T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

FARKLI SENTETİK FİBERLER İLE TAKVİYE EDİLMİŞ ALÜMİNYUM TABAKALI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE TERMAL ÇEVRİMİN ETKİSİ

İbrahim BİLİZ

Haziran-2025
BATMAN

T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

FARKLI SENTETİK FİBERLER İLE TAKVİYE EDİLMİŞ ALÜMİNYUM TABAKALI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE TERMAL ÇEVRİMİN ETKİSİ

İbrahim BİLİZ

Danışman
Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Erol KILIÇKAP **Prof. Dr. Ahmet YARDIMEDEN**

Doç. Dr. Musa KILIÇ **Doç Dr. Hüseyin GÜRBÜZ**

Haziran-2025
BATMAN

TEZ KABUL VE ONAYI

İbrahim BİLİZ tarafından hazırlanan "Farklı Sentetik Fiberler İle Takviye Edilmiş Alüminyum Tabakalı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Termal Çevrimin Etkisi" adlı tez çalışması 16/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri **İmza**

Başkan
Prof. Dr. Erol KILIÇKAP

Danışman
Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Üye
Prof. Dr. Ahmet YARDIMEDEN

Üye
Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

Üye
Doç. Dr. Musa KILIÇ

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*Bu tez çalışması Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BTÜBAP) tarafından BTÜBAP–2023–Doktora–04 nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

İbrahim BİLİZ
Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FARKLI SENTETİK FİBERLER İLE TAKVİYE EDİLMİŞ ALÜMİNYUM TABAKALI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE TERMAL ÇEVRİMİN ETKİSİ

İbrahim BİLİZ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2025, 178 Sayfa

Bu çalışmada, farklı fiberlerle takviye edilmiş alüminyum tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine termal çevrim işleminin etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Araştırma kapsamında, 2024-T3 alüminyum alaşımlı levha ile cam, karbon, bazalt ve aramid fiberlerin tekil veya kombinasyon hâlinde kullanımıyla toplam beş tabakadan oluşan on farklı tabakalı kompozit yapı (Arall, Carall, Glare, Barall, Ar-Carall, Ar-Glare, Ar-Barall, Car-Glare, Car-Barall ve Gl-Barall) vakum torbalama yöntemiyle üretilmiştir. Kompozitlerin 1., 3. ve 5. tabakaları alüminyum levhalardan, 2. ve 4. tabakaları ise belirlenen fiber takviye kombinasyonlarından oluşturulmuştur.

Üretilen kompozit numunelerin bir bölümü doğrudan mekanik testlere tabi tutulmak üzere ayrılmış; diğer bölümü ise farklı sayılardaki termal çevrim işlemine maruz bırakılmıştır. Termal çevrimler, sıcaklık farkı 120 °C olacak şekilde –45 °C ile +75 °C arasında uygulanmış ve bu çevrimler sırasıyla 5., 15., 25., 50., 100. ve 150. döngü sayılarında gerçekleştirilmiştir. Çevrim sonrasında, kompozit numunelerin mekanik davranışları çekme testi, eğilme testi, çentik darbe testi, kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) testi ve yarı statik penetrasyon testi (QSPT) ile değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, hem tabakalı kompozit yapı bileşiminin hem de uygulanan termal çevrim sayısının mekanik performans üzerindeki etkileri karşılaştırmalı ve sistematik bir biçimde analiz edilmiştir.

Elde edilen bulgular, termal çevrimlerin fiber metal laminat (FML) kompozitlerin mekanik performansı üzerinde karmaşık ve yapıya özgü etkilere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Genel olarak, bazı kompozit türlerinde ilk çevrimlerde hafif bir mukavemet artışı gözlemlenirken, artan çevrim sayısıyla bu artışın kısmı geri kaybedildiği ve uzun çevrimler sonunda yeniden bir toparlanma eğiliminin ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Termal çevrimlerin uzama miktarı ve enerji emilimi kapasitesi üzerinde ise genellikle olumlu etkiler yarattığı görülmüştür. Özellikle bazı hibrit FML kompozitlerin, tek tip fiber içeren kompozitlere kıyasla termal çevrimlere karşı daha istikrarlı veya iyileşmiş mekanik özellikler sergilediği belirlenmiştir.

Bu sonuçlar, FML'lerin tasarım ve uygulama süreçlerinde termal çevrim etkilerinin dikkate alınmasının kritik önem taşıdığını göstermektedir. Ayrıca, farklı malzemeler arasındaki termal genleşme katsayılarının uyumsuzluğundan kaynaklanan iç gerilmeler, mikroçatlak oluşumu ve delaminasyon gibi hasar mekanizmalarının anlaşılması, daha dayanıklı ve uzun ömürlü kompozit yapıların geliştirilmesi açısından yol gösterici olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Fiber Metal Laminat (FML), Hibrit Kompozit, QSPT, SBS, Termal Çevrim.

ABSTRACT

DOCTORAL THESIS

THE EFFECT OF THERMAL CYCLING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM LAMINATED COMPOSITES REINFORCED WITH DIFFERENT SYNTHETIC FIBERS

İbrahim BİLİZ

Batman University Graduate Education Institute

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2025, 178 Pages

In this study, the effect of thermal cycling process on the mechanical properties of aluminum layered composite materials reinforced with different fibers was investigated experimentally. Within the scope of the research, ten different layered composite structures (Arall, Carall, Glare, Barall, Ar-Carall, Ar-Glare, Ar-Barall, Car-Glare, Car-Barall and Gl-Barall) consisting of a total of five layers were fabricated using 2024-T3 aluminum alloy sheet and glass, carbon, basalt and aramid fibers individually or in combination by vacuum bagging method. The 1st, 3rd and 5th layers of the composites were made of aluminum sheets, while the 2nd and 4th layers were made of determined fiber reinforcement combinations.

Some of the fabricated composite samples were separated for direct mechanical testing; the other part was subjected to different numbers of thermal cycling processes. Thermal cycling was applied between –45 °C and +75 °C with a temperature difference of 120 °C and these cycles were carried out in the 5th, 15th, 25th, 50th, 100th and 150th cycle numbers, respectively. After the cycling, the mechanical behaviors of the composite samples were evaluated by tensile test, flexural test, notch impact test, short beam shear (SBS) test and quasi-static penetration test (QSPT). In this direction, the effects of both the layered composite structure composition and the applied number of thermal cycles on the mechanical performance were analyzed comparatively and systematically.

The findings revealed that thermal cycling has complex and structure-specific effects on the mechanical performance of fiber metal laminate (FML) composites. In general, it was found that while a slight increase in strength was observed in some composite types at the first cycles, this increase was partially lost with increasing cycle numbers and a recovery tendency emerged at the end of long cycles. Thermal cycling was generally found to have positive effects on the amount of elongation and energy absorption capacity. In particular, it was determined that some hybrid FML composites exhibited more stable or improved mechanical properties against thermal cycling compared to composites containing single fibers.

These results show that considering thermal cycling effects in the design and application processes of FMLs is of critical importance. In addition, understanding the damage mechanisms such as internal stresses, microcrack formation and delamination resulting from the mismatch of thermal expansion coefficients between different materials will guide the development of more durable and long-lasting composite structures.

Keywords: Fiber Metal Laminate (FML), Hybrid Composite, QSPT, SBS, Thermal Cycling.

ÖN SÖZ

Kompozit malzemelerin en dikkat çeken özelliklerinden biri, nihai üründe ihtiyaç duyulan mühendislik özelliklerinin, uygun matris ve takviye malzemelerinin seçimiyle özelleştirilebilmesidir. Özellikle fiber takviyeli kompozitler, hafifliklerinin yanı sıra yüksek mekanik dayanımları sayesinde havacılıktan otomotive kadar birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda bu malzemelere duyulan ilginin artmasıyla birlikte, özellikle tabakalı yapıya sahip Arall, Glare ve Carall gibi fiber metal laminat kompozitler üzerine yapılan araştırmalarda da belirgin bir artış gözlemlenmektedir.

Bu tez çalışmasında, cam, karbon, bazalt ve aramid fiberleriyle takviye edilmiş alüminyum tabakalı kompozitlerin, termal çevrim koşulları altında sergiledikleri mekanik davranışları incelenmiştir. Bu doğrultuda, malzemelerin üretim süreçleri detaylı biçimde açıklanmış; uygulanan termal çevrim prosedürlerinin ardından çekme, eğilme, çentik darbe, kısa kiriş tabakalar arası kayma ve yarı statik penetrasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, fiber türü ile çevrim sayısının mekanik performans üzerindeki etkileri değerlendirilmiş; elde edilen sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Çalışma sonunda, ileride yapılacak araştırmalara katkı sağlayacak çeşitli öneriler sunulmuştur.

Bu doktora çalışması, alüminyum tabakalı kompozitlerin uzun vadeli performansını değerlendirmek ve bu yapıların yeni nesil mühendislik uygulamalarındaki potansiyel kullanım alanlarını ortaya koymak amacıyla literatüre katkı sunmayı hedeflemektedir.

Bu çalışmanın tüm süreçlerinde rehberliğini ve akademik katkılarını büyük bir titizlikle sunan, danışman hocam Sayın Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK'e en içten şükranlarımı sunarım.

Mekanik test sürecinde gerek ekipman gerekse teknik görüş desteği sağlayarak sürece önemli katkılarda bulunan değerli meslektaşım Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI'ya teşekkür ederim.

Çentik darbe deneyleri sürecinde katkı sunan Yıldız Teknik Üniversitesi'nden hocam Arş. Gör. Zekeriya Yaşar CÖMERT'e ve Ziraat Teknoloji'den M. Salih ERTUĞRUL'a, ayrıca çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen Ahmet YAVUZ'a, Muhammed GEZER'e, S. Ali CANDAN'a ve Dr. Öğr. Üyesi İsmail BAYAR'a teşekkür ederim.

Bu çalışmanın BTÜBAP–2023–Doktora–04 numaralı proje kapsamında desteklenmesini sağlayan Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (BATÜBAP) ve birim çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tez sürecimin her aşamasında maddi ve manevi destekleriyle daima yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

İbrahim BİLİZ
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖN SÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

ÇİZELGELER LİSTESİ ..... **x**

ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **xii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **xx**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Tezin Amacı 4
1.2. Tezin Önemi 5

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **6**

3. GENEL BİLGİLER **17**

3.1. Kompozit Malzemeler 17
3.1.1. Matris türüne göre kompozitler 18
3.1.1.1. Metal matrisli kompozitler 18
3.1.1.2. Seramik matrisli kompozitler 19
3.1.1.3. Polimer matrisli kompozitler 20
3.1.2. Takviye türüne göre kompozitler 21
3.1.2.1. Partikül takviyeli kompozitler 23
3.1.2.2. Fiber takviyeli kompozitler 23
3.1.2.3. Laminat kompozitler 24
3.2. Fiber Metal Laminat (FML) Kompozitler 25
3.2.1. FML'lerde kullanılan metal levhalar 26
3.2.2. FML'lerde kullanılan fiberler 27
3.2.3. FML'lerin tarihsel gelişimi 29
3.2.4. FML arayüzey bağ gücünü artırma yöntemleri 30
3.2.5. FML'lerde termal genleşme ve termal yorulma 31
3.3. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri 33
3.3.1. El yatırma yöntemi 33
3.3.2. Püskürtme yöntemi 34
3.3.3. Elyaf sarma yöntemi 34
3.3.4. Sıkıştırma kalıplama yöntemi 35
3.3.5. Reçine transfer kalıplama yöntemi 36
3.3.6. Vakum infüzyon yöntemi 37
3.3.7. Vakum torbalama yöntemi 38
3.4. Havacılıkta Kompozitlerin Bakım Süreçleri ve Kontrol Türleri 39
3.5. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesine Yönelik Teorik Açıklamalar 41
3.5.1. Çekme testi 41
3.5.2. Eğilme testi 42

3.5.3. Çentik darbe testi 42
3.5.4. Kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) testi 43
3.5.5. Yarı starik penetrasyon testi (QSPT) 43
3.5.6. Termal yorulma testi 44

4. MATERYAL VE YÖNTEM 45

4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler 45
4.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Üretim Planı 48
4.3. Vakum Torbalama Düzeneği Kurulumu ve Uygulama Adımları 50
4.4. Vakum Torbalama Yöntemiyle Kompozit Malzeme Üretimi 51
4.4.1 Hazırlık süreci 52
4.4.2. Tabakalı kompozit üretim süreci 57
4.5. Tabakalı kompozitlere Terma Çevrim İşleminin Uygulanması 62
4.6. Tabakalı Kompozitlerin Mekanik Testleri 66
4.6.1. Çekme testinin yapılışı 66
4.6.2. Eğilme testinin yapılışı 67
4.6.3. Çentik darbe testinin yapılışı 68
4.6.4. SBS testinin yapılışı 70
4.6.5. QSPT ve yapılışı 71

5. BULGULAR VE TARTIŞMA 74

5.1. Çekme Testi Sonuçları 74
5.1.1. Carall malzemesine ait çekme testi sonuçları 74
5.1.2. Barall malzemesine ait çekme testi sonuçları 77
5.1.3. Glare malzemesine ait çekme testi sonuçları 79
5.1.4. Arall malzemesine ait çekme testi sonuçları 81
5.1.5. Ar-Carall malzemesine ait çekme testi sonuçları 83
5.1.6. Ar-Glare malzemesine ait çekme testi sonuçları 85
5.1.7. Car-Glare malzemesine ait çekme testi sonuçları 87
5.1.8. Gl-Barall malzemesine ait çekme testi sonuçları 89
5.1.9. Ar-Barall malzemesine ait çekme testi sonuçları 91
5.1.10. Car-Barall malzemesine ait çekme testi sonuçları 94
5.1.11. Tabakalı kompozitlerin çekme testi genel değerlendirmesi 96
5.1.12. Kırılma yüzeylerinin makro boyutta incelenmesi 100
5.1.13. Kırılma yüzeylerinin mikro boyutta incelenmesi 102
5.2. Eğilme Testi Sonuçları 105
5.2.1. Carall malzemesine ait eğilme testi sonuçları 105
5.2.2. Barall malzemesine ait eğilme testi sonuçları 106
5.2.3. Glare malzemesine ait eğilme testi sonuçları 108
5.2.4. Arall malzemesine ait eğilme testi sonuçları 110
5.2.5. Ar-Carall malzemesine ait eğilme testi sonuçları 111
5.2.6. Ar-Glare malzemesine ait eğilme testi sonuçları 113
5.2.7. Car-Glare malzemesine ait eğilme testi sonuçları 115
5.2.8. Gl-Barall malzemesine ait eğilme testi sonuçları 116
5.2.9. Ar-Barall malzemesine ait eğilme testi sonuçları 118
5.2.10. Car-Barall malzemesine ait eğilme testi sonuçları 119
5.2.11. Tabakalı kompozitlerin eğilme testi genel değerlendirmesi 121
5.3. Çentik Darbe Testi Sonuçları 124
5.3.1. Tek tip fiberli FML kompozitlere ait çentik darbe testi sonuçları 125

5.3.2. Carall ve hibritlerine ait çentik darbe testi sonuçları 126
5.3.3. Barall ve hibritlerine ait çentik darbe testi sonuçları 127
5.3.4. Glare ve hibritlerine ait çentik darbe testi sonuçları 128
5.3.5. Arall ve hibritlerine ait çentik darbe testi sonuçları 129
5.3.6. Tabakalı kompozitlerin çentik darbe testi genel değerlendirmesi 130
5.4. SBS Testi Sonuçları 132
5.4.1. Tek tip fiberli FML kompozitlere ait SBS testi sonuçları 133
5.4.2. Hibrit fiberli FML kompozitlere ait SBS testi sonuçları 135
5.4.3. Tabakalı kompozitlerin SBS testi genel değerlendirmesi 137
5.5. QSPT Sonuçları 139
5.5.1. Tek tip fiberli kompozitlerin QSPT sonuçları 144
5.5.1.1. Carall kompozitinin QSPT sonucu 144
5.5.1.2. Barall kompozitinin QSPT sonucu 146
5.5.1.3. Glare kompozitinin QSPT sonucu 148
5.5.1.4. Arall kompozitinin QSPT sonucu 150
5.5.2. Hibrit kompozitlerin QSPT sonuçları 151
5.5.2.1. Ar-Carall kompozitinin QSPT sonucu 151
5.5.2.2. Ar-Glare kompozitinin QSPT sonucu 153
5.5.2.3. Car-Glare kompozitinin QSPT sonucu 154
5.2.2.4. Gl-Barall kompozitinin QSPT sonucu 156
5.2.2.5. Ar-Barall kompozitinin QSPT sonucu 158
5.5.2.6. Car-Barall kompozitinin QSPT sonucu 159
5.5.3. QSPT sonucu enerji emilimi ve genel değerlendirmesi 161

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 164

5.1. Sonuçlar 164
5.2. Öneriler 168

KAYNAKLAR 169

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Bazı termoset reçinelerin tipik özellikleri 20

Çizelge 3.2. Bazı termoplastik reçinelerin tipik özellikleri 21

Çizelge 3.3. Termoplastik ve termosetlerin genel özelliklerinin karşılaştırması 21

Çizelge 3.4. Glare türleri ve özellikleri 29

Çizelge 4.1. 2024-T3 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi ile bazı önemli fiziksel, mekanik ve termal özellikleri 46

Çizelge 4.2. Kompozit malzeme bileşenlerinin özellikleri 47

Çizelge 4.3. LR160/LH160 epoksi sisteminin teknik özellikleri 47

Çizelge 4.4. Alüminyum ve fiber kombinasyonlarına göre üretilecek kompozit numuneler 49

Çizelge 5.1. Carall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları 75

Çizelge 5.2. Barall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları 78

Çizelge 5.3. Glare malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları 80

Çizelge 5.4. Arall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları 81

Çizelge 5.5. Ar-Carall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları .. 84

Çizelge 5.6. Ar-Glare malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları ... 86

Çizelge 5.7. Car-Glare malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları .. 89

Çizelge 5.8. Gl-Barall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları... 90

Çizelge 5.9. Ar-Barall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları .. 92

Çizelge 5.10. Car-Barall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları94

Çizelge 5.11. Termal çevrime bağlı Carall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri 106

Çizelge 5.12. Termal çevrime bağlı Barall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri 107

Çizelge 5.13. Termal çevrime bağlı Glare malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri 109

Çizelge 5.14. Termal çevrime bağlı Arall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri 110

Çizelge 5.15. Termal çevrime bağlı Ar-Carall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri 112

Çizelge 5.16. Termal çevrime bağlı Ar-Glare malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri 114

Çizelge 5.17. Termal çevrime bağlı Car-Glare malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri 115

Çizelge 5.18. Termal çevrime bağlı Gl-Barall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri 117

Çizelge 5.19. Termal çevrime bağlı Ar-Barall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri 118

Çizelge 5.20. Termal çevrime bağlı Car-Barall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri 120

Çizelge 5.21. FML kompozitlerin SBS testinden elde edilen değerleri 137

Çizelge 5.22. QSPT testine ait Carall numunelerinin mekanik yanıt verileri 145

Çizelge 5.23. QSPT testine ait Barall numunelerinin mekanik yanıt verileri 147

Çizelge 5.24. QSPT testine ait Glare numunelerinin mekanik yanıt verileri 149

Çizelge 5.25. QSPT testine ait Arall numunelerinin mekanik yanıt verileri 151

Çizelge 5.26. QSPT testine ait Ar-Carall numunelerinin mekanik yanıt verileri 152

Çizelge 5.27. QSPT testine ait Ar-Glare numunelerinin mekanik yanıt verileri 154

Çizelge 5.28. QSPT testine ait Car-Glare numunelerinin mekanik yanıt verileri 156

Çizelge 5.29. QSPT testine ait Gl-Barall numunelerinin mekanik yanıt verileri 157

Çizelge 5.30. QSPT testine ait Ar-Barall numunelerinin mekanik yanıt verileri 159

Çizelge 5.31. QSPT testine ait Car-Barall numunelerinin mekanik yanıt verileri 160

Çizelge 5.32. FML kompozitlerin enerji emilim değerleri 161

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Kompozit yapılarda kullanılan takviye türleri 22

Şekil 3.2. FML kompozitlerin katman yapısına ait bir örnek 25

Şekil 3.3. FML'lerde çatlak büyüme davranışı ve çatlak ilerlemesinin şematik gösterimi 26

Şekil 3.4. Bazalt kayaçları 28

Şekil 3.5. FML kompozitlerde kullanılan en yaygın fiber kumaşlar 28

Şekil 3.6. Yüzey işlemleri sonucu metal tabakada kalıntı matris görüntüleri 31

Şekil 3.7. Soğutma esnasında reçinenin ve fiberlerin boyutsal değişimi 32

Şekil 3.8. Elle yatırma işleminin şematik gösterimi 33

Şekil 3.9. Püskürtme yönteminin şematik gösterimi 34

Şekil 3.10. Elyaf sarma yönteminin şematik gösterimi 35

Şekil 3.11. Sıkıştırma kalıplama yönteminin şematik gösterimi 36

Şekil 3.12. Reçine transfer kalıplama yönteminin şematik gösterimi 37

Şekil 3.13. Vakum infüzyon yönteminin şematik gösterimi 38

Şekil 3.14. Vakum torbalama yöntemi kesit görünüşü 39

Şekil 3.15. Vakum torbalama yöntemi izometrik görünüş 39

Şekil 4.1. Tabakalı kompozit üretiminde kullanılan malzemeler 46

Şekil 4.2. Arall numunesinde tabakalarının görüntüsü 49

Şekil 4.3. Vakum torbalama yöntemine ait üretim sürecinin şematik gösterimi 50

Şekil 4.4. Vakum göstergesi 51

Şekil 4.5. Vakumlama düzeneği 51

Şekil 4.6. Vakum torbalama düzeneği ve numune üretim tezgâhı 51

Şekil 4.7. Alüminyum levha kesimi 52

Şekil 4.8. Kesilmiş dokuma fiber kumaşlar 53

Şekil 4.9. Zımpara öncesi ve sonrası alüminyum levha 53

Şekil 4.10. Vakum pompası ve odasına ait görseller 54

Şekil 4.11. Silikonize bant kullanıldığında sızıntıların oluşabildiği bölgeler 54

Şekil 4.12. Silikonize mastik kullanarak üretim 54

Şekil 4.13. Vakumlamada ulaşılan basınç değeri 55

Şekil 4.14. Kompozit malzeme üstündeki akış filesi ve akış yolları 56

Şekil 4.15. LR160 epoksi reçine ve LH160 epoksi sertleştirici 57

Şekil 4.16. Hassas terazi 58

Şekil 4.17. Manyetik karıştırıcı 58

Şekil 4.18. Ultrasonik temizleyici 58

Şekil 4.19. Vakumlama yapılan tabakalı kompozit malzeme 59

Şekil 4.20. Vakumlanmış ortam ve vakum hortumuna bağlanmış U cıvata 60

Şekil 4.21. Vakumlu ortamda kürlenme aşamasındaki kompozit plakalar 60

Şekil 4.22. Vakum torbasından çıkarılan malzeme. 61

Şekil 4.23. Numune kesim şablonu 61

Şekil 4.24. Üretilmiş Glare malzeme ve kesim şablonuna göre hazırlanmış test numuneleri 62

Şekil 4.25. a) Kesilmiş bir Glare kompoziti b) Bu kompozite termokupl yerleştirilmesi 63

Şekil 4.26. Dondurucunun göstergesi ve dondurucunun iç sıcaklığını ölçen termometreler 63

Şekil 4.27. Metal ağlardan oluşturulmuş bölmeli sepet 64

Şekil 4.28. Numunelere uygulanan termal çevrimin zaman – sıcaklık grafiği 64

Şekil 4.29. Numunelerin yerleştirildiği ağ yapılı sepetler 65

Şekil 4.30. Numunelerin sırasıyla dondurucudan çıkarılması, oda sıcaklığında bekletilmesi ve etüvde ısındıktan sonraki yüzey değişim görüntüleri 65

Şekil 4.31. Çekme test cihazı ve çekme testine tabi tutulan numune görüntüsü 67

Şekil 4.32. Eğilme testine tabi tutulan numune görüntüsü 67

Şekil 4.33. Çentik darbe cihazı ve özellikleri 68

Şekil 4.34. U çentik açılmış numune görüntü ve test ölçüleri 69

Şekil 4.35. Çentik darbe sonrası kırılan Arall numunesinin görüntüsü 69

Şekil 4.36. SBS test düzeneği ve numune uygulaması 70

Şekil 4.37. QSPT deney düzeneği ve delici zımba görüntüsü 71

Şekil 4.38. QSPT kalıp kesitinin şematik görünümü 72

Şekil 4.39. Sol üstten sırayla numunenin kalıba yerleştirilmesi ve test sonrası görünümü 72

Şekil 5.1. Carall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri 75

Şekil 5.2. Carall malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri 75

Şekil 5.3. Carall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri 76

Şekil 5.4. Barall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri 77

Şekil 5.5. Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri 77

Şekil 5.6. Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri 78

Şekil 5.7. Glare malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri 79

Şekil 5.8. Glare malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri 80

Şekil 5.9. Glare malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri 80

Şekil 5.10. Arall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri 81

Şekil 5.11. Arall malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri 82

Şekil 5.12. Arall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri 82

Şekil 5.13. Ar-Carall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri 83

Şekil 5.14. Ar-Carall malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri 84

Şekil 5.15. Ar-Carall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri 85

Şekil 5.16. Ar-Glare malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri 85

Şekil 5.17. Ar-Glare malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri . 87

Şekil 5.18. Ar-Glare malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri..... 87

Şekil 5.19. Car-Glare malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri..... 88

Şekil 5.20. Car-Glare malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri 89

Şekil 5.21. Car-Glare malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri 89

Şekil 5.22. Gl-Barall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri..... 90

Şekil 5.23. Gl-Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri . 91

Şekil 5.24. Gl-Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri..... 91

Şekil 5.25. Ar-Barall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri 92

Şekil 5.26. Ar-Baral malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri.. 93

Şekil 5.27. Ar-Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri..... 93

Şekil 5.28. Car-Barall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri..... 94

Şekil 5.29. Car-Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri95

Şekil 5.30. Car-Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri..... 95

Şekil 5.31. FML kompozitlerde termal çevrim işlemine bağlı maksimum gerilme grafiği..... 96

Şekil 5.32. FML kompozitlerde termal çevrim işlemine bağlı uzama grafiği..... 99

Şekil 5.33. FML kompozitlerde termal çevrim işlemine bağlı enerji emilimi grafiği.... 99

Şekil 5.34. FML kompozitlerde çekme testi sonucu oluşan hasar görüntüleri..... 101

Şekil 5.35. FML kompozitlerde aramid fiberin kırılma bölgeleri 103

Şekil 5.36. FML kompozitlerde karbon fiberin kırılma bölgeleri 103

Şekil 5.37. FML kompozitlerde bazalt fiberin kırılma bölgeleri..... 104

Şekil 5.38. FML kompozitlerde cam fiberin kırılma bölgeleri..... 104

Şekil 5.39. Carall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri..... 105

Şekil 5.40. Carall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri 106

Şekil 5.41. Barall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri..... 107

Şekil 5.42. Barall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri 107

Şekil 5.43. Glare malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri..... 108

Şekil 5.44. Glare malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri 109

Şekil 5.45. Arall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri 110

Şekil 5.46. Arall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri 111

Şekil 5.47. Ar-Carall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri 112

Şekil 5.48. Ar-Carall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri 112

Şekil 5.49. Ar-Glare malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri 113

Şekil 5.50. Ar-Glare malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri 114

Şekil 5.51. Car-Glare malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri 115

Şekil 5.52. Car-Glare malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri 115

Şekil 5.53. Gl-Barall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri 117

Şekil 5.54. Gl-Barall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri 117

Şekil 5.55. Ar-Barall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri 118

Şekil 5.56. Ar-Barall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri 119

Şekil 5.57. Car-Barall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri..... 120

Şekil 5.58. Car-Barall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri 120

Şekil 5.59. FML kompozitlerde, çevrim sayısına bağlı eğilme mukavemeti sütun grafiği 121

Şekil 5.60. FML kompozitlerde, çevrim sayısına bağlı eğilme mukavemeti çizgi grafiği 121

Şekil 5.61. FML kompozitlerin çevrim sayısına ve deplasman değerine bağlı maksimum eğilme mukavemeti çizgi grafiği 124

Şekil 5.62. Tek tip fiberli FML kompozitlerin termal çevrim sayısına göre darbe enerjisi ve tokluğu değişimi 125

Şekil 5.63. Carall ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre darbe enerjisi ve tokluğu değişimi 126

Şekil 5.64. Barall ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre darbe enerjisi ve tokluğu değişimi 128

Şekil 5.65. Glare ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre darbe enerjisi ve tokluğu değişimi 128

Şekil 5.66. Arall ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre darbe enerjisi ve tokluğu değişimi 130

Şekil 5.67. FML kompozitlerde, çevrim sayısına bağlı darbe enerjisi ve tokluğu sütun grafiği 130

Şekil 5.68. FML numunelerde SBS testi sonucu oluşan kayma gerilmesi şematik görüntüsü 132

Şekil 5.69. Tek tip fiberli FML kompozitlerinin termal çevrim sayısına göre ILSS değişimi 133

Şekil 5.70. Caral ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre ILSS değişimi 135

Şekil 5.71. Baral ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre ILSS değişimi 135

Şekil 5.72. Arall ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre ILSS değişimi 136

Şekil 5.73. Glare ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre ILSS değişimi 136

Şekil 5.74. Carall kompozit numunesinin QSPT grafiği 140

Şekil 5.75. Zımbanın malzemeye nüfuz etme aşamalarının şematik gösterimi 142

Şekil 5.76. Delinme sürecini alttan kayıt eden kameraya ait numunenin ilk görüntüsü 142

Şekil 5.77. Delinme aşamalarına ait kamera görüntüleri 143

Şekil 5.78. Delinme aşamaları görüntülerinin kuvvet – yer değiştirme grafiği üzerindeki karşılığı 143

Şekil 5.79. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Carall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği 144

Şekil 5.80. Soldan sağa Caral numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri 145

Şekil 5.81. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Barall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği 146

Şekil 5.82. Zımba ilerlemesine bağlı kuvvet – yer değiştirme grafik türleri 147

Şekil 5.83. Soldan sağa Barall numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri 148

Şekil 5.84. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Glare numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği 148

Şekil 5.85. Soldan sağa Glare numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri 149

Şekil 5.86. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Arall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği 150

Şekil 5.87. Soldan sağa Arall numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri 150

Şekil 5.88. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Ar-Carall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği 152

Şekil 5.89. Soldan sağa Ar-Caral numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri 152

Şekil 5.90. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Ar-Glare numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği 153

Şekil 5.91. Soldan sağa Ar-Glare numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri 153

Şekil 5.92. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Car-Glare numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği 155

Şekil 5.93. Soldan sağa Car-Glare numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri 155

Şekil 5.94. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Gl-Barall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği..... 156

Şekil 5.95. Soldan sağa Gl-Barall numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri 157

Şekil 5.96. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Ar-Barall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği..... 158

Şekil 5.97. Soldan sağa Ar-Barall numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri 158

Şekil 5.98. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Car-Barall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği..... 159

Şekil 5.99. Soldan sağa Car-Barall numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri 160

Şekil 5.100. Soldan sağa sırasıyla tek tip ve hibrit FML kompozitlerin enerji emilim grafikleri 161

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$\boldsymbol{A}$: Numune yüzey alanı, m^2

$\boldsymbol{A_c}$: Numunenin çentik altındaki kesit alanı, m^2

$\boldsymbol{b}$: Numune genişliği, kg

$\mathbf{D_p}$: Zımba çapı, mm

$\mathbf{D_s}$: Destek açıklığı çapı, mm

$\boldsymbol{E_f}$: Eğilme modülü, MPa

$\boldsymbol{F}$: Kuvvet, N

$\boldsymbol{F_{max}}$: Maksimum kuvvet, N

$\boldsymbol{F_{pmax}}$: Maksimum zımba kuvveti, N

$\boldsymbol{g}$: Yerçekimi ivmesi, m/s^2

$\boldsymbol{h}$: Akışkan sütununun deniz seviyesinden yüksekliği, m

ILSS : Tabakalar arası kayma dayanımı

$\boldsymbol{K}$: Çentik darbe dayanımı, J/mm^2

$\boldsymbol{L}$: Destekler arası mesafe, mm

$\boldsymbol{m}$: Kütle, kg

$\boldsymbol{P_b}$: Basınç, Pa

$\boldsymbol{P_{max}}$: Uygulanan maksimum yük, N

$\boldsymbol{t}$: Numune kalınlığı, kg

$\boldsymbol{W}$: Numunenin kırılması için harcanan toplam enerji (kırılma enerjisi), J

$\boldsymbol{W_{max}}$:Çekiç numuneye temas etmeden önce sahip olduğu potansiyel enerji, J

$\boldsymbol{W_{son}}$:Numuneyi kırdıktan sonra çekicin sahip olduğu artık enerji, J

$\boldsymbol{\rho}$: Akışkanın yoğunluğu, kg/m^3

$\boldsymbol{\sigma_f}$: Maksimum eğilme dayanımı, MPa

Kısaltmalar

Arall	**:** Aramid alüminyum laminat
Ar-Barall	**:** Aramid ve bazalt fiber içeren alüminyum laminat
Ar-Carall	**:** Aramid ve karbon fiber içeren alüminyum laminat
Ar-Glare	**:** Aramid ve cam fiber içeren alüminyum laminat
Barall	**:** Bazalt alüminyum laminat
Carall	**:** Karbon alüminyum laminat
Car-Barall	**:** Karbon ve bazalt fiber içeren alüminyum laminat
Car-Glare	**:** Karbon ve cam fiber içeren alüminyum laminat
CTE	**:** Termal genleşme katsayısı
FML	**:** Fiber metal laminat
Glare	**:** Cam alüminyum laminat
Gl-Barall	**:** Cam ve bazalt fiber içeren alüminyum laminat
QSPT	**:** Yarı statik penetrasyon testi
SBS	**:** Kısa kiriş tabakalar arası kayma
SBS	**:** Tabakalar arası kayma
SEM	**:** Taramalı elektron mikroskobu
SPR	**:** Destek açıklığı oranı

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, biri lif, tabaka veya parçacık formunda olan takviye fazı ile bu fazı çevreleyen matris fazından oluşan çok fazlı mühendislik malzemeleridir. Takviye fazı genellikle düşük yoğunluklu, ancak yüksek dayanımlı malzemelerden seçilirken; matris fazı, sünek ya da sert karakterde olup takviye elemanlarını bir arada tutarak yük aktarımını sağlar. Takviye ve matris fazlarının uygun şekilde seçilmesi ve tasarlanması durumunda, geleneksel malzemelerin sağlayamadığı yüksek mekanik dayanım, üstün korozyon direnci, yüksek sıcaklık dayanımı ve sertlik gibi niteliklere sahip ileri mühendislik malzemeleri üretilebilmektedir (Clyne ve Hull, 2019)

Mühendislik kompozit malzemelerinin üstün fiziksel ve mekanik özellikler sergileyebilmesi; takviye fazının morfolojisi, kimyasal bileşimi, matris malzemesinin yapısal ve mekanik özellikleri, her iki fazın oranları ile aralarındaki arayüzey etkileşimlerinin optimizasyonuna bağlıdır. Bu bileşenlerin uygun şekilde tasarlanıp uyumlu bir biçimde birleştirilmesi durumunda, elde edilen kompozit malzemeler yalnızca yüksek mukavemet (Topkaya vd., 2020; Demir vd., 2024), sertlik ve korozyon direnci (Włodarczyk-Fligier vd., 2007) gibi temel özellikleri değil; aynı zamanda düşük yoğunluk (Luyt vd., 2006) geliştirilmiş yorulma performansı (Li vd., 2024), zorlu çevresel koşullara karşı direnç (Harle, 2024), yüksek sıcaklıklarda elastisikiyet modülü (Mazzuce vd., 2024) ve dayanımını koruyabilme (Malik vd., 2025) gibi ileri düzey özellikleri de bünyesinde barındırabilir.

Teknolojik gelişmelerin hız kazanması ve uygulama alanlarının çeşitlenmesi, özellikle fiber takviyeli kompozit malzemelerin mühendislikteki önemini belirgin biçimde artırmıştır. Bu malzemeler, yüksek özgül mukavemet ve sertlik, korozyon direnci, tasarım esnekliği gibi avantajları sayesinde başta havacılık ve uzay olmak üzere birçok yüksek performans gerektiren sektörde tercih edilmektedir. Fiber takviyeli kompozitlerin havacılık uygulamalarında kullanımı, 1969 yılında bor fiber takviyeli epoksi kompozitlerin F-14 savaş uçağının stabilizatör yüzeylerinde kaplama malzemesi olarak uygulanmasıyla başlamıştır. Bu gelişmeyi takiben karbon fiber takviyeli kompozitler, B-2 Bomber ve V-22 Osprey gibi askeri uçakların kanat, gövde ve kuyruk yapılarında birincil yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Sivil havacılık

alanında ise bu eğilim, 1995 yılında Boeing 777 modelinde ve 1998'de Airbus A320 modelinde fiber takviyeli kompozit malzemelerin yapısal elemanlarda kullanımına öncülük etmiştir. Boeing 777'de toplam yapısal ağırlığın yaklaşık %10'u kompozit malzemelerden oluşurken, 2007 yılında hizmete giren Airbus A380 modelinde cam, karbon ve kuvars fiberlerinden oluşan kompozitlerin toplam yapıdaki oranı %20 civarındadır. Daha yakın tarihlerde geliştirilen Boeing 787 Dreamliner ve Airbus A350 XWB uçaklarında ise karbon epoksi esaslı kompozitlerin kullanım oranları sırasıyla %50 ve %52'ye ulaşarak bu malzemelerin modern havacılıkta ne denli kritik hale geldiğini ortaya koymaktadır (Miller, 2014).

Bu bağlamda, son yıllarda farklı yapıdaki takviye elemanlarının, özellikle sentetik fiberlerin metal matrislerle tabakalı formda birleştirilmesiyle elde edilen kompozit sistemler, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi açısından önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. 1982 yılında Alcoa firması tarafından, aramid fiber takviyeli tabakalardan ve alüminyum levhalardan oluşan ilk ticari tabakalı kompozit olan aramid alüminyum laminat (Arall) piyasaya sürülmüş ve bu malzeme, C-17 tipi askeri nakliye uçağının kargo kapısında başarıyla uygulanmıştır (Crouch, 2009). Arall'ın ardından geliştirilen cam alüminyum laminat (Glare) ve karbon alüminyum laminat (Carall) gibi yeni nesil fiber metal laminat (FML) kompozit sistemleri, 1980'li yıllardan itibaren endüstriyel uygulamalarda yer almaya başlamıştır (Khalid vd., 2021; Khan vd., 2017; Qaiser vd., 2015). Bu malzemeler, sünek alüminyum alaşım tabakaları ile rijit ve elastik özellikteki fiber takviyeli kompozit tabakaların bir araya getirilmesiyle oluşturulmakta ve bu sayede hem metalin hem de fiberin avantajlarını bir arada sunmaktadır (Biliz ve Çelik, 2022).

Arall, Glare ve Carall gibi yapılar endüstriyel uygulamalarda pek çok avantaj sunmakla birlikte, maliyet açısından geleneksel alüminyum alaşımlarına göre daha yüksektir. Örneğin, cam fiber takviyeli polimer tabakaların kullanılması ile oluşturulan Glare kompozitler, klasik alüminyum yapı malzemelerine kıyasla en az %20 daha hafif olmaktadır. Airbus A380 modelinde kullanılan 27 Glare paneli sayesinde uçağın toplam ağırlığında yaklaşık %25'lik bir azalma sağlanmıştır (Alderliesten ve Benedictus, 2009). Glare ve Arall'ın yanı sıra, günümüzde alüminyum/bor/epoksi, titanyum/karbon fiber/epoksi gibi yeni nesil FML kompozit sistemler de yapısal bileşenler olarak kullanılmak üzere araştırılmaktadır (Botelho vd., 2006).

Kompozit malzemelerin en önemli dezavantajlarından biri, matris ile fiber arayüzeyinde çatlak oluşumu ve bu çatlağın ilerlemesidir. Özellikle uçak konstrüksiyonlarında kullanılan hibrit tabakalı kompozitlerde, düşük çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesine karşı direnç, bu malzemelerin tercih edilme sebeplerinin başında gelmektedir (Qaiser vd., 2015). Ancak, farklı malzemelerin farklı termal genleşme katsayılarına sahip olması nedeniyle ortaya çıkan termal gerilmeler ve zayıf arayüzey bağlanma mukavemeti, çok malzemeli yapılar için önemli mühendislik zorlukları oluşturmaktadır (Öztoprak, 2021).

Hibritleştirme yaklaşımı, tabakalı kompozitlerin performansını artırmak ve daha üstün özellikler sunan yapılar elde etmek açısından kritik bir öneme sahiptir (Keleş vd., 2024). Farklı takviye malzemelerinin bir araya getirilmesiyle sinerjik etkiler elde edilerek, örneğin karbon fiber ve cam fiber takviyesinin kombinasyonu sayesinde hem yüksek mukavemet hem de iyi enerji emilimi gibi avantajlar bir arada sunulabilir. Böylece daha dayanıklı, hafif ve fonksiyonel kompozit yapılar elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu yapıların hafifliği, özellikle havacılık sektöründe yakıt tüketimini azaltarak karbon ayak izinin düşürülmesine katkı sağlar. Yüksek mukavemetleri ise güvenlik ve yapısal dayanıklılığı artırır. Malzeme teknolojilerindeki gelişmeler ve hibrit kompozitlerin yükselişi, havacılık ve uzay sanayisinde çığır açıcı yeniliklerin önünü açmıştır (Botelho vd., 2006).

Farklı takviye malzemelerinin bir araya getirilmesi sadece performans artışı değil, aynı zamanda maliyet optimizasyonu da sağlamaktadır. Örneğin, pahalı fiber takviyelerinin tüm yapı boyunca kullanılması yerine, yalnızca kritik bölgelerde kullanılarak, daha ekonomik fakat yeterli performansa sahip hibrit kompozit sistemler üretilebilir. Bu yaklaşım, hem teknik hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir çözümler sunmaktadır (Şanlıtürk, 2020).

Tabakalı hibrit kompozitler, yeni nesil mühendislik malzemelerinin geliştirilmesi açısından önemli bir araştırma alanı sunmaktadır. Örneğin, cam fiber düşük maliyetli bir takviye malzemesi olmakla birlikte, nispeten düşük mekanik mukavemet özelliklerine sahiptir. Buna karşın karbon fiber, yüksek basma mukavemeti sunmakla birlikte, düşük tokluk ve yüksek maliyet gibi dezavantajlara sahiptir. Bu iki malzemenin hibritlenmesiyle oluşturulan kompozit yapılar; yalnızca karbon fiber esaslı kompozitlere göre daha tok, cam fiber esaslı kompozitlere göre ise daha mukavemetli olmakta ve karbon fiber temelli kompozitlere kıyasla ekonomik açıdan daha avantajlı hale gelmektedir (Botelho vd., 2006). Benzer şekilde, karbon ve bazalt fiberlerin hibritlenmesiyle elde edilen

kompozitler, bazalt esaslı yapılardan daha üstün mekanik özellikler sunarken, karbon esaslı yapılarla karşılaştırıldığında ise daha düşük maliyetli çözümler sunmaktadır. Bazalt fiberin nispeten düşük mukavemet değerleri, gerilmenin az olduğu bölgelerde kullanımıyla üretim maliyetlerini düşürmeye olanak sağlarken; bazaltın sahip olduğu iyi termo-mekanik özellikler sayesinde darbe tokluğu ve termal stabilite gibi performans kriterlerinde de iyileşme sağlanabilmektedir (Matykiewicz, 2017; Özsoy, 2022).

Tüm bu gelişmeler ışığında, malzeme bilimi alanındaki güncel araştırmalar; havacılık, uzay ve diğer ileri mühendislik uygulamalarında kullanılmak üzere daha hafif, daha güçlü ve çevresel etkilere karşı daha dayanıklı malzemelerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, kompozit malzemeler geleneksel metal alaşımlara göre çok daha yüksek mukavemet/ağırlık oranı sunarak modern yapısal tasarımlarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Ağırlığın azaltılmasının kritik önem taşıdığı havacılık ve uzay uygulamalarında, kompozitlerin sunduğu bu özellikler hem yapısal verimliliği artırmakta hem de yakıt tüketimi ve çevresel etkileri azaltmaktadır. Ayrıca, yorulma ve korozyon direnci gibi üstün performans göstergeleriyle öne çıkan FML kompozit sistemler, çok yönlü mekanik dayanım, hafiflik ve çevresel etkilere karşı direnç gibi avantajları sayesinde uçak yapılarında yaygın olarak tercih edilmekte ve bu alandaki Ar-Ge faaliyetlerinde temel bileşen olarak değerlendirilmektedir (Trzepieciński vd., 2021; Asundi ve Choi, 1997).

1.1. Tezin Amacı

Bu doktora tezi, fiber metal laminat (FML) yapılarının mekanik performanslarını, klasik ve hibrit yapılar dâhil olmak üzere geniş bir malzeme yelpazesinde değerlendirmeyi amaçlayan özgün bir çalışmadır. Literatürde, Arall, Glare ve Carall gibi klasik FML sistemlerinin ayrı ayrı incelendiği pek çok araştırma bulunsa da, bu sistemlerle birlikte daha az çalışılmış olan bazalt gibi fiberleri hem tek başına hem de hibrit yapılar içerisinde değerlendirilmesine sınırlı bir şekilde yer verilmektedir. Bu tezde, aramid, karbon, cam ve bazalt fiberlerinin hem homojen hem de hibrit kombinasyonlarından oluşturulan on farklı FML kompozit yapısı, aynı üretim yöntemi ve test koşulları altında karşılaştırmalı bir şekilde analiz edilmiştir.

Buna ek olarak, literatürde termal çevrimin FML yapıları üzerindeki etkisini ele alan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, -45 °C ile +75 °C arasındaki sıcaklık aralıklarında uygulanan 5, 15, 25, 50, 100 ve 150 termal çevrim sonrasında numunelerin

çekme, eğilme, kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS), çentik darbe ve yarı statik penetrasyon testi (QSPT) davranışları sistematik bir şekilde incelenmiştir. Bu sayede, FML yapıların termal çevrime karşı gösterdiği mekanik tepkiler detaylı bir biçimde ortaya konarak, literatüre özgün ve karşılaştırmalı bir katkı sağlanması hedeflenmiştir.

1.2. Tezin Önemi

Havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan yapısal malzemelerin seçiminde yalnızca hafiflik ve mekanik dayanım değil, aynı zamanda çevresel koşullara karşı gösterilen direnç de büyük önem taşımaktadır. Özellikle termal çevrim etkisi, uçak gövdeleri gibi dış ortama doğrudan maruz kalan yapısal bileşenlerde performans düşüklüğüne, delaminasyon ve mikroçatlak oluşumlarına yol açabilmektedir. Bu bağlamda, fiber metal laminat (FML) yapıların yalnızca başlangıçtaki dayanım değerlerinin değil, aynı zamanda uzun dönemli çevresel kararlılıklarının da değerlendirilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Bu tez çalışması, farklı lif kombinasyonları kullanılarak oluşturulan FML yapıların termal çevrime karşı gösterdikleri performansları karşılaştırmalı bir şekilde sunarak, özellikle hibrit yapıların sunduğu sinerjik etkilerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Termal çevrim sonrası gözlemlenen mekanik dayanım değişimleri, yalnızca tek tip takviye kullanılan sistemlerde değil, aynı zamanda maliyet/performans açısından avantaj sağlayan hibrit sistemlerde de analiz edilmiştir. Bu çalışma, havacılık uygulamaları için daha ekonomik, hafif ve dayanıklı malzeme kombinasyonlarının belirlenmesine katkıda bulunmakta olup, aynı zamanda ilerleyen dönemde geliştirilecek yapısal tasarımlar için termal çevrim dayanımı yüksek malzeme seçimlerine yönelik bir veri tabanı oluşturma potansiyeline sahiptir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, fiber takviyeli laminat kompozitler ile fiber metal laminat (FML) kompozitlerin mekanik özellikleri, üretim süreçleri ve çevresel faktörler altındaki performansları üzerine yapılmış mevcut literatür çalışmaları derlenmiş ve analiz edilmiştir. FML yapılarında kullanılan farklı fiber türleri ve hibrit kombinasyonlarının mekanik dayanımları, ayrıca termal çevrim gibi çevresel faktörlerin bu yapılar üzerindeki etkileri literatürde sınırlı sayıda ele alınmıştır. Bu araştırmaların bulguları, çalışmanın özgün katkılarının daha iyi anlaşılmasını sağlamak adına önemli bir temel oluşturmaktadır. Bu bağlamda, mevcut literatürde yer alan çalışmaların kapsamlı bir şekilde incelenmesi, FML yapıların performansını etkileyen başlıca faktörlerin yanı sıra, literatürdeki açıklıkları ve araştırılması gereken alanları da gözler önüne sermektedir. Aşağıda, fiber takviyeli laminat kompozitler ile özellikle farklı fiber türleri kullanılarak üretilen FML kompozitlerin mekanik özellikleri ve çevresel etkilere karşı verdikleri tepkiler üzerine gerçekleştirilen araştırmalara yer verilmiştir.

Wu ve Yang (2005), Glare laminatlarının olağanüstü yorulma direnci, yüksek statik dayanım, mükemmel darbe direnci ve iyi kalıntı mukavemeti gibi özelliklerinin yanı sıra, alev direnci ve korozyon gibi çevresel etkilere karşı da üstün performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Glare laminatlarının fiber/reçine sistemleri, alaşım tipi, kalınlıkları, istifleme sırası, fiber oryantasyonu ve yüzey ön işleme tekniklerinin, malzemenin performansını etkileyen önemli parametreler olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, bu özelliklerin, Glare kompozitlerinin çeşitli endüstriyel uygulamalara uyum sağlamasına olanak tanıdığını ifade etmişlerdir.

Qaiser vd. (2015), kürleme işleminin reçinenin mukavemetini artırmada önemli bir etkiye sahip olduğunu, ancak laminatların arayüzü üzerindeki etkinin sınırlı olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, Arall kompozitlerinde arayüzey etkileşiminin anotlama işlemi ile geliştirilebileceğini vurgulamışlardır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ve müteakip enerji dağılımlı spektroskopi verileri ile yaptıkları incelemelerde, anotlanmış ve kürlenmiş laminatlarda alüminyum yüzeyindeki yapışmanın çok daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir.

Asghar vd. (2017), laminatların nihai gerilme mukavemetinin bileşenlerinin doğasıyla ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Carall'ın 215 MPa olan çekme mukavemetinin ve 87,554 MPa olan kırılma tokluğunun, Arall'ın maksimum çekme gerilmesinden %50 ve kırılma tokluğundan %47, Glare'nin maksimum çekme gerilmesinden %22 ve kırılma tokluğundan %23 daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca Carall'ın fiber köprüleme etkisinden dolayı Arall ve Glare'ye göre üstün yorulma performansı sergilediğini belirtmişlerdir. FML'lerdeki fiber köprüleme etkisinin, çatlak büyüme oranını daha da azaltan ve FML'lerin yorulma mukavemetini artıran, hızlı büyüyen birincil çatlaktan ayrı olarak çatlak dallanmasına ve ikincil çatlakların başlamasına ve ilerlemesine neden olduğunu SEM analizi ile gözlemlemişlerdir.

Alshamma ve Kadhim (2022), geleneksel olarak pahalı otoklav yöntemleriyle üretilen Glare kompozitlerin, daha ekonomik bir alternatif olan enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilebileceğini göstermişlerdir. Çalışmalarında Glare yapısını dışta iki alüminyum levha ve içte cam fiber kumaş katmanlarından oluşacak şekilde tasarlamışlardır. Alüminyum yüzey hazırlık sürecinin arayüzey dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla; biri anodize edilmemiş, diğerleri ise sabit, artan ve azalan voltaj modlarında anodize edilmiş olmak üzere dört farklı alüminyum yüzey grubu oluşturmuşlardır. Elde etikleri FML kompozitlere iki farklı kürleme işlemi uygulamışlar ve ASTM D1876 T-peel testi ile yapışma dayanımını ve Mod-I kırılma tokluğunu değerlendirmişlerdir. Anodize edilmiş tüm örneklerde yapışma kuvveti ve kırılma tokluğunda anlamlı artışlar olduğunu gözlemlemişlerdir. Özellikle azalan voltaj modunda anodize edilen ve birinci kürleme işlemine tabi tutulan numunenin, anodize edilmemiş örneğe kıyasla yaklaşık altı kat daha yüksek performans sergilediği bildirilmişlerdir. Ayrıca, kürleme ve post-kürleme işlemlerinin epoksi reçinesinin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini, arayüzey kayma dayanımına ise sınırlı düzeyde katkı sağladığını vurgulamışlardır.

Özsoy (2022), vakum infüzyon yöntemi kullanarak karbon ve bazalt liflerden farklı lif dizilimlerine sahip laminat kompozit yapılar üretmiş ve bu yapıların mekanik davranışlarını incelemiştir. Karbon fibere bazalt fiber ilavesinin kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımları ile elastikiyet modülünü azalttığını ifade etmiştir. Bununla birlikte, dış yüzeylerinde karbon fiber bulunan hibrit kompozitlerin, dış yüzeylerinde bazalt fiber bulunanlara kıyasla çekme ve eğilme dayanımı ile elastikiyet modülü açısından daha üstün performans sergilediğini belirtmiştir. Öte yandan, bazalt fiber ilavesinin karbon

fiber takviyeli kompozitlerin darbe dayanımını %32 ile %59 oranında artırdığını vurgulamıştır.

Gümülcine vd. (2013), ince çaplı bazalt fiber ile takviye edilen kompozit numunelerin, daha kalın çaplı fiberlerle takviye edilenlere kıyasla daha yüksek çekme ve eğilme mukavemeti gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu doğrultuda, fiber çapındaki azalmanın mekanik performans üzerinde olumlu bir etki yarattığını vurgulamışlardır.

Yıldız (2019), bazalt fiberin sünek özelliklere sahip olduğunu ve çalışma sıcaklık aralığının cam ve karbon fiberlere göre daha yüksek olduğunu vurgulayarak, bazalt fiber ile üretilen kompozitlerin daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilme potansiyeline sahip olduğunu gözlemlemiştir. Bu nedenle, yüksek sıcaklıkların ve titreşimin söz konusu olduğu uygulamalarda, titreşimi sönümlemek amacıyla bazalt fiber kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Fiore vd. (2015), tek eksenli bazalt kumaş katmanlarının, denizcilik uygulamalarında kullanılan cam fiber/epoksi kompozitlerin mekanik performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, bazalt tabaka sayısı ve konumunun mekanik özelliklere etkisini değerlendirmek üzere üç nokta eğilme ve çekme testleri gerçekleştirilmişlerdir. Deneysel sonuçlardan özellikle iki dış bazalt tabakasının bulunduğu hibrit laminatların, GFRP laminatlara kıyasla mekanik özelliklerde en yüksek artışı sağladığını gözlemlemişlerdir.

Wei vd. (2010), bazalt fiberlerin asidik ortamlara karşı direncinin, alkali ortamlara kıyasla çok daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Buna karşın, cam fiberlerin asit ve alkali dirençlerinin birbirine benzer seviyelerde olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan testlerde, asidik işlem sonrasında hem bazalt hem de cam fiberlerin yüzey morfolojilerinde, alkali işleme kıyasla daha az değişim gözlemlemişlerdir. Ancak sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ile temas sonucunda her iki fiber türünde de belirgin yüzey bozulmaları meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Genel olarak, bazalt fiberlerin kimyasal stabilitesinin, özellikle asidik ortamlarda cam fiberlere göre daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

Ulus (2018), bazalt kumaşının alkali kimyasallara karşı yüksek direnç gösterdiğini, ultraviyole ışınlarına ve neme karşı dayanıklı olduğunu, ayrıca ısı yalıtımının yüksek olduğunu belirtmiştir. Bunların yanı sıra, bazalt kumaşının düşük maliyeti, aramid ile hibrit yapılar oluşturulmasına olanak tanıdığını ve bu yapıların aramid plakaların bazı eksikliklerini, ağırlık artışı olmadan giderebileceğini ifade etmiştir.

Azghan vd. (2021), alüminyum/epoksi/bazalt ve cam fiberlerinden oluşan FML kompozitlerin çekme davranışı üzerindeki termal çevrim etkisini incelemişlerdir. Numunelere 25°C ile 115°C sıcaklık aralığında, toplamda 55 termal çevrim uygulamışlardır. Termal çevrime maruz kalan ve bazalt fiber kullanılan FML'lerde çekme dayanımının %2,9, elastikiyet modülün %3,4 ve enerji soğurma kapasitesinin ise %1,8 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Cam fiber kullanılan FML'lerde ise bu değerlerin sırasıyla %3,5; %4,1 ve %4 olduğunu gözlemlemişlerdir. Termal çevrime maruz bırakılan numuneler arasında, en yüksek termal stabilitenin bazalt fiber içeren FML kompozitlerden elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Semerciöz (2021), –50°C, 0°C, 50°C, 100°C ve 150°C sıcaklıklarda karbon fiber takviyeli kompozitlerin fiber yönündeki termal genleşme katsayı değerlerini sırasıyla 2,89 µm/m.°C, –0,51 µm/m.°C, –2,84 µm/m.°C, 0,44 µm/m.°C ve 2,37 µm/m.°C olarak elde etmiştir. Aynı koşullarda bor fiber kompozitlerinin termal genleşme katsayılarını ise sırasıyla 19,49 µm/m.°C, 24,73 µm/m.°C, 30,71 µm/m.°C, 34,06 µm/m.°C ve 41,65 µm/m.°C olarak ölçmüştür. Karbon fiber kompozitlerin, fiber yönünde sıcaklık değişimlerine karşı boyutsal kararlılık gösterdiği; buna karşın, bor fiber kompozitlerin sıcaklık arttıkça fiber yönünde uzama eğilimi sergilediği sonucuna varmıştır.

Li vd. (2016), alüminyum–lityum alaşımına dayalı FML kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine termal yorulmanın etkisini incelemişlerdir. 1000 termal döngüye maruz bırakılan FML kompozitlerde belirgin bir delaminasyon veya yapısal kusur gözlememişlerdir. Ayrıca, alüminyum-lityum tabakanın pozitif yaşlanma sertleşmesi özelliği göstermesi sayesinde, bu kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemetlerinde termal yorulma döngüleriyle birlikte artış meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Lafarie-Frenot vd. (2006), karbon/epoksi laminatların oksidatif bir ortamda yapılan −50/180°C aralığındaki termal döngü testlerinde, iki hasar mekanizmasının birbiriyle etkileşimde olduğunu belirtmişlerdir. İlk olarak, döngünün en yüksek sıcaklıklarında matris oksidasyonu meydana geldiğini, ikinci olarak plakalardaki farklı genleşmelerin engellenmesinden kaynaklanan termo-mekanik gerilmeler nedeniyle matris çatlaması oluştuğunu ifade etmişlerdir. İzoterm koşullar altında laminatların oksidasyonunun yalnızca yüzeyde hasara yol açtığını, ancak termal döngü sırasında meydana gelen sürekli termal gerilmelerin oksidasyon ile birleşmesinin, hasar süreçlerini hızlandırdığını ve özellikle matris çatlamasının yüzeylerden laminatın çekirdeğine doğru yayılmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Tabatabaeian ve Ghasemi (2019), farklı reçine türleri ve çok katmanlı karbon nanotüpler kullanarak ürettikleri polimer kompozit ve nanokompozit levhaların termal çevrim altındaki eğrilik değişimlerini ve kütle kayıplarını incelemişlerdir. Çok katmanlı karbon nanotüp kullanımının eğriliği azalttığını, ancak eğrilik değişimlerinin reçine türüne ve nanoparçacık oranına bağlı olarak farklılık gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Termal çevrim koşullarının kompozit levhaların ağırlık kaybı üzerindeki etkisini değerlendirdiklerinde ise, termal çevrim sayısının nanoparçacık eklemesinden daha belirgin bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, reçine türü ne olursa olsun, kompozit malzemelerin kütlesinin termal döngü sayısının artmasıyla azaldığını ve kompozitlere nanoparçacık eklenmesinin, termal yorgunluk koşulu altında ağırlık kaybı yüzdesinin azalmasına yol açtığını ortaya koymuşlardır.

Parlevliet vd. (2007), mekanik özellikler açısından termal artık gerilmelerin kompozit laminatların performansını önemli ölçüde düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Kırılma tokluğu, çekme ve eğilme dayanımı gibi özellikler üzerinde yapılan çalışmalarda, artık gerilmelerin bu parametreleri olumsuz etkilediği sonucuna varmışlardır. Ancak, basma, kesme, darbe ve yorulma özellikleri üzerindeki etkiler hakkında literatürde önemli bir bilgi eksikliği bulunduğunu belirtmişlerdir. Bu eksikliğin temel nedenleri arasında, bu yük türlerinde ortaya çıkan karmaşık kırılma mekanizmalarının anlaşılmasındaki zorluklar ve kompozit laminatlardaki artık gerilme miktarının kesin olarak belirlenmesindeki teknik güçlükler olduğunu vurgulamışlardır.

Botelho vd. (2007a), cam fiber takviyeli epoksi kompozitler ile Glare laminatların nem alma davranışlarını ve bu durumun mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Numuneleri %90 bağıl nem oranı ve 80°C sıcaklığa 6 hafta boyunca maruz bırakmışlardır. Cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin yaklaşık %1,5 oranında nem emdiğini, Glare laminatların ise dış katmanında bulunan alüminyum tabakanın nemin iç katmanlara geçişini büyük ölçüde engellemesi nedeniyle yalnızca %0,15 oranında nem emdiğini belirtmişlerdir. Bunlara ilaveten higrotermal şartlara maruz kalan cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerde, reçine plastifikasyonu nedeniyle çekme dayanımında yaklaşık %22 oranında azalma olduğunu, buna karşın Glare laminatlarında ise anlamlı bir mekanik özellik kaybı meydana gelmediğini gözlemlemişlerdir. Çekme modülü açısından teorik hesaplamalar ile deneysel sonuçlar arasında cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerde %10, Glare laminatlarda ise yalnızca %1,1 oranında sapma olduğunu tespit etmişlerdir. Basınç testlerinde de çekme deneyinde olduğu gibi higrotermal şartlara maruz kalan cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerde önemli bir

azalma, Glare laminatlarında ise bu etkilerin minimum düzeyde olduğunu vurgulamışlardır. Mekanik testler sonucunda cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerde lif kırılması, lif demeti ayrılması, çekilme ve tabakalar arası ayrılma gibi tipik kırılma mekanizmaları olduğunu, Glare numunelerde ise kompozit laminatlar ile alüminyum arayüzeyinde ayrılmalar olduğunu belirtmişlerdir.

Vermeeren vd. (2003), fiber takviyeli epoksi kompozitlerde epoksinin neme karşı hassas olduğunu, ancak FML yapılarda dıştaki alüminyum levhaların bariyer işlevi sayesinde nem emiliminin yalnızca levha kenarları ve deliklerle sınırlı kaldığını belirtmişlerdir.

Botelho vd. (2007b), Carall ve karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin çekme ve basma özelliklerini inceleyerek, bu malzemelerin elastik davranışları üzerindeki higrotermal koşullandırmanın etkilerini değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar, tüm örneklerin sıcaklık ve nem ortamında altı haftalık bekletme süresi sonunda nem doygunluğuna ulaştığını gözlemlemişlerdir. Higrotermal koşullandırmanın, karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin çekme dayanımını %14, Carall laminatlarınkini ise %4 oranında azalttığını tespit etmişlerdir. Benzer şekilde, basma dayanımında da düşüşler meydana geldiğini; bu düşüş oranının karbon fiber takviyeli kompozitlerde %8, Carall laminatlarda ise %4 olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, alüminyum katmanlarının, Carall gibi hibrit kompozitlerde neme bağlı performans kayıplarını azaltmada önemli bir rol oynadığını vurgulamışlardır.

Zhong ve Joshi (2015), Glare 4A tipi fiber metal laminatların sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullara uzun süre maruz kaldıklarında yapısal dayanımlarında meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Bu amaçla numuneleri 80°C sıcaklıktaki suya daldırarak dört aya kadar higrotermal şartlandırmaya tabi tutmuşlardır. Bu süreç sonunda gerçekleştirdikleri testlere göre Glare 4A laminatların dış alüminyum tabakaları sayesinde çevresel koşullara karşı başlangıçta dirençli göründüğünü, ancak kenarlardan difüze olan nemin zamanla kompozit çekirdek yapıyı zayıflattığını ve özellikle çekme dayanımı ile yorulma ömrü üzerinde olumsuz etkiler yarattığını belirtmişlerdir. Buna bağlı olarak uzun süreli kullanıma yönelik havacılık yapılarında kenar yalıtımının kritik bir öneme sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Surowska vd. (2021), karbon fiber takviyeli FML ile cam fiber içeren hibrit varyantlara, –50°C ile 80°C arasında toplam 1500 termal çevrim uygulamışlardır. Termal çevrim öncesi ve sonrasında numunelerin statik ve yorulma koşullarındaki tabakalar arası kayma dayanımı (ILSS) özelliklerini incelemişlerdir. Termal şok uygulamaları

sonrasında ILSS değerlerinde küçük değişimler gözlemlemiş olmalarına rağmen, yaptıkları istatistiksel analizlerde bu değişimlerin anlamlı olmadığını belirtmişlerdir. Cam fiber tabakası varlığının da ILSS üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık yaratmadığını vurgulamışlardır. Tüm FML türlerinde termal çevrim uygulamasının yorulma davranışı üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığını raporlamışlardır. Yorulma döngüleri süresince rijitlikte kararlı bir azalma gözlemlendiğini ve bu azalmanın birikimli yorulma hasarından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Ayrıca termal genleşmeye bağlı iç gerilmelerin ara yüzeylerde zayıflamalara neden olarak genel dayanımı olumsuz etkilediğini vurgulamışlardır.

Jakubczak vd. (2018), alüminyum ve karbon fiber takviyeli polimer katmanlardan oluşan Carall laminatlara ilave edilen ince cam ara tabaka ile termal çevrimlerin ILSS ve mikroyapı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Termal çevrimler sonrasında FML kompozitlerde delaminasyon, matris veya lif çatlağı gözlemlememişlerdir. ILSS sonuçlarına göre, termal çevrimlerin kesme dayanımı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir. Ancak, mikroyapıda bazı farklılıkların meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Termal çevrime tabi tutulmamış laminatlarda hasarın genellikle örneklerin orta bölgelerinde, metal ile kompozit arayüzeylerinde oluşan delaminasyonla meydana geldiğini; termal çevrim uygulanmış laminatlarda ise delaminasyonun yine aynı arayüzeylerde gerçekleştiğini, ancak çoğunlukla numunelerin kenarlarından başladığını gözlemlemişlerdir.

Eslami-Farsani vd. (2013), karbon/bazalt hibrit fenolik kompozitlerin darbe direnci üzerindeki termal döngülerin etkilerini, bazalt ve karbon takviyeli kompozitlerle karşılaştırarak incelemişlerdir. Termal döngü işlemini, her biri –30 °C'de 3 dakika ve hemen ardından +220 °C'de 3 dakika sürecek şekilde, beşerlik artışlarla toplam 30 çevrim olarak uygulamışlardır. Tüm çevrimler boyunca bazalt/fenolik kompozitlerin ortalama Charpy darbe enerjisinin, hem hibrit hem de karbon takviyeli kompozitlerden daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, karbon/fenolik ve hibrit kompozitlerin darbe dayanımlarının termal döngülerden anlamlı şekilde etkilenmediğini, buna karşın bazalt/fenolik kompozitlerin darbe direncinin artan çevrim sayısıyla birlikte belirgin bir düşüş gösterdiğini ve belli bir çevrimden sonra sabit bir seviyeye ulaştığını belirtmişlerdir.

Chen vd. (2019a), karbon, cam ve bazalt fiberlerin hibritlenmesi ile tabaka sıralamalarının kompozit laminatların düşük hızlı darbe dayanımı ve hasar mekanizmaları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, karbon fiberli katmanların cam ve

bazalt fiberli katmanlara göre daha gevrek bir yapıya sahip olduğunu ve bu nedenle daha düşük darbe dayanımı gösterdiğini belirtmişlerdir. Cam ve bazalt fiberli katmanların ise benzer darbe davranışları sergilediği gözlemlenmiştir. Fiber tabaka sıralamasının darbe dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, karbon fiberlerin üst ve alt yüzeylerde yer aldığı hibrit yapıların, karbonun orta katmanda kullanıldığı hibritlere kıyasla daha düşük darbe dayanımı sergilediği ifade etmişlerdir. Üç farklı fiber türüyle tam hibritlenmiş laminatların ise daha geniş bir hasar alanı ile birlikte yüksek deformasyon kabiliyeti gösterdiğini belirtmişlerdir. Özellikle karbon liflerinin merkezde konumlandığı dizilimin, diğer hibrit konfigürasyonlara göre en yüksek enerji soğurma performansını sağladığı tespit etmişlerdir.

Sarasini vd. (2013), farklı tabaka dizilimlerine sahip bazalt ve cam fiber takviyeli hibrit laminat kompozitleri 5 J, 12,5 J ve 25 J olmak üzere üç farklı darbe enerjisinde test etmişlerdir. Darbe sonrası mekanik özellikleri dört nokta eğilme testleri ile değerlendirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre iç içe geçmiş tabaka dizilimlerine sahip bazalt ve hibrit laminat kompozitlerin, yalnızca cam fiber takviyeli kompozitlere kıyasla daha yüksek darbe enerjisi soğurma kapasitesine ve daha yüksek hasar toleransına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Azimpour-Shishevan vd. (2020a), karbon/bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri üzerindeki tabaka içi hibritleştirmenin etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu kapsamda, homojen karbon fiber ve bazal fiber takviyeli kompozitlerin yanı sıra karbon/bazalt fiber takviyeli hibrit kompozitler üretmişlerdir. Karbon fiber yapısına bazalt fiberin dâhil edilmesinin; elastikiyet modülü, çekme dayanımı, eğilme modülü, eğilme dayanımı ve ILSS gibi mekanik özelliklere ve sıcaklıkla değişen rijitlik, enerji sönümleme kapasitesi ve termal iletkenlik gibi termal özelliklere etkisini değerlendirmişlerdir. Ayrıca, hibritleşmenin kompozitlerin hidrofobikliği üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla dinamik darbe testi yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre hibrit kompozitlerin, mekanik performans açısından homojen karbon fiber takviyeli kompozit ve bazalt fiber takviyeli kompozitler arasında orta düzeyde bir performans sergilediğini gözlemlemişlerdir. Öte yandan, karbon fiber yapısına bazalt fiberin dâhil edilmesini yalnızca kompozitlerin termal kararlılığını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda daha düşük maliyetli bir üretim süreci sağladığını ifade etmişlerdir.

Azimpour-Shishevan vd. (2020b), çok katmanlı karbon nanotüpler ve grafen nano levhalar gibi karbon bazlı nanoparçacıkların, karbon fiber takviyeli kompozitlerin

mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırmışlardır. Ayrıca, bu nanoparçacık katkılarının karbon fiber takviyeli kompozitlerin su alma davranışı üzerindeki etkisini hidrofobiklik testleriyle incelemişlerdir. Kompozitlere eklenen nanoparçacıkların elastikiyet modülü, çekme dayanımı, eğilme modülü ve dayanımı, ILSS, kritik burkulma yükü ve doğal frekans gibi mekanik ve dinamik özellikleri iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, karbon fiber takviyeli kompozitlerin termal özelliklerinde, özellikle enerji depolama modülü, termal kararlılık ve termal iletkenlik açısından önemli iyileşmeler olduğunu belirtmişlerdir. Çok katmanlı karbon nanotüplerle üretilen kompozitlerin, grafen nano levha katkılı kompozitlere kıyasla daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. Hidrofobiklik test sonuçlarına göre, kompozitlerde kullanılan çok katmanlı karbon nanotüp hidrofobik doğasını artırırken, graven nano levha hidrofilik özellikte bir artışa neden olduğunu belirtmişlerdir.

Azimpour-Shishevan vd. (2020c), bazalt fiber takviyeli kompozitlerinin mekanik ve termal özellikleri üzerine termal yorgunluğun etkisini araştırmışlardır. Ayrıca, termal döngülerin bazalt fiber takviyeli kompozitlerinin termal özellikleri ve su alma özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bazalt fiber takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı, eğilme modülü ve ILSS değerlerinin 80 döngü sayısına kadar arttığını, daha yüksek döngü değerlerinde ise bu değerlerde belirgin bir şekilde azalma olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, döngü sayısındaki artışın temas açılarını azaltarak kompozitlerinin hidrofobikliğini artırdığını belirtmişlerdir.

Rathore vd. (2017), cam fiber takviyeli kompozit, karbon fiber takviyeli kompozit ve cam/karbon fiber takviyeli hibrit kompozitlerin sıcaklık artışının sürünme ve eğilme özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sıcaklık arttıkça, tüm kompozitlerin eğilme dayanımı ve eğilme modülünde belirgin bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Özellikle cam fiber takviyeli kompozit numunelerde, sıcaklığın 110°C'ye çıkmasıyla eğilme dayanımının yaklaşık %57, 90°C'de ise eğilme modülünün %16 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Bu durumun temel nedeni olarak, yüksek sıcaklıkların fiber ile matris arayüzeyinde termal gerilmeleri artırarak bağlanma kuvvetini zayıflatması olarak açıklamışlardır. Zayıflayan arayüzeyin, mikroçatlakların oluşmasına ve bu çatlakların birleşerek kritik hasar bölgelerine dönüşmesine yol açtığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar, bu sürecin kompozitlerin düşük yükler altında bile hasar görebileceğini vurgulamışlardır.

Hawileh vd. (2016), farklı istifleme dizilerine sahip homojen karbon fiber ve bazalt fiber takviyeli laminat kompozitler ile karbon/bazalt fiber takviyeli hibrit laminat

kompozitlerin sıcaklık etkisi altındaki mekanik davranışlarını incelemişlerdir. 25 °C ile 250 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirdikleri çalışmada, toplam 140 numune üzerinde yaptıkları testler sonucunda, sıcaklık artışının tüm kompozitlerde elastikiyet modülü ve çekme dayanımı üzerinde olumsuz etkiler yarattığını gözlemlemişlerdir. Özellikle karbon fiber takviyeli kompozitlerde, sıcaklığın 250 °C'ye ulaşması durumunda elastikiyet modülünde oda sıcaklığına kıyasla yaklaşık %90, çekme dayanımında ise %80 oranında bir azalma meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Bu mekanik kayıpların, yüksek sıcaklıkların matris malzemenin termal bozunmasını hızlandırması ve fiber ile matris arayüzeyindeki bağların zayıflamasına neden olmasıyla ilişkilendirmişlerdir.

