
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ISLAK SERİM/VAKUM TORBALAMA YÖNTEMİ İÇİN KÜR ÇEVRİMİ PARAMETRELERİNİN KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Lütfullah Sefa OKUŞLUK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- 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 çalışmasında 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.

Lütfullah Sefa OKUŞLUK

16/01/2025

ISLAK SERİM/VAKUM TORBALAMA YÖNTEMİ İÇİN KÜR ÇEVRİMİ PARAMETRELERİNİN KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Lütfullah Sefa OKUŞLUK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2025

ÖZET

Kompozit parçanın kalitesi ve performansında kürleme koşulları kritiktir. İstenen kaliteye ulaşmak, kür parametreleri üzerinde hassas kontrolü gerektirir. Hassas kontrolü sağlamak pahalıdır ve bazen üretim sırasında öngörülen parametrelerden sapmalar meydana gelebilmektedir. Bu sapmalar kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, kürleme parametrelerinde kabul edilebilir varyasyon düzeyini belirlemek önemlidir. Kompozit tamiri de yapısal bütünlüğü korumak, operasyonel güvenliği sağlamak ve ürünün ömrünü uzatmak için önemlidir. Tamir yapmak için bileşenleri yerinden çıkarmak pratik değildir ve bu durum ideal olmayan kürleme koşullarında çalışmayı beraberinde getirir. Bir fırın kullanmak yerine ıslak serim/vakum torbalama yöntemiyle yapılan serimin ardından gerekli sıcaklık genellikle bir battaniye ile sağlanır. Bu tez çalışmasının amacı, yukarıda açıklanan gerekçelerden hareketle kür çevrimi parametrelerinden kür sıcaklığı, bekleme süresi ve ısıtma hızındaki değişimin ıslak serim/vakum torbalama yöntemiyle üretilmiş kompozit plakaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektir. Kür sıcaklığı olarak 65, 85 ve 105°C; ısıtma hızı olarak 0,5, 1 ve 2°C/dk; bekleme süresi olarak 5, 10 ve 15 saat seçilmiştir. Dokuz farklı kür çevrimiyle plakalar ayrı ayrı kürlenmiştir. Ardından FVC, basma, ILSS ve DMA testleri koşularak test sonuçları istatistiksel analiz programıyla bilimsel bir temelde yorumlanmıştır. Basma testinde kür sıcaklığındaki değişimin ve bekleme süresi değişiminin (sadece 85°C'de); ILSS testindeyse sadece kür sıcaklığı değişiminin sonuçlarda istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sebep olduğu tespit edilmiştir. 85/15/0,5 kür çevriminin numuneleri basma ve ILSS testinde en düşük değerleri vermiştir. Bunun mikro yapısal boyuttaki gerekçesini anlamak için SEM analizi yapılmıştır. C3 ve L3 numuneleri SEM analizinde, karşılaştırıldığı diğer kür çevrimi numunelerine kıyasla temel bazı farklılıklar ihtiva etmiştir. Delaminasyon çatlaklarının yaygınlığı, debond olmuş fiberlerin varlığı, fiberlerin üzerindeki matris kalıntılarının yoğunluğunun az oluşu ve formasyonu bu farklılıklardan bazılarıdır. Bu kür çevrimi ile kürlenen numunelerin fiber-matris ara yüzey yapışmasının yeterince güçlü olmamasından dolayı mekanik dayanımlarının düşük olduğu ispatlanmıştır.

Bilim Kodu	:	91417
Anahtar Kelimeler	:	Kompozit, ıslak serim, vakum torbalama, kür çevrimi, kür parametreleri, karbon fiber, polimer matris, mekanik özellikler
Sayfa Adedi	:	137
Danışman	:	Doç. Dr. Elmas SALAMCI

EFFECTS OF CURE CYCLE PARAMETERS FOR WET LAY-UP/VACUUM BAG METHOD ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CFRP LAMINATED COMPOSITES

(M. Sc. Thesis)

Lütfullah Sefa OKUŞLUK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2025

ABSTRACT

Curing conditions are critical to the quality and performance of the composite part. Achieving the desired quality requires precise control over the curing parameters. Precise control is expensive and sometimes deviations from the predefined parameters may occur during production. These deviations may adversely affect the mechanical properties of composite materials. Therefore, it is important to determine the acceptable level of variation in curing parameters. Composite repair is also an important issue for maintaining structural integrity, ensuring operational safety and extending the life of the product. It is not practical to remove components for composite repair and this situation leads to working under non-ideal curing conditions. After stacking with the wet lay-up/vacuum bag method without using an oven, temperature is usually provided by a heat blanket. The aim of this thesis is to investigate the effects of the changes in the cure cycle parameters, such as cure temperature, dwell time and heat-up rate, on the physical and mechanical properties of composite laminates produced by wet lay-up/vacuum bagging method, based on the reasons explained above. Curing temperatures were selected as 65, 85 and 105°C; heat-up rates as 0,5, 1 and 2°C/min; dwell times as 5, 10 and 15 hours. Laminates were cured separately with nine different cure cycles. Then, FVC, compression test, ILSS and DMA tests were run and the test results were interpreted on a scientific basis with a statistical analysis program. It was determined that the curing temperature change and dwell time change (only at 85°C) in the compression test caused a statistically significant difference in the results; and only the curing temperature change in the ILSS test caused a statistically significant difference. The samples of 85/15/0,5 cure cycle gave the lowest values in compression and ILSS tests. SEM analysis was performed to understand the reason for this in microstructural dimensions. C3 and L3 samples contained some fundamental differences in SEM analysis compared to the other cure cycle samples. The prevalence of delamination cracks, the presence of debonded fibers, the low density and formation of resin cusps on the fibers are some of these differences. It was proven that the mechanical strength of the samples (C3 and L3) cured with this cure cycle was low due to the lack of strong fiber-matrix interface bonding.

Science Code	:	91417
Key Words	:	Composite, wet lay-up, vacuum bagging, cure cycle, curing parameters, carbon fiber, polymer matrix, mechanical properties
Page Number	:	137
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Elmas SALAMCI

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince nasıl bilim yapılacağını bana öğreten kıymetli cennet mekan Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL hocamıza ve tezimi birlikte tamamladığım, yüksek lisans eğitimim boyunca hem ders hem tez döneminde bana kompozitler konusunda çok şey katan Doç. Dr. Elmas SALAMCI hocamıza çok teşekkür ederim. Çalışma konumun belirlenmesinden üretim, test, analiz süreçlerine kadar çalışmaları bünyesinde yürüttüğüm Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın başından neticelenmesine kadar mühendislik ve idari anlamda desteklerini her daim yanımda hissettiğim sanayi danışmanlarım Sn. Faruk OĞUZ ve Sn. Yavuz AKALIN'a en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Kompozit plakanın üretiminde verdiği kıymetli desteklerinden dolayı Sn. Sabit ÖZCAN'a teşekkür ederim.

Son olarak, bugüne kadar hiçbir karşılık gözetmeksizin çok büyük bir özveri ile her konudaki desteklerini cömertçe sunan sevgili anneme, babama ve biricik kardeşlerime en kalbi şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

RESİMLERİN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xvii

1. GİRİŞ 1

2. KOMPOZİT MALZEMELER 7

2.1. Kompozit Malzemelere Genel Bakış 7

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 10

2.2.1. Metal matrisli kompozitler (MMK) 11

2.2.2. Seramik matrisli kompozitler (SMK) 12

2.2.3. Karbon matrisli kompozitler (KMK) 13

2.2.4. Polimer matrisli kompozitler (PMK) 14

2.2.5. Takviye elemanları 17

2.2.6. Yapısal kompozitler 19

2.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri 21

2.3.1. Islak serim vakum torbalama yöntemi 22

2.4. Kompozit Malzemelerin Özellikleri 24

2.4.1. Hacim ve kütle oranı, yoğunluk ve boşluk içeriği 24

2.4.2. Çekme mukavemeti ve elastisite modülü 26

Sayfa

2.4.3. Katmanlar arası kesme dayanımı 29
2.4.4. Basma dayanımı 31
2.4.5. Camsı geçiş sıcaklığı 33
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 37
3.1. Kür Çevriminin FRP Malzemenin Üzerindeki Etkileri 37
4. MATERYAL VE YÖNTEM 67
4.1. Malzeme 67
4.1.1. Kompozit malzemeler 67
4.1.2. Yardımcı malzemeler 70
4.2. Islak Serim Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Plaka Üretimi 70
4.3. Basma Testi 76
4.4. ILSS Testi 79
4.5. DMA Deneyi 82
4.6. Yoğunluk Testi 85
4.7. Fiber Hacim Oranı (FVC) Testi 85
4.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi 86
5. DENEYSEL ÇALIŞMA 89
5.1. Fiber Hacim Oranı (FVC) Testi Sonuçları 89
5.2. Basma Testi Sonuçları 91
5.3. ILSS Sonuçları 106
5.4. Dinamik Mekanik Analiz (DMA) Sonuçları 122
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 127
KAYNAKLAR 131
ÖZGEÇMİŞ 137

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Metal matrisli kompozitlerin tipik mekanik özellikleri 12

Çizelge 2.2. Bazı seramik matrisli kompozitlerin tipik mekanik özellikleri 13

Çizelge 2.3. Karbon-karbon matris kompozitlerinin tipik mekanik özellikleri 13

Çizelge 2.4. Bazı termoset reçinelerin tipik özellikleri 15

Çizelge 2.5. PMK, MMK ve SMK arasında karşılaştırmalı analiz 16

Çizelge 3.1. Kürlenmiş CFRP numunelerinin özellikleri 38

Çizelge 3.2. Fiberlerin ve reçinenin özellikleri 39

Çizelge 3.3. Basma ve eğme testi numunelerine ait bilgiler 40

Çizelge 3.4. Proses parametreleri 41

Çizelge 3.5. Çalışmada kullanılan reçine ve karbon fiberin özellikleri..... 47

Çizelge 3.6. Çalışma kapsamında incelenen kür parametreleri 50

Çizelge 3.7. Ortagonal deneysel yöntem ve ILSS testi sonuçları 51

Çizelge 3.8. IM7/977-2 UD için tasarlanmış kür çevrimleri 58

Çizelge 3.9. Oda sıcaklığı/kuru ve sıcak/ıslak SBS sonuçları 59

Çizelge 3.10. Kompozit plakaların farklı üretim yöntemlerine göre Vf değerleri 61

Çizelge 3.11. Numunelerin kalınlığı ve açıklık uzunluğu 62

Çizelge 3.12. Üretim yöntemlerine göre kompozit plakaların boşluk içeriği 62

Çizelge 3.13. Çalışmada kullanılan kür çevrimleri 64

Çizelge 4.1. Kullanılan karbon elyaftan dokunmuş kumaşın özellikleri..... 68

Çizelge 4.2. Kumaşın dokumasında kullanılan sürekli fiberin özellikleri..... 68

Çizelge 4.3. Saf reçine LR285 özellikleri..... 69

Çizelge 4.4. Sertleştirici kür ajanı LH287 69

Çizelge 4.5. Otoklavda 9 ayrı test plakasına uygulanan 9 farklı kür çevrimi..... 74

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.6. Basma testi numune özellikleri 76

Çizelge 4.7. Basma testi numunelerinin tanımlanması/markalanması 77

Çizelge 4.8. ILSS testi numunesi özellikleri 79

Çizelge 4.9. ILSS testi numunelerinin tanımlanması/markalanması 79

Çizelge 4.10. DMA testi numunesi özellikleri 82

Çizelge 4.11. DMA testi numunelerinin tanımlanması/markalanması 83

Çizelge 4.12. FVC testi numunesi özellikleri 85

Çizelge 4.13. FVC testi numunelerinin tanımlanması/markalanması 85

Çizelge 5.1. Fiber hacim oranı (FVC) testi sonuçları 90

Çizelge 5.2. FVC için koşulan ANOVA testi sonuçları 90

Çizelge 5.3. Boşluk içeriği için koşulan ANOVA testi sonuçları 91

Çizelge 5.4. Tüm kür çevrimleri bir arada basma testi sonuçları 91

Çizelge 5.5. Basma testi ilk alt grubu sonuçları (Sıcaklık değişimi) 92

Çizelge 5.6. Basma testi ilk alt grubu ANOVA testi sonucu 92

Çizelge 5.7. Tukey testiyle bilgilerin gruplandırılması (Basma birinci alt grup) 93

Çizelge 5.8. Basma testi ikinci alt grubu sonuçları (Isınma hızı değişimi) 98

Çizelge 5.9. Basma testi ikinci alt grubu ANOVA testi sonucu 98

Çizelge 5.10. Basma testi üçüncü alt grubu sonuçları 100

Çizelge 5.11. Basma testi üçüncü alt grubu ANOVA testi sonucu 101

Çizelge 5.12. Basma testi dördüncü alt grubu sonuçları 103

Çizelge 5.13. Basma testi dördüncü alt grubu ANOVA testi sonucu 104

Çizelge 5.14. Tüm kür çevrimleri bir arada ILSS testi sonuçları 107

Çizelge 5.15. ILSS testi ilk alt grubu sonuçları (Sıcaklık değişimi) 107

Çizelge 5.16. ILSS testi ilk alt grubu ANOVA testi sonucu 108

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.17. Tukey testiyle bilgilerin gruplandırılması (ILSS birinci alt grup) 108

Çizelge 5.18. ILSS testi ikinci alt grubu sonuçları (Isınma hızı değişimi) 113

Çizelge 5.19. ILSS testi ikinci alt grubu ANOVA testi sonucu 114

Çizelge 5.20. ILSS testi üçüncü alt grubu sonuçları 117

Çizelge 5.21. ILSS testi üçüncü alt grubu ANOVA testi sonucu 117

Çizelge 5.22. ILSS testi dördüncü alt grubu sonuçları 120

Çizelge 5.23. ILSS testi dördüncü alt grubu ANOVA testi sonucu 120

Çizelge 5.24. DMA testi koşulan kür çevrimleri ve Tg-başlangıç sonuçları 123

Çizelge 5.25. DMA testi ilk alt grubu sonuçları (Sıcaklık değişimi) 123

Çizelge 5.26. DMA testi ikinci alt grubu sonuçları 124

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. 2008'den 2025'e kadar CFRP kompozitlerine yönelik küresel talep 1

Şekil 1.2. Ticari Airbus ve Boeing uçaklarında artan kompozit kullanımı 2

Şekil 1.3. Boeing 787 uçağında kullanılan malzemelerin ağırlıkça yüzdeleri 3

Şekil 1.4. Boeing 787 uçağında kullanılan malzemeler ve kullanıldığı bölgeler 3

Şekil 1.5. Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi 5

Şekil 2.1. Kompozitlerin şematik gösterimi 8

Şekil 2.2. Fiber, matris ve kompozitin dayanımı 9

Şekil 2.3. Takviye elamanına göre sınıflandırma..... 10

Şekil 2.4. Matris türüne göre kompozitler 11

Şekil 2.5. Kürleme sırasında termoset moleküllerin çapraz bağlanması 16

Şekil 2.6. Takviye elemanına göre kompozit çeşitleri 18

Şekil 2.7. Dokuma kumaş çeşitlerinin şematik gösterimi 19

Şekil 2.8. Serim çeşitleri (a) Tek yönlü (b) Çapraz kat (c) Açılı kat (d) Çok yönlü 20

Şekil 2.9. Sandviç panel kompozitin şematik gösterimi 21

Şekil 2.10. Fiber takviyeli kompozitlerin üretim tekniklerinden bazıları 22

Şekil 2.11. Islak serim elle yatırma yöntemi 22

Şekil 2.12. Islak serim elle yatırma yöntemi süreç akış şeması 23

Şekil 2.13. Islak serim vakum torbalama yöntemi şematik gösterimi 24

Şekil 2.14. Gerilme/gerinim davranışı (a) sünek matrisli (b) gevrek matrisli 28

Şekil 2.15. Katmanlar arası kayma mukavemeti test kurulumu 30

Şekil 2.16. Üç nokta eğilme testlerinde karşılaşılan olası hata modlarının şeması 31

Şekil 2.17. ASTM D3410 ve D6641'e göre hasar tipleri 32

Şekil 2.18. DMA setup tileri A) Tek konsol eğme modu B) Çift konsol eğme modu .. 34

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.19. DMA testinde Tg bulma yöntemleri 35

Şekil 3.1. Parametre değişikliklerinin basma mukavemeti üzerindeki etkisi 37

Şekil 3.2. Tipik iki aşamalı kür çevrimi 42

Şekil 3.3. Torbalama teknikleri A) SVB B) MSVB 43

Şekil 3.4. A)SVB ve MSVB için EMRCC profili ve B) DVB için EMRCC profili 44

Şekil 3.5. A)SVB ve MSVB yöntemleri DC profili ve B) DVB yöntemi DC profili ... 45

Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan iki farklı kür çevrimi 48

Şekil 3.7. ILSS sonuçlarına göre kürleme parametrelerinin grafiği 50

Şekil 3.8. Çekme mukavemeti ve Tg (a) farklı sıcaklıklar (b) farklı süreler 53

Şekil 3.9. Kür çevrimlerinde ILSS ve T_g: (a) farklı sıcaklıklar (b) farklı süreler 53

Şekil 3.10. AS4/8552 için kür çevrimleri (a) C-1 (b) C-2 (c) C-3 (d) C-0 55

Şekil 3.11. Boşluk içeriği fonksiyonu olarak AS4/8552 kompozit plakaların ILSS'i .. 56

Şekil 3.12. 1'den 5'e kadar olan paneller için son DOC ve Tg 58

Şekil 4.1. LR 285+LH287 epoksi seti Tg değişim grafiği 69

Şekil 4.2. Basma numunesi ölçüleri (mm) 77

Şekil 4.3. ILSS numunesi ölçüleri (mm) 80

Şekil 4.4. DMA numunesi ölçüleri (mm) 83

Şekil 4.5. FVC testi (mm) 86

Şekil 5.1. Basma testi ilk alt grubu a) Tukey testi b) Bar grafiği 93

Şekil 5.2. a) C2 b) C3 c) C4 setleri için basma testi kuvvet-deplasman eğrileri 95

Şekil 5.3. Basma testi ikinci alt grubuna ait bar grafiği 98

Şekil 5.4. a) C3 b) C5 c) C6 setleri için basma testi kuvvet-deplasman eğrileri 100

Şekil 5.5. Basma testi üçüncü alt grubuna ait bar grafiği 101

Şekil 5.6. a) C9 b) C10 c) C4 setleri için basma testi kuvvet-deplasman eğrileri 103

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.7. Basma testi dördüncü alt grubu a)Tukey testi b) Bar grafiği..... 104

Şekil 5.8. a) C7 b) C8 c) C3 setleri için basma testi kuvvet-deplasman eğrileri 106

Şekil 5.9. ILSS testi ilk alt grubu a) Tukey testi b) Bar grafiği 109

Şekil 5.10. Set a) L2 b) L3 c) L4 için kuvvet vs. deplasman eğrileri 110

Şekil 5.11. ILSS testi ikinci alt grubu için Tukey çifler arası karşılaştırma testi..... 114

Şekil 5.12. Set a) L3 b) L5 c) L6 için kuvvet vs. deplasman eğrileri 115

Şekil 5.13. Set a) L9 b) L10 c) L4 için kuvvet vs. deplasman eğrileri 118

Şekil 5.14. Set a) L7 b) L8 c) L3 için kuvvet vs. deplasman eğrileri 121

Şekil 5.15. DMA test termogramları a) D2-3 b) D3-2 c) D4-1..... 124

Şekil 5.16. DMA test termogramları a) D7-3 b) D8-3 c) D3-2..... 125

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Kullanılan karbon fiber dokuma kumaş ve epoksi reçine 67

Resim 4.2. Serim a) zımpara b) ayırıcı dökme c) ayırıcı uygulaması d) kumaş serimi. 71

Resim 4.3. Serim a) reçine b) soyma kumaşı c) ayırıcı film d) vakum battaniyesi 72

Resim 4.4. Serim a) vakum torbası b) portlar c) basınç regülatörü d) 0,8 bar ayarı..... 73

Resim 4.5. Ön kürleme a) fırına yerleştirme b) ısıl çift c) kalıptan çıkarma d) kesim .. 74

Resim 4.6. Plakaların kürlenmesinde kullanılan otoklav..... 75

Resim 4.7. Otoklavda kürlemesi yapılmış kompozit plakalar 76

Resim 4.8. Altıncı kür çevrimine ait basma testi numuneleri, C6-1'den C6-8'a kadar. 78

Resim 4.9. EN 2850 standardına göre yapılan basma testinin düzeneği 78

Resim 4.10. İkinci kür çevrimine ait ILSS test numuneleri, L2-1'den L2-5'a kadar 81

Resim 4.11. EN2563 standardına göre yapılan ILSS testi düzeneği 82

Resim 4.12. İkinci kür çevrimine ait DMA test numuneleri, D2-1'den D2-3'a kadar .. 84

Resim 4.13. EN6032 standardına göre yapılan DMA testi düzeneği 84

Resim 4.14. Dördüncü kür çevrimine ait FVC test numunesi, V2-1'den V2-3'e kadar. 86

Resim 4.15. Kullanılan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı..... 87

Resim 5.1. Analitik terazi cihazı 90

Resim 5.2. a)C2 b) C3 c)C4 setleri için basma testi sonrası fotoğrafları..... 94

Resim 5.3. C2 SEM görüntüleri: a) 1 mm b) 40 µm c) 40 µm d) 20 µm 96

Resim 5.4. C3 SEM görüntüleri: a) 1 mm b) 40 µm c) 30 µm d) 20 µm 97

Resim 5.5. a) C3 b) C5 c) C6 setleri için basma testi sonrası fotoğrafları..... 99

Resim 5.6. a) C9 b) C10 c) C4 setleri için basma testi sonrası fotoğrafları..... 102

Resim 5.7. a) C7 b) C8 c) C3 setleri için basma testi sonrası fotoğrafları..... 105

Resim 5.8. a) L2 b) L3 c) L4 setleri için ILSS testi sonrası fotoğrafları 111

Resim **Sayfa**

Resim 5.9. L2 SEM görüntüleri: a) 1 mm b) 500 µm c) 200 µm d) 20 µm 112

Resim 5.10. L3 SEM görüntüleri: a) 1 mm b) 400 µm c) 200 µm d) 40 µm 113

Resim 5.11. a) L3 b) L5 c) L6 setleri için ILSS testi sonrası fotoğrafları 116

Resim 5.12. a) L9 b) L10 c) L4 setleri için ILSS testi sonrası fotoğrafları 119

Resim 5.13. a) L7 b) L8 c) L3 setleri için ILSS testi sonrası fotoğrafları 122

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
cm^3	Santimetre küp
dk	Dakika
GPa	Gigapaskal
g	Gram
Hz	Hertz
MPa	Megapaskal
m^2	Metrekare
mm^2	Milimetre kare
Pa	Paskal
s	Saniye
T_g	Camsı geçiş sıcaklığı
V_f	Fiber hacim oranı
°C	Santigrat derece

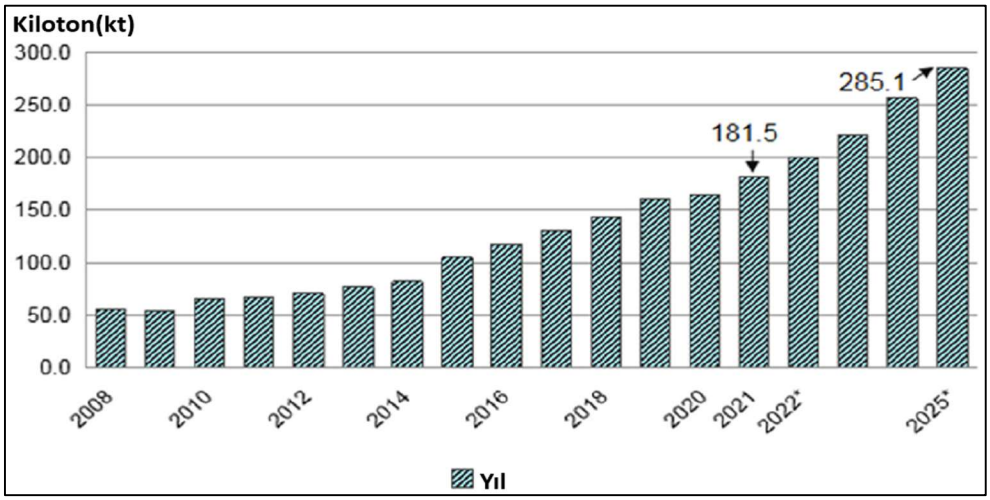
Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ANOVA	Varyans Analizi
ASTM	American Society for Testing and Material
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Polimer
DF	Serbestlik Derecesi
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
DMTA	Dinamik Mekanik Termal Analiz
DoC	Kürlenme Derecesi
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
E’	Depolama Modülü
E”	Kayıp Modülü

Kısaltmalar	Açıklamalar
FRP	Fiber Takviyeli Polimer
GFRP	Cam Fiber Takviyeli Polimer
ILSS	Katmanlar Arası Kesme Dayanımı
KMK	Karbon Matrisli Kompozit
LRI	Sıvı Reçine İnfüzyon
MMK	Metal Matrisli Kompozit
PVA	Polivinil Alkol
RTM	Reçine Transfer Kalıplama
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
TMA	Termomekanik Analiz
UD	Tek Yönlü
VARIM	Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Kalıplama
WL/VB	Islak Serim/Vakum Torbalama

1. GİRİŞ

Kompozit malzeme, aralarında tanınabilir bir arayüze sahip iki veya daha fazla farklı malzemenin makroskobik bir kombinasyonudur. Kompozitler sadece yapısal özellikleri için değil, aynı zamanda elektriksel, termal, tribolojik ve çevresel uygulamalar için de kullanılmaktadır. Modern kompozit malzemeler genellikle belirli bir uygulama yelpazesi için belirli bir özellik dengesi elde etmek üzere optimize edilir [1].

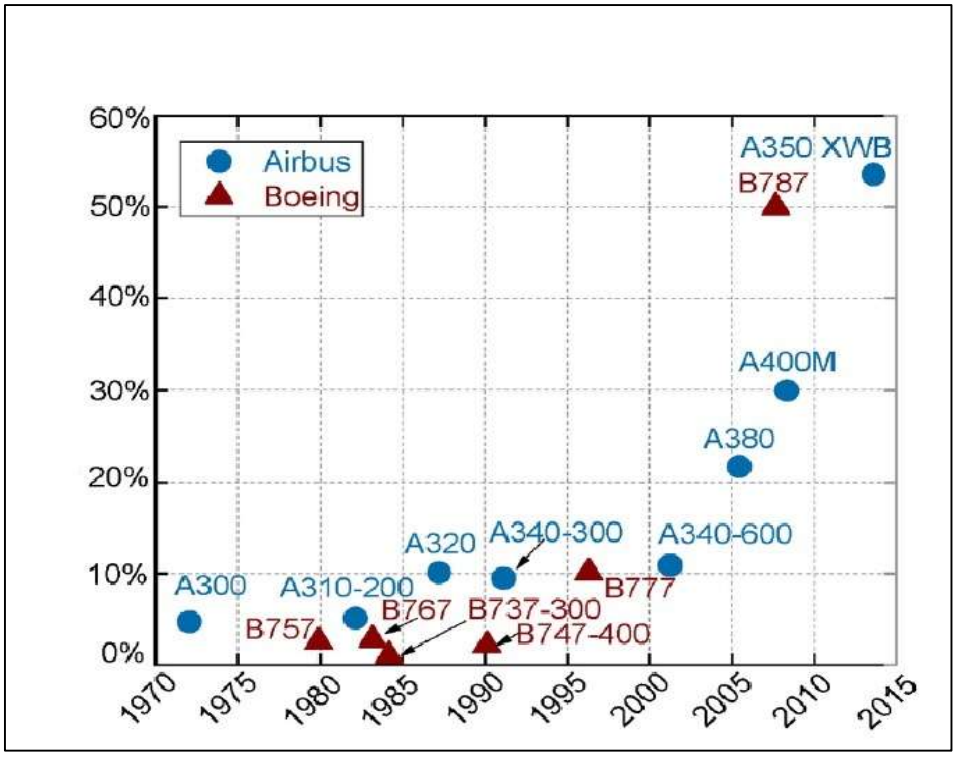
Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelmesiyle oluşur. Havacılık, otomobil, inşaat, makine ve denizcilik endüstrilerinde parça üretmek için yoğun bir şekilde kullanılırlar. Bir kompozit malzeme ya kendisini oluşturan malzemelerde bulunmayan yeni bir özellik kazanır ya da bu bileşenlerin en büyük özelliklerini birleştirir. Yüksek mukavemet ve hafiflik arandığında, metallere göre çok daha fazla tercih edilirler. Ayrıca esneklik, şekil verme kolaylığı, rijitlik, korozyon & kimyasal etkilere dayanıklılık, ısı & yangın direnci ve/veya titreşim sönümleme gibi özelliklerden bir veya birkaçının gerekli olduğu durumlarda tercih edilirler [2].



Şekil 1.1. 2008'den 2025'e kadar CFRP kompozitlerine yönelik küresel talep [3]

Şekil 1.1'de Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler (CFRP) kompozit kullanımının 2014 yılından itibaren istikrarlı bir artış gösterdiği görülmektedir. 2021 yılında yaklaşık 181 kt tüketilerek 2014 yılındaki değeri ikiye katlamıştır. 2025 yılında talebin 285 kt'a ulaşması beklenmektedir [3].

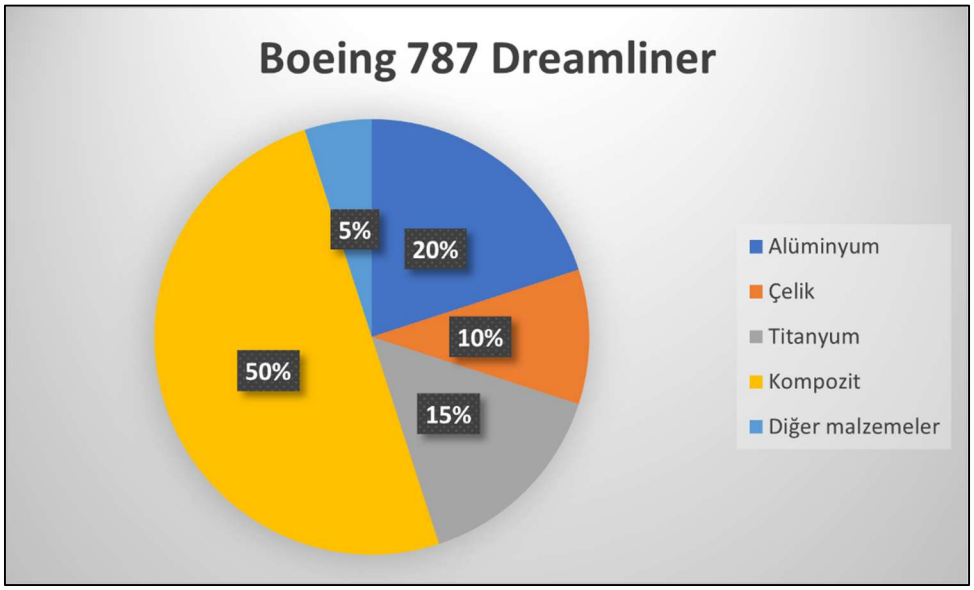
Kompozit üretim teknolojisindeki gelişmeler sayesinde havacılık endüstrisinde kompozit parça kullanımı giderek artmaktadır. Yeni teknolojik yöntemlerle, tasarlanan parçaların ağırlığı önemli ölçüde azaltılabilmekte, bu da güç ve sertlik gereksinimlerini karşılarken karbon emisyonunun azalmasına katkıda bulunmaktadır. Ek olarak, kompozit malzemeler, rekabetçi termal/ses izolasyonu ve iyi erozyon, aşınma ve korozyon direnci özellikleri nedeniyle de tercih edilmektedir [4]. CFRP, yüksek mukavemet/ağırlık oranlarına ilişkin benzersiz avantajlar nedeniyle havacılık alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılık yapılarının güvenilirliğinin, emniyetinin ve dayanıklılığının garanti edilmesi en önemli sorundur [5].



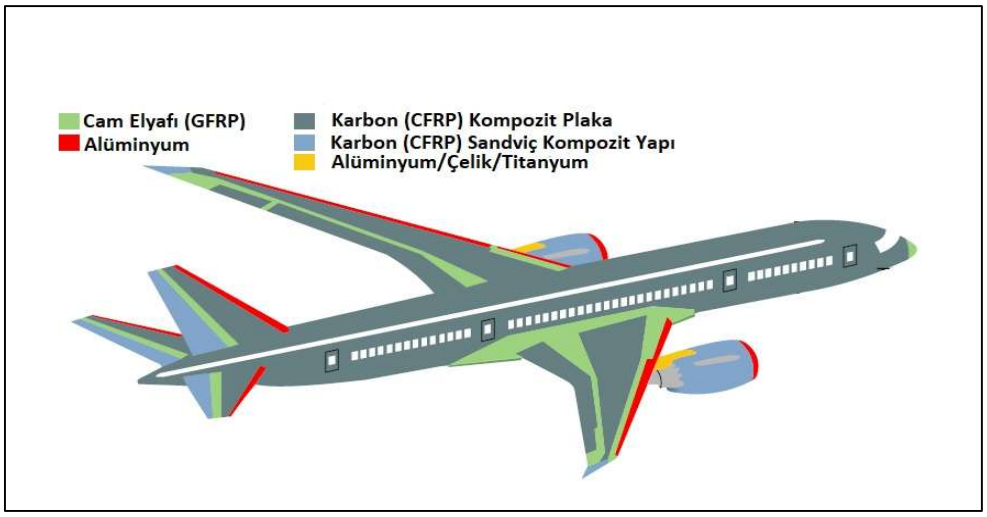
Şekil 1.2. Ticari Airbus ve Boeing uçaklarında artan kompozit kullanımı [3]

Sivil ve askeri uçakların yanısıra insansız hava araçlarında (İHA) ve uydu üretiminde de kullanılan fiber takviyeli kompozitlerin artan kullanım oranı, Şekil 1.2'de Airbus ve Boeing firmalarının ürettiği uçakların imalinde kullanılan kompozit malzemenin ağırlıkça yüzdesi dikey eksende sunulmuştur, konvansiyonel yapı malzemeleri ile kıyaslandığında sahip oldukları yüksek özgül mukavemet ve sertliklerinden ileri gelmektedir [6]. Çünkü fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin (FRP) ulaşım, uçak ve diğer havacılık uygulamalarındaki kullanım değeri özellikle yoğunluk ile ilişkilidir. Özgül değerler

mukavemet, elastisite modülü gibi malzeme özelliklerinin yine malzemenin yoğunluğuna bölünmesi ile elde edilir. Şu anda yeni uçak gövdeleri, Boeing 787 Dreamliner ve Airbus A350 XWB gibi, hacimce %80 (ağırlık olarak %50 oranında) kompozitten imal edilmektedirler [7]. Şekil 1.3'te Boeing 787 Dreamliner uçağında kullanılan malzemelerin ağırlıkça yüzdeleri pasta grafiği halinde sunulmuştur. Şekil 1.4'te ise bahsi geçen uçak modelinin imalinde kullanılan malzeme çeşitlerinin bu uçağın hangi bölgelerinde kullanıldığı resmedilmiştir.

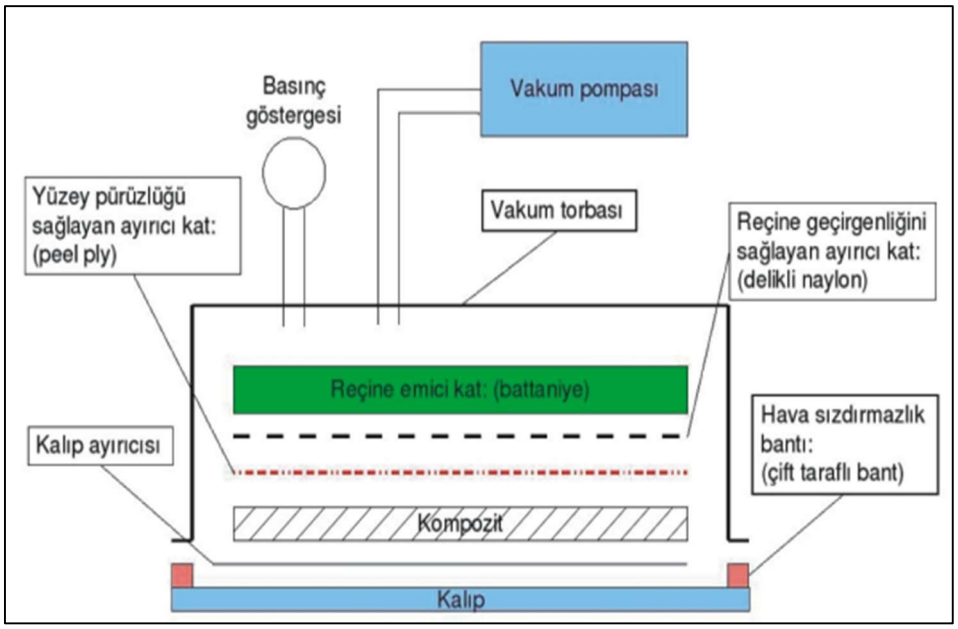


Şekil 1.3. Boeing 787 uçağında kullanılan malzemelerin ağırlıkça yüzdeleri [8]



Şekil 1.4. Boeing 787 uçağında kullanılan malzemeler ve kullanıldığı bölgeler [8]

Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit bileşenleri imal etmek için birçok farklı yöntem kullanılabilmektedir. Otoklav işlemi, reçine transfer kalıplama işlemi (RTM), vakum infüzyonu (LRI) ve elektron ışını kürleme işlemi, ıslak serim elle yatırma, ıslak serim vakum torbalama, filaman sarma bu yöntemlere örnek olarak verilebilir. Şu anda, otoklav işlemi, yüksek performanslı kompozit bileşenlerin üretilmesi için ana yöntem haline gelmiştir. Yarı mamul kompozit prepreg laminaların kalıp üzerine istiflendiği, vakum durumunda sıkıca sıkıştırıldığı ve teknolojik ısıtma, basınçlandırma, bekleme, soğutma sürecinden geçtiği bu yöntem ile havacılıkta kullanılacak bileşenler üretilmektedir [9]. Otoklavlar, büyük boyutları, yüksek ilk yatırım maliyetleri ve aşırı enerji tüketimleri nedeniyle kompozit malzemelerin üretiminde çalıştırılması pahalı ekipman parçalarıdır [2]. Bu sebeple diğer endüstriyel sektörlerde kullanım açısından maliyet etkin bir üretim yöntemi değildir [10]. Diğer taraftan ıslak serim elle yatırma yöntemi emek yoğun bir proses olsa da, yüksek üretim esnekliğinden dolayı otomobil parçaları ve havacılık malzemeleri gibi çeşitli ürünlerin prototip üretimi ve küçük parti üretimlerde büyük ilgi görmektedir [11]. Ancak, düşük fiber hacim oranı ve boşluk-gözeneklerin varlığı nedeniyle otoklavda elde edilen mekanik özellikleri çoğu zaman elde edemedikleri belirtilmelidir. Islak serim yöntemi vakum torbalama ile kullanılınca büyük ticari parça ve bileşenlerin düşük maliyetle üretimine olanak sağlamaktadır. Klasik ıslak serim yöntemine kıyasla vakum torbalama kullanılan ıslak serim yöntemiyle daha üstün mekanik özelliklere sahip parçalar imal edilebilmektedir. Bu gelişmiş yöntemle, daha yüksek fiber hacim fraksiyonları ve daha düşük boşluk içeriği sağlanabilmektedir. Ancak ekstra ekipman, sarf malzeme ve daha yüksek bir imalatçı becerisi gerekmektedir [12]. Kompozit malzemelerde kür çevriminin malzemenin mekanik özelliklerine doğrudan etkisi mevcuttur. Örneğin bir otoklav kürlenme prosesindeki parametreler; kürlenme süresi, kürlenme sıcaklığı, ısınma hızı, soğuma hızı, otoklav basıncı, vakum gibi parametrelerdir. Bu tezin konusu olan ve Şekil 1.5'te şematik gösterimi sunulan ıslak serim vakum torbalama yöntemiyle üretilen kompozitlerin kürlenmesi için ise otoklava ihtiyaç duyulmaz. Sıcaklık kontrollü fırınlarda kürleme işlemi yapılabilmektedir.



Şekil 1.5. Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi [13]

Kürleme basıncının polimer kompozit malzemelerin gözenekliliği ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi yıllar boyunca incelenmiştir. Kürleme basıncı üzerine yapılan pek çok çalışma[5, 9, 14-16], basıncın düşürülmesinin gözenekliliği arttırdığını ve bunun da mekanik özellikleri, özellikle tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) gibi matris ağırlıklı özellikleri ve çekme mukavemeti gibi diğer mekanik özellikleri azalttığını göstermiştir. Bu tez çalışmasında ise uygulanan ısıl işlemdeki değişiminin polimer kompozit malzemelerin nihai özellikleri üzerindeki etkisi, diğer kürleme parametrelerinden ziyade incelenmiştir. Bunun başlıca nedeni, kürlenme durumunun polimer kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki bilinen etkisidir. Örneğin, kürleme sıcaklığı yeterince yüksek değilse, reçine tam olarak kürlenmeyecek ve bu nedenle elyafları tamamen desteklemeyecek ve bu da kompozit plakanın nihai mekanik özelliklerinin azalmasına neden olacaktır. Kür sıcaklığı aynı zamanda camsı geçiş sıcaklığını (T_g) ve termoset reçinelerin akma gerilimini de etkiler [17].

Literatürde, kürleme sıcaklığı ve bekleme süresi gibi kürleme parametrelerini değiştirerek farklı mekanik özelliklerin elde edildiği bildirilen çalışmalar bulunmaktadır [10, 18-21]. Ancak, yukarıda belirtilen kürleme parametrelerinin karbon fiber takviyeli epoksi matris kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı veya çok düşük bir etkiye sahip olduğu bildirilen çalışmalar da bulunmaktadır [9, 17, 22, 23]. Bunun yanı sıra, bu çalışmalardan sadece birkaçı farklı kürleme döngülerinde kürlenen

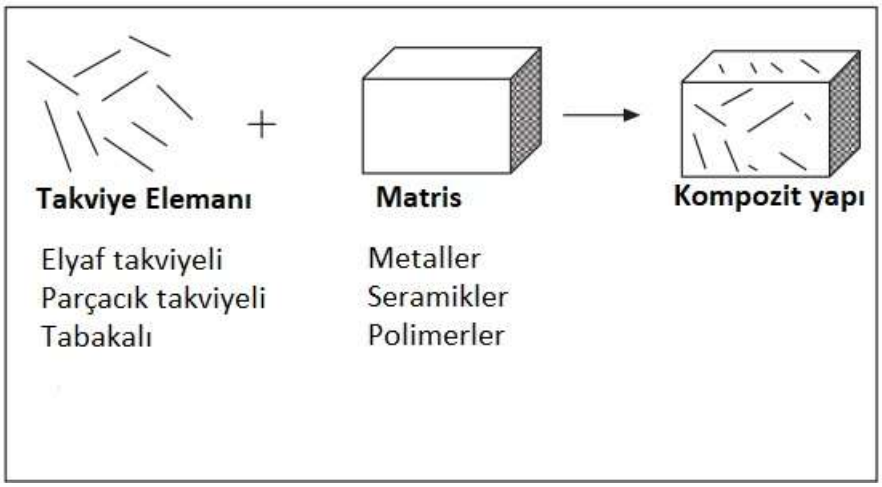
kompozitlerin termo-mekanik özelliklerini de araştırmıştır [17, 22]. Bu çalışma ile ıslak serim vakum torbalama yöntemi ile tek seferde üretilmiş büyük bir plaka ve bu plakadan kesilmiş küçük plakaların farklı kür çevrimlerinde kürlenmesinin ardından elde edilen kupon numunelerin viskoelastik ve mekanik özellikleri, yapılan testler ile irdelenmiştir. Sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve ıslak serim/vakum torbalama (WL/VB) yöntemi ile üretilmiş kompozit plaka üzerinde hangi kür parametrelerinin numunelerin mekanik davranışı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sebep olduğu ortaya koyulmuştur. SEM analizi ile bu farklılığa neden olan mikro yapı mekanizması ortaya konmuştur.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Tezin bu bölümü dört alt başlıktan oluşmaktadır. İlk alt başlıkta, bu çalışmada araştırmaya konu olan ve üretimi yapılan numuneler üzerinde deneysel çalışmaların da yürütüldüğü kompozit malzemeler hakkında genel kapsamlı bilgi verilmiştir. İkinci alt başlıkta, kompozit malzemelerin nasıl sınıflandırıldığı konusu tartışılmıştır. Üçüncü alt başlıkta, polimer matrisli fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri hakkında genel kapsamlı bilgi verilmiş ve özellikle bu tezde numuneleri üretmek için seçilen yöntem olan ıslak serim/vakum torbalama yöntemi tartışılmıştır. Dördüncü alt başlıkta ise fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin fiziksel, viskoelastik ve mekanik özellikleri hakkında bilgi verilmiş, bu özellikler hakkında veri elde etmek ve yorumlamak için koşulan testler paylaşılmıştır.

2.1. Kompozit Malzemelere Genel Bakış

Kompozit malzemeler, birçok farklı şekilde tanımlanabilmekle birlikte, daha iyi özellikler (mekanik, fiziksel, termal, elektriksel) elde etmek için birleştirilen, makroskobik olarak ayırt edilebilir en az iki malzemeden oluşan bir malzeme yapısıdır [24]. Kompozit malzemelerin nihai özellikleri, bileşen malzeme özelliklerinden daha iyidir. Kavram olarak kompozit ilk defa insanlar tarafından icat edilmemiştir. Doğada zaten örnekleri bulunmaktadır. Örneğin odun, lignin adı verilen doğal bir tutkal matrisindeki selüloz liflerinin bir bileşimi ile oluşmaktadır. Salyangoz ve istiridye gibi omurgasızların kabukları yine kompozitin bir örneğidir [25]. Şekil 2.1'de de değinildiği üzere matris ve takviye elemanı olmak üzere iki temel fazdan oluşmaktadırlar. Takviye elemanı kompozite mukavemet ve dayanım sağlarken, matris sertlik ve çevresel etkilere karşı direnç sağlar.



Şekil 2.1. Kompozitlerin şematik gösterimi [26]

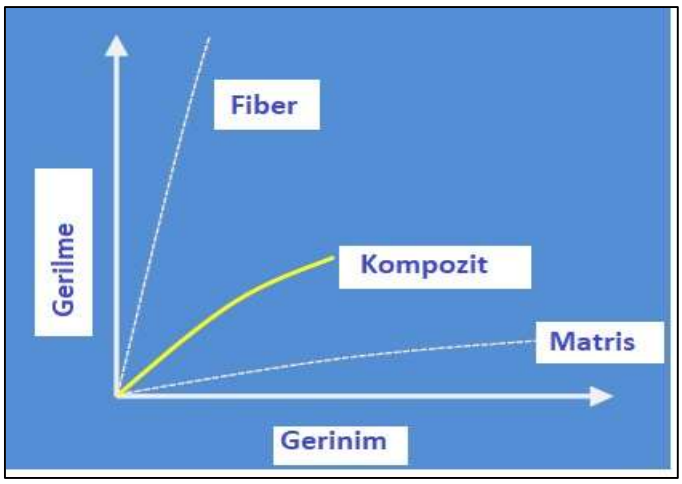
Matris malzemesi kompozit bir yapıda, yapının tatmin edici performansı için hayati önem taşıyan çeşitli işlevleri yerine getirir. Bir matris malzemesi veya bağlayıcının varlığı olmadan, takviye edici malzemelerin kendi başlarına çok az faydası vardır. Matris malzemesinin rolü aşağıdaki gibidir:

- Matris malzemesi elyafları birbirine bağlayarak yükü elyaflara aktarır. Yapıya sağlamlık ve şekil kazandırır,
- Matris, elyafları izole ederek elyafların ayrı ayrı hareket edebilmesini sağlar. Bu, çatlağın yayılmasını durdurur veya yavaşlatır,
- Matris iyi bir yüzey kalitesi sağlar ve net şekilli veya net şekle yakın parçaların üretimine yardımcı olur,
- Matris, takviye elemanını kimyasal etkilere ve mekanik hasarlara (aşınma) karşı koruma sağlar,
- Seçilen matris malzemesine bağlı olarak süneklik, darbe dayanımı vb. performans özellikleri de etkilenir,
- Hata modu, kompozitte kullanılan matris malzemesinin türünden ve bunun fiberle uyumluluğundan büyük ölçüde etkilenmektedir,
- Gerilimi takviye malzemesine/malzemelerine dağıtır [25].

Takviye elemanının rolü ise aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yükü taşımak. Yapısal bir kompozitte yükün %70 ile 90'ı fiberler tarafından taşınır,

- Kompozitlerde sertlik, mukavemet, termal stabilite ve diğer yapısal özellikleri sağlar,
- Kullanılan elyafın türüne bağlı olarak elektriksel iletkenlik veya izolasyon sağlar,
- Matrisi tercihli yönlerde güçlendirir [27].



Şekil 2.2. Fiber, matris ve kompozitin dayanımı [28]

Kompozit malzemenin dayanımı, onu oluşturan fiber ve matrisin dayanımının arasında bir değeri ihtiva eder. Şekil 2.2'de bu izah edilmektir.

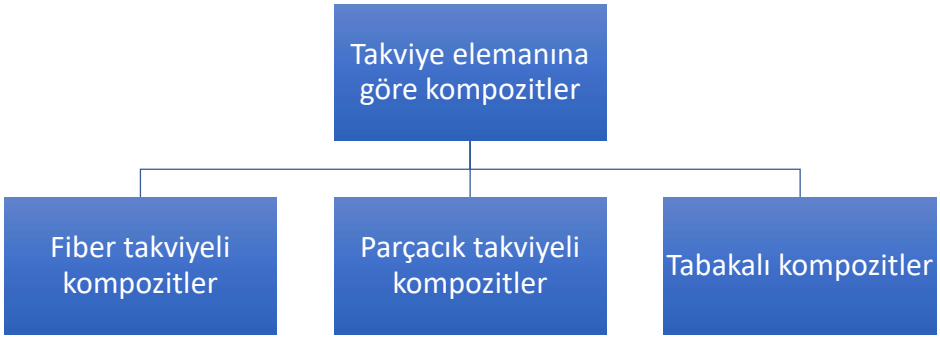
Kompozit malzemeler giriş bölümü ve bu bölümde bahsedildiği üzere birçok avantajı sunmalarına rağmen aşağıda değinilen dezavantajlara da sahiptirler:

- Kompozit malzemelerin malzeme maliyeti çelik ve alüminyuma göre çok yüksektir. Ağırlık bazında alüminyum ve çeliğe göre neredeyse 5 ile 20 kat daha fazladır.
- Metallerle ürün tasarlamanın klasik yolları, makine ve metal el kitaplarının yanı sıra tasarım ve veri el kitaplarının kullanımına bağlıdır. Metaller için geniş tasarım veri tabanları mevcuttur. Kompozitlerle parça tasarlama konusunda veri tabanının olmaması nedeniyle bu tür kitaplar bulunmamaktadır.
- Kompozit parçaların sıcaklık dayanımı matris malzemelerinin sıcaklık dayanımına bağlıdır. Kompozitlerin büyük bir kısmı polimer bazlı matrisler kullandığından, sıcaklık direnci plastiğin özellikleriyle sınırlıdır. Ortalama kompozitler –40 ile +100°C sıcaklık aralığında çalışır. Epoksiler, bismaleimidler ve PEEK gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı plastikler için üst sıcaklık sınırı +150 ile +200°C arasında değişebilmektedir.
- Kompozitler nemi emer ve bu da malzeme özelliklerini ve boyutsal stabiliteyi etkiler [25].

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

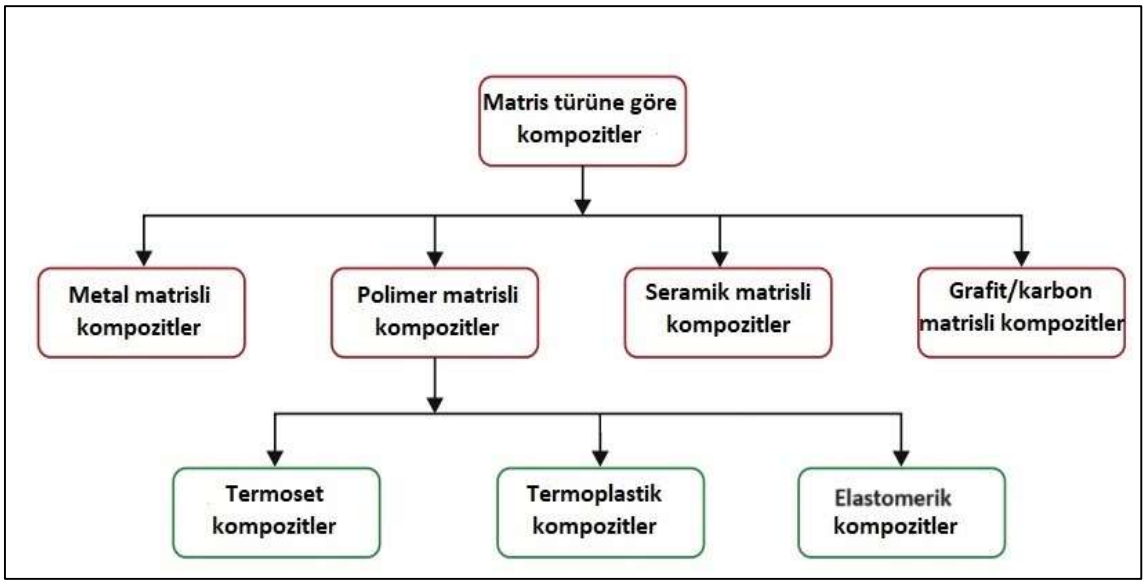
Kompozit malzemeleri sınıflandırmanın birçok yolu vardır. Farklı uygulama gereksinimlerine göre yapısal ve fonksiyonel kompozit malzemeler mevcuttur. Fonksiyonel kompozit malzemeler, işlevine uygun olarak elektriksel fonksiyonel kompozit malzemelere, termal fonksiyonel kompozit malzemelere, optik fonksiyonel kompozit malzemelere vb. de ayrılabilir [29].

Kompozit malzemeler ihtiva ettiği takviye elemanına göre de sınıflandırılabilir. Bunlar fiber takviyeli, parçacık takviyeli ve tabakalı kompozitlerdir. Şekil 2.3'teki kırılım bunu izah etmektedir.



Şekil 2.3. Takviye elamanına göre sınıflandırma [30]

Kompozit malzemeleri matris malzemesinin türüne göre sınıflandırmak da mümkündür. Bunlar metal, seramik, polimer ve karbon matrisli kompozitlerdir. Şekil 2.4'teki grafik kompozit malzemelerin matris tipine göre kırılımını göstermektedir.



Şekil 2.4. Matris türüne göre kompozitler [30]

Polimer (reçine) matrisli kompozitlerin geliştirilmesi ve uygulanması, küresel olarak kompozit geliştirmenin ana odak noktası olmuştur [31]. Bu nedenle, bu tezin bu bölümünde polimer matrisli kompozitlere, ilgili temel teorilere ve son gelişmelere odaklanılacaktır. Metal, seramik ve karbon matrisli kompozitlere ise kısaca değinilecektir.

2.2.1. Metal matrisli kompozitler (MMK)

Metal Matris Kompozitleri yaygın olarak gelişmiş malzemeler olarak kabul edilmektedir. MMK'ler, iyi aşınma direnci ve olağanüstü termal iletkenliği kapsayan gelişmiş mekanik ve termal özellikler açısından geleneksel malzemelerden daha iyidir [24]. Bu malzemeler, ana metal muadillerine göre daha yüksek servis sıcaklıklarında kullanılabilir. Ayrıca takviye elemanı, spesifik sertliği, spesifik mukavemeti, aşınma direncini, sürünme direncini, termal iletkenliği ve boyutsal stabiliteyi geliştirebilir. Bu malzemelerin polimer matrisli kompozitlere göre avantajlarından bazıları arasında daha yüksek çalışma sıcaklıkları, yanmazlık ve organik sıvılar tarafından bozunmaya karşı daha fazla direnç yer alır. Metal matrisli kompozitler PMK'lardan çok daha pahalıdır ve bu nedenle MMC kullanımı bir miktar sınırlıdır [32]. Günümüzde yaygın olarak kullanılan matris metalleri alüminyum, bakır, demir, magnezyum, nikel ve titanyumdur. Genel olarak mukavemeti ve elastisite modülünü arttırmak için yaygın olarak kullanılan takviye parçacıkları SiC, Al_2O_3, TiN, TiC, B_4C, TiB_2'dir [24]. Otomobil üreticileri son dönemde ürünlerinde MMK kullanmaya başlamıştır. Örneğin, alüminyum oksit ve karbon fiberlerle güçlendirilmiş alüminyum

alaşımlı matristen oluşan bazı motor bileşenleri piyasaya sürülmüştür. MMK hafiftir, aşınmaya ve termal bozulmaya karşı dayanıklıdır. Metal matrisli kompozitler ayrıca tahrik millerinde (daha yüksek dönme hızlarına ve azaltılmış titreşim gürültü seviyelerine sahip), dövme süspansiyon ve şanzıman bileşenlerinde de kullanılmaktadır. Havacılık ve uzay endüstrisi de MMK'leri kullanmaktadır. Bu malzemelerin yoğunlukları düşüktür ve mekanik ve termal özelliklerini kontrol etmek mümkündür. Hubble Uzay Teleskobu'ndaki anten kolunun takviyesi için sürekli grafit fiberler kullanılmıştır [32]. Çizelge 2.1'deki tablo MMK'lerin tipik mekanik özelliklerinin bazılarını içermektedir.

Çizelge 2.1. Metal matrisli kompozitlerin tipik mekanik özellikleri [33]

Özellikler	Birim	SiC/Alüminyum	Grafit/Alüminyum	Çelik	Alüminyum
Yoğunluk	g/cm^3	2,6	2,2	7,8	2,6
Young modülü	GPa	117,2	124,1	206,8	68,95
Maksimum çekme gerilmesi	MPa	1206	448,2	648,1	234,4
Termal genleşme katsayısı	(µm/m)/°C	12,4	18	11,7	23

2.2.2. Seramik matrisli kompozitler (SMK)

Silisyum karbür (SiC), silisyum nitrür (Si_3N_4), alümina (Al_2O_3), zirkonya, alüminyum titanat (Al_2TiO_5) ve alüminyum nitrür (AlN) matris kompoziti gibi seramik matris kompozitleri (SMK), son yıllarda geniş çapta araştırılmaktadır. Yüksek sıcaklık stabilitesi (1400 °C'de çalışma sıcaklığına dayanacak şekilde), yüksek sertlik (alümina bazlı bir kompozit için 22,9 GPa), yüksek korozyon direnci ve çok yönlü kullanışlılık gibi çekici özellikleri nedeniyle uçakların egzoz nozulu gibi yüksek sıcaklıktaki bölümlerinde kullanılır. Karbon fiber takviyeli silisyum karbür, acil durum fren koşulları altında sıcaklığın 1200 °C'ye kadar çıkabileceği uçak frenleri için aday olarak araştırılmıştır. Bahsi geçen birçok avantaja rağmen MMK'lerin zayıf kırılma tokluğuna sahip olduğu bildirilmektedir. Bu eksikliğin üstesinden gelmek için çeşitli çalışmalar seramik matrisli kompozitlerin kırılma dayanıklılığını arttırmak için karbon nanotüpler ve grafen gibi nano materyallerin eklenmesine odaklanmıştır [34]. Esas itibarıyla, kırılma özelliklerindeki bu iyileşme, ilerleyen çatlaklar ile dağılmış faz parçacıkları arasındaki etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Çatlak başlangıcı normalde matris fazında meydana gelirken çatlak

ilerlemesi parçacıklar, lifler veya whiskerler tarafından engellenir [32]. Çizelge 2.2'deki tablo SMK'lerin tipik mekanik özelliklerinin bazılarını içermektedir.

Çizelge 2.2. Bazı seramik matrisli kompozitlerin tipik mekanik özellikleri [33]

Özellikler	Birim	SiC/LAS	SiC/CAS	Çelik	Alüminyum
Yoğunluk	g/cm^3	2,1	2,5	7,8	2,6
Young modülü	GPa	89,63	121	206,8	68,95
Maksimum çekme gerilmesi	MPa	496,4	400	648,1	234,4
Termal genleşme katsayısı	(μm/m)/°C	3,6	4,5	11,7	23

2.2.3. Karbon matrisli kompozitler (KMK)

Karbon matrisli kompozitler (KMK), bir karbon veya grafit matris içine gömülü karbon veya grafit fiberlerden oluşan karmaşık bir ileri malzeme ailesidir. Bu malzemelerin karbon fiber takviyesi, onları geleneksel grafitten daha güçlü, daha sağlam ve termal şoka karşı daha dirençli hale getirir. Bileşenler grafit ve karbon olmak üzere farklılık gösterebilir. Bu kompozitler, 1650°C gibi yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve oksidasyon direnci gibi gereksinimler nedeniyle havacılık parçalarında uygulama alanı bulmaktadır [35]. Çizelge 2.3'teki tablo KMK'lerin tipik mekanik özelliklerinin bazılarını içermektedir.

Çizelge 2.3. Karbon-karbon matris kompozitlerinin tipik mekanik özellikleri [33]

Özellikler	Birim	C-C	Çelik	Alüminyum
Yoğunluk	g/cm^3	1,68	7,8	2,6
Young modülü	GPa	13,5	206,8	68,95
Maksimum çekme gerilmesi	MPa	35,7	648,1	234,4
Termal genleşme katsayısı	(μm/m)/°C	2	11,7	23

2.2.4. Polimer matrisli kompozitler (PMK)

Polimer matrisli kompozitler (PMK), geleneksel malzemelere göre avantajları nedeniyle son yıllarda büyük ölçüde geleneksel malzemelerin yerini almıştır. PMK'ler, düşük ağırlık, yüksek mukavemet gibi özellikleri ve geniş uygulama yelpazesi nedeniyle en hızlı büyüyen ve en çok kullanılan kompozit malzemeler haline gelmiştir. Bu malzemeler tasarım esnekliği ve diğer birçok malzemeye göre nispeten daha iyi yorulma ve korozyon direnci sunar. Üstün mekanik özellikleri ve nispeten sağladığı imalat kolaylığı nedeniyle ileri kompozit malzemeler olarak da kabul edilmektedir. Ayrıca, MMK ile karşılaştırıldığında PMK'ler, 600 °C'nin altındaki (bu sıcaklığın üzerinde polimerlerin bozunmaya başladığı için) nispeten düşük işlem sıcaklıkları nedeniyle dünya çapında çeşitli endüstrilerdeki geniş kompozit uygulama yelpazesinin temelini oluşturmaktadır [36]. PMK'ler, karbon, cam, aramid, bor, SiC ve Al_2O_3 elyaf takviyeli termoset veya termoplastik matristen oluşur. PMK'de kullanılan polimer matrisler, termosetler ve termoplastikler olmak üzere iki türe ayrılabilir. Termoplastik matris örnekleri arasında polipropilen, poliüretan, naylon vb. yer alırken, polyester ve epoksi en sık kullanılan termoset matrislerden bazılarıdır. Epoksi reçine, minimum büzülme, düşük toksisite, iyi yapışma özellikleri ve çok çeşitli endüstriyel kullanımlara elverişli olması gibi umut verici nitelikleri nedeniyle polimer kompozitlerde en popüler matristir [37]. Takviye elemanını birlikte tutmada birincil role sahip olan matris, özellikle polimerler söz konusu olduğunda reçine olarak da kabul edilir. Özellikle hafifliği nedeniyle diğer türlerden ayrılan PMK'ler ayrıca termoset, termoplastik ve elastomerik kompozitler olarak da sınıflandırılır. Termosetler, sertleşme aşamasında çapraz bağlı polimer zincirlerine sahiptir ve bu, sonunda yeniden şekillendirilemeyen sert bir ürüne yol açar. Termoplastikler, termosetlerden farklı olarak daha fazla ısıtılabilir ve yeniden eritilebilir, bu da onların yeni bir ürün olarak yeniden şekillendirilmesine ve dolayısıyla termosetlere kıyasla daha geniş bir şekilde geri dönüştürülmesine olanak tanır. Termosetlerin en avantajlı yanı, ısıtıldığında yapısal sertliğini kaybetmemesi nedeniyle yüksek sıcaklıklarda da kullanılabilmesidir. Termoset polimer matrislerin tipik örnekleri polyester, vinil ester, epoksi, fenolik, siyanat ester, poliüretan, poliimid ve bismaleimiddir. Öte yandan poliamid, polietilen, polipropilen, PEEK, termoplastik poliimid, termoplastik poliüretan, polikarbonat, PLA, polisülfon, polifenilen sülfür termoplastik polimer matrislerin yaygın örneklerindendir [30]. Termosetler, daha yüksek mukavemetleri ve yüksek sıcaklıklara karşı dirençleri nedeniyle termoplastiklere göre daha popülerdir. Termosetler, reçinenin sertleştirici ile belirli oranlarda karıştırılmasıyla hazırlanır. İstenilen kalınlık elde edilene kadar ince fiberlerden

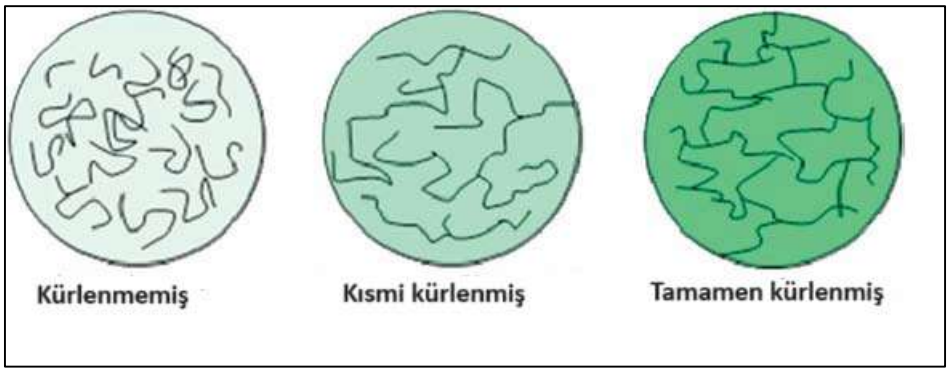
dokunmuş kumaş ve polimer katmanlarının istiflenmesi ve birbirine bağlanmasıyla devam edilir [38].

Epoksi reçineler

Epoksi reçineler, kürlenme sırasında düşük büzülme (%1-5) ile nispeten düşük moleküler ağırlığa sahiptir. Kısmen kürlenebilirler ve bu durumda saklanabilirler. Kürlenmiş epoksi reçineler iyi mekanik ve termal özellikler, kimyasallara ve korozyona karşı yüksek direnç gösterir. Camsı geçiş sıcaklıkları 100°C ile 270°C arasında değişmektedir. Ancak polyester reçineye göre daha pahalıdırlar. Bu reçineler düşük viskoziteli sıvılardan yüksek moleküler ağırlıklı katılara kadar çeşitlilik gösterir. Kür ajanı (curing agent) veya sertleştirici, epoksi için gerekli bileşenlerden biridir. Bu bileşikler reaksiyon hızını kontrol eder ve bitmiş parçanın performans karakteristiğini belirler. 4,4′-metilen-dianilin (MDA) ve 4,4′-sülfonildianilin (DDS) gibi aromatik aminler, ileri kompozit endüstrisinde en yaygın kullanılan kür ajanlarıdır [39]. Çizelge 2.4'te bazı termoset reçinelerin tipik özellikleri bir arada verilmiştir.

Çizelge 2.4. Bazı termoset reçinelerin tipik özellikleri [39]

Reçine	Yoğunluk (g/cm^3)	Çekme mukavemeti (MPa)	Çekme modülü (GPa)	HDT (°C)	Kürlenme Büzülmesi (%)	Camsı geçiş sıcaklığı (°C)
Epoksi	1,2 – 1,3	55 – 130	2,75 – 4,10	48	1 – 5	100 – 270
Polyester	1,1 – 1,43	34,5 – 103,5	2,1 – 3,45	60 – 205	5 – 12	70 – 120
Vinil ester	1,12 – 1,32	73 – 81	3 – 3,5	93 – 135	5,4 – 10,3	102 – 150
Fenolik	1 – 1,25	30 – 50	3,6	165 – 175	0 – 0,01	260
Poliimid (PMR-15)	1,32	38,6	3,9	-	0 – 0,006	320 – 330
Poliüretan	1,1 – 1,5	1 – 69	0,069 – 0,69	50 – 205	0,02	135



Şekil 2.5. Kürleme sırasında termoset moleküllerin çapraz bağlanması [40]

Şekil 2.5'te 3 ayrı fazda gösterilen çapraz bağlanma sayısı ne kadar yüksek olursa malzemeler o kadar sert ve termal olarak stabil olacaktır. Kürlenmiş termoset reçineler ısıtıldığında yumuşayabilir ancak erimez veya akmaz. Termosetler genellikle termoplastiklere göre ısıya karşı daha yüksek bir dayanıma sahiptirler [40]. Çok ileri düzey bir çapraz bağlanma, kürlenmiş reçinenin mukavemetine ve sertliğine katkıda bulunur, ancak doğası gereği çok az tokluğa sahip kırılgan bir malzeme üretimine neden olabilir [41].

PMK, MMK ve SMK belirli kriterler dikkate alınarak kendi arasında karşılaştırması Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.5. PMK, MMK ve SMK arasında karşılaştırmalı analiz [36]

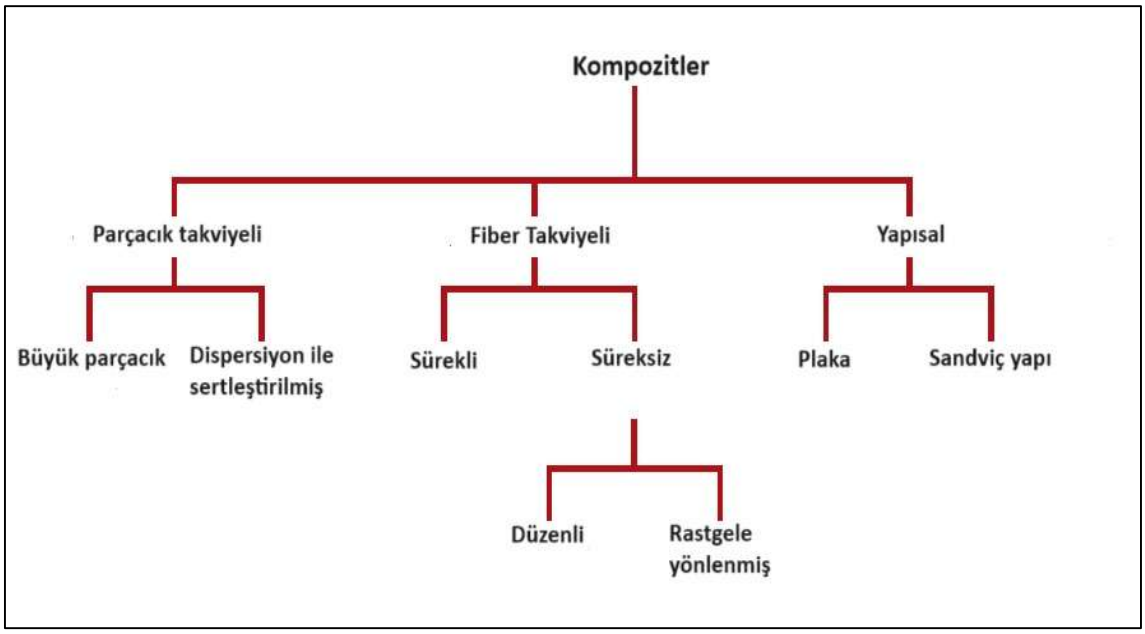
Özellikler	PMK	MMK	SMK
Elastisite modülü	Orta	Çok yüksek	Çok yüksek
Proses kolaylığı	Düşük	Orta	Çok yüksek
İmalat kolaylığı	Kolay işleme teknikleri	Zor işleme teknikleri	Makul işleme teknikleri
Yoğunluk	Düşük	Orta	Düşük
Sürünme direnci	Yüksek	Yüksek	Düşük
Kırılma tokluğu	Yüksek	Orta	Düşük
Yorulma dayanımı	Yüksek	Orta	Düşük
Çekme dayanımı	Çok yüksek	Yüksek	Orta
Basma dayanımı	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Aşınma direnci	İyi	Yüksek	Çok yüksek
Korozyon direnci	Çok yüksek	Düşük	İyi

2.2.5. Takviye elemanları

Kompozit malzemeler temel olarak matrislerden (polimerler, metaller ve seramikler) ve takviyelerden (sürekli fiberler, whiskerler ve parçacıklar) oluşur. Takviye elamanı, kompozitlerin önemli bir bileşenidir ve kompozitlerin mukavemetine doğrudan katkıda bulunurlar.

Polimer matrisli kompozitlerde karbon, cam ve aramid elyaflar (Kevlar gibi) yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramik elyaflar (ve parçacıklar) metal matrisli kompozitleri güçlendirmek için kullanılabilirken, seramik matrisli kompozitlerde hem metalik hem de seramik elyaflar yaygın olarak kullanılır. İkincisi, pek olası görünmese de aslında uçak frenleri gibi uygulamalar için oldukça önemli olan karbon-karbon kompozitlerini içerir [42].

Polimer matris materyallerin yapısal özellikleri, dağılmış (disperse edilmiş) takviye elemanı materyallerin çeşitli yollarla dahil edilmesiyle geliştirilebilir. Dağınık faz sürekli (lif, tape) veya süreksiz (partikül, pul, whisker) olabilir. Bu tez çalışması maliyet düşürme, elektriksel özellikler veya diğer mekanik olmayan yönlerden ziyade mekanik takviye etkileriyle ilgilendiğinden, araştırma fiber formunda kullanılan takviye fazlarıyla sınırlandırılacaktır. Polimer matrisli kompozitlerde takviye fiberleri esas olarak sertliği ve mukavemeti arttırmak için kullanılır. Sertliği örnek olarak alırsak, çoğu polimer matrisinin düşük modül değeri (tipik olarak 1-5 GPa), cam veya karbon fiberlerin (tipik modül: sırasıyla 72 GPa ve 250-750 GPa) varlığıyla kolayca ve önemli ölçüde artar. İleri fiber takviyeli kompozit malzemeler, üstün yapısal özellikler oluşturmak için fiberlerin yüksek yönsel özelliklerinden yararlanır. Kompozit uygulamalarda kullanılan ana fiberler arasında çeşitli cam türleri ve karbon/grafit, bor, silisyum karbür, alümina, aramidler ve polietilen yer almaktadır [40]. Şekil 2.6'da kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılmasını içeren kırılım grafiğine yer verilmiştir.



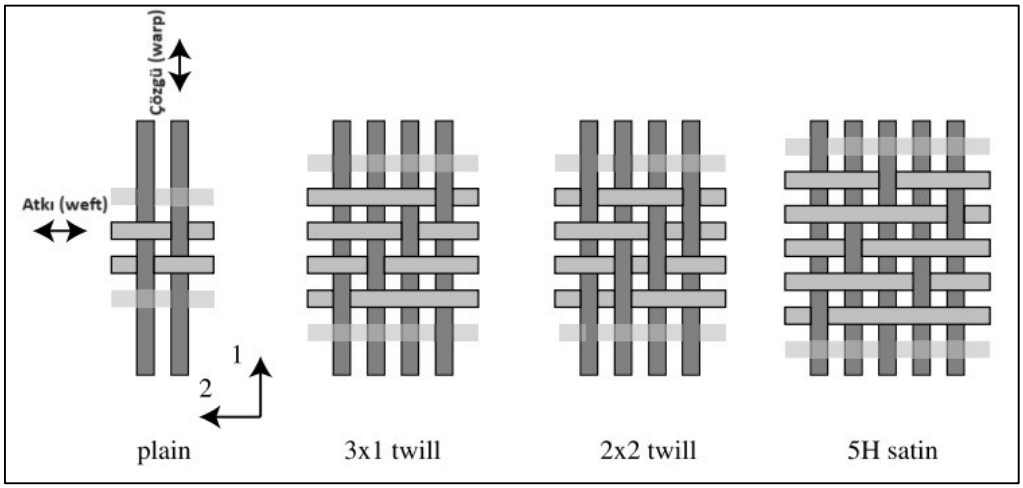
Şekil 2.6. Takviye elemanına göre kompozit çeşitleri [32, 37]

Karbon fiber

Karbon fiberler, yaklaşık 0,005-0,010 mm çapında son derece ince fiberlerden oluşan yüksek mukavemetli bir malzeme türüdür. Karbon fiberler, uygun fiberlerin kontrollü pirolizi ile elde edilen, en az %90 karbon içeren fiberler olarak tarif edilmektedir. Karbon atomları, elyafın uzun eksenine az çok paralel olarak hizalanan mikroskobik kristaller halinde birbirine bağlanır. Kristal hizalaması, fiberi boyutuna göre çok güçlü kılar. Binlerce karbon fiber, kendi başına kullanılabilen veya bir kumaşa dokunabilen bir iplik oluşturmak üzere birlikte bükülür. Karbon fiberlerin yoğunluğu çeliğinkinden önemli ölçüde daha düşüktür; bu da onu düşük ağırlık gerektiren uygulamalar için ideal kılar. Karbon fiberlerin yüksek çekme mukavemeti, düşük ağırlık ve düşük termal genleşme gibi özellikleri, onu havacılık, inşaat mühendisliği, askeriye ve motor sporlarının yanı sıra diğer yarışma sporlarında da çok popüler kılmaktadır. Ancak fiberglas veya plastik gibi benzer malzemelerle karşılaştırıldığında nispeten pahalıdır. Karbon fiberler gerildiğinde veya büküldüğünde çok güçlüdür ancak sıkıştırıldığında veya yüksek darbeye maruz kaldığında zayıftır. Örneğin, karbon fiber çubuğun bükülmesi son derece zordur ancak çekiçle vurulduğunda kolayca kırılır [40].

Karbon fiberler, özelliklerine göre şu şekilde gruplandırılabilir:

1. Ultra yüksek modüllü, UHM tipi (modül >450 GPa).
2. Yüksek modüllü, HM tipi (modül 350–450 GPa arası).
3. Orta modül, tip IM (modül 200–350 GPa arası).
4. Düşük modüllü, yüksek gerilimli, tip HT (modül <100 GPa, gerilme mukavemeti >3 GPa).
5. Süper yüksek gerilimli, SHT tipi (gerilme mukavemeti >4,5 GPa) [40].



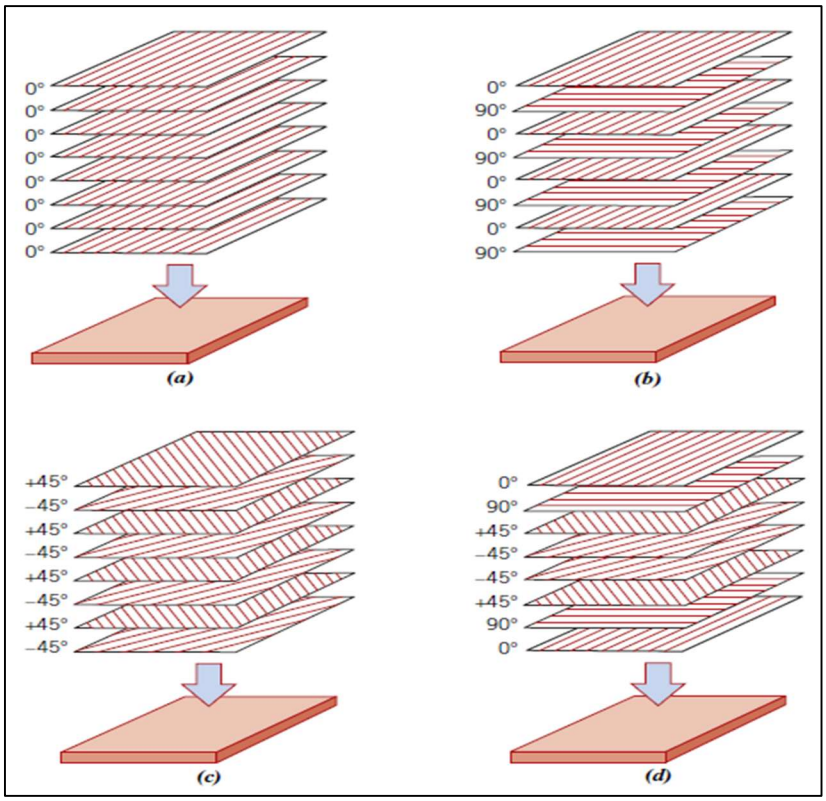
Şekil 2.7. Dokuma kumaş çeşitlerinin şematik gösterimi [43]

Pek çok kompozit bileşen yaygın olarak bulunabilen, iyi şekillendirilebilirlik özelliklerinden dolayı dokuma kumaş takviyeleri kullanılarak üretilmektedir [43]. Kumaşlar hemen hemen her türlü takviye elyafı kullanılarak üretilebilir. En yaygın kumaşlar cam, karbon veya aramid örgü kumaşlardır. Kumaşlar çeşitli örgü yapılarında ve kalınlıklarda (0,0010 ile 0,40 inç arası) mevcuttur. Dokuma çeşitlerinden bazıları Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Dokuma kumaş takviyeler yönlendirilmiş mukavemete olanak sağlar [40].

2.2.6. Yapısal kompozitler

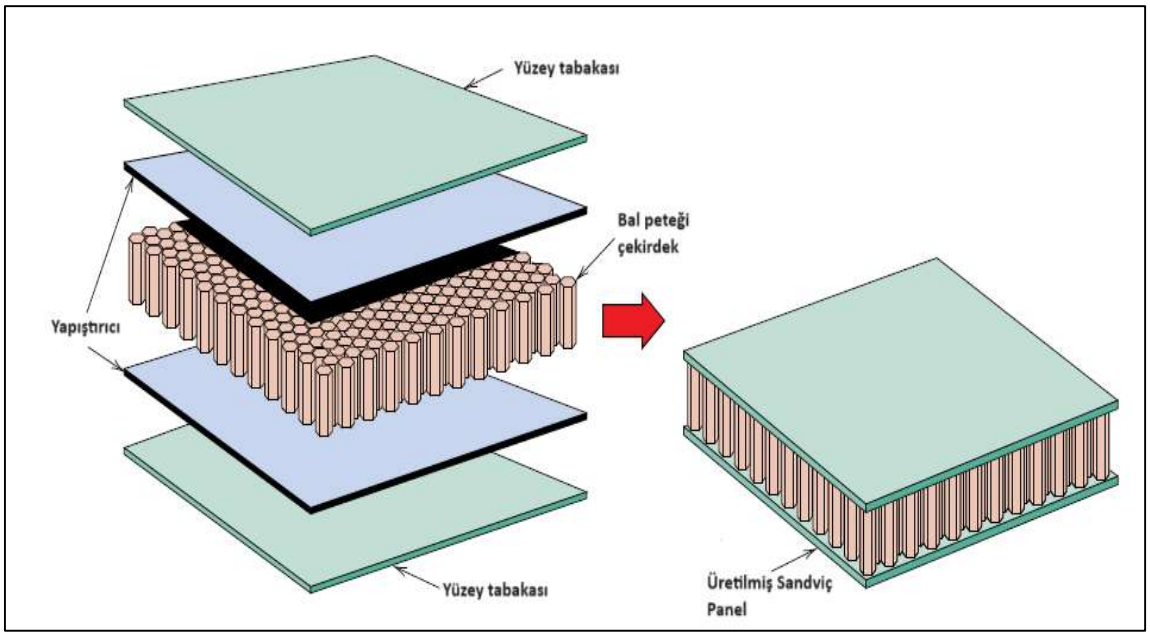
Yapısal kompozitler, yapısal bütünlük, yüksek çekme, basma ve burulma mukavemeti ve sertliği gerektiren uygulamalarda kullanılan çok katmanlı ve normalde düşük yoğunluklu kompozitlerdir. Bu kompozitlerin özellikleri sadece onları oluşturan malzemelerin özelliklerine değil aynı zamanda yapısal elemanların geometrik tasarımına da bağlıdır. Plaka kompozitler ve sandviç paneller en yaygın yapısal kompozitlerden ikisidir. Plaka kompozit,

birbirine bağlanmış iki boyutlu katmanlardan(plies), kumaşlardan, oluşur. Her katın, sürekli ve hizalanmış fiber takviyeli polimerlerde olduğu gibi, tercih edilen bir yüksek mukavemet yönü vardır [32]. Şekil 2.8'de plaka kompozitlerde kullanılan serim çeşitlerine yer verilmiştir.



Şekil 2.8. Serim çeşitleri (a) Tek yönlü (b) Çapraz kat (c) Açılı kat (d) Çok yönlü [1]

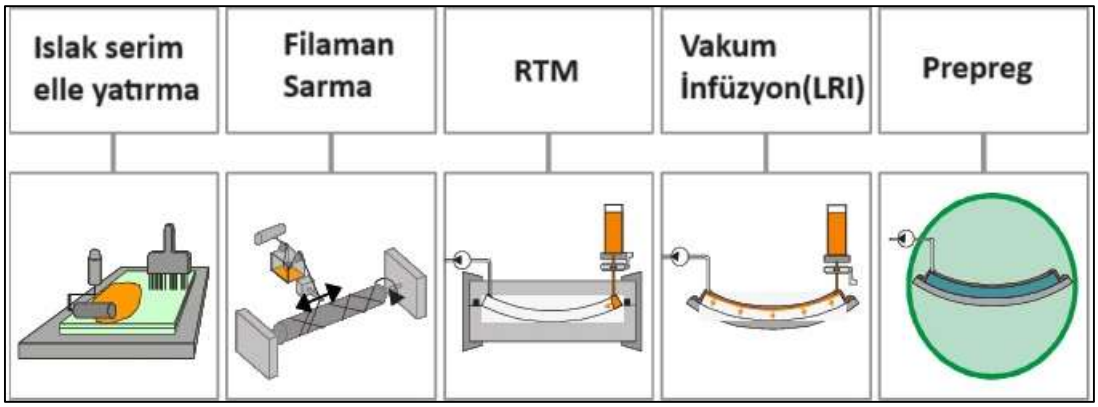
Sandviç paneller havacılık, inşaat, otomotiv ve denizcilik uygulamalarında kullanılmaktadır. Uçakların hücum ve firar kenarları, radom, fairing, nasel, flap, rudder, helikopterlerdeki stabilizatör ve pallerin imalinde sandviç kompozitler kullanılmaktadır [32]. Şekil 2.9'da sandviç panel kompozitlerin yapısını gösteren bir şematik gösterime yer verilmiştir.



Şekil 2.9. Sandviç panel kompozitin şematik gösterimi [32]

2.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozitler çok çeşitli tekniklerle üretilir. Bazen iki veya daha fazla prosesin birleşimi de söz konusu olabilir [38]. Üretim teknikleri, kullanılan matris tipine veya fiber malzemeye göre seçilir. Bununla birlikte bir imalat prosesi seçilirken, kompozit parçanın üretim hızı, maliyeti, mukavemeti, boyut ve şekli gibi ister ve gereksinimler dikkate alınır. Islak serim elle serme, püskürtme, LRI, ıslak serim vakum torbalama, RTM, otoklav kalıplama, filament sarma, otomatik fiber yerleştirme (AFP), profil çekme (pultrüzyon) polimer matrisli kompozit parçaların üretiminde kullanılan üretim tekniklerinin başlıcalarıdır. Filament sarma genellikle kimyasal uygulamalarında kullanılan boru ve tank yapımında kullanılırken; otoklav kalıplama düşük boşluk içeriğinin, yüksek kalite ve dayanımın önemli olduğu karmaşık şekilli parçalar ve düz paneller imal etmek için özellikle havacılıkta yaygın şekilde kullanılmaktadır. RTM havacılık da dahil birçok sektörde kullanılırken, özellikle kısa çevrim sürelerinin önemli bir gereklilik olduğu otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [33]. En verimli üretim sürecini seçmek için üretim ekibi, kullanıcı ihtiyaçları, dayanım gereksinimleri, ürünün boyutu, yüzey karmaşıklığı, görünüm, üretim hızı, toplam üretim hacmi, ekonomik hedefler/sınırlamalar, işçilik, malzemeler, kalıp ve sarf malzemeler gibi çeşitli faktörleri göz önünde bulundurmalıdır [40]. Şekil 2.10'da fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde sıkça başvurulan bazı yöntemlere yer verilmiştir.

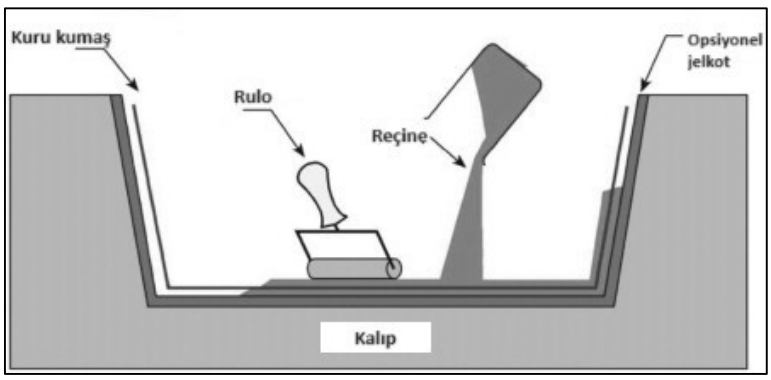


Şekil 2.10. Fiber takviyeli kompozitlerin üretim tekniklerinden bazıları [44]

Tezin bundan sonraki kısmında tezde kullanılan imalat yöntemi olan ıslak serim vakum torbalama yöntemi tartışılacaktır.

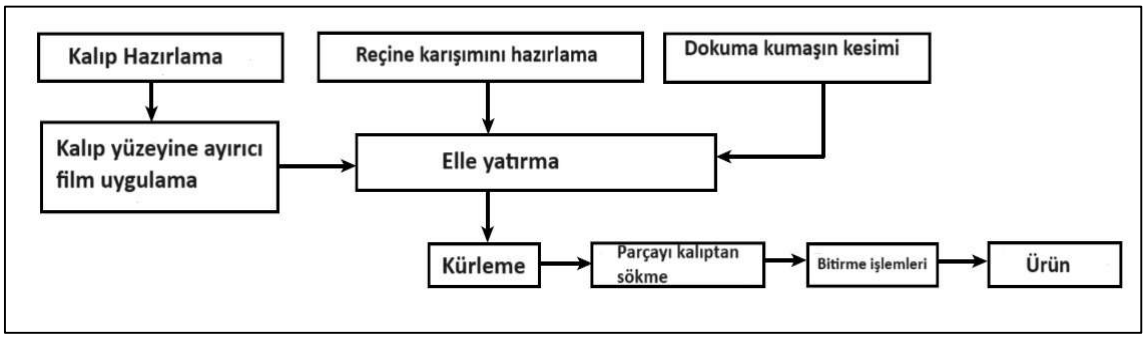
2.3.1. Islak serim vakum torbalama yöntemi

Islak serim el yatırma yöntemi tek başına kullanıldığında açık kalıpta kompozit üretimi yöntemlerinden biri olarak sınıflandırılabilir. Elle yatırma yönteminin uygulaması şematik olarak Şekil 2.11' de gösterilmiştir. Elle yatırma tekniğinde, dokuma kumaş kalıbın üzerine yerleştirilir ve sıvı reçine ile ıslatılır. Fırçalar genellikle reçineyi kumaşın üzerine eşit bir şekilde dağıtmak, hava kabarcıklarını takviyeden çıkarmak ve tamamen ıslanmayı sağlamak için rulolar kullanılır. Rulo, takviye fiberlerden örülerek üretilmiş kumaşın ardışık katmanları ile matris malzemesi arasında gelişmiş bir etkileşim sağlamak amacıyla reçineyi kumaşlara emdirmek için kullanılır [45]. Kürleşme (çapraz bağlanma) kalıplamaya herhangi bir konsolidasyon basıncı uygulanmadan ortam sıcaklığında gerçekleşmeye başlar [46].



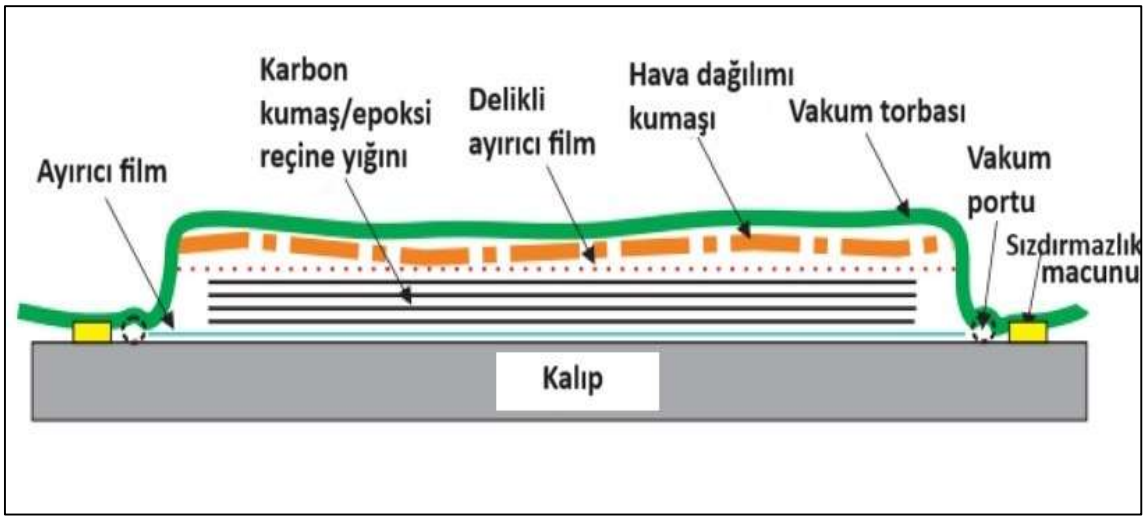
Şekil 2.11. Islak serim elle yatırma yöntemi [46]

Şekil 2.12'de ıslak serim elle yatırma yönteminin işlem basamaklarına yer verilmiştir.



Şekil 2.12. Islak serim elle yatırma yöntemi süreç akış şeması [29]

Bu yöntem pahalı kalıplar ve ekipman kullanılmadan bitmiş kompozit parçaların üretilmesine olanak tanıyan en yaygın kullanılan tekniklerden biri olmasına rağmen, çok sayıda çalışma bu yöntem ile sınırlı sayıda yapısal kusurlu yüksek kaliteli, yüksek fiber hacim oranlı parçalar elde etmenin zor olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, endüstriyel uygulamalarda sıklıkla farklı düşük maliyetli üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler, daha yüksek derecede fiber hacim oranına sahip parçaların üretimine olanak tanır; boşluk (void) ve gözenek (pore) riskini en aza indirir. Sürekli fiberlerle takviye edilmiş geniş yüzeyli ve karmaşık şekilli kompozit parçaların üretimini mümkün kılan teknolojiler arasında ıslak serim vakum torbalama (VB) ve vakum destekli reçine infüzyonu (VARIM) sayılabilir [47]. Vakum torbasıyla kalıplamada, parçayı dış atmosferden yalıtmak için naylon polietilen veya polivinil alkol (PVA) gibi bir malzemeden yapılmış esnek bir torba kullanılır. Parça üretimi için kesilmiş kumaşlar önce elle yatırma tekniği kullanılarak serilir ve daha sonra vakum torbasıyla kapatılır. Kalıp ile vakum torbası arasındaki hava daha sonra bir vakum pompası tarafından çekilirken atmosferik basınç parçayı sıkıştırır [45]. Şekil 2.11.'de şematik olarak uygulama şekline yer verilen geleneksel ıslak serim elle yatırma işlemiyle karşılaştırıldığında, Şekil 2.13'te gösterilen WL/VB işlemiyle üretilen plakalar, daha iyi mukavemet ve sertlik, daha yüksek fiber hacim oranı ve daha düşük boşluk hacim oranı dahil olmak üzere üstün mekanik özellikler gösterir [48].



Şekil 2.13. Islak serim vakum torbalama yöntemi şematik gösterimi [49]

Bu özellikler, elle serilmiş plakanın soyma kumaşı, delikli ayırıcı film, havalandırma/hava alma kumaşı, vakum torbası ile kaplanması ve bant formundaki conta macununun kalıbın kenarlarına ve vakum torbasına yapıştırılmasıyla elde edilir. Bu sayede fazla reçine ve yapı içerisindeki hava boşlukları vakum yardımı ile sistemden uzaklaştırılmış olur. Soyma kumaşı gözenekli yapısından dolayı plakadaki fazla reçinenin çekilebilmesine imkân sağlar. Sektörde vakum keçesi/battaniyesi olarak da bilinen hava dağılımı kumaşı serimi tamamlanmış kompozit plakanın tamamı üzerinde bir hava yolu sağlayarak yapıya eşit basıncın uygulanmasına izin verir ve vakum yardımıyla çekilen fazla reçineyi bünyesinde hapseder [46].

2.4. Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Bu bölümde kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri kısaca tartışılacaktır. Genel bir kural olarak kompozitin özellikleri; takviye malzemesi ve matrisin özelliklerine, kompozitteki takviye malzemesinin matrise oranına ve kompozitteki takviye malzemesinin geometrisine ve yönelimine göre farklılık göstermektedir [50].

2.4.1. Hacim ve kütle oranı, yoğunluk ve boşluk içeriği

Liflerin hacme göre göreceli oranı kavramı kritiktir. Çünkü polimer matrisli fiber takviyeli kompozit bir plakanın sertlik ve mukavemet özelliklerini bulmaya yönelik teorik formüller, fiber hacim oranının bir fonksiyonudur. Bileşenlerin ölçümleri genellikle kütlelerine dayalı

olduğundan fiber kütle oranlarının da tanımlanması gerekir. Ayrıca, bir kompozitin yoğunluğunun tanımlanması da gerekli hale gelir. Çünkü bu değer, bir kompozitin fiber hacminin ve boşluk oranlarının deneysel olarak belirlenmesinde kullanılır. Ayrıca spesifik modülün ve spesifik mukavemetin tanımlanmasında yoğunluk değeri kullanılır [33].

Kompozitin fiber ve matristen oluştuğu değerlendirildiğinde aşağıdaki eşitlikler yazılabilir [33, 50]:

$$\nu_c = Kompozit\ hacmi \quad ; \quad \nu_f = Fiber\ hacmi \quad ; \quad \nu_m = Matris\ hacmi$$

$$\rho_c = Kompozit\ yoğunluğu \ ; \ \rho_f = Fiber\ yoğunluğu \ ; \ \rho_m = Matris\ yoğunluğu$$

Kompozit yapının içindeki boşluk hacmi ν_v tanımlandığında kompozit yapının toplam hacmi:

$$\nu_c = \nu_f + \nu_m + \nu_v \tag{2.1}$$

Kompozit yapının toplam kütlesi m_c:

$$m_c = m_f + m_m \tag{2.2}$$

Eş. 2.1 ve Eş. 2.2 kullanılarak kompozitin yoğunluğu ρ_c bulunabilir:

$$\rho_c = \frac{m_c}{\nu_c} = \frac{m_f + m_m}{\nu_f + \nu_m + \nu_v} \tag{2.3}$$

Fiber ve matrisin kütle oranı W_f, W_f:

$$W_f = \frac{m_f}{m_f + m_m} \ , \ W_m = \frac{m_m}{m_f + m_m} \ \text{ ve } \ W_f + W_m = 1 \tag{2.4}$$

Fiber ve matris hacim oranı V_f, V_m sırasıyla:

$$V_f = \frac{\nu_f}{\nu_c} = \frac{{}^{m_f}/_{\rho_f}}{{}^{m_c}/_{\rho_c}} \ , \ V_m = \frac{\nu_m}{\nu_c} = \frac{{}^{m_m}/_{\rho_m}}{{}^{m_c}/_{\rho_c}} \ \text{ ve } \ V_f + V_m = 1 \tag{2.5}$$

Eş. 2.4'te verilen fiber ve matris kütle oranları da işleme katılarak hacim oranları hesaplanabilir:

$$V_f = W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} \ , \ V_m = W_m \frac{\rho_c}{\rho_m} \tag{2.6}$$

Kompozitin boşluk içeriği mekanik özellikleri olumsuz yönde etkiler. Daha düşük kayma ve basma mukavemeti, enine çekme mukavemeti, yorulma dayanımına neden olurken yapının neme karşı direncini azaltır.

Eş. 2.6'da tanımlanan hacim oranları ışığında boşluk hacim oranı V_v bulunabilir.

$$V_v = [1 - \rho_c(\frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m})] = [1- (V_f + V_m)] \tag{2.7}$$

Kompozitin yoğunluğu ρ_c:

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \tag{2.8}$$

2.4.2. Çekme mukavemeti ve elastisite modülü

Sürekli fiber takviyeli polimer matrisli kompozitte ana eksenler, fiber yönüne paralel ve dik olan eksenler olarak kabul edilirse bu iki eksen için mukavemet hesaplaması aşağıdaki gibi yapılabilir [33, 50, 51]:

Fiberlere paralel yönde yükleme durumu için elastik davranış

Fiber takviyeli polimer matrisli bir kompozite uygulanan yük fiber F_f ve matris F_m tarafından paylaşılır.

$$F_c = F_f + F_m \tag{2.9}$$

Fiber, matris ve kompozitin taşıdığı yükler, bu bileşenlerdeki gerilmeler ve bu bileşenlerin kesit alanları cinsinden yazılabilir:

$$F_c = \sigma_c A_c \;\; ; \;\; F_f = \sigma_f A_f \;\; ; \;\; F_m = \sigma_m A_m \tag{2.10}$$

Matris ile fiber arasında iyi bir bağ olduğunu varsayarsak, her ikisi de benzer şekilde esner ve eğer yükleme eş gerinimli ise:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \tag{2.11}$$

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \tag{2.12}$$

Eş. 2.12 eşitliği kompozitin toplam kesit alanına bölerek yeniden düzenlediğimizde, kompozit malzemenin stresini matrisin ve fiberlerin stres ve yüzey alanı oranlarının (yani hacim oranlarının) bir fonksiyonu olarak veren bir denklem elde ederiz. Çünkü bu durumda matrisin, fiberlerin ve kompozitin uzunlukları aynıdır:

$$\sigma_{cl} = \sigma_f V_f + \sigma'_m V_m \tag{2.13}$$

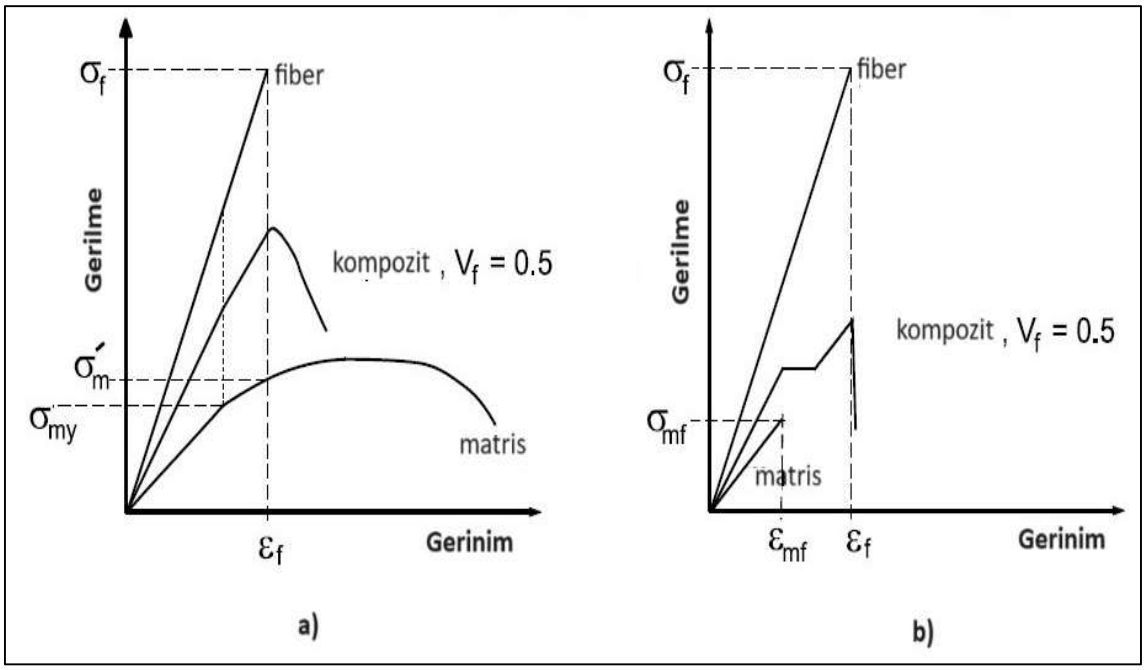
$V_f + V_m = 1$ olduğundan Eş. 2.13 aşağıdaki şekilde basitleştirilebilir:

$$\sigma_{cl} = \sigma_f V_f + \sigma'_m (1 - V_f) \tag{2.14}$$

Eş. 2.14' teki σ'_m elyafın hasara uğradığı anda matriste meydana gelen gerilme değerini ifade etmektedir.

Eş. 2.13'te eşitliğin iki tarafı gerinime bölünürse:

$$E_{cl} = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \tag{2.15}$$



Şekil 2.14. Gerilme/gerinim davranışı (a) sünek matrisli (b) gevrek matrisli [52]

Sünek ve gevrek matrisli kompozitlerin tipik gerilme/gerinim davranışına Şekil 2.14'te yer verilmiştir.

Fiberlere dik yönde yükleme durumu için elastik davranış

Kompozit malzemeye fiberlerin yönüne dik bir yük uygulandığında yük, fiberlerin ve matrisin bir dizi direnci tarafından desteklenir. Bu nedenle matris, fiber ve kompozitte karşılaşılan gerilmeler eşittir. Bu duruma eş gerilme hali denir ve şu şekilde karakterize edilir:

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m = \sigma \tag{2.16}$$

Tüm kompozitteki birim şekil değişimi ise:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m \;\; ve\; buradan \;\; \varepsilon_c = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m (1 - V_f) \tag{2.17}$$

Hooke yasasını kullanarak Young modülünü tanımlamak gerekirse:

$$\frac{\sigma_{ct}}{E_{ct}} = \left(\frac{\sigma_f}{E_f}\right) V_f + \left(\frac{\sigma_m}{E_m}\right)(1 - V_f) \quad (2.18)$$

Eşitliklerdeki gerilmeler birbirine eşit olduğu için sadeleştirilir ise:

$$\frac{1}{E_{ct}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2.19)$$

Düzenlemeler ile denklem son olarak şu hale gelir:

$$E_{ct} = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (2.20)$$

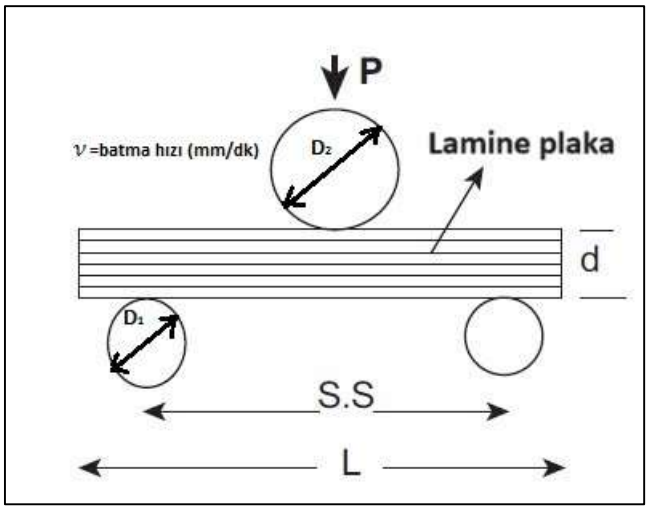
2.4.3. Katmanlar arası kesme dayanımı

ILSS, fiber ve matris arasındaki ara yüzey yapışmasını ölçmek için önemli bir göstergedir. Malzemelerin mukavemeti yaklaşımında, tabakalar arası kayma nedenli delaminasyonun başlangıcı durumu için kontrol faktörü olarak kullanılır. Çünkü fiber takviyeli kompozit malzemelerde enine ve tabakalar arası kayma mukavemetinin düşük olması nedeniyle delaminasyonlar oluşur [53]. Bu nedenle kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma dayanımının uygun testlerle belirlenmesi büyük ilgi görmekte ve önem taşımaktadır [54].

ILSS veya τ(MPa) şu şekilde bulunur:

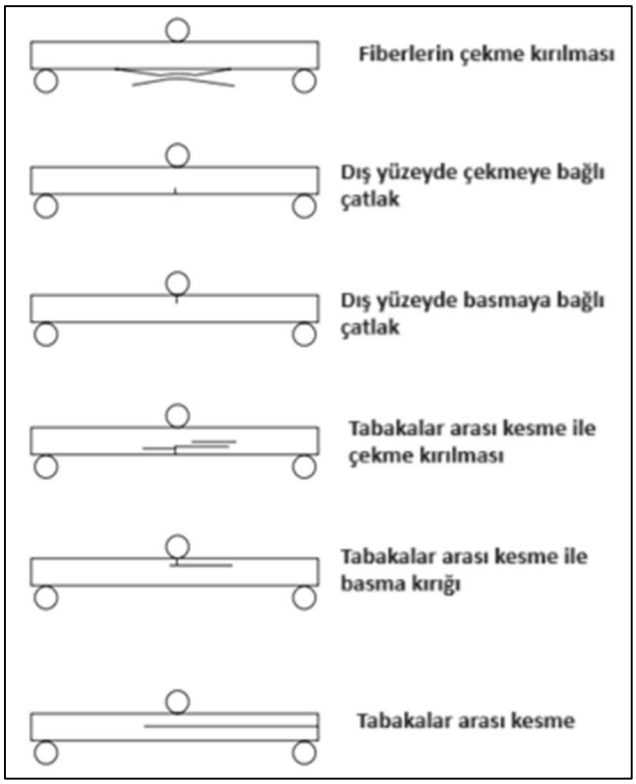
$$\tau = 0{,}75 \frac{P_{max}}{b.d} \quad (2.21)$$

Bu denklemde P_{max} test sırasında ölçülen en yüksek kuvvet değeri (N), b numune genişliği(mm), d ise numune kalınlığını (mm) ifade etmektedir.



Şekil 2.15. Katmanlar arası kayma mukavemeti test kurulumu [55]

Şekil 2.15'te kısa kirişle kesme (SBS) ile ILSS testi düzeneği şematik olarak gösterilmektedir. S.S (support span) olarak gösterilen ölçü destekler arası mesafedir. D_1 destek çubuklarının çapı ve D_2 yükleme çubuğu çapını ifade etmektedir. L ile gösterilen ölçü ise numune uzunluğudur. Destekler arası mesafe/numune kalınlığı oranı ve numune uzunluğu/ numune kalınlığı oranı kullanılacak test standardına göre değişiklik göstermektedir. Şekil 2.16'da ise fiber takviyeli polimer kompozitlerin üç nokta eğilme testlerinde karşılaşılan olası hata modlarının şematik gösterimine yer verilmiştir.



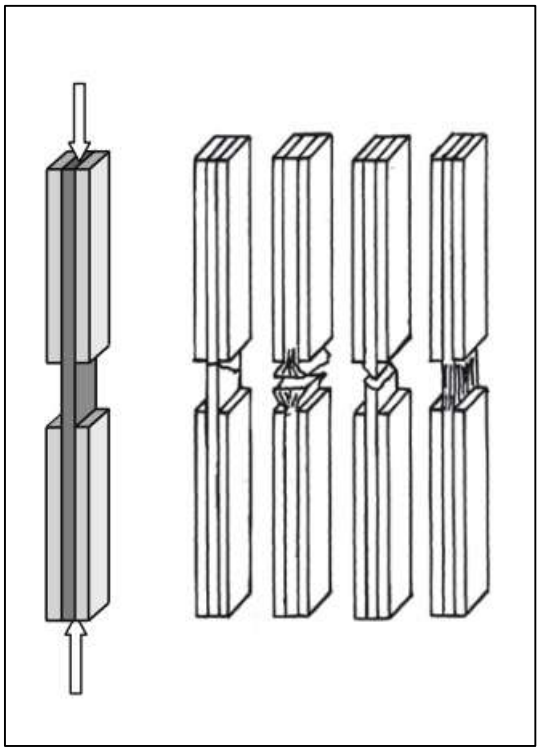
Şekil 2.16. Üç nokta eğilme testlerinde karşılaşılan olası hata modlarının şeması [56]

Bu testte fiber/kumaş-matris arayüzeyinde yapışkan bir kırılma beklenmektedir ve matriste gerçekleşen kohezif hatalar geçersiz kabul edilmektedir. Dolayısıyla ILSS değerinin maksimum olduğu kompozit numunedeki elyaf hacim oranı ne düşük ne de çok yüksektir [55, 57].

2.4.4. Basma dayanımı

Basma testi kompozit malzemelerin davranışını belirlemek için en önemli testlerden biridir [58]. Kompozit basma testi yöntemleri, malzemenin burkulmasını önlerken malzemeye bası yükü vermenin bir yolunu sağlar. Ortaya çıkan gerilim-gerinim diyagramı elastik limit, orantı sınırı, akma dayanımı ve basma dayanımı hakkında bilgi sağlar. Bir basama testinde numunenin yanlış hizalanması kararsızlığa ve erken hataya neden olacaktır. Bu etkileri engellemek için kullanılan basma fikstürleri, bükülmeyi önlemek için hassas hizalama ve hassas kılavuzluk sağlar [59]. Bir fiber takviyeli kompozitin basma dayanımı, çekme dayanımından çok farklı olabileceğinden, basma testi önemlidir [60]. Örneğin fiber kırıkları ve matris çatlaması çekme mukavemetini etkiler. Küçük bir delaminasyon ise malzemenin çekme mukavemeti üzerinde hiçbir etkisi olmazken basma mukavemetini önemli ölçüde

azaltabilir [53]. Ölçülen basma mukavemetleri genellikle aynı malzemenin çekme mukavemetinin altındadır. Basma mukavemetini etkileyen elyaf kalınlığı dışındaki faktörler matris mukavemeti ve sertliği ile arayüzey bağlanma mukavemetidir. Matris ne kadar sert olursa, basma mukavemeti de o kadar büyük olur. Bu nedenle, seramik ve metal matrisli kompozitler, reçine bazlı kompozitlere göre basma açısından çok daha mukavimdir [52]. Özetle fiberlere paralel olan çekme ve basma dayanımları büyük ölçüde fiberlerin mekanik özelliklerine bağlıdır. Fakat bu noktada dikkate alınması gereken önemli bir nokta vardır. Çekme dayanımında fiberlere dik olan çatlak büyümesi büyük ölçüde fiber-matris arayüzey dayanımına bağlıdır. Basma dayanımında ise özellikle düşük fiber hacim oranlarında matris modülü baskın rol oynar. Çünkü her bir fiberin burkulmasını matris modülü (E_m) kontrol eder. Genel olarak matrisin (reçinenin) elastisite modülü, epoksinin omurga zincirinin kimyasal yapısı, serbest hacimli üç boyutlu çapraz bağlama ağı ile bağlantılıdır [61, 62].

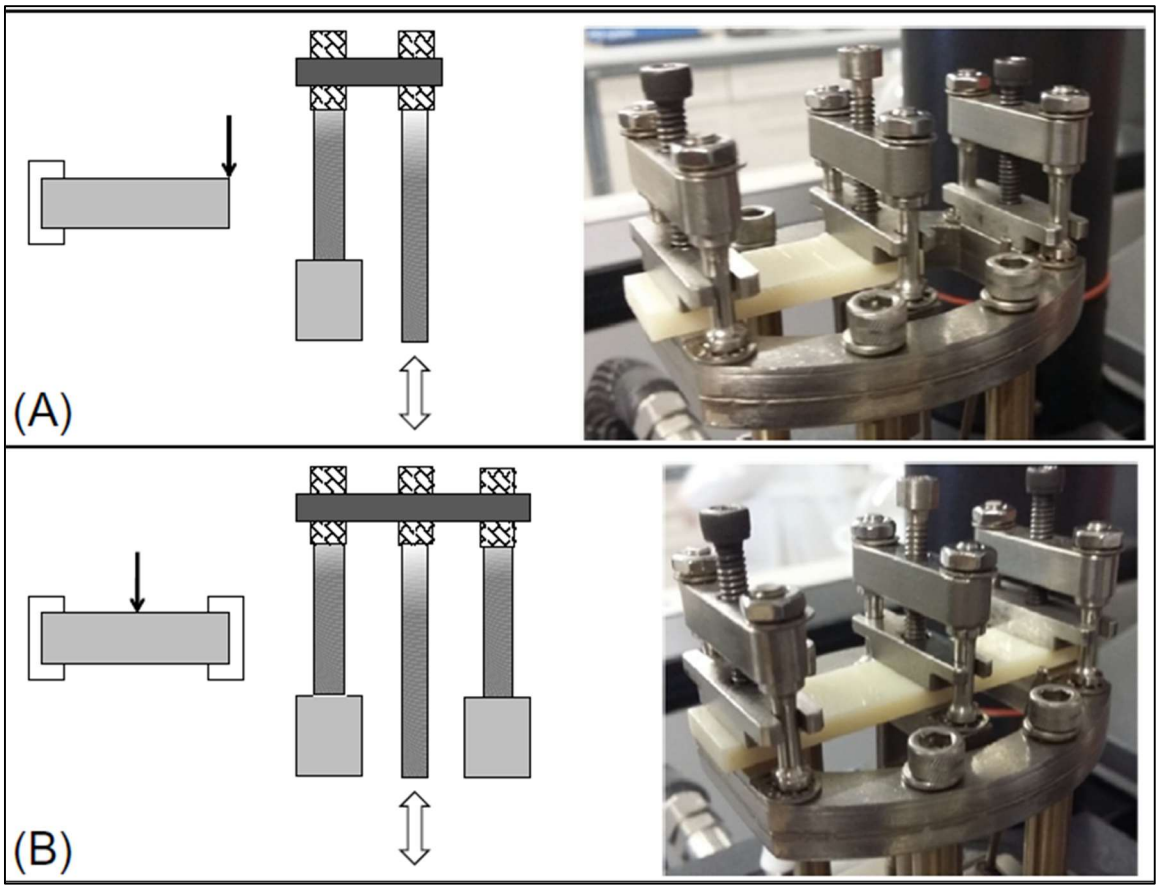


Şekil 2.17. ASTM D3410 ve D6641'e göre hasar tipleri [63]

Matrisin elastisite modülü E_m'in CFRP'nin basma dayanımı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir ve matrisin plastik özelliklerinin CFRP'nin basma dayanımı üzerindeki etkisi açıktır [64]. Basma testinde karşılaşılan tipik hasar modlarına Şekil 2.17'de yer verilmiştir.

2.4.5. Camsı geçiş sıcaklığı

T_g, camsı, sert ve gevrek polimerlerin yumuşak ve esnek kauçuklara dönüştüğü noktayı tanımlar ve çoğunlukla yapısal uygulamalarda kullanılan polimerik malzemelerin üst servis sıcaklığının belirlenmesinde kullanılır [65]. Camsı geçiş sıcaklığında mekanik özellikler düşmeye başlar ve tipik olarak Young modülü belirgin bir şekilde değişir [66]. Kürlenme yayılımını tanımlamak ve bunu mekanik özelliklerle ilişkilendirmek için kullanılan temel bir parametre, cam geçiş sıcaklığı T_g 'dir. T_g, birkaç faktör tarafından belirlenir: epoksi reçinenin kimyasal yapısı, sertleştiricinin (kür ajanı) türü ve kürlenme derecesi [67]. Nem T_g'yi düşürür. Bununla birlikte T_g, kürlenme derecesinden (DoC) de etkilenir. Bu nedenle T_g kürlenme seviyesinin izlenmesine olanak tanır [68]. Polimerlerin T_g'sini belirlemek için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), termomekanik analiz (TMA) ve dinamik-mekanik analiz (DMA) gibi farklı teknikler kullanılabilir. DMA, T_g'ye yakın veya altındaki gevşemelere karşı oldukça duyarlı olma avantajını sunar ve DSC tarafından tespit edilemeyecek hassasiyette T_g'yi ölçmek için kullanılmaktadır. Literatüre göre DMA bu gevşemelerde meydana gelen değişikliklere karşı yaklaşık olarak 10 ile 100 kat daha duyarlıdır. DSC yoluyla bulunan T_g, numunenin kalorifik kapasitesi değişiminin sonucudur. DMA ile bulunan T_g ise mekanik kuvvetlerdeki değişikliklerle ve numunedeki enerji kaybıyla ilgilidir [69]. DMA'ya DMTA, yani dinamik mekanik termal analiz de denir. Ancak DMA'yı termomekanik analiz olan TMA ile karıştırmamak gerekir. Esasen TMA'da bir numuneye sabit bir statik kuvvet uygulanır ve sıcaklığın veya zamanın bir fonksiyonu olarak malzemedeki değişiklikler gözlemlenir. Dolayısıyla, TMA boyut değişikliklerini bildirirken, DMA numuneye belirli bir frekansta salınım kuvveti (veya deformasyon) uygular, sertlik ve sönümlemedeki değişiklikleri bildirir. Ayrıca modül bilgisi elde etmek için DMA verilerinden yararlanılırken, TMA ise ısıl genleşme katsayısını verir. DMA, bir numunenin salınımlı yük altındaki elastik ve viskoz tepkisinin sıcaklığa, zamana veya frekansa göre izlendiği bir tekniktir. Viskoelastik davranış, "bir malzemede viskoz (yani sıvı benzeri) ve elastik (yani katı benzeri) özelliklerin eşzamanlı varlığı" olarak tanımlanabilir. Katıya benzer davranış, gerinimin Young modülü adı verilen sabit tarafından gerilimle doğru orantılı olduğunu belirten Hooke yasasıyla tanımlanır. Aksine, ideal bir sıvı için, uygulanan bir gerilime verilen tepki, viskozite adı verilen bir sabit ile gerinim oranıyla orantılıdır. Polimerik malzemeler, iki modelden (yani elastik benzeri ve sıvı benzeri) az çok farklı olabilen bir ara karakter sergiler [70].



Şekil 2.18. DMA setup tileri A) Tek konsol eğme modu B) Çift konsol eğme modu [70]

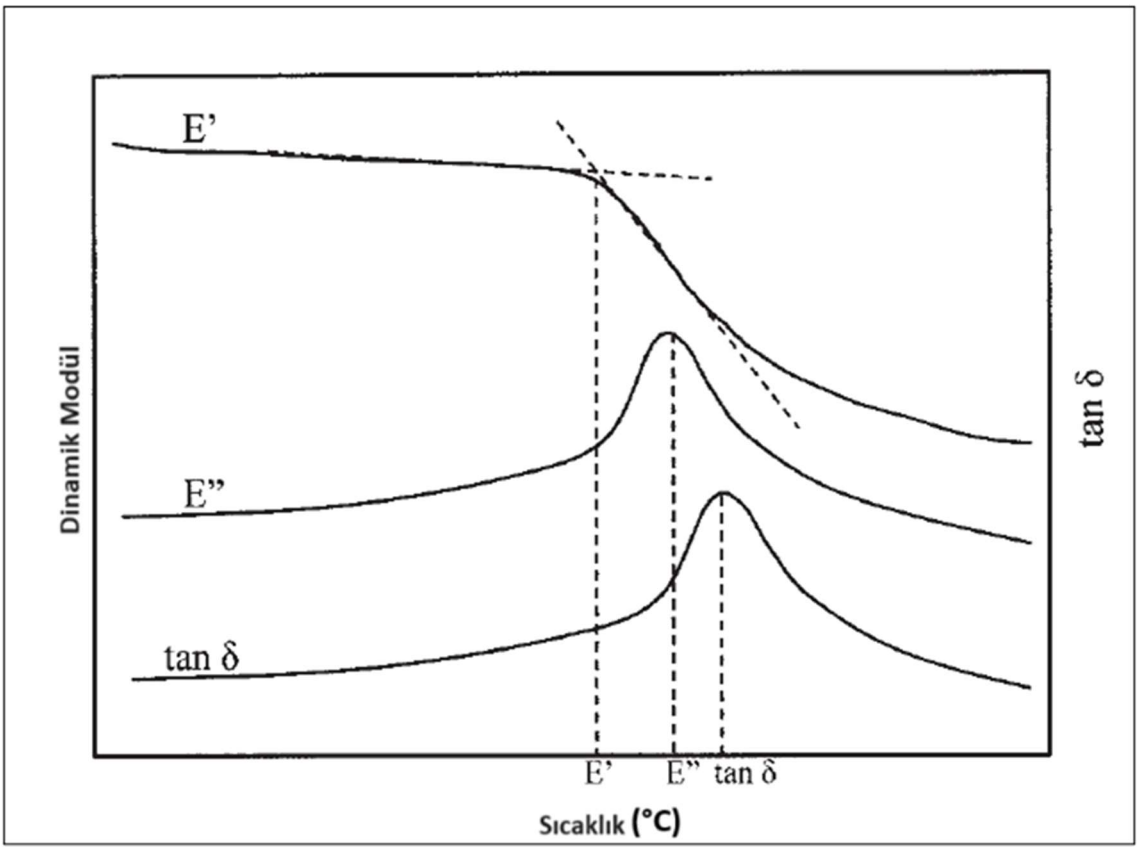
Şekil 2.18'de gösterilen tek ve çift konsol eğme modları, termoplastik, termoset, yüksek sönümlü polimerik malzemelerin (örneğin elastomerler) değerlendirilmesi için kullanılan iyi birer genel amaçlı modlardır. Bununla birlikte çekme, basma ve kesme modları da DMA testinde kullanılmaktadır.

Sıcaklık rampası uygulandığında frekans ve genlik sabitlenerek sinüs dalgası uygulanır. Frekans ayarlanması gereken önemli bir parametredir. Herhangi bir frekansa özel talep olmadığı ve bir polimerdeki termal geçişlerin (örneğin cam geçişi) konumunu belirlemek için tipik bir sıcaklık rampası testinin yapılmasına gerek olmadığı sürece, önerilen frekans 1 Hz'dir [71]. Taramadaki ilk veri noktası $t = 7/f$ ve burada f frekans (Hz); İkinciden son veri noktalarına kadar $t = 3/f$ olduğu düşünülürse ve test 1 Hz'lik bir tarama çalıştırıyorsa, ilk veri noktası taramaya 7. Saniyede alınacak ve son veri noktalarına kadar olan ikinci ve sonraki veri noktaları her 3 saniyede bir alınacaktır. Ayrıca yeterli bir sıcaklık rampası (sıcaklık artış hızı °C/dk) seçmek önemlidir. DMA deneyleri için en çok kullanılan sıcaklık artış hızı 1 °C/dk ile 5 °C/dk arasındadır. Sıcaklık artış hızının seçimi numune boyutuna,

ilgilenilen frekansa ve camsı geçiş sıcaklığında istenen doğruluk derecesine bağlı olacaktır [70].

Camsı geçiş sıcaklığı DMA verilerinden birkaç farklı yolla belirlenebilir ve bu, T_g için bildirilen değerlerdeki farklılıkların kaynağı olabilir. Şekil 2.19'da bu yöntemler DMA sonuç eğrileri üzerinde gösterilmiştir. T_g, aşağıdakilere dayalı olarak geçişin başlangıcındaki veya orta noktasındaki sıcaklık olarak belirlenebilir [1]:

· Depolama modülü eğrisinden
· Tan deltada maksimum nokta
· Kayıp modülünde maksimum nokta



Şekil 2.19. DMA testinde T_g bulma yöntemleri [72]

Depolama modülü numunenin elastik karakterinin, kayıp modülü viskoz karakterinin, sönümleme oranı ise sıcaklık değişimi sırasında harcanan enerjinin bir göstergesidir.

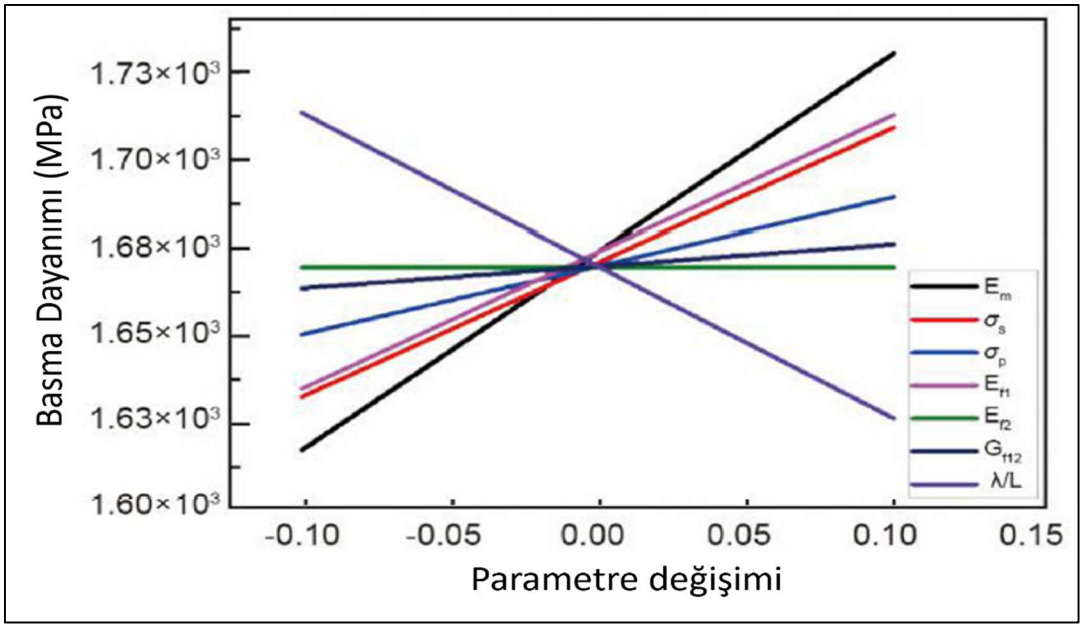
Sönümleme oranı, $\tan \delta = \frac{E''}{E'}$ (2.21)

olarak bulunur [71].

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. Kür Çevriminin FRP Malzemenin Üzerindeki Etkileri

Li ve diğerleri, yaptıkları çalışmada fiberlerin ve matrisin mekanik özelliklerinin epoksi reçineli karbon fiber takviyeli kompozitin basma dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Fiberin eksenel elastisite modülü (E_{f1}), enine elastisite modülü (E_{f2}), kayma modülü (G_{f12}); matrisin elastisite modülü (E_m), oransal sınırı (σ_p), akma mukavemeti(σ_s) ve başlangıçtaki fiber yanlış hizalama derecesi dahil olmak üzere fiber ve matrisin çeşitli özelliklerinin CFRP'nin basma dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. E_m, σ_p, σ_s, E_{f1} ve G_{f12}'nin CFRP'nin basma dayanımı üzerindeki etkileri pozitif iken, başlangıçtaki fiber yanlış hizalamasının CFRP'nin basma dayanımı üzerindeki etkisi negatiftir. Fiberin enine elastisite modülü (E_{f2})'nün ise CFRP'nin basma dayanımı üzerinde hiçbir etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Toray T800 karbon fiber ve 603 epoksi reçine sisteminden üretilen kompozit plakadan 150×10×3 mm ebatlarında kesilen kupon numuneler basma testi standardı ASTM D3410-03'e göre test edilmiş ve elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar modeli doğrulanmıştır. Numunenin her iki ucunda 65 mm'lik tabler kullanılmıştır. Numunenin fiber hacim oranı %60 ve boşluk oranı %3'ten az olarak belirtilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde belirlenmiş parametrelerin değişimi neticesinde elde edilen basma dayanımı değerlendirilmiştir [64].



Şekil 3.1. Parametre değişikliklerinin basma mukavemeti üzerindeki etkisi [64]

Sonlu elemanlar modelinde parametre değişikliklerinin basma mukavemeti üzerindeki etkileri Şekil 3.1'deki grafikte toplu olarak gösterilmiştir. Bu grafikte görüldüğü üzere matrisin elastisite modülü (E_m), CFRP'nin basma dayanımı üzerinde en büyük etkiye sahiptir ve ardından başlangıçtaki fiber yanlış hizalaması gelmektedir. Matrisin plastik özelliklerinin etkileri de göz ardı edilemeyeceği ve bu nedenle üretimde, başlangıçtaki fiber yanlış hizalamasını en aza indirerek ve reçinenin mekanik özelliklerini geliştirerek CFRP'nin eksenel basma performansını geliştirmek mantıklı olacağı bildirilmiştir [64].

Das ve diğerleri, yaptıkları çalışmada ASTM standartlarına uygun olarak kompozit plakadan farklı testler için numuneler kesmiş ve bu numuneleri fırında 140°C'de 2, 4 ve 6 saat kürlemişlerdir. Kürlenmiş CFRP numunesinin yoğunluğu, boşluk hacim oranı, sertliği, çekme mukavemeti, darbe mukavemeti, aşındırıcı ile aşınma oranları ve spesifik aşınması deneysel olarak belirlenmiş ve açık literatürden elde edilen geçmiş araştırma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Kompozit plakanın imalatında matris olarak 1.15 g/cm^3 yoğunluğa ve 70 MPa çekme mukavemetine sahip epoksi reçine kullanılmıştır. Kompozitte takviye olarak 2 g/cm^3 yoğunluğa ve 3500 MPa çekme mukavemetine sahip dokuma karbon fiber kumaş kullanılmıştır. Islak serim elle yatırma yöntemi üretim için seçilmiştir. On kat karbon kumaş, her kata rulo reçine yedirilerek serilmiştir. Etkili bağlanma sağlamak için epoksiye ağırlıkça yaklaşık %10 Trietilentetramin (sertleştirici) ilave edilmiştir [21]. Çizelge 3.1'de test sonuçlarına yer verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kürlenmiş CFRP numunelerinin özellikleri [21]

Kürlenme süresi/Özellikler	2 saat	4 saat	6 saat
Deneysel yoğunluk (g/cm^3)	1,532	1,527	1,519
Teorik yoğunluk (g/cm^3)	1,579	1,579	1,579
Yüzde boşluk (%)	2,97	3,29	3,8
Barcol sertliği	47,39	48,52	50,67
Akma dayanımı (MPa)	370,529	379,463	388,462
Çekme dayanımı (MPa)	463,524	474,719	486,154
Kopma dayanımı (MPa)	462,847	473,476	485,231
Yüzde uzama (%)	2,11	2,84	3,03
Çarpışma sırasında emilen enerji (J)	1,47	1,62	1,83
Darbe dayanımı (KJ/m^2)	36,171	39,862	45,112

Üretilen CFRP'lerin yoğunluk ve gözeneklilik içeriği gibi fiziksel özellikleri sırasıyla Arşimet prensibi ve karışımlar kuralı ile belirlenmiştir. Kürleme süresi arttıkça yoğunluk

azalmış ve gözeneklilik biraz artmıştır. Boşlukların varlığı, CFRP numunelerinin deneysel yoğunluğunun, teorik yoğunluğuna kıyasla hafif azalmasına neden olmuştur. Sertlik (Barcol), akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma dayanımı ve uzama yüzdesi gibi farklı mekanik özellikler belirlenmiştir. Bu değerler en yüksek 6 saat kürlenen CFRP numunesinde elde edilmiştir. Darbe testi, Izod darbe test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve yine en yüksek değerlerin 6 saat kürlenen numunelerden elde edildiği bulunmuştur. Bunun nedeninin, daha yüksek kürleme süresinde CF-epoksi arayüzey bağının daha güçlü olması ve çok yavaş soğuma hızının (fırın içinde) bir sonucu olarak tokluğun artmasıyla açıklanabileceği bildirilmiştir. Deney sonuçları geçmiş araştırmalarla karşılaştırılmış ve buna göre doğrulanmıştır [21].

Singh ve diğerleri, CFRP ve GFRP plakaların kürlenme süresi ve sıcaklığının çekme, basma ve eğilme özellikleri üzerindeki etkisini ele alınmıştır. Plakalar 80 °C, 120 °C ve 160 °C sıcaklıklarda sıcak hava fırınında 1, 2 ve 3 saat gibi farklı sürelerde kürlenmiş ve başka bir plaka referans olarak oda sıcaklığında 15 gün kürlenmiştir. CFRP ve GFRP numunelerinin mekanik özelliklerinin fırında kürlendiğinde, oda sıcaklığında üretilmeye göre daha iyi performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir [20].

Çizelge 3.2. Fiberlerin ve reçinenin özellikleri [20]

Özellikler	Kuru Cam Fiber	Kuru Karbon Fiber	Reçine[a]
Yoğunluk (g/cm^3)	2600	1780	1160
Poisson oranı	0,30	0,25	0,32
Çekme dayanımı (MPa)	3530	2750	71
Elastisite modülü(GPa)	71	235	3,6
Kopma uzaması(%)	4,5	1,8	4,0
Camsı geçiş sıcaklığı, T_g (°C)	-	-	91,23
Bozunma sıcaklığı, T_d (°C)	-	-	230
[a]Reçinenin derecesi T691'dir.			

Karbon fiber kumaşın alan yoğunluğu 250 g/m^2 ve kalınlığı 0,19 mm olarak verilmiştir. Cam kumaşların alan yoğunluğu ve kalınlığı sırasıyla 600 g/m^2 ve 0,4 mm'dir. Matris, sırasıyla 'Resin 691' dereceli epoksi (reçine) ve ağırlıkça 90:10 konsantrasyona sahip 'Reaktif Poliamid 140' dereceli sertleştiricinin karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan reçine ve fiberlerin mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Reçinenin yoğunluk, çekme mukavemeti, elastisite modülü, kopma uzaması ve termal bozunma

sıcaklığı (T_d) gibi özellikleri üreticiden alınırken, reçinenin camsı geçiş sıcaklığı diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) testi kullanılarak belirlenmiştir. Plakaların imalatında ıslak serim elle yatırma yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada numunedeki fiber hacim oranı %60±3 ile sınırlandırılmıştır. Plakaların uniform biçimde preslenmesi için bu çalışmaya yazara göre yeni bir teknik dahil edilmiştir. Nihai plakanın kalınlığı uygulanan basınca bağlıdır. İyi yüzey kalitesi ve kalıptan çıkarma kolaylığı için ilk olarak alüminyum folyo (0,75 mm kalınlık) arasına istiflenmiş elyaf katmanları yerleştirilmiştir. Ardından bu düzenek her biri 12 mm kalınlığındaki iki demir plaka arasına sıkıştırılmıştır. Demir plakalar cıvatalarla birleştirilmiş ve her bir bağlayıcı 250 Nm torklanmıştır [20]. Çizelge 3.3'te basma ve eğilme testi numunelerine ait bilgilere yer verilmiştir.

Çizelge 3.3. Basma ve eğme testi numunelerine ait bilgiler [20]

Eğilme testi numuneleri			Basma testi numuneleri		
CFRP numuneleri	Kür Sıcaklığı (ºC)	Kür süresi (saat)	CFRP numuneleri	Kür Sıcaklığı (ºC)	Kür süresi (saat)
F0-C-OPN	27 (±3)	360	C0-C-OPN	27 (±3)	360
F0-C80-1	80	1	C0-C80-1	80	1
F0-C80-2	80	2	C0-C80-2	80	2
F0-C80-3	80	3	C0-C80-3	80	3
F0-C120-1	120	1	C0-C120-1	120	1
F0-C120-2	120	2	C0-C120-2	120	2
F0-C120-3	120	3	C0-C120-3	120	3
F0-C160-1	160	1	C0-C160-1	160	1
F0-C160-2	160	2	C0-C160-2	160	2
F0-C160-3	160	3	C0-C160-3	160	3

Çekme testinde ASTM D3039, basma testinde ASTM D3410, eğilme testinde ASTM D790-02 standartlarına göre numune ölçüleri tayin edilmiştir. 0° fiber yönünde hizalanan CFRP numuneleri 80°C sıcaklıkta 3 saat kürlenerek maksimum çekme mukavemeti ve sertliği elde edilmiştir. CFRP plakalar yüksek sıcaklıkta kürlendiğinde, plakaların enine çekme mukavemeti azalmıştır. Ayrıca, 160 °C sıcaklıkta yaklaşık iki saat kürlenen numune, oda sıcaklığında kürlenen numuneye eşdeğer enine çekme dayanımına sahipken, maksimum sertlik, 80 °C'de 1 saatte kürlenen numunede elde edilmiştir [20].

80 °C'de 3 saat kürlenen GFRP 0° fiberle hizalanmış numuneler çekme mukavemetinde baskınken, 120 °C sıcaklıkta 3 saat kürlenen numunelerde sertlik baskındır. 90° fiberle

hizalanmış GFRP çekme numuneleri için, 1 saat 160°C sıcaklıkta kürlenen numunelerde çekme mukavemeti yüksekken, yaklaşık üç saat 160°C sıcaklıkta kürlenen numunelerde sertlik baskındır [20].

80 °C sıcaklıkta 3 saat kürlenen CFRP numuneler, oda sıcaklığında kürlenen numuneden daha yüksek boyuna basma dayanımına sahipken, CFRP numuneler için maksimum enine basma dayanımı 160 °C sıcaklıkta iki saat kürlenmesi durumunda elde edilmiştir [20].

Yüksek sıcaklıkta kürlenen GFRP numunelerin boyuna ve enine basma dayanımı, oda sıcaklığında kürlenen numunelerden daha yüksektir [20].

Yüksek sıcaklıkta kürlenen GFRP numunelerin çekme ve basma kopma uzamaları, oda sıcaklığında kürlenene göre daha yüksektir. CFRP numunelerin boyuna kopma uzaması ise yüksek sıcaklıkta daha düşüktür. Yüksek sıcaklıkta CFRP numunelerin enine basma kopma uzaması, oda sıcaklığındakilerden daha yüksektir [20].

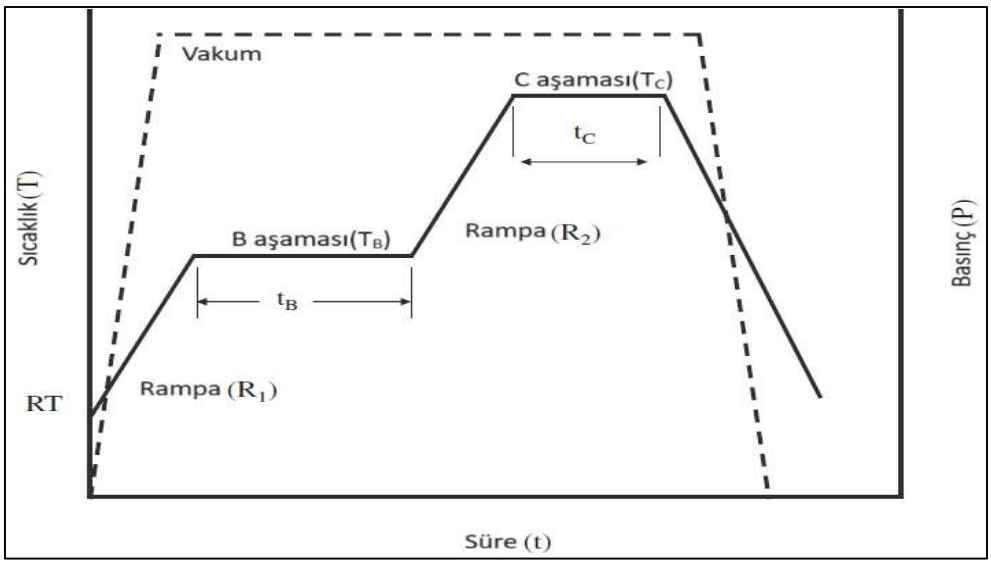
Mujahid ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada torbalama tekniği, kür çevrimi ve laminat kalınlığı olmak üzere üç ana üretim parametresi seçmiş ve bu parametrelerin kompozit yapıdaki boşluk oranına (hem yüzeyde hem de kalınlık boyunca) ve kompozit malzemenin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. OoA XC110 3 K, 210 g, 2x2 Twill karbon prepreg plakaların üretimi için seçilmiştir. Bu prepreg ağırlıkça %42 epoksi reçine bisfenol-A- (epiklorohidrin) ile emprenye edilmiş ağırlıkça %58 fiber içeriğine sahiptir. Fiber ve reçinenin yoğunlukları sırasıyla 1,79 ve 1,2 g/cm^3'tür. Tüm prepreg'ler $[0^\circ]_n$ yönünde istiflenmiştir. Sırasıyla 6, 10 ve 13 kat prepreg ply kullanılarak 1,6, 2,5 ve 3,2 mm plaka kalınlığı elde edilmiştir [23].

Çizelge 3.4. Proses parametreleri [23]

Parametreler			
Torbalama tekniği (A)	SVB (A_1)	MSVB (A_2)	DVB (A_3)
Kür çevrimi (B)	MRCC (B_1)	EMRCC (B_2)	DC (B_3)
Plaka kalınlığı (C)	1,6 mm (C_1)	2,5 mm (C_2)	3,2 mm (C_3)

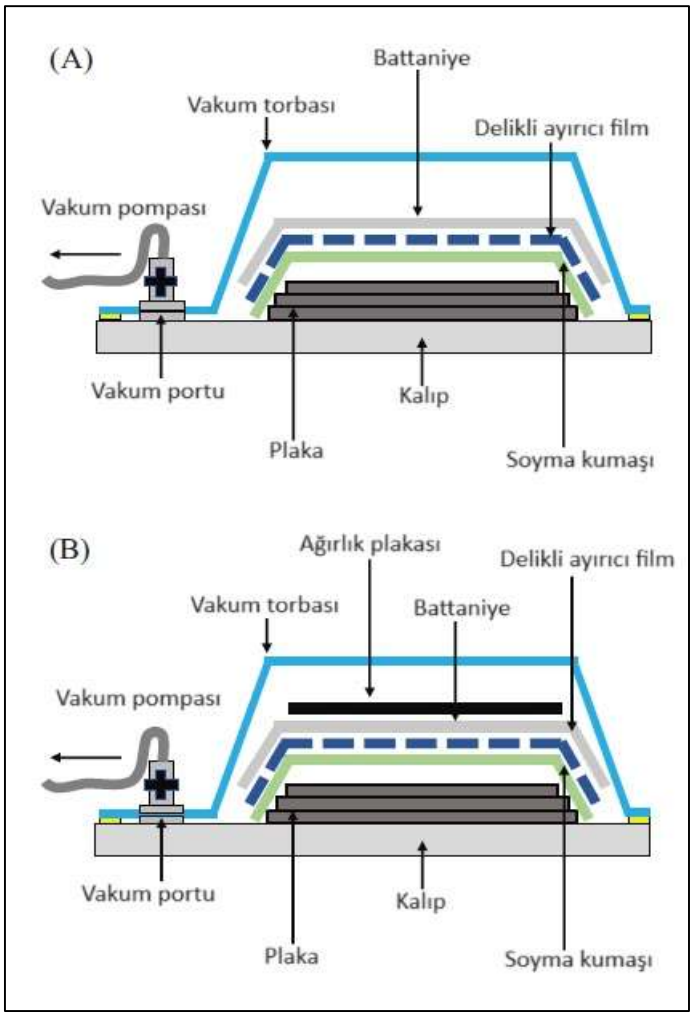
Çizelge 3.4'te bu çalışmada seçilen parametreler yer almaktadır. Tek vakum torbalama tekniği SVB, değiştirilmiş tek vakum torbalama tekniği MSVB, çift vakum torbalama

tekniği ise DVB ile ifade edilmiştir. Bununla birlikte üreticinin tavsiye ettiği kür çevrimi MRCC, üreticinin önerdiği kür çevriminin genişletilmiş hali EMRCC ve doğrudan kür çevrimi ise DC ile ifade edilmiştir. Bunlardan EMRCC ve DC değiştirilmiş kür çevrimleridir. EMRCC, C aşamasından önce ek bir sıcaklık bekleme süresi T_{B2}'yi içermektedir. Öte yandan DC, B aşaması sıcaklığını C aşaması sıcaklığına yakın daha yüksek bir sıcaklığa yükseltmiştir. Kompozit laminatlar, L27 Taguchi ortogonal dizi deney planı kullanılarak, geleneksel bir fırında kürlenen ticari olarak temin edilebilen prepregler kullanılarak üretilmiştir.



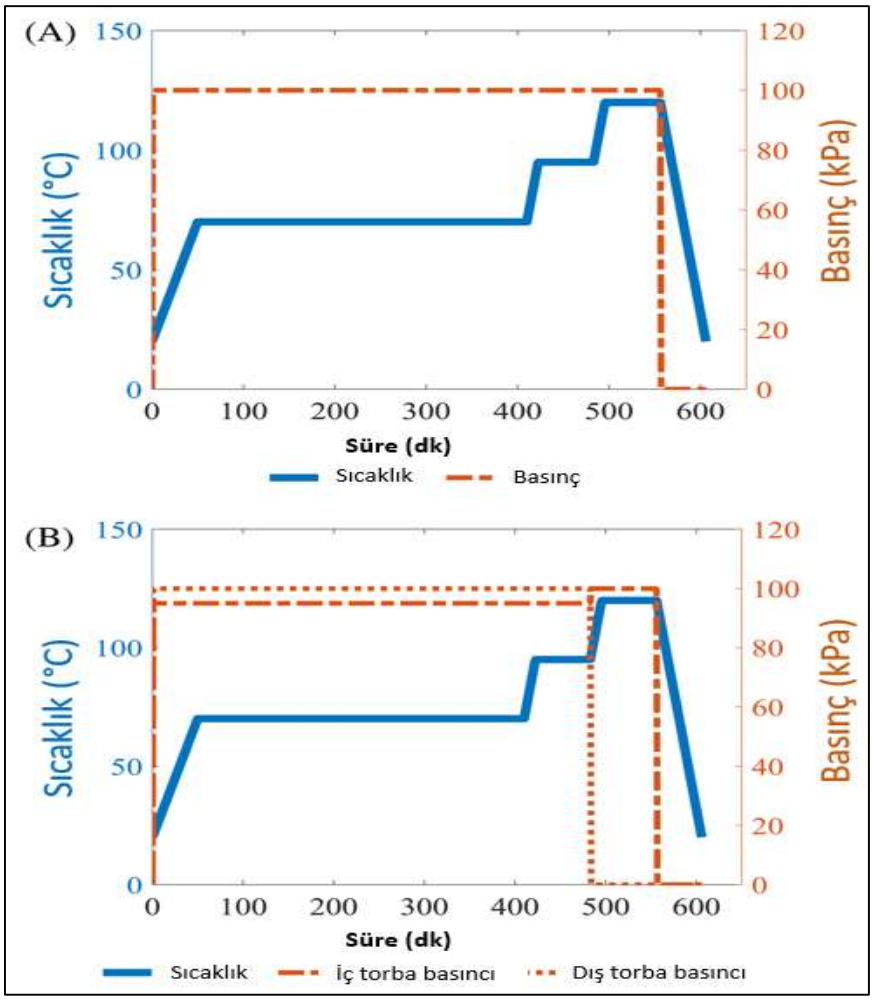
Şekil 3.2. Tipik iki aşamalı kür çevrimi [23]

Üreticinin tavsiye ettiği kür çevrimi MRCC, Şekil 3.2'de paylaşılan tipte bir eğriye sahiptir.



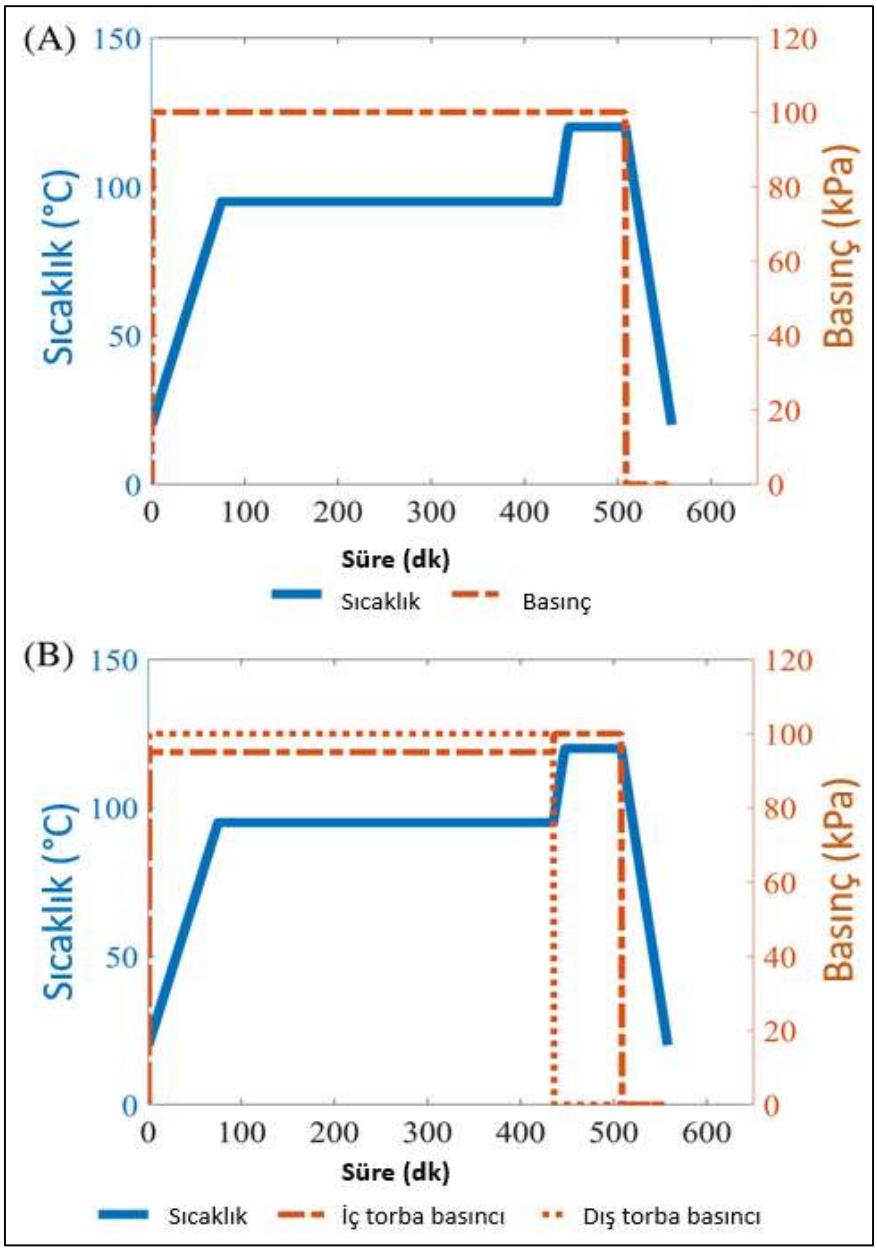
Şekil 3.3. Torbalama teknikleri A) SVB B) MSVB [23]

Şekil 3.3'te çalışmada kullanılan torbalama tekniklerinden tek vakum torbası yöntemi SVB ve değiştirilmiş tek vakum torbalama tekniği MSVB'ye ait şematik gösterime yer verilmiştir.



Şekil 3.4. A)SVB ve MSVB için EMRCC profili ve B) DVB için EMRCC profili [23]

Bu çalışma kapsamında, üreticinin önerdiği kür çevriminin genişletilmiş hali EMRCC ile farklı bir kür çevrimi denenmiştir. İzlenen kür çevrimi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. A)SVB ve MSVB yöntemleri DC profili ve B) DVB yöntemi DC profili [23]

Bu çalışma kapsamında doğrudan kür çevrimi (DC) ile farklı ikinci bir kür çevrimi denenmiştir. İzlenen kür çevrimi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

Hazırlanan numunelerin çekme ve eğilme özellikleri sırasıyla ASTM D3039 ve ASTM D790 standartlarına göre test edilmiştir. Her bir parametrenin önemini ve yüzde katkısını ve bunların birbirleri arasındaki etkileşimini %90 güven aralığında belirlemek için üç yollu varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Her parametre, her proses parametresinin dokuz

tekrarlı numune testinin ortalamasını temsil etmektedir. Yapılan testlerin sonuçlarından hareketle yazarlar şu sonuçlara varmıştır [23]:

Torbalama tekniği ve kür çevrimi, boşluk içeriğin kontrolünde ana parametrelerdir. Geleneksel SVB ile karşılaştırıldığında DVB, yüzey gözenekliliği ve kalınlıktaki boşluk içeriğinde sırasıyla %48,33 ve %23,7 oranında iyileşme sergilemiştir. Kolay hava tahliyesine olanak tanıyan balonlaşma etkisi nedeniyle DVB'de daha düşük boşluk içeriği elde edilmiştir.

Değiştirilmiş kürleme çevrimlerinin daha düşük bir boşluk içeriği sergilediği gözlemlenmiştir. Tüm kür çevrimleri arasında DC, geleneksel MRCC ile karşılaştırıldığında sırasıyla %65,71 ve %18,12'lik iyileştirmelerle en düşük yüzey gözenekliliği ve kalınlık boyunca boşluk içeriğini sergilemiştir. EMRCC ayrıca yüzey gözenekliliğinde %25,71'lik bir azalma ile geliştirilmiş bir laminat yüzeyi sergilemiştir. Boşluk içeriğindeki bu iyileştirmeler, daha uzun vakumda tutma süresi ve minimum reçine viskozitesi nedeniyle elde edilebilmiştir.

Laminat kalınlığının artmasıyla birlikte boşluk içeriğinin de artması bu çalışma kapsamında gözlemlenmiş ancak istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Çekme özelliklerini etkileyen ana parametrenin yalnızca torbalama tekniği olduğu bulunmuştur. Torbalama teknikleri arasında SVB ve MSVB mükemmel gerilme özellikleri sergilemiştir. MSVB çekme mukavemetini %2 oranında artırmıştır. Tüm kür çevrimlerinde hemen hemen benzer çekme özellikleri gözlemlenmiştir. SVB ve MSVB tekniklerinin üstün gerilme özellikleri, %56,77 ve %53,55 gibi elde edilen daha yüksek fiber hacim oranına bağlanmıştır. DVB tekniğindeki %50,49'luk düşük fiber hacim oranı, çekme özelliklerinin azalmasına neden olmuştur.

Torbalama tekniği ve kür çevrimi eğilme özelliklerini etkileyen ana faktörlerdir. Tüm torbalama teknikleri arasında SVB en yüksek eğilme mukavemeti ve modülü sergilemiş ve onu hemen ardından MSVB izlemiştir. SVB ve MSVB tekniklerindeki üstün eğilme özellikleri, DVB tekniğiyle karşılaştırıldığında elde edilen üstün fiber hacim oranına atfedilmiştir.

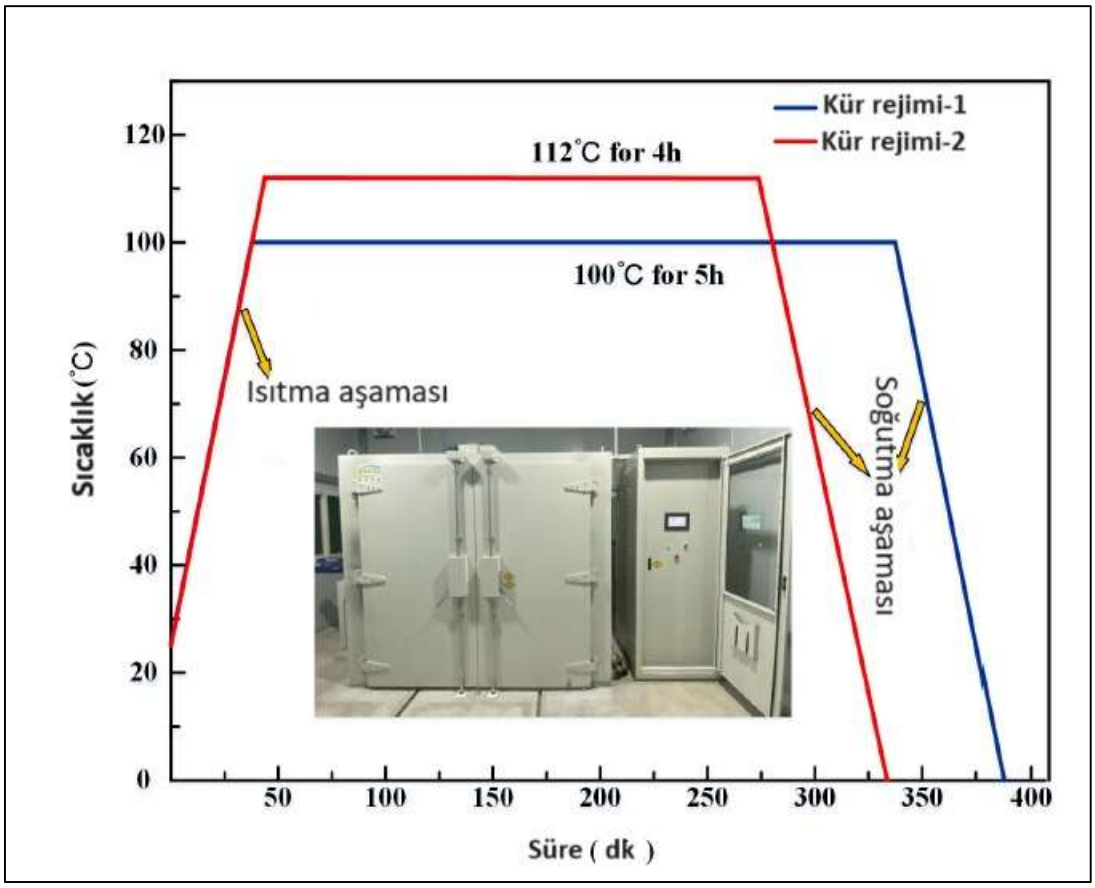
Tüm kür çevrimleri arasında, EMRCC'nin MRCC'ye kıyasla %20 oranında daha iyi eğilme mukavemeti sergilediği, DC'de ise %17,4 oranında eğilme mukavemetinde yine MRCC'ye kıyasla iyileşme sağladığı gözlenmiştir. Kür çevriminin ve laminat kalınlığının mekanik özellikler üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı bulunmuştur. Tüm deneysel sonuçlarda iyi bir tutarlılık gösteren, sonuçlarda önemli bir değişiklik gözlemlenmediği belirtilmiştir. Hem çekme hem de eğilme özellikleri açısından proses parametreleri arasında dikkate değer bir etkileşim gözlenmemiştir.

Liang ve diğerleri, yaptıkları çalışmada kür sıcaklığının karbon fiber kompozitin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu özelliklerin bilinmesinin karbon fiber kullanılarak filaman sarma yöntemi ile üretilen basınçlı kapların tasarımında çok kıymetli olduğu vurgulanmıştır. 4251 A4/B2 epoksi reçinesinin kürlenme sıcaklığı, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) kullanılarak ölçülmüş, çekme ve eğilme özellikleri, saf epoksi reçine matris test parçaları, Donanma Mühimmat Laboratuvarı (NOL) halkaları ve karbon fiber kompozit tek yönlü (UD) plakalar oluşturularak iki farklı kürleme rejimi altında test edilmiştir. Çekme ve eğilme testleri ile kür çevriminin mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Test sonuçları, basınçlı kapların sayısal simülasyonu ve üretimi için güvenilir proses parametreleri sağlayacağı belirtilmiştir [19]. Çizelge 3.5'te çalışmada kullanılan reçine ve karbon fiberin özellikleri listelenmiştir.

Çizelge 3.5. Çalışmada kullanılan reçine ve karbon fiberin özellikleri [19]

Epoksi reçinenin fizikokimyasal özellikleri				
Yoğunluk (g/mL)	Viskozite (mPa.s)	Jelleşme süresi (saat)	Jelleşme süresi (s)	
1,47	1400-1500	>12	80-120	
Karbon fiberin özellikleri				
Çekme Mukavemeti (MPa)	Doğrusal yoğunluk (g/km)	Hacimsel yoğunluk(g/cm^3)	Uzama (%)	Çap (μm)
4900	800	1,8	2,1	7

Saf reçine A4 ve kür ajanı(sertleştirici) B2 ağırlıkça 100:90 oranında karıştırılmıştır. Bu ikili 10 dk karıştırılmış ve iyice karıştırıldıktan sonra hava kabarcıklarının giderilmesi için 20 dk bekletilmiştir. Deneysel test verileri sonuçlarının güvenilirliğini sağlamak amacıyla, test malzemeleri için aynı karbon fiber ve epoksi reçine partileri kullanılmıştır. Döner kür fırınında numuneler Şekil 3.6'da verilen kür çevrimlerinde kürlenmiştir.



Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan iki farklı kür çevrimi [19]

NOL halkaları ve UD plakalar ilgili test standartlarına uygun ebatlarda hazırlanıp test edilmiştir. 100°C ile karşılaştırıldığında, 112°C kürleme sıcaklığında 4251A4/B2 saf epoksi reçine matrisinin çekme mukavemeti %6,30 oranında iyileşmiş ve eğilme mukavemeti hala orijinal seviyeyi koruyabilmiştir. 112°C kür sıcaklığının, kompozitlerde kullanılan epoksi reçinenin genel özelliklerinin iyileştirilmesini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir [19].

Filaman sarılmış kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti, 112°C 'lik bir kürleme rejimi kullanılarak geliştirilmiştir. NOL halkalarının çekme mukavemeti %22 oranında artırılmıştır. UD plakaların çekme mukavemeti ve eğilme mukavemeti 90˚ yönünde sırasıyla %68,86 ve %37,42 artarken, 0˚ yönünde çekme mukavemeti %5,82 artmıştır. Bu kürleme rejiminin uygulanması, kompozit malzemelerin iyileştirilmesi ve hidrojen depolama tanklarındaki genel performansın iyileştirilmesi için güçlü bir garanti sağlamıştır. Bununla birlikte 35 MPa basınçlı kap 112°C'de kürlenmiş ve kalıplanmıştır. Patlama basıncı, minimum tasarım patlama basıncından %26,93 daha yüksek olan 104,4 MPa'ya ulaştığı görülmüştür [19].

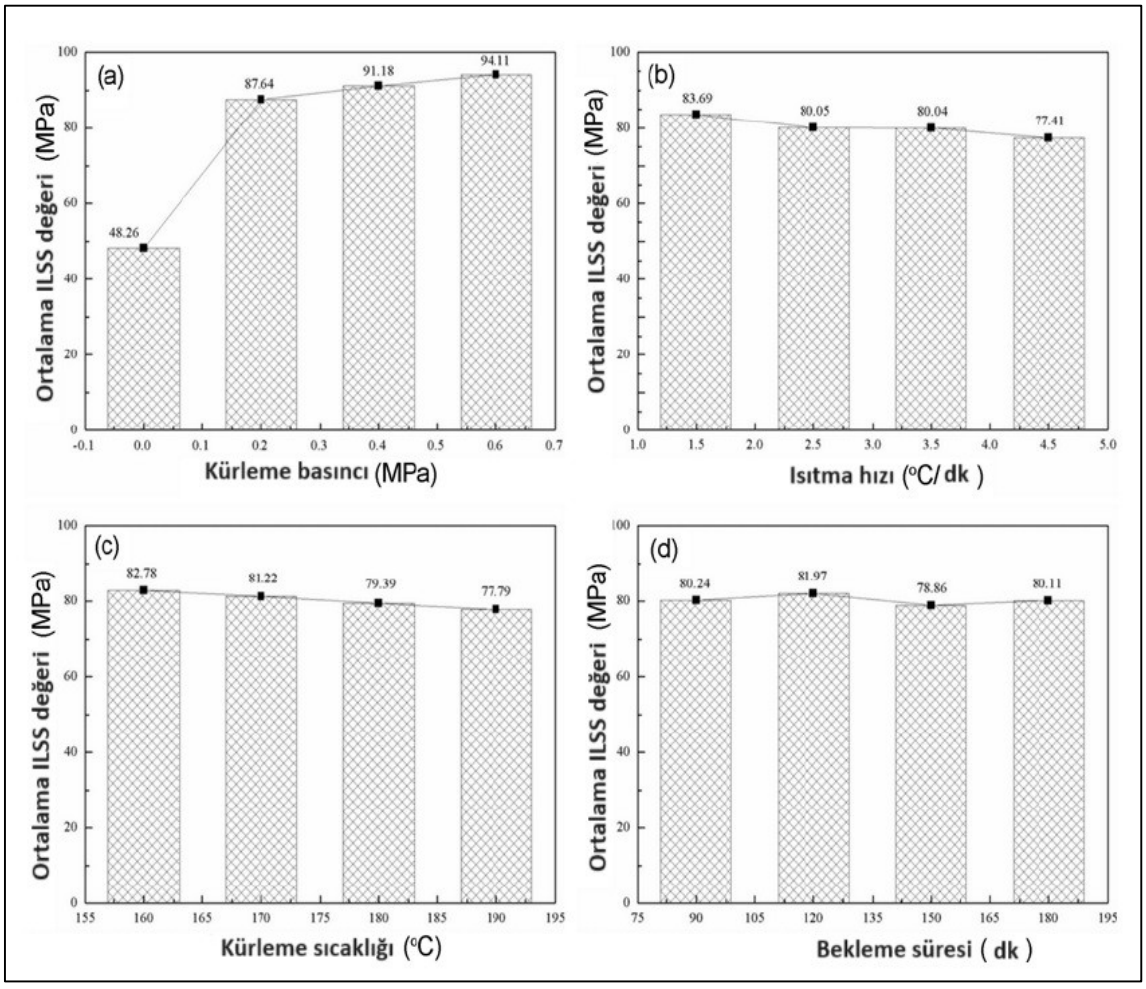
Kürleme sıcaklığı kürleme sürecini etkileyen çok önemli bir faktör olduğu anlaşılmıştır. 4251A4/B2 epoksi reçinenin ıslak şekillendirme kompozit malzemeleri ve basınçlı kaplardaki uygulanmasında 112 °C'lik kürleme sıcaklığının, yapının genel performansını artırmak için göz ardı edilemeyecek bir kürleme parametresi olduğu anlaşılmıştır [19].

Chang ve diğerleri, yaptıkları bu çalışmada X850/T800 prepreg havacılık kompozitinin otoklavda kürleme prosesinin optimize edilmesine odaklanmışlardır. Bu çalışmada kullanılan kompozit malzeme, fiber hacim oranı %65 ve alan yoğunluğu 190 g/m^2 olan tek yönlü karbon fiber (T800) takviyeli/epoksi (X850) prepregden üretilmiştir. Yazarlar, kürleme basıncını, ısıtma hızını, kürleme sıcaklığını ve bekleme süresini içeren en iyi kürleme parametrelerini belirlemek için ortogonal bir deneysel yöntem uygulamışlardır. Çalışma, katmanlar arası kesme dayanımı testleri ve taramalı elektron mikroskobu(SEM) ile mikro yapı analizi yoluyla bu parametrelerin kürleme kalitesi üzerindeki etkilerini analiz etmek için on altı numunenin üretilmesini içermektedir. ILSS kısa kiriş üç nokta eğilme testi kullanılarak değerlendirilmiş ve arayüzey bağlanma kalitesi SEM ile incelenmiştir. Sonuçlar, X850/T800 kompozit laminat için optimum kürleme işleminin 0,6 MPa kürleme basıncına, 1,5 °C/dk ısıtma hızına, 160 °C kürleme sıcaklığına ve 120 dk'lik bekleme süresine sahip olması gerektiğini göstermiştir. Bu koşulların en iyi tabakalar arası özellikleri ve arayüzey bağlanma kalitesini ürettiği bulunmuştur. Makale, kompozit bileşenlerin iç kalitesinin stabilitesini ve güvenilirliğini sağlamak için otoklav işleminde kürleme parametreleri üzerinde hassas kontrolün önemini vurgulamaktadır. Bulgular, özellikle havacılık endüstrisinde yüksek performanslı kompozit bileşenlerin üretimi için önemlidir. Yüksek ilk yatırım maliyeti ve düşük verimlilik gibi dezavantajlar otoklav prosesinin gelişimini engelleyen ana nedeni olduğunu vurgulayan yazarlar, otoklav işleminin rekabet avantajını artırabilecek kürleme işleminin optimizasyonunu gerektirdiğinin altını çizmişlerdir. ILSS, kısa kiriş üç nokta eğilme testi yöntemi kullanılarak Çin standardı JC/T 773-2010'a göre belirlenmiştir. Numuneler elmas testere ile 20 mm×10 mm (uzunluk×genişlik) nominal boyutunda kesilmiştir. Test edilen numunelerin kırılma yüzeylerini incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM, model: TESCAN MIRA3 LMU) kullanılmıştır [9].

Çizelge 3.6. Çalışma kapsamında incelenen kür parametreleri [9]

Faktörler ve seviyeler	A (MPa)	B (°C/dk)	C (°C)	D (dk)
1	0	2,5	160	90
2	0,2	3,5	170	120
3	0,4	4,5	180	150
4	0,6	1,5	190	180
Burada A kürleme basıncı, B ısıtma hızı, C kürleme sıcaklığı ve D bekleme süresini ifade etmektedir.				

Çizelge 3.6'da çalışma kapsamında incelenen kür parametrelerine yani bağımsız değişkenlere yer verilmiştir.



Şekil 3.7. ILSS sonuçlarına göre kürleme parametrelerinin grafiği [9]

Şekil 3.7'de paylaşılan ILSS sonuçlarından hareketle bekleme süresinin ILSS üzerinde anlamlı etkisinin olmadığı ve ısıtma hızı ve kürleme sıcaklığının ILSS üzerindeki etkilerinin

biraz küçük olduğu gösterilmiştir. Ancak kürleme basıncının ILSS üzerindeki etkisinin hepsinden fazla olduğu anlaşılmıştır.

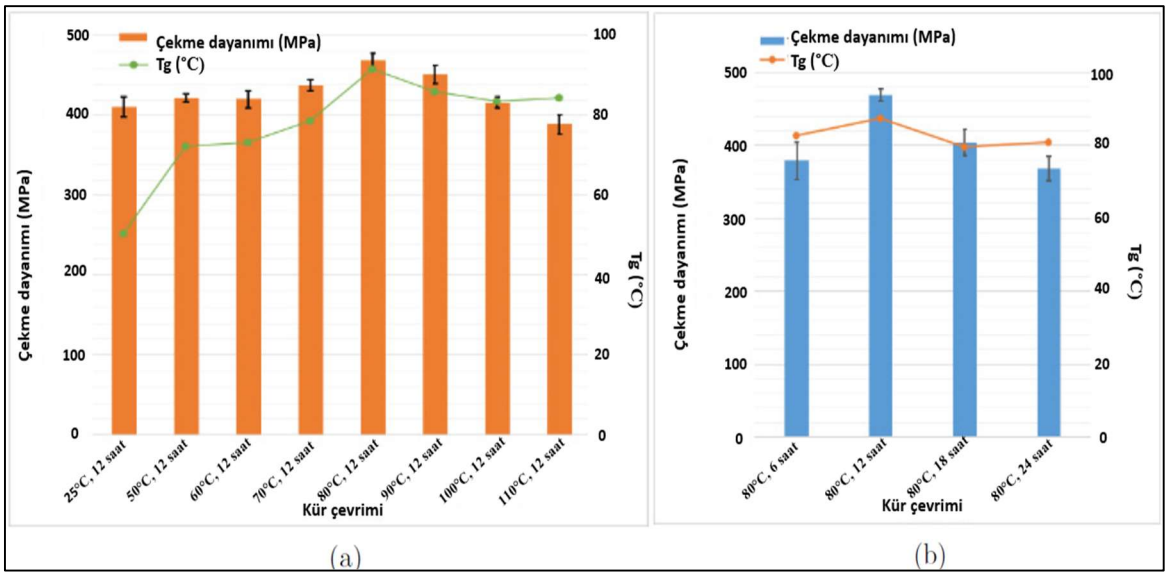
Çizelge 3.7. Ortagonal deneysel yöntem ve ILSS testi sonuçları [9]

Numune numarası	Faktör				ILSS test sonuçları (MPa)
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	53,24
2	1	2	2	2	46,65
3	1	3	3	3	41,96
4	1	4	4	4	51,17
5	2	1	2	3	89,09
6	2	2	1	4	88,62
7	2	3	4	1	78,23
8	2	4	3	2	94,60
9	3	1	3	4	85,89
10	3	2	4	3	89,77
11	3	3	1	2	94,67
12	3	4	2	1	94,37
13	4	1	4	2	91,97
14	4	2	3	1	95,12
15	4	3	2	4	94,76
16	4	4	1	3	94,6
Ortalama değer 1	48,26	80,05	82,78	80,24	
Ortalama değer 2	87,64	80,04	81,22	81,97	
Ortalama değer 3	91,18	77,41	79,39	78,86	
Ortalama değer 4	94,11	83,69	77,79	80,11	
Açıklık R	45,86	6,28	5,00	6,75	

Yukarıda bahsedilen ortogonal deney analizine dayanarak, X850/T800 kompozitlerinde optimum kür çevriminin şu şekilde olduğu tespit edilmiştir: 0,6 MPa kür basıncı, 1,5 °C/dk ısıtma hızı, 160 °C kür sıcaklığı ve 120 dk'lik bekleme süresi. Bu sayede otoklav prosesinde enerji tasarrufu ve verimlilik maksimuma çıkarılabileceği vurgulanmıştır. Son olarak bu optimum koşulların ILSS sonuçlarına etkisini teyit etmek amacıyla bir doğrulama testi koşulmuştur. Yukarıda sıralanan üretim parametreleri ile kompozit numuneler üretilmiş ve test edilmiştir. Bu numunelerin ILSS testlerinin ortalama değeri 102,18 MPa bulunmuştur. Çizelge 3.7'de gösterildiği gibi ortogonal deneydeki maksimum ILSS sonucu karşılaştırıldığında, ILSS %7,42 oranında artış sağlanmıştır. Normalde tam deneysel çalışmada 64 ayrı numuneye ihtiyaç duyulacakken L_{16} (4^4) ortogonal deney tasarımı ile

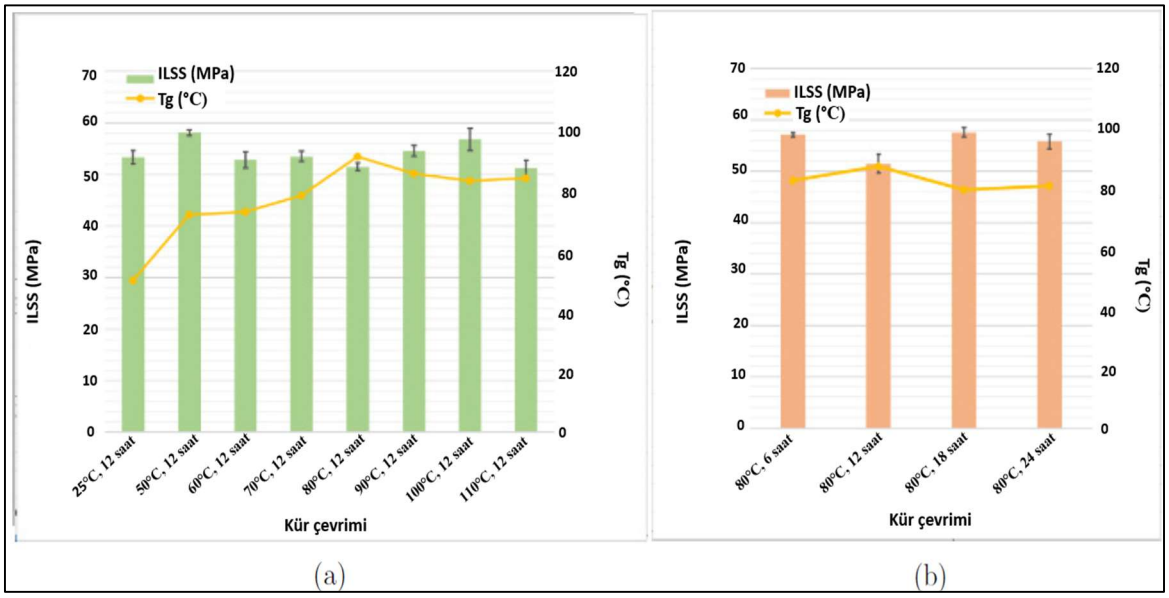
numune sayısı 16'ya düşürülmüştür. Bu kısmi deneyin analiz edilmesiyle tam deneysel sonuçların elde edilebildiği ve çalışma verimliliği artırılabildiği vurgulanmıştır [9].

Zixuan ve diğerleri, yaptıkları çalışmada farklı kür çevrimlerinin, ıslak prepreg şekillendirme işlemi kullanılarak üretilen CFRP mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kompozit parçaların prototiplenmesi ve özelleştirilmesi ihtiyacı arttıkça, kısa üretim çevrim süresini ve düşük üretim maliyetini gerçekleştirmek için yeni üretim süreçlerindeki yeniliklerin teşvik edilmesi gerekliliğini vurgulamışlardır. Islak prepreg işlemi sırasında, CFRP numunesini üretmek için 300 mm x 500 mm boyutunda dokuma düz karbon kumaşlar (200T), epoksi reçine (KFR-120V) ve sertleştirici (KFR-141) kullanılmıştır. Karbon fiber laminatlara ilk önce elle yatırma işlemiyle reçine emdirilmiş, daha sonra fazla reçineyi emmesi için soyma kumaşıyla birlikte yeterli bir vakum battaniyesi ile kaplanmıştır. Vakum atmosferini iletmek için tüm düzeneği kapatan bir parça vakum torbası kullanılmıştır. Kantitatif bilgi sağlayan termal analiz için diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC N-650) cihazından bir kürleme sıcaklığı aralığı elde edilmiştir. T_g'nin ve çekme mukavemetinin en yüksek olduğu 80°C sabit tutulup bekleme süresi değiştirilmiştir. CFRP kompozitlerin mekanik özellik değerlendirmesi, kür sistemlerine göre ASTM D 3039'a göre çekme testi ve ASTM D 2344'e göre ILSS kısa kiriş eğilme testi ile gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikle kürlenme derecesi ve camsı geçiş sıcaklığını bulabilmek için farklı kür çevrimlerinin uygulanmasından sonra DSC testi koşulmuştur. Araştırmacılar kompozit plakanın üretiminde önce 50-110 °C arası değişen bir kürleme sıcaklığı kullanmış, kürleme süresini 12 saatte sabit tutmuşlardır. Ardından kürleme sıcaklığını 80 °C'de sabit tutup kürleme süresini 6-24 saat arasında altışar saat arttırarak değiştirmişlerdir [18].



Şekil 3.8. Çekme mukavemeti ve Tg (a) farklı sıcaklıklar (b) farklı süreler [18]

Şekil 3.8'de sıcaklık ve bekleme süresi değişimlerinin çekme dayanımında ve T_g üzerindeki etkisi bar grafiği ile verilmiştir. Şekil 3.9'da ise bu geçişimlerin ILSS dayanımına etkisi yine bar grafikleriyle verilmiştir.

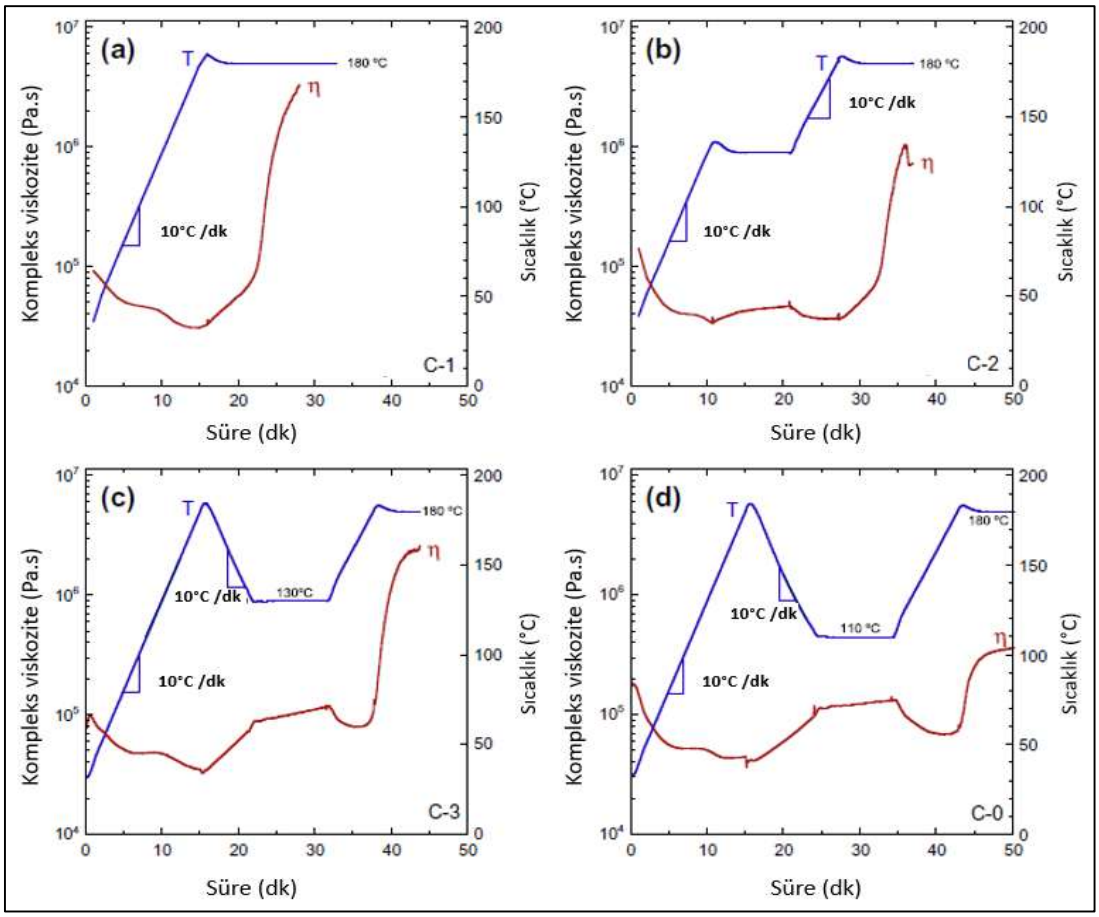


Şekil 3.9. Kür çevrimlerinde ILSS ve T_g: (a) farklı sıcaklıklar (b) farklı süreler [18]

12 saat sabit kürleme süresinde sıcaklık 80°C'ye çıkana kadar çekme mukavemeti artmış sonrasında düşmeye başlamıştır. T_g değeri de bununla paralel olarak seyretmiştir. Kürleme sıcaklığı sabit 80°C iken, bekleme süresi 12 saate kadar çekme mukavemeti artmış, ardından

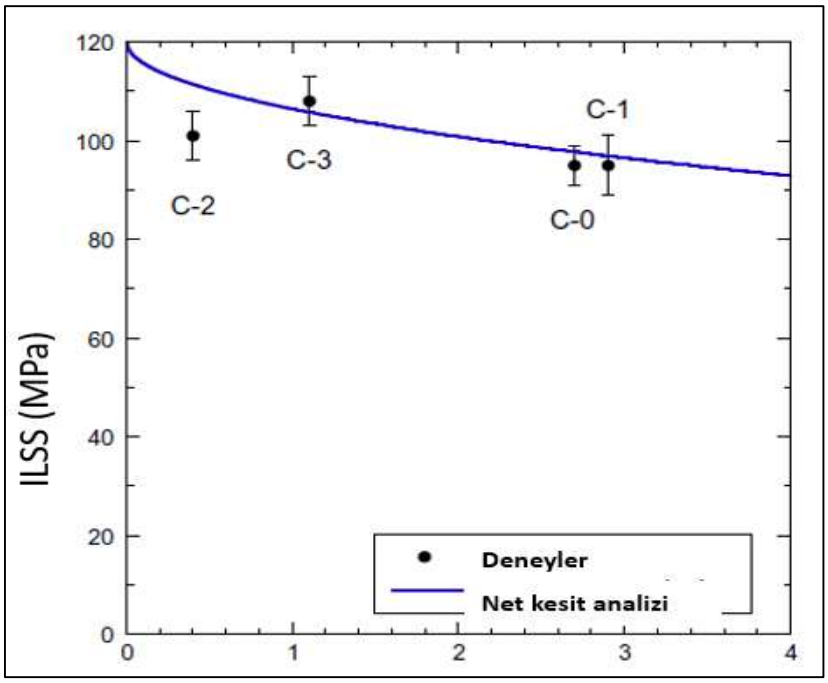
azalma eğilimine girmiştir. ILSS sonuçları ise çekme testi sonuçları ile neredeyse zıttır. Çekme mukavemetinin daha düşük olduğu çevrimlerde daha yüksek ILSS elde edilmiştir. Bunun nedenini yazarlar, ILSS testindeki hata modlarında normalde matris ve tabakalar arası özelliklerin hâkim olmasına bağlamışlardır [18].

Hernandez ve diğerleri, yaptıkları çalışmada polimer matrisli kompozitlerde kürleme çevriminin boşluk dağılımı ve ILSS üzerine etkisini incelemişlerdir. Önceki çalışmalarda gözenekliliğin kompozitin mekanik özelliklerinde, özellikle de tabakalar arası kayma mukavemeti ve enine çekme mukavemeti gibi matris davranışının hâkim olduğu özelliklerde belirgin bir azalmaya yol açtığının eski çalışmalarda tespit edildiği bildirilmiştir. Bu nedenle, minimum boşluk içeriğini sağlayan kür döngüleri en iyi mekanik davranışı üretmelidir ve bu hipotez, farklı kür çevrimleriyle üretilen plakaların ILSS'si ASTM D2344 standardına göre ölçülerek test edilmiştir. Kompozit panellerin kürlenme derecesini (α) ve camsı geçiş sıcaklığını ölçmek için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) kullanılmıştır. Kompozit panellerin nominal fiber hacim oranı, boşluk hacim oranını dikkate alınmaksızın, karbon (1,79 g/cm^3) ve epoksi reçinenin (1,3 g/cm^3) yoğunluklarından elde edilmiştir. AS4/8552 polimer matrisli kompozitin tek yönlü laminatları, ham prepreglerin reolojik ve termo-kimyasal davranışına göre tasarlanan 2 bar basınç ve farklı sıcaklık döngüleri altında basma kalıplama yoluyla üretilmiştir. Tüm çevrimler için benzer kürlenme derecesi ve camsı geçiş sıcaklığı elde edilmiş, ancak boşlukların hacim oranı %0,4 ile %2,9 arasında değişmiştir. Daha uzun işlem pencereleri (jelleşmeden önce daha fazla zaman), basit sıcaklık döngüleri için (yalnızca rampaları ve tutmaları içeren) daha düşük boşluk oranına sahip kompozit plakaların elde edilmesini sağlamıştır. Boşlukların çoğu, hava sıkışması ve yerleştirme sırasında oluşan kırışıklıkların sonucu olduğu bildirilmiştir [10].



Şekil 3.10. AS4/8552 için kür çevrimleri (a) C-1 (b) C-2 (c) C-3 (d) C-0 [10]

Şekil 3.90'da çalışmada seçilen dört ayrı kür çevriminin grafiklerine yer verilmiştir.



Şekil 3.11. Boşluk içeriği fonksiyonu olarak AS4/8552 kompozit plakaların ILSS'i [10]

ILSS'nin karşılık gelen değerleri Şekil 3.11'de gösterilmektedir ve hipotezle geniş bir uyum içerisindedir: en yüksek gözenekliliğe (C-0 ve C-1) sahip plakalar en düşük ILSS'yi gösterirken, en düşük boşluk hacim oranına sahip olanlar (C-1 ve C-2) en yüksek ILSS'yi sunmuştur [10].

Polimer kompozit malzemelerin nihai mekanik özellikleri büyük oranda otoklav veya fırında kürlenme parametrelerine bağlıdır. Kompozit malzeme üreticileri, bir veya daha fazla üreticinin önerdiği kürleme (MRC) döngüsüyle uygun kürleme koşulunu belirtir.

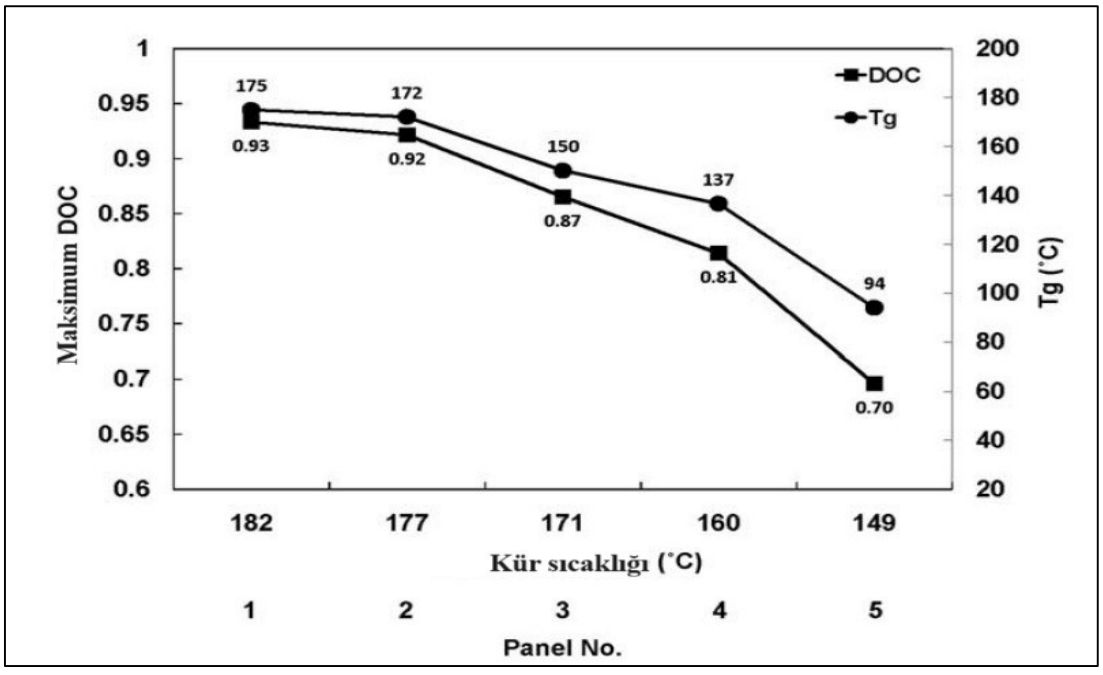
Koushyar ve diğerleri, polimer kompozit malzemelerin nihai mekanik özellikleri büyük oranda otoklav veya fırında kürlenme parametrelerine bağlı olduğunu vurgulamıştır. Kompozit malzeme üreticileri, bir veya daha fazla MRC döngüsüyle uygun kürleme koşulunu belirtir. Kompozit laminatları uygun şekilde kürlemek ve dolayısıyla en iyi mekanik özellikleri elde etmek için MRC döngüsü yakından takip edilmelidir. Kompozit malzemelerin otoklavda kürlenmesi için MRC döngüsünde belirtilen kürleme parametreleri kürleme süresi, kürleme sıcaklığı, kürleme basıncı ve vakum basıncıdır. Kürleme parametrelerinin uygun şekilde kontrol edilmesiyle kürlenmiş laminatların kalitesinin sağlanması arzu edilir. Ancak kürleme parametrelerinin hassas kontrolü genellikle maliyetlidir. Bu sebeple üretimde kaçınılmaz olarak öngörülen kürleme parametrelerinden

sapmalar meydana gelebilmektedir. Bu sapmalar kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, kürlenmiş laminatların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemeyecek kürleme parametrelerindeki ne oranda varyasyonun kabul edilebilir olduğunu bilmek önemlidir. Kür parametrelerindeki değişimin kompozit malzemelerin son mekanik özellikleri üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmalarda, bir veya iki kürleme parametresi değiştirilerek laminatlarda kasıtlı olarak çeşitli kusurlar oluşturulmuştur. Daha sonra kusurun ilgilenilen mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmış ve mekanik özellikler ile kürleme parametrelerinin değişimi arasındaki ilişki rapor edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan malzeme, Cytec tarafından üretilen ticari bir karbon fiber/epoksi prepreg, Cycom IM7/977-2 UD tapedir. Bu, otoklav veya pres kalıplama kürlemesi için tasarlanmış, orta modüllü tek yönlü karbon fiberlerle takviye edilmiş sertleştirilmiş bir epoksi reçinedir. Bu prepreg için MRC döngüsü, 177°C'de 180 dk süreyle izotermal kürlemedir. $[0/90_2/0]4s$ dizilimine sahip plaka, her 4 katta bir kompaksiyon için 5 dk vakuma alınmış ve son katta vakuma alma 30 dk sürmüştür. Toplamda 32 kat ply elle yatırma yöntemi ile serilmiştir. Kürlenmiş numunelerin DoC ve T_g değerleri DSC testi ile elde edilmiştir. Test ASTM E2602 standardı kullanılarak yapılmıştır. Numuneler kısa kiriş eğilme testine tabii tutulmuştur. Yerleşimdeki her SBS numunesinin boyutu (genişlik ve uzunluk), panelin elde edilen kalınlık konturuna dayalı olarak ASTM D2344'e göre belirlenmiştir. SBS kuponunun uzun ekseni 0° yönü ile hizalanmıştır. Boşluk içerikli numunelerin çoğunun yoğunluğunu ölçmek için kullanılan yöntem suya daldırmadır. Ancak görünür yüzey boşlukları olan numuneler için bu yöntem kullanılamamaktadır. Dolayısıyla bu numunelerin yoğunluğu, boyutların ve kütlenin doğrudan ölçülmesiyle elde edilmiştir. Tüm numuneler için boşluk içeriğini ve fiber hacim fraksiyonunu elde etmek amacıyla ASTM D3171'e göre asit parçalama yöntemi kullanılmıştır. Boşluk içerikli numunelerden reçineyi çıkarmak için sülfürik asit kullanılmıştır. Numuneler RT/D (Oda sıcaklığında/Kuru) ve H/W (Sıcak/Nemli) olmak üzere iki koşul altında SBS testine tabii tutulmuştur. H/W test numuneleri ASTM D5229'a göre 30 gün boyunca %85 bağıl nem ile 71°C'de şartlandırılmıştır. Test, her panelden beş numune üzerinde 82°C'de gerçekleştirilmiştir [17].

Çizelge 3.8. IM7/977-2 UD için tasarlanmış kür çevrimleri [17]

Kür çevrimi panel numarası	Isıtma hızı (°C/dk)	Bekleme sıcaklığı (°C)	Bekleme süresi (dk)	Soğutma hızı (°C/dk)	Kürleme basıncı (kPag)	Vakum (26 inHg)
1	2,8	182	180	2,8	586	69 kPa'da vent
2	2,8	177	180	2,8	586	69 kPa'da vent
3	2,8	171	180	2,8	586	69 kPa'da vent
4	2,8	160	180	2,8	586	69 kPa'da vent
5	2,8	149	180	2,8	586	69 kPa'da vent
6	2,8	177	180	2,8	552	69 kPa'da vent
7	2,8	177	180	2,8	276	69 kPa'da vent
8	2,8	177	180	2,8	138	69 kPa'da vent
9	2,8	177	180	2,8	690	Baştan sona
10	2,8	177	180	2,8	552	Baştan sona
11	2,8	177	180	2,8	414	Baştan sona
12	2,8	177	180	2,8	276	Baştan sona
13	2,8	177	180	2,8	138	Baştan sona
14	2,8	177	180	2,8	0	Baştan sona

Çizelge 3.8'de çalışmada test edilen on dört ayrı kür çevrimi ve ihtiva ettiği kür parametrelerine yer verilmiştir. Şekil 3.12'de ise sıcaklık değişimiyle kürlenme derecesi ve T_g'nin nasıl değiştiğini gösteren grafiğe yer verilmiştir.



Şekil 3.12. 1'den 5'e kadar olan paneller için son DOC ve Tg [17]

Camsı geçiş sıcaklığı ve kürlenme derecesi yalnızca 1 ile 5 arasındaki kür çevrimleri için elde edilmiştir. Panel 6 ile 14 için T_g ve DoC'nin elde edilmemesine karar verilmiştir. Çünkü bunların hepsi kür çevrimi 2 ile aynı sıcaklık profiline sahiptir. Hem T_g hem de DoC, izotermal kürleme sıcaklığının azalmasıyla birlikte bir azalma eğilimi göstermiştir. Bu düşüş, en düşük kürleme sıcaklığına sahip olan panel 5 için en belirgindir [17]. Çizelge 3.9'da iki farklı şartlandırma neticesinde elde edilen SBS sonuçlarına yer verilmiştir.

Çizelge 3.9. Oda sıcaklığı/kuru ve sıcak/ıslak SBS sonuçları [17]

	Oda sıcaklığı/Kuru			Sıcak/Islak			
Kür çevrimi no	Dayanım (MPa)	Standart Sapma (MPa)	COV(%)	Dayanım (MPa)	Standart Sapma (MPa)	COV(%)	Azalma(%)
1	91,01	0,72	0,79	61,03	1,10	1,80	32,93
2	88,54	2,88	3,25	60,32	1,07	1,77	31,88
3	89,85	2,70	3,00	58,37	1,35	2,31	35,03
4	90,78	2,39	2,63	56,67	2,38	4,21	37,57
5	81,38	2,55	3,14	48,41	0,97	2,01	40,51
6	90,72	3,89	4,28	58,83	1,05	1,79	35,15
7	89,71	3,05	3,40	58,92	1,18	2,00	34,32
8	87,16	4,90	5,62	57,06	2,19	3,83	34,54
9	84,84	7,93	9,35	56,09	3,88	6,91	33,89
10	90,32	4,89	5,42	58,28	1,41	2,41	35,47
11	79,42	10,2	12,84	55,4	3,73	6,74	30,24
12	77,29	14,85	19,22	53,03	7,63	14,39	31,39
13	68,12	19,89	29,20	51,46	9,18	17,84	24,46
14	28,07	12,72	45,31	20,35	7,98	39,20	27,49

Kürleme sıcaklığı, kürleme basıncı ve vakum uygulama süresinin ticari bir karbon fiber prepreg olan Cycom IM7/977-2 UD tapenin termal özellikleri, gözenekliliği ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılmasından elde edilen sonuçlar sunulmuştur. İlgilenilen mekanik özellik, RT/D ve H/W'da SBS mukavemetidir. Bu çalışma için on dört kür çevrimi tasarlanmıştır. 1'den 5'e kadar kür çevrimleri izotermal kürleme sıcaklığı değişiminin etkisi, 6'dan 8'e kadar kürleme döngüleri otoklav basıncı değişiminin etkisi ve 9'dan 14'e kadar kürleme döngüleri otoklav basıncı değişiminin yanı sıra vakumun birleşik etkisi incelenmiştir. Panel 1 ile 4 için kürlenmiş laminatların gözenekliliğinin ve SBS mukavemetinin, nispeten geniş bir kürleme sıcaklığı aralığı boyunca (RT/D mukavemeti için 160°C ile 182°C ve H/W mukavemeti için 171°C ile 182°C) önemli ölçüde değişmediği de bulunmuştur. Panel 7'nin kürleme basıncı (276 kPa) panel 6'nın (552 kPa) yarısı kadar

olmasına rağmen, panel 6 ve 7'nin gözenekliliği ve ortalama SBS mukavemeti önemli ölçüde değişmemiştir. Bu, işlem spesifikasyonlarından daha düşük sıcaklıklarda veya basınçlarda kürlenseler bile yine de kabul edilebilir mekanik özelliklere ulaşabileceklerini göstermektedir. Ancak belli bir noktadan sonra hem kür sıcaklığının hem de kür basıncının düşürülmesiyle ortalama H/W ve RT/D SBS mukavemetinde azalma eğilimi gözlenmiştir. SBS mukavemetinin karşılaştırılması, H/W SBS mukavemetinin kürleme basıncı değişiminden ziyade sıcaklık değişimine daha duyarlı olduğunu göstermiştir. Özetle kırılan SBS numunelerinin incelenmesi, kürleme sıcaklığının ve kürleme basıncının düşürülmesiyle hem H/W hem de RT/D SBS arıza modlarında bir değişiklik olduğunu göstermiştir. Ancak farklı kür sıcaklıklarında kürlenen numunelerde hasar modu değişimi daha baskın olmuştur [17].

Uzay ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada farklı üretim yöntemlerinin karbon/epoksi kompozit plakaların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerini araştırmıştır. Bunun için fiziksel ve mekanik karakterizasyon testleri koşulmuştur. Düz (plain) dokunmuş karbon fiber kumaşlar ve polimer matris olarak epoksi reçine kullanılarak kompozit plakalar üretilmiştir. Kumaşlar 200 $g.m^{-2}$ alan yoğunluğuna ve 0,2 mm kat kalınlığına sahiptir. Fiberler sürekli ve 1790 $kg.m^{-3}$ yoğunluğa, 3800 MPa çekme mukavemetine, %1,6 uzama ve 240 GPa çekme modülüne sahiptir. Matris, ağırlıkça 100:25'lik bir reçine (MGS L160)/sertleştirici (MGS H160) oranıyla hazırlanmıştır ve üreticinin teknik veri sayfasına göre yoğunluğu yaklaşık 1190 $kg.m^{-3}$, çekme mukavemeti, çekme modülü, eğilme mukavemeti ve yüzde uzama sırasıyla yaklaşık 75 MPa, 3,4 GPa, 125 MPa ve %4,5'tir. Islak serim elle yatırma, basma kalıplama ve ıslak serim elle yatırma/vakum torbalama olmak üzere üç farklı üretim yöntemi uygulanmıştır. Üretilen kompozit plakaların fiber hacim oranı (V_f) değerleri yanma testleri ile belirlenmiştir. Testler ASTM D 3171 – 99 standardının sağladığı prosedüre göre kül fırınında 500°C sıcaklıkta bir saatte gerçekleştirilmiştir. Fiber ve matrisin ağırlık oranları, ilk numunenin kütlesi ile yanma testi sonrasındaki fiber kütlesi arasındaki farka dayalı olarak hesaplanmıştır. Eşitlik 3.1, V_f değerlerini belirlemek için kullanılmıştır [49].

$$V_f = \frac{{}^{W_f}/_{\rho_f}}{\left({}^{W_f}/_{\rho_f}\right)+\left({}^{W_m}/_{\rho_m}\right)} \tag{3.1}$$

Koşulan testler neticesinde elde edilen sonuçlar ise Çizelge 3.10'da verildiği gibidir.

Çizelge 3.10. Kompozit plakaların farklı üretim yöntemlerine göre Vf değerleri [49]

No	Üretim Yöntemi	Fiber Hacim Oranı (%)
1	Islak serim elle yatırma	34
2	Düşük kapasiteli vakum torbalama	38
3	Basma kalıplama	45
4	Yüksek kapasiteli vakum torbalama	50

Kompozit plakaların her biri için gerçek ve teorik yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Gerçek (deneysel) yoğunluğu belirlemek için kontrol numunesinin kütlesi ve hacmi 10^{-4}'lük hassas bir ölçekle hassas bir şekilde ölçülmüştür. Daha sonra teorik yoğunluk Eşitlik 3.2'ye göre hesaplanmıştır [49].

$$\rho_{ct} = \rho_f V_f + \rho_m(1 - V_f) \tag{3.2}$$

Gerçek ve teorik yoğunluk değerleri arasındaki yüzde fark, kompozit plakalar içindeki boşluk içeriğini verir. Boşluğun belirlenmesi Eşitlik 3.3'e göre yapılmıştır. Burada ρ_{exp} (kg.m^{-3}) numunenin ölçülen deneysel kompozit yoğunluğudur ve V_v (hacim%) plaka içindeki boşluk miktarıdır [49].

$$V_v = \frac{\rho_{ct} - \rho_{exp}}{\rho_{ct}} \tag{3.3}$$

Çekme testleri ASTM D 3039 standardına uygun olarak yapılmıştır ve numune boyutları 250x15 mm (uzunluk x genişlik)'dir. İstenmeyen hata modlarını önlemek için E-cam elyaf/epoksi kompozit plakalardan üretilen tab elemanları kullanılmıştır. Testler Instron 8801 üniversal test makinesi ile gerçekleştirilmiş ve kafa hızı 2 mm.dk^{-1}'ya ayarlanmıştır. Beş numune çekme testine tabi tutulurken geri kalan numuneler yoğunluk ve V_f ölçümleri için kullanılmıştır. Üç nokta eğilme testleri, Instron 8801 üniversal test makinesi kullanılarak ASTM 7264 Standardına göre 1 mm.dk^{-1} kafa hızında gerçekleştirilmiştir. 100x13 mm (uzunluk x genişlik) numune ölçüsüdür. Üç nokta eğilme testlerinde açıklık-kalınlık oranı ASTM standardının önerdiği gibi 60:1 olup, kompozit plakalar için yapılan testler sırasında açıklık uzunluğu oranı sabit tutacak şekilde numune kalınlığına göre ayarlanmıştır [49].

Çizelge 3.11. Numunelerin kalınlığı ve açıklık uzunluğu [49]

Üretim Yöntemi	V_f (%)	Kalınlık (mm)	Açıklık (mm)
Islak serim elle yatırma	34	1,195	71,70
Düşük kapasiteli vakum torbalama	38	1,030	61,08
Basma kalıplama	45	0,900	54,00
Yüksek kapasiteli vakum torbalama	50	0,820	49,20

Farklı üretim yöntemleri kullanılarak üretilen numunelerin kalınlığı ve açıklığı Çizelge 3.11'de bir arada verilmiştir. Kompozitlerin boşluk içeriği ise Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Üretim yöntemlerine göre kompozit plakaların boşluk içeriği [49]

Üretim Yöntemi	V_f (%)	Boşluk (%)
Islak serim elle yatırma	34	7,43
Düşük kapasiteli vakum torbalama	38	6,87
Basma kalıplama	45	2,63
Yüksek kapasiteli vakum torbalama	50	1,36

Üretim yöntemi, lamine kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Yüksek fiber hacim oranı (V_f) değeri ile üretilen kompozitler daha az boşluk içeriği, daha yüksek yoğunluk ve daha iyi fiber ve matris ara yüzey dayanımı sağlayarak fiber ve matris arasında daha düzgün bir yük dağılımına ve daha yüksek mekanik özelliklere yol açmıştır. Bu nedenle V_f değeri kompozit ürün kalitesinin güçlü bir göstergesidir. %38-45 V_f aralığında laminat yoğunluğundaki artış oranı çok yüksektir. Aynı aralıkta boşluk oluşumundaki azalma oranı çok yüksektir. Hem basma kalıplama hem de yüksek kapasiteli vakum torbalama yeterli sıkıştırma basıncı ve verimli reçine akışı sağlamıştır. Elle yatırma yöntemiyle karşılaştırıldığında düşük kapasiteli vakum torbalama, basma kalıplama ve yüksek kapasiteli vakum torbalamadaki boşluk içeriğindeki azalma sırasıyla %7,54, %64,60 ve %81,70 olmuştur. Gerçek ve teorik yoğunluklar arasındaki fark V_f değeri arttıkça daha da azalmıştır. Kompozitlerin spesifik çekme ve eğilme modülü HVB>CM>LVB>HL olarak elde edilmiştir. Spesifik çekme dayanımları HVB>CM>LVB>HL sırasına göre elde edilirken, spesifik eğilme dayanımları HVB>CM>HL>LVB sıralaması şeklinde tezahür etmiştir. İki farklı vakumlu torbalamanın uygulanması, sıkıştırma basıncındaki artışın reçine akışına, yüksek V_f'ye ve kompozit yapılardaki boşlukların azaltılmasına katkıda bulunduğunu göstermiştir. Kompozit plakalar içindeki boşluklar daha düşük mekanik özellikler, daha düşük matris ağırlıklı özelliklere yol açar. Bu da arayüzey mukavemetini,

delaminasyonu olumsuz etkiler ve fiber matris ayrılmasına sebep olur. Bu tür kompozitler aynı zamanda nem emilimi gibi çevresel etkilere de duyarlıdır. Bu nedenle, daha düşük boşluk içeriği ve daha yüksek V_f ile sonuçlanan optimize edilmiş bir üretim tekniğinin uygulanması esastır [49].

Sun ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada farklı proses koşulları altında hazırlanan UD karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin ILSS değerlerini araştırmışlardır. Bu çalışmada sıcak pres kalıplama yöntemi kullanılmıştır. ILSS'i fiber ve matris arasındaki arayüzey yapışmasını ölçmek için önemli bir gösterge olduğunu vurgulayan yazarlar, numune hazırlamada üç ana faktör olarak kalıplama işlemindeki basınç, kompozitin fiber içeriği ve numune hazırlama işlemine vakum işlemi eklenip eklenmemesi seçilmiştir. Yüksek basınç altında hazırlanan numunelerin düşük ILSS değerleri sunduğunu, ancak basınçsız hazırlanan numunenin test için uygun olmadığını ve optimum basıncın 0.5 MPa olduğunu bulmuşlardır. Daha düşük fiber içeriğinde hazırlanan numune de test için uygun olmamıştır. Optimum fiber oranı ağırlıkça %60 bulunmuştur ve bu oranın üzerine çıkıldığında ILSS değerinin düştüğü görülmüştür. ILSS değeri, ön kürlemeye vakum uygulaması eklenerek önemli ölçüde arttırılmıştır. Matris reçinesi, 10: 1: 2 kütle oranında epoksi reçinesi E51, teta ve asetonun bir karışımıdır. Hizalanmış fiberler, elle yatırma işlemi ile matris reçinesiyle emprenye edilmiştir. Reçine emprenye edilmiş karbon fiber, bir fırında 0,5 saat 60°C'de ön kürlenmiştir. Bundan sonra, ön kürlenmiş numuneler fırından çıkarılmış, uygun boyuta kesilmiş ve kompozitler üretmek için bir kalıp içine yerleştirilmiştir. Kürleme işlemi 30 dk boyunca 80°C'de, daha sonra 120°C'ye yükselmiş ve 10 dk boyunca sabit tutulmuştur. 30 dk boyunca 0.5MPa basınç uygulanmış, daha sonra sıcaklığın 120°C'de tutulması koşuluyla 1,5 saat boyunca 1 MPa'ya yükseltilmiştir. Kürleme işlemi bittiğinde, kalıp doğal yollarla oda sıcaklığına soğutulmuştur. Hazırlanan kompozitlerin fiber ağırlık oranı %60 civarındadır. Numuneler yarı otomatik kesme makinesi kullanılarak standart numune boyutlarına kesilmiştir. Standart ISO 14130: 1997, IDT'ye (JC/T 773-2010) göre, üç noktalı kısa kiriş bükme testi kullanılarak, numunelerin (20 x 10 x 2 mm^3) ILSS değerleri universal bir test makinesi ile test edilmiştir. Kafa hızı 1,0 mm/dk ve her deney durumu için sekiz numune test edilmiştir. Vakum senaryolarından biri vakum işlemini ön kürlemede yapmak, diğeri ise, birinci yol temelinde post-kürlenmeden önce kalıbın 1 saat için numune ile vakumlamasıdır. Vakum olmadan hazırlanan numuneler için, maksimum ILSS değeri 52,8 MPa'dır. Vakumla birlikte bu değer 65,94 MPa'ya kadar ulaşmıştır. Ön kürleme işlemine vakum işleminin eklenmesinin numunenin ILSS değerini önemli ölçüde arttırdığı, post-

kürleme işleminden önce kalıbın numune ile vakumlanıp vakumlanmaması arasında önemli bir fark olmadığı açıkça görülmektedir [57].

Alavi-Soltani ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada farklı izotermal kür sıcaklıklarında kürlenen polimer kompozitin termal, reolojik ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Malzeme olarak ticari karbon fiber epoksi prepreg, Cycom 977-2 UD kullanılmıştır. CLC ve SBS testlerinde kullanılmak üzere Çizelge 3.13'te gösterilen kür çevrimleri ile kürlenmiş plakalardan her çevrim için beşer adet numune kesilmiştir. Plakanın üretimi için $[(0/90/90/0)_8]$ serim düzenine göre simetrik olarak 32 ply prepreg serilmiştir [22].

Çizelge 3.13. Çalışmada kullanılan kür çevrimleri [22]

Kür Sıcaklığı (°C)	Kür Süresi(dk)	Isıtma Hızı(°C/dk)	Soğutma Hızı(°C/dk)
182	180	2,8	2,8
177[a]	180	2,8	2,8
171	180	2,8	2,8
160	180	2,8	2,8
149	180	2,8	2,8

[a] Üreticinin tavsiye ettiği kür çevrimi

Numunelerin kürlenme derecesini tespit etmek için DSC testi; T_g değerlerini tespit etmek için reometri testi koşulmuştur. Çalışmada polimer kompozitlerin kürlenmesinde otoklav kullanılmıştır. Kürleme basıncı tüm çevrimler için sabit 586 kPa seçilmiştir. SBS testi sonuçlarına göre 149°C'de kürlenen numunelerin SBS dayanımı ortalaması 160-180°C arasında kürlenen numunelerin sonuçlarına göre %10 daha azdır. Ayrıca 149°C'de kürlenen numunenin SBS testinde gösterdiği hata modu da diğer çevrimlerin gösterdiğinden farklı olmuştur. 149°C numunelerinde tabakalar arası kayma hata modu görülmüştür. Fiber kırılması iç tabakalarda bir yerde gerçekleşmiştir. 160-180°C arası kürlenen numunelerde ise basma hata modu görülmüştür. Fiber kırılması numunenin basma yüküne maruz kalan üst kısmından başlamış alt tabakalara doğru yayılmıştır. CLC basma testinde ise hata modlarında bir farklılık görülmemiştir. Bunda basma test düzeneğinin etkisi olabileceği bildirilmiştir. Basma dayanımları arasında anlamlı bir farklılık olmasa da sıcaklık düştükçe basma dayanımının kademeli olarak biraz düştüğü görülmüştür. Basma modülünün ise farklı kür çevrimleriyle birlikte anlamlı bir farklılık göstermediği, neredeyse aynı kaldığı görülmüştür. T_g değerinin ise 171-182°C arası kürlenen numunelerde izotermal kür sıcaklığına yakın değerler elde edilmiştir. Ancak 149-160°C'de kürlenen numunelerde ise

kür sıcaklığının altında bir T_g değerleri elde edilmiştir. Sonuçlardan yola çıkarak SBS mukavemeti ile Depolama modülü arasında güçlü sayılabilecek bir korelasyonun olduğu görülmüştür. T_g ve kürlenme derecesi ile ise zayıf korelasyon görülmüştür. T_g ile kürlenme derecesi arasında ise yine güçlü bir korelasyonun mevcut olduğu tespit edilmiştir. 977-2 UD'nin nihai viskoelastik ve mekanik özellikleri, 160°C ile 182°C arasında değişen izotermal kür sıcaklıklarında önemli ölçüde değişmemiştir. Bu durum, kür sıcaklığı değişimi nedeniyle reddedilebilecek kompozit malzemelerin, satıcının spesifikasyonlarından daha düşük sıcaklıklarda kürlenmiş olsalar bile yine de kabul edilebilir mekanik özelliklere ulaşabileceğini göstermektedir [22].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, kompozit numunelerin imalinde kullanılan malzemeler ve tercih edilen üretim yöntemi açıklanmıştır. Bununla birlikte numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için koşulan testler anlatılmıştır.

4.1. Malzeme

4.1.1. Kompozit malzemeler

Bu çalışma kapsamında, kompozit numunelerin üretiminde Resim 4.1'de paylaşılan takviye elemanı olarak karbon fiberden 2x2 twill tipinde dokunmuş kumaş ve matris malzeme olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Bu deneysel çalışmada kullanılan malzemeler TUSAŞ tarafından temin edilmiştir.



Resim 4.1. Kullanılan karbon fiber dokuma kumaş ve epoksi reçine

Karbon fiber kumaş Hexcel firmasının "43200 UE1250 105M" isimli ürünüdür. Epoksi reçine, Hexion firmasının EPIKOTE™ Resin MGS® LR285 LR 285 isimli ürünüdür. Kür ajanı (sertleştirici) ise yine aynı firmaya ait EPIKURE™ Curing Agent MGS® LH287 ürünüdür. Tezin bundan sonraki kısmında saf reçine LR 285 ve sertleştirici LH 287 olarak anılacaktır. Bu ürünlerin teknik veri sayfalarından alınmış bazı teknik özelliklerine aşağıdaki çizelgelerde yer verilmiştir. Çizelge 4.1'de kumaşın özelliklerine yer verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kullanılan karbon elyaftan dokunmuş kumaşın özellikleri

Özellik	Değer
Alan ağırlığı	200 g/m^2
Aktı	HexTow AS4C GP 3K
Çözgü	HexTow AS4C GP 3K
Dokuma stili	TWILL 2/2
Dokuma sıklığı	5 iplik/cm
Ağırlık dağılımı	Aktı: %50 ve Çözgü: %50
Kalınlık	0,2 mm

Kumaşın dokumasında kullanılan PAN bazlı sürekli fiberlerin (HexTow AS4C GP 3K) özellikleri ise aşağıda listelenmiştir. Çizelge 4.2'de kumaşın dokumasında kullanılan fiberin özelliklerine yer verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kumaşın dokumasında kullanılan sürekli fiberin özellikleri

Tipik Elyaf Özellikleri	Değer
Çekme mukavemeti (MPa)	4646
Elastisite modülü (GPa)	231
Kopma uzaması (%)	1,8
Yoğunluk (g/cm^3)	1,78
Elyaf Çapı (µm)	6,9

Kompozit plaka üretiminde kullanılan epoksi reçine 2 parçalıdır. Saf reçinenin içerisine üreticinin tavsiye ettiği ağırlık oranında kür ajanı (sertleştirici) eklenmiştir. Bu oran 100:40'tır. Yani bu karıştırma oranına göre 100 birim ağırlıkta saf reçineye 40 birim ağırlıkta sertleştirici eklenip belirli bir süre homojenizasyon sağlanana kadar karıştırılacaktır. Karıştırma kabında hiçbir bulanıklık kalmayana kadar karıştırmaya devam edilmiş ve plastik karıştırma kabının duvarlarına ve tabanına özellikle dikkat edilmiştir. Saf reçine LR285 ve sertleştirici kür ajanı LH287'nin teknik verileri aşağıdaki tablolarda sunulmuştur. Reçine ve sertleştirici yukarıda belirtilen oranda karıştırıldıktan sonra karışım 1,1211 g/cm^3 yoğunluğa sahip olmaktadır.

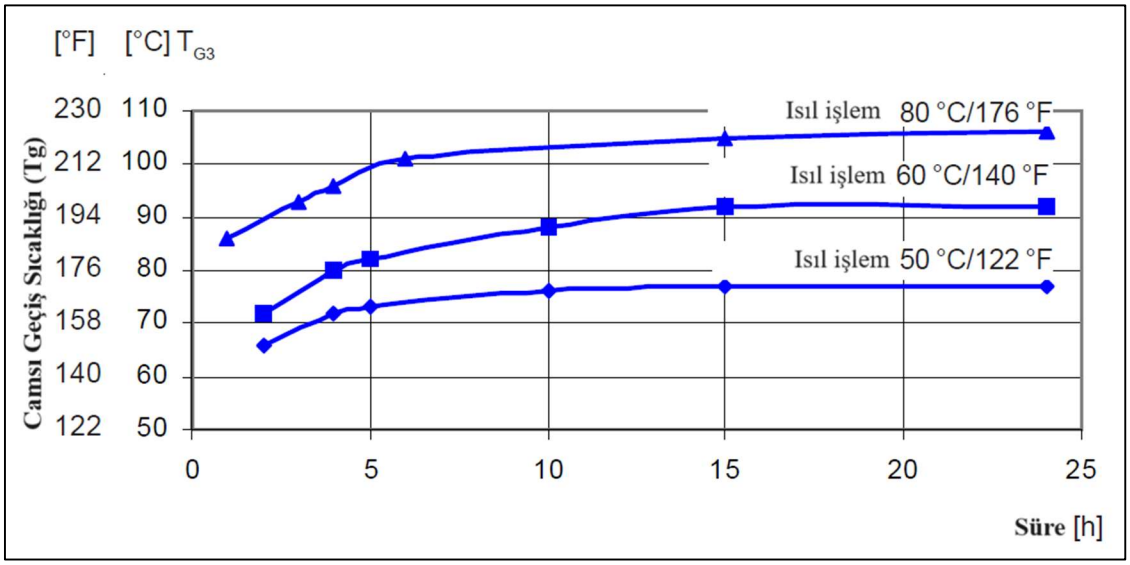
Çizelge 4.3. Saf reçine LR285 özellikleri

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm^3)	1,205
Viskozite (mPa.s)	600 - 900
Epoksi Eşdeğeri (g/eşdeğer)	155 - 170
Epoksi Değeri (eşdeğer/100g)	0,59 - 0,65
Kırılım indeksi	1,525 - 1,530
Eğilme Mukavemeti (N/mm^2)	110 - 120
Elastisite Modülü (kN/mm^2)	3 - 3,3
Çekme Mukavemeti (N/mm^2)	70 - 80
Basma Mukavemeti (N/mm^2)	120 - 140
Kopma Uzaması (%)	5 - 6,5
Darbe Dayanımı (KJ/m^2)	45 - 55

Bu tez çalışmasında kullanılan LR285 saf reçinenin özelliklerine Çizelge 4.3'te yer verilmiştir. Saf reçineye katılan sertleştirici LH287'nin özelliklerine ise Çizelge 4.4'te yer verilmiştir.

Çizelge 4.4. Sertleştirici kür ajanı LH287

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm^3)	0,955
Viskozite (mPa.s)	50 - 100
Kırılım indeksi	1,5020 - 1,55



Şekil 4.1. LR 285+LH287 epoksi seti Tg değişim grafiği

Şekil 4.1'de epoksi reçine üreticisi Hexion, LR 285+LH287 setinin farklı sıcaklıklarda post-kürlenmesi sonucunda elde ettikleri T_g değerlerini grafik halinde sunmuştur. Post-kür öncesi başlangıç kürlemesi tüm numuneler için oda sıcaklığında 24 saatte tamamlandığı belirtilmiştir.

4.1.2. Yardımcı malzemeler

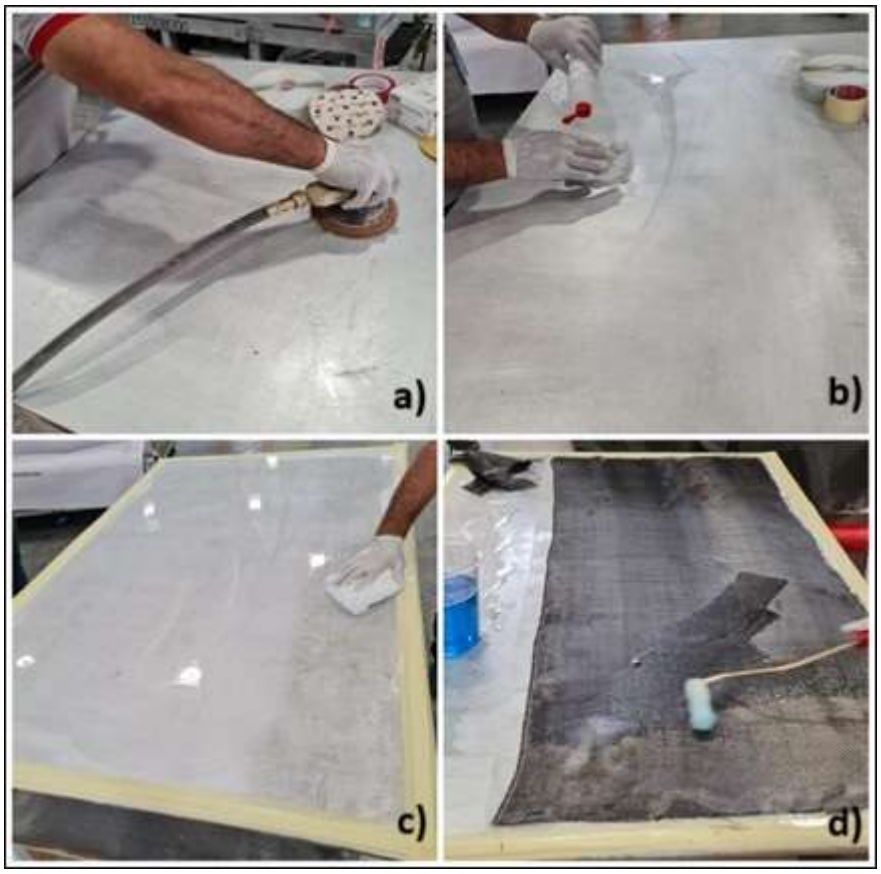
Bu tez çalışması kapsamında üretimi yapılan kompozit plakanın üretim sürecinde birçok sarf malzeme kullanılmıştır. Kalıp ayırıcı olarak sıvı bir kimyasal kullanılmıştır. Kalıp yüzeyine yatay ve dikey eksende on beşer dakika arayla uygulanmıştır. Kalıp yüzeyini temizlemede organik solvent olarak M.E.K (Metil Etil Keton) kullanılmıştır. Kalıp yüzey hazırlığı P120 kum inceliğinde disk zımpara kullanılmıştır. Soyma kumaşı kompozit laminasyonun her iki yüzüne de uygulanmıştır. Ayırıcı filmlerin birçok çeşidi vardır. Bunlardan bazıları delikli bazıları deliksizdir. Bu çalışmada delikli ayırıcı film kullanılmıştır. Vakum battaniyesi fazla reçineyi emmek ve düzgün bir hava akışı oluşturması için kullanılmıştır. Serimi tamamlanan karbon kumaş ve reçine sisteminin atmosferle olan temasını kesmek ve vakum oluşturabilmek için kalıp çevresi boyunca vakum sızdırmazlık bandı kullanılmıştır. Kalıbın üstü vakum torbası kullanılarak kapatılmıştır. Ön kürlenme sırasında sıcaklık verilerinin takibi için T tipi ısıl çift kullanılmıştır.

4.2. Islak Serim Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Plaka Üretimi

Bu tez çalışması kapsamında, kompozit üretim yöntemi olarak ıslak serim vakum torbalama yöntemi seçilmiştir. Bu yöntemin avantajlı ve dezavantajlı yönleri giriş ve literatür araştırması bölümlerinde etraflıca tartışılmıştır. Kompozit plakaların üretim prosesleri TUSAŞ tesislerinde yürütülmüştür.

Kompozit plaka üretiminde öncelikle hedef kalınlığı (2±0,2 mm) yakalamak için karbon fiberden dokunmuş kumaş belirlenmiş ölçülerde 9 kat olacak şekilde ($[0^{\circ}]_9$) kesilmiştir. Serimin yapılacağı alüminyum kalıp yüzeyi serim öncesinde zımparalanarak ve organik solvent ile silinerek hazırlanmıştır. Ardından kalıp ayırıcı kimyasalı kalıp yüzeyine 2 kat ve her kat arası 15 dk kuruması için beklenerek uygulanmıştır. Ardından karışım işlemi tamamlanmış epoksi reçine kalıp yüzeyine rulo yardımıyla uygulanarak önce soyma kumaşı ardından karbon kumaşların serimine başlanmıştır. 9 kat karbon kumaş serilmiştir. Her

kattaki kumaş yüzeyinde eşit reçine dağılımını sağlamak ve katmanlar arası hava kabarcıklarını gidermek için rulo ve spatula ile geçilmiştir. Resim 4.2 ve Resim 4.3'te bu aşamalara ait fotoğraflara yer verilmiştir.



Resim 4.2. Serim a) zımpara b) ayırıcı dökme c) ayırıcı uygulaması d) kumaş serimi

Her katta tekrarlanan karbon kumaş ve reçine uygulaması ardından 9. Katın sonunda soyma kumaşı yine reçineyle birlikte uygulanmıştır. Daha sonra delikli ayırıcı film ve vakum battaniyesi serilmiştir. Resim 4.3'te bu aşamalara ait fotoğraflara yer verilmiştir.



Resim 4.3. Serim a) reçine b) soyma kumaşı c) ayırıcı film d) vakum battaniyesi

Vakum battaniyesinin ardından vakum torbası uygulanmıştır. Battaniyenin üzerine 2 ayrı köşeye konumlandırılan vakum portları için vakum torbasında uygun delikler açılmış ve portlar bağlanmıştır. Bu vakum portlarına bağlı hortumlar bir basınç regülatörüne bağlanmış ve vakum basıncı -0,8 bar olarak ayarlanmıştır. Resim 4.4'te bu aşamalara ait fotoğraflara yer verilmiştir.



Resim 4.4. Serim a) vakum torbası b) portlar c) basınç regülatörü d) 0,8 bar ayarı

Kompozit serimi 24 saat vakum altında bekletilmiş, ardından vakumdan sökülüp 45 °C'de 4 saat ön kürleme yapılmak üzere fırına gönderilmiştir. Fırından çıkarıldıktan sonra kalıptan sökülen kompozit plaka daire testere tezgahında 300x500 mm boyutlarda kesilmiştir. Resim 4.5'te bu aşamalara ait fotoğraflara yer verilmiştir. Kesilen 9 adet özdeş plaka farklı kür çevrimlerinde kontrollü bir biçimde kürlenmek üzere otoklava gönderilmiştir. Çizelge 4.5'te belirlenmiş kür çevrimleri otoklav sistemine kürleme işleminden önce otoklav otomasyon sistemine tanımlanmıştır.



Resim 4.5. Ön kürleme a) fırına yerleştirme b) ısıl çift c) kalıptan çıkarma d) kesim

Büyük kompozit plakadan kesilen bu küçük dokuz plaka otoklavda dokuz farklı kür çevrimiyle kontrollü olarak kürlenmiştir. Otoklavda herhangi bir kür basıncı kullanılmamıştır. İleride gerçekleştirilecek benzer konudaki çalışmalarda otoklav yerine kontrollü bir fırın da tercih edilebilir.

Çizelge 4.5. Otoklavda 9 ayrı test plakasına uygulanan 9 farklı kür çevrimi

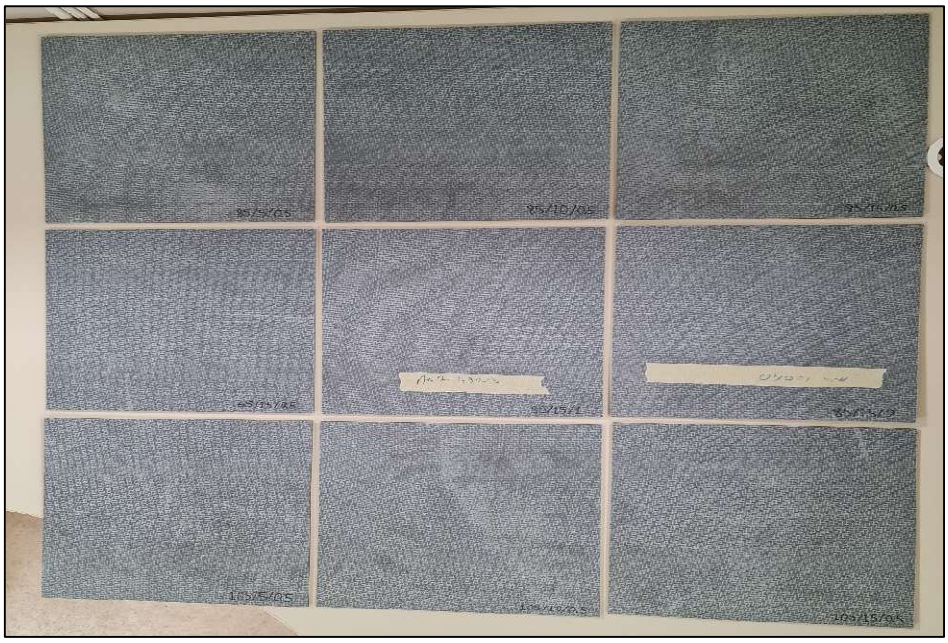
Kür Çevrimleri					
Kür Çevrimi No	Markalama	Kür Sıcaklığı(°C)	Bekleme Süresi (saat)	Isıtma hızı(°C/dk)	Soğuma hızı(°C/dk)
2	65/15/0,5	65 ± 5	15	0,5	1
3	85/15/0,5	85 ± 5	15	0,5	1
4	105/15/0,5	105 ± 5	15	0,5	1
5	85/15/1	85 ± 5	15	1	1
6	85/15/2	85 ± 5	15	2	1
7	85/5/0,5	85 ± 5	5	0,5	1
8	85/10/0,5	85 ± 5	10	0,5	1
9	105/5/0,5	105 ± 5	5	0,5	1
10	105/10/0,5	105 ± 5	10	0,5	1

Plakalar, Resim 4.6’da gösterilen otoklavda kontrollü olarak kürlenmiştir.



Resim 4.6. Plakaların kürlenmesinde kullanılan otoklav

Resim 4.7’de gösterilen kürleme işlemi tamamlanmış plakalar otoklavdan çıkarılmış, bu tez çalışması için kullanılmak üzere seçilen standartların istediği ölçülerde test numunelerinin kesilerek hazırlanması için dairesel testere tezgahına gönderilmiştir.



Resim 4.7. Otoklavda kürlemesi yapılmış kompozit plakalar

4.3. Basma Testi

Basma testi EN 2850 standardı referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Standartta yer alan B_1 tipi test numunesi hazırlanmıştır. Standart B_1 tipi numunede tab kullanımını şart koştuğu için yine aynı malzeme ve yönelimde karbon fiberden tabler imal edilmiş ve ikincil birleştirme yöntemi ile farklı kür çevrimlerinde kürlenmiş test plakalarına Loctite EA 9396 AERO epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Tab kullanımı sayesinde uçtan yüklemeli basma(end loading compression) deney düzeneği kullanılarak basma mukavemeti elde edilebilmiştir. Test her kür çevrimi seti için EN 2850 standardına uygun olarak en az 5 adet numune ile koşulmuştur.

Çizelge 4.6. Basma testi numune özellikleri

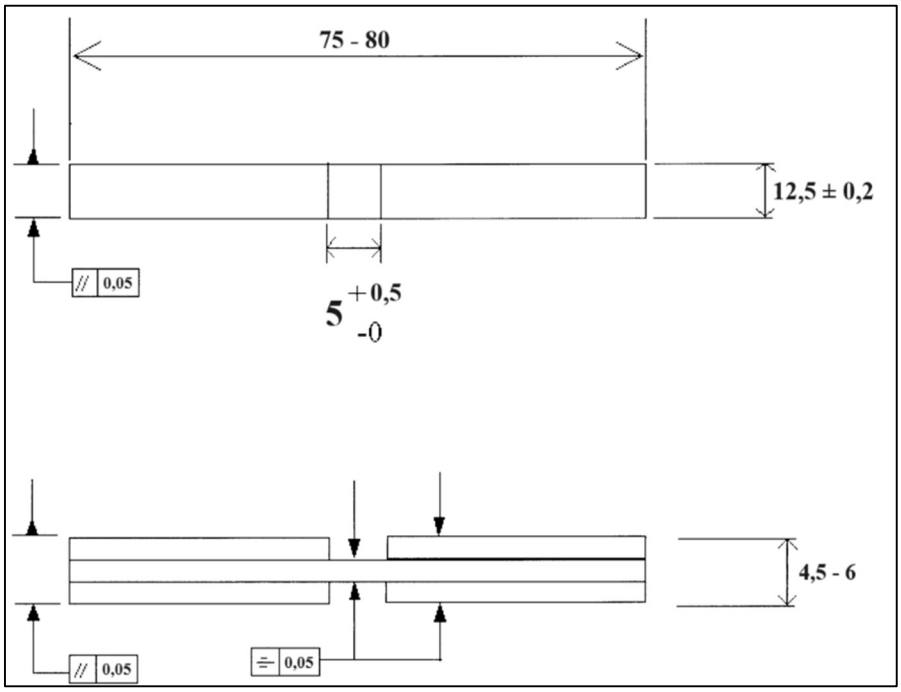
Test Numunesi						
Basma Mukavemeti/Modülü	Standart	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	# Ply	Ply Oryantasyonu
	EN 2850	75 to 80	12,5±0.2	2.0 ± 0.2	9	0°

Basma testi numunelerinin ebat ve serim bilgilerine Çizelge 4.6'da yer verilmiştir. Bununla birlikte her bir numunenin tanımlama bilgilerine Çizelge 4.7'de yer verilmiştir.

Çizelge 4.7. Basma testi numunelerinin tanımlanması/markalanması

Kür Çevrimi No	Plaka	Yön	Numune
2	65/15/0,5	0°	C2-1'den C2-8'a kadar
3	85/15/0,5	0°	C3-1'den C3-8'a kadar
4	105/15/0,5	0°	C4-1'den C4-8'a kadar
5	85/15/1	0°	C5-1'den C5-7'a kadar
6	85/15/2	0°	C6-1'den C6-8'a kadar
7	85/5/0,5	0°	C7-1'den C7-8'a kadar
8	85/10/0,5	0°	C8-1'den C8-8'a kadar
9	105/5/0,5	0°	C9-1'den C9-8'a kadar
10	105/10/0,5	0°	C10-1'den C10-8'a kadar

Basma numunelerinin tab yapıştırıldıktan sonraki boyutlarına Şekil 4.2'de yer verilmiştir.



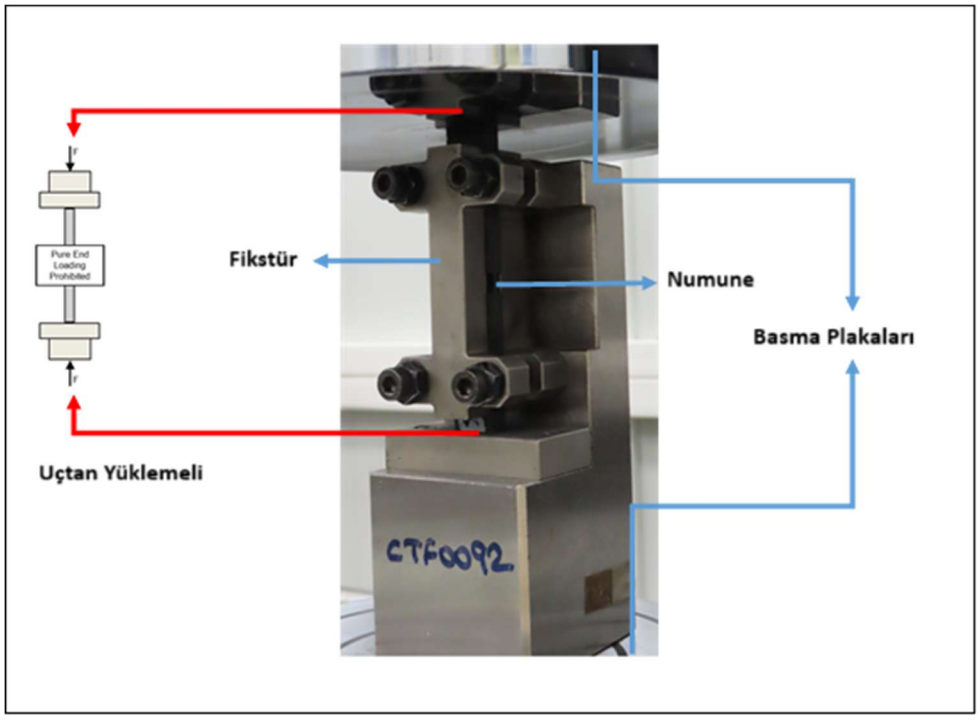
Şekil 4.2. Basma numunesi ölçüleri (mm)

Teste hazır basma numunelerinden bazılarının fotoğrafına Resim 4.8'de yer verilmiştir.



Resim 4.8. Altıncı kür çevrimine ait basma testi numuneleri, C6-1'den C6-8'a kadar

Basma testleri, TUSAŞ Mekanik Test Laboratuvarı'nda, 23 ± 2°C ve 50 ± 5% RH laboratuvar koşullarında, EN 2850 standardının Metod-B'sine göre INSTRON 5985 test makinesiyle, 1,00 mm/dk kafa ilerleme hızında, test parçasının yalnızca doğrudan uçtan yüklenmesiyle (direct end loading) gerçekleştirilmiştir. Resim 4.9'da basma testinin gerçekleştiği test düzeneğinin fotoğrafına yer verilmiştir.



Resim 4.9. EN 2850 standardına göre yapılan basma testinin düzeneği

4.4. ILSS Testi

ILSS deneyi EN 2563 standardı referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Test her kür çevrimi seti için 5 adet numune ile koşulmuştur.

Çizelge 4.8. ILSS testi numunesi özellikleri

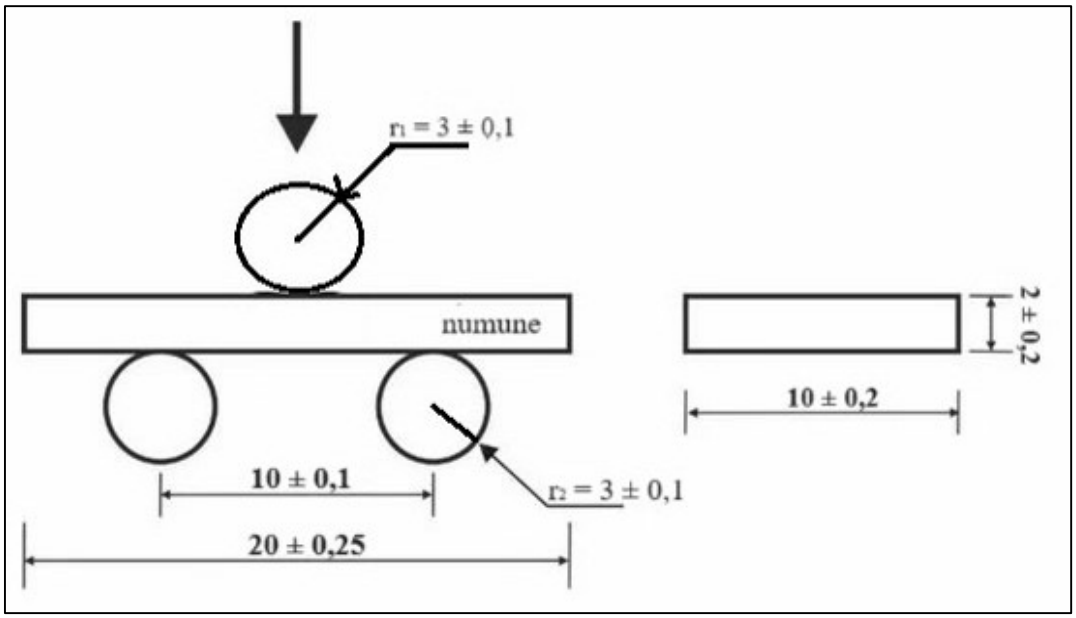
Test Numunesi						
ILSS	Standart	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	# Ply	Ply Oryantasyonu
	EN 2563	20 ± 0.25	10± 0.2	2.0 ± 0.2	9	0°

ILSS testi numunelerinin ebat ve serim bilgilerine Çizelge 4.8'de yer verilmiştir. Bununla birlikte her bir numunenin tanımlama bilgilerine Çizelge 4.9'de yer verilmiştir.

Çizelge 4.9. ILSS testi numunelerinin tanımlanması/markalanması

Kür Çevrimi No	Plaka	Yön	Numune
2	65/15/0,5	0°	L2-1'den L2-5'e kadar
3	85/15/0,5	0°	L3-1'den L3-5'e kadar
4	105/15/0,5	0°	L4-1'den L4-5'e kadar
5	85/15/1	0°	L5-1'den L5-5'e kadar
6	85/15/2	0°	L6-1'den L6-5'e kadar
7	85/5/0,5	0°	L7-1'den L7-5'e kadar
8	85/10/0,5	0°	L8-1'den L8-5'e kadar
9	105/5/0,5	0°	L9-1'den L9-5'e kadar
10	105/10/0,5	0°	L10-1'den L10-5'e kadar

ILSS test numunesi ve testte kullanılan destek silindirlerinin ebatlarına Şekil 4.3'te yer verilmiştir.



Şekil 4.3. ILSS numunesi ölçüleri (mm)

ILSS veya τ(MPa) şu formülle bulunmuştur:

$$\tau = 0{,}75\frac{P_R}{b.h} \tag{4.1}$$

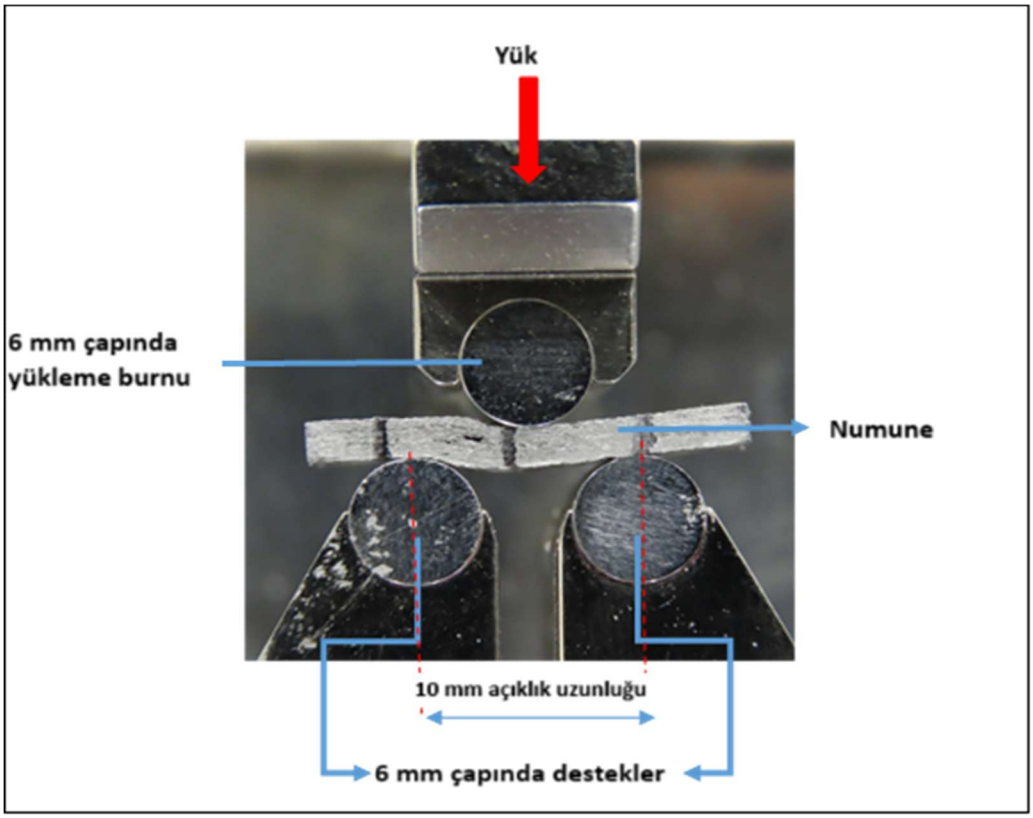
Bu denklemde P_R test sırasında ölçülen en yüksek kuvvet değeri (N), b numune genişliği (mm), h ise numune kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

ILSS testine hazır numunelerden bazılarının fotoğrafına Resim 4.10'da yer verilmiştir.



Resim 4.10. İkinci kür çevrimine ait ILSS test numuneleri, L2-1'den L2-5'a kadar

ILSS testleri, TUSAŞ Mekanik Test Laboratuvarı'nda, 23 ± 2°C ve 50 ± 5% RH laboratuvar koşullarında, EN 2563 standardına göre INSTRON 68TM test makinesiyle, 1.00 mm/dk kafa ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.11. EN2563 standardına göre yapılan ILSS testi düzeneği

ILSS test düzeneğine Resim 4.11'de yer verilmiştir.

4.5. DMA Deneyi

DMA deneyi EN 6032 standardı referans alınarak TUSAŞ Fizikokimyasal Test Laboratuvarı'ında TA Instruments DMA Q800 cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Test esnasında DMA test cihazı, çember içi sıcaklığını oda sıcaklığından 150°C' ye kadar dk'de 5°C hızında arttırmış ve 1 Hz frekansla salınım yapmıştır. Test her kür çevrimi seti için 3 adet numune ile koşulmuştur. Test edilen her numune için camsı geçiş sıcaklıkları (Tg-başlangıç ve Tg-kayıp) bulunmuştur. DMA testi numunelerinin ebat ve serim bilgilerine Çizelge 4.10'da yer verilmiştir.

Çizelge 4.10. DMA testi numunesi özellikleri

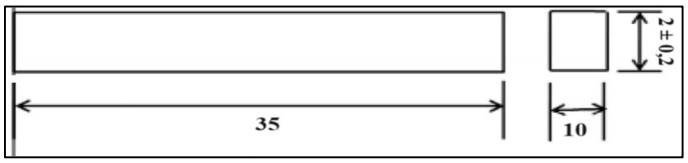
Test Numunesi						
Dinamik Mekanik Analiz (DMA)	Standart	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	# Ply	Ply Oryantasyonu
	EN 6032	35 ± 0.2	10± 0.2	2.0 ± 0.2	9	0°

DMA testi numunelerinin ebat ve serim bilgilerine Çizelge 4.10'da yer verilmiştir. Numunelerinin tanımlama bilgilerine ise Çizelge 4.11'de yer verilmiştir.

Çizelge 4.11. DMA testi numunelerinin tanımlanması/markalanması

Kür Çevrimi No	Plaka	Yön	Numune
2	65/15/0,5	0°	D2-1'den D2-3'e kadar
3	85/15/0,5	0°	D3-1'den D3-3'e kadar
4	105/15/0,5	0°	D4-1'den D4-3'e kadar
5	85/15/1	0°	D5-1'den D5-3'e kadar
6	85/15/2	0°	D6-1'den D6-3'e kadar
7	85/5/0,5	0°	D7-1'den D7-3'e kadar
8	85/10/0,5	0°	D8-1'den D8-3'e kadar
9	105/5/0,5	0°	D9-1'den D9-3'e kadar
10	105/10/0,5	0°	D10-1'den D10-3'e kadar

DMA numunelerinin ölçüleri Şekil 4.4'teki şematik gösterimde de paylaşılmıştır.



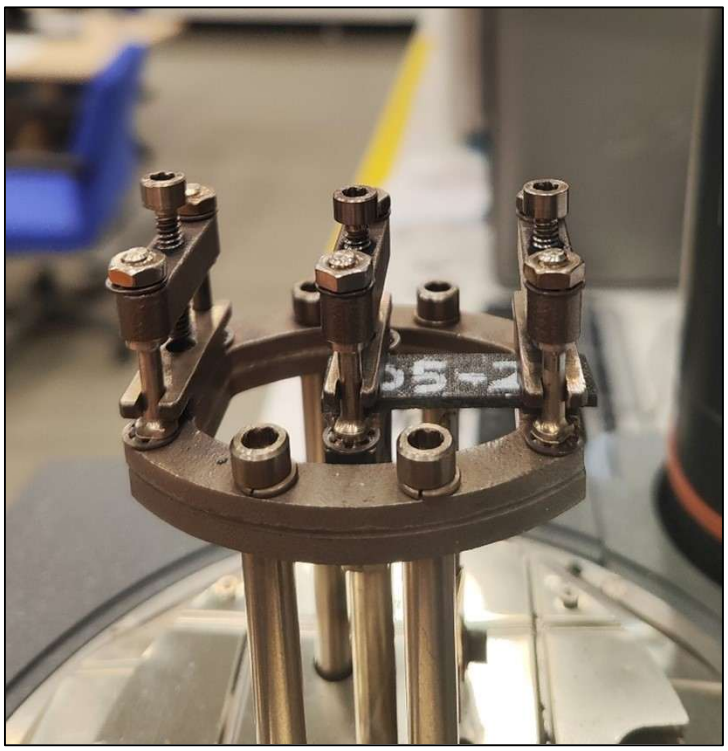
Şekil 4.4. DMA numunesi ölçüleri (mm)

DMA testine hazır bazı numunelerin fotoğraflarına Resim 4.12'de yer verilmiştir.



Resim 4.12. İkinci kür çevrimine ait DMA test numuneleri, D2-1'den D2-3'e kadar

Resim 4.13'te de görüleceği üzere DMA numuneleri tek konsollu sıkıştırma prensibiyle ilgili test düzeneğinde test edilmiştir.



Resim 4.13. EN6032 standardına göre yapılan DMA testi düzeneği

4.6. Yoğunluk Testi

Islak serim/vakum torbalama yöntemi ile üretilen ve farklı kür çevrimleri ile kürlenen kompozit plakaların yoğunluğu tespit edebilmek için ASTM D792 standardı referans alınarak esasen Archimedes prensibi yardımıyla ölçülmüştür. Test her kür çevrimi için FVC testi numuneleri ile FVC testi öncesi 3 tekrar koşulmuştur.

4.7. Fiber Hacim Oranı (FVC) Testi

Test EN 2564 standardına göre yapılmıştır. Fiber, matris ve boşluk hacim oranı kompozit numunenin sülfürik asit içinde çözülmesi, elyafın kurutulması, tartılması ve testten elde edilen değerlerin yardımıyla gerekli hesaplamaların yapılmasıyla tespit edilmiştir. Test aşağıdaki tabloda belirtilen kür çevrimleri için 3 adet numune ile koşulmuştur.

Çizelge 4.12. FVC testi numunesi özellikleri

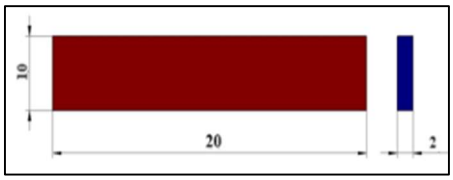
Test Numunesi						
Fiber Hacim Oranı (FVC)	Standart	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	# Ply	Ply Oryantasyonu
	EN 2564	20 ± 1	10 ± 0.8	2.0 ± 0.2	9	0°

FVC testi numunelerinin ebat ve serim bilgileri Çizelge 4.12'de bir arada verilmiştir. Bu numunelerin her birinin tanımlama bilgilerine ise Çizelge 4.13'te yer verilmiştir.

Çizelge 4.13. FVC testi numunelerinin tanımlanması/markalanması

Kür Çevrimi No	Plaka	Yön	Numune
2	65/15/0,5	0°	V2-1'den V2-3'e kadar
3	85/15/0,5	0°	V3-1'den V3-3'e kadar
4	105/15/0,5	0°	V4-1'den V4-3'e kadar
7	85/5/0,5	0°	V7-1'den V7-3'e kadar
8	85/10/0,5	0°	V8-1'den V8-3'e kadar

FVC testi numunelerinin boyut bilgileri Şekil 4.5'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5. FVC testi (mm)

Teste hazır FVC numunelerinin bazılarına ait fotoğraf Resim 4.14'te paylaşılmıştır.



Resim 4.14. Dördüncü kür çevrimine ait FVC test numunesi, V2-1'den V2-3'e kadar

4.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Basma ve ILSS testleri sonuçları analiz edildiğinde aralarında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar bulunan kür çevrimlerine ait test edilmiş numuneler SEM analizine tabii tutulmuştur. Hasarlı bölgelerinden alınan görüntüler incelenerek mekanik dayanımdaki bu farklılıklar anlamlandırılmıştır. Testler Gazi Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı'nda yer alan Resim 4.15'te gösterilen HITACHI SU8700 model cihaz ile gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.15. Kullanılan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Fiber Hacim Oranı (FVC) Testi Sonuçları

Bu çalışmada, farklı kür çevrimleriyle kürlenmiş CFRP numunelerin fiziksel, termomekanik ve matris baskın mekanik özellikleri, kür parametrelerinin etkisini anlamak için test edilmiştir. Kompozit numunelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi kapsamında, yoğunluk testi ve fiber hacim içeriği testi sırasıyla ASTM D792 ve EN 2564'e göre yapılmıştır. 20 mm x 10 mm boyutlarındaki dikdörtgen kesitli numuneler sırasıyla yoğunluk ve elyaf hacim içeriği testlerine tabi tutulduğundan yoğunluk deneyleri için ilave numune hazırlamaya gerek kalmamıştır. Fiber hacim içeriği testinde reçineyi uzaklaştırmak için sülfürik asit kullanılmıştır. Kompozit numunelerin yoğunluğu, ASTM D-792'ye uygun olarak, Resim 5.1'de gösterilen 0,0001 ile 220 g kapasite aralığına sahip, suda tartım yapan enstrümantasyonlu Mettler Toledo analitik terazi cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Numunenin ağırlığı hem havada hem de suda ölçülmüş ve yoğunluk değeri daha sonra terazi tarafından su deplasmanı yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.1, her kür çevrimi için 3 tekrarda gerçekleştirilen FVC test sonuçlarının ortalama değerlerini göstermektedir. Kürlenmiş plakaların elyaf hacim içeriğindeki ve boşluk içeriğindeki değişimler istatistiksel olarak anlamsızdır, bu da ön kür vakumunun düzgün bir şekilde uygulandığını göstermektedir. Bu nedenle, mekanik özelliklerdeki değişimler kür durumundaki farklılığa bağlanabilir. Farklı kür sıcaklıkları ve bekleme süreleri FVC'yi etkilemediğinden, ısınma hızının etkisini değerlendirmek için hazırlanan Kür Döngüsü-5 ve 6 için FVC testi yapılmamasına karar verilmiştir. Benzer FVC ve boşluk içeriği sonuçları, son kürleme işleminde vakum veya kür basıncı uygulanmadığı ıslak serim/vakum torbalama yönteminin kullanılmasından kaynaklandığı düşünülebilir. Uzay, Ç., ve diğerleri [49] ile Liu, L., ve diğerleri [73] yapmış oldukları çalışmalarda vakum seviyesi ve kürleme basıncının FVC ve boşluk içeriğindeki en önemli belirleyici faktörler olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte kürleme basıncı üzerine yapılan pek çok çalışma [5, 9, 14-16], basıncın düşürülmesinin gözenekliliği arttırdığını ve bunun da mekanik özellikleri, özellikle ILSS gibi matris ağırlıklı özellikleri ve çekme mukavemeti gibi diğer mekanik özellikleri azalttığını göstermiştir.



Resim 5.1. Analitik terazi cihazı

Çizelge 5.1. Fiber hacim oranı (FVC) testi sonuçları

Kür Çevrimi	Panel	Numune	FVC (%)	Boşluk İçeriği (%)
2	65/15/0,5	V2	57,33	8,58
3	85/15/0,5	V3	53,25	7,63
4	105/15/0,5	V4	55,26	6,89
7	85/5/0,5	V7	55,58	7,40
8	85/10/0,5	V8	54,86	6,03
		Ortalama	55,12	7,30
		Std. Sap.	1,47	0,94

Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te sunulan sonuçlara göre elde edilen p-değerleri 0,05'ten büyük olup, FVC ve boşluk içeriğindeki değişimlerin %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamsız olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.2. FVC için koşulan ANOVA testi sonuçları

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Gruplararası	4	25,81	6,452	0,54	0,712
Hata	10	120,26	12,026		
Toplam	14	146,07			

Çizelge 5.3. Boşluk içeriği için koşulan ANOVA testi sonuçları

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Gruplararası	4	10,66	2,664	0,72	0,599
Hata	10	37,15	3,715		
Toplam	14	47,81			

5.2. Basma Testi Sonuçları

Her kür çevrimi seti için en az beş kez tekrarlanan basma testlerinin sonuçları Çizelge 5.4'te gösterilmiştir. Basma dayanımı testinde, tüm hasar test numunelerinin serbest (gage) uzunluğu içinde meydana geldiğinden hem hasar modu hem de dayanım değerleri EN 2850 standardına göre geçerli kabul edilir. Çekme ve kesme kuvvetleri altında liflerin çıkması (pull-out) ana hasar mekanizması olabilirken, basma kuvveti altında debonding, çatlama ve delaminasyonun hasar modlarının kaynağı olması beklenmektedir.

Çizelge 5.4. Tüm kür çevrimleri bir arada basma testi sonuçları

Kür Çevrimi	Panel	Numune	Ortalama Basma Dayanımı [MPa]
2	65/15/0,5	C2	467,99
3	85/15/0,5	C3	394,28
4	105/15/0,5	C4	433,95
5	85/15/1	C5	405,60
6	85/15/2	C6	413,83
7	85/5/0,5	C7	435,83
8	85/10/0,5	C8	459,76
9	105/5/0,5	C9	458,38
10	105/10/0,5	C10	464,67

Basma testi sonuçlarını değerlendirebilmek amacıyla, dört alt grup için tek yönlü varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Her alt grupta bir adet kür parametresi haricinde diğer parametreler sabit tutulmuştur. Varyansların homojenliği Levene testi yardımıyla değerlendirilmiştir. Aşağıda açıklanan tüm alt gruplar homojen varyansa sahip olduğu görülmüştür. Çünkü Levene testlerinin p-değeri sonuçları anlamlılık düzeyi 0,05'ten büyüktür. Bu 4 alt grup için Levene's Test p-değerleri sırasıyla 0,581; 0,129; 0,403; 0,429 elde edilmiştir. Varyanslar homojen olduğu için tek yönlü varyans analizi (ANOVA) yapılması uygundur.

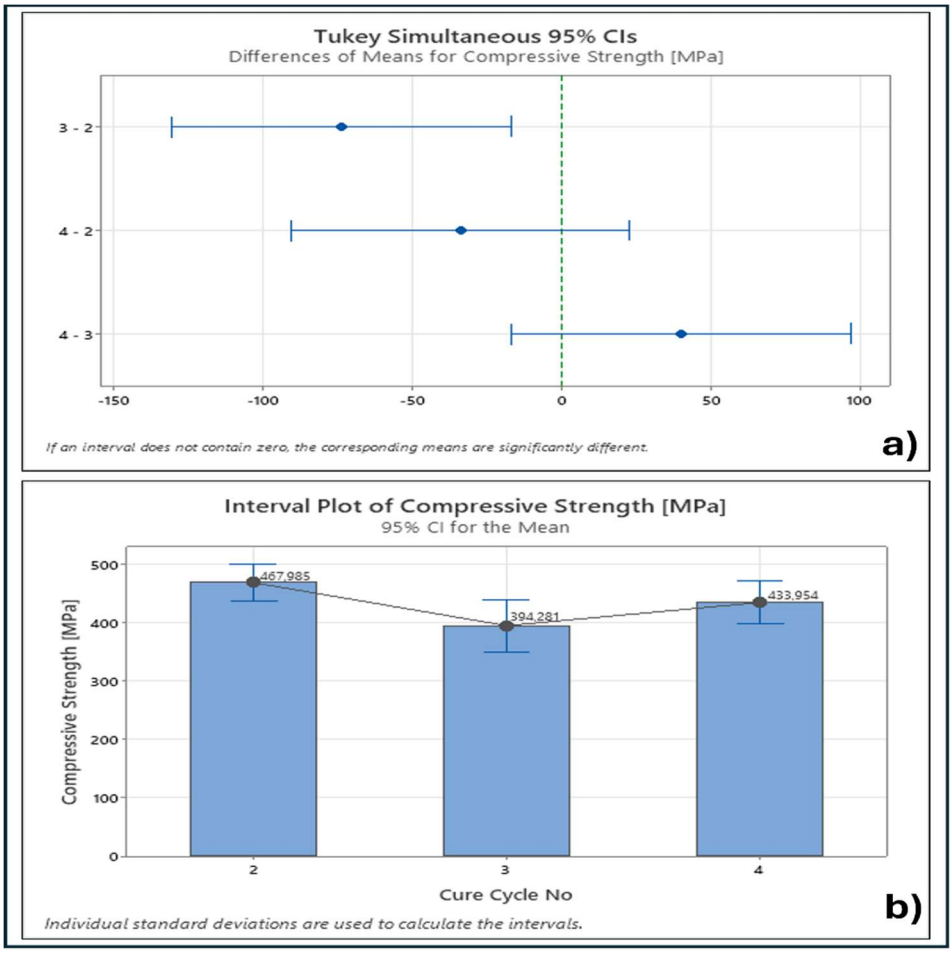
Çizelge 5.5. Basma testi ilk alt grubu sonuçları (Sıcaklık değişimi)

Kür Çevrimi	Panel	Numune	Ortalama Basma Dayanımı [MPa]
2	65/15/0,5	C2	467,99
3	85/15/0,5	C3	394,28
4	105/15/0,5	C4	433,95

Çizelge 5.5'te gösterilen yorumlanacak basma dayanımı testlerinin ilk alt grubu, üç kür döngüsü için aynı bekleme süresi (15 saat) ve ısınma hızı (0,5 °C/dk) ile değişken kürleme sıcaklığını temsil eder. Çizelge 5.6'da Minitab^{TM} istatistiksel analiz programı yardımıyla koşulan tek yönlü ANOVA testi sonuçları bu alt grubu oluşturan kür çevrimi setlerine ait basma dayanımı ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olduğunu göstermektedir. Çünkü p değeri 0,013, anlamlılık seviyesi 0,05'ten küçüktür. Dolayısıyla, alternatif hipotez (H_a) kabul edilebilir. Bu farklılığın hangi kür çevrimleri arasında olduğunu anlamak için post-hoc testlerinden biri olan Tukey çiftler arası karşılaştırma testi yapılmıştır. 85 °C'de kürlenen numunelerin ortalama basma dayanımının, 65 °C'de kürlenen numunelerden önemli ölçüde daha az olduğunu anlaşılmıştır.

Çizelge 5.6. Basma testi ilk alt grubu ANOVA testi sonucu

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Gruplararası	2	21771	10886	5,36	0,013
Hata	21	42684	2033		
Toplam	23	64455			



Şekil 5.1. Basma testi ilk alt grubu a) Tukey testi b) Bar grafiği

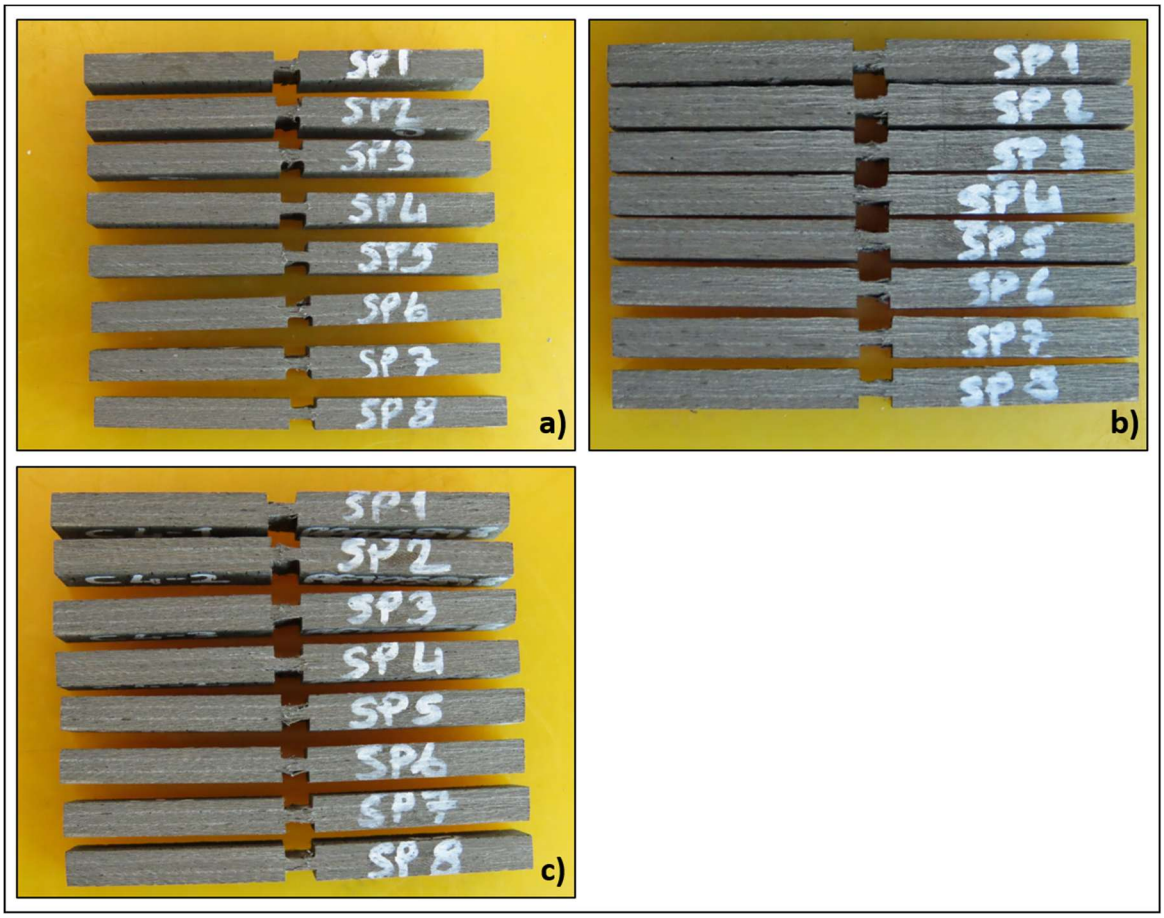
Şekil 5.1-a'da Tukey çiftler arası karşılaştırma testine yer verilmiştir. Bu grafikte C2 ve C3 numunelerinin ikili karşılaştırması sıfır çizgisinin dışında yer almaktadır. Bu durum karşılaştırılan bu iki basma numunesi setinin ortalama basma dayanımı değerlerinin anlamlı bir farklılık ihtiva ettiğini göstermektedir.

Çizelge 5.7. Tukey testiyle bilgilerin gruplandırılması (Basma birinci alt grup)

Kür Çev.	N	Ortalama	Gruplama	
2	8	467,99	A	
4	7	434,0	A	B
3	7	394,3		B

Aynı harfi paylaşmayan ortalamalar anlamlı derecede farklıdır.

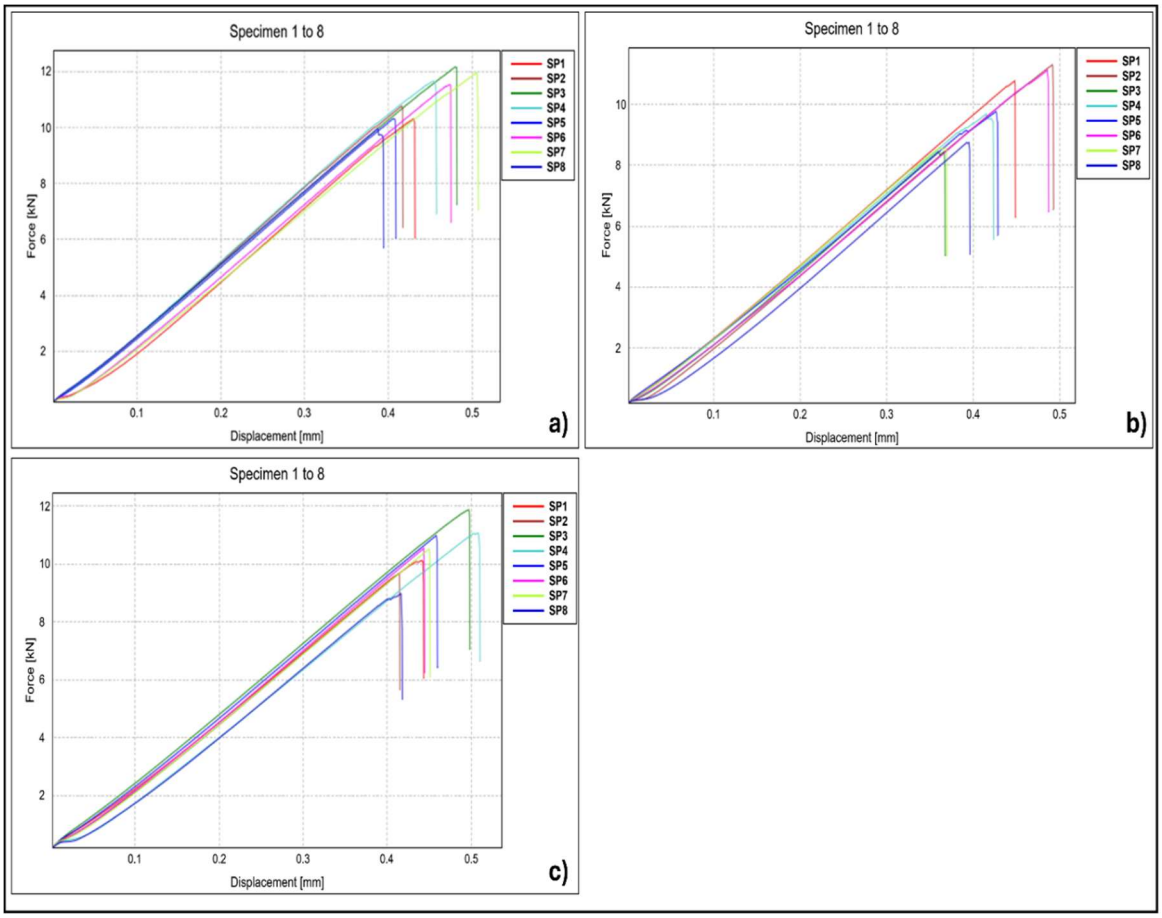
Çizelge 5.7'de %95 güven aralığında Tukey testi ile setlerin gruplandırılması yapılmıştır. Farklı harfleri paylaşan setler anlamlı derecede birbirinden farklılık ihtiva etmektedir.



Resim 5.2. a)C2 b) C3 c)C4 setleri için basma testi sonrası fotoğrafları

Resim 5.2'de C2, C3 ve C4'e ait basma testi numunelerinin test sonrası hasarlı hallerinin fotoğraflarına yer verilmiştir. EN2850 standardına her setten en az 5 adet numune ile test yapılması gerekmektedir ve bu koşul yaptığımız çalışmada sağlanmıştır. Bununla birlikte fotoğraflardan da görüleceği üzere test sonucu meydena gelen hasarlar ortadaki serbest uzunlukta gerçekleşmiştir. Tab kullanımı işe yaramıştır.

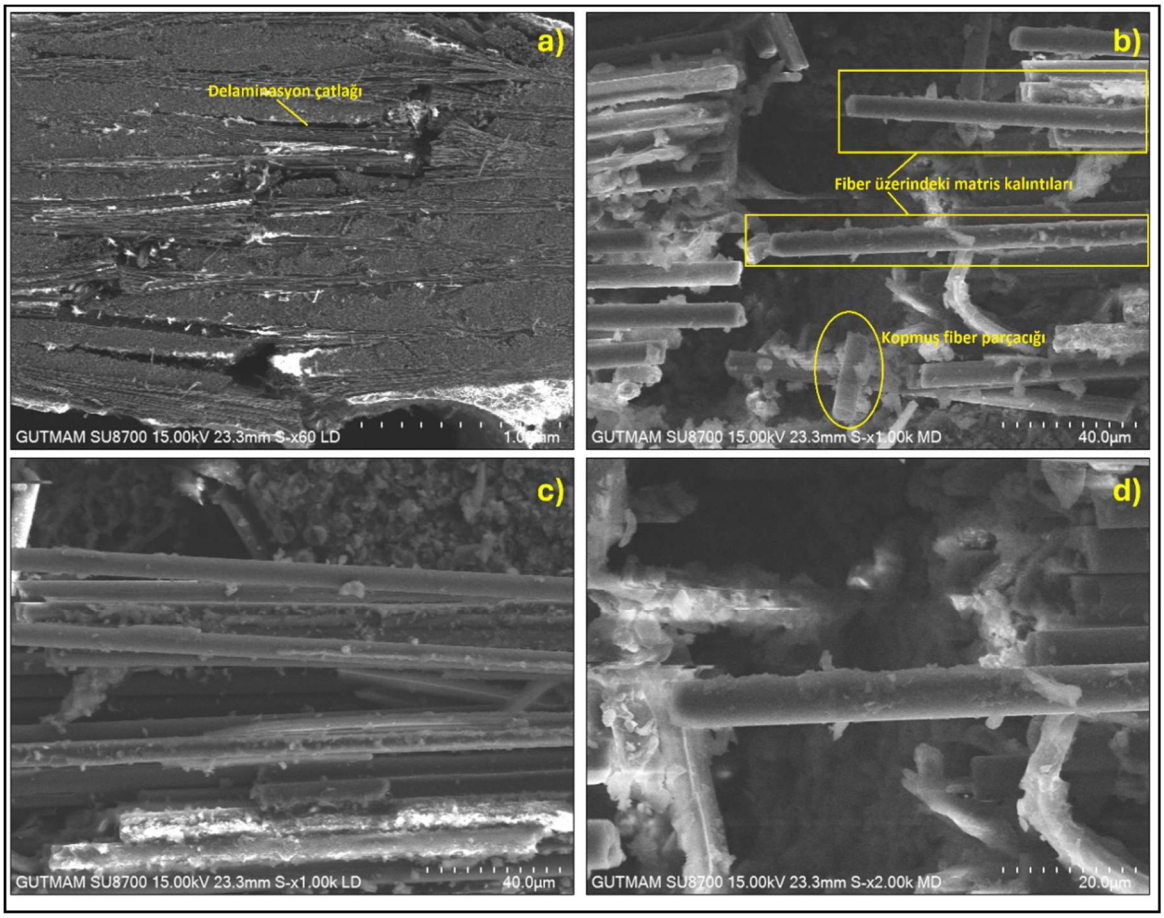
Şekil 5.2'de C2, C3 ve C4 setlerine ait basma testi eğrilerine yer verilmiştir.



Şekil 5.2. a) C2 b) C3 c) C4 setleri için basma testi kuvvet-deplasman eğrileri

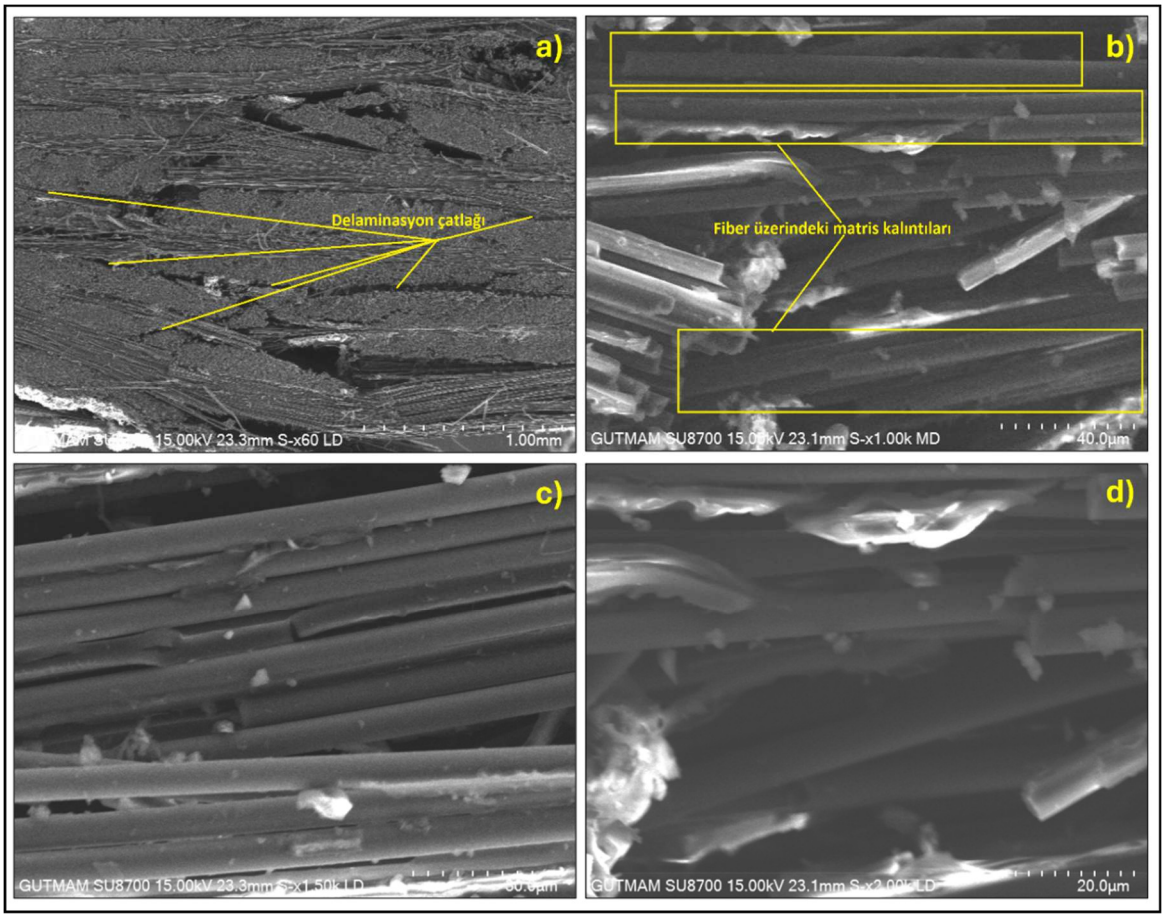
Çizelge 5.5'te de görüldüğü gibi en yüksek basma mukavemeti C2, en düşük basma mukavemeti ise C3 kür çevrimi ile kürlenen numuneler ile elde edilmiştir. Tukey çifler arası karşılaştırma testinde de bu set için anlamlı farklılığın C2 ve C3 arası farklılıktan kaynaklandığı Şekil 5.1-a'da görülebilir. Bu farklılığın nedenini anlamak adına kırılan basma numuneleri SEM analizine tabii tutulmuş ve hasarlı bölgelerden görüntüler alınmıştır.

Resim 5.3.'te C2 basma numunesinin hasar bölgesine ait SEM görüntülerine yer verilmiştir. SEM görüntülerinde basma deneyi sonrası oluşan kırılmış karbon fiber parçacıkları, kopmuş karbon fiberler, tabakalar arası delaminasyon çatlak oluşumu, matris kalıntıları görülebilmektedir.



Resim 5.3. C2 SEM görüntüleri: a) 1 mm b) 40 µm c) 40 µm d) 20 µm

Resim 5.3-b'de karbon fiber boyunca üzerinde kopmuş matris kalıntılarının formasyonu ve miktarının fazlaca oluşu görülebilmektedir. Bu da fiber-matris arayüzey bağlanma kuvvetinin 2 nolu kür çevrimi ile kürlenmiş kompozit numuneler için yüksek olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte C3 basma testi numunesine ait SEM görüntülerine Resim 5.4'te yer verilmiştir. Resim 5.4-a'da delaminasyon çatlaklarının miktarının C2 numunesine kıyasla çok daha fazla olduğu görülmektedir. Resim 5.4-b-c ve d'deki SEM görüntüsünde ise fiberler üzerindeki matris kalıntısı miktarının C2 numunesine kıyasla çok daha düşük olduğu görülebilmektedir. Bu durum 3 nolu kür çevrimi ile kürlenen kompozit numunelerin fiber-reçine arayüzey bağlanma kuvvetinin C2'ye oranla daha düşük olmasıyla açıklanabilir.



Resim 5.4. C3 SEM görüntüleri: a) 1 mm b) 40 µm c) 30 µm d) 20 µm

Bu setin basma testi sonuçları ile SEM analizinde tespit edilen durum birlikte ele alındığında, karbon fiber ile epoksi reçine arasındaki arayüzey yapışmasının güçlü olmasının matristen elyaflara etkili bir stres transferi sağlayarak, C2 seti için CFRP'lerin yüksek basma yüklerine dayanacak kadar güçlü olmasını sağladığı söylenebilir. Bu güçlü arayüzey yapışması aynı zamanda daha az tabakalar arası delaminasyon çatlağı gelişimini sağlamıştır. Arayüzey yapışmasının güçlendirilmesinin mekanik dayanımın artmasını sağladığı bu durum literatürde açık kaynaklardan erişilebilecek konuyla ilgili yapılmış geçmiş çalışmalar ile uyum içerisindedir [9, 17-19, 21, 57].

Çizelge 5.8'de yorumlanması gereken basma dayanımı testlerinin ikinci alt grubu, üç kür çevrimi için aynı bekleme süresi (15 saat) ve kürleme sıcaklığı (85°C) ile değişken ısınma hızını temsil eder.

Çizelge 5.8. Basma testi ikinci alt grubu sonuçları (Isınma hızı değişimi)

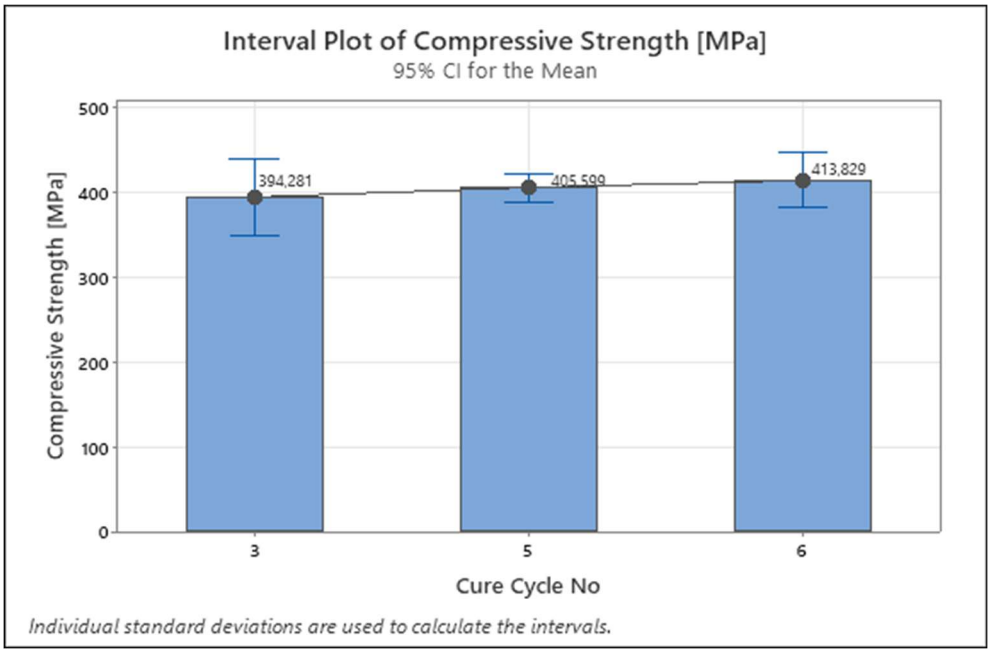
Kür Çevrimi	Panel	Numune	Ortalama Basma Dayanımı [MPa]
3	85/15/0,5	C3	394,28
5	85/15/1	C5	405,60
6	85/15/2	C6	413,83

Çizelge 5.9'da paylaşılan Tek yönlü ANOVA testine göre, ısınma hızının basma dayanımı özelliklerine olan etkisinin istatistiksel olarak anlamsız olduğu sonucuna varılabilir; çünkü p-değeri 0,629, anlamlılık düzeyi olan 0,05'ten büyük olup, bu üç kür çevrimi arasında belirgin bir fark yoktur. Dolayısıyla bir post-hoc testi gerekliliği de söz konusu değildir.

Çizelge 5.9. Basma testi ikinci alt grubu ANOVA testi sonucu

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Gruplararası	2	1540	770,0	0,47	0,629
Hata	20	32437	1621,9		
Toplam	22	33977			

Basma testi ikinci alt grubuna ait bar grafiği Şekil 5.3'te paylaşılmıştır.



Şekil 5.3. Basma testi ikinci alt grubuna ait bar grafiği

Literatürde mevcut benzer konularda yapılan geçmiş çalışmalar incelendiğinde, ıslak serim/vakum torbalama yöntemi veya diğer kompozit üretim yöntemlerinde ısınma hızının

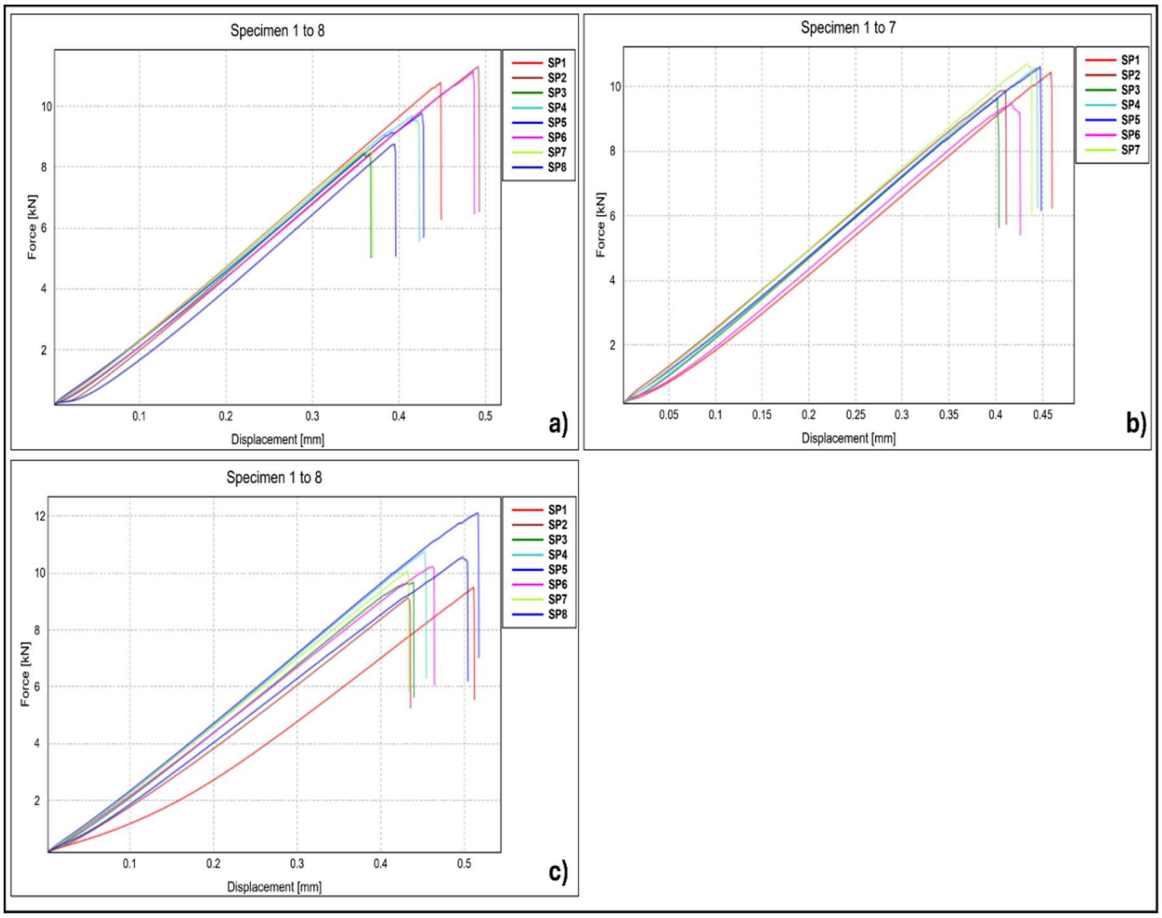
basma dayanımı üzerindeki etkisinin incelenmediği ve bu tez çalışmasının bu kapsamdaki gelecek araştırmalara destek olabileceği düşünülmektedir.



Resim 5.5. a) C3 b) C5 c) C6 setleri için basma testi sonrası fotoğrafları

Resim 5.5'te C3, C5 ve C6'e ait basma testi numunelerinin test sonrası hasarlı hallerinin fotoğraflarına yer verilmiştir. EN2850 standardına her setten en az 5 adet numune ile test yapılması gerekmektedir ve bu koşul çalışmada sağlanmıştır. Bununla birlikte fotoğraflardan da görüleceği üzere test sonucu meydana gelen hasarlar ortadaki serbest uzunlukta gerçekleşmiştir. Tab kullanımı işe yaramıştır.

Şekil 5.4'te C3, C5 ve C6 setlerine ait basma testi eğrilerine yer verilmiştir.



Şekil 5.4. a) C3 b) C5 c) C6 setleri için basma testi kuvvet-deplasman eğrileri

Çizelge 5.10'da yorumlanması gereken basınç dayanımı testlerinin üçüncü alt grubu, üç kür döngüsü için aynı ısınma hızı (0,5 °C/dk) ve kürleme sıcaklığı (105 °C) ile değişken bekleme süresini temsil eder.

Çizelge 5.10. Basma testi üçüncü alt grubu sonuçları

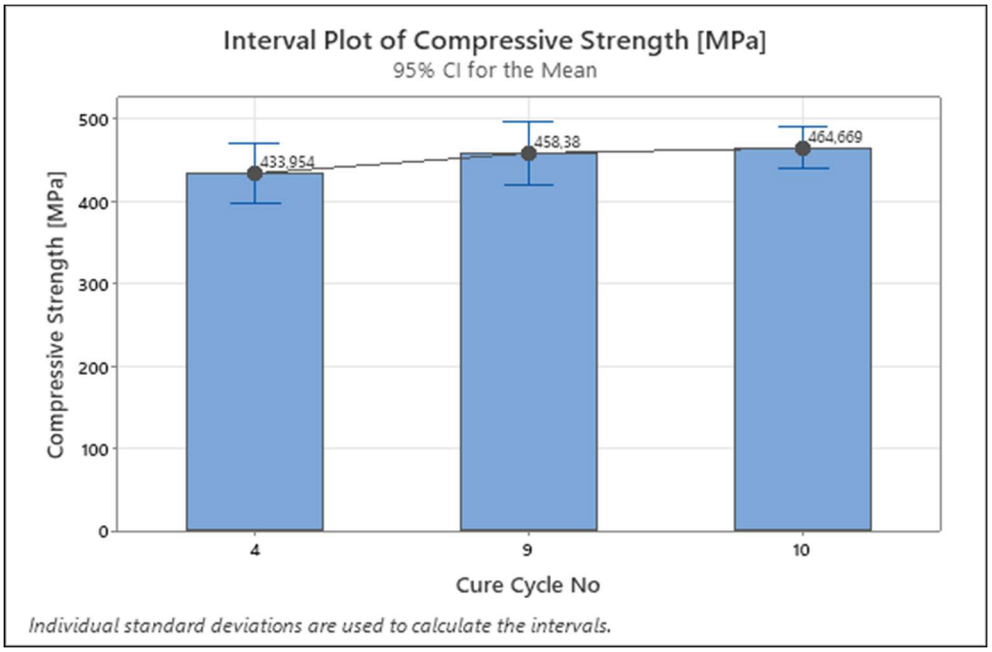
Kür Çevrimi	Panel	Numune	Ortalama Basma Dayanımı [MPa]
9	105/5/0,5	C9	458,38
10	105/10/0,5	C10	464,67
4	105/15/0,5	C4	433,95

Çizelge 5.11'de verilen Tek yönlü ANOVA testine göre, 105°C'de bekleme süresinin basma dayanımı özellikleri üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamsız olduğu sonucuna varılabilir. Çünkü p değeri 0,291, anlamlılık seviyesi 0,05'ten büyüktür ve bu üç kür çevrimi arasında anlamlı bir fark yoktur. Dolayısıyla farklı alt grupları bulmak için post-hoc testi yapmaya gerek yoktur.

Çizelge 5.11. Basma testi üçüncü alt grubu ANOVA testi sonucu

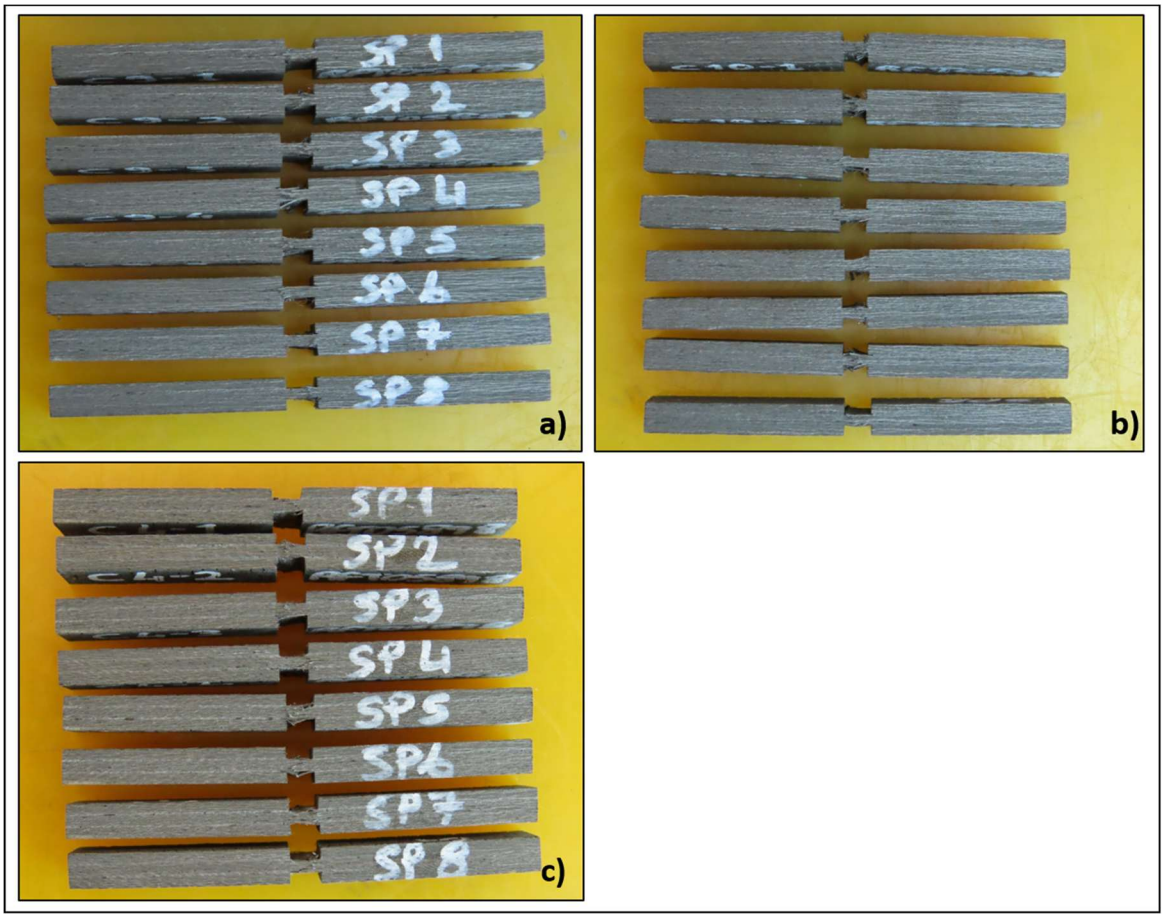
Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Gruplararası	2	4212	2106	1,31	0,291
Hata	21	33812	1610		
Toplam	23	38024			

Basma testi üçüncü alt grubuna ait bar grafiği Şekil 5.5'te paylaşılmıştır.



Şekil 5.5. Basma testi üçüncü alt grubuna ait bar grafiği

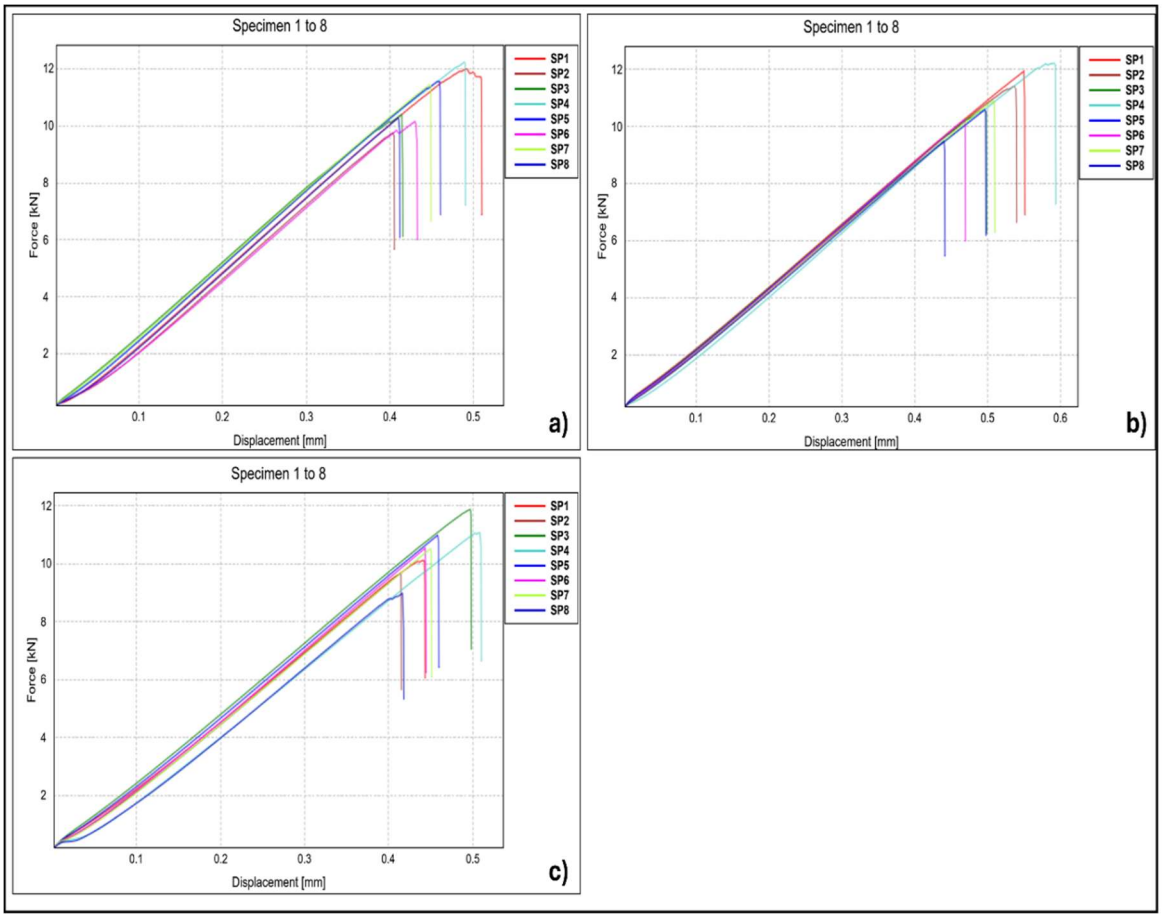
Literatürde mevcut benzer konularda yapılan geçmiş çalışmalar incelendiğinde, Singh ve diğerleri 80°C, 120°C ve 160°C'de 1, 2 ve 3 saat kürleme sürelerinde kürlenmiş CFRP numunelere basma testi uyguladığında 80 ve 120°C'de kürleme süresi arttıkça basma dayanımı artarken; 160°C'de kürleme süresi değişiminin böyle bir değişime neden olmadığı bilgisini raporlamışlardır. Yani prensipte bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla Singh ve diğerlerinin yaptığı çalışma büyük oranda uyum içerisindedir.



Resim 5.6. a) C9 b) C10 c) C4 setleri için basma testi sonrası fotoğrafları

Resim 5.6'da C9, C10 ve C4'e ait basma testi numunelerinin test sonrası hasarlı hallerinin fotoğraflarına yer verilmiştir. EN2850 standardına her setten en az 5 adet numune ile test yapılması gerekmektedir ve bu koşul yaptığımız çalışmada sağlanmıştır. Bununla birlikte fotoğraflardan da görüleceği üzere test sonucu oluşan hasarlar ortadaki serbest uzunlukta gerçekleşmiştir. Tab kullanımı işe yaramıştır.

Şekil 5.6'da C9, C10 ve C4 setlerine ait basma testi eğrilerine yer verilmiştir.



Şekil 5.6. a) C9 b) C10 c) C4 setleri için basma testi kuvvet-deplasman eğrileri

Çizelge 5.12'de yorumlanması gereken basma dayanımı testlerinin dördüncü alt grubu, üç kür çevrimi için aynı ısınma hızı (0,5 °C/dk) ve kürleme sıcaklığı (85 °C) ile birlikte bekleme süresi değişimini temsil eder.

Çizelge 5.12. Basma testi dördüncü alt grubu sonuçları

Kür Çevrimi	Panel	Numune	Ortalama Basma Dayanımı [MPa]
7	85/5/0,5	C7	435,83
8	85/10/0,5	C8	459,76
3	85/15/0,5	C3	394,28

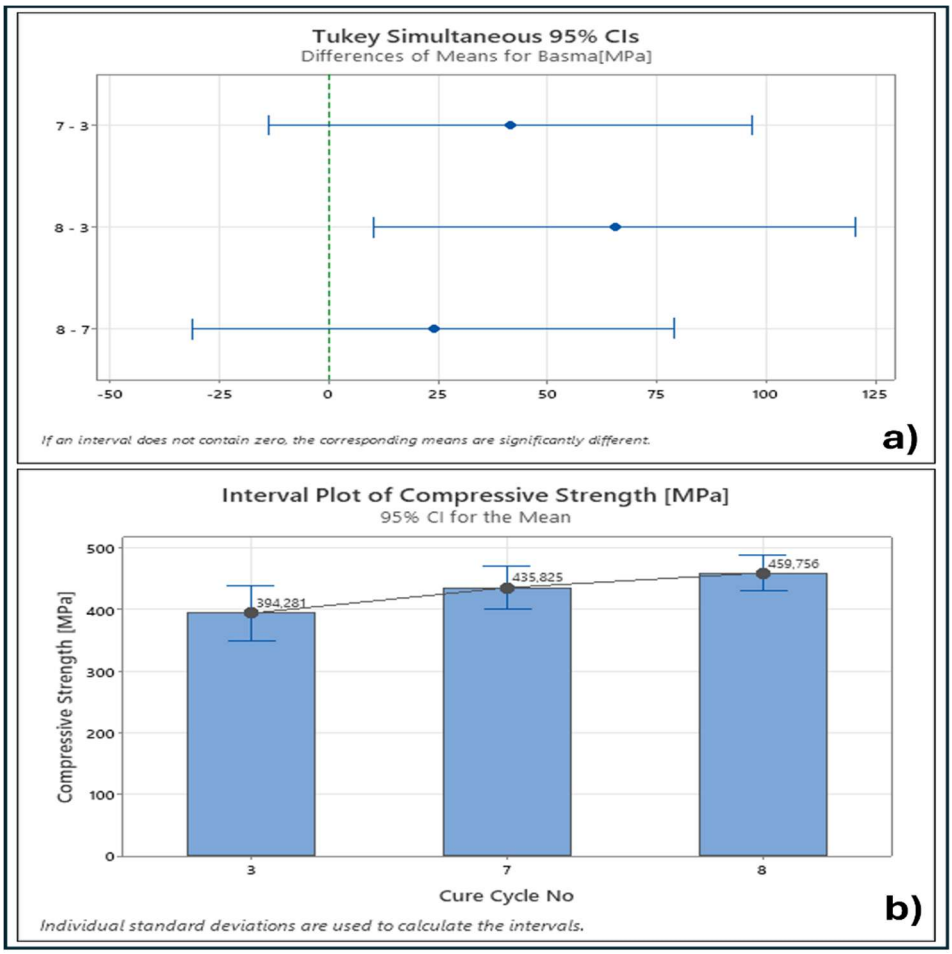
Çizelge 5.13'te verilen Minitab™ istatistiksel analiz programı ile tek yönlü ANOVA sonuçları bu alt grubu oluşturan kür çevrimi setlerine ait basma dayanımı ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olduğunu göstermektedir. Çünkü p değeri 0,022, anlamlılık seviyesi 0,05'ten küçüktür. Dolayısıyla, alternatif hipotez (H_a) kabul edilebilir. Bu farklılığın hangi kür çevrimleri arasında olduğunu anlamak için post-hoc

testlerinden biri olan Tukey çiftler arası karşılaştırma testi yapılmıştır. 85°C'de 10 saat bekleme süresiyle kürlenen numunelerin (C8) ortalama basma dayanımının, 15 saat bekleme süresiyle kürlenen numunelerden (C3) daha fazla olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 5.13. Basma testi dördüncü alt grubu ANOVA testi sonucu

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Gruplararası	2	17562	8781	4,60	0,022
Hata	21	40106	1910		
Toplam	23	57667			

Basma testi dördüncü alt grubu Tukey testi ikili karşılaştırma grafiğine ve bar grafiğine Şekil 5.7'de yer verilmiştir.



Şekil 5.7. Basma testi dördüncü alt grubu a)Tukey testi b) Bar grafiği

Bu alt grupta ise 85°C'de bekleme süresi 5 ve 10 saat olan numunelerin basma dayanımları arasında anlamlı bir fark görülmezken; 15 saat kürlenen numunelerin dayanımının 10 saat

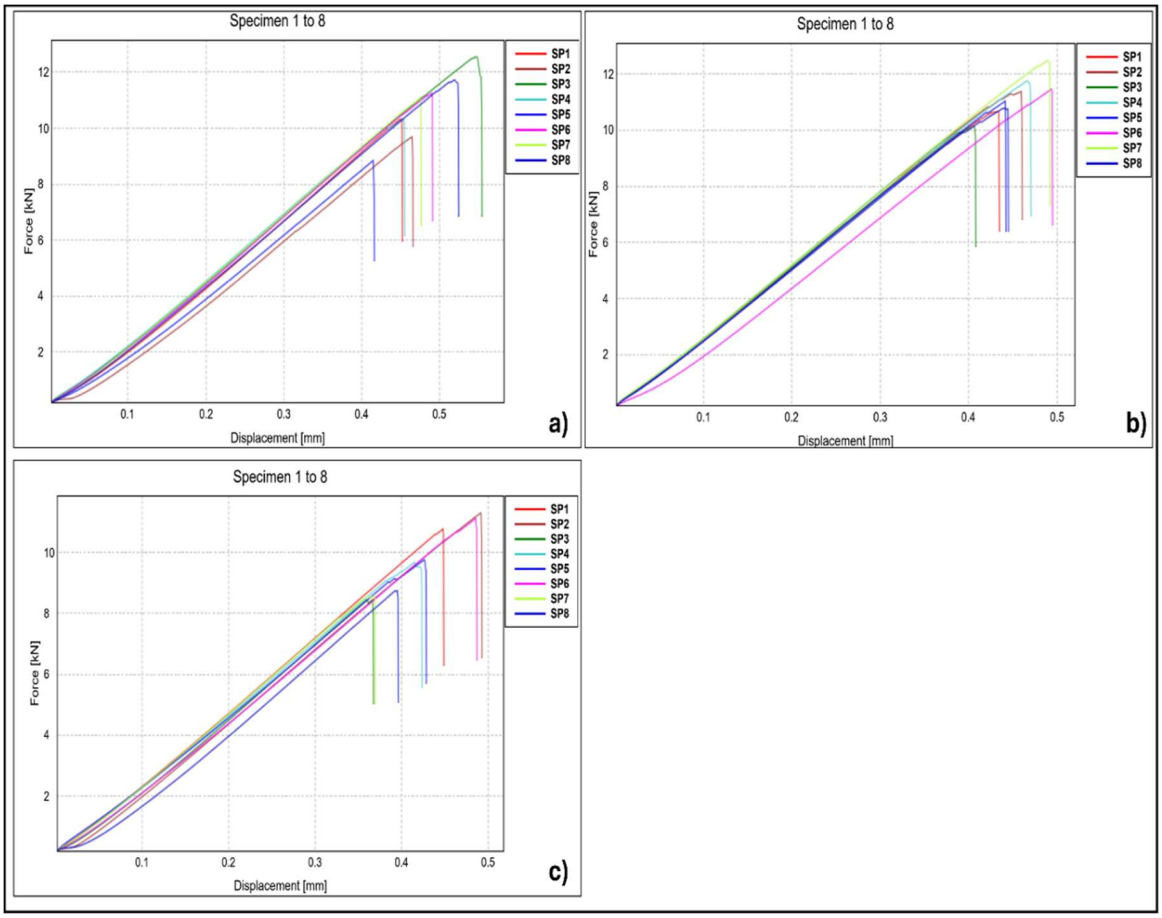
kürlenenlerden belirgin şekilde düşük olduğu anlaşılmıştır. Literatürde mevcut benzer konularda yapılan geçmiş çalışmalar incelendiğinde, Singh ve diğerleri 80°C, 120°C ve 160°C'de 1, 2 ve 3 saat kürleme sürelerinde kürlenmiş CFRP numunelere basma testi uyguladığında 80 ve 120°C'de kürleme süresi arttıkça basma dayanımı artarken; 160°C'de kürleme süresi değişiminin böyle bir değişime neden olmadığı bilgisini raporlamışlardır. Yani prensipte bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla Singh ve diğerlerinin yaptığı çalışma büyük oranda uyum içerisindedir.



Resim 5.7. a) C7 b) C8 c) C3 setleri için basma testi sonrası fotoğrafları

Resim 5.7'de C7, C8 ve C3'e ait basma testi numunelerinin test sonrası hasarlı hallerinin fotoğraflarına yer verilmiştir. EN2850 standardına her setten en az 5 adet numune ile test yapılması gerekmektedir ve bu koşul yaptığımız çalışmada sağlanmıştır. Bununla birlikte fotoğraflardan da görüleceği üzere test sonucu oluşan hasarlar ortadaki serbest uzunlukta gerçekleşmiştir. Tab kullanımı işe yaramıştır.

Şekil 5.8'de C7, C8 ve C3 setlerine ait basma testi eğrilerine yer verilmiştir.



Şekil 5.8. a) C7 b) C8 c) C3 setleri için basma testi kuvvet-deplasman eğrileri

5.3. ILSS Sonuçları

ILSS testi reçine ile karbon lifler arasındaki kürlenme kalitesi hakkında bilgi sağlar. ILSS testi sonuçları ayrıca, kesme kuvvetleri altında delaminasyona karşı direncin de bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Her kür çevrimi için beş kez tekrarlanan katmanlar arası kesme dayanımı testinin sonuçları Çizelge 5.14'te gösterilmiştir. ILSS testinde, birden fazla kesme modunun (multiple shear modes) varlığı hem gözlemlenen arıza modunu hem de elde edilen katmanlar arası kesme dayanımı değerini doğrular. Tüm setler için, testten sonra arıza modunu görmek için büyütülmüş bir görünüm sağlayan numunelerin makro fotoğrafları çekilmiştir. Ardından mekanik dayanımda istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulunan setlere ait numunelerin ILSS testi sonrasında oluşan hasarlı bölgeleri SEM analizine tabii tutulmuş, görüntüler alınmıştır.

Çizelge 5.14. Tüm kür çevrimleri bir arada ILSS testi sonuçları

Kür Çevrimi	Panel	Numune	ILSS [MPa]
2	65/15/0,5	L2	32,64
3	85/15/0,5	L3	28,78
4	105/15/0,5	L4	32,12
5	85/15/1	L5	31,40
6	85/15/2	L6	31,06
7	85/5/0,5	L7	30,60
8	85/10/0,5	L8	31,40
9	105/5/0,5	L9	31,12
10	105/10/0,5	L10	30,83

Basma testi sonuçları için yapıldığı gibi, dört alt grup için de tek yönlü varyans analizi (ANOVA) yapıldı, hepsinin sabit bir bağımsız değişkeni vardır. Varyansların homojenliği Levene testi yardımıyla değerlendirildi. Aşağıda açıklanan tüm alt gruplar homojen varyansa sahiptir. Çünkü Levene testlerinin p-değeri sonucu, anlamlılık seviyesi 0,05'ten büyüktür. Dört alt grubun Levene's testi p-değerleri sırasıyla 0,508; 0,395; 0,441; 0,800 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.15'te gösterilen yorumlanacak olan katmanlar arası kesme mukavemeti testlerinin ilk alt grubu, üç kür çevrimi için aynı bekleme süresi (15 saat) ve ısınma hızı (0,5 °C/dk) ile birlikte kürleme sıcaklığı değişimini temsil eder. Minitab^{TM} istatistiksel analiz programı ile tek yönlü ANOVA ve Tukey çiftler arası karşılaştırma testi yapılmış ve bu alt grubu oluşturan setler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olduğu görülmüştür. Çünkü p değeri Çizelge 5.16'da paylaşıldığı üzere 0,000, anlamlılık seviyesi 0,05'ten küçüktür. Dolayısıyla, alternatif hipotez (H_a) kabul edilebilir. 85°C'de kürlenen numunelerin (L3) ortalama ILSS'sinin, 65 °C (L2) ve 105 °C'de kürlenen numunelerden (L4) önemli ölçüde daha az olduğunu göstermiştir.

Çizelge 5.15. ILSS testi ilk alt grubu sonuçları (Sıcaklık değişimi)

Kür Çevrimi	Panel	Numune	ILSS [MPa]
2	65/15/0,5	L2	32,64
3	85/15/0,5	L3	28,78
4	105/15/0,5	L4	32,12

Çizelge 5.16. ILSS testi ilk alt grubu ANOVA testi sonucu

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Gruplararası	2	43,88	21,9380	23,83	0,000
Hata	12	11,05	0,9207		
Toplam	14	54,92			

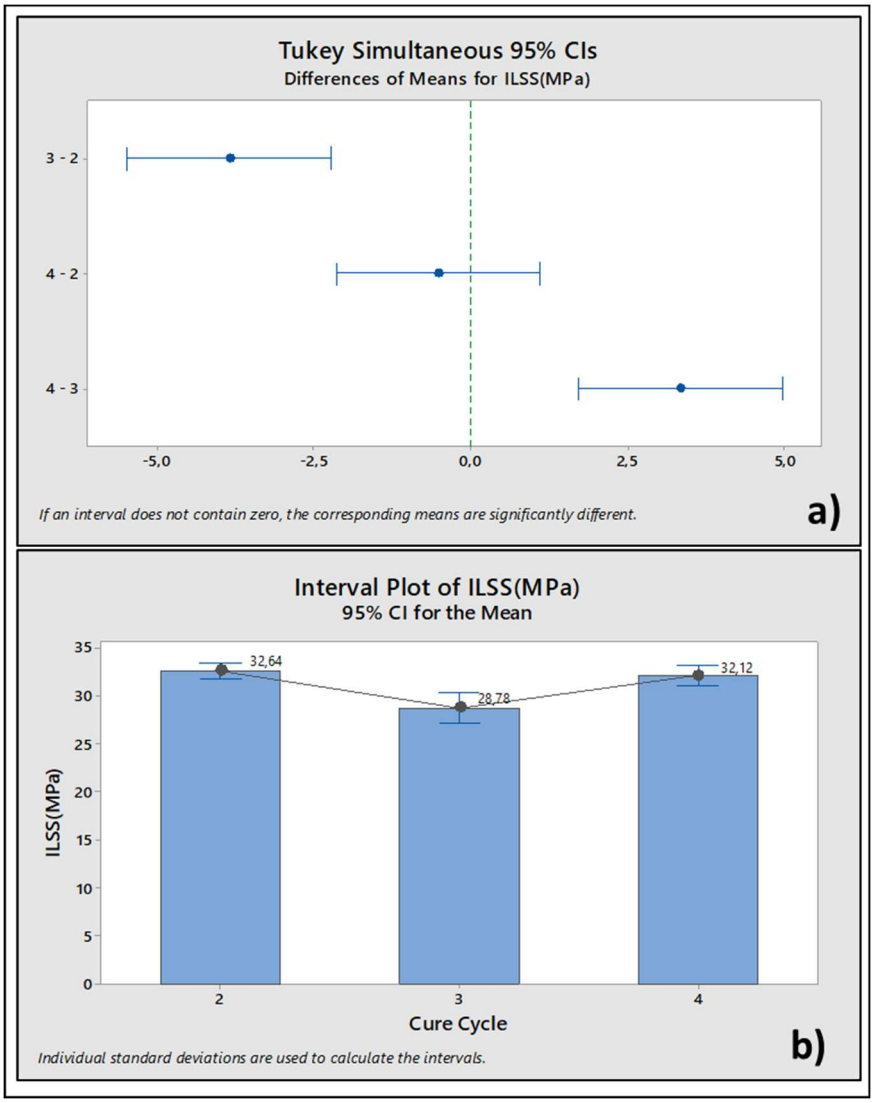
ANOVA testinin ardından Çizelge 5.17'de sonuçları paylaşılan Tukey çoklu karşılaştırma testi koşulmuştur.

Çizelge 5.17. Tukey testiyle bilgilerin gruplandırılması (ILSS birinci alt grup)

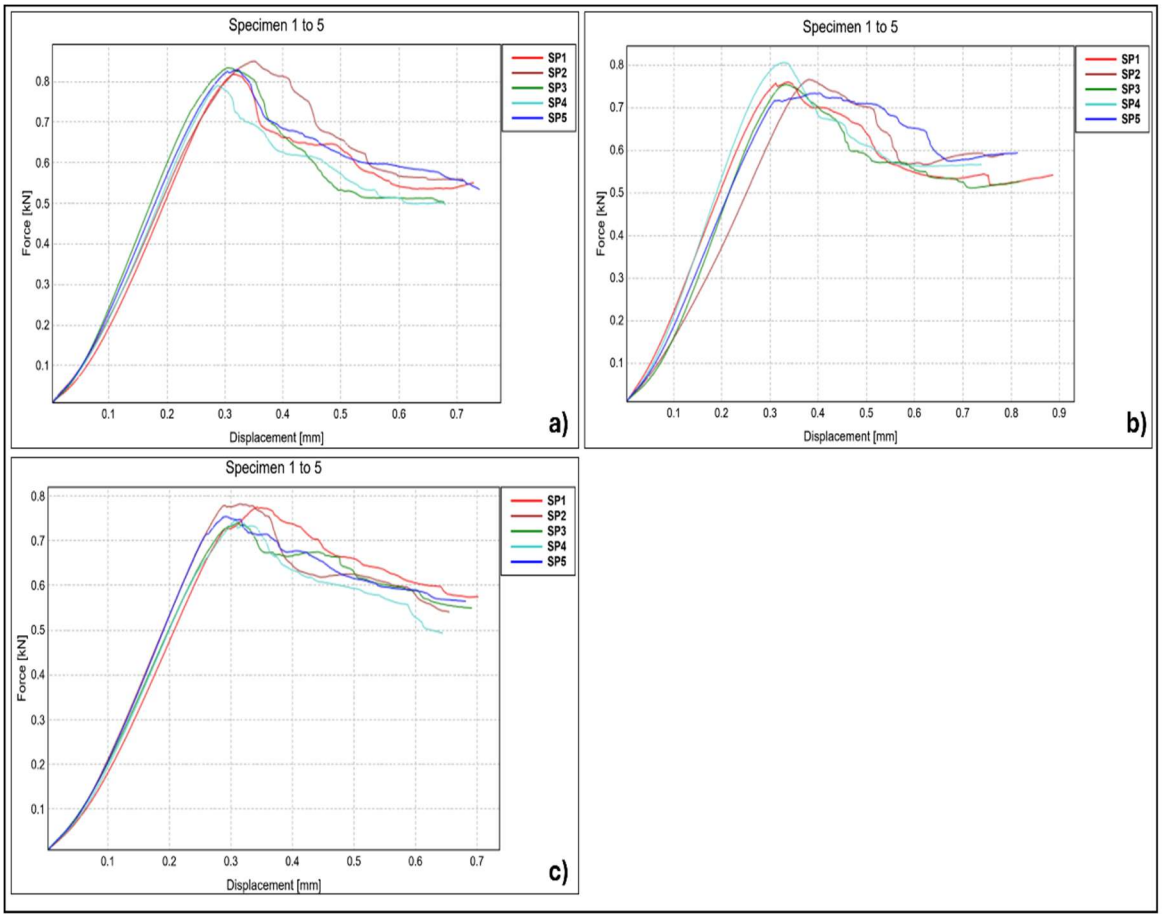
Kür Çevrimi	N	Ortalama	Gruplama
2	5	32,640	A
4	5	32,120	A
3	5	28,780	B

Aynı harfi paylaşmayan ortalamalar anlamlı derecede farklıdır.

ILSS testi ilk alt grubuna ait Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuç grafiği ve bar grafiği Şekil 5.9'da paylaşılmıştır.

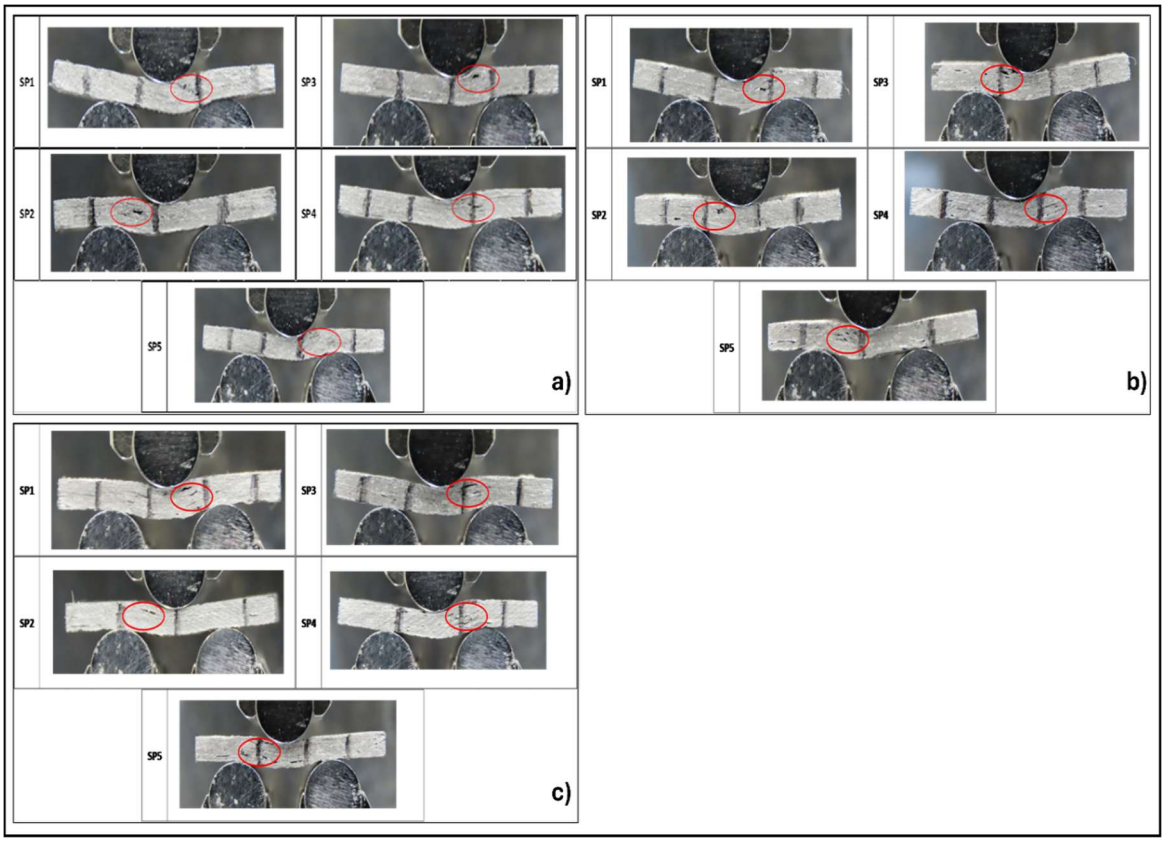


Şekil 5.9. ILSS testi ilk alt grubu a) Tukey testi b) Bar grafiği



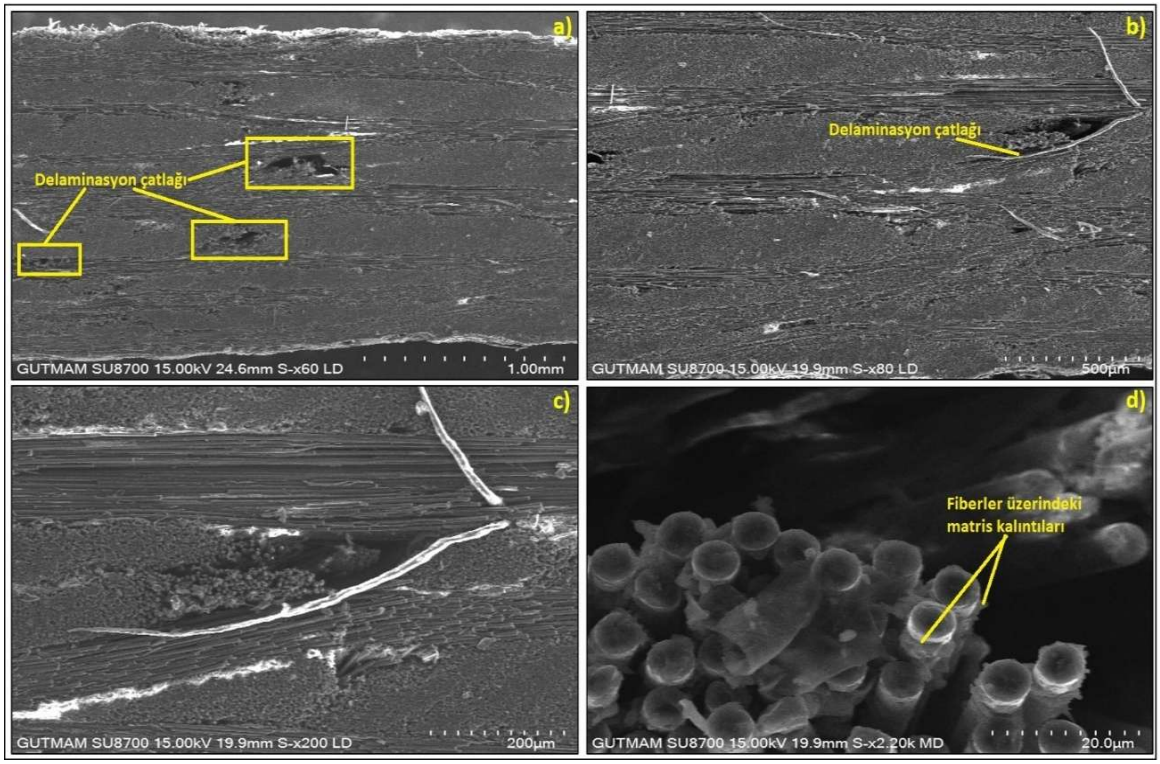
Şekil 5.10. Set a) L2 b) L3 c) L4 için kuvvet vs. deplasman eğrileri

Şekil 5.10'da birinci ILSS testi alt grubunda yer alan setlerin kuvvet-uzama eğrileri yer almaktadır. Eğrilerde pik noktasından sonra başlayan dalgalanma, numunelerde çoklu kayma hasarı oluştuğunu göstermektedir.



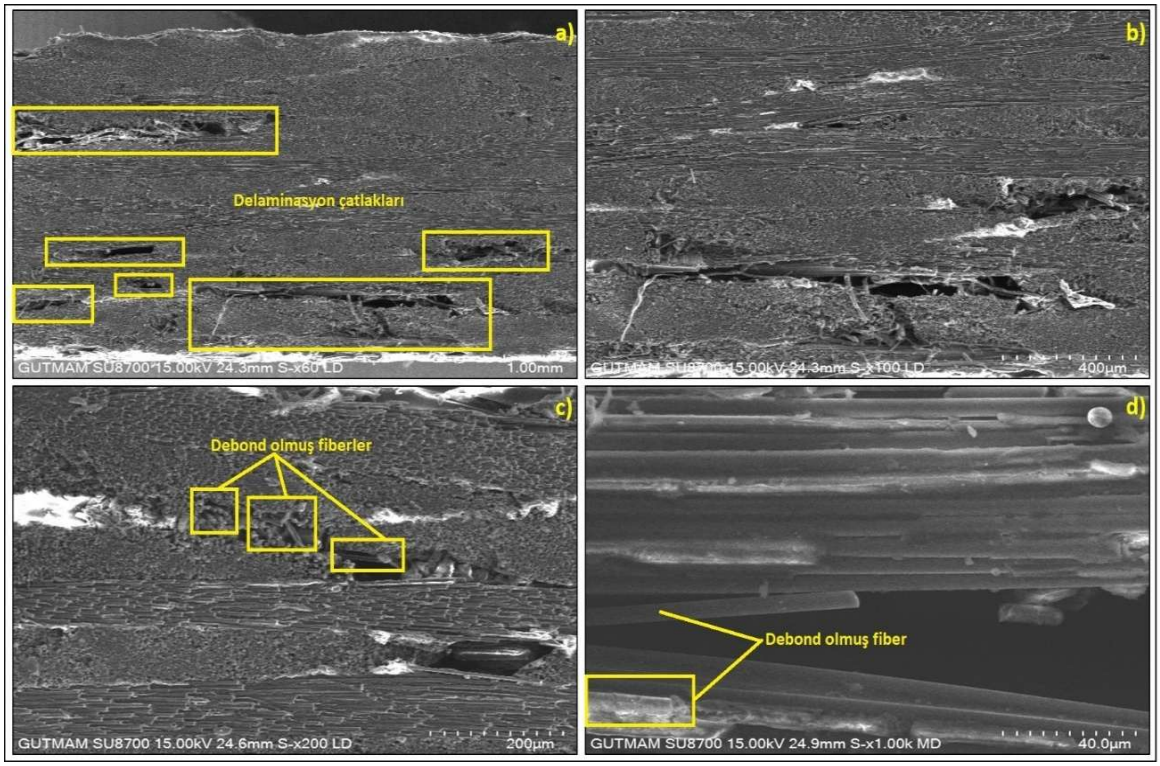
Resim 5.8. a) L2 b) L3 c) L4 setleri için ILSS testi sonrası fotoğrafları

Resim 5.8'de sunulan ILSS testi sonrası numunelerin makro çekim fotoğrafların yanı sıra, katmanlar arası kesme mukavemetindeki bu farklılığın nedenini daha iyi anlamak amacıyla bu alt gruptaki kür çevrimlerine ait ILSS testi numunelerinin test sonrası oluşan hasar bölgelerinden SEM mikrograf görüntüleri de alınmıştır.



Resim 5.9. L2 SEM görüntüleri: a) 1 mm b) 500 µm c) 200 µm d) 20 µm

Resim 5.9-a'da verilen L2'ye ait SEM görüntüleri incelendiğinde tabakalar arası delaminasyonların miktarının az olduğu dikkat çekmektedir. Numune kırıldıktan sonra bile tabakalar arası delaminasyon çatlağının hasarlı bölgenin etrafına yayılmadığı ve lokal olarak kaldığı görülmektedir. Ayrıca Resim 5.9-d'de paylaşılan delaminasyon çatlaklarına yakından bakıldığında fiberlerin üzerinde görülen matris kalıntıları bize fiber-matris ara yüzey yapışmasının güçlü olduğunu bir kez daha ispatlamaktadır. Bu durumun aksine Resim 5.10-a'da L3 numunesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde delaminasyonun yaygın olarak farklı katmanlar arasında meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca Resim 5.10-c ve Resim 5.10-d'de paylaşıldığı üzere matristen ayrılarak debond olmuş fiberlere rastlanmış ve fiberlerin üzerinde ya çok az ya da hiç matris kalıntısının olmaması bu kür çevrimiyle kürlenen numunelerin fiber-matris ara yüzey yapışmasının güçsüz olduğu çıkarımında bulunabileceğini göstermiştir.



Resim 5.10. L3 SEM görüntüleri: a) 1 mm b) 400 µm c) 200 µm d) 40 µm

Dolayısıyla 2 ve 4 nolu kür çevrimi ile kürlenen numunelerin karbon fiber-reçine arası ara yüzey yapışma kuvvetinin 3 nolu kür çevrimi ile kürlenen numunelerden daha yüksek olduğu söylenebilir. Bu testin sonucunda kürleme sıcaklığının ILSS değeri üzerinde etkili bir kür parametresi olduğu çıkarımı literatürde mevcut geçmiş çalışmalarla uyum içerisindedir [9, 17, 18, 22].

Çizelge 5.18'de yorumlanması gereken katmanlar arası kesme dayanımı testlerinin ikinci alt grubu, üç kür döngüsü için aynı bekleme süresi (15 saat) ve kürleme sıcaklığı (85°C) ile birlikte ısıtma hızındaki değişimi temsil eder.

Çizelge 5.18. ILSS testi ikinci alt grubu sonuçları (Isınma hızı değişimi)

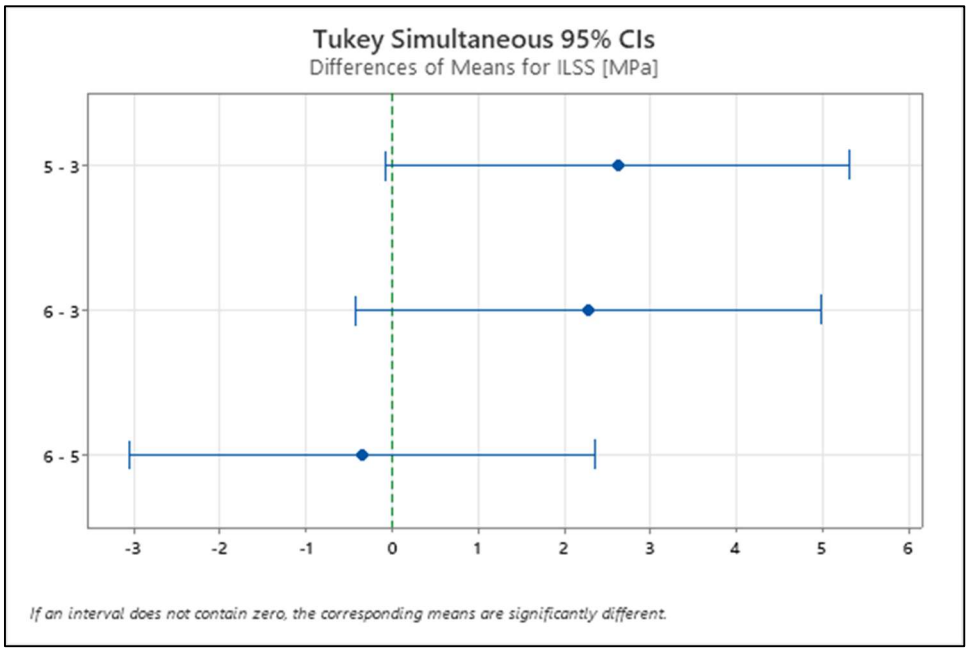
Kür Çevrimi	Panel	Numune	ILSS [MPa]
3	85/15/0,5	L3	28,78
5	85/15/1	L5	31,40
6	85/15/2	L6	31,06

Çizelge 5.19'da paylaşıldığı üzere Tek yönlü ANOVA testine göre, p değeri 0,047 çıkmıştır. Bu sınırda bir değerdir ve setler arası anlamlı bir farklılık olup olmadığı, farklılık var ise

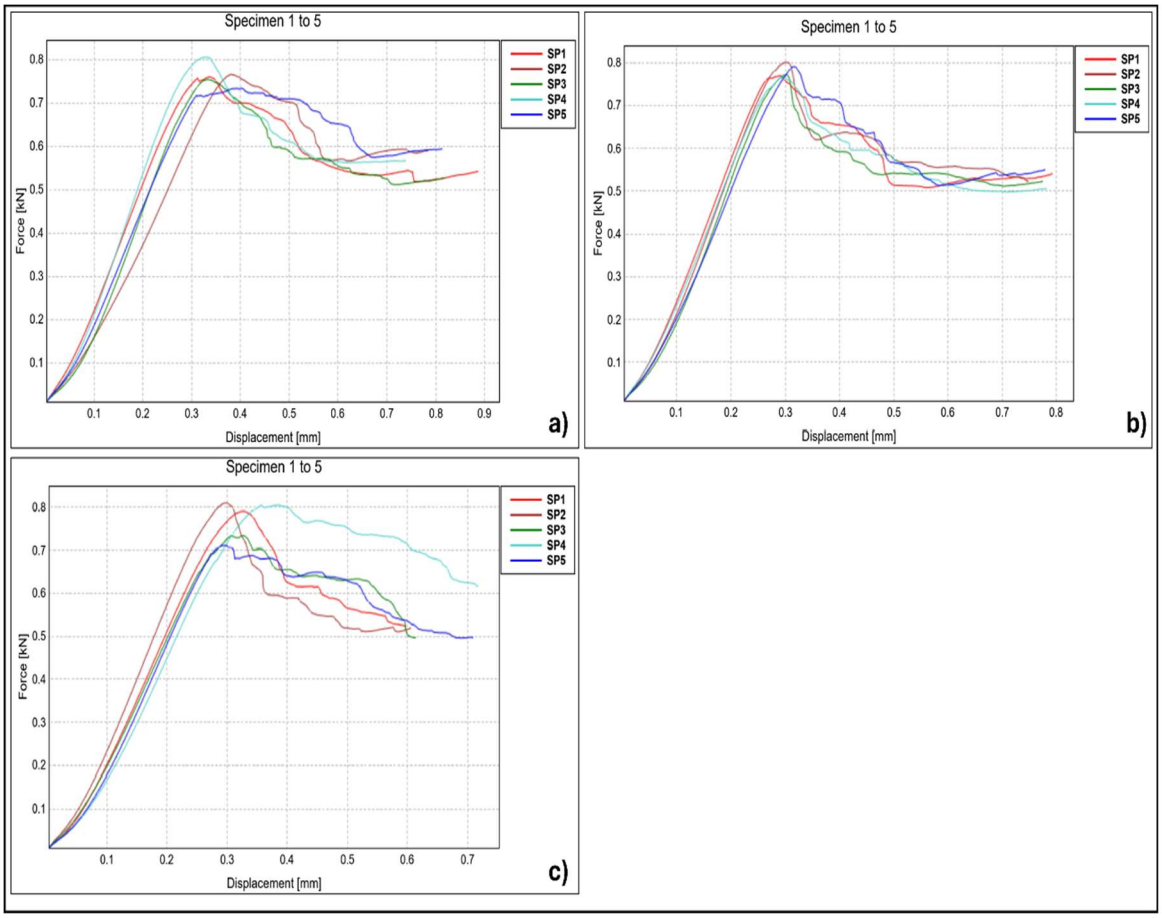
hangi setler arası olduğunu belirlemek için post-hoc testi gereklidir. Yapılan Tukey ikili karşılaştırma testinde Şekil 5.11'de gösterilen aralıklar tüm ikili karşılaştırmalar için sıfır içerdiğinden, ısınma hızının katmanlar arası kesme dayanımı özellikleri üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamsız olduğu sonucuna varılabilir.

Çizelge 5.19. ILSS testi ikinci alt grubu ANOVA testi sonucu

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Gruplararası	2	20,30	10,149	3,97	0,047
Hata	12	30,66	2,555		
Toplam	14	50,96			

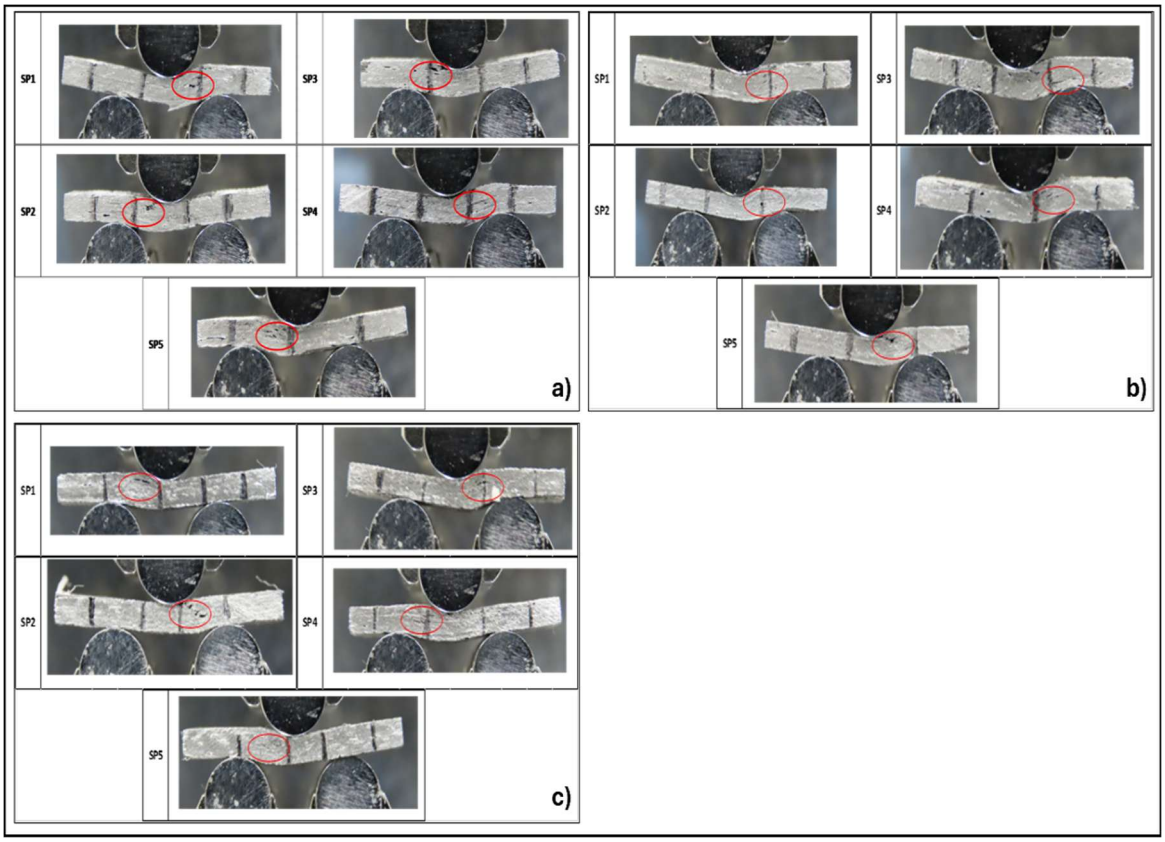


Şekil 5.11. ILSS testi ikinci alt grubu için Tukey çifler arası karşılaştırma testi



Şekil 5.12. Set a) L3 b) L5 c) L6 için kuvvet vs. deplasman eğrileri

Şekil 5.12'de ikinci ILSS testi alt grubunda yer alan setlerin kuvvet-uzama eğrileri yer almaktadır. Eğrilerde pik noktasından sonra başlayan dalgalanma, numunelerde çoklu kayma hasarı oluştuğunu göstermektedir.



Resim 5.11. a) L3 b) L5 c) L6 setleri için ILSS testi sonrası fotoğrafları

Resim 5.11'de L3, L5 ve L6 setleri için ILSS testi sonrası makro fotoğraflarına yer verilmiştir. Bu fotoğraflardan yola çıkarak test edilen setlerin hasar modlarının çoklu kayma hasarı olduğunu söyleyebiliriz. EN2563 standardına göre bu hasar modu bu tezin 4.4 nolu kısmında paylaşılan Eş. 4.1 ile ILSS değerinin hesaplanabilmesi için uygun olduğunu ifade etmektedir. Benzer şekilde, Chang ve diğerleri [9] yaptıkları çalışmada ısıtma hızının ILSS dayanımı üzerinde bir etkiye sahip olmadığını raporlamıştır. Bununla birlikte ıslak serim/vakum torbalama yöntemiyle üretilmiş CFRP numunelerin ILSS dayanımı üzerinde ısıtma hızının etkisini bu tez çalışmasıyla literatüre kazandırmış bulunmaktayız.

Çizelge 5.20'de yorumlanması gereken katmanlar arası kesme dayanımı testlerinin üçüncü alt grubu, üç kür çevrimi için aynı ısınma hızı (0,5 °C/dk) ve kürleme sıcaklığı (105 °C) ile birlikte bekleme süresi değişimini temsil eder.

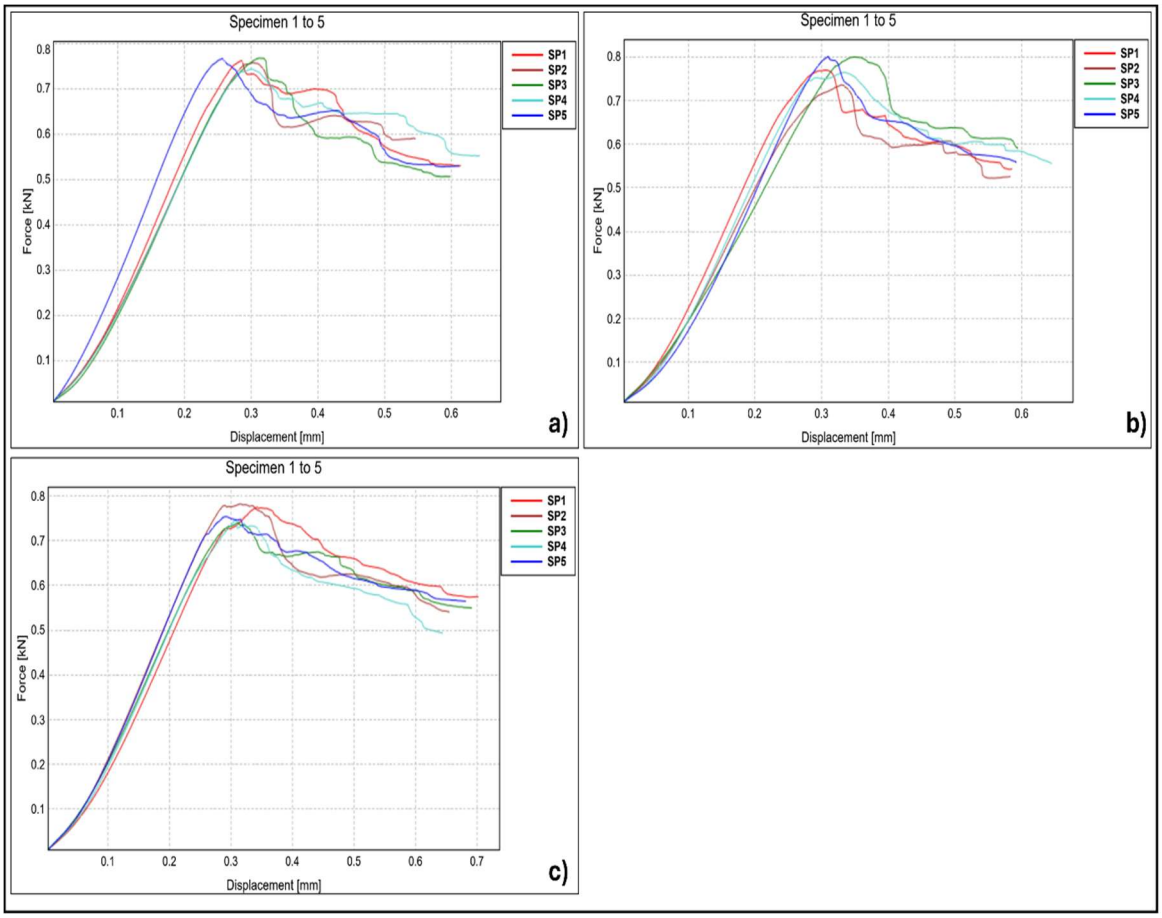
Çizelge 5.20. ILSS testi üçüncü alt grubu sonuçları

Kür Çevrimi	Panel	Numune	ILSS [MPa]
9	105/5/0,5	L9	31,12
10	105/10/0,5	L10	30,83
4	105/15/0,5	L4	32,12

Çizelge 5.21'de paylaşılan Tek yönlü ANOVA testine göre, 105°C'de bekleme süresinin ILSS özellikleri üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamsız olduğu sonucuna varılabilir. Çünkü p değeri 0,107, anlamlılık seviyesi 0,05'ten büyüktür ve bu üç kür çevrimi arasında belirgin bir fark yoktur. Bu nedenle farklı alt grupları bulmak için post-hoc testi yapmaya gerek yoktur.

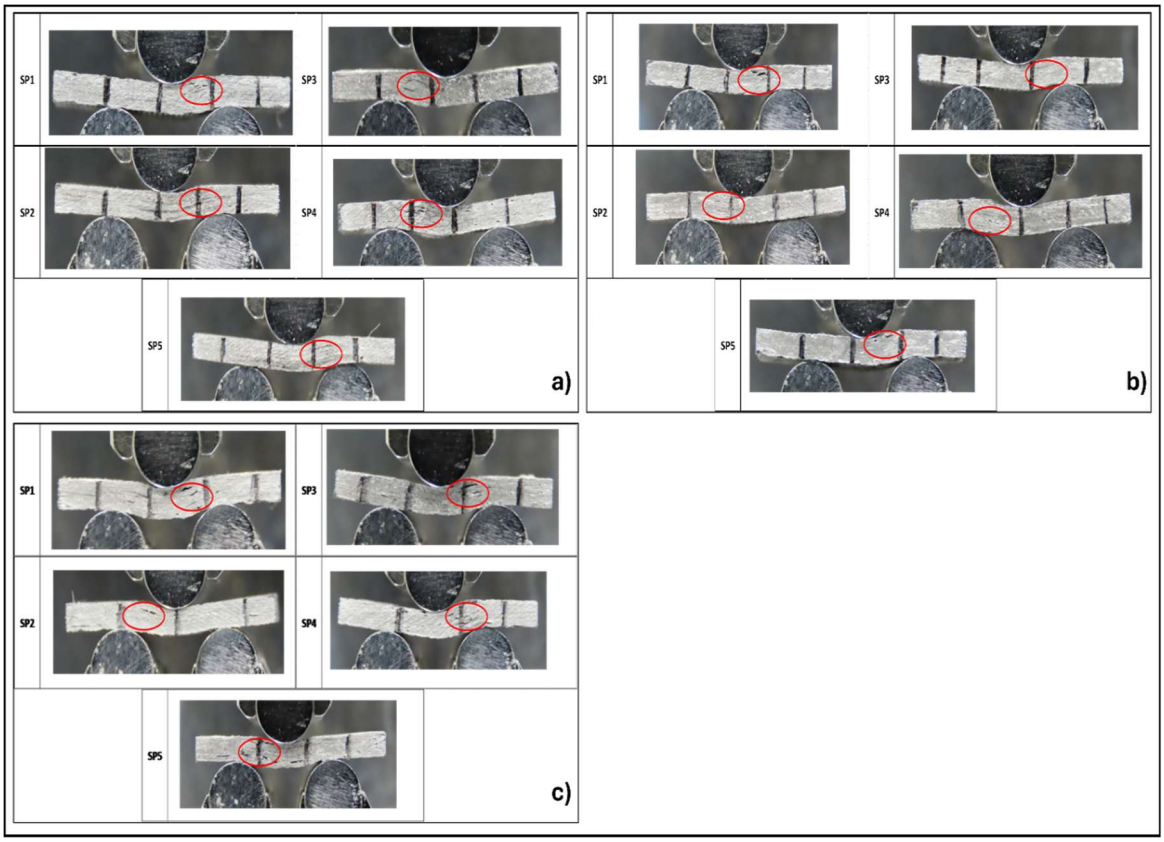
Çizelge 5.21. ILSS testi üçüncü alt grubu ANOVA testi sonucu

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Gruplararası	2	4,601	2,3007	2,70	0,107
Hata	12	10,216	0,8513		
Toplam	14	14,817			



Şekil 5.13. Set a) L9 b) L10 c) L4 için kuvvet vs. deplasman eğrileri

Şekil 5.13'te üçüncü ILSS testi alt grubunda yer alan setlerin kuvvet-uzama eğrileri yer almaktadır. Eğrilerde pik noktasından sonra başlayan dalgalanma, numunelerde çoklu kayma hasarı oluştuğunu göstermektedir.



Resim 5.12. a) L9 b) L10 c) L4 setleri için ILSS testi sonrası fotoğrafları

Resim 5.12'de L9, L10 ve L4 setleri için ILSS testi sonrası makro fotoğraflarına yer verilmiştir. Bu fotoğraflardan yola çıkarak test edilen setlerin hasar modlarının çoklu kayma hasarı olduğunu söyleyebiliriz. EN2563 standardına göre bu hasar modu bu tezin 4.4 nolu kısmında paylaşılan Eş. 4.1 ile ILSS değerinin hesaplanabilmesi için uygun olduğunu ifade etmektedir. Benzer şekilde, Chang ve diğerleri [9] yapmış oldukları çalışmada bekleme süresinin ILSS dayanımı üzerinde bir etkisinin olmadığı belirtmektedir. Bununla birlikte ıslak serim/vakum torbalama yöntemiyle üretilmiş CFRP numunelerin ILSS dayanımı üzerinde bekleme süresinin etkisini bu tez çalışmasıyla literatüre kazandırmış bulunmaktayız.

Çizelge 5.22'de yorumlanması gereken katmanlar arası kesme dayanımı testlerinin dördüncü alt grubu, üç kür çevrimi için aynı ısınma hızı (0,5 °C/dk) ve kürleme sıcaklığı (85 °C) ile birlikte bekleme süresi değişimini temsil eder.

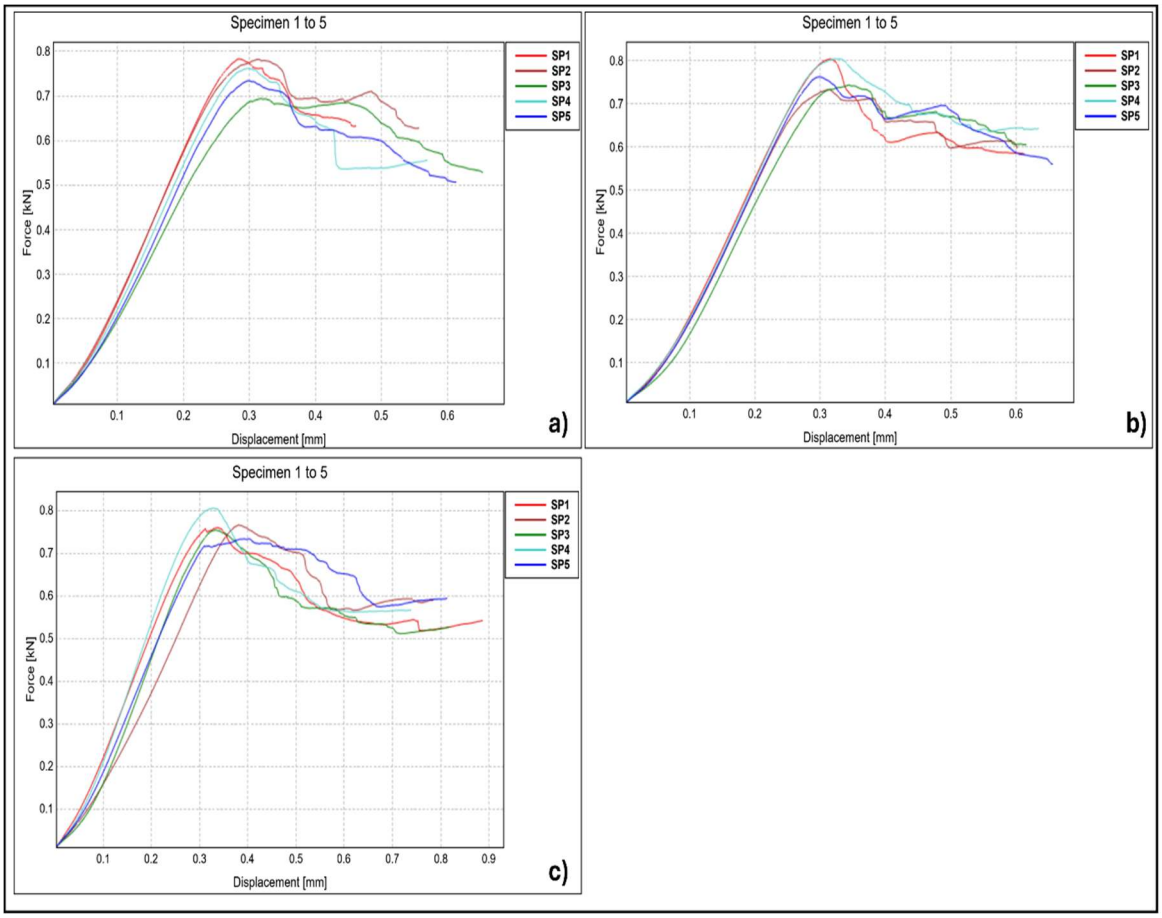
Çizelge 5.22. ILSS testi dördüncü alt grubu sonuçları

Kür Çevrimi	Panel	Numune	ILSS [MPa]
7	85/5/0,5	L7	30,60
8	85/10/0,5	L8	31,40
3	85/15/0,5	L3	28,78

Çizelge 5.23'te paylaşılan Tek yönlü ANOVA testine göre, 105°C'de bekleme süresinin ILSS özellikleri üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamsız olduğu sonucuna varılabilir, çünkü p değeri 0,071, anlamlılık seviyesi 0,05'ten büyüktür ve bu üç kür döngüsü arasında belirgin bir fark yoktur. Bu nedenle farklı alt grupları bulmak için post-hoc test yapmaya gerek yoktur.

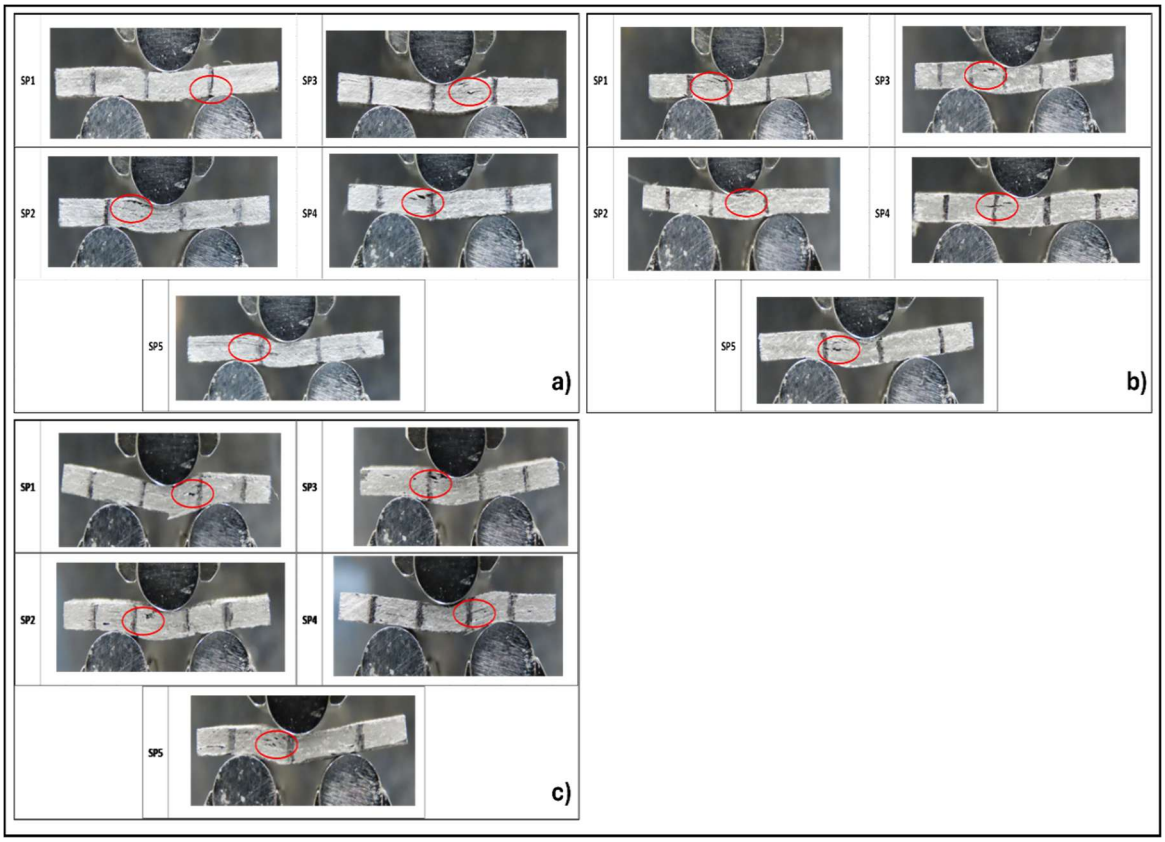
Çizelge 5.23. ILSS testi dördüncü alt grubu ANOVA testi sonucu

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Gruplararası	2	18,03	9,014	3,32	0,071
Hata	12	32,61	2,717		
Toplam	14	50,64			



Şekil 5.14. Set a) L7 b) L8 c) L3 için kuvvet vs. deplasman eğrileri

Şekil 5.14'te dördüncü ILSS testi alt grubunda yer alan setlerin kuvvet-uzama eğrileri yer almaktadır. Eğrilerde pik noktasından sonra başlayan dalgalanma, numunelerde çoklu kayma hasarı oluştuğunu göstermektedir.



Resim 5.13. a) L7 b) L8 c) L3 setleri için ILSS testi sonrası fotoğrafları

Resim 5.13'te L7, L8 ve L3 setleri için ILSS testi sonrası makro fotoğraflarına yer verilmiştir. Bu fotoğraflardan yola çıkarak test edilen setlerin hasar modlarının çoklu kayma hasarı olduğunu söyleyebiliriz. EN2563 standardına göre bu hasar modu bu tezin 4.4 nolu kısmında paylaşılan Eş. 4.1 ile ILSS değerinin hesaplanabilmesi için uygun olduğunu ifade etmektedir. 105°C'de bekleme süresi alt grubuna benzer şekilde bu alt grupta da ILSS dayanımı üzerinde bekleme süresi parametresinin istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sebep olmadığı sonucuna varılmıştır.

5.4. Dinamik Mekanik Analiz (DMA) Sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında koşulan DMA testleri EN 6032 standardına göre yürütülmüştür. Numuneler tek konsollu sıkıştırma test düzeneği ile test edilmiştir. Genlik 15 µm ve frekans 1 Hz olarak uygulanmış ve ısıtma hızı 5 °C/dk olmuştur. Testler numuneler için oda sıcaklığı ile 150 °C arasında kuru havada gerçekleştirilmiştir. Depolama modülü ve kayıp modülü değerleri kaydedilmiş ve camsı geçiş sıcaklıkları depolama modülünden (T_g-başlangıç) hesaplanmış, ardından kayıp modülünün (T_g-kayıp) pik sıcaklığıyla bildirilmiştir. Basma ve

ILSS testlerinde kendi içlerinde anlamlı farklılık bulunan alt gruplara DMA testi koşulmuştur. Çizelge 5.24'te yer alan her kür çevrimi seti için üç tekrar koşulmuş DMA testinde depolama modülü eğrisine teğet çizilen eğriler yardımıyla bulunan T_g-başlangıç değeri ortalamaları bir arada verilmiştir.

Çizelge 5.24. DMA testi koşulan kür çevrimleri ve Tg-başlangıç sonuçları

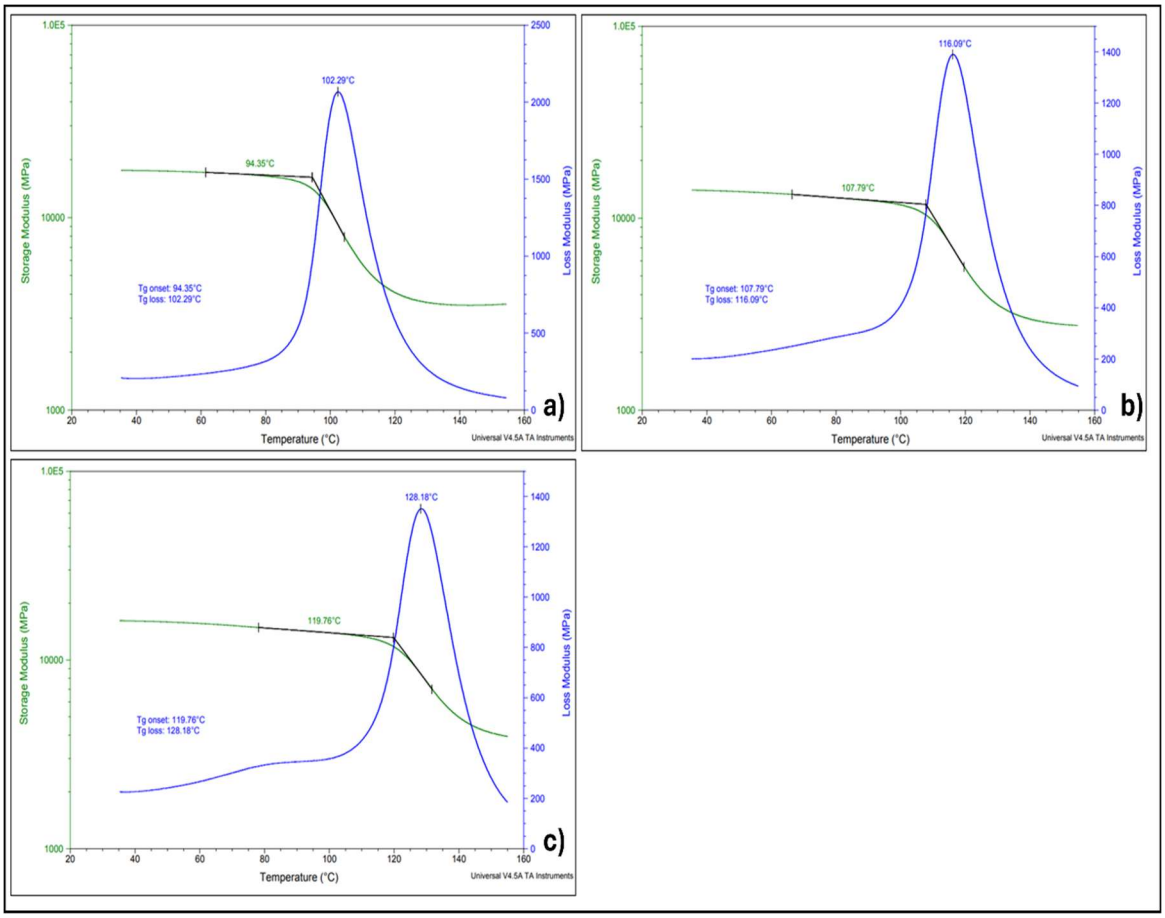
Kür Çevrimi	Panel	Numune	T_g-başlangıç
2	65/15/0,5	D2	94,59
3	85/15/0,5	D3	107,72
4	105/15/0,5	D4	119,48
7	85/5/0,5	D7	106,70
8	85/10/0,5	D8	108,44

Çizelge 5.25'te yorumlanması gereken DMA testlerinin birinci alt grubu, üç kür döngüsü için aynı bekleme süresi (15 saat) ve ısıtma hızı (0,5°C/dk) ile birlikte kürleme sıcaklığındaki değişimi temsil eder.

Çizelge 5.25. DMA testi ilk alt grubu sonuçları (Sıcaklık değişimi)

Kür Çevrimi	Panel	Numune	T_g-başlangıç
2	65/15/0,5	D2	94,59
3	85/15/0,5	D3	107,72
4	105/15/0,5	D4	119,48

Çizelge 5.25'te paylaşılan T_g sonuçlarından hareketle kürleme sıcaklığı arttıkça T_g değerinin arttığı görülmektedir. Kür sıcaklığı 65°C'den 85°C'ye çıktığında bu 20°C'lik artışın T_g'de 13,13°C'lik bir artışa neden olduğu görülmüştür. Bununla birlikte kür sıcaklığı 85°C'den 105°C'ye çıktığında ise T_g'deki artış 11,76°C olmuştur. Bu azalmanın nedeni artan kürleme sıcaklığıyla birlikte kompozit yapının içeriğindeki reçinenin sahip olduğu kürlenme derecesinin tamamen kürlenmiş olma durumuna gittikçe yaklaşmasıdır. Şekil 5.15'te D2, D3 ve D4'e ait DMA termogram grafiklerine yer verilmiştir.



Şekil 5.15. DMA test termogramları a) D2-3 b) D3-2 c) D4-1

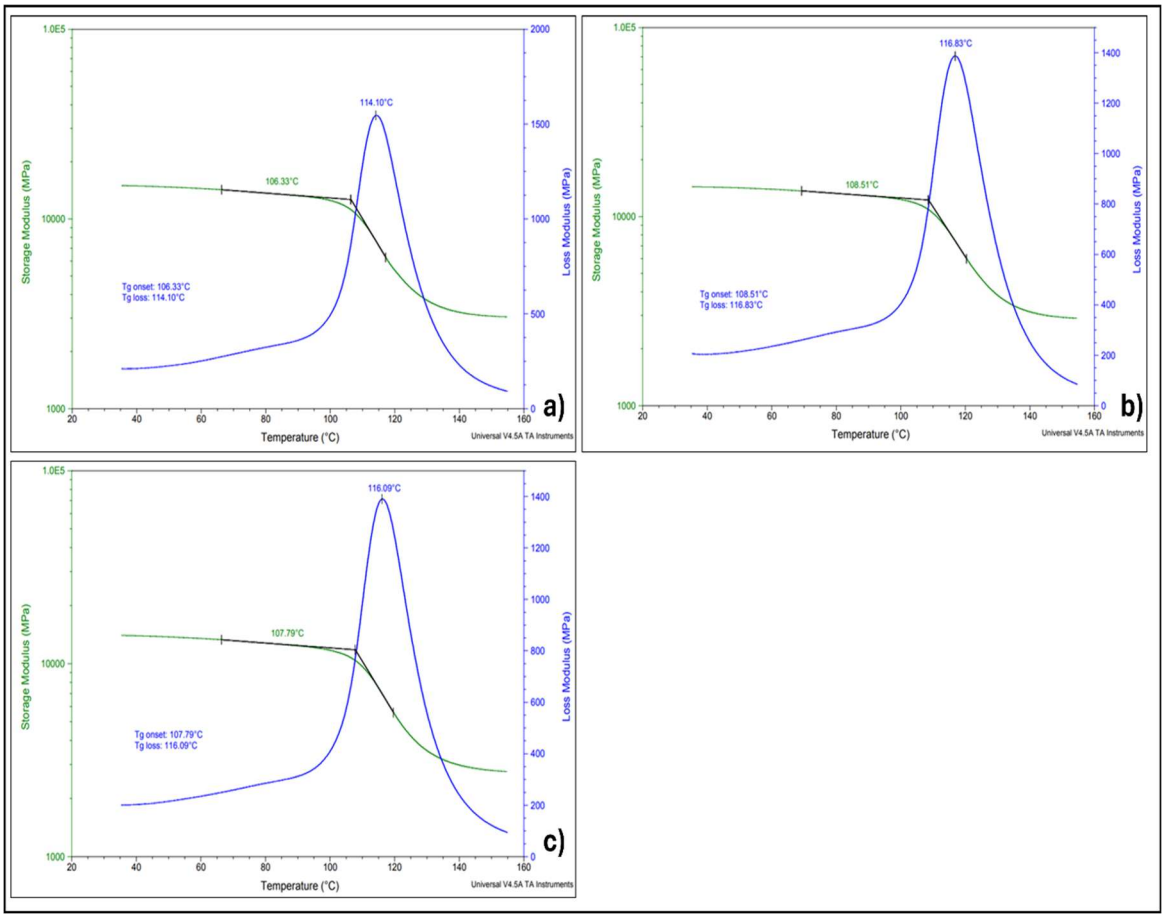
Çizelge 5.26'da yorumlanması gereken DMA testlerinin ikinci alt grubu, üç kür çevrimi için aynı ısınma hızı (0,5°C/dk) ve kürleme sıcaklığı (85°C) ile birlikte bekleme süresi değişimini temsil eder.

Çizelge 5.26. DMA testi ikinci alt grubu sonuçları

Kür Çevrimi	Panel	Numune	T_g-başlangıç
7	85/5/0,5	D7	106,70
8	85/10/0,5	D8	108,44
3	85/15/0,5	D3	107,72

Çizelge 5.26'da paylaşılan T_g sonuçlarından hareketle bekleme süresi 5 saatten 10 saate çıktığında T_g'de ufak da olsa bir artış olsa da bu süreden sonra Tg'de bir artış gözlenmemiştir. Bu noktadan sonra T_g'de bir artış sağlayabilmek için daha yüksek sıcaklıklarda kürlemek gerekmektedir. D4 numunesi 105°C'de kürlenerek bunu sağlamıştır.

Sonuçlar epoksi reçinenin teknik veri sayfasında paylaşılanlarla uyumlu çıkmıştır. Şekil 5.16'da D7, D8 ve D3'e ait DMA termogram grafiklerine yer verilmiştir.



Şekil 5.16. DMA test termogramları a) D7-3 b) D8-3 c) D3-2

DMA testlerinde görüldüğü üzere epoksi-amin karışımıyla hazırlanan matrisin T_g'si sabit değildir. Çünkü çapraz bağlanma mükemmel değildir. Kürleme sıcaklığı T_g'yi aştığında çapraz bağlanma tekrar başlar ve epoksi içinde kalan aminler epoksitlerde kalan halkaları açmaya devam eder. Sonuçlar bu yönüyle Michel ve Ferrier'in [67] yapmış olduğu çalışma ile uyum içerisindedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında dokuma karbon fiber kumaş ve epoksi reçine malzemeleri kullanılarak üretilen lamine kompozit paneller farklı kür çevrimleriyle kürlenmiştir. Tezin önceki bölümlerinde bahsedilen standartların isterleri dikkate alınarak bu panellerden numuneler kesilmiştir. Bu numuneler fiziksel ve mekanik testlere tabii tutulmuştur. Testlerin çıktısı olan sonuçlar istatistiksel analiz programı yardımıyla analiz edilmiş ve kür parametrelerinin kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi bilimsel bir temelde yorumlanmıştır. Varyansların homojenliğinden Levene testi ile emin olduktan sonra alt grupların her biri için tek yönlü varyans analizi (ANOVA) koşulmuştur. Sıfır ve karşıt hipotezden hangisinin kabul edildiğine karar verilmiş, eğer karşıt (alternatif) hipotez kabul edildiyse bu farklılığa sebep olan kür setlerini bulmak için Tukey post-hoc testi koşulmuştur.

Kür sıcaklığı, bekleme süresi, ısıtma hızı bu çalışmada incelenen kür parametreleridir. Kür sıcaklığı olarak 65°C, 85°C ve 105°C; ısıtma hızı olarak 0,5°C/dk, 1°C/dk ve 2°C/dk; bekleme süresi olarak 5 saat, 10 saat ve 15 saat seçilmiştir. Bu parametrelerin değişimiyle kurgulanmış dokuz farklı kür çevrimiyle ayrı ayrı kürlenmiş kompozit plakalar numune hazırlama için kullanılmıştır.

2, 3, 4, 7 ve 8 nolu kür çevrimleri ile kürlenen numunelerin fiber hacim oranını (FVC) bulabilmek için sülfürik asitte çözme yöntemiyle EN 2564 standardına uygun olarak FVC testi yapılmıştır. Test sonuçları bu kür çevrimleri ile kürlenen numunelerin sahip olduğu fiber hacim oranları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farkın olmadığını göstermiştir. Uzay, Ç., ve diğerleri [49] ile Liu, L., ve diğerleri [73] yapmış oldukları çalışmalarda vakum seviyesi ve kürleme basıncının FVC ve boşluk içeriğindeki en önemli belirleyici faktörler olduğunu belirtmişlerdir. Bu tez çalışmasında ön kürleme aşamasında uygulanan vakum seviyesi tüm kür çevrimleri için sabit tutulduğundan FVC'de anlamlı bir farklılığın oluşmadığı çıkarımı yapılabilir. Dolayısıyla kür çevrimi setleri arası mekanik özelliklerdeki farklılıkların kürlenme durumundaki farklılığa atfedilebileceği anlaşılmıştır.

Basma testlerinden kür sıcaklığı değişimini araştıran alt grubun test sonuçları incelenmiştir. P-değeri 0,013 çıkmış ve bu değer anlamlılık düzeyi 0,05'ten küçük olduğundan kür sıcaklığı parametresinin basma dayanımı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sebep olduğu anlaşılmıştır. Diğer parametreler sabit tutularak 65°C'de kürlenen numunelerin

basma dayanımının (467,99 MPa) 85°C'de kürlenen numunelerinkinden (394,28 MPa) istatistiksel olarak anlamlı düzeyde fazla olduğu görülmüştür. Bu farklılığın nedenini anlamak için C2 ve C3 basma numunelerinin hasarlı bölgeleri SEM analizi ile incelenmiştir. Alınan mikrograflar bu iki numunenin mikro yapısında temel bazı farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. C3 numunesinde C2'den daha fazla delaminasyon çatlağı görülmüştür. Bununla birlikte C3 numunesinde fiberler üzerindeki matris kalıntısı miktarının C2 numunesine kıyasla çok daha düşük olduğu görülebilmektedir. Bu durum 3 nolu kür çevrimi ile kürlenen kompozit numunelerin fiber-reçine arayüzey bağlanma kuvvetinin C2'ye oranla daha düşük olmasıyla açıklanabilir.

Basma testlerinde ısıtma hızı değişimini araştıran alt grubun test sonuçları incelenmiştir. p-değeri 0,629 çıkmış ve bu değer anlamlılık düzeyi 0,05'den büyük olduğundan alternatif hipotez reddedilmiş, ısıtma hızı parametresinin basma dayanımı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sebep olmadığı anlaşılmıştır.

Basma testlerinde bekleme süresi değişimini araştıran iki alt grubun test sonuçları incelenmiştir. 85°C'de bekleme süresi değişimini araştıran alt grupta p-değeri 0,022 çıkmış ve bu değer anlamlılık düzeyi 0,05'den küçük olduğundan alternatif hipotez kabul edilmiş, bekleme süresi parametresinin basma dayanımı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sebep olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte 105°C'de bekleme süresi değişimini araştıran alt grupta p-değeri 0,291 çıkmıştır ve alternatif hipotez reddedilmiştir. Dolayısıyla 85°C'deki kür prosesinde bekleme süresi basma dayanımında anlamlı bir değişikliğe neden olmuşken; 105°C'de kürde olmamıştır. Singh ve diğerleri 80°C, 120°C ve 160°C'de 1, 2 ve 3 saat kürleme sürelerinde kürlenmiş CFRP numunelere basma testi uyguladığında 80 ve 120°C'de kürleme süresi arttıkça basma dayanımı artarken; 160°C'de kürleme süresi değişiminin böyle bir değişime neden olmadığı bilgisini raporlamışlardır. Yani prensipte bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla Singh ve diğerlerinin yaptığı çalışma büyük oranda uyum içerisindedir.

ILSS testinde kür sıcaklığı değişimini araştıran alt grubun test sonuçları incelenmiştir. P-değeri 0,000, anlamlılık seviyesi 0,05'ten küçüktür. Dolayısıyla, alternatif hipotez (H_a) kabul edilebilir. 85°C'de kürlenen numunelerin (L3) ortalama ILSS'sinin, 65°C (L2) ve 105 °C'de kürlenen numunelerden (L4) önemli ölçüde daha az olduğunu göstermiştir. L2, L3 ve L4 numunelerinin ILSS değerleri sırasıyla 32,64 MPa, 28,78 MPa ve 32,12 MPa çıkmıştır.

Çizelge 5.17'de paylaşılan Tukey testi ile gruplamada L2 ve L4 aynı grupta yer aldığı için L2 ve L3 SEM analizine tabii tutulmuştur. Bu numunelerin hasarlı bölgelerinden alınan mikrograflarda temel bazı farklılıklar göze çarpmıştır. L2 nolu numune hasara uğradıktan sonra bile tabakalar arası delaminasyon çatlağının hasarlı bölgenin etrafına yayılmadığı ve lokal olarak kaldığı görülmektedir. Ayrıca delaminasyon çatlaklarına yakından bakıldığında fiberlerin üzerinde görülen matris kalıntıları bize fiber-matris ara yüzey yapışmasının güçlü olduğunu bir kez daha ispatlamaktadır. Bu durumun aksine L3 numunesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde delaminasyonun yaygın olarak farklı katmanlar arasında meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca matristen ayrılarak debond olmuş fiberlere rastlanmış ve fiberlerin üzerinde ya çok az ya da hiç matris kalıntısının olmaması bu kür çevrimiyle kürlenen numunelerin fiber-matris ara yüzey yapışmasının güçsüz olduğu çıkarımında bulunabileceğimizi göstermiştir. Bu testin sonucunda kürleme sıcaklığının ILSS değeri üzerinde etkili bir kür parametresi olduğu çıkarımı literatürde mevcut geçmiş çalışmalarla uyum içerisindedir [9, 17, 18, 22].

Kompozit parçaların viskoelastik özelliklerini anlamak üzere basma ve ILSS testinde istatistiksel farklılık arz eden alt gruplara DMA testi de koşulmuştur. Kür sıcaklığı arttıkça T_g'nin arttığı görülmüştür. D7, D8 ve D3 numunelerinde yapılan DMA testinde ise bekleme süresi başta 5 saatten 10 saate çıktığında T_g bir miktar artma olurken daha sonrasındaki bekleme süresi artışlarında aynı sıcaklıkta bir artış olmadığı görülmüştür. Bu noktadan sonra T_g'yi arttırmak için sıcaklığı arttırmak gerekmektedir. Nitekim D4 numunesinde bu sağlanmıştır. Kür sıcaklığı sabit bekleme süresinde 85°C'den 105°C'ye çıktığında T_g değeri 107,72°C'den 119,48°C'ye çıkmıştır. T_g değeri kompozit malzemenin maksimum servis sıcaklığını belirlemede kullanıldığı için önemli bir kriterdir. Tabii olunan standarda göre değişse de genellikle T_g'nin 15 ile 20°C aşağısı o kompozit malzemenin maksimum servis sıcaklığını verir. Özetle kompozit malzeme üretiminde basma ve ILSS gibi mekanik davranışı tayin eden testlerin yanında T_g değeri de önemli bir kriterdir. Ayrıca bu tez çalışmasında Tg ile basma veya ILSS dayanımları arasında bir korelasyon tespit edilmemiştir. Alavi-Soltani, S. ve diğerleri [22] de yapmış oldukları çalışmada mekanik dayanım ile T_g arasında bir korelasyonun olmadığını raporlamışlardır.

ILSS testinde ısıtma hızı ve iki farklı kür sıcaklığında bekleme süresi değişimini araştıran alt grupların test sonuçları incelenmiştir. Koşulan ANOVA testleri ve post-hoc testlerinden hareketle bu parametrelerin ILSS testi sonuçlarında anlamlı bir farklılık yaratmadığı tespit

edilmiştir. Chang ve diğerleri [9] yapmış oldukları çalışmada ısıtma hızının ILSS dayanımı üzerinde çok düşük bir etkisinin olduğunu ve bekleme süresinin bir etkisinin bulunmadığını belirtmektedir. Bununla birlikte WL/VB yöntemiyle üretilmiş CFRP numunelerin ILSS dayanımı üzerinde bekleme süresi ve ısıtma hızının etkisini bu tez çalışmasıyla literatüre kazandırmış bulunmaktayız. Çünkü literatürde mevcut çalışmaların ekserisi kür çevrimi parametrelerinin mekanik özelliklere olan etkisini otoklav prosesleri özelinde incelenmiştir. Bundan önceki bölümlerde de ifade edildiği üzere WL/VB yöntemi günümüzde havacılıkta özellikle İHA üretiminde ve diğer birçok sektörde maliyet etkin bir üretim yöntemi olması hasebiyle tercih edilmesinin yanında kompozit tamirinde olduğu gibi operasyonel bazı zorunluluklardan dolayı yegane yöntem haline gelebilmektedir. Bu sebeple bu üretim ve tamir yönteminde kullanılan kür çevriminin ve parametrelerindeki değişimin nihai ürün üzerindeki etkilerinin anlaşılması adına bu tez çalışmasının literatüre katkı sunduğu kanaatindeyiz.

KAYNAKLAR

1. Miracle, D.B., and Donaldson, S.L. (2001). *Asm handbook Volume 21*. ASM International. 2605

2. Haskilic, V., Ulucan, A., Atici, K. B., and Sarac, S. B. (2023). A real-world case of autoclave loading and scheduling problems in aerospace composite material production. *Omega*, 120, 102918.

3. Zhang, J., Lin, G., Vaidya, U., and Wang, H. (2022). Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications. *Composites Part B Engineering*, 250, 110463.

4. Karsandik, Y., Sabuncuoglu, B., Yildirim, B., and Silberschmidt, V.V. (2023). Impact behavior of sandwich composites for aviation applications: A review. *Composite Structures*, 314, 116941.

5. Zhu, H., Wu, B., Li, D., Zhang, D., and Chen, Y. (2011). Influence of Voids on the Tensile Performance of Carbon/epoxy Fabric Laminates. *Journal of Material Science and Technology*, 27(1), 69–73.

6. Soutis, C. (2005). Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. *Materials Science and Engineering A*, 412(1–2), 171–176.

7. Giurgiutiu, V. (2022). *Stress, vibration, and wave analysis in aerospace composites*. Academic Press. 1–27.

8. Abramovich, H. (2017). *Stability and vibrations of thin-walled composite structures*. Woodhead Publishing. 1-47.

9. Chang, T., Zhan, L., Tan, W., and Li, S. (2017). Optimization of curing process for polymer-matrix composites based on orthogonal experimental method. *Fibers and Polymers*, 18(1), 148–154.

10. Hernández, S., Sket, F., Molina-Aldareguı´a, J. M., González, C., and LLorca, J. (2011). Effect of curing cycle on void distribution and interlaminar shear strength in polymer-matrix composites. *Composites Science and Technology*, 71(10), 1331–1341.

11. Kikuchi, T., Suzuki, E., Takai, Y., Goto, A. and Hamada, H. (2015). *An investigation of experienced person in hand lay-up fabrication method - converting tacit knowledge to explicit in the fiber reinforced plastics molding*. 20th International Conference on Composite Materials (ICCM), Danimarka, 1-3.

12. Kromik, A., Underhill, I., Javanbakht, Z., Francucci, G., and Hall, W. (2022). Low-cost fabrication of high-performance composite structures using external compaction pressure. *Materials Science and Technology*, 38(17), 1459–1466.

13. Turgut, T., Kayran, A., Alemdaroğlu, N. ve Ceylan, M. (2007). Vakum torbalama yöntemi ile kompozit malzemeden yapı üretimi örnek bir havacılık uygulaması. *Mühendis ve Makina*, 48(566). 1-21.

14. Sudarisman, N. and Davies, I. (2008). The effect of processing parameters on the flexural properties of unidirectional carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites. *Materials Science and Engineering A*, 498(1–2), 65–68.

15. Chang, T., Zhan, L., Tan, W. and Li, S. (2016). Void content and interfacial properties of composite laminates under different autoclave cure pressure. *Composite Interfaces*, 24(5), 529–540.

16. Mouritz, A.P. (2000). Ultrasonic and interlaminar properties of highly porous composites. *Journal of Composite Materials*, 34(3), 218–239.

17. Koushyar, H., Alavi-Soltani, S., Minaie, B. and Violette, M. (2011). Effects of variation in autoclave pressure, temperature, and vacuum-application time on porosity and mechanical properties of a carbon fiber/epoxy composite. *Journal of Composite Materials*, 46(16), 1985–2004.

18. Zixuan, C., Tianyu, Y., Jung, K., Park, C., Park, S., Koinkar, P. and Kim, Y. (2018). Effect of curing cycles using wet prepreg processing on mechanical properties. *International Journal of Modern Physics B*, 32(19), 1840076.

19. Liang, J., Liu, L., Qin, Z., Zhao, X., Li, Z., Emmanuel, U. and Feng, J. (2023). Experimental Study of Curing Temperature Effect on Mechanical Performance of Carbon Fiber Composites with Application to Filament Winding Pressure Vessel Design. *Polymers*, 15(4), 982.

20. Singh, S., Vummadisetti, S. and Chawla, H. (2017). Influence of curing on the mechanical performance of FRP laminates. *Journal of Building Engineering*, 16, 1–19.

21. Das, D., Pradhan, S.K., Nayak, R.K., Nanda, B.K. and Routara, B.C. (2019). Influence of curing time on properties of CFRP composites: A case study. *Materials Today Proceedings*, 26, 344–349.

22. Alavi-Soltani, S., Sabzevari, S., Koushyar, H. and Minaie, B. (2011). Thermal, rheological, and mechanical properties of a polymer composite cured at different isothermal cure temperatures. *Journal of Composite Materials*, 46(5), 575–587.

23. Mujahid, Y., Sallih, N., Abdullah, M.Z. and Mustapha, M. (2020). Effects of processing parameters for vacuum-bag-only method on void content and mechanical properties of laminated composites. *Polymer Composites*, 42(2), 567–582.

24. Sharma, A.K., Bhandari, R., Aherwar, A. and Rimašauskienė, R. (2019). Matrix materials used in composites: A comprehensive study. *Materials Today Proceedings*, 21, 1559–1562.

25. Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. CRC Press, 28-35.

26. Nair, A.B. and Joseph, R. (2014). Eco-friendly bio-composites using natural rubber (nr) matrices and natural fiber reinforcements. *Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber*, 249–283.

27. Teti, R. (2002). Machining of composite materials. *CIRP Annals*, 51(2), 611–634.

28. Nijssen, R. (2015). *Composite materials: an introduction*. Netherlands: Inholland University of Applied Sciences, 18-20.

29. Wang, R., Zheng, S. and Zheng, Y. (2011). *Polymer matrix composites and technology*. Woodhead Publishing, 4-9.

30. Erden, S. and Ho, K. (2017). 3 - Fiber reinforced composites. *Fiber-Reinforced Technology for Fiber-Reinforced Composites*, 51-79.

31. Yi, X.-S., S. Du and L. Zhang. (2018). *Composite materials engineering, volume 1: fundamentals of composite materials*. Springer, 2-5.

32. Callister, W.D. and Rethwisch, D.G. (2014). *Materials science and engineering, 9th edition SI version* (9th ed). Wiley, 660-665.

33. Kaw, A.K. (2005). *Mechanics of composite materials.* CRC Press, 42-50.

34. Zhang, X., Chen, Y. and Hu, J. (2018). Recent advances in the development of aerospace materials. *Progress in Aerospace Sciences*, 97, 22–34.

35. Zweben, C.H. and Beaumont, P.W.R. (2018). *5.14 Carbon matrix composites*, in *Comprehensive Composite Materials II*. Elsevier: Oxford, 339-378.

36. Kangishwar, S., Radhika, N., Sheik, A.A., Chavali, A. and Hariharan, S. (2022). A comprehensive review on polymer matrix composites: material selection, fabrication, and application. *Polymer Bulletin,* 80(1), 47-87.

37. Sumithra, G., Reddy, R.N., Dheeraj Kumar, G., Ojha, S., Jayachandra, G. and Raghavendra, G. (2023). Review on composite classification, manufacturing, and applications. *Materials Today: Proceedings,* 1-8.

38. Rajak, D.K., Pagar, D.D., Kumar, R. and Pruncu, C.I. (2019). Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology,* 8(6), 6354–6374.

39. Kar, K.K. (2017). *Composite materials: processing, applications, characterizations.* Berlin Heidelberg: Springer, 5-21.

40. Park, S.J. and Seo, M.K. (2011). Element and processing. İçinde *Interface science and technology*. Elsevier, 431-499.

41. Irving, P. E. and Soutis, C. (2019). *Polymer composites in the aerospace industry.* Woodhead Publishing, 5-9.

42. Clyne, T. W. and Hull, D. (2019). *An introduction to composite materials.* Cambridge university press, 9-10.

43. Akkerman, R. (2005). Laminate mechanics for balanced woven fabrics. *Composites Part B Engineering,* 37(2–3), 108–116.

44. Mahrholz, T., Mosch, J., Mosch, R., Riedel, U. and Herbeck, L. (2003). New high-performance fibre reinforced Materials with nanocomposites. *AAAF Colloquium–Materials for Aerospace Applications*, 24-26.

45. Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L. and Linul, E. (2019). Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. *Polymers,* 11(10), 1667.

46. Cripps, D. (2000). 2.21 – Open Mold Techniques for Thermoset Composites. *Comprehensive Composite Materials*, 2, 737-761.

47. Sałasińska, K., Cabulis, P., Kirpluks, M., Kovalovs, A., Kozikowski, P., Barczewski, M., Celiński, M., Mizera, K., Gałecka, M., Skukis, E., Kalnins, K., Cabulis, U. and Boczkowska, A. (2022). The Effect of Manufacture Process on Mechanical Properties and Burning Behavior of Epoxy-Based Hybrid Composites. *Materials,* 15(1), 301.

48. Lai, J., Zhang, X. and Zhang, X. (2023). Measuring the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforcement Polymer Composite Laminates Obtained by Different Fabrication Processes. *Journal of visualized experiment,* 196.

49. Uzay, Ç., Çetin, A. and Geren, N. (2022). Physical and mechanical properties of laminar composites depending on the production methods: an experimental investigation. *Sadhana,* 47(4).

50. Cardarelli, F. (2008). *Materials handbook* (Üçüncü Baskı). Springer*,* 1498.

51. Wang, F., Zhang, Z., Ning, F., Wang, G. and Dong, C. (2020). A mechanistic model for tensile property of continuous carbon fiber reinforced plastic composites built by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing,* 32, 101102.

52. Harris, B. (1999). *Engineering composite materials.* Routledge, 61-68.

53. Wong, B. S. (2013). Non-destructive evaluation (NDE) of composites: detecting delamination defects using mechanical impedance, ultrasonic and infrared thermographic techniques. *Non-destructive evaluation (NDE) of polymer matrix composites*, 279-308.

54. Sridharan, S. (Ed.). (2008). *Delamination behaviour of composites.* Elsevier. 117-137.

55. Jawaid, M., Sultan, M. T. H. and Saba, N. (2019). *Mechanical and physical testing of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites.* Woodhead Publishing, 343-385.

56. Hodgkinson, J.M. (2012). Testing the strength and stiffness of polymer matrix composites. *Failure Mechanisms in Polymer Matrix Composites: Criteria, Testing and Industrial Applications*, 129-182.

57. Sun, Y., Lu, Y. and Guo, X. (2019). The effects of sample preparation on the interlaminar shear strength test values of unidirectional carbon fiber-reinforced epoxy composites. *Polymers and Polymer Composites,* 27, 228 - 234.

58. Muda, M.K. and Mustapha, F. (2018). Composite patch repair using natural fiber for aerospace applications, sustainable composites for aerospace applications. *Sustainable Composites for Aerospace Applications,* 171–209.

59. Saba, N., Jawaid, M. and Sultan, M.T.H. (2019). An overview of mechanical and physical testing of composite materials. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites,* 1-12.

60. Plummer, C.J.G. (2014). *Testing of polymeric materials.* Elsevier, 35–70.

61. Lu, K., Zhu, W., Su, Q., Li, G. and Yang, X. (2020). Correlation between compression strength and failure mechanism of carbon fiber composite with tailored modulus of amide acid/SiO2 synergistically stiffened epoxy matrix. *Composites Science and Technology,* 202, 108593.

62. Hull, D. (1994). Matrix-dominated properties of polymer matrix composite materials. *Materials Science and Engineering A*, 184(2), 173–183.

63. Jumahat, A., Soutis, C., Jones and Hodzic, A. (2009). Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composites subjected to compressive loading. *Composite Structures,* 92(2), 295–305.

64. Li, A., Zhang, J., Zhang, F., Li, L., Zhu, S. and Yang, Y. (2020). Effects of fiber and matrix properties on the compression strength of carbon fiber reinforced polymer composites. *New Carbon Materials,* 35(6), 752–761.

65. Zhang, L., Tian, X., Malakooti, M. H. and Sodano, H. A. (2018). Novel self-healing CFRP composites with high glass transition temperatures. *Composites Science and Technology,* 168, 96–103.

66. Gabrion, X., Placet, V., Trivaudey, F. and Boubakar, L. (2016). About the thermomechanical behaviour of a carbon fibre reinforced high-temperature thermoplastic composite. *Composites Part B Engineering,* 95, 386–394.

67. Michel, M. and Ferrier, E. (2020). Effect of curing temperature conditions on glass transition temperature values of epoxy polymer used for wet lay-up applications. *Construction and Building Materials,* 231, 117206.

68. Pacáková, V. and Virt J. (2005). Plastics. *Encyclopedia of Analytical Science* (Second Edition), 180-187.

69. De Paula, A.C., Uliana, F., Da Silva Filho, E.A., Soares, K. and Luz, P.P. (2019). Use of DMA-material pocket to determine the glass transition temperature of nitrocellulose blends in film form. *Carbohydrate Polymers,* 226, 115288.

70. De Nardo, L., & Farè, S. (2017). Dynamico-mechanical characterization of polymer biomaterials. *Characterization of Polymeric Biomaterials*, 203–232.

71. Menard, K.P. and Menard, N. (2020). *Dynamic Mechanical Analysis.* CRC Press, 4-7.

72. Herzog, B., Gardner, D. J., Lopez-Anido, R. and Goodell, B. (2005). Glass-transition temperature based on dynamic mechanical thermal analysis techniques as an indicator of the adhesive performance of vinyl ester resin. *Journal of Applied Polymer Science,* 97(6), 2221–2229.

73. Liu, L., Zhang, B., Wang, D. and Wu, Z. (2005). Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates. *Composite Structures,* 73(3), 303–309.



Gazili olmak ayrıcalıktır