



**ÜRETİMDEKİ SICAKLIK VE SERİM PARAMETRELERİNİN
TERMOPLASTİK KOMPOZİT KULAKÇIKLARIN MEKANİK
DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**

Uğur Görkem ÇAKICI

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Uğur Görkem ÇAKICI

30/12/2021

ÜRETİMDEKİ SICAKLIK VE SERİM PARAMETRELERİNİN TERMOPLASTİK
KOMPOZİT KULAKÇIKLARIN MEKANİK DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

(Doktora Tezi)

Uğur Görkem ÇAKICI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2021

ÖZET

Savunma ve havacılık teknolojileri her geçen gün hızla gelişmektedir. Havacılıkta ağırlık azaltılması çok önemli bir konudur, bu nedenle malzemelerin hafifletilmesi için yapılan çalışmalar son dönemlerde hızlanmıştır. Kompozit malzemelerde bu noktada havacılıktaki kullanım alanı olarak sürekli gelişme göstermektedir. Termoset kompozitler artık havacılık alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır fakat termoplastik kompozitler ise kullanım alanının arttırılabilmesi için halen üzerinde çalışmaların yürütüldüğü kısımdır. Termoplastik kompozitler tekrar şekillendirilebilme ve proses kolaylığı ile birlikte ham madde stoklama kolaylığı gibi konular nedeni ile termoset kompozitlere göre avantajlar sunmaktadır. Bu tez kapsamında son dönemlerde savunma ve havacılık alanında kullanımı için çalışmalar yürütülen poli-eter-keton-keton matrisli karbon fiber takviyeli (CF/PEKK) kompozitlerin otoklav ile üretimi esnasındaki temel üretim parametrelerinden kürleme sıcaklığının malzemenin mekanik dayanımları üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. İdeal kürleme sıcaklığının belirlenmesinden sonra ise kompozit kulakçık yapıların mekanik dayanımlarının serim parametresinin üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. Kompozit kulakçık yapılar döner kanat hava araçlarında rotor ile pallerin bağlantısının yapıldığı delikli yapılar olup döner kanat hava araçlarında yapısal olarak çok önemli bir rol üstlenmektedir. Yapılan testler neticesinde termoplastik kompozit kulakçıkların statik ve yorulma testleri icra edilmiş ve alınan sonuçlar başarılı olarak bulunmuştur. Bu tez kapsamında yapılan testler ile kavramsal tasarımı olan bir hava aracında kullanılabilirliği görünen kompozit kulakçık yapıların daha detaylı testler neticesinde bir hava aracında kullanılabilirliğini göstermektedir. Ayrıca üretim aşamasındaki problemler tespit edilmiş olup, ileride yapılacak çalışmalara bir altyapı sağlaması beklenmektedir.

Bilim Kodu : 91417
Anahtar Kelimeler : Termoplastik kompozitler, kompozit kulakçık yapılar, otoklav
Sayfa Adedi : 206
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Osman Selim TÜRKBAŞ
İkinci Danışman : Prof. Dr. Bora YILDIRIM

DETERMINATION OF THE EFFECT OF PRODUCTION TEMPERATURE AND
STACKING PARAMETERS ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF THE
THERMOPLASTIC COMPOSITE LUGS

(Ph. D. Thesis)

Uğur Gökem ÇAKICI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2021

ABSTRACT

Defense and aerospace technologies are developing rapidly day by day. Due to the demand on reduction of weight is such an essential issue in aviation, research into lighter materials has lately increased. At this point, composite materials are constantly developing as a field of use in aerospace. Thermoset composites are already widely used in the aviation industry, although thermoplastic composites are still the subject of research to expand their application. Because of its re-formability and ease of processing, as well as the convenience of stocking raw materials, thermoplastic composites have an advantage over thermoset composites. The goal of this thesis is to assess the impact of curing temperature on mechanical strength during autoclave manufacturing of poly-ether-ketone-ketone matrix carbon fiber reinforced (CF/PEKK) composites, which have recently been studied in defense and aerospace industries. The effect of the mechanical strength of the composite lug structures on the layup parameter will be investigated after the ideal curing temperature has been determined. In rotary-wing aircraft, composite lug structures are perforated structures that connect the rotor and blades. They play a crucial role in rotary-wing aircraft as primary structural parts. As a result of mechanical evaluation, performed static and fatigue test of the thermoplastic composite lugs were found to be successful. The tests conducted as part of this thesis demonstrate the usability of composite lug structures, which can be employed in a rotary-wing aircraft with a conceptual design, after more extensive testing. Furthermore, process parameters in the production phase have been clarified, and it is expected to serve as a foundation for future research.

Science Code : 91417
Key Words : Thermoplastic composites, composite lug structures, autoclave
Page Number : 206
Supervisor : Dr. Öğr. Üyesi Osman Selim TÜRKBAS
Co-Supervisor : Prof. Dr. Bora YILDIRIM

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasındaki değerli bilgi ve tecrübeleri ile birlikte sonsuz desteklerinden dolayı değerli hocalarım ve danışmanlarım Dr. Öğr. Üyesi Osman Selim TÜRKBAŞ'a ve Prof. Dr. Bora YILDIRIM'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sürecinde değerli katkıları nedeni Prof. Dr. Bedri TUÇ ve Dr. Öğr. Üyesi Nihat GEMALMAYAN'a şükranlarımı sunarım.

Bu tezin oluşmasındaki destekleri nedeni ile Türk Havacılık ve Uzay Sanayi'ne ve tüm değerli yöneticilerime, tez çalışmalarım boyunca bir abi olarak destek gösteren Remzi Ecmel ECE ve Murat ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve bana destek olan dosttan öte kardeşim Alper AVCIOĞLU'na ;

Hayatımın her döneminde bana kayıtsız şartsız destek olan, beni cesaretlendiren ve hakkını asla ödeyemeyeceğim kıymetlim abim İbrahim Orçun ÇAKICI'ya

Hayatımın her döneminde bana her zaman destek olup sonsuz sevgileri ile her zaman yanımda olan ve çok değerli dualarını benden hiç esirgemeyen, asla haklarını ödeyemeceğim çok değerli annem Gülhan ÇAKICI ve babam Mustafa ÇAKICI'ya

Sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışma TUSAŞ'ın Tübitak 1515 İMPET Öncül Ar-Ge Laboratuvarı Desteęiyle (Proje No : 5189901) yürütülen projeler kapsamında gerçekleştirilmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	7
2.2. Sürekli Elyaf Takviyeli Polimerik Kompozitler.....	8
2.3. Sürekli Elyaf Takviyeli Polimerik Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri.....	8
2.3.1. Fiber tipleri	9
2.3.2. Fiberlerin yüzey işlemleri - Fiber ve polimer arasındaki uyumluluk	13
2.3.3. Takviye formları.....	14
2.4. Sürekli Takviyeli Polimerik Fiber Kompozitlerde Polimer Sistemler	17
2.4.1. Termoset polimerler	18
2.4.2. Termoplastik polimerler	19
2.4.3. Termoplastik ve termoset matrislerin avantajları ve dezavantajları.....	21
2.5. Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Metotları	23
2.5.1. Prepreg hazırlığı	24
2.5.2. Termoset matrisli kompozit üretim metotları.....	28
2.5.3. Termoplastik matrisli kompozit üretim metotları.....	32

	Sayfa
2.6. Kompozit Kulakçık Yapılar.....	34
3. MATERYAL VE ÜRETİM YÖNTEMİ.....	39
3.1. Kupon ve Komponentlerde Kullanılan Materyal	39
3.2. Kupon Numunelerinin Üretim Metodu	41
3.3. Kupon Numune Testleri ve Numune Hazırlığı.....	45
3.4. Kupon Numune Plakalarına Ultrasonik Muayene Analizi	49
3.5. Kupon Numunelerine Boşluk Oranı Testleri	50
3.6. Kupon Numunelerinin Taramalı Elektron Mikroskop İle İncelenmesi.....	52
3.7. Kupon Numunelerinin Otoklav Döngüleri	54
3.8. Komponent Numunelerinin Üretim Metodu	55
3.9. Komponent Numunelerinin Ultrasonik Muayene Analizi.....	56
3.10. Komponent Numunelerinin X-Ray Görüntülemesi.....	58
3.11. Komponent Numunelerinin Mikroskop İle İncelenmesi	62
4. TESTLER VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	65
4.1. Kupon Numune Plakalarına Ultrasonik Muayene Analiz Sonuçları.....	65
4.2. Kupon Numunelerinde Boşluk Oranı Test Sonuçları.....	69
4.3. Kupon Numune Mekanik Testleri	75
4.3.1. 0 derece çekme testi sonuçları.....	79
4.3.2. 90 derece çekme testi sonuçları.....	85
4.3.3. +/- 45 derece çekme testi sonuçları	92
4.3.4. Üç nokta eğilme testi sonuçları	98
4.3.5. Kupon seviyesi mekanik testlerin değerlendirmesi.....	104
4.4. Kupon Numunelerinin Elektron Mikroskop İncelemeleri.....	105
4.4.1. 0 derece çekme testi SEM görüntüleri.....	106
4.4.2. 90 derece çekme testi SEM görüntüleri.....	109
4.4.3. +/- 45 derece çekme testi SEM görüntüleri.....	112

	Sayfa
4.4.4. Üç nokta eğilme testi SEM görüntüleri	115
4.4.5. Boşluk oranı testleri SEM görüntüleri.....	117
4.5. Komponent Numunelerinin Ultrasonik Test Sonuçları	118
4.5.1. 1 Numaralı komponent tahribatsız muayene sonuçları	119
4.5.2. 2 Numaralı komponent tahribatsız muayene sonuçları	120
4.5.3. 3 Numaralı komponent tahribatsız muayene sonuçları	120
4.5.4. 4 Numaralı komponent tahribatsız muayene sonuçları	122
4.5.5. 5 Numaralı komponent tahribatsız muayene sonuçları	123
4.5.6. 6 Numaralı komponent tahribatsız muayene sonuçları	123
4.6. Komponent Numunelerinin Radyografik (X-ray) Test Sonuçları	124
4.7. Komponent Numunelerinin Statik Test Sonuçları.....	128
4.7.1. 1 Numaralı komponent statik test sonucu	132
4.7.2. 2 Numaralı komponent statik test sonucu	133
4.7.3. 3 Numaralı komponent statik test sonucu	134
4.7.4. 4 Numaralı komponent statik test sonucu	135
4.7.5. 5 Numaralı komponent statik test sonucu	136
4.7.6. 6 Numaralı komponent statik test sonucu	137
4.7.7. Kompozit komponent statik test sonuçlarının değerlendirilmesi	138
4.8. Komponent Numunelerinin Statik Test Sonucu X-Ray Görüntüleri.....	140
4.8.1. 1 Numaralı komponent statik test sonucu X-ray görüntüleri	141
4.8.2. 2 Numaralı komponent statik test sonucu X-ray görüntüleri	142
4.8.3. 3 Numaralı komponent statik test sonucu X-ray görüntüleri	143
4.8.4. 4 Numaralı komponent statik test sonucu X-ray görüntüleri	144
4.8.5. 5 Numaralı komponent statik test sonucu X-ray görüntüleri	145
4.8.6. 6 Numaralı komponent statik test sonucu X-ray görüntüleri	146
4.9. Komponent Numunelerinin Mikroskop Görüntüleri	147

	Sayfa
4.9.1. 1 Numaralı komponent mikroskop incelemesi.....	150
4.9.2. 2 Numaralı komponent mikroskop incelemesi.....	152
4.9.3. 3 Numaralı komponent mikroskop incelemesi.....	155
4.9.4. 4 Numaralı komponent mikroskop incelemesi.....	158
4.9.5. 5 Numaralı komponent mikroskop incelemesi.....	161
4.9.6. 6 Numaralı komponent mikroskop incelemesi.....	164
4.9.7. Komponent mikroskop incelemesi değ�erlendirmesi	166
4.10. Komponent Yorulma Testi	167
5. DEĞ�ERLEND�İRME	175
6. SONU�LAR.....	183
KAYNAKLAR	189
EKLER.....	209
EK-1. Komponent par�aların serim kombinasyonları	196
�ZGE�M��	205

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Elyaf çapına göre cam elyaf akma noktaları.....	13
Çizelge 2.2. Takviye formları ve uygulama alanları ile avantajları.....	14
Çizelge 2.3. Yüksek Sıcaklık Termoplastikleri	20
Çizelge 2.4. Mühendislik Termoplastikleri	20
Çizelge 2.5. Tipik termoplastik ve termoset karşılaştırması.....	21
Çizelge 3.1. Keton varlıklarının oranları ile farklı PAEK'in kimyasal yapısı.....	41
Çizelge 3.2. Otoklav teknik özellikleri	45
Çizelge 3.3. Plaka ve kupon test özellikleri.....	46
Çizelge 4.1. Plaka ve test numunelerinin kodlanması	65
Çizelge 4.2. Daldırma yoğunluk test sonuçları.....	71
Çizelge 4.3. Varyant 1 ve Varyant 2 plakaların piknometredeki yoğunluk test sonuçları.....	72
Çizelge 4.4. Varyant 3 ve Varyant 4 plakaların piknometredeki yoğunluk test sonuçları.....	73
Çizelge 4.5. Üretimleri yapılan plakaların boşluk oranları test sonuçları.....	74
Çizelge 4.6. Varyant A1 kupon numunelerinin test sonuçları.....	80
Çizelge 4.7. Varyant A1 ortalama mekanik özellikleri.....	80
Çizelge 4.8. Varyant B1 kupon numunelerinin test sonuçları	82
Çizelge 4.9. Varyant B1 ortalama mekanik özellikleri.....	82
Çizelge 4.10. Varyant C1 kupon numunelerinin test sonuçları	84
Çizelge 4.11. Varyant C1 ortalama mekanik özellikleri.....	84
Çizelge 4.12. Varyant A2 kupon numunelerinin test sonuçları	86
Çizelge 4.13. Varyant A2 ortalama mekanik özellikleri.....	87
Çizelge 4.14. Varyant B2 kupon numunelerinin test sonuçları	88
Çizelge 4.15. Varyant B2 ortalama mekanik özellikleri.....	88

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.16. Varyant C2 kupon numunelerinin test sonuçları	90
Çizelge 4.17. Varyant C2 ortalama mekanik özellikleri.....	90
Çizelge 4.18. Varyant A3 kupon numunelerinin test sonuçları	93
Çizelge 4.19. Varyant A3 ortalama mekanik özellikleri.....	93
Çizelge 4.20. Varyant B3 kupon numunelerinin test sonuçları	95
Çizelge 4.21. Varyant B3 ortalama mekanik özellikleri.....	95
Çizelge 4.22. Varyant C3 kupon numunelerinin test sonuçları	96
Çizelge 4.23. Varyant C3 ortalama mekanik özellikleri.....	96
Çizelge 4.24. Varyant A4 kupon numunelerinin test sonuçları	99
Çizelge 4.25. Varyant A4 ortalama mekanik özellikleri.....	99
Çizelge 4.26. Varyant B4 kupon numunelerinin test sonuçları	101
Çizelge 4.27. Varyant B4 ortalama mekanik özellikleri.....	101
Çizelge 4.28. Varyant C4 kupon numunelerinin test sonuçları	102
Çizelge 4.29. Varyant C4 ortalama mekanik özellikleri.....	102
Çizelge 4.30. Komponent serim yönlerine göre numune kodlaması	118
Çizelge 4.31. Komponent serim yönlerine göre numune kodlaması	129
Çizelge 4.32. 1 numaralı komponent test sonuçları özeti	133
Çizelge 4.33. 2 numaralı komponent test sonuçları özeti	134
Çizelge 4.34. 3 numaralı komponent test sonuçları özeti	135
Çizelge 4.35. 4 numaralı komponent test sonuçları özeti	136
Çizelge 4.36. 5 numaralı komponent test sonuçları özeti	137
Çizelge 4.37. 6 numaralı komponent test sonuçları özeti	138
Çizelge 4.38. Yorulma test sonuçları	173
Çizelge 5.1. Kavramsal tasarım değerleri	179

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Boeing 787 Dreamliner uçağında kullanılan malzemeler	6
Şekil 2.2. Takviye malzemesine göre kompozitler	7
Şekil 2.3. Matris malzemelerine göre kompozitler	8
Şekil 2.4. Takviyeli dokuma ve çift eksenli kumaş arasındaki farklar	16
Şekil 2.5. Dokuma türlerine göre farklı fomlarda kumaş yapılar	16
Şekil 2.6. Çok yönlü takviyeli kompozit yapı örneği	17
Şekil 2.7. Polimer matrisli kompozitlerin genel üretim metotları	23
Şekil 2.8. Filament sargı şematik gösterimi	28
Şekil 2.9. Vakum torbasında prepreg elle serme şematiği	30
Şekil 2.10. Reçine transfer kalıplama metodu şematiği	31
Şekil 2.11. Profil çekme yöntemi şematik gösterimi	31
Şekil 2.12. Pres ile şekillendirme üretim şematiği	33
Şekil 2.13. Otoklav üretim şematiği	34
Şekil 2.14. Kulakçık yapılarında tipik hata modelleri a-) Çekme yükü altında b-) Bası yükü altında	35
Şekil 3.1. a-) Eter b-) Keton molekülleri	40
Şekil 3.2. Termoplastik polimerlerin termo-mekanik özelliklerinin bir fonksiyonu olarak sınıflandırılması	40
Şekil 3.3. Üretilen plakalara ait otoklav döngüsü	54
Şekil 3.4. Üretilen komponent ölçüleri	55
Şekil 4.1. C3 Plakasının Doppler cihazındaki tarama görüntüsü	66
Şekil 4.2. B2 Plakasının Doppler cihazındaki tarama görüntüsü	67
Şekil 4.3. A,B ve C plakaları için ultrasonik C-tarama sonuçları	68
Şekil 4.4. Üretilen plakaların boşluk oranları test sonuçları	75
Şekil 4.5. Varyant A1 test sonuçları	79

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. Varyant B1 test sonuçları.....	81
Şekil 4.7. Varyant C1 test sonuçları.....	83
Şekil 4.8. 0 derece çekme testi sonuçlarının karşılaştırılması	85
Şekil 4.9. Varyant A2 test sonuçları	86
Şekil 4.10. Varyant B2 test sonuçları.....	88
Şekil 4.11. Varyant C2 test sonuçları.....	90
Şekil 4.12. 90 derece çekme testi numunelerinin karşılaştırılması.....	92
Şekil 4.13. Varyant A3 test sonuçları	93
Şekil 4.14. Varyant B3 test sonuçları.....	94
Şekil 4.15. Varyant C3 test sonuçları.....	96
Şekil 4.16. +/- 45 derece çekme testi numunelerinin karşılaştırılması	97
Şekil 4.17. Varyant A4 test sonuçları	99
Şekil 4.18. Varyant B4 test sonuçları.....	100
Şekil 4.19. Varyant C4 test sonuçları.....	102
Şekil 4.20. Üç nokta eğilme testi numunelerinin karşılaştırılması	104
Şekil 4.21. Komponent 1 numaralı tahribatsız muayene görseli (C-taraması-B-taraması)	119
Şekil 4.22. Komponent 2 numaralı tahribatsız muayene görseli (C-taraması-B-taraması)	120
Şekil 4.23. Komponent 3 numaralı tahribatsız muayene görseli (C-taraması-B-taraması)	121
Şekil 4.24. Komponent 4 numaralı tahribatsız muayene görseli (C-taraması-B-taraması)	122
Şekil 4.25. Komponent 5 numaralı tahribatsız muayene görseli (C-taraması-B-taraması)	123
Şekil 4.26. Komponent 6 numaralı tahribatsız muayene görseli (C-taraması-B-taraması)	124
Şekil 4.27. 1 numaralı komponent kuvvet-zaman grafiği.....	132
Şekil 4.28. 2 numaralı komponent kuvvet-zaman grafiği.....	133

Şekil	Sayfa
Şekil 4.29. 3 numaralı komponent kuvvet-zaman grafiği.....	134
Şekil 4.30. 4 numaralı komponent kuvvet-zaman grafiği.....	136
Şekil 4.31. 5 numaralı komponent kuvvet-zaman grafiği.....	137
Şekil 4.32. 6 numaralı komponent kuvvet-zaman grafiği.....	138
Şekil 4.33. Statik testlerin mekanik dayanım karşılaştırması	139
Şekil 4.34. Komponent test parçalarının kalınlık karşılaştırması	140
Şekil 4.35. Yorulma yükleme grafiği.....	168
Şekil 4.36. Yorulma numunesi gerinim ölçer lokasyonları ve isimlendirmesi.....	169
Şekil 4.37. MTS test cihazı yorulma yüklemesi grafiği.....	170
Şekil 4.38. Test esnasında gerinim ölçer değerlerini gösteren grafik	171
Şekil 4.39. Yorulma testi gerinim ölçerlerden alınan değerler 1.bölüm.....	171
Şekil 4.40. Yorulma testi gerinim ölçerlerden alınan değerler 2.bölüm.....	172
Şekil 4.41. Yorulma testi gerinim ölçerlerden alınan değerler 3.bölüm.....	172
Şekil 5.1. Helikopter pal yapısı.....	178
Şekil 5.2. Helikopter pal yapısına gelen yüklemeler	178
Şekil 5.3. Helikopter pal kökü bağlantısı.....	180
Şekil 5.4. CF/PEKK gerilme-döngü grafiği.....	181

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Tek yönlü mat, dokuma prepreg ve fitil örnekleri	24
Resim 2.2. Tek yönlü prepreg üretimi	24
Resim 2.3. Isı ile şekillendirme ile üretilmiş paneller	32
Resim 3.1. Tek yönlü karbon fiber PEKK bant	39
Resim 3.2. Tek yönlü karbon fiber PEKK bant üzerinden el ile kesim işlemi	42
Resim 3.3. Tek yönlü karbon fiber PEKK bant üzerinden el ile kesim işlemi	42
Resim 3.4. Takımın otoklav döngüsüne hazırlık döngüsü	43
Resim 3.5. Otoklav yerleşimi ve vakum portlarının bağlantıları	44
Resim 3.6. Otoklav görüntüsü	44
Resim 3.7. CNC cihazı görüntüsü	47
Resim 3.8. İklimlendirme cihazı görüntüsü	48
Resim 3.9. İklimlendirme cihazı içerisindeki kupon malzeme görüntüsü	48
Resim 3.10. Gerinim ölçer bağlantısı ve veri toplama cihazı görseli	49
Resim 3.11. Ultrasonik muayene işlemi	50
Resim 3.12. Piknometre cihazı	51
Resim 3.13. Daldırma testi terazisi	52
Resim 3.14. ZEISS Evo 40 SEM cihazı	53
Resim 3.15. Emitech K550X kaplama cihazı	53
Resim 3.16. Üretimi yapılan komponent parça görseli	56
Resim 3.17. TECNATOM tahribatsız muayene cihazı	58
Resim 3.18. COMET MXR-160/20 X-ray cihazı	60
Resim 3.19. Balteau TSD225/3 X-ray	61
Resim 3.20. Numunelerin cihaza bağlanma görüntüsü	62
Resim 3.21. Olympus GX53 mikroskop görüntüsü	63

Resim	Sayfa
Resim 3.22. Epson tarama cihazı görüntüsü.....	64
Resim 4.1. Varyant A1-B1-C1 test numuneleri.....	69
Resim 4.2. Varyant A2-B2-C2 test numuneleri.....	69
Resim 4.3. Varyant A3-B3-C3 test numuneleri.....	70
Resim 4.4. Varyant A4-B4-C4 test numuneleri.....	70
Resim 4.5. Zwick Z250Allround Universal Test cihazı	76
Resim 4.6. Gerinim ölçer yapıştırma işleminde zımparalama	77
Resim 4.7. Gerinim ölçer yapıştırma işlemi	78
Resim 4.8. Lehimleme işlemi	78
Resim 4.9. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası.....	81
Resim 4.10. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası.....	83
Resim 4.11. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası.....	84
Resim 4.12. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası.....	87
Resim 4.13. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası.....	89
Resim 4.14. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası.....	91
Resim 4.15. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası.....	94
Resim 4.16. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası.....	95
Resim 4.17. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası.....	97
Resim 4.18. Üç nokta eğilme test rigi.....	98
Resim 4.19. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası.....	100
Resim 4.20. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası.....	101
Resim 4.21. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası.....	103
Resim 4.22. Karbon pasta uygulanması.....	105
Resim 4.23. Altın kaplama işleminin uygulanması	105
Resim 4.24. Altın kaplama işleminin uygulanmış kontrol numuneleri	106
Resim 4.25. Varyant A numunesi SEM görüntüsü a-) kırım yüzeyi b-) 200X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü d-) 1500X SEM görüntüsü.....	106

Resim	Sayfa
Resim 4.26. Varyant B numunesi SEM görüntüsü a-) kırım yüzeyi b-) 200X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü d-) 1500X SEM görüntüsü.....	107
Resim 4.27. Varyant C numunesi SEM görüntüsü a-) kırım yüzeyi b-) 200X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü d-) 1500X SEM görüntüsü.....	108
Resim 4.28. Varyant A numunesi SEM görüntüsü a-) kırım yüzeyi b-) 200X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü d-) 1500X SEM görüntüsü.....	109
Resim 4.29. Varyant B numunesi SEM görüntüsü a-) kırım yüzeyi b-) 200X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü d-) 1500X SEM görüntüsü.....	110
Resim 4.30. Varyant C numunesi SEM görüntüsü a-) kırım yüzeyi b-) 200X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü d-) 1500X SEM görüntüsü.....	111
Resim 4.31. Varyant A numunesi SEM görüntüsü a-) yan yüzeyi b-) 100X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü.....	112
Resim 4.32. Varyant B numunesi SEM görüntüsü a-) yan yüzeyi b-) 100X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü.....	113
Resim 4.33. Varyant C numunesi SEM görüntüsü a-) yan yüzeyi b-) 100X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü.....	114
Resim 4.34. Varyant A numunesi 100X SEM görüntüsü.....	115
Resim 4.35. Varyant B numunesi 100X SEM görüntüsü	116
Resim 4.36. Varyant C numunesi 100X SEM görüntüsü	117
Resim 4.37. Boşluk oranı tespiti için alınan SEM görüntüsü a-)Varyant A test numunesi b-) Varyant C test numunesi c-)Varyant B test numunesi	117
Resim 4.38. 1 ve 2 numaralı komponent numunelerinin X-ray görüntüleri.....	126
Resim 4.39. 3 ve 4 numaralı komponent numunelerinin X-ray görüntüleri.....	127
Resim 4.40. 5 ve 6 numaralı komponent numunelerinin X-ray görüntüleri.....	128
Resim 4.41. Besmak S100 çekme test cihazı.....	129
Resim 4.42. Otoklavdan çıkmış komponent numunesi	130
Resim 4.43. İşlemleri tamamlanmış komponent test numunesi	130
Resim 4.44. Test cihazına bağlanmış komponent parça	131
Resim 4.45. Dijital eğim ölçer ölçümü	131
Resim 4.46. 1 numaralı numune hasar bölgesi X-ray görüntüsü.....	141

Resim	Sayfa
Resim 4.47. 2 numaralı numune hasar bölgesi X-ray görüntüsü	142
Resim 4.48. 3 numaralı numune hasar bölgesi X-ray görüntüsü	143
Resim 4.49. 4 numaralı numune hasar bölgesi X-ray görüntüsü	144
Resim 4.50. 5 numaralı numune hasar bölgesi X-ray görüntüsü	146
Resim 4.51. 6 numaralı numune hasar bölgesi X-ray görüntüsü	147
Resim 4.52. Struers Tegamin 30 yüzey hazırlık cihazı	148
Resim 4.53. Buehler Varidur 10&200	149
Resim 4.54. Bakalite alınmış muayene örneği.....	149
Resim 4.55. 1 numaralı komponent muayene parçaları.....	150
Resim 4.56. 1 numaralı komponent numunesine ait makro görüntüleri.....	150
Resim 4.57. 1.1 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri	151
Resim 4.58. 1.2 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri	152
Resim 4.59. 2 numaralı komponent muayene parçaları.....	152
Resim 4.60. 2.2 numaralı komponent numunesine ait makro görüntüleri.....	153
Resim 4.61. 2.1 numaralı komponent numunesine ait yüzey görüntüsü	154
Resim 4.62. 2.2 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri	155
Resim 4.63. 3 numaralı komponent muayene parçaları.....	156
Resim 4.64. 3 numaralı komponent numunesine ait makro görüntüleri.....	156
Resim 4.65. 3.1 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri	157
Resim 4.66. 3.2 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri	158
Resim 4.67. 4 numaralı komponent muayene parçaları.....	158
Resim 4.68. 4.2 numaralı komponent numunesine ait makro görüntüleri.....	159
Resim 4.69. 4.1 numaralı komponent numunesine ait yüzey görüntüsü	160
Resim 4.70. 4.2 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri	161
Resim 4.71. 5 numaralı komponent muayene parçaları.....	161
Resim 4.72. 5 numaralı komponent numunesine ait makro görüntüleri.....	162

Resim	Sayfa
Resim 4.73. 5.1 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri	163
Resim 4.74. 5.2 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri	163
Resim 4.75. 6 numaralı komponent muayene parçaları.....	164
Resim 4.76. 6 numaralı komponent numunesine ait makro görüntüleri.....	164
Resim 4.77. 6.1 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri	165
Resim 4.78. 6.2 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri	166
Resim 4.79. MTS 312.21 - 100 kN kapasiteli test cihazı	167
Resim 4.80. 6 numaralı komponent yorulma numunesi	169
Resim 5.1. Helikopter ana rotor yapısı	177

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
V_0	Boşluk oranı
$\rho_{immerson}$	Daldırma sonucu hesaplanan yoğunluk
ρ_{pyc}	Piknometreden hesaplanan yoğunluk
dB	Desibel
E	Elastik modül
F	Kuvvet
Hz	Frekans birimi
kV	Kilovolt
m	Kütle
r	Yarıçap
R	Yükleme oranı
T _g	Camsı geçiş sıcaklığı
T _m	Erime(ergime) sıcaklığı
ν	Poisson oranı
ω	Açısal hız

Kısaltmalar	Açıklamalar
CBT	Butilen tereflatat
CF/PEKK	Karbon fiber/poli-eter-keton-keton
PAN	Poliakrilonitril
RTM	Reçine transfer kalıplama

1. GİRİŞ

Termoplastik kompozitler, hafif yapıları ve çok fonksiyonlu özellikleri sebebiyle uzay ve havacılık, otomotiv, tüketim malzemeleri, spor ve hobi gibi endüstriyel uygulamalarda büyük ilgi görmektedir [1]. Bununla birlikte termoplastik malzemelerin sahip olduğu yüksek kırılma tokluğu [2], yüksek servis sıcaklığı, kısa üretim süresi, soğuk depolamaya ihtiyaç duyulmaması [3] ve tekrar tekrar proses edilebilirliğinden dolayı ve geri dönüşüm potansiyelinden [4] dolayı kompozit üretim endüstrisinde termoset malzemelerin yerine kullanılması konusunda ciddi bir eğilim vardır.

Termoplastik kompozitlerin matris malzemesi olan polimerler günlük hayatımızda çok önemli bir yer edinmiş durumdadır. Farklı malzemeler ile son kullanım uygulamalarında kullanmak için kombine edilebilirlik özelliği taşımaktadır. Bunların lifler ile birleştirilmesi ise malzemenin mekanik özelliklerini geliştirdiğinden dolayı birçok uygulamada fiber takviyesi ile kullanılır polimer malzemeler. Yapısal polimerik kompozit uygulamalarda, tek yönlü veya dokuma kumaşlar gibi tekstiller elde edilebilecek lif hacmi fraksiyonları ve yük taşıma kapasitesini elyaf dökmesi yolu ile uyarılma olasılığı nedeni ile takviye olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Termoset reçineler, tekstil takviyeli kompozit endüstrisinde, kolay işleme özelliği nedeni ile %90'a yakın bir çoğunlukta kullanılmaktadır. Termoplastik reçineler ise daha niş bir pazarda kullanılmaktadır, işlemedeki zorluklarına rağmen kompozit pazarında giderek daha önemli bir konu olmaya başlamışlardır [5-7]. Termoplastik kompozit malzemelerin üretimi ile ilgili araştırmalar, geri dönüşüm kolaylığı, yüksek tokluk, darbe direnci, sağlık ve çevre kurallarının kısıtlamaları gibi termoset kompozitlere göre avantajları nedeniyle son yıllarda artmıştır [8-10]. Kırılmış fiber takviyeli termoplastik kompozitleri ekstrüzyon ve enjeksiyon işlemi ile kolayca üretimi yapısal olmayan uygulamalar dışında mümkündür. Bu sınırlamanın nedeni ise işleme esnasında matris ile akan kısa liflerin kullanımı ve nispeten düşük lif içeriği nedeniyle fiber yönelimleri üzerinde çok az bir kontrol sağlanabilmesidir. Sürekli fiber takviyeli termoplastik kompozitleri daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir, ancak sınırlı üretim yöntemlerine sahiptir [11-15]. Geleneksel olarak, tekstil takviyeli termoplastik kompozitler, alternatif elyaf tekstil tabakaları ve polimer tabakaları sıcak bir pres ile istiflenerek işlenir. İstiflenmiş plaka polimerin erime noktasının üzerinde ısıtılmasından sonra, istenen ürün şeklini elde etmek için pres işlemi uygulanır. Bir sonraki soğutma aşamasında, ürünün katılaşması ve ardından kalıptan çıkarılması işlemi

yapılır. Bununla birlikte, geleneksel eriyik işleme, termoplastik reçinelerin kullanılmasındaki temel sorun, yüksek erime viskozitesidir, buda lifli takviyenin zayıf empoze edilmesine ve işleme zorluklarına neden olur ve daha yüksek bir basınç gerektirerek işlem maliyetini yükseltir [16]. Elyafın empoze edilmesini kolaylaştırmak için, polimer matrisinin gerekli akış uzunluğunun azaltılması, örneğin karışık iplikler [17] kullanılarak veya empoze sırasında viskozitenin azaltılması [18] incelenen ana metotlardır. Bir yaklaşım, düşük viskoziteli bir oligomerik öncü ile elyafların empoze edilmesine dayanan tekstil elyaf takviyeli termoplastiklerin reaktif olarak işlenmesi ve ardından yerinde polimerizasyonudur [19]. Bu yaklaşım son zamanlarda döngüsel butilen tereftalat (CBT) gibi döngüsel oligomerlerin kullanımı ile incelenmiştir, su benzeri olarak adlandırılabilir düşük bir işlem viskozitesine sahiptir [20-22]. Döngüsel oligoesterler kısa sürede entropik olarak tahrik edilen halka açma polimerizasyonu ile doğrusal yüksek molekül ağırlıklı termoplastiklere dönüştürülebildiğinden, izotermal koşullar altında işlenebilirler. Bu nedenle döngüsel butilen tereftalat (CBT) matrisinin viskozite değeri yeterince düşüktür ve şu anda reçine transfer kalıplama (RTM), vakum infüzyonu ve reçine film infüzyonu gibi termoset kompozit üretim metotları termoplastik reçineli kompozitler içinde kullanılabilir [23]. Reaktif termoplastik reçine transfer kalıplama (RTM) ile ilgili bazı çalışmalar vardır, burada sürekli takviyeli polimerik öncülerle empoze edilmiş ve ardından termoplastik matris oluşturmak için bir kimyasal reaksiyon prosesi gerçekleşir. Reçine transfer kalıplama (RTM), sürekli cam elyaf takviyeli kompozitlerin üretimi için yararlı bir süreç olmasına rağmen elyafların tamamen ıslanması için gerekli dar empoze süresi, özel ekipman gerekliliği, reçine karıştırma ve infüzyon sırasında zaman israfı ortadan kaldırılabilir ve prepregler kullanılarak maliyet azaltılabilir [24].

Kirchhoff'un tüm tabaka paketi için düz boyutsuz normaller hipotezine dayanan klasik iki boyutlu lamine tabaka teorisinin yalnızca ince kompozit plakalar için yeterince doğru sonuçlar verdiği uzun dönemdir kabul edilmektedir [25-27]. Laminatların üç boyutlu (3D) analizleri için, düzlem gerilme kabuk eleman teoremi makul ve yeterli sonuçlar vermez, bu nedenle daha kalın laminatlar için başka sayısal ve analitik metotlar araştırılmalıdır. Bugüne kadar kullanılan gelişmiş kompozitlerin çoğu, enine kesme modülünün düzlem içi modülüne oranı düşük bir orandır ve bu nedenle enine kesme deformasyonu, bu kompozitlerden yapılmış lamine plakaların etkili eğilme sertliğini azaltmada karşılık gelen metal parçalara göre çok daha önemli bir rol oynamaktadır [28]. Enine kayma deformasyonunun, çok katmanlı kompozit yapılarda delaminasyon kırılma tipini tahmin etmede önemli bir

parametre olduğu görülmüştür [29]. Ayrıca kompozitlerin tasarımını ve üretimini etkileyen birkaç parametre daha vardır. Etkin bir sonuç alabilmek için, kompozit malzemeler doğru ve tutarlı bir şekilde tasarlanmalı, üretilmeli ve test edilmelidir. Kompozit yapılar için, tasarım, imalat, ve testlerdeki eksiklikler veya bu aşamalar arasındaki uyumsuzluklar, ürün üzerinde delaminasyon, matris hataları, fiber kırılmaları ve arayüz bağlarının çözülmesi gibi dramatik sonuçlara neden olabilmektedir. Bu nedenle tüm bu aşamaların güvenilirliğini sağlayan “Yapı Taşı Yaklaşımı” ilkeleri, kompozit parça tasarımı sırasında dikkate alınmalıdır [25].

Son zamanlarda birincil havacılık yapısal uygulamalarında kalın kompozit kullanım eğilimi artmıştır. Sadece kalın laminatların mekanik ve hata davranışının doğru modellenmesi değil, aynı zamanda bu heterojen yapıların imalat ve proses kalite güvencesi de kabul edilebilir ürünler elde etmekte çok önemli bir konu haline gelmiştir. Buna ek olarak özellikle döner kanat havacılık alanında kullanılacak yapıların yüksek devirli dönüşler nedeni ile üzerine alacağı karmaşık yüklemenin çözümlenebilmesi için yapısal tasarım, üretim süreçleri ve dinamik özellikler açısından ayrıntılı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, termoplastik kompozit malzemelerin otoklav ile üretimindeki temel parametreler olan kürlleme sıcaklığı, basınç ve vakum gibi parametrelerden kürlleme sıcaklığının malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi için kupon seviyesi mekanik testler, tahribatsız muayeneler ve boşluk oranlarının belirlenmesi için testler icra edilmiştir. Yapılan testler sonrası belirlenen sıcaklıklar içerisindeki ideal üretim kürlleme sıcaklığı tespit edilmiştir. Tespit edilen ideal kürlleme sıcaklığı ile döner kanat hava araçlarında sıklıkla kullanılmakta olan kompozit kulakçık yapılarda ki serim parametrelerinin kulakçık yapının statik ve yorulma dayanımı üzerinde ki etkisinin belirlenmesi için testler icra edilmiştir. Kullanılan kompozit kulakçık yapılar kavramsal tasarım aşamasında düşünülen bir döner kanat hava aracının pallerinin rotor ile bağlantısını sağlayan pal kökleri için düşünülen bir tasarımıdır. Kompozit kulakçık üretiminde genel olarak üç metot kullanılmaktadır. Birinci yöntem, fiberleri metalik veya kompozit burcun etrafına sarmaktır, ikinci yol esnek kiriş konseptidir ve üçüncü metot ise bağlantı deliğinin delinerek sağlanmasıdır. Bu çalışmada da üretim kısıtlamaları nedeni ile son yöntem olan delik delme yöntemine odaklanılmış ve delinen kalın kompozit kulakçıkların statik ve yorulma davranışlarının anlaşılması amaçlanmıştır. Kulakçıklarda temel olarak üç temel kırılım davranışı gözlenir; gerilim (çekme), kesme ve yatak hasarları [26]. Gerilme (çekme)

arızasında, gerilme konsantrasyonlarına bağlı matris ve elyaf gerilme arızası baskındır [30]. Oysa yatak ve kesme hasarlarında esas olarak elyaf ve matrisin kesme ve sıkıştırma arızalarından kaynaklanmaktadır [31]. Kupon seviyesi testlerin akabinde elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile fiber-matris bağları incelenmiştir. Kompozit kulakçıklar içinde statik test sonrası radyografik görüntüler ve mikroskop görüntüleri ile hasarların ilerleme şekilleri ve boyutları tespit edilmiştir.

Tezin amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, havacılık sektöründe ağırlıklı olarak kullanılmakta olan termoset kompozitlerin kısıtlı raf ömürleri ve tekrar işlenememesi nedeni ile üretim ve tamir maliyetlerinin yükselmesi nedeni ile yerine alternatif olarak kullanılabilecek malzemelerin arayışdır. Sınırsız raf ömrü ve tekrar işlenebilme özelliklerinin yanında termoset kompozitler gibi hafif olup yüksek mekanik değerlere sahip olan termoplastik kompozit malzemeler bu önemli avantajları nedeni son dönemde havacılıkta ilgi alanı olmuştur. PEEK (poli-eter-eter-eton) ve PPS (polifenilen-sülfid) polimerli malzemeler ile ilgili literatürde birçok çalışma yer alırken bu tez kapsamında yüksek ergime ve camsı sıcaklığı nedeni ile PEKK (poli-eter-eton-eton) malzeme üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma iki bölüme ayrılmıştır, birinci bölümde otoklav ile üretimde temel parametreler olan basınç, kütleme sıcaklığı ve vakum değerlerinden kütleme sıcaklığı için belirlenen hedef üç sıcaklıktan en ideal kütleme sıcaklığı belirlenmiştir. Bu işlemler yapılırken basınç ve vakum değerleri sabit tutularak üretimde kütleme sıcaklığının malzemenin mekanik dayanımı üzerindeki etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir. İkinci bölümünde ise, döner kanat hava araçlarında birincil yapısal parçalardan olan pal köklerinin kulakçık yapıda üretimi yapılarak statik ve yorulma testleri ile bir hava aracında kullanılabilirliği gösterilmiştir. Aynı zamanda kulakçık yapıların hasar modları üzerinden serim parametresinin dayanım üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Böylece hem kulakçık yapıdaki kesme hasarlarına maksimum dayanımın serim yönlerine göre nasıl değiştiği tespit edilmiş hemde kompozit kulakçık yapının temel olarak birincil yapısal parça olarak hava aracında kullanılabilirliği gösterilmiştir. Aynı zamanda bundan sonraki çalışmalar için malzemenin farklı kütleme sıcaklıklarına bağlı olarak mekanik dayanımları literatüre kazandırılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kompozitler, genel olarak bir bileşik, makro ölçekte şekil veya bileşim bakımından farklılık gösteren iki veya daha fazla bileşenin, aralarında tanınabilir arayüzlere sahip iki veya daha fazla farklı fazın bir kombinasyonu olarak tanımlanır [32].

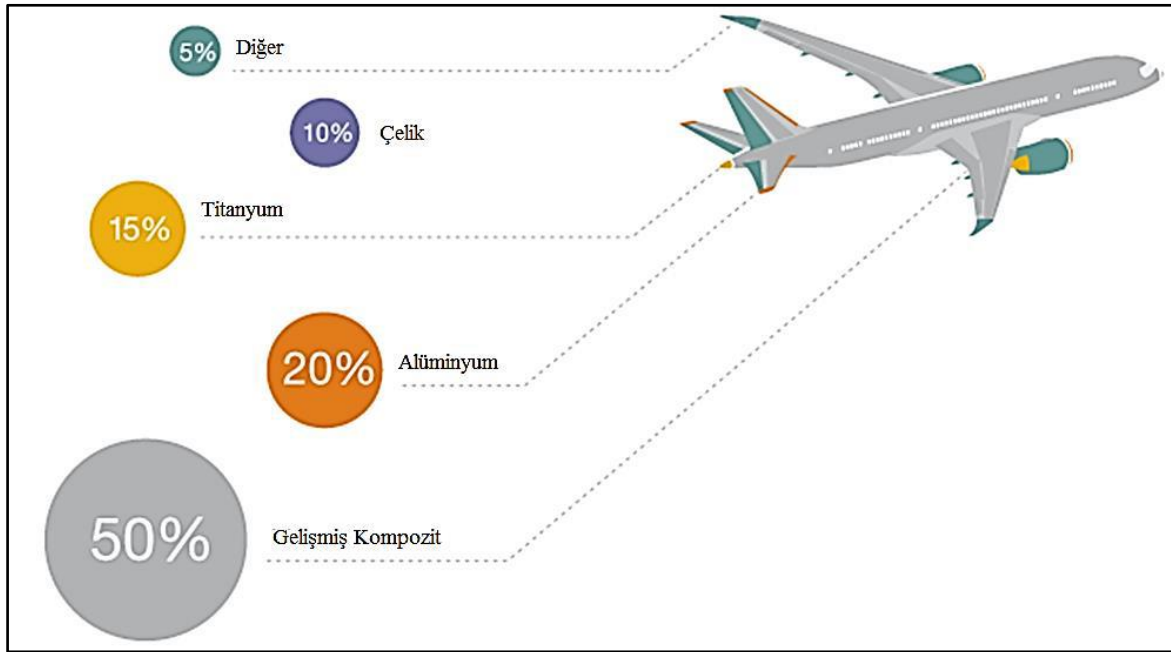
Son dönemlerde, malzeme bilimindeki ilerleme kaynaklı olarak kompozit malzemelerinde üretim ve kullanım alanlarında ciddi bir artış eğilimi vardır. Özellikle ileri teknolojinin yoğun olarak kullanıldığı ve araştırıldığı havacılık, uzay ve savunma sanayi gibi alanlarda ihtiyaçlar doğrultusunda her geçen gün daha yoğun olarak kullanılmaktadır [33].

Kompozit malzemeler aslında yeni bir teknoloji olmayıp, binlerce yıldır bilinen ve kısımda olsa da kullanım alanları olan bir malzemedir. M.Ö 2800’lü yıllarda Mısır’da bulunan lamine halindeki tahta tabakalar bunu ispatlar niteliktedir. 20. Yüzyılda ise özellikle havacılıkta alüminyum malzemeler ve alaşımları uçakların iskeletlerinin yapımında kullanılmaktadır. Bu çalışmalar esnasında Al içerisine Cu ve Mg eklenerek elde edilen duralüminyum olarak adlandırılan saf alaşımda, alüminyum kadar hafif fakat dayanım olarak çok daha yüksek değerler elde edildiği bir rastlantı ile görülmüştür. Bu yeni bulunan malzeme ile de I. Dünya savaşı esnasında birkaç uçak üretimi yapılmıştır. Kompozit malzemelerde ki asıl atılım periyodu ise II. Dünya savaşı sırasında geleneksel olarak bilinen malzemelerin yeteriz kalması nedeni ile yeni malzeme teknolojilerine olan ilgidir. Gelişmelerde ise temel olarak malzemede ki yüksek dayanım/yoğunluk oranı ve yüksek elastik modül (E)/yoğunluk oranının en üst limitlere ulaştırılması için çalışmalar yapılmaktadır [34].

Kompozit malzemeler çeliklere göre %60-%80 aralığında alüminyumlara göre ise %20-%50 oranında ağırlıktan kazanç sağlayabilmektedir. Bu ağırlık azalışı ise günümüzde en büyük fosil yakıt kaynak problemine karşılık önemli bir tasarruf kaynağıdır [35].

Kompozit malzemeler en basit tanımlaması ile daha zayıf bir malzeme içerisine yük taşıma kapasitesi daha yüksek olan güçlü bir malzemenin eklenmesi ile ortaya çıkan yapılardır. Bu bileşimde güçlü malzeme olarak adlandırılan kısım genellikle takviye elemanı olarak adlandırılırken zayıf malzeme ise matris malzemesi olarak adlandırılır. Takviye elemanının görevi ihtiyaç duyulan güç ve rijitliği sağlarken malzemenin yapısal yükleri taşımasına

destek olmaktır. Matris malzemesi ise takviye elemanın oryantasyonu ve konumunu koruma işlevini yerine getirmektedir. Kompozit malzemeler bu bileşimler sayesinde ağırlık kazancı sağlamanın yanında farklı yapısal ayrıcalıklar ile birlikte mekanik özellikler üzerinde de farklı imkanlar sağlayabilmektedir. Bu avantajları nedeni ile havacılık sektöründe kompozit kullanımının önemi sürekli olarak artmaktadır. Şekil 2.1’de Boeing 787 Dreamliner uçağındaki kompozit kullanımı verilmiştir. Görüldüğü gibi karbon ve cam elyaf takviyeli kompozit kullanımı oranı %50 gibi yüksek bir değerdedir [36].

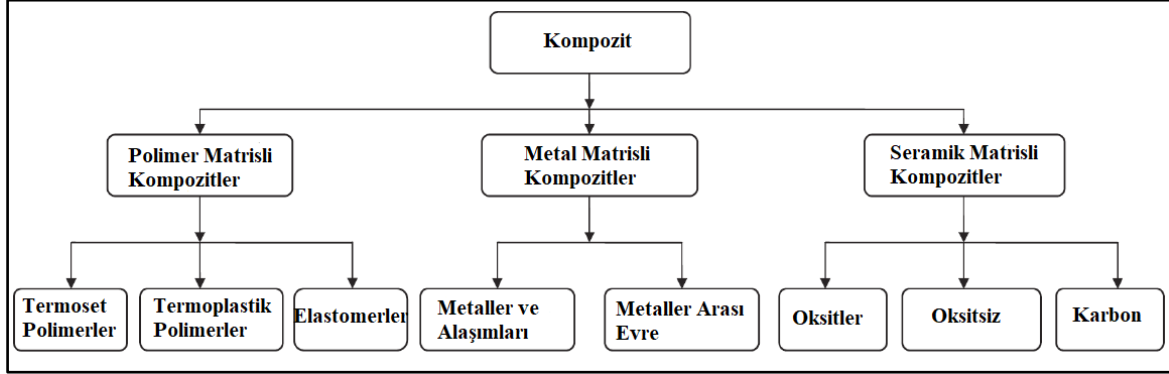


Şekil 2.1. Boeing 787 Dreamliner uçağında kullanılan malzemeler [36]

Kompozitlerin tarihçesi incelendiğinde çok sayıda tarihsel örnek ile karşılaşmak mümkündür. Mısırlıların ahşap lamineleri, lamina dövme metalden oluşan kılıçlar vb. gibi örnekler verilebilir. 20.Yüzyılda ise modern kompozitler daha çok yer almaya başlamıştır. 1930’lu yıllarda cam fiber takviyeli kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmış olup, 1970’li yıllara gelindiğinde karbon, boron, aramid gibi yeni takviye elemanları ile metal ve seramik gibi yeni matris malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır [37].

Kompozit malzemeler, sürekli gelişme eğilimindedir, kaliteli bir tasarım ile birlikte geleneksel olarak bilinen malzemelere oranla daha iyi mekanik özellikler sergileyebilmektedir. Bu özelliklerden bazıları mukavemet, rijitlik, korozyon direnci, aşınma dayanımı, ağırlık, yorulma ömrü, sıcaklığa bağlı davranışlar, termal iletkenlik, termal

Kompozit malzemelerde ikinci sınıflandırma alanı olan matris malzemesine göre sınıflandırma Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Matris malzemelerine göre kompozitler [41]

2.2. Sürekli Elyaf Takviyeli Polimerik Kompozitler

Fiber takviyeli plastikler, matrisin bir polimer veya plastik olduğu ve takviyenin her zaman bir fiber olduğu kompozit alanının bir alt bölümünü oluşturmaktadır. Fiber takviyeli kompozitler tipik olarak bir laminat yapıda düzenlenir. Her bir tabaka ince bir hafif polimer matris malzeme tabakası içine gömülü olarak tek yönlü elyafların veya dokuma elyaf kumaşların bir düzenlemesini içerir. Tipik olarak karbon, cam veya aramidden oluşan elyaflar mukavemet ve sertlik sağlar. Genellikle polyester, vinilester, epoksi gibi termoset veya polieter eter keton (PEEK), polifenilen sülfid (PPS), poliesterler (PET) gibi termoplastiklerden yapılan matris malzemeleri lifleri bağlar ve hasardan koruyarak gerilmeyi lifler arasında aktarır [8].

2.3. Sürekli Elyaf Takviyeli Polimerik Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri

Tamamlanmış bir parçaya mukavemet kazandırmak için reçine sistemine elyaf takviye malzemeleri eklenir. Takviye malzemesinin seçimi, bitmiş üründe istenen özelliklere göre belirlenmektedir. Kullanılan takviye malzemeleri matris malzemesi olan reçine ile herhangi bir reaksiyona girmezler ancak gelişmiş kompozit sistemlerinin vazgeçilmez bir parçasını oluşturmaktadırlar.

2.3.1. Fiber tipleri

Gelişmiş kompozit endüstrisinde kullanılan üç temel fiber güçlendirme malzemesi türü karbon, aramid ve cam elyafıdır.

Karbon fiber

En çok tercih edilen takviye malzemeleri karbon / grafit elyafıdır. Bunun nedeni ise yüksek gerilme ve sıkıştırma özellikleri ve yüksek modül değerleri gibi istenen performans özelliklerinin çoğunun karbon liflerinin kullanılmasını gerektirmesidir. Karbon fiberler öncül lifler olarak bilinen üç tür malzemeden üretilmektedir;

- PAN (poliakrilonitril)
- Yapay ipek
- Petrol zifti

Karbon elyaflar, elyafta sadece karbon bırakarak, oksijen, nitrojen ve öncü elyafın diğer karbon olmayan kısımların kontrollü yakılmasıyla üretilir. Bu yakma (veya oksitleme) adımının ardından, lifler, karbon veya grafit lifleri üretmek için bir fırından geçirilir. Karbon lifleri 1000-2000°C'lik fırın sıcaklıklarında üretilirken, grafit lifler için 2000-3000°C'lik sıcaklıklar gerekmektedir. Bu sıcaklıklarda liflerdeki karbon atomları, bitmiş life gerekli özellikleri kazandırmak için yeniden düzenlenir. PAN bazlı fiber, günümüzde gelişmiş kompozit endüstrisinde daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon fiber takviyeli kompozitlerde en çok tercih edilen matris polimeri epoksidir, ancak bazen polyester, vinil ester veya naylon gibi diğer polimerler kullanılır. Kompozit malzemelerde Kevlar, alüminyum veya cam elyaf gibi diğer elyafların yanı sıra karbon elyafı da içerebilir. Karbon fiberler nispeten daha pahalı olsa da, havacılık ve otomotiv alanlarında Formula 1 gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Karbon fiberli bileşikler yüksek mukavemet / ağırlık oranının ve iyi sertliğin önemli olduğu yelkenli teknelerde, modern bisikletlerde de kullanılmaktadır.

Aramid fiber

Aramid lifleri, başka bir insan yapımı üründür. Bu lifler, temel polimerin üretilmesi ve ardından bunun kağıt benzeri bir konfigürasyonda veya lif haline getirilmesiyle üretilir.

Aramid lifleri, yüksek mukavemet ve modül, sıcaklık kararlılığı, esneme performansı, boyutsal kararlılık, kimyasal direnç, tekstil işlenebilirliği gibi çeşitli yararlı özelliklere sahiptir [42]. Aramid elyafları, yaygın olarak bulunan takviye edici elyaflarla karşılaştırıldığında çok düşük yoğunluğa ve yüksek özgül gerilme mukavemetine sahiptir. Kurşun geçirmez yeleklerde, motorlu testere pantolonlarında, güvenlik eldivenlerinde ve kesilmeye karşı direnç ve hasar toleransının gerekli olduğu diğer uygulamalarda kullanımları ile tanımlanır. Aramid elyafların ana avantajları [24];

- Hafif
- Yüksek darbe hasarı toleransı
- Yüksek çekme dayanımı
- Orta derecede yüksek gerilme modülü
- Mükemmel titreşim sönümleme
- Düşük (negatif) uzunlamasına termal genleşme

Aramid fiberlerin temel dezavantajları ise;

- Çok düşük basınç dayanımı
- UV radyasyonuna duyarlılık
- İşlenmesi zor
- Yüksek nem emilimi
- Çok yüksek enine termal genleşme

Cam fiber

Cam elyaf, amorf bir yapıya sahip inorganik bir elyaftır. Tekstil işlemeye uygun küçük çaplı birçok elyaf halinde ekstrüde edilebilir. Teknik, camı ısıtmak ve ince liflere çekmekten oluşur. Ocak ürünleri (kum, kaolin, kireçtaşı, kolemanit) 1600°C’de karıştırarak sıvı cam oluşturulur. Sıvı, mikro ince kovanlardan geçirilir ve aynı anda soğutulur ve çapı 5-24 mikrometre olan cam elyaf filamentler üretilir. Filamentler birlikte bir tel veya fitil halinde çekilir ve filaman kohezyonu sağlamak ve camı aşınmadan korumak için bir bağlama maddesi, yani ‘‘apreleme’’ ile kaplanır. Bununla birlikte, bileşenlerin seçimi ve bileşimi, son kullanım gereksinimlerine bağlı olarak bir dereceye kadar değişir. Ticari olarak temin

edilebilen, hepsi farklı bileşimlere ve çoğu zaman özel teknik öneme sahip olan farklı cam elyaf türleri vardır. AR-cam, takviye amaçlı elyaf formunda kullanılan kimyasal olarak dayanıklı bir cam bileşimine sahiptir. E-cam neredeyse evrensel olarak kabul edilebilir bir formülasyona sahiptir ve fiber ve astarlı ürünlerde çoğu kullanım için bir standart haline gelmiştir. Bileşimin yüksek bir elektrik direnci olduğundan dolayı ‘‘E’’ harfi elektrik anlamına gelmektedir. HS-cam, yüksek mukavemetli cam elyafıdır. Üretilen tüm kesintisiz cam elyafların %90’ından fazlası ‘‘E’’ cam bileşimidir [43].

E-cam elyaf aşağıdaki formlarda mevcuttur;

İplik teli - sıkıca ilişkili bir filament demeti. İplikler ticari olarak nadiren görülür ve genellikle iplik vermek için birlikte bükülür.

İplikler - yakından ilişkili bir bükülmüş filament veya iplik demeti. Bir iplikteki her filament çapı aynıdır ve genellikle 4 ile 13 mikron arasındadır. İplikler ‘‘tex’’ (1000 doğrusal metrenin gram cinsinden ağırlığı) veya denyeye (10000 ipliğin lbs cinsinden ağırlığı) göre değişen ağırlıklara sahiptir ve tipik tex aralığı genellikle 5 ile 400 arasındadır. Fitiller, bükülmemiş ipliklerin veya ipliklerin gevşek bir şekilde bağlanmış bir demetidir. Bir fitildeki her bir filament çapı aynıdır ve genellikle 13-24 mikron arasındadır.

Fitillerin de değişen ağırlıkları vardır ve tex aralığı olarak genellikle 300 ile 4800 arasındadır. Filamentlerin eritme işleminden hemen sonra bir araya getirildiği durumlarda, elde edilen elyaf demeti doğrudan fitil olarak bilinir. Birleştirilmiş fitil olarak bilinen şeyi elde etmek için camın imalatından sonra birkaç tel de ayrı ayrı bir araya getirilebilir. Birleştirilmiş fitiller genellikle doğrudan fitillere göre daha küçük filaman çaplarına sahiptir, bu da daha iyi ıslanma ve mekanik özellikler sağlar, ancak katener problemlerinden (eşit olmayan iplik gerginliği) muzdarip olabilirler ve üretim prosesleri nedeni ile de maliyet olarak yüksek kalmaktadır. Kısa liflerden eğilerek uzun cam lifleri elde etmek de mümkündür. Bu eğrilmiş iplik lifleri daha yüksek yüzey alanlarına sahiptir ve reçineyi daha fazla emebilir, ancak eşdeğer sürekli olarak çekilmiş liflere göre daha düşük yapısal değerlere sahiptirler. E-cam, güçlendirilmiş polimer kompozitlerde açık ara en çok kullanılan elyafıdır. Pek çok endüstride kullanılan takviye elemanlarının yaklaşık %90’nını temsil etmektedir.

Başlıca avantajları;

- Düşük maliyet
- Yüksek mukavemet
- Hafiflik (çeliklere göre)
- Yüksek kimyasal direnç

Başlıca dezavantajları ise;

- Düşük modül (diğer takviye liflere göre)
- Düşük yorulma direnci (karbon fiberlere göre)
- Yüksek ağırlık (diğer güçlendirici liflere göre)
- İşlendiğinde oldukça aşındırıcı
- Gerilme korozyonuna duyarlı

Yaygın kullanımı nedeni ile avantajları dezavantajlarına göre daha ağır basmaktadır. Neredeyse tüm cam elyaflar, özel bir akma ile ilişkilendirilmiş gruplanmış elyaflar veya fitiller halinde satılmaktadır. Akma, fitildeki pound başına iplik sayısıdır. Metrik ölçüm biriminde kilometre başına gram cinsinden ağırlık olan TEX'dir. Tex ve akma arasındaki dönüşüm denklemi Eş. 2.1 ve Eş.2.2 de verilmiştir.

$$\text{Akma (yd/lb)} = 496054.6/\text{TEX} \quad (2.1)$$

$$\text{TEX (g/1000m)} = 496054.6 / \text{Akma} \quad (2.2)$$

Dikiş ile bağlanmış takviye kumaşlar için, kullanılan tipik fitil boyutları 1800 ile 113 akma (276 ile 4390 TEX) arasındadır. Bazı yaygın cam verileri ve filamanet çapları aşağıda Çizelge 2.1'de verilmiştir [24].

Çizelge 2.1. Elyaf çapına göre cam elyaf akma noktaları

TEX (g/1000m)	Akma (yield/lb)	Fiber Çapı (μm)
44390	113	24
2400	206	17
1100	450	17
735	675	13
276	1800	13

Tek tek filamentlerin çapı, fiberlerin yüzey alanının hacmine oranını temsil ettiği için önemli olabilir. Daha küçük filament çapları, daha yüksek yüzey alanı / hacim oranları verir, bu da reçinenin bağlanması için daha fazla alan olduğu anlamına gelir. Daha küçük filamentler bazı durumlarda biraz daha iyi özellikler verebilir [24].

2.3.2. Fiberlerin yüzey işlemleri - Fiber ve polimer arasındaki uyumluluk

Fiber ve polimer arasındaki yapışmanın sağlanabilmesi için aralarında yakın bir temasın kurulması kuralı temeldir. Matris malzemesinin bağlanmayı sağlayabilmesi için fiberi ıslatma yeteneği, fiber ile matris arasındaki nispi yüzey gerilmesine bağlıdır. Matris malzemesinin yüzey gerilimi fiberinkinden daha düşük ise, matris malzemesinin viskozite değeri uygun olduğu koşullarda kendiliğinden ıslanma meydana getirebilir [9]. Buna ilave olarak, fiber ve matris ara yüzü boyunca kaliteli bir ara yüz yapışmasını ve yüzey gerilim aktarımını sağlamak için, matris malzemesi ile fiber malzemenin arasında kimyasal veya fiziksel bir etkileşimin olması gerekmektedir. Bağlayıcı maddeler, bağlayıcı olmayan ve uyumsuz iki yüzey arasındaki sabit bağ sağlama işlevi görür. Bu bağlayıcıların bir ucu camın silan yapısı ile diğer ucuda matris malzemesi ile uyumlu moleküllerdir. Bu moleküller için, takviye elemanları ile matris malzemesini bir arada tutan köprüler olarak da düşünülebilir [8]. Güçlendirilmiş ve dolgulu plastiklerde, fiber veya partikülat inorganik bileşen ile organik matris polimer arasındaki gelişmiş bağ, kompozit malzemedeki mukavemet artışı ve hizmet ömrü uzamasını sağlar. Organofonksiyonel silanlar, cam elyafı için bilinen en uygun maddelerdir ve etkileri tipik olarak özel kimyasal yapılarından gelmektedir. $Y-Si(OR)_3$, OR'nin metoksi, etoksi veya asetoksi gibi hidrolize edilebilir bir grup olduğu ve XY'nin amino, metakriloksi, epoksi vb. gibi organofonksiyonel bir grup olduğu ana formüldür. Bu iki farklı tip grubun farklı reaktivite özellikleri sergilediği görülür ve sıralı bir reaksiyon girme izni verir. Çapraz bağlanma işleminde birinci aşama, genellikle silanollerin yoğunlaşması ile polimer zincirlerin bağlanması ile silanın polimer temel

yapısına bağlanmasıdır. Camın yüzeyindeki bir amino veya kloropropil işlevsel silan, amid grupları ile koordinasyona ve muhtemel poliamidlerin cam yüzeyine bağlanmasına katkıda bulunur. Aramid elyaflar için, etilen oksit ve propilen oksit bağları içeren iyonik olmayan silanlar, bir bağlama maddesi olarak elyaf bükme işlemi sırasında en yaygın işlem yardımcılarıdır [44].

2.3.3. Takviye formları

Gelişmiş kompozit üretiminde kullanılan fiberler, iplikler, fitiller, doğranmış iplikler, dokuma kumaşlar ve pedler olmak üzere çeşitli şekillerde bulunur. Bunların her birinin kendi özel uygulaması vardır. Parça imalatı için prepreg malzeme kullanımı hedefleniyorsa ihtiyaç olan dokuma kumaş veya pedlerdir. Filament ıslak sarım veya pultrüzyon gibi üretim metodu kullanılmak isteniyorsa ihtiyaç olan form ise iplikler ve fitillerdir [42]. Çizelge 2.2’de farklı takviye formlarını ve avantajları ve uygulama alanları gösterilmiştir [32].

Çizelge 2.2. Takviye formları ve uygulama alanları ile avantajları

Takviye	Avantajları	Uygulamalar
Bant	Bir yönde yüksek mukavemet ve sertlik	Spor aletleri Uçakların birincil yapıları
Demet	Filament sargı için uygun Doğru fiber yerleşimi için çok dar genişlikte (1mm)	Basınçlı kaplar Tahrik milleri Tüpler
Şeritler	Bir yönde yüksek mukavemet ve sertlik Yüksek fiber ağırlığı = 1000g/m^2 Ekonomik işleme	Yat direkleri Yaprak yayları Kayaklar
Kumaşlar > %80 çözgü	Tek yönde baskın güç ve sertlik $160\text{-}1000\text{g/m}^2$ arası ağırlık	Havacılık Endüstriyel Spor ekipmanları
Dengeli kumaşlar	İki yönde güç ve sertlik Çok iyi kullanım özellikleri İyi örtme özelliği Örgü stilleri seçimi Lifleri karıştırmak mümkün $20\text{-}1000\text{g/m}^2$ arası ağırlık	Havacılık Endüstriyel Spor ekipmanları

Çizelge 2.2. (devam) Takviye formları ve uygulama alanları ile avantajları

Çok eksenli	Birden çok yönelimde sertlik ve dayanım Fiber oryantasyonunun kontrolü Kumaşta ağırlık dağılımını optimize etme yeteneği Lifleri karıştırmak mümkün Kıvrım yok Karmaşık yerleşimlerde daha az atık Azaltılmış işlem maliyeti	Havacılık Denizcilik Boru üretimi Otomotiv Rüzgar tribünleri Spor ekipmanları Endüstriyel
-------------	--	---

Sürekli filament takviyeleri, havacılık gibi üst düzey uygulamalar için çok önemli bir malzemedir. Fiber takviyeli yapının oryantasyonu, yük taşıma ihtiyacından dolayı üçüncü boyuta yönelik takviye yerleştirme ihtiyacından her geçen gün daha da önemli hale gelmektedir. Bu bağlamda, yüksek performanslı elyaflardan yapılan tekstil yapıların kompozit uygulamalardaki önemi artmaktadır. Tekstil işlemlerinin önem kazanmasında ki temel konu ise, fiber yerleşimi üzerinde doğrudan kontrol ve fiber kullanım kolaylığı yatmaktadır. Tekstil teknolojileri, ekonomik olarak sunduğu avantajların yanında matris ve takviye elemanlarının homojen dağılımını da sağlar. Bu nedenle, tekstil preformları kompozit yapıların yapısal omurgasını oluşturur [19].

Dokuma ve kıvrımsız çok eksenli takviyeler, kompozit yapılarda en yaygın olarak kullanılan takviye şekilleridir. Çok eksenli kıvrımsız takviyeler, dokuma kumaşlara göre aşağıda sıralanmış birçok avantaj sağlar;

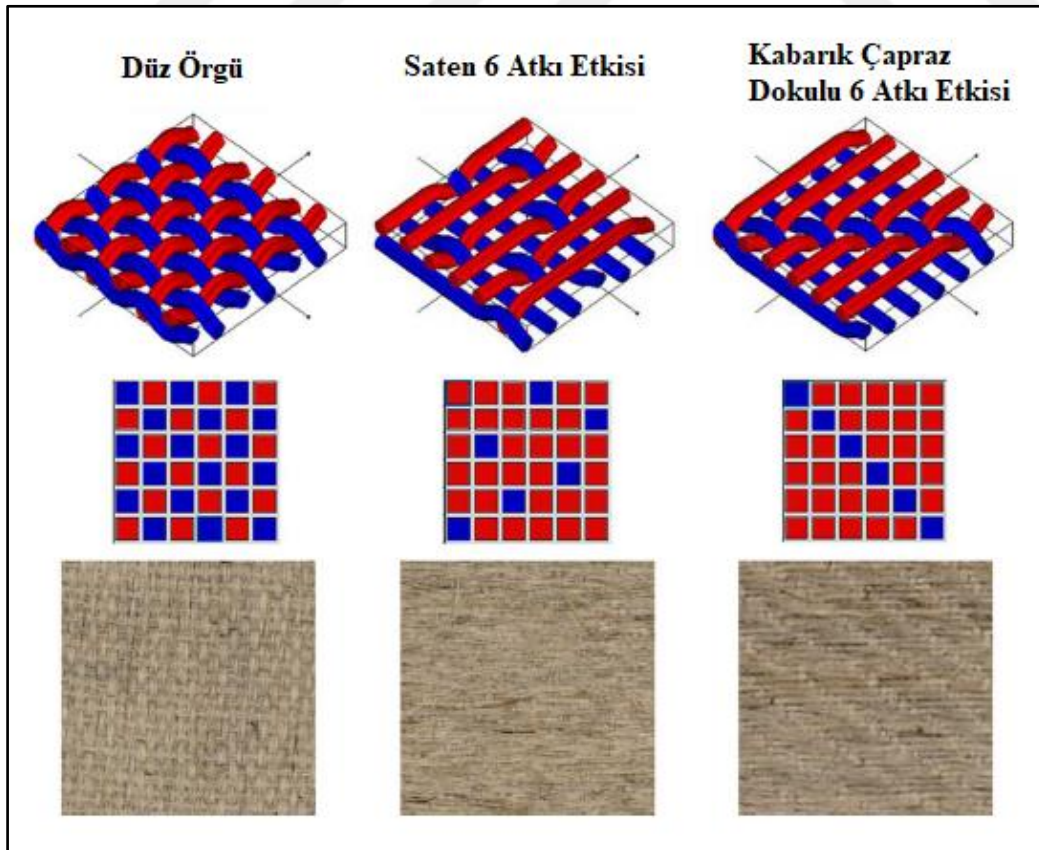
- Nihai ürünlerdeki mekanik özelliklerin iyileşmesi
- Ağırlık azaltma
- Tasarım esnekliği
- Daha düşük reçine tüketimi
- Daha kolay ve hızlı ıslatma süreci
- Yüzey kalitesindeki artış
- Daha hızlı serim süresi
- İşçilik maliyetlerinde azalma

Şekil 2.4'te bu avantajları dokuma bir kumaş ile kıvrımsız $0^\circ / 90^\circ$ takviyenin temel bir karşılaştırılması verilmiştir. Reçine kesesi ve kıvrım etkisi daha yüksek reçine tüketimine, düşük mekanik özelliklere ve çatlamaya neden olur. Ayrıca kıvrımsız yapı reçine tüketimini azaltır ve mekanik özellikleri artırır [24].



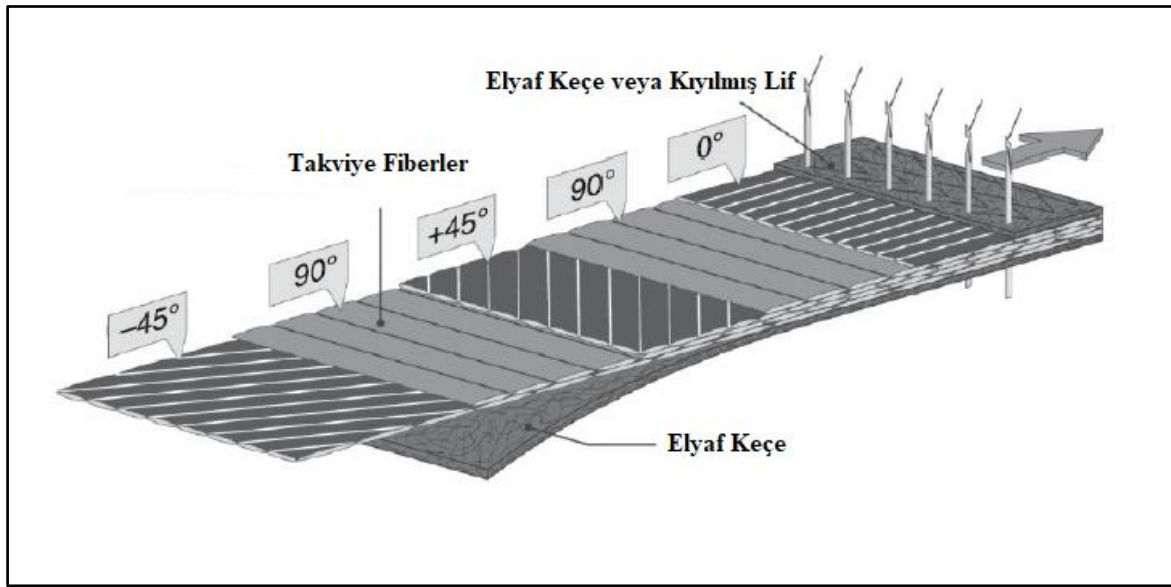
Şekil 2.4. Takviyeli dokuma ve çift eksenli kumaş arasındaki farklar [24]

Dokuma kumaşlar, dokuma türlerine göre farklı formlarda bulunabilir. Şekil 2.5'te bu türlere örnekler verilmiştir.



Şekil 2.5. Dokuma türlerine göre farklı formlarda kumaş yapıları [45]

Çok eksenli takviyeler, fiber yönelimlerinin tüm temel yönlerde olduğu dört katmandan oluşabilir; $0^\circ / +45^\circ / 90^\circ / -45^\circ$. Takviyenin işlenmesi ve işlenmesi sırasında herhangi bir olası hasarı önlemek için lifler genellikle esnek termoplastik iplikler ile dikilerek daha stabil hale getirilebilir. Dikiş deseni, kompozit üretim sürecinin gereksinimlerine göre sert veya esnek olarak değişebilir. Şekil 2.6'da tüm olası yönleri ve diğer parametreleri kapsayan çok eksenli bir takviye yapısının temel şeması verilmiştir. Kıvrımsız çok eksenli ürünler, tek eksenli ile dört eksenli arasında değişen lif katmanlarından oluşabilir. Farklı sayıda katman içeren kıvrımsız çok eksenli yapılarda üretilebilmektedir.



Şekil 2.6. Çok yönlü takviyeli kompozit yapı örneği [46]

2.4. Sürekli Takviyeli Polimerik Fiber Kompozitlerde Polimer Sistemler

Gelişmiş kompozit üretmek amaçlı kullanılan polimer sistemleri termoset ve termoplastik olarak iki temel tiptedir. Termoset polimerler günümüzde termoplastiklere göre daha baskın olarak kullanılmaktadır. Buna karşın termoplastik ise gelişmiş kompozit üretiminde küçük bir alana sahiptir [42]. Polimer matris malzemesi kompozit endüstrisinde reçine olarak isimlendirilmektedir.