Shimokawa vd. (2002), karbon fiber takviyeli poliimid kompozit malzemeye −54 °C ile +177 °C arasında değişen sıcaklıklarda, 1000 ila 10.000 arasında termal çevrim uygulayarak, kompozitte açılan bir deliğin açık delik basma mukavemetini incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel bulgular doğrultusunda, termal çevrimler öncesi ve sonrasında açık delik basma mukavemetinde anlamlı bir değişiklik gözlemlenmediğini belirtmişlerdir. Ayrıca, termal çevrimlerin ardından laminatların kesit yüzeyinde enine mikroçatlakların oluştuğunu tespit etmişler, ancak bu çatlakların açık delik basma mukavemeti üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığını vurgulamışlardır.

Müller vd. (2016), Glare kompozit malzemesinin termal döngülere karşı performansını değerlendirmek amacıyla geliştirdikleri özel bir termal çevrim düzeneğinde, bu kompozitleri –25 °C ile 95 °C sıcaklık aralığında 4.000, 8.000 ve 12.000 çevrime maruz bırakmışlardır. Yapılan testler sonucunda, ILSS değerlerinin çevrimsiz numunelere kıyasla 4.000 çevrim sonrasında %3,1 ve 8.000 çevrim sonrasında %2 oranında azaldığını, ancak 12.000 çevrim sonrasında %4,2 oranında arttığını gözlemlemişlerdir. Bu düşüş ve artışların, epoksi matrisin yaşlanmasına bağlı olarak meydana gelen sertlik artışından kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir.

Fidan (2018), 4/3 dizilimli Glare kompozit malzemenin eğilme dayanımı üzerindeki termal yaşlandırmanın etkisini, –30 °C ile +40 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirdiği bir çalışmayla incelemiştir. Tam otomatik bir iklimlendirme odasında, farklı sayılarda termal çevrime tabi tutulan numunelere toplamda 300 çevrime kadar işlem uygulamıştır. Eğilme testlerini, 1 mm/dak ve 10 mm/dak olmak üzere iki farklı hızda gerçekleştirmiştir. Üç nokta eğilme testleri sonucunda, 300 çevrim sonrasında 1 mm/dak hızla test edilen numunelerde eğilme dayanımının %4, eğilme modülünün ise %3,45 oranında azaldığını belirtmiştir. Benzer şekilde, 10 mm/dak hızında test edilen numunelerde ise bu oranların sırasıyla %4,95 ve %4,85 olduğunu kaydetmiştir. Hasar

analizleri sonucunda, düşük hızda test edilen numunelerde yalnızca delaminasyon oluştuğunu, yüksek hızda ise en alt metal tabakada kırılmalar meydana geldiğini gözlemlemiştir. Ayrıca, eğilme hızının artmasının numunelerdeki kalıcı hasarın şiddetini artırdığını ifade etmiştir.

Da Costa vd. (2012), –50 °C ile +80 °C arasında gerçekleştirdikleri 1.000 ve 2.000 termal şok döngüsüyle Glare kompozit malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. 2.000 çevrimlik uygulamanın, ticari uçaklar için tipik bir C bakım kontrol aralığını temsil ettiğini vurgulayarak, termal şok döngülerinin FML üzerinde, özellikle kompozit tabakalarda önemli mikroyapısal bir değişim yaratmadığını ifade etmişlerdir. Ancak, bileşenler arasındaki ısıl genleşme katsayılarının %80'e varan farklar göstermesi nedeniyle, özellikle metal ile fiber arayüzünde hasar oluşturabileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, bu tür sıcaklık döngülerinin FML'lerin genel mekanik performansı üzerinde anlamlı bir etkiye yol açmadığını, ancak konuya ilişkin literatürde yeterli sayıda çalışmanın bulunmadığını da vurgulamışlardır.

Literatürde, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çalışmaların yanı sıra, havacılık sektöründe gerçek çevresel koşullara dayalı uygulamalı testler de mevcuttur. Bu kapsamda Airbus, ABD'nin Florida eyaletinde yer alan McKinley İklim Laboratuvarı'nda uçaklarını bir bütün hâlinde çeşitli iklim koşullarına maruz bırakarak test etmektedir. İklim kontrollü bu hangarda +40 °C ile –40 °C arasında değişen sıcaklıklarda gerçekleştirilen uygulamalarla, uçakların performansı ve dayanımı analiz edilmektedir (Airbus, 2025).

3. GENEL BİLGİLER

3.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla farklı türdeki malzemenin makro düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok fazlı sistemlerdir. Bu malzemeler temel olarak matris ve takviye elemanı olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Takviye elemanı, kompozit yapıya mekanik dayanım kazandırırken; matris fazı, takviye elemanlarını bir arada tutar, yük transferini sağlar ve aynı zamanda onları çevresel ve kimyasal etkilere karşı korur (Şanlıtürk, 2020).

Kompozitleri oluşturan bileşenler, malzemeye istenen mekanik dayanımı, sertliği ve diğer mühendislik özellikleri kazandırmak amacıyla birbirleriyle uyum içinde çalışacak şekilde tasarlanır. Bu malzemeler yalnızca yapısal özellikleriyle değil; aynı zamanda elektriksel iletkenlik, ısıl dayanım, sürtünme direnci ve çevresel koşullara karşı gösterdikleri direnç gibi çok yönlü özellikleriyle de tercih edilmektedir. Günümüzde kompozit malzemeler, belirli uygulama alanlarına yönelik performans gereksinimlerini karşılayacak şekilde optimize edilerek geliştirilmektedir. Bu bağlamda, kompozitlerin temel avantajı, nihai ürünün istenen mühendislik performansına ulaşmasının, uygun matris ve takviye elemanlarının dikkatli seçimi ve uyumlu entegrasyonu sayesinde mümkün olmasıdır (Batı, 2022).

Kompozit malzemeler, sahip oldukları farklı yapısal ve işlevsel özellikler dikkate alınarak çeşitli şekillerde sınıflandırılabilmektedir. Bu sınıflandırmalar, çoğunlukla kompoziti oluşturan temel bileşenler olan matris fazı ve takviye fazı esas alınarak yapılmaktadır. Matris fazı temel alındığında, kompozit malzemeler; metal matrisli, seramik matrisli ve polimer matrisli olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Öte yandan, takviye fazı esas alınarak yapılan sınıflandırmada ise kompozitler; fiber takviyeli, parçacık takviyeli ve tabakalı (laminat) olmak üzere çeşitli alt kategorilere ayrılmaktadır. Bu sınıflandırmalarda, takviye elemanlarının şekli, boyutu, yönelimi ve matris içindeki dağılımı gibi parametreler ön plana çıkmaktadır. Her iki sınıflandırma yaklaşımı da, farklı mühendislik ihtiyaçlarına yönelik en uygun kompozit sisteminin belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Campbell, 2010; Callister Jr ve Rethwisch, 2020).

3.1.1. Matris türüne göre kompozitler

3.1.1.1. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler, genellikle alüminyum, titanyum, magnezyum veya nikel bazlı metal alaşımlarının, oksit, karbür veya nitrür gibi seramik partiküller ya da sürekli/süreksiz fiberlerle kontrollü bir şekilde birleştirilmesiyle elde edilen ileri mühendislik malzemeleridir. Bu kompozitler, metal ve seramik fazların sinerjik etkisiyle, geleneksel metal ve seramik malzemelere kıyasla daha üstün yapısal dayanım ve işlevsel performans sunmaktadır.

Günümüzde bu üstün özelliklere sahip kompozitlerin endüstriyel ölçekte üretilebilmesi, uygulanan üretim yöntemlerinin çeşitliliği ve uygunluğu ile mümkün olmaktadır. Metal matrisli kompozitler; toz metalürjisi, sıvı metal infiltrasyonu ve sıkıştırma döküm gibi tekniklerle imal edilebilmektedir. Uygulanan üretim teknikleri, yalnızca üretilebilirliği değil, aynı zamanda kompozitin sergilediği dayanım, deformasyon kabiliyeti ve çevresel direnç gibi performans özelliklerini de doğrudan şekillendirmektedir (Demir, 2021).

Metal matrisli kompozitler, yüksek sıcaklıklarda boyutsal stabiliteyi koruyarak mukavemet kaybı yaşamadan çalışabilir. Ayrıca, ani sıcaklık değişimlerine karşı yüksek ısıl şok direnci sergiler. Kompozitte kullanılan düşük yoğunluklu metal alaşımlar ile seramik takviye fazının uygun oranlarda seçilmesi, hem yapısal hafiflik sağlar hem de rijitliğin artırılmasına katkıda bulunur. Bunun yanı sıra, seramik takviye fazı; kompozitin elastikiyet modülünü, çekme mukavemetini ve yüzey sertliğini önemli ölçüde artırmakta, bu da malzemenin yük taşıma kapasitesi ve deformasyona karşı direncini iyileştirmektedir. Metal matrisin yüksek elektriksel ve termal iletkenliği ise kompozitin ısı ve elektrik iletiminde avantaj sunmasına olanak tanımaktadır. Tüm bu özellikler, mekanik, termal ve tribolojik performansın önemli olduğu uygulamalarda metal matrisli kompozitlerin tercih edilmesine olanak tanır. Bu kapsamda, metal matrisli kompozitler; yüksek sıcaklık dayanımı ve hafifliğin ön planda olduğu havacılık ve uzay sektörlerinde (türbin kanatları, uydu yapıları), enerji soğurma ve balistik direnç gereksinimlerinin öne çıktığı savunma sanayi ürünlerinde (zırh plakaları), aşınma direnci ile ısıl iletkenliğin kritik olduğu otomotiv bileşenlerinde (pistonlar, silindir gömlekleri) ve yüksek ısı iletimi

ile düşük termal genleşme gerektiren elektronik sistemlerde (termal yönetim plakaları) yaygın ve etkili bir şekilde kullanılmaktadır (Kumar vd., 2011; Chawla, 2012).

3.1.1.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler, genellikle oksit, karbür, nitrür veya borür esaslı seramik matrislerin sürekli ya da süreksiz takviye elemanlarıyla birleştirilmesiyle elde edilen ileri mühendislik malzemeleridir. Bu kompozit malzemeler, geleneksel seramiklerin sahip olduğu yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal kararlılık ve aşınma direnci gibi üstün özelliklerini korurken, kırılganlık gibi temel dezavantajlarını azaltır.

Seramik matrisli kompozitler, oldukça sert ve dayanıklı malzemelerdir. Bu kompozitler, yüksek sıcaklıklarda dahi boyutsal stabilitelerini koruyarak güvenli şekilde kullanılabilirler. Ani sıcaklık değişimlerine karşı geliştirilmiş ısıl şok dirençleri sayesinde çatlama eğilimleri düşüktür. Oksidatif ortamlarda, asidik ya da bazik çözeltilerde ve aşındırıcı yüzeylerde yüksek kimyasal kararlılık gösteren seramik matrisli kompozitler, korozyon ve aşınmaya karşı dirençlidir. Metal esaslı malzemelere kıyasla daha düşük yoğunlukta olmaları nedeniyle hafiflik avantajı sunar. Aynı zamanda yüksek elastikiyet modülü ile mekanik rijitlik gerektiren sistemlerde yapısal bütünlüğü sağlarlar.

Seramik matrisli kompozitler, üstün yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma ve kimyasal direnç özellikleri sayesinde çeşitli endüstrilerde kritik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kompozitler özellikle havacılık ve uzay sanayisi (roket nozulları, hipersonik uçak yüzeyleri), enerji sektörü (gaz türbinleri, nükleer reaktörlerde yakıt kaplamaları), savunma sanayi (zırh plakaları, balistik koruma sistemleri) ve otomotiv endüstrisi (yüksek performanslı fren diskleri) gibi yüksek sıcaklık, aşınma ve kimyasal dayanım gerektiren alanlarda tercih edilmektedir. Ancak, seramik matrisli kompozitlerin üretimi, yüksek sıcaklık gerektiren prosesler içerdiği için, üretim maliyetlerini artırmaktadır. Ayrıca, takviye elemanları ile seramik matris arasındaki ara yüzey uyumsuzlukları, mekanik performansı olumsuz etkileyebileceğinden, bu tür kompozitlerin tasarım aşamasında dikkatli mühendislik yaklaşımları gerekmektedir (Chawla, 2012).

3.1.1.3. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler, genellikle fiber veya diğer takviye elemanlarının polimer matris içinde homojen bir şekilde dağılmasıyla üretilen, hafif, yüksek mukavemetli ve geniş uygulama alanına sahip ileri mühendislik malzemeleridir. Bu kompozitler, hafiflik, yüksek mukavemet ve sertlik, kimyasal direnç, boyutsal kararlılık ve kolay işlenebilirlik gibi üstün özellikler sunduğundan, özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde metal bileşenlerin yerini almakta ve bu sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca, düşük sürtünme ve kendi kendini yağlama gibi özelliklere sahip oldukları için tribolojik sistemler gibi uygulamalarda da tercih edilmektedirler. Polimer matrisli kompozitlerin üretiminde, iki ana matris reçine türü olan termosetler ve termoplastikler kullanılmaktadır.

Termoset reçineler; ısı etkisiyle şekillendirilip, daha sonra tekrar şekillendirilemeyen ve kalıcı bir yapı kazanan malzemelerdir. Bu reçineler, çapraz bağlanma reaksiyonları sonucu sertleşir ve bir kez sertleştikten sonra yeniden şekil alamazlar. Epoksi, polyester, vinilester ve fenolik gibi reçineler, termoset kategorisinde yer alır ve genellikle yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal direnç ve yapısal sağlamlık gibi özellikleri nedeniyle tercih edilirler (Chawla, 2012). Çizelge 3.1'de, çeşitli termoset reçinelerin tipik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bazı termoset reçinelerin tipik özellikleri (Kar, 2017)

Reçine	***Yoğunluk (g/cm^3)***	***Çekme Mukavemeti (MPa)***	***Çekme Modülü (GPa)***	***Yük Altında Eğilme Sıcaklığı(°C)***	***Sertleşme 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
Vinilester	1,12–1,32	73–81	3,0–3,5	93–135	5,4–10,3	102–150
Fenolik	1,00–1,25	30–50	3,6	165–175	0–0,01	260

Termoplastik reçineler; ısıtılarak şekillendirilebilen ve soğutularak katılaştırılan, reaktif olmayan yapıda reçinelerdir. Yeniden şekillendirilebilir olmaları, hızlı işlenme süreçleri ve geri dönüştürülebilir yapılarıyla dikkat çekerler. Çizelge 3.2'de, çeşitli termoplastik reçinelerin tipik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Bazı termoplastik reçinelerin tipik özellikleri (Kar, 2017)

Reçine	*Yoğunluk (g/cm³)*	*Çekme Mukavemeti (MPa)*	*Çekme Modülü (GPa)*	*Yük Altında Eğilme Sıcaklığı (°C)*	*Sertleşme Büzülmesi (%)*	*Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)*
Polisitren	1,02–1,18	17,9–60,7	0,3–3,35	62–98	0,002–0,008	83–100
Naylon 6	1,12–1,14	41–166	2,6–3,2	68–85	0,003–0,015	47
Polikarbonat	0,95–1,51	46,1–93,1	1,8–3,0	78–187	–	143–152
Polisülfon	1,37–1,48	60–131	–	172–213	–	–
Polietilen	0,94–1,53	11–113	0,7–13,6	51,7–127	0,001–0,003	–

Çizelge 3.3'te, termolastik ve termoset plastiklerin genel özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

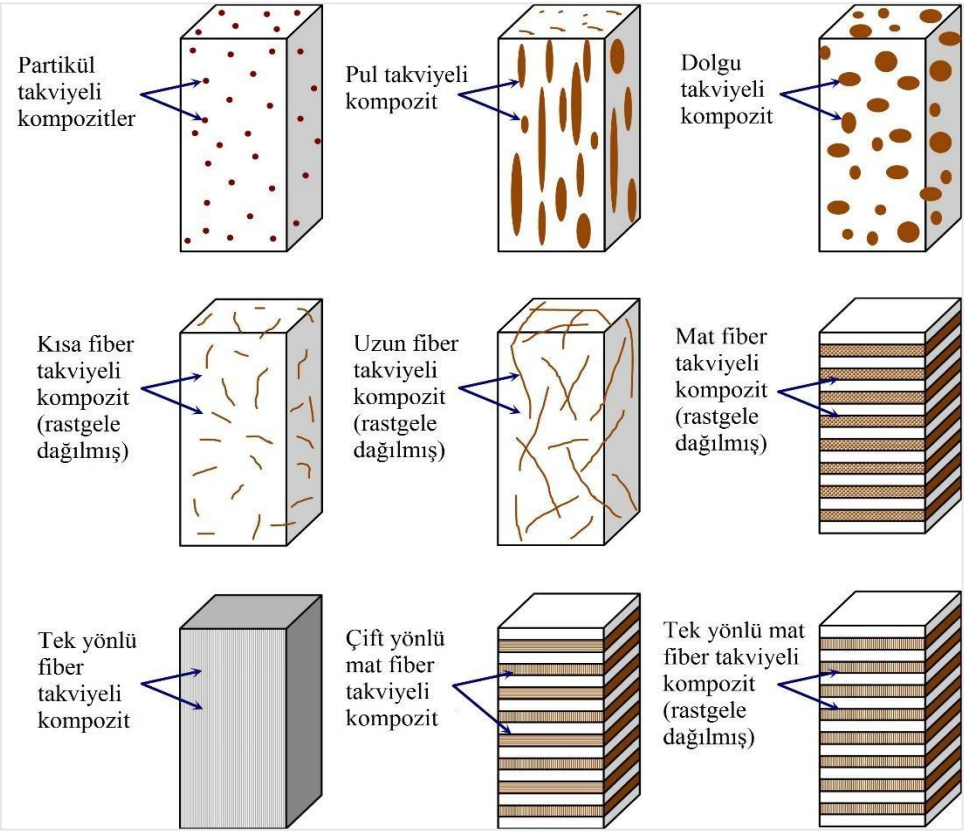
Çizelge 3.3. Termoplastik ve termosetlerin genel özelliklerinin karşılaştırması (Chawla, 2012)

Özellik	*Termoplastik*	*Termoset*
Çekme mukavemeti	Mükemmel	Mükemmel
Sertlik	Mükemmel	Mükemmel
Basma mukavemeti	İyi	Mükemmel
Darbe sonrası basma	İyi ile mükemmel arası	Orta ile mükemmel arası
Civatalı bağlantısı	Orta	İyi
Yorulma dayanımı	İyi	Mükemmel
Darbe toleransı	Mükemmel	Orta ile mükemmel arası
Sağlamlık	Mükemmel	İyi ile mükemmel arası
Bakım kolaylığı	Orta ile kötü arası	İyi
Servis sıcaklığı	İyi	İyi
Dielektrik özellikleri	İyi ile mükemmel arası	Orta ile iyi arası
Çevresel zayıflık	Yoktur, ya da hidrolik akışkanlar	Nem
Duman test performansı	İyi ile mükemmel arası	Orta ile iyi arası
İşleme sıcaklığı, °C	343-427	121-315
İşleme basıncı, MPa	1,38-2,07	0,59-0,69
Yatırma karakteristiği	Zor	Kolay
İşlem sonrası birleştirme	Vida ile tutturma, yapıştırma, füzyon	Vida ile tutturma, yapıştırma
Üretim hurdası oranı	Düşük	Düşük
Ön hazırlık kolaylığı	Orta ile zayıf arası	İyi ile mükemmel arası
Uçucu olmayan prepreg	Mükemmel	Mükemmel
Prepreg raf ömrü	Mükemmel	İyi
Sağlık/güvenlik	Mükemmel	Mükemmel

3.1.2. Takviye türüne göre kompozitler

Kompozit malzemeler, belirli yönlerde mukavemet sağlamak amacıyla ana matris içerisinde özel takviye elemanlarının kullanılmasıyla üretilen malzemelerdir. Bu malzemeler, genellikle polimerler, metaller veya seramiklerden oluşan matris yapıları ile sürekli lifler, kırpılmış lifler ve partiküller gibi takviye elemanlarının bir kombinasyonu olarak tasarlanırlar (Batı, 2022).

Takviye elemanları, kompozit malzemelere yalnızca yapısal bütünlük kazandırmakla kalmayıp, aynı zamanda ısı iletkenliği ve aşınma direnci gibi özelliklere de önemli ölçüde katkı sağlar. Kompozit malzemelerin performansını belirleyen temel bileşenler arasında ise takviye elemanları öne çıkar. Endüstride yaygın olarak kullanılan takviye elemanları arasında alümina, bor nitrür, bor karbür, silisyum karbür, tungsten karbür, karbon fiber, cam fiber, çeşitli metaller ve organik materyaller yer almaktadır (Kar, 2017). Şekil 3.1'de, kompozit yapılarda kullanılan çeşitli takviye türlerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.1. Kompozit yapılarda kullanılan takviye türleri (Batı, 2022)

Takviye elemanları, kompozit malzemelerde sürekli lif formunda ya da süreksiz partikül yapısında kullanılabilmektedir. Sürekli lif takviyeleri, özellikle belirli yönlerde yüksek mekanik mukavemetin gerekli olduğu uygulamalarda tercih edilirken; partikül takviyeleri ise malzeme boyunca daha homojen özellik dağılımı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Kompozit malzeme tasarımında, uygulamanın gerektirdiği mekanik, termal ve kimyasal performans kriterlerini karşılayacak en uygun takviye türünün seçimi

büyük önem taşımaktadır. Bu seçim, hem kompozitin nihai performansını hem de üretim sürecinin ekonomik verimliliğini doğrudan etkilemektedir.

3.1.2.1. Partikül takviyeli kompozitler

Partikül takviyeli kompozitler, bir matris fazı içerisinde dağılmış mikro veya nano boyuttaki katkı maddelerinden oluşan malzeme sistemleridir. Genellikle polimer, metal ya da seramik esaslı matris içerisine homojen şekilde dağıtılan bu parçacıklar, kompozitin mekanik, termal ve kimyasal özelliklerini iyileştirmeyi amaçlar. Kullanılan takviye elemanları, boyutlarına göre üç temel grupta sınıflandırılmaktadır: 100 µm'den büyük olanlar makro parçacıklar, 0,1–100 µm aralığında olanlar mikro parçacıklar ve 100 nm'den küçük olanlar ise nano parçacıklar olarak tanımlanır.

Partikül takviyeli kompozitlerin başlıca avantajları arasında; üretim süreçlerinin nispeten basit ve ekonomik olması, istenilen özellikler doğrultusunda tasarım esnekliği sunması ve geleneksel malzemelere kıyasla daha yüksek özgül mukavemet değerleri göstermesi yer almaktadır. Ancak, bu tür kompozitlerin performansı büyük ölçüde takviye parçacıklarının matris içerisindeki homojen dağılımına ve arayüzey bağlanma kuvvetine bağlıdır. Yetersiz dağılım ya da zayıf arayüzey etkileşimleri, beklenen performans artışının elde edilememesine neden olabilmektedir (Muniyan vd., 2025).

3.1.2.2. Fiber takviyeli kompozitler

Fiber takviyeli kompozitler, günümüz mühendislik uygulamalarında en yaygın kullanılan ve en yüksek performans sağlayan kompozit malzeme grubunu oluşturmaktadır. Bu malzemeler, cam, karbon, aramid, bor ve silika gibi çeşitli fiberlerin; polimer, metal veya seramik esaslı matris fazları içerisinde dağıtılmasıyla elde edilmektedir. Fiberlerin sürekli veya süreksiz formda kullanımına bağlı olarak farklı performans özellikleri gösteren bu kompozit sistemler, özellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranı gerektiren uygulamalarda tercih edilen vazgeçilmez malzemeler arasında yer almaktadır (Camcı, 2020).

Fiber takviyeli kompozitlerin mekanik performansı, temel olarak üç ana faktöre bağlıdır. Bunlar, fiber ile matris arasındaki arayüzey bağlanma kuvveti, fiberlerin yönelimi ve fiber hacim oranıdır. Sürekli fiber takviyeli kompozit sistemlerde, fiberlerin

tek yönlü veya çok yönlü şekilde düzenlenmesi, farklı yükleme koşullarına uygun tasarımların geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle dokuma yapısına sahip kompozitler, çok eksenli yüklemelere karşı üstün mekanik direnç sergilemektedir. Öte yandan, süreksiz fiber takviyeli sistemler; karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde ve izotropik özelliklerin arandığı uygulamalarda daha yaygın olarak tercih edilmektedir (Kar, 2017).

Son yıllarda, çevre bilincinin artmasıyla doğal fiber takviyeli kompozitler önemli bir trend haline gelmiştir. Bu kompozitler, biyolojik ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen fiberlerle üretilerek, sentetik fiberlere çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Düşük enerji tüketimi, biyobozunabilirlik ve geri dönüşüm gibi özellikleriyle sürdürülebilir endüstriyel çözümler sağlamaktadır (Keleş vd., 2024).

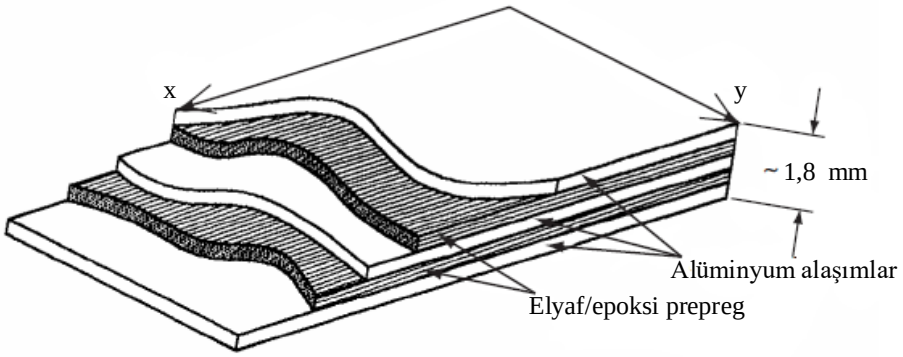
3.1.2.3. Laminat kompozitler

Laminat kompozitler, birden fazla katmandan oluşan ve her bir katmanın farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip olduğu malzeme sistemleridir. Bu kompozitlerin her bir katmanı, özel olarak seçilen malzemelerden üretilir ve her katmanın amacı, kompozitin genel performansını belirli bir özellik açısından optimize etmektir. Laminat kompozitler, genellikle yüksek mukavemet, düşük ağırlık, üstün dayanıklılık ve çevresel faktörlere karşı direnç gibi avantajlar sunar. Bu özelliklerin bir arada bulunması, laminat kompozitlerin geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilmesine olanak tanır.

Bu kompozitlerin yapısal özellikleri, kullanılan malzeme türleri ile katmanların dizilim ve oryantasyonuna bağlı olarak farklılık göstermektedir. Kompozitin mekanik performansı; özellikle çekme, basma, eğilme ve darbe dayanımı gibi temel özellikler, bu yapısal parametrelerden doğrudan etkilenmektedir. Katmanlar arasındaki malzeme geçişleri ve farklılıklar, yalnızca mekanik değil, aynı zamanda ısıl iletkenlik, elektriksel yalıtkanlık ve korozyon direnci gibi fiziksel ve çevresel dayanım özelliklerini de olumlu yönde geliştirebilmektedir. Bu yönleriyle laminat kompozitler, çok işlevli yapı malzemeleri olarak dikkat çekmektedir. Günümüzde bu kompozitlerin kullanım alanları giderek genişlemektedir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde, yapısal elemanların ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırmaları ve performans-güvenlik dengesini sağlamaları nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedirler.

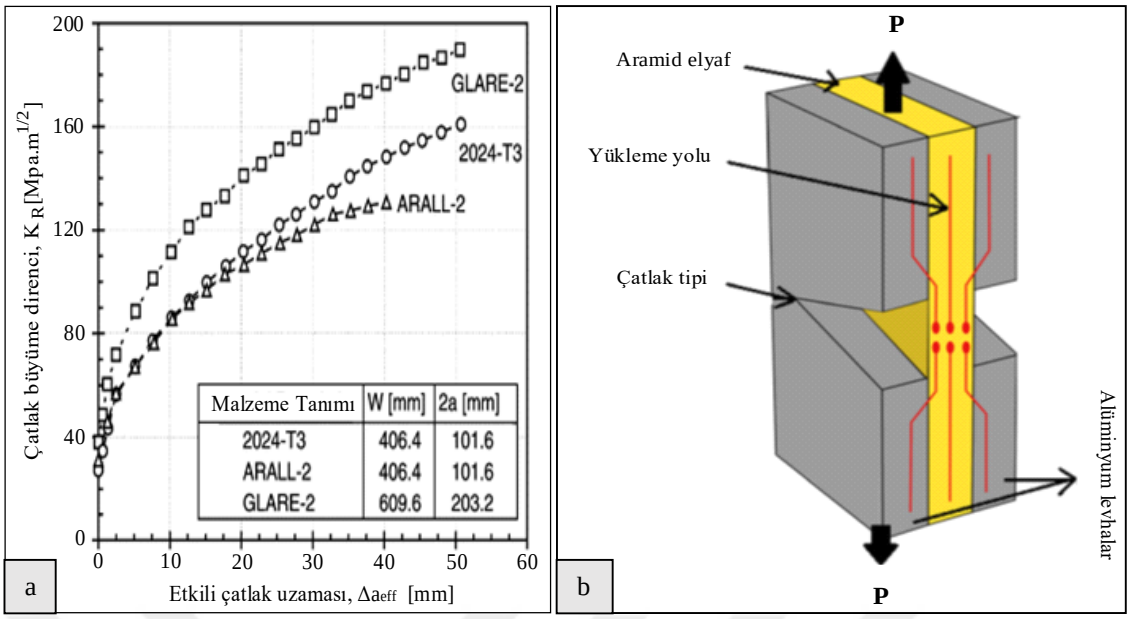
3.2. Fiber Metal Laminat (FML) Kompozitler

Fiber metal laminat (FML) kompozitler, havacılık ve uzay sanayisinde geleneksel monolitik metallerin sınırlı kaldığı mukavemet, ağırlık ve yorulma ömrü gibi konularda alternatif çözümler sunan yenilikçi malzeme sistemleridir. Bu kompozit yapılar, yüksek yorulma ömrü, üstün darbe dayanımı, iyi korozyon direnci ve düşük özgül ağırlık gibi özellikleri bir arada sunarak yapısal performansın artırılmasına olanak tanımaktadır. Özellikle uçak gövdeleri, kanat yapıları ve helikopter rotoru gibi dinamik yüklere maruz kalan yapılarda, hem güvenlik hem de verimlilik açısından önemli avantajlar sağlamaktadırlar. FML'ler, genellikle simetrik bir yapı içerisinde düzenlenmiş ince metal levhalar ile bunlar arasında yer alan epoksi gibi termoset reçinelerle emdirilmiş fiber takviye katmanlarından oluşmakadır. FML kompozitlerini oluşturan katmanlara ilişkin tipik bir yapı Şekil 3.2'de verilmiştir (Botelho, 2006; Müller, 2016).



Şekil 3.2. FML kompozitlerin katman yapısına ait bir örnek (Botelho vd., 2006)

FML kompozitlerde, metal levhalar yapının mekanik dayanımını ve çevresel etkilere (ısı, korozyon, yangın vb.) karşı direncini sağlarken; fiber takviyeli katmanlar çatlak ilerlemesini engelleyerek yorulma ömrünü artırır. Metal katmanlarda oluşan çatlaklar, fiber katmanlar tarafından köprülenir ve çatlak açıklığı sınırlandırılır. Fiberlerin yük yönünde hizalanması, çatlağın yalnızca metal katmanda kalmasını sağlayarak, gerilme yoğunluğunu ve çatlak büyüme hızını azaltır (Afaghi-Khatibi, 2000). Ayrıca, fiber köprüleme etkisi, yalnızca çatlak büyümesini yavaşlatmakla kalmaz, aynı zamanda çatlak dallanması ve ikincil çatlak oluşumu gibi mikro hasar mekanizmalarını sınırlar (Qaiser vd., 2015). FML'lerde çatlak büyüme davranışı ve ilerlemesine ilişkin şematik gösterim Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. FML'lerde çatlak büyüme davranışı ve çatlak ilerlemesinin şematik gösterimi a) 2024-T3, Arall-2 ve Glare-2 malzemelerine ait çatlak büyüme direnci, b) Arall'da çatlak durdurma mekanizmasının şematik temsili (Qaiser vd., 2015)

3.2.1. FML'lerde kullanılan metal levhalar

FML kompozit yapılarının üretiminde kullanılan metal levhalar, uygulama koşullarına göre özenle seçilmektedir. Titanyum alaşımları, yüksek sıcaklık ve yapısal hasar riski bulunan ortamlarda üstün performans sundukları için motor bileşenlerinde tercih edilmektedir. Magnezyum alaşımları ise düşük yoğunluk (~1,8 g/cm^3), yüksek korozyon direnci ve elektromanyetik koruma özellikleri ile elektronik muhafazalarda öne çıkmaktadır. Alüminyum alaşımları, düşük yoğunluğu (~2,7 g/cm^3), yüksek sertliği, elastisite modülü ve mukavemeti nedeniyle tercih edilmektedir. Örneğin, 2024-T3 alüminyum alaşımı (Duralümin), 470 MPa akma dayanımı ve %20 uzama kapasitesiyle uçak kanatlarında ve gövde panelleri gibi yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Paslanmaz çelik ise alüminyum esaslı FML kompozitlere kıyasla daha yüksek statik ve yorulma dayanımı sunmasına rağmen, yüksek yoğunluğu (~8 g/cm^3) nedeniyle kalınlık sınırlamalarına tabidir. Ayrıca, ince tabakalarda sıkıştırma yükleri altında kararsızlık sorunlarıyla karşılaşılabilmektedir (Chawla, 2012; Vlot, 2001; Fiore vd., 2011, Sinmazçelik, 2011).

3.2.2. FML'lerde kullanılan fiberler

FML kompozit yapıların bir diğer kritik temel bileşeni olan fiber takviyeli katmanlar, kullanılan elyaf türüne bağlı olarak farklı mekanik ve fiziksel özellikler sergilemektedir. Bu katmanlarda, cam, aramid, karbon ve bazalt gibi çeşitli fiber malzemeler tercih edilmekte olup, her birinin yapısal performansa katkısı farklılık göstermektedir. Cam fiber, erimiş camın ince lifler hâlinde çekilmesiyle elde edilmekte ve yaygın olarak farklı elyaf türlerinin üretiminde temel malzeme olarak kullanılmaktadır. Cam fiberlerin öne çıkan özellikleri arasında maliyet etkinliği, yüksek çekme mukavemeti, iyi korozyon direnci, düşük yoğunluk, sınırlı ısıl dayanım, elektriksel yalıtkanlık özelliği ve nem absorpsiyonunun yok denecek düzeyde olması yer almaktadır. Ancak, cam fiber ile matris arasındaki arayüzeyde nem etkisine bağlı ayrışmalar meydana gelebilmekte olup, bu durum özel kaplama işlemleriyle minimize edilebilmektedir (Gülcan vd., 2019). Bu özellikleri sayesinde cam fiber, fiber takviyeli kompozit sistemlerde en yaygın tercih edilen takviye malzemelerinden biri hâline gelmiştir.

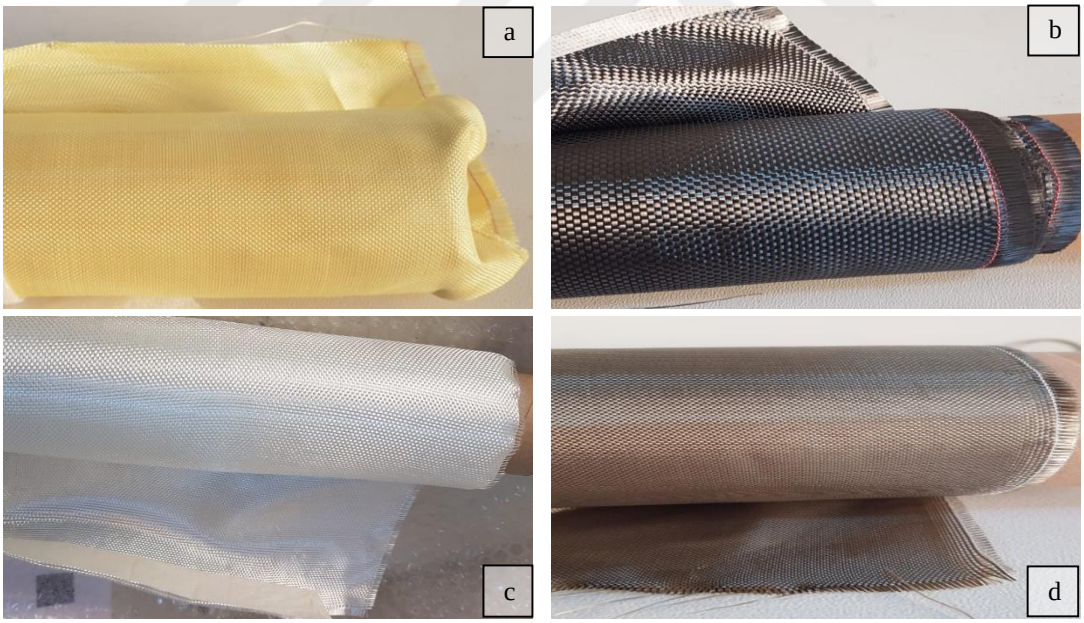
Aramid fiberler, özellikle Kevlar gibi yüksek özgül çekme mukavemetine sahip türleri sayesinde, balistik koruma ve darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, hidrofobik yapıları nedeniyle matris ile yeterli arayüzey bağının sağlanabilmesi için özel işlem teknikleri gerektirmektedir. Düşük yanma sıcaklığına sahip olmaları nedeniyle yüksek sıcaklığa maruz kalmamaları önemlidir. Ayrıca, UV ışınlarına karşı duyarlıdırlar ve uzun süreli nemli ortamlarda yapısal bozulma riski taşıdıkları için kuru ve doğrudan güneş ışığı almayan koşullarda muhafaza edilmeleri önerilmektedir (Alderliesten, 2009; Gülcan vd., 2019).

Karbon fiberler, cam ve aramid fiberlere kıyasla çok daha yüksek mukavemet ve rijitlik değerleri sunmaları nedeniyle ileri mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Geçmişte karşılaşılan kırılganlık sorunları, günümüzde yüksek uzama kabiliyetine sahip yeni nesil karbon fiber türlerinin geliştirilmesiyle büyük ölçüde giderilmiştir. Karbon fiberlerin en belirgin özellikleri arasında düşük yoğunluk, yüksek çekme mukavemeti, sürünme dayanımı, nemden etkilenmeme ve yüksek aşınma ile yorulma direnci yer almaktadır. Bu özellikleri sayesinde, özellikle askeri ve sivil havacılık yapılarında geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Alderliesten, 2009; Chawla, 2012).

Bazalt fiberler, donmuş lav kaynaklı volkanik kayaçlardan elde edilen doğal bir elyaf türüdür. Üretim sürecinde, bazalt taşları (Şekil 3.4) kırılarak fırınlara yüklenmekte

ve yaklaşık 1500–1700 °C sıcaklık aralığında ergitilerek potalardan çekilmek suretiyle kırpılmış veya sürekli lif formunda elde edilmektedir. Bu üretim yöntemi, bazalt lifinin herhangi bir kimyasal katkı maddesi kullanılmaksızın yalnızca tek bir hammadde ile üretilebilmesini mümkün kılmakta ve bu yönüyle cam elyafa kıyasla daha basit ve çevre dostu bir işleme süreci sunmaktadır (Ulus, 2018).

Şekil 3.4. Bazalt kayaçları (Ulus, 2018)



Şekil 3.5. FML kompozitlerde kullanılan en yaygın fiber kumaşlar
a) Aramid, b) Karbon, c) Cam, d) Bazalt

Bazalt lifleri, %100 doğal yapısı, toksik olmayan karakteri ve çevre dostu üretim süreciyle öne çıkmakta, aynı zamanda ekonomik bir alternatif sunmaktadır. Yüksek elastikiyet modülü, mukavemet, korozyon ve sıcaklık dayanımı gibi mekanik

özelliklerinin yanı sıra hafifliği, termal stabilitesi, ısı ve ses yalıtımı ile cam fibere benzer özellikler sergilemektedir. Deniz suyu ve kimyasal ortamlarda gösterdiği dayanıklılık sayesinde, havacılık, otomotiv ve gemi yapımı gibi alanlarda cam fibere alternatif olarak kullanılabilmektedir. Ayrıca, –200 °C ile 800 °C arasındaki geniş sıcaklık aralığında çalışabilme kabiliyeti ile sürdürülebilir ve ekonomik bir takviye malzemesi olarak dikkat çekmektedir (Fiore vd., 2011; Ulus, 2018; Yıldız, 2019). FML kompozitlerde kullanılan en yaygın fiber kumaşara ait görüntüler Şekil 3.5'te verilmiştir.

3.2.3. FML'lerin tarihsel gelişimi

FML kompozitlerin tarihsel gelişimi, 1970'li yıllarda Delft Teknoloji Üniversitesi'nde başlatılan çalışmalarla ivme kazanmıştır. Bu süreçte ilk olarak geliştirilen Arall yapılar, aramid fiberlerle güçlendirilmiş alüminyum levhalardan oluşmakta ve geleneksel alüminyuma kıyasla 2-3 kat daha yüksek yorulma direnci sağlamaktaydı. Bu malzeme Boeing C-17 uçaklarında kullanılmış; ancak nemli ortam koşullarında aramid ve alüminyum ara yüzeylerinde gözlemlenen ayrışma problemleri nedeniyle 1990'lı yıllarda Glare sistemler geliştirilmiştir. Glare kompozitleri, E-cam fiberleri ile 2024-T3 alüminyumun birleştirilmesiyle elde edilmekte ve Airbus A380 uçağında yaklaşık 27 ton ağırlık tasarrufu sağladığı raporlanmaktadır (Botelho vd., 2006). Farklı alüminyum alaşımları, metal levha kalınlıkları ve fiber yönelim açıları kullanılarak uygulamaya özgü performans ihtiyaçlarını karşılayan farklı Glare türleri oluşturulmuştur. Bu türlere ait bileşenler ve baskın özellikler Çizelge 3.4'te verilmiştir (Vlot, 2001).

Çizelge 3.4. Glare türleri ve özellikleri (Vlot, 2001)

Sınıfı	***Levha Kalınlığı (mm) / Alaşımı***	***Her Fiber Tabakasındaki Prepreg Yönelimi***	***Başlıca Faydalı Özellik***
Glare 1	0,3-0,4 / 7475-T761	0/0	Yorulma, Mukavemet, Akma Gerilmesi
Glare 2A	0,2-0,5 / 2024-T3	0/0	Yorulma, Mukavemet
Glare 2B	0,2-0,5 / 2024-T3	90/90	Yorulma, Mukavemet
Glare 3	0,2-0,5 / 2024-T3	0/90	Yorulma, Darbe
Glare 4A	0,2-0,5 / 2024-T3	0/90/0	Yorulma, Mukavemet (0° Yönünde)
Glare 4B	0,2-0,5 / 2024-T3	90/0/90	Yorulma, Mukavemet (90° Yönünde)
Glare 5	0,2-0,5 / 2024-T3	0/90/0/90	Kesme, Eksen Dışı
Glare 6A	0,2-0,5 / 2024-T3	45/-45	Kesme, Eksen Dışı
Glare 6B	0,2-0,5 / 2024-T3	45/+45	Kesme, Eksen Dışı

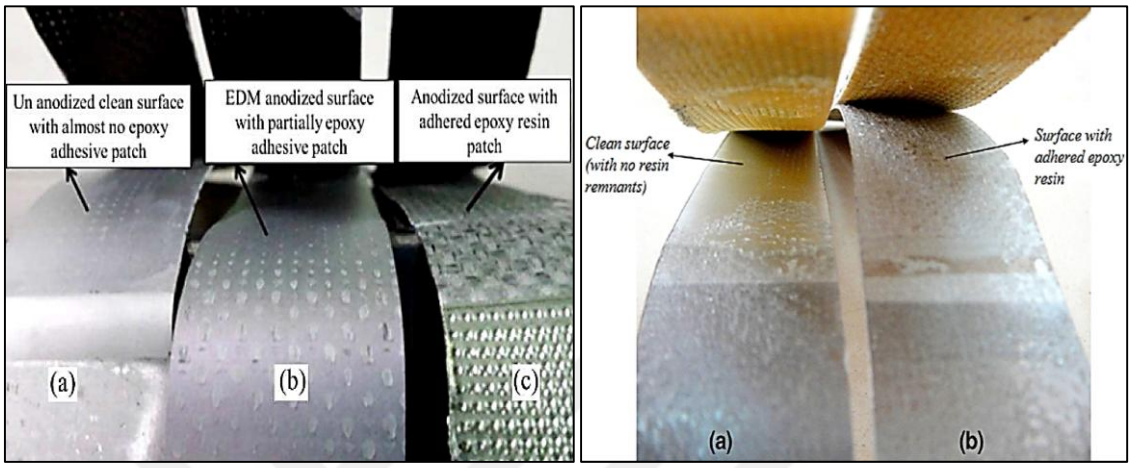
3.2.4. FML arayüzey bağ gücünü artırma yöntemleri

FML yapıların mekanik performansını belirleyen en önemli unsurlardan biri de arayüzey mukavemetidir. FML'lerde arayüzey mukavemeti, alüminyum metal levhalara uygulanan uygun kimyasal yüzey işlemleri ile iyileştirilebilmektedir. Özellikle alüminyum levha yüzeylerinin önce asit, ardından alkalin çözeltilerle aşındırılması, arayüzey bağ dayanımını artırmaktadır. Bu sayede geliştirilmiş arayüzey özelliklerine sahip kompozitlerde delaminasyon oluşumu, çoğunlukla metal/polimer ara yüzeyinden ziyade polimerik kompozit katmanlarda gerçekleşmektedir (Megahed vd., 2019). Yapılan deneysel çalışmalar, tabaka yüzey morfolojisinin Glare laminatların bağlantı davranışını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, metal levha ile prepreg katmanı arasındaki bağlantı mukavemetini artırmak amacıyla pürüzlü tabakaların kullanılması gerektiği vurgulanmıştır (Park vd., 2010a).

Arayüzey mukavemetini artırmaya yönelik çeşitli mekanik, kimyasal ve elektrokimyasal yüzey işlem teknikleri geliştirilmiş ve literatürde geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) direncini artırma yöntemlerinden biri olan metal yüzey işlemleriyle, alüminyum levhanın yüzey pürüzlülüğü artırılarak yapıştırıcı ya da bağlayıcı fazın yüzeye daha güçlü tutunması sağlanmaktadır. Bu kapsamda, levhaların yüzeyindeki kir, yağ ve gevşek partiküllerin uzaklaştırılması amacıyla farklı zımpara kâğıtları (180, 320, 600, 1000 ve 1200 grit) kullanılarak ilk mekanik işlem uygulanır. Ardından, levhalar %11 NaOH çözeltisinde 15 dakika bekletilerek yağdan arındırılır ve ardından %10 $Na_2Cr_2O_7$ ile %30 H_2SO_4 içeren bir çözeltide 15 dakika deoksidasyon işlemiyle kimyasal temizlik tamamlanır (Aşkın, 2020). Bu işlemler sonrası reçine infüzyonu hemen gerçekleştirilmelidir.

Alternatif olarak, zımparalama işleminden sonra %11 HCl çözeltisine 30 dakika daldırma ve %5 NaOH çözeltisinde 70 °C'de 5 dakika bekletme yönteminin yeterli yüzey pürüzlendirmeyi sağladığı bildirilmiştir (Megahed vd., 2019). Kimyasal işlem sonrası uygulanan elektrokimyasal yüzey işlemi ise ASTM D3933 standardına uygun olarak, DC 12V gerilim altında %12 H_3PO_4 çözeltisinde 25 dakika süresince gerçekleştirilir. Bu yöntemin ardından da reçine infüzyonunun vakit kaybedilmeden uygulanması gerekir. Literatürde, bu yöntemle hazırlanan anodize edilmiş numunelerin en yüksek soyulma mukavemetine sahip olduğu, bunun da delaminasyonun tabakalar arası değil matris fazı içinde gerçekleşmesiyle doğrulandığı ifade edilmiştir (Khan vd., 2017). Alüminyum tabakalı kompozitlerde anodizasyon yöntemiyle yüzey pürüzlendirme işlemi, kompozitin

mekanik performansını artırması nedeniyle endüstride yaygın olarak tercih edilen bir standart haline gelmiştir (Park vd., 2010b; Aşkın, 2020). Şekil 3.6'da, farklı anodizasyon yüzey işlemlerine tabi tutulmuş alüminyum levhalarda epoksi reçine tutunma durumları görsel olarak verilmiştir.

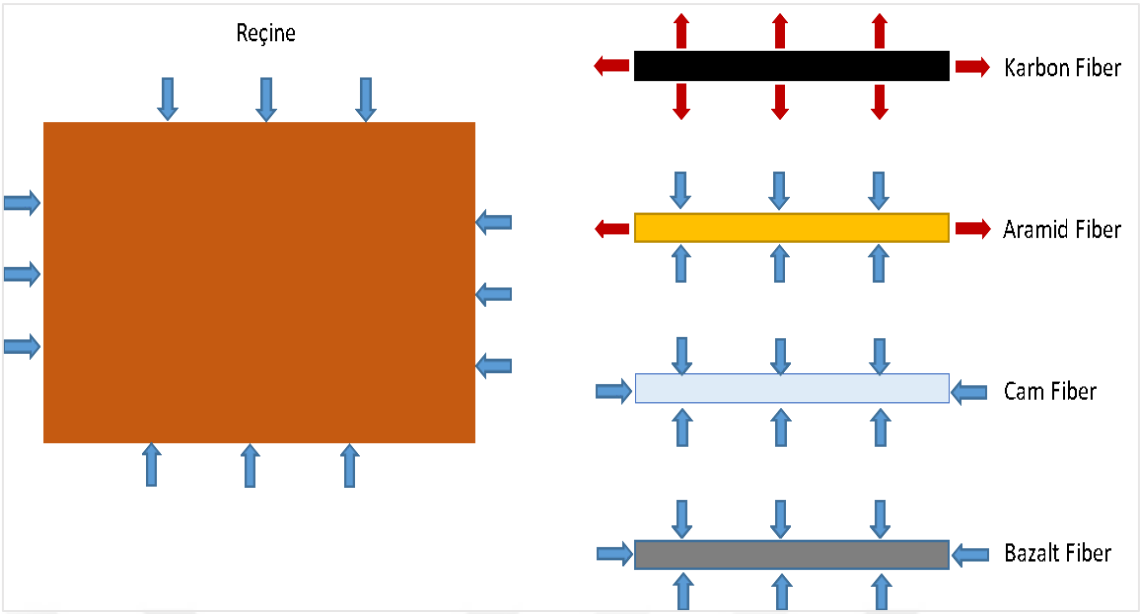


Şekil 3.6. Yüzey işlemleri sonucu metal tabakada kalıntı matris görüntüleri (Khan vd., 2017, Qaiser vd., 2015)

Şekil 3.6'da, anodize edilmemiş yüzeylerde reçine tutunmasının zayıf olduğu, EDM anodize edilmiş yüzeylerde kısmi tutunma gerçekleştiği ve tamamen anodize edilmiş yüzeylerde ise reçinenin yüzeye güçlü şekilde yapıştığı gözlemlenmektedir.

3.2.5. FML'lerde termal genleşme ve termal yorulma

Termal genleşme, düşük sıcaklıklarda kompozit malzemelerin mekanik davranışını etkileyen başlıca faktörlerden biridir. Fiber ile matris malzemesi arasındaki termal genleşme katsayısı farkının etkisi, çoğunlukla bileşen düzeyinden ziyade katman düzeyinde değerlendirilir. Bu bağlamda, fiberlerin uzunlamasına (lif doğrultusu) ve enine (lif dik doğrultu) yönlerdeki termal genleşme katsayıları arasında anlamlı farklılıklar gözlemlenmektedir (Sápi ve Butler, 2020). Lif ekseni boyunca, aramid ve çoğu karbon fiber soğuma sırasında genleşme eğilimindeyken; cam ve bazalt fiberler ise büzülmektedir. Enine yönde ise aramid, cam ve bazalt fiberler büzülürken; karbon fiberler genleşme göstermektedir (Şekil 3.7) (Reed ve Golda, 1994; Sápi ve Butler, 2020).



Şekil 3.7. Soğutma esnasında reçinenin ve fiberlerin boyutsal değişimi (Sápi ve Butler, 2020)

Bu termal genleşme davranışı, özellikle FML gibi kompozit malzemelerde daha belirgin hale gelmektedir. FML yapısında yer alan metal ve kompozit katmanlar, farklı termal genleşme katsayılarına sahiptir. Bu uyumsuzluk, sıcaklık değişimlerinde katmanlar arasında kalıntı gerilmelerin oluşmasına neden olur. Bu gerilmeler, FML yapısının bütünlüğünü tehdit edebilecek ölçüde iç gerilim birikimine yol açabilir. Özellikle fiber yöneliminin ve bağlayıcı matrisin davranışının da bu genleşmeye katkıda bulunması, sistemin termomekanik tepkisini daha karmaşık hale getirir.

FML'lerdeki termal genleşme farklarının, zamanla tekrarlanan sıcaklık döngülerine maruz kalması durumunda termal yorulma olarak adlandırılan bir hasar mekanizması ortaya çıkmaktadır. Termal yorulma, genleşme ve büzülme hareketlerinin süreklilik göstermesiyle, özellikle katmanlar arası arayüzeylerde tekrarlayan termomekanik gerilmelere neden olur. Bu durum, zamanla mikroçatlakların oluşmasına, delaminasyonlara ve yapısal bütünlükte bozulmalara yol açar. Termal yorulma döngüleri, kullanılan malzemenin türüne ve maruz kaldığı sıcaklık aralığına bağlı olarak genellikle 10–100 ile 10.000–100.000 çevrim arasında değişebilmektedir. Ancak, termal döngü testlerinin zorluğu ve süresinin uzunluğu nedeniyle, mevcut literatürde 10.000 çevrimin üzerindeki çalışmalar oldukça sınırlıdır. Yazarların en iyi bilgisine göre, 10.000 çevrimden daha fazla termal döngü içeren deneysel çalışmalara dair kapsamlı veriler bulunmamaktadır (Shimokawa vd., 2002; Sápi ve Butler, 2020).

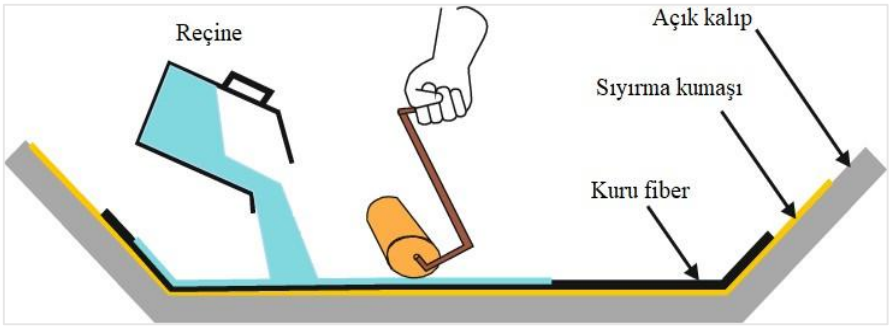
Termal yorulma sürecinde, çatlak oluşumu ilk döngüden itibaren başlayabilir ve sonraki döngülerde çatlak yoğunluğu sabit kalsa bile, çatlak uzunluklarında artış gözlemlenebilir. Bu durum, malzemenin geçirgenliğinde artışa ve mekanik özelliklerinde azalmaya yol açabilir. Yüksek sıcaklıklara ve hızlı soğuma oranlarına maruz bırakılan kompozitlerde, eşit sayıda döngü altında daha fazla çatlak gelişimi gözlemlenmektedir. Çatlak oluşumuna karşı direnç, tok yapılı reçineler, düşük termal genleşme katsayısına sahip reçineler ve lifler ile gözenekliliği düşük laminat tasarımları sayesinde artırılabilir ve böylece çatlak oluşum riski azaltılabilir (Flanagan vd., 2017).

3.3. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

3.3.1. El yatırma yöntemi

El yatırma, kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan en eski açık kalıp yöntemlerinden biridir. Bu süreç, basit bir prosedür olmasına karşın düşük hacimli üretim ve yüksek emek yoğunluğu gerektiren bir tekniktir. Bu yöntem, özellikle tekne gövdesi gibi büyük parçaların üretiminde kullanıma olanak tanır (Kar, 2017).

El yatırma, öğrenilmesi ve uygulanması kolay bir işlem olup, kullanılan ekipman son derece basit ve düşük maliyetlidir. Bu yöntemin bir avantajı, üretilecek parçaların boyut ve şekli bakımından herhangi bir sınırlamanın olmamasıdır. Ancak, el yatırma işlemi düşük verimlilik, kötü çalışma koşulları ve yüksek iş gücü yoğunluğu gibi olumsuzluklar içermektedir.



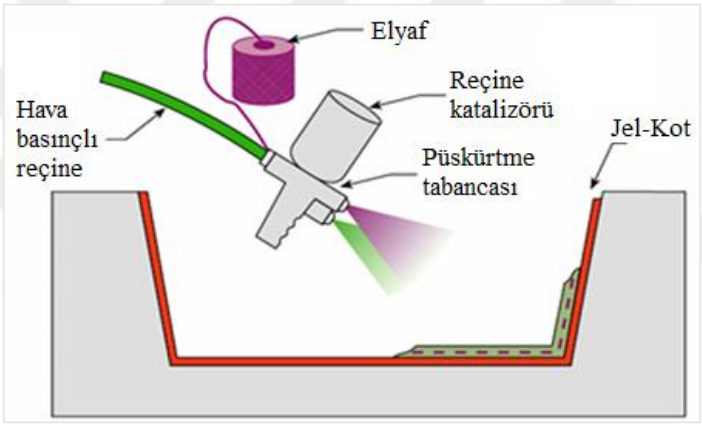
Şekil 3.8.1 Elle yatırma işleminin şematik gösterimi (Uzay ve Geren, 2020)

Ürün kalitesi, büyük ölçüde işçinin uygulama becerisine bağlıdır ve bu da kaliteyi kontrol etmeyi zorlaştırabilir. Ancak, özellikle az miktarda üretim gereksinimi olan ve büyük veya karmaşık şekilli cam fiber takviyeli kompozitler için el yatırma işlemi, hâlâ

benzersiz bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Yi vd., 2018). El yatırma yöntemiyle kompozit üretim sürecine ilişkin şematik gösterim Şekil 3.8'de verilmiştir.

3.3.2. Püskürtme yöntemi

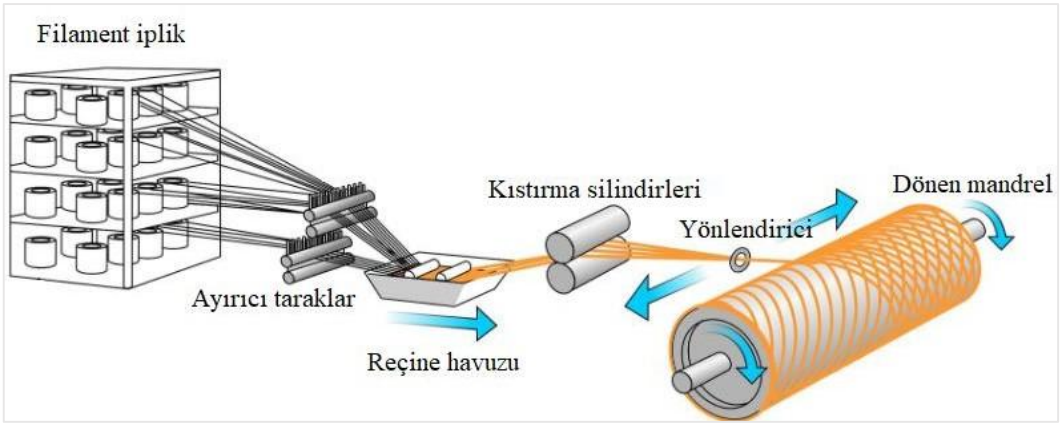
Püskürtme yöntemi, el yatırma tekniğine benzerlik gösteren bir üretim sürecidir. Bu yöntemde, reçine özel bir püskürtücü aracılığıyla kalıp yüzeyine uygulanırken, aynı anda püskürtme tabancasındaki mekanizma aracılığıyla fiberler de reçine ile birlikte yüzeye aktarılır. Bu yönüyle püskürtme işlemi, el yatırma yönteminin kısmen otomatikleştirilmiş bir formu olarak değerlendirilmektedir (Uzay ve Geren, 2020). Püskürtme yöntemiyle kompozit üretim sürecine ilişkin şematik gösterim Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Püskürtme yönteminin şematik gösterimi (Ömercikoğlu, 2009)

3.3.3. Elyaf sarma yöntemi

Elyaf sarma yöntemi, reçine esaslı kompozitlerin üretiminde kullanılan gelişmiş bir tekniktir. Bu yöntemde, sürekli elyaflar uygun bir reçine çözeltisiyle ıslatıldıktan sonra, önceden belirlenen bir desen doğrultusunda dönen bir kalıp üzerine sarılır. Sarma işleminin ardından, malzeme belirli bir sıcaklık altında kürlenerek son hâlini alır (Yi vd., 2018). Elyaf sarma yöntemiyle; basınçlı kaplar, roket motoru gövdeleri, depolama tankları, borular, golf sopası gövdeleri ve olta kamışları gibi yapısal dayanımı yüksek ve silindirik şekilli parçalar üretilebilmektedir. Bu yöntemle kompozit üretim sürecine ilişkin şematik gösterim Şekil 3.10'da verilmiştir.

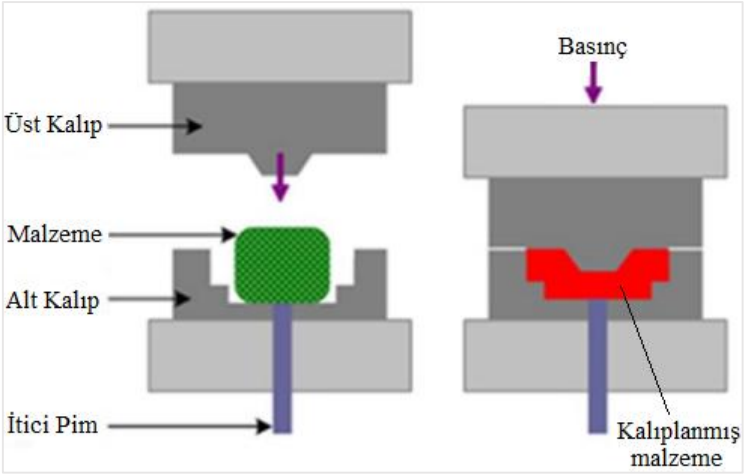


Şekil 3.10. Elyaf sarma yönteminin şematik gösterimi (Supian vd., 2018)

Gelişen üretim teknikleri sayesinde, silindirik ve küresel olmayan bazı kompozit parçaların imalatı elyaf sarma yöntemiyle gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemde yaygın olarak tercih edilen özgün termoset reçineler arasında poliester, vinil ester, epoksi ve fenolik reçineler yer alır (Kar, 2017).

3.3.4. Sıkıştırma kalıplama yöntemi

Sıkıştırma kalıplama yöntemi, kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılan bir şekillendirme tekniğidir. Bu yöntemde, kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler önceden hazırlanarak metal bir kalıba yerleştirilir. Ardından, kontrollü sıcaklık ve basınç koşulları altında kalıp kapatılarak, matrisin sertleşmesi sağlanır. Sertleşme (kürlenme) süreci tamamlandığında, istenilen geometrik ve mekanik özelliklere sahip nihai ürün elde edilir. Süreçte kullanılan kalıplar, yüksek basınç koşullarına dayanabilecek özellikte olup, genellikle yüksek sertlikte takım çeliklerinden üretilmektedir. Sıkıştırma kalıplama yönteminin en önemli avantajlarından biri, dar toleranslarda ve yüksek yüzey kalitesinde ürün elde etmeye imkân tanımasıdır (Yi vd., 2018). Sıkıştırma kalıplama yöntemine ait örnek bir şematik gösterim Şekil 3.11'de verilmiştir.

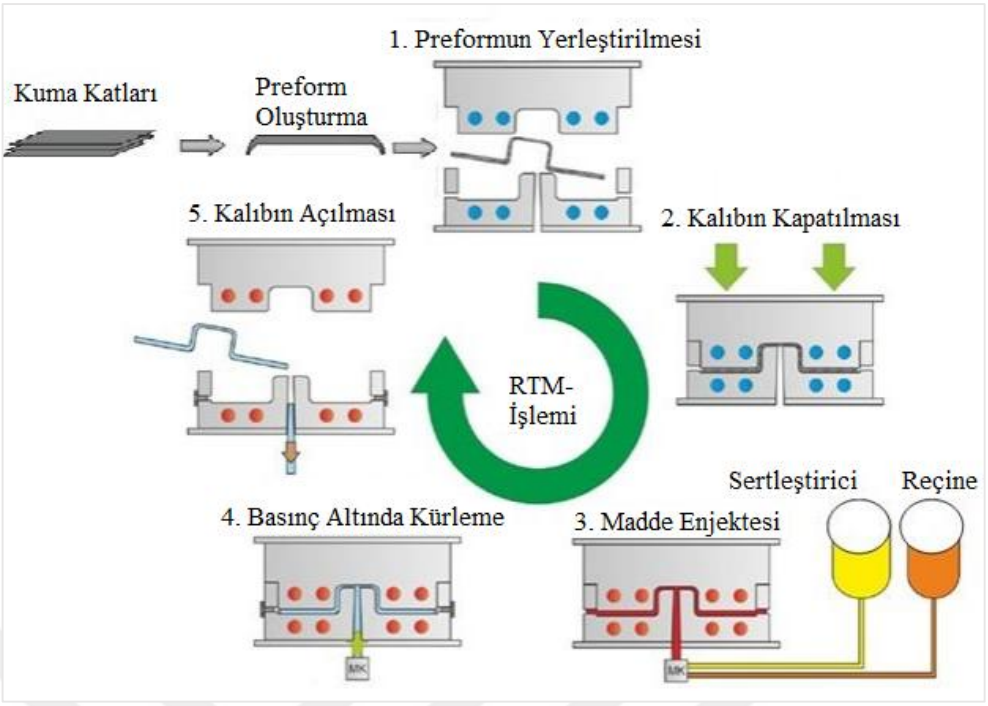


Şekil 3.11. Sıkıştırma kalıplama yönteminin şematik gösterimi (Aydın ve Altun, 2020)

3.3.5. Reçine transfer kalıplama yöntemi

Reçine transfer kalıplama yöntemi, düşük basınç altında gerçekleştirilen ve kapalı kalıp sistemine dayanan gelişmiş bir kompozit üretim tekniğidir. Bu yöntem, özellikle orta ve yüksek hacimli üretimler için tercih edilmekte olup, hem yüzey kalitesi hem de boyutsal hassasiyet açısından avantaj sağlamaktadır. Üretim sürecinde, fiber kumaş malzemeleri kalıbın alt veya üst bölümüne yerleştirilir. Ardından kalıp kapatılır ve sistem sızdırmaz hale getirilir. İçerisinde kürleştirici (katalizör) bulunan düşük viskoziteli termoset reçine, enjeksiyon portları aracılığıyla kalıba enjekte edilir. Aynı anda kalıp içinde kalan hava, hava çıkış portlarından veya yardımcı bir vakum sistemiyle dışarı atılır. Reçinenin lif dokusuna tam olarak nüfuz etmesinin ardından, belirli sıcaklık ve sürede kürleme işlemi gerçekleştirilir. Reçine tam mukavemetini kazandıktan sonra kalıp açılarak kompozit parça çıkarılır.

Bu yöntem, otomotiv, savunma ve uzay sanayii gibi yüksek performanslı parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, işlem sırasında reçinenin kontrollü akışı sayesinde lif yönelimi bozulmadan korunabilir ve mekanik özellikleri optimize edilmiş kompozit yapılar elde edilebilir (Kaplan, 2017; Yi vd., 2018). Reçine transfer kalıplama yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.12'de verilmiştir.



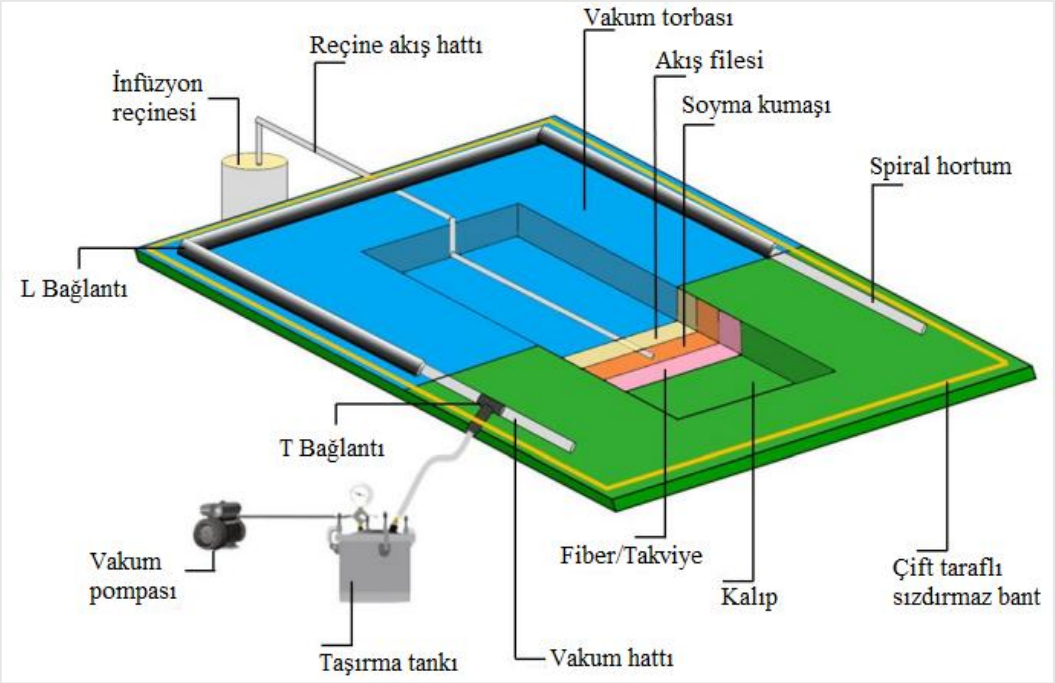
Şekil 3.12. Reçine transfer kalıplama yönteminin şematik gösterimi (Kaplan, 2017)

3.3.6. Vakum infüzyon yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi, temel prensipleri bakımından reçine transfer kalıplama yöntemiyle benzerlik göstermektedir. Her iki yöntem de kompozit üretiminde kapalı kalıplama sistemlerine dayalı olarak çalışmakta ve takviye malzemeleri içerisine reçine enjeksiyonunu esas almaktadır. Ancak bu iki teknik arasındaki temel fark, reçinenin kalıba iletilme sürecinde uygulanan basıncın yönü ve kaynağından kaynaklanmaktadır.

Vakum infüzyon, kapalı kalıplama sistemlerinin gelişmiş bir varyantı olarak, yüksek yapısal bütünlüğe sahip, hafif ve güçlü kompozit parçaların üretilmesinde öne çıkmaktadır. Polyester, epoksi ve fenolik reçinelerin başarıyla kullanılabildiği bu yöntemde, yalnızca yüksek kalite değil, aynı zamanda üretim sürecinde daha az reçine tüketimi ve daha az iş gücü gereksinimi gibi üretim verimliliği sağlayan avantajlar mevcuttur. Özellikle elle yatırma yöntemine kıyasla çok daha düşük boşluk oranlarına sahip ürünlerin elde edilmesi, bu yöntemi havacılık, otomotiv ve rüzgâr enerjisi gibi hassas sektörler için ideal hale getirmektedir. Bu yöntemde, Fiber takviye malzemeleri genellikle kalıbın içine serildikten sonra üzeri özel bir vakum torbası ile kapatılır ve sistem tamamen sızdırmaz hale getirilir. Ardından vakum uygulanarak ortamdan hava uzaklaştırılır ve oluşturulan negatif basınç sayesinde reçine, sistemdeki tüpler aracılığıyla malzeme içine çekilir. Bu kontrollü akış, lif-reçine etkileşimini optimize ederken,

homojen bir dağılım ve daha yüksek mekanik performans sağlar (Durgun, 2014; Batı, 2022). Vakum infüzyon yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.13'te verilmiştir.



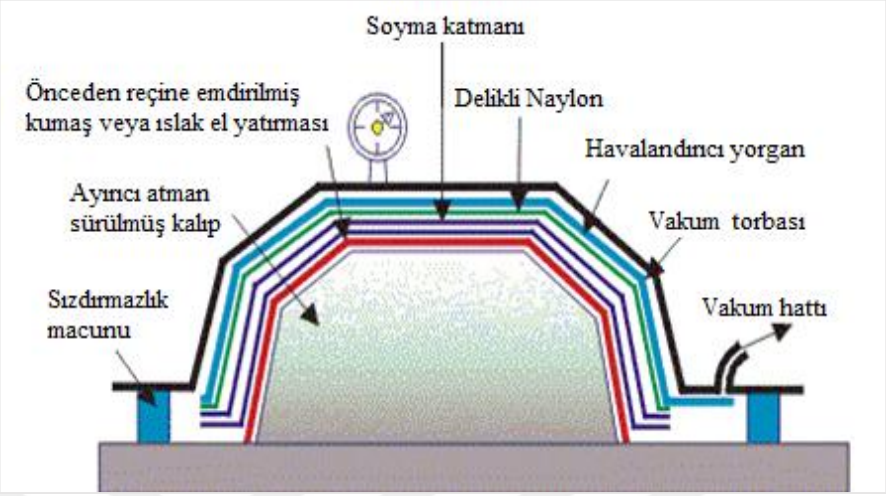
Şekil 3.13. Vakum infüzyon yönteminin şematik gösterimi (Keleş vd., 2023)

3.3.7. Vakum torbalama yöntemi

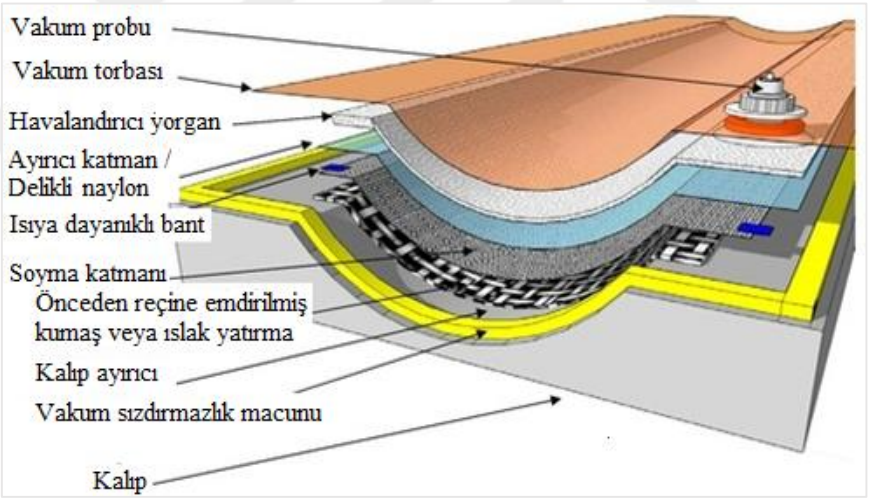
Vakumlu torbalama yöntemi, el yatırma yönteminin daha gelişmiş bir versiyonu olup, vakum infüzyon tekniğine kıyasla daha sade ve ekonomik bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, özellikle düşük adetli üretimler ile prototipleme süreçlerinde tercih edilmekte olup, uygulama kolaylığı ve sınırlı ekipman gereksinimiyle dikkat çekmektedir. Süreç kapsamında, reçine ile önceden emdirilmiş (prepreg) takviye malzemeleri kalıp yüzeyine yerleştirilir. Ardından sistem, esnek bir vakum torbası ile kapatılarak içerisindeki hava uzaklaştırılır. Uygulanan negatif basınç sayesinde malzeme katmanları arasında etkin bir temas sağlanır ve boşluksuz bir yapı elde edilir. Reçinenin harici olarak enjekte edilmemesi, bu yöntemi hem zaman açısından verimli kılmakta hem de proses kontrolünü kolaylaştırmaktadır (Fidan, 2018; Akbulut vd., 2016).

Vakum infüzyon torbalama yönteminde en uygun reçineler arasında polyester ve epoksi yer almaktadır. Reçineye; yanmazlık sağlama, hafiflik kazandırma veya arayüzey bağını güçlendirme gibi amaçlarla çeşitli dolgu maddeleri ilave edilebilmektedir. Ayrıca reçinenin kalıp yüzeyine yapışmasını önlemek amacıyla; polivinil alkol, silikon, madeni

yağlar ve vaks gibi kalıp ayırıcı malzemelerden yararlanılmaktadır (Sezgin, 2020). Vakum infüzyon yönteminde kullanılan tipik vakum torbasına ait görüntüler Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.14. Vakum torbalama yöntemi kesit görünüşü (Fidan, 2018)



Şekil 3.15. Vakum torbalama yöntemi izometrik görünüş (Akbulut vd., 2016)

3.4. Havacılıkta Kompozitlerin Bakım Süreçleri ve Kontrol Türleri

Havacılık endüstrisinde kompozit malzemelerin kullanım oranı arttıkça, bu malzemelere yönelik bakım ve onarım stratejileri de büyük önem kazanmıştır. Uçuş güvenliği açısından yüksek standartlara sahip olan havacılık sektöründe, uçak gövdeleri ve yapısal bileşenleri belirli periyotlarla detaylı bakım ve kontrol süreçlerinden geçirilmek zorundadır. Bu bağlamda, hava taşıtı operatörleri tarafından uygulanan bakım

prosedürleri; uçağın toplam uçuş saati, kalkış ve iniş döngü sayısı ile yapısal yaş gibi çeşitli parametrelere dayalı olarak belirlenmektedir. Uluslararası sivil havacılık otoriteleri tarafından standartlaştırılmış bu süreçler, bakım faaliyetlerini dört temel kategori altında sınıflandırmaktadır. Bunlar; A, B, C ve D kontrolleridir (Bis research paper, 2016).

Her bir kontrol türü, kapsam ve derinlik açısından farklılık göstermekte; bakım sıklığı, gerekli iş gücü ve süre bakımından artan bir ölçeğe sahiptir. Ayrıca bu kontrollerin tamamı, yalnızca geleneksel metalik yapıların değil, kompozit esaslı parçaların da incelenmesini ve değerlendirilmesini içermektedir. Özellikle hasar modları klasik malzemelere göre farklılık gösteren kompozitlerde, yapısal bütünlüğün korunabilmesi için detaylı muayene tekniklerinin uygulanması gerekmektedir.

- **A-Kontrol:** En düşük kapsamlı bakım türü olan A-kontrol, genellikle her 80–100 uçuş saati veya yaklaşık olarak 7–9 günde bir uygulanır. Ortalama 10–20 işçi-saat süren bu kontrol; temel yüzeysel muayeneler, sıvı seviyelerinin kontrolü, hızlı gözlemler ve bazı sistem testlerinden oluşur. Uçak, genellikle gece saatlerinde apronda veya hangarda bu kontrole tabi tutulur.
- **B-Kontrol:** A-kontrole kıyasla daha detaylı bir bakım süreci olan B-kontrol, yaklaşık her 500–600 uçuş saati veya 200–300 uçuş döngüsü sonunda gerçekleştirilir. Bu bakım, genellikle bir hangarda yapılır ve uçak tipine bağlı olarak 100–300 işçi-saat aralığında sürebilir. B-kontrol, yüzeysel testlerin ötesinde, belirli yapısal ve sistemsel bileşenlerin kapsamlı kontrolünü içermektedir.
- **C-Kontrol:** Yapısal incelemeler açısından oldukça ayrıntılı ve sistematik bir bakım türüdür. Her 18–24 ayda bir ya da yaklaşık 2000 uçuş döngüsünde bir uygulanır. Bu süreçte neredeyse tüm uçak, gövde, iniş takımları, kontrol yüzeyleri ve sistemleri dahil olmak üzere geniş kapsamlı test, inceleme ve onarımlara tabi tutulur. Uygulama süresi 2–4 hafta arasında değişebilirken, gerekli iş gücü 10.000–30.000 işçi-saate kadar çıkabilir. C-kontrol sürecinde, kompozit yapıların ultrasonik test, termografik muayene veya shearografi gibi tahribatsız kontrol yöntemleriyle değerlendirilmesi özellikle önem arz etmektedir.
- **D-Kontrol:** çakların en kapsamlı ve derinlemesine bakım türüdür. Yaklaşık her 6–8 yılda bir veya 10.000 uçuş döngüsü sonunda gerçekleştirilir. Bu kapsamda uçak, neredeyse tamamen sökülerek tüm yapısal ve sistemsel bileşenleri yeniden incelenir ve gerekirse revize edilir. Ortalama 50.000 işçi-saate kadar sürebilen bu kontrol, genellikle 6–8 hafta arasında tamamlanmakta ve yalnızca yetkilendirilmiş

bakım üslerinde gerçekleştirilmektedir. D-kontrol sırasında, kompozit yapılar üzerinde yer alan mikroyapısal kusurların tespiti için gelişmiş tekniklerinin kullanımı zorunluluk arz eder (Bis research paper, 2016).

3.5. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesine Yönelik Teorik Açıklamalar

Laminat kompozit malzemeler, farklı türdeki takviye fiberlerinin ve matris malzemesinin katmanlar hâlinde bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve özellikle havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılan yüksek performanslı malzemelerdir. Havacılık uygulamalarında kullanılan malzemeler, zorlu çevresel koşullara ve sürekli değişen mekanik yüklere maruz kaldığından, bu malzemelerin güvenilirliğini ve performansını değerlendirmek için çok sayıda mekanik test uygulanmaktadır. Bu testler:

1. Çekme testi.
2. Eğilme testi.
3. Çentik darbe testi
4. Kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) Testi.
5. Yarı statik penetrasyon testi (QSPT).
6. Termal yorulma testi.

Mekanik testler; kompozit yapıların mukavemet, rijitlik, enerji absorpsiyonu, çatlak ilerleme direnci ve tabakalar arası etkileşim gibi davranışlarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilir (Callister Jr ve Rethwisch, 2020; Batı, 2022).

3.5.1. Çekme testi

Havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılan malzemeler, hem yüksek mukavemet hem de düşük ağırlık özelliklerini bir arada taşımalıdır. Uçak ve uzay aracı yapılarında maruz kalınan yükler çoğunlukla çekme etkisi oluşturacak biçimde dağıldığından, kompozitlerin çekme davranışının detaylı bir şekilde incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Çekme testi, bir malzemenin eksenel bir kuvvet altında gösterdiği mekanik davranışları belirlemek amacıyla uygulanan en temel mekanik testlerden biridir. Bu test ile malzemenin elastikiyet modülü, akma dayanımı**,** maksimum çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi önemli özellikleri tespit edilir (Callister Jr ve Rethwisch, 2020).

3.5.2. Eğilme testi

Uçak yapılarında birçok parça, sadece çekme ve basma değil aynı zamanda eğilme yüklerine de maruz kalır. Kanat kirişleri, paneller ve bağlantı elemanları, uçuş esnasında oluşan aerodinamik kuvvetler nedeniyle eğilme zorlaması yaşar. Bu nedenle eğilme dayanımının doğru belirlenmesi, tasarım güvenliği ve servis ömrü açısından oldukça önemlidir.

Eğilme testi, malzemenin eğilme ve kırılma davranışını belirlemek amacıyla yapılan önemli bir deneydir. Bu testte, dikdörtgen veya daire kesitli düz bir numune, iki desteğe serbest bir şekilde yerleştirilir ve ortasına, malzeme deformasyona uğrayana kadar bir kuvvet uygulanır. Uygulanan kuvvet nedeniyle numunenin üst yüzeyinde basma gerilmeleri, alt yüzeyinde ise çekme gerilmeleri oluşur. Test sonucunda malzemenin eğilme dayanımı ve eğilme modülü gibi özellikleri belirlenir (Walter vd., 2010; Callister Jr ve Rethwisch, 2020; Demir, 2021).

Laminat kompozitlerde eğilme testi, hem matris fazının hem de fiber ile matris arayüzeyinin davranışını değerlendirmek açısından önemlidir. Özellikle laminat kompozit yapılar için bu test, tabakalar arasında oluşabilecek ayrılmalar hakkında fikir verir.

3.5.3. Çentik darbe testi

Havacılık sektöründe kullanılan yapı malzemeleri, uçuş esnasında karşılaşılan ani darbe yükleri, yabancı cisim çarpmaları, kuş çarpması, dolu taneleri veya bakım sırasında oluşabilecek küçük hasarlar gibi beklenmedik durumlara karşı dayanıklı olmalıdır. Bu tür yüklemelere karşı malzemenin nasıl davrandığını anlamak amacıyla çentik darbe testi, kritik bir öneme sahiptir.

Çentik darbe testi, özellikle kompozit ve metalik yapıların gevrek ya da sünek kırılma davranışını, ani yükler altında enerji absorpsiyon kapasitesini ve hasar toleransını değerlendirmek için kullanılır. Test sırasında, numunenin absorbe ettiği enerji, sarkaç mekanizmasının hareketindeki azalma temel alınarak hesaplanmaktadır (Batı, 2022).

Darbe dayanımının tayininde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında Charpy ve Izod darbe testleri öne çıkmaktadır. Her iki yöntem de malzemelerin kırılma direncini karşılaştırmalı olarak analiz etmeye olanak tanımakla birlikte, uygulama şekilleri bakımından yapısal farklılıklar göstermektedir. Charpy testinde, numune iki basit destek arasında yatay konumda yerleştirilerek yük uygulanırken; Izod testinde numune, bir

ucundan sabitlenmiş şekilde dikey konumda yerleştirilir ve serbest kalan uç darbe yüküne maruz bırakılır. Çentik darbe testinde, çentiğin yerleşim yönü testin karakteristik sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Charpy testinde çentik, darbe yönünün aksi tarafında bulunacak şekilde konumlandırılırken; Izod testinde çentik, darbeyi doğrudan karşılayacak biçimde yerleştirilir (Saba vd., 2019; Pham ve Hao, 2016).

3.5.4. Kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) testi

Kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) testi, kompozit malzemelerin özellikle tabakalar arası kayma dayanımı (ILSS) değerini belirlemek amacıyla uygulanan önemli testlerden biridir. Bu test, kompozitlerin katmanları arasındaki bağ kuvvetlerini ve delaminasyona karşı gösterdikleri direnci değerlendirmede kritik bir rol oynar. SBS testi, kompozit malzemelerin yapı bütünlüğünü ve uzun ömürlülüğünü analiz etmek için havacılık ve diğer endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

SBS testi, uygulama biçimi açısından eğilme testine benzerlik gösterse de, eğilme testinde fiber ile matris arayüzey mukavemeti daha baskınken, SBS testinde tabakalar arası mukavemet genellikle matris malzemesi ile fiberler arasındaki bağların dayanımıyla ilişkilidir. ASTM D790 standardına göre eğilme testinde, numunenin kalınlığının en az 16 katı kadar bir destek aralığı kullanılırken, SBS testinde destek aralığı numune kalınlığının 4 katı kadar olmalıdır. SBS testinin kısa destek aralığı, eğilme gerilmelerinin minimize edilmesini sağlar. Bu durum, tabakalar arasında kayma kuvveti oluşturur ve düzlemde yatay kırılmaya yol açar. Bununla birlikte, numune genişliği/kalınlığı oranı 2'nin üzerine çıktığında kayma gerilmelerinde önemli değişiklikler gözlemlenebilir (Adams ve Lewis, 1995; Park ve Jang, 1998; Walter vd., 2010; Nasser vd., 2020).

3.5.5. Yarı starik penetrasyon testi (QSPT)

Yarı statik penetrasyon testi (QSPT), kompozit malzemelerin yüzeyine belirli bir hızda veya statik olarak uygulanan bir penetrasyon kuvvetiyle malzemenin davranışlarını analiz etmek için kullanılan etkili bir yöntemdir. Bu test, özellikle kompozit laminatların katmanlar arası bağlarının dayanımını, yüzeyin aşınma direncini ve penetrasyona karşı gösterdiği tepkiyi değerlendirmede önemli bir rol oynar. QSPT, malzemenin katmanlar arası dayanımını ve genel yapısal bütünlüğünü ölçmek amacıyla geliştirilmiş olup, özellikle kalın laminat yapısına sahip kompozit malzemelerde dışarıdan gelen yüklerin etkisiyle yüzeyde veya katmanlar arasında meydana gelen davranışları anlamada

kullanılır. Test, malzemenin penetrasyona karşı gösterdiği direnç, delaminasyon olasılıkları, mikro çatlak oluşumu ve genel yapısal dayanıklılığı hakkında bilgi sağlar.

QSPT'nin önemli bir avantajı, yeni bir cihaz gerektirmeden, yalnızca uygun bir kalıp yardımıyla mevcut üniversal test cihazlarında gerçekleştirilebilmesidir. Testin prensibi, farklı geometrilere sahip bir zımba aracılığıyla, iki destek kalıbı arasındaki malzeme yüzeyine belirli bir hızda veya sabit bir yük altında batırılarak delinmesi esasına dayanır. Bu süreçte, malzemenin penetrasyona karşı gösterdiği direnç, penetrasyon miktarı ve test sırasında ortaya çıkan deformasyonlar dikkatlice ölçülür ve kaydedilir. Bu şekilde, kompozit malzemelerin katmanlar arası bağ kuvvetleri ve yapısal dayanıklılıkları hakkında önemli veriler elde edilir (Pach vd., 2020; Bati ve Çelik, 2024).

3.5.6. Termal yorulma testi

Termal yorulma testi, malzemelerin sıcaklık değişimlerine karşı gösterdiği dayanıklılığı değerlendiren bir test yöntemidir. Bu test, malzemelerin ısıl koşullarda maruz kaldığı genleşme, büzülme ve termal stres gibi etkiler karşısında nasıl bir performans sergilediğini ölçmeyi amaçlar. Özellikle yüksek sıcaklık ve soğukluk değişimlerine maruz kalan malzemelerin yapısal bütünlüğünü, dayanıklılığını ve uzun süreli performansını incelemeye olanak tanır. Test sırasında, malzeme belirli bir sıcaklık aralığında ısıtılır ve soğutulur. Bu süreç birden fazla döngüye tabi tutulur ve her döngüde malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenir. Testin amacı, malzemenin sıcaklık değişimlerine karşı nasıl davrandığını, aşırı termal stres altında ne kadar süre dayanabileceğini ve deformasyon veya kırılma gibi olumsuz etkilerin ne zaman başlayacağını belirlemektir (Shimokawa vd., 2002; Flanagan vd., 2017; Sápi ve Butler, 2020).

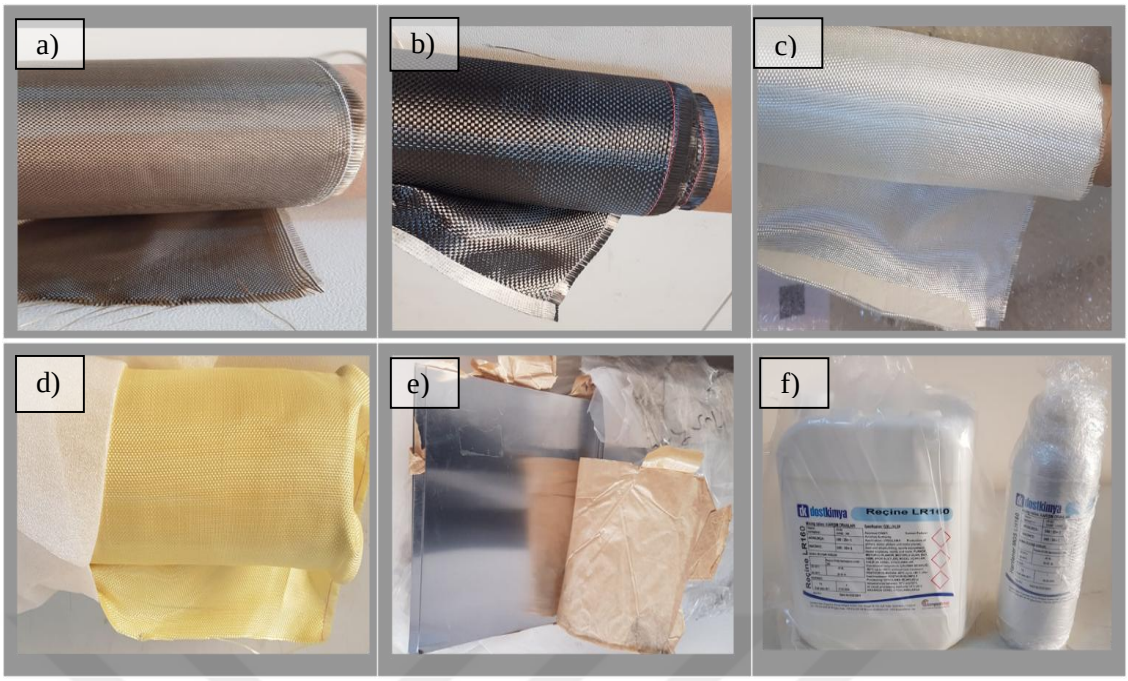
4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, tabakalı kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bileşenler ile uygulanan üretim yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Kompozit numunelerin mekanik testlere uygun hale getirilmesi amacıyla gerçekleştirilen kesim işlemleri, test öncesi hazırlık süreçleri ve uygulanan termal çevrim prosedürü detaylandırılmıştır. Ayrıca, uygulanan mekanik test türleri, bu testlerin dayandığı standartlar, kullanılan test cihazları ile testlerin gerçekleştirilme yöntemlerine ilişkin bilgiler sunulmuştur. Elde edilen verilerin analizinde kullanılan ekipmanlar ve analiz yöntemleri kapsamlı biçimde açıklanmıştır.

4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, üretilen tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerine termal çevrimin etkilerinin incelenmesi amaçlandığından, kompozit üretiminde endüstriyel uygulamalarda, özellikle de havacılık ve uzay sanayisinde yaygın olarak tercih edilen bileşenlerin kullanılmasına özen gösterilmiştir. Bu kapsamda, tabakalı kompozitlerin üretiminde yüzey tabakası olarak kullanılmak üzere Güral Alüminyum firması aracılığıyla 0,5 mm kalınlığında, 220 mm genişliğinde ve 1200 mm uzunluğunda 2024-T3 alüminyum alaşımı temin edilmiştir. Takviye elemanları olarak Dost Kimya firmasından cam, karbon, bazalt ve aramid esaslı dokuma fiber kumaşlar sağlanmıştır. Matris malzemesi olarak ise aynı firmadan LR160 epoksi reçinesi ile LH160 epoksi sertleştirici temin edilerek kompozit üretiminde kullanılmıştır. Söz konusu malzemelere ait görseller Şekil 4.1'de verilmiştir.

Yüksek mukavemet, iyi yorulma dayanımı, yüksek şekillendirilebilirlik ve sünekliğini koruma gibi üstün özelliklere sahip olması; ayrıca yapısal hafiflik, yüksek hasar toleransı ve uzun süreli dayanım gibi kritik mühendislik gereksinimlerini karşılayabilmesi nedeniyle, 2024-T3 alüminyum alaşımı özellikle hava taşıtlarının gövde panelleri, kanat yapıları ve bağlantı elemanları gibi yüksek performans gerektiren bileşenlerinde yaygın olarak tercih edilen bir malzemedir (Huda vd., 2009; MatWeb, 2025). Deneysel çalışma için temin edilen bu malzemenin kimyasal bileşimi ile bazı önemli fiziksel, mekanik ve termal özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Tabakalı kompozit üretiminde kullanılan malzemeler a) Bazalt fiber, b) Karbon fiber, c) Cam fiber, d) Aramid fiber, e) Alüminyum levha, f) Epoksi reçine ve sertleştirici

Çizelge 4.1. 2024-T3 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi ile bazı önemli fiziksel, mekanik ve termal özellikleri (MatWeb, 2025)

Kimyasal Bileşimi (%)								
Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
90,7–94,7	Mak. 0,10	3,8–4,9	Mak. 0,50	1,2–1,8	0,30–0,90	Mak. 0,50	Mak. 0,15	Mak. 0,25

Önemli Özellikleri					
Fiziksel	***Mekanik***				***Termal***
Yoğunluk (g/cm^3)	Sertlik (HB)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Elastikiyet Modülü	Isıl İletkenlik (W/mK)
2,78	120	290–435	10–15	73,1	121

Hafiflik ve yüksek dayanımın kritik bir gereklilik olduğu kanat, pervane ve benzeri yapısal uygulamalarda, karbon fiber; yüksek mukavemeti, düşük yoğunluğu ve gelişmiş mekanik özellikleri sayesinde havacılık standartlarında nitelikli bir takviye malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Epoksi reçine sistemleriyle yüksek derecede uyumluluk gösteren cam ve bazalt esaslı dokuma fiber kumaşlar ise, kolay bir şekilde reçineye daldırılabilmeleri ve tatmin edici mekanik performansları sayesinde; havacılık, modelcilik, insansız hava aracı ve drone gibi hafif yapısal gereksinimlerin bulunduğu alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu fiber türleri, yüksek performans sağlamalarının yanı sıra karbon fiber gibi alternatiflerine kıyasla daha ekonomik olmaları dolayısıyla da önemli avantajlar sunmaktadır. Öte yandan, balistik uygulamalarda yaygın

olarak kullanılan Kevlar ® 29 veya muadili para-aramid liflerinden imal edilen dokuma kumaşlar, kurşungeçirmez yelek ve benzeri balistik koruma sistemlerinde etkin rol oynamaktadır. Belirtilen uygulamalarda yaygın olarak 200 g/m^2 yüzey yoğunluğuna sahip fiber takviye malzemeleri tercih edildiğinden, bu çalışmada da cam, karbon, bazalt ve aramid esaslı fiberlerin tümü için 200 g/m^2 yüzey yoğunluğuna sahip dokuma kumaşlar kullanılmıştır. Temin edilen bu fiber kumaşlara ait temel özellikler, Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kompozit malzeme bileşenlerinin özellikleri

Özellik	***Karbon Fiber***	***Bazalt Fiber***	***Cam Fiber***	***Aramid Fiber***
Yoğunluk (g/cm^3)	1,76	2,67	2,54	1,44
Çekme Mukavemeti (MPa)	3950	3420	3448	2900
Kopmadaki Uzama (%)	1,7	4,1	5,1	2,9
Elastikiyet Modülü (GPa)	238	93	72,4	113
Termal Genleşme Katsayısı (µm/m°C)	-0,1	5,5	5	-2,4
Termal İletkenlik (W/mK)	11	0,035	0,8	0,05

Kompozitlerin üretiminde matris malzemesi olarak LR160 epoksi reçinesi ile LH160 epoksi sertleştirici kullanılmıştır. Bu sistem, düşük viskozitesi sayesinde el yatırma yöntemi ile üretilecek kompozitlerin fiber ile etkin bir şekilde emdirilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, uzun çalışma süresi ve yüksek mekanik dayanım özellikleri nedeniyle özellikle havacılık ve savunma sanayisi gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bu bağlamda, çalışmanın amacı doğrultusunda hem üretim kolaylığı hem de son kullanım özellikleri açısından uygunluk göstermesi nedeniyle teknik özellikleri Çizelge 4.3'te verilen LR160/LH160 epoksi sistemi tercih edilmiştir.

Çizelge 4.3. LR160/LH160 epoksi sisteminin teknik özellikleri (Dostkimya, 2025)

Özellik	***Değer / Açıklama***
Reçine tipi	MGS L160 Laminasyon Epoksi Reçinesi
Sertleştirici tipi	LH160
Reçine / Sertleştirici karışım oranı	100:25 ±2 gram (ağırlıkça)
Çalışma süresi (25 °C)	30–45 dakika
Yoğunluk (reçine)	1,13–1,17 g/cm³
Viskozite (reçine, 25 °C)	700–900 mPa·s
Depolama süresi (kapalı ambalajda)	24 ay
Isıl işlem uygulanmadan sıcaklık aralığı	-60 °C ile +50 °C
Isıl işlem uygulandığında sıcaklık aralığı	-60 °C ile +80 °C
Lif uyumluluğu	Karbon, cam, aramid fiber kumaşlarla yüksek uyum
Kullanım alanları	Havacılık, denizcilik, spor ekipmanları, kalıplama, modelcilik

4.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Üretim Planı

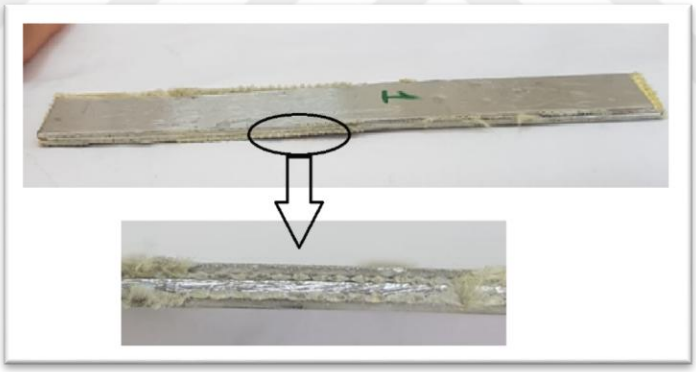
Homojen reçine dağılımı sağlaması, boşluk oranını azaltarak mekanik özellikleri iyileştirmesi, lif hacmi oranını artırması ve yüzey kalitesini geliştirmesi gibi sağladığı avantajlar ile üretim sürecinde düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir bir yöntem olması nedeniyle vakum torbalama yöntemi kullanılacaktır. Vakum torbalama yöntemiyle gerçekleştirilecek kompozit malzeme üretim süreci aşağıda adım adım açıklanmıştır.

- *Malzeme Hazırlığı:* 0,5 mm kalınlığındaki 2024-T3 alüminyum alaşım levhalar ve fiber takviye malzemeleri, 220 mm × 330 mm boyutlarında kesilecektir. Fiber takviyenin alüminyum yüzeyle daha güçlü bir arayüzey bağı oluşturabilmesi amacıyla, levhaların fiberle temas edecek yüzeyleri 200 numara zımpara ile mekanik olarak zımparalanarak yüzey pürüzlülüğü artırılacaktır. Zımparalama işleminin ardından alüminyum levhalar, üretim sürecine uygunluk sağlamak amacıyla yüzeyde bulunan kir, yağ ve diğer yabancı maddelerden arındırılacaktır. Temizlik işlemi, levha yüzeyine zarar vermeyecek nitelikte uygun solventlerle gerçekleştirilecek; sonrasında yüzeyler, kuru ve temiz bir bezle silinerek tamamen kurutulacaktır.
- *Reçine Hazırlığı:* Epoksi reçinesi (LR160) ve sertleştirici (LH160), ürün tanıtımında önerilen 4:1 oranında hassas terazide tartılacak ve Wisestir marka manyetik karıştırıcıda, 10 dakika süreyle, 50 °C tabla sıcaklığında ve 750 dev/dak karıştırma hızında homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılacaktır. Karıştırma aşamasında oluşan hava kabarcıklarını gidermek için ultrasonik temizleme cihazı kullanılacaktır.
- *Katmanların Yerleştirilmesi:* Temizlenmiş ve yüzeyi zımparalanmış ilk alüminyum levhanın üzerine epoksi reçinesi uygulanacak, ardından fiber takviye malzemesi yerleştirilecektir. Reçine ile emdirilmiş fiberin üzerine çift tarafı zımparalanmış ikinci alüminyum levha yerleştirilecek ve aynı işlem tekrarlanarak reçine emdirilmiş yeni bir fiber tabakası yerleştirilecektir. Son olarak, fibere temas edecek yüzeyi zımparalanmış son alüminyum levha eklenerek katmanlar tamamlanacaktır.

Bu süreç, toplam beş tabakadan oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Aynı üretim prosedürü, farklı fiber türlerinin (cam, karbon, bazalt, aramid) kullanıldığı alüminyum tabakalı kompozitler için de uygulanacaktır. Bu kapsamda; cam alüminyum laminat (Glare), karbon alüminyum laminat (Carall), bazalt alüminyum laminat (Barall) ve aramid alüminyum laminat (Arall) olmak üzere dört farklı kompozit türü üretilecektir. Bunlara ilaveten, hibrit fiberlerin kullanımıyla farklı fiber kombinasyonları içeren alüminyum tabakalı kompozitler de üretilecektir. Bu hibrit kompozitler arasında;

- ✓ Aramid ve karbon fiber içeren alüminyum laminat (Ar-Carall),
- ✓ Aramid ve cam fiber içeren alüminyum laminat (Ar-Glare),
- ✓ Aramid ve bazalt fiber içeren alüminyum laminat (Ar-Barall),
- ✓ Karbon ve cam fiber içeren alüminyum laminat (Car-Glare),
- ✓ Karbon ve bazalt fiber içeren alüminyum laminat (Car-Barall),
- ✓ Cam ve bazalt fiber içeren alüminyum laminat (Gl-Barall) bulunmaktadır.

Üretilen tabakalı kompozitlerin görsel temsili Şekil 4.2'de, üretim planlamasına ilişkin detaylı bilgi ise Çizelge 4.4'te verilmiştir.



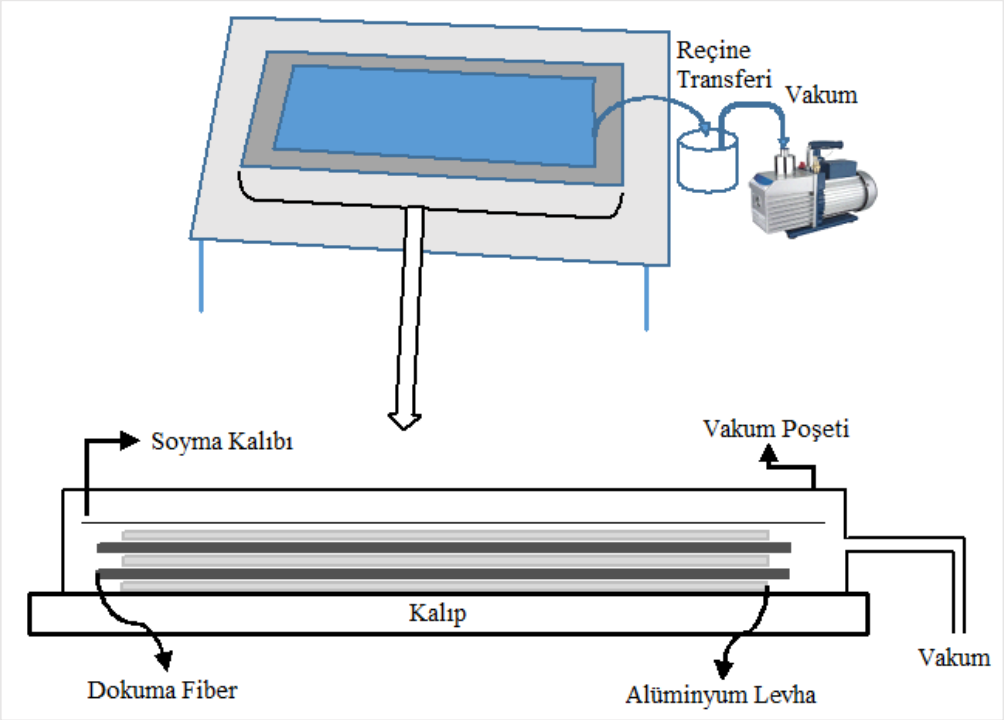
Şekil 4.2. Arall numunesinde tabakalarının görüntüsü (Biliz ve Çelik, 2022)

Çizelge 4.4. Alüminyum ve fiber kombinasyonlarına göre üretilecek kompozit numuneler

Numune No	*İsim*	*Alüminyum*	*Aramid*	*Karbon*	*Cam*	*Bazalt*
1	Arall	3	2			
2	Carall	3		2		
3	Glare	3			2	
4	Barall	3				2
5	Ar-Carall	3	1	1		
6	Ar-Glare	3	1		1	
7	Ar-Barall	3	1			1
8	Car-Glare	3		1	1	
9	Car-Barall	3		1		1
10	Gl-Barall	3			1	1

4.3. Vakum Torbalama Düzeneği Kurulumu ve Uygulama Adımları

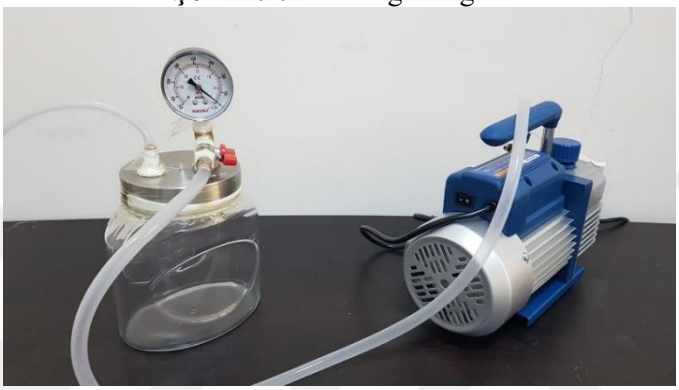
Vakum torbalama yöntemiyle üretim yapmak amacıyla, Şekil 4.3'te şematik olarak gösterilen düzeneğin kurulumu gerçekleştirilmiştir. Bu düzenek, çalışma tezgâhı veya masası, cam veya yüksek derecede pürüzsüz bir altlık-kalıp, tek kademeli vakum pompası, vakum haznesi, vakum saati, akışın engellenmesi için U civatası, reçine kabı ve hortumlardan oluşmaktadır.



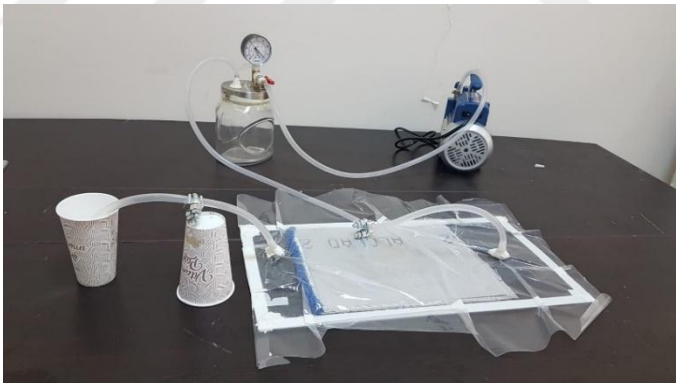
Şekil 4.3. Vakum torbalama yöntemine ait üretim sürecinin şematik gösterimi

Hortumlar kullanılarak pompa vakum haznesine bağlanmış, vakumlamanın takip edilebilmesi için vakum haznesinin kapağına vakum göstergesi takılmıştır (Şekil 4.4). Vakum torbası, hortumlar yardımıyla sırasıyla vakum haznesine ve ardından vakum pompasına bağlanarak sistemin hava sızdırmazlığı sağlanmıştır (Şekil 4.5). Vakum torbalama düzeneği ve numune üretim tezgâhı hazırlanarak (Şekil 4.6) deneme üretimlere başlanmıştır.

Şekil 4.4. Vakum göstergesi



Şekil 4.5. Vakumlama düzeneği



Şekil 4.6. Vakum torbalama düzeneği ve numune üretim tezgâhı

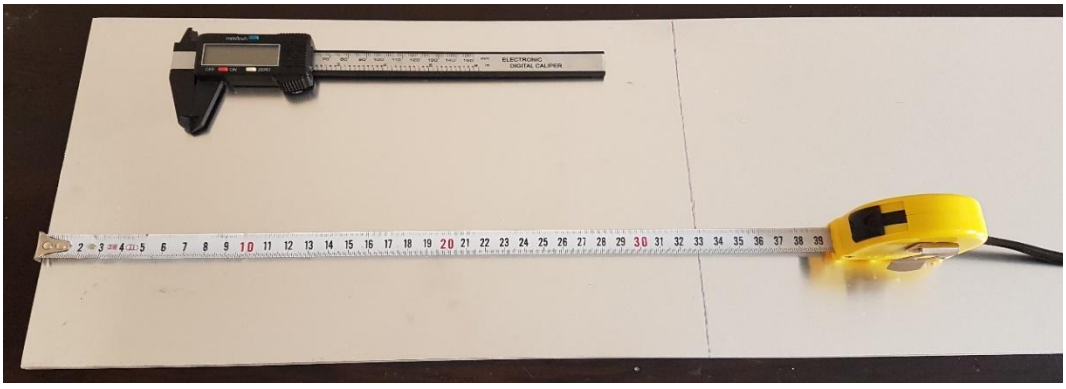
4.4. Vakum Torbalama Yöntemiyle Kompozit Malzeme Üretimi

Vakum torbalama yöntemi, kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak tercih edilen bir imalat tekniğidir. Bu yöntemde, malzeme içerisindeki hava ve gazların ortamdan uzaklaştırılması amacıyla vakum uygulanmaktar. Böylece torba içerisinde bir basınç farkı oluşturularak kalıp içinde homojen ve istenilen geometrik özelliklere sahip bir yapı elde edilmektedir. Havacılık, otomotiv, denizcilik ve rüzgâr enerjisi gibi birçok endüstriyel alanda yaygın şekilde kullanılan vakum torbalama tekniği, yüksek

mukavemetli ve hafif yapılı kompozit parçaların üretiminde önemli avantajlar sunmaktadır. Söz konusu yöntem; homojen yapı elde etme, yüksek yüzey kalitesi sağlama ve karmaşık geometriye sahip parçaların üretiminde esneklik gibi üstünlükleriyle öne çıkmaktadır. Ancak, uygulama sırasında vakum kaçakları veya torba yırtılmaları gibi çeşitli sorunların ortaya çıkabileceği göz önünde bulundurulmalı ve bu tür olasılıklara karşı gerekli önlemler alınmalıdır (Fidan, 2018). Bu doğrultuda, vakum düzeneği ve numune üretimi sırasında tespit edilen eksiklikler giderilmiş ve başarılı bir şekilde tabakalı kompozit numune üretimine geçilmiştir.

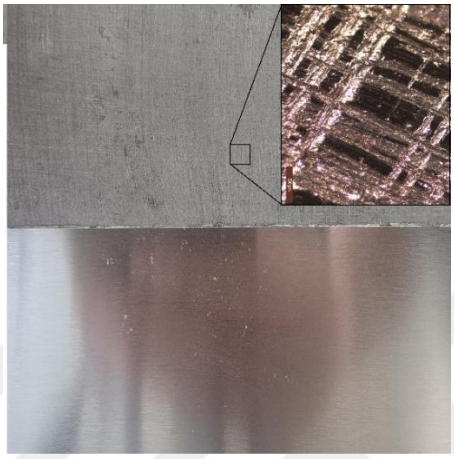
4.4.1 Hazırlık süreci

Hazırlık sürecinde, ticari olarak temin edilen 0,5 mm kalınlığındaki 2024-T3 alüminyum alaşımı (Şekil 4.7) ve her biri 200 g/m^2 dokuma tipinde cam, karbon, bazalt ve aramid fiber dokuma kumaşlar alüminyum levhanın 220 mm genişliği referans alınarak 220 mm × 330 mm ebatlarında kesilmiştir (Şekil 4.8). Kompozit yapıda, metal yüzey ile epoksi matris arasındaki bağlanma mukavemetini artırmak amacıyla pürüzlü alt tabakaların gerekliliği literatürde vurgulanmaktadır (Park vd., 2010a). Bu doğrultuda, alüminyum levhalar kesildikten sonra, fiberle temas edecek yüzeyleri 200 numara zımpara ile mekanik olarak işlenerek yüzey pürüzlülüğü artırılmıştır (Şekil 4.9). Zımparalama işleminden sonra, yüzeyde biriken kir, yağ ve zımpara tozlarının giderilmesi amacıyla önce etil alkol, ardından ise aseton ile kimyasal temizlik gerçekleştirilmiş ve yüzeyler temiz ve kuru hâle getirilmiştir.



Şekil 4.7. Alüminyum levha kesimi

Şekil 4.8. Kesilmiş dokuma fiber kumaşlar. Soldan sırayla cam, karbon, bazalt ve aramid



Şekil 4.9. Zımpara öncesi ve sonrası alüminyum levha

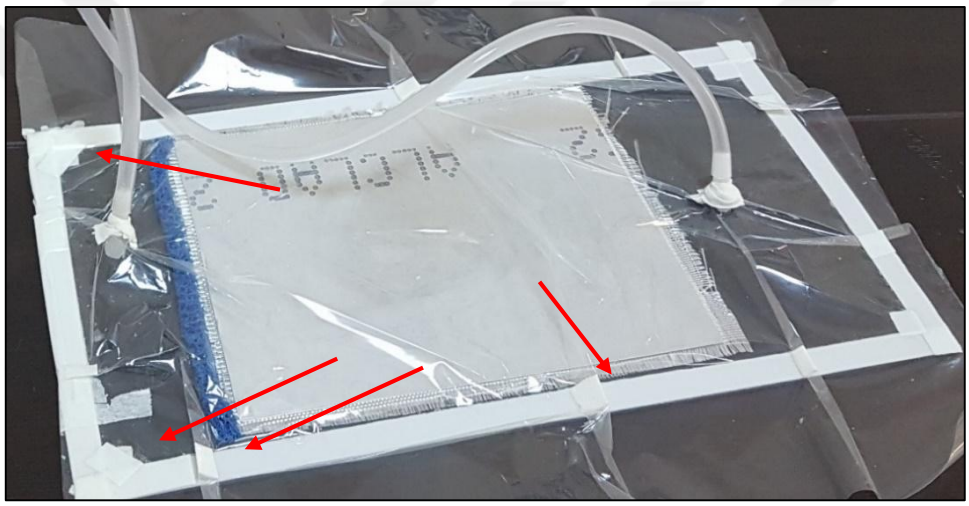
Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılacak olan vakum torbalama yöntemi için öncelikle vakum pompası temin edilmiştir. Pompa seçimi, üretici firma ile yapılan teknik istişare sonucunda, vakumlanacak ortamın toplam hacmi ve gerekli çekiş gücü göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Vakumlama işlemi sırasında, pompa sistemine reçine kaçışını engellemek amacıyla, sistemde bir ara vakum odası tasarlanmıştır. Bu amaçla, 4,5 mm cidar kalınlığına sahip cam kavanoz kullanılmış ve bu kavanoz vakum odası işlevi görmüştür. Vakum sisteminin sızdırmazlık kontrolü ve vakum seviyesinin izlenebilmesi amacıyla vakum odasına bir vakum göstergesi entegre edilmiştir. Vakum pompası ve vakum odasına ait görseller Şekil 4.10'da verilmiştir

Sistemin bileşenleri olan vakum pompası, vakum odası ve vakum torbası, 3/8 inç çapındaki hortumlar aracılığıyla birbirine bağlanmıştır. Vakumlama işlemi sırasında torbanın emme kuvveti nedeniyle zarar görmesini engellemek amacıyla, 100 mikron kalınlığında yüksek dayanımlı vakum torbası kullanılmıştır.

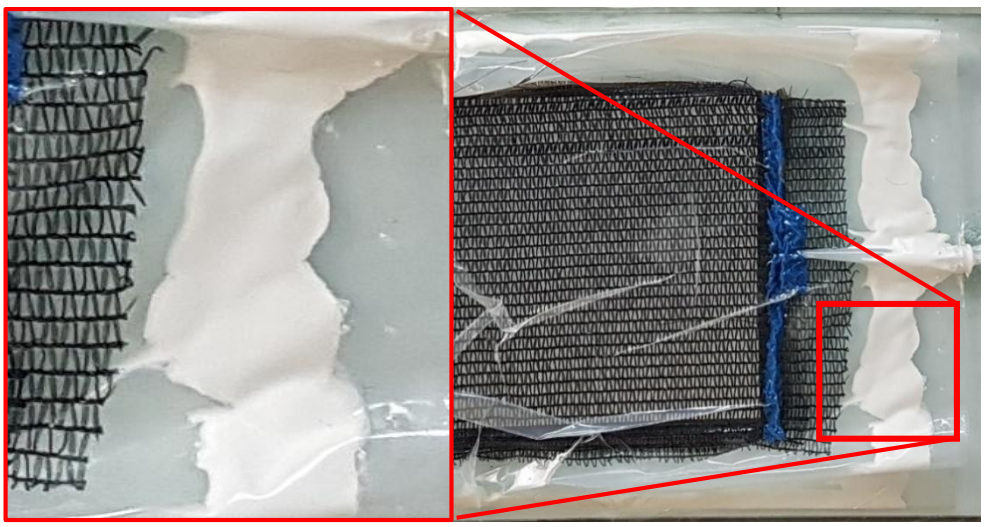
Vakumlama esnasında sızdırmazlığı sağlamak için genellikle yüksek maliyetli bütil çift taraflı bant kullanılır. Bütil bant maliyetinin yüksek olması ve üreteceğimiz kompozitlerin ebat ve sayısının çokluğundan dolayı alternatif birkaç farklı çift taraflı bant

ile denemeler yapılmış, köşelerde veya vakum sonucu katlanmaların olduğu bölgelerde sızıntı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.11).

Şekil 4.10. Vakum pompası (solda) ve odasına ait görseller



Şekil 4.11. Silikonize bant kullanıldığında sızıntıların oluşabildiği bölgeler



Şekil 4.12. Silikonize mastik kullanarak üretim

Vakum torbalama sürecinde sistemin tam sızdırmazlığının sağlanması amacıyla, geleneksel bant uygulamaları yerine silikonize mastik kullanılmıştır. Silikonize mastik, yüksek akışkanlık özelliği sayesinde, vakum esnasında sızıntı riski taşıyan bölgelerde etkin bir sızdırmazlık sağlamıştır (Şekil 4.12).

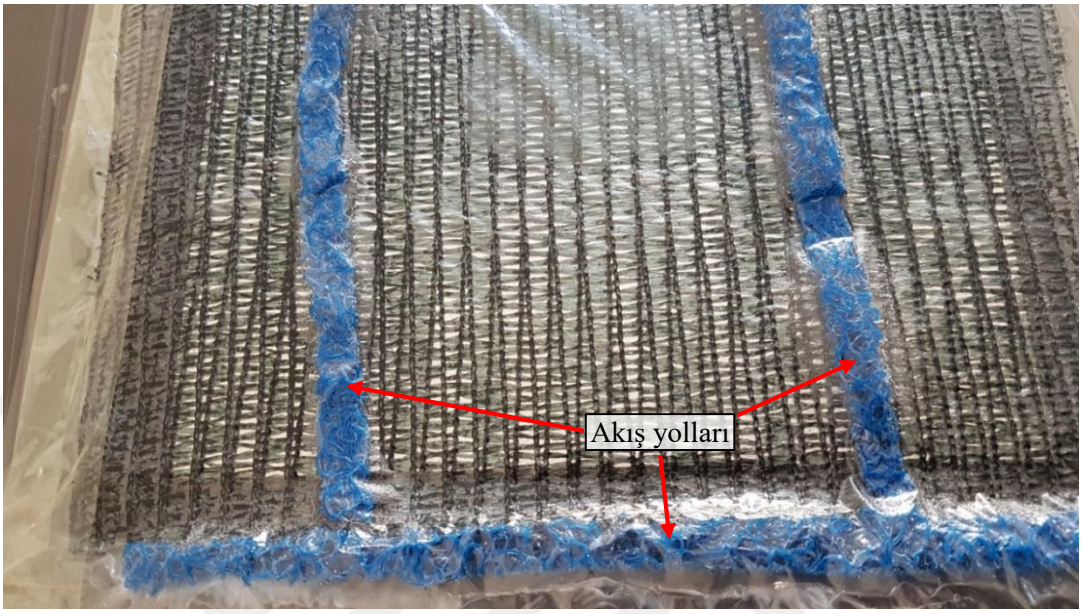
Yapılan uygulamalar sonucunda sistemde herhangi bir hava kaçağı tespit edilmemiştir. Sistemin tamamen sızdırmaz hale getirilmesinin ardından, vakum pompası çalıştırılmış ve elde edilen vakum seviyesi ölçülmüştür. Vakum göstergesi üzerinden yapılan okumalarda, vakum basıncının pompa kapasitesine bağlı olarak -700 mmHg seviyesine ulaştığı belirlenmiştir (Şekil 4.13).

Şekil 4.13. Vakumlamada ulaşılan basınç değeri

Üretilecek kompozit yapının alt ve üst yüzeylerini alüminyum levhaların oluşturması nedeniyle, vakum torbalama sürecinde torbanın metal levha yüzeyine yapışması ve bu durumun fazla reçine emilimini sınırlaması öngörülmüştür. Bu nedenle, fazla reçinenin sistemden uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla, alüminyum levhaların dış yüzeylerine akış filesi yerleştirilmiştir. Ayrıca, yapılan deneme üretimleri sonucunda fazla reçinenin daha etkin şekilde alınabilmesi ve reçine akış yollarının düzenlenebilmesi için 10 mm kalınlığında üç boyutlu plastik örgü kullanılmış ve bu sayede akış yolları oluşturulmuştur (Şekil 4.14).

Vakum torbalama işlemi sırasında, uygulanan negatif basıncın etkisiyle kompozit yapı içerisinde yer alan fazla epoksi reçine, tabakalar arasından dışarı itilerek önceden yerleştirilen akış yolları ve akış filesi üzerine yönlendirilmiştir. Reçine miktarının fazlalığına bağlı olarak, bu artık reçine vakum torbası ile vakum odasını birbirine

bağlayan hortuma doğru ilerleyebilmektedir. Şekil 4.14'te de görüldüğü üzere, fazla epoksinin akış yolları ve akış filesi üzerine geçtiği açıkça gözlemlenmiştir. Özellikle, akış filesi üzerinde reçine ile temas eden bölgelerin daha koyu bir renge sahip olması, epoksinin bu bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir.



Şekil 4.14. Kompozit malzeme üstündeki akış filesi ve akış yolları

Vakum motoru tarafından sağlanan negatif basınç, vakum göstergesi üzerinde -700 mmHg ile -710 mmHg aralığında ölçülmüştür. Bu ölçülen vakum seviyesi, kompozit yapı üzerine uygulanan efektif basıncın belirlenmesinde temel alınmıştır. Kompozit üzerine etkiyen bu kuvvet, denklem 4.1 ve 4.2'deki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$P_b = \rho \times g \times h \tag{4.1}$$

$$F = P \times A \tag{4.2}$$

Burada; P_b uygulanan basıncı (Pa), ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), g yerçekimi ivmesini (9,81 m/s^2), h akışkan sütununun deniz seviyesine göre yüksekliğini (m), F uygulanan kuvveti (N) ve A numune yüzey alanını (m^2) temsil etmektedir.

Vakum basıncının hesaplanmasında, sıvı sütununun yüksekliği h = 0,7 m (700 mm), kullanılan cıva sütununun yoğunluğu ρ = 13600 kg/m^3 ve yerçekimi ivmesi g = 9,81 m/s^2 olarak alınmıştır. Bu değerlere göre uygulanan basınç, denklem 4.1'de verilen eşitlik kullanılarak hesaplandığında, vakum basıncı yaklaşık olarak 93391,2 N/m^2 (Pa) yani 93,4 kPa olarak elde edilmektedir.

Malzeme boyutları 220 mm × 330 mm olduğundan, yüzey alanı metrekare cinsinden $A = 0{,}22\ m\ \times\ 0{,}33\ m = 0{,}0726\ \mathrm{m}^2$'dir. Bu yüzeye uygulanan vakum basıncı 93,4 kPa olduğundan denklem 4.2'deki eşitlik kullanılarak uygulanan kuvvet 6,78284 kN yani 6782,84 N olarak elde edilmiştir. Bu kuvvetin kütle (m) karşılığı ise yerçekimi ivmesi kullanılarak denklem 4.3'teki eşitlikle 691,3 kg olarak hesaplanmıştır.

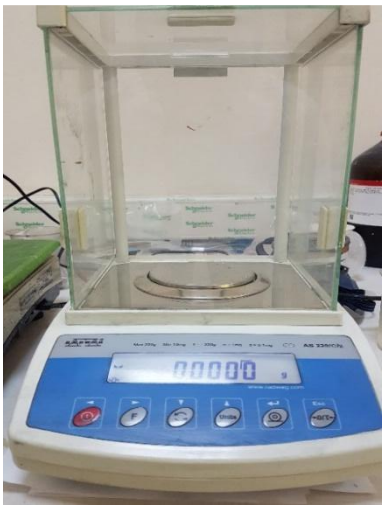
$$m = F/g \tag{4.3}$$

Yapılan hesaplamalar doğrultusunda, 220 mm × 330 mm boyutlarındaki kompozit malzemeye vakumlama işlemi sırasında, tüm yüzeyine yaklaşık 690 kg kütleye eşdeğer bir kuvvet uygulanmaktadır. Bu durum, vakum basıncının etkisiyle malzeme yüzeyine homojen şekilde yayılan yaklaşık 6782,84 N'luk bir kuvvetin varlığını göstermektedir.

4.4.2. Tabakalı kompozit üretim süreci

Epoksi ve sertleştirici, üretici firmanın teknik dokümanlarında önerilen 4:1 oranına uygun olarak, hassas terazi kullanılarak tartılmıştır (Şekil 4.15 ve Şekil 4.16). Hazırlanan karışım, Wisestir marka manyetik karıştırıcıda 50 °C tabla sıcaklığı ve 750 dev/dak karıştırma hızıyla 10 dakika boyunca homojen bir şekilde karıştırılmıştır (Şekil 4.17). Karıştırma esnasında sistem içerisine hapsolmuş hava kabarcıklarının uzaklaştırılması amacıyla, karışım ultrasonik temizleme cihazında 10 dakika süreyle bekletilmiştir (Şekil 4.18).

Şekil 4.15. LR160 epoksi reçine ve LH160 epoksi sertleştirici



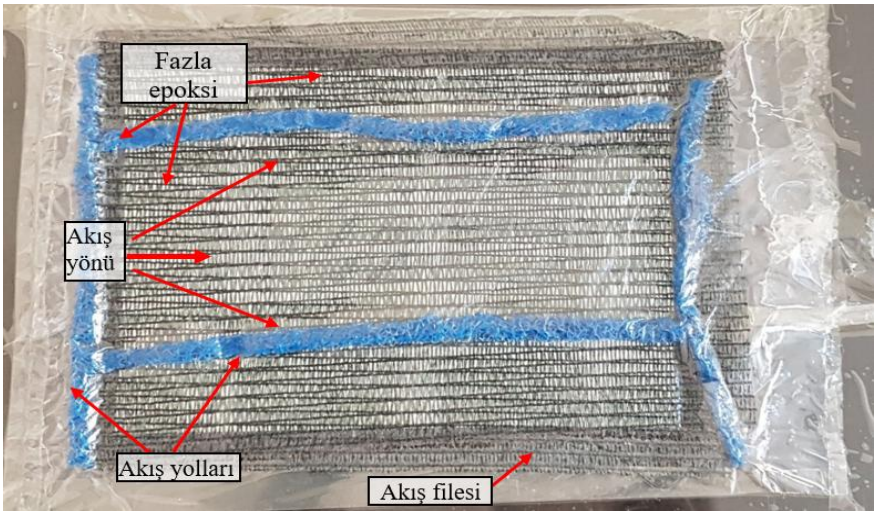
Şekil 4.16. Hassas terazi

Şekil 4.17. Manyetik karıştırıcı

Şekil 4.18. Ultrasonik temizleyici

Vakum torbasının iç yüzeyine, epoksinin yapışmasını önlemek amacıyla kalıp ayırıcı uygulanarak üretim sürecine başlanmıştır. Kompozitin hem alt hem de üst yüzeylerinde fazla epoksinin uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla bu yüzeylere akış filesi yerleştirilmiştir. Benzer şekilde, akış filesi ve epoksinin metal levhanın dış yüzeyine yapışmasını önlemek için metal levha yüzeyine de kalıp ayırıcı uygulanmış ve üzerine ince bir naylon film serilmiştir. Bu işlemlerin ardından, önceden zımparalanarak kir ve yüzey kalıntılarından arındırılmış 2024-T3 alüminyum alaşım levhanın yüzeyine epoksi reçine uygulanmış, ardından epoksi ile emdirilmiş fiber kumaş tabakası bu yüzeyin üzerine yerleştirilmiştir. Bu tabakanın üzerine, her iki yüzeyine de epoksi uygulanmış bir alüminyum levha konulmuş ve bunun üstüne tekrar epoksi emdirilmiş fiber kumaş yerleştirilmiştir. Son olarak, yalnızca bir yüzeyine epoksi uygulanmış bir alüminyum levha en üste eklenerek tabakalı kompozit yapı tamamlanmıştır (Şekil 4.19).

Kompozitin en üst alüminyum levhasının dış yüzeyine de epoksinin yapışmasını engellemek amacıyla kalıp ayırıcı sürülmüş ve üzerine ince bir naylon film yerleştirilmiştir. Epoksi emdirilmiş fiber katmanlar ile alüminyum levhalar arasından fazla epoksinin vakumlama sırasında dışarı atılabilmesi için en üste akış filesi ile birlikte akış yolları oluşturmak üzere üç boyutlu plastik örgü yerleştirilmiştir. Son olarak, vakum torbasının açık kısmına vakum hortumu yerleştirilmiştir. Açık kalan bölgeler ise silikonize mastik kullanılarak sızdırmaz biçimde kapatılmıştır.

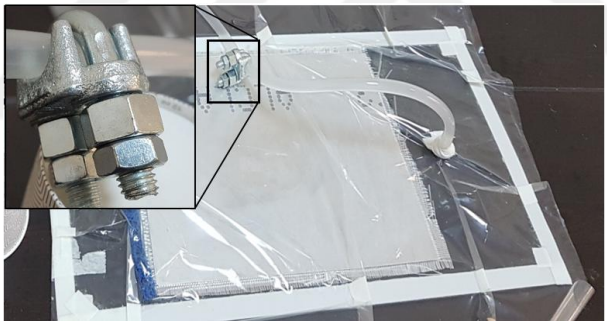


Şekil 4.19. Vakumlama yapılan tabakalı kompozit malzeme

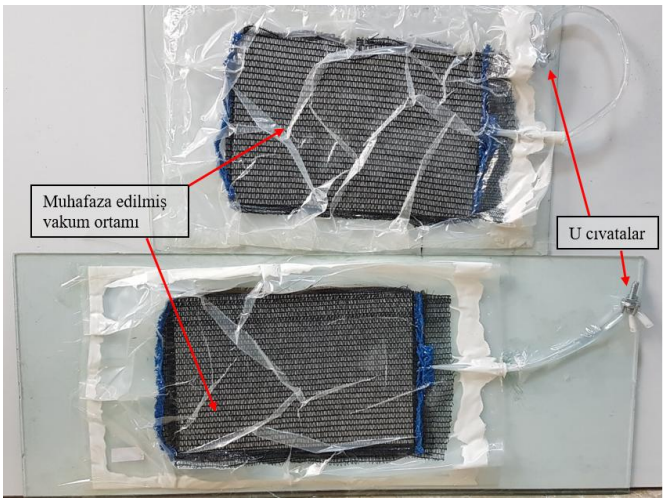
Vakum pompası çalıştırılarak, vakum torbası içerisindeki hava sistematik olarak uzaklaştırılmıştır. Şekil 4.19'da, vakumlama işlemi tamamlanmış tabakalı kompozit

malzemenin görünümü verilmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere, torba içindeki havanın çekilmesinin ardından tabakalar arasında kalan fazla epoksi, akış filesine yönlendirilmiş ve buradan vakum hortumu aracılığıyla sistemden uzaklaştırılmıştır. Önceki deneme üretimlerinde üç boyutlu plastik örgü kullanılmadan yalnızca akış filesi ile de fazla epoksinin etkin şekilde uzaklaştırılabildiği gözlemlenmiştir. Vakumlama işlemi, vakum pompasının göstergesinde -700 mmHg seviyesine ulaşana kadar sürdürülmüş ve bu değerde sistem dengelenmiştir.

Akış filesinin epoksi ile ıslanmış kısımlarının artmadığı ve vakum hortumu aracılığıyla sisteme daha fazla epoksinin taşınmadığı gözlemlendikten sonra, yaklaşık 10 dakika beklenmiş ve ardından vakum hortumu U cıvata yardımıyla kelepçelenerek sabitlenmiştir (Şekil 4.20). Bu işlemle, vakum pompası kapatıldıktan sonra kompozit malzemenin bulunduğu vakum torbası içerisindeki basıncın korunması sağlanmıştır. Vakumlu ortamda kürlenme aşamasındaki tabakalı kompozit malzemelerin görüntüsü Şekil 4.21'de verilmiştir. Kompozit yapı, bu koşullarda 48 saat süreyle oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmış ve sürenin sonunda vakum torbasından çıkarılmıştır (Şekil 4.22).

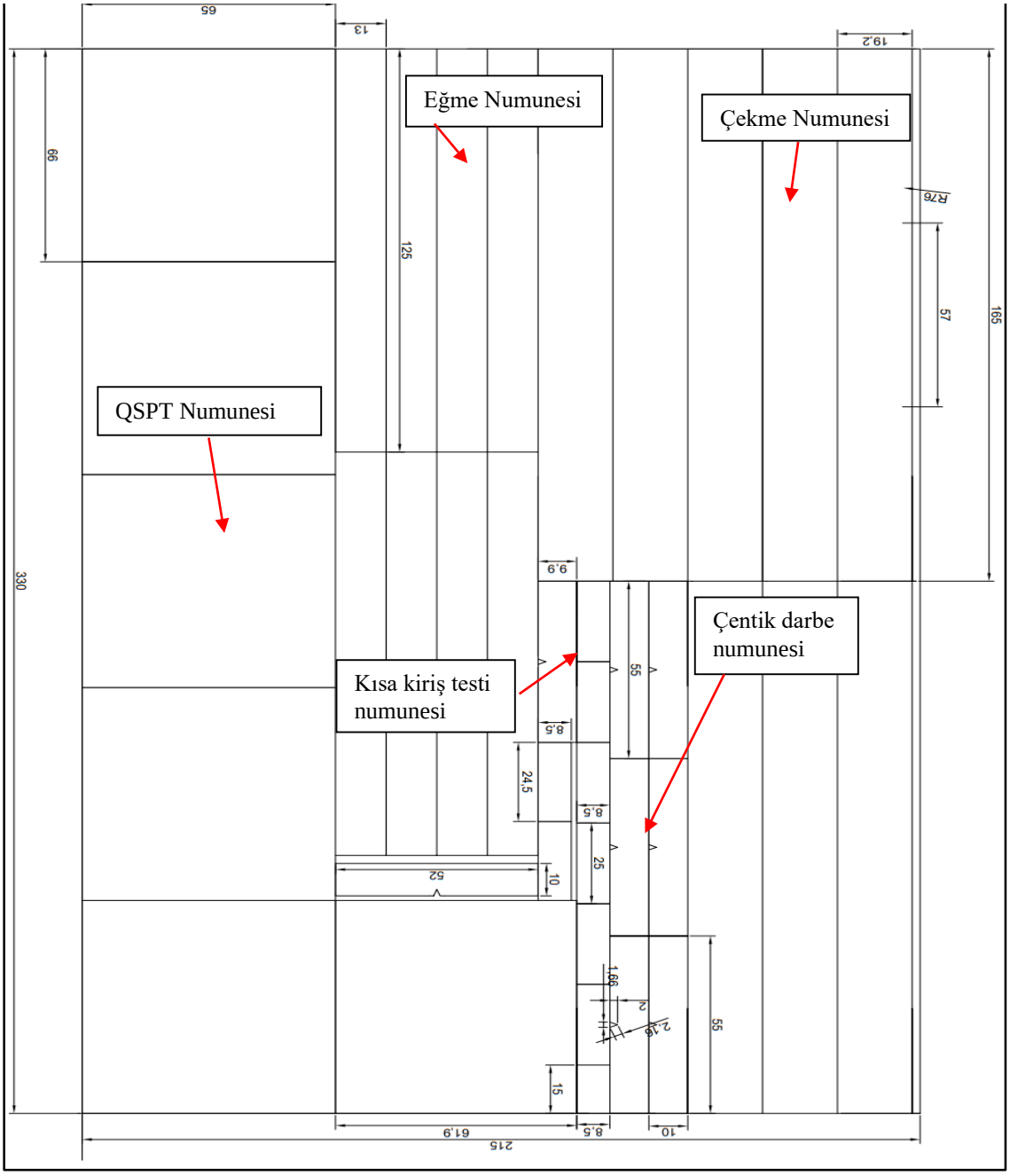


Şekil 4.20. Vakumlanmış ortam ve vakum hortumuna bağlanmış U cıvata



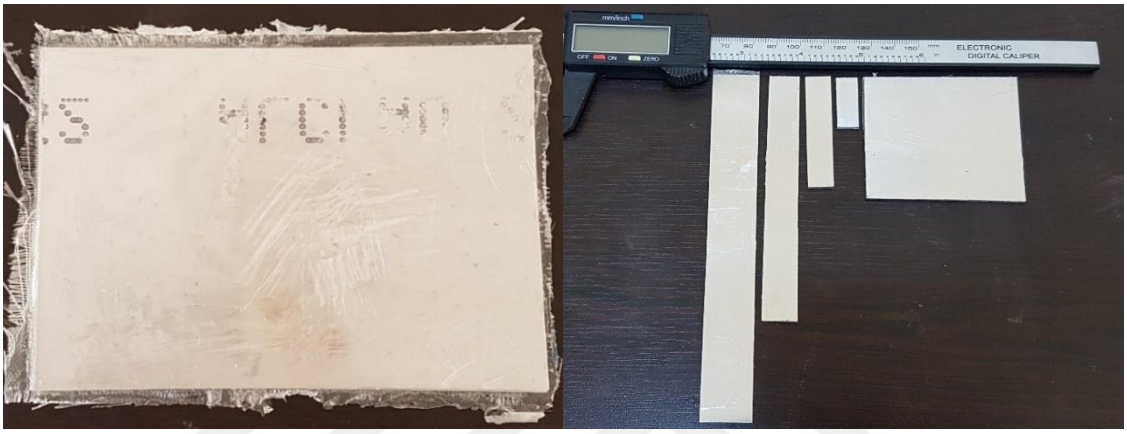
Şekil 4.21. Vakumlu ortamda kürlenme aşamasındaki kompozit plakalar

Şekil 4.22. Vakum torbasından çıkarılan malzeme.



Şekil 4.23. Numune kesim şablonu

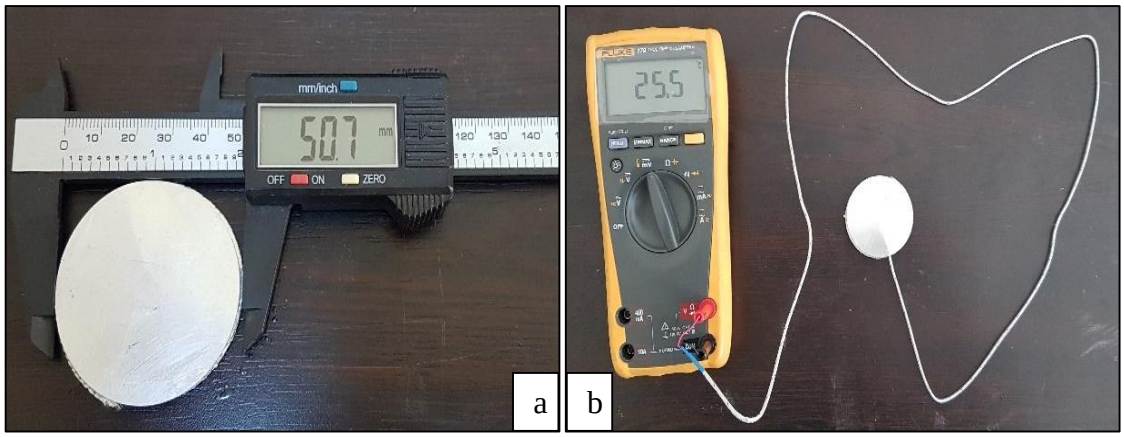
Vakum torbasından çıkarılan tabakalı kompozit malzeme, üzerindeki akış filesinden arındırılmış ve kenar kısımlarındaki fazla parçalar uygun şekilde kesilerek kompozit üretim süreci tamamlanmıştır. Bu işlemin ardından, mekanik testlerde kullanılacak numunelerin hazırlanması amacıyla, standart numune boyutlarına uygun olarak kesim işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, numune ölçülerine uygun bir kesim şablonu çizim programı yardımıyla oluşturulmuş (Şekil 4.23) ve kompozit malzeme, bu şablon referans alınarak kesilmiştir (Şekil 4.24).



Şekil 4.24. Üretilmiş Glare malzeme ve kesim şablonuna göre hazırlanmış test numuneleri

4.5. Tabakalı kompozitlere Terma Çevrim İşleminin Uygulanması

Numune kesim işlemlerinin tamamlanmasının ardından, termal çevrim uygulama aşamasına geçilmiştir. Numunelerin soğuk ve sıcak ortamlarda ne kadar süreyle tutulmaları gerektiğini belirlemek amacıyla, öncelikle Şekil 4.25a'da gösterilen ölçülerde bir Glare kompozit örneği kesilmiş ve içerisine termokupl yerleştirilmiştir (Şekil 4.25b). Şekil 4.26'da görüldüğü üzere, termometre ile dondurucunun dahili termometresi arasında 4 – 5 °C'lik bir sıcaklık farkı tespit edilmiştir. Yapılan ölçümlerde elde edilen 42 °C, 46 °C ve 47 °C değerlerinin ortalaması alınarak, dondurucunun minimum sıcaklığı yaklaşık –45 °C olarak kabul edilmiştir. Bu doğrultuda, dondurucuya yerleştirilen numunenin bu sıcaklığa ulaşması için geçen süre belirlenmiştir. Benzer şekilde, farklı termometre kullanılarak numunelerin soğuk (–45 °C), sıcak (+75 °C) ve çevre ortam sıcaklık (+17 °C) koşullarında kalmaları gereken süreler de tespit edilmiştir.



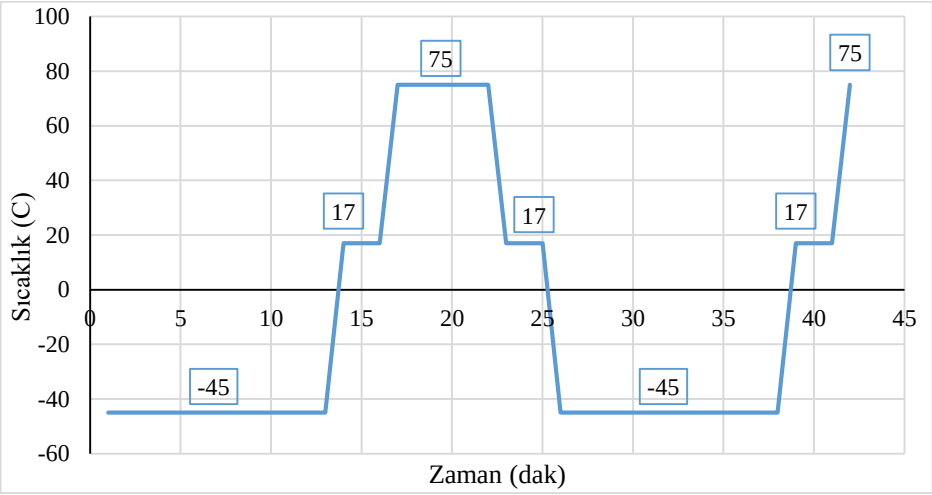
Şekil 4.25. a) Kesilmiş bir Glare kompoziti b) Bu kompozite termokupl yerleştirilmesi

Şekil 4.26. Dondurucunun göstergesi (üstte) ve dondurucunun iç sıcaklığını ölçen termometreler

Numune sayısının fazla olması nedeniyle, tüm numunelerin eş zamanlı olarak soğuk ve sıcak ortamlara yerleştirilebilmesini sağlamak amacıyla özel bir taşıma sepeti tasarlanmıştır. Sepet, tüm numunelere hava akışının engellenmeden ulaşabilmesi ve ısıl iletimin etkin bir şekilde sağlanabilmesi amacıyla boşluklu metal ağlar kullanılarak imal edilmiştir (Şekil 4.27).

Şekil 4.27. Metal ağlardan oluşturulmuş bölmeli sepet

Şekil 4.27'de görüldüğü üzere, toplamda on farklı numune türü bulunmakta olup, her bir numune türü için sepet içerisinde ayrı bölmeler tasarlanmıştır. Numuneler, sepete yerleştirilerek yapılan süre tespit işlemine göre, bir termal çevrim süreci toplamda 25 dakikada tamamlanmıştır. Bu süreç, sırasıyla sepetin dondurucuda 13 dakika, açık havada 3 dakika, ısıtıcı etüvde 6 dakika ve tekrar açık havada 3 dakika tutulması ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.28). Numunelerin etüvde kalma süresinin dondurucuya göre daha kısa olmasının başlıca nedeni, etüvde bulunan rezistansların hızlı ısıtabilme kabiliyeti ve fanın yardımıyla sıcak havanın numunelere daha hızlı enerji aktarabilmesidir.

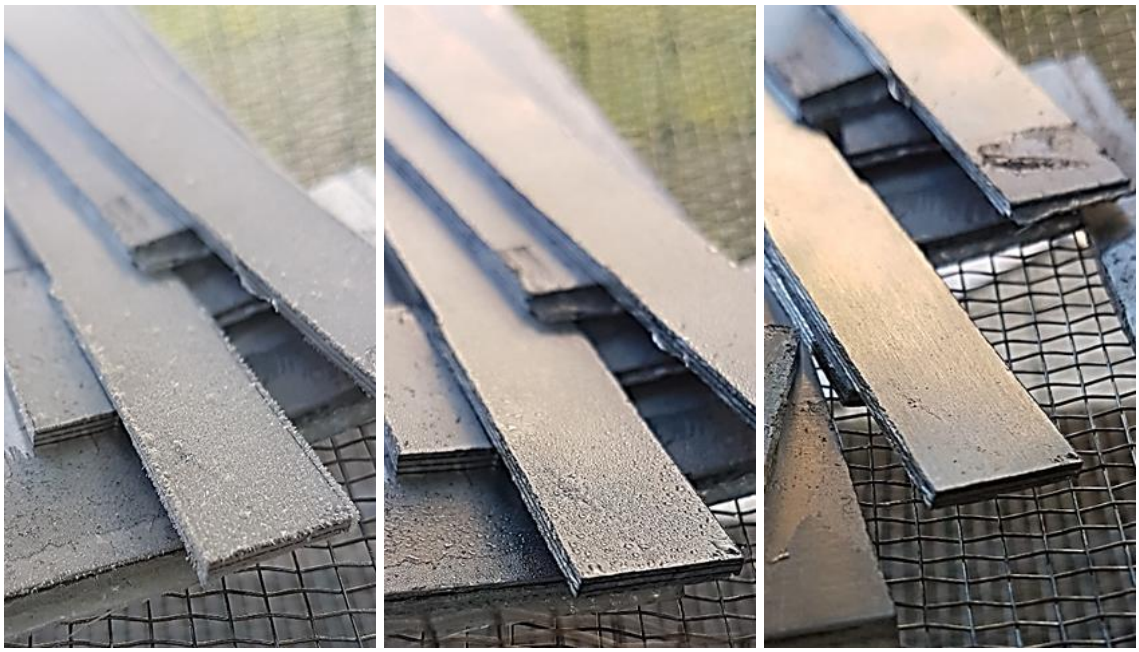


Şekil 4.28. Numunelere uygulanan termal çevrimin zaman – sıcaklık grafiği

Bunun yanı sıra, açık hava ve etüv süreçlerinde zaman kazanmak amacıyla, ikinci bir sepet tasarlanmıştır. Bu düzenleme ile özellikle uzun süre gerektiren soğuk ortam süreci için oda koşullarında sepetin bekleme süresi ortadan kaldırılmıştır. Böylece aynı süre zarfında daha fazla numune termal çevrime tabi tutulmuştur (Şekil 4.29).

Şekil 4.29. Numunelerin yerleştirildiği ağ yapılı sepetler

Termal çevrim işlemi sırasında numuneler, dondurucudan çıkarıldığında, kompozitin metal yüzeylerinde su buharının yoğunlaşarak ince bir buz tabakası oluşturduğu gözlemlenmiştir. Oda sıcaklığında, bu buz tabakası kompozit yüzeyinde su damlacıkları haline dönüşmüştür. Etüvde ise su moleküllerinin buharlaşarak havaya karıştığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.30). Dış yüzeyde suya ve neme karşı dayanıklı alüminyum levhanın kullanımı, bu süreçte kritik bir rol oynamaktadır. Çünkü epoksi gibi hidroksil ve çapraz bağlı moleküller içeren polimerler, higroskopik özellikleri nedeniyle ortamdan nem emebilir. Nem, epoksinin mekanik dayanımını, boyutsal kararlılığını, yorulma ömrünü, ağırlık artışını ve termal genleşme katsayısını olumsuz yönde etkileyebilir (Jansen vd. 2020).



Şekil 4.30. Numunelerin sırasıyla dondurucudan çıkarılması, oda sıcaklığında bekletilmesi ve etüvde ısındıktan sonraki yüzey değişim görüntüleri

Termal çevrim işlemine tabi tutulmamış saf epoksi ve diğer tüm numuneler, ilk grup numuneleri olarak seçilmiştir. İlk grup numuneler alındıktan sonra, diğer tüm test numuneleri sepetteki bölmelere yerleştirilerek termal çevrim süreci başlatılmıştır. Beşinci çevrim sonrasında, ikinci grup numuneler sepetten alınmış ve bu işlem, sırasıyla 15., 25., 50., 100. ve 150. çevrimlerde tekrarlanarak üçüncü, dördüncü, beşinci, altıncı ve yedinci grup numuneler sırasıyla sepetten alınmıştır. Termal çevrim uygulaması tamamlandıktan sonra, tüm numunelere mekanik testler uygulanmıştır.

4.6. Tabakalı Kompozitlerin Mekanik Testleri

Arall, Carall, Glare, Barall, Ar-Carall, Ar-Glare, Ar-Barall, Car-Glare, Car-Barall ve Gl-Barall olmak üzere toplam 10 farklı tabakalı kompozit malzeme türü üzerinde gerçekleştirilen mekanik testler, hem termal çevrim işlemine tabi tutulmamış hem de altı farklı termal çevrim seviyesine maruz bırakılmış numuneler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Her bir kompozit yapı ve çevrim seviyesi için, her bir mekanik test türünden üçer adet numune üzerinde deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Elde edilen üç deney sonucunun aritmetik ortalamaları esas alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, hem malzeme yapısının hem de uygulanan termal çevrim sayısının mekanik özellikler üzerindeki etkileri karşılaştırmalı ve sistematik bir şekilde analiz edilmiştir.

4.6.1. Çekme testinin yapılışı

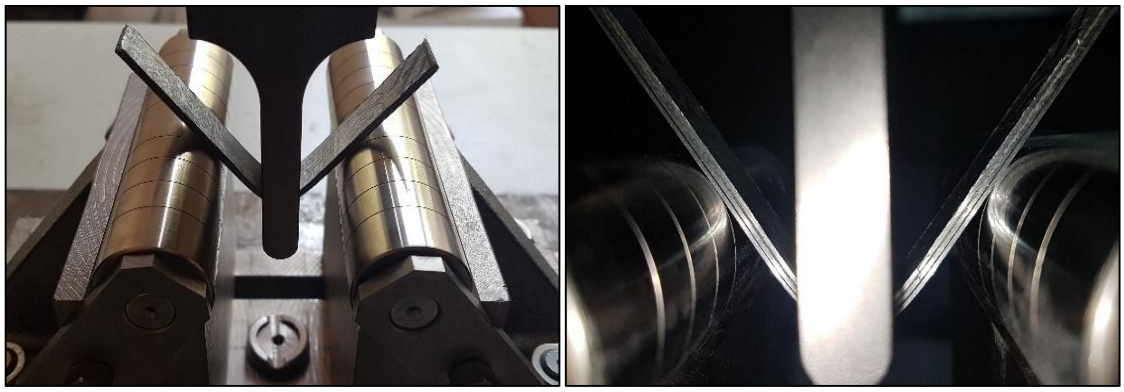
Tabakalı kompozit malzemelere, ASTM D3039 standardına uygun olarak çekme testi uygulanmıştır. Çekme deneyleri, Shimadzu marka AG-IC üniversal test cihazı kullanılarak yapılmış olup, test sırasında uygulanan hız 1 mm/dak olarak belirlenmiştir. Cihaz, 250 kN yük kapasitesinde kalibre edilmiştir. Test cihazı ve çekme testine tabi tutulan numuneye ait görüntü, Şekil 4.31'de verilmiştir.

Çekme testi sırasında, numuneler üzerinde meydana gelen hasarların tespiti ve analiz edilmesi için, numunelerin kırılma bölgelerinden makroskobik ve mikroskobik görüntüler alınmıştır. Bu görüntüler, malzemenin kırılma mekanizmasını, yapısal zayıflıkları ve potansiyel arızaları daha net bir şekilde değerlendirmek amacıyla ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Şekil 4.31. Çekme test cihazı ve çekme testine tabi tutulan numune görüntüsü

4.6.2. Eğilme testinin yapılışı

Eğilme testi, ASTM D790 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem doğrultusunda, numune üzerindeki destekler arasındaki mesafe, numune kalınlığının 32 katı olacak şekilde ayarlanmıştır. Eğilme testleri, Shimadzu marka AG-IC universal test cihazı kullanılarak, 1 mm/dak hızda ve 5 kN yük kalibrasyonunda yapılmıştır (Şekil 4.32).



Şekil 4.32. Eğilme testine tabi tutulan numune görüntüsü

Tabakalı kompozit malzemelerin eğilme dayanım değerleri, üç nokta eğilme testinden elde edilen veriler doğrultusunda, denklem 4.4'te verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_f = \frac{3 \times P_{max} \times L}{2 \times b \times t^2} \tag{4.4}$$

Burada, σ_f maksimum eğilme dayanımını (MPa), P_{max} uygulanan maksimum yükü (N), L destekler arası mesafeyi (mm), b test edilen numunenin genişliğini (mm) ve t ise numunenin kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

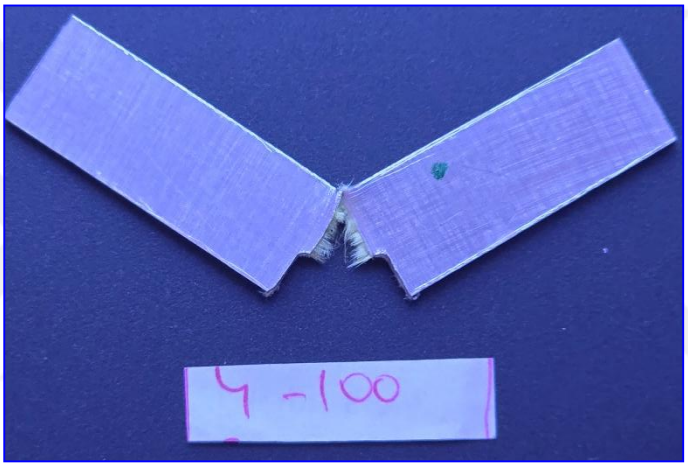
4.6.3. Çentik darbe testinin yapılışı

Tabakalı kompozit malzemelere, oda sıcaklığında, 300 J darbe enerjisine sahip Mohr & Federhaff AG markalı darbe test cihazı ile Charpy çentik darbe testi uygulanmıştır (Şekil 4.33).

Şekil 4.33. Çentik darbe cihazı ve özellikleri

Deney numunelerine, ASTM D6110 standardı doğrultusunda, 5 mm derinliğinde ve 2 mm genişliğinde U tipi çentikler açılmıştır (Şekil 4.34). Hazırlanan bu numunelere, belirli bir potansiyel enerjiye sahip sarkaçlı darbe test cihazı aracılığıyla darbe uygulanmıştır. Cihaza yerleştirilen numunelere sarkacın çarpmasıyla oluşan kırılma enerjisi kaydedilerek, malzemelerin darbe davranışları değerlendirilmiştir. Darbe testleri sonrasında kırılan bir örnek numuneye ait makro görüntü Şekil 4.35'te verilmiştir.

Şekil 4.34. U çentik açılmış numune görüntü ve test ölçüleri



Şekil 4.35. Çentik darbe sonrası kırılan Arall numunesinin görüntüsü

Yapılan testler sonucunda, sarkacın darbe sonrası erişemediği maksimum yükseklikten hareketle, sistemde kaybolan potansiyel enerji hesaplanmış ve bu fark malzemenin kırılma enerjisi olarak değerlendirilmiştir. Bu enerji değeri, darbe tokluğunun belirlenmesinde temel parametre olarak kullanılmıştır. Söz konusu kırılma enerjisi, ASTM D6110 standardında yer alan denklem 4.5 uyarınca hesaplanmıştır.

$$W = Wmax - Wson \tag{4.5}$$

Burada; W numunenin kırılması için harcanan toplam enerji, yani kırılma enerjisi (J), W_{max} çekiç numuneye temas etmeden önce sahip olduğu potansiyel enerji (J), W_{son} numuneyi kırdıktan sonra çekicin sahip olduğu artık enerji (J) olarak ifade edilmektedir.

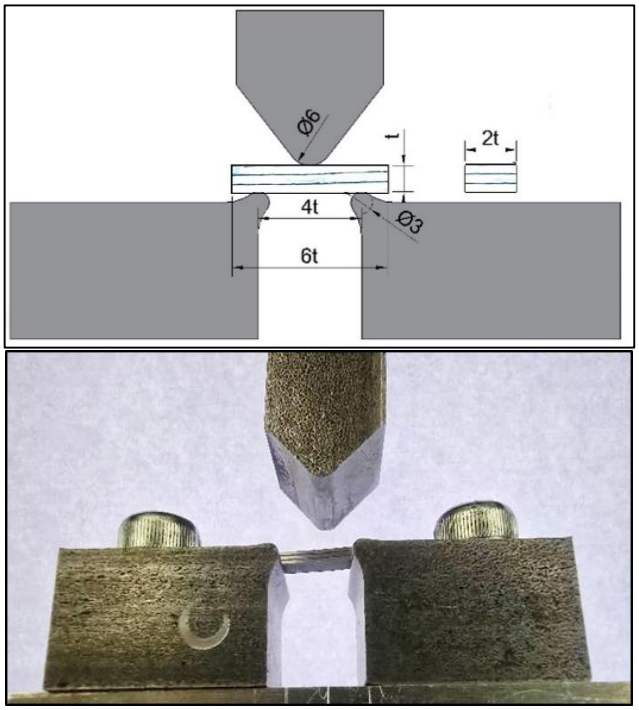
Çentikli darbe dayanımı (K), ASTM D6110 standardına göre, kırılma enerjisi ile numunenin çentik altındaki kesit alanı dikkate alınarak hesaplanmakta ve denklem 4.6 ile verilmektedir.

$$K = W/A_c \tag{4.6}$$

Burada; K çentik darbe dayanımı (J/mm^2), yani birim alanda sönümlenen darbe enerjisini, A_c ise numunenin çentik altındaki kesit alanını (mm^2) tanımlar.

4.6.4. SBS testinin yapılışı

Kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) testleri, ASTM D2344 standardı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde, çapı 3 mm olan destekler kullanılmış ve bu destekler, üniversal test cihazının çeneleri değiştirilerek cihaza monte edilmiştir. Cihaza sabitlenen destekler üzerine, söz konusu standarda uygun olarak hazırlanmış kompozit numuneler yerleştirilmiştir. Bu standart kapsamında; numune genişliği, destekler arası mesafe ve numune uzunluğu sırasıyla numune kalınlığının 2, 4 ve 6 katı olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 4.36. SBS test düzeneği ve numune uygulaması

Deneyler, Shimadzu marka AG-IC üniversal test cihazı kullanılarak, 1 mm/dak test hızıyla gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği ve uygulama görüntüsü Şekil 4.36'da verilmiştir.

SBS test sonuçlarına dayanarak, kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemeti denklem 4.7'de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

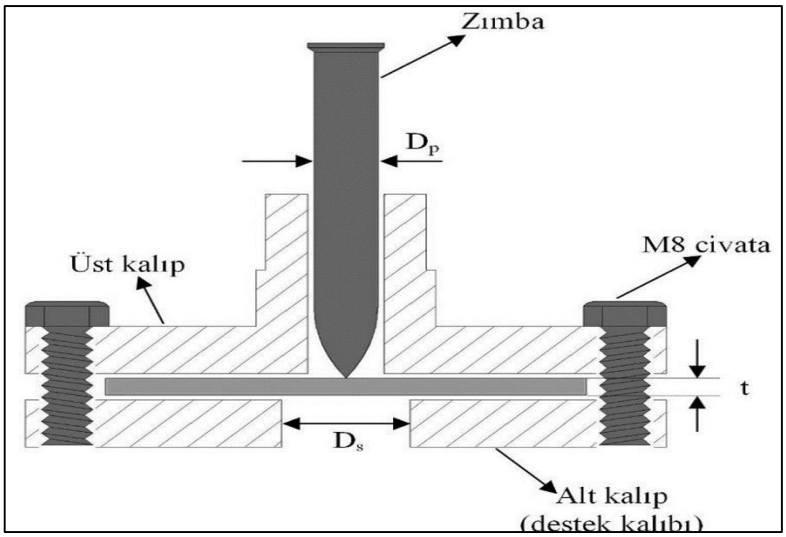
$$ILSS = 0{,}75 \times \frac{F_{max}}{t \times b} \tag{4.7}$$

Burada; ILSS, tabakalar arası kayma mukavemeti (MPa), F_{max} elde edilen maksimum kuvvet (N), *t* numune kalınlığını (mm) ve *b ise* numune genişliğini (mm) ifade etmektedir.

4.6.5. QSPT ve yapılışı

Yarı statik penetrasyon testi (QSPT), 250 kN kapasiteli Shimadzu marka AG-IC universal test cihazında, ASTM D732 standardına uygun olarak 1,25 mm/dak hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.37). Deneysel düzenek, standart bir kalıp kullanılarak tasarlanmıştır. Bu kalıbın üst ve alt delikleri, destek açıklığı oranı (SPR), yani destek açıklığı çapı (Ds) ile zımba çapı (Dp) oranı 4 olacak şekilde 40 mm çapında belirlenmiştir. Kalıp arasındaki kompozit plakanın test sırasında kaymadan sabit bir şekilde durabilmesi için her iki kalıpta da 8 adet M8 vida deliği bulunmaktadır (Şekil 4.38).

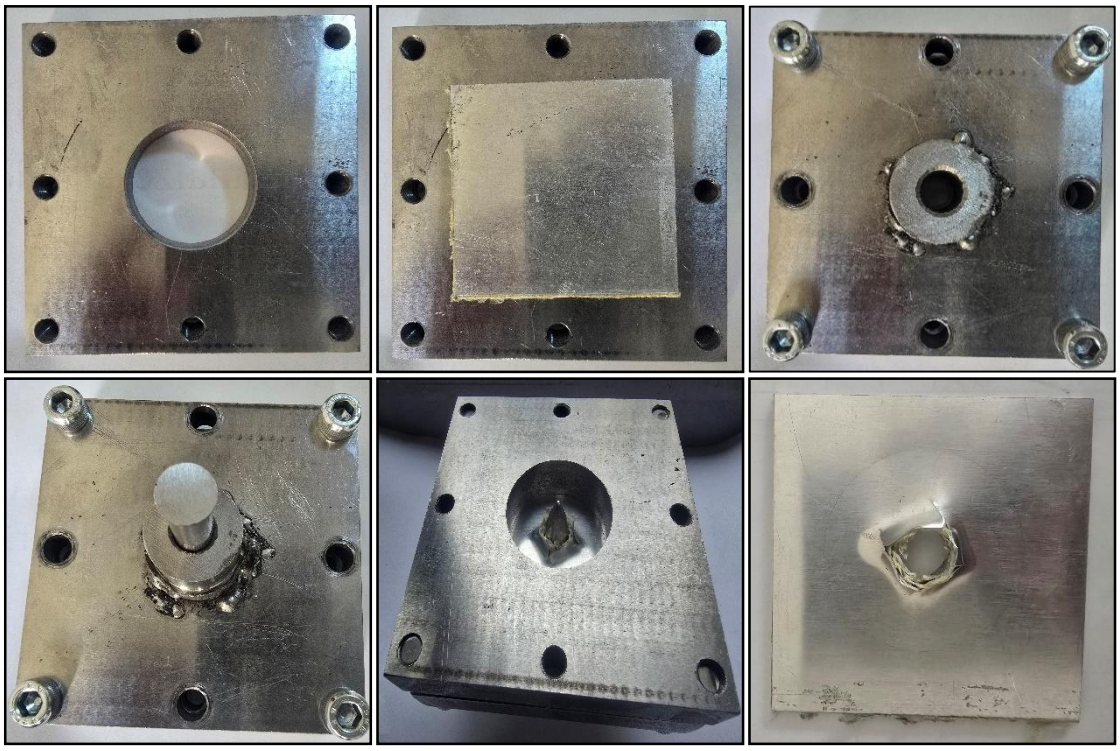
Şekil 4.37. QSPT deney düzeneği ve delici zımba görüntüsü



Şekil 4.38. QSPT kalıp kesitinin şematik görünümü (Batı, 2022)

QSPT testi sırasında, sertliği 64±2 HRC olan, konik baş formuna sahip bir zımba kullanılmıştır. Kompozit malzeme üzerinde meydana gelen hasar, anlık olarak izlenebilmesi amacıyla kalıbın alt yüzeyine yerleştirilen bir kamera ile takip edilmiştir (Şekil 4.37).

Test uygulama sürecinde, numunenin kalıba yerleştirilmesi, kalıbın kapatılması ve test sonrası delme işlemi aşamalarına ait görüntüler Şekil 4.39'da verilmiştir.



Şekil 4.39. Sol üstten sırayla numunenin kalıba yerleştirilmesi ve test sonrası görünümü

Deney sonucunda, numune tamamen delinmiş olup, delinme işleminden sonra numunenin arka yüzeyinde konik bir çıkış formu oluşmuştur. Numunelerde meydana gelen maksimum zımba kuvveti (F_{pmax}) ayrı ayrı her bir tabakalı kompozit için analiz edilmiştir. Ayrıca, delinme sırasında kompozit malzeme tarafından absorbe edilen enerji, kuvvet – yer değiştirme grafiğinin altındaki alan dikkate alınarak hesaplanmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, 2024-T3 alüminyum alaşımlı levha ile cam, karbon, bazalt ve aramid fiberlerin tekil veya kombinasyon hâlinde kullanımıyla üretilen on farklı tabakalı kompozit malzemenin hem termal çevrim uygulanmamış (0 çevrim) hem de altı farklı termal çevrim (5, 15, 25, 50, 100 ve 150) seviyesi sonucu elde edilen mekanik deney sonuçları alt başlıklar halinde sunulmuştur. Çekme testi, eğilme testi, çentik darbe testi, kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) testi ve yarı statik penetrasyon testi (QSPT) için elde edilen bulgular grafik, tablo ve şekillerle gösterilmiştir. Ayrıca sonuçlar, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

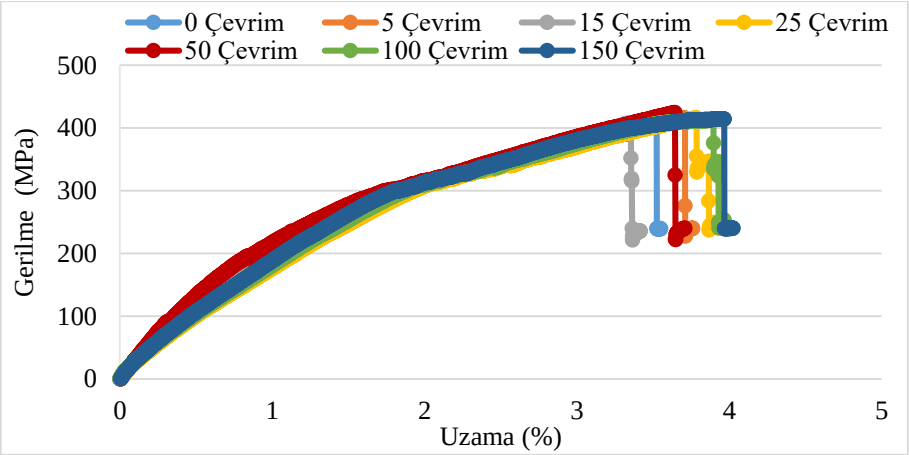
5.1. Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi yapılan 10 farklı tabakalı kompozit malzemeye ait test sonuçları, termal çevrimin mekanik performansa etkisini belirlemek amacıyla, termal çevrime maruz bırakılan numunelerle birlikte grup halinde değerlendirilmiştir.

5.1.1. Carall malzemesine ait çekme testi sonuçları

Carall malzemesinin termal çevrim öncesi ve sonrası gerçekleştirilen çekme testlerine ait gerilme – uzama eğrileri, Şekil 5.1'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Elde edilen sayısal veriler ise Çizelge 5.1'de detaylı bir şekilde tablolaştırılmıştır.

Şekil 5.1 incelendiğinde, Carall kompozitinin maksimum gerilme değerinin termal çevrim uygulamalarına bağlı olarak anlamlı bir değişim göstermediği belirlenmiştir. Çizelge 5.1'de verilerin değerlere göre, termal çevrim sayısının artmasıyla maksimum gerilmede en fazla 12 MPa'lık bir değişim (50 ile 100 çevrim arasında) gözlenmiştir. 150 çevrim sonunda, 0 çevrime göre maksimum gerilmede toplam değişim %1'in altındadır. Ancak, termal çevrimin maksimum gerilme noktasındaki uzamayı etkilediği görülmektedir.

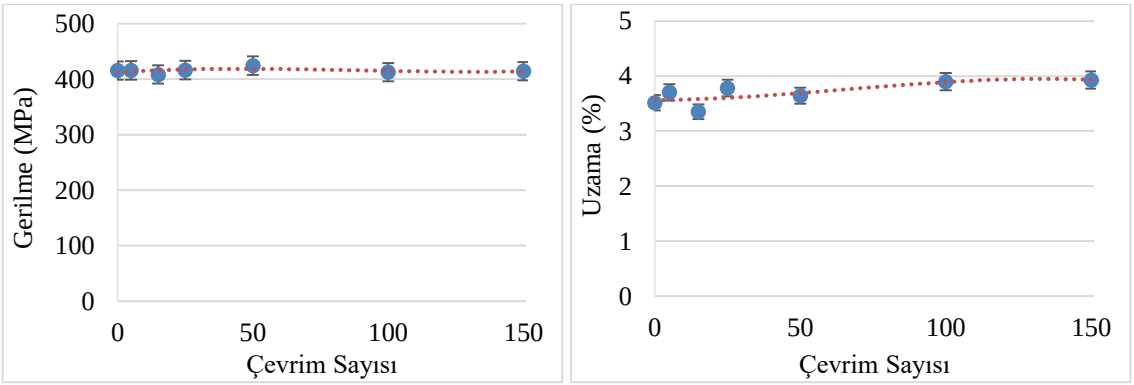


Şekil 5.1. Carall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri

Çizelge 5.1. Carall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları

Çevrim Sayısı	*Elastikiyet Modülü (GPa)*	*Tokluk (kJ/m^3)*	*Maksimum Gerilme (MPa)*	*Maksimum Gerilmedeki Uzama (%)*
0	33,66	933	415,55	3,51
5	35,60	1027	415,69	3,71
15	33,78	886	408,40	3,35
25	28,59	1029	416,35	3,78
50	37,07	1024	424,39	3,64
100	28,07	1072	412,62	3,90
150	27,47	1098	414,44	3,93

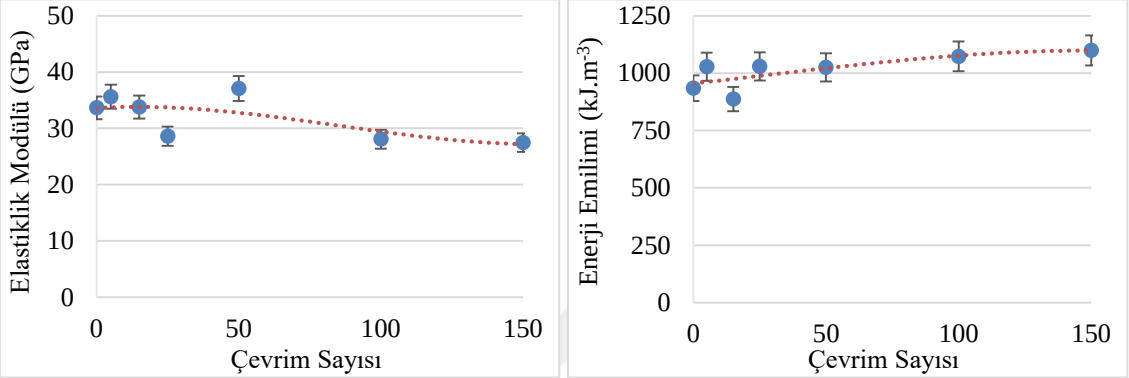
Çevrim sayısının artmasıyla birlikte uzama değerinde dalgalanmalar görülmekle beraber, genel olarak artış yönünde bir trend izlediği belirlenmiştir. Başlangıçta 0 çevrim numunesi %3,51 uzamada maksimum gerilme değerine ulaşırken 150 çevrim sonunda bu uzama değeri %3,93 olmuştur (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Carall malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri

Termal çevrimlerin elastikiyet modülü üzerindeki etkisi incelendiğinde, genel olarak dalgalı ancak azalan bir eğilim gösteren bir davranış gözlemlenmiştir. Kompozit

malzemenin uzama kabiliyetinde artış meydana gelirken, maksimum gerilme seviyesinin büyük ölçüde sabit kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesinde bir artışı işaret etmektedir. Nitekim, çevrim sayısındaki artışa paralel olarak enerji emiliminin yükseldiği ve bu doğrultuda malzemenin enerji sönümleme yeteneğinde belirgin bir iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir (Şekil 5.3).



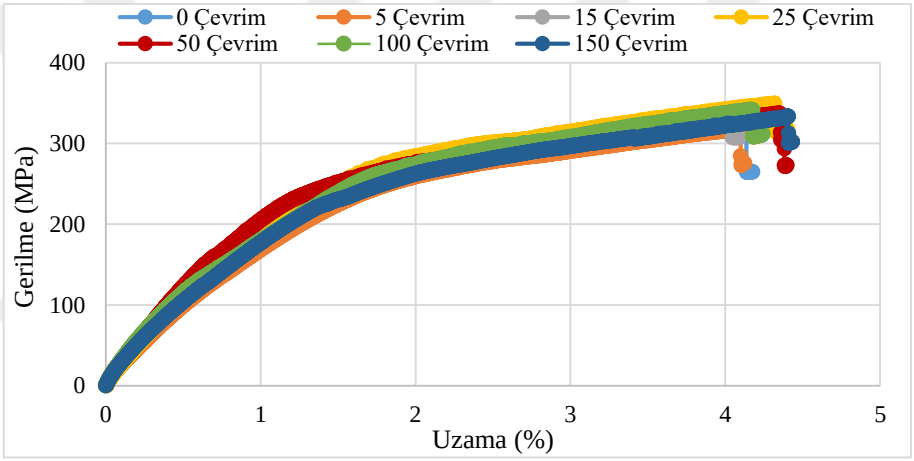
Şekil 5.3. Carall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri

Tabakalı kompozit malzemelerde, farklı tabakaların sahip olduğu çeşitli termal genleşme katsayıları, tabakalar arasında iç gerilme farklarının oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle epoksi reçine gibi matris malzemeleri ile birleştirilen tabakalarda, sıcaklık değişimlerine bağlı olarak ortaya çıkan genleşme uyumsuzlukları, tabakalar arası bağların zayıflamasına yol açabilmektedir. Ayrıca epoksi bazlı sistemlerin kürleşme süreci sonrasında bünyelerinde artık gerilmeler barındırdığı bilinmektedir. Ancak termal çevrimlerin etkisiyle meydana gelen post-kürleşme sonucunda, bu artık gerilmelerin azaldığı ve moleküler çapraz bağ yapısının daha düzenli hale geldiği çeşitli çalışmalarda ifade edilmiştir (Akbulut vd., 2016).

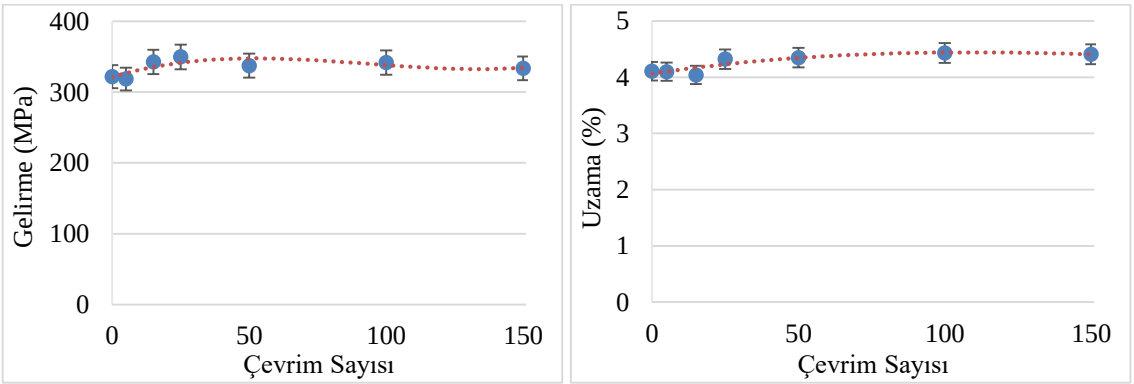
Eslami-Farsani vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, karbon fiber takviyeli kompozitlerin 30 termal çevrim sonrasında başlangıç mukavemet değerine göre yaklaşık %15 oranında bir azalma gösterdiği rapor edilmiştir. Benzer şekilde, ilk çevrimlerde gözlemlenen bu tür mekanizmalar, literatürde başka araştırmacılar tarafından da doğrulanmıştır (Russell-Stevens vd., 2005). Bu bağlamda, özellikle ilk termal çevrimlerde elde edilen dalgalı gerilme-tepki eğrilerinin gözlemlenmesi, yukarıda belirtilen termomekanik süreçler doğrultusunda daha anlaşılır ve tutarlı hale gelmektedir.

5.1.2. Barall malzemesine ait çekme testi sonuçları

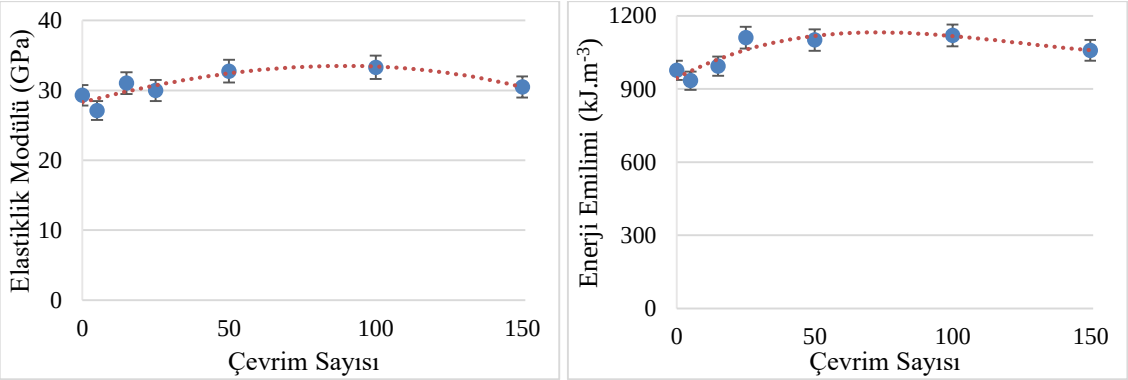
Barall malzemesi, termal çevrimler süresince genel mekanik performans açısından diğer kompozit sistemlerle benzer bir davranış sergilemiştir (Şekil 5.4). Özellikle enerji absorpsiyon kapasitesinde belirgin bir iyileşme eğilimi öne çıkarken, maksimum gerilme ve elastikiyet modülü değerlerinde ise hafif dalgalanmalar gözlemlenmiştir (Şekil 5.5 ve Şekil 5.6). Uzama miktarında ise sınırlı fakat istikrarlı bir artış eğilimi dikkat çekmektedir. Bu durum, artan çevrim sayısıyla birlikte malzemenin enerji sönümleme yeteneğinde gözlenen artışı desteklemektedir. Dolayısıyla, Barall malzemesinin termal çevrimlere maruz kaldıkça enerji emilim kapasitesinde artış yönünde bir trend sergilediği söylenebilir.



Şekil 5.4. Barall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri



Şekil 5.5. Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri



Şekil 5.6. Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri

Baral malzemesinin termal çevrim öncesi ve sonrası gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen sayısal veriler Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Barall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları

Çevrim Sayısı	*Elastikiyet Modülü (GPa)*	*Tokluk (kJ/m^3)*	*Maksimum Gerilme (MPa)*	*Maksimum Gerilmedeki Uzama (%)*
0	29,30	976,69	321,87	4,11
5	27,11	934,10	318,48	4,10
15	31,05	993,27	342,58	4,04
25	29,99	1110,00	349,71	4,32
50	32,76	1100,92	337,39	4,35
100	33,31	1119,37	341,68	4,43
150	30,50	1058,36	333,78	4,41

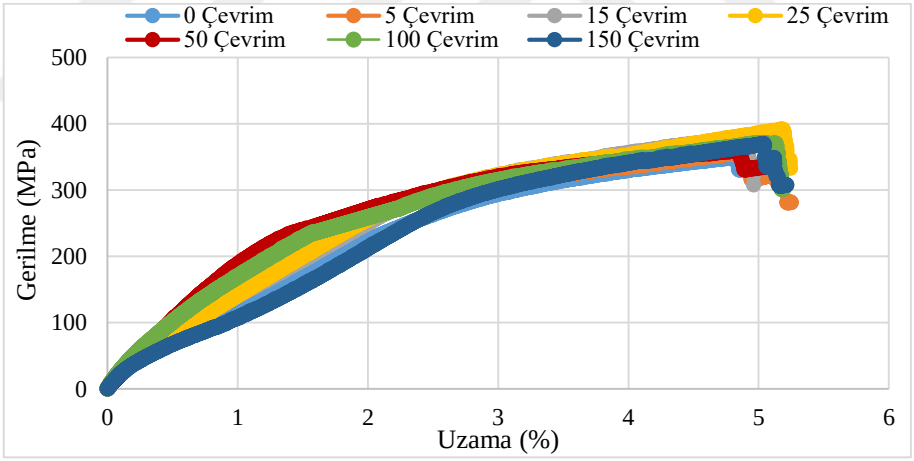
Barall tabakalı kompoziti, termal çevrimlere karşı gösterdiği mekanik davranış açısından diğer kompozitlere kıyasla orta düzeyde istikrarlı bir profil sergilemiştir. Çizelge 5.2'de sunulan verilere göre, uygulanan çevrim sayısının artmasıyla birlikte maksimum gerilme değerinde en belirgin değişim 5 ile 15 çevrim arasında gerçekleşmiş ve bu aralıkta yaklaşık 24 MPa'lık bir fark oluşmuştur. Bazalt fiberin yüksek termo-mekanik kararlılığı ise daha önceki çalışmalarla da desteklenmektedir (Yıldız, 2019; Fiore vd., 2015).

Termal çevrim sayısı 150'ye ulaştığında, 0 çevrimli numuneye kıyasla maksimum gerilme değerinde %3,7 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, çevrim sayısının artışıyla birlikte maksimum gerilme anındaki uzama miktarında ve enerji absorpsiyon kapasitesinde de artış eğilimi tespit edilmiştir. Her ne kadar çevrim sayısına bağlı olarak mekanik özelliklerde yer yer dalgalanmalar meydana gelse de genel eğilimin artış yönünde olduğu görülmektedir. Başlangıçta, 0 çevrimli numunede maksimum gerilme değeri %4,11'lik bir uzama seviyesinde elde edilirken, 150 çevrim sonunda bu

değer %4,41'e ulaşmış ve %7,3'lük bir artış göstermiştir. Maksimum gerilme değerindeki artışla birlikte, enerji emilimi de paralel olarak artmış ve 150 çevrim sonunda %8,4 oranında iyileşme kaydedilmiştir.

5.1.3. Glare malzemesine ait çekme testi sonuçları

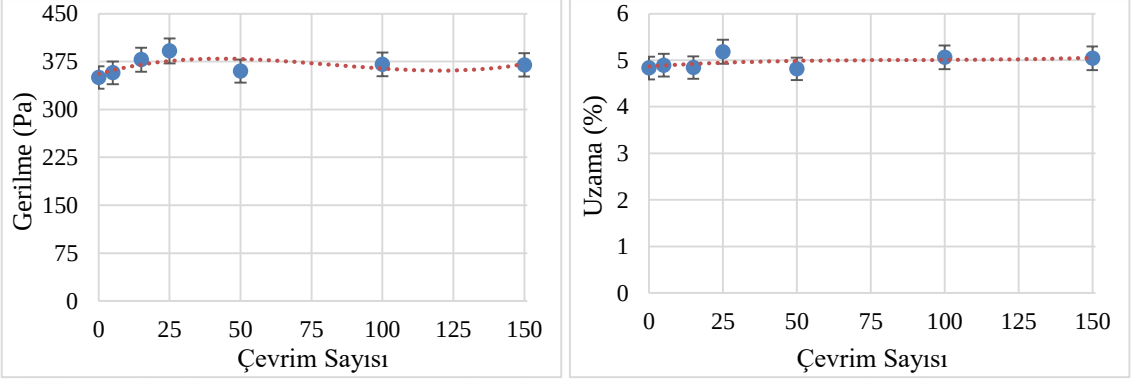
Glare kompozitine uygulanan termal çevrimlerin ardından gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda elde edilen gerilme – uzama eğrileri Şekil 5.7'de verilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, 150 termal çevrim uygulaması Glare kompozitinin mekanik özelliklerinde anlamlı bir bozulmaya neden olmamıştır. Şekil 5.8'de gösterilen maksimum gerilme değerleri ile bu noktadaki uzama miktarları ve Şekil 5.9'da yer alan elastikiyet modülü ile enerji emilimi değerleri, Barall kompozitine kıyasla daha yüksek düzeyde gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, termal çevrimlerin neden olduğu değişim eğilimleri bakımından Glare ve Barall kompozitlerinin benzer tepkiler verdiği gözlemlenmiştir.



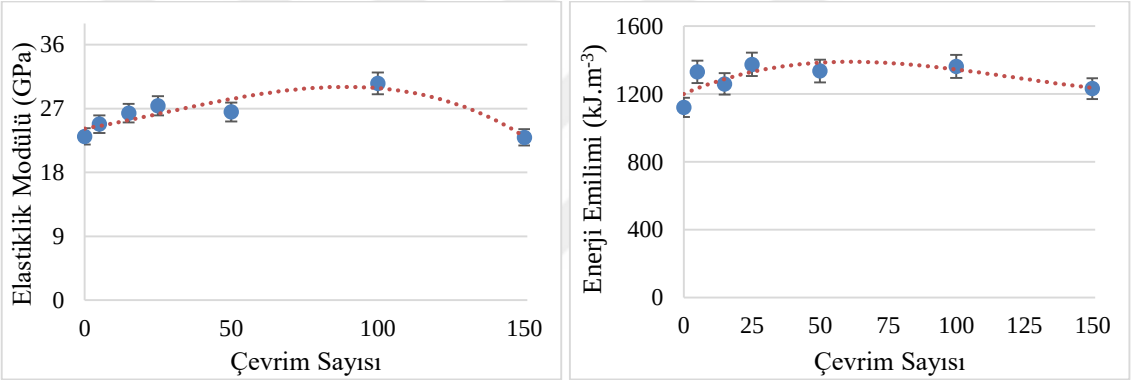
Şekil 5.7. Glare malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri

Glare malzemesinin termal çevrim öncesi ve sonrası gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen sayısal veriler Çizelge 5.3'te verilmiştir. Çizelge 5.3 incelendiğinde, mekanik özelliklerdeki en belirgin değişim, 25 ile 50 çevrim arasındaki Glare numunelerinde görülmüş olup, bu aralıkta maksimum gerilme değerinde yaklaşık 32 MPa'lık bir azalma meydana gelmiştir. Özellikle 25 çevrim uygulanmış Glare numunesinin çekme değerlerinin yüksek çıkması, bu farkın büyük olmasının temel nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. 150 çevrim sonrasında, 0 çevrimli

örneğe kıyasla maksimum gerilme değerinde %5,7 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, çevrim sayısının artışı, maksimum gerilme noktasındaki uzama miktarını ve enerji absorpsiyon kapasitesini de artırıcı yönde etkilemiştir.



Şekil 5.8. Glare malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri



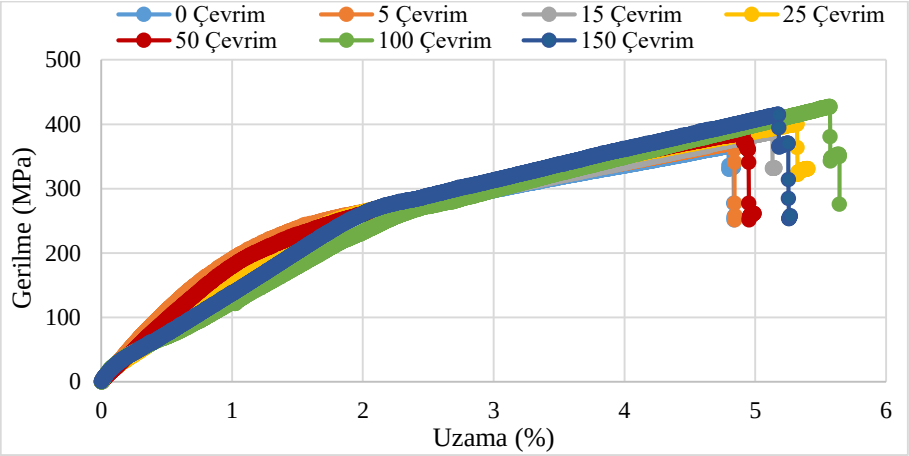
Şekil 5.9. Glare malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri

Çizelge 5.3. Glare malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları

Çevrim Sayısı	*Elastikiyet Modülü (GPa)*	*Tokluk (kJ/m³)*	*Maksimum Gerilme (MPa)*	*Maksimum Gerilmedeki Uzama (%)*
0	23,09	1121,52	349,93	4,83
5	24,82	1330,96	357,43	4,89
15	26,37	1259,49	377,95	4,84
25	27,41	1374,60	391,71	5,18
50	26,53	1336,21	359,97	4,82
100	30,56	1363,33	370,61	5,06
150	22,96	1232,02	369,77	5,04

5.1.4. Arall malzemesine ait çekme testi sonuçları

Arall tabakalı kompozit malzemeye uygulanan termal çevrimler öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama eğrileri Şekil 5.10'da verilmiştir. Bu testler sonucunda elde edilen sayısal veriler ise Çizelge 5.4'te detaylı bir şekilde tablolaştırılarak sunulmuştur.

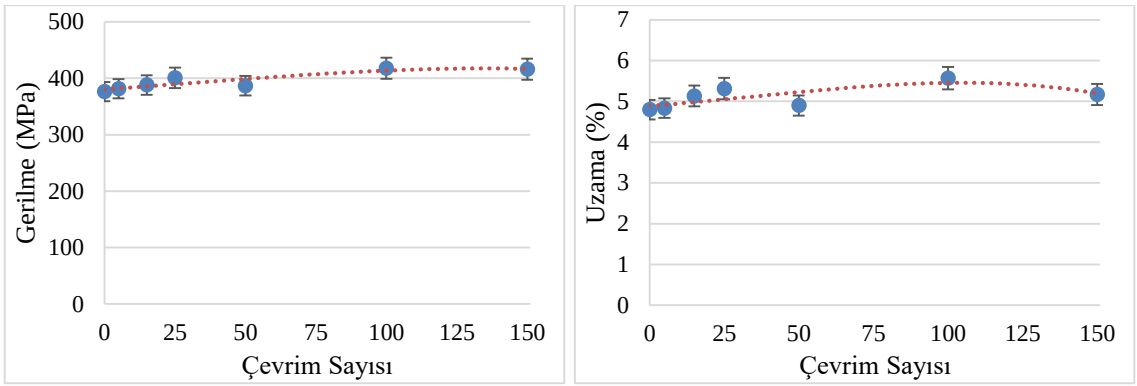


Şekil 5.10. Arall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri

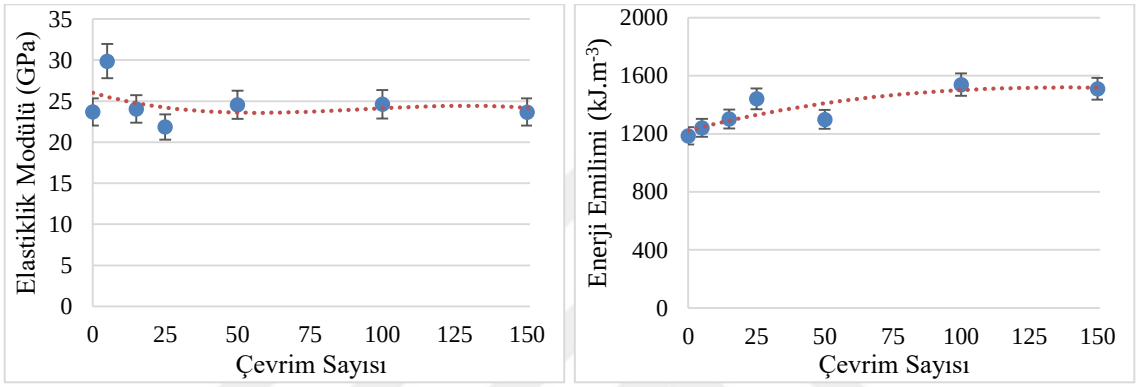
Çizelge 5.4. Arall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları

Çevrim Sayısı	*Elastikiyet Modülü (GPa)*	*Tokluk (kJ/m^3)*	*Maksimum Gerilme (MPa)*	*Maksimum Gerilmedeki Uzama (%)*
0	23,70	1195,16	386,34	4,90
5	29,88	1240,32	391,43	4,96
15	24,04	1301,80	394,04	5,13
25	21,86	1441,31	400,79	5,31
50	24,56	1299,29	396,68	4,98
100	24,62	1510,72	417,73	5,40
150	23,66	1461,36	415,82	5,17

Arall kompozitine ait verilerin incelenmesi sonucunda, uygulanan termal çevrimlerle birlikte mekanik özelliklerde belirgin değişimlerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Termal çevrim sayısındaki artışla birlikte maksimum gerilme değerinde genel olarak artış eğilimi gözlemlenmiştir. Bu artışın en belirgin olduğu aralık 50 ile 100 çevrim arasında gerçekleşmiş ve yaklaşık 31 MPa'lık bir fark kaydedilmiştir. 50 çevrim uygulanmış numune dışında, 150 çevrime kadar olan örneklerde hem maksimum gerilme değeri hem de bu noktadaki uzama miktarı düzenli bir artış göstermiştir (Şekil 5.11). Bu doğrultuda, hesaplanan enerji emilimi değerleri de çevrim sayısına paralel olarak artış eğilimi sergilemiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.11. Arall malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri

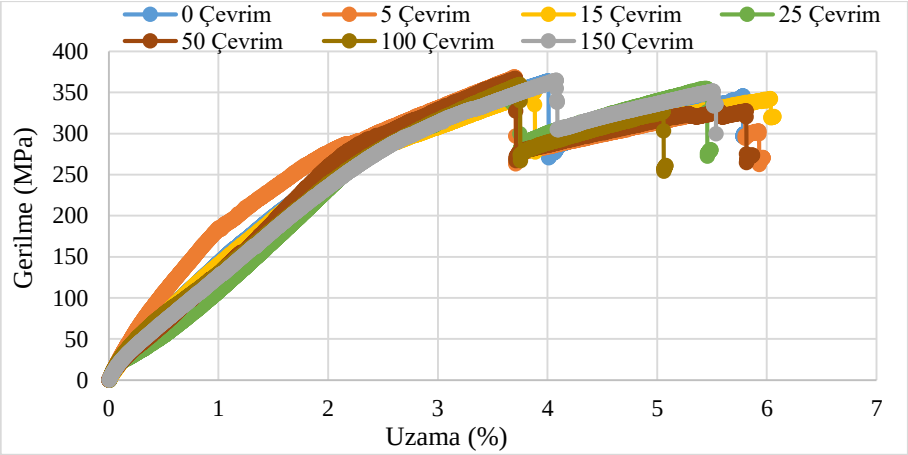


Şekil 5.12. Arall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri

150 çevrim uygulanmış numunelerde mekanik parametrelerde hafif bir düşüş gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, 0 çevrim ile karşılaştırıldığında 150 çevrim sonunda maksimum gerilme değerinde %7,5 oranında bir artış elde edilmiştir. Başlangıçta, 0 çevrimli numune %4,90 uzama seviyesinde maksimum gerilmeye ulaşırken, bu değer 150 çevrim sonunda %5,08'e yükselmiş ve böylece maksimum gerilme noktasındaki uzama miktarı %3,7 oranında artış göstermiştir. Bu durum, termal çevrimlerin malzemenin deformasyon kapasitesini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Kuvvet ve uzama değerlerinde gözlenen bu artışlar sonucunda, enerji emilimi kapasitesinde de belirgin bir iyileşme meydana gelmiş ve 150 çevrim sonunda enerji emilimi %22,2 oranında artmıştır. Çevrim sayısındaki artışa bağlı olarak uzama değerinde gözlenen yükseliş, malzemenin deformasyon toleransını artırarak enerji absorpsiyon kapasitesinde iyileşmeye katkı sağlamıştır.

5.1.5. Ar-Carall malzemesine ait çekme testi sonuçları

Aramid ve karbon fiber içeren alüminyum laminat, diğer bir ifadeyle Ar-Carall kompozitine ait termal çevrim öncesi ve sonrası çekme testi eğrileri Şekil 5.13'te gerilme – uzama ilişkisi şeklinde verilmiştir.



Şekil 5.13. Ar-Carall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri

Bu kompozit yapı, tek tip fiber içeren kompozitlerden farklı olarak, hibrit yapısından kaynaklanan iki ayrı gerilme tepe noktasına sahiptir. Bu durum, kullanılan fiberlerin farklı mekanik davranışları ve uzama kapasitelerine sahip olmalarından kaynaklanmaktadır.

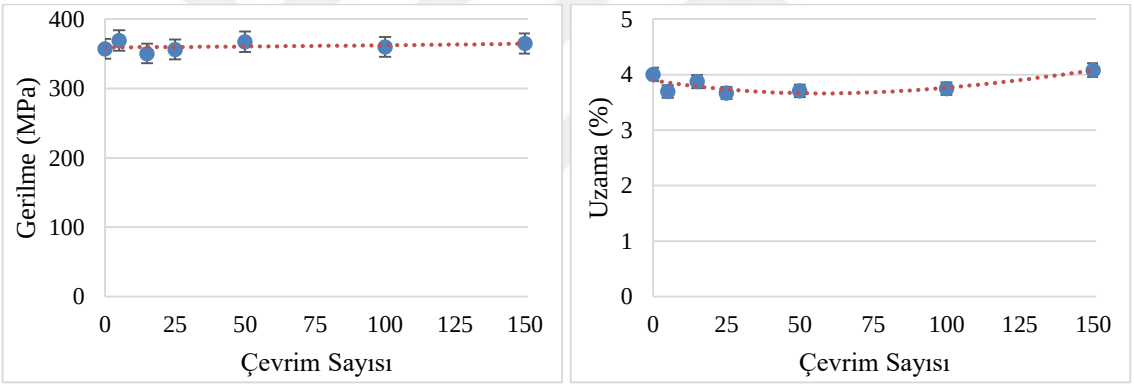
Aramid fiber, karbon fiberle karşılaştırıldığında daha yüksek uzama yeteneğine sahiptir. Bu nedenle ilk tepe noktası, karbon fiberin kırılma yaşadığı aralığa karşılık gelmekte olup, %3,70–%4,08 uzama değerleri arasında gerçekleşmiştir. İkinci tepe ise aramid fiberin kopma noktasını temsil etmekte ve %5,06–%6,06 uzama aralığında gözlenmiştir. Karbon fiber içeren tek tip fiberli kompozitlerle kıyaslandığında, karbon fiberin kırılması, daha dar bir uzama aralığında (%3,29–%4,50) meydana gelmiştir. Aramid fiberin kırılma uzaması ise hibrit yapı sayesinde, tek başına kullanıldığı duruma kıyasla (%4,80–%5,87) hafif bir artış eğilimi göstermiştir.

Ar-Carall malzemesinin termal çevrim öncesi ve sonrası gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen sayısal veriler Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Ar-Carall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları

Çevrim Sayısı	*Elastikiyet Modülü (GPa)*	*Tokluk (kJ/m^3)*	*Maksimum Gerilme (MPa)*	*Maksimum Gerilmedeki Uzama (%)*
0	23,78	1468,47	357,20	4,00
5	30,95	1575,64	369,10	3,70
15	22,51	1533,85	350,44	3,87
25	16,63	1320,88	356,35	3,67
50	20,77	1467,85	367,26	3,71
100	26,06	1196,60	359,85	3,75
150	22,45	1376,63	364,92	4,08

Ar-Carall kompozitine ait incelenen veriler, termal çevrim uygulamaları ile birlikte malzemenin mekanik özelliklerinde değişim meydana geldiğini ortaya koymuştur. Çizelge 5.5'te sunulan verilere göre, termal çevrim sayısındaki artışa paralel olarak maksimum gerilme değerinde genel bir artış eğilimi gözlenmiştir. Bu artışın en belirgin olduğu aralık 5–15 çevrim arasında gerçekleşmiş ve yaklaşık 19 MPa'lık bir yükselme meydana gelmiştir (Şekil 5.14).

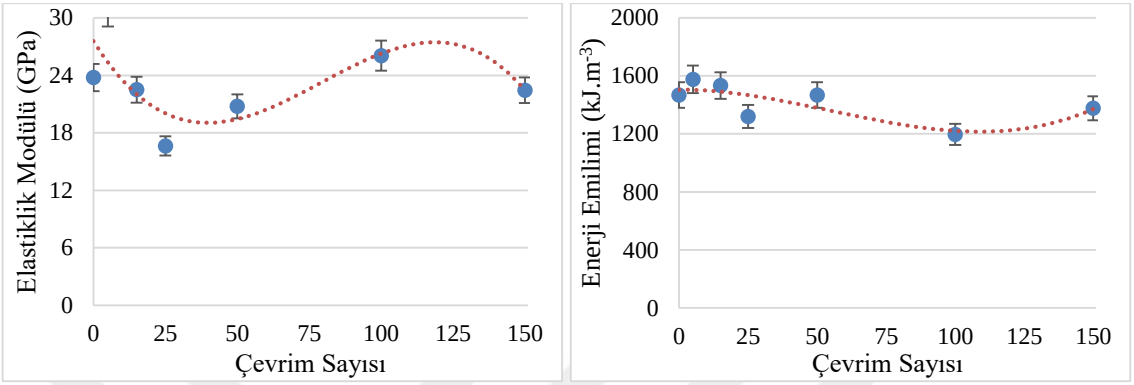


Şekil 5.14. Ar-Carall malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri

Şekil 5.14'te verilen uzama ile Şekil 5.15'te verilen enerji emilimi, ve elastikiyet modülü değerleri çevrim sayısındaki artışla birlikte düzenli bir artış yerine dalgalı bir değişim eğilimi sergilemiştir. Özellikle enerji emilimi açısından hibrit yapılı Ar-Carall kompozitlerinin, tek fiber içeren kompozitlere kıyasla daha fazla dalgalanma gösterdiği tespit edilmiştir. En belirgin azalma ise 50–100 çevrim aralığında gerçekleşmiş ve bu aralıkta enerji emilimi değerinde yaklaşık %15'lik bir düşüş meydana gelmiştir.

150 çevrim sonunda, 0 çevrim uygulanmış örneğe kıyasla maksimum gerilme değerinde %2,1 oranında bir artış elde edilmiştir. Bununla birlikte, termal çevrimlerin ardından maksimum gerilme noktasındaki uzama değerinde meydana gelen artış, diğer hibrit kompozitlerle karşılaştırıldığında sınırlı kalmış ve yalnızca %2 düzeyinde

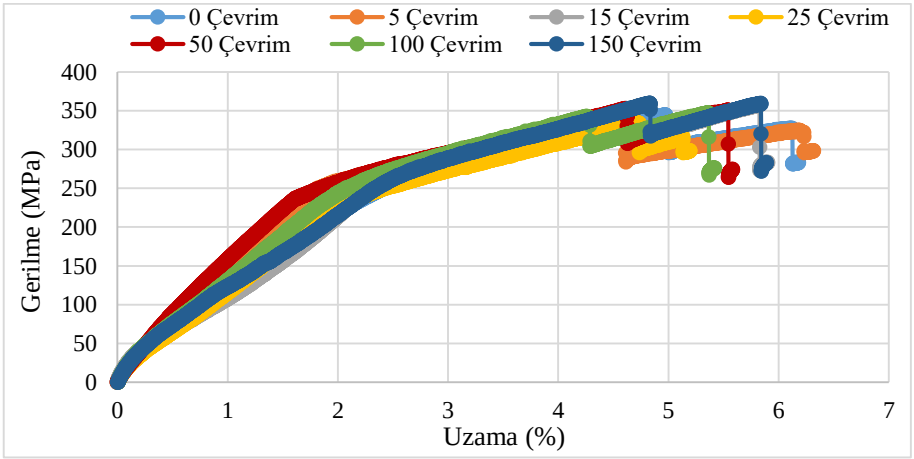
gerçekleşmiştir. Öte yandan, elastikiyet modülünde gözlemlenen %5,5 oranındaki azalma, kompozitin rijitliğinde düşüşe işaret etmektedir. Bu durum, enerji emilimi kapasitesine de yansımış ve enerji emilimi değerinde %6,3'lük bir azalma meydana gelmiştir.



Şekil 5.15. Ar-Carall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri

5.1.6. Ar-Glare malzemesine ait çekme testi sonuçları

Şekil 5.16'da, aramid ve cam fiberlerden oluşan Ar-Glare kompozitinin termal çevrim öncesi ve sonrası gerçekleştirilen çekme testlerine ait gerilme – uzama eğrileri verilmiştir. Kompozitte yer alan iki farklı fiberin uzama karakteristiklerinin farklı olması nedeniyle, Ar-Carall malzemede olduğu gibi Ar-Glare malzemesinde de gerilme – uzama eğrilerinde iki ayrı tepe noktası ortaya çıkmıştır. Bu tepeler, fiberlerin ardışık olarak hasar görmesini yansıtmaktadır.



Şekil 5.16. Ar-Glare malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri

Termal çevrim sayısına bağlı olarak, 15., 50., 100. ve 150. çevrimlerde aramid fiberlerin, diğer çevrimlerde ise cam fiberlerin ilk olarak hasar gördüğü belirlenmiştir. Aramid ve cam fiberlerin kopma uzamaları birbirine oldukça yakın olduğundan, hangi fiberin önce hasar göreceği çevrim sayısına bağlı olarak değişiklik göstermiştir.

Cam fiberlerin daha geç hasar gördüğü numunelerde, ikinci tepe noktası birinci tepeye kıyasla daha düşük bir gerilme değerinde ortaya çıkmıştır. Buna karşılık, aramid fiberlerin ikinci sırada hasar gördüğü numunelerde, ikinci tepe noktası birinci tepeye oldukça yakın bir gerilme düzeyindedir. İlk hasarın meydana geldiği uzama değerleri, aramid ve cam fiberlerin kopma uzamaları arasında yer almakta olup, bu aralık yaklaşık %4,61 ile %5,35 arasındadır. Ar-Glare'nin termal çevrim öncesi ve sonrası gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen sayısal veriler Çizelge 5.6'da verilmiştir.

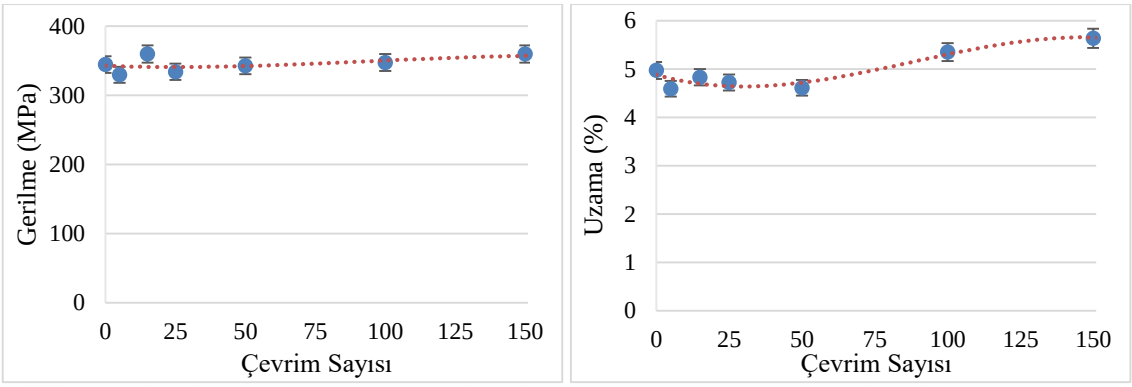
Çizelge 5.6. Ar-Glare malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları

Çevrim Sayısı	*Elastikiyet Modülü (GPa)*	*Tokluk (kJ/m^3)*	*Maksimum Gerilme (MPa)*	*Maksimum Gerilmedeki Uzama (%)*
0	23,05	1499,63	344,46	4,97
5	22,50	1592,53	329,35	4,59
15	24,29	1433,71	359,53	4,83
25	20,94	1152,16	333,81	4,72
50	31,97	1433,46	342,34	4,61
100	24,86	1312,63	347,22	5,35
150	24,20	1476,74	359,51	5,64

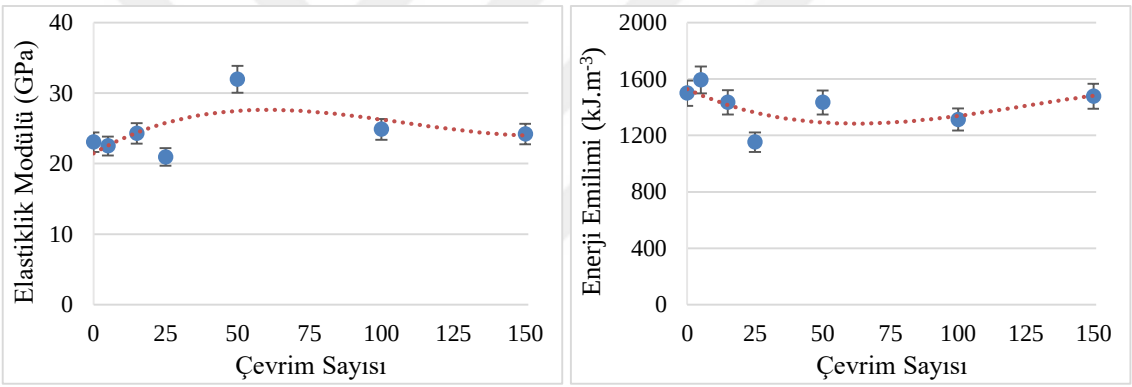
Ar-Glare kompozitinin incelenen mekanik verilerinde, termal çevrim sayısının artmasıyla birlikte belirgin değişimler gözlemlenmiştir. Termal çevrim uygulama sayısı arttıkça, maksimum gerilme değerinde genel bir artış trendi kaydedilmiştir. En belirgin değişim ise 5 ile 15 çevrimler arasında gerçekleşmiş olup, bu dönemde yaklaşık 30 MPa'lık bir artış meydana gelmiştir. Buna karşın, enerji emilimi, % uzama ve elastikiyet modülü değerleri, termal çevrim sayısının artışına bağlı olarak artış ve azalışlar şeklinde dalgalanmalar sergilemiştir (Şekil 5.17 ve Şekil 5.18).

Enerji emilimi, hibrit kompozitlerde tek fiberli kompozitlere kıyasla daha belirgin dalgalanmalar göstermiştir. Ar-Glare kompozitinde, enerji emiliminde en yüksek değişim %24 oranında azalma ile 15-25 termal çevrimler arasında gözlemlenmiştir. 150 termal çevrim sonunda, başlangıçtaki çevrimsiz numuneye göre maksimum gerilmede toplam %4,3'lük bir artış meydana gelmiştir. Aynı zamanda, termal çevrim sonrasında maksimum gerilme noktasındaki uzama diğer kompozitlere kıyasla daha yüksek bulunmuş ve %13,4 oranında artış göstermiştir. Enerji emilimi değeri ise %1,6

seviyesinde artmıştır. Eğriler incelendiğinde, çevrimsiz örneklerde ikinci fiberin kırılma uzamasının daha yüksek olması nedeniyle enerji emilimi farkının düşük kaldığı görülmüştür.



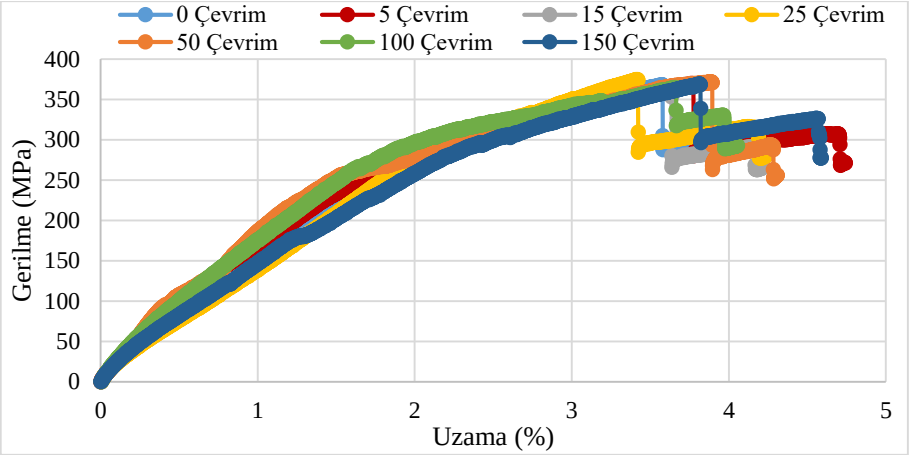
Şekil 5.17. Ar-Glare malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri



Şekil 5.18. Ar-Glare malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri

5.1.7. Car-Glare malzemesine ait çekme testi sonuçları

Karbon ve cam fiberlerden oluşan Car-Glare kompozitinin termal çevrim öncesi ve sonrası çekme testi eğrileri Şekil 5.19'da gerilme – uzama grafikleri olarak verilmiştir. Fiberlerin doğası gereği farklı uzama özelliklerine sahip olmaları nedeniyle, eğrilerde iki ayrı uzama noktasında gerilme tepeleri meydana gelmiştir. Termal çevrim sayısındaki değişimlerin maksimum gerilme seviyeleri üzerinde önemsiz etkiler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Carall kompozitindeki numuneler arasında maksimum gerilme farkı en fazla 16 MPa iken, Car-Glare'de bu fark 10 MPa olarak tespit edilmiştir. Maksimum gerilme davranışının karbon fiberin mekanik özelliklerini yansıttığı belirlenmiştir.



Şekil 5.19. Car-Glare malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri

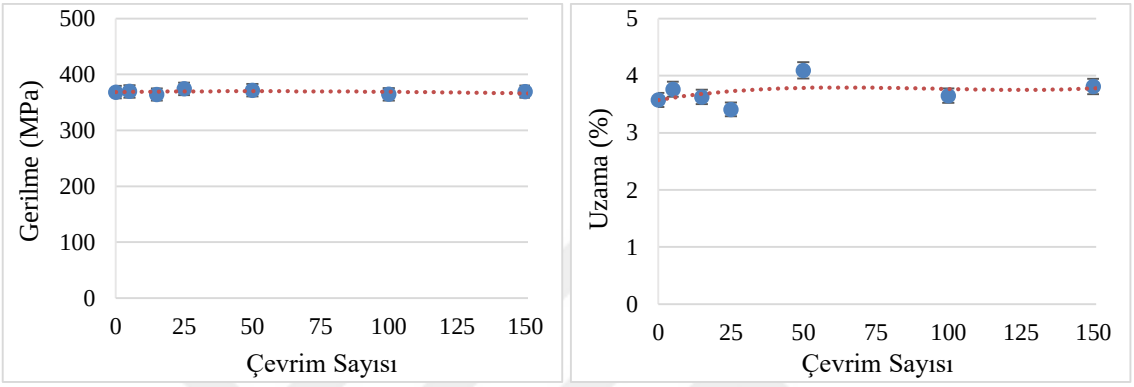
Ayrıca, maksimum gerilme noktasındaki % uzama değerleri Carall kompozitinin karakteristiğini yansıtmakta olup, karbon fiberin kopma uzaması %3,41 ile %4,09 arasında gerçekleşmiştir. Cam fiberin kopma uzaması ise %3,96 ile %4,69 arasında olup, bu değerler Glare kompozitinin uzama değerlerinden daha düşüktür.

Car-Glare kompozitinin termal çevrim öncesi ve sonrası gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen sayısal veriler Çizelge 5.7'de verilmiştir. Bu veriler doğrultusunda, maksimum gerilme, uzama ve enerji emilimi değerlerinde artış eğilimi gözlemlenirken, elastikiyet modülünde ise küçük çaplı artış ve azalış dalgalanmaları meydana gelmiştir. Söz konusu eğilimler, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de yer alan termal çevrime bağlı çekme, uzama, elastikiyet modülü ve enerji emilimi grafiklerinde açık bir şekilde görülmektedir.

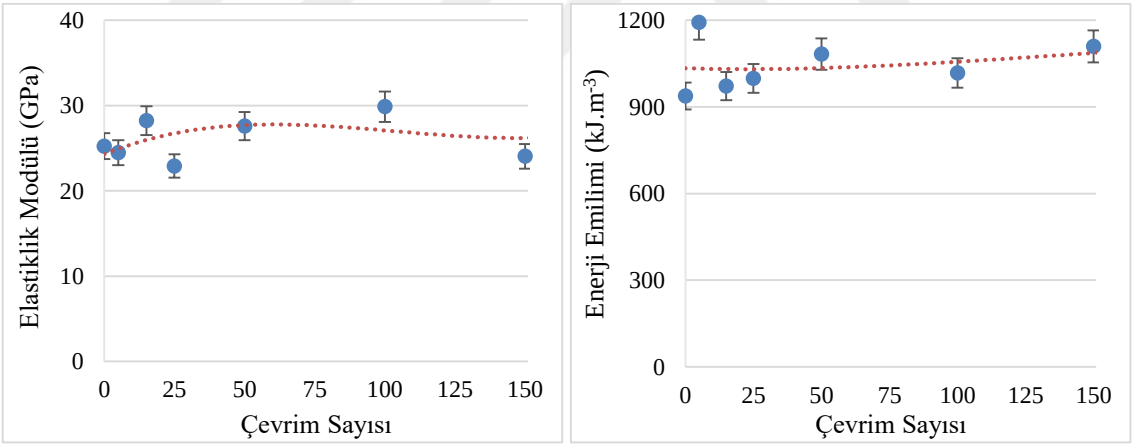
Maksimum gerilme değerindeki en belirgin değişim, 15-25 termal çevrimleri arasında %2,7 azalma olarak tespit edilmiştir. Enerji emilimi açısından ise en düşük değer, termal çevrim uygulanmamış numunede gözlenmiştir. Termal çevrim sayısı arttıkça enerji emilimi dalgalı bir seyir izlese de genel trend artış yönündedir. 150 çevrim sonunda, çevrimsiz numuneye kıyasla maksimum gerilmede toplam değişim önemsiz olup, yalnızca %0,2 artış kaydedilmiştir. Bu gerilmedeki stabilite, Carall kompozitinde de gözlemlenmiş olup, karbon fiberin karakteristik bir özelliğini yansıtmaktadır. Benzer şekilde, termal çevrim sonrasında maksimum gerilme noktasındaki uzama %6,4 oranında artış göstermiştir. Enerji emilimi ise %18 oranında artarken, elastikiyet modülünde dalgalanmalar görülmüş ve son durumda %4,2 oranında azalma meydana gelmiştir.

Çizelge 5.7. Car-Glare malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları

Çevrim Sayısı	*Elastikiyet Modülü (GPa)*	*Tokluk (kJ/m^3)*	*Maksimum Gerilme (MPa)*	*Maksimum Gerilmedeki Uzama (%)*
0	25,25	937,97	368,30	3,58
5	24,48	1192,60	369,64	3,76
15	28,23	972,40	364,22	3,63
25	22,92	998,75	374,32	3,41
50	27,60	1082,74	371,85	4,09
100	29,87	1017,94	364,46	3,65
150	24,06	1109,39	369,25	3,81



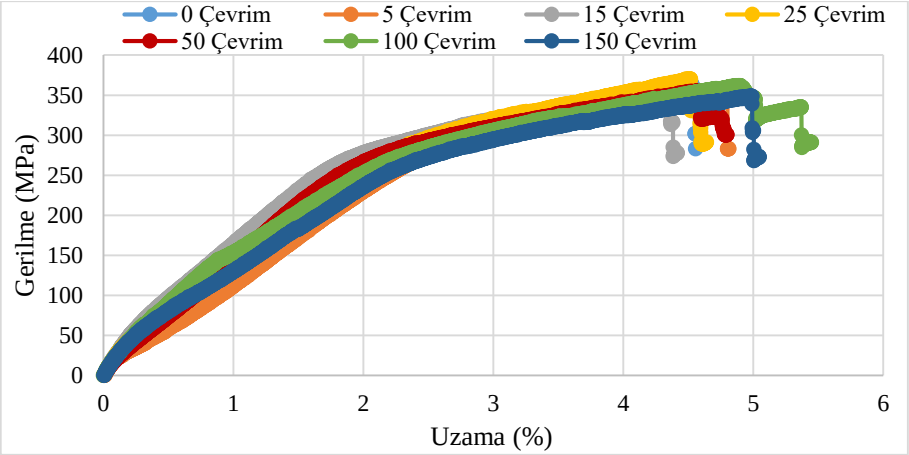
Şekil 5.20. Car-Glare malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri



Şekil 5.21. Car-Glare malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri

5.1.8. Gl-Barall malzemesine ait çekme testi sonuçları

Cam ve bazalt fiberlerden oluşan Gl-Barall kompozitine ait termal çevrim öncesi ve sonrası gerçekleştirilen çekme testlerinin gerilme – uzama eğrileri Şekil 5.22'de sunulmuş, testler sonucunda elde edilen sayısal veriler ise Çizelge 5.8'de verilmiştir.



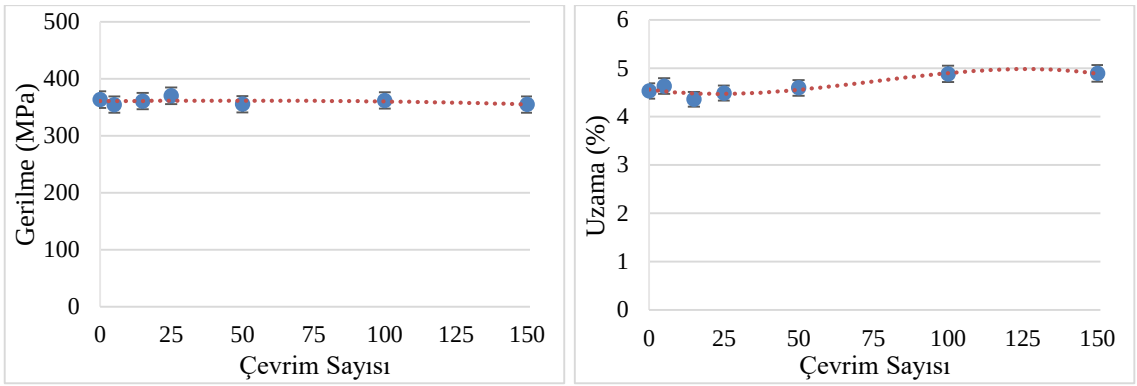
Şekil 5.22. Gl-Barall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri

Çizelge 5.8. Gl-Barall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları

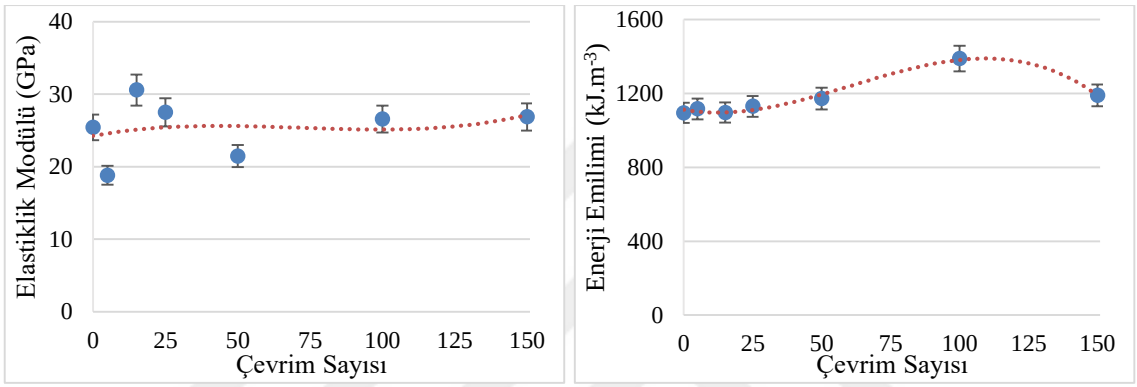
Çevrim Sayısı	*Elastikiyet Modülü (GPa)*	*Tokluk (kJ/m^3)*	*Maksimum Gerilme (MPa)*	*Maksimum Gerilmedeki Uzama (%)*
0	25,42	1094,91	363,32	4,53
5	18,82	1116,11	354,71	4,63
15	30,58	1096,90	360,76	4,36
25	27,50	1130,23	370,25	4,48
50	21,47	1172,64	355,32	4,59
100	26,58	1389,51	361,96	4,88
150	26,87	1189,64	354,76	4,89

Cam ve bazalt fiberlerin benzer kopma uzama değerlerine sahip olmaları nedeniyle, Gl-Barall kompozitinde bazı termal çevrim durumlarında (örneğin 50 ve 100 çevrim) çekme testi eğrilerinde iki ayrı gerilme tepe noktası gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bazı numunelerde kompozit tek bir fiber gibi davranarak yalnızca bir maksimum gerilme noktası göstermiştir. Termal çevrim sayısındaki değişime bağlı olarak maksimum gerilme seviyelerinde belirgin bir farklılık oluşmamış, tüm numuneler arasında en fazla 22 MPa'lık bir fark tespit edilmiştir. Maksimum gerilme noktasındaki uzama değerleri ise %4,36 ile %4,99 aralığında gerçekleşmiş olup, bu aralık cam ve bazalt fiberlerin uzama özelliklerinin ortalamasına karşılık gelmektedir.

Gl-Barall kompozitinin çekme testi sonuçlarına göre, 150 çevrim sonunda 0 çevrime kıyasla maksimum gerilmede %2,4 oranında bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir (Şekil 5.23). Aynı zamanda, termal çevrimlerin sonunda maksimum gerilme noktasındaki uzama %7,9 oranında artmış, buna bağlı olarak enerji emilimi değerinde %8,6'lık bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca elastikiyet modülü de %5,7 oranında artış göstermiştir (Şekil 5.24).



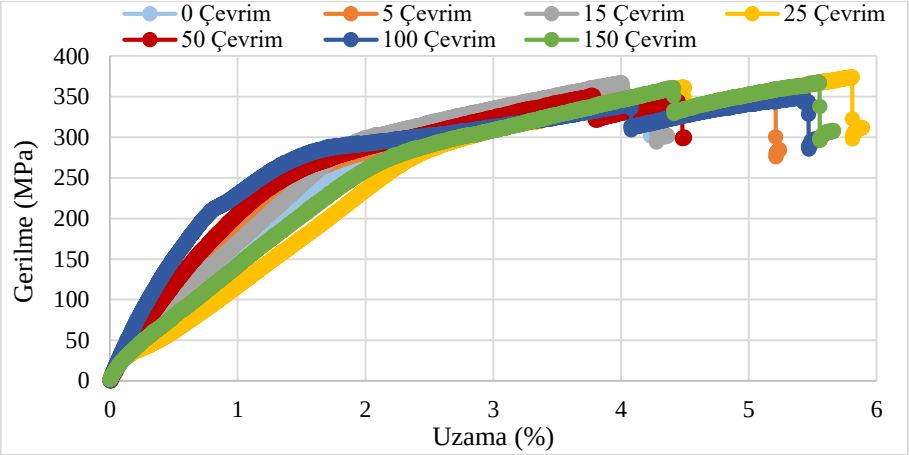
Şekil 5.23. Gl-Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri



Şekil 5.24. Gl-Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri

5.1.9. Ar-Barall malzemesine ait çekme testi sonuçları

Aramid ve bazalt fiberlerden oluşan Ar-Barall kompozitinin termal çevrim öncesi ve sonrası çekme testi eğrileri Şekil 5.25'te gerilme – uzama formatında verilmiştir. Elde edilen test verileri ise Çizelge 5.9'da yer almaktadır. Kompozitte kullanılan fiberlerin farklı uzama özelliklerine sahip olmaları nedeniyle, aramidin yer aldığı diğer hibrit tabakalı kompozitlerde olduğu gibi, Ar-Barall hibrit kompozit malzemede de çekme eğrilerinde iki farklı uzama noktasında gerilme tepe noktaları gözlemlenmiştir. 0 ve 5 çevrim numunelerinde bu iki tepe birbirine yakın seviyelerde gerçekleşirken, 15 ve 50 çevrimlerde ilk tepe daha yüksek, 25, 100 ve 150 çevrimlerde ise ikinci tepe daha baskın olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.25. Ar-Barall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri

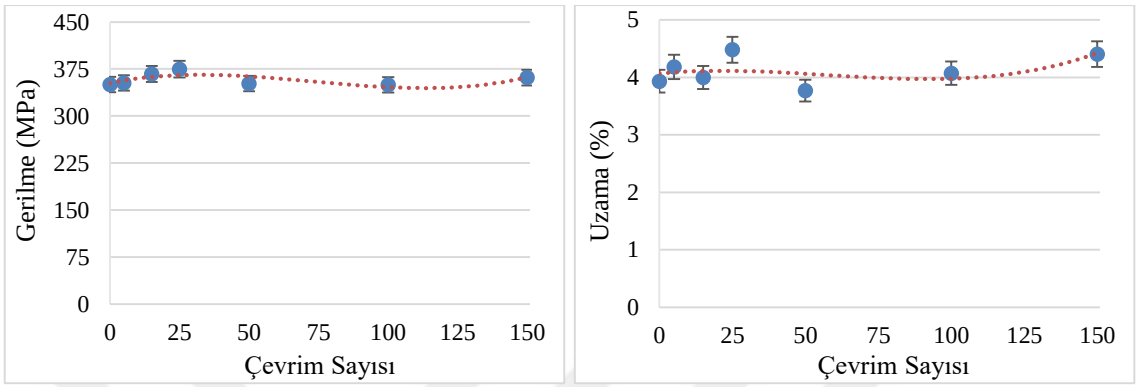
Çizelge 5.9. Ar-Barall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları

Çevrim Sayısı	*Elastikiyet Modülü (GPa)*	*Tokluk (kJ/m^3)*	*Maksimum Gerilme (MPa)*	*Maksimum Gerilmedeki Uzama (%)*
0	27,85	1024,86	350,26	3,93
5	30,30	1395,40	352,56	4,18
15	32,22	1124,22	367,10	4,00
25	24,40	1509,89	374,69	4,48
50	31,58	1175,57	351,72	3,77
100	39,56	1600,35	349,86	4,07
150	27,55	1475,19	361,20	4,40

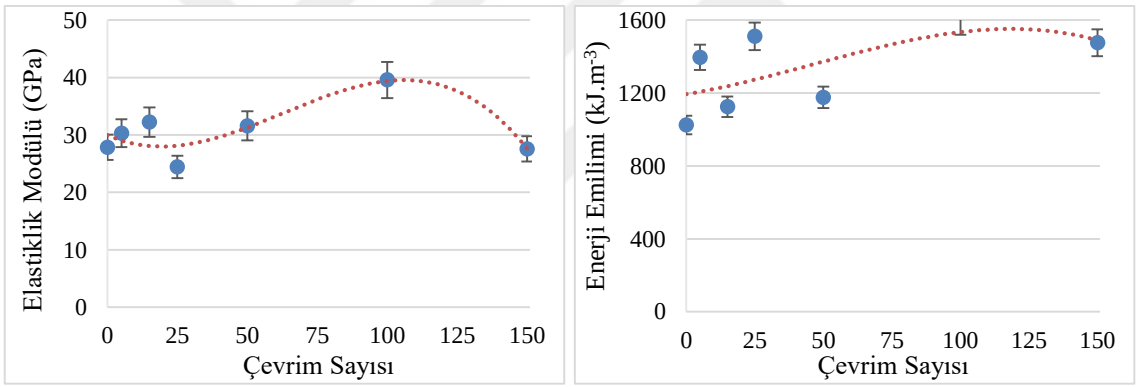
Aramid fiberin uzama kapasitesinin bazalt fibere kıyasla daha yüksek olması nedeniyle, Ar-Barall kompozitinde genellikle ikinci gerilme tepe noktası daha yüksek değere ulaşmakta ve bu tepe, aramid fiberin maksimum gerilmeye ulaştığı noktayı temsil etmektedir. Ar-Barall örneklerinde ilk hasarın meydana geldiği ortalama uzama değeri %4,15 olarak belirlenmiş olup, bu değer Barall kompozitinin ortalama uzama değeri olan %4,25'e oldukça yakın bulunmuştur. İkinci tepe noktası, yani aramid fiberin kopma uzamasına karşılık gelen uzama aralığı ise %4,61–%5,35 arasında değişmiş ve bu değerler, Arall kompozitinin ortalama uzama değeri olan %5,19 ile uyumlu bir görünüm sergilemiştir.

Ar-Barall kompozitinde termal çevrim uygulamaları ile birlikte mekanik özelliklerde belirgin değişimler gözlemlenmiştir. Termal çevrim sayısının artmasına paralel olarak maksimum gerilme değerlerinde genel bir artış eğilimi ortaya çıkmış; bu eğilim özellikle 25 ile 50 çevrim arasında yaklaşık 23 MPa'lık değişimle en belirgin seviyeye ulaşmıştır. Bununla birlikte, enerji emilimi, % uzama ve elastikiyet modülü değerleri çevrim sayısına bağlı olarak artış ve azalış gösteren dalgalı bir seyir izlemiştir (Şekil 5.26–Şekil 5.27). Enerji emilimi açısından değerlendirildiğinde, hibrit

kompozitlerin tek fiberli kompozitlere kıyasla daha fazla dalgalanma sergilediği belirlenmiştir. Bu bağlamda Ar-Barall, 25-50 ve 100 çevrimler arasında yaklaşık %36 oranında artış ve azalış ile enerji emiliminde en yüksek dalgalanmayı gösteren hibrit kompozit olmuştur (Şekil 5.27).



Şekil 5.26. Ar-Baral malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri

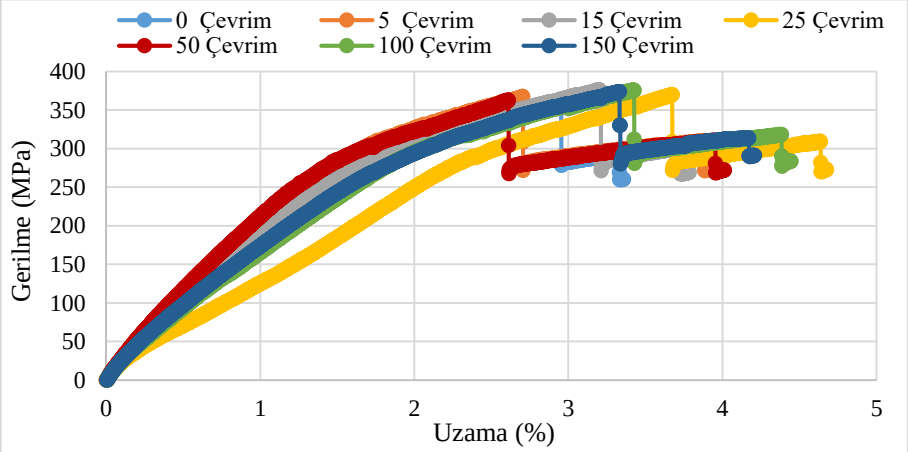


Şekil 5.27. Ar-Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri

150 çevrim sonunda, çevrim uygulanmamış örneklerle karşılaştırıldığında maksimum gerilme değerinde toplam %3,1 oranında bir artış kaydedilmiştir. Bu gerilmedeki artış eğiliminin Barall kompozitinde gözlemlenmemesine karşın Arall örneklerinde belirgin şekilde görülmesi, söz konusu etkinin büyük ölçüde aramid fiberin mekanik özelliklerinden kaynaklandığını göstermektedir. Benzer şekilde, termal çevrim sonunda maksimum gerilme noktasındaki uzama miktarında %11,9 oranında bir artış gerçekleşmiş; enerji emilimi ise diğer tüm kompozit türlerine kıyasla en hızlı artış eğilimi göstermiş ve toplamda %44 oranında yükselmiştir. Buna karşılık elastikiyet modülü, 150 çevrim sonunda %1,1 oranında hafif bir düşüş sergilemiştir.

5.1.10. Car-Barall malzemesine ait çekme testi sonuçları

Karbon ve bazalt fiberlerden oluşan Car-Barall kompozitine ait, termal çevrim öncesi ve sonrası çekme testi sonuçlarına ilişkin gerilme – uzama eğrileri Şekil 5.28'de, deneysel çalışma sonucunda elde edilen nicel veriler ise Çizelge 5.10'da verilmiştir.



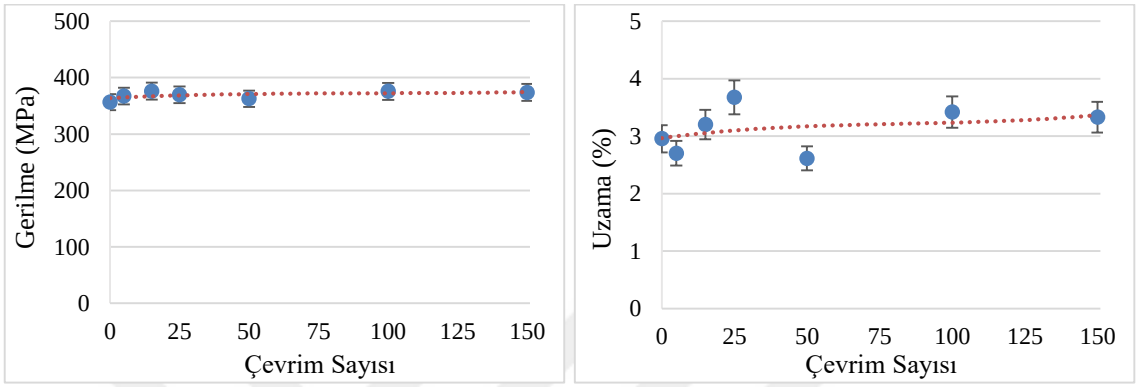
Şekil 5.28. Car-Barall malzemesinin çekme testine ait gerilme – uzama eğrileri

Çizelge 5.10. Car-Barall malzemesinin farklı çevrim sayılarında çekme testi sonuçları

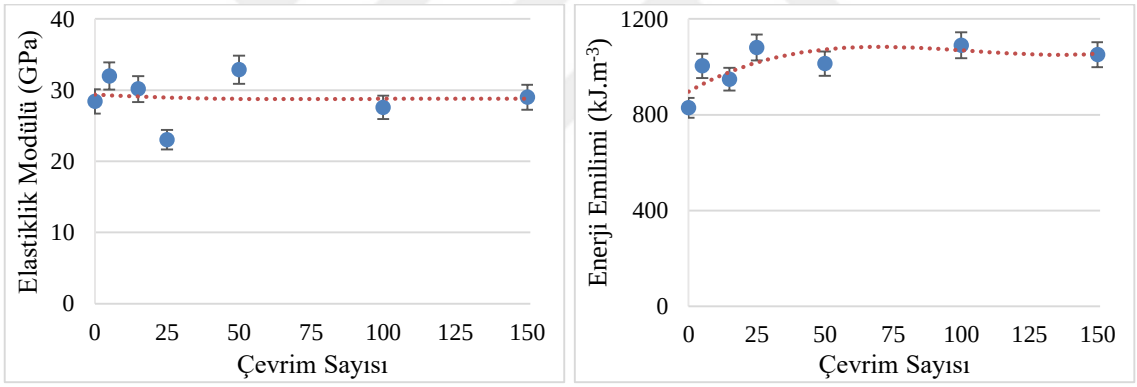
Çevrim Sayısı	*Elastikiyet Modülü (GPa)*	*Tokluk (kJ/m^3)*	*Maksimum Gerilme (MPa)*	*Maksimum Gerilmedeki Uzama (%)*
0	28,41	829,47	356,52	2,95
5	31,98	1003,95	367,41	2,70
15	30,14	947,95	376,11	3,20
25	23,03	1080,39	369,87	3,67
50	32,86	1013,15	362,74	2,61
100	27,58	1090,01	375,74	3,42
150	29,00	1050,66	373,82	3,33

Diğer hibrit kompozitlerde olduğu gibi, Car-Barall kompozitlerin çekme testi sonuçlarında da iki farklı uzama noktasında gerilme tepe noktaları oluşmuştur. Karbon fiber, bazalt fibere kıyasla daha düşük uzama oranlarında ve daha yüksek gerilme değerlerinde kopma gösterdiğinden; ayrıca maksimum gerilme değişim aralığı daha dar olduğundan, ilk tepe noktası karbon fiberin kopmasına karşılık gelmektedir. Termal çevrimler arasında maksimum gerilme değerindeki değişim oldukça stabil olup, en fazla değişim 50–100 çevrim arasında yaklaşık 13 MPa olarak gözlemlenmiştir. Bu çevrim aralığında gözlemlenen uzama miktarı %3,42 ile %2,61 arasında değişmiştir. Bazalt fiberin kopma uzaması ise %3,29 ile %4,63 arasında gerçekleşmiş, bu uzamalara karşılık gelen gerilme değerleri ise 293–318 MPa aralığında ölçülmüştür.

Çizelge 5.10'daki verilere göre, uygulanan termal çevrim sayısı arttıkça maksimum gerilme değerinde genel bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Bu artışın en belirgin olduğu aralık 50–100 çevrim arasında olup, yaklaşık 13 MPa'lık bir fark oluşmuştur. Enerji emilimi, uzama ve elastikiyet modülü değerleri ise termal çevrim sayısına bağlı olarak düzensiz artış ve azalışlar sergilemiştir (Şekil 5.29 ve Şekil 5.30).



Şekil 5.29. Car-Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı gerilme ve uzama trendleri

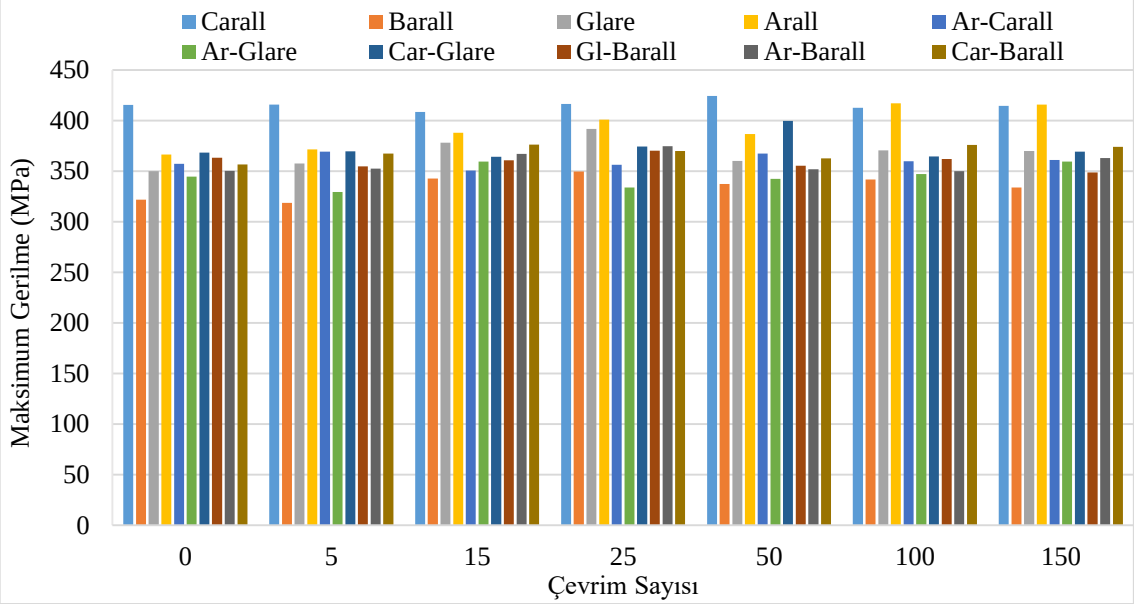


Şekil 5.30. Car-Barall malzemesinin çevrim sayısına bağlı elastikiyet modülü ve enerji emilimi trendleri

Enerji emilimi açısından değerlendirildiğinde, hibrit kompozitlerin tek fiberli kompozitlere kıyasla daha fazla dalgalanma sergilediği belirlenmiştir. Özellikle Car-Barall kompozitinde, 0–5 çevrim arasında enerji emilimi yaklaşık %21 oranında artış göstermiştir. 150 çevrim sonunda ise çevrimsiz örneklere göre maksimum gerilme değerinde %4,8, maksimum gerilme noktasındaki uzama miktarında ise %12,8 oranında artış gözlemlenmiştir. Car-Barall kompoziti, enerji emilimi bakımından tüm kompozit türleri arasında en hızlı yükseliş eğilimini sergileyerek %26,6 oranında artış göstermiştir. Ayrıca elastikiyet modülü, 150 çevrim sonunda %2 oranında yükselmiştir.

5.1.11. Tabakalı kompozitlerin çekme testi genel değerlendirmesi

2024-T3 alüminyum alaşımlı levha ile cam, karbon, bazalt ve aramid fiberlerin tekil veya kombinasyon hâlinde kullanıldığı fiber metal laminat (FML) kompozitlerde, termal çevrim işleminin çekme dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 5.31'de verilmiştir.



Şekil 5.31. FML kompozitlerde termal çevrim işlemine bağlı maksimum gerilme grafiği

Şekil 5.31'de, FML kompozitler arasında en yüksek çekme dayanımı Carall numunesinde gözlemlenmiştir. Termal çevrimsiz durumda 415,55 MPa olan çekme dayanımı, termal çevrim uygulamasıyla birlikte artış göstererek 50 çevrimde 424,39 MPa'a ulaşmıştır. Carall'ı takiben en yüksek çekme dayanımı değerine ulaşan diğer kompozitler sırasıyla 417,73 MPa ile Ar-Carall (15 çevrimde), 391,71 MPa ile Glare (25 çevrimde) ve 391,43 MPa ile Arall (5 çevrimde) olmuştur. Bu sonuçlar, belirli sayıda termal çevrimin çekme dayanımı üzerinde olumlu etkiler yaratabildiğini göstermektedir. Ancak genel olarak tüm kompozitlerde termal çevrim sayısına bağlı olarak çekme dayanımında dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Örneğin Baral kompozitinde başlangıç değeri 321,87 MPa iken 25 çevrimde 349,71 MPa'a çıkmış; Ar-Glare kompozitinde ise 344,46 MPa olan başlangıç değeri, 15 çevrimde 359,53 MPa'a ulaşmış ve 150. çevrimde bu değer 359,51 MPa seviyesinde korunmuştur. Benzer şekilde Car-Glare, Gl-Barall, Ar-Barall ve Car-Barall kompozitlerinde de termal çevrimle birlikte çekme dayanımında artış eğilimi gözlemlenmiştir.

FML kompozitlerin ilk çevrim sayılarında maksimum gerilme değerinde görece daha fazla dalgalanmalar olmuştur. Bu durum, literatürdeki bazı çalışmalarda da benzer şekilde raporlanmıştır. Eslami-Farsani vd. (2013) ile Lafarie-Frenot vd. (2016) çalışmalarında, termal çevrimlerin ilk aşamalarında malzemede ciddi yapısal değişimlerin meydana geldiği, ancak çevrim sayısı arttıkça malzemenin davranışının stabilize olduğu belirtilmiştir.

Genel olarak, çevrim sayısının artmasıyla mukavemette hafif bir artış görülse de, ilerleyen termal çevrimlerde bu artış genellikle kaybedilmektedir. 150 çevrim sonunda ise gerilme değerlerinde çoğu kompozit malzemede artış gözlemlenmiştir. Carall ve Car-Glare kompozitleri neredeyse stabil kalırken, Gl–Barall kompozitinde ise hafif bir düşüş meydana gelmiştir. Diğer yedi FML kompozitte ise termal çevrimler sonunda gerilme değerlerinde %2,1 ile %7,7 arasında iyileşmeler görülmüştür. Bu bulgular, Azghan vd. (2021), Asghar vd. (2017) ile Zhong ve Joshi (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmalara paralellik göstermektedir.

Azghan vd. (2021), bazalt ve cam takviyeli FML'lerde 55 termal çevrim sonrası en fazla %2,9 mukavemet kaybı olduğunu raporlamışlardır. Asghar vd. (2017), Carall kompozitinin Glare'ye kıyasla daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğunu ve termal çevrim sonrası mukavemet kaybının daha sınırlı olduğunu belirtmişlerdir. Zhong ve Joshi (2015) ise Glare kompozitlerin kenarlarından nemin difüze olması sonucu çekirdek yapıda zayıflama ve çekme mukavemetinde düşüş yaşandığını ifade etmişlerdir.

Yüksek sayıda termal çevrim uygulanan malzemelerde çekme dayanımındaki artış, metal alaşımının pozitif yaşlanma sertleşme davranışına (Li vd., 2016) ve epoksinin termal yaşlanmaya bağlı sertleşme ile yapışma kabiliyetindeki artışa (Müller vd., 2016) atfedilebilir; bu faktörler çekme dayanımının yükselmesine katkı sağlamaktadır. Diğer yandan, epoksi reçineler gibi matris malzemeleriyle bağlanan tabakalar, sıcaklık değişimlerine bağlı olarak farklı genleşme davranışları sergilemektedir. Bu durum, tabakalar arasındaki bağların zayıflamasına neden olabilir. Bununla birlikte, epoksinin kürleşme sürecinde oluşan artık gerilmeler, termal çevrimlerin etkisiyle çapraz bağların post-kürleşme süreciyle daha düzenli bir yapıya kavuşması sonucu azalabilir (Akbulut vd., 2016).

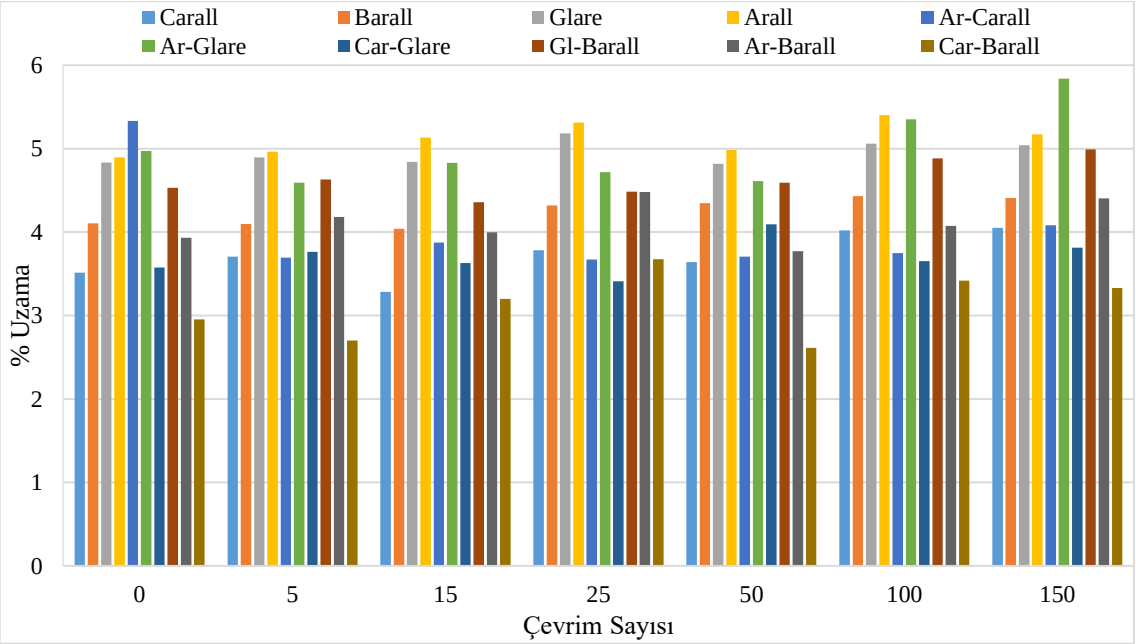
Yapılan testler sonucunda, çevrimler arasında çekme dayanımındaki küçük farklılıkların bir sebebi, ürettiğimiz FML malzemelerin dış yüzeyinde alüminyum levha bulunmasıdır. Metal tabakalı ve tabakasız kompozitlerin higrotermal koşullarda yorulmaya tabi tutulduğu çalışmalarda, higrotermal etkinin FML'ler üzerinde fiber

takviyeli kompozitlere kıyasla çok daha düşük olduğu belirtilmiştir. Bunun nedeni, reçine ile nem arasındaki temas noktalarını sınırlayan ve laminatın kenarlarını koruyan alüminyum tabakanın, FML'lerin doyma noktasındaki kütle kazancını fiber takviyeli kompozitin sadece %10'u seviyesine düşürmesidir (Botelho vd., 2007c). Ayrıca, literatürde karbon ve epoksiden oluşan bir kompozit malzemenin –50 ila 180 °C aralığında gerçekleştirilen termal çevrimlerinde, termal çevrim başına yaklaşık $0,9 \pm 0,55 \times 10^{-6}$ oranında kütle kaybı yaşandığı bildirilmiştir (Lafarie-Frenot vd., 2006).

Üretilen FML kompozitler, termal çevrim işlemi sırasında dondurucudan çıkarıldığında, metal yüzeylerde su buharının yoğunlaşarak ince bir buz tabakası oluşturduğu; oda sıcaklığına geçildiğinde ise bu buz tabakasının kompozit yüzeyinde su damlacıklarına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Etüvde ise su moleküllerinin buharlaşarak ortama karıştığı tespit edilmiştir. Her ne kadar termal çevrim işlemi sıvı ya da buhar ortamında gerçekleşmese de, soğuk ve sıcak ortamlar arasındaki döngüler sırasında malzeme yüzeyinde su buharı yoğuşmakta ve böylece higrotermal etki koşulları oluşmaktadır. Ayrıca, 2xxx serisi gibi çökelme sertleşmesi gösterebilen alüminyum alaşımlarında, termal çevrimlerin çökelme sertleşmesi mekanizması aracılığıyla mekanik özelliklere olumlu katkılar sağlayabileceği bilinmektedir. Yapay yaşlanma (T6 temper) için tipik sıcaklıklar 93 °C'den başlamakla birlikte, termal çevrimde ulaşılan 75 °C sıcaklıkta kısmi yaşlanma etkisinin ortaya çıkabileceği ifade edilmiştir (Alexopoulos vd., 2013).

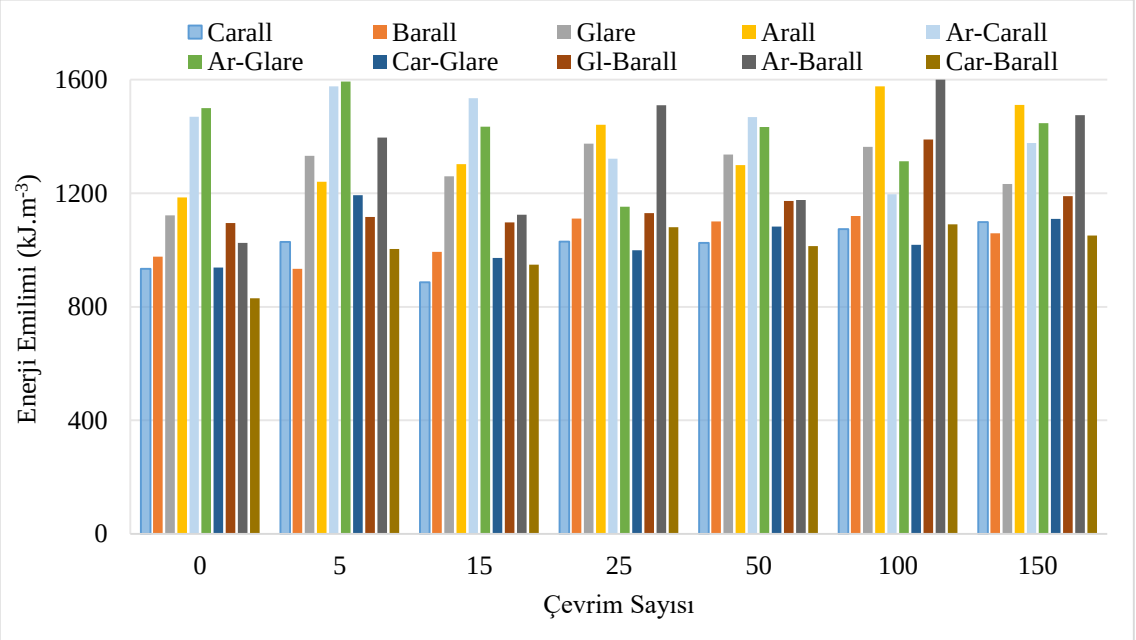
FML kompozitlerde, termal çevrim işleminin uzama üzerindeki etkisi Şekil 5.32'de verilmiştir.

Şekil 5.32'de görüldüğü üzere, FML kompozitlerde kullanılan fiber türü ve kombinasyonlarına bağlı olarak uzama değerleri %2 ile %13,5 arasında değişen oranlarda artış göstermiştir. Özellikle hibrit fiberli FML kompozitlerdeki artış, tek tip fiber içeren FML kompozitlere kıyasla daha belirgindir. Tek tip fiberli FML kompozitlerde %3,7 ile %12 arasında değişen uzama artışları kaydedilirken, hibrit FML kompozitlerde (Ar-Carall hariç) bu oran %6,4 ile %13,4 arasında değişmiştir. Çevrim sayısının artmasıyla birlikte uzama değerlerindeki artış, malzemenin deformasyon toleransını artırıcı bir etki yaratmıştır.



Şekil 5.32. FML kompozitlerde termal çevrim işlemine bağlı uzama grafiği

Eslami-Farsani vd. (2013), çalışmalarında da termal çevrim sonrası çekme mukavemetinde hafif bir azalma görülürken, maksimum gerilmenin gerçekleştiği uzama miktarının önemli ölçüde arttığı rapor edilmiştir. Bu durum, termal çevrimlerin epoksi matrisin plastikleşmesine ve dolayısıyla sünekliğin artmasına neden olduğu şeklinde açıklanmıştır. FML kompozitlerde, termal çevrim işleminin enerji emilimi üzerindeki etkisi Şekil 5.33'te verilmiştir.



Şekil 5.33. FML kompozitlerde termal çevrim işlemine bağlı enerji emilimi grafiği

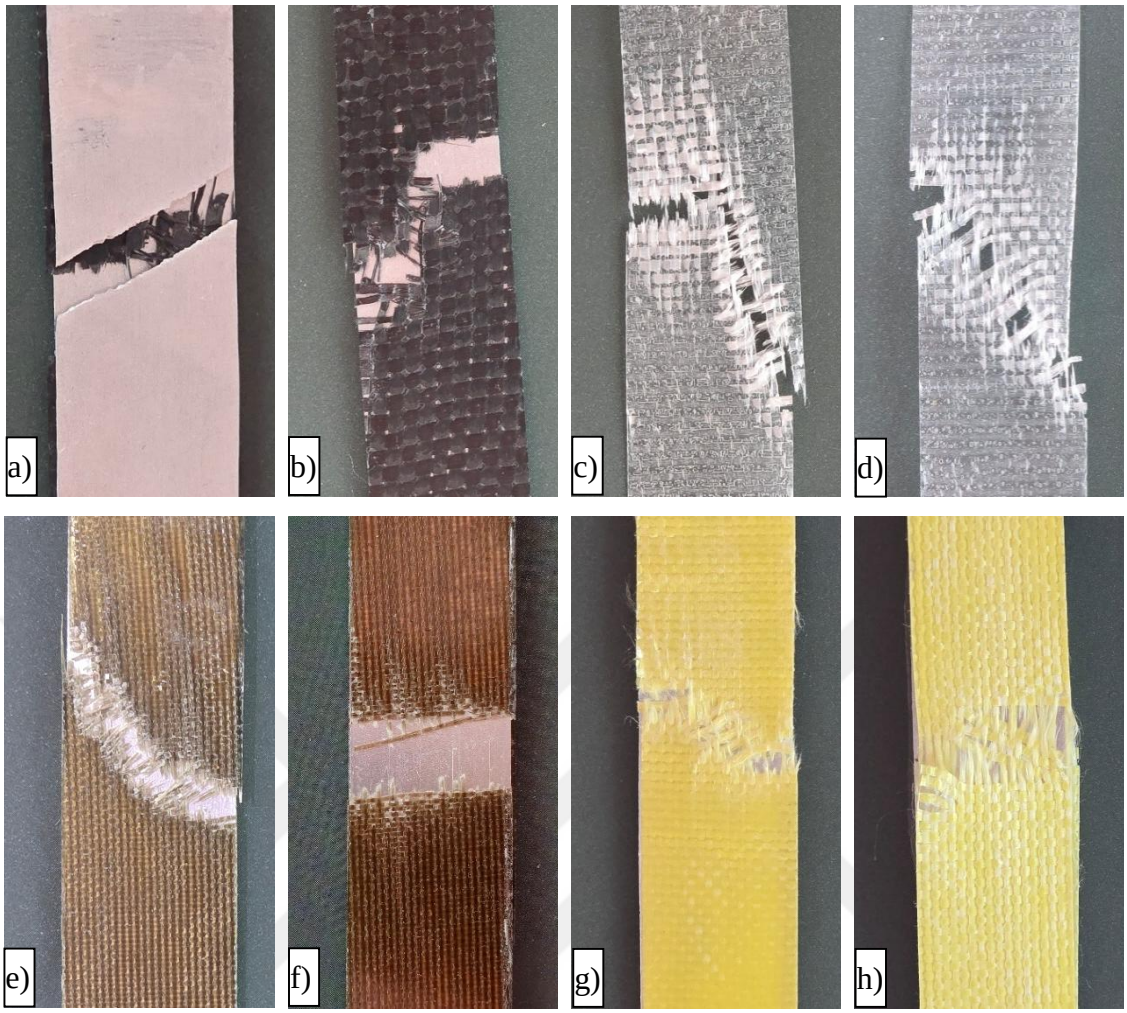
Gerilme – uzama eğrisinin altında kalan alan olarak tanımlanan enerji emilimi miktarı da, malzemenin deformasyon davranışına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Termal çevrim sayısındaki artışla birlikte, enerji emilim kapasitesinde dalgalı bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Şekil 5.33'te görüldüğü üzere, çevrimsiz numuneler karşılaştırıldığında dört farklı kompozit malzemenin enerji emilimi 1000 kJ/m^3 seviyesinin altında kalmıştır. Ancak çevrim sayısının artmasıyla birlikte bu değerlerde bir iyileşme gözlemlenmiş, 150 çevrim sonrasında tüm numuneler bu eşiğin üzerine çıkmıştır. Bu bulgular, belirli bir seviyeye kadar uygulanan termal çevrimlerin, tabakalı kompozitlerin enerji emilimi kapasitesini genel olarak artırdığını ortaya koymaktadır.

Tek tip fiber kullanılan FML kompozitlerde enerji emilimi %8,4 ile %22,3 arasında artış gösterirken; hibrit fiberli FML kompozitlerde Ar-Carall ve Ar-Glare sırasıyla %6,3 ve %1,5 oranında azalış sergilemiştir. Diğer hibrit kompozitlerde ise enerji emilimi %8,6 ile %44 arasında artmıştır. Tek tip fiberli FML kompozitlerde enerji emilimindeki değişimi büyük oranda uzama miktarındaki artış belirlerken, hibrit FML kompozitlerde ise ikinci sırada kırılan fiberin uzama miktarı belirleyici olmuştur. Zira ikinci kırılan fiberin uzama kapasitesindeki azalma ya da artış, genel enerji absorbsiyon kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Örneğin, Ar-Carall kompozitinde 150 çevrim uygulanmış numunenin maksimum gerilme değeri ve bu noktadaki uzaması, çevrimsiz örneğe göre daha yüksek olmasına rağmen, toplam enerji emilimi daha düşük ölçülmüştür. Bu durum, 150 çevrim numunesinde ikinci kırılan fiberin uzamasının, çevrimsiz örneğe kıyasla daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

5.1.12. Kırılma yüzeylerinin makro boyutta incelenmesi

Alüminyum tabakası ile karbon, aramid, cam ve bazalt fiberlerin kullanıldığı FML kompozitlerin çekme testi sonrası hasar morfolojileri Şekil 5.34'te verilmiştir. Tüm kombinasyonlarda, alüminyum katmanların yaklaşık 60° açıyla kırıldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, metal kristal yapısında meydana gelen kayma gerilmelerinin yönelimiyle ilişkilendirilmektedir (Beylergil vd., 2021; Rajkumar vd., 2014; Carrillo ve Cantwell, 2009).

Karbon ve aramid fiber içeren FML yapılarında, fiber tabakalarında önce matris çatlaması, ardından çözgü yönündeki liflerin kırılmasıyla yükleme yönüne dik doğrultuda hasar gelişimi gerçekleşmiştir. Bu hasar davranışı, karbon fiber ile epoksi matris arasındaki yüksek bağlanma mukavemetine atfedilmektedir (Rajkumar vd., 2014).



Şekil 5.34. FML kompozitlerde çekme testi sonucu oluşan hasar görüntüleri: a) Carall'da Al hasarı, b) Carall'da fiber hasarı, c) Glarede fiber hasarı, d) Hibrit FML'de, cam fiber hasarı, e) Hibrit FML'de, bazalt fiber hasarı, f) Barall'da fiber hasarı, g) Arall'da fiber hasarı ve h) Arall'da fiber hasarı

Cam ve bazalt fiber içeren tek tip fiberli FML kompozitlerde, hasar davranışı karbon ve aramid fiberli kompozitlerle benzerlik göstermiştir. Ancak, bu fiberlerin hibrit yapı içerisinde kullanılması durumunda, hasarın yükleme yönüne yaklaşık 45° açıyla ilerlediği ve hem çözgü hem de atkı yönündeki liflerin kırıldığı tespit edilmiştir.

Alüminyum tabakanın deformasyonu sırasında, epoksi arayüzey boyunca kesme kuvvetleri oluşmakta ve bu kuvvetler, özellikle hibrit kompozit yapılar içerisinde yer alan bazalt tabakasını kayma gerilmesine maruz bırakmaktadır. Bu durum nedeniyle, karbon ve aramide kıyasla daha düşük kayma dayanımına sahip olan cam ve bazalt fiberlerin, alüminyum levhadan arayüzey aracılığıyla aktarılan kayma gerilmeleri sonucunda özgün bir hasar formu sergilediği düşünülmektedir. Ayrıca, termal çevrimlerin etkisiyle fiber–alüminyum arayüzünde kalıntı gerilmelerin oluşabileceği ve bu gerilmelerin kırılma mekanizmasını etkileyerek kırılma açısında farklılıklara yol açabileceği

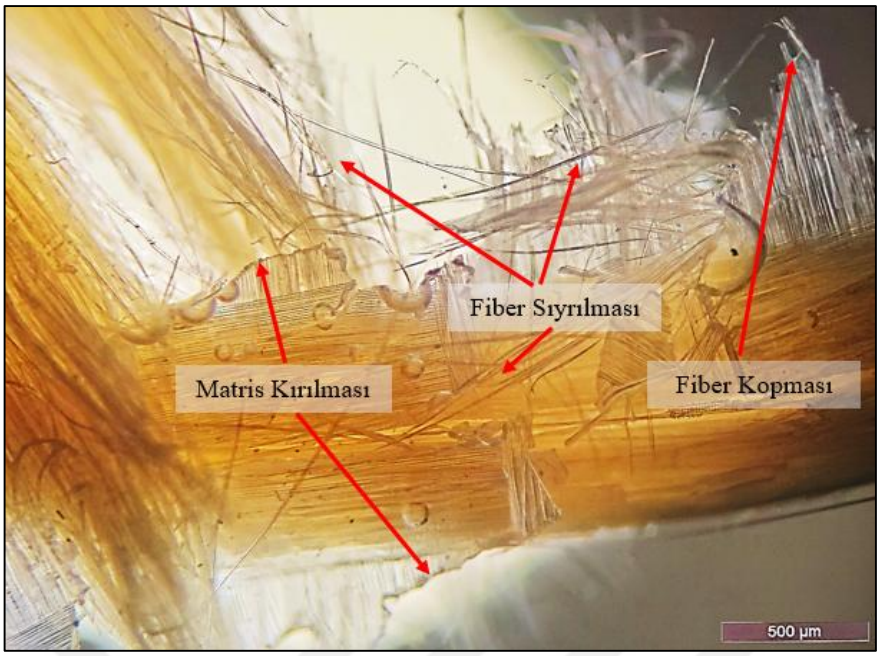
değerlendirilmektedir. Bu durum, bazı hibrit FML kompozitlerde liflerin kırılma yönündeki farklılıkların yani bazen doğrusal (0°), bazen yaklaşık 45° açılı kırılmaların oluşmasına sebep olabilir. Bu kırılma davranışı aşağıdaki mekanizmalar ile açıklanabilir.

1. Çekme kuvveti uygulandığında metal tabaka elastik deformasyona uğrar.
2. Oluşan gerilme, epoksi matrisi aracılığıyla fiber tabakasına iletilir.
3. Fiber tabakası, aynı anda hem eksenel çekme gerilmesine hem de arayüzeyden aktarılan kayma gerilmesine maruz kalır.
4. Nihai kırılma açısı, bu iki gerilme türünden hangisinin baskın olduğuna bağlı olarak şekillenir.
   - Çekme gerilmesinin baskın olduğu durumlarda liflerde doğrusal (0°) kırılma;
   - Kayma gerilmesinin baskın olduğu durumlarda ise yaklaşık 45°'lik açılarla kırılma meydana gelmesi beklenir.

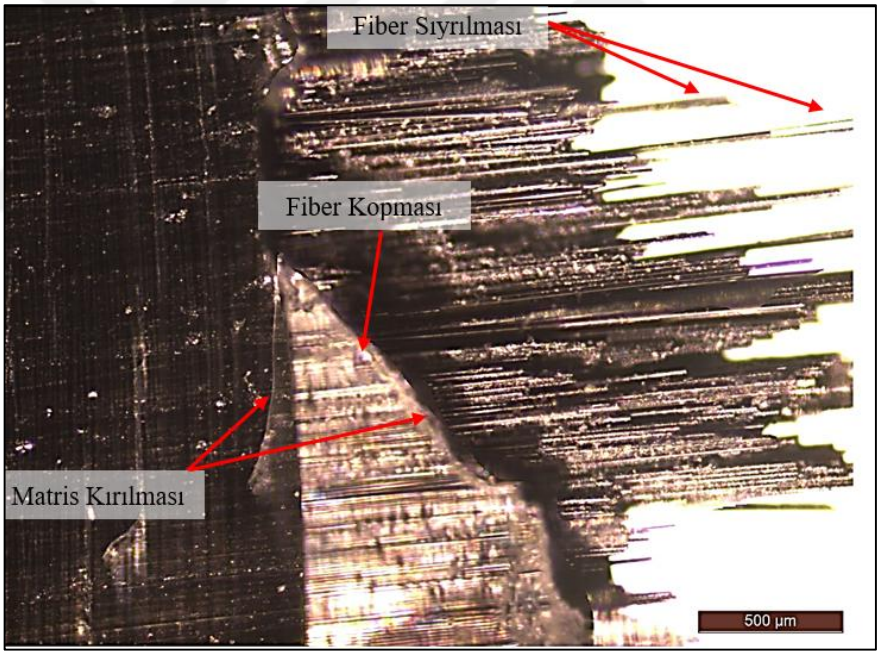
5.1.13. Kırılma yüzeylerinin mikro boyutta incelenmesi

Kırılma davranışını daha ayrıntılı analiz edebilmek amacıyla, numunelerin kırılma yüzeyleri mikroskobik ölçekte incelenmiş; fiber-matris etkileşimleri ile hasar mekanizmaları detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu çerçevede, aramid, karbon, bazalt ve cam fiber içeren numunelere uygulanan çekme testleri sonrasında oluşan hasar bölgelerine ait mikroyapısal görüntüler sırasıyla Şekil 5.35–5.38'de verilmiştir.

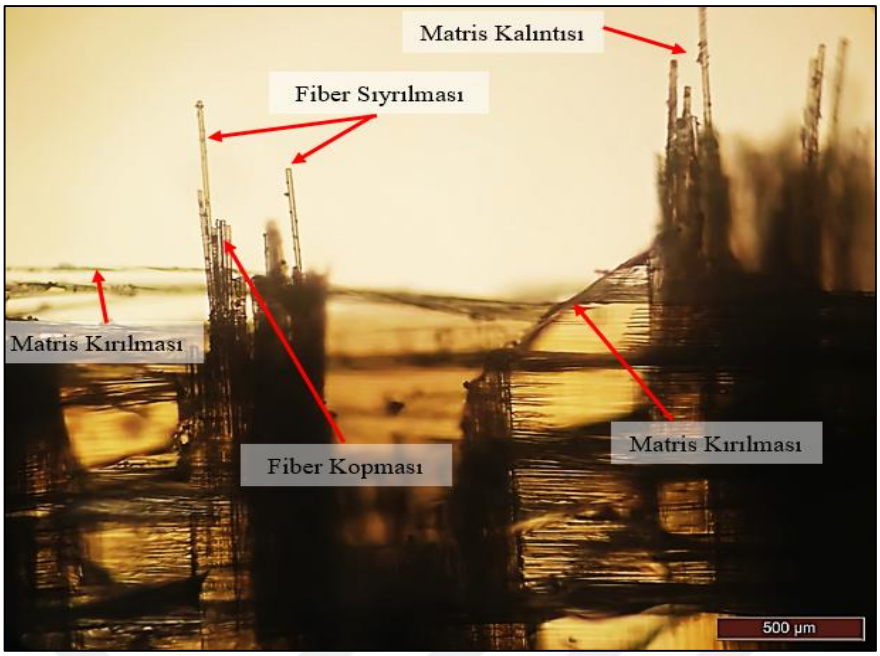
Mikroskop görüntüleri incelendiğinde, dört farklı fiber türünün kırılma bölgelerinde genel olarak benzer hasar mekanizmalarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu hasar mekanizmaları; fiber kırılması, matris kırılması ve fiber sıyrılması şeklinde sınıflandırılabilir. Ancak fiberler arasında en belirgin fark, sıyrılma miktarındaki değişkenlikte ortaya çıkmıştır. Özellikle aramid fiberlerde, hasar bölgesinde belirgin düzeyde fiber sıyrılması gözlemlenmiş olup, bu durum söz konusu fiberlerin özgün yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır.



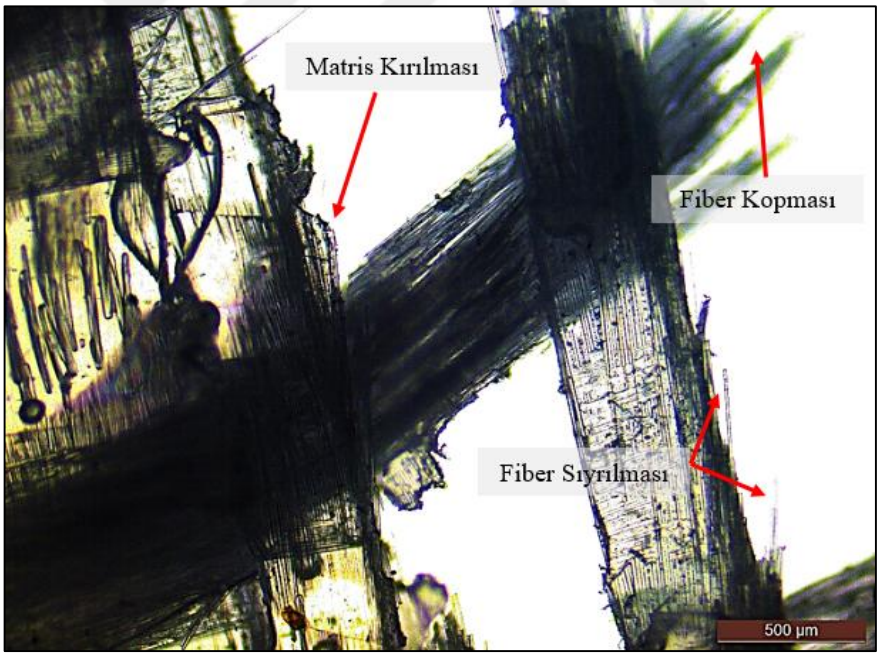
Şekil 5.35. FML kompozitlerde aramid fiberin kırılma bölgeleri



Şekil 5.36. FML kompozitlerde karbon fiberin kırılma bölgeleri



Şekil 5.37. FML kompozitlerde bazalt fiberin kırılma bölgeleri



Şekil 5.38. FML kompozitlerde cam fiberin kırılma bölgeleri

Nitekim literatürde 'mikrofiberleşme' olarak tanımlanan ve aramid fiberlerin boyuna yönde liflenerek ayrışması şeklinde gerçekleşen bu mekanizma, fiber-matris ara yüzeyinden ayrılmayı kolaylaştırmakta ve sıyrılma tipi hasarın daha baskın hale gelmesine neden olmaktadır (Hudspeth vd., 2015). Bu bağlamda, aramid fiberlerin

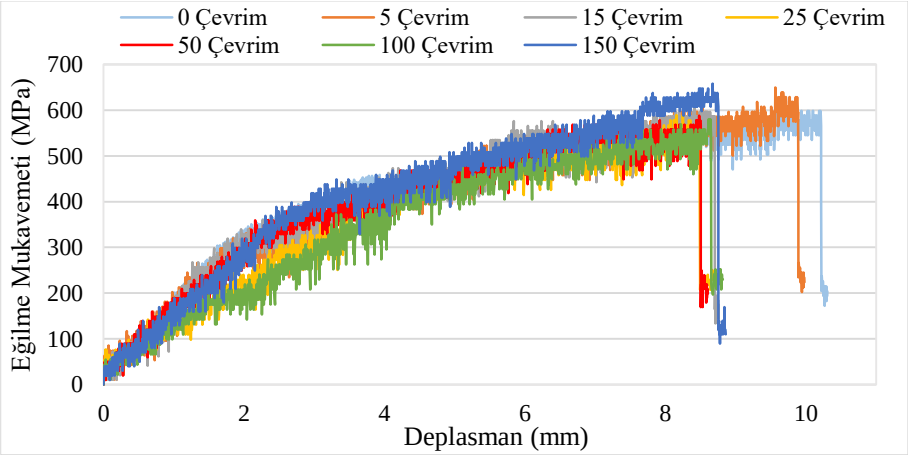
kırılma sonrası sergilediği mikroyapısal davranışın, diğer fiber türlerine kıyasla daha kompleks bir hasar gelişimi sunduğu söylenebilir.

5.2. Eğilme Testi Sonuçları

Eğilme testi, on farklı tabakalı kompozit malzeme üzerinde uygulanmış ve elde edilen veriler, termal çevrim uygulamasının mekanik performans üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla, çevrime maruz bırakılan numunelerle birlikte grup hâlinde değerlendirilmiştir. Her bir FML kompozite ait eğilme test sonuçları, malzeme türüne göre alt başlıklar hâlinde sunulmuş; böylece farklı kompozit yapıların termal çevrim sonrası eğilme davranışları ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Öte yandan, 'Eğilme testi genel değerlendirmesi' başlığı altında ise, tüm kompozit sistemler karşılaştırmalı olarak ele alınarak, genel eğilimler ve performans farkları tartışılmıştır.

5.2.1. Carall malzemesine ait eğilme testi sonuçları

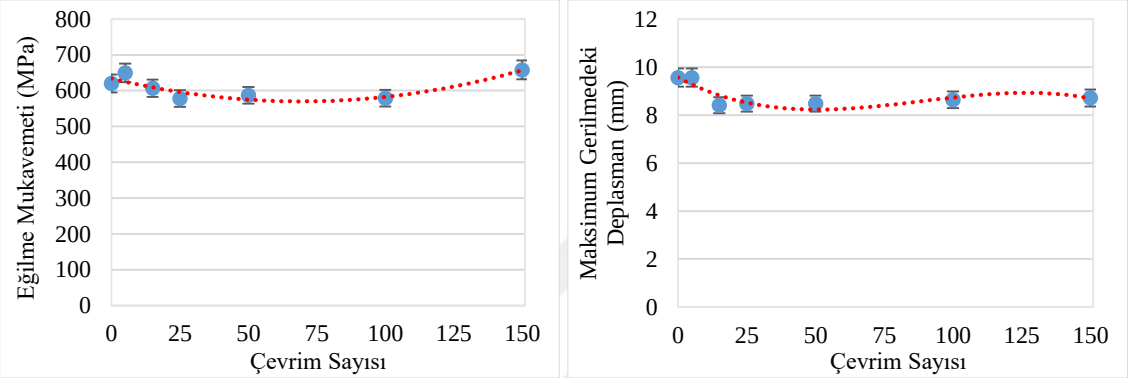
Carall kompozit malzemesine uygulanan termal çevrim öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen eğilme testine ait eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri Şekil 5.39'da, bu teste ait sayısal veriler ise Çizelge 5.11'de verilmiştir. Ayrıca, çevrim sayısına bağlı olarak elde edilen maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri de Şekil 5.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 5.39. Carall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri

Çizelge 5.11. Termal çevrime bağlı Carall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri

Çevrim Sayısı	*Eğilme Mukavemeti (MPa)*	*Deplasman (mm)*
0	619	9,51
5	649	9,57
15	606	8,42
25	578	8,48
50	587	8,48
100	579	8,64
150	657	8,71



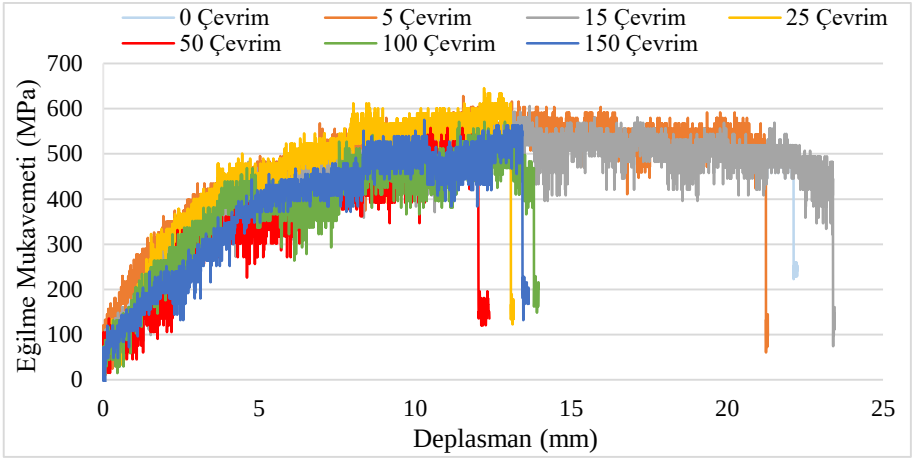
Şekil 5.40. Carall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri

Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'da gösterilen grafikler ile Çizelge 5.11'de sunulan sayısal veriler incelendiğinde, Carall kompozitinin maksimum eğilme mukavemeti değerlerinin termal çevrim sayısındaki artışa bağlı olarak önce artış, ardından düşüş ve tekrar artış eğilimi sergilediği gözlemlenmiştir. 150 çevrim sonunda elde edilen maksimum eğilme mukavemeti, 5 çevrim uygulanmış numuneye kıyasla yaklaşık %1,2, çevrimsiz numuneye kıyasla ise yaklaşık %6,1 oranında artış göstermiştir. Trend analizine göre, Carall kompoziti termal çevrimler karşısında başlangıçta bir dayanım kaybı yaşamış, ancak daha yüksek çevrim sayılarında bu kaybı telafi ederek mekanik özelliklerinde toparlanma eğilimi göstermiştir. Öte yandan, maksimum gerilme anındaki deplasman değerlerinin çevrim sayısı arttıkça azalma eğilimi sergilediği belirlenmiştir.

5.2.2. Barall malzemesine ait eğilme testi sonuçları

Barall kompozit malzemesine uygulanan termal çevrimlerin öncesinde ve sonrasında gerçekleştirilen eğilme testine ait eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri Şekil 5.41'de verilmiştir. Bu testlere ilişkin sayısal veriler Çizelge 5.12'de sunulmuş olup,

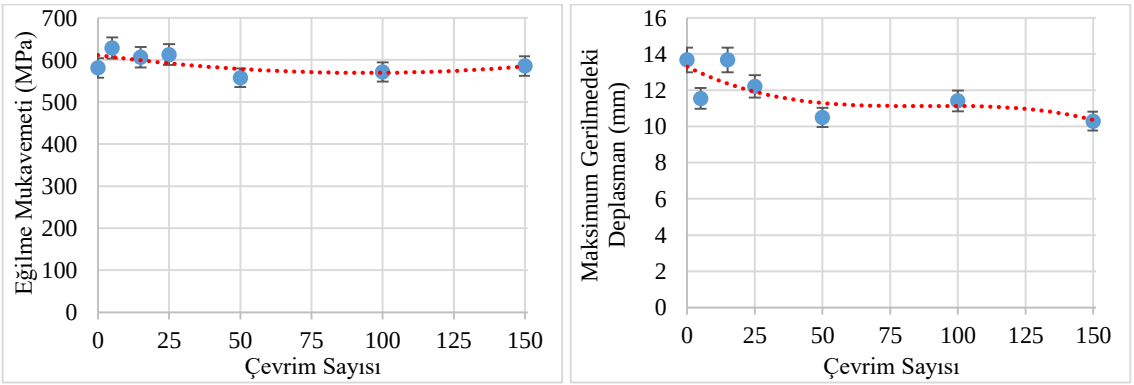
çevrim sayısına bağlı olarak değişen maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerlerine ait trend eğrileri ise Şekil 5.42'de gösterilmiştir.



Şekil 5.41. Barall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri

Çizelge 5.12. Termal çevrime bağlı Barall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri

Çevrim Sayısı	*Eğilme Mukavemeti (MPa)*	*Deplasman (mm)*
0	580	13,7
5	628	11,5
15	605	13,7
25	612	12,2
50	557	10,5
100	571	11,4
150	585	10,3



Şekil 5.42. Barall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri

Şekil 5.41'deki çevrimsiz (0 çevrim), 5 ve 15 çevrim uygulanan numunelere ait grafikler incelendiğinde, fiber veya metal tabaka hasarının ancak yüksek deplasman seviyelerinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu numunelerde maksimum eğilme mukavemetine ulaşıldığında tam bir kırılma oluşmamış, bunun yerine arayüz

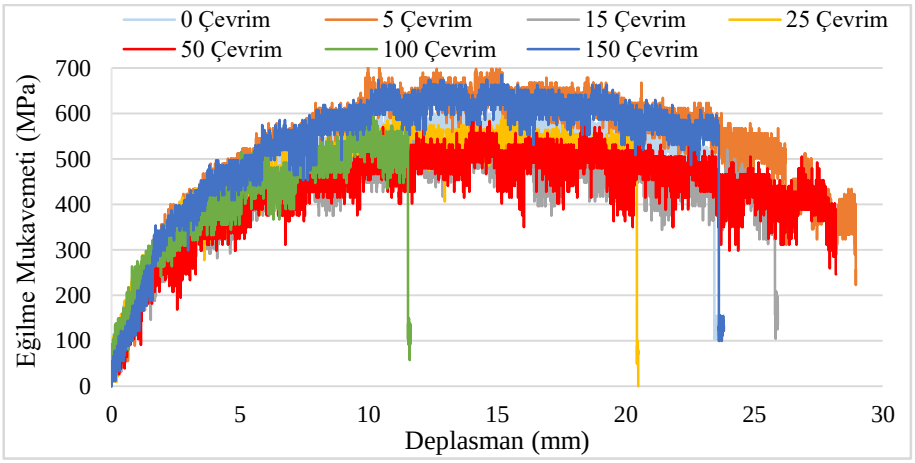
bölgelerinde delaminasyon türünde hasarlar ortaya çıkmıştır. Testin ilerleyen aşamalarında ise fiberlerde bölgesel kırılmalar meydana gelmiş ve bu durum eğilme mukavemetinde belirgin bir azalmaya neden olmuştur.

Termal çevrim sayısı arttıkça kırılmanın daha dar bir deplasman aralığında (12,3 mm – 13,9 mm) gerçekleştiği görülmüştür. Bu durumun, termal çevrimlerin epoksi matrisin yapısında yer alan çapraz bağların post-kürleşme etkisiyle daha düzenli bir hale gelmesine bağlı olarak meydana geldiği değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, termal çevrimlerin malzemenin mikroyapısal bütünlüğünü yeniden yapılandırarak mekanik davranış üzerinde doğrudan etkili olduğu söylenebilir.

Şekil 5.42'deki trend analizine göre, çevrim sayısındaki artışla birlikte maksimum eğilme dayanımında başlangıçta bir azalma, ardından ise hafif bir toparlanma eğilimi gözlemlenmiştir. Buna karşılık, maksimum eğilme mukavemeti anındaki deplasman değerleri ise çevrim sayısının artmasıyla birlikte genel olarak azalma eğilimi sergilemiştir. Özellikle 150 çevrim sonunda, maksimum deplasman değerinde yaklaşık %25 oranında bir düşüş tespit edilmiştir.

5.2.3. Glare malzemesine ait eğilme testi sonuçları

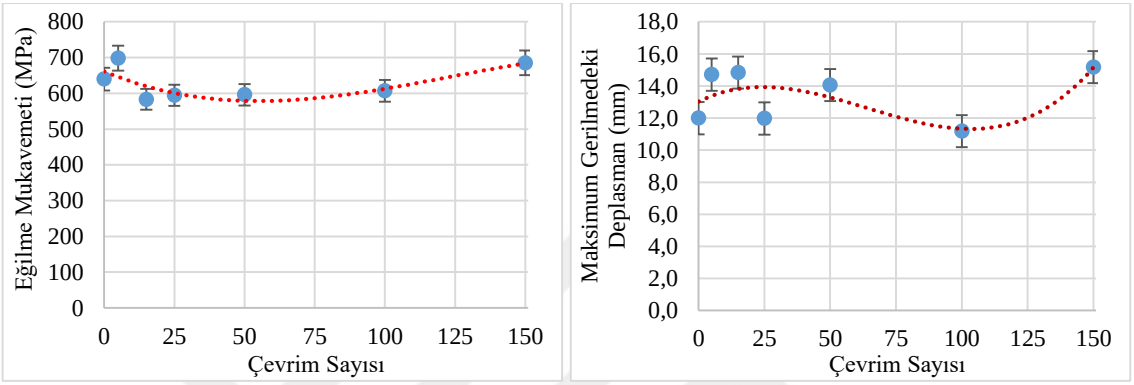
Glare kompozit malzemesine uygulanan termal çevrimler öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen eğilme testlerinden elde edilen eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri Şekil 5.43'te sunulmaktadır. İlgili testlerin sayısal sonuçları Çizelge 5.13'te verilmiş olup, çevrim sayısına bağlı olarak değişen maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerlerine ait trend eğrileri ise Şekil 5.44'te yer almaktadır.



Şekil 5.43.1 Glare malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri

Çizelge 5.13. Termal çevrime bağlı Glare malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri

Çevrim Sayısı	*Eğilme Mukavemeti (MPa)*	*Deplasman (mm)*
0	640	12,0
5	698	14,7
15	583	14,8
25	594	12,0
50	596	14,1
100	607	11,2
150	685	15,2



Şekil 5.44. Glare malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri

Şekil 5.43'te sunulan grafik ve Çizelge 5.13'te yer alan sayısal veriler doğrultusunda yapılan değerlendirmeler sonucunda, termal çevrimlerin Glare kompozit malzemenin mekanik davranışları üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu tespit edilmiştir. Çevrim sayısının artmasına bağlı olarak eğilme mukavemetinde başlangıçta bir azalma eğilimi gözlemlenmiş, daha yüksek çevrim sayılarında ise kısmi bir toparlanma eğilimi ortaya çıkmıştır.150 çevrim sonunda maksimum eğilme gerilmesi %7 oranında artış göstermiştir. 5 çevrim uygulanan numune ile karşılaştırıldığında ise, 150 çevrim sonunda eğilme mukavemetinde %1,9'luk bir azalma, buna karşılık deplasman değerinde %3,4'lük bir artış meydana gelmiştir.

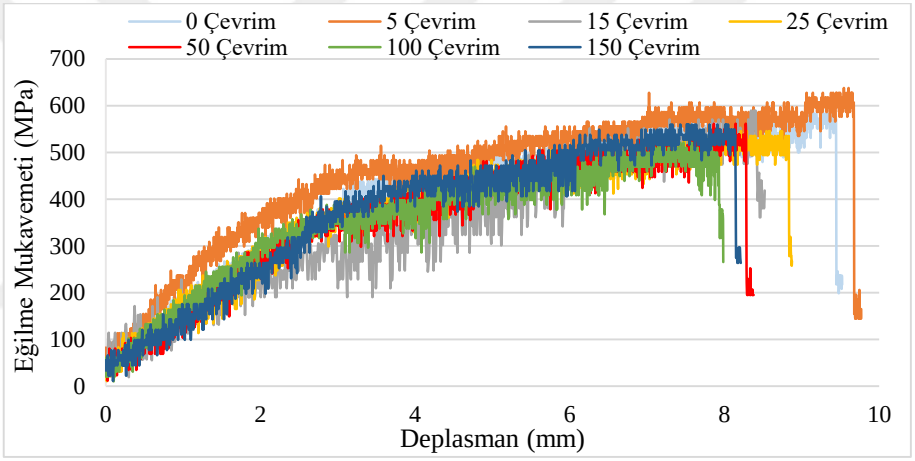
Şekil 5.44'te yer alan eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri incelendiğinde, maksimum gerilme anındaki deplasman değerlerinin çevrim sayısındaki artışa bağlı olarak başlangıçta azalma, ardından ise artış eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle 150 çevrim sonunda, başlangıç değerine kıyasla deplasmanda %26 oranında bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir.

Glare kompozit numunelerin büyük çoğunluğunda (100 çevrim numunesi hariç), maksimum eğilme gerilmesinin ardından delaminasyon hasarı gerçekleşmiş ve bunu takiben yüksek deplasman seviyelerinde kırılma hasarı meydana gelmiştir. Özellikle 5 ve

50 çevrim uygulanan numunelerde belirgin bir kırılma noktası gözlenmemiştir. Bu durumun, cam fiberlerin hasar mekanizmasının matris çatlaması ve fiber sıyrılması gibi aşamalı olarak gelişmesine bağlı olduğu değerlendirilmektedir.

5.2.4. Arall malzemesine ait eğilme testi sonuçları

Arall kompozit malzemesi üzerinde, termal çevrim öncesi ve sonrasında uygulanan eğilme testlerinden elde edilen eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri Şekil 5.45'te sunulmuştur. Bu testlere ait nicel veriler Çizelge 5.14'te yer almakta, çevrim sayısına bağlı olarak değişen maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman eğilimlerini gösteren trend grafiklerine ise Şekil 5.46'da yer verilmektedir.



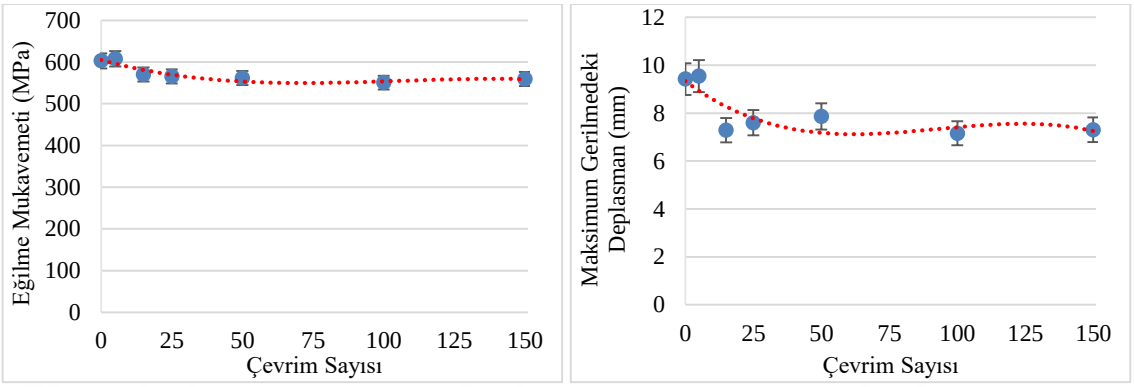
Şekil 5.45. Arall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri

Çizelge 5.14. Termal çevrime bağlı Arall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri

Çevrim Sayısı	*Eğilme Mukavemeti (MPa)*	*Deplasman (mm)*
0	603	9,4
5	608	9,5
15	570	7,3
25	565	7,6
50	562	7,9
100	551	7,2
150	560	7,3

Arall kompozit malzemelerinde gerçekleştirilen termal çevrim deneyleri sonucunda, çevrim sayısının artmasıyla birlikte eğilme mukavemetinde bir azalma eğilimi gözlemlenmiş, bu azalmanın ardından mukavemet değerlerinde nispeten yatay bir seyir izlenmiştir. Özellikle 150 çevrim sonrasında, maksimum eğilme mukavemetinde yaklaşık %7,7 oranında bir düşüş meydana gelmiştir. Eğilme davranışına ilişkin eğilim

analizi, maksimum gerilme anındaki deplasman değerlerinin çevrim sayısındaki artışa paralel olarak azaldığını ortaya koymuştur. Bu kapsamda, 150 çevrim sonunda maksimum deplasman değerinde %22,3 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

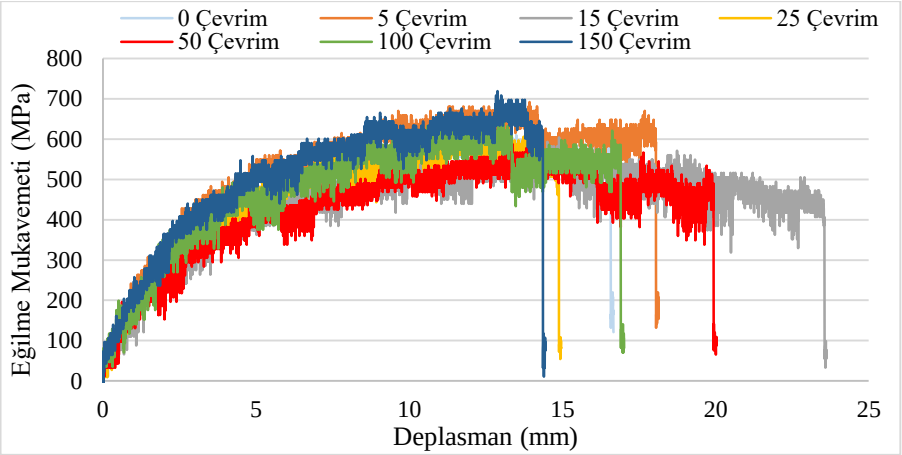


Şekil 5.46. Arall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri

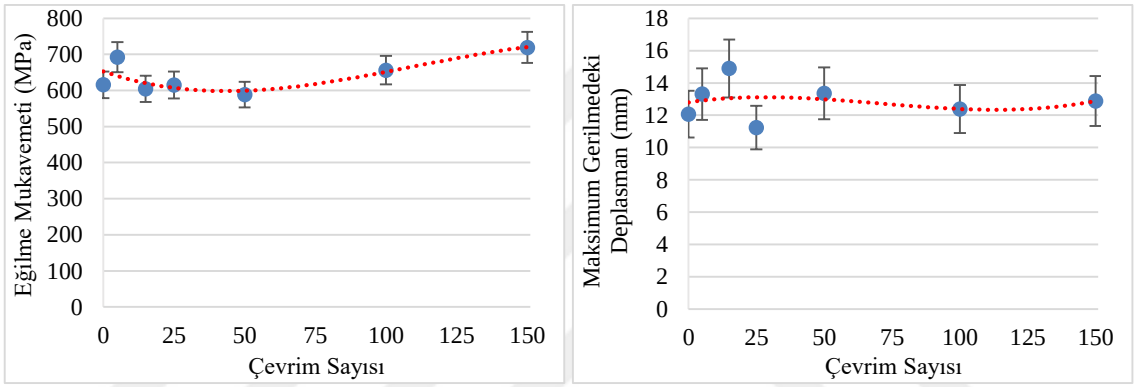
Farklı türdeki fiberlerle takviye edilmiş kompozit malzemelerin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri birlikte değerlendirildiğinde, Arall ve Carall kompozitlerinin benzer bir mekanik davranış sergilediği görülmüştür. Bu iki malzeme, maksimum gerilme noktasında kırılma gerçekleştirerek gevrek kırılma karakteristiği göstermiştir. Buna karşılık, Barall ve Glare kompozitleri maksimum gerilme noktasından sonra deformasyon kapasitesini bir süre daha koruyarak daha fazla uzama sergilemiş ve sünek davranışa sahip olduklarını ortaya koymuştur. Bu bağlamda, malzeme yapısında kullanılan fiber türünün termal çevrim sonrası eğilme davranışı üzerinde önemli bir rol oynadığı ve kompozitin kırılma mekanizmasına doğrudan etki ettiği sonucuna varılmıştır.

5.2.5. Ar-Carall malzemesine ait eğilme testi sonuçları

Farklı termal çevrim koşullarına maruz bırakılan Ar-Carall kompozit malzemeleri, eğilme dayanımı üzerindeki etkilerin belirlenmesi amacıyla eğilme testine tabi tutulmuştur. Bu testler sonucunda elde edilen eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri Şekil 5.47'de, maksimum eğilme gerilmesi ile ilgili deplasman değerlerinin çevrim sayısına bağlı olarak gösterdiği değişimi yansıtan trend eğrileri ise Şekil 5.48'de verilmiştir. Eğilme testi neticesinde elde edilen nicel veriler ayrıntılı şekilde Çizelge 5.15'te tablo formatında sunulmuştur.



Şekil 5.47. Ar-Carall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri



Şekil 5.48. Ar-Carall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri

Çizelge 5.15. Termal çevrime bağlı Ar-Carall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri

Çevrim Sayısı	*Eğilme Mukavemeti (MPa)*	*Deplasman 1 (mm)*	*Deplasman 2 (mm)*
0	616	12,1	16,7
5	692	13,3	18,1
15	604	14,9	23,6
25	615	11,2	15,0
50	589	13,4	20,0
100	656	12,4	17,0
150	719	12,9	14,4

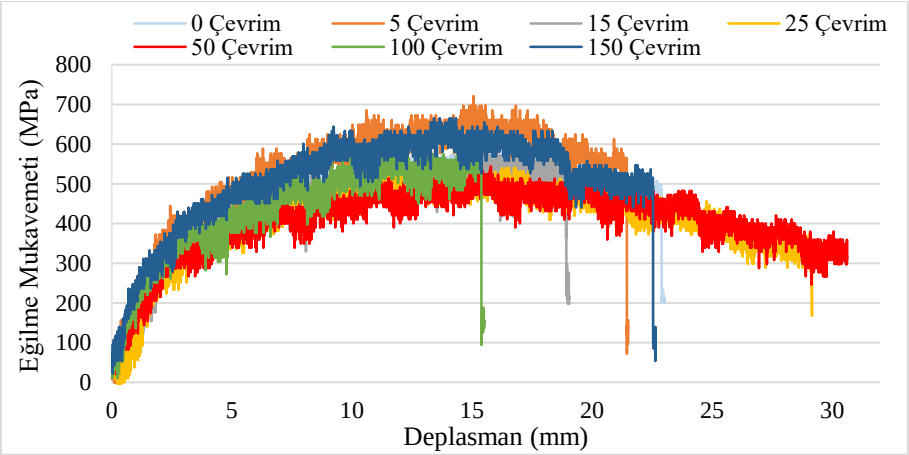
Ar-Carall kompozit malzemelerinde gerçekleştirilen eğilme testleri sonucunda, 150 termal çevrim sonrasında elde edilen eğri incelendiğinde, hem maksimum eğilme gerilmesinde hem de bu gerilmenin oluştuğu deplasman miktarında artış eğilimi gözlemlenmiştir. 150 çevrim sonucunda, çevrime maruz kalmamış numuneye kıyasla maksimum eğilme mukavemetinde %7,2 oranında, ilgili deplasman değerinde ise %22,4

oranında artış elde edilmiştir. Bu durum, termal çevrimlerin hibrit yapıya sahip kompozitler üzerinde bazı olumlu etkiler yaratabileceğini ortaya koymaktadır.

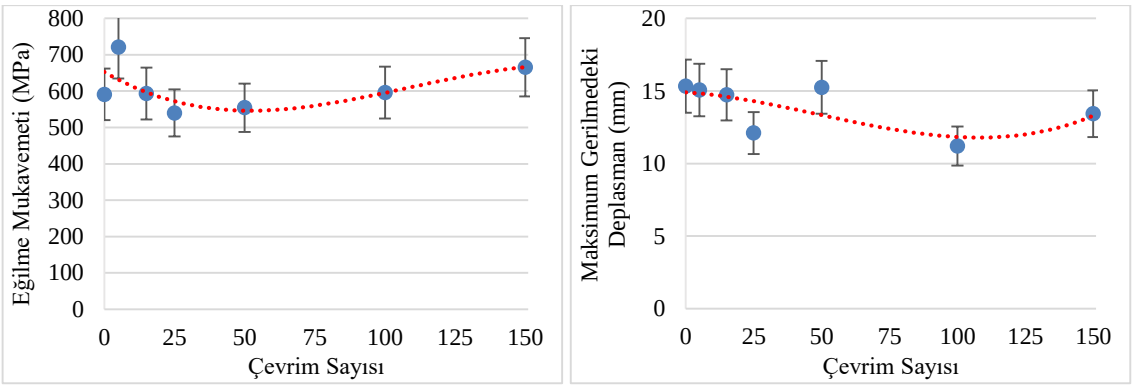
Tek tip fiber içeren kompozitlerin aksine, hibrit fiber takviyeli Ar-Carall kompozit malzemelerde farklı uzama karakteristiklerine sahip iki ayrı fiberin bir arada bulunması nedeniyle, eğilme testi sırasında iki farklı kırılma noktası oluştuğu gözlemlenmiştir. İlk kırılmanın ardından, henüz kırılmamış olan fiberin genişlik/kalınlık oranının daha yüksek olması nedeniyle, nihai kırılmanın meydana geldiği deplasman değeri daha yüksek gerçekleşmiştir. Yalnızca Arall ve Carall fiberlerinin kullanıldığı kompozitlerde maksimum deplasman sırasıyla 9,4 mm ve 9,6 mm seviyelerinde kalırken, bu fiberlerin birlikte kullanıldığı Ar-Carall hibrit kompozitinde nihai kırılma, 14,4 mm ile 23,6 mm aralığında gerçekleşmiştir. Bu farklılık, hibrit fiber takviyeli kompozitlerin daha sünek davranış sergilemesine, daha yüksek enerji soğurma kapasitesine ve artan deformasyon toleransına sahip olmasına olanak tanımaktadır.

5.2.6. Ar-Glare malzemesine ait eğilme testi sonuçları

Ar-Glare kompozit malzemelerine uygulanan eğilme testleri sonucunda elde edilen eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri ile maksimum eğilme gerilmesi ve bu gerilmeye karşılık gelen deplasman değerlerinin termal çevrim sayısına bağlı değişimini gösteren trend eğrileri sırasıyla Şekil 5.49 ve Şekil 5.50'de sunulmuştur. Eğilme testlerinden elde edilen sayısal veriler ise ayrıntılı olarak Çizelge 5.16'da tablo formatında verilmiştir.



Şekil 5.49. Ar-Glare malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri



Şekil 5.50. Ar-Glare malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri

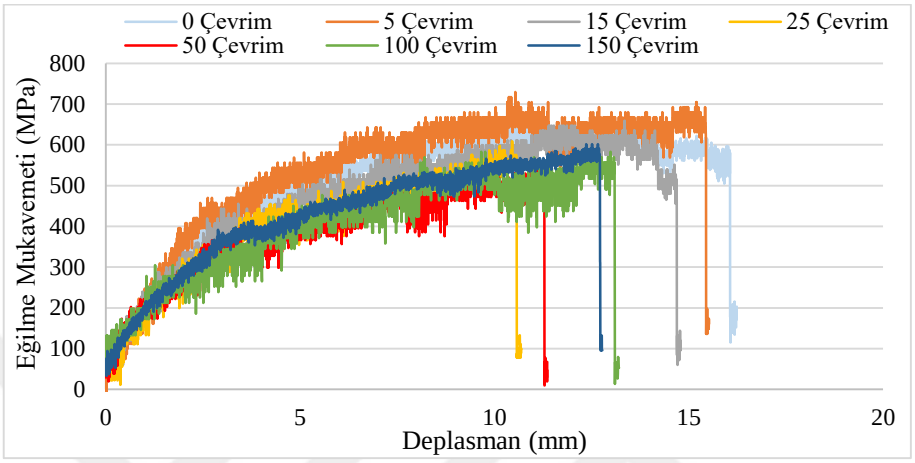
Çizelge 5.16. Termal çevrime bağlı Ar-Glare malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri

Çevrim Sayısı	*Eğilme Mukavemeti (MPa)*	*Deplasman 1 (mm)*	*Deplasman 2 (mm)*
0	591	15,3	23,0
5	721	15,1	21,5
15	593	14,7	19,1
25	540	12,1	29,3
50	554	15,3	30,6
100	596	11,2	15,5
150	666	13,4	22,7

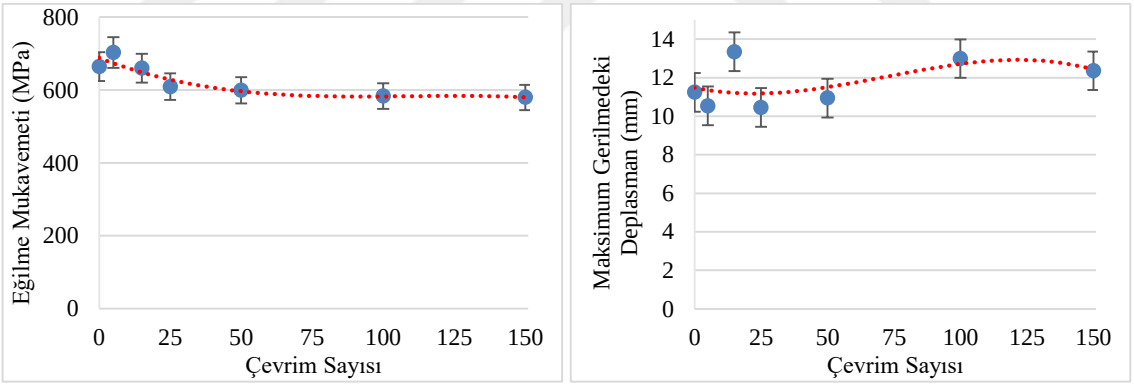
Ar-Glare kompozit malzemelerine uygulanan termal çevrimler sonucunda elde edilen eğilme eğrileri incelendiğinde, maksimum eğilme gerilmesi değerlerinde başlangıçta bir azalma eğilimi gözlemlenmiş, bu durumu çevrim sayısının artmasıyla birlikte kademeli bir artış takip etmiştir. Deplasman değerlerinde ise ilk etapta bir düşüş yaşanmış, sonrasında ise hafif düzeyde bir toparlanma eğilimi ortaya çıkmıştır. 150 çevrim sonucunda, çevrimsiz numunelere kıyasla maksimum eğilme mukavemetinde %12,6 oranında bir artış, buna karşın deplasman değerinde %12,5 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Maksimum gerilme anında elde edilen deplasman değerlerinin görece yüksek oluşu, bu noktada belirgin bir kırılmanın meydana gelmemesi ve bazı numunelerde kırılma davranışının açıkça gözlemlenememesi, cam fiber takviyesinin malzemenin yapısal bütünlüğüne olan katkısını ve deformasyon direncini artırıcı etkisini ortaya koymaktadır.

5.2.7. Car-Glare malzemesine ait eğilme testi sonuçları

Car-Glare kompozit malzemelerine uygulanan eğilme testleri sonucunda elde edilen grafiksel gösterimler ve ilgili sayısal veriler sırasıyla Şekil 5.51, Şekil 5.52 ve Çizelge 5.17'de sunulmuştur.



Şekil 5.51. Car-Glare malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri



Şekil 5.52. Car-Glare malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri

Çizelge 5.17. Termal çevrime bağlı Car-Glare malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri

Çevrim Sayısı	*Eğilme Mukavemeti (MPa)*	*Deplasman 1 (mm)*	*Deplasman 2 (mm)*
0	664	11,2	16,1
5	703	10,5	15,4
15	659	13,4	14,7
25	609	10,5	10,6
50	599	10,9	11,3
100	583	13,0	13,1
150	579	12,4	12,7

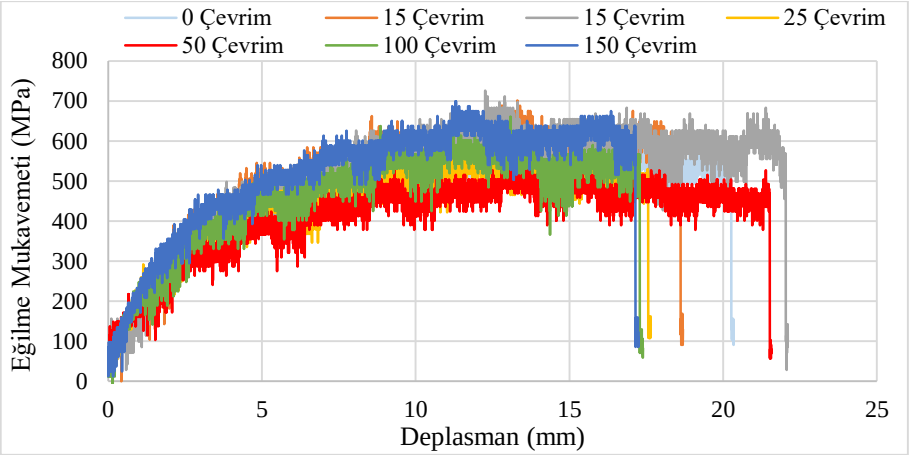
Karbon ve cam fiberlerin birlikte kullanımıyla elde edilen Car-Glare kompozit malzemesinin eğilme testi sonuçları, termal çevrim öncesi ve sonrasındaki eğilme davranış değişimlerini ortaya koymaktadır. Termal çevrim sayısındaki artışla birlikte eğilme mukavemetinde genel olarak bir azalma eğilimi gözlemlenmiş ve 150 çevrim sonunda maksimum eğilme gerilmesinde anlamlı bir düşüş meydana gelmiştir. Deplasman değerleri incelendiğinde ise, çevrim sayısının başlangıçta hafif bir azalmaya neden olduğu, ancak çevrim sayısı arttıkça bu değerde yeniden bir artış eğiliminin oluştuğu görülmektedir. Nitekim, 150 termal çevrim sonunda çevrimsiz numuneye kıyasla maksimum eğilme mukavemetinde %12,8 oranında bir azalma, buna karşılık deplasman miktarında %10,7 oranında bir artış kaydedilmiştir.

Maksimum gerilme noktasında elde edilen deplasman değerinin görece yüksek oluşu ve bazı numunelerde belirgin bir kırılma davranışının gözlenmemesi, cam fiberin sünek davranış gösterme potansiyeline işaret etmektedir. Her ne kadar Arall ve Carall kompozit malzemelerinin eğilme eğrileri benzer bir kırılma karakteristiği sergilese de, Ar-Glare ve Car-Glare kompozitleri arasında farklılık dikkat çekmektedir. Bu durum, karbon fiberin yüksek mukavemet özelliği nedeniyle kırılma anında yapıda bulunan cam fiberin yeterli uzamaya fırsat bulamadan kırılmasına neden olmasından kaynaklanabilir. Bu bağlamda, Ar-Glare kompozitlerinde bazı eğrilerde kırılma gözlenmezken, Car-Glare kompozitlerinin tüm eğrilerinde belirgin kırılma davranışları tespit edilmiştir.

5.2.8. Gl-Barall malzemesine ait eğilme testi sonuçları

Gl-Barall kompozitine uygulanan termal çevrimlerin ardından gerçekleştirilen eğilme testlerine ait eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri Şekil 5.53'te gösterilmiştir. Bu testlere ilişkin sayısal veriler Çizelge 5.18'de bulunmakta, çevrim sayısına bağlı olarak ortaya çıkan maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman eğilimleri ise Şekil 5.54'te grafiksel olarak sunulmuştur.

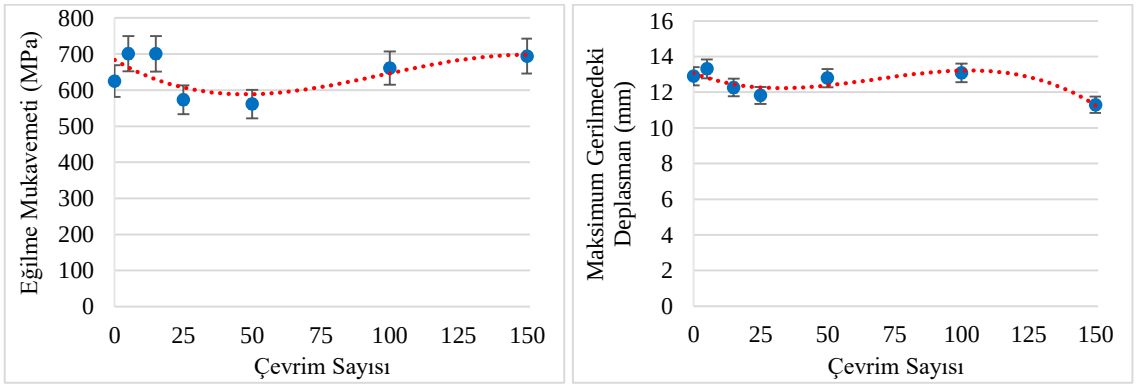
Cam ve bazalt fiberlerin hibritlenmesiyle elde edilen Gl-Barall kompozit malzemesinin eğilme testi eğrileri incelendiğinde, artan termal çevrim sayısıyla birlikte eğilme dayanımında başlangıçta bir düşüş gözlemlenmiş, bunu takiben bir artış eğilimi meydana gelmiştir. Deplasman değerleri ise çevrim sürecine bağlı olarak önce azalmış, ardından artmış ve yeniden bir azalma göstererek dalgalı bir seyir izlemiştir.



Şekil 5.53. Gl-Barall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri

Çizelge 5.18. Termal çevrime bağlı Gl-Barall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri

Çevrim Sayısı	*Eğilme Mukavemeti (MPa)*	*Deplasman 1 (mm)*	*Deplasman 2 (mm)*
0	625	12,9	20,3
5	701	13,3	18,7
15	701	12,3	22,1
25	573	11,8	17,7
50	561	12,8	21,6
100	661	13,1	17,4
150	694	11,3	17,2



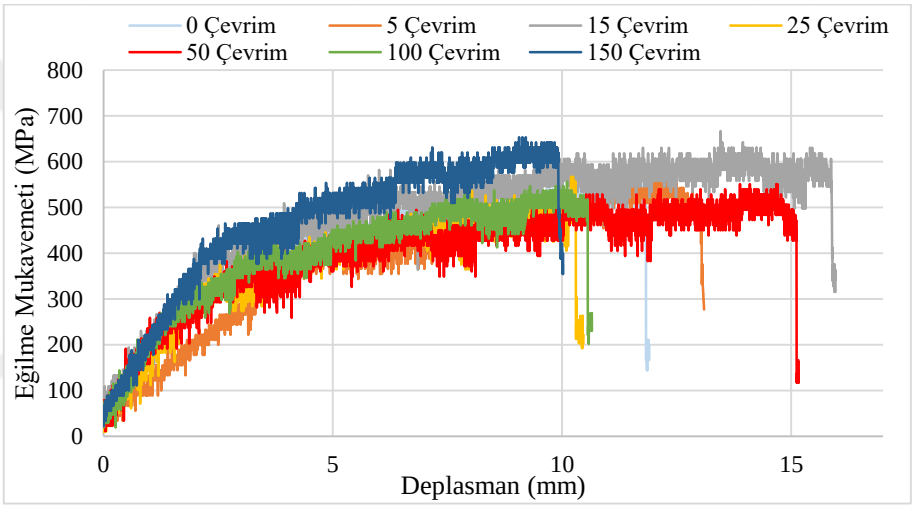
Şekil 5.54. Gl-Barall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri

Yapılan testler sonucunda, 150 termal çevrim sonunda çevrimsiz numuneye kıyasla maksimum eğilme mukavemetinde %11 oranında artış elde edilirken, deplasman değerinde %12,4 oranında bir azalma kaydedilmiştir. Elde edilen maksimum gerilme ve bu noktaya karşılık gelen deplasman değerlerinin, cam ve bazalt fiberli kompozitlerin ortalama eğilme davranışını yansıttığı söylenebilir. Bununla birlikte, kırılma anındaki

deplasman büyüklüğünün görece yüksek olması, özellikle cam fiberin sünek yapısının kompozit davranışına katkısını ortaya koymaktadır.

5.2.9. Ar-Barall malzemesine ait eğilme testi sonuçları

Ar-Barall kompozit malzemesi için termal çevrim öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen eğilme testlerinin sonuçlarına ait eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri Şekil 5.55'te yer almaktadır. Bu testlerin sayısal karşılıkları Çizelge 5.19'da sunulmuş, çevrim sayısına göre değişen maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerlerine ilişkin eğilim grafikleri ise Şekil 5.56'da verilmiştir.



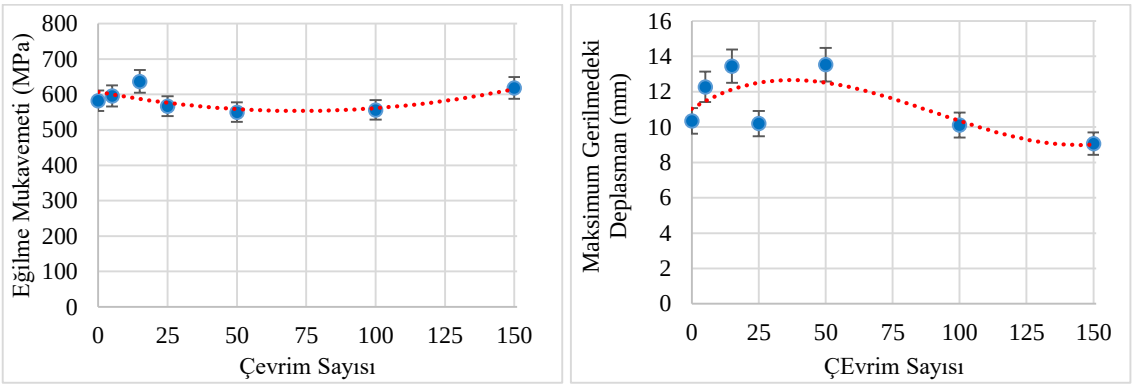
Şekil 5.55. Ar-Barall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri

Çizelge 5.19. Termal çevrime bağlı Ar-Barall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri

Çevrim Sayısı	*Eğilme Mukavemeti (MPa)*	*Deplasman 1 (mm)*	*Deplasman 2 (mm)*
0	582	10,4	11,8
5	596	12,3	13,0
15	637	13,5	15,9
25	567	10,2	10,3
50	550	13,5	15,1
100	556	10,1	10,6
150	618	9,1	10,0

Aramid ve bazalt fiber takviyeleriyle oluşturulan Ar-Barall kompozit malzemesinin termal çevrim öncesi ve sonrası eğilme testi sonuçları incelendiğinde, maksimum eğilme mukavemeti trendinin termal çevrim sayısının artmasıyla birlikte başlangıçta hafif bir düşüş gösterdiği, ardından yeniden bir artış eğilimine girdiği

gözlemlenmiştir. Maksimum eğilme gerilmesi noktalarındaki deplasman değerleri ise çevrim sürecine bağlı olarak önce artmış, daha sonra azalma eğilimi sergilemiştir.



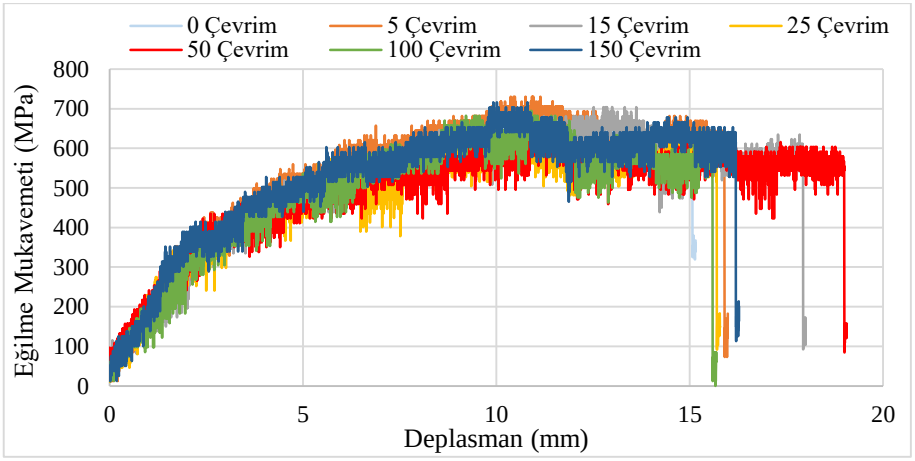
Şekil 5.56. Ar-Barall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri

150 termal çevrim sonunda, çevrimsiz numuneye kıyasla maksimum eğilme mukavemetinde %6,2 oranında artış, deplasman değerinde ise %12,5 oranında azalma tespit edilmiştir. Elde edilen maksimum eğilme mukavemeti ve buna karşılık gelen deplasman değerlerinin, aramid ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin ortalama özelliklerini yansıttığı değerlendirilmektedir. Kırılma anındaki deplasmanın görece yüksek oluşu, bazalt fiberin deformasyon sürecine katkısını ortaya koymaktadır.

5.2.10. Car-Barall malzemesine ait eğilme testi sonuçları

Car-Barall kompozitine uygulanan termal çevrimlerin öncesinde ve sonrasında yapılan eğilme testlerine ait eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri Şekil 5.57'de sunulmuştur. Söz konusu testlere ilişkin sayısal veriler Çizelge 5.20'de verilmiş olup, çevrim sayısına bağlı olarak değişim gösteren maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerlerinin trend analizleri Şekil 5.58'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

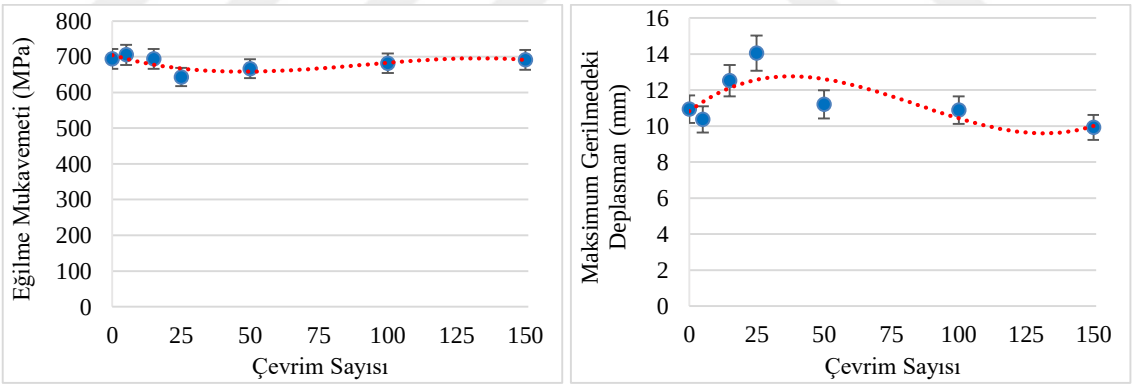
Termal çevrimler sonucunda elde edilen eğilme eğrilerine göre, söz konusu kompozit malzeme, diğer kompozitlere kıyasla çevrim sayıları arasında daha istikrarlı bir maksimum eğilme gerilmesi profili sergilemiştir. Maksimum gerilme noktasındaki deplasman miktarında ise, çevrim sayısının artışına bağlı olarak önce bir artış, ardından bir azalış eğilimi gözlemlenmiştir.



Şekil 5.57. Car-Barall malzemesinin eğilme mukavemeti – deplasman eğrileri

Çizelge 5.20. Termal çevrime bağlı Car-Barall malzemesinin maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman değerleri

Çevrim Sayısı	*Eğilme Mukavemeti (MPa)*	*Deplasman 1 (mm)*	*Deplasman 2 (mm)*
0	694	10,9	15,2
5	705	10,4	16,0
15	694	12,5	18,0
25	643	14,1	15,8
50	666	11,2	19,1
100	681	10,9	15,7
150	691	9,9	16,3

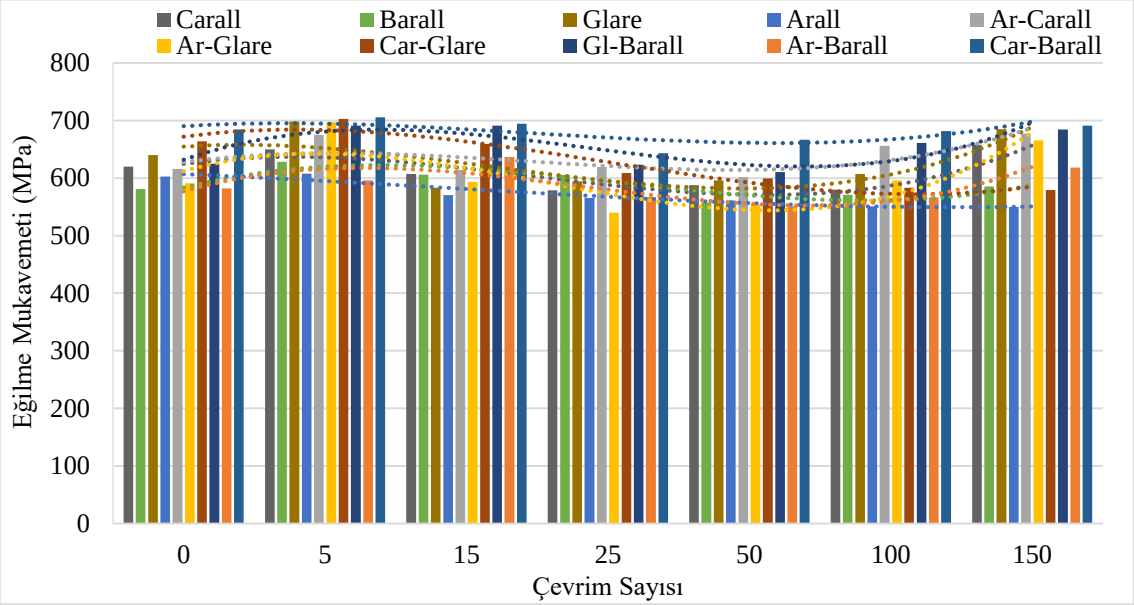


Şekil 5.58. Car-Barall malzemesinin çevrim sayısına göre maksimum eğilme mukavemeti ve deplasman trend eğrileri

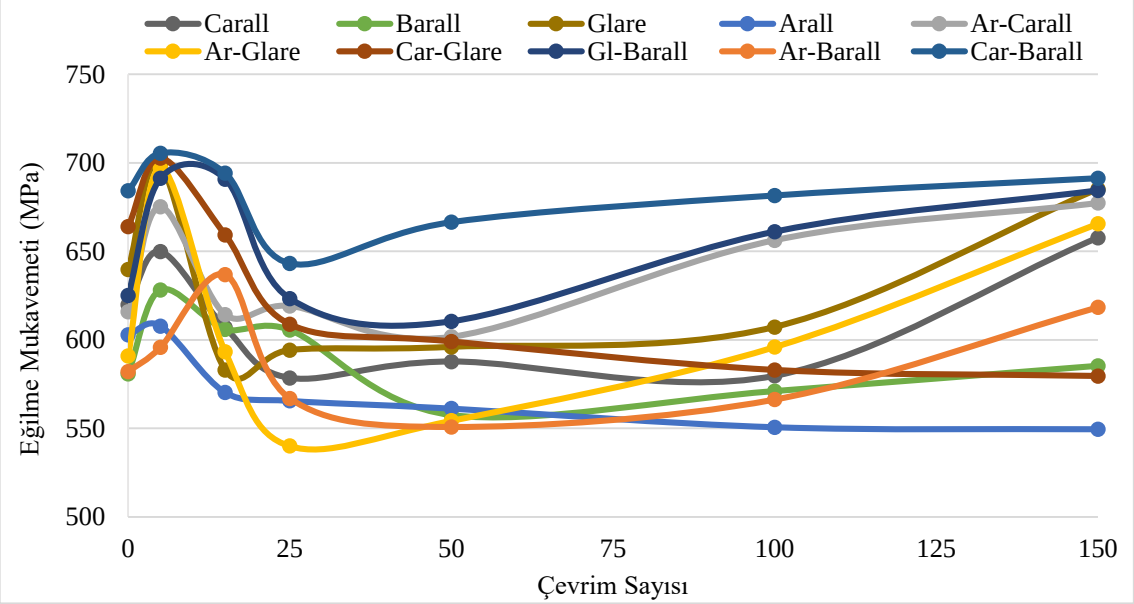
Car-Barall kompozit malzemesine ait eğilme testi sonuçları incelendiğinde, 150 termal çevrim sonrasında çevrimsiz numuneye kıyasla maksimum eğilme mukavemetinde %0,4'lük sınırlı bir azalma, deplasman değerinde ise %9,2 oranında bir düşüş kaydedilmiştir. Maksimum eğilme mukavemeti açısından elde edilen değerlerin büyük ölçüde karbon fiberin yüksek dayanım özelliklerini yansıttığı, buna karşılık maksimum gerilme noktasındaki deplasman değerlerinin ise karbon ve bazalt fiberlerin mekanik davranışlarının ortalamasını temsil ettiği değerlendirilmektedir.

5.2.11. Tabakalı kompozitlerin eğilme testi genel değerlendirmesi

Cam, karbon, bazalt ve aramid fiberlerin tekil veya hibrit biçimde kullanıldığı fiber takviyeli 2024-T3 alüminyum alaşımlı laminat kompozit malzemelerin eğilme dayanımı üzerindeki termal çevrim işleminin etkisi Şekil 5.59 ve Şekil 5.60'ta verilmiştir.



Şekil 5.59. FML kompozitlerde, çevrim sayısına bağlı eğilme mukavemeti sütun grafiği



Şekil 5.60. FML kompozitlerde, çevrim sayısına bağlı eğilme mukavemeti çizgi grafiği

Maksimum eğilme gerilmesi değerlerinde, genel olarak ilk çevrimlerde hafif bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Ancak çevrim sayısının artmasıyla birlikte bu artışın büyük bölümü kaybedilmiş ve çoğu laminat konfigürasyonunda belirgin bir düşüş meydana gelmiştir. Bununla birlikte, 150 çevrim sonunda bazı konfigürasyonlarda mukavemet değerlerinde kısmi bir toparlanma eğilimi gözlenmiştir.

En yüksek eğilme mukavemetini sergileyen FML kompozit konfigürasyonu, Car-Barall yapısı olmuştur. Bu yapı, başlangıçta 694 MPa'lık yüksek bir mukavemet değeriyle dikkat çekmiş, 5. çevrimde 705 MPa ile maksimum seviyeye ulaşmış ve 150. çevrim sonunda 691 MPa gibi oldukça yüksek ve stabil bir değerle dayanımını büyük ölçüde korumuştur.

Benzer şekilde, Gl-Barall ve Ar-Carall konfigürasyonları da çevrimler boyunca yüksek eğilme mukavemeti değerleri sergilemiştir. Özellikle Ar-Carall yapısı, çevrim sayısının artmasına paralel olarak mukavemetini artırarak 150. çevrim sonunda 719 MPa'ya ulaşmış ve termal çevrimlere karşı üstün bir direnç performansı ortaya koymuştur. Gl-Barall ise 625 MPa'lık başlangıç mukavemetini çevrim süreci boyunca kademeli olarak artırmış ve 150. çevrimde 694 MPa'ya ulaşarak yapısal kararlılık açısından başarılı bir profil sunmuştur.

Diğer taraftan, Carall yapısı 619 MPa ile başlamış ve çevrimler boyunca dayanımını artırarak 150. çevrimde 657 MPa'ya yükselmiştir. Buna karşın, Car-Glare konfigürasyonu 664 MPa'lık yüksek bir başlangıç mukavemetine sahip olmasına rağmen zamanla azalarak 150. çevrim sonunda 579 MPa'ya gerilemiştir. Glare konfigürasyonu ise çevrim süreci boyunca bazı dalgalanmalar göstermiş olsa da 150. çevrim sonunda ulaştığı 685 MPa'lık değer ile genel olarak yüksek bir dayanım profili sergilemiştir.

Öte yandan, Barall, Arall ve Ar-Barall yapılar nispeten daha düşük eğilme mukavemeti değerleri ile dikkat çekmiştir. Barall yapısı, 0. çevrimde 580 MPa ile başlamış ve 150. çevrimde yalnızca 585 MPa'ya ulaşarak sınırlı bir mekanik performans ortaya koymuştur. Arall yapısı, başlangıçta 603 MPa'lık mukavemet değerine sahipken, çevrimler ilerledikçe bu değer azalmış ve 150. çevrim sonunda 560 MPa'ya kadar gerilemiştir. Ar-Barall yapısı ise 0. çevrimde 582 MPa ile başlamış ve 150. çevrimde 618 MPa'ya ulaşarak yüksek bir dayanım profili sergilemiştir.

Ar-Glare yapısı ise dinamik bir dayanım profili sergilemiştir. Bu konfigürasyon, 0. çevrimde 591 MPa ile başlamış, 5. çevrimde 721 MPa ile maksimum değere ulaşmış, ancak 25. çevrimde 540 MPa'ya kadar düşerek belirgin bir zayıflama göstermiştir. Sonraki çevrimlerde toparlanarak 150. çevrim sonunda 666 MPa'ya yükselmiş ve hibrit

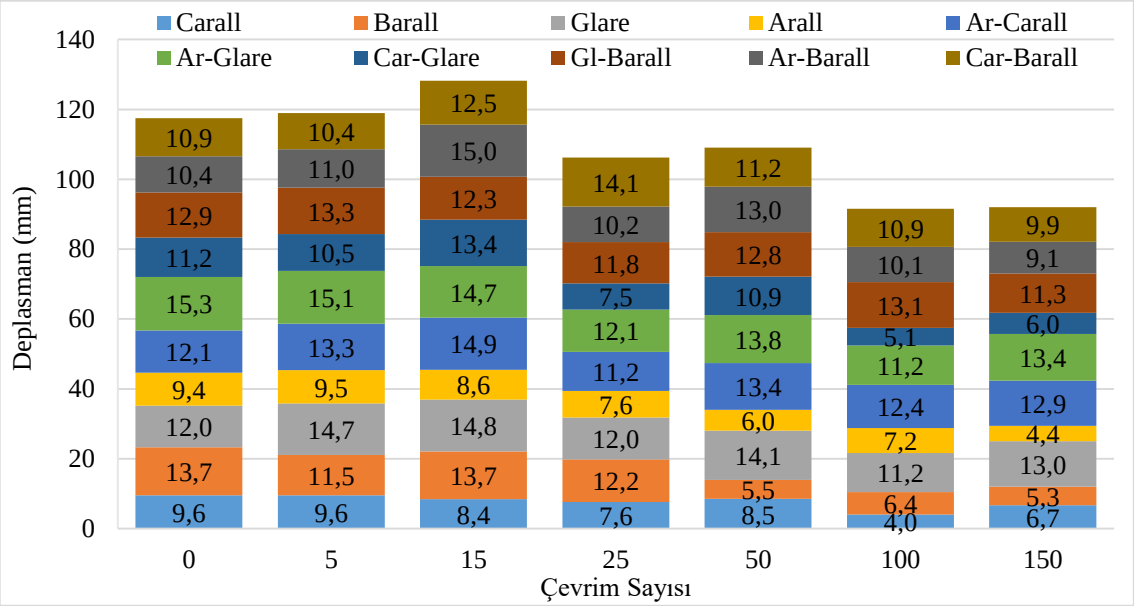
yapının, bileşen fiberlerin özelliklerine bağlı olarak çevrim sayısına karşı değişken ancak dirençli bir tepki geliştirdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, literatürdeki bazı çalışmalara paralellik göstermektedir. Eslami-Farsani (2013) ve Lafarie-Frenot (2006) tarafından yapılan araştırmalarda, termal çevrimlerin ilk aşamalarında malzemede ciddi yapısal değişimler meydana geldiği, ancak çevrim sayısı arttıkça malzemenin davranışının zamanla stabilize olduğu vurgulanmaktadır. Çalışmamızda da benzer şekilde, 150 çevrim sonunda gerilme değerlerinde kompozit malzemelerin büyük çoğunluğunda belirgin bir artış gözlenmiştir. Özellikle Arall ve Car-Glare kompozitleri dışında kalan diğer FML kompozit konfigirasyonları, termal çevrimler sonunda gerilme değerlerinde %12,6'ya varan artışlar göstermiştir.

Termal çevrim sürecinde, FML kompozit malzemenin matris, fiber ve alüminyum tabakası gibi farklı bileşenleri, çeşitli termal genleşme katsayılarına sahip olmaları nedeniyle uyumsuz genleşme ve büzülmeye maruz kalmaktadır. Bu durum, yapıda iç gerilmelerin birikmesine ve mikroçatlak oluşumuna yol açmakta, dolayısıyla malzemenin uzama ve gerilme değerlerinde değişikliklere neden olmaktadır. Ayrıca, epoksinin kürleşme sürecinde artık gerilmelere sahip olduğu; termal çevrim etkisiyle çapraz bağların post-kürleşme ile daha düzenli bir yapıya kavuşması sonucu bu artık gerilmelerin azaldığı literatürde belirtilmiştir (Akbulut vd., 2016). Tüm bu faktörler göz önünde bulundurulduğunda, termal çevrimlerin tabakalı kompozitlerin mekanik davranışı üzerindeki etkisinin oldukça karmaşık ve çok boyutlu olduğu sonucuna varılmaktadır.

FML kompozitlerde, termal çevrim işleminin deplasman üzerindeki etkisi Şekil 5.61'de verilmiştir.

Genel olarak, tek tip fiber içeren kompozit malzemeler olan Carall ve Arall'da termal çevrim sayısı arttıkça deplasman değerlerinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Buna karşılık, hibrit fiberli kompozitler olan Ar-Carall ve Ar-Glare'de deplasman değerleri termal çevrim sayısına bağlı olarak dalgalanmalar ve ani artışlar sergilemiştir. Bu farklılık, malzemelerin içyapısındaki farklı fazların termal genleşme katsayılarındaki uyumsuzluklardan kaynaklanan gerilmelerin mikroyapı üzerinde karmaşık etkiler oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle hibrit fiberli kompozitlerde, iki farklı fiberin farklı uzama özelliklerine sahip olması nedeniyle iki ayrı kırılma noktası oluşmuştur. İlk kırılma noktasından sonra henüz kırılmamış olan tek katman fiberin genişlik/kalınlık oranının yüksek olması, kademeli hasar mekanizmasını tetikleyerek kırılma deplasman değerinin daha yüksek olmasını sağlamıştır. Bu kapsamda, Arall ve Carall kompozitlerinde maksimum deplasman yaklaşık 9,4 mm ve 9,6 mm iken, bu

fiberlerin kullanıldığı Ar-Carall kompozitinde son kırılma deplasmanı 14,4 mm ile 23,6 mm arasında değişmiştir.



Şekil 5.61. FML kompozitlerin çevrim sayısına ve deplasman değerine bağlı maksimum eğilme mukavemeti çizgi grafiği

Tüm FML kompozitlerin aynı termal çevrim prosedürüne bağlı olarak deplasman miktarları Şekil 5.61'de topluca incelendiğinde, genel olarak 150 termal çevrime kadar deplasman miktarının önce artış, ardından azalış ve son olarak yataya yakın bir seyir izlediği görülmektedir. Termal çevrim sonrasında eğilme testlerinde maksimum gerilmenin oluştuğu noktadaki uzama değerinde gözlemlenen azalma, matris malzemenin gevrekleşmesi ve artan kalıntı gerilmelerle açıklanmaktadır (Lafarie-Frenot, 2006). Glare, Ar-Carall ve Car-Glare kompozitleri dışındaki tek tip veya hibrit fiberli FML kompozitlerde deplasman miktarlarında %8,4 ile %25 arasında azalma meydana gelmiştir. Bu durum, termal çevrimler sonucunda kompozitin iç yapısındaki epoksinin gevrekleştiğini ve maksimum gerilmenin daha küçük deplasman değerlerinde ortaya çıktığını göstermektedir.

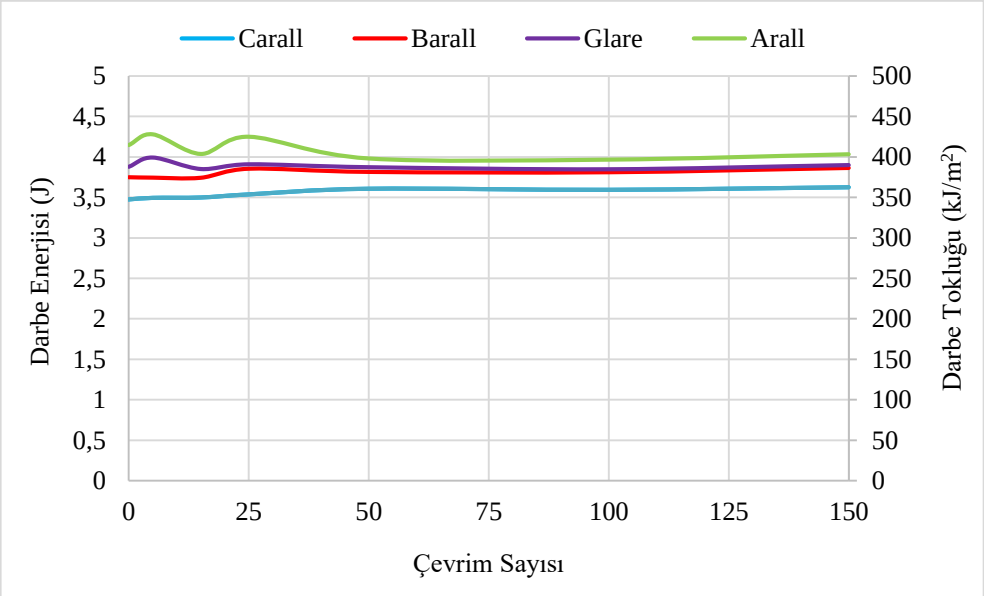
5.3. Çentik Darbe Testi Sonuçları

Çentik darbe testi, malzemelerin darbe dayanımını belirlemek amacıyla kullanılan standart bir yöntemdir. Bu test, malzemelerin tokluk ve kırılganlık özelliklerini değerlendirmede önemli bilgiler sağlar. Tabakalı kompozitler, özellikle metallere kıyasla,

çentik darbe testinde genellikle daha yüksek darbe dayanımı sergiler. Bunun asıl nedeni fiber katmanların çatlak oluşumunu köprüleyerek enerjinin etkili bir şekilde dağıtılmasını sağlaması ve kırılmayı geciktirmesidir (Muniyan vd., 2025; Gülcan vd., 2019; Asghar vd., 2017; Sadighi vd., 2012). Bu çalışmada, tabakalı kompozitlerin çentik darbe özellikleri ASTM D6110 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Tek tip ve hibrit fiberli kompozitlerin darbe sırasında soğurduğu enerji ve kırılma tokluk değerleri grafikler yardımıyla karşılaştırılmıştır.

5.3.1. Tek tip fiberli FML kompozitlere ait çentik darbe testi sonuçları

Çentik darbe testleri amacıyla, FML kompozit malzemelere en fazla 150 döngüye kadar termal çevrim uygulanmıştır. Bu çevrimler sırasında belirli döngü sayılarında (0, 5, 15, 25, 50, 100 ve 150) numuneler alınarak testler gerçekleştirilmiştir. Farklı çevrim sayılarında termal çevrime maruz bırakılan tek tip fiberli FML kompozitlerin çentik darbe testlerinden elde edilen darbe enerjisi ve darbe tokluğu değerleri, Şekil 5.62'de verilmiştir.



Şekil 5.62. Tek tip fiberli FML kompozitlerin termal çevrim sayısına göre darbe enerjisi ve tokluğu değişimi

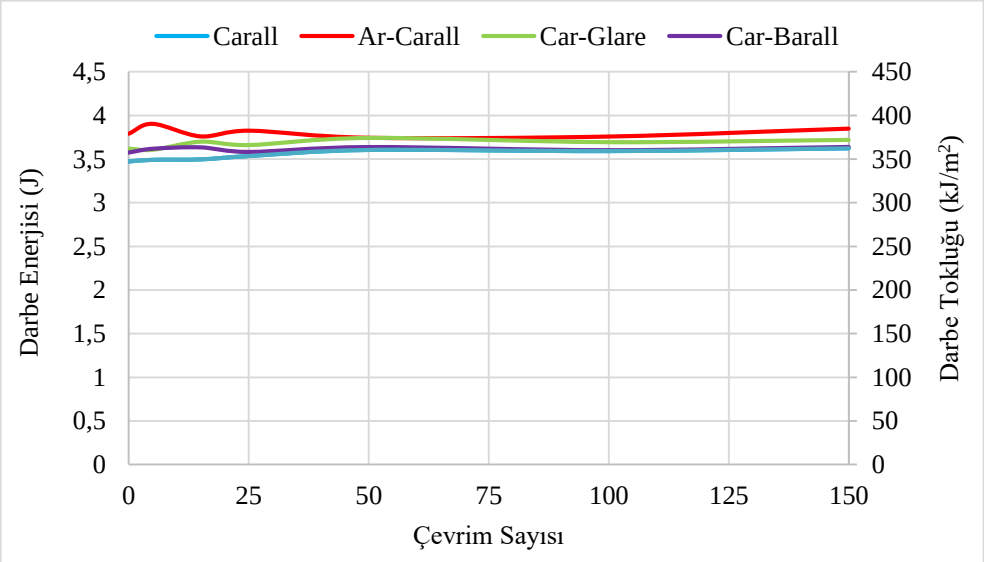
Çentik darbe testlerinden elde edilen darbe enerjisi ve darbe tokluğu değerleri incelendiğinde, tüm çevrimlerde Arall kompozitinin performansının diğer tek tip FML kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. En düşük darbe enerjisi ve

tokluğu değerleri ise Carall kompozitinden elde edilmiştir. Glare ve Barall kompozitlerinden elde edilen değerler arasında kısmi farklılıklar bulunsa da sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Tüm çevrimlerin ortalaması alındığında, Arall kompozitinin darbe tokluğu Glare'ye göre %5,3, Barall'a göre %7,8 ve Carall'a göre %15,1 oranında daha yüksek bulunmuştur.

Darbe tokluğu değerleri, ilk çevrimlerden itibaren artış ve azalış şeklinde dalgalı bir seyir izlerken, ilerleyen çevrimlerde daha belirgin bir doğrusal eğilim göstermiştir. Bu dalgalanma eğilimi genellikle 25. çevrimden sonra yerini daha stabil değerlere bırakmıştır. Termal çevrimler arasındaki karşılaştırmalarda en belirgin dalgalanma Arall kompozitinde gözlenmiş. Bu kompozitte 5–15 çevrimleri arasında %5,9 oranında bir artış, 15–25 çevrimleri arasında ise %5,1 oranında bir azalış tespit edilmiştir.

5.3.2. Carall ve hibritlerine ait çentik darbe testi sonuçları

Karbon fiber ve alüminyum levhalardan oluşan Carall FML kompoziti ile karbon fiberin yanı sıra cam, bazalt ve aramid fiberlerin de kullanılmasıyla hibritleştirilen FML kompozitlerde, farklı termal çevrim sayılarında gerçekleştirilen çentik darbe testlerinden elde edilen darbe enerjisi ve darbe tokluğu değerleri, Şekil 5.63'te grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 5.63. Carall ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre darbe enerjisi ve tokluğu değişimi

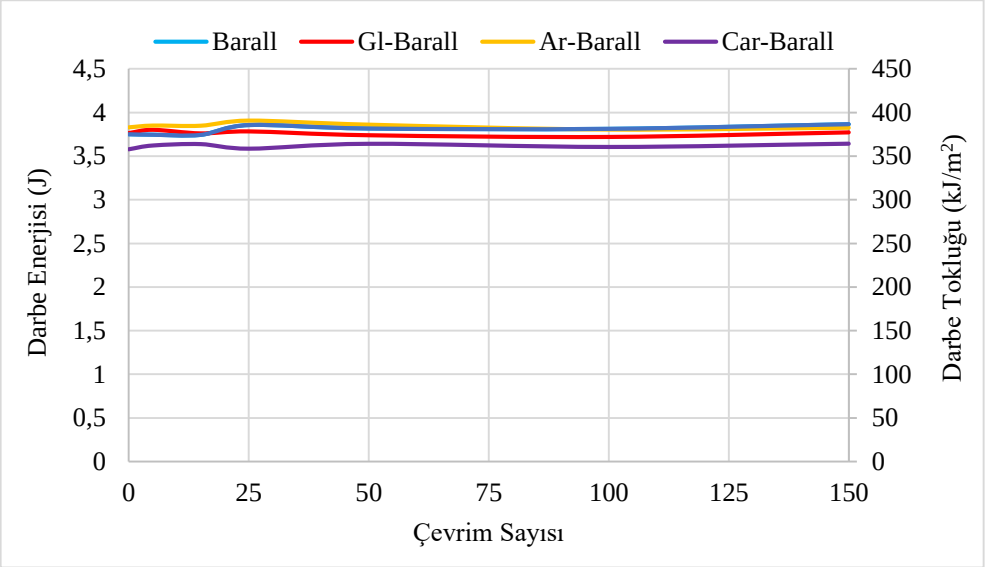
Tüm çevrimler dikkate alındığında, hibrit kompozitlerin darbe enerjisi ve tokluğu değerleri Carall kompozitine kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Ortalama darbe tokluğu, Ar-Carall için %5,5, Car-Glare için %1,9 ve Car-Barall için %0,2 oranında artış göstermiştir. Karşılaştırma yapılan referans değer olan Carall'ın ortalama darbe tokluğu ise 354,6 kJ/m^2'dir.

Karbon fiberin, cam, bazalt ve aramid gibi diğer fiber türlerine kıyasla daha düşük enerji soğurma kapasitesine sahip olması, hibrit kompozitlerin darbe tokluğu değerlerinin Carall kompozitine göre daha yüksek çıkmasının temel nedenidir. Arall kompozitinde gözlemlenen erken çevrim dalgalanmalarına benzer şekilde, Ar-Carall hibrit kompozitinde de termal çevrimlerin başlangıç aşamalarında darbe tokluğu değerlerinde belirli bir dalgalanma tespit edilmiştir. Ancak bu dalgalanmanın genliği Arall kompozitine kıyasla daha düşüktür. Ar-Carall kompozitinde, ilk 25 çevrim içerisinde sırasıyla %2,9'luk bir artış, %3,5'lik bir azalış ve ardından %1,5'lik bir artış gözlemlenmiştir. Arall kompozitinde olduğu gibi, Ar-Carall kompoziti de 25. çevrimden sonra kararlı bir darbe tokluğu eğilimi sergilemeye başlamıştır.

5.3.3. Barall ve hibritlerine ait çentik darbe testi sonuçları

Farklı sayılarda termal çevrime maruz bırakılan Barall kompoziti ve bazalt fiberin cam, karbon ve aramid fiberlerle birleştirilmesiyle elde edilen hibrit FML yapılar üzerinde gerçekleştirilen çentik darbe testleri sonucunda elde edilen darbe enerjisi ve darbe tokluğu değerleri, Şekil 5.64'te verilmiştir.

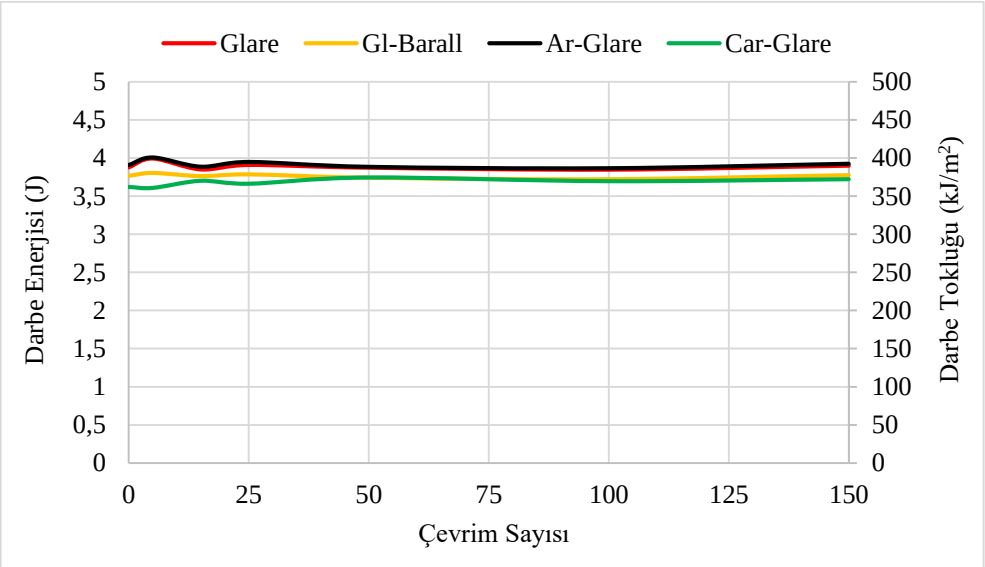
Şekil 5.62'de verilen kompozitlerin çentik darbe testlerinden elde edilen kırılma enerjilerinin, tüm termal çevrimlerin ortalaması alındığında Car-Barall, Gl-Barall ve Ar-Barall hibritlerinin Barall'a göre sırasıyla %4,7 ve %3,9 oranında azalma ile %1,3 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu farklılıkların temel nedeni, bazalt fiberin enerji soğurma kapasitesinin karbon fibere göre yüksek, cam fibere yakın ve aramid fibere göre daha düşük olmasıdır. Bu durum, Zhang vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada da desteklenmiştir. Ayrıca, Barall ve hibrit kompozitlerin kırılma enerjilerinin 25 termal çevrimden sonra genel olarak yatay ve stabil bir seyir izlediği gözlemlenmiştir. Termal çevrimler arasındaki maksimum kırılma enerjisi değişimi, Barall kompozitinde %2,9 iken hibritlerinde %1,5 olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.64. Barall ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre darbe enerjisi ve tokluğu değişimi

5.3.4. Glare ve hibritlerine ait çentik darbe testi sonuçları

Farklı termal çevrim sayılarında teste tabi tutulan Glare kompoziti ve bu yapıya karbon, bazalt ve aramid fiberlerin ilavesiyle oluşturulan hibrit FML yapılar üzerinde yapılan çentik darbe testleri sonucunda elde edilen darbe enerjisi ve darbe tokluğu verileri Şekil 5.65'te grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.65. Glare ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre darbe enerjisi ve tokluğu değişimi

Şekil 5.65'te görüldüğü üzere, yalnızca aramid takviyeli hibrit kompozit (Ar-Glare), çentik darbe dayanımı bakımından Glare kompozitinden daha yüksek performans sergilemiştir. Diğer hibrit yapılarda ise darbe dayanımı değerleri Glare kompozitine kıyasla daha düşük bulunmuştur. Tüm termal çevrimlerin ortalaması dikkate alındığında, Ar-Glare kompoziti, Glare'ye kıyasla %0,5 oranında daha yüksek kırılma enerjisi göstermiştir. Buna karşılık, Car-Glare ve Gl-Barall hibrit kompozitlerinin kırılma enerjisi sırasıyla %5,9 ve %3,5 oranında daha düşük bulunmuştur.

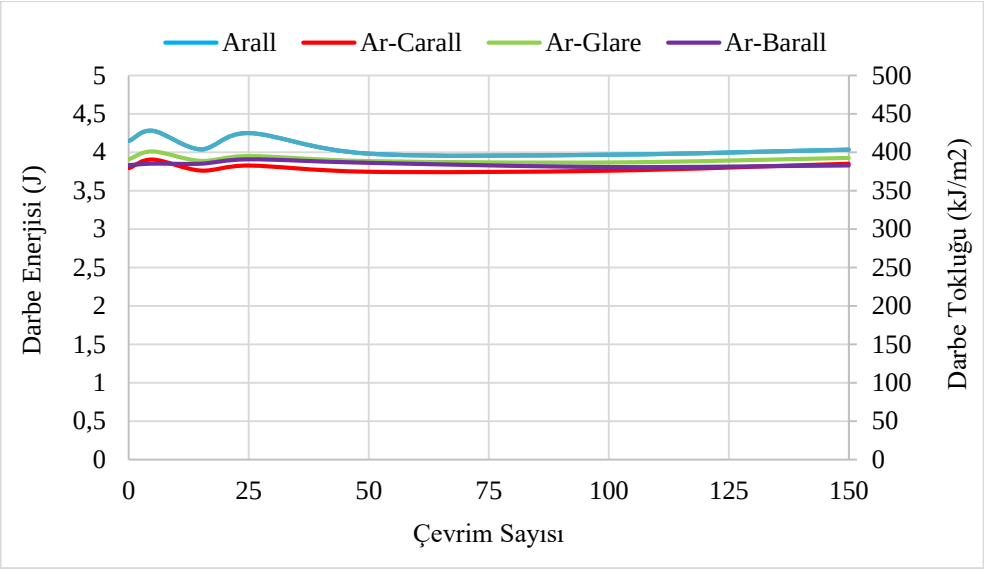
Glare ve hibritlerine ait kırılma enerjisi değişimleri incelendiğinde, özellikle ilk 25 termal çevrim boyunca dalgalanmaların daha belirgin olduğu, sonraki çevrimlerde ise bu değişimlerin azalarak stabil bir yapıya dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bu dalgalanma, Gl-Barall hibritinde oldukça sınırlı olup yaklaşık %1 seviyesinde kalırken; Glare, Car-Glare ve Ar-Glare kompozitlerinde 5–15 çevrim aralığında sırasıyla %3,6, %2,5 ve %3 oranında değişim göstermiştir.

5.3.5. Arall ve hibritlerine ait çentik darbe testi sonuçları

Arall kompoziti ve bu yapının cam, karbon ve bazalt fiberlerle hibritleştirilmesiyle elde edilen FML kompozitler, belirlenen termal çevrim aralıklarında çentik darbe testine tabi tutulmuştur. Testler sonucunda elde edilen darbe enerjisi ve darbe tokluğu değerleri, Şekil 5.66'da sunulmakta olup, bu grafikler hem Arall'ın hem de hibrit konfigürasyonlarının ısıl çevrimlere karşı mekanik dayanım davranışlarını karşılaştırmalı olarak yansıtmaktadır.

Arall kompoziti, çentik darbe dayanımı açısından değerlendirildiğinde, hibrit türevlerinin tamamından daha yüksek performans sergilemiştir. Tüm termal çevrimlerin ortalaması alındığında, Arall kompozitinin kırılma enerjisi; Ar-Carall'a göre %7,6, Ar-Barall'a göre %6,5 ve Ar-Glare'e göre %4,6 oranında daha yüksek bulunmuştur.

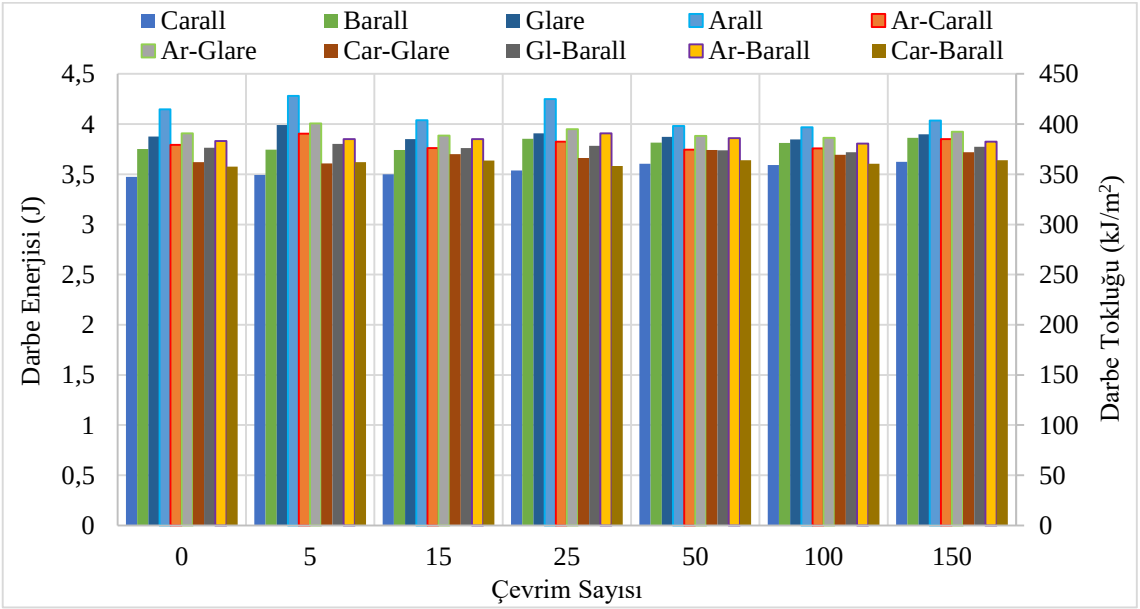
Diğer FML kompozit yapılarda olduğu gibi, Arall ve hibritlerinin kırılma enerjilerinde de ilk 25 termal çevrim boyunca belirgin dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Özellikle Arall kompozitinde, bu dalgalanma 5–15 çevrim aralığında %5,9 oranında artış, 15–25 çevrim aralığında ise %5,1 oranında azalış şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 5.66. Arall ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre darbe enerjisi ve tokluğu değişimi

5.3.6. Tabakalı kompozitlerin çentik darbe testi genel değerlendirmesi

Şekil 5.67'de, cam, karbon, bazalt ve aramid fiberlerin tekil ve hibrit formlarda kullanıldığı fiber takviyeli 2024-T3 alüminyum alaşımlı laminat kompozit malzemelerin, çentik darbe testi sonucunda elde edilen darbe enerjisi ve tokluk değerleri üzerine uygulanan termal çevrim işleminin etkisi gösterilmektedir.



Şekil 5.67. FML kompozitlerde, çevrim sayısına bağlı darbe enerjisi ve tokluğu sütun grafiği

Şekil 5.67'de, farklı FML kompozitlerin çentik darbe testi sonucunda elde edilen darbe enerjisi ve darbe tokluğu değerlerinin, uygulanan termal çevrim sayısına bağlı olarak nasıl değiştiği açıkça görülmektedir. İncelenen FML kompozitlerin darbe enerjileri yaklaşık olarak 3,4 ile 4,4 J arasında değişirken, darbe tokluğu değerleri ise yaklaşık 350 ile 440 kJ/m^2 aralığında elde edilmiştir.

Kompozit türleri arasında karşılaştırıldığında, Arall kompozitleri hem darbe enerjisi hem de darbe tokluğu açısından en yüksek performansı sergilemektedir. Tüm çevrim sayılarında Arall'ın darbe enerjisi yaklaşık 4,4 J, darbe tokluğu ise yaklaşık 440 kJ/m^2 seviyelerinde ölçülmüştür. Bu sonuçlar, aramid fiberlerin darbe yükleri altında yüksek enerji absorpsiyon kapasitesi ve kırılma dayanımı sağladığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, Carall kompozitleri grafikteki en düşük darbe enerjisi ve tokluğu değerlerine sahiptir. Darbe enerjisi yaklaşık 3,4–3,6 J, darbe tokluğu ise 350–370 kJ/m^2 aralığında değişmektedir. Bu durum, karbon fiberlerin yüksek rijitliğine rağmen darbe yükleri karşısında yeterli sönümleme kapasitesine sahip olmadığını göstermektedir. Glare ve Barall kompozitleri ise orta-yüksek seviyede darbe dayanımı göstermekte olup, darbe enerjisi değerleri genellikle 3,9–4,2 J, darbe tokluğu ise 390–420 kJ/m^2 arasında değişmektedir. Genel ortalamalar değerlendirildiğinde, soğurulan enerji değerleri Arall, Glare, Barall ve Carall kompozitleri sırasıyla azalan şekilde sıralanmış; hibrit yapılar ise kullanılan fiberlerin özelliklerine paralel olarak yaklaşık ortalama değerler sergilemiştir.

Literatürde, aramid takviyeli FML'lerin darbe altında çatlak yayılımını engelleme ve enerjiyi yayma açısından karbon ve cam takviyeli FML'lere kıyasla daha başarılı olduğu bildirilmiştir (Asghar vd., 2017; Botelho vd., 2006). Aramid takviyeli sistemlerin sünek yapıları sayesinde, mikroskobik lif çekilmesi ve lif kopma mekanizmaları yoluyla yüksek enerji soğurma kapasitesine sahip olduğu da vurgulanmıştır (Fiore vd., 2015).

Aramid lifler darbe veya hasar altında yüklendiğinde, arayüzeyde lif-matris ayrışması meydana gelir. Bu ayrışma, kompozitin tamamen kırılmasını geciktirerek daha fazla enerji absorbe etmesini sağlar. Ayrıca, aramid liflerin kırılmadan önce diğer fiberlere kıyasla daha fazla deformasyona uğrayabilmesi, enerji soğurma kapasitesini artırır. Karbon fiberler ise çok gevrek bir şekilde kırılırken, aramid lifler kırılmadan önce daha yüksek yük taşıyabilmektedir (Botelho vd., 2006; Muniyan vd., 2025).

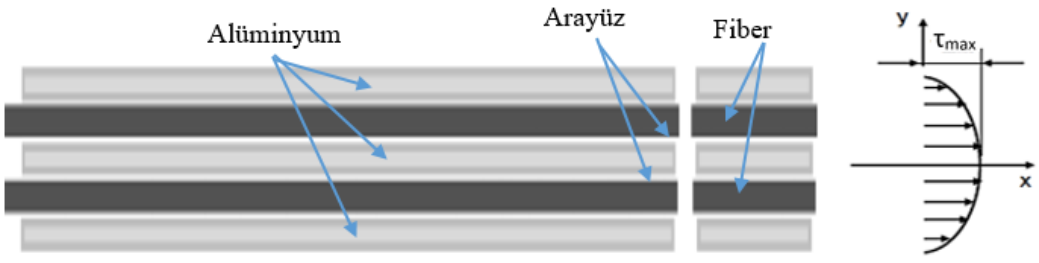
FML kompozitlerde, ilk 25 termal çevrim sürecinde darbe enerjisi ve tokluğunda belirgin dalgalanmalar meydana gelmiştir. Bazalt ve karbon fiberli kompozitler, termal çevrimlere karşı daha az dalgalanma eğilimi gösterirken, en belirgin dalgalanma Arall ve Ar-Glare kompozitlerinde ortaya çıkmıştır. Bu ilk çevrimlerdeki dalgalanma, literatürde

gerçekleştirilen farklı çalışmalarda da doğrulanmıştır. Tabatabaeian ve Ghasemi (2019), farklı sayılarda termal yorulmaya maruz bırakılan bazı FML kompozitlerin özellikle ilk 50 termal çevrim sürecinde daha fazla etkilendiğini rapor etmişlerdir.

Bu tür termal etkilerin mekanizmasını anlamak amacıyla yapılan çalışmalarda ise, özellikle liflerin yapısal düzeyde maruz kaldığı kimyasal ve fiziksel değişimler incelenmiştir. García-Moreno vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, aramid liflerinin termal yaşlanmaya bağlı olarak aramid zincirleri üzerindeki hidrojen bağlarının bozulduğu ve kimyasal bağların zayıfladığı belirtilmiştir. Bu bozulma sürecinin, özellikle 75 °C'nin üzerinde başlayıp sıcaklık arttıkça hızla ilerlediği ifade edilmiştir. Benzer şekilde, karbon ve bazalt fiberlerinin kullanıldığı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerine termal çevrimlerin etkisini inceleyen başka bir çalışmada ise, termal çevrimlerin post-kürleşme sürecini tetiklediği ve bu nedenle ilk termal çevrimlerde kompozitlerin mekanik performansında değişikliklerin gözlemlenebileceği bildirilmiştir (Akbulut vd., 2016).

5.4. SBS Testi Sonuçları

Kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) testi, kompozit malzemelerin arayüzey kayma mukavemetini değerlendirmek amacıyla uygulanan standart bir yöntemdir (Şekil 5.68). Özellikle çok katmanlı kompozit yapıların tabakaları arasındaki bağlanma dayanımını belirlemede kritik bir öneme sahiptir. SBS testi, kompozitlerin yük taşıma kapasitesi ile tabakalar arası arayüz yapısının mekanik dayanıklılığını analiz ederek, delaminasyon gibi yapısal zayıflıkların tespitine olanak tanır.



Şekil 5.68. FML numunelerde SBS testi sonucu oluşan kayma gerilmesi şematik görüntüsü

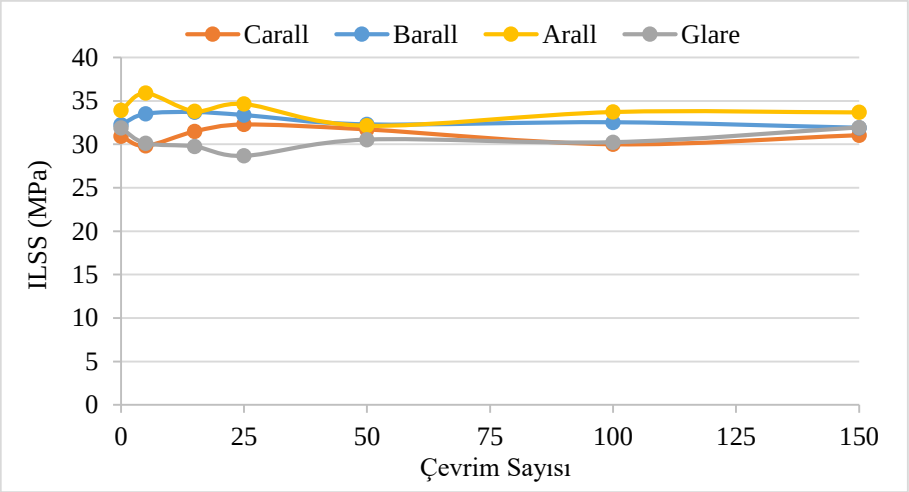
Havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi yüksek performans gerektiren uygulama alanlarında, malzeme güvenilirliğinin değerlendirilmesinde SBS testi yaygın olarak kullanılmaktadır (Li vd., 2022). Üretim sürecinde oluşabilecek bağlanma hataları,

reçine eksiklikleri veya zayıf arayüzler gibi potansiyel kusurların erken aşamada belirlenmesini sağlar. SBS testinden elde edilen veriler, tabaka malzemesi ve bağlayıcı reçine seçiminde, üretim parametrelerinin optimizasyonunda ve nihai ürün tasarımının iyileştirilmesinde önemli bir karar destek aracı olarak rol oynar (Kaybal, 2021).

Bu çalışmada, Carall, Barall, Glare, Arall ve hibrit yapılarının termal çevrim koşullarına karşı performansları, SBS testleri ile değerlendirilmiştir. Termal çevrimlerin, farklı fiber içeriklerine sahip FML kompozitlerin arayüz kayma dayanımları üzerindeki etkileri, alt başlıklar altında analiz edilmiştir. Her bir termal çevrim seviyesi için elde edilen maksimum kayma mukavemeti değerleri, grafiksel olarak sunulmuş ve çevrim sayısına bağlı dayanım değişimleri karşılaştırmalı biçimde incelenmiştir.

5.4.1. Tek tip fiberli FML kompozitlere ait SBS testi sonuçları

Farklı termal çevrim süreçlerine tabi tutulan Carall, Barall, Glare ve Arall kompozitlerinin SBS testi sonucu elde edilen tabakalar arası kayma dayanımı (ILSS) grafikleri Şekil 5.69'da verilmiştir.



Şekil 5.69. Tek tip fiberli FML kompozitlerinin termal çevrim sayısına göre ILSS değişimi

SBS test sonuçlarına göre, tüm termal çevrimler boyunca Arall kompozitinin ILSS değerlerinin diğer tek tip fiberli kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğunu gözlemlenmiştir. Termal çevrimin ilk aşamalarında, özellikle 50 çevrime kadar, tabakalar arası kayma gerilmesi değerlerinde sonraki çevrimlere göre daha dalgalı bir seyir izlemiştir. Literatürde, epoksinin kürleşme sürecinde artık gerilmelere sahip olduğu;

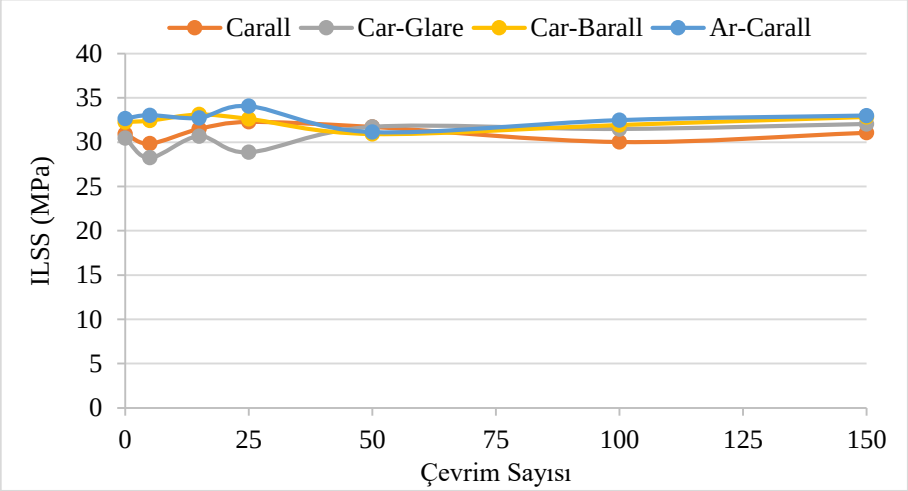
termal çevrimin etkisiyle çapraz bağların daha düzenli hale gelmesiyle bu gerilmelerin azaldığı, ayrıca kompozitteki malzemelerin termal genleşme farklılıklarından kaynaklanan post-artık gerilmelerin oluştuğu belirtilmektedir (Hosseini-Toudeshky ve Mohammadi, 2009). Bu etmenlerin, termal çevrim sayısına bağlı olarak FML malzemelerinin ILSS değerlerinde farklılıklara yol açtığı düşünülmektedir. Nitekim, karbon ve bazalt fiber kullanılarak üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerine termal çevrimin etkisinin incelendiği bir çalışmada, FML kompozitlerin en fazla ilk 50 çevrim sürecinde etkilendiği ifade edilmiştir (Akbulut vd., 2016). Bu çalışmanın bulguları, tabakalar arası kayma gerilmesinde gözlemlenen dalgalı seyrin nedenlerini daha anlaşılır kılmaktadır.

Tek tip fiberli kompozitlerin ILSS değerlerinin, tüm çevrimler baz alınarak hesaplanan genel ortalamaları incelendiğinde; yüksekten düşüğe doğru sıralama Arall, Barall, Carall ve Glare şeklinde olmuştur. Aramid fiberli kompozitlerde SBS dayanımının yüksek olması, aramid fiberin lifli yapısının yükü daha geniş bir alana yayarak epoksi-alüminyum ara yüzeyinde gerilme yığılmalarını azaltmasıyla açıklanmaktadır (Nasser vd., 2020). Ayrıca, tüm çevrimler dikkate alınarak elde edilen uzama değerlerinin ortalamaları da bu durumu desteklemektedir. Zira Arall kompozitinin ortalama uzama değeri, diğer kompozitlere kıyasla daha yüksek bulunmuştur.

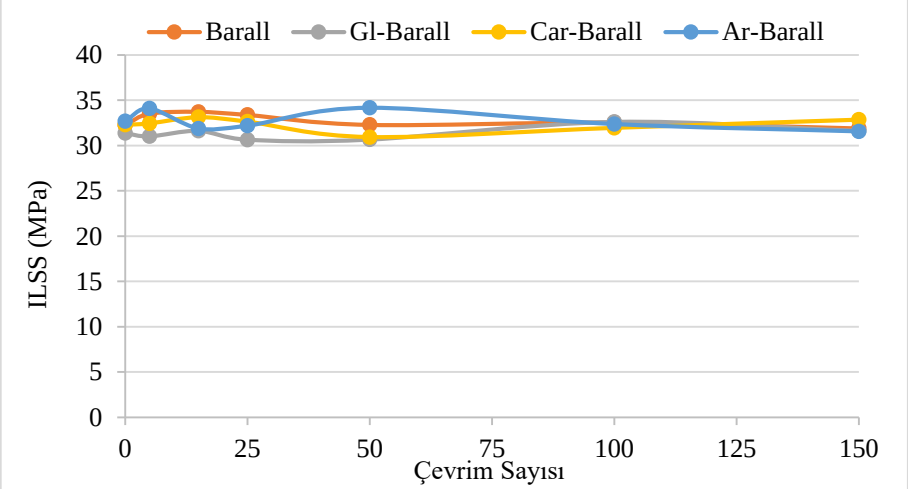
Termal yorulma sürecinde, 150 çevrim sonunda kayma gerilme değerlerindeki değişimin göz ardı edilecek seviyede az olduğu belirlenmiştir. Daha yüksek çevrimlerin uygulandığı diğer çalışmalarda ise Glare ve Carall laminatları üzerindeki termal şokların, kayma gerilmeleri üzerindeki etkilerinin 10.000'den fazla termal döngü sonrasında anlamlı hale geldiği rapor edilmiştir (Müller vd., 2016; Hagenbeek ve Sinke, 2019; Teixeira De Freitas ve Sinke, 2017; Botelho vd., 2007b). Test edilen laminatların tabakalar arası kayma gerilmelerinde önemli farklılıklar gözlenmemesi, fiberlerin metal/kompozit arayüzünün bozulmasını etkili bir şekilde sınırlandırmasından kaynaklanmaktadır. Elde ettiğimiz sonuçlar, Surowska vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada da benzer şekilde ifade edilmiş ve bunun cam fiber katmanlarının metal/kompozit arayüzünün bozulmasını engellemede etkili olduğuna vurgu yapılmıştır.

5.4.2. Hibrit fiberli FML kompozitlere ait SBS testi sonuçları

Farklı termal çevrim süreçlerine tabi tutulan Carall, Barall, Glare ve Arall kompozitleri ile bunların hibrit yapılarına ait SBS testi sonuçlarından elde edilen ILSS grafikleri, sırasıyla Şekil 5.70, Şekil 5.71, Şekil 5.72 ve Şekil 5.73'te verilmiştir.



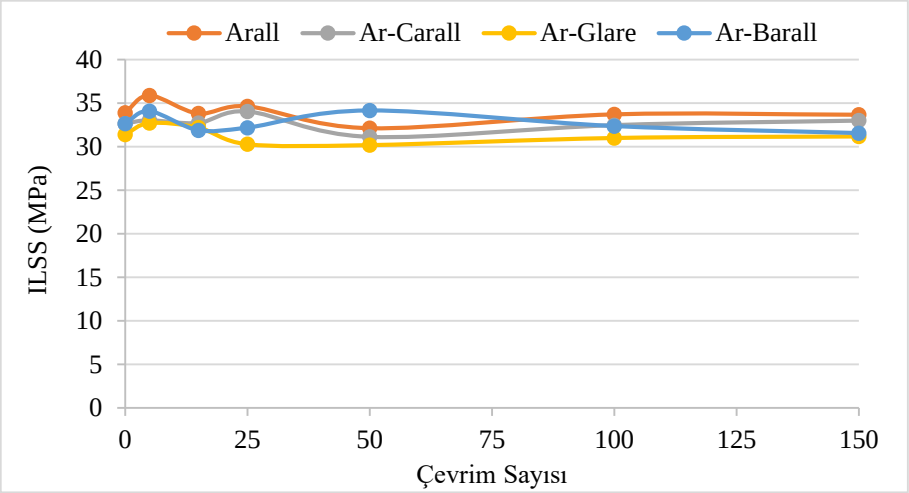
Şekil 5.70. Caral ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre ILSS değişimi



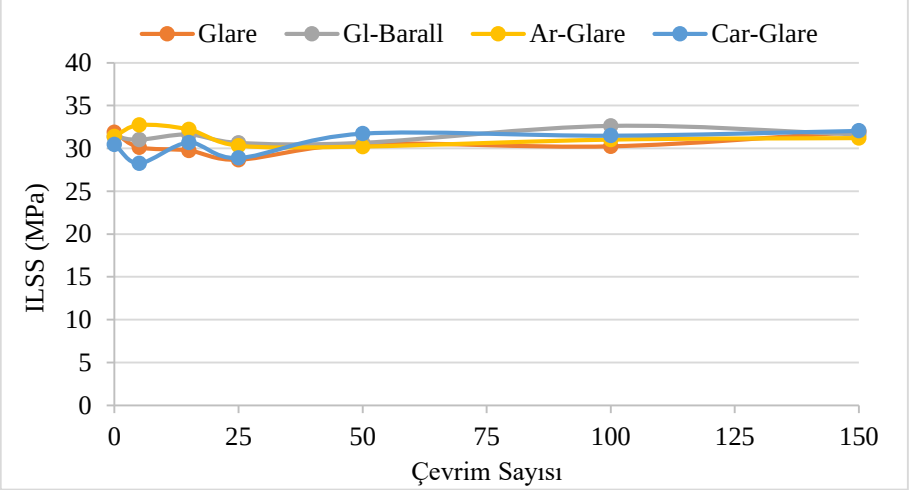
Şekil 5.71. Baral ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre ILSS değişimi

Hibrit fiberli FML kompozitlerin SBS testi sonucundan elde edilen ILSS değerleri incelendiğinde, tüm termal çevrim süreçlerinde aramid fiber içeren hibrit kompozitlerin tabakalar arası kayma gerilmesinin en yüksek olduğu görülmüştür. Hibrit fiberlerin kayma gerilme değerleri, genellikle tek fiberli kompozitlerdeki kayma gerilmelerinin ortalamasına yakın sonuçlar vermiştir. Özellikle Ar-Barall ve Ar-Carall hibritleri,

sırasıyla 32,9 MPa ve 32,7 MPa ile en yüksek tabakalar arası kayma gerilmesi değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 5.72. Arall ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre ILSS değişimi



Şekil 5.73. Glare ve hibritlerinin termal çevrim sayısına göre ILSS değişimi

Tek tip fiberli FML kompozitlerde olduğu gibi, hibrit fiberli FML kompozitlerde de 50 çevrim sonrası ILSS eğrilerinin daha stabil bir seyir izlediği gözlemlenmiştir. Ancak hibrit kompozitlerde dikkat çeken nokta, çevrimsiz ile 150 çevrim arasındaki değişim yüzdesinin tek tip fiberli kompozitlere kıyasla daha yüksek olmasıdır. Tek tip fiberli kompozitlerde bu değişim mutlak olarak %0,3 ile %0,8 arasında değişirken, hibrit kompozitlerde %0,7 ile %2 arasında değişim göstermiştir.

5.4.3. Tabakalı kompozitlerin SBS testi genel değerlendirmesi

Farklı termal çevrim süreçlerine tabi tutulan FML kompozitlere ait SBS testi sonucunda elde edilen sayısal veriler Çizelge 5.21'de verilmiştir.

Çizelge 5.21. FML kompozitlerin SBS testinden elde edilen değerleri

FML Cinsi	*Ortalama ILSS (MPa)*	*Ortalama Uzama (mm)*	*0. Çevrimde ILSS (MPa)*	*150. Çevrimde ILSS (MPa)*	*Değişim (%)*
Carall	31,1	0,327	30,9	31,1	0,4
Barall	32,8	0,386	32,3	32,0	-0,8
Glare	30,2	0,404	31,2	31,1	-0,3
Arall	34,0	0,417	33,9	33,7	-0,7
Ar-Carall	32,7	0,402	32,7	33,0	1,0
Ar-Glare	31,3	0,404	31,4	31,2	-0,7
Car-Glare	30,4	0,389	30,4	31,0	2,0
Gl-Barall	31,4	0,334	31,4	31,6	0,8
Ar-Barall	32,9	0,414	32,9	32,6	-1,0
Car-Barall	32,3	0,394	32,3	32,9	1,8

Farklı FML kompozitlerin ILSS değerleri incelendiğinde, ortalama ILSS değerlerinin en yüksek olduğu kompozit Arall'dır ve bu değer 34,0 MPa olarak ölçülmüştür. Bunu sırasıyla Ar-Barall (32,9 MPa), Barall (32,8 MPa), Ar-Carall (32,7 MPa) ve Car-Barall (32,3 MPa) takip etmiştir. En düşük ortalama ILSS değerleri ise Glare (30,2 MPa) ve Car-Glare (30,4 MPa) kompozitlerinde gözlemlenmiştir.

Termal çevrimlerin başlangıcında (0. çevrim) ve 150. çevrim sonunda ölçülen ILSS değerleri genel olarak çok küçük değişimler göstermiştir. 0. çevrimde en yüksek ILSS değeri Ar-Barall kompozitinde 32,9 MPa iken, 150. çevrim sonunda en yüksek değer Car-Barall'da 32,9 MPa olarak tespit edilmiştir. En düşük ILSS ise 0. çevrimde Carall'da 30,9 MPa, 150. çevrimde ise Ar-Glare'da 31,2 MPa olarak bulunmuştur. Bu veriler, çevrim süresince malzemelerin ILSS değerlerinin oldukça stabil kaldığını göstermektedir.

Çevrim öncesi ve sonrasındaki ILSS değerlerindeki değişim yüzdeleri incelendiğinde, en yüksek pozitif değişimin Car-Glare kompozitinde %2,0 ve Car-Barall'da %1,8 olduğu görülmektedir. Bu, bu iki kompozitin termal çevrim sonrası tabakalar arası kayma dayanımında hafif bir artış yaşadığını göstermektedir. En yüksek negatif değişim ise Ar-Barall'da %1,0 ve Barall'da %0,8 azalma olarak gözlemlenmiştir.

FML kompozitlerin ortalama uzama değerleri incelendiğinde ise en yüksek ortalama uzama değeri Arall kompozitinde 0,417 mm olarak bulunmuştur. En düşük ortalama uzama ise Gl-Barall kompozitinde 0,334 mm olarak elde edilmiştir.

Arall kompoziti hem tabakalar arası kayma dayanımı hem de uzama kapasitesi açısından en üstün performansı sergilemiştir. Hibrit kompozitler ise genel olarak tek tip fiberli kompozitlere benzer dayanım değerleri ve stabilite göstermektedir. Termal çevrimler sonrasında ILSS değerlerinde gözlemlenen küçük değişimler, FML kompozitlerin termal çevrimlere karşı yüksek dayanıklılığa sahip olduğunu ve metal/kompozit arayüzünün sağlam kaldığını göstermektedir.

Arayüz, FML kompoziti oluşturan bileşenlerin termal genleşme katsayısı (CTE) değerleri ile doğrudan ilişkilidir. Alüminyum yüksek bir termal genleşme katsayısına ($22{,}5 \times 10^{-6}$ /°C) sahiptir, ancak daha düşük CTE'ye sahip fiber tabakası ile birleştirildiğinde, sıcaklık değişimlerinde alüminyum ile fiber arasında genleşme farkı oluşur. Bu durum, malzeme birleşim noktalarında gerilmeler yaratmakta ve mikroçatlakların oluşmasına neden olabilmektedir.

Termal çevrimlerde alüminyumun genleşip büzülme miktarı, fiberlere kıyasla daha fazla olduğundan, tabakalar arasında gerilim birikmekte ve bu da fiber-metal arayüzünde dayanım düşüşüne yol açabilmektedir. CTE farkı daha az olan fiberler, bu gerilmeleri daha az oluşturmaktadır. Bunun ana nedeni her iki malzemenin de benzer şekilde genleşip büzülmesidir.

Kullanılan malzemelerin CTE değerleri sırasıyla aramid fiberde $24{,}9 \times 10^{-6}$ /°C, karbon fiberde $22{,}6 \times 10^{-6}$ /°C, cam ve bazalt fiberlerde ise yaklaşık 17×10^{-6} /°C civarındadır. Cam ve bazalt fiberler, CTE değerlerinin alüminyuma daha yakın olması nedeniyle alüminyumla daha uyumlu olup, termal gerilmeleri azaltabilirler. Buna karşın, aramid ve karbon fiberlerin düşük CTE değerleri, alüminyumla termal genleşme farkını artırmakta ve ILSS üzerinde daha fazla etkiye neden olabilirler. Burada, arayüzü oluşturan epoksi matrisinin rolü de önemlidir. Epoksinin oda sıcaklığındaki CTE değeri $60–80 \times 10^{-6}$ /°C arasında değişmekte olup (Singer vd., 2019), bu değer alüminyumla olan CTE farkından daha büyüktür. Epoksi, alüminyum ve fiber arasında yapıştırıcı görevi görerek mekanik yüklerin aktarımını sağlar. Ancak bileşenlerin farklı CTE değerlerine sahip olması, sıcaklık değişimleri sırasında arayüzlerde önemli termal gerilimlerin oluşmasına yol açar. Termal çevrim sırasında sıcaklık arttığında, epoksi yüksek CTE'ye sahip olduğundan en fazla genleşmek ister. Ancak fiberler düşük CTE'ye sahip olduklarından epoksinin genleşmesini kısıtlarlar. Alüminyum ise epoksiden daha az genleşirken, fiberlerden daha fazla genleşir. Bu durum, epoksi tabakasında iç gerilmelerin oluşmasına ve özellikle epoksi-alüminyum arayüzünde gerilim birikimine neden olur (Matvienko vd., 2019).

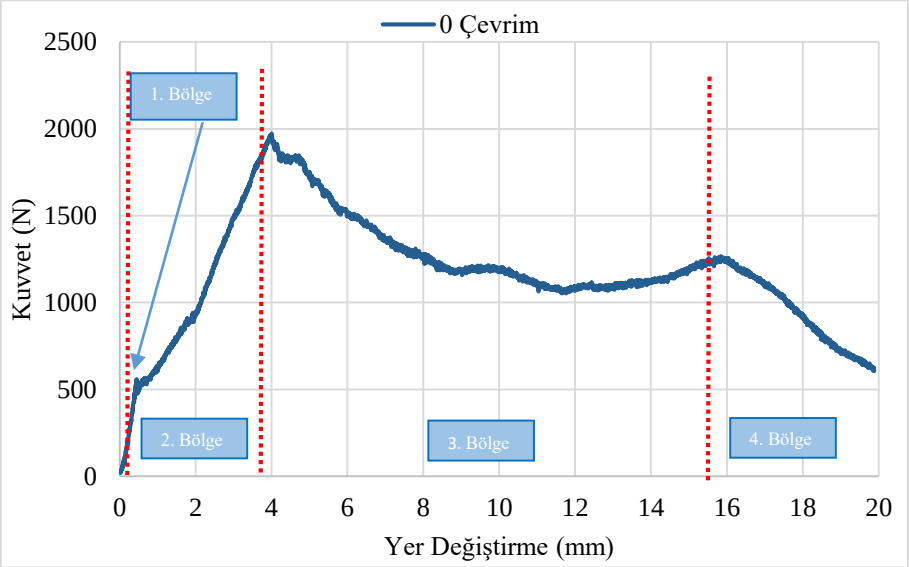
Her ne kadar literatürde, FML kompozitlerde bileşenlerin CTE'nin arayüzey bağının kuvveti üzerinde önemli etkileri olduğu belirtilmiş olsa da, bu çalışmada üretilen FML kompozitlerde arayüzey bağının sağlamlığı, alüminyum levhanın epoksi ve fiber ile temas eden yüzeyinin zımparalanması işlemi ile artırılmıştır. Ayrıca, uygulanan termal çevrimlerde sıcaklık farklarının çok yüksek olmaması ve çevrim sürelerinin makul seviyede tutulması, arayüzey bağının bozulmasını engellediği ve dolayısıyla termal çevrim sürecinde arayüzeyde önemli bir deformasyonun meydana gelmediği düşünülmektedir.

Bununla birlikte, SBS testinde malzemeye uygulanan kuvvet sonucu FML kompozitlerde tabaka diziliminden kaynaklanan kayma gerilmesinin en yoğun olarak ortaya çıktığı bölge, malzemenin orta noktası olan alüminyum tabakasıdır. Onu takip eden en yüksek kayma gerilmesi ise alüminyum-epoksi birleşme arayüzünde gözlemlenmektedir (Selmy vd., 2012). Bu arayüz bölgesi, komşu alanlar olan alüminyum ve fiber-epoksi bölgelerine kıyasla daha zayıf yapıya sahip olduğundan, kuvvet etkisi altında delaminasyon hasarları genellikle burada başlamaktadır. Literatürde de tabakalar arası kayma gerilmesi değerlendirilirken, epoksi matrisinin fiber ile bağlanmasının yanı sıra alüminyum ile epoksi arasındaki bağın da önemi vurgulanmaktadır. Yüksek kayma kuvvetleri uygulandığında, tabakalar arası ayrılmanın metal-kompozit arayüzünde gerçekleşmesi, alüminyum ile epoksi arasındaki bağın göreceli olarak zayıf olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, kayma gerilmesinden kaynaklanan hasarlar çoğunlukla bu arayüz bölgesinde ortaya çıkmaktadır (Dhaliwal ve Newaz, 2016).

5.5. QSPT Sonuçları

Yarı statik penetrasyon testi (QSPT), genellikle ince levha veya kompozit malzemelerin düşük hızlarda uygulanan darbe yüklerine karşı dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla kullanılan mekanik bir test yöntemidir. Bu testte, özel olarak tasarlanmış bir delici uç yardımıyla numuneye yavaş ve kontrollü bir şekilde artan bir yük uygulanır. Yükleme sırasında malzemenin deformasyon davranışı, delme veya diğer hasar oluşumları kaydedilerek incelenir. Böylece, malzemenin gerçek davranışı daha ayrıntılı ve net bir şekilde gözlemlenebilir.

FML kompozitlere ait numunelerden, termal çevrimsiz (0 çevrim) Carall numunesinin QSPT sonucu elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği örnek olarak Şekil 5.74'te verilmiştir.



Şekil 5.74. Carall kompozit numunesinin QSPT grafiği

Zımbanın malzemeye temas anında başlayan hızlı kuvvet artışı, numunenin elastik ve elastik-plastik davranışını yansıtmaktadır. Bu aşamada, malzeme deformasyona karşı direnç göstererek uygulanan kuvvet hızla yükselir. Belirli bir kuvvet seviyesinden sonra gözlenen hafif düşüş, malzeme yüzeyinde mikro hasarların veya küçük çatlakların oluşumuna işaret eder. Takip eden kuvvet artışı ise malzemenin ilerleyen plastik deformasyonuna bağlı olarak yük taşıma kapasitesinin tekrar yükseldiğini göstermektedir. Maksimum kuvvet değerine ulaşıldıktan sonra, kuvvetteki kademeli azalma, malzemede kritik hasar gelişimi ve yırtılma süreçlerinin başladığını gösterir. Bu azalma dönemi boyunca, yer değiştirme mesafesinde görülen yatay seyir, malzemenin enerji emme kapasitesine bağlı plastik akma veya kayma fazını temsil eder. Son aşamada kuvvette meydana gelen azalma ise numunenin zayıflaması ve nihai hasarın gerçekleştiğine işaret eder. Literatürde, kuvvet değişimlerinin malzemenin mikro yapısal davranışları ve hasar mekanizmalarıyla yakından ilişkili olduğu belirtilmiştir (Lee ve Sun, 1993; Bati ve Çelik, 2024).

Şekil 5.74'te grafik üzerinde işaretlenen bölgeler ve bunlara ilişkin açıklamalar aşağıda ayrıntılı şekilde verilmiştir.

1. Bölge: Başlangıç noktasından bu bölgenin sonuna kadar kuvvet neredeyse doğrusal olarak artış göstermektedir. Bu süreçte, kompozit malzemenin zımbaya temas eden üst yüzeyinde lokal plastik deformasyon başlar ve üst katmandaki matris bölgesinde

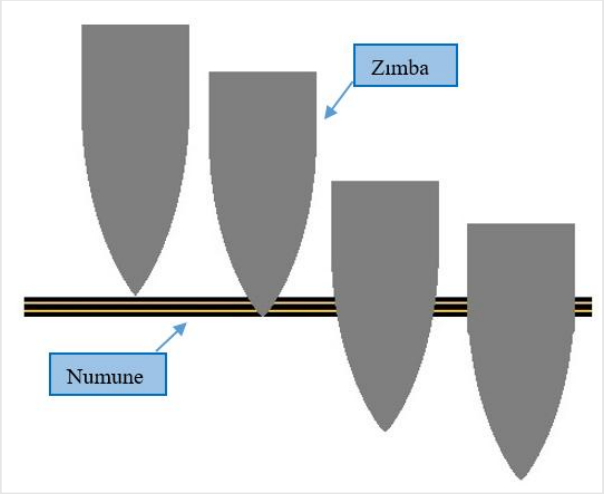
hasar meydana gelir. Bölgedeki çatlak oluşumu, eğride yerel bir maksimum noktasına ulaşarak hafif bir düşüşe sebep olur.

2. Bölge: İlk hafif düşüşün ardından, bu bölgenin başlangıcından itibaren kuvvet tekrar artış göstererek ikinci bir tepe noktasına ulaşır ve maksimum değeri belirler. Bu maksimum noktaya kadar, kompoziti oluşturan tüm tabakalarda plastik hasar gelişir. Zirve noktasına ulaşıldığında, en alt tabakadaki alüminyum levhada ilk çatlak oluşur ve bunun sonucunda kuvvette düşüş eğilimi gözlemlenmeye başlar.

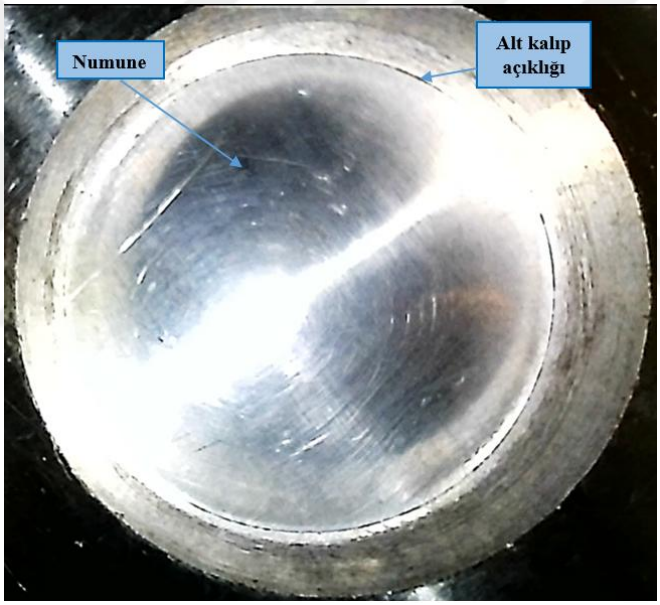
3. Bölge: Ojiv burun geometrisine sahip zımbanın ilerlemesi sırasında çatlak oluşumları artar ve çatlaklarda dallanmalar meydana gelir, bu da hasarın büyümesine yol açar. Belirli bir seviyeye ulaşıldığında yeni çatlak oluşumu durur, ancak mevcut çatlakların ilerlemesi devam eder. Bu çatlak ilerlemesi sürecinde uygulanan kuvvet, yataya yakın sabit bir seviyede seyreder. Üst yüzeydeki çatlak ilerlemeye devam eder.

4. Bölge: Çatlak ilerlemesi, zımbanın ojival kısmı üst tabakadan geçip silindirik yan yüzeylerine temas ettiğinden, kompozit malzemenin üst tabakasında durur. Zımba aşamalı olarak en alt tabakaya kadar ilerledikçe kuvvette düşüş gözlemlenir. Ojival burun bölgesi en alt tabakayı terk ettiğinde, gösterge üzerindeki kuvvet değeri yalnızca kompozitin zımbaya temas eden yüzeyindeki sürtünme kuvvetini yansıtır.

Bu bölgelerin oluşumunda, zımbanın malzemeye nüfuz etme mekanizması, uygulanan kuvvetin etkisi altında malzemenin delinmesi ile birlikte, malzeme içerisindeki deformasyonlara bağlı olarak mikroçatlaklar ve yırtılmaların gelişimi temel rol oynamaktadır. Bu süreçler, grafikte gözlemlenen karakteristik eğrinin şekillenmesinde belirleyici etkenlerdir. Şekil 5.75'te, zımbanın malzemeye temas ederek nüfuz etmesi ve malzemeyi delip çıkışını sembolize eden şematik bir gösterim sunulmuştur. Ancak, bu delme sürecinde malzemedeki çatlak oluşumu ve ilerleyişine dair doğrudan görsel bir veri mevcut değildir. Bu nedenle, delme davranışının ayrıntılı olarak incelenebilmesi amacıyla, QSPT testi sırasında FML numunesinin altına yerleştirilen kamera aracılığıyla çatlak oluşumu ve ilerlemesi anlık olarak kayda alınmış ve bu görüntü Şekil 5.76'da verilmiştir.

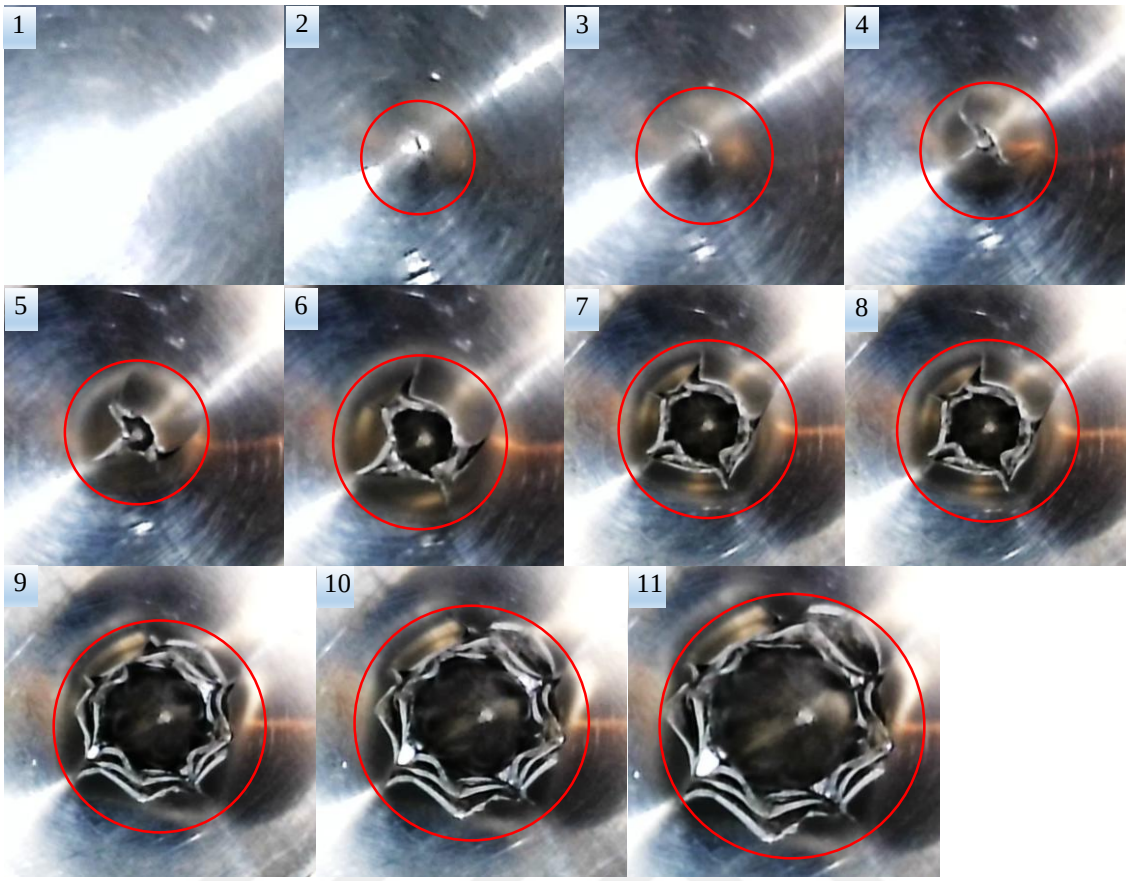


Şekil 5.75. Zımbanın malzemeye nüfuz etme aşamalarının şematik gösterimi

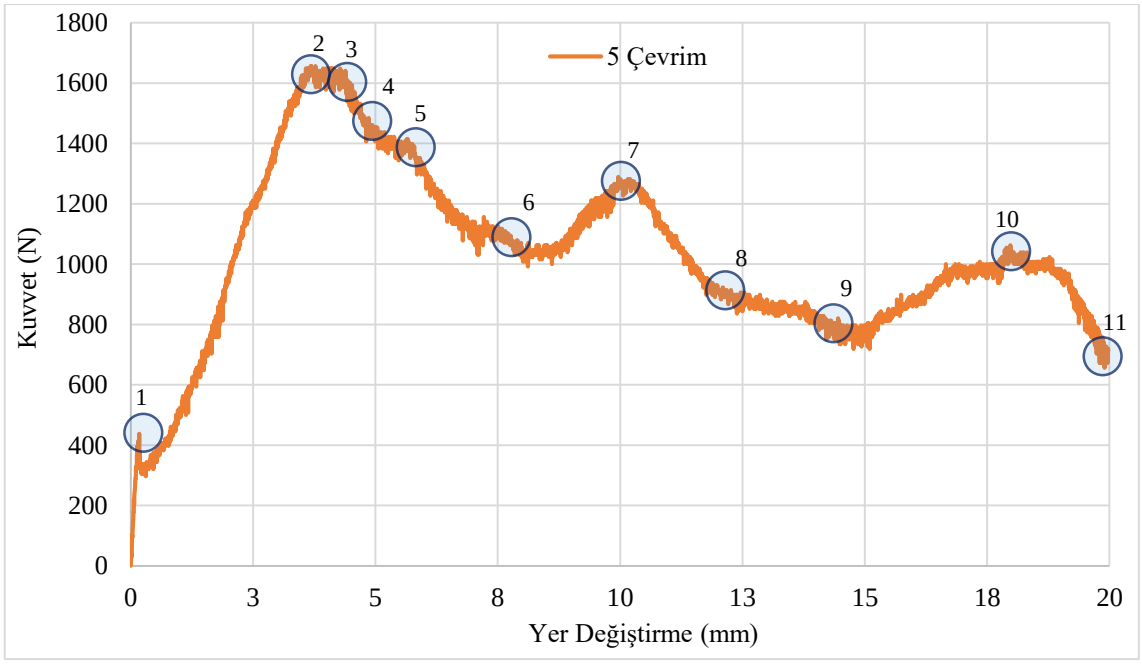


Şekil 5.76. Delinme sürecini alttan kayıt eden kameraya ait numunenin ilk görüntüsü

Çatlak ilerlemesi kaydı için örnek alınan Barall kompozitinin 5 çevrim numunesine ait görüntüler (Şekil 5.77), kuvvet – yer değiştirme eğrisi (Şekil 5.78) ile eşleştirilerek hasar oluşumu ilişkilendirilmiştir. Test süresi ve görüntü kayıt zamanlaması eş zamanlı başlatılmış olup, eğri üzerinde numaralandırılmış konumlarda kompozitteki çatlak ilerleme ve delinme süreçleri görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 5.77. Delinme aşamalarına ait kamera görüntüleri



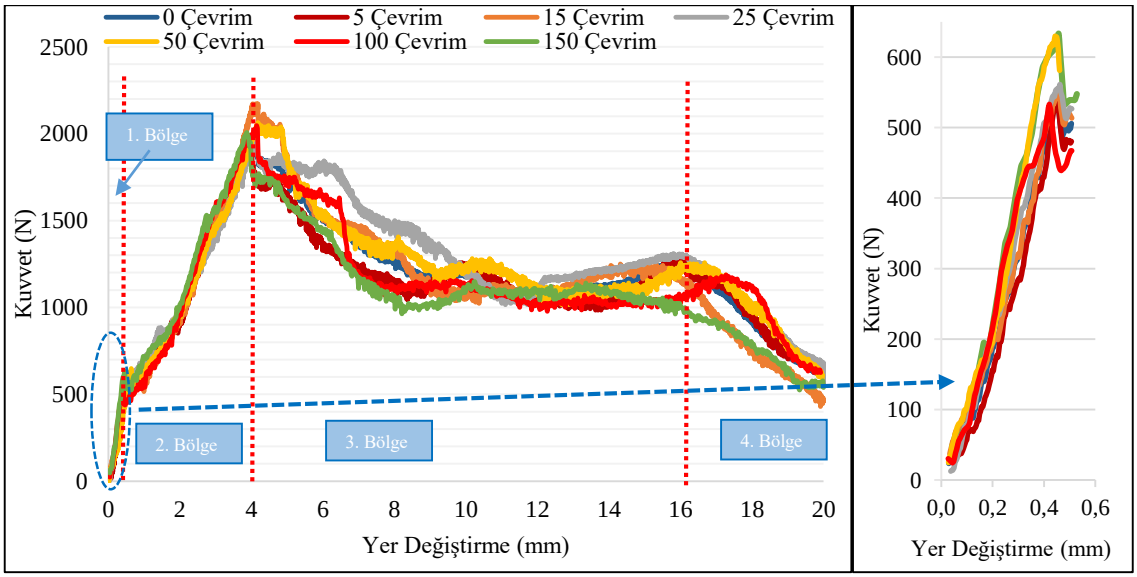
Şekil 5.78. Delinme aşamaları görüntülerinin kuvvet – yer değiştirme grafiği üzerindeki karşılığı

QSPT eğrisindeki 1 numaralı yer değiştirme noktasında (0,17 mm), testin henüz 8. saniyesinde ve toplam 16 dakikalık test süresinin başlangıç aşamasında, matris yapısında ilk kırılma gözlemlenmiştir. 2 numaralı aşamada, zımbanın kompozitin alt yüzeyine tam olarak temas etmediği bu erken evrede, zımbanın burun formu belirginleşmeye başlamış ve ilk çatlak oluşumları tespit edilmiştir. 3 numaralı noktada, burun formu daha belirgin hale gelmiş; mevcut çatlakların boyu gözle görülür şekilde artış göstermiştir. 4 numaralı aşamada ise burun yapısı daha net bir şekilde izlenebilir hale gelmiş, mevcut çatlaklar büyümüş, yeni çatlak kolları oluşmuş ve zımbanın ucu alt yüzeyde görünür hâle gelmiştir. Test süreci boyunca çatlakların ilerlemesi devam etmiş; mevcut çatlaklardan türeyen yeni dallanmalar, kompozit malzeme içerisinde ilerleyici bir hasar mekanizmasının geliştiğini ortaya koymuştur.

5.5.1. Tek tip fiberli kompozitlerin QSPT sonuçları

5.5.1.1. Carall kompozitinin QSPT sonucu

Termal çevrime tabi tutulmuş Caral kompozit numunelere ait kuvvet – yer değiştirme şeklindeki QSPT eğrileri Şekil 5.79'daverilmiştir.



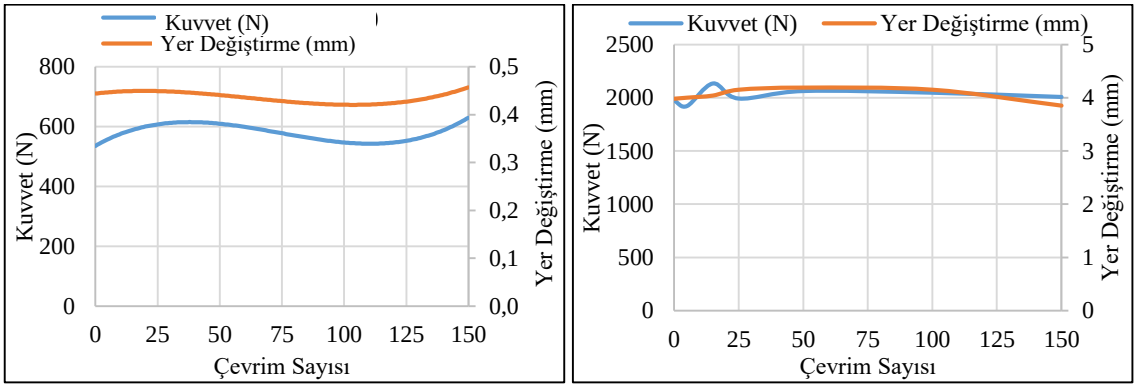
Şekil 5.79. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Carall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği

Şekil 5.79'daki tüm çevrimler incelendiğinde, birinci bölgede yerel maksimum noktanın 532 – 648 N yük değerleri ve 0,42 – 0,46 mm yer değiştirme aralığında

gerçekleştiği görülmektedir. İkinci bölgede ise maksimum kuvvetler 1922 – 2134 N arasında, bu kuvvetlere karşılık gelen yer değiştirmeler ise 3,85 – 4,15 mm aralığında oluşmuştur.

Şekil 5.79'daki birinci bölgede, termal çevrim uygulamasıyla numunelerde ilk matris kırılmasının gerçekleştiği yer değiştirme miktarının çok az değiştiği, buna karşılık kuvvet değerlerinde hafif bir artış eğiliminin olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, birinci bölgenin büyütülmüş görüntüsünde açıkça görülebilmektedir. İkinci bölgedeki eğriler incelendiğinde, termal çevrimlerin etkisiyle malzemelerde hem maksimum yük değerinde hem de uzama miktarında değişim meydana geldiği; ancak 150 çevrim sonunda kayda değer bir fark oluşmadığı tespit edilmiştir. Bunun dışında, ikinci bölgede herhangi bir numunede ikinci bir tepe oluşumu gözlemlenmemiştir.

0 ve 150 çevrime tabi tutulmuş numuneler karşılaştırıldığında, termal çevrim uygulamasının maksimum kuvvet üzerinde ihmal edilebilir düzeyde bir artışa yol açtığı görülmektedir (1973–2007 N; %1,7 artış). Buna karşılık, tepe noktasının gerçekleştiği yer değiştirme miktarında hafif bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir (3,98–3,85 mm; %3,3 azalış). Bu eğilim, Şekil 5.80'de net bir biçimde ortaya konmaktadır. Ayrıca, farklı termal çevrim sürelerine maruz bırakılan Carall kompozit numunelerin birinci ve ikinci bölgelerinde elde edilen maksimum kuvvet değerleri ile bu kuvvetlere karşılık gelen yer değiştirme miktarları Çizelge 5.22'de detaylı olarak sunulmuştur.



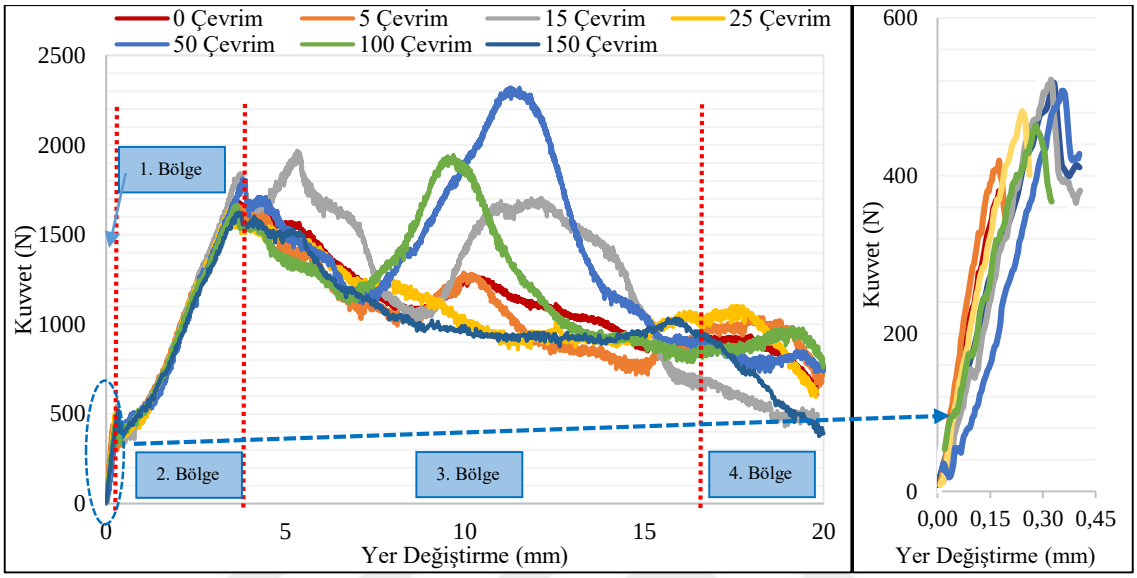
Şekil 5.80. Soldan sağa Caral numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri

Çizelge 5.22. QSPT testine ait Carall numunelerinin mekanik yanıt verileri

Çevrim Sayısı		***0***	***5***	***15***	***25***	***50***	***100***	***150***
1. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	558	554	562	585	648	532	632
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	0,45	0,44	0,46	0,45	0,64	0,42	0,46
2. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	1973	1922	2134	1992	2063	2047	2007
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	3,98	4	4,04	4,15	4,19	4,15	3,85

5.5.1.2. Barall kompozitinin QSPT sonucu

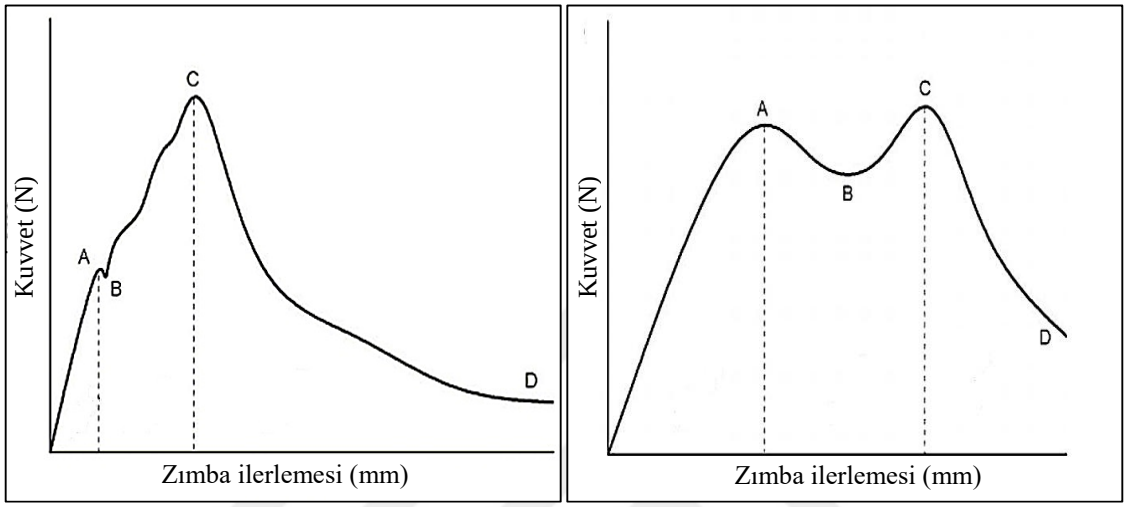
Termal çevrim uygulanmış Baral kompozit numunelerinin QSPT eğrileri Şekil 5.81'de gösterilmiştir.



Şekil 5.81. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Barall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği

Tüm çevrimler incelendiğinde, birinci bölgede yerel maksimum noktalarının 392–507 N yük değerleri ve 0,175–0,329 mm yer değiştirme aralığında gerçekleştiği görülmüştür. İkinci bölgede ise maksimum kuvvetler 1624–1843 N arasında, bu noktalardaki yer değiştirmeler ise 3,471–3,796 mm aralığında oluşmuştur. Diğer tek tip fiberli kompozitlerden farklı olarak, Barall kompozitlerinde grafiğin üçüncü bölgesinde ikinci hatta üçüncü yerel maksimum değerler tespit edilmiştir. Bu değerler bazı testlerde, ikinci bölgedeki maksimum değeri dahi aşmıştır. Örneğin, 50 çevrimde test edilen numunede üçüncü bölgedeki maksimum kuvvet değeri (2320 N), ikinci bölgedeki değerden (1812 N) yüksek bulunmuştur. Benzer şekilde, 100 çevrim numunesinde de (1945 N – 1664 N) bu eğilim gözlenmiştir. Ayrıca, Barall'ın 15 çevrim numunesinde üçüncü bölgede iki adet maksimum kuvvet tepesi oluştuğu belirlenmiştir. Literatürde benzer eğri davranışlarındaki bu farklılıkların, malzeme kalınlığı ve delinme davranışına bağlı çatlak ilerleme şeklinin bir sonucu olduğu ifade edilmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça, zımbanın malzeme üzerindeki sürtünme kuvvetinin de arttığı belirtilmiştir. İnce malzemelerde birinci tepe kuvveti, ikinci tepe kuvvetinden daha düşük iken; kalın

malzemelerde birinci ve ikinci tepe kuvvetlerin yaklaşık olarak eşit olduğu rapor edilmiştir (Şekil 5.82). Çatlak köprüleme mekanizmasından kaynaklanan çatlak sayısının artması durumunda ise birden fazla kuvvet tepe noktasının oluştuğu bildirilmiştir (Ruan vd., 2010). Barall numunesinde benzer davranışlar özellikle 15, 100 ve 150 çevrimlerde gözlenmiştir.

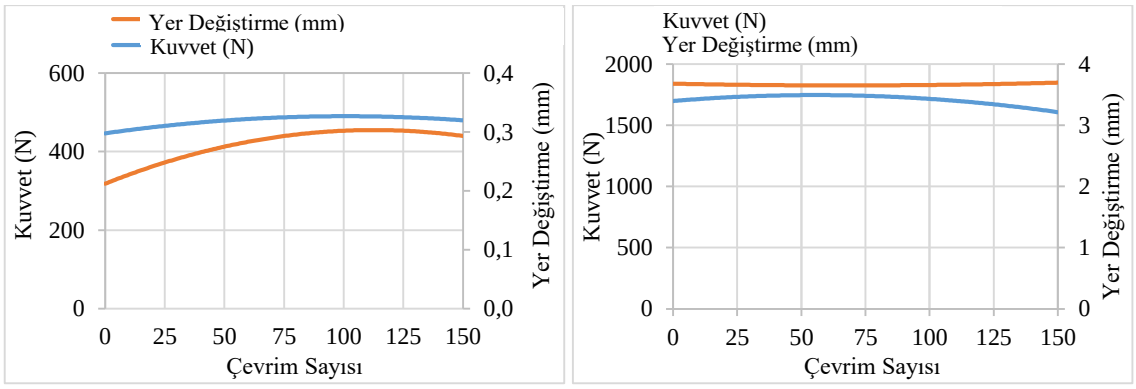


Şekil 5.82. Zımba ilerlemesine bağlı kuvvet – yer değiştirme grafik türleri (Ruan vd., 2010)

0 ile 150 çevrim arasındaki numuneler incelendiğinde, termal çevrimin maksimum kuvvet üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir (1685–1624 N; %3 azalış). Tepe noktasına karşılık gelen yer değiştirme miktarı ise oldukça istikrarlı bir seyir izlemiş ve hafif bir artış göstermiştir (3,692–3,709 mm; %0,4 artış). Bu durum, Şekil 5.83'te açıkça görülmektedir. Farklı termal çevrim sürelerine maruz bırakılan Barall kompozit numunelerin ilk üç bölgesinde elde edilen maksimum kuvvet değerleri ile bu kuvvetlere karşılık gelen yer değiştirme miktarları Çizelge 5.23'te verilmiştir.

Çizelge 5.23. QSPT testine ait Barall numunelerinin mekanik yanıt verileri

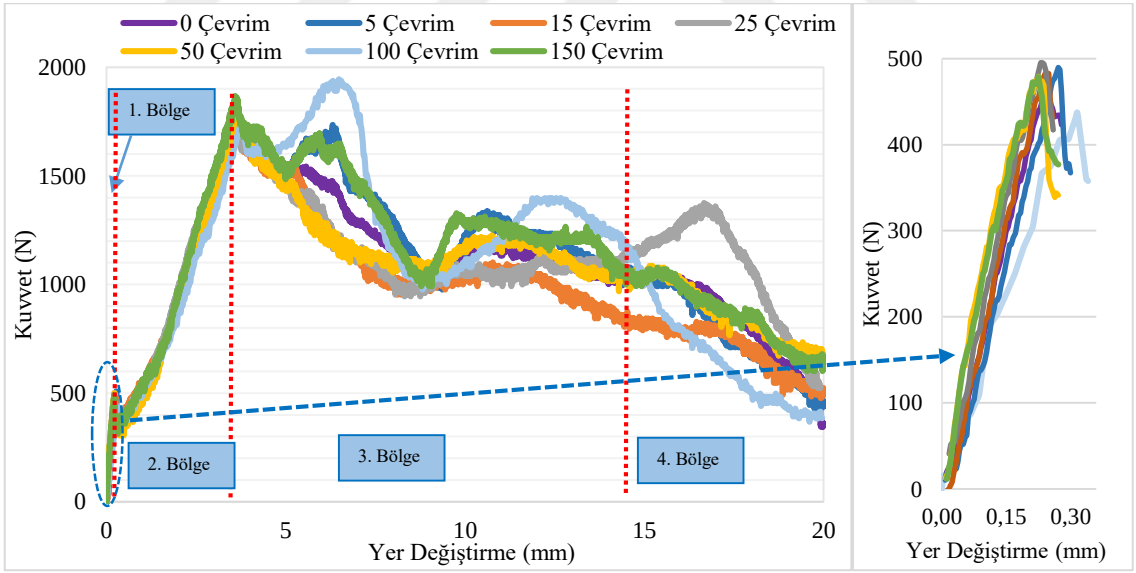
	Çevrim Sayısı	***0***	***5***	***15***	***25***	***50***	***100***	***150***
1. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	392	437	507	500	500	429	502
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	0,18	0,18	0,32	0,24	0,329	0,23	0,32
2. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	1685	1656	1843	1640	1812	1664	1624
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	3,69	3,68	3,74	3,47	3,78	3,61	3,71
3. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	1269	1289	1968	-	2320	1945	-
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	10,27	9,96	5,38	-	11,25	9,68	-



Şekil 5.83. Soldan sağa Barall numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri

5.5.1.3. Glare kompozitinin QSPT sonucu

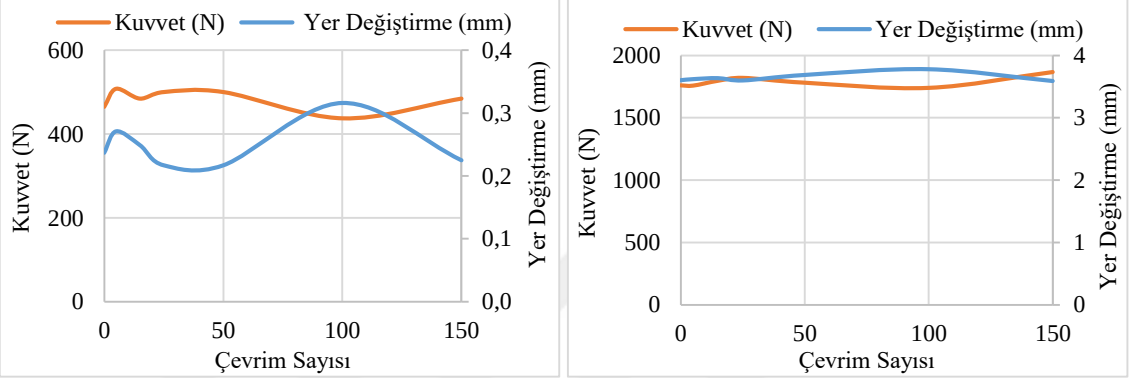
Termal çevrime maruz bırakılmış Glare kompozit numunelerine ait QSPT eğrileri Şekil 5.84 ve Şekil 5.85'te gösterilmiştir. Bu eğrilerde gözlemlenen maksimum kuvvet değerleri ile bu kuvvetlere karşılık gelen yer değiştirme miktarları ise Çizelge 5.24'te ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 5.84. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Glare numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği

Glare kompozitinin çevrim sayısına bağlı olarak elde edilen QSPT sonuçları incelendiğinde, birinci bölgede yerel bir maksimum noktanın 437 – 508 N aralığında kuvvet değerleriyle ve 0,22 – 0,32 mm arasında değişen yer değiştirme değerlerinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. İkinci bölgede ise maksimum kuvvet değerleri 1739 –

1867 N arasında ölçülmüştür. Bu kuvvetlere karşılık gelen yer değiştirme değerleri ise 3,78 – 3,59 mm aralığında gerçekleşmiştir. Üçüncü bölge incelendiğinde, 5 ve 100 çevrim eğrilerinde kuvvet artışlarını gösteren belirgin tepeciklerin oluştuğu görülmüştür. Ayrıca 150 çevrim eğrisinde, ikinci bölgedekinden daha yüksek kuvvet değerlerine ulaşıldığı kaydedilmiştir. Bu bölgede oluşan kuvvet tepelerinin yer değiştirme eksenine olan yakınlıkları dikkat çekmektedir.



Şekil 5.85. Soldan sağa Glare numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri

Çizelge 5.24. QSPT testine ait Glare numunelerinin mekanik yanıt verileri

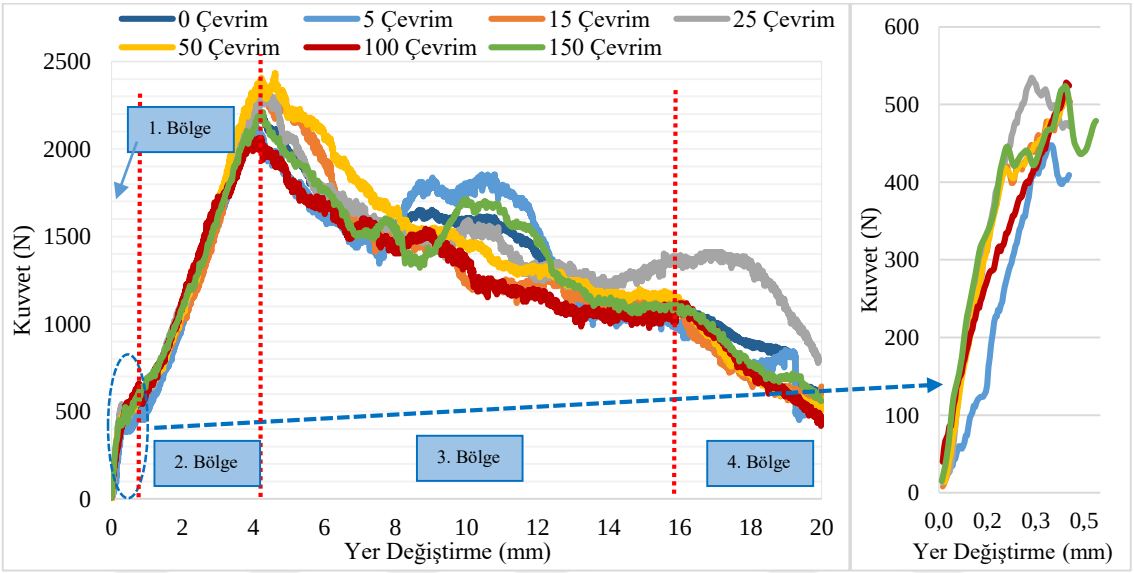
	Çevrim Sayısı	***0***	***5***	***15***	***25***	***50***	***100***	***150***
1. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	465	508	484	500	500	437	484
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	0,24	0,27	0,25	0,22	0,22	0,32	0,23
2. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	1760	1758	1797	1820	1781	1739	1867
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	3,60	3,62	3,63	3,60	3,68	3,78	3,59
3. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	-	1734	-	-	-	1937	1695
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	-	6,31	-	-	-	6,32	5,93

Dördüncü bölgede ise özellikle 25 çevrim eğrisinde gözlenen kuvvet artışının, son çatlak köprüleme mekanizması ve bunun sonucunda ortaya çıkan artan sürtünme kuvveti etkisiyle meydana geldiği düşünülmektedir.

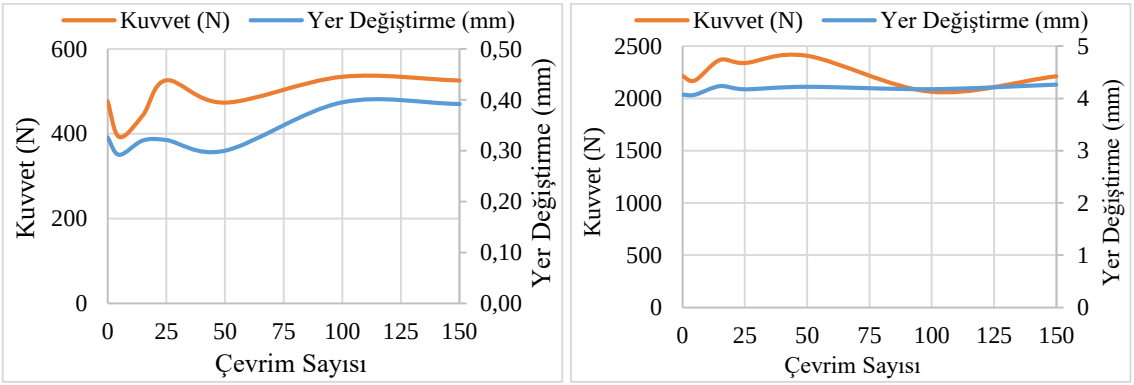
Tüm termal çevrim uygulanmış örneklerin ikinci bölgedeki maksimum kuvvet ve bu kuvvetlere karşılık gelen yer değiştirme değerleri dikkate alındığında, Glare kompozitinin diğer kompozit malzemelere kıyasla daha stabil bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Diğer kompozitlerde maksimum kuvvet değerleri arasında 200 N'nin üzerinde bir değişim görülürken, Glare kompozitinde bu fark 128 N ile sınırlı kalmıştır. Benzer şekilde, yer değiştirme değerleri açısından diğer kompozitlerde yaklaşık 0,33 mm'lik bir değişim söz konusu iken, Glare'de bu değişim 0,19 mm olarak ölçülmüştür.

5.5.1.4. Arall kompozitinin QSPT sonucu

Şekil 5.86 ve Şekil 5.87'de, termal çevrime tabi tutulmuş Arall kompozit numunelerine ait QSPT eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerde elde edilen maksimum kuvvet değerleri ile bu değerlere karşılık gelen yer değiştirme miktarlarına ilişkin sayısal verilere ise Çizelge 5.25'te yer verilmiştir.



Şekil 5.86. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Arall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği



Şekil 5.87. Soldan sağa Arall numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri

Arall kompozit numunesinin çevrim sayısına bağlı olarak elde edilen QSPT sonuçları incelendiğinde, birinci bölgede yerel maksimum noktaların 393 – 535 N aralığındaki yük değerleri ve 0,29 – 0,40 mm arasındaki yer değiştirme değerleriyle meydana geldiği belirlenmiştir. İlk matris kırılmasının gerçekleştiği bu bölgede Arall

kompoziti, diğer tek tip fiber içeren kompozitlerden farklı olarak kuvvet – yer değiştirme eğrisinde zikzaklı bir davranış sergilemiştir. Bu durumun, aramid fiberin yükü geniş bir alana yayma özelliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. İkinci bölgede ise maksimum kuvvet değerlerinin 2063 – 2434 N aralığında değiştiği, bu değerler arasında yaklaşık 371 N'lik bir fark bulunduğu tespit edilmiştir. Aynı noktadaki yer değiştirme değerleri ise 4,07–4,62 mm arasında gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.25. QSPT testine ait Arall numunelerinin mekanik yanıt verileri

	Çevrim Sayısı	***0***	***5***	***15***	***25***	***50***	***100***	***150***
1. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	477	393	443	526	474	535	526
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	0,33	0,29	0,36	0,32	0,30	0,40	0,39
2. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	2214	2171	2368	2338	2434	2063	2212
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	4,07	4,07	4,24	4,18	4,62	4,18	4,27

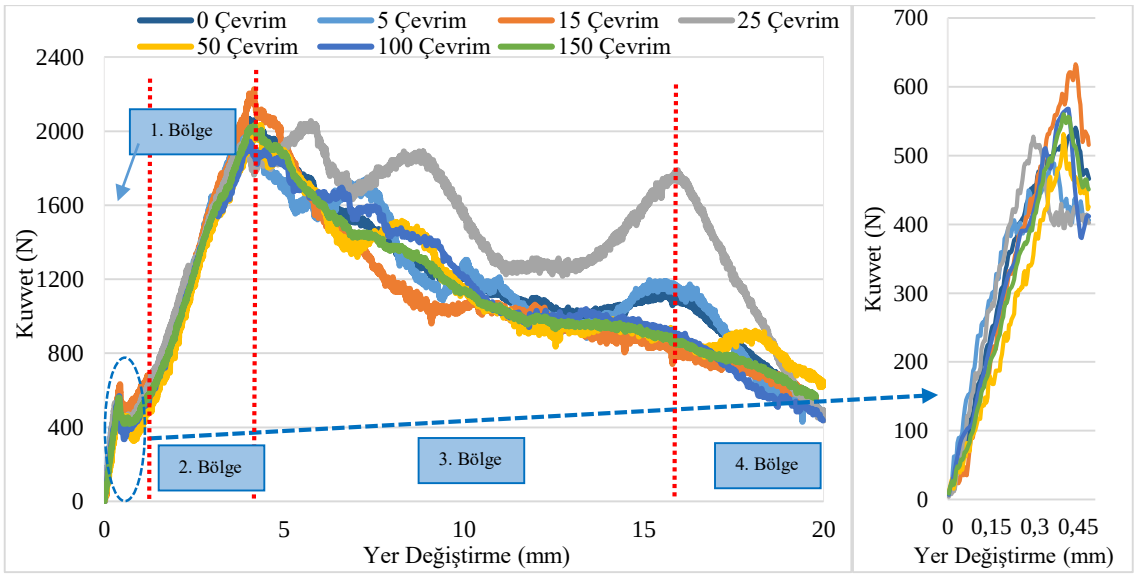
0 ve 150 çevrim geçirmiş numunelerin QSPT maksimum kuvvet – yer değiştirme değerleri karşılaştırıldığında, maksimum kuvvetler arasında yalnızca 2 N, yer değiştirme değerleri arasında ise 0,2 mm'lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, 150 termal çevrimin Arall kompozitinin delinme davranışı üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olmadığını ortaya koymaktadır.

5.5.2. Hibrit kompozitlerin QSPT sonuçları

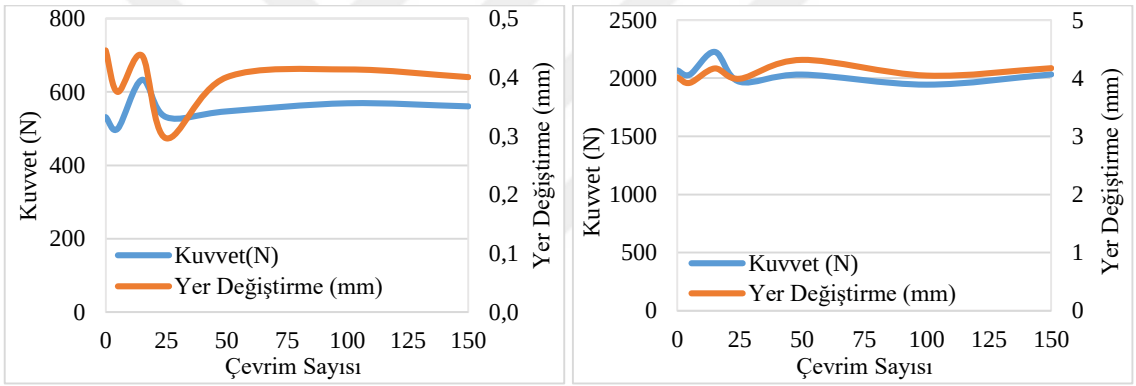
5.5.2.1. Ar-Carall kompozitinin QSPT sonucu

Aramid ve karbon fiberler ile alüminyum tabakalardan oluşan Ar-Carall kompozitine ait, termal çevrime maruz bırakılmış numunelerin QSPT kuvvet – yer değiştirme eğrileri Şekil 5.88 ve Şekil 5.89'da gösterilmiş, bu eğrilere ait sayısal veriler ise Çizelge 5.26'da verilmiştir.

Aramid ve karbon fiberlerden oluşan Ar-Carall kompozitinin çevrim sayısına bağlı olarak elde edilen QSPT sonuçları incelendiğinde, birinci bölgede yerel maksimum kuvvet noktası 500 – 633 N ve 0,30 – 0,45 mm yer değiştirme aralığında gerçekleşmiştir. Arall kompozitinde gözlemlenen yüksek genlikli kuvvet değişimleri, aramid fiberin etkisiyle Ar-Carall kompozitinde de benzer şekilde ortaya çıkmıştır. İkinci bölgede ise maksimum kuvvetler 1944 – 2266 N arasında, bu noktadaki yer değiştirmeler ise 3,92 – 4,32 mm arasında oluşmuştur. Elde edilen bu değerlerin, Arall ve Carall kompozitlerinden elde edilen değerlerin arasında yer aldığı görülmektedir.



Şekil 5.88. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Ar-Carall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği



Şekil 5.89. Soldan sağa Ar-Caral numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri

Çizelge 5.26. QSPT testine ait Ar-Carall numunelerinin mekanik yanıt verileri

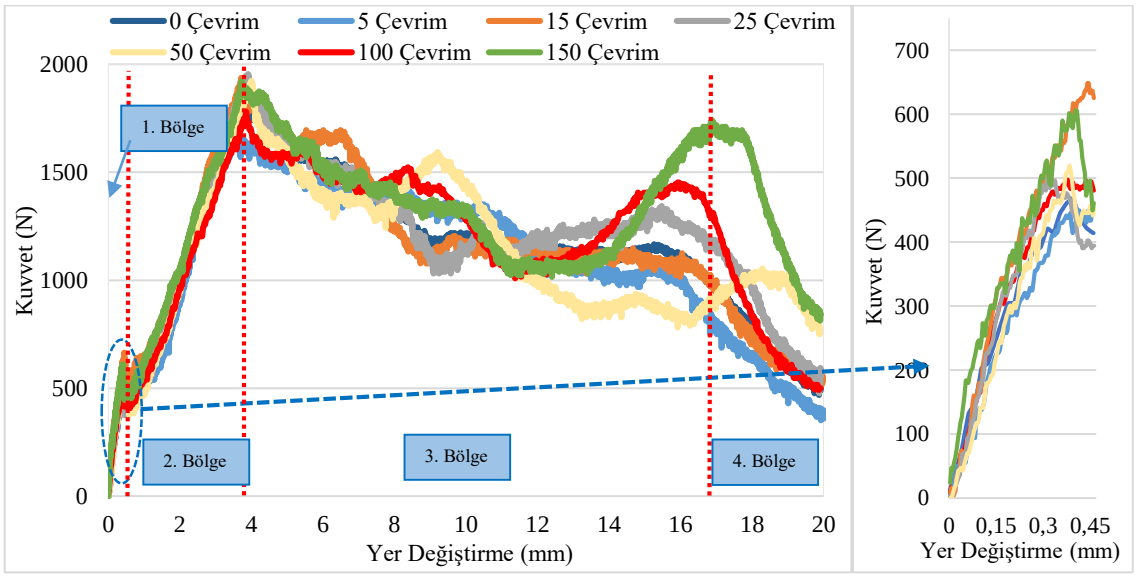
	Çevrim Sayısı	***0***	***5***	***15***	***25***	***50***	***100***	***150***
1. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	531	633	500	531	547	569	560
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	0,45	0,44	0,32	0,30	0,40	0,41	0,40
2. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	2066	2031	2226	1968	2031	1944	2032
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	4,01	3,92	4,17	3,99	4,32	4,04	4,17
3. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	-	-	-	2055	-	-	-
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	-	-	-	5,75	-	-	-
4. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	-	-	-	1789	-	-	-
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	-	-	-	15,95	-	-	-

0 ve 150 çevrime tabi tutulmuş Ar-Carall kompozit numunelerine ait QSPT maksimum kuvvet – yer değiştirme değerleri incelendiğinde, maksimum kuvvetler arasında 34 N, yer değiştirme değerleri arasında ise 0,16 mm'lik bir fark olduğu tespit

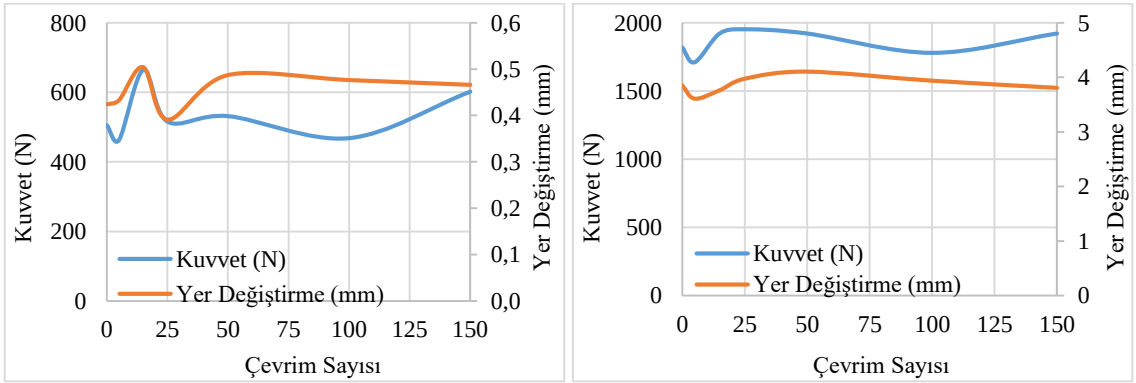
edilmiştir. Bu sonuçlar, 150 termal çevrimin Ar-Carall kompozitinin delinme davranışı üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir.

5.5.2.2. Ar-Glare kompozitinin QSPT sonucu

Aramid ve cam fiberler ile alüminyum tabakalardan oluşan Ar-Glare kompozitine ait, termal çevrime maruz bırakılmış numunelerin QSPT kuvvet–yer değiştirme eğrileri Şekil 5.90 ve Şekil 5.91'de gösterilmiş olup, bu eğrilere ilişkin sayısal veriler Çizelge 5.27'de sunulmuştur.



Şekil 5.90. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Ar-Glare numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği



Şekil 5.91. Soldan sağa Ar-Glare numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri

Çizelge 5.27. QSPT testine ait Ar-Glare numunelerinin mekanik yanıt verileri

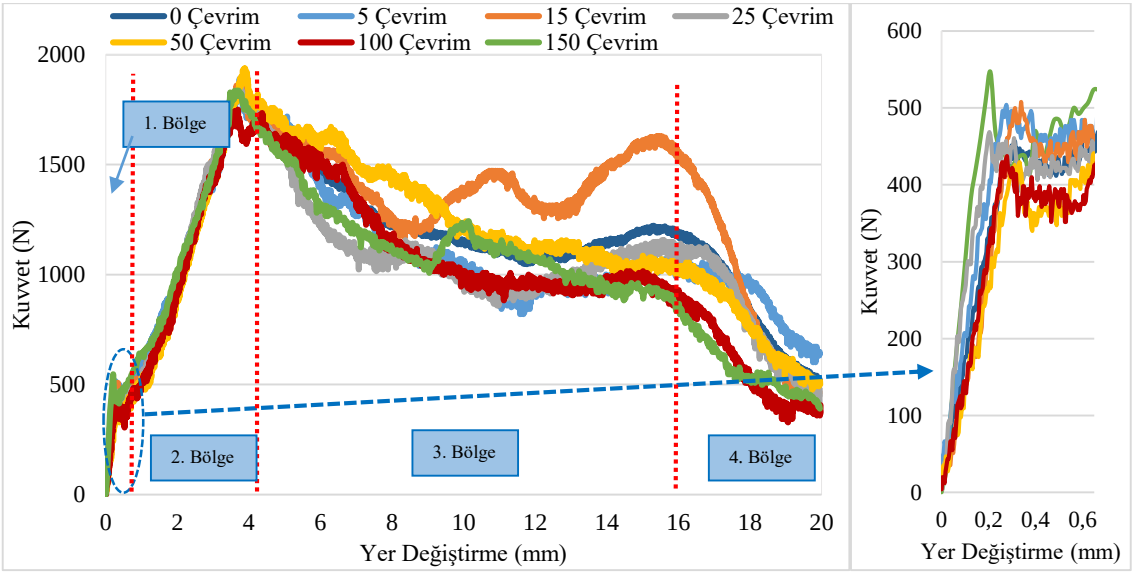
	Çevrim Sayısı	***0***	***5***	***15***	***25***	***50***	***100***	***150***
1. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	505	484	664	516	484	468	602
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	0,42	0,66	0,50	0,39	0,66	0,48	0,47
2. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	1820	1711	1922	1953	1922	1780	1922
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	3,85	3,61	3,76	3,97	4,10	3,94	3,81
4. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	-	-	-	-	1594	1453	1742
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	-	-	-	-	9,31	16,04	16,96

Ar-Glare kompozitine ait QSPT sonuçları incelendiğinde, birinci bölgede yerel maksimum kuvvet değerlerinin 468 – 664 N aralığında, yer değiştirme miktarlarının ise 0,39 – 0,66 mm arasında gerçekleştiği belirlenmiştir. Arall kompozitinde gözlemlenen yüksek genlikli kuvvet dalgalanmalarının, aramid fiberin etkisiyle Ar-Glare kompozitinde de benzer şekilde ortaya çıktığı görülmüştür. İkinci bölgede ise maksimum kuvvet değerleri 1711 – 1922 N aralığında değişmiş, bu kuvvetlere karşılık gelen yer değiştirme değerleri 3,61 – 4,10 mm aralığında ölçülmüştür. Elde edilen bu değerler, Arall ve Glare kompozitlerinden elde edilen değerlerin arasında bulunmaktadır.

0 ve 150 termal çevrime tabi tutulmuş Ar-Glare kompozit numunelerine ait QSPT maksimum kuvvet – yer değiştirme değerleri incelendiğinde, maksimum kuvvetler arasında 98 N, yer değiştirme değerleri arasında ise 0,04 mm'lik bir fark olduğu belirlenmiştir.

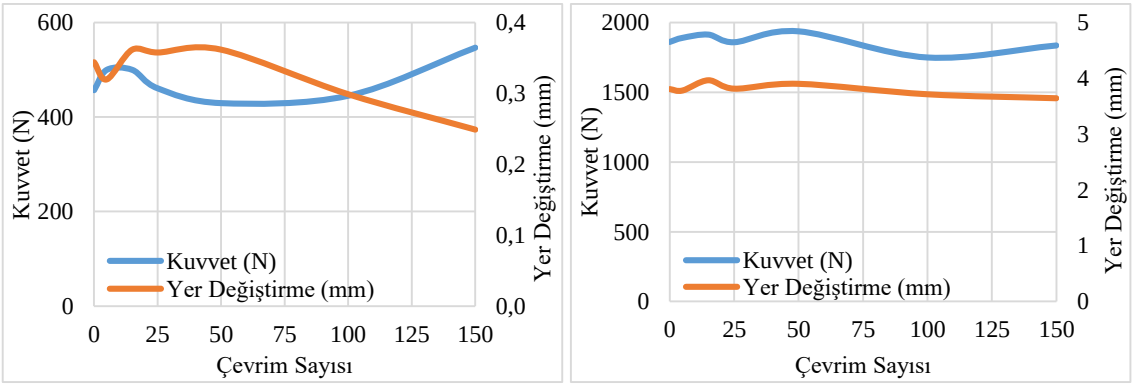
5.5.2.3. Car-Glare kompozitinin QSPT sonucu

Termal çevrime maruz bırakılan karbon ve cam fiber ile alüminyum tabakalardan oluşan Car-Glare kompozit numunelerine ait QSPT kuvvet – yer değiştirme eğrileri Şekil 5.92 ve Şekil 5.93'te verilmiştir. İlgili eğrilere ait sayısal veriler ise Çizelge 5.28'de detaylandırılmıştır.



Şekil 5.92. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Car-Glare numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği

Car-Glare kompozitine ait tüm çevrimler incelendiğinde, birinci bölgede yerel maksimum kuvvet noktası 445 – 547 N ve yer değiştirme 0,25 – 0,36 mm aralığında gerçekleşmiştir. Diğer kompozitlerden farklı olarak, erken matris hasarı belirtileri göstermesi, Çizelge 5.29'da yer alan birinci bölgedeki ilk maksimum kuvvet noktalarında meydana gelen cam fiber tabakasındaki matris kırılmaları ile ilişkilendirilmektedir. Bu durum, Carall kompozitinde matris kırılmasının en erken 0,44 mm'de gerçekleşmesine karşın, Glare kompozitinde bu değerin 0,22 mm olması ile desteklenmektedir.



Şekil 5.93. Soldan sağa Car-Glare numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri

İkinci bölgede ise maksimum kuvvet değerleri 1750 – 1938 N aralığında, bu değerlere karşılık gelen yer değiştirmeler ise 3,65 – 3,97 mm aralığında ölçülmüştür.

Elde edilen bu sonuçların, Carall ve Glare kompozitlerinden elde edilen sonuçlara karşılık gelen değerler arasında yer aldığı gözlemlenmiştir.

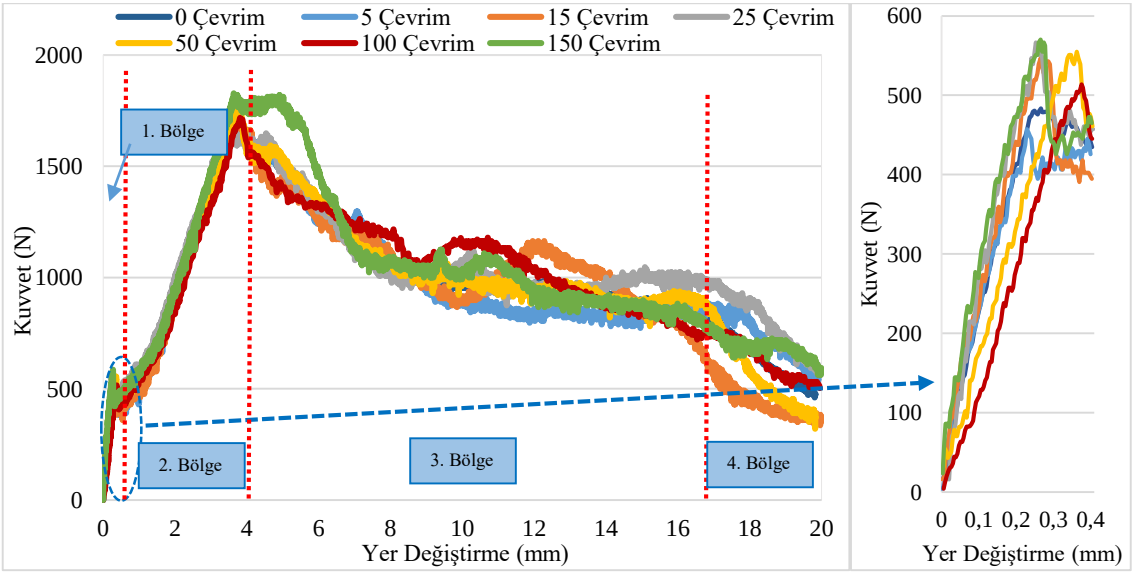
Çizelge 5.28. QSPT testine ait Car-Glare numunelerinin mekanik yanıt verileri

	Çevrim Sayısı	***0***	***5***	***15***	***25***	***50***	***100***	***150***
1. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	457	500	500	469	430	445	547
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	0,34	0,32	0,36	0,25	0,36	0,30	0,25
2. Bölge	Maksimum Kuvvet (N)	1861	1891	1914	1859	1938	1750	1836
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	3,81	3,78	3,97	3,82	3,90	3,72	3,65
3. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	-	-	1629	-	-	1734	1242
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	-	-	15,45	-	-	4,39	10,17

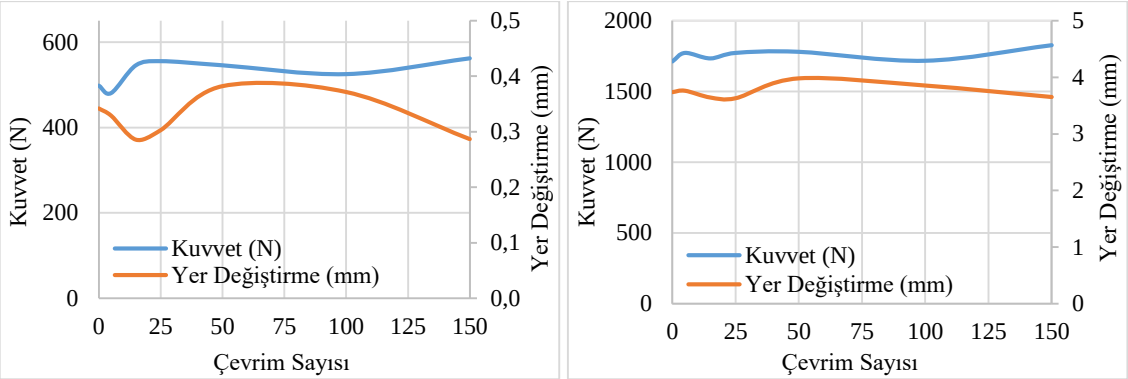
0 ve 150 çevrime tabi tutulmuş Car-Glare kompozit numunelerine ait QSPT maksimum kuvvet – yer değiştirme değerleri incelendiğinde, maksimum kuvvetler arasında 25 N, yer değiştirme değerleri arasında ise 0,16 mm'lik bir fark olduğu tespit edilmiştir.

5.2.2.4. Gl-Barall kompozitinin QSPT sonucu

Cam ve bazalt fiberler ile alüminyum tabakalardan oluşan Gl-Barall kompozitine ait termal çevrime maruz bırakılmış numunelerin QSPT kuvvet – yer değiştirme eğrileri Şekil 5.94 ve Şekil 5.95'te verilmiştir. Söz konusu eğrilere ait sayısal veriler ise Çizelge 5.29'da detaylandırılmıştır.



Şekil 5.94. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Gl-Barall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği



Şekil 5.95. Soldan sağa Gl-Barall numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri

Çizelge 5.29. QSPT testine ait Gl-Barall numunelerinin mekanik yanıt verileri

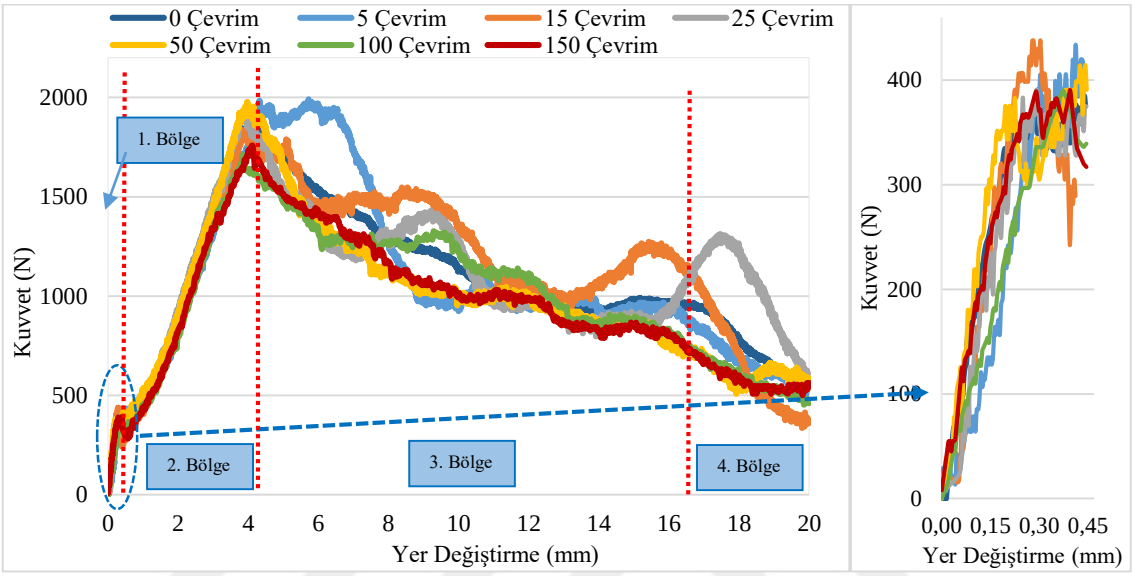
	Çevrim Sayısı	***0***	***5***	***15***	***25***	***50***	***100***	***150***
1. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	498	481	546	555	546	525	562
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	0,34	0,33	0,29	0,30	0,51	0,42	0,29
2. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	1713	1773	1734	1773	1781	1718	1828
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	3,74	3,76	3,64	3,63	3,98	3,85	3,65
3. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	-	-	1164	-	-	-	1125
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	-	-	11,96	-	-	-	9,41

Gl-Barall kompozitine ait tüm çevrimlerden elde edilen QSPT sonuçları incelendiğinde, birinci bölgede yerel maksimum kuvvet değerlerinin 481 – 562 N aralığında, yer değiştirme miktarlarının ise 0,29 – 0,51 mm arasında gerçekleştiği belirlenmiştir. Diğer kompozitlerden farklı olarak, ilk çevrimlerde Gl-Barall kompoziti Barall kompozitine benzer bir davranış sergilemiştir. Barall kompozitinde de ilk çevrimlerde, birinci bölgedeki kuvvet değerlerinin görece düşük seyretmesi, bu bölgede Barall tarafındaki matris kırılmasına işaret etmektedir. İkinci bölgede ise maksimum kuvvet değerleri 1713 – 1828 N arasında ölçülmüş, yer değiştirme miktarları ise 3,63–3,98 mm aralığında gerçekleşmiştir. Elde edilen bu sonuçların, Barall ve Glare kompozitlerinden elde edilen sonuçlara karşılık gelen değerler arasında yer aldığı görülmüştür.

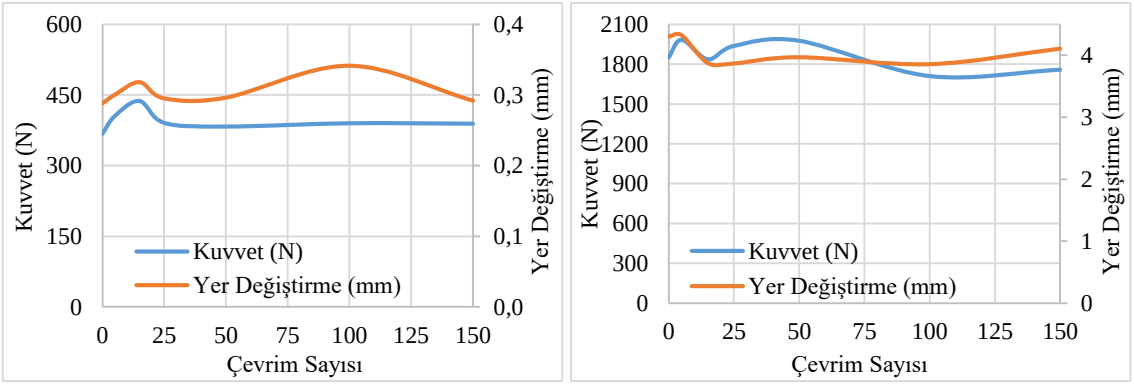
0 ve 150 termal çevrime tabi tutulmuş Gl-Barall kompozit numunelerinin QSPT maksimum kuvvet ve yer değiştirme değerleri karşılaştırıldığında, maksimum kuvvetler arasında 115 N, yer değiştirme değerleri arasında ise 0,09 mm fark olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, 150 termal çevrimin Glare-Barall kompozitinin delinme karakteri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

5.2.2.5. Ar-Barall kompozitinin QSPT sonucu

Aramid ve bazalt fiberler ile alüminyum tabakalardan oluşan Ar-Barall kompozitinin termal çevrime maruz bırakılmış numunelerine ait QSPT eğrileri Şekil 5.96 ve Şekil 5.97'de, bu eğrilere ilişkin sayısal veriler ise Çizelge 5.30'da verilmiştir.



Şekil 5.96. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Ar-Barall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği



Şekil 5.97. Soldan sağa Ar-Barall numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri

Ar-Barall kompoziti için birinci bölgedeki yerel maksimum kuvvet değerleri, 367 – 438 N aralığında, yer değiştirme değerleri ise 0,23–0,41 mm arasında gerçekleşmiştir. Bu bölgede, Arall kompozitine özgü olan yükü geniş bir alana yayma davranışı ile Barall kompozitinde gözlenen düşük yer değiştirmeye karşılık gelen matris kırılması, hibrit yapıdaki Ar-Barall kompozitinde birlikte gözlemlenmiştir. İkinci bölgede ise maksimum

kuvvet değerleri 1709 – 1984 N arasında değişmiş, bu değerlere karşılık gelen yer değiştirme miktarları 3,85 – 3,87 mm aralığında ölçülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar, Arall ve Barall kompozitlerine ait QSPT verileriyle karşılaştırıldığında, Ar-Barall kompozitinin bu iki yapı arasında mekanik performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

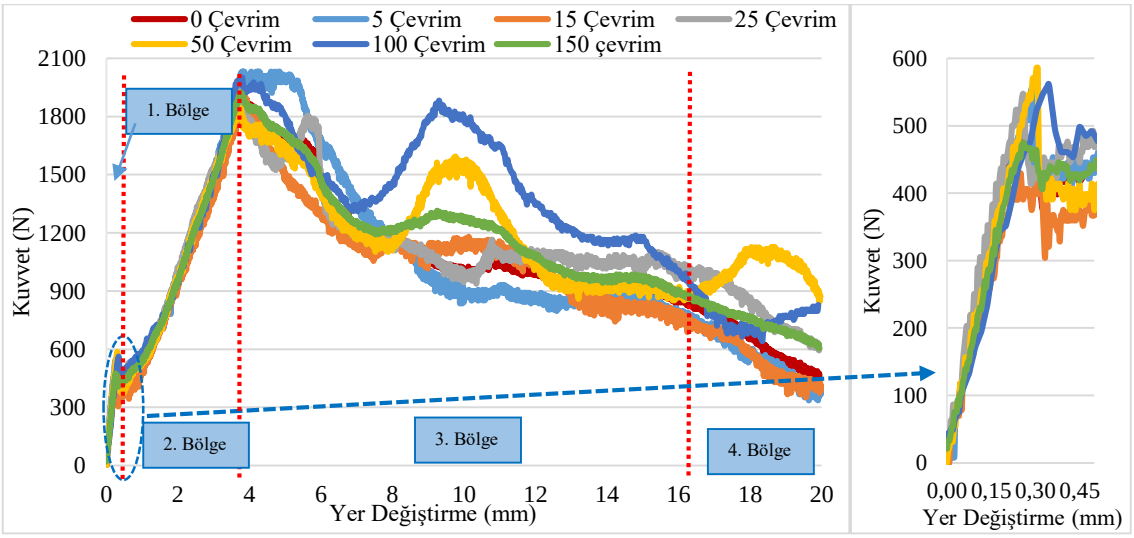
Çizelge 5.30. QSPT testine ait Ar-Barall numunelerinin mekanik yanıt verileri

	Çevrim Sayısı	***0***	***5***	***15***	***25***	***50***	***100***	***150***
1. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	367	434	438	391	383	390	389
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	0,29	0,41	0,32	0,30	0,23	0,38	0,29
2. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	1852	1984	1836	1938	1977	1709	1758
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	4,30	4,32	3,87	3,87	3,97	3,85	4,11
3. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	-	1991	1273	1430	-	-	-
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	-	5,72	15,44	9,21	-	-	-
4. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	-	-	-	1313	-	-	-
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	-	-	-	17,47	-	-	-

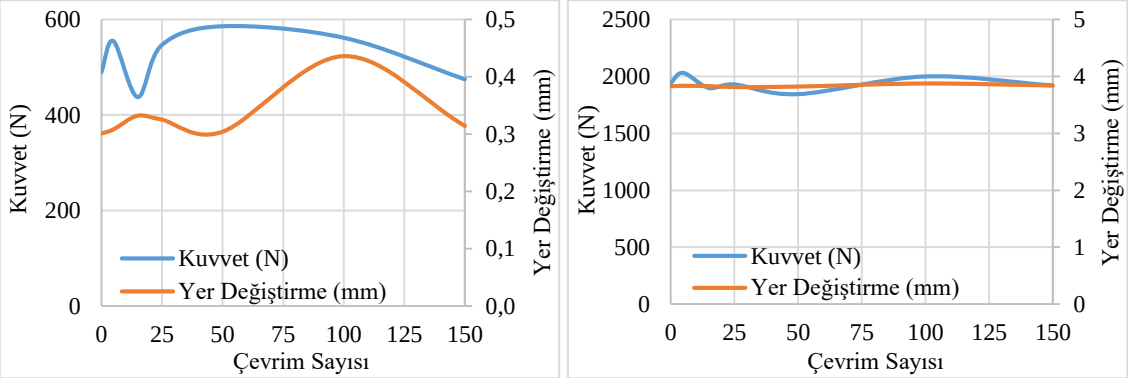
0 ve 150 termal çevrime tabi tutulmuş Ar-Barall kompozit numunelerine ait QSPT test sonuçları incelendiğinde, maksimum kuvvet değerleri arasında 94 N, yer değiştirme değerleri arasında ise 0,19 mm'lik bir fark gözlemlenmiştir.

5.5.2.6. Car-Barall kompozitinin QSPT sonucu

Karbon ve bazalt fiberler ile alüminyum tabakalardan oluşan Car-Barall kompozitine ait, termal çevrim sonrası elde edilen QSPT eğrileri Şekil 5.98 ve Şekil 5.99'da, bu eğrilere ilişkin nicel veriler ise Çizelge 5.31'de verilmiştir.



Şekil 5.98. Farklı termal çevrim işlemlerine maruz bırakılan Car-Barall numunelerinde QSPT yöntemiyle elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiği



Şekil 5.99. Soldan sağa Car-Barall numunesinin 1. bölge ve 2. bölge maksimum değerlerine ait trend grafikleri

Çizelge 5.31. QSPT testine ait Car-Barall numunelerinin mekanik yanıt verileri

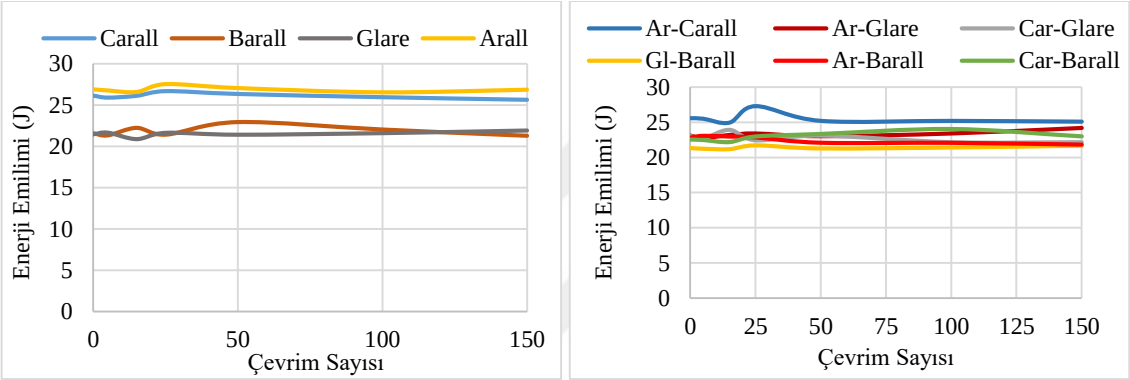
	Çevrim Sayısı	***0***	***5***	***15***	***25***	***50***	***100***	***150***
1. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	490	555	438	547	586	562	475
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	0,30	0,31	0,33	0,33	0,30	0,44	0,31
2. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	1940	2031	1898	1930	1844	2000	1920
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	3,83	3,83	3,83	3,81	3,82	3,88	3,84
3. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	-	-	-	1805	1594	1882	-
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	-	-	-	5,70	9,84	9,39	-
4. Bölge	Maksimum kuvvet (N)	-	-	-	-	1125	-	-
	Maksimum kuvvetteki yer değiştirme (mm)	-	-	-	-	18,11	-	-

Car-Barall kompozitine ait QSPT verilerine bağlı olarak gerçekleştirilen tüm termal çevrimlerin incelenmesi sonucunda, birinci bölgede yerel maksimum kuvvet değerlerinin 438 – 586 N arasında, yer değiştirme değerlerinin ise 0,30 – 0,44 mm aralığında gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu bölgede, Carall kompozitine özgü yüksek delinme direnci ile Barall kompozitinde gözlenen birden fazla matris kırılma tepesi davranışı, hibrit yapıdaki Car-Barall kompozitinde birlikte ortaya çıkmıştır. İkinci bölgede maksimum kuvvet değerleri 1844 – 2031 N aralığında ölçülmüş; bu değerlere karşılık gelen yer değiştirme miktarları ise 3,82 – 3,83 mm gibi oldukça dar bir aralıkta kalmıştır. Elde edilen bu veriler, Car-Barall kompozitinin delinme performansının Barall ve Glare kompozitlerinin arasında yer aldığını göstermektedir. Ayrıca, ikinci bölgedeki yer değiştirme değerlerinin gösterdiği stabilite, Carall kompozitine özgü mekanik davranışla benzerlik göstermektedir.

0 ve 150 termal çevrime tabi tutulmuş Car-Barall kompozit numunelerine ait QSPT maksimum kuvvet – yer değiştirme verileri değerlendirildiğinde, maksimum kuvvetler arasında yalnızca 20 N, yer değiştirme değerleri arasında ise 0,01 mm gibi oldukça düşük bir fark gözlemlenmiştir.

5.5.3. QSPT sonucu enerji emilimi ve genel değerlendirmesi

Tabakalı kompozitlerin QSPT testleri sırasında delinme işlemi boyunca gerçekleşen enerji emilimi, kuvvet – yer değiştirme eğrilerinin altındaki alanın hesaplanması yoluyla belirlenmiştir. FML kompozitlerin enerji emilim miktarları, hem uygulanan çevrim sayısına hem de kullanılan fiber türlerine göre değerlendirilmiş olup, bu değerlendirmelere ait grafiksel gösterim Şekil 5.100'de, ilgili sayısal veriler ise Çizelge 5.32'de verilmiştir.



Şekil 5.100. Soldan sağa sırasıyla tek tip ve hibrit FML kompozitlerin enerji emilim grafikleri

Çizelge 5.32'deki veriler incelendiğinde, tek tip fiber takviyeli kompozit malzemeler arasında Carall ve Arall kompozitlerinin, Barall ve Glare kompozitlerine kıyasla daha yüksek enerji emilim kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Aynı sayıda fiber tabakası kullanılarak üretilmiş olan Carall ve Glare kompozitleri karşılaştırıldığında ise, literatürde de belirtildiği üzere (Chen vd., 2019b), Carall kompozitinin enerji emiliminin Glare kompozitine göre daha yüksek olduğu ifade edilmektedir. Bu çalışmada söz konusu olan enerji emilimi, darbe dayanımından ziyade, gerilme-gerinim eğrisinin altında kalan alan ile tanımlanmaktadır. Karbon fiberin yüksek elastiklik modülüne sahip olması nedeniyle, cam fiber daha fazla uzama kabiliyeti gösterse de, toplam enerji emilim miktarı (eğri altı alan) karbon fiber takviyeli kompozitlerde daha yüksek olmuştur.

Çizelge 5.32. FML kompozitlerin enerji emilim değerleri

Çevrim Sayısı	***Enerji Emilimi (J)***									
	Carall	Barall	Glare	Arall	Ar-Carall	Ar-Glare	Car-Glare	Glare-Barall	Ar-Barall	Car-Barall
0	26,15	21,57	21,46	26,89	25,57	23,12	23,03	21,33	22,82	22,53
5	25,91	21,32	21,66	26,76	25,49	22,76	22,68	21,23	23,07	22,47

15	26,13	22,24	20,86	26,57	24,93	23,20	23,91	21,17	22,96	22,17
25	26,70	21,41	21,64	27,53	27,30	23,41	22,43	21,72	22,84	22,97
50	26,35	22,94	21,40	27,05	25,19	23,02	23,10	21,27	22,10	23,33
100	25,96	22,03	21,60	26,53	25,19	23,41	22,16	21,40	22,09	24,04
150	25,65	21,27	21,93	26,84	25,08	24,19	22,16	21,67	21,84	22,99
Ortalama	26,12	21,83	21,51	26,88	25,53	23,30	22,78	21,40	22,53	22,93
150 Çevrim Sonunda Değişim (%)	+ 2	- 1,4	+ 2,1	- 0,2	-1,9	+ 4,6	- 3,8	+ 1,6	- 4,3	+ 2

Tüm çevrimlerin ortalaması alındığında, Arall kompozitinin delinme enerjisi 26,88 J olarak belirlenmiş olup, bu değer Carall kompozitine göre %2,9 (26,12 J), Barall kompozitine göre %23,1 (21,83 J) ve Glare kompozitine göre %24,9 (21,51 J) oranında daha yüksek çıkmıştır. Literatürde benzer penetrasyon davranışları sergilediği ifade edilen Carall ve Arall kompozitlerinin enerji emilim seviyeleri, farklı termal çevrim sayılarına karşı benzer eğilimler göstermektedir (Vlot, 1996). Bu durum, Şekil 5.100'de açıkça görülebilmektedir. Her iki kompozit türü için çevrimsiz durumdan 150 çevrime kadar olan süreçte enerji emilimi eğrilerinin birbirine oldukça yakın bir seyir izlediği anlaşılmaktadır.

Hibrit fiberlerden oluşturulan FML kompozitlerin enerji emilim miktarları, içerdiği fiber türlerinin mekanik özelliklerini yansıtarak, genellikle ilgili tekil kompozitlerin aritmetik ortalamasına yakın sonuçlar vermiştir. Tüm çevrimlerin ortalaması alınarak yapılan karşılaştırma sonucunda, en yüksek ortalama enerji emilimi 25,53 J ile Ar-Carall kompozitinde elde edilmiştir. Ar-Carall kompoziti, enerji emilimi bakımından Ar-Glare'e kıyasla %9,6 (23,30 J), Car-Glare'e kıyasla %12,0 (22,78 J), Gl-Barall'a göre %19,3 (21,40 J), Ar-Barall'a göre %13,3 (22,53 J) ve Car-Barall'a göre %11,3 (22,93 J) oranında daha yüksek performans göstermiştir.

Bu çalışmada, üretilen tabakalı kompozit malzemelerde uygulanan termal çevrimlerin delinme davranışı üzerindeki etkisi genel olarak sınırlı düzeyde bulunmuştur. Her ne kadar ilk çevrimlerde enerji emilimi değerlerinde belirli düzeyde dalgalanmalar gözlemlense de, çevrim sayısının artmasıyla birlikte bu değerlerin dengeye ulaştığı ve yüksek çevrim sayılarında toparlayıcı bir eğilim gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle 150 çevrim sonrasında elde edilen delinme enerjisi değerleri, çevrime maruz bırakılmamış numunelerle karşılaştırıldığında, hibrit kompozitlerde %–4,3 ile %+4,6 arasında bir değişim göstermiştir. Bu değişim oranı, tek tip fiber takviyeli kompozitlerde gözlemlenen %–1,4 ile %+2,1 aralığındaki değişime kıyasla daha geniş bir dağılım sergilemektedir.

Bu durum, hibrit yapıdaki kompozitlerin termal çevrimler karşısında daha değişken ancak bazı durumlarda daha uyumlu bir enerji emilim tepkisi gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca hibrit kompozitlerdeki bu davranış, kullanılan fiber kombinasyonlarının termomekanik özellikleri ve fiber-matris arayüzey dayanımı ile doğrudan ilişkili olabilir. Bu bağlamda, hibrit kompozitlerin termal çevrime karşı gösterdiği delinme performansı, malzeme tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir parametre olarak değerlendirilebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde, cam, karbon, bazalt ve aramid fiberlerin tekil ve çoklu kombinasyonlarıyla üretilen on farklı alüminyum tabakalı kompozit malzemenin, termal çevrim öncesi ve sonrasındaki mekanik özelliklerine ilişkin elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında ulaşılan sonuçlara dayalı önerilere yer verilmiştir.

5.1. Sonuçlar

Yürütülen deneysel çalışma sonucunda, farklı fiberlerle takviye edilmiş alüminyum tabakalı kompozit malzemelerin termal çevrim öncesi ve sonrası mekanik davranışları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş.

Çekme testi sonucuçları;

- ✓ Termal çevrim uygulanmamış fiber metal laminat (FML) kompozitler arasında en yüksek çekme dayanımı 415,55 MPa ile Carall kompozitinde elde edilmiştir. Bunu sırasıyla 386,34 MPa ile Arall, 368,30 MPa ile Car-Glare, 363,32 MPa ile Gl-Barall, 357,20 MPa ile Ar-Carall, 356,52 MPa ile Car-Barall, 350,26 MPa ile Ar-Barall, 349,93 MPa ile Glare, 344,46 MPa ile Ar-Glare ve 321,87 MPa ile Barall kompozitleri takip etmiştir.
- ✓ Termal çevrim uygulanan numunelerde çekme dayanımlarında çevrim sayısına bağlı olarak dalgalanmalar gözlemlenmiş ve bu dalgalanmalar yaklaşık ±%8 aralığında gerçekleşmiştir. Maksimum çekme dayanımları, Arall kompozitinde 5 çevrimde 391,43 MPa; Ar-Carall ve Car-Barall kompozitlerinde 15 çevrimde sırasıyla 417,73 MPa ve 376,11 MPa; Barall, Glare, Car-Glare, Gl-Barall ve Ar-Barall kompozitlerinde ise 25 çevrimde sırasıyla 349,71 MPa, 391,71 MPa, 374,32 MPa, 370,25 MPa ve 374,69 MPa olarak elde edilmiştir.
- ✓ Carall kompoziti, 50 çevrimde 424,39 MPa ile tüm kompozitler arasında en yüksek çekme dayanımına ulaşarak, termal çevrimden en olumlu etkilenen kompozit olmuştur.

- ✓ Termal çevrimlerin etkisiyle FML kompozitlerin uzama davranışında %2 ile %13,5 arasında değişen oranlarda genel bir iyileşme gözlemlenmiştir. Bu artış, özellikle hibrit fiber kombinasyonlarıyla takviye edilen numunelerde daha belirgin şekilde ortaya çıkmıştır.
- ✓ Artan termal çevrim sayısıyla birlikte FML kompozitlerin enerji absorbsiyon kapasitesinde genel bir artış eğilimi görülmüştür. Bu eğilim, tekil fiber takviyeli kompozitlerde uzama miktarındaki artışla korelasyon gösterirken, hibrit yapılı kompozitlerde ikinci kırılan fiberin uzama kapasitesine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir.
- ✓ FML kompozit malzemelerin kırılma bölgelerinde genel olarak benzer hasar mekanizmalarının meydana gelmiştir. Söz konusu hasar mekanizmaları; fiber kırılması, matris çatlaması ve fiber sıyrılmasıdır. Bu bulgular, kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının yalnızca fiber türüne değil, aynı zamanda fiber-matris ara yüzey etkileşimlerine ve yapısal kombinasyonlara da bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle karbon ve aramid fiber içeren kompozitlerde, hasar matris çatlağı ile başlamakta ve bunu, yükleme yönüne dik doğrultuda gerçekleşen fiber kırılması izlemektedir. Cam ve bazalt fiber içeren tek tip fiberli sistemlerde de benzer bir kırılma davranışı izlenmiştir. Buna karşılık, cam ve bazalt fiberlerin birlikte kullanıldığı hibrit yapılar, kayma gerilmeleri etkisiyle yaklaşık 45° açıyla gerçekleşen fiber kırılmaları göstermiştir.

Eğilme testi sonuçları;

- ✓ Termal çevrim uygulanmamış FML kompozitler arasında en yüksek eğilme mukavemeti 694 MPa ile Car-Barall kompozitinde elde edilmiştir. Bunu sırasıyla 664 MPa ile Car-Glare, 640 MPa ile Glare, 625 MPa ile Barall, 619 MPa ile Carall, 616 MPa ile Ar-Carall, 603 MPa ile Arall, 591 MPa ile Ar-Glare, 582 MPa ile Ar-Barall ve 580 MPa ile Barall takip etmiştir.
- ✓ Eğilme deneyleri sonucunda, 150 termal çevrim sonunda çoğu FML kompozit malzemenin gerilme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Arall ve Car-Glare kompozitleri hariç, diğer tek tip ve hibrit fiber içeren FML kompozitlerin termal çevrimler sonrası gerilme değerlerinde %12,6'ya kadar artış olmuştur. Öte yandan, termal çevrimler sonucunda, tek tip fiberli kompozitlerde deplasman değerlerinde genel bir azalma gözlenirken, hibrit fiberli kompozitlerde mikroyapısal farklılıklardan dolayı deplasman değerlerinde dalgalanmalar ve

artışlar meydana gelmiş, bu durum hibrit yapının kırılma davranışını ve deformasyon kapasitesini olumlu yönde etkilemiştir.

Çentik darbe testi sonuçları;

- ✓ Farklı fiber türlerine sahip FML kompozitlerin darbe testi sonucunda, aramid liflerinin kullanıldığı Arall kompozitlerinin hem darbe enerjisi hem de darbe tokluğu açısından en yüksek dayanımı gösterdiği; karbon lifli Carall kompozitlerinin ise nispeten daha düşük darbe performansına sahip olduğu belirlenmiştir. Hibrit kompozitlerin ise içerdikleri fiberlerin mekanik özelliklerine paralel olarak orta seviyede performans sergilediği sonucuna ulaşılmıştır.
- ✓ Arall kompozitlerinin tüm termal çevrimlerde ortalama 4,4 J darbe enerjisi ve 440 kJ/m² darbe tokluğu değerleriyle en yüksek darbe dayanımını sergilediğini göstermektedir. Buna karşın, Carall kompozitleri 3,4–3,6 J darbe enerjisi ve 350–370 kJ/m² darbe tokluğu aralığında daha düşük performans göstermiştir. Glare ve Barall kompozitlerinin ise darbe enerjisi 3,9–4,2 J, darbe tokluğu ise 390–420 kJ/m² seviyelerinde orta-yüksek bir dayanım sunduğu belirlenmiştir.
- ✓ Termal çevrim sonuçlarına göre, ilk 25 döngü boyunca darbe enerjisi ve darbe tokluğunda belirgin dalgalanmalar gözlemlenmiş, ancak 25. çevrimden itibaren bu parametrelerin sabitlenerek yatay bir seyir izlediği belirlenmiştir. En yüksek dalgalanma, aramid fiber içeriği nedeniyle termal çevrimlere karşı daha duyarlı olan Arall kompozitinde meydana gelmiştir.

Kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) testi sonuçları;

- ✓ SBS testleri sonucunda, FML kompozitlerin tabakalar arası kayma dayanımı (ILSS) değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek ortalama ILSS değerinin Arall kompozitinde (34,0 MPa) elde edilmiştir. Bunu sırasıyla Ar-Barall (32,9 MPa), Barall (32,8 MPa), Ar-Carall (32,7 MPa) ve Car-Barall (32,3 MPa) kompozitleri takip etmiştir. En düşük ortalama ILSS değerleri ise Glare (30,2 MPa) ve Car-Glare (30,4 MPa) kompozitlerinde gözlemlenmiştir.
- ✓ Termal çevrimlerin başlangıcında (0. çevrim) ve 150. çevrim sonunda ölçülen ILSS değerleri arasında çok küçük değişimler tespit edilmiştir.
- ✓ Ortalama uzama değerleri açısından, Arall kompoziti (0,417 mm) en yüksek performansı sergilemiş; en düşük ortalama uzama ise Gl-Barall kompozitinde (0,334 mm) gerçekleşmiştir.

Yarı statik penetrasyon testi (QSPT) sonuçları;

- ✓ Arall ve Ar-Carall kompozitleri, tüm termal çevrim ortalamaları dikkate alındığında en yüksek delinme enerjisi performansını göstermiştir. Arall kompoziti 26,88 J ile tüm tek fiberli kompozitler arasında öne çıkarken, hibrit yapıdaki Ar-Carall kompoziti 25,53 J ile en yüksek enerji emilimine ulaşmıştır.
- ✓ Termal çevrimlerin tabakalı kompozitlerin delinme davranışı üzerindeki etkisi sınırlı düzeyde olup, hibrit kompozitlerde gözlemlenen enerji emilimi değişimi, tek tip fiberli kompozitlere kıyasla daha geniş bir aralıkta seyretmiştir. QSPT sonuçlarına göre, tek tip fiber içeren kompozitlerde termal çevrim işlemi sonrasında enerji absorpsiyon kapasitesindeki değişim %2,1 ile %–1,4 aralığında gerçekleşmiştir. Öte yandan, hibrit elyaf takviyeli kompozitlerde bu değişim daha geniş bir aralıkta olup %4,6 ile %–4,3 arasında gözlemlenmiştir. Bu durum, fiber kombinasyonlarının termomekanik duyarlılığına bağlı olarak daha esnek ancak kontrol edilebilir bir delinme tepkisi ortaya koyduğunu göstermiştir.

Genel olarak, tüm FML kompozit numunelerde uygulanan termal çevrim işleminin mekanik özellikler üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde üç aşamalı bir eğilim gözlemlenmiştir. Bu eğilim sırasıyla; ilk toparlanma evresi (0–25 çevrim), geçici zayıflama evresi (25–100 çevrim) ve ikinci toparlanma evresidir (100–150 çevrim). İlk toparlanma evresinde, özellikle FML üzerinde yapılan çekme ve eğilme testlerinde genel bir dayanım artışı kaydedilmiştir. Benzer şekilde, arayüzey dayanımı ve çentik darbe tokluğunda da belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir. Bu artışın, matris fazındaki termal gerilmelerin yeniden düzenlenmesi ve mikroçatlakların kısmen kapanma eğiliminden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Geçici zayıflama evresi olarak tanımlanan 25 ila 100 çevrim aralığında ise, iç gerilmelerin birikmesi sonucu tüm mekanik testlerde performans düşüşü meydana gelmiştir. Bu düşüş, özellikle Glare ve Barall kompozitlerde daha belirgin olup; çekme dayanımlarında yaklaşık %6–%8 oranında azalma ile kendini göstermiştir. Son olarak, ikinci toparlanma evresi süresince, post-kürleşme ve kısmi yeniden sertleşme etkilerinin devreye girmesiyle birlikte, tüm numunelerde mekanik özelliklerde yeniden toparlanma eğilimi gözlemlenmiştir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada elde edilen bulgular ve yapılan kapsamlı değerlendirmeler doğrultusunda, tabakalı kompozit malzemelerin performansını iyileştirmeye yönelik aşağıda yer alan stratejik öneriler sunulmuştur.

- ✓ Alüminyum ile fiberler arasındaki ara yüzey bağının kuvvetlendirilmesi amacıyla çeşitli yüzey işlemleri uygulanabilir. Bu tür modifikasyonlar, fiber ile matris etkileşimini artırarak termal çevrim koşulları altında yapının kararlılığını ve uzun vadeli dayanımını önemli ölçüde iyileştirebilir.
- ✓ Farklı oryantasyon açıları ve örgü tiplerine ek olarak, FML yapı içerisinde çeşitli istifleme açılarında yapılan dizilimlerin termal çevrim dayanımı üzerinde farklı etkiler oluşturabileceği öngörülmektedir. Bu kapsamda, istifleme dizilim türlerinin termomekanik performansa etkileri sistematik ve karşılaştırmalı deneysel çalışmalarla detaylı bir biçimde incelenebilir.
- ✓ Malzemenin gerçek kullanım senaryolarına daha yakın sonuçlar elde edebilmek adına, termal çevrim sayısı ve çevrim hızı gibi parametrelerin, kompozit yapıların mekanik özellikleri ve ömrü üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak araştırılabilir.

KAYNAKLAR

Adams, D. F., & Lewis, E. Q. (1995). Current status of composite material shear test methods. *SAMPE J.*, *31*(1), 32-41.

Afaghi-Khatibi, A., Ye, L., & Mai, Y.-W. (2000). *Hybrids and Sandwiches*. *Comprehensive Composite Materials* (ss. 249-290). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B0-08-042993-9/00066-8

Airbus. (2025, Nisan 25). *Airbus test and certification: Approvals for entry-in-service*. https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/the-life-cycle-of-an-aircraft/test-and-certification

Akbulut, H., & Seydibeyoğlu, M. Ö. (2016). *Termal Çevrimin bazalt/karbon elyaf takviyeli intraply hibrit kompozitlerin yapısal özellikleri üzerindeki etkisi*. Project No: 213M600. TÜBİTAK.

Alderliesten, R. (2009). On the development of hybrid material concepts for aircraft structures. *Recent Patents on Engineering*, *3*(1), 25-38.

Alderliesten, R. C., & Benedictus, R. (2008). Fiber/Metal Composite Technology for Future Primary Aircraft Structures. *Journal of Aircraft*, *45*(4), 1182-1189.

Alexopoulos, N. D., Migklis, E., Stylianos, A., & Myriounis, D. P. (2013). Fatigue behavior of the aeronautical Al–Li (2198) aluminum alloy under constant amplitude loading. *International Journal of Fatigue*, *56*, 95-105.

Alshamma, F. A., & Kadhim, M. M. (2022). Optimization of delamination resistance of vacuum infused glass laminate aluminum reinforced epoxy (GLARE) using various surface preparation techniques. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, *10*(1), 361.

Asghar, W., Nasir, M. A., Qayyum, F., Shah, M., Azeem, M., Nauman, S., & Khushnood, S. (2017). Investigation of fatigue crack growth rate in CARALL, ARALL and GLARE. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, *40*(7), 1086-1100.

Asundi, A., & Choi, A. Y. (1997). Fiber metal laminates: an advanced material for future aircraft. *Journal of Materials processing technology*, *63*(1-3), 384-394.

Aşkın, M. Y. (2020). *Alüminyum ve magnezyum matrisli prepreg takviyeli lamine kompozit malzeme üretimi ve özelliklerinin incelenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Karabük Üniversitesi.

Aydın, H. Y., & Altun, S. (2020). Odun kökenli malzemelerin takviyesi ile oluşturulan polilaktik asit matrisli kompozitler. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, *22*(3), 1061-1076.

Azghan, M. A., Bahari-Sambran, F., & Eslami-Farsani, R. (2021). Modeling and

experimental study on the mechanical behavior of glass/basalt fiber metal laminates after thermal cycling. *International Journal of Damage Mechanics*, *30*(8), 1192-1212.

Azimpour-Shishevan, F., Akbulut, H., & Mohtadi-Bonab, M. A. (2020a). Mechanical and thermal properties of carbon/basalt intra-ply hybrid composites. I. Effect of intra-ply hybridization. *Fibers and Polymers*, *21*(11), 2579-2589.

Azimpour-Shishevan, F., Akbulut, H., & Mohtadi-Bonab, M. A. (2020b). Synergetic effects of carbon nanotube and graphene addition on thermo-mechanical properties and vibrational behavior of twill carbon fiber reinforced polymer composites. *Polymer Testing*, *90*, 106745.

Azimpour-Shishevan, F., Akbulut, H., & Mohtadi-Bonab, M. A. (2020c). Effect of thermal cycling on mechanical and thermal properties of basalt fibre-reinforced epoxy composites. *Bulletin of Materials Science*, *43*(1), 88.

Batı, S. (2022). *Aramid fiber takviyeli kompozitlerde nanopartikül takviyesinin mekanik ve balistik özelliklere etkilerinin deneysel incelenmesi*. [Yayınlanmış dokrora tezi]. Batman Üniversitesi.

Bati, S., & Çelik, Y. H. (2024). Investigation of quasi-static punch shear behaviors of aramid/epoxy laminated composites modified with GNP-MWCNT nanoparticles. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *49*(2), 2499-2517.

Beylergil, B., Tabrizi, I. E., Zanjani, J. S., Saeidiharzand, S., Poudeh, L. H., & Yildiz, M. (2021). Experimental failure analysis and mechanical performance evaluation of fiber-metal sandwich laminates interleaved with polyamide-6, 6 interlayers through the combined usage of acoustic emission, thermography and microscopy techniques. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, *23*(7), 3044-3080.

Biliz, İ., & Çelik, Y. H. (2022). Investigation of mechanical properties of layered composites formed from glass, karbon and Aramid fibers and aluminum plates. *European Journal of Technique (EJT)*, *12*(2), 117-122.

Bis research paper. (2016). *UK aerospace maintenance, repair, overhaul & logistics industry analysis*. Number 275. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/502588/bis-16-132-uk-mrol-analysis.pdf

Botelho, E. C., Almeida, R. S., Pardini, L. C., & Rezende, M. C. (2007a). Elastic properties of hygrothermally conditioned glare laminate. *International Journal of Engineering Science*, *45*(1), 163-172.

Botelho, E. C., Almeida, R. S., Pardini, L. C., & Rezende, M. C. (2007b). Influence of hygrothermal conditioning on the elastic properties of carall laminates. *Applied Composite Materials*, *14*(3), 209-222.

Botelho, E. C., Pardini, L. C., & Rezende, M. C. (2007c). Evaluation of hygrothermal effects on the shear properties of carall composites. *Materials Science and Engineering: A*, *452-453*, 292-301.

Botelho, E. C., Silva, R. A., Pardini, L. C., & Rezende, M. C. (2006). A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. *Materials Research*, *9*(3), 247-256.

Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: an introduction*. John wiley & sons.

Camcı, E. (2020). Metal esaslı sandviç kompozitlerin balistik performansının incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *8*(2), 1454-1469.

Campbell, F. C. (2010). *Structural composite materials*. ASM international. Materials Park, Ohio 44073-0002, 629 pages.

Carrillo, J. G., & Cantwell, W. J. (2009). Mechanical properties of a novel fiber–metal laminate based on a polypropylene composite. *Mechanics of materials*, *41*(7), 828-838.

Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials: Science and Engineering (3 ed*.) Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2966-5

Chen, D., Luo, Q., Meng, M., Li, Q., & Sun, G. (2019a). Low velocity impact behavior of interlayer hybrid composite laminates with carbon/glass/basalt fibres. *Composites Part B: Engineering*, *176*, 107191.

Chen, D., Sun, G., Meng, M., Jin, X., & Li, Q. (2019b). Flexural performance and cost efficiency of carbon/basalt/glass hybrid FRP composite laminates. *Thin-Walled Structures*, *142*, 516-531.

Clyne, T. W., & Hull, D. (2019). *An introduction to composite materials*. Cambridge university press, Third Edition. ISBN 978-0-521-86095-6 Hardback.

Crouch, T. P. (2009). Optimal Design of fibre-reinforced metal laminates by numerical modelling, *The UNSW Canberra at ADFA Journal of Undergraduate Engineering Research*, 2(1).

Da Costa, A. A., Da Silva, D. F. N. R., Travessa, D. N., & Botelho, E. C. (2012). The effect of thermal cycles on the mechanical properties of fiber–metal laminates. *Materials & Design*, *42*, 434-440.

Demir, M. E. (2021). *Aramid fiber ve B_4C parçacık ile takviye edilmiş Al7075 matrisli kompozitlerde haddelemenin ve yaşlandırmanın mekanik ve tribolojik özelliklere etkisi*. [Yayınlanmış doktora tezi]. Batman Üniversitesi.

Demir, M. E., Topkaya, H., Bağatır, T., & Çelik, Y. H. (2024). Impact of reinforcement ratio on mechanical properties and wear behaviour of graphene nanoplatelet reinforced epoxy composites. *Politeknik Dergisi*, *27*(6), 2181-2192.

Dhaliwal, G. S., & Newaz, G. M. (2016). modeling low velocity ımpact response of carbon fiber reinforced aluminum laminates (CARALL). *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, *2*(2), 181-193.

Dostkimya. (2025, Mayıs 10). *Epoksi Sistemler*. https://www.dostkimya.com/tr/urunler/epoksi-sistemler//mgs-laminasyon-epoksi-recine-l160

Durgun, İ. (2014). Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit parça üretimi. *OTEKON'14 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*. Bursa.

Eslami-Farsani, R., Reza Khalili, S. M., & Najafi, M. (2013). Effect of thermal cycling on hardness and ımpact properties of polymer composites reinforced by basalt and carbon fibers. *Journal of Thermal Stresses*, *36*(7), 684-698.

Fidan, H. (2018). *Termal çevrime maruz bırakılmış 4/3 dizilimli fiber metal tabakalı kompozitlerin eğilme özelliklerinin ve oluşan hasar mekanizmalarının belirlenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Kocaeli Üniversitesi.

Fiore, V., Di Bella, G., & Valenza, A. (2011). Glass–basalt/epoxy hybrid composites for marine applications. *Materials & Design*, *32*(4), 2091-2099.

Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., & Valenza, A. (2015). A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering*, *74*, 74-94.

Flanagan, M., Grogan, D. M., Goggins, J., Appel, S., Doyle, K., Leen, S. B., & Brádaigh, C. Ó. (2017). Permeability of carbon fibre PEEK composites for cryogenic storage tanks of future space launchers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *101*, 173-184.

García-Moreno, I., Caminero, M., Rodríguez, G., & López-Cela, J. (2019). Effect of thermal ageing on the impact and flexural damage behaviour of carbon fibre-reinforced epoxy laminates. *Polymers*, *11*(1), 80.

Gülcan, O., Tekkanat, K., & ÇetiNkaya, B. (2019). A review on fiber metal laminates and their usage in aerospace industry. *Mühendis ve Makina*, *60*(697), 262-288.

Gümülcine, T., Bekem, A., Doğu, M., Gemici, Z., & Ünal, A. (2013). İzoftalik polyester matrisli sürekli e-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine deneysel bir çalışma. *Sigma*, *5*, 104-115.

Hagenbeek, M., & Sinke, J. (2019). Effect of long-term thermal cycling and moisture on heated Fibre Metal Laminates and glass-fibre epoxy composites. *Composite Structures*, *210*, 500-508.

Harle, S. M. (2024, February). Durability and long-term performance of fiber reinforced polymer (FRP) composites: A review. In *Structures* (Vol. 60, p. 105881). Elsevier.

Hawileh, R. A., Abdalla, J. A., Hasan, S. S., Ziyada, M. B., & Abu-Obeidah, A. (2016). Models for predicting elastic modulus and tensile strength of carbon, basalt and hybrid carbon-basalt FRP laminates at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, *114*, 364-373.

Hosseini-Toudeshky, H., & Mohammadi, B. (2009). Thermal residual stresses effects on fatigue crack growth of repaired panels bounded with various composite materials. *Composite Structures*, *89*(2), 216-223.

Huda, Z., Taib, N. I., & Zaharinie, T. (2009). Characterization of 2024-T3: An aerospace aluminum alloy. *Materials Chemistry and Physics*, *113*(2-3), 515-517.

Hudspeth, M., Claus, B., Parab, N., Lim, B., Chen, W., Sun, T., & Fezza, K. (2015). In situ visual observation of fracture processes in several high-performance fibers. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, *1*(1), 55-64.

Jakubczak, P., Bienias, J., & Surowska, B. (2018). Interlaminar shear strength of fibre metal laminates after thermal cycles. *Composite Structures*, *206*, 876-887.

Jansen, K. M. B., Zhang, M. F., Ernst, L. J., Vu, D. K., & Weiss, L. (2020). Effect of temperature and humidity on moisture diffusion in an epoxy moulding compound material. *Microelectronics Reliability*, *107*, 113596.

Kaplan, M. (2017). Otomotiv endüstrisinde reçine transfer kalıplama (RTM): Güncel gelişmeler ve başarılı uygulamalar. *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*. *5*(1), 47-53.

Kar, K. K. (Ed.). (2017). *Composite Materials*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49514-8

Kaybal, H. B. (2021). An experimental study on interlaminar shear strength and fracture toughness: Carbon fiber reinforced epoxy composites enhanced with the $CaCO_3$ nanoparticles. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *10*(2), 777-783.

Keleş, M., Yıldırım, K., & Topbaşoğlu, M. C. (2023). Vakum infüzyon yöntemi ile üretilen parçalarda jelkot kullanımı ve elyaf laminasyonunun mekanik özelliklere etkisi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, *11*(1), 197-209.

Keleş, Ö., Bati, S., & Çelik, Y. H. (2024). Hybrid effect on tensile, flexural, and quasi-static punch shear behavior of jute/ramie and jute/flax reinforced hybrid composites. *Materials Testing*, *66*(6), 802-816.

Khalid, M. Y., Al Rashid, A., & Sheikh, M. F. (2021). Effect of Anodizing Process on Inter Laminar Shear Strength of GLARE Composite through T-Peel Test: Experimental and Numerical Approach. *Experimental Techniques*, *45*(2), 227-235.

Khan, F., Qayyum, F., Asghar, W., Azeem, M., Anjum, Z., Nasir, A., & Shah, M. (2017). Effect of various surface preparation techniques on the delamination properties of vacuum infused Carbon fiber reinforced aluminum laminates (CARALL): Experimentation and numerical simulation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *31*(11), 5265-5272.

Kumar, G. V., Rao, C. P., & Selvaraj, N. (2011). Mechanical and tribological behavior of particulate reinforced aluminum metal matrix composites–a review. *Journal of minerals and materials characterization and engineering*, *10*(01), 59.

Lafarie-Frenot, M. C., Rouquié, S., Ho, N. Q., & Bellenger, V. (2006). Comparison of damage development in C/epoxy laminates during isothermal ageing or thermal cycling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *37*(4), 662-671.

Lee, S-W. R., & Sun, C. T. (1993). A quasi-static penetration model for composite laminates. *Journal of Composite Materials*, *27*(3), 251-271.

Li, H., Hu, Y., Liu, C., Zheng, X., Liu, H., & Tao, J. (2016). The effect of thermal fatigue on the mechanical properties of the novel fiber metal laminates based on aluminum–lithium alloy. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *84*, 36-42.

Li, L., Reynaud, P., & Fantozzi, G. (2022). Thermal cyclic fatigue damage evolution of fiber-reinforced ceramic-matrix composites under constant loading. *Composite Interfaces*, *29*(9), 1033-1052.

Li, X., Zhou, C., Xing, C., He, A., Yu, J., & Wang, G. (2024). A phase-field fracture model for fatigue behavior in fiber-reinforced composites. *International Journal of Mechanical Sciences*, *269*, 108989.

Luyt, A. S., Molefi, J. A., & Krump, H. (2006). Thermal, mechanical and electrical properties of copper powder filled low-density and linear low-density polyethylene composites. *Polymer Degradation and Stability*, *91*(7), 1629-1636.

Malik, R., Zhou, S., Li, Z. L., Diaz, O. G., Bouville, F., & Saiz, E. (2025). Direct ink writing of alumina-fiber reinforced alumina-matrix composites: Processing and mechanical behavior. *Additive Manufacturing*, *99*, 104671.

Matvienko, O., Daneyko, O., Kovalevskaya, T., Khrustalyov, A., Zhukov, I., & Vorozhtsov, A. (2021). Investigation of stresses ınduced due to the mismatch of the coefficients of thermal expansion of the matrix and the strengthening particle in aluminum-based composites. *Metals*, *11*(2), 279.

MatWeb. (2025, Mayıs 10). *Alüminyum 2024-T3*. https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=57483b4d782940faaf12964a1821fb61&ckck=1

Matykiewicz, D., Barczewski, M., Knapski, D., & Skórczewska, K. (2017). Hybrid effects of basalt fibers and basalt powder on thermomechanical properties of epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, *125*, 157-164.

Mazzuca, P., Pisani, B., Firmo, J. P., & Ombres, L. (2024). Tensile and bond properties at elevated temperatures of a PBO-FRCM composite system for strengthening concrete elements: Experimental and analytical investigations. *Construction and Building Materials*, *432*, 136519.

Megahed, M., Abd El-baky, M. A., Alsaeedy, A. M., & Alshorbagy, A. E. (2019). An experimental investigation on the effect of incorporation of different nanofillers on the mechanical characterization of fiber metal laminate. *Composites Part B: Engineering*, *176*, 107277.

Miller, J. L. (2014). *Investigation of machinability and dust emissions in edge trimming of laminated carbon fiber composites*. [A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy]. University of Washington.

Muniyan, V., Vijay Kumar, V., Suyambulingam, I., Priyadharshini, S., Divakaran, D., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2025). A review of recent advancements in the

impact response of fiber metal laminates. *Heliyon*, *11*(2), e41756.

Müller, B., Hagenbeek, M., & Sinke, J. (2016). Thermal cycling of (heated) fibre metal laminates. *Composite Structures*, *152*, 106-116.

Nasser, J., Zhang, L., & Sodano, H. (2020). Aramid nanofiber interlayer for improved interlaminar properties of carbon fiber/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, *197*, 108130.

Ömercikoğlu, A. (2009). *Metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik cevabının incelenmesi*. [Yayınlanmış yükek lisasn tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Özsoy, M. İ. (2022). Investigation of the mechanical properties of carbon and basalt fiber laminated hybrid epoxy composites. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, *28*(4), 499-505.

Öztoprak, N. (2021). Investigation of metal-matrix composite based hybrid laminates under quasi-static penetration and Charpy impact loading. *Journal of Manufacturing Processes*, *68*, 1328-1338.

Pach, J., Frączek, N., & Kaczmar, J. (2020). The effects of hybridisation of composites consisting of aramid, carbon, and hemp fibres in a quasi-static penetration test. *Materials*, *13*(20), 4686.

Park, R., & Jang, J. (1998). The effects of hybridization on the mechanical performance of aramid/polyethylene intraply fabric composites. *Composites science and technology*, *58*(10), 1621-1628.

Park, S. Y., Choi, W. J., Choi, H. S., & Kwon, H. (2010a). Effects of surface pre-treatment and void content on GLARE laminate process characteristics. *Journal of Materials Processing Technology*, *210*(8), 1008-1016.

Park, S. Y., Choi, W. J., Choi, H. S., Kwon, H., & Kim, S. H. (2010b). Recent trends in surface treatment technologies for airframe adhesive bonding processing: A review (1995–2008). *The Journal of Adhesion*, *86*(2), 192-221.

Parlevliet, P. P., Bersee, H. E. N., & Beukers, A. (2007). Residual stresses in thermoplastic composites – a study of the literature. Part III: Effects of thermal residual stresses. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *38*(6), 1581-1596.

Pham, T. M., & Hao, H. (2016). Review of concrete structures strengthened with FRP against impact loading. In *Structures*, *7*, 59-70.

Qaiser, H., Umar, S., Nasir, A., Shah, M., & Nauman, S. (2015). Optimization of interlaminar shear strength behavior of anodized and unanodized ARALL composites fabricated through VARTM process. *International Journal of Material Forming*, *8*(3), 481-493.

Rajkumar, G. R., Krishna, M., Narasimhamurthy, H. N., Keshavamurthy, Y. C., & Nataraj, J. R. (2014). Investigation of tensile and bending behavior of aluminum

based hybrid fiber metal laminates. *Procedia Materials Science*, *5*, 60-68.

Rathore, D. K., Prusty, R. K., Mohanty, S. C., Singh, B. P., & Ray, B. C. (2017). In-situ elevated temperature flexural and creep response of inter-ply glass/carbon hybrid FRP composites. *Mechanics of Materials*, *105*, 99-111.

Reed, R. P., & Golda, M. (1994). Cryogenic properties of unidirectional composites. *Cryogenics*, *34*(11), 909-928.

Ruan, D., Lu, G., & Wong, Y. C. (2010b). Quasi-static indentation tests on aluminium foam sandwich panels. *Composite Structures*, *92*(9), 2039-2046.

Russell-Stevens, M., Todd, R., & Papakyriacou, M. (2005). The effect of thermal cycling on the properties of a carbon fibre reinforced magnesium composite. *Materials Science and Engineering: A*, *397*(1-2), 249-256.

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

Sadighi, M., Alderliesten, R. C., & Benedictus, R. (2012). Impact resistance of fiber-metal laminates: A review. *International Journal of Impact Engineering*, *49*, 77-90.

Sápi, Z., & Butler, R. (2020). Properties of cryogenic and low temperature composite materials – A review. *Cryogenics*, *111*, 103190.

Sarasini, F., Tirillò, J., Valente, M., Valente, T., Cioffi, S., Iannace, S., & Sorrentino, L. (2013). Effect of basalt fiber hybridization on the impact behavior under low impact velocity of glass/basalt woven fabric/epoxy resin composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *47*, 109-123.

Selmy, A. I., Elsesi, A. R., Azab, N. A., & Abd El-baky, M. A. (2012). Interlaminar shear behavior of unidirectional glass fiber (U)/random glass fiber (R)/epoxy hybrid and non-hybrid composite laminates. *Composites Part B: Engineering*, *43*(4), 1714-1719.

Semercioöz, S. M. (2021). *Bor Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Sezgin, A. (2020). *Vakum infüzyon yöntemiyle alümina nanopartikül takviyeli hibrit kompozit malzemelerin üretilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Beykent Üniversitesi.

Shimokawa, T., Katoh, H., Hamaguchi, Y., Sanbongi, S., Mizuno, H., Nakamura, H., Asagumo, R., & Tamura, H. (2002). Effect of thermal cycling on microcracking and strength degradation of high-temperature polymer composite materials for use in next-generation SST structures. *Journal of Composite Materials*, *36*(7), 885-895.

Singer, G., Sinn, G., Lichtenegger, H. C., Veigel, S., Zecchini, M., & Wan-Wendner, R. (2019). Evaluation of in-situ shrinkage and expansion properties of polymer

composite materials for adhesive anchor systems by a novel approach based on digital image correlation. *Polymer Testing, 79*, 106035.

Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. Ö., & Çoban, O. (2011). A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. *Materials & Design, 32*(7), 3671-3685.

Supian, A. B. M., Sapuan, S. M., Zuhri, M. Y. M., Zainudin, E. S., & Ya, H. H. (2018). Hybrid reinforced thermoset polymer composite in energy absorption tube application: A review. *Defence Technology, 14*(4), 291-305.

Surowska, B., Dadej, K., Jakubczak, P., & Bieniaś, J. (2021). Short-beam shear fatigue life assessment of thermally cycled carbon–aluminium laminates with protective glass interlayers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering, 21*(2), 50.

Şanlıtürk, S. (2020). *Al katmanlar kullanılarak üretilmiş fiber metal tabakalı kompozitlerin delinmesinin araştırılması*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Batman Üniversitesi.

Tabatabaeian, A., & Ghasemi, A. R. (2019). Curvature changes and weight loss of polymeric nano-composite plates with consideration of the thermal cycle fatigue effects and different resin types: An experimental approach. *Mechanics of Materials, 131*, 69-77.

Teixeira De Freitas, S., & Sinke, J. (2017). Failure analysis of adhesively-bonded metal-skin-to-composite-stiffener: Effect of temperature and cyclic loading. *Composite Structures, 166*, 27-37.

Topkaya, T., Çelik, Y. H., & Kilickap, E. (2020). Mechanical properties of fiber/graphene epoxy hybrid composites. *Journal of Mechanical Science and Technology, 34*, 4589-4595.

Trzepieciński, T., Najm, S. M., Sbayti, M., Belhadjsalah, H., Szpunar, M., & Lemu, H. G. (2021). New advances and future possibilities in forming technology of hybrid metal–polymer composites used in aerospace applications. *Journal of Composites Science, 5*(8), 217.

Ulus, S. (2018). *Balistik koruyucu kompozit plakalarda bazalt fiber kullanımı*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Harran Üniversitesi.

Uzay, Ç., & Geren, N. (2020). Advanced technologies for fiber reinforced polymer composite manufacturing. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23*(4), 245-257.

Vermeeren, C. A. J. R., Beumler, T., De Kanter, J. L. C. G., Van Der Jagt, O. C., & Out, B. C. L. (2003). Glare design aspects and philosophies. *Applied Composite Materials, 10*, 257-276.

Vlot, A. (1996). Impact loading on fibre metal laminates. *International Journal of Impact Engineering, 18*(3), 291-307.

Vlot, A., & Gunnink, J. W. (Ed.). (2001). *Fibre Metal Laminates: An Introduction*. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0995-9

Walter, T. R., Subhash, G., Sankar, B. V., & Yen, C. F. (2010). Monotonic and cyclic short beam shear response of 3D woven composites. *Composites Science and Technology*, *70*(15), 2190-2197.

Wei, B., Cao, H., & Song, S. (2010). Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. *Materials & Design*, *31*(9), 4244-4250.

Włodarczyk-Fligier, A., Dobrzański, L. A., & Adamiak, M. (2007). Influence of heat treatment on properties and corrosion resistance of Al-composite. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, *21*(1), 55-58.

Wu, G., & Yang, J.-M. (2005). The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures. *JOM*, *57*(1), 72-79.

Yıldız, R. (2019). *Karbon prepreg, cam prepreg ve bazalt elyaf ile üretilmiş hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Marmara Üniversitesi.

Yi, X. S., Du, S., & Zhang, L. (2018). *Composite materials engineering, volume 1: fundamentals of composite materials*. Chemical Industry Press. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5696-3

Zhang, C. H., Zhang, J. B., Qu, M. C., & Zhang, J. N. (2010). Toughness Properties of Basalt/Carbon Fiber Hybrid Composites. *Advanced Materials Research, 150-151*, 732-735.

Zhong, Y., & Joshi, S. C. (2015). Response of hygrothermally aged GLARE 4A laminates under static and cyclic loadings. *Materials & Design, 87*, 138-148.