

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR UÇAK KOMPOZİT YAPISAL BİLEŞENİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK
ODAKLI TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melisa ALTUNTAŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erdem ACAR

KASIM 2025

Prof. Dr. Osman EROĞUL

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Erdem ACAR

Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 231511016 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Melisa ALTUNTAŞ** 'nın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**BİR UÇAK KOMPOZİT YAPISAL BİLEŞENİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ODAKLI TASARIMI**” başlıklı tezi **04/11/2025** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. Erdem ACAR**

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Eş Danışman : **Doç.Dr. Yahya Öz**

TUSAŞ

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Erdem ACAR**

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Prof. Dr. Ercan GÜRSES

Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Recep M. GÖRGÜLÜARSLAN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Melisa Altuntaş

İMZA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİR UÇAK KOMPOZİT YAPISAL BİLEŞENİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ODAKLI TASARIMI

Melisa Altuntaş

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Erdem ACAR

Tarih: Kasım 2025

Bu tez sürdürülebilir tasarım ilkeleri doğrultusunda karbon elyaf takviyeli Poly-Ether-Ketone-Ketone (PEKK/KF) matrisli kompozit malzeme rib (kaburga) yapısal uçak parçası üzerinden termoplastik kompozitlerin yeniden şekillendirilebilirlik özelliğini kullanarak çok yönlü bir araştırmayı ortaya koymayı amaçlamaktadır. Tasarım sürecine mekanik performans değerleri yanında; ekonomik, çevresel etki ve döngüsellik kriterlerini de tasarım sürecine dahil ederek bütüncül bir yaklaşım sunulmuştur. Sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımla havacılıkta yaygın olan termoset kompozitlere karşı, termoplastik malzemeler yeniden şekillendirilebilir ve döngüsellik özelliğiyle tasarım odaklı bir alternatif olarak ortaya konmuştur.

Bu kapsamda, termoplastik yapısal rib (kaburga) parçalarına çoklu termal çevrim (0.–2. çevrim) uygulanmıştır. Yapılan deneysel testlerin sonuçları çevrimlerin mekanik performans karşılaştırmalarına girdi oluştururken; Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment, LCA) ve Yaşam Döngüsü Maliyeti (Life Cycle Costing, LCC) değerleri yardımıyla çevresel etki ve maliyet karşılaştırmasına veri sağlamıştır.

Rib (kaburga) uçak yapısal parçası, Toray Cetex TC1320 PEKK/CF bazlı, 14 katmanlı $[45, 0, 90, -45, 90, 0, 45]_s$ dizilimli malzemeden üretilmiştir. Parçalar ilk olarak tahribatsız muayene yöntemleriyle taranmıştır. Farklı çevrimlere (0.–2. çevrim) giren parçalardan alınan numunelerde basma testi (ASTM D6641/D3410) ile kiriş(chord) modülü ve basma dayanımı; diferansiyel taramalı kalorimetri (DTK) yöntemiyle kristallenme oranı; termogravimetrik analiz (TGA) yöntemiyle de ısı bozulma ve kütle değişimi değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen veriler tekrarlanan çevrimlerde termoplastik (TP) malzemenin değişen mekanik ve malzeme performansı değerlerine girdi oluşturmaktadır. Sürdürülebilirlik analizinde çok kriterli karar verme metodlarından Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process, AHP) ve İdeal Çözüm Benzerliğe Göre Tercih Sıralama Tekniği (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) yöntemleriyle kullanılmıştır. Bu çalışmada sürdürülebilirlik analizi 3 uzman katılımcı tarafından yapılan değerlendirmeye göre hesaplanmıştır. Termal işlem görmemiş laminat plaka numunesinin maksimum basma kuvveti 4660,4 N, basma dayanımı 233,5 MPa, kiriş(chord) modül 13,4 GPa bulunmuştur. Laminat plakadan 3. çevrime kiriş(chord) modül %58,9 artışla 13,4 GPa'dan 21,3 GPa'ya yükselirken, basma kuvveti %7,8 düşerek 4295,1 N ve buna paralel olarak da basma dayanımı aynı oranında düşerek 214,7 MPa bulunmuştur. Kristallik %15,52'den %20–23 bandına çıkmış; TGA başlangıç bozunma sıcaklığı 550 °C'den 350 °C'ye gerilerken toplam kütle kaybı %12,72'den %20,89'a yükselmiştir. Sürdürülebilirlik analizi değerlendirmesinde hesaplanan TOPSIS yakınlık katsayıları: TP (0. Çevrim) 0,729, termoset (TS) 0,633, TP (1. çevrim) 0,485, TP (2. çevrim) 0,364 olarak bulunmuştur.

Çevrim sayısının tekrarlanmasıyla artan kristallik oranı, artan elastik modül eğilimini doğrularken; azalan ısı kararlılık ve artan mikroyapısal hasarlardan kaynaklı etkilerin dayanımda azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Sürdürülebilir odaklı tasarım analizinde çok kriterli karar metoduyla yapılan karşılaştırmada en iyi alternatif TP(0. çevrim) malzemesi olmuştur. Sıralamayı termoset (TS), TP (1. çevrim) ve TP (2. çevrim) malzemeleri takip etmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir tasarım, Sürdürülebilirlik, Termoplastik kompozit, Yeniden şekillendirilebilir malzemeler, Termoform, Tahribatsız muayene, Kristallik, , Eko-Verimlilik, PEKK/KF, Çok kriterli karar verme metodu, AHP, TOPSIS.

ABSTRACT

Master of Science

SUSTAINABILITY DRIVEN DESIGN OF A RECYCLED AIRCRAFT COMPOSITE COMPONENT

Melisa Altuntaş

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Erdem ACAR

Date: October 2025

The thesis gives an extensive investigation in a PEKK/CF material rib (frame) structural aircraft part based on the reshaping property of thermoplastic composites according to sustainable design principles. In addition to mechanical performance values, economic, environmental footprint, and circularity requirements were incorporated in the design process, providing an integrated design approach. From a sustainability perspective, thermoplastics have been offered as a design-driven alternative to thermoset composites commonly used in aerospace, with their reshaping and recyclability characteristics. In the present work, a few thermal cycles (0–3 cycles) were applied to thermoplastic structural rib parts. Experimental test results were used as input to compare the mechanical performances of the cycles, while LCA and LCC values were used to provide data for environmental impact and cost comparison. The rib (frame) aircraft structural component was made of Toray Cetex TC1320 PEKK/CF-based, 14-ply [45, 0, 90, –45, 90, 0, 45]_s laminated composite material. The parts were subsequently examined using non-destructive testing methods. Compressive modulus and

compressive strength were quantified through the compression test (ASTM D6641/D3410) on specimens of exposed parts for different cycles (0–2 cycles). The degree of crystallinity was determined using differential scanning calorimetry (DSC); and thermal degradation and mass change quantities were determined using thermogravimetric analysis (TGA). The data collected were fed into the changing mechanical and material performance values of the TP material subjected to repeated cycles. In the sustainability analysis, Analytic Hierarchy Process (AHP) and TOPSIS approaches, two of the multi-criteria decision-making methods, were used. Sustainability analysis was calculated in this study based on ratings given by three expert participants. The maximum compressive force of the thermally untreated laminate plate sample was found to be 4660.4 N, compressive strength was 233.5 MPa, and chord modulus was 13.4 GPa. From the laminate plate to the 3rd cycle, the chord modulus increased by 58.9% from 13.4 GPa to 21.3 GPa, while the compressive force decreased by 7.8% to 4295.1 N, and parallel to this, the compressive strength decreased by the same amount to 214.7 MPa. The crystallinity was increased from 15,5% to the range of 20–23%; the initial decomposition temperature of TGA was decreased from 550 °C to 350 °C, and the cumulative mass loss was raised from 12,7% to 20,8%. During assessment of sustainability analysis, the TOPSIS closeness coefficients computed were derived as follows: TP (0th Cycle) 0,729, Thermoset (TS) 0,633, TP (1st Cycle) 0,485, TP (2 nd Cycle) 0,364. The increment in the crystallinity ratio with several cycles confirmed the growing trend in elastic modulus, whereas the effects introduced due to decreasing thermal stability and increasing microstructural damages were found to result in a reduction in strength. In the multi-criteria decision-making approach for the sustainability-oriented design analysis, comparison retained based on the methodology indicated that TP (0th Cycle) was the best alternative material. Thermoset (TS), TP (1 st Cycle), and TP (2 nd Cycle) materials followed the ranking.

Keywords: Sustainable design, Sustainability, Thermoplastic composite, Reshapable materials, Thermoforming, Non-Destructive inspection, Crystallinity, Eco-Efficiency, PEKK/CF, Multi-Criteria decision-making method, AHP, TOPSIS.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocalarım Prof. Dr. Erdem ACAR ve Doç. Dr. Yahya Öz'e, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve şirketim TUSAŞ' a çok teşekkür ederim. Ayrıca bu süreçte sevgisi ve desteğiyle yanımda olan nişanlım Mert'e ve her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma da çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
KISALTMALAR	xix
SEMBOL LİSTESİ	xxi
RESİM LİSTESİ	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1.Tezin Amacı.....	3
1.2.Tezin Kapsamı ve İçeriği.....	3
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1.Kompozit Malzemeler ve Uygulama Alanları.....	5
2.1.1. Kompozitlerin Genel Özellikleri ve Önemi	5
2.1.2. Kompozitlerin Karakteristikleri	6
2.1.3. Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	6
2.1.4. Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler	8
2.2. Termoplastik Kompozitlerin Özellikleri ve Avantajları	10
2.3 .Termoform Süreçleri ve Yeniden Şekillendirme Döngüleri	12
2.4. Termoplastikler İçin Polimer Morfolojisi ve Termal Özellikler.....	13
2.4.1. Cam Geçiş Sıcaklığı ve Erime Sıcaklığı.....	14
2.4.2. Kompozitlerin Tasarım Kuralları	15
2.5.Kompozitlerin Muayene Yöntemleri.....	17
2.5.1.Tahribatsız Muayene Yöntemleri	17
2.5.2.Tahribatlı Muayene Yöntemleri	20
2.6.Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi ve Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri	23
2.6.1. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi (ÇKKV)	23
2.6.2. LCA ve LCC Yaklaşımları.....	24
2.6.3. AHP, TOPSIS ve Literatur Kullanım Örnekleri	25
2.6.4. Sürdürülebilirlik Değerlendirme Sürecinin Genel Akışı ve Karar Verme Yöntemleri Karşılaştırması.....	30
2.7 .Literatürdeki Boşluk.....	34
3. MALZEME VE YÖNTEM	35
3.1. Kullanılan Malzeme	35
3.2. Termoform Döngüleri.....	36
3.3. Numune Hazırlama ve Deney Tasarımı	41
3.4. Deneysel Metodoloji Akış Şeması	43

4. TAHRİBATLI MUAYENE SONUÇLARI	45
4.1. Ultrasonik ve Çoklu Ultrasonik Darbe Yankı Test (UT, ÇUDY).....	45
4.2. Bilgisayarlı Tomografi.....	51
4.3. Bulguların Yorumlanması.....	55
5. TAHRİBATLI MUAYENE SONUÇLARI	57
5.1. Basma Testi	57
5.2. Termogravimetrik Analiz (TGA).....	66
5.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri Analizi (DTK)	72
5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	78
6. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ	83
6.1. LCA ve LCC Hesaplamaları	83
6.2. Sürdürülebilirlik Değerlendirme Yöntemleri	85
6.3. AHP ve TOPSIS' in Seçilme Gerekçesi	86
6.4. AHP ile Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması.....	86
6.5. TOPSIS ile Alternatiflerin Sıralanması	89
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR	95
EKLER	99

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1-1:Çalışma akış şeması.	2
Şekil 2-1: Kompozit malzemelerin matris türüne göre sınıflandırılması.	7
Şekil 2-2:Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması.	7
Şekil 2-3:Kompozit malzemenin polimer matris türüne göre sınıflandırılması.	8
Şekil 2-4:Fiber–matris–kompozit gerilme–gerinim davranışı.....	9
Şekil 2-5:Termoplastik kompozit malzemenin termoform işlemindeki adımları.....	12
Şekil 2-6:Yarı-kristalin malzemede kristal ve amorf bölgeler.....	14
Şekil 2-7:: Amorf, yarı-kristalin ve kristalin polimer zincir düzenleri.....	14
Şekil 2-8:TGA ve DTG eğrilerinin tipik görünüm [39].	22
Şekil 2-9:TOPSIS metodolojisi görseli	27
Şekil 2-10:Karar verme metodunda problem yapısı ve analiz süreci.....	30
Şekil 2-11:Sürdürülebilirlik endeksi hesaplamasında kullanılan çok kriterli karar verme yaklaşımında, birbirini izleyen ve sırasıyla uygulanan adımların şematik olarak gösterimi.....	31
Şekil 2-12:AHP ve TOPSIS sistematik akış şeması.	32
Şekil 3-1:Termoforming işlemindeki üretim döngüleri ve numune gruplarının deneysel akışı.....	41
Şekil 3-2:Deneysel Metodoloji ve sürdürülebilirlik akış şeması.....	43
Şekil 3-3: Her çevrim için uygulanan adımlar.....	44
Şekil 5-1:Çevrimlerin gerilme-gerinim grafiği.	64
Şekil 5-2:Basma Dayanımı (MPa) ve bir önceki adıma göre değişimi.	65
Şekil 5-3:İşlem görmemiş laminat plaka, N-7 TGA grafiği.	68
Şekil 5-4:Rib-3, 0.Çevrim, N-3 TGA grafiği.....	68
Şekil 5-5:Rib-4, 1.Çevrim, N-4 TGA grafiği.....	69
Şekil 5-6:Rib-1, 2.Çevrim, N-1 TGA grafiği.....	70
Şekil 5-7:L.plaka,0.,1.,2. Çevrimlerin kütle kaybı oranı.	71
Şekil 5-8:Laminat plaka, N-7 kodlu numune DTK grafiği.	73
Şekil 5-9:0.Çevrim, N-3 kodlu numune DTK grafiği.	74
Şekil 5-10:1.Çevrim, N-4 kodlu numune DTK grafiği.	75
Şekil 5-11:2.Çevrim, N-1 kodlu numune DTK grafiği.	76
Şekil 6-1:Sürdürülebilirlik analiz akışı.....	85
Şekil Ek. 1: Rib-1, 3. Çevrim, numune 1-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği	99
Şekil Ek. 2:Rib-1, 3. Çevrim, numune 1-2 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	99
Şekil Ek. 3:Rib-1, 3. Çevrim, numune 1-3 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	100
Şekil Ek. 4:Rib-1, 3. Çevrim, numune 1-4 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	100
Şekil Ek. 5:Rib-2, 3. Çevrim, numune 2-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	101

Şekil Ek. 6:Rib-2, 3. Çevrim, numune 2-2 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	101
Şekil Ek. 7:Rib-2, 3. Çevrim, numune 2-3 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	102
Şekil Ek. 8:Rib-2, 3. Çevrim, numune 2-4 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	102
Şekil Ek. 9:Rib-3, 1. Çevrim, numune 3-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	103
Şekil Ek. 10:Rib-3, 1. Çevrim, numune 3-2 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	103
Şekil Ek. 11:Rib-3, 1. Çevrim, numune 3-3 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	104
Şekil Ek. 12:Rib-3, 1. Çevrim, numune 3-3 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	104
Şekil Ek. 13:Rib-4, 2. Çevrim, numune 4-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	105
Şekil Ek. 14:Rib-4, 2. Çevrim, numune 4-2 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	105
Şekil Ek. 15:Rib-4, 2. Çevrim, numune 4-3 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	106
Şekil Ek. 17:Rib-5, 2. Çevrim, numune 5-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	107
Şekil Ek. 18:Rib-5, 2. Çevrim, numune 5-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	107
Şekil Ek. 19:Rib-5, 2. Çevrim, numune 5-3 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	108
Şekil Ek. 20:Rib-5, 2. Çevrim, numune 5-4 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	108
Şekil Ek. 21:Rib-6, 1. Çevrim, numune 6-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	109
Şekil Ek. 22:Rib-6, 1. Çevrim, numune 6-2 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	109
Şekil Ek. 23:Rib-6, 1. Çevrim, numune 6-3 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	110
Şekil Ek. 24:Rib-6, 1. Çevrim, numune 6-4 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.....	110
Şekil Ek. 25:Laminat plaka, 0.Çevrim, numune 7-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği...	111
Şekil Ek. 26:Laminat plaka, 0.Çevrim, numune 7-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği...	111
Şekil Ek. 27:Laminat plaka, 0.Çevrim, numune 7-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği...	112
Şekil Ek. 28:Laminat plaka, 0.Çevrim, numune 7-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği...	112

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2-1:Termoplastik ve termoset arasında yapılan karşılaştırma tablosu.....	11
Çizelge 2-2:Termoplastik ve termoset kritik özelliklerinin karşılaştırılma özeti.	11
Çizelge 2-3:Kompozit tasarım kuralları ve teknik gerekçeleri [26] [27] [28].....	16
Çizelge 2-4:Tahribatsız muayene yöntemlerinin hassasiyet, hız, derinlik analizi ve boyut açısından karşılaştırılması.	20
Çizelge 2-5:Çiftler arası karşılaştırma ölçeği değerleri.....	26
Çizelge 2-6:TOPSIS en yakın pozitif ve en uzak negatif seçim tablosu.....	29
Çizelge 2-7:AHP ve TOPSIS karşılaştırma tablosu.	32
Çizelge 2-8:Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri – karşılaştırma tablosu. ...	33
Çizelge 3-1:Polimer matris özellikleri.....	36
Çizelge 3-2: Yarı preg Karbon UD özellikleri.....	36
Çizelge 3-3:Mekanik özellikler.	36
Çizelge 3-4:Termoforming çevrim parametreleri.....	41
Çizelge 3-5: Deney tasarımı ve numune kodları.	42
Çizelge 4-1: 3 numaralı rib parçası tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) sonuçları....	47
Çizelge 4-2: 4 numaralı rib parçası tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) sonuçları....	49
Çizelge 4-3: 1 numaralı rib parçası tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) sonuçları....	51
Çizelge 5-1: Laminat plaka numunelerin (ısıl işlem görmemiş) basma test sonuçları. 60	
Çizelge 5-2:Rib-3 (0.Çevrim) numunelerin basma test sonuçları.	60
Çizelge 5-3: Rib-6(0.Çevrim) numunelerin basma test sonuçları.	61
Çizelge 5-4:Rib-4(1.Çevrim) numunelerin basma test sonuçları.	61
Çizelge 5-5:Rib-5(1.Çevrim) numunelerin basma test sonuçları.	61
Çizelge 5-6:Rib-1(2.Çevrim) numunelerin basma test sonuçları.	62
Çizelge 5-7:Rib-2(2.Çevrim) numunelerin basma test sonuçları.	62
Çizelge 5-8:Plaka ve çevrimlerin basma testi sonuçları.	64
Çizelge Ek. 1: Uzman-1 AHP tablosu.....	114
Çizelge Ek. 2:Uzman-1 TOPSIS tablosu.....	114
Çizelge Ek. 3:Uzman-2 AHP tablosu	114
Çizelge Ek. 4:Uzman-2 TOPSIS tablosu.....	114
Çizelge Ek. 5:Uzman-3 AHP tablosu.	115
Çizelge Ek. 6:Uzman-3 TOPSIS tablosu.....	115
Çizelge Ek. 7:AHP ve TOPSIS işlem basamakları.....	116
Çizelge Ek. 8:Uzman TOPSIS ortalama değerleri.	118
Çizelge Ek. 9:Uzmanların TOPSIS normalize matris işlemi-1.	118
Çizelge Ek. 10:Uzmanların TOPSIS normalize matris işlemi-2.	119

KISALTMALAR

AHP	: Analitik Hiyerarşi Süreci
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BT	: Bilgisayarlı Tomografi
CI	: Tutarlılık endeksi
CR	: Tutarlılık oranı
ÇUDY	: Çoklu Ultrasonik Darbe Yankı Yöntemi
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi
DIC	: Dijital Görüntü Korelasyonu
DSC	: Differential Scanning Calorimetry
DTK	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
DTG	: Derivative Thermogravimetry
DTP	: Dönüştürülmüş Termoplastik
GPa	: Gigapaskal
KF	: Karbon Fiber
LCA	: Yaşam döngüsü değerlendirmesi
LCC	: Yaşam döngüsü maliyeti
MEPU	: Multiple Echo Pulse Ultrasonic
MPa	: Megapaskal
UT	: Ultrasonik Tarama
PEEK	: Polyetheretherketone
PEKK	: Polyetherketoneketone
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik analiz
TP	: Termoplastik
TS	: Termoset
TOPSIS	: Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemi

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Alan
ρ	Yoğunluk
σ	Gerilme
ε	Gerinim
$^{\circ}\text{C}$	Frekans
ΔH_e	Erime entalpisi
ΔH_{kk}	Kristallenme entalpisi
g	Gram
J	Joule
T_C	Cam geçiş sıcaklığı
T_E	Erime sıcaklığı
T_k	Kristallenme sıcaklığı
N	Newton
P	Basınç
X_K	Kristallenme derecesi
t	Zaman
T	Sıcaklık