2.4.1. Termoset polimerler

Isı ile sertleşen malzemeler veya “termosetler” polimer ve sertleştirici veya reçine ve katalizör maddelerin karıştırılarak reaksiyona giren daha sonra sert ve erimeyen bir ürün oluşturmak için tersine işlem yapılamayan kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşur. Termoset reçineler, bir kütleme faktörü veya sertleştiricinin eklenmesi ile birlikte bir takviye malzemesinin üzerine empoze edilmesi ve ardından kürlenmiş veya bitmiş bir malzeme üretmek için kütleme prosesine maruz kalmaları gerekmektedir. Parçada sertleşme süreci tamamlandıktan sonra final işlemleri dışında parça değiştirilemez veya düzeltilemez. Kompozit endüstrisinde kullanılan birçok farklı reçine türü olmasına rağmen, yapısal olarak üretilen parçaların çoğunluğu için polyester, vinil ester ve epoksi gibi üç temel tip kullanılmaktadır.

Polyester reçineler, özellikle denizcilik endüstrisinde en yaygın kullanılan reçine türleridir. Polyester reçineler “doymamış” tipteki reçinelerdir. Doymamış polyester reçineler, doğru koşul ve prosesler ile sıvı veya katı halde kürlenebilen bir termosettir. Çoğu polyester reçinesi, genellikle stiren olan bir monomerdeki bir polyester çözeltisinden meydana gelen viskoz, soluk renkli sıvılardır. Viskozitesi yüksek bu yapıya %50’ye kadar stiren ilavesi ile viskozite değeri düşürülerek reçinenin işlenmesini kolaylaştırır. Stiren ayrıca, herhangi bir yan ürüne ihtiyaç duyulmadan, polyesterin moleküler zincirlerini “çapraz bağlayarak” reçinenin bir sıvıdan katıya geçişinde önemli bir işlev görmektedir. Bu reçineler bu nedenle basınç prosesi uygulanmadan kalıplanabilir ve “temas” veya “düşük basınçlı” reçineler olarak adlandırılır. Polyester reçineler, belirli süre aralığında sertleşecek veya jelleşecek olmalarından dolayı saklama süreleri kısıtlıdır. Bu jelleşme hızını yavaşlatabilmek için reçine imalatı esnasında genellikle küçük miktarlarda inhibitör eklenir. Kalıplamada kullanım için, bir polyester reçine birkaç yardımcı ürünün eklenmesi gerekmektedir. Bu ürünler ise genellikle katalizör, hızlandırıcı, katkı maddeleridir [42-43].

Vinilester reçineleri, molekül yapıları açısından polyesterlere benzerlik göstermesine rağmen esas olarak reaktif bölgelerin konumlarında farklılık gösterirler ve yalnızca molekül yapılarının uçlarında bulunurlar. Bir polyestere oranla vinilesterler azaltılmış ester grubu nedeni ile hidrolizden zarar görmeye daha az eğilim gösterirler. Bu nedenle vinilester malzemeler tekne gövdesi gibi su ile temas edecek bir polyester linaat için koruyucu veya kaplama olarak kullanılır. Vinilesterlerin kürlenmiş moleküler yapısı aynı zamanda

polyesterden daha sert olma özelliği taşır fakat bunun için reçinenin genellikle yüksek sıcaklıkta post-kürleme işlemi görmesi gerekmektedir.

Epoksi reçineler yaklaşık olarak 40 yılı aşkın bir süredir kompozit endüstrisinde kullanılmaktadır. Endüstride en yaygın kullanımı olan bazik epoksi bileşikleri, epiklorhidrin ve bifenol-A'nın reaksiyonu sonucu ortaya çıkan üründür. Epoksiler, katalizörden ziyade bir sertleştirici ile kürlendikleri için polyester reçinelerden farklıdır. Genellikle bir amin olan sertleştirici, epoksiyi kimyasal reaksiyonda her iki malzemenin de yer aldığı bir ek reaksiyon ile sertleştirmede kullanılır. Bu reaksiyonun kimyası, genellikle her amin bölgesine bağlanan iki epoksi bölgesinin olduğu anlamına gelir. Bu karmaşık bir üç boyutlu moleküler bir yapı oluşturur. Genel olarak kehribar rengi veya kahverengi bir renk ile tanımlanabilen epoksi reçinelerin yararlı özellikleri vardır. Hem sıvı reçine hem de sertleştirme faktörü, düşük viskoziteli ve kolay işlenen sistemlerden oluşturulur. Epoksi reçineler, kürlenme faktörü seçimine bağlı olarak 5°C ila 150°C arasındaki herhangi bir sıcaklıkta kolay ve hızlı bir şekilde kürlenir. Epoksilerin en avantajlı özelliklerinden biri ise, kürlenme prosesi esnasındaki düşük büzülme yetenekleridir. Bu özellikleri ile de kumaş baskı geçişini ve iç gerilmeleri en aza indirir. Yüksek yapışma mukavemeti ve yüksek mekanik özellikleri, yüksek elektrik yalıtımı ve kimyasal direnç ile de geliştirilmiştir.

Gelişmiş bir kompozit yapı sisteminin temel bileşenlerinden bir diğeri ise, kürlenme faktörü veya sertleştiricidir. Bu bileşikler çok önemlidir çünkü reaksiyon hızını kontrol ederler ve bitmiş parçanın mekanik özelliklerinin başarısını belirlerler. Bu bileşikler reaksiyon üzerinde katalizör görevi gördüklerinden, moleküller üzerinde de aktif kısımlar içermelidir [32].

2.4.2. Termoplastik polimerler

Termoplastikler şu an için polimerik kompozit endüstrisinin nispeten daha küçük bir bölümünü temsil etmektedir. Tipik olarak reaktif olmayan katılar olarak tedarik edilirler yani işlem sırasında kimyasal reaksiyon oluşmaz ve parçanın üretimi için yalnızca ısı ve basınç gerekir. Termosetlerin aksine termoplastikler genellikle yeniden ısıtılabilir ve istenirse başka bir şekle dönüştürülebilirler.

Termoplastik polimerler temel olarak iki sınıfa ayrılabilir bunlar yüksek sıcaklık termoplastikleri ve mühendislik termoplastikleridir. Bu sınıflandırma, polimerlerin maksimum servis sıcaklığına göre yapılmış ve buda cam geçiş (T_g) sıcaklığına dayanır. Termoset polimer malzemeler kullanışlı bir şekilde T_g 'nin üzerinde mekanik olarak yük taşıyamayabilir ancak yarı kristal yapıdaki termoplastik polimerler, yalnızca polimerin amorf fazı lastiksi bir hale geldiğinden T_g 'nin üzerinde de mekanik yük taşıyabilirler. Polimerin kristal kısmı erime sıcaklığı (T_m)'ye kadar ki sıcaklıklarda katı fazda kalır [47].

Çizelge 2.3'te, termoplastik kompozitler için en yaygın kullanılan yüksek sıcaklık termoplastik polimerlerini göstermektedir. Çizelge 2.4'te ise termoplastik kompozitlerde kullanılan mühendislik termoplastik polimerler gösterilmektedir [24].

Çizelge 2.3. Yüksek Sıcaklık Termoplastikleri

Matris	Morfoloji	T_g (°C)	Proses Sıcaklığı (°C)	Maliyet (Göreceli)
PEEK	SC	143	390	\$\$\$
PEI	A	217	330	\$\$
PPS	SC	89	325	\$
PEKK	SC	156	340	\$\$

Çizelge 2.4. Mühendislik Termoplastikleri

Matris	Morfoloji	T_g (°C)	Proses Sıcaklığı (°C)	Maliyet (Göreceli)
PBT	SC	56	190	\$\$
PA-6	SC	48	220	\$
PA-12	SC	52	190	\$
PP	SC	-20	190	\$

Kompozit malzemelerde kullanılan çok sayıda termoplastik reçine uygun şekilde iki kategoriye ayrılabilir;

- Uzun yıllardır elyaf takviyeleri ile kullanılan geleneksel endüstriyel (mühendislik) termoplastikler.

- Özellikle gelişmiş kompozitlerde kullanılmak üzere geliştirilmiş yeni bir yüksek performanslı termoplastik seti.

Günlük yaşantımızda yaygın olarak kullanılan endüstriyel plastikler (polietilen, naylon, polistiren, polyester, polikarbonat, akrilik vb.) güçlerini ve sertliklerini artırmak için takviye edilebilir. Hangi geleneksel reçinenin kullanılacağına seçimi ise genellikle maliyet, çevresel direnç, işlem kolaylığı ve sünmeye karşı direnç gibi reçine ile ilgili özellikler ile belirlenir [8].

2.4.3. Termoplastik ve termoset matrislerin avantajları ve dezavantajları

Termoplastik ve termoset polimerler arasındaki içsel farklılıklar her reçine tipinin diğerine göre bazı belirgin avantajlar sağlar. Termoplastikler, reaktif bir kür döngüsü gerektirmezler, sadece yapıyı oluşturmak için ısı ve basınç ihtiyaçları vardır, prosesin tamamlanması için soğutmaya ihtiyaç duyarlar ve temel olarak reaktif olmayan katılar olarak tedarik edilebilirler. Bu işlem süresi ve ekipman maliyetlerinde çok ciddi bir tasarrufa sahiptir, ancak bazı işlemler için reçinenin düşük viskoziteye sahip olduğu durumlarda takviye malzemesini kaplamak için hızlı bir şekilde dağılmasını gerektirir. Bununla birlikte, kürlenmiş termosetler çok daha yüksek moleküler ağırlıklara sahiptir buda daha gelişmiş güç ile sonuçlanırken uzama ve toklukta ise azalmaya neden olur. Termoplastiklerden üretilen reçine emdirilmiş prepregler termosetlerden üretilen prepreglerin sınırlı ömürleri ile karşılaştırıldığında sonsuz bir raf ömrü sağlamaktadır. Termoplastik prepregler serttir ve sertleşmeden önce termosetlerde bulunan örtü veya yapışkanlık içermez. Bu nedenle, termoplastik yerine termoset reçinenin seçiminde, çeşitli tavizlerin verileceği açıktır. Bu farkları Çizelge 2.5'te özetlenmiştir [8].

Çizelge 2.5. Tipik termoplastik ve termoset karşılaştırması [8]

	Termoset (Fiber Epoksi)	Termoplastik (APC-2 PEEK)
Erime Viskozitesi	Düşük	Yüksek
Fiber Emdirme	Kolay	Zor
Prepreg Yapışması	İyi	Yok
Prepreg Şekillendirme	İyi	Zayıf
Prepreg Stabilizesi (0°F)	6 mos.	Belirsiz
Proses Döngüsü	1-6 saat	15 saniye-6 saat

Çizelge 2.5. (devam) Tipik termoplastik ve termoset karşılaştırması [8]

Proses Sıcaklığı	350°F	700°F
Mekanik Özellikler	İyi	İyi
Çevresel Direnç	İyi	Çok iyi
Hasar Toleransı	Ortalama	İyi
Veritabanı	Geniş	Ortalama

Termoset polimerlerin en büyük avantajı, çok düşük viskoziteye sahip olmaları ve bu nedenle düşük basınçlarda elyaflara sokulabilmeleridir. Liflere reçine emdirildikten sonra genellikle izotermal olarak gerçekleştirilebilen katı bir yapı elde etmek için kimyasal kütleme yapılır. Termoplastiklerin avantajı ise kalıplamanın izotermik olmayan, yani hızlı bir döngü süresi ile elde etmek için soğuk kalıpta sıcak eriyik ile gerçekleştirilmesidir. Bununla birlikte, polimerize termoplastikler termosetlerin 500 ile 1000 katı arasında eriyik viskozitelerine sahip olma eğilimindedir buda daha yüksek basınçlar gerektirip işlem zorluklarına neden olur ve üretim maliyetlerini yükseltir.

Bununla birlikte, termoplastik kompozit polimerler kolayca geri dönüştürülebilirler buda birçok pazarda özellikle otomotiv sektöründe giderek daha önemli bir konudur. Örneğin, gelişmiş bir termoplastik kompozit bileşen palet boyutuna öğütülebilir ve uzun elyaf takviyeli kalıplar elde etmek için enjeksiyon kalıplanabilir ve buda servis ömrünün sonunda geri dönüştürülebilir. Termoset kompozitler ise sadece öğütülebilir ve dolgu maddesi olarak kullanılabilir, bu da kompozit değerini büyük ölçüde düşüren bir işlemdir.

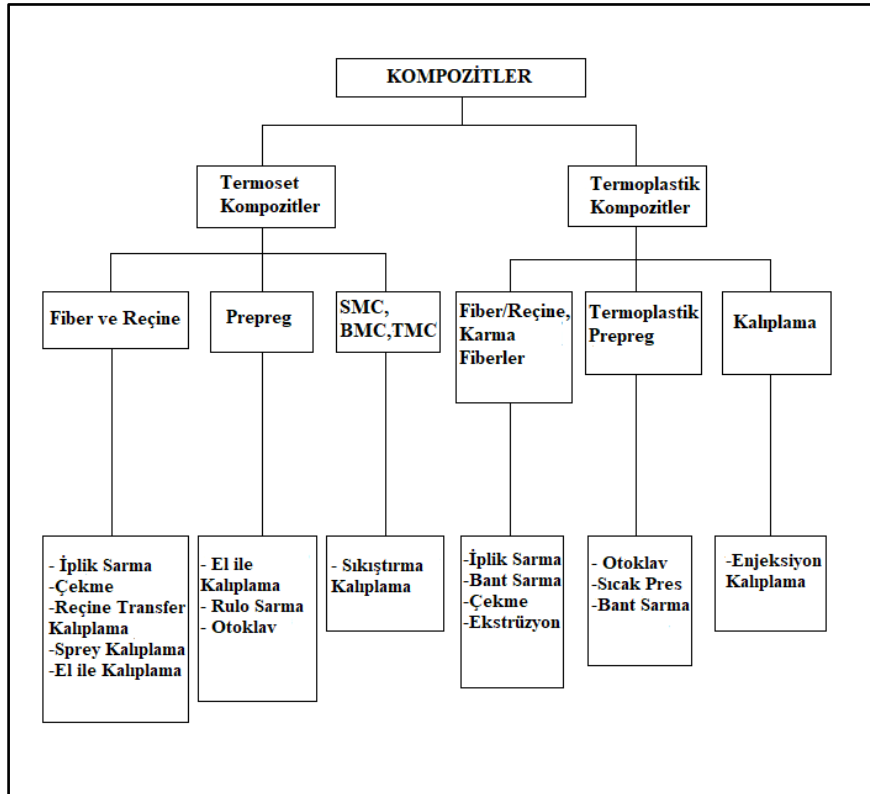
Termoplastik kompozitlerin diğer bir avantajı, üstün darbe ve hasar direnci özellikleridir. Kompozitlerde kullanılan polimerlerin %90'ından fazlası termosetlerdir ve termoplastik kompozitler, esas olarak işlemedeki zorluklar nedeniyle halen daha niş bir pazardır.

Polimerin katı yapısını oluşabilmesi için bir kimyasal reaksiyon gerekmektedir, bununla birlikte termoset işleme ile ilişkili olarak çevresel açıdan önemli sorunlar da vardır. Yapısal kompozitlerde kullanılan termoset matrislerin yaklaşık %65'i doymamış polyesterlerdir. Doymamış polyesterin stiren emilimi ile ilgili çevresel düzenlemeler ve bunların kullanımı ile ilgili toplam proses maliyeti etkilenmektedir. Bu nedenle, birçok çalışma daha yüksek maliyetli doymamış polyesterin yerini alabilmesi için yapılmaktadır.

Özet olarak, termoplastik kompozitler bugüne kadar yüksek işleme basınçlarına ve dolayısı ile pahalı üretim aletlerine ve ayrıca ekipmanların ısıtıp soğutulması için ciddi enerji tüketim ihtiyacı doğurmaktadır. Bu dezavantajlar, birçok alanda bu malzemelerin geri dönüşüm kolaylığı ve yüksek tokluk gibi avantajlarından daha ağır basmış ve uygulamalarını sınırlandırmıştır. Öte yandan, termoset kompozitlerin işlenmesi daha kolay ve üretim sürecinde daha az enerji ve basınç gerektirir. Ancak doğası gereği kırılğan ve tekrar kullanılabilir değildirler [8,42,43,44]. Genel bir değerlendirme yapılması durumunda, termoplastik matrisli kompozitlerin üretim aşamasında yüksek enerji ihtiyacı ve takım desteği nedeni ile termoset kompozitlere oranla zayıf kalmasına rağmen, matrisin raf ömrünün termosetlere göre çok daha uzun olması ve tekrar şekillendirilebilmesi ve tamir edilebilmesi açısından ise termosetlere karşı güçlü yanlarıdır. Sonuç olarak ihtiyaçlara göre malzeme seçimi yapılır.

2.5. Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Metotları

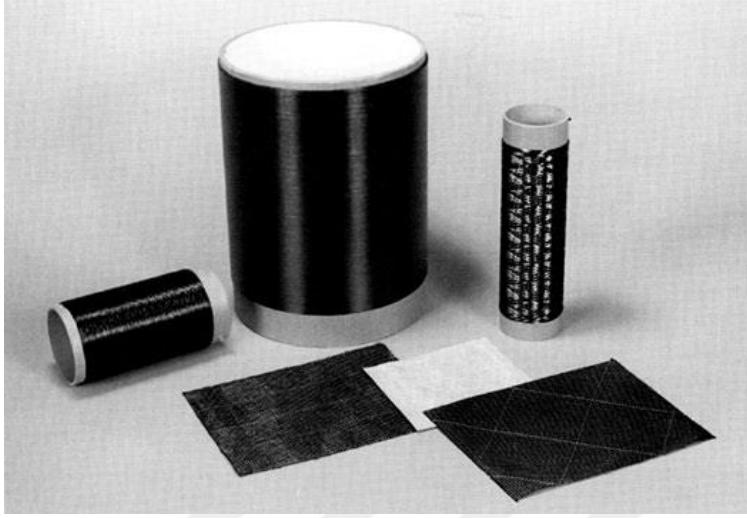
Genel olarak takviyeli polimer matrisli kompozit yapıların üretim metotları Şekil 2.7’de verilmiştir [48].



Şekil 2.7. Polimer matrisli kompozitlerin genel üretim metotları [48]

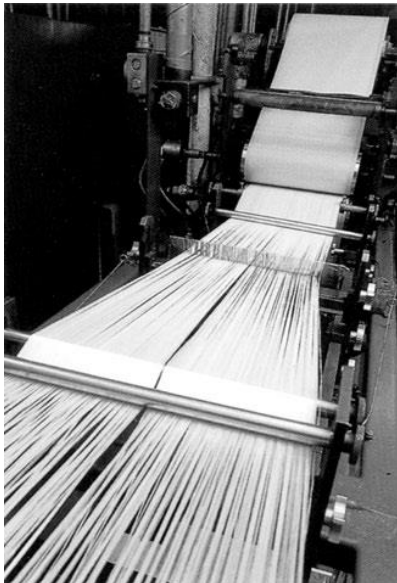
2.5.1. Prepreg hazırlığı

Prepreg, daha sonra elle yatırma veya kalıplama işlemlerinde kullanılmak üzere depolanan, düze formda reçine emdirilmiş bir elyaf, kumaş veya mattır. 0° yönünde yerleştirilmiş ve önceden reçine emdirilmiş liflere tek yönlü bant denir. Resim 2.1’de, tek yönlü bant, dokuma kumaş bant ve fitiller olarak bulunan çeşitli prepreg türleri gösterilmiştir.



Resim 2.1. Tek yönlü mat, dokuma prepreg ve fitil örnekleri [48]

Resim 2.2’de tek yönlü prepreg bandların yapımı gösterilmiştir. Tek yönlü bant, kompozit özelliklerin istenen yönde uyarlanabilmesini sağlar.



Resim 2.2. Tek yönlü prepreg üretimi [48]

Tek yönlü bant, kompozit özelliklerin istenen yönde uyarlanabilmesini sağlar. Dokuma kumaş prepregler, malzeme esnekliğinin anahtar olduğu yüksek dayanımlı parçaların üretimi için kullanılır. Ayrıca çekirdek malzeme olarak bal peteği yapısı kullanılarak sandviç paneller yapmak için kullanılır. Önceden emdirilmiş fitiler esas olarak filaman sarma uygulamalarında kullanılır. Epoksi bazlı prepregler endsütride çok yaygın bir şekilde kullanılır ve 0,127 mm ila 0,254 mm kalınlık aralığında düz levha formunda gelir. Prepregler, genel olarak termoset bazlı prepregler ve termoplastik bazlı prepregler olarak sınıflandırılabilir. Bu iki prepreg tipinin ayrımı ise kullanılan reçine tipine göre yapılır. Bir prepreg içindeki takviyeler cam, karbon veya aramid olabilir ve her iki prepreg tipinde filament sargı, dokuma kumaş veya mat formatında kullanılabilir. Piyasada çeşitli uygulama ihtiyaçlarını karşılamak için 100'den fazla prepreg türü mevcuttur.

Prepregler, tutarlı özelliklerinin yanında tutarlı elyaf / reçine karışımı ve tamamen ıslatma sağlar. Reçine ve katalizörün tartılması ve karıştırılması ihtiyacını ortadan kaldırır. Çeşitli uygulama ihtiyaçlarını karşılamak için prepregler ile birlikte çeşitli tiplerde teyel ve kaplama sağlanır. Kaplama, prepreg'in konturlu bir yüzey şeklini alma yeteneğidir. Örneğin, termoplastik prepreglerin kaplanması kolay değil iken termoset prepreglerin kaplanması kolaydır. Teyellemek, kurlenmemiş prepreglerin yapışkanlığıdır. Kolay kat serimi ve işleme için belirli bir miktar yapışkanlık gerekir. Termoplastik bantlar herhangi bir yapışkanlığa sahip olmadığından, serilirken başka bir katmanla kaynaklanır. Termoset prepreglerin sınırlı bir raf ömrü vardır ve depolama için soğutma gerektirir. Soğutma, prepreg malzemelerindeki kurlenme derecesini en aza indirir çünkü ısı, termoset prepreglerin kurlenmesine neden olur.

Tek yönlü prepreg bantlar, 0,5 ile 60 inç arasında değişen çok çeşitli genişliklerde mevcuttur. İstenilen kat yönlerinde tek yönlü bantlar döşenirken, yapının sertliği, mukavemeti ve termal genleşme katsayısı kontrol edilebilir. Kumaş prepregler, 39 ile 60 inç arasında değişen standart genişliklerde bir dizi dokuma deseninde mevcuttur. Kumaş prepregler, dokuma kumaşların reçine ile bir sıcak eritme işlemi veya çözelti işlemi ile önceden empoze edilmesi ile elde edilir. Bu yapı, yüksek konturlu ve karmaşık parçalarda pozitif yönde esneklik sağlar. Kumaş prepregler, uçak parçaları, sandviç paneller, spor malzemeleri, endüstriyel ürünler gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Fitil formundaki prepregler ise filament sarma amaçlı olarak kullanılırlar.

Prepregler, havacılık parçaları, spor malzemesi, baskılı devre kartları, tıbbi bileşenler ve endsütriyel ürünler dahil bir çok alanda kullanılmaktadır. Prepreg malzemelerin metallere göre avantajları daha yüksek özgül sertlik, özgül mukavemet, korozyon direnci ve daha hızlı üretilebilirlikleridir. Buna karşın prepreglerin en büyük dezavantajı, daha yüksek maliyetleridir. Prepreg malzemelerle yapılan ürünler, filament sarma ve çekme metotları ile yapılanlardan daha yüksek bir fiber hacmi oranı sağlar. Prepregler ayrıca diğer kompozit ürünlere göre daha kontrollü özellikler ve daha yüksek sertlik ve mukavemet özelliği sağlar [48].

Termoset prepregler

Termoset prepreg malzemelerinde kullanılan en yaygın reçine epoksidir. Bu prepregler genellikle düşük sıcaklıkta ki ortamlarda depolanır ve raf ömürleri sınırlıdır. Oda sıcaklığında da prepregler uygun hale gelmektedir. Genellikle reçine, kısmen B-evreleme adı verilen yapışkan olmayan bir duruma kürlenir. Bazı son kullanım özelliklerini, işleme ve taşıma ihtiyaçlarını karşılamak için çeşitli katkı maddeleri eklenir. Bu katkı maddelerine örnek olarak alev geciktirici, katalizör ve inhibitörler verilebilir. Termoset prepregler, daha yavaş kinetik reaksiyonları nedeniyle tipik olarak 1 ila 8 saat aralığında daha uzun bir işlem döngü süresi gerektirir. Daha yüksek üretim ihtiyacı nedeni ile daha hızlı kürlenebilen prepreg çalışmaları yapılmaktadır. Termoset prepregler daha yaygındırlar ve termoplastiklere göre daha yoğun kullanılmaktadır. Genellikle solvent emdirme ve sıcak eritme teknolojisi ile üretilirler. Solvent emdirme yönteminde, reçine bir kimyasal madde ile çözülerek, elyafların daldırıldığı düşük viskoziteli bir sıvı oluşturulur. Gelişen çevre bilincine bağlı olarak, bu süreçten kaynaklanan çözücünün bertaraf edilmesi endişe yaratarak bir problem teşkil etmektedir. Sıcak eriyik teknolojisinde, çözücülerin kullanımı ortadan kaldırılmaktadır. Bu işlemde matris reçinesi viskoz formda uygulanır. Bu işlemin dezavantajı ise, reçinenin daha yüksek viskozitesinden dolayı elyaf ıslatmanın kolayca elde edilememesidir. Prepregler genellikle elle yatırma, rulo sarma, sıkıştırma kalıplama ve otomatik yerleştirme işlemleri için kullanılır. Prepregler bir alete yerleştirildikten sonra, nihai ürünü elde etmek için basınç ve sıcaklık varlığında kürlenir [48].

Termoplastik prepregler

Termoplastik prepregler oda sıcaklığında sınırsız bir raf ömrüne sahiptir ve genellikle reçinenin erime sıcaklığında işlenir. En yaygın reçineler naylon, polietereterketon (PEEK), polifenilen sülfid, poliimid vb. dir. Termoplastik kompozitler için proses döngü süresi, birkaç dakika aralığında gerçekleşmektedir ve bu açıdan termoset kompozitlerden çok daha hızlı üretim prosesine sahiptir. Termosetlere nazaran daha yeni bir teknolojidir ve termoset prepreglere göre çeşitli işleme ve tasarım avantajları sağlar. Termoplastik prepreglerin avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz ;

- Geri dönüştürülebilirlik
- İyi çözücü ve kimyasal direnç
- İşlem döngü süresinin kısalığı
- Daha yüksek tokluk ve darbe direnci
- Soğutma ihtiyacı duyulmadan sınırsız raf ömrü
- Yeniden şekillendirilebilirlik
- Füzyon bağlama ve yerinde konsolidasyon ile birleştirme ve montaj için daha fazla esneklik
- Daha iyi tamir edilebilirlik potansiyeli

Termoplastik prepreglerin dezavantajları, işleme için daha yüksek sıcaklıklar ve basınçlar gerektirmeleridir. Yetersiz kaplama yeteneklerinden dolayı bazı işleme zorlukları yaşarlar.

Termoplastik prepregler, termoset prepreg üretimine benzer şekilde solvent empoze ve eriğik kaplama teknikleri ile üretilir. Solvent emdirme, termoplastikler daha fazla kimyasal direnç sunduğundan zorlaşır. Sıcak eriğik kaplama tekniği ise liflerin ve reçinelerin aynı anda tabaka halinde ekstrüde edildiğinden bir ekstrüzyon işlemine benzemektedir. Prepreg üretimi için film istifleme ve kuru toz biriktirme yöntemleri gibi başka üretim yöntemleri de vardır. Film istifleme işleminde, termoplastik reçine filmi takviye malzemesi ile birlikte istiflenir ve elyafları tamamen empoze etmek için ısı ve basınç altında birleştirilir. Bu işlem temiz ve çözücü içermez ancak boşluksuz bir prepreg üretimi için uygun koşulların oluşturulması gerekmektedir. Kuru toz biriktirme tekniğinde, reçine başlangıç malzemesi olarak toz biçimde olmalıdır. Toz, bir reçine bulutu oluşturabilmek için akışkanlaştırılır ve

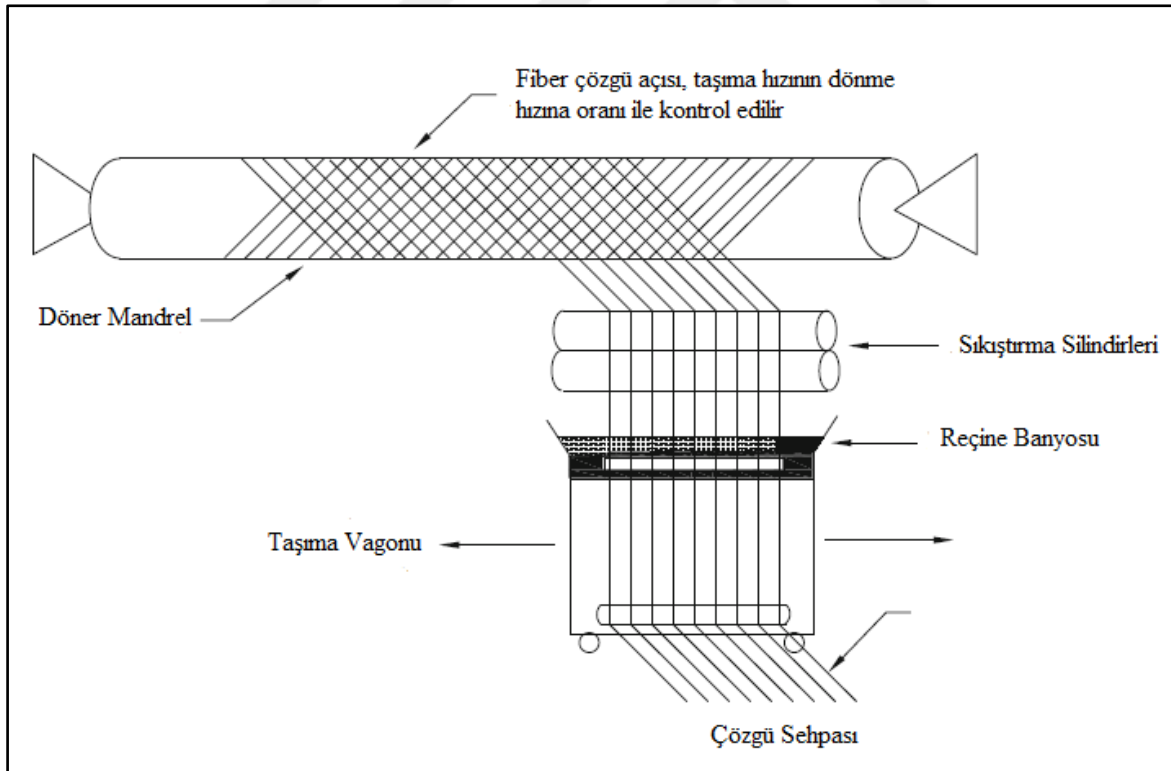
yüklenir. Lifler buluttan geçirilir ve lifler çekildikçe yüklü reçine ile kaplanır. Kaplanmış fiberler daha sonra reçineyi tamamen eritmek ve sürekli bir malzeme tabakası oluşturmak için bir ısı kaynağından geçirilir [48].

2.5.2. Termoset matrisli kompozit üretim metotları

Termoset matrisli kompozitlerin üretim metotlarından daha yoğun olarak kullanılan metotları aşağıda açıklanmıştır.

Filament (iplik) sarma

Bu işlem, üzerine önceden empoze edilmiş liflerin veya takviyelerin önceden belirlenmiş modellerde sarıldığı dönen bir mandrelden oluşur. Yöntem, elyaf yerleştirmenin en iyi şekilde kontrolünü sağlar. Islak yöntem Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Filament sargı şematik gösterimi [40]

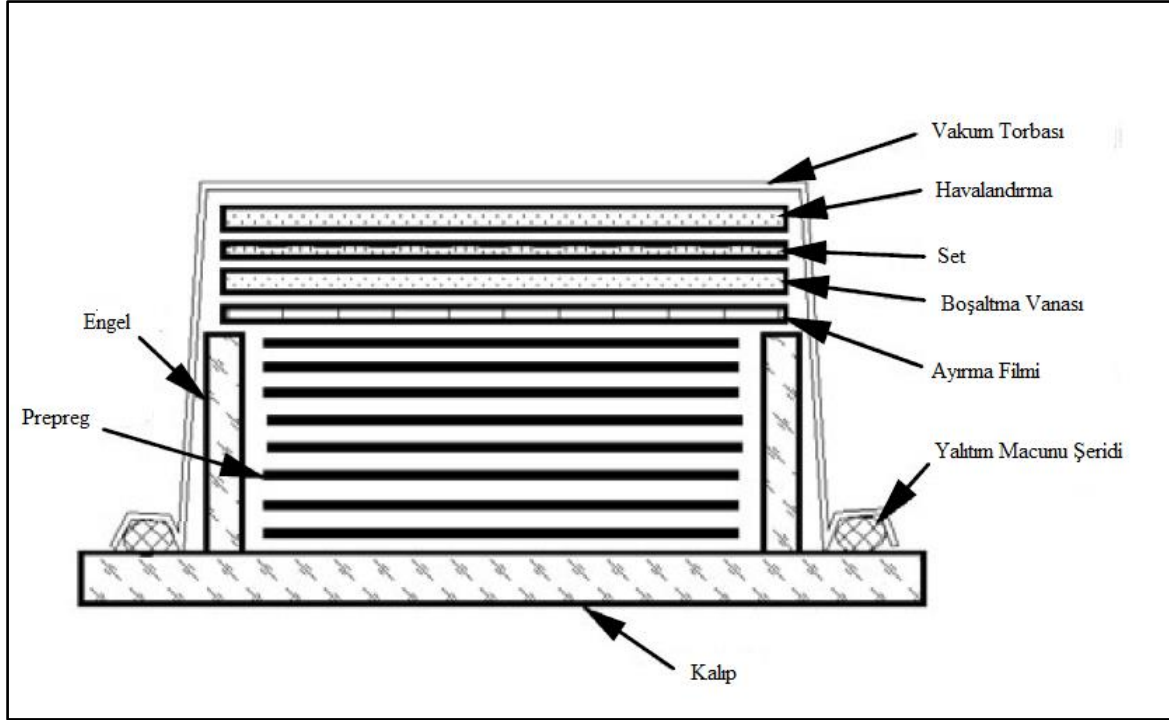
Burada, elyafın düşük viskoziteli reçine içeren bir banyodan geçmesine izin verilir. Kuru yöntemde, önceden empoze edilmiş takviye tabakaları mandrel üzerine sarılır ve daha sonra

bileşen çıkarılır ve sonradan sertleştirilir. Geleneksel olarak bu işlem basınçlı kaplar, roket motoru kutuları, tanklar, kanallar, golf sopası ve oltalar yapmak için kullanılır. Son zamanlarda silindirik olmayan ve küresel olmayan kompozit parçalarda filament sargı teknolojisi ile üretilmektedir. Polyesterler, vinil esterler, epoksiler ve fenolikler filaman sarılı kısımlarda kullanılan tipik termoset reçinelerdir. Reçinelerle empoze edilmiş sürekli liflerden yapılan kompozit üretimi için bir filaman sarma teknolojisi araştırılmıştır ve imalat malzemeleri, reçineler, sarma modelleri ve filament sargı uygulamaları incelenmektedir [49]. Gene fiber kompozit bileşenlerin geleneksel ve robotik sarımlarının kalite karşılaştırması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [50].

Hibrit filament sargı süreçleri, hafif ağırlıklı sargı sistemleri ve gelişmiş filament sargı teknikleri kavramlarıda çalışılmaktadır. Robotik sistemle asimetrik şekilli parçaların filaman sarılması üzerine çalışmalar yürütülmektedir [51]. Robotize edilmiş filaman sarma işleminde, tasarlanmış bir robot yörüngesine göre bir kalıp üzerine bir fitil yerleştirilir ve sarılı parçalar termoset matrisi için bir fırında polimerize edilir. Bu tekniği kullanarak asimetrik veya karmaşık geometrileri sarmak mümkündür. Robotize edilmiş filament sargı metodunun kritik yönü, kompozit parçanın mekanik performansını ve sarma süresini etkileyen sarım yörüngesidir.

Prepregleri el ile serme

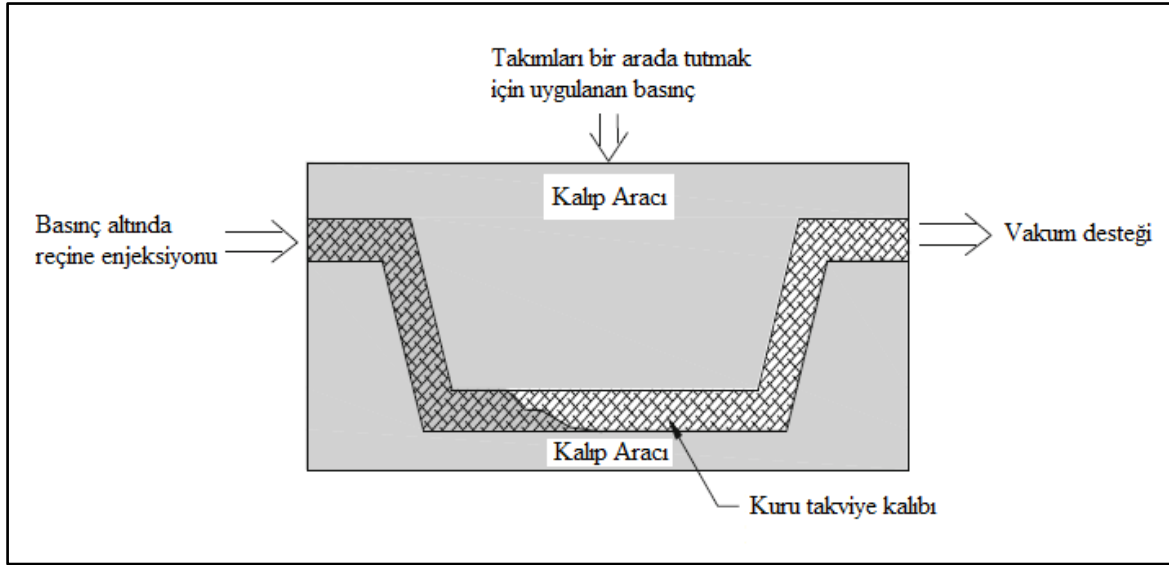
El ile serme işlemi temel olarak iki ana yöntem ile yapılmaktadır; ıslak yerleştirme ve prepreg serme şeklindedir. Bu bölümde havacılık endüstrisinde çok yaygın olarak kullanılan prepreg serme yöntemi üzerinde durulacaktır. Otoklav işleme veya vakumlu torbalama işlemi olarak da adlandırılır. Çok yüksek lif hacmi fraksiyonlarına sahip karmaşık şekiller bu işlem kullanılarak üretilir. Düşük hacim kabiliyetine sahip açık kalıplama işlemidir. Bu işlemde, prepregler kesilir ve bir takım üzerine istenilen lif yönünde yerleştirilir ve ardından vakumla torbalanır. Vakumlu torbalamadan sonra, kalıp ile kompozit bir fırın veya otoklav içine konur ve ardından parçanın kurlenmesi ve sağlamlaştırılması için ısı ve basınç uygulanır. Prepreg yerleştirme veya otoklav işleminde işçilik fazladır. İşçilik maliyetleri filament sargı, pultrüzyon ve diğer yüksek hacimli işlemlerden 50 ile 100 kat daha fazladır. Bununla birlikte, prototip parçaları ve küçük miktarda çalışmalar oluşturmak için, prepreg yerleştirme işlemi diğer işlemlere göre avantaj sağlar. Şekil 2.9'da el ile serme prosesinin özeti verilmiştir [48].



Şekil 2.9. Vakum torbasında prepreg elle serme şematığı [48]

Reçine transfer kalıplama metodu

Reçine transfer kalıplama orta ve yüksek hacimli üretim için düşük basınçlı kapalı kalıplama işlemidir. Bu işlem temelde kuru takviye istifinin kalıbın alt kısmına yerleştirilmesini ve ardından diğer yarının alt kalıbın üzerine sıkıştırılmasını içerir. Karmaşık şekiller için kalıplar kullanılır. Kalıbı kapattıktan sonra planlı olarak yerleştirilmiş havalandırma deliklerinden havanın yerini alan, katalizör içeren düşük viskoziteli bir reçine pompalanır. Reçine / katalizör oranları, ölçülü karıştırma ekipmanları tarafından kontrol edilir ve Şekil 2.10'da gösterildiği gibi kalıp girişine enjekte edilir. Yaygın olarak kullanılan matris reçineleri arasında polyester, vinil ester, epoksi ve fenolikler bulunur. Hem enjeksiyon hem de sertleştirme, ortam sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilebilir. Optimum yüzey kalitesi elde etmek için, kalıplamadan önce kalıp yüzeyine jel kaplaması uygulanır. Otomotiv gövde parçaları, konteynerler gibi yüksek kaliteli parçalar bu yöntemle üretilir. Reçine transfer kalıplama metodu ile parça üretebilmek için kullanılan bir cihazda, içine bileşenin üretilmesi için başlangıç malzemesinin sokulabileceği bir tekne, başlangıç malzemesini kapatmak için oluğa takılabilen bir kapak, bileşeni imal etmek için bir ısıtma cihazı bulunur [52].

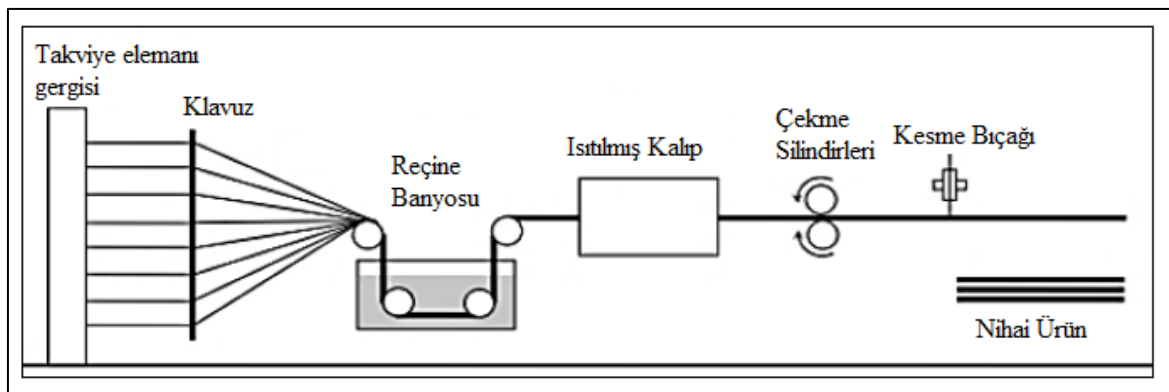


Şekil 2.10. Reçine transfer kalıplama metodu şematiği [40]

Oluk malzemesi ise, bileşenin üretilmesi için başlangıç malzemesinin genişleme katsayısına esasen özdeş olan bir malzemedan imal edilmelidir.

Profil çekme yöntemi

Şekil 2.11’de profil çekme yöntemi şematik olarak verilmiştir. Profil çekme yönteminde parçanın şeklini verebilmek için reçine ile doyurulmuş fiberlerin ısıtılmış kalıp içinden çekilerek toplanır.



Şekil 2.11. Profil çekme yöntemi şematik gösterimi [53]

Profil çekme sisteminde amaçlanan tek hedef fiberleri reçineye doyurmak değildir, doyurma işleminin yanında sistemin içinde kurlama ve şekillendirme gibi fonksiyonlarda mevcuttur.

Matris malzemesinin bulunduğu banyodan geçirilen takviye malzemesi aynı zamanda ısıtılmış olan kalıp içerisinde geçirilerek sertleştirme işlemini de gerçekleştirir. Profil çekme yönteminde genel olarak cam elyaf takviye elemanı ile doymamış polyester veya vinil ester reçine tercih edilirken, aramid ve karbon gibi elyaf takviye elemanlarında epoksi daha yoğun olarak tercih edilmektedir. Genel olarak olta, kayak direkleri vb. ürünlerin üretiminde kullanılan bir yöntemdir [53].

2.5.3. Termoplastik matrisli kompozit üretim metotları

Genel olarak kullanılan termoplastik üretim teknolojilerinden aşağıda açıklanmıştır. Bu üretim metotlarının tamamı termoplastik reçinedeki faz değişimi ile gerçekleşmektedir. Termoplastik reçineler erime sıcaklığının üzerinde sıcaklıklara çıkarılıp şekil verildikten sonra basınç altında soğutma prosesine tabi tutulurlar [54].

Isı ile şekillendirme

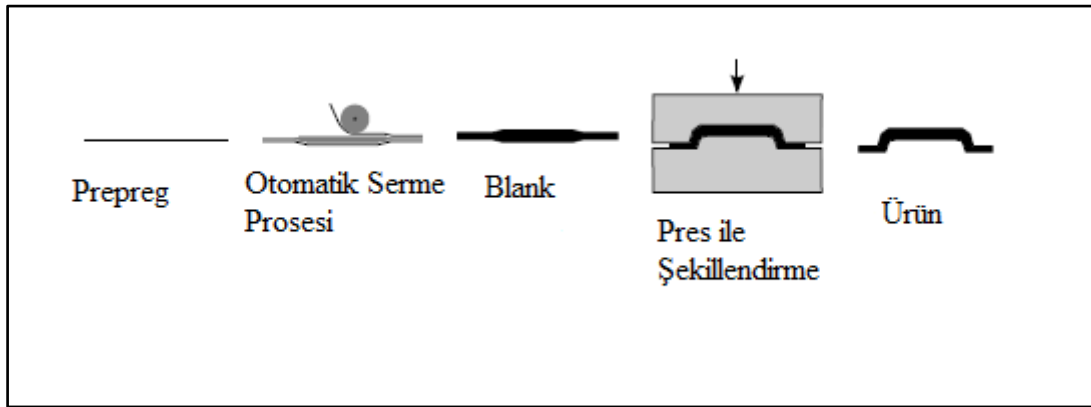
Termoplastik kompozitlerinde üretimdeki en basit şekil verme metodudur. Doğrusal şeritlerin istenilen bölgeleri ısıtıcı bir bıçak tarafından ısıtılır ve bükme işlemi ile istenilen şekil verilir. Bu üretim metodu ile hem laminatlara hemde sandviç yapılara uygulanabilir. Uygulama ile üretilen parça örnekleri Resim 2.3’de verilmiştir.



Resim 2.3. Isı ile şekillendirme ile üretilmiş paneller [55]

Pres ile şekillendirme

“Blank” olarak adlandırılan ve öncesinde belirli serim açıları ve şekli ile serme işlemi yapılan ve konsolidasyon işlemi tamamlanan kompozit plakaların erime sıcaklığının üzerine kadar ısıtılıp akabinde hızlı bir proses ile pres kalıba basılması ile şekil verilir. Şekil 2.12’de pres ile şekillendirme üretim şematığı verilmiştir.



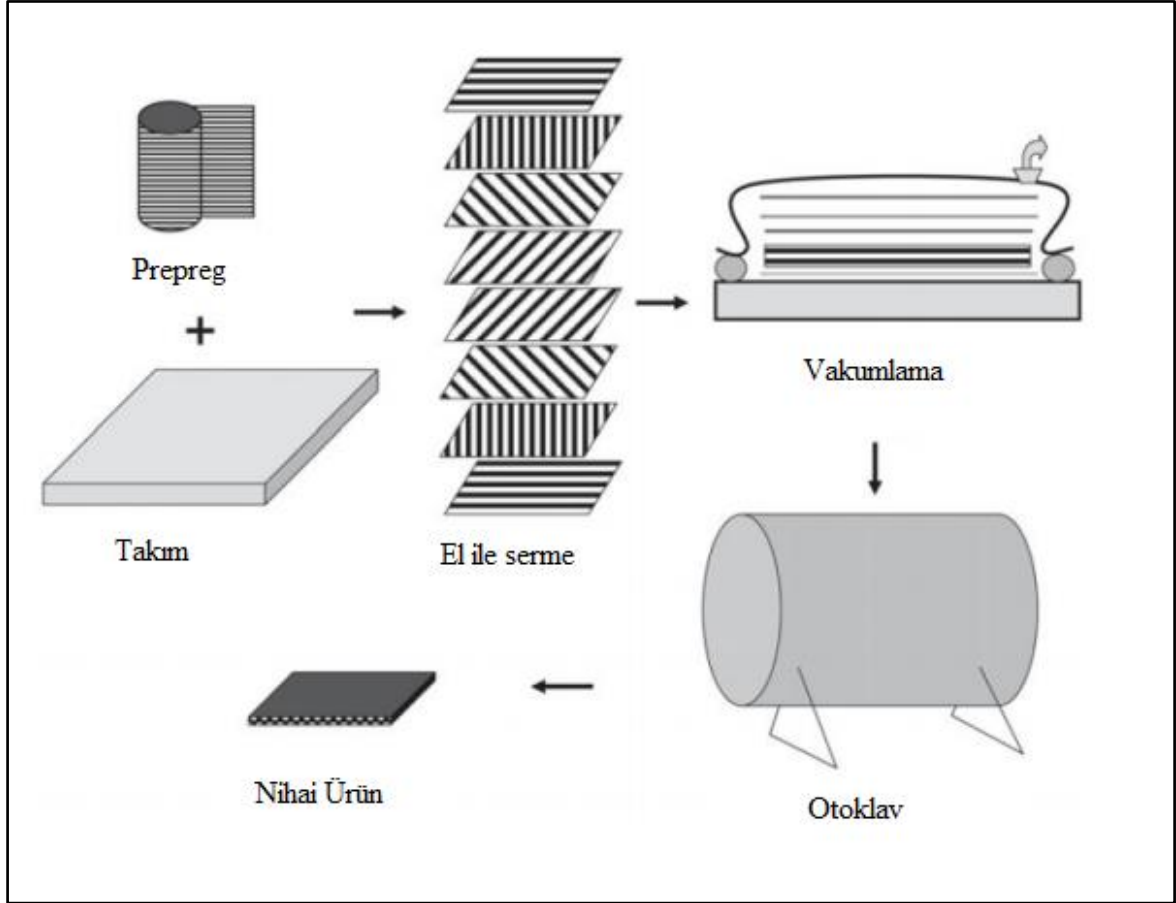
Şekil 2.12. Pres ile şekillendirme üretim şematığı [56]

Pres ile şekillendirme metodunda en önemli noktalardan biri, malzemenin kalıp ile olan ilk teması ile basıncın uygulanması arasındaki sürenin saniyeler mertebesinde olmasıdır. Nihai parçanın geometrik olarak yapısına bağlı olarak düz paneller kullanılabilir ve ayrıca daha kompleks bir parça üretebilmek için önceden şekil verilmiş plakalarda kullanılabilir. Pres ile şekillendirme metodunda farklı kumaş formları ile gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde üç boyutlu yapılar veya karmaşık formdaki parçaların üretimi için şerit kullanımından ziyade dokuma kumaşların daha verimli oldukları görülmüştür.

Otoklav ile üretim

Lokal bölgelerde daha güçlü yapıların oluşturulması istendiğinde ve daha kompleks serimlerin oluşturulabilmesi için kullanılan metottur. Prepregler üretilmek istenen parça formuna uygun olarak el ile serilir. Ardından serilmiş prepreg plaka vakum torbasına alınarak serilen katların sabit kalması sağlanır. Vakum torbası için tercih edilen malzemeler genel olarak kapton veya polyimide gibi yüksek sıcaklığa dayanımlı malzemelerdir. Bu malzemelerin tercih edilmesinin ana sebebi ise proses süresince vakumun korunması gereğidir. Vakum torbasına alınmış parça otoklavda, tercih edilen reçinenin proses

sıcaklığına bağlı olarak (330°C - 400°C), 7 ila 21 bar basınç altında 5 ile 30 dk arasında pişirilir. Son olarak ısıtılan parça kristal yapının korunması için 5°C - 20°C /dk hız ile oda sıcaklığında soğutulur. Şekil 2.13'te otoklav ile üretim süreci verilmiştir.



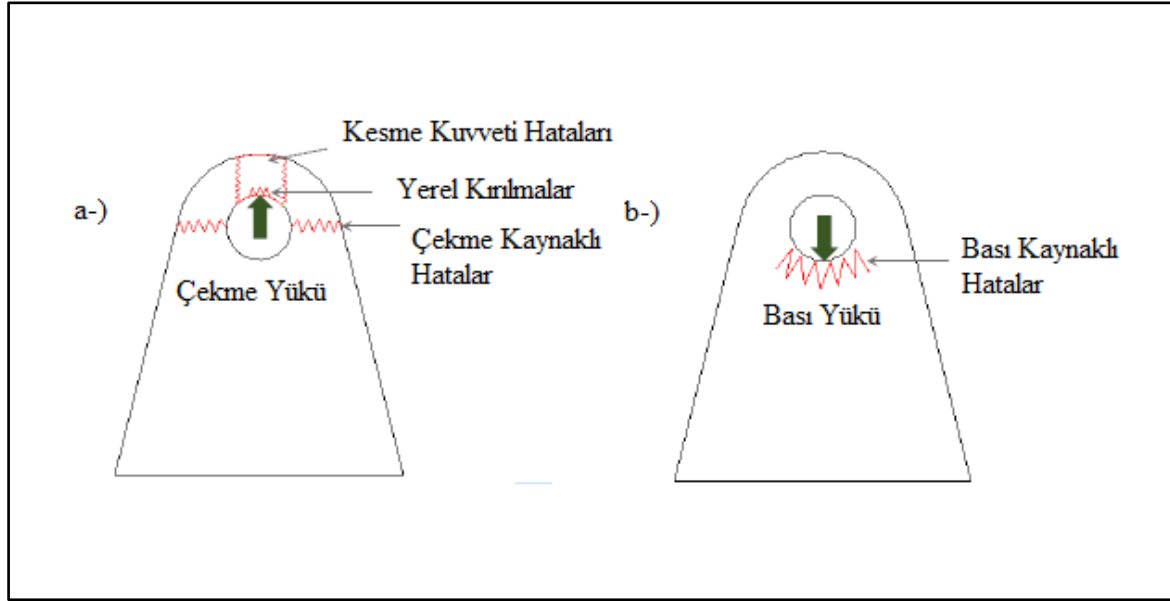
Şekil 2.13. Otoklav üretim şematiği [57]

2.6. Kompozit Kulakçık Yapılar

Kompozit malzemeler, metalik alaşımlarınkine benzer mekanik performans sağlamalarının yanında önemli derece hafiflik sağladığından havacılık ve uzay alanlarında kullanım alanı sürekli artmaktadır. Kompozit laminatlar, büyük boyutlu ancak nispeten daha basit geometrilere sahip bileşenlerin imalatı için kullanılabilirken, kilit yük taşıyan parçalar ve delikli veya çentikli karmaşık yapılar için katmanlı tasarımların uygunluğu tartışmaya açıktır. Sonuç olarak, kilit yük taşıyan parçalar için kompozit kullanımı örneğin; uçakların kanatları ile gövde, kanatçıklar ve kanatlar, dümen ve dikey kuyruk plakası gibi parçaların bağlantısı olacak kulakçık yapılar henüz yaygın değildir [58]. Bu doğrultuda yapılan bazı

çalışmalarda, örgülı kompozitler kullanarak kulakçık yapıların kilit yük taşıması konusunda çalışmalar yürütölmüştür [59, 60].

Bir kulakçık genellikle cıvata ile delikten yüklenir. Genel bir kulakçık yapısında tipik yükleme koşulları şekil 2.14'te verilmiştir.



Şekil 2.14. Kulakçık yapılarında tipik hata modelleri a-) Çekme yükü altında b-) Bası yükü altında [58]

Tipik olarak hata modları, metalik emsallerininkine benzerlik gösterir. Çekme altında yüklemenin modları dairesel alanın farklı bölgeleri ile ilişkilendirilir. Yanlarda çekme kaynaklı gerilme kırılması, deliğın üst tarafında kenarda yükleme cıvatasına karşı lokal ezilmeler, uç kısımlarda kesme kuvveti nedeni ile hatalar meydana gelir. Bası yükü altında ise deliğın altında bası kaynaklı hatalar beklenir [61]. Burada en kritik mod büyük olasılıkla çekme yükü altında oluşacak hatalar olacakken, bası yükü altındaki hata durumu en az kritik durumu oluşturacaktır [58]. Kulakçık yapılarında ana tasarım düşüncesi, yükleme sırasında, uygulanan yükün çoğunun eksenel çekmeler tarafından hatasız olarak sürdürölmesi gerektiğidir. Matrisin uygun bir şekilde tüm katlarda konsolide olması da çok önemli bir parametredir.

Tamas ve Eckart, yapmış oldukları çalışmalarında havacılıktaki gelişmiş kanat sistemlerindeki bağlantı yapısı olan kulakçık yapılarını incelemişlerdir. Bu çalışmada iki

üretim metodundan oluşan yapıları incelemişlerdir. Bunlardan birincisi serme yöntemi ile dairesel bir delik ve ayrı bir kenar mesafesi ile kompozit kulakçık olarak tanımlanır. Diğer model ise pim etrafında sarma yöntemi ile oluşturulan kompozit kulakçık yapılarıdır. İki farklı yapının hata davranışlarının farklı olduğu tespit edilmiş. Serme yöntemi ile üretilen kulakçık yapının katlar içinde oluşan bir kırılma nedeni ile tamamen yapının bozulduğu görülürken, sarma yöntemi ile elde edilen kulakçık yapının orta kısmında ilmek katlarının birbirinden ayrılması ile hata başlar [31].

Chriatos ve William, yapmış oldukları çalışmalarında tipik olarak problemin karmaşıklığı ve kırılma modlarının etkileşimi nedeni ile kulakçık yapılarının sonlu elemanlar veya sınır elemanlar ile analiz edilmesi gerektiğini önermişlerdir. Aynı zamanda kulakçık yapılarının analitik olarak da kontrolünün sağlanabilmesi için bir çalışma yapılmış olup kulakçık yapının geometrisini optimize etmek için kullanılmıştır. Pim çapının, pim-kulakçık genişlik oranına göre optimum bir değerin var olduğu görülmüş olup bu optimum değerinde kulakçık yapının yük taşıma kapasitesinin de maksimum olduğu tespit edilmiştir. Bu oran bu çalışmada 0,41 olarak tespit edilmiştir [30].

Markus, Olli ve Francesco yapmış oldukları çalışmalarında kalın bir kompozit kulakçığın yük tepkisi ve hata modlarını analitik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmadaki amaç kulakçığın sertliği, mukavemeti ve kırılma modu hakkında araştırma yapmanın yanında kulakçık yapısının yük tepkisi ve hata modlarını tahmin edebilmek için araştırma yapmaktır. Kulakçık reçine transfer kalıplama metodu ile üretilmiştir. Kulakçık yapının dış ve iç çapları sırası ile 145mm ve 75mm'dir. Yani çapların oranı 1.93 olarak kulakçık tasarımı yapılmıştır. Test numuneleri kulakçık delik merkezinden 27° açı ile yüklenmiştir. Sonuçlar, gerilme tepkisinin neredeyse doğrusal olduğu görülmüştür. Bununla birlikte analizlerde tahmin edilen kırılma yüklerinden çok daha yüksek değerlere dayanım gösterdiği görülmüştür. Bunun temelinde de kompozitlerin anizotropik yapısının, metal kulakçıklara kıyasla yapısal davranışı önemli ölçüde değiştirmesi vardır. Burada kalın kompozit kulakçık yapının bir kesme işlemi geçirmesi gerekmektedir ve bu durum kenar mesafesini kısalttığı için problem oluşturmaktadır. Burada kesme işlemi esnasında kritik olan enine kesitlerdeki liflerin kısa kesilip, sürekli laminatta olduğu kadar verimli bir şekilde yük taşıyamaması sonucunu doğurmaktadır. Bu nedenle temel olarak analizlerde elde edilen kırılma sonuçları ile testlerde elde edilen kırılma sonuçları arasındaki farkın temelini oluşturmaktadır [62].

Fonseca ve Almeida yapmış oldukları çalışmalarında reçine transfer kalıplama metodu ile ürettikleri kulakçık yapıların üretim aşamalarını belirlemişlerdir. Kulakçık üretimini dört aşamaya ayırmışlar ve bu aşamaları şu şekilde sıralamışlar;

- Kumaşın kesilmesi ve ön kalıp imalatı
- Enjeksiyon kalıplama prosesi
- Kalıptan çıkarma
- Final işlemleri ve delik delinmesi

Tasarlanan model toplam 48 kat prepreg ile üretilmiştir. 48 katlı yapının prepreg oryantasyonu ise $[+45, -45, 0, 90, 90, 0, -45, +45]_{6T}$ şeklinde uygulanmıştır. Sonuç olarak yapılan testler ve analizlere dayanarak laminasyon ile üretilen ve akabinde delinen delik için tutarlı sonuçlar alınabilmiş [63].

Markus ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada hedeflenen konu havacılık uygulamalarında kullanılan kompozit kulakçıklar üzerinde çalışmalar yapmaktır. Ana amaç ise, kulakçık yapı ile ana yapı arasındaki bağlantının sertliği, mukavemeti ve kırılma modu hakkında araştırma yapmaktır. Yapısal gerekliliklerden sonra ana tasarım faktörü olarak uygun maliyetli üretim yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Seçilen model konsept tasarlanmış, üretilmiş ve yapısal olarak test edilmiştir. Analizler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmış. Analizde kontak tanımının sağlanabilmesi için çelik bir pim tasarlanmış ve yüklemeyi kulakçığa uygulamak için modellenmiştir. Test kulakçıkları reçine transfer kalıplama tekniği ile üretilmiş. Kullanılan malzemeler ise karbon fiber kumaş ve G926 ve epoksi reçine RTM6 dır. Test numunelerine eksenel çekme yüklemesi uygulanmıştır. Tasarım kaynaklı kulakçık yapının gücü beklenenin üzerinde çıkmıştır. Bununla birlikte kulakçık ile yapı yüzeyi arasındaki bağlantı beklenenden daha düşük bir değerde hasara uğramıştır. Genel olarak bu değerler için ön görülen çıkarımlar şu şekilde sıralanmış;

- Önerilen kulakçık geometrisi, yüksek yük transfer uygulamaları için uygun bir çözümdür.
- İkincil bağlantı elemanları ile bağlantının mukavemeti nihai olarak montajın mukavemetini belirler.

- Kulakçık ve ana yapının arasındaki bağlantı onarılabılır ve mukavemeti korumak mümkündür.

Bu çalışmada ayrıca yüklemenin yapıya iletilmesinde cıvatalı bağlantı kullanılmış olup, kulakçık yapının daha önce kırılması nedeni ile cıvatalı bağlantının dayanım değeri kontrol edilememiş olarak çalışmaya işlenmiştir [64].

Kulakçık bağlantılarında dört temel grup parametre etkilidir [65];

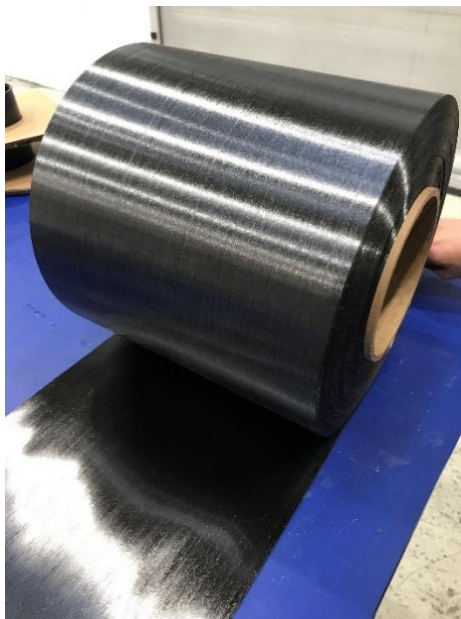
- Malzeme Parametreleri: Fiber malzemesi , matris malzemesi, serim oryantasyonu ve tabaka kalınlığı gibi parametreler malzeme parametresinin değişkenlerini oluşturur.
- Bağlayıcı Parametreleri: Bağlayıcının boyutu, tipi ve bağlanma alanı gibi parametreler bağlayıcı parametresinin değişkenlerini oluşturur.
- Geometrik Parametreler: Parça genişliği veya parçanın genişliğinin bağlantı deliğinin çapına oranı, bağlantı deliğinin parça kenarına olan uzaklığı veya çoklu deliklerde delikler arası uzaklık gibi parametreler geometrik parametrelerin değişkenlerini oluşturur.
- Tasarım Parametreleri: Yükleme koşulları, yükleme yönü ve tipi gibi konularda tasarım parametrelerinin değişkenlerini oluşturmaktadır.

3. MATERYAL VE ÜRETİM YÖNTEMİ

Bu tez kapsamında, termoplastik kompozit malzemelerin otoklav ile üretim parametrelerinden olan sıcaklık, basınç ve vakum gibi değişkenlerden sıcaklık parametresinin kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi ve bir döner kanat hava aracının pal kökünü temsil eden bir kulakçık yapıdaki serim parametresinin parçanın dayanımı üzerindeki etkisinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Termoplastik kompozit yapının, fiber malzemesi karbon ve matris malzemesi poli eter keton (PEKK) malzeme oluşturmaktadır. Testler iki bölüme ayrılmıştır, kupon seviyesi testler Mitec Innovation & Technology merkezinde gerçekleştirilmiştir. Komponent seviyesi testleri ise Ion Metal Endüstriyel Metalurji Araştırma ve Geliştirme AŞ laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Kupon ve komponent parça üretimi ise Türk Havacılık ve Uzay Sanayi AŞ tesislerinde gerçekleştirilmiştir.

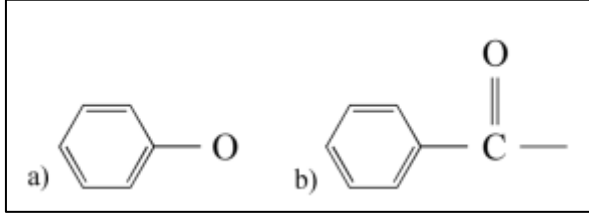
3.1. Kupon ve Komponentlerde Kullanılan Materyal

Bu çalışmada kullanılan termoplastik kompozit malzeme, Solvey S.A tarafından üretilen tek yönlü karbon fiber takviyeli PEKK bazlı polimer APC/AS4D 12K'dır. Otoklavda plaka üretimi için 305mm genişliğinde tek yönlü bant kullanılmıştır. Tek yönlü karbon fiber PEKK bant Resim 3.1'de gösterilmiştir.



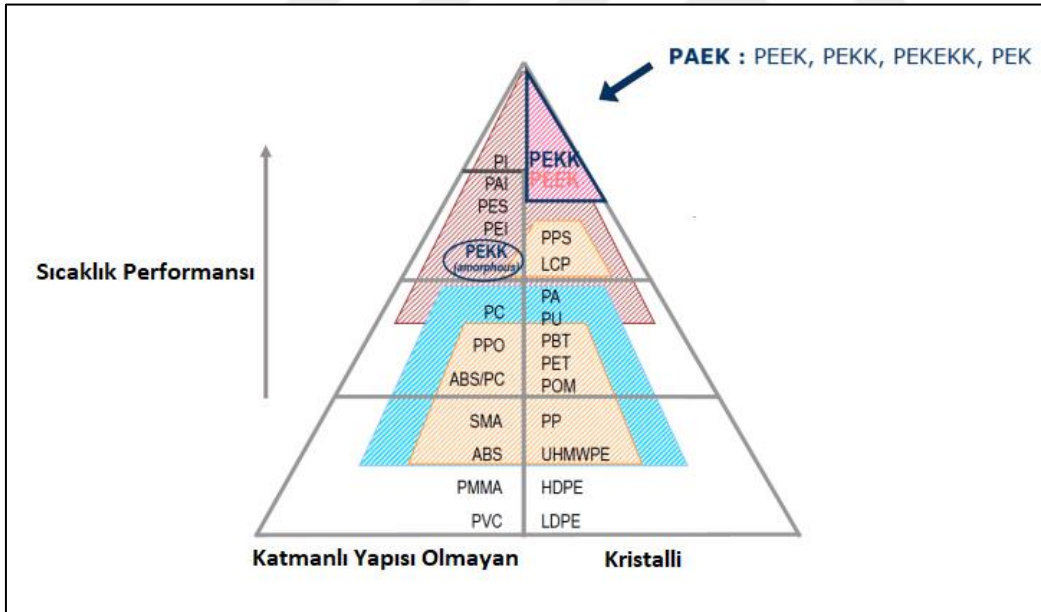
Resim 3.1. Tek yönlü karbon fiber PEKK bant

PEKK matris PAEK polimer ailesinin bir üyesidir. PAEK, eter ve keton moleküllerinden oluşan yarı kristal termoplastik polimerdir. Şekil 3.1’de eter ve keton molekülleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. a-) Eter b-) Keton molekülleri [66]

Yüksek bir camsı geçiş sıcaklığı, yüksek modül ve yüksek akma mukavemeti ile PAEK matrisler, mevcut termoplastikler arasında en iyi termo-mekanik özelliklere sahiptir. Şekil 3.2’de sıcaklık performansına göre polimerler verilmiştir.

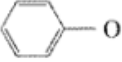
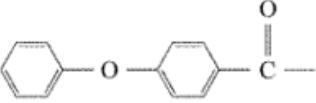
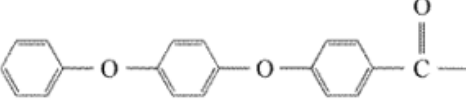
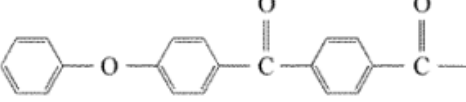


Şekil 3.2. Termoplastik polimerlerin termo-mekanik özelliklerinin bir fonksiyonu olarak sınıflandırılması [67]

PAEK, monomerlerinin eter ve keton moleküllerinin sayısına bağlı olarak birbirinden farklıdır. Çizelge 3.1’de keton varlıklarının oranları ile farklı PAEK’in kimyasal yapısı gösterilmiştir. Keton varlıkları PAEK özellikleri üzerindeki etkisi birçok çalışmada incelenmiştir. Erime sıcaklığı (T_m) ve cam geçiş sıcaklığının (T_g) keton varlıklarının oranı ile arttığı görülmüştür. Aslında, keton bağları makromoleküler zincirlerin sertliğini ve

dolayısı ile T_g 'yi artıran eterden daha az esnektir. Ayrıca, moleküller arası enerji bağlarını ve dolayısı ile erime sıcaklığı T_m 'yi artıran kristal yapının kompaktlığını da arttırırlar.

Çizelge 3.1. Keton varlıklarının oranları ile farklı PAEK'in kimyasal yapısı [68]

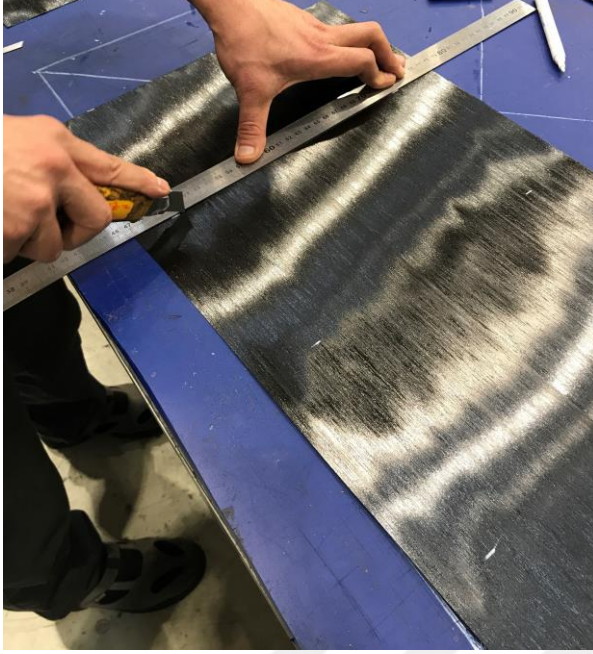
YAPI	İSİM	KETON (%)
	PPO	0
	PEK	50
	PEEK	33
	PEKK	67

PEKK homopolimeri en yüksek keton varlığı oranına (%67) ve dolayısı ile en yüksek T_g ve T_m 'ye sahiptir. T_g 'si yüksek sıcaklık uygulamaları için ilginçtir ancak T_m 'si kompozit parça üretimi sırasında bozulmaya yol açabilecek yüksek işlem sıcaklığına sahiptir [68]. Bu nedenlerden dolayı PEKK polimerler son dönemlerde havacılık ve uzay alanında hızla kullanımını arttırmaktadır ve bu kapsamda üstün özellikleri nedeni ile bu çalışma kapsamında kullanılması hedeflenmiştir.

3.2. Kupon Numunelerinin Üretim Metodu

Termoplastik kompozitlerin otoklav ile üretim prosesi, termoset kompoziterin otoklav üretimine benzer bir prosedir. Bu prosenin temelinde el ile veya kesim cihazı yardımı ile kesimleri yapan tek yönlü bant üzerinden kesilen parçaların istenilen formasyona uygun olarak bir kalıp üzerine yerleştirilmesidir. El ile kesim için Resim 3.2'de işlem gösterilmiştir. Kalıp üzerine yerleştirilen tek yönlü kesilen katmanlar birbirlerine göre kalıp üzerinde hareket etmemesi için punta kaynağı ile birbirlerine sabitlenir. Punta kaynağı işlemi Resim 3.3'de gösterilmiştir. Puntalama işlemleri yapılan katmanlı kumaşlar otoklav prosesi öncesi

kalıp üzerine yerleştirilmeden önce kalıp temizlenir sonrasında “ ayırıcı film ” kalıp üzerine serilir daha sonra kompozit serimler yerleştirilir ve tekrar üzeri “ ayırıcı film ” ile kapatılır.



Resim 3.2. Tek yönlü karbon fiber PEKK bant üzerinden el ile kesim işlemi



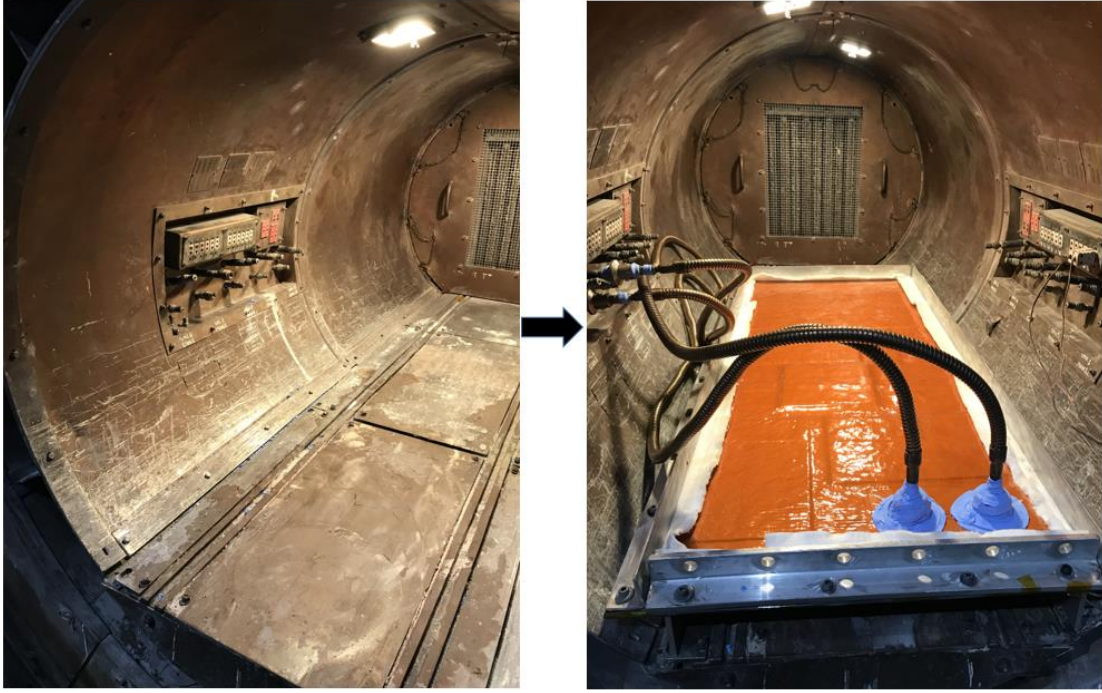
Resim 3.3. Tek yönlü karbon fiber PEKK bant üzerinden el ile kesim işlemi

Daha sonra baskı plakaları serimleri yapılan kompozit serimlerinin üzerine yerleştirilir. Baskı plakalarının üstüne ise havalandırma katmanı (nem alıcı katman) serilir. En üstüne de vakum poşeti geçirilir. Kalıp ile poşetlerin arasından bir vakum ve hava kaçağı olmaması için yalıtım macunu ile tamamen kapatılır. Vakum poşeti üzerinde vakum portlarının bağlantısının sağlanabilmesi için delikler açılarak vakum portları yerleştirilir. Kalıp üzerindeki çerçeveler takıma montajlanır ve kaçakların engellenmesi için torklanır. Kontroller sağlandıktan sonra takımımız otoklava girmek için hazır hale getirilmiştir. Tüm süreç Resim 3.4’de döngü olarak gösterilmiştir.



