verilir. Rotor kanadının yapısal gereksinimleri doğrudan üzerinde hareket eden yüklerden gelir. Bir rüzgar türbini rotor kanadı integral bir yapı olmasına rağmen, birkaç yük taşıyan bileşen tanımlanabilir.

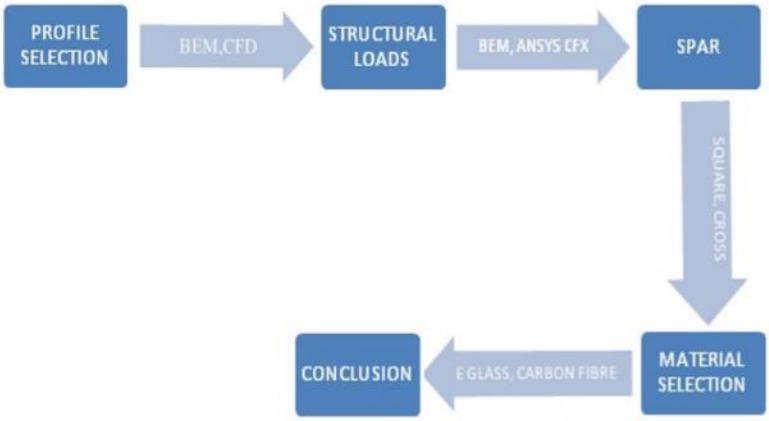
Aerodinamik yükler, kanat açıklığı boyunca kabaca üçgen bir dağılıma sahip, ucun yakınında maksimum bölüm yükleri ve enerji üretiminden sorumlu olan aerodinamik profil itme yükünü temsil eden benzer bir düzlem içi yük ile bir kelebekleme yükü uygun olabilir. Aerodinamik yükler, rüzgar hızı, rüzgar kesme ve rüzgarların değişiklikleri nedeniyle değişir.

Rotor kanadı yükünün doğasını anlamak için çalışma sırasında rotorun karşılaştığı rüzgar alanını dikkate almak önemlidir. Rüzgar alanı, rüzgar kayması (rüzgar hızının yükseklikle artması), eğilimli rüzgar hızı (yavaş ve tutarlı değişimler), şiddetli rüzgarlar (ani değişimler) ve türbülans (hızlı değişimler) gibi olaylarla karakterize edilen, rotora yaklaşan değişken rüzgar hızı vektörlerinden oluşur (Şekil 3.2).

Bir tasarımcı profilini seçtikten sonra kanadın çalışma koşullarını ve parametrelerini belirler ve maruz kalacağı mekanik yükleri tanımlar. Kanadın üzerinde oluşan bu yüklerden sürükleme ve kaldırma kuvvetleri rüzgar hızına bağlıdır. Özellikle kanadın yüzeyine etki eden sürükleme kuvveti, Şekil Stabilitesi için çok önemlidir. Bu kuvvetin etkilerinde, kanadı spar ve spar kepleri korur. Üçüncü adım malzeme seçimidir ve rüzgar türbinin kanadından efektif sonuçlar almak için ağırlıkta hafif, yüksek mukavemetli ve yük taşıma kapasitesi iyi olmalıdır. Bunların üçü birlikte uyumlu bir şekilde kanat tasarımına yansımalıdır (Şekil 3.3) (Singh, Thomas ve Warudkar, 2013).



Şekil 3.2 Rotor kanadı yükünün doğası (Brøndsted vd., 2023)

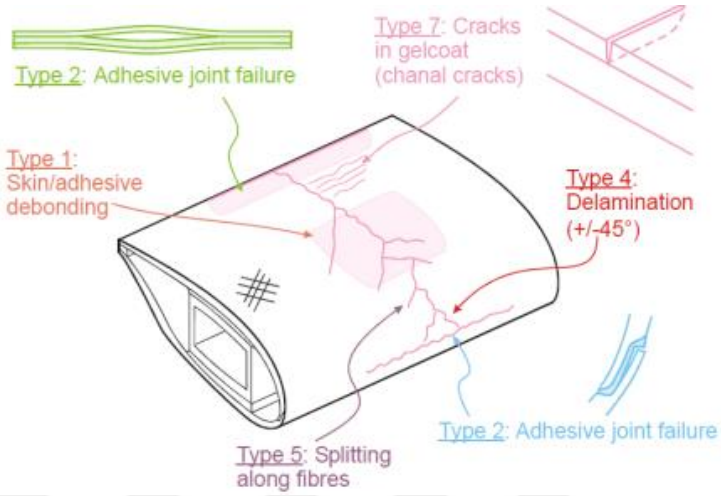


Şekil 3.3 Şekil Stabilitesi tasarım adımları (Singh, Thomas ve Warudkar, 2013)

3.2.2 Lokal Gerilmeler ve Gerinimler

Lokal gerilmeler ve gerinimler, bir rotor kanadına etki eden dış kuvvetler ve momentler olarak kabul edilmektedir; ancak bu yükler, kanat yapısı içindeki malzemeye iç gerilmeler uygular. Malzeme, iletilen kuvvetle orantılı gerinimler sergileyerek bu gerilmelere yanıt verir. Bu iç yüklerin büyüklüğü ve yönü, kanat yapısının bu yükleri kullanılan belirli malzemeler için izin verilen sınırlar içinde etkili bir şekilde kontrol edebilmesini ve koruyabilmesini sağlamaları gerektiğinden, tasarımcılar için çok önemlidir. Kanat kesiti kabuğunda meydana gelen hasar tipleri, sırasıyla Tip 1, özellikle orta kabuk kısmında gerçekleşen kabuk/yapışkan ayrılması; Tip 2, firar veya hücum

kenarında gerçekleşen yapışkan bağ hasarı; Tip 4, kanadın hücum bölgesinde meydana gelen delaminasyon; Tip 5, sıklıkla kanadın hücum bölgesinde gerçekleşen elyaf boyunca yırtılma; Tip 7, firar bölgesindeki jelkotlarda oluşan çatlaklar olarak sınıflandırılmıştır. Bu hasar tipleri, Şekil 3.4'te gösterilmiştir (Shohag vd., 2017).

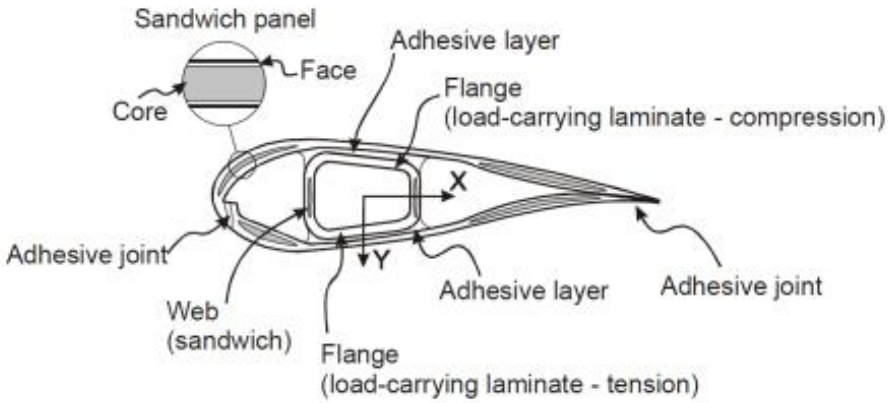


Şekil 3.4 Kanat kesiti kabuğunda oluşan hasar tipleri: Spar kep yapısının özellikle orta kabuk kısmında gerçekleşen Tip 1 ve diğer hasar tipleri Tip 2, Tip 4, Tip 5, Tip7 (Shohag vd., 2017)

Fiber takviyeli plastik (FRP) kullanan modern rotor kanadı tasarımının önemli bir avantajı, yük taşıyan fiberlerin yönünün iletmeyi amaçladıkları kuvvetlerle hizalanabilmesidir; böylece, tasarımcıların kanat tasarımında temel gereksinimler olan maksimum sağlamlık ve minimum ağırlık elde etmelerini sağlar. Ayrıca belirli yüklerin üstesinden gelmek için belirli kanat bileşenleri stratejik olarak dahil edilmiştir. Örneğin, kanat spar kepi birincil yanal eğilme yüklerini taşımak için ankastre kiriş işlevi görür ve çeşitli konfigürasyonlarda gerçekleştirilebilir; ancak tipik olarak kanadın uzunlamasına yönündeki normal gerilmeye dayanacak üst ve alt spar kepleri ve kayma yüklerini kaldıracak spar ağlarını içerir. Spar keplerinin, sehim sırasında emme tarafı ve basınç tarafı yüzeylerinin birbirine temas etmesini önler. Kabuk bileşeni ise kanadın aerodinamik şeklini oluşturmaktan sorumludur (Şekil 3.5).

Üst ve alt kanat kısımlarının birbirine birleştirilmesi gerektiğinden, söz konusu olan birleştirme bağlantıları vardır. Tasarım sürecinde, sapmanın elastik olduğu ve

deformasyonun sınırlı olduğu varsayıldığında, normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri birincil öneme sahiptir (Broṇdsted vd., 2023).



Şekil 3.5 Kanat iç yapısı ve yapışkan bağlayıcılar (Broṇdsted vd., 2023)

Kompozit malzemeler, düzlem dışı deforme olduklarında daha düşük mukavemete sahiptir. Sonlu eleman modelleri, kanat spar keplerinden arka kenara orta noktada paneller arasındaki göreli deformasyon olan "nefes alma" gibi global kanat deformasyonlarının neden olduğu yerel deformasyonları analiz etmek için de kullanılır. Enine kesitin dönüşü dikkate alınarak nihai deformasyonları incelemek için de yerel yer değiştirmeler hesaplanır.

3.2.3 Sehim ve Deformasyon

Rotor kanatlarına etki eden dış yükler, yalnızca iç gerilmeler ve gerinimler oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda kanadın şeklinde gözle görülür değişikliklere neden olabilir. Kanadın belirli bölümleri veya alanları, yüzeyi dahil olmak üzere, sehime ve enine kesit şeklinde değişikliklere maruz kalabilir. Öne çıkan bir örnek, çalışan birçok rüzgar türbininde kanat ucunda gözlemlenebilir kanat ucu sapmadır. Kanat ile kule arasında güvenli bir mesafe sağladığından, maksimum kanat ucu sapmasını yönetmek tasarım için çok önemlidir. Aşırı kanat sapması, kanat elemanları rotor düzleminin dışına veya ilerleme-gecikme yönünde yer değiştirdiğinde de sorunlara yol açarak, uygulanan aerodinamik kuvvetlerin radyal yönün dışında olması nedeniyle ek momentlere neden olabilir.

Kanat yüzeyindeki panellerin burkulması gibi daha az belirgin olaylar da meydana gelebilir. Bu deformasyonlar tipik olarak kanadın kabuk panellerinde, spar keplere bitişik hem arka kenara hem de ön kenara doğru ortaya çıkar. Kanat kabuğu birincil olarak ana yükleri taşımak için tasarlanmasa da, asıl rolü aerodinamik şekli oluşturmak ve aerodinamik basıncı birincil yük spar keplere iletilen bir kuvvete dönüştürmektir. Öngörülebilir ve etkili kanat performansı sağlamak için kanat profilinin şeklini korumak son derece önemlidir. Ağırlığı düşük tutarken yeterli direngenlik sağlamak için sandviç yapılar kullanılır. Kanadın yüzeyinin aşırı kanat yükleri altında burkulması, enine kesit şeklini önemli ölçüde değiştirdiği ve eğilmeye karşı direncini önemli ölçüde azalttığı için önemli bir risk oluşturur. Şiddetli burkulma, kanadın tamamen hasarlanmasına bile yol açabilir (Brondsted vd., 2023).

3.3 Kanat Yapısı

Kanat parçalarının tümü yük taşıyan parçalar olarak düşünülebilir; ancak spar kepler tipik olarak aerodinamik yüklere karşı direncin en büyük kısmından sorumludur. Kanadın geri kalanı aerodinamik bir kabuk olarak düşünülebilir (Şekil 3.6).

1.Aerodinamik Kabuk:

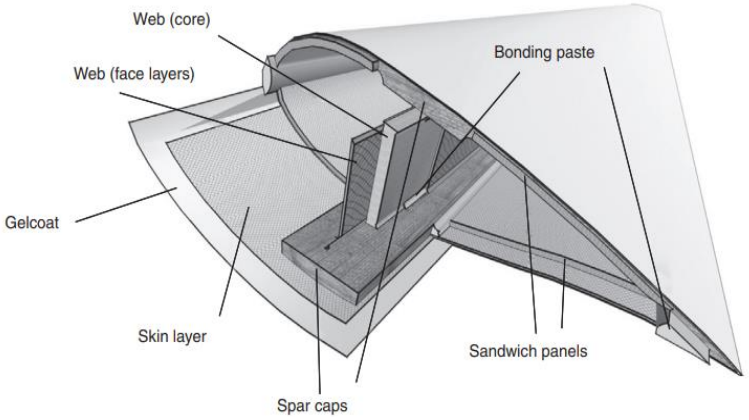
- Jel katının uygulanması ve kanat üzerindeki aerodinamik ve yerçekimi kuvvetlerinin neden olduğu burulma ve kayma yükleri taşımak için dış kabuk tabakası
- Aerodinamik profil ve burkulma dayanımını korumak için sandviç paneller

2.Yük taşıyan spar:

- Normal yükün çoğunu taşıyan spar kepleri
- Kayma yükünün çoğunu taşıyan spar ağları

3.Yapışkan Bağ

4.Kanat kökü bağlantısı



Şekil 3.6 Kanat kesiti ve elemanları (Broṇdsted vd., 2023)

Yük taşıyıcı yapı, büyük bir kısmı flap yönünde tek yönlü (UD) malzemeden oluşurlar. Kök yakınındaki elemanlar en kalın olanlarıdır, aerodinamik eğilme momenti dağılımını takip ederek kalınlık, kanat ucuna doğru incelir. Basınç tarafı spar kep malzemesi, değişen rüzgar hızı, rüzgar kesmesi ve sert rüzgarların neden olduğu bir yorulma bileşeniyle birlikte ağırlıklı olarak çeki yüklerine maruz kalır. Yüksek basınç kanat yüzeyi tarafındaki spar kepi ağırlıklı olarak bası yüklerine maruz kalır(Broṇdsted vd., 2023).

Çoğu rotorun kanadı, esasen ince duvarlı, çok hücreli, prizmatik olmayan ankastre kiriş yapılar olarak ele alınır. Daha büyük kanatların çoğu, üst ve alt kısım olmak üzere iki yarıda üretilir ve yapışkan bağ kullanılarak birleştirilir. Her durumda, rotor kanadı çoğu bileşenin birlikte çalıştığı integral bir yapı olmasına rağmen, ayrı bileşenler tanımlanabilir ve kanat bileşenleri verimli enerji dönüşümüne ve sistem çalışmasına katkıda bulunur. Bu kanat bileşenleri aşağıda ifade edilmiştir.

3.3.1 Aerodinamik Kabuk

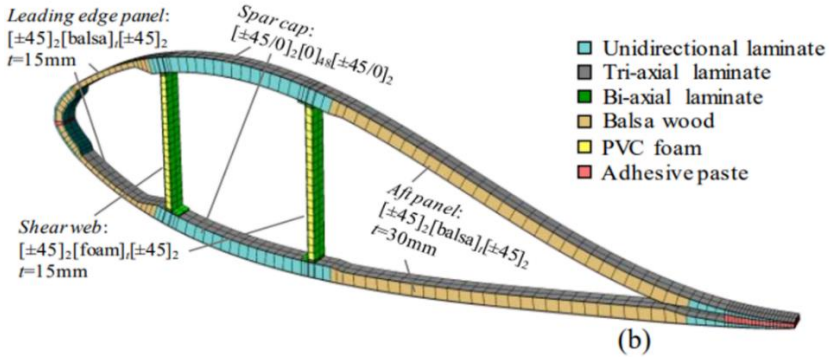
Kanat kabuğunun birincil işlevi, kanadın şeklini korumak, rüzgârın ürettiği kuvvetlere direnmek ve yerçekiminin etkilerine karşı koymaktır. Bunun için, yapımında malzeme olarak genellikle güçlü ve hafif kompozitler kullanılır. Spesifik kompozit malzeme tipi, uygulamaya ve tasarım gereksinimlerine bağlı olarak değişebilir. Aerodinamik açıdan verimli olacak şekilde tasarlanıp ve sürtünmeyi en aza indirmesine

ve enerji dönüşümünü en üst düzeye çıkarması amaçlanır. Kanadın şeklini yapısal bütünlüğü koruyarak sağlar. Rüzgârdan etkili bir şekilde faydalanılmasına ve oluşan gücün mekanik sisteme aktarılmasına yardımcı olur. Aynı zamanda rüzgar kuvvetlerine karşı direnci, türbin kanatlarının kuvvetli rüzgarlar tarafından üretilen dinamik yüklere dayanmasına yardımcı olur. Ek olarak, yerçekimi kuvvetlerine dayanım yeteneği ile kanadın konumunu korumak ve herhangi bir deformasyonu veya yanlış hizalamayı önlemek için çok önemlidir.

Aerodinamik kabuklar ve ağlar, balsa ağacından veya polivinil klorürden (PVC) yapılmış kor yapılara ayrılmış, 45^{o} veya 0/45^{o} laminat yerleşimli kompozit yüzey katmanlarına sahip sandviç malzemelerden üretilmektedir. Kanat kabuğunun temel işlevlerinden biri doğrudan yapısal dayanım sağlamak değil, UV ışığı ve erozyon gibi dış etkenlerden korumaktır; bu bakımdan dış jelkot kabuk olarak düşünülebilir. Jel kaplamanın altında tipik olarak bir miktar burulma direngenliği sağlayan 45^{o}'lik bir katman bulunur. Rotor kanatlarında iki farklı sandviç panel türü vardır: spar ağlı sandviç ve aerodinamik paneller. İlki tipik olarak yüzey olarak 45^{o} katmanlara sahip olan ve ağırlıklı olarak düzlem içi kayma kuvvetiyle yüklenen düz bir sandviç paneldir. Bir kanattaki aerodinamik paneller genellikle iki yönde kavislidir ve esas olarak düzlem içi yönde çeki ve/veya bası ile yüklenir. Bir kanat yapısında, kanadın eğilmesiyle ilişkili bası yükleri, panellerin önemli ölçüde düzlem dışı hareketine neden olur ve eğilme kritik olabilir. Rotor kanatları için sandviç panellerin test edilmesi son zamanlarda ilgi çekici hale geldi ve hala yaygın değildir. Spar ağ için kritik kayma burkulması bileşen testleri aracılığıyla daha iyi doğrulanır (Broṇdsted vd., 2023).

Kabuğun desteklenmeyen kısımlarında ise doğrudan desteğe sahip olmayan ribler veya iç bölümler arasındaki alanlar gibi burkulma yüküne karşı koymak için kritik öneme sahiptir. Desteklenmeyen bu alanlarda burkulmayı önlemek için, hafif özlü malzemeler ve çok yönlü yüz laminatları ile kalınlaştırılmış sandviç yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Kalınlaştırılmış sandviç yapıların kullanılması, yükün kabuğun yüzeyi boyunca daha eşit bir şekilde dağılmasına yardımcı olarak burkulma riskini azaltır. Bu tasarım, kabuğun genel yapısal bütünlüğünü ve uzun ömürlülüğünü garanti

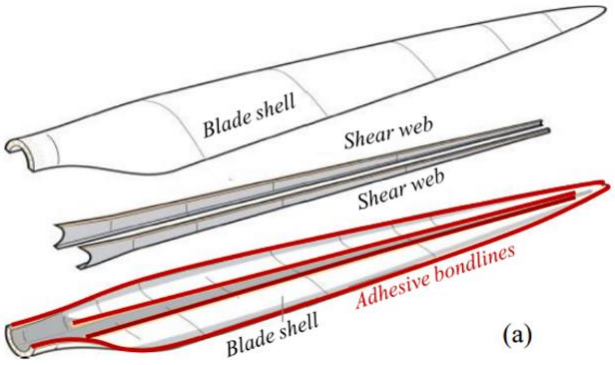
ederek burkulmaya karşı direncini arttırır ve zorlu çalışma koşulları altında işlevselliğini korur (Şekil 3.7) (Broṇdsted vd., 2023).



Şekil 3.7 Kompozit yüzey katmanlarına sahip sandviç malzemenin kanat kesitinde görünümü (Broṇdsted vd., 2023)

3.3.2 Yekpare Spar Ağları

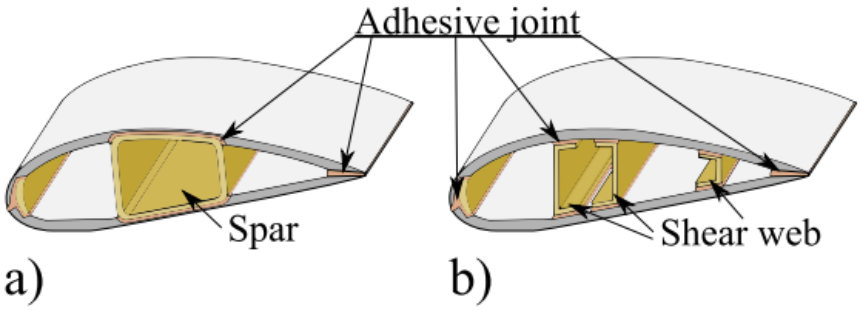
Kabuk yapısının önemli bir bileşenidir ve kanatlı eğilme nedeniyle oluşan kabuk burkulmasına ve kayma gerilmelerine direnmek üzere tasarlanmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Spar ağları ve yapışma bölgeleri (Broṇdsted vd., 2023)

Kelebekleme eğilmesi, bir yapının hava akışı veya rüzgâr yükü yönüne dik olan eğilme hareketini ifade eder. Mukavemetlerini ve eğilmeye karşı dirençlerini artırmak için, yekpare spar kepleri için yaygın olarak +45°/-45° açılarda çift eksenli yerleştirmeler kullanılır. Bu düzenleme, fiberlerin birçok yöndeki kuvvetlere dayanmasını ve hem eğilme hem de kayma gerilmelerine etkili bir şekilde direnmesini sağlar. +45°/-45° çift eksenli yerleştirme modeli, yüklerin spar boyunca eşit olarak dağıtılmasına yardımcı olarak gerilme konsantrasyonlarını en aza indirir ve genel yapısal bütünlüğü geliştirir. Bu açılardaki liflerin kombinasyonu, yekpare spar kutuların

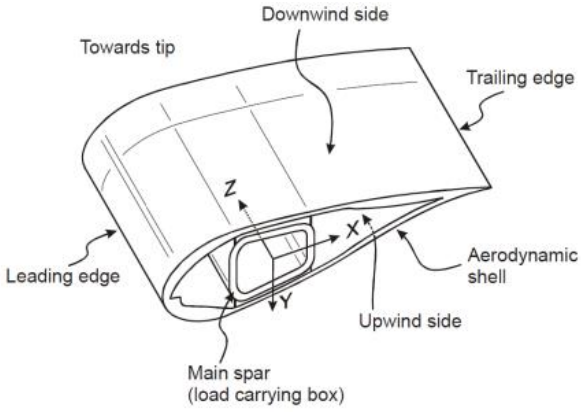
kanat yönünde eğilme sırasında meydana gelebilecek kayma gerilmelerine ve burkulmaya dayanmasını sağlayarak, kanadın çeşitli yükler altında şeklini ve performansını korumasını sağlar (Şekil 3.9) (Broṇdsted vd., 2023).



Şekil 3.9 (a) Kutu kirişler (b) Spar ağı (Broṇdsted vd., 2023)

3.3.3 Spar ve Spar Kepleri

Spar kep ve spar ağı bileşenleri, kanadın üzerinde oluşan normal kuvvetleri ve eğilme momentlerini sönümlemekte ve eğilme etkisini azaltmaktadır. Kanat ağırlığını, elastikiyetini ve rijitliğini olumlu yönde etkiler. Sparlar kanada etki eden yükün neredeyse %90'nını taşır ki bu çalışan kanadın bütünlüğünü ve devamlılığını ifade eden *Şekil Stabilitesinin* sağlanması için çok önemlidir. Bir başka açıdan, *Şekil Stabilitesini* maruz kaldığı mekanik yükler altında kanadın minimum sehimi olarak da tanımlayabiliriz. Bu *Şekil Stabilitesini* sağlamak için özellikler kanat kenarlarında sandviç yapılar kullanılır. Farklı üreticilerin çeşitli kanat tasarımları, takviye için üst ve alt kabuklar, ağlar, spar kep kutuları ve ribler kullanan bu ilkeleri göstermektedir (Şekil 3.10) (Nielsen, Tesauro ve Bitsche, 2012).

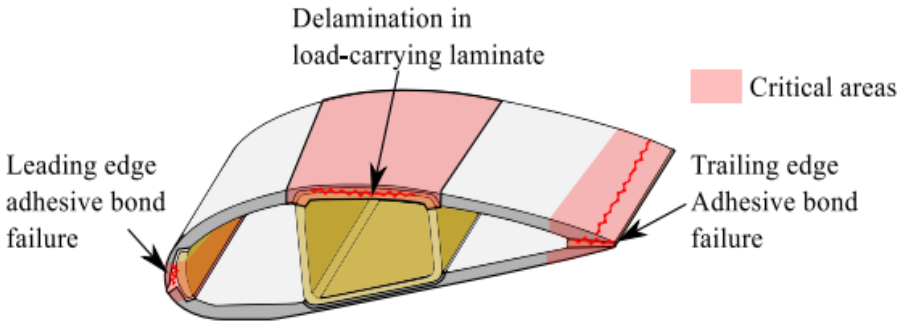


Şekil 3.10 Kanat şeklini oluşturan ve koruyan yapılar (Nielsen, Tesauro ve Bitsche, 2012)

Spar amacı, kanada hem global hem de yerel olarak yeterli dayanım ve direngenlik kazandırmaktır. Genel olarak, kanadın örneğin çok fazla eğilmemesi ve farklı yükleme türleri altında kuleye çarpmaması için yeterli derecede eğilme direngenliğine sahip olması gerekir. Bu, spar keplerin ağlarının oldukça kalın olmasını, kullanılan malzemelerin yüksek mukavemet ve direngenlik-ağırlık oranlarına sahip son derece gelişmiş kompozitler olmasını ve fiberlerin çoğunun uzunlamasına yönde olmasını gerektirir.

3.3.4 Yapışkan tabakalar

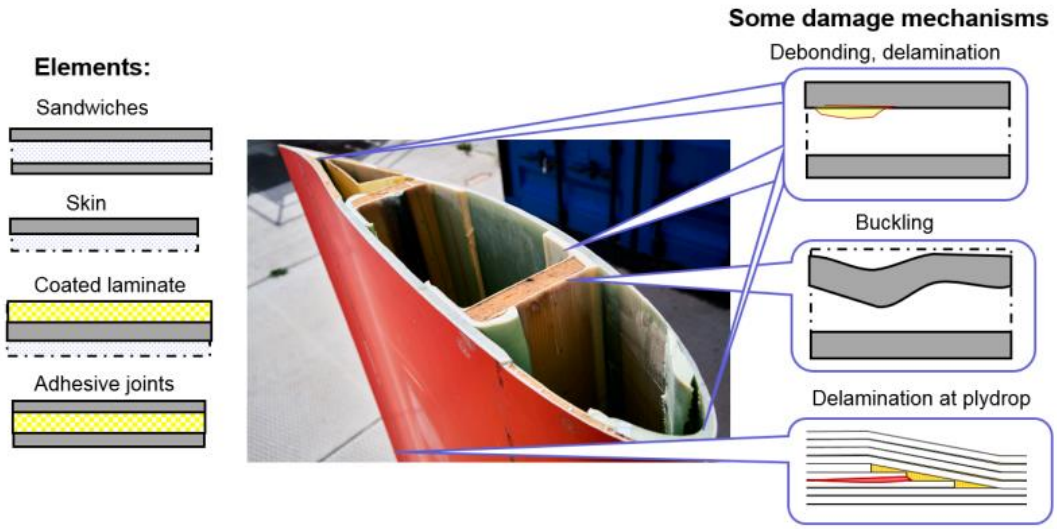
Kompozit katlar, ağ ve kanat kabuğu arasında bir bağ sağlayarak kanadın düzlem dışı mukavemetini ve direngenliğini sağlamada çok önemli bir rol oynar. Ana işlevi, yükü katlar arasında aktarmak ve gerilmeleri etkili bir şekilde dağıtmaktır. Farklı katmanların birleşik bir yapı olarak birlikte çalışmasına izin veren güçlü bir bağ oluşturarak kanadın genel dayanımını ve direngenliğini arttırırlar. Bunu başarmak için, yapışkan tabakalar için güçlü ve yüksek düzeyde yapışkan matris malzemeleri kullanılır. Matris malzemesi, kompozit katların liflerini bir arada tutan ve genel yapıya kohezyon kuvveti sağlayan bir bağlayıcı görevi görür. Güçlü ve oldukça yapışkan bir matris malzemesi kullanılarak, yapışkan tabakaların kanadın düzlem dışı mukavemetini ve direngenliğini önemli ölçüde artırılabilir. Böylece kanadın yapısal bütünlüğünü korurken rüzgar, titreşimler ve merkezkaç kuvvetleri gibi çeşitli kuvvetlere ve yüklere dayanmasına yardımcı olur. Yapışkan tabakalar esasen katlar, spar ağı ve kanat kabuğu arasında güçlü bir bağ sağlayarak, kanadın uzun vadeli güvenilirliğini sağlar, delaminasyon riskini en aza indirir (Mishnaevsky vd., 2017) (Şekil 21).



Şekil 3.11 Yapışkan bağlar ve olası hasar türleri (Mishnaevsky vd., 2017)

3.4 Burkulma ve Bası Dayanımı

Spar kep kutusunun amacı, kanada hem global hem de yerel olarak yeterli dayanım ve direngenlik kazandırmaktır. Yerel olarak kutu kirişi, dış kabuğun direngenliğini ve aerodinamik profilin şeklinin korunmasını sağlar. Kanadın üzerindeki bası yükü, kanadın burkulma yükünün yanı sıra kenar ve kanat yönünde eğilmeye neden olur. Spar kepler öncelikle kanat yönünde burkulma yüklerini taşırken, kenar yönünde eğilme de öncelikle aerodinamik profilin ön ve arka kenarlarının güçlendirilmesi yardımıyla taşınır. Kanatlı eğilmede kutu kirişin bir tarafı bası altında, bir tarafı ise çeki altındadır. Bası yüklemesi kanadın burkulmasına neden olabilir. Rüzgar türbini kanatlarının boyutu arttıkça bu hasar mekanizmasının daha kritik olması beklenmektedir. Kanat eğilmeye başladıkça enine yönde büyük yerel deplasmanlar meydana gelir ve spar ağları da bu deformasyona katılır. Spar kep yapısını *Sonlu Elemanlar Analizi (FEA)* ile modellemek için genellikle enine yönde yalnızca az sayıda kabuk elemanı kullanılır. Bu nedenle elde edilen sonuçların enine (xy) düzlemindeki gerilmeler ve gerinimler için ne kadar doğru olduğu sorgulanabilir (Mishnaevsky vd., 2017) (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Spar kep ve yapışkan bağlar (Mishnaevsky vd., 2017)

3.5 Burkulma Kaynaklı Delaminasyon

Kompozit laminatlarda katmanlara ayrılmalar (delaminasyon) mevcut olabilir veya kanadın çalışması sırasında oluşabilir. Gerçek bir kompozit elemanda, bir iç

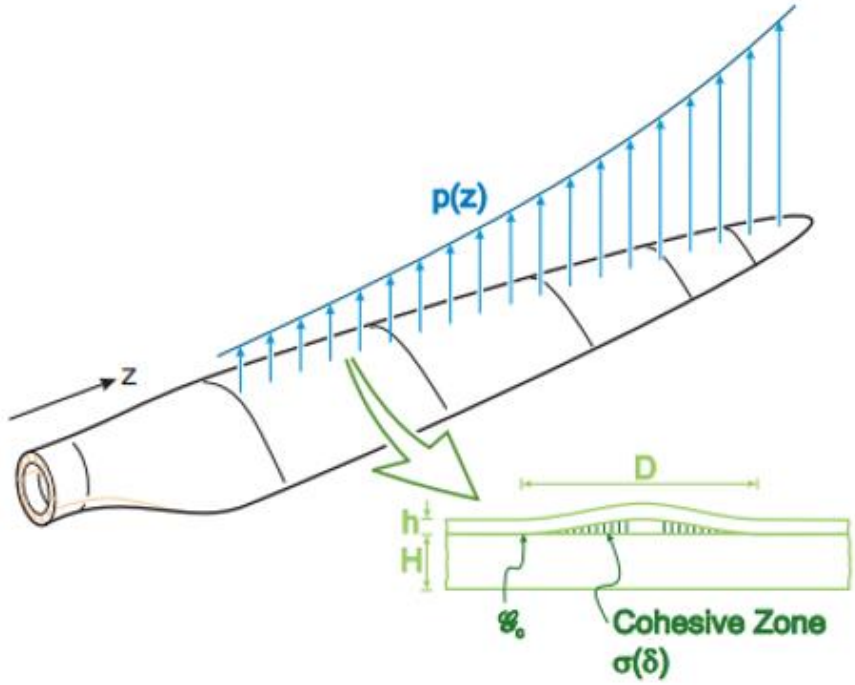
delaminasyon, boyutuna, eleman içinde yüzeyin ne kadar altında konumlandığına ve yerel bası gerilmesini alanının seviyesine bağlı olarak gerçekleşebilir veya elemanın geri kalanından ayrılmayabilir. Boyut olarak çok küçükse veya delaminasyon laminatın iç kısmında derinde yer alıyorsa veya yerel bası gerilmesinin büyüklüğü küçükse hiç burkulmayabilir. Eğer burkulursa, burkulma sonrası tepki yalnızca boyutuna ve yüzeyin altındaki konumuna ve yerel bası gerilmesinin seviyesine bağlı olmayacak, aynı zamanda kompozit malzemenin mevcut mod karışımı için kritik enerji salınım hızına da bağlı olacaktır. Burkulma sonrası durumda, eğer yerel bası gerilmesi artarsa, delaminasyon basitçe deforme olmaya devam edebilir veya enerji salınım hızı, verilen mod karışımı için kritik değeri aşarsa, boyut olarak büyüyebilir. Yerel burkulma anında hasara neden olur. Panel, ayrılmış bölge ortaya çıktıktan hemen sonra hasarlanır. Bu genellikle yüksek yüklemede meydana gelir.

Bası ile yüklenen paneller iki farklı burkulma moduna maruz kalır;

- Global burkulma modu
- Yerel burkulma modu

Eğilme momentine olan tepkiler şöyle olabilir:

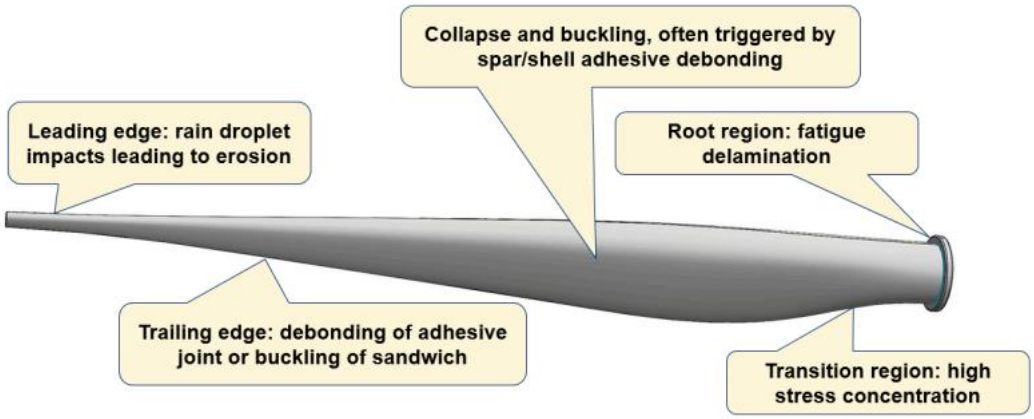
- Global burkulma
- Büyüme olmadan yerel burkulma: Delamine olmuş bölge dışarı fırlar ve nihai hasardan önce delamine olmuş bölgede çok az bir büyüme gözlenir.
- Büyümeyle birlikte yerel burkulma: Delamine olmuş bölge ortaya çıkar ve nihai hasardan önce delamine olmuş bölgenin önemli ölçüde büyümesi gözlemlenir (Şekil 3.13).
- Mod atlamalı global burkulma: Burkulma 1. global mod şeklinde başlar. Hasar durumunda bir mod sıçraması gözlenir ve panel s şeklinde hasarlanır.



Şekil 3.13 Kanat kabuğunda yük dağılımı ve katman ayrılması (Sørensen vd., 2010)

3.6 Tasarım İlkeleri ve Hasar Mekanizmaları

Mevcut rüzgar türbini kanatları yapısal güç için tam olarak optimize edilmemiştir ve bu da farklı hasar modlarına karşı güvenlikte önemli farklılıklara yol açmaktadır. Modern kanat tasarımlarında malzeme mukavemeti (düzlem içi ve düzlem dışı), yapısal mukavemet ve burkulma hasarları için güvenlik sınırlarını sağlar. Rüzgar türbini kanatlarında kullanılan kompozit malzemeler düzlem içi dayanımı yüksek gösterirken düzlem dışı dayanımı nispeten zayıftır. Kanat panelleri üzerinde yapılan deneysel testler, sınırlı düzlem dışı deformasyonlar ve katmanlar arası gerilmeler göstermiştir. Kusurlu panel testlerinde gözlemlenen gerinim seviyeleri, tam ölçekli testlerde ölçülenlerden oldukça yüksekti. Optimize edilmiş tasarımların güvenlik katsayısı, mevcut kanat tasarımlarına kıyasla iki kat yük taşıma yeteneğini göstermektedir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Hasar mekanizmaları (Philippidis ve Roukis, 2013)

Rüzgar türbini kanatlarının doğrusal olmayan davranışlar, kanat tasarımına ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişebilir. Rüzgar türbini kanatlarındaki doğrusal olmamanın en yaygın kaynaklarından bazıları şunlardır:

1.Malzemenin doğrusal olmaması: Rüzgar türbini kanatlarını oluşturan kompozit laminatlar ve sandviç köpükler gibi malzemeler doğrusal olmayan gerilme-gerinim davranışı sergileyebilir. Kompozit laminatlarda meydana gelebilecek yerel burkulma, Brazier etkisi ve büyük deformasyon gibi farklı doğrusal olmayan davranış türlerinden kaynaklanabilir. Malzemedeki doğrusal olmama durumları yorulma çatlaklarına ve diğer hasar türlerine yol açabilir.

2.Geometrik doğrusal olmama: Rüzgar türbini kanatlarının büyük boyutu ve karmaşık şekli, geometrik doğrusal olmamalara yol açabilir. Bu doğrusal olmama durumları, kanadın eğilmesi, burulması ve ön koni (kanat ile rotor göbeği arasındaki açı) gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Geometrik doğrusalsızlıklar kanadın doğal frekanslarını, sönümleme özelliklerini ve yük dağılımını etkileyebilir. Geometrik doğrusalsızlıklar kanadın aşırı titremesine neden olabilir, bu da gürültüye ve güç kayıplarına neden olabilir.

3.Statü doğrusal olmama: Sınır koşulları, şartların değişimi ve yük değişimlerinden kaynaklı basınç dağılımı değişimi ve kanat malzemelerinde ayrılmaya sebep olabilir.

Yapısal tepkiyi doğru bir şekilde yakalamak için, doğrusal olmayan geometrik etkiler dikkate alınmalıdır. Doğrusal olmayan sonlu eleman modelleri, özellikle burkulma gibi göçme mekanizmalarında bu etkileri hesaba katmak için önerilir. Statik ve yorulma yükü altında kanadın yapısal gücünü doğrulayan kanat testi, sayısal sonlu eleman simülasyonlarına göre avantajlar sunar.

Özetle, rüzgar türbini kanat tasarımlarının yapısal güç için optimize edilmesi, çeşitli hasar mekanizmalarının ele alınmasını ve farklı hasar modları için güvenlik faktörlerini dikkate alınmasını içerir. Deneysel testler, yapısal gücün doğrulanmasında çok önemli bir rol oynar ve gelecekteki gelişmeler, daha gerçekçi yük senaryoları ve geliştirilmiş yük uygulama yöntemleri içermelidir (Şekil 3.15) (Chen, Tang ve Yang, 2019).

3.6.1 Spar Keplerde Hasar Mekanizmaları

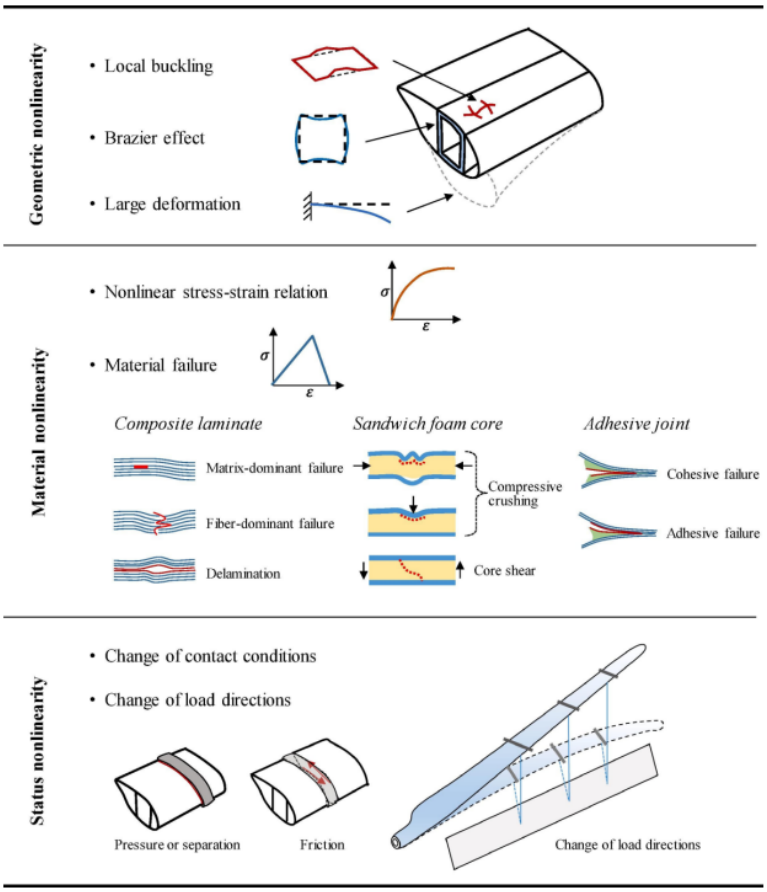
Bir rüzgar türbini kanadının hasarı tipik olarak elastik bölgede başlar ve kırılma mekaniği kullanılarak analiz edilebilen malzeme hasarına kadar ilerler. Hasarlar kararlı veya kararsız olabilir ve kararsız hasar mekanizmaları için ekstra güvenlik katsayısı düşünülmelidir. İki özel hasar modu aşağıda ifade edilmiştir.

3.6.1.1 Spar Keplerde Rüzgar Yüklerinden Kaynaklanan Hasar

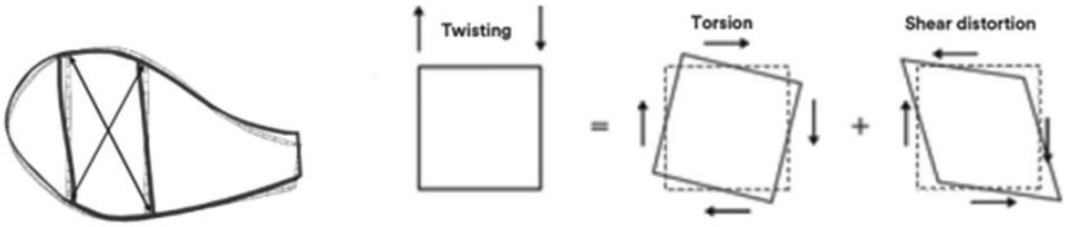
Rüzgar yüklerinden dolayı spar keplerin düzlem dışı deformasyonu (düzleşmesi) spar kep hasarına neden olabilir. Bu göçme, nötr eksene en yakın tek yönlü tabakalarda enine çekme kırılması veya tabakalar arasında tabakalar arası kayma kırılması olarak ortaya çıkabilir. Kanadın, esas olarak uzunlamasına yönde hizalanmış liflerle tipik yerleşimi, spar kepi yanal yönde nispeten esnek hale getirir. Bu esneklik, enine gerilme hasarı riskini artırır. Ek olarak, laminat içindeki üretim kusurları, yorgunluk ve nihai mukavemetini daha da azaltır.

Sparlar ve spar kepler, kanatlardaki kirişler ve iç gövdeler olarak kanat yönündeki eğilme yüklerinin etkisini sınırlamak için kullanılırken, profilin kenarları kenar yönlü eğilme yüklerini taşır. Kanatlara etkiyen yükün %85-90'ını sparlar taşır, bu nedenle

rüzgâr türbini kanadında çok önemli ve vazgeçilmez bir parçadır. Geleneksel olarak kullanılan kare kutu kirişi, modifiye edilmiş spar (çapraz kutu kirişi) ile karşılaştırılır. Çapraz kutu sparının, kare şeklindeki spar göre biraz daha az sehime bozulmaya maruz kaldığı bulundu. Bu nedenle, çapraz spar kutu kanadı, rüzgar türbini kanadının biraz daha fazla yükünü kaldırabilir (Şekil 3.16).



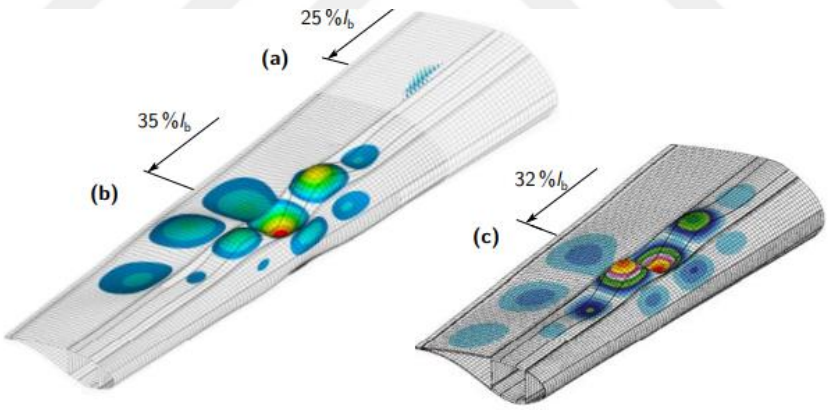
Şekil 3.15 Doğrusal olmama durumunda hasar mekanizmaları (Chen, Tang ve Yang, 2019)



Şekil 3.16 (a) Kesitte kayma bozulması (b)Burulma ve kayma kombinasyonu (Broṇdsted vd., 2023)

Burkulma, rüzgar türbini kanadı tasarımında önemli olan doğrusal olmayan bir kararsızlık olgusudur ve bu fenomen doğrusal olmayan geometrik sonlu elemanlar analizi veya doğrusal özdeğer burkulma analizi yoluyla ele alınabilir. Doğrusal burkulma analizi, uygulanan uygun bir azaltma faktörü ile tasarım yükü için bir kılavuz sağlar; lakin bu yaklaşım her zaman ihtiyatlı olmayabilir ve doğrusal olmayan yaklaşım önerilir. Burkulma, tam ölçekli testler sırasında "arka arkaya" boyuna gerinimler ölçülerek tespit edilebilir.

Burkulmaya dayalı delaminasyon, bası altındaki kompozit panellerde ilerleyen bir kırılma mekanizmasıdır. Katmanlar arasında zayıf bağlanma olan alanlar olan delaminasyonlar, yapının mukavemetini azaltabilir. Delaminasyonlar, yerel veya global burkulma modlarına neden olabilir ve yerel burkulma durumunda, delaminasyonun büyümesini sağlayabilir ve panel hasarına yol açabilir. Bu yüzden doğrusal olmayan sonlu elemanlar modelleri, özellikle burkulma gibi göçme mekanizmalarında bu etkileri hesaba katmak için önerilir (Şekil 3.17).

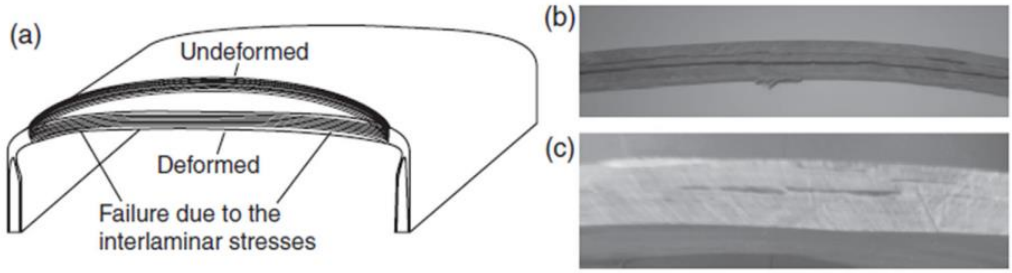


Şekil 3.17 Delaminasyon kaynaklı spar keplerde yerel veya global burkulma (Rosemeier, Buriticá ve Antonioui, 2018)

3.6.1.2 Enine Kesit Kayma Kaynaklı Hasar

Enine kesit kayma kaynaklı hasar, önemli bir hasar mekanizmasıdır ve kanatların boyutu ve ağırlığı arttıkça, özellikle kanat daha esnek hale geldiğinde ortaya çıkan yükün açısı daha kritik hale gelir. Bu durum kayma bozulması riskini artırabilir. Rüzgâr türbini kanatlarında çökmenin ana nedeni olarak spar ağı hasarı gözlemlenmiştir. Spar

ağ yapısının sandviç bölümündeki dış kabuk bağının çözülmesi kanat yapısının nihai olarak çökmesine yol açabilir. Burulma yükleri, rüzgar türbini kanatlarını önemli ölçüde etkiler ve uzunlamasına eksenleri etrafında dönmelerine neden olur. Burulma yükünün, kök ve geçiş bölgesindeki lokalize deformasyonlar, gerilmeler ve gerinmeler üzerinde büyük bir etkisi vardır. İnce cidarlı ve simetrik olmayan kesitler yüklendiğinde meydana gelen kesit kayma distorsiyonu burulma rijitlik analizinde dikkate alınmalıdır (Şekil 3.18).

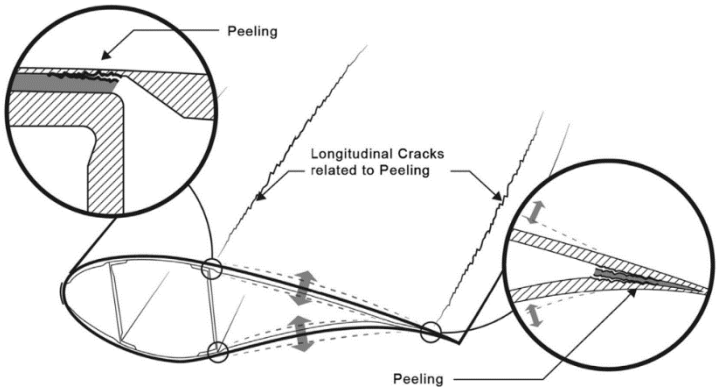


Şekil 3.18 Yük taşıyan spar kep laminatının tabakalar arası kayma kopması: (a) spar kep deformasyonunun ve katmanlar arasındaki hasarın taslağı, (b) katmanlara ayrılan bir spar kepin fotoğrafı ve (c) imalat kusurlu bir spar kepin fotoğrafı (Broṇdsted vd., 2023)

3.6.1.3 Yorulma Hasarı

Diğer bir hasar türü ise kök geçiş alanındaki yorulma sorunudur, burada büyük kenar kuvvetleri, düzlem dışı deformasyonlara ve yapışkan bağ hatlarında soyulmaya neden olur. Kökteki eğilme momentleri kanat uzunluğu ile arttığında, bu durum özellikle gelecekteki rüzgar türbini kanatları için kritik bir hasar modu haline gelir. Arka kenar panellerinin düzlem dışı deformasyonları, yorulma hasarına yol açabilen soyulma gerilmelerine neden olduğundan, yapışkan bağlantı hatlarındaki hasar da önemlidir. Soyulma gerilmelerindeki yapışkan bağ çizgilerinin mukavemeti, diğer yükleme modlarına göre daha düşüktür (Şekil 3.19).

Genel olarak, yapısal bütünlüğü ve güvenilirliği sağlamak için rüzgar türbini kanadı tasarımında enine kesit kayma hasarı, kök geçiş alanındaki yorulma, yapışkan bağlantı hatlarındaki hasar ve burkulma kaynaklı delaminasyon dâhil olmak üzere bu hasar mekanizmaları dikkatlice değerlendirilmelidir.

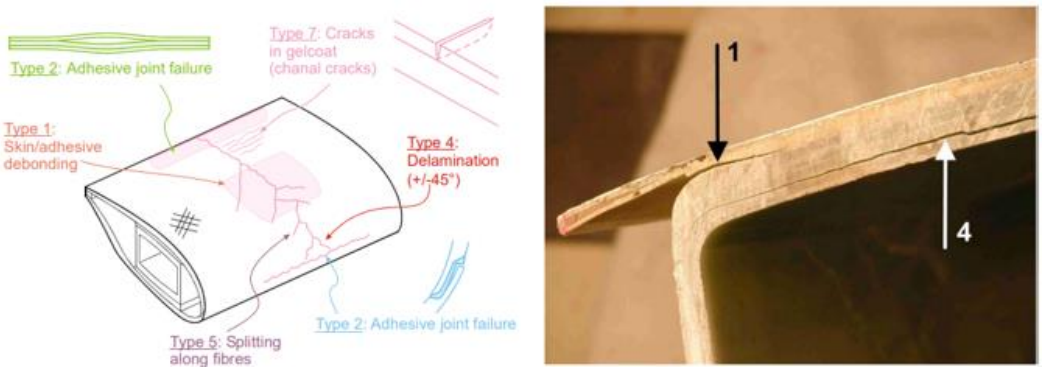


Şekil 3.19 Arka kenar panellerinin düzlem dışı deformasyonlarının soyulma gerilmeleri (Broṇdsted vd., 2023)

Belirli bir kanadın hasarlanmasıyla ilgili süreçler, kanadın yük taşıyan yapısal elemanlarında (kabuklar ve spar kepleri) çeşitli hasar türlerini içerebilir. Bu çalışmada tespit edilen hasar türleri şu şekilde sınıflandırılmıştır:

Tip 1: Kabuk ve ana spar kepleri birleştiren yapışkan tabakada hasar oluşumu ve büyüme: kabuk/yapışkan ayrılması ve/veya ana spar/yapışkan tabakası ayrılması;

Tip 4: Çekme veya basma yükü altında, kabuk ve/veya ana spar keplerindeki laminatlarda iç hasar oluşumu ve büyüme: çeki veya burkulma yükünün neden olduğu delaminasyon (Şekil 3.20);



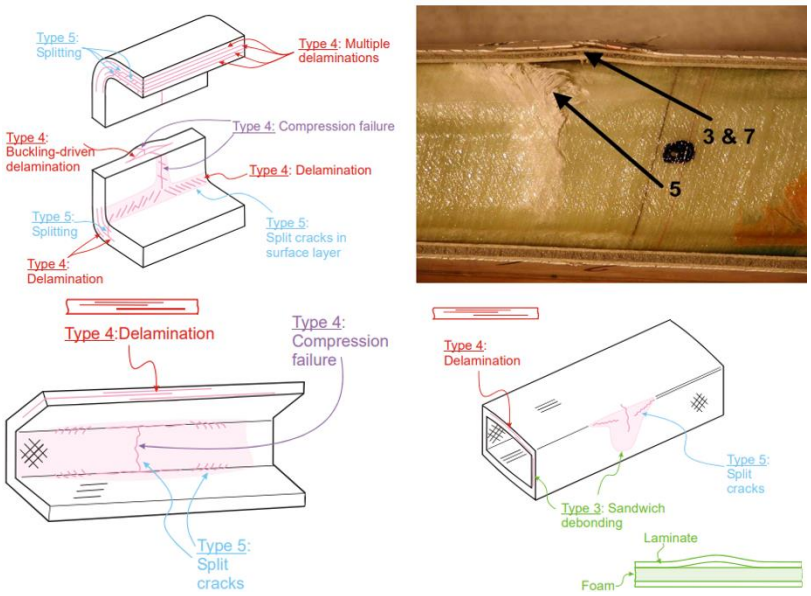
Şekil 3.20 Spar keplerde Tip1, Tip4 ve Tip5 (Shohag vd., 2017)

Tip 3: Kabuklardaki ve ana spar ağındaki sandviç panellerde yüzey ile çekirdek arasındaki arayüzde hasar oluşumu ve büyüme: sandviç panel yüzeyi/çekirdek ayrılması;

Tip 5: Kabuk ve ana spardaki laminatlarda ayrı fiberlerin ayrılması ve kırılması: çekide fiber kopması; basıda laminat kopması;

Tip 6: Bası yükü altında kabuk ile ana spar arasındaki bağda hasar oluşumu ve büyüme nedeniyle kabukta burkulma: burkulmanın neden olduğu kabuk/yapıştırıcı ayrılması, spesifik bir tip 1 durum (Şekil 3.21);

Önemli bir hasar modu, yapısal burkulmaya bağlı olarak yük taşıyan fiber kompozitin bası altında hasarlanmasıdır. Problem oldukça karmaşıktır ve geometrik doğrusal olmayan analiz gerektirir. Bu çalışmada problemi modellemek için Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılmıştır. Kompozitlerin bası kararlılığı, FEM simülasyonları herkesin bildiği gibi zordur ve yapılan çok sayıda araştırmaya rağmen gelecekte çözülmesi gereken birçok sorun vardır.



Şekil 3.21 Spar keplerde Tip 3, Tip 4 ve Tip 5 (Shohag vd., 2017)

Spar kepin yük-deplasman yolunun FEM simülasyonu, çatallanma noktasından sonra kararlı bir burkulma sonrası davranış göstermiştir. Delaminasyon, kusur, malzeme bozulması olmayan ve küçük bir eğriliğe sahip güçlü ortotropik panelin burkulma sonrası kararlı bir davranışa sahip olduğu sonucuna varılabilir. Delaminasyon olmaması durumunda, spar kepleri kusurlara karşı çok hassas olmayacaktır, ancak tabakalara ayrılmaların geliştiği durumlarda burkulma sonrası uzun süreli kararlı bir davranış olmayacak ve yük kapasitesi kusurlara karşı hassas olacaktır.

FEM araçları, kompozitlerin bası altında nasıl davrandığının anlaşılmasını geliştirmek için oldukça yararlıdır ve parametre analizleri ile desteklenebilir. Parametre analizi ile geometri, fiber yerleşimleri, malzeme parametreleri vb. değiştirildiğinde burkulma davranışı daha iyi incelenebilir. Spar kepin FEM modelinin olası iyileştirmeleri şunlardır:

- Geometri, yerleşim, kat düşüşleri vb. ayrıntıları iyileştirilmelidir.
- Malzeme bozulmaları dahil edilmelidir, böylece yerleştirmedeki direngenlik azalması dikkate alınır.
- İkinci dereceden kayma etkileri düzlem dışı kayma esnekliğini iyileştirebilir.
- Hasar gelişimi (örn. katmanlara ayrılma) dahil edilmelidir.

3.6.2 Hashin ve Puck Hasar Kriteri

Hashin hasar kriterleri, çekme ve sıkıştırma modlarına daha da bölünebilen fiber ağırlıklı ve matris ağırlıklı kırılma arasında ayrım yapar. Ayrıca Hashin hasar kriterleri, gerilme altında matrisin hakim olduğu hasar durumunda, kırılmanın fiberlere paralel olan kırılma düzlemine etki eden normal ve teğetsel gerilmelerden kaynaklandığını varsayar. Kompozit tabakanın x-y düzleminde izotropik olduğu dikkate alındığında Hashin hasar kriterleri şu şekilde ifade edilebilir:

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_T}\right)^2 = 1 \qquad (3.1)$$

Hashin kriterleri, kırılma düzleminin gerçek yönelimini belirleyemediğinden gerilme değişmezleri arasında ikinci dereceden bir etkileşimi varsaydığından, bası gerilmesi varlığında kayma mukavemetindeki artışı yakalayamaz. Hashin kriteri hasar düzleminin eğimini belirlemeye çalışmaz. Puck kriteri, Hashin kriterinin kaldığı yerden devam ederek elde edilen formülasyondaki malzeme sabitlerini belirlemek için ayrıntılı bir yöntem içerir. Fiber ve fiberler arası ilişkili hasarlar, kırılma düzlemi konseptine dayanan Puck kriteri ile ayrı ayrı ele alınır. Bu yöntem son kırılmanın meydana geldiği düzlem anlamına gelen kırılma düzlemine, etki eden makroskobik gerilmeleri içeren Puck polinom kriteri içerir.

Kompozitlerin çekme ve bası dayanımlarına dayanan Puck kriterleri, gerilmenin hakim olduğu bölgedeki mevcut sayısal sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Puck hasar kriterleri çeki, bası ve düzlem içi kayma altındaki deneysel sonuçlarla tutarlıdır. Puck, hasarın bası altındaki kompozitler için bir kırılma düzlemine etki eden normal ve teğetsel gerilmelerden kaynaklandığını varsayar ki bu durum çeki gerilmelerine dik yön ile bir θ_f açısı oluşturur; burada θ_f, normal gerilme σ_2'nin ve kompozitlere etki eden kayma gerilmesi τ_{12} 'nin her bir kombinasyonu için açıkça belirlenebilir. Puck hasar kriterleri şu şekilde verilmektedir:

$$\sqrt[2]{\left(\left(\frac{1}{Y_T}+\frac{\cos(2\theta_C)}{2Y_C cos^4\theta_c}\right)\sigma_n(\theta_f)\right)^2+\left[\frac{\tau_t(\theta_f)}{Y_C cos^2\theta_c}\right]^2}-\frac{\cos(2\theta_C)}{2Y_C cos^4\theta_c}\sigma_n(\theta_f)=1 \qquad (3.2)$$

ile

$$\sigma_n(\theta_f)=\sigma_2 cos^2\theta_f+2\tau_{12}\sin\theta_f\cos\theta_f, \qquad (3.3)$$

$$\tau_t(\theta_f)=-\sigma_2\sin\theta_f\cos\theta_f+\tau_{12}(cos^2\theta_f-sin^2\theta_f)$$

Her iki kriteri kullanan tahminler, enine çekme mukavemetini Y_T, enine kayma mukavemetini S_T, enine bası mukavemetini Y_C ve karşılık gelen kırılma açısını θ_f sağlayan mekanik testlere dayanmaktadır.

Puck'ın kriteri, statik çöküşün nedeni olarak kabul edilecek etkin gerilmelerin kırılma düzleminde yer alan gerilmeler olduğu hipotezine dayanmaktadır. Puck'a göre σ_2 ve σ_6'nın pozitif değerleri, normali enine yönde (2. eksen) olan bir kırılma düzlemine yol açar. Bu nedenle efektif gerilmeler global gerilme bileşenleri σ_2 ve σ_6'dır. Kırılma düzleminin aynı kavramı ve tanımı da benimsenmiştir ve onlar için de eksen dışı bir lamina durumunda hesaba katılacak gerilme bileşenleri bir polinom kriterinde birleştirilmiş σ_2 ve σ_6'dır (Liu, 2021).

3.6.3. Kırılma Mekaniği

Kırılma mekaniği yaklaşımları, başlangıçtaki kusur veya çatlağın tanımına dayanır; ancak pratik durumda hasarın başladığı yer belli değildir. Bu nedenle, delaminasyonun başlangıcını tahmin etmek için gerilmeye dayalı yöntemler kullanılabilir ve kırılma mekaniği, doğru delaminasyon yayılım modellemesi sağlar.

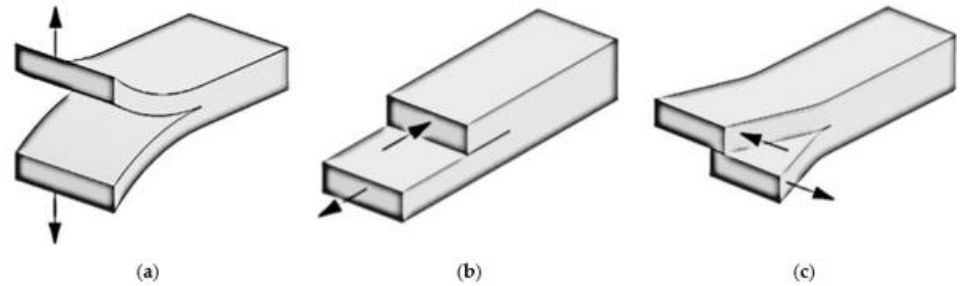
3.6.3.1. Karma Mod

Doğrusal Elastik Kırılma Mekaniği (LEFM) teorisi, çatlak analizi için en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Delaminasyon büyümesi, kırılma mekaniğinin enerji kriteri yaklaşımı uygulanarak incelenebilir.

Bu çalışmada, malzemenin yüzey enerjisini aşacak yeterli potansiyel enerjinin mevcut olması durumunda çatlağın büyüyebileceği varsayılmaktadır. G ile gösterilen enerji salınım hızı, çatlak itici kuvvetidir. G, G_c kritik değerini aştığında çatlak büyüyecektir. Bu kritik değer kırılma tokluğudur ve malzemeye ait bir özelliktir. Her moda karşılık gelen enerji salınım oranları (ERR) sırasıyla G_I, G_{II} ve G_{III}'tür ve her kırılma moduna ait kırılma tokluğu değerleri şu şekildedir: G_{IC}, G_{IIC} ve G_{IIIC}.

Süreksizliklerde meydana gelen kayma ve çeki gerilmesi gradyanları nedeniyle tabakalar arası gerinim enerjisi salınımı, kırılma tokluğu adı verilen kritik eşiği aştığında, delaminasyon başlayacaktır (Şekil 3.22) (Boyano vd., 2017).

- Mod I veya çatlak yüzlerinin tabakalar arası gerilme nedeniyle doğrudan birbirinden ayrıldığı açılma modu
- Mod II veya kayma modu; burada çatlak yüzeyleri tabakalar arası kayma nedeniyle çatlak ucuna dik olarak birbirleri üzerinde kayar.
- Mod III veya tabakalar arası kayma nedeniyle çatlağın ucuna paralel olarak birbiri üzerinde kayma



Şekil 3.22 Kırılma modları: (a) Mod-I (açılma); (b) Mod-II (kayma); (c) Mod-III (yırtılma) (Boyano vd., 2017)

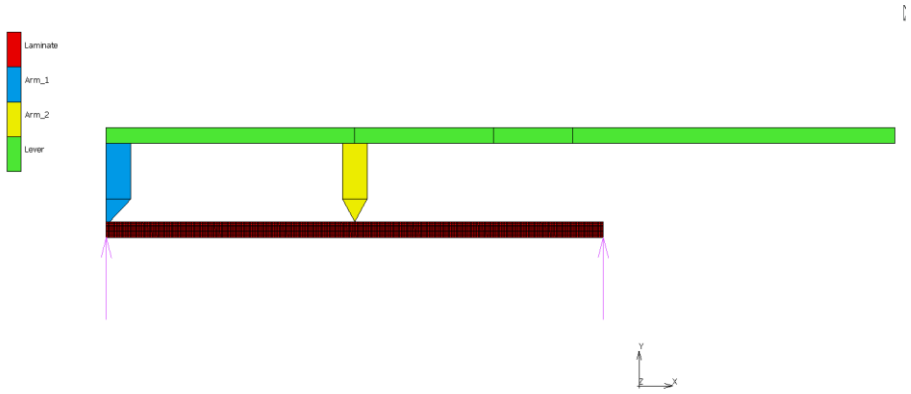
Delaminasyon testlerinde genellikle kiriş tipi numuneye yapay çatlakla çatlak büyüyene kadar yük uygulanır. Uygulanan kuvvet ve yer değiştirme test makinesinden elde edilir. Bunlar çatlak uzunluğunu belirlemek için girdi verileridir.

Karışık mod I/II, kompozit laminatlarda çok yaygın bir yükleme senaryosudur. Karışık Mod Delaminasyonun test prosedürü, bölünmüş tek yönlü bir laminat üzerinde bir çift konsol kirişinin (mod-I yükleme) ve bir uç çentik fikstürünün (mod-II yükleme) birleştirilmesini içerir (Şekil 33). Yapışkan bölge modeliyle karışık modlu delaminasyon hasarını simüle etmek için Turon modelinin kullanılması yaygınlaşmıştır.

Marc'ın üç standart kohezif bölge modeli vardı: doğrusal, üstel ve doğrusal üstel. Bu modellere ilişkin malzeme parametreleri saf mod-I ve saf mod-II yükleme koşullarındaki davranışı tanımlar. Karışık mod yükleme için etkili çekiş-deplasman davranışı, mod-I ve mod-II ilişkilerinden otomatik olarak türetilir (Şekil 3.23)

Kompozit malzemelerdeki tabakalaşmanın modellenmesi ve tahmini, doğrudan bir prosedür değildir; yani, tabakalaşmanın modellenmesi ve tahmin edilmesi için

kullanılabilecek teknikler ve prosedürler, ticari olarak temin edilebilen hesaplamalı veya sonlu eleman araçlarına yeterince uygulanmamıştır. Temel olarak iki hesaplama yöntemi mevcuttur; kohezif bölge modellemesi ve hesaplamalı kırılma mekaniğine dayalı çatlak kapatma yöntemi.



Şekil 3.23 Karma mod testi(Mod I/Mod II)

Turon modeli olarak adlandırılan yeni bir yapışkan bölge modeli, karma mod yükleme koşulları altında hasarın daha iyi modellenmesi için eklenmiştir. Malzeme parametreleri mevcut doğrusal modeldekilere benzer ancak karma mod davranışını kontrol etmek için ek bir parametre daha vardır. Bu parametre, Benzeggagh ve Kenane tarafından önerilen ve B-K Kriteri olarak adlandırılan karma mod kriterinin η üssüdür. Bu kriter, aşağıdakilere göre, mod-I ve mod- II'deki enerjilerin bir fonksiyonu olarak karışık modlu yapışma enerjisini ifade eder. Bu denklemde G_{Ic} ve G_{IIc} ise Mod-I ve Mod-II'deki kohezyon enerjilerini, G_I ve G_{II} ise Mod-I ve Mod-II'deki mevcut enerji salınım oranlarını, η ise hesaplanabilen B-K etkileşim parametresini göstermektedir. Deneylerden elde edilen birleşik enerji verilerinin en küçük kareler uyumunu kullanarak bu parametrenin iki farklı değeri için, G_{Ic} = 1 ve G_{IIc} = 2 için, G_{II} ve (G_I + G_{II}) oranının bir fonksiyonu olarak karma modlu yapışma enerjisini göstermektedir.

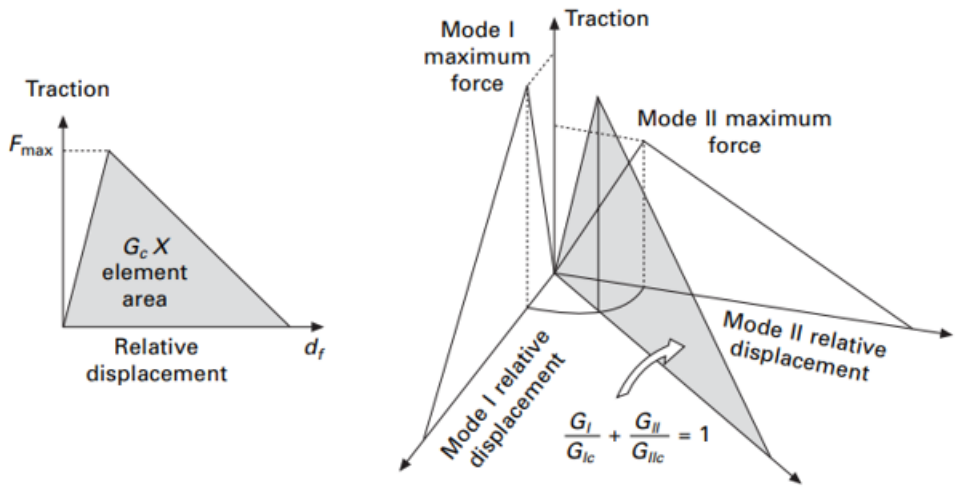
3.6.3.2. Delaminasyon

Kompozit yapıların mukavemeti, tabakaların birbirine güçlü bir şekilde bağlanmasına bağlıdır ve tabakalar arası gerilmeler nedeniyle delaminasyonlar meydana gelebilir. Delaminasyon, bitişik katmanlar arasında oluşan bir katman ayrılmasıdır.

Delaminasyonun en yaygın nedeni, malzeme özelliklerindeki farklılıklardır. Örneğin, farklı malzemelerden yapılmış katmanlar veya aynı malzemeden yapılmış ancak farklı yönlere yönlendirilmiş katmanlar arasında delaminasyonlar meydana gelebilir. Yapısal süreksizlikler de delaminasyona neden olabilir çünkü katmanların birleştiği yerlerde veya tabakaların kalınlığının değiştiği yerlerde delaminasyonlar meydana gelebilir. Gerilmenin olmadığı kenarlarda, kalınlıkların azaltılması gereken kat düşüşlerinde (hem iç hem de dış) ve kavisli yapıların eğilmesi gibi düzlem dışı eğilmeye maruz kalan bölgelerde delaminasyonlar meydana gelir. Pratikte delaminasyon, katlar arasındaki reçine açısından zengin bölgede meydana gelir. Eleman kurucu modelinin elastik bölgesinin başlangıç direngenliğini ayarlamak için kullanılabilir. Anizotropik bir malzemeye uygulanıyor olmasına rağmen, varsayım, kırılmanın yönlendirilmiş kompozit katlar arasındaki saf reçine bölgesinde meydana geldiği yönündedir.

Delaminasyonlar, gerilme alanları ve gerinim enerjisi salınım hızı analizleri gibi yöntemler kullanılarak incelenebilir. Bu analizler, delaminasyonun nerede ve ne zaman meydana geleceğini tahmin etmek için kullanılabilir çünkü delaminasyonlar, kompozit yapıların performansını önemli ölçüde azaltabilir. Delaminasyon meydana gelebilecek bölgelerin belirlenmesi ve delaminasyona karşı önlemler alınması önemlidir.

Uygulanan bir yük altındaki bağıl düğüm yer değiştirmeleri, normal ve kayma bileşenlerine ayrılabilir. Normal bileşen, mod I tipi bir çatlak açılmasını temsil eder. Kayma bileşeni, mod II ve III'ün bir kombinasyonunu temsil eder. Bu, çatlak cephesinin yönü bilgisi olmadan ayırt edilemez. Basitlik açısından bu kayma moduna mod II olarak değinilecektir. Ara yüz elemanının kurucu ilişkisi, genellikle gerilmeye dayalı bir hasar kriterine (başlatma) kadar elastik olan bir çekme-yer değiştirme yasasına dayanır. Daha sonra, tam hasarda (hasar ilerlemesi) kritik kırılma enerjisine (G_C) eşit eğri altında bir alanı tanımlayan bir yumuşama davranışına uğrar (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 Çekiş-yerdeğiştirme grafikleri(Mod I/Mod II) (Boyano vd., 2017)

3.6.4 Yapışkan Bölgelerin Modellenmesi

Kanatlarda yapışkan bağlantıların çatlamasına ve/veya ayrılmasına neden olabilen, kanat yapısının çökmesine yol açabilen değişken çevresel koşullar içinde statik ve döngüsel yorulma yüklerine maruz kalır ve öngörülme ve onarım bu hususta çok kritiktir. Kompozit onarımla birleştirilmiş bağlantılardaki geometrik şekillerin ve malzeme davranışının artan karmaşıklığı, kapsamlı bir yönetici denkleminin türetilmesi için zorluklar yaratır. Dahası, nem ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerin dahil edilmesi, matematiksel formülasyonları daha da karmaşık hale getirir. Bu sorunları çözmek için deneyler yapmak genellikle zaman alıcı ve pahalıdır. Analitik yöntemlerle bu sınırlamalarının üstesinden gelebilmek için araştırmacılar, analitik araçlarla birlikte sonlu elemanlar analizini başarıyla kullanırlar. Onarım ve bağlama performansını optimize etmek için çeşitli geometrik ve malzeme parametrelerini içeren kapsamlı çalışmalar gerçekleştirdiler.

Kompozit esaslı bağlantıların sonlu elemanlar analizinde, uygun hasar kriterinin seçilmesi çok önemlidir. Doğrusal elastik analizde, hasar kriteri, elastik yapışkan davranışı esas alarak tipik olarak soyulma gerilmesine ve kayma gerilmesine dayanır. Yapışma davranışı doğrusal olmayan hale geldiğinde, birleştirme mukavemetini değerlendirmek için yapıştırıcı tabakalarda oluşan maksimum kayma gerilmesi kullanılır. Bununla birlikte, gerilme veya gerinim kriterlerinin kullanılmasındaki zorluklardan biri, çatlak ucunda (geometrik tekillik) ve her bir katın ve yapıştırıcının

kesişme noktasında (direngenlik uyumsuzluğu) sonlu elemanlar ağından kaynaklanan tekilliklerin varlığıdır. Son zamanlarda, yapışkan bölge modeli (CZM), nemli ortamlarda yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların dayanıklılığını tahmin etmek için çok yönlü bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Nem konsantrasyonu kohezyon özelliklerini önemli ölçüde etkiler, bu nedenle kohezif bölge yaklaşımı kullanılarak doymuş veya doymamış yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılardaki hasar davranışını doğru bir şekilde tahmin etmek için neme bağlı kohezyon özelliklerini dahil etmek önemlidir.

Özellikle zorlu ortamlarda ve mekanik yüklemenin bileşik etkileri altında yapışkan bağlantıların kullanım ömrünü ve uzun vadeli performansını doğru bir şekilde modellemek zordur. Bu parametre, birleştirilmiş onarımın performansını olumlu yönde etkilediğinden üretim sürecinin, kohezif bölge modelindeki birleştirilmiş onarımın sahip olduğu gerilmeye etkilerini dikkate almak da önemlidir. Zorlu ortamlarda yapışkan bağlantıların dayanıklılığı, araştırmacılar için önemli bir sorun olmaya devam etmektedir; ancak bu soruna rağmen simülasyonda moda bağlı CZM parametreleri kullanılarak kompozit delaminasyon mukavemeti üzerinden ele alınması daha başarılı sonuçlar elde etmeyi sağlayabilir.

İlk hasardan sonra, hasar bölgenin daha fazla büyümesini modellemek için iki yöntem kullanılacaktır.

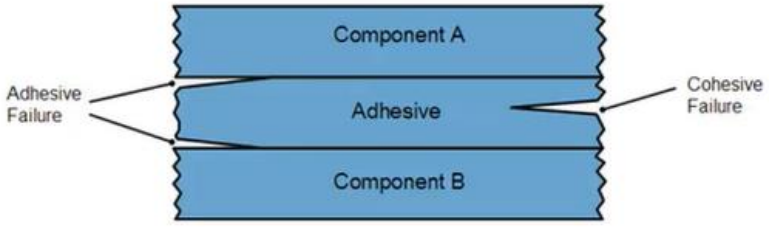
3.6.4.1 Yapışkan (Kohezif) Bölge Modeli

Yapışkan bölge modeli, arayüzde başarılı bir bağlantı modellemek için kullanılır. Bu modelde, arayüz direngenliği sonsuz derecede yüksektir. Bununla birlikte, sonlu eleman formülasyonu için, arayüz elemanına sonlu bir direngenlik değeri getirilmelidir. Yapışkan bölge modelleme (CZM) elemanları, yapışkan bölgeyi simüle etmek için kullanılır ve bunlar genellikle beklenen çatlak yolu boyunca sonlu elemanlar ağına yerleştirilir. CZM, doğrusal elastik kırılma mekaniği (LEFM) gibi diğer kırılma modelleme tekniklerine göre bir takım avantajlara sahiptir. CZM çatlak ucu yakınındaki malzemelerin doğrusal olmayan davranışını açıklayabilir ve çatlak başlangıcını ve

yayılmasını simüle edebilir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş yapılardaki delaminasyon gibi arayüz kırılmasını modelleyebilir. CZM, çeşitli kırılma problemlerini (metallerde, seramiklerde ve kompozitlerde çatlak başlangıcı ve yayılması, yapıştırıcıyla birleştirilmiş yapılarda delaminasyon ile yorulma çatlağı büyümesi vb.) simüle etmek için kullanılabilir.

Yapışkan elemanlar, nominal gerilme ve gerinim miktarlarını kullanarak çekiş-ayırma yasasını uygular ve yapışkan elemanın gerçek kalınlığına bakılmaksızın, gerilme ve gerinim değerlerinin yapışkan elemanın birim alanı başına hesaplanır. Bir başka deyişle, nominal gerilme, yapışkan elemana etki eden kuvvetin, yapışkan elemanın orijinal alanına bölünmesiyle hesaplanır ve yapışkan eleman üzerindeki ortalama gerilmenin bir ölçüsüdür.

Yapışkan elemana birim kalınlık belirtilirse, nominal gerinim ayırma değerine karşılık gelir ki ayırma değerinin, yapışkan elemanın iki yüzeyi arasındaki bağıl yer değiştirme olarak tanımlanması sebebiyle gerçekleşir. Yapışkan elemana birim olmayan bir kalınlık belirtilir ise, doğru direngenliği elde etmek için verileri ölçeklendirmek gerekir**.** Kohezyonlu bir elemanın direngenliği Young modülünün ve elemanın kalınlığının çarpımı olarak hesaplanır. Kohezyonlu bölge içindeki başlatma kriterini aşan malzeme veya elemanlar, bir çekiş-yer değiştirme ilişkisi tarafından yönetilir. Bu ilişki, elemanın veya malzemenin kopma sürecini tanımlar (Şekil 3.25). Yayılma kriterini karşılamak için, çekme sıfıra düştüğünde eğrinin altındaki alan, kritik kırılma enerjisine eşit olmalıdır. Bu durumda elemanın veya malzemenin tamamen hasarlı olduğu kabul edilir. Konsept olarak, gerilmeye dayalı başlatma ve ardından enerjiye dayalı yayılma ilkesini izler.



Şekil 3.25 Kohezif hasar durumu (Rastogi, 2016)

Kapalı form çözümlerinden elde edilen tahminlere dayanarak, belirli bir ağ boyutu için, arayüz elemanının maksimum gerilmesi, yapışkan bölgede yeterli elemanın bulunmasını sağlamak için uygun şekilde azaltılır. Kohezyon bölgesi uzunluğu tahminleri, malzeme özelliklerine (E, G_C, σ_{max}) ve narin numunelerde çatlağı çevreleyen malzemenin derinliğine bağlıdır. Kırılmanın hakim olduğu problemlerde, arayüz elemanları içindeki analizlerden elde edilen sonuçlar, gerilmeye dayalı başlatma kriterine çok az bağımlılık göstermektedir.

3.6.4.2 VCCT Yaklaşımı

Doğrudan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, sanal çatlak kapatma tekniği (VCCT) ile delaminasyon gibi kırılma problemlerini simüle etmek mümkündür. Bu yöntem, çatlağın yayılmasını, yerel çatlak ucu gerinim enerjisi salınım hızının kritik bir değeri aştığında kontrol eder.

Bu yaklaşımın bir sınırlaması, başlangıçta bir kusurun bulunması gerektiğidir. Bu kusur, bir çatlak başlatıcı özelliği kullanılarak oluşturulabilir. Çatlağın konumunu tanımlamak için bir dizi eleman yüzü kullanılır. Çatlak daha sonra VCCT tabanlı çatlak yayılımı kullanılarak büyüyecektir. VCCT'de, çatlak büyümesi nedeniyle yeni oluşturulan yüzler serbest yüzeyler olarak kabul edilir. Bu, çatlak yüzleri arasındaki arayüzün çatlak başlangıcından sonra tamamen kaybolduğu kırılgan malzemelerin modellenmesi için bu yaklaşımı özellikle uygun hale getirir.

VCCT yöntemi, çatlak büyümesini modellemek için popüler bir yöntemdir; fakat bazı önemli sınırlamaları vardır. Bu sınırlamalar, VCCT yönteminin geçerliliğini ve güvenilirliğini sınırlayabilir. Sınırlamalardan biri, tekil çatlak ucu gerilme alanının salınımlı doğasıdır. Bu durum sayısal çözümün kararlılığını etkileyebilir ve VCCT yaklaşımının daha karmaşık ve daha hesaplama yoğun hale gelmesine neden olur.

BÖLÜM DÖRT

MALZEME

RÜZGEM 5-m kanadının sonlu elemanlar modelindeki dizilimi yapılırken, kompozit laminatların tasarımı ve kök ile arka kenar/spar ağ panellerindeki kanat yapısı için 4 farklı malzeme dikkate alınmıştır. Daha spesifik olarak, sandviç yapıların çekirdek malzemesi olarak 2 cam kumaş (Triax ve UD), çelik ve polimerik köpük (Divinycell H45) kullanılmıştır (Tablo 4.1).

Kanadın yapısal analizi, ilgili gerilme analizi araçlarıyla birlikte kat bazında gerçekleştirildi. Bu, üç eksenli katmanın hem FE hem de kesit modellerinde +45, -45 ve 0 derecelik üç farklı katman olarak modellendiği anlamına gelir. Bu katmanlar, ölçülen UD malzemesiyle aynı özelliklere sahiptir ancak kalınlıkları farklıdır; h_{0UD}=0,716 mm, h_{0TRI}=0,483 mm, h_{+45TRI}=0,238 mm, h_{-45TRI}=0,238 mm (Şekil 4.1).

Tablo 4.1 Malzeme özellikleri ve mukavemet değerleri

	Yoğunluk (kg/m^3)	Modül (GPa)	Mukavemet (MPa)	Poisson Oranı
Lamina (Triax)	1896	E_1= 24,84 E_2= 9,14 G_{12}=2,83	S_{XT} = 191,73 S_{XC} = 101,16 S_{YT} = 16,86 S_{YC} = 50,41 S_{SH} = 11,29	0,29
Çelik	7850	E= 210	S=581,80	0,30
Jel Kaplama	1200	E= 3,98	S=35,29	0,34
CSM 300 (UD)	1896	E= 9,14	S=16,86	0,29
Divinycell H45 (Köpük)	48	E_1= 55E-03 E_2= 55E-03 G_{12}= 15E-03	S_T =1,40 S_C =0,60 S_{SH} =0,56	0,40
Yapıştırıcı	1400	E= 3.00 G_{12}= 1,59	S= 7,8	0,30

Kanat, tamamen cam takviyelerden yapılmıştır. Kanadın dış yüzeyi şeffaf Jel Kaplama ve 300 g/m^2 CSM 300'lük elyaf tabakasıyla kaplıdır. Arka kenarda kullanılan Divinycell H45 köpük 0,7m'den 2m'ye kadar olan alanda 10mm, 2m'den 3m'ye kadar olan alanda ise 5mm kalınlığındadır. Emme ve basınç taraflarındaki Triax kumaşlar ±45 kat kalıplara temas edecek şekilde serilir. Benzer şekilde, iç kanat yapısının Triaks katmanları kalıpla temas halinde olan ±45 katmana sahiptir (Philippidis ve Roukis, 2013). Muyan ve arkadaşları kullandıkları arayüz mukavemet ve kırılma tokluğu değerleri, 2.5 olan emniyet katsayısı dahil edilerek bu tabloyu oluşturmuşlardır. Kohezif direngenlik değerlerinin tabiatıyla simülasyon sonuçlarına etkisi olmaması ve simülasyonun yakınsaması için görece yüksek değerler belirlenmektedir; bu vesileyle referansta verilen değerler değiştirilmeden analizde kullanılmıştır (Tablo 4.2)

Tablo 4.2 Kohezif bölge arayüz özellikleri (Batmaz, Muyan ve Çöker, 2021)

	Arayüz Mukavemeti(MPa)	Kırılma Tokluğu(N/m)	Kohezif Direngenliği(N/m^3)	B-K Kriteri
Batmaz, Muyan, Çöker	t_n = 1,2 t_{sh} = 2,4	G_{IC}= 40 G_{IIC}= 200 G_{IIIC}= 200	K_{nn} = 3E14 K_{ss} = 1.15E14 K_{tt} = 1.15E14	η= 3,8

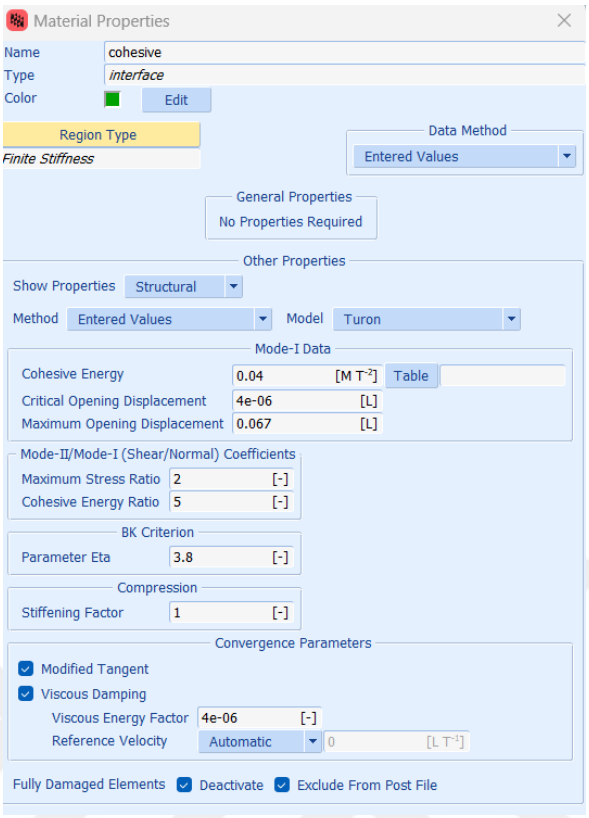
Mod-I kritik açılma yer değiştirmesi v_{nc}, model için mod-I penaltı direngenliği K = 10^6 N/mm^3 varsayılarak hesaplanabilir: $v_{nc} = \tau_{nc}/K = 4 \times 10^{-6}$ mm.

Mod-I maksimum açılma yer değiştirmesi v_{nm}, çekme ve açılma yer değiştirmesi için çift doğrusal bir ilişki varsayılarak hesaplanabilir: $v_{nm} = (2G_{Ic})/(\tau_{nc})$=0.067mm.

Maksimum gerilme oranı β_1 (Kayma/Normal) ve kohezif enerji oranı β_2 (Kayma/Normal) şu şekilde hesaplanır: $\beta_1 = \tau_{tc}/\tau_{nc} = 2$ ve $\beta_2 = G_{IIc}/G_{Ic} = 5$

Arayüzde Turon Modeli için hesaplanan değerler (Şekil 4.1):

- G_c= 0,04 kJ/m^2
- v_{nm} = 0,067 mm
- $v_{nc} = 4 \times 10^{-6}$ mm
- Parametre Eta (η) = 3,8

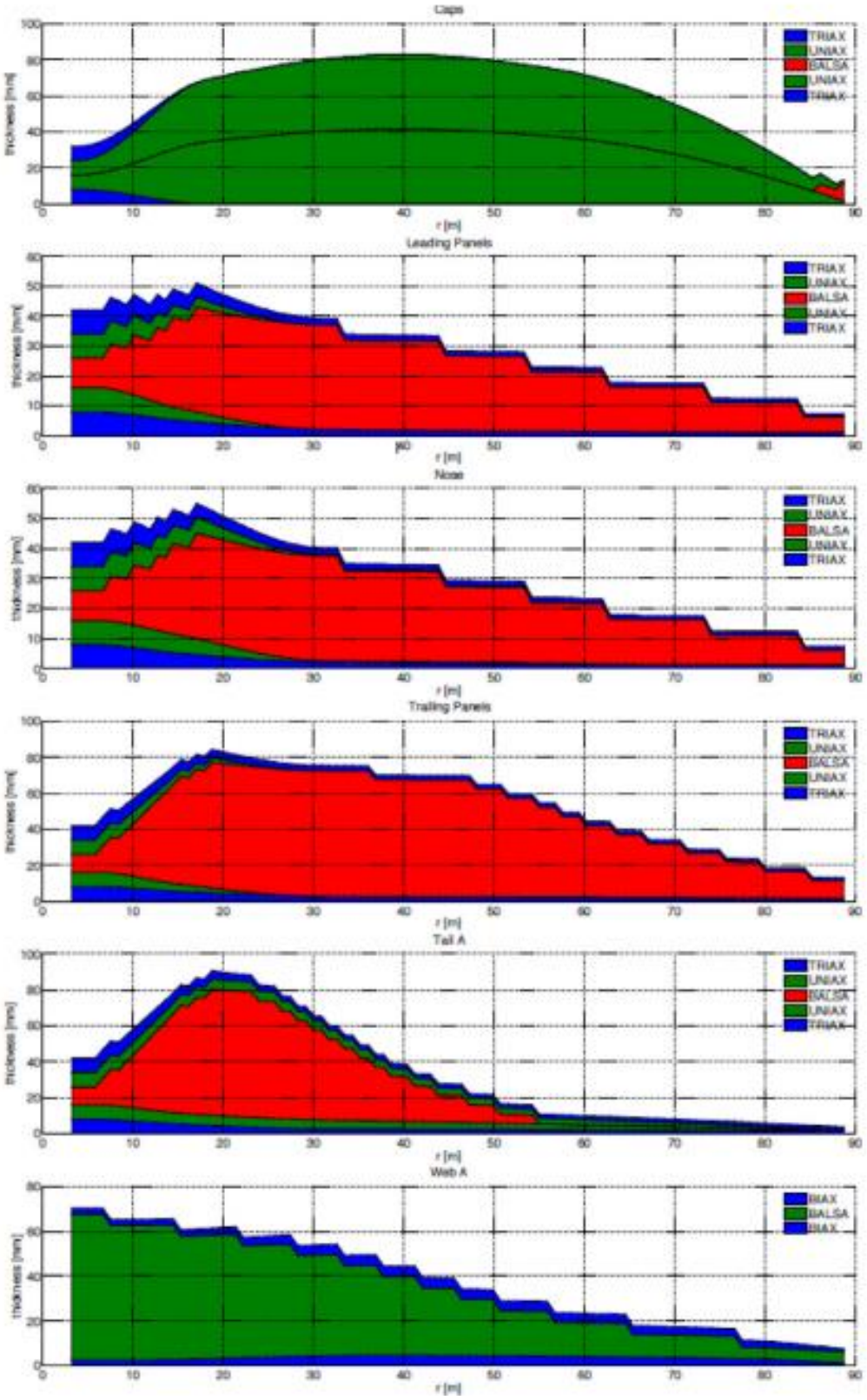


Şekil 4.1 RÜZGEM Turon Modeli

İkinci çalışmamızdaki kanat kesiti için gerekli malzeme ve dizilimleri tablo ve grafiklerden alınmıştır. Kanadın dış yüzeyi, sonlu eleman düğümlerini içeren referans yüzeyi olarak kullanıldı. Kanadın tüm düzeni ve malzeme özellikleri çevrimiçi olarak mevcuttur (Şekil 4.2-4.3) (Bak vd., 2013).

Engineering constants	*U/D glass*	*Triaxial glass*	*Triaxial glass HRC*	*Biaxial glass*	*Biaxial pre-preg*	*Polymer foam*	*Units*
E_{11}	41.26	20.26	16.70	12.75	11.58	0.0485	GPa
E_{22}	11.39	10.42	8.587	12.75	11.58	0.0485	GPa
ν_{12}	0.33	0.50	0.50	0.50	0.50	0.40	-
G_{12}	3.91	7.35	6.605	10.06	10.06	0.0391	GPa
$\epsilon_{tensile}$	0.021	0.023	0.023	0.017	0.011	-	-
$\epsilon_{compressive}$	0.016	0.012	0.016	0.015	0.014	-	-
ϵ_{shear}	0.0037	0.014	0.014	0.014	0.014	-	-
X^T	903.60	472.06	389.04	214.20	123.91	1.4	MPa
X^C	660.16	324.16	267.15	184.88	156.33	1.3	MPa
Y^T	42.14	127.12	104.76	184.88	156.33	1.4	MPa
Y^C	42.14	127.12	104.76	184.88	156.33	1.3	MPa
S^L	58.65	99.25	89.17	143.91	143.91	1.1	MPa
S^T	58.65	99.25	89.17	143.91	143.91	1.1	MPa
ρ	1931	1864	1683	1894	1890	80	kg/m^3

Şekil 4.2 Üretici tarafından belirtilen malzeme özellikleri (Haselbach, 2015)



Şekil 4.3 DTU 10MW kanat bölgelerinin kompozit yerleşimi: spar kep, hücum kenarı paneller, firar kenarı arka paneller, kuyruk A ve spar ağı A (Castro ve Branner, 2021)

BÖLÜM BEŞ

YÖNTEM

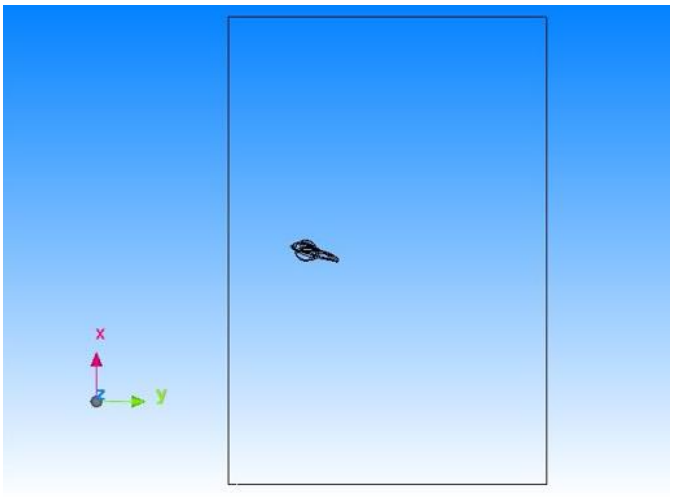
İki kanat çalışması üzerinden RUZGEM 5-m kanadı ve DTU 10 MW rüzgar türbini kanatlarını sırasıyla kullanarak çalışmaların yöntemleri incelenecektir.

İlk kanat çalışmamızda RUZGEM 5-m kanadı ilk olarak üzerinde oluşacak akıştan kaynaklı basınç dağılımı MSC Cradle üzerinden hesaplandı. MSC Apex/Nastran dört düğüm kabuk elemanı ile modellenmiştir ve malzeme modeli, modal analizlerle doğrulanmıştır. MSC Marc/Mentat tarafında doğrusal olmayan statik ve burkulma analizleri yapılmıştır.

5.1 RÜZGEM 5m Rüzgar Türbini Kanadının CFD Analizleri

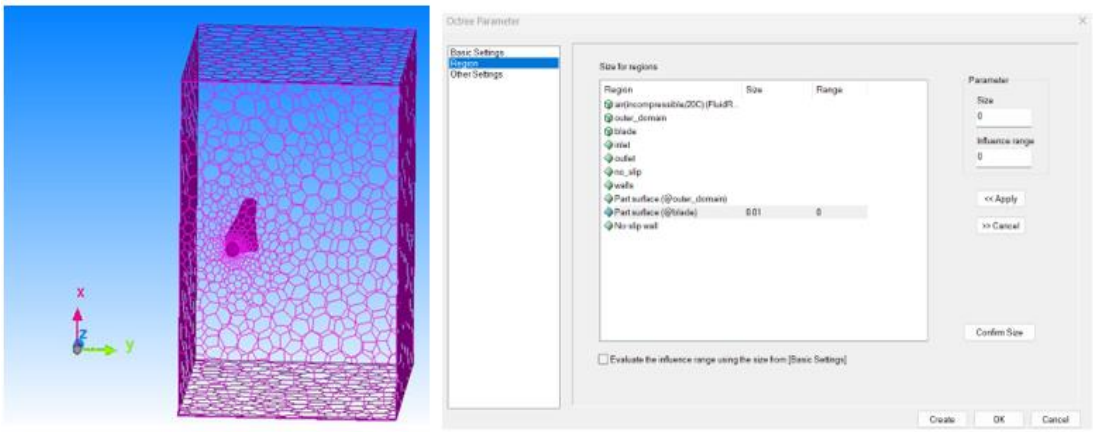
Rüzgar kanada çarptığı için hızlanır ve bu hızlanma, Bernoulli prensibine göre emme tarafındaki basıncın basınç tarafı kısmından daha düşük olmasına neden olur. Bu basınç farkı, kanadın hareketini sağlayan itici güç oluşturur çünkü Bernoulli ilkesi gereği kanadın üst yüzeyindeki basıncın alt yüzeydekine göre daha düşük olması nedeniyle meydana gelir.

Bu kanat üzerinde oluşan deformasyonu incelemek için 10 m/s hıza sahip rüzgar altında gerekli basınç dağılımı MSC Cradle'da CFD analizleri hesaplanmaktadır. İlk olarak, hesaplama hacmi oluşturulur ve oluşturulan hesaplama hacminde giriş, çıkış, duvar ve sınır koşulları belirlenir (Şekil 5.1). Hesaplamada rotor çapı D= 280 mm olarak belirlendi. Hesaplama hacmini oluştururken, inlet (giriş) uzunluğunu 3D ve outlet (çıkış) uzunluğunu 10D olarak ayarlandı (Şekil 40). Bu analizden elde edilen basınç değerleriyle statik analiz için gerekli girdiler belirlendi. Ayrıca, değerlerin bulunması için 1000 döngü üzerinden transient analiz yapıldı.



Şekil 5.1 3D (Inlet) ve 10D (outlet) mesafelerinin gösterimi

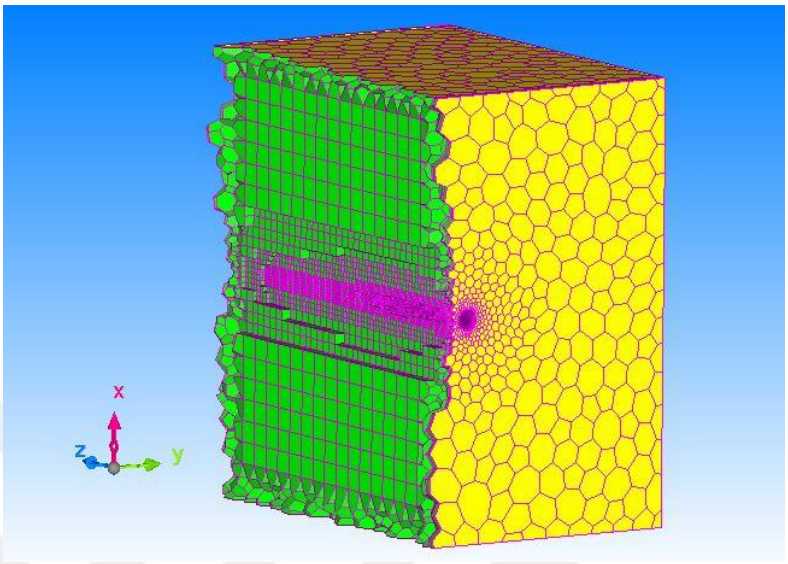
Başarılı bir mesh işlemi için Cradle CFD'de pre-mesh işlemi olan Octree ataması kanat yüzeyine 0.01 boyutunda ataması yapılmıştır. Inlet 10 m/s'lik hızımızın geldiği yer olup kanadın arka kısmı outlet kısmımız olarak rüzgar akışının domain terk ettiği yerdir. Kanat kökü "Kaymazlık şartı" olarak tanımlanırken diğer kalan 3 yüzey kısmı ise "Duvar" olarak değerlendirilmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Hesaplama hacmi bölgeleri

Kanadın kabuk kısmına çarpan hava sınır tabakası oluşturur ve burada yığılan akış çizgilerini veya daha doğrusu rüzgarın kanat geometrisine göre oluşan basınç dağılımını anlamak çok önemlidir. Bu kritik bölgelerdeki ağ eleman boyutları küçültülerek ağ yapısı iyileştirildi. Genel olarak geri kalan hesaplama hacmi kısmına kaba eleman olarak 0.3 boyutunda polyhedral mesh elemanları kullanılırken kritik bölgelere 0.01 boyutunda

polyhedral mesh elemanları kullanılmaktadır (Şekil 5.3). Bu analiz optimum hassasiyet ve süre ile gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.



Şekil 5.3 Hesaplama hacmi sonlu eleman modeli ve ağ hassasiyet çalışması

Ağ çalışmasındaki kanat yüzleri katman sayısı durumunu belirlemek için ağ ayarları y+ hesaplaması kullanılarak hesaplanır. Burada y+ çalışmaları ve gerekli literatür incelemeleri sonuçlarına göre y+ değerinin 1 olması gerektiği belirlendi. Daha sonra katman sayısını bulmak için aşağıdaki denklem kullanıldı.

(Kalınlık Değişimi)^x (ilk hücre yüksekliği)= Sınır Tabakası Kalınlığı

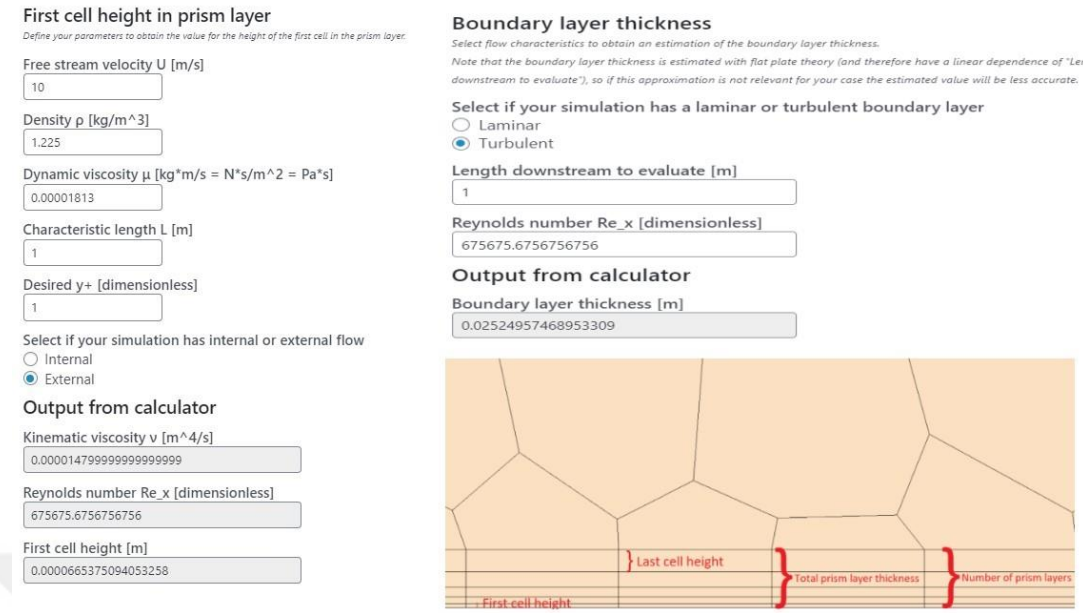
Yüzey pürüzlülüğü hassasiyeti $\frac{outer\ domain}{x-direction\ of\ blade\ dimension}$ x5 = $\frac{0.991}{0.151}$ =32.814

y+ hesaplaması için serbest akış hızı= 10 m/s olarak ilk hücrenin yüksekliği, y+=1 olarak kabul ederek işlemlere başlanır. Sınır Tabakası Kalınlığı=0.006135m ve Kalınlık değişkeni: 1.1 hesaplanır (Şekil 5.4). Karakteristik uzunluk L=1 m olarak kabul edersek;

(1,1)^x (0,00006758)= 0,006135; x=23.4; Katman sayısı: 25 kabul edildi.

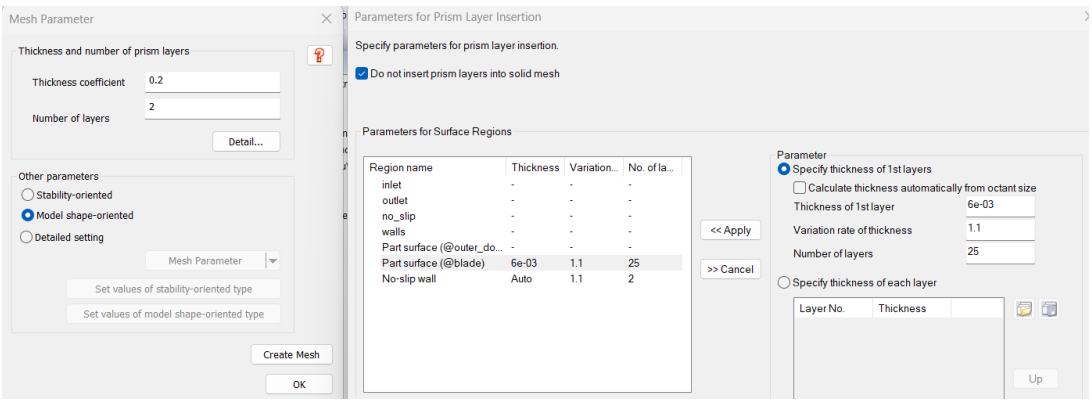
Türbülans seçildi: Sınır Tabakası Kalınlığı: 0,0253 m

İlk hücre: 0,00006758 m



Şekil 5.4 Dış akışta ilk hücre yüksekliğinin ve türbülansta kullanılması gereken sınır koşulu kalınlığının hesaplanması (Johansson, 2023)

Yapılan hesaplamaların sonuçları, ağ ayarlarına entegre edilmiştir. Şekil 5.5'te görüldüğü üzere kanat üzerine atılacak yukarıda hesaplanan katman sayısı değeri, 25 ve ilk layer kalınlığı, $6x10^{-3}$ değerleri kanat yüzeyine girdi olarak verilmiştir. Kanat yüzeyi dışında kalan yerlere ise kalınlık katsayısı 0,2 ve katman sayısı 2 olarak verilmiştir.



Şekil 5.5 Katman sayısı ve ilk katman kalınlığı girdileri

5.2 Modal Analiz

RÜZGEM 5-m kanadı kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modelindeki malzeme modelini MSC Apex'te titreşim analizi yoluyla doğruladık. Modal analiz, gerilme veya

deplasman çıktıları yerine frekans gibi net değerlerle yapının titreşim karakteristiğini ve doğasını anlamak için de kullanılır. Ek olarak herhangi bir analiz öncesi yapısal bütünlük veya gerekli tasarım değişiklikleri ile ilgili bilgi verir. Bunu da herhangi bir yüklemenin etkisini artıracak mod şekillerini ve frekanslarını belirleyerek bize yardımcı olur.

Sınırlandırma olmayan durumlarda kullanılan serbest titreşimli modal analiz ile kontrol yaparak öncelikle serbestlik derecesinin durumunu doğrularız; 10 mod içinde yapı sabitlenmediği için (serbest titreşim modu) 6 rijit modu elde edilir Daha sonraki modlar esneklik (elastiklik) modlarıdır ve yapının hangi yönde esneyeceği konusunda bilgi verir. Ayrıca elastik modlar; modelde istenmeyen bir modelleme hatası, istenmeyen iç sınırları veya bağlanamamış kısımları fark etmemizi sağlar. Direngenliğe de etki de parça için gerekli gözden kaçan sınırlandırmaları veya oluşmuş bağlantı hatalarını bulmamızı sağlar. Bu çalışmada serbest titreşimli modal analiz geçekleştirirken kanat için bazı kabullerde bulunuruz.

1.Kanadın kütle ve direngenlik matrislerini sabit kabul ederiz
2. Yük etkisi (kuvvet, basınç, sıfır olmayan yer değiştirme) yoktur.

Doğal frekanslara malzemenin kütlesi, direngenliği ve sınır koşulları etkiler. Direngenliğe de malzeme türü ve geometrik kalınlık değişimi etkiler. Modal analizde atalet kuvvetleri ve mukavemet kuvvetlerinin toplamının sıfır olduğu kabul edilir.

5.2.1 Yerdeğiştirme Ötelemesi

Düğümler, mod şekilleri olarak bilinen belirli modellerde hareket eder. Nodların öteleme hareketinin yönünü ve büyüklüğünü tanımlar. Esas değerlendirme noktası bu dağılım üzerinden olacaktır; çünkü

1. Titreşim sırasında yer değiştirmenin uzanımsal dağılımını verir ve yapının hareketini görselleştirir.

2. Yüksek yer değiştirme alanlarını, potansiyel gerilme yoğunluklarını ve yorulma ömrüne önemli etkili olacak bölgeleri belirlemeye yardımcı olur.
3. Yer değiştirmelerin kabul edilebilir sınırlar içinde kalıp kalmadığı ve yapının titreşim kuvvetlerinin zararlı etkileri dayanıp dayanmayacağını değerlendirir.

5.2.2 Eleman Gerinim Enerjisi

Her bir titreşim modu sırasında yapıda depolanan enerji miktarı, elastik gerinim enerjisi ile ölçülür. Genellikle önceki ve sonraki Eleman Gerinim Enerjisi Değişimleri karşılaştırılarak dinamik etki incelenir. Özellikle lokal modların gösterdiği elastik modlar incelenir ve enerji dağılımının iyileştiği ve kötüleştiği yerler bulunur.

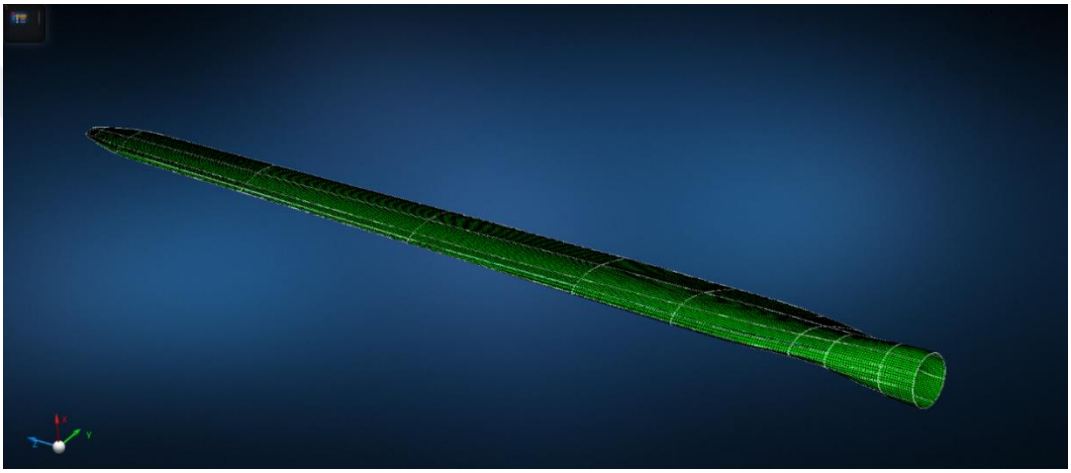
Gerinim enerjinin en yüksek olduğu konumlar mode direngenliği üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Bu noktalara ek direngenlik eklemek deformasyonun en büyük olduğu yönde mantıklı bir çözümdür. Maksimum kinetik enerji olan bölgeleri; direngenliği çok artırmadan yapılacak kütle değişimleriyle iyileştirmek mümkündür. Lokal hareketinin artığı yerlerde eleman enerjisi daha fazladır.

5.2.3 Model Oluşturma ve Eleman Seçimi

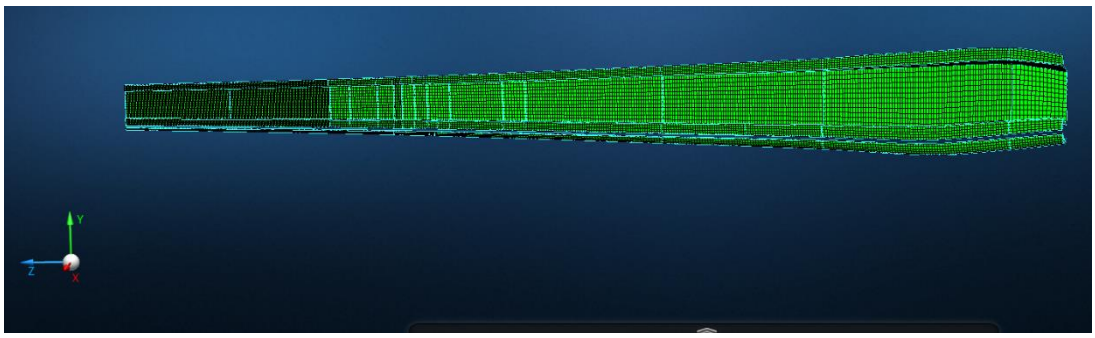
Kabuk model, 3 boyutlu bir katı yapının iki ekseni diğer 3. eksene göre daha baskınsa bu eleman tipi tercih edilir. Düğümlerden ve öğelerden oluşan ağ, buna göre ayrıca lineer olmayan problemlerde 3 boyutlu elemanların kullanılması çok fazla serbestlik derecesine yol açarak problemin çözücü tarafından çözülmesini engelleyebilir. Bu nedenle doğrusal olmayan analizde 1B ve 2B öğeler tercih edilirken, 3B öğeler yalnızca başka alternatif olmadığında kullanılır.

Kanat gibi ince cidarlı yapıları modellemek için 3B katı elemanları kullanmanın ana sorunu kayma kilitlemesidir. Kayma kilitlemesi, elemanı eğmek yerine kaymaya enerji harcandığında ortaya çıkan aşırı rijit bir davranıştır. Bu kilitleme fenomeni, katı elemanlar kabuk gibi göründüğünde (bir boyut diğer ikisinden çok daha küçük olan)

daha da belirgindir. Bu sorun, tüm eğilme ve direngenlik etkilerini yakalamak ve doğru bir çözüm üretmek için kalınlık boyunca üç veya dört eleman yerleştirilerek aşılabilir. Bununla birlikte, bu yaklaşım muazzam sayıda serbestlik derecesi üretir. Bu nedenle, kabuklar, basınçlı kaplar, kanatlardaki ribler ve spar ağları ile benzeri ince cidarlı yapılar için tek seçenek 2B kabuk elemanlardır ve bunlardan tercih edilen seçenek lineer dörtgen elemandır. Kabuk modeli yaklaşık toplamda 75,000 adet dört düğümlü kabuk eleman ve arayüz katı elemanlar içerir. Modeldeki tipik elemanların karakteristik eleman uzunluğu 100 mm idi (Şekil 5.6-5.7).



Şekil 5.6 RÜZGEM 5-m rüzgar türbini kanadı



Şekil 5.7 RÜZGEM 5-m rüzgar türbini kanadının spar kepleri

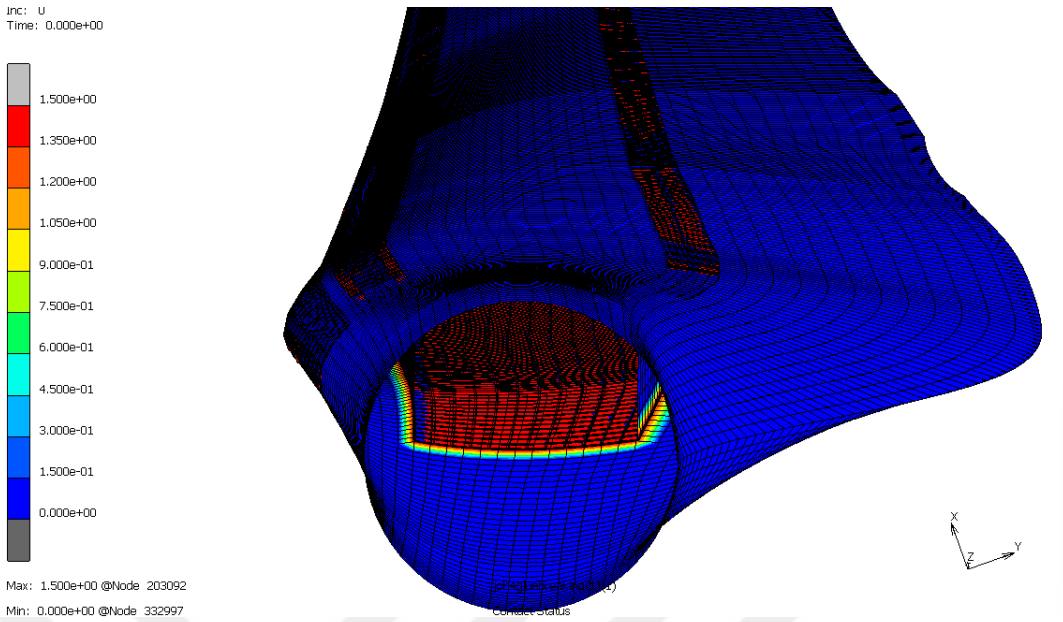
Ayrıca yüksek kaliteli bir ağ gerekiyorsa, bir kabuk ağ oluşturmak, solid bir ağ oluşturmaktan daha kolaydır. Analitik bir bakış açısından, kabuk modeli, özellikle doğrusal olmayan analiz ve daha büyük modeller için daha az kaynak kullanma (daha az RAM, disk alanı ve CPU süresi) gibi büyük avantajlar da sunar. Bunun nedeni, kalınlığı ek nodlar ve elemanlar fiilen modellemek yerine, kabuk modellerinin duvar

kalınlığını matematiksel bir değer olarak yakalaması ve çözülmesi gereken daha az denklemle sonuçlanmasıdır. 2B kabuk modellerinin 3B katı modellere göre diğer bir avantajı, kalınlık kabuk elemanıyla ilişkili bir özellik olduğundan, simülasyonlardaki kalınlığı kolayca değiştirebilmesidir. Bir 3B modelle, düğümleri taşımanız ve hatta belirli parçaları yeniden meshlemeniz gerekecek. Bu nedenle, mesh hassasiyeti çalışmaları yürütmek için kabuk modeli daha iyi bir seçimdir.

Üçgen elemanlarla ilgili sorun, eğilme sorunları için çok direngen olmalarıdır çünkü tüm alanları boyunca sürekli gerilme yaşarlar. Bu nedenle, doğru bir eğilme tepkisi elde etmek için çok sayıda üçgen eleman kullanılmalıdır. Bir üçgen elemanın tamamındaki gerilme tensörünün değeri bir sabittir ve bu hiç de gerçekçi değildir. Özellikle ilgi alanlarında dörtgen elemanlar kullanıldı Ayrıca yer değiştirmeler daha yüksek bir dereceye kadar enterpolasyonlu olduğundan, dörtgen bir ağ üçgen bir ağdan daha doğrudur. Dörtgen elemanlarda bu aşırı rijitlik sorunu yoktur ve bu nedenle 2B örgülü bir yapıda eğilme gerilmelerini yakalamak için en iyi seçimdir.

5.3 Statik Analiz

Spar kep, ana yanal eğilme yüklerini karşılayan, mesnetli bir kiriş gibi hareket eder. Spar kep birçok farklı yolla gerçekleştirilebilir; ancak kanadın uzunlamasına yönünde normal gerilmeyi alacak üst/alt kirişler (spar kepler) ve kayma yüklerini karşılayacak spar kepleri her zaman mevcuttur. Spar kepleri, sehim sırasında alçak basınç tarafı ve yüksek basınç tarafı yüzeylerini ayrı tutar. Gerçek aerodinamik şekli oluşturmak için kabuğa ihtiyaç vardır ve üst ve alt kanadın kısımları birbirine yapıştırılmalıdır ve bu nedenle çok sayıda bağlantı noktası vardır. Yapımız Yapışkan kontaklar ile destek elemanlarına bağlıdır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Kanat yapısındaki yapışkan kontak durumu

Hasarlı yapıların sonlu elemanlar analizi, hasar bölgesinin büyümesine ve rijitliğin azalmasına neden olabilir. Bu etkenler yakınsama sorunlarına yol açabilir ve belirli bir yük seviyesinde çözümü elde etmeyi zorlaştırabilir veya imkansız hale getirebilir. Yakınsama sorunlarını önlemek için, geometrik olarak doğrusal olmayan bir analizde daha küçük zaman adımlarını veya daha yüksek çözünürlüklü elemanları kullanmak gibi daha fazla geri dönüşe izin vermek önemlidir. Hasarlı elemanlar, düşük rijitlikleri nedeniyle yakınsama sorunlarına neden olma eğilimindedir. Devre dışı bırakma seçeneği kullanılarak önlenebilir. Tüm entegrasyon noktalarında tam hasarı olan elemanlar devre dışı bırakılabilir ve seçilen hasar modları için bu seçilebilir.

5.1.1 Puck Hasar Kriteri

Kompozit malzemeler, aşırı yükleme altında fiber ve matris malzemeleri arasında kopmalara neden olabilir. Bu kopmalar, yapının taşıma kapasitesini düşürür ve hatta çökmesine neden olabilir. Puck hasar kriteri, bu kopmaların başlangıcını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Puck yöntemi, fiber ve matris hasarına ayrı ayrı ele alarak, yapının hasar görmeden taşıyabileceği maksimum yükü daha doğru bir şekilde tahmin edebilir. Bu nedenle, 1. çalışmamızda, kompozit malzemelerin hasar analizinde kullanılmıştır (Batmaz, Muyan ve Çöker, 2021).

MSC Marc/Mentat, kompozitler ve diğer elastik malzemelerin aşamalı hasar analizini gerçekleştirmek için kullanılabilir. Bu analizde, malzemenin kırılma noktasına kadar doğrusal elastik olduğu kabul edilir ve hasar kriterleriyle gösterilir. Hasar oluştuğunda, elemanın direngenliği azalır. MSC Marc/Mentat, malzeme bozulması için üç farklı yöntem sunar:

1.Aşamalı Seçici Direngenlik Bozulması (*Gradual Selective*): Bu yöntemde, hasarının gerçekleştiği eleman veya elemanların direngenliği, hasarının ilerleyen aşamalarında kademeli olarak azalır. Bu, hasarın yavaş yavaş ilerlediğini gösterir.

2.Anında Direngenlik Bozulması (*Immediate Selective)*: Bu yöntemde, hasarının gerçekleştiği eleman veya elemanların direngenliği, hasarının gerçekleştiği anda aniden sıfır olur. Bu, hasarın aniden gerçekleştiğini gösterir.

3.Standart: Bu yöntemde, hasarının gerçekleştiği eleman veya elemanların direngenliği, hasarının ilerleyen aşamalarında kademeli olarak sıfıra yaklaşır. Bu, hasarın yavaş yavaş ilerlediğini, ancak sonunda tamamen gerçekleştiğini gösterir.

MSC Marc/Mentat, hasar indeksi hesaplaması için en fazla üç hasar kriterinin kullanılmasına izin verir; ancak aşamalı hasar için yalnızca ilk kriter kullanılır. Bu, hasarın başlangıcını belirlemek için kullanılan kriterdir. Malzeme iyileşmez; hasarlı elemanlar yük boşaltması sonrasında bozulmuş özelliklerini korur. Bu durum ise hasarın kalıcı olduğunu gösterir. Düzlem gerilme kabukları için, yalnızca hasar başlangıcı ve ilerlemesini kontrol etmek için iki hasar kriterini belirleriz. Malzeme özelliklerini düşürmek için, hasar meydana geldikçe malzemenin direngenliğini azaltan *Progressive Failure* özelliğini etkinleştiririz.

Puck hasar kriterini seçerek, fiber ve matris hasarı ayrı ayrı ele alınır. *Gradual Selective* yöntemini seçerek, hasar meydana geldikçe direngenliğin kademeli olarak azaldığını varsayılır ve bu seçim hasarın yavaş yavaş ilerlediğini gösterir. Bu yöntemde, hasar meydana geldikten sonra malzemenin de yüklemeye devam ettiği varsayılır.

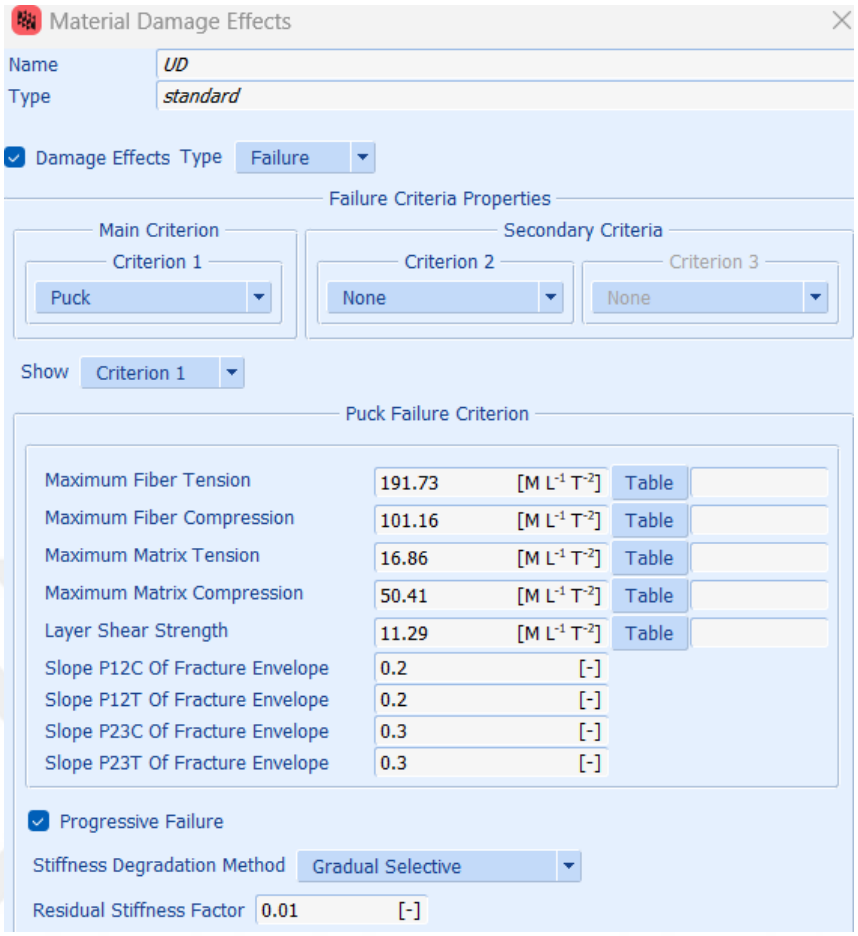
Direngenlik, en büyük hasar indeksi 1,0'ın altında kalacak kadar azaltılır. Böylece malzemenin tamamen hasar görmediğini ancak taşıma kapasitesinin azaldığını gösterir.

5.1.2 Aşamalı Seçici Direngenlik Bozulmasının Uygulanması

Bu model, hasar meydana geldiğinde malzemenin direngenliğini azaltmak için modüllerin seçici bir bozulmasını kullanır. Böylece malzemenin taşıma kapasitesinin azalmasını önlemeye yardımcı olur. Hasar meydana geldiğinde, modüller kademeli olarak azaltılır ve bu da malzemenin yavaş yavaş hasar gördüğünü gösterir. Hasar meydana geldiğinde, en yüksek hasar indeksi birden küçük veya ona eşit tutulmaya çalışılır ve malzemenin tamamen çökmesini önlemeye yardımcı olur. Hasar moduna bağlı olarak, farklı bhasar kriterleri için azaltma faktörleri hesaplanır. Böylece farklı malzemelerin farklı hasar davranışlarını hesaba katmaya yardımcı olur. Poisson oranları karşılık gelen kayma modülüyle aynı şekilde ölçeklendirilir ve bu vesileyle malzemenin deformasyon davranışını korumaya yardımcı olur. MSC Marc'ta mukavemet modüllerin azaltılma şeklini kontrol etmek için birçok parametre mevcuttur. a_1 çalışmamızda kritiktir ve Artık Direngenlik faktörü (*Residual stiffness factor*) olarak direngenlik hiçbir zaman bu faktörün altına düşürülmez. Varsayılan 0,01'dir (Şekil 5.9).

Malzemenin farklı yönlerde farklı hasar görebileceğini hesaba katmak için maksimum gerilme ve maksimum gerinim kriterleri için, azaltma faktörleri her ayrı hasar indeksinden ayrı olarak hesaplanır. Yalnızca tek bir hasar indeksine sahip olan hasar kriterleri için, altı azaltma faktörünün tümü, en küçük azaltma faktörü kullanılarak aynı şekilde azaltılır. Bu, malzemenin tüm yönlerde aynı şekilde hasar görebileceğini hesaba katmaya yardımcı olur.

Malzeme kompleks bir yapıya sahip olabilir ve fiber ve matris hasarlarını birbirinden ayıran kriterler için hasar modları arasında daha karmaşık bir bağlantı vardır. Varsayılan aşağıdaki gibidir:



Şekil 5.9 Puck kriterleri

- r_1 fiber kopmasına bağlıdır (birinci ve ikinci hasar indeksi): 1- fiber gerilmesi veya 3- matris gerilmesi, mod A
- r_2 matris hasarına bağlıdır (üçüncü, dördüncü ve beşinci hasar indeksi) : 2- fiber sıkıştırma veya 4 - matris sıkıştırma modu B (Bu malzemeyi kullanan katı elemanlar için matris sıkıştırması için yalnızca 4. hasar indeksi kullanılır.) veya 5 matris sıkıştırma modu C.
- r_3, r_1 ile aynı şekilde davranır ($r_3=r_1$).
- r_4, r_2 ile aynı şekilde davranır ($r_4=r_2$).
- r_5 ve r_6, r_4 ile aynı şekilde davranır ($r_5=r_6=r_4$).

Yalnızca bir hasar indeksine sahip kriterler için güncelleme en kötü faktöre dayanmaktadır. Program, farklı malzeme modüllerini aşağıdakilere göre

ölçeklendirmek için kullanılan r_1'den r_6'ya kadar altı direngenlik azaltma faktörünü takip eder:

$E_{11\ yeni} = r_1 E_{11\ orig}$
$E_{22\ yeni} = r_2 E_{22\ orig}$
$E_{33\ yeni} = r_3 E_{33\ orig}$
$G_{12\ yeni} = r_4 G_{12\ orig}$
$G_{23\ yeni} = r_5 G_{23\ orig}$
$G_{31\ yeni} = r_6 G_{31\ orig}$

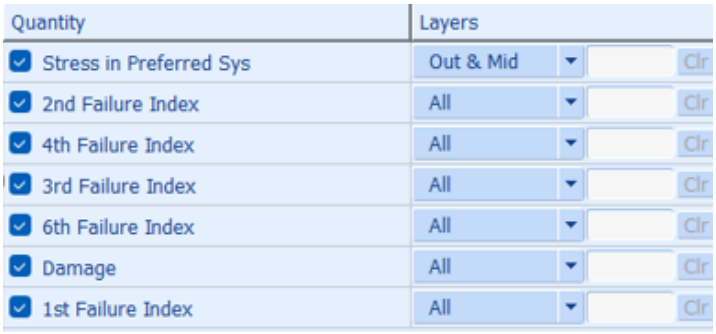
Puck, faktörlerin ayarlanması aşağıdaki şekilde bağlanmıştır.

- Varsayılan davranış r_1 fiber hasarına bağlıdır (birinci ve ikinci hasar indeksi)
- r_2 matris hasar bağlıdır. (üçüncü, dördüncü ve beşinci hasar indeksi)
- r_3 ile r_1 ile aynı şekilde davranır.
- (r_3=r_1) ise r_4 ile r_2 ile aynı şekilde davranır (r_4= r_2).
- r_5 ve r_6, r_4 ile aynı şekilde davranır (r_5=r_6=r_4).

Pozitif normal gerilme için 3. hasar indeksi ve 4. hasar indeksi olarak kaydedilir. Bu durumda 5. başarısızlık indeksi kullanılmaz. Kritik hasar açısı, tıpkı düzlem gerilmesinde olduğu gibi son işlemler için 6. hasar indeksi olarak saklanır. İlk beş hasar kriterinin maksimumudur. Benzer şekilde minimum dayanım oranı da yedinci dayanım oranı olarak mevcuttur (Şekil 5.10) (Marc, M. S. C. User's Guide, "Volume A: Theory and User Information", 2023).

Puck Hasarı Kriteri için, her bir modun mukavemet oranları, karşılık gelen hasar indekslerinin karşılığı olarak SR=1/FI şeklinde hesaplanır. Beş hasar indeksi şöyledir:

1. hasar indeksi- fiber çeki
2. hasar indeksi- fiber bası
3.hasar indeksi- matris çeki, mode A
4. hasar indeksi- matris bası mode B
5. hasar indeksi- matris bası mode C



Şekil 5.10 Hasar endekslerini çıktı olarak alma

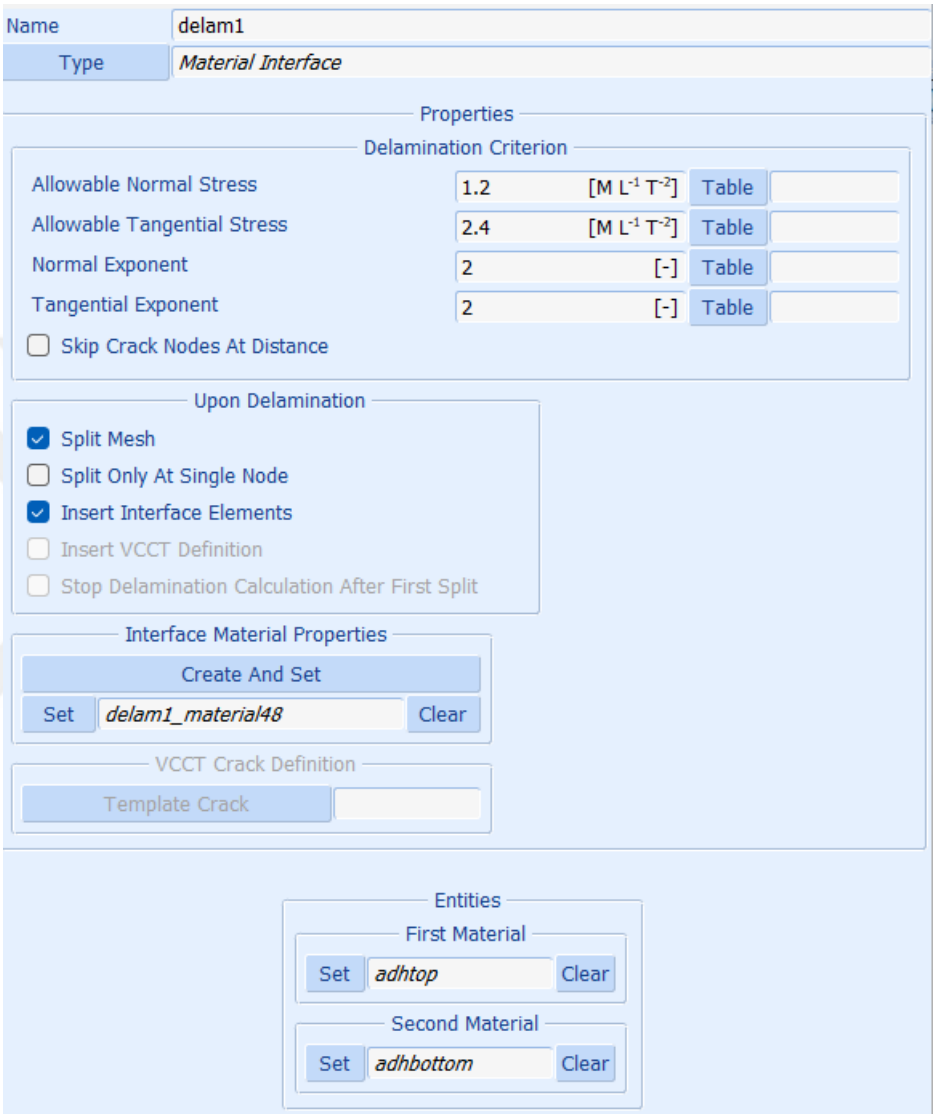
5.2 Delaminasyon Komutu

MSC Marc, hem delaminasyon hem de hasar durumunda ağın parçalanmasına yönelik kriterlerin tanımlanmasına yönelik komutlar içerir. Ağ, iki malzeme arasındaki arayüzde veya bir malzeme içinde parçalanabilir. Malzeme arayüzünde parçalanma, normal ve teğetsel gerilmeler tarafından kontrol edilir. Bu gerilmeler, malzeme arayüzü ile hizalanacak şekilde dönüştürülür. Gerilmelerin malzeme arayüzünde maksimum olduğu ve dolayısıyla parçalanmaya neden olabileceği anlamına gelir. Bir malzeme içindeki katmanlara ayrılma, gerilmeler tarafından kontrol edilir. Bu gerilmeler, elemanın kenarları veya yüzleri ile hizalanacak şekilde dönüştürülür. Gerilmelerin katmanlar arasında maksimum olduğu ve dolayısıyla ayrılmaya neden olabileceği anlamına gelir.

MSC Marc'ta delaminasyon, malzeme arayüzü veya malzeme içinde gerçekleşebilir. Malzeme arayüzünde delaminasyon, normal ve teğetsel gerilmeler tarafından kontrol edilir. Bu gerilmeler, malzeme arayüzü ile hizalanacak şekilde dönüştürülür. Bu etki Delaminasyon aracındaki "Malzeme Arayüzü" komutunu seçerek oluşturuldu. Hesaplamaya yönelik gerilmeler, arayüzle hizalanacak şekilde dönüştürülür. Malzeme içinde delaminasyon, gerilmeler tarafından kontrol edilir. Bu gerilmeler, elemanın kenarları veya yüzleri ile hizalanacak şekilde dönüştürülür. *Upon Delamination* komutu ile hasardan sonra ne olması gerektiğini belirlenir.

Delaminasyonun nasıl ve nerede başlayacağını belirlemek için *Split Mesh* seçeneği kullanılır. Bu seçenek, delaminasyonun arayüzde veya bir bölgede gerçekleşmesine izin

verir. Delaminasyonun nasıl ve nerde başlayacağını otomatik ayarlar. FEM meshinin eleman kenarı veya yüzeylerinden ayrılmasını sağlar. Bu yolu gerilme üzerinden belirler (Şekil 5.11). İçerdiği belirli seçenekler çok önemlidir:



Şekil 5.11 Delaminasyon türü ve özellikleri

1. Malzeme Arayüzü *(Material Interface):* Arayüzde delaminasyon için, *Material Interface* seçeneği kullanılır. Bu seçenek, iki malzemenin arayüzünde ve *composite veya pshell'lerin* içinde *Mesh Split* yapar. Yüzey ve katman ayrılması genelde eğilmeden kaynaklı delaminasyonlarda kullanılır.

2. Malzeme İçinde *(Within Material):* Malzeme içi delaminasyon durumunda tercih edilir ve özellikle burkulma kaynaklı delaminasyonlarda kullanılır.

3.Uzaklardaki Çatlak Düğümlerini Atla *(Skip Crack Nodes at Distances):* Delaminasyon hesaplamalarında, çatlak ucu ve çatlak önü kullanılmaması önerilir. Böylece gerilme yığılmasından kaynaklanabilecek delaminasyon durumlarından kaçınmak için yapılır.

4.Çatlak Mesafesi Kesimi *(Crack Distance Cutoff):* Belli mesafedeki tüm nodları hariç tutar ve bu vesileyle gerilme yığılmalarından kaçınmamızı sağlar.

5.2.1 Gerilme Kriteri

Herhangi bir ayrılma içeren simülasyon aracı (*delamination, glue breaking, breaking index* vb.) aşağıdaki formüle göre ortak olarak çalışır. 1'den büyük olma durumunda yapışkan bağlantı pasifleşir.

$$\left(\frac{\sigma_n}{S_n}\right)^m + \left(\frac{\sigma_t}{S_t}\right)^n > 1 \qquad (5.1)$$

Gerilmeye dayalı kriter aşağıdaki dayanım yasası formülasyonunu sırasıyla *Delaminasyon İndeksi Normali* ve *Delaminasyon İndeksi Teğeti* kullanılır.

- σ_n hesaplanan normal temas gerilmesidir: 0,206 MPa
- σ_t hesaplanan temas teğetsel gerilmesidir: 2,1 MPa
- S_n Normal Gerilme Eşiği: 1,2 MPa
- m Normal Gerilme Üssü: 2
- S_t Teğetsel Gerilme Eşiği: 2,4 MPa
- n Teğetsel Gerilme Üssü: 2

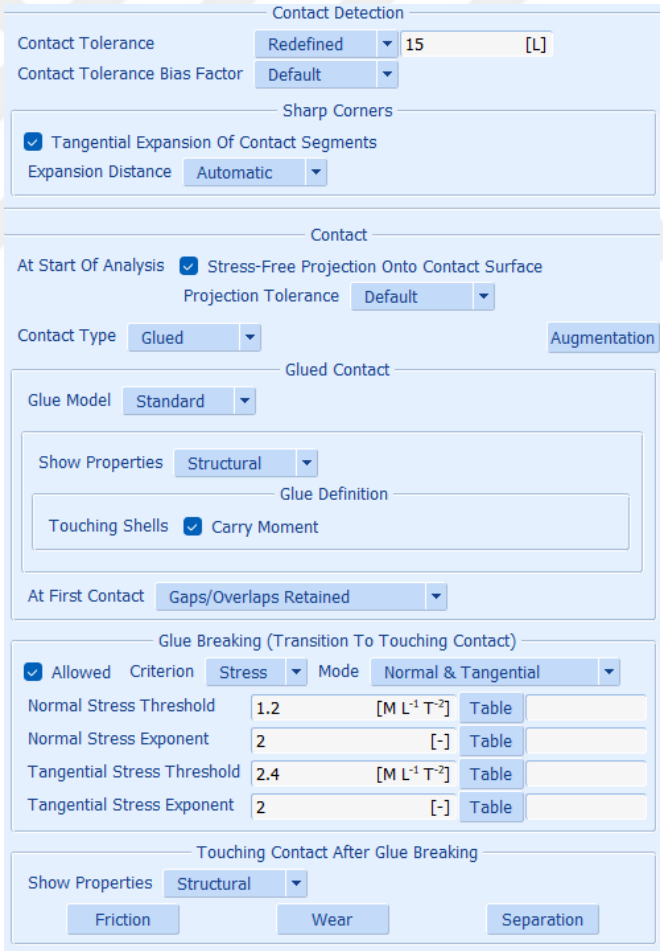
5.2.2 Kırılma Endeksi

Bu durum yapışkan kontağın kırılması için hesaplanan indeksleri ifade eder. Kırılma İndeksi (Normal) (σ_n/S_n) m ile verilir ve Kırılma İndeksi (Teğetsel) (σ_t/S_t) n ile verilir;

burada σ_n ve σ_t sırasıyla temas normal gerilmeyi ve temas teğetsel gerilmedir, S_n, S_t, n ve m kullanıcı tanımlı parametrelerdir. Kırılma indeksi normal ve teğetsel indekslerin toplamıdır. *Yapışkan Kontak Devre Dışı Bırakma* özelliği, kırılma indeksi > 1,0 nedeniyle tutkalın kapatıldığı düğümleri belirtmek için kullanılan bir skaler değerdir. Yapışkan kontak serbest bırakılması gerekip gerekmediğini belirlemek için bir gerilme kriterinin kullanıldığı *Glue Breaking* seçeneğini etkinleştirir

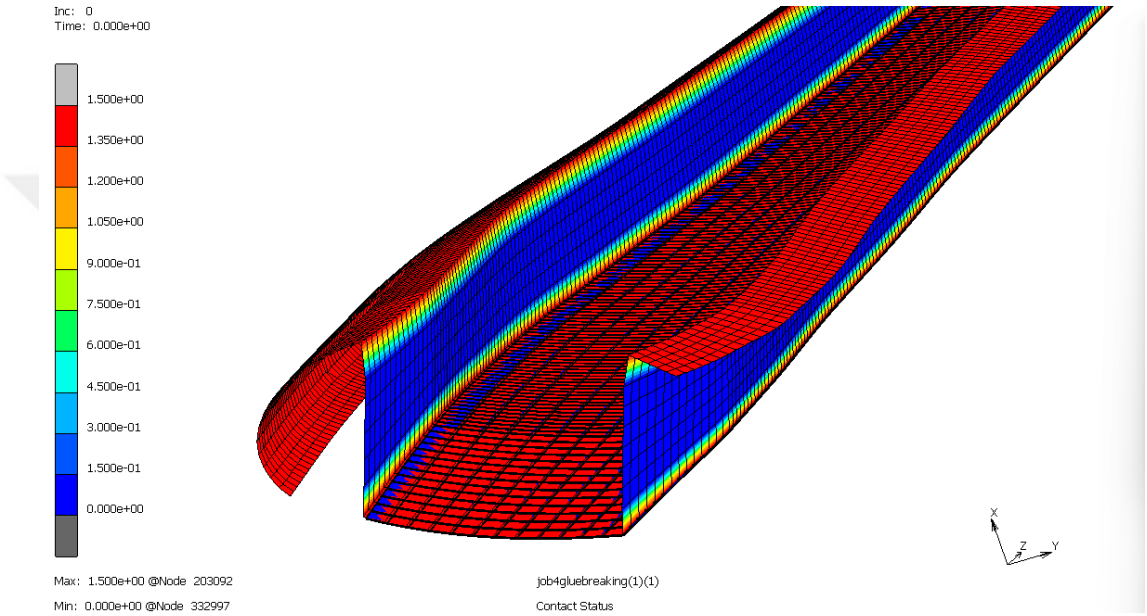
5.2.2.1 Yapışkan Kırılması (Glue Breaking)

MSC Marc'ta *Glue Breaking*, parçalar arasındaki yapışkan bağların hasarını modellemek için kullanılan belirli bir malzeme davranışı tipini ifade eder (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 Yapışkan temas ve arayüz malzeme özelliklerine göre yapışkan temas kırılması

Uygulanan yükler veya gerilmeler altında glue ile birleştirilen iki yüzeyin ayrılmasını simüle eder. Bu metotla yapışkan bağlantı davranışını etkili bir şekilde modellenebilir ve birleştirilmiş yapıların performansı ve hasarı hakkında önemli bilgileri edinebilir. Bu seçenek, yapışkan kontağın normal temasa dönüştürülmesine olanak tanır. Düzenli temasa geçtiğinde tekrar yapı yapışmaz ancak düzenli temas kontağı (*Touch Contact*) yapmaya devam eder (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 Spar kepte yapışkan kontak durumu

5.2.3 Arayüz Elemanları

Delaminasyon modellemesi için hasar görebilir bir katmanın yerleştirilmesi aracı olarak bir kompozit malzemenin alt yapıları arasında modellenen ayrı sonlu eleman öğeleridir. Arayüz elemanları, delaminasyonu içeren çok çeşitli kompozit hasar tahmini alanlarında kullanılmıştır. Özellikle, yüksek gerilmeli alanların meydana geldiği durumlarda, delaminasyonun başlamasını ve yayılmasını başarılı bir şekilde tahmin edebilirler. Arayüz elemanı yaklaşımı, geleneksel gerilmeye dayalı hasar kriterlerinin ağ bağımlı sonuçlar verdiği ve kırılma mekaniğinin önceden var olan bir başlangıç çatlağı hakkında bilgi gerektirdiği yüksek yerel gerilme konsantrasyonunun olduğu bölgelerde özellikle faydalıdır. Bu tür yüksek gerilmeli alanlar, kompozit yapılarda

geometrik gerilme yükselticiler, kat düşüşleri gibi süreksizlikler veya serbest kenar gerilmelerine yol açan özellik uyumsuzlukları nedeniyle meydana gelebilir.

