T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN SICAK HADDELEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ

İsmail YILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Danışman

Prof. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM

Şubat, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN SICAK HADDELEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ

İsmail YILDIRIM tarafından hazırlanan tez çalışması 24.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Aslı GÜNAY BULUTSUZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Egemen SULUKAN, Üye
İstanbul Gedik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitlerin Sıcak Haddeleme Yöntemi İle Üretimi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

İsmail YILDIRIM

İmza

Aileme

ve

sevgili eşime

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam ve lisansüstü eğitimim süresince destekleri ve katkılarıyla beni sürekli ileriye götüren, bilgi ve tecrübeleriyle her zaman destekleyen, yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM'a ve laboratuvar çalışmalarımda beni yalnız bırakmayan ve her zaman yardımcı olan Araş. Gör. Metehan DEMİRKOL'a teşekkür ederim.

Lisans ve lisansüstü öğrenim hayatım boyunca bu tez çalışmamı yapacağım bilgi birikimini sağlayan ve mesleğimi kazandıran bilim ve fen yuvası Yıldız Teknik Üniversitesi'ne ve akademisyenlerine teşekkürü borç bilirim.

Tüm eğitim hayatım boyunca yanımda olan ve hiçbir zaman yardımlarını eksik etmeyen değerli aileme ve lisansüstü eğitim sürecimin her anında yanımda olan, ümitsizliğe düştüğümde her daim destekleyen sevgili eşim Berna'ya sonsuz teşekkür ederim.

İsmail YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vi
KISALTMA LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
TABLO LİSTESİ x
ÖZET xi
ABSTRACT xiii
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı 4
2 KOMPOZİT MALZEMELER 8
2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 9
2.2 Kompozit Malzemelerin Tarihi ve Uygulama Alanları 12
2.3 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları 15
3 ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLER 18
3.1 Kullanılan Malzemeler 19
3.2 Üretim Yöntemleri 27
3.3 Sürekli Elyaf Takviyeli Polipropilen Matrisli Kompozitler 38
4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR 42
4.1 Malzeme, Metod ve Deney Numunelerinin Hazırlanması 43
4.2 Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu 49
4.3 Elyaf Takviye Oranı Değişiminin Değerlendirilmesi 55
5 BULGULAR VE TARTIŞMA 58
6 SONUÇ 70
KAYNAKÇA 72
A ÇEKME TESTİ GERİLME GERİNİM GRAFİKLERİ 78
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 98

SİMGE LİSTESİ

dk	Dakika
GPa	Gigapaskal
g	Gram
MPa	Megapaskal
m	Metre
µm	Mikrometre
mm	Milimetre
s	Saniye
°C	Santigrat Derece
cm	Santimetre

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
GMT	Cam Mat Termoplastik
H	Haddeleme
HS	Haddeleme Sonrası Suyla Soğutma
LFT	Uzun Elyaf Termoplastik
MÖ	Milattan Önce
MR	Manyetik Rezonans Görüntüleme
N	Numune
PA	Poliamid
PP	Polipropilen
PVC	Polivinil Klorür
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
S/G	Sinyal Gürültü Oranı
T	Test

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kompozit malzemeyi oluşturan fazların şematik gösterimi [11] 8
Şekil 2.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması 10
Şekil 2.3 Formlarına göre elyaf takviyelerin sınıflandırılması 11
Şekil 2.4 Kompozit malzemelerde kullanılan takviye türleri: a) partikül, b) kısa elyaf, c) sürekli elyaf [17] 12
Şekil 2.5 2019 yılı kompozit malzeme sektör payları [20] 13
Şekil 3.1 Dokuma kumaşları oluşturan atkı ve çözgü iplikleri 21
Şekil 3.2 Düz dokuma, twill dokuma ve tek yönlü dokuma (soldan sağa) 22
Şekil 3.3 Termoplastik ve termoset moleküler bağ yapısı oluşumu [35] 25
Şekil 3.4 Enjeksiyon kalıplama prosesi aşamaları [41] 29
Şekil 3.5 Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiş plaka SEM görüntüsü [43] 30
Şekil 3.6 Basınçlı kalıplama prosesi şematik gösterimi 31
Şekil 3.7 Uzun elyaf termoplastik peletleri [52] 33
Şekil 3.8 Cam mat termoplastik üretim prosesi [53] 33
Şekil 3.9 Termoform kalıplama proses aşamaları [57] 34
Şekil 3.10 Cam elyaf termoplastik kesit görüntüsü [58] 35
Şekil 3.11 Elyaf sarma proses şeması [60] 36
Şekil 3.12 Pultruzyon kalıplama proses şeması [61] 37
Şekil 3.13 Elyaf-matris kırılma arayüzeyi SEM görüntüsü [65] 38
Şekil 3.14 Sürekli cam elyaf takviyeli PP kırılma arayüzeyi, a)53x, b)270x [68] 40
Şekil 4.1 Cam elyaf kumaş; a) twill, b) düz 44
Şekil 4.2 PP matris malzeme 45
Şekil 4.3 Matris ve elyaf malzemenin kalıplanması 46
Şekil 4.4 Kalıplanan yapının haddelenmesi 46
Şekil 4.5 Kalıp ayırıcı kağıt ve alüminyum plaka 47
Şekil 4.6 Masaüstü hadde tezgahı 47
Şekil 4.7 Çekme testi numune ölçüleri 48
Şekil 4.8 Çekme testi numunesi 49

Şekil 4.9 Taguchi tasarımı çekme test numuneleri; a) T1, b) T2, c) T3, d)T4, e) T5, f) T6, g) T7, h)T8, ı) T9 52

Şekil 4.10 T1, N1 çekme testi 52

Şekil 4.11 Sinyal/Gürültü diagramı 54

Şekil 4.12 Farklı oranda takviye içeren kompozit levhalar; a) T11, b) T12, c) T13, d)T14 56

Şekil 4.13 Farklı oranda takviye içeren çekme test numuneleri; a) T11, b) T12, c) T13, d)T14 57

Şekil 5.1 Çekme testi uygulanan numuneler; a) T1, b) T2, c) T3, d)T4, e) T5, f) T6, g) T7, h)T8, ı) T9 58

Şekil 5.2 ASTM D3039 standart kırılma karakteristiği [73] 59

Şekil 5.3 Haddeleme sonrası su ile soğutulan numuneler; a)T3, b) T5, c) T7 60

Şekil 5.4 Çekme testi uygulanan numuneler; a) T12, b) T13, c) T14 62

Şekil 5.5 ASTM D3039 standart kırılma karakteristiği [73] 63

Şekil 5.6 T11 test numaralı takviyesiz PP levha kırılma arayüzeyleri 64

Şekil 5.7 T12 test numuneleri SEM görüntüleri, 400x büyütme 65

Şekil 5.8 T13 test numuneleri SEM görüntüleri, 400x büyütme 65

Şekil 5.9 T12 test numuneleri SEM görüntüleri, 1000x büyütme 66

Şekil 5.10 T13 test numuneleri SEM görüntüleri, 1000x büyütme 66

Şekil 5.11 T12 test numuneleri arayüzey SEM görüntüleri, 1000x büyütme 67

Şekil 5.12 T13 test numuneleri arayüzey SEM görüntüleri, 1000x büyütme 67

Şekil 5.13 Elyaf-matris arayüzey SEM görüntüleri, 4000x büyütme 68

Şekil 5.14 T14 test numuneleri SEM görüntüleri, 400x büyütme 69

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Kompozit malzeme kullanımının avantaj ve dezavantajları [26] 17
Tablo 3.1 Endüstride kullanılan elyafların mekanik özellikleri [29] 20
Tablo 3.2 Cam elyafların mekanik ve fiziksel özellikleri [33] 23
Tablo 3.3 Termoplastik ve termoset matrislerin karşılaştırılması [37] 26
Tablo 3.4 Polimer matris malzemeler 27
Tablo 4.1 Cam elyaf kumaş teknik özellikler 43
Tablo 4.2 PP malzeme özellikleri [27, 72] 44
Tablo 4.3 Değişken parametre seviyeleri 51
Tablo 4.4 Taguchi test tasarımı 51
Tablo 4.5 Taguchi tasarımı çekme test sonuçları, MPa 53
Tablo 4.6 Sinyal/Gürültü oranları tablosu 54
Tablo 4.7 Farklı elyaf oranına sahip test numune özellikleri 55
Tablo 4.8 Farklı oranda takviye içeren numunelerin çekme test sonuçları, MPa . 57

ÖZET

Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitlerin Sıcak Haddeleme Yöntemi İle Üretimi

İsmail YILDIRIM

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM

Polimer matrisli elyaf takviyeli kompozitler, sahip olduğu yüksek mekanik özellikleri, düşük ağırlıkları ve tasarım esnekliği gibi özellikleri nedeniyle endüstride yoğun miktarda kullanılmaktadır. İlk modern elyaf takviyeli kompozit uygulamalarında, termoset matris malzemeler kullanılmıştır. Ancak, termoset matrisli elyaf takviyeli kompozitlerin üretim süreçlerinin uzun olması ve geri dönüşüme uygun olmamaları, termoplastik matris malzemelere yönelimi artırmıştır. Termoplastik matrisli kompozitler, geri dönüştürülebilmekte ve geri dönüştürülmüş termoplastik malzemeler, matris malzeme olarak kullanılabilmektedir. Termoplastik matrisli elyaf takviyeli kompozitlerin, düşük proses çevrim süreleri, düşük maliyetleri ve daha çevreci olmaları endüstride kullanımını günden güne artırmaktadır. Kompozit üretiminde termoplastik matris malzemelerinin, yüksek eriyik vizkozitesi matrisin elyaf ıslatma performansını düşürmekte ayrıca üretim sırasında yapı içerisinde kalan gaz boşlukları mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Termoplastik matrisli kompozitlerin sıcak haddeleme yöntemi ile üretilmesinde, hadde merdanesinin basınç

oluşturacağı bölgede takviye-matris konsolide olurken haddelenmeyen bölgeden gaz çıkışı sağlanabilmektedir. Ayrıca, düz ve profil formda kompozit levhalar istenilen uzunlukta, düşük maliyetle ve yüksek hızlarda üretilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, sürekli cam elyaf takviyeli geri dönüştürülmüş polipropilen matrisli kompozitlerin, sıcak haddeleme yöntemi ile üretimi, haddeleme prosesinde kullanılan parametrelerin optimizasyonu, elde edilen kompozit yapının mekanik özellikleri ve elyaf-matris arayüzey performansının incelenmesi amaçlanmaktadır. Kompozit yapının sıcak haddeleme prosesi ile üretiminde sıcaklık, haddeleme hızı ve soğutma parametrelerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkiler incelenmiştir. Proses parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisinin belirlenmesinde, Taguchi optimizasyon metodu kullanılmıştır. En optimum parametreler 230 °C proses sıcaklığı, 0.035 m/s haddeleme hızı ve 1 kere haddeleme olarak belirlenmiştir.

3 katman 300 g/m² ağırlığında düz dokuma cam elyaf kumaş ve ağırlıkça %55 geri dönüştürülmüş polipropilen içeren 2 mm kalınlığındaki levhaların ağırlığı 2260 g/m² ve ortalama çekme dayanımı 125 MPa olarak, 4 katman cam elyaf kumaş ve ağırlıkça %48 geri dönüştürülmüş polipropilen içeren 2 mm kalınlığındaki levhaların ağırlığı 2500 g/m² ve ortalama çekme dayanımı 154 MPa olarak elde edilmiştir. Elyaf oranı artışıyla görülen yaklaşık %10'luk ağırlık artışı, ortalama çekme dayanımı değerini %23 artırmıştır. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde aynı kompozit levha kalınlığında 4 katman kumaş içeren numunelerde, 3 katman içerenlerden daha fazla miktarda elyaf kırılması ve elyaf yüzeylerine yapışmış matris malzeme gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Termoplastik kompozit, haddeleme, geri dönüşüm

ABSTRACT

Manufacturing Of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites By Hot Rolling Process

İsmail YILDIRIM

Department of Mechanical Engineering
Master of Science

Supervisor: Prof. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM

Polymer matrix fiber reinforced composites are used extensively in the industry due to their high mechanical properties, low weight and design flexibility. The first modern fiber-reinforced composite applications used thermoset matrix materials. However, the long production processes of thermoset matrix fiber-reinforced composites and their unsuitability for recycling have increased the tendency towards thermoplastic matrix materials. Thermoplastic matrix composites can be recycled and recycled thermoplastic materials can be used as matrix materials. The use of thermoplastic matrix fiber reinforced composites in the industry is increasing day by day due to their short process cycle times, low costs and greater environmentally friendliness. In composite production, the high melt viscosity of thermoplastic matrix materials reduces the fiber wetting performance of the matrix and the gas voids remaining in the structure during production negatively affect the mechanical properties. In the production of thermoplastic matrix composites by hot rolling process, while the reinforcement-matrix is consolidated in the region where the roller creates pressure, gas can be released from the non-rolled region. Additionally, composite sheets in flat and profile forms can be produced in desired lengths, at low cost and at short time.

In this thesis, it is aimed to produce continuous glass fiber reinforced recycled polypropylene matrix composites by hot rolling process, to optimize the parameters used in the rolling process, to investigate the mechanical properties of the obtained composite structure and the fiber-matrix interface performance. The effects of temperature, rolling speed and cooling parameters on the mechanical properties of the composite structure in the production of hot rolling process were investigated. Taguchi optimization method was used to determine the effect of process parameters on mechanical properties. The most optimum parameters were determined as 230°C process temperature, 0.035 m/s rolling speed and once rolling.

The weight of 2 mm thick sheet containing 3 plies of 300 g/m² plain woven glass fiber weave and 55% by weight recycled polypropylene was 2260 g/m² and the average tensile strength was 125 MPa, and the weight of 2 mm thick sheet containing 4 plies of glass fiber weave and 48% by weight recycled polypropylene was 2500 g/m² and the average tensile strength was 154 MPa. Approximately 10% weight rise with increasing fiber content raised the average tensile strength value by 23%. When the fracture surfaces were examined, it was observed that in samples containing 4 plies of weave with the same composite sheet thickness, more fiber breakage and matrix material bonding to the fiber surfaces were observed than in those containing 3 plies.

Keywords: Thermoplastic composite, rolling process, recycling

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit uygulamalarında, ilk olarak termoset matris malzemeleri modern yapısal kompozit üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Termoset plastikler düşük vizkoziteye sahip olduğundan elyaf ıslatma kabiliyetleri yüksektir. Ancak, elyaf-matris birleşiminden sonra yapının kimyasal kürleme için belirli bir sıcaklık ve basınç altında proses edilmesi gerekmektedir. Bu durum termoset matrisli kompozitlerin üretim süreçlerinin uzamasına neden olmaktadır. Termoset matris yapısının kürlenmesi, bir dizi kimyasal tepkimeyle gerçekleştiğinden bu malzemelerin geri dönüşümle tekrar kullanılması imkansız hale gelmektedir. Termoset matrisli kompozitlerin geri dönüşümle tekrar kullanılamaması ve endüstride artan ihtiyaca bağlı olarak kullanımlarının artması çevresel sorunlara neden olmaktadır.

Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan reçinelerin %90'ı uzun bir geleneğe sahip oldukları için hala termoset plastiklerdir. Doymamış polyesterler, yapısal kompozitlerde kullanılan termoset matrislerinin %65'ini oluşturmaktadır. Termoset matrisli kompozitlerin üretimi sırasında açığa çıkan ve çevresel sorunlara yol açan emisyonlar, farklı yöntemlerin benimsenmesine neden olarak yüksek maliyetlere yol açmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, tüm sektörler diğer seçenekleri değerlendirmeye isteklidir [1].

Termoplastik matrisli kompozitlerde sabit basınç ve sıcaklık altında kürlenme ihtiyacı bulunmadığından hızlı proses edilmeye uygundur. Üretimleri sırasında kimyasal reaksiyonlar oluşmaması geri dönüşümle tekrar kullanılabilmelerine imkan sağlamaktadır. Ayrıca, termoplastiklerin oda sıcaklıklarında termosetlere

göre çok daha yüksek darbe dayanımına sahip olması termoplastik kompozitlerin mühendislik uygulamalarında kullanımlarını artırmaktadır.

Termoplastik matrisli kompozitlerin proses edilmesi sırasında eriyik fazda bulunan matrisin, termoset matris malzemelerine göre çok daha yüksek viskoziteye sahip olması matrisin elyaf ıslatma kabiliyetini düşürmektedir. Elyaf ıslatma performansının artması için enjeksiyon kalıplama, basınçlı kalıplama ve termoform kalıplama gibi yöntemlerde daha yüksek basınç gereksinimi oluşmaktadır. Yüksek basınç sağlayacak takım ve tezgahlar üretim maliyetini artırmaktadır.

Sürekli elyaf takviyeli termoplastik plaka üretiminde sıcak haddeleme yöntemi kullanılarak hadde düzlemi boyunca düz veya profil kesitli mamül ya da yarı mamül olarak kullanılabilecek termoplastik matrisli kompozit elde edilebilmektedir.

Kizaki vd. [2], karbon elyaf takviyeli kompozitlerin üretim süreçlerinin hızlandırılması, demiryolu araçlarında kullanılan uzun bileşenlerin geleneksel otoklav yöntemiyle üretilmesi zorluğu üzerine kompozit levhaların haddeleme yöntemi ile üretilmesini önermiştir. Yapılan çalışmalarda termoset reçine emdirilmiş karbon elyaf prepreg malzeme kullanılarak önerilen üretim yöntemi otoklav yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Haddeleme işlemiyle üretilen kompozit levhalar, boşluk oranı, mukavemet, şekillendirilebilirlik ve enerji emilimi gibi özelliklerinin otoklav işlemiyle üretilen levhalarla karşılaştırılabilir performans özelliklerine sahip olduğunu belirtmiştir.

Dong-Jun Kwon vd. [3], sürekli elyaf takviyelerinin termoplastiklerle emprenye edilmesinde, termoplastik matrisin yüksek eriyik viskozitesinin oluşturduğu zorlukları iyileştirmek için sürekli matris filamentleri ve takviye elyafları ile karışık ipler oluşturarak ürettikleri kompozit plakaların mekanik özellikleri üzerine çalışamalar yapmıştır. Farklı oranlarda cam elyaf içeren ipliklerle dokunan kumaşlar, PP laminasyon makinesi kullanılarak kompozit plakalar haline getirilmiştir. Sıralı hadde şeklinde merdanelere sahip laminasyon makinesinde ilk üç hadde sırasıyla 280 °C, 260 °C ve 240 °C sıcaklıkta kompozit plakaları ısıtmak için kullanılırken, son iki hadde 80 °C ve 40 °C sıcaklıkta kompozit plakaları soğutmak ve sertleştirmek için kullanılmıştır.

Henninger vd. [4], sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin şekillendirilmesinde, profil haddeleme yöntemi kullanarak termoplastik

kompozitlere özgü tüm performans avantajlarına sahip yapısal olarak verimli uzun profillerin ekonomik olarak verimli bir şekilde üretilebilirliğini araştırmıştır. Cam elyaf kumaş takviyeli polipropilen ve poliamid levhalar, 10 m/dk'ya kadar hızlarda şekillendirilmiştir. Sıcaklık ve proses hızı gibi temel işleme parametrelerinin profillerin şekillendirme davranışı ve kalitesi üzerindeki etkisi deneysel olarak incelemiştir.

Tatsuno vd. [5], sıcak presleme ile üretilen karbon elyaf takviyeli termoplastik levhalarda, soğutma hızının mekanik özellik üzerindeki etkisini araştırmıştır. PA6 ile emprenye edilmiş 0,2 mm kalınlığındaki düz dokuma kumaştan 15 adet kullanılarak 200 mm x 3100 mm x 33 mm boyutlarında düz bir levha üretmişlerdir. 280 °C'ye kadar ısıtılıp 5 MPa'da preslenerek üretilen levhalar, 7 s basınç tutma süresi 226 °C/s soğutma hızı ve 18 s basınç tutma süresi 24,4 °C/s soğutma hızı ile sırasıyla 536 MPa ve 733 MPa eğilme mukavemeti vermiştir.

Borazghi vd. [6], polipropilen ve cam elyaf karışımı bir kumaşın sürekli haddeleme işlemi kullanılarak konsolidasyonunu araştırmıştır. Üretimde, elyaf kumaş ve matris katmanları bir dizi haddeden geçirilerek kademeli olarak konsolide edilmiştir. Çalışmada, karışık cam elyaf ve polipropilen elyaflarından oluşan, nominal ağırlığı 1485 g/m² ve %35'lik nihai elyaf hacim oranı sağlayan kumaşlar kullanılmıştır. Tekrarlanan haddeleme işleminin, yapıda sıkışmış havanın erimiş matristen kaçmasına izin vererek konsolidasyon seviyesini önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. Dar hadde açıklıklarında, kumaş yapısının reçinenin akışıyla değiştiğini göstermiştir. Ayrıca, yüksek proses sıcaklıkları ve düşük proses hızlarında malzemelerin, daha düşük matris viskozitesi ve haddelerle daha uzun temas süresi nedeniyle daha iyi konsolidasyon seviyelerine sahip olduğunu göstermiştir. Optimum işlem parametrelerinde, 4 katmanlı laminatın 0,5 m/dk hızında sürekli haddelenmesiyle, %4'ten daha az boşluk içeriğine sahip bir kompozit yapı oluşturulmuştur.

Kim vd. [7], kompozit plaka üretiminde epoksi matrisinin yüksek basınç altında uzun süre kürlenmesinin seri üretim için bir engel olmasından dolayı, karbon/fenol kompozit bipolar plakaların seri üretimi için sıcak haddeleme kullanan sürekli bir proses geliştirilmiştir. Sıcak haddeleme işlemi için sıcaklık, süre ve haddeleme adımları optimize edilmiştir. Optimize edilmiş proses parametreleriyle üretilen

kompozit plakaların çekme mukavemeti, basınçlı kalıplama prosesi ile üretilen numunelere kıyasla %33'lük bir artışa 400 MPa olarak bulunmuştur.

Bernatas vd. [8], kompozit malzeme kullanımının ve birçok sektörde kompozitlere olan talebin artması doğrultusunda oluşacak atıkların yönetimi ve yeniden kullanılmasına yönelik sürdürülebilir atık yönetimi ihtiyacını ortaya koymuştur. Bu doğrultuda kompozit geri dönüşüm için kullanılabilecek mekanik, termal ve kimyasal proseslerleri derlemiştir. Termoset matrisli kompozitlerin geri dönüşümü kısıtlı bir oranda mümkün olsa da, termoplastik kompozitler endüstide yaygınlaşmasıyla, termoplastik matrislerin yeniden eritilerek veya yeniden kalıplanmasında elyafların termomekanik özelliklerini koruması için gerekli yolları sunmaktadır.

Chen vd. [9], ağırlıkça %50 oranında cam elyaf ile güçlendirilmiş enjeksiyonla kalıplanmış PP için, üç çevrim olarak mekanik geri dönüşüm uygulamıştır. Dönüşüm sonunda, ağırlıkça %50 cam elyaf takviyeli PP matrisli kompozitin çekme dayanımında %30 azalma, elastisite modülünde ise %5 azalma gözlemlemiştir. Uzun cam elyaf takviyede önemli kırılmalar görülmüş ve bu durum mekanik özelliklerin düşmesine neden olmuştur.

Sam Daliri vd. [10], cam elyaf takviyeli polipropilen atığından üretilen takviye ağırlık oranı %0, %15, %30, %40 olan ekstrüzyon mamülü hammadde ile üç boyutlu baskı yöntemi kullanılarak numune basılabilirliği ve mekanik özellikleri üzerine araştırma yapmıştır. En yüksek çekme dayanım değeri %40 elyaf ağırlık içeriğine sahip baskı filamentinde 112 MPa olarak görülmüştür. Baskı filamentin tekrarlanan geri dönüşümünün elyaf en/boy oranını azalttığı ve filament kalitesini artırdığı göstermiştir. Üretilen numunelerde görülen dayanım değerleri, cam elyaf takviyeli polipropilenin, üç boyutlu baskı ekstrüzyon filamentine geri dönüştürülebileceğini göstermektedir.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Elyaf takviyelerin üretimi ve matris malzeme olarak kullanılabilecek termoset polimerlerin bulunması, elyaf takviyeli termoset matrisli modern polimer kompozitlerin yapısal uygulamalarda kullanılmasının önünü açmıştır. Elde edilen kompozit yapıların mekanik ve fiziksel özelliklerinin ağırlıklarına oranla yüksek

olması, uygulama alanlarının hızla artmasına neden olmuştur. Ancak, termoset matrisli kompozitlerin üretimindeki yüksek emek gereksinimi, kürlenme süreleri ve proses çevrim sürelerinin uzun olması dezavantaj olarak görülmektedir. Ayrıca, üretimleri sırasında termoset matriste gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucunda açığa çıkan emisyonlar, üretimlerinde geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılamaması ve üretilen kompozit yapıların geri dönüşüme uygun olmaması çevresel sorunlara neden olmaktadır.

Endüstride, polimer matrisli elyaf takviyeli kompozitlerin üretimlerinde termosplastik matris malzemelerin kullanılmasıyla, termoset matris kullanımından kaynaklanan dezavantajları elimine etme fikri ortaya çıkmıştır. Yüksek performanslı termoplastik matris malzemelerin üretilmesi ve mühendislik tasarımlarında termoplastik malzemelerin sunduğu mekanik ve fiziksel özelliklere duyulan ihtiyaç bu malzemelerin üretim ve kullanım oranını hızla artırmıştır. Üretimlerinin otomatikleştirilmiş proses döngüleriyle kısa çevrim sürelerinde tamamlanması ve geri dönüşümleriyle daha çevreci olmaları mühendislik endüstrilerinde daha çok tercih edilmelerini sağlamaktadır.

Termoplastik matrisli kompozitlerin üretimlerinde, eriyik fazda bulunan matrisin yüksek viskoziteye sahip olması matrisin elyaf ıslatma kabiliyeti düşürmektedir. Optimize edilmemiş proses parametreleriyle üretilen kompozit yapılarda elyaf-matris arasında oluşacak düşük kalitedeki arayüzey ve yapı içerisinde oluşabilecek gaz boşlukları, kompozit yapının mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Elyaf ıslatma performansının artırılarak yüksek mekanik özelliklere sahip kompozit yapıların eldesi için literatürde genellikle karşılaşılan enjeksiyon kalıplama, basınçlı kalıplama ve termoform kalıplama gibi yöntemlerde yüksek basınç gereksinimi oluşmaktadır. Maliyet etkin olmaları, tercih edilmelerindeki nedenlerden biri olan termoplastik kompozit yapıların üretiminde yüksek basınçlara dayanacak kalıp ve tezgahların tasarım ve üretimi, maliyetleri artırmaktadır. Ayrıca, üretilecek kompozit yapıların büyüklüklerini kalıp boyutlarının sınırlandırması mühendislik uygulamalarında tasarım esnekliğine engel olmakta ve üretim sürelerinin uzamasına neden olmaktadır.

Sürekli elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit üretimine ilişkin literatür çalışmalarına bakıldığında hem termoset hem de termoplastik matris yapısına sahip kompozitlerin üretiminde sıcak haddeleme yöntemi kullanılarak hadde düzlemi

boyunca düz veya profil kesitli mamül yada yarı mamül üretimini hedefleyen bir takım çalışmaya rastlanmaktadır [2, 3, 4, 5, 6, 7].

Bu tez çalışmasında, yapılan literatür araştırmalarının ışığında elyaf takviyeli geri dönüştürülmüş termoplastik matrisli kompozitlerin sıcak haddeleme prosesi ile elde edilmesinde kullanılacak üretim proseslerinin optimize edilmesi, optimum proses parametreleri ile farklı elyaf/matris oranlarında üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri ve haddeleme prosesi ile elde edilecek kompozit malzemelerde arayüzey yapılarının incelenerek proses verimliliğinin araştırılması amaçlanmaktadır.

Dünyada nüfusun artmasına bağlı olarak kullanılan plastik malzemeler artmakta ve bununla birlikte plastik atık oluşumu hızlanmaktadır. Her yıl milyonlarca ton plastik üretilmekte ve üretilen plastik malzemeler bir süre sonra atığa dönüşmektedir. Oluşan bu atıklar çevresel sorunlara neden olmaktadır. Ortaya çıkan termoplastik atıkların geri dönüşüm ile tekrar kullanılması doğada milyonlarca yılda yok olacak atıkların bertaraf edilmesine ve daha çevreci bir üretim metodu oluşmasını sağlamaktadır. Dünya polipropilen pazarına bakıldığında her yıl büyüdüğü ve buna bağlı olarak oluşacak polipropilen atık miktarının artacağı bilinen bir gerçektir. Bu tez çalışmasının en önemli özgün değerlerinden biri olarak, yapılan çalışmada geri dönüştürülmüş polipropilen matris malzeme kullanımı planlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, literatürdeki çalışmalar, haddeleme proses mekanizması ve termoplastik kompozit üretim metodları incelenerek, sıcak haddeleme proses parametreleri olarak proses sıcaklığı, haddeleme hızı ve soğutmanın üretilecek olan kompozit yapının mekanik özelliklerine ve elyaf-matris arayüzey kalitesine etkilerinin tespiti amaçlanmaktadır.

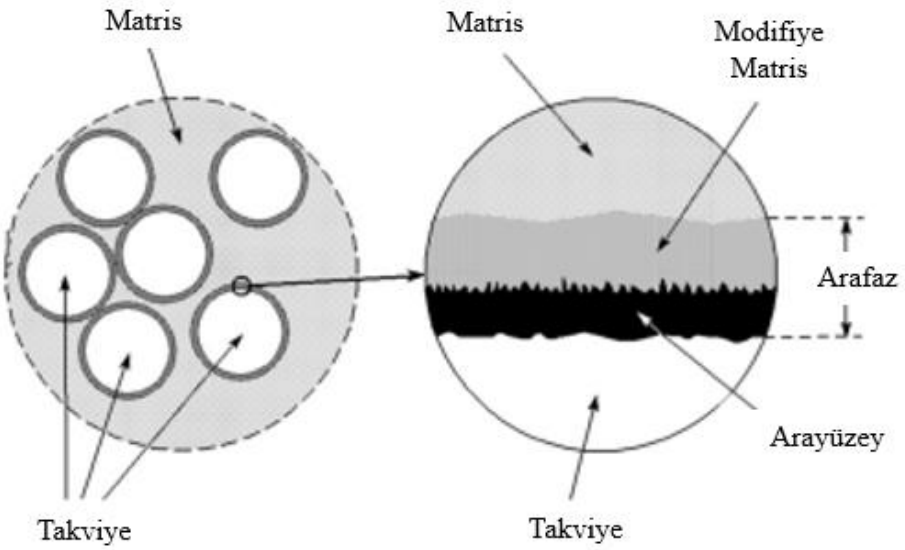
Üretilecek kompozit yapıyı oluşturan cam elyaf takviye, geri dönüştürülmüş polipropilen matris malzeme ve kullanılacak hadde tezgahının özelliklerine göre proses parametrelerinin seviyeleri belirlenmektedir. Belirlenecek sıcak haddeleme proses parametre seviyelerinin, mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi amacıyla Taguchi optimizasyon yöntemi ile oluşturulan deney parametre setlerine göre üretilen numunelere çekme testi uygulanarak optimum proses parametrelerinin belirlenmesi planlanmaktadır.

Sıcak haddeleme işleminde belirlenecek proses parametreleriyle, farklı oranda elyaf ve matris içeren levhaların üretiminde, elyaf/matris oranının elde edilecek yapının mekanik özelliklerine olan etkisinin incelenmesi amacıyla farklı elyaf/matris oranlarında üretilecek numunelere yapılacak çekme testleriyle, çekme dayanımlarının incelenmesi hedeflenmiştir.

Üretilecek numunelere yapılacak çekme testleriyle elde edilen dayanım değerleri ve numunelerin kırılma arayüzeylerinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilecek görüntülerle, sıcak haddeleme prosesi için belirlenen optimum parametrelerle üretilen farklı oranlarda elyaf ve geri dönüştürülmüş matris içeren termoplastik kompozitlerin arayüzey özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

2
KOMPOZİT MALZEMELER

En az iki veya daha fazla malzemenin makro boyutta, birbiri içerisinde kimyasal birleşik oluşturmaksızın oluşturduğu yapılar kompozit malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Kompozit malzemeler genel olarak, matris olarak tanımlanan dolgu fazının içerisinde belli oranda ve kurallar çerçevesinde dağıtılmış veya düzenlenmiş takviye fazından oluşmaktadır. Kompozit malzeme yapısındaki temel amaç kompozit yapıyı oluşturan her bir malzemenin ayrı ayrı sahip olduğu özellikleri, tek bir malzeme yapısında elde etmektir.



Şekil 2.1 Kompozit malzemeyi oluşturan fazların şematik gösterimi [11]

Bir kompozit malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kompozit malzemeyi oluşturan malzemelerin karışım içerisindeki oranlarına göre belirlenmektedir. Elde edilen kompozit malzemenin ağırlık, yoğunluk gibi fiziksel, dayanım, tokluk gibi mekanik özellikleri malzemeyi oluşturan karışımdaki oranların yüzde miktarlarına göre hesaplanmaktadır. Bu kurala "kompozit karışım kuralı" denmektedir.

Kompozit malzemelerin yapılarında, metal alaşımlandırmaki gibi bir kimyasal birleşim mekanizması oluşmadığından karışımı oluşturan malzemelerin ilgili özelliklerinden daha yüksek değerlerde bir özellik değeri görülmemektedir. Ayrıca kompozit malzemelerde, takviye elemanının karışım içerisindeki dağılım ve düzenine göre izotropik, anizotropik veya ortotropik özellik gösterebilmektedir.

Kompozit malzemelerde takviye fazı, genel olarak yapının mekanik özelliklerini belirlerken matris fazı, kompozit yapıya şeklini verir, asıl yük taşıma görevini üstlenen faz olan takviyeler arasında yük aktarır ve daha kırılgan olan takviye fazını korumaktadır.

Kompozit malzemelerde, matris ve takviye fazları arasında kimyasal, fiziksel ve mekanik olarak etkileşen, takviye ve matrisi bir arada tutarak fazlar arası yük akışını sağlayan üçüncü bir arayüzey fazı bulunmaktadır. Arayüzey fazının takviye-matris arasında yük aktarma kuvveti, takviye fazını fiziksel ve kimyasal çevre şartlarından koruyuculuğu kompozitin verimini önemli oranda etkilemektedir.

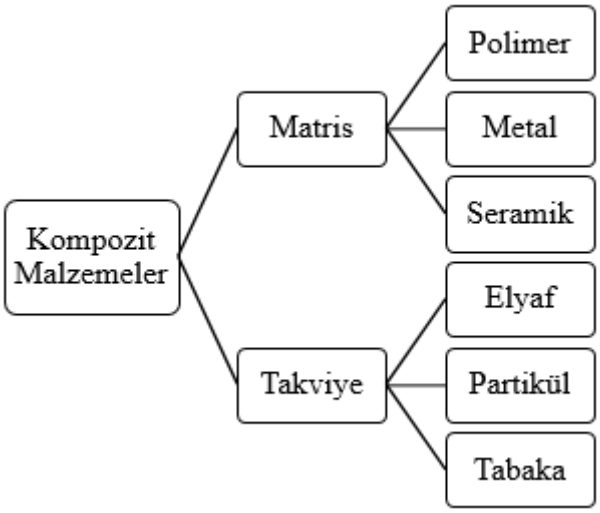
Genel olarak değerlendirildiğinde, kompozit malzemeler yapıda ihtiyaç duyulan gereksinimlere göre modifiye edilebilen, çok geniş bir aralıkta mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olarak tasarlanabilen malzemeler olduğundan günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmakta, kullanım oranı ve alanları giderek artmaktadır.

2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, matris ve takviye malzemesine göre iki ana başlık altında sınıflandırılmaktadır. Matris ve takviye türleri Şekil 2.2'de verilmiştir. Matris malzemesi olarak; polimer, metal veya seramik malzemeler, takviye olarak farklı formlardaki elyaf, partikül veya tabaka ile birlikte uygun matris-takviye gruplamalarıyla kompozit malzemeler oluşturulmaktadır.