RESİM LİSTESİ

Sayfa

Resim 2.1:FTP, Elyaf takviyeli polimer ve bileşenleri.	9
Resim 2.2:Termoset ve termoplastik malzeme zincir yapısı	10
Resim 2.3:Robotik sistemle çalışan UT.....	18
Resim 2.4:Taşınabilir cihazla yapılan UT.....	18
Resim 3.1:Şekil verme işlemine uğramamış laminat plaka.....	35
Resim 3.2:Termoformlama işleminin gerçekleştirildiği deney düzeneğinin genel görünümü.	38
Resim 3.3:Termoformlama sistemine ait görünüm: (a) ön ısıtma bölmesi, (b) şekillendirme bölmesi.....	38
Resim 3.4:Presleme işlemindeki dişi ve erkek kalıplar.	39
Resim 3.5:Termoformlama işleminin aşamalarının görsel gösterimi: (a) Laminantın düzeneğe sabitlenmesi, (b) Fırında ön ısıtma işlemi, (c) Malzemenin yumuşayarak form alabilir hale gelmesi, (d) Dişi ve erkek kalıpların kapatılarak presleme aşaması, (e) Şekillendirme sonrası kalıptan çıkarılmış rib parça görünüm.	40
Resim 3.6:Numune kesiminden önce test bölgelerinin parçaya işaretlenmesi.	42
Resim 4.1: 3 Numaralı rib parçası üzerinde tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) ölçüm bölgelerinin işaretlenmesi.	46
Resim 4.2:Numune-3 ÇUDY yöntemiyle tespit edilen kusur bölgeleri ve yankı genliği haritaları a) Numune-3 sağ flanş yüzeyinde ölçülen genlik dağılım b) Numune-3 sol flanş yüzeyinde ölçülen genlik dağılım c) Numune-3 üst yüzeyinde ölçülen genlik dağılım.	46
Resim 4.3: 4 Numaralı rib parçası üzerinde tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) ölçüm bölgelerinin işaretlenmesi.	48
Resim 4.4: Numune-4 ÇUDY yöntemiyle tespit edilen kusur bölgeleri ve yankı genliği haritaları a) Numune-4 sağ flanş yüzeyinde ölçülen genlik dağılım b) Numune-4 sol flanş yüzeyinde ölçülen genlik dağılım c) Numune-4 üst yüzeyinde ölçülen genlik dağılım.	48
Resim 4.5: 1 Numaralı rib parçası üzerinde tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) ölçüm bölgelerinin işaretlenmesi.	50
Resim 4.6: Numune-1 ÇUDY yöntemiyle tespit edilen kusur bölgeleri ve yankı genliği haritaları a) Numune-1 sağ flanş yüzeyinde ölçülen genlik dağılım b) Numune-1 sol flanş yüzeyinde ölçülen genlik dağılım c) Numune-1 üst yüzeyinde ölçülen genlik dağılım	50
Resim 4.7: Bilgisayarlı tomografi cihazı.	52
Resim 4.8: Rib-4(1.çevrim),N-4 kodlu numune BT tarama sonucu-1.	52
Resim 4.9: Rib-4(1.çevrim),N-4 kodlu numune BT tarama sonucu-2.	53
Resim 4.10: Rib-6(0.çevrim),N-6 kodlu numune BT tarama sonucu-1.	54
Resim 4.11Rib-6(0.çevrim),N-6 kodlu numune BT tarama sonucu-2.....	54
Resim 4.12: Tahribatsız muayene işaretlemeleri (a) 6.Rib,0.termoform çevrimi (b) 4.Rib,1.termoform çevrimi (c) 1.Rib,2.termoform çevrimi (d) 3.Rib,0.termoform çevrimi.	56

Resim 5.1: Basma testi için hazırlanan numuneler.	57
Resim 5.2: Basma test düzeneği.	59
Resim 5.3: Basma testinde deformasyona uğramadan önce ve sonraki an görüntüsü.....	59

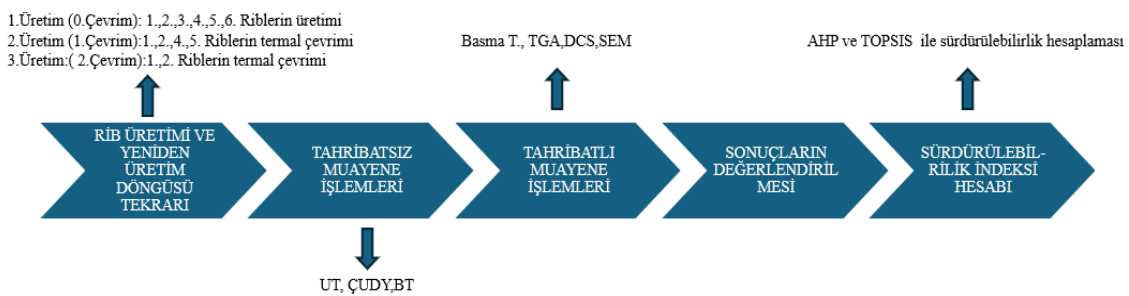
1. GİRİŞ

Son yıllarda etkisini giderek artıran küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel kaygılar, karbon salımının azaltılmasına yönelik çalışmaları hızlandırmıştır. Çevresel etkisi yüksek sektörlerin başında gelen havacılık ve savunma alanlarında hem sürdürülebilir malzeme kullanımı hem de üretim süreçlerinin çevresel ayak izinin küçültülmesi öncelik kazanmıştır. Havacılık sektörü, tek başına küresel karbon salımının yaklaşık %2'sinden sorumludur ve bu oranın 2050'ye kadar %3 civarına çıkacağı öngörülmektedir [1]. Bu bağlamda kompozit malzemeler, yüksek özgül sertlik ve mukavemetleri sayesinde geleneksel metallere güçlü bir alternatiftir. Örneğin, aynı yükü taşıyacak bir cam elyaf takviyeli polimer (Glass Fiber Reinforced Polymer ,GFRP) bileşen çeliğin yaklaşık dörtte biri ağırlıkta olabilir; sertliğin kritik olduğu durumlarda karbon elyaf takviyeli polimer(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) bileşen çeliğin onda biri ağırlığa kadar inebilir. Hafiflik, havacılık ve otomotiv gibi sektörlerde yakıt tüketimini ve emisyonu doğrudan düşürür. Üstelik kompozitler, üretimde daha az enerji gereksinimi ve toplam kütlenin azalmasına bağlı enerji/yakıt verimliliği kazandırır [2]. Kısaca, kompozitler; havacılık, otomotiv ve enerji gibi sektörlerde hafiflik ile yüksek mekanik performansı birleştirdikleri için yaygın biçimde tercih edilmektedir [3].Yüksek mukavemet, sertlik, yorulma direnci yanında yüksek sıcaklık ve korozyon direnci ile radar emilimi gibi işlevsel avantajlar da sağlar [4]. Sektörde yaygın kullanılan alüminyum gibi malzemelere göre daha hafif olmaları, daha düşük yakıt tüketimi ve daha az emisyon anlamına gelir [5].Sayısal olarak, geleneksel metalik tasarımlara kıyasla %10–%50 ağırlık, %10–%20 maliyet tasarrufu potansiyeli raporlanmıştır [6].

Bununla birlikte, geleneksel termoset kompozitlerin onarım ve geri kazanım süreçlerinde yapısal kısıtlar bulunur. Bu noktada polieterketonketon (PEKK) matrisli karbon elyaf takviyeli termoplastik kompozitler, hızlı termoformlanabilirlik, yeniden ısıl işlemle tamir/yeniden kullanım ve geri dönüştürülebilirlik özellikleriyle sürdürülebilirlik hedeflerine güçlü bir yanıt vermektedir.

Ancak yeniden ısıtma–şekillendirme çevrimleri, mikroyapı, kristallenme davranışı ve lif–matris ara yüzeyindeki değişimler üzerinden mekanik performansı etkileyebilir. Bu nedenle, termoplastik kompozitlerin çoklu çevrimlerdeki yapısal davranışının, çevresel ve ekonomik etkilerle birlikte sistematik biçimde değerlendirilmesi gereklidir.

Bu tez, Toray Cetex TC1320 (PEKK/KF) [45, 0, 90, -45, 90, 0, 45]s dizilimli malzemesinin yeniden şekillendirme çevrimlerine maruz kaldığında (0., 1. ve 2. çevrim) gösterdiği malzeme,proses ve yapısal etkileşimini deneysel ve analitik olarak incelemekte; elde edilen performans göstergelerini Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment, LCA) ve Yaşam Döngüsü Maliyeti (Life Cycle Costing, LCC) ile birleştirerek, AHP–TOPSIS temelli çok kriterli bir sürdürülebilirlik endeksi ile karar desteği sunmaktadır. Çalışma kapsamında termoformlama süreci, ısıtma çevrim koşulları ve kalıp basıncı gibi proses parametrelerinin etkisi; Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DTK)/ Termogravimetrik Analiz (TGA) ile kristallenme ve ısı kararlılık, Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Electron Microscope,SEM) ile yüzey-iç yapı, ultrasonik tarama (UT) ile iç kusurlar; ASTM D3410/D3039 referanslı basma testleri ile kiriş(chord) modülü ve basma dayanımı üzerinden incelenmiştir. Böylece, “termoplastiklerin geri dönüştürülebilirliği” söylemi, mekanik doğrulama, çevresel etki ve maliyet boyutlarıyla nicel olarak araştırılmıştır. İzlenen metodoloji sırasıyla üretim/yeniden üretim, tahribatsız–tahribatlı karakterizasyon ve çok ölçütlü değerlendirmeden oluşur; bu adımlar Şekil 1.1’deki akışta kısaca özetlenmiştir.



Şekil 1.1:Çalışma akış şeması.

1.1. Tezin Amacı

Bu tezde amaç; termoplastik matrisli kompozitlerin (PEKK/KF) yeniden şekillendirilebilir doğasından yararlanarak, yeniden kullanılabilirlik ve sürdürülebilir tasarım perspektifini, havacılıkta yaygın kabul gören termoset kompozitlere alternatif oluşturacak şekilde ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda:

- Vaka parçası (rib) üzerinde birden çok termoform çevrimi uygulanarak yeniden işlenebilirliğin yapısal bütünlük ve performans üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.
- Her çevrim sonrası malzemeye tahribatsız muayene (NDT) uygulanmış; ardından tahribatlı testlerle (Basma, DTK, TGA, SEM) mikroyapı özellik ve performans ilişkisi nicel olarak ortaya konmuştur.
- Deneysel çıktılar, mekanik performans, maliyet, döngüsellik (yeniden kullanım/geri kazanım) ve çevresel etki kriterleri altında AHP ve TOPSIS yöntemleriyle karar verme matrislerine aktarılmış; çok ölçütlü sürdürülebilir tasarım yaklaşımı kapsamında gösterilmiştir.
- Böylece, yapısal tasarımın yalnızca mekanik dayanım ile değerlendirilmemesi, sürdürülebilirlik odaklı bir seçim çerçevesinin literatüre kazandırılması hedeflenmiştir.

Bu amaç doğrultusunda tez, (i) hipotez olarak “arttırılan çevrim sayısının kristallenme ve fiziksel yaşlanma yoluyla rijitliği (modülü) artırabileceği; ancak ara yüzey/kesme taşıma kapasitesindeki zayıflamalar nedeniyle basma dayanımında azalma yaratabileceği”, (ii) mühendislik sonucu olarak “dönüştürülmüş termoplastik seçeneğinin, belirli görev/ömür senaryolarında LCA ve LCC bileşik metriği açısından termosete üstünlük sağlayabileceği” önermelerini sınar.

1.2. Tezin Kapsamı ve İçeriği

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde araştırma konusunun motivasyonu, araştırma problemi, kapsam ve özgün katkılar yer almaktadır. Ayrıca, tezin amacı (1.1) ve kapsam-içerik (1.2) alt başlıkları bu bölümde sunulmuştur.

İkinci bölümde literatür taramasına yer verilmiştir. Bu bölümde sırayla şu konu başlıkları hakkında bilgi verilmiştir: Kompozit malzeme ve uygulamalar;Termoplastik kompozitlerin özellikleri ve uygulama alanları;Termoform süreçleri;Termoplastik polimer morfolojisi;Kompozit muayene yöntemleri;Çok kriterli karar verme yöntemleri; LCA-LCC yaklaşımları;AHP ve TOPSIS yöntemleri ve literatürdeki araştırma boşlukları.

Üçüncü bölümde bu tez çalışmasında kullanılan Toray Cetex TC1320 PEKK/CF malzemesi, numune hazırlama süreci ve termoformlama işlemleri ayrıntılı şekilde açıklanmıştır. Ayrıca termal çevrimler sırasındaki proses parametreleri (sıcaklık, süre, basınç) ile termoformlama döngülerine ait deney tasarımı detaylandırılmıştır.

Dördüncü bölümde tahribatsız muayene yöntemlerinde kullanılan ultrasonik çoklu darbe yankı tarama(UT-PE) ölçümleri ve bilgisayarlı tarama(BT) test sonuçları sunulmuş ve elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Beşinci bölümde sırayla yapılan tahribatlı muayene işlemlerine yer verilmiştir. Bu kapsamda basma testi, termogravimetrik analiz(TGA), diferansiyel taramalı kalorimetre analizi(DTK), taramalı elektron mikroskobu deneyleri uygulanmış ve sonuçlar detaylı şekilde raporlanmıştır. Tezin altıncı bölümünde sürdürülebilirlik analizine yer verilmiştir. Senaryo bazlı LCA ve LCC sonuçları kullanılarak, üç uzman katılımcının görüşleriyle hazırlanan AHP yöntemiyle kriter ağılığı hesaplanmış ve TOPSIS yöntemi ile alternatiflerin sıralaması oluşturularak sürdürülebilirlik endeksi hesaplanmıştır. Son bölüm olan yedinci bölümde ise ana bulgular özetlenerek sonuç ve ileri çalışmalar için öneriler sunulmuştur. Ayrıca gelecekte havacılık yapısal tasarımı ve döngüsel ekonomi hedeflerine yönelik mühendislik önerileri verilerek tez çalışması sonlandırılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Kompozit Malzemeler ve Uygulama Alanları

Lüiteratürde kompozit malzeme, iki ya da daha fazla malzemenin bir araya gelmesiyle oluşturulan ve bileşenlerin tekil özelliklerinden daha üstün özelliklere sahip malzemeler olarak tanımlanmaktadır [7]. Bileşenlerinden farklı özellik göstererek oluşan bu malzemede, ortaya çıkan farklılık bileşenlerinden birinin %10'dan fazla olması ve bir bileşenin diğerine kıyasla en az beş kat daha üstün özellik göstermesi durumunda belirgin hale gelir. Bu bağlamda kompozitler, makro ölçekte kimyasal olarak farklı fazlardan oluşan malzemeler olarak kabul edilmektedir [8].

2.1.1. Kompozitlerin Genel Özellikleri ve Önemi

Kompozitler, en önemli mühendislik malzemesi sınıflarından birini oluşturmaktadır. En düstriyel önemi ve uygulamalama çeşitliliği bakımından çelik malzemelerden sonra yer almaktadır. [9].Kompozitleri öne çıkaran en önemli özellikleri arasında yüksek özgül mukavemet,yüksek sertlik, yorulma ve korozyon direnci değerleri gelmektedir [2], [10].Bu sayede, kompozitler kullanılarak bileşen ağırlığı önemli ölçüde azaltılabilir. Kompozitlerin ikinci avantajı sağladığı enerji verimliliğidir. Günümüzde kullanılan kompozitlerin çoğu polimer bazlıdır. Polimer bazlı bu kompozitler ortam sıcaklığında veya ortam sıcaklığının birkaç yüz derece üzerinde üretilir. Bu sayede, kompozit üretimi için çok daha az enerji gerekir. Bu özelliğe ek olarak, uçak ve otomobillerdeki kullanımlarında toplam ağırlık azaltarak yakıt verimliliği artırılabilir. Kompozitler düşük sıcaklıklarda işlem görebilmesi ve hafif olmaları sebebiyle enerji açısından verimlidir [2]. Özellikle dünya genelinde artan sera gazı emisyonu düzenlemeleri nedeniyle, havacılık ve otomotiv endüstrisi yakıt verimliliği ve karbon salınımının azaltılması için baskı altındadır. Bunun için araç kütlesini azaltmak ve farklı üretim yöntemleri gerekmektedir [11]. Kompozit malzemelerin günümüz ihtiyaçlarına

sunduğu özellikler sayesinde; havacılık, otomotiv ve enerji sektöründe çeşitli avantajlar sunmakta ve bu sayede kompozit kullanımı her geçen yıl artmaktadır.

2.1.2. Kompozitlerin Karakteristikleri

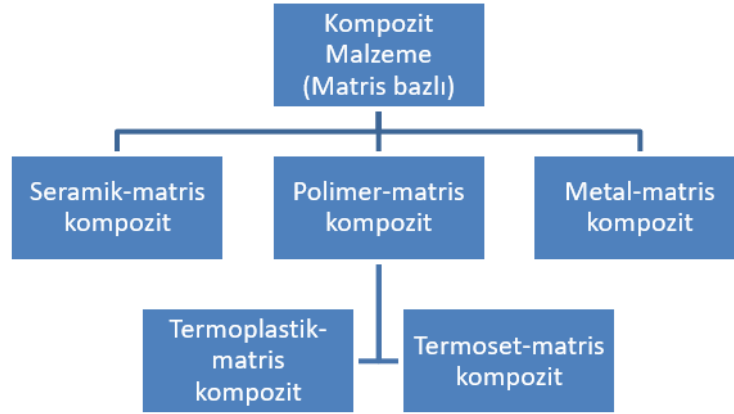
Kompozitler, sürekli faz(matris) içerisinde gömülü bir ve daha fazla süreksiz fazdan(takviye) meydana gelir. Matris fazı, kompozitin takviye elemanlarını bir arada tutarak yük transferini sağlar; takviye fazı (fiberler), kompozite yüksek elastisite, rijitlik ve dayanım özellikleri kazandırır. Kompozitler, yalnızca bileşenlerin özelliklerinden değil; aynı zamanda bileşenlerinin şekli, boyutu, dağılımı, yoğunluğu ve yönlenmesinden etkilenir. Takviye fazının yoğunluğu, kompozit özelliklerini etkileyen en önemli özelliklerdendir. Ayrıca takviye bileşenlerinin yönlenmesi, malzemenin izotropik veya anizotropik davranış göstermesinde belirleyici rol oynar. Sürekli lifli kompozitlerde anizotropi, tasarımcıya istenen yönlerde özellikleri kontrol etme imkanı sağlar [8].

2.1.3. Kompozitlerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler farklı kriterlere göre sınıflandırılmaktadır. En yaygın kullanılan sınıflandırma, matris fazına göre yapılmakta olup; polimer matrisli kompozitler (PMK),metal matrisli kompozitler (MMK),seramik matrisli kompozitler

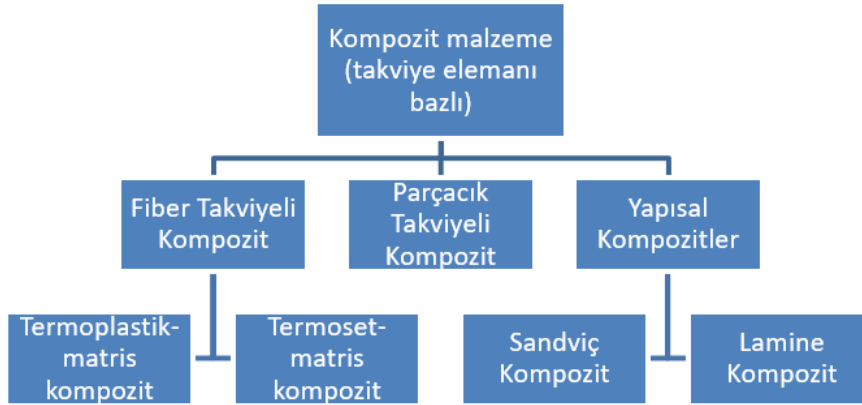
(SMK) ve karbon-karbon kompozitler olarak dört ana grupta incelenmektedir [12].Kompozitler takviye fazının geometrisine göre de sınıflandırılabilir. Parçacık takviyeli kompozitler, küresel , plaka parçacıklardan da oluşabilir.Buna ek olarak fiber takviye malzemesinin sürekli veya süreksiz takviye olarak da gruplandırılabilir [8]. Bu sınıflandırmalar, kompozit malzemelerin çeşitliliğini ortaya koymakta ve tez kapsamında ele alınan fiber takviyeli kompozit malzemenin konumlandırılması için temel oluşturmaktadır.

Kompozit malzemeler matris yapısına göre gruplandırılabilir. Malzemenin temel davranışını belirleyen matris türüne göre genel sınıflandırması Şekil 2.1’de sunulmuştur.



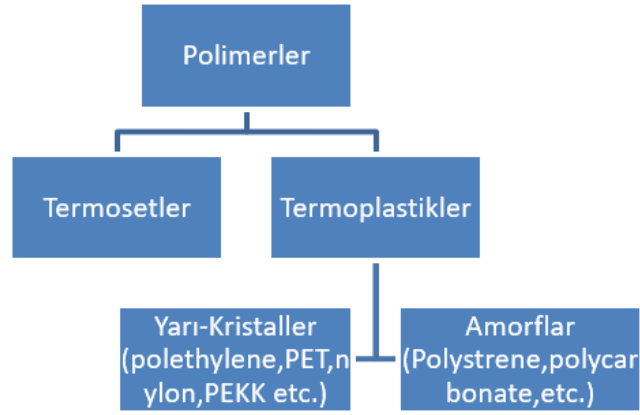
Şekil 2.1: Kompozit malzemelerin matris türüne göre sınıflandırılması.

Kompozit malzemelerin önemli sınıflandırma türlerinden biri de aynı zamanda temel bileşenlerinden biri olan takviye elemanına göre yapılan sınıflandırmadır. Şekil 2.2’de kompozit malzemenin takviye türlerine göre gruplandırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması.

Polimer-matrisli kompozitlerde diğer bir sınıflandırma türü matris malzemesinin polimer türüne göre yapılan sınıflandırmadır. Malzemenin mekanik ve termal özelliklerini belirleyen temel parametrelerden biri olan polimer yapısına göre gerçekleştirilen bu sınıflandırma Şekil 2.3’de verilmiştir.

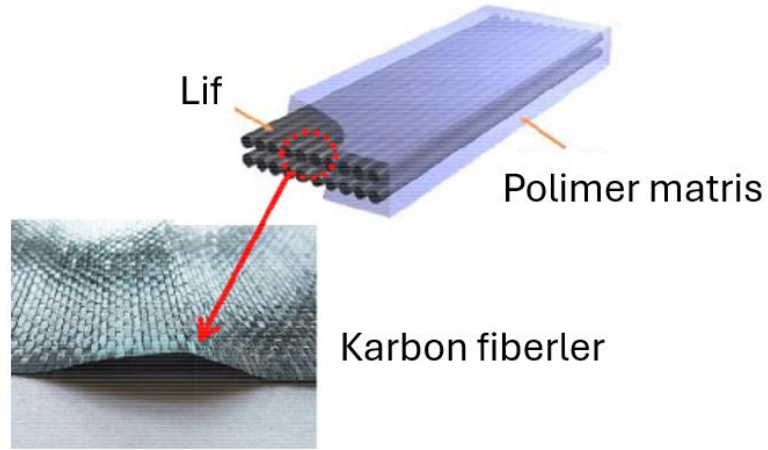


Şekil 2.3:Kompozit malzemenin polimer matris türüne göre sınıflandırılması.

