

**DERECELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT MALZEMEDEN
RÜZGAR TÜRBİN KANADI TASARIMI VE TEKNİK BİLGİ
PAKETİ HAZIRLANMASI**

**DESIGN OF WIND TURBINE BLADE MADE OF GRADED
COMPOSITE MATERIALS AND PREPARATION OF
TECHNICAL DATA PACKAGE**

YELDA ÖZDİL KAÇAN

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
MAKİNE Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2014

“Derecelendirilmiş Kompozit Malzemedeki Rüzgar Türbin Kanadı Tasarımı ve Teknik Bilgi Paketi Hazırlanması” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 08/09/2014 tarihinde, **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof. Dr. Tahir YAVUZ

Üye (Danışman)

Yrd. Doç. Dr. Cenk BALÇIK

Üye

Yrd. Doç. Dr. Yusuf Tansel İÇ

ONAY

..../09/2014

Prof. Dr. Emin AKATA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEŐEKKÜR

Bu çalıőmanın yűrűtűlmesinde benden yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve desteęiyle tezimi yűnlendiren yűksek lisans danıőmanım saygıdeęer hocam Yrd. Doç. Dr. Bedi Cenk Balçık ve yűksek lisans eő danıőmanım Prof. Dr. Faruk Elaldı'ya teőekkűrlerimi sunarım. Çalıőmalarım sırasında bana çok yardımcı olan saygıdeęer hocalarım Prof. Dr. Tahir Yavuz, Yrd. Doç. Dr. Őzgűr Erol'a çok teőekkűr ederim. Tasarım ve Akıőkan analizleri konularında destekleri nedeniyle sevgili arkadaşlarım Araő. Gűr. Emre Koç ve Araő. Gűr. Onur Gűnel'e gűnűlden teőekkűr ederim.

Son olarak bu tezi hazırlarken, her zaman yanımda olan ve beni destekleyen canım aileme ve tűm arkadaşlarıma teőekkűrlerimi sunarım.

ÖZ

DERECELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT MALZEMEDEN RÜZGAR TÜRBİN KANADI TASARIMI VE TEKNİK BİLGİ PAKETİ HAZIRLANMASI

Yelda ÖZDİL KAÇAN

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Sınırsız ve temiz bir kaynak olan rüzgar enerjisi, son yıllarda alternatif enerji kaynakları arasında ilk sırayı almaktadır. Rüzgar türbinlerinin operasyonel performansı, seçilen kanat profillerine ve kullanılan malzemeye bağlıdır. Rüzgar türbinlerinde, kanadın hafif, ekonomik ve dayanıklı olması arzu edildiğinden kanat imalatında son yıllarda kompozit malzeme kullanımı tercih sebebi olmuştur. Bu nedenle 4 m çapında yüksek aerodinamik performanslı NACA 4412 kanat profiline sahip kompozit rüzgar türbin kanadının tasarımı hedeflenmiştir. Bu tasarım için gerekli olan 3 boyutlu rüzgar türbin kanadının akış ve mekanik analizi ANSYS 14.5.7 programı kullanılarak yapılmıştır. Rüzgar türbin kanadının tasarımı 25 m/s rüzgar hızında, 286 devirde ortaya çıkan gerilmenin maksimum olduğu bölgeler dikkate alınarak yapılmış, Epoksi-ECam kompozit tabakanın katman sayısı ve fiber oryantasyon açıları değişimi ile kanat tabakalarında optimum oryantasyon ve kabuk kalınlığı elde edilmiştir. Tasarım sonucunda en yüksek gerilmenin (172,57 MPa) kanat ile kök arasında meydana geldiği görülmüştür. Kanat numunesi üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda, çekme deneyinde maksimum gerilme 201,9 MPa, eğilme deneyinde ise 280,1 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlarla kanadın kritik bölgede meydana gelen gerilmeye dayanımlı olduğu görülmüştür. Böylece, düşük hızlarda dönebilecek hafif rüzgar türbin kanadının kritik tasarım modeli geliştirilmiş ve imalata hazır hale getirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Rüzgar Türbin Kanadı, Kompozit Malzeme, Sonlu Elemanlar Analizi, Tasarım ve Üretim

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Bedi Cenk BALÇIK, Başkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü.

Eş Danışman: Prof. Dr. Faruk ELALDI

ABSTRACT

DESIGN OF WIND TURBINE BLADE MADE OF GRADED COMPOSITE MATERIALS AND PREPARATION OF TECHNICAL DATA PACKAGE

Yelda ÖZDİL KAÇAN

Baskent University, Institute Science and Engineering

Department of Mechanical Engineering

Wind energy, as sustainable and green resource, became an alternative energy source in the last decade. Operational effectiveness of the wind turbine depends on the performance of the airfoils chosen and the material used. At wind turbines, because the composite materials are used lately to make the blade light, economical and durable; the composite material was preferred for the design of high-performance wind turbine blade (NACA 4412) with a diameter of 4 m. Three dimensional flow and mechanical analysis of the blade were carried out by using ANSYS 14.5.7 program. The design of wind turbine blade was done at the maximum stress regions which occurred at 25 m/s and 286 rpm, the optimum orientation and thickness of blade shells were obtained by changing the number of plies and fiber orientation angles of Epoxy-EGlass composite layers. In final design, the maximum stress was found as 172.57 MPa located between hub and blade. In experimental study of blade samples, the maximum stress was found 201.9 MPa in tension test, whereas the corresponding value was obtained as 280.1 MPa in bending test. Based on these results, it was observed that the blade can withstand against the stress occurred at the critical region. Hence, a critical design model of light wind turbine blade which could be used at low wind speed was developed and made ready for manufacturing.

KEYWORDS: The Blade of Wind Turbine, Composite Materials, FEA, Design and Production

Advisor: Assistant Professor Bedi Cenk BALÇIK, Baskent University, Department of Mechanical Engineering.

Co-Advisor: Professor Faruk ELALDI

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

Sayfa

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	ix
SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	2
1.2 Kapsam	2
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ, KOMPOZİT MALZEMELER VE METODOLOJİ	13
3.1 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli	14
3.2 Rüzgar Türbinleri	15
3.3 Kompozit Malzemeler	19
3.3.1 Fiberler (Lifli Güçlendiriciler)	20
3.3.1.1 Cam fiber	20
3.3.1.2 Aramid (Kevlar)	21
3.3.1.3 Karbon fiber	22
3.3.2 Matris malzemeleri	22
3.3.2.1 Termoset reçineler	22
3.3.2.2 Termoplastik reçineler	23
3.3.3 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	24
3.4. Tahribatlı Testler	30
3.4.1 Çekme testi	31
3.4.2 Eğilme testi	33
4. SAYISAL ÇALIŞMALAR	35
4.1 Sonlu Elemanlar Metodu	35
4.2 Türbin Kanadının Sonlu Elemanlar İle Modellenmesi	37
4.2.1 Akış analizi için türbin kanadının modellenmesi	37
4.2.2 Mekanik analiz için türbin kanadının modellenmesi	37
4.3 Ağ Yapısı	39
4.3.1 Akış analizi için ağ yapısı	39
4.3.2 Mekanik analiz için ağ yapısı	40
4.4 Sayısal Analizler	42
4.4.1 Akış analizleri	42
4.4.2 Mekanik analizler	45
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	66
5.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması	66
5.2 Teorik Hesaplamalar	67
5.2.1 Rüzgar türbin kanat verimi için teorik hesaplamalar	68
5.2.2 Çekme numunesi için teorik hesaplamalar	68
5.2.3 Eğilme numunesi için teorik hesaplamalar	71
5.3 Çekme Deneyleri	72
5.4 Eğilme Deneyleri	74
5.5 Bulgular	77
5.5.1 Çekme deneylerinden elde edilen bulgular	77
5.5.2 Eğilme deneylerinden elde edilen bulgular	80

5.5.3 Çekme numunesi için yapılan sayısal analiz ile elde edilen bulgular....	83
5.5.4 Eğilme numunesi için yapılan sayısal analiz ile elde edilen bulgular	87
6. SAYISAL VE DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	89
7. ELDE EDİLEN VERİLER VE TARTIŞMA	94
8. BULGULAR VE ÖNERİLER	99
8.1 Bulgular	99
8.2 Öneriler.....	101
KAYNAKLAR LİSTESİ	104
EKLER LİSTESİ.....	109

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1	Dünya enerji tüketim 13
Şekil 3.2	2013 yılındaki Türkiye’de enerji üretimi 14
Şekil 3.3	2020 yılındaki dünya yenilenebilir enerji üretimi 14
Şekil 3.4	Rüzgar türbini elemanları 15
Şekil 3.5	Üç palalı rüzgar türbini 16
Şekil 3.6	Güç katsayısının uç hız oranı ile değişimi 18
Şekil 3.7	Epoksi reçinelerde görülen çekme gerilmesi/dayanım eğrisi.....23
Şekil 3.8	Kompozit malzeme yapısı24
Şekil 3.9	Tek tabakalı kompozit yapıda tek yönlü fiber dizilimi24
Şekil 3.10	Tek tabakalı kompozit yapıda örgü fiber dizilimi25
Şekil 3.11	Kompozit malzemede fiber yönleri25
Şekil 3.12	Alüminyum alaşımının gerilme- gerinim grafiği32
Şekil 4.1	Kanat modeli37
Şekil 4.2a	Kanadın alt geometrisi38
Şekil 4.2b	Kanadın üst geometrisi38
Şekil 4.3a	Akış analizi için kanadın ağ yapısı39
Şekil 4.3b	Akış analizi için kanadın ağ yapısı40
Şekil 4.4a	Mekanik analiz için kanadın ağ yapısı.....40
Şekil 4.4b	Mekanik analiz için kanadın ağ yapısı.....41
Şekil 4.5	Mekanik analiz için ağ yapısı kalitesinin kriterleri41
Şekil 4.6	Kanat akış alanı43
Şekil 4.7	Kanat ön yüzeyi basınç dağılımı44
Şekil 4.8	Kanat arka yüzeyi basınç dağılımı44
Şekil 4.9	Kanat kesitleri45
Şekil 4.10	Yüzey haline getirilmiş kanat modeli46
Şekil 4.11	Malzemelere göre “Kök-Alt” bölgesinde meydana gelen gerilme değeri52
Şekil 4.12	Malzemelere göre “Kök-Alt” bölgesinde meydana gelen gerinim değerleri 53
Şekil 4.13	Malzemelere göre “Kök-Alt” bölgesinde meydana gelen toplam deformasyon değerleri53
Şekil 4.14	“Kök-Alt” bölgesinde kullanılan malzemelere göre kanadın kütlesi.....54
Şekil 4.15	“Kök-Alt” bölgesinde tabaka-1’in açılara göre gerilme değerleri57
Şekil 4.16	“Kök-Alt” bölgesinde tabaka-2’nin açılara göre gerilme değerleri57
Şekil 4.17	“Kök-Alt” bölgesinde tabaka-3’ün açılara göre gerilme değerleri58
Şekil 4.18	“Kök-Alt” bölgesinde tabaka-4’ün açılara göre gerilme değerleri 58
Şekil 4.19	“Kök-Alt” bölgesinde tabaka-5’in açılara göre gerilme değerleri 59
Şekil 4.20	“Kök-Alt” bölgesinde tabaka-6’nın açılara göre gerilme değerleri 59
Şekil 4.21	“Kök-Alt” bölgesinde tabaka-7’nin açılara göre gerilme değerleri 60

Şekil 4.22	“Kök-Alt” bölgesinde tabaka-8’in açılara göre gerilme değerleri.....	60
Şekil 4.23	Kalınlığa göre “Kök-Alt” bölgesinin gerilme değerleri.....	61
Şekil 4.24	Epoksi-Ecam malzemesine ait ansys 14.5.7’de tanımlı olan mekanik özellikler	62
Şekil 4.25	“Static Stuctural” modülünde kanattaki tabaka sayısının, kalınlığının ve oryantasyonların girildiği kısım.....	63
Şekil 4.26	Malzemesi Epoksi-Ecam olan kanadın optimum gerilme değerleri.....	64
Şekil 4.27	Malzemesi Epoksi-Ecam olan kanadın optimum gerinim değerleri.....	64
Şekil 4.28	Malzemesi Epoksi-ecam olan kanadın optimum toplam deformasyon değerleri	64
Şekil 5.1	Çekme (a) ve eğilme (b) numunelerinin boyutları	67
Şekil 5.2	Epoksi-ECam malzemesinden yapılan çekme-eğilme numuneleri	67
Şekil 5.3	Test numunesinin alt ve üst katmanı.....	69
Şekil 5.4	Epoksi-ECam malzemesinden yapılan çekme numunesi.....	73
Şekil 5.5	Instron Universal Malzeme Test Cihazı.....	73
Şekil 5.6	Çekme deneyi esnasında çekme numunesi.....	74
Şekil 5.7	Çekme deneyi sonrasında hasara uğramış çekme numunesi	74
Şekil 5.8	Eğilme deneyi esnasında Instron Universal Malzeme Test Cihazı.....	75
Şekil 5.9	Epoksi-ECam malzemesinden yapılan eğilme numunesi... ..	75
Şekil 5.10	Eğilme deneyi esnasında eğilme numunesi	76
Şekil 5.11	Eğilme deneyi sonrasında hasara uğramış eğilme numunesi	77
Şekil 5.12	Çekme numunesinin modeli.....	85
Şekil 5.13	Eğilme numunesinin modeli	87
Şekil 6.1	“Kök_Üst” bölgesi çekme numunesinin deneysel, teorik ve sayısal gerilme-gerinim grafiği.....	89
Şekil 6.2	“Kök_Üst” bölgesi eğilme numunesinin deneysel, teorik ve sayısal gerilme-gerinim grafiği.....	90
Şekil Ek 1.1	Yapısal Çelik malzemesine ait ANSYS 14.5.7’de tanımlı olan mekanik özellikler	110
Şekil Ek 1.2	Alüminyum malzemesine ait ANSYS 14.5.7’de tanımlı olan mekanik özellikler	110
Şekil Ek 1.3	Epoksi-ECam Islak malzemesine ait ANSYS 14.5.7’de tanımlı olan mekanik özellikler	111
Şekil Ek 1.4	Epoksi-Karbon malzemesine ait ANSYS 14.5.7’de tanımlı olan mekanik özellikler	111
Şekil Ek 1.5	Epoksi-SCam malzemesine ait ANSYS 14.5.7’de tanımlı olan mekanik özellikler	112
Şekil Ek 2.1	Malzemesi Yapısal Çelik olan kanadın gerilme değerleri... ..	113
Şekil Ek 2.2	Malzemesi Yapısal Çelik olan kanadın gerinim değerleri... ..	113

Şekil Ek 2.3	Malzemesi Yapısal Çelik olan kanadın toplam deformasyon değerleri	113
Şekil Ek 3.1	Malzemesi Alüminyum olan kanadın gerilme değerleri	114
Şekil Ek 3.2	Malzemesi Alüminyum olan kanadın gerinim değerleri	114
Şekil Ek 3.3	Malzemesi Alüminyum olan kanadın toplam deformasyon değerleri	114
Şekil Ek 4.1	Malzemesi Epoksi-ECam Islak olan kanadın gerilme değerleri	115
Şekil Ek 4.2	Malzemesi Epoksi-ECam Islak olan kanadın gerinim değerleri	115
Şekil Ek 4.3	Malzemesi Epoksi-ECam Islak olan kanadın toplam deformasyon değerleri	115
Şekil Ek 5.1	Malzemesi Epoksi-Karbon olan kanadın gerilme değerleri	116
Şekil Ek 5.2	Malzemesi Epoksi-Karbon olan kanadın gerinim değerleri	116
Şekil Ek 5.3	Malzemesi Epoksi-Karbon olan kanadın toplam deformasyon değerleri	116
Şekil Ek 6.1	Malzemesi Epoksi-SCam olan kanadın gerilme değerleri	117
Şekil Ek 6.2	Malzemesi Epoksi-SCam olan kanadın gerinim değerleri	117
Şekil Ek 6.3	Malzemesi Epoksi-SCam olan kanadın toplam deformasyon değerleri	117
Şekil Ek 7.1	Malzemesi Yapısal Çelik Olan "Kök-Alt" Bölgesinin gerilme değerleri	118
Şekil Ek 7.2	Malzemesi Yapısal Çelik olan "Kök-Alt" bölgesinin gerinim değerleri	118
Şekil Ek 7.3	Malzemesi Yapısal Çelik olan "Kök-Alt" bölgesinin toplam deformasyon değerleri	119
Şekil Ek 8.1	Malzemesi Alüminyum olan "Kök-Alt" bölgesinin gerilme değerleri	120
Şekil Ek 8.2	Malzemesi Alüminyum olan "Kök-Alt" bölgesinin gerinim değerleri	120
Şekil Ek 8.3	Malzemesi Alüminyum olan "Kök-Alt" bölgesinin toplam deformasyon değerleri	120
Şekil Ek 9.1	Malzemesi Epoksi-ECam Islak olan "Kök-Alt" bölgesinin gerilme değerleri	121
Şekil Ek 9.2	Malzemesi Epoksi-ECam Islak olan "Kök-Alt" bölgesinin gerinim değerleri	121
Şekil Ek 9.3	Malzemesi Epoksi-ECam Islak olan "Kök-Alt" bölgesinin toplam deformasyon değerleri	122
Şekil Ek 10.1	Malzemesi Epoksi-Karbon olan "Kök-Alt" bölgesinin gerilme değerleri	123
Şekil Ek 10.2	Malzemesi Epoksi-Karbon olan "Kök-Alt" bölgesinin gerinim değerleri	123
Şekil Ek 10.3	Malzemesi Epoksi-Karbon olan "Kök-Alt" bölgesinin toplam deformasyon değerleri	124
Şekil Ek 11.1	Malzemesi Epoksi-SCam olan "Kök-Alt" bölgesinin gerilme değerleri	125
Şekil Ek 11.2	Malzemesi Epoksi-SCam olan "Kök-Alt" bölgesinin gerinim değerleri	125

Şekil Ek 11.3	Malzemesi Epoksi-SCam olan "Kök-Alt" bölgesinin toplam deformasyon değerleri.....	126
Şekil Ek 12.1	Kanat için malzeme-gerilme grafiği	127
Şekil Ek 12.2	Kanat için malzeme-gerinim grafiği	127
Şekil Ek 12.3	Kanat için malzeme-toplam deformasyon grafiği	128
Şekil Ek 12.4	Kanat için malzeme-kütle grafiği	128
Şekil Ek 13.1	Birinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği	129
Şekil Ek 13.2	İkinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	129
Şekil Ek 13.3	Üçüncü çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	130
Şekil Ek 13.4	Dördüncü çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği	130
Şekil Ek 13.5	Beşinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği	131
Şekil Ek 13.6	Altıncı çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	131
Şekil Ek 13.7	Yedinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği	132
Şekil Ek 13.8	Sekizinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	132
Şekil Ek 13.9	Dokuzuncu çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	133
Şekil Ek 13.10	Onuncu çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği	133
Şekil Ek 13.11	Onbirinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	134
Şekil Ek 13.12	Onikinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği	134
Şekil Ek 14.1	Birinci eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği	135
Şekil Ek 14.2	İkinci eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	135
Şekil Ek 14.3	Üçüncü eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	136
Şekil Ek 14.4	Dördüncü eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği	136
Şekil Ek 14.5	Beşinci eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği	137
Şekil Ek 14.6	Altıncı eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği	137
Şekil Ek 14.7	Yedinci eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği	138
Şekil Ek 14.8	Sekizinci eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	138
Şekil Ek 14.9	Dokuzuncu eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	139
Şekil Ek 14.10	Onuncu eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği	139
Şekil Ek 14.11	Onbirinci eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	140
Şekil Ek 14.12	Onikinci eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği	140

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1	Örnek olan rüzgar türbini toplam verimi 17
Tablo 4.1	Sayısal analiz sonucunda bulunan ağ yapısı kriterleri 41
Tablo 4.2	Malzemelere göre gerilme, gerinim, toplam deformasyon ve kanadın kütle değerleri..... 46
Tablo 4.3	“Kök_Üst” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri 48
Tablo 4.4	“1_Üst” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri 49
Tablo 4.5	“1-Alt” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri 50
Tablo 4.6	“2_Üst” ve “2_Alt” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri 50
Tablo 4.7	“3_Üst” ve “3_Alt” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri 51
Tablo 4.8	“4_Üst” ve “4_Alt” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri 51
Tablo 4.9	“Kök-Alt” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri 55
Tablo 4.10	“Kök_Alt” bölgesi için optimum tabaka kalınlığı ve oryantasyon 55
Tablo 4.11	“Kök_Alt” bölgesi dışındaki kanat bölgelerinde optimum kalınlık ve oryantasyonlar 56
Tablo 4.12	“Kök_Alt” bölgesinde malzemeye göre gerilme değerleri 56
Tablo 4.13	Kanattaki tabaka sayısı, kalınlık ve oryantasyonlar 62
Tablo 4.14	Malzemeye göre kanatta meydana gelen gerilme değerleri 65
Tablo 5.1	Çekme deneyi için teorik gerinim, gerilme ve Young’s Modülü değerleri 70
Tablo 5.2	Eğilme deneyi için teorik gerinim, gerilme ve Young’s Modülü değerleri 72
Tablo 5.3	Çekme numunelerine ait deneysel ve teorik olarak elde edilen gerilme ve gerinim değerleri 78
Tablo 5.4	Çekme deneyi verilerinin teorik verilere göre hata değerleri 79
Tablo 5.5	Çekme numunelerinin deneysel elde edilen Young’s Modül değerlerinin teorik değere göre % hataları 80
Tablo 5.6	Eğilme numunelerine ait deneysel ve teorik olarak elde edilen gerilme ve gerinim değerleri 81
Tablo 5.7	Eğilme deneyi verilerinin teorik verilere göre hata değerleri 82
Tablo 5.8	Eğilme numunelerinin deneysel elde edilen Young’s Modül değerlerinin teorik değere göre % hataları 82
Tablo 5.9	Homojen katı olarak modellenen Yapısal Çelik malzemesinin mekanik özellikleri 84
Tablo 5.10	0° derece ile tabakalandırılmış Yapısal Çelik malzemesinin mekanik özellikleri 84
Tablo 5.11	0° derece ile tabakalandırılmış Epoksi-Ecam malzemesinin mekanik özellikleri 85
Tablo 5.12	“Kök_Üst” bölgesi ile aynı oryantasyonlara sahip tabakalandırılmış Epoksi-Ecam malzemesinin mekanik özellikleri 86
Tablo 5.13	Çekme numunesi için sayısal analizde kuvvete göre gerinim gerilme değerlerinin teorik değerler ile karşılaştırılması 86
Tablo 5.14	Eğilme numunesi için kuvvete göre gerinim-gerilme değerlerinin sayısal analiz sonuçları 88
Tablo 5.15	Eğilme numunesi için sayısal analizde kuvvete göre gerinim gerilme değerlerinin teorik değerler ile karşılaştırılması 88

Tablo 6.1	Çekme deneylerinden ve analizinden elde edilen gerinim sonuçları	91
Tablo 6.2	Çekme deneylerinden ve analizinden elde edilen gerilme sonuçları	91
Tablo 6.3	Eğilme deneylerinden ve analizinden elde edilen gerinim değerleri.....	92
Tablo 6.4	Eğilme deneylerinden ve analizinden elde edilen gerilme değerleri.....	93
Tablo 8.1	Son tasarımda bölgelerin özellikleri	100

SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	kesit alanı
AC	Alternatif Akım
A_f	fiber kesit alanı
A_m	matris kesit alanı
A_t	rüzgarın taradığı alan
b	numunenin genişliği
c	nötral eksenenden kesitin en uç noktasının mesafesi
$\cos(\theta)$	katmanının x eksenine ile yaptığı açının $\cos(\theta)$ değeri
C_p	rotor (kanat) güç katsayısı (kanat verimi)
[D]	büyüklik alanının düğümlerdeki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör
E	Young's Modülü
E_f	fiberin elastik modülü
E_l	katmanının fiber yönündeki Young's Modülü
E_m	matrisin elastik modülü
E_t	katmanının fibere dik yöndeki Young's Modülü
$E_x(\theta)$	katmanının x eksenine ile yaptığı açıdaki Young's Modülü
$E_{üst}$	üst katmanının Young's Modülü
E_1	birinci katmanının Young's Modülü
E_2	ikinci katmanının Young's Modülü
E_3	üçüncü katmanının Young's Modülü
E_4	dördüncü katmanının Young's Modülü
E_5	beşinci katmanının Young's Modülü
E_6	altıncı katmanının Young's Modülü
E_7	yedinci katmanının Young's Modülü
E_8	sekizinci katmanının Young's Modülü
E_9	dokuzuncu katmanının Young's Modülü
F	uygulanan kuvvet
G_{lt}	katmanının xy düzleminde kayma modülü
h	numunenin kalınlığı
I	kesitin atalet momenti
[K]	rijitlik matrisi
L	test uzunluğu
l	son uzunluk
l_i	anlık uzunluk
l_0	ilk uzunluk
M_{max}	maksimum moment
P	uygulanan yük
PEI	Polieterimid
PES	Polietersulfon
P_f	fiber üzerine gelen yük
P_m	matris üzerine gelen yük
P_{max}	numunenin kırıldığı andaki maksimum yükü
P_w	rüzgar gücü
R	rotor pala yarıçapı
[R]	bilinen yük vektörü
r	eğrilik yarıçapı

$\sin(\theta)$	katmanının x eksenine ile yaptığı açının $\sin(\theta)$ değeri
T	tork
V	rüzgar hızı
ν_{tl}	katmanın xy düzlemindeki poisson oranı
W	malzemenin ortasından uygulanan yük
ω	açısal hız
y_{max}	maksimum sehim
Λ	uç hız oranı
α	eğme açısı
ρ	havanın yoğunluğu
φ_1	birinci katmanın hacimsel oranı
φ_2	ikinci katmanın hacimsel oranı
φ_3	üçüncü katmanın hacimsel oranı
φ_4	dördüncü katmanın hacimsel oranı
φ_5	beşinci katmanın hacimsel oranı
φ_6	altıncı katmanın hacimsel oranı
φ_7	yedinci katmanın hacimsel oranı
φ_8	sekizinci katmanın hacimsel oranı
φ_9	dokuzuncu katmanın hacimsel oranı
η_{FD}	frekans dönüş verimi
η_{DK}	dişli kutusunun verimi
η_J	jeneratör verimi
η_T	toplam verim
η_{TR}	transformatörün verimi
ε	mühendislik gerinimi
ε_x	malzemenin x yönündeki gerinimi
ε_1	fiber yönündeki gerinim
σ	mühendislik gerilmesi
σ_f	fiberin gerilmesi
σ_m	matrisin gerilmesi
σ_{max}	maksimum gerilme
σ_T	gerçek gerilme
σ_{UTS}	malzemenin üst düzey çekme dayanımı
σ_y	malzemenin akma dayanımı
σ_1	fiber yönündeki kompozit yapının gerilmesi
σ_2	fibere dik yöndeki gerilme
\emptyset_f	fiber hacim oranı
\emptyset_m	matris hacim oranı

1. GİRİŞ

Tükenebilen fosil yakıtların egemenliğindeki dünyamız hızla bir çevre felaketine doğru giderken; yeni, karbon emisyonu düşük, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının tümüne olan ilgi ve ihtiyaç aynı oranda artmaktadır. Bu nedenle daha önce yeterince dikkat çekmemiş olan ancak dünyamızın sahip olduğu bütün temiz enerji türlerini yeterince değerlendirme ve tüm potansiyel alternatifleri verimli ve yaygın kullanma zorunluluğu doğmuştur. Ülkemizde ve dünyada enerji darboğazına ve çevresel-iklimsel sorunlara yeni ve sürdürülebilir çözümler üretmek için birçok alternatif çalışmalar yapılmaktadır [1]. Enerji verimliliği bağlamında mevcut ulusal enerji kaynaklarımızın da yerli teknolojilerle tümleşmiş bir biçimde mobilize edilmesi büyük önem kazanmaktadır. Alternatif enerji kaynakları yönünden Ülkemiz oldukça şanslıdır ve bu enerji köprüsü olmak yerine enerji merkezi olmaya layık ve yetkin bir ülkedir. Bu yetkinlik yerli enerji kaynaklarımızın tümünün yerli teknolojilerle değerlendirilmesine bağlıdır.

Rüzgar enerjisi 24 saat kesintisiz enerji üretebilen ve ülkemizde yaygın kullanma potansiyeli yüksek olan yenilenebilir enerji kaynaklarımızdan birisidir. Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine çevrilmesinde rol alan rüzgar türbinlerinin performansında rüzgar hızı, kanat geometrisi, kanadın mukavemeti, dolayısıyla kanat malzemesi ve kanadın ağırlığı çok önemlidir. Rüzgar türbin kanadı kompozit malzemedan yapıldığında, kanadın ağırlığı azalarak, kanat düşük rüzgar hızlarında dönebilecek dolayısıyla daha fazla elektrik enerjisi elde edilmiş olabilecektir. Rüzgar hızlarından kanatta meydana gelen gerilme ve deformasyonlar kanat malzemesine ve kanadı oluşturan kompozit malzeme tabakalarının oryantasyonlarına bağlıdır. Kanatta gerilmenin ve deformasyonun yüksek olduğu yerlerde kompozit tabaka kalınlıkları ve oryantasyonlar değiştirilerek gerilme ve deformasyon değerleri alt değerlere çekilebilir.

Bu tez çalışmasında kompozit malzemedan yapılan rüzgar türbin kanadı ile rüzgar enerjisi kullanılarak, gerek yüksek rüzgar hızlarında kentlerin ihtiyaçlarını, gerekse düşük rüzgar hızlarında bireysel ihtiyaçları karşılayabilecek bir türbini çalıştıracak mekanik gücü elde etmek üzere, verimli küçük ölçekli bir rüzgar türbin kanat modeli geliştirilmiştir. Bu bağlamda bölgesel ve ulusal enerji ihtiyacına önemli katkıda bulunabilecek şekilde uyarlanabilir ve elektrik gücü üretiminde rüzgar

enerjisini verimli bir şekilde kullanabilen ve özellikle düşük rüzgar hızlarında çalışabilecek bir tasarımın yapılması, sayısal olarak incelenmesi ve deneysel testlerinin yapılması gerçekleştirilmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda, Epoksi-ECam malzemesi ile hafiflik ve ekonomiklik sağlanarak, düşük rüzgar hızında çalışabilen ve yüksek rüzgar hızlarında kanat üzerinde oluşan gerilmelere dayanımlı rüzgar türbin kanadı tasarımı yapılmış ve imalatı yapılabilecek hale getirilmiştir.

1.1 Amaç

Tez çalışmasında amaç yenilenebilir enerji çeşitlerinden biri olan rüzgar hızını kullanarak elektrik üreten yatay eksenli rüzgar türbin uygulamalarında kullanılacak düşük hızlarda yüksek performanslı çalışabilecek kompozit malzemeden türbin kanadı geliştirmektir. Bu amaçla Tübitak 109M419 nolu 1001 projesi [2] ile geliştirilen yüksek aerodinamik performans veren NACA 4412 kanat profilinin, maksimum rüzgar hızında ($V=25$ m/s) ve 286 devirde akış analizi gerçekleştirilerek kanat üzerinde oluşan basınç değerleri elde edilmiş, daha sonra bu basınç değerleri kullanılarak türbin kanadının mekanik analizi yapılmıştır. Kanadın mekanik analizinde kanat yüzeylerinde tanımlanan kompozit tabaka sayısı ve fiber oryantasyonları değiştirilerek kanat üzerinde oluşan gerilme-gerinim değerleri düşürülmeye çalışılmıştır. Ayrıca kanada ait numunelerin deneysel çalışmaları gerçekleştirilerek kanatta en dayanımlı ve kalınlığı en fazla olması gereken bölgenin("Kök_Üst") dayanımı bulunarak (200 MPa) kanat üzerinde oluşan maksimum gerilmeye (172,57 MPa) dayanımlı olduğu tespit edilmiştir.

1.2 Kapsam

Rüzgar türbin uygulamalarında kullanılmak üzere yüksek performanslı kanat geliştirilmesi konusundaki çalışmalara model belirleme, sayısal analizler ve deneysel analizler ile devam edilmiştir. Kanadın farklı bölgelerinde çeşitli kalınlıklarda kompozit malzemeler ve tabaka oryantasyonları gerilme-gerinim analizlerinde denenmiş ve kanadın üzerinde oluşan maksimum gerilme ve gerinim değerleri düşürülmüştür. Böylece kanadın optimum kompozit kalınlığı ve fiber oryantasyonları belirlenmiştir.

Sayısal alışmalar bölümünde; kullanılan kanat modeline, kullanılan sınır koşullarına, ağ yapılarına, kompozit tabaka kalınlığına, fiber oryantasyonlarına, gerilme-gerinim değerlerine yer verilmiştir. Deneysel alışmalar bölümünde ise kullanılan test düzeneğine, çalışmada kullanılan yöntemlere ve deneysel olarak bulunan gerilme-gerinim değerlerine yer verilmiştir.

Sayısal analiz için 3D akış ve yükleme şartlarında problem modellenmiş, deneysel çalışma için ise Başkent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde bulunan Instron Universal Malzeme Test Cihazı kullanılarak çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmaların detayları sonraki bölümlerde verilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Rüzgar enerjisi kullanılarak enerji üretilmesi ile ilgili olarak, rüzgar türbinleri, rüzgar türbin kanatlarında kullanılan malzemeler, kompozit malzemeler ve üretim yöntemleri ile ilgili yapılan literatür çalışmaları incelenmiştir.

Literatüre bakıldığında rüzgar türbin verimini büyük oranda rotor verimliliği etkilemektedir. Dolayısıyla rüzgar türbininin düşük hızlarda verimli çalışabilmesi için kanat geometrisi, malzemesi ve kanadın mukavemeti önemlidir. Bechly ve Clausen [3] rüzgar türbin verimini arttırmak için 2,5 m uzunluğundaki rüzgar türbini kanadını cam fiber malzemesinden tasarlanmış ve bu tasarımın sayısal analizini Fortran sonlu elemanlar program yazılımını geliştirerek gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonunda, kanat eleman teorisi kullanılarak oluşturulan sonlu eleman programı verileri ile teorik olarak kanadın statik eğilme ve burulma sehimleri uyumlu bulunmuştur. Ayrıca üzerinde çalışılan bu yazılım ile tasarım koşullarında kanattaki maksimum gerilmeyi ve kanat ucundaki sehimini azaltmak için kanat elemanı teorisi ile farklı dizilişte en uygun kanat tasarımını ortaya çıkarmışlardır.

Fuglsang ve Madsen [4] yüksek enerji üreten yatay eksenli rüzgar türbinlerinin tasarımının en uygun hale getirilmesi üzerine disiplinler arası optimizasyon metodu üzerine çalışmışlardır. Bu metot sonucunda, tasarımı yapılmış rüzgar türbin rotorlarının aşırı yüklenme ve yorulmada, enerji maliyeti minimuma indirilmiştir.

Optimum ağırlık ve aerodinamik performans için kanat tasarımı zordur. Malzeme seçimi, üretim teknolojisi ve ileri tasarım araçlarının kullanımı kanat tasarımında oldukça önemlidir. Scherer [5] rotor çapı 62 m, malzemesi epoksi cam fiber olan kanadın aerodinamik ve yapısal tasarımı üzerine çalışmıştır. Kanatta kompozit malzeme kullanarak hafif, statik yüklere karşı yüksek mukavemetli, yorulma ömrü uzun olan kanat tasarımı gerçekleştirmiştir.

Habali ve Saleh [6] 5 m'ye kadar uzunluğa sahip küçük kanatları incelemiş, iki farklı kanat profilini birleştirerek verimli, iyi mukavemete ve aerodinamik karakteristiklere sahip kanat tasarlamışlardır. Kanat malzemesi olarak cam fiberle güçlendirilmiş plastik seçilmiştir. Tasarlanan bu kanat test edildiğinde %41,2 verimle çalışacağını ön görmüşlerdir.

Habali ve Saleh [7] bir önceki çalışmalarında [6] seçilen 2 kanat profilinin kombinasyonu yapılarak bir kanat tasarımı üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada ise fiberle güçlendirilmiş plastik kompozit malzemesinden tasarımı yapılan bu kanadın üretimi, testleri ve performansı üzerine çalışmışlardır. Tasarlanan bu kanat test edildiğinde %41,2 verimle çalıştığını göstermişlerdir.

Rüzgar türbini kanatları maliyet açısından ucuz olduğu için cam elyaf malzemesinden yapılmaktadır. Rüzgar türbin kanadının nemden, yorulmadan zarar görüp, kanatta kopma olabileceğinden Ghoshal et al., [8] bu çalışmada; rüzgar türbin kanatları üzerinde zarar gören yerin tespiti için farklı dört algoritma üzerinde çalışmışlardır.

Ronold ve Christensen [9] rüzgar kanatlarında eğilmeye bağlı kopma ve yorulmaya karşı güvenilirlik tabanlı tasarım kodunun uygun hale getirilmesi üzerine çalışmışlardır. Kalibrasyon edilen bu kod kanat üzerine gelen yük ve dayanıklılık esas alınarak olasılıklı model ile belirleyici modelin birleştirilmesi ile oluşan sayısal bir koddur.

Qian ve Dutta [10] türbin kanadının malzeme özelliğini zorlayacak olan basınç ve sıcaklığı düşünerek türbin kanat malzemesinin difüzyon yöntemi ile birçok malzemenin birleştirilmesi ile herhangi bir tek malzeme ile tasarlanan türbin kanadı özelliklerinden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Eral [11] farklı sıcaklık ve gerilme değerlerinde, Al-6061 malzemesi ile SiC metal matrisli kompozitin sürünme uzaması hareketini karşılaştırmıştır. Sayısal çalışmalarda ise Ansys sonlu elemanlar analizi paket programını ile bu malzemelere ait literatürde bulunan deneysel sürünme grafikleri kullanmıştır. Çalışmada deneysel ve sayısal veriler karşılaştırılmıştır ve metal matrisli kompozitin sürünme uzamasında daha iyi sonuç verdiğini kanıtlamıştır.

Kong et al., [12] Epoksi ECam'dan yapılmış orta ölçekli rüzgar türbin kanadın farklı yüklemeler altında yapısal olarak nasıl davranacağını ve yorulma ömrünü hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Tasarımı yapılan Epoksi ECam kompozit kanadın yorulma ömrünü 20 yıl bularak güvenli bir şekilde çalışacağını kanıtlamışlardır.

Rüzgar türbininin üretim maliyetinin %15-20'si kanat üretim maliyetidir. Bir rüzgar türbini tasarlanırken amaç belirlenen atmosfer koşullarında mümkün olduğunca yüksek güç elde etmektir. Teknik açıdan bakıldığında bu güç, kanadın şekline bağlıdır. Kanat şeklinin ve malzemesinin, aerodinamik yüklerin ve sınır koşullarının belirlenmesi oldukça karmaşık bir iştir. Bu yüzden Jureczko et al., [13] bu kriterleri göz önünde bulundurarak rüzgar türbin kanatlarının optimum tasarımını yapmak için bilgisayar programı geliştirmişlerdir.

Jensen et al., [14] 34 m kompozit rüzgar türbini kanadında kopmanın nerde olacağına dair çalışmışlardır. Bu çalışmayı hem deneysel hem sayısal olarak yürütmüşlerdir. Türbin kanadında ilk kopmanın kanadın dış yüzeyinde deliminasyon olarak başladığını göstermişlerdir.

Shokrieh ve Rafiee [15] yatay eksenli kompozit rüzgar türbin kanadının ömrünü hesaplamaya yönelik çalışmalar yapmışlardır. Rastgele rüzgar hızlarında kanada gelen yükler dikkate alınarak 3 boyutlu sonlu eleman metodu kullanarak statik analizler yapmışlardır. Bu analizler sonucu kanadın 18 ile 24 yıl ömrünün olduğunu ortaya koymuşlardır.

Kong et al., [16] orta ölçekli (750 kW) rüzgar türbinin yorulma ömrünü uzatmak için çok iyi bilinen S-N denkleminin geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Üzerine çalışılan rüzgar türbin ömrünün 20 yıldan daha fazla güvenli bir şekilde çalışacağını göstermişlerdir.

Maheri et al., [17] yatay eksenli rüzgar türbinleri için uyumlu olan kanatların performansını tahmin etmek için aero-yapısal denilen bir kod geliştirmişlerdir. Bu kod aerodinamik kod, uyumlu ağ yapısı üreten ve sonlu eleman kodunun birleşimidir.

Cheng ve Hwu [18] literatürde rüzgar türbini kanatlarında bölgesel hasarın gerçekleştiği yerdeki malzeme özelliğini belirleyen geliştirilmiş teknikler yerine gerçek zamanlı ve anında kanat yapısı içine gömülü olan gerinim sensörleri ve frekanslar ile tüm kanat yapısının elastik özelliğini belirleyen bir sistem üzerinde çalışmıştır.

Kensche [19] rüzgar türbini kanatlarının kullanım ömrünün daha uzun olması için kompozit malzemeden yapılması gerektiğini vurgulamıştır.

Maheri et al., [20] rüzgar türbin kanatlarında eğilme ve burulma analizlerini ayrı ayrı yapan bir metot geliştirmişlerdir. Bu metotla eğilme ve burulmayı birlikte yapan sonlu elemanlar analizinde hesaplama zamanının ciddi bir şekilde azaldığını göstermişlerdir.

Uysal [21] rüzgar türbini kanat malzemelerinin gerilme-gerinim karakteristiklerinin mikro sertlik değerlerinin ve mikro yapıları incelemelerinin yapılması amacıyla el yatırma yöntemi kullanılarak cam fiber keçe ve/veya balsa takviyeli polyeester matrisli ve vinilester matrisli kompozit malzemeleri üretmiştir. Ayrıca kiriş uzunluğu 400 mm olan bir kanat modeli üretmiştir.

Vatangül [22] çeşitli oryantasyonlarda kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin mukavemet deneyleri ile deney sonuçları kullanılarak Ansys 10 programı ile gerilme analizlerini yapmıştır.

Ameku et al., [23] momentum ve kanat elemanı teorisi hesaplanan ve tasarımı yapılan ince, 3 palalı 3 kW'lık rüzgar türbini tasarımı üzerine çalışmışlardır.

Dönmez [24] kompozit malzemelerin gelen etkilere karşı davranışını gerilme analizleriyle incelemiştir. Kompozit zırhlar için farklı kompozit malzemeler kullanarak ve modellemelerini yapıp Ansys programında analizlerini gerçekleştirmiş olup, deneysel çalışmalarla sayısal çalışmalarını karşılaştırmıştır.

Marin et al., [25] 300 kW'lık rüzgar türbinlerinin bazı kanatlarında çatlaklardan, geometriden, kalınlıktaki ani değişimden dolayı ve yorulmaya bağlı olarak hasar olabileceğini ortaya koymuşlardır.

Overgaard et al., [26] tek tabakalı kompozit rüzgar türbini kanadında kopma yerini bulmak için sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda kanat yüzeylerinde delimasyonlarla başlayan kopmaların olduğunu ve kanadın ana kirişindeki fiberlerin kopmasıyla izlediğini ortaya koymuşlardır.

Lai et al., [27] küçük boyutlarda kompozitten yapılmış türbin kanatları için yorulma testleri yapmışlardır. Kanadın 1800 çevrimde kırıldığını ortaya koymuşlardır.

Karabağ [28] rüzgar türbin kanatlarında kompozit malzemelerinin önemini vurgulayarak geçmişte kullanılan rüzgar türbin kanadının üretim yöntemleri ile günümüzde kullanılan ve yaygın olan üretim yöntemlerini karşılaştırmıştır.

Toft Ve Sorensen [29] güvenilirlik tabanlı rüzgar türbini kanadında belirsizlikleri kaldırmak için metotlar geliştirmişlerdir. Bu metotlarla var olan belirsizlikler kaldırıldıktan sonra güvenilirlik tabanlı rüzgar türbini kanadının imal edilebilirliğini savunmuşlardır.

Mishnaevsky Jr et al., [30] gelişmekte olan ülkelerde ahşaptan yapılan rüzgar türbin kanatları ile düşük maliyetli rüzgar türbini kurulabileceğini göstermişlerdir.

Tseng ve Kuo [31] 1 kW rüzgar jeneratör sisteminin cam fiber/epoksiden oluşan kanada burulma yükü uygulayarak kanadın burulma yükünü ve kök kısmında kanadın nerden kopacağını belirlemek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Kanadın iç kısmı köpük ile doldurulmuş, kabuk kısmı kompozit tabakalardan oluşmaktadır. Uygulanan burulma yükü sonrası kanadın kök kısmındaki alüminyum shaft ile kompozit tabakaların temas yüzeyinden kopmanın başladığını ve daha sonra kök kısmının tamamen koptuğunu deneysel olarak belirlemişlerdir.

Song et al., [32] 20 kW'lık bir rüzgar türbin kanadının MATLAB programı ile aerodinamik analizi ve sonlu eleman metodu kullanarak dinamik analizi üzerine çalışmışlardır.

Yang et al., [33] büyük ölçekli rüzgar türbinlerindeki kompozit kanatta oluşan deformasyonu ölçmek için videometrik tekniği kullanmışlardır. Videometrik tekniğinin fotogrametri prensibiyle çalışan, büyük ölçekli rüzgar türbinlerine ve çeşitli çevre koşullarına uygun bir teknik olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Malhotra et al., [34] rüzgar türbin kanatlarının statik testler ve yorulma testleri ile test edildiğini söyleyerek, büyük ölçekli rüzgar türbinleri kanatlarının üç eksenli test edilebilmeleri için bir tasarım yapmışlardır ve bu tasarlanan test düzeneği üzerinde çalışmışlardır.

Carvelli et al., [35] fiberle güçlendirilmiş ortogonal E-Cam kompozitin düzlemsel çekme ve kaymada şekil değiştirebilme durumunu ölçmek ve anlamak için

deneysel çalışmalar yapmışlardır. Tek eksenli çekme testinde kaymanın yüzeyin 30° olduğunu, kayma deformasyonu olurken kompozit malzemenin kalınlığının ölçülemeyeceğini ve kompozit malzemedede fiber hacim oranının önemli olduğunu vurgulamıştır.

Rüzgar enerjisini kinetik enerjiye çeviren kanatlardır. Kanatların yapımında zarar görmesi performansında azalmasına sebep olmaktadır. Kanatlardaki performansının azalmasına en çok etki eden de ayrılmalardır. Nagarajan et al., [36] ayrılma faktörünü Buchingam π teoremini kullanarak ayrılma faktörünü yenileme üzerine çalışmışlardır.

Liao et al., [37] düşük maliyetli rüzgar türbini ve hafif kanat üretimini düşünerek, kanadın maksimum yer değiştirmesinin olduğu yeri esas alarak FAST programını kullanmışlardır ve kanattaki uygun dizilimi bulmak için PSO algoritmasını geliştirmişlerdir.

Aceves et al., [38] bu çalışmada düşük hızlı rüzgarda çalışan rüzgar türbin kanadında malzeme seçimi üzerinde durmuşlar ve özellikle rüzgar türbini kanatlarında kompozit malzeme üzerine çalışmışlardır.

Yang et al., [39] bir başka çalışmada büyük ölçekli rüzgar türbinlerindeki kompozit kanadın yapısal davranışını statik testlerle denemişlerdir. Yükleme durumunda kanadın verdiği cevapları incelemişlerdir. Test edilen 40 m kanat için uygulanan tasarım yükünün %160 kadar yük uygulandığında kanadın toplam deformasyonunun 11 m olduğunu bulmuşlardır.

Türkmen vd., [40] bu çalışmada; farklı cam elyaf tabaka sayısına sahip, el yatırması üretim yöntemiyle üretilmiş kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Üretilen kompozit malzemelerin çekme ve üç nokta eğme testleri yapılarak ortalama mukavemet değerleri elde etmişlerdir. Ayrıca düşük hızlı darbe testi (impact test) yapılarak malzemelerin darbe dayanımlarını incelemişlerdir. Kompozit malzeme katman sayısı arttıkça mekanik özelliklerin iyileştiğini ve malzemelerin absorbe ettiği enerji miktarının arttığını göstermişlerdir.

Toumi et al., [41] statik ve yorulma yükleri altında oluşan sürekli olan E-Cam fiberle güçlendirilmiş kompozit üzerindeki hasarları araştırmak için 2 tane

tahribatsız teknik kullanmışlardır. Bu tekniklerin biri akustik emisyon kayıtları, diğeri ise mikroskopik gözlemlerdir. Bunun yanı sıra ekstansometre ile rijitlik takip edilmiştir. Elde edilen veriler statik ve yorulma yüklerinin her ikisi altında kompozit malzemenin mikroskopik davranışı üzerinde etkisini ve hasar durumunu belirlemede kullanılmıştır.

Grogan et al., [42] gelgit olayları yaşanan denizlerde çalışan türbin kanatlarını incelemiştir. Bu kanatlar deniz suyunun yüksek yoğunluğundan dolayı ciddi bir şekilde itme ve burulma yüklerine maruz kalmaktadır. Türbinin normal ve sıra dışı çalışma koşullarında kanat üzerine dağılmış yükü belirlemek için hidrodinamik analiz yapmış ve bu analizden elde ettiği çıktıları kullanarak kanadın ana kirişindeki gerinim dağılımlarını elde etmiştir. Ayrıca kanadın ana kirişindeki malzemeyi cam fiber ile güçlendirilmiş polimer ve karbon fiber ile güçlendirilmiş polimer seçerek sonlu elemanlar modelinde analizi yaparak bu iki modeli karşılaştırmıştır. Karbon fiberin cam fiberden daha dayanıklı olduğunu ispatlamışlardır.

Buckney et al., [43] rüzgar türbininin maliyetini azaltacak, ağırlığı minimum olacak şekilde rüzgar türbini kanatlarının yapısal dizilişleri hakkında araştırmalar yapmışlardır. 45 m uzunluğa sahip bir rüzgar türbini kanadı için topolojiye uygun teknikler kullanarak yeni konseptler tanımlamışlardır. Gerilmenin minimum sertliğin ile maksimum olduğu yerdeki şekil faktörünü geliştirerek ve asimetrik eğilme altında verimli şekilde çalışabilecek kanattaki uygun yapısal dizilmeyi bulmuşlardır.

Öktem vd., [44] süreksiz fourier serileri yöntemiyle fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (fd) kompozit plakların statik analizini analitik bir çözüm tekniğiyle gerçekleştirmişlerdir. Kısmi türevli yüksek dereceden lineer diferansiyel denklemlerin oluşturduğu sistemi, ankastre ve basit mesnetli sınır şartları için süreksiz fourier serileri yöntemiyle çözdürmüşlerdir. Plâğın mekanik özelliklerinin kalınlık boyunca, bileşenlerin hacim oranları ölçüsünde üstel bir şekilde dağıldığı kabulünü yapmışlardır. Analitik çözümü, sabit yayılı yük için sonlu elemanlar programı kullanılarak karşılaştırmışlardır.

Jia et al., [45] küçük ölçekli dikey eksenli rüzgar türbinlerinde fiberle güçlendirilmiş kompozit kanat tasarımını ve analizlerini yapmışlardır ayrıca bu kanadın türbin

üzerindeki performansını incelemişlerdir. 13 m/s'de çalışan dikey eksenli rüzgar türbinlerinde fiberle güçlendirilmiş kompozit malzeme kullanılarak rüzgar kanadının hem hafifliği hem de mekanik özelliklerinin iyi olması sebebiyle rüzgar türbininin 4,5 m/s ile 18 m/s'de çalıştığını göstermişlerdir.

Rarani et al., [46] E-Cam epoksiden oluşmuş tabakalı kompozitlerin tabaka diziliş sıralarını değiştirmenin kompozit yapıdaki burulma davranışına olan etkisini analitik ve sonlu elemanlar kullanarak incelemişlerdir. Deneysel analizlerde kopmanın tabakanın köşesinden başlayıp tabakanın genişliği boyunca yayıldığını, burulma yükünün tabaka oryantasyonlarında 0°'den 90°'ye gidildikçe azaldığını göstermişlerdir.

Chen et al., [47] 52,3 m uzunluğa sahip cam epoksiden yapılmış rüzgar türbin kanadında meydana gelen kopmanın nedenini araştırmışlardır. Bu çalışmada kopmanın kanatın ana kirişindeki tek yönlü tabakaların birbirinden ayrılması yüzünden ortaya çıktığını ve kanat kalınlığı boyunca oluşan gerilmelerin büyük boyutta kanatların kopmasına ciddi bir şekilde etki edeceğini savunmuşlardır.

Liu et al., [48] cam fiber kompozitten yapılmış rüzgar türbin kanadındaki ayrılmayı ve ayrılma ilerleyişini optik tomografi ile incelemişlerdir.

Rüzgar türbini kanadının tasarımını yapmak oldukça karmaşıktır. Zangenberg et al., [49] rüzgar türbini tasarımında kanadın kopma durumlarını, üretim teknolojisini ve çalışmasına kadar olan süreci çalışmalarında anlatmışlardır.

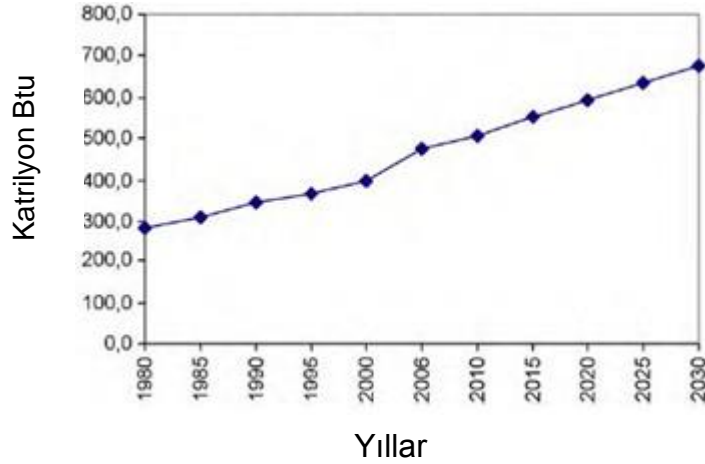
Pollayi ve Yu [50] bu çalışmasında helikopter ve rüzgar türbini kanatları kompozit malzemeden yapıldığı için kanatlarda oluşan matris mikro çatlakların, fiber kırılmasının, ayrılmanın kanatta hasar bıraktığını savunmuş, meydana gelen hasarların modellenmesi ile ilgili çalışmışlardır.

Yapılan literatür taraması sonucunda; rüzgar türbin kanatlarında genellikle Epoksi-ECam kompozit malzemesi kullanıldığı görülmüştür. Bu yüzden tasarımı yapılan rüzgar türbin kanadının malzemesi hafiflik, yüksek mukavemet ve kolay bulunabilirlik özellikleri göz önünde bulundurularak Epoksi-ECam kompozit malzemesi seçilmiştir. Literatür taraması sonucu türbin kanatlarında hafiflik, türbin aerodinamik performansı ve dayanım kriterlerini sağlamak için katmanlı kompozit

tasarımları yapıldığı tespit edilmiş, ancak türbin kanadına gelen rüzgar basınçlarının kanatta yarattığı gerilme dağılımı düşünülerek değişik bölgelerde farklı katman sayısı ve oryantasyonu belirleme yönünde yapılan çalışmaların eksik olduğu görülmüştür. Bu sayede türbin kanadının ağırlığının daha da düşürülebileceği ve düşük rüzgar hızlarında da çalışma şartlarının sağlanılabileceği sonucu çıkarılmıştır. Bu tez çalışmasının literatürde bulunan çalışmalardan farkı ise kanat 10 bölgeye ayrılarak ve her bölgedeki katman sayısı, kalınlık ve fiber oryantasyonlar değiştirilerek kanat üzerinde oluşan maksimum gerilme değerleri düşürülmeye çalışılacaktır. Böylece düşük rüzgar hızlarında çalışabilecek kadar hafif, dolayısıyla rüzgar türbin verimine ilave katkıda bulunabilecek ve yüksek rüzgar hızlarında mukavemetli olacak şekilde kompozit malzemeden rüzgar türbin kanat tasarımı yapılmış olacaktır.

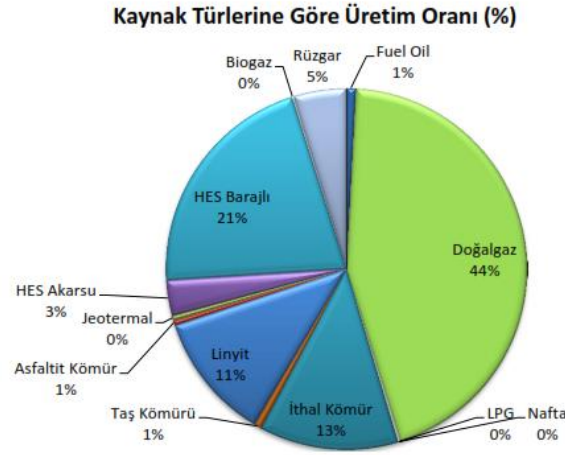
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ, KOMPOZİT MALZEMELER VE METODOLOJİ

Ekonomik gelişmeler ve insanların artan ihtiyaçları enerji tüketiminin artmasındaki en önemli faktörlerdir. 2030 yılına kadar dünya enerji tüketim tahminini gösteren grafik Şekil 3.1'de verilmiştir [51]. Grafikten görüldüğü gibi tüketim miktarı hızla artmaktadır. 2013 yılına ait Türkiye'deki enerji üretiminde kullanılan çeşitli kaynakların dağılımları Şekil 3.2'de verilmiştir. Buradan görüleceği üzere üretimde büyük payı, tükenmekte olan ve aynı zamanda çevreye zarar veren kömür, doğalgaz ve petrol gibi kaynaklar almaktadır. Diğer bir alternatif olan nükleer enerji ise tehlike potansiyeli yüksek, üretimde kullanılan yakıt ve hatta yakıt atığının bertaraf edilmesi bile dış ülkelere bağımlı, riskli bir enerji kaynağıdır. Bu kaynakların çevreye verdikleri zarar ve rezervlerindeki azalma nedeniyle alternatif enerji kullanımı günümüzde kaçınılmaz ve tercih edilebilir olmuştur. Önümüzdeki yıllarda yenilenebilir enerjinin kullanımının hızlı bir şekilde artması beklenmektedir. Şekil 3.3'de ise 2020 yılına ait tahmini yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elde edilen enerji miktarı yer almaktadır.

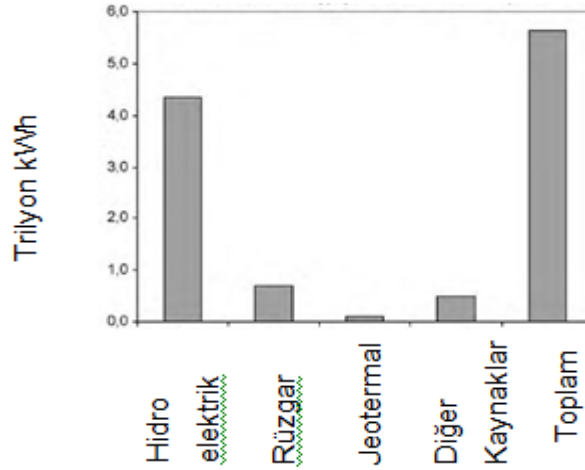


Şekil 3.1 Dünya enerji tüketimi [51]

Ülkemizde (Ağustos 2013) çeşitli kaynaklar kullanılarak gerçekleşen elektrik üretimi Şekil 3.2'de verilmiştir. Enerji üretimi en fazla doğalgazdan sağlanırken, yenilenebilir enerji kaynakları arasında olan rüzgardan %5 oranında sağlanmıştır.



Şekil 3.2 2013 yılındaki Türkiye’de enerji üretimi



Şekil 3.3 2020 yılındaki dünya yenilenebilir enerji üretimi [51]

3.1 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

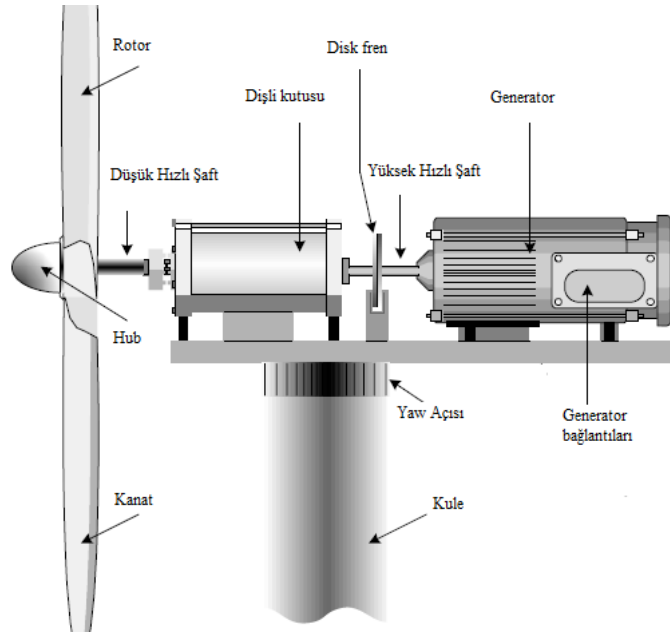
Dünyada ve Ülkemizde enerji sorunu yıldan yıla büyümekte ve ülkeler enerji sorununu çözmek için çareler aramaktadır. Enerji sorununun sürdürülebilir çözümünün anahtarı, enerji verimliliği ve tasarrufunun yanında küçük ölçekli hidrolik, güneş, jeotermal, biyokütle ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji potansiyelimizin kullanımını teşvik etmektir. Ülkemizde, yenilenebilir enerji kaynaklarımız enerji ihtiyacımızın önemli bir bölümünü karşılayabilecek potansiyele sahip olmasına rağmen, bu kaynaklarımız ya kullanılmamakta ya da potansiyelin çok altında değerlendirilmektedir [1]. Türkiye 128 Milyar kW-h olan hidrolik güç potansiyelinin %65’ini kullanırken, 10000 MW ekonomik rüzgar enerjisi potansiyelimizin %99’unu ve mevcut jeotermal kaynaklarımızın %97’sini ve

ülkemizin her yerinde bulunan güneş enerjisini hemen hemen hiç kullanmayan bir ülke durumundadır [1].

Yukarıda da bahsedildiği gibi, ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarımız enerji ihtiyacımızın önemli bir bölümünü karşılayabilecek potansiyele sahip olmasına rağmen, bu kaynaklarımız ya kullanılmamakta ya da potansiyelin çok altında değerlendirilmektedir.

3.2 Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri yüksek basınç merkezinden alçak basınç merkezine doğru hareket eden hava akımını yani rüzgar enerjisini ilk önce kinetik enerjiye daha sonra mekanik enerjiye çeviren sistemlerdir. Rüzgar türbinlerinde jeneratör, dişli kutusu, şaft, kule ve pervaneler (kanatlar) bulunmaktadır. Şekil 3.4'de rüzgar türbin elemanları gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Rüzgar türbini elemanları [52]

Kule

Kule malzemesi, genelde çelik veya betondur. Modern rüzgar türbinleri, halka enine kesitli kulelere sahiptir. Kule yüksekliği, yüksekteki daha rüzgar hızlarından yararlanmanın getirisi ile boya bağlı artış gösteren kule maliyeti arasındaki optimum çözümlerle belirlenir. Kule boyutlandırılmasındaki bir diğer parametre de,

eğilme doğal frekansı, kule malzemesidir ve dolayısıyla maliyeti önemli ölçüde etkilemektedir. Rüzgar türbinlerinin tüm imalat giderlerinin %11-20'si kule imalatına aittir [53].

Pervane Kanatları

Rüzgar estiği zaman pervanenin kanatlarına çarparak onu döndürmeye başlar. Bu sayede rüzgar enerjisi ile kinetik (hareket) enerji elde edilmiş olur. Rüzgar enerjisi ile elde edilen kinetik enerji Denklem (3.1) ile bulunur. Pervaneler rüzgar estiğinde aynı yönde dönecek şekilde tasarlanır [53].

$$P_w = \frac{1}{2} \rho V^3 A_t \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de P_w rüzgar enerjisi, ρ havanın yoğunluğu, V rüzgar hızı, A_t ise rüzgarın taradığı alandır.

Şekil 3.5'de üç palalı rüzgar türbini gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Üç palalı rüzgar türbini [54]

Şaft

Pervanelerin dönmesiyle ona bağlı olan şaftta dönmeye başlar. Şaftın dönmesiyle de motor içinde hareket oluşur ve motorun çıkışında elektrik enerjisi sağlanmış olur. Rotorun açısal hızı (ω) genellikle ihtiyaç duyulan elektriksel frekans değerini üretmek için jeneratörü hareket ettirmede yeteri kadar hızlı değildir. Dişli takımları dönme sistemleri için hızlarda mekanik olarak bir artış ve azalış sağlayabilirler. Rüzgar türbinlerini dikkate aldığımızda dişli takımları düşük hızlı milin açısal hızını

jeneratöre bağlanan yüksek hızlı mil hareketine dönüştürmede kullanılırlar. Sürücü dişli karşı dişli ile temas yapmadan önce bir açı boyunca döner, giriş dişlinin açısız dönüşü gerçekleşene kadar çıkış dişlisinin açısız dönüşü gerçekleşmez. Dişli kutusu için giriş parametreleri, rotoru dişli kutusuna bağlayan düşük hızlı mil için açısız hız ve torktur. Çıkış parametreleri ise, dişli kutusunu jeneratöre bağlayan yüksek hızlı mil için açısız hız ve torktur [53].

Jeneratör (Üreteç)

Elektromanyetik indüksiyon ile elektrik enerjisi üreten çok basit bir çalışma yöntemi vardır. Jeneratörün içinde bulunan mıknatısların ortasında ince tellerle sarılmış bir bölüm bulunur. Pervane şaftı döndürdüğü zaman motor içindeki bu sarım bölgesi, etrafındaki mıknatısların ortasında dönmeye başlar. Bunun sonucunda da alternatif akım (AC) oluşur. Rüzgar enerjisi tesislerinde kullanılan jeneratörler, alternatif akım veya doğru akım jeneratörleri olabilir. Burada elde edilen elektrik akımı, yetersiz kalitede alternatif akım veya doğru akım bile olsa, çeşitli güç elektroniği düzenekleriyle şebekeye uygun hale getirilebilir [53].

Rüzgar türbinlerinde verim ise türbin sisteminde bulunan her elemanın verimi dikkate alınarak Denklem (3.2) kullanılarak bulunur.

$$\eta_T = C_P * \eta_{DK} * \eta_J * \eta_{FD} * \eta_{TR} \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'de η_T toplam verim, C_P kanat verimi (güç katsayısı), η_{DK} dişli kutusunun verimi, η_J jeneratör verimi, η_{FD} frekans dönüş verimi, η_{TR} transformatörün verimidir. Örnek olan bir rüzgar türbininin toplam verimi Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Örnek olan rüzgar türbini toplam verimi

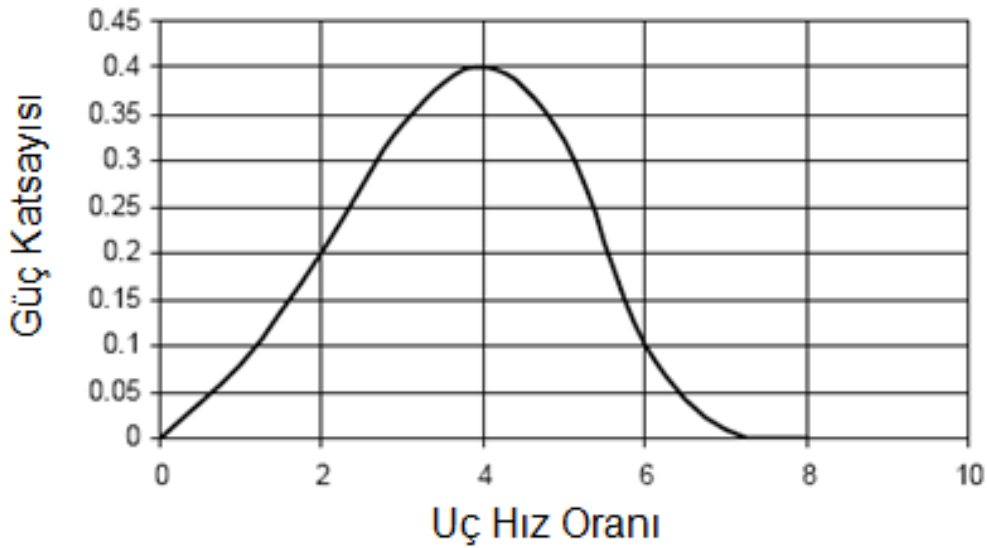
Rüzgar Türbinindeki Eleman	Verim (%)
Rotor (C_P)	40
Dişli Kutusu	95
Jeneratör	95
Frekans Dönüş	98
Transformatör	98
TOPLAM VERİM	34

Bu tablodan görüldüğü gibi sistem verimini etkileyen en önemli eleman rotor yada kanat verimidir. Bilindiği gibi rüzgar türbinlerinde üç palalı bir kanat için erişilebilecek maksimum verim %59 olup buna Betz limiti denilmektedir.

Rüzgar türbinlerinde verim iki şekilde ifade edilir; bunlar değişken rotor hızındaki verim ve sabit rotor hızındaki verimdir. Değişken rotor hızı için, rotor enerji dönüştürme verimi hemen hemen sabittir. Sabit rotor hızı için, enerji dönüşüm verimi rotor uç hız oranına, λ , (tip-velocity ratio) bağlı olarak değişmektedir. Uç hız oranı, rotor palasının uçtaki hızının rüzgar hızına oranı olarak ifade edilir.

$$\lambda = \omega R/V \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'de ω rotor açısal hızı, R rotor pala yarıçapı ve V rüzgar hızıdır. Şekil 3.6'da Kanat güç katsayısının (veya enerji dönüştürme verimi) uç hız oranına (ilerleme hız oranı) göre değişimi verilmiştir.



Şekil 3.6 Güç katsayısının uç hız oranı ile değişimi [1]

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi maksimum verim, uç hız oranının 4 olduğu değerde %40 olmaktadır.

Tablo 3.1'deki ve Şekil 3.6'daki kanat verim (%40) değeri Betz Limiti'nin altında bir değerdir [1]. Bu yüzden kanat verim değerini, yüksek performanslı kanat geliştirerek yükseltmek gerekir.

3.3. Kompozit Malzemeler

Teknolojik gelişimin hızla ilerlemesi ile sektördeki tüm firmaların ürettiği türbinlerin alt standartları iyice yükselmiş ve önemli bir unsur olarak kanatların tasarımı, malzemesi ve üretim şekli önem kazanır olmuştur. Artık günümüzde rüzgar türbini kanatlarının, türbin verimliliğinde ciddi oranda etkisi olduğu kabul edildiğinden mühendislik ve teknoloji olarak önemli yatırımlar yapılmakta ve sürekli gelişim/değişim yaşanmaktadır.

Rüzgar türbini kanatlarından en büyük beklenti; uzun sürede dayanıklılığını koruması, aerodinamik olarak türbinin enerji verimliliğine ilave katkı sağlaması, tüm dış etkenlere karşı bütünlüğünü ve yüzey kalitesini kaybetmemesi gibi özelliklerdir. Bu özellikleri sağlamak için de yapılan tüm çalışmalar ve denemeler sonucunda rüzgar türbinleri kanatlarının kompozit teknolojisi ile üretilmesinin en uygun yöntem olduğu ve kullanılan malzemelerde de günden güne gelişim yaşanması ile bunun desteklendiği görülmüştür.

Rüzgar türbinlerinin yapımında çok çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerinden yüksek verim elde edilmesi, her birim için uygun malzemenin seçilmesiyle mümkündür. Bu nedenle, tüm koşullarda malzeme gelişim ve davranışları incelenmektedir. Genellikle tüm durumlarda malzeme seçimi için beş metot tercih edilmektedir. Bu metotlar: ekonomik ve performans karakteristikleri, özellik ölçüm değerleri, değerlerin analizi, hasar analizi, ekonomik ve fayda analizi olarak adlandırılır.

Kompozit malzeme fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı iki ya da daha fazla malzemenin bir araya gelerek oluşturduğu malzemedir. Kompozit malzemeler genellikle güçlendirici ve matris denilen iki farklı yapının uygun yöntemlerle bir araya gelmesiyle oluşurlar. Kompozit yapının içinde bulunan güçlendiriciler, malzemenin mukavemetini sağlarken matris ise güçlendiricileri bir arada tutan ve dış etkilerden koruyan yapıdır. Güçlendiriciler, parçacıklar, plakalar ya da fiber gibi farklı formlarda olabilirler.

3.3.1 Fiberler (Lifli Güçlendiriciler)

Kompozit malzeme içerisindeki fiberler binlerce liften oluşurlar. Her bir lifin çapı 5 ile 15 mikrometre arasında değişmektedir [55]. Çeşitli formlardaki uzun fiberler aynı malzemeden yapılmış kütleli formdan daha dayanıklıdır. Örneğin sıradan bir cam plaka 20 MPa'da kırılabilirken, cam fiberlerin sahip olduğu dayanım 4800 MPa'dır [56]. Fiberler sadece uzunluklarının çaplarına oranı ile değil dayanımlarının yoğunluklarına oranı ve Young's Modülünün yoğunluklarına oranına göre seçilir. Fiberlerin birçok çeşidi mevcuttur. Bunların bir kaçı aşağıdaki gibidir;

- Demet halinde olan fiberler
- Dokuma şeklinde olan fiberler
- Kesilmiş fiberler
- Pre-prag malzeme yapısındaki fiberler

Temel fiber malzemelerinin en bilinenleri ise aşağıda verilmiştir;

- Cam
- Aramid (Kevlar)
- Karbon

3.3.1.1 Cam fiber

Cam fiberi, silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda, magnezyum oksit gibi geleneksel cam üretim hammaddelerinden üretilmektedir. Hammadde bileşimi, çok ince öğütülerek, homojen bir karışım elde etmek üzere karıştırılır ve yaklaşık 1600°C sıcaklıkta çalışan bir ergitme fırınına beslenir. Fırın içinde, karışım yavaşça sıvı hale geçer. Prosesine uygun olarak yerleştirilmiş bir sarma sistemi ile 50-70 m/sn gibi yüksek bir hız ile daha sonraki uygulama türüne bağlı olarak 5 ile 20 mikron çapında çekilen cam fiberleri bir mandrel üzerine sarılarak "kek" adı verilen bir bobin üzerinde toplanır. Cam fiberleri, demet haline getirilmeden önce, bağlayıcı adı verilen bir kimyasal bileşim ile kaplanır. Bağlayıcı cinsi, kompozit malzeme içindeki cam fiberin performansını etkileyen en önemli faktörlerden birisidir.

Kompozitin mukavemeti, reçine-cam bağının kuvveti ile orantılıdır. Bu bağın kuvveti, kullanılan bağlayıcı içindeki bağlama gruplarının cinsine bağlıdır. Bağlayıcı, "film oluşturucu", "bağlama grupları", "antistatik katkı", "plastifiyan" "Lübrikant" adı verilen malzemelerin karışımından oluşmaktadır. Kek adı verilen bir bobin üzerine sarılan cam fiberleri kurutulduktan sonra, kırılmış demetten keçe, çok uçlu fitil, kırılmış demetler gibi cam elyafı ürünlerinin elde edilmesi amacıyla işleme tabi tutulur.

Cam fiberin avantajı; yüksek mukavemetli, düşük maliyetli, yüksek kimyasal direncine ve iyi yalıtım özelliklerine sahip olmasıdır. Düşük elastik modülüne sahip olması, yapışkanlık özelliğinin kötü olması, özgül ağırlığının yüksek olması, aşınmaya duyarlı olması ve yorulma mukavemetinin düşük olması dezavantajlarıdır. Cam fiberin 2 çeşidi mevcuttur; E - Cam ve S - Cam'dır. E-Cam'daki E, elektriği temsil etmektedir. Bu yüzden elektriksel tasarımlarda kullanılması daha uygundur. S - Cam'daki S, kullanılan Silisyum miktarının fazla olduğunu göstermektedir. Silisyum yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruduğu için yorulma mukavemeti daha yüksektir. Bu yüzden havacılık uygulamalarında kullanılır [22].

3.3.1.2 Aramid (Kevlar)

Aramid, -10°C'de aromatik polyamidlerin sentezlenmesi ile oluşan sarımsı renkte DuPont firması tarafından icat edilen fiber çeşididir. Avantajları; düşük yoğunluğa, yüksek dayanıklılığa, darbe, aşınma, yorulma ve kimyasal dayanıma sahip olmasıdır. Dezavantajları ise; ultraviyole ışınlarına maruz kaldığında bozulabilmesi, pahalı olması, çok iyi yapışma özelliği taşıyamaması ve anizotropik davranış göstermesi söylenebilir. Kullanım alanlarına ise; balistik koruma uygulamaları, gemileri bağlamak için kullanılan halatların yapımı, madencilerin giydiği giysilerin imalatı, itfaiyecilerin üniformalarının imalatı, cam işi ile uğraşan iş dalı giysilerinin imalatı, hava kuvvetleri pilotlarının üniformalarının imalatı, tank, uçak kanatları, hafif ağırlıklı kano imalatı, askeri miğfer yapımı, paraşüt ve dağcılık için halatlar, yeni nesil hoparlörlerin diyaframları, motosiklet ekipmanları örnek verilebilir [21].

3.3.1.3 Karbon fiber

Karbon fiber, poliakrilonitril veya zift iplikçiklerinin yüksek sıcaklıklarda oksidasyonu ile elde edilir. Mekanik özellikleri yaklaşık 1500°C'a kadar korunur. Bu özelliği sayesinde roket nozüllerinde, fren bloklarında, fırın elemanlarında kullanılmaktadır. Karbon fiber, anti-oksidan tabakayla kaplanarak oksitleyici atmosferlerde de kullanılabilir [21]. Avantajları; kimyasal maddelere, neme ve yorulmaya dayanıklıdır. Elektriksel ve ısı iletkenliği yüksektir. Isıl genleşmesi düşüktür. Dezavantajı ise; çok pahalıdır ve anizotropik davranış göstermektedir.

3.3.2 Matris malzemeleri

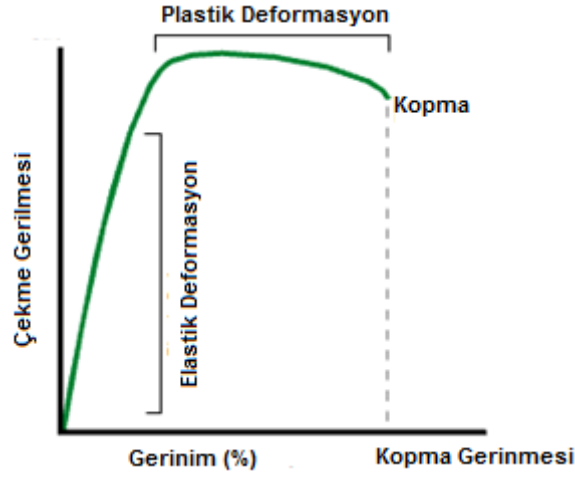
Bir kompozit iki veya daha fazla bileşenin kompozisyonundan oluşan yapısal bir malzemedir. Bileşenler makroskobik düzeyde kombine edilmiştir ve birbiri içinde çözünmezler. Bu bileşenlerin gömülü olduğu yapıya matris denir. Matrisin amacı fiberleri desteklemek ve fiberlerde kırılma olduğunda gerilmeyi aktarabilmektir.

İki çeşit matris vardır. Bunlar;

- Termoset
- Termoplastik

3.3.2.1 Termoset reçineler

Termoset reçinelerdeki moleküller üç boyutlu bir yapı ile birbirine bağlıdır. Yüksek sıcaklıkta katılaşırlar. Tekrar işleme sokulamazlar. En yaygın kullanılan termoset reçineler epoksi ve poliesterdir. Epoksi reçineler özellikle hacimsel çekme dayanımlarının ve boyutsal stabilite değerlerinin diğer termoset reçinelere oranla yüksek olması nedeniyle kullanılması tercih edilir. Epoksi reçineler öncelikle üstün mekanik özellikleri, üstün elektriksel özellikleri, korozif sıvılara, ortamlara ve yüksek ısı derecelerine dayanımları veya bu değerlerin bir kombinasyonu olarak yüksek performanslı kompozit ürünlerinin üretiminde tercih edilmektedirler. Şekil 3.7'de epoksi reçinesinin gerilim-gerinim grafiği verilmiştir.



Şekil 3.7 Epoksi reçinelerde görülen çekme gerilmesi/dayanım eğrisi [55]

Termoset reçinelerin avantajları;

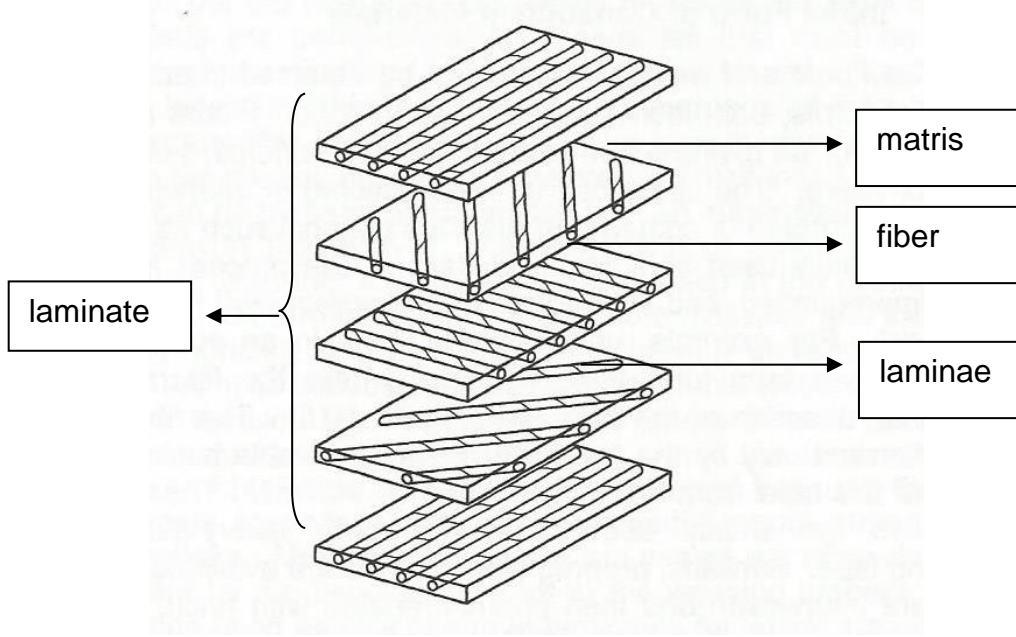
- Fiberlerin matrise iyi gömülebilmesi
- Yüksek sıcaklıklarda çalışılabilmesi
- Birçok parçanın termoset reçineden yapılabilmesi

3.3.2.2 Termoplastik reçineler

Termoplastik reçinelerin molekül yapısı yan zincirler veya gruplar ihtiva eder. Moleküller üç boyutlu bir yapı teşkil etmezler. Termoplastik reçineler yüksek sıcaklıkta yumuşar veya erirler ve soğutma esnasında katılaşırlar. Tekrar işleme sokulabilirler. Termoset reçinelere polietersulfon (PES) ve polieterimid (PEI) örnek verilebilir. Daha sonra havacılık sektörü uygulamaları için çözücülere karşı dayanım önemli bir kriter olarak ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyaç sonrasında polipropilen, naylon, polietereterketon malzemeleri geliştirilmiştir [21]. Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matris olarak tercih edilmemelerinin başlıca nedeni üretimindeki zorlukların yanı sıra yüksek maliyetidir. Oda sıcaklığında düşük işleme kalitesi sağlarlar, bu onların üretimde zaman kaybına yol açmasına neden olur. Bazı termoplastikleri istenilen şekillere sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulabilir. Termoplastiklerin termosetlere kıyasla hammaddesi daha pahalıdır.

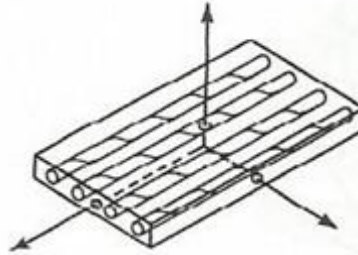
3.3.3 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Fiber ve matrisin birleşimiyle oluşan bir katmana, tabaka (ply yada laminae) denir. Birden fazla tabakanın farklı oryantasyonlarda birleşmesi ile tabakalar (laminat) oluşmaktadır. Şekil 3.8'de kompozit malzeme yapısı gösterilmiştir.

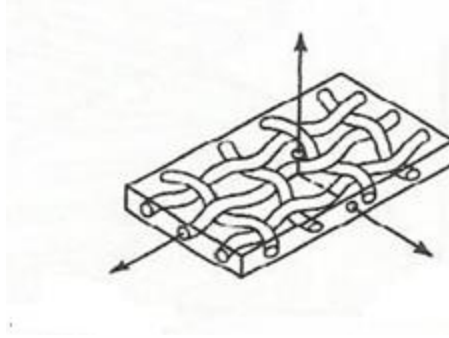


Şekil 3.8 Kompozit malzeme yapısı [56]

Fiberlerin kompozit yapı içinde dizilişleri farklı olabilir. Şekil 3.9'da tek tabakalı kompozit yapıda fiberlerin matris içinde tek yönde dizildiği, Şekil 3.10'da örgü şeklinde dizildiği gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Tek tabakalı kompozit yapıda tek yönlü fiber dizilimi [56]



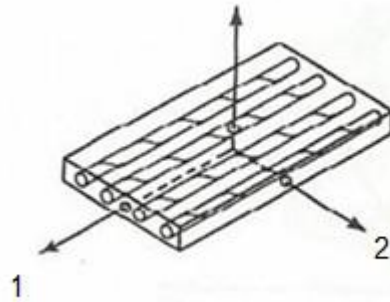
Şekil 3.10 Tek tabakalı kompozit yapıda örgü fiber dizilimi [56]

Kompozit malzemeler genellikle 4 sınıfa ayrılır;

- Fiber takviyeli kompozitler
- Tabakalı kompozitler
- Tanecikli kompozitler
- Yukarıdaki 3 tipten bazılarının ya da hepsinin bir araya gelmesiyle oluşan kompozit malzemelerdir.

Tek yönlü kompozit tabakalarda gerilme, gerinim ve toplam deformasyon hesabı

Tek tabakalı tek eksen boyunca dizilmiş fiber ile oluşturulmuş kompozit yapı Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Bu yapının gerilmesini bulmak için uygulanan kuvvetin fiberlerin yönü ile aynı yönde ya da fiberlerin enine yönde uygulanmasına bakılır. Şekil 3.11'de, 1 yönü fiberler ile aynı yönü, 2 yönü ise fiberlerin enine olan yönü göstermektedir.



Şekil 3.11 Kompozit malzemede fiber yönleri [56]

Tek yönlü tabakalarda fiberlere paralel yükleme olursa;

Fiber için gerilme formülü [55] Denklem (3.4)'de verilmiştir.

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 \quad (3.4)$$

Bu denklemde σ_f fiberin gerilmesi, E_f fiberin elastik modülü, ε_1 1 yönündeki eksenindeki gerinim değeridir. Matris için gerilme formülü [55] Denklem (3.5)'de verilmiştir.

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_1 \quad (3.5)$$

Bu denklemde σ_m matrisin gerilmesi, E_m matrisin elastik modülü, ε_1 1 yönündeki eksenindeki gerinim değeridir. Kompozit yapının ortalama gerilmesi [55] ise Denklem (3.6)'da verilmiştir.

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} = E_1 \varepsilon_1 \quad (3.6)$$

Bu denklemde P, uygulanan yük, A ise kesit alanıdır. Uygulanan yük, fiber üzerine gelen yük (P_f) ile matris üzerine gelen yükün (P_m) toplamıdır ve Denklem (3.7)'de gösterilmiştir.

$$P = P_f + P_m \quad (3.7)$$

Denklem (3.6) ve Denklem (3.7) kullanılarak aşağıdaki denklem haline gelir.

$$P = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'de A_f fiberin, A_m matrisin kesit alanıdır. Bu denklemin her iki tarafı da $Ax\varepsilon_1$ ile bölünürse ve $\varepsilon_1 = \varepsilon_f = \varepsilon_m$ hatırlandığında aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{P}{Ax\varepsilon_1} = \frac{\sigma_f A_f}{Ax\varepsilon_1} + \frac{\sigma_m A_m}{Ax\varepsilon_1} \quad (3.9)$$

Bu denklemde $\frac{P}{A}$ yerine $\varepsilon_1 E_1$, $\frac{\sigma_f}{\varepsilon_1}$ yerine E_f , $\frac{\sigma_m}{\varepsilon_1}$ yerine E_m yazılırsa 1 yönündeki kompozit yapının Elastik Modülünü veren denklem elde edilmiş olur (Denklem (3.10)).

$$E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \quad (3.10)$$

Fiberin kesit alanı (A_f) ile matrisin kesit alanının (A_m) toplamı toplam kesit alanını vermektedir (Denklem (3.11)).

$$A = A_f + A_m \quad (3.11)$$

Eğer fiberler arasında boşluk yoksa (sürekli fiber), kompozit yapı içindeki her bir elemanın (fiberler ve matrisler) hacmi kendi kesit alanı ile orantılıdır.

Eğer fiber ve matris aynı uzunluğa sahip ise, hacimleri oranı kesit alanlarına oranına eşittir.

Fiberin kompozit yapı içindeki hacim oranı (ϕ_f) Denklem (3.12) ile matrisin hacim oranı (ϕ_m) Denklem (3.13) ile gösterilmiştir.

$$\phi_f = \frac{A_f}{A} \quad (3.12)$$

$$\phi_m = \frac{A_m}{A} \quad (3.13)$$

Denklem (3.12) ve Denklem (3.13) toplanacak olursa Denklem (3.14) elde edilir.

$$\phi_f + \phi_m = \frac{A_f}{A} + \frac{A_m}{A} = 1 \quad (3.14)$$

Denklem (3.10)'un içine Denklem (3.12) ve Denklem (3.14) konulacak olursa;

$$E_1 = E_f \phi_f + E_m (1 - \phi_f) \quad (3.15)$$

elde edilir. Bu denklem ile 1 yönündeki kompozit yapının Young's Modülü bulunmuş olur.

Denklem (3.6)'da Denklem (3.15) kullanılırsa kompozit malzemenin 1 yönündeki gerilme değeri de bulunur.

Tek yönlü tabakalarda fiberlere dik yükleme olursa;

Tek yönlü tabakalarda fiberlere dik yükleme (2 yönünde) olursa, 2 yönündeki gerilme, fiberlerin gerilmesi ve matrisin gerilmesi birbirine eşittir. Bu eşitlik Denklem (3.16)'da gösterilmiştir.

$$\sigma_2 = \sigma_f = \sigma_m \quad (3.16)$$

Bu durumda fiberlerin ve matrisin gerinimsi Denklem (3.17) ve Denklem (3.18)'deki gibi olur.

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \quad (3.17)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \quad (3.18)$$

2 yönündeki toplam gerinim ise fiberlerin ve matrisin gerinimlerinin ortalamasına eşittir (Denklem(3.19)).

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f \phi_f + \varepsilon_m \phi_m \quad (3.19)$$

Denklem (3.19)'un içine Denklem (3.17) yerleştirildiğinde 2 yönünde kompozit malzemenin Young's Modülü bulunur (Denklem (3.20)).

$$E_2 = \left(\frac{\sigma_f}{E_f} + \frac{\sigma_m}{E_m} \right)^{-1} \quad (3.20)$$

Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

Kompozit malzemeler çeşitli yöntemler ile üretilmektedir. Bu yöntemler aşağıda verilmiştir.

- Basıncılı Kapta Kürleme (Autoclaving Curing)
 - El Yatırma Yöntemi (Hand Lay-Up)
 - El Spreyleme Yöntemi (Hand Spray-Up)
- Tel Sarma (Filament Winding)
- Örgü (Braiding)
- Profil çekme (Pultrusion)
- Enjeksiyonlu Kalıplama (Injection Molding)

Kompozit malzemelerin avantajları [53] ise;

Sağlamlık ve Dayanım: Lifli kompozitlerin, geleneksel mühendislik malzemeleriyle karşılaştırıldığında en önemli avantajı yüksek dayanım ve sağlamlığıdır. Bu özellikler mühendislik yapılarının tasarımında çok önemli olan performansın iyileştirilmesini ve enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Optimal Tasarım: Üretilen kompozit malzemeler, her uygulamanın belirli taleplerini karşılamak için projelendirilebilirler. Mümkün tasarım seçenekleri; malzeme (fiber ve matris), işleme yöntemi ve tabaka tipi (tek yönlü veya dokuma) seçimini, tabaka konumlarının, verilen doğrultudaki tabaka sayısının ve tabakaların kalınlığının değiştirilmesini içermektedir. Kompozitler için tasarım değişikliklerinin bu geniş aralığı, geleneksel mühendislik malzemelerine göre zıt bir durumdur. Bu malzemelerin tasarımlarındaki bu geniş çeşitlilik, daha az malzemenin artık olarak atılmasıyla üretilen verimli yapıların elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca çeşitlilikteki bu büyük imkan, kompozit yapıların üretilmesinde bilgisayarlar, optimizasyon, uzman sistemler ve yapay zeka kullanılmasını ve tasarımların geliştirilmesini sağlamaktadır.

Yorulma Süresi: Kompozit malzemelerin yorulma süresi, havacılık endüstrisinde kullanılmasının ana sebeplerinden biridir. Yorulma süresi, diğer birçok yapı (ulaşım araçları, köprüler, endüstriyel bileşenler ve çeşitli rüzgar ve su yüklerine maruz kalan yapılar) için de önemlidir.

Ölçüsel Kararlılık: Hemen hemen tüm yapılar, kullanım süreleri boyunca sıcaklık değişikliklerine maruz kalmaktadır. Sıcaklık değişimiyle ilgili oluşan genleşmeler, boyut veya şekilde değişikliklerle, sürtünmenin artmasıyla ve termal gerilmelerle sonuçlanabilir. Bazı uygulamalarda bu termal etkiler kritik olabilmektedir. Hareketli parçalar (örneğin, motorda) arasında sürtünmenin artması, aşırı ısınmadan dolayı sorunlara neden olabilir. Karayolları ve çatı sistemlerinde de ısı genleşme hatalara neden olabilmektedir. Bu nedenle, sıfır veya sıfıra yakın ısı genleşme katsayısına sahip malzemelerin kullanılmasının gerekli olduğu birçok uygulama vardır. Uygun tasarım sayesinde, sıfır ısı genleşme katsayısına sahip kompozit malzemeler elde etmek veya termal gerilimi ve uygunsuzluğu minimuma indirmek amacıyla diğer bileşenlerin ısı genleşme katsayısı ile eşleştirmek için kompozitin ısı genleşme katsayısını tasarımılamak mümkündür.

Korozyon Direnci: Polimer ve seramik matrisli malzemeler, kompozit malzemelerin nem ve diğer kimyasallara karşı korozyon direncini arttırmak için seçilebilirler. Bu matris malzemeleri kullanılarak üretilen kompozitler, geleneksel mühendislik malzemeleriyle karşılaştırıldığında bakım gerektirmemektedirler.

Etkin Üretim: Kompozit yapılar; filaman sargısı, püskürtme ve şerit tabaka gibi otomatikleştirilmiş metotların kullanılmasıyla etkili bir şekilde üretilmektedir. Üretimdeki verim, kompozit malzemelerin çok az artık malzeme çıkaracak şekilde üretilmesini de sağlamaktadır. Bu, son ürünün elde edilmesine kadar büyük miktarlarda talaşın artık olarak oluştuğu metal malzemelerle karşılaştırıldığında kompozit malzemelerin avantajıdır. Üretim maliyetleri de doğrudan yapıdaki parçaların sayısı ile ilgilidir ve kompozit malzemeler son şekli bir kerede üretebilme yeteneğine sahip olmasından ve perçin bağlantılarından daha etkili birleşme sağlamasından dolayı bu parça sayılarını önemli şekilde azaltabilmektedir. Örnek olarak; F22, F117, B2, F35 savaş uçakları gövdesinin iki kesiti, alüminyum bileşenlerin perçinlenmesiyle ve kompozit bileşenlerin yapıştırılarak bağlanmasıyla yapılmaktadır. Alüminyum yapı yaklaşık 11,000 parçadan, kompozit yapı yaklaşık 1000 parçadan oluşmaktadır. Parça sayısındaki bu azalma, bileşen ve montaj maliyetinde kayda değer tasarruflar sunmaktadır.

Yalıtkanlık: Birçok mühendislik yapılarının elektriksel yalıtkanlığa sahip olması istenmektedir. Örnek olarak cam/polyester ile yapılan merdiven ve ışık direklerinin elektrik iletkenliklerini azaltmak için çelik ve alüminyumdan yapılanlara göre tercih edilmesi gösterilebilir. Yalıtkan bileşenler, elektronik endüstrisindeki uygulamalar için de önemlidir. Bakır matrisli kompozitlerin, bakırın yüksek termal iletkenliğinden dolayı yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaya çalışmaları devam etmektedir.

3.4 Tahribatlı Testler

Malzeme seçiminde daha çok sertlik, mukavemet ve süneklik gibi temel mekanik özelliklere bakılmaktadır. Söz konusu mekanik özellikler de malzemelerin içyapılarına bağlıdır. Bu nedenle, malzemelerin yapı ve özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Malzemelerin yapı ve özellikleri bir takım tahribatlı testler ile incelenerek elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir. Tahribatlı malzeme testleri metalografi, sertlik, çekme, basma, darbe, yorulma, sürünme, eğme, çökertme ve burulma testleridir. Bu testlerden çekme ve eğme testleri aşağıda açıklanmıştır [57].

3.4.1 Çekme testi

Çekme testi germe deneyi olarak da bilinmektedir ve bir malzeme üzerinde yapılabilen en temel mekanik testtir. Çekme testleri basit, ucuz ve tam olarak standardizedir. Bir malzeme çekildiğinde, uygulanan kuvvetlere malzemenin nasıl tepki vereceği kolayca görülebilir. Malzeme çekilirken, uzama miktarına göre dayanımı bulunur. Çekme testinde bir malzeme hakkında farklı mekanik özellikleri tespit edilebilir. Malzeme kopana dek çekme sürdürüldüğünde, iyi ve tam bir çekme profili elde edilir. Uygulanan kuvvetlere nasıl yanıt verdiğini belirten bir eğri sunulur. Kopma noktası en son dayanım olarak adlandırılır. Malzemelerin çoğu çekme testinde, özellikle testin ilk kısmında uygulanan kuvvet ile numunenin uzaması arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu görülür. Elastik bölge adı verilen bu doğrusal bölgede, yükleme hızı boyunca gerilmenin gerinime oranının sabit olduğu görülür ve aşağıda verilen Hooke Yasası'na uyar. Young's Modülü (E), bu bölgede çizginin eğimidir ve gerilmenin gerinime oranı şeklinde bulunabilir [58].

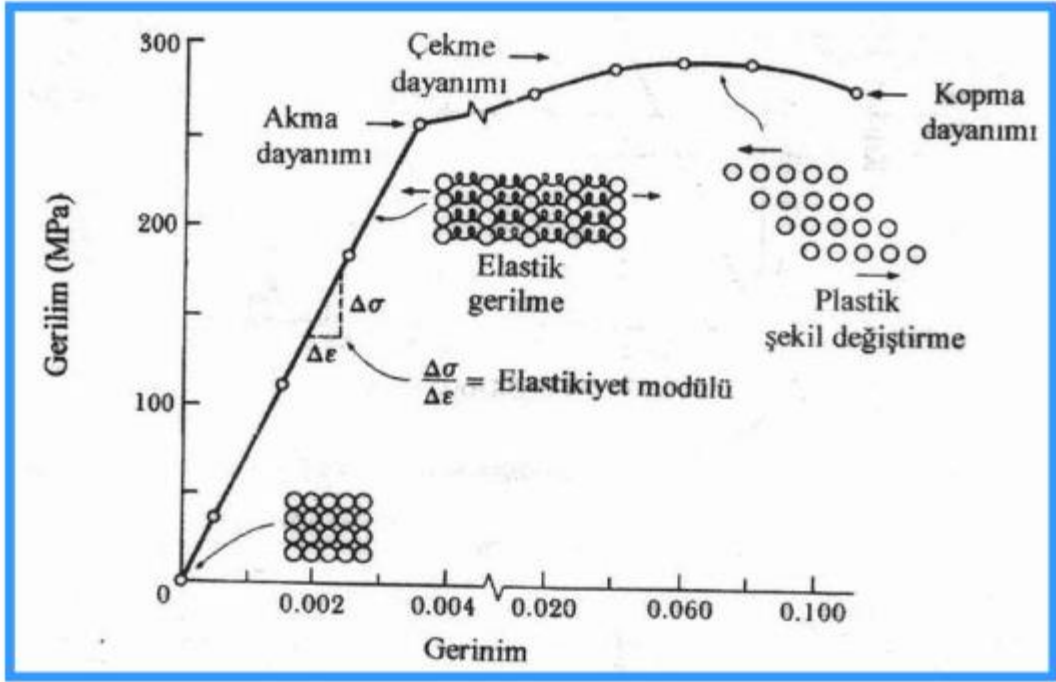
$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.21)$$

Young's modülü

Young's Modülü malzeme rijitliğinin bir ölçüsüdür fakat sadece eğrinin doğrusal bölgesinde geçerlidir. Bu doğrusal bölge içine bir numune yüklenirse, yük kaldırıldığında malzeme tam olarak aynı durumuna dönecektir. Eğrinin artık doğrusal olmadığı ve düz çizgi ilişkisinden saptığı noktada, Hooke Yasası artık geçerli değildir ve numunede bazı kalıcı deformasyonlar olabilir. Bu noktaya elastik ya da oransal sınır denir. Çekme testinde bu noktadan itibaren, malzeme yük ya da gerilmedeki her bir artışa plastik olarak yanıt verir. Yük ortadan kalkarsa, eski gerilimsiz durumuna dönmez [58].

Akma dayanımı

Akma dayanımı adı verilen değer, bir malzemeye yük uygulandığında plastik deformasyonun başladığı noktada oluşan gerilme olarak tanımlanır. σ_y ile gösterilir. Şekil 3.12'de alüminyum alaşımının gerilme-gerinim grafiğinde akma dayanımı gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Alüminyum alaşımının gerilme- gerinim grafiği [58]

Ofset yöntemi

Bazı malzemeler için (örneğin metaller ve plastikler), doğrusal elastik bölgeden ayrılma kolayca tespit edilemez. Bundan dolayı, test edilen malzemenin akma dayanımını belirlemek amacıyla bir ofset yöntemine izin verilir. Bir ofset, gerinim % değeri olarak belirtilir (metaller için genellikle %0,2 ve bazen plastikler için de %2'lik bir değer kullanılır). Ofset yöntemine göre akma dayanımı, doğrusal elastik bölgenin (eğim Young's Modülü'ne eşitken) çizgisi ofsetten çekildiğinde kesişim noktasından belirlenen gerilme haline gelir [58].

Gerinim

Numunenin çekme testi sırasında yaşadığı uzama ya da gerilme miktarı da bulunabilir. Bu, uzunluktaki değişimin mutlak bir ölçüsü ya da gerinim adı verilen bağıl bir ölçüm olarak ifade edilebilir. Deneylerde gerinim, iki farklı şekilde ifade edilebilir; bunlar mühendislik gerinimi ve gerçek gerinimdir. Mühendislik gerinimi, kullanımı en kolay ve en yaygın gerinim ifadesidir. Mühendislik gerinimi, uzunluktaki değişimin orijinal uzunluğa göre oranıdır (Denklem 3.22).

$$\epsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.22)$$

Denklem (3.22)'de l son uzunluk ve l_0 ilk uzunluktur. Mühendislik gerilmesini bulmak için Denklem (3.21) kullanılır.

Gerçek gerinim mühendislik gerinimi ile benzerdir fakat test devam ettikçe numunenin anlık uzunluğuna dayalıdır. Deneylerde sabit kesite ve gerinime sahip malzemelerin gerçek gerinimini bulmak için aşağıdaki formül kullanılır.

$$\varepsilon_T = \ln\left(\frac{l_i}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3.23)$$

Denklem (3.23)'de l_i anlık uzunluk ve l_0 ilk uzunluktur. Gerçek gerilme ise Denklem (3.24) ile bulunur.

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (3.24)$$

Denklem (3.24)'de σ_T gerçek gerilme, σ mühendislik gerilmesi ve ε mühendislik gerinimidir [57].

Maksimum çekme dayanımı

Bir malzeme hakkında belirlenebilen özelliklerden biri üst düzey çekme dayanımıdır (σ_{UTS}). Üst düzey çekme dayanımı, test sırasında numunenin kaldırabileceği maksimum yüküdür. σ_{UTS} , kopma sırasındaki dayanıma eşit ya da farklı olabilir. Bu tamamen test edilen malzemenin test sıcaklığında kırılğan, sünek ya da her iki özelliği de sergileyen bir malzeme olup olmamasına bağlıdır. Bazı durumlarda, bir laboratuarda test edildiğinde bir malzeme sünek olabilir, fakat hizmete alındığında ve soğuğa maruz kaldığında ise kırılğan bir yapı sergileyebilir.

3.4.2 Eğilme testi

3 noktalı eğilme testi, iki desteğe serbest olarak oturtulan genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının, yön değiştirmeksizin ortasına bir eğme kuvveti uygulandığında oluşan biçim değişmesidir. Katlama ise, eğmenin özel bir durumu olup, daire veya dikdörtgen kesitli deney parçasının iki kolunun birbirine paralel duruma getirilmesi (180° eğme) işlemidir.

İmalat sırasında eğerek veya katlayarak form verilen malzemelerin şekil değiştirme kapasitesinin tayininde çoğu kez bu deneyden faydalanılır. Hem çekme, hem de

basma gerilmeleri oluştuğundan dolayı hem sünek hem de gevrek malzemelerin mekanik davranışlarının tespiti için kullanılabilir. Birçok değişik eğme yöntemi mevcuttur. Bunların hepsinde (ileri-geri eğme hariç) esas amaç malzemeyi çatlayıncaya kadar tek yönde eğmektir. Sünekliliği iyi olan malzemeler 180° katlamaya rağmen çatlamazlar. Yani eğme deneyinde kriter olarak eğme açısı (α) kullanılır. Eğilme açısı ise eğme tamamlandıktan sonra numunenin 2 kolu arasındaki diş açı olarak tanımlanır.

Bazen eğme sonunda bükülmüş kısmının eğrilik yarıçapı (r) da kriter olarak alınabilir. Eğme deneylerinde maksimum moment veya maksimum gerilme hesabı için, numunenin kırıldığı andaki maksimum yükü (P_{max}) ölçmek gerekir. Bundan sonra aşağıdaki formül kullanılarak maksimum gerilme hesap edilir [59].

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}c}{I} \quad (3.25)$$

Yukarıdaki formülde σ_{max} maksimum gerilme, M_{max} eğilme momenti, c nötral eksenenden kesitin en uç noktasına olan mesafesi, I ise kesitin atalet momentidir.

$$M_{max} = \frac{F.L}{4} \quad (3.26)$$

Yukarıdaki maksimum moment denkleminde F uygulanan kuvvet, L numunenin uzunluğudur. Dikdörtgen kesitli bir kirişin atalet momenti Denklem (3.27)'de verilmiştir.

$$I = \frac{b.h^3}{12} \quad (3.27)$$

Yukarıdaki formülde b numunenin genişliği, h numunenin kalınlığıdır.

Kanada ait numunelerin çekme deneyinden elde edilen veriler Denklem (3.21), Denklem (3.22), Denklem (3.23) ve Denklem (3.24)'de kullanılarak çekme numunelerinin çekme gerilmeleri ve gerinimleri elde edilmiştir. Kanada ait numunelerin eğilme deneyinden elde edilen veriler ise Denklem (3.25), Denklem (3.26) ve Denklem (3.27)'de kullanılarak eğilme numunelerinin eğilme gerilmeleri ve gerinimleri elde edilmiştir.

4. SAYISAL ÇALIŞMALAR

Tasarımı yapılan rüzgar türbin kanadının akış analizi ve mekanik analizi ANSYS 14.5.7 programı kullanılarak yapılmıştır. Tasarımı yapılan bu rüzgar türbin kanadının 3D akış analizi ANSYS 14.5.7 programının “CFX” modülünde, 3D mekanik analizi ise ANSYS 14.5.7 programının “Static Structural” modülünde yapılmıştır. Tasarımı yapılan kanadın önce akış analizi 3D akım şartlarında yapılmış ve optimum geometrik değerler ve akım şartları belirlenmiştir. Daha sonra 3D akış analizden bulunan basınç değerleri kullanılarak, 3D mekanik analize geçilmiştir ve kanadın optimum gerilme-gerinim değerleri bulunarak optimum kompozit tabaka sayısı, kalınlığı ve oryantasyonu elde edilmiştir.

4.1 Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu, mühendislik problemlerinin çözümünde sıkça kullanılan sayısal metotlardan biridir. Bu metot bilgisayar teknolojisinin çıkmasının hemen ardından ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Tüm bu uygulamalarda bir sayısal büyüklük alanının hesaplanması istenmektedir. Gerilme analizinde bu değer deplasman alanı veya gerilme alanı; ısı analizinde sıcaklık alanı veya ısı akısı; akışkan problemlerinde ise akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonudur [60].

Sonlu elemanlar sayısal bir yaklaşım yöntemidir. Sonlu elemanlar metodunda, karmaşık yapıların davranışlarını incelemek için bu yapılar davranışı daha önceden belirlenmiş olan birçok elemana bölünür ve her eleman için denklem kümeleri matris formunda elde edilir. Elemanlar düğüm (nod) adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler ve eksiksiz bir ağ yapısı oluştururlar. Bu şekilde sonlu sayıda denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır. Sonlu elemanlar metodunda sürekli fonksiyonlar, bölgesel sürekli fonksiyonlar (genellikle polinomlar) ile temsil edilmektedir. Bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün değeri, o elemanın düğümlerindeki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler, düğümlerdeki değerlerdir. Varyasyon prensibi kullanılarak büyüklük alanının düğümlerdeki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Durağan bir

problem için denklem takımının matris formundaki gösterimi

$$[K].[D]=[R] \quad (4.1)$$

şeklindedir. Burada [D] büyüklük alanının düğümlerdeki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, [R] bilinen yük vektörü ve [K] ise bilinen sabitler matrisidir. Gerilme analizinde [K] rijitlik matrisi olarak bilinmektedir [60].

Sonlu elemanlar yönteminin statik analiz, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, elektromanyetik analiz ve akustik gibi birçok fiziksel olayın çözümünde uygulama alanı bulması ve bilgisayarlara uygulanması kolay bir algoritmaya dayanması karşılaşılan problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır [61].

Sonlu elemanlar yönteminin günümüzdeki uygulamaları diferansiyel eşitliklerle düzenlenen fiziksel tüm problemleri kapsar. Sonlu elemanlar yönteminin yararları, çok yaygın bir alanda kullanılmasına yardımcı olmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminin avantajları:

1. Bitişik elemanlardaki malzeme özellikleri aynı olmayabilir. Bu özellik birkaç malzemenin birleştirildiği cisimlerde uygulanabilmesine imkan vermektedir.
2. Düzgün olmayan sınırlara sahip şekiller, eğri kenarlı elemanlar kullanılarak analiz edilebilirler.
3. Eleman boyutları kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Böylece önemli değişiklikler beklenen bölgelerde daha küçük elemanlar kullanılarak hassas işlemler yapılabilirken, aynı parçanın diğer bölgeleri büyük elemanlara bölünerek işlem hızı arttırılabilir.
4. Süreksiz yüzey yüklemeleri gibi sınır durumları yöntem için zorluk oluşturmaz. Karışık sınır durumları kolaylıkla ele alınabilir [61].
5. Katı mekaniğinde, özellikle plastik deformasyon için uygulama yöntemleri belli olan, en yakın sonuçları verebilen ve en genel kullanılan sayısal analiz yöntemidir.

Sonlu elemanlar yönteminin hacim integralleri alarak katı yapıyı modellemesi, katı yapıyı kabul edilebilir bir sonuç için gerektiğinde milyon mertebesinde parçaya

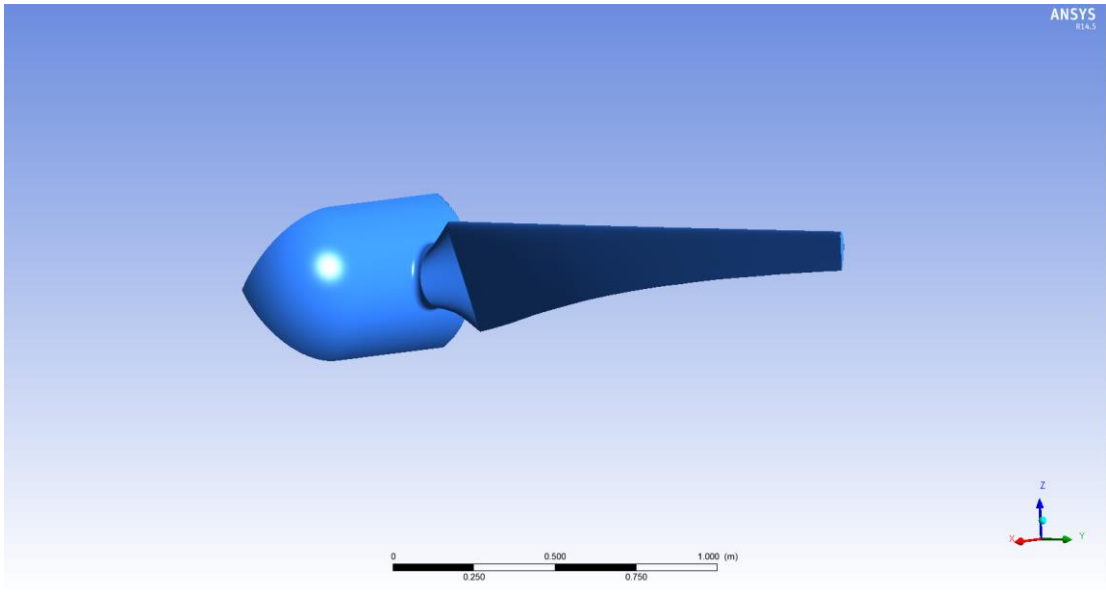
bölmesi ve denklem kümesini çıkartması sonucu yüksek kapasiteli bilgisayarlar ile çözümlene ihtiyacı bulunmaktadır.

4.2 Türbin Kanadının Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi

TÜBİTAK 1001 109M419 nolu projedeki [2] yüksek aerodinamik performanslı standart NACA 4412 kanat profili, tasarımı yapılan rüzgar türbin kanat profili olarak seçilmiş ve bu kanat hem akış analizi hem de mekanik analiz için sonlu elemanlar metodu ile ayrı ayrı modellenmiştir.

4.2.1 Akış analizi için türbin kanadının modellenmesi

Kanadın her bölgesinde farklı oryantasyon ve kalınlıkta olan kompozit malzemenin sağlayacağı hafiflik ve mukavemet ile düşük hızlarda çalışması beklenen standart NACA 4412 kanat kesitlerinin birleştirilmesi sonucu oluşturulan kanat modeli Şekil 4.1'deki gibidir.

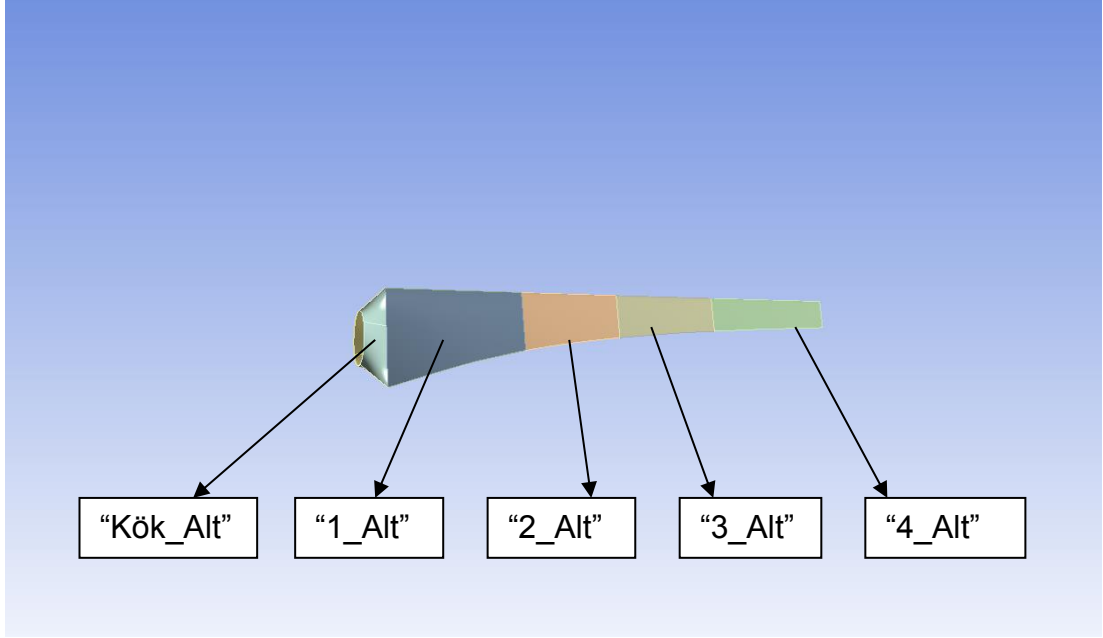


Şekil 4.1 Kanat modeli

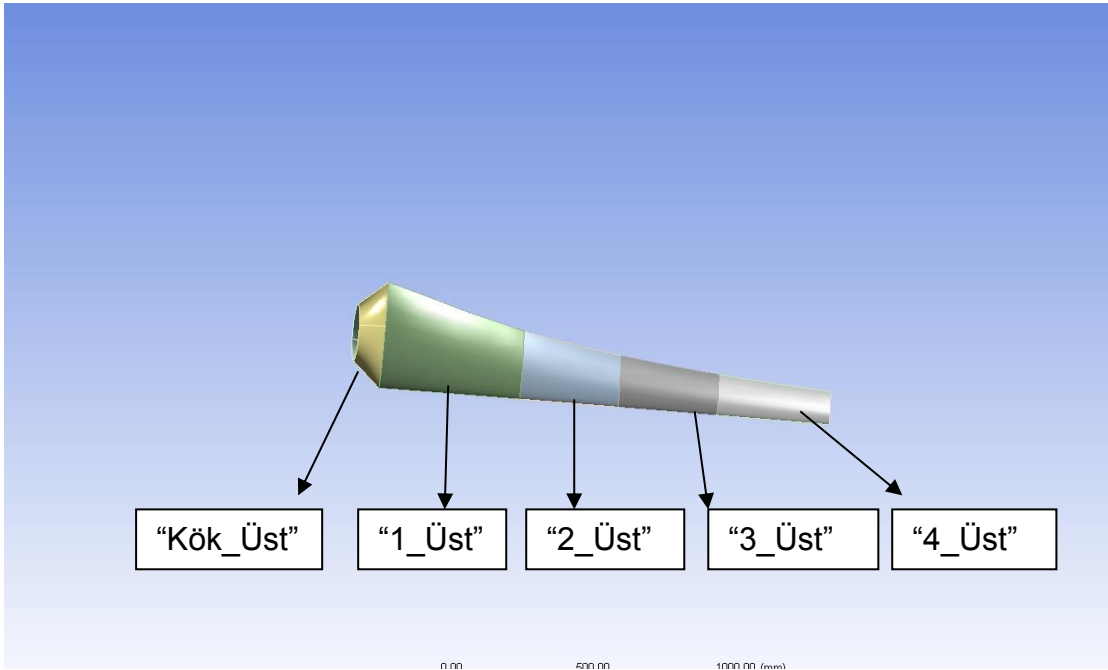
4.2.2 Mekanik analiz için türbin kanadının modellenmesi

Mekanik analizde türbin kanadının modellenmesi için akış analizinde kullanılan kanat geometrisi ANSYS 14.5.7. "Workbench" kısmına aktarılmıştır. Aktarılan bu geometri kompozit malzemedeki yapılabacağı için rotor kısmı çıkarılıp, kalan kanat geometrisi yüzey haline getirilmiştir. Yüzey haline getirilen kanat geometrisi "Slice" komutu ile parçalara ayrılmıştır. Parçalara ayrılan kanat geometrisi "Static

Structural” modülünün geometri sekmesine bağlanarak, kanada kompozit tabakalar atılmıştır. Mekanik analiz için modellenen kanat geometrisi Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b’de verilmiştir.



Şekil 4.2a Kanadın alt geometrisi



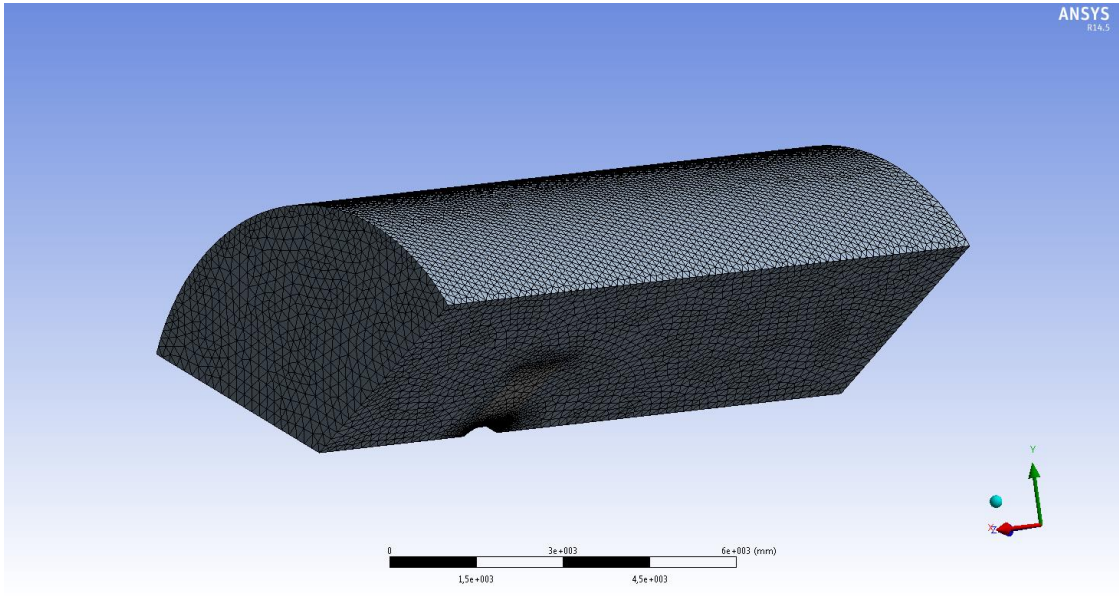
Şekil 4.2b Kanadın üst geometrisi

4.3 Ağ Yapısı

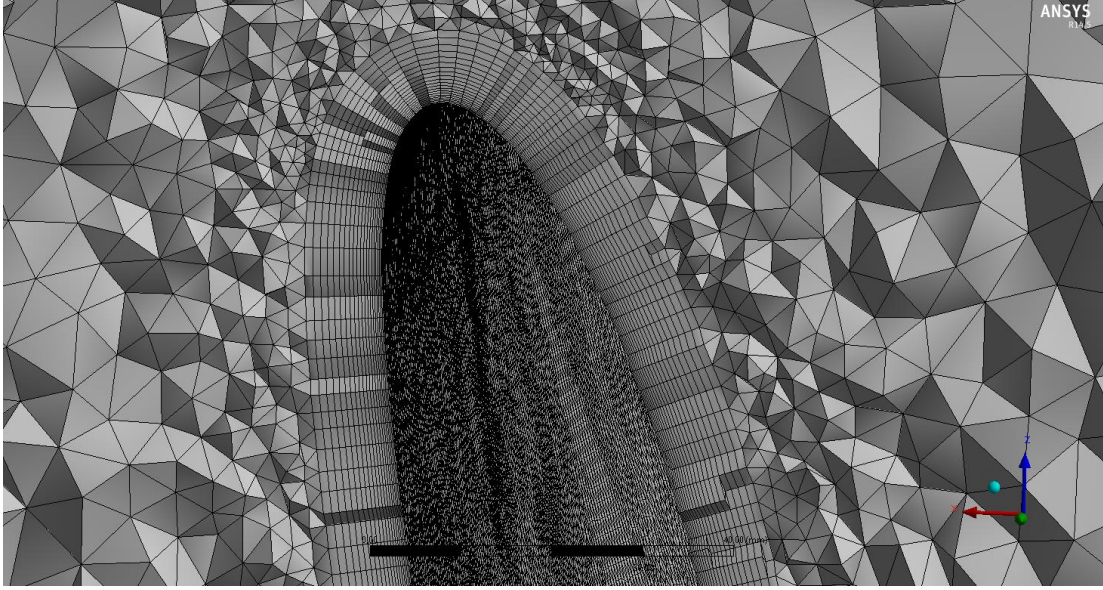
Türbin kanadının ağ yapısı hem akış analizi için hem de mekanik analiz için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Akış analizi için tetra elemanlar kullanılırken, mekanik analiz için quadrahedral elemanlar kullanılmıştır.

4.3.1 Akış analizi için ağ yapısı

Tetra elemanların oluşturduğu ağ yapısı Şekil 4.3a ve Şekil 4.3b'de görülmektedir. Tüm hacimlerde yaklaşık olarak 16628715 ağ elemanı bulunmaktadır. Daha fazla ağ elemanı kullanarak elde edilen sonuçlar ile 16628715 ağ elemanı ile elde edilen sonuçlar birbirinden farklı olmadığı için tasarımı yapılan rüzgar türbin kanadının akış analizinde bulunan 16628715 ağ eleman sayısı yeterlidir.



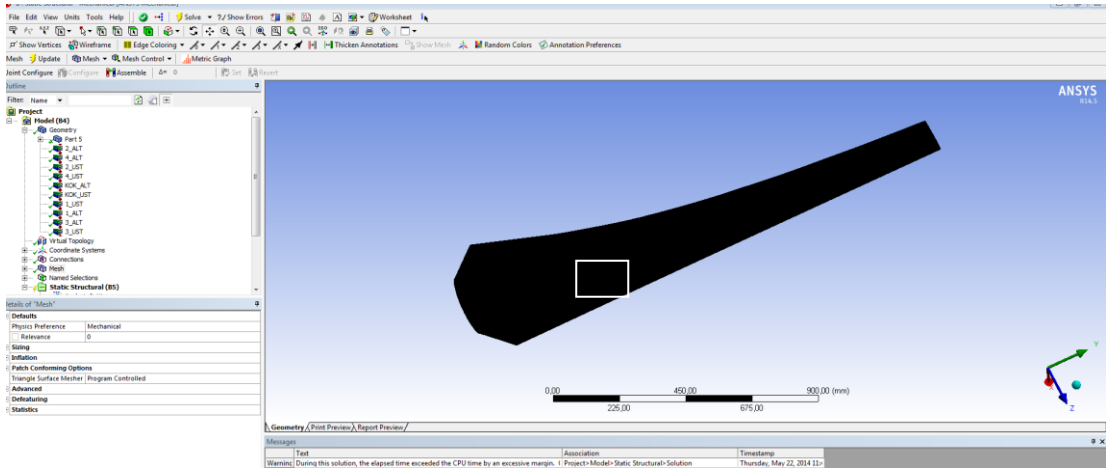
Şekil 4.3a Akış analizi için kanadın ağ yapısı



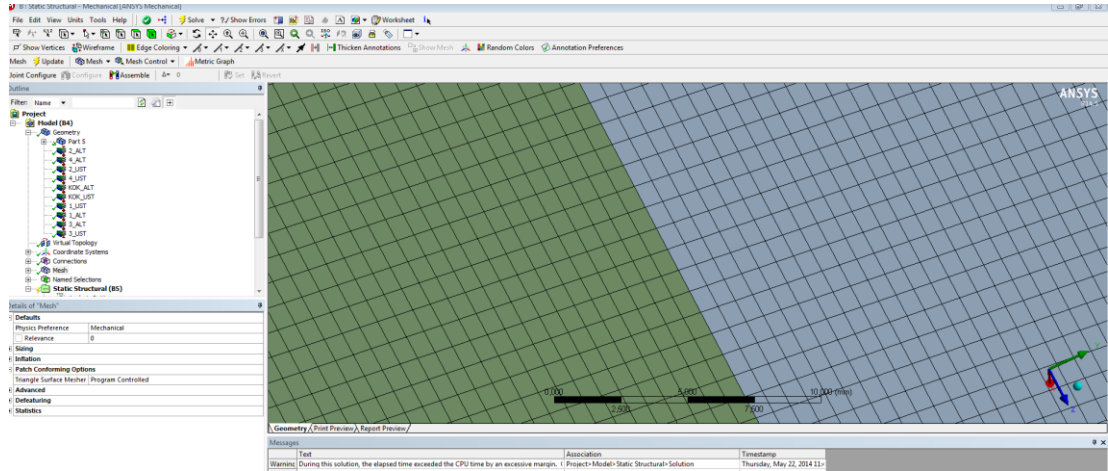
Şekil 4.3b Akış analizi için kanadın ağ yapısı

4.3.2 Mekanik analiz için ağ yapısı

Quadrahedral elemanlarla oluşturulan kanat ağ yapısı Şekil 4.4a ve Şekil 4.4b'de görülmektedir. Kanat üzerine atılan ağ yapısındaki düğüm sayısı 1300272, ağ elemanı ise 1299746'dır. Kanat üzerine atılan ağ yapısındaki düğüm sayısı ağ elemanı sayısına bağlıdır. Kanat üzerine atılan ağ eleman sayısı arttırıldığında sonuçlar değişmediğinden tasarımı yapılan kanat üzerindeki ağ eleman sayısı yeterlidir.

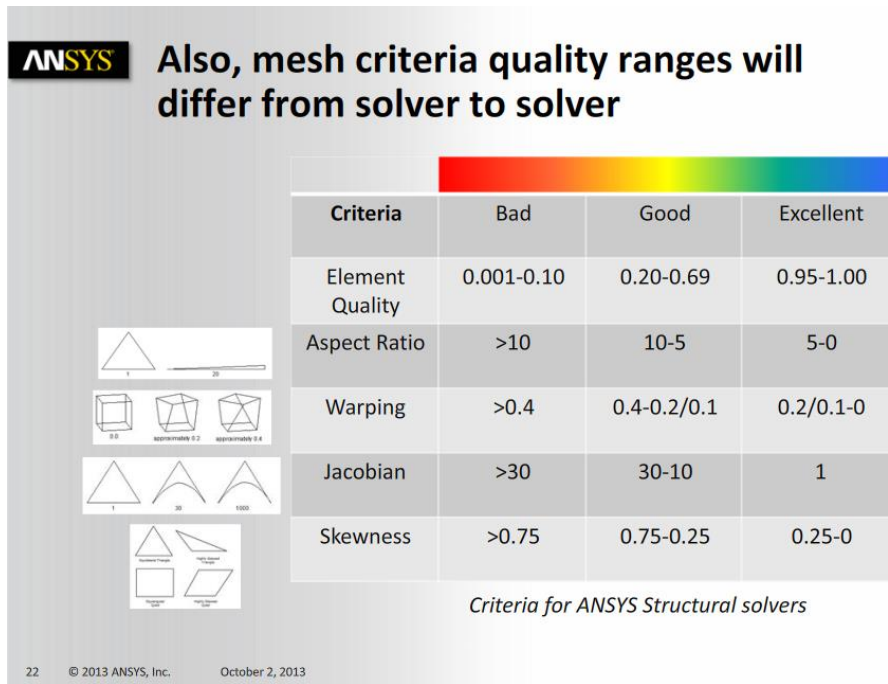


Şekil 4.4a Mekanik analiz için kanadın ağ yapısı



Şekil 4.4b Mekanik analiz için kanadın ağ yapısı

Mekanik analiz için yapılan ağ yapısının kalitesini kontrol etmek için Ansys Mekanik Analiz Eğitim dosyasından alınan kriterler Şekil 4.5’de verilmiştir. Sayısal analiz sonucu bulunan kriterlerle bu kriterler karşılaştırılmış ve uygunluğu Tablo 4.1’de görüldüğü gibi kontrol edilmiştir.



Şekil 4.5 Mekanik analiz için ağ yapısı kalitesinin kriterleri

Tablo 4.1 Sayısal analiz sonucunda bulunan ağ yapısı kriterleri

Ağ Kriteri	Maksimum	Minimum	Ortalama
Eleman Kalitesi	0,999	0,49	0,89
En/Boy Oranı	2,62	1	1,424

Tablo 4.1 devam ediyor.

Jakobi Oranı	1,0134	1	1,0008
Çarpılma Faktörü	0,010737	$5,8783 \times 10^{-10}$	$2,728 \times 10^{-4}$
Yamukluk	0,437	$6,543 \times 10^{-5}$	0,0579

Tablo 4.1’de görüleceği gibi ilk üç kriter için ideal değer olan “1” değerine yaklaşılmış ve son iki kriter için ideal değer olan “0” değerine yakın sonuç elde edilmiş olup, ağ yapısı kriterlerinde hedefe ulaşıldığı gözükmemektedir. Bu kriterlerin değerlendirilmesi sonucu atılan ağ yapısının kalitesi çok iyi bulunmuştur. İyi kalitede atılan ağ yapısı analizin doğru sonuç vermesini sağlayan etmenlerden bir tanesidir.

4.4 Sayısal Analizler

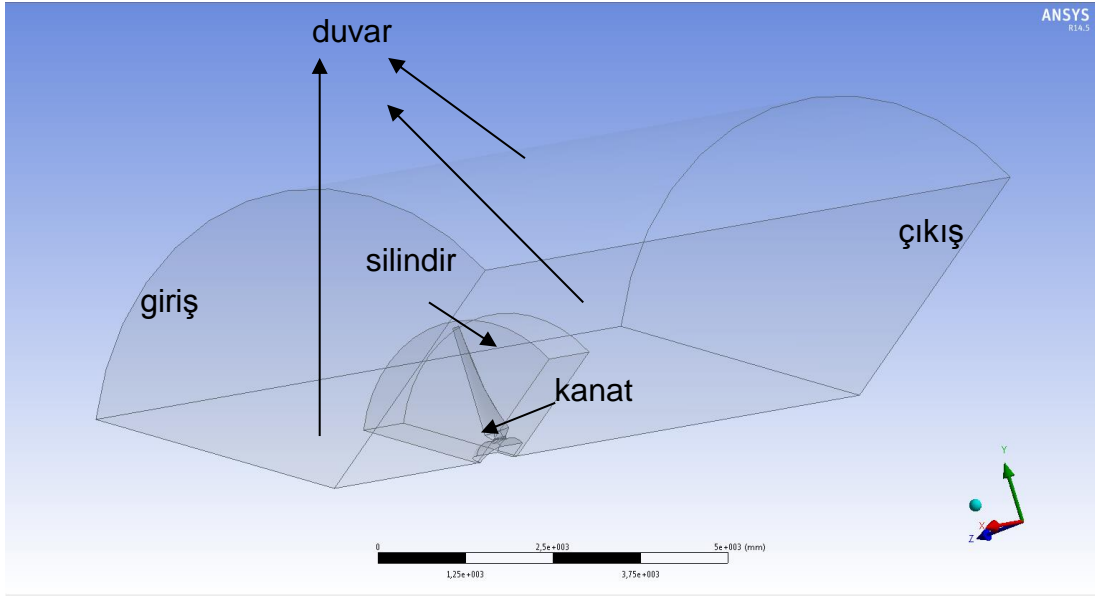
Sayısal analizler için ANSYS 14.5.7 yazılımı kullanılmıştır. Sayısal analizler önce 3D akım şartlarında yapılmış ve optimum geometrik değerler ve akım şartları belirlenmiştir. Daha sonra 3D akış analizden bulunan basınç değerleri kullanılarak, 3D mekanik analize geçilmiştir ve kanadın optimum gerilme-gerinim değerleri bulunarak optimum kompozit tabaka sayısı, kalınlığı ve oryantasyonu elde edilmiştir.

4.4.1 Akış analizleri

Başkent Üniversitesi Bağlıca Kampüsü’nde kurulması planlanan rüzgar türbininin yerleştirileceği bölgeden, rüzgar ölçüm direği ile alınan 1 yıllık ölçüm verileri sonucunda en yüksek rüzgar hızı 25 m/s olarak tespit edilmiştir. Kanat elemanı momentum teorisi kullanılarak kesitleri oluşturulan kanat modelinin üç boyutlu sayısal akış analizinde 25 m/s rüzgar hızı referans alınmış olup, 286 devirde oluşan tork değeri ve buna bağlı türbin güç değeri, güç katsayısı ve basınç dağılımı gibi akış karakteristikleri incelenmiştir. Akış analizleri ANSYS 14.5.7 programında yapılmıştır.

Üç boyutlu analizde bağımsız parametre olarak uç hız oranı (λ) 5 alınmış ve bu değere göre aerodinamik karakteristikler belirlenmiştir.

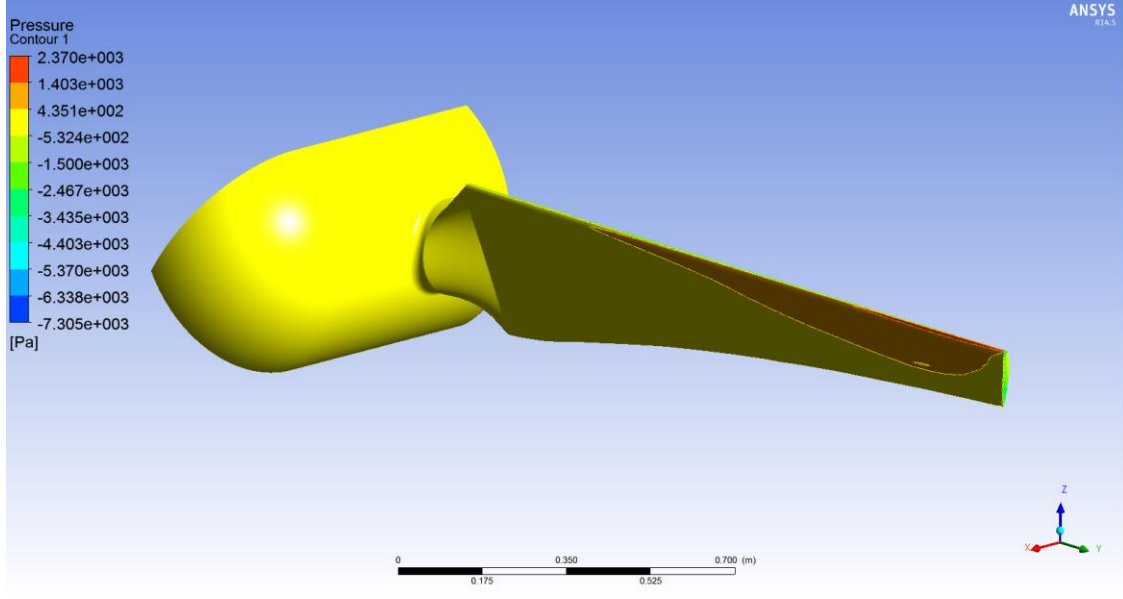
Kanat modelinin analizini yapmak için standart kanat kesitli türbin etrafına şekillerde gösterilen akış alanları oluşturulmuştur. Kanada dönerlik verebilmek için etrafına silindirik bir yapı çizilmiştir. Sınır koşulları olarak giriş “velocity inlet”, çıkış “pressure outlet”, üst, alt, yan duvarlar “wall” olarak, silindirin ön, arka ve yan yüzeyi “interior”, dikdörtgen prizma ve silindir ayrı ayrı “domain” olarak tanımlanmıştır. Türbülans modeli olarak k-ε modeli kullanılmıştır. Şekil 4.6’da kanadın akış alanı gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Kanat akış alanı

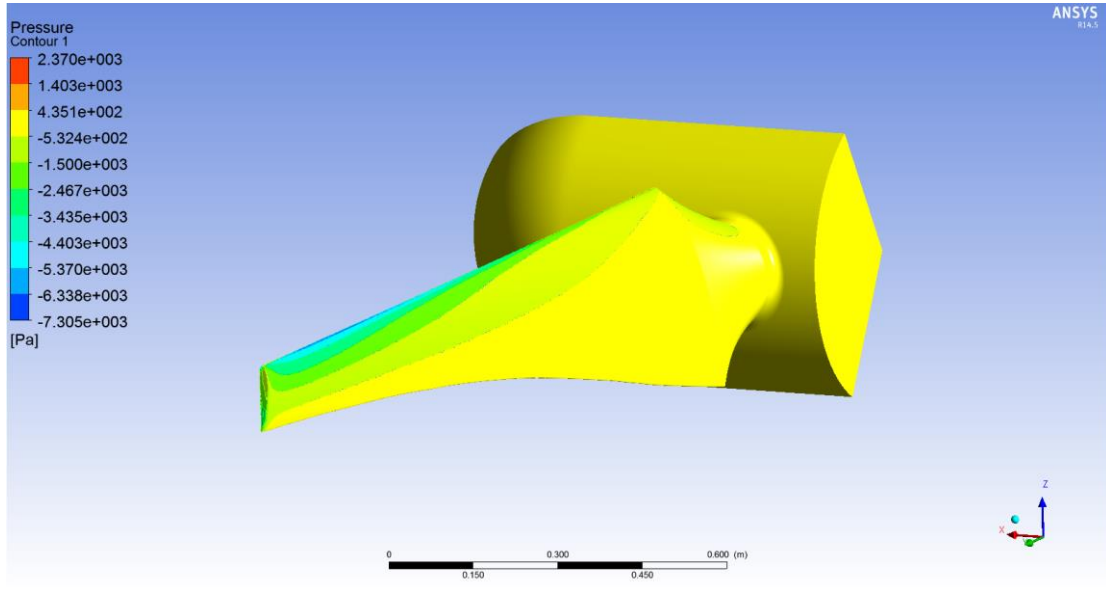
Programda rüzgar hızı olarak 25 m/s tanımlanmış ve 286 devir sayısında 213 Nm tork değeri elde edilmiştir.

Üç boyutlu analizdeki kanat kesiti etrafında oluşan basınç dağılımları elde edilmiştir. 286 devir sayısında kanadın ön ve arka kısımlarında oluşan basınç dağılımları sırasıyla Şekil 4.7 ile Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7 Kanat ön yüzeyi basınç dağılımı

Kanadın ilk kesitinin ön yüzeyinde (Şekil 4.9) ortalama basıncın 420 Pa olduğu görülmektedir. Kanadın 3. kesitinin hücum kenarına yakın kısımlarındaki basınç değeri 1150 Pa, orta ve firar kısımlarında ortalama basıncın 500 Pa olduğu, 5. kesitte ise hücum kenarına yakın kısımlarındaki basınç dağılımı 1630 Pa, orta ve firar kısımlarında ortalama basıncın 780 Pa olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8 Kanat arka yüzeyi basınç dağılımı

Güç katsayısının maksimum olduğu $\lambda=5$ değerine bakılırsa, kanadın uç kısmına doğru üst yüzey ile alt yüzeyin birleştiği yerde basınç değerleri skalada gösterildiği gibi 2370 Pa'dır. Kanadın ilk kesitinin arka yüzeyinde hücum kenarına yakın

kisimlarda basıncın -900 Pa, orta kısımlarda -300 Pa, firar kenarına yakın kısımlarda -150 Pa olduğu görülmektedir. Kanadın 3. kesitinin hücum, orta ve firar kısımlarındaki basınç değerleri sırasıyla -4800 Pa, -500 Pa ve -400 Pa'dır. 5. kesitte ise benzer bölgelerdeki basınç değerleri -6500 Pa, -2540 Pa, -250 Pa'dır. Bu sonuçlara bakıldığında, basınç değerlerinin bu şekilde değişmesinin nedeni açılma hızının kanat ucuna doğru artmasından kaynaklanmaktadır.

4.4.2 Mekanik analizler

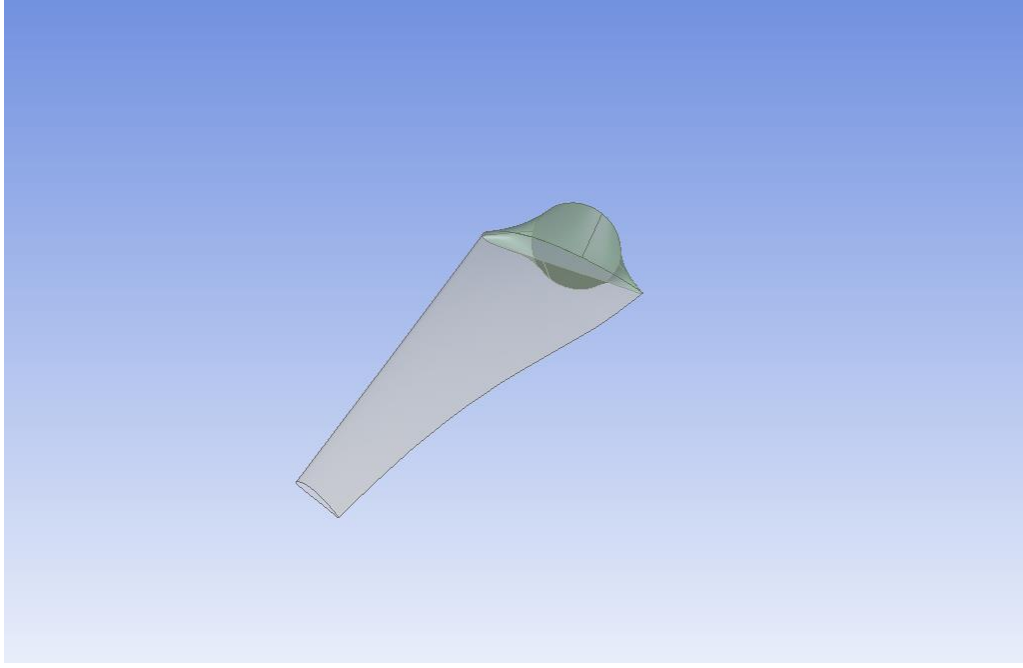
Üç boyutlu sayısal mekanik analiz ANSYS 14.5.7 programı kullanılarak yapılmıştır. Kanat analizi yapılmadan önce Autocad programında kanat kesitleri çizilmiş olup, CATIA programında bu kesitler birleştirilmiştir. Autocad programında çizilen kanat kesitleri Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Kanat kesitleri

Kanadın ilk kesiti (Şekil 4.9) hub bölgesinden 0,4 m uzaklığında olup, bu kesitteki burulma açısı $22,46^\circ$, kesitin veter uzunluğu 0,376 m'dir. Kanadın 2.,3.,4.,5. ve 6. kesitlerinin burulma açısı sırasıyla $11,83^\circ$, $6,49^\circ$, $3,39^\circ$, $1,39^\circ$ ve 0° 'dir. Bu kesitlerin veter uzunlukları ise sırasıyla 0,286 m, 0,218 m, 0,173 m, 0,143 m ve 0,121 m'dir.

Akış analizinde kullanılan birleştirilmiş kanat profili ANSYS 14.5.7 programının "Workbench" kısmındaki "Geometry" bölümüne aktarılmıştır. Bu kısımda kanat komple yüzey haline getirildikten sonra 5 parçaya bölünmüş, kompozit tabaka atılabilmesi için kanadın her bir parçası alt ve üst kısımlar olmak üzere 10 bölgeye ayrılmıştır. Yüzey haline getirilmiş kanat Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Yüzey haline getirilmiş kanat modeli

Tamamen yüzey haline gelen kanat geometrisi ANSYS 14.5.7 programının “Workbench” kısmında bulunan “Static Structural” modülüne aktarılmıştır. Kompozit malzemeden yapılması tasarlanan kanat, analize tabii tutulmadan önce kanat malzemesi Yapısal Çelik, Alüminyum, Epoksi-ECam Islak, Epoksi-Karbon, Epoksi-Scam ve Epoksi-ECam seçilerek kompozit tabaka atılmadan, sadece kalınlık girilerek statik analizler yapılmış ve kanatta meydana gelen gerilme, gerinim, toplam deformasyon değerlerine ve kanat kütesine bakılmıştır. Bu değerler Tablo 4.2’de verilmiştir. Yapısal çelik, Alüminyum, Epoksi-ECam Islak, Epoksi-Karbon ve Epoksi-SCam malzemelerine ait mekanik özellikler ANSYS 14.5.7. programının “Engineering Data” bölümünde, programa önceden tanımlanmış programın içinde olan değerlerdir. Bu değerler Ekler kısmında Şekil Ek 1.1, Şekil Ek 1.2, Şekil Ek 1.3, Şekil Ek 1.4 ve Şekil Ek 1.5’de verilmiştir.

Tablo 4.2 Malzemelere göre gerilme, gerinim, toplam deformasyon ve kanadın kütle değerleri

Malzeme	Gerilme Değeri (MPa)	Toplam Deformasyon Değeri (mm)	Gerinim Değeri (mm/mm)	Kütle (kg)
Yapısal Çelik	172,01	14,354	0,00086	15,28

Tablo 4.2 devam ediyor.

Alüminyum	172,83	40,33	0,002434	5,392
Epoksi-SCam	234,49	82,49	0,00799	3,8931
Epoksi-Karbon	281,61	51,37	0,006347	2,9004
Epoksi-Ecam Islak	225,59	123,67	0,008904	3,6011
Epoksi-Ecam	233,58	100,2	0,007752	3,7049

Yukarıdaki Tablo 4.2'ye bakıldığında kanat malzemesini seçerken öncelikle kanadın kütlesine bakılmıştır. Kütlesi fazla olan bir kanadın düşük hızlarda dönüş yapıp elektrik üretmesi daha az bir ihtimaldir. Bu yüzden Yapısal Çelik ve Alüminyum malzemeleri kanat malzemesi olarak düşünülmemiştir. Minimum kütleyle sahip olan Epoksi-Karbon kompozit malzemesidir. Kompozit malzemeler arasından minimum gerilme değeri (225,59 MPa) Epoksi-Ecam Islak kompozit malzemesine, minimum toplam deformasyon değeri (51,937 mm) ve minimum kütle değeri (2,9004 kg) Epoksi-Karbon malzemesine aittir. Epoksi-Karbon kompozit malzemesi maliyetli olduğu için kanat malzemesi olarak seçilmesi uygun görülmemiştir. Bu 3 kriter dikkate alındığında, Epoksi-Ecam Islak kompozit malzemesi ve Epoksi-Ecam kompozit malzemesi kanat malzemesi için uygun görülmektedir. Epoksi-Ecam Islak kompozit malzemesi gerilme ve kütle değerleri yönünden Epoksi-Ecam kompozit malzemesinden daha avantajlı iken, toplam deformasyon ve gerilme değerinde Epoksi-Ecam kompozit malzemesi daha avantajlı görülmektedir. Epoksi-Ecam kompozit malzemesi daha kolay elde edilebileceğinden dolayı kanat malzemesi olarak Epoksi-Ecam kompozit malzemesi uygun görülmüştür. Epoksi-Ecam kompozit malzemesini kanat bölgelerinde farklı oryantasyonlarda ve kalınlıklarda kullanarak Yapısal Çelik malzemesinin gerilme değerine yaklaşabileceği düşünülmüştür. Böylece kanadın hem daha hafif, hem de Yapısal Çelik malzemesi kadar mukavemetli ve daha verimli bir kanat tasarımı olabileceği düşünülmüştür.

Kanat malzemesine karar verildikten sonra Ansys 14.5.7. programının “Engineering Data” bölümünde tanımlanmış olan Epoksi-ECam kompozit malzemesini kanat malzemesi seçerek kanat yüzeylerinin bütün tabakalarında optimum oryantasyon için mekanik analizler yapılmıştır. Bu tabakalar en dıştan (1.tabaka) kanadın içine doğru sıralanmışlardır. Yapılan mekanik analizler sonucunda, “Kök_Üst”, “1_Üst”, “1_Alt”, “2_Üst”, “2_Alt”, “3_Üst”, “3_Alt”, “4_Üst” ve “4_Alt” bölgeleri için meydana gelen gerilme değerleri sırasıyla Tablo 4.3, Tablo 4.4, Tablo 4.5, Tablo 4.6, Tablo 4.7 ve Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.3 “Kök_Üst” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri

“Kök_Üst”	Oryantasyon (°)	Gerilme Değerleri (MPa)
Tabaka 1	0	202,55
	-30	202,87
	-45	200,09
	-60	200,85
	-90	203,13
Tabaka 2	0	174,82
	30	173,99
	45	173,37
	60	172,86
	90	173,05
Tabaka 3	0	198,51
	-30	195,46
	-45	204,63
	-60	182,69
	-90	181,58
Tabaka 4	0	235,40
	30	221,88
	45	215,01
	60	219,83
	90	211,06
Tabaka 5	0	212,03
	-30	212,08
	-45	212,55
	-60	211,93
	-90	214,32
Tabaka 6	0	211,90
	30	210,70
	45	210,60
	60	213,78
	90	214,86
Tabaka 7	0	212,59
	-30	212,12
	-45	212,95
	-60	214,66
	-90	215,47

Tablo 4.3 devam ediyor.

Tabaka 8	0	216,30
	30	217,50
	45	215,78
	60	220,42
	90	228,00
Tabaka 9	0	225,07
	-30	227,13
	-45	217,93
	-60	221,74
	-90	224,85

Tablo 4.4 “1_Üst” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri

“1_Üst”	Oryantasyon (°)	Gerilme Değerleri (MPa)
Tabaka 1	0	200,09
	-30	204,12
	-45	209,69
	-60	216,99
	-90	226,89
Tabaka 2	0	201,28
	30	200,14
	45	201,12
	60	202,36
	90	202,99
Tabaka 3	0	200,09
	-30	199,23
	-45	199,53
	-60	200,64
	-90	204,42
Tabaka 4	0	198,77
	-30	199,28
	-45	206,14
	-60	212,47
	-90	214,37
Tabaka 5	0	198,53
	30	201,72
	45	219,24
	60	234,06
	90	241,66
Tabaka 6	0	226,01
	30	198,77
	45	191,69
	60	191,85
	90	192,46

Tablo 4.5 “1-Alt” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri

“1_Alt”	Oryantasyon (°)	Gerilme Değerleri (MPa)
Tabaka 1	0	178,41
	30	185,49
	45	185,67
	60	184,32
	90	183,91
Tabaka 2	0	184,48
	30	181,45
	45	183,43
	60	185,71
	90	183,64
Tabaka 3	0	195,62
	30	213,27
	45	218,36
	60	212,34
	90	215,98
Tabaka 4	0	200,07
	30	194,84
	45	198,57
	60	198,62
	90	196,35
Tabaka 5	0	215,47
	30	219,52
	45	223,79
	60	228,16
	90	221,30
Tabaka 6	0	239,06
	30	217,93
	45	250,74
	60	252,52
	90	285,33

Tablo 4.6 “2_Üst” ve “2_Alt” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri

“2_Üst” ve “2_Alt”	Oryantasyon (°)	Gerilme Değerleri (MPa)
Tabaka 1	0	183,26
	30	180,94
	45	182,41
	60	182,70
	-90	181,50
Tabaka 2	0	201,63
	-30	201,74
	-45	200,03
	-60	197,42
	-90	198,55

Tablo 4.6 devam ediyor.

Tabaka 3	0	179,25
	-30	177,01
	-45	178,13
	-60	177,30
	-90	179,11
Tabaka 4	0	205,97
	30	204,67
	45	204,20
	60	201,36
	90	203,40

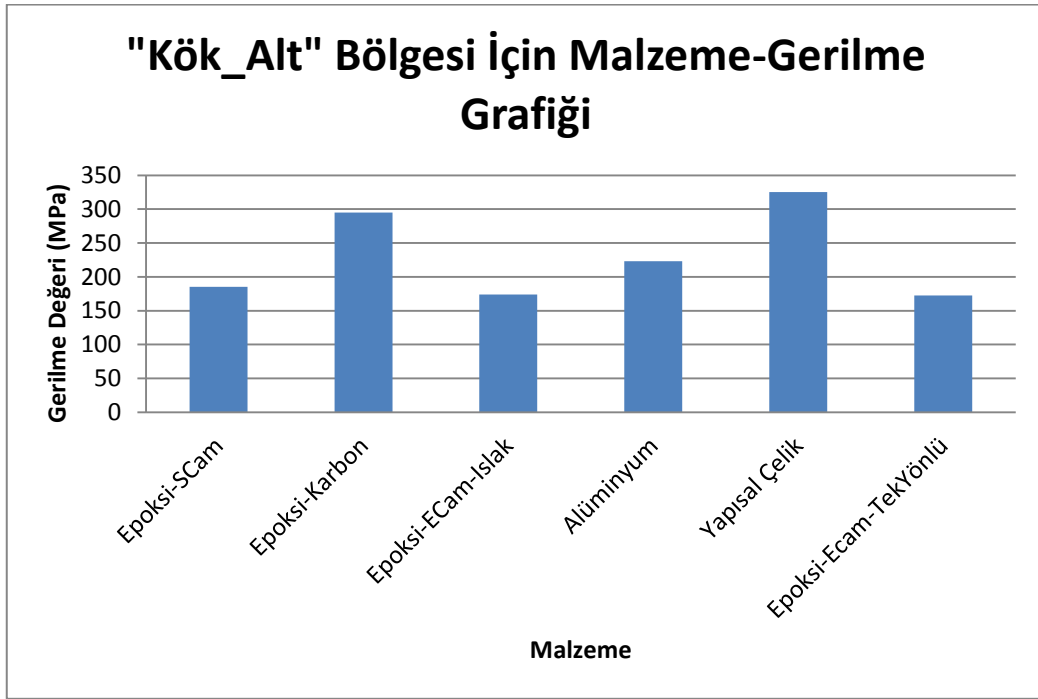
Tablo 4.7 “3_Üst” ve “3_Alt” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri

“3_Üst” ve “3_Alt”	Oryantasyon (°)	Gerilme Değerleri (MPa)
Tabaka 1	0	180,50
	30	182,98
	45	180,33
	60	181,10
	90	179,67
Tabaka 2	0	182,46
	30	185,66
	45	192,40
	60	189,52
	90	194,01
Tabaka 3	0	180,94
	-30	180,70
	-45	181,06
	-60	180,87
	-90	178,54

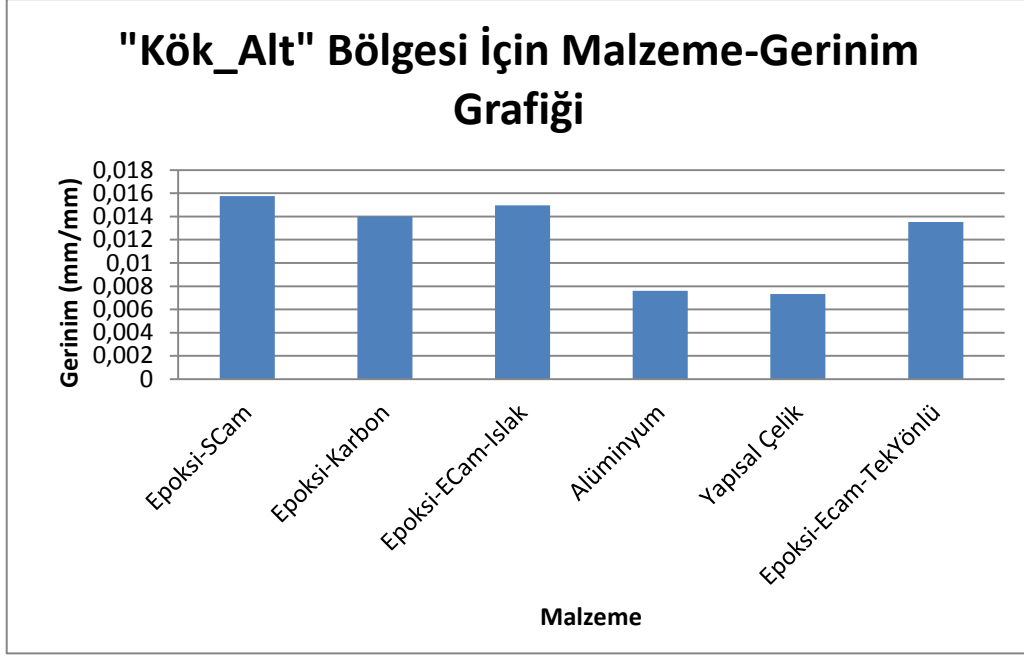
Tablo 4.8 “4_Üst” ve “4_Alt” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri

“4_Üst” ve “4_Alt”	Oryantasyon (°)	Gerilme Değerleri (MPa)
Tabaka 1	0	184,79
	30	185,10
	45	185,62
	60	183,72
	90	184,26
Tabaka 2	0	187,32
	-30	188,14
	-45	191,83
	-60	183,41
	-90	190,03
Tabaka 3	0	185,89
	30	186,18
	45	185,63
	60	185,07
	90	187,23

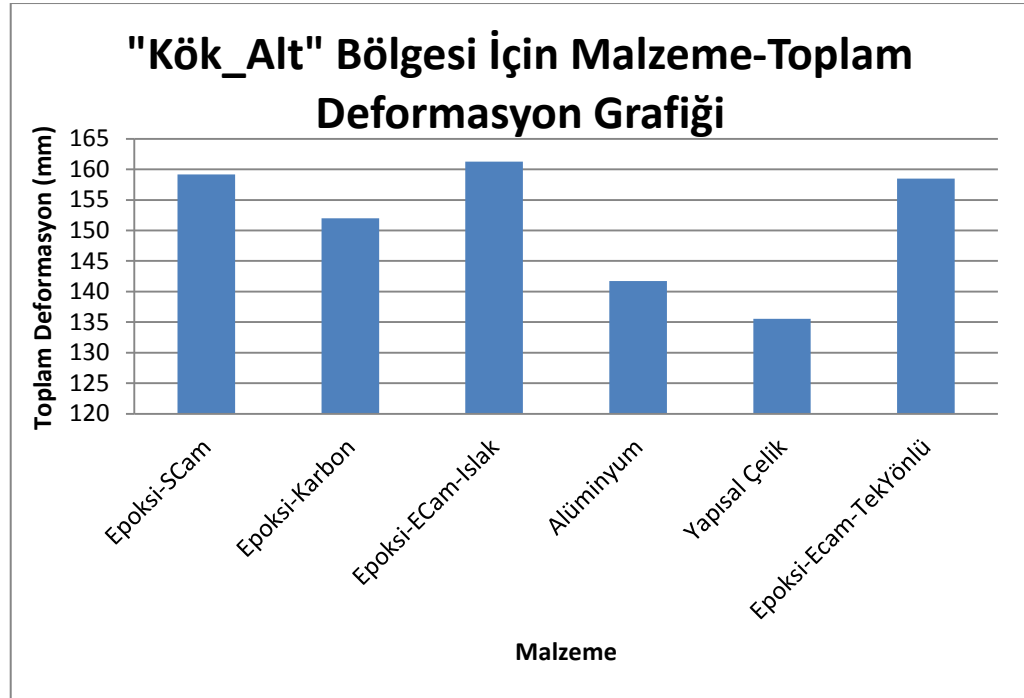
Sayısal analiz boyunca kanatta kritik olan, en dayanımlı ve kalınlığı en fazla olması gereken yer “Kök_Üst” bölgesi çıkmıştır. “Kök_Üst” bölgesinin kalınlığı ve oryantasyonları ile optimizasyon sonucu bu bölgede gerilme değerleri düşürülmüş ve son tasarımda en yüksek gerilmelerin “Kök_Alt” bölgesinde olduğu görülmüştür. Bu yüzden “Kök_Alt” bölgesinde optimum fiber oryantasyonları belirlendikten sonra “Kök_Alt” bölgesinde daha detaylı sayısal incelemelerde bulunulmuştur. “Kök-Alt” bölgesinde malzeme değiştirilerek ve kanadın diğer bölgelerinde kanat malzemesi Epoksi-ECam seçilerek mekanik analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda meydana gelen gerilme, gerinim, toplam deformasyon ve kütle değerleri sırasıyla Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te verilmiştir.



Şekil 4.11 Malzemelere göre “Kök-Alt” bölgesinde meydana gelen gerilme değerleri

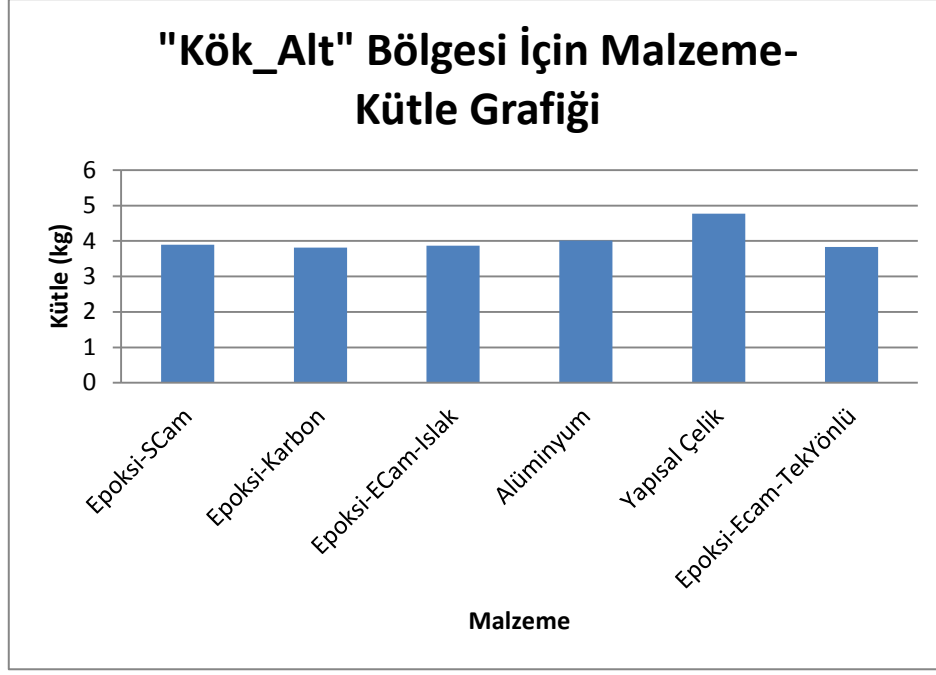


Şekil 4.12 Malzemelere göre "Kök-Alt" bölgesinde meydana gelen gerinim değerleri



Şekil 4.13 Malzemelere göre "Kök-Alt" bölgesinde meydana gelen toplam deformasyon değerleri

Yukarıdaki Şekil 4.11'e göre kanadın minimum gerilme değeri Epoksi-ECam kompozit malzemesinde olduğu görülmüştür. "Kök-Alt" bölgesinin malzeme seçiminde malzemeler arası toplam deformasyon ve gerinim değerleri arasında küçük farklar olduğu için gerilim değerleri dikkate alınmıştır.



Şekil 4.14 "Kök-Alt" bölgesinde kullanılan malzemelere göre kanadın kütlesi

Malzemeye göre kanat kütlelerine bakılacak olursa maksimum kütle 4,7739 kg ile Yapısal Çelik malzemesi, minimum kütle ise 3,8163 kg ile Epoksi-Karbon kompozit malzemesi ile elde edilmiştir. Şekil 4.14'e bakıldığında "Kök-Alt" bölgesinde Epoksi-ECam malzemesi kullanıldığında kanadın kütlesi 3,8306 kg'a sahiptir. Epoksi-Karbon kompozit malzemesi ile Epoksi-ECam malzemesi kütle değerleri yönünden karşılaştırıldığında hemen hemen aynı kütle değerlerine sahiptir, fakat maliyet açısından bakılacak olursa Epoksi-Karbon daha pahalı olduğundan, "Kök_Alt" bölgesinde de Epoksi-ECam kompozit malzemesi kullanımı uygun görülmüştür.

Yukarıdaki gerilme, gerinim, toplam deformasyon ve kütle değerleri incelendiğinde, "Kök_Alt" bölgesinin malzeme seçiminde Epoksi-ECam kompozit malzemesinin uygun olduğu görülmüştür.

Bu bölgenin bütün tabakalarında optimum oryantasyon için sayısal analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda "Kök-Alt" bölgesi için meydana gelen gerilme değerleri Tablo 4.9'da verilmiştir. "Kök_Alt" bölgesi 4mm yani 8 tabaka kompozit malzemedan oluşmuştur. Bu tabakalar en dıştan kanadın içine doğru sıralanmışlardır. Bu sıralamaya göre en dıştaki tabaka 1. tabaka, en içteki tabaka ise 8. tabakadır.

Tablo 4.9 “Kök-Alt” bölgesi için oryantasyon-gerilme değerleri

“Kök-Alt”	Oryantasyon (°)	Gerilme Değerleri (MPa)
Tabaka 1	0	206,47
	-30	248,55
	-45	250,25
	-60	234,65
	-90	191,69
Tabaka 2	0	200,83
	30	197,71
	45	197,17
	60	191,69
	90	178,51
Tabaka 3	0	182,47
	-30	178,74
	-45	178,87
	-60	178,61
	-90	178,56
Tabaka 4	0	174,32
	30	180,65
	45	181,14
	60	178,51
	90	172,71
Tabaka 5	0	183,94
	-30	175,48
	-45	176,17
	-60	175,34
	-90	172,92
Tabaka 6	0	183,48
	30	172,59
	45	173,62
	60	172,91
	90	173,24
Tabaka 7	0	191,74
	-30	179,31
	-45	177,39
	-60	174,31
	-90	172,68
Tabaka 8	0	258,19
	30	228,68
	45	179,93
	60	172,57
	90	217,22

“Kök_Alt” bölgesindeki optimum kalınlık ve oryantasyon aşağıdaki Tablo 4.10’da verilmiştir.

Tablo 4.10 “Kök_Alt” bölgesi için optimum tabaka kalınlığı ve oryantasyon

Bölge	Malzeme	Kalınlık(mm)	Oryantasyon (°)
“Kök_Alt”	Epoksi-ECam	4	60/-90/30/-90/90/-90/90/-90

“Kök_Alt” bölgesi dışındaki kanat bölgelerinde optimum kalınlıklar ve oryantasyonlar ise Tablo 4.11’de gösterilmiştir.

Tablo 4.11 “Kök_Alt” bölgesi dışındaki kanat bölgelerinde optimum kalınlık ve oryantasyonlar

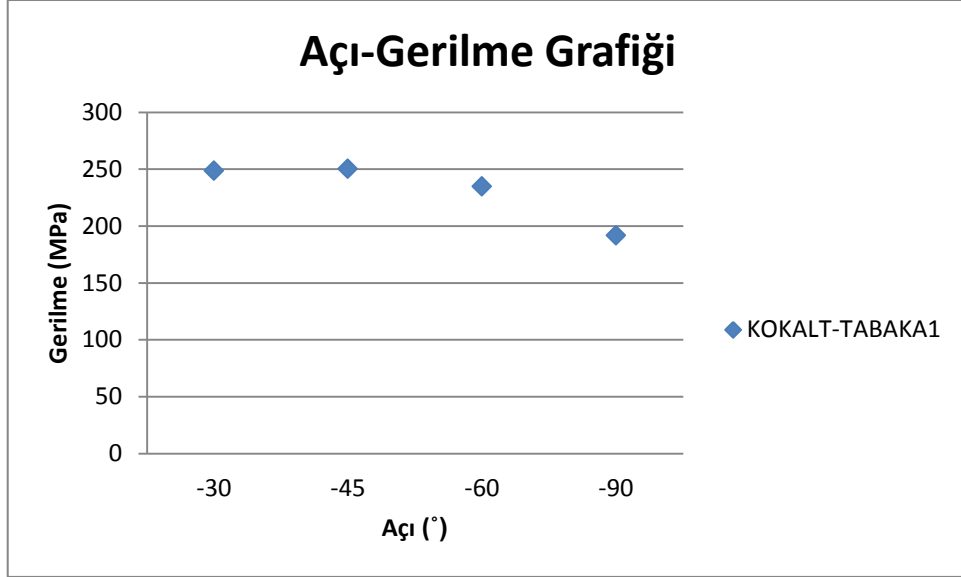
Bölge	Malzeme	Kalınlık(mm)	Oryantasyon (°)
“Kök_Üst”	Epoksi-ECam-(Tek Yönlü)	4,5	-45/45/-30/45/-60/90/-90/60/-45
“1_Alt”	Epoksi-ECam-(Tek Yönlü)	3	30/0/30/0/30/0
“1_Üst”	Epoksi-ECam-(Tek Yönlü)	3	45/0/0/-30/30/0
“2_Alt”	Epoksi-ECam-(Tek Yönlü)	2	60/-30/-60/30
“2_Üst”	Epoksi-ECam-(Tek Yönlü)	2	60/-30/-60/30
“3_Üst”	Epoksi-ECam-(Tek Yönlü)	1,5	-90/0/90
“3_Alt”	Epoksi-ECam-(Tek Yönlü)	1,5	-90/0/90
“4_Üst”	Epoksi-ECam-(Tek Yönlü)	1,5	60/-60/60
“4_Alt”	Epoksi-ECam-(Tek Yönlü)	1,5	60/-60/60

Ayrıca “Kök-Alt” ta ve diğer bölgelerde oryantasyonlar ve kalınlık değiştirilmeden sadece “Kök-Alt” bölgesinin malzemesi değiştirilerek sayısal analiz ile gerilme değerleri hesaplanmıştır. Analiz sonucunda elde edilen gerilme değerleri Tablo 4.12’de verilmiştir.

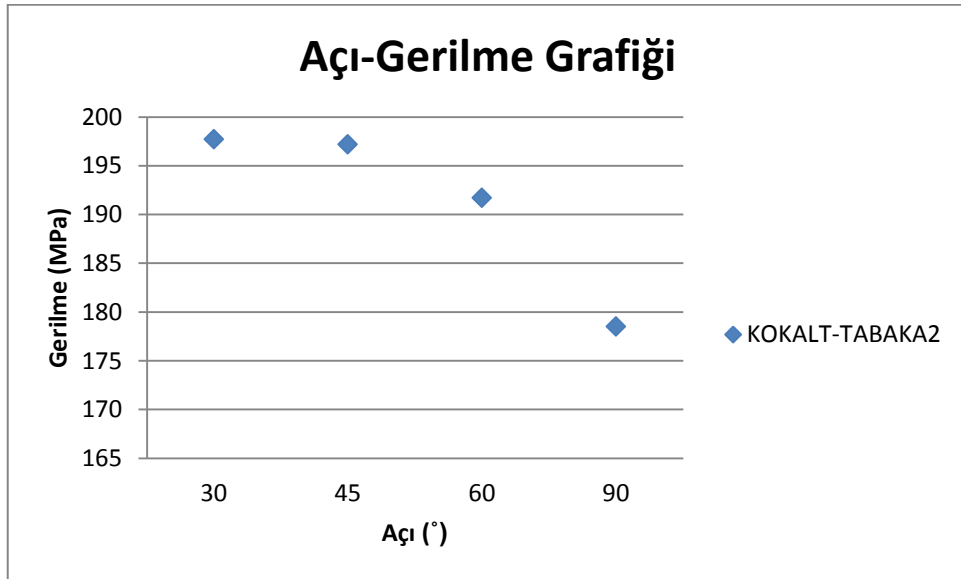
Tablo 4.12 “Kök_Alt” bölgesinde malzemeye göre gerilme değerleri

Kanattaki Bölgeler	Malzeme	Bölge	Malzeme	Gerilme Değeri (MPa)
“Kök-Alt” Hariç Diğer Tüm Bölgeler	Epoksi- ECam(Tek Yönlü)	“Kök-Alt”	Epoksi-SCam	185,07
		“Kök-Alt”	Epoksi-Karbon	295,15
		“Kök-Alt”	Alüminyum	223,26
		“Kök-Alt”	Epoksi-ECam-İslak	174
		“Kök-Alt”	Yapısal Çelik	325,36
		“Kök-Alt”	Epoksi-ECam(Tek Yönlü)	172,57

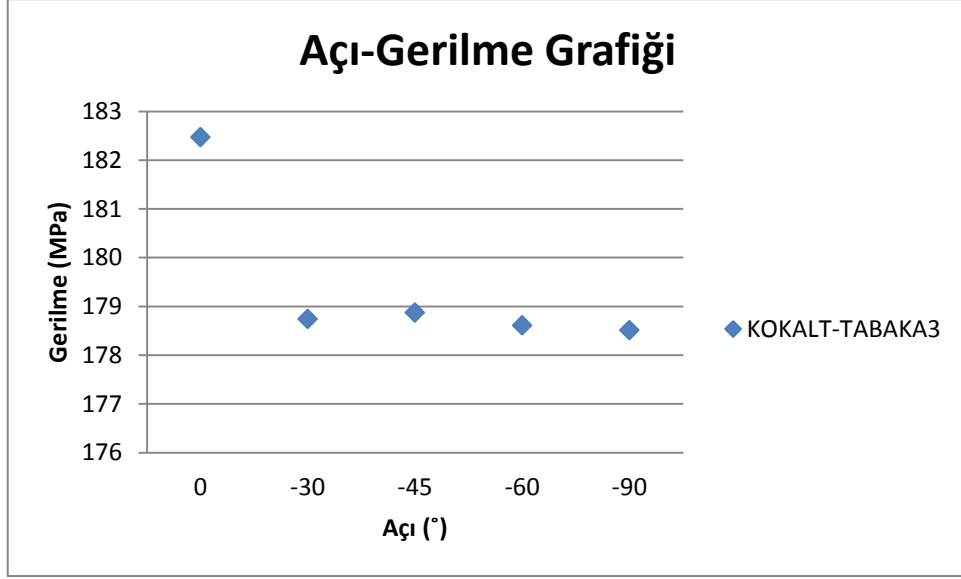
“Kök-Alt” bölgesinde malzeme Epoksi-ECam seçildikten sonra, bu bölgedeki her tabaka için verilen açılara göre gerilme analizleri yapılmıştır. Bu analiz sonuçları sırasıyla aşağıda Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21, ve Şekil 4.22’de verilmiştir.



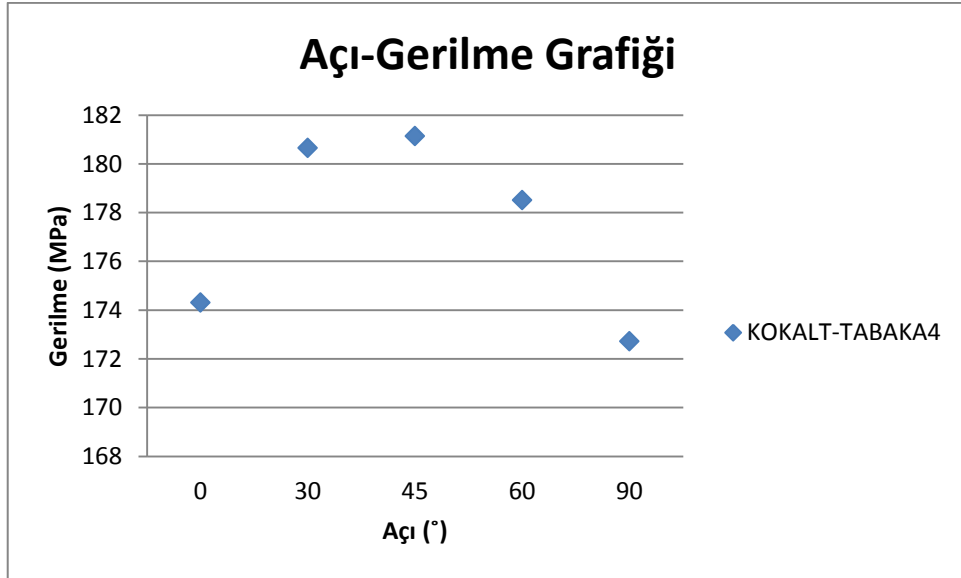
Şekil 4.15 “Kök-Alt” bölgesinde Tabaka-1’in açılara göre gerilme değerleri



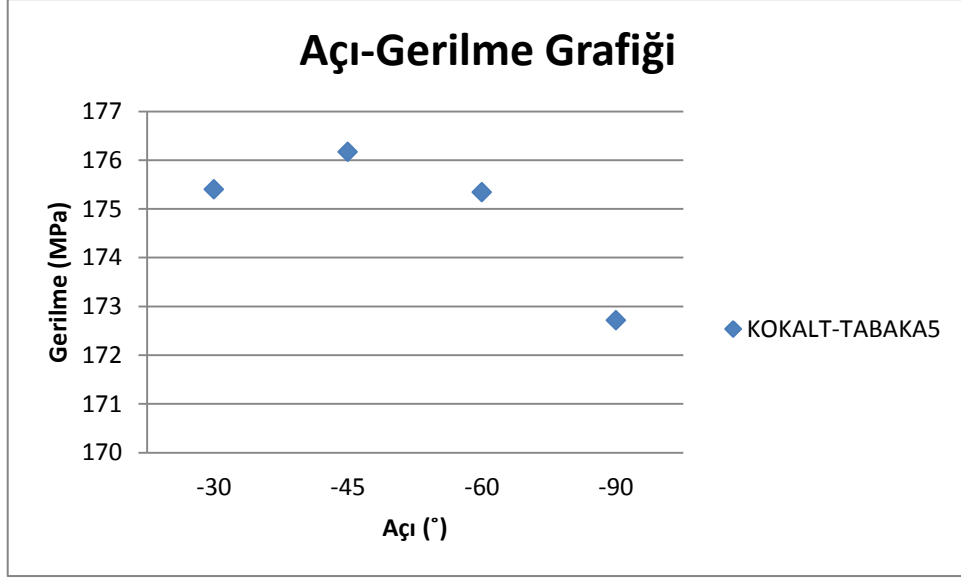
Şekil 4.16 “Kök-Alt” bölgesinde Tabaka-2’nin açılara göre gerilme değerleri



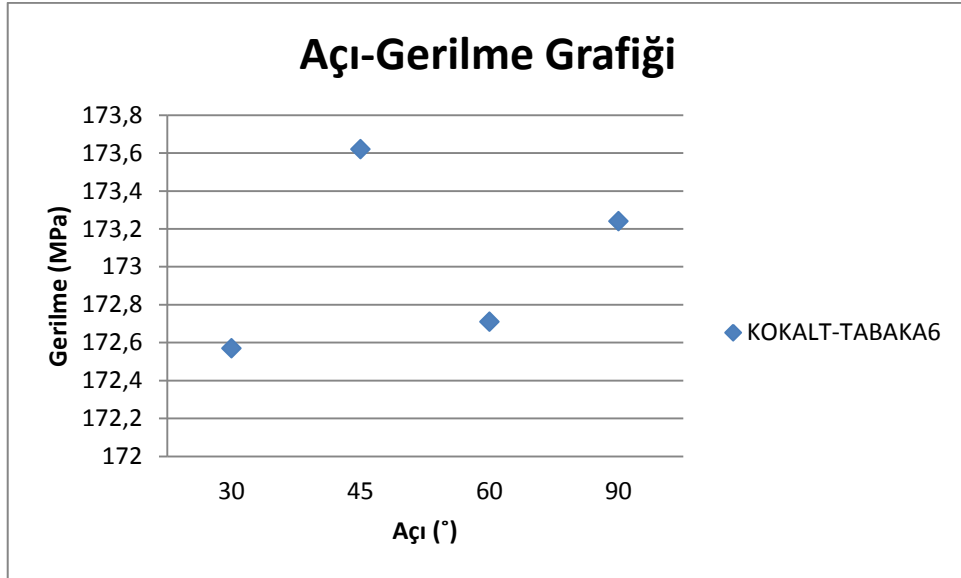
Şekil 4.17 “Kök-Alt” bölgesinde Tabaka-3’ün açılara göre gerilme değerleri



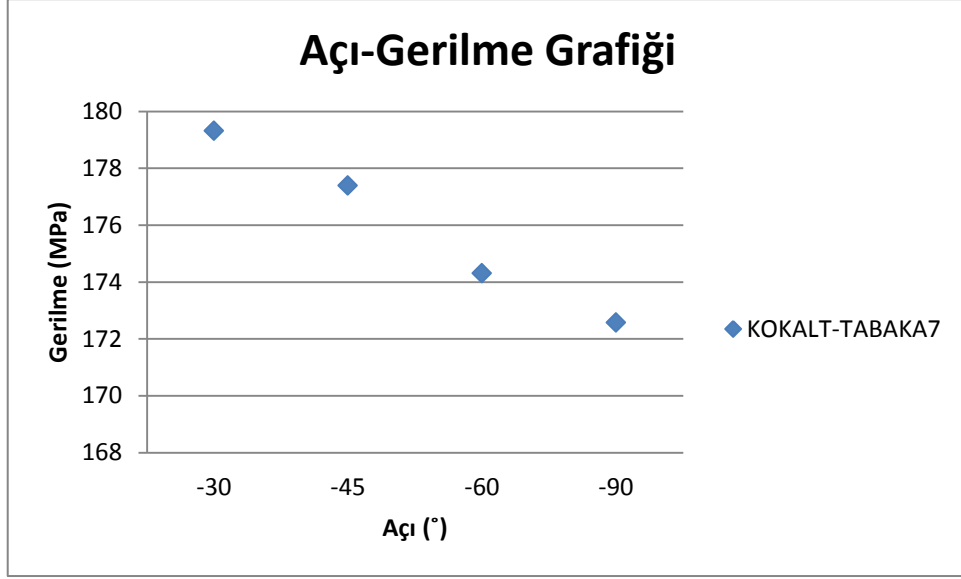
Şekil 4.18 “Kök-Alt” bölgesinde Tabaka-4’ün açılara göre gerilme değerleri



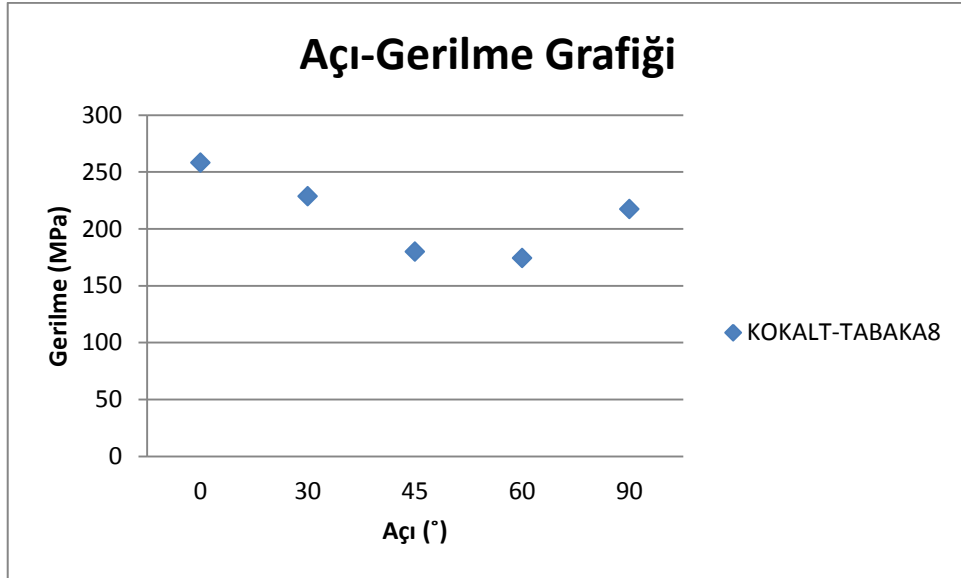
Şekil 4.19 “Kök-Alt” bölgesinde Tabaka-5’in açılara göre gerilme değerleri



Şekil 4.20 “Kök-Alt” bölgesinde Tabaka-6’nın açılara göre gerilme değerleri

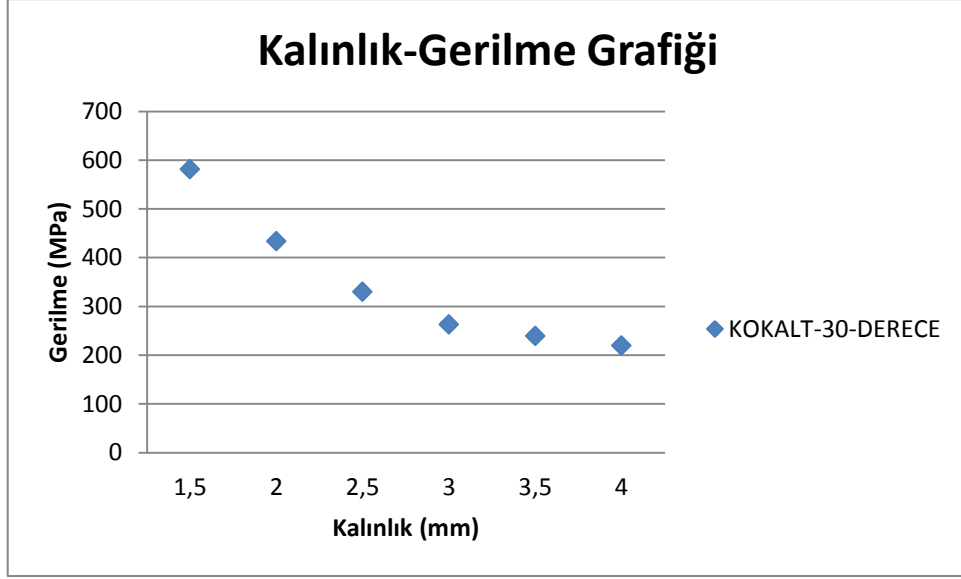


Şekil 4.21 “Kök-Alt” bölgesinde Tabaka-7’nin açılara göre gerilme değerleri



Şekil 4.22 “Kök-Alt” bölgesinde Tabaka-8’in açılara göre gerilme değerleri

Ayrıca “Kök-Alt” bölgesindeki bütün tabakalara aynı açığı vererek kalınlığa göre “Kök_Alt” bölgesinde oluşan gerilme değerlerini bulabilmek için analiz yapılmıştır. Bu analiz sonucunda ortaya çıkan gerilme değerleri Şekil 4.23’de verilmiştir.



Şekil 4.23 Kalınlığa göre “Kök-Alt” bölgesinin gerilme değerleri

Bu bölgede maksimum gerilme değeri 1,5 mm kalınlığında 581,12 MPa, minimum değer ise 4 mm kalınlığında 219,24 MPa bulunmuştur.

Analizi yapılan diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında kanat üzerinde meydana gelen gerilmenin, geriliminin ve toplam deformasyonun en düşük olduğu kanat malzemesi Epoksi-ECam olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden kanat malzemesi Epoksi-ECam seçilmiştir. ANSYS programında mekanik analiz için Engineering Data bölümünde bu malzemeye ait özellikler kullanılmıştır.

Epoksi-ECam kompozit malzemesinin mekanik özellikleri Şekil 4.24’de verilmiştir.

Property	Value	Unit
Density	2E-09	mm^-3 t
Orthotropic Elasticity		
Young's Modulus X direction	45000	MPa
Young's Modulus Y direction	10000	MPa
Young's Modulus Z direction	10000	MPa
Poisson's Ratio XY	0,3	
Poisson's Ratio YZ	0,4	
Poisson's Ratio XZ	0,3	
Shear Modulus XY	5000	MPa
Shear Modulus YZ	3046,2	MPa
Shear Modulus XZ	5000	MPa
Orthotropic Stress Limits		
Tensile X direction	1100	MPa
Tensile Y direction	35	MPa
Tensile Z direction	35	MPa
Compressive X direction	-675	MPa
Compressive Y direction	-120	MPa
Compressive Z direction	-120	MPa
Shear XY	80	MPa
Shear YZ	46,154	MPa
Shear XZ	80	MPa
Orthotropic Strain Limits		
Tensile X direction	0,0244	
Tensile Y direction	0,0035	
Tensile Z direction	0,0035	
Compressive X direction	-0,015	
Compressive Y direction	-0,012	
Compressive Z direction	-0,012	
Shear XY	0,036	
Shear YZ	0,012	
Shear XZ	0,036	
Tsai-Wu Constants		
Coupling Coefficient XY	-1	
Coupling Coefficient YZ	-1	
Coupling Coefficient XZ	-1	
Puck Constants		
Material Classification	Glass	
Compressive Inclination XZ	0,25	
Compressive Inclination YZ	0,2	
Tensile Inclination XZ	0,3	
Tensile Inclination YZ	0,2	

Şekil 4.24 Epoksi-ECam malzemesine ait ANSYS 14.5.7’de tanımlı olan mekanik özellikler

Kanada ait 10 bölgenin tabaka sayısı ve kalınlık değerleri kanat kesitlerine göre ayarlanmış olup, ANSYS 14.5.7. programının “Static Structural” modülünde olan “Model” kısmında her bölgenin optimum tabaka sayısı, kalınlık değerleri, malzemesi ve optimum tabaka oryantasyon açıları girilmiştir. Kanat üzerindeki optimum tabaka sayısı, malzemesi, kalınlığı ve optimum tabaka oryantasyonları Tablo 4.13 verilmiştir.

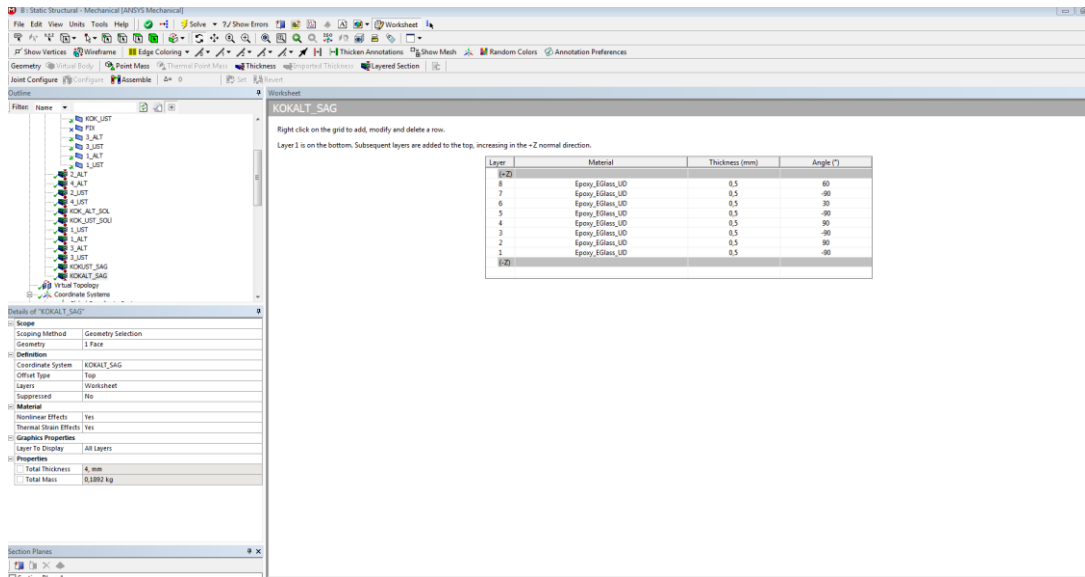
Tablo 4.13 Kanattaki tabaka sayısı, kalınlık ve oryantasyonlar

Bölge	Malzeme	Tabaka Sayısı	Kalınlık(mm)	Oryantasyon (°)
“Kök_Üst”	Epoksi-ECam(Tek Yönlü)	9	4,5	-45/45/-30/45/-60/90/-90/60/-45
“Kök_Alt”	Epoksi-ECam(Tek Yönlü)	8	4	60/-90/30/-90/90/-90/90/-90

Tablo 4.13 devam ediyor.

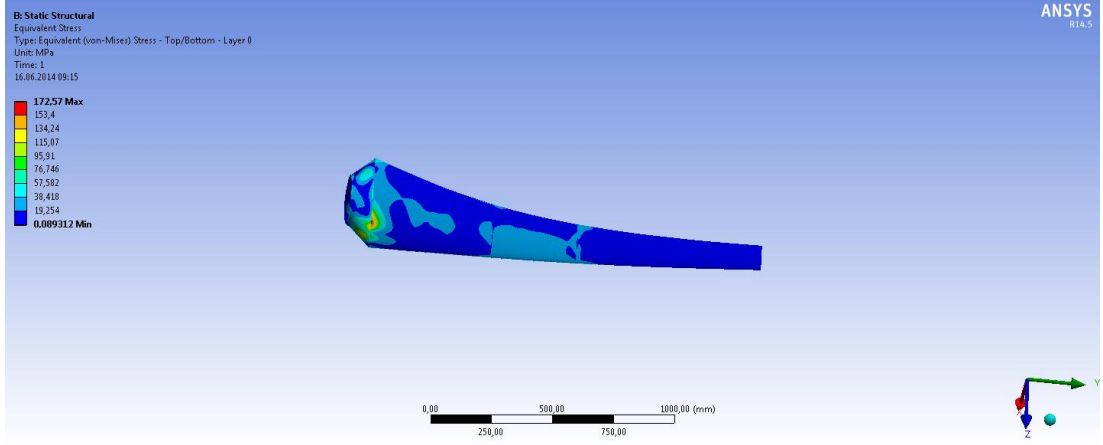
"1_Alt"	Epoksi-Ecam(Tek Yönlü)	6	3	30/0/30/0/30/0
1_Üst	Epoksi-Ecam(Tek Yönlü)	6	3	45/0/0/-30/30/0
"2_Üst" ve "2_Alt"	Epoksi-Ecam(Tek Yönlü)	4	2	60/-30/-60/30
"3_Üst" ve "3_Alt"	Epoksi-Ecam(Tek Yönlü)	3	1,5	-90/0/90
"4_Üst" ve "4_Alt"	Epoksi-Ecam(Tek Yönlü)	3	1,5	60/-60/60

"Static Structural" modülünde girilen kanattaki tabaka sayısı, kalınlık ve oryantasyonları içeren kısım aşağıda Şekil 4.25'de gösterilmiştir.

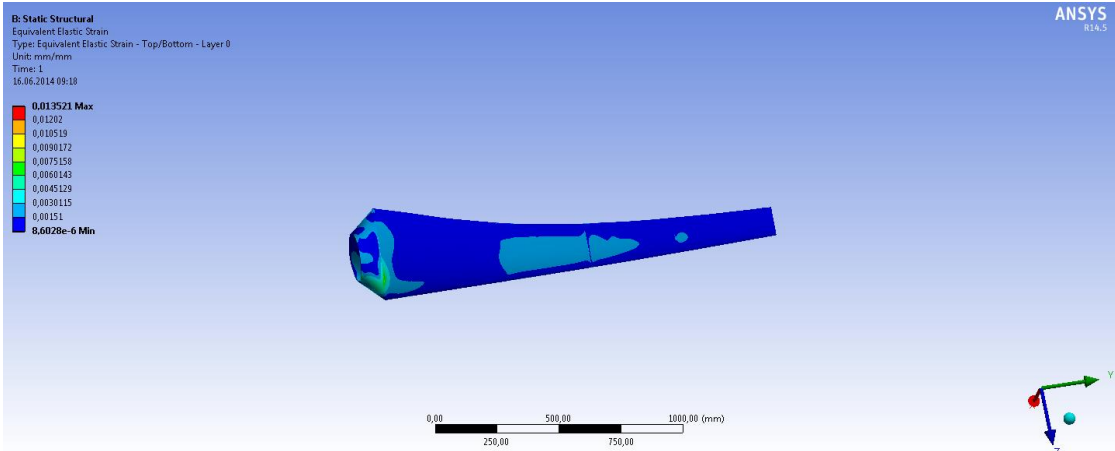


Şekil 4.25 "Static Structural" modülünde kanattaki tabaka sayısının, kalınlığının ve oryantasyonların girildiği kısım

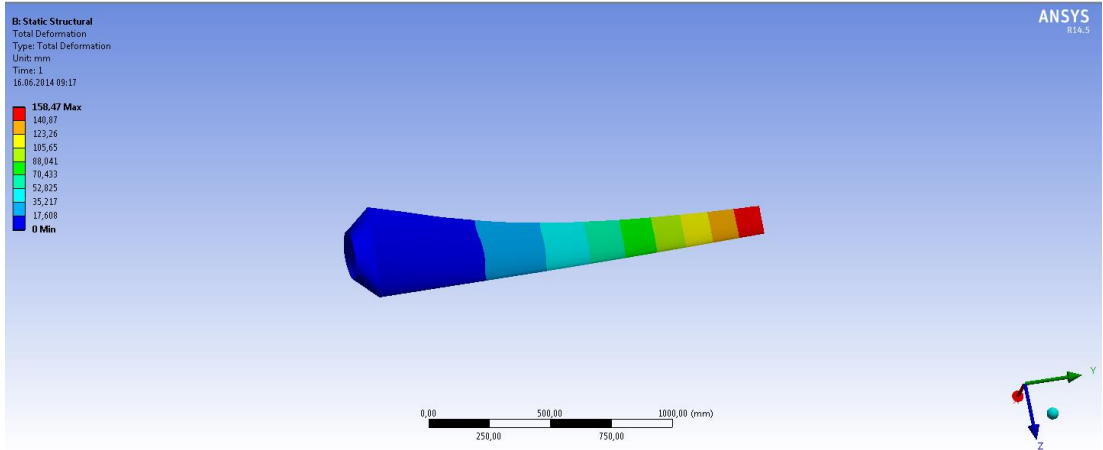
Bu değerlerle elde edilen toplam deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri sırasıyla Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.26 Malzemesi Epoksi-Ecam olan kanadın optimum gerilme değerleri



Şekil 4.27 Malzemesi Epoksi-Ecam olan kanadın optimum gerinim değerleri



Şekil 4.28 Malzemesi Epoksi-Ecam olan kanadın optimum toplam deformasyon değerleri

Ayrıca kanadın kompozit tabaka sayısı, oryantasyonları aynı kalacak şekilde sadece her kanat bölgesinin bütün tabakalarında malzemeyi değiştirerek analizler yapılmıştır. Bu analiz sonuçları Tablo 4.14'de verilmiştir.

Tablo 4.14 Malzemeye göre kanatta meydana gelen gerilme değerleri

Malzeme	Gerilme Değeri (MPa)	Toplam Deformasyon Değeri (mm)	Gerinim Değeri (mm/mm)	Kütle (kg)
Yapısal elik	173,87	16,859	0,0009	15,28
Epoksi-ECam	172,57	158,47	0,013521	3,7049
Alüminyum	175,09	47,377	0,0024661	5,392
Epoksi-SCam	187,09	155,83	0,01584	3,8931
Epoksi-ECam Islak	163,95	188,73	0,014942	3,8011
Epoksi-Karbon	246,47	90,661	0,014073	2,9004

Tablo 4.14'ten de görüleceği gibi optimum oryantasyon ve tabaka sayısı ile kanat malzemesi olarak kullanılan Epoksi-ECam kompozit malzemesi ile yüksek mukavemetli Yapısal elik malzemesinin mukavemetine ulaşılmış hatta Yapısal elik malzemesinden daha mukavemetli bir kanat elde edilmiştir. Böylece hem Yapısal elik malzemesi kadar mukavemetli hem de düşük hızlarda dönebilecek kadar hafif, verimli bir rüzgar türbin kanat tasarımı yapılmıştır.

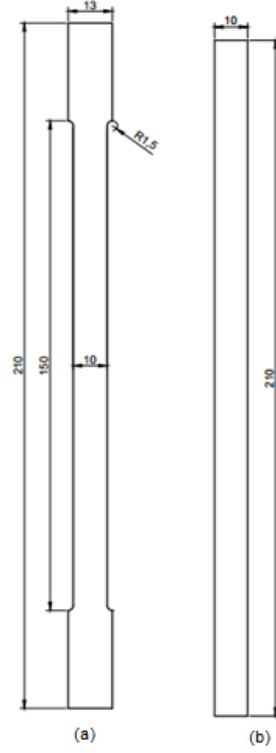
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar kompozit malzemeden yapılmış standart kanat profili malzemesinin mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik olmuştur. Çalışmalar Başkent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde bulunan Biyomekanik ve Mukavemet Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

5.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması

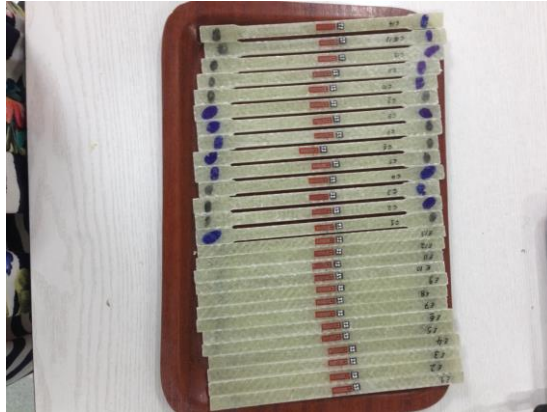
Kanadın sayısal analizi boyunca kanatta kritik olan, en dayanımlı ve kalınlığı en fazla olması gereken yer "Kök_Üst" bölgesi çıkmıştır. "Kök_Üst" bölgesinin katman sayısı ve fiber oryantasyonları ile bu bölgede meydana gelen maksimum gerilme bertaraf edilmiş, ancak buna karşılık kritik eşiği (maksimum gerilme) geçmeyen ama kanat üzerinde oluşan en yüksek gerilmenin "Kök_Alt" bölgesinde artık meydana gelebileceği görülmüştür. Bu yüzden dayanımın en yüksek olması gereken "Kök_Üst" kısmı ile tabaka sayısı, oryantasyonları ve malzemesi aynı olan numuneler Global Teknik A.Ş. tesislerinde hazırlanmıştır. ECam fiberi ile epoksi matrisinden yapılan cam elyaf kumaş, "Kök_Üst" kısmının her katmanının fiber oryantasyonlarına göre serilip, reçine sürülerek el yatırma yöntemi ile tabaka haline getirilmiştir. Fiber ile matris arasında boşluk kalmaması için vakum torbalama yöntemi kullanılmıştır. Çekme ve eğme numunelerinin boyutları elyafa çizilerek kompozit için özel bir makas (roller) ile boyutlara göre kesilmiştir. Çekme numuneleri için ASTM D638-02 standartlarında belirtilen numune boyutları referans alınmış ancak kullanılan test cihazının yük kapasitesi sebebi ile boyutlarda değişikliğe gidilmiştir. Çekme numunesinin test uzunluğu 150 mm, test genişliği 10 mm seçilmiştir. Çekme numunesi "Dog - Bone Shape" şeklinde yaptırılmıştır. Eğilme numunesinin boyutları çekme numunesinde olduğu gibi kullanılan test cihazının kapasitesi ve ASTM D790 standartları dikkate alınarak ayarlanmıştır. Çekme testi ile elde edilen sonuçların kolay karşılaştırılabilmesi için eğilme numunesinin test uzunluğu 150 mm, test genişliği 10 mm seçilmiştir. Eğilme numunesi dikdörtgen plaka şeklinde yaptırılmıştır.

Çekme numunesi 12 adet ve eğilme numunesi 12 adet ürettirilmiştir. Çekme ve eğilme numunelerinin boyutları Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 Çekme (a) ve eğilme (b) numunelerinin boyutları

Çekme ve eğilme numunesinin kalınlığı kanat tasarımında en kalın olan bölgenin ("Kök_Üst") kalınlığı ile aynı alınmıştır. Çekme ve eğilme numuneleri Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2 Epoksi-ECam malzemesinden yapılan çekme-eğilme numuneleri

5.2 Teorik Hesaplamalar

Kanadın "Kök_Üst" bölgesinin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deneylerden alınan ve sayısal analiz sonucunda elde edilen gerilme ve gerinim değerlerinin doğruluğunu tespit etmek için bu bölgeye ait çekme ve eğilme numunelerinin teorik hesaplamaları yapılmıştır. Aynı zamanda kompozit

malzemeden tasarımı yapılan NACA 4412 kanat profilinin teorik verimi de hesaplanmıştır.

5.2.1 Rüzgar türbin kanat verimi için teorik hesaplamalar

Rüzgar türbinlerinde sistem verimini etkileyen en önemli eleman kanat (rotor) verimidir. Rüzgar türbinindeki kanat verimi ise Denklem (5.1) ile hesaplanır.

$$C_p = \frac{T\omega}{P_w} \quad (5.1)$$

Denklem (5.1)'de, C_p kanat güç katsayısı (kanat verimi), T tork değeri, ω açısal hız, P_w ise rüzgar gücüdür. Açısal hız değerini bulmak için Denklem (3.3) kullanılmıştır. Rüzgar türbini tasarım koşulları için Denklem (3.3)'deki λ değeri 5 ve rüzgar hızı 12 m/s'dir. Denklem (3.3)'de kanat yarıçapı 2 m alınarak, ω değeri 30 rad/s bulunmuştur.

Denklem (3.1)'de P_w rüzgar gücü, ρ havanın yoğunluğu, V rüzgar hızı, A_t ise rüzgarın taradığı alandır. Rüzgarın taradığı alan ise Denklem (5.2)'den elde edilmiştir.

$$A_t = \pi r^2 \quad (5.2)$$

Denklem (5.2)'de kanat yarıçapı 2 m alınarak rüzgarın taradığı alan, A_t , 12,57 m² bulunmuştur.

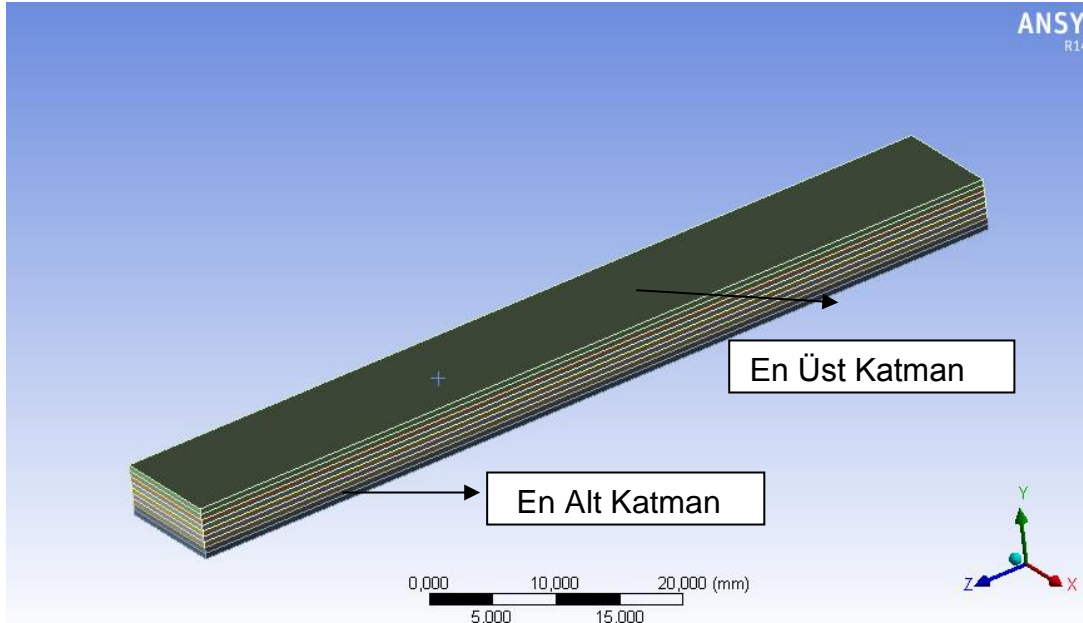
Denklem (3.1)'de havanın yoğunluğu 1,225 kg/m³, rüzgar hızı 12 m/s, rüzgarın taradığı alan ise 12,57 m² alınarak rüzgar gücü 13304,1 watt elde edilmiştir.

Denklem (5.1)'de sayısal akış analizi sonucunda bulunan tork değeri (T) 213 Nm, Denklem (3.3)'den elde edilen 30 rad/s açısal hız değeri, Denklem (3.1)'den elde edilen 13304,1 watt değeri kullanılarak, kanat verimi (Denklem (5.1)) teorik olarak 0,48 bulunmuştur. Bu değer Betz Limiti'ne yakın bir değerdir.

5.2.2 Çekme numunesi için teorik hesaplamalar

Çekme numunelerinin sayısal analiz ve deneysel sonuçları, numunelerin teorik hesaplamaları ile karşılaştırılmıştır.

Test edilen çekme numunesinin en üst tabakasından en alt tabakasına doğru fiber oryantasyonları -45/60/-90/90/-60/45/-30/45/-45'dir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Test numunesinin alt ve üst katmanı

“Gerinim Ölçer” ile elde edilen ve sayısal analiz ile hesaplanan gerinimler, gerçek gerinim değerleridir ve deneysel verileri teorik değerler ile kıyaslamak için teorik gerçek gerinim ve gerilme değerlerinin bulunması gerekmektedir. Malzemenin Young’s modülü fiber oryantasyon açılarına göre değişmektedir. Tabakaların kendi koordinat sisteminde x eksenine ile yaptığı açı dikkate alınarak “Kök_Üst” tabakasındaki her katmanın Young’s Modülü [55] Denklem (5.3) ile bulunmuştur.

$$E_x(\theta) = \frac{1}{\frac{\cos^4(\theta)}{E_l} + \frac{\sin^4(\theta)}{E_t} + \sin^2(\theta)\cos^2(\theta)\left(\frac{1}{G_{lt}} - \frac{2\nu_{tl}}{E_t}\right)} \quad (5.3)$$

Denklem (5.3)’de $E_x(\theta)$ katmanın x eksenine ile yaptığı açıdaki Young’s Modülü, $\cos(\theta)$ katmanının x eksenine ile yaptığı açının $\cos(\theta)$ değeri, $\sin(\theta)$ katmanının x eksenine ile yaptığı açının $\sin(\theta)$ değeri, E_l katmanın fiber yönündeki Young’s Modülü, E_t katmanın fibere dik yöndeki Young’s modülü, G_{lt} katmanın xy düzleminde kayma modülü, ν_{tl} katmanın xy düzlemindeki poisson oranıdır. Denklem (5.3) ile bulunan her katmandaki Young’s Modülleri Denklem (5.4)’te yerine konularak çekme numunesi yaptırılan “Kök_Üst” tabakasının Young’s modülü Denklem (3.15) göz önüne alınarak bulunmuştur.

$$E_{üst} = (E_1\varphi_1 + E_2\varphi_2 + E_3\varphi_3 + E_4\varphi_4 + E_5\varphi_5 + E_6\varphi_6 + E_7\varphi_7 + E_8\varphi_8 + E_9\varphi_9) \quad (5.4)$$

Denklem (5.4)'te $E_{üst}$ üst katmanın Young's modülü, E_1 birinci katmanın Young's modülü, E_2 ikinci katmanın Young's modülü, E_3 üçüncü katmanın Young's modülü, E_4 dördüncü katmanın Young's modülü, E_5 beşinci katmanın Young's modülü, E_6 altıncı katmanın Young's modülü, E_7 yedinci katmanın Young's modülü, E_8 sekizinci katmanın Young's modülü, E_9 dokuzuncu katmanın Young's modülü, φ_1 birinci katmanın hacimsel oranı, φ_2 ikinci katmanın hacimsel oranı, φ_3 üçüncü katmanın hacimsel oranı, φ_4 dördüncü katmanın hacimsel oranı, φ_5 beşinci katmanın hacimsel oranı, φ_6 altıncı katmanın hacimsel oranı, φ_7 yedinci katmanın hacimsel oranı, φ_8 sekizinci katmanın hacimsel oranı, φ_9 dokuzuncu katmanın hacimsel oranıdır. Denklem (5.4)'te her bir katmanın hacmi eşit olduğundan, her bir katmanın hacim oranı 1/9 alınmış ve "Kök_Üst" numunesinin teorik Young's Modülü 13256 MPa bulunmuştur.

Çekme numunesinin 250 N, 500 N, 1000 N, 2000 N, 3000 N, 4000 N, 5000 N, 6000 N, 7000 N, 8000 N ve 8864 N kuvvetler için mühendislik gerilmeleri Denklem (5.5) ile bulunmuştur. Numunenin kesit alanı 45 mm²'dir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.5)$$

Mühendislik gerilmesini gerçek gerilme değerine dönüştürmek için Denklem (3.24) kullanılması gerekmektedir. Denklem (3.24)'te mühendislik gerinim değerine ihtiyaç vardır. Mühendislik gerinimi ise, çekme deneyinde z ve y yönünde yükleme olmadığı için Hooke kanunu olan Denklem (3.21) ile bulunmuştur.

Denklem (3.23) ile mühendislik gerinimleri gerçek gerinim değerlerine dönüştürülmüştür. Elde edilen gerçek gerinim değerleri Denklem (3.24)'te kullanılarak gerçek gerilme değerleri elde edilmiştir. Tablo 5.1'de teorik olarak bulunan gerçek gerinim, gerilme ve malzemenin Young's Modülü değerleri gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Çekme deneyi için teorik gerinim, gerilme ve Young's Modülü değerleri

	Teorik Değerler		
Yük (N)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)	E (MPa)
250	4,19x10 ⁻⁴	5,6	13256

Tablo 5.1 devam ediyor.

500	$8,38 \times 10^{-4}$	11,1	13256
1000	$1,67 \times 10^{-3}$	22,3	13256
2000	$3,35 \times 10^{-3}$	44,6	13256
3000	$5,02 \times 10^{-3}$	67,0	13256
4000	$6,68 \times 10^{-3}$	89,5	13256
5000	$8,35 \times 10^{-3}$	112,0	13256
6000	1×10^{-2}	135,0	13256
7000	$1,17 \times 10^{-2}$	157,0	13256
8000	$1,33 \times 10^{-2}$	180	13256
8864	$1,48 \times 10^{-2}$	199,99	13256

5.2.3 Eğilme numunesi için teorik hesaplamalar

Eğilme numunelerinin sayısal analiz ve deneysel sonuçları teorik hesaplamalarla karşılaştırılmıştır.

3 noktalı eğilme deneyinde y yönünde hareket etmeyen mesnetler üzerine konan malzemenin yüke karşılık maksimum sehimi Denklem (5.6) ile yapılmıştır. Denklem (5.6) ile elde edilen maksimum sehimi değerleri Denklem (5.7)'de kullanılarak malzemenin x yönünde gerinimi bulunmuştur.

$$y_{max} = \frac{WL^3}{48EI} \quad (5.6)$$

Denklem (5.6)'da y_{max} malzemenin maksimum sehimi, W malzemenin ortasından uygulanan yük, L ise test uzunluğu, E malzemenin Young's modülü, I eğilme numunesi kesitinin atalet momentidir.

Numune kesitinin atalet momenti Denklem (3.27) ile, numunenin Young's Modülü ise Denklem (5.4) ile bulunmuştur. Eğilme numunesinin 100 N, 125 N, 150 N, 175 N, 200 N, 225 N ve 250 N kuvvetlerine karşılık gelen maksimum moment değeri Denklem (3.26) ile bulunarak, malzemenin maksimum gerilme Denklem (3.25) ile elde edilmiştir. Numunenin x yönündeki mühendislik gerinimi ise Denklem (5.7) ile

bulunup, Denklem (3.23) ile gerçek gerinime dönüştürülmüştür. Denklem (3.24) ile malzemenin gerçek gerilme değeri bulunmuştur.

$$\varepsilon_x = \frac{6hy_{max}}{L^2} \quad (5.7)$$

Denklem (5.7)'de ε_x malzemenin x yönündeki gerinimi, h malzemenin kalınlığı, y_{max} malzemenin maksimum sehimi, L ise test uzunluğudur. Tablo 5.2'de teorik olarak bulunan gerçek gerinim, gerilme ve Young's modülü değerleri gösterilmiştir.

Tablo 5.2 Eğilme deneyi için teorik gerinim, gerilme ve Young's Modülü değerleri

Yük (N)	Teorik Değerler		
	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)	E (MPa)
100	$8,35 \times 10^{-3}$	112	13256
125	$1,04 \times 10^{-2}$	140	13256
150	$1,25 \times 10^{-2}$	169	13256
175	$1,46 \times 10^{-2}$	197	13256
200	$1,66 \times 10^{-2}$	226	13256
225	$1,87 \times 10^{-2}$	255	13256
250	$2,07 \times 10^{-2}$	284	13256

5.3 Çekme Deneyleri

Deneylerde kullanılan çekme numuneleri, kanadın en kalın bölgesi olan ""Kök_Üst"" kısmındaki oryantasyonlara sahip kompozit malzemeyi temsil edecek şekilde 12 adet hazırlanmıştır. Malzeme üzerinde oluşan gerilmeler Instron Universal Malzeme Test Cihazından alınırken, gerinimler ise hem Instron Universal Malzeme Test Cihazından hem de bir ucu malzeme üzerine yapıştırılmış olan "Gerinim Ölçer" e bağlı bir ucu da bilgisayara bağlı "Datalogger"dan alınmıştır. Deney öncesinde numunelerin ilk ölçüm uzunlukları kaydedilmiştir. Deney yapmaya hazır hale gelen numunenin kuvvete bağlı uzama miktarları Instron Universal Malzeme Test Cihazı'na bağlı bilgisayardan, kuvvete bağlı gerinim değerleri ise "Datalogger"a bağlı bilgisayardan elde edilmiştir. Deneylerde

kaydedilen kuvvet-uzama ölçüm değerleri kullanılarak gerçek gerinim ve gerçek gerilme değerleri hesaplanmıştır. Çekme test numunesi Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



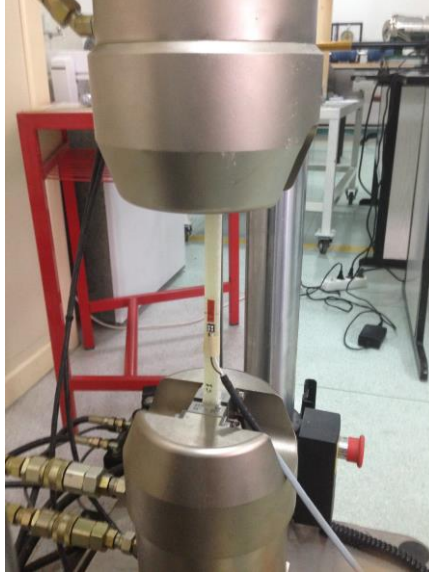
Şekil 5.4 Epoksi-ECam malzemesinden yapılan çekme numunesi

“Gerinim Ölçer” gerçek gerinimi ölçmektedir. “Gerinim Ölçer” numunenin en üst tabakasına yapıştırıldığından bu tabakadaki kuvvete karşı gerçek gerinim değerleri elde edilmiştir. Çekme deneyinde z ve y yönünde yükleme olmadığı için, x yönündeki teorik gerinim ise Denklem (3.21) kullanılarak Hooke kanundan elde edilmiştir.

Deneyin yapıldığı Instron Universal Malzeme Test Cihazı ve deney sırasında çekme numunesi sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Instron Universal Malzeme Test Cihazı



Şekil 5.6 Çekme deneyi esnasında çekme numunesi

Deney sonrası hasara uğramış çekme numunesi Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Çekme deneyi sonrasında hasara uğramış çekme numunesi

5.4 Eğilme Deneyleri

Eğilme deneyleri Başkent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Biyomekanik ve Mukavemet Laboratuvarı’nda bulunan Instron Universal Malzeme Test Cihazı ile yapılmıştır. Eğilme deneyi esnasında Instron Universal Malzeme Test Cihazı ve Epoksi-ECam malzemesinden yapılan eğilme numunesi sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



Şekil 5.8 Eğilme deneyi esnasında Instron Universal Malzeme Test Cihazı



Şekil 5.9 Epoksi-ECam malzemesinden yapılan eğilme numunesi

Eğilme numuneleri cihaza yerleştirilerek numunelerin tam ortasından yük uygulanmış ve eğilme numuneleri hasara uğratılıncaya kadar yük arttırılmıştır.

Deney sırasında eğilme numunesi Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10 Eğilme deneyi esnasında eğilme numunesi

Deney sırasında Instron Universal Malzeme Test Cihazı ile yük-sehim bilgileri bilgisayara kaydedilmiştir. Elde edilen kuvvete karşı sehim değerleri Denklem (5.7)'de kullanılarak, mühendislik gerinim değerleri elde edilmiştir.

Denklem (3.23) kullanılarak Denklem (5.7)'de bulunan mühendislik gerinim değerleri gerçek gerinime dönüştürülmüş, ölçülen kuvvet değeri Denklem (3.25), Denklem (3.26) ve Denklem (3.27)'de kullanılarak mühendislik gerilmesi elde edilmiştir. Mühendislik gerilmesini gerçek gerilmeye dönüştürebilmek için Denklem (3.24) kullanılmıştır.

Ayrıca Instron Universal Malzeme Test Cihazı kuvvete karşı sehim değerlerini alırken numunenin alt tarafına bağlanan "Gerinim Ölçer" ile "Datalogger"a bağlı bilgisayardan kuvvete karşı gerinim değerleri elde edilmiştir. Instron Universal Malzeme Test Cihazı için yapılan mühendislik gerilmesini gerçek gerilme değerine dönüştürme işlemi "Gerinim Ölçer" sistemi için de yapılmıştır. Böylece aynı zamanda hem Instron Universal Malzeme Test Cihazı hem de "Gerinim Ölçer" ile gerçek gerinim ve gerilme değerleri elde edilmiştir.

Eğilme deneyi sonrası hasara uğramış numune Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11 Eğilme deneyi sonrasında hasara uğramış eğilme numunesi

5.5 Bulgular

Çekme ve eğilme deneyleri ile elde edilen numunelerin mekanik özellikleri teorik ve sayısal analiz ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

5.5.1 Çekme deneylerinden elde edilen bulgular

Çekme deneyleri Instron Universal Malzeme Test Cihazı ve “Gerinim Ölçer” ile toplam 12 adet yapılmıştır. Instron Universal Malzeme Test Cihazı ve “Gerinim Ölçer” ile yapılan deney verileri kendi aralarında gruplandırılmıştır. Instron Universal Malzeme Test Cihazının bağlı olduğu 25 kN kapasiteye bağlı yük hücresi kuvvet ve uzama miktarını ölçtüğü için mühendislik gerinimi ve mühendislik gerilmesi elde edilmiştir. “Gerinim Ölçer” ve sayısal analizden elde edilen veriler gerçek gerinim ve gerçek gerilim olduğu için Instron Universal Malzeme Test cihazından elde edilen veriler gerçek gerinim ve gerçek gerilme değerlerine dönüştürülmüştür. Instron Universal Malzeme Test Cihazı ile elde edilen gerilme ve gerinim değerlerinin ortalaması ayrı alınmış, Instron Universal Malzeme Test Cihazının yük hücresinin bağlı olduğu “Gerinim Ölçer” ile elde edilen gerinim ve gerilme değerlerinin ayrı olarak ortalamaları alınmıştır ve teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Çekme deneyi sonucunda elde edilen gerilme - gerinim değerleri ve bu değerlerin teorik değerlere göre farklılıkları Tablo 5.3 ve Tablo 5.4’te verilmiştir.

Tablo 5.3 Çekme numunelerine ait deneysel ve teorik olarak elde edilen gerilme ve gerinim değerleri

Yük (N)	Instron Universal Malzeme Test Cihazı		“Gerinim Ölçer”		Teorik Değerler	
	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
250	$3,10 \times 10^{-4}$ $\pm 1,4 \times 10^{-5}$	5,9 $\pm 0,09$	$3,8 \times 10^{-4}$ $\pm 2,7 \times 10^{-5}$	5,5 $\pm 0,02$	$4,19 \times 10^{-4}$	5,6
500	$7,20 \times 10^{-4}$ $\pm 5,9 \times 10^{-5}$	11,3 $\pm 0,05$	$7,6 \times 10^{-4}$ $\pm 4 \times 10^{-5}$	11,1 $\pm 0,03$	$8,38 \times 10^{-4}$	11,1
1000	$1,51 \times 10^{-3}$ $\pm 1,6 \times 10^{-4}$	22,3 $\pm 0,06$	$1,54 \times 10^{-3}$ $\pm 9 \times 10^{-5}$	22,3 $\pm 0,02$	$1,67 \times 10^{-3}$	22,3
2000	$3,45 \times 10^{-3}$ $\pm 7,2 \times 10^{-4}$	44,6 $\pm 0,19$	$3,26 \times 10^{-3}$ $\pm 2 \times 10^{-4}$	44,6 $\pm 0,04$	$3,35 \times 10^{-3}$	44,6
3000	$5,55 \times 10^{-3}$ $\pm 2,2 \times 10^{-4}$	67,0 $\pm 0,30$	$4,56 \times 10^{-3}$ $\pm 3 \times 10^{-4}$	66,9 $\pm 0,03$	$5,02 \times 10^{-3}$	67,0
4000	$8,05 \times 10^{-3}$ $\pm 4,3 \times 10^{-4}$	89,5 $\pm 0,16$	$6,21 \times 10^{-3}$ $\pm 5 \times 10^{-5}$	89,5 $\pm 0,07$	$6,68 \times 10^{-3}$	89,5
5000	$1,09 \times 10^{-2}$ $\pm 7,1 \times 10^{-4}$	112,3 $\pm 0,14$	$7,58 \times 10^{-3}$ $\pm 1,4 \times 10^{-3}$	112,1 $\pm 0,09$	$8,35 \times 10^{-3}$	112,0
6000	$1,42 \times 10^{-2}$ $\pm 9,6 \times 10^{-4}$	135,1 $\pm 0,16$	$9,23 \times 10^{-3}$ $\pm 1,2 \times 10^{-3}$	134,9 $\pm 0,15$	1×10^{-2}	135,0
7000	$1,80 \times 10^{-2}$ $\pm 1,4 \times 10^{-3}$	158,2 $\pm 0,21$	$1,08 \times 10^{-2}$ $\pm 1,7 \times 10^{-3}$	157,9 $\pm 0,23$	$1,17 \times 10^{-2}$	157,0
8000	$2,29 \times 10^{-2}$ $\pm 2,2 \times 10^{-3}$	181,6 $\pm 0,35$	$1,30 \times 10^{-2}$ $\pm 2,8 \times 10^{-3}$	181,1 $\pm 0,40$	$1,33 \times 10^{-2}$	180
8864	$2,63 \times 10^{-2}$ $\pm 3,1 \times 10^{-3}$	196,9 $\pm 0,43$	$1,6 \times 10^{-2}$ $\pm 3,1 \times 10^{-3}$	201,3 $\pm 0,50$	$1,48 \times 10^{-2}$	199,9

Tablo 5.4 Çekme deneyi verilerinin teorik verilere göre hata değerleri

Yük (N)	Instron Universal Malzeme Test Cihazı		“Gerinim Ölçer”	
	Gerinim Hata (%)	Gerilme Hata (%)	Gerinim Hata (%)	Gerilme Hata (%)
250	26	5,36	9,31	1,79
500	14,08	1,8	9,31	0
1000	9,58	0	7,78	0
2000	9,18	0	2,69	0
3000	10,56	0	9,16	0,15
4000	20,51	0	7,04	0
5000	30,54	0,27	9,22	0,09
6000	42,00	0,07	7,77	0,07
7000	53,85	0,76	7,69	0,57
8000	72,18	0,89	2,26	0,61
8864	77,70	1,5	8,1	0,65

Tablo 5.4’den de görüleceği gibi “Gerinim Ölçer”den elde edilen gerilme değerleri ile teorik değerler arasında en fazla %1,79 değerinde farklılık vardır. Gerinim değerinde ise teorik değerler ile Instron Universal Malzeme Test Cihazının verdiği değerler arasında uyumsuzluk görülürken, “Gerinim Ölçer”in ölçtüğü gerinim değerleri ile teorik değerler birbiri ile daha uyumludur. Gerilme-gerinim değerlerinin standart sapma değerlerine bakıldığında tutarlı ve düzgün bir dağılım gösterdiği görülmüştür.

Test numunesinin Young’s Modülü değerinin deney verileri ile teorik değer arasındaki farklılık Tablo 5.5’de gösterilmiştir.

Tablo 5.5 Çekme numunelerinin deneysel elde edilen Young's Modül değerlerinin teorik değere göre % hataları

	Instron Universal Malzeme Test Cihazı	“Gerinim Ölçer”
Yük (N)	“E” Üzerinde Hata (%)	“E” Üzerinde Hata (%)
250	43,57	9,19
500	18,40	10,18
1000	11,41	9,24
2000	2,48	3,21
3000	8,93	10,67
4000	16,13	8,72
5000	22,28	11,56
6000	28,23	10,25
7000	33,70	10,29
8000	40,18	5,09
8864	43,52	5,10

Tablo 5.5'den de görüleceği gibi “Gerinim Ölçer” ile elde edilen Young's Modülü değerleri teorik Young's Modülü değeri ile daha uyumlu iken, Instron Universal Malzeme Test Cihazından elde edilen Young's Modülü değeri teorik Young's Modülü değeri ile uyumlu değildir.

5.5.2 Eğilme deneylerinden elde edilen bulgular

Instron Universal Malzeme Test Cihazı ve “Gerinim Ölçer” ile toplam 12 adet eğilme deneyi yapılmıştır. Instron Universal Malzeme Test Cihazı kuvvet ve sehim miktarını ölçtüğü için mühendislik gerinimi ve mühendislik gerilmesi elde edilmiştir. “Gerinim Ölçer” ve sayısal analizden elde edilen veriler gerçek gerinim ve gerçek gerilim olduğu için Instron Universal Malzeme Test Cihazından elde edilen veriler gerçek gerinim ve gerçek gerilme değerlerine dönüştürülmüştür. Instron Universal Malzeme Test Cihazı ve “Gerinim Ölçer” ile elde edilen belirli kuvvetlere karşılık gelen gerinim ve gerilme değerlerinin kendi aralarında ortalaması alınmıştır. Eğilme numunelerinden deneysel olarak elde edilen gerçek gerilme ve gerinim

değerleri Tablo 5.6'da, bu değerlerin teorik değerler ile farkı ise Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.6 Eğilme numunelerine ait deneysel ve teorik olarak elde edilen gerilme ve gerinim değerleri

Yük (N)	Instron Universal Malzeme Test Cihazı		"Gerinim Ölçer"		Teorik Değerler	
	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
100	$7,75 \times 10^{-3}$ $\pm 7,3 \times 10^{-4}$	112,7 $\pm 0,69$	$7,50 \times 10^{-3}$ $\pm 7,1 \times 10^{-4}$	111,7 $\pm 3,10$	$8,35 \times 10^{-3}$	112
125	$1,01 \times 10^{-2}$ $\pm 5,2 \times 10^{-4}$	141,1 $\pm 0,52$	$9,80 \times 10^{-3}$ $\pm 6 \times 10^{-4}$	140,0 $\pm 0,07$	$1,04 \times 10^{-2}$	140
150	$1,28 \times 10^{-2}$ $\pm 1,2 \times 10^{-3}$	169,4 $\pm 0,30$	$1,19 \times 10^{-2}$ $\pm 1,1 \times 10^{-3}$	167,4 $\pm 0,04$	$1,25 \times 10^{-2}$	169
175	$1,39 \times 10^{-2}$ $\pm 3,5 \times 10^{-4}$	195,3 $\pm 0,47$	$1,37 \times 10^{-2}$ $\pm 1,2 \times 10^{-3}$	197,8 $\pm 0,81$	$1,46 \times 10^{-2}$	197
200	$1,56 \times 10^{-2}$ $\pm 1,6 \times 10^{-3}$	225,3 $\pm 0,26$	$1,54 \times 10^{-2}$ $\pm 1,3 \times 10^{-3}$	225,2 $\pm 2,27$	$1,66 \times 10^{-2}$	226
225	$1,75 \times 10^{-2}$ $\pm 6,2 \times 10^{-3}$	252,7 $\pm 0,68$	$1,69 \times 10^{-2}$ $\pm 5,8 \times 10^{-3}$	252,6 $\pm 2,01$	$1,87 \times 10^{-2}$	255
250	$1,99 \times 10^{-2}$ $\pm 1,9 \times 10^{-3}$	280,1 $\pm 1,57$	$1,86 \times 10^{-2}$ $\pm 1,1 \times 10^{-2}$	272,9 $\pm 3,21$	$2,07 \times 10^{-2}$	284

Tablo 5.6'ya bakıldığında Instron Universal Malzeme Test Cihazı ile ölçülen gerilme-gerinim değerlerinin standart sapma değerleri tutarlı ve düzgün dağılımlı olduğu görülmektedir.

Tablo 5.7 Eğilme deneyi verilerinin teorik verilere göre hata değerleri

Yük (N)	Instron Universal Malzeme Test Cihazı		“Gerinim Ölçer”	
	Gerinim Hata (%)	Gerilme Hata (%)	Gerinim Hata (%)	Gerilme Hata (%)
100	7,18	0,63	10,18	0,27
125	2,89	0,79	5,78	0
150	2,4	0,24	4,8	0,95
175	4,79	0,86	6,16	0,41
200	6,02	0,31	7,23	0,35
225	6,42	0,90	9,63	0,95
250	3,86	1,37	10,15	3,91

Tablo 5.7’den de görüleceği gibi Instron Universal Malzeme Test Cihazı ile ölçülen gerilme değerlerin teorik değerler ile arasında en fazla %1,37 değerinde farklılık vardır. Gerinim değerinde ise teorik değer ile “Gerinim Ölçer” cihazının verdiği değerler arasında Instron Universal Malzeme Test Cihazına göre daha fazla uyumsuzluk görülürken, Instron Universal Malzeme Test Cihazı’nın gerinim değerleri ile teorik değerler daha uyumludur.

Test numunesinin deneysel Young’s Modülü değerleri ile teorik değer arasındaki farklılık Tablo 5.8’de gösterilmiştir.

Tablo 5.8 Eğilme numunelerinin deneysel elde edilen Young’s Modül değerlerinin teorik değere göre % hataları

Yük (N)	Instron Universal Malzeme Test Cihazı	“Gerinim Ölçer”
	“E” Üzerinde Hata (%)	“E” Üzerinde Hata (%)
100	9,70	12,35
125	5,39	7,77
150	0,16	6,12

Tablo 5.8 devam ediyor.

175	5,99	8,92
200	8,95	10,32
225	8,93	12,75
250	6,18	10,68

Tablo 5.8 incelendiğinde Instron Universal Malzeme Test Cihazı ile elde edilen Young's Modülü değeri teorik Young's Modülü değerinden en fazla %9,70 farklı çıkmışken, "Gerinim Ölçer" ile elde edilen Young's Modülü değeri teorik Young's Modülü değerinden en fazla %12,75 farklı çıkmıştır.

5.5.3 Çekme numunesi için yapılan sayısal analiz ile elde edilen bulgular

"Kök_Üst" bölgesinin oryantasyonlarına sahip Epoksi-ECam kompozit malzemesinden yapılan çekme numunesinin sayısal analizi yapılmadan önce modelin sınır koşullarının, yüklerin doğru yerden verilip doğru sonuçlara ulaşıp ulaşılmadığını görmek için, test numunesi ile aynı boyutlara sahip hem homojen katı hem de katmanlı olarak Yapısal Çelik malzemesinden model hazırlanmıştır. Sınır şartları olarak numunenin kalınlık boyunca olan bir yüzeyinin, "Fixed Support" komutu ile x, y ve z yönlerine hareketi engellenmiştir. Kalınlık boyunca olan diğer yüzeyinin normali yönünde kuvvet verilmiştir. Test numunesinin deneysel verilerinin doğru olup olmadığını görebilmek için modelin sayısal analiz sonuçları teorik değerler ile karşılaştırılmış ve daha sonra deneysel veriler ile sayısal analiz sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Test numunesi ile aynı yükler altında analize tabi tutulan Yapısal Çelik malzemesinin homojen katı halde ve yüzey haline getirilerek bütün katmanlarda 0° oryantasyonda yüke karşılık elde edilen Young's Modülü, gerilme, gerinim, toplam deformasyon değerleri, teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Homojen katı ve 0° derece oryantasyon ile modellenen Yapısal Çelik malzemesinin yüke karşı vermiş olduğu Young's Modülü, gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri Tablo 5.9 ve Tablo 5.10'da verilmiştir.

Tablo 5.9 homojen katı olarak modellenen Yapısal Çelik malzemesinin mekanik özellikleri

F= 1000 N	Teorik Değer	Sayısal Değer	Hata(%)
Gerilme (MPa)	22,222	22,222	0
Gerinim (mm/mm)	$1,11 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-4}$	0
Toplam Deformasyon (mm)	$1,67 \times 10^{-2}$	$1,67 \times 10^{-2}$	0
Young's Modülü (MPa)	2×10^5	2×10^5	0

Tablo 5.9'a bakıldığında gerilme, gerinim, toplam deformasyon ve Young's Modülü değerlerinde hata çıkmamıştır.

Tablo 5.10 0° derece ile tabakalandırılmış Yapısal Çelik malzemesinin mekanik özellikleri

F=1000 N	Teorik Değer	Sayısal Değer	Hata (%)
Gerilme (MPa)	22,2	20,2	9,09
Gerinim (mm/mm)	$1,11 \times 10^{-4}$	$1,01 \times 10^{-4}$	9,01
Toplam Deformasyon (mm)	$1,67 \times 10^{-2}$	$1,55 \times 10^{-2}$	7,18
Young's Modülü (MPa)	2×10^5	2×10^5	0

Tablo 5.10 incelendiğinde tabakalandırılmış ve malzemesi Yapısal Çelik olan modelde gerilme değeri teorik değere göre %9,09, gerinim değeri ise teorik değere göre %9,01 hatalı çıkmıştır.

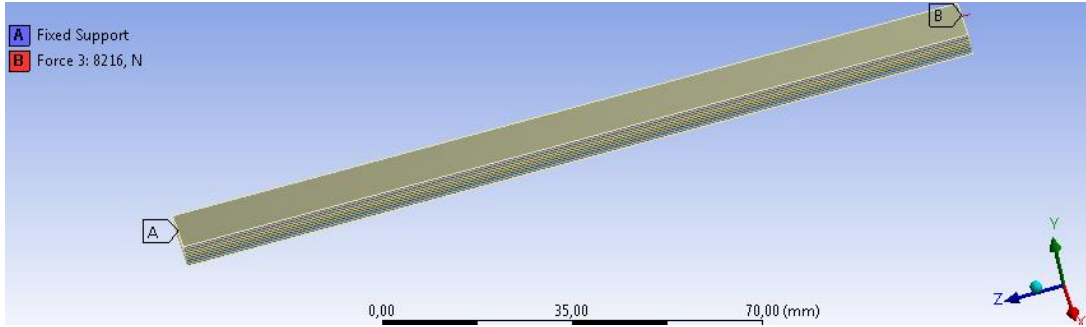
Sayısal modelin kompozit malzemelerde doğru sonuç verip vermediğini görmek için, model malzemesi Epoksi-ECam seçilerek, bütün katmanlara 0° oryantasyon verilerek ve sınır şartları homojen katı ve 0° ile tabakalandırılmış Yapısal Çelik ile aynı verilerek kontrol edilmiştir. Sayısal analiz sonucunda elde edilen gerilme, gerinim, toplam deformasyon ve Young's Modülü değeri Tablo 5.11'de verilmiştir.

Tablo 5.11 0° derece ile tabakalandırılmış Epoksi-Ecam malzemesinin mekanik özellikleri

F= 1000 N	Teorik Değer	Sayısal Değer	Hata (%)
Gerilme (MPa)	22,2	20,3	8,78
Gerinim (mm/mm)	$4,94 \times 10^{-4}$	$4,50 \times 10^{-4}$	8,78
Toplam Deformasyon (mm)	$7,41 \times 10^{-2}$	$6,76 \times 10^{-2}$	8,79
Young's Modülü (MPa)	45×10^3	45×10^3	0

Tablo 5.10 ve Tablo 5.11'e bakıldığında hem gerilme hem de gerinim değerleri için sayısal analiz ile teorik değer arasında yaklaşık %9 farklılık çıkmıştır.

“Kök_Üst” bölgesi ile aynı kalınlığa, katman sayısına, malzemeye, fiber oryantasyonlara ve diziliş sırasına sahip çekme numunesi modeli için sınır şartları homojen katı ve 0° derece ile tabakalandırılmış Yapısal Çelik ve Epoksi-ECam ile aynı verilmiştir. Çekme numunesinin modeli, sınır şartları ile birlikte Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.12 Çekme numunesinin modeli

Çekme numunesinin sayısal analiz verilerini deneysel verilerle karşılaştırmak için, numune modeline çekme deneyinde elde edilen kuvvetler verilerek analiz yapılmıştır. Sayısal analiz sonucunda elde edilen gerinim ve gerilme değerleri Tablo 5.12'de verilmiştir.

Tablo 5.12 “Kök_Üst” bölgesi ile aynı oryantasyonlara sahip tabakalandırılmış Epoksi-Ecam malzemesinin mekanik özellikleri

Sayısal Analiz Sonuçları		
Yük (N)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
250	4×10^{-4}	5,5
500	$8,2 \times 10^{-4}$	11,1
1000	$1,6 \times 10^{-3}$	22,4
2000	$3,2 \times 10^{-3}$	44,2
3000	$4,8 \times 10^{-3}$	67,4
4000	$6,5 \times 10^{-3}$	89,9
5000	8×10^{-3}	111,0
6000	$9,7 \times 10^{-3}$	135,9
7000	$1,12 \times 10^{-2}$	158,2
8000	$1,31 \times 10^{-2}$	178,21
8864	$1,46 \times 10^{-2}$	198,96

Sayısal analizde elde edilen gerinim ve gerilme değerleri teorik değerler ile karşılaştırılmıştır (Tablo 5.13).

Tablo 5.13 Çekme numunesi için sayısal analizde kuvvete göre gerinim-gerilme değerlerinin teorik değerler ile karşılaştırılması

Sayısal Analiz		
Yük	Gerinim Hata (%)	Gerilme Hata (%)
250	4,53	1,79
500	2,15	0,00
1000	4,19	0,45
2000	4,48	0,90
3000	4,38	0,60

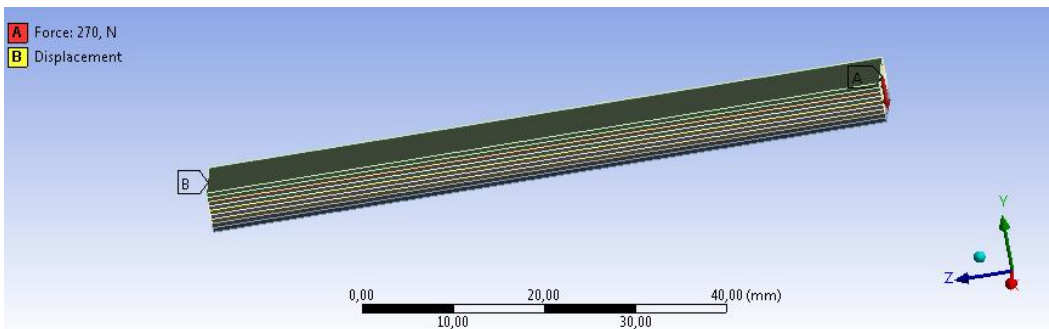
Tablo 5.13 devam ediyor.

4000	2,69	0,45
5000	4,19	0,89
6000	3,00	0,67
7000	4,27	0,76
8000	1,50	0,99
8864	1,35	0,52

Tablo 5.13'e bakıldığında; çekme numunesi için yapılan sayısal analiz sonuçlarından gerilme değerlerinde, teorik gerilme değerlerinden en fazla %1,79, gerinim değerlerinde ise teorik gerinim değerinden en fazla %4,53 farklı sonuç bulunmuştur.

5.5.4 Eğilme numunesi için yapılan sayısal analiz ile elde edilen bulgular

Eğilme numunesi için sayısal modelin boyutları eğilme numunesi ile aynı genişlikte ve kalınlıkta fakat eğilme numunesi uzunluğunun yarısı kadar, 75 mm, alınmıştır. Bunun sebebi Ansys 14.5.7 sonlu elemanlar programında kuvvetin tek noktadan değil kuvveti yüzeye yayarak vermesidir. Sınır şartları olarak numunenin kalınlık boyunca olan bir yüzeyi "Displacement" komutu ile x ve z yönlerinde serbest, y yönünde hareket edemez şekilde ayarlanmıştır. Kalınlık boyunca olan diğer yüzeyi "Symmetry Region" komutu ile simetrik yüzey seçilerek bu yüzey boyunca kuvvet uygulanmıştır. Eğilme numunesinin modeli sınır şartları ile birlikte Şekil 5.13'de verilmiştir.



Şekil 5.13 Eğilme numunesinin modeli

Eğilme numunesinin sayısal analiz verileri ile deneysel verileri karşılaştırmak için numune modeline eğilme deneyinde elde edilen kuvvetler verilerek sayısal analiz yapılmıştır. Sayısal analiz sonucunda elde edilen gerinim ve gerilme değerleri Tablo 5.14’de verilmiştir.

Tablo 5.14 Eğilme numunesi için kuvvete göre gerinim-gerilme değerlerinin sayısal analiz sonuçları

Sayısal Analiz Sonuçları		
Yük (N)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
100	8×10^{-3}	111,2
125	$1,02 \times 10^{-2}$	143,4
150	$1,24 \times 10^{-2}$	175,1
175	$1,44 \times 10^{-2}$	203,6
200	$1,60 \times 10^{-2}$	222,9
225	$1,84 \times 10^{-2}$	252,9
250	$2,04 \times 10^{-2}$	280,5

Sayısal analizde elde edilen gerinim ve gerilme değerleri teorik değerler ile karşılaştırılmıştır (Tablo 5.15).

Tablo 5.15 Eğilme numunesi için sayısal analizde kuvvete göre gerinim-gerilme değerlerinin teorik değerler ile karşılaştırılması

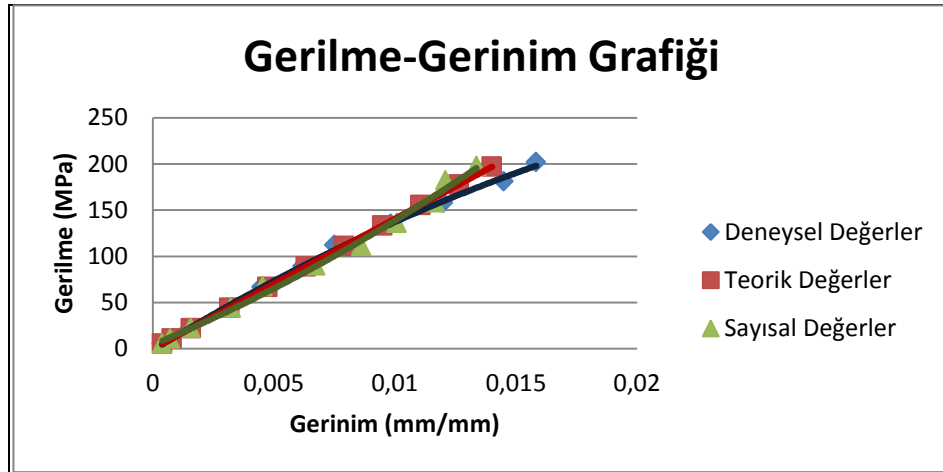
Sayısal Analiz		
Yük (N)	Gerinim Hata (%)	Gerilme Hata (%)
100	4,19	0,71
125	1,92	2,43
150	0,80	3,61
175	1,37	3,35
200	3,61	1,37
225	1,60	0,82
250	1,45	1,23

Tablo 5.15’den görüleceği gibi eğilme numunesi için yapılan sayısal analiz sonuçlarından gerilme değerleri ile teorik değerler arasında en fazla %3,61, gerinim değerleri ile teorik değerler arasında en fazla %4,19 farklılık bulunmuştur.

6. SAYISAL VE DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Kanat normal çalışma koşullarında hissedebileceği en kritik gerilme ve gerinim değerlerine dayanım gösterecek şekilde optimize edilmiş, optimum oryantasyonda tasarımı yapılan kanadın "Kök_Üst" bölgesi numunelerinin mekanik özelliklerini incelemek amacıyla numunelere çekme ve üç noktalı eğilme tahribatlı test yöntemleri uygulanmıştır. "Kök_Üst" bölgesine ait numunelerin gerilme, gerinim ve Young's Modülü değerleri sayısal, deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Numunelerin sayısal analizinden ve deneysel çalışmalarından elde edilen değerler numuneler için hesaplanan teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Instron Universal Malzeme Test Cihazı ile yapılan çekme ve eğilme testlerinden elde edilen yük ve deformasyon değerleri ile mühendislik gerilme-gerinim değerleri elde edilmiştir. Numuneler için yapılan sayısal analizden elde edilen değerler gerçek gerilme-gerinim değerleri olduğu için, deneyden elde edilen veriler gerçek gerilme-gerinim değerlerine çevrilmiştir. Deneylerden elde edilen gerilme değerleri ile sonlu eleman analizinden elde edilen gerilme değerleri arasında uyumluluk görülmüştür.

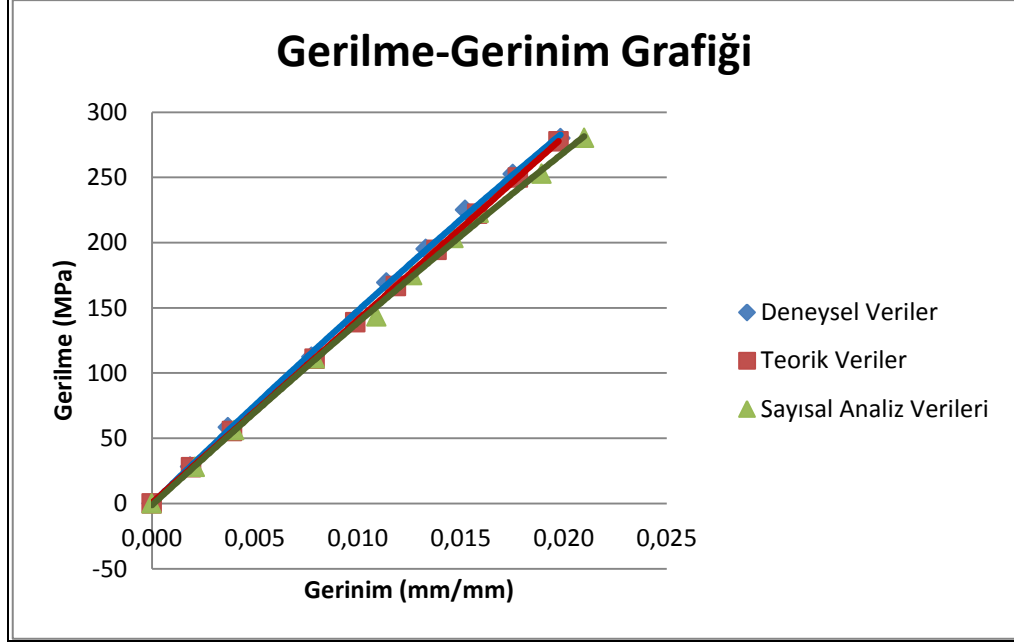
Kanadın "Kök_Üst" bölgesine ait numunelerin çekme deneylerinden, sonlu elemanlar analiz programından elde edilen gerilme-gerinim değerleri ve numuneler için hesaplanan teorik değerler Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 "Kök_Üst" bölgesi çekme numunesinin deneysel, teorik ve sayısal gerilme-gerinim grafiği

Şekil 6.1'de görüldüğü üzere, kanadın "Kök_Üst" bölgesinin elastik bölgesinde deneysel değerler ile teorik değerler arasında %4,97, sayısal değerler ile teorik değerler arasında %2,59 farklılık tespit edilmiştir.

Kanadın “Kök_Üst” bölgesine ait numunelerin eğilme deneylerinden, sonlu elemanlar analiz programından elde edilen gerilme-gerinim değerleri ve numuneler için hesaplanan teorik değerler grafik Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 “Kök_Üst” bölgesi eğilme numunesinin deneysel, teorik ve sayısal gerilme-gerinim grafiği

Şekil 6.2’de görüldüğü üzere, kanadın “Kök_Üst” bölgesinin elastik bölgesinde deneysel değerler ile teorik değerler arasında %3,94, sayısal değerler ile teorik değerler arasında %2,99 farklılık tespit edilmiştir.

Çekme ve eğilme deneylerinde hesaplanan standart sapma değerleri küçük olduğu için Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de gösterilmemiştir.

Optimum kanat tasarımında kanadın “Kök_Üst” bölgesi numunelerinin çekme deneyi ve analiz sonuçlarından elde edilen mekanik özellikler Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Çekme deneylerinden ve analizinden elde edilen gerinim sonuçları

Yükler (N)	Sayısal Analiz Sonucu (mm/mm)	Teorik Hesaplama Sonucu (mm/mm)	Deney Sonucu (mm/mm)	Sayısal ve Teorik Hata (%)	Deneysel ve Teorik Hata (%)
250	4×10^{-4}	$4,19 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-4}$	4,53	9,31
500	$8,2 \times 10^{-4}$	$8,38 \times 10^{-4}$	$7,6 \times 10^{-4}$	2,15	9,31
1000	$1,6 \times 10^{-3}$	$1,67 \times 10^{-3}$	$1,54 \times 10^{-3}$	4,19	7,78
2000	$3,2 \times 10^{-3}$	$3,35 \times 10^{-3}$	$3,26 \times 10^{-3}$	4,48	2,69
3000	$4,8 \times 10^{-3}$	$5,02 \times 10^{-3}$	$4,56 \times 10^{-3}$	4,38	9,16
4000	$6,5 \times 10^{-3}$	$6,68 \times 10^{-3}$	$6,21 \times 10^{-3}$	2,69	7,04
5000	8×10^{-3}	$8,35 \times 10^{-3}$	$7,58 \times 10^{-3}$	4,19	9,22
6000	$9,7 \times 10^{-3}$	1×10^{-2}	$9,23 \times 10^{-3}$	3,00	7,77
7000	$1,12 \times 10^{-2}$	$1,17 \times 10^{-2}$	$1,08 \times 10^{-2}$	4,27	7,69
8000	$1,31 \times 10^{-2}$	$1,33 \times 10^{-2}$	$1,30 \times 10^{-2}$	1,50	2,26
8864	$1,46 \times 10^{-2}$	$1,48 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	1,35	8,1

Tablo 6.2 Çekme deneylerinden ve analizinden elde edilen gerilme sonuçları

Yükler (N)	Sayısal Analiz Sonucu (MPa)	Teorik Hesaplama Sonucu (MPa)	Deney Sonucu (MPa)	Sayısal ve Teorik Hata (%)	Deneysel ve Teorik Hata (%)
250	5,5	5,6	5,5	1,79	1,79
500	11,1	11,1	11,1	0	0
1000	22,4	22,3	22,3	0,45	0
2000	44,2	44,6	44,6	0,90	0
3000	67,4	67,0	66,9	0,60	0,15
4000	89,9	89,5	89,5	0,45	0
5000	111,0	112,0	112,1	0,89	0,09

Tablo 6.2 devam ediyor.

6000	135,9	135,0	134,9	0,67	0,07
7000	158,2	157,0	157,9	0,76	0,57
8000	178,21	180	181,1	0,99	0,61
8864	198,96	199,99	201,3	0,52	0,65

Çekme deneyinden elde edilen gerilme değeri ile sayısal analizden elde edilen gerilme değeri arasında en fazla %1,62 farklılık, çekme deneyinden elde edilen gerilme değeri ile sayısal analizden elde edilen gerilme değeri arasında en fazla %9,59 farklılık elde edilmiştir.

Optimum kanat tasarımında kanadın “Kök_Üst” bölgesi numunelerinin eğilme deneyi ve analiz sonuçlarından elde edilen mekanik özellikler Tablo 6.3 ve Tablo 6.4’de verilmiştir.

Tablo 6.3 Eğilme deneylerinden ve analizinden elde edilen gerilme değerleri

Yük (N)	Sayısal Analiz Sonucu (mm/mm)	Teorik Hesaplama Sonucu (mm/mm)	Deney Sonucu (mm/mm)	Sayısal ve Teorik Hata (%)	Deneysel ve Teorik Hata (%)
100	8×10^{-3}	$8,35 \times 10^{-3}$	$7,75 \times 10$	4,19	7,18
125	$1,02 \times 10^{-2}$	$1,04 \times 10^{-2}$	$1,01 \times 10$	1,92	2,89
150	$1,24 \times 10^{-2}$	$1,25 \times 10^{-2}$	$1,28 \times 10$	0,80	2,4
175	$1,44 \times 10^{-2}$	$1,46 \times 10^{-2}$	$1,39 \times 10$	1,37	4,79
200	$1,60 \times 10^{-2}$	$1,66 \times 10^{-2}$	$1,56 \times 10$	3,61	6,02
225	$1,84 \times 10^{-2}$	$1,87 \times 10^{-2}$	$1,75 \times 10$	1,60	6,42
250	$2,04 \times 10^{-2}$	$2,07 \times 10^{-2}$	$1,99 \times 10$	1,45	3,86

Tablo 6.4 Eğilme deneylerinden ve analizinden elde edilen gerilme değerleri

Yük (N)	Sayısal Analiz Sonucu (mm/mm)	Teorik Hesaplama Sonucu (mm/mm)	Deney Sonucu (mm/mm)	Sayısal ve Teorik Hata (%)	Deneysel ve Teorik Hata (%)
100	111,2	112	112,7	0,71	0,63
125	143,4	140	141,1	2,43	0,79
150	175,1	169	169,4	3,61	0,24
175	203,6	197	195,3	3,35	0,86
200	222,9	226	225,3	1,37	0,31
225	252,9	255	252,7	0,82	0,90
250	280,5	284	280,1	1,23	1,37

Eğilme deneyinden elde edilen gerilme değeri ile sayısal analizden elde edilen gerilme değeri arasında en fazla %4,08 farklılık, eğilme deneyinden elde edilen gerilme değeri ile sayısal analizden elde edilen gerilme değeri arasında en fazla %4,89 farklılık elde edilmiştir.

7. ELDE EDİLEN VERİLER VE TARTIŞMA

Sayısal çalışmada rüzgar türbin kanadının üzerine gelen basınç değerine ve kanadın geometrisine bakılarak malzeme kalınlığı ve malzeme seçimi yapılmıştır. Kanada ait numunelerin deneysel çalışmalarına geçilmeden önce, sayısal analiz ile kanat üzerinde oluşan maksimum gerilme tespit edilmiş ve kompozit malzemenin çeşitli fiber oryantasyonları ile kanat üzerindeki gerilme değerleri düşürülmeye çalışılmıştır. Kanadın gerilme ve gerinim değerini etkileyen en kalın bölgesindeki (“Kök_Üst”) kompozit malzemenin mekanik özelliklerini sayısal analizden elde edilen değerler ile karşılaştırmak için, bu bölgenin kompozit malzemesi ve fiber oryantasyonları ile aynı olacak şekilde çekme ve eğilme numuneleri hazırlanıp, bu numunelerin çekme ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca bu bölgenin çekme ve eğilme numuneleri için teorik hesaplamalar ve sayısal analizler yapıлып, deneylerden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışma, Instron Universal Malzeme Test Cihazının kendi LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ve yük hücresi kullanılarak, Instron Universal Malzeme Test Cihazında bulunan BlueHill programı ile yapılmıştır. Bunun yanında Instron Universal Malzeme Test Cihazının yük hücresinden alınan bilgiler “Gerinim Ölçer” sistemine de girdi olarak verilmiştir. Böylece gerçek gerinim değerinin ölçüldüğü deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler teorik değerler ile karşılaştırıldığında;

- Çekme deneyinde Instron Universal Malzeme Test Cihazından alınan numune gerilme değeri maksimum yükte %1,5, gerinim değeri %77,70 hatalı elde edilirken, “Gerinim Ölçer”den alınan maksimum yükte numune gerilme değeri %0,65, gerinim değeri %8,1 hatalı bulunmuştur.
- Eğilme deneyinde ise Instron Universal Malzeme Test Cihazından alınan gerilme değeri maksimum yükte %1,37, gerinim değeri %3,86 hatalı elde edilirken, “Gerinim Ölçer”den alınan maksimum yükte numunenin gerilme değeri %3,91, gerinim değeri %10,15 hatalı bulunmuştur.

Deneysel çalışma sonunda bulunan gerilme ve gerinim değerlerindeki hata dikkat çekicidir. Instron Universal Malzeme Test Cihazında ve “Gerinim Ölçer”de aynı yük

hücresi kullanılmasına rağmen gerilme değerlerinde farklı oranlarda hata bulunmuştur. Bunun sebebi; Instron Universal Malzeme Test Cihazının Blue Hill programı, numune üzerinde ölçtüğü gerilme değerlerinde ortalama yapmaktadır, “Gerinim Ölçer” sistemi ise tüm değerleri anlık almaktadır. Bu durum sonuçlarda farklılık yaratmaktadır. Bunun yanında anlık ölçümlerde dış etkilerin de hata yarattığı bilinmektedir. Gerinim değerlerindeki farklılıklar ise daha çok ölçme tekniğinin değişikliğinden kaynaklanmaktadır. Çekme deneyinde maksimum yükte Instron Universal Malzeme Test Cihazından elde edilen gerinim değerlerinin % 77,70 farklı çıkmasının sebebi; malzeme deformasyona uğrarken sistemde bulunan elemanlar da deformasyona uğmaktadır ve Instron Universal Malzeme Test Cihazının LVDT sistemi malzeme deformasyonunu, bu elemanların deformasyonunu da hesaba katarak bulmaktadır. Bu yüzden çekme deneyinde Instron Universal Malzeme Test Cihazından elde edilen gerinim değerleri yüksek oranda hatalıdır. “Gerinim Ölçer”den elde edilen gerçek gerinim değerleri, çekme numunesi için hesaplanan teorik değerler ile kıyaslandığında en fazla %9,31 hatalı çıkmıştır. Bunun sebebi; “Gerinim Ölçer”in, gerinim değeri ölçülmek istenen yöne paralel yerleştirilmesi gerektiğinden, malzeme üzerine istenen yön ile açı yaparak yapıştırılması hataya yol açmış olabilir. Deneylerde yapılan hatalara göre, çekme deneyinde “Gerinim Ölçer” ile elde edilen sonuçların, eğilme deneyinde ise Instron Universal Malzeme Test Cihazı ile elde edilen sonuçların numuneler için hesaplanan teorik değerlere daha yakın olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarının hem teorik hem de sayısal analiz sonuçlarıyla uyumlu olması “Kök_Üst” bölgesine ait kompozit malzemenin mekanik özelliğinin belirlenmesini sağlamıştır.

“Kök_Üst” bölgesine ait numunelerin sayısal çalışmasında hem çekme hem de eğilme analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizler sonucunda gerçek gerilme ve gerinim değerleri bulunmuş ve numuneler için hesaplanan teorik değerler ile karşılaştırılmıştır.

Analizlerden elde edilen veriler ile teorik değerler karşılaştırıldığında;

- Çekme analizinde maksimum yükte numunenin gerilme değeri %0,52, gerinim değeri ise %1,35 hatalı bulunmuştur.
- Eğilme analizinde maksimum yükte numunenin gerilme değeri %1,37, gerinim değeri ise %3,86 hatalı bulunmuştur.

Sayısal analizde sonuçların teorik değerlere yakın çıkması, çekme ve eğilme numunelerinin modellenmesinin doğru yapıldığını, sınır koşullarının doğru verildiğini göstermektedir.

Numunelerin sayısal analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırıldığında;

- Çekme analizi ile çekme deneyi arasında maksimum yükte gerilme değerleri %1,18, gerinim değerleri %9,58 farklı iken,
- Eğilme analizi ile eğilme deneyi arasında maksimum yükte gerilme değerleri % 1,25 gerinim değerleri %1,47 farklı bulunmuştur.

Deney ve analiz sonuçları birbirine yakın çıkmasına rağmen arasında oluşan ufak farklılıklar, deneyde ve sayısal analizlerde oluşan muhtemel hatalardan kaynaklanmaktadır.

Çekme ve eğilme numuneleri için yapılan deneysel çalışmalarındaki hata kaynakları şu şekilde söylenebilir;

- Deneyde kullanılan numunelerde boşluklar ve yüzey pürüzlülüğü gözlemlenmiştir. Sayısal analizde bu tür durumlar modellenemediği için, deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçlar arasında farklılıklar vardır.
- Numunelerin üretimi sırasında fazla ya da az reçine sürülmesi, katman açılarının doğru verilmemesi malzemenin mekanik özelliklerini değiştirebilmektedir. Bu durum deneysel hatalara sebep olmaktadır.
- Deneyle ilgili test cihazından ve ortam koşullarından kaynaklı sistematik hataların, sonuçların farklı çıkmasında etkisi vardır.
- Deney numunelerinin üzerindeki "Gerinim Ölçer" pullarının, numunenin yüzeyi ile doğru açıda yapıştırılmaması deney sonuçlarını etkilemektedir.

Çekme ve eğilme numuneleri için yapılan sayısal çalışmadaki hata kaynakları şu şekilde sıralanabilir;

- Sonlu elemanlar analizinde kuvvet için verilen sınır koşullarında deney ile zaman zaman aynı koşullar sağlanamadığından sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlar ile birebir örtüşmeyebilmektedir.
- Sayısal analiz ile karmaşık problemlerin yaklaşık çözümleri elde edildiği için

deneysel sonuçlar ile birebir örtüşmeyebilir.

- Sayısal analizde oluşturulan ağ yapısının eleman tipi ve boyutu sonuçları etkilemektedir. Bu yüzden deneysel veriler ile sayısal analiz sonucu elde edilen veriler arasında hata oluşabilir.
- Sayısal analiz, analize veri olarak girilen ya da işlem sonucu elde edilen sayıları sınırlı sayıda basamaklı verir. Bazı rakamların yuvarlama ile basamak sayısının azaltılması, yuvarlama hatasına neden olur. Bu durum da sayısal analiz sonucunda bulunan değerler ile deneysel elde edilen veriler arasında fark yaratmaktadır.

Sayısal, deneysel ve teorik hesaplamaların uyumlu olması, sayısal analizde kullanılan numunelerin doğru modellenip, doğru sınır koşulları verildiğini göstermektedir. Böylece tasarımı yapılan rüzgar türbini kanadının “Kök_Üst” bölgesi için tanımlanan kompozit malzeme yapısının mekanik özellikleri, deneysel çalışmalar, sayısal analiz ve teorik hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar ile sonlu eleman analizi kullanılarak elde edilen türbin tasarımda kullanılan malzeme modelinin doğruluğunu kanıtlamaktadır. Ancak tasarımda kullanılan 10 adet bölgesel bağlantı sınır koşullarının ideal olduğu düşünülmüştür. Kanadın üretim sonucuna bağlı olarak tasarımda kabul edilen ideal bağlantı koşullarının hangi ölçüde sağlanacağı bilinmemektedir.

Optimum oryantasyonda tasarımı yapılan kanadın akış analizi, TÜBİTAK 109M419 nolu 1001 Projesi [2] referans alınarak yapılmıştır. Bu çalışma hem deneysel hem de sayısal olarak kanıtlanmış bir projedir. Kanadın akış analizinde sınır koşulları ve ağ yapısı bu proje ile aynı yapılmış ve bu akış analizi sonucunda tasarımı yapılan kanadın tork değeri 213 Nm bulunmuştur.

Akış analizi ile kanadın üzerinde oluşan basınç değerleri kullanılarak yapılan kanadın sayısal mekanik analizi sonucunda, maksimum gerilme Tseng ve Kuo'nun çalışmalarında [31] olduğu gibi “Kök” bölgesinde çıkmıştır. Yapılan sayısal analizlerin en son tasarımında maksimum gerilme “Kök_Alt” bölgesinde 172,57 MPa bulunmuştur. Kanadın en dayanımlı olması gereken ve en kalın yeri olan “Kök_Üst” bölgesidir. Bu bölgeye ait numunelerin sayısal analiz, deneysel çalışma ve teorik hesaplamalardan dayanımı tüm numune için 200 MPa olarak belirlenmiştir. Ancak katmanlı yapıda yapılan bu testlerin her bir katman için

gerilme sonuçları detaylı değerlendirildiğinde, kırılma anında 200 MPa'dan fazla gerilme bulunan katmanların varlığı gözükmemektedir. Kırılma anında yükü en fazla alan katmanlarda gerilme değerleri 250 MPa seviyelerine ulaştıkları görülmüştür. Tüm bu gözlemlerin sonucu; kanatta en dayanımlı olması gereken yerin, ("Kök_Üst") kanadın üzerinde oluşan maksimum gerilmeye dayanımlı olduğu gözükmemektedir. Kanadın deneysel çalışmaları ancak rüzgar türbini kurulduğu zaman gerçekleşmesi mümkündür.

Kanat bölgelerindeki tabaka oryantasyonlarına bakıldığı zaman "Kök_Üst" ve "Kök_Alt" bölgelerinde çoğunlukla 90° Epoksi-ECam katmanının kullanıldığı görülmüştür. "Kök" bölgesinde en yüksek kesme kuvveti, kayma gerilmesi ve eğilme momenti olduğu için bu bölgenin en dayanımlı bölge olması gerekmektedir. Bu yüzden "Kök" kısmında 90° yönünde dayanıklılığın artırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. 30°, 45° ve 60° oryantasyonlu katmanlarda ise kanadın çift yönlü dayanımının iyi olduğu görülmüştür.

Tasarımı yapılan rüzgar türbin kanadı hafiflik bakımından incelenecek olursa; optimum tasarımda yapılan kanadın çapı 4m, veter uzunluğu 0,37m, kanat malzemesi Epoksi-ECam ve kütlesi 3,7049 kg'dır. Chortis et al. [62] yapmış olduğu çalışmada ise, 1,540 m çapa ve 0,28m veter uzunluğuna sahip, farklı kalınlıklarda ve farklı fiber oryantasyonlarında alt ve üst bölgeleri olan, malzemesi Epoksi Cam olan kanadın kütlesi 6 kg bulunmuştur. Chortis et al. [62] yapmış olduğu bu çalışma ile tasarımı yapılan kanadın kütle değerleri kıyaslandığında, tasarımı yapılan rüzgar türbin kanat boyutlarının daha büyük olmasına rağmen Chortis ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmadaki kanattan daha hafif olduğu görülmüştür. Bu yüzden tasarımı yapılan kanat için bulunan kütle değeri oldukça iyi bir sonuçtur.

Tasarımı yapılan kanadın rüzgar türbin performansına etkisi incelenecek olursa; teorik hesaplamalar sonucunda, rüzgar türbin kanat verimi %48 ile Betz Limitine yakın bir değer çıkmıştır. Bu değer Habali et al. [7] yaptığı çalışmada bulunan değer (%41,2) ile karşılaştırıldığında; tasarımı yapılan rüzgar türbin kanadı için bulunan teorik verim oldukça iyi bir sonuçtur.

8. BULGULAR VE ÖNERİLER

Rüzgar türbin kanatları genellikle her kesitte aynı kalınlık ve aynı fiber oryantasyonları kullanılarak kanadın alt ve üst kısmı olmak üzere iki parça şeklinde üretilmektedir. Bu tez çalışması ile tasarımı yapılan kanat 10 bölgeye ayrılarak, her bölgede farklı kalınlık ve farklı fiber oryantasyonlar kullanılarak düşük rüzgar hızlarında çalışabilecek kadar hafif, yüksek rüzgar hızlarına karşı mukavemetli, daha az maliyetli kompozit malzemedен rüzgar türbin kanat tasarımı yapılması hedeflenmiştir. Bu yüzden tasarımı yapılan kanat ilk önce yüzey haline getirilip, 10 bölgeye ayrılmıştır. Kanat malzemesi kanadın ağırlığı göz önüne alınarak seçilmiş, kanattaki bölgelerin kalınlığı ve oryantasyonları ise kanadın geometrisine ve kanat üzerinde oluşan gerilme değerlerine göre ayarlanmıştır. Kanadın sayısal analizi boyunca, kanatta kritik olan, en dayanımlı ve kalınlığı en fazla olması gereken yer “Kök_Üst” bölgesi çıkmıştır. “Kök_Üst” bölgesinin kalınlığı ve oryantasyonları ile optimizasyonu sonucu bu bölgede gerilme değerleri düşürülmüş ve son tasarımda en yüksek gerilmelerin “Kök_Alt” bölgesinde olduğu görülmüştür. “Kök_Üst” bölgesi numunelerinin deney sonuçları, sayısal analiz sonuçları ve teorik değerleri karşılaştırıldığında bu bölgenin ortalama dayanımı 200 MPa olduğu görülmüştür. Kanadın üzerinde en yüksek gerilme değerinin olduğu yer olan “Kök_Alt” bölgesinde maksimum gerilme değeri 172,57 MPa olup, ortalama dayanım gerilmesi (200 MPa) ile kıyaslandığında emniyetli tasarım (design-safe) kriteri içinde kaldığı görülmektedir. Böylece 4 m çapında 25 m/s rüzgar hızında çalışabilecek rüzgar türbin kanadında, alışagelmış, konvensiyonel yaklaşım olan kanadın her kesitinde aynı kalınlık, aynı katman sayısı ve aynı fiber oryantasyonu terk edilerek gerilme ve gerinim profiline göre derecelendirilmiş kompozit malzeme özellikleri kullanılmış ve bu yöntem ile kanadın hafifliği sağlanarak kanat üzerinde oluşan gerilmeye dayanıklı, daha az maliyetli, daha hafif, optimum rüzgar türbin kanat tasarımı geliştirilmiştir. Ayrıca kanadın hafifliğinden dolayı kanattaki ilk dönme hareketi daha düşük rüzgar hızlarında gerçekleşerek, daha fazla elektrik enerjisi sağlanmış olacaktır.

8.1 Bulgular

Yapılan bu çalışmada 109M419 nolu TÜBİTAK 1001 projesi ile geliştirilen 4m çapında yüksek aerodinamik performanslı NACA 4412 profile sahip rüzgar türbin

kanadının, türbinin kurulacağı bölgeden alınan 25 m/s maksimum rüzgar hızında, 286 devirde akış analizi yapılarak kanat üzerinde oluşan en yüksek basınç değeri 2370 Pa bulunmuştur. Kanadın mekanik analizinde ise akış analizinde bulunan kanat üzerindeki basınç değerleri kullanılarak, kanat yüzeylerinde tanımlanan kompozit malzeme tabaka sayısı, kalınlık ve fiber oryantasyonları değiştirilerek kanatta meydana gelen gerilme değerleri düşürülmeye çalışılmıştır. Kanat 10 bölgeye ayrılarak yapılan mekanik analizden elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır. Yapılan son tasarım sonucunda elde edilen bulgular Tablo 8.1’de verilmiştir.

Tablo 8.1 Son tasarımda bölgelerin özellikleri

Bölge	Malzeme	Tabaka Sayısı	Kalınlık(mm)	Oryantasyon (°)	Gerilme Değeri (MPa)
“Kök_Üst”	Epoksi-Ecam (Tek Yönlü)	9	4,5	-45/45/ -30/45/ -60/90/ -90/60/-45	170,24
“Kök_Alt”	Epoksi-Ecam (Tek Yönlü)	8	4	60/-90/30/ -90/90/ -90/90/-90	172,57
“1_Üst”	Epoksi-Ecam (Tek Yönlü)	6	3	30/0/30/0/30/ 0	165,71
“1_Alt”	Epoksi-Ecam (Tek Yönlü)	6	3	45/0/0/ -30/30/0	135,66
“2_Üst”	Epoksi-Ecam (Tek Yönlü)	4	2	60/-30/-60/30	75,59
“2_Alt”	Epoksi-Ecam (Tek Yönlü)	4	2	60/-30/-60/30	73,55
“3_Üst”	Epoksi-Ecam (Tek Yönlü)	3	1,5	-90/0/90	46,56

Tablo 8.1 devam ediyor.

“3_Alt”	Epoksi-Ecam (Tek Yönlü)	3	1,5	-90/0/90	44,72
“4_Üst”	Epoksi-Ecam (Tek Yönlü)	3	1,5	60/-60/60	16,17
“4_Alt”	Epoksi-Ecam (Tek Yönlü)	3	1,5	60/-60/60	17,00

Tablo 8.1’den görüldüğü gibi “Kök_Üst” bölgesinde oluşan maksimum gerilme 170,24 MPa’dır. “Kök_Üst” bölgesinin çekme ve eğilme deneyi sonucunda dayanımı ise 200 MPa ve 280 MPa bulunmuştur. “Kök_Üst” bölgesinin deneysel ve sayısal analiz sonuçları incelendiğinde; kanatta en dayanımlı, kalınlığı en fazla olması gereken yerin (“Kök_Üst”) kanat üzerine gelen maksimum basınç değerine karşı dayanımlı olduğu görülmüştür.

8.2 Öneriler

Bu çalışmanın geliştirilmesi için aşağıdaki öneriler yapılabilir;

- Kanat analizi yapılan bilgisayarın kapasitesi artırılarak, ağ yapısı oluşturma işleminde ağ yapısı eleman boyutunu küçültülerek dolayısıyla daha fazla eleman kullanılarak, Ansys Eğitim dosyasındaki kaliteli ağ yapısı oluşturma kriterlerine daha da yaklaşılabilir. Böylece daha doğru sonuçlar alınabilir. Fakat bu ağ yapısı analiz yapılan bilgisayarın kapasitesine göre analiz süresini uzatabilir.
- Kanatta bulunan katmanların oryantasyonunu tespit edebilmek için tüm katmanlar için en düşük gerilmeyi yaratacak durum, kanadın baştan sona fiber oryantasyonu taraması ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Burada bulunan sonuç, tüm yapının en optimum oryantasyonu değeri değildir. Olası konfigürasyon seçenekleri milyonlar mertebesinde olduğu için mevcut yöntem seçilmiştir. Mevcut tasarımın daha optimum seviyeye ulaşması mümkündür ve bu konuda ileride çalışmalar yapılabilir.

- Kanadın sayısal analiz modeli katmanlı olarak modellendiğinden “kenar-kenar”, “yüzey-yüzey”, “yüzey-kenar” bağlantı noktaları gerilme değerlerini etkilemektedir. Bu yüzden bu bağlantı noktalarının eksiksiz verilmesi teorik değerlere yaklaşılmalarını sağlayabilir.
- Kanattaki gerilme değerini daha alt değerlere çekmek için kanat geometrisi daha çok parçaya bölünerek ve böylece daha fazla oryantasyon açıları kullanılarak daha detaylı analiz yapılabilir.
- Gerilmeleri daha alt sınırlara çekmek ve dayanıklılığı arttırmak için kalınlık artırılabilir fakat bu kanadın ağırlığını arttıracaktır. Dolayısıyla kanat ilk dönüş hareketini yüksek rüzgar hızında yapacak ve üretilecek olan elektrik enerji miktarı da düşecektir.
- Kanadın tüm bölgelerinde Epoksi-ECam malzemesinden daha hafif ve mukavemetli olan Epoksi-Karbon malzemesi kullanılarak gerilme-gerinim değerleri düşürülebilir. Fakat bu maliyeti arttıracaktır. Bunun yerine kanadın çeşitli bölgelerinde çeşitli oryantasyonlarda çeşitli malzemeler kullanılarak kanatta oluşan gerilme ve gerinim değerleri azaltılabilir.
- Fiber oranı artırılarak, daha yüksek mukavemetli kompozit malzemeler kullanılarak kanat üzerinde oluşan gerilmeler daha alt gerilme değerine düşürülebilir fakat bu kompozit malzemenin kırılma dayanıklılığını ve maliyetini yükseltebilir.
- Tasarımı yapılan kanat için güvenlik faktörü kullanılmamıştır. Kanadın “Kök_Üst” bölgesine ait numunelerin ortalama dayanımı deneysel çalışmalar, sayısal analiz ve teorik hesaplamalar ile 200MPa bulunmuş ve bu değer referans alınarak kanat üzerinde oluşan maksimum gerilme değeri düşürülmeye çalışılarak tasarım yapılmıştır. Bu yüzden kanadın üretimi sırasında güvenlik faktörü kullanılması uygun olacaktır. Kanat tasarımında kanat bölgelerindeki kalınlık artırılarak ya da daha mukavemetli kompozit malzeme kullanılarak güvenlik faktörü artırılabilir.
- Tasarımı yapılan kanadın sadece statik analizi yapılarak, yani kanat üzerinde oluşan dinamik yükler ihmal edilerek kanat üzerinde oluşan maksimum gerilme değeri 172,57 MPa bulunmuştur. Bu yüzden kanadın dinamik analizinin üretimden önce yapılması uygun olacaktır.
- Tasarlanan rüzgar türbin kanat modelinin sayısal analizinde sadece

kompozit kabuk yapının dayanımı incelenmiştir. Kanadın sayısal analizinde bu kompozit yapının içinde köpük modellenerek kanat üzerinde oluşan gerilme değerleri düşürülebilir.

- Yapılan literatür araştırmalarında [63;64;65] rüzgar türbin kanadına slat eklenerek rüzgar türbin performansını etkilediği görölmüştür. Bu yüzden tasarımı yapılan kanatta slat kullanılarak verimliliğin artacağı düşünölmektedir.

KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] Koç, E., İkili Kanat Profiline Sahip Su Türbininin Üç Boyutlu Sayısal ve Deneysel Performans Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [2] Yavuz, T., Kılış, B., Balas, C.E., Aydemir, M.T., Elektrik Üretiminde Serbest Akışlı Hidrokinetik Enerjiyi Kullanan, Uyarlanabilir Bir Model Türbin Tasarımı, TÜBİTAK 1001 Projesi, Proje No:109M419, 2012.
- [3] Bechly, M.E., Clausen, P.D., Structural Design of a Composite Wind Turbine Blade Using Finite Element Analysis, Computers & Structures, Vol. 63, No. 3, 639-646, 1997.
- [4] Fuglsang, P., Madsen, H.A., Optimization Method for Wind Turbine Rotors, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 80, 191-206, 1999.
- [5] Sherer, R., Blade Design Aspects, Renewable Energy, 16, 1272-1277, 1999.
- [6] Habali, S.M., Saleh, I.A., Local Design, Testing and Manufacturing of Small Mixed Airfoil Wind Turbine Blades of Glass Fiber Reinforced Plastics Part I: Design of the Blade and Root, Energy Conversion & Management, 41, 249-280, 2000a.
- [7] Habali, S.M., Saleh, I.A., Local Design, Testing and Manufacturing of Small Mixed Airfoil Wind Turbine Blades of Glass Fiber Reinforced Plastics Part II: Manufacturing of Blade and Rotor, Energy Conversion & Management, 41, 281-298, 2000b.
- [8] Ghoshal, A., Sundaresan, M.J., Schulz, M.J., Pai, P.F., Structural Health Monitoring Techniques for Wind Turbine Blades, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 85, 309-324, 2000.
- [9] Ronald, K.O., Christensen, C. J., Optimization of A Design Code for Wind-Turbine Rotor Blades in Fatigue, Engineering Structures, 23, 993-1004, 2001.
- [10] Qian, X., Dutta, D., Design of Heterogeneous Turbine Blade, Computer-Aided Design, 35, 319-329, 2003.
- [11] Eral, G., Kompozit Malzemelerdeki Termal Gerilmelerin ve Sürünme Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi, Bitirme Tezi, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 2003.
- [12] Kong, C., Bang, J., Sugiyama, Y., Structural Investigation of Composite Wind Turbine Blade Considering Various Load Cases and Fatigue Life, Energy, 30, 2101-2114, 2005.

- [13] Jureczko, M., Pawlak, M., Mezyk, A., Optimisation of Wind Turbine Blades, *Journal of Materials Processing Technology*, 167, 463-471, 2005.
- [14] Jensen, F.M., Falzon, B.G., Ankersen, J., Stang, H., Structural Testing and Numerical Simulation of A 34 M Composite Wind Turbine Blade, *Composite Structures*, 76, 52-61, 2006.
- [15] Shokrieh, M.M., Rafiee, R., Simulation of Fatigue Failure in a Full Composite Wind Turbine Blade, *Composite Structures*, 74, 332-342, 2006.
- [16] Kong, C., Kim, T., Han, D., Sugiyama, Y., Investigation of Fatigue Life for a Medium Scale Composite Wind Turbine Blade, *International Journal of Fatigue*, 28, 1382-1388, 2006.
- [17] Maheri, A., Noroozi, S., Toomer, C.A., Vinney, J., WTAB, a Computer Program for Predicting the Performance of Horizontal Axis Wind Turbines with Adaptive Blades, *Renewable Energy*, 31, 1673-1685, 2006.
- [18] Cheng, S.H., Hwu, C., On-Line Measurement of Material Properties for Composite Wing Structures, *Composites Science and Technology*, 66, 1001-1009, 2006.
- [19] Kensche, C.W., Fatigue of Composites for Wind Turbines, *International Journal of Fatigue*, 28, 1363-1374, 2006.
- [20] Maheri, A., Noroozi, S., Vinney, J., Decoupled Aerodynamic and Structural Design of Wind Turbine Adaptive Blades, *Renewable Energy*, 32, 1753-1767, 2007.
- [21] Uysal, A., Rüzgar Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
- [22] Vatangül, E., Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Ansys 10 Programı ile Isıl Gerilme Analizi, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, 2008.
- [23] Ameku, K., Nagai, B.M., Roy, J.N., Design Of A 3 kW Wind Turbine Generator with Thin Airfoil Blades, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 1723-1730, 2008.
- [24] Dönmez, A., Yapısal Kompozit Malzemelerde Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- [25] Marin, J.C., Barroso, A., Paris, F., Canas, J., Study of Fatigue Damage in Wind Turbine Blades, *Engineering Failure Analysis*, 16, 656-668, 2009.
- [26] Overgaard, L.C.T., Lund, E., Thomsen, O.T., Structural Collapse of a Wind Turbine Blade. Part A: Static Test and Equivalent Single Layered Models, *Composites: Part A*, 41, 257-270, 2010.

- [27] Lai, F., Yang, S., Wu, J., Hsueh, C., Yang, C., Wang, B., Lan, C., Development Of Fatigue Test System For Small Composite Wind Turbine Blades, *Procedia Engineering*, 14, 2003-2013, 2011.
- [28] Karabağ, S., Rüzgar Türbin Kanadı İmalatı, İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi, 2011.
- [29] Toft, H.S., Sorensen, J.D., Reliability-Based Design of Wind Turbine Blades, *Structural Safety*, 2011.
- [30] Mishnaevsky, Jr L., Freere, P., Sinha, R., Acharya, P., Shrestha, R., Manandhar, P., Small Wind Turbines With Timber Blades For Developing Countries: Materials Choice, Development, Installation And Experiences, *Renewable Energy*, 36, 2128-2138, 2011.
- [31] Tseng, Y.C., Kuo, C.Y., Engineering and Construction Torsional Responses of Glass-Fiber/Epoxy Composite Blade Shaft for a Small Wind Turbine, *Procedia Engineering*, 14, 1996-2002, 2011.
- [32] Song, F., Ni, Y., Tan, Z., Optimization Design, Modeling and Dynamic Analysis for Composite Wind Turbine Blade, *Procedia Engineering*, 16, 369-375, 2011.
- [33] Yang, J., Peng, C., Xiao, J., Zeng, J., Yuan, Y., Application Of Videometric Technique To Deformation Measurement For Large- Scale Composite Wind Turbine Blade, *Applied Energy*, 98, 292-300, 2012.
- [34] Malhotra, P., Hyers, R.W., Manwell, J.F., MCGowan, J.G., A Review and Design Study of Blade Testing Systems for Utility-Scale Wind Turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 284-292, 2012.
- [35] Carvelli, V., Pazmino, J., Lomov, S. V., Verpoest, I., Deformability of a Non-Crimp 3D Orthogonal Weave E-Glass Composite Reinforcement, *Composites Science and Technology*, 73, 9-18, 2012.
- [36] Nagarajan, V.A., Rajadurai, J.S., Kumar, T.A., A Digital Image Analysis to Evaluate Delamination Factor for Wind Turbine Composite Laminate Blade, *Composites: Part B*, 43, 3153-3159, 2012.
- [37] Liao, C.C., Zhao, X.L., Xu, J.Z., Blade Layers Optimization of Wind Turbines Using FAST and Improved PSO Algorithm, *Renewable Energy*, 42, 227-233, 2012.
- [38] Aceves, C.M., Sutcliffe, M.P.F., Ashby, M.F., Skordos, A.A., Roman, C.R., Design Methodology for Composite Structures: a Small Low Air-Speed Wind Turbine Blade Case Study, *Materials and Design*, 36, 296-305, 2012.
- [39] Yang, J., Peng, C., Xiao, J., Zeng, J., Xing, S., Jin, J., Deng, H., Structural Investigation Of Composite Wind Turbine Blade Considering Structural Collapse In Full-Scale Static Tests, *Composite Structures*, 97, 15-29, 2013.

- [40] Türkmen, İ., Köksal, N.S., Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerde Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8.2, 17-30, 2013.
- [41] Toumi, K.B., Renard, J., Monin, M., Nimdum, P., Fatigue Damage Modelling of Continuous E-Glass Fibre/Epoxy Composite, Procedia Engineering, 66, 723-736, 2013.
- [42] Grogan, D.M., Leen, S.B., Kennedy, C.R., Bradaigh, C.M., Design of Composite Tidal Turbine Blades, Renewable Energy, 57, 151-162, 2013.
- [43] Buckney, N., Pirrera, A., Green, S.D., Weaver, P.M., Structural efficiency of a Wind Turbine Blade, Thin-Walled Structures, 67, 144-154, 2013.
- [44] Öktem, A.S., Fonksiyonel Derecelendirilmiş İleri Kompozit Plakaların Statik Analizi, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 29, 111-119, 2014.
- [45] Jia, Y.Z.J., Zhuo, G.Y., Min, L., Xia, L., Y., Jie, L., Guang, Z.Z., Design and Analysis of Small-Scale Lift-Type Vertical-Axis Wind Turbine Using Composite Blade, Polimer & Polimers Composites, Vol. 22, No. 4, 2014.
- [46] Rarani, M.H., Sharifi, S.S.K., Shokrieh, M.M., Effect of Ply Stacking Sequence on Buckling Behavior of E-Glass/Epoxy Laminated Composites, Computational Materials Science, 89, 89-96, 2014.
- [47] Chen, X., Zhao, W., Zhao, X.L., Xu, J.Z., Preliminary Failure Investigation of a 52.3 m Glass/Epoxy Composite Wind Turbine Blade, Engineering Failure Analysis, 44, 345-350, 2014.
- [48] Liu, P., Groves, R.M., Benedictus, R., 3D Monitoring of Delamination Growth in a Wind Turbine Blade Composite Using Optical Coherence Tomography, NDT&E International, 64, 52-58, 2014.
- [49] Zangenberg, J., Brondsted, P., Koefoed, M., Design of a Fibrous Composite Preform for Wind Turbine Rotor Blades, Materials and Design, 56, 635-641, 2014.
- [50] Pollayi, H., Yu, W., Modeling Matrix Cracking in Composite Rotor Blades within VABS framework, Composite Structures, 110, 62-76, 2014.
- [51] Energy Information Administration, International Energy Outlook 2009, U.S. Department of Energy, 2009.
- [52] Engin, Ş.C., Rüzgar Enerjisi Çalışma Alanları ve Milres Projesi, İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi, 2011.
- [53] Avcı, B., Yılmaz, T.B., Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, 2012.

- [54] Emniyetli, G., Evrensel Elektrik İhtiyacının Karşılanması İçin Rüzgar Türbini Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2007.
- [55] GAY, Daniel and HOA, Suong V., Composite Materials Design and Applications, 2nd Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [56] JONES, R.M., Mechanics Of Composite Materials, 2nd Edition, Taylor & Francis Group, 1999.
- [57] SAVAŞKAN, T., Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, 5. Baskı, Celepler Matbaacılık, 2009.
- [58] Keleş, Ö., Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Ders Notları, http://web.itu.edu.tr/ozgulkeles/dersler/MalzemeBilimi_06_2010.pdf, 2010.
- [59] Beer, F., Johnston, E., Cisimlerin Mukavemeti, 2. Baskı, Beta Basım A.Ş., 2003.
- [60] Ergin, A., BAYRAKTARKATAL, E., ÜNSAN, Y., Sonlu Elemanlar Metodu ve Gemi İnşaatı Sektöründeki Uygulamaları Seminer Kitabı, 95s, İstanbul, 2000.
- [61] İpek, N.E., Kaynak Ağız Açısının ve Geometrisinin Zırh Malzemesinin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [62] Chortis, D.E., Varelis D.S., Saravanos D.A., Prediction of Material Coupling Effect On Structural Damping Of Composite Beams and Blade, Composite Structures, 94, 1646-1655, 2012.
- [63] Liebeckand, R.H., Ormsbee, A. I., Optimization of Airfoils For Maximum Lift, J. Aircraft, 7(9–10), 409–415, 1970.
- [64] Bingham, G. J., Chen, A. W., Low-speed aerodynamic characteristics of an airfoil optimized for maximum lift coefficient, NASA TN D-7071, Washington, DC., 1972.
- [65] Liebeck, R. H., A Class of Airfoils Designed for High Lift in Incompressible Flow, J. Aircraft, 10(10), 610–617, 1973.

EKLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Ek 1. Malzemelerin mekanik özellikleri	110
Ek 2. Malzemesi Yapısal Çelik olan kanadın gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri	113
Ek 3. Malzemesi Alüminyum olan kanadın gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri	114
Ek 4. Malzemesi Epoksi-Ecam Islak olan kanadın gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri	115
Ek 5. Malzemesi Epoksi – Karbon olan kanadın gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri	116
Ek 6. Malzemesi Epoksi – Scam olan kanadın gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri	117
Ek 7. Malzemesi Yapısal Çelik olan "Kök-Alt" gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri	118
Ek 8. Malzemesi Alüminyum olan "Kök-Alt" gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri	120
Ek 9. Malzemesi Epoksi-Ecam Islak olan "Kök-Alt" gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri	121
Ek 10. Malzemesi Epoksi-Karbon olan "Kök-Alt" gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri	123
Ek 11. Malzemesi Epoksi-Scam olan "Kök-Alt" gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri	125
Ek 12. Kanadın malzeme-gerilim, malzeme-gerinim, malzeme-toplam deformasyon, malzeme-kütle grafikleri	127
Ek 13. Çekme numuneleri için gerilme-gerinim grafikleri	129
Ek 14. Eğilme numuneleri için gerilme- gerinim grafikleri.....	135

Ek 1. Malzemelerin mekanik özellikleri

Properties of Outline Row 8: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
4	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C ⁻¹	
5	Reference Temperature	22	C	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and...		
8	Young's Modulus	2E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
13	Interpolation	Log-Log		
14	Scale	1		
15	Offset	0	Pa	
16	Strain-Life Parameters			
24	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Şekil Ek 1.1 Yapısal Çelik malzemesine ait ANSYS 14.5.7'de tanımlı olan mekanik özellikler

Properties of Outline Row 3: Aluminum Alloy				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	2770	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
4	Coefficient of Thermal Expansion	2,3E-05	C ⁻¹	
5	Reference Temperature	22	C	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and...		
8	Young's Modulus	7,1E+10	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,33		
10	Bulk Modulus	6,9608E+10	Pa	
11	Shear Modulus	2,6692E+10	Pa	
12	Alternating Stress R-Ratio	Tabular		
16	Tensile Yield Strength	2,8E+08	Pa	
17	Compressive Yield Strength	2,8E+08	Pa	
18	Tensile Ultimate Strength	3,1E+08	Pa	
19	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Şekil Ek 1.2 Alüminyum malzemesine ait ANSYS 14.5.7'de tanımlı olan mekanik özellikler

Outline of Schematic B2: Engineering Data			
Properties of Outline Row 7: Epoxy-EGlass_Wet			
A	B	C	D E
Property	Value	Unit	
Density	1,85E-09	mm ⁻³ t	
Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
Orthotropic Elasticity			
Young's Modulus X direction	35000	MPa	
Young's Modulus Y direction	9000	MPa	
Young's Modulus Z direction	9000	MPa	
Poisson's Ratio XY	0,28		
Poisson's Ratio YZ	0,4		
Poisson's Ratio XZ	0,28		
Shear Modulus XY	4700	MPa	
Shear Modulus YZ	3500	MPa	
Shear Modulus XZ	4700	MPa	
Orthotropic Stress Limits			
Tensile X direction	780	MPa	
Tensile Y direction	31	MPa	
Tensile Z direction	31	MPa	
Compressive X direction	-80	MPa	
Compressive Y direction	-100	MPa	
Compressive Z direction	-100	MPa	
Shear XY	60	MPa	
Shear YZ	35	MPa	
Shear XZ	60	MPa	
Orthotropic Strain Limits			
Tensile X direction	0,0244		
Tensile Y direction	0,0038		
Tensile Z direction	0,0038		
Compressive X direction	-0,015		
Compressive Y direction	-0,0125		
Compressive Z direction	-0,0125		
Shear XY	0,015		
Shear YZ	0,012		
Shear XZ	0,015		
Tsai-Wu Constants			
Coupling Coefficient XY	-1		
Coupling Coefficient YZ	-1		
Coupling Coefficient XZ	-1		
Puck Constants			
Material Classification	Glass		
Compressive Inclination XZ	0,25		
Compressive Inclination YZ	0,2		
Tensile Inclination XZ	0,3		
Tensile Inclination YZ	0,2		

Şekil Ek 1.3 Epoksi-ECam Islak malzemesine ait ANSYS 14.5.7'de tanımlı olan mekanik özellikler

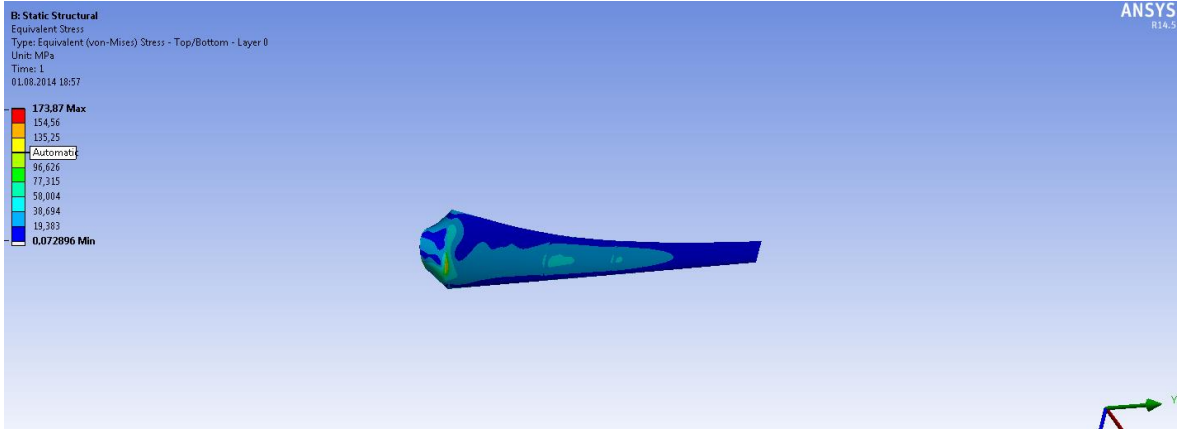
Properties of Outline Row 4: Epoxy_Carbon_ID_230GPa_Prepreg			
A	B	C	D E
Property	Value	Unit	
Density	1,49E-09	mm ⁻³ t	
Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
Orthotropic Elasticity			
Young's Modulus X direction	1,21E+05	MPa	
Young's Modulus Y direction	8600	MPa	
Young's Modulus Z direction	8600	MPa	
Poisson's Ratio XY	0,27		
Poisson's Ratio YZ	0,4		
Poisson's Ratio XZ	0,27		
Shear Modulus XY	4700	MPa	
Shear Modulus YZ	3100	MPa	
Shear Modulus XZ	4700	MPa	
Orthotropic Stress Limits			
Tensile X direction	2231	MPa	
Tensile Y direction	29	MPa	
Tensile Z direction	29	MPa	
Compressive X direction	-1082	MPa	
Compressive Y direction	-100	MPa	
Compressive Z direction	-100	MPa	
Shear XY	60	MPa	
Shear YZ	32	MPa	
Shear XZ	60	MPa	
Orthotropic Strain Limits			
Tensile X direction	0,0167		
Tensile Y direction	0,0032		
Tensile Z direction	0,0032		
Compressive X direction	-0,0108		
Compressive Y direction	-0,0192		
Compressive Z direction	-0,0192		
Shear XY	0,012		
Shear YZ	0,011		
Shear XZ	0,012		
Tsai-Wu Constants			
Coupling Coefficient XY	-1		
Coupling Coefficient YZ	-1		
Coupling Coefficient XZ	-1		
Puck Constants			
Material Classification	Carbon		
Compressive Inclination XZ	0,3		
Compressive Inclination YZ	0,25		
Tensile Inclination XZ	0,35		
Tensile Inclination YZ	0,25		

Şekil Ek 1.4 Epoksi-Karbon malzemesine ait ANSYS 14.5.7'de tanımlı olan mekanik özellikler

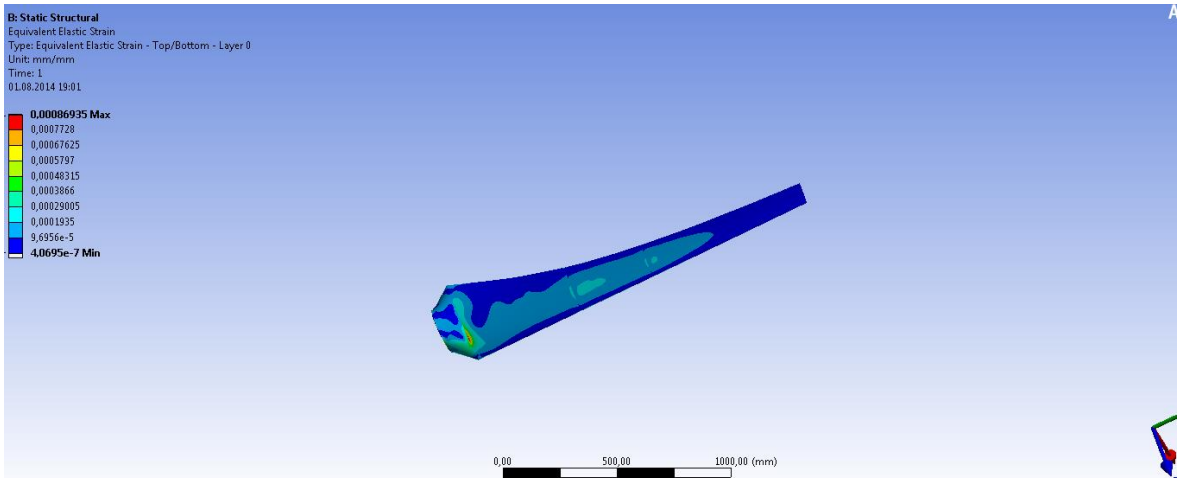
Properties of Outline Row 6: Epoxy_SGlass_UD				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	2E-09	mm^-3 t	
3	Orthotropic Elasticity			
4	Young's Modulus X direction	50000	MPa	
5	Young's Modulus Y direction	8000	MPa	
6	Young's Modulus Z direction	8000	MPa	
7	Poisson's Ratio XY	0,3		
8	Poisson's Ratio YZ	0,4		
9	Poisson's Ratio XZ	0,3		
10	Shear Modulus XY	5000	MPa	
11	Shear Modulus YZ	3846,2	MPa	
12	Shear Modulus XZ	5000	MPa	
13	Orthotropic Stress Limits			
14	Tensile X direction	1700	MPa	
15	Tensile Y direction	35	MPa	
16	Tensile Z direction	35	MPa	
17	Compressive X direction	-1000	MPa	
18	Compressive Y direction	-120	MPa	
19	Compressive Z direction	-120	MPa	
20	Shear XY	80	MPa	
21	Shear YZ	46,154	MPa	
22	Shear XZ	80	MPa	
23	Orthotropic Strain Limits			
24	Tensile X direction	0,0244		
25	Tensile Y direction	0,0035		
26	Tensile Z direction	0,0035		
27	Compressive X direction	-0,015		
28	Compressive Y direction	-0,012		
29	Compressive Z direction	-0,012		
30	Shear XY	0,016		
31	Shear YZ	0,012		
32	Shear XZ	0,016		
33	Tsai-Wu Constants			
34	Coupling Coefficient XY	-1		
35	Coupling Coefficient YZ	-1		
36	Coupling Coefficient XZ	-1		
37	Puck Constants			
38	Material Classification	Glass		
39	Compressive Inclination XZ	0,25		
40	Compressive Inclination YZ	0,2		
41	Tensile Inclination XZ	0,3		
42	Tensile Inclination YZ	0,2		

Şekil Ek 1.5 Epoksi-SCam malzemesine ait ANSYS 14.5.7'de tanımlı olan mekanik özellikler

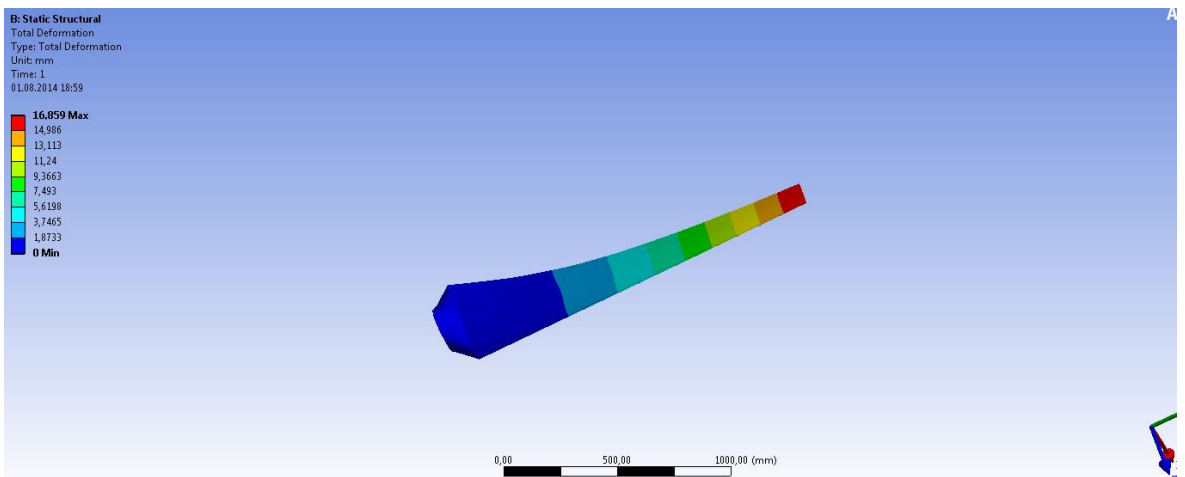
Ek 2. Malzemesi Yapısal Çelik olan kanadın gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri



Şekil Ek 2.1 Malzemesi Yapısal Çelik olan kanadın gerilme değerleri

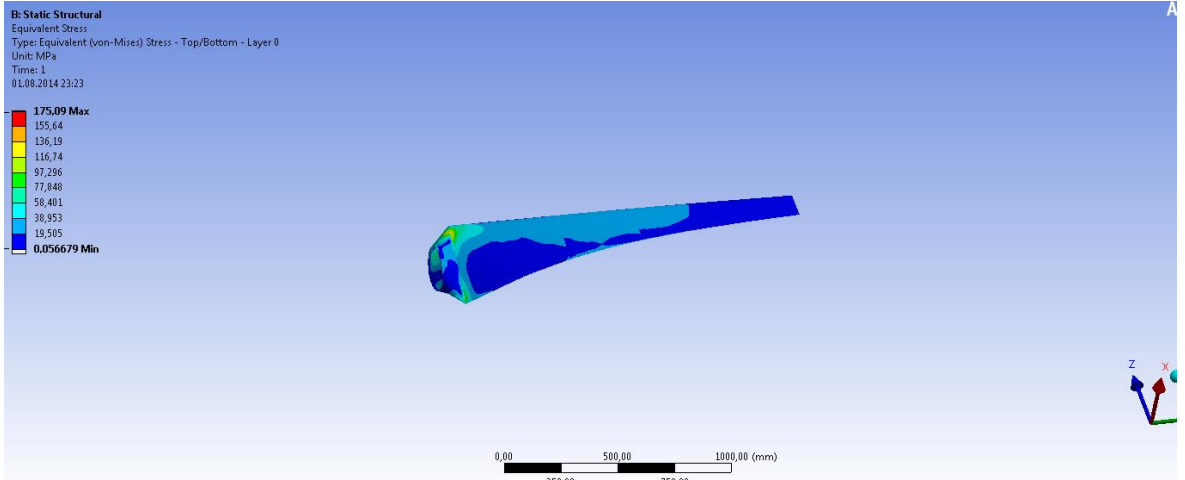


Şekil Ek 2.2 Malzemesi Yapısal Çelik olan kanadın gerinim değerleri

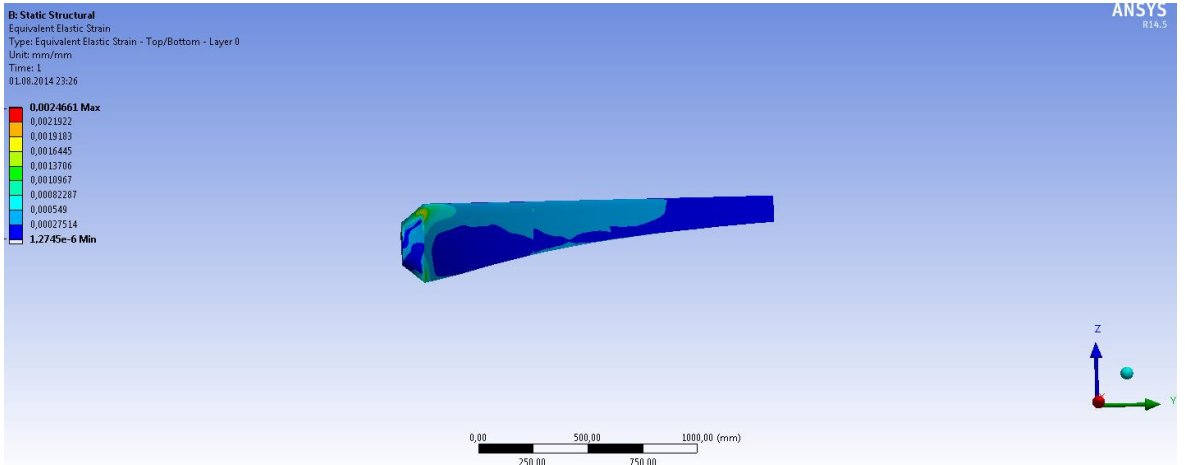


Şekil Ek 2.3 Malzemesi Yapısal Çelik olan kanadın toplam deformasyon değerleri

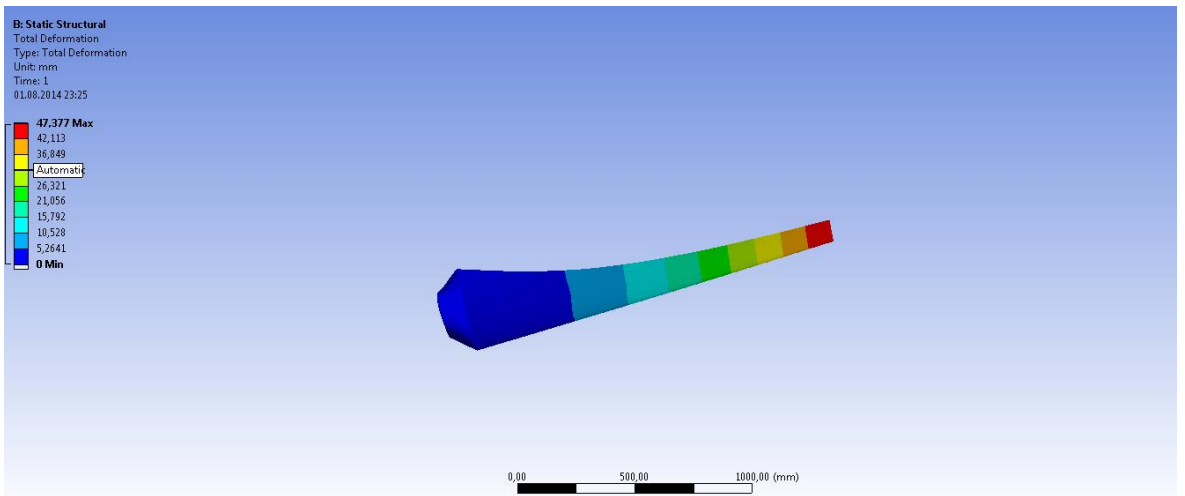
Ek 3. Malzemesi Alüminyum olan kanadın gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri



Şekil Ek 3.1 Malzemesi Alüminyum olan kanadın gerilme değerleri

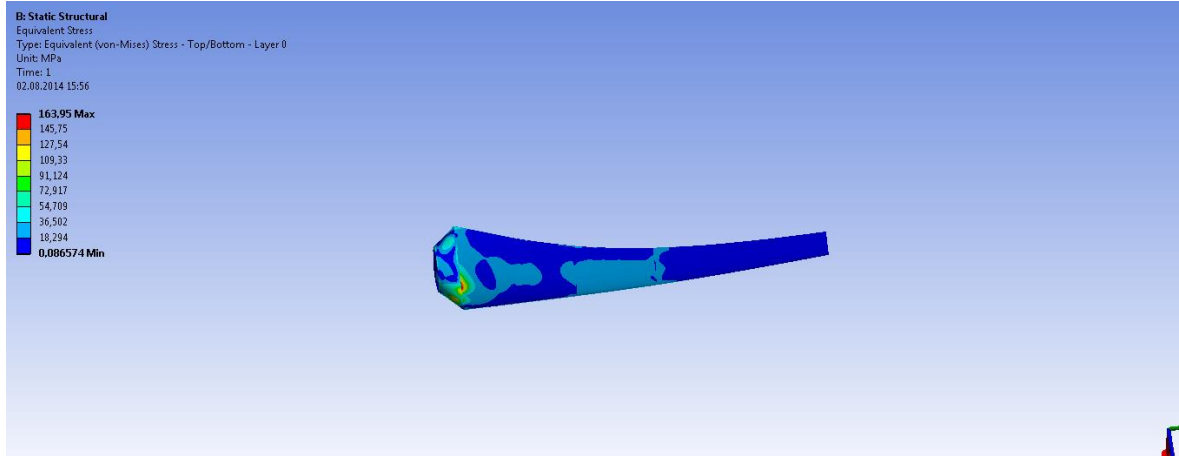


Şekil Ek 3.2 Malzemesi Alüminyum olan kanadın gerinim değerleri

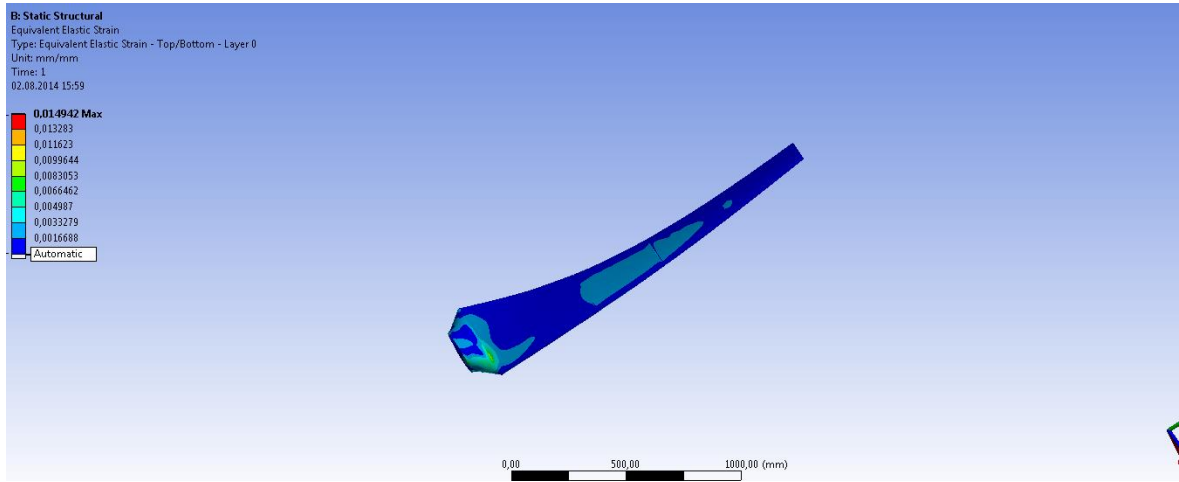


Şekil Ek 3.3 Malzemesi Alüminyum olan kanadın toplam deformasyon değerleri

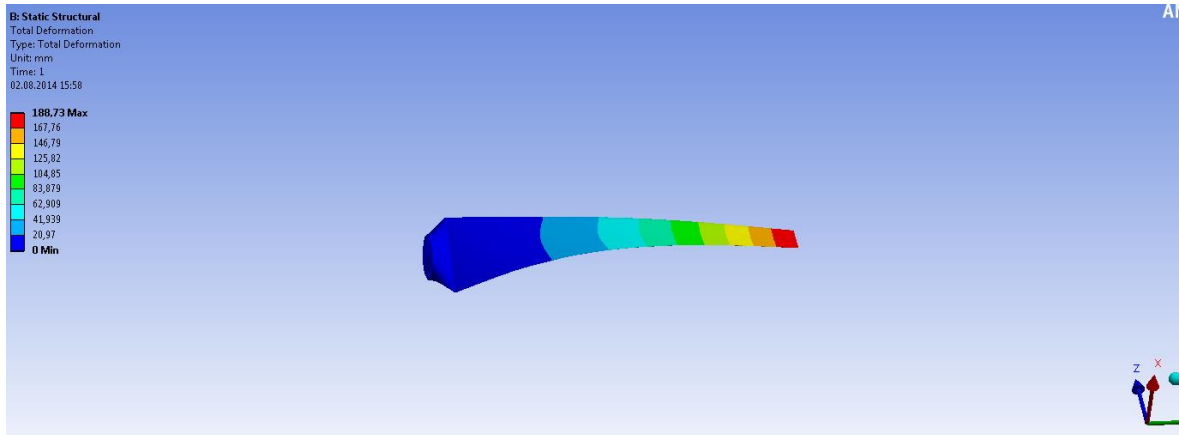
Ek 4. Malzemesi Epoksi – Ecam Islak olan kanadın gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri



Şekil Ek 4.1 Malzemesi Epoksi-ECam Islak olan kanadın gerilme değerleri

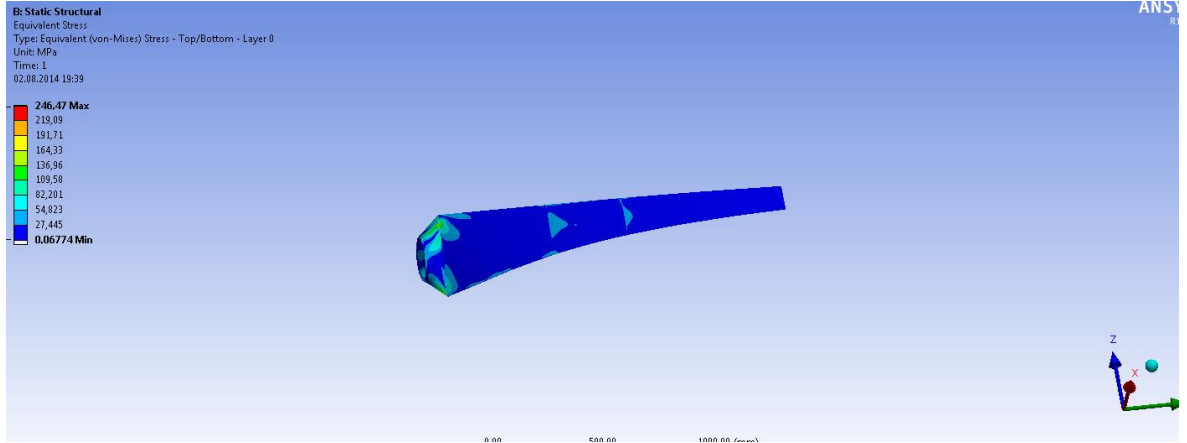


Şekil Ek 4.2 Malzemesi Epoksi-ECam Islak olan kanadın gerinim değerleri

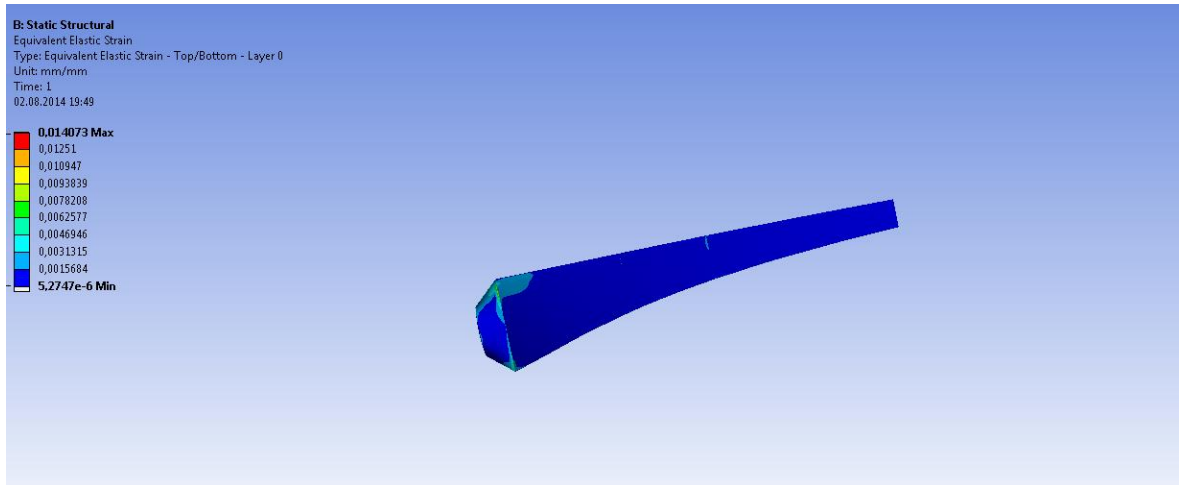


Şekil Ek 4.3 Malzemesi Epoksi-ECam Islak olan kanadın toplam deformasyon değerleri

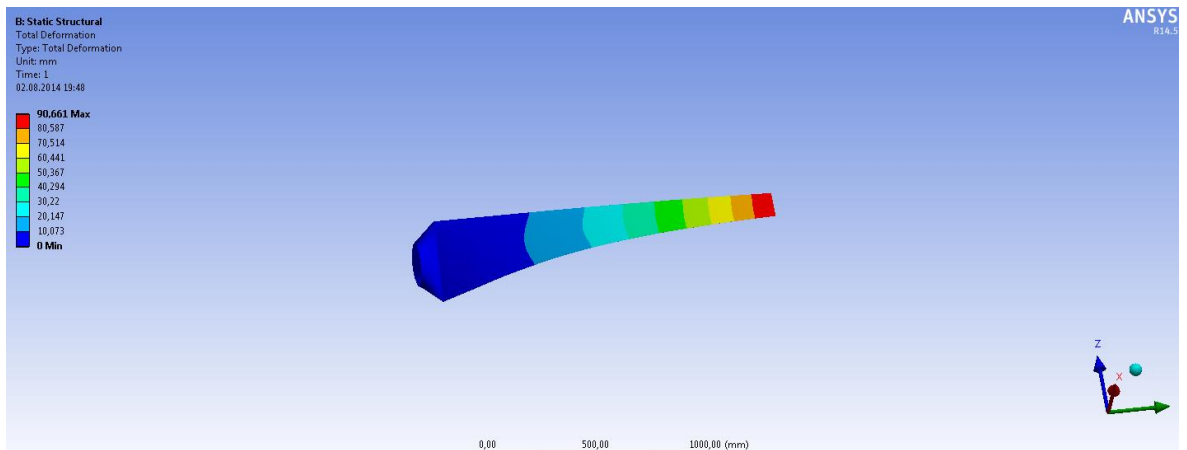
Ek 5. Malzemesi Epoksi-Karbon olan kanadın gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri



Şekil Ek 5.1 Malzemesi Epoksi-Karbon olan kanadın gerilme değerleri

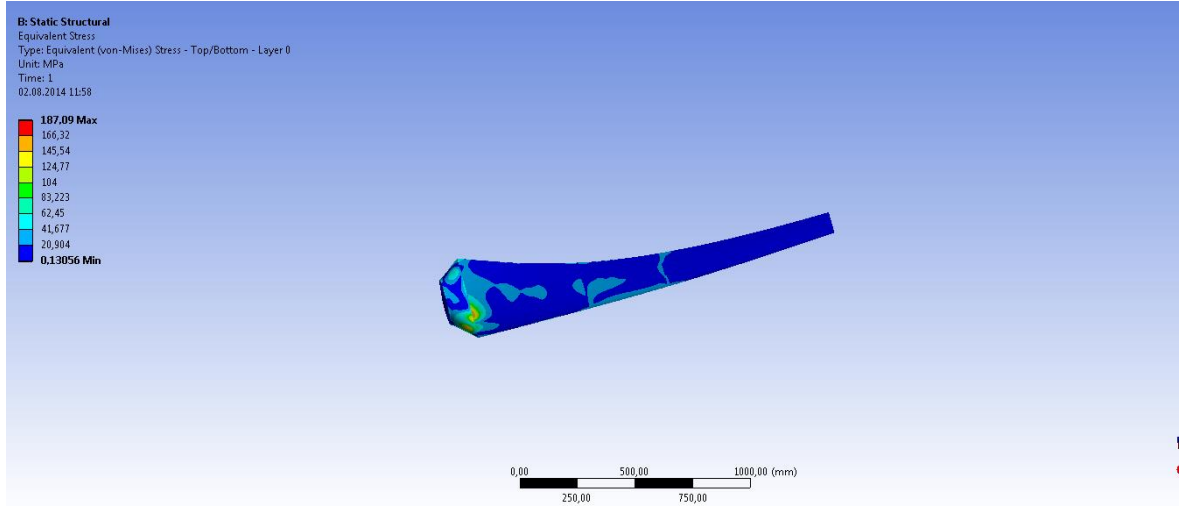


Şekil Ek 5.2 Malzemesi Epoksi-Karbon olan kanadın gerinim değerleri

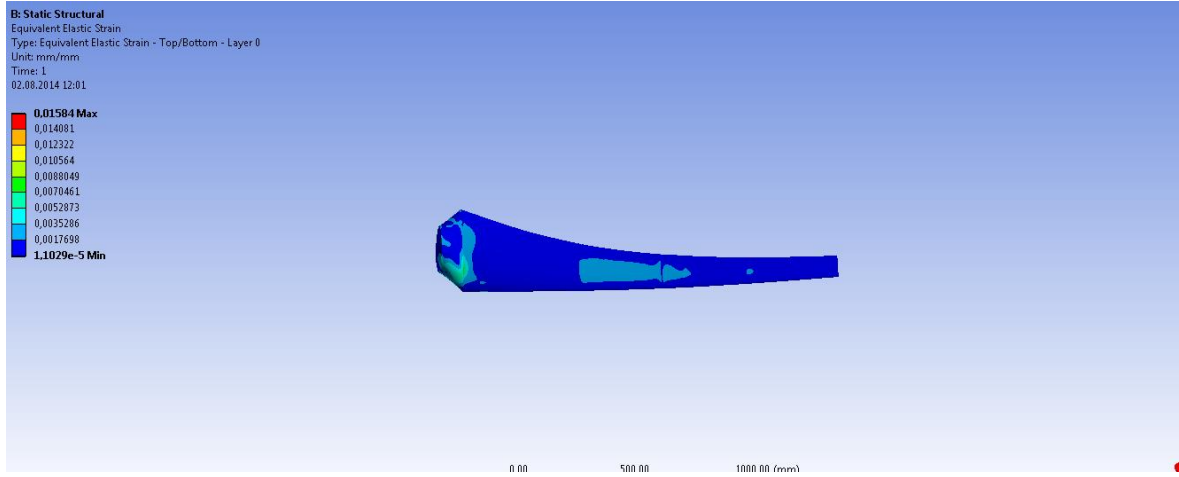


Şekil Ek 5.3 Malzemesi Epoksi-Karbon olan kanadın toplam deformasyon değerleri

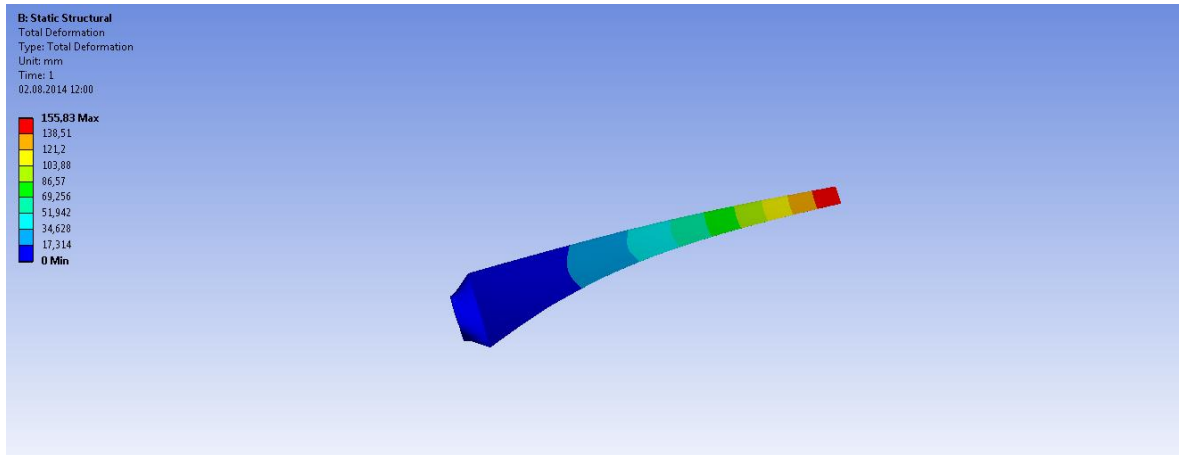
Ek 6. Malzemesi Epoksi-SCam olan kanadın gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri



Şekil Ek 6.1 Malzemesi Epoksi-SCam olan kanadın gerilme değerleri

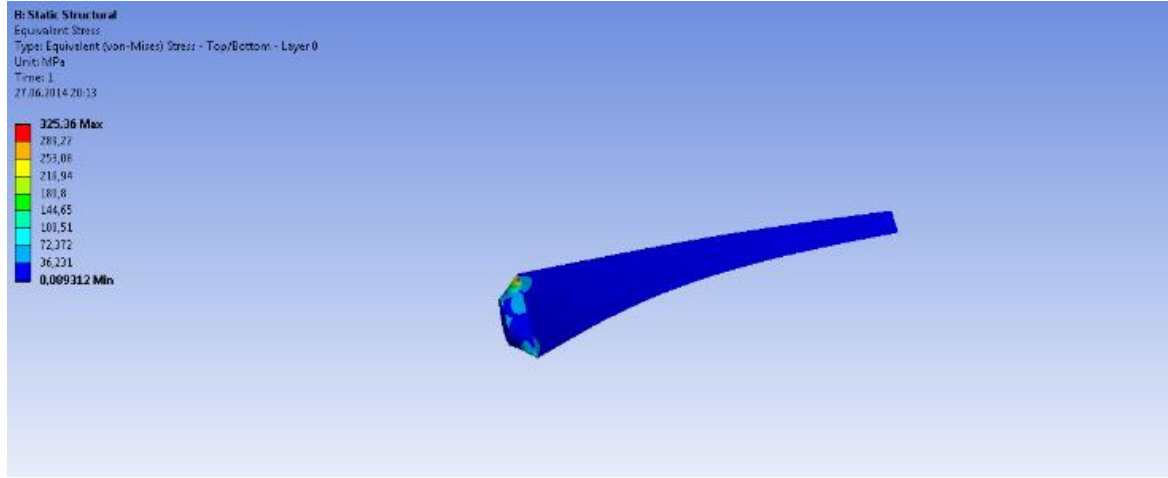


Şekil Ek 6.2 Malzemesi Epoksi-SCam olan kanadın gerinim değerleri

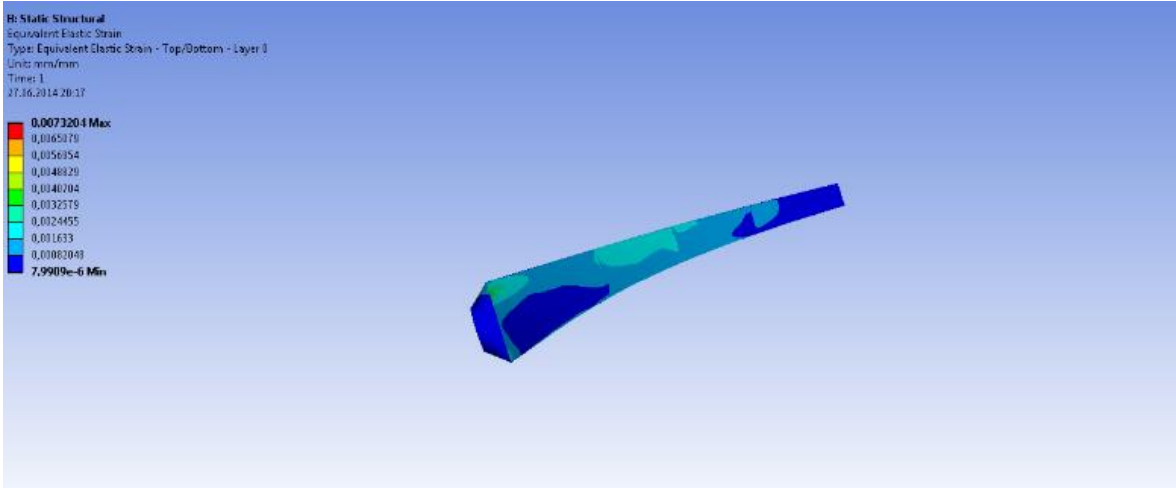


Şekil Ek 6.3 Malzemesi Epoksi-SCam olan kanadın toplam deformasyon değerleri

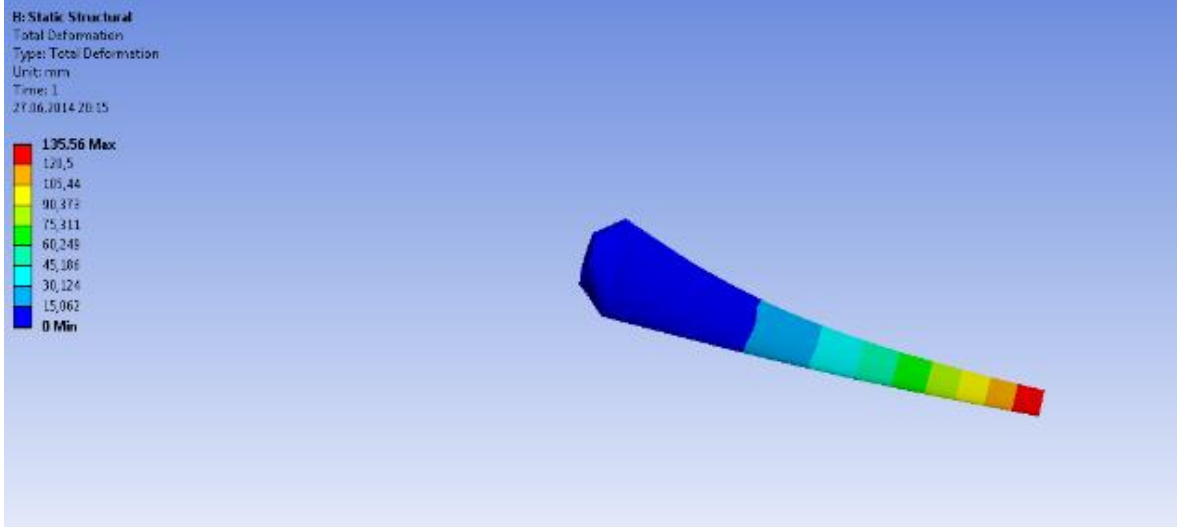
Ek 7. Malzemesi Yapısal Çelik olan “Kök-Alt” bölgesinin gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri



Şekil Ek 7.1 Malzemesi Yapısal Çelik olan “Kök-Alt” bölgesinin gerilme değerleri

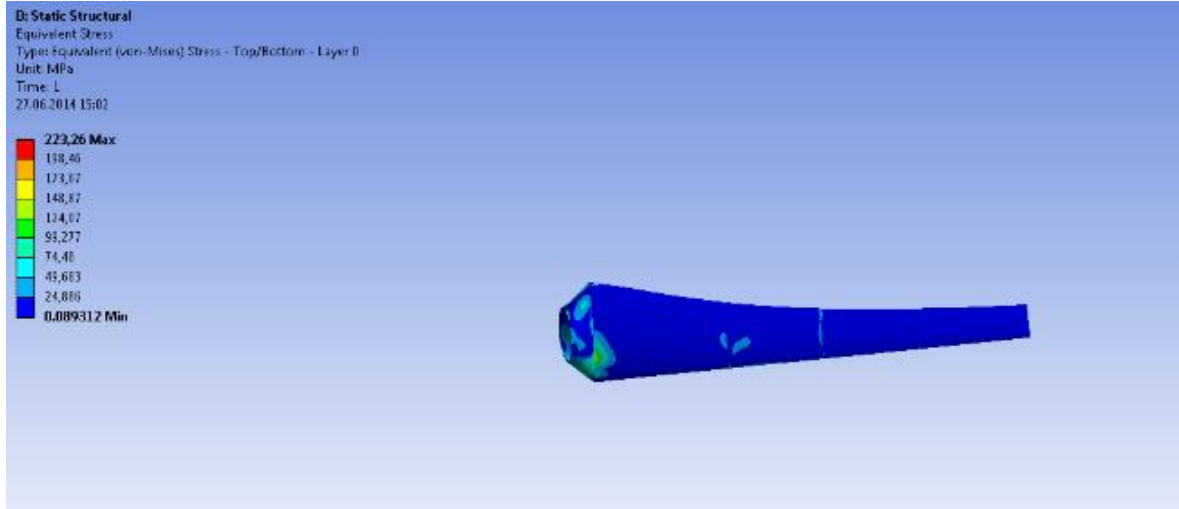


Şekil Ek 7.2 Malzemesi Yapısal Çelik olan “Kök-Alt” bölgesinin gerinim değerleri

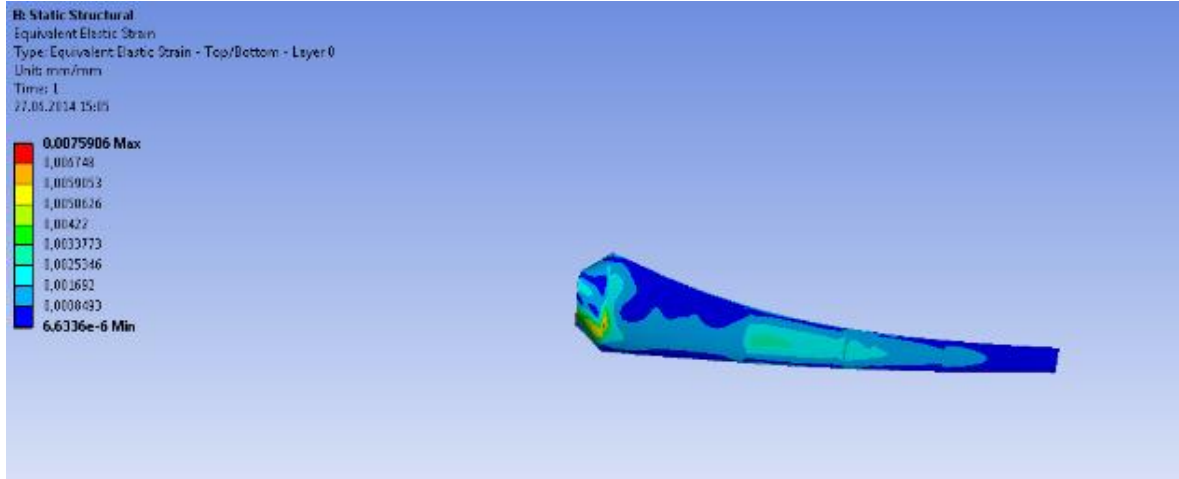


Şekil Ek 7.3 Malzemesi Yapısal Çelik olan “Kök-Alt” bölgesinin toplam deformasyon değerleri

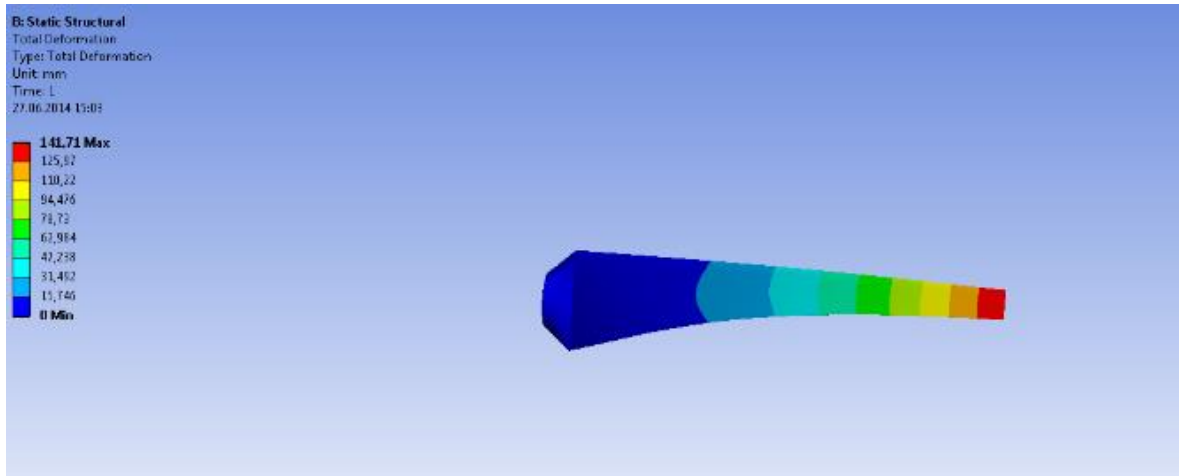
Ek 8. Malzemesi Alüminyum olan “Kök-Alt” bölgesinin gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri



Şekil Ek 8.1 Malzemesi Alüminyum olan “Kök-Alt” bölgesinin gerilme değerleri

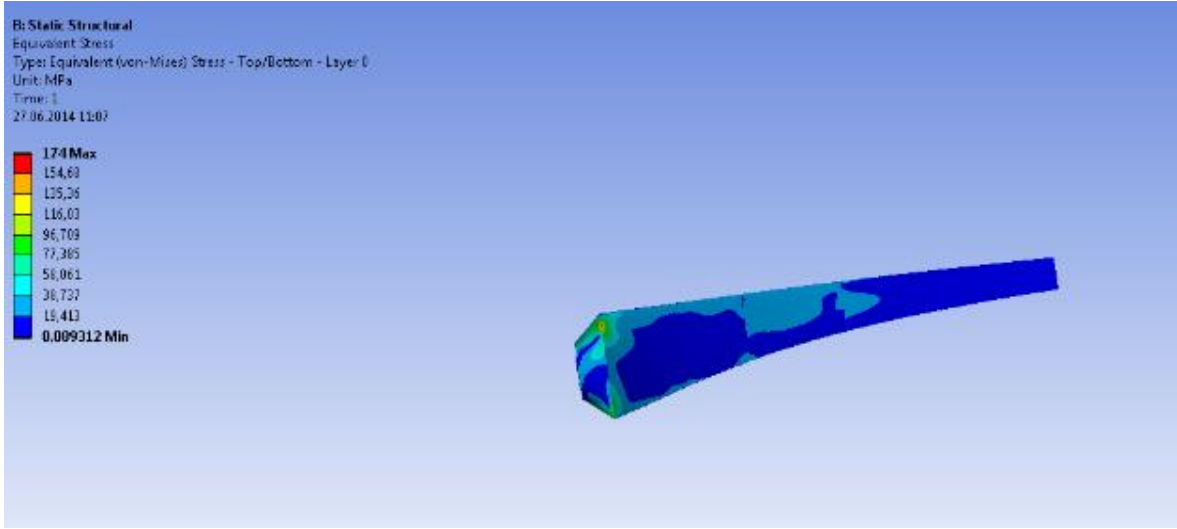


Şekil Ek 8.2 Malzemesi Alüminyum olan “Kök-Alt” bölgesinin gerinim değerleri

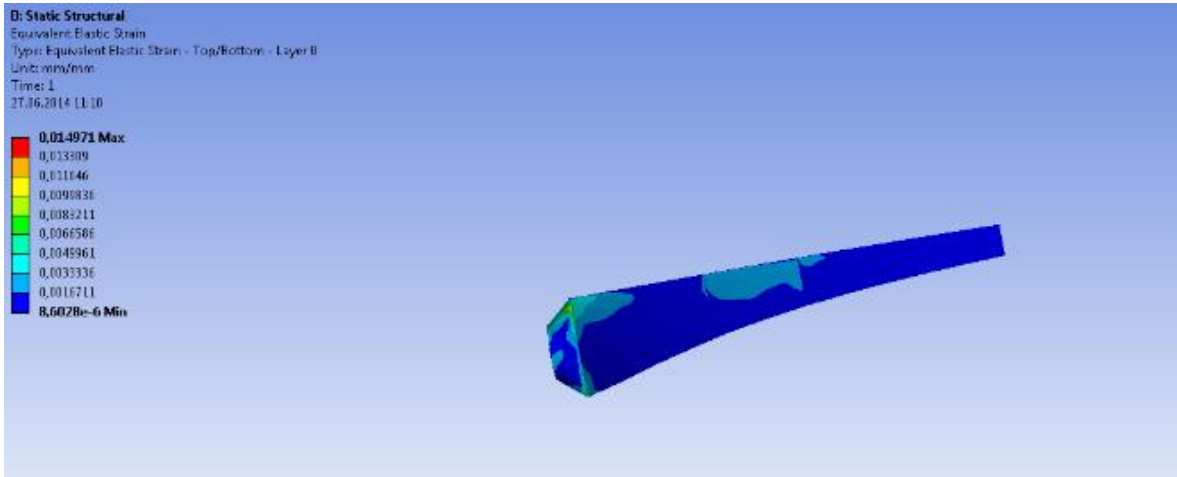


Şekil Ek 8.3 Malzemesi Alüminyum olan “Kök-Alt” bölgesinin toplam deformasyon değerleri

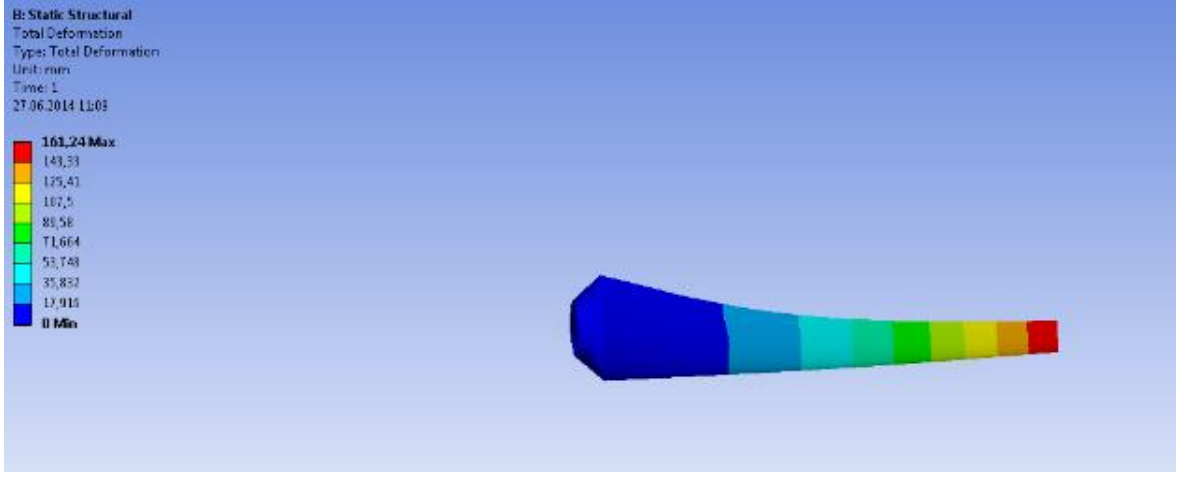
Ek 9. Malzemesi Epoksi – Ecam Islak olan “Kök-Alt” bölgesinin gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri



Şekil Ek 9.1 Malzemesi Epoksi-ECam Islak olan “Kök-Alt” bölgesinin gerilme değerleri

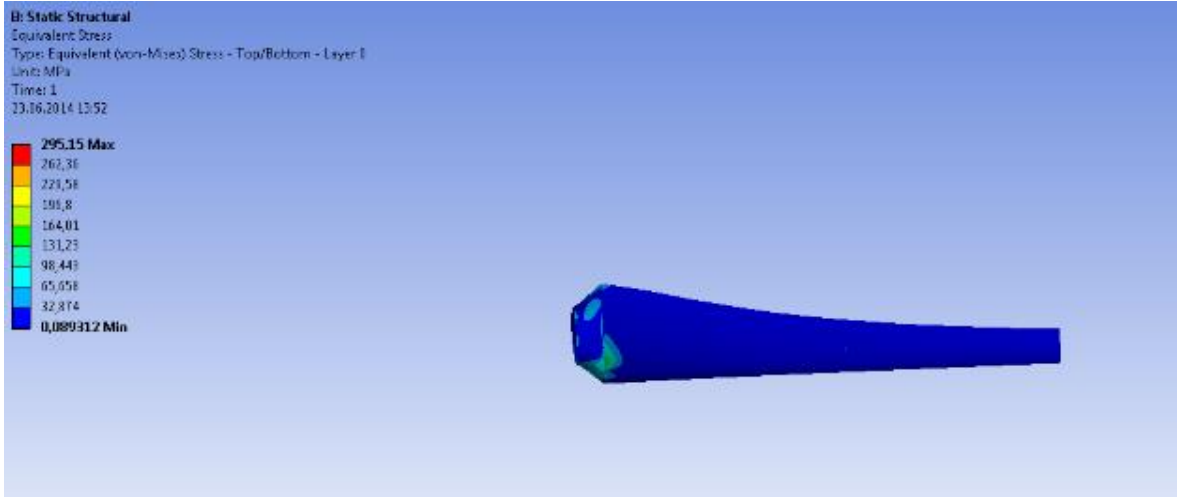


Şekil Ek 9.2 Malzemesi Epoksi-ECam Islak olan “Kök-Alt” bölgesinin gerinim değerleri

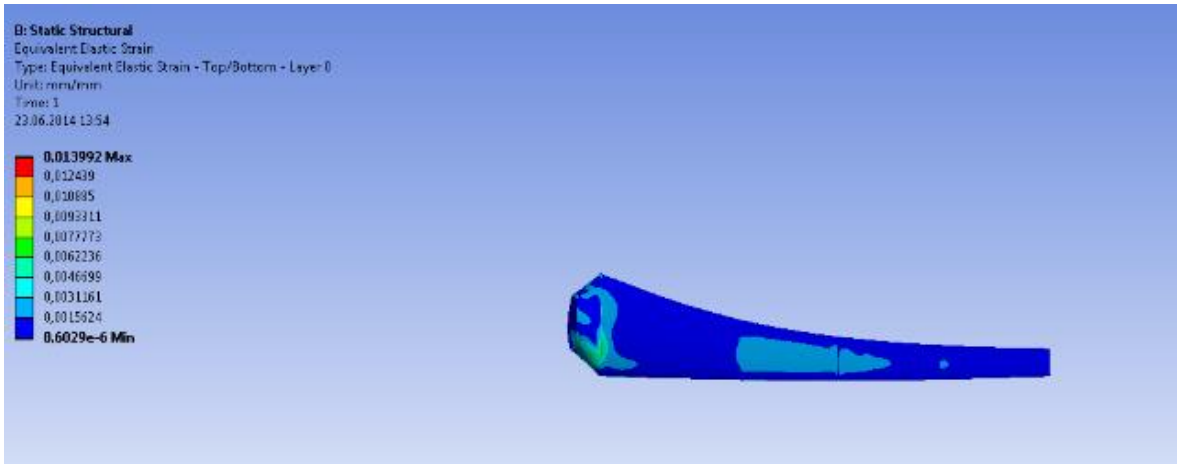


Şekil Ek 9.3 Malzemesi Epoksi-ECam Islak olan “Kök-Alt” bölgesinin toplam deformasyon değerleri

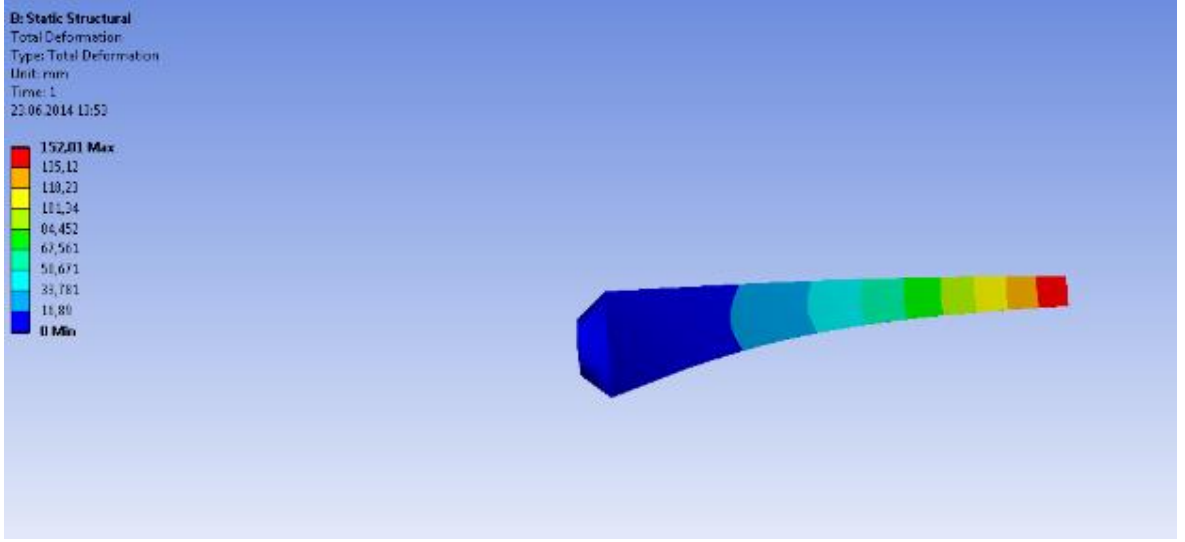
Ek 10. Malzemesi Epoksi – Karbon olan “Kök-Alt” bölgesinin gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri



Şekil Ek 10.1 Malzemesi Epoksi-Karbon olan “Kök-Alt” bölgesinin gerilme değerleri

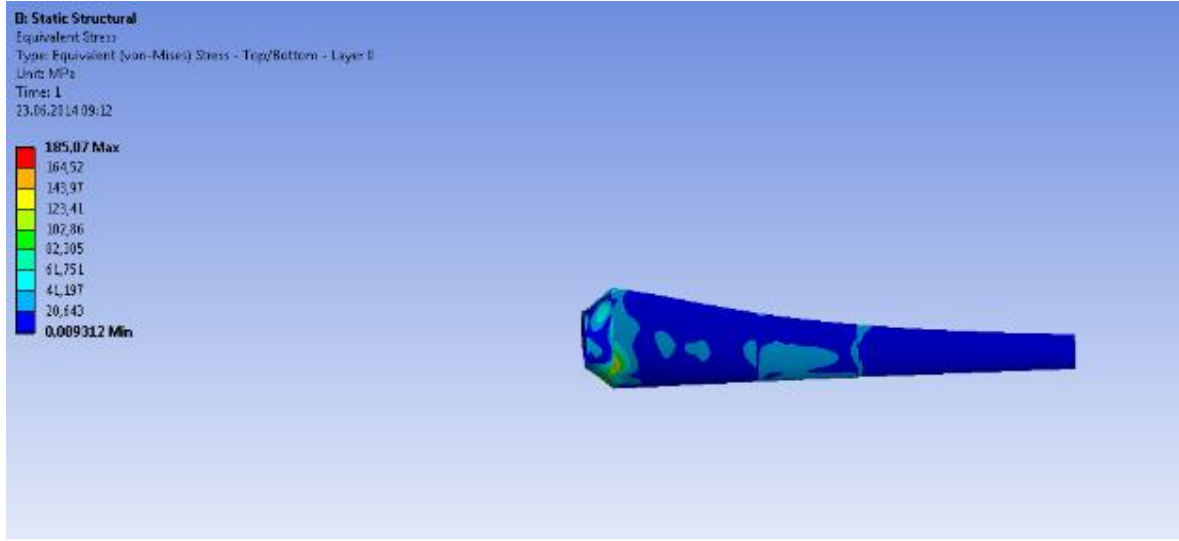


Şekil Ek 10.2 Malzemesi Epoksi-Karbon olan “Kök-Alt” bölgesinin gerinim değerleri

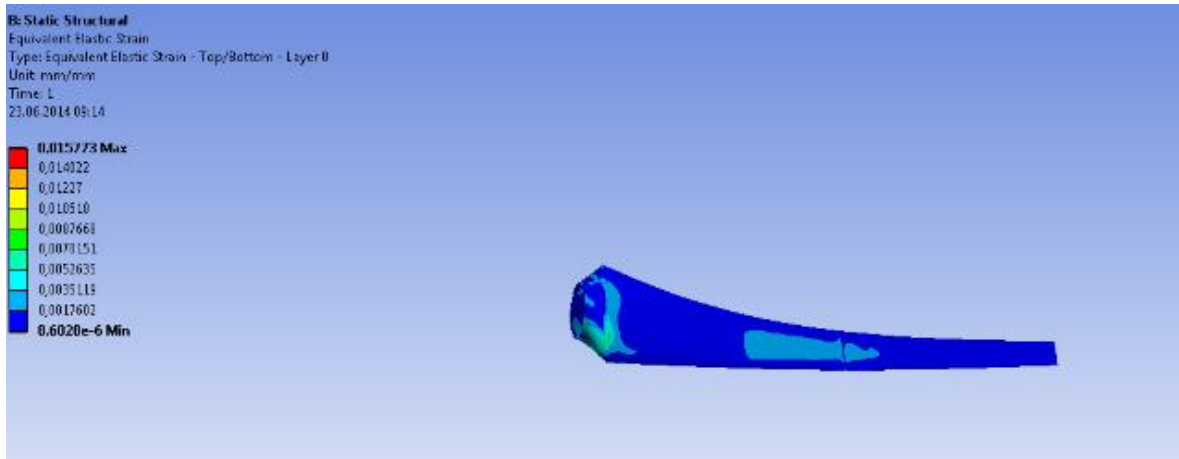


Şekil Ek 10.3 Malzemesi Epoksi-Karbon olan “Kök-Alt” bölgesinin toplam deformasyon değerleri

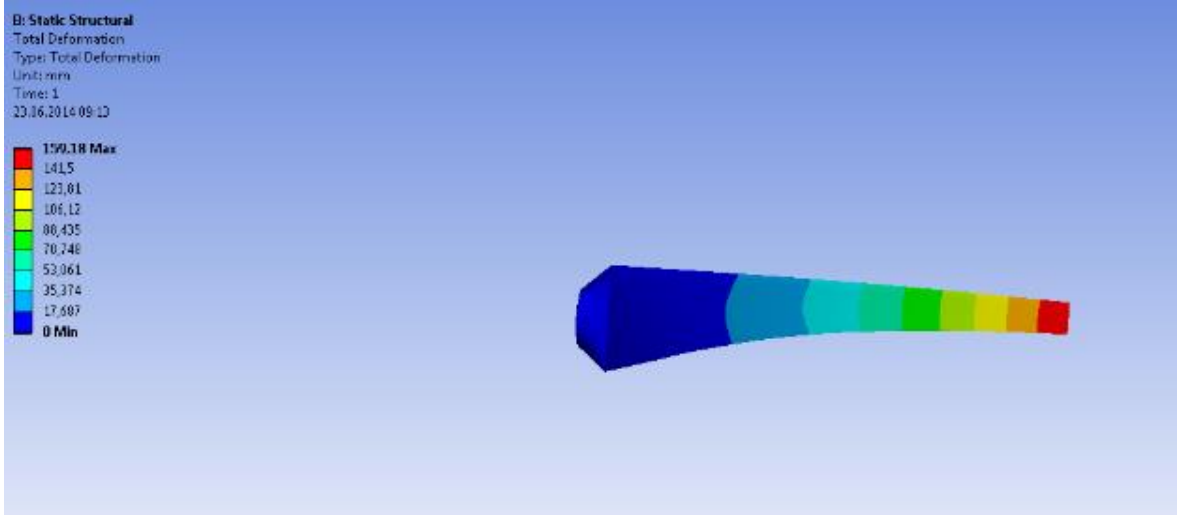
Ek 11. Malzemesi Epoksi – Scam olan “Kök-Alt” bölgesinin gerilme, gerinim ve toplam deformasyon değerleri