Polimer matrisli kompozitler, termoset veya termoplastik bir malzemenin matris olarak kullanıldığı kompozit türleridir. Termoset matrisli kompozitler, daha yüksek mukavemetleri ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılıkları nedeniyle termoplastiklere göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır [12]. Genel mühendislik uygulamalarında kısa veya sürekli elyaf ile takviye edilmektedir. Yüksek kırılma tokluğu ve yorulma direnci, yüksek mukavemet, tokluk ve korozyon direncine sahiptirler. Elektriksel iletkenliği ve termal direncinin düşük olması dezavantajıdır. Polimer matrisli

kompozitlerin üretim prosesleri, diğer kompozit malzemelere göre kolay olduğundan genel endüstri uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 2.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

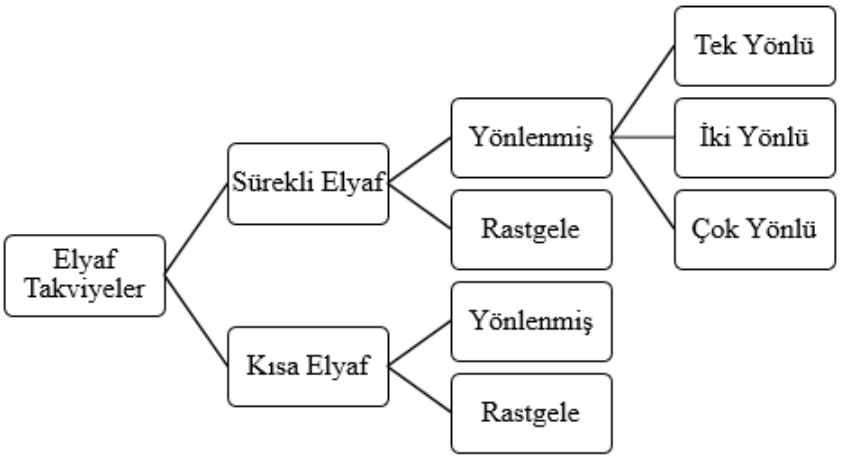
Metal matrisli kompozitler, bir metal matris malzemesi içerisinde daha yüksek sertlik ve dayanıma sahip genellikle partikül olmak üzere elyaf takviyeler de bulundurabilen kompozit türüdür. Genel olarak, yüksek dayanım ve tokluk, yüksek sıcaklık, termal şok dayanımı, aşınma ve korozyon direnci gibi özelliklere sahiptir. Takviye olarak kullanılacak malzemeler seramik veya metal olabilmektedir. Takviye türü yalnızca mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için değil, aynı zamanda termal genleşme, elektriksel iletkenlik vb. gibi fiziksel özelliklerin de özelleştirilmesi için kullanılabilmektedir [13].

Seramik matrisli kompozitlerde matris olarak kullanılan seramikler, yüksek korozyon ve sıcaklık direncine karşın çok kırılgan özellik göstermektedir. Seramiklerin kırılgan özelliklerini elimine etmek için kısa elyaf veya partikül takviyeli kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Seramik matrisli kompozitler, yüksek kırılma tokluğu, yüksek mukavemet ve düşük termal genleşme potansiyeline sahip olmasının yanı sıra yüksek korozyon dayanımları ile yüksek sıcaklığa dayanmaktadır. Seramik matrisli kompozitler, metallere veya diğer geleneksel mühendislik malzemelerine göre yüksek sıcaklıklara ve aşırı korozif ortamlara karşı çok daha fazla direnç göstermektedir [14].

Elyaf takviyeli kompozitler, malzeme liflerinin bir araya gelmesiyle oluşturulan elyafların uygun bir matris malzemesiyle birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Elyaf

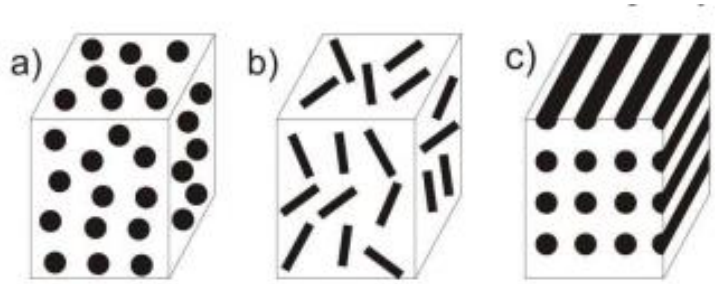
üretiminde cam, karbon aramid ve bor gibi malzemeler kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitler endüstride yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Elyafların formu ve boyutları, matris içindeki yerleşimi ve doğrultuları kompozit malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Elyaflardan oluşturulan homojen örülmüş kumaşların kullanılmasıyla ortotropik mekanik özelliklere sahip yapılar, dağınık veya belirli bir doğrultu boyunca yönlemiş elyafların matris malzemeye eklenmesiyle anizotropik veya izotropik yapılar elde edilebilmektedir. Elyaf takviyeler, neredeyse sonsuz uzunlukta ve tek yönlü olarak yerleştirildiğinde, yapı üzerinde elyaf doğrultusunda çok yüksek mekanik özellikler görülebilmektedir. Elyafların anizotropik olarak dağılımı ve elyaf uzunluklarının kısa olması, kompozit malzemenin genel mekanik performanslarının düşük olmasına neden olmaktadır. Uzunluk, yön ve elyaf malzemesiyle ilgili gözlemlenen büyük hareket alanı, elyaf takviyeli kompozitlerinin uygulama penceresini genişletmektedir [15]. Elyaf takviye formları Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 Formlarına göre elyaf takviyelerin sınıflandırılması

Partikül takviyeli kompozit malzemeler, partikül formundaki takviye malzemenin matris içerisinde homojen ve rastgele bir düzende eklenmesiyle oluşmaktadır. Takviye fazını oluşturan partiküllerin, matris fazı içinde homojen dağıldığı durumda bu malzemeler izotropik özellik göstermektedir. Silisyum karbür, zirkonyum oksit ve alüminyum oksit gibi partiküller, yüksek mukavemeti, yüksek elastik modülü, yüksek elektriksel ve termal iletkenliği de dahil olmak üzere olağanüstü mekanik niteliklere sahip olmasından metal matrisli kompozitlerde takviye malzeme olarak kullanılmaktadır [16].



Şekil 2.4 Kompozit malzemelerde kullanılan takviye türleri: a) partikül, b) kısa elyaf, c) sürekli elyaf [17]

2.2 Kompozit Malzemelerin Tarihi ve Uygulama Alanları

Tanımı gereği, temel olarak kompozit malzeme üretimi ve bu malzemelerin kullanımı tarihsel olarak binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. Kompozitler, insanların su geçirgenliğini önlemek için çamurla kaplı ahşap ve çalılar kullandığı ilk barınaklarla başlayarak tarih boyunca kullanılmıştır. MÖ 8000'li yıllarda Anadolu'da toprak ve samandan oluşan kerpiçten yerleşim alanlarına rastlanmıştır. Orta asya toplumları, hayvansal ürünler ve ağaç reçineleri kullanarak kompozit malzemeler oluşturmuş ve yüksek performanslı savaş yayları üretmişlerdir [18]. MÖ 3000'li yıllarda mezopotamyalıların ince cidarlı ahşap katmanları farklı açılarla, ağaç reçinesiyle bir araya getirerek lamine ahşap plakalar oluşturmuşlardır. Yukarıdaki örneklerden de çıkarımda bulunulacağı gibi insanoğlu eski tarihlerden beri elinde var olan malzemelerin güçlü özelliklerini bir yapıda toplamak için kompozit malzeme haline getirmeye başvurmuştur.

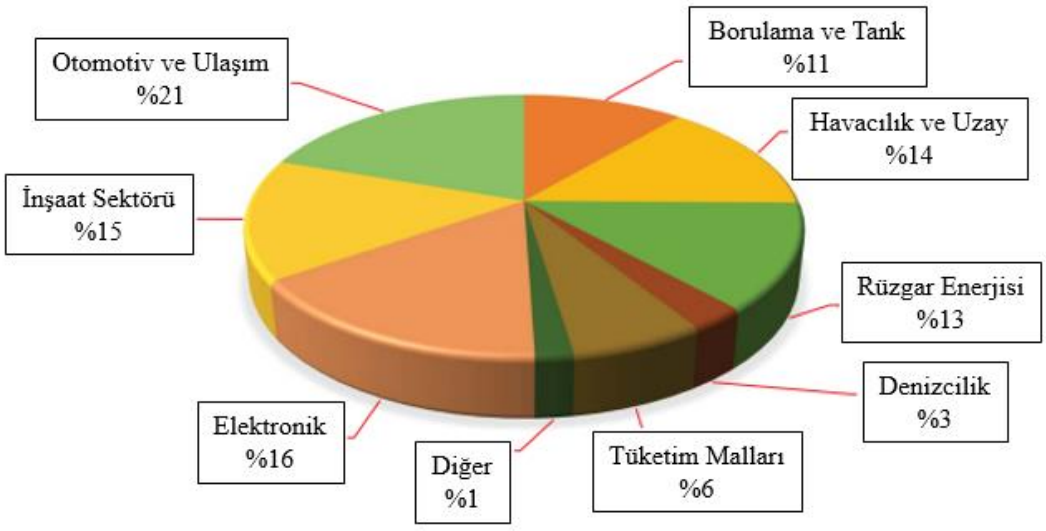
Günümüzde kullandığımız modern kompozitlerin doğuşu, 1900'lü yıllarda petrol ürünü olan polimer malzemelerin ve sonrasında 1930'lu yıllarda ilk elyaf takviye malzeme olarak kullanılacak cam elyafların üretilmesiyle başlamıştır. Sonrasındaki yıllarda yüksek performanslı epoksi reçinelerin kullanılmaya başlaması kompozit malzemelerin kullanım alanlarını giderek artırmıştır.

1940'larda ilk ticari epoksi ürünü ABD'de üretilmiştir. 1960'larda epoksiler sahip olduğu yüksek tokluk, iyi yapışma ve kimyasal direnç özelliklerinin yanı sıra daha yüksek sıcaklıklarda da kullanılabilen çok işlevli polimer malzemelere dönüşmüştür. 1980'lerde ve 1990'larda, daha yüksek camsı geçiş sıcaklığı ve termal ayrışma sıcaklıklarına sahip yüksek performanslı malzemelerin talep

edildiği elektrik ve elektronik endüstrisindeki gelişmelere karşılık olarak yeni epoksi malzemeler geliştirilmiştir [19].

Endüstride kullanılabilecek modern kompozitlerin ilk keşif ve geliştirme çalışmalarının başlamasından kısa bir süre sonra başlayan 2. Dünya Savaşı kompozit malzemelerin hava ve kara araçları, silah sanayisi ve enerji tesisleri gibi alanlarda kullanımını artırmıştır. Özellikle bu dönemde askeri sanayi, düşük ağırlıklı ve yüksek mukavemetli malzemelere ihtiyaç duymuş ve elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitler bu ihtiyaca karşılık verebilmiştir. Ayrıca polimer matrisli kompozitlerin düşük termal ve elektriksel iletkenliğe sahip olması da bu malzemelerin kullanıldığı araçlarda radar görünürlüğü ve geçirgenliği tarafında metal malzemelere göre çok yüksek avantajlar sağlamıştır. Daha sonraki yıllarda seramik takviyeli metal matrisli kompozitler, yüksek performanslı askeri kara ve hava araçlarında kullanılmaya başlanmıştır.

20. yüzyılın başından beri kullanılan modern kompozitler, geçmişten günümüze kadar çeşitleri, özellikleri ve üretim yöntemleri geliştirilerek günümüzde neredeyse malzemenin ihtiyaç duyulduğu tüm alanlarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.5 2019 yılı kompozit malzeme sektör payları [20]

Kompozit malzemeler, havacılık ve uzay sanayi, savunma sanayi, otomotiv sanayi, inşaat sektörü, enerji sektörü, elektronik sektörü ve sağlık sektörü gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmakta ve kullanım oranı artmaktadır. Şekil 2.5'te değer bazında sektörel kompozit malzeme kullanım oranları görülmektedir.

Son yıllarda kompozit malzeme kullanımı ve kullanım oranının artması konusunda havacılık sektörü ön plana çıkmaktadır. Yakıt, işletme ve bakım maliyetlerini en aza indirgeyerek daha yüksek performanslı hava araçları ile operasyon verimliliğini artırmayı hedefleyen hava aracı üreticileri, metal malzemelerin yerine mukavemet/ağırlık oranı daha yüksek kompozit malzemelerin kullanımını artırmıştır. Kompozit malzemeler ile hafifliğin yanı sıra yüksek darbe dayanımı, korozyon dayanımı, metal yorulması ve parça sayısının azaltılması gibi avantajlar sağlanmaktadır.

Boeing firmasının üretmiş olduğu B-787 Dreamliner, son derece gelişmiş kompozit malzemelerden tasarlanmış ve üretilmiştir. Hava aracı, modern kompozit tasarımları, yüksek teknoloji motorlar, hafif kompozit malzemelerin kullanımı ile karakterize edilmektedir. Kanatlar, kuyruk ve gövde gibi yapısal bileşenlerde yüksek oranda kompozit malzeme kullanılmıştır. Tüm uçak ağırlığının yaklaşık %50'sine ulaşan kısmı kompozit malzemelerden tasarlanmıştır. Bu oran hacim olarak hesaplandığında %80 olarak dikkat çekmektedir [21].

Savunma sanayinde, askeri hava araçlarında kanat, kuyruk ve gövde elemanlarında askeri hava ve kara araçları yapı ve zırhlarında, hava savunma ve radar sistemlerinde, tüm askeri araçlarda kullanılan silah mühimmatlarında, insansız hava araçlarında, askeri personel koruyucu zırhlar ve askeri sarf malzemeler gibi birçok alanda kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Otomotiv uygulamalarında hem termoplastik hem de termoset matrisli kompozitler geçmişten günümüze yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe ilk olarak termoset matrisli kompozitler, araç yapısal elemanları ve kaportada kullanılmıştır. Termoplastik matrisli kompozitler, gösterge panelleri, koltuk kapamaları, kapıların iç panelleri, çamurluklar ve tampon kirişleri gibi çeşitli iç ve gövde uygulamaları için kullanılmaktadır. Bu uygulamalardaki termoplastik polimerler genellikle polipropilen ve poliamid olarak görülmektedir [22].

Kompozit malzemeler, denizcilik endüstrisinde yüksek özgül mukavemet ve sertlik oranları, yüksek dayanıklılık, yüksek boyutsal kararlılık, özellikle askeri denizcilikte görünmezlik gereksinimlerini karşılaması, genel tasarım esnekliği, ağırlık azaltımı ve gövde formu ile sağlanan düşük yakıt tüketimi, düşük üretim ve bakım maliyetleri, yüksek korozyon dayanımı, artırılmış titreşim sönümleme

özellikleri, ses ve ses dalgalarının yansımasını engelleme ve yüksek düzeyde akustik şeffaflık gibi birçok ihtiyaca karşılık verebilen mekanik ve fiziksel özellikleri ile sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır [23].

Elyaf takviyeli polimer kompozitler hafiflik, yüksek mukavemet ve özellikle biyolojik uyumluluk gibi avantajlarından dolayı sağlık sektöründe kullanılmaktadır. X-ray ve MR gibi tıbbi görüntüleme cihazlarının mekanik yapılarında kullanılmalarının yanı sıra yapay insan uzuvların üretimi ve diş implantlarında kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

2.3 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Bir endüstriyel ürün, araç, gereç veya ekipman belirli ortamlarda farklı zorlayıcı şartlara maruz kalmaktadır. Bu şartlar altında yapı, bütünlüğü bozulmadan idame ettirilebilmesi ve tasarım ihtiyacını karşılaması gerekmektedir. Ayrıca, yapıyı oluşturan malzemelerden bir takım fiziksel ve mekanik özellikler beklenmektedir. Tasarımda kullanılacak malzemelerden içinde bulunduğu koşullardan dolayı istenen birden fazla özellikten bazıları, birbirleriyle çelişen karakteristikte olabilmektedir.

Örneğin bir yapının, hem hafif hem de yüksek mukavemetli olması istendiği durumda klasik mühendislik malzemelerinden mukavemet değerleri yüksek olan metallerin kullanımı öne çıksada bu malzemelerin yüksek özgül ağırlıklarıyla karşılaşılacaktır. Bu gibi durumlarda kompozit malzemeler, probleme cevap verecek şekilde kullanılabilmektedir. Takviye ve matris fazından, takviye için yüksek mukavemet sağlayacak bir malzeme, matris için takviye fazını bir arada tutacak ve takviye arasında yük akışını sağlayacak ancak düşük özgül ağırlıkta bir malzeme seçilebilmektedir. Böylece kompozit malzemeyi oluşturacak karışımda daha düşük ağırlık ve yüksek mukavemet özellikleri oluşturulabilmektedir. Farklı bir örnekte, bir yapıda kullanılacak malzemede tokluk ve aşınma direnci gibi iki özelliğin bir arada olması gereken bir durum oluşabilir. Bu durumda takviye elemanı aşınma direncini artıracak bir malzeme seçilirken, matris elemanı için tokluk özelliklerini iyileştirecek bir malzeme kullanılarak bir kompozit yapı oluşturulabilir. Kompozit malzeme kullanımının başlıca avantajı, tasarım gereksinimleri karşılayacak nitelikte düzenlenebilmesi ve ihtiyaca direkt cevap verecek şekilde uyarlanabilmesidir.

Kompozit malzemelerde uygulamaya yönelik tasarım esnekliklerinin yanı sıra farklı endüstrilerde yapısal eleman tasarımlarında kullanılmasının temel avantajları olarak, özellikle yüksek dayanım ve düşük ağırlık gereksinimi gereken uygulamalarda kullanılan sürekli elyaf takviyelerin bölgesel olarak artırılabilmesi veya azaltılabilmesi ve yapıda oluşacak kritik yükleri karşılayacak şekilde değiştirilmesine imkan tanıması, yapıdaki eleman sayılarının azaltılmasıyla birlikte entegre az bileşenli yapıların tasarlanabilmesi, birim ağırlık başına daha yüksek mekanik özellikler sağlaması gösterilmektedir [24].

Kompozit malzemeler sahip oldukları, üstün ihtiyaca yönelik tasarım avantajlarının yanı sıra bu avantajlardan kaynaklanan birtakım dezavantajlara sahiptir. Kompozitler, birçok farklı yapı ve çeşitte malzemenin bir araya gelmesiyle oluştuğundan farklı üretim yöntemlerine sahiptir. Üretimleri ve uygulamaları yüksek teknoloji içermektedir. Kompozit malzemelerin tasarımı ve üretimi yüksek tecrübe ve bilgi birikimi gerektirir. Kompozit malzemelerin üretimi için başlangıçta yüksek yatırım maliyetlerini göze almak gerekmektedir. Yüksek teknoloji ürünler, yüksek yatırım maliyetleri, eğitimli ve tecrübeli kalifiye personel gerekliliği kompozit malzeme tasarımını, üretimini ve bu malzemelerin kullanımını pahalı hale getirmektedir.

Kompozit malzemeler, ağırlıklarıyla karşılaştırıldığında yaklaşık olarak alüminyumdan 5 ve çeliklerden 20 kat daha pahalıdır. Yüksek maliyetlerinden dolayı yalnızca yüksek performans gereksiniminin öncelikli olduğu durumlarda kendilerine yer bulmaktadırlar. Mikro yapıları tamamen farklı malzemelerin birleşmesiyle oluştuğundan, takviye-matris arayüzeylerinde kusurlar görülebilmektedir. Ayrıca, kompozit yapı içerisinde üretim prosesinden kaynaklanan makro boyuttaki boşluk gibi kusurlar oluşabilmektedir. Arayüzey durumu ve kompozit yapıda oluşan bu kusurlar beklenmeyen mekanik özellik düşüşlerine neden olmaktadır [25]. Üretimlerinde proses çevrim sürelerinin uzun olması yüksek hacimli üretim endüstrileri için kullanımlarının uygun olmamasına neden olmaktadır. Ayrıca, kompozitlerin geri dönüşüm ile tekrar kullanımının metalik malzemelere kıyasla zor olması tüm endüstrilerde yaygın olarak tercih edilmesinin önüne geçmektedir. Özellikle polimer matrisli kompozitlerde, termoset matris malzemelerinin kullanılması bu kompozitlerin sınırlı geri dönüşümüne imkan vermektedir. Kompozit malzeme sektöründe geniş bir yer tutan bu malzeme

grubu çevresel sorunların oluşmasına neden olmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerde, termoplastik malzemelerin matris olarak kullanılması yavaş üretim süreçleri, geri dönüşüm ve çevresel problemlere çözüm getirerek endüstride kullanımının artmasını sağlamaktadır.

Kompozit malzeme kullanımından kaynaklanak avantaj ve dezavantajlar genel olarak Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Kompozit malzeme kullanımının avantaj ve dezavantajları [26]

Avantajlar	**Dezavantajlar**
Ağırlık azaltma (yaklaşık %20-%50)	Yüksek malzeme maliyeti
Korozyon dayanımı	Matrise bağımlı sıcaklık dayanımı
Yüksek yorulma dayanımı	Darbe hasarının tespit zorluğu
Yüksek özgül dayanım	Yüksek onarım maliyeti
Tasarım parça azaltımı ve düşük montaj maliyeti	Nem emme eğiliminin mekanik özellikleri etkilemesi

3
ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Polimer matrisli kompozitler, polimer bir matris malzemenin farklı formlardaki elyaf ya da partikül ile takviye edilmesi ile meydana gelmektedir. Partikül veya elyaf takviye, kullanılan matris malzemenin belirlenmiş özelliklerini iyileştirmek için kompozit yapısına eklenmektedir.

Mikron boyutundaki partiküller, tokluk ve termal kararlılık özelliklerini iyileştirirken kısa veya sürekli elyaflar gibi en/boy oranı yüksek olan takviyeler, fiziksel ve mekanik özellikleri güçlendirmektedir. Sürekli elyaf takviyelerin kompozit yapısında kullanımı, dayanım ve sertlik gibi mekanik özelliklerde en yüksek iyileştirmeyi sağlamaktadır.

Polimerler, uzun moleküler yapıları tekrarlı zinciler halinde birbirine bağlı kimyasal bileşiklerdir. Polimeri oluşturan monomer yapısı ve aralarındaki bağlar polimer malzemelerin yapılarını etkilemektedir. Bu yapı değişimi birbirinden farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip polimer malzemelerin oluşturulmasına imkan vermektedir. Endüstriyel uygulamalarda polimer malzemeler yaygın olarak kullanılsa da mekanik özellikleri bakımından yalın halde yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda yapı malzemesi olarak kullanılamamaktadır.

Polimer malzemeler, genel özellikleri bakımından değerlendirildiğinde kimyasallara karşı dirençli, elektrik ve ısı iletkenliği düşük malzemelerdir. Ayrıca metaller ve seramikler ile karşılaştırıldığında düşük yoğunluğa sahiptirler. Üretimleri tarafında değerlendirildiğinde, işlenmesi ve şekillendirmesi kolay, hızlı ve düşük maliyetli olduğundan yüksek dayanım kriterlerinin bulunmadığı tasarımlarda sıklıkla tercih edilen malzemelerdir.

Polimerler doğal olarak elde edildiği gibi sentetik olarak da üretilebilmektedir. Plastikler, genellikle petrol kaynaklı polimerlerin sentezlenmesi ile oluşturulan sentetik malzemelerdir. Plastikler, dayanıklılık, hafiflik ve düşük maliyet gibi üstünlükleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Plastikler temel olarak, termoplastikler, termosetler ve elastomerler olarak üç sınıfa ayrılabilmektedir.

Elastomerler, yapısı gereği elastik davranış gösterebilen plastik malzemelerdir. Mekanik yüklemelere maruz bırakıldığında içeriğinde bulunan çapraz bağ yapıları açılma göstererek yüksek miktarda uzama gösterebilmektedir. Yükleme kalktığında ise biçimleri yükleme öncesi halini alabilmektedir.

Termoplastikler ve termosetler, zincir yapıları arasında içerdikleri kimyasal bağların yapı farklılıkları nedeniyle ısı altında farklı tepki veren iki önemli plastik grubudur. Sahip oldukları fiziksel ve mekanik özellikler bakımından farklı özellikler taşımaktadırlar.

3.1 Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Elyaf Malzemeler

Takviye malzemeler kompozitlerde dayanım ve sertlik gibi mekanik özellikler katarken termal dayanım, elektriksel iletkenlik ve aşınma dayanımı gibi fiziksel özelliklerin iyileşmesini de sağlamaktadır. Elyaf malzemenin kompozit yapısına katkısı, takviye malzemesine ve formuna göre değişkenlik göstermektedir.

Takviye malzemeler bitkisel veya sentetik malzemelerden elde edilebilmektedir. Ancak, en yaygın kullanılan takviye malzemeler elyaflar veya elyafların farklı formlarda düzenlenmesi ile oluşturulmaktadır. Elyaf takviyeler kompozit malzemelerin yapısında genellikle hacmen yaklaşık olarak %30-%70 arasında bir miktarda bulunmaktadır. Elyaf takviyeler, doğrusal formda olan iplikler, iki yönlü dokuma kumaşlar ve çok yönlü forma sahip olan karmaşık kumaşlar gibi çeşitli ticari ürünler olarak bulunur. Ayrıca, mekanik özellikleri yüksek olan belirli kısa elyaf takviyeler de geliştirilmiştir. Ancak bunların kullanımı, üretim zorlukları nedeniyle sınırlıdır [27].

Takviye malzemeler birkaç mikron çapında ve metrelerce uzunluktaki lif formuna getirilerek elde edilen yapı filament olarak adlandırılmaktadır. Belirli sayıdaki

filament bir araya getirilerek filament demetleri oluşturulmaktadır. Demet formundaki malzeme takviye olarak kullanılacağı gibi elde edilen iplikler kompozit malzemeye farklı yönde mekanik özellikler kazandırmak için örgü kumaş haline getirilip kullanılabilmektedir.

Bir malzemeden elyaf bir takviye oluşturmak için bu malzemenin mikroyapısının, mikron mertebesine indirgenerek, uzunluk/çap oranının yüksek olacak şekilde bir forma getirebilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bu formdaki malzemenin, şekillendirilerek forma getirilebilmesi için belirli bir esnekliğe sahip olması beklenmektedir.

Günümüzde özellikle yüksek lif yapısına sahip çeşitli bitkilerin tohum, gövde ve yaprak gibi doğal malzemelerin liflerinin takviye malzemesi olarak kullanıldığı polimer matrisli kompozitler üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Ancak, endüstride doğal elyafların kullanımına yaygın olarak rastlanmamaktadır [28]. Elyaflar, doğal malzemelerden elde edilebileceği gibi sentetik olarak insan eliyle de üretilmektedir. 20. yüzyılın başlarından beri sentetik elyaf üretimi yapılmakta ve polimer matrisli kompozitlerde takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Günümüzde cam elyaflar, karbon elyaflar, aramid elyaflardan oluşan farklı formdaki takviye ürünleri sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca, kullanım sıklığı az olsa da boron elyaf ve seramik elyafların üretimi de yapılmaktadır.

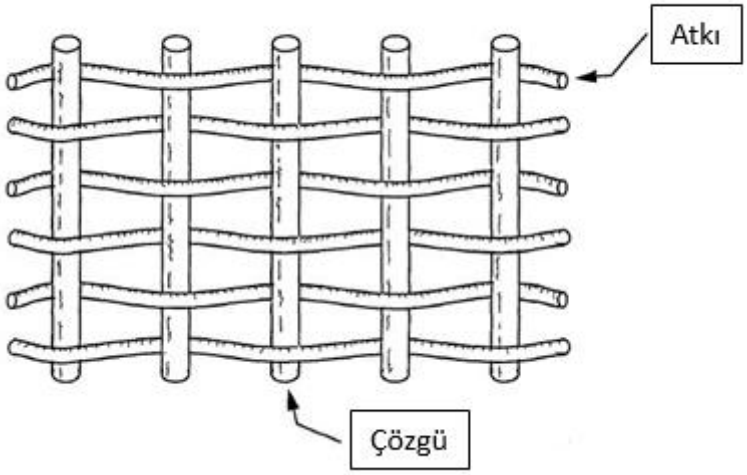
Tablo 3.1 Endüstride kullanılan elyafların mekanik özellikleri [29]

Malzeme	**Yoğunluk g/cm3**	**Elastisite Modülü GPa**	**Çekme Dayanımı MPa**	**Kopma Uzaması %**
Cam Elyaf (E-Camı)	2.60	73	3450	4.73
Karbon Elyaf (AS4)	1.81	235	3700	1.57
Kevlar Elyaf (49)	1.44	131	3800	2.90

3.1.1.1 Dokuma Kumaşlar

İki boyutlu kumaşlar, birbirine dik iki set ipliğin birbiri içinden geçmesinden oluşmuş dokumalardır. Uzunlamasına iplikler çözgü, enlemesine iplikler atkı

olarak adlandırılmaktadır. Her bir dokuma, çözgü ve atkı ipliği sayısına ve tekrarına göre farklı formlara sahiptir. Kumaş dokuları, ipliklerin doğrusal yoğunluğuna ve dokuma türüne göre farklı özellikler göstermektedir.



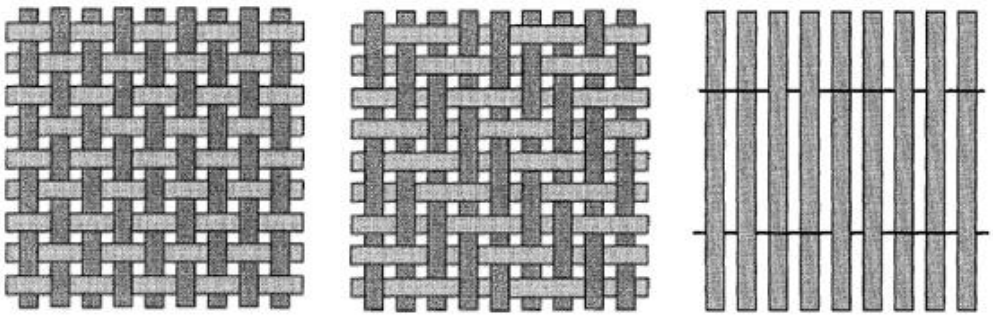
Şekil 3.1 Dokuma kumaşları oluşturan atkı ve çözgü iplikleri

Dokuma kumaşlar, yüksek mekanik özellikleri, yüksek enerji absorbe eğilimi ve yüksek yorulma dayanımı davranışları nedeniyle ulaşım, savunma ve inşaat gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Dokuma kumaşların belirli bir hacimde nispeten yüksek oranda elyaf içermeleri önemli bir avantaj sağlamaktadır. İki veya daha fazla sayıda dokuma kumaş kullanılarak üretilen kompozit yapılar, takviye-matris arayüzeylerinden ayrılmaya ve katmanlar arasında delaminasyona karşı hassastır. Dokuma bir kumaştaki elyafların homojen olarak dağılmaması, kompozit yapıda takviye bakımından zayıf kalacak bölgelerde matris açısından zengin bölgeler oluşturmaktadır. Dengesiz matris ve takviye dağılımı malzeme içerisinde süreksizliğe neden olarak belirli bir yükü maruz kaldığında yapıda beklenmeyen erken kırılmalara yol açmaktadır [30].

Her bir atkı ipliğinin, çözgü iplerinin sırayla bir altından bir üstünden geçirilerek oluşturulan kumaş formu düz dokuma olarak adlandırılmaktadır. Bu dokumalar, serbest halde bozunmaya karşı diğer dokumalara kıyasla dirençlidir ancak kompozit üretimi safhasında düşük serim performansı göstermektedir. Mekanik özellikleri her iki yönde de eşit olarak kabul edilmektedir. Ancak düz dokuma kumaş örgülerindeki ipliklerin kıvrım açısının yüksek olması, mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir.

Bir veya daha fazla çözgü lifinin, düzenli tekrarlanan bir şekilde iki veya daha fazla atkı lifinin üzerinden ve altından dönüşümlü olarak geçmesiyle twill dokumalar oluşmaktadır. Twill dokumalarda, düz dokumaların üzerinde ıslanma ve serim özellikleri görülür, ancak örgü yapısına bağlı olarak stabilite düşük miktarda bir azalma göstermektedir. Ayrıca, örgüdeki ipliklerin kıvrım açısının azalmasıyla, kumaş daha pürüzsüz bir yüzeye ve daha yüksek mekanik özelliklere sahip olmaktadır.

Kumaşı oluşturan ipliklerin tamamının bir yönde hizalanıp dokumanın yalnızca ince iplikler tarafından bir arada tutulmasıyla tek yönlü dokumalar oluşturulmaktadır. Bu kumaşlar tek yönlü olarak nitelendirilmektedir ve mekanik olarak yalnızca içerdiği ipliklerin bulunduğu doğrultuda etkin yük taşıma performansı göstermektedir.



Şekil 3.2 Düz dokuma, twill dokuma ve tek yönlü dokuma (soldan sağa)

Farklı örgü yapısındaki kumaşların mekanik performansları, çözgü ve atkı ipliklerinin dokumadaki yoğunluğu ve dokuma türüne bağlı olmaktadır. Ancak kompoziti oluşturan takviye fazının malzemesi, kompozit yapının fiziksel ve mekanik özelliklerini yüksek oranda etkilemektedir [31].

3.1.1.2 Cam Elyaflar

Elyaf üretiminde farklı kimyasal kompozisyonlara sahip camlar ticari olarak kullanılmaktadır. Genellikle kullanılan cam elyaflar %50-%60 silika ile birlikte kalsiyum, bor ve sodyum oksit içermektedir. Elyaf üretiminde kullanılacak malzemenin kimyasal kompozisyonu, elde edilen elyafın mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir.

Cam elyaf üretimi yapılan malzemelerden E-camları yüksek elektrik yalıtkanlığına sahiptir. Mekanik özellikleri değerlendirildiğinde, ortalama mukavemet ve

elastiklik modülüne sahiptir. Ticari olarak kullanılan sürekli cam elyafının büyük bir oranı E-cam malzemeden üretilmektedir. E-cam elyafının elektriksel yalıtkanlığıyla öne çıkmasının aksine, toplam kullanımlarının çoğunluğu yapısal uygulamalarda görülmektedir. C-camları diğer camlara oranla daha yüksek korozyon direncine sahiptir. S-camlarında, diğer camlardan daha yüksek sıcaklıklara dayanmasını sağlayan yüksek silika bulunmaktadır [32].

Tablo 3.2 Cam elyafların mekanik ve fiziksel özellikleri [33]

Sınıf	**Çekme Dayanımı MPa**	**Elastisite Modülü GPa**	**Kopma Uzaması %**	**Özellik**
C-Camı	3300	69	4.8	Yüksek korozyon direnci
D-Camı	2400	52	4.6	Düşük dielektrik sabiti
E-Camı	3450	73	4.8	Yüksek elektrik direnci
S-Camı	4600	89	5.2	Yüksek çekme dayanımı

Cam elyaflarının mukavemet/ağırlık oranı oldukça yüksek bir seviyede olsa da, young modülü/ağırlık oranları ortalama seviyededir. Oldukça ucuz ve kolay erişilebilir olmasının yanı sıra birçok formda yarı mamül imkanı olmasına rağmen young modülü/ağırlık oranının düşük kalmasından dolayı, özellikle havacılık endüstrisi karbon ve aramid gibi diğer gelişmiş elyafları genel yapısal uygulamalarda tercih etmektedir. Nemli ortamda çalışma şartları, cam elyafların mukavemetini azaltan önemli bir faktördür. Ayrıca, cam elyafların yorulma hassasiyeti yüksektir. Nemli ortamlarda yüksek yorulma yüklerine maruz kalan hava araçlarında cam elyafların kullanımları kısıtlı olsa da, düşük maliyetleri ve yüksek mukavemetlerinden dolayı otomotiv, inşaat, kimya gibi daha maliyet etkin sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Cam elyafların mekanik özelliklerinin sıcaklık etkisi ile değişimi amorf organik polimerlerle benzer ilişki içerisindedir. Yaklaşık olarak 600 °C'de yüksek camsı geçiş sıcaklıklarında yanmamalarıyla birlikte, polimer matris malzemelere oranla

daha yüksek sıcaklık direnci göstermektedirler. Cam elyaf takviyelerin kullanıldığı polimer matrisli kompozitlerin ısıya karşı direncini, temel olarak matris malzemesi belirlemektedir. Camsı geçiş sıcaklığının altında olsa bile, cam elyafların uzun sürelerde yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması çekme mukavemetini büyük ölçüde etkilemektedir. Cam elyaflar, yüksek sıcaklıkta ısıl işleme maruz bırakıldığında mukavemeti önemli ölçüde azalır. Genellikle, 200 °C - 250 °C'nin altında sıcaklıklara tabi tutulduğunda belirgin bir değişiklik görülmemektedir. Ayrıca, cam elyaflar metalik malzemelerle kıyaslandığında yaklaşık olarak alüminyum alaşımlarından 150 kat düşük termal iletkenliğe sahiptir [34].

3.1.2 Matris Malzemeler

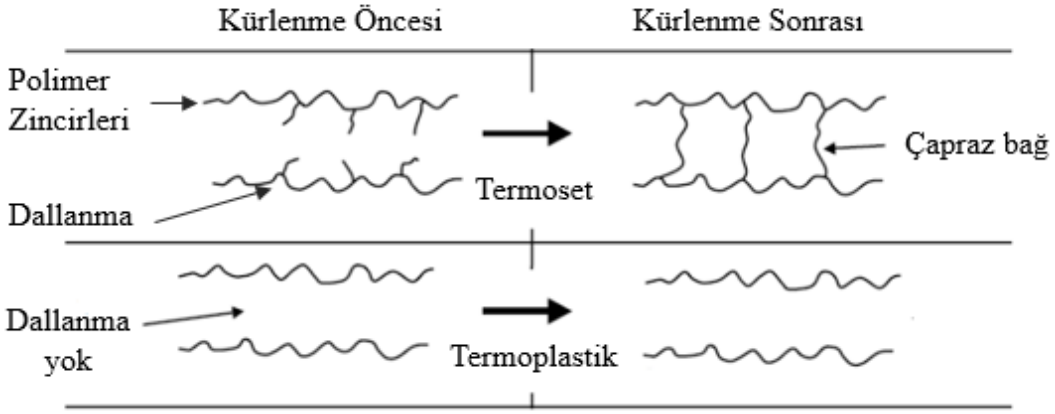
Kompozitlerde matris olarak kullanılan malzemeler, mekanik yükleri elyaflara aktarma ve elyafları dış ortam şartlarına karşı koruma görevini üstlenmektedir. Bu nedenle, kullanılacak matris malzemeler yüksek esneklikte olmalı ve elyaflarla iyi bir arayüzey sağlamalıdır. Ayrıca, kompozitin dayanım/ağırlık oranını korumak ve iyileştirmek için düşük yoğunluğa sahip olmalıdır. Burada belirtilen gereksinimler göz önüne alındığında, kullanılabilecek matris malzemeleri için polimer malzemeler iyi bir opsiyon olarak görülmektedir.

Kompozitlerde, matris malzeme olarak polimer malzemelerin kullanılması endüstride modern kompozit uygulamalarının başlangıcı olarak kabul görmektedir. Sentetik polimerlerin elyaf takviyeleriyle birlikte kullanılması, polimerlerin mekanik özelliklerini yüksek oranda artırmış ve birçok endüstride yapısal uygulamalarda kullanılmasının önünü açmıştır. İlk olarak, epoksi ve polyester gibi termoset polimerler düşük vizkoziteye ve yüksek mekanik özelliklere sahip olmalarından dolayı yoğun olarak kullanılmıştır. Ancak, proses edilmelerindeki zorluklar, geri dönüştürülememeleri gibi nedenler termoplastik polimerlerin matris malzemesi olarak kullanılmalarının önünü açmıştır.

3.1.2.1 Termoset Plastikler

Isıya maruz bırakıldığında katılaşma ile sertleşme gösteren ve yapısını koruyan plastik grubudur. Isı ile birlikte lineer molekül zincirleri arasında çapraz kovalent bağlar oluşmaktadır. Zincirleri arasında oluşan güçlü çapraz bağ yapısı malzemeye rijitlik katmakta ve mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Ayrıca, termoset plastikler sahip olduğu bağ yapısından dolayı elastik ve plastik şekil değiştirme

kabiliyeti düşük, sert ve gevrekliği yüksektir. Tekrar ısıtılması ile bağ yapısı bozunmadığından kürlendikten sonra tekrar yumuşamazlar ve tekrar bir şekillendirme yapılamamaktadır. Bundan dolayı geri dönüşümle tekrar kullanılmaya uygun değillerdir. Kompozit malzeme yapılarında en çok kullanılan termoset polimerler; polyesterler, epoksiler, vinil esterler ve fenolik matris malzemeleridir.



Şekil 3.3 Termoplastik ve termoset moleküler bağ yapısı oluşumu [35]

3.1.2.2 Termoplastikler

Isıya maruz bırakıldıkları durumda, yapısal bütünlüklerini kaybederek yumuşayan ve eriyen, soğutulunca katılaşarak sertleşen plastik grubudur. Isıtılarak eritilme, soğutularak sertleştirme dönüşümü termoplastikler için tekrarlanabilir bir durumdur. Katılaşmaları sırasında molekül zincirleri arasında çapraz bağların oluşmaması ve lineer zincirli, az miktarda dallanmış moleküler yapılarında olmaları termoplastiklere bu özelliği katmaktadır. Mekanik özellikleri ve sıcaklık dayanımları termosetlere göre düşüktür. Ancak, çok yüksek darbe dayanımına sahiptirler. Özellikle mühendislik uygulamalarında kullanılan termoplastikler oda sıcaklığının üzerinde bile iyi darbe dayanımı gösterir. Ham madde maliyetlerinin düşük olması ve eritme-kalıplama-katılaşma prosesi ile üretilme hızının yüksek olması termoplastikleri ilgi odağı haline getirmektedir. Ayrıca, termoplastik kompozitlerin kolaylıkla geri dönüştürülebilir yapıda olması birçok endüstride kullanım oranının artmasına neden olmaktadır.

Kompozitlerde kullanılan matris malzemelerin %90'ı termoset plastiklerdir. Diğer taraftan bakılacak olursa termoplastikler, geliştirilen üretim proseslerinde yaşanan problemler ve mekanik özellikler nedeniyle yapısal kompozit uygulamalarında

daha az tercih edilen taraftadır. Bazı mühendislik termoplastik polimerleri, termosetlerin yerini hızla almaktadır. Termosetlerin üretiminde oluşan emisyonlara ve geri dönüştürülerek tekrar kullanılamamalarına bağlı olarak geliştirilen çevresel düzenlemeler ve yeni kısıtlamalar farklı opsiyonların kullanımını ön plana çıkarmaktadır.

Termoplastikler, kürleme ile dönüşüme ihtiyaç duymamaları, daha az tehlikeli kimyasal bileşimleri, geleneksel termoset matrislere kıyasla iyileştirilmiş geri dönüşüm kolaylığı ve seri üretim kabiliyetleri nedeniyle polimer matris malzemeler içerisinde ilgi görmektedir. Günümüzde polietilen, polipropilen, polivinil klorür, polistiren, poliamid ve polikarbonat gibi geleneksel termoplastiklerin yanında poliamid-imid, polifenilen sülfür, poliarilsülfon ve polieter eter keton gibi malzemeler kompozit malzemelerde matris olarak kullanılmaktadır [36].

Tablo 3.3 Termoplastik ve termoset matrislerin karşılaştırılması [37]

Malzeme	Avantaj	Dezavantaj
Termoplastik Matris	• Sonsuz raf ömrü • Kolay kullanım • Kolay geri dönüşüm • Kolay tamir edilebilme • Üretim sonrası tekrar şekillendirilebilme	• Düşük sürünme dayanımı • Düşük eriyik vizkozitesi
Termoset Matris	• Düşük reçine vizkozitesi • Yüksek elyaf ıslatma performansı • Mükemmel termal stabilite • Yüksek kimyasal dayanım • Yüksek sürünme dayanımı	• Gevrek • Standart teknikler ile geri dönüşüme uygun değil • Üretim sonrası tekrar şekillendirilemez

Endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan polimer matris malzemeler, özellikleri ve uygulama alanları Tablo 3.4'te verilmiştir [38].

Tablo 3.4 Polimer matris malzemeler

Matris Malzeme	Fiziksel Özellikleri	Uygulama Alanları
Polietersülfon (PES)	Aleve dayanıklı	Otomotiv
Polifenilin Sülfür (PPS)	Yüksek sıcaklık ve kimyasallara dayanıklı	Elektrik
Polisülfon (PSU)	Düşük nem emilimi, yüksek dayanım	Denizcilik, gıda paketleme
Polietilen (PE)	Korozyona dayanıklı	Borulama
Polipropilen (PP)	Kimyasallara dayanıklı	Otomotiv, paketleme, yapısal
Poliaktik Asit (PLA)	Doğal çözünme, toksik içermez	Gıda paketleme, biyomedikal
Poliüretan (PU)	Aşınmaya dayanıklı, ucuz, ses ve su geçirimsiz	Yapısal, akustik
Polivinil Alkol (PVA)	Yüksek çekme dayanımı	Biyomedikal
Doğal Kauçuk	Düşük yoğunluk, ucuz	Yapısal, otomotiv
Epoksi	Yüksek dayanım	Otomotiv, havacılık, denizcilik
Polyester	Su ve kimyasallara dayanıklı	Yapısal

3.2 Üretim Yöntemleri

Elyaf malzemenin özellikleri ve matris malzeme, oluşturduğu kompozitin nihai özelliklerinde önemli bir etkiye sahip olsa da, kullanılan malzemelerin formu ve kompozit yapıyı üretmek veya konsolide edilmiş kompoziti şekillendirmek için

kullanılan üretim yöntemi kompozitin mekanik özelliklerini ve performansını etkilemektedir. Kompozit endüstrisi, daha düşük maliyetli, hızlı proses edilebilir ve daha yüksek kalitede kompozit parçalar üretebilecek takviye ve polimer malzemeler ve bunların proses edilebilmesine olanak sağlayacak yeni üretim süreçleri geliştirmektedir.

Kompozit üretiminde elyaf ve matrisi daha yüksek performanslı özellikler elde etmek için bir araya getirirken bu birleşim sonucunda oluşabilecek zayıflıkları yok etmek veya azaltmak üzere bir üretim metodu seçimi gerekmektedir. Bu durum elyaf takviyeli kompozitlerde, kısa veya sürekli elyaf takviyeler farketmeksizin kompozit performansı için önemli bir etkendir.

Kısa elyaf takviyelerinde, takviye malzemenin üretim prosesindeki davranışı, proses sonucu oluşan nihai elyaf yönelimi ve dağılım yoğunluğunu etkileyerek elde edilecek kompozitte homojen olmayan özellikler ortaya çıkarabilmektedir.

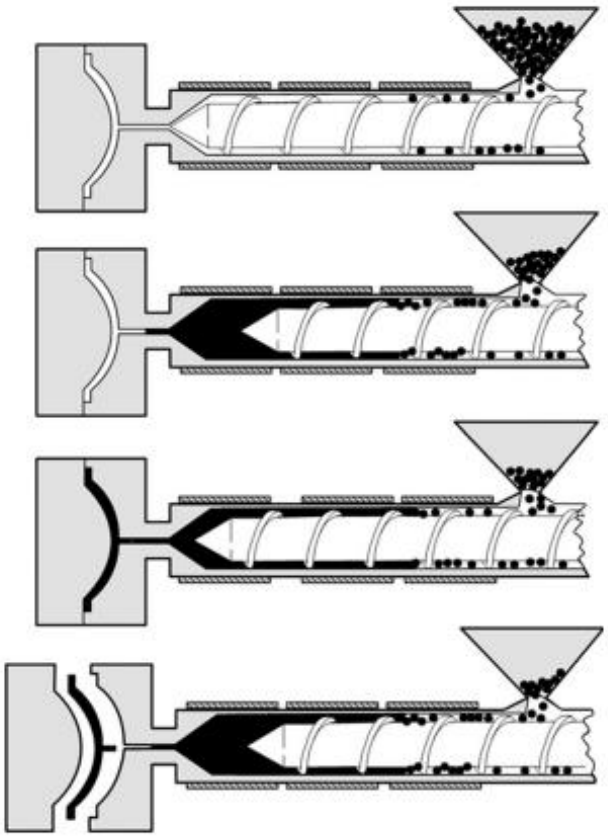
Sürekli elyaf takviyelerde, kompozit yapı üretiminde karşılaşılan zorluk, elyaflar arasındaki tüm boş bölgeleri matrisle doldurarak iyi bir matris-elyaf arayüzey bağı oluşturmaktır. Bu durum, delaminasyon oluşumunu engellemek ve uygulanan yükler altında çatlak başlamasını önlemek için önemlidir [39].

Termoplastik matrisli kompozitlerde, matris malzemenin özelliği gereği üretim prosesleri, matrisin eritilerek elyaf takviye ile birleştirilmesi ve yeniden katılaştırılarak kompozit üretimine dayanmaktadır. Matris fazının sabit olmasından dolayı, termoplastik matrisli kompozit üretiminde seçilecek yöntemi, üretilmek istenen parçanın şekli ve takviye malzemenin formu belirlemektedir. Termoplastik bir matrisin kısa veya sürekli bir elyaf malzeme ile takviye edilerek bir kompozit oluşturmak veya bu yöntemlerle oluşturulmuş kompozit yapıyı şekillendirmek için bilinen birden fazla yöntem bulunmaktadır.

3.2.1 Enjeksiyon Kalıplama Prosesi

Enjeksiyon kalıplama, çeşitli şekil, boyut ve ebatlardaki plastik ürünlerin imalatı için kullanılan çok yönlü bir üretim prosesidir. Üç boyutlu karmaşık şekillere sahip ürünlerin üretimi için tercih edilmektedir. Enjeksiyon kalıplama, termoplastik malzemelere ek olarak matris fazı termoplastik olan kompozit ürünler elde etmek için de kullanılmaktadır [40].

Enjeksiyon kalıplama prosesi, genel olarak içinde Arşimet vidası bulunan bir borudan geçirilen malzemenin boru boyunca sıcaklığın artırılmasıyla erimesi ve eriyik fazdaki malzemenin kalıba enjekte edilmesine dayanmaktadır. Proses için kullanılan kalıp istenen parçanın nihai formunda veya çok yakın bir forma sahip olmaktadır.



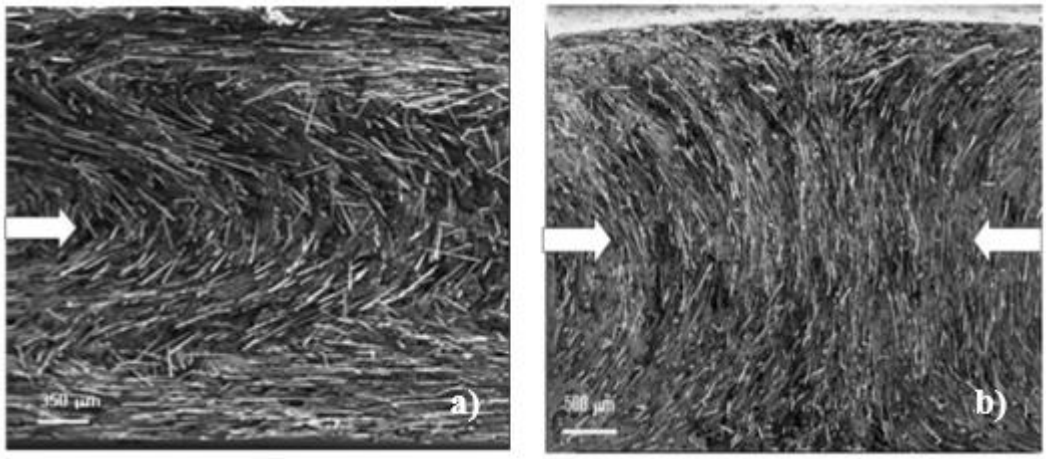
Şekil 3.4 Enjeksiyon kalıplama prosesi aşamaları [41]

Termoplastik matrisli kompozitlerin, enjeksiyon kalıplama ile üretilmesi iki aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak saf bir termoplastik matris malzeme, partikül veya kısa elyaf formunda takviye malzeme ile birleştirilir ve takviyeli termoplastik pelet adı verilen küçük boyuttaki kompozit granüller oluşturulur. Sonrasında, takviyeli termoplastik peletler enjeksiyon kalıplama işlemiyle kalıplanarak istenilen forma getirilmektedir.

Elyaf takviyeli peletler için enjeksiyon kalıplama işlemi, takviyesiz termoplastikler ile büyük oranda aynı şekilde gerçekleştirilmektedir. Farklı olarak, proses sırasında vida aşınmasını sınırlamakla birlikte daha yüksek eriyik viskozitesi oluşturmak için takviyesiz termoplastik bileşiklere kıyasla yaklaşık 10 °C – 30 °C daha yüksek bir

proses sıcaklığı kullanılmaktadır. Ayrıca, enjeksiyon kalıplama yöntemi ile kompozit parça üretiminde kompozit malzemenin erime bölgesinden kalıp boşluğunu doldurucaya kadar proses boyunca elyaf kırılmaları meydana gelmektedir. Bu durum üretilen parçanın mikroyapısında mekanik özelliklerini etkileyecek bir yapı oluşturmaktadır.

Enjeksiyon kalıplama, yüksek doğruluk ve hassasiyet gerektiren karmaşık şekilli parçaların fazla miktarda ve hızlı üretimi için en ideal üretim yöntemidir. Ancak, elyaf takviye ile birlikte termoplastik matrisin özellikle ince cidarlı parçalarda kalıbı tam olarak dolduramaması ve parça üzerinde boşluk oluşumu gibi üretim hataları görülebilmektedir. Ayrıca, termoform kalıplama prosesinin aksine sürekli veya kısa elyaf takviyeli kompozit levhaların şekillendirilmesine imkan sunmamaktadır. Ayrıca, yüksek mukavametli elyaf takviyeli parçaların üretiminde elyaf yönelimi kontrolü sağlanamamaktadır [42].



Şekil 3.5 Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiş plaka SEM görüntüsü [43]

Cam elyaf takviyeli polipropilen matrisli kompozit malzemenin enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretiminden alınan SEM görüntüsü Şekil 3.5'te verilmiştir. Şekil a)'da üst ve alt tarafların parçanın kabuk tarafı olmak üzere ok yönündeki akışla birlikte kısa cam elyaflar yönlenmiştir. Şekil b)'de iki zıt taraftan gelen akışın birleşme noktası görülmektedir.

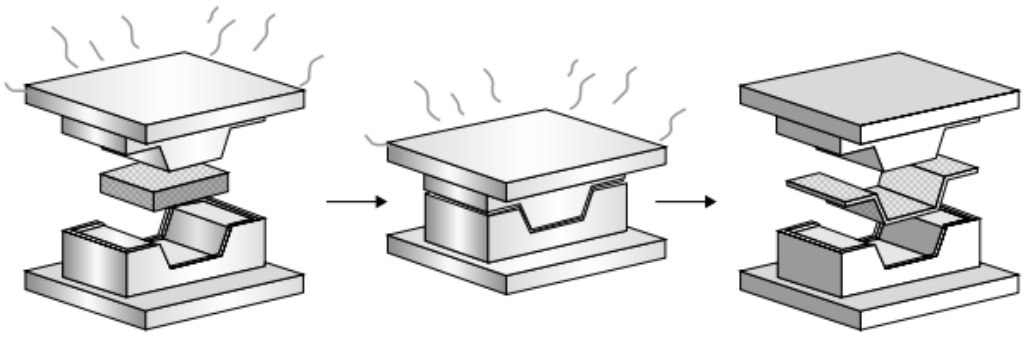
Takviyeli termoplastik malzeme, işlem sırasında hem kayma hem de uzama gerilimlerine maruz kalmaktadır. Malzeme üzerinde oluşan bu gerilmeler, polimer zincirlerinin uygulanan gerilimle yönlenmesine neden olmaktadır. Enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilen parçalarda belirgin elyaf yönelimlerinin duvara

yakın bölgede akış yönüne paralel olarak yönlendirilirken, çekirdekte elyafların akış yönüne esasen dik olarak yönlendiği görülmektedir [44]. Üretim sonrası elde edilen parçada bulunan elyaf takviyenin parçanın tüm bölgelerinde homojen olarak dağılmaması yapının mekanik özelliklerinin homojen olmamasına neden olmaktadır.

3.2.2 Basınçlı Kalıplama Prosesi

Basınçlı kalıplama prosesi en eski plastik kalıplama yöntemlerinden biridir. Temel çalışma prensibi polimerik malzemenin yüksek basınç altında, kapalı bir kalıp boşluğunda istenen forma getirilmesine dayanmaktadır. Basınç ve sıcaklık altında polimer hammadde eriyerek sıvılaşır ve akarak kalıp boşluğunu doldurur, nihai şeklini alan parça katılaşır. Yeterince soğuduktan sonra parça kalıptan çıkarılarak döngü tamamlanmaktadır.

Farklı oryantasyon ve formda takviye malzeme içeren kalıplamaya hazır kompozit yarı mamülleri bulunmaktadır. Bu mamüllerde genellikle cam olmak üzere karbon veya aramid gibi takviye malzemeler kullanılmaktadır. Termoplastik matrisli kompozitlerin kalıplanabildiği gibi termoset matrislerde de kalıplanabilmektedir.



Şekil 3.6 Basınçlı kalıplama prosesi şematik gösterimi

Tek yönlü veya dokuma kumaşlar, rastgele veya yönlenmiş kısa elyaf takviyeli termoplastik matrisli kompozitler basınçlı kalıplama prosesiyle şekillendirilebilmektedir [45]. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerin, özellikle derin geometrilere getirilmesi sırasında yapıda bulunan elyaflar basınçla birlikte yönlenmeye ve bükülmeye maruz kalarak deforme olmakta ve bu durum nihai parçanın mekanik özelliklerini etkilemektedir [46].

Basınçlı kalıplama tekniği malzemenin tipinden bağımsız olarak kullanılan büyük hacimli kompozitler için tercih edilen bir kalıplama yöntemidir. Kalıplanan

kompozitlerin şekilleri ve boyutları nettir, nihai parça olarak kullanılabilmektedir. Enjeksiyon kalıplama prosesinin aksine nihai parça üzerinde kalıptan kaynaklanan ekstra detaylar olmadığından atık malzeme oluşumunu engellemekte ve daha düşük proses süreleri sunmaktadır [47].

Basınçlı kalıplama prosesi ile sert, hafif ve daha yüksek mukavemetli ürünler oluşturmak için elyaf takviyeli termoset matrisli kütlesel ve levha kalıplama bileşenleri gibi yarı mamülleri kullanılmaktadır. Bu yöntemle birlikte, denizcilik, havacılık ve otomotiv gibi endüstrilerde karmaşık geometrili parçalar üretilebilmektedir [48].

Termoplastik matrisli kompozit uygulamalarıyla birlikte GMT (Cam Mat Termoplastik) ve LFT (Uzun Elyaf Termoplastik) gibi elyaf içerikli termoplastik matrisli kalıplama yarı mamülleri kullanılmaya başlanmıştır. Farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip çeşitli üretim yöntemleriyle elde edilen termoplastik matrisli bu yarı mamüller, basınçlı kalıplama prosesi ile işlenebilmektedir. Termoplastik matrisli yarı mamüllerle birlikte basınçlı kalıplama prosesiyle otomotiv endüstrisinde, gösterge panellerinin destek parçalarının ve gövde altı panellerinin yüksek adetlerde hızlı bir şekilde üretilmesi sağlamaktadır [49].

3.2.2.1 Uzun Elyaf Termoplastikler

Kritik çap/boy oranından daha büyük uzunluklarda süreksiz elyaf takviye içeren termoplastik matrisli kompozit malzemelerdir. Yüksek işlenebilirlikleri, düşük yoğunlukları, geri dönüştürülebilirlikleri, düşük maliyetleri ve sonsuz raf ömürleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [50].

Uzun elyaf termoplastik üretiminde, bir kalıp aracılığıyla termoplastik matris emprenye edilerek tamamen ıslanmış uzun şerit formda kompozit elde edilmektedir. Ardından şeritler ihtiyaca yönelik uzunluklarda kesilerek son haline getirilmektedir. Takviye malzeme olarak genellikle cam, karbon ve aramid elyaflar, matris malzeme olarak polipropilen, poliamid ve polikarbonat kullanılmaktadır.

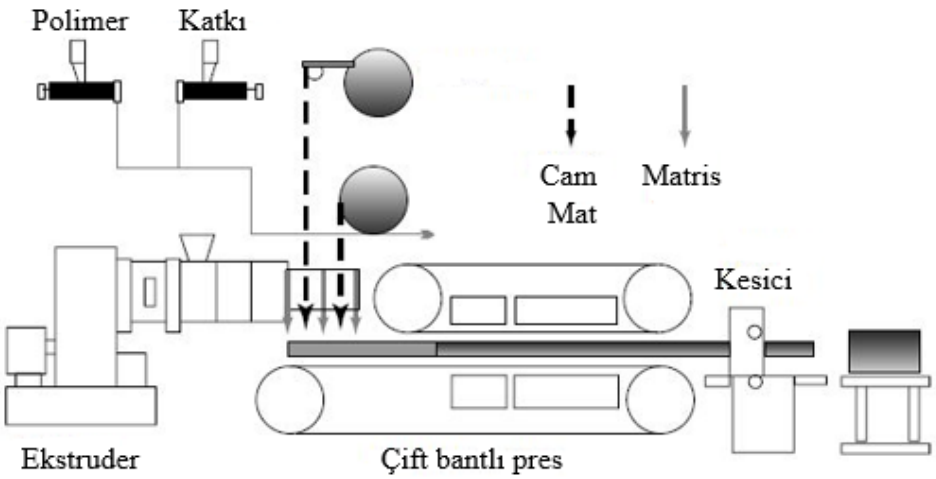
Farklı son proses işlemlerine bağlı olarak uzun elyaf termoplastiklerde lif uzunlukları da farklılık göstermektedir. Bu yöntemle elde edilen yarı mamülden üretilecek parçaların mekanik özellikleri lif uzunluğuna bağlıdır. Buna bağlı olarak, daha uzun elyaf takviyeli termoplastiklerin proses edilmesinde basınçlı kalıplama, enjeksiyon kalıplamadan önemli ölçüde yüksek performans göstermektedir [51].



Şekil 3.7 Uzun elyaf termoplastik peletleri [52]

3.2.2.2 Cam Mat Termoplastik

Cam elyaf takviyeli levhalar, genellikle matris malzemesi olarak termoplastik matrislerden polipropilen, poliamid, polikarbonat ve PVC kullanılan, cam elyaflarla takviye edilmiş levha formundaki proses edilmeye hazır kompozit malzemelerdir. Takviye malzemelerin formu, yönlenmiş, rastgele, kısa ve sürekli elyaflar veya dokuma kumaşlar olabilmektedir. Genel olarak, yapısal bileşenler için sürekli elyaflar veya elyaf dokuma kumaşlar tercih edilmektedir.



Şekil 3.8 Cam mat termoplastik üretim prosesi [53]

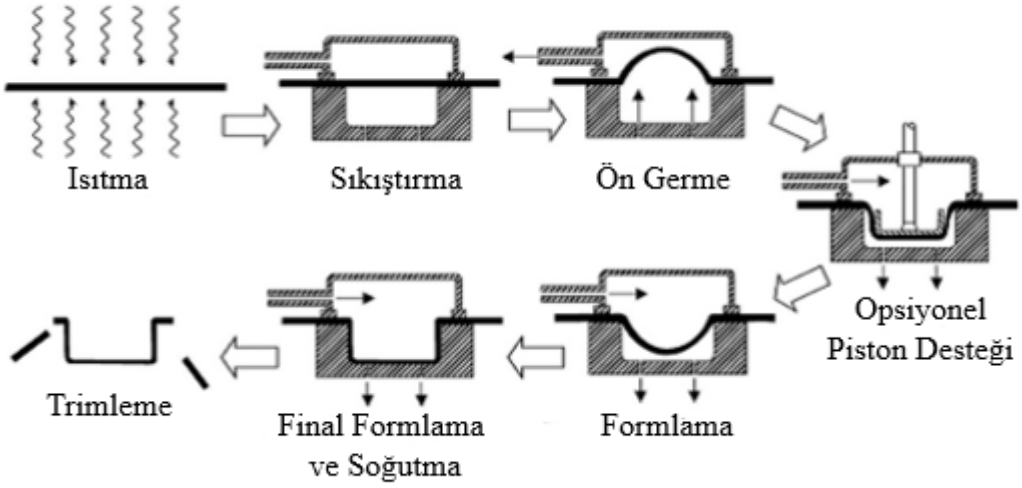
Cam elyaf takviyesiyle birlikte polipropilen matrisi kompozit oluşturmak, sertlik ve düşük sıcaklıklarda yüksek darbe dayanımı gibi mekanik özellikler sağlamaktadır. Termoplastik matrisli kompozitlerde, cam mat levhanın oluşturulmasıyla birlikte polimerizasyon tamamlanarak katılaşma olacağından, cam mat termoplastikler

basınçlı kalıplama prosesinden önce yumuşamaları için ısıtılmalıdır. Cam mat termoplastikler, içeriğinde termoset matris bulunduran elyaf takviyeli levhalar kadar mekanik olarak yüksek mukavemet değerlerine sahip ve ısıya dayanıklı olmamasına rağmen daha sert ve daha hafif fiziksel özellikler göstermektedir [54].

Yüksek darbe dayanımı ve sertlik özelliklerinin yanı sıra yüksek mekanik özellikleri ve hızlı şekillendirilebilmeleri, termoset matrisli yarı mamüller gibi kesin bir raf ömrünün olmaması ve kürlenmeleri için bir süre gerekmeksizin seri üretime uygun olması, cam mat termoplastikleri otomotiv endüstrisinde yapısal bileşenlerde kullanımı için cazip hale getirmiştir [55].

3.2.3 Termoform Kalıplama Prosesi

Termoform kalıplama, ince kompozit levhaların şekillendirilmesi için kullanılan, yarı mamüle istenen nihai parça şeklinin elde edileceği bir kalıp üzerinde basınçla form verme prosesidir. Kompozit levha içerisinde takviye malzeme olarak kullanılan elyaflar, kısa veya sürekli, rastgele veya yönlenmiş, 2 veya 3 yönlü dokuma kumaş olabilmektedir. Hem termoset hem de termoplastik matrisli kompozitlerin şekillendirilmesi için kullanılmaktadır [56].

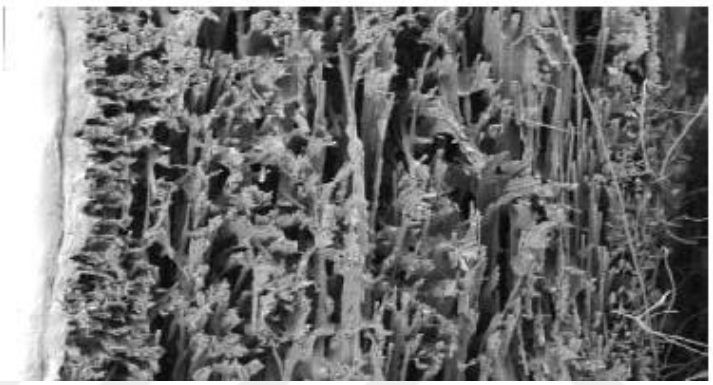


Şekil 3.9 Termoform kalıplama proses aşamaları [57]

Termoset matrisli kompozitlerin üretilmesinde, önceden matris emdirilmiş veya işlem sırasında matris emdirilen elyaflar, matrisin kürlenmesi için belli bir sıcaklık ve basınca maruz bırakılmaktadır. Termoplastik matrisli kompozitlerde, matrisin

yumuşaması için belirli bir sıcaklığa getirilen kompozit plaka basınç altında istenen forma getirilmektedir.

Form verme prosesi sırasında, yarı mamül halindeki levhanın eriyerek dağılmaması ve malzeme içerisinde hava boşluklarının oluşmaması için genellikle kullanılan cam mat termoplastiklerin yüzeylerinde gözeneksiz filmler bulunmaktadır. Termoform kalıplama prosesi sırasında yüzeyde kullanılan filmin eriyerek matris fazına karışmaması için proses sıcaklığı seçiminde, matrisin erime sıcaklığından daha yüksek ve kompozit levha üzerinde bulunan filmin erime sıcaklığından daha düşük bir sıcaklık gerekmektedir.



Şekil 3.10 Cam elyaf termoplastik kesit görüntüsü [58]

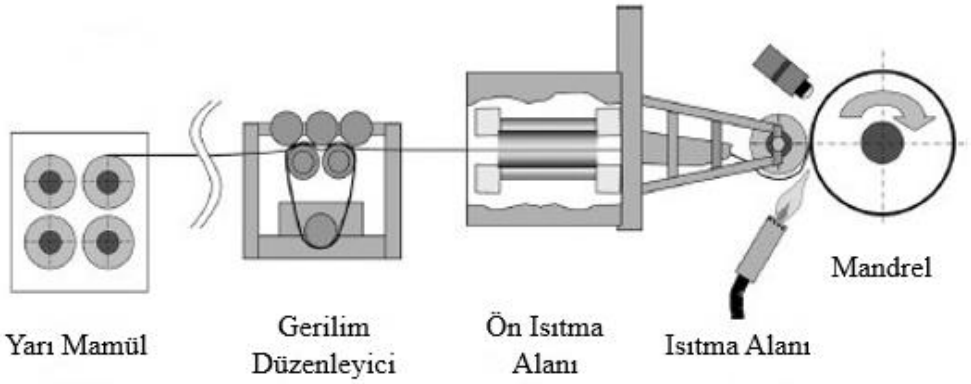
Şekil 3.10'da süreksiz kısa cam elyaf takviyeli polipropilen matrisli kompozit levhanın kesit görüntüsü verilmiştir. Sağ tarafta matris fazının içinde dağınık halde bulunan elyaf takviye görülürken sol tarafta yalnızca geçirimsiz film görülmektedir.

Proses çevrim süreleri, kompozit parçaların seri üretimi için önemli bir parametre olmaktadır. Termoform kalıplama prosesi, termoplastik matrisli kompozitlerin şekillendirilmesi için hızlı bir üretim sürecidir. Yüzeysel formda, sürekli veya kısa elyaf içeren termoplastik matrisli kompozitlerin yüksek hassasiyet ve doğrulukta üretimine imkan vermektedir. Şekillendirme süreci, malzemeyi güçlü ve sert bir halden kolayca şekillendirilebilir bir hale dönüştürmek için yalnızca ısıtma ve ardından soğutma prosesine dayanmaktadır. Termoform kalıplama prosesinde, nihai parça geometrisinin karmaşıklığı, takviye türü, matris malzeme ve kullanılan proses parametrelerine göre üretim zorlukları oluşabilmekte ve bunun sonucunda kompozit yapıda kırışmalar, gözenek oluşumları ve elyaf kırılmalarıyla karşılaşılabilmektedir [59].

3.2.4 Elyaf Sarma Prosesi

Elyaf sarma yöntemi, elyaf doğrultusu iyi tanımlanmış ve istenen doğrultunun yüksek hassaslıkta sağlandığı bir sürekli elyaf takviyeli kompozit üretim yöntemidir. Geometrileri eksenel olarak simetrik ve büyük hacimli parçaların üretilmesine imkan sağlamaktadır. Sıvı tankları, borular gibi bileşenler genellikle elyaf sarma yöntemi ile üretilmektedir.

Termoplastik matrisli kompozitlerde elyaf sarma yöntemi, önceden termoplastik matris emdirilmiş elyafın belirli gerilim, ilerleme ve sıcaklık parametreleri altında nihai parça geometrisini oluşturacak olan kalıp üzerine sarılma tekniğine dayanmaktadır. Termoplastik matrisin ısıtılarak yumuşama ve soğutularak sertleşme tekniğine bağlı olarak, proses boyunca işlem tamamlanmakta ve üretim sonrasında kürlenme süresi gerekmemektedir.

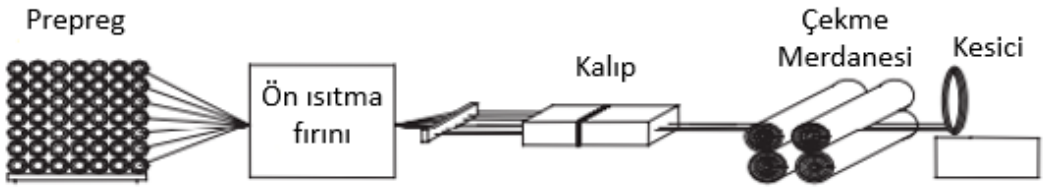


Şekil 3.11 Elyaf sarma proses şeması [60]

Elyaf sarma prosesi, termoplastik matrisli kompozit yapıların üretiminde, boyutlarına göre üretimi hızlı ve hassas bir üretim imkanı sunmaktadır. Üretim süreci, otomatik olarak yapıldığı için düşük işçilik maliyeti oluşturmaktadır. Matris oranı, yarı mamüldeki orana bağlı olarak kontrol edilebilmektedir. Kalıbın sarım sırasındaki hareketine bağlı olarak her katmanda farklı yönlerde serim yapma imkanı, farklı doğrultularda yönlenmiş elyaf katmanları oluşturmakta böylece yapı birden fazla yönde mukavemet sağlamaktadır. Üretilecek parça geometrilerinin sınırlı olması ve üretimi yapılacak parçaların büyük olmasına bağlı olarak kalıp maliyetinin yüksek olması prosesin dezavantajlarıdır.

3.2.5 Pultruzyon Kalıplama Prosesi

Pultruzyon kalıplama, sabit kesitli ve uzunluk/kesit oranı yüksek kompozit yapıların üretiminde kullanılan genellikle tam otomatize edilmiş bir üretim prosesidir. Takviye fazı olarak, sürekli uzun elyaf takviyeler ve elyaf ipliklerinin bir araya getirilmesi ile oluşturulan dokuma yapılar kullanılmaktadır. Takviye malzeme olarak cam, karbon ve aramid elyaflar kullanılmaktadır. Matris malzeme olarak polyester gibi termoset matrisler kullanılırken, polipropilen ve poliamid gibi termoplastik malzemelerde kullanılabilmektedir.



Şekil 3.12 Pultruzyon kalıplama proses şeması [61]

Proses genel olarak ön ısıtmaya tabi tutulmuş elyaf-matris bileşiminin istenen formda kesite sahip ve sıcaklığı kontrol edilebilen bir kalıp içerisinden çekme merdanesi ile çekilmesi prensibine dayanmaktadır. Şekil 3.12'de termoplastik matrisli kompozitlerin pultruzyon kalıplama prosesi ile üretimine ait proses şeması verilmiştir. Termoplastik matrisli kompozitlerin üretiminde, önceden matris malzeme emdirilmiş elyaflar (prepreg) kullanılırken, termoset matrisli kompozitlerin üretiminde kuru elyaf proses başında matris banyosundan geçirilerek elyaf-matris karışımı oluşturulmaktadır. Termoset matris kullanımında, kuru elyaflar tercih edileceği gibi prepreg malzemeler de kullanılabilmektedir.

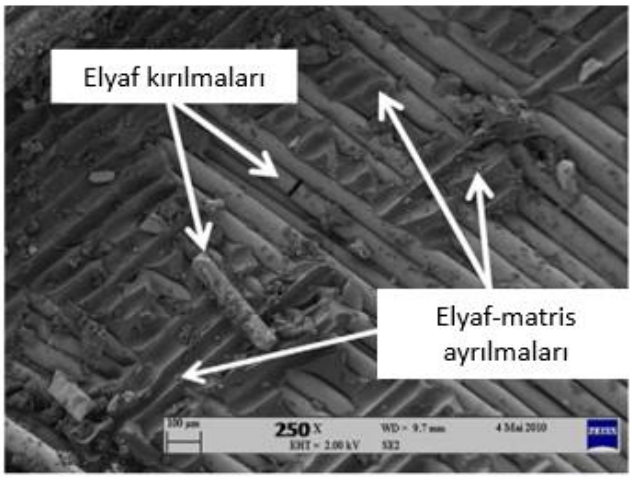
Pultruzyon kalıplama prosesi, yüksek üretim hızlarında verimli bir şekilde ve düşük maliyetlerle, yüksek elyaf içeriği ile birlikte uzunluğu doğrultusunda yüksek mekanik özelliklere sahip kompozit üretimini mümkün kılmaktadır. Kalıp boyutundan bağımsız olarak istenen uzunlukta üretim yapılabilmektedir [62].

Değişken kesitli ve karmaşık geometrili yapıların üretimi pultruzyon kalıplama ile yapılamamaktadır. Proses parametrelerinin sabit tutulmasının aksine üretilecek geometride dar tolerans değerleri elde edilememekle birlikte, ince cidarlı parçaların üretiminde çeşitli zorluklar oluşmaktadır [63].

3.3 Sürekli Elyaf Takviyeli Polipropilen Matrisli Kompozitler

Endüstride yeni tasarım çalışmalarında en iyiye gitme eğilimi, özellikleri daha iyi seviyelere getirilmiş malzemelere olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu durum son yüzyılda kullanımı giderek artan kompozit malzemelerde de geçerlidir. Polimer matrisli elyaf takviyeli kompozit malzemelerde özellikle kısa elyaf takviyeli kompozitlerin, mekanik özelliklerinin sınırlı olmasından dolayı belirli yapısal uygulamalarda kullanımı kısıtlı kalmıştır.

Elyaf takviyeli kompozitlerde, kompozitin fiziksel yapısı ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkinin daha derin bir şekilde anlaşılması, elyafın kritik uzunluğu konusu ön plana getirmiş ve bu da kritik elyaf uzunluğundan daha uzun elyafların yalnızca kompozitin mukavemetinin iyileşmesine fayda sağladığı ve kritik elyaf uzunluğundan daha kısa uzunluklara sahip olan liflerin kompozitin mukavemetinin artırılmasına katkıda bulunmadığını ortaya koymuştur. Bu konu göz önünde tutulduğunda, kompozitlerin üretimleri sırasında ortalama elyaf uzunluğunun üzerinde lifler kullanılarak bir takım çalışmalar yapılmıştır. Kritik elyaf uzunluğunun çok daha üzerinde elyaf uzunlukları içeren çalışmalarda elde edilen kompozit yapıların çok daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu ortaya koyulmuştur [64].



Şekil 3.13 Elyaf-matris kırılma arayüzeyi SEM görüntüsü [65]

Bir kompozitin azami dayanımı, yapı içerisinde kullanılan takviyenin lif uzunluğu ile kritik uzunluk arasındaki ilişki tarafından belirlenmektedir. Belirli bir lif çapı için kritik uzunluğun altındaki liflerde, arayüzeydeki kayma kuvveti bozulmaya neden olacak çekme kuvvetinden daha düşük olduğundan matris malzemesinden

ayrılarak kompozit yapı bozulmaktadır. Bu durumda yüke maruz kalan yapıda matris üzerinden liflere aktarılan yük etkisiyle takviye kırılmasının aksine matris-takviye arasında sıyrılma gözlenmektedir. Kritik uzunluğun üzerindeki liflerle takviye edilmiş kompozitlerde, malzemenin kırılması için yapıda bulunan elyaf takviyenin daha kısa liflere parçalanma durumu gözlenmektedir [66].

Şekil 3.13'te sürekli elyaf takviyeli polimer matrisli bir kompozit yapıda kırılma yüzeyinde yapılmış görüntülemede, elyaf kırılmaları ve elyaf matris ayrılmaları görülmektedir. Kritik lif uzunluğunun altında yoğun olarak ayrılmalar görüleceği gibi sürekli elyafların takviyeli yapılarda da kırılma yüzeyinde ayrılmalar görülebilmektedir. Bu duruma, elyaf-matris arası arayüzey kalitesi neden olmaktadır.

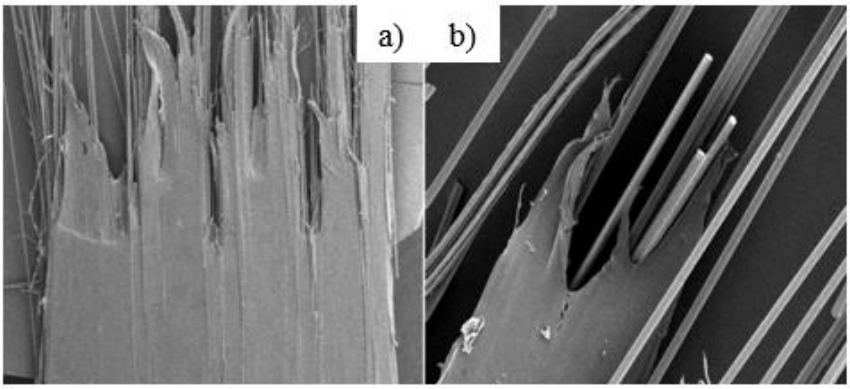
Kritik lif uzunluğunun üzerinde elyaf içeren takviyeli kompozitlerde yüksek mekanik özellikler, yapıdaki elyaf oranının yanı sıra kompozit içeriğindeki elyafların yeterince yüksek bir çap/uzunluk oranına sahip olması ile elde edilebilmektedir. Bu durum sürekli takviyeli kompozitlerin kullanımını ön plana getirmektedir. Nihai parça tasarımında yükün uygulanacağı yönde bulunan sürekli elyaf takviyeler, kompozit yapının bu yöndeki mekanik özelliklerinin en üst seviyede olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, kompozit yapıda kullanılacak matris özellikleri, elyaf özellikleri ve arayüzey bağ kalitesi gibi değişkenler de nihai parçaların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde birincil öneme sahiptir.

Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozitler, yüksek özgül mukavemet, yüksek kırılma gerilmesi, yüksek darbe toleransı, düşük üretim çevrim süreleri, ham malzemelerin sonsuz raf ömrü ve geri dönüştürülebilir olmalarından dolayı endüstrinin birçok alanında yapısal malzemeler olarak kullanılmaktadır. Termoplastik matris malzemelerinin kompozit yapılarda oluşturduğu avantajlar, bu kompozit grubunun kullanımını artırmaktadır. Eriyik termoplastik matrisin yüksek vizkozitesi ve elyaf ıslatma performansı, sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin üretimindeki dezavantajlar olarak görülebilmektedir.

Polipropilen, özgül mekanik özellikleri yüksek, kimyasallara karşı dirençli, üretimi ve endüstride kullanımı fazla olduğundan ulaşılabilirliği kolay ve düşük maliyetli bir termoplastik polimer malzemedir. Sahip olduğu özellikler, kompozit yapılarda matris malzeme olarak kullanımı sağlamaktadır. Cam elyaf takviyeli polipropilen

matrisli kompozitler, kolay erişebilir ham madde, düşük tedarik maliyetleri, kolay proses edilebilirlikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir kompozit grubudur.

Polipropilen, yeterli sertlik ve boyutsal kararlılık gerektiren otomotiv endüstrisinde yapısal malzeme olarak kullanılmaktadır. Polipropilenin sahip olduğu özellikler, takviye elyafların eklenmesiyle iyileştirilebilmektedir. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler uzun süredir piyasada ticari olarak mevcuttur [67].



Şekil 3.14 Sürekli cam elyaf takviyeli PP kırılma arayüzeyi, a)53x, b)270x [68]

PP'nin sahip olduğu özellikler, kullanım alanlarını ve miktarını günden güne artırmasıyla önümüzdeki yıllarda pazarının yıllık 94 milyar dolara kadar ulaşması beklentisini oluşturmuştur. PP'nin elyaf malzemelerle takviye edilmesiyle yapıda görülecek ağırlık azaltımları, özellikle yoğunlukla kullanıldığı otomotiv sektöründe yüksek yakıt ekonomisi ile birlikte verimliliği artırmaktadır [69].

Termoplastik bir matris malzeme olan PP'nin yüksek miktarda kullanımı, bu orana bağlı olarak oluşacak atık miktarını da etkilemektedir. Petrokimyasal bir ürün olan polipropilen için geri dönüştürülerek yeniden kullanım avantajı hem üretimde oluşacak kirliliği önlemek hem de plastik atıklarının elimine edilmesi imkanını sunmaktadır. Yapılan çalışmalarda geri dönüştürülmüş polipropilen kullanılmış yapılarda darbe dayanımı tarafında düşüşler görülürken çekme dayanımı sonuçları tatminkar seviyerde görülmüştür [70].

Mekanik özelliklerin yeterli olduğu durumlarda kısa elyaf takviyeli kompozitler hammadde ve proses maliyeti açısından daha uygun olsa da yüksek mukavemet ve dayanım gerektiren tasarımlarda sürekli elyaf takviyelerin kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Otomotiv ve havacılık endüstrisindeki kısa cam elyaf takviyeli termoplastik uygulamaları düşük mukavemet ve sertlik nedeniyle yapısal olmayan

bileşenlerle sınırlı kalmaktadır. Kalıplama kolaylığı göz önüne alındığında yapısal bileşenlerde kullanmak için, sürekli elyaf takviyeler yapısal parçaların yük taşıma yönü boyunca yerleştirildiği tasarımlar oluşturulmaktadır. Sürekli elyaf üzerine kısa elyafların takviye edilerek karmaşık geometrilerin oluşturulabildiği hibrit yöntemler de bulunmaktadır [71].

4
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Termoplastik matrisli elyaf takviyeye sahip kompozit malzemelere ait literatür çalışmaları ve endüstriyel uygulamalar incelendiğinde cam elyaf takviyeli polipropilen matrisli kompozitlerin yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Özellikle otomotiv sanayi uygulamalarında levha formundaki elyaf takviyeli termoplastikler, yapısal ve sistem yerleşim parçalarında ağırlık azaltımı amacıyla kullanılmaktadır. Termoplastik kompozitlerin üretim proseslerinin ve mekanik özelliklerini iyileştirmeye yönelik çalışmalar, tüm endüstrilerde kullanımlarını ve kullanım oranlarının artmasının önünü açması beklenmektedir.

Bu tez çalışmasında, yukarıdaki bilgiler ışığında, cam elyaf takviyeli polipropilen matrisli kompozitlerin sıcak haddeleme yöntemi ile üretilmelerine ait haddeleme proses parametrelerinin belirlenmesi ve elde edilen bu parametrelerle üretilen farklı elyaf oranına sahip kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve mekanik özelliklere direkt olarak etki edecek matris-elyaf arayüzeylerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Termoplastik malzemeler geri dönüşümle tekrar kullanılabilir bir molekül yapısına sahiptir. Buna bağlı olarak bu tez çalışmasında, geri dönüştürülmüş polipropilen kullanımıyla kompozit üretiminde plastik geri dönüşümü ve geri dönüştürülmüş termoplastik malzemelerin elyaf ile takviye edilmesiyle elde edilecek sonuçların araştırılması amaçlanmaktadır.

Bu bölümde, sıcak haddeleme yöntemi ile kompozit üretimi, üretim prosesinin oluşturulması, üretimde kullanılacak proses parametrelerinin belirlenmesine yönelik olarak Taguchi deneysel optimizasyon çalışmaları, deneysel optimizasyon çalışmalarında kullanılacak çekme deneyi numunelerinin hazırlanması, optimum proses parametreleriyle üretilecek farklı elyaf takviye oranına sahip kompozitlerin

mekanik özellikleri ve üretim prosesi, kompozit yapıyı oluşturan malzemeler ve takviye oranının takviye-matris arayüzeyi üzerine etkisi araştırılacaktır.

4.1 Malzeme, Metod ve Deney Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında kompozit yapısını oluşturacak çeşitli elyaf kumaş ve geri dönüştürülebilecek termoplastik malzeme incelenmiştir. Endüstride fiyat, fayda ve proses edilebilirlik açısından sıklıkla kullanılan cam elyaf takviye kumaş ve polipropilen matris malzeme olarak kullanılmıştır.

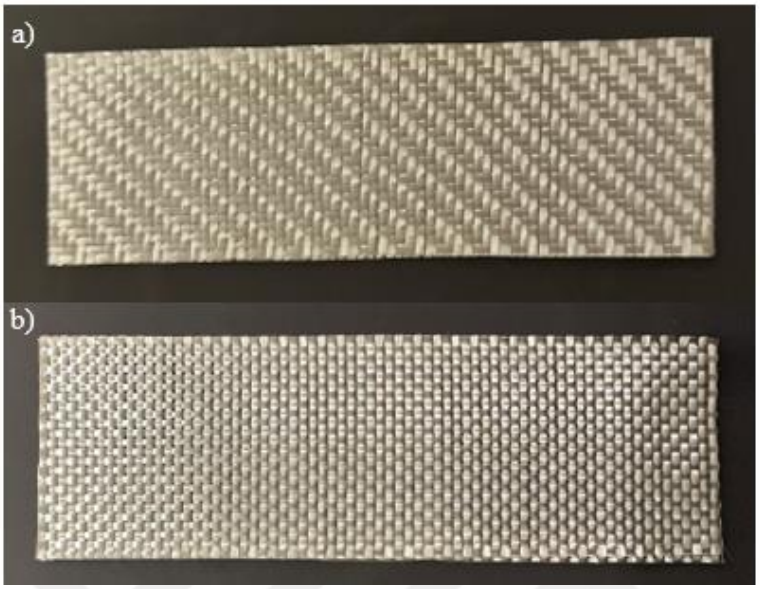
Cam elyaf takviye, E-camından üretilmiş, ortotropik özellikler gösteren düz dokuma kumaş olarak seçilmiştir. Carbomid tarafından, Şişecam WR-300 iplik kullanılarak üretilen CM GR 300 malzeme kullanılmıştır. Ortotropik özellikler göstererek daha düzenli kırılma geometrileri oluşturduğu için iki yönlü dokuma kumaş tercih edilmiştir.

Tablo 4.1 Cam elyaf kumaş teknik özellikler

ÖZELLİK	CM GR 300
Ağırlık, g/m²	300
Desen	Twill/Düz
Atkı, adet/cm	5
Çözgü, adet/cm	5
Teks, g/1000m	300
Filament kalınlığı, μm	16
Kalınlık, mm	0.28

Cam elyaf kumaşa ait teknik özellikler Tablo 4.1'de verilmiştir. 300 g/m² ağırlıkta olan dokuma kumaş 0.28 mm kalınlığa sahipken ağırlıkça doldurduğu hacim 0.12 mm olarak hesaplanmıştır. Buna göre kumaş içerisinde dokuma arasındaki

boşluklardan kaynaklanan yaklaşık %57 boşluk bulunmaktadır. Haddeleme işlemi ile elyaf ıslatma performansının değerlendirilmesi için boşluk oranı yüksek olan kumaş kullanılmıştır.



Şekil 4.1 Cam elyaf kumaş; a) twill, b) düz

Tablo 4.2 PP malzeme özellikleri [27, 72]

Özellik	**Polipropilen**
Yoğunluk, g/cm^3	0.90-0.95
Çekme Dayanımı, MPa	20-35
Elastisite Modülü, GPa	1.1-1.4
Erime Sıcaklığı, °C	160-165

Matris olarak kullanılmak üzere numune üretiminde kullanılabilecek formda polipropilen film araştırılmış, kırtasiye malzemesi olarak kullanılan dosya ayıracı ürünlerinin PP'den üretildiği saptanmıştır. Kolaylıkla erişilebilecek, geri dönüşüme uygun ve ölçülebilir kalınlık ve hacme sahip olduğundan Bigpoint 229-20 PP Ayraç Separatör ürünü, matris malzeme olarak kullanılmıştır. A4 kağıt ebatında 130 μm kalınlığındaki PP filmler matris malzeme olarak kullanılmıştır.

Firma tarafından ürünlerde kullanılan malzemelerin hammadde özellikleri paylaşılmamaktadır. Literatür çalışmalarına göre polipropilen malzeme özelliklerine ait değer aralığı Tablo 4.2'de verilmektedir.

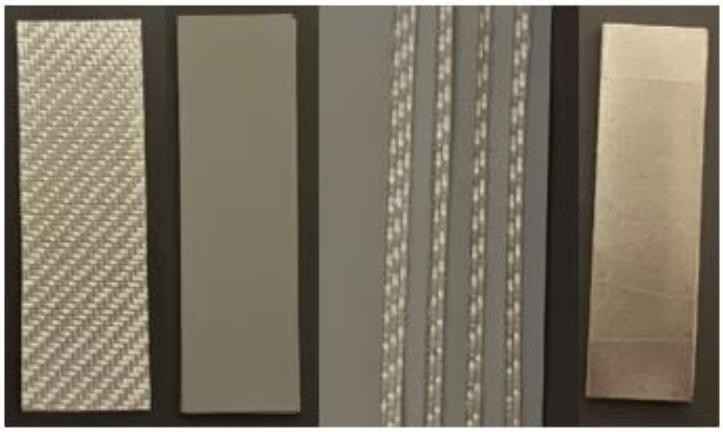


Şekil 4.2 PP matris malzeme

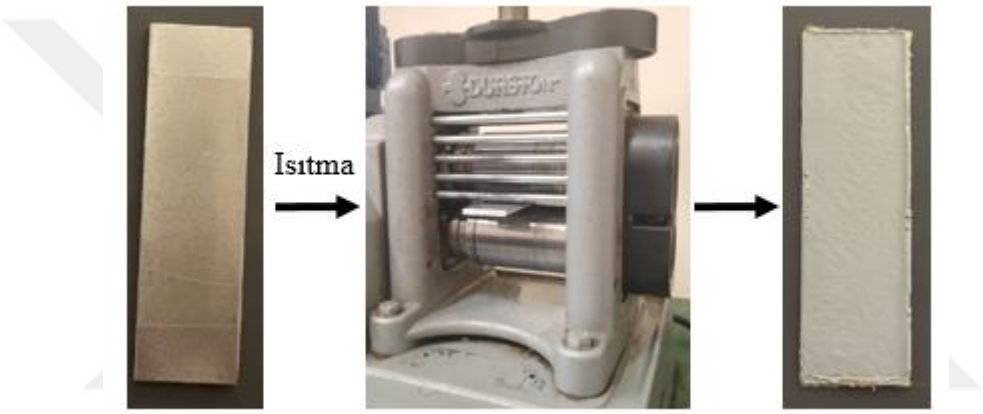
Termoplastik matrisli kompozitlerin üretiminde oda sıcaklığında katı halde olan matris malzemenin eritilerek, basınç altında elyaf malzemeyle birleştirilme sonrasında konsolide hale gelen takviye-elyaf bileşiminin soğutularak katılaştırılması tekniği kullanılmaktadır. Başlangıç proseste elde edilen plaka veya pelet formunda yarı mamül haline getirilen kompozit malzemelere nihai şekillerinin verilmesi için farklı üretim teknikleri uygulanmaktadır.

Bu çalışmada, belirli sayıdaki cam elyaf kumaş ve geri dönüşüm PP filmden oluşan yapının, matrisin erime sıcaklığına getirilerek haddelenmesi ile kompozit plaka üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu yöntemle, sürekli elyaf kumaş ve matris film ile beslenecek hadde tezgahında, teorik olarak sonsuz uzunlukta yarı veya son mamül olarak kullanılabilecek kompozit plaka elde edilebilmektedir. Proses boyunca ilerlemeli olarak gerçekleşecek hadde basıncı, haddenin ilerleme yönündeki bölgeden gaz çıkışına imkan vermektedir. Üretim prosesi laboratuvar koşullarına indirgendiğinde işlem adımları kompozit yapıyı oluşturacak cam elyaf kumaş ve polipropilen katmanlarının kalıplanması, kompozitin ısıtılması, ısıtılan kompozit yapının haddelenmesi ve soğuduktan sonra kalıp olarak kullanılan plakalardan ayrılması şeklindedir.

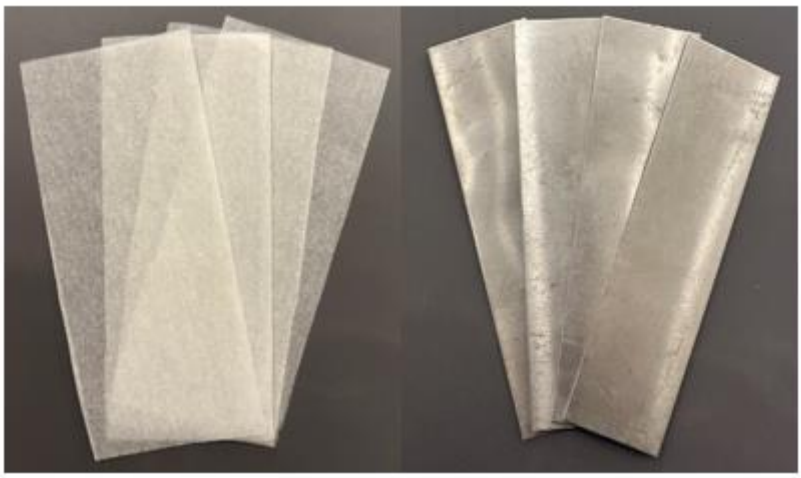


Şekil 4.3 Matris ve elyaf malzemenin kalıplanması



Şekil 4.4 Kalıplanan yapının haddelenmesi

Üretilecek numune kalınlığına göre belirlenmiş belirli sayıdaki cam elyaf kumaş ve PP film iki alüminyum plaka arasında kalıplanmaktadır. Proses süresinde alt ve üst plakanın birbirinden ayrılmaması için plakalar birbirlerine yüksek sıcaklığa dayanıklı alüminyum bant ile tutturulmuştur. Plaka malzemesi olarak ısıl iletkenliğinin yüksek olması ve proses sıcaklığında mekanik özelliklerini kaybetmemesi açısından alüminyum malzeme tercih edilmiştir. Kullanılan plakalar eriyik matrisin dağılmasını engellemekte ve haddeleme sırasında hadde merdanesinin uyguladığı kuvvetin yayılmasını sağlamaktadır. Eriyik termoplastiğin alüminyum plakaların yüzeylerine yapışmaması ve plakalardan kolaylıkla ayrılması için alt ve üst plakalar ile kompozit yapı arasına yüksek proses sıcaklıklarına dayanıklı silikon kaplı düşük gözenekli selülozik kağıt malzeme kullanılmıştır.



Şekil 4.5 Kalıp ayırıcı kağıt ve alüminyum plaka



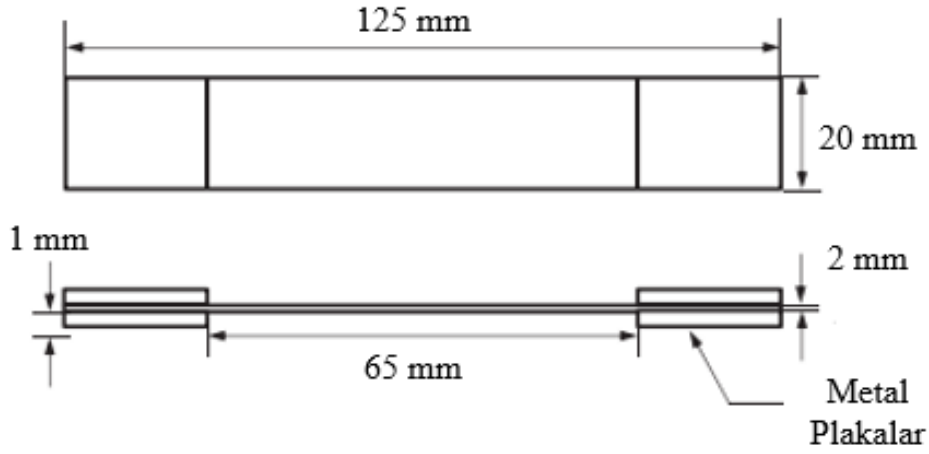
Şekil 4.6 Masaüstü hadde tezgahı

Kalıplanmış kompozit yapı, içindeki matris malzemenin tamamının eriyik faza geçmesi için belirli bir süre fırında tutulduktan sonra haddeden geçirilerek proses tamamlanmaktadır. Hadde kalınlığı, elde edilecek kompozit içerisinde boşluk kalmaması ve matrisin tamamıyla kumaşa infiltre olabilmesi için, kalıplanan toplam malzemeye göre hesaplanmaktadır. 2 mm olan numune kalınlığı için 1 mm plaka kalınlıkları ve 50 µm ayırıcı kağıt kalınlığı alındığında hadde açıklığı 4.1 mm olarak belirlenmiştir. Kullanılan masa üstü hadde tezgahı 65 mm çapında merdanelere, 10 mm maksimum hadde açıklığına sahiptir. Maksimum çalışma hızı 0.35 m/s'dir. Haddeleme işlemi için kullanılan tezgah Şekil 4.6'da verilmiştir.

Haddeden geçirilen kompozit yapı, oda sıcaklığına kadar soğuduktan sonra kalıp olarak kullanılan plakalar, plakaları tutan bant ve ayırıcı olarak kullanılan kağıt film yapıdan ayrılarak kompozit plaka elde edilmektedir.

Haddeleme işlemi sırasında hadde kalınlığından kaynaklı olarak kalıp kenarları doğrultusunda taşan fazlalık matris malzeme ve proses sırasında kumaş kenarlarında sürekliliğini kaybederek ortantasyonu bozulmuş elyaf kumaşlar, elde edilen kompozit plakadan kesilerek çıkartılmaktadır.

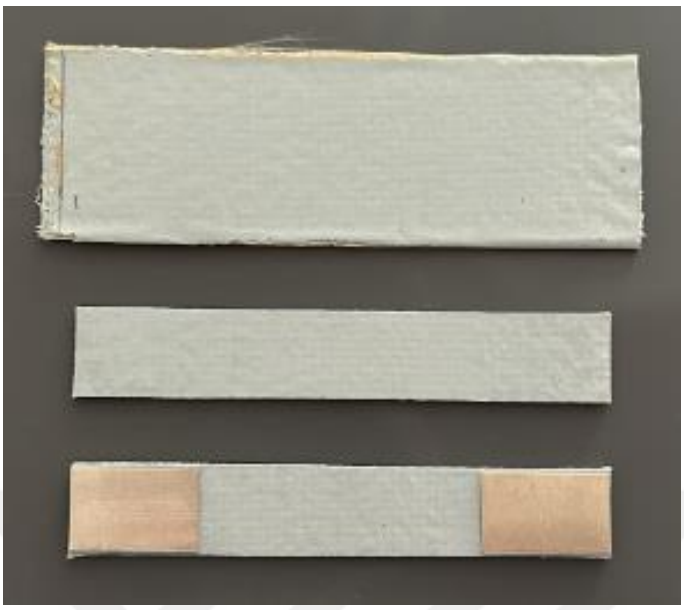
Proses etkinliğinin saptanması ve proses için kullanılacak farklı parametrelerin optimizasyonu için üretilecek kompozit plakalara çekme testi yapılması planlanmıştır. Bu çalışmada, kullanılacak numune ölçülerinin belirlenmesinde yüksek modüllü elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerde çekme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan ASTM D3039 standardı referans alınmıştır [73]. Standarda uygun şekilde üretilen çekme testi numune ölçüleri Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7 Çekme testi numune ölçüleri

ASTM D3039 standardına göre çekme numuneleri sabit kesitli olarak üretimekte olup gerekli olması durumunda çekme tezgahı çenelerine bağlanacak uçları metal plakalarla desteklenmelidir. Numunenin çene bağlantısından ilk yüklemeyle birlikte kopmaması için numune uçları alüminyum plakalarla desteklenmiştir. Standarda uygun kalınlıkta üretilip gerekli boy ve genişlikte kesilen numunelerin uçlarına alüminyum plakalar yapıştırılmıştır. PP matris malzemesi ve alüminyum plakanın yapıştırılarak güçlü bir bağlantı sağlanması ve test boyunca yapışma

arayüzeyinin bozulmaması için siyanoakrilat yapıştırıcı kullanılmıştır. Çekme testine hazır hale getirilen numunenin son hali Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8 Çekme testi numunesi

4.2 Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu

Üretim sırasında kullanılacak değişken proses parametreleri olarak fırın sıcaklığı, ısıtma süresi, haddeleme hızı ve haddeleme sayısı bulunmaktadır. Ayrıca, kompozit yapıya haddelemeden sonra uygulanacak farklı bir soğutma işlemi tatbik edilebilmektedir.

Fırın sıcaklığı, kompozit yapıdaki matris malzemenin tamamının eriyik faza geçmesini sağlayacak ve haddeleme işlemi sonuna kadar numunenin eriyik halini koruyacak sıcaklıkta olmalıdır. Deney numunesinin proses için yeterli sıcaklığa ulaşmaması durumunda kompozit yapı içerisinde eriyik faza geçmemiş bölgeler bulunabilmekte veya haddeleme işlemi öncesinde haddeden geçmeden tekrar katılaşma görülebilmektedir. Kompozit yapının çok yüksek sıcaklığa çıkarılması durumunda, polipropilen matrisin viskozitesi düşerek plakalar arasında akarak kalıptan uzaklaşabilmekte veya kimyasal bozunma gerçekleşmektedir. Ayrıca, cam elyaf malzemeler belirli sıcaklıkların üzerinde uzun süreler tutulduğunda mekanik özelliklerinde gerilemeler görülmektedir. Bu durumda PP'nin erime sıcaklığı olarak yaklaşık 165 °C göz önünde tutularak minimum fırın sıcaklığı olarak 190 °C alınmıştır. Fırınlama süresinin yapı içerisinde matris fazının tümüyle eriyik hale geçtikten sonra daha uzun tutulmasının üretilecek numunedeki mekanik ve fiziksel

özellikleri etkilemeyeceği ön testlerle saptanmıştır. Buna göre üretilecek numuneler için 25 dk fırınlama süresi belirlenmiştir.

Haddeleme hızı, matrisin takviyeye infilte olarak kompozit yapıyı oluşturacağı toplam süreyi belirlemektedir. Proses süresi, matris-takviye arasındaki arayüzey kalitesini ve bunun sonucunda kompozitin mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir. Ayrıca, haddelemenin yavaş olması durumunda haddelenmeden katılaşma veya hızlı olması durumunda merdane etkisinden dolayı kompozit yapının bütünlüğünde bozulmalar meydana gelebilmektedir. Proses için kullanılacak hadde tezgahının minimum ve maksimum limitleri de proses hızını etkilemektedir. Bu çalışmada, kullanılan hadde tezgahının minimum, maksimum ve ortalama haddeleme hızları kullanılarak farklı test numuneleri hazırlanmıştır.

Haddeleme sonrasında prosesin tamamlanabilmesi için eriyik haldeki matrisin tekrar katı hale gelmesi gerekmektedir. Prosesin bu aşamasında, kompozit yapı soğuk merdanede bir veya birden fazla kez haddelenerek oda sıcaklığında soğutulabilir yada haddeleme sonrasında hızlı soğutma için su gibi bir sıvıya daldırılabilmektedir. Matrisin soğuma hızı, takviye ile arasında oluşacak arayüzey özelliklerini etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, haddeleme sonrası oda sıcaklığında soğutma ve suya daldırma ile hızlı soğutma yapılarak farklı numuneler hazırlanmıştır.

Kompozit plakaların sıcak haddeleme ile üretiminde proses sonucu elde edilecek kompozit yapının karakteristiğini belirleyici proses parametreleri olarak proses sıcaklığı, hadde hızı ve soğutma türü seçilmiştir.

Seçilen parametrelerin farklı düzeylerdeki seviyelerinin çekme testi sonucuna etkilerinin araştırılması için Taguchi test metodolojisi kullanılmıştır. Taguchi test yöntemi değişkenlerin farklı seviyelerdeki girdilerinin, çıktı üzerindeki etki oranlarını daha az sayıda test kombinasyonuyla belirlenmesinde kullanılan maliyet etkin bir deneysel optimizasyon tasarımıdır.

Proses parametreleri olarak 3 farklı değişken olduğu için Taguchi L9 tablosuna göre deneysel tasarım yapılmıştır. Seçilen değişken parametrelerin farklı seviyeleri Tablo 4.3'teki gibi belirlenmiştir. Taguchi L9 ortogonal dizinine göre seçilen parametrelerin farklı seviyeleri kullanılarak üretilecek numune setleri Tablo 4.4'te

verilmiştir. Birbirinden farklı seviyelerdeki parametrelerin kullanıldığı 9 farklı test seti tanımlanmıştır.

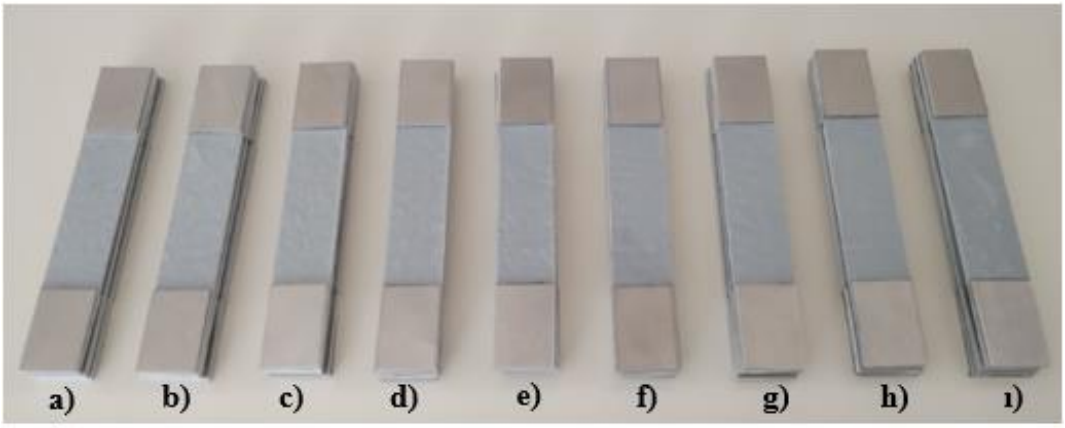
Tablo 4.3 Değişken parametre seviyeleri

Parametre	**Seviye 1**	**Seviye 2**	**Seviye 3**
Sıcaklık, °C	230	210	190
Hadde Hızı, m/s	0.035	0.175	0.315
Soğutma	1 kere hadde, soğutma	2 kere hadde, soğutma	1 kere hadde, suda soğutma

Tablo 4.4 Taguchi test tasarımı

Test Numarası	**Sıcaklık, °C**	**Hadde Hızı, m/s**	**Soğutma**
T1	230	0.035	1H
T2	230	0.175	2H
T3	230	0.315	1HS
T4	210	0.035	2H
T5	210	0.175	1HS
T6	210	0.315	1H
T7	190	0.035	1HS
T8	190	0.175	1H
T9	190	0.315	2H

Belirlenen her bir test seti için 3'er adet numune hazırlanmıştır. Toplamda üretilen 27 adet numuneye çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi için hazırlanan numuneler Şekil 4.9'da verilmiştir. Yapılan çekme testlerinde 2 mm kalınlık ve 20 mm genişliğe sahip numuneler için 10 mm/dk ön yükleme ve 15 mm/dk çekme hızı kullanılmıştır. Her bir test seti için yapılan çekme testinin sonuçları Tablo 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.9 Taguchi tasarımı çekme test numuneleri; a) T1, b) T2, c) T3, d)T4, e) T5, f) T6, g) T7, h)T8, ı) T9



Şekil 4.10 T1, N1 çekme testi

Tablo 4.5 Taguchi tasarımı çekme test sonuçları, MPa

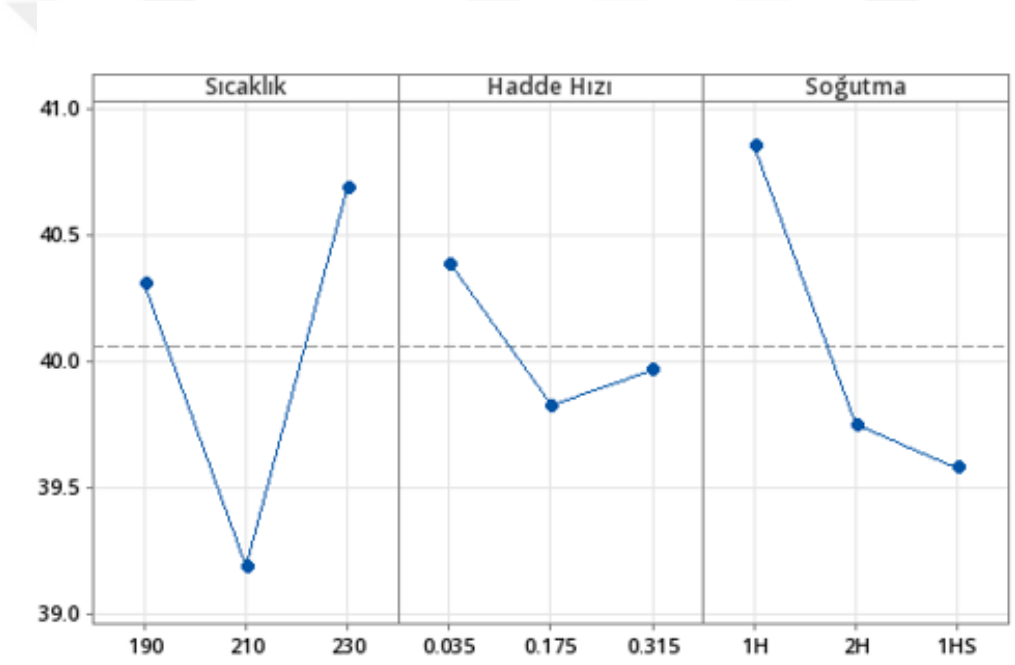
Test No	Numune 1 (N1)	Numune 2 (N2)	Numune 3 (N3)
T1	123	119	134
T2	111	101	75
T3	104	120	110
T4	92	105	104
T5	87	89	80
T6	86	99	84
T7	101	86	90
T8	127	110	128
T9	104	86	119

Test sonuçlarından alınan değerlerin en yüksek olduğu değer, istenen en iyi durum olduğundan, elde edilen tüm çekme testi sonuçlarına göre deneyin sinyal/gürültü oranları Taguchi deney tasarımının ‘en büyük değer en iyi’ teoremine göre hesaplanmıştır.

Çekme testi sonuçlarının tamamı kullanılarak Minitab programı ile sinyal/gürültü oranı hesaplamaları yapılmış ve sinyal/gürültü diagramları çizdirilmiştir. Ortalama S/G oranları, parametreler arası seviye farkları Tablo 4.6’da verilmiştir. Elde edilen S/G oranları diagramı Şekil 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.6 Sinyal/Gürültü oranları tablosu

Seviye	Sıcaklık	Hadde Hızı	Soğutma
1	40.69	40.39	40.85
2	39.19	39.83	39.75
3	40.30	39.97	39.58
Fark	1.50	0.56	1.27



Şekil 4.11 Sinyal/Gürültü diagramı

Her 3 değişken parametrenin 3 farklı seviyesi için hesaplanan S/G oranları incelendiğinde 230 °C'de, 0.035 m/s hızda, 1 kere haddeleme ile en yüksek çekme dayanımına sahip numunenin üretileceği sonucu görülmektedir. Taguchi deney tasarımı sonucu elde edilen optimum parametre seti mevcut yapılan testlerde Test-1'de yer aldığı için doğrulama testi yapılmamıştır. En yüksek dayanım değerleri, en yüksek ortalama dayanım ve en düşük standart sapma değeri Test-1 sonuçlarında görülmektedir.

4.3 Elyaf Takviye Oranı Değişiminin Değerlendirilmesi

Bir kompozit yapının sahip olduğu mekanik özellikleri içeriğindeki takviye ve matris miktarı belirlemektedir. Yapıda genel yük taşıma görevini üstlenen takviye oranı artışının mekanik özellikleri artıracağı öngörülebilmektedir. Ancak bu artış yapı içerisinde bulunan matrisin tüm elyaf takviyeyi ıslatarak yüksek kalitede bir arayüzey oluşturması ve yapıda elyaf haricindeki kalan tüm hacmi doldurmasıyla mümkün olabilmektedir. Kompozit karışımı oluşturan matris miktarının yeterli olmaması yapı içerisinde kuru kalmış bölgelere veya makro boyutta boşluklar kalmasına neden olmaktadır. Yapıda süreksizlik oluşturacak bu hatalar, korozif ortamda düşük yüklerde kompozit yapıda delaminasyona ve yüksek yükler altında ani kırılmalara neden olacaktır.

Cam elyaf kumaş takviyeli geri dönüştürülmüş polipropilen matris içeren kompozitlerin sıcak haddeleme yöntemi ile üretilmesinde, elyaf/matris oranının kompozit yapıda mekanik özelliklere ve arayüzey kalitesine etkisinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

Mekanik özelliklerin belirlenmesinde, farklı sayıda cam elyaf kumaş içeren çekme testi numuneleri Bölüm 4.2'de belirlenen proses parametreleriyle üretilmiş ve çekme testine tabi tutulmuştur. Üretilen numuneler, içerdikleri kumaş katman sayısı, ağırlıksal ve hacimsel elyaf oranları Tablo 4.7'de verilmiştir.

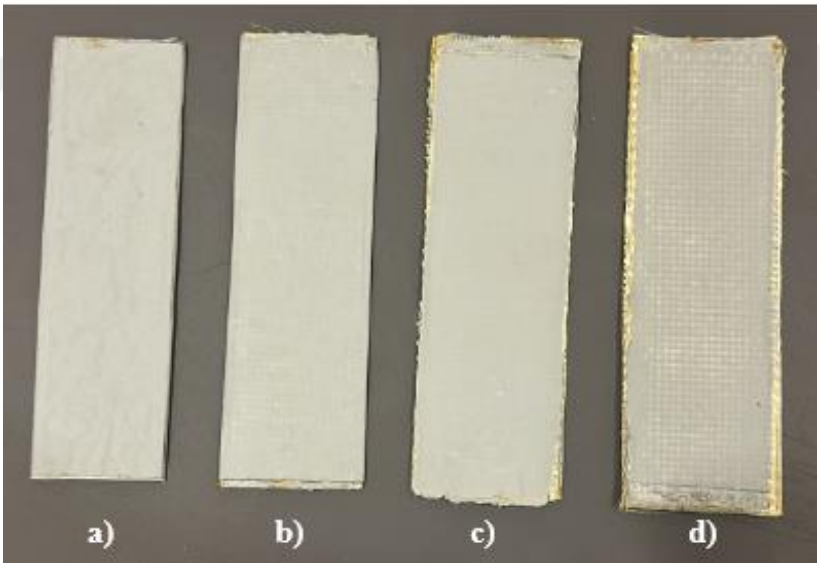
Tablo 4.7 Farklı elyaf oranına sahip test numune özellikleri

Test No	**Levha Kalınlığı (mm)**	**Kumaş Sayısı (adet)**	**Levha Ağırlığı (g/m^2)**	**Elyaf Ağırlık Oranı (%)**	**Elyaf Hacim Oranı (%)**
T11	2	0	1740	0	0
T12	2	3	2260	45	18
T13	2	4	2500	52	24
T14	2	5	2720	60	30

Üretilen T11, T12, T13 ve T14 test numuneleri 2 mm kalınlığında, farklı sayıda cam elyaf kumaş takviyesi ile geri kalan hacmi matrisle doldurularak üretilmiştir. Kullanılan düz dokuma kumaş ağırlığı 300 g/m² ve kumaş kalınlığı 0.28 mm olarak verilmiştir. Buna göre cam elyaf dokuma içerisinde %57'lik bir boşluk bulunmaktadır. Kompozit yapıda matris malzeme yetersizliği ile boşluk kalmaması için elyaf kumaş boşluğu ve levha kalınlığı göz önüne alınarak yeterli sayıda polipropilen film kullanılmıştır.

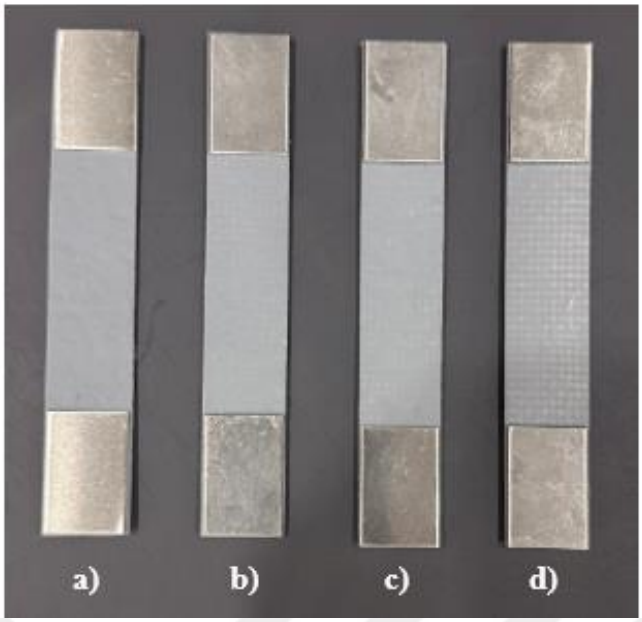
Sıcak haddeleme işleminde, iki alüminyum plaka arasına kalıplanan takviye ve matristen, proses sırasında fazlalık matris malzeme ve oluşabilecek gazların çıkışı için kalıp baş ve sonunda açıklıklar bırakılmıştır.

Farklı oranda elyaf ve matris miktarında kalıplanan malzemeler 230 °C'de ısıtılarak ve 0.035 m/s hızda, 1 kere haddeleme ile kompozit levha haline getirilmiştir. Üretilen kompozit levhalar Şekil 4.12'de verilmiştir. Elde edilen levhalardan kesilerek ASTM D3039 standartına göre hazırlanan çekme testi numuneleri Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.12 Farklı oranda takviye içeren kompozit levhalar; a) T11, b) T12, c) T13, d)T14

Farklı oranlarda cam elyaf takviye içeren her bir test numunesi için 3'er adet üretilerek çekme testi yapılmıştır. Yapılan çekme testi ile elde edilen çekme dayanımları Tablo 4.8'de verilmiştir.



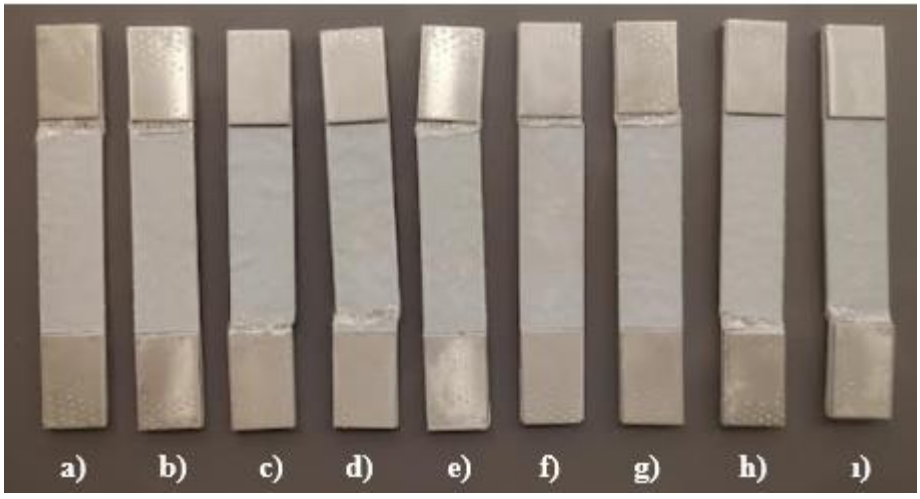
Şekil 4.13 Farklı oranda takviye içeren çekme test numuneleri; a) T11, b) T12, c) T13, d)T14

Tablo 4.8 Farklı oranda takviye içeren numunelerin çekme test sonuçları, MPa

Test No	**Numune 1 (N1)**	**Numune 2 (N2)**	**Numune 3 (N3)**	**Ortalama**
T11	17	20	17	18
T12	122	130	123	125
T13	155	157	150	154
T14	155	149	131	145

5
BULGULAR VE TARTIŞMA

Taguchi L9 ortogonal tablosu ile yapılan deney tasarımı için sıcaklık, haddeleme hızı ve soğutma parametrelerinin farklı seviyeleriyle oluşturulan 9 farklı parametre seti ile 4 katman twill dokuma 300 g/m² ağırlığında cam elyaf kumaş ve geri dönüştürülmüş polipropilen içeren 2 mm kalınlığında, yaklaşık 2500 g/m² ağırlığında kompozit levhalar üretilmiştir. Taguchi deneysel tasarım için üretilerek çekme testi uygulanan numuneler Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 Çekme testi uygulanan numuneler; a) T1, b) T2, c) T3, d)T4, e) T5, f) T6, g) T7, h)T8, ı) T9

Çekme testi sonucunda numunelerde oluşan kırılma bölgeleri incelendiğinde, numunelerde çekme çenesi-numune bağlantılarını desteklemek için numune üzerine yapıştırılan alüminyum plakalara yakın bölgelerde kırılma olduğu saptanmıştır. ASTM D3039 çekme testi standardında bu tür kırılmalar, metal destek plakası bölgesinde, yanal yönde ilerleyen ve kırılma bölgesinin numunenin alt veya üst bölgesinde olmasına göre adlandırılan standart bir kırılma karakteristiği olarak verilmektedir. Yapılan çekme testlerinde görülen kırılma karakteristiği Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2 ASTM D3039 standart kırılma karakteristiği [73]

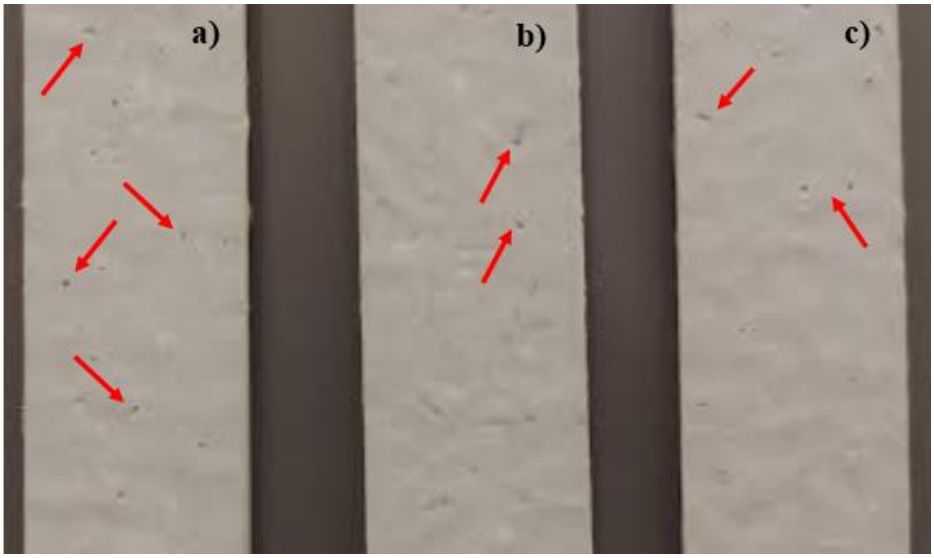
Ayrıca yapılan çekme testlerinde, ekseri olarak kırılmaların numune üzerinde yanal yönde ilerlediği görülmektedir. İki yönlü sürekli elyaf içeren kompozitlerde çekme yönüne dik olarak yönlenmiş elyaf takviye bulunması, kırılma yönlerinin tek yönlü takviye içeren kompozitlerin aksine daha düzenli bir kırılma karakteriyle yanal yönde ilerlemesine neden olmaktadır.

Çekme testi uygulanan tüm numunelerin kırılma arayüzlerinde, çekme yönündeki elyafların uzayarak matristen sıyrıldığı görülmektedir. Bu durum, sıcak haddeleme yöntemiyle farklı proses parametreleri kullanılarak üretilen numunelerde, mükemmel bir elyaf ıslatma performansı sağlanamadığını ve yüksek kalitede bir elyaf-matris arayüzeyi oluşmadığı yönünde bir izlenim oluşturmaktadır. Ancak, numunelere uygulanan çekme testleri ile elde edilen çekme dayanım değerleri ve bu değerler kullanılarak oluşturulan Taguchi deneysel tasarımı, sürekli elyaf takviyeli polipropilen matrisli kompozit levhaların sıcak haddeleme yöntemiyle üretilmesinde kullanılacak proses parametrelerinin belirlenmesinde birtakım sonuçlar çıkarılmasına katkıda bulunmaktadır.

Çekme test sonuçlarından elde edilen çekme dayanım değerleri kullanılarak, en büyük değer en iyi teoremine göre hesaplanan sinyal/gürültü oranlarından elde edilen sonuçlar en yüksek mekanik özelliklere sahip kompozit levhanın 230 °C'de, 0.035 m/s hızda, 1 kere haddeleme ile üretileceği sonucunu vermektedir. Taguchi deneysel optimizasyonuyla elde edilen bu sonuç yapılan 9 farklı test setinden T1 numaralı testte kullanılan parametreler olarak görülmektedir. T1 numaralı test için üretilen 3 farklı numuneden elde edilen çekme dayanımı değerleri 123 MPa,

119 MPa ve 134 MPa olup, tüm testler içinde en yüksek dayanım değerlerini vermektedir. T1 numaralı testte kullanılan proses parametrelerinin Taguchi deneysel optimizasyonuyla elde edilen en optimum değerler olması ve yapılan tüm testler içinde en yüksek dayanım değerlerinin T1 numaralı testte elde edilmesi yapılan Taguchi deneysel tasarım optimizasyonunu doğrulamaktadır.

Sıcak haddeleme prosesinde kullanılan farklı parametre seviyelerinin sinyal/gürültü oranları incelendiğinde, soğutma için uygulanan 1 kere haddeleme, 2 kere haddeleme ve 1 kere haddemeden sonra su ile soğutulan numunelerden en düşük dayanım değerlerine sahip olan numunelerin su ile soğutulanlar, sonrasında 2 kere haddeleme ile soğutulanlar olduğu görülmektedir. Ayrıca, 2 kere haddeleme ve haddeleme sonrası su ile hızlı soğutulan levhalardan üretilen numunelerden elde edilen çekme dayanımı sonuçları daha geniş bir aralığa yayılmıştır. Aynı şartlar altında kalıplanan elyaf-matris yapısının, uygulanan farklı soğutma türlerine bağlı olarak çekme dayanımı sonuçlarında birbirinden bu oranda farklı gelmesi, 2 kere haddeleme ve haddeleme sonrasında suyla soğutmanın sıcak haddeleme prosesi için tekrarlanabilir ve süreklilik arz etmeyen sonuçlar ortaya çıkardığı görülmektedir. Ayrıca, haddelenen kompozit levhanın serbest halde su ile hızlı soğutulmasının, matris fazının çok hızlı soğumasına yol açarak levha yüzeyinde boş gözeneklerin oluşumuna, dalgalanmalara ve yapıda çarpılmalara neden olduğu görülmüştür.



Şekil 5.3 Haddeleme sonrası su ile soğutulan numuneler; a)T3, b) T5, c) T7

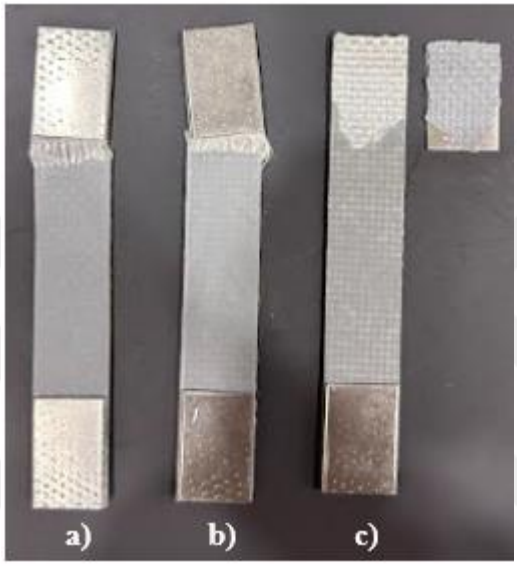
Haddeleme prosesi öncesinde ısıtılarak eritilen matris için 190 °C, 210 °C ve 230 °C sıcaklıklar kullanılmıştır. PP malzemelerin 160 °C -165 °C'de eriyik faza geçtiği düşünüldüğünde, kullanılan sıcaklık değerlerinin tümünde matrisin eriyik faza geçtiği görülmüştür. Taguchi deneysel tasarımından elde edilen sinyal/gürültü oranları karşılaştırıldığında en iyi sonucun 230 °C'de elde edileceği görülmektedir. Eriyik sıcaklığının artması matrisin viskozitesini düşürerek, elyaf içerisine daha iyi infiltre olmasını ve matris-elyaf arasındaki konsolidasyonu artırmaktadır. Bu doğrultuda en iyi ikinci proses sıcaklık parametresi 210 °C olması beklenirken, 190 °C olarak görülmüştür. Bu durum, farklı sıcaklık seviyelerinin sinyal/gürültü oranlarının çok dar bir aralıkta gelmesinde kaynaklanmaktadır.

Kompozit levhaların sıcak haddeleme ile üretilmesinde bir diğer proses parametresi olarak haddeleme hızı belirlenmiştir. Haddeleme prosesinde kullanılacak olan hız parametresi toplam üretim süresini belirleyeceği gibi proses sırasında hadde merdanelerinin belli bir alanda oluşturacağı basınç süresini de belirleyen bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Taguchi deney tasarımı için proses parametreleri olarak 0.035 m/s, 0.175 m/s ve 0.315 m/s haddeleme hızları kullanılmış ve en yüksek sinyal/gürültü oranı 0.035 m/s hızda görülmüştür. Bu durum, beklenen bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Eriyik fazda matris içeren kalıplanmış kompozit yapının düşük hızlarda haddelenmesi, hadde merdanelerinin belirli bir bölgede daha uzun süre basınç oluşturmasına ve buna bağlı olarak eriyik matrisin elyaf takviye içerisine daha iyi infiltre olarak kompozit yapı içerisinde oluşabilecek gaz boşluklarının matris tarafından doldurulmasını sağlamaktadır.

Sürekli elyaf takviyeli ve geri dönüştürülmüş PP matrisli kompozit malzemelerin sıcak haddeleme yöntemi ile üretilmesinde sıcaklık, haddeleme hızı ve soğutma gibi proses parametrelerinin belirlenmesi için Taguchi deneysel optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Proses parametrelerinin farklı seviyeleriyle oluşturulan ayrı ayrı hazırlanmış 9 test setinden elde edilen çekme dayanımı sonuçları, sinyal/gürültü oranları ve görsel incelemeler neticesinde sıcak haddeleme prosesi için en optimum parametrelerin 230 °C'de, 0.035 m/s hızda, 1 kere haddeleme ile elde edileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Sürekli elyaf takviyeli polipropilen matrisli kompozitlerin sıcak haddeleme yöntemiyle üretilmesinde, kompozit yapının içerdiği takviye elyaf miktarının çekme dayanımına etkisinin ve haddeleme prosesi ile konsolide olan matris-elyaf

birleşimindeki arayüzeylerin incelenmesi amacıyla sırasıyla 3 katman, 4 katman ve 5 katman 300 g/m² ağırlığında düz dokuma cam elyaf kumaş içeren 2 mm kalınlığında kompozit levhalar üretilmiştir. Kompozit levhaların ve matris malzemenin çekme dayanımlarının karşılaştırılması için 2 mm kalınlığında tamamıyla matris malzeme olarak kullanılan geri dönüştürülmüş polipropilenden oluşan levhalar üretilmiştir. Elde edilen takviye edilmiş PP ve takviyesiz PP levhalara ait ağırlık ve elyaf oranları Tablo 4.6'da verilmiştir. Çekme testine tabi tutulan T12, T13 ve T14 numaralı test numuneleri Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4 Çekme testi uygulanan numuneler; a) T12, b) T13, c) T14

3 katman cam elyaf içeren T12 test numunelerinde ve 4 katman cam elyaf içeren T13 test numunelerinde, Taguchi deneysel tasarım için yapılan çekme testlerinde de gözlemlenen metal destek plakası bölgesinde, yanal yönde ilerleyen ve kırılma bölgesinin numunenin alt veya üst bölgesinde olmasına göre adlandırılan standart bir kırılma karakteristiği görülmüştür.

5 katman cam elyaf kumaş içeren T14 numaralı test numunelerinde ise metal destek plakası bölgesinde, plakanın kompozit yapıdan bir parçayı sıyırarak koparmasıyla oluşan ve kırılma bölgesinin numunenin alt veya üst bölgesinde olmasına göre adlandırılan standart bir kırılma karakteristiği görülmüştür. T14 test numunelerinde gözlemlenen standart kırılma karakteristiği Şekil 5.5'te verilmiştir.



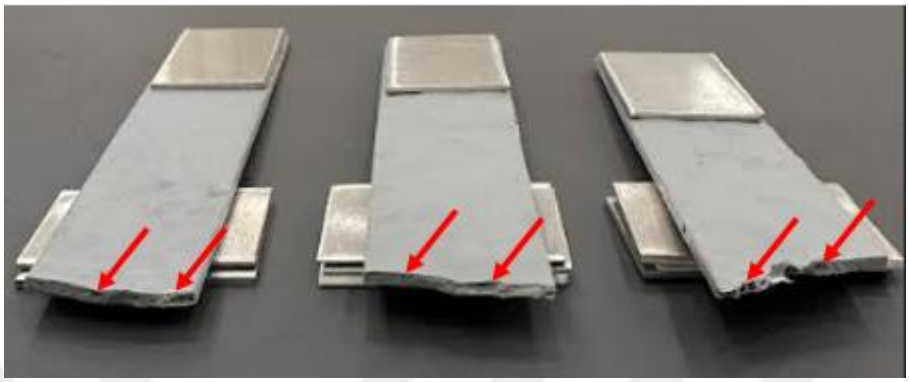
Şekil 5.5 ASTM D3039 standart kırılma karakteristiği [73]

Üretilen kompozit levhaların 2 mm kalınlığında ve farklı elyaf oranları içermesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, farklı sayıda kumaş katman ve PP matris içeren tüm test numuneleri 4.1 mm hadde açıklığında proses edilmiştir. Kullanılan cam elyaf kumaşın levhada kapladığı toplam hacim 0.12 mm ye karşılık gelmesine rağmen kumaş dokumasından kaynaklanan boşluklar nedeniyle 0.28 mm bir kalınlığa sahiptir. Maksimum elyaf takviye oranına sahip numune elde etmek amacıyla 5 katmandan fazla kumaş kullanıldığı durumda, kalıplanan kompozit yapının haddeleme öncesindeki kalınlığı hadde açıklığına göre çok daha kalın olduğundan haddeleme sırasında merdane hareketine bağlı olarak dağılmalarla karşılaşılmıştır. Ayrıca, üretilen en yüksek takviye oranına sahip 5 katman cam elyaf kumaş içeren T14 test numaralı numunelerde, kumaş boşluk oranına bağlı olarak levha yüzeylerinde az miktarda matris malzeme bulunmaktadır.

T14 test numaralı numunelerin çekme testi sırasında, metal destek plakalarının yapıştırıldığı yüzeylerdeki matris miktarının az olması ve içerdiği 5 katman cam elyaf kumaşın oluşturduğu çekme dayanımının, metal destek plakaları-numune arasındaki bölgede matris malzeme ve elyaf arasında oluşan arayüzeyin kesme dayanımından büyük olduğundan bu numunelerde metal destek plaka bölgesinde sıyrılarak oluşan kırılmalar görülmüştür.

Takviyesiz 2 mm kalınlığındaki T11 numaralı test numunelerinin ağırlığı 1740 g/m² ve çekme dayanımları ortalama 18 MPa olarak bulunmuştur. Üretilen levhaların ölçülen ağırlıkları ve hacimleri üzerinden yoğunlukları hesaplandığında yaklaşık 0.87 g/cm^3 olarak hesaplanmaktadır. Haddelenerek üretilen levhanın çekme

dayanımının ve yoğunluğunun beklenen değerden daha düşük bir seviyede olması yapı içerisinde boşluklar olduğunu göstermektedir. Çekme testi uygulanan T11 numaralı test numunelerinin kırılma arayüzeyleri incelendiğinde yapı içerisinde boşluklar gözlemlenmiştir.



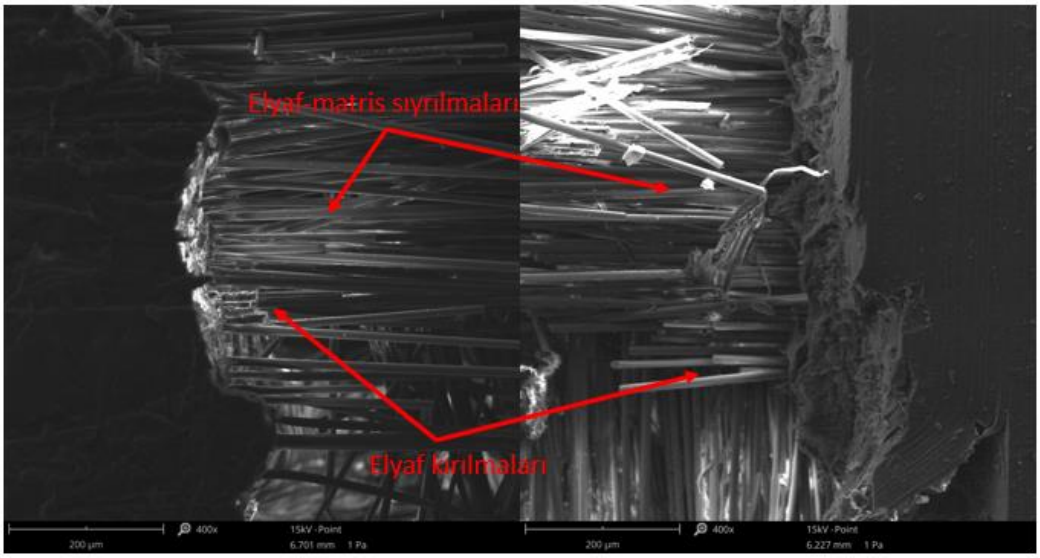
Şekil 5.6 T11 test numaralı takviyesiz PP levha kırılma arayüzeyleri

İçeriğinde hiçbir takviye bulunmayan PP malzemenin sıcak haddeleme ile konsolide edilmesinde, eriyik malzemenin yalnızca haddelenme sırasında kısa bir süre basınca maruz kalması sonrasında serbest halde soğutulması, yapıda eriyik fazdaki malzemenin çekilerek boşluklar oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, takviyesiz PP levhaların üretiminde sıcak haddeleme yönteminin kullanılmasının uygun olmadığı sonucunu göstermektedir.

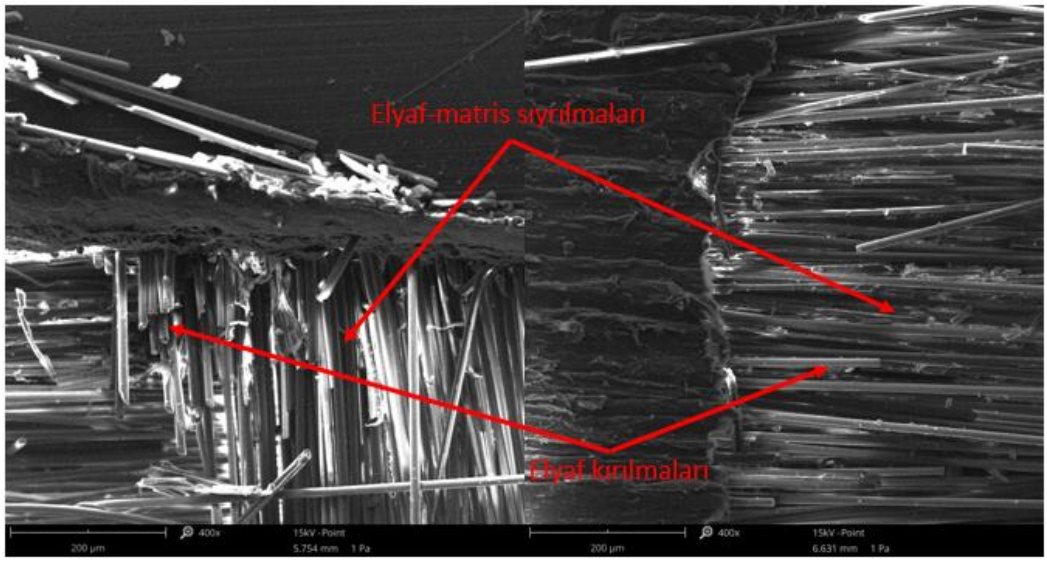
Takviyesiz PP levha üretiminin aksine, cam elyaf takviye içeren levhalarda soğuma sırasında yapının içeriğinde bulunan takviye, haddelenerek konsolide edilmiş elyaf-matris yapısında matrisin soğuma sırasında serbest halde hareketiyle boşluklar oluşturmasını engellemektedir. 230 °C, 0.035 m/s ve 1 kere haddeleme parametreleriyle üretilen T12, T13 ve T14 test numunelerinde yapıda belirli bir boşluk oluşumu gözlenmemiştir.

3 katman kumaş içeren T12 test numunelerinin ağırlıkları 2260 g/m² ve ortalama çekme dayanımları 125 MPa olarak elde edilirken, 4 katman kumaş içeren T13 test numulerinin ağırlıkları 2500 g/m² ve ortalama çekme dayanımları 154 MPa olarak elde edilmiştir. Ağırlıkta görülen yaklaşık %10'luk artışla birlikte, ortalama çekme dayanımı değerinde yaklaşık %23'lük bir artış görülmüştür. Kullanılan her bir cam elyaf katmanının geri dönüştürülmüş polipropilen ile konsolide edilmesi yaklaşık olarak 40 MPa'lık bir çekme dayanımı sağlamaktadır. Buna göre, 5 katman cam elyaf kumaş içeren T14 test numaraları numunelerde yaklaşık 200 MPa'lık bir

çekme dayanımı elde edilebileceği beklenmektedir. 5 katman cam elyaf kumaş içeren numunelerin çekme testlerinde, hazırlanan numunenin dik kesitinden bir kırılma sağlanarak çekme dayanım değerlerinin görülebilmesi için çekme testi sırasında numunenin çekme test cihazı çenelerine bağlanan yüzey alanının, bu seviyede bir gerilime dayanabilecek şekilde artırılması gerekmektedir.

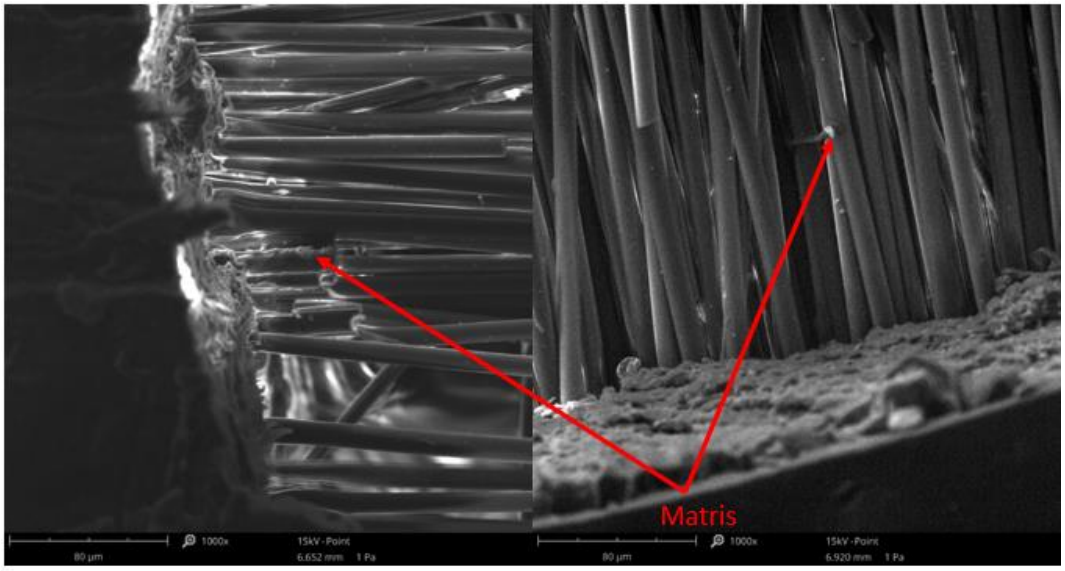


Şekil 5.7 T12 test numuneleri SEM görüntüleri, 400x büyütme

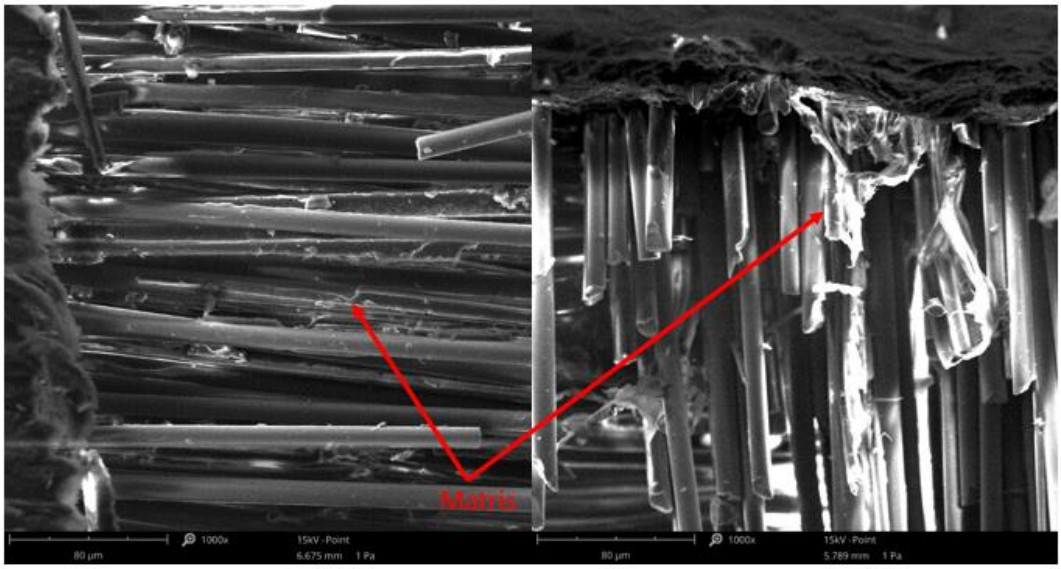


Şekil 5.8 T13 test numuneleri SEM görüntüleri, 400x büyütme

Çekme testi sonucunda elde edilen kırılma yüzeylerinin SEM altındaki görüntüleri incelendiğinde 400 kat büyütme altında, T13 numaralı test numunelerindeki elyaf kırılma miktarının T12 numaralı test numunelerine göre daha fazla olduğu görülmektedir.



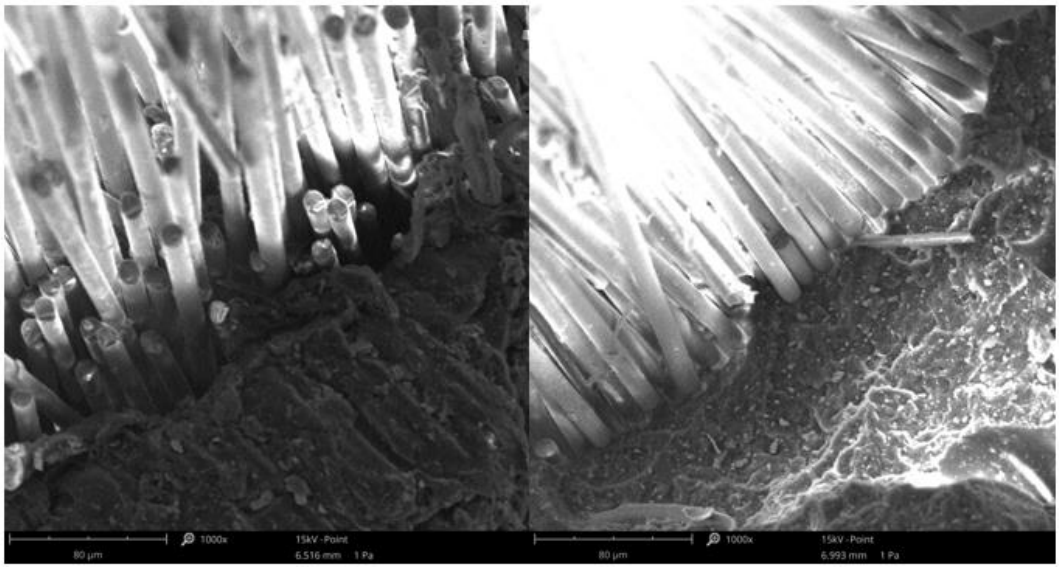
Şekil 5.9 T12 test numuneleri SEM görüntüleri, 1000x büyütme



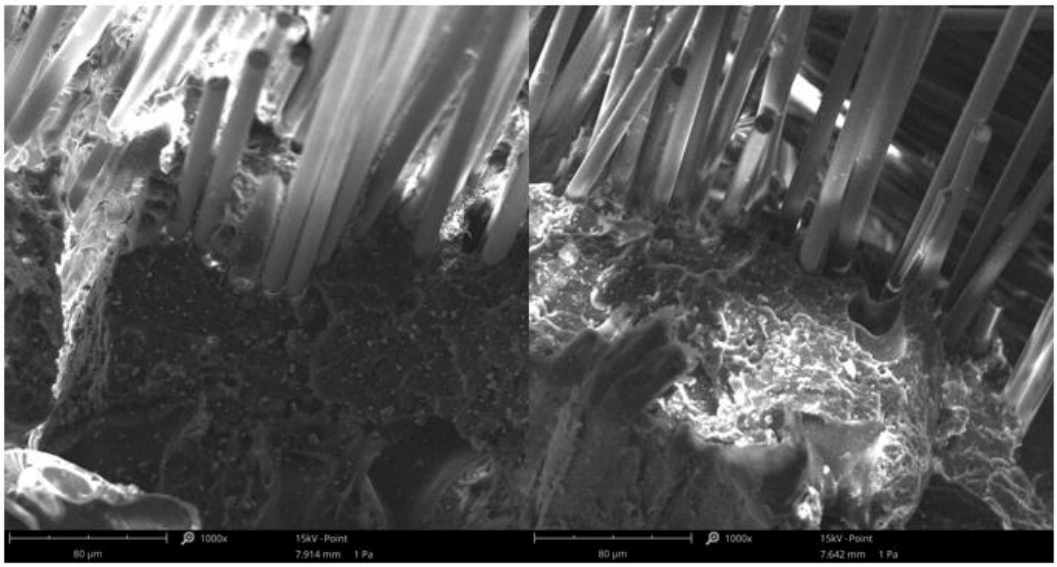
Şekil 5.10 T13 test numuneleri SEM görüntüleri, 1000x büyütme

Kırılma yüzeyleri 1000 kat büyütme altında incelendiğinde elyaf liflerinin yüzeyleri daha detaylı bir şekilde görülebilmektir. T13 numaralı test numunelerinde kırılan veya sıyrılan elyaflar fark etmeksizin elyaf lifleri üzerine yapışan matris miktarı daha yüksek miktarda görülmektedir.

T12 ve T13 test numuneleri karşılaştırıldığında aynı kalınlık içerisinde daha fazla katman cam elyaf kumaş bulunduran T13 test numunelerinde matris sıyrılması göstermeden kırılan elyaf miktarı daha fazla görülmektedir. Ayrıca, kırılan veya sıyrılan elyaf yüzeylerine yapışmış matris yapısına daha fazla oranda rastlanmaktadır.



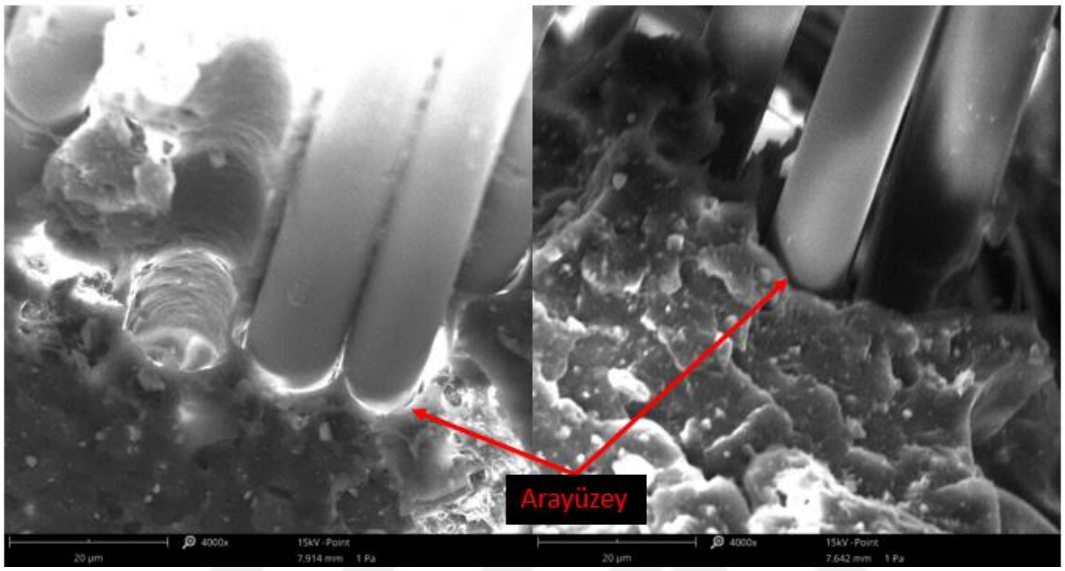
Şekil 5.11 T12 test numuneleri arayüzey SEM görüntüleri, 1000x büyütme



Şekil 5.12 T13 test numuneleri arayüzey SEM görüntüleri, 1000x büyütme

Şekil 5.11'deki SEM görüntüleri incelendiğinde, T12 numaralı test numunelerinde matris malzemenin filament liflerinin arasına infiltre olmadığı ve buna bağlı olarak elyaf kırılmalarının oluşmadığı veya yalnızca filamentin dış bölgelerinde bulunan liflerde elyaf-matris arayüzeyi oluşturarak elyaf kırılmalarının meydana geldiği görülmektedir. Şekil 5.12'deki T13 numaralı test numunelerinde ise T12 numaralı test numunelerine göre matris malzemenin filament liflerinin aralarına daha iyi nüfuz ettiği görülmektedir. Matris malzemenin filament liflerinin aralarını daha yüksek oranda doldurması, lifler arasındaki mesafenin açılmasını ve filamentlerin iç bölgelerinde bulunan liflerde de kırılmalar oluşmasını sağlamaktadır.

T12 ve T13 numaralı test numuneleri incelendiğinde, sıcak haddeleme yöntemi ile aynı hadde açıklığında üretilen ve içeriğinde farklı sayıda cam elyaf kumaş katman bulunan levhalarda, elyaf oranındaki artış sıcak haddeleme prosesi sırasında eriyik matrisin serbest hareketini engellemesiyle birlikte, kalıp boşluklarından akma eğilimi yerine cam elyaf takviye içerisine daha iyi infiltre olmasını sağlamaktadır.



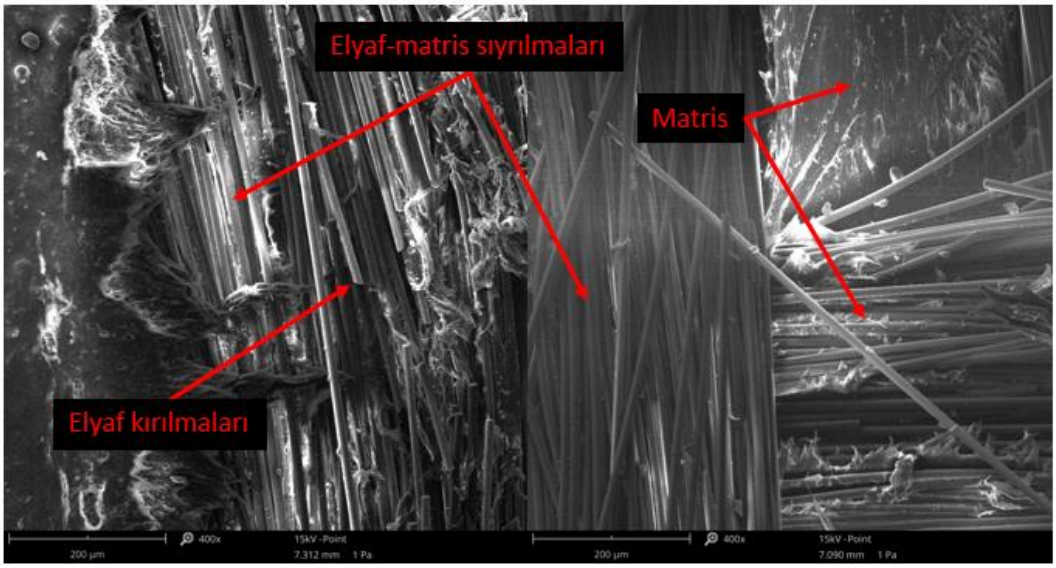
Şekil 5.13 Elyaf-matris arayüzey SEM görüntüleri, 4000x büyütme

Şekil 5.13'teki 4000 büyütme altında elyaf-matris arayüzeyleri incelendiğinde, matrisin elyafları ıslattığı bölgelerde dahi iyi bir arayüzey oluşmadığı görülmektedir. Bu durum, kırılma yüzeylerinin çıplak gözle incelenmesi sonucunda, elyaf-matris sıyrılmaları meydana geldiği yorumunu destekler niteliktedir. Cam elyaf lifleri ve polipropilen arasında oluşan düşük arayüzey kalitesine bağlı olarak, matrisin çepeçevre sardığı liflerde arayüzey alanının artışıyla birlikte yeterli yük aktarımını sağlanarak elyaf kırılmalarına yol açtığı gözlemlenmiştir. Elyaf liflerinde matrisin nüfuz etmediği yüzeylerin artışı, bu liflerde elyaf kırılmalarına yetecek miktarda yük akışını sağlayamamakla birlikte, elyaf-matris sıyrılmalarına neden olmaktadır.

Kompozit yapı içerisinde, esas yük taşıma görevini üstlenen elyaf miktarının artmasına bağlı olarak, çekme dayanımının artması beklenmektedir. 3 katman ve 4 katman kumaş içeren test numuneleri karşılaştırıldığında, kompozit yapıda ağırlıkça %7'lik (hacimce %6) elyaf artışıyla numunelerde görülen ortalama çekme dayanımında %23'lük artış gözlemlenmiştir. Sabit levha kalınlığında, kumaş katman sayısının 3'ten 4'e çıkarılmasına bağlı olarak oluşan %33'lük elyaf

artışında, tamamıyla konsolide olmuş elyaf-matris yapısında matris oranının dayanıma etkisi çok düşük kalacağından en az %33'lük bir çekme dayanımı artışı beklenmektedir. 4 katman kumaş içeren numunelerde, 3 katman kumaş içeren numunelerden daha fazla elyaf ıslatma performansı ve bununla birlikte kırılma yüzeylerinde daha fazla miktarda elyaf kırılması görülse de, cam elyaf ve geri dönüştürülmüş polipropilen arasında oluşan düşük kalitedeki elyaf-matris arayüzeyine bağlı olarak, kompozit yapı içerisindeki tüm lifler göz önüne alındığında elyaf sıyrılmalarının kırılmalardan çok daha yüksek oranda olması nedeniyle ortalama çekme dayanımında yalnızca %23'lük bir artış gözlemlenmiştir.

Sabit numune kalınlığında, cam elyaf kumaş katmanı miktarındaki artış, yapıdaki matris miktarının azalmasına neden olacağından, haddeleme sırasında matrisin tüm yapıdaki boşlukları dolduramaması veya numune yüzeylerinde yeterli miktarda birikerek elyaf takviyenin korunmasını sağlayamamaktadır.



Şekil 5.14 T14 test numuneleri SEM görüntüleri, 400x büyütme

T14 numaralı test numunelerine ait metal destek plakası-numune birleşiminden ayrılma ile oluşan kırılma arayüzlerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 5.14'te verilmiştir. Numune yüzeyindeki matris, metal plaka ile birlikte ayrılırken kumaş dokumasından kaynaklanan daha derin bölgelerde yoğun matris birikimleri ve elyaflar üzerine yapışmış matris malzeme görülmektedir. Daha sığ bölgelerde ise elyaflardan matris malzeme sıyrılarak ayrılmıştır.

6
SONUÇ

Sıcak haddeleme prosesi işlem parametreleri olarak sıcaklık, haddeleme hızı ve soğutma belirlenmiştir. Parametrelerin optimizasyonu için Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak optimum parametreler saptanmıştır. Elde edilen sinyal/gürültü oranlarına göre optimum parametreler 230 °C sıcaklık, 0.035 m/s haddeleme hızı ve 1 kere haddeleme olarak belirlenmiştir.

Sıcak haddeleme prosesinde kompozit yapının ısıtılacağı sıcaklık olarak matrisin dayanabileceği oranda sıcaklık artışının, eriyik viskozitesini artırarak matrisin elyafa nüfuziyetini artıracağı düşüncesine paralel olarak, seviyeler arasında en yüksek olan 230 °C proses sıcaklığında en yüksek sinyal/gürültü oranı elde edilmiştir.

Haddeleme hızındaki düşüşle birlikte, hadde merdanesinin kompozit yapının belirli bir bölgesinde uygulayacağı basınç süresi artacağından, eriyik matrisin yapı içerisindeki boşlukları daha iyi doldurarak ıslatma verimini artıracağı gözlemlenmiştir.

1 kere haddeleme sonrasında, yapının tekrar haddelenmesi veya su ile hızla soğutulması çekme dayanım sonuçlarının daha geniş bir aralığa yayılmasına neden olmaktadır. 2 kere haddeleme veya 1 kere haddeleme sonrası su ile soğutma, sıcak haddeleme prosesi için tekrarlanabilir ve stabil sonuçlar vermemiştir.

Su ile hızlı soğutma yapılan numunelerde, matrisin hızla soğuması nedeniyle üretilen levha yüzeylerinde dalgalanma ve boşluklar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bu numunelerde düşük çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir.

2 mm kalınlığındaki takviyesiz geri dönüştürülmüş polipropilen levhaların ağırlığı 1740 g/m² ve çekme dayanımları ortalama 18 MPa olarak elde edilmiştir. Levha ağırlığı ve çekme dayanımındaki bu düşük sonuçlar, elde edilen takviyesiz polipropilen levhanın proses sonrası soğuma sırasında yapısında boşluklar

oluşmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, sıcak haddeleme prosesinin takviyesiz polipropilen levha üretimine uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

230 °C, 0.035 m/s ve 1 kere haddeleme proses parametreleriyle üretilen, 3 katman 300 g/m² ağırlığında düz dokuma cam elyaf kumaş ve ağırlıkça %55 geri dönüştürülmüş polipropilen içeren 2 mm kalınlığındaki levhaların ağırlığı 2260 g/m² ve ortalama çekme dayanımı 125 MPa olarak elde edilmiştir.

4 katman 300 g/m² ağırlığında düz dokuma cam elyaf kumaş ve ağırlıkça %48 geri dönüştürülmüş polipropilen içeren 2 mm kalınlığındaki levhaların ağırlığı 2500 g/m² ve ortalama çekme dayanımı 154 MPa olarak elde edilmiştir.

Yapıya bir katman kumaş eklenmesiyle görülen yaklaşık %10'luk ağırlık artışıyla birlikte, ortalama çekme dayanımı değerinde yaklaşık %23'lük bir artış gözlemlenmiştir.

Kırılma yüzeyleri SEM altında mikro boyutta incelendiğinde 4 katman kumaş içeren numunelerde, 3 katman kumaş içeren numunelerden daha fazla miktarda elyaf kırılması ve elyaf yüzeylerine yapışmış halde olan daha fazla matris malzeme gözlemlenmiştir. Sıcak haddeleme prosesiyle aynı hadde açıklığında üretilecek levhalarda, elyaf oranının artması matrisin elyaf lifleri arasına nüfuziyetini artırarak elyaf-matris arayüzey miktarında artışa neden olduğu sonucuna varılmaktadır.

Çekme testi sonucu elde edilen kırılma yüzeyleri çıplak gözle incelendiğinde, tüm numunelerde yoğunlukla elyafların matristen sıyrıldığı gözlemlenmektedir. Numunelerin SEM ile incelenmesinde de bu duruma paralel olarak düşük kalitede elyaf-matris arayüzeyleri ve elyaf kırılmalarından çok daha yüksek oranda elyaf sıyrılmaları görülmüştür. Sabit levha kalınlığında 4 katman kumaş içeren numunelerde, 3 katman kumaş içeren numunelere kıyasla daha fazla miktarda elyaf kırılması görülse de, tüm yapı içerisindeki elyaf sıyrılma miktarının elyaf kırılmalarından çok daha yüksek oranda olması yapıdaki %33'lük elyaf artışına karşın ortalama çekme dayanımında yalnızca %23'lük artış gözlemlenmiştir.

KAYNAKÇA

[1] Xavier, S. F. (2022). Introduction: Technical Background. Thermoplastic Polymer Composites: Processing, Properties, Performance, Applications and Recyclability, 1-99.

[2] Kizaki, T., Zhang, J., Yao, Q., & Yanagimoto, J. (2020). Continuous manufacturing of CFRP sheets by rolling for rapid fabrication of long CFRP products. Composites Part B: Engineering, 189, 107896.

[3] Kwon, D.-J., Kim, N.-S.-R., Jang, Y.-J., Choi, H. H., Kim, K., Kim, G.-H., Nam, S. Y. (2021). Impacts of thermoplastics content on mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites. Composites Part B: Engineering, 216, 108859.

[4] Henninger, F., Friedrich, K. (2004). Production of textile reinforced thermoplastic profiles by roll forming. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 35(5), 573–583.

[5] Tatsuno, D., Yoneyama, T., Kawamoto, K., Okamoto, M. (2017). Effect of Cooling Rate on the Mechanical Strength of Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Sheets in Press Forming. Journal of Materials Engineering and Performance, 26(7), 3482–3488.

[6] Borazghi H, Trudel-Boucher D, Denault J, et al. (2008). Continuous consolidation of polypropylene/glass fiber commingled fabric. Polymers & Polymer Composites, Vol. 16, No. 1.

[7] Kim, M., Choe, J., Lim, J. W., & Lee, D. G. (2015). Manufacturing of the carbon/phenol composite bipolar plates for PEMFC with continuous hot rolling process. Composite Structures, 132, 1122–1128.

[8] Bernatas, R., Dagreou, S., Despax-Ferreres, A., & Barasinski, A. (2021). Recycling of fiber reinforced composites with a focus on thermoplastic composites. Cleaner Engineering and Technology, 5, 100272.

[9] Chen, T., Mansfield, C. D., Ju, L., & Baird, D. G. (2020). The influence of mechanical recycling on the properties of thermotropic liquid crystalline polymer and long glass fiber reinforced polypropylene. Composites Part B: Engineering, 200, 108316.

[10] Sam-Daliri, O., Ghabezi, P., Steinbach, J., Flanagan, T., Finnegan, W., Mitchell, S., & Harrison, N. (2023). Experimental study on mechanical properties of material extrusion additive manufactured parts from recycled glass fibre-reinforced polypropylene composite. Composites Science and Technology, 241, 110125.

[11] Cech, V., Palesch, E., & Lukes, J. (2013). The glass fiber–polymer matrix interface/interphase characterized by nanoscale imaging techniques. Composites Science and Technology, 83, 22-26.

[12] Dang, Z. M., Yuan, J. K., Zha, J. W., Zhou, T., Li, S. T., & Hu, G. H. (2012). Fundamentals, processes and applications of high-permittivity polymer–matrix composites. Progress in materials science, 57(4), 660-723.

[13] May, M., Rupakula, G. D., & Matura, P. (2020). Non-polymer-matrix composite materials for space applications. Composites Part C: Open Access, 3, 100057.

[14] Alves, F. L., Baptista, A. M., & Marques, A. T. (2016). Metal and ceramic matrix composites in aerospace engineering. In Advanced composite materials for aerospace engineering (pp. 59-99). Woodhead Publishing.

[15] Prashanth, S., Subbaya, K. M., Nithin, K., & Sachhidananda, S. (2017). Fiber reinforced composites-a review. J. Mater. Sci. Eng, 6(03), 2-6.

[16] Wang, Y., & Monetta, T. (2023). Systematic study of preparation technology, microstructure characteristics and mechanical behaviors for SiC particle-reinforced metal matrix composites. Journal of Materials Research and Technology.

[17] Pastuszak, P. D., & Muc, A. (2013). Application of composite materials in modern constructions. Key engineering materials, 542, 119-129.

[18] Nemessanyi, C. (2023). Brief History of Fiber Reinforced Polymers as Structural Material. Periodica Polytechnica Architecture, 54(3), 193-206.

[19] Pham, H. Q., & Marks, M. J. (2004). Epoxy resins. In Encyclopedia of polymer science and technology. John Wiley & Sons.

[20] Ali, M. S., Al-Shukri, A. A., Maghami, M. R., & Gomes, C. (2021). Nano and bio-composites and their applications: A review. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering(Vol.1067,No.1,p.012093). IOP Publishing.

[21] Koniuszewska, A. G., & Kaczmar, J. W. (2016). Application of polymer based composite materials in transportation. Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology, 32(1), 1-24.

[22] Mallick, P. K. (2012). Advanced materials for automotive applications: An overview. Advanced materials in automotive engineering, 5-27.

[23] Oladele, I. O., Omotosho, T. F., & Adediran, A. A. (2020). Polymer-based composites: an indispensable material for present and future applications. International Journal of Polymer Science, 2020(1), 8834518.

[24] Chawla, K. K. (2012). Composite materials: science and engineering (Vol. 1). Springer.

[25] Balasubramanian, M. (2014). Composite materials and processing (Vol. 711). Boca Raton: CRC press.

[26] Hamidon, M. H., Sultan, M. T. H., & Ariffin, A. H. (2019). Investigation of mechanical testing on hybrid composite materials. In Failure analysis in biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites (pp. 133-156). Woodhead Publishing.

[27] Berthelot J.-M., (1999). Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis, Springer, New York.

[28] Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2020). A review of natural fiber composites: Properties, modification and processing techniques, characterization, applications. Journal of Materials Science, 55(3), 829-892.

[29] Carlsson, L. A., Adams, D. F., & Pipes, R. B. (2013). Basic Experimental Characterization of Polymer Matrix Composite Materials. Polymer Reviews, 53(2), 277–302.

[30] Chowdhury, I.R., Summerscales, J. (2024). Woven Fabrics for Composite Reinforcement: A Review. J. Compos. Sci., 8, 280.

[31] Begum, M.S.; Milašius, R. (2022). Factors of Weave Estimation and the Effect of Weave Structure on Fabric Properties: A Review. Fibers, 10, 74.

[32] Matinlinna, J. P. (2012). E-Glass Fiber Reinforced Composites in Dental Applications. Silicon.

[33] Sathishkumar, T., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 33(13), 1258–1275.

[34] Wang, R. M., Zheng, S. R., & Zheng, Y. G. (2011). Polymer matrix composites and technology. Elsevier.

[35] Morales Ibarra, R. (2014). Carbon fiber recovery using subcritical and supercritical fluids for chemical recycling of thermoset composite materials (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

[36] Yao, S.-S., Jin, F.-L., Rhee, K. Y., Hui, D., & Park, S.-J. (2018). Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: A review. Composites Part B: Engineering, 142, 241–250.

[37] Nordin, N. A., Yussof, F. M., Kasolang, S., Salleh, Z., & Ahmad, M. A. (2013). Wear Rate of Natural Fibre: Long Kenaf Composite. Procedia Engineering, 68, 145–151.

[38] Rajak, D., Pagar, D., Menezes, P., & Linul, E. (2019). Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. Polymers, 11(10), 1667.

[39] Advani, S. G., & Hsiao, K. T. (Eds.). (2012). Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs). Elsevier.

[40] Kamal, M. R., & Isayev, A. I. (Eds.). (2012). Injection molding: Technology and fundamentals. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

[41] Liu, S.-J. (2012). Injection molding in polymer matrix composites. Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs), 15–46.

[42] Goodship, V. (2015). Injection molding of thermoplastics. Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality: Structural Composites, Injection Molding, and 3D Printing, 103.

[43] Morelli, C. L., Pouzada, A. S., & Sousa, J. A. (2009). Influence of hybridization of glass fiber and talc on the mechanical performance of polypropylene composites. Journal of Applied Polymer Science, 114(6), 3592–3601.

[44] Mlekusch, B., Lehner, E. A., & Geymayer, W. (1999). Fibre orientation in short-fibre-reinforced thermoplastics I. Contrast enhancement for image analysis. Composites science and technology, 59(4), 543-545.

[45] Khosravani, M. R. (2012). Composite materials manufacturing processes. Applied mechanics and materials, 110, 1361-1367.

[46] Kim, H. S., & Chang, S. H. (2019). Simulation of compression moulding process for long-fibre reinforced thermoset composites considering fibre bending. Composite Structures, 230, 111514.

[47] Jaafar, J., Siregar, J. P., Tezara, C., Hamdan, M. H. M., & Rihayat, T. (2019). A review of important considerations in the compression molding process of short natural fiber composites. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 105, 3437-3450.

[48] Lautenschläger, M. I., Mayer, L., Gebauer, J., Weidenmann, K. A., Henning, F., & Elsner, P. (2018). Comparison of filler-dependent mechanical properties of jute fiber reinforced sheet and bulk molding compound. Composite Structures, 203, 960-967.

[49] Henning, F., Ernst, H., & Brüssel, R. (2005). LFTs for automotive applications. Reinforced plastics, 49(2), 24-33.

[50] Ning, H., Lu, N., Hassen, A. A., Chawla, K., Selim, M., & Pillay, S. (2020). A review of Long fibre thermoplastic (LFT) composites. International Materials Reviews, 65(3), 164-188.

[51] Kim, Y., & Park, O. O. (2020). Effect of fiber length on mechanical properties of injection molded long-fiber-reinforced thermoplastics. Macromolecular Research, 28, 433-444.

[52] Mathijsen, D. (2019). Long fiber thermoplastics are a key technology in expanding existing markets for composites. Reinforced plastics, 63(5), 267-272.

[53] Park, C. H., & Lee, W. I. (2012). Compression molding in polymer matrix composites. In Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs) (pp. 47-94). Woodhead Publishing.

[54] Tatara, R. A. (2024). Compression molding. In Applied plastics engineering handbook (pp. 389-424). William Andrew Publishing.

[55] Li, Y., Lin, Z., Jiang, A., & Chen, G. (2004). Experimental study of glass-fiber mat thermoplastic material impact properties and lightweight automobile body analysis. Materials & Design, 25(7), 579–585.

[56] Akkerman, R., & Haanappel, S. P. (2015). Thermoplastic composites manufacturing by thermoforming. In Advances in composites manufacturing and process design (pp. 111-129). Woodhead Publishing.

[57] Sin, L. T., & Tueen, B. S. (2019). Processing of Poly(Lactic Acid). Polylactic Acid, 307–324.

[58] Pham, X. T., Bates, P., & Chesney, A. (2005). Modeling of thermoforming of low-density glass mat thermoplastic. Journal of reinforced plastics and composites, 24(3), 287-298.

[59] Wang, P., Hamila, N., & Boisse, P. (2013). Thermoforming simulation of multilayer composites with continuous fibres and thermoplastic matrix. Composites Part B: Engineering, 52, 127–136.

[60] Mack, J., & Schledjewski, R. (2012). Filament winding process in thermoplastics. In Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs) (pp. 182-208). Woodhead Publishing.

[61] Ahmed, F., Joshi, S. C., & Lam, Y. C. (2004). Three-Dimensional FE–NCV Modeling of Thermoplastic Composites Pultrusion. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 17(5), 447–462.

[62] Minchenkov, K., Vedernikov, A., Safonov, A., & Akhatov, I. (2021). Thermoplastic Pultrusion: A Review. Polymers, 13(2), 180.

[63] Mazumdar, S. K. (2009), 'Manufacturing techniques'. In Composites manufacturing: Materials, product, and process engineering, CRC Press, USA, Chapter 6, pp. 1–135.

[64] Xavier, S. F. (2022). Long Fiber Reinforced Composites. Thermoplastic Polymer Composites: Processing, Properties, Performance, Applications and Recyclability, 369-477.

[65] Khalifa, A. B., Zidi, M., & Abdelwahed, L. (2012). Mechanical characterization of glass/vinylester ±55° filament wound pipes by acoustic emission under axial monotonic loading. Comptes Rendus Mécanique, 340(6), 453–460.

[66] Park, S. J., & Seo, M. K. (2011). Interface science and composites (Vol. 18). Academic Press.

[67] Várdai, R., Lummerstorfer, T., Pretschuh, C., Jerabek, M., Gahleitner, M., Faludi, G., & Pukánszky, B. (2020). Comparative study of fiber reinforced PP composites: Effect of fiber type, coupling and failure mechanisms. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 133, 105895.

[68] Etcheverry, M., & Barbosa, S. E. (2012). Glass fiber reinforced polypropylene mechanical properties enhancement by adhesion improvement. Materials, 5(6), 1084-1113.

[69] Yang, C., Wang, G., Zhao, J., Zhao, G., & Zhang, A. (2021). Lightweight and strong glass fiber reinforced polypropylene composite foams achieved by mold-opening microcellular injection molding. Journal of Materials Research and Technology, 14, 2920-2931.

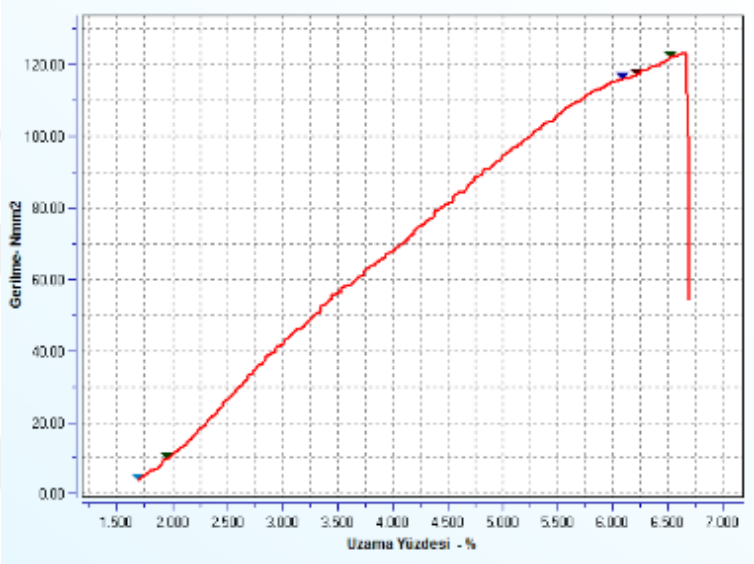
[70] Barbosa, L. G., Piaia, M., & Ceni, G. H. (2017). Analysis of impact and tensile properties of recycled polypropylene. Int. J. Mater. Eng, 7(6), 117-120.

[71] Anandakumar, P., Timmaraju, M. V., & Velmurugan, R. (2021). Development of efficient short/continuous fiber thermoplastic composite automobile suspension upper control arm. Materials Today: Proceedings, 39, 1187-1191.

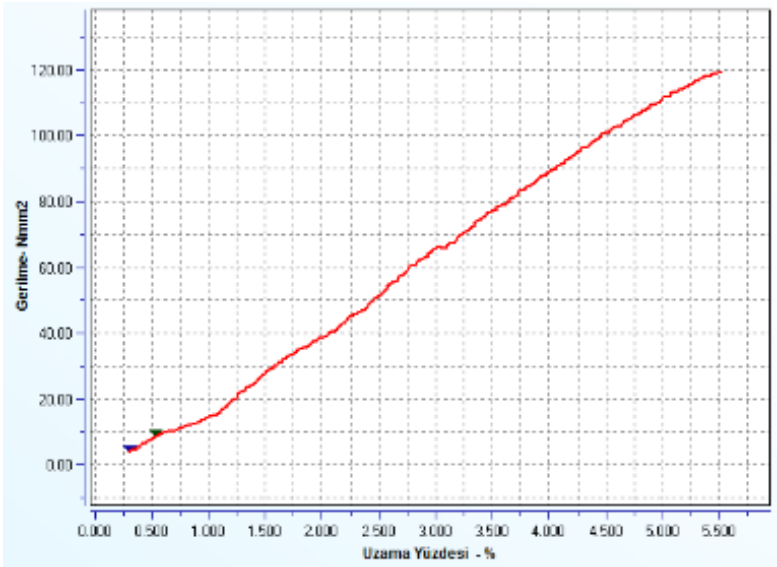
[72] Kutz, M. (Ed.). (2011). Applied plastics engineering handbook: processing and materials. William Andrew.

[73] ASTM, A. M. (2017). ASTM D3039-standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. Book ASTM D3039-standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials (ASTM International, 2017), 360.

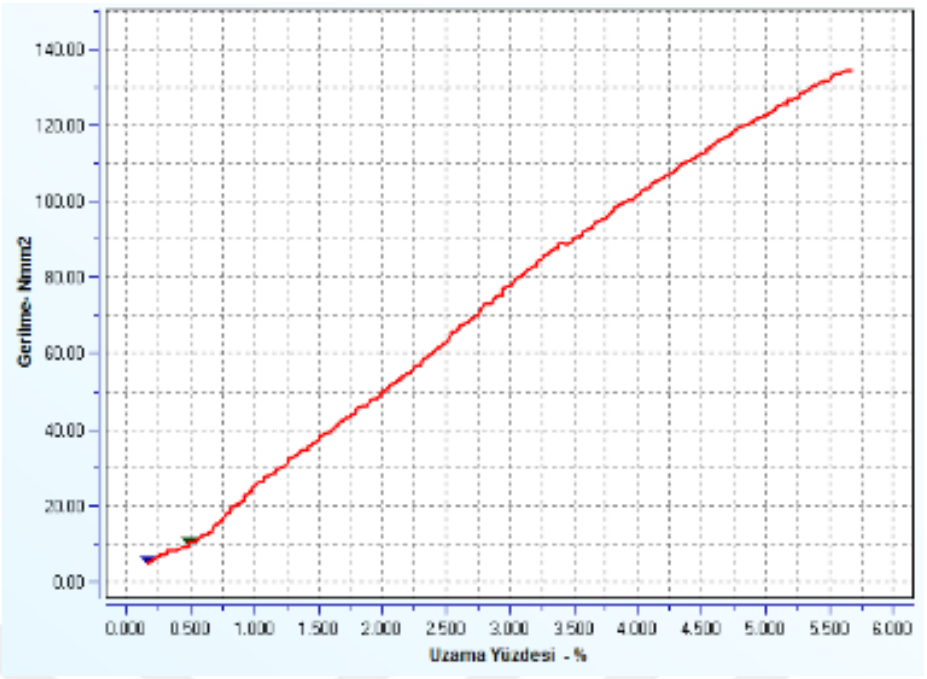
A
ÇEKME TESTİ GERİLME GERİNİM GRAFİKLERİ



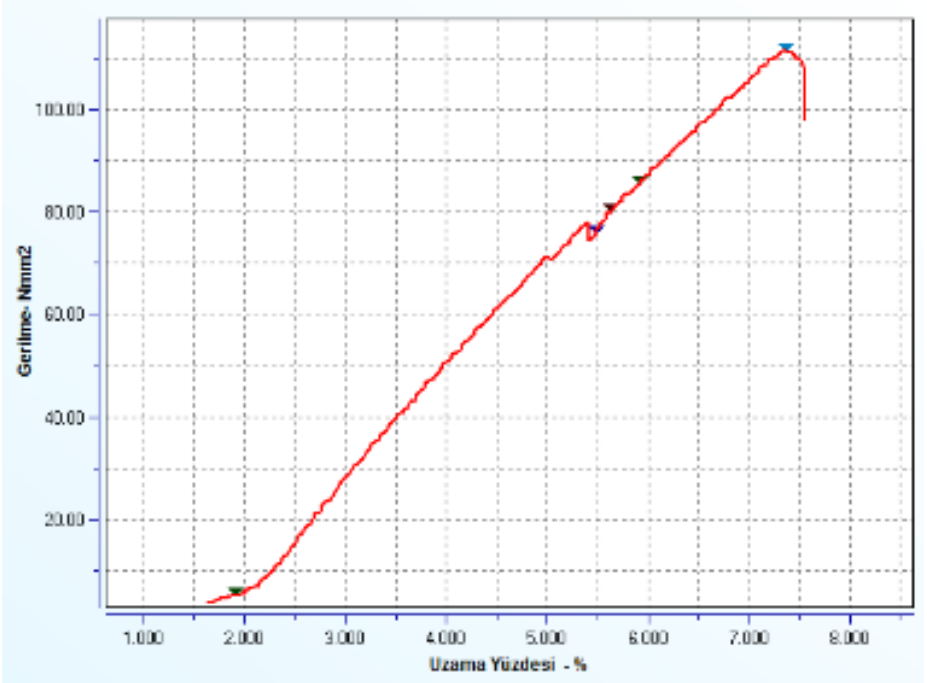
Şekil A.1 T1, N1 Gerilme-Gerinim Grafiği



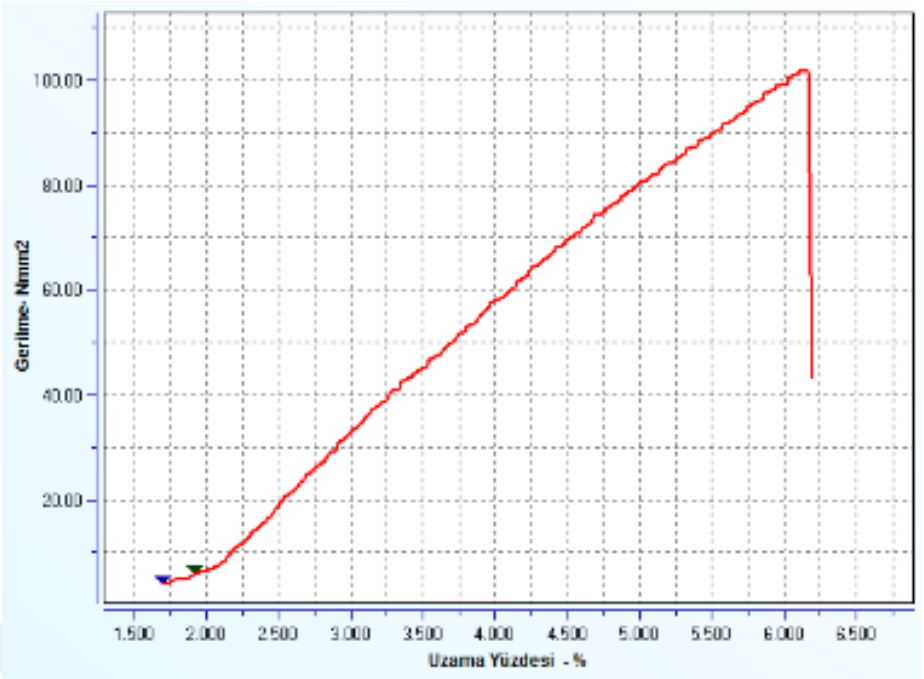
Şekil A.2 T1, N2 Gerilme-Gerinim Grafiği



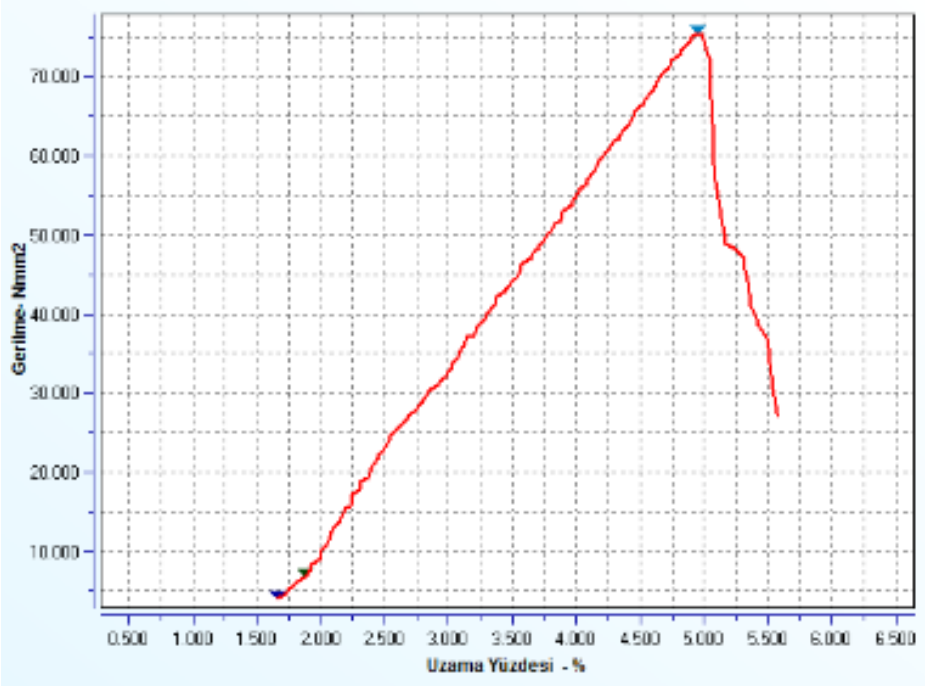
Şekil A.3 T1, N3 Gerilme-Gerinim Grafiği



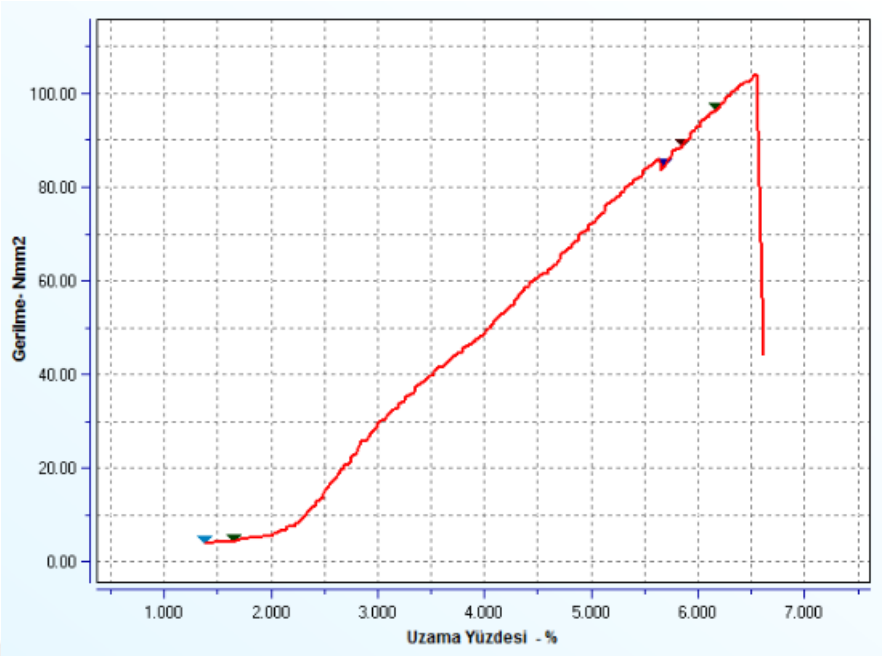
Şekil A.4 T2, N1 Gerilme-Gerinim Grafiği



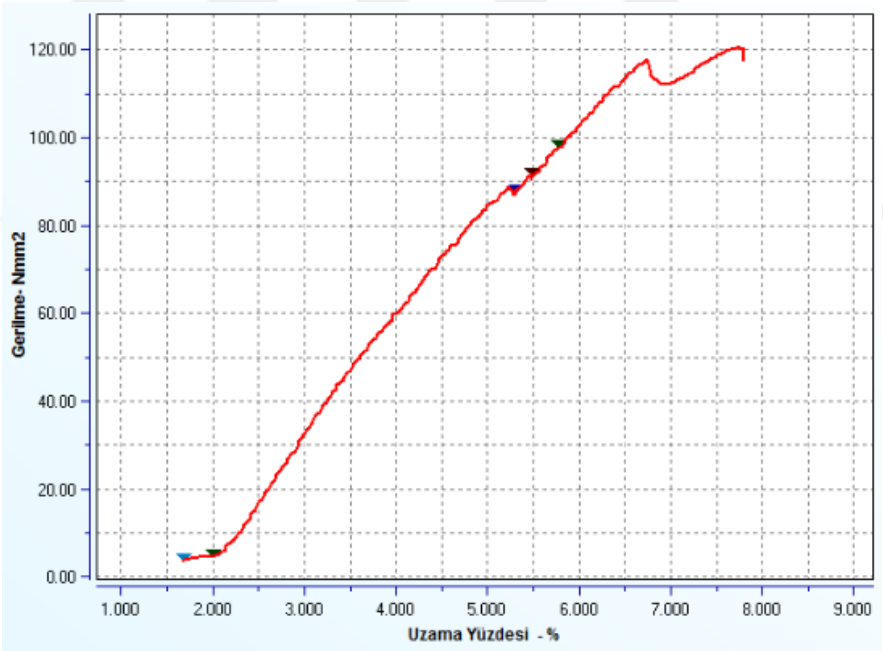
Şekil A.5 T2, N2 Gerilme-Gerinim Grafiği



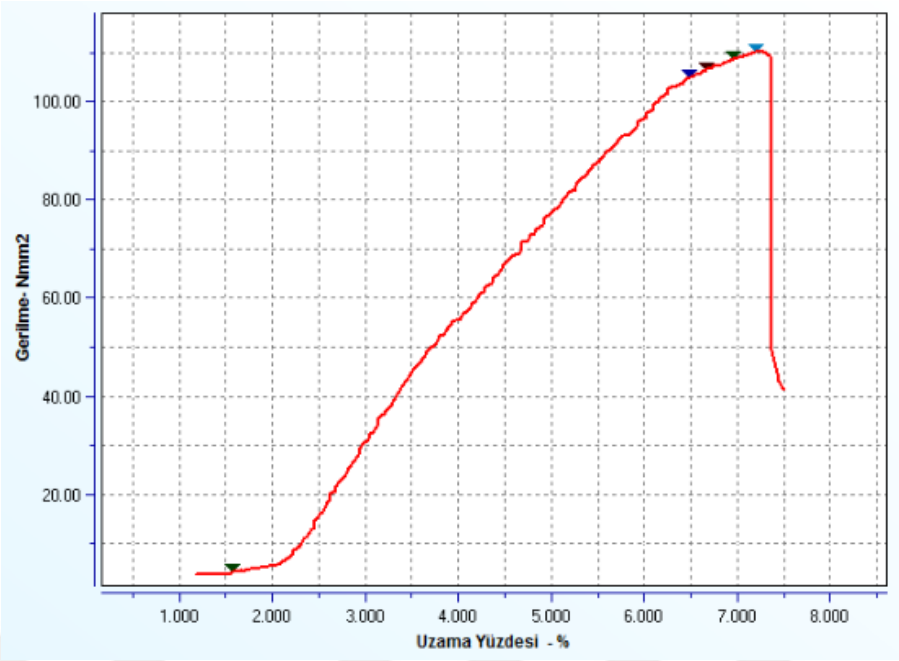
Şekil A.6 T2, N3 Gerilme-Gerinim Grafiği



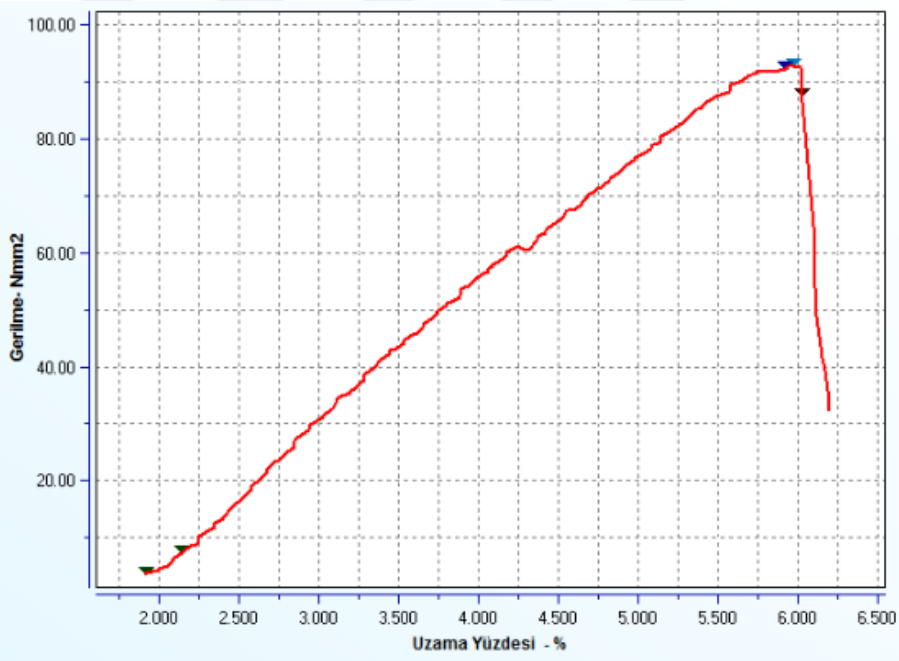
Şekil A.7 T3, N1 Gerilme-Gerinim Grafiği



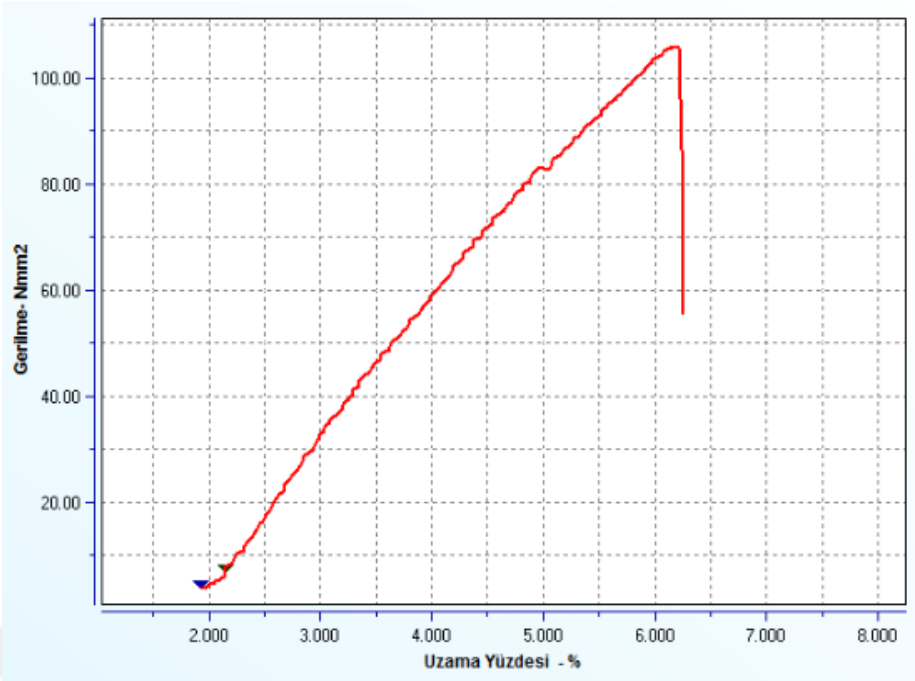
Şekil A.8 T3, N2 Gerilme-Gerinim Grafiği



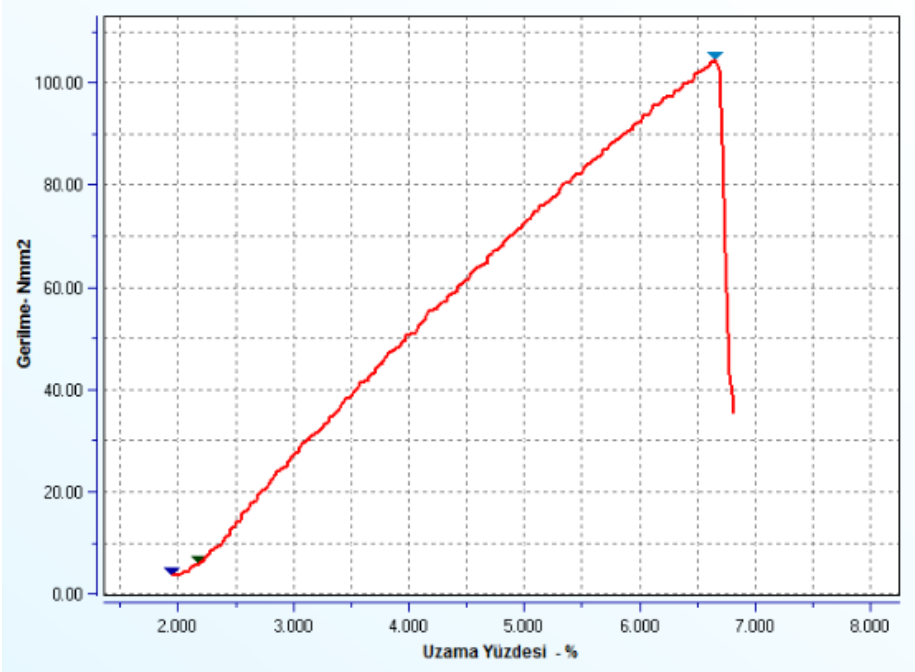
Şekil A.9 T3, N3 Gerilme-Gerinim Grafiği



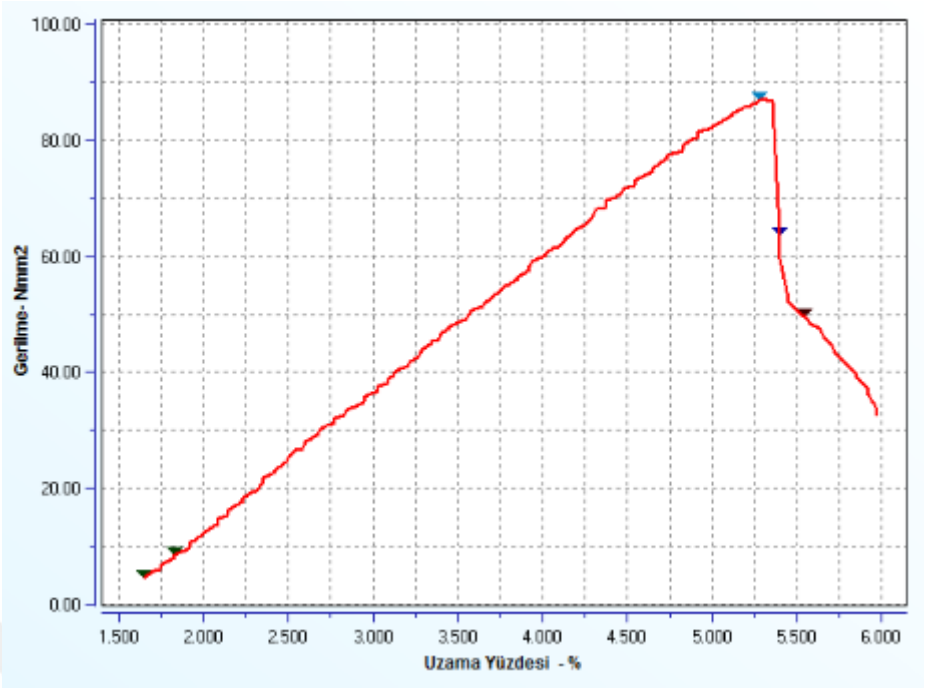
Şekil A.10 T4, N1 Gerilme-Gerinim Grafiği



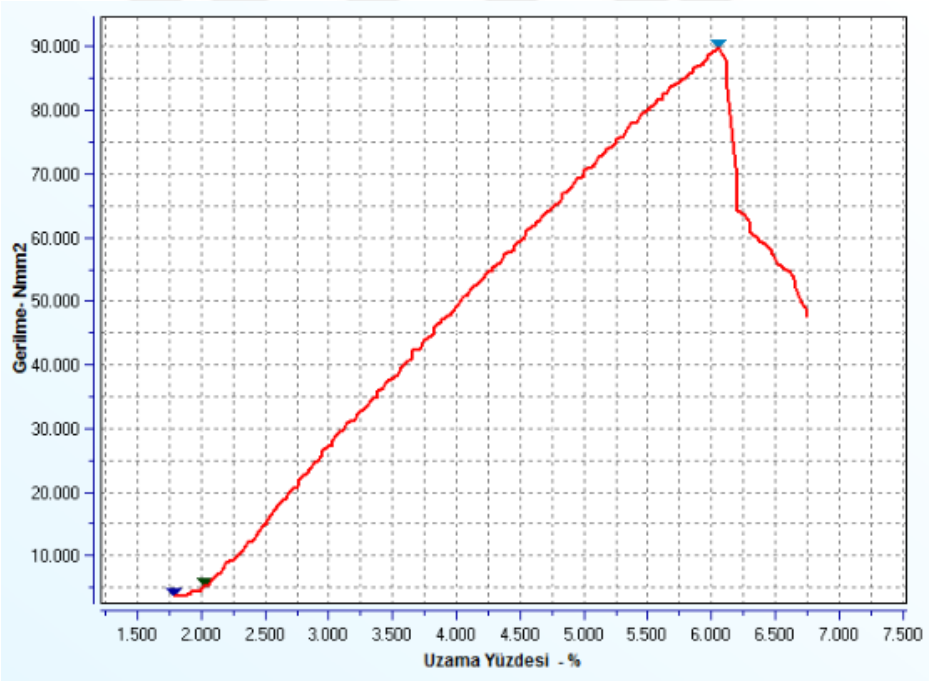
Şekil A.11 T4, N2 Gerilme-Gerinim Grafiği



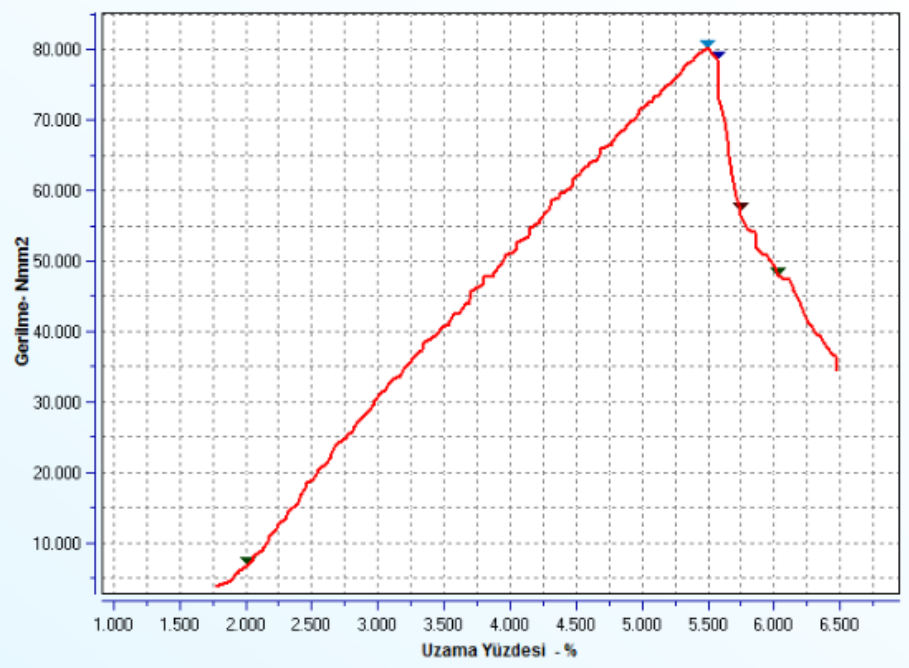
Şekil A.12 T4, N3 Gerilme-Gerinim Grafiği



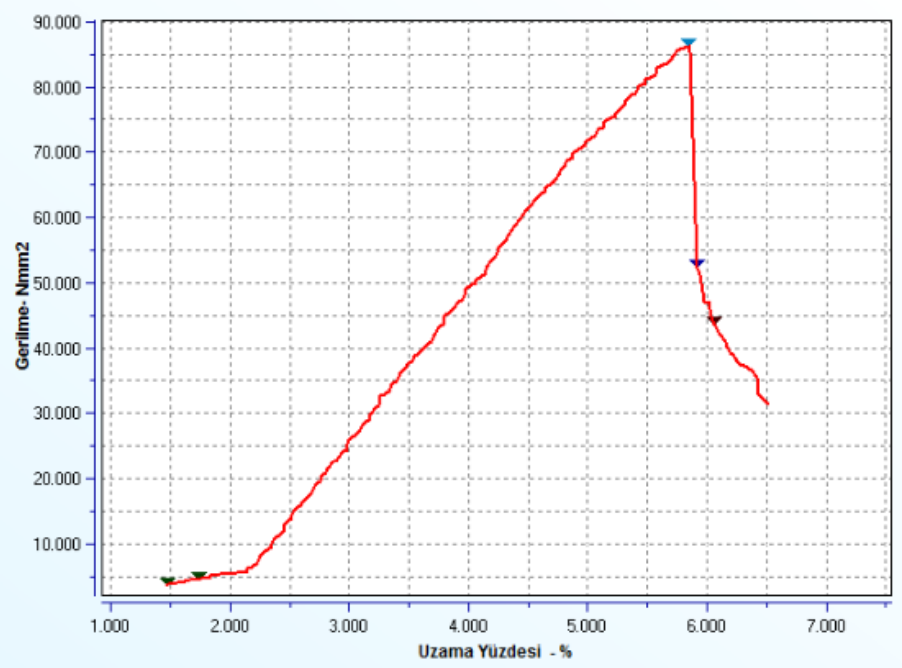
Şekil A.13 T5, N1 Gerilme-Gerinim Grafiği



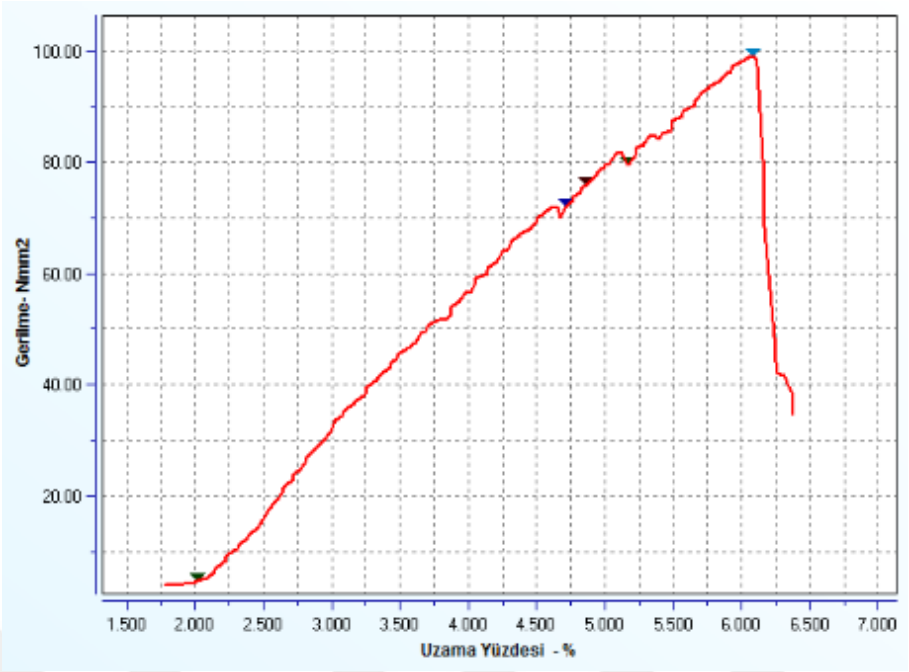
Şekil A.14 T5, N2 Gerilme-Gerinim Grafiği



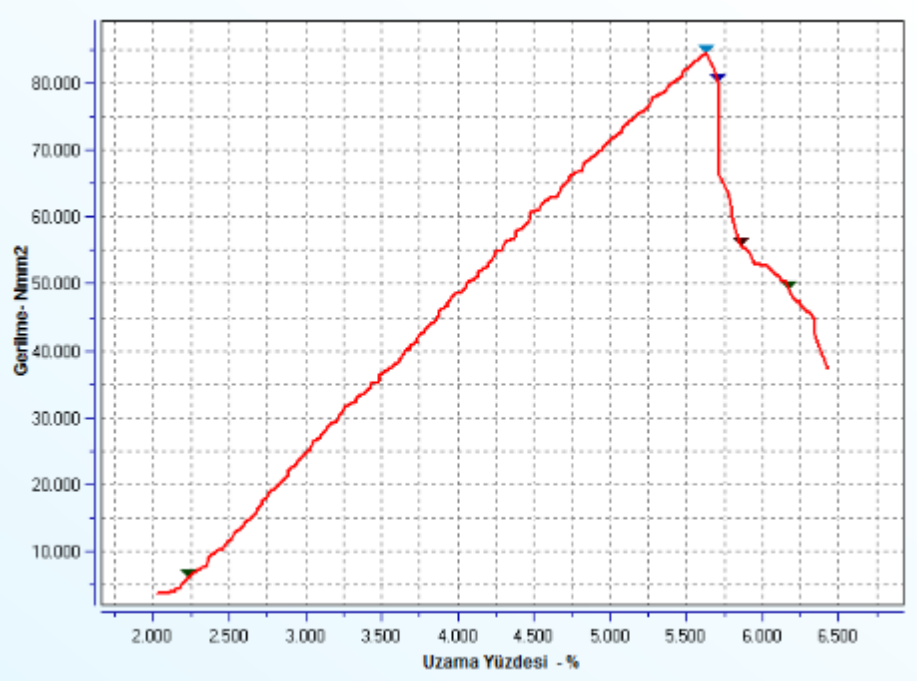
Şekil A.15 T5, N3 Gerilme-Gerinim Grafiği



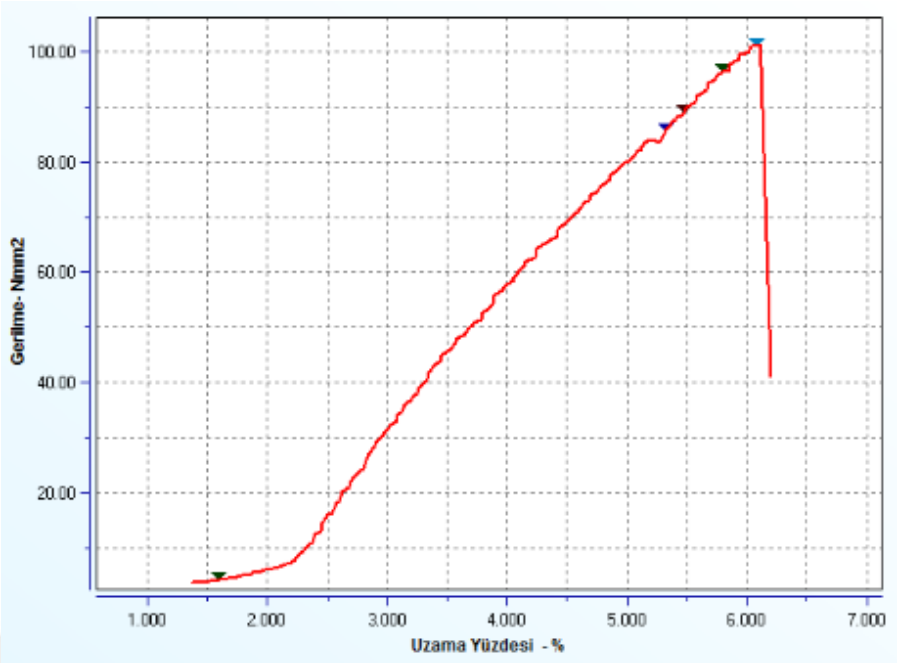
Şekil A.16 T6, N1 Gerilme-Gerinim Grafiği



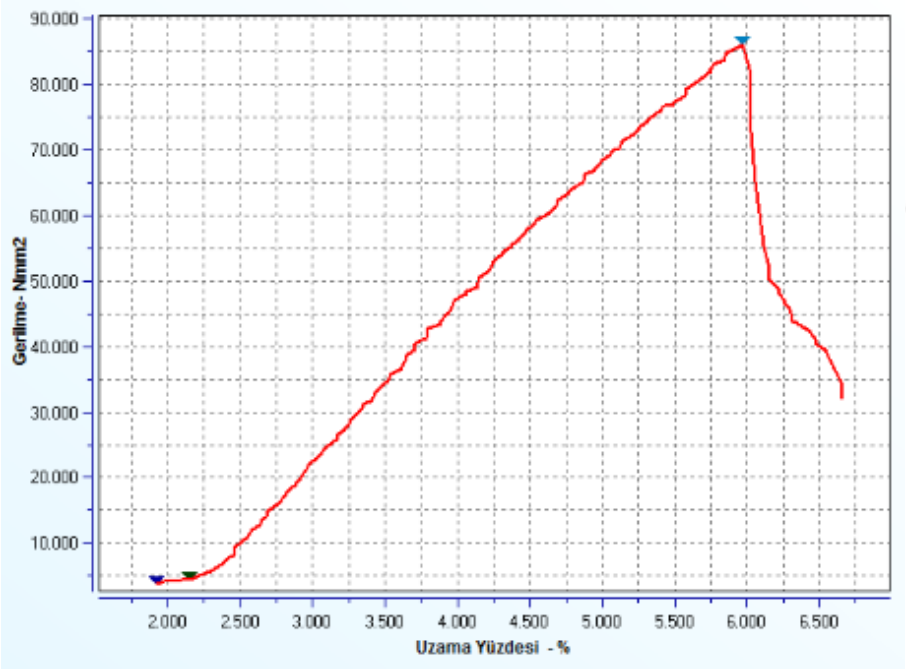
Şekil A.17 T6, N2 Gerilme-Gerinim Grafiği



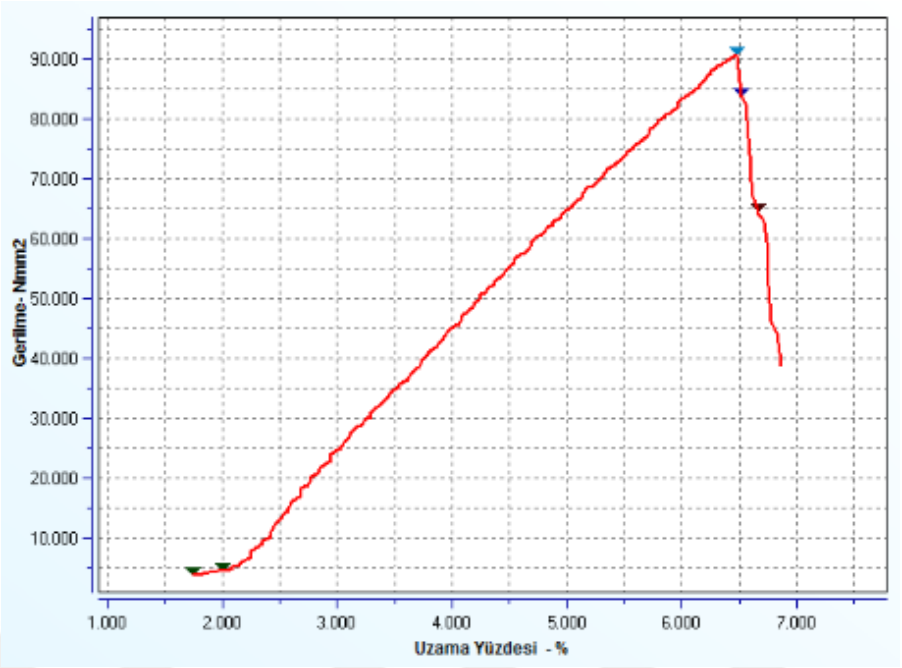
Şekil A.18 T6, N3 Gerilme-Gerinim Grafiği



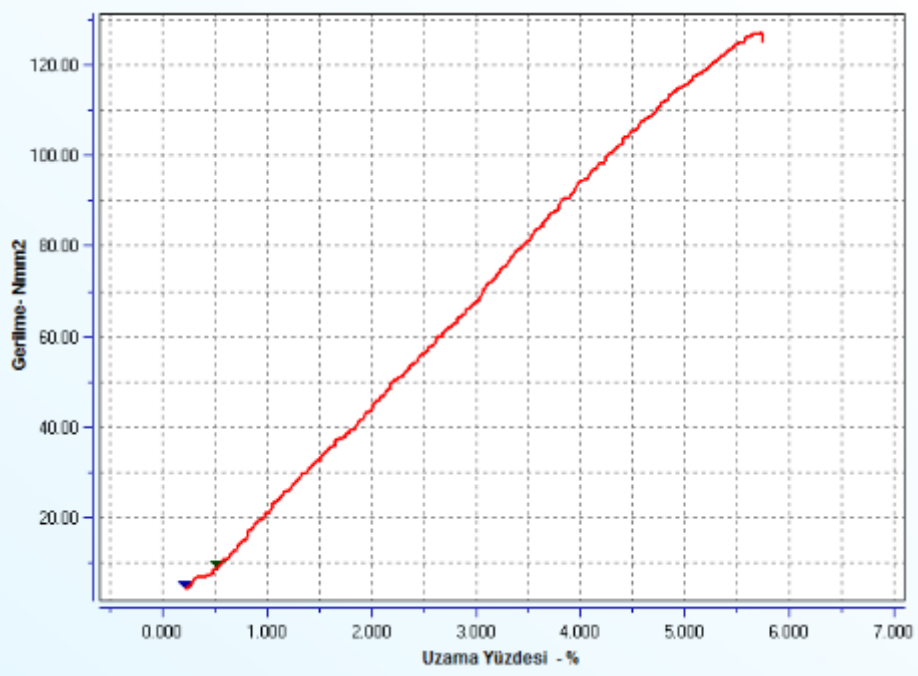
Şekil A.19 T7, N1 Gerilme-Gerinim Grafiği



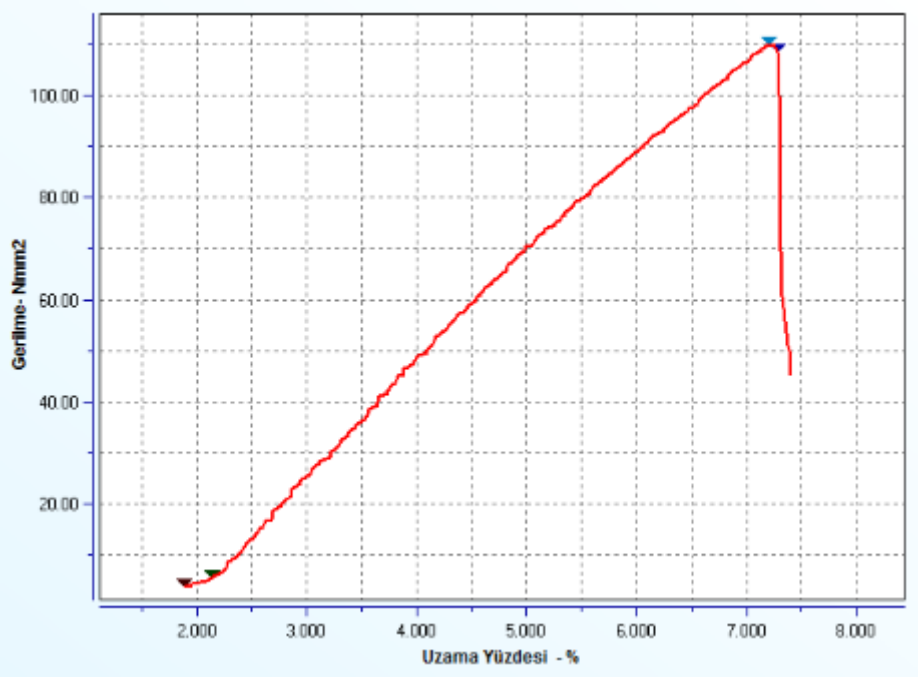
Şekil A.20 T7, N2 Gerilme-Gerinim Grafiği



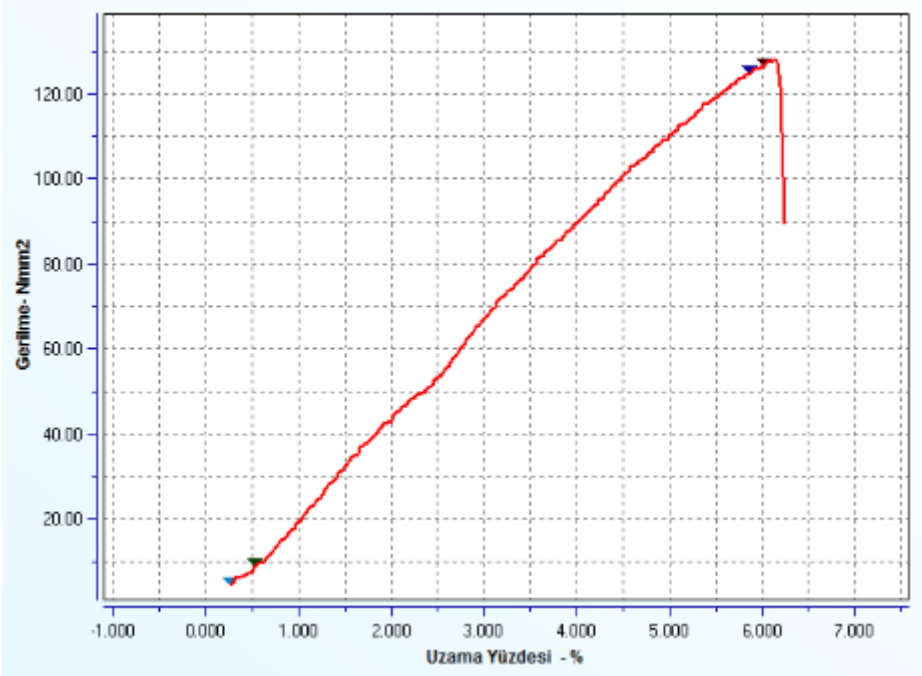
Şekil A.21 T7, N3 Gerilme-Gerinim Grafiği



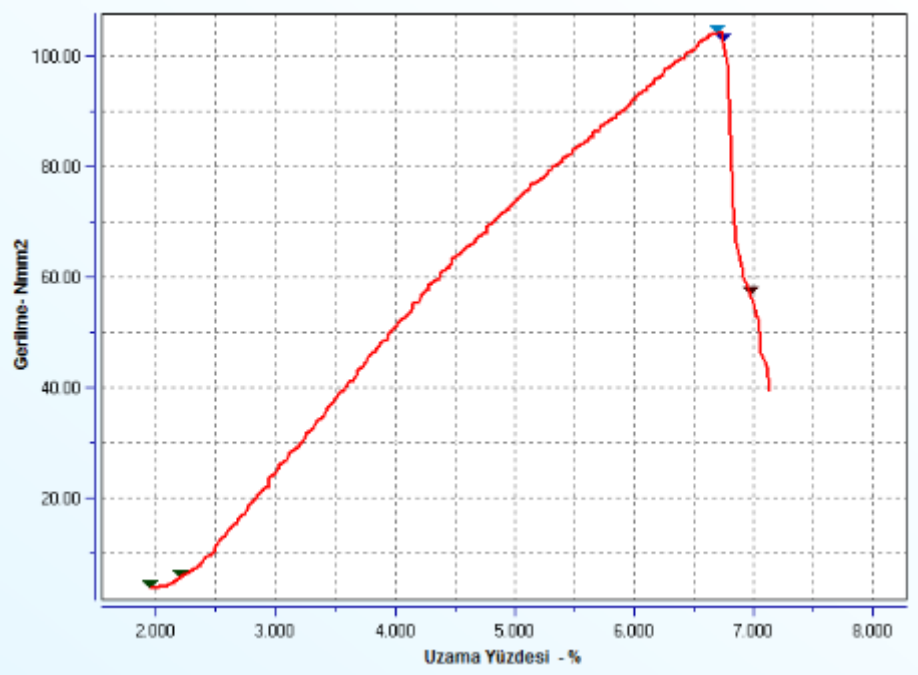
Şekil A.22 T8, N1 Gerilme-Gerinim Grafiği



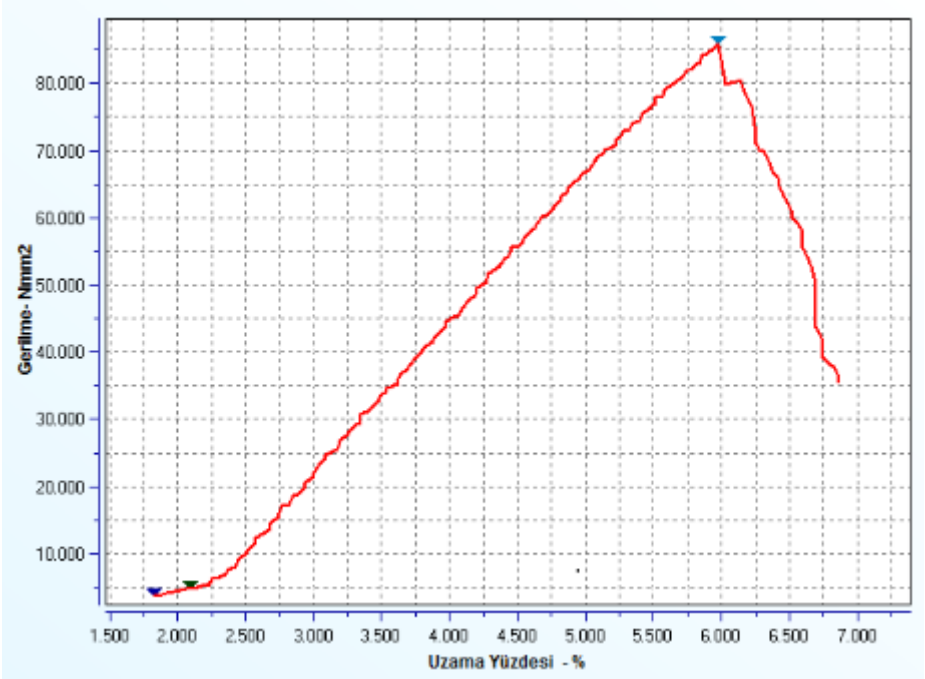
Şekil A.23 T8, N2 Gerilme-Gerinim Grafiği



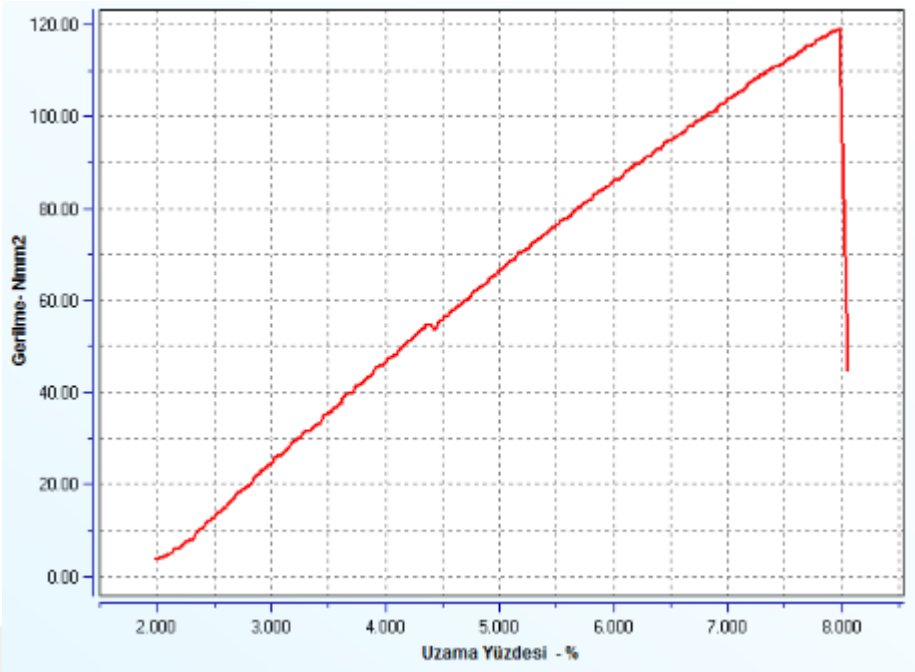
Şekil A.24 T8, N3 Gerilme-Gerinim Grafiği



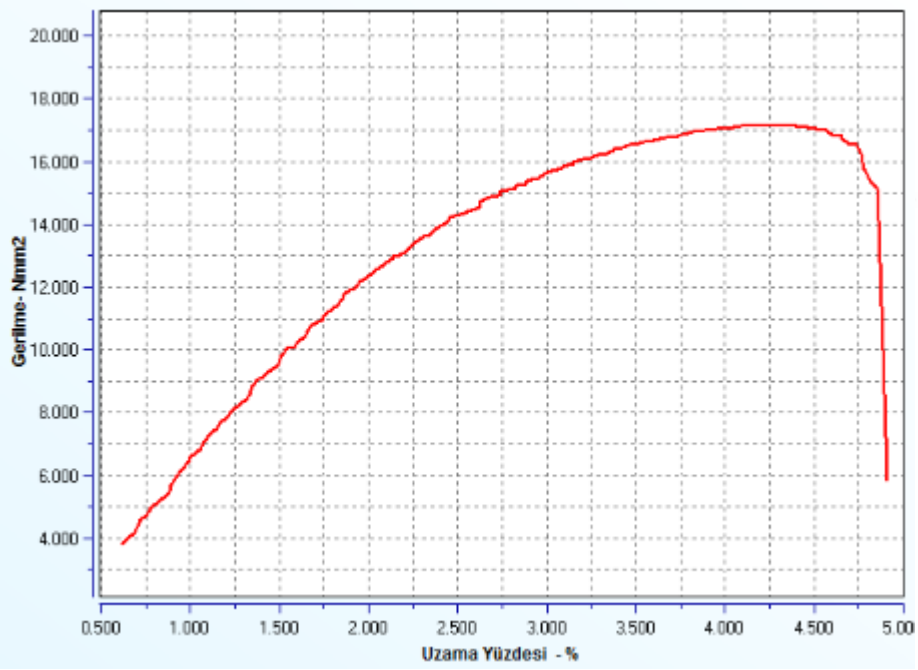
Şekil A.25 T9, N1 Gerilme-Gerinim Grafiği



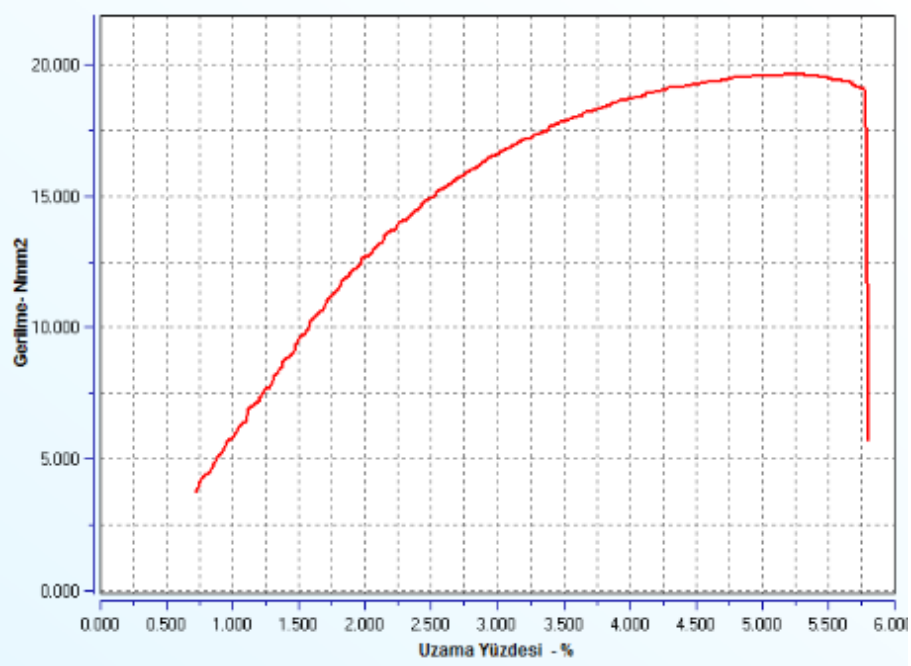
Şekil A.26 T9, N2 Gerilme-Gerinim Grafiği



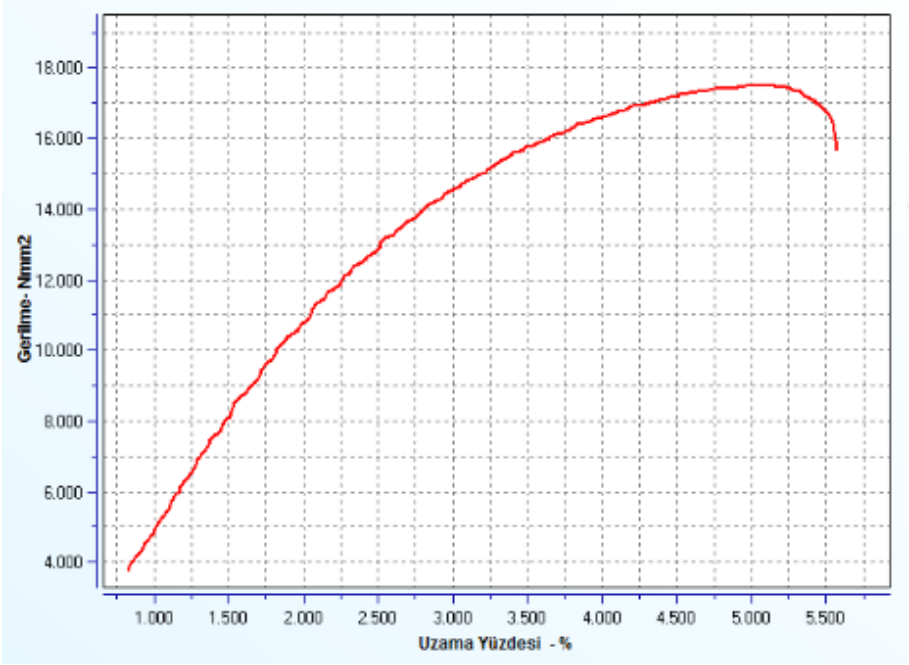
Şekil A.27 T9, N3 Gerilme-Gerinim Grafiği



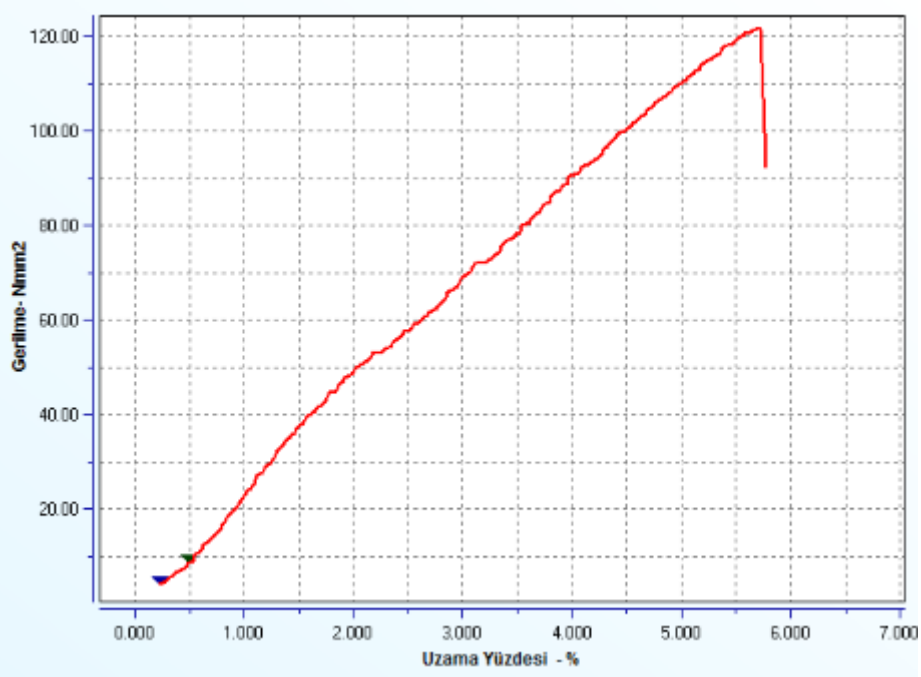
Şekil A.28 T11, N1 Gerilme-Gerinim Grafiği



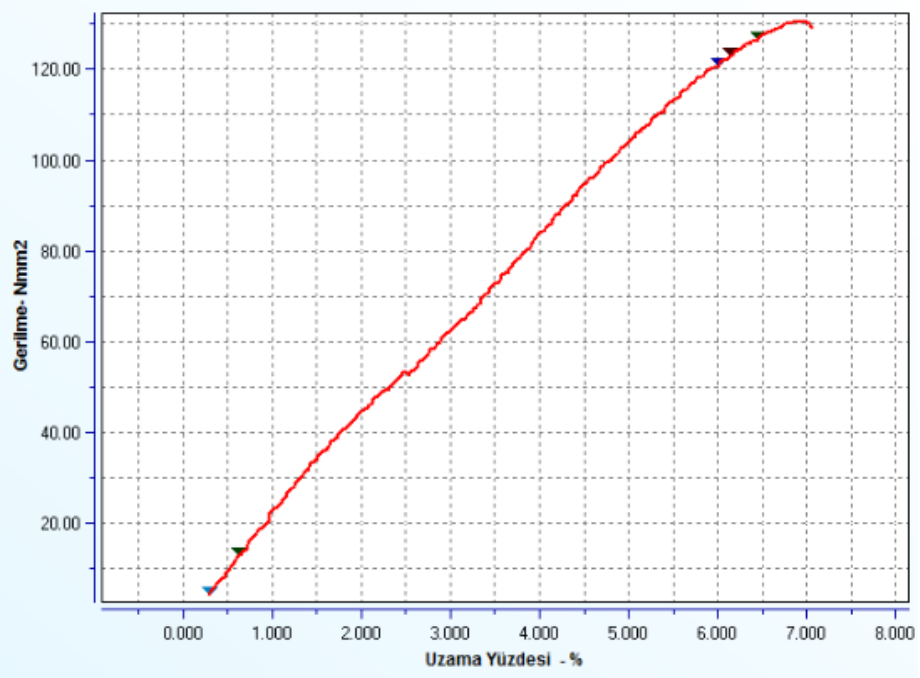
Şekil A.29 T11**,** N2 Gerilme-Gerinim Grafiği



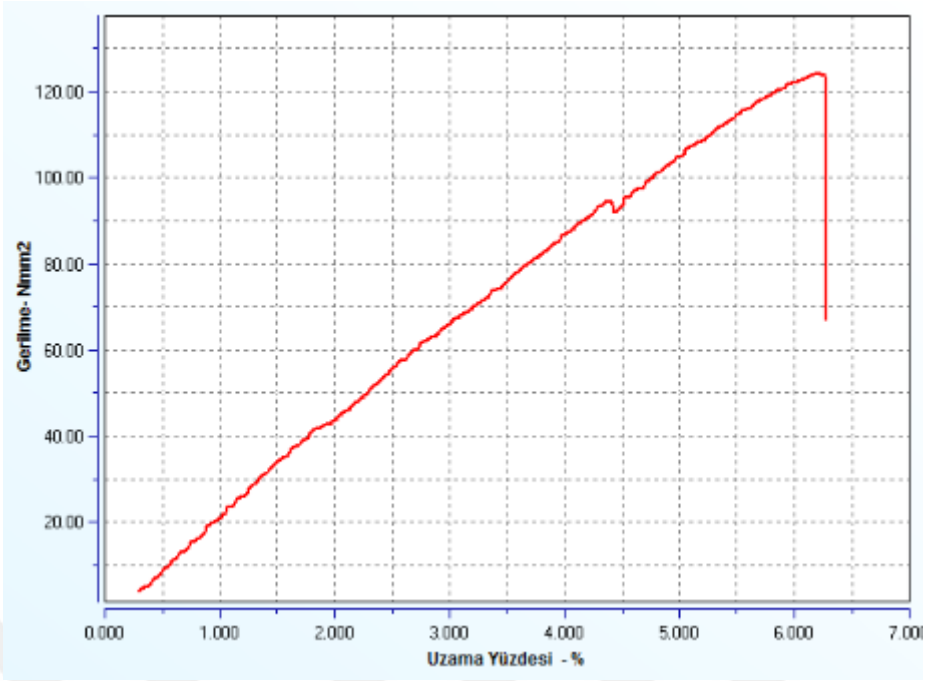
Şekil A.30 T11, N3 Gerilme-Gerinim Grafiği



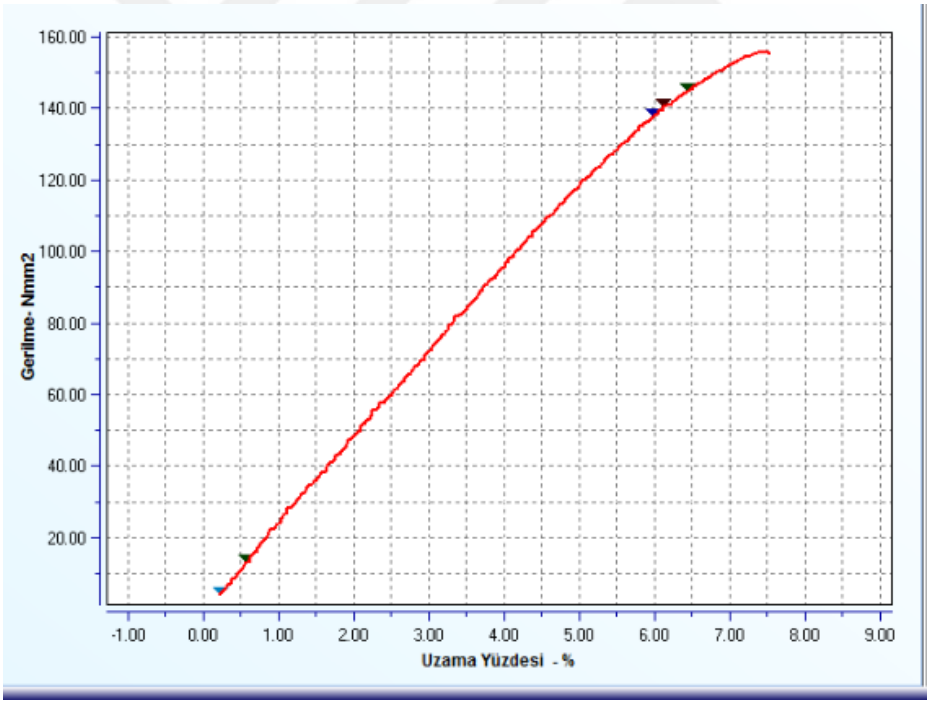
Şekil A.31 T12, N1 Gerilme-Gerinim Grafiği



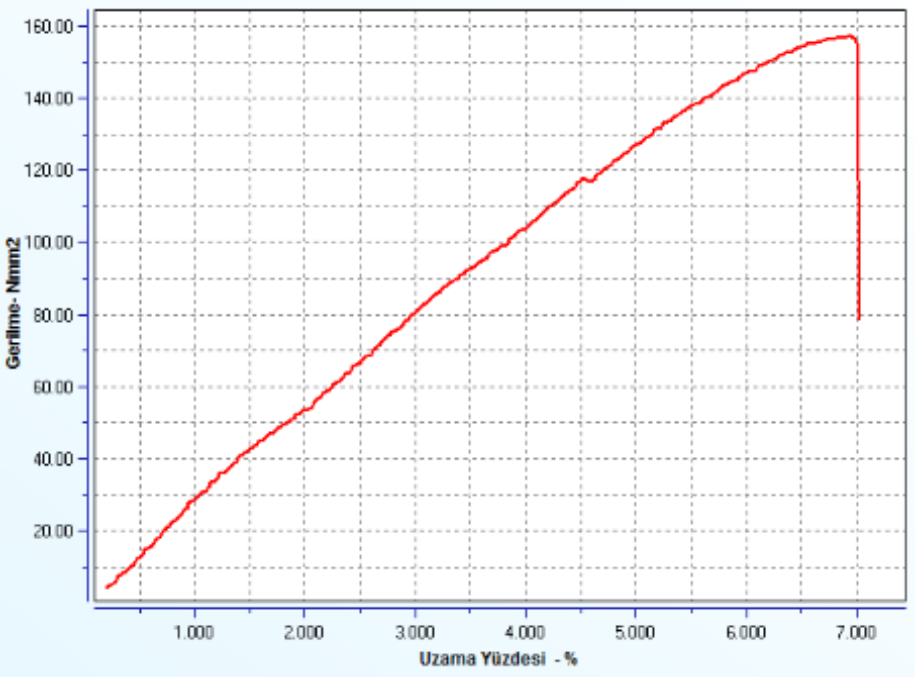
Şekil A.32 T12, N2 Gerilme-Gerinim Grafiği



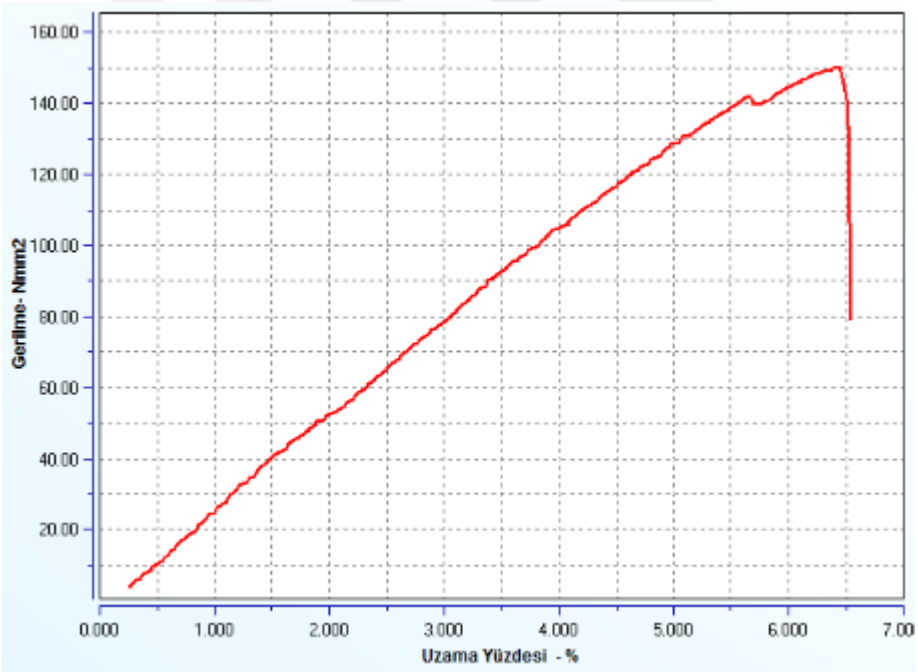
Şekil A.33 T12, N3 Gerilme-Gerinim Grafiği



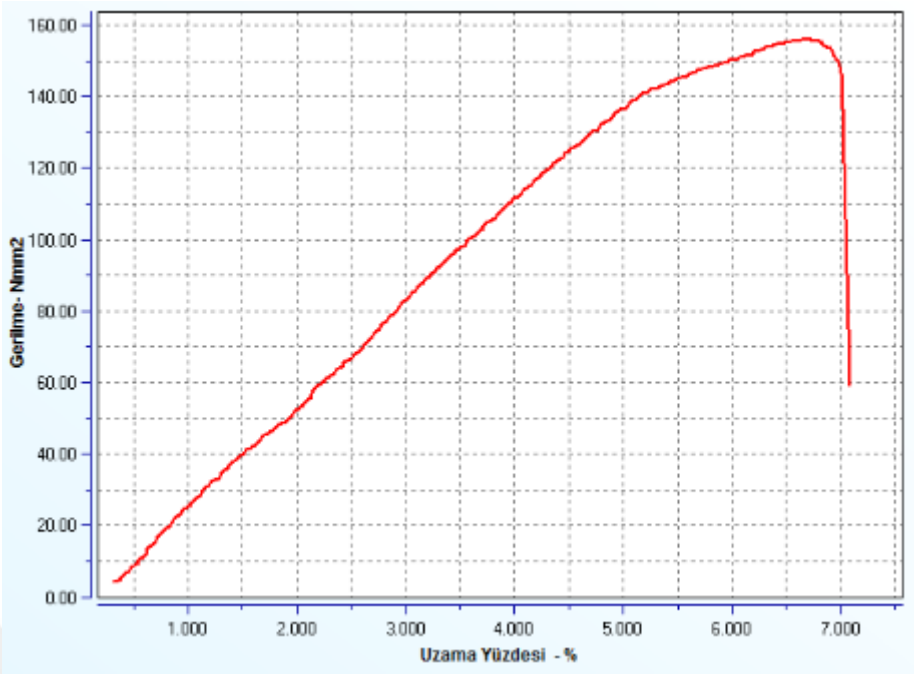
Şekil A.34 T13, N1 Gerilme-Gerinim Grafiği



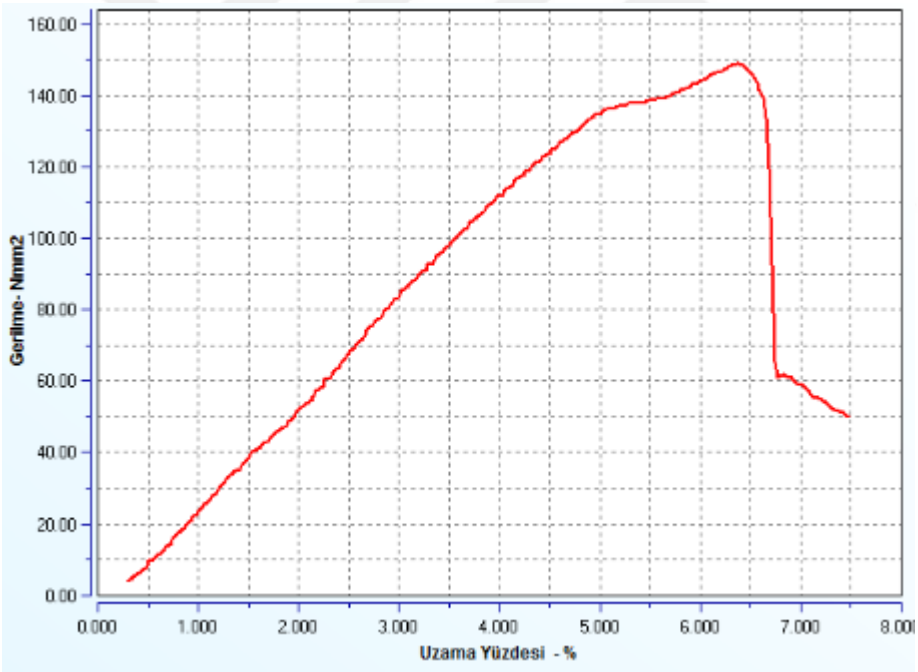
Şekil A.35 T13, N2 Gerilme-Gerinim Grafiği



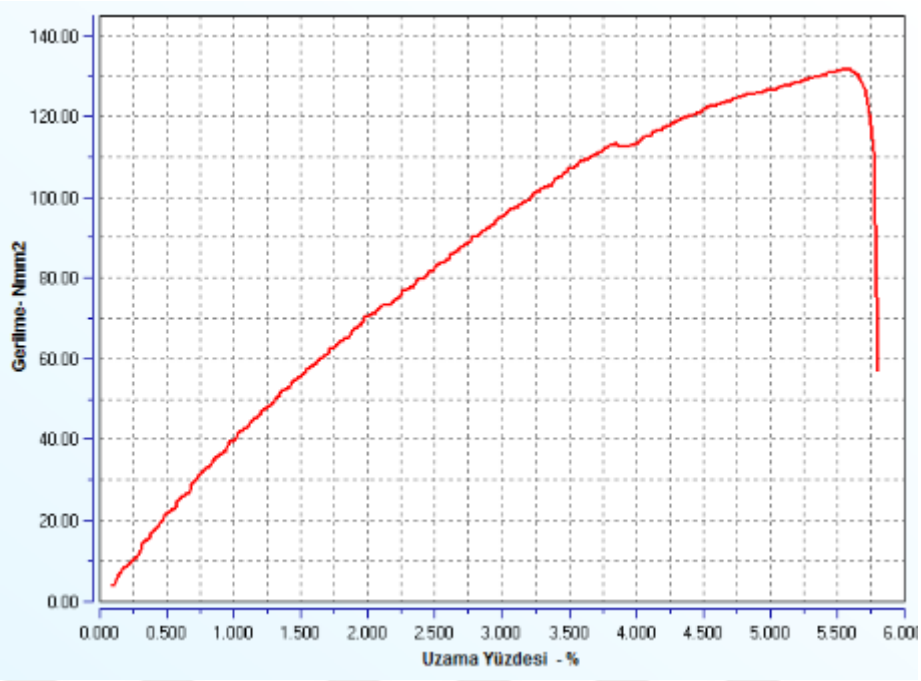
Şekil A.36 T13, N3 Gerilme-Gerinim Grafiği



Şekil A.37 T14, N1 Gerilme-Gerinim Grafiği



Şekil A.38 T14, N2 Gerilme-Gerinim Grafiği



Şekil A.39 T14, N3 Gerilme-Gerinim Grafiği

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. I. Yildirim, B. O. Kucukyildirim, “Determining Process Parameters Of Continuous Fiber Reinforced Recycled Thermoplastics Produced By Roll Processing”, 7th International Conference on Advances In Mechanical Engineering, Istanbul, Türkiye.