Ara yüz elemanları, sonlu elemanlar analizinde süreklilik arasında ince veya sıfır kalınlıktaki bir katmanı modelleyen elemanlardır. Ara yüz elemanlarının konumu, çatlak yolunun bir tahmini değildir. Bunun yerine, yüklemeye ve ilgili hasar kriterlerine bağlı olarak hasarlanabilecek veya hasarlanmayabilecek bir potansiyel delaminasyon düzlemidir. Lamine kompozitler için bu yaklaşım iyi sonuç verir, çünkü olası delaminasyon düzlemleri genellikle katlar arasında veya yapışkan bağlantı hatlarında iyi tanımlanır. Ara yüz elemanı yaklaşımı, gerilmeye dayalı bir başlatma kriterini ve kırılma mekaniği bazlı bir yayılma kriterini birleştirir. Böylece herhangi bir başlangıç kusuruna gerek kalmadan, hem başlatma hem de yayılmanın tek bir tutarlı analizde yakalanmasına olanak tanır. Hesaplama açısından bir zorluk olabilir, çünkü süreç bölgesindeki çeşitli elemanların korunması gerekir.

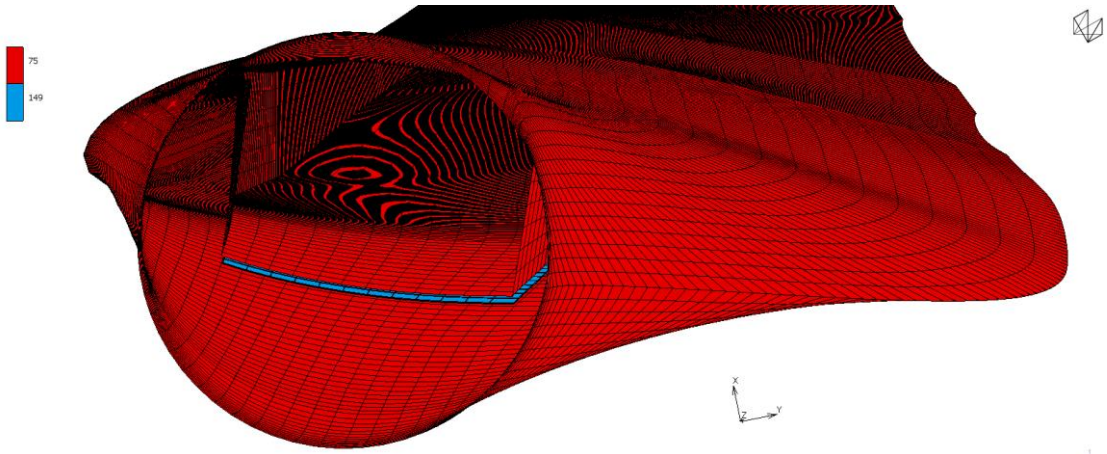
Ağ, kenarlardan (2-B ve kabuklar) veya yüzlerden (3-B) kırılabilir. Yeni düğümler otomatik olarak eklenir ve ağı açmak için öğe topolojisi değiştirilir. Ağın parçalandığı kısma yapışkan malzeme modelini kullanarak arayüz elemanları ekleme seçeneği mevcuttur. Arayüz elemanları, delaminasyonun meydana gelmesinin beklendiği yerde tanımlanır. Arayüz elemanları eklemek için laminat ağ, eşleşen sınırlar seçeneği kullanılarak iki yarıya bölünür. Mesh, *MeshSplit* seçeneği kullanılarak ve bölmenin üst tarafındaki elemanlar seçilerek bölünür. Arayüz elemanları oluşturmak için menüden *Interface Elements* seçilir ve *Create* tıklanır. Arayüz elemanları geometrik ve malzeme özellikleri aşağıdaki gibi ayarlandıktan sonra oluşturulur.

5.2.3.1 Modellemelerde Kullanılan Eleman Tipleri

MSC Marc çatlak büyümesini modellemek için kullanılan bir sonlu elemanlar yazılımıdır; lakin bu elemanlar sadece 3B eleman özelliğinde kullanılabilir; bu yüzden yapışkan bölgemizi kabuk yapı yerine 3B olacak şekilde oluşturduk. Eleman tipi olarak da *Eleman 75, 149* ve *188* kullanılmıştır.

1) Eleman 75: Enine kayma etkileri içeren çift-doğrusal, serbestlik derecesi olarak global yer değiştirmeleri ve dönmeleri olan dört düğümlü, kalın kabuklu bir elemandır. Koordinatlar, yer değiştirmeler ve dönüşler için çift doğrusal enterpolasyon kullanılır. Membran gerinimleri yer değiştirme alanından elde edilir. Enine kayma şekil değiştirmeleri kenarların ortasında hesaplanır ve entegrasyon noktalarına enterpole edilir. Bu şekilde ince kabukların sınır durumunda doğru davranış sergileyen, oldukça verimli ve basit bir eleman elde edilir. Standart yüksek dereceli kabuk elemanlarıyla karşılaştırıldığında basit formülasyonu nedeniyle çözücü için daha az yorucudur ve bu nedenle doğrusal olmayan analizlerde tercih edilir (Marc, M. S. C. User's Guide,"Volume A: Element Library", 2023).

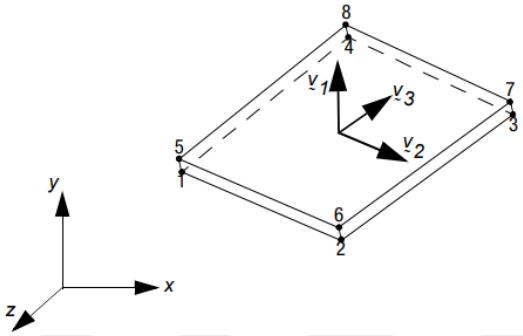
2) Eleman 149: Bu eleman izoparametrik, üç boyutlu, 8 düğümlü kompozit bir tuğla elemandır. Eleman içindeki farklı katmanlar için farklı malzeme özellikleri kullanılabilir. Bir eleman içindeki sürekli katmanların sayısı KOMPOZİT seçeneği aracılığıyla girilir. Elemanın stabilitesini sağlamak için eleman içinde en az iki katman gereklidir. Her katmanda, KOMPOZİT seçeneği aracılığıyla kalınlığı (veya kalınlığın yüzdesini) ve malzeme seti kimliğini girilir. Bu elemanın kütle matrisi sekiz noktalı Gauss entegrasyonu kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 5.14) (Marc, M. S. C. User's Guide,"Volume A: Element Library", 2023).



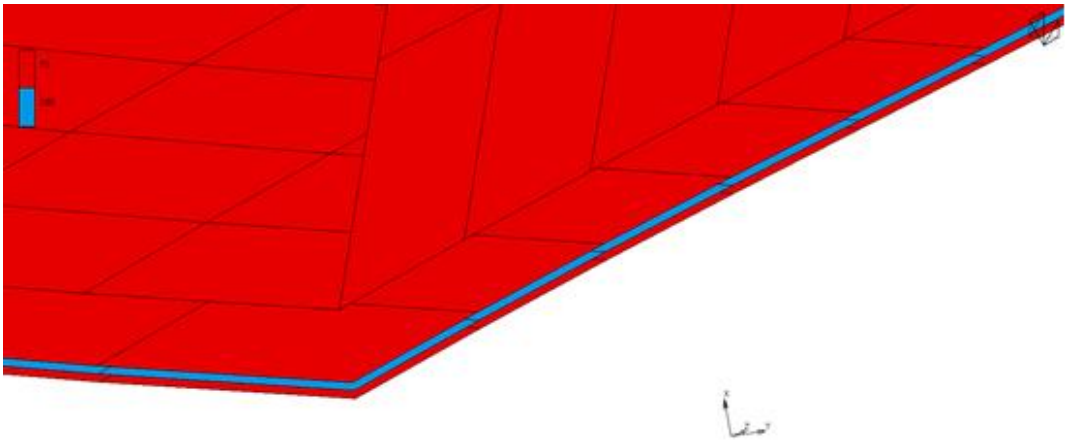
Şekil 5.14 Eleman 75 ve 149 ile yerel koordinat sistemi

3) Eleman 188: Delaminasyonun başlangıcını ve ilerlemesini simüle etmek için kullanılabilen, mekanik sekiz düğümlü üç boyutlu bir arayüz elemanıdır. Öğe tipik

olarak farklı malzemeler arasındaki arayüzü modellemek için kullanılır; burada 1, 2, 3 ve 4 numaralı düğümler, arayüzün alt tarafına (alt olarak adlandırılır) ve 5, 6, 7 ve 8 numaralı düğümler üst tarafa karşılık gelir (Şekil 5.15). Elemanın gerilme bileşenleri, yerel koordinat sistemine göre ifade edilen bir normal çekme ve iki kayma kaynaklı çekmedir. Elemanın davranışı, kohezif model tanımlama seçeneği aracılığıyla tanımlanır. Elemanın hacmi sıfır olduğundan elemanla ilişkili bir kütle yoktur (Şekil 5.14) (Marc, M. S. C. User's Guide,"Volume A: Element Library", 2023).



Şekil 5.15 Eleman türü 188'nün bağlantı ve yerel koordinat sistemi (Marc, M. S. C. User's Guide,"Volume A: Element Library", 2023)



Şekil 5.16 Arayüz elemanı olarak Eleman 188

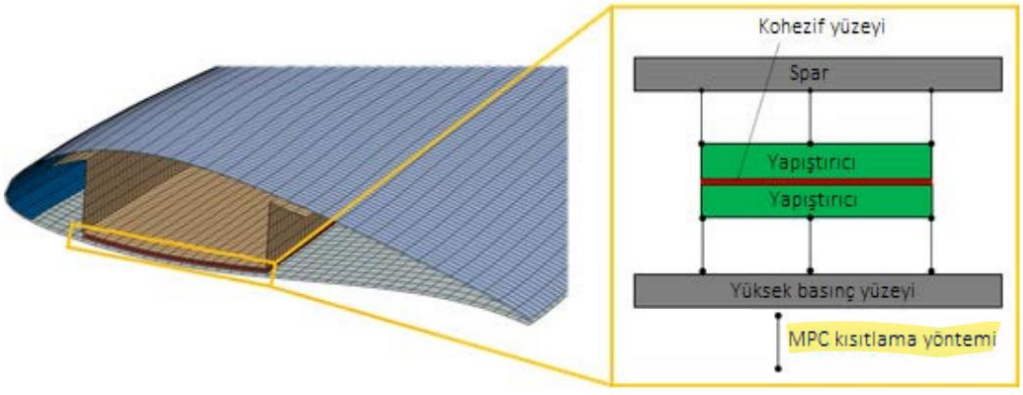
5.3 Hasarlı Bölgeyi Modelleme Yöntemleri

İlk hasardan sonra, hasar bölgenin daha fazla büyümesini modellemek için genel olarak iki yöntem kullanılacaktır.

5.3.1 Yapışkan (Kohezif) Bölge Modeli

Yapışkan bölge modelleme (CZM), malzeme ve yapılardaki kırılma ve delaminasyonu simüle etmek için kullanılan bir sayısal tekniktir. Bu teknik, kırılma ve delaminasyonun, malzemenin yapışkan bölge olarak bilinen sonlu bir bölgede meydana gelen kademeli bir süreç olduğu fikrine dayanmaktadır. Yapışkan bölge, çatlak yüzeylerine etki eden çekişler ile bu yüzeylerin ayrılması arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir çekme-ayırma yasası ile temsil edilir. Sonlu elemanlar yönteminde (FEM), yapı veya malzeme, bir elemanlar ağına ayrıklaştırılır ve yönetim denklemleri, ağın her düğümünde çözülür.

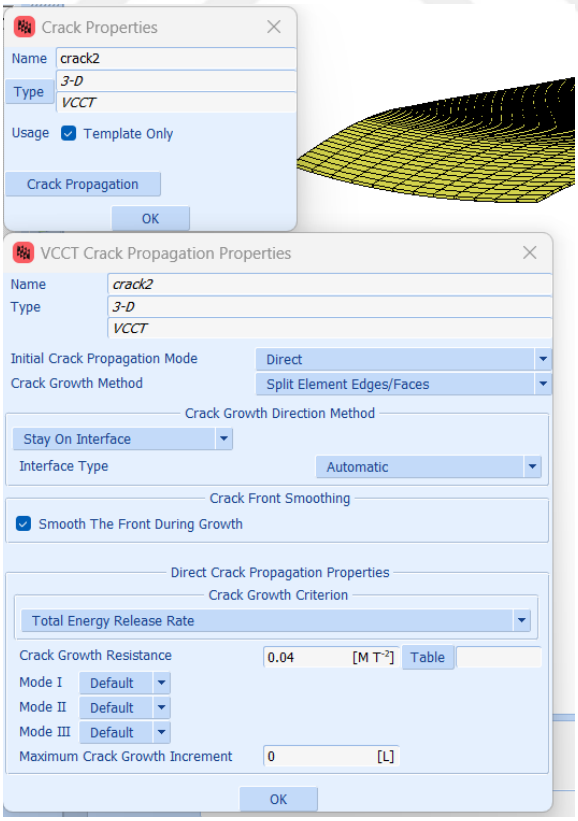
Yapışkan elemanlar, yapıştırıcıların ayrılması veya malzemelerin kırılmasını modellemek için kullanılan bir eleman türüdür. Kohezyonlu elemanlar bağlamında maksimum bozulma, elemanın tamamen hasarlanmasına neden olmadan ulaşabileceği maksimum hasar değerini ifade eder. Kohezyonlu bir eleman maksimum bozunma değerine ulaştığında tamamen kopmuş olduğu varsayılır ve bu nedenle ağdan çıkarılır. Öngörülen yapıştırıcı ayrılma hasarı bölgesinde yapıştırıcı modelleri ile kohezif bölge tanımlanmıştır. Kohezif bölge tanımlanırken kohezif yüzey method kullanılmıştır. Yapıştırıcı ve kompozit parçalar arasındaki bağlantı çoklu kısıtlama yöntemine uygun olması için yapışkan kontak tercih edilmiştir (Şekil 5.15).



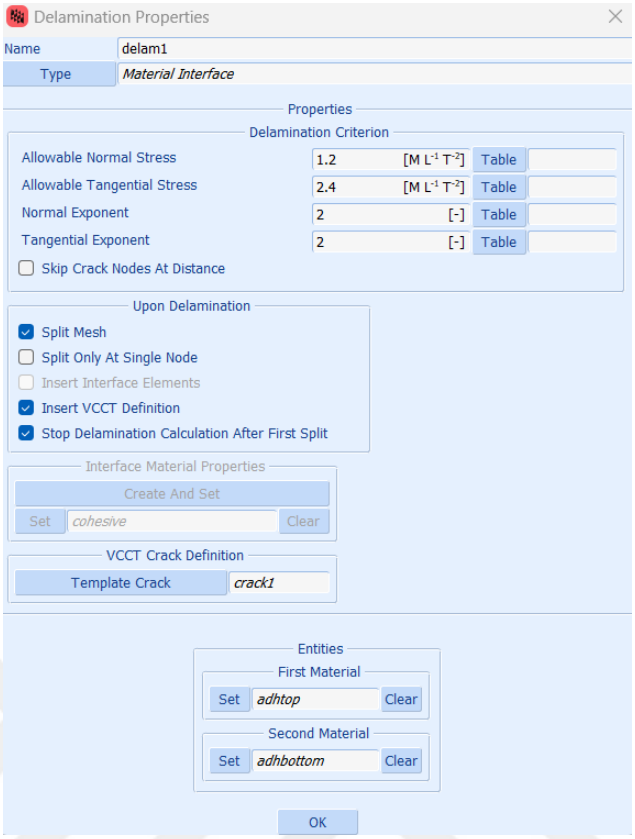
Şekil 5.17 Yapıştırıcı modelinin şeması (Batmaz, Muyan ve Çöker, 2021)

5.3.2 VCCT Yöntemi

Araç Kutusu'ndaki Kırılma Mekaniği komutu altındaki Çatlaklar sekmesinden Yeni 3B VCCT oluşturulur. Yalnızca Şablon onay kutusunu işaretleyerek bir şablon çatlak oluşturabilir ve çatlak cephesinin başlangıç düğümüne sahip olmayacağı anlamına gelir. Program, delaminasyona dayalı olarak çatlak ön düğümlerini hesaplayacaktır (Şekil 5.18). Çatlak büyümesini kontrol etmek için kullanılan iki kriter vardır: delaminasyon kriteri ve çatlak büyüme kriteri. Delaminasyon kriteri, çatlağın malzeme arayüzünden ayrılıp ayrılmayacağına karar verir. Bölünme meydana geldikten sonra, delaminasyon kriteri devre dışı bırakılır. Çatlak büyüme kriteri, çatlağın ne zaman ve ne kadar büyüyeceğini belirler. Bu kriterin de iki ana parametresi vardır: G_C ve *Çatlak Büyüme Artışı*dır. Kısaca özetlenirse; G_C, çatlağın büyüme direncidir. Çatlak büyümesi ise $G > G_C$ olduğunda gerçekleşir. Çatlak Büyüme Artışı, büyüme tespit edildiğinde çatlağın ne kadar büyümesi gerektiğini belirler. *Remeshing* (yeniden ağ oluşturma)'e dayalı büyüme ile modelde çok sayıda öğenin oluşmasına neden olabilir (Şekil 5.19).



Şekil 5.18 Çatlak oluşturma ve ilerleme özellikleri



Şekil 5.19 VCCT yöntemi özellikleri

VCCT, çatlağın yayılmasını modellemek için, çatlağın açılma yer değiştirmelerinin ters yönüne eşit bir yer değiştirme uygulanarak, çatlağın sanal olarak kapatılması fikrine dayanır. Bu, çatlağın yayıldıkça şeklinin değişmemesi anlamına gelir. Bu yaklaşımın bir sınırlaması, çatlak cephesinin değiştirilmesine izin vermemesidir. Bu nedenle, çatlak yayılırken, çatlak cephesinin şekli ve boyutu değişmemelidir. Bu gereklilik kapsamında, sonlu elemanlar modelinden elde edilen düğüm kuvvetleri ve yer değiştirmelerden enerji salınım oranları hesaplanabilmektedir.

5.3.3 Çatlak Başlatıcı (Crack Initiator) Yöntemi

Hasar modeli yöntemlerin bir diğeri olarak *Çatlak Başlatıcı* ise bir yapı içinde çatlağın başlangıcını açıkça tanımlamak için kullanılan bir araçtır. Bu, *Delaminasyon* seçeneği kullanılmadan yapılabilir. *Çatlak Başlatıcı*'yı kullanmak için, çatlak başlangıcının konumunu temsil eden elemanların yüzlerini seçmeniz gerekir. Seçilen

alan gerekenden biraz daha büyük olmalıdır. Bu girdi, çatlak başlatıcının sınırı boyunca iki çatlak cephesi verecektir.

Çatlak Başlatıcı ve *Delaminasyon* aynı anda kullanılamaz. Bunun nedeni, her ikisinin de *Split Mesh* özelliğine sahip olmasıdır. Remeshing ise yalnızca *Çatlak Başlatıcı* ile kullanılabilir. Delaminasyon Aracı, hem VCCT hem de Arayüz eleman ekleme özelliklerine sahiptir. VCCT bir çatlak başlangıcı şartı gerektirir. Delaminasyon, bir çatlak başlangıcı yapabilir veya Arayüz elemanları başlatabilir. *Çatlak Başlatıcılar*, bir yapı içinde çatlağın başlangıcını tanımlamak için kullanılan üç farklı yönteme sahiptir.

1. Bölme (*Splitting*): Bu yöntemde, çatlak başlangıcının konumunu tanımlamak için elemanların yüzleri ve kenarları kullanılır.

2.Yeniden ağ oluşturma (*Remeshing*): Bu yöntemde, çatlak başlangıcının konumunu tanımlamak için bir kesişime bakılarak seçili bir yüzey kullanılır.

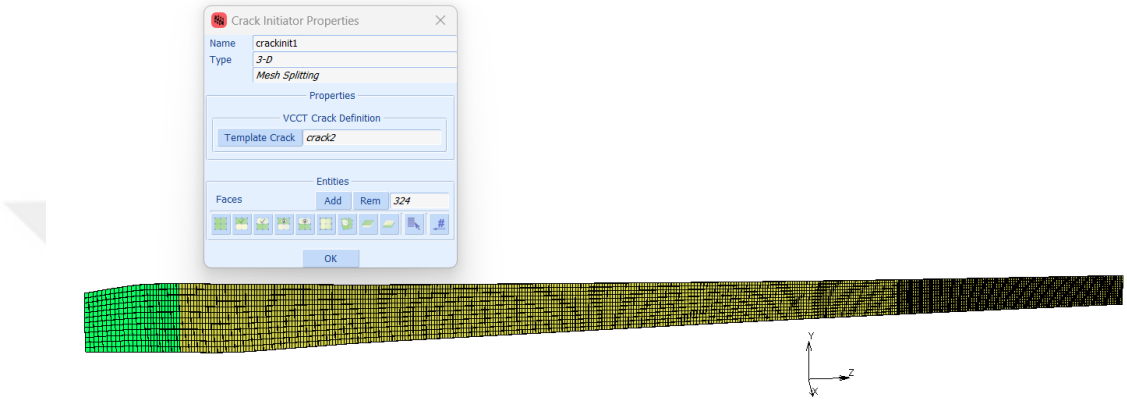
3.Kesme (*Cutting*): Bu yöntemde, yalnızca 2D çatlaklarda geçerli olup çatlak başlangıcının konumunu tanımlamak için bir çizgi üzerinden kesme işlemi yapılır

Spar kepte çatlak oluşumu durumunu incelemek için yapıştırıcı ayrılma bölgesi olarak beklenen yerdeki eleman seçilerek bir *Şablon Çatlak* oluşturuldu. *3-D Mesh Splitting* özelliği bu bölgeye atandı (Şekil 5.20). Çatlak ilerlemesini tanımlamak için aşağıdaki iki özellik bizim çalışmamız için önemlidir:

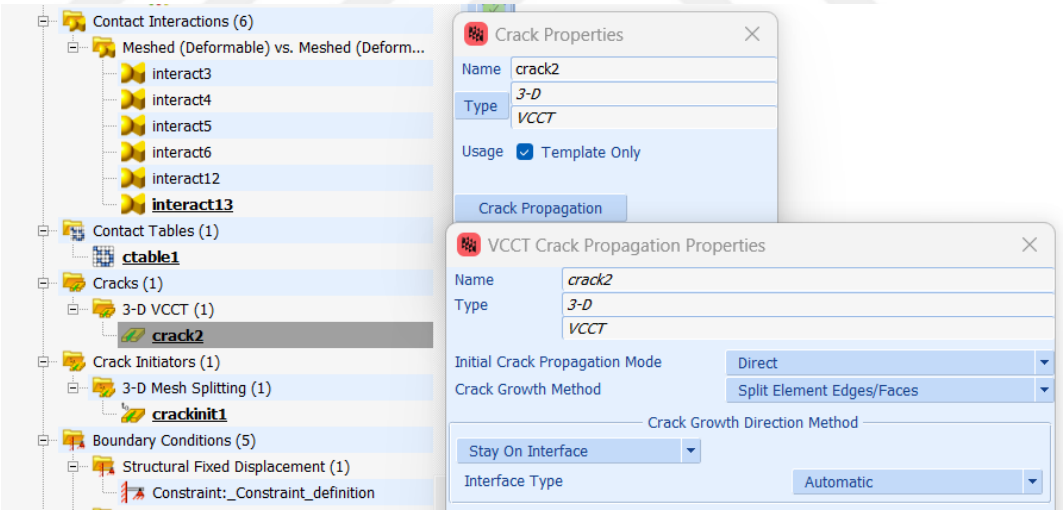
1. Eleman kenarların veya yüzlerinde ağ bölünmesi (*Mesh split at element edges or faces*): Mevcut ağı takip edecek şekilde çatlak büyümesini sınırlar. Ana uygulama, çatlak yolunun bilindiği durumlar içindir; örneğin bir malzeme arayüzündeki bir çatlak büyümesi vb.

2. Arayüzde Kalma (*Stay on Interface*): seçeneği, çatlağın yalnızca belirli bir arayüz boyunca büyüyebileceğini belirtir. Bağları veya yapıştırılmış teması serbest

bırakarak büyüme için mevcut tek seçenek budur ve arayüz, dolaylı olarak bağlar veya temas gövdeleri tarafından sağlanır. Ayrıca eleman kenarları veya yüzleri boyunca büyüme için de kullanılabilir. Burada kullanıcı iki malzeme arasında veya iki eleman seti arasında bir arayüz belirler ve büyüme yalnızca bu arayüz boyunca gerçekleşir (Şekil 5.21) (Marc, M. S. C. User's Guide,"Volume A: Element Library", 2023).



Şekil 5.20 Çatlak bölgesi seçimi ve Şablon Çatlak oluşturma



Şekil 5.21 RÜZGEM 5-m rüzgar türbini kanadının çatlak ilerlemesi özellikleri

5.4 Delaminasyon Başlatıcısı Burkulma Modlarını İnceleme Yöntemleri

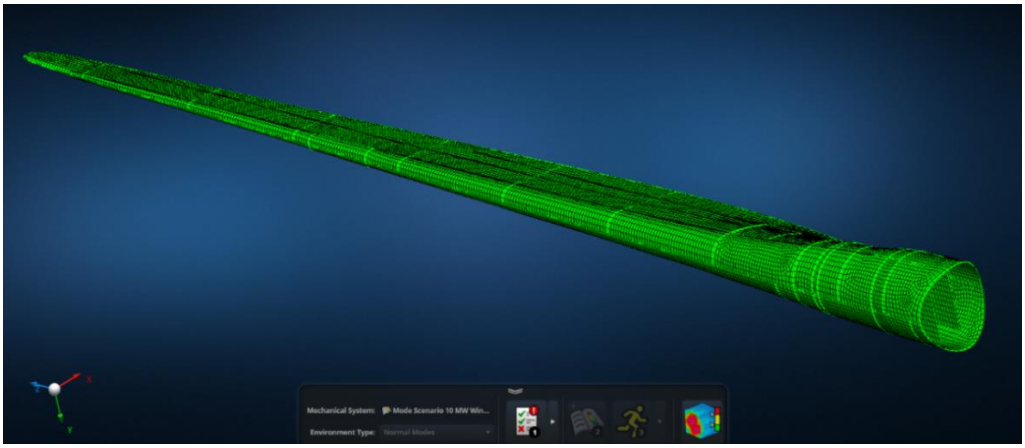
İkinci kanat çalışmamızda ise delaminasyon başlatıcısı burkulma modlarının incelenmesi için rüzgar türbini kanatlarındaki burkulma ve delaminasyon modellemesini ele almaktadır ve rüzgar türbini rotor kanatlarının yük taşıma kapasitesi

üzerindeki delamination tehlikesini değerlendirmek amacıyla bir kanat bölümünün başlıklarındaki delamination etkisi incelemiştir (Haselbach, 2015). Bu çalışmada DTU 10MW referans rüzgar türbini kanadı, katmanlara ayrılma etkisini simüle etmek için kullanılmış ve delaminasyonların büyük bir rüzgar türbini kanadının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir.

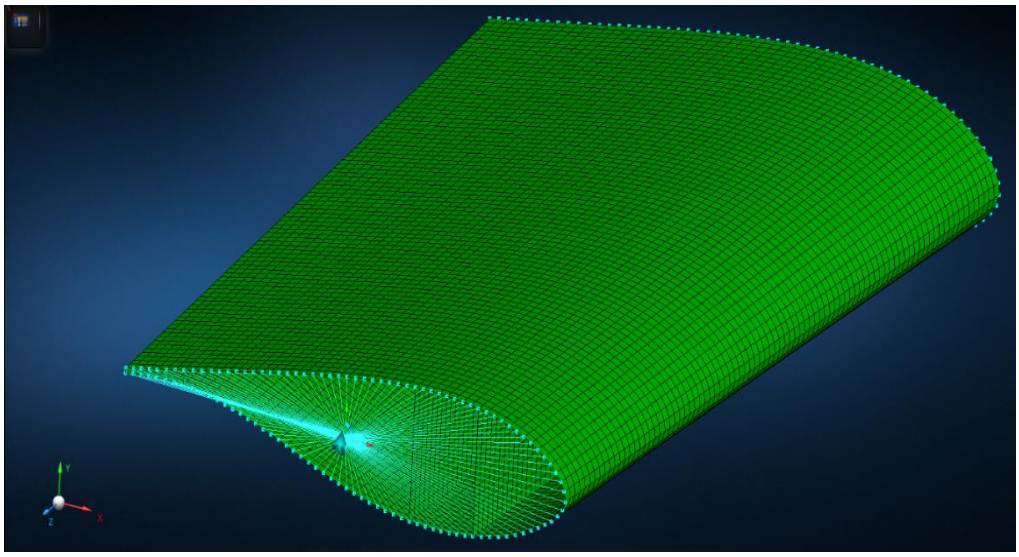
Kanatta kelebekleme eğilmesi esas yükleme alınarak delaminasyon başlangıcını oluşturan etkiler analiz edilmiştir. Burkulma modlarının oluşturduğu delaminasyonun çevresinde malzeme dayanımı aşabilecek yüksek gerilmeye ve gerinim oluşması tehlikelidir. Özellikle kanat yapısında spar kep bölgesinde ve orta yüzeyinde tarafından başlar. Başlık genişliğinin %30-50'si arasında bir genişliğe sahip, yüzeye yakın konumlandırılmış başlangıç delaminasyonlarına sahip kanat yapılarının, normal çalışma koşullarının yük aralıklarında yayılma tehlikesi gösterir. Kanat bölümü, MSC Apex/Nastran dört düğüm kabuk elemanı ile modellenmiştir ve MSC Marc/Mentat tarafında doğrusal olmayan statik ve burkulma analizleri yapılmıştır.

5.4.1 Sonlu Elemanlar Yaklaşımı ve Sınır Koşulları

Kabuk modelleme yaklaşımı nedeniyle daha fazla basitleştirmeler yapıldı. Firar kenarı ve kep/gövde bağlantıları, bağlantı noktalarındaki geometrik detaylar belirtilmeden genel bir şekilde modellenmiştir. Kabuk modeli yaklaşık 40,000 adet dört düğümlü kabuk elemanı içerir. Modeldeki tipik elemanların karakteristik eleman uzunluğu 0,05m idi (Şekil 5.22-23).

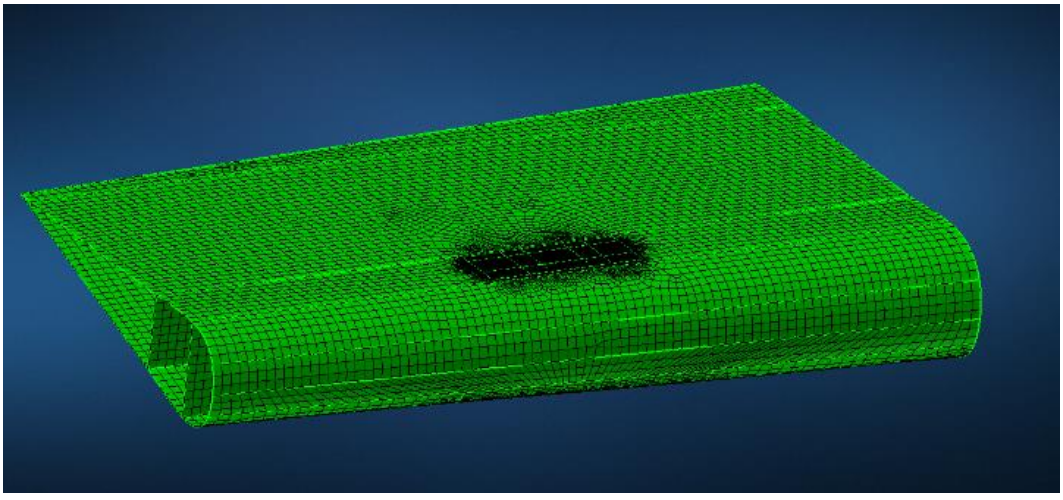


Şekil 5.22 DTU 10 MW rüzgar türbini kanadı (86-m)

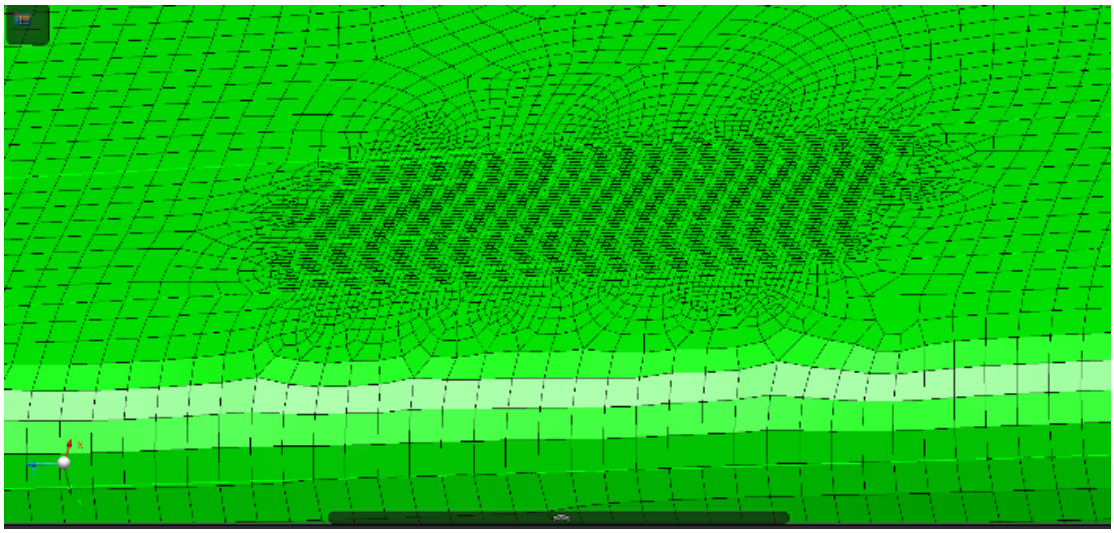


Şekil 5.23 DTU 10 MW rüzgar türbini kanadının incelenen spar kepi için kesilen kanat bölümü (1,7m)

İlk delaminasyonun modellendiği ilgi alanı etrafındaki kabuk elemanlara uygulanan ağ iyileştirmesi, karakteristik eleman uzunluğunu 0,01 m'ye düşürdü. Delaminasyonu çevreleyen bölge, ince bir ağ kullanılarak ayrıklaştırıldı. Spar kepte burkulmaya bağlı delaminasyon büyümesini simüle etmek için simülasyonda alt model yöntemi uygulandı. Alt model 1,7 m uzunluğunda ve başlığın ortasına yerleştirildi (Şekil 5.24-25).

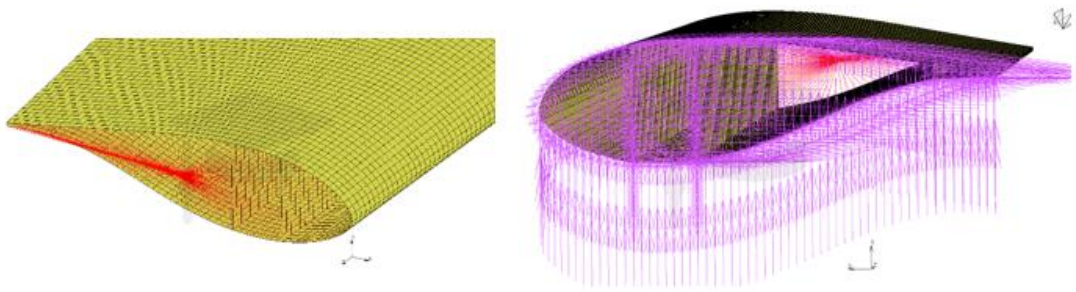


Şekil 5.24 DTU 10MW rüzgar türbininin kanat bölümü kabuk modeli



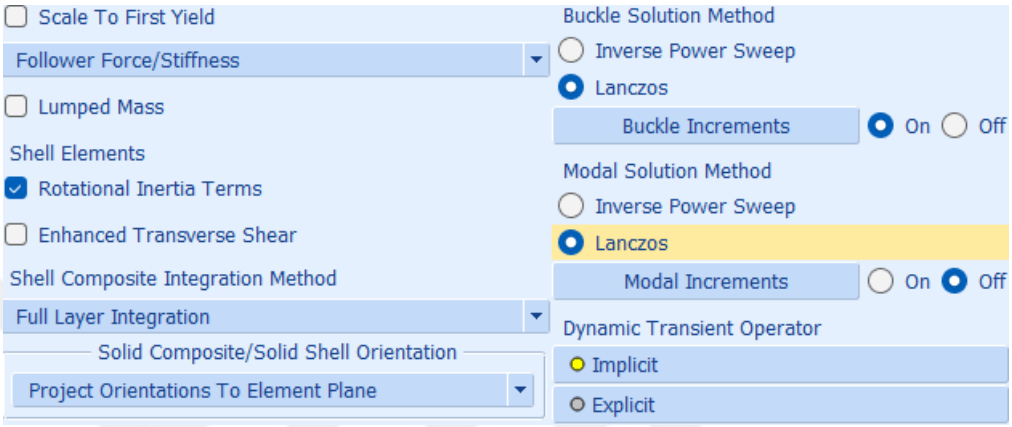
Şekil 5.25 Alt modele göre ağ iyileştirmesi yapılmış kanat bölüm

Arka bölümü (köke en yakın bölüm) temsil eden tüm düğümler tamamen sınırlandırılmıştır. Ön bölümü temsil eden düğümler, rijit link (RBE2) adı verilen bir kısıtlama kullanılarak bir referans düğüme bağlanmıştır ve ön bölümün katı bir gövde gibi hareket etmesini sağlar. Ön kısımdaki referans düğümüne üç moment uygulanmıştır: M_x = −16,4e9 Nmm, M_y = 2,4e9 Nmm ve M_z = 0,32e9 Nmm. Momentler, r = 48,775m'deki (simüle edilmiş kanat kesitinin ortası) kanat kesiti için değerlendirilen tasarım yüklerinin momentlerinin yaklaşık %100'üne karşılık gelir (Şekil 5.26). Kalın kompozit panellerin bası dayanımı üzerine yapılan deneysel araştırmalar, panellerin merkezine yakın konumdaki delaminasyonların yayılmasından önce yüklemenin yüksek olması gerektiğini göstermiştir. Simüle edilen tüm durumlarda delaminasyon büyümesini sağlamak amacıyla uygulanan moment, 1,35 güvenlik faktörü de dahil olmak edilmiştir (Haselbach, 2015).



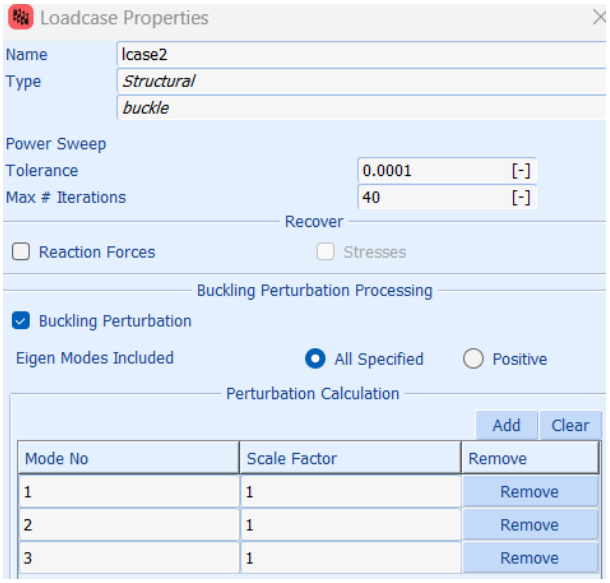
Şekil 5.26 DTU 10MW rüzgar türbini kanadının sınır koşuları ve RBE2

Kütle ölçeklendirme kullanılmadı. Yarı statik bir yükleme sürecini simüle etmek için yükleme hızı o kadar düşük tutuldu ki sistemin kinematik enerjisi, atalet kuvvetlerinin önemsiz olmasını sağlayacak şekilde yapının iç enerjisine kıyasla çok küçüktü. MSC Marc'ta doğrusal olmayan analiz *Implicit* çözücüde çözülmüş ve *Large Strain* olarak kullanılmıştır (Şekil 5.27).



Şekil 5.27: Implicit çözücü ile burkulma çözüm metodunda Lanczos kullanımı

Statik ve burkulma analizi yapılmış olup statik analiz adımları için bir multi-kriter prosedürü kullanılmıştır. Burkulma modları, pertübasyon analizi kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 5.28).



Şekil 5.28 Pertübasyon hassasiyeti

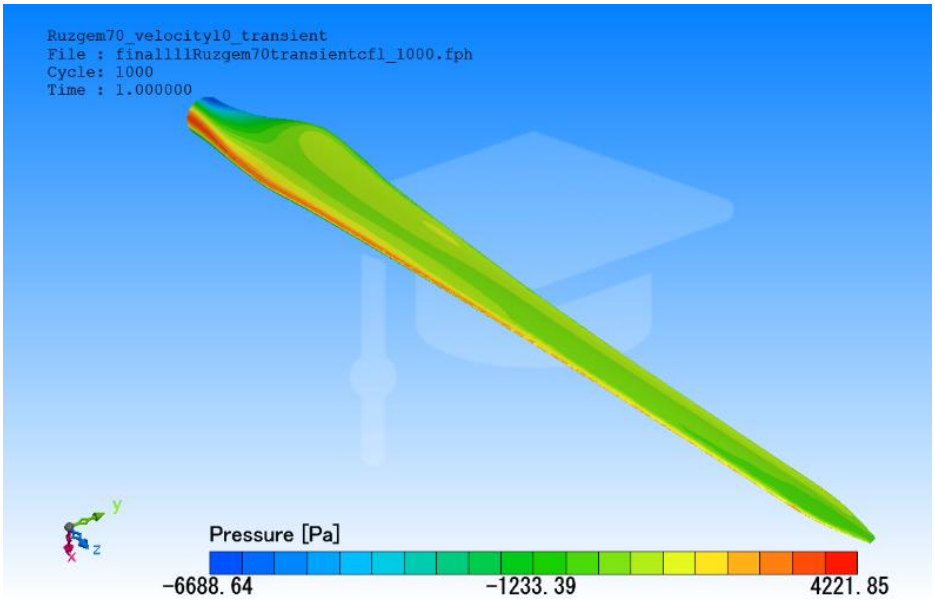
BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

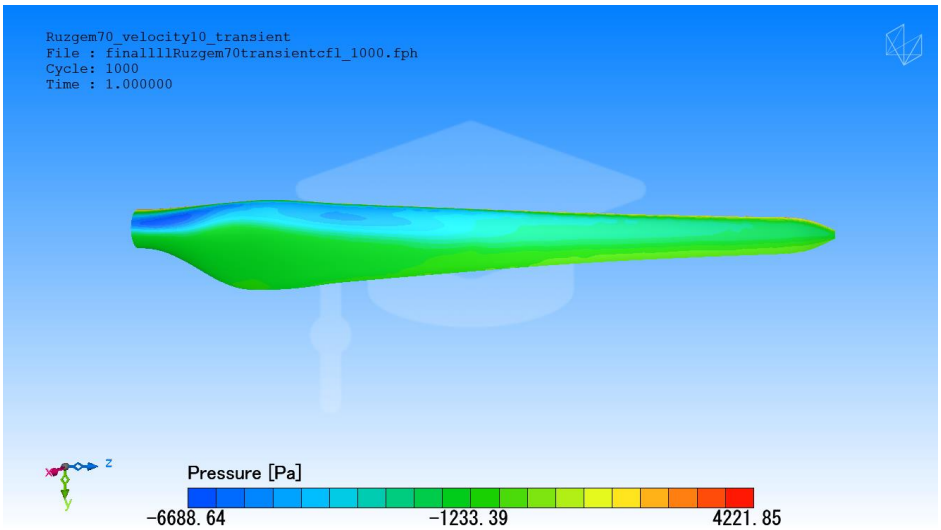
CFD analizleri sonucunda oluşan yük dağılımını belirlenip, statik kelebekleme yüklemesi altındaki yapısal davranışını incelemek için 2-boyutlu Puck modeli ve CZM modeli kullanarak ilerlemeli kompozit hasar analizi yapıldı (Batmaz, Muyan ve Çöker, 2021).

6.1. CFD Analiz Sonuçları

Yüksek basınç kabuğunu bası gerilmeleri negatif değerlerde daha çok etkilerken, emme (alçak basınç) kabuğunda ise çeki gerilmeleri pozitif değerlerde etkilemektedir. Kanadın hareketini sağlayan itici kuvvet bu kısımlarda oluşması beklendiği gibi basınç kısmında bası, emme kısmında ise çeki olacak şekilde dağılımı sayesinde oluşur. Daha iyi bir mesh optimizasyonuyla daha hassas sonuçlar elde edilebilir. CFD analizi sonucunda elde edilen kanat basınç değerleri, modelin statik analizindeki gerilmeleri ve deformasyonları belirlemede yardımcı olacaktır (Şekil 6.1-6.2)



Şekil 6.1 Alçak basınç (emme) kabuğu basınç dağılımı



Şekil 6.2 Yüksek basınç kabuğu basınç dağılımı

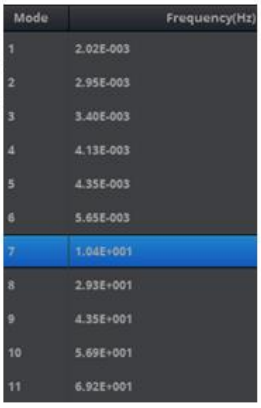
6.2 Modal Analiz

6.2.1 Serbest Titreşimli Modal Analiz

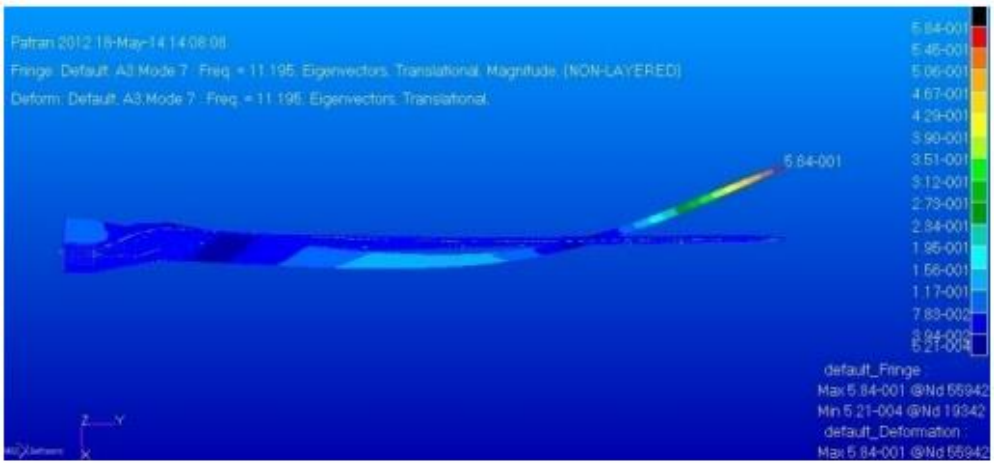
Doğal frekansları ve bunlara karşılık gelen mod şekillerini bulmak amacıyla, serbest sınır koşulu için MSC Patran/Nastran ortamında 'normal modlar' analiz türü gerçekleştirilmiştir(Amer ve Sahin, 2014). Bizim çalışmamız için malzeme modelini karşılaştırma ve doğrulama yapabilmek için doğal frekansları ve bunlara karşılık gelen mod şekillerini bulmak amacıyla, serbest sınır koşulu için MSC Apex/Nastran ortamında rijit ve elastik modlar içeren bir modal analiz türü kullandık. İlk 6 mod ilk 6 serbestlik derecesininin 3 eksende sırasıyla öteleme ve rotasyon durumları ile kanadın global durumunu ifade eder. 7. Moddan itibaren lokal durumları gözlemlemeye başlarız.

NATURAL FREQUENCIES FOR THREE DIFFERENT MESH DENSITIES (FREE – FREE CASE)

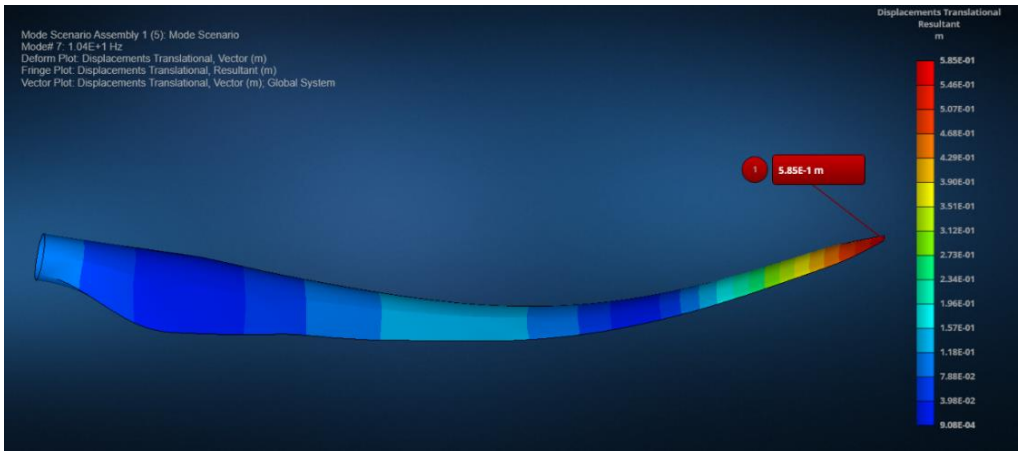
Mode Shapes	Natural Frequencies[Hz]		
	Coarse Mesh	Fine Mesh	Finest Mesh (Original)
1st Out-of-plane Bending	10.92	11.13	11.20
2nd Out-of-plane Bending	29.37	30.11	30.28
2nd Out-of-plane Bending& 1st In-plane Bending Coupling	47.20	47.38	47.55
3rd Out-of-plane Bending	56.14	56.91	57.18
1st Torsion	62.47	67.33	68.44



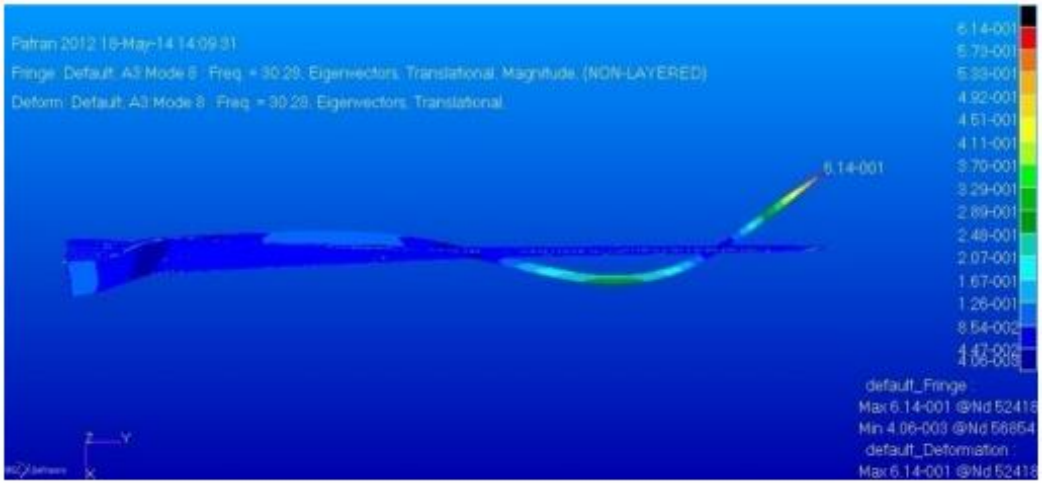
Şekil 6.3 5-m modelinin MSC Patran ve MSC Apex karşılaştırması (Amer ve Sahin, 2014)



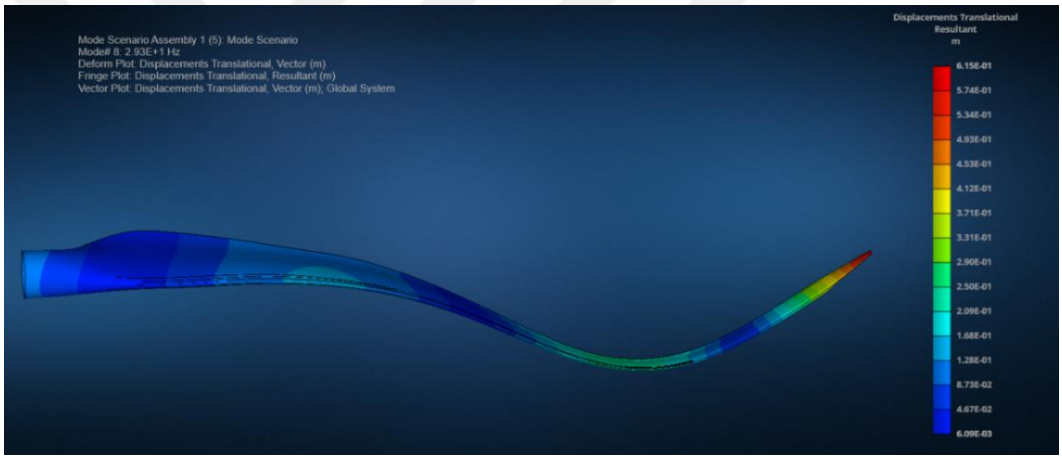
Şekil 6.4 1 düzlem dışı eğilme (11.20 Hz) MSC Patran/Nastran (Amer ve Sahin, 2014)



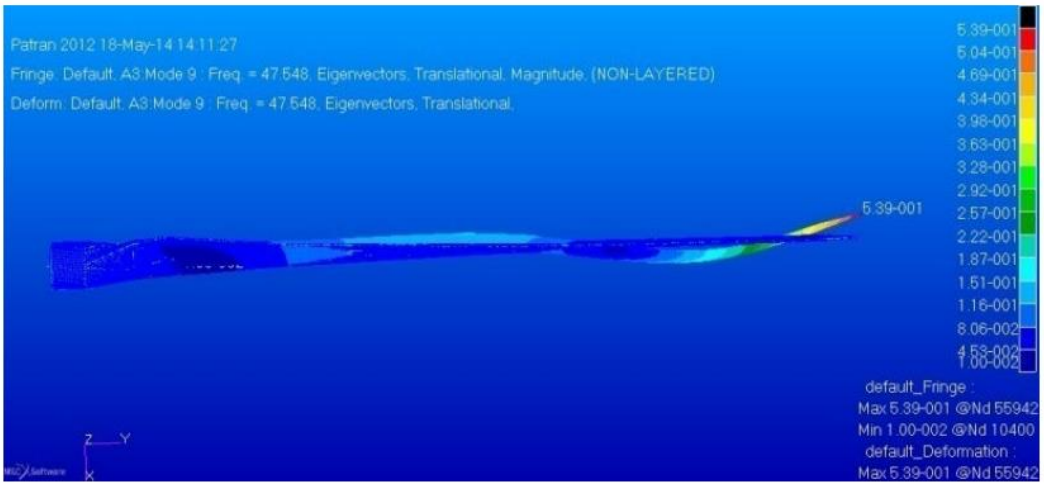
Şekil 6.5 1 düzlem dışı eğilme (10.4 Hz) MSC Apex/Nastran



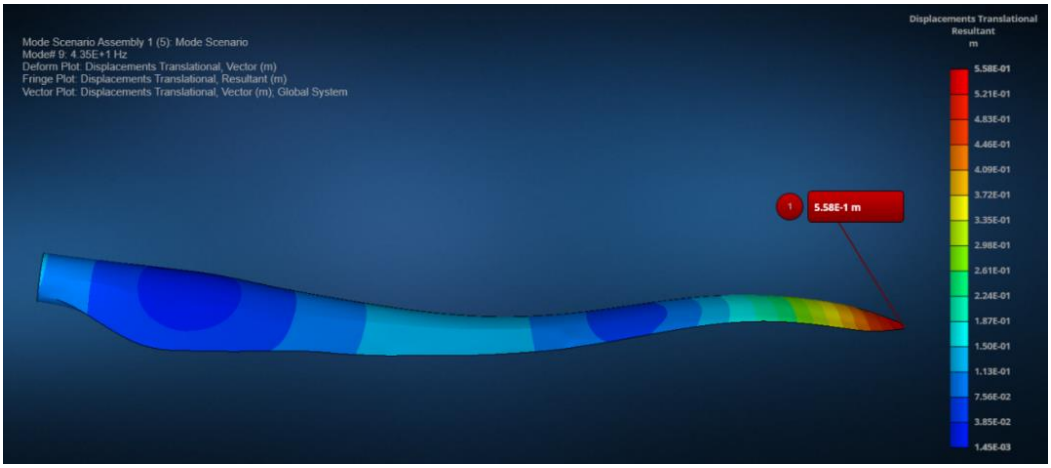
Şekil 6.6 2 düzlem dışı eğilme (30.28 Hz) MSC Patran/Nastran (Amer ve Sahin, 2014)



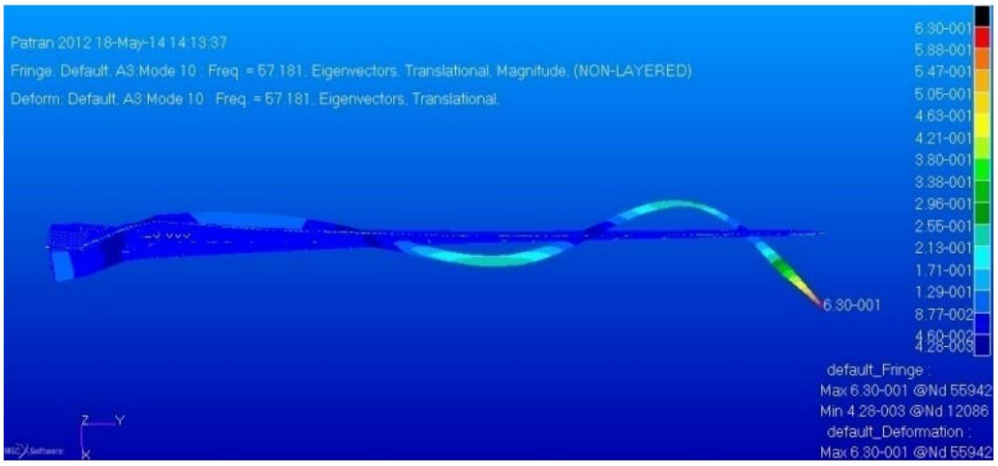
Şekil 6.7 2. düzlem dışı eğilme (29.3Hz) – MSC Apex/Nastran



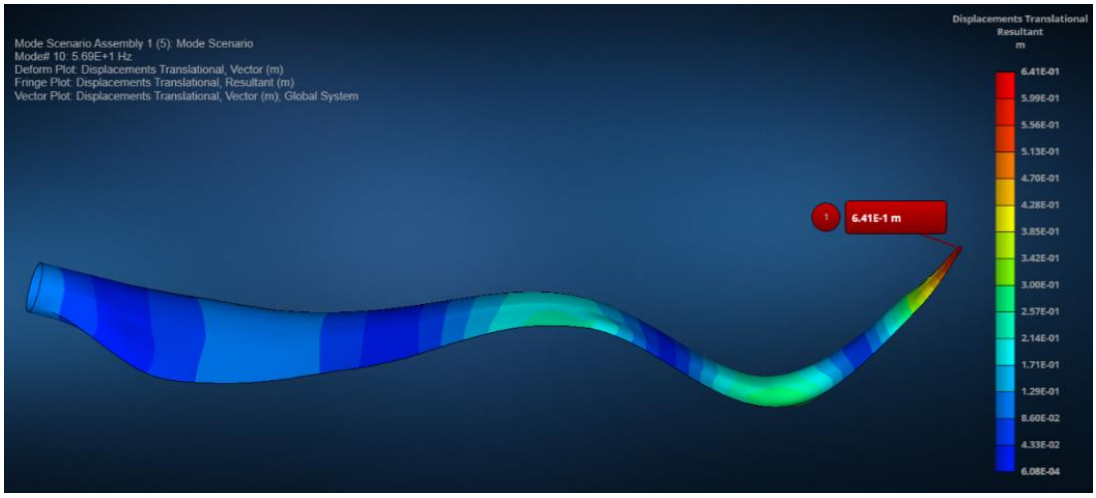
Şekil 6.8 2. düzlem dışı eğilme (47.5 Hz) - MSC Patran/Nastran (Amer ve Sahin, 2014)



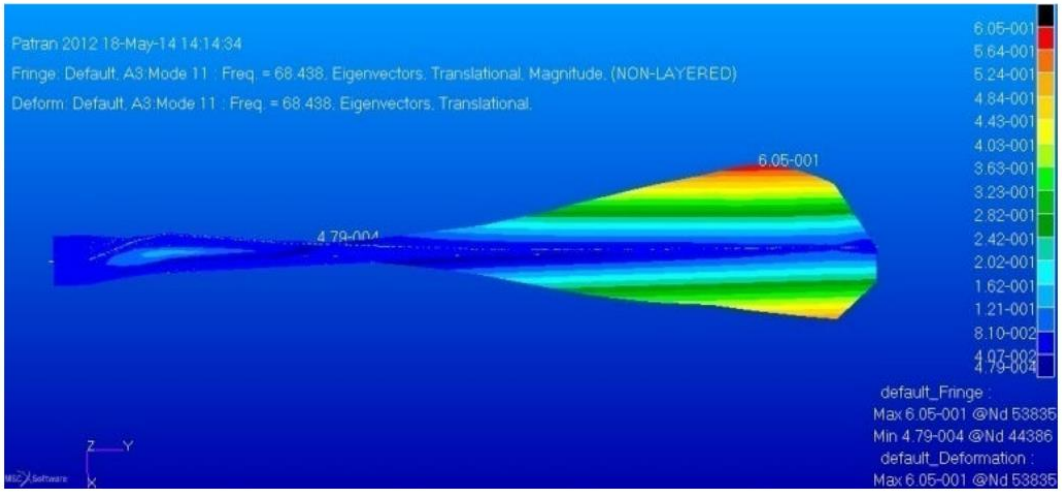
Şekil 6.9 2. düzlem dışı eğilme (43.5 Hz) - MSC Apex/Nastran



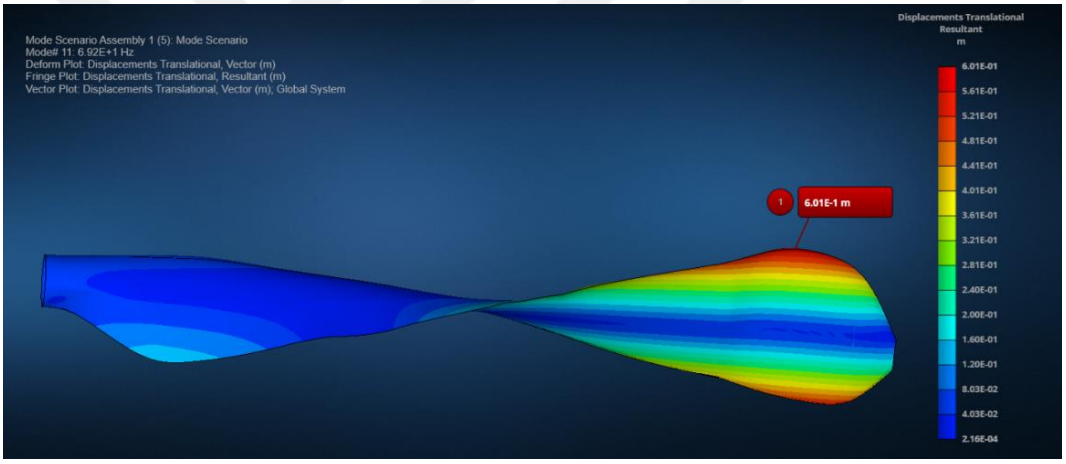
Şekil 6.10 3. düzlem dışı eğilme (57.18 Hz) MSC Patran/Nastran (Amer ve Sahin, 2014)



Şekil 6.11 3. düzlem dışı eğilme (56.9Hz) MSC Apex/Nastran



Şekil 6.12 1. burulma (68.44 Hz) MSC Patran/Nastran (Amer ve Sahin, 2014)



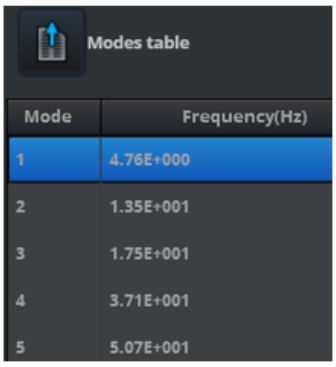
Şekil 6.13 1. burulma (69.2 Hz) MSC Apex/Nastran

6.2.2 Sabit-Serbest Titreşimli Modal Analiz

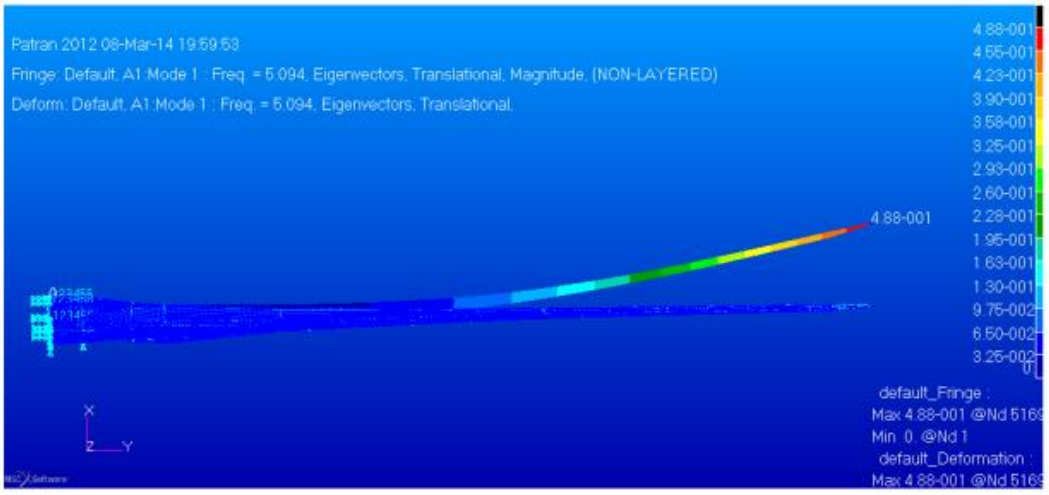
Kanadın ilk üç düzlem dışı eğilme, iki düzlem içi eğilme ve burulma modlarına odaklanan doğal frekansları ve karşılık gelen mod şekillerini elde etmek için MSC Patran/Nastran ortamında 'normal modlar' analiz türü gerçekleştirilmiştir (Amer ve Sahin, 2014). Bizim çalışmamız da modelimizi MSC Apex/Nastran üzerinden doğruladık (Şekil 77).

NATURAL FREQUENCIES FOR THREE DIFFERENT MESH DENSITIES (FIXED – FREE CASE)

Mode Shapes	Natural Frequencies[Hz] Coarse Mesh	Fine Mesh	Finest Mesh (Original)
1st Out-of-plane Bending	5.02	5.06	5.09
2nd Out-of-plane Bending & 1st In-plane Bending Coupling	13.66	13.70	13.80
2nd Out-of-plane Bending	17.33	17.56	17.71
3rd Out-of-plane Bending	36.37	37.16	37.44
2nd In-plane Bending & 1st Torsion Coupling	51.71	51.89	52.17



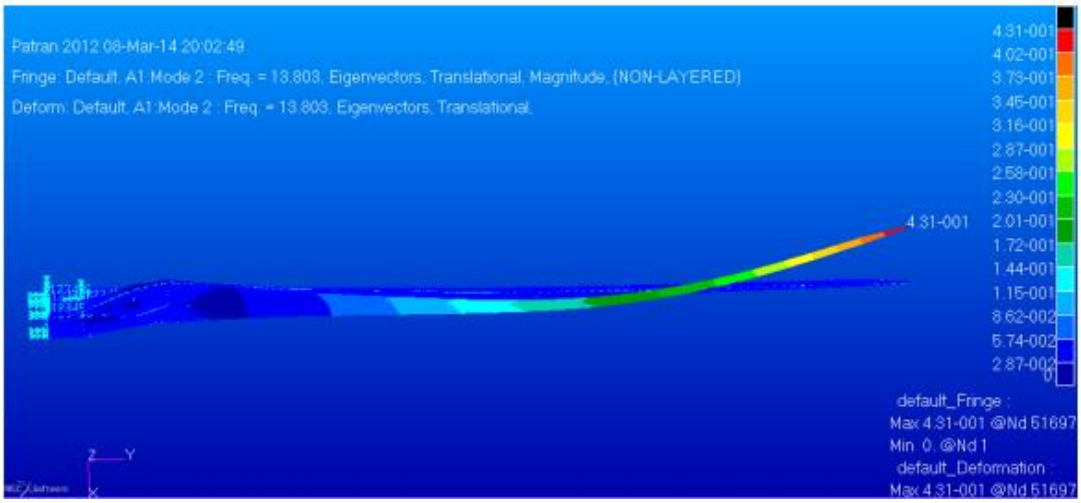
Şekil 6.14 5-m modelinin MSC Patran ve MSC Apex karşılaştırması (Amer ve Sahin, 2014)



Şekil 6.15 1. düzlem dışı eğilme (5.09 Hz)-MSC Patran/Nastran (Amer ve Sahin, 2014)



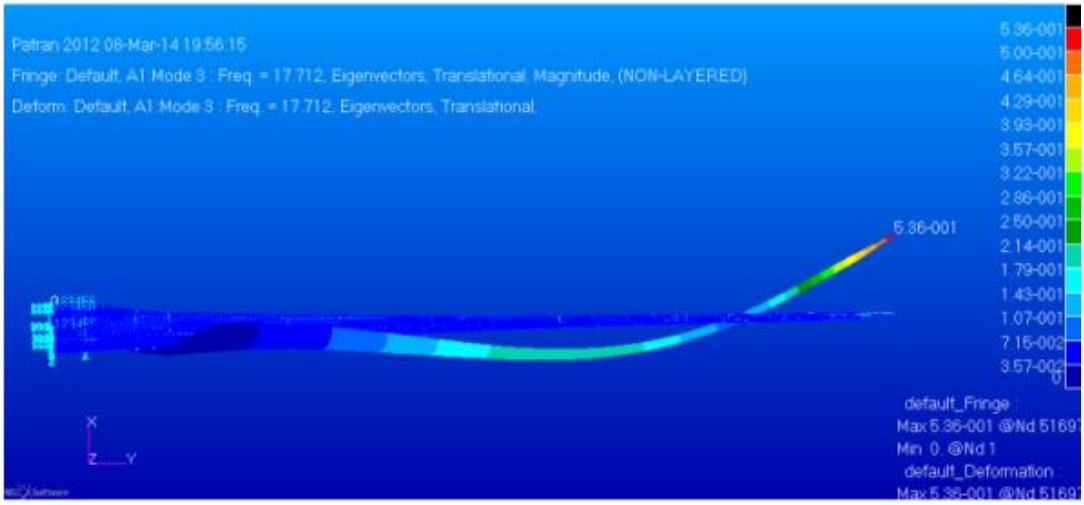
Şekil 6.16 1. düzlem dışı eğilme (4.76Hz)-MSC Apex/Nastran



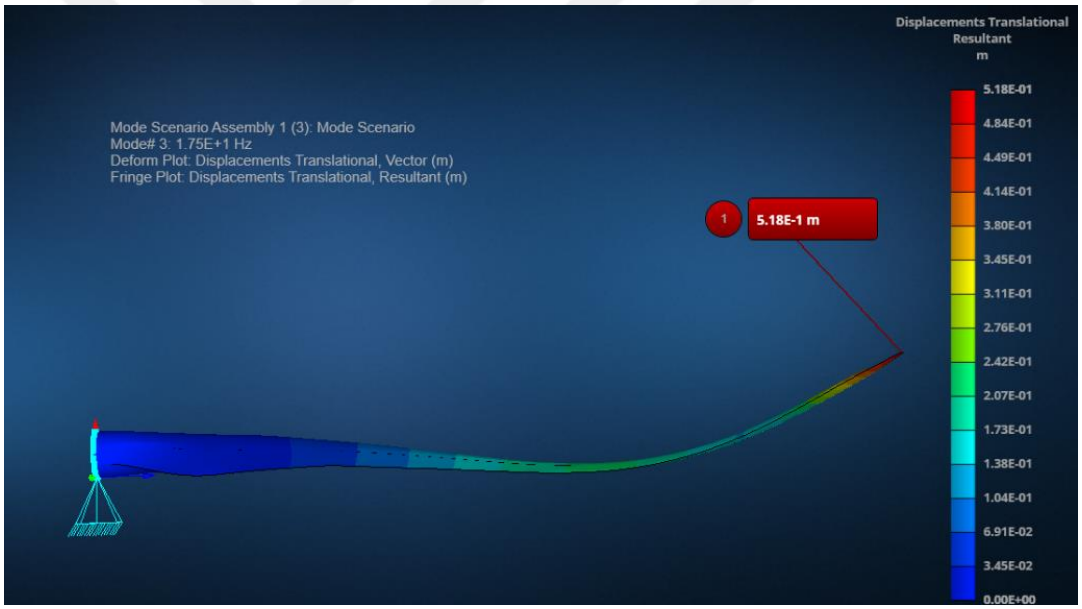
Şekil 6.17 2. düzlem dışı eğilme ve 1. düzlem içi eğilme çifti (13.8 Hz) – MSC Patran (Amer ve Sahin, 2014)



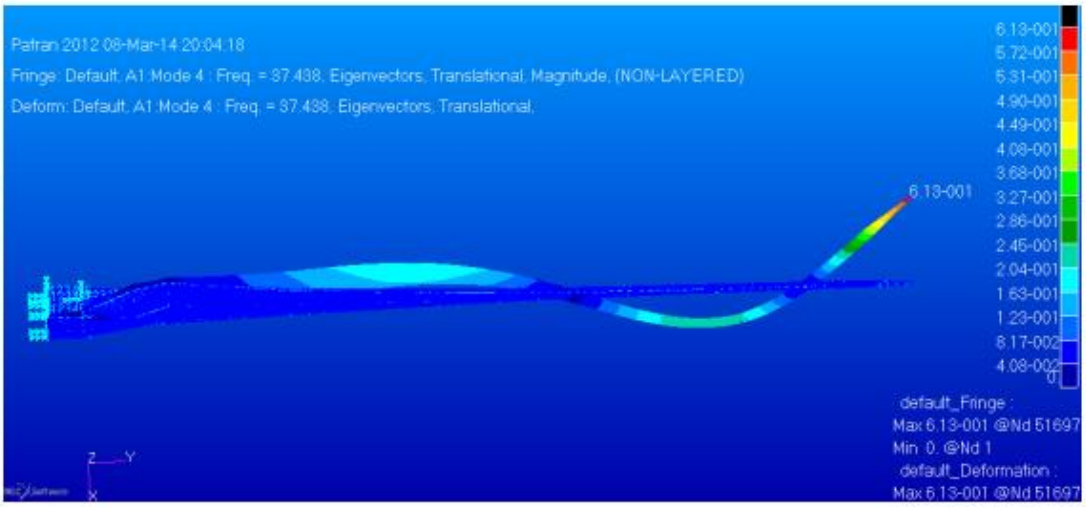
Şekil 6.18 2. düzlem dışı eğilme ve 1. düzlem içi eğilme çifti(13.5 Hz)- MSC Apex/Nastran



Şekil 6.19 2. düzlem dışı eğilme (17,71 Hz) MSC Patran/Nastran (Amer ve Sahin, 2014)



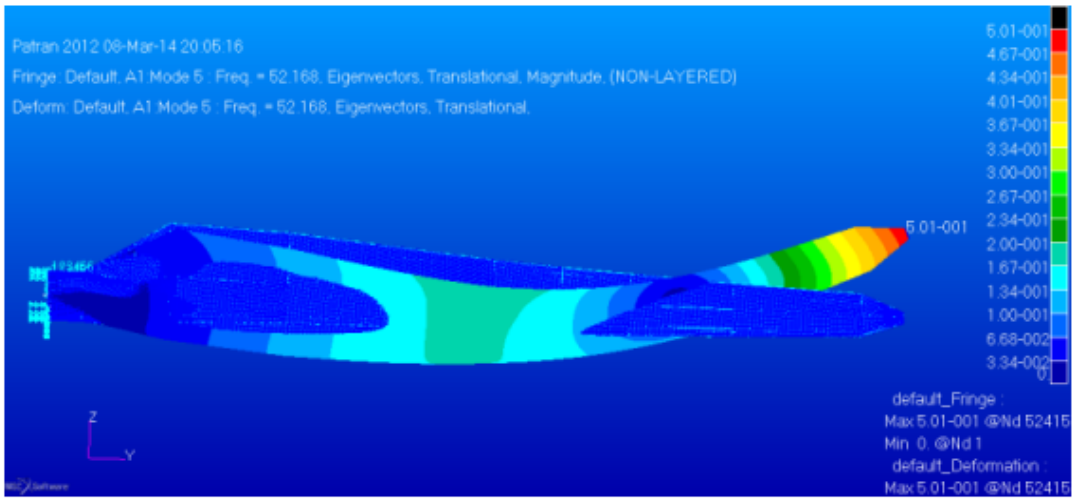
Şekil 6.20 2. düzlem dışı eğilme (17.5Hz) - MSC Apex/Nastran



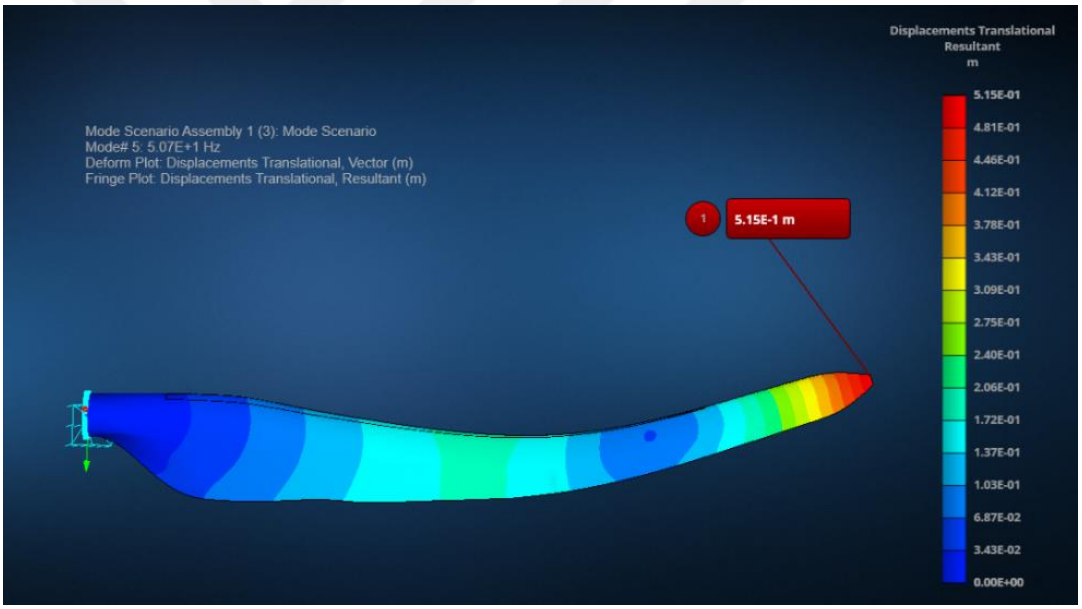
Şekil 6.21 3. düzlem dışı eğilme [37.44 Hz] MSC Patran/Nastran (Amer ve Sahin, 2014)



Şekil 6.22 3. düzlem dışı eğilme (37.1 Hz)-MSC Apex/Nastran



Şekil 6.23 2. düzlem içi eğilme ve 1. burulma çifti (52.17Hz) - MSC Patran/Nastran (Amer ve Sahin, 2014)



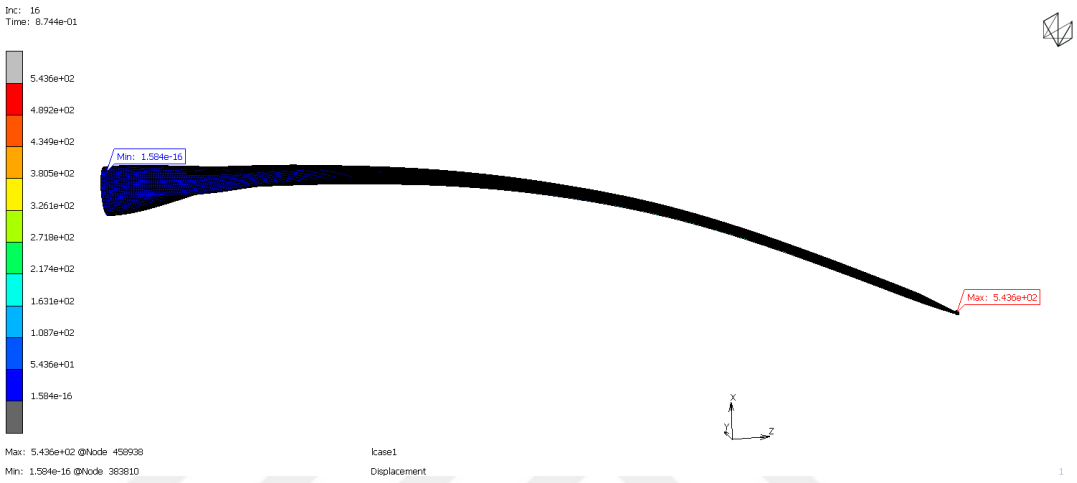
Şekil 6.24 düzlem içi eğilme ve 1. burulma çifti (50.7Hz) -MSC Apex/Nastran

6.3 Statik Analiz Sonuçları

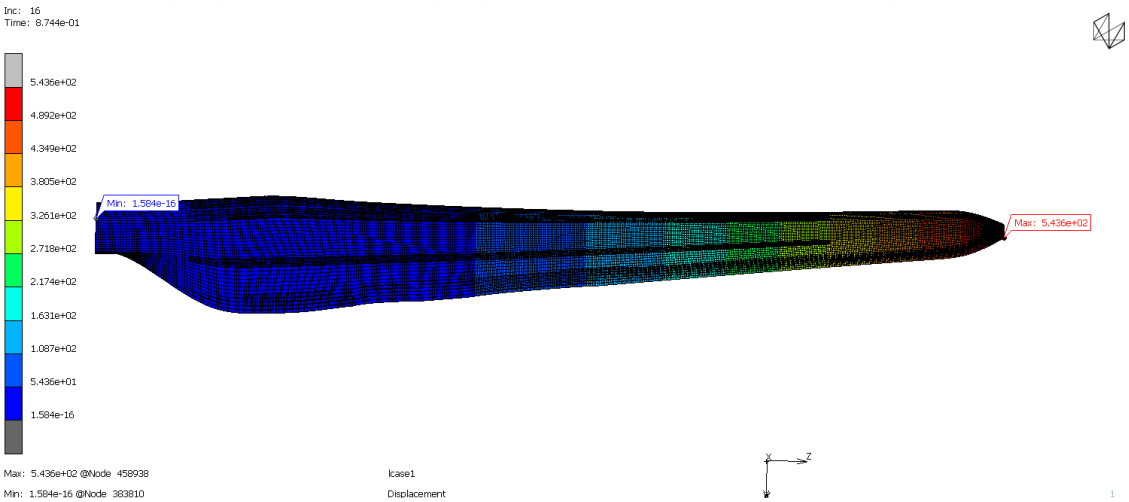
En yüksek deplasman değeri kanat ucunda 522.1 mm olarak bulunmuş olup bu çalışmada 543 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 6.25 En yüksek deplasman değeri kanat ucunda 522.1 mm (Batmaz, Muyan ve Çöker, 2021)



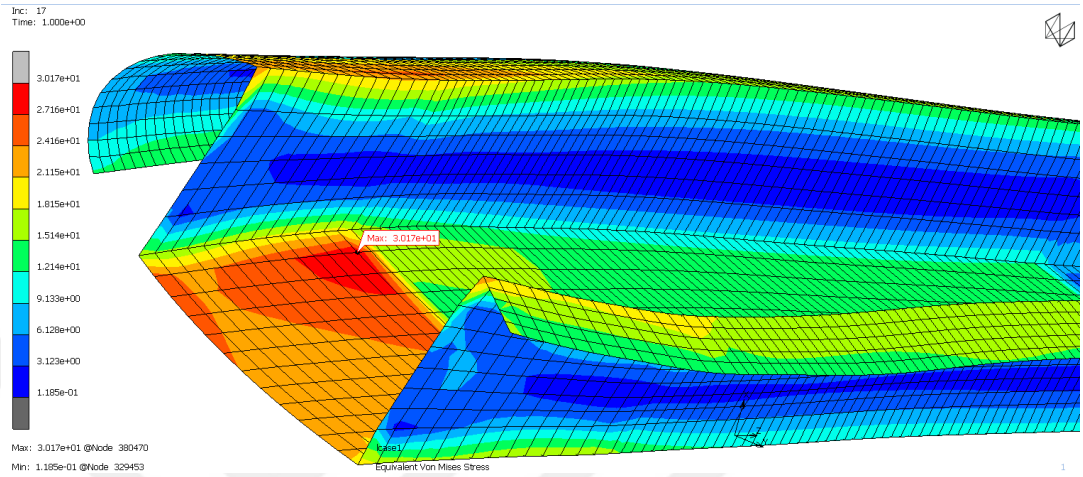
Şekil 6.26 En yüksek deplasman değeri kanat ucunda 543.6 mm - MSC Marc/Mentat



Şekil 6.27 Yandan görünüş - MSC Marc/Mentat

Spar kepleri ve kök geçiş bölgesindeki spar ağlarındaki hasarın, kanadın kırılmasında kritik rol oynadığı görülmüştür. Lokal burkulma da düzleme dik deformasyonu kolaylaştırarak ana hasar mekanizmasına katkıda bulundu. Büyük kanatlarda kanat kök geçiş bölgesinde görülen yapışkan ayrılması ve delaminasyon hasarına sebep olan

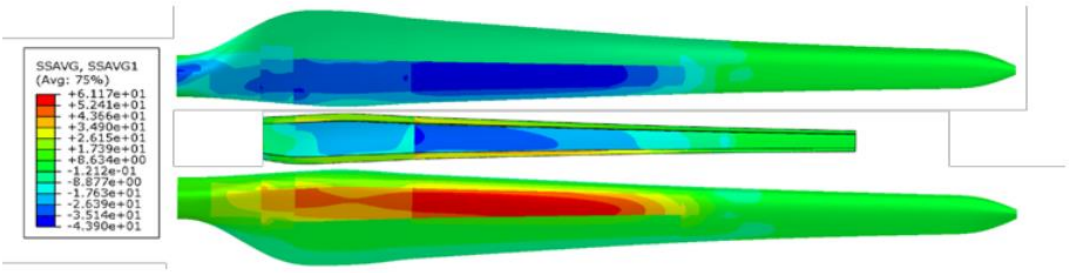
kanadın kalınlığı yönündeki gerilmelerin sonlu elemanlar analizinde dikkate alınması gerekir. Bu gerilmeler, spar kepleri ve ağları arasındaki bağları zayıflatabilir ve delaminasyona yol açabilir (Şekil 6.28) .



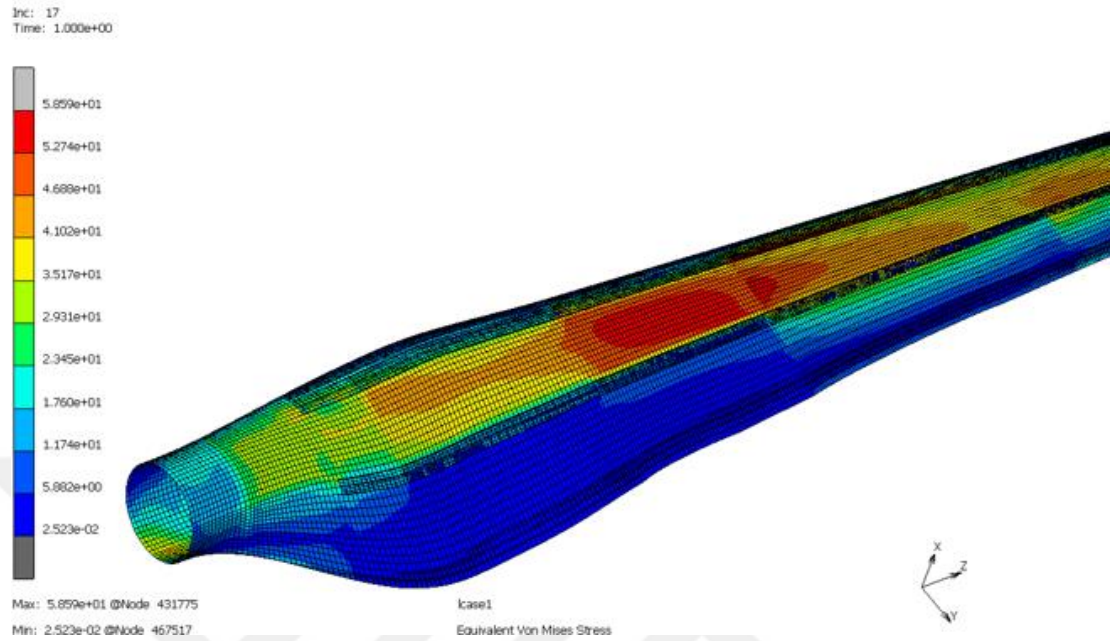
Şekil 6.28 Spar kep gerilme dağılımı

6.3.1 Puck Hasar Kriteri

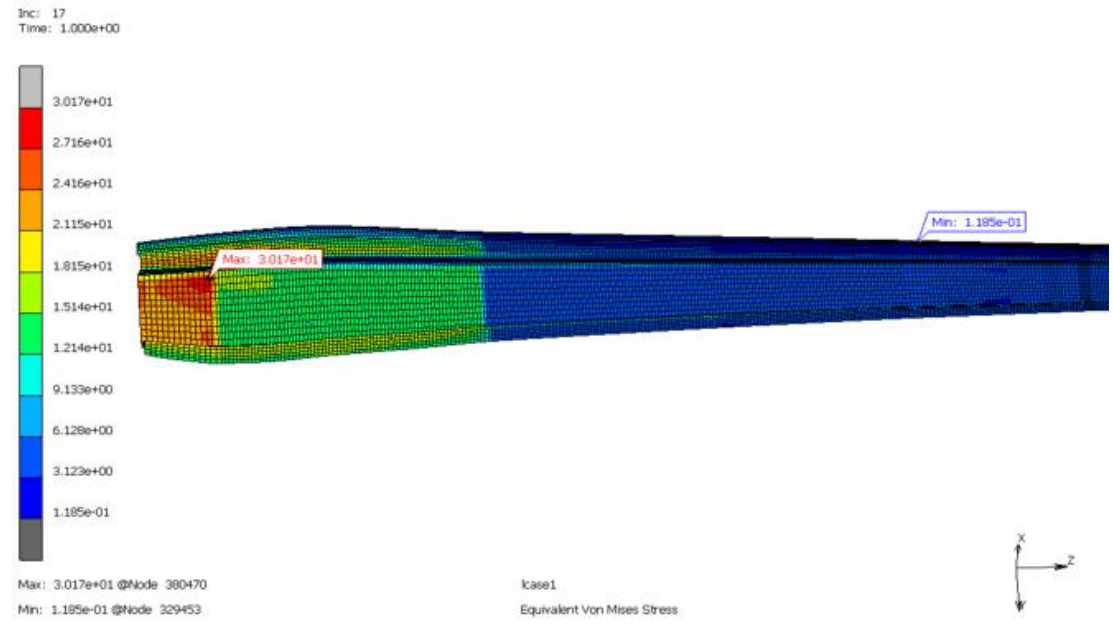
Puck ilerlemeli hasar modeli, kanadın kök geçiş bölgesinde sparın aerodinamik kabuk yüzeyiyle birleştiği kesişim bölgesinde laminat hasarının başladığını göstermektedir. Hasar, ağırlıklı olarak aerodinamik kabukta ilerlemektedir. Bu bölgedeki ani kalınlık/rijitlik değişimi, laminat kalınlık değişiminden kaynaklanan konikleşme ve kat farkları ile birlikte, eğilme momentinden kaynaklanan gerilme değerlerinin ve dolayısıyla hasar indekslerinin ani artışına neden olmaktadır (Şekil 6.29-6.32).



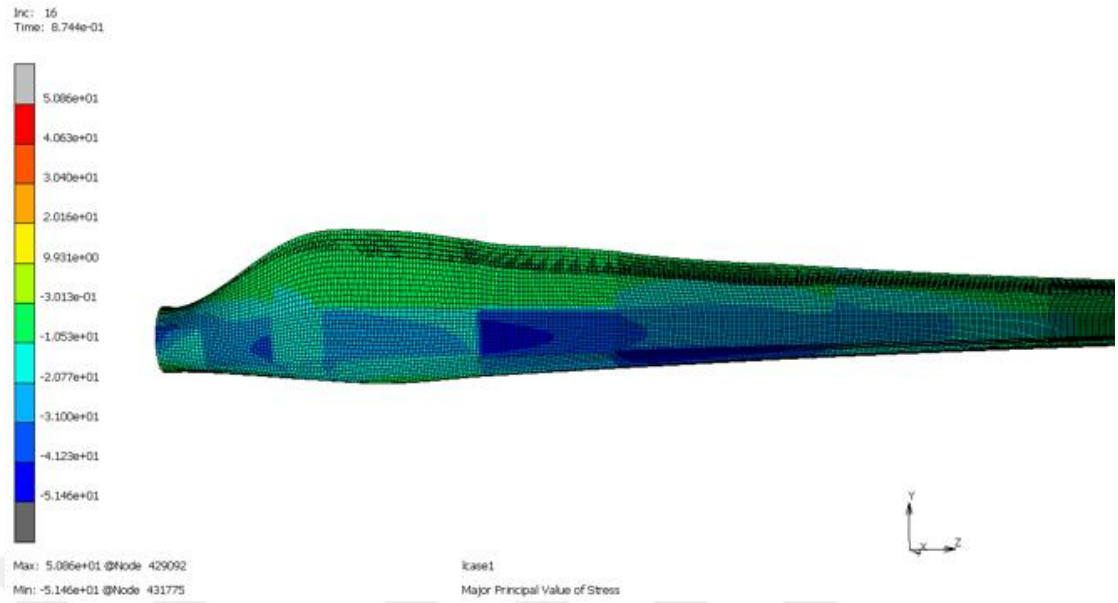
Şekil 6.29 Referans çalışmasındaki yüksek basınç, spar ve alçak basınç yüzeyleri için fiber yönündeki ortalama gerilme dağılımları (Batmaz, Muyan ve Çöker, 2021)



Şekil 6.30 Yüksek basınç yüzeyi için eşdeğer von Misses gerilmesi



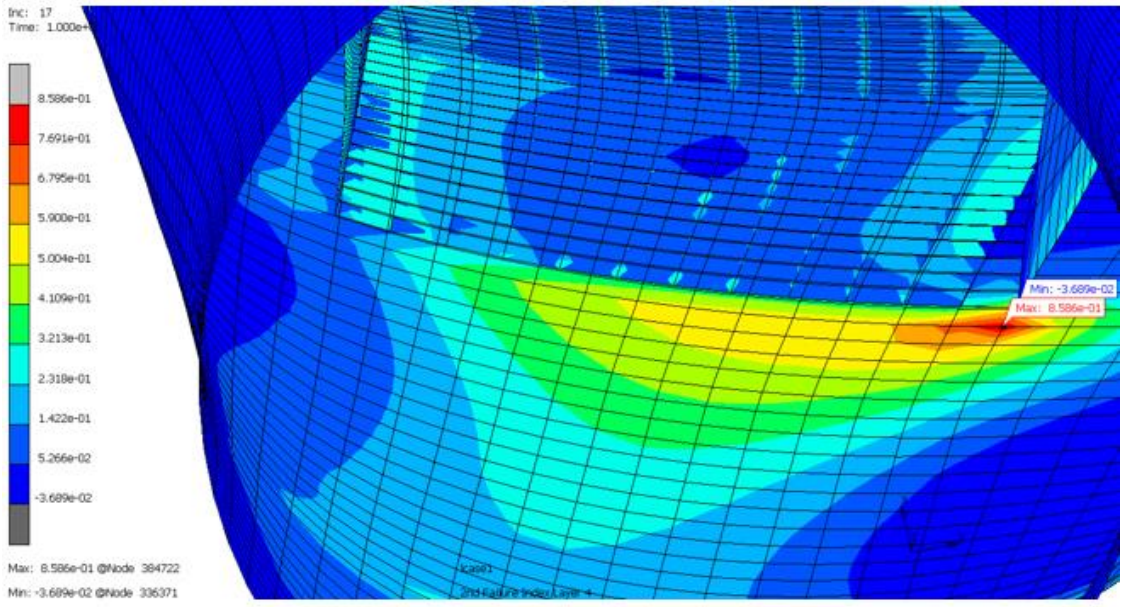
Şekil 6.31 Spar yüzeyleri için eşdeğer gerilme dağılımı



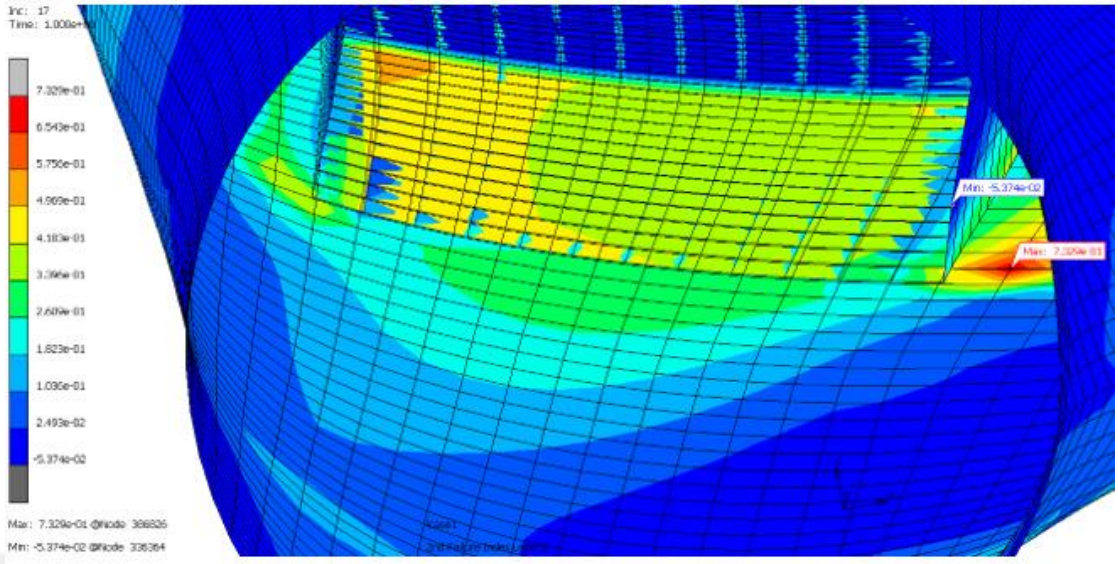
Şekil 6.32 Alçak basınç yüzeyleri için eşdeğer gerilme dağılımı

6.3.1.1 Seçici Kademeli Bozunma

r_1 fiber kopmasına bağlıdır: birinci ve ikinci hasar indeksi (Şekil 6.33-34)

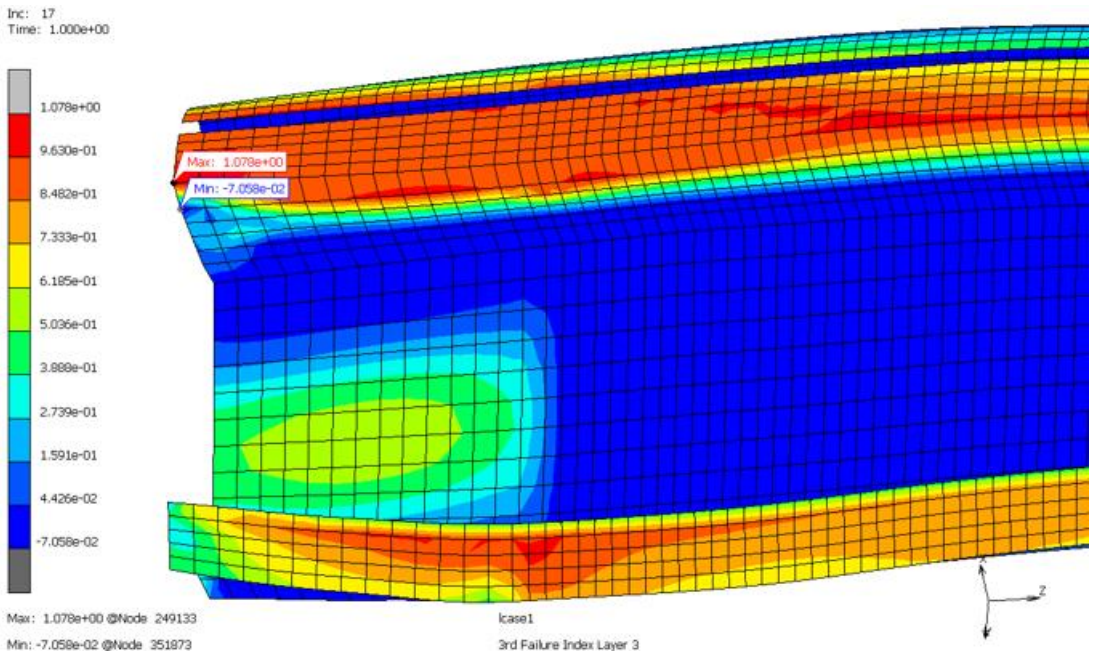


Şekil 6.33 Spar kep civarında artış- 2. Hasar indeksi 4. Katman (fiber bası)

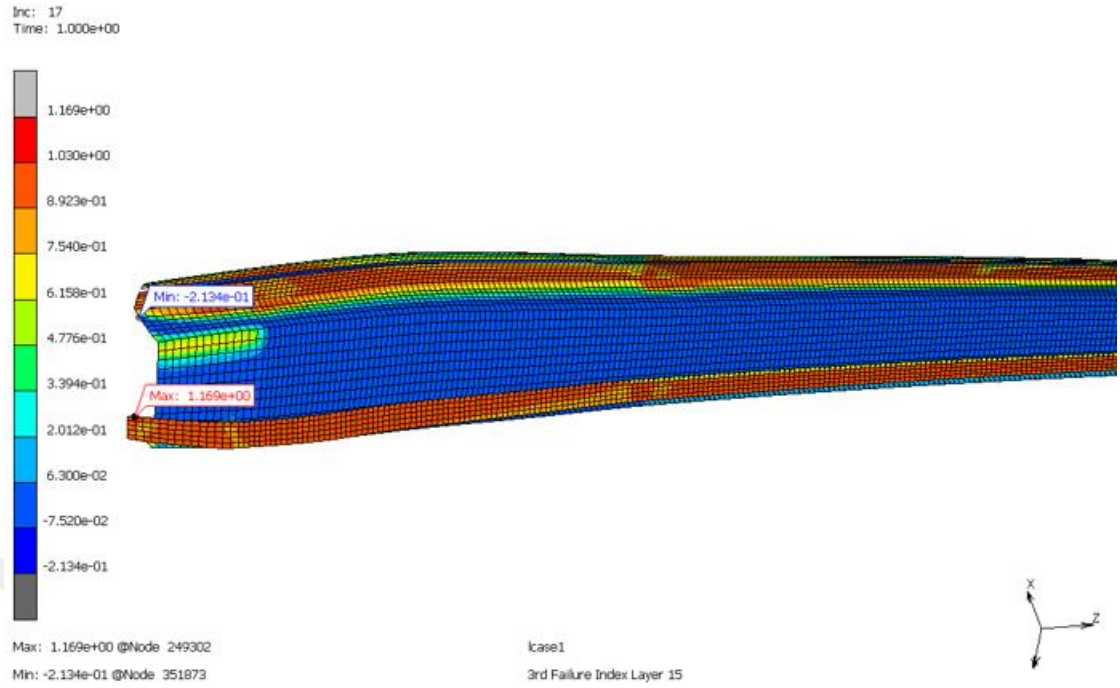


Şekil 6.34 Spar kep civarında artış- 2. Hasar indeksi 6. Katman (fiber bası)

r_2 matris hasarına bağlıdır (üçüncü, dördüncü ve beşinci hasar indeksi) : 2- fiber sıkıştırma veya 4 - matris sıkıştırma modu B (Bu malzemeyi kullanan katı elemanlar için matris sıkıştırması için yalnızca 4. hasar indeksi kullanılır.) veya 5 matris sıkıştırma modu C.