Resim 3.4. Takımın otoklav döngüsüne hazırlık döngüsü

Otoklav döngüsüne hazır hale getirilmiş olan kalıp otoklav içerisine alınır ve vakum portlarının bağlantısı sağlanır. Sonrasında vakum kaçağının önlenmesi için vakum portlarının etrafı yalıtım macunu ile sıkıca sarılarak kapatılır. Otoklav yerleşimi Resim 3.5’de gösterilmiştir.



Resim 3.5. Otoklav yerleşimi ve vakum portlarının bağlantıları

Üretim yapılan otoklav'ın görüntüsü Resim 3.6'da verilmiştir. Ayrıca plaka üretiminde kullanılan otoklav'a ait olan teknik özellikleride Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Resim 3.6. Otoklav görüntüsü

Çizelge 3.2. Otoklav teknik özellikleri

Özellikler	Değerler
Marka/Model	Sistem Teknik/CO 1x2 1271-1413
Üretim Yılı	2014
Faydalı Ölçümleri	D:1000mm- L:2000mm
Kapasite	400 kg (takım dahil)
Isıtma Sistemi	Elektrik
Maksimum Sıcaklık	400 °C
Isı Gücü	66 kW
Elektrik Gücü	26 kW
Ağırlık	7000 kg

3.3. Kupon Numune Testleri ve Numune Hazırlığı

Bu tez kapsamında hedeflenen birincil hedef üretim parametrelerindeki temel değişkenlerden sıcaklık parametresinin CF/PEKK malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. Bu amaçla belirlenen üç farklı sıcaklıkta otoklav döngüsünde üretilen plakalardan elde edilen kupon numunelerine ASTM standartlarına göre yapılan mekanik testlerin gerçekleştirilmesidir. Belirlenen üç sıcaklık 350°C, 377°C ve 400°C dir. Belirlenen minimum sıcaklık değeri malzemenin erime sıcaklığının $T_m = 337^\circ\text{C}$ olması nedeni ile 350°C olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.3'te üretilen plakaların üretim özellikleri ve kupon numune ölçüleri verilmiştir. Üretilen plakalardan hazırlanan kupon testlerine dört farklı mekanik test uygulanmıştır. Uygulanan testler; kumaşların serim yönlerine göre 0° ve 90° olan kupon numunelerine çekme testleri, +/-45° olan kupon numunelerine çekme testi ve 3 nokta eğilme testleridir. 0° ve 90° serim yönlerine sahip olan kupon numuneleri ASTM D3039 standartlarına göre test edilerek fiber yönlerine bağlı olarak malzemenin çekme dayanımının belirlenmesi hedeflenmiştir. +/-45° serim yönlerine sahip kupon numuneleri ASTM 3518 standartlarına uygun olarak test edilmiş ve test sonucunda serim yönleri kaynaklı malzemenin kayma gerilmesi değerlerinin tespit edilmesi hedeflenmiştir. Son olarak gerçekleştirilen 3 nokta eğilme testi ise ASTM 2344 standartlarına göre icra edilmiştir. Bu testlerin amacı ise serimleri yapılmış katlar arasındaki kayma dayanımlarının tespit edilmesidir. Bu kuponlar için hedeflenen testler 3 farklı sıcaklıkta üretimi yapılmış olan kupon numunelerine tekrarlanarak termoplastik kompozitlerin üretimindeki temel parametrelerden biri olan sıcaklığın CF/PEKK malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin tespit edilmesidir.

Çizelge 3.3. Plaka ve kupon test özellikleri

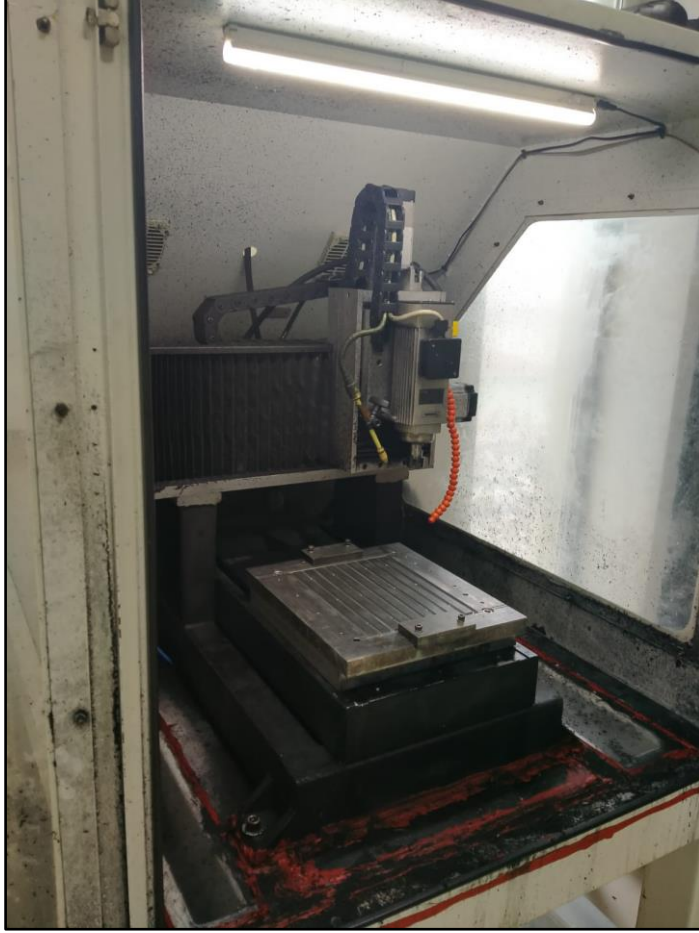
V	Plaka Ölçü (mm)	Serim	Yapılacak Test	Standart	Numune Ölçüleri	Not
Varyant A	200x200x5,2	[(0) ₂ (+/-45) ₁₆ (0) ₂] (36ply)	3 Nokta Eğilme	ASTM 2344	30*10*5 mm	377°C'de üretilmiş plakalardır.
	210x265x2,3	[90] ₁₆ (16ply)	Çekme 90	ASTM D3039	175*25*2 mm	
	310x215x2,3	[(+/-45) ₁₆] _s (16ply)	Çekme +/- 45	ASTM 3518	200*25*2 mm	
	330x180x1	[0] ₈ (8ply)	Çekme 0	ASTM D3039	250*15*1 mm	
Varyant B	200x200x5,2	[(0) ₂ (+/-45) ₁₆ (0) ₂] (36ply)	3 Nokta Eğilme	ASTM 2344	30*10*5 mm	350°C'de üretilmiş plakalardır.
	210x265x2,3	[90] ₁₆ (16ply)	Çekme 90	ASTM D3039	175*25*2 mm	
	310x215x2,3	[(+/-45) ₁₆] _s (16ply)	Çekme +/- 45	ASTM 3518	200*25*2 mm	
	330x180x1	[0] ₈ (8ply)	Çekme 0	ASTM D3039	250*15*1 mm	
Varyant C	200x200x5,2	[(0) ₂ (+/-45) ₁₆ (0) ₂] (36ply)	3 Nokta Eğilme	ASTM 2344	30*10*5 mm	400°C'de üretilmiş plakalardır.
	210x265x2,3	[90] ₁₆ (16ply)	Çekme 90	ASTM D3039	175*25*2 mm	
	310x215x2,3	[(+/-45) ₁₆] _s (16ply)	Çekme +/- 45	ASTM 3518	200*25*2 mm	
	330x180x1	[0] ₈ (8ply)	Çekme 0	ASTM D3039	250*15*1 mm	

Üretilen plakalardan kupon numunelerinin hazırlanması için 3 eksenli CNC freze router cihazı kullanılmıştır. Kullanılan CNC cihazının özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Freze çakısı modeli: OSG-48108001 DİA-BNC CFRP ø6
- Kullanılan soğutma sıvısı: FUCHS ECOCOOL S-SNA, CNC haznesine %7,5 oranında eklenerek, su ile karıştırılmaktadır.
- İlerleme hızı: F200 mm/dk
- Freze çakısı dönme hızı: 12000 dev/dk

Kupon numunelerinin çıkarılmasında kullanılan CNC cihazı aşağıda Resim 3.7'de verilmiştir. Kesme işlemleri tamamlandıktan sonra kupon numuneleri üzerinde özellikle köşe ve kenarlardaki yüzey pürüzlülüğünü gidermek için taşlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Böylece kupon numunlerinin test standartlarına uygun ölçülere getirilme işlemleri tamamlanmıştır.



Resim 3.7. CNC cihazı görüntüsü

Kupon numunelerinin şartlandırılması, kesme işleminin ardından test numunleri 23°C sıcaklık ve %50 nem koşulları altında 2 saat süresince Angelatoni DY1200 marka ve modele sahip şartlandırma kabini içerisinde iklimlendirilmiştir. Şartlandırma kabininin teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Kapasite: 1152 lt
- Çalışma sıcaklık aralığı: (-40 °C ... +180 °C)
- Sıcaklıkta ki dalgalanma aralığı: (± 0.1 °C ... ± 0.3 °C)
- Isıtma/Soğutma hızı: 4 °C/dak
- Relatif nem aralığı: (%10 ... %98)
- Relatif nem hassasiyeti: (± 1 ... ± 3)

Temel olarak şartlandırma ihtiyacı plakaların kesimi esnasında karbon fiberlerin sıcaklık nedeni ile zarar görmemesi açısından kullanılan sıvı nedeni ile parça içerisinde kalabilecek nemin giderilmesidir. İklimlendirme için kullanılan cihaz görüntüsü Resim 3.8’de verilmiştir. Resim 3.9’da ise parçaların cihaz içerisindeki görüntüsü verilmiştir.



Resim 3.8. İklimlendirme cihazı görüntüsü



Resim 3.9. İklimlendirme cihazı içerisindeki kupon malzeme görüntüsü

Kupon testlerinde poisson oranının hesaplanması için çekme 0° , 90° ve $\pm 45^\circ$ serimlerdeki test numunelerine gerinim ölçerler yapıştırılmıştır. Testler esnasında

kullanılan gerinim ölçerler “Kyowa KFGS-3-350-D16-11 N3C2” biaksiyel model gerinim ölçerler kullanılmıştır. Veri toplama birimi olarak HBM QuantumX MX1615B kullanılmıştır. Resim 3.10’da gerinim ölçer bağlantısı ve veri toplama birimi görseli verilmiştir.



Resim 3.10. Gerinim ölçer bağlantısı ve veri toplama cihazı görseli

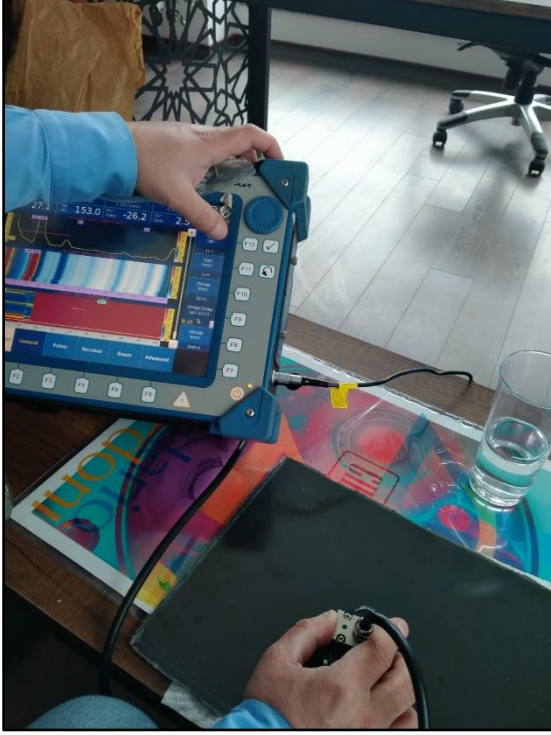
3.4. Kupon Numune Plakalarına Ultrasonik Muayene Analizi

Test panellerinin ultrasonik muayeneleri DOPPLER/Phascan 16/64 cihazı kullanılarak yapılmıştır. Cihazın özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Konvansiyonel ve Phase Array Ultrasonik Tahribatsız Muayene
- 5 Mhz, 32 Element Phase Array Probe
- C-Clamp Scanner – Universal Encoder
- Delay Line Ultrasonik Muayene Problemleri: 2,25 Mhz / 5Mhz /10 Mhz

Temel olarak muayene işleminde parça üzerindeki sıvı ile birlikte ses dalgalarının plakaların bir yüzeyi ile diğer yüzeyi arasındaki iletimi presibine dayanmaktadır. Parça üzerinde oluşan

hatalar bu ses dalgasındaki gecikme ve iletimin sağlanamaması prensibine dayanarak belirlenebilmektedir. Burada parça üzerinde oluşan boşluk veya delaminasyonların tespiti hedeflenmektedir. Aşağıda Resim 3.11’de numune muayene görüntüsü verilmiştir.



Resim 3.11. Ultrasonik muayene işlemi

3.5. Kupon Numunelerine Boşluk Oranı Testleri

Kupon numunelerinin üretim başarısının karşılaştırılması için boşluk oranlarının tespiti ihtiyacı doğmuştur. Bu tez kapsamında “Piknometre ve Etil Alkol’de Daldırma Yöntemi Kullanılarak Plakalardaki Boşluk Oranının Belirlenmesi” metodu kullanarak gerçekleştirilecektir. Bu metot ile yapılan testlerin test basamakları aşağıda sıralanmıştır;

1. 2mm kalınlığındaki plakadan, uzunluğu 20mm ve genişliği 10mm ölçülerinde dikdörtgen numuneler kesilir.
2. Numuneler 23°C ve %50 nem koşullarında test öncesinde en az 2 saat bekletilir. Test numunesi bu koşullarda saklanır veya şartlandırılır.
3. Ardından “TS EN ISO 1183 standardı, Plastikler- Gözeneksiz Plastikler-Yoğunluk Tayin Metotları-Bölüm 3: Gaz Piknometre Metodu” standardı kullanılarak kesilen plakaların yoğunlukları ölçülür.

4. Sonrasında aynı plakaların “ ASTM D792 Standardı, Yer Değiştirme ile Plastiklerin Yoğunluk ve Özgül Ağırlığının Belirlenmesi için Test Metodu” standardı kullanılarak yoğunlukları bulunur.
5. Ölçülen yoğunluk verileri aşağıdaki formülasyonda yerine koyularak plakaların boşluk oranları hesaplanır.

$$V_0 = \frac{\rho_{pyc} - \rho_{immerson}}{\rho_{pyc}} * 100 \quad (3.1)$$

$V_0 = \text{Boşluk Oranı}$

ρ_{pyc} : Piknometreden hesaplanan plaka yoğunluğu(g/cm^3)

$\rho_{immerson}$: Daldırma sonucu hesaplanan plaka yoğunluğu (g/cm^3)

Testler esnasında kullanılan piknometre Resim 3.12’de verilmiştir. Ayrıca daldırma testinde kullanılan terazide Resim 3.13’te verilmiştir.



Resim 3.12. Piknometre cihazı



Resim 3.13. Daldırma testi terazisi

3.6. Kupon Numunelerinin Taramalı Elektron Mikroskop İle İncelenmesi

Bu tez kapsamında yapılan kupon testlerinin mekanik testlerinden sonra tahrip edilmiş numunelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenerek, fiberler ile matris arasındaki bağlantı ve üretim sonrası parça içerisindeki homojenizasyonun kontrol edilmesi hedeflenmektedir.

Bu tez kapsamında SEM incelemeleri Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü bünyesinde bulunan ZEISS marka EVO 40 model SEM cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazı görüntüsü Resim 3.14’te verilmiştir.

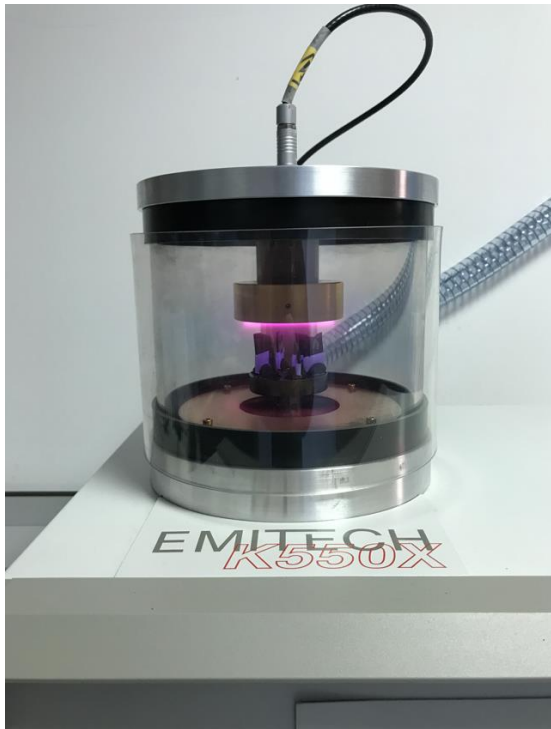
Elektron mikroskobunda daha sağlıklı bir görüntü alabilmek için iletken olmayan malzemelerin görüntü yüzeylerinin kaplamaya ihtiyacı doğmaktadır. Tez kapsamında incelenecek olan karbon fiber PEKK matrisli kompozit malzemelerin kaplama işlemleri Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü laboratuvarında yer alan Emitech K550X cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihazın özellikleri aşağıda verilmiştir;

- Depozisyon oranı: 0-25 nm/dk
- Kaplama zamanlayıcı: 0-4 dk

Emitech K550X cihazı yardımı ile görüntüleme yüzeyleri altın ile kaplanmıştır. Kaplama işleminin gerçekleştirildiği Emitech K550X cihazının görüntüsü Resim 3.15'te verilmiştir.



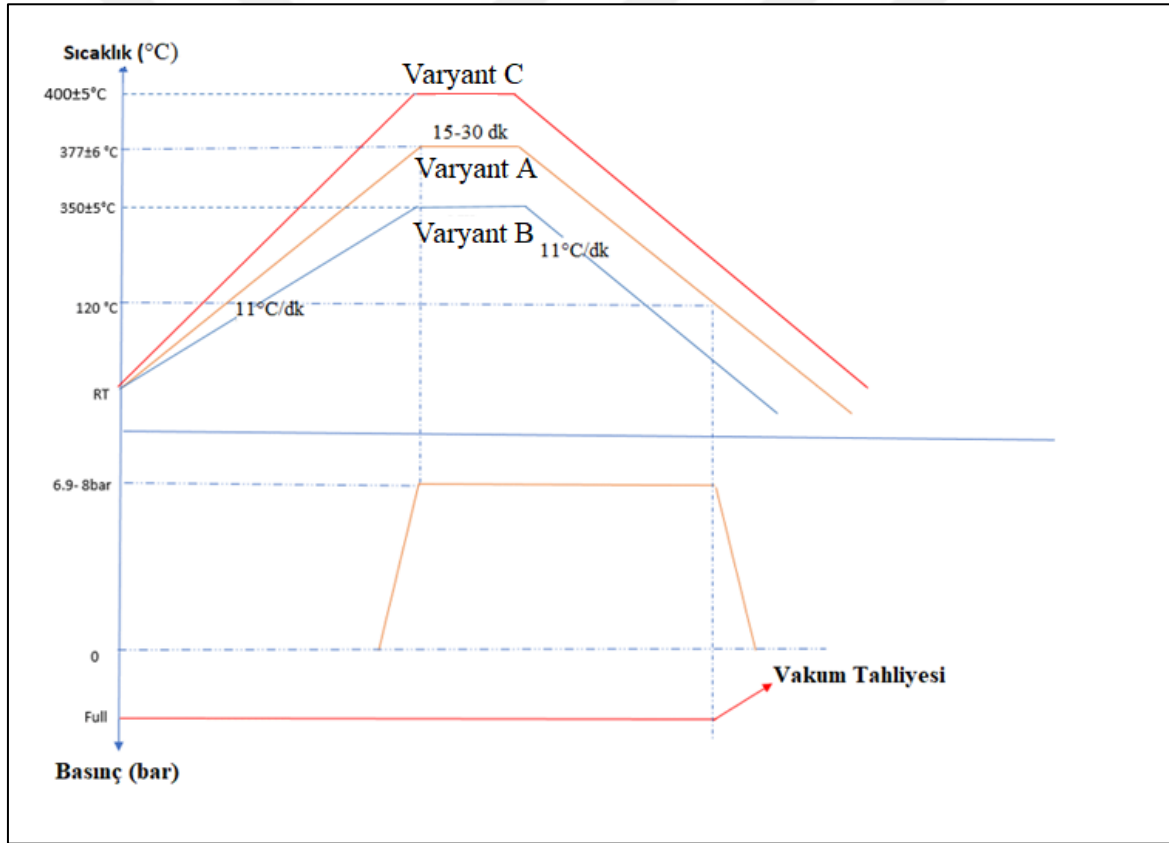
Resim 3.14. ZEISS Evo 40 SEM cihazı



Resim 3.15. Emitech K550X kaplama cihazı

3.7. Kupon Numunelerinin Otoklav Döngüleri

Bu tez kapsamında incelenecek olan termoplastik kompozitlerin üretim parametrelerinden biri olan sıcaklık parametresinin yanında otoklav ile üretimde sıcaklık kadar önemli olan basınç ve vakum parametreleride yer almaktadır. Tüm üretim döngülerinde basınç ve vakum değerleri sabit tutularak sadece sıcaklık parametresi değiştirilerek kontrollü bir üretim yapılması hedeflenmektedir. Üretim esnasında tüm otoklav döngülerinde sıcaklık artış ve soğutma sürecindeki değerler sabit tutulmuştur. Basınç ve vakum değerleride testler esnasında kontrol altında tutularak sabit tutulmuştur. Aşağıda otoklav döngüsünde kullanılan döngü Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Üretilen plakalara ait otoklav döngüsü

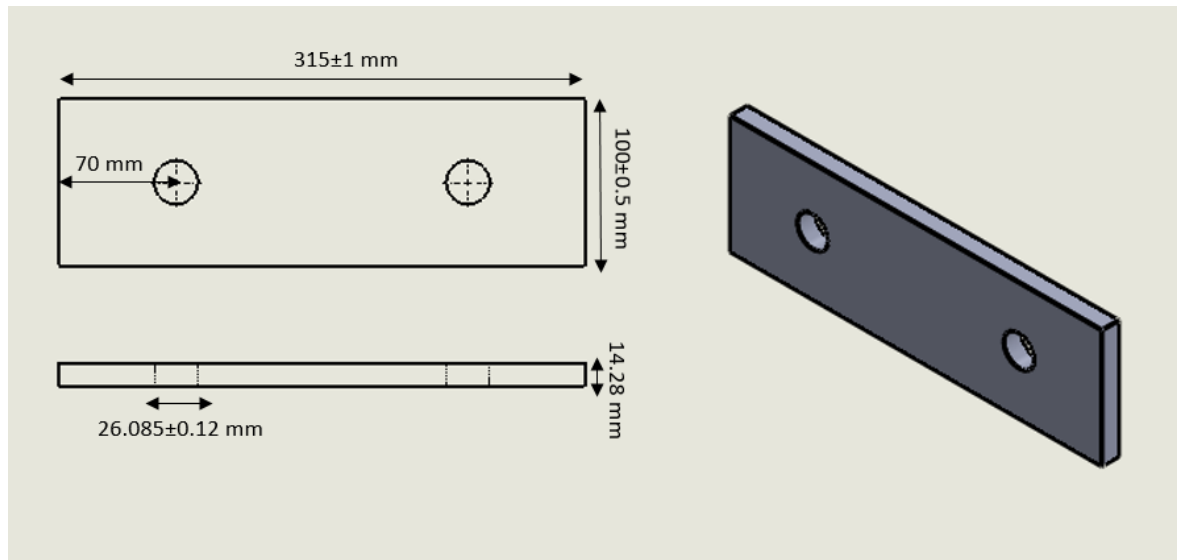
Otoklav döngüsü üzerindende görüldüğü gibi üretimde hedeflenen nokta kompozit plakaların konsolidasyon sıcaklıkları üzerinden mekanik özelliklerinin karşılaştırılmasıdır. Burada Varyant A, Varyant B ve Varyant C olarak gösterilen eğriler farklı konsolidasyon sıcaklık eğrilerini temsil etmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta ise termoplastik kompozit mazlemelerin termoset malzemelere oranla çok daha yüksek bir

sıcaklık ve basınç altında konsolide ediliyor olmasıdır. Üretim esnasında otoklav dataları kontrollü bir şekilde üretim yapılmıştır.

3.8. Komponent Numunelerinin Üretim Metodu

Bu tez kapsamında komponent seviyesi numuneler vasıtası ile kompozit kulakçık yapıların dayanımlarının incelenmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla üretimi hedeflenen komponent numuneleri için belirlenen ölçülerde kesim cihazı yardımı ile kesimleri yapılan katların el ile serme metodu ile kupon seviyesi üretimindeki adımlar tekrarlanarak üretim yapılmıştır. Temel olarak incelenmesi hedeflenen parametre olarak katların serim açılarının kulakçık yapılarındaki dayanıma etkisinin tespit edilmesidir. Bu nedenle altı farklı serim kombinasyonu üzerinden üretim yapılmıştır. Üretilen tüm kompozit yapılar simetrik ve balanslı olarak serim yapılmıştır. Üretimleri gerçekleştirilen serim parametreleri Ek-1’de verilmiştir.

Serim kombinasyonları verilmiş olan komponent parçanın hedeflenen üretim ölçüleri Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Üretilen komponent ölçüleri

Resim 3.16’da ise otoklav’dan çıkarılmış parçanın görüntüsü verilmiştir. Resim 3.16’da görünen parça herhangi bir işlem görmemiş olup daha sonra parçanın çerçevesinde nihai boyutlandırma için parça işlenecektir, ayrıca kulakçık yapının oluşturulabilmesi için parça

üzerinden delikler delinerek daha sonrasında çelik burçların deliklere sıkı geçme ile montajı yapılacaktır. Tüm bu işlemlerin akabinde komponent seviyesi parça testler için hazır hale getirilmiş olacaktır.



Resim 3.16. Üretimi yapılan komponent parça görseli

3.9. Komponent Numunelerinin Ultrasonik Muayene Analizi

Komponent parçalarının ultrasonik muayeneleri TECNATOM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın özellikleri aşağıda verilmiştir.

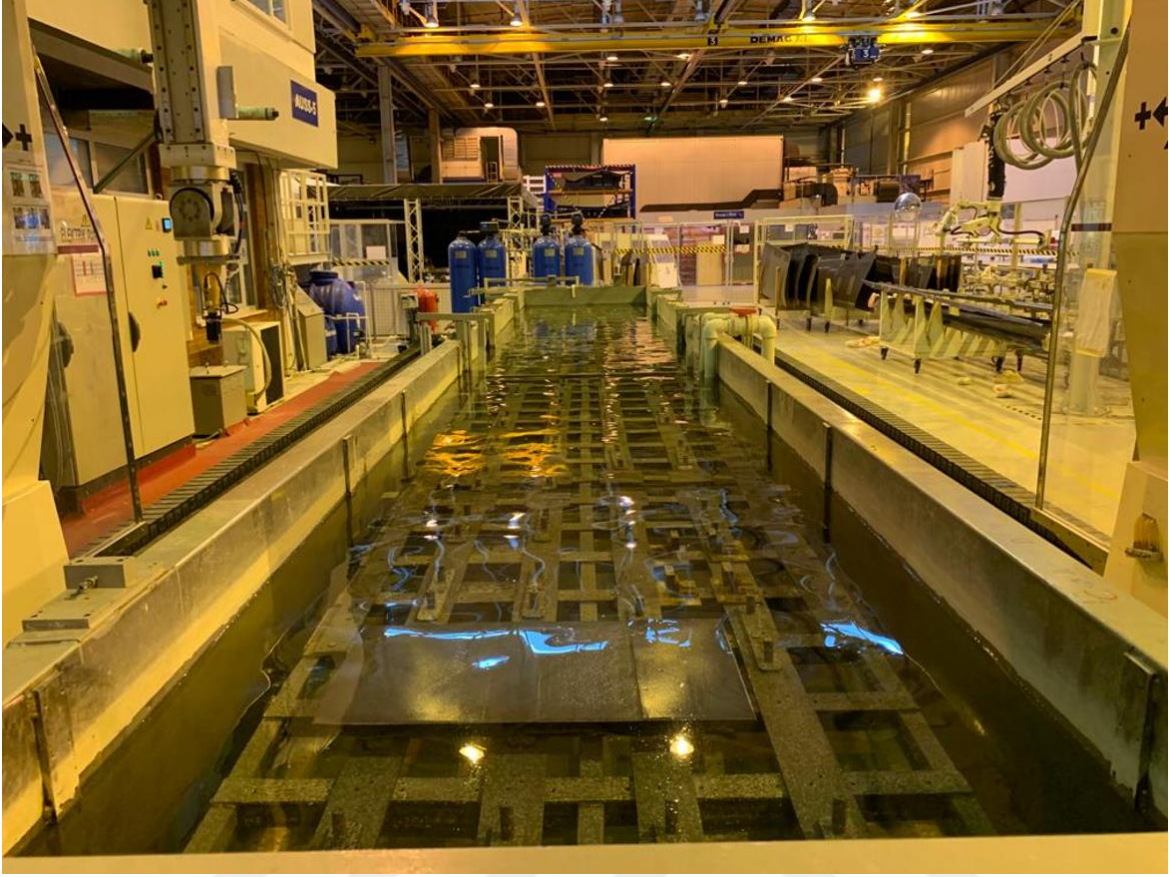
- Ekipman İsmi : TECNATOM
- Sistem Ölçüleri : X:14000 Y:4320 Z:2214 mm
- Eksen Sayısı : 6
- Kanal Sayısı: 1

- Değerlendirme Yazılımı : Midas V3.14
- Temas Maddesi : Su
- Muayene Modu : Lokal Batırma
- Muayene Tekniği : Otomatik Darbe/Yankı Tekniği

Cihazda kullanılan doğrusal evre dizi prob'un özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Dönüştürücü Markası: IMASONIC
- Dönüştürücü Adı: Faz Dilimli Prob
- Dizi Türü : Doğrusal Dizi
- Merkez Frekansı : 5 Mhz
- Eleman Sayısı : 32
- Mekanik Odaklama : Yok, Düz Aktif Alan
- Temel Adım : 1 mm
- Elemanlar Arası Boşluk : 0.1 mm
- Elemanın Genişliği : 6.0 mm
- Toplam Aktif Uzunluk : 31.9 mm
- Pasif Açıklık Boyutu : 4.1 mm
- Bant Genişliği (- 6 db) : %79
- Seri Numarası : 81061008

Ultrasonik muayene yapılan cihazın görüntüsü Resim 3.17'de verilmiştir.



Resim 3.17. TECNATOM tahribatsız muayene cihazı

3.10. Komponent Numunelerinin X-Ray Görüntülemesi

Üretimleri gerçekleştirilen komponent numunelerinin iç yapısını daha detaylı incelemek amacı ile ultrasonik görüntüleme sonrası numunelerin x-ray cihazı ile görüntülenmesi hedeflenmiştir. X-ray görüntüleri ile parça içerisindeki hataların varlığı veya lokasyonu hakkında bilgi sahibi olunması hedeflenmiş ve böylece üretim kalitesinin durumunu netleştirmek hedeflenmiştir.

X-ray görüntülemesi COMET MXR-160/20 cihazı vasıtası ile gerçekleştirilmiş olup, MXR-160/20 cihazı entegre radyasyon korumasına sahip tek kutuplu su soğutmalı bir boru tertibatıdır. Çift odak noktası, bir tungsten anot ve bir yön ışını içerir. Cihaz ile ilgili teknik bilgiler aşağıda verilmiştir.

- Nominal tüp voltajı : 160 kV
- Sürekli güç : 640 W/640 W

- Odak noktası : $d=1.0 \text{ mm}$ / $d=1.0 \text{ mm}$ (EN 12543)
- Filament akımı maksimum : 4.1 A / 4.1 A
- Filament akımı tipik : 4.2 V / 4.2 V
- Doğal filtreleme : $0.8 \pm 0.1 \text{ mm Be}$
- Hedef malzeme : W
- Hedef açısı : 20°
- Radyasyon kapsamı : 40°
- Sızan radyasyon maksimum 1m mesafedeki yükleme faktörlerinde : 2.5 mSv/h (160kV; 4mA)
- Ağırlık : 7.3 kg
- Terminal tipi : R24
- Yaylı HV kablusunun açıklığı : 2 halka görünür ($\sim 7 \text{ mm}$)
- Yay yükü olmayan HV kablusunda boşluk : $5.5\text{-}6 \text{ mm}$
- HV-kablo terminali için gres miktarı : 1.2 ml

Cihazın soğutma parametreleri ile teknik dataları ise aşağıda verilmiştir.

- Soğutma ortamı : Su
- Su soğutma sıvı akışı minimum : 4 L/dak
- Girişte soğutma ortamı sıcaklığı maksimum : 35°C
- Soğutma sıvısı girişindeki basınç maksimum : 6 bar
- Kapattıktan sonra son soğutma süresi minimum : 2 dk

X-ray cihazının görüntüsü Resim 3.18’de verilmiştir.



Resim 3.18. COMET MXR-160/20 X-ray cihazı

Üretim sonrası incelenen komponent parçaları statik test sonrası hata modlarının daha detaylı olarak gözlemlenebilmesi için voltaj değeri daha yüksek olan Balteau TSD225/3 X-ray

cihazı ile incelenmesi planlanmıştır. TSD225/3 X-ray cihazının teknik verileri aşağıda paylaşılmıştır.

- Maksimum yüksek voltaj : 225 kV
- Nominal güç : 800/1800
- Odak noktası boyutu (EN12543) : 0.4-1
- Işın açısı : 40° x 30°
- Hedef açısı : 11°
- Doğal filtreleme (mm) : 0.8 Be
- Anot soğutma tipi : Su
- Soğutma akış hızı : 4L/dk
- Sızıntı miktarı : 10mSv@1m
- Maksimum akım : 14.5 / 30 mA
- Ağırlık : 11kg
- Tüp başlığı : Metal seramik

Balteau TSD225/3 X-ray cihazının görüntüsü Resim 3.19’da gösterilmiştir. Ayrıca cihaza numune bağlama şeklinin gösterildiği görüntü de Resim 3.20’de verilmiştir.



Resim 3.19. Balteau TSD225/3 X-ray



Resim 3.20. Numunelerin cihaza bağlanma görüntüsü

3.11. Komponent Numunelerinin Mikroskop İle İncelenmesi

Statik testleri tamamlanan komponent numunelerinin X-ray yardımı ile görüntülenmesi sonrası daha detaylı olarak kırılma bölgelerinin incelenmesi için makro ve mikro muayene yapabilmek için mikroskop ile incelenmesi hedeflenmiştir.

Makro incelemede, dağlanmış veya dağlanmamış test numunesi yüzeyinin çıplak gözle veya optik araçlar kullanılarak küçük bir büyütme oranı ($\leq x20$) ile incelenmesidir. Bu inceleme ile çatlaklar, gözenekler, kalıntılar gibi hatalar gözlemlenebilmektedir.

Mikro inceleme, dağlanmış veya dağlanmamış test numunesinin yzeyinin metalografi mikroskobu kullanılarak daha bzyk bir bzytme oranı ($>x20$) ile incelenmesidir. Bu metot yardımı ile mikro-yapı incelemesi yapılabilmektedir.

Mikro yapının incelendiği Olympus GX53 mikroskop cihazının teknik ozellikleri aşağıda verilmiştir.

- İnceleme metodu: Yansıtma
- Optik : UIS2
- Kademe: Maksimum hareket 50x50mm
- Ağırlık: 25 kg

İncelemelerde kullanılan mikroskop'un gzyntysy Resim 3.21'de verilmiştir.



Resim 3.21. Olympus GX53 mikroskop gzyntysy

Makro yapının incelendiği Epson Perfection V700 cihazının teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Tarayıcı türü: Düz
- Tarama çözünürlüğü: 6.400 inç başına nokta
- Optik çözünürlük: Ana 6.400 inç başına nokta
- Optik yoğunluk: 4Dmaks
- Tarama alanı: 216mm x 297mm
- Renk derinliği: 48 bit renk (girdi-çıkı için)

Epson Perfection tarama cihazının görüntüsü Resim 3.22’de verilmiştir.



Resim 3.22. Epson tarama cihazı görüntüsü

4. TESTLER VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Materyal ve yöntem bölümünde detayları anlatılan testlerden elde edilen veriler ve sonuçlar bu bölümde paylaşılacaktır.

4.1. Kupon Numune Plakalarına Ultrasonik Muayene Analiz Sonuçları

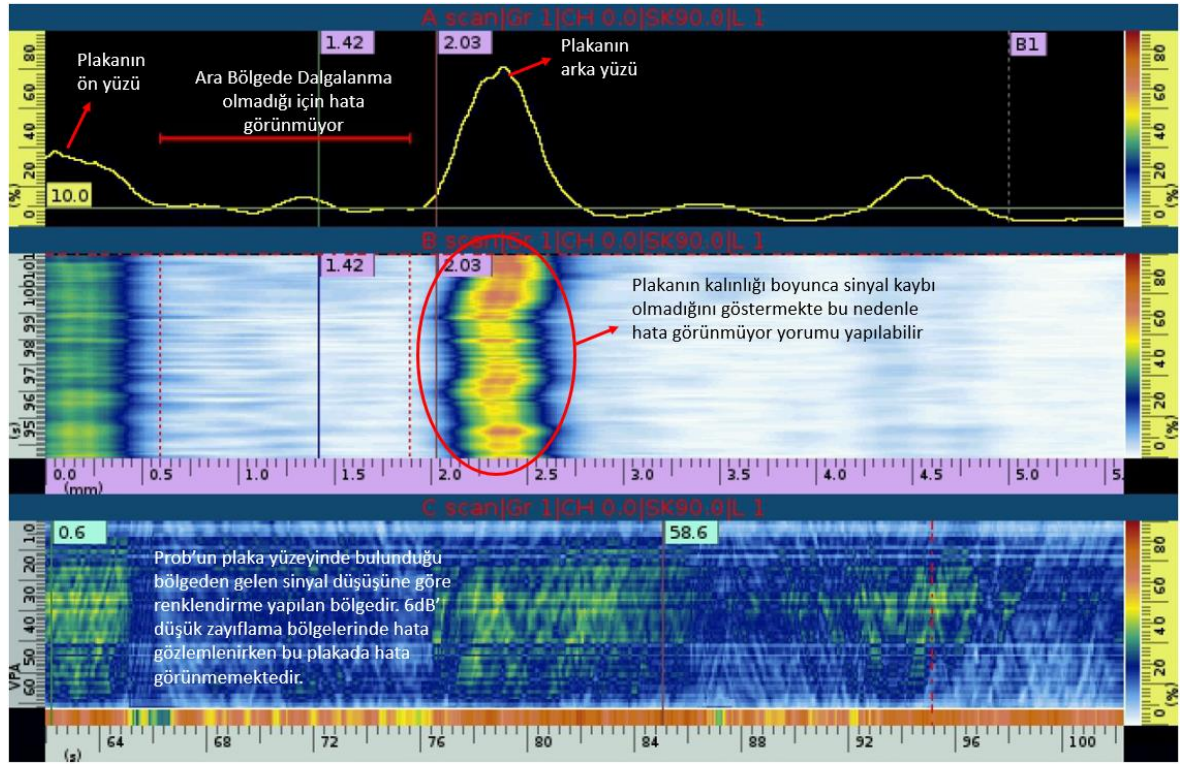
Analiz edilen plakaların daha kolay bir şekilde ifade edilebilmesi için kodlanmıştır. Plakaların ve daha sonrasında test edilmek için plakalardan kesilen parçaların kodlamaları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Plaka ve test numunelerinin kodlanması

Serimler	Plaka Kodu	1.Numune	2.Numune	3.Numune	4.Numune	5.Numune	Kür Sıcaklığı	Numune Ölçüsü (mm)
[0]8	A1	1a	2a	3a	4a	5a	377°C	250x15x1
[90]16	A2	6a	7a	8a	9a	10a		175*25*2,3
[(+/-45)16]s	A3	11a	12a	13a	14a	15a		200*25*2,3
[(0)2 (+/-45)16S (0)2]	A4	16a	17a	18a	19a	20a		30*10*5,2
[0]8	B1	1b	2b	3b	4b	5b	350°C	30*10*5,2
[90]16	B2	6b	7b	8b	9b	10b		175*25*2,3
[(+/-45)16]s	B3	11b	12b	13b	14b	15b		200*25*2,3
[(0)2 (+/-45)16S (0)2]	B4	16b	17b	18b	19b	20b		250x15x1
[0]8	C1	1c	2c	3c	4c	5c	400°C	30*10*5,2
[90]16	C2	6c	7c	8c	9c	10c		175*25*2,3
[(+/-45)16]s	C3	11c	12c	13c	14c	15c		200*25*2,3
[(0)2 (+/-45)16S (0)2]	C4	16c	17c	18c	19c	20c		250x15x1

Otomatik Doppler tipi faz tarama cihazları ile tüm laminatları taramak amacı ile ultrasonik tarama yapılmıştır. Taramalarda plaka yüzeyi su ile ıslatılarak iletim sağlanır. Tüm plakalar için A,B ve C tarama sonuçları zayıflama ve genlik modları ile işlenmiştir. Tüm plakaların incelenebilmesi için 10 MHz’lik prob kullanıldı ve plakaların ortalama ultrasonik zayıflama (dB cinsinden) değerleri hesaplandı. Tarama işlemleri TUSAŞ’ın sertifikeli edilmiş çalışanları eşliğinde referans plakalar yardımı ile parça üzerinde referans bölge seçimi yapılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece parçanın ses kaybının minimum olduğu bölge referans olarak alınarak parça taranmıştır.

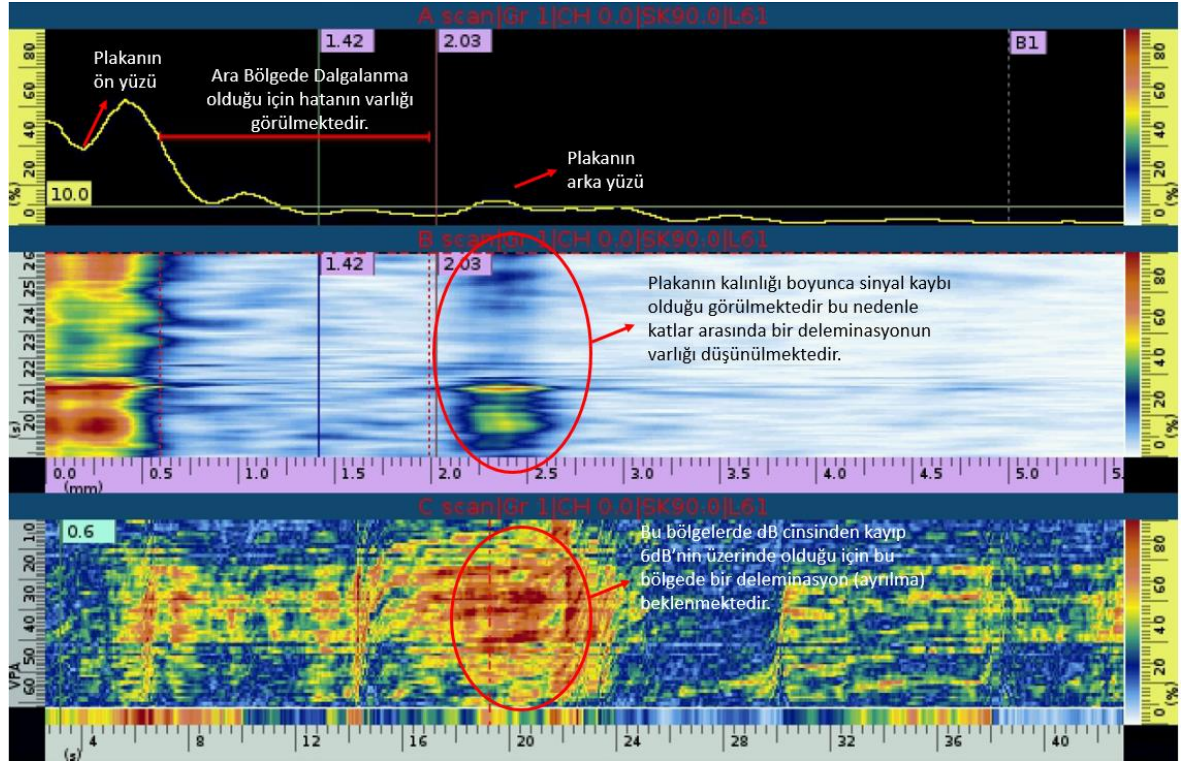
Görüntülemenin yapıldığı ekran görüntüsü için örnek olarak C3 plakasının ultrasonik görüntüleme esnasında ki cihaz görüntüsü Şekil 4.1’de verilmiştir. Grafik üzerinde de gösterildiği gibi A-taramasında; ilk tepe ile ikinci tepe plakanın alt ve üst yüzeyini göstermektedir. Bunun nedeni cihazın çalışma prensibinin arka duvar yankısı üzerinden çalışmasıdır. Bu iki tepe arasında ses dalgalarında bir dalgalanma olması durumunda bu bölgede hata olduğu düşünülmektedir. B-taramasında; A-taramasındaki sınır bölgeler renklendirilir ve bu bölgede sinyal kaybının olması durumunda burada hata var olduğu düşünülür. C-taraması ise; en yaygın ve tarama bölgesindeki alan içerisinde dB cinsinden sinyal kabına göre renklendirme yapan tarama şeklidir.



Şekil 4.1. C3 Plakasının Doppler cihazındaki tarama görüntüsü

Bununla birlikte hatanın tespit edildiği bir plaka örneği olan B2 plakasının ultrasonik muayene ekran görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir. Burada ise C3 plakasının aksine A-taramasında iki tepe arasındaki bölgede yükselen ve ikinci tepe noktasında da bir değer düşüşü vardır. Bu nedenle plakanın kalınlığı boyunca bir hatanın varlığı görülmektedir. B-taramasında ise gönderilen sinyalde bir kesinti bölgesi tespit edilmiştir ve bu bölgede bir delemantasyonun varlığı düşünülmektedir. C-taramasında ise incelenen bölgede 6dB değerinden daha fazla düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle bu bölgede parça üzerinde

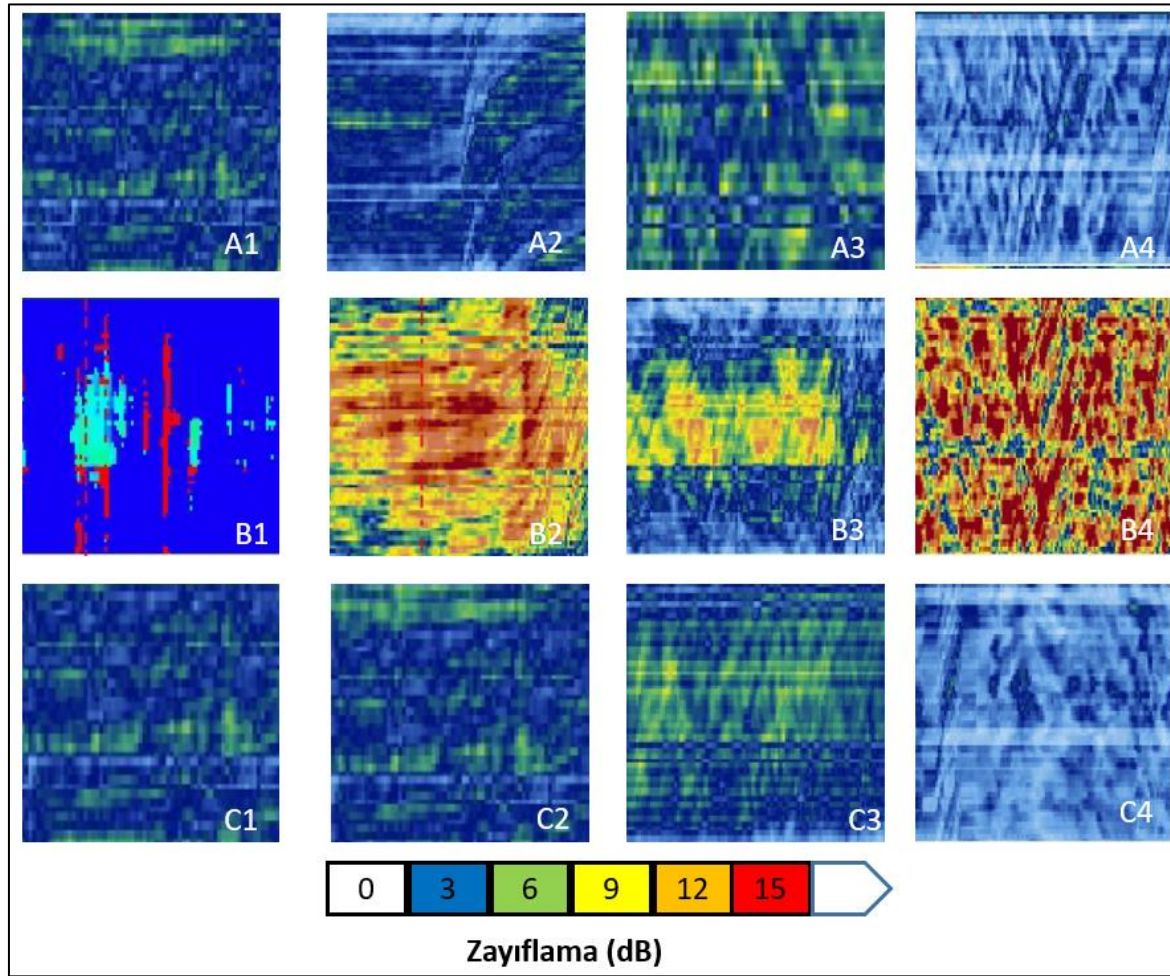
bir delemantasyon (ayrılma) veya bir boşluk vb. gibi bir hatanın varlığı düşünülmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda tüm plakalar üzerinde A,B ve C taraması yapılmıştır. Karşılaştırma için literatürde en fazla kullanılan C-taraması üzerinden değerlendirme yapılacağı için tüm plakaların C-tarama görüntüleri üzerinden yorumlama yapılacaktır.



Şekil 4.2. B2 Plakasının Doppler cihazındaki tarama görüntüsü

Bu tez kapsamında ultrasonik tahribatsız muayene için C-tarama üzerinden değerlendirme yapılacaktır. Şekil 4.3'te kupon testlerinin yapıldığı tüm test plakalarına ait olan C-tarama görüntüleri verilmiştir. C-taramaları, çeşitli zayıflama derecelerini (dB cinsinden) gösteren bir renk ölçeğinde gösterilir. Boşluklar, dağılmış gözeneklilik veya zayıf tabaka konsolidasyonu gibi laminattaki kusurları nedeniyle hareket eden bir ultrasonik ışın zayıflatılabilir. Zayıflatılmış alanlar, en istenmeyen üretim koşullarına sahip numunelerde bulunur, bu da sıkışmış havanın yeterince çekilmediğini ve plakanın konsolidasyon derecesinin endüstriyel uygulamalar için yeterli olmayabileceğini düşündürür. C-tarama analizinde 6 dB'den düşük zayıflama değerine sahip laminatlar homojen ve hatasız kabul edilir. 6 dB'den büyük zayıflamaya sahip alanlarda ise hataların var olduğu düşünülür ve ayrıca incelenmelidir. İnce laminatlara 6dB'lik bir eşik uygulanır. Varyant A ve Varyant C plakaları, 6 dB'nin üzerinde fark edilebilir bir sinyal zayıflaması göstermez. Sonuç olarak,

otoklav işleme sıcaklığını 377°C ve 400°C’de 15-30 dakika boyunca tutulan CF/PEKK laminatların ultrasonik muayenesi üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı ve parçaların belirlenen kriterlere uygun olarak üretilmiş olduğu belirlenmiştir. 350°C de kürlenmiş olan Varyant B plakalarında ise ultrasonik tahribatsız muayene esnasında gönderilen ses dalgasında 6 dB’nin üzerinde bir zayıflamanın var olduğu gözlemlenmiştir. Varyant B plakalarında 1 mm ile 5 mm arasında üretilen plakalarda katlar arasındaki yapışmanın yetersiz olduğu belirlenmiştir.

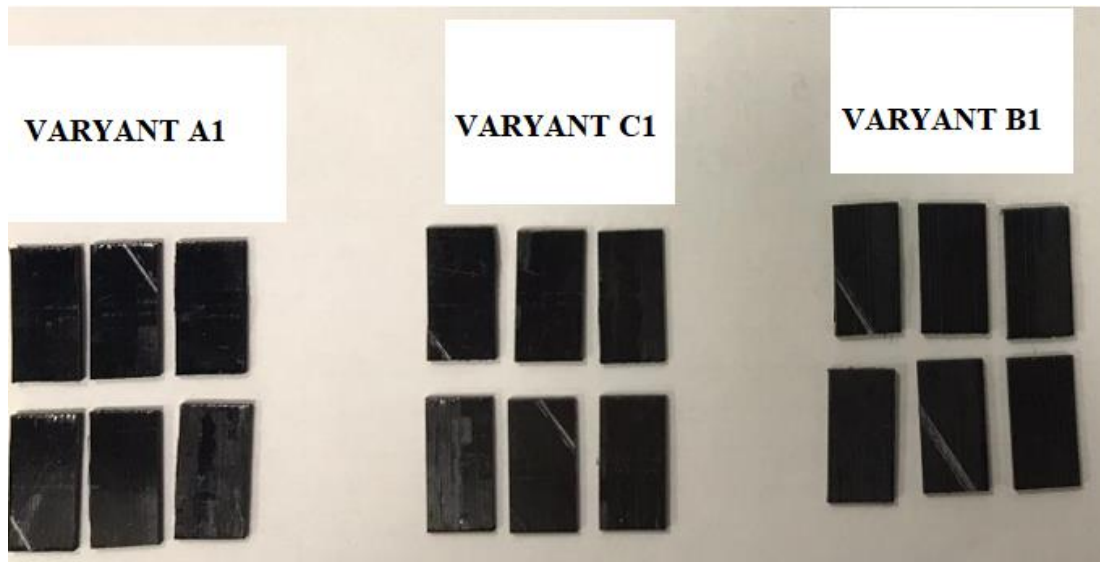


Şekil 4.3. A,B ve C plakaları için ultrasonik C-tarama sonuçları

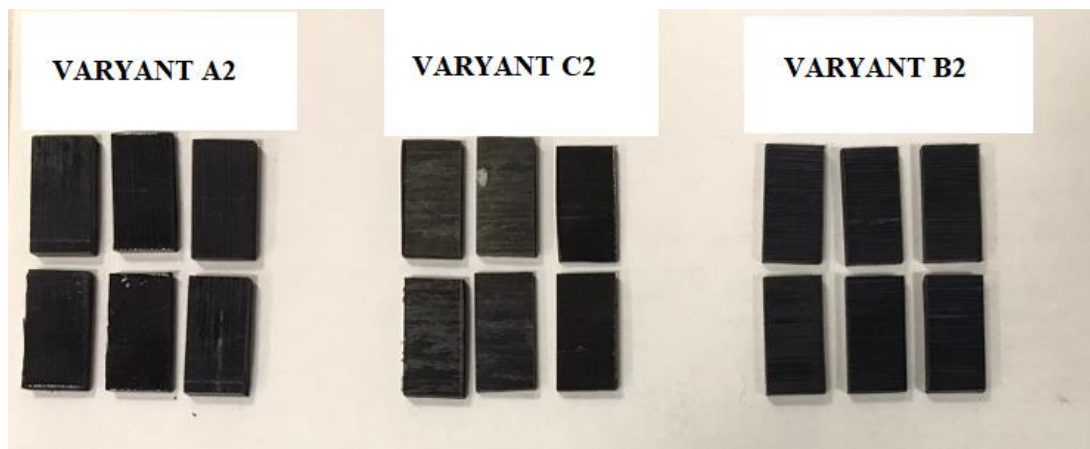
Bu nedenle üretilen plakalar üzerinde yapılan ilk test olan ultrasonik muayene ile 377°C ve 400°C sıcaklıkta üretilen kürlemede hedeflenen üretim kalitesine ulaşılabilirken, 350°C kürleme sıcaklığı ile üretilen Varyant B plakalarında katlar arası yapışmanın hedeflenen değerlerin altında kaldığı gözlemlenmiştir.

4.2. Kupon Numunelerinde Boşluk Oranı Test Sonuçları

Piknometre ve daldırma yönteminde boşluk oranı esas olarak yoğunluk farkı hesaplanarak belirlenir. Yoğunluk yaklaşımı, belirli teorik malzeme özellikleri hakkında ön bilgi gerektiren bir şeyi değerlendirmenin hızlı bir yoludur ve azda olsa yanlış gözeneklilik değerlerine neden olabilir. Bu küçük hatalara rağmen yoğunluk yaklaşımı teorisi üretilen plakalar üzerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu hata oranları kabul edilerek kullanılan metot teorik ve pratik olarak kabul görmektedir. Testler esnasında kullanılan numuneler Resim 4.1 ile Resim 4.4 arasında verilmiştir.



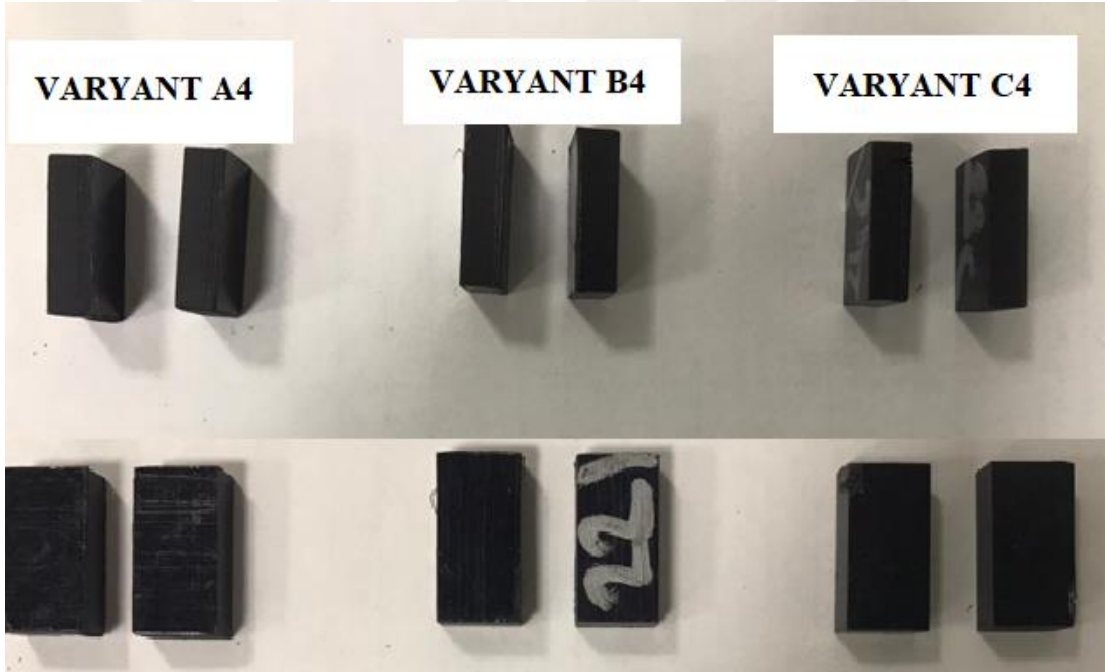
Resim 4.1. Varyant A1-B1-C1 test numuneleri



Resim 4.2. Varyant A2-B2-C2 test numuneleri



Resim 4.3. Varyant A3-B3-C3 test numuneleri



Resim 4.4. Varyant A4-B4-C4 test numuneleri

Materyal ve yöntem kısmında anlatılan boşluk oranı tespit metodu ile gerçekleştirilen daldırma yoğunluk ölçümü yöntemi ile gerçekleştirilen testlerin sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.2’de belirlenen test numune sayısına göre test sonuçları ayrı ayrı verilmiş ve ortalama değerleri tespit edilmiştir. Testler esnasındaki standart sapma değeri hesaplanarak verilmiştir.

Çizelge 4.2. Daldırma yoğunluk test sonuçları

Numune Kodu	No	Daldırma Yoğunluk (g/cm ³)	Ort.	Std. Sapma	coV (%)
A4	1	1,567	1,565	0,003	0,181
	2	1,563			
B4	1	1,53	1,532	0,002	0,139
	2	1,533			
C4	1	1,566	1,565	0,001	0,09
	2	1,564			
A3	1	1,552	1,556	0,002	0,143
	2	1,558			
	3	1,558			
	4	1,556			
	5	1,556			
	6	1,557			
B3	1	1,525	1,528	0,005	0,322
	2	1,522			
	3	1,536			
	4	1,53			
	5	1,528			
	6	1,525			
C3	1	1,556	1,557	0,004	0,225
	2	1,559			
	3	1,553			
	4	1,554			
	5	1,561			
	6	1,561			
A1	1	1,561	1,561	0,001	0,067
	2	1,561			
	3	1,560			
	4	1,562			
	5	1,559			
	6	1,560			
B1	1	1,542	1,540	0,002	0,114
	2	1,540			
	3	1,539			
	4	1,539			
	5	1,543			
	6	1,539			

Çizelge 4.2. (devam) Daldırma yoğunluk test sonuçları

C1	1	1,574	1,573	0,002	0,136
	2	1,570			
	3	1,572			
	4	1,575			
	5	1,575			
	6	1,571			
A2	1	1,575	1,575	0,006	0,357
	2	1,579			
	3	1,564			
	4	1,579			
	5	1,577			
	6	1,576			
B2	1	1,548	1,549	0,002	0,150
	2	1,547			
	3	1,549			
	4	1,546			
	5	1,551			
	6	1,552			
C2	1	1,572	1,569	0,007	0,474
	2	1,565			
	3	1,574			
	4	1,556			
	5	1,576			
	6	1,572			

İkinci olarak boşluk hesabının yapılabilmesi için piknometre ile yapılan yoğunluk ölçümleri Varyant 1 ve Varyant 2 için Çizelge 4.3’de, Varyant 3 ve Varyant 4 için ise Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Varyant 1 ve Varyant 2 plakaların piknometredeki yoğunluk test sonuçları

	Varyant 1A	Varyant 1B	Varyant 1C	Varyant 2A	Varyant 2B	Varyant 2C
Döngü#	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)
1	1,5878	1,58	1,597	1,5887	1,5771	1,5832

Çizelge 4.3. (devam) Varyant 1 ve Varyant 2 plakaların piknometredeki yoğunluk test sonuçları

2	1,5842	1,5789	1,5962	1,5875	1,578	1,5837
3	1,584	1,5777	1,5945	1,5866	1,5774	1,5822
4	1,5807	1,5762	1,5954	1,5867	1,5772	1,5826
5	1,581	1,5762	1,5906	1,5869	1,5748	1,5804
6	1,5778	1,5775	1,5923	1,5856	1,5773	1,5802
7	1,5776	1,5776	1,5938	1,586	1,5767	1,5818
8	1,577	1,5751	1,5935	1,5858	1,5764	1,5819
9	1,574	1,574	1,5921	1,5853	1,5753	1,5798
10	1,5748	1,574	1,5886	1,5855	1,5751	1,5803
Ortalama	1,5799	1,5767	1,5934	1,5865	1,5765	1,5816
std.sapma	0,0045	0,002	0,0026	0,0011	0,0011	0,0014
coV (%)	0,282	0,127	0,162	0,067	0,07	0,086

Çizelge 4.4. Varyant 3 ve Varyant 4 plakaların piknometredeki yoğunluk test sonuçları

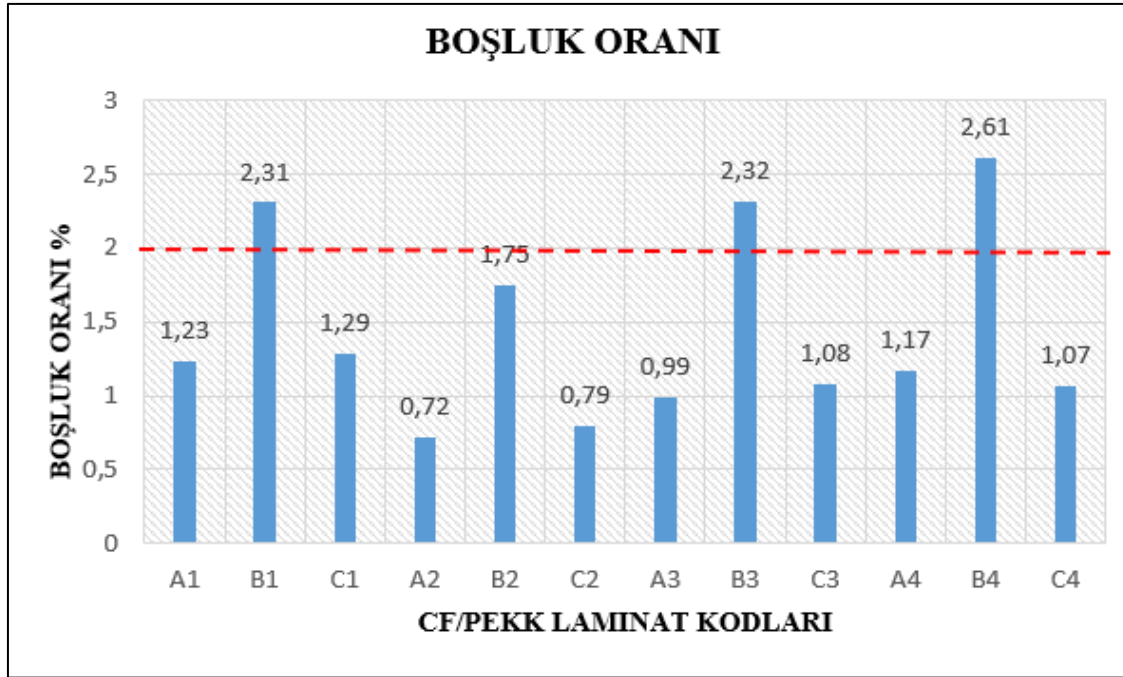
	Varyant 4A	Varyant 4B	Varyant 4C	Varyant 3A	Varyant 3B	Varyant 3C
Döngü#	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)
1	1,5858	1,5733	1,5839	1,5722	1,5643	1,5767
2	1,5855	1,5744	1,584	1,5713	1,5648	1,5765
3	1,586	1,5737	1,5822	1,5736	1,5652	1,5742
4	1,5837	1,5738	1,584	1,5721	1,5638	1,5738
5	1,5839	1,5708	1,5812	1,5721	1,5635	1,5725
6	1,5829	1,5735	1,5813	1,5704	1,5648	1,5744
7	1,5834	1,5725	1,5814	1,5715	1,5629	1,574
8	1,5829	1,5723	1,5797	1,5711	1,5636	1,5742
9	1,5812	1,571	1,581	1,5711	1,5629	1,5749
10	1,5809	1,5706	1,5809	1,5714	1,564	1,5723
Ortalama	1,5836	1,5726	1,582	1,5717	1,564	1,5744
std.sapma	0,0018	0,0014	0,0015	0,0009	0,0008	0,0014
coV (%)	0,1121	0,0876	0,0957	0,0556	0,0508	0,0912

Materyal ve yöntem kısmında açıklanmış olan boşluk hesabı formülleri kullanılarak üretimleri yapılan plakalarda ki boşluk oranları tespit edilmiştir. Çizelge 4.5'te üretimleri gerçekleştirilen plakalara ait olan boşluk hesapları verilmiştir.

Çizelge 4.5. Üretimleri yapılan plakaların boşluk oranları test sonuçları

Numune Kodu	Daldırma Yoğunluk (g/cm ³)	Piknometre Yoğunluk (g/cm ³)	Boşluk Oranı (%)
Varyant 1A	1,5605	1,5799	1,23
Varyant 2A	1,5403	1,5767	2,31
Varyant 3A	1,5728	1,5934	1,29
Varyant 2A	1,575	1,5865	0,72
Varyant 2B	1,5488	1,5765	1,75
Varyant 2C	1,5692	1,5816	0,79
Varyant 3A	1,5562	1,5717	0,99
Varyant 3B	1,5277	1,564	2,32
Varyant 3C	1,5573	1,5744	1,08
Varyant 4A	1,565	1,5836	1,17
Varyant 4B	1,5315	1,5726	2,61
Varyant 4C	1,565	1,582	1,07

Şekil 4.4'te boşluk oranı test çalışmalarının bulguları özetlenmiştir. %0,99 ile %3,11 arasında bir gözeneklilik aralığı elde etmek mümkün olmuştur. Yatay noktali çizgi, mühendislik uygulamalarında standart bir eşik olan %2 boşluk oranına göre ayarlanmıştır. Ultrasonik tahribatsız muayene sonuçlarına göre, Varyant A ve Varyant C olarak üretilen plakalarda bir konsolidasyon problemi gözlemlenmemiştir bu nedenle 377°C ve 400°C'de kürlenene laminatlarda %2'den aşağıda bir boşluk içeriğinin tespit edilmesi doğaldır. Öte yandan, düşük sıcaklıklarda yapılan otoklav konsolidasyon işleminin boşluk oranlarının varlığını ciddi ölçüde etkilediği yapılan testlerin sonuçlarında görülmüştür. Sertleştirme sıcaklığı parametresi, otoklav imalatında katı bir yeterli konsolidasyon derecesine uyma eğilimindedir. Yalnızca Varyant A ve Varyant C laminatların boşluk içerikleri %2'den azdır. En yüksek boşluk içeriği değeri %2.61 ile Varyant B4 plakasında görülmüştür. Bu boşluk oranında C-taramasında beklendiği gibi 350°C'de elde edildi ve bozunma etkileri matriste süreksizlikler olduğunu göstermektedir. Bu gözlemlere dayanarak, CF/PEKK laminatların otoklavla kürlenmesi, prepreg hammaddesinde bulunan boşlukları boşaltmak için 400°C'ye yakın bir işlem sıcaklığı gerektirdiğini göstermektedir. Varyant B2 laminatı ise kalınlık olarak ince olması nedeni ile yapılan testlerde %2'den daha az boşluk içeriğine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.4. Üretilen plakaların boşluk oranları test sonuçları

Otoklav üretiminde en önemli iki çıktı parametresi olan basınç ve sıcaklık parametrelerinden tüm çevrimlerde basınç sabit tutularak sıcaklığın boşluk oranı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 1mm ile 5mm arasında üretilen laminatlarda, kür sıcaklığının boşluk oranına etkisi kalınlık arttıkça daha baskın olma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.

4.3. Kupon Numune Mekanik Testleri

Mekanik testler kapsamında üç farklı üretim sıcaklığında üretilmiş olan kupon numunelerinin ASTM D3039 standardına göre 0 derece serilmiş olan numunelerin, ASTM D3039 standardına göre 90 derece serilmiş olan numunelerin, ASTM 3518 standardına göre +/- 45 derece serilmiş olan numunelerin ve ASTM 2344 standardına göre üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Üç sıcaklık arasında en ideal üretim sıcaklığının belirlenmesi hedeflenmiştir. Tüm kupon testleri Zwick Z250Allround Universal Test cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazı görseli Resim 4.5'te verilmiştir.



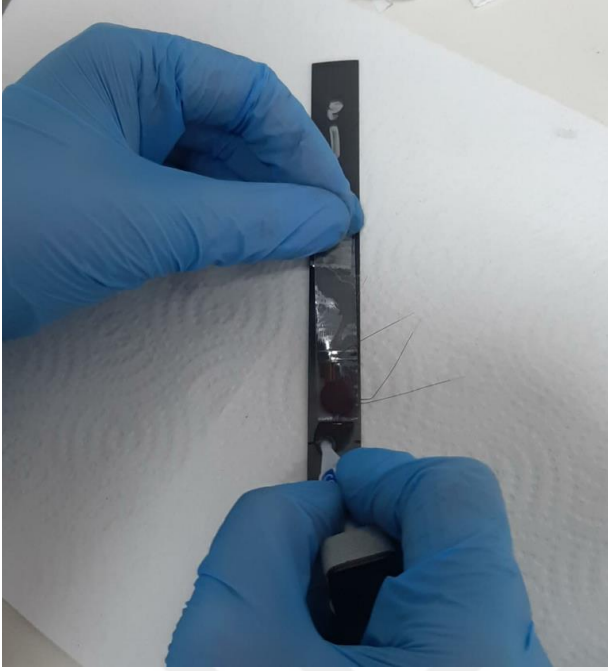
Resim 4.5. Zwick Z250Allround Universal Test cihazı

0 derece, 90 derece ve +/- 45 derece serilmiş test numunelerinin poisson oranının belirlenmesi amacı ile kupon numunelerine gerinim ölçerler uygulanmıştır. Gerinim ölçerlerin uygulanması için kesim işlemleri tamamlanan kupon numunelerine önce gerinim ölçer bölgesinde yapışmanın daha sağlıklı olması için zımpara işlemi yapılmıştır. Zımpara işlemi Resim 4.6'da gösterilmiştir.



Resim 4.6. Gerinim ölçer yapıştırma işleminde zımparalama

Zımparalama işlemi ile yüzey hazır hale getirilir. Gerinim ölçer parça yüzeyine yapıştırıldıktan sonra gerinim ölçerin hassasiyeti nedeni ölçüm bölgesi koruyucu bant ile kapatılmıştır. Gerinim ölçer yapıştırma işlemi sonrası ise dataların toplanabilmesi için gerinim ölçerlerin bağlı olduğu teller lehimlenmiştir. Gerinim ölçer yapıştırma işlemi Resim 4.7’de, lehimleme işlemi ise Resim 4.8’de verilmiştir.