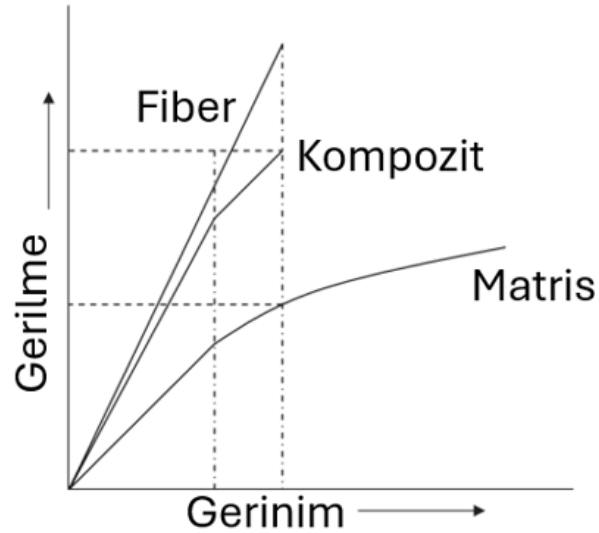
2.1.4. Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler

Fiber takviyeli polimer(FTP) kompozit, kompozit malzemelerin en yaygın ve endüstride de en çok tercih edilen türlerindendir. FTP kompozitler polimer esaslı bir matris ile bu matrisin içerisinde bulunan yüksek dayanımlı liflerden oluşmaktadır. FTP kompozitlerde genellikle lifler için cam elyafı, karbon elyafı ve aramid; matris malzemesi için ise epoksiler, polyesterler,bismaleimidler ve poliamidler kullanılır [13]. Sürekli lifler genellikle belirli bir yönde hizalanmışken, süreksiz lifler kısmen hizalı veya rastgele dağılmış olabilmektedir [2]. Elyaflarla takviyeli edilmiş polimer matris ile hazırlanan kompozit ve bileşenleri Resim 2.1’de gösterilmiştir. Bu iki bileşen farklı görevleri üstlenir: matris, yükün kohezifliğini ve yönelimini sağlar [14]. Matris, elyaf kompozite şekil vermek için elyafı birbirene bağlar, uygulanan yükü elyafı aktarır ve onları çevresel etkilere karşı korur. Taşıyıcı bileşen olan takviye lifleri, yüksek mukavemet ve rijitliği sayesinde malzemenin mukavemetini artırır [15]. Bu tür kompozitlerin mekanik davranışı, lif ve matris gerilme ve şekil değiştirme davranışlarına, lif içeriğine ve yükün uygulandığı yöne bağlıdır. Liflerin hizalı olduğu fiber takviyeli kompozitler anizotropik olduğundan özellikleri ölçüm yönüne bağlı olarak değişmektedir. Çekme gerilmesinin lif doğrultusunda uygulandığı durumda, lif genelde gevrek ve matris ise belli bir süneklikte olduğu kabul edilmektedir.Başlangıçta hem lifler hem de matris elastik deformasyona uğrar. Matris plastik deformasyonu geçtiğinde lifler ise elastik deformasyonu sürdürür. Bu sırada kompozit malzeme, eğilimi azalarak doğrusal davranış göstermeye devam eder. Kompozit kırılma

başlangıcı, liflerde çatlamların başlamasıyla meydana gelir. Ancak ideal durumda tüm lifler aynı anda kırılmaz ve bazı lifler kırıldıktan sonra matris bu kırık lifleri tutarak plastik deformasyon devam edebilir. Fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikler fiber ve matris bileşenlerinin ayrı ayrı gösterdiği gerilme ve şekil değiştirme davranışlarının birleşimidir. Kompozit bileşenlerinin malzeme üzerindeki etkileşimi Şekil 2.4’de gösterilmiştir [2].



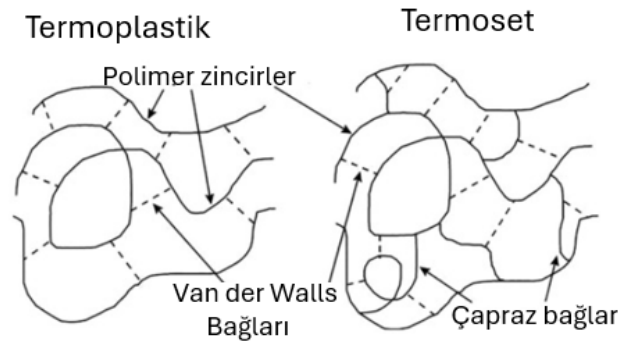
Resim 2.1:FTP, Elyaf takviyeli polimer ve bileşenleri [13]



Şekil 2.4:Fiber–matris–kompozit gerilme–gerinim davranışı.

2.2. Termoplastik Kompozitlerin Özellikleri ve Avantajları

Polimerler gelişmiş kompozitlerde tartışmasız en yaygın kullanılan matris malzemeleridir. Polimerler, termosetler (epoksi, polyester, fenolik) ve termoplastikler (Polietereterketon-PEEK, Polyetherketoneketone-PEKK, poliamid) olarak tanımlanır. Termosetlerin molekülleri arasında kovalent bağlarla birbirine çapraz bağlı ağ yapısına sahiptir. Bu yapısal özelliği sebebiyle de kürlenme sırasında yüksek sıcaklıklarda erimezler. Termosetler kürlenme işleminden sonra ısıtılırsa erimez, aksine bozulur. Bunun aksine, termoplastikler ısıtıldığında yumuşayan veya eriyen polimerlerdir. Termoplastikler, güçlü intramoleküler bağlara ancak zayıf intermoleküler bağlara sahip doğrusal veya dallanmış zincir moleküllerden oluşmaktadır. Bu polimerlerin erime ve katılaşma süreçleri tersinirdir ve ısı ve basınç etkisiyle yeniden şekillendirilebilirler [8] [16]. Termoset ve termoplastik arasında zincir yapısındaki farklılık Resim 2.2’de gösterilmiştir.



Resim 2.2: Termoset ve termoplastik malzeme zincir yapısı [17]

Termoplastiklerin sıcaklığa dayanıklı olması ve yeniden şekillendirilebilmeleri, yapılarının yarı kristal ve amorf olmasına bağlıdır. Yarı kristalin polimerlerde erime sıcaklığının yanı sıra cam geçiş sıcaklığı T_c de bulunmaktadır. Termoplastiklerin işleme sıcaklığı, erime sıcaklığı veya cam geçiş sıcaklığına göre belirlenir. Örneğin, amorf bir termoplastiğin şekillendirme işleminde, eriyik viskozitenin azalması için T_c ’nin oldukça üzerinde sıcaklıklara çıkılması gerekir [8]. Termoplastikler bu yapıları ve davranışları sayesinde yalnızca yüksek sıcaklık dayanımı sağlamakla kalmayıp aynı zamanda hızlı ısıtma ve soğutma döngülerine olanak vererek seri üretim süreçlerine entegre olabilen malzemeler olarak da öne çıkmaktadır. Çizelge 2-1’de termoplastik ve termoset malzemelerin temel karakteristik farklarını özetleyen tablo sunulmuştur.

Çizelge 2-1:Termoplastik ve termoset arasında yapılan karşılaştırma tablosu [18]

Özellik	Termoplastik	Termoset
Akışkanlık	Düşük	Yüksek
İşlenmemiş malzeme	Tamamen polimerize edilmiş ve katı paletler halinde tedarik edilir.	Tamamen polimerize edilmemiş genellikle reçineli sıvı veya yarı katı olarak tedarik edilir.
Komşu zincirleri arasında bağlanma	Komşu zincirler, hidrojen bağları veya van der Waals kuvvetleri gibi fiziksel bağlarla bir arada tutulur.	Komşu zincirler kimyasal bağlar veya çapraz bağlarla bir arada tutulur.
İşleme	Şekiller erimiş halde oluşturulur ve daha sonra şeklin korunması için soğutulur.	Şekiller soğuk veya sıcak halde oluşturulur ve daha sonra şeklin korunması için ısıtılır.
İşleme ekipmanları	Enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon gibi standart eriyik işleme ekipmanları kullanılabilir.	Kürleme işlemi için otoklav, pres veya kalıplama sistemleri gerekir.
İşlem süresi	Kısadır çünkü malzemenin sertleşmesi soğuma yoluyla hızlı gerçekleşir.	Uzundur çünkü çapraz bağların tamamlanması uzun zaman alır.
Geri dönüşüm	Termal geri dönüşüm mümkündür.	Termal geri dönüşüm mümkün değildir.
Boyutsal kararlılık	Orta dereceli	Yüksek

Çizelge 2-2’de termoplastik ve termoset karşılaştırmasını tamamlayıcı nitelikte olan proses, kullanım ve performans kriterleri açısından kritik görülen özelliklerin özeti verilmiştir.

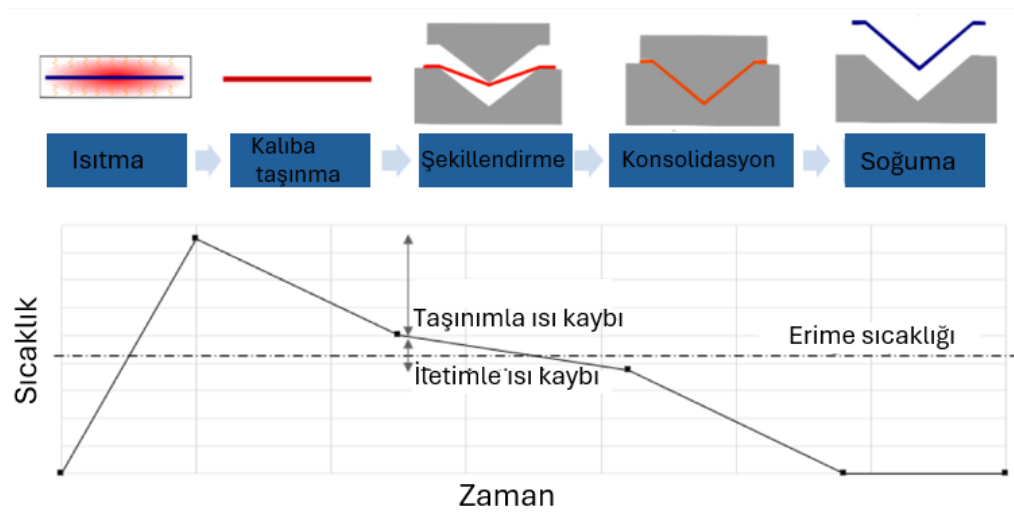
Çizelge 2-2:Termoplastik ve termoset kritik özelliklerinin karşılaştırılma özeti.

Termoplastik	Termoset
Çok viskozdur, sıcaklığa ihtiyaç duyar, ancak tekrar eritilebilir.	Sertleştirilmemiş haldeyken düşük viskozitelidir, ancak yeniden eritilemez.
Potansiyel olarak hızlı süreç, kısa üretim döngüsü	Nispeten yavaş bir süreç
Düşük işçilik maliyeti	Yüksek işçilik maliyeti
Oda sıcaklığında ve uzun süreli depolama (UV koruması altında)	Termoset reçinelerin kimyasal yapısının bozulmaması için özel koşullarda saklanmalıdır.
Nakliyesi için kısıtlama yoktur denilebilir.	Soğutmalı taşımacılık gerekir.
Yüksek işleme sıcaklığı > 200 C°	Düşük ila orta işleme sıcaklığı <180 C°
Düşük yanıcılık, duman ve toksisite (FST)	FST gerekliliklerini karşılamak için gerekli katkı maddeleri

2.3. Termoform Süreçleri ve Yeniden Şekillendirme Döngüleri

Termoplastik düz laminatların sıcaklık ve basınç etkisiyle hızlı bir şekilde şekillendirilmesi termoformlama olarak adlandırılmaktadır [19]. Termoplastikler için farklı üretim yöntemleri bulunsa da, havacılık sektöründe kısa çevrim süreleri sağlaması nedeniyle termoformlama ön plana çıkmaktadır. Bu işlem üç temel aşamadan oluşur: ön ısıtma, şekillendirme ve soğutma. Ön ısıtma aşaması, malzemenin radyasyon, iletim veya konveksiyon yoluyla ısıtılması gerçekleştirilmektedir. Fırın bölmesinde ön ısıtma işlemi tamamlandıktan sonra parça, malzemenin erime sıcaklığının üzerinde ısıtılmış kalıplarda preslenerek üç boyutlu şekil almaktadır. Termoformlama işleminin adımları Şekil 2.5'te gösterilmektedir.

Bununla birlikte, sıcaklık ve basınç parametrelerinin yanlış uygulanması malzemenin yapısında bozulmalara yol açabilmekte ve bu durum malzemenin performansını doğrudan etkilemektedir [20]. Dolayısıyla termoformlama sürecinde işlem parametrelerinin doğru seçilmesi kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 2.5:Termoplastik kompozit malzemenin termoform işlemindeki adımları [21]

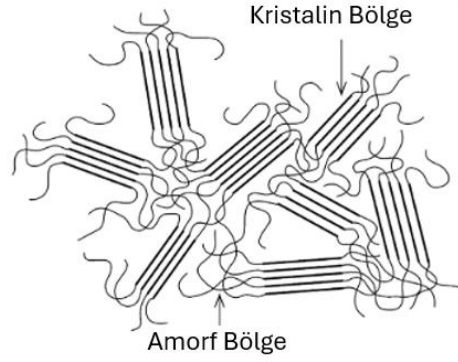
2.4. Termoplastikler İçin Polimer Morfolojisi ve Termal Özellikler

Morfoloji, plastiklerde moleküler zincirlerin katı yapı içerisindeki düzenleme biçimini ifade etmektedir. Zincirler düzenli bir yapı oluşturabilir (kristalin) ya da rastgele ve düzensiz bir şekilde dizilebilir (amorf). Moleküler zincirlerin bu düzenlenme biçimi, malzemenin mekanik, termal ve optik özellikleri üzerine doğrudan etkili olmaktadır. Morfoloji kavramı, atomik ölçekteki dizilimden daha büyük, ancak ürünün veya numunenin tamamından daha küçük boyutları tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu bağlamda “yapı” ve morfoloji kavramları çoğunlukla birbirinin yerine kullanılmakta olup, zincirlerin düzenlenmesini ifade etmektedir [17].

Kristalin malzemeler, moleküler zincirlerin yüksek derece düzenli ve tekrar edilebilir şekilde istiflendiği yapılardır. Bu malzemeler keskin erime noktalarına sahiptir. Kristallik derecesi, zincirlerin yapısal düzenliliğini ve düzenliliğin malzeme bütününe oranını tanımlamaktadır. Kristallik oranı, sertlik, yoğunluk, erime sıcaklığı, saydamlık ve difüzyon gibi özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir. Bununla birlikte, hiçbir polimer %100 kristalin değildir; her zaman belirli bir orada amorf içerik bulundurmaktadır [17].

Amorf malzemelerde ise moleküler zincirler belirli bir geometrik düzen sergilemez; zincirler karmaşık ve rastgele bir şekilde dizilmiş durumdadır. Bu tür polimerler genellikle gevrek, saydam ve sert özellik gösterirler. Kristalin malzemelerin aksine, belirgin bir erime noktaları bulunmaz; geniş bir sıcaklık aralığında yumuşama eğilimi sergilerler. Moleküler zincirlerin düzensiz dizilimi, moleküler zincirlerin birbirine dolanmasına neden olur. Bu zincirlerin birbirine dolanması durumu, eriyik işleme akışkanlığını azaltır ve dolayısıyla büzülme ve uzama eğilimini azaltır [17].

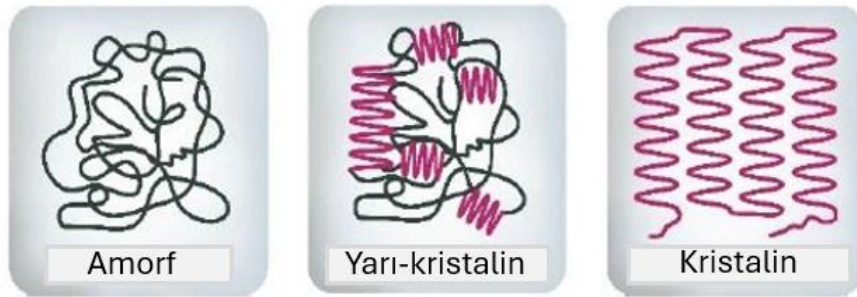
Yarı-kristalin malzemeler, hem kristalin hem de amorf bölgeleri içeren yapılardır. Kristalin bölgeler, polimer zincirlerinin katlanarak ve istiflenerek oluşturduğu yüksek derecede düzenli yapıları ifade ederken; amorf bölgeler, düzenin olmadığı ve zincirlerin birbirine dolaştığı kısımlardan oluşmaktadır. Yarı-kristalin malzemenin düzenli ve düzensiz zincir yapısı Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Bu ikili yapı sayesinde yarı-kristalin malzemeler, kristalin ve amorf özellikleri bir arada göstermektedir.



Şekil 2.6:Yarı-kristalin malzemede kristal ve amorf bölgeler [17]

Yarı-kristalin polimerler sertlik, mukavemet, kimyasal direnç, rijitlik, optik saydamlık ve erime sıcaklığı gibi özellikleri, kristallik oranı ile doğrudan ilişkilidir.

Ayrıca işleme koşulları da kristallik derecesini belirleyen kritik bir faktördür. Özellikle eriyik halde tüm polimerler amorf yapıda bulunmakta, soğuma hızına bağlı olarak kristalin bölgeler farklı oranlarda oluşmaktadır. Hızlı soğutma zincirlerin düzenlenmesini engelleyerek amorf yapıyı artırırken, yavaş soğutma kristallik oranını yükseltmektedir. Şekil 2.7 amorf, yarı-kristalin ve kristalin yapıların moleküler düzeyde şematik gösterimi sunulmaktadır [17].



Şekil 2.7: Amorf, yarı-kristalin ve kristalin polimer zincir düzenleri [22]

2.4.1. Cam Geçiş Sıcaklığı ve Erime Sıcaklığı

Cam geçiş sıcaklığı (T_c), amorf bölgelerdeki moleküler zincirlerin hareketsiz ve sert durumdan daha esnek bir yapıya geçtiği kritik sıcaklık aralığı olarak tanımlanmaktadır. Bu sıcaklıkta zincirler arasındaki serbest hacim artmakta, dolayısıyla malzeme katı

halden kauçuksu hale geçiş göstermektedir. T_c yalnızca tamamen amorf polimerlerin değil, aynı zamanda yarı-kristalin polimerlerin amorf kısımlarının da karaktersitik bir özelliğidir. Ortam sıcaklığı T_c 'nin altında olduğunda amorf zincirler donmuş halde kalır ve cam benzeri davranış sergiler. Esnek ana zincire sahip polimerlerde T_c daha düşüş değerlerde gözlenirken, rijit ve kısıtlı hareketliliğe sahip zincir yapıları T_c 'ın daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle cam geçiş sıcaklığı, polimerlerin esnek veya rijit uygulamalardaki uygunluğunu belirlemede kritiktir [23] [24].

Erime sıcaklığı (T_E), yarı-kristalin polimerlerde kristalin bölgelerin düzenli yapısını kaybederek akışkan hale geçtiği sıcaklık aralığıdır. Yarı-kristalin polimerler T_c 'ın üzerinde yumuşamaya başlayarak, gerçek akışkanlık davranışını yalnızca T_E aralığında göstermektedir. Genel olarak, T_E değeri T_c ' den daha yüksektir. Ayrıca, polimer zincir uzunluklarının farklılığı ve zincir hareketliliği nedeniyle T_c ve T_E tek bir sıcaklık değerinde değil, belirli bir sıcaklık aralığında gözlemlenmektedir. Yarı-kristalin polimerler T_E 'nin üzerinde hızlı bir faz geişyle katı halden viskoz sıvı hale dönüşerek şekillendirilebilirken, amorf polimerler T_c ' ın üzerinde daha geniş bir sıcaklık aralığında yumuşamakta ve mekanik dayanımlarını hızla kaybetmektedir [25].

2.4.2. Kompozitlerin Tasarım Kuralları

Metal gibi geleneksel malzemelerden farklı olarak, kompozit malzemelerde yapısal davranış; katman sayısı, lif açıları, dizilim düzeni ve simetri özelliklerine doğrudan bağlıdır. Bu parametreler, malzemenin yük taşıma kapasitesini, burkulma direncini ve hasar toleransını belirleyen temel etkenlerdendir. Bu sebeple, kompozitlerde malzeme tasarımı için bazı kuralları bulunmaktadır. Bu kurallar, literatürde yer alan deneysel çalışmaların ve üretici tecrübelerinin sonucunda geliştirilmiş, kompozitlerin mekanik performansını arttırmayı ve hasar riskini amaçlayan yaklaşımlardan oluşmaktadır [26], [27]. Kompozit üretimindeki bazı başlıca tasarım kuralları vce teknik gerekçeleri Çizelge 2-3'te özetlenmiştir.

Çizelge 2-3:Kompozit tasarım kuralları ve teknik gerekçeleri [26] [27] [28].

Tasarım Kuralı	Açıklama	Teknik Gerekçe
Simetri kuralı	Laminatın bir yarısındaki dizilim diğer yarısıyla aynıysa simetriktir.	Simetrik dizilim burkulma ve deformasyon dengesini sağlar.
Katman tekrarı	Aynı yöndeki en fazla dört katman ardışık olabilir.	Aşırı tekrar matris çatlamasına yol açar.
0°–90° kuralı	0° ve 90° katmanları ardışık bulunamaz.	Düzgün yük dağılımı için katman düzeni gerekir.
Denge kuralı	+45° ve –45° katman sayıları eşit olmalıdır.	Denge sağlanarak burkulma ve bükülme engellenir.
Oran kuralı	Her açı en az %6, en fazla %80 oranında bulunmalıdır.	Farklı açılar yapısal denge için kritik sınırlar dahilinde olmalıdır.
Lif yönelimi sınırı	Lif yönelimleri genellikle ±45°, 90°, 0° ile sınırlandırılmalıdır.	Belirli yönelimler mekanik özellikleri optimize eder.
Katman kalınlığı	Her katman eşit kalınlıkta olmalıdır.	Düzgün kalınlık üretim kolaylığı ve homojenliği artırır.
Matris çatlaması önleme	En fazla dört aynı lif yönelimi; en fazla iki fiber yönelimine izin verilir.	Matris çatlakları ve lif kopmalarını önlemek için sınır konur.
0° katmanı konumu	0° katmanı simetri ekseninden uzak yerleştirilmelidir.	Burkulma direncini artırır.
±45° katmanlarının konumu	±45° katmanları simetri ekseninden uzağa yerleştirilmelidir.	Hasar toleransını ve burkulma direncini iyileştirir.
Dış katmanlarda 45°	Dış katmanlara 45° lif eklenerek darbe hasarı sınırlandırılır.	Lif bölünmesini sınırlandırır, darbe dayanımını artırır.
Kesme gerilmesi bölgeleri	±45° katmanları yoğun kullanılarak kesme rijitliği artırılır.	Kesme mukavemetini ve rijitliği yükseltir.
±45° lif oranı	Liflerin en az %40'ı eksenel yüke göre ±45° olmalıdır.	Bağlantılarda yük aktarımını iyileştirir.