Şekil 6.35 Spar kep civarında artış-3. hasar indeksi katman 3 (matris çeki, mode A)



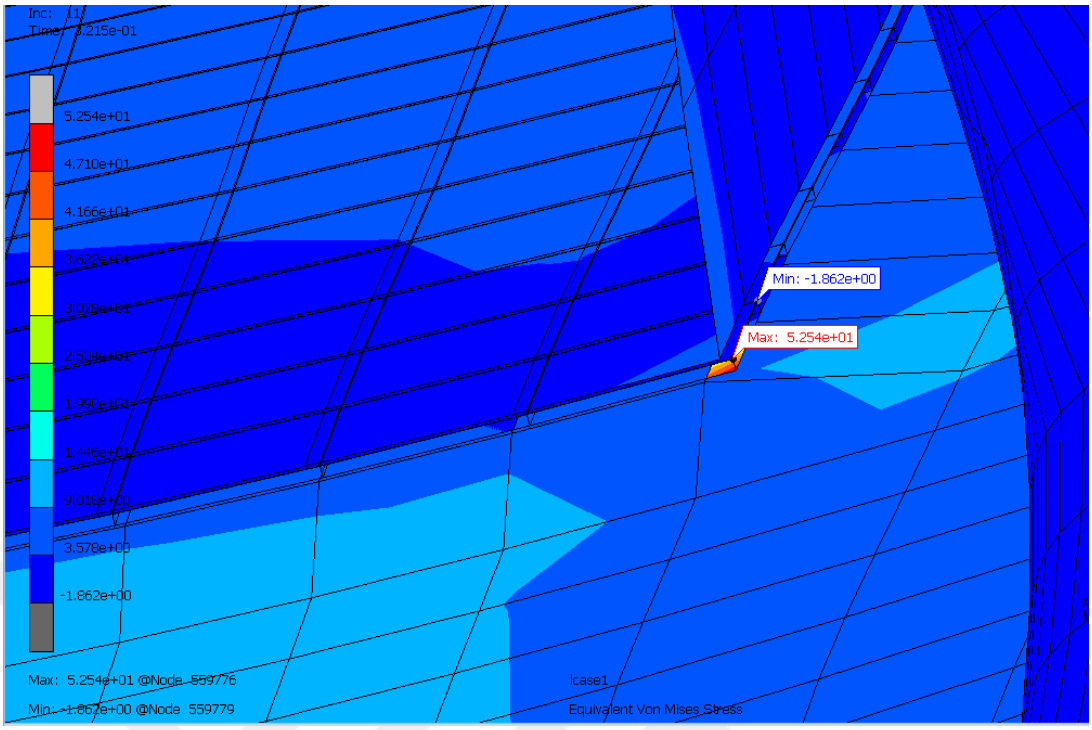
Şekil 6.36 Spar kep civarında artış-3. hasar indeksi katman 1 (matris çeki, mode A)

6.3.2 Kırılma Mekaniği ve Delaminasyon

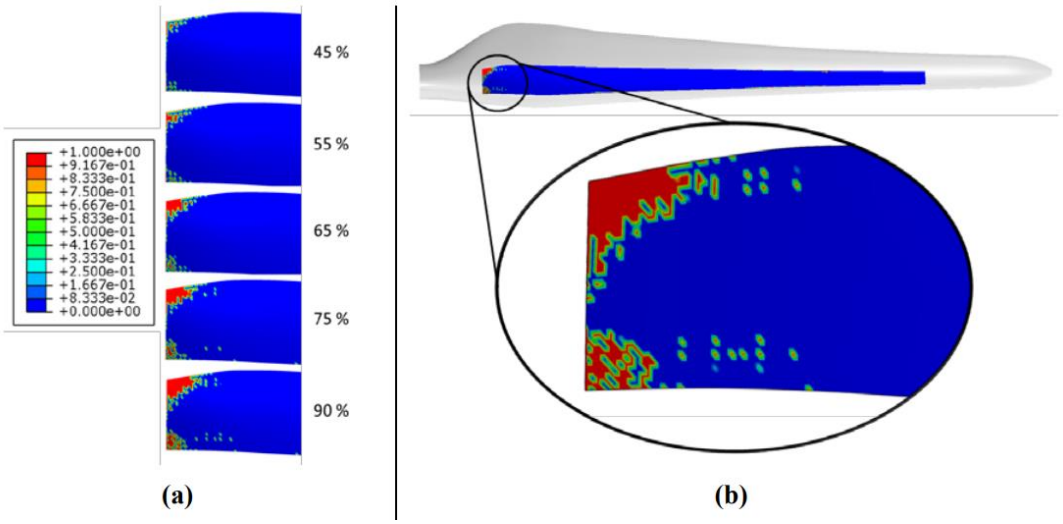
6.3.2.1 Gerilme Kriteri

Yüksek basınç yüzeyi ve spar arayüzüne kohezif bölge modeli uygulanarak yapıştırıcı ayrılma hasarı simüle edilmiştir. Bu model, yapıştırıcı ayrılma hasarının önce spar yapısının köşelerinden başladığını ve kök-geçiş bölgesini kapsayacak şekilde ilerlediğini göstermektedir.

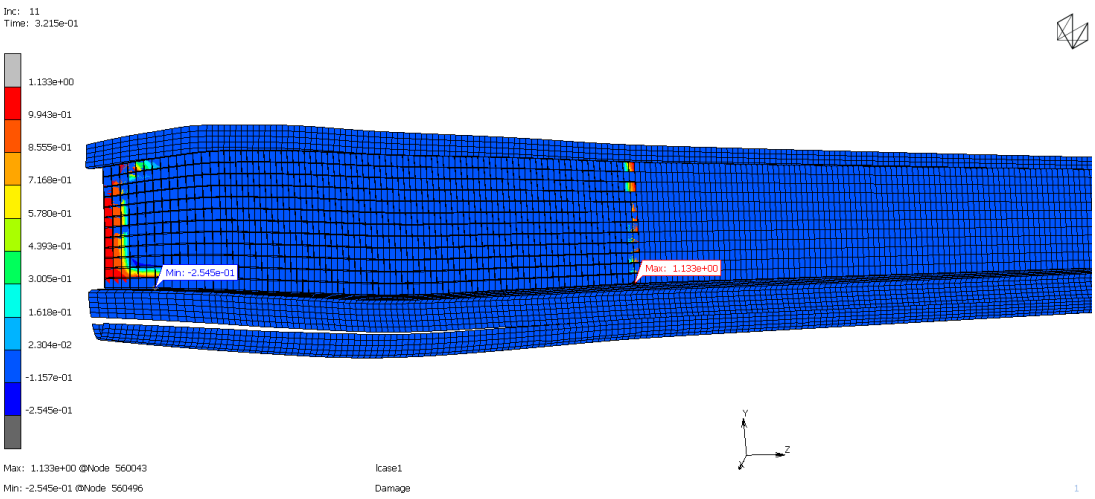
Modal analizlerle yüksek oranda tutarlılık sağlayan sonlu elemanlar modeli, Puck ilerlemeli hasar analizi ile incelendiğinde, bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, kanadın kök-geçiş bölgesinde bulunan yüksek basınç yüzeyi-spar arayüzünde yaşanabilecek yapıştırıcı ayrılma hasarının kritik olduğu öngörülmüştür (Şekil 6.38-6.40) (Batmaz, Muyan ve Çöker, 2021).



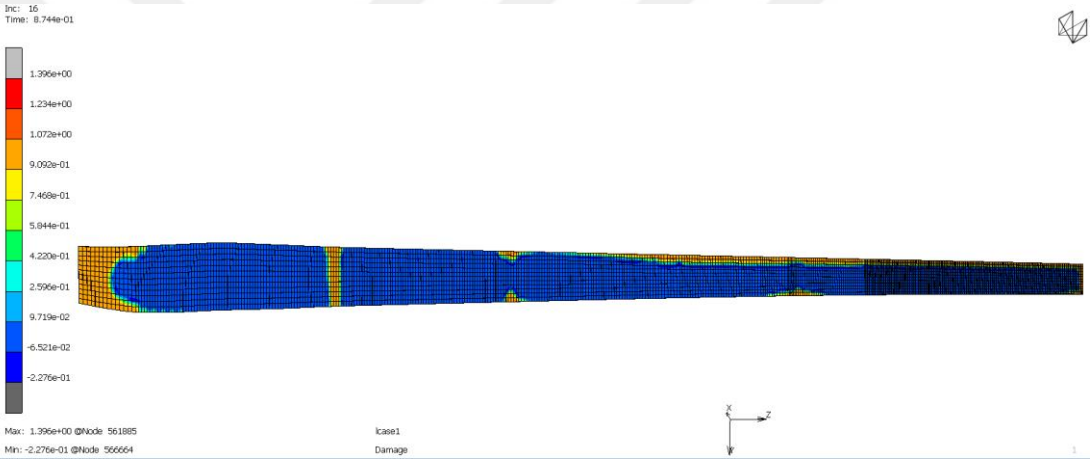
Şekil 6.37 Gerilmenin yoğunlaştığı kısımlar



Şekil 6.38 Yapıştırıcı yüzeyindeki ayrılma hasarının (a) farklı yük yüzdelerindeki oluşum sekansı ve (b) limit yük değerindeki nihai hasar dağılımı (Batmaz, Muyan ve Çöker, 2021)



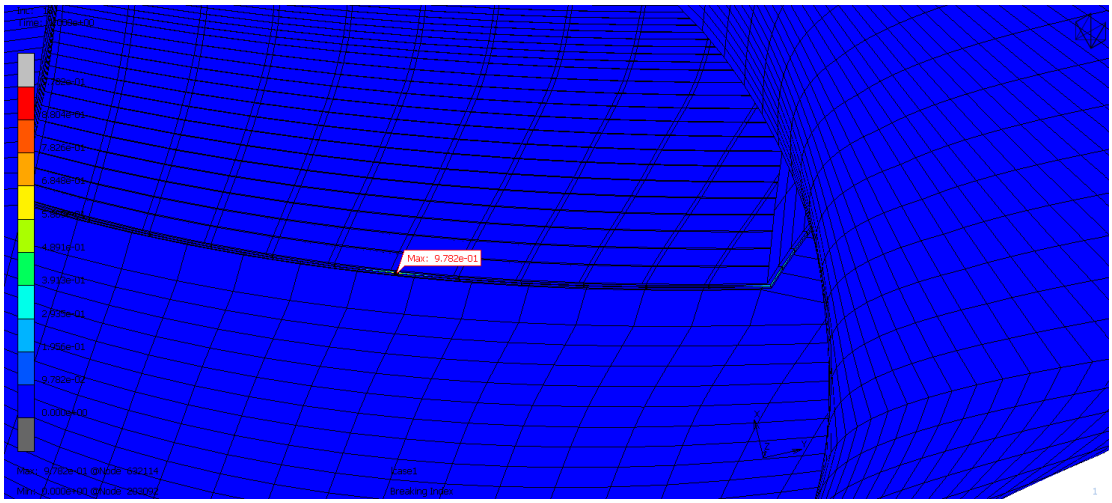
Şekil 6.39 Yapıştırıcı yüzeyindeki ayrılma hasarının oluşumu



Şekil 6.40 Yapıştırıcı yüzeyindeki ayrılma nihai hasarının dağılımı

6.3.2.1 Kırılma İndeksi

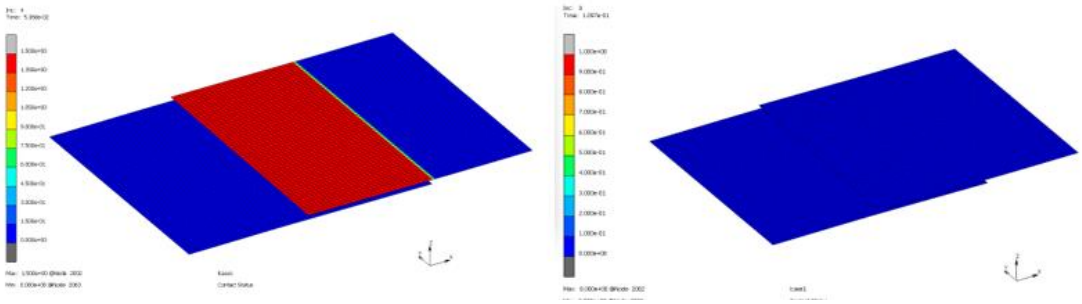
Mevcut geometri, malzeme özellikleri ve uygulanan yük altında, Puck ilerlemeli hasar analizi sonuçlarında kritik olarak belirlenen bölgede yapıştırıcı ayrılma hasarı tek başına kanadın yapısal bütünlüğüne yıkımsal bir etki yaratmamaktadır (Şekil 6.41).



Şekil 6.41 Yapıştırıcı ayrılmasının yapısal yıkıma etkisinin olmaması

6.3.2.2 Yapışkan Kırılması

Kırılma kriteri karşılandığında, sürtünme ve diğer özellikleri içerebilecek düzenli temas kontağı kullanır ve dolayısıyla temas kontağı için ayarlanabilen özellikler burada tanımlanabilir. Örnek bir çalışmada 2 plaka üste üste çekme testi uygulanıp Glue kontak ve glue breaking durumları incelenmiştir. Adım 8 ‘den sonra ayrılma yaşanır ve kontak kalkar ve Adım 9’dan itibaren değer ölçümü durur (Şekil 6.42).



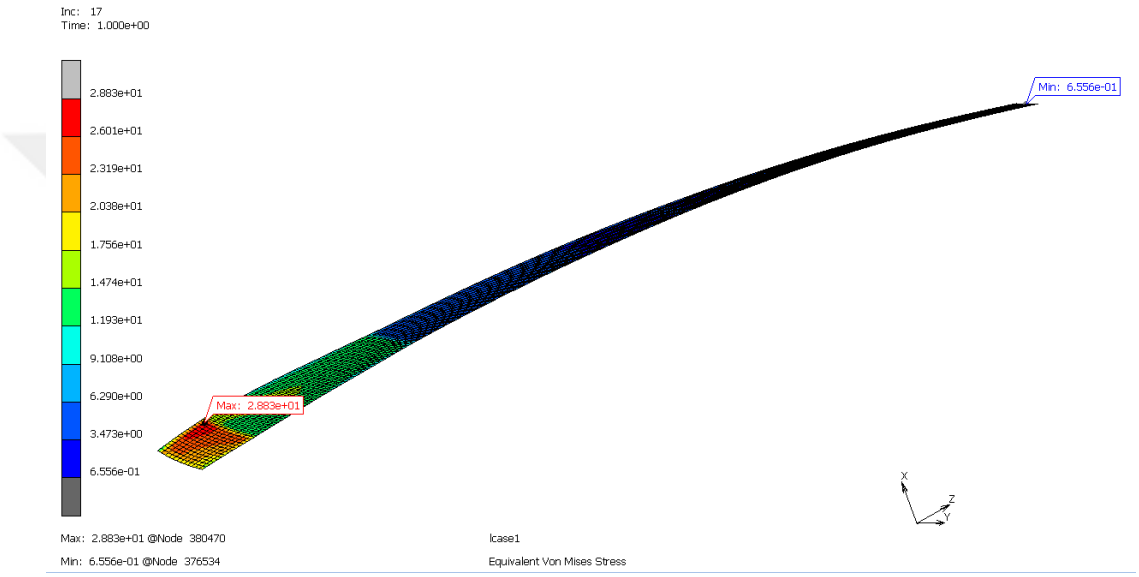
Şekil 6.42 Deneme numunesi ayrılma hasarı bölgesinde Glue Breaking kontak durumu

6.3.2.3 Yapışkan (Kohezif) Bölge Modeli Sonuçları

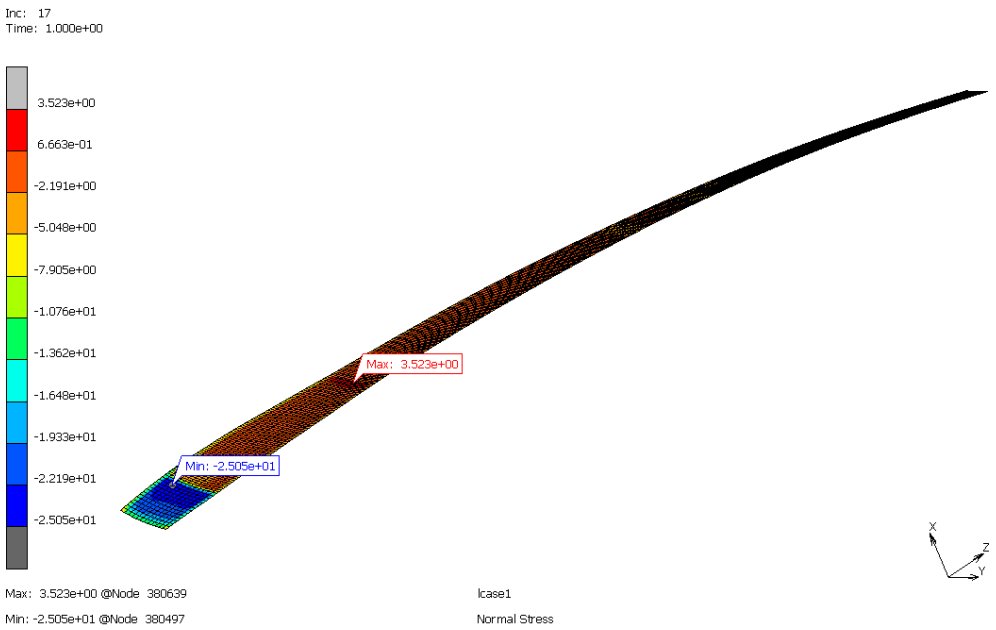
Eleman 149, 8 düğümlü katı kompozit eleman olarak geçer, 75 ise 4 düğümlü kabuk eleman olarak kullanılır. 188 ise 8 düğümlü arayüz elemanıdır. Farklı denemeler yapıldı ve yapışkan teması *(Glue contact)* etkisi olup olmamasına göre VCCT ve CZM yöntemleri değerlendirildi (Tablo 6.1-6.4)

Tablo 6.1 Kohezif hasar durumu

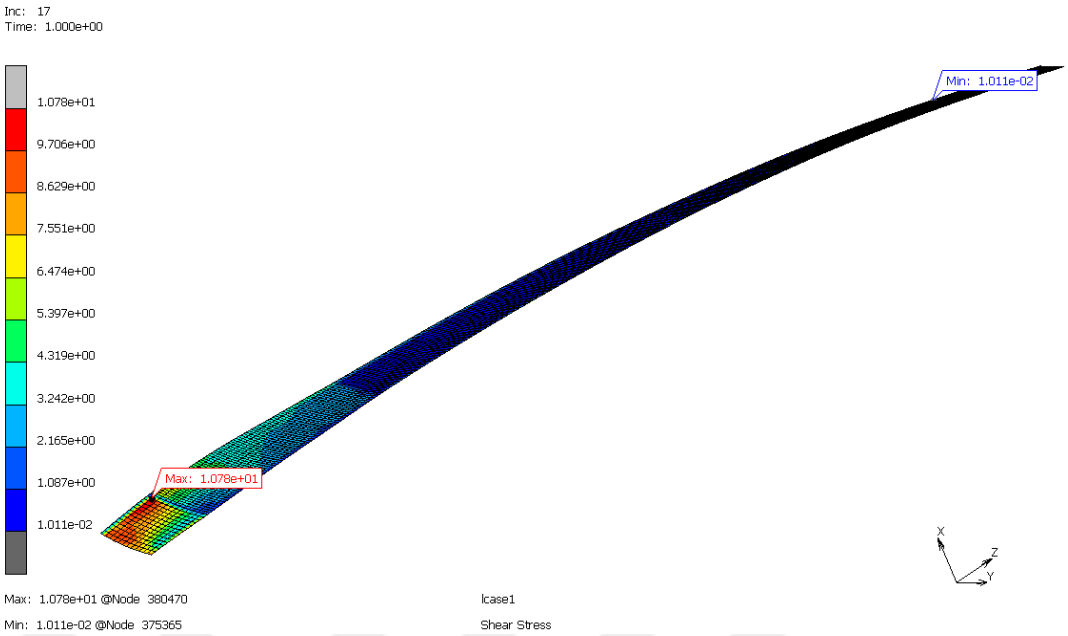
CZM (*gluebreaking olmayan)*	Gerilme Değerleri (MPa)
Von Misses	28,8
Normal Gerilme	-25,05
Kayma Gerilmesi	10,8
Maks. Asal Gerilme	-30,30
Min. Asal Gerilme	15,1



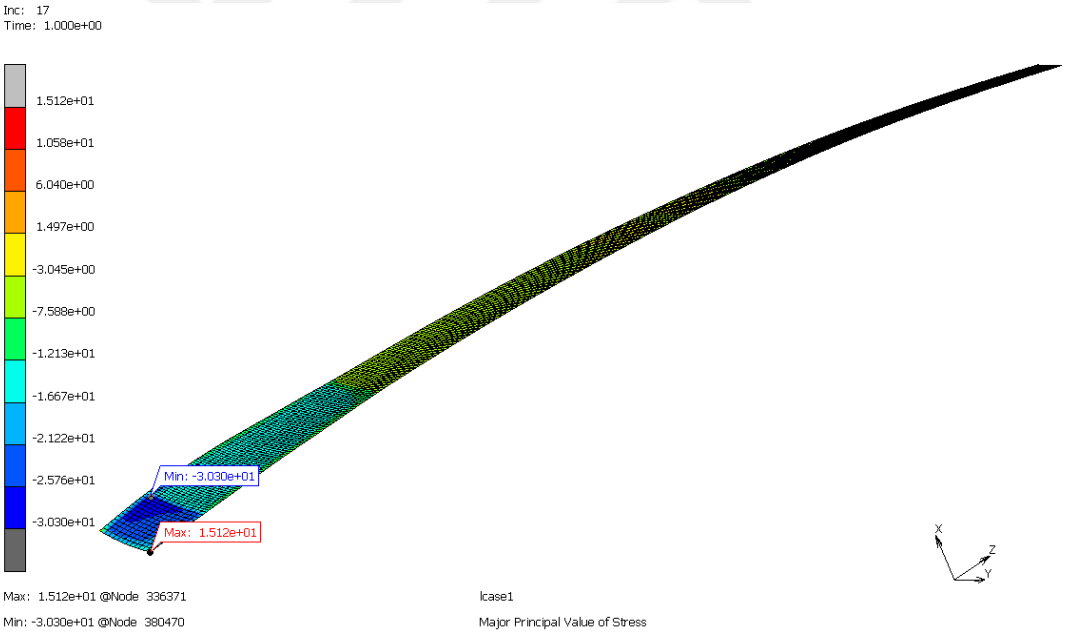
Şekil 6.43 Eşdeğer von Misses gerilmesi



Şekil 6.44 Normal gerilmesi



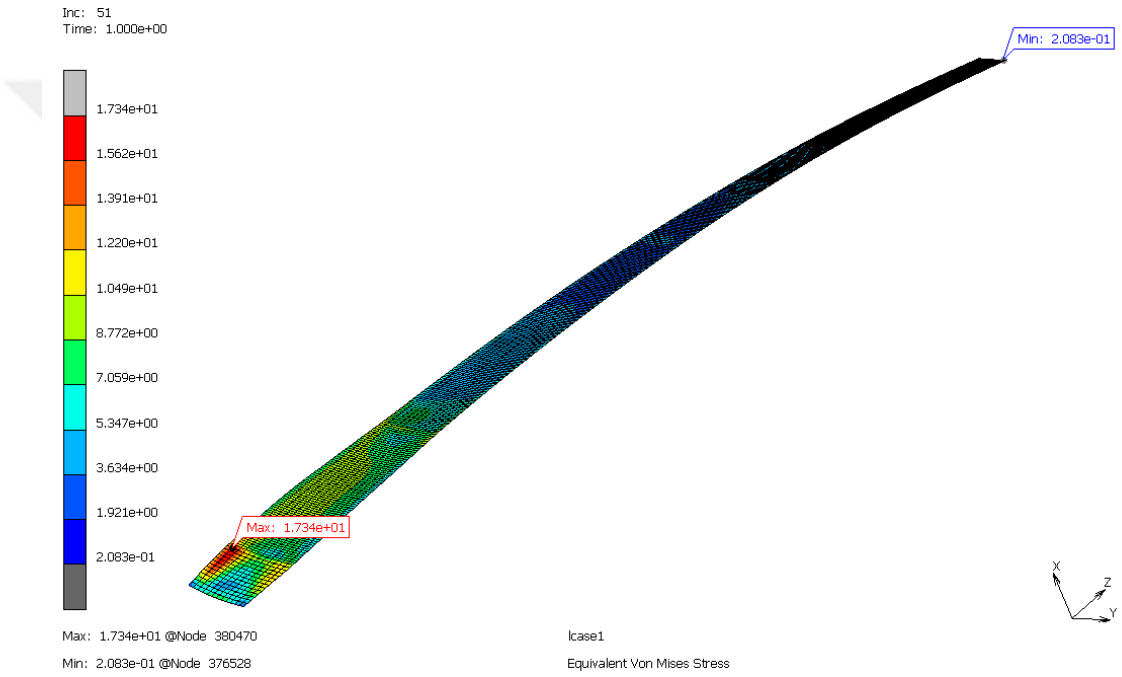
Şekil 6.45 Kayma gerilmesi



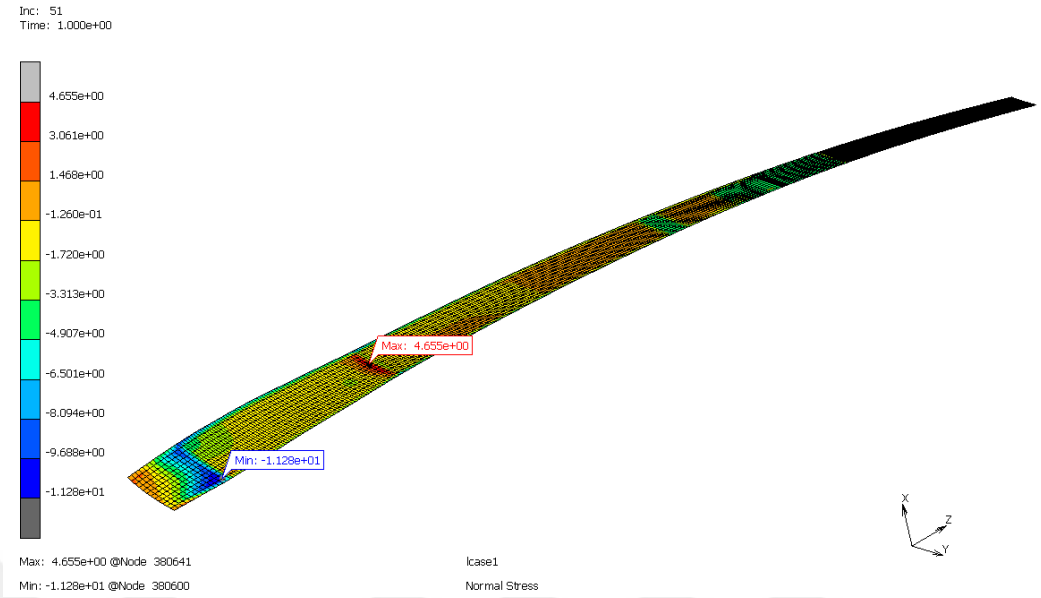
Şekil 6.46 Minimum ve maksimum asal gerilmeler

Tablo 6.2 Kohezif hasar durumu

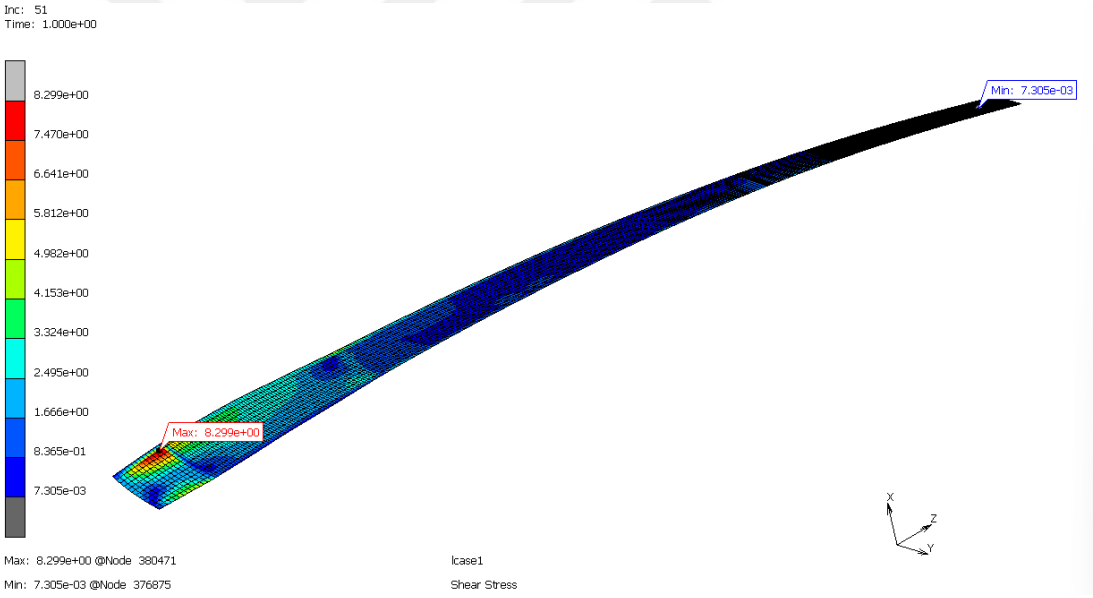
CZM (gluebreaking olan)	Gerilme Değerleri (MPa)
Von Misses	17,34
Normal Gerilme	-11,3
Kayma Gerilmesi	8,3
Maks. Asal Gerilmesi	8,2
Min. Asal Gerilmesi	-16,8



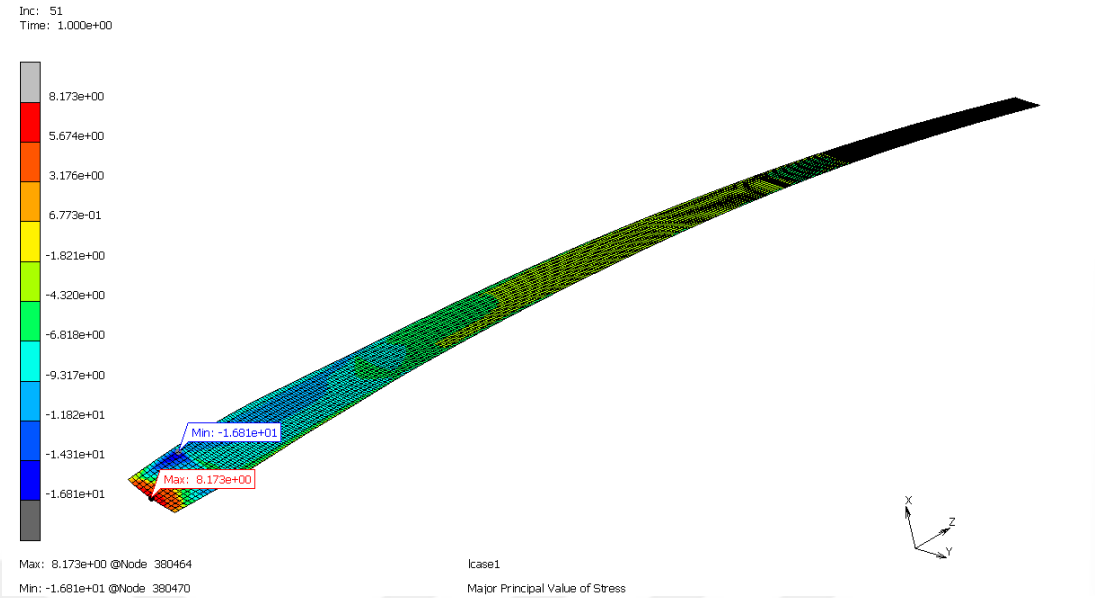
Şekil 6.47 Eşdeğer von Misses gerilmesi



Şekil 6.48 Normal gerilme



Şekil 6.49 Kayma gerilmesi



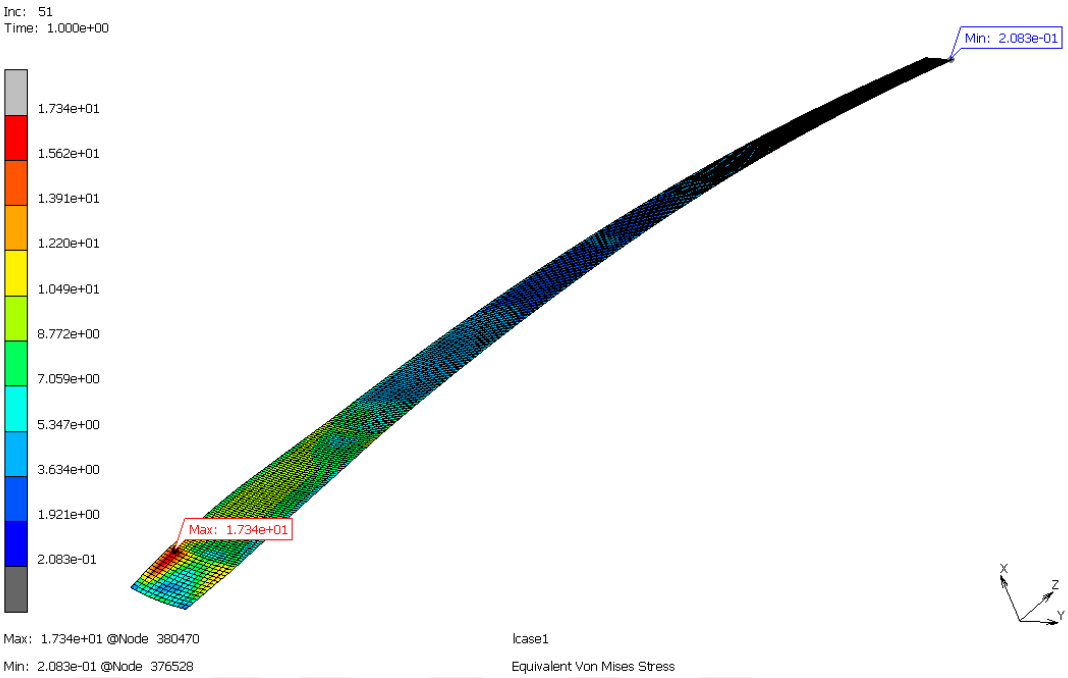
Şekil 6.50 Minimum ve maksimum asal gerilmeler

6.3.2.4 VCCT ile Çatlak Yayılımı

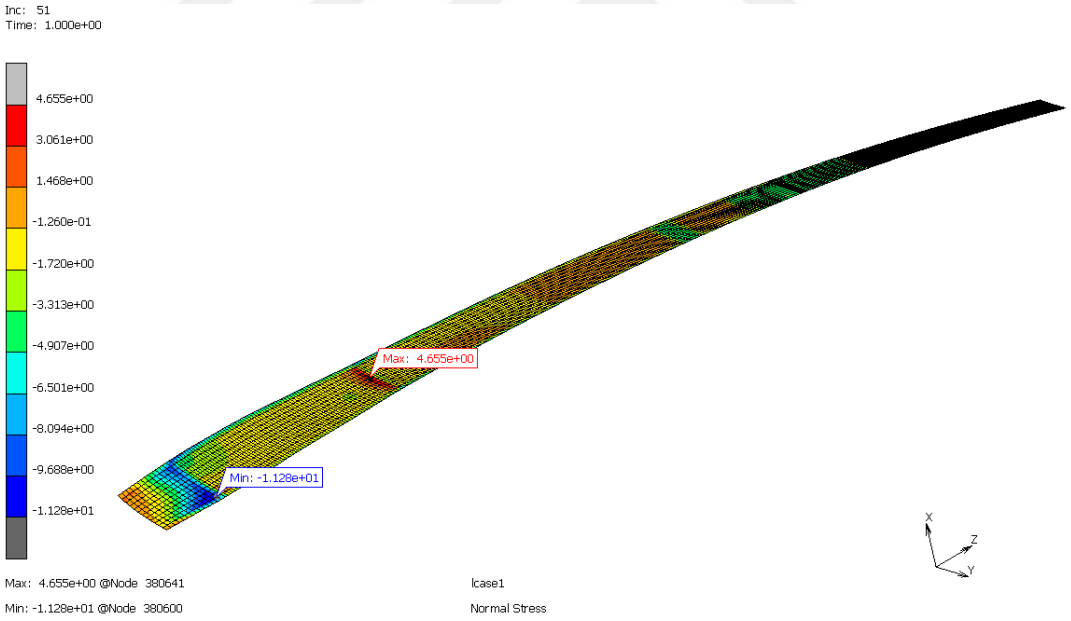
Glue breaking olmayan CZM çalışmalarında hassasiyetin düşmüş olduğu görülür ve nerdeyse CZM VCCT ile neredeyse aynı sonuçları verir.

Tablo 6.3 VCCT hasar durumu

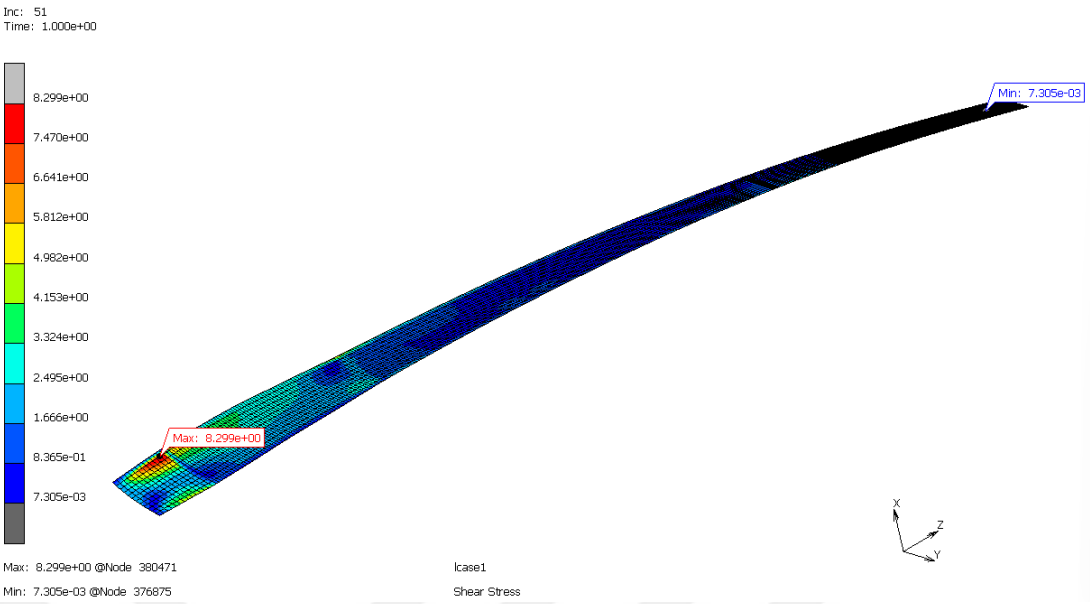
VCCT (gluebreaking olan)	Gerilme değerleri (MPa)
Von Misses	17,34
Normal Gerilme	-11,3
Kayma Gerilmesi	8,29
Maks. Asal Gerilme	8,2
Min. Asal Gerilme	-16,8



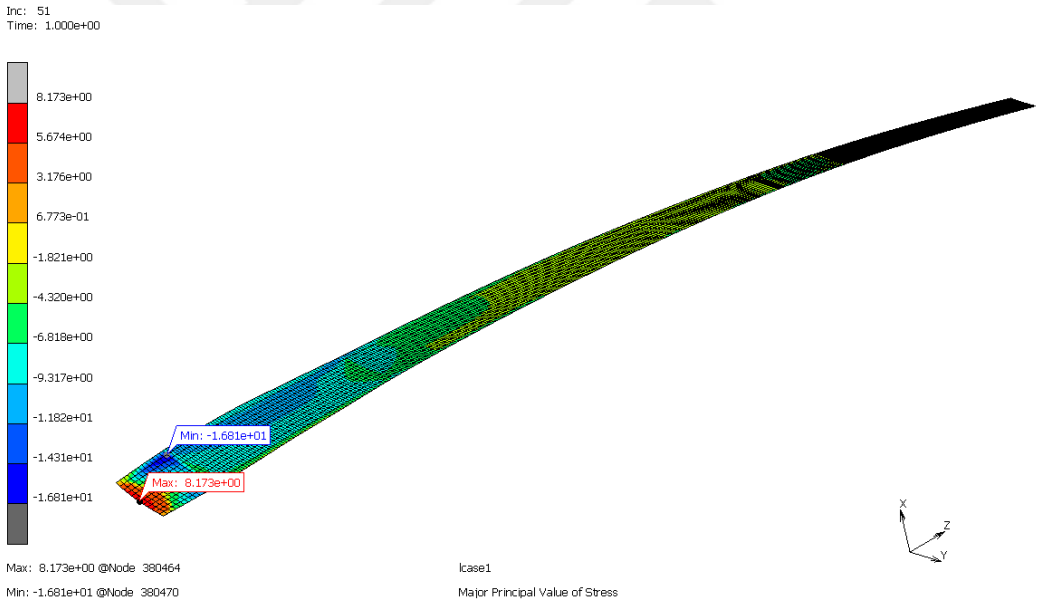
Şekil 6.51 Eşdeğer von Misses gerilmesi



Şekil 6.52 Normal gerilme



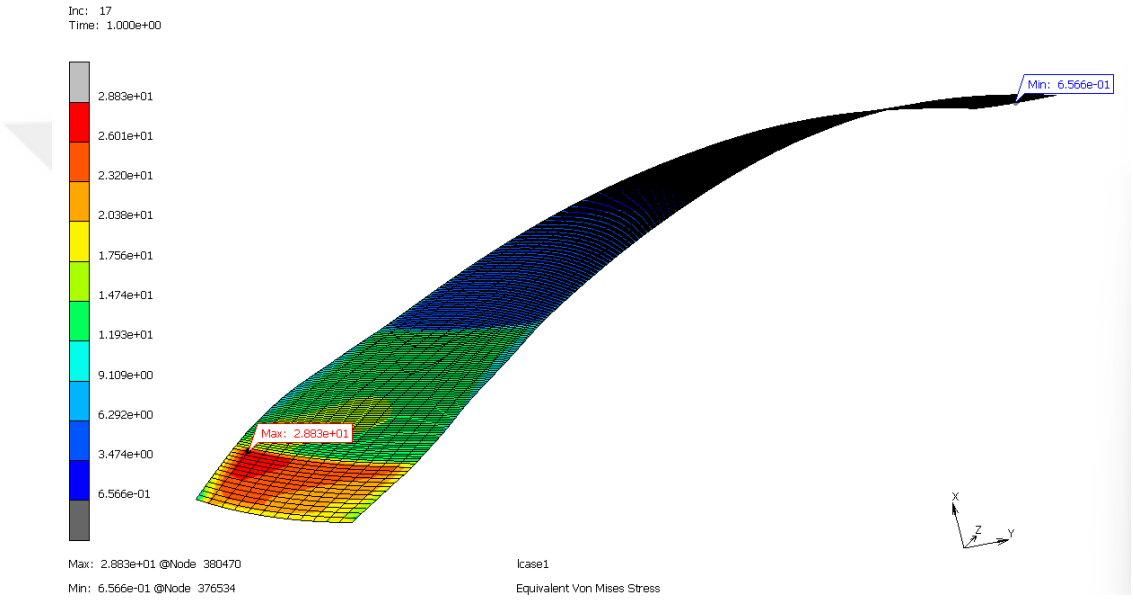
Şekil 6.53 Kayma gerilmesi



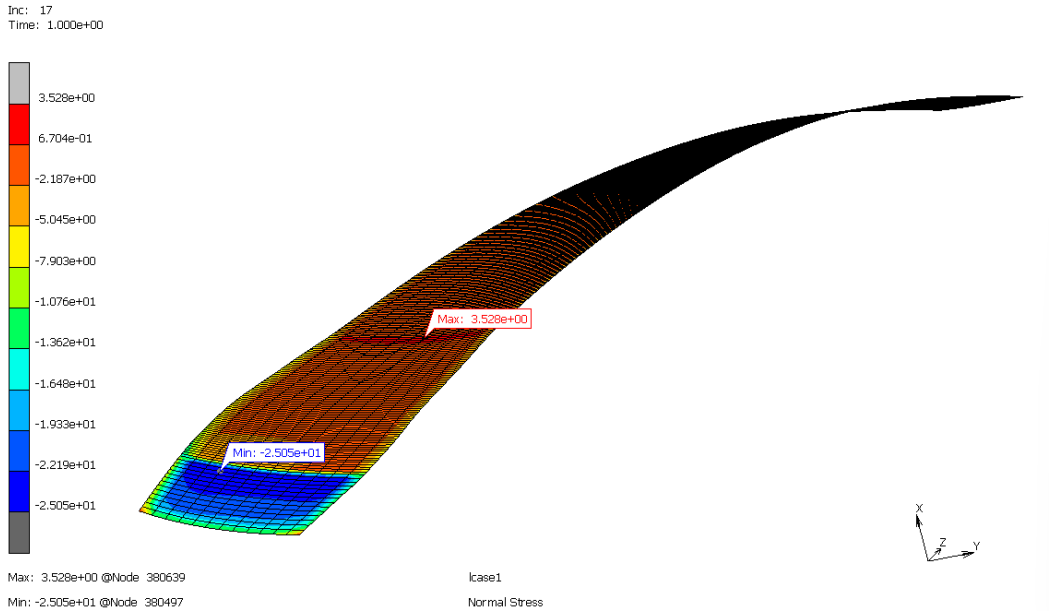
Şekil 6.54 Minimum ve maksimum asal gerilmeler

Tablo 6.4 VCCT hasar durumu

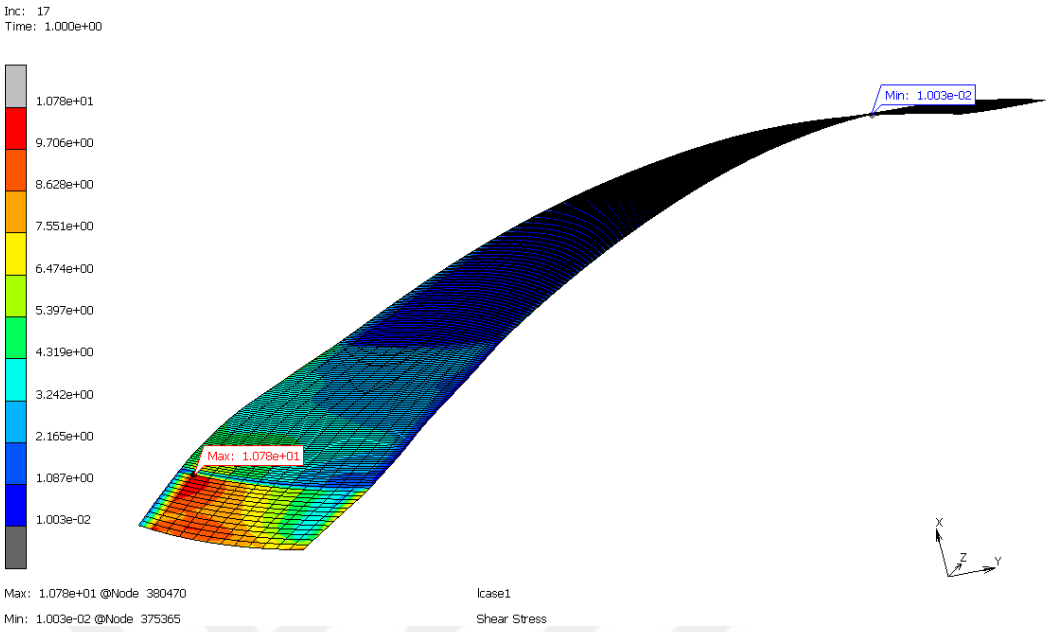
VCCT (gluebreaking olmayan)	Gerilme Değerleri (MPa)
Von Misses	28,8
Normal Gerilme	-25
Kayma Gerilmesi	10,8
Maks. Asal Gerilme	-30,3
Min. Asal Gerilme	15,13



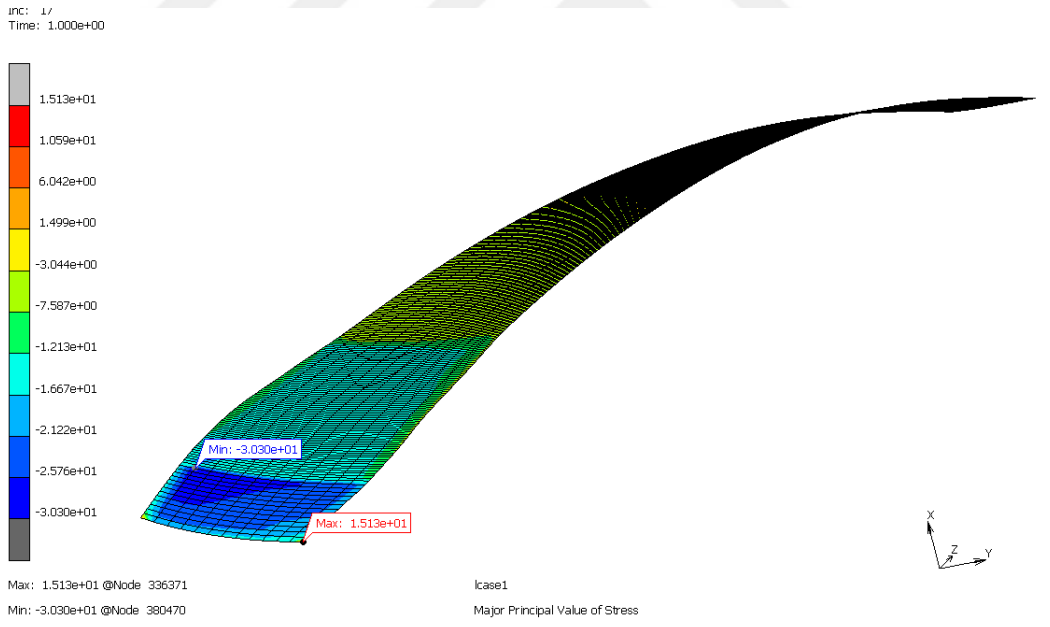
Şekil 6.55 Eşdeğer von Misses gerilme



Şekil 6.56 Normal gerilme

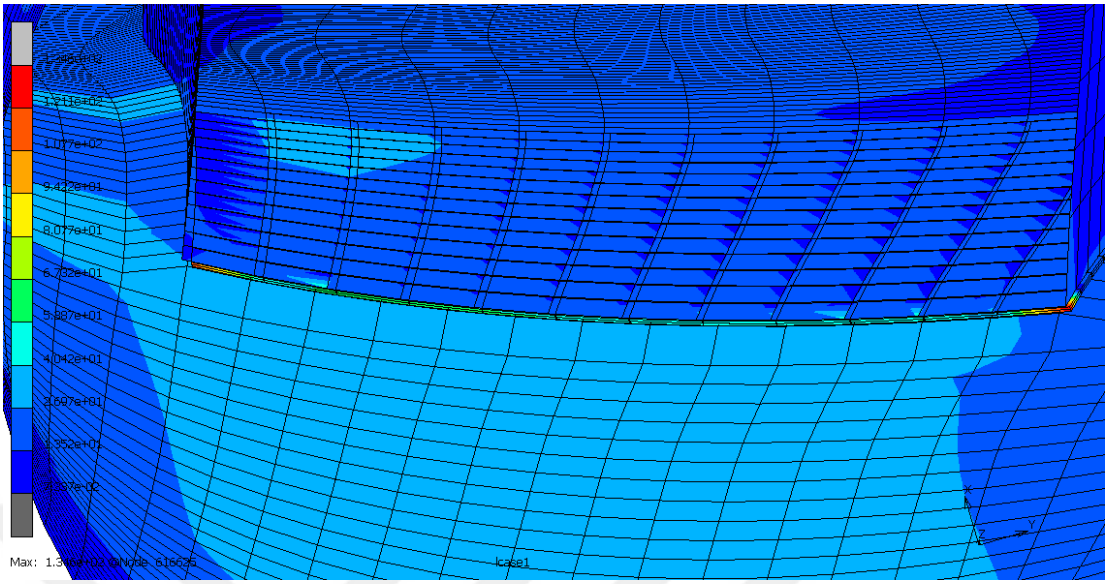


Şekil 6.57 Kayma gerilme



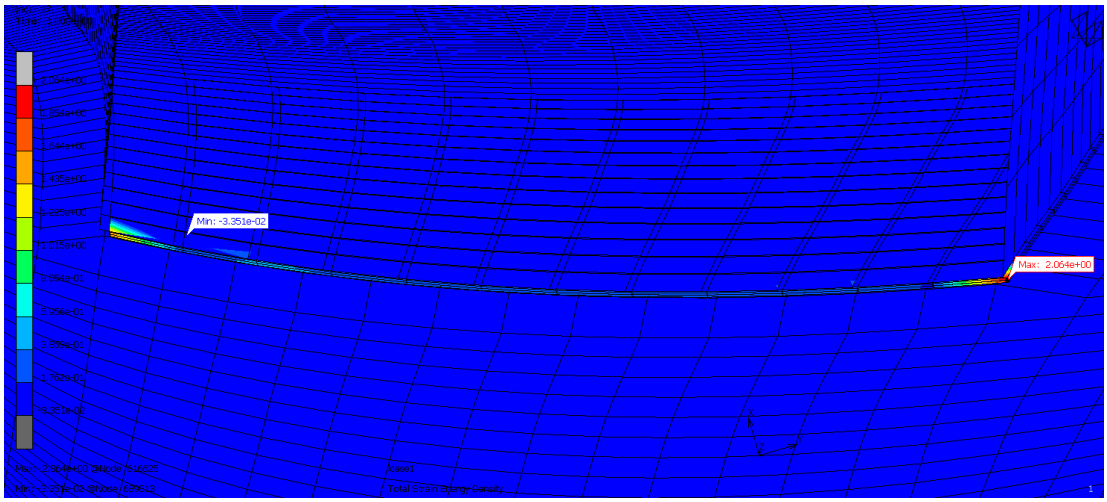
Şekil 6.58 Minimum ve maksimum asal gerilmeler

Yapılan analizlerde VCCT ve CZM arasında herhangi bir fark görülmemiştir. Bu analizde VCCT'de çatlak oluşumu olmadığını anlamış olduk. Bu bölgede hasar olsa da yapısal yıkım olmadığı görülmüştür. *Glue breaking* ile arayüz özellikleri kohezif bölgedeki yapışkan kontağa girildiğinde gerilme değerleri referanslarımıza göre daha doğru sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 6.59).



Şekil 6.59 Hasar beklenen yapışkan bölgede gerilme dağılımı

Toplam gerinim enerjisi yoğunluğu değerleri çatlak oluşacak bölgeyi gösteren bir değerdir. Bu maksimum değerleri yapışkan ayrılmasında başlayacak çatlağı ifade eder (Şekil 6.60).



Şekil 6.60 Hasar beklenen yapışkan bölgede toplam gerinim enerjisi yoğunluğu

Çatlak oluşumu ile kırılmayı, yapısal yıkımı görebilmek için delaminasyon başlangıcı olan spar kep bölgesi çatlak başlama bölgesi olarak seçildi. Herhangi bir çatlak görülmedi ve bunun sebebinin bası etkisi olduğu düşünülmektedir çünkü çeki gerilmeleri genellikle çatlakları açarken, bası gerilmeleri çatlakları kapatma

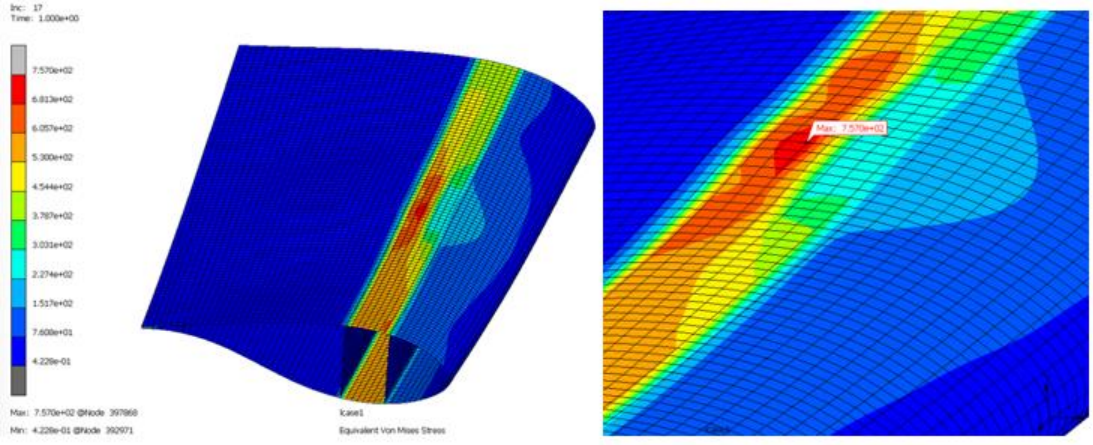
eğilimindedir. Buradan çıkacak bir sonuçta delaminasyonun direkt *kırılma* demek olmadığıdır.

6.4 Burkulma Analizi Sonuçları

DTU 10 MW Rüzgar türbini kanadından alınan bölüm ile önerilen global-yerel modelleme yaklaşımının, kanadın hasar davranışını yakalamada etkili olduğu ve kanadın tamamını modellemedeki zorlukları önemli ölçüde azalttığı kanıtlanmıştır (Haselbach, 2015). Hem referans çalışmasında hem de bizim çalışmamızda; lokal burkulma, spar kepin lokal düzlem dışı deformasyonunu arttırarak hasar sürecine katkıda bulunmuştur. Bu çalışma ile büyük kompozit kanatların kırılmasında kalınlık boyunca gerilmelerin ne denli kritik olabileceğini görmüş olduk.

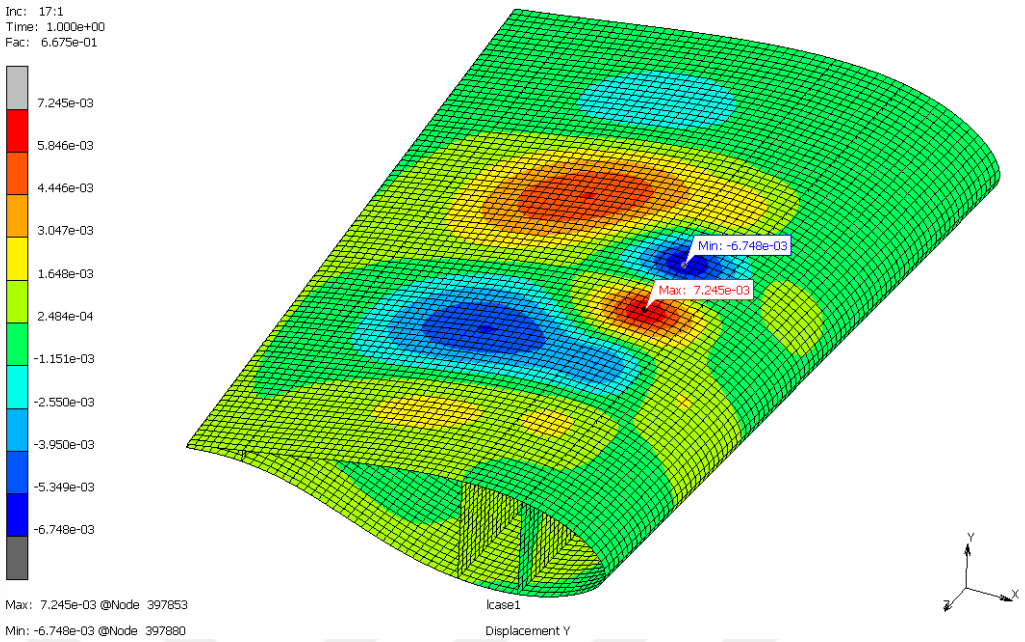
6.4.1 Yük Altındaki Kanat Modelinin Yapısal Davranışları

Spar kep tarafından orta kısmında yüksek bir gerilme görülmektedir; bunun sebebi delaminasyon ve sebep olduğu burkulma modlarıdır.



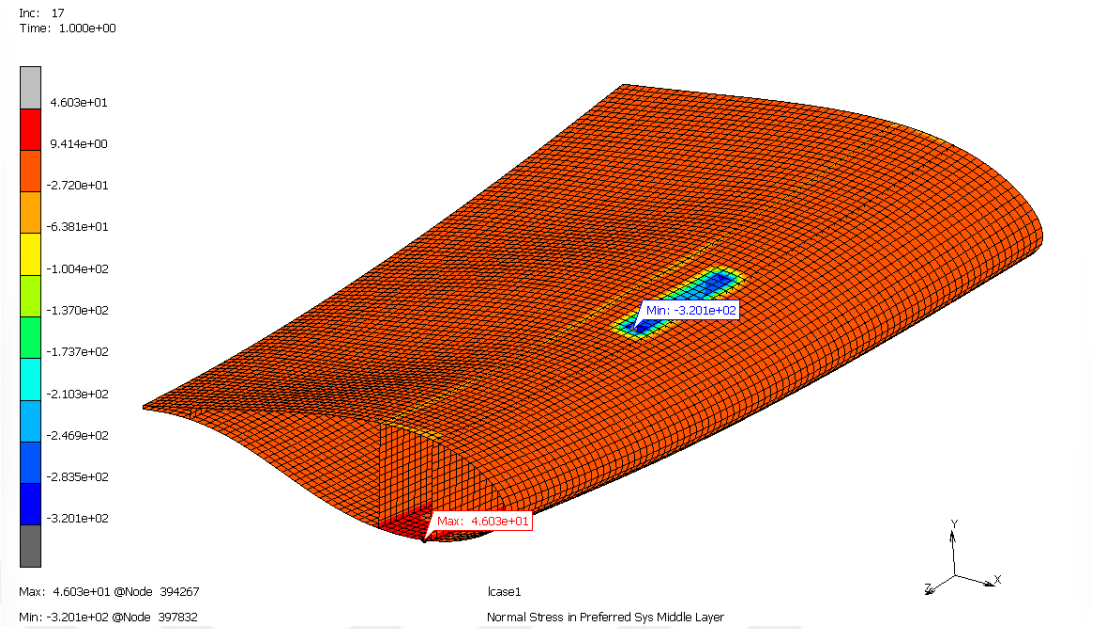
Şekil 6.61 Burkulma beklenen bölgede gerilmenin yüksek olması

Lokalize deformasyonlardan biri "nefes alma"dır. Nefes alma, spar keplerden arka kenara kadar orta noktada paneller arasındaki göreceli deformasyondur. Yer değişimleri burkulma modu oluşturacak şekilde spar kep üzerinde bir dağılım gösterir (Şekil 6.62).

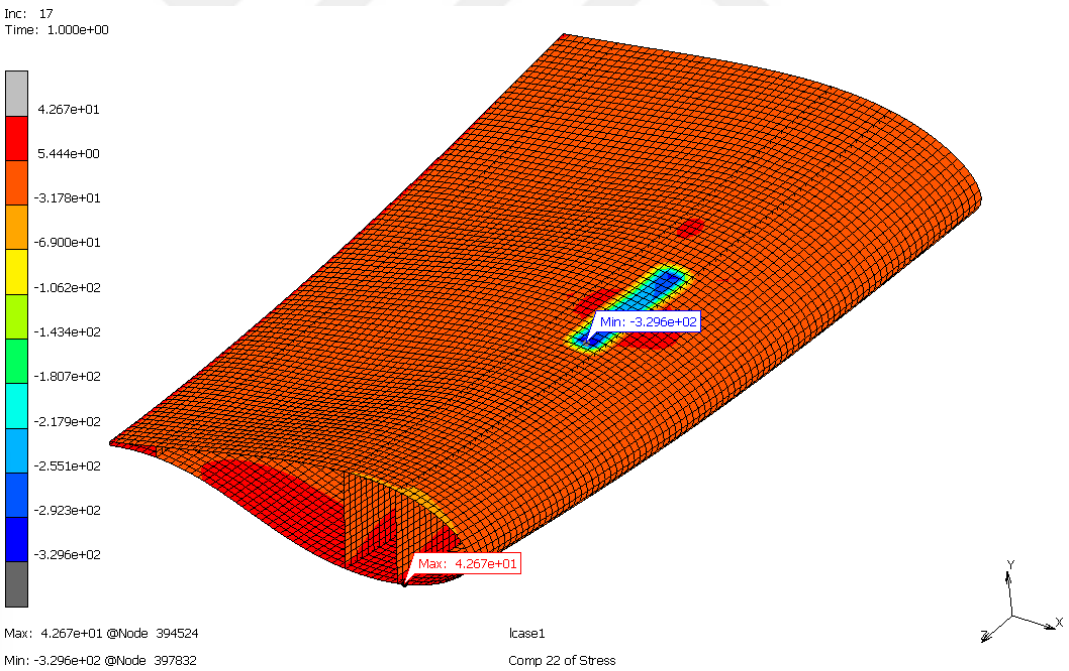


Şekil 6.62 Y yönünde(burkulma yönü) yerdeğişimi

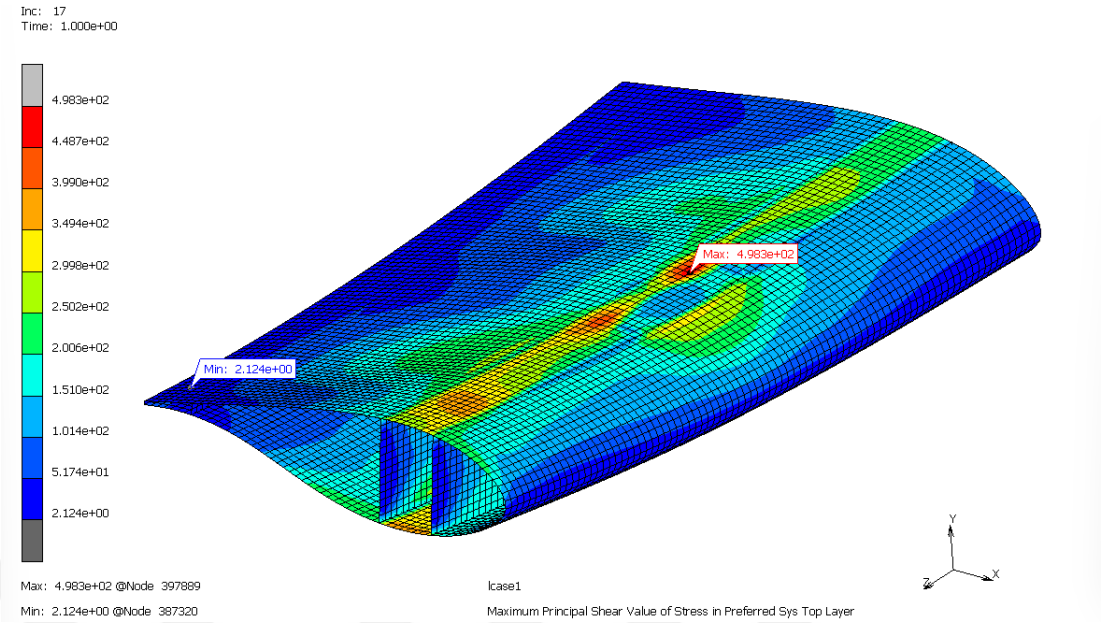
Rüzgar yüklerinden dolayı spar keplerin düzlem dışı deformasyonu (düzleşmesi) spar kep hasarına neden olabilir. Bu göçme, nötr eksene en yakın tek yönlü tabakalarda enine çekme kırılması veya tabakalar arasında tabakalar arası kayma kırılması olarak ortaya çıkabilir. Kanadın, esas olarak uzunlamasına yönde hizalanmış liflerle tipik yerleşimi, spar kepi yanal yönde nispeten esnek hale getirir. Bu esneklik, enine gerilme hasarı riskini artırır. Ek olarak, laminat içindeki üretim kusurları, yorgunluk ve nihai mukavemetini daha da azaltır. Y ekseni bu bölge için belirleyicidir. Delaminasyon bölgesinin sınırında çok yüksek olan σ_{22}, burkulma kırılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Şekil 6.63-6.66).



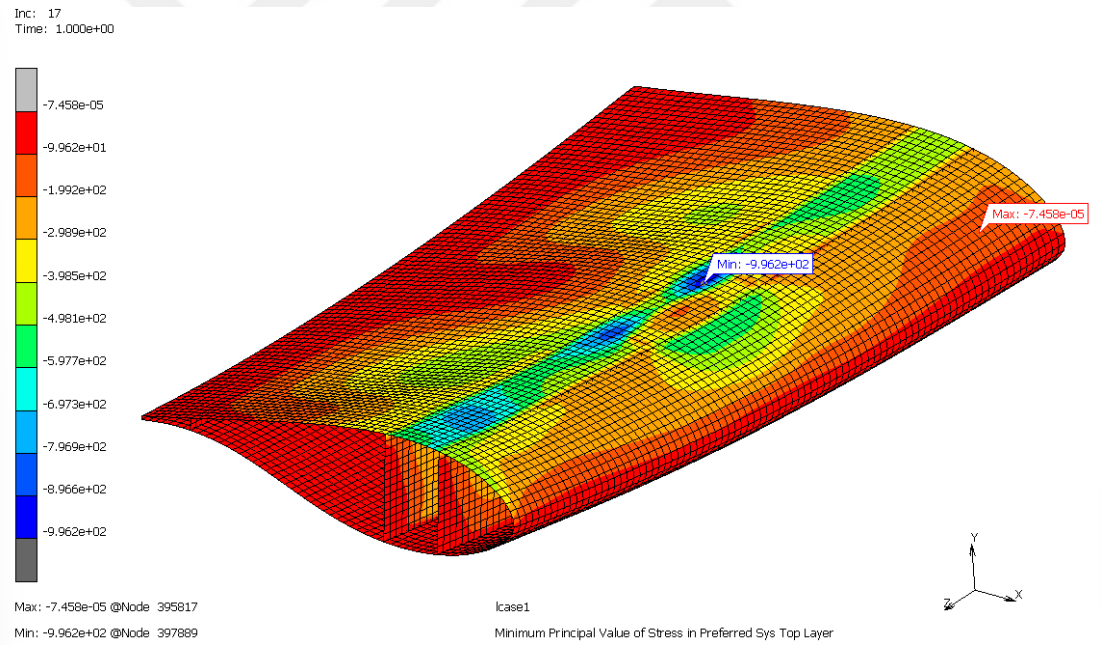
Şekil 6.63 Kritik bölgede normal gerilme



Şekil 6.64 Kritik bölgede σ_{22} değerleri



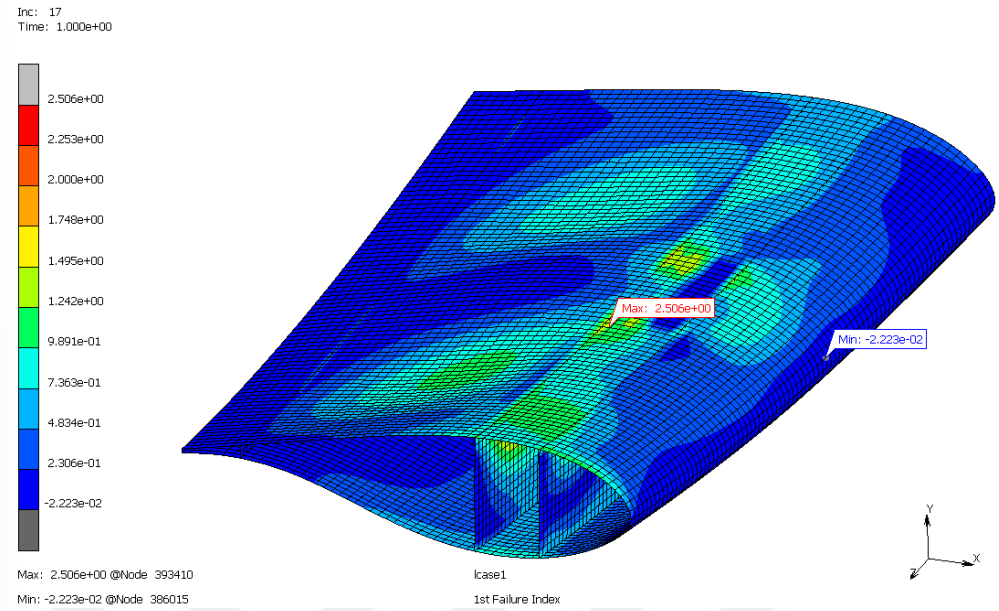
Şekil 6.65 Kritik bölgede maksimum asal kayma gerilmeler



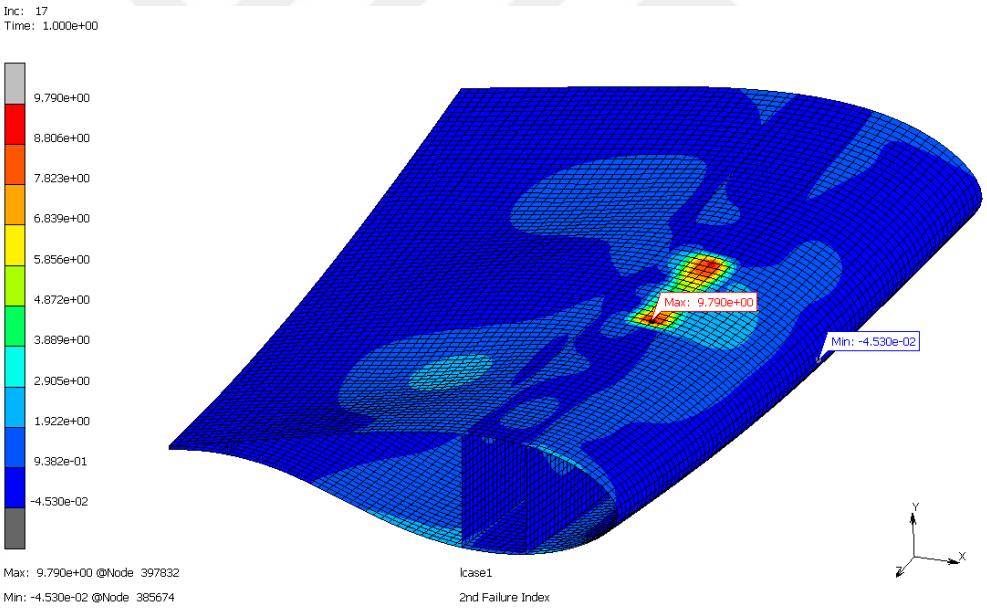
Şekil 6.66 Kritik bölgede maksimum asal gerilmeler

6.4.2 Hasar İndeksleri

1. hasar indeksinden 2. hasar indeksine başlayarak mod durumu netleşir. Tip 1 (kabuk/yapışkan ayrılması ve/veya ana spar/yapışkan tabakası ayrılması) ve Tip 4 (çekme veya burkulma yükünün neden olduğu delaminasyon) bu bölgede belirleyicidir (Şekil 6.67-6.68).

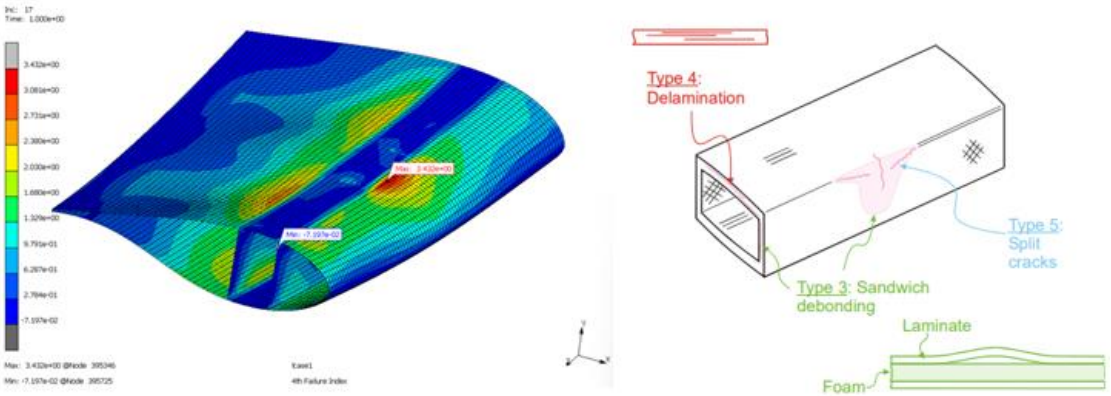


Şekil 6.67 1. hasar indeksi (fiber çeki) ve Tip 1 (spar/yapışkan tabakası ayrılması)



Şekil 6.68 2. hasar indeksi (fiber bası) ve Tip 4 (çekme veya burkulma kaynaklı delaminasyon)

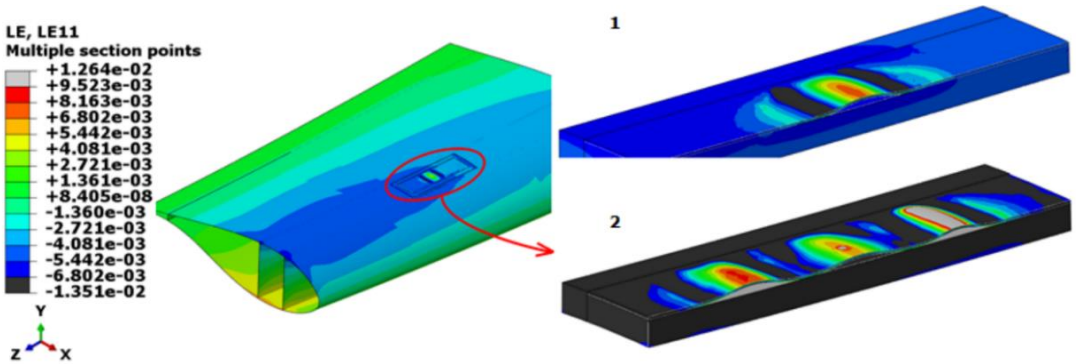
Tip 3 (sandviç panel yüzeyi/çekirdek ayrılması) ve Tip 5 (çekide fiber kopması; basıda laminat kopması) spar keplerde oluşması da muhtemeldir (Şekil 6.69).



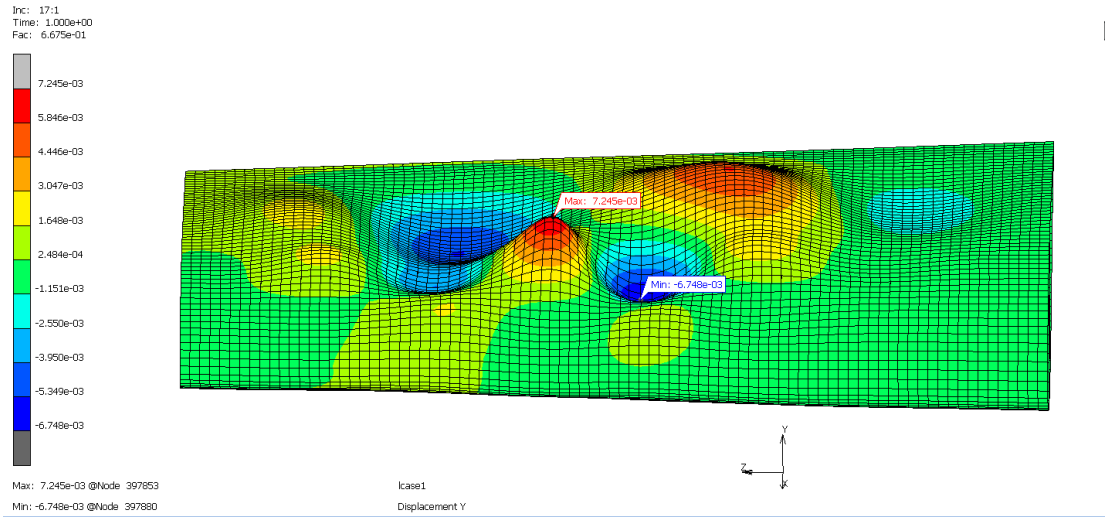
Şekil 6.69 4. hasar indeksi (matris bası modu B) (Shohag vd., 2017)

6.4.3 Burkulma Modları

Spar kep üzerinde lokal olarak meydana gelen burkulma modları, tam spar kep burkulması ve lokal spar kep açılması olmak üzere iki farklı gruba ayrılmıştır. Tam spar kep burkulması, panel seviyesindeki global burkulmaya benzer. Her iki düğümün de aynı yolu izlemesi ile karakterize edilir. Delaminasyon, yerel spar kep açıklığı burkulma moduna yol açtı. Delaminasyonun yayılması, ilk delaminasyonlu alandan kaynaklandı ve onun etrafında dairesel olarak büyüdü, üst alt tabakanın düzlem dışı yer değiştirmesi küçük bir kıvrılma gösterir. Bu kıvrılma burkulma modu şeklindeki değişikliklerle açıklanabilir. Tek zirveli lokal kep açma sinüs şeklindeki burkulma modu, üç zirveli başka bir burkulma modu konfigürasyonuna doğru ilerler (Şekil 6.70-6.71).

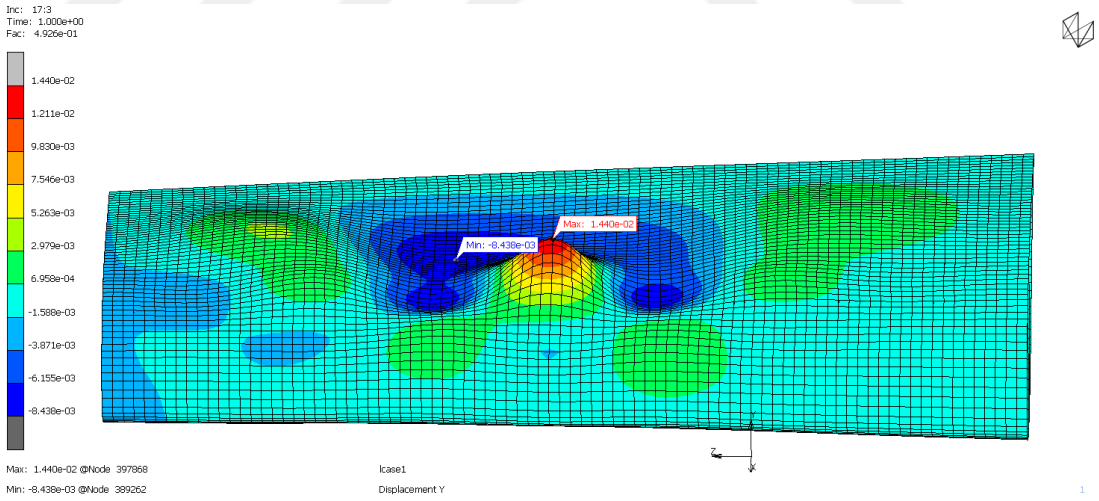


Şekil 6.70 Sabit çatlak büyümesi ile yerel kep açma burkulması modu ve %100 yüklemede tek zirveli sinüs şeklindeki lokal kep açıklığı burkulma modu (Haselbach, 2015)

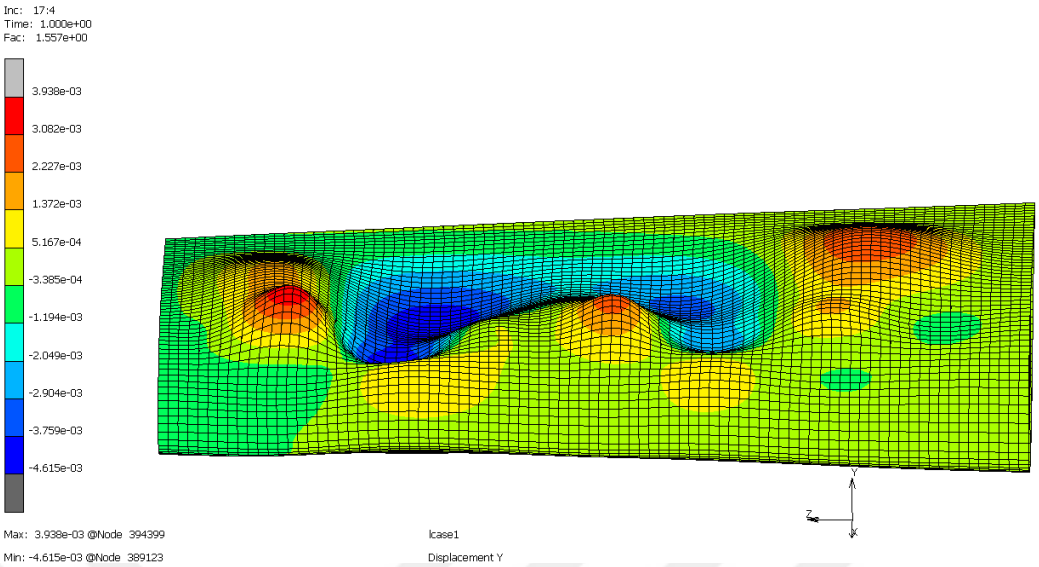


Şekil 6.71 Yerel burkulma modu

Burkulma modunun gerilme konsantrasyonlarına neden olduğunu ve ilk delaminasyon etrafındaki bası geriniminin, bası gerinim tasarım değerini aştığını göstermektedir (Şekil 6.72). Delaminasyon çevresinde yüksek gerinim ve gerilmelere neden oldu (Şekil 6.74).



Şekil 6.73 Spar kepte yerel burkulma modu



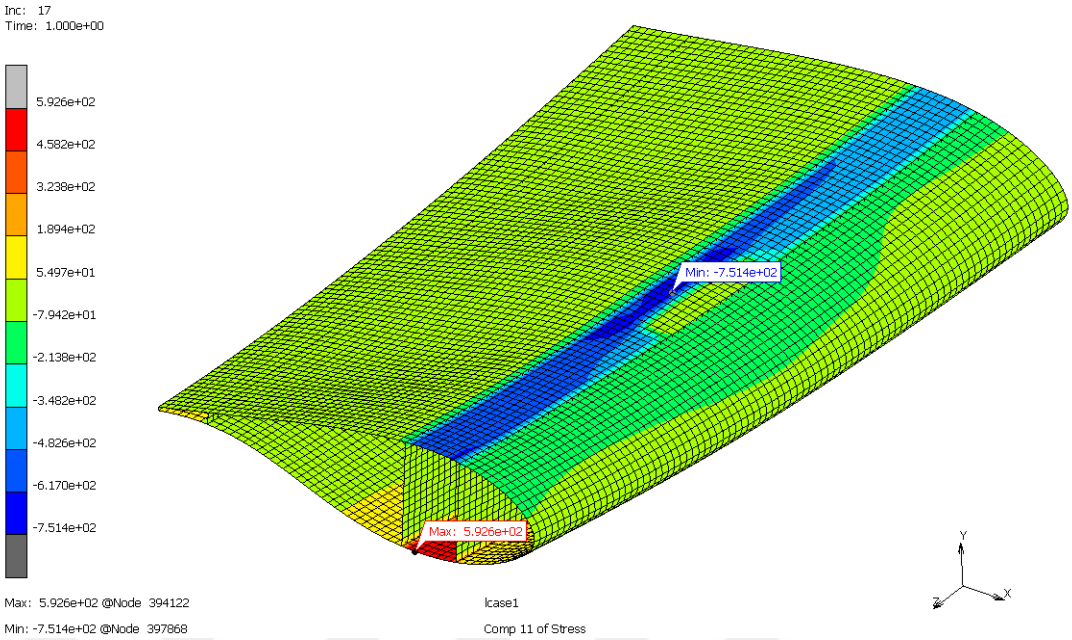
Şekil 6.74 Yerel burkulma modunda yüksek gerinimler

Üst alt laminattaki bu yüksek gerinimler ve gerilmeler, malzeme tasarım özelliklerine yakın ve hatta kısmen üzerindeydi ve kolayca malzeme hasarına yol açabilirdi. Bu yük seviyelerinde tabakalara ayrılmanın halihazırda artmış olması, tabakalara ayrılmaların ne kadar kritik olabileceği konusunda farkındalık yaratmaktadır.

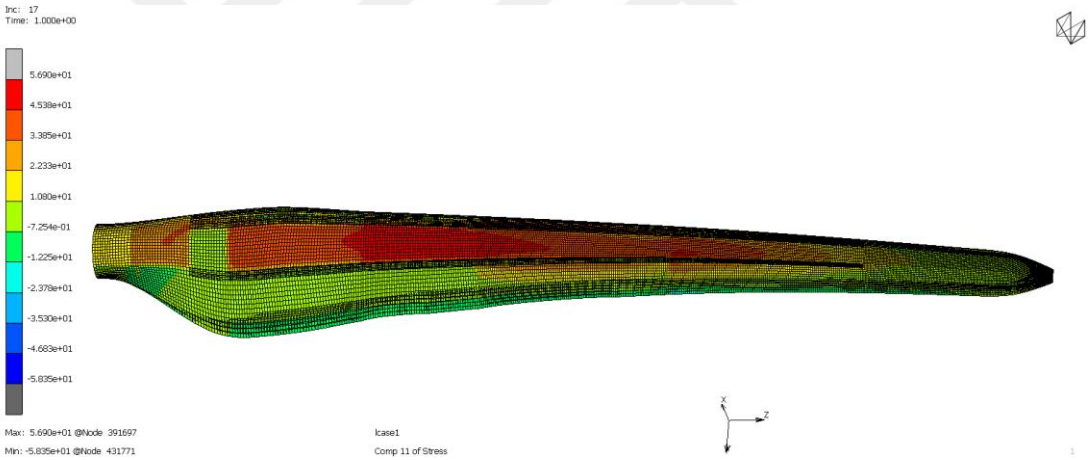
6.4.4 Kanatlarda Oluşan Hasara Asal Gerilmelerin Etkisi

Delaminasyon bölgesinin sınırında çok yüksek olan σ_{11}, burkulma kırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Hem katı hem de kabuk modellerde malzemenin delaminasyon sınırında σ_{11} değerinin σ_{22} ve σ_{33}'ten daha yüksek olduğu görülmektedir. 1 yönü boyunca daha yüksek gerilmeye maruz kalır (Şekil 6.75-6.76).

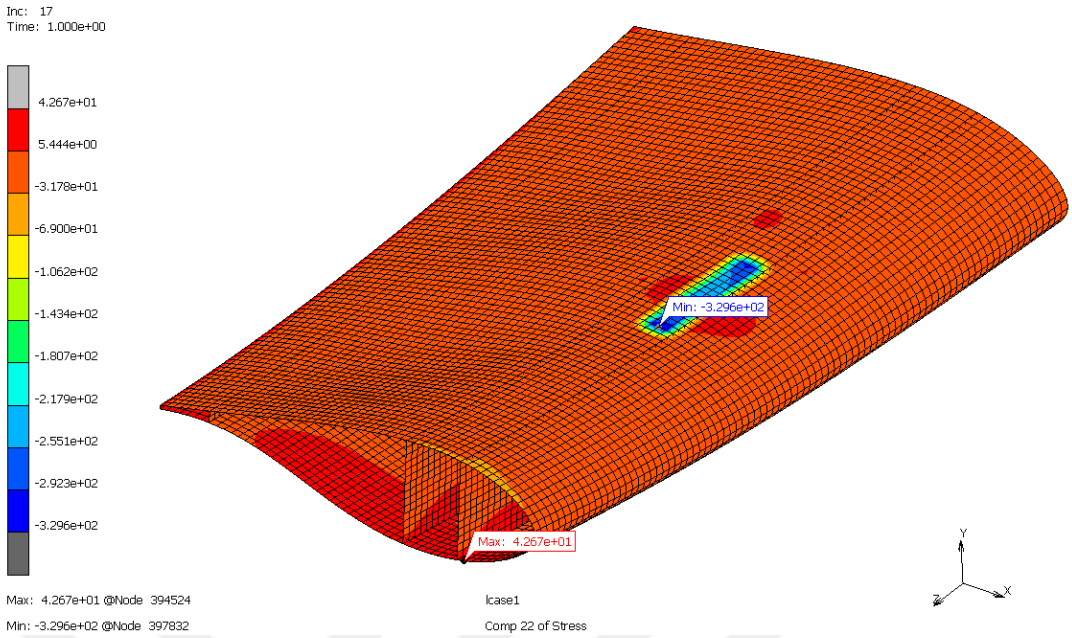
Delaminasyonun orta bölgesinde, σ_{11} ve σ_{22} değerleri σ_{33}'ün değerlerinden daha yüksektir, burada malzeme 1 yönü boyunca daha yüksek bir çekiye ve 2 yönü boyunca basıya maruz kalır. σ_{33} lif yönüne diktir ve katman yüzeyi düşük bir değere sahiptir (Şekil 6.77-6.78).



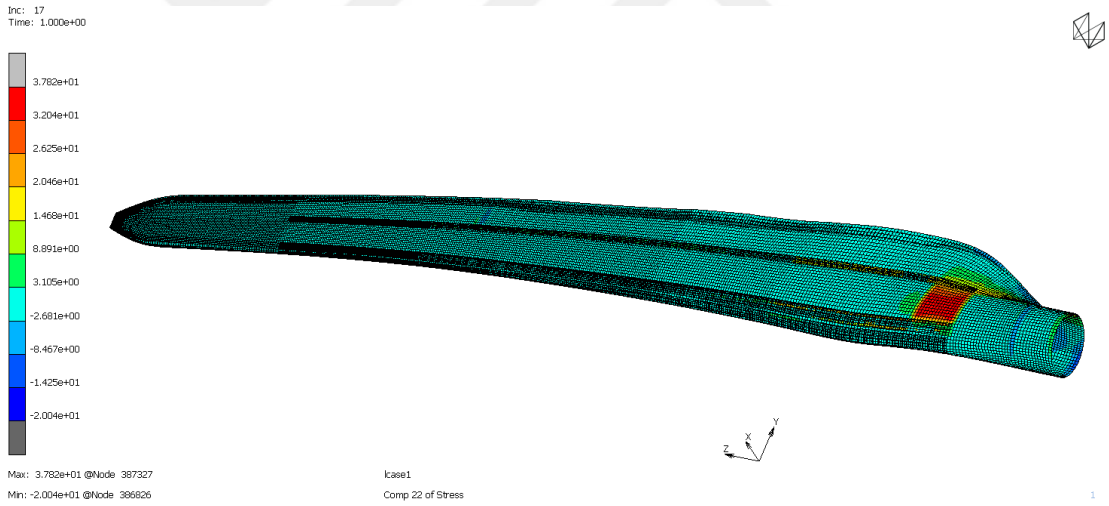
Şekil 6.75 Delaminasyon sınırında yüksek değere sahip olan σ_{11}'in lokal burkulmaya etkisi



Şekil 6.76 Malzemenin 1 yönü boyunca daha yüksek bir çekiye maruz kalması ve ayrılma hasarı başlangıcı beklenen bölgede oluşan bası gerilme etkisi



Şekil 6.77 Lokal burkulma kaynaklı delaminasyonun orta bölgesindeki fiberin 2 yönü boyunca basıya maruz kalması ve gerilme yoğunlaşması

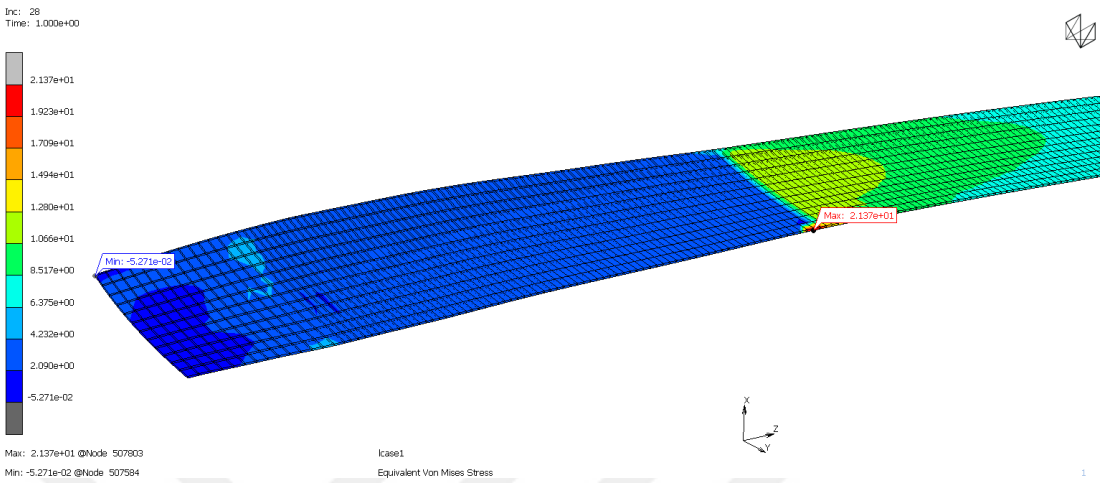


Şekil 6.78 Malzemenin 2 yönü boyunca daha yüksek bir basıya maruz kalması ve ayrılma hasarı başlangıcı beklenen bölgedeki çeki etkisi

6.5 Çatlak Başlatıcı (*Crack Initiator*) Yöntemi

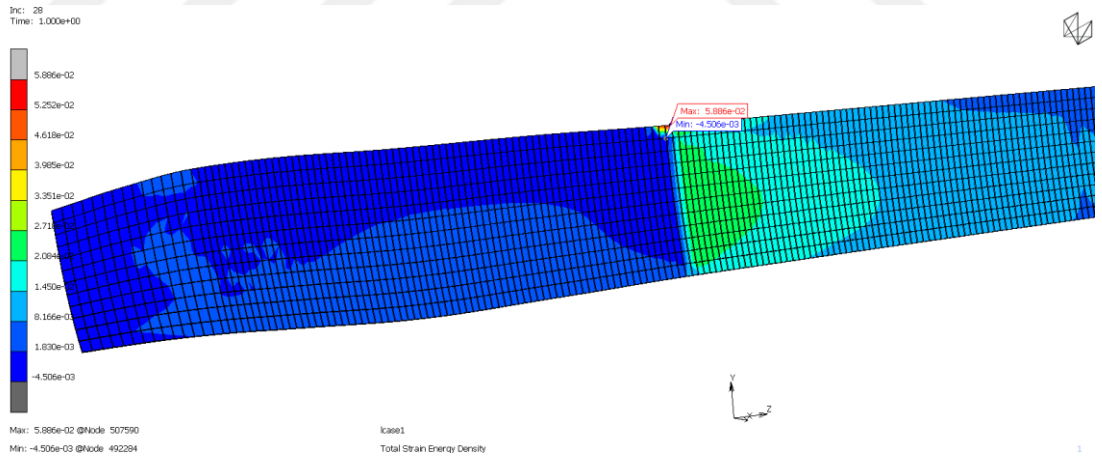
Çatlak Başlatıcı, bir yapı içinde çatlağın başlangıcını açıkça tanımlamak için kullanılan bir araçtır. Delaminasyon veya Turon modeli kullanılmamıştır. Çatlak ve yapısal yıkım için kritik bölge spar kepin uç kısmından 1 metre daha ilerideki bölgesinde olması daha muhtemeldir. Çatlak başlangıcı olarak seçilen kısımda çatlak oluşumu

görülmemesinin sebebi *toplam şekil değiştirme enerjisi yoğunluğunun* bası gerilmeleri olabilir (Şekil 6.79).



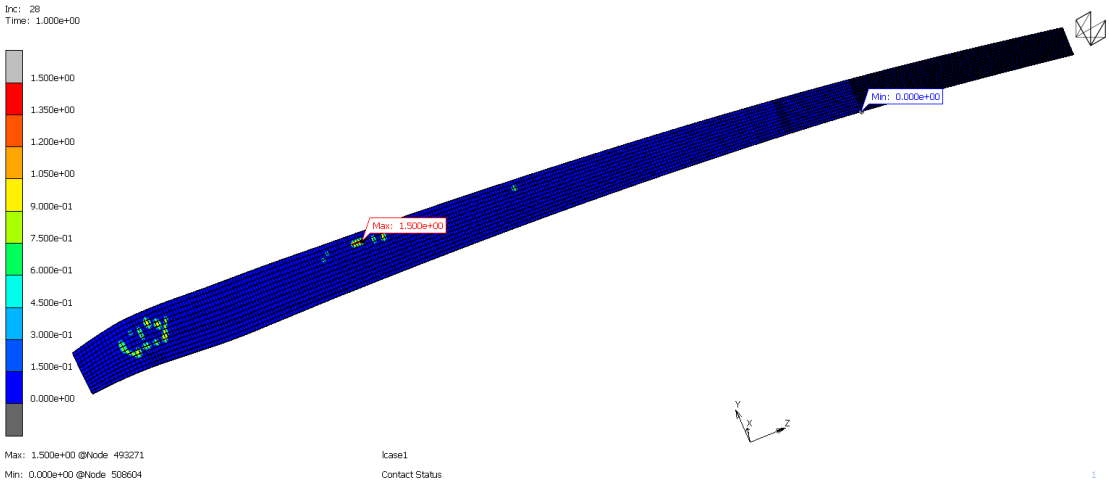
Şekil 6.79 Çatlak oluşumu görülmemesi ve bası gerilmeleri

Çatlak oluşumu toplan şekil değiştirme enerjisinin yoğunlaştığı bölgede olması daha çok beklenir ve *Çatlak Başlatıcı* genellikle bu yoğun bölgelere atanır (Şekil 6.80).

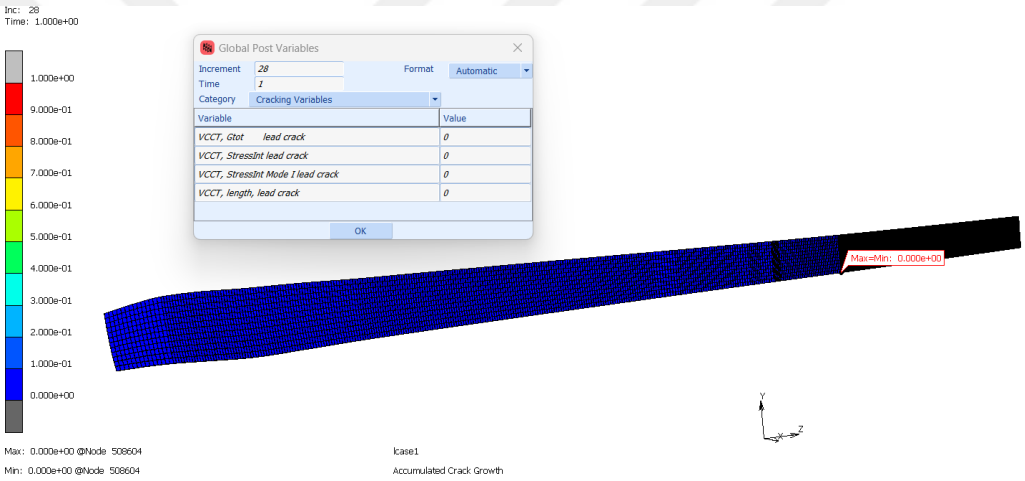


Şekil 6.80 Toplam şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu ve çatlak başlangıcı

Hem yapışkan ayrılması beklenen bölgede hem de laminat kırılması beklenen kısımda kontak statüsünün kalktığı görülmüştür (Şekil 6.81-6.82).

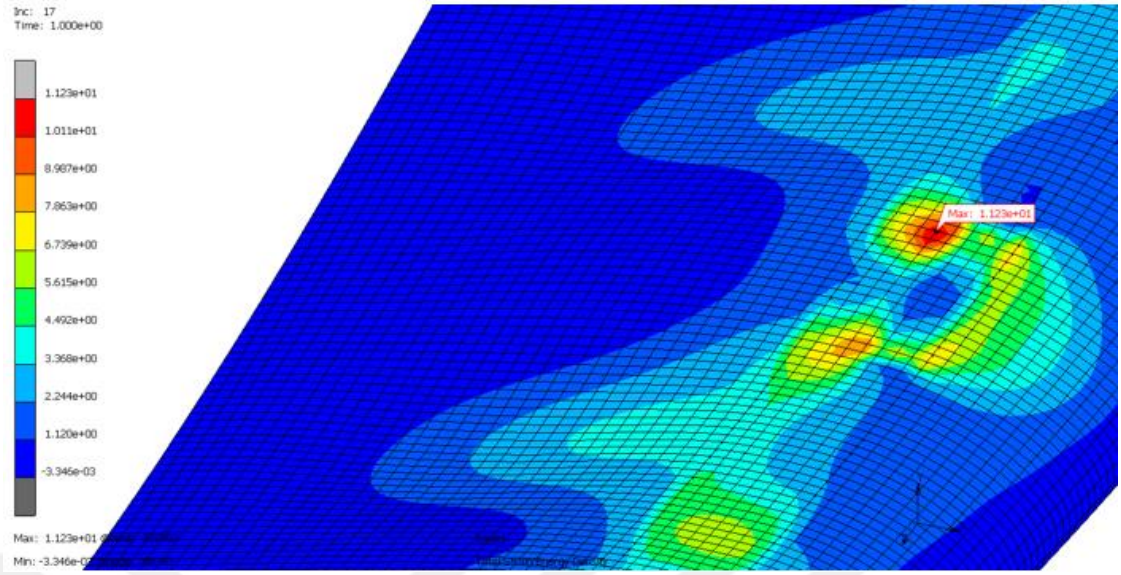


Şekil 6.81 Toplam şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu ve çatlak başlangıcı



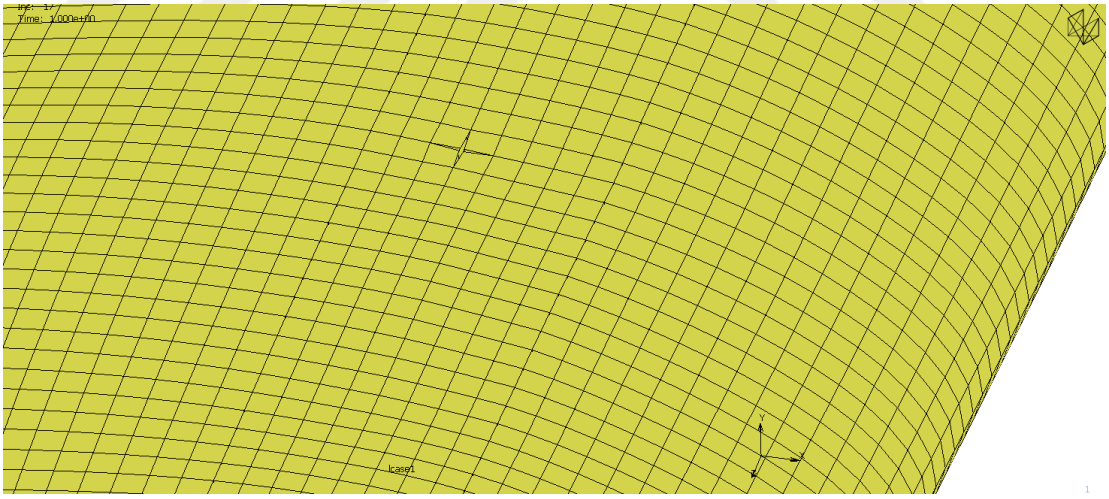
Şekil 6.82 Çatlak büyümesi gerçekleşmemesi

DTU 10MW rüzgar türbini kanadındaki *toplam şekil değiştirme enerjisi yoğunluğunun* maksimum olduğu nodu çatlak başlangıcı olarak seçilir ve çatlak oluşumu görülür (Şekil 6.83).

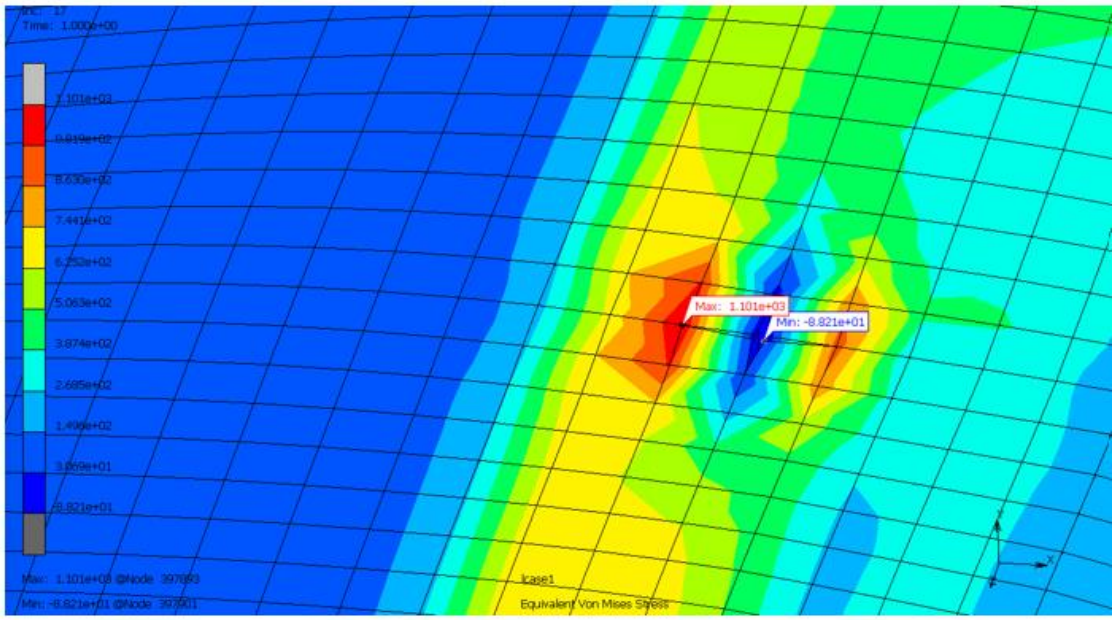


Şekil 6.83 Toplam şekil değiştirme enerjisi yoğunluğunun maksimum olduğu düğüm

Genel olarak hasar analizinde, çatlak başlangıcını, çatlak büyümesini ve çatlak birleşmesini dikkate alır. Çatlak ucunda gerilme yoğunlaşmaları görülür (Şekil 6.84-6.85).

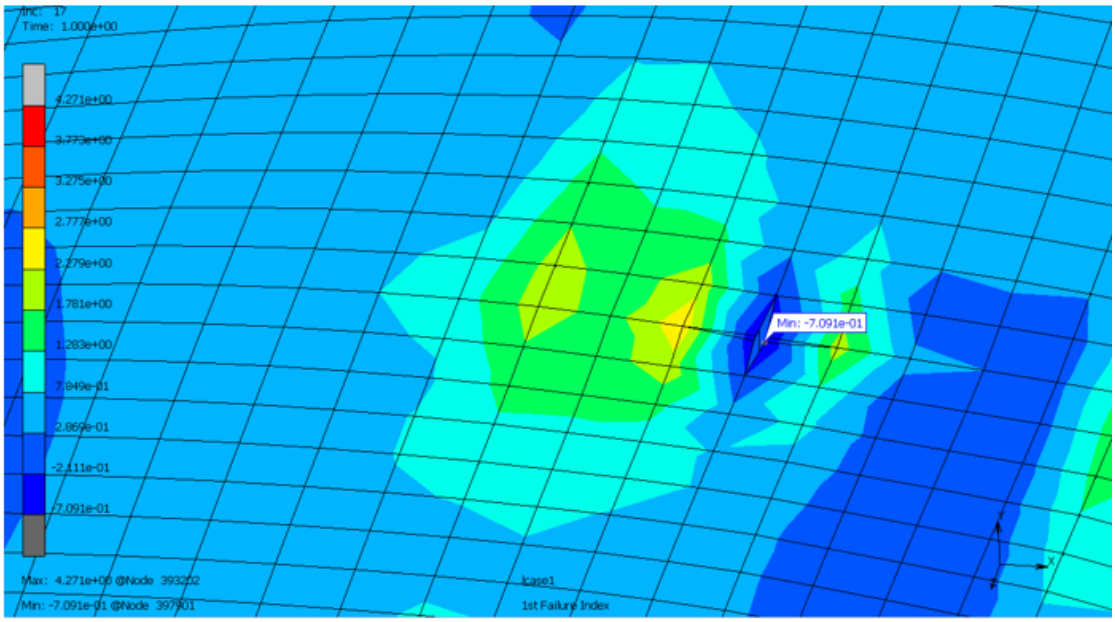


Şekil 6.84 Seçilen düğümde çatlak oluşumu

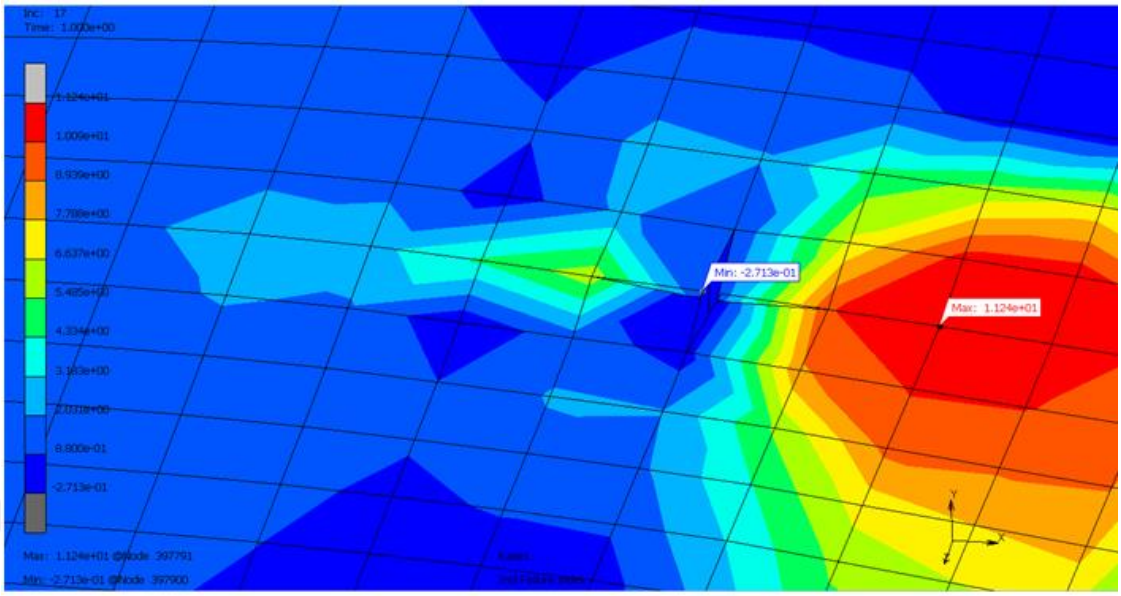


Şekil 6.85 Çatlakta oluşan eşdeğer von Misses gerilmesi

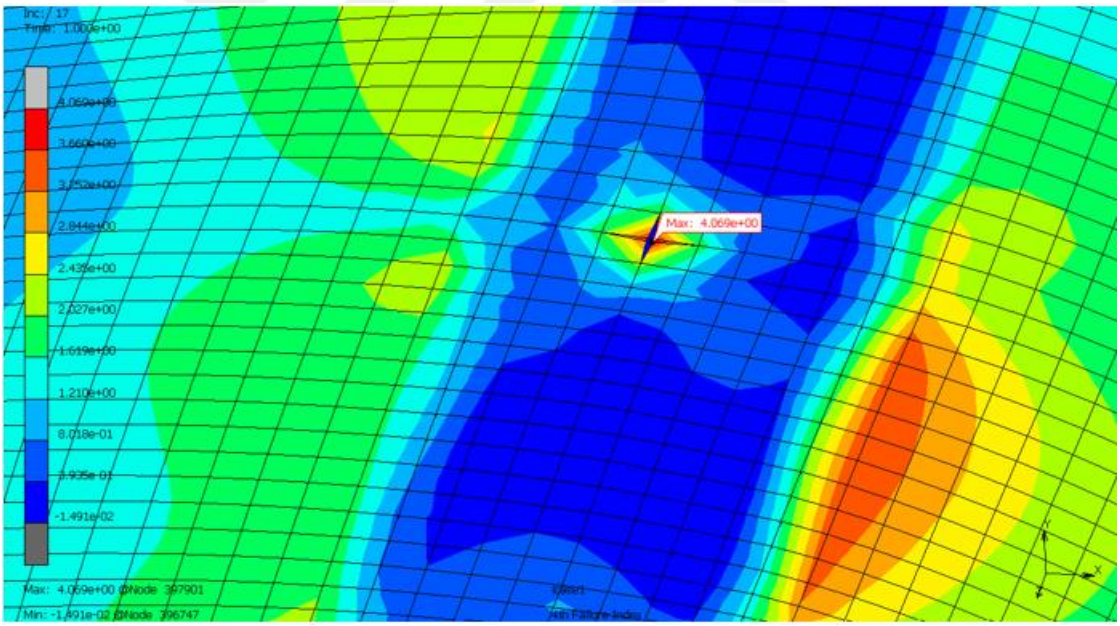
Delaminasyon büyümesiyle ilişkili enerji salınım hızı, kırılma moduna büyük ölçüde bağlıdır. Çatlak başlangıcı ve çatlak ilerlemesi kriterleri mod karışımını dikkate almalıdır. İlerleyen süreçte gerçekleşecek 3B modellerdeki delaminasyonların etkisini incelerken daha yüksek doğruluk elde etmek için tabakalar arası çatlak büyümesine izin verilmesi önemlidir (Şekil 6.86-6.90).



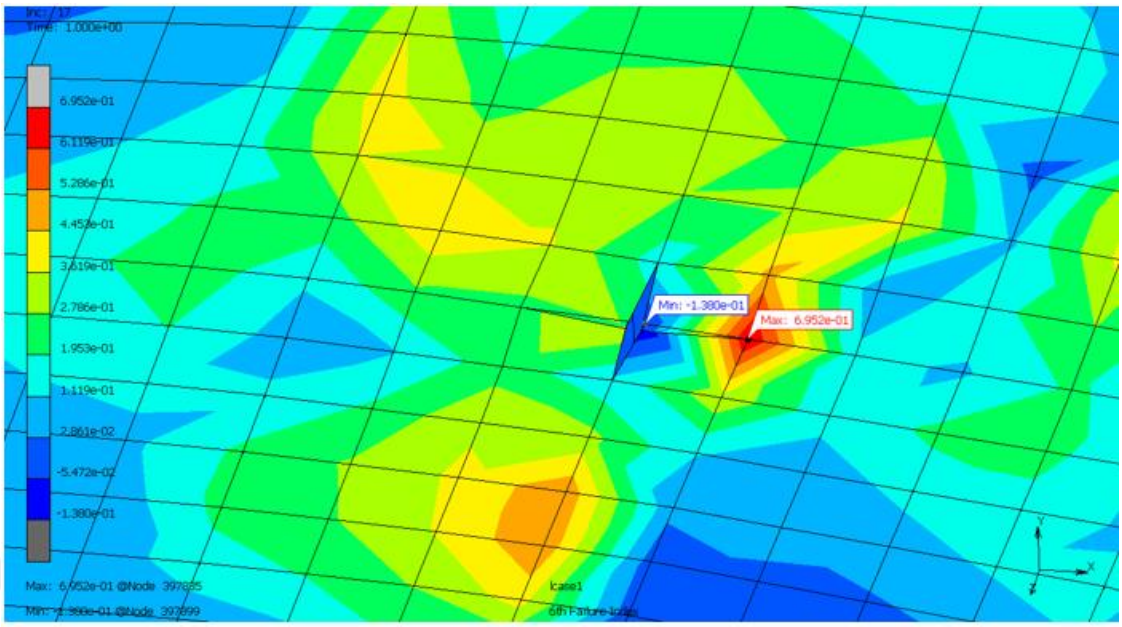
Şekil 6.86 1. hasar indeksi (fiber çeki)



Şekil 6.87 2. hasar indeksi (fiber bası)



Şekil 6.88 4. hasar indeksi (matris bası mode B)



Şekil 6.89 6. hasar indeksi (kritik hasar açısı)

6.6 Değerlendirme

Yapılan çalışmalarda, kanatlar özellikle kelebekleme yönünde eğilme altında yük taşıma kapasitesinin tamamen kaybolması nedeniyle sıklıkla hasar aldığı görülmüştür. Ana hasar ise kök bölgesine yakın yerde geçiş bölgesinde bulunmuştur ve hem düzlem içi hem de kalınlık boyunca gerilmelerle ilişkili çoklu hasar modlarıyla karakterize edilmektedir.

Simülasyonlarda, hasar süreci ve geçiş bölgesinin hasar özellikleri tatmin edici bir şekilde yeniden üretildi. Spar kepte oluşan delaminasyonun ve geçiş bölgesindeki spar ağı kopmasının kanadın çökmesinin ana nedenleri olduğu bulundu. Yerel burkulma, yerel düzlem dışı deformasyonu artırarak hasar sürecinde önemli bir rol oynadığı görüldü.

Spar keplerde ise yerel burkulmayı gösteren nispeten büyük düzlem dışı deformasyon ve firar kenarının içe doğru çökmesi şeklinde gözlendi. Yerel burkulmadan kaynaklanan düzlem dışı deformasyon, spar kepte kalınlık boyunca gerilmeleri önemli ölçüde arttırdı. Bu da spar kepin dayanımını kötüleştirdi ve hasar sürecini olumsuz etkiledi.

Geçiş bölgesinde gözlemlenen karmaşık hasar özellikleri ve global-yerel modelleme yaklaşımı kullanılarak FE simülasyonunda incelendi ve kanadın yükleme geçmişi boyunca hasar biriktirdiği bulunmuştur. Gözlemlenen tipik hasar modları, alçak basınç tarafındaki spar kepinin delaminasyonu, sandviç yüzey-kor bağının ayrılması, laminat kırılması ve spar ağı kopmasıydı. Bu hasar modları arasında spar kep delaminasyonu ve spar ağı hasarının, kanat hasarının temel nedeni olduğu belirlendi.

Rüzgarın neden olduğu basınç, σ_{11} ve σ_{22} malzeme gerilmelerini üretir; bu gerilmeler, spar keplerin burkulmasına yol açan esas etkenlerdir. Bu ikisini kendi arasında karşılaştırılırsa, delaminasyon sınırında yüksek değere sahip olan σ_{11}, hasarın başlıca nedeni olmaktadır.

Delaminasyon kusurlarına sahip laminatlar, yük altında yerel burkulmayı ve ağır yük altında yerel burkulmanın ve global burkulmanın karışık modunu gösterir. σ_{11}'in etkisiyle delaminasyon bölgesindeki lokal burkulma, delaminasyonun orta bölgesindeki fiberin 2 yönü boyunca basınca maruz kalmasına neden olur ve bu da gerilme yoğunlaşmasına neden olur. Sonuç olarak laminatın eğildiği yön boyunca σ_{11}'e bağlı olarak delaminasyon sınırında gerilme yoğunlaşması meydana gelir.

Yapışkan bağlantı, malzemenin direngenliğinin çevredeki malzemeye göre daha düşük olduğu bir bölgedir. Direngenlikte bu fark, gerilmenin yapışkan bağlantının kenarında yoğunlaşmasına neden olur. σ_{22}'deki gerilmenin konsantrasyonu, yapışkan eleman için potansiyel bir hasar bölgesidir. Eğer σ_{22}'deki gerilmenin kohezyon elemanının mukavemetini aşarsa, kohezyon elemanı kopacak ve birbirine bağlanan iki parça ayrılacaktır.

Bu çalışmada gördüğümüz sonuçlar:

1. σ_{11} özellikle kusurlu laminatların burkulmasına neden olur. Fiber boyunca bası dayanımının arttırılması, laminatların burkulmasından kaynaklı hasarı yavaşlatacaktır.

2. Yön boyunca σ_{11} ve σ_{22} nedeniyle delaminasyon alanının ortasında gerilme yoğunlaşması vardır.

3. σ_{33}' ün yapının burkulmadan kaynaklı hasarı üzerinde düşük bir etkisi vardır.

4. RÜZGEM 5-m kanadının durumuna da çok uygun olacak şekilde, delaminasyon farklı malzeme yapılarında daha sık görülür. DTU 10 MW kanadında ise tamamen tek yönlü cam elyaf kompozit (UD) yapıdan oluşmasına rağmen, eğilme etkisi burkulma modlarına neden olur ve spar kepin yapısal dayanım performansını azaltır.

5. Yapışkan Kırılması (Glue Breaking) komutu kullanımıyla, yapışkan temas kesildiğinde (yapışkan kontak etkisi sona erdiğinde) temas kontağı devam eder ve bu özellik, referans çalışmalarındaki test verileri ele alındığında doğruluk açısından daha hassas sonuçların elde edilmesine olanak tanır.

6. Herhangi bir çatlak görülmedi ve bunun sebebinin bası etkisi olduğu düşünülmektedir çünkü çeki gerilmeleri genellikle çatlakları açarken, bası gerilmeleri çatlakları kapatma eğilimindedir. Bu bölgedeki spar eklentisiyle de oluşan malzeme düzeni boyunca oluşan kat düşüşleri (ply drops), bu bölgedeki ayrılma hasarını başlatan esas etkendir. Buradan çıkacak bir sonuç da delaminasyonun direkt kırılma demek olmadığıdır. Delaminasyon yapısal yıkımı oluşturabilecek etmenlerden sadece biridir.

7. Yapışkan ayrılmasında bir çatlak ilerlemesi olmamıştır ve CZM ve VCCT sonuçları aynı çıkmıştır ve bu da yapışkan ayrılmasını sonlu elemanlar yöntemiyle incelerken CZM yerine VCCT yöntemini kullanılabileceği anlamına gelir. VCCT yöntemi, CZM yönteminde gerekli olan kullanıcı tanımlı arayüz elemanlarının oluşturulmasını gerektirmez ve FEM kodlarına da kolayca uygulanabilir; böylece VCCT yöntemi çalışmayı daha kolay ve daha verimli hale getirir.

KAYNAKLAR

Abbate, E., Mirpourian, M., Brondi, C., Ballarino, A., ve Copani, G. (2022). Environmental and Economic Assessment of Repairable Carbon-Fiber-Reinforced Polymers in Circular Economy Perspective. *Materials*, *15*(9), 2986.

AIMPLAS - Technological Institute of Plastics (2023), 28 Mart 2023 https://www.aimplas.net/

Åkesson, D., Foltynowicz, Z., Christeen, J., ve Skrifvars, M. (2012). Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *31*(17), 1136-1142.

Amaechi, C. V., Agbomerie, C. O., Sotayo, A., Wang, F., Hou, X., ve Ye, J. (2019). Recycling of renewable composite materials in the offshore industry.

Amantayeva, A., Shehab, E., Meiirbekov, A., Suleimen, A., Tokbolat, S., & Sarfraz, S. (2022). Challenges and Opportunities of Implementing Industry 4.0 in Recycling Carbon Fiber Reinforced Composites. *Advances in Science and Technology*, *116*, 67-73.

Amer, C., ve Sahin, M. (2014). Structural analysis of a composite wind turbine blade. *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, *8*(7), 1264-1270.

Anadolu Ajansı, Halil Şahin (2023) https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/gecen-yil-avrupaya-gonderilen-3-ruzgar-turbini-kanadindan-biri-izmirden/2938262 #

Bak, C., Zahle, F., Bitsche, R., Kim, T., Yde, A., Henriksen, L. C., ... ve Natarajan, A. (2013). The DTU 10-MW reference wind turbine. In *Danish wind power research 2013*.

Bashir, M. B. A. (2022). Principle parameters and environmental impacts that affect the performance of wind turbine: an overview. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *47*(7), 7891-7909.

Batmaz, O. A., Muyan, C., ve Çöker, D. (2021) RÜZGAR TÜRBİN KANATLARINDA YAPIŞTIRICI AYRILMA HASARININ KANAT YAPISAL BÜTÜNLÜĞÜNE ETKİSİ.

Baturkin, D., Hisseine, O. A., Masmoudi, R., Tagnit-Hamou, A., ve Massicotte, L. (2021). Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, *174*, 105807.

Bernasconi A, Rossin D and Armanni C. (2007) Analysis of the effect of mechanical recycling upon tensile strength of a short glass fibre reinforced polyamide 6,6; 74: 627–641.

Boyano, A., Ansoategui, I. G. O. R., Fernandez-Gamiz, U. N. A. I., Zulueta, E. K. A. I. T. Z., Lopez-Guede, J. M., ve Mujika, F. A. U. S. T. I. N. O. (2017). One Application of the ENFR Fracture Test: Coupon Testing for Wind Turbine Blade Materials. *Int. J. Mech. Eng*, *2*, 51-57.

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

Carbon Rivers Makes Wind Turbine Blade Recycling and Upcycling a Reality With Support from DOE Department of Energy (2022) 11 Mayıs 2023, https://www.energy.gov/ eere/wind/articles/carbon-rivers-makes-wind-turbine-blade-recycling-andupcycling-reality-support

Castro, O., ve Branner, K. (2021). Effect of tunneling cracks on structural property degradation of wind turbine blades. *Composite Structures*, *268*, 113914.

CATACK-H (Mayıs 2022) https://www.compositesworld.com/suppliers/catack-h

CETEC initiative established to commercialize technology for full composite wind turbine blade recyclability (2023) https://www.compositesworld.com/news/cetec-initiative-established-tocommercialize-technology-for-full-composite-wind-turbine-bladerecyclability

Chen J, Wang J and Ni A (2019) Recycling and reuse of composite materials for wind turbine blades: An overview. Journal of Reinforced Plastics and Composites 38: 567–577.

Chen, X. (2018). Fracture of wind turbine blades in operation—Part I: A comprehensive forensic investigation. *Wind Energy*, *21*(11), 1046-1063.

Chen, X., Tang, J., ve Yang, K. (2019). Modeling multiple failures of composite box beams used in wind turbine blades. *Composite Structures*, *217*, 130-142.

Compositeworld.com (2022), https://www.compositesworld.com/articles/recycling-end-of-life-composite-parts-new-methods-markets

Cooperman, A., Eberle, A., & Lantz, E. (2021). Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options. *Resources, Conservation and Recycling*, *168*, 105439.

Cousins, D. S., Suzuki, Y., Murray, R. E., Samaniuk, J. R., ve Stebner, A. P. (2019). Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades. *Journal of cleaner production*, *209*, 1252-1263.

Cunliffe, A. M., Jones, N., ve Williams, P. T. (2003). Pyrolysis of composite plastic waste. *Environmental technology*, *24*(5), 653-663.

Du, Y., Zhou, S., Jing, X., Peng, Y., Wu, H., ve Kwok, N. (2020). Damage detection techniques for wind turbine blades: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *141*, 106445.

Electricity Market Report (2023), https://iea.blob.core.windows.net/assets/255e9cba-da84-4681-8c1f-458ca1a3d9ca/ElectricityMarketReport2023.pdf

Enerjidünyası.com (2023), https://www.enerji-dunyasi.com/yayin/324/-2023-ruzgari-en-ust-seviyede-vurguladigimiz-yil-olacak-_32027.html

ETIPWind blade recycling (2019) 5 Mayıs 2023, https://etipwind.eu/files/reports/ETIPWind-How-wind-is-going-circular-blade-recycling.pdf.

Fantin Irudaya Raj, E., Appadurai, M., Lurthu Pushparaj, T., ve Chithambara Thanu, M. (2023). Wind turbines with aramid fiber composite wind blades for smart cities like urban environments: Numerical simulation study. MRS Energy & Sustainability, 1-18.

Fonte, R., ve Xydis, G. (2021). Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials. *Journal of environmental management*, *287*, 112269.

Garcia, D. A., Lamagna, L., Gsänger, S., Martone, S., Rae, P., Reggiani, R., and Togni, S. (2022, September). 20th World Wind Energy Conference and Exhibition (WEEC 2022). *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1073, No. 1, p. 011001). IOP Publishing.*

Ginder, R. S., & Ozcan, S. (2019). Recycling of commercial E-glass reinforced thermoset composites via two temperature step pyrolysis to improve recovered fiber tensile strength and failure strain. Recycling, 4(2), 24.

Global Wind Energy Council, 2022. Global wind report 2022 (2022) 10 Mayıs 2023, https:// gwec. net/ wp- content/ uploads/ 2022/ 04/ Annual Wind Report- 2022_ screen_ final_ April. pdf.

Gukendran, R., Sambathkumar, M., Sabari, C., Raj, C. R., ve Kumar, V. R. (2022). Structural analysis of composite wind turbine blade using ANSYS. Materials Today: Proceedings, 50, 1011-1016.

Haider, M. M., Nassiri, S., Englund, K., Li, H., ve Chen, Z. (2021). Exploratory study of flexural performance of mechanically recycled glass fiber reinforced polymer shreds as reinforcement in cement mortar. *Transportation Research Record*, *2675*(10), 1254-1267.

Haselbach, P. U. (2015). Ultimate strength of wind turbine blades under multiaxial loading. *Technical University of Denmark*.

Heng, H., Meng, F., & McKechnie, J. (2021). Wind turbine blade wastes and the environmental impacts in Canada. *Waste Management*, *133*, 59-70.

*IACMI - The Composites Institute (*2022) 15 Mayıs 2023, https://iacmi.org/

IEA Dünya Enerji raporu (2019) Mayıs 2023, https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019

İzmir Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası (2023) 3 Mayıs 2023, https://izka.org.tr/wp-content/uploads/pdf/ruzgar-turbin-geri-donusumu-projesi.pdf

JECcomposite.com (2023) 12.06.2023, https://www.jeccomposites.com/news/the-intrinsic-value-of-composite-materials-at-the-end-of-their-first-life-is-so-high-we-have-to-reuse-them-says-volker-mathes-of-avk/

JECcomposites.com (2023), https://www.jeccomposites.com/news/university-of-sydney-develops-recycling-method-to-address-carbon-and-glass-fibre-composites-waste/

Jensen, J. P., ve Skelton, K. (2018). Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *97*, 165-176.

Johansson, C. (2023b, September 13). y+ calculator - VOLUPE Software. VOLUPE Software. https://volupe.se/wall-y-calculator-when-meshing-a-geometry-for-cfd-analysis-this-handy-volupe-calculator-computes-the-height-of-the-first-mesh-cell-off-the-wall-required-to-achieve-a-desired-y-using-flat-plate-boun/

Joustra, J., Flipsen, B., ve Balkenende, R. (2021). Structural reuse of high end composite products: A design case study on wind turbine blades. *Resources, Conservation and Recycling*, *167*, 105393.

Karuppannan Gopalraj, S., ve Kärki, T. (2020). A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: Fibre recovery, properties and life-cycle analysis. *SN Applied Sciences*, *2*(3), 433.

Kennerley, J. R., Kelly, R. M., Fenwick, N. J., Pickering, S. J., ve Rudd, C. D. (1998). The characterisation and reuse of glass fibres recycled from scrap composites by the action of a fluidised bed process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *29*(7), 839-845.

Khalid, M. Y., Arif, Z. U., Hossain, M., ve Umer, R. (2023). Recycling of wind turbine blade through modern recycling technologies: Road to zero waste. Renewable Energy Focus.

Kompozit Hammadde Raporu (2023) 12 Haziran 2023, https://www.kompozit.org.tr/wp content/uploads/2021/06/Hammadde_Raporu_1_Mayis_2021.pdf

Kouparitsas, C. E., Kartalis, C. N., Varelidis, P. C., Tsenoglou, C. J., ve Papaspyrides, C. D. (2002). Recycling of the fibrous fraction of reinforced thermoset composites. *Polymer composites*, *23*(4), 682-689.

Krauklis, A. E., Karl, C. W., Gagani, A. I., ve Jørgensen, J. K. (2021). Composite material recycling technology—state-of-the-art and sustainable development for the 2020s. *Journal of Composites Science*, *5*(1), 28.

Larsen, K. (2009). Recycling wind turbine blades. *Renewable energy focus*, *9*(7), 70-73.

Lefeuvre A, Garnier S, Jacquemin L (2017) Anticipating in-use stocks of carbon fiber reinforced polymers and related waste flows generated by the commercial aeronautical sector until 2050. *Resour Conserv Recycl* 125:264–272

Lester E, Kingman S, Wong KH vd. (2004) Microwave heating as a means for carbon fibre recovery from polymer composites: a technical feasibility study. Materials Research Bulletin 39: 1549–1556.

Li, C., Mogollón, J. M., Tukker, A., ve Steubing, B. (2022). Environmental impacts of global offshore wind energy development until 2040. *Environmental Science & Technology*, *56*(16), 11567-11577.

Liang J., Li Y., Zhang J., Wang X., ve Wang H. (2017). Solvolysis of carbon fiber reinforced epoxy resin waste for recovery of carbon fibers. Journal of Cleaner Production, 142, 4225-4232.

Lichtenegger, G., Rentizelas, A. A., Trivyza, N., ve Siegl, S. (2020). Offshore and onshore wind turbine blade waste material forecast at a regional level in Europe until 2050. *Waste management*, *106*, 120-131.

Liu, P. (2021). *Damage Modeling of Composite Structures: Strength, Fracture, and Finite Element Analysis*. Elsevier.

Liu, P., & Barlow, C. Y. (2017). Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*, *62*, 229-240.

Liu, P., Meng, F., ve Barlow, C. Y. (2019). Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison. *Journal of Cleaner Production*, *212*, 1268-1281.

Ma, X., Xu, H., Xu, Z., Jiang, Y., Chen, S., Cheng, J., ... & Zhang, D. (2021). Closed-loop recycling of both resin and fiber from high-performance thermoset epoxy/carbon fiber composites. ACS Macro Letters, 10(9), 1113-1118.

Mamanpush, S. H., Li, H., Englund, K., ve Tabatabaei, A. T. (2018). Recycled wind turbine blades as a feedstock for second generation composites. *Waste Management*, *76*, 708-714.

Mankins, J. C. (1995). Technology readiness levels. White Paper, April, 6 (1995). *Marc, M. S. C.* (2023). User's Guide, "Volume A: Theory and User Information", MSC. *Software Corporation*.

Marc, M. S. C. (2023). User's Guide, "Volume B: Element Library", MSC. *Software Corporation*.

Mattsson, C., André, A., Juntikka, M., Tränkle, T., ve Sott, R. (2020, October). Chemical recycling of End-of-Life wind turbine blades by solvolysis/HTL. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 942, No. 1, p. 012013). IOP Publishing.

Mishnaevsky Jr, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., ve Sørensen, B. F. (2017). Materials for wind turbine blades: An overview. *Materials*, *10*(11), 1285.

Moslehi, A., Ajji, A., Heuzey, M. C., Rahimizadeh, A., ve Lessard, L. (2022). Polylactic acid/recycled wind turbine glass fiber composites with enhanced mechanical properties and toughness. *Journal of Applied Polymer Science*, *139*(15), 51934.

Murdy, P., Hughes, S., ve Barnes, D. (2022). Characterization and repair of core gap manufacturing defects for wind turbine blades. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, *24*(7), 2083-2100.

Naqvi SR, Prabhakara HM, Bramer EA vd. (2018) A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy. *Resour Conserv Recycl* 136:118–129

Nie W., Liu J., Liu W., et al. (2015). Decomposition of waste carbon fiber reinforced epoxy resin composites in molten potassium hydroxide. Polymer Degradation and Stability, 111, 247-256.

Nielsen, P. H., Tesauro, A., ve Bitsche, R. (2012). Design and test of box girder for a large wind turbine blade.

Oliveux, G., Bailleul, J. L., ve La Salle, E. L. G. (2012). Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *43*(11), 1809-1818.

Oliveux, G., Dandy, L. O., ve Leeke, G. A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in materials science*, *72*, 61-99.

Öztürk, S. ve Karipoğlu, F. (2023). Investigation of the best possible methods for wind turbine blade waste management by using GIS and FAHP: Turkey case. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(6), 15020-15033.

Palmer, J. A. T. (2009). Mechanical recycling of automotive composites for use as reinforcement in thermoset composites.

Pender, K., ve Yang, L. (2020). Regenerating performance of glass fibre recycled from wind turbine blade. *Composites Part B: Engineering*, *198*, 108230.

Philippidis, T. and Roukis, G. (2013) Structure design report of METUWIND small rotor Blade, Confidential Interim Report, CORE team of the University of Patras, Greece

Pickering, S. J., Kelly, R. M., Kennerley, J. R., Rudd, C. D., ve Fenwick, N. J. (2000). A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites. *Composites science and technology*, *60*(4), 509-523.

Pimenta, S.,ve Pinho, S. T. (2011). Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste management*, *31*(2), 378-392.

Psomopoulos, C. S., Kalkanis, K., Kaminaris, S., Ioannidis, G. C., ve Pachos, P. (2019). A review of the potential for the recovery of wind turbine blade waste materials. *Recycling*, 4(1), 7.

Rahimizadeh, A., Kalman, J., Fayazbakhsh, K., ve Lessard, L. (2019). Recycling of fiberglass wind turbine blades into reinforced filaments for use in Additive Manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, *175*, 107101.

Rahimizadeh, A., Tahir, M., Fayazbakhsh, K., ve Lessard, L. (2020). Tensile properties and interfacial shear strength of recycled fibers from wind turbine waste. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *131*, 105786.

Rani, M., Choudhary, P., Krishnan, V., ve Zafar, S. (2021). A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades. *Composites part B: engineering*, *215*, 108768.

Rani, M., Choudhary, P., Krishnan, V., ve Zafar, S. (2022). Development of sustainable microwave-based approach to recover glass fibers for wind turbine blades composite waste. *Resources, Conservation and Recycling*, *179*, 106107.

Rastogi, M. (2016). Moisutre Ingress in Honeycomb Sandwich Composite Structures–Effects and Detection. *International Journal of Engineering Research and Technology*, *5*, 171-176.

Rathore, N., ve Panwar, N. L. (2023). Environmental impact and waste recycling technologies for modern wind turbines: An overview. Waste Management & Research, 41(4), 744-759.

Renewable Recycling and Composite Manufacturing | Carbon Rivers | Knoxville (2022) 11 Mayıs 2023, https://www.carbonrivers.com/

Revolutionary Recyclable Blades: Siemens Gamesa technology goes full circle at RWE's Kaskasi offshore wind power project (2022) 12 Mayıs 2023, https://www.siemensgamesa.com/en-int/newsroom/2022/07/080122-siemens-gamesapress-release-recycle-wind-blade-offshore-kaskasi-germany

Ribeiro, M. C. S., Meira-Castro, A. C., Silva, F. G., Santos, J., Meixedo, J. P., Fiúza, A., ... ve Alvim, M. R. (2015). Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete-polymer composite materials: A case study regarding GFRP pultrusion wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, *104*, 417-426.

Rosemeier, M., Buriticá, P., ve Antoniou, A. (Haziran 2018) Impact of resin uptake of core materials on buckling of wind turbine blades. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1037, No. 4, p. 042001). IOP Publishing.

Rybicka, J., Tiwari, A., ve Leeke, G. A. (2016). Technology readiness level assessment of composites recycling technologies. Journal of Cleaner Production, 112, 1001-1012.

Shohag, M. A. S., Hammel, E. C., Olawale, D. O., ve Okoli, O. I. (2017). Damage mitigation techniques in wind turbine blades: A review. *Wind Engineering*, *41*(3), 185-210.

Shuaib, N. A., ve Mativenga, P. T. (2016). Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites. *Journal of Cleaner Production*, *120*, 198-206.

Siemens Gamesa Producing First Recyclable Blades for Offshore Deployment | Offshore Wind (2022), https://www.offshorewind.biz/2022/05/27/siemensgamesa-producing-first-recyclable-blades-for-offshore-deployment/

Singh, V. K., Thomas, T. T., & Warudkar, V. (2013). Structural design of a wind turbine blade: A review. *International Journal of ChemTech Research*, *5*(5), 2443-2448.

Smoleń, J., Olesik, P., Jała, J., Adamcio, A., Kurtyka, K., Godzierz, M., ... ve Boczkowska, A. (2022). The Use of Carbon Fibers Recovered by Pyrolysis from End-of-Life Wind Turbine Blades in Epoxy-Based Composite Panels. Polymers, 14(14), 2925.

Sokoli, H. U., Simonsen, M. E., ve Søgaard, E. G. (2017). Investigation of degradation products produced by recycling the solvent during chemical degradation of fiber-

reinforced composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *36*(17), 1286-1296.

Sommer, V., Becker, T., ve Walther, G. (2022). Steering sustainable end-of-life treatment of glass and carbon fiber reinforced plastics waste from rotor blades of wind power plants. *Resources, Conservation and Recycling*, *181*, 106077.

Song YS, Youn JR and Gutowski TG (2009) Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 40: 1257–1265.

Sørensen, B. F., Toftegaard, H., Goutanos, S., Branner, K., Berring, P., Lund, E., ... ve Garm, J. H. (2010). Improved design for large wind turbine blades of fibre composites (Phase 4)-Summary report.

SusWIND partners and supporters | National Composites Centre (2023), Tahir, M., Rahimizadeh, A., Kalman, J., Fayazbakhsh, K., ve Lessard, L. (2021). Experimental and analytical investigation of 3D printed specimens reinforced by different forms of recyclates from wind turbine waste. *Polymer Composites*, *42*(9), 4533-4548.

Temizenerji.org (2023) 3 Mayıs 2023, https://temizenerji.org/2023/06/01/kuresel-ruzgar-enerjisi-kurulu-gucunun-1-tw-seviyesine-ulasmasi-bekleniyor/

Thomason, J. L., Nagel, U., Yang, L., ve Sáez, E. (2016). Regenerating the strength of thermally recycled glass fibres using hot sodium hydroxide. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *87*, 220-227.

Thomason, J., Jenkins, P., ve Yang, L. (2016). Glass fibre strength—a review with relation to composite recycling. *Fibers*, *4*(2), 18.

Türkiye Elektrik İstatistikleri https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf

Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporları (2023) 12 Haziran 2023, https//tureb.com.tr/yayinlar/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporlari/5

Türkiye Ulusal Enerji Plan (2023) 12 Haziran 2023, https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf

Uysal, A. (2008). Rüzgar türbini kanat malzemelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi

Wang X., Li Y., Zhang J., Chen Y., ve Wang H. (2019). Thermal recycling of carbon fiber reinforced epoxy resin waste by fluidized bed pyrolysis. Journal of Cleaner Production, 209, 1022-1030.

Wang Y., Cui X., Yang Q., et al. (2015). Chemical recycling of unsaturated polyester resin and its composites via selective cleavage of the ester bond. Green Chemistry, 17, 4527-4532.

Wang, L., Liu, X., ve Kolios, A. (2016). State of the art in the aeroelasticity of wind turbine blades: Aeroelastic modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *64*, 195-210.

Wang, Y., Li, A., Zhang, S., Guo, B., ve Niu, D. (2023). A review on new methods of recycling waste carbon fiber and its application in construction and industry. *Construction and Building Materials*, *367*, 130301.

WindEurope İstatistik Raporu (2023) Mayıs 2023, https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2022-statistics-and-the-outlook-for-2023-2027/

WindEurope–Cefic–EuCIA Wind Turbine Blade Circularity (Mayıs 2020) 11 Kasım 2022, https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-

wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-bladecircularity.pdf (accessed on 11 November 2022).

Yang, L., Sáez, E. R., Nagel, U.,ve Thomason, J. L. (2015). Can thermally degraded glass fibre be regenerated for closed-loop recycling of thermosetting composites?. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *72*, 167-174.

Yeşilekonomi.com (2023) 12 Haziran 2023, https//yesilekonomi.com/tedarik-krizini-ruzgarda-firsata-cevirebiliriz/

Yip HLH, Pickering SJ and Rudd CD (2002) Characterisation of carbon fibres recycled from scrap composites using fluidised bed process. Plastics, Rubber and Composites 31: 278–282.

ZEBRA project achieves key milestone with production of the first prototype of its recyclable wind turbine blade - JEC Group (2023) 1 Mayıs 2023, https:// www.jeccomposites.com/

Zhang C., Wu G., & Guo S. (2015). Solvolysis of carbon fiber reinforced epoxy resin waste for recovery of carbon fibers: Effect of solvents and reaction conditions. Journal of Applied Polymer Science, 132(6), 41367.

Zhang J., Li Y., Chen Y., Wang X., ve Wang H. (2017). Thermal recycling of carbon fiber reinforced epoxy resin waste by pyrolysis in a fluidized bed reactor: Effect of temperature and residence time on product yields and properties. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 124, 1-10.