Şekil Ek 11.1 Malzemesi Epoksi-SCam olan “Kök-Alt” bölgesinin gerilme değerleri

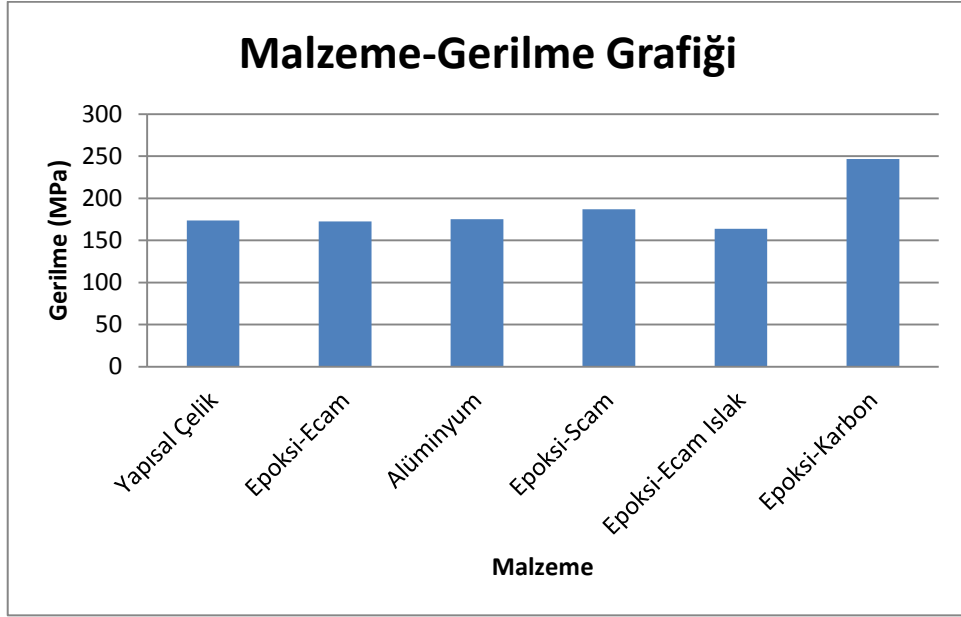


Şekil Ek 11.2 Malzemesi Epoksi- SCam olan “Kök-Alt” bölgesinin gerinim değerleri

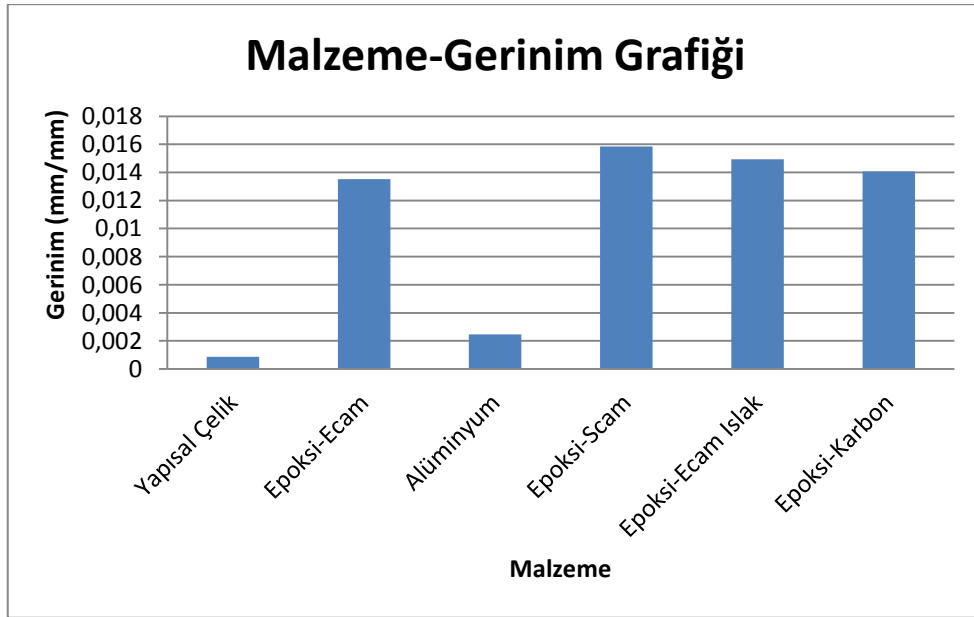


Şekil Ek 11.3 Malzemesi Epoksi- SCam olan “Kök-Alt” bölgesinin toplam deformasyon değerleri

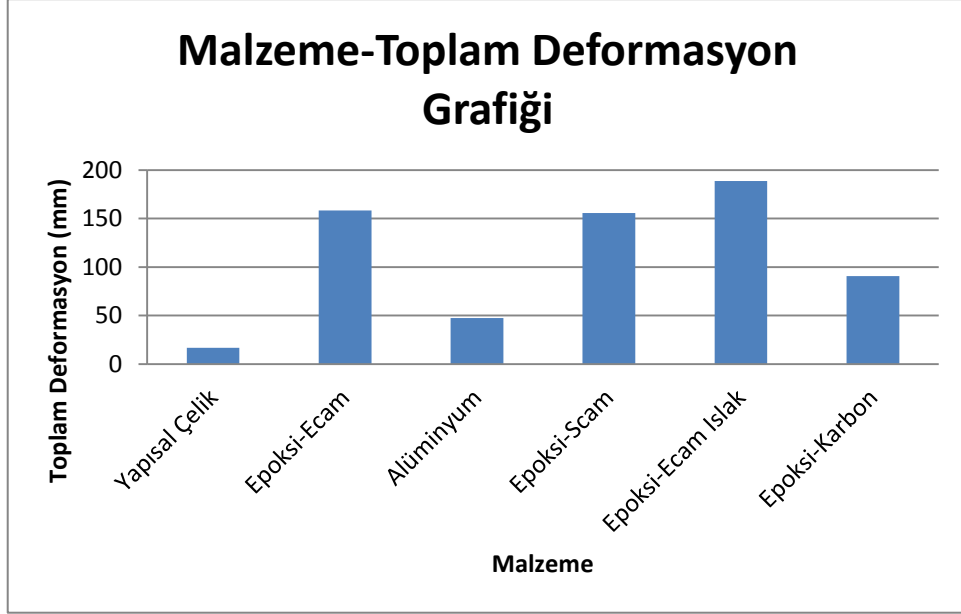
Ek 12. Kanadın malzeme-gerilim, malzeme-gerinim, malzeme-toplam deformasyon, malzeme-kütle grafikleri



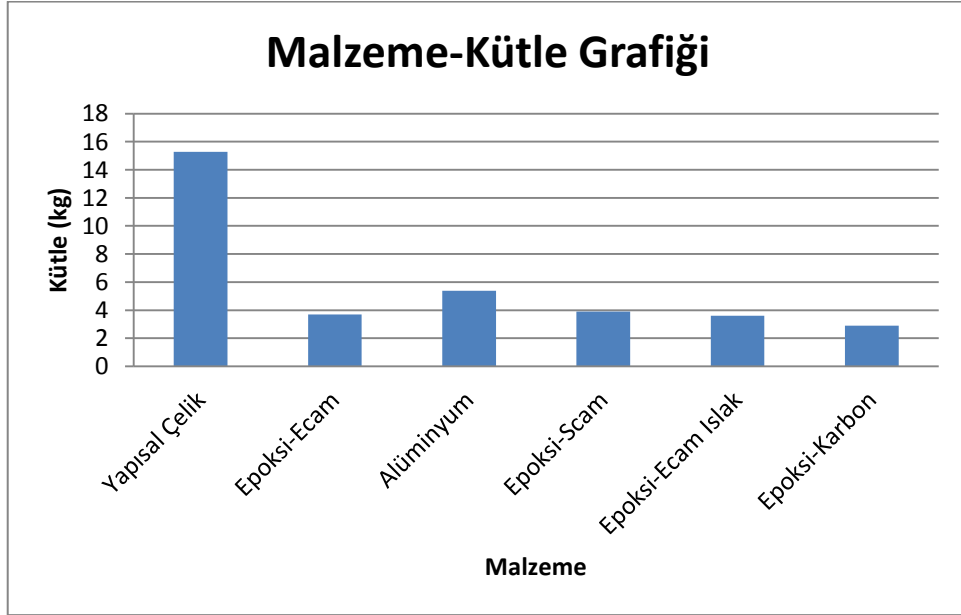
Şekil Ek 12.1 Kanat için malzeme-gerilme grafiği



Şekil Ek 12.2 Kanat için malzeme-gerinim grafiği

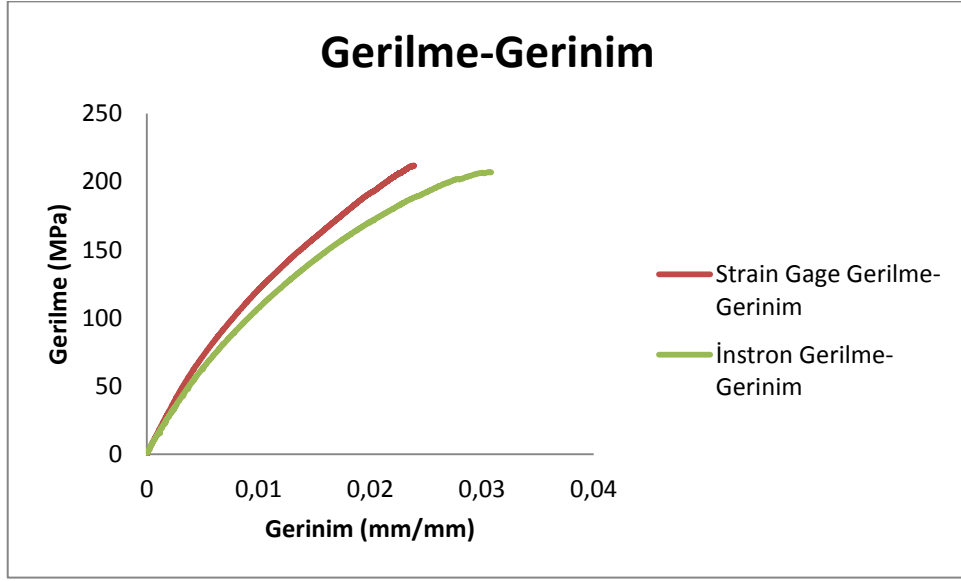


Şekil Ek 12.3 Kanat için malzeme-toplam deformasyon grafiği

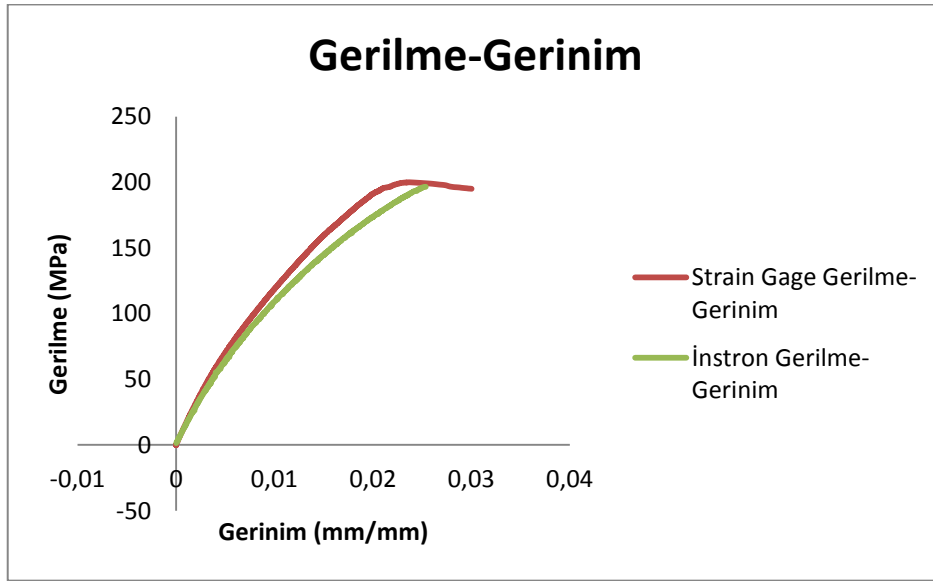


Şekil Ek 12.4 Kanat için malzeme-kütle grafiği

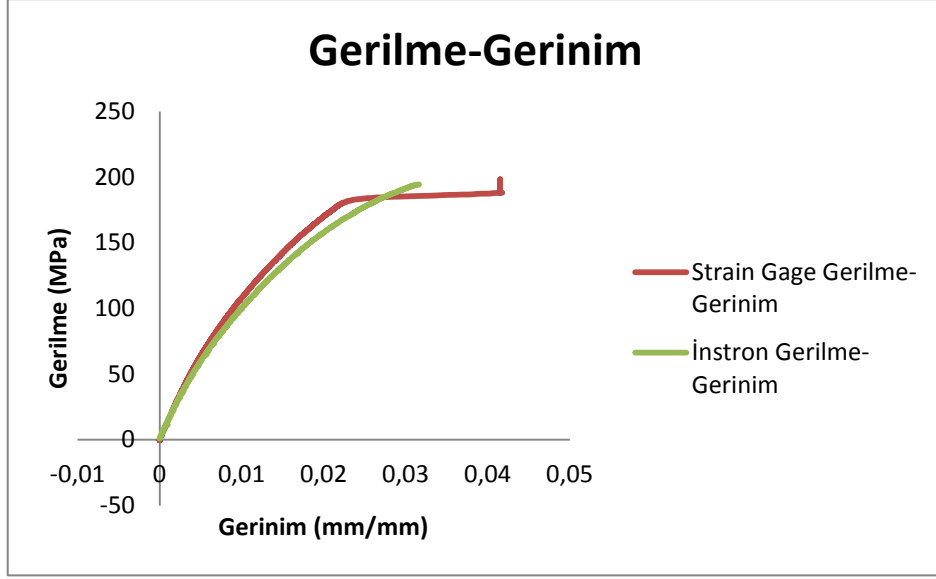
Ek 13. Çekme numuneleri için gerilme-gerinim grafikleri



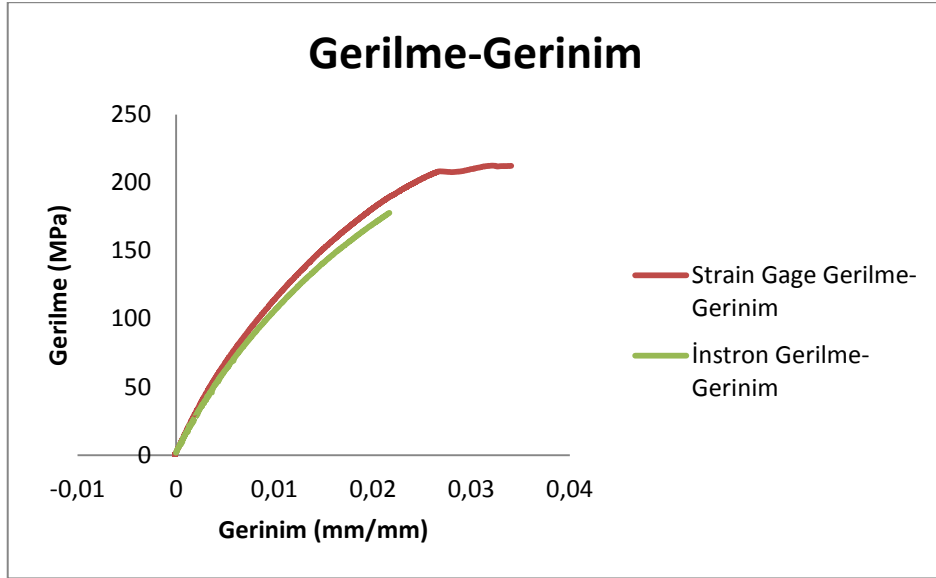
Şekil Ek 13.1 Birinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



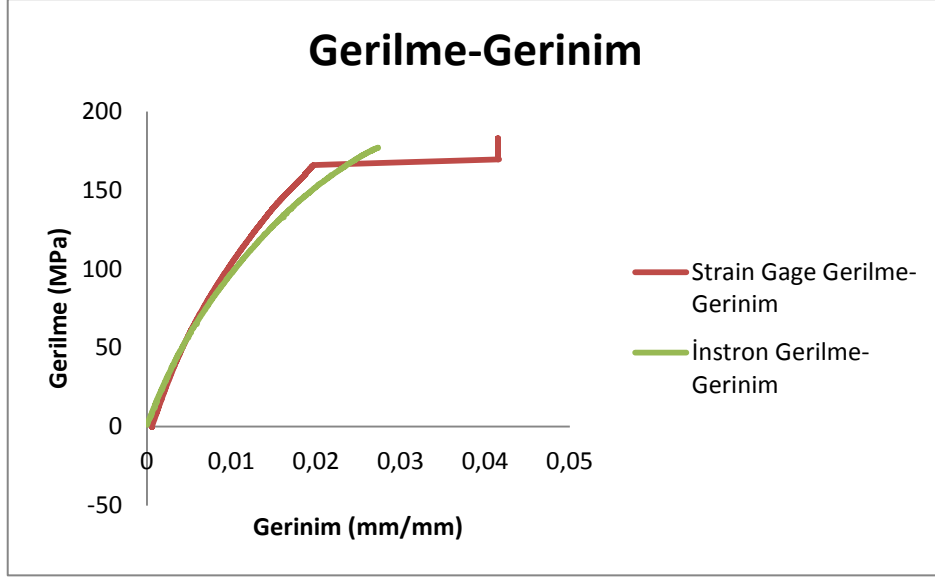
Şekil Ek 13.2 İkinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



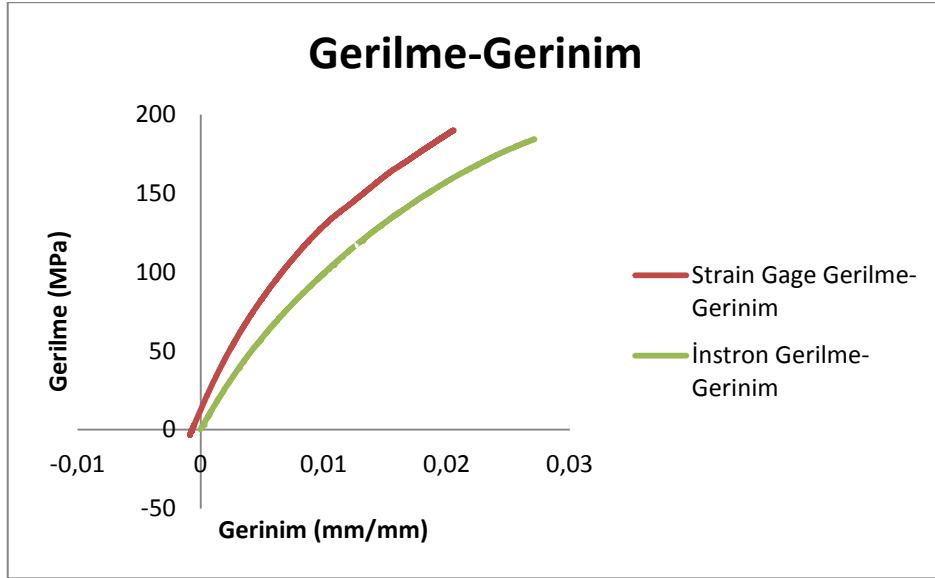
Şekil Ek 13.3 Üçüncü çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



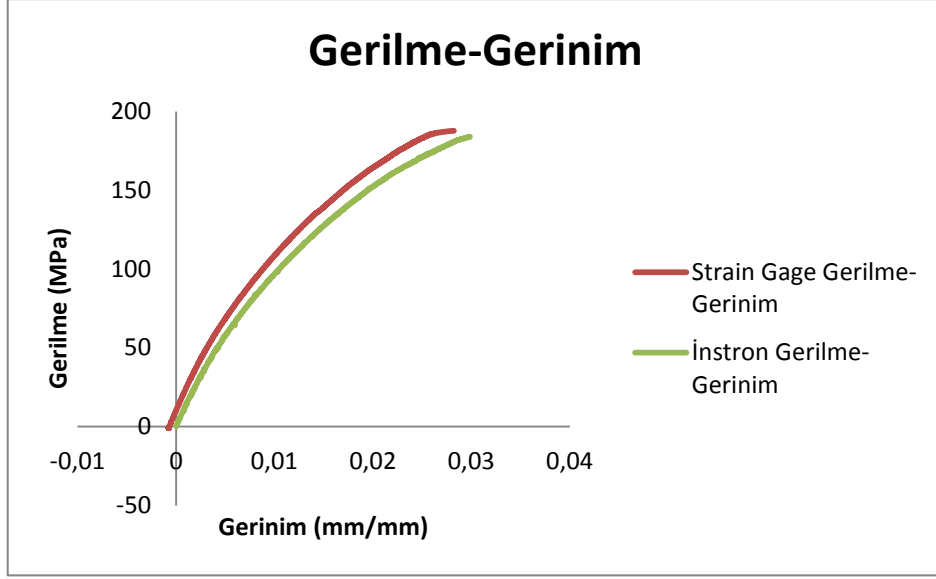
Şekil Ek 13.4 Dördüncü çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



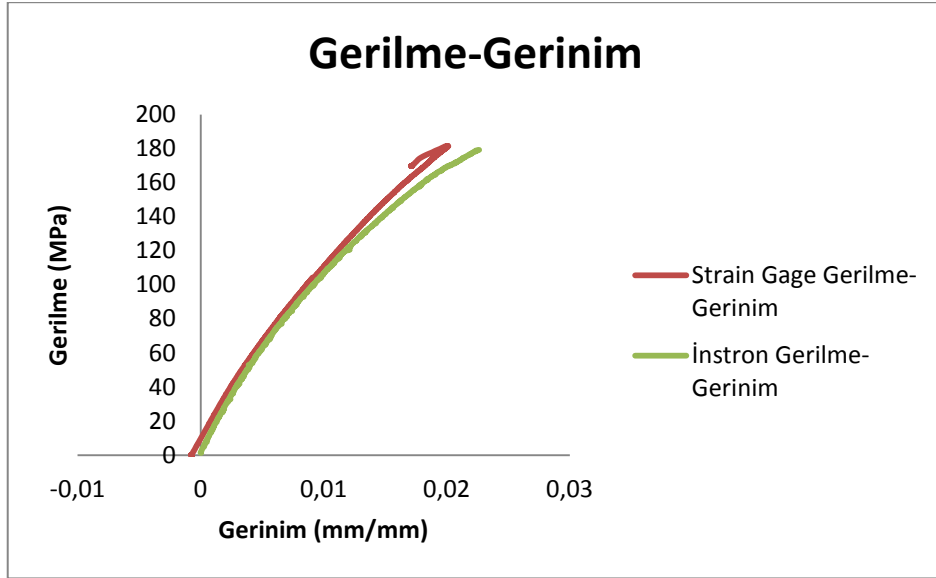
Şekil Ek 13.5 Beşinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



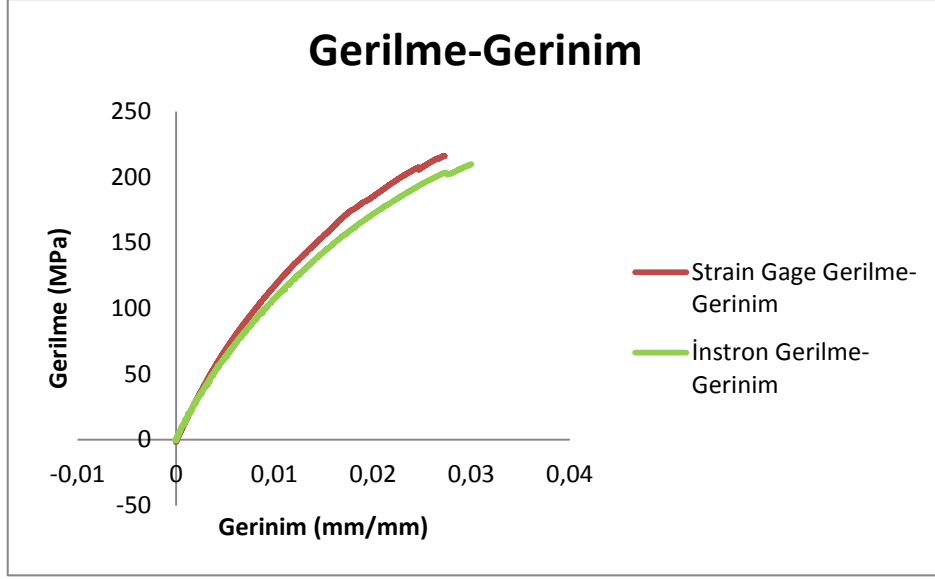
Şekil Ek 13.6 Altıncı çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



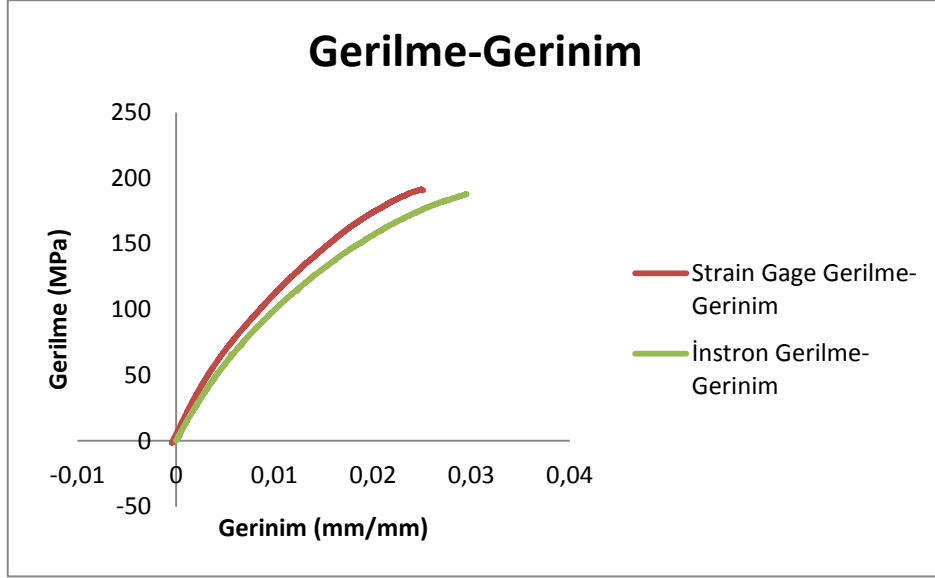
Şekil Ek 13.7 Yedinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



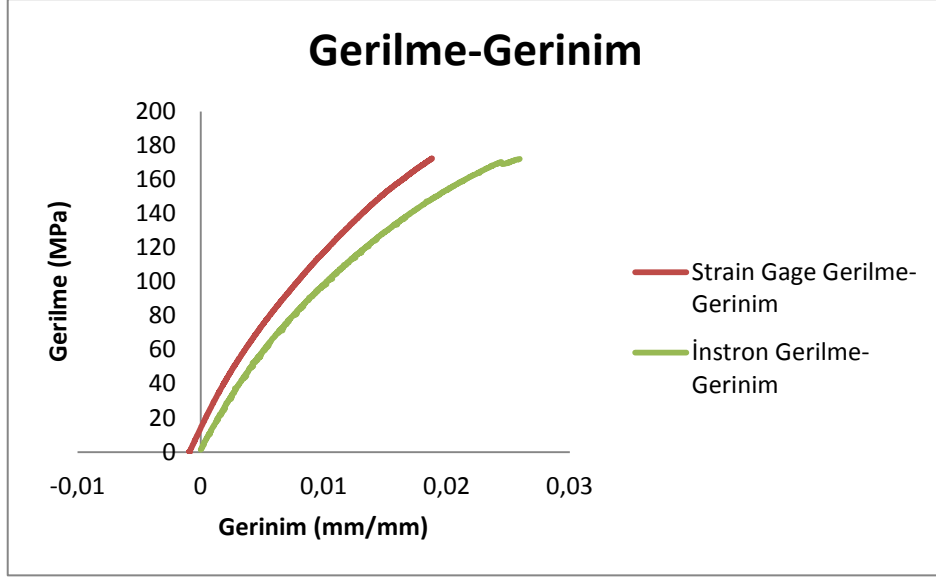
Şekil Ek 13.8 Sekizinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



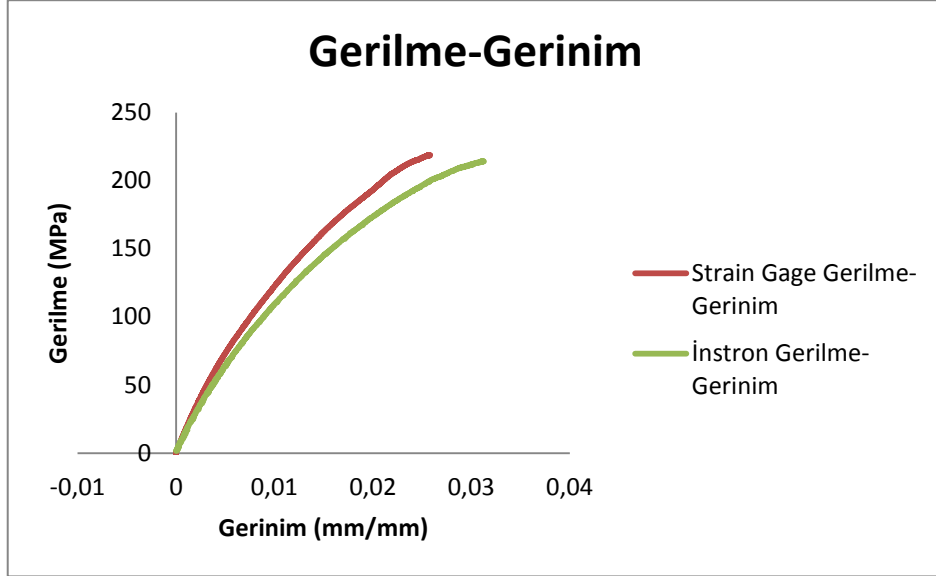
Şekil Ek 13.9 Dokuzuncu çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



Şekil Ek 13.10 Onuncu çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği

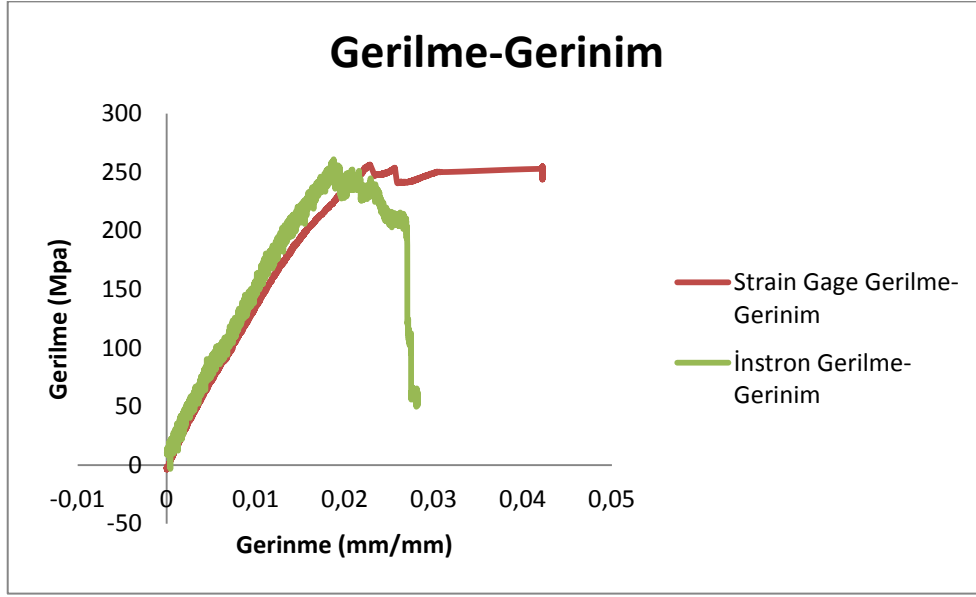


Şekil Ek 13.11 Onbirinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği

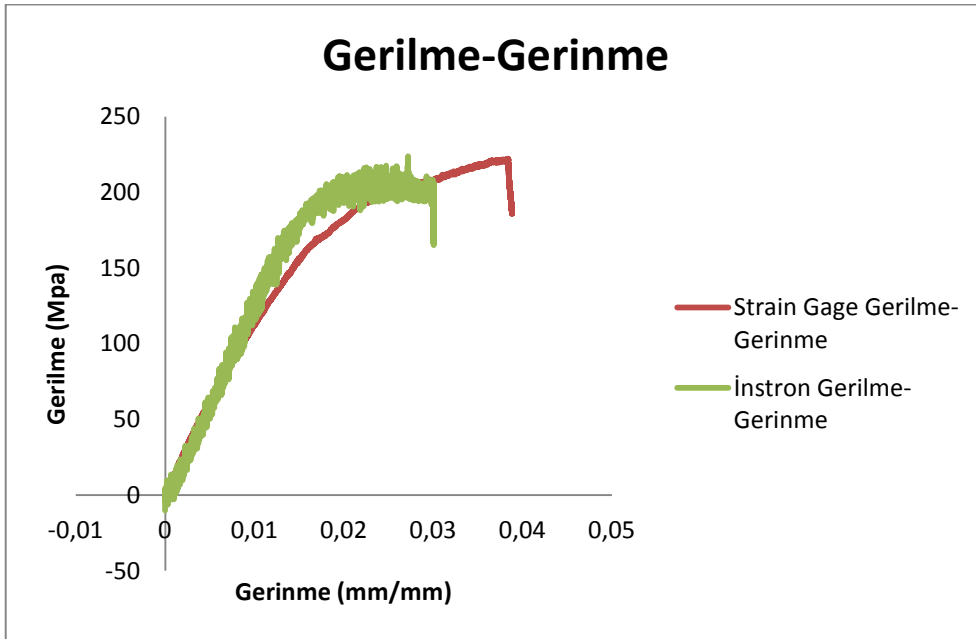


Şekil Ek 13.12 Onikinci çekme numunesinin gerilme-gerinim grafiği

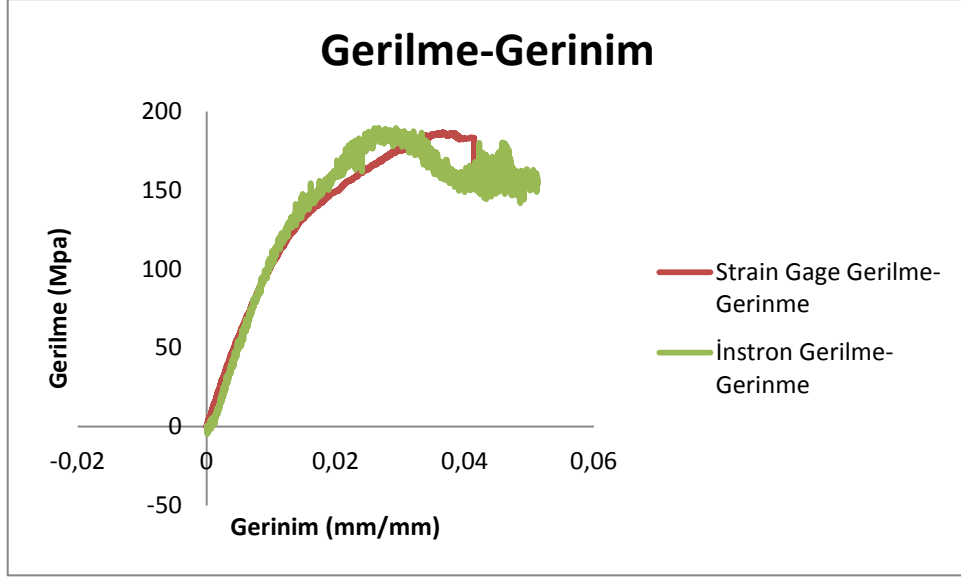
Ek 14. Eğilme numuneleri için gerilme-gerinim grafikleri



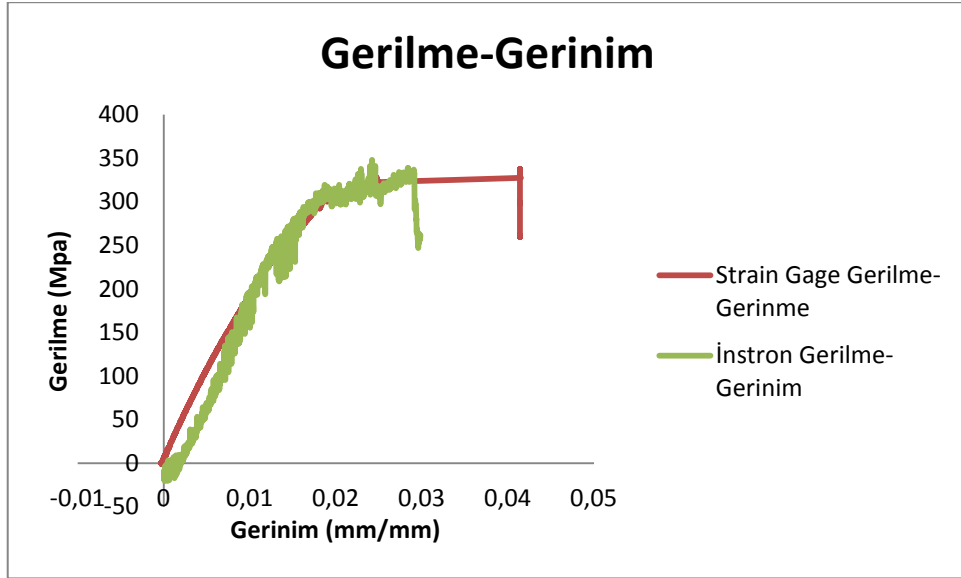
Şekil Ek 14.1 Birinci eğilme numunesinin gerilme--gerinim grafiği



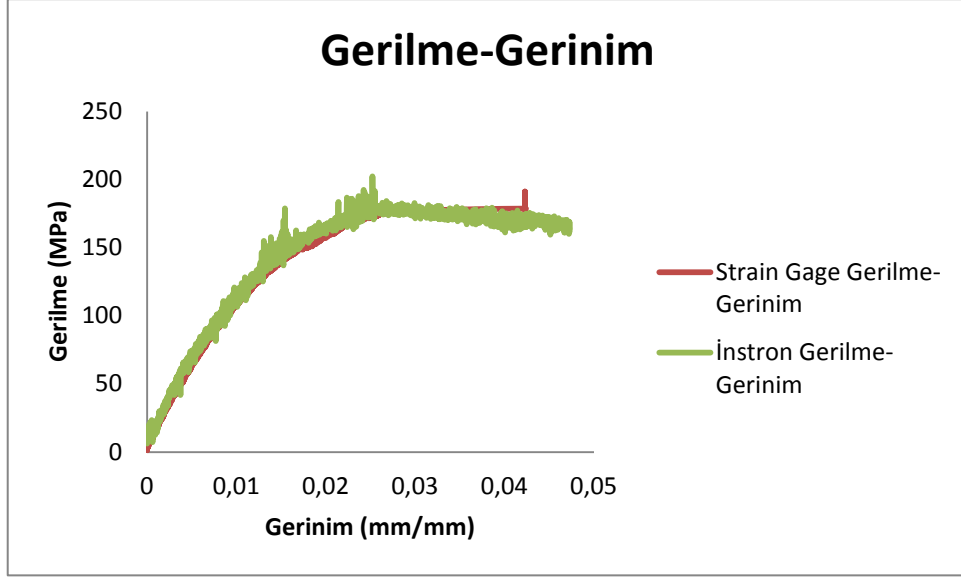
Şekil Ek 14.2 İkinci eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



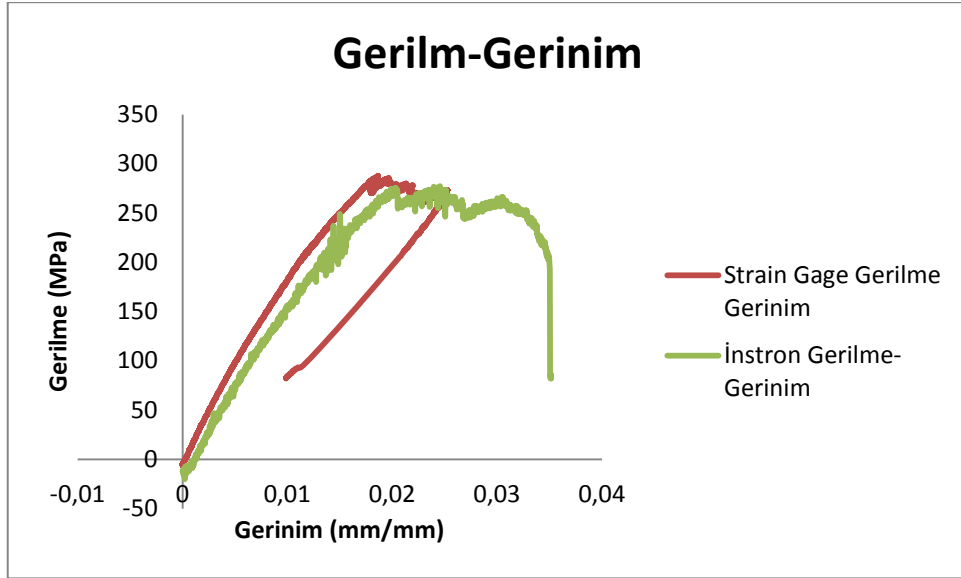
Şekil Ek 14.3 Üçüncü eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



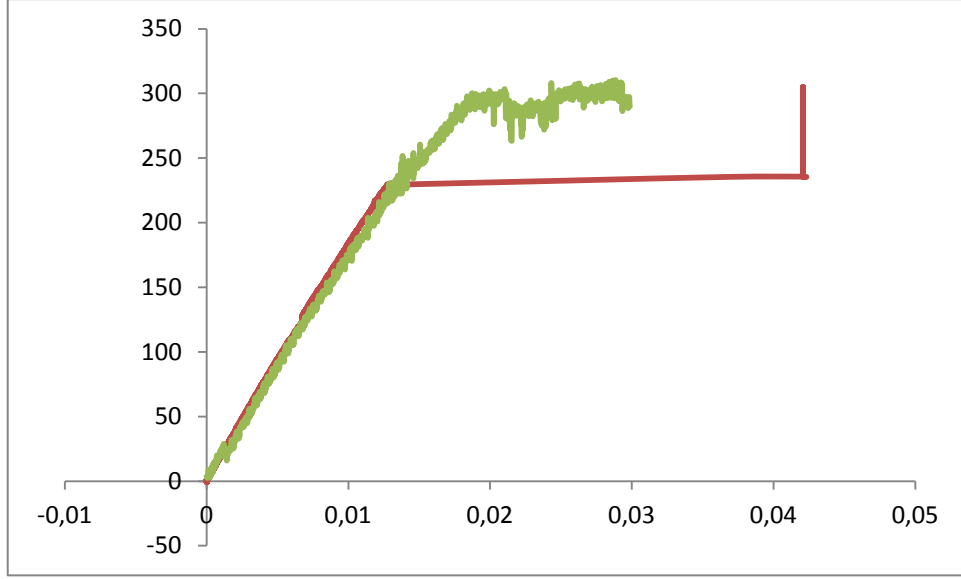
Şekil Ek 14.4 Dördüncü eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



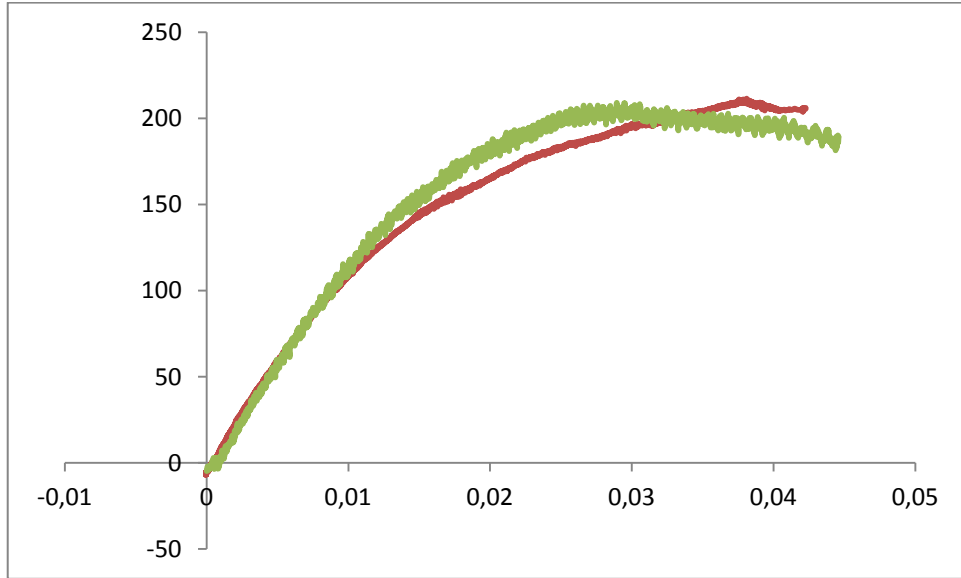
Şekil Ek 14.5 Beşinci eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



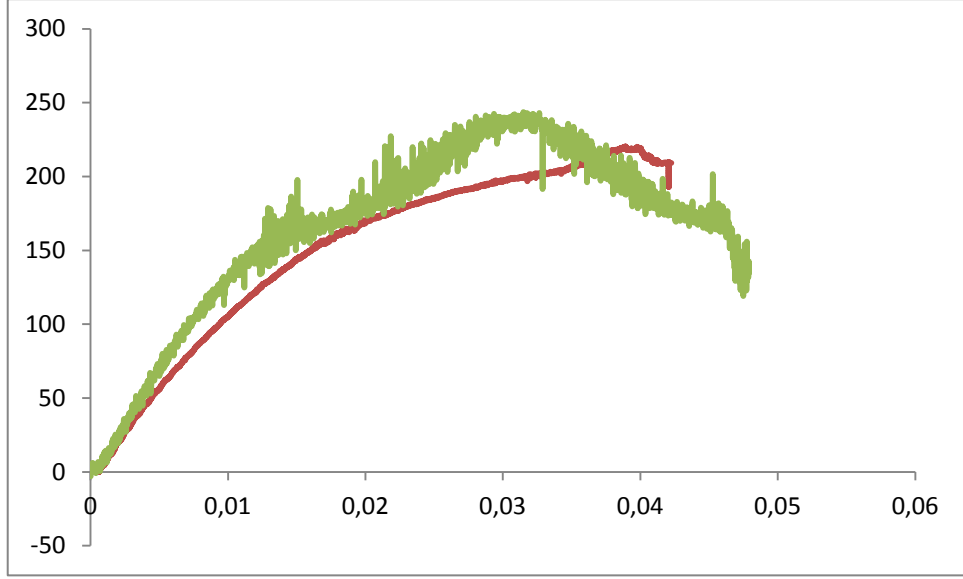
Şekil Ek 14.6 Altıncı eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



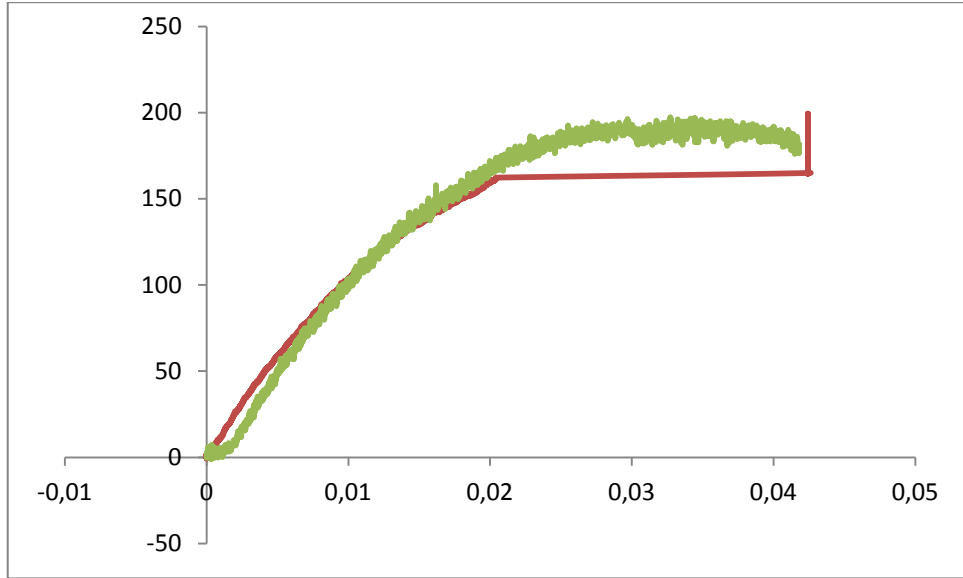
Şekil Ek 14.7 Yedinci eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



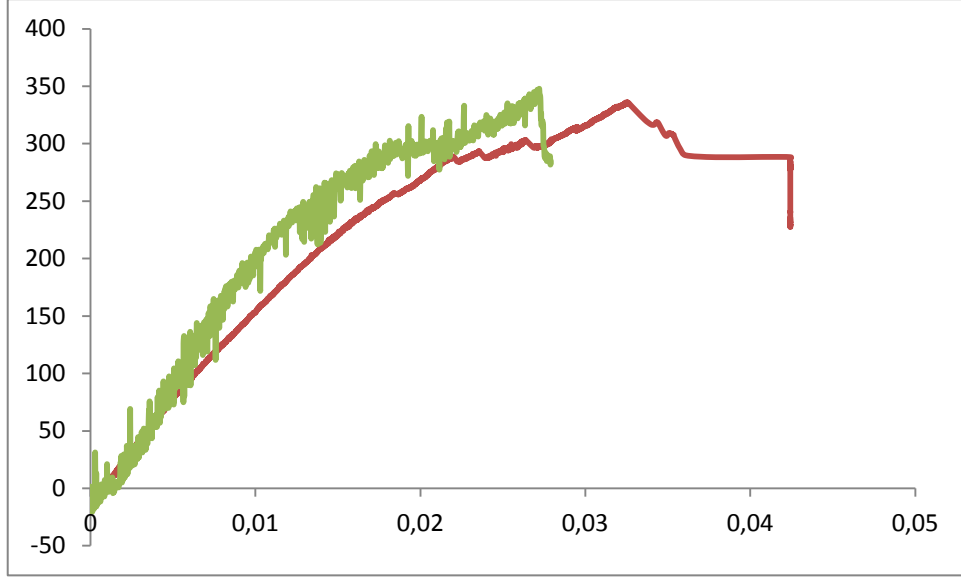
Şekil Ek 14.8 Sekizinci eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



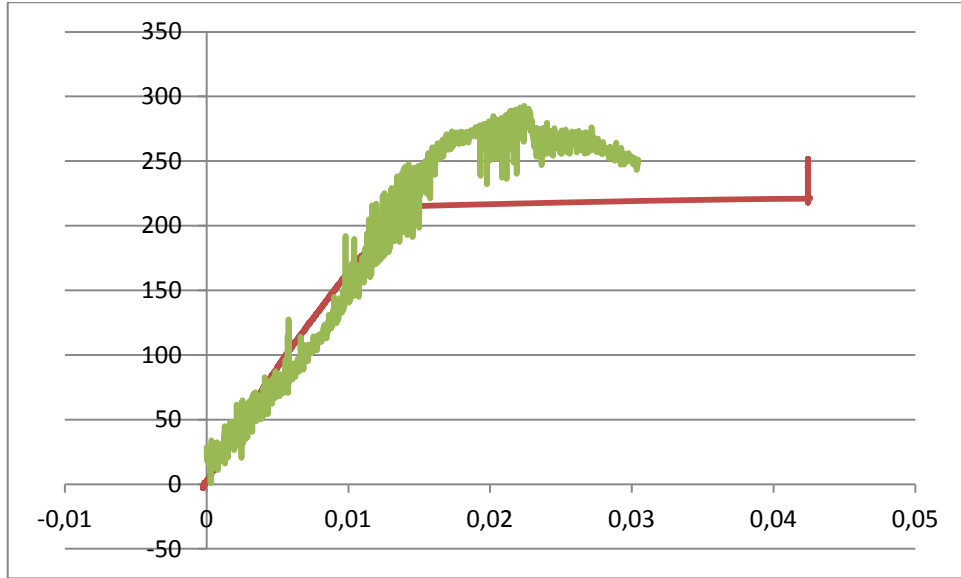
Şekil Ek 14.9 Dokuzuncu eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



Şekil Ek 14.10 Onuncu eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



Şekil Ek 14.11 Onbirinci eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği



Şekil Ek 14.12 Onikinci eğilme numunesinin gerilme-gerinim grafiği