2.5. Kompozitlerin Muayene Yöntemleri

Kompozit malzemeler birçok sektörde tercih edilen ileri mühendislik malzemeleri olmasına rağmen, üretim sürecindeki zorluklar ve işlem sırasında oluşabilecek hasarların anlık olarak kolayca tespit edilmemesi önemli dezavantajlar arasında yer almaktadır. Bu durum, malzeme kalitesine duyulan güveni azaltabilmektedir. Dolayısıyla, üretim sonrasında gerçekleştirilen kontroller, hem malzemenin güvenilirliğinin sağlanması hem de hizmet ömrünün garanti altına alınması açısından kritik öneme sahiptir. Bu amaçla kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri, yapıya herhangi bir zarar vermeden üretim sürecinde veya sonrasında meydana gelebilecek hasarları tespit etmeye imkan sağlamaktadır. Literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında x-ışını radyografisi, ultrasonik testler, termografi ve akustik emisyon teknikleri yer almaktadır [29]. Bu çalışma kapsamında ise tahribatsız muayene yöntemlerinden ultrasonik tarama, çoklu sarbe yankı ve bilgisayarlı tomografi teknikleri kullanılmıştır.

2.5.1. Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Ultrasonik Tarama Yöntemi

Ultrasonik tarama (UT) akustik temelli tahribatsız muayene teknikleri arasında uzun süredir kullanılan güvenilir ve etkili bir yöntemdir. Basit uygulama prensibine rağmen yüksek hassasiyetli ölçümler yapabilemesi bu yöntemi hasar tespiti açısından öne çıkarmaktadır. Ultrasonik dalgalar 20 kHz'in üzerinde yüksek frekanslı ses sinyalleri olup, incelenecek parçaya gönderilir ve malzeme içerisinden geri yansıyan sinyallerin analizi ile hasarın konumu, boyutu ve türü hakkında bilgi elde edilir. Bu yöntem, üç ana bileşenden oluşan bir sistemle çalışabilmektedir. Kaynak, ultrasonik dalgayı üretir; alıcı, malzemeden geri dönen sinyalleri toplar; sinyallerin analizi ise hasar karakteristiğini ortaya koyar [29].

Bu yöntemin doğru şekilde kullanılabilmesi için ultrasonik dalgaların malzeme içerisine kayıpsız iletilmesi oldukça önemlidir. Bu sebeple, prob ile numune arasındaki hava boşluğunun yarattığı iletim engelini ortadan kaldırmak amacıyla su iletim ortamı olarak kullanılmaktadır. Su, akustik köprü görevi kurarak dalgaların yüzeyden malzeme içerisine etkin şekilde geçmesini sağlar. Bu sayede dalgalar, malzeme içindeki

süreksizliklere ulaştığında yansır, alıcı tarafından toplanır ve hataların türü ve konumu güvenilir şekilde analiz edilir. Böylece ölçümlerde olası sinyal kaybı önlenmekte ve daha doğru hasar tespiti gerçekleştirilmektedir [30].

Çalışmada uygulanan ultrasonik tarama sürecine ilişkin görseller Resim 2.3 ve Resim 2.4’de verilmiştir. Resim 2.3’de üretim hattında robotik sistemlerle çalışan ultrasonik tarama işlemi görülmektedir.



Resim 2.3:Robotik sistemle çalışan UT.

Resim 2.4’ te taşınabilir ultrasonik tarama cihazı kullanılarak probun fiziksel olarak erişemediği dar bölgelerde gerçekleştirilen ölçüm uygulamasına ait bir an gösterilmiştir. Bu tür sistemler, özellikle karmaşık geometrilere sahip kompozit yapılarda lokal kusurların tespiti için hızlı ve yüksek doğrulukta ölçüm yapılmasına olanak sağlamaktadır.



Resim 2.4:Taşınabilir cihazla yapılan UT.

Çoklu Ultrasonik Darbe Yankı (ÇUDY)

Çoklu ultrasonik darbe yankı yöntemi, ultrasonik uygulamalardan biri olup 1-50 MHz aralığındaki yüksek frekanslı ses dalgalarının kullanıldığı bir muayene yöntemidir. Bu yöntemde dalgaların iletimi, yansıması ve geri saçılması olmak üzere üç farklı mod incelenir. Her bir ölçüm dizisi için uygun dönüştürücü, bağlantı ortamı ve frekans değerleri kullanılarak sinyal üretimi ve algılama gerçekleştirilir. Homojen malzemelerde mevcut kusurlar bu yöntemle kolaylıkla tespit edilebilirken; heterojen malzemelerde de hasar analizi için etkili sonuçlar elde edilebilmektedir [31]. Yöntemin temel prensibi, birden fazla yansımanın kaydedilmesi ve bu yansımalar arasındaki gecikme sürelerinin analiz edilmesidir. Böylece dalga geçiş süresi, kusurlarda meydana gelen zayıflama ve saçılmaya bağlı enerji kaybı değerlendirilmektedir. Bu sayede, kusurların derinliği ve katman yapısının ayrıntılı profili hassas bir şekilde ortaya çıkarılabilmektedir.

Bilgisayarlı Tomografi Yöntemi (BT)

Bilgisayarlı tomografi, kompozit malzemelerde gözeneklilik, delaminasyon, matris çatlakları ve lif kırılmaları gibi iç kusurların tahribatsız şekilde incelenmesine imkan tanıyan ileri seviye bir muayene yöntemidir. X-ışını tabanlı hesaplamalı tomografi prensibine dayanan bu teknik, malzeme içerisindeki farklı bölgeleri X-ışını absorpsiyon kontrastı aracılığıyla ayırt edebilmekte; matris, fiber ve hasarlı alanlar doğrusal zayıflama katsayısı (μ) üzerinden belirlenmektedir [32]. Literatürde, BT'nin mikrometre seviyesinde çözünürlük sağlayarak gözeneklerin şekil, boyut ve dağılımını üç boyutlu olarak görselleştirebildiği ve diğer yöntemlere kıyasla daha güvenilir sonuçlar sunduğu belirtilmektedir [33] [34]. Özellikle havacılıktan otomotive kadar çeşitli sektörlerde yüksek oranda kullanılan kompozit malzemelerin iç kusurlarının hassas biçimde analiz edilmesi gerekliliği, BT'nin yaygın kullanımını teşvik etmektedir.

Bilgisayarlı tomografinin çalışma mantığı şu şekildedir: Parça farklı açılardan gönderilen X-ışınları ile taranır. Malzeme içerisinden geçen ışınlar, dedektör paneli tarafından elektriksel sinyallere dönüştürülür ve bu sinyallerden elde edilen iki boyutlu projeksiyon görüntüleri bilgisayar yazılımı aracılığıyla işlenir. Farklı açılardan alınan binlerce 2B projeksiyonun matematiksel olarak birleştirilmesiyle, numunenin üç

boyutlu hacimsel rekonstrüksiyonu elde edilir. Bu çalışmada kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinin avantaj ve sınırlarını daha net gösterebilmek için karşılaştırmalı bir özet Çizelge 2-4’te sunulmuştur.

Çizelge 2-4:Tahribatsız muayene yöntemlerinin hassasiyet, hız, derinlik analizi ve boyut açısından karşılaştırılması.

Yöntem	Hassasiyet	Hız	Derinlik Analizi	Boyut
UT	Yüksek	Orta	Yüzey altı	2B
ÇUDY	Orta	Yüksek	Katman ve derinlik	2B
BT	Düşük	Çok yüksek	Tüm hacim	3B

2.5.2. Tahribatlı Muayene Yöntemleri

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DTK)

DTK izotermal koşullar altında numunenin ısıtılması veya soğutulması sırasında ısı akışını sıcaklık ya da zamanın bir fonksiyonu olarak ölçen bir termal analiz tekniğidir. Çok yönlü bir yöntem olup kompozit malzemelerde cam geçiş sıcaklığı, özgül ısı kapasite, fiziksel yaşlanma, gerilme ile ilişkili entalpik değişimler ve kurlenme gibi termodinamik ve kinetik süreçlerin incelenmesinde kullanılmaktadır [35].

Polimer esaslı malzemelerin termal özelliklerini belirlemek için DTK tabanlı çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar arasında geleneksel DTK, paralel-nano DTK ve mikro elektro-mekanik (MEMS- DTK) teknikleri sayılabilir. Bu yöntemlerle erime sıcaklığı, kristallenme sıcaklığı, kristallik oranı, polimorfik dönüşümler ve ayrışmalar belirlenebilmektedir. Polimer bilimi açısından DTK büyük önem taşır, çünkü malzemenin ısıya karşı tepkisini doğrudan ölçme ve analiz etme imkânı sunar. Bu kapsamda polimer malzemeyi karakterize eden başlıca parametreler ısı kapasite, cam geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı ve geçiş entalpikleridir. Ayrıca kristallik oranı ve ısı iletkenlik gibi özellikler de DTK ile belirlenebilir.

DTK’nın en temel yöntemi geleneksel DTK’dır. Bu teknikte test numunesi ile referans numune arasındaki ısı transferi ölçülür. Ölçüm sırasında ısıtma veya soğutma oranı sabit tutulur. Bu sayede cam geçiş sıcaklığı, erime noktası ve kristallenme sıcaklığı gibi özellikler üzerinden polimerik malzemeler tanımlanabilir [36].

Kristallik derecesi, erime sırasında açığa çıkan füzyon entalpisine bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Bu hesaplamada ölçülen entalpi ile teorik tam kristalin entalpi karşılaştırılır. Kristallik derecesi ise aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir:

$$X_C (\%) = \frac{\Delta H_f(T_m)}{\Delta H_f^\circ T_m} \quad (2.1)$$

Burada, $\Delta H_f(T_m)$ erime noktasında ölçülen füzyon entalpisini, $\Delta H_f^\circ T_m$ ise tamamen kristalin bir polimerin teorik füzyon entalpisini temsil etmektedir [37].

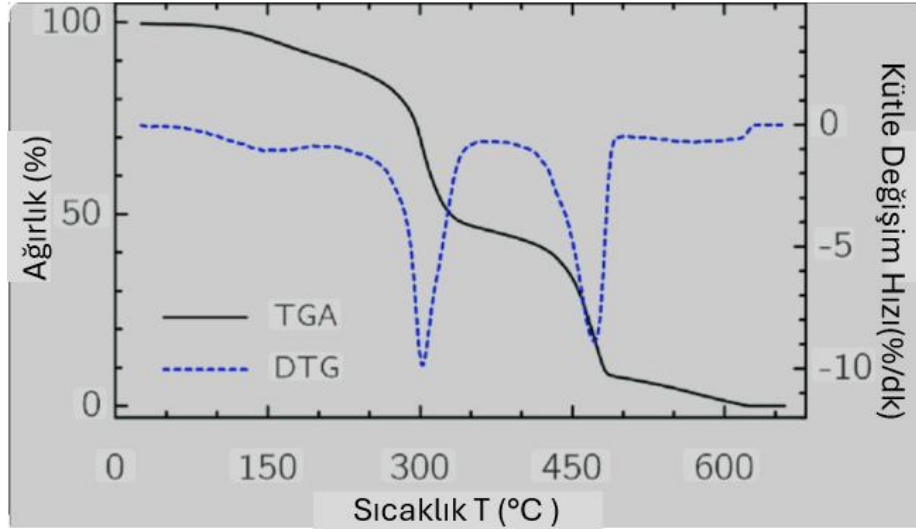
Termo Gravimetrik Analiz (TGA)

Kompozit malzemelerin termal kararlılığı maruz kaldıkları termal bozunmalara karşı gösterecekleri performansın doğrudan belirleyicisidir. Termogravimetrik analiz (TGA) bu kararlılığı değerlendirmek amacıyla belirli yüzde ağırlık kayıplarına karşılık gelen sıcaklıkların nicel olarak karşılaştırılması esasına dayanır. Genellikle %5, %20 ve %50 ağırlık kaybının gerçekleştiği sıcaklık değerleri incelenir [38].

TGA yönteminin çalışma prensibi, kontrollü bir atmosfer (hava, azot, argon vb.) altında numunenin belirli bir hızla ısıtılması ve bu süreçte meydana gelen kütle kayıplarının yüksek hassasiyetli bir terazi ile ölçülmesine dayanır. Ölçülen kütle kaybıyla, malzemedeki fiziksel ve kimyasal süreçlerin nicel değerlendirilmesi yapılabilir. TGA'daki ölçüm verileri arasında başlangıç bozunma sıcaklığı ve bozunma sonunda kalan kütle yer alır. Ayrıca, kütle kaybı hızının sıcaklığa göre türevlenmesiyle elde edilen diferansiyel termogravimetrik (DTG) eğrileri, malzemenin tek ya da çok basamaklı bozunma mekanizmasına sahip olup olmadığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 2-8'de polimer bir malzemenin TGA testi sonucunda, TGA(siyah düzgün eğri) ve DTG(mavi kesikli eğri) sonuçları örnek olarak verilmiştir. TGA eğrisi, sıcaklık arttıkça malzemedeki meydana gelen kütle kaybını göstermektedir. Grafiğin düşük sıcaklığa denk gelen kısımlarında gözlenen kütle kaybı düşüktür çünkü buradaki kütle kaybı genelde nemin veya uçucu bileşenlerin uzaklaştırılması sebebiyle gerçekleşir. Yüksek sıcaklık bölgelerindeki keskin kütle kayıpları ise polimer matrisin termal bozunmasıyla ilişkilidir. DTG eğrisi, kütle kaybı hızını sıcaklığın fonksiyonu olarak göstermektedir. Eğri üzerindeki pikler, bozunma sürecinin gerçekleştiği en yüksek sıcaklığı temsil etmektedir. Örneğin, Şekil 2.8 DTG'deki yaklaşık 300 ve 450 civarında

gözlenen pikler, malzemenin bu iki sıcaklıkta iki aşamalı bozunmaya uğradığını göstermektedir.



Şekil 2.8: TGA ve DTG eğrilerinin tipik görünümü [39].

Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM)

Polimer malzemelerin karakterizasyonu, yapısal özelliklerinin geliştirilmesi ve performanslarının anlaşılması açısından büyük önem taşır. Polimerlerin morfolojisi ve zincir yapısı üzerine yapılan çalışmalar, makroskobik özellikler ile moleküler düzen arasındaki ilişkiyi ortaya koymakta ve yeni polimerik malzemelerin geliştirilmesine yön vermektedir. Bu kapsamda kullanılan önemli yöntemlerden biri de taramalı elektron mikroskobudur. SEM, malzemelerin yüzey topografyası ve morfolojisini yüksek çözünürlükle incelemeye olanak tanır. Polimerlerin kırılma yüzeyleri (fraktografi), mikro deformasyon mekanizmaları ve organizasyon yapıları bu yöntemle detaylı biçimde gözlemlenebilir. Yaklaşık 10 nm ve üzerindeki yapısal özelliklerin görüntülenmesine imkân sağlayan SEM, polimerlerin yüzey analizi ve morfolojik karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır [40].

2.6. Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi ve Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

Sürdürülebilirlik politik bir kavram olup kökeni 1987 yılında yayımlanan Brundtland Raporu'na dayanmaktadır. Bu rapor, insanlığın daha iyi yaşam beklentileri ile doğanın sınırlamaları arasındaki gerilimi açıklamış ve sürdürülebilir kalkınmayı, “gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama imkânını tehlikeye atmadan mevcut nesillerin ihtiyaçlarının karşılanabilmesi” şeklinde tanımlamıştır [41],[42] .

Sürdürülebilirlik doğası gereği karmaşık ve çok boyutlu bir yaklaşımı ifade etmektedir. Çevresel (ekolojik) sürdürülebilirlik, sosyal (toplumsal) sürdürülebilirlik ve ekonomik sürdürülebilirlik alt sistemler birbirleriyle eş zamanlı ve dinamik ilişkiler içindedir [43]. Bu çok boyutlu yapının ölçülebilmesi için farklı kriterlerin entegre edilmesi ve bileşik endekslerin oluşturulması gerekmektedir [44]. Dolayısıyla, sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde yalnızca tek bir göstergeye odaklanmak yeterli olmayıp, çeşitli göstergelerin bütüncül şekilde dikkate alınması zorunludur.

Bu bağlamda yaşam döngüsü temelli yöntemler (örneğin LCA – Life Cycle Assessment, LCC – Life Cycle Costing) ve çok kriterli karar verme (ÇKKV) teknikleri, malzemelerin ve üretim süreçlerinin çevresel, ekonomik ve döngüsellik boyutları açısından nesnel biçimde değerlendirilmesine ve karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

2.6.1. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi (ÇKKV)

Malzeme seçimi ve mühendislik uygulamalarında tek bir ölçüt yerine çok sayıda ve çoğu zaman birbiriyle çelişen kriter dikkate alınmaktadır. Bu tür problemlerin çözümünde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri çok kriterli karar verme (ÇKKV) teknikleridir. ÇKKV, karar vericilere farklı kriterleri aynı anda göz önünde bulundurarak optimum alternatifi seçme imkânı sunar. Bu süreçte yalnızca fayda ve maliyet göstergeleri değil, aynı zamanda karar vericilerin tercih ve değerlendirmeleri de sistematik biçimde hesaba katılmaktadır.

Literatürde ÇKKV kapsamında kullanılan başlıca araçlar arasında Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), VIKOR, Çok Kriterli Fayda Teorisi (MAUT), ELECTRE ve TOPSIS bulunmaktadır. Bu yöntemlerin her biri, farklı kriterlerin önem derecelerini dikkate alarak alternatiflerin sıralanmasını veya optimum seçimin yapılmasını sağlar.

Sürdürülebilir mühendislik uygulamalarına yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde, özellikle enerji, inşaat ve ulaştırma gibi disiplinlerde AHP ve TOPSIS yöntemlerinin en sık tercih edilen teknikler olduğu görülmektedir.

ÇKKV yöntemleri özellikle çok sayıda alternatifin bulunduğu, ölçülmesi zor veya çelişkili kriterlerin söz konusu olduğu durumlarda karar verme sürecini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Bu nedenle, sürdürülebilirlik analizlerinde kullanılan yöntemler arasında ÇKKV teknikleri, nesnel ve sistematik karar desteği sunması bakımından öne çıkmaktadır [45].

2.6.2. LCA ve LCC Yaklaşımları

Yaşam Döngüsü Maliyeti (Life Cycle Costing, LCC)

Bir ürün veya sistemin tüm yaşam süresi boyunca oluşan maliyetlerinin analiz edilmesine yaşam döngüsü maliyeti (LCC) denir. LCC analizinin temel amacı, mevcut kaynaklar dikkate alınarak toplam maliyet açısından en uygun seçeneğin belirlenmesidir. Bu yöntem sayesinde, alternatif eylem yollarının maliyet etkileri sistematik olarak değerlendirilebilmektedir. Örneğin, başlangıç maliyeti yüksek olan bir ürün, bakım ve onarım maliyetlerinin düşük olması sayesinde yaşam döngüsü boyunca alternatifine kıyasla daha ekonomik olabilir [46]. Dolayısıyla LCC, bir ürün veya sistemin üretimden kullanım sürecine ve nihai bertarafına kadar tüm aşamalarda oluşan ekonomik maliyetlerin çok boyutlu biçimde değerlendirilmesine imkân tanımaktadır.

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment, LCA)

Yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) bir ürün veya üretim sisteminin tüm aşamalarında kullanılan girdilerin ve ortaya çıkan çıktıların çevresel etkilerini sistematik biçimde değerlendiren bir araçtır. Literatürde hem yaşam döngüsü analizi hem de yaşam döngüsü değerlendirme terimleri kullanılmaktadır; bunun nedeni, yaşam döngüsü değerlendirmesinin envanter analizi ve etki değerlendirmesi bileşenlerini içermesidir. LCA yaklaşımıyla hammaddenin doğadan elde edilmesinden başlayarak ürünün işlenmesi, kullanılması ve nihai bertarafına kadar geçen süreçte çevresel etkiler bütüncül olarak incelenmektedir. Bu kapsamda, ürün yaşam döngüsü boyunca harcanan enerji miktarı ile atmosfere, suya ve toprağa bırakılan emisyonların

çevresel etkileri değerlendirilebilmektedir. Böylece yöntem, doğrudan ve dolaylı çevresel etkilerin tanımlanmasına ve ölçülmesine olanak sağlamaktadır [47].

2.6.3. AHP, TOPSIS ve Literatür Kullanım Örnekleri

Analitik Hiyerarşi Proses Yöntemi (AHP)

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) çok kriterli karar verme problemlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Temel prensibi problemin genel hedeften başlayarak kriterler, alt kriterler ve alternatifler şeklinde hiyerarşik bir yapıya dönüştürülmesidir. Karar vericiler aynı seviyedeki unsurları ikili karşılaştırmalar yoluyla değerlendirir ve bu karşılaştırmalarda 1–9 arasında bir ölçek kullanılır. Bu ölçek iki unsurdan hangisinin daha önemli olduğuna ve ne ölçüde önemli olduğuna ilişkin yargıları sayısal hale getirir.

Elde edilen ikili karşılaştırma matrislerinden ağırlıklar özvektör tekniği ile hesaplanır ve alternatiflerin öncelik sıralaması belirlenir. AHP'nin önemli özelliklerinden biri tutarlılık oranı (Consistency Ratio, CR) hesaplamasıdır. CR karar vericilerin yargılarındaki tutarlılığı ölçerek elde edilen sonuçların güvenilirliğini değerlendirir. Tutarlılık oranı kabul edilebilir seviyede olduğunda AHP yöntemi hem objektif hem de subjektif kriterlerin birlikte değerlendirilebilmesini sağlar.