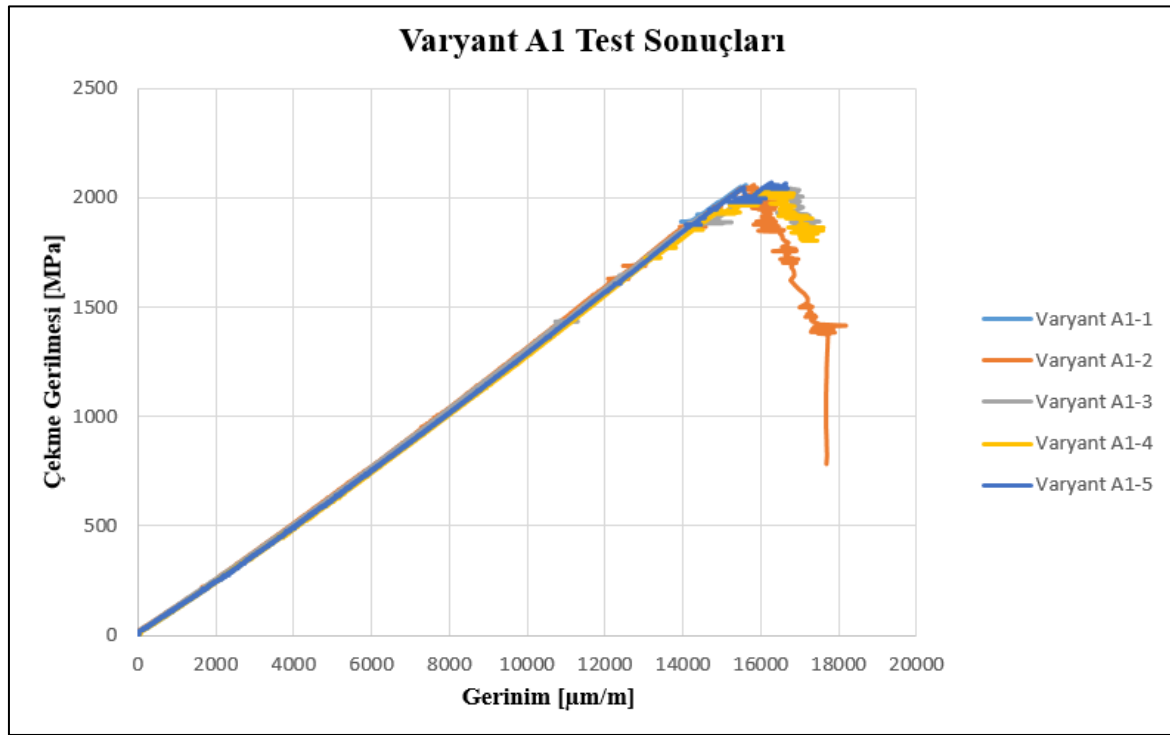
Resim 4.7. Gerinim ölçer yapıştırma işlemi



Resim 4.8. Lehimleme işlemi

4.3.1. 0 derece çekme testi sonuçları

ASTM D3039 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen test Varyant A, Varyant B ve Varyant C numuneleri için tekrarlanmıştır. Teste başlamadan önce numuneler 23°C’de %50 nemde 2 saatlik ön şartlandırma yapılmıştır. Beş numune için tekrarlanan testlerin gerilme-gerinim grafikleri Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Varyant A1 test sonuçları

Çizelge 4.6’da Varyant A1’e ait olan test sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.6. Varyant A1 kupon numunelerinin test sonuçları

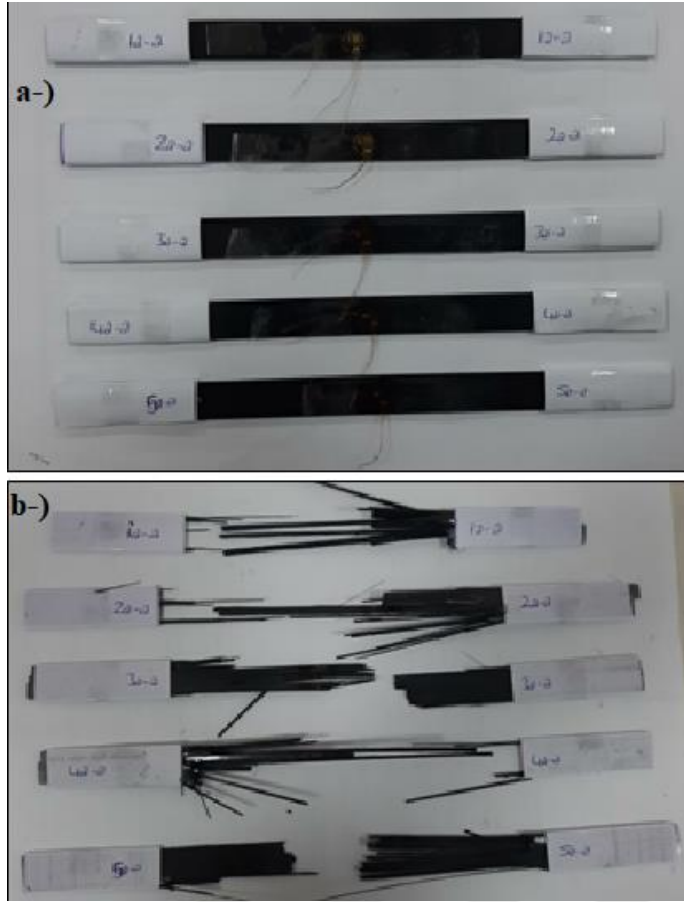
No	Numune Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (v)	Kopma Uzaması (%)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Gage Mesafesi (mm)
1	1a	2150,15	123,46	40560,9	0,325	1,76	1,237	15,25	130
2	2a	2058,5	119,83	38763,28	0,321	1,77	1,234	15,26	130
3	3a	2042,59	121,39	38151,94	0,35	1,76	1,224	15,26	130
4	4a	2048,11	121,39	38735,61	0,316	1,74	1,241	15,24	130
5	5a	2074,23	116,22	40088,29	0,309	2,06	1,269	15,23	130

Son olarak istatistiksel yaklaşımla malzemenin belirlenmiş mekanik özellikleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

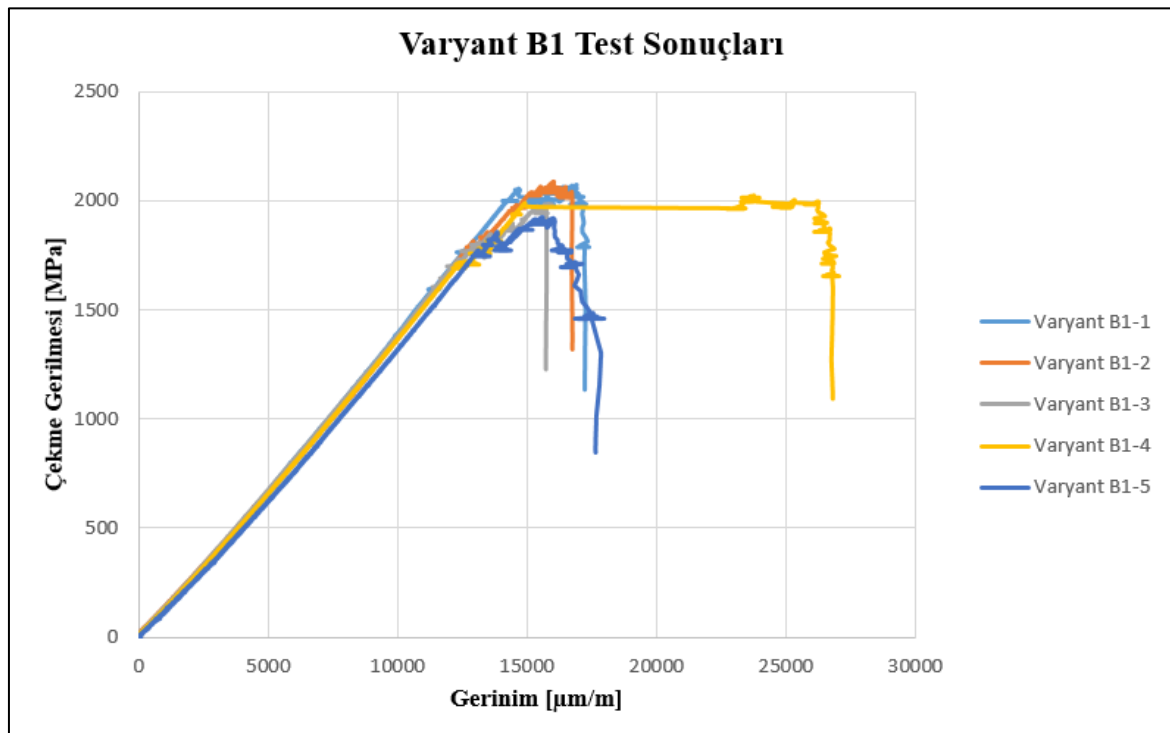
Çizelge 4.7. Varyant A1 ortalama mekanik özellikleri

Seri n=5	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (v)	Kopma Uzaması (%)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Gage Mesafesi (mm)
x	2074,71	120,46	39260	0,324	1,82	1,241	15,25	130
s	43,85	2,7	1015,86	0,02	0,135	0,01687	0,01304	
n [%]	2,11	2,24	2,59	4,8	7,4	1,36	0,09	

Testler esnasında kupon numunelerinin test öncesi ve test sonrası görselleri Resim 4.9’da verilmiştir.



Resim 4.9. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası



Şekil 4.6. Varyant B1 test sonuçları

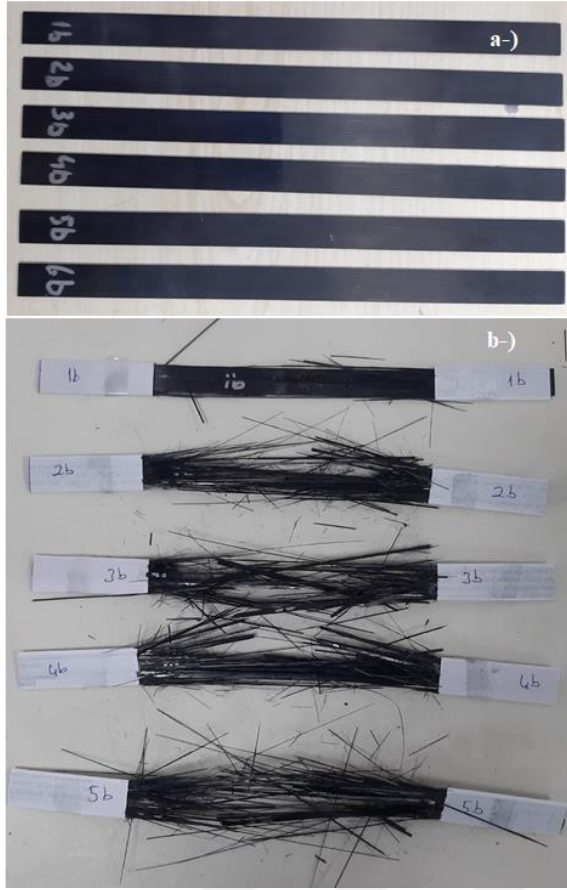
Çizelge 4.8. Varyant B1 kupon numunelerinin test sonuçları

No	Numune Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (ν)	Kopma Uzaması (%)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Gage Mesafesi (mm)
1	1b	2072,94	129,55	35864,73	0,294	1,72	1,139	15,19	130
2	2b	2087,93	123,88	39537,95	0,302	1,67	1,245	15,21	130
3	3b	1985,65	130,49	38830,05	0,353	1,57	1,284	15,23	130
4	4b	2024,58	128,2	39354,52	0,354	2,68	1,278	15,21	130
5	5b	1925,07	122,49	35598,96	0,373	1,76	1,215	15,22	130

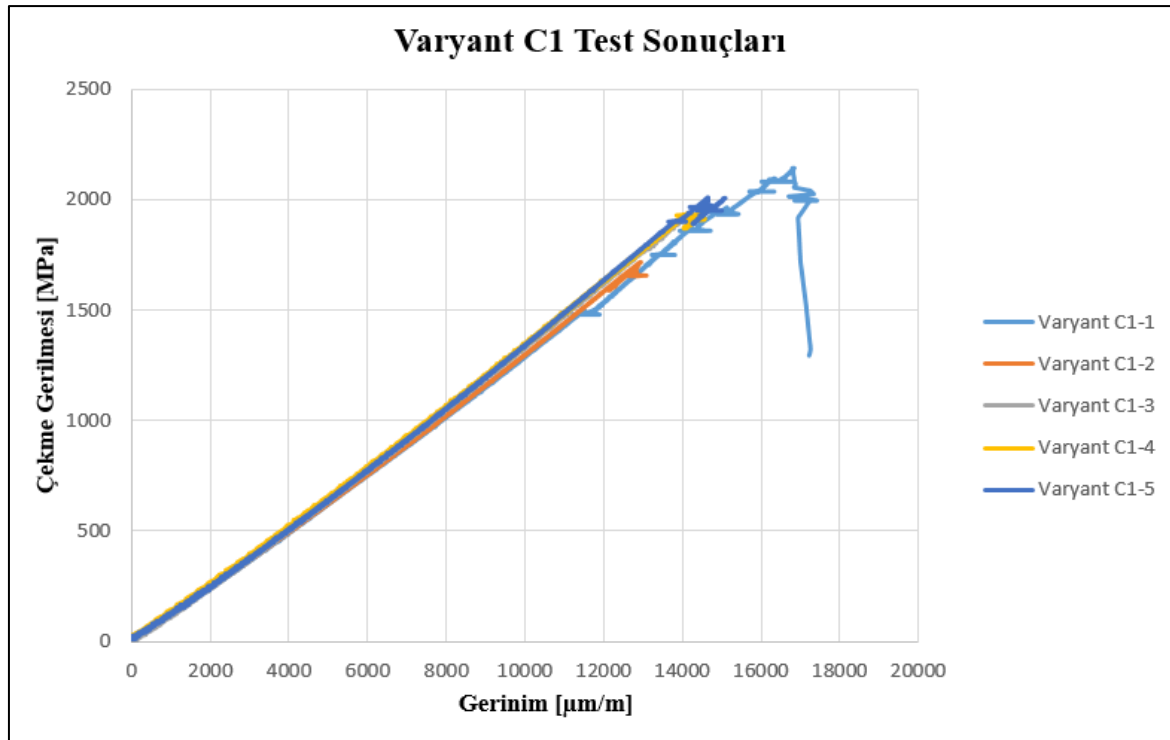
Çizelge 4.9. Varyant B1 ortalama mekanik özellikleri

Seri n=5	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (ν)	Kopma Uzaması (%)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Gage Mesafesi (mm)
x	2019,23	126,92	37837,24	0,335	1,88	1,232	15,21	130
s	66,38	3,54	1941,71	0,04	0,45	0,05901	0,01483	
n [%]	3,29	2,79	5,13	10,45	23,99	4,79	0,1	

Testler esnasında kupon numunelerinin test öncesi ve test sonrası görselleri Resim 4.10’da verilmiştir.



Resim 4.10. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası



Şekil 4.7. Varyant C1 test sonuçları

Çizelge 4.10. Varyant C1 kupon numunelerinin test sonuçları

No	Numune Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (v)	Kopma Uzaması (%)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Gage Mesafesi (mm)
1	1c	2142,75	118,81	37855,5	0,356	1,72	1,16	15,23	130
2	2c	1937,95	119,21	38390,23	0,345	1,58	1,299	15,25	130
3	3c	2170,87	121,02	45255,58	0,406	1,73	1,367	15,25	130
4	4c	2177,97	121,72	44075,09	0,287	3,81	1,327	15,25	130
5	5c	2010,52	127,69	36976,45	0,308	3,33	1,206	15,25	130

Çizelge 4.11. Varyant C1 ortalama mekanik özellikleri

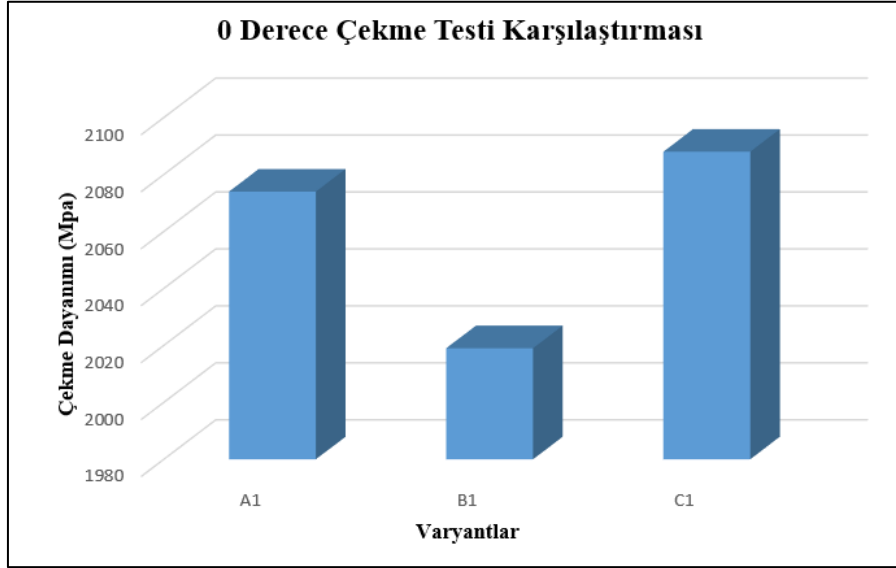
Seri n=5	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (v)	Kopma Uzaması (%)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Gage Mesafesi (mm)
x	2088,01	121,69	40510,57	0,34	2,43	1,272	15,25	130
s	107,8	3,57	3848,9	0,05	1,05	0,08614	0,008944	0
n [%]	5,16	2,93	9,5	13,57	43,3	6,77	0,06	0

Testler esnasında kupon numunelerinin test öncesi ve test sonrası görselleri Resim 4.11’de verilmiştir.



Resim 4.11. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası

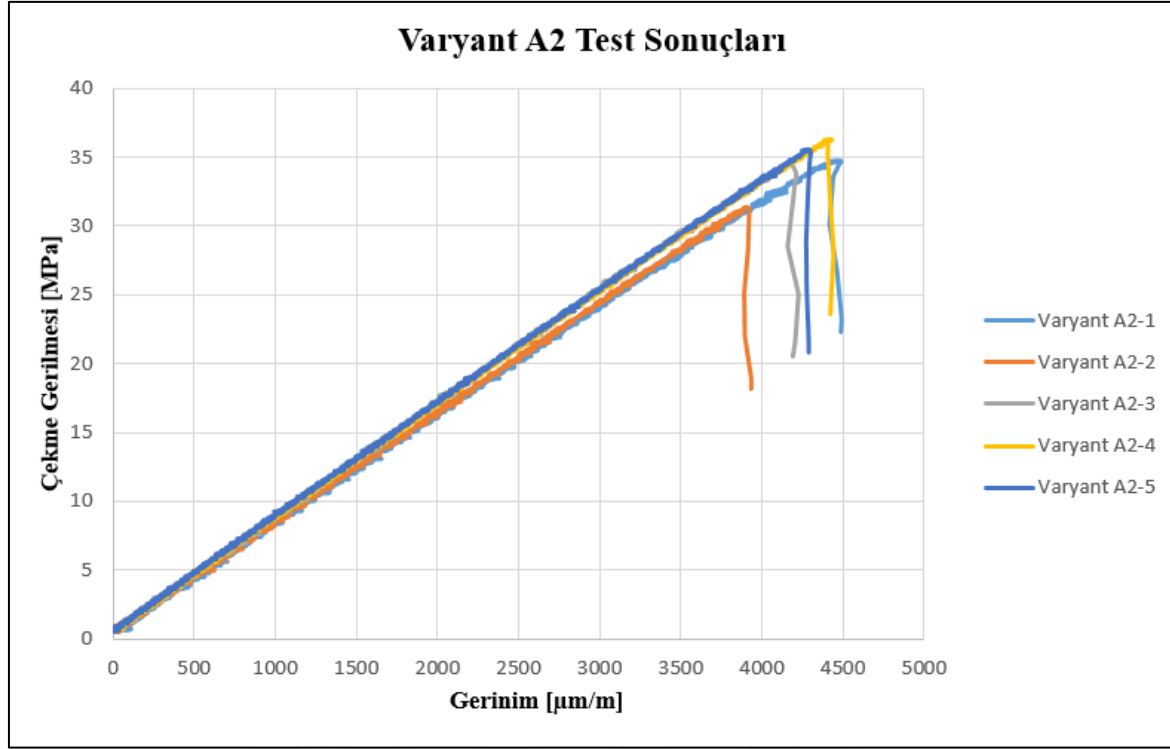
0 derece çekme testlerinden alınan sonuçların karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.8’de verilmiştir. En yüksek dayanım 400°C’deki üretimde gözlenirken en düşük dayanım da 350°C’deki üretimde görülmüştür.



Şekil 4.8. 0 derece çekme testi sonuçlarının karşılaştırılması

4.3.2. 90 derece çekme testi sonuçları

ASTM D3039 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen test Varyant A, Varyant B ve Varyant C numuneleri için tekrarlanmıştır. Teste başlamadan önce numuneler 23°C’de %50 nemde 2 saatlik ön şartlandırma yapılmıştır. Test hızı 2mm/dk ‘dir. Beş numune için tekrarlanan testlerin gerilme-gerinim grafikleri Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.9. Varyant A2 test sonuçları

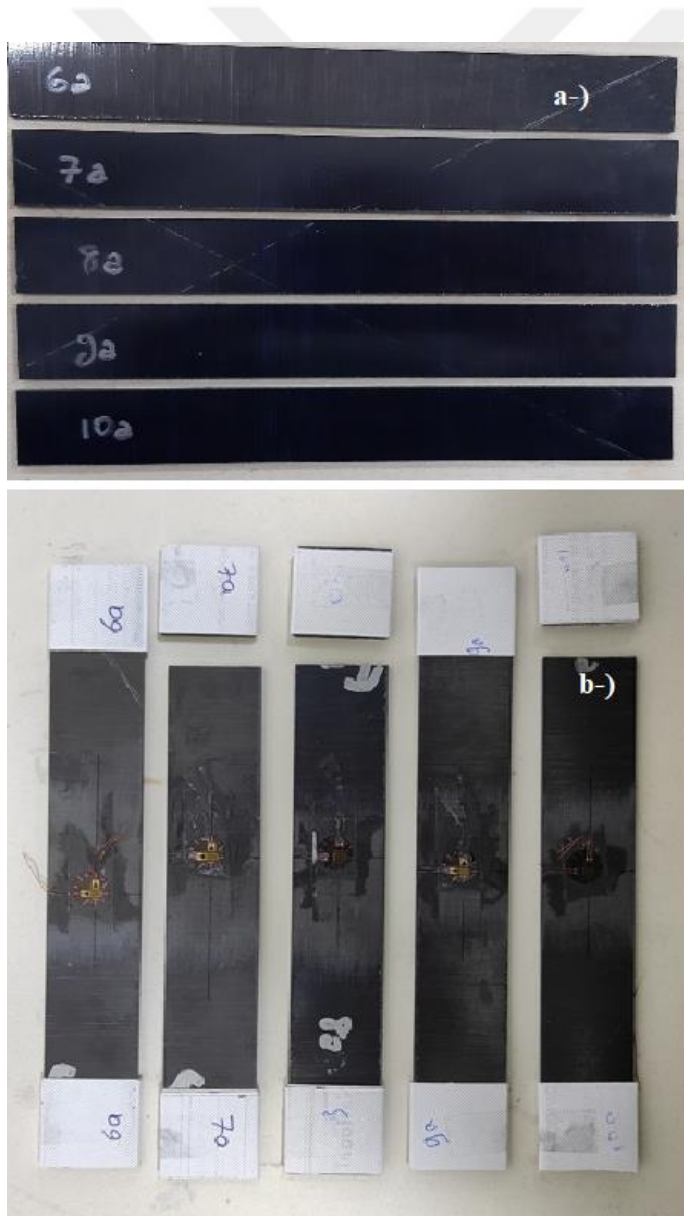
Çizelge 4.12. Varyant A2 kupon numunelerinin test sonuçları

No	Numune Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (ν)	Kopma Uzaması (%)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Gage Mesafesi (mm)
1	6a	34,74	7,72	2040,47	0,0304	0,449	2,328	25,23	125
2	7a	31,34	7,79	1853,64	0,0366	0,393	2,346	25,21	125
3	8a	34,71	8,29	2048,06	0,031	0,419	2,337	25,25	125
4	9a	36,28	8,19	2137,59	0,0313	0,442	2,338	25,2	125
5	10a	35,51	8,12	2093,5	0,0312	0,429	2,336	25,24	125

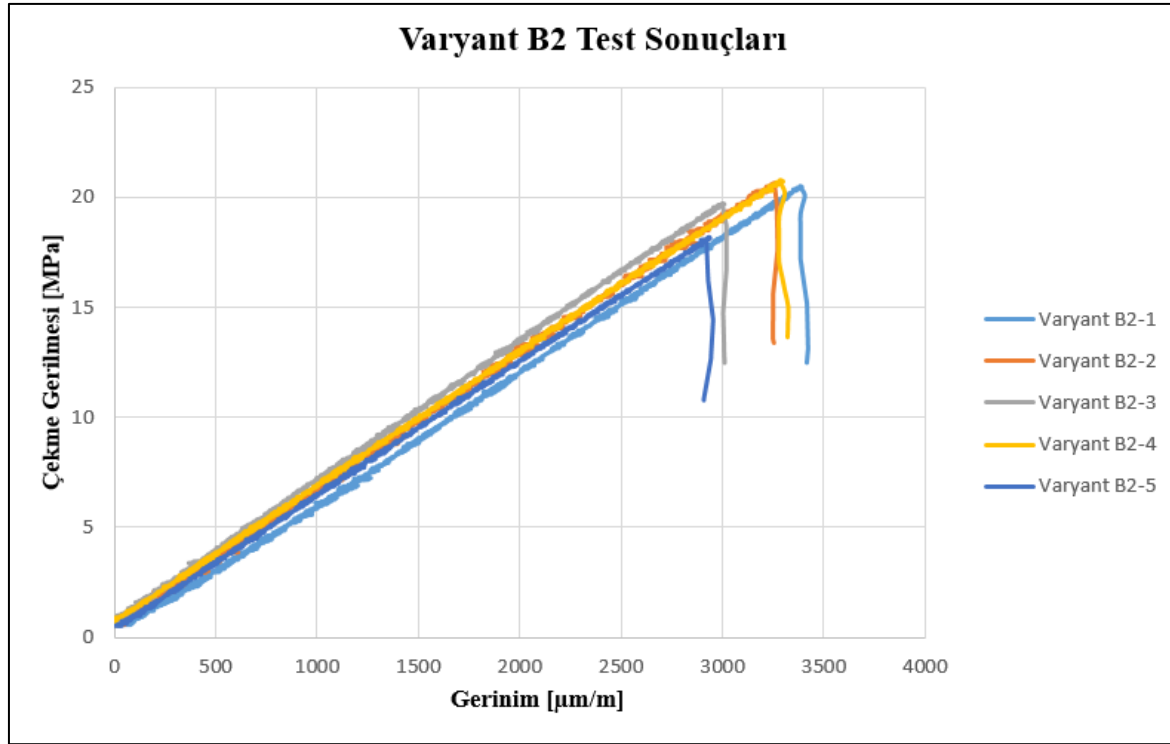
Çizelge 4.13. Varyant A2 ortalama mekanik özellikleri

Seri n=5	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (ν)	Kopma Uzaması (%)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Gage Mesafesi (mm)
x	34,52	8,02	2034,65	0,0321	0,427	2,337	25,23	125
s	1,89	0,253	108,44	0,003	0,022	0,006403	0,02074	
n [%]	5,47	3,15	5,33	7,87	5,11	0,27	0,08	

Testler esnasında kupon numunelerinin test öncesi ve test sonrası görselleri Resim 4.12’de verilmiştir.



Resim 4.12. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası



Şekil 4.10. Varyant B2 test sonuçları

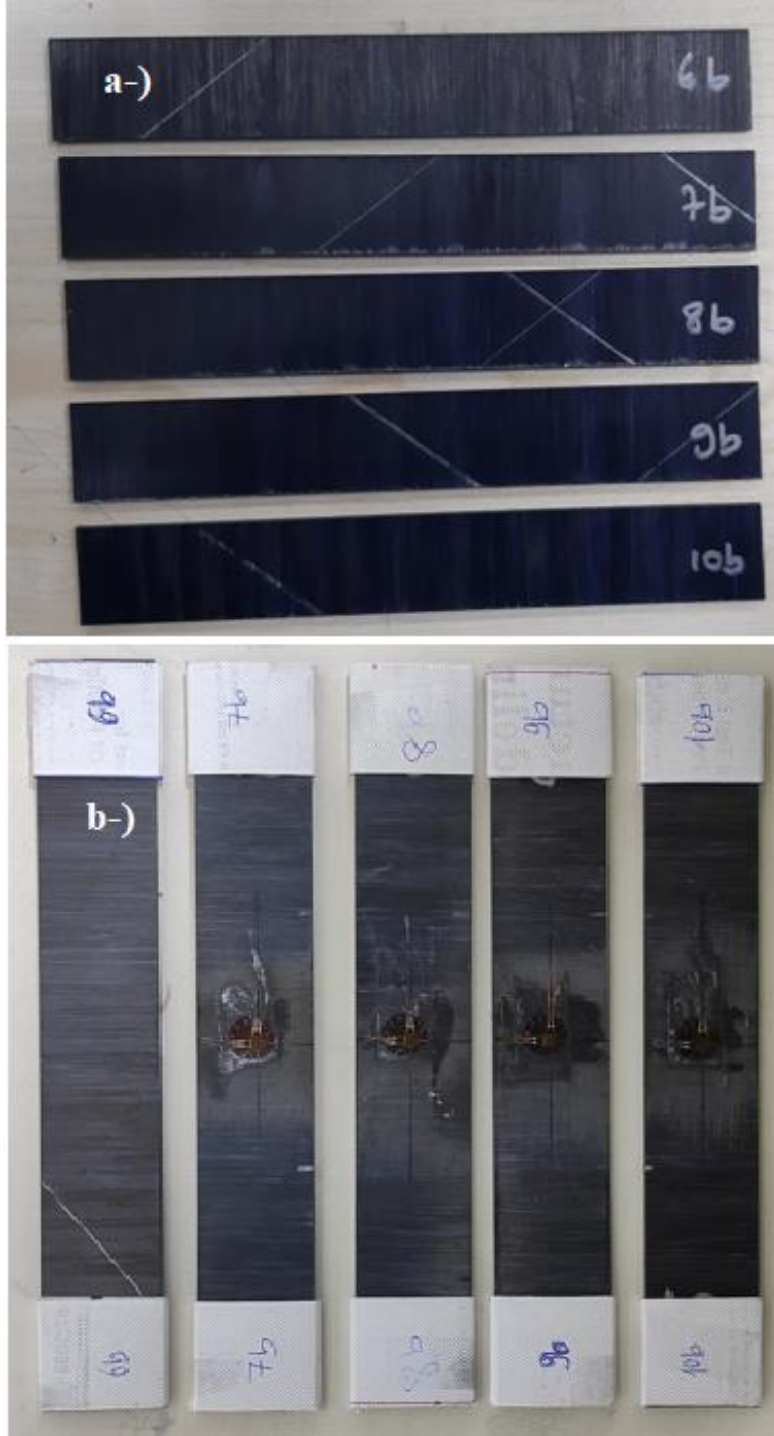
Çizelge 4.14. Varyant B2 kupon numunelerinin test sonuçları

No	Numune Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (v)	Kopma Uzaması (%)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Gage Mesafesi (mm)
1	6b	20,49	5,96	1256,98	0,0364	0,342	2,432	25,22	125
2	7b	20,65	6,19	1268,63	0,0268	0,325	2,435	25,23	125
3	8b	19,72	6,14	1214,81	0,0683	0,301	2,438	25,27	125
4	9b	20,75	6,18	1284,98	0,0269	0,332	2,451	25,26	125
5	10b	18,2	6,14	1127,94	0,0288	0,291	2,456	25,24	125

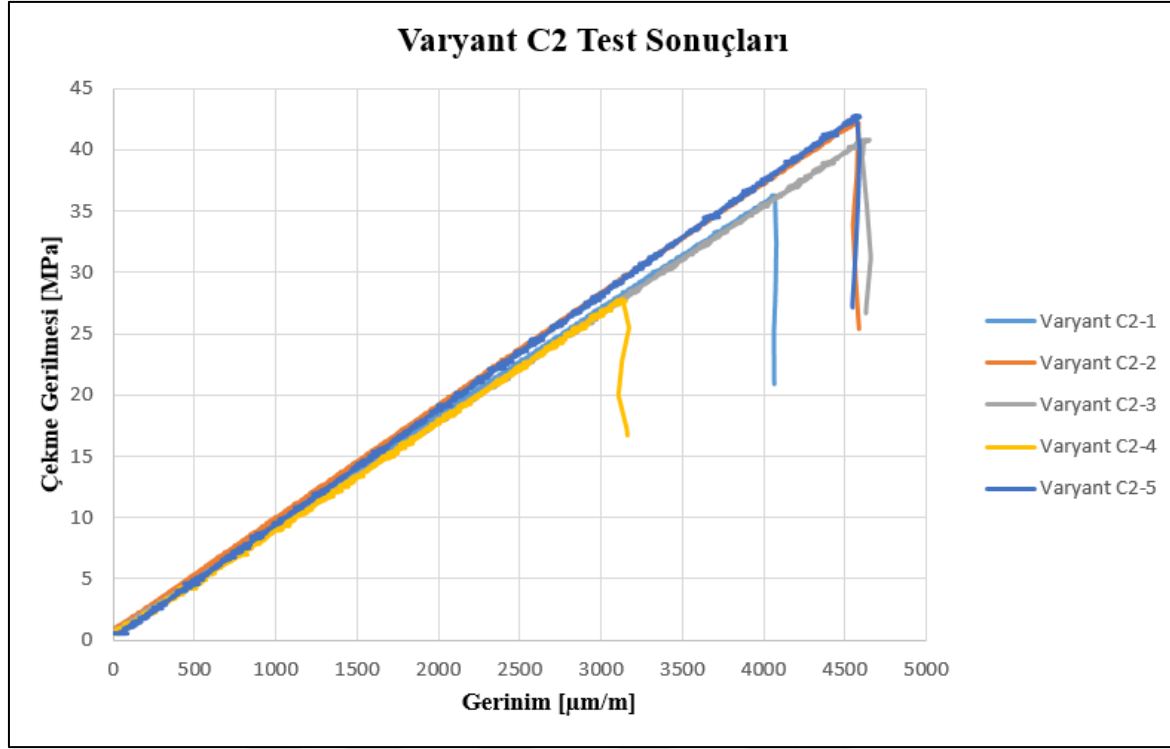
Çizelge 4.15. Varyant B2 ortalama mekanik özellikleri

Seri n=5	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (v)	Kopma Uzaması (%)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Gage Mesafesi (mm)
x	19,96	6,12	1230,67	0,0374	0,318	2,442	25,24	125
s	1,07	0,091	63,02	0,018	0,021	0,0105	0,02074	
n [%]	5,35	1,49	5,12	47,24	6,74	0,43	0,08	

Testler esnasında kupon numunelerinin test öncesi ve test sonrası görselleri Resim 4.13'te verilmiştir.



Resim 4.13. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası



Şekil 4.11. Varyant C2 test sonuçları

Çizelge 4.16. Varyant C2 kupon numunelerinin test sonuçları

No	Numune Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (ν)	Kopma Uzaması (%)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Gage Mesafesi (mm)
1	6c	36,27	8,98	2155,52	0,0315	0,407	2,359	25,19	125
2	7c	42,22	9,01	2329,33	0,0363	0,459	2,19	25,19	125
3	8c	40,81	8,7	2274,88	0,0306	0,463	2,206	25,27	125
4	9c	27,83	8,76	1564,36	0,0349	0,316	2,231	25,2	125
5	10c	42,78	9,14	2358,24	0,0317	0,455	2,184	25,24	125

Çizelge 4.17. Varyant C2 ortalama mekanik özellikleri

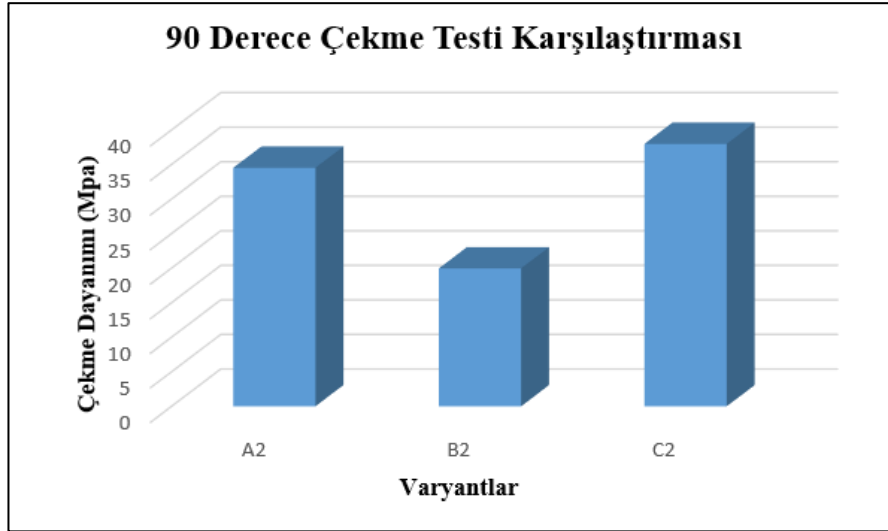
Seri n=5	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (ν)	Kopma Uzaması (%)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Gage Mesafesi (mm)
x	37,98	8,92	2136,46	0,033	0,42	2,234	25,22	125
s	6,23	0,183	329,09	0,0024	0,062	0,0722	0,03564	
n [%]	16,39	2,06	15,4	7,4	14,82	3,23	0,14	

Testler esnasında kupon numunelerinin test öncesi ve test sonrası görselleri Resim 4.14'te verilmiştir.



Resim 4.14. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası

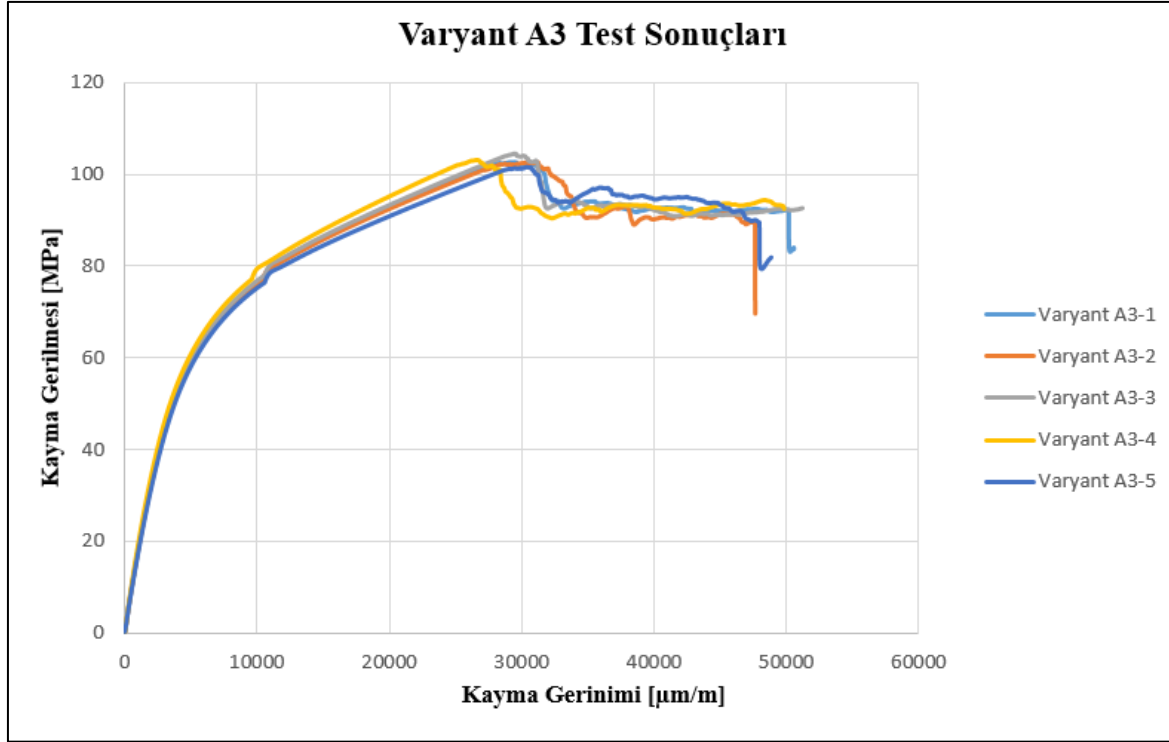
Varyant 2 için yapılan testlerde de en düşük mekanik değerler Varyant B numunelerinde görülmüştür. Burada Varyant A ve Varyant C numunelerinin dayanım değerleri yakındır. Belirli sıcaklık üzerinde yapılan üretimlerin dayanım üzerinde ki etkisinin daha az olduğu da bu şekilde gözlemlenmiştir. Şekil 4.12’de yukarıda paylaşılan dayanım değerlerinin özeti yapılmıştır.



Şekil 4.12. 90 derece çekme testi numunelerinin karşılaştırılması

4.3.3. +/- 45 derece çekme testi sonuçları

Düzlem içi kayma mukavemetinin belirlenmesi için yapılan +/- 45 derece çekme testi için Varyant A, B ve C numunelerine aynı testler uygulanmıştır. Ön şartlandırma olarak 23 °C, %50 nem’de 2 saat bekletilmiştir. Test numunleri 2mm/dk olarak uygulanmıştır. Beş numune için tekrarlanan testlerin gerilme-gerinim grafikleri Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’te verilmiştir.



Şekil 4.13. Varyant A3 test sonuçları

Çizelge 4.18. Varyant A3 kupon numunelerinin test sonuçları

No	Numune Adı	Düzlem İçi Kayma Dayanımı (MPa)	Düzlem İçi Kayma Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (ν)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
1	11a	103	5,27	11500	0,643	25,15	2,231
2	12a	103	5,11	11500	0,628	25,07	2,228
3	13a	104	5,11	11500	0,623	25,06	2,201
4	14a	103	5,12	11400	0,639	25,08	2,21
5	15a	102	5,07	11400	0,63	25,16	2,238

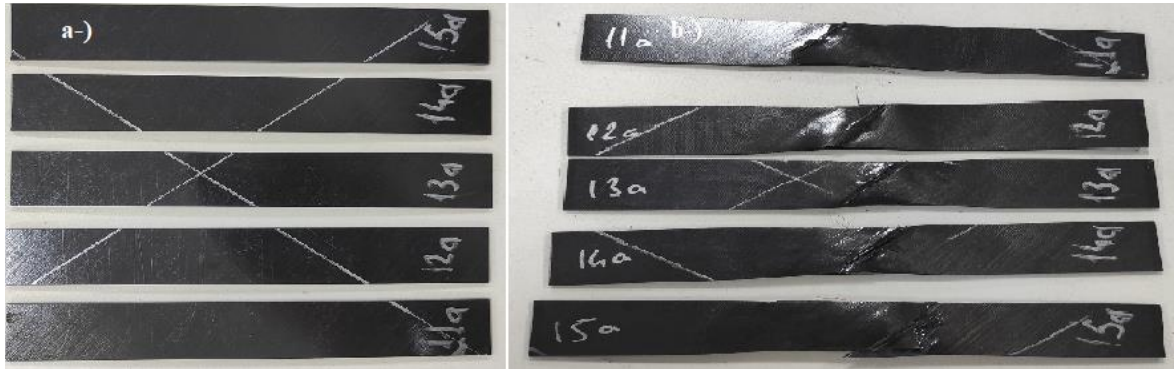
Çizelge 4.19. Varyant A3 ortalama mekanik özellikleri

Seri n=5	Düzlem İçi Kayma Dayanımı (MPa)	Düzlem İçi Kayma Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (ν)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
x	103	5,13	11500	0,633	25,1	2,222

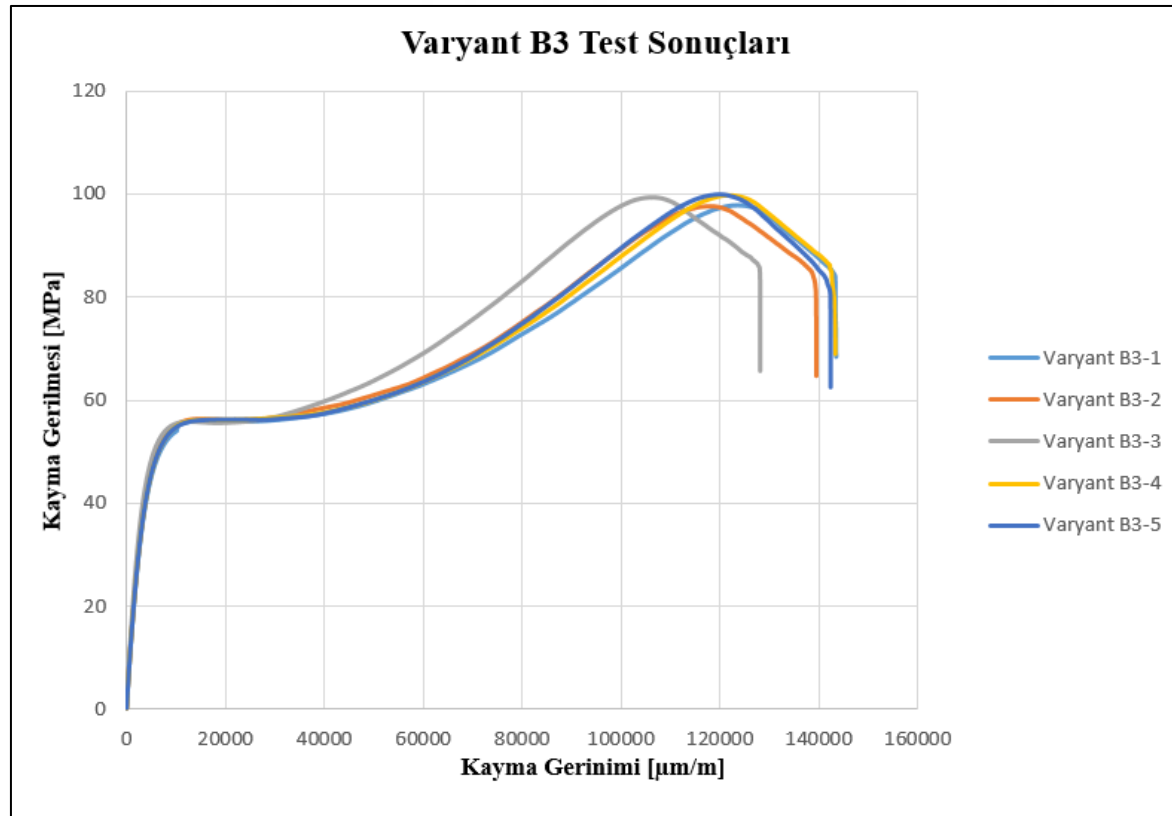
Çizelge 4.19. (devam) Varyant A3 ortalama mekanik özellikleri

s	1,05	0,076	44,5	0,0079	0,04722	0,01547
n [%]	1,02	1,48	0,39	1,24	0,19	0,7

Testler esnasında kupon numunelerinin test öncesi ve test sonrası görselleri Resim 4.15'te verilmiştir.



Resim 4.15. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası



Şekil 4.14. Varyant B3 test sonuçları

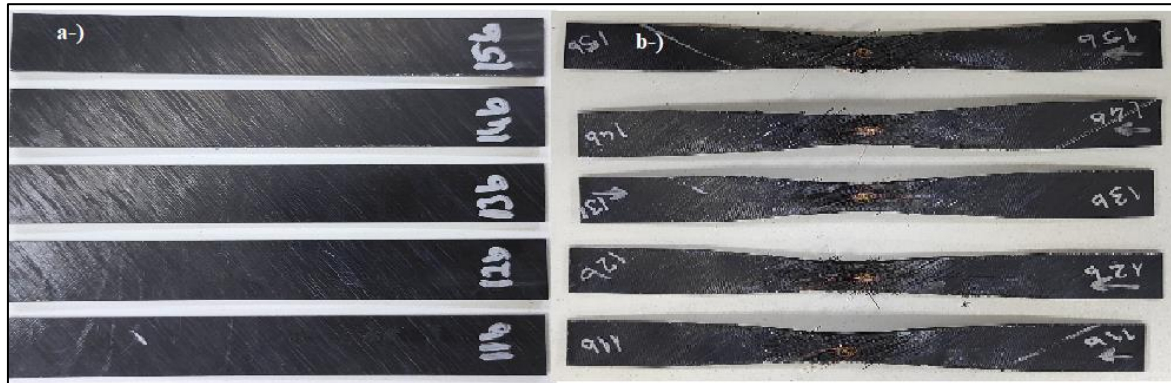
Çizelge 4.20. Varyant B3 kupon numunelerinin test sonuçları

No	Numune Adı	Düzlem İçi Kayma Dayanımı (MPa)	Düzlem İçi Kayma Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (v)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
1	11b	97,8	3,8	11400	0,68	25,15	2,319
2	12b	97,6	3,68	11200	0,692	25,14	2,291
3	13b	99,4	3,77	11400	0,835	25,15	2,28
4	14b	99,8	3,7	11600	0,7	25,16	2,316
5	15b	99,9	3,87	11700	0,689	25,15	2,319

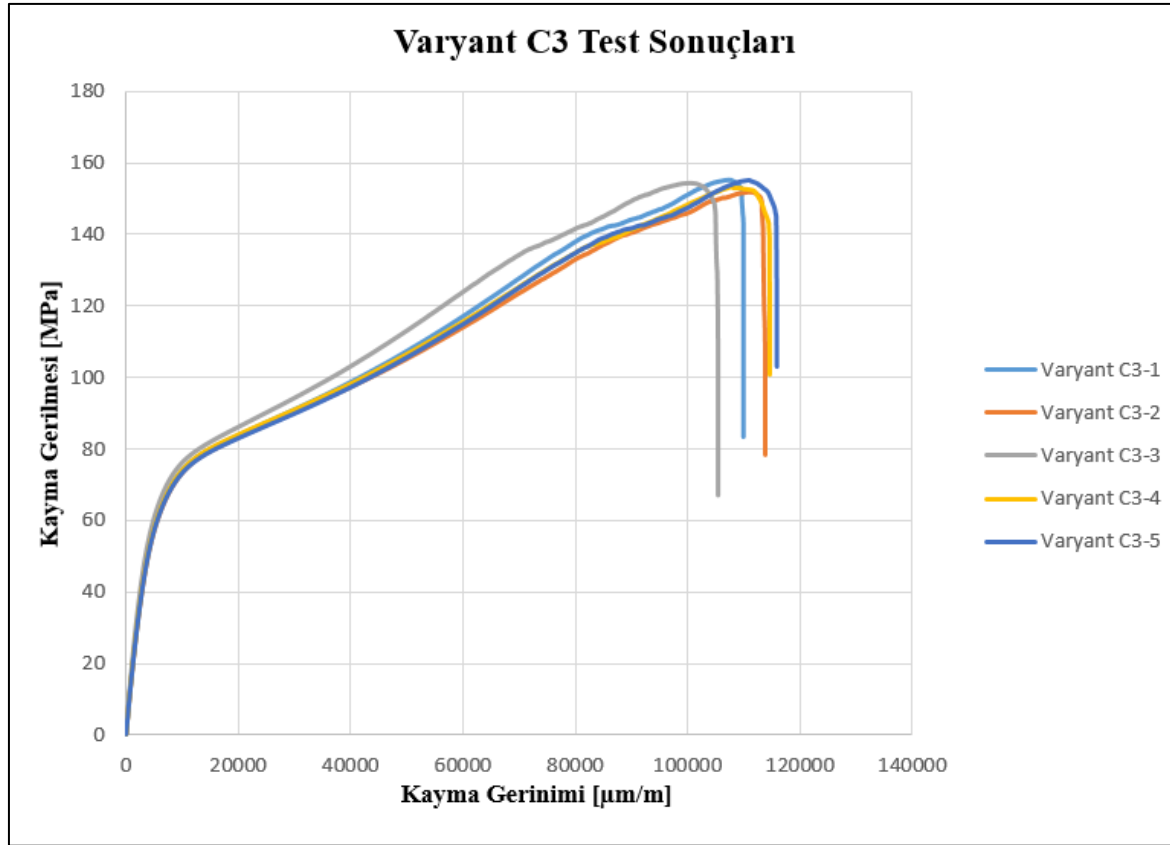
Çizelge 4.21. Varyant B3 ortalama mekanik özellikleri

Seri	n=5	Düzlem İçi Kayma Dayanımı (MPa)	Düzlem İçi Kayma Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (v)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
x		98,9	3,76	11500	0,719	25,15	2,305
s		1,09	0,0792	172	0,0653	0,007071	0,01826
n [%]		1,1	2,1	1,5	9,08	0,03	0,79

Testler esnasında kupon numunelerinin test öncesi ve test sonrası görselleri Resim 4.16’da verilmiştir.



Resim 4.16. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası



Şekil 4.15. Varyant C3 test sonuçları

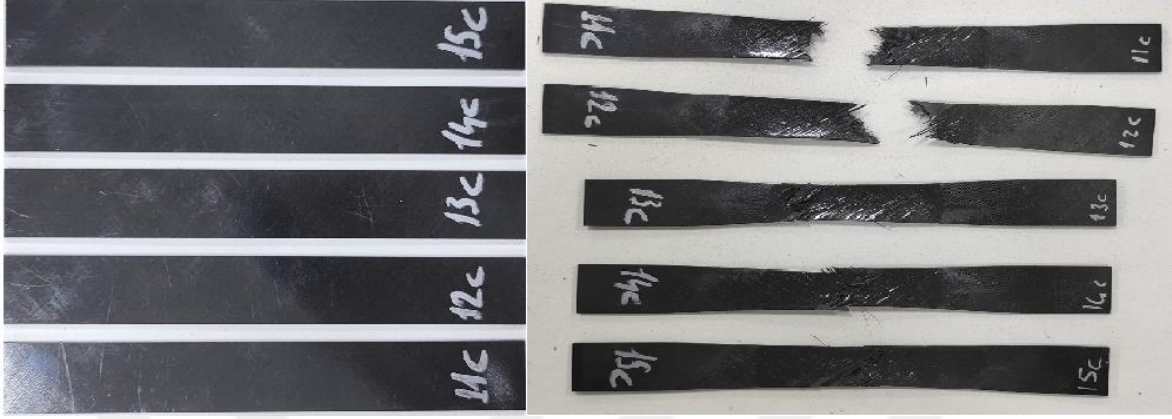
Çizelge 4.22. Varyant C3 kupon numunelerinin test sonuçları

No	Numune Adı	Düzlem İçi Kayma Dayanımı (MPa)	Düzlem İçi Kayma Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (v)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
1	11c	155	4,94	17600	0,654	25,12	2,259
2	12c	152	5,04	17100	0,654	25,06	2,249
3	13c	154	5,07	17200	0,666	25,1	2,216
4	14c	153	5,11	17200	0,653	25,11	2,238
5	15c	155	5,1	17700	0,654	25,11	2,267

Çizelge 4.23. Varyant C3 ortalama mekanik özellikleri

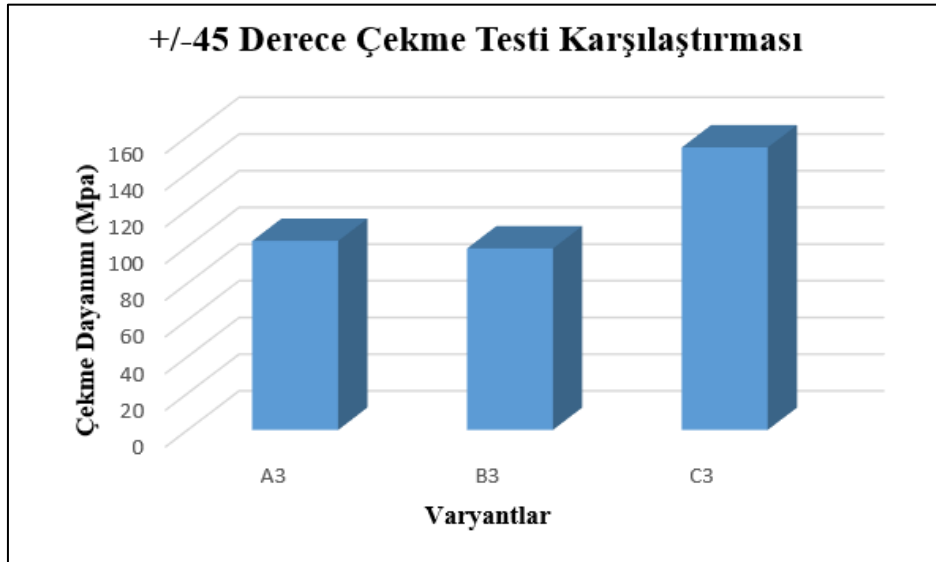
Seri	Düzlem İçi Kayma Dayanımı (MPa)	Düzlem İçi Kayma Modülü (GPa)	Maks. Kuvvet (N)	Poisson Oranı (v)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
x	154	5,05	17400	0,656	25,1	2,246
s	1,43	0,0695	261	0,00542	0,02345	0,01989
n [%]	0,93	1,38	1,51	0,827	0,09	0,89

Testler esnasında kupon numunelerinin test öncesi ve test sonrası görselleri Resim 4.17’de verilmiştir.



Resim 4.17. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası

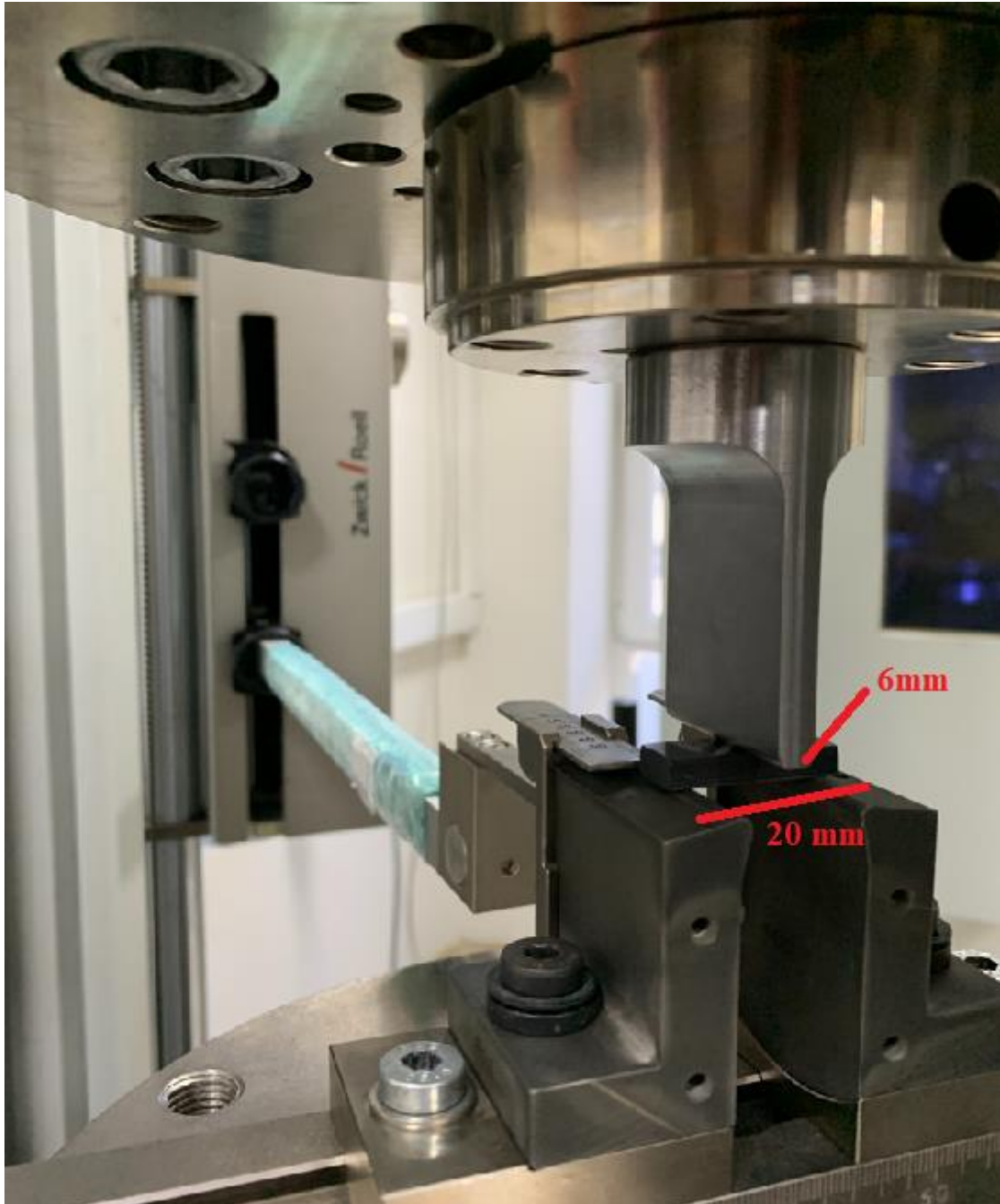
+/- 45 serimli numunlerin çekme testleri sonucuna göre hazırlanmış karşılaştırma grafiği Şekil 4.16’da verilmiştir. Varyant B düşük kürlleme sıcaklığı nedeni ile zayıf yapışma nedeni ile en düşük dayanım değerini göstermiştir. En yüksek üretim sıcaklığına sahip olan Varyant C üretimi plakada ise en yüksek dayanım görülmüştür.



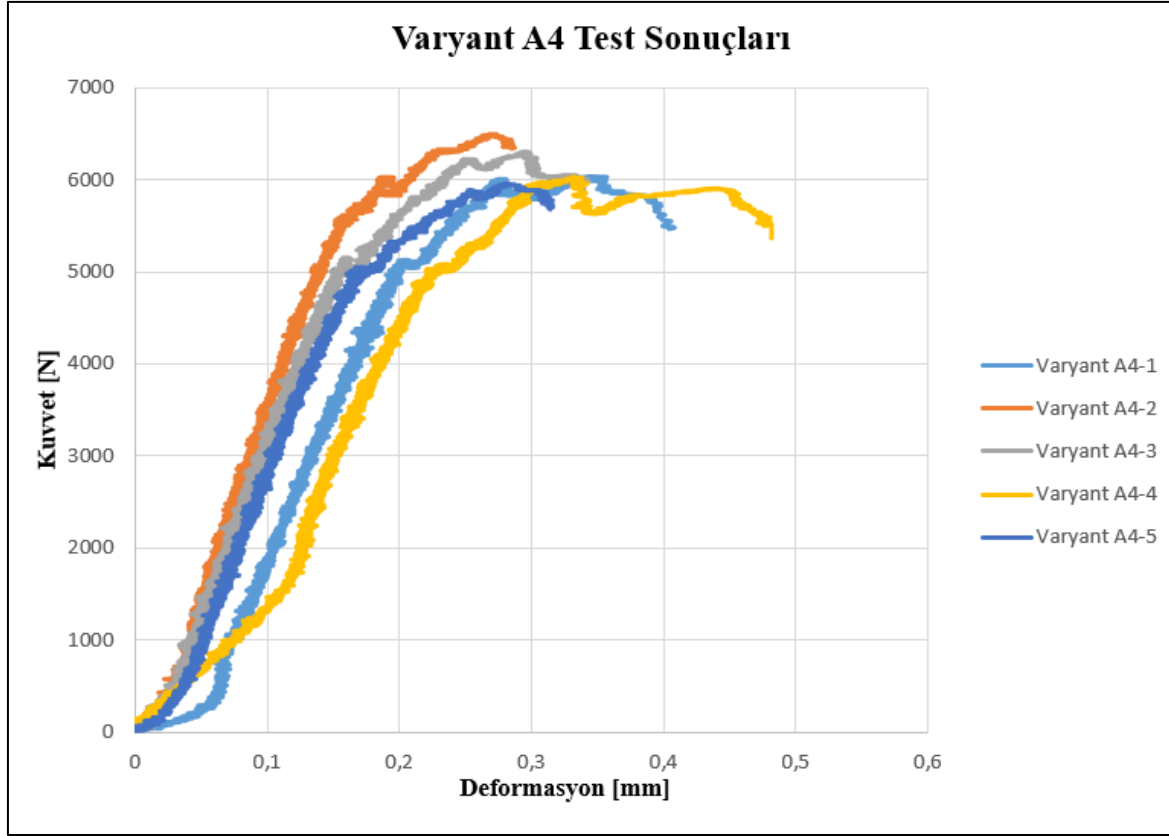
Şekil 4.16. +/- 45 derece çekme testi numunelerinin karşılaştırılması

4.3.4. Üç nokta eğilme testi sonuçları

ASTM 2344 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen üç nokta eğilme testleri tüm varyantlarda üretimi yapılmış kupon numunelerine uygulanmıştır. Standartlara uygun olan test rigi görseli Resim 4.18’de verilmiştir. Temas uzaklığı 20 mm iken temas yarıçapı 6 mm’dir. Beş numune için tekrarlanan testlerin kuvvet-deformasyon grafikleri Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilmiştir.



Resim 4.18. Üç nokta eğilme test rigi



Şekil 4.17. Varyant A4 test sonuçları

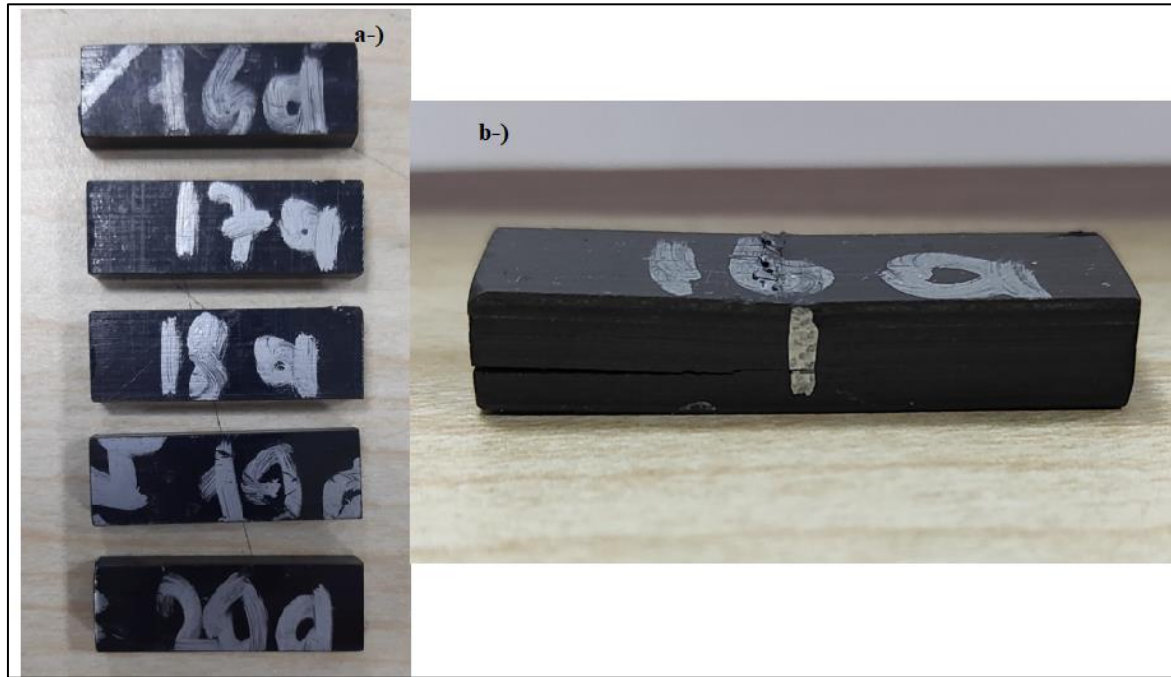
Çizelge 4.24. Varyant A4 kupon numunelerinin test sonuçları

No	Numune Adı	Maks. Kuvvet (N)	Dayanım (MPa)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kırılma Türü
1	16a	6034	83,4	5,312	10,21	Katmanlar arası kayma
2	17a	6494,1	88,6	5,39	10,2	Katmanlar arası kayma
3	18a	6304,5	87,5	5,294	10,21	Katmanlar arası kayma
4	19a	6030,2	84,5	5,251	10,19	Katmanlar arası kayma
5	20a	5952,3	83,6	5,253	10,17	Katmanlar arası kayma

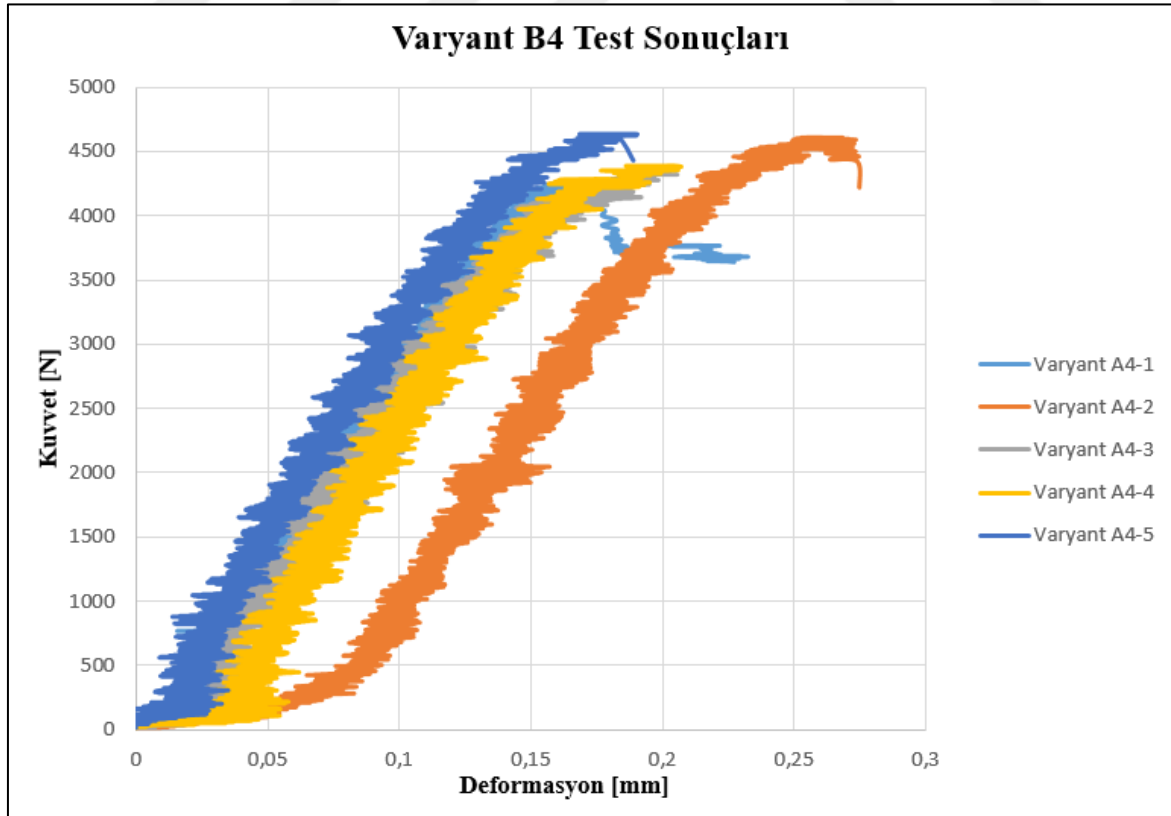
Çizelge 4.25. Varyant A4 ortalama mekanik özellikleri

Seri	n=5	Maks. Kuvvet (N)	Dayanım (MPa)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)
x		6163	85,5	5,3	10,2
s		228,2	2,37	0,05677	0,01673
n [%]		3,7	2,77	1,07	0,16

Kupon numunelerine ait olan test öncesi ve sonrası görselleri Resim 4.19’da verilmiştir.



Resim 4.19. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası



Şekil 4.18. Varyant B4 test sonuçları

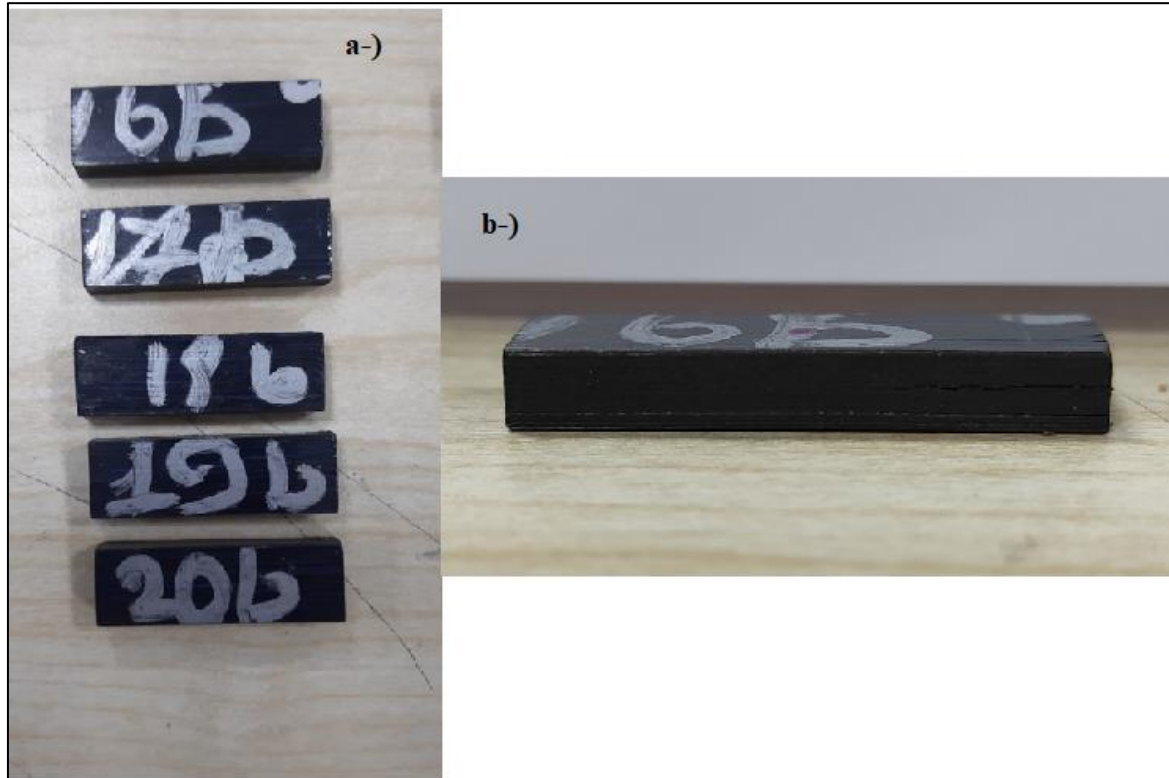
Çizelge 4.26. Varyant B4 kupon numunelerinin test sonuçları

No	Numune Adı	Maks. Kuvvet (N)	Dayanım (MPa)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kırılma Türü
1	16b	4257,9	58,5	5,341	10,22	Katlar arası kayma
2	17b	4609,6	64,2	5,266	10,23	Katlar arası kayma
3	18b	4323,5	60	5,278	10,24	
4	19b	4387,4	60,4	5,348	10,19	Katlar arası kayma
5	20b	4635,3	64,4	5,303	10,18	

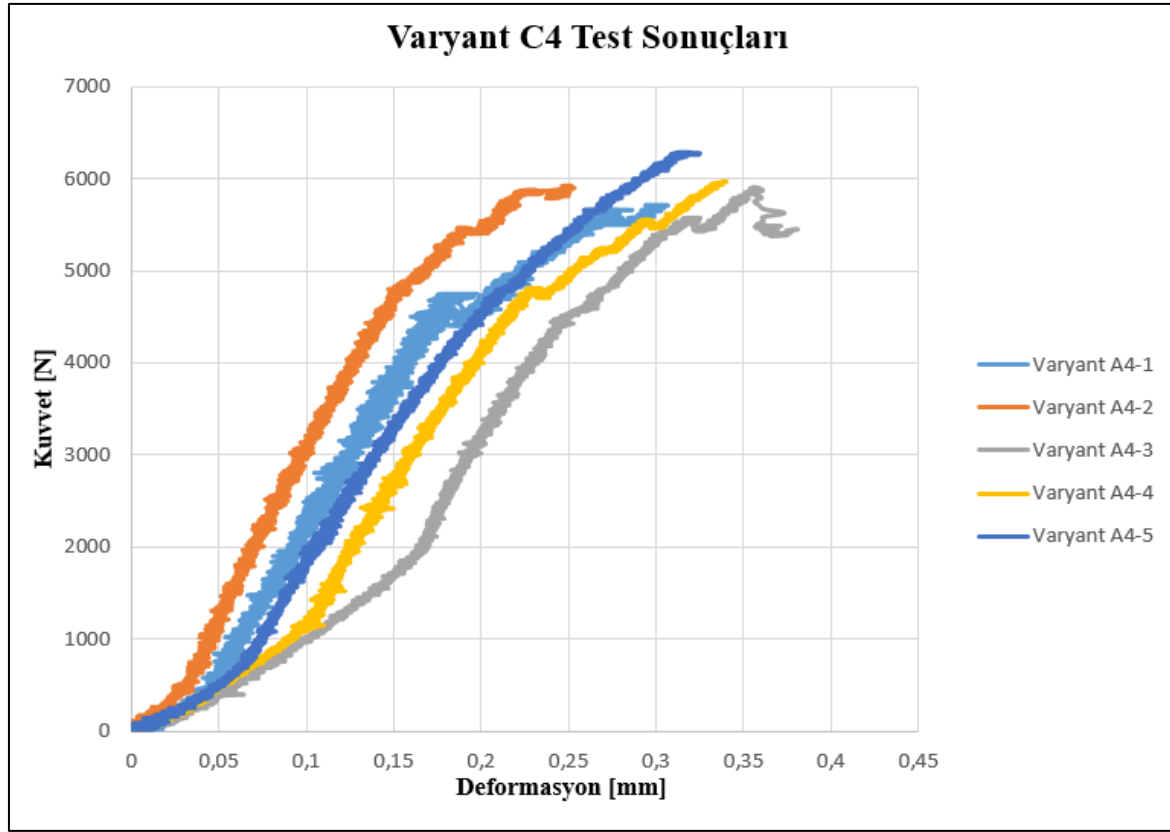
Çizelge 4.27. Varyant B4 ortalama mekanik özellikleri

Seri n=5	Maks. Kuvvet (N)	Dayanım (MPa)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)
x	4442,7	61,5	5,307	10,21
s	170,6	2,65	0,03666	0,02588
n [%]	3,84	4,31	0,69	0,25

Kupon numunelerine ait olan test öncesi ve sonrası görselleri Resim 4.20’de verilmiştir.



Resim 4.20. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası



Şekil 4.19. Varyant C4 test sonuçları

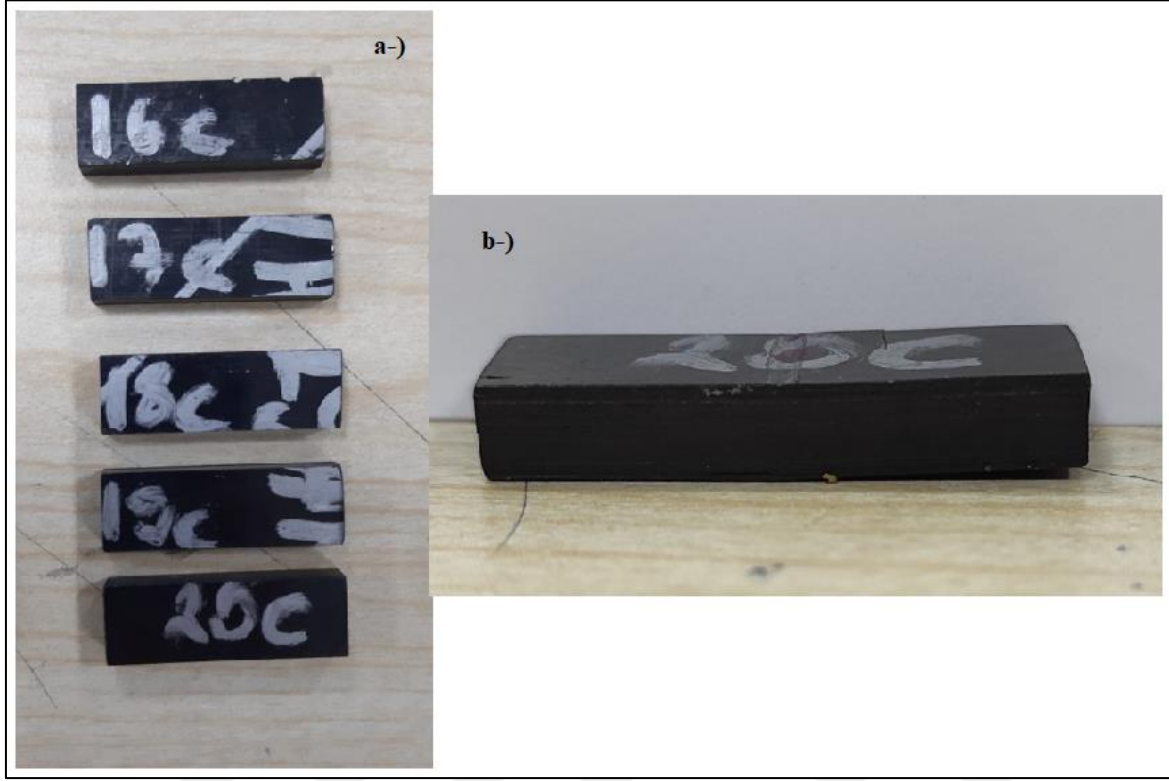
Çizelge 4.28. Varyant C4 kupon numunelerinin test sonuçları

No	Numune Adı	Maks. Kuvvet (N)	Dayanım (MPa)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kırılma Türü
1	16c	5719,5	78,6	5,338	10,22	
2	17c	6009,4	81,9	5,403	10,19	
3	18c	5907,3	81,8	5,328	10,17	Katlar arası kayma
4	19c	5994,9	83,6	5,286	10,18	Katlar arası kayma
5	20c	6422,2	89,9	5,265	10,18	Katlar arası kayma

Çizelge 4.29. Varyant C4 ortalama mekanik özellikleri

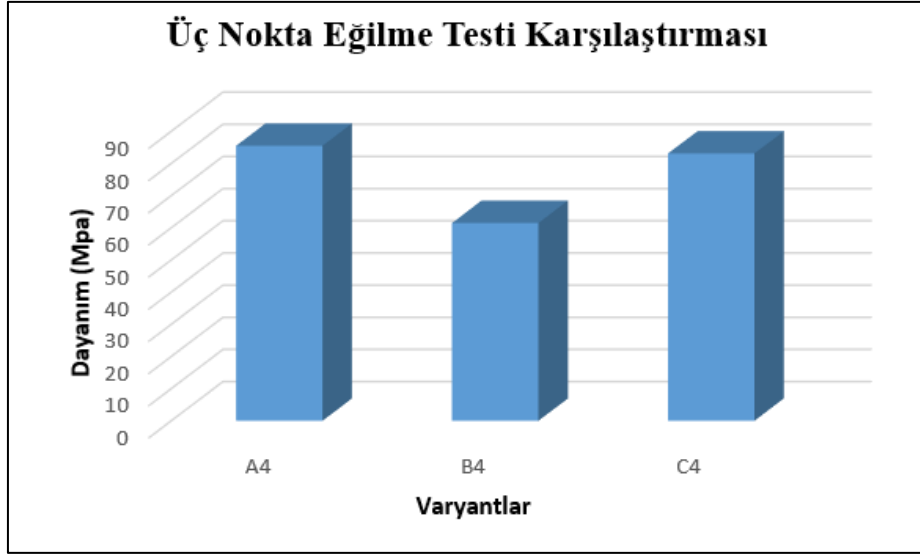
Seri	n=5	Maks. Kuvvet (N)	Dayanım (MPa)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)
x		6010,6	83,1	5,324	10,19
s		257,4	4,16	0,05333	0,01924
n [%]		4,28	5,01	1	0,19

Kupon numunelerine ait olan test öncesi ve sonrası görselleri Resim 4.21’de verilmiştir.



Resim 4.21. Kupon numune görselleri a-) test öncesi b-) test sonrası

Üç nokta eğilme testi için hazırlanmış karşılaştırma grafiği Şekil 4.20’de verilmiştir. Karşılaştırmada görüldüğü gibi en düşük dayanım Varyant B üretimi numunelerdedir. Bunun temel nedeninin düşük sıcaklıklarda katmanlar arası yapışmada ki zayıflık olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Varyant A ve Varyant C arasındaki değer çok yakındır, buda yüksek sıcaklıklarda dayanımın etkisinin düştüğünü göstermektedir.



Şekil 4.20. Üç nokta eğilme testi numunelerinin karşılaştırılması

4.3.5. Kupon seviyesi mekanik testlerin değerlendirmesi

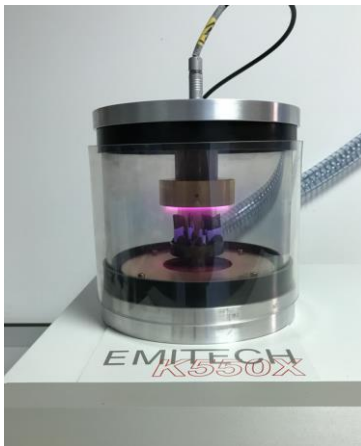
Fiber serim yönlerine bağlı gerçekleştirilen çekme testleri ve katmanlar arası kayma dayanımının gözlemlenmesi için gerçekleştirilen mekanik testler neticesinde kritik olarak görünen üretimdeki sıcaklık parametresinin etkisi gözlemlenmiştir. En düşük üretim sıcaklığı olan Varyant B numunelerinin yapılan tüm mekanik testlerde en düşük değerleri vermesi erime sıcaklığına yakın sıcaklıklarda yapılan üretimlerde yeterince yüzey yapışmalarının gerçekleşmediğini göstermektedir. Varyant A ve Varyant C numunelerinde ise mekanik dayanımlar Varyant B'nin üzerinde görülmektedir. Çekme değerlerinde Varyant C değerleri Varyant A değerlerinin üzerinde iken eğilme testinde çok küçük bir fark ile Varyant B'nin dayanım değeri Varyant C'nin dayanım değerinin üzerinde gelmiştir. Bu sonuçlar neticesinde özellikle sıcaklık parametresinin üretim üzerindeki etkisi net bir şekilde görülmüştür. Özellikle üretilen plakanın kalınlığı arttıkça sıcaklık etkisi daha belirginleşmiştir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan üretimlerde katmanlar arası yapışmanın başarılı bir şekilde yapıldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle burada en ideal üretim sıcaklığı olarak 400°C olarak belirlenmiştir ve komponent seviyesi üretimde otoklav döngüsünde kullanılacak sıcaklık değeri olarak kabul edilmiştir.

4.4. Kupon Numunelerinin Elektron Mikroskop İncelemeleri

Elektron mikroskobu ile numune incelemesi yapılırken öncelikle numunelerin hazırlıkları yapıldı. Kırına uğramış numuneler kontrol edilecek yüzeylere zarar verilmeden kesilerek kontrol numunesi boyutlarına getirildi. Daha sonra siyah karbon pasta ile kaplanarak iletkenliği artırıldı. Resim 4.22’de karbon pasta uygulaması gösterilmiştir. Daha sonra numuneler elektron mikroskobunda (SEM) daha net bir görüntü alabilmek için altın ile kontrol yüzeyi kaplanmıştır. Kaplama işlemi Resim 4.23’de gösterilmiştir. Ayrıca kaplanmış olan numune yüzeyleri içinde görsel Resim 4.24’de verilmiştir. Tüm proses tamamlandıktan sonra kontrol numuneleri alüminyum damga üzerinden incelenmek için cihaza yerleştirilir. Cihaz içerisinde bölgeler incelenerek daha detaylı görüntü alınmasının istenildiği bölgelere yaklaşılarak detaylı görüntüler alınır. Bu bölümde testleri gerçekleştirilen tüm kupon numunelerinin birer örneklerinin SEM görüntüleri üzerinden malzemenin iç yapısı ile ilgili inceleme yapılacaktır.

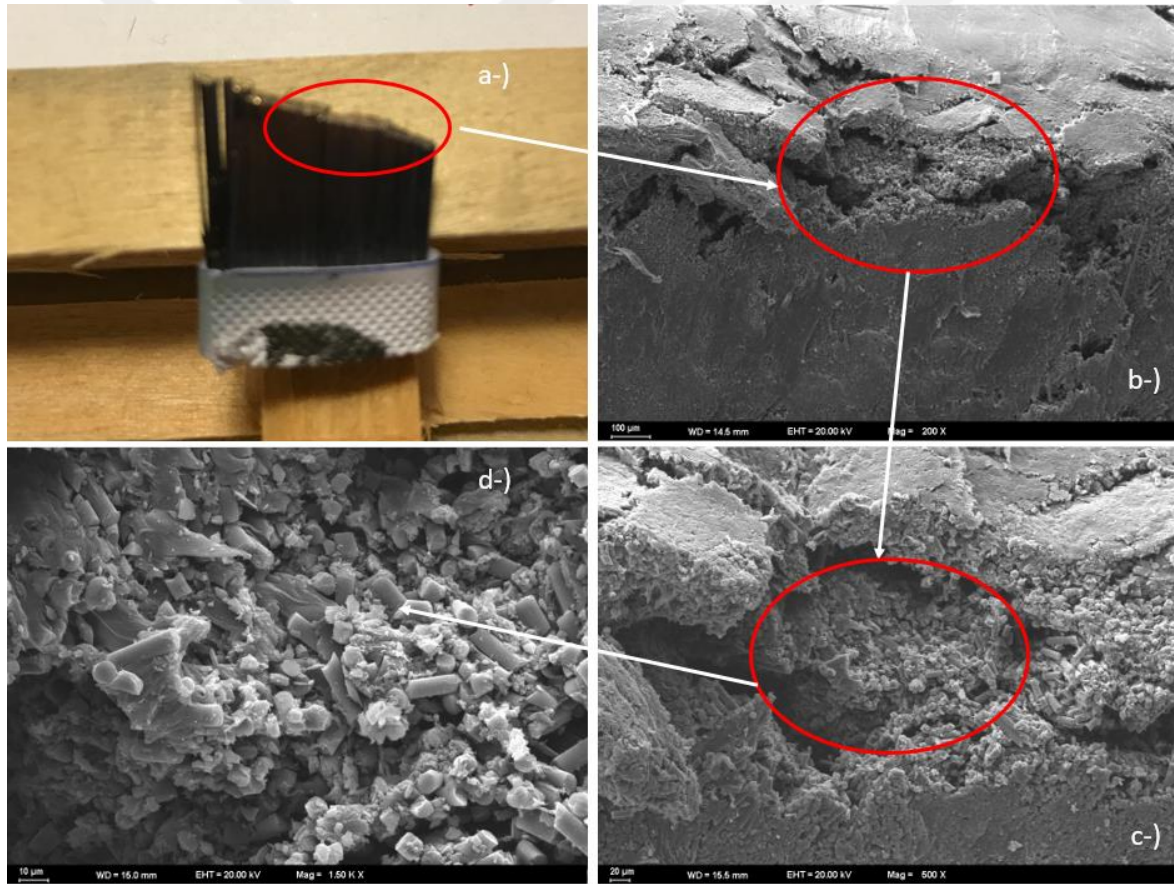


Resim 4.22. Karbon pasta uygulanması



Resim 4.23. Altın kaplama işleminin uygulanması

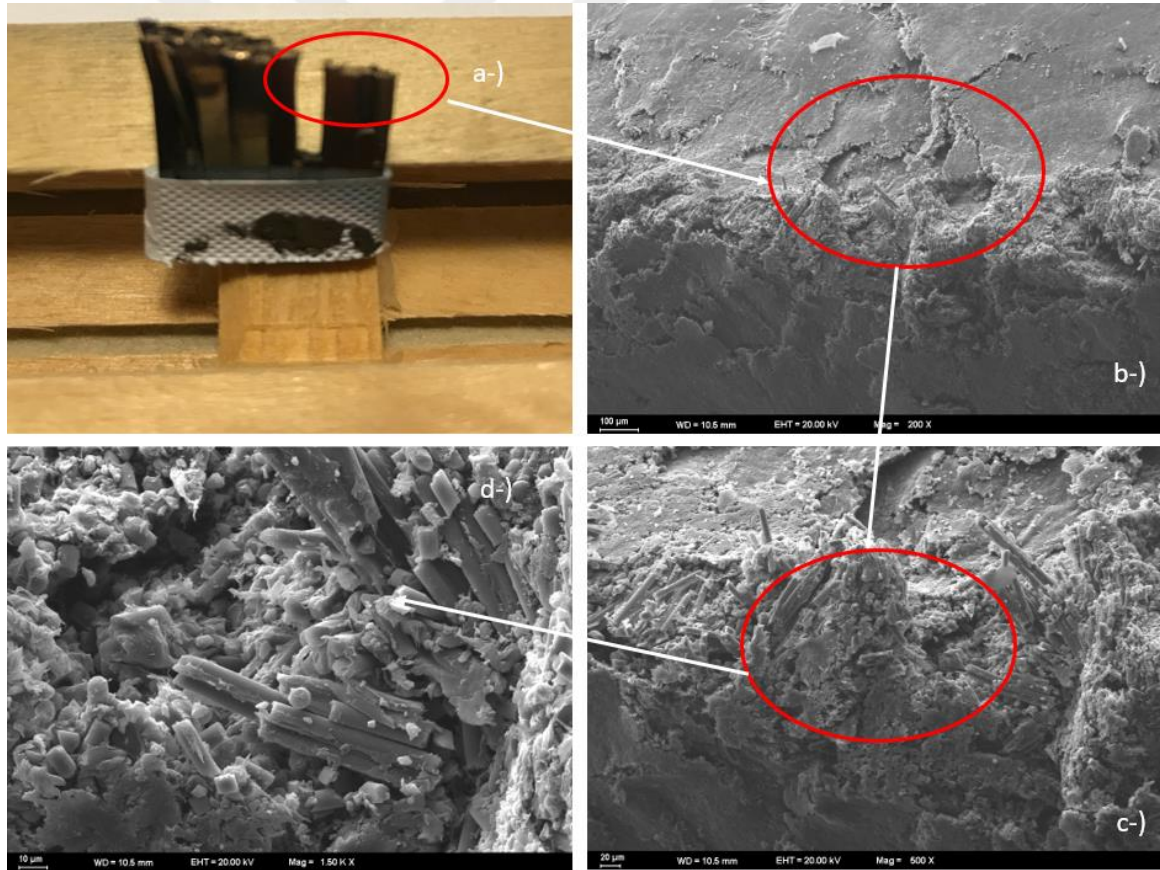
Resim 4.25(a)'da kırım olan kupon numunesinin kırılma yüzeyi görülmektedir. Resim 4.25(b)'de 200X büyütme ile yüzey görüntüsü görülmektedir. Bu görüntüden matris ile fiber bağlantısının sağlıklı bir şekilde kurulduğu gözlemlenmektedir. Fiberlerin daha detaylı görüntüsü için Resim 4.25(c)'de 500X büyütme ile gösterilmiştir. Detaylı görüntü üzerinde fiberlerin etrafının matris tarafından sarıldığını ve yapışmanın kuvvetli olduğunu görmekteyiz. Resim 4.25(d)'de ise 1500X büyütme ile fiber bölgesine yaklaşılmıştır. Fiberlerin matris bağlantısının homojen olarak sağlandığı ve kırımların temel olarak fiberlerden meydana geldiği gözlemlenmiştir. Genel olarak Varyant A numunesi için fiber-matris bağlantısının homojen bir şekilde kurulduğunu gözlemleyebiliriz. Bu nedenle de daha önce testler ve tahribatsız muayene görsellerini destekler bir görüntü alınmıştır.



Resim 4.26. Varyant B numunesi SEM görüntüsü a-) kırım yüzeyi b-) 200X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü d-) 1500X SEM görüntüsü

Resim 4.46'da Varyant B numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.46(a)'da kırımın yüzeyi gösterilmiştir. Resim 4.26(b)'de 200X büyütme oranı ile kırım yüzeyine yaklaşılmıştır. Yaklaşılan bölgede ki görüntü matris dağılımının yeterli seviyede homojen

olmadığı ve genel olarak fiberlerin dış yüzeyinden tutulduğu gözlemlenmiştir. Resim 4.26(c)'de 500X büyütme oranı ile belirtilen bölgeye yaklaşılmıştır. Yaklaşılan bölge de fiberlerin matris ile bağlantısındaki zayıflıklar nedeni ile kırım esnasından fiberlerin matristen ayrıldığı bölgelerin varlığı gözlemlenmiş ve aynı zamanda matris malzemesinin belirli bölgelerde birikme yaptığı gözlemlenmiştir. Daha detaylı olarak bölgeye yaklaşıldığında Resim 4.26(d)'de görüldüğü gibi 1500X büyütme oranı ile, bölgede ki matrisin homojen dağılmadığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak düşük üretim sıcaklığında yeterince ergime sağlayamadığı düşünülebilir. SEM görüntüleri ile mekanik testler ve ultrasonik tahribatsız muayene sonuçları birbirini destekler niteliktedir. Fiber-matris bağlantısının zayıf olması numune üzerinden hatalar ve mekanik dayanım değerlerinde ki düşüşleri açıklamaktadır.



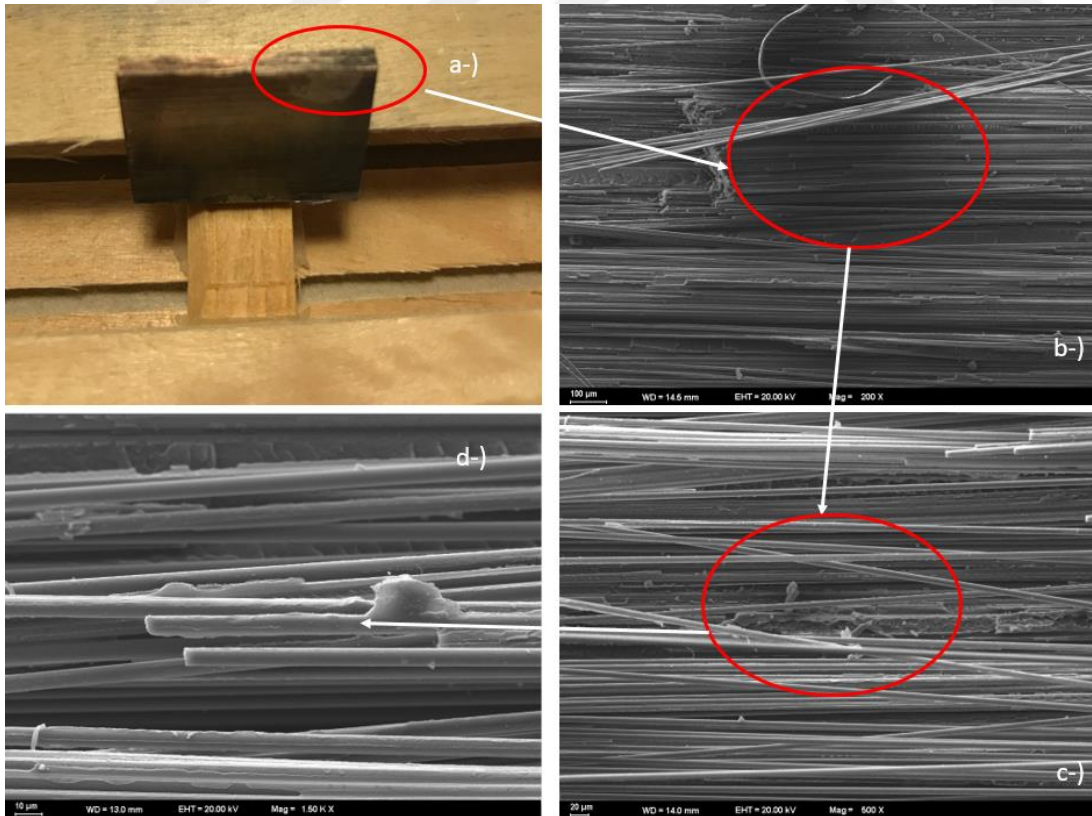
Resim 4.27. Varyant C numunesi SEM görüntüsü a-) kırım yüzeyi b-) 200X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü d-) 1500X SEM görüntüsü

Resim 4.27'de Varyant C numunesine ait olan SEM görüntüleri verilmiştir. Resim 4.27(a)'da kırım yüzeyi gösterilmiştir. Resim 4.27(b)'de 200X büyütme oranı ile kırılma yüzeyi daha detaylı olarak incelenmiştir. 200X büyütme oranı ile incelenen kısımda matris

dağılımının fiberleri büyük ölçüde kapsadığını ve homojen bir dağılımın var olduğu göstermektedir. Resim 4.27(b)'de bu bölgeye daha fazla yaklaşarak 500X büyütme oranı ile görüntü alınmıştır. Bu bölgede fiberlerin genel olarak matris malzemesinden ayrılmadan direk fiber kırıkları ile parçanın hasar aldığı gözlemlenmiştir. Bu durumda fiber-matris yapışma kalitesinin üretim esnasında başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Resim 4.27(d)'de ise büyütme oranı 1500X oranında kullanılarak fiber bölgesine yaklaşılmıştır. Bu görüntü üzerinden fiber-matris bağlantı yüzeylerinin başarılı bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. Matris malzemesinin sadece yüzeydeki fiberlere değil, iç bölgede ki fiberlere de nüfuz ettiği gözlemlenmektedir. Nihai olarak Varyant C için alınmış SEM görüntüleri ultrasonik tahribatsız muayene ve mekanik testleri doğrular niteliktedir. Fiber-matris bağlantısının başarılı olduğu gözlemlenmektedir.

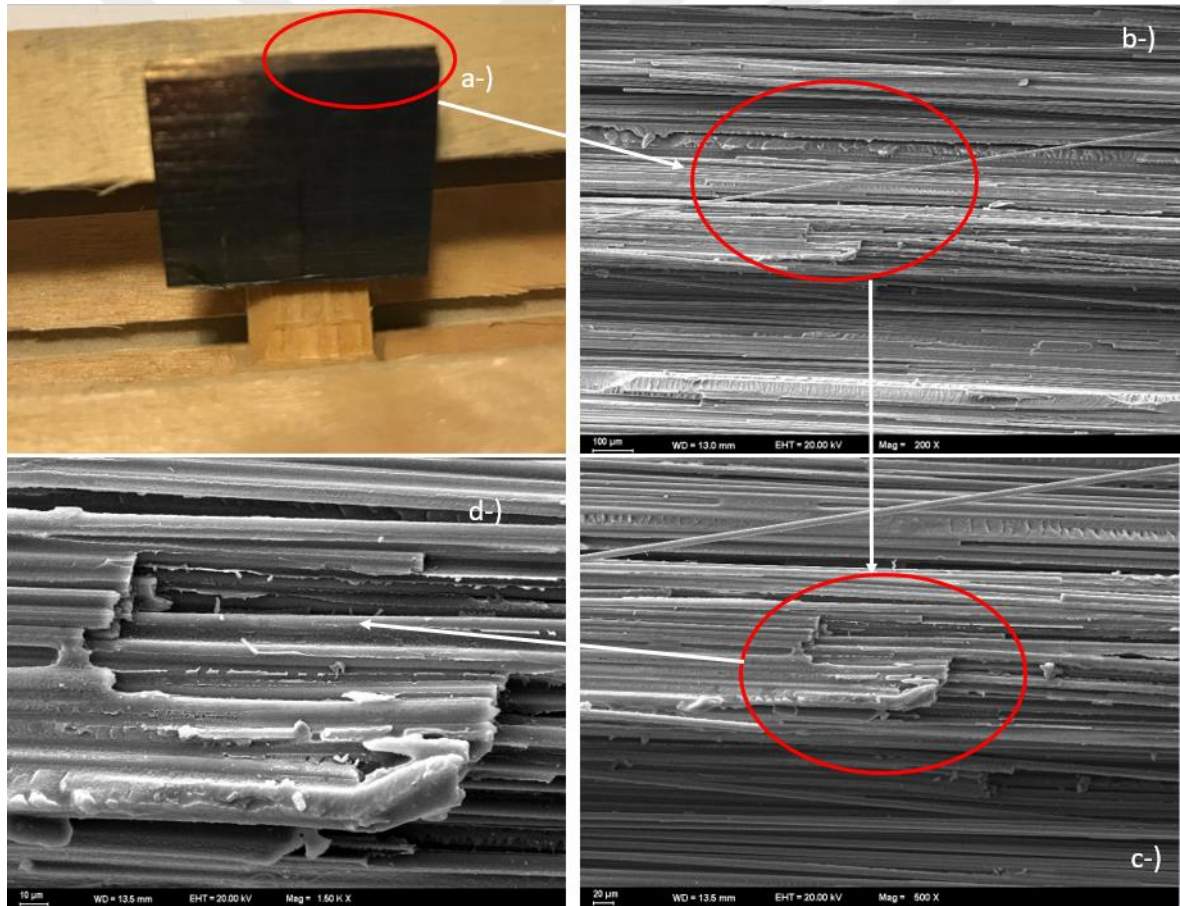
4.4.2. 90 derece çekme testi SEM görüntüleri

90 derece çekme numunelerinden Varyant A numunesi için kırım bölgesinde yapılan SEM incelemesinin görselleri Resim 4.28'de verilmiştir.



Resim 4.28. Varyant A numunesi SEM görüntüsü a-) kırım yüzeyi b-) 200X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü d-) 1500X SEM görüntüsü

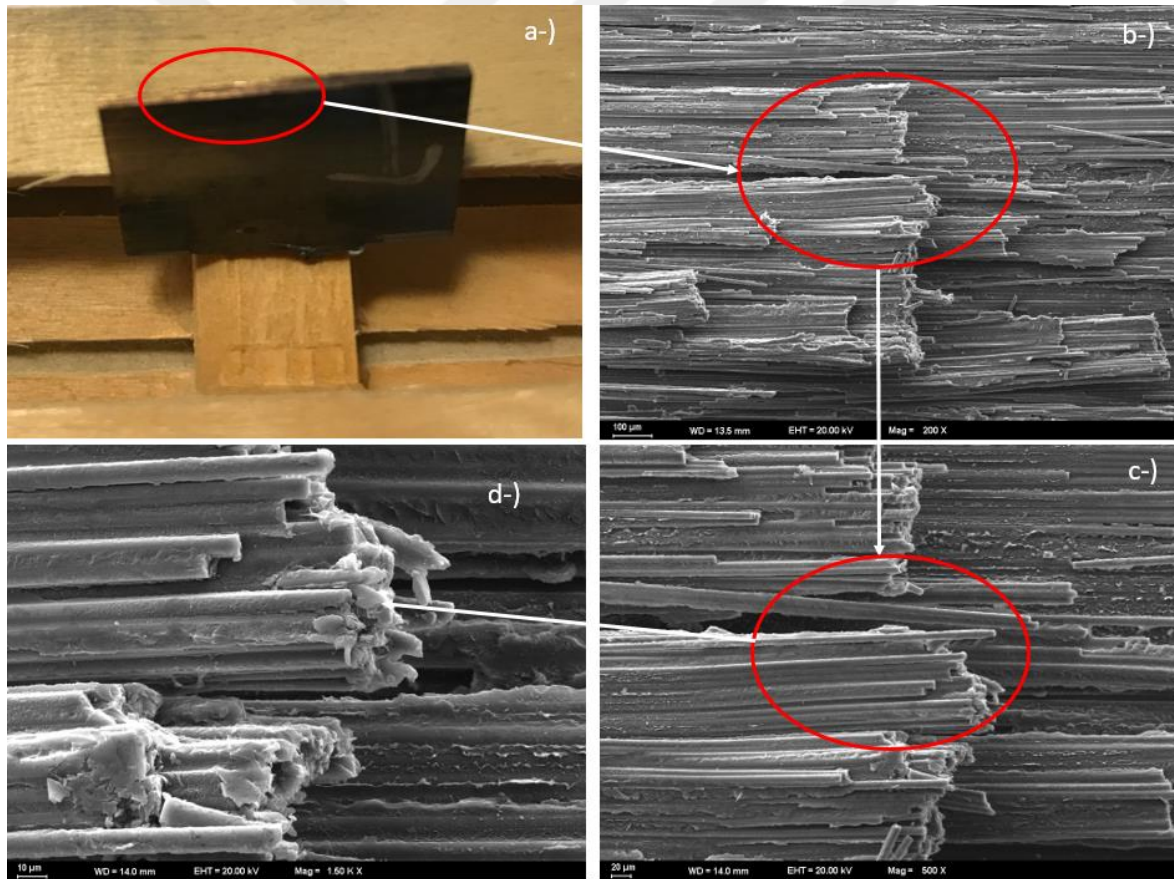
Resim 4.28(a)'da 90 derece üretilmiş Varyant A numunesinin kırım bölgesi gösterilmiş ve kırım bölgesinde ki inceleme alanı belirtilmiştir. Resim 4.28(b)'de kırım bölgesine 200X büyütme oranı ile yaklaşılmıştır. Burada incelenen kısım fiber-matris bağlantısının homojen olarak oluştuğudur ve görüldüğü gibi fiberlerin etrafı matris malzemesi tarafından sarılmış olarak görülmektedir. Resim 4.28(c)'de ise fiber bölgesi 500X büyütme oranı ile incelenmiştir. Bu görüntüde de matris bağlantısının sağlıklı bir şekilde yapıldığı gözlemlenirken kırımların fiber kırılmalarından oluştuğu gözlemlenmektedir. Resim 4.28(d)'de ise 1500X büyütme ile fiberlere yaklaşılmıştır. Burada SEM görüntüsünde de görüldüğü gibi matrisler fiberleri çevrelemiş ve güçlü bir bağ oluşturmuştur. Görüntüler mekanik testleri ve muayene işlemlerini destekler niteliktedir.



Resim 4.29. Varyant B numunesi SEM görüntüsü a-) kırım yüzeyi b-) 200X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü d-) 1500X SEM görüntüsü

Resim 4.29'da 90 derece serimleri yapılan test kupon numunesine ait olan SEM görüntüleri verilmiştir. Resim 4.29(a)'da kupon numunesine ait olan kırım yüzeyi ve odaklanılan bölge gösterilmiştir. Resim 4.29(b)'de 200X büyütme oranı ile kırım yüzeyine yaklaşılmıştır. Bu

bölge de katmanlar arası yapışma yüzeylerinde zayıflıklar olduğu gözlemlenebilmektedir. Aynı zamanda fiberlerin kırılmadan önce matris içerisinden ayrıldığı bölgelerin var olduğu gözlemlenmiştir. Daha detaylı bir görüntü için Resim 4.29(c)'de bu bölgeye 500X büyütme oranı ile yaklaşılmıştır. Bu bölgede de fiberlerin matris içerisinden kırılmadan ayrıldığı bölgelerin var olduğu daha net bir şekilde görülmektedir, bunun temel nedeni ise üretim sıcaklığı kaynaklı yeterli bir matris-fiber arayüzü bağlantısının oluşamaması gösterilmektedir. Resim 4.29(d)'de 1500X yakınlaşma oranı ile bu bölge daha detaylı olarak incelenmiştir. İncelenen bölgede bazı bölgelerde matris malzemesinin yığıldığı görülmektedir. Bu yığılma kaynaklı homojen bir fiber-matris bağlantısının oluşamadığı gözlemlenmektedir. SEM görüntüleri neticesinde yapılan tahribatsız muayene ve mekanik testleri doğrular görüntüler elde edilmiştir.



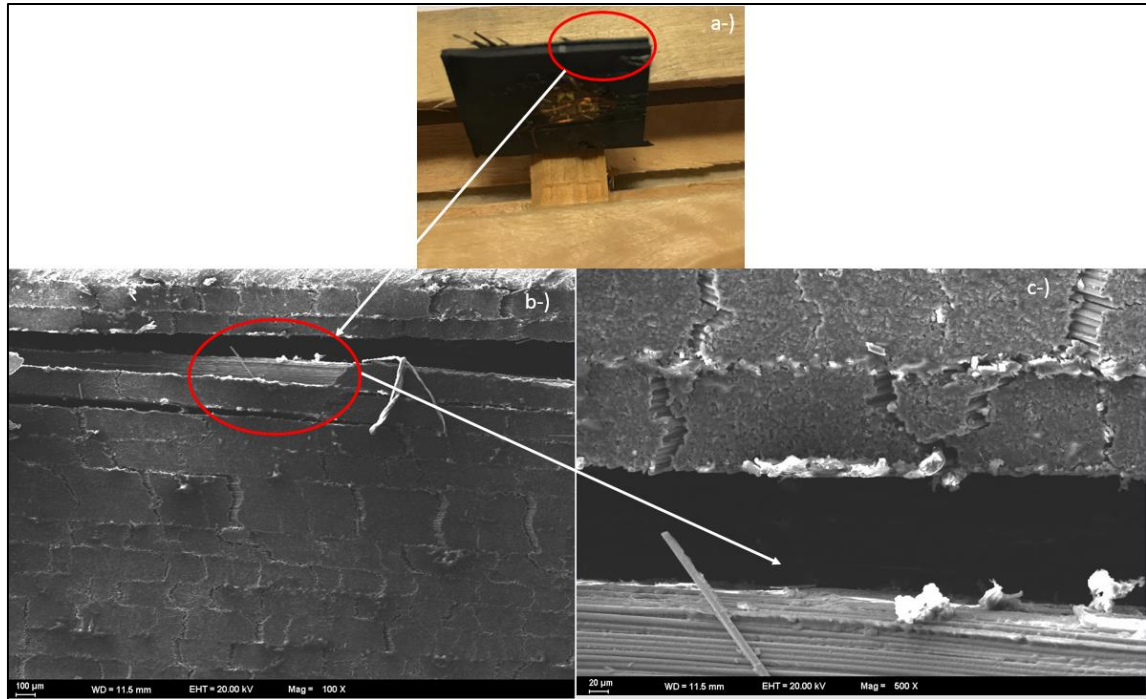
Resim 4.30. Varyant C numunesi SEM görüntüsü a-) kırım yüzeyi b-) 200X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü d-) 1500X SEM görüntüsü

Resim 4.30'da 90 derece serimle üretilen kupon seviyesi test numunesine ait olan SEM görüntüleri yer almaktadır. Resim 4.30(a)'da kırıma uğramış olan yüzey ve yüzey üzerinde

odaklanılan bölge gösterilmiştir. Resim 4.30(b)'de 200X yakınlaşma oranı ile bölge incelenmiştir. Bu bölgede fiberlerin matris tarafından homojen bir dağılım ile yapışmış olarak görülmektedir. Kırımların genel olarak fiberlerden kaynaklı olduğu gözlemlenmektedir. Belirtilen bölgeye daha fazla dikkat çekmek için Resim 4.30(c)'de 500X ile yakınlaşma sağlanarak bölge incelenmiştir. 500X yakınlaşma ile alınan görüntülerde de fiber-matris bağlantısının homojen bir şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Resim 4.30(d)'de 1500X yakınlaşma oranı ile alınan görselde fiber bölgesi daha detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu görsel üzerinde fiberlerin matris tarafından uygun ve homojen bir şekilde sarıldığı gözlenmektedir. Ayrıca kırılmalarında fiberlerden meydana geldiği gözlenebilmektedir. Varyant C için yapılan SEM incelemelerinde mekanik testleri ve ultrasonik muayeneyi doğrulamaktadır. Ayrıca fiber-matris bağlantısındaki homojenizasyon nedeni ile parça üzerinde ki boşluk oranlarında istenilen seviyelerde kalarak başarılı bir üretim yapılabilmektedir.

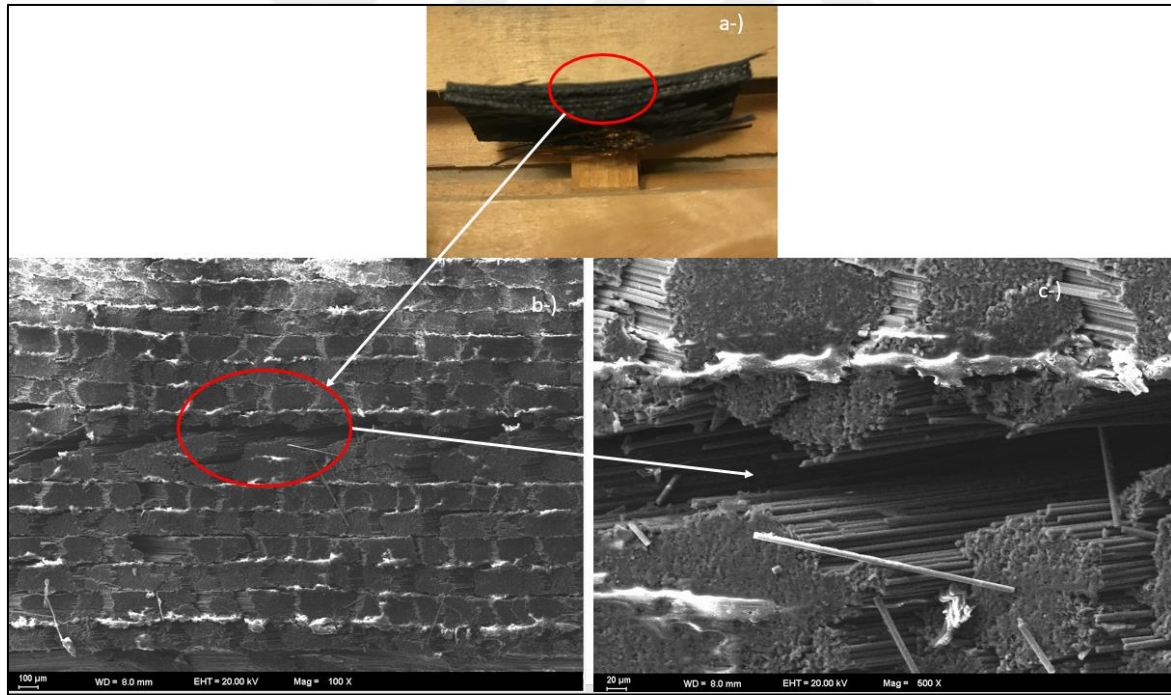
4.4.3. +/- 45 derece çekme testi SEM görüntüleri

+/- 45 serim ile üretilen test numunelerinden Varyant A için hazırlanmış görüntüler Resim 4.31'de verilmiştir.



Resim 4.31. Varyant A numunesi SEM görüntüsü a-) yan yüzeyi b-) 100X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü

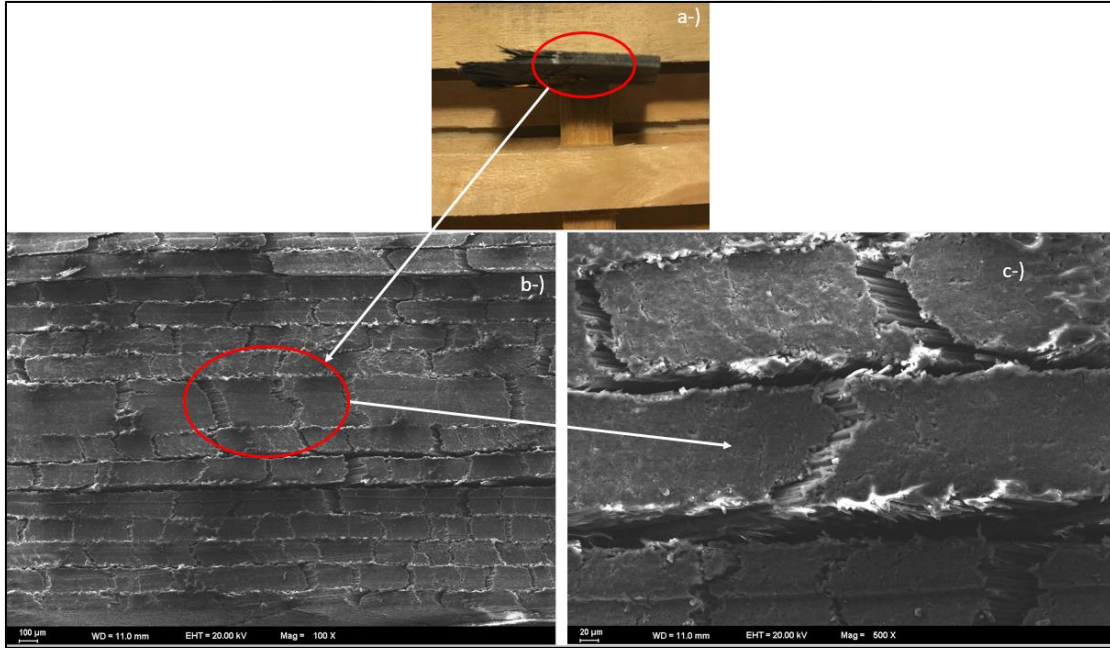
Resim 4.31(a)'da tabakalar arası kayma mukavemeti testinin gerçekleştirildiği test numunesinin yan yüzeyi görülmekte olup, yan yüzeyde odaklanılan alanda belirtilmiştir. Resim 4.31(b)'de 100X yakınlaşma oranı ile bölge yakından incelenmiştir. Bu görüntüde serim yönleri nedeni ile katmanlar arası açılı yerleşim gözlemlenebilmektedir. Görüntü olarak katmanlar arası açılmış bir bölgeye yaklaşılarak incelenmiştir. Genel olarak fiber-matris arayüzünde ki bağlantı başarılı olarak gözlemlenmiştir. Resim 4.31(c)'de 500X yakınlaşma oranı ile bölge incelendiğinde fiberlerin matris bağlantısı başarılı bir şekilde kurulmuş olarak gözlemlenmektedir. Ayrıca çekme testi esnasında fiber kırılmasından daha baskın bir mod olarak katmanlar arası ayrılmanın da var olduğu gözlemlenmektedir. SEM görüntüleri ile daha önce gerçekleştirilen mekanik test sonuçları ve ultrasonik tahribatsız muayene işlemleri arasında tutarlı bir korelasyon kurulabilmektedir. Varyant A sıcaklıkta üretilen plakalarda yeterli bir matris-fiber bağı kurulurken, matris dağılımıda homojen olarak gözlemlenebilmektedir.



Resim 4.32. Varyant B numunesi SEM görüntüsü a-) yan yüzeyi b-) 100X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü

Resim 4.32'de Varyant B olarak üretilmiş katmanlar arası kayma mukavemetinin belirlenmesi amacı ile yapılan mekanik test sonrası kırılma uğramış test numunesinin yan alan görüntüsü yer almaktadır. Resim 4.32(a)'da yer alan görüntü ile odaklanılan alan belirlenmiştir. Resim 4.32(b)'de 100X büyütme oranı ile ayrılan katman bölgesine

odaklanılmıştır. 100X görüntüsünde serim yönleri kaynaklı katmanlar arasındaki fark gözlemlenebilmektedir. Bu görüntü üzerinden tam olarak fiber-matris arayüzü için yorum yapmak çok sağlıklı görünmediği için bölgeye daha fazla odaklanma ihtiyacı doğmuştur. Resim 4.32(c)'de 500X büyütme oranı ile bölgeye yaklaşılmıştır. Bu görüntü ile katmanlar arası ayrımın gerçekleştiği bölgede fiberlerin tam olarak matris malzemesi ile kaplı olmadığı ve bu nedenle arayüz bağlantısında bir zayıflık olduğu görülebilir. Aynı zamanda odaklanılan bölge de yer yer matris malzemesinde birikme olduğu gözlemlenebilmektedir. Bu durumda temel olarak fiber-matris bağının homojen bir dağılım ile gerçekleşmediğini göstermektedir. Varyant B için yapılan SEM incelemesinde tespit edilen bulgular, mekanik testler ve ultrasonik tahribatsız muayene ile elde edilen bulgular ile paralellik göstermektedir. Varyant B üretiminde, belirlenen sıcaklığın malzemenin erime sıcaklığına yakın olması nedeni ile yeterince matris-fiber arayüzü bağı oluşamadığı SEM görüntüleri ile de görülmektedir.



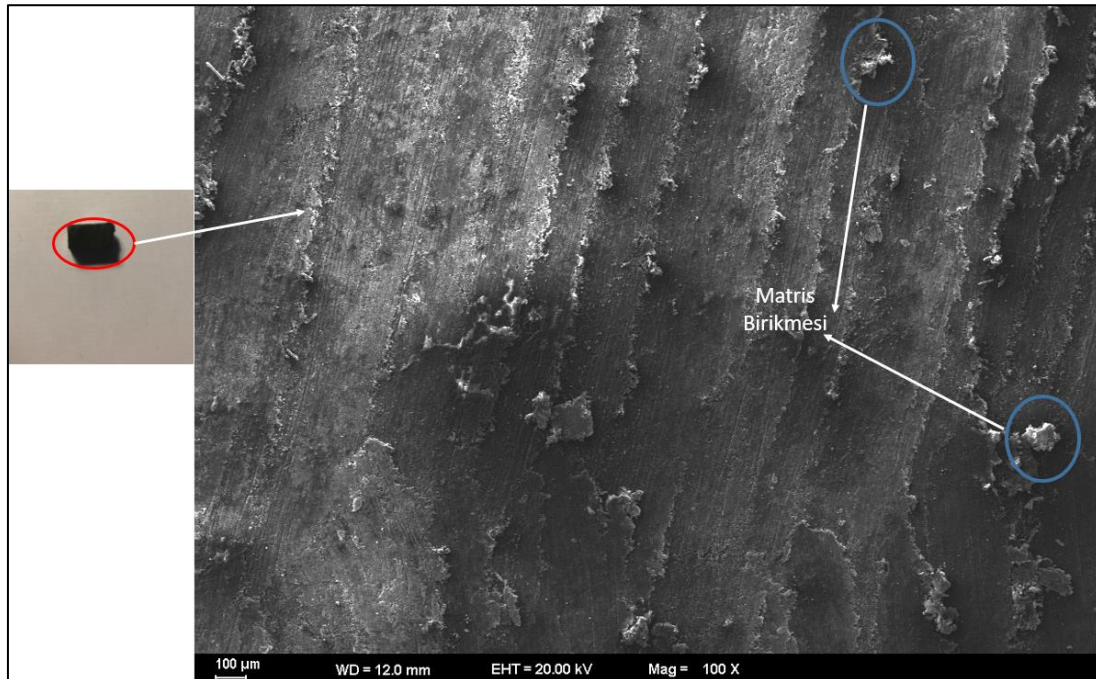
Resim 4.33. Varyant C numunesi SEM görüntüsü a-) yan yüzeyi b-) 100X SEM görüntüsü c-) 500X SEM görüntüsü

Varyant C olarak üretilmiş katmanlar arası kayma mukavemeti değerlerinin tespit edilmesi amacı ile yapılan çekme testlerine ait kupon numunesinin görseli Resim 4.33'te verilmiştir. Resim 4.33(a)'da kırım bölgesinin yan yüzeyinin ve odaklanılan bölge belirtilmiştir. Resim 4.33(b)'de 100X büyütme oranı yapılan yaklaşılan bölgede katmanlar arasında kaymaların ve ayrılmaların varlığı görülmektedir. Bu görüntü üzerinden serim yönlerinin farklılıklarında

görülebilmektedir. Yüzey üzerinden kontrol ettiğimizde yüzeyde fiber-matris bağlantısının sağlıklı bir şekilde kurulduğu gözlemlenmektedir. Bazı bölgelerde matris çatlaklarında gözlemlenebilmektedir. Resim 4.33(c)'de belirtilen bölgeye 500X büyütme oranı ile yaklaşılan bölgede fiber demetleri daha net bir şekilde görüntülenebilmiştir. Burada fiber demetleri üzerinde matris-fiber bağlantısının homojen bir şekilde olduğu gözlemlenebilmektedir. Katmanların arasında bir kısım matris malzemesi birikmesi gözlemlenmektedir ve bazı kırıklarda bu bölgelerde gözlemlenmektedir. Sonuç olarak Varyant C numuneleri belirlenen üretim sıcak parametrelerinden en yüksek sıcaklık değeri ile otoklav döngüsünde kürlenmiştir. Belirlenen sıcaklık ile matris-fiber bağlantısının homojen bir şekilde dağıldığı ve kurulan yapışma alanlarının kuvvetli bir şekilde olduğu gözlemlenebilmektedir. Varyant C için alınan SEM görüntüleri, mekanik testler ve ultrasonik tahribatsız muayane sonuçları ile paralellik göstermektedir. Ayrıca yapının hasar almayan bölgelerindeki hacim boşluk oranının düşük olmasında açıklamaktadır.

4.4.4. Üç nokta eğilme testi SEM görüntüleri

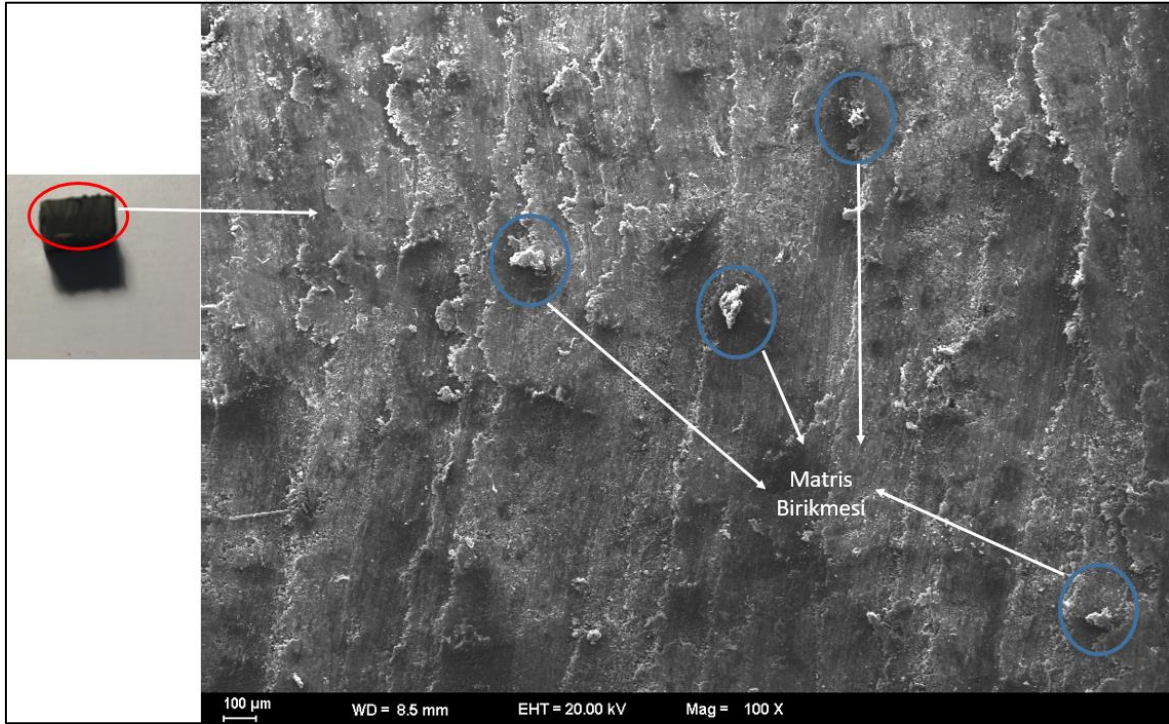
Üç nokta eğilme testi numunelerinde SEM incelemesi yapabilmek için parça da kesim işlemi yapılmıştır bu nedenle tam olarak fiber kırılmaları gözlemek mümkün olmamıştır. Temel olarak gözlemek istenilen kısımlar matris malzemesinin dağılımı ile ilgili fikir sahibi olmaktır.



Resim 4.34. Varyant A numunesi 100X SEM görüntüsü

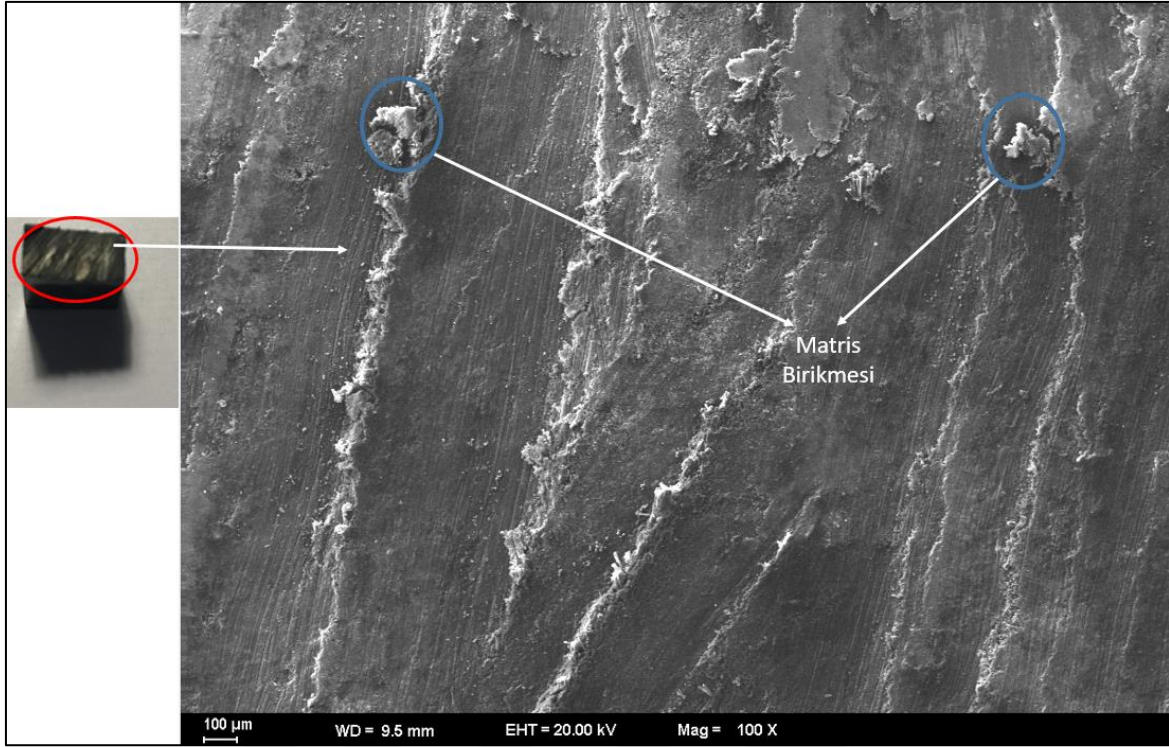
Varyant A numunesi üzerinden alınan SEM görüntüsünde Resim 4.34'te görüldüğü gibi belirtilen bölgelerde matris malzemesinin biriktiği görünmektedir. Bu birikmeler malzemenin dayanımını olumsuz etkilemektedir.

Varyant B numunesi için Resim 4.35'te verilen SEM görüntüsünde de belirtilen bölgelerde matris malzemesinin biriktiği görülmektedir. Varyant A'daki numuneye oranla daha çok bölgede görünen bu birikmeler malzeme dayanımını olumsuz etkilemiştir. Yapılan mekanik testlerde ve muayenelerde de alınan sonuçlar bu SEM görüntüsü ile paralellik göstermektedir. Bunun temel nedeni ise bu birikmeler bize aslında fiber-matris homojenizasyonunun zayıflığını göstermektedir. Matrisin fiberleri sarmak ve homojen bir dağılım oluşmadığı zaman matris malzemesi plakanın belirli bölgelerinde birikme yapmaktadır.



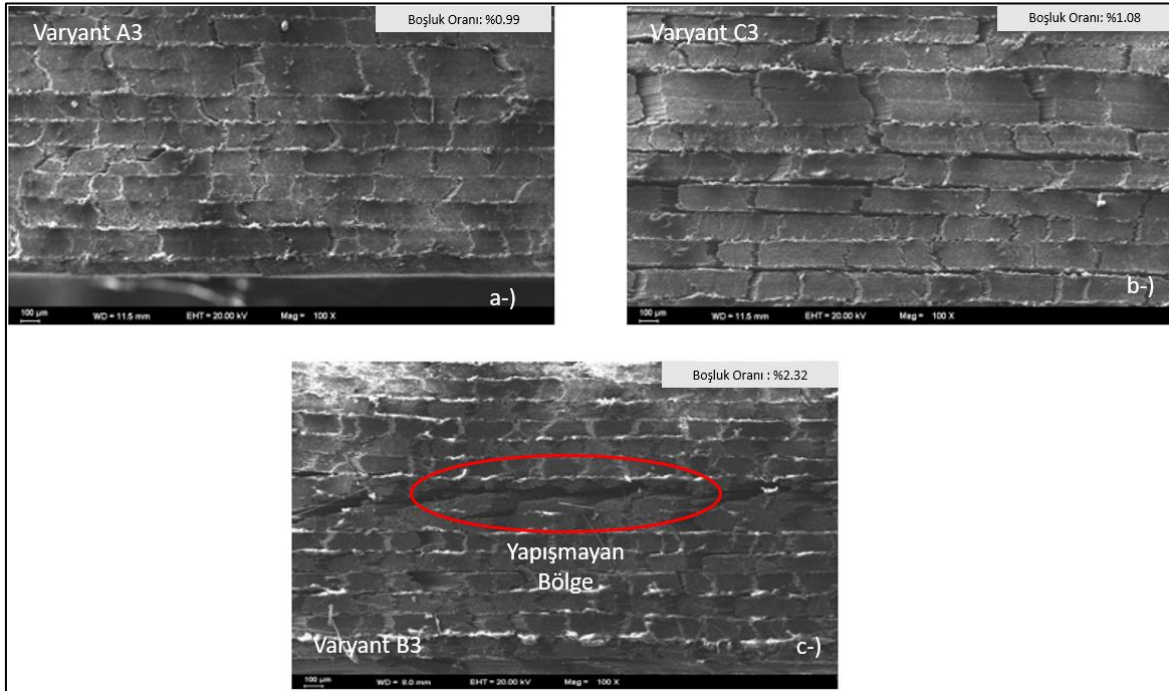
Resim 4.35. Varyant B numunesi 100X SEM görüntüsü

Varyant C numunesi için alınan SEM görüntüsü Resim 4.36'da gösterilmiştir. Alınan görüntü üzerinden bir karşılaştırma yaptığımızda matris birikme bölgeleri Varyant A'da görülene yakındır ve mekanik değerler olarak da bu iki numune değerleri yakın değerler göstermiştir.



Resim 4.36. Varyant C numunesi 100X SEM görüntüsü

4.4.5. Boşluk oranı testleri SEM görüntüleri



Resim 4.37. Boşluk oranı tespiti için alınan SEM görüntüsü a-)Varyant A test numunesi b-) Varyant C test numunesi c-)Varyant B test numunesi

Yukarıda boşluk oranı tespiti için yapılan testler için alınmış SEM görüntüleri Resim 4.37’de verilmiştir. Varyant A ve Varyant C numunelerinde üretim parametresi olan otoklavda kullanılan kürleme sıcaklığı kaynaklı olarak katmanlar arası yapışmanın başarılı bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Bunun temel nedeni ise malzemenin erime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta kürleme olması nedeni ile fiberler ile matris arasında homojen bir dağılım oluşmuş ve aradaki bağ kuvvetli bir şekilde oluşmuştur. Varyant B numunesinde ise katmanlar arasında yapışma problemleri gözlemlenmiştir. Bu hatalar nedeni ile de Varyant B’nin mekanik test sonuçları ile korelasyonlu bir sonuç göstermektedir. Varyant B için kullanılan üretim parametresinde ki düşük kürleme sıcaklığı nedeni ile fiberler ile matris malzemesi arasında yeterince bir bağ oluşamamıştır. Bu zayıf bağ nedeni ile katmanlar arasında yapışmayan bölgeler oluşmuştur. Bu bölgeler boşluk oranlarında yüksek değerler oluşmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda bu yapışmayan bölgeler arasındaki zayıflık nedeni ile mekanik test sonuçlarında da dayanım noktasında değerler düşmektedir. Sonuç olarak Resim 4.37’de görünen SEM görüntülerinden malzemenin üretim sıcaklığı olan kürleme sıcaklığının malzemenin yapısal olarak dayanımını etkilediğini görülmektedir. SEM görüntüleri neticesinde yüksek sıcaklık üretimi dayanımı olumlu etkilemiştir.

4.5. Komponent Numunelerinin Ultrasonik Test Sonuçları

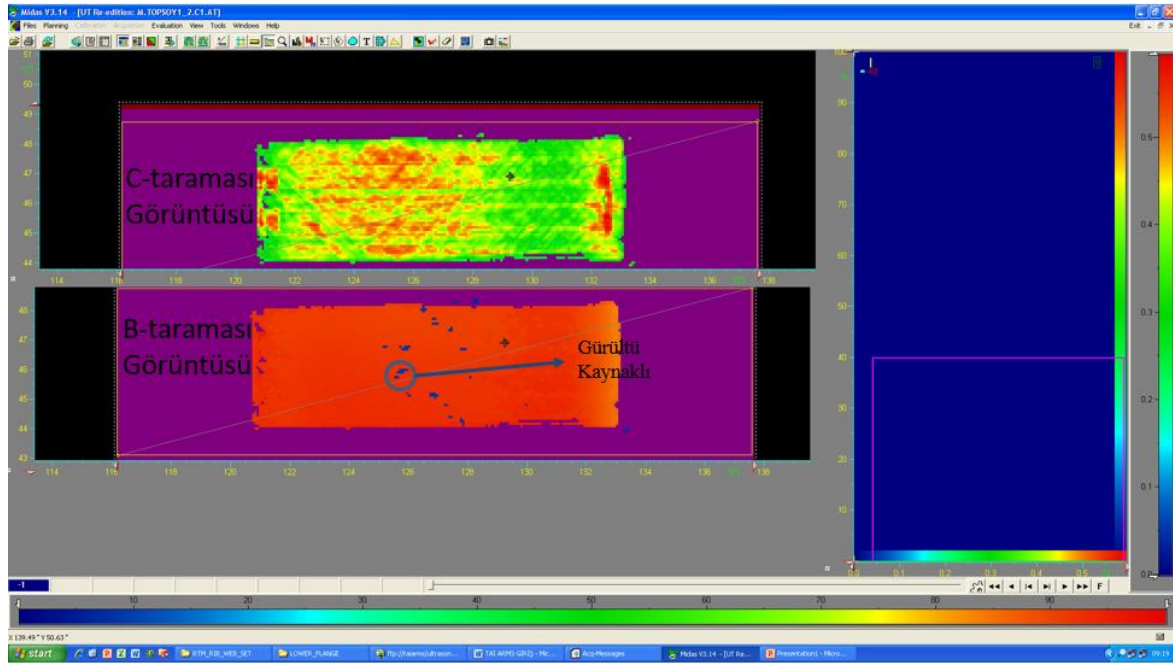
Komponent seviyesi testler için tasarlanmış kompozit kulakçık yapıların numune kodlaması Çizelge 4.30’da verilmiştir. Materyal ve yöntem kısmında açıklanan kontrol ünitesi ile yapılan ultrasonik muayene metotları ile gerçekleştirilen kontrollerin sonuçları bu bölümde verilmiştir. C-taraması ile yapılan karşılaştırmalar bu bölümde verilmiştir.

Çizelge 4.30. Komponent serim yönlerine göre numune kodlaması

Markalama Kodu	45 Serim Sayısı	0 Serim Sayısı	Toplam Serim Sayısı
1	50	52	102
2	64	38	102
3	72	30	102
4	64	18	102
5	92	10	102
6	100	2	102

4.5.1. 1 Numaralı komponent tahribatsız muayene sonuçları

Şekil 4.21’de 1 numaralı komponent’in C-taraması ve B-taraması verilmiştir. C-taraması üzerinde parçadaki boşluk yapısı tespit edilirken, B-taraması üzerinde ise parçadaki kalınlık boyunca oluşan delaminasyonları göstermektedir. C-taramasında %100’lük gönderilen ses dalgaları %40’ın altında bir düşüş yaşadığında 6dB’lik bir kayıp oluştuğu kabul edilir.

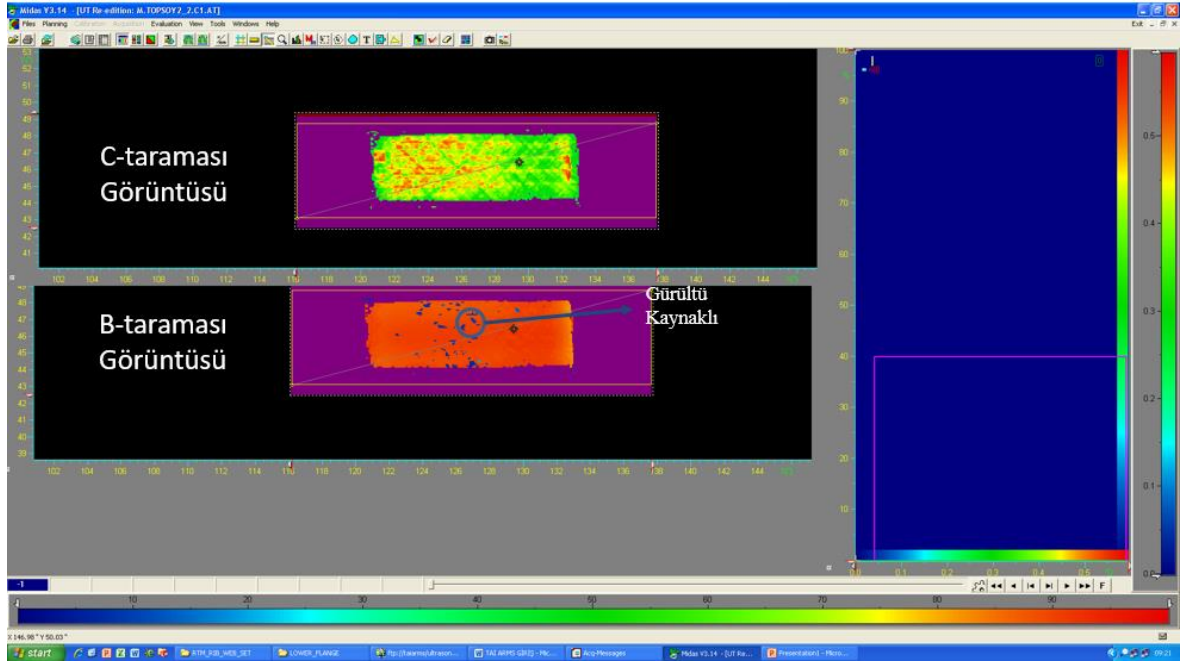


Şekil 4.21. Komponent 1 numaralı tahribatsız muayene görseli (C-taraması-B-taraması)

6dB’lik kayıpların görüldüğü bölgede boşlukların oluştuğu kabul edilir. Şekil 4.21’de komponent numunesi üzerinde C-taraması incelendiğinde parça üzerinde 6dB2lik bir kayıp bölgesi gözlemlenmemiş olup yapının üretim kalitesi olarak uygun olduğu görülmüştür. B-taramasında ise parça kalınlık boyunca taranmaktadır ve gönderilen ses dalgalarında oluşan düşüşler incelenmektedir. Şekil 4.21’de görüldüğü gibi parça üzerinde bir kayıp görünmemektedir, bu nedenle parçada herhangi bir delaminasyonun oluşmadığını kabul edilmektedir. B-taramasında oluşan noktasal mavi bölgeler ise arka duvar sinyalinde bir düşüş olmadığı için gürültü kaynaklı oluşan görüntülerdir. Bu nedenle üretilen 1 numaralı numune üretim standartlarına uygundur.

4.5.2. 2 Numaralı komponent tahribatsız muayene sonuçları

Şekil 4.22’de verilen C-taraması ve B-taraması görüntüsü 2 numaralı komponent numunesine aittir. C-taraması incelendiğinde, parça üzerinde 6dB’lık bir kayıp bölgesinin oluşmadığı görülmektedir. Bu nedenle parçanın üretim standartları içerisinde kaldığı gözlemlenmiştir. B-taraması üzerinden yapılan incelemede ise ses dalgalarında bir kayıp gözlemlenmemiş ve bu nedenle parçada bir delaminasyonun oluşmadığı görülmüştür. B-taramasında oluşan mavi noktalarda incelenmiş olup arka duvar sinyalinde bir düşüş gözlemlenmemiş olup kaynağının gürültü olduğu tespit edilmiştir.

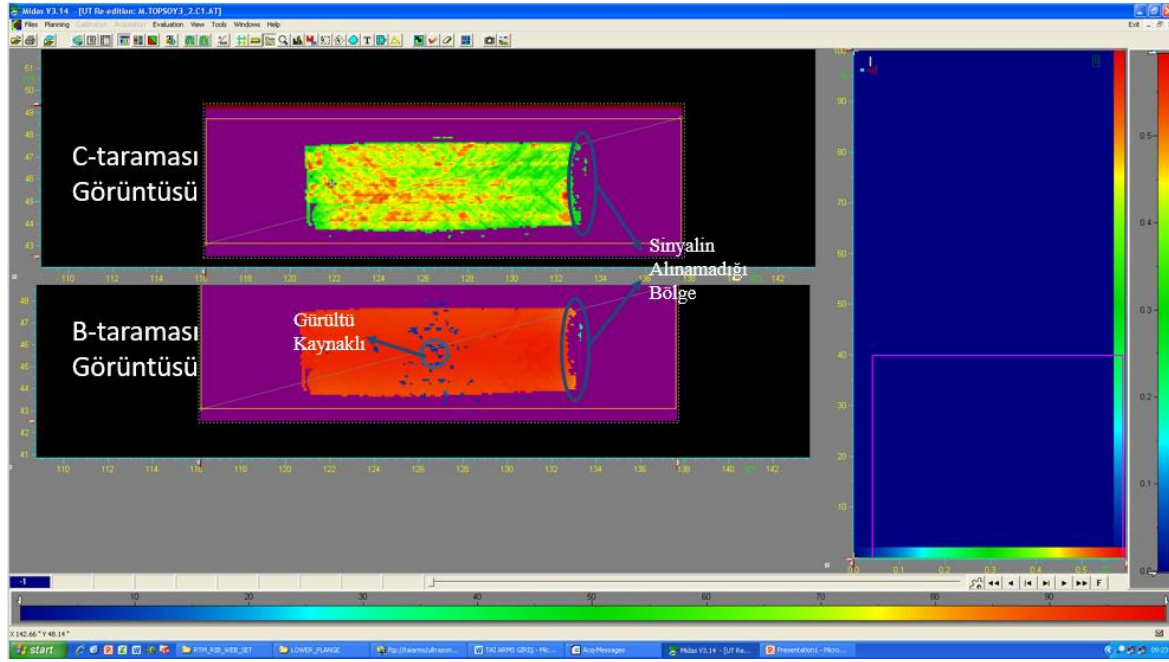


Şekil 4.22. Komponent 2 numaralı tahribatsız muayene görseli (C-taraması-B-taraması)

4.5.3. 3 Numaralı komponent tahribatsız muayene sonuçları

3 numaralı komponent için gerçekleştirilen ultrasonik test muayene sonuçları Şekil 4.23’te verilmiştir. 3 numaralı komponent içinde +/- 45 serim miktarı 2 numaralı komponente oranla daha fazladır. Şekil 4.23’te C-taraması incelendiğinde parça üzerinde 6dB’lık düşüş bölgesi tespit edilmemiştir bu nedenle parça üretim standartlarına uygun olarak kabul edilmiştir. B-taraması üzerinden yapılan incelemede ise parçanın kalınlık boyunca bir ses dalgası kaybı yaşanmadığı gözlemlenmiştir ve bu nedenle parça üzerinde bir delaminasyonun oluşmadığı tespit edilmiştir. C-taraması ve B-taramasında ortak olarak görünen parçanın son kısmındaki

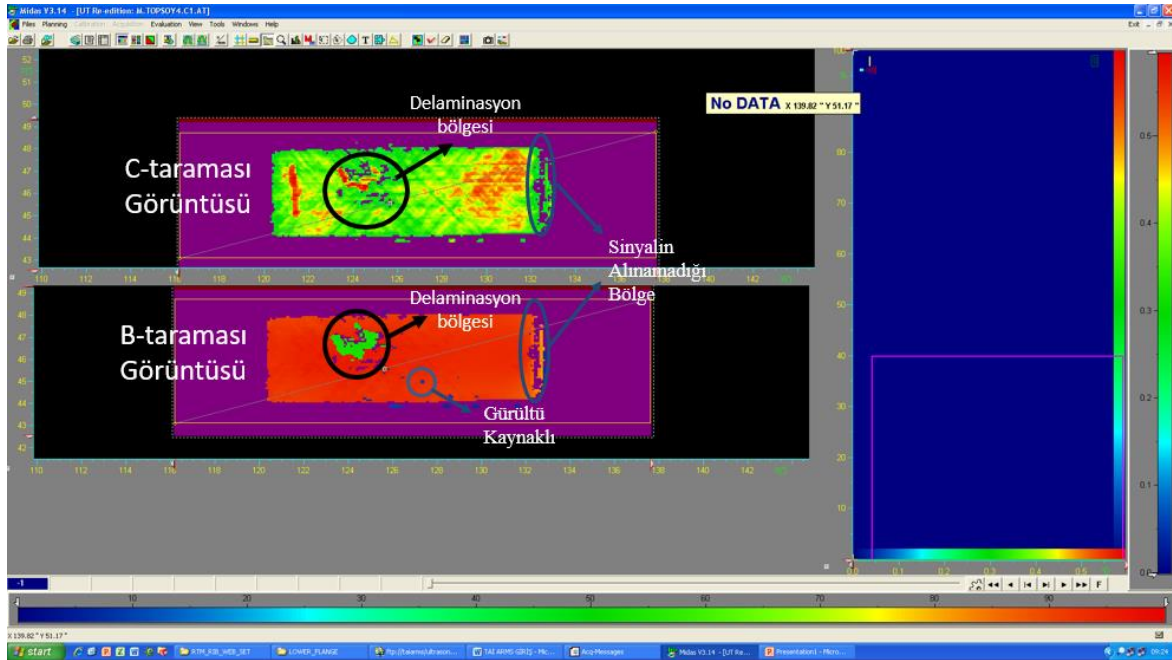
görüntü kaybının nedeni ise parçanın doğrusal yapısında ki kayıptır. Burada temel prensip olan prob üzerinden çıkan ses dalgası parçaya dik olarak iletilmektedir parça üzerinde doğrusallık veya kalınlık düşüşü nedeni ile bozulan doğrusallıklar nedeni ile dik olarak gelen ses dalgasının parça üzerinde saçılması nedeni ile tekrar prob üzerine ulaşamaması nedeni ile sinyalin alınmadığı bölgelerde görüntünün alınamamasıdır.



Şekil 4.23. Komponent 3 numaralı tahribatsız muayene görseli (C-taraması-B-taraması)

Bu nedenle C-taraması ve B-taramasında simetrik olarak görünen parçanın son kısmındaki görüntünün alınamaması sinyalin kaybı nedeni ile oluşmaktadır. Parçanın belirtilen bölgesi üretimdeki baskı plakası kaynaklı uç noktasının diğer bölgelere oranla doğrusallığının kaybolması nedeni oluşmaktadır. İncelenen görüntüler neticesinde 3 numaralı kompozit yapının üretim standartları içerisinde kaldığı kabul edilmiştir.

4.5.4. 4 Numaralı komponent tahribatsız muayene sonuçları

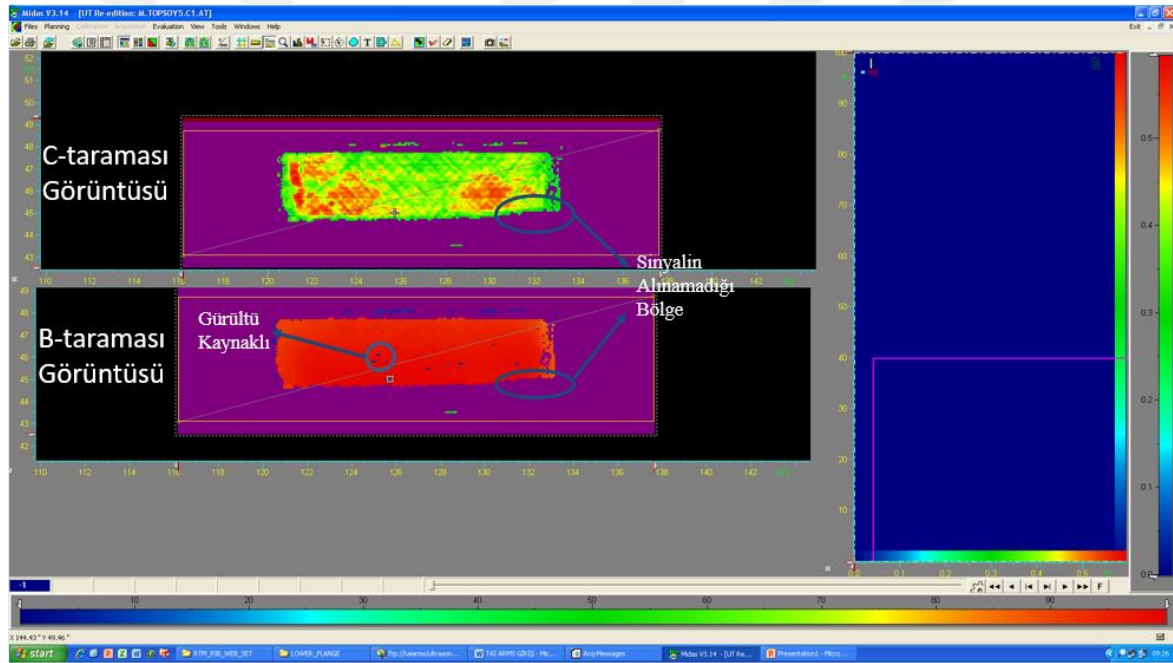


Şekil 4.24. Komponent 4 numaralı tahribatsız muayene görseli (C-taraması-B-taraması)

4 numaralı komponent numunesi için yapılan C-taraması ve B-taraması görüntüleri Şekil 4.24'te verilmiştir. Parçanın B-taramasında alınan görüntüde sol kısmında bir arka duvar sinyali düşüşü gözlemlenmiştir. Düşüşün olduğu bölgede delaminasyonun var olduğu gözlemlenmiştir. Burada temel alınan nokta parçanın kalınlığı boyunca giden sinyal parçanın orta bölgesinden geri dönmüştür bu nedenle bu kalınlık seviyesinde bir delaminasyonun var olduğu kabul edilmiştir. B-taramasında görünen delaminasyon bölgesi C-taramasında incelendiğinde bölgede daha ince bölgeden ses dalgası döndüğü için ses dalgasının dönüş gücü daha yüksek olarak alındığından bölgede kırmızı ile görünen bölgeler görünmektedir. C-taraması görüntüleri incelendiğinde ise 6dB'lık bir düşüş bölgesi gözlemlenmediği için parça üzerinde bir boşluk veya gözeneklilik varlığı tespit edilmemiştir. B-taraması ve C-taraması görüntülerinde parçanın uç kısmında bir kalınlık değişimi veya parça yüzeyindeki pürüzlülük nedeni ile oluşan doğrusallıktaki bozulma nedeni ile sinyal alınamayan bölgeler görüntü üzerinde veilmiştir. 4 numaralı komponent parçası üzerinde delaminasyon tespit edilmesi nedeni ile parçanın üretim kalitesi beklenen seviyede değildir. Bu delaminasyon özellikle parçanın delik bölgesine geleceği için parçanın dayanımı üzerinde olumsuz etkisinin var olacağı düşünülmektedir.

4.5.5. 5 Numaralı komponent tahribatsız muayene sonuçları

5 numaralı komponent için yapılan C-taraması ve B-taraması Şekil 4.25'te verilmiştir. C-taraması incelendiğinde parça üzerinde 6dB'lık bir düşüş bölgesi gözlemlenmemektedir bu nedenle parça üzerinde boşluk gözlemlenmemiştir. B-taraması incelendiğinde ise ses dalgalarında bir düşüş veya kayıp bölgesinin oluşmadığı görülmekte olup parçada delaminasyonun oluşmadığı kabul edilmiştir. B-taraması ve C-taraması üzerinde parçanın alt köşelerinde bir kalınlık değişimi veya doğrusallık kaybı nedeni ile sinyalin alınamadığı bölgeler Şekil 4.25'te gösterilmiştir. C-taraması ve B-taraması görüntülerine göre parça üretim standartlarına uygun olarak görülmüştür.

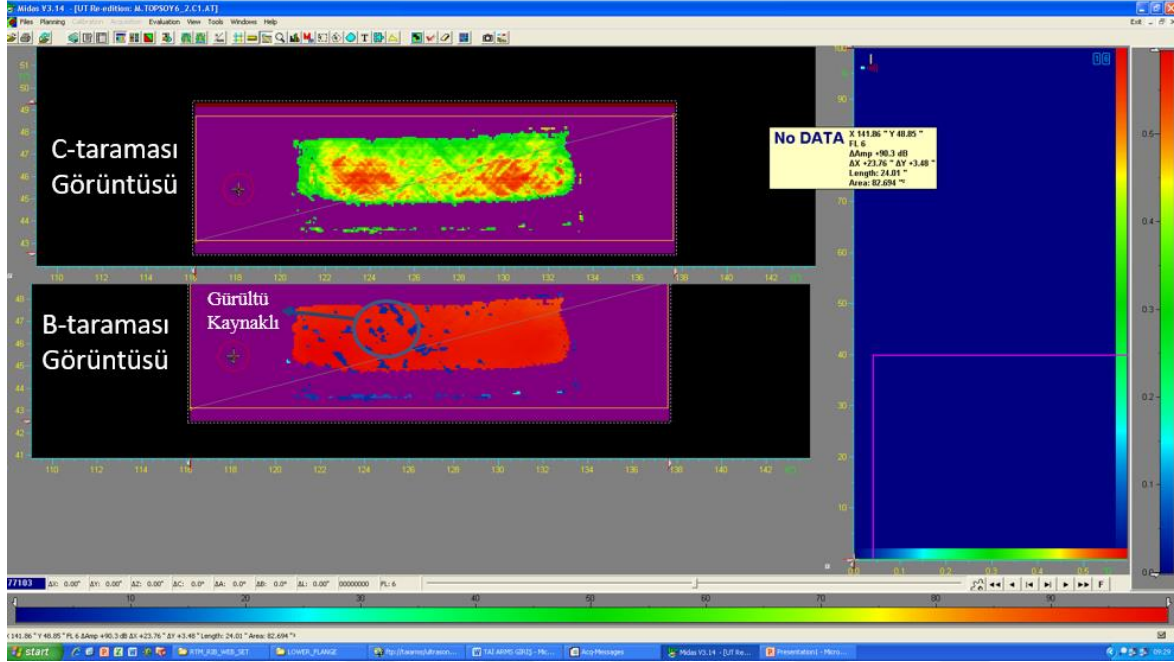


Şekil 4.25. Komponent 5 numaralı tahribatsız muayene görseli (C-taraması-B-taraması)

4.5.6. 6 Numaralı komponent tahribatsız muayene sonuçları

Şekil 4.26'da 6 numaralı komponent parçasının tahribatsız muayene sonuçları verilmiştir. C-taraması üzerinden yapılan değerlendirmede 6dB'lık bir düşüş bölgesinin var olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle parça üzerinde boşluk veya gözeneklilik tespit edilmediği kabul edilmiştir. B-taraması üzerinden parça incelendiğinde ise, ses dalgalarında bir kayıp gözlemlenmemiştir bu nedenle parçada bir delaminasyonun var olmadığı kabul edilmiştir. 6 numaralı numune üzerinde B-taramasında daha çok gürültü kaynaklı noktalar görülmektedir,

arka duvar yansıması incelendiğinde bu bölgelerde bir ses dalgası kaybı gözlemlenmemiştir bu nedenle bu bölgelerde bir hata olmadığı görülmüştür. Gürültü kaynağı parçanın yüzeyindeki pürüzlülüğün yüksek olması kaynaklı olabileceği düşünülmüştür.



Şekil 4.26. Komponent 6 numaralı tahribatsız muayene görseli (C-taraması-B-taraması)

Parçanın C-taraması ve B-taraması'na göre yapılan değerlendirmede parçanın üretim standartlarına uygun olarak üretilmiş olduğu kabul edilmiştir.

4.6. Komponent Numunelerinin Radyografik (X-ray) Test Sonuçları

X-ray ile muayene yöntemi, oldukça hassas bir kontrol metodudur. Yapılan muayenelerin sonuçları da kalıcı bir şekilde saklanabilmesi nedeni ile yaygın olarak kullanılan bir metottur. Temel olarak çalışma prensibi, kontrol edilecek parça bir kaynaktan çıkan radyasyon demeti (x veya gama ışınları) ile ışınlanır. Kaynaktan gönderilen radyasyon malzemenin içinden geçerken malzemenin özelliğine bağlı olarak belli oranda yutularak kayba uğrar ve sonra parçanın arka yüzüne yerleştirilen filme ulaşarak filmi etkiler. Parça içerisindeki hatalar radyasyonun farklı oranlarda zayıflamasına neden olur, bu zayıflama da parçanın arkasındaki filmde farklı oranlarda kararlar yaparak parça üzerindeki hataların tespit edilmesini sağlar. Altı farklı serim ile üretilen komponent numuneleri ultrasonik tahribatsız muayene sonrası kontrol amacı ile radyografik muayeneye tabi tutulmuştur. Resim 4.38'de

1 ve 2 numaralı komponent parçasının X-ray ile alınmış görüntüsü verilmiştir. Alınan görüntü üzerinden parçada herhangi bir hatanın varlığı tespit edilememiş ve parçalar ultrasonik muayenede ki sonuçlar ile paralellik göstermektedir. X-ray görüntülerinde parçada ki küçük boşlukları tespit edemiyoruz. Fakat hata olarak kabul edeceğimiz delaminasyon vs. gibi hatalar gözlemlenebilir.

Resim 4.39’da 3 ve 4 numaralı komponent parçalarının X-ray görüntüleri verilmiştir. Parçaların görüntüleri incelendiğinde parçaların ultrasonik tahribatsız muayene sonuçları ile aynı sonuçları verdiğini gözlemleyebiliriz. X-ray ile yapılan incelemede parça yüzeyi ve katmanların yüzeyinin kalitesi incelendiği için 4 numaralı parçadaki delaminasyon görülemedi. 3 numaralı numune için ise sonuçlar ultrasonik muayene ile paralellik göstermiştir.

Resim 4.40’da ise 5 ve 6 numaralı komponent parçalarının X-ray görüntüleri verilmiştir. 5 ve 6 numaralı parçaların görüntüleri incelendiğinde parçalar içerisinde delaminasyon vs. gibi hataların yer almadığı gözlemlenmektedir. Alınan görüntüler ultrasonik tahribatsız muayene ile elde edilen sonuçlar ile paralel sonuçlar vermektedir. Bu nedenle komponent parçalarının üretimi başarılı olarak kabul edilmiştir.

İncelenen tüm komponent parçalarımızın X-ray görüntülerinde herhangi bir hata tespiti yapılmamıştır. Bu nedenle üretimleri yapılan tüm komponent parçaları test için kullanılabilecek parçalar olarak kabul edilmiştir.



Resim 4.38. 1 ve 2 numaralı komponent numunelerinin X-ray görüntüleri



Resim 4.39. 3 ve 4 numaralı komponent numunelerinin X-ray görüntüleri



Resim 4.40. 5 ve 6 numaralı komponent numunelerinin X-ray görüntüleri

4.7. Komponent Numunelerinin Statik Test Sonuçları

Kupon seviyesi testlerin neticesinde malzemenin mekanik dayanımları incelenmiş ve ideal üretim paramatresi olarak 400°C’de üretim yapılması kabul edilmiştir. Materyal ve yöntem kısmında detayları verilen komponent seviyesi numunelerin statik testleri yapılarak malzemenin dayanımı üzerinde serim yönlerinin etkisi incelenmiştir. Komponent seviyesi olarak tasarlanan parça insansız bir döner kanat hava aracının pal köklerini temsil eden kulakçık yapılarını temsil etmektedir. Aşağıda Çizelge 4.31’da komponent seviyesi

malzeme kodlaması verilmiştir. Materyal ve yöntem kısmında tüm serimlerin sıralaması verilmiş olup, bu bölümde ± 45 serimlerinin oranlarına göre kodlama yapılmıştır. Yapılan tüm serimler simetrik ve balanslı olarak yapılmıştır.

Çizelge 4.31. Komponent serim yönlerine göre numune kodlaması

Markalama Kodu	45 Serim Sayısı	0 Serim Sayısı	Toplam Serim Sayısı
1	50	52	102
2	64	38	102
3	72	30	102
4	64	18	102
5	92	10	102
6	100	2	102

Statik testler Besmak S100 test cihazında yapılmıştır ve cihaz görüntüsü Resim 4.41’de gösterilmiştir. Besmak S100 test cihazının kapasitesi 1000kN’a kadar çıkabilmektedir. Komponent seviyesi test numuneleri otoklav’dan çıktıktan sonra hedef ölçülere getirilmiştir. Daha sonra ise parçanın asıl incelenmesi hedeflenen kulakçık yapının oluşturulması için parçada delik delme işlemi yapılmıştır. İnceleme bölgesindeki deliğin karşılığında test cihazına bağlantının da sağlanması için simetrik olarak da bir delik açılmıştır. Açılan deliklere çelik malzemeden yapılmış yüzükler kuru buz ile soğutma yapılarak sıkı geçme ile montaj edilmiştir.



Resim 4.41. Besmak S100 çekme test cihazı

Otoklav döngüsünde çıkarılan komponent numunesi Resim 4.42’de verilmiştir. Komponent test parçasının nihai hale getirilmesi işlemleri olan boyut olarak ve delik delme işleminin arkasından deliklere yüzüklerin sıkı geçme ile montajının tamamlanmış hali Resim 4.43’te verilmiştir.

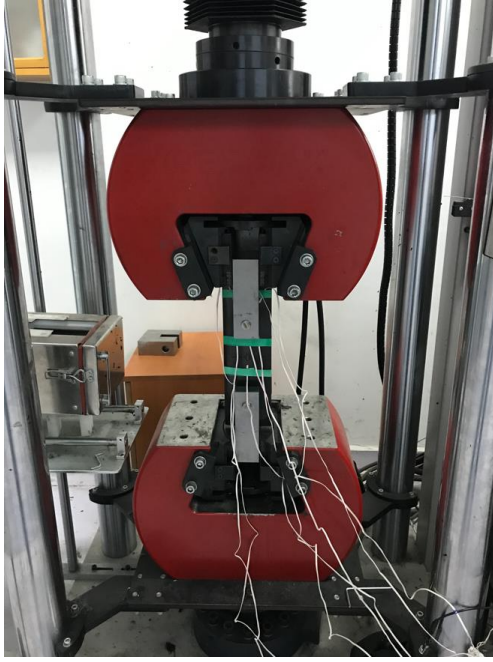


Resim 4.42. Otoklavdan çıkmış komponent numunesi



Resim 4.43. İşlemleri tamamlanmış komponent test numunesi

Tüm komponent testlerinde parçalar test cihazına bağlandıktan sonra alt ve üst aparat üzerinden digital eym ölçer yardımı ile parçanın doğrusallığı kontrol edilmiştir. Parçanın test cihazına bağlanmış görüntüsü Resim 4.44'te gösterilmiştir. Testler esnasında eğim ölçer ile parçanın doğrusallığı kontrol edilmiş ve maksimum 0.5 derece sapma ile testler gerçekleştirilmiştir. Eğim ölçer görseli Resim 4.45'te verilmiştir.



Resim 4.44. Test cihazına bağlanmış komponent parça

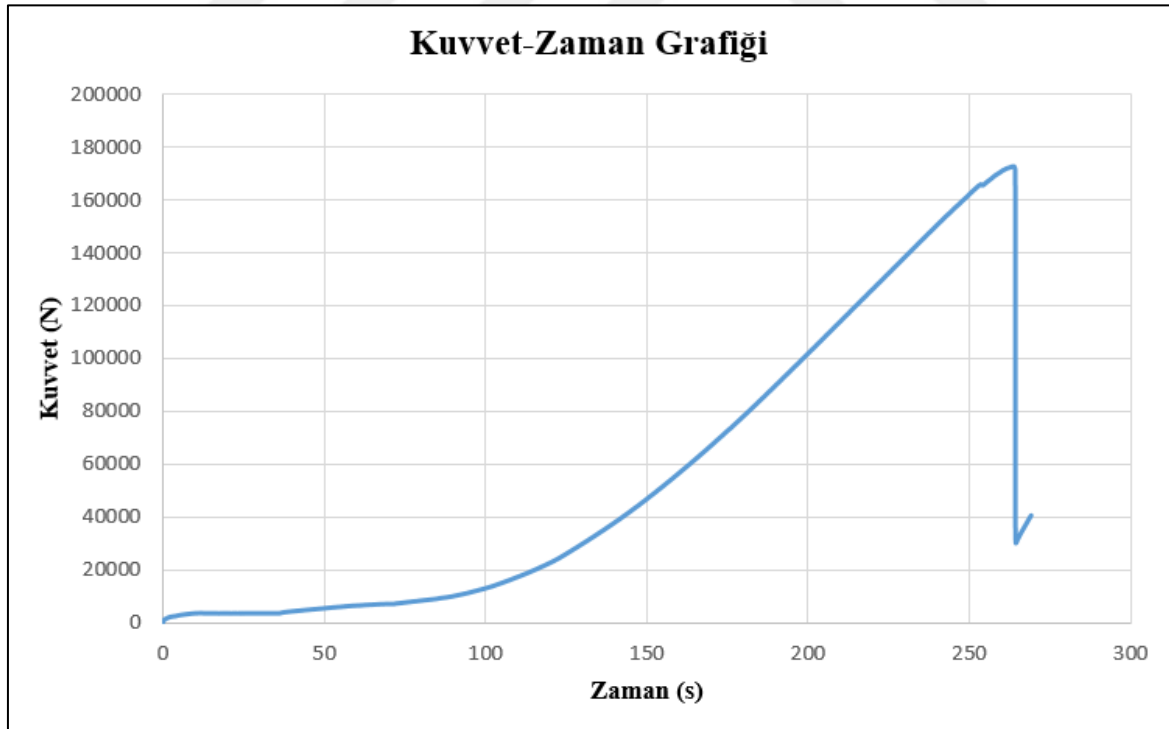


Resim 4.45. Dijital eğim ölçer ölçümü

4.7.1. 1 Numaralı komponent statik test sonucu

1 numaralı numude tüm komponent parçalarında olduğu gibi toplam 102 kat serim yapılmıştır. Temel olarak incelenmesi hedeflenen bölge olan kompozit kulakçı yapıdır. Kulakçık yapılarda delik nedeni ile fiberlerin süreklilikleri bozulduğu için bölgede temel olarak yükü $\pm 45^\circ$ serimlerin taşıdığı düşünülmektedir ve bu nedenle parça üzerinde $\pm 45^\circ$ serimlerin oranları değiştirilerek dayanım üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. 1 numaralı numunenin serimleri detaylı olarak materyal ve yöntem kısmında verilmiştir. Yapılan serimler kompozit malzemeler için balanslı ve simetrik olarak yapılmıştır. 1 numaralı komponent parçası toplam serim sayısına oranla %49 oranında $\pm 45^\circ$ serime sahiptir.

Aşağıda Şekil 4.27’de 1 numaralı komponent malzemesinin yük-zaman grafiği verilmiştir. Parçanın tamamen kopması durumu beklenmeyerek fiberlerin kopması durumu olan yükün düşüş anı parçanın bozulduğu an olarak kabul edilmiştir. 1 numaralı numunen statik olarak eksenel çekme esnasında göstermiş olduğu dayanım 172 663 N olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.27. 1 numaralı komponent kuvvet-zaman grafiği

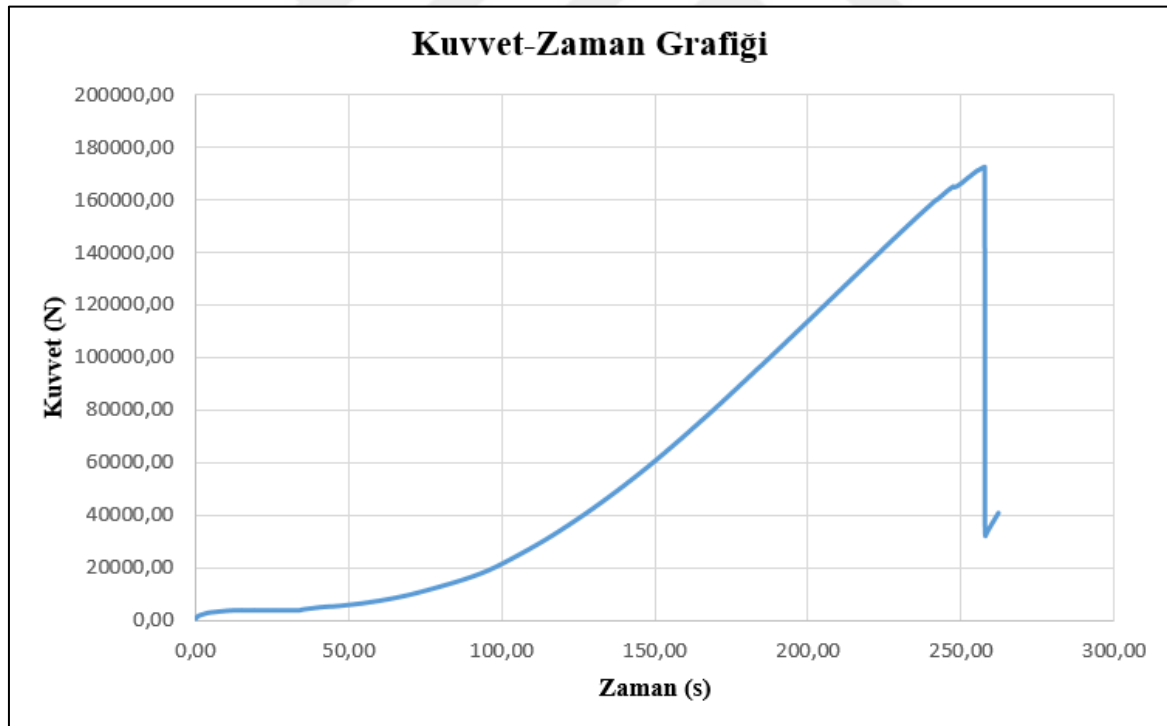
1 numaralı numune test sonuçları özet olarak Çizelge 4.32’de verilmiştir.

Çizelge 4.32. 1 numaralı komponent test sonuçları özeti

Deney Sıcaklığı(°C)	Oda Sıcaklığında (20°C-22°C)
Pin Çapları (mm)	17,96/18,02
Pin Merkezleri Arası Mesafe (mm)	175
Parçanın Tam Boyu (mm)	315
Kalınlığı (mm)	14,2
Test Hızı	2 mm/dk
Maksimum Yük (N)	172 663

4.7.2. 2 Numaralı komponent statik test sonucu

2 numaralı komponent test parçasında da serimler simetrik ve balanslı olarak üretilmiştir. 2 numaralı komponent parçasında +/- 45° serimleri toplam serim sayısının %63'ü oranında kullanılmıştır. 2 numaralı komponent numunesinin maksimum yükü aldığı değer ise 172 556 N'dur.



Şekil 4.28. 2 numaralı komponent kuvvet-zaman grafiği

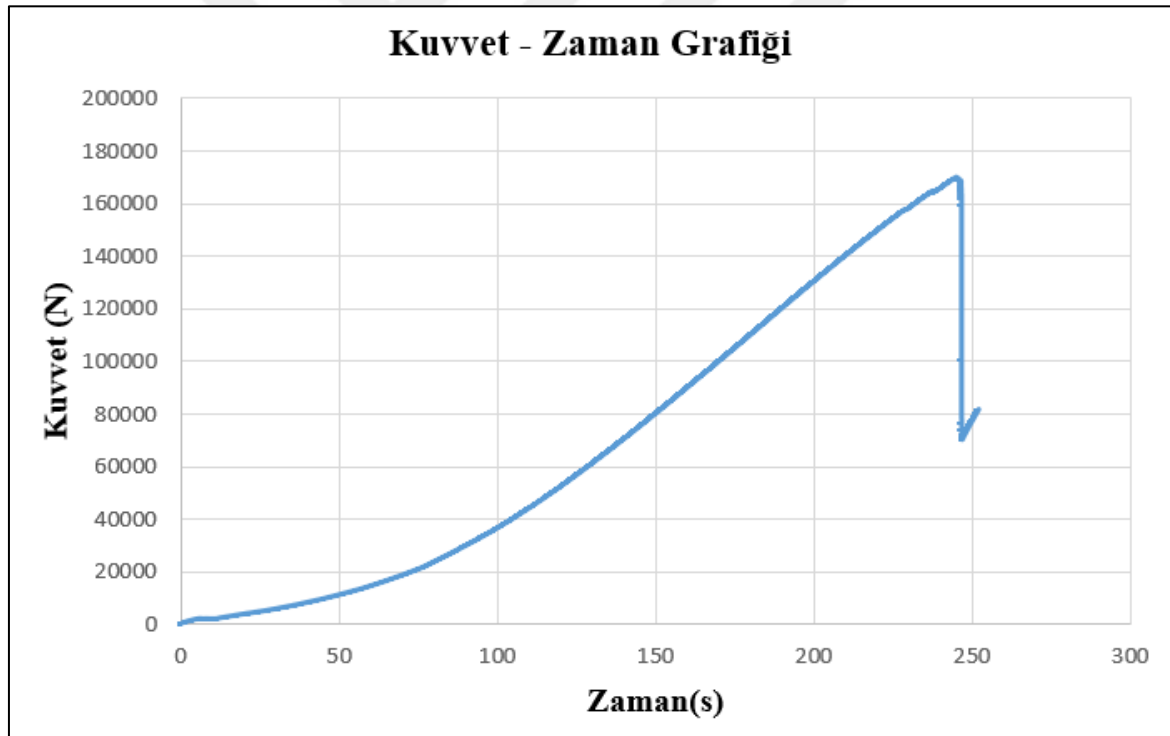
Yukarıda Şekil 4.28'de verilen 2 numaralı komponent numunesine ait olan yük-zaman grafiği verilmiştir. 2 numaralı komponent parçasında ki fiberlerin kopma noktası 172 556 N değerlerindedir. Bu değer esnasında fiberlerde kopma başladığı için yük düşüşü meydana

gelmiştir ve bu noktada parça hasarlandı olarak kabul edilmiştir. Çizelge 4.33’de 2 numaralı komponent parçasına ait olan test sonuçlarının özeti verilmiştir.

Çizelge 4.33. 2 numaralı komponent test sonuçları özeti

Deney Sıcaklığı(°C)	Oda Sıcaklığında (20°C-22°C)
Pin Çapları (mm)	17,92/17,96
Pin Merkezleri Arası Mesafe (mm)	175
Parçanın Tam Boyu (mm)	315
Kalınlığı (mm)	14,19
Test Hızı	2 mm/dk
Maksimum Yük (N)	172 556

4.7.3. 3 Numaralı komponent statik test sonucu



Şekil 4.29. 3 numaralı komponent kuvvet-zaman grafiği

Şekil 4.29’da 3 numaralı komponent için kuvvet-zaman grafiği verilmiştir. Kuvvet grafiği üzerinden komponent parçasının hasarlandığı nokta olarak 170 145 N olarak tespit edilmiştir. 3 numaralı komponent numunesinin seriminde toplam katman sayısının %71’i +/- 45° katmanları ile serilmiştir. Komponent numunesinde kullanılan katmanlar simetrik ve

balanslı olarak serilmiştir. 3 numaralı komponent numunesinin test sonuçları için hazırlanmış olan özet Çizelge 4.34’de verilmiştir.

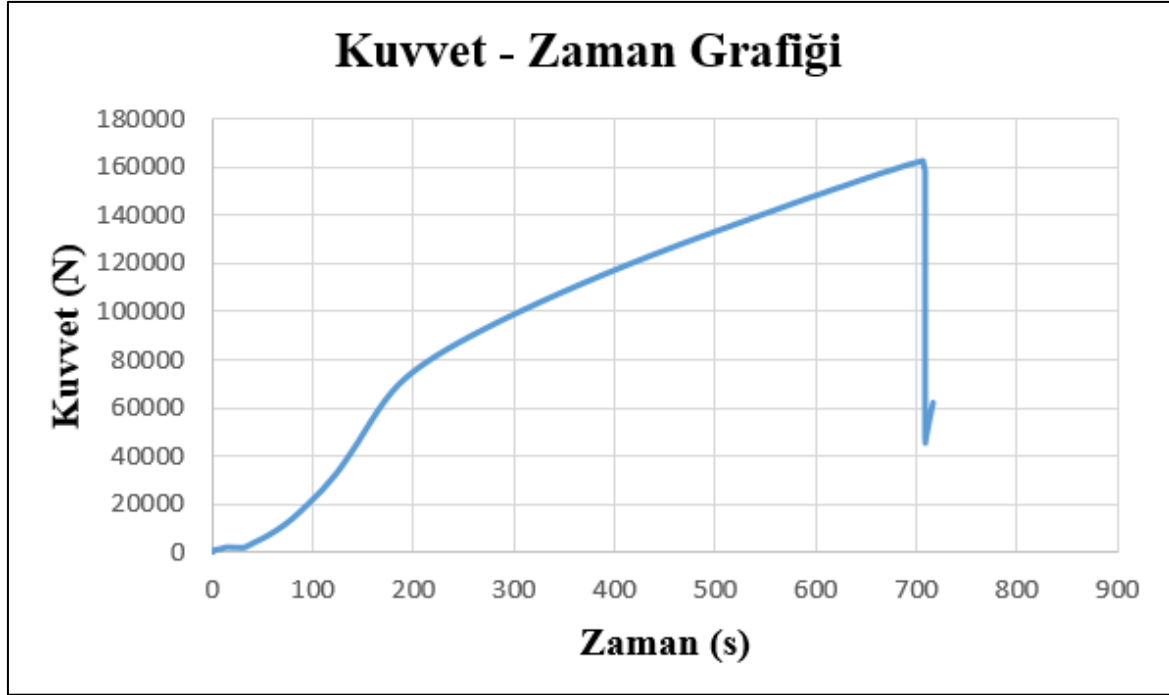
Çizelge 4.34. 3 numaralı komponent test sonuçları özeti

Deney Sıcaklığı(°C)	Oda Sıcaklığında (20°C-22°C)
Pin Çapları (mm)	17,97/18,02
Pin Merkezleri Arası Mesafe (mm)	175
Parçanın Tam Boyu (mm)	315
Kalınlığı (mm)	14,1
Test Hızı	2 mm/dk
Maksimum Yük (N)	170 145

4.7.4. 4 Numaralı komponent statik test sonucu

4 numaralı komponent test numunesi için yapılan serimler simetrik ve balanslı olarak yapılmıştır. 4 numaralı komponent numunesi toplam katman sayısının %82’si +/- 45° serimlerine sahiptir.

4 numaralı komponent testi için alınan kuvvet-zaman grafiği Şekil 4.30’da verilmiştir. Fiberlerin kırılmaya başladığı yükleme anı 4 numaralı kompozit kulakçık yapı için maksimum dayanım değeri olarak kabul edilmiştir. 4 numaralı komponent için maksimum yükleme değeri 162 509 N olarak gözlemlenmiştir. Çizelge 4.35’de 4 numaralı kompozit kulakçık yapı için yapılan test ve test detayları özet olarak verilmiştir.



Şekil 4.30. 4 numaralı komponent kuvvet-zaman grafiği

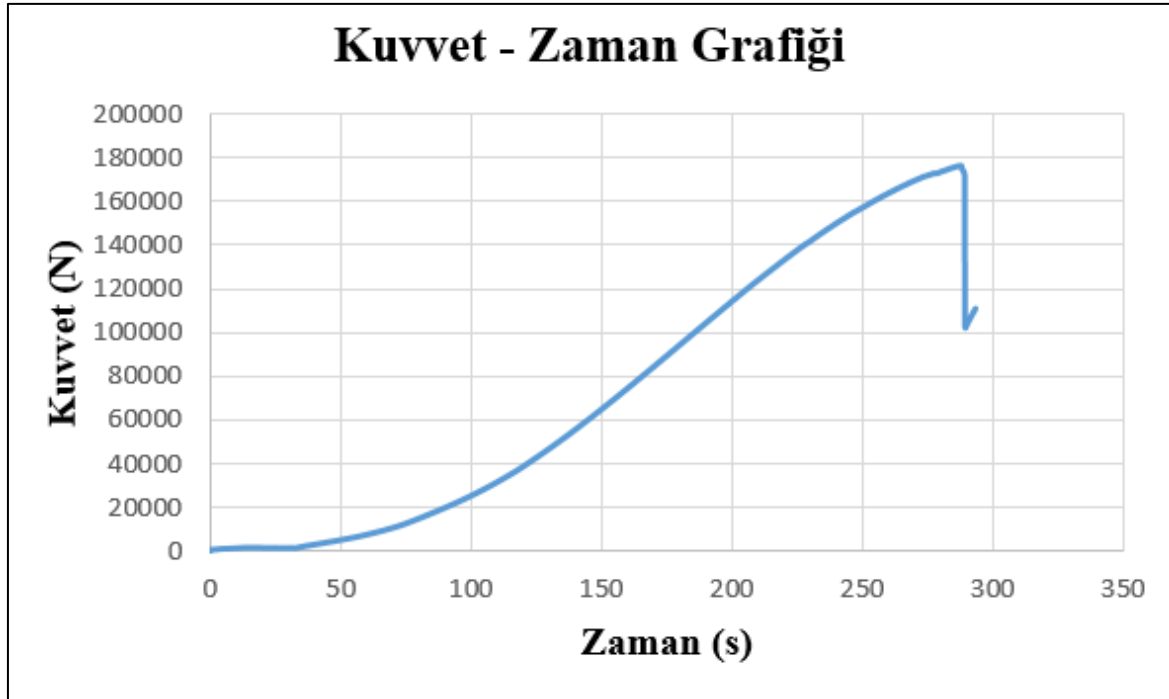
Çizelge 4.35. 4 numaralı komponent test sonuçları özeti

Deney Sıcaklığı(°C)	Oda Sıcaklığında (20°C-22°C)
Pin Çapları (mm)	17,97/18,04
Pin Merkezleri Arası Mesafe (mm)	175
Parçanın Tam Boyu (mm)	315
Kalınlığı (mm)	14,2
Test Hızı	2 mm/dk
Maksimum Yük (N)	162 509

4.7.5. 5 Numaralı komponent statik test sonucu

5 numaralı kompozit kulakçık yapıda da serimleri yapılırken simetrik ve balanslı olarak üretim yapılmıştır. %90 oranında +/- 45° serimlerden oluşan 5 numaralı komponent parçası sadece 10 kat sıfır derece serim yapılarak üretilmiştir.

5 numaralı numune için kuvvet-zaman grafiği Şekil 4.31’de verilmiştir. 5 numaralı komponent parçası için statik olarak maksimum dayanım grafik üzerinden okunduğu gibi 176 335 N olarak tespit edilmiştir. Diğer numunelerde uygulanan metot olan yükteki düşüş anı parçanın hasarlandığı an olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.31. 5 numaralı komponent kuvvet-zaman grafiği

Çizelge 4.36’da 5 numaralı komponent parçası için test parametreleri ve test sonuçları için hazırlanmış özet verilmiştir.

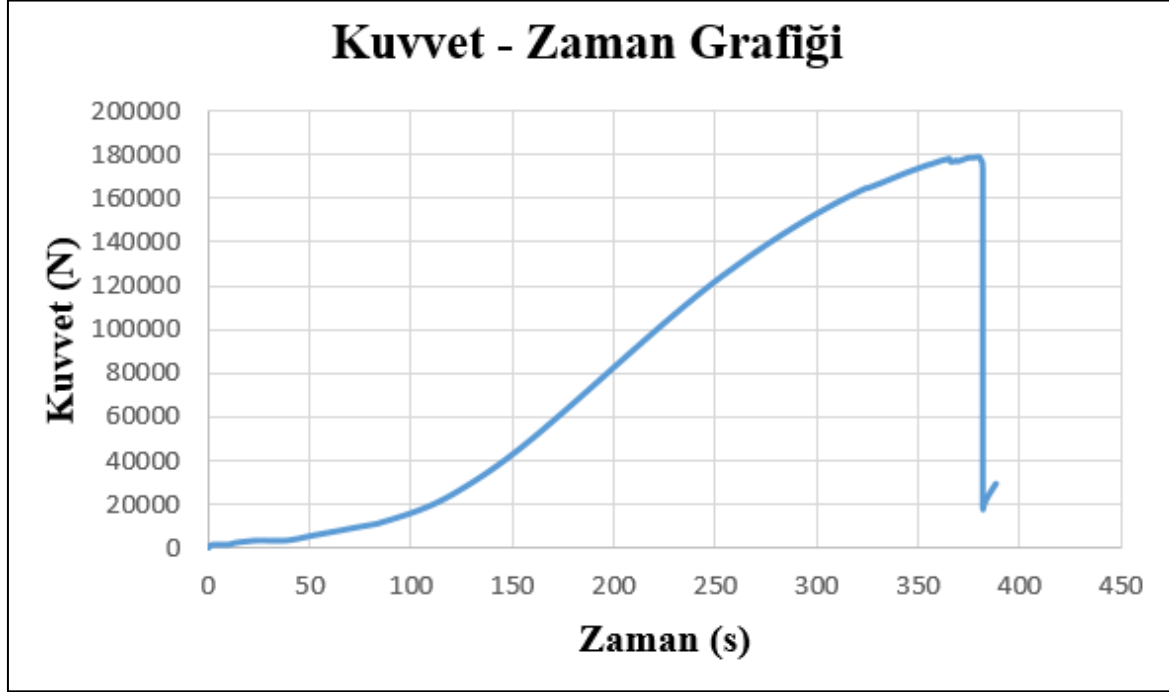
Çizelge 4.36. 5 numaralı komponent test sonuçları özeti

Deney Sıcaklığı(°C)	Oda Sıcaklığında (20°C-22°C)
Pin Çapları (mm)	17,99/18,00
Pin Merkezleri Arası Mesafe (mm)	175
Parçanın Tam Boyu (mm)	315
Kalınlığı (mm)	14,2
Test Hızı	2 mm/dk
Maksimum Yük (N)	176 335

4.7.6. 6 Numaralı komponent statik test sonucu

6 numaralı kompozit kulakçık komponent parçası da tüm parçalar gibi simetrik ve balanslı olarak üretilmiştir. 6 numaralı komponent parçasının %98’i +/- 45° serim ile üretilmiştir. Sadece simetri ekseninde karşılıklı birer kat sıfır derece serim yapılmıştır.

Şekil 4.32’de 6 numaralı komponent numunesi için hazırlanmış kuvvet-zaman grafiği verilmiştir. 6 numaralı komponent parçasının maksimum dayanım değeri ise 179 015 N’dur.



Şekil 4.32. 6 numaralı komponent kuvvet-zaman grafiği

Çizelge 4.37’de ise 6 numaralı kompozit kulakçık yap için yapılan test ve test parametreleri ile ilgili özet bilgi verilmiştir.

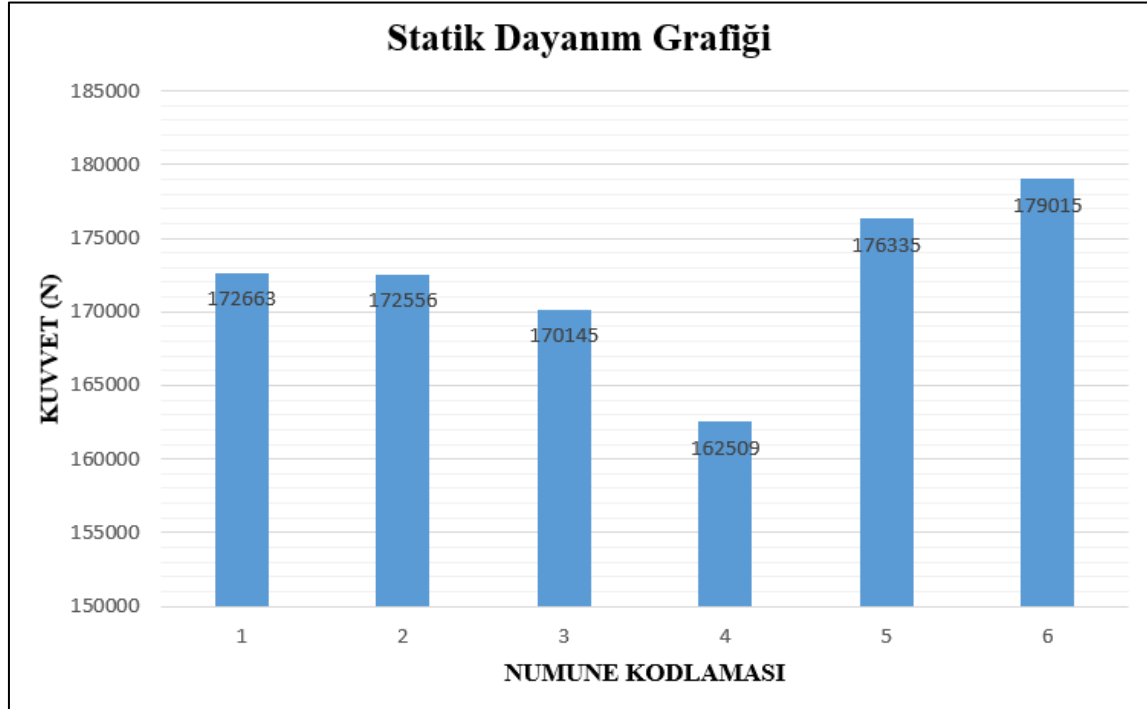
Çizelge 4.37. 6 numaralı komponent test sonuçları özeti

Deney Sıcaklığı(°C)	Oda Sıcaklığında (20°C-22°C)
Pin Çapları (mm)	18,07/18,00
Pin Merkezleri Arası Mesafe (mm)	175
Parçanın Tam Boyu (mm)	314
Kalınlığı (mm)	14,2
Test Hızı	2 mm/dk
Maksimum Yük (N)	179 015

4.7.7. Kompozit komponent statik test sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 4.33’de yapılan tüm statik testlere ait olan statik dayanım değerleri verilmiştir. 1 numaralı numuneden 6 numaralı numuneye doğru ilerledikçe parçanın serimlerindeki +/-

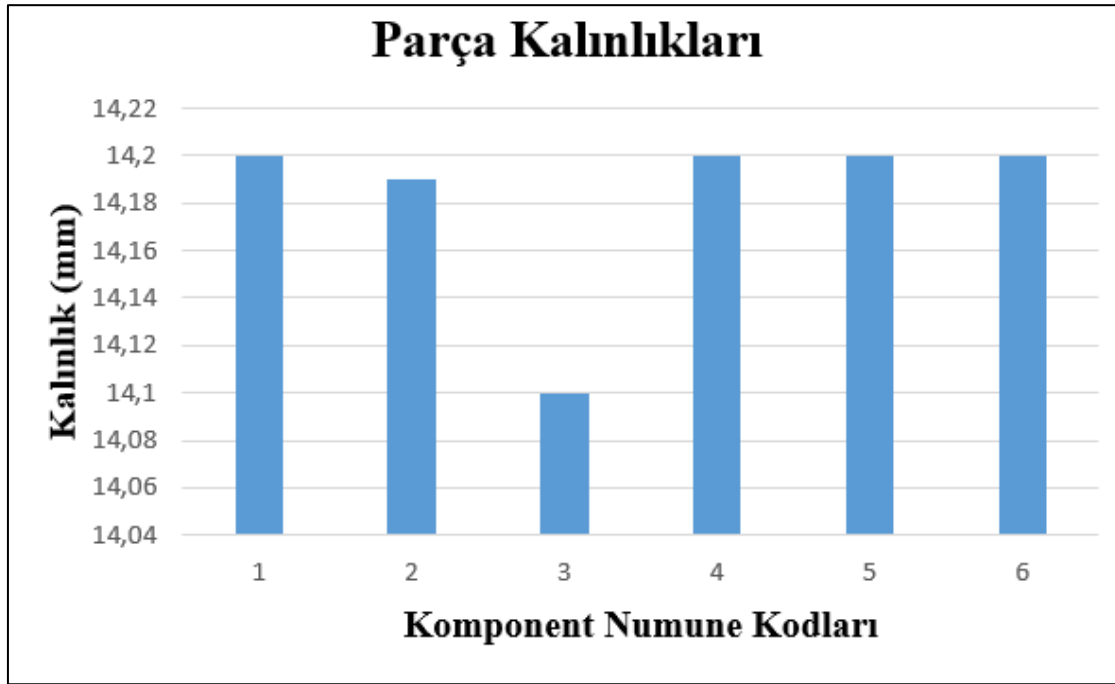
45° oranının arttığı bilinmektedir. Temel olarak incelenen nokta olan kompozit kulakçık yapılarıdaki dayanımın delik bölgesinde ki serim kombinasyonuna göre karşılaştırılmasıdır.



Şekil 4.33. Statik testlerin mekanik dayanım karşılaştırması

Genel trend olarak parçaların 1 ve 2 numaralı numunelerde çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. 3 numaralı numunede ise 1 ve 2 numaralı numunelerin aksine küçük bir değer düşüşü meydana gelmiştir. Bunun temel nedeni ise 3 numaralı komponent parçasında ki kalınlığın diğer numunelere göre daha düşük değerde kalmasıdır. 1 numaralı numunenin %51'i +/- 45° serimlere sahip iken 2 numaralı numunede bu oran %63'e çıkmaktadır. 3 numaralı numunede ise %71 seviyelerine çıkmaktadır. Delik etrafında oluşan yüklemenin +/- 45° serimler tarafından taşındığını düşündüğümüz için 3 numaralı komponent numunesindeki bu küçük dayanım düşüşü parçanın kalınlığında ki azalma ile açıklanabilmektedir. Parçaların kalınlıklarının karşılaştırılmasının yapıldığı grafik Şekil 4.34'de verilmiştir. 4 numaralı numunede ise %82 seviyesinde +/- 45° serim yapılmıştır. 4 numaralı kompozit kulakçık yapının test sonucundaki dramatik düşüş ise komponent numunelerinin ultrasonik test sonuçlarının açıklandığı bölümde 4 numaralı numune özelinde ki delaminasyon kaynaklıdır. Parça üzerinde oluşan delaminasyon nedeni ile parçanın dayanımında ciddi oranda bir düşüş oluşmuştur. 5 numaralı numunede ise +/- 45 derece serimlerin oranı %90 seviyesinde tutulmuştur ve dayanım değeri en yüksek ikinci test

numunesi olmuştur. 6 numaralı numunede ise bu oran %98 seviyesindedir ve parçanın dayanımı diğer parçalara göre en yüksek değere ulaşmıştır. Yapılan testlerin sonuçlarına göre kompozit kulakçık yapılarında delik etrafında temel olarak yükü taşıyan fiber yönleri ± 45 derece serimleridir ve parça üzerinde bu oran ne kadar yüksek olursa parçanın dayanımı o seviyede artmaktadır.



Şekil 4.34. Komponent test parçalarının kalınlık karşılaştırması

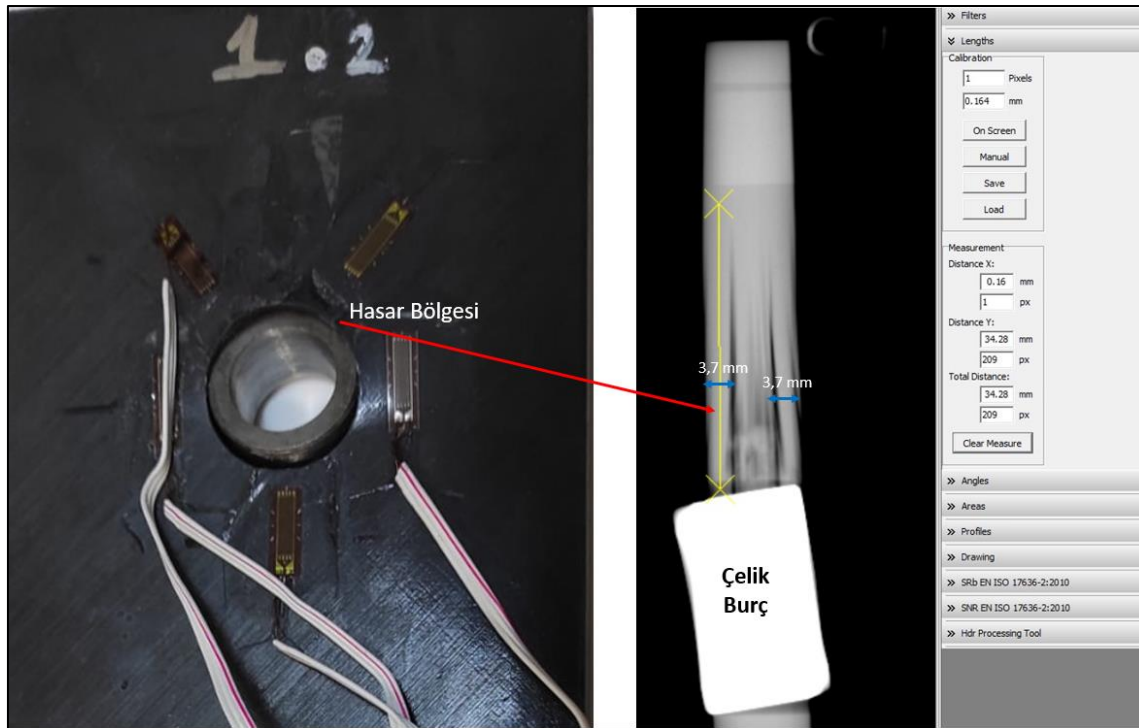
4.8. Komponent Numunelerinin Statik Test Sonucu X-Ray Görüntüleri

Komponent parçaları için gerçekleştirilen eksenel çekme testleri ile tespit edilen parçaların statik dayanım değerleri ile birlikte parçaların hasarlanma bölgelerini incelemek amacı ile detaylı radyografik testler bu bölümde sunulacaktır. Parçaların çekme testi esnasında kulakçık bölgesinde oluşan hasar modları gözlemlenmiştir. Oluşan hasarların boyutları ve doğrultuları incelenmiştir. Parçaların test sonrası görselleri ile X-ray görüntüleri birlikte verilerek aralarında kurulacak korelasyonda görsel olarak kolaylık sağlanması amaçlanmıştır. Görüntüler 185 kV voltaj değeri ile 4,3mA değerleri kullanılarak çekilmiştir. Bu görüntüler vasıtası ile parçaların katmanları arasındaki ayrılmaları, kırılma başlangıç ve yönelim doğrultuları ve kırılma alanı ile ilgili bilgi sahibi olunacaktır. Serim sıralamaları bilindiği için kırılma bölgelerinin hangi serim varyasyonunun içerisinde veya bölgesinde gerçekleştiği ile ilgili bilgi sahibi olunacaktır. Bu bilgiler ışığında serim varyasyonunun

mekanik testler sonuçları ile paralellik kurulması sağlanacaktır. Kullanılan x-ray cihazı ve metodu materyal ve yöntem kısmında detaylı olarak anlatılmıştır.

4.8.1. 1 Numaralı komponent statik test sonucu X-ray görüntüleri

1 numaralı numunenin test sonrası orjinal parça görüntüsü üzerinden kırımın gerçekleştiği bölgenin detaylı X-ray görüntüsü Resim 4.46'da verilmiştir. X-ray görüntüsünde parlayan bölge kompozit kulakçık yapıdaki çelik burçtur. Numune üzerinde görünen hasar yüzeyden dikkat çekici bir şekilde görülmesede parçanın iç yapısında ciddi bir hasar oluşturduğu gözlemlenmektedir. Parçadaki hasarın boyutu aksel olarak yaklaşık 34mm'ye kadar uzanmaktadır. Parça'nın x-ray görüntüsünden alınan ölçülendirmeye göre kırım kenarlara 3,7mm uzaklıklarda simetrik olarak oluşmuş görünmektedir. Bu kalınlık bölgesi $\pm 45^\circ$ serim bölgesine karşılık gelmektedir. Kırım bölgesi incelendiğinde fiber kırılmasından önce katmanlar arası bir ayrımın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni yüklemenin aksel olarak uygulanması nedeni ile kayma ekseninde ki dayanımın aksel yöne oranla zayıf kalması olarak görülebilmektedir. Parçanın kulakçık yapısının üst bölgesinde oluşan hasar nedeni ile çelik burç aksel düzlemini yitirmiş ve kaymaya uğramıştır.



Resim 4.46. 1 numaralı numune hasar bölgesi X-ray görüntüsü

Parçanın simetri eksenı bölgesi yani parçanın orta bölgesinde bir hasarlanma tespit edilmemiştir. Ayrılan katmanların bölgesel olarak fiber boyunca kırılmaların ilerlediği bölgelerde görülmekte.

4.8.2. 2 Numaralı komponent statik test sonucu X-ray görüntüleri

2 numaralı kompozit kulakçık yapısının statik test sonrası X-ray görüntüsü Resim 4.47’de verilmiştir. Parçanın test sonrası hasar bölgesi sol kısımda verilmiştir ve bölgeye kalınlık boyunca dik olarak görüntü olarak X-ray görüntüsü incelenmiştir.

En uzun hasarın boyutu en sağda yüzeyden başlayan bir hasar olarak görünen hasardır ve yaklaşık 31mm boyunca ilerlemiş olarak görünmektedir. Yüzeylerdeki serimler 2 numaralı komponent parçası için $\pm 45^\circ$ serim kombinasyonuna sahiptir. Görüntünün sol kısmında da çelik burç bölgesinden başlayan ince bir çatlağın yukarı doğru ilerlerken genişlediği ve katmanlar arasında bir ayrılmanın olduğu gözlemlenmektedir. Parçanın iç kısmında ise parçanın simetri eksenine göre simetrik olan iki hasarın olduğu görülmektedir. Sol tarafta oluşan hasar yaklaşık 5mm boyunca ilerleyip durmuş iken simetriğinde yer alan hasar ise genişleyerek ilerlemiş ve katmanlar arası bir ayrılmanın oluşması ile birlikte yaklaşık 25-26 mm kadar ilerleyerek durmuş olarak görünmektedir.



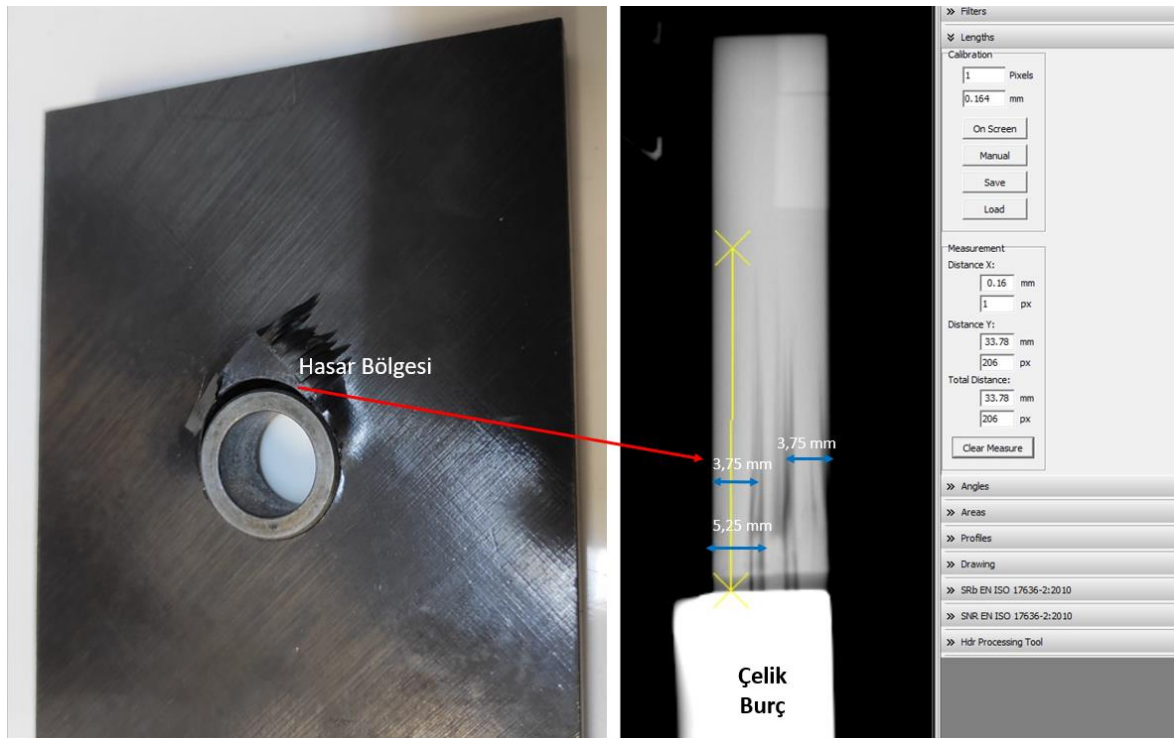
Resim 4.47. 2 numaralı numune hasar bölgesi X-ray görüntüsü

Hasarların oluştuğu katmanlar $\pm 45^\circ$ serimlerin yer aldığı bölümlerdir. 1 numaralı numunede görünen çelik burcun kayması durumu 2 numaralı numunede gözlemlenmemiştir. Burç üzerinde bir kayma durumu olmadığı için katmanlar arası ayrılmanın 1 numaralı numuneye göre daha az olduğu gözlemlenmektedir.

4.8.3. 3 Numaralı komponent statik test sonucu X-ray görüntüleri

3 numaralı kompozit kulakçık yapının aksenal çekme testi sonrası hasar bölgesi ve sonrasında hasarlanan bölgenin X-ray görüntüsü Resim 4.48’de verilmiştir. X-ray görüntüsü üzerinde sağ tarafında verilen 3,75mm ile belirtilen bölgede oluşan hasar temel de çelik burç ile temas bölgesinde başlamıştır. Başlangıç olarak iki paralel hasarın ilerlediğini görüyoruz. Sonrasında ise iki paralel hasar fiber ve matris kırılımı ile birleşerek katmanlar arası ayrımın oluşmasına neden olmuştur.

X-ray görüntüsünde sol kısımdaki 3,75mm ile 5,25mm ile belirtilen bölgelerde kırılım gerçekleşmiş ve yukarı doğru fiber ve matris kırılması ile birleşerek katmanlar arası ayrım ile neticlenmiştir. Bu bölgede oluşan hasar maksimum uzunluktaki hasardır parça içerisinde. Toplam hasar boyu yaklaşık 33-34mm’ye kadar uzanmıştır.

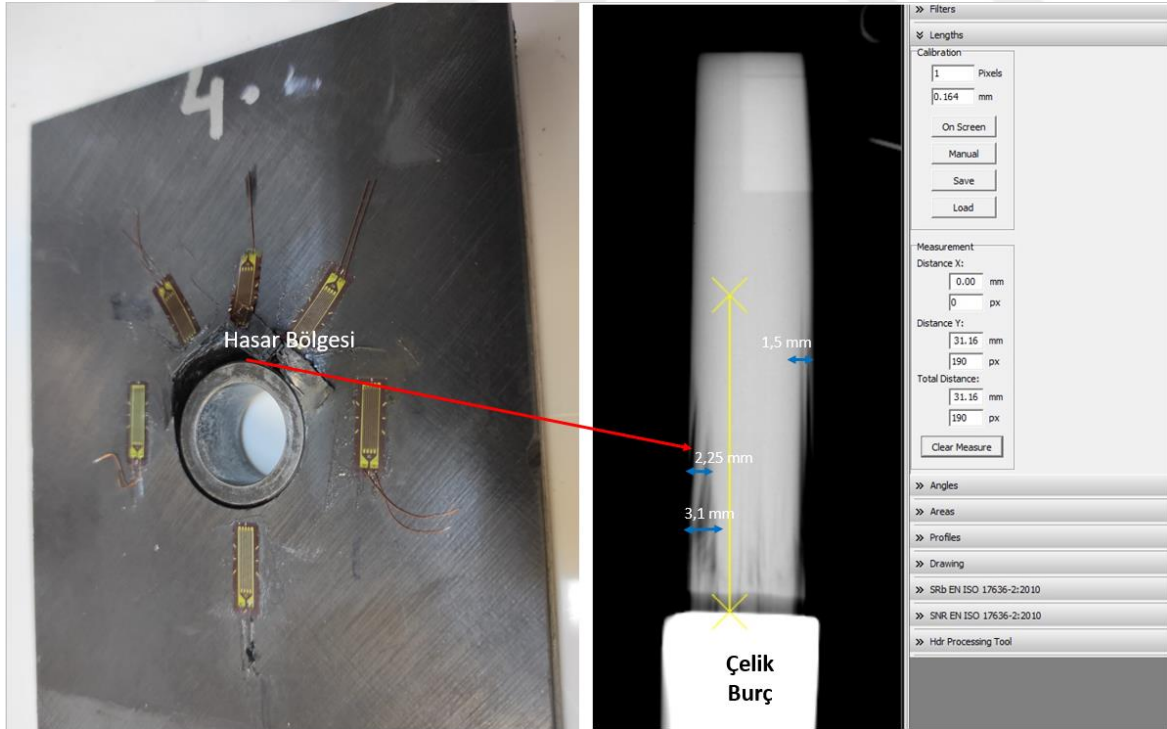


Resim 4.48. 3 numaralı numune hasar bölgesi X-ray görüntüsü

X-ray görüntülerine göre 3,75mm uzaklıktaki hasarlar $\pm 45^\circ$ serim bölgelerinde meydana gelmektedir. 5,25mm uzaklıktaki bölge ise 0° ile $\pm 45^\circ$ serimlerin arayüz bölgesine karşılık gelmektedir. Temel olarak hasarların oluştuğu ve ilerlediği bölgeler $\pm 45^\circ$ serimlerin oluşturduğu bölgelerdir. X-ray görüntüsüne göre katmanlar arası ayrım oluşan bölgelerde dağılma yatay ilerlemezken çekme yönünde hasara dik olarak devam etmekte olduğu gözlemlenmektedir.

4.8.4. 4 Numaralı komponent statik test sonucu X-ray görüntüleri

4 numaralı kompozit kulakçık yapının eksenel çekme testi sonucunda parça üzerinde oluşan hasar bölgesi ve radyografik görüntüsü Resim 4.49’da verilmiştir. Parça üzerinde eksenel yönde uzanan hasarlardan en uzun olanı yaklaşık 31-32mm kadar ilerlemiştir. Hasar bölgesi çelik burcun kompozit delik bölgesine basması ile başlamış ve 3,1mm ile gösterilen bölge üzerinden devam etmiştir. Aşağıdan başlayan hasar 2,25mm mesafede devam etmiştir. Diğer tarafta 1,5mm kalınlıkta ilerleyen hasar ise yüzeyde başlayan ve kopan parçanın devamı olarak gözlemlenmiştir.

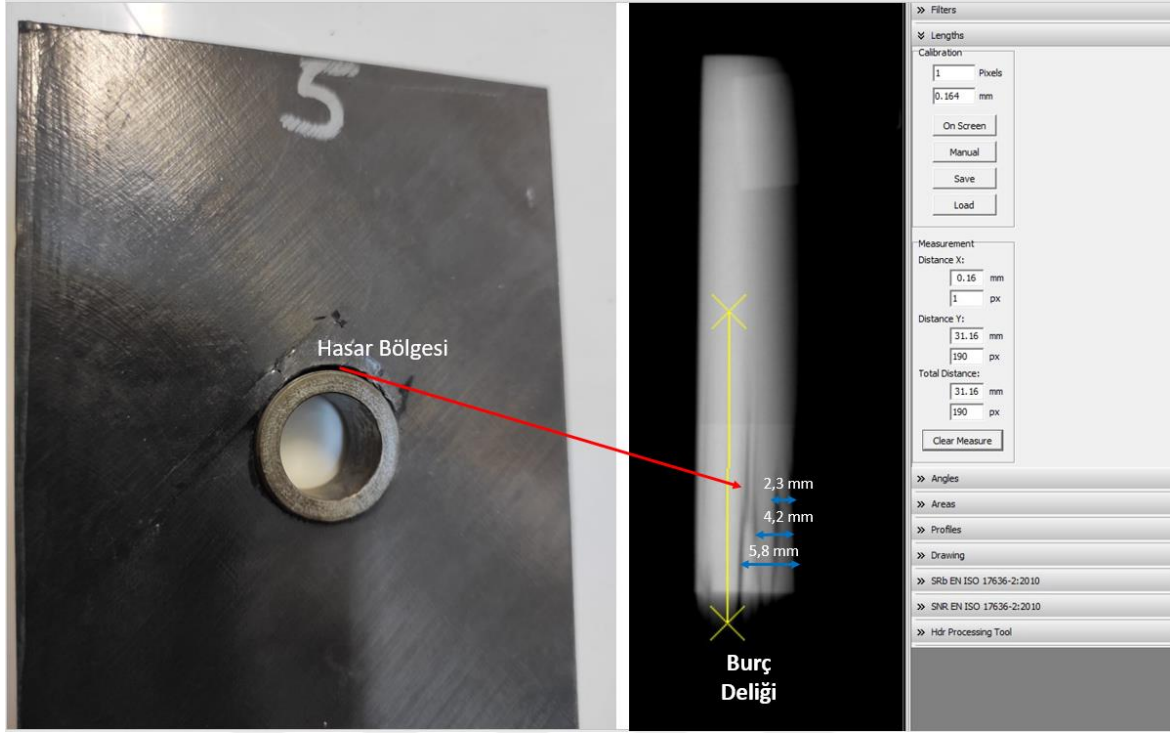


Resim 4.49. 4 numaralı numune hasar bölgesi X-ray görüntüsü

Resim 4.49’da gösterilen tüm hasar bölgeleri $\pm 45^\circ$ serimlerin yer aldığı bölgede oluşmaktadır. Görünen çatlak ilerlemesine göre parça üzerinde katmanlar arasında bir ayrılma gözlemlenmemiştir. Çatlakların ilerlemesi fiber kırıkları ve sonrasında oluşan matris kırıkları olarak gözlemlenmemektedir. 3,1mm mesafede oluşan hasar bölgesinde kırımın gerçekleşmesi ile birlikte yüzeyin alt kısmında bir malzeme kaybı gözlemlenmiştir. Bu kayıp fiber ve matris kırıkları nedeni ile gerçekleşen alandır. Kompozit kulakçık yapıda ki serimlerin sayısı diğer test numunelerinin $\pm 45^\circ$ serim sayısından fazladır. 4 numaralı kompozit kulakçık tasarımı yapılırken diğer test numunesi gibi simetrik ve balanslı olarak tasarlanıp, üretilmiştir.

4.8.5. 5 Numaralı komponent statik test sonucu X-ray görüntüleri

5 numaralı kompozit kulakçık yapı için eksenel statik test sonrası parça üzerinde ki hasar bölgesi ve detaylı radyografik görüntü Resim 4.50’de verilmiştir. Detaylı X-ray görüntüsüne göre temel hasar parçanın 5.8mm derinliğinde oluşmuştur. Bu bölgede ki hasar yaklaşık 31-32mm kadar ilerlemiştir. Bu bölge $\pm 45^\circ$ serimlerin yer aldığı bölgedir. 4,2mm derinlikte oluşan hasarın temeli parça yüzeyine daha yakın bir hattan başlamış olarak görünmektedir ve bu hasar doğrultusunda matris ve fiberlerde kırılma nedeni ile hasar parçanın merkezine doğru yönelmiştir. Bu hasarın doğrultusunda ki değişimin çelik burcun darbe etkisi ile eksenelliğini kaybetmesi ile parçaya kayma yönünde bir yük aktarımı yapması nedeni ile kaynaklandığı düşünülmektedir. 2,3mm derinlikte olan bölge ise 5 numaralı kompozit kulakçık yapının 0 serimlerinin var olduğu bölgeye yakınsamaktadır. Bu alanda hasarın oluşması ile birlikte 0 derece serimlerin ± 45 derece serim bölgesinden ayrıldığı görülmektedir.



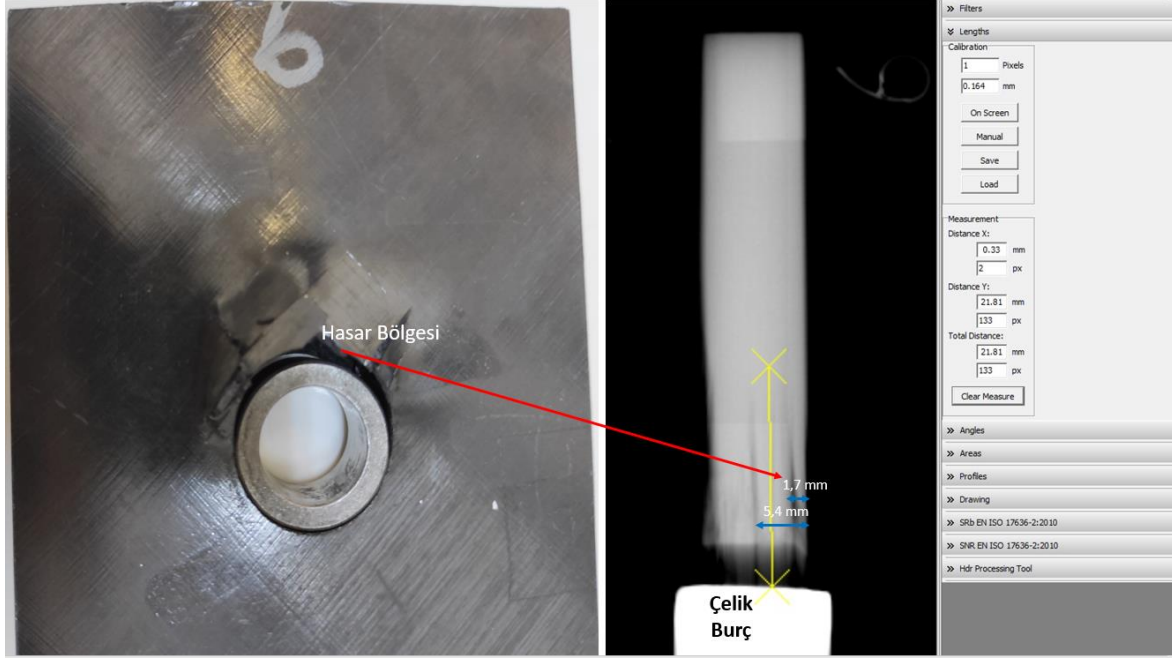
Resim 4.50. 5 numaralı numune hasar bölgesi X-ray görüntüsü

5 numaralı numune özelinde parçanın kat serimleri tüm numunelerde olduğu gibi simetrik ve balanslı olarak serimleri yapılmıştır. 5 numaralı numunede toplam 102 kat serimi yapılan katmanlardan sadece 10 katı 0 derece serime sahiptir ve diğer 92 kat serimi +/- 45 derece serimler ile oluşturulmuştur.

4.8.6. 6 Numaralı komponent statik test sonucu X-ray görüntüleri

6 numaralı kompozit kulakçık yapının eksenel statik çekme testi sonrasında parça üzerinde oluşan hasar bölgesi ve detaylı radyografik görüntüsü Resim 4.51’de verilmiştir. 6 numaralı komponent parçası diğer test parçalarına göre en yüksek sayıda +/- 45 derece serimlere sahiptir. Parça üzerinde ki en büyük hasarın ilerleme mesafesi yaklaşık 21-22mm seviyelerindedir ve bu noktada en düşük hasar boyutu 6 numaralı numunede tespit edilmektedir. Çelik burcun parçaya darbe ile verdiği hasar sonrası temel hasar parçanın 5,4mm derinliğinde ilerlemiştir. Bu bölge parçanın +/-45 derece serimlerin yer aldığı bölgedir ve hasar eksen boyunca çekme yönüne doğru ilerlemiştir. Diğer bir hasar ilerlemesi ise parçanın 1,7mm derinliğinde meydana gelmiştir. Bu bölgede +/- 45 derece serimlerin yer aldığı bölgedir. Parça üzerinde temel hasar hatları ve hasarların ilerleme boyutları göz önüne

alındığında statik eksenel çekme testinde maksimum dayanımın 6 numaralı numune gözlemlenmesi X-ray görüntüleri ile de desteklenmektedir.

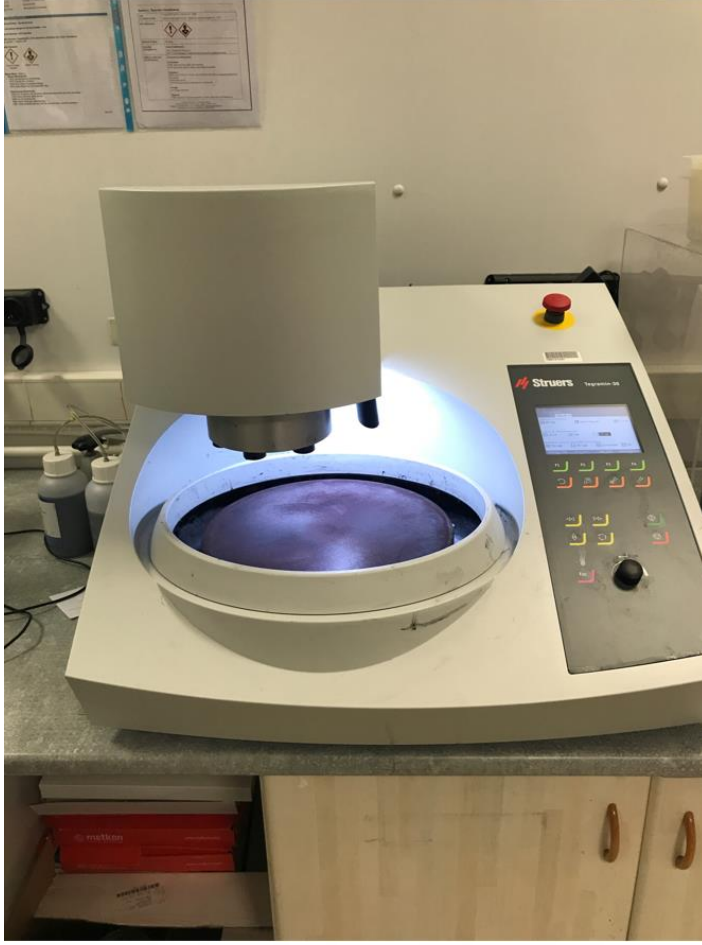


Resim 4.51. 6 numaralı numune hasar bölgesi X-ray görüntüsü

6 numaralı numune diğer tüm numunler gibi serim metodu açısından simetrik ve balanslı olarak hazırlanmıştır. Toplam 102 katmandan sadece simetri eksenindeki 2 katman 0 derece katlar ile serilmiş iken diğer tüm katmanlar ± 45 derece serimler ile serilmiştir. X-ray görüntüleri de kompozit kulakçık yapılarda delik etrafında temel olarak yükün ± 45 derece serimler ile taşındığını doğrulamaktadır. Hasarın ± 45 derece serim hatlarında oluşması ve minimum uzunlukta olması bunu desteklemektedir.

4.9. Komponent Numunelerinin Mikroskop Görüntüleri

Statik testleri gerçekleştirilen kompozit kulakçık yapıların test sonrası tahribatlı muayenesi için mikroskop ile incelemesi yapılacaktır. Parçalar makro ve mikro yapıda incelenecektir. Mikroskop öncesi yüzeyin iyileştirilmesi için numune hazırlığı yapılmıştır. Numune hazırlığı için yüzey iyileştirilmesinin yapılmasında kullanılan cihaz Struers Tegamin 30'dur. Resim 4.52'de yüzey iyileştirilmesinde kullanılan cihaz görüntüsü verilmiştir.

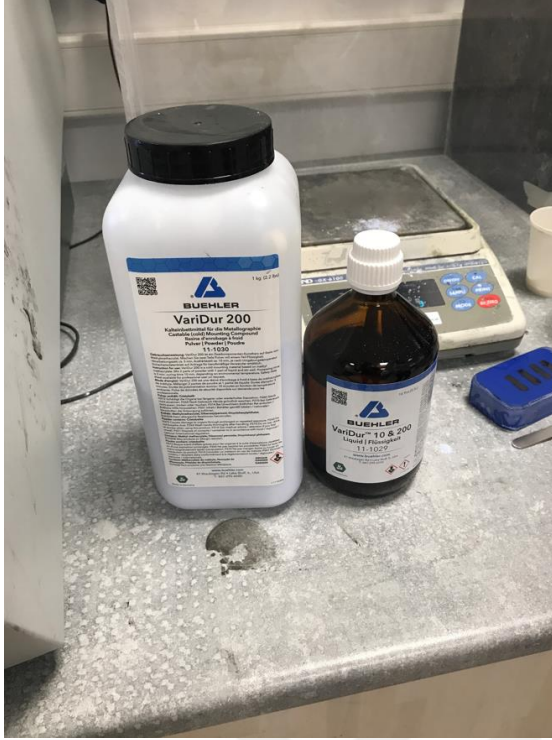


Resim 4.52. Struers Tegramin 30 yüzey hazırlık cihazı

Struers Tegramin 30 cihazının teknik özellikleri aşağıda verilmiştir;

- Disk çapı: 300mm
- Disk hızı: 40-600 rpm
- Dönme yönü: Saat yönü ve tersi
- Disk motoru: 750 W

Yüzey iyileştirme işlemlerinden sonra ise numune bakalite alınır. Bakalite alınmanın temel nedeni ise şekilsiz veya keskin yüzeyli numunelerin tutulma zorluğu ve işlemler sırasında deforme olmasını engellemektir. Bakalite alma işlemi iki temel metot ile yapılabilmektedir. Sıcak ve soğuk sertleştirme işlemleri bu iki temel prensiptir. Sıcak işlemlerde toz malzeme kullanırken soğuk işlemlerde sıvı kimyasallar kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında soğuk işlem metodu kullanılmıştır. Kullanılan kimyasallar Buehler Varidur 10&200 sıvı tipi Resim 4.53'te gösterilmiştir.



Resim 4.53. Buehler Varidur 10&200

Bakalite alma işlemi tamamlandıktan sonra mikroskop ile inceleme için hazırlanmış numune Resim 4.54'te gösterilmiştir. Bu bölümde statik testleri yapılmış altı farklı komponent parçası için makro ve mikro yapıda incelemesi yapılacaktır.



Resim 4.54. Bakalite alınmış muayene örneği

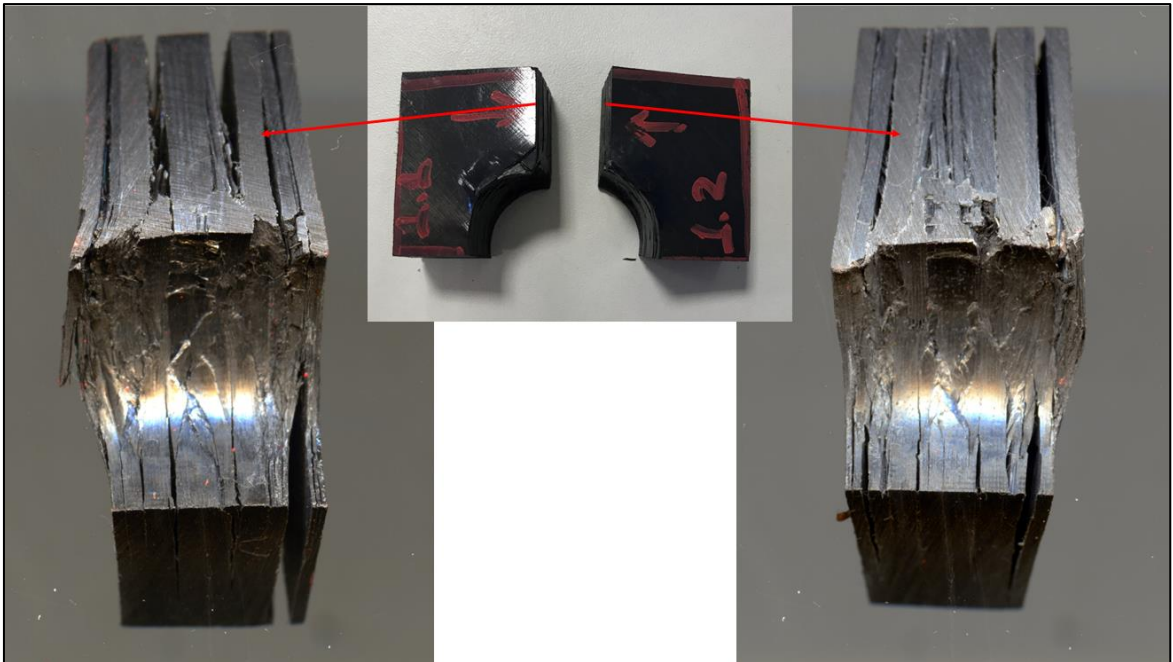
4.9.1. 1 Numaralı komponent mikroskop incelemesi

1 numaralı komponent parçası üzerinden iç yapının incelenmesi için statik çekme testi sonrası parça üzerinden kesilmiş olan muayene parçaları aşağıda Resim 4.55’te verilmiştir.



Resim 4.55. 1 numaralı komponent muayene parçaları

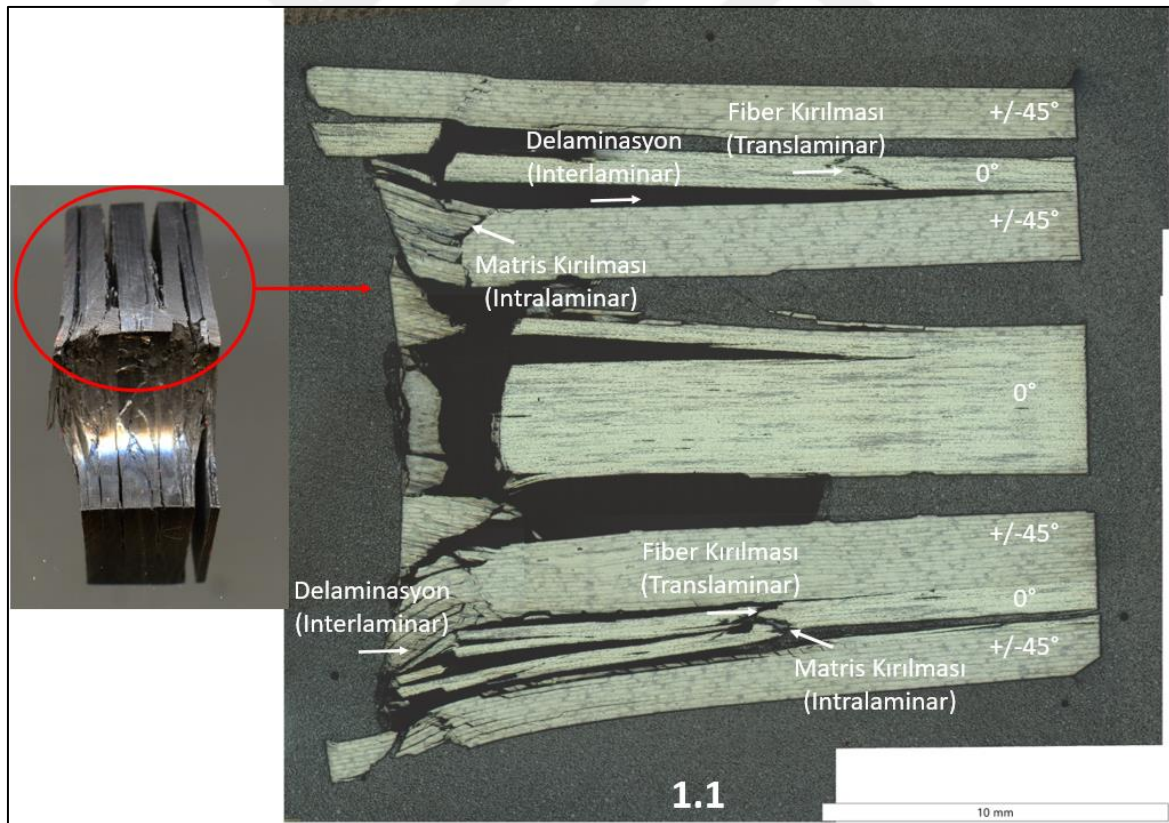
Resim 4.56’da 1 numaralı numune üzerinden alınmış makro görüntüleri verilmiştir. Makro görüntüler üzerinden çelik burçların darbe ile delik etrafında oluşturduğu hasarlar görülmektedir. Aynı zamanda delik etrafında oluşan hasarların genel olarak ilerleme şekli ile katmanlar arasında ki bağın koptuğu görüntüler elde edilmiştir.



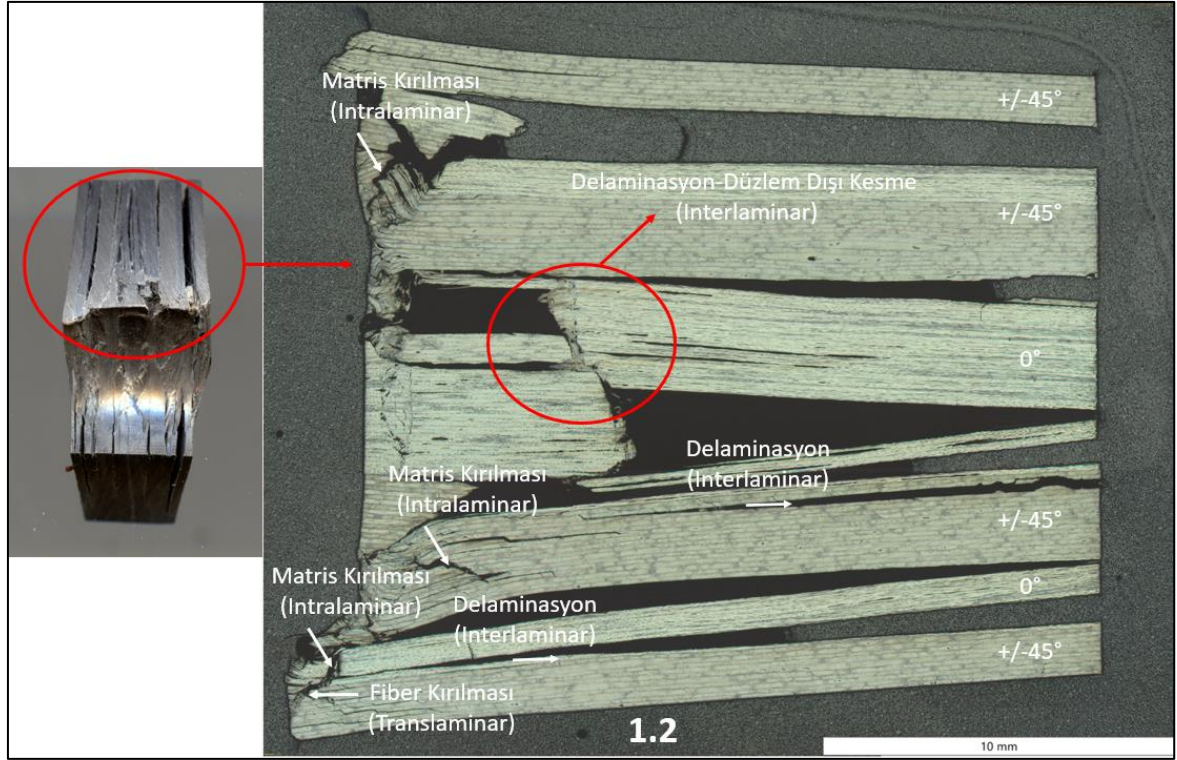
Resim 4.56. 1 numaralı komponent numunesine ait makro görüntüleri

Resim 4.57’de 1 numaralı komponent parçasının delik etrafından çıkarılmış olan 1.1 parçasının mikro görüntüsü verilmiştir. Delik bölgesinde ki burcun darbe etkisi ile oluşan çatlaklar ve çatlakların ilerlemesi görülmektedir. Parça üzerinde oluşan ilk hasarlar +/- 45 serimlerin yer aldığı bölgelerde delaminasyon şeklinde görülmekte. +/- 45 serimler ile 0 derece serimler arasındaki arayüzde ayrılmalar devam ederek ilerlemektedir. 0 derece serim bölgelerinde fiber kırıkları meydana gelmiştir. Fiber kırıklarını takip eden bölgelerde çatlak matris kırıkları ile doğrultu değiştirerek alt katmanlar üzerinden ilerlediği görülmektedir.

Resim 4.58’de ise 1.2 parçasının mikro görüntüsü verilmiştir. Parçanın bu kısmında orta bölgede ki delaminasyonda bir düzlem dışı kaymanın olduğu gözlemlenmektedir. Parçanın alt kısmında oluşan fiber kırıkları matris kırıkları ile ilerleyerek üst bölgede +/- 45° serimler ile 0 derece serimler arasında delaminasyon ile ayrılmalar meydana gelmiştir. Parçanın üst kısmında ise oluşan hasar fiber kırıkları ile ilerlemiştir.



Resim 4.57. 1.1 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri



Resim 4.58. 1.2 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri

4.9.2. 2 Numaralı komponent mikroskop incelemesi

2 numaralı komponent parçasının detaylı incelenmesi için statik test sonrası hasarlanmış parçanın delik bölgesinde ki iki parçanın kesilerek muayeneye hazırlanan parçaların görselleri Resim 4.59’da gösterilmiştir.



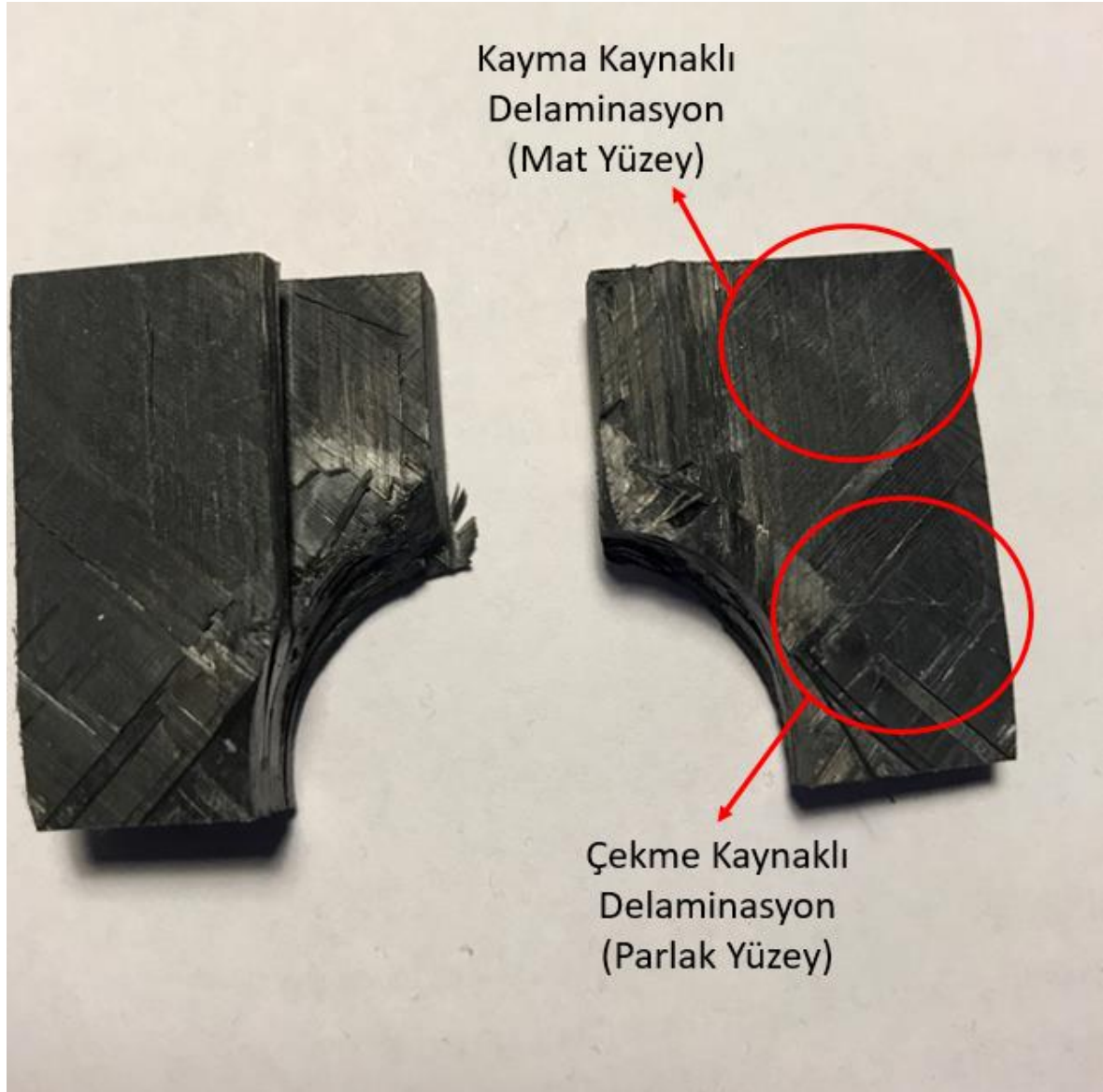
Resim 4.59. 2 numaralı komponent muayene parçaları



Resim 4.60. 2.2 numaralı komponent numunesine ait makro görüntüleri

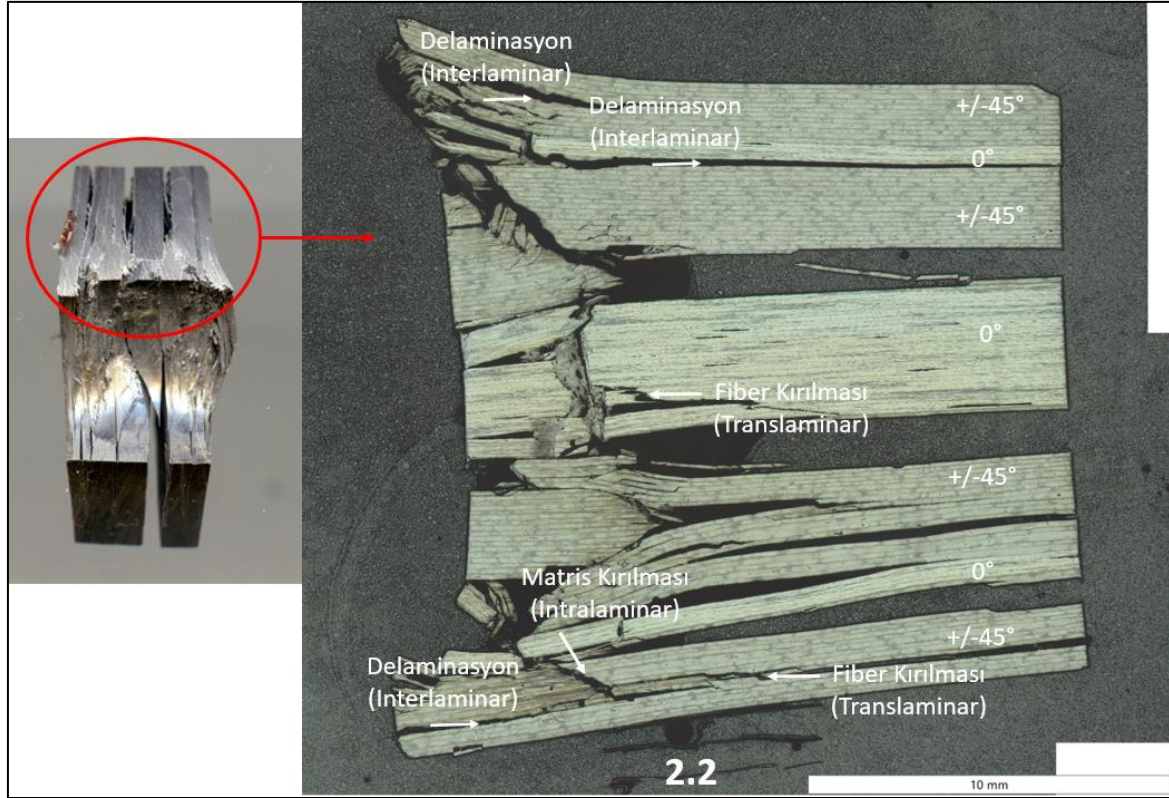
Resim 4.60'ta 2 numaralı komponent parçasına ait olan makro görüntüleri verilmiştir. Parçanın 2.2 kısmının makro görüntüsü alınırken 2.1 kısmı ise kesim esnasında katmanlar arasında ayrılma olduğu için bu kısım için makro görüntüsü alınmamıştır. 2 numaralı numune üzerinde hasarlanan bölgeler ve kaba olarak çatlakların ilerleyişleri görülmektedir.

Resim 4.61'de 2.1 kısmı için yüzey incelemesi yapılmıştır. Hata modları içerisinde parlak yüzeyler üzerinde çekme kaynaklı delaminasyon varlığı kabul edilirken, mat kısımlarda ise kayma kaynaklı delaminasyonların varlığı görülmektedir.



Resim 4.61. 2.1 numaralı komponent numunesine ait yüzey görüntüsü

Resim 4.62’de 2.2 nolu parçanın mikro mikroskop görüntüsü verilmiştir. Parçanın burç teması olan bölgede hasar başlamıştır. 0 derece ve +/- 45 derece katmanlar arasında delaminasyonlar gözlemlenmiştir. Orta bölgede 0 derece serimlerin olduğu bölgede fiber kırılmaları meydana gelmiştir.



Resim 4.62. 2.2 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri

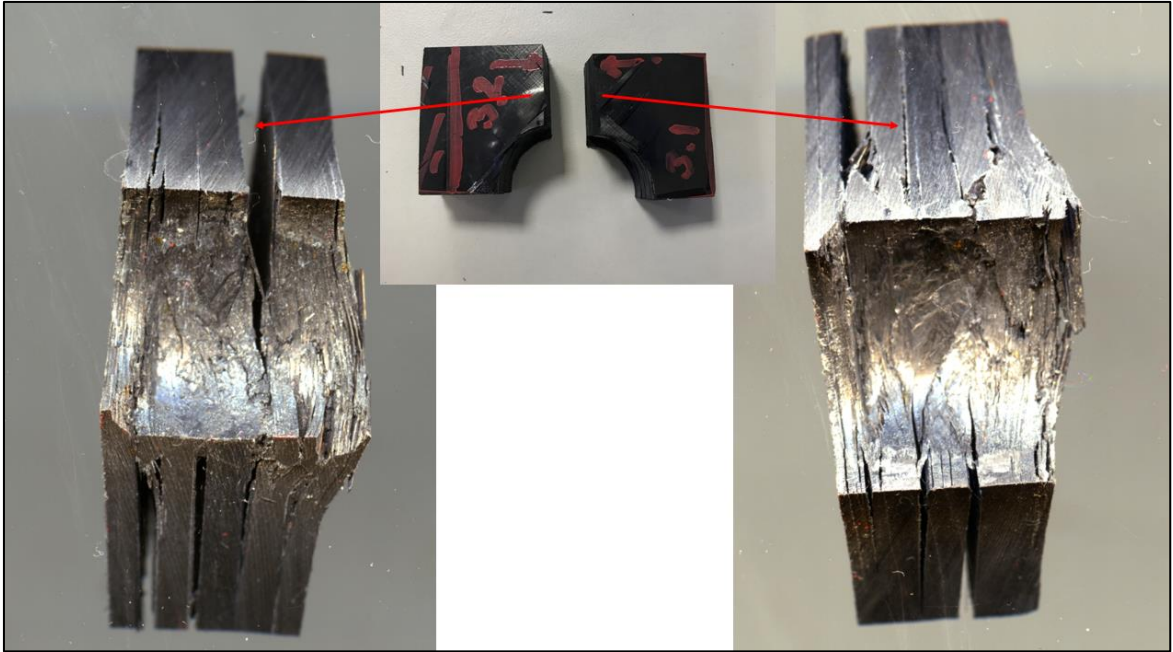
2.2 numunesinin alt kısmında burç kısmının teması sonrası başlayan hata modu ilerleyerek matris kırılması ile alt katmanlara geçmiştir. Alt katmanda ilerleyen çatlak fiber kırıklarının oluşması ile büyüyerek delaminasyonla katmanlar arası ayrıma neden olmuştur.

4.9.3. 3 Numaralı komponent mikroskop incelemesi

3 numaralı kompozit kulakçık yapısının aksenal çekme testi sonrası detaylı iç yapının incelenmesi için makro ve mikro seviyede mikroskop görüntüleri alınmıştır. Resim 4.63'te test sonrası hasarlanan delik çevresinden alınan parçaların görüntüsü verilmiştir. Resim 4.64'te ise kesimleri tamamlanan parçaların makro ölçekte görüntüleri alınmıştır. Makro seviyede alınan görüntülere göre parça çelik burç parçasının çekme yüklemesi ile birlikte temas bölgesinde hasarlanmalar başlamış olup, parça içerisinde oluşan hasarlar ise parça boyunca hareketlenmiştir. 3.1 ve 3.2 parçalarında da katmanlar arası ayrımlar meydana gelmiştir.

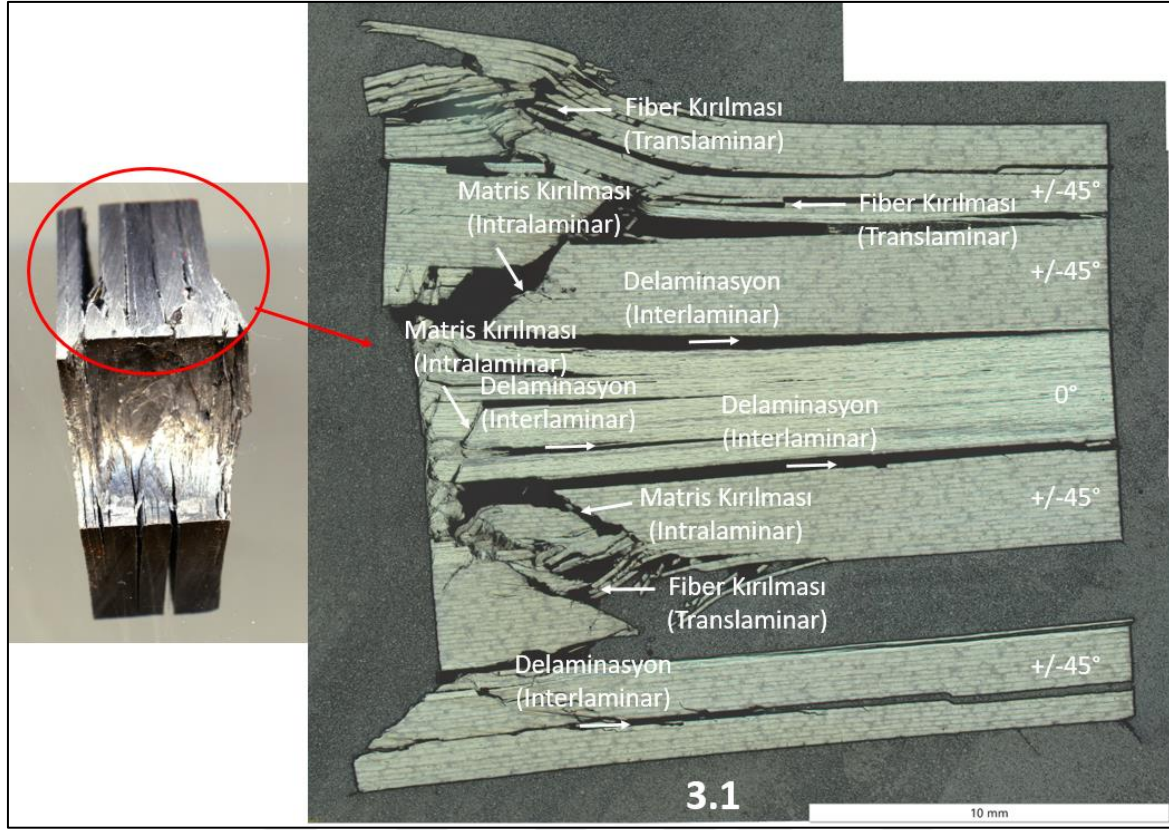


Resim 4.63. 3 numaralı komponent muayene parçaları



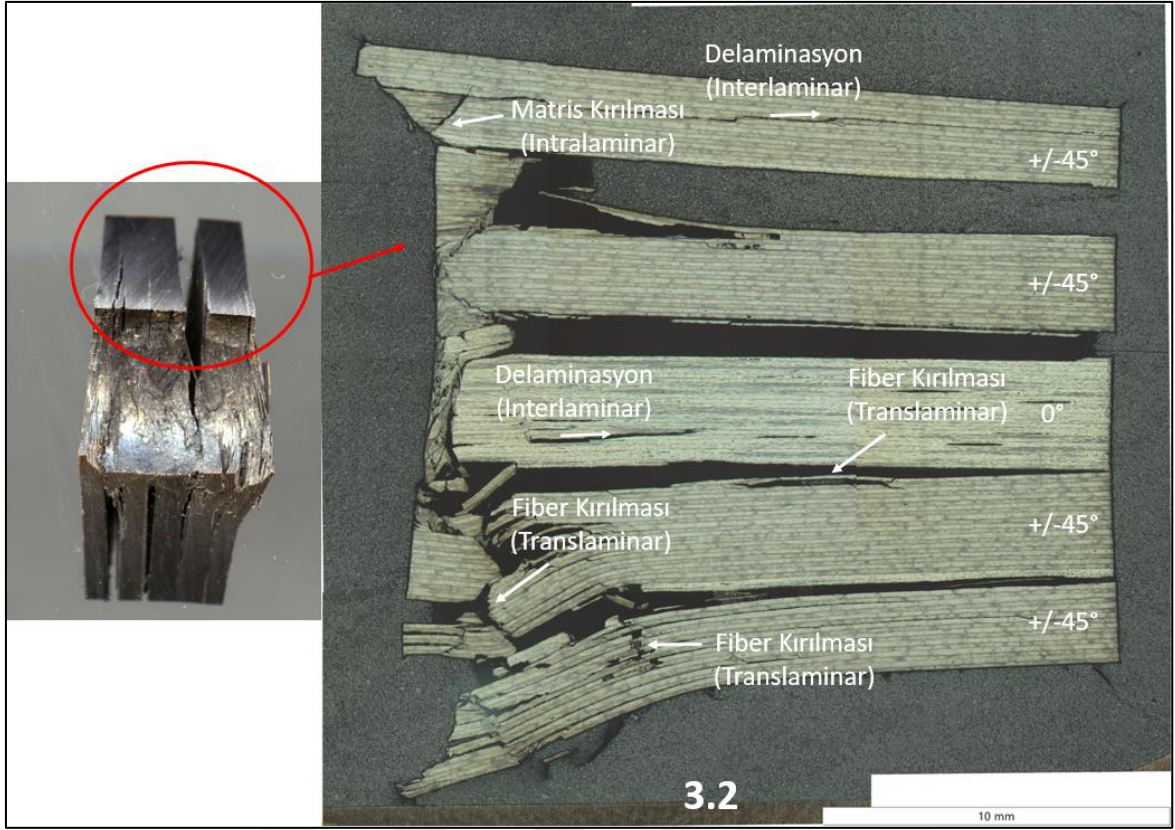
Resim 4.64. 3 numaralı komponent numunesine ait makro görüntüleri

Resim 4.65'te 3.1 parçasının mikro yapıda mikroskop görüntüsü verilmiştir. Kırımların başlangıç bölgeleri çelik burcun parçaya baskı yaptığı bölgelerden başlamıştır. Alt kısımda +/- 45 derece serim bölgesinde delaminasyon kaynaklı bir katman ayrımı gözlemlenirken. Üst kısımda ki bölgede çatlak fiber kırıkları ile ilerlemiş ve akabinde delaminasyon oluşmuştur. 0 derece bölgesinde başlamış olan birden fazla çatlak ilerlerken matris kırılması ile alt katmanlara iletilmiştir. İlerleyen çatlak delaminasyon ile katmanlar arası ayrılmaya neden olmuştur.



Resim 4.65. 3.1 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri

Resim 4.66'da 3 numaralı komponent parçasının delik bölgesinin diğer tarafını oluşturan 3.2 test numunesine ait olan mikroskop görüntüsü verilmiştir. 3.2 numaralı parçanın hasar başlangıç bölgesi çelik burcun parçaya bastığı bölgelerdir. Parçanın alt kısmındaki +/- 45 derece serimlerin yer aldığı bölgede fiber kırılmaları meydana gelmiş ve kırılmalar yukarı doğru hareketlenerek delaminasyona neden olmuştur. 0 derece katman bölgesinde burcun hasarladığı bölgelerde kılcal çatlaklar matris kırılmasına neden olmuştur. Yine 0 derece bölgesinde delaminasyonlar oluşmuştur. Üst kısımda ki +/- 45 derece serimlerin olduğu kısımda matris kırılması ile başlayan hasar delaminasyona sebep olmuş ve parça boyunca uzanmıştır.



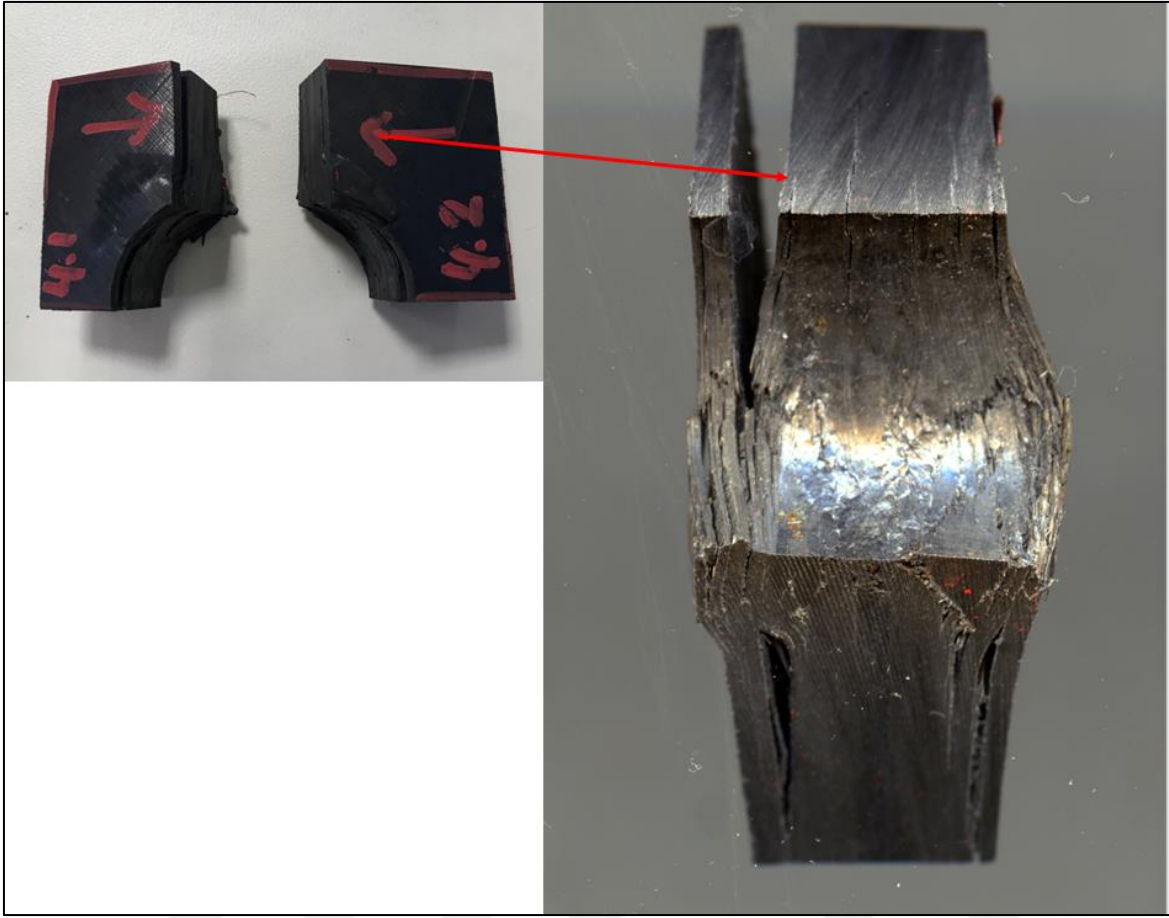
Resim 4.66. 3.2 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri

4.9.4. 4 Numaralı komponent mikroskop incelemesi

4 numaralı komponent için statik test sonrası mikroskop incelemesine hazırlanan parçalar Resim 4.67’de verilmiştir. Resim 4.68’de komponent parçasından çıkarılmış 4.2 numunesinin makro görüntüsü verilmiştir.



Resim 4.67. 4 numaralı komponent muayene parçaları



Resim 4.68. 4.2 numaralı komponent numunesine ait makro görüntüleri

Resim 4.68’de görüldüğü gibi makro boyutta delik etrafında çelik burç üzerinde eksenel olarak uygulanmış yüklemenin oluşturduğu hasarlar görülmüştür. Katmanlar arası ayrımlar ve delik yüzeyinde oluşan çatlaklar ve çatlakların ilerleme yönleri gözlemlenmiştir.

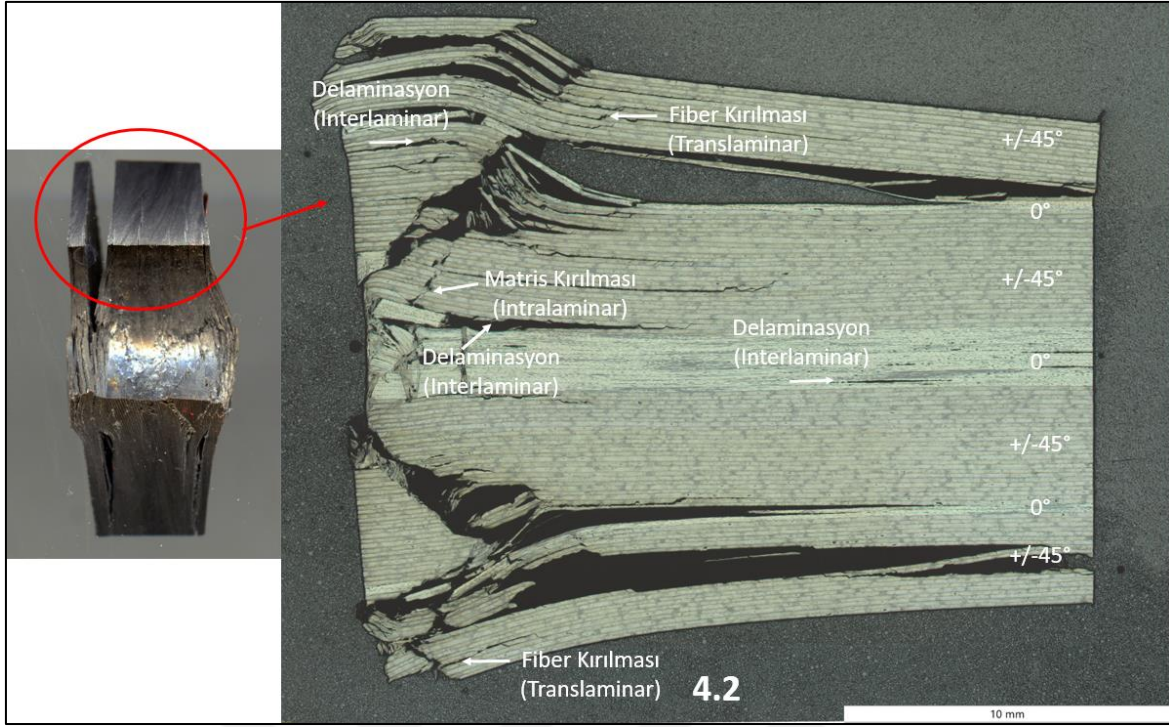
Resim 4.69’da ise katmanlar arası ayrımının kesim esnasında direk ayrılmış olan 4.1 numunesinin yüzey incelemesi yapılmıştır. Parça katmanları arasında ayrıldığı için mikroskop ile incelenmemiş ve yüzey incelemesine bırakılmıştır. 4.1 numunesinin üst kısmında yüzey mat bir şekilde görülmektedir bu nedenle bu alandaki katmanlar arasın ayrımın kayma gerilmeleri kaynaklı olduğu görülmektedir. Aynı parçanın alt kısmında ise parlak bir yüzey görülmektedir. Parlak yüzey bölgesinde oluşan hasar ise çekme yüklemesi kaynaklı oluşan hasarlardır.

4.1 ve 4.2 numunelerinin makro ölçüde alınmış görüntülerinden temel olarak parça üzerindeki yükleme koşulları ve temel hasar oluşumları gözlemlenmiştir.



Resim 4.69. 4.1 numaralı komponent numunesine ait yüzey görüntüsü

Resim 4.70’te 4.2 numaralı numuneye ait olan mikro yapıda mikroskop görüntüsü verilmiştir. Bu parça içinde ilk hasar alma bölgesi çelik burcun parçaya bastığı bölgede olduğu gözlemlenmektedir. Parça üzerinden temel olarak oluşan hasarlar +/- 45 derece serimlerin yer aldığı bölgelerde gözlemlenmektedir. Parçanın orta kısmında ilk hasarın ilerlediği ve sonrasında matris kırılması ile katmanlar arası geçiş yaparak ilerleyen hasar gözlemlenmektedir. Matris kırılması nedeni ile alt katmanlara geçen hasar 0 derece ile +/- 45 derece serim bölgesi arasında bir delaminasyon ile ilerlemiştir. Parçanın üst kısmında da delaminasyon kaynaklı ayrılmalar gözlemlenmiştir. Aynı zamanda en üst kısımda da fiber kırılmaları gözlemlenmektedir.



Resim 4.70. 4.2 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri

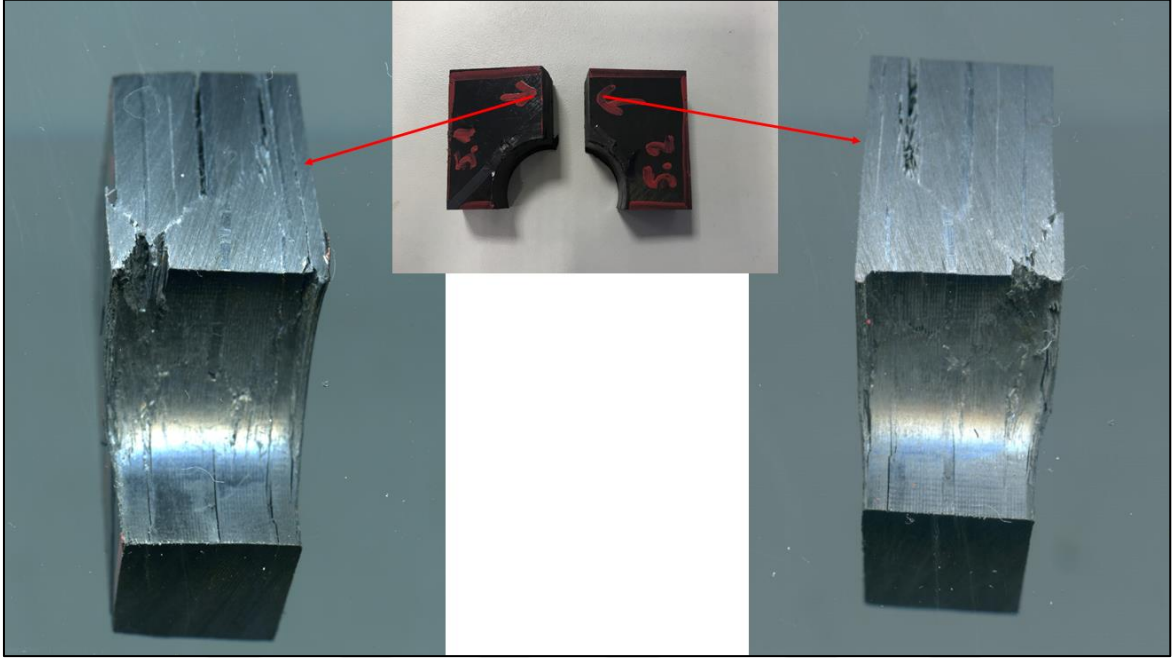
4.9.5. 5 Numaralı komponent mikroskop incelemesi

Statik olarak uygulanan testlerin sonunda hasar almış olan 5 numaralı komponent parçasının delik etrafındaki hasar modlarının gözlemlenmesi için yapılan kesimlerin görselleri Resim 4.71’de gösterilmiştir.



Resim 4.71. 5 numaralı komponent muayene parçaları

Resim 4.72’de 5 numaralı komponent parçasına ait olan makro görüntüleri verilmiştir. Temel olarak makro görüntülerde görünen delik etrafındaki burç baskısı nedeni ile hasar başlangıçlarının olduğu gözlemlenmektedir.

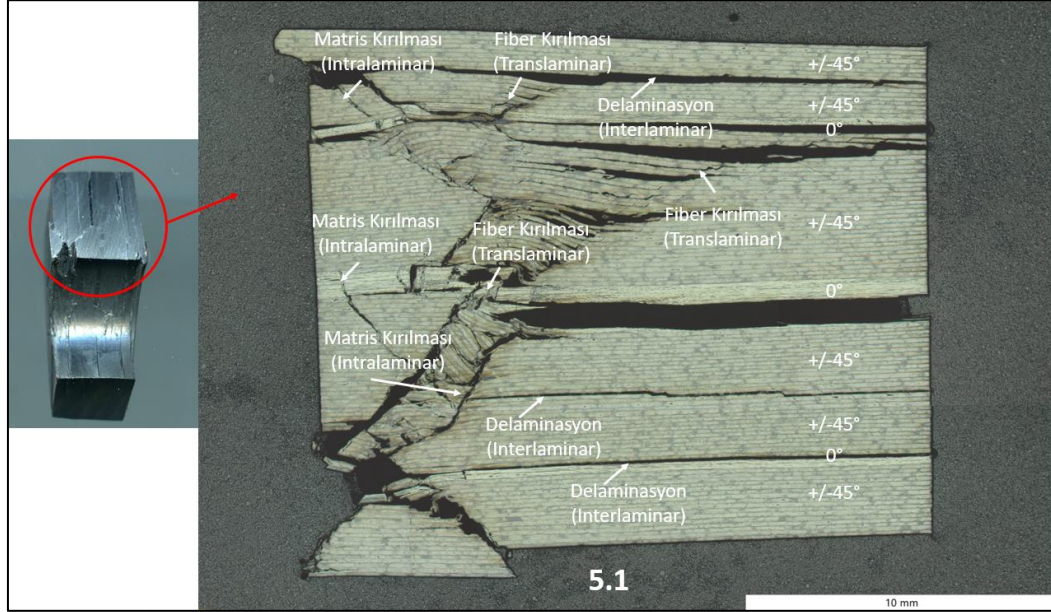


Resim 4.72. 5 numaralı komponent numunesine ait makro görüntüleri

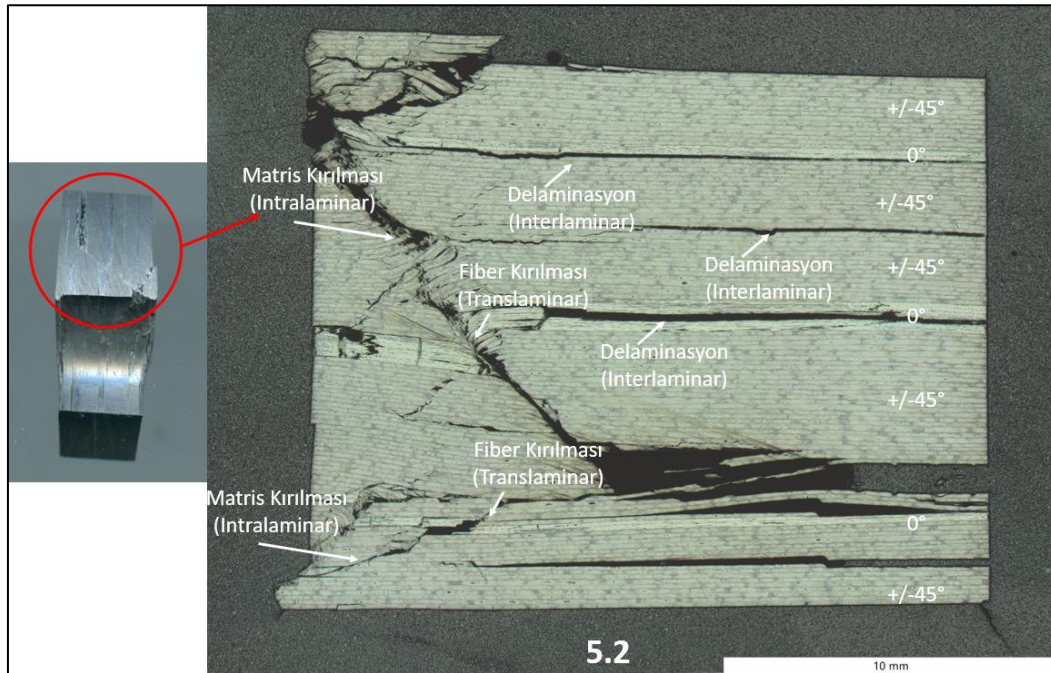
Resim 4.73’te 5.1 numaralı numuneye ait olan mikro yapıda mikroskop görüntüsü verilmiştir. Temel hasar başlangıçları burç bölgesindeki baskıdan kaynaklı başlamış olarak görülmektedir. Alt kısımda 0 derece serimler ile +/- 45 derece serimlerin yer aldığı katmanlar arasında bir ayrılma gözlemlenmiştir. Burç bölgesinden başlayan hasarın ilerleyerek +/- 45 derece serimlerin yer aldığı bölgede bir delaminasyon meydana getirdiği görülmüştür. Parçanın orta bölgelerinde fiber kırıkları gözlenirken, parçanın üst kısımlarına doğru matris kırılmaları nedeni ile katmanlar arası hareket eden hasar fiber kırılmalarına neden olmuştur. Parçanın en üst kısmında ise matris kırıkları ile başlayan hasar ilerledikten sonra fiber kırılmalarına neden olmuş ve nihai olarak taşındığı üst bölge de delaminasyonlara neden olmuştur.

Resim 4.74’te ise 5.2 numaralı numuneye ait olan mikro yapıda mikroskop görüntüsü verilmiştir. Burcun baskı yaptığı bölgeden başlayan hasarlar parçanın alt kısmında matris kırılması ile yukardaki katmanlara ilerlemiştir. Yukarıda ki bölgede ise ilerleyen çatlak fiber kırılması ile yukarı yönlü olarak ilerlemiştir. Parçanın üst kısmında +/- 45 derece serimlerin

yer aldığı bölgede oluşan büyük hasar aşağıya doğru matris kırılmaları ile ilerlemektedir. Bu ana kırılma nedeni ile ilerleyen hasarlardan 0 derece serimler ile ± 45 derece serimler arasında bir delaminasyon oluşmuştur. Parçanın orta bölgesinde ise fiber kırılmaları nedeni ile başlayan hasar 0 derece serimlerin yer aldığı katmanda bir delaminasyona neden olmuştur.



Resim 4.73. 5.1 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri



Resim 4.74. 5.2 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri

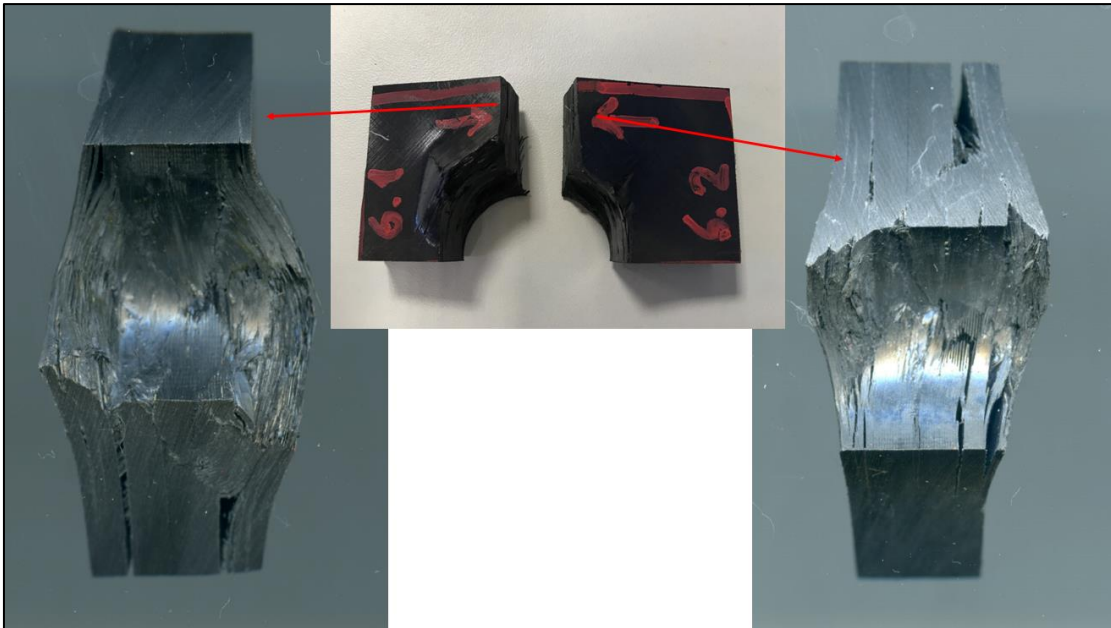
4.9.6. 6 Numaralı komponent mikroskop incelemesi

6 numaralı komponent test numunesine ait olan statik test sonrası hasar görüntüsü ve delik etrafında oluşan hasarların detaylı incelenmesi için kesilen numune parçaları Resim 4.75’te verilmiştir.



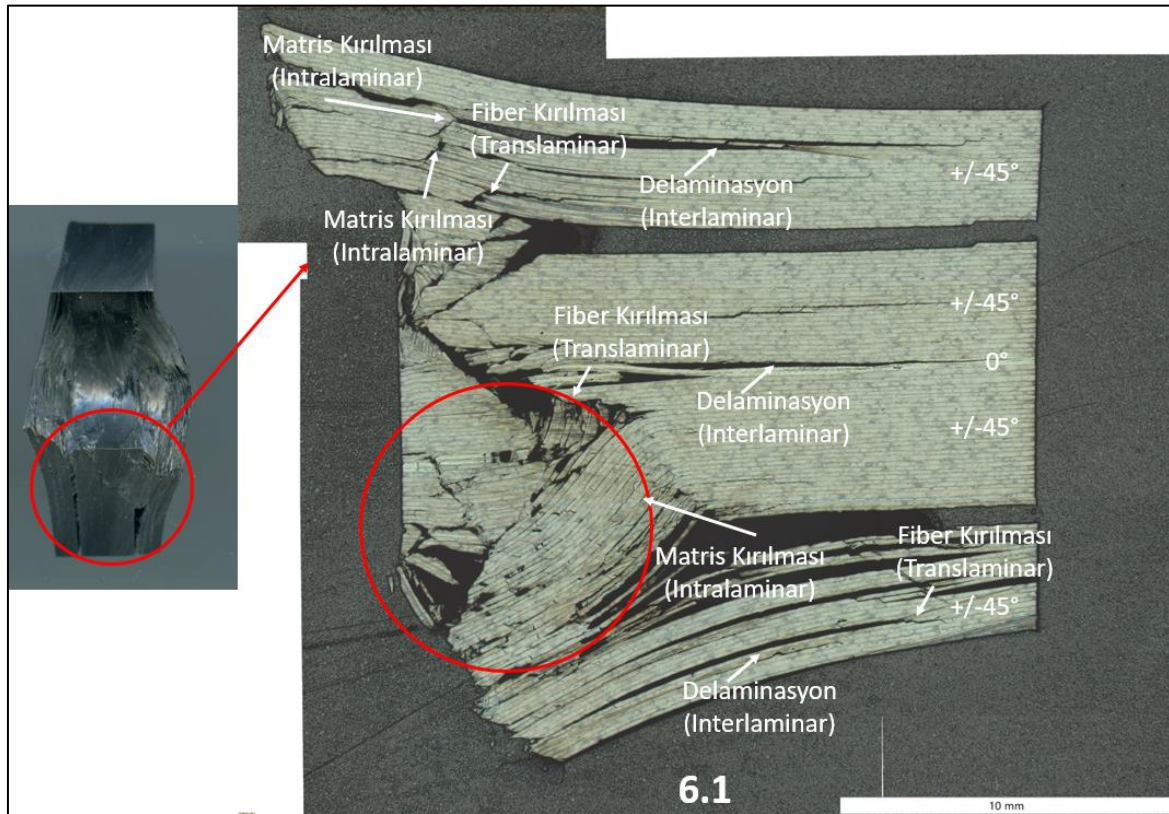
Resim 4.75. 6 numaralı komponent muayene parçaları

Resim 4.76’da ana parçadan incelenmek için çıkarılan iki adet parçanın makro boyutta incelemesi verilmiştir. Makro görüntüye göre parçanın delik etrafı burç teması ile başlayan hasarlar gözlemlenmektedir.



Resim 4.76. 6 numaralı komponent numunesine ait makro görüntüleri

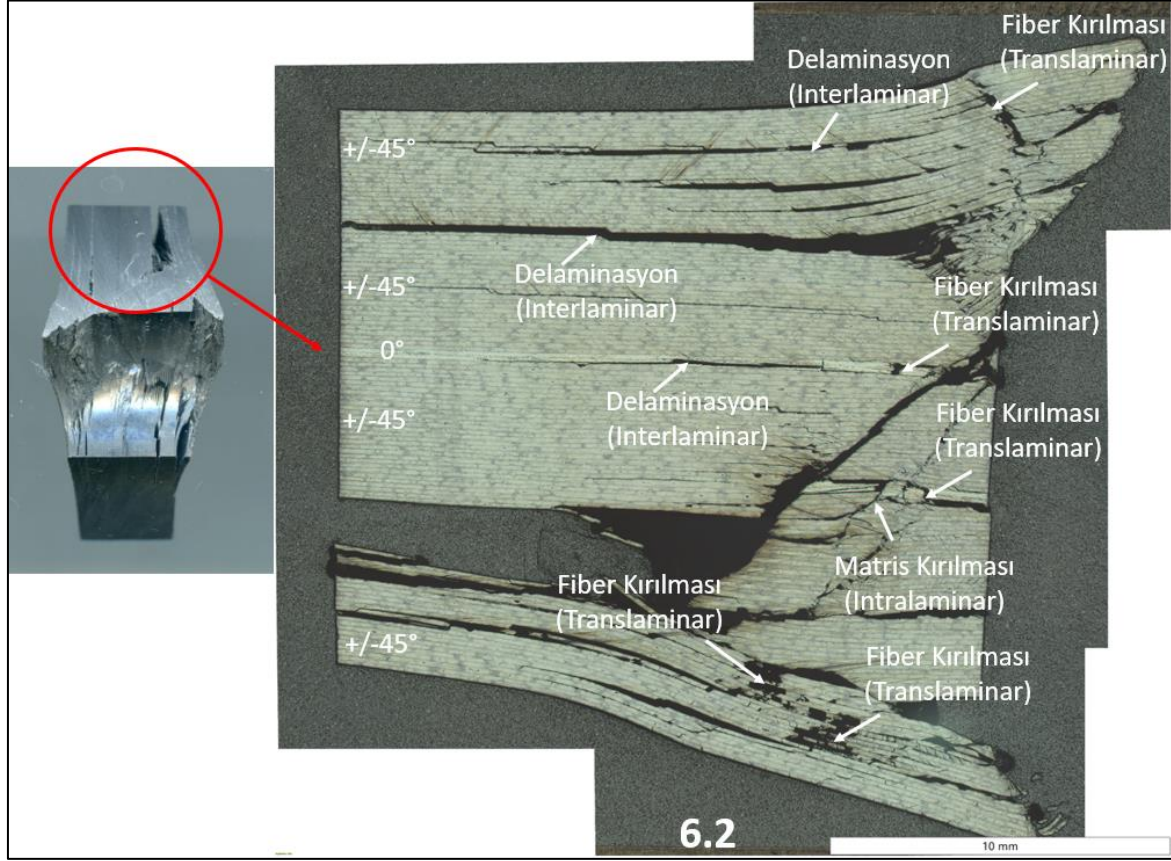
Resim 4.77’de 6.1 numaralı numuneye ait olan mikro yapının mikroskop görüntüsü verilmiştir. Parçanın hasar başlangıç bölgesi burcun temas bölgesi ile ilişkili olduğu görülmektedir. Parçanın orta kısmına gelen yüksek yükleme ile matris kırımı ve fiber kırımının bir arada olduğu karışık modda bir hasar oluşumu meydana gelmiştir. İlerleyen hasar 0 derece serimleri ile ± 45 derece serimlerin arasında bir delaminasyona neden olmuştur. Parçanın üst kısmında ise matris ve fiber kırıkları gözlemlenirken ilerleyen hasarlar delaminasyona neden olmuşlardır.



Resim 4.77. 6.1 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri

Resim 4.78’de parçanın diğer kısmı olan 6.2 numunesi için alınmış olan mikroskop görüntüsü verilmiştir. Parçanın orta bölgesinde burç teması kaynaklı başlayan hasar aşağı doğru matris kırılmaları ile ilerlemiş ve fiber kırıkları ile birlikte ilerlemiştir. Parçanın alt kısmında fiber kırılmaları oluşmuştur. Fiber kırıklarının devamında ise parçada delaminasyonlar oluşmuştur. Parçanın orta kısmında oluşan hasarlar aşağı yönlü giderken 0 derece serimlerin doğrultusu boyunca da ilerlemiş ve bölgede fiber kırılmasına neden olmuştur. Devam eden hasar 0 derece serimli katman ile ± 45 derece serimli katman arasında delaminasyon oluşturmuştur. Parçanın alt ve üst kısımlarında delik yapının burcun

baskısı nedeni ile uçlara doğru bir kaymaya neden olmuştur. Bu kayma nedeni ile uç bölgelerde katmanlar arası açılmalar görülmektedir.



Resim 4.78. 6.2 numaralı komponent numunesine ait mikro görüntüleri

4.9.7. Komponent mikroskop incelemesi değerlendirilmesi

6 farklı dizilim kombinasyonuna sahip olan kompozit kulakçık yapının incelenmesi için mikroskop yardımı ile iç yapıyı ve statik olarak test sonrası oluşan hasarların şekli, ilerleme süreci, ve boyutları gibi konuları detaylandırmak için yapılmıştır. Temel olarak mekanik test sonuçları ile uyumlu görüntüler alınmıştır. Parça üzerinde delik etrafında maksimum yüklemelerin kayma yönünde geldiği için parçanın dayanımını arttıran esas konu serim kombinasyonudur. +/- 45 derece serimlerin yoğunluğu arttığı durumda dayanımında arttığı gözlemlenmiş ve mikroskop görüntüsünde hasarların olduğu bölgelerin bu serimlerin olduğu bölgelerde yoğunlaştığı görülmektedir. Bunun nedeni ise bu bölgede asıl olarak gelen yüklerin +/- 45 derece serimlerin taşıdığı gözlemlenmektedir. 1 numaralı numuneden 6 numaralı numuneye kadar sürekli +/- 45 derece serimlerin arttığı bilindiği için mikroskop

görüntülerinde de 6 numaralı numuneye doğru dayanım artarken hasar bölgelerinde ki dağılımda bir azalma gözlemlenmiştir.

4.10. Komponent Yorulma Testi

Statik testleri tamamlanan altı farklı serim kombinasyonuna sahip olan kompozit kulakçık yapılardan eksenel çekme dayanımı en yüksek olan 6 numaralı komponent parçası üzerinde bir yorulma testi icra edilmiştir. Parça üzerinde hedeflenen 2 milyon döngüyü tamamlaması olacaktır. Bu döngünün tamamlanması durumunda parçanın yorulma kritik durumunu başardığı kabul edilmiştir. Yorulma testleri MTS 312.21 - 100 kN kapasiteli servohidrolik dinamik universal test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Test cihazının görüntüsü Resim 4.79’da verilmiştir.



Resim 4.79. MTS 312.21 - 100 kN kapasiteli test cihazı

MTS 312.21 çekme ve yorulma test cihazının teknik özellikleri aşağıda verilmiştir;

- 100 kN max kapasite
- 5,8 – 16,5 mm çapında yuvarlak numune bağlama kapasitesi
- 100 kN statik ve dinamik yüklemeye uygun basma plakaları
- -80 °C - +175 °C'ye kadar sıcaklıklarda çalışabilen, ilk ölçüm uzunluğu 12,5 mm, 25 mm ve 50 mm olarak ayarlanabilen +5 mm ile -2,5 mm arasında hareket edebilen dinamik ekstensometre
- -40 °C ile +100 °C arası sıcaklıklara çalışabilen, en az ± 15 mm aralığında ölçüm yapabilen harici bir LVDT (deflektometre)

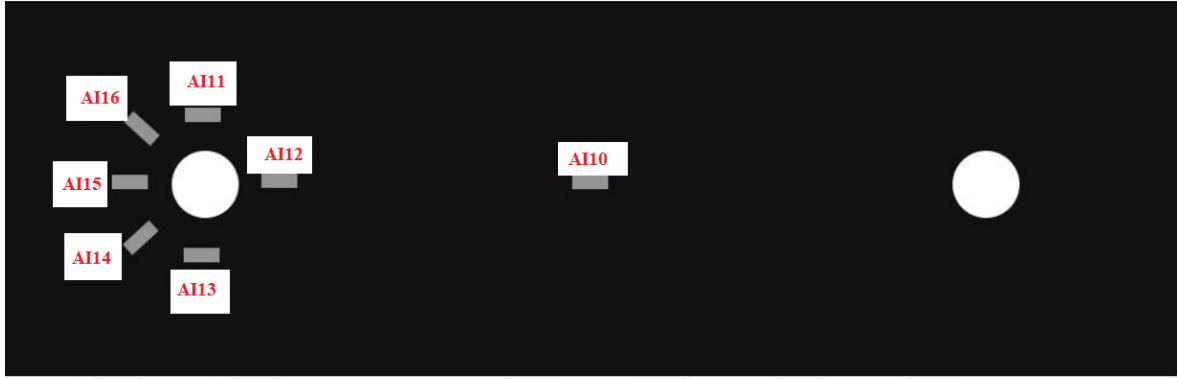
Yorulma için kullanılan yükleme Şekil 4.35'de verilmiştir. Yükleme 30kN'luk bir yükleme hedeflenmiştir. Kulakçık yapıların testlerinde sıkça kullanılan yükleme koşulu olarak $R=0,1$ yüklemesi kullanıldığı için yükleme 30kN ile 3kN arasında bir salınım yapmıştır.



Şekil 4.35. Yorulma yükleme grafiği

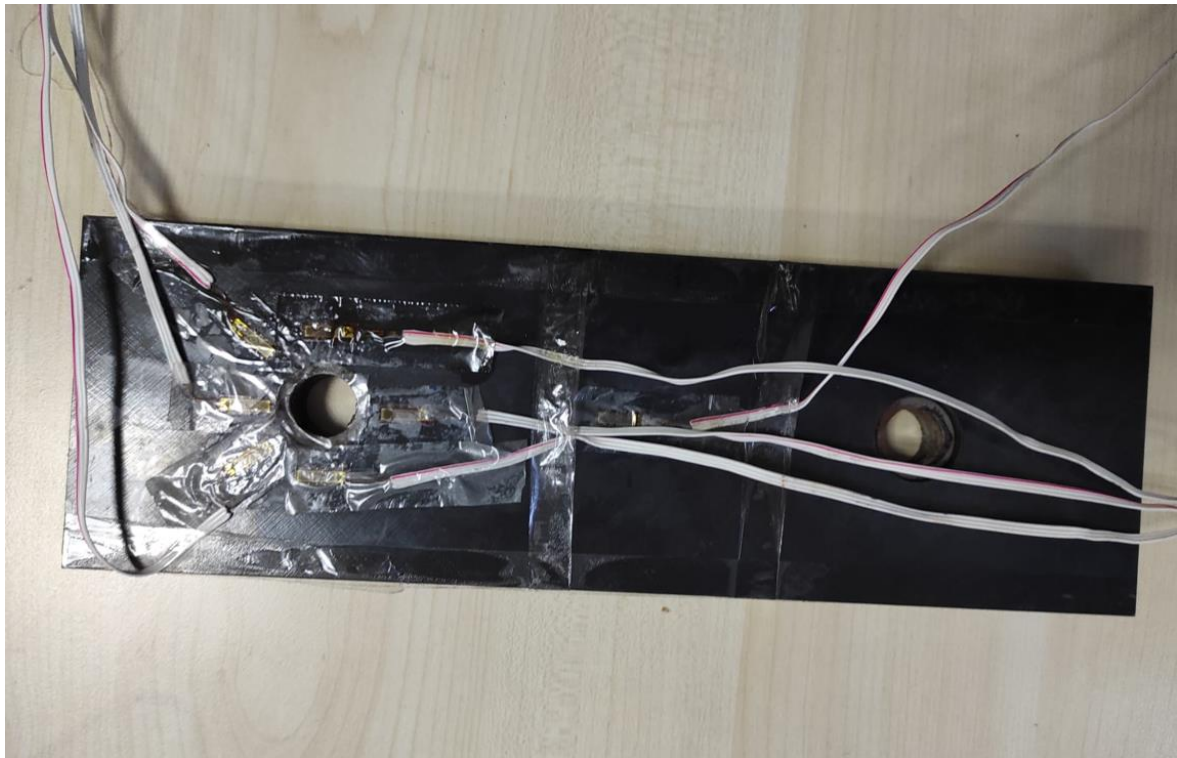
Yorulma test numunesi test sürecinde 7 adet gerinim ölçer ile izlenmiştir. Parça üzerindeki gerinim ölçer lokasyonları ve isimlendirmeleri Şekil 4.36'da verilmiştir. Parça üzerinde

gerinim ölçerler delik etrafındaki yükleme durumlarını incelemek ve parçanın simetri eksenini üzerindeki yüklemeleri takip etmek için yerleştirilmiştir. Yorulma testinde kullanılan gerinim ölçer KYOWA marka KFGS-5-120-C1-11 L1M3R tipi gerinim ölçerlerdir.



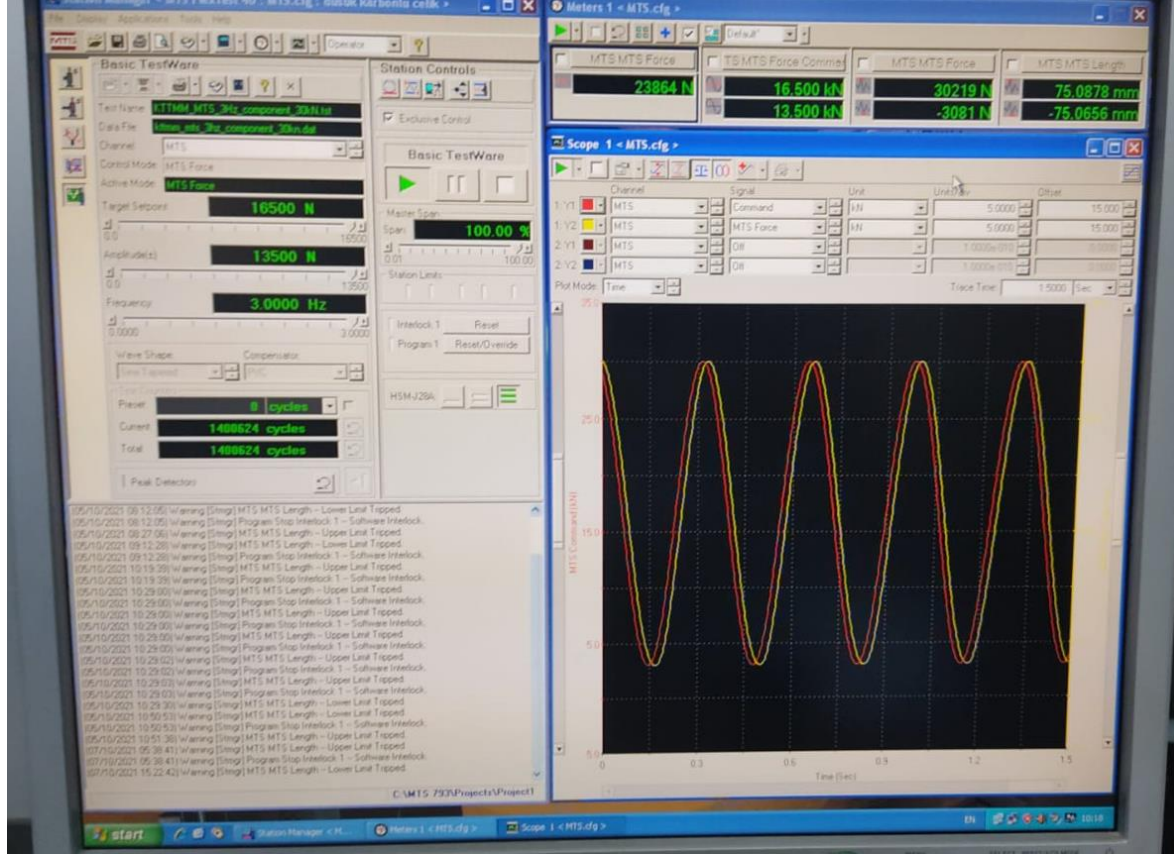
Şekil 4.36. Yorulma numunesi gerinim ölçer lokasyonları ve isimlendirmesi

Resim 4.80’de testi gerçekleştirilen 6 numaralı komponent parçasının görüntüsü verilmiştir. Yukarıda lokasyonları verilen gerinim ölçerler parça üzerine konumlandırılmıştır. Test oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.80. 6 numaralı komponent yorulma numunesi

MTS test cihazında yüklemenin yapıldığı ekran görüntüsü Şekil 4.37’de verilmiştir. Yükleme hedeflendiği şekilde $R=0,1$ ’de 30kN ile 3kN arasında yapılmıştır.

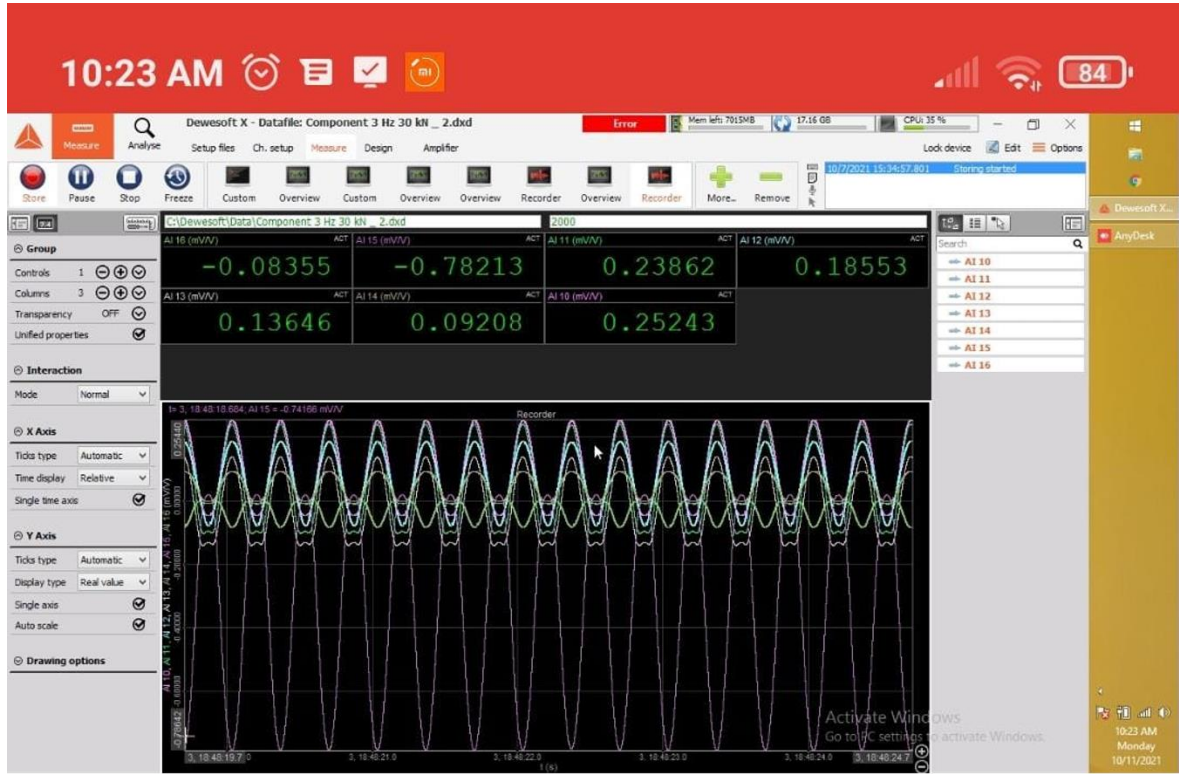


Şekil 4.37. MTS test cihazı yorulma yüklemesi grafiği

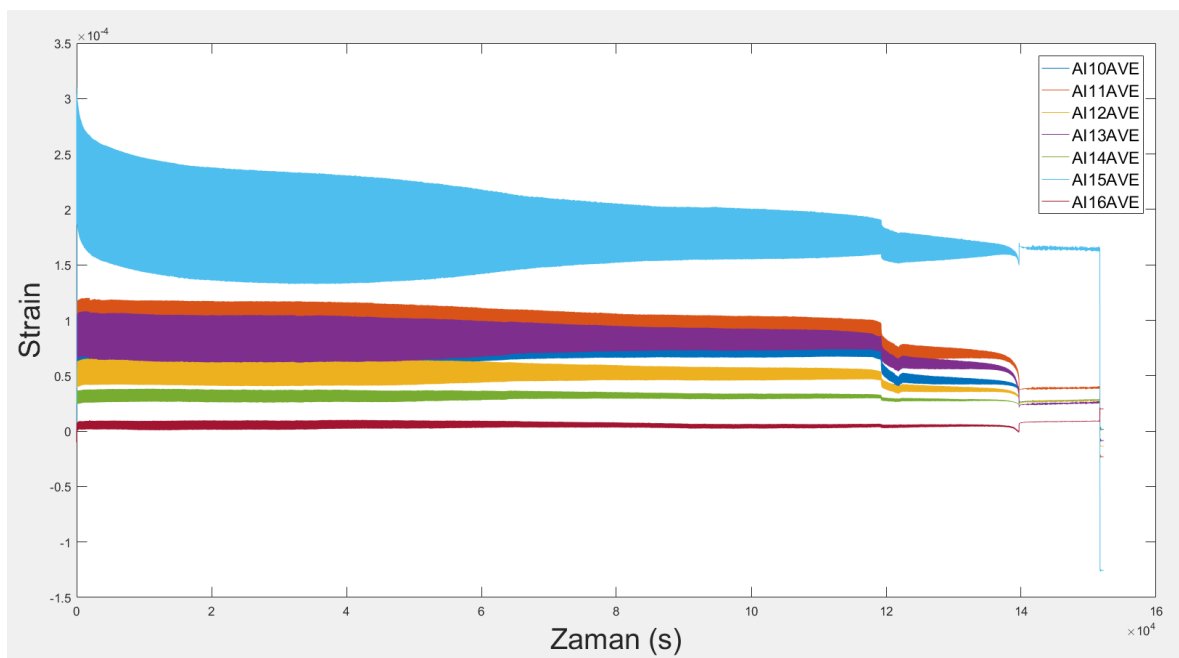
Şekil 4.38’de ise yükleme esnasında gerinim ölçer değerlerinin alındığı data toplama cihazından alınan görsel verilmiştir. Gerinim ölçerler beklenendiği gibi sinüzoidal bir görüntü vermektedir. Eksi olarak görünen değerler ise gerinim ölçerin bağlanma yönü nedeni ile oluşmuştur.

Test dataları Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41 olarak üç bölümde verilmiştir. Bunun temel nedeni data büyüklüğüdür. Testimiz MTS cihazındaki ısınma nedeni ile 419 100 döngüde durmuştur. Test tekrar başlatıldığında 1 900 000 döngüye ulaştığında parçanın test cihazı ile bağlantısı olan pim kopmuştur bu nedenle test durdurulmuştur. Testin 3. Döngüsü ile başlatıldığında ise toplam olarak 2 101 101 döngü tamamlandıktan sonra durdurulmuştur. Test parçasında yapılan göz ile incelemede parçada herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir bu nedenle parçanın yorulma testi başarı ile tamamlanmıştır.

Yapılan testler neticesinde parçanın yorulma kritik bir parça olmadığı gözlemlenmiştir. Kompozit kulakçık yapıda herhangi bir hasar görülmemiş olması parçanın yorulma yüklemesinin olduğu bölgelerde kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

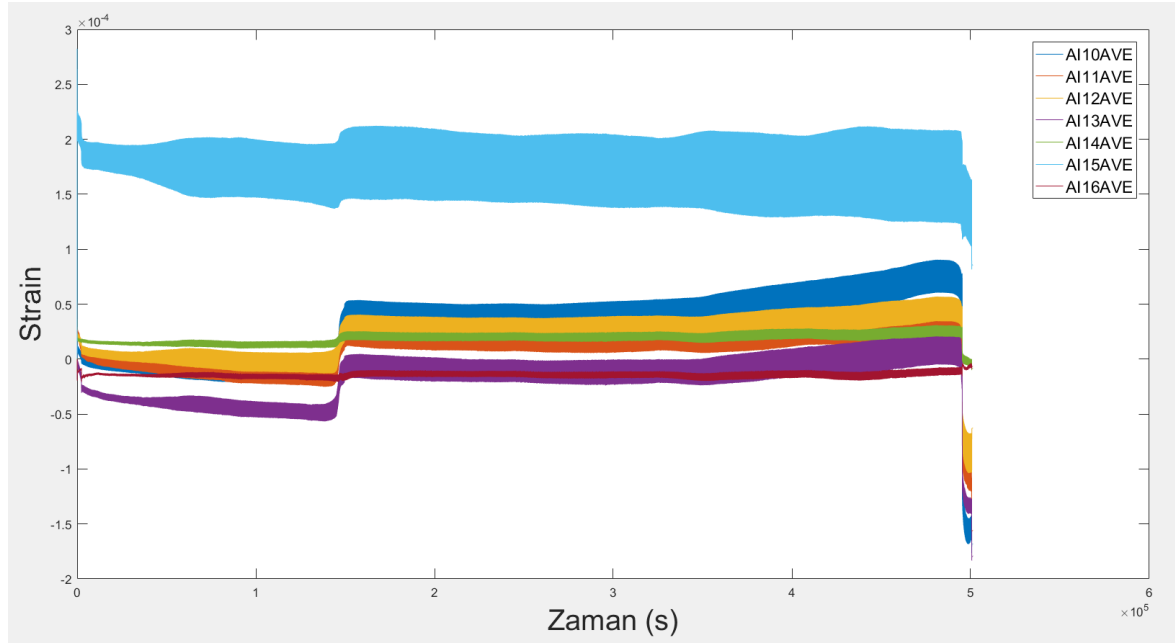


Şekil 4.38. Test esnasında gerinim ölçer değerlerini gösteren grafik

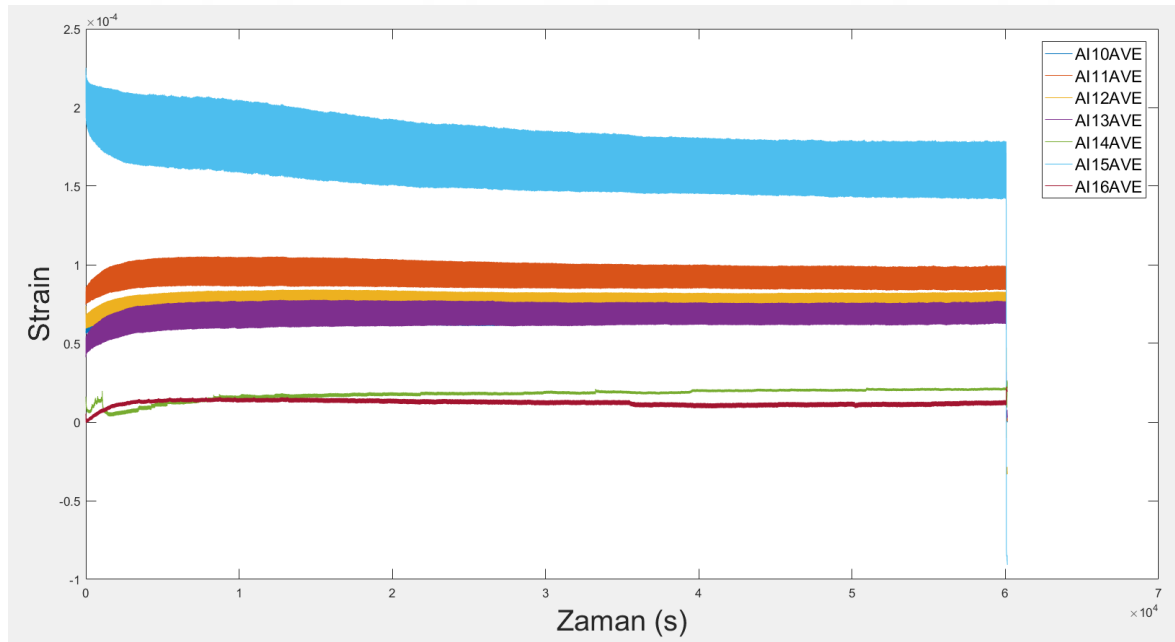


Şekil 4.39. Yorulma testi gerinim ölçerlerden alınan değerler 1.bölüm

Yorulma testi esnasında gerinim ölçerlerden alınan datalar test sürecinde stabil değerler arasında kalmıştır buda parça özelinde bir hasarın oluşmadığını göstermektedir.



Şekil 4.40. Yorulma testi gerinim ölçerlerden alınan değerler 2.bölüm



Şekil 4.41. Yorulma testi gerinim ölçerlerden alınan değerler 3.bölüm

Yorulma testlerinin özeti Çizelge 4.38’de özetlenmiştir. Parça boyutlandırmaları ve test parçasının maruz kaldığı yükleme ile birlikte test parametreleri bu bölümde verilmiş olup

testin toplam döngüsü paylaşılmıştır. Test frekansı için bazı denemeler yapılmış olup test hızı yükseltildiğinde parça bağlantısında düzensizlik oluşması ihtimali ve ısınma problemi ile karşılaşılması için test frekansı 3Hz olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.38. Yorulma test sonuçları

Yorulma Test Parametreleri	
Test Sıcaklığı (C°)	20°C-22°C
Pim Çapı (üst)(mm)	18,07
Pim Çapı (alt)(mm)	18,07
Delik Merkezleri Arası (mm)	175,00
Parça Kalınlığı (mm)	14,28
Parça Boyu (mm)	315
Gerilme Oranı (R)	0,1
Test Yüğü (kN)	30
Test Frekansı (Hz)	3
Toplam Döngü	2 101 101

Yorulma yüklerinin nasıl belirlendiği değerlendirme kısmında detaylı olarak açıklanacaktır.



5. DEĞERLENDİRME

Bu tez kapsamında havalıcılık ve uzay alanında son dönemlerde kullanılması hedeflenen CF/PEKK (Karbon fiber poli-eter-keton-keton) kompozit malzemelerin otoklav ile üretiminde temel parametrelerden olan kürlleme sıcaklığının malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi ve sonrasında ideal kürlleme sıcaklığının belirlenmesi ile birlikte döner kanat hava araçlarında pal köklerinin rotor hub'ına bağlantısını sağlayan pal kökü yapısının (kompozit kulakçık) yapılarının serim parametrelerinin yapının dayanımı üzerindeki etkisinin tespit edilmesidir.

Bu amaç doğrultusunda 4.bölümde yer alan kompozit kupon testleri icra edilmiştir. Bu kapsamda ASTM standartlarına bağlı olarak 3 farklı sıcaklıkta 350°C, 377°C ve 400°C'de otoklav döngüsü ile üretim yapılmıştır. Üretimleri yapılan kompozit plakalarda vakum ve basınç parametreleri sabit tutularak sadece kürlleme sıcaklığının malzemenin mekanik dayanımları üzerindeki etkisinin tespit edilmesi için çekme ve 3 nokta eğilme testleri icra edilmiştir. Bu doğrultuda parçalar 0 derece, 90 derece ve +/-45 derece serimleri gerçekleştirilen çekme testleri ile standartlara uygun olarak 0 derece ve +/-45 derece serimleri yapılan 3 nokta eğilme testi gerçekleştirilmiştir.

Kupon seviyesi mekanik testlerin gerçekleştirilmesinden önce üç farklı sıcaklık için üretilen plakaların ultrasonik muayeneleri yapılmıştır. Ultrasonik muayeneler sonucunda 350°C'de üretilen plakalarda gözeneklilikler ve delaminasyonlar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte diğer sıcaklıklarda üretilen plakalarda ise üretim kalitesi istenilen seviyelerde yapılabilmektedir. Ultrasonik muayene sonrası ise üretilen plakaların boşluk oranlarının belirlenmesi için piknometre yardımı ile testleri gerçekleştirilmiştir. Hava araçlarında kullanılacak kompozit parçalar için %2'nin altında boşluk oranları kabul edilebilir seviyede kabul edilmektedir. Boşluk oranı testleri sonucunda 350°C'de üretilen kompozit parçaların boşluk oranları %2'nin üzerinde sonuçlar vermiştir. Diğer sıcaklıklarda üretilen plakalar ise %2'nin altında sonuçlar vermiştir. Böylece boşluk tespiti için gerçekleştirilen testler ultrasonik muayene sonuçları ile paralellik göstermiştir. Daha sonra ASTM standartlarına göre mekanik testlerin icrası gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen mekanik testler neticesinde en yüksek dayanım değerleri 400°C'de üretilen plakalardan üretilen kupon numunelerinde elde edilmiştir.

Kupon seviyesi testlerin gerçekleştirilmesinden sonra tahrip edilmiş kupon numuneleri elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. SEM ile yapılan incelemelerde ise diğer icra edilen testler ile korele olacak şekilde sonuçlar alınmıştır. SEM görüntülerinde 350°C’de üretilen parçaların fiber-matris bağlantısının homojen bir şekilde kurulamadığı ve matris malzemesinin birikmesi gibi durumlar gözlemlenmiştir. Bu hataların nedeni ile malzemelerin mekanik dayanımları düşmüştür. 377°C’de üretilen plakalarda ise bu hatalar çok düşük olmuştur fakat 400°C’de üretilen plakalara göre daha zayıf kalmıştır. SEM görüntüleri sonucunda en başarılı üretimlerin 400°C’de üretildiği gözlemlenmiştir.

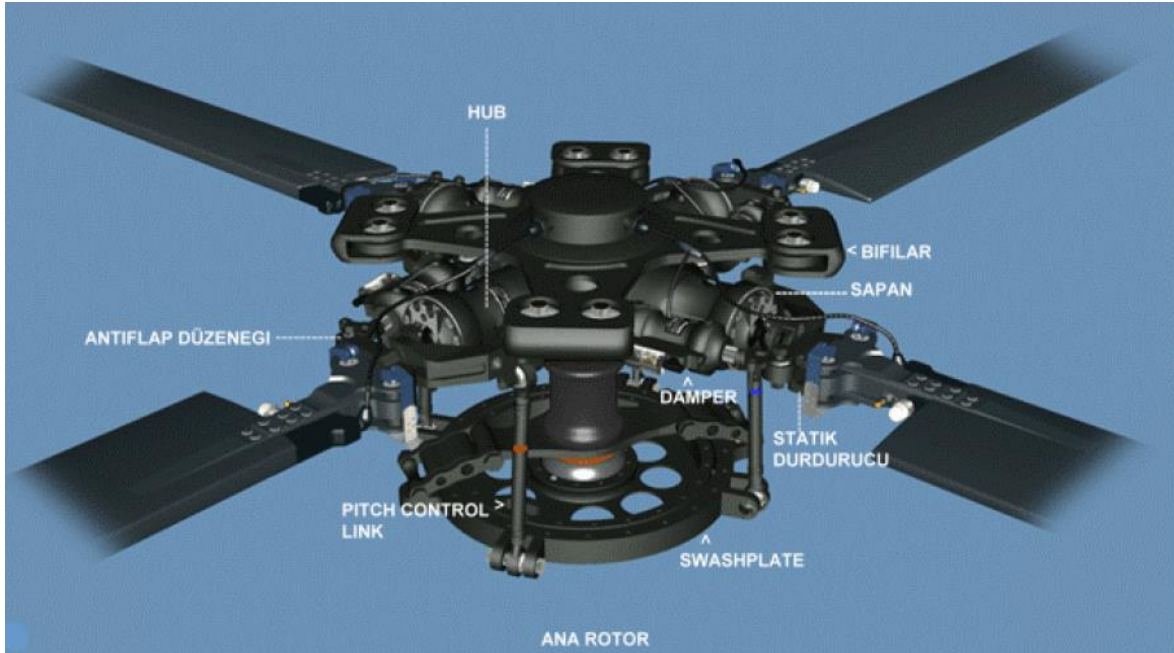
Kupon testleri sonucunda 400°C’de üretilen plakaların mekanik dayanımlarının en yüksek değerlerde sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle otoklav döngüsünde CF/PEKK termoplastik kompozitler için belirlenen 3 kürleme sıcaklığından ideal üretim sıcaklığının 400°C olduğu tespit edilmiştir. Bu tez kapsamında belirlenen bu kürleme sıcaklığı tezin ikinci bölümünde hedeflenen komponent parça olarak adlandırılan kompozit kulakçık yapıların üretimindeki otoklav döngüsünde kullanılmıştır.

Kompozit kulakçık yapılarda serim kombinasyonlarının mekanik dayanımına etkisinin belirlenmesi için altı farklı serim kombinasyonu denenmiştir. Temel prensip olarak delik etrafında oluşan maksimum gerilmelerin kayma gerilmeleri olması nedeni ile bölgede kayma yüklerini taşımaktaki üstünlüğü ile +/- 45 derece serimlerin yoğunluğu üzerinden gözlem yapılmıştır. Uygulanan testler eksenel yönde yapılan yüklemeler olduğu için parça serimlerinde 0 derece ve +/- 45 derece serim yönleri kullanılmıştır. 1 numaralı komponent parçasından 6 numaralı komponent parçasına doğru +/- 45 derece serimlerin yoğunluğu artırılmıştır. Her komponent parçası için toplamda 102 kat serim yapılmıştır. 1 numaralı numunede 50 kat +/- 45 derece serim yapılırken 6 numaralı numunede bu değer 100 kat +/- 45 derece serim yapılmıştır.

Gerçekleştirilen statik çekme testleri neticesinde maksimum dayanım 6 numaralı komponent numunesinde tespit edilmiştir. Statik test sonrası gerçekleştirilen mikro yapıdaki mikroskop incelenmesinde yapının yükleme durumunda hasar aldığı bölgeler ve hasarın ilerleme şekli üzerinden yapılan değerlendirmeye görede parçanın yükleme esnasında yükün taşındığı kısmın +/-45 derece serimlerin oluşturduğu bölgeler olduğu görülmektedir. Kulakçık yapılarda ki hasar modlarından da bilindiği gibi parçalarda da oluşan hasarların kayma gerilmeleri nedeni ile oluşan hasarlar olduğu görülmektedir. Kayma gerilmelerinin

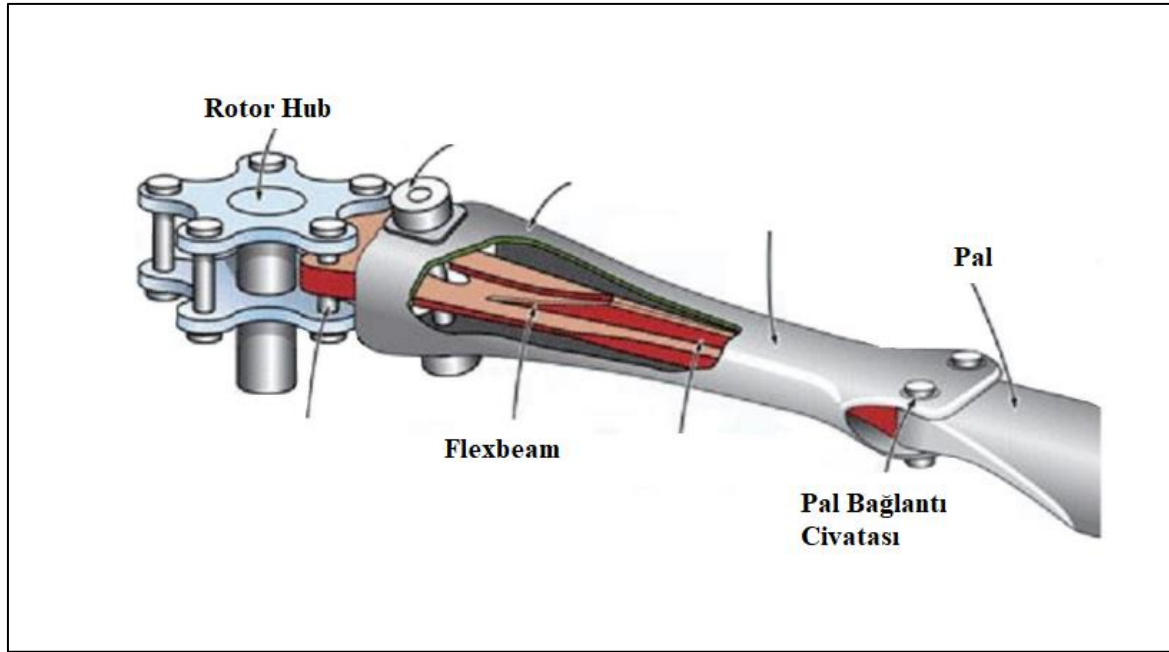
taşınmasında da temel serim yönteminin ± 45 derece serimler olduğu görülmüştür. Ayrıca bunun nedenlerinden birinde 0 derece serimlerin delik etrafında sürekliliğinin bozulması nedeni ile dayanımda ± 45 derece serimlere göre daha zayıf kaldığı görülmektedir.

Bu tez kapsamında hedeflenen temel nokta ise döner kanat bir hava aracında temel olan rotor ile pal yapısının bağlantı bölgesi olan helikopter pal köklerinin temsili tasarımının yapılarak kavramsal tasarım olarak oluşturulan bir hava aracı için termoplastik kompozitlerden üretilen pal kökü kompozit kulakçık yapıların kullanılabilirliğini görebilmektir. Temel olarak bir döner kanat hava aracının ana rotor yapısı Resim 5.1’de gösterilmiştir.

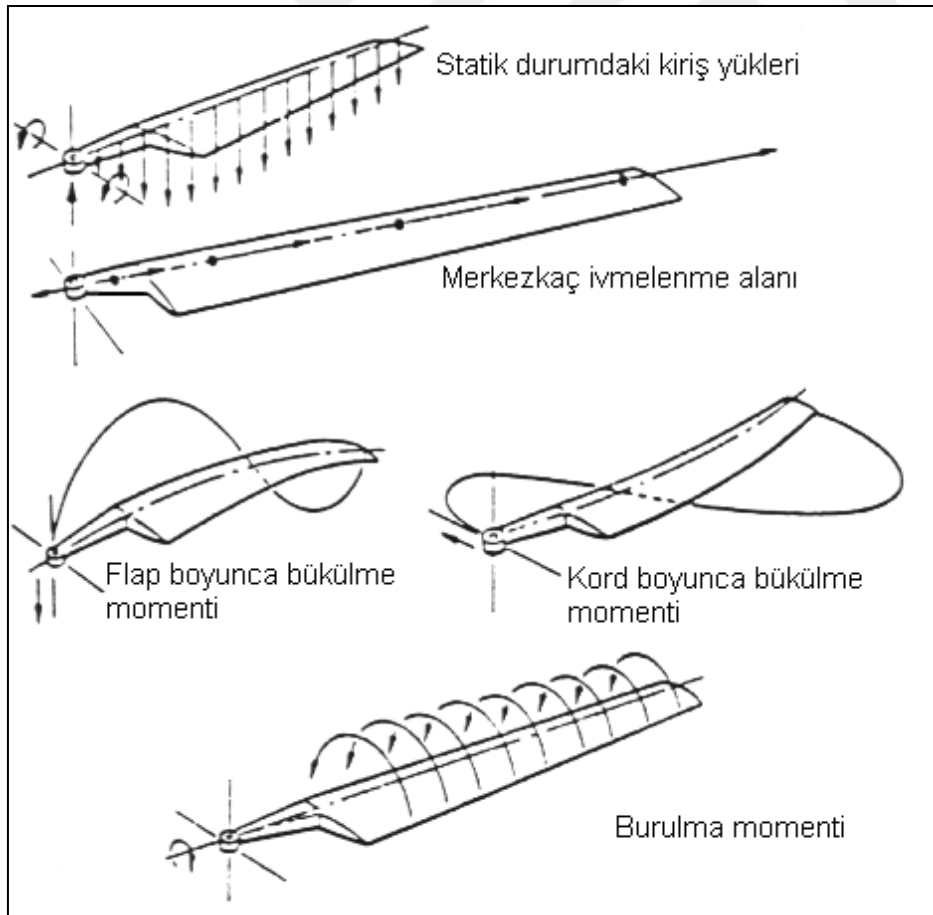


Resim 5.1. Helikopter ana rotor yapısı [69]

Helikopter ana rotorunda görüldüğü gibi parçaların bağlantısı ana rotor hub'ına bağlanmaktadır. Pallerinde rotor ile bağlantısını sağlayan pal kökleridir. Rotor ile pal kökü bağlantısının daha detaylı görüntüsü Şekil 5.1’de verilmiştir. Pal kökleri helikopterin tüm hareketlerini sağlayan pallerin tüm hareketlerini taşıyan yapılardır. Paller üzerine gelen yükleme şekilleri Şekil 5.2’de verilmiştir. Bu tez kapsamında temel olarak parçaya ana yük olarak gelen dönme esnasındaki merkezkaç kuvvetlerinin göz önüne alınması ile oluşturulan kavramsal bir tasarımın yüklerinin belirlenmesi ve bu kapsamda gerçekleştirilen testlerden oluşmaktadır. Yapı üzerinde birden fazla kompozit kök yapısı bulunduğu için bunun tek yapıya indirgenmiş yüklere göre bir kontrol sağlanmıştır.



Şekil 5.1. Helikopter pal yapısı [70]



Şekil 5.2. Helikopter pal yapısına gelen yüklemeler

Yapılan kavramsal tasarıma göre aşağıda Çizelge 5.1’de verilmiş datalara göre merkezkaç kuvvetinin hesaplanması ile testleri gerçekleştirilen parçaların hava aracına maruz kalacağı statik yükler belirlenmiştir.

Çizelge 5.1. Kavramsal tasarım değerleri

Taşıma Kapasitesi	2 Pilot, 8 Yolcu
Ana Rotor rpm	400 rpm
Ana Rotor Çapı	10 m
Pal sayısı	4
Pal Uzunluğu	4,3m
Merkezkaç Kuvveti Yarı Çapı	2,85 m
Pal Ağırlığı	45 kg

Çizelge 5.1’de verilen değerlere göre pal üzerine uygulanan merkezkaç kuvvetinin hesabı Eş.5.1’de verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$F = m \times \omega^2 \times r \quad (5.1)$$

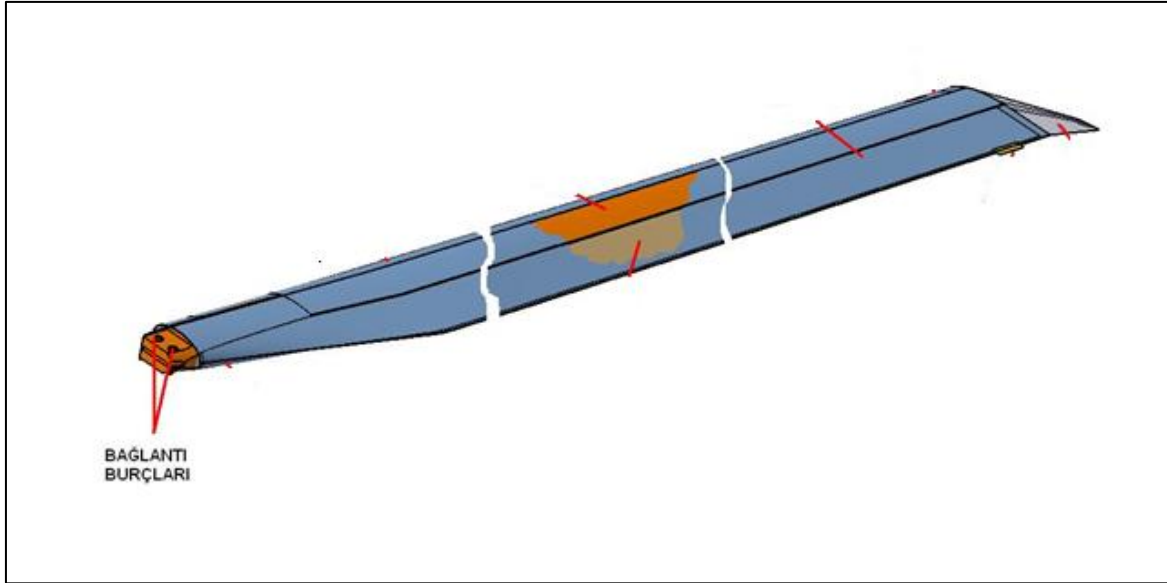
Bu formülde;

F: Merkezkaç kuvveti (N)

m: Pal ağırlığı (kg)

r: Pal ile rotor merkezi arasındaki mesafe

Eş.5.1 yardımı ile yapılan hesaplama sonucunda elde edilen değer 225kN’luk bir merkezkaç kuvveti hesaplanmıştır. Hesaplama yapılırken palın ağırlık merkezi palın merkezi olarak kabul edilmiştir. Pal bölgesinde tasarımını yaptığımız pal kökünden 4 adet yer aldığı için herbirine düşen yükün hesaplanmasında toplam yük 4 kulakçık bölgesine eşit olarak paylaştırıldığında 56,2 kN’luk bir yüklemenin geldiği görülmüştür. Şekil 5.3’te pal kökünün 4 kulakçık yapıya dağılımının yapıldığı tasarım örneği verilmiştir. 6 numaralı komponent tasarımının statik çekme değeri ise 179kN’luk bir dayanım göstermiştir. Bu sonuç bize termoplastik kompozit kulakçık yapıların kavramsal tasarımı yapılan bir döner kanat hava aracı için güvenli ve uygun olduğunu göstermektedir. Baskın olarak pal köküne gelen yüklemenin merkezkaç yüklemesi olduğu için yapılan tasarımdaki güvenlik marjının yüksekliği diğer burulma yüklerinin de karşılayabilecektir.

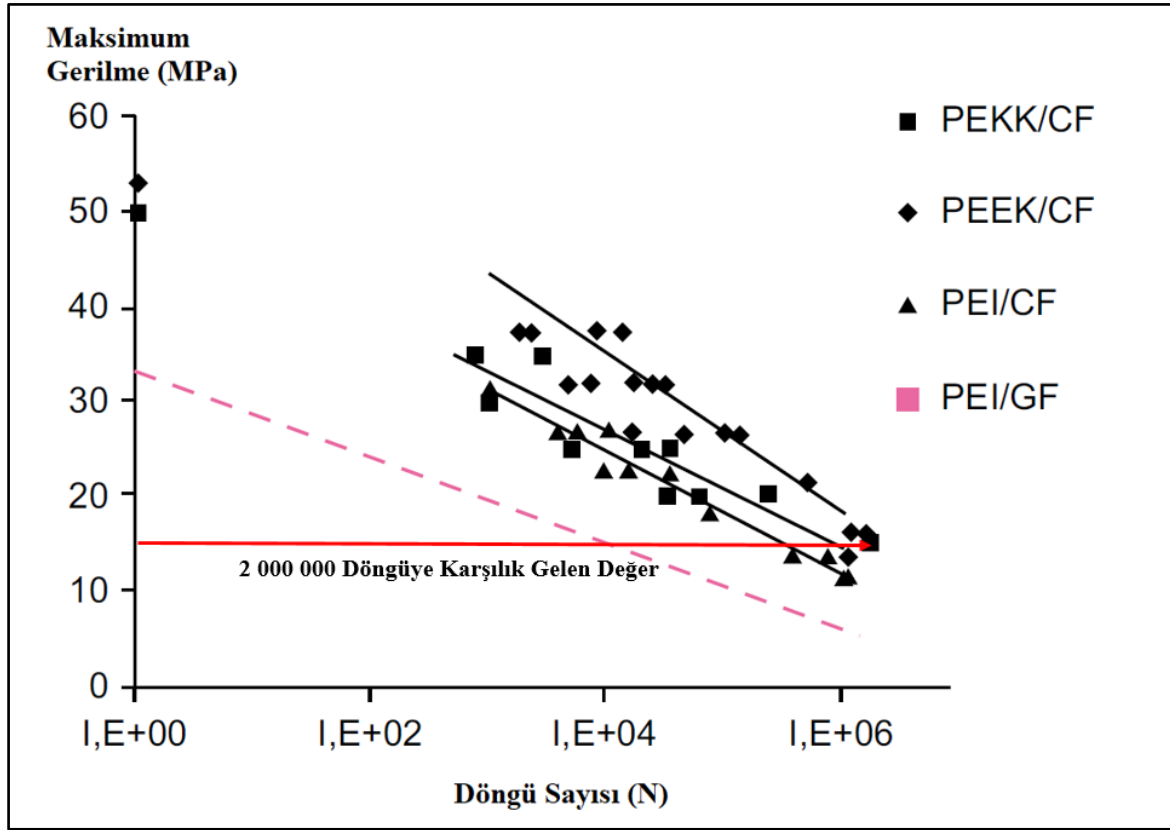


Şekil 5.3. Helikopter pal kökü bağlantısı

Testin devamında yorulma testi icra edilmiş ve parça 2 milyon döngüden fazla bir döngü tamamlayarak yorulma kriterinde sağlamıştır. Yorulma testlerinde kullanılacak yükler hava aracının uçuş koşullarında üzerine gelen ve sürekli tekrar eden yükler olduğu için teorik olarak bir yük belirlemek için daha önce literatürde yapılan yorulma eğrilerinin çalışmalarından faydalanılmıştır. Şekil 5.4'te verilen gerilme-döngü grafiğinde PEKK malzeme için verilen değerlerden statik dayanım noktasının yaklaşık beşte ikisinin yorulma değerinde 2 milyon döngüye karşılık geldiği görülmüştür. Statik olarak ihtiyaç duyulan yük olan 56,2kN'luk yükleme koşuluna karşı literatürde yer alan SN eğrisinden yapılan yaklaşım ile yaklaşık 17kN'luk bir yükleme ihtiyacı yorulma yükü olarak öngörülebilmekte iken daha güvenli bir analiz koşulu için test yükü 30kN olarak belirlenmiştir. Yapılan testlerin standart kupon numuneleri üzerinden yapıldığı için test numunesinin kulakçık yapı olması nedeni ile delik etrafında oluşacak ek bir gerilme konsantrasyonu oluşacağı için test yükü olarak belirlenen 30kN'luk yükleme yeterince güvenli görünmektedir. Kulakçık yapı testlerinde gerilme oranı olan $R=0,1$ değerinde parça test edilmiştir. Test sürecinde gerinim ölçerler ile parça sürekli takip edilmiştir. Gerinim değerlerinde herhangi bir agrasif artış gözlemlenmemiştir bu nedenle parçada herhangi bir hasar oluşmadı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak gerçekleştirilen testler neticesinde parça serimlerinde ± 45 derece serimleri arttıkça parçanın mekanik dayanımının arttığı görülmüştür. Parça statik ve yorulma kriterlerini karşılamıştır ve kavramsal tasarımdaki bir helikopterin palinde kullanılabilecek

olduğu görülmüştür. Havacılık için yeni bir malzeme olan termoplastik kompozitlerin özellikle PEKK matrisli malzemelerinde artık havacılıkta birincil olarak adlandırılan kritik parçalarda kullanılabilir olacağı bu testler kapsamında görülmüştür.



Şekil 5.4. CF/PEKK gerilme-döngü grafiği [71]

Bu tez kapsamında termoplastik kompozitlerden kalın parça üretimi esnasında karşılaşılan problemlerin var olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık ve basınç altında kürlenme esnasında vakum kaçaklarının önlenmesi için bu proseslere özel tasarlanacak dolgu macunları üretim kalitesini arttıracaktır. Aynı zamanda özellikle kalın parça üretiminde parça tasarımına bağlı özel takımların tasarımının yapılmasında üretim kalitesinde ki artışı sağlayacaktır. Ayrıca parçaların üzerinde kullanılan baskı plakaları içinde ayrıca bir optimizasyon çalışmasının yapılması üretim kalitesini olumlu yönde etkileyecektir. Baskı plakasının basınç nedeni ile köşelerde daha fazla bükülmesi nedeni ile parça üzerinde kalınlık farklılıkları oluşabildiği gözlemlenmiş ve bu nedenle bu öneride bulunulmuştur.

Sonuç olarak CF/PEKK kompozitlerin kulakçık yapılarda kullanılabilirliği ve güvenli bir kullanım alanı sunduğu görülmüştür.



6. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların temel amacı, havacılık alanında yoğun olarak kullanılan termoset matrisli kompozitlere alternatif olabilecek termoplastik matrisli kompozitlerin kullanılabilirliğini göstermektir. Termoset matrisli kompozitlerin birçok avantajının yanında raf ömrü ve tekrar işlenebilme özelliği olmadığı için maliyetlerinin yüksekliğidir. Termoplastik kompozitlerde ise sınırsız raf ömrü ve tekrar işlenebilirlik nedeni ile tamirat avantajları kaynaklı maliyetlerin düşürülebileceği düşünülmektedir. Bu avantajları nedeni ile termoplastik matrisli kompozitlerin hava araçlarında birincil seviye komponentlerde kullanılabilirliğini göstermek amaçlanmıştır. Döner kanat hava araçlarının en kritik yapılarından birini oluşturan pallerin kök bağlantısı bu çalışmada simüle edilmiştir. Pal kökleri ile rotor bağlantısı kulakçık yapılardan oluştuğu için bu tez kapsamında kompozit kulakçık yapıların serim parametreleri üzerinde bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın birinci safhasında, kompozit parçaların otoklav ile üretimindeki temel üretim parametrelerinden sıcaklık, basınç ve vakum değerlerinden sıcaklık parametresi üzerinde bir çalışma yapılmıştır. 3 farklı üretim sıcaklığı belirlenmiştir ve bunların içinden en ideal üretim sıcaklığı tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen plaka üretimleri neticesinde 350°C’de üretilen plakalar üzerinde gerçekleştirilen ultrasonik muayeneler sonucunda parçanın ergime sıcaklığına yakın bir değer olması nedeni ile katmanlar arası yapışma ve boşluk değerlerinde belirgin bir zayıflık görülmüştür. 377°C ve 400°C’de üretilen plakalarda ise matris malzemesi olan polimer reçinenin yeteri kadar eriyik hale gelerek viskozitesinin yükselmesi ile daha homojen bir dağılım göstererek katmanlar arası yapışmanın başarılı bir şekilde oluştuğu tespit edilmiştir. Ultrasonik muayeneler için TUSAŞ bünyesinde sertifikeli olmuş çalışanların kontrolünde referans plakalardan edinilen tecrübe ile parça üzerinde referans bölgeler tespit edilmiş ve buna göre tarama gerçekleştirilmiştir.

Ultrasonik muayenesi gerçekleştirilen plakalardan alınan test parçaları üzerinde gerçekleştirilen boşluk oranı tespit testlerinde ultrasonik muayene sonuçları ile paralel sonuçlar vermiştir. 350°C’de üretilen plakalarda havacılık standartlarının belirttiği %2 boşluk oranının üzerinde boşluklar tespit edilmiştir. Bunun temel nedeni ise düşük sıcaklık

ile reçinenin yeterince eriyik hale gelmemesi ile fiber ile matris bağlantısının tam olarak sağlanamamasıdır. Bu eksiklik nedeni ile katmanlar arası yapışma yeterince sağlanamadığı için boşluk oranları istenilen değerlerin üzerinde sonuçlar vermiştir. 377°C ve 400°C’de yapılan üretimlerde ise bu oran istenilen değerlerin altında elde edilmiştir. Bu nedenle bu sıcaklıklarda yapılan otoklav kürlemelerinde katmanlar arası bağlantı başarılı bir şekilde sağlanmıştır.

Boşluk testleri yapılan plakalardan kesilerek hazırlanan kupon test numuneleri üzerinde mekanik dayanımların tespitinin sağlanabilmesi için testler gerçekleştirilmiştir. Burada kompozit malzemelerin mekaniği kısmında anlatılan kompozit malzemelerin anizotropik davranışları nedeniyle serim yönleri malzemenin mekanik dayanımı üzerinde çok önemlidir. Kompozit malzemelerin en büyük avantajlarından biri olan yükleme koşuluna göre serimlerin yapılabilmesidir. Bu nedenle eksenel yükleme esnasında 0°, 90° ve +/- 45° serimleri yapılan kupon numunelerine eksenel çekme testi uygulanmıştır. 0° serimleri yapılan kupon numunelerinin eksenel çekme dayanımı en yüksektir çünkü kompozit malzemelerde asıl yük taşıyan yapı fiberlerdir. Fiberler serim yönünde maksimum dayanım gösterecektir. Üç farklı kürleme sıcaklığı ile üretimleri gerçekleştirilen kupon numunelerinden en düşük dayanımlar 350°C’de yapılan üretimlerden elde edilmiştir. Bunun temel nedeni ise ultrasonik muayene ve boşluk oranı testlerinden alınan sonuçlar ile paralellik gösteren fiber-matris ara yüzeyindeki zayıflıktır. Serim yönü olarak 0°’de yükün taşındığı yönde bir serim yapılmasına rağmen yükü taşıyan fiberlere yükün eşit bir şekilde dağılmasını sağlayan matris malzemesi olduğu için ve 350°C’de üretilen plakaların fiber-matris bağlantısının istenilen seviyede homojen olmadığı için dayanım değerleri diğer üretim sıcaklıklarına göre düşmüştür. 377°C ve 400°C’de üretilen plakların fiber-matris bağlantısının daha homojen olarak sağlanması nedeniyle yük dağılımı daha homojen olmuş ve bu nedenle dayanım değerleri daha yüksek olmuştur. 90°’de yapılan serimlerde ise parçanın serim yönüne dik olarak bir eksenel yükleme yapıldığı için dayanımlar 0° olarak yapılan serimlerden düşük elde edilmiştir. 350°C’de yapılan 90° serimlerde elde edilen dayanım sonuçlarının diğer sıcaklıklardaki üretimlerden düşük olmasının nedeni ise bu yönde matris malzemesinde yük taşınması ve homojen bir dağılım gösterememesi nedeni ile matris kırılmalarının diğer sıcaklıktaki üretimlerden fazla olmasıdır. +/- 45°’de yapılan serimlerde ise malzemenin katmanları arasındaki kayma dayanımının tespiti hedeflenmiştir. Bu testler neticesinde, 350°C’de üretilen plakaların gene fiber-matris bağlantısının zayıflığı nedeniyle dayanım değerleri diğer sıcaklıklardaki üretilere göre düşük elde edilmiştir. 3

nokta eğilme testi ile katmalar arası ayrılma gözlemlenmiştir. Bu testler sonucunda 350°C’de yapılan üretimlerdeki katmanlar arası yapışmanın zayıflığı nedeniyle en düşük dayanım değerleri bu sıcaklıktaki üretimlerde elde edilmiştir.

Kupon seviyesi testlerin sonucunda üretimde kürleme sıcaklığının önemi görülmüştür. 350°C’de üretilen numunlerin dayanımı en düşük olarak tespit edilmiştir. 377°C ve 400°C’de üretilen plakaların dayanımları birbirlerine yakın olsada 400°C’de üretilen kupon numune değerleri belirlenen üç üretim sıcaklığı arasında en ideal üretim sıcaklığı olarak belirlenmiştir.

Kupon seviyesi testlerinden sonra gerçekleştirilen elektron mikroskop (SEM) incelemeleride tahrip edilmiş numunelerde önceki testleri doğrulamıştır. 350°C’de üretilen numunelerde fiberlerin etrafında matris paketçikleri görülmüş veya fiber-matris arayüzeyinin diğer üretim sıcaklıklarındakinden zayıf olduğu görülmüştür. Bu zayıflık yük taşıma kabiliyetini olumsuz etkilemiştir.

İdeal üretim sıcaklığının tespit edilmesinden sonra ikinci safhada, PEKK matrisli kulakçık yapıların havacılık alanında birincil yapısal parçalarda kullanılabilirliğinin tespiti hedeflenmiştir. Bu nedenle döner kanat hava araçlarında kritik öneme sahip olan pal köklerinin simüle edilmesi tercih edilmiştir. Pal kökleri rotor yapısına bağlantı civataları ile bağlandığı için yapı kulakçık yapı olarak tasarlanmaktadır. Kulakçık yapılardaki hasar modları literatür kısmında detaylı olarak açıklanmıştır. Pal köklerinin baskın olarak maruz kaldıkları yükleme merkezkaç yüklemesi olduğu için, tasarımı yapılan kompozit kulakçıklarda temel hasar modeli olarak delik üst yüzeyinde kesme hasarları beklenmektedir. Beklenen hasara göre mohr çemberinde bir inceleme yapıldığında maksimum kayma gerilmesi 2θ ’da oluşmaktadır yani gerçek değer olarak θ açısında oluşmaktadır. Bu değerde 45°’dir. Bu nedenle kulakçık üzerinde 45° serimlerin yük taşıması beklenmektedir. Bu beklenti nedeniyle delik etrafında 45° serimlerin yoğunluğunun dayanım üzerindeki etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda altı farklı serim kombinasyonu ile 45° serimlerin yoğunluğu artırılarak dayanım üzerindeki etkisi tespit edilmiştir. Belirlenen ideal serim kombinasyonu üzerinde yorulma testleri gerçekleştirilerek parçanın birincil yapısalarda kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Kompozit kulakçıkların üretim metodu içinde otoklav kullanılmış ve kürleme sıcaklığı 400°C olarak uygulanmıştır. Parçaların radyografik görüntüleri alınmış ve yüzey ve iç kısmında bir hasarın varlığı incelenmiştir. Yapılan radyografik incelemelerde parçaların yüzeyinde veya iç kısmında bir hataya rastlanmamıştır.

Radyografik görüntüleri alınan parçalar daha sonra ultrasonik muayene ile daha detaylı bir şekilde incelenmiştir. Gerçekleştirilen ultrasonik muayenelerde 4 numaralı komponent parçasında delaminasyon tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak parçaların kalıp üzerindeki yerleşimi ile baskı plakasının parça üzerindeki etkisinin varlığı düşünülmüştür.

Kompozit kulakçık yapılar için gerçekleştirilen statik dayanım testlerinden en yüksek dayanım 6 numaralı komponent parçasında elde edilmiştir. 6 numaralı komponent parçası +/- 45° serimlerinin en yoğun olarak kullanıldığı komponent parçasıdır. Bu sonuçta tasarım esnasında öngörülen koşulu doğrulamıştır ve kulakçık bölgesindeki hasarların temel nedeni olan kesme hasarlarına maksimum dayanımı +/- 45° serimlerin dayandığını göstermiştir.

Statik testleri tamamlanan parçalar üzerinde tekrar radyografik görüntülemeler yapılmıştır. Yapılan görüntüler ile serim kombinasyonu bilinen parçalar üzerinde hasarların ilerleme şekli ve boyutu tespit edilmiştir. Burada da alınan görüntülerde parçanın temel olarak yük taşıyan kısmının +/- 45° serimlerin olduğu bölgeler olduğu görülmüştür. Kırımların olduğu bölgeler +/- 45° serim bölgeleri olmuş sonrasında 0° serimlerin olduğu bölgelerde delaminasyon hasarı kaynaklı ayrılmaların olduğu gözlemlenmiştir. +/- 45° yoğunluğu en yüksek olan 6 numaralı numune incelendiğinde çatlakların ilerlediği boyutun minimum düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

Radyografik görüntüleme sonrası parçaların hasar bölgeleri mikroskop yardımı ile incelenmiştir. Alınan görüntüler radyografik görüntüler ile paralellik göstermiştir. Parçanın delik etrafında oluşan hasarlanmasından sonra ilerlemelerin genel olarak +/-45° serim bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir. Buda bu bölgelerde yükün temel taşınmasının +/- 45° serimler ile yapıldığını göstermektedir.

Son olarak statik dayanımı maksimum olan 6 numaralı numunenin serim kombinasyonundaki parça yorulma testi uygulanmıştır. Yorulma yüklerinin nasıl belirlendiği geniş olarak sonuç kısmında açıklanmıştır. Yorulma testinde başarı ile

tamamlayan kompozit kulakçık yapı birincil yapısal parça olarak bir hava aracında kullanılabilirliğini kanıtlamıştır.

Yapılan testler esnasında karşılaşılan problemlerin çözümü üretim kalitesini arttıracaktır. Birincil olarak parçanın şekline uygun olarak takım tasarımının önemi testler esnasında gözlemlenmiştir. Bu çalışma kapsamında düz bir takım üzerine serimler gerçekleştirilmiştir ve 4 numaralı parçadaki delaminasyonun bu nedenle oluşmuş olabileceği düşünülmektedir. Parçanın şekline göre hazırlanacak bir takım ile tüm parçalara eşit olarak basınç ve sıcaklık dağılımı yapılabilir. İkincil olarak macunların geliştirilmesi konusunun önemi gözlemlenmiştir. Üretim aşamasında kullanılan macunlar termosetler için kullanılan daha düşük sıcaklık ve basınç için uygun olan macunlardır. Bu nedenle bu çalışmada üretim normlarının üzerinde bir macun kullanımı yapılarak kaçaklar engellenmiştir fakat uygun bir macun geliştirilmesi ile bu konu daha ekonomik olarak çözümlenebileceği gözlemlenmiştir. Üçüncü olarak baskı plakasının idealizasyonunun önemi gözlemlenmiştir. Kullanılan baskı plakasının kalınlığı ve boyutları üretilen parçaların kalitesini doğrudan etkilemiştir. Baskı plakasının kullanılmadığı durumlarda ise matris malzemesinin homojen dağılımının sağlanamadığı ve aynı zamanda üretilen parçalarda yüzey pürüzlülüğünün çok olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bu tez kapsamında yapılan çalışmalar neticesinde termoplastik kompozitlerin hava araçlarında birincil yapısal olarak kullanılabilecekleri kanıtlanmıştır. Ayrıca detaylı olarak yapılan mekanik testlerin bundan sonra yapılacak deneysel ve sonlu elemanlar analizleri için açık kaynak oluşturmuştur.



KAYNAKLAR

1. Chatterjee, S., Nafezarefi, F., Tai, N. H., Schlagenhauf, L., Nüesch, F. A., and Chu, B. T. T. (2012). Size and synergy effects of nanofiller hybrids including graphene nanoplatelets and carbon nanotubes in mechanical properties of epoxy composites. *Carbon*, 50(15), 5380-5386.
2. Chang, I. Y., and Lees, J. K. (1988). Recent development in thermoplastic composites: a review of matrix systems and processing methods. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1(3), 277-296.
3. Díaz, J., and Rubio, L. (2003). Developments to manufacture structural aeronautical parts in carbon fibre reinforced thermoplastic materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 143, 342-346.
4. Shen, Z., Bateman, S., Wu, D. Y., McMahon, P., Dell'Olio, M., and Gotama, J. (2009). The effects of carbon nanotubes on mechanical and thermal properties of woven glass fibre reinforced polyamide-6 nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 69(2), 239-244.
5. Stewart, R. (2011). Thermoplastic composites—recyclable and fast to process. *Reinforced Plastics*, 55(3), 22-28.
6. Marsh, G. (2010). Could thermoplastics be the answer for utility-scale wind turbine blades?. *Reinforced Plastics*, 54(1), 31-35.
7. Offringa, A. (2010). New thermoplastic composite design concepts and their automated manufacture: AERONAUTICS. *JEC composites*, (58), 45-49.
8. Pimenta, S., and Pinho, S. T. (2011). Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste management*, 31(2), 378-392.
9. Stavrov, D., and Bersee, H. E. N. (2005). Resistance welding of thermoplastic composites-an overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(1), 39-54.
10. Steenkamer, D. A., and Sullivan, J. L. (1998). On the recyclability of a cyclic thermoplastic composite material. *Composites Part B: Engineering*, 29(6), 745-752.
11. Miller, A. H., Dodds, N., Hale, J. M., and Gibson, A. G. (1998). High speed pultrusion of thermoplastic matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29(7), 773-782.
12. Bradley, J. (2001). *Consolidation of fiber-reinforced composites with thermoplastic matrices*. Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 12.
13. Lauke, B., Bunzel, U., and Schneider, K. (1998). Effect of hybrid yarn structure on the delamination behaviour of thermoplastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29(11), 1397-1409.

14. Mäder, E., Rausch, J., and Schmidt, N. (2008). Commingled yarns—processing aspects and tailored surfaces of polypropylene/glass composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(4), 612-623.
15. Alagirusamy, R., Fangueiro, R., Ogale, V., and Padaki, N. (2006). Hybrid yarns and textile preforming for thermoplastic composites. *Textile Progress*, 38(4), 1-71.
16. Hagstrand, P. O., Bonjour, F., and Månson, J. A. (2005). The influence of void content on the structural flexural performance of unidirectional glass fibre reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(5), 705-714.
17. Vendramini, J., Bas, C., Merle, G., Boissonnat, P., and Alberola, N. D. (2000). Commingled poly (butylene terephthalate)/unidirectional glass fiber composites: influence of the process conditions on the microstructure of poly (butylene terephthalate). *Polymer Composites*, 21(5), 724-733.
18. Mitschang, P., Blinzler, M., and Wöginger, A. (2003). Processing technologies for continuous fibre reinforced thermoplastics with novel polymer blends. *Composites Science and Technology*, 63(14), 2099-2110.
19. Van Rijswijk, K., and Bersee, H. E. N. (2007). Reactive processing of textile fiber-reinforced thermoplastic composites—An overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(3), 666-681.
20. Mäder, E., Gao, S. L., Plonka, R., and Wang, J. (2007). Investigation on adhesion, interphases, and failure behaviour of cyclic butylene terephthalate (CBT®)/glass fiber composites. *Composites Science and Technology*, 67(15-16), 3140-3150.
21. Harsch, M., Karger-Kocsis, J., and Apostolov, A. A. (2008). Crystallization-induced shrinkage, crystalline, and thermomechanical properties of in situ polymerized cyclic butylene terephthalate. *Journal of applied polymer science*, 108(3), 1455-1461.
22. Ishak, Z. M., Leong, Y. W., Steeg, M., and Karger-Kocsis, J. (2007). Mechanical properties of woven glass fabric reinforced in situ polymerized poly (butylene terephthalate) composites. *Composites Science and Technology*, 67(3-4), 390-398.
23. Parton, H., Baets, J., Lipnik, P., Goderis, B., Devaux, J., and Verpoest, I. (2005). Properties of poly (butylene terephthalate) polymerized from cyclic oligomers and its composites. *Polymer*, 46(23), 9871-9880.
24. Başer, G. (2014). *Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitlerin Üretimi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 28.
25. Handbook-MIL-HDBK, M. (2002). *17-3F: Composite Materials Handbook, Volume 3-Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis*. USA: US Department of Defense, 119.
26. Bruhn, E. F. (1973). *Analysis & design of flight vehicle structures*, USA: SR Jacobs & Associates, D1-D17.

27. Kolesnikov, B., Herbeck, L., and Fink, A. (2008). CFRP/titanium hybrid material for improving composite bolted joints. *Composite Structures*, 83(4), 368-380.
28. Reddy, D. J. (2006, July). *Composites in rotorcraft industry & damage tolerance requirements*. In Federal Aviation Administration Composites Workshop, Chicago, Illinois.
29. Kuhlmann, G., and Rolfes, R. (2004). A hierarchic 3D finite element for laminated composites. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 61(1), 96-116.
30. Kassapoglou, C., and Townsend Jr, W. A. (2003). Failure prediction of composite lugs under axial loads. *AIAA Journal*, 41(11), 2239-2243.
31. Havar, T., and Stuibler, E. (2009). Design and testing of advanced composite load introduction structure for aircraft high lift devices. In Bos M. J. (Editor). *International Committee on Aeronautical Fatigue 2009, Bridging the Gap between Theory and Operational Practice*, Dordrecht: Springer, 365-374.
32. Akovalı, G., and Uyanık, N. (2001). *Handbook of composite fabrication*, United Kingdom: Rapra Technology Limited, 3.
33. Dokur, M. M. (2009). *Karbon fiber esaslı polimerik matrisli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 13.
34. Demirel, A. (2007). *Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1.
35. Ersoy, M. S. (2005). *Lif takviyeli polimerik kompozit malzeme tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2.
36. Boeing, C. (2006). Boeing 787 from the ground up. *Aero*, 24, 1-32.
37. Kaw, A. K. (2005). *Mechanics of composite materials*. Florida: CRC Press, 1-7.
38. Robert, M. J. (1999). *Mechanics of composite materials* (Second edition). Virginia: State University Blacksburg, 1-472.
39. Teti, R. (2002). Machining of composite materials. *CIRP Annals*, 51(2), 611-634.
40. Kar, K. K. (Editor). (2016). *Composite materials: processing, applications, characterizations*. Berlin: Springer, 3.
41. Balasubramanian, M. (2013). *Composite materials and processing*. Florida: CRC press, 6.

42. İnternet: Occupational Safety and Health Administration. (2008). *Polymer matrix materials: advanced composites. OSHA technical manual*. Washington, DC: OSHA, URL: <https://www.osha.gov/otm/section-3-health-hazards/chapter-1>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.
43. Sikorski, M. E., Buckley, C. P., Hearle, J. W. S., and Mukhopadhyay, S. K. (1993). Flexible thermomechanical analysis of polymeric fibers. *Review of scientific instruments*, 64(7), 1947-1955.
44. İnternet: Special Chem Coupling Agent Center, URL: <https://polymer-additives.specialchem.com/selection-guide/silanes-coupling-agents-center#content>, Son Erişim Tarihi: 30.09.2020.
45. Corbin, A. C., Soulat, D., Ferreira, M., Labanieh, A. R., Gabrion, X., Malécot, P., and Placet, V. (2020). Towards hemp fabrics for high-performance composites: Influence of weave pattern and features. *Composites Part B: Engineering*, 181, 107582.
46. İnternet: Karaduman, N. S., Karaduman, Y., Ozdemir, H., and Ozdemir, G. (2017). Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications. *Textiles for Advanced Applications*, 87-133, URL: <https://www.intechopen.com/chapters/55424>, Son Erişim Tarihi: 30.09.2021.
47. İnternet: How Polymers Work, The Glass Transition, URL: <https://www.pslc.ws/macrog/tg.htm>, Son Erişim: 02.10.2020
48. Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. Florida: CRC press, 12.
49. Beckwith, S. W. (1998). Filament winding—the string and the glue. *Compos Fab*, 14(1), 8-12.
50. Munro, M. (1988). Review of manufacturing of fiber composite components by filament winding. *Polymer Composites*, 9(5), 352-359.
51. Polini, W., and Sorrentino, L. (2005). Winding trajectory and winding time in robotized filament winding of asymmetric shape parts. *Journal of Composite Materials*, 39(15), 1391-1411.
52. Sharma, S. D., Sowntharya, L., and Kar, K. K. (2017). Polymer-Based Composite Structures: Processing and Applications. In Kar K. (Editor). *Composite Materials*, Berlin, Heidelberg: Springer, 1-36.
53. Sheikh-Ahmad, J. Y. (2009). *Machining of polymer composites* (Volume 387355391). New York: Springer, 23.
54. Offringa, A. R. (1996). Thermoplastic composites—rapid processing applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27(4), 329-336.
55. Özel, D. ve Şolpan Temiz, A. (2018, Eylül). *Havacılık dünyasından termoplastik kompozitlere genel bir bakış*. VII. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.

56. Slange, T. K. (2019). *Rapid manufacturing of tailored thermoplastic composites by automated lay-up and stamp forming: A study on the consolidation mechanisms*. Doctoral Thesis, University of Twente, Twente, 13.
57. Çiçek, K. F. (2014). *Experimental and numerical study of spring-in angle in corner shaped composite parts*. Master's Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 11.
58. Sitnikova, E., Chen, J., Yang, J., Wang, B., and Li, S. (2017, August). *Conceptual Design of Braided Preforms for the Manufacturing of Composite Lug*. 21st International Conference on Composite Materials, Xi'an, China.
59. Rana, S., and Figueiro, R. (Editors). (2015). *Braided structures and composites: production, properties, mechanics, and technical applications* (Volume 3). Florida: CRC Press.
60. Kyosev, Y. (Editor). (2016). *Advances in braiding technology: Specialized techniques and applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 7-11.
61. Niu, M. (1992). *Composite Airframe Structures*. Hong Kong: Conmilit Press, 290-300.
62. Wallin, M., Saarela, O., and Pento, F. (2002). *Load Response and Failure of Thick RTM Composite Lugs*. In 23rd Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, Toronto, Canada.
63. Fonseca, G. C., and Almeida, S. F. M. (2016, September). *Numerical Simulation in Finite Element Method and Manufacturing of Lug Material Composite by RTM Process*. In 30th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, Daejeon, Korea.
64. Wallin, M., Saarela, O., Law, B., and Liehu, T. (2006, September). *RTM Composite Lugs for High Load Transfer Applications*. In 25th International Congress Of the Aeronautical Sciences, Hamburg, Germany.
65. Ataş, A. (2007). *Dokuma fiber takviyeli paralel pim delikli tabakalı polyester kompozit plakaların statik yük altındaki davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 5.
66. Choupin, T. (2017). *Mechanical performances of PEKK thermoplastic composites linked to their processing parameters*, Doctoral dissertation, ParisTech The National School of Arts and Crafts, Paris, 8-16.
67. Alexandre, M. A. (2017). *Optimization of mechanical behavior of PEKK / Carbon fibers structural composites by PEKK oligomers sizing*. Doctoral Thesis, Toulouse University Doctoral School of Matter Science, Toulouse, 15.
68. Gardner, K. H., Hsiao, B. S., Matheson, R. R., and Wood, B. A. (1992). Structure, crystallization and morphology of poly (aryl ether ketone ketone). *Polymer*, 33(12), 2483-2495.

69. Uzundağ, U. (2008). *Hafif, ticari bir helikopterin güç iletim sisteminin burulma titreşimlerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 5.
70. Coppinger, R. (2006). Five-blade bearingless rotor flies. *Flight International*, 169(5035), 42-42.
71. Saad, N. (2016). The fatigue behavior of composite materials for high-temperature applications. In Njuguna J. (Editor). *Lightweight Composite Structures in Transport*, Cambridge: Woodhead Publishing, 239-266.





EKLER

EK-1. Komponent parçaların serim kombinasyonları

Çizelge 1.1. 1 numaralı komponent serim kombinasyonu

1.Numaralı Komponent Serimi			
PLY 1	45	PLY 102	45
PLY 2	-45	PLY 101	-45
PLY 3	45	PLY 100	45
PLY 4	-45	PLY 99	-45
PLY 5	45	PLY 98	45
PLY 6	-45	PLY 97	-45
PLY 7	45	PLY 96	45
PLY 8	-45	PLY 95	-45
PLY 9	45	PLY 94	45
PLY 10	-45	PLY 93	-45
PLY 11	0	PLY 92	0
PLY 12	0	PLY 91	0
PLY 13	0	PLY 90	0
PLY 14	0	PLY 89	0
PLY 15	0	PLY 88	0
PLY 16	0	PLY 87	0
PLY 17	0	PLY 86	0
PLY 18	0	PLY 85	0
PLY 19	45	PLY 84	45
PLY 20	-45	PLY 83	-45
PLY 21	45	PLY 82	45
PLY 22	-45	PLY 81	-45
PLY 23	45	PLY 80	45
PLY 24	-45	PLY 79	-45
PLY 25	45	PLY 78	45
PLY 26	-45	PLY 77	-45
PLY 27	45	PLY 76	45
PLY 28	-45	PLY 75	-45
PLY 29	45	PLY 74	45
PLY 30	-45	PLY 73	-45
PLY 31	45	PLY 72	45
PLY 32	-45	PLY 71	-45
PLY 33	45	PLY 70	45
PLY 34	-45	PLY 69	-45
PLY 35	0	PLY 68	0

EK-1. (devam) Komponent parçaların serim kombinasyonları

Çizelge 1.1. (devam) 1 numaralı komponent serim kombinasyonu

PLY 36	0	PLY 67	0
PLY 37	0	PLY 66	0
PLY 38	0	PLY 65	0
PLY 39	0	PLY 64	0
PLY 40	0	PLY 63	0
PLY 41	0	PLY 62	0
PLY 42	0	PLY 61	0
PLY 43	0	PLY 60	0
PLY 44	0	PLY 59	0
PLY 45	0	PLY 58	0
PLY 46	0	PLY 57	0
PLY 47	0	PLY 56	0
PLY 48	0	PLY 55	0
PLY 49	0	PLY 54	0
PLY 50	0	PLY 53	0
PLY 51	0	PLY 52	0

Çizelge 1.2. 2 numaralı komponent serim kombinasyonu

2.Numaralı Komponent Serimi			
PLY 1	45	PLY 102	45
PLY 2	-45	PLY 101	-45
PLY 3	45	PLY 100	45
PLY 4	-45	PLY 99	-45
PLY 5	45	PLY 98	45
PLY 6	-45	PLY 97	-45
PLY 7	45	PLY 96	45
PLY 8	-45	PLY 95	-45
PLY 9	45	PLY 94	45
PLY 10	-45	PLY 93	-45
PLY 11	45	PLY 92	45
PLY 12	-45	PLY 91	-45
PLY 13	45	PLY 90	45
PLY 14	-45	PLY 89	-45
PLY 15	0	PLY 88	0
PLY 16	0	PLY 87	0
PLY 17	0	PLY 86	0
PLY 18	0	PLY 85	0

EK-1. (devam) Komponent parçaların serim kombinasyonları

Çizelge 1.2. (devam) 2 numaralı komponent serim kombinasyonu

PLY 19	45	PLY 84	45
PLY 20	-45	PLY 83	-45
PLY 21	45	PLY 82	45
PLY 22	-45	PLY 81	-45
PLY 23	45	PLY 80	45
PLY 24	-45	PLY 79	-45
PLY 25	45	PLY 78	45
PLY 26	-45	PLY 77	-45
PLY 27	45	PLY 76	45
PLY 28	-45	PLY 75	-45
PLY 29	45	PLY 74	45
PLY 30	-45	PLY 73	-45
PLY 31	45	PLY 72	45
PLY 32	-45	PLY 71	-45
PLY 33	45	PLY 70	45
PLY 34	-45	PLY 69	-45
PLY 35	45	PLY 68	45
PLY 36	-45	PLY 67	-45
PLY 37	0	PLY 66	0
PLY 38	0	PLY 65	0
PLY 39	0	PLY 64	0
PLY 40	0	PLY 63	0
PLY 41	0	PLY 62	0
PLY 42	0	PLY 61	0
PLY 43	0	PLY 60	0
PLY 44	0	PLY 59	0
PLY 45	0	PLY 58	0
PLY 46	0	PLY 57	0
PLY 47	0	PLY 56	0
PLY 48	0	PLY 55	0
PLY 49	0	PLY 54	0
PLY 50	0	PLY 53	0
PLY 51	0	PLY 52	0

EK-1. (devam) Komponent parçaların serim kombinasyonları

Çizelge 1.3. 3 numaralı komponent serim kombinasyonu

3.Numaralı Komponent Serimi			
PLY 1	45	PLY 102	45
PLY 2	-45	PLY 101	-45
PLY 3	45	PLY 100	45
PLY 4	-45	PLY 99	-45
PLY 5	45	PLY 98	45
PLY 6	-45	PLY 97	-45
PLY 7	45	PLY 96	45
PLY 8	-45	PLY 95	-45
PLY 9	45	PLY 94	45
PLY 10	-45	PLY 93	-45
PLY 11	45	PLY 92	45
PLY 12	-45	PLY 91	-45
PLY 13	45	PLY 90	45
PLY 14	-45	PLY 89	-45
PLY 15	45	PLY 88	45
PLY 16	-45	PLY 87	-45
PLY 17	0	PLY 86	0
PLY 18	0	PLY 85	0
PLY 19	45	PLY 84	45
PLY 20	-45	PLY 83	-45
PLY 21	45	PLY 82	45
PLY 22	-45	PLY 81	-45
PLY 23	45	PLY 80	45
PLY 24	-45	PLY 79	-45
PLY 25	45	PLY 78	45
PLY 26	-45	PLY 77	-45
PLY 27	45	PLY 76	45
PLY 28	-45	PLY 75	-45
PLY 29	45	PLY 74	45
PLY 30	-45	PLY 73	-45
PLY 31	45	PLY 72	45
PLY 32	-45	PLY 71	-45
PLY 33	45	PLY 70	45
PLY 34	-45	PLY 69	-45
PLY 35	45	PLY 68	45
PLY 36	-45	PLY 67	-45
PLY 37	45	PLY 66	45
PLY 38	-45	PLY 65	-45

EK-1. (devam) Komponent parçaların serim kombinasyonları

Çizelge 1.3. (devam) 3 numaralı komponent serim kombinasyonu

PLY 39	0	PLY 64	0
PLY 40	0	PLY 63	0
PLY 41	0	PLY 62	0
PLY 42	0	PLY 61	0
PLY 43	0	PLY 60	0
PLY 44	0	PLY 59	0
PLY 45	0	PLY 58	0
PLY 46	0	PLY 57	0
PLY 47	0	PLY 56	0
PLY 48	0	PLY 55	0
PLY 49	0	PLY 54	0
PLY 50	0	PLY 53	0
PLY 51	0	PLY 52	0

Çizelge 1.4. 4 numaralı komponent serim kombinasyonu

4.Numaralı Komponent Serimi			
PLY 1	45	PLY 102	45
PLY 2	-45	PLY 101	-45
PLY 3	45	PLY 100	45
PLY 4	-45	PLY 99	-45
PLY 5	45	PLY 98	45
PLY 6	-45	PLY 97	-45
PLY 7	45	PLY 96	45
PLY 8	-45	PLY 95	-45
PLY 9	45	PLY 94	45
PLY 10	-45	PLY 93	-45
PLY 11	45	PLY 92	45
PLY 12	-45	PLY 91	-45
PLY 13	45	PLY 90	45
PLY 14	-45	PLY 89	-45
PLY 15	45	PLY 88	45
PLY 16	-45	PLY 87	-45
PLY 17	0	PLY 86	0
PLY 18	0	PLY 85	0
PLY 19	45	PLY 84	45
PLY 20	-45	PLY 83	-45
PLY 21	45	PLY 82	45

EK-1. (devam) Komponent parçaların serim kombinasyonları

Çizelge 1.4. (devam) 4 numaralı komponent serim kombinasyonu

PLY 22	-45	PLY 81	-45
PLY 23	45	PLY 80	45
PLY 24	-45	PLY 79	-45
PLY 25	45	PLY 78	45
PLY 26	-45	PLY 77	-45
PLY 27	45	PLY 76	45
PLY 28	-45	PLY 75	-45
PLY 29	45	PLY 74	45
PLY 30	-45	PLY 73	-45
PLY 31	45	PLY 72	45
PLY 32	-45	PLY 71	-45
PLY 33	45	PLY 70	45
PLY 34	-45	PLY 69	-45
PLY 35	45	PLY 68	45
PLY 36	-45	PLY 67	-45
PLY 37	45	PLY 66	45
PLY 38	-45	PLY 65	-45
PLY 39	45	PLY 64	45
PLY 40	-45	PLY 63	-45
PLY 41	45	PLY 62	45
PLY 42	-45	PLY 61	-45
PLY 43	45	PLY 60	45
PLY 44	-45	PLY 59	-45
PLY 45	45	PLY 58	45
PLY 46	-45	PLY 57	-45
PLY 47	45	PLY 56	45
PLY 48	-45	PLY 55	-45
PLY 49	0	PLY 54	0
PLY 50	0	PLY 53	0
PLY 51	0	PLY 52	0

EK-1. (devam) Komponent parçaların serim kombinasyonları

Çizelge 1.5. 5 numaralı komponent serim kombinasyonu

5.Numaralı Komponent Serimi			
PLY 1	45	PLY 102	45
PLY 2	-45	PLY 101	-45
PLY 3	45	PLY 100	45
PLY 4	-45	PLY 99	-45
PLY 5	45	PLY 98	45
PLY 6	-45	PLY 97	-45
PLY 7	45	PLY 96	45
PLY 8	-45	PLY 95	-45
PLY 9	45	PLY 94	45
PLY 10	-45	PLY 93	-45
PLY 11	45	PLY 92	45
PLY 12	-45	PLY 91	-45
PLY 13	45	PLY 90	45
PLY 14	-45	PLY 89	-45
PLY 15	45	PLY 88	45
PLY 16	-45	PLY 87	-45
PLY 17	0	PLY 86	0
PLY 18	0	PLY 85	0
PLY 19	45	PLY 84	45
PLY 20	-45	PLY 83	-45
PLY 21	45	PLY 82	45
PLY 22	-45	PLY 81	-45
PLY 23	45	PLY 80	45
PLY 24	-45	PLY 79	-45
PLY 25	45	PLY 78	45
PLY 26	-45	PLY 77	-45
PLY 27	45	PLY 76	45
PLY 28	-45	PLY 75	-45
PLY 29	45	PLY 74	45
PLY 30	-45	PLY 73	-45
PLY 31	45	PLY 72	45
PLY 32	-45	PLY 71	-45
PLY 33	45	PLY 70	45
PLY 34	-45	PLY 69	-45
PLY 35	45	PLY 68	45
PLY 36	-45	PLY 67	-45
PLY 37	45	PLY 66	45
PLY 38	-45	PLY 65	-45

EK-1. (devam) Komponent parçaların serim kombinasyonları

Çizelge 1.5. (devam) 5 numaralı komponent serim kombinasyonu

PLY 39	45	PLY 64	45
PLY 40	-45	PLY 63	-45
PLY 41	45	PLY 62	45
PLY 42	-45	PLY 61	-45
PLY 43	45	PLY 60	45
PLY 44	-45	PLY 59	-45
PLY 45	45	PLY 58	45
PLY 46	-45	PLY 57	-45
PLY 47	45	PLY 56	45
PLY 48	-45	PLY 55	-45
PLY 49	0	PLY 54	0
PLY 50	0	PLY 53	0
PLY 51	0	PLY 52	0

Çizelge 1.6. 6 numaralı komponent serim kombinasyonu

Simetrik-Balanslı(2-100)			
PLY 1	45	PLY 102	45
PLY 2	-45	PLY 101	-45
PLY 3	45	PLY 100	45
PLY 4	-45	PLY 99	-45
PLY 5	45	PLY 98	45
PLY 6	-45	PLY 97	-45
PLY 7	45	PLY 96	45
PLY 8	-45	PLY 95	-45
PLY 9	45	PLY 94	45
PLY 10	-45	PLY 93	-45
PLY 11	45	PLY 92	45
PLY 12	-45	PLY 91	-45
PLY 13	45	PLY 90	45
PLY 14	-45	PLY 89	-45
PLY 15	45	PLY 88	45
PLY 16	-45	PLY 87	-45
PLY 17	45	PLY 86	45
PLY 18	-45	PLY 85	-45
PLY 19	45	PLY 84	45
PLY 20	-45	PLY 83	-45
PLY 21	45	PLY 82	45

EK-1. (devam) Komponent parçaların serim kombinasyonları

Çizelge 1.6. (devam) 6 numaralı komponent serim kombinasyonu

PLY 22	-45	PLY 81	-45
PLY 23	45	PLY 80	45
PLY 24	-45	PLY 79	-45
PLY 25	45	PLY 78	45
PLY 26	-45	PLY 77	-45
PLY 27	45	PLY 76	45
PLY 28	-45	PLY 75	-45
PLY 29	45	PLY 74	45
PLY 30	-45	PLY 73	-45
PLY 31	45	PLY 72	45
PLY 32	-45	PLY 71	-45
PLY 33	45	PLY 70	45
PLY 34	-45	PLY 69	-45
PLY 35	45	PLY 68	45
PLY 36	-45	PLY 67	-45
PLY 37	45	PLY 66	45
PLY 38	-45	PLY 65	-45
PLY 39	45	PLY 64	45
PLY 40	-45	PLY 63	-45
PLY 41	45	PLY 62	45
PLY 42	-45	PLY 61	-45
PLY 43	45	PLY 60	45
PLY 44	-45	PLY 59	-45
PLY 45	45	PLY 58	45
PLY 46	-45	PLY 57	-45
PLY 47	45	PLY 56	45
PLY 48	-45	PLY 55	-45
PLY 49	45	PLY 54	45
PLY 50	-45	PLY 53	-45
PLY 51	0	PLY 52	0



GAZİ GELECEKTİR..