Bu yöntem esnek yapısı, hiyerarşik modelleme kolaylığı ve farklı karar kriterlerini aynı çatı altında bütünleştirebilme kapasitesi nedeniyle mühendislikten planlamaya, kaynak tahsisinden sürdürülebilirlik analizlerine kadar pek çok alanda yaygın biçimde kullanılmaktadır [48].

Analitik hiyerarşik proses adımları;

1. Adım: İlk adım olarak problem tanımlanır ve buna uygun olarak amaç, kriterler ve alternatifler belirlenir. Bu hiyerarşik düzen içerisinde en üst seviyede amaç, orta seviyede kriterler ve en alt seviyede ise alternatifler konumlandırılır. Örneğin, bu tez çalışmasında amaç farklı malzeme alternatiflerinin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesidir. Bu kapsamda kriterler mekanik performans, maliyet, çevresel etki ve döngüsellik olarak belirlenmiştir. Alternatifler ise 0., 1., ve 2. termal çevrime girmiş termoplastik kompozitler ile termoset kompozitler olarak belirlenmiştir.

2. Adım: Hiyerarşik modelinin oluşturulmasının ardından kriterler ve alt kriterler arasındaki önem düzeylerinin belirlenmesi amacıyla ikili karşılaştırma matrisi

hazırlanır. Bu aşamada karar verici, kriterleri ya da alternatifleri çiftler halinde karşılaştırarak daha önemli olanı ortaya koyar [49]. Kriterler Saaty tarafından geliştirilen 1-9 arası ikili karşılaştırma ölçeği kullanılarak yapılır. 1 değeri bir kriterin diğerine göre eşit derece önemli olduğunu ifade ederken, 9 değeri bir kriterin diğerine göre aşırı önemli olduğunu ifade eder [50]. Bu çalışmada kullanılan karşılaştırma ölçeği Çizelge 2-5’te sunulmuştur.

Çizelge 2-5:Çiftler arası karşılaştırma ölçeği değerleri

Skor	Tanım
1	Eşit önemli
3	Orta ölçekte önemli
5	Yüksek önemli
7	Çok yüksek önemli
9	Aşırı önemli
2,4,6,8	Ara değerler

Ardından, n adet kriterin değerlendirilmesi için, i.kriterin j.kritere göre önem derecesini gösterecek şekilde A matrisi oluşturulur.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & a_{21} & a_{31} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & a_{32} & \dots & a_{2n} \\ 1/a_{31} & 1/a_{32} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & 1/a_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (2.2)$$

3. Adım: Kriterler arasındaki karşılaştırmalar A matrisi üzerinden yapılır ve ağırlık değerleri w_j dikkate alınarak her kriter için öncelik vektörü aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

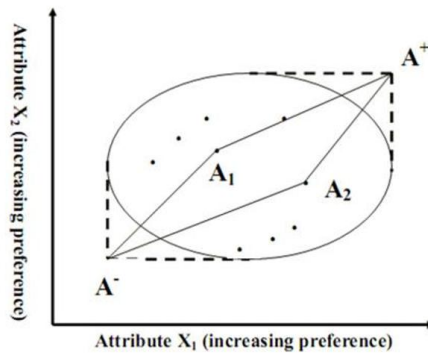
$$W_i = (\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j) / n \quad (2.3)$$

4. Adım: Karşılaştırmaların tutarlılığı tutarlılık oranı (CR) hesaplanarak belirlenir. CR’nin 0.1’den küçük olması beklenir. Eğer CR bu değerin üzerinde çıkıyorsa, bu ikili karşılaştırmaların tutarsız ya da hatalı olduğu kabul edilir ve süreç yeniden başlatılır. CR değeri, en büyük özdeğer (λ_{max}) ile hesaplanan tutarlılık indeksinin (CI), rassal indeks (RI)’ye oranıyla elde edilir [51].

Bu çalışmada AHP yöntemi farklı kriterlerin ağırlık faktörlerini belirlemek için kullanılmıştır. Belirlenen ağırlık faktörleri aşağıda detayları verilen TOPSIS yöntemi dahilinde kullanılmıştır.

Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemi (TOPSIS)

TOPSIS yöntemi çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden biri olup, alternatifler arasından en uygun seçeneğin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Yöntemin temel ilkesi, en iyi alternatifin pozitif ideal çözüme en kısa Öklidyen mesafede ve negatif ideal çözüme en uzak Öklidyen mesafede bulunmasıdır. Pozitif ideal çözüm, maliyet kriterlerinin minimum, fayda kriterlerinin ise maksimum değer aldığı çözüm kümesini temsil etmektedir. Buna karşılık, negatif ideal çözüm maliyet kriterlerinin maksimum, fayda kriterlerinin ise minimum olduğu çözüm kümesi olarak tanımlanmaktadır. TOPSIS yaklaşımında, her alternatifin pozitif ve negatif ideal çözümlere olan uzaklığı hesaplanmakta ve bu değerlerden hareketle ideal çözüme olan göreceli yakınlık katsayısı elde edilmektedir [52]. Şekil 2.9’da sunulan şematik gösterimde de görüldüğü üzere, yöntem alternatiflerin pozitif ve negatif ideal çözümlere yakınlık derecelerini dikkate alarak en uygun karar seçeneğinin belirlenmesini amaçlamaktadır.



Şekil 2.9: TOPSIS metodolojisi görseli [53]

TOPSIS Adımları:

1. Adım: Karar matrisi oluşturulur. Karar matrisi, alternatiflerin kriterler karşısındaki performanslarını gösterir ve uzmanlar tarafından doldurulan tablodan elde edilen değerlerden oluşur [49].

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2. Adım: Normalize matris oluşturulur. Normalizasyonun amacı, farklı ölçeklerdeki kriterleri aynı seviyeye getirmektir. Bu işlemde, değerlerin kareleri alınarak toplanır ve her bir değer, elde edilen toplamın kareköküne bölünür [49]. Burada a_{ij} elemanları Denklem (2.4) ile hesaplanmaktadır.

$$r_{ij} = \left\{ \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n a_{kj}^2}}, i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m \right\} \quad (2.5)$$

3. Adım: Bu çalışma için ağırlık faktörleri AHP yöntemiyle elde edilmektedir. Hesaplanan ağırlıkların toplamı 1 olmalıdır. Ayrıca bu ağırlıklar, “öncelik vektörü” olarak adlandırılmaktadır [49].

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (2.6)$$

4. Adım: Normalleştirilmiş değerler, kriter ağırlıklarıyla çarpılır.

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (2.7)$$

5. Adım: Pozitif ve negatif ideal çözümler belirlenir. Pozitif ideal çözümde fayda kriterleri için maksimum, maliyet kriterleri için ise minimum değerler; negatif ideal çözümde fayda kriterleri için minimum, maliyet kriterleri için ise maksimum değerler esas alınır. Bu değerler elde edildikten sonra, Çizelge 2-6’ da gösterildiği üzere her bir kritere karşılık gelen alternatiflerin uzaklıkları hesaplanabilir [52].

$$\begin{aligned} PIÇ &= A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \\ &= \{(\max_j v_{ij} \mid i \in J_1) (\min_j v_{ij} \mid i \in J_2) \mid j = 1, 2, \dots, n\} \\ NIÇ &= A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \\ &= \{(\max_j v_{ij} \mid i \in J_1) (\min_j v_{ij} \mid i \in J_2) \mid j = 1, 2, \dots, n\} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Çizelge 2-6:TOPSIS en yakın pozitif ve en uzak negatif seçim tablosu.

Kriter	Pozitif İdeal (A^+)	Negatif İdeal (A^-)
Mekanik Performans	Max()	Min ()
Maliyet	Min ()	Max()
Çevresel Etki	Min ()	Max()
Döngüsellik	Max()	Min ()

6. Adım: Alternatiflerin ideal çözüme uzaklıkları, Öklidyen yaklaşım kullanılarak hesaplanır. Bu yöntemde, v_{ij} değerleri ile her sütundaki maksimum değer v_j^+ ve minimum değer v_j^- dikkate alınarak hesaplama yapılır [52].

$$D_i^+ = \sqrt{\left\{ \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2 \right\}} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$D_i^- = \sqrt{\left\{ \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2 \right\}} \quad i = 1, 2, \dots, m$$
(2.9)

7. Adım: Alternatifin pozitif ve negatif ideal uzaklık değerleri kullanılarak çözüme olan yakınlığı, aşağıda verilen formül ile hesaplanır. Bu değer, “yakınlık katsayısı” olarak adlandırılır [52].

$$C_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad (2.10)$$

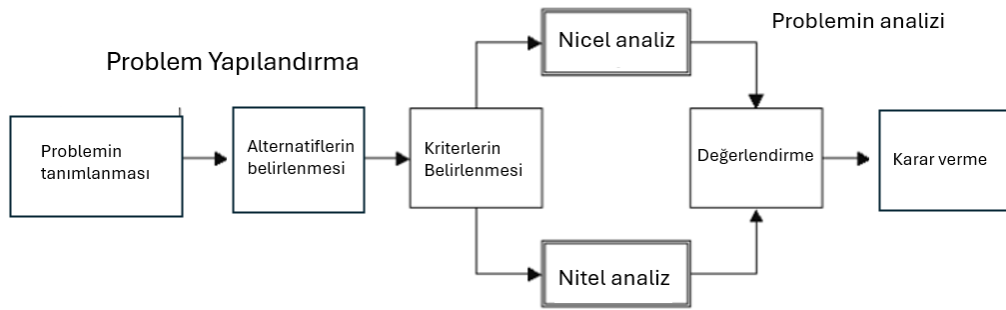
8. Adım: Yakınlık katsayısı 0 ile 1 arasında bir değer alır. Alternatifler arasından yakınlık katsayısı 1’e en yakın olan, en iyi alternatif olarak kabul edilir [52].

$$0 \leq C_i \leq 1 \quad (2.11)$$

Bu çalışmada TOSIS yöntemi farklı alternatifler arasından en iyi olanı belirlemek için kullanılmıştır.

2.6.4. Sürdürülebilirlik Değerlendirme Sürecinin Genel Akışı ve Karar Verme Yöntemleri Karşılaştırması

Çok kriterli karar verme yöntemleri karar sürecini sistematik ve yapılandırılmış bir yaklaşımla ele almaktadır. Bu kapsamda süreç iki ana aşamadan oluşmaktadır: problemin yapılandırılması ve problemin analizi. İlk aşamada problem tanımlanmakta, alternatifler belirlenmekte ve değerlendirme kriterleri ortaya konulmaktadır. İkinci aşamada ise nitel ve nicel analizler gerçekleştirilmekte, elde edilen bulgular bütüncül bir şekilde değerlendirilerek karar verme süreci tamamlanmaktadır. Bu yöntemsel yaklaşım Şekil 2.10'da şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 2.10: Karar verme metodunda problem yapısı ve analiz süreci [54]

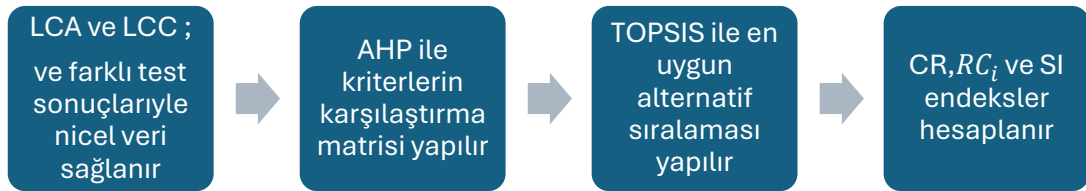
Bu çalışmada sürdürülebilirlik endeksinin hesaplanması amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri adım adım uygulanmıştır. Süreç şu şekilde özetlenebilir:

- **Amaç Tanımı:** İlk aşamada, çalışmanın temel amacı belirlenir. Bu çalışma özelinde amaç, bir yapısal hava aracı parçası için en sürdürülebilir malzeme alternatifinin seçilmesidir.
- **Kriterlerin Belirlenmesi:** İkinci aşamada, değerlendirmede kullanılacak sürdürülebilirlik kriterleri tanımlanır. Bu kriterler, üst ve alt başlıklar altında sınıflandırılarak sistematik bir yapı oluşturulur. Bu çalışma özelinde kriterler, mekanik performans, maliyet, çevresel etki ve döngüsellik olarak belirlenmiştir.
- **Alternatiflerin Seçimi:** Belirlenen kriterler çerçevesinde karşılaştırmaya tabi tutulacak alternatif malzemeler belirlenir. Bu çalışma kapsamında alternatif

malzemeler olarak; 0.,1.,2. Termal çevrim termoplastik kompozit ve termoset kompozit olarak belirlenmiştir.

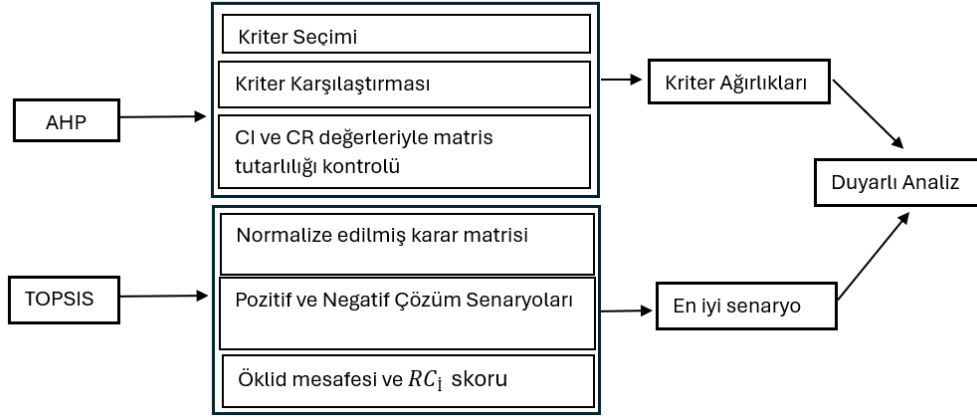
- Veri Toplama: Dördüncü aşamada, her bir alternatif için kriterlere ilişkin gerekli nicel ve nitel veriler toplanır. Bu çalışma özelinde, LCA, LCC değerleri, deneysel çalışma kapsamında yapılan tahribatsız ölçümler, basma testi, ısı testler (DTK, TGA) ve SEM yöntemleriyle sağlanmıştır.
- AHP Uygulaması: Beşinci aşamada, uzman görüşleri doğrultusunda ikili karşılaştırma matrisleri Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi kullanılarak oluşturulur ve kriter ağırlıkları elde edilir.
- TOPSIS Uygulaması: Altıncı aşamada, normalize edilmiş karar matrisleri TOPSIS yöntemi ile düzenlenir. Bu yöntem aracılığıyla alternatiflerin pozitif ideal çözüme yakınlığı ve negatif ideal çözüme uzaklığı hesaplanır.

Sonuç olarak, elde edilen veriler kullanılarak tüm alternatiflerin sürdürülebilirlik endeks değerleri hesaplanabilmektedir. Böylelikle çok yönlü malzeme özellikleri sayısallaştırılarak karar verme sürecine entegre edilmiştir. Şekil 2.11’de sürdürülebilirlik hesaplamasında sırayla uygulanan adımların akışı verilmiştir.



Şekil 2.11:Sürdürülebilirlik endeksi hesaplamasında kullanılan çok kriterli karar verme yaklaşımında, birbirini izleyen ve sırasıyla uygulanan adımların şematik olarak gösterimi.

Karar verme süreci iki aşamalı olarak kurgulanmıştır. İlk aşamada AHP yöntemi ile kriterler arasında ikili karşılaştırmalar yapılarak ağırlıklar elde edilmiştir. İkinci aşamada ise, bu ağırlıklar TOPSIS yöntemine entegre edilerek alternatifler pozitif ve negatif ideal çözümlerle karşılaştırılmıştır. Nihai olarak, en iyi senaryonun belirlenmesi için duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Sürecin bütünsel işleyişi Şekil 2.12’de sunulmaktadır.



Şekil 2.12:AHP ve TOPSIS sistematik akış şeması.

Bu çalışmada kriter ağırlıklarının belirlenmesi için AHP, alternatiflerin sıralanması için ise TOPSIS yöntemi tercih edilmiştir. AHP yöntemi ikili karşılaştırmalara dayalı olarak kriterlerin önem derecelerini sistematik şekilde ortaya koyarken; TOPSIS yöntemi bu ağırlıkları kullanarak alternatifleri pozitif ideal çözüme yakınlığı ve negatif ideal çözüme uzaklığı esasına göre sıralamaktadır. Bu iki yöntemin birbirini tamamlayıcı özellikleri literatürde yaygın olarak vurgulanmakta ve sürdürülebilirlik gibi çok disiplinli değerlendirmeler için uygun bir yaklaşım sunmaktadır. Çizelge 2-7’de AHP ve TOPSIS yöntemlerinin temel özellikleri, avantajları ve dezavantajları özetlenmiştir.

Çizelge 2-7:AHP ve TOPSIS karşılaştırma tablosu.

ÇKKV Metodu	Karar alma yöntemi	Avantajlar	Dezavantajlar	Mucit/Yılı
AHP	Optimum sonuç kriter ve alternatiflerin önem derecesine göre yapılır. Çözümünden önce problem hiyerarşik yapılandırılır.	Kriter ağırlıkları için ek bir araca gerek yoktur.	Kriter ve seçenekler arttıkça teknik olarak daha karmaşık hale gelebilir.	Thomas Saaty: 1970
TOPSIS	Optimum alternatif pozitif ve negative çözümlere olan mesafelere göre değerlendirilir.	Çözüm prosedürü basittir, karar verme kriteri ve alternatif çokluğundan bağımsız olarak değişmez.	Kriter korelasyonu için aradaki öklid mesafesi dikkate alınmaz. Çok boyutlu problemlerde vektör normalizasyonu gerekebilir.	Hwang and Yoon:1981

Çizelge 2-8’de çok kriterli karar verme yöntemlerinin karşılaştırması verilmiştir. Bu çizelgede yöntemlerin temel farkları, avantajları ve dezavantajları sunularak, yöntemler arası değerlendirme yapılması amaçlanmıştır.

Çizelge 2-8:Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri – karşılaştırma tablosu.

Yöntem	Açılımı	Temel Yaklaşım	Avantajları	Dezavantajları	Kullanım Alanları
AHP	Analytic Hierarchy Process	İkili hiyerarşik yapıdadır.Uzman yargısına dayanır.	Kolay ve anlaşılırdır. Kendi içinde tutarlılık analizi vardır.	Subjektiflik riski vardır. Fazla kıyaslama gerektirebilir.	Mühendislik, sürdürülebilirlik , stratejik planlama
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution	İdeal çözüme uzaklık tabanlı sıralama yöntemiyle çalışır.	Kolay hesaplanabilir ve nicel karşılaştırma sağlar.	Uç değerlerden etkilenebilir.	Malzeme seçimi, tedarikçi seçimi, sürdürülebilirlik
VIKOR	VlseKriteriju mska Optimizacija I Kompromisno Resenje	İyi ve kötü değerler hesaba katarak uç sonuçları önler.	Grup faydasını gözetir, uzlaşmacı çözüm sunar.	Bireysel ağırlık farklılıkları sonucu etkiler. Hesap karmaşıklığı yüksektir.	Mühendislik tasarımları, proje yönetimi
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité	Alternatiflerin değerine göre ne kadar üstün veya zayıf olduğunu belirler.	Kötü kriter değeri iyi kriter değeriyle dengelenemez .	Sonuç yorumlaması zor olabilir.	Altyapı projeleri, ulaştırma planlaması
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations	Tercih fonksiyonlarının arasındaki farka dayanır. Küçük farkların abartılmasını önler ve güvenilir sıralama elde edilir.	Gerçekçidir ve karar verici merkezlidir.	Eşik seçimi yüksektir ve bu subjektifliğe neden olur. Karmaşık hesaplar gerekir.	Enerji yönetimi, çevre yönetimi
MAUT / MAVT	Multi-Attribute Utility/Value Theory	Fayda fonksiyonu, hedefe başarı oranı baz alarak hesaplanır.	Önemli kriterlerin düşük performanslı olanı varsa gizlenemez.	Kriter etkileşimlerini dikkate almaz.	Finans, risk analizi
DEMATEL	Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory	Sistemdeki karmaşık ilişkiler analiz edilir ve kriterler arasındaki nedensel bağlantı yapılabilir.	Kriterler arası nedensellik ilişkisi vardır ve karmaşık sistemler nedensel diagramlarla analiz eder.	Uzman yargısına bağlılık hata riskini artırabilir.	Stratejik planlama, tedarik zinciri
ANP	Analytic Network Process	AHP nin üstüdür fakat hiyerarşi yerine ağ modeli kullanır, kriterler arası geri besleme yöntemini kullanır.	Bağımlı ve döngüsel durumlar daha iyi modellenabilir .	Sistemin kurulumu ve çift karşılaştırma çokluğu zaman alıcıdır.	İleri mühendislik, yönetim kararları
Fuzzy MCDM	Bulanık Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri	Bulanık küme teorisini, insana algısının kesinlikten uzak yapısını modellemek için referans alır.	Belirsiz ve subjektifliğin olduğu durumların modellenmesine izin verir.	Hesaplama karmaşıktır ve farklı yöntemlerle farklı sonuçlar verebilir.	Sürdürülebilirlik , risk, çevre politikaları

2.7. Literatürdeki Boşluk

Literatürde termoplastik matrisli kompozitlerle ilgili çeşitli çalışmalar olmasına rağmen bu malzemelerin havacılık yapısal uygulamalarına entegrasyonu üzerine yapılan araştırmalar sınırlıdır. Mevcut çalışmaların çoğu laminatların tek termal çevrim sonrası mekanik ve ısı davranışlarının incelenmesiyle sınırlıdır.

Sürdürülebilir tasarım yaklaşımıyla TP esaslı bir hava aracı yapıdal parçasının çoklu termal çevrim sonrasında mekanik, termal ve mikroyapısal özelliklerinin sırayla bütün olarak değerlendirmesine yönelik uygulanabilir bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu tez çalışması üretim süreci, deneysel test ve ölçümler ile bunları izleyen sürdürülebilirlik analizini bütüncül biçimde ele almaktadır. Literatürde tasarım odaklı araştırmalar sadece mekanik performansa odaklanırken, bu çalışmada sürdürülebilir tasarım yaklaşımıyla çevresel etki, maliyet ve döngüsellik kriterlerini de değerlendirmeye dahil edilmiştir. Böylece döngüsel ekonomi prensibi doğrultusunda TP'nin malzemenin yeniden kullanılabilirliğine ilişkin yenilikçi bir katkı ortaya konulmuştur.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, çalışmada kullanılan PEKK kompozit malzemeye döngülerin uygulanışı, numune hazırlama süreci ve deneysel metodoljinin genel akışıyla ilgili ayrıntılı bilgi verilmiştir. Amaç, termoformlama çevrimlerinin Toray Cetex TC1320 PEKK termoplastik kompozitin mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektir.

3.1. Kullanılan Malzeme

Bu araştırmada kullanılan malzeme Toray Cetex TC1320 PEKK(Karbon fiber/PEKK) termoplastik prepregdir. Bu malzeme, sürekli karbon fiber takviyeli ve polieterketonketon (PEKK) matrinden oluşmaktadır ve yarı kristalin bir yapıya sahiptir. Prepregler tek yönlü (UD) şerit formundadır. Malzeme dizilimi $[45, 0, 90, -45, 90, 0, 45]_s$, simetrik yerleşim dizilimiyle 14 katmanlı bir laminat şeklinde düzenlenmiştir. Üretilecek parça ölçülerine göre su jetinde dikdörtgen şeklinde kesilen ve termofom işlem görececek plakaların görüntüsü Resim 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1:Şekil verme işlemine uğramamış laminat plaka.

Laminatların üretimi, öncelikle elle serim işlemiyle temiz odada gerçekleştirilmiştir. Vakumlu torbalama işleminden sonra, katman dizilimi tamalanan numunler 380°C sıcaklık ve 8 bar basınç altında otoklav işlemiyle imal edilmiştir. Kullanılan malzemenin temel mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 3-1, Bu çalışmada kullanılan yarı-preg UD karbon liflerinin başlıca fiziksel özellikleri Çizelge 3-2’de verilmiştir.

Çizelge 3-2 ve Çizelge 3-3'te verilmiştir. Çizelge 3-1'de çalışmada kullanılan polimer matrisin temel fiziksel ve termal özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 3-1:Polimer matris özellikleri.

Polimer matris özellikleri	Değerler
Yoğunluk	1.30 g/cm ³
T_c (cam geçiş sıcaklığı)	160 °C
T_k (kristalleşme sıcaklığı)	265 °C
T_E (erime sıcaklığı)	337 °C
T_p (proses sıcaklığı)	370–400 °C

Bu çalışmada kullanılan yarı-preg UD karbon liflerinin başlıca fiziksel özellikleri Çizelge 3-2'de verilmiştir.

Çizelge 3-2: Yarı preg Karbon UD özellikleri.

Fiziksel Özellikler	Değerler
Yoğunluk	1.59 g/cm ³
Ağırlıkça matris içeriği	34%
Konsolide katman kalınlığı	0.14 mm

Kompozit malzemelerin farklı yönlerden gelen yükler altındaki davranışı, lif yönelimlerine bağlı olarak değişen dayanım özellikleriyle belirlenir. Malzemenin dizilim düzenine ve yönelimine göre elde edilen mekanik özellikler Çizelge 3-3'te sunulmuştur.

Çizelge 3-3:Mekanik özellikler.

%34 Polimer matris içerikli UD karbon mekanik özellikleri		
Özellik	Test Metodu	Değerler
Çekme kuvveti 0 °	ASTM D 3039	2410 MPa
Çekme kuvveti 90 °	ASTM D 3039	86 MPa
Basma kuvveti 0 °	ASTM D 3039	1300 MPa
Basma kuvveti 90 °	ASTM D 3039	1222 MPa

3.2. Termoform Döngüleri

Laminatlara belirlenen çevrim parametreleriyle termoformlama işlemi yapılmıştır. Proses boyunca sıcaklık ,basıç ve zaman verileri kaydedilmiştir. Termoformlama süreci ön ısıtma, basınç altında sıcak kalıplarda şekillendirme , soğutma ve kalıptan çıkarma aşamalarından oluşmaktadır.

Bu çalışmada aynı anda üretilmiş ve aynı özelliklere sahip plakalara termoformla şekil verme işleminden sonra, bir kere ve iki kere daha termoformla termal çevrim işlemi

uygulanmıştır. Her çevrime giren parçalardan numuneler alınmış ve sonrasında yapılan farklı uygulamalarla değişen özellikleri ölçülmüştür.

Her şekillendirme aşamasından alınan parçalara ait numunler farklı testlerle mekanik, termal ve mikroyapısal özelliklerdeki değişiklikler ölçülmüştür. Bu yaklaşımla, basma dayanımı testleri ile mekanik performans; DTK ve TGA testleriyle termal özellikler, reçine kalitesi, kristallenme davranışı; SEM, ultrasonik (UT,ÇUDY) ve BT ile mikroyapısal bütünlük ve hasar karakterizasyonu incelenmiştir.

Termoform işlemini gerçekleştirmek için kullanılan test düzeneği birkaç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar; malzemenin şekil almadan önce ısıtıldığı fırın bölümü, sıcaklık ve basınç altında şekillendirme işleminin gerçekleştirildiği kalıp bölümü, kalıbın ısınmasını sağlayan besleyici ünite ve sistem parametrelerinin ayarlamasının yapıldığı kontrol ünitesi olarak gruplandırılabilir. Şekillendirme işleminden önce termoplastik levhalar IR fırında ön ısıtmaya tabi tutulur. Isıtma işlemi, her biri 120 mm × 120 mm boyutlarında toplam 25 adet seramik ısıtıcı eleman ile sağlanmaktadır. Plakanın fırına alınması ısıtıcılar arasındaki mesafenin ayarlanması ve ısınan plakanın sıcak kalıp bölümüne taşınması servo motorlar yardımıyla gerçekleştirilir. Her bölmede yer alan PID kontrol üniteleri sayesinde, sistem içerisindeki farklı sıcaklık bölgeleri ayarlanabilmektedir. Resim 3.2’de termoform işleminin uygulandığı cihazın genel görünümü gösterilmektedir.



Resim 3.2:Termoformlama işleminin gerçekleştirildiği deney düzeneğinin genel görünümü.

Resim 3.3’de de ısıtma ve presleme işlemlerinin yapıldığı bölmelerin görüntüleri verilmiştir.

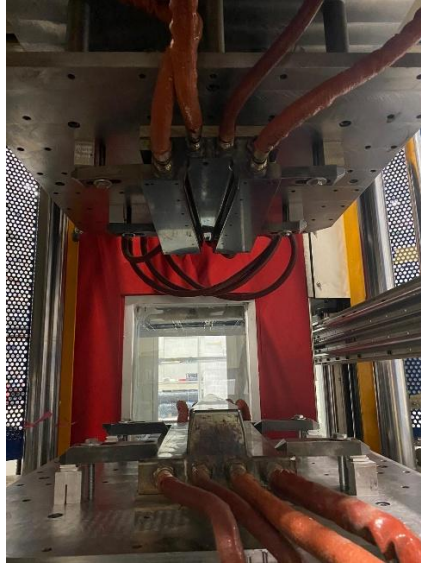


(a)

(b)

Resim 3.3:Termoformlama sistemine ait görüntüler: (a) ön ısıtma bölgesi, (b) şekillendirme bölgesi.

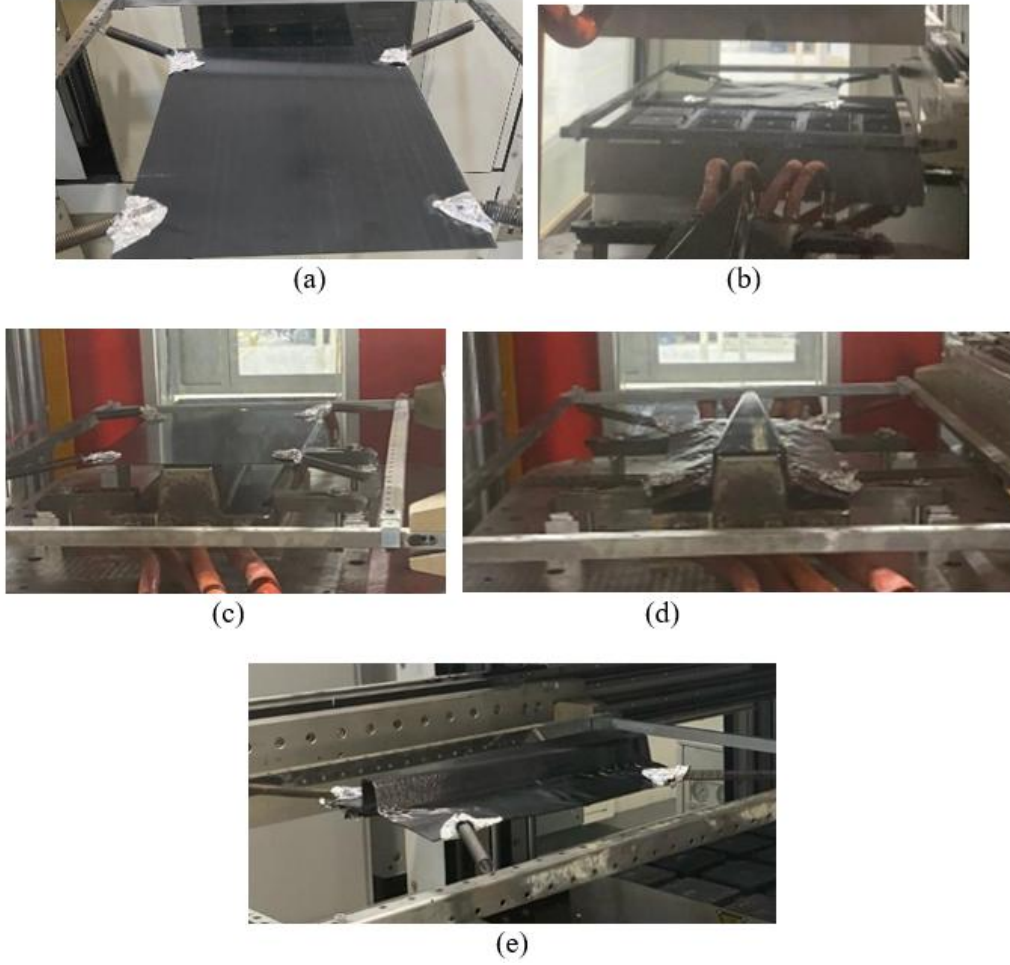
Presleme işleminde parça için özel tasarlanan dişi ve erkek kalıpların görüntüsü Resim 3.4’de sunulmuştur.



Resim 3.4:Presleme işlemindeki dişi ve erkek kalıplar.

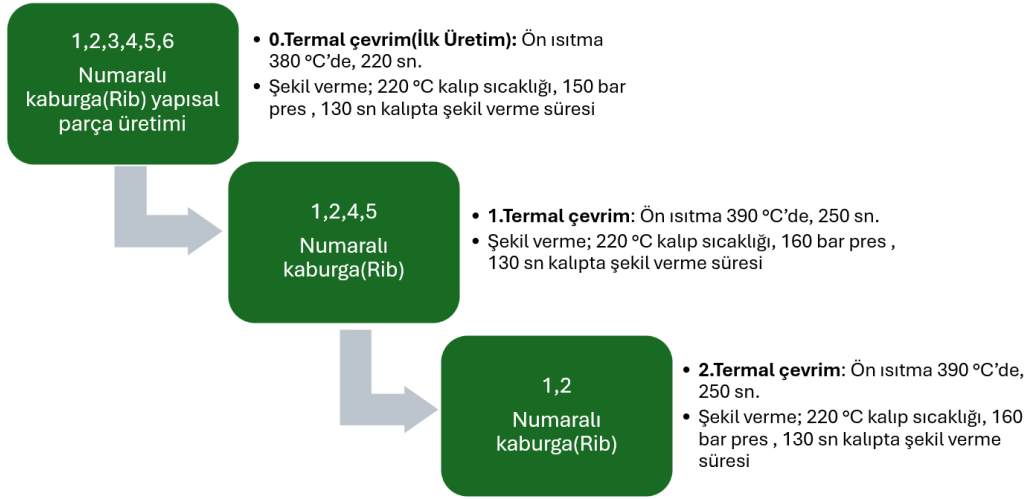
Termoform Yöntemiyle Kompozit Şekil Verme İşlemi Basamakları

Termoformlama süreci birkaç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak laminat plaka yaylar yardımıyla düzeneğe sabitlenir. Bu işlem malzemenin ısı etkisiyle yumuşayıp formunu kaybetmesi durumunda düzeneğin dışına taşmaması ve kalıp bölmesine düzgün bir şekilde ilerleyebilmesi için uygulanmaktadır. Ardından plaka kalıba girmeden önce fırın bölümünde ön ısıtma işlemine tabi tutulur. Bu aşamada IR fırın aracılığıyla laminat homojen şekilde ısıtılarak istenilen termoformlama sıcaklığına ulaşır. Malzeme yeterli sıcaklığa ulaştığında yumuşayarak şekil alabilir hale gelir; bu durumda yüzeyde form kaybı ve lif yönlerinin belirginleştiği gözlemlenmektedir. Son aşamada düz plaka malzemeye rib geometrisi kazandırmak amacıyla tasarlanan dişi ve erkek kalıplar kapatılarak yüksek sıcaklık ve basınç altında presleme işlemi gerçekleştirilir. Resim 3.5’te termoformlama sürecinin adımları sırasıyla gösterilmiştir. Bu işlem sonucunda düz plaka, ısı ve basınç etkisiyle kalıp geometrisine uygun rib formuna dönüştürülmektedir.



Resim 3.5:Termoformlama işleminin aşamalarının görsel gösterimi: (a) Laminantın düzeneğe sabitlenmesi, (b) Fırında ön ısıtma işlemi, (c) Malzemenin yumuşayarak form alabilir hale gelmesi, (d) Dişi ve erkek kalıpların kapatılarak presleme aşaması, (e) Şekillendirme sonrası kalıptan çıkarılmış rib parça görünüm.

Bu çalışmada, malzemenin çoklu ısıl çevrimlere karşı davranışını inceleyebilmek amacıyla aynı işlem farklı sayılarda çevrimlerle tekrarlanmıştır. Uygulanan işlemler; ilk şekillendirme, 1. ve 2. çevrimler şeklindedir. Her çevrim malzemenin yeniden ısıtılıp şekillendirme adımlarınıdan oluşmaktadır. Bu deneysel yaklaşım tekrar ısıl döngülerin mikroyapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Üretim döngüleri numune gruplarının dağılımı Şekil 3.1 'de verilmiştir.



Şekil 3.1:Termoforming işlemindeki üretim döngüleri ve numune gruplarının deneysel akışı.

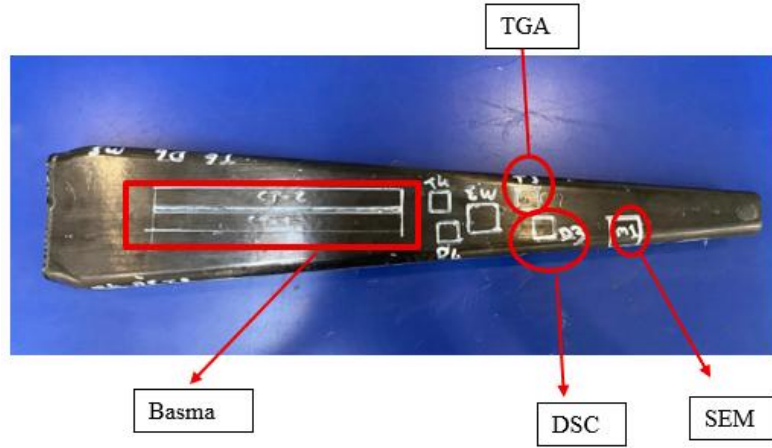
Her termoformlama çevriminde uygulanan proses parametreleri Çizelge 3-4'de sunulmuştur.

Çizelge 3-4:Termoforming çevrim parametreleri.

Üretim Döngüsü	Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	Ön ısıtma Süresi(sn)	Kalıp Basıncı (bar)	Şekil Verme Süresi (sn)	Uygulanan Numuneler
1. Üretim Döngüsü	380	220	380	220	150	130	1, 2, 3, 4, 5, 6
2. Üretim Döngüsü	390	220	390	250	160	130	1, 2, 4, 5
3. Üretim Döngüsü	390	220	390	250	160	130	1, 2

3.3. Numune Hazırlama ve Deney Tasarımı

Termoformlama işlemi tamamlandıktan sonra deney numuneleri hazırlama işlemi yapılmıştır. Numaralandırılan her parçadan , yapılacak test standartlarına uygun ölçülerde numuneler hazırlanmıştır. Kesim işlemi su jeti cihazı kullanılarak yapılmıştır. Resim 3.6'da parça üzerinde farklı test yöntemlerine (Basma, DSC, TGA ve SEM) ait bölgelerin işaretlemesi sonrasında alınan görüntü verilmiştir.



Resim 3.6:Numune kesiminden önce test bölgelerinin parçaya işaretlenmesi.

3 farklı termoformlama çevrimi uygulanmış bu deneysel çalışmada her çevrim sonrası elde edilen numuneler belirli test grupları için ayrılmıştır. Numunelere ait kodlar, uygulanan çevrim sayısı ve gerçekleştirilen test türleri Çizelge 3-5’de sunulmuştur. Tahribatsız işlemler tamamlandıktan sonra her çevrim grubundan dört adet numune hazırlanmıştır ve bu numunelere basma,TGA,DSC testleri gerçekleştirilmiştir.

Uygulanan deneysel testler:

- Tahribatsız muayene testleri;
- Ultrasonik Tarama Yöntemi (UT)
- Çoklu Ultrasonik Darbe Yankı (MEPU)

Tahribatlı muayene testleri;

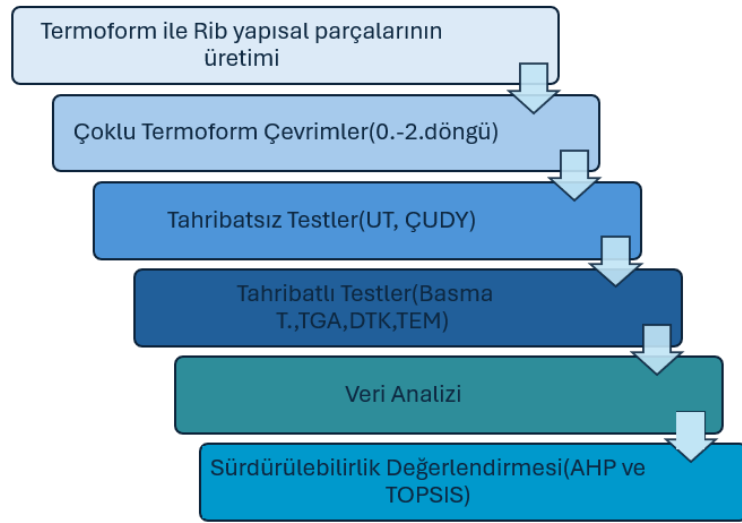
- Basma testi: ASTM D6641
- TGA Termal analiz testi: TS ISO EN 11358-1
- DSC Termal analiz testi: ISO EN 11357-1
- Mikroyapı incelemesi: TEM

Çizelge 3-5: Deney tasarımı ve numune kodları.

Numune Kodu	Uygulanan Döngü	Test Türü	Numune Sayısı
N-0	Referans, laminat plaka(işlem görmemiş)	Basma,DSC,TGA,TEM	4
N-1	0.Çevrim	Basma,DSC,TGA,TEM	4
N-2	1.Çevrim	Basma,DSC,TGA,TEM	4
N-3	2.Çevrim	Basma,DSC,TGA,TEM	4

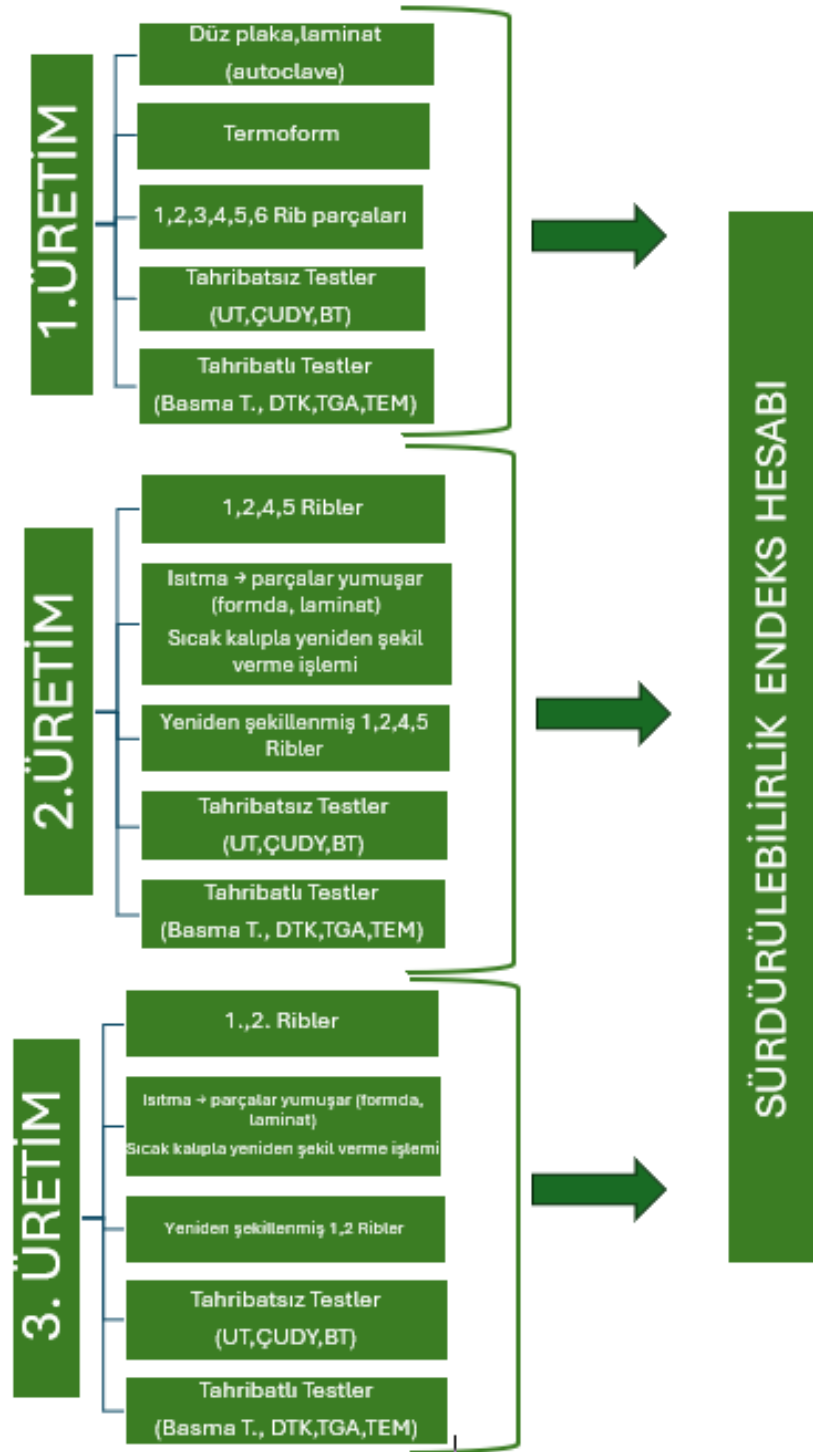
3.4. Deneysel Metodoloji Akış Şeması

Bu çalışmada uygulanan deneysel adımların genel akışı Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu genel sürecin deneysel kısmı, her üretim çevriminde uygulanan adımlar açısından detaylandırılmış olup Şekil 3.3’te sunulmuştur. Şekil 3.2’deki şema malzeme hazırlığından başlayarak termoform çevrimleri, numune kesimi, testler, veri analizi ve sürdürülebilirlik değerlendirme aşamalarını sistematik biçimde göstermektedir.



Şekil 3.2: Deneysel Metodoloji ve sürdürülebilirlik akış şeması.

Akış şemasında görüldüğü üzere deneysel metodoloji birbirini tamamlayan dört ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada laminat plakalardan kaburga(rib) yapısal parçaları üretilmiş ve termoform çevrimleri uygulanmıştır. İkinci aşamada tahribatsız muayene yöntemleriyle (UT ve ÇUDY) termoformlama sonucunda numunelerin iç kusur yapısı ve tabaka bütünlüğü incelenmiştir. Üçüncü aşamada çevrimlerden elde edilen plaklar numunelere dönüştürülmüş ve standartlara uygun olacak şekilde basma, TGA, DTK ve SEM testleri yapılarak malzeme davranışı incelenmiştir. Son aşamada elde edilen veriler karşılaştırılarak çevrim sayısının malzeme özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Bu deneysel veriler çalışmanın sonraki bölümünde yürütülen sürdürülebilirlik değerlendirmesine girdi olarak kullanılmıştır. Böylece çalışmadaki deneysel metodolojiden elde edilen bulgular, malzemenin yapısal performansına ile çevresel sürdürülebilirliği arasında bütüncül bir ilişki kurmak amacıyla analitik yöntemlerle desteklenmiştir.



Şekil 3.3: Her çevrim için uygulanan adımlar.

4. TAHRİBATLI MUAYENE SONUÇLARI

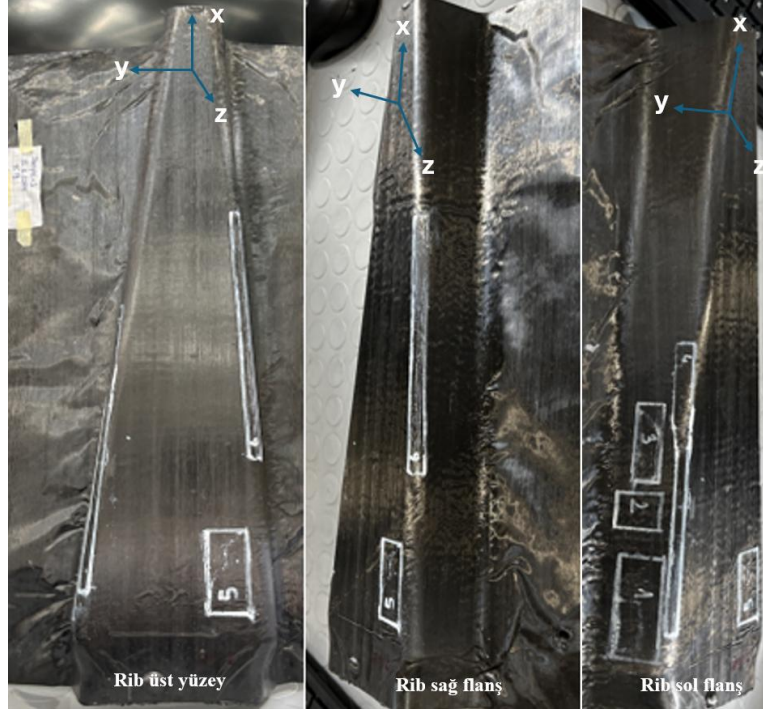
4.1. Ultrasonik ve Çoklu Ultrasonik Darbe Yankı Test (UT, ÇUDY)

Bu bölümde, termoforming işlemi sonrasında üretilen rib numunelere uygulanan tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) testlerinin sonuçları sunulmuştur. Tahribatsız muayene termoforming çevrimleri sonucunda malzeme içinde oluşabilecek delaminasyon, boşluk (void) ve tabaka ayrışması gibi üretim kusurlarını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Testlerde flanş ve gövde(web) bölgeleri detaylı olarak incelenmiştir.

Çoklu ultrasonik darbe testinde elde edilen renkli haritalar ultrasonik darbenin malzeme içerisinde ilerlerken karşılaştığı yoğunluk değişimlerine, tabaka arayüzlerine veya olası kusurlara bağlı olarak yansıyan sinyallerin genlik dağılımını göstermektedir. Bu doğrultuda, renkli haritanın amacı, malzeme iç yapısının homojenliğini ve olası süreksizlik bölgelerini görsel olarak temsil etmektir. Ancak bu renk farklılıkları her zaman fiziksel bir kusur anlamına gelmemekte; yalnızca yankı genliği belirli bir eşik değeri üzerinde olduğunda ve sinyal sürekliliği belirgin biçimde bozulduğunda kusur olarak raporlanmaktadır.

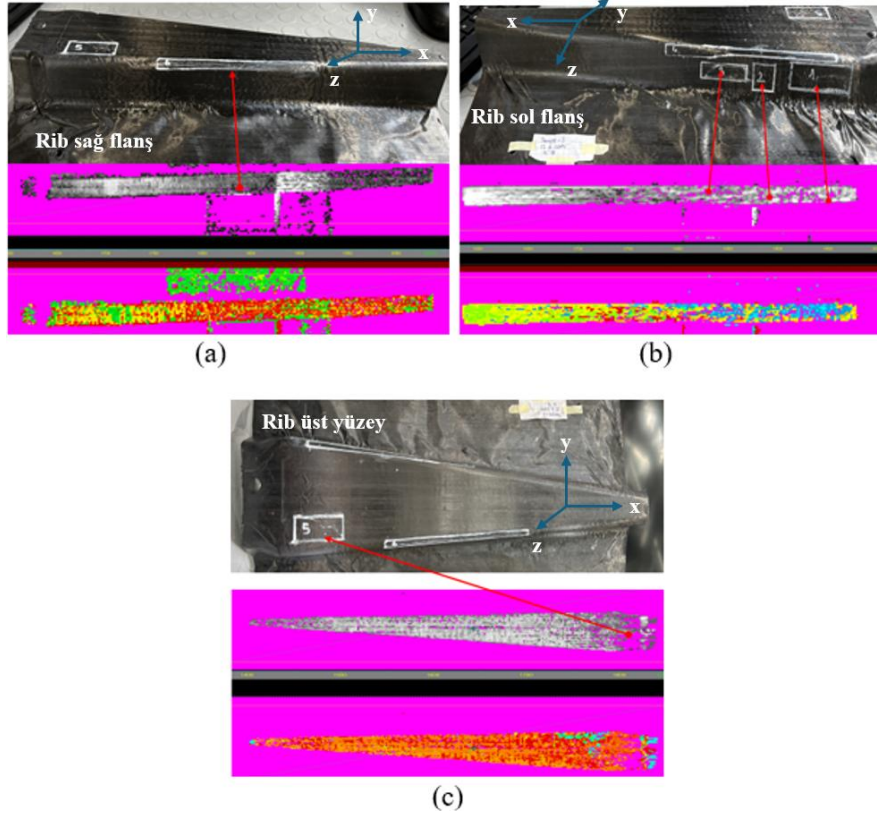
0.Termoform Çevrimi (Rib-3 parçası, Numune-3)

Resim 4.1’de 3 numaralı rib parçası yüzeyinde yapılan işaretlemeler gösterilmektedir. Resim 4.2’de , 1. Çevrim sonrasında ÇYDY haritaları ve tespit edilen kusur görselleri, yankı genliği dağılımını ve olası delaminasyonların renk skalasını temsil etmektedir. Tespit edilen kusurların konumu, tipi ve boyutsal özellikleri Çizelge 4-1’de özetlenmiştir. Kusur bölgeleri genellikle sol flanşa ve web geçişlerinde yoğunlaşmış olup, çoğunlukla çok katmanlı delaminasyon türünde olduğu tespit edilmiştir.



Resim 4.1: 3 Numaralı rib parçası üzerinde tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) ölçüm bölgelerinin işaretlenmesi.

Resim 4.2 numunenin farklı yüzeylerinde ölçülen yankı genliği dağılımlarını ve tespit edilen lokal zayıf bölgeler gösterilmiştir.



Resim 4.2: Numune-3 ÇUDY yöntemiyle tespit edilen kusur bölgeleri ve yankı genliği haritaları a) Numune-3 sağ flanş yüzeyinde ölçülen genlik dağılım b) Numune-3 sol

flanş yüzeyinde ölçülen genlik dağılımı c) Numune-3 üst yüzeyinde ölçülen genlik dağılımı.

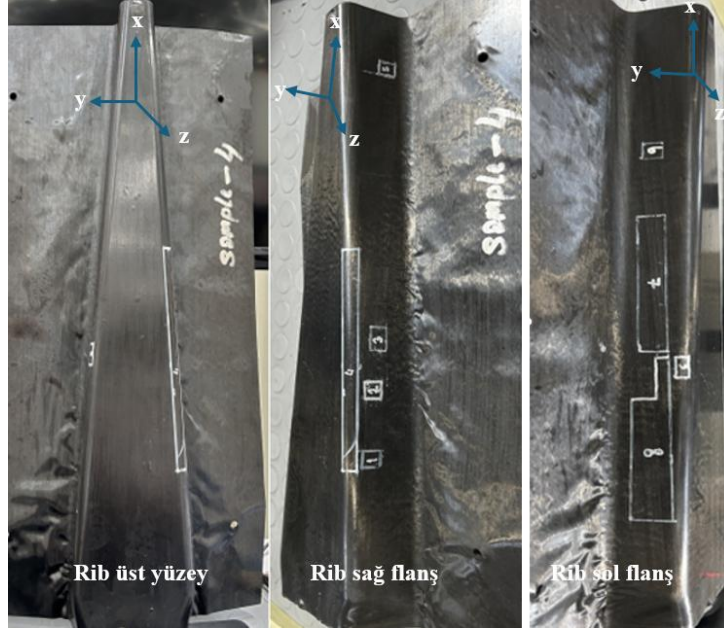
Numune-3 üzerinde gerçekleştirilen tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) uygulamaları sonucunda tespit edilen kusurların boyutsal özellikleri aşağıda verilen Çizelge 4-1’de özetlenmiştir.

Çizelge 4-1: 3 numaralı rib parçası tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) sonuçları.

Kusur Tipi			
Kusur 1 (Sol Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Çok katmanlı delaminasyon	22 mm	58 mm	Min:0.34mm max:0.84 mm
Kusur 2 (Sol Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Çok katmanlı delaminasyon	21 mm	22 mm	Min:0.36mm max:1.19mm
Kusur 3 (Sol Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Delaminasyon	12 mm	46 mm	0.36 mm
Kusur 4 (Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Çok katmanlı delaminasyon	7 mm	169 mm	Min:0.56mm max:1.26mm
Kusur 5 (Web)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Çok katmanlı delaminasyon	19 mm	46 mm	Min:0.44mm max:0.91mm
Kusur 6 (Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Çok katmanlı delaminasyon	8 mm	154 mm	Min:0.35 mm max:1.52 mm

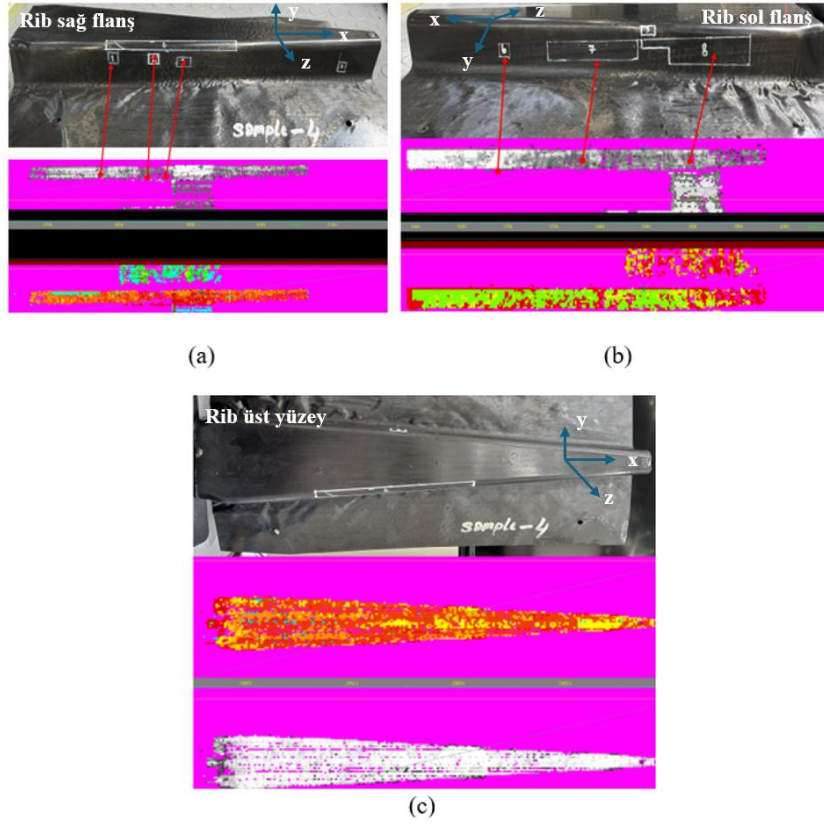
1. Termoform Çevrimi (Rib-2,Numune-4)

Resim 4.3’te 4 numaralı rib parçası yüzeyinde yapılan işaretlemeler gösterilmektedir. Resim 4.4’te ise yapılan taramalardan elde edilen yankı genliği haritaları gösterilmektedir. Sağ flanş bölgesinde (kusur 1-3) ve sol flanş bölgesindeki (kusur 6-8) yüksek genlikli yansımalar gözlenmiş olup, çok katmanlı delaminasyon şeklinde sınıflandırılmıştır. Çizelge 4-2’de verilen boyutsal ölçümler incelendiğinde , kusurların uzunluklarının 9-21 mm, derinliklerinin 0.29-1.89 mm arasında değiştiği tespit edilmiştir. 2. Çevrimde içsel süreksizliğin arttığı ve özellikle flanşlarda olduğu gözlenmiştir.



Resim 4.3: 4 Numaralı rib parçası üzerinde tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) ölçüm bölgelerinin işaretlenmesi.

Resim 4.4'te her bir yüzey için tespit edilen kusurların konumu ve şiddetine ilişkin genlik haritaları sunulmuştur.



Resim 4.4: Numune-4 ÇUDY yöntemiyle tespit edilen kusur bölgeleri ve yankı genliği haritaları a) Numune-4 sağ flanş yüzeyinde ölçülen genlik dağılımı b) Numune-4 sol flanş yüzeyinde ölçülen genlik dağılımı c) Numune-4 üst yüzeyinde ölçülen genlik dağılımı.

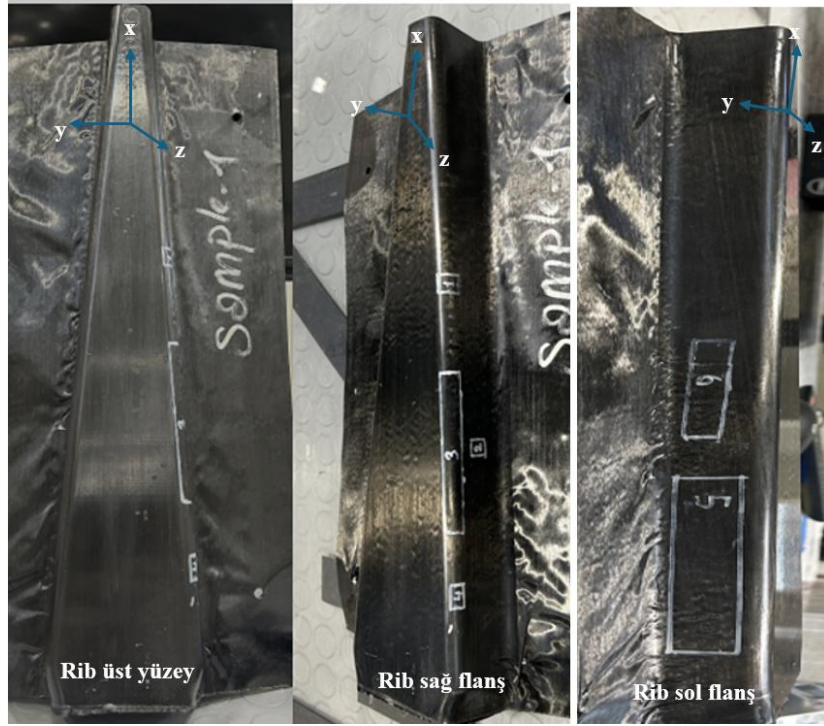
Numune-4 üzerinde gerçekleştirilen tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) uygulamaları sonucunda tespit edilen kusurların boyutsal özellikleri aşağıda verilen Çizelge 4-2’de özetlenmiştir.

Çizelge 4-2: 4 numaralı rib parçası tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) sonuçları.

Kusur Tipi			
Kusur 1 (Sağ Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Delaminasyon	11 mm	10 mm	1.4 mm
Kusur 2 (Sağ Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Delaminasyon	9 mm	11 mm	1.58 mm
Kusur 3 (Sağ Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Çok katmanlı delaminasyon	10 mm	16 mm	Min:0.48mm max:1.34mm
Kusur 6 (Sol Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Delaminasyon	10 mm	10 mm	1.89 mm
Kusur 7 (Sol Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Çok katmanlı delaminasyon	14	94	Min:0.29mm max:1.72mm
Kusur 8 (Sol Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Çok katmanlı delaminasyon	21	117	Min:0.67mm max:1.76mm

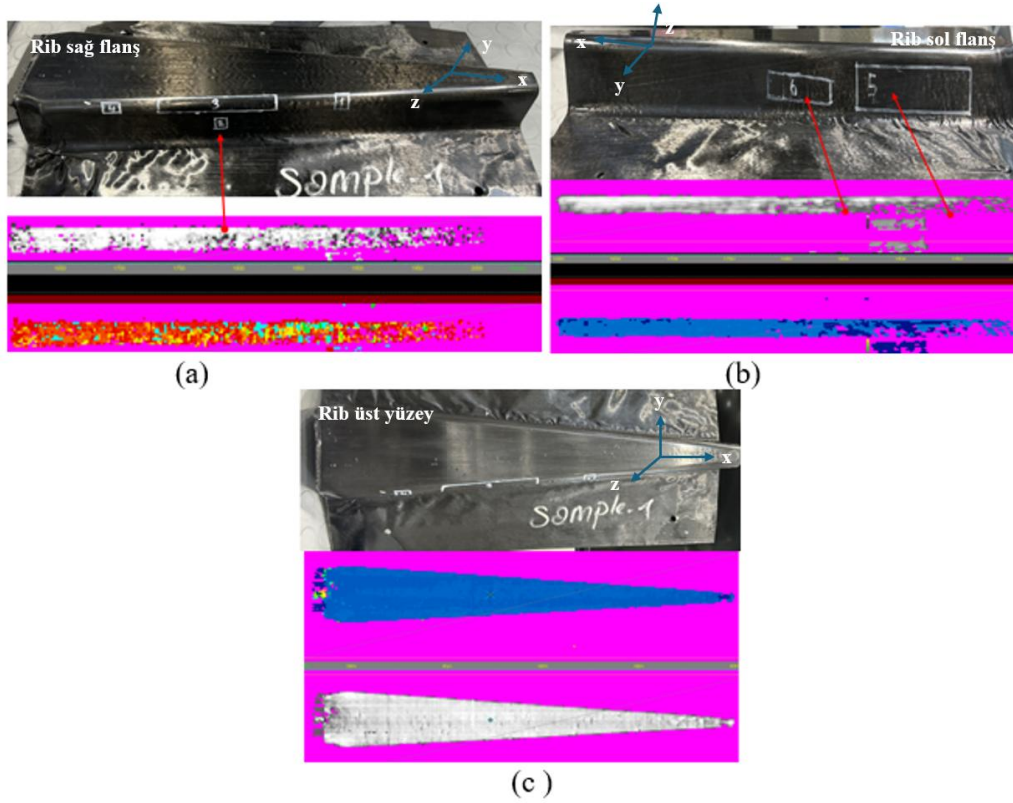
2. Termoform Çevrimi (Rib-1,Numune-1)

Resim 4.5’te, 1 numaralı numunenin farklı bölgelerinde (radius,sağ ve sol flanş) yapılan taramalar sonucu sinyal bozukluğu tespit edilen yerlerde yapılan işaretlemeler gösterilmektedir. Resim 4.6’daki renk dağılımları, genlik yankıları ve olası delaminasyon bölgelerini temsil etmektedir. Çizelge 4-3 ölçüm sonuçlarına göre, özellikle radius ve sol flanş bölgelerinde çok katmanlı delaminasyonlar tespit edilmiştir. Bu kusurların uzunlukları 6–23 mm, derinlikleri ise 0.38–1.53 mm aralığındadır. Tekrarlanan ısı ve mekanik yüklemeler etkisiyle delaminasyon derinliklerinde artış kusurların flanş geçişlerine doğru yoğunlaştığı gözlenmiştir.



Resim 4.5: 1 Numaralı rib parçası üzerinde tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) ölçüm bölgelerinin işaretlenmesi.

Resim 4.6’da yüzeylere ait kusur bölgeleri ve yankı genliği dağılımları haritaları sunulmuştur.



Resim 4.6: Numune-1 ÇUDY yöntemiyle tespit edilen kusur bölgeleri ve yankı genliği haritaları a) Numune-1 sağ flanş yüzeyinde ölçülen genlik dağılım b) Numune-1 sol

flanş yüzeyinde ölçülen genlik dağılımı c) Numune-1 üst yüzeyinde ölçülen genlik dağılımı

Numune-1 üzerinde gerçekleştirilen tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) uygulamaları sonucunda tespit edilen kusurların boyutsal özellikleri aşağıda verilen Çizelge 4-3’de özetlenmiştir.

Çizelge 4-3: 1 numaralı rib parçası tahribatsız muayene (UT ve ÇUDY) sonuçları.

Kusur Tipi			
Kusur 1 (Radius)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Delaminasyon	12 mm	12 mm	0.6 mm
Kusur 2 (Sağ Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Delaminasyon	10 mm	10 mm	1.24 mm
Kusur 3 (Radius)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Çok katmanlı delaminasyon	11	95	min:0.43mm max:1.53mm
Kusur 4 (Radius)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Delaminasyon	6 mm	14 mm	1.37 mm
Kusur 5 (Sol Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Çok katmanlı delaminasyon	23 mm	106 mm	min:0.57mm max:1.19mm
Kusur 6 (Sol Flanş)	Uzunluk	Genişlik	Kusur Derinliği
Çok katmanlı delaminasyon	18 mm	60 mm	min:0.38 mm max:1.05 mm

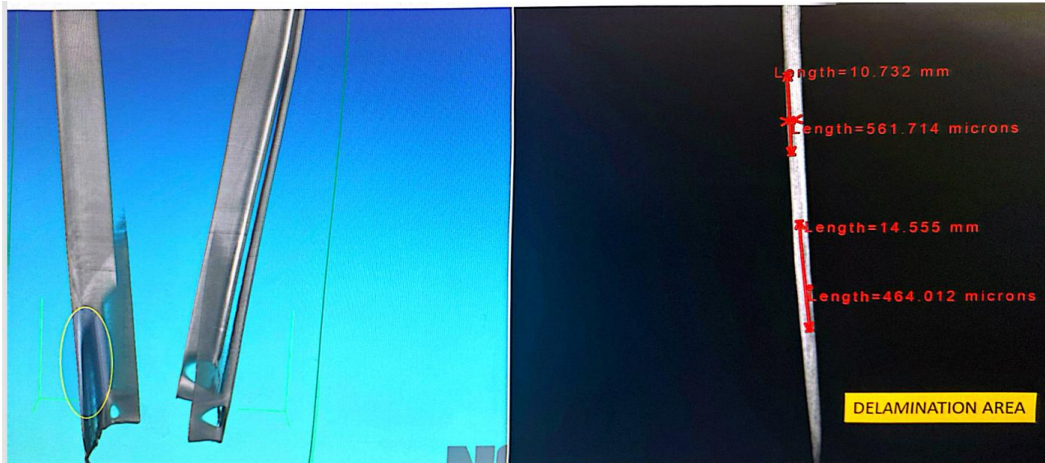
4.2. Bilgisayarlı Tomografi

İç yapısal kusurların üç boyutlu olarak incelenebilmesi amacıyla, Resim 4.7(a)’da gösterilen North Star Imaging firmasına ait X5000 X-ray Bilgisayarlı Tomografi (BT) cihazı kullanılmıştır. Sistem, X-View BT arayüz yazılımı ile entegre bir şekilde çalışmaktadır. Parçaya göre cihaz kalibrasyonu yapıldıktan sonra, Resim 4.7(b)’de görülen 360° döner tabla üzerinde X-ışını kaynağından gönderilen ışınlarla numunenin iç yapısı taranmıştır. Bu sayede numune içerisinde oluşmuş olası gözenek, çatlak veya delaminasyon gibi yapısal kusurlar tespit edilmiştir.



Resim 4.7: Bilgisayarlı tomografi cihazı.

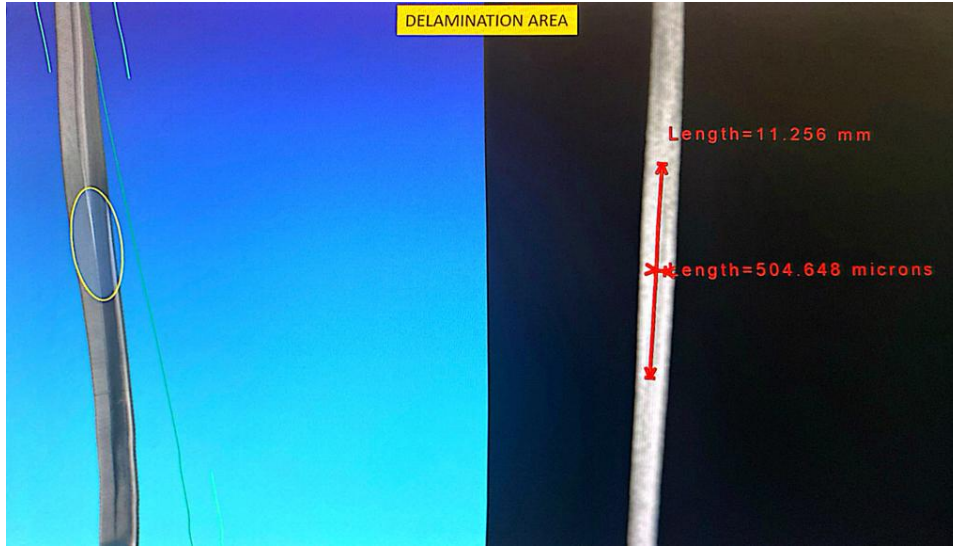
Resim 4.8’de 1.çevrim N-4 kodlu numunenin bilgisayar tomografi test sonucundan görsel sunulmuştur. Bir önceki tahribatsız muayenede tespit edilen hasarlar bilgisayarlı tomografi taramasında doğrulanmıştır. ÇUDY’de rib parçasının sol duvarında tespit edilen 7 ve 8 numaralı işaretlenmiş hasarlar BT’de de tespit edilmiştir. Raporlanan kusurların uzunlukları; 10.7 mm, 14.6 mm, ara tabaka kalınlıkları 0.46–0.56 mm civarındadır. Tespit edilen kusurların lokal ayrışmalar olduğu gözlenmiştir. Hasarlar delaminasyon çizgisel formdadır ve flanşın alt kenarından yukarı doğru uzanmaktadır. Bu tip hasarlar, termal genleşme farklarının, flanşlı veya açılı yüzeylerde oluşan gerilme yığılmalarının tipik bir sonucudur.



Resim 4.8: Rib-4(1.çevrim), N-4 kodlu numune BT tarama sonucu-1.

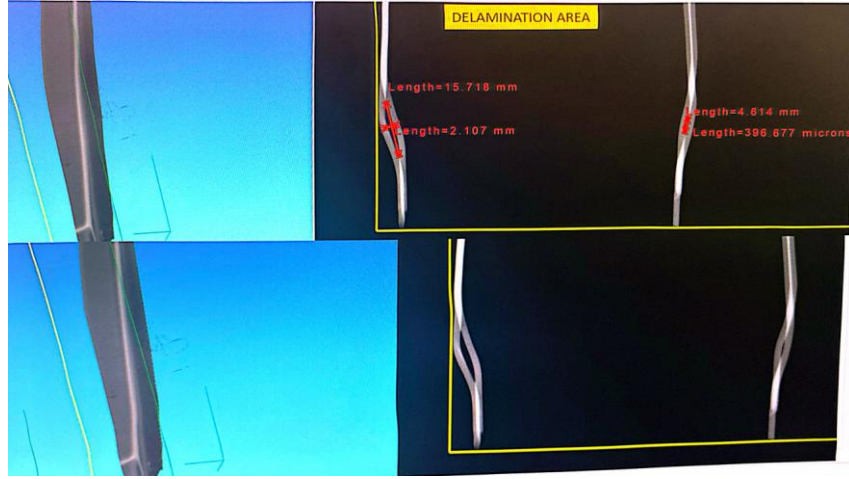
Resim 4.9’da 1. çevrim N-4 kodlu numunenin bilgisayar tomografisi (BT) test sonucuna ait ikinci görsel verilmiştir. Tahribatsız ÇUDY’de raporlanan 1, 2 ve 3 numaralı hasarlar BT’de de tespit edilmiştir. Ancak BT’nin yüksek çözünürlüğü sayesinde, ÇUYD’de üç

farklı nokta olarak görülen sinyal bozulmasının aslında tek bir dar tabaka ayrışması olduğu anlaşılmıştır. BT daha yüksek çözünürlüklü üç boyutlu doğrulama sağladığından kesin tespit yapılabilir. Bu tespit BT'nin amacını göstermektedir. Hasar uzunluğu 11,25 mm, kalınlığı yaklaşık 0,50 mm olarak ölçülmüş; sol flanşta, yüzeye daha yakın dar bir tabaka ayrılması şeklinde gözlenmiştir. Rib-4 (1. çevrim) için bilgisayarlı tomografi ile tahribatsız muayene taramasının karşı doğrulaması yapılmıştır.



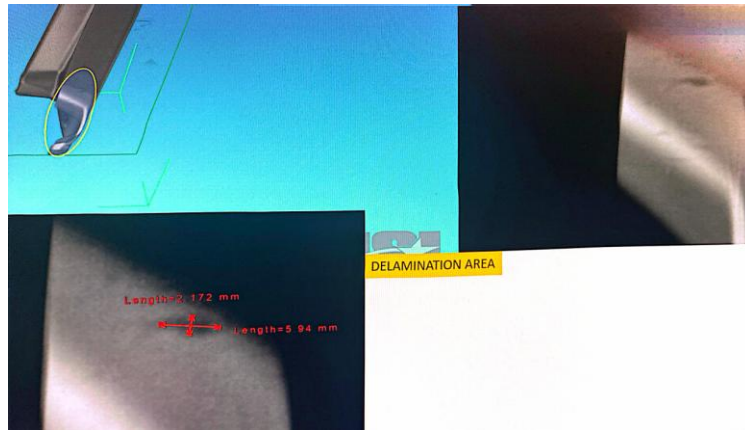
Resim 4.9: Rib-4(1.çevrim), N-4 kodlu numune BT tarama sonucu-2.

Resim 4.10'da, 0. çevrim N-6 kodlu numunenin bilgisayar tomografisi (BT) test sonucuna ait ilk görsel verilmiştir. ÇUDY ölçümünde tespit edilen 5 ve 6 numaralı hasarlar BT'de de bulunmuştur. Her iki duvarda da ince delaminasyon hatları tespit edilmiştir. Hasarların ölçüleri; Uzunluklar 2.1 mm, 15.7 mm, 4.6 mm, kalınlıklar yaklaşık 0.4 mm civarındadır. Bu çok ince delaminasyonlar termoform işlemi sırasında oluşmuştur. Üretim prosesindeki parametreler veya kalıptan kaynaklı olduğu yorumlanmaktadır.



Resim 4.10: Rib-6(0.çevrim),N-6 kodlu numune BT tarama sonucu-1.

Resim 4.11’de 0. çevrim N-6 kodlu numunenin bilgisayar tomografisi (BT) sonucuna ait ikinci görsel sunulmuştur. ÇUDY’de 1 numaralı işaretlenen hasar, BT’de de tespit edilmiştir. Hasar tespiti, kaburga(rib) parçasının üst duvar flanş–radius geçiş bölgesinde olup 2,17 mm kalınlık ve 5,94 mm genişlikte ölçülmüştür. Köşe (radius) bölgesinde oluşmuş tekil delaminasyondur. Şekil verme sırasında yüksek eğilme ve basma gerilmelerinden kaynaklandığı yorumlanmıştır.



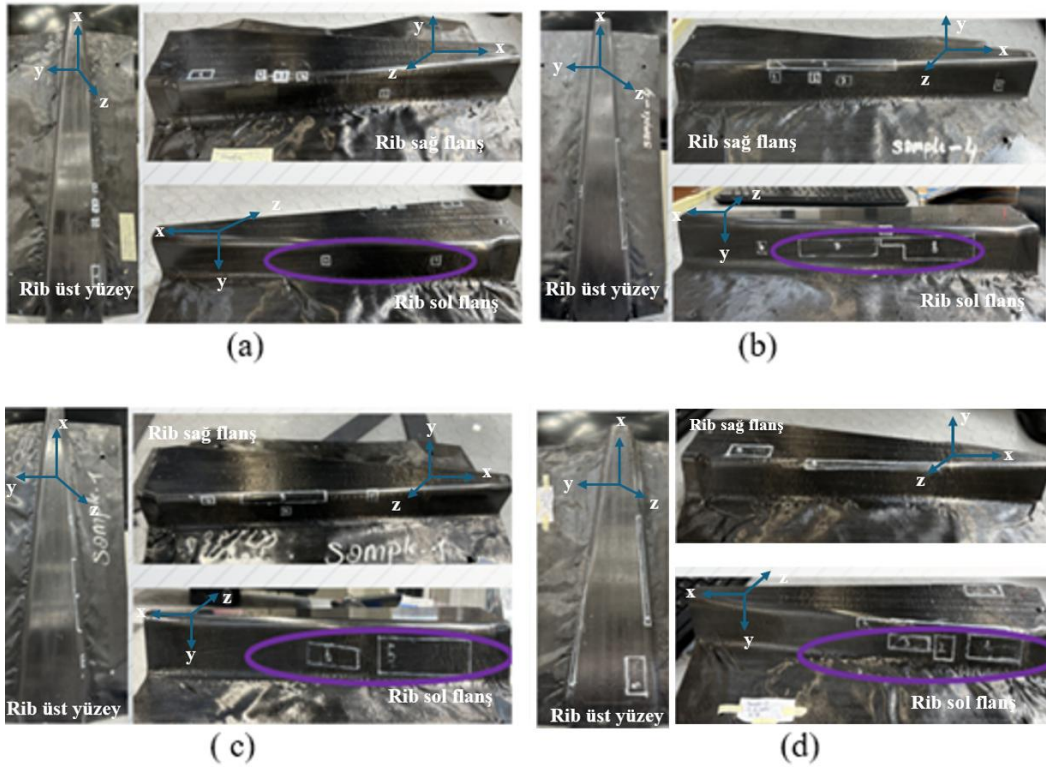
Resim 4.11 Rib-6(0.çevrim),N-6 kodlu numune BT tarama sonucu-2.

4.3. Bulguların Yorumlanması

Tahribatsız testler sonucunda tüm numunelerde farklı konumlarda delaminasyon tipi kusurlar tespit edilmiştir. Resim 4.12’de tüm çevrimlere ait riblerin kusur tespiti için yapılan işaretlemeler gösterilmiştir.

Özellikle sol flanş bölgesinde tekrarlayan şekilde gözlemlenen bu kusurlar, kalıp tasarımı ve sıcaklık dağılımı ile doğrudan ilişkili olabileceğini göstermektedir. Termoformlama sırasında kalıbın bu bölgesinde ısı transferinin homojen olmaması, yerel sıcaklık farklarının oluşmasına ve bu bölgelerde tabaka ayrılmalarına (delaminasyon) neden olmuş olabilir.

Tespit edilen delaminasyonların boyutsal özellikleri incelendiğinde, kusur uzunluklarının 7 mm ile 23 mm, genişliklerinin 10 mm ile 169 mm, derinliklerinin ise yaklaşık 0.3 mm ile 1.9 mm arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu değerler termoform çevrimleri ilerledikçe kusurların hem sayısında hem boyutlarında sınırlı da olsa bir artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle 1. ve 2. çevrimlerde flanş bölgelerinde tespit edilen delaminasyon derinlikleri (örneğin 1.19 mm, 1.76 mm) 3. çevrimde nispeten artış göstermiştir. Kusurların büyük çoğunluğunun yüzeye yakın konumlandığı ve çok katmanlı delaminasyon tipinde olduğu görülmüştür. Bu durum üretim parametrelerinin genel olarak uygun seçildiğini, ancak lokal gerilme birikimleri ve sıcaklık dengesizliklerinin kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bilgisayarlı tomografi (BT) taramaları da UT ve ÇUDY testlerinin destekleyici nitelikte olup, aynı bölgelerde benzer delaminasyonların varlığını doğrulamıştır.



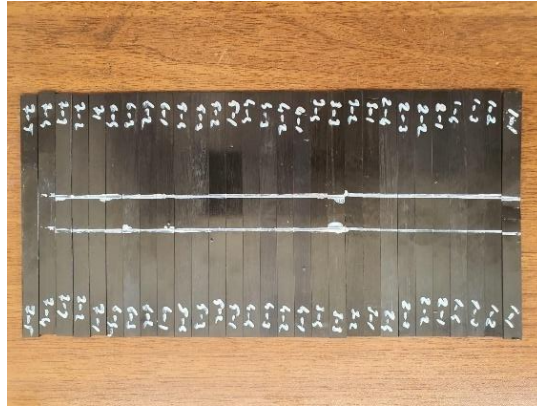
Resim 4.12: Tahribatsız muayene işaretlemeleri (a) 6.Rib,0.termoform çevrimi (b) 4.Rib,1.termoform çevrimi (c) 1.Rib,2.termoform çevrimi (d) 3.Rib,0.termoform çevrimi.

5. TAHRİBATLI MUAYENE SONUÇLARI

5.1. Basma Testi

Basma testi malzemelerin yük altında deformasyon davranışını ve dayanım seviyesini belirlemek amacıyla uygulanır. Kompozit, metal veya plastik malzemelerin genel mekanik performansının makro ölçekte değerlendirildiği bu test ile malzemenin basma dayanımı, elastisite modülü ve kırılma davranışı gibi temel mekanik özellikleri elde edilir.

Bu çalışmada, termoform çevrimleri sonrasında malzeme performansında herhangi bir mekanik kayıp olup olmadığını belirlemek amacıyla ASTM D3410/D3410M standardına uygun olarak basma testleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler, bu standarda göre 10 mm × 145 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Resim 5.1’de gösterilmektedir.



Resim 5.1: Basma testi için hazırlanan numuneler.

Deneyler Resim 5.2’de gösterilen Shimadzu Autograph üniversal test cihazında, sisteme entegre video tip ekstansometre ile uzama ölçümleri alınarak gerçekleştirilmiştir. Testler, oda sıcaklığında ve 1.3 mm/dk yükleme hızında yürütülmüştür. Kullanılan

temassız ölçüm sistemi sayesinde, yüzey hasarı oluşmadan anlık deformasyon verileri elde edilmiştir.

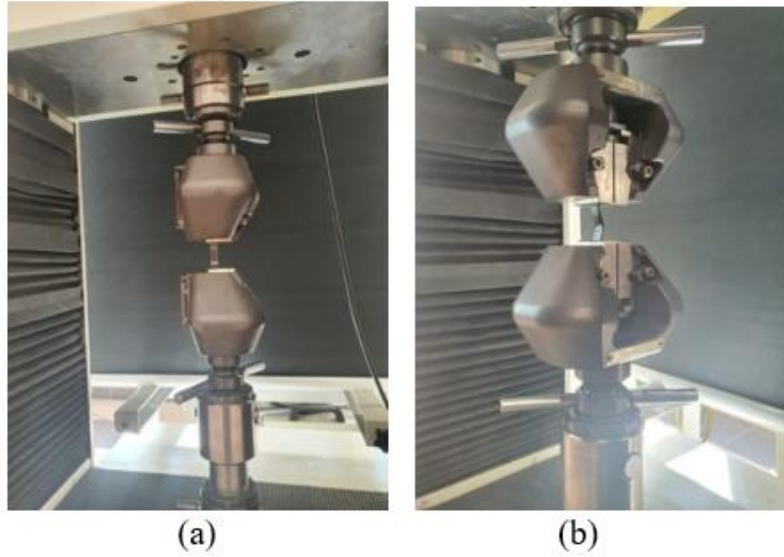
Bu çalışmada gerinim değerleri Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) yöntemiyle elde edilmiştir. DIC sistemi numune yüzeyindeki speckle desenini yüksek örnekleme hızında (frame rate) takip ederek lokal yer değiştirmeleri tespit eder. Bu yöntem elastik bölgedeki deformasyonların hassas şekilde izlenmesine imkân tanımasına rağmen çok küçük deformasyon seviyelerinde çözünürlük sınırlamalarına bağlı olarak gerinim verilerinde yüksek frekanslı gürültü oluşabilmektedir. Bu nedenle grafiklerde, aynı gerinim değerine çok yakın konumlarda birden fazla gerilme noktası varmış gibi görünen bir dağılım ortaya çıkabilmektedir. Bu durum bir ölçüm hatası değil, DIC tekniğinin yüksek örnekleme hızına karşın gerinim çözünürlüğünün sınırlı olmasından kaynaklanan doğal bir etkidir.

Video analiz sisteminden kaynaklanan frame senkronizasyonu farkı ve sinyal gürültüsü özellikle elastik bölgede gerilme-gerinim eğrisinde lokal sapmalara neden olmuştur. Bu sapmaların etkisini azaltmak için elastik bölgede yer alan aykırı ölçümler veri setinden çıkarılmıştır. Kiriş (chord) modülü referans standartta belirtilen gerinim aralığındaki verilere lineer regresyon uygulanarak hesaplandığından bu gürültü eğilimin genel doğrusal yapısını etkilememekte ve güvenilir bir kiriş (chord) modül değerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Basma testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrilerinde elastik bölgenin doğrusal olmaması nedeniyle elastisite modülü ASTM D6641/D6641M standardında tanımlanan kiriş(chord) modülü yöntemiyle hesaplanmıştır. Standartta belirli bir gerinim aralığı zorunlu tutulmamakla birlikte, literatürde (ASTM D3039 ve havacılık uygulamaları) doğrultusunda yaygın olarak kullanılan 1000–3000 μ strain (0.1–0.3% strain) aralığı esas alınmıştır.



Resim 5.2: Basma test düzeneği.

Resim 5.3'te basma testi deformasyon oluşmadan hemen önce ve sonrasında alınmış görüntüler sunulmuştur.



Resim 5.3: Basma testinde deformasyona uğramadan önce ve sonraki an görüntüsü.

Bu bölümde, referans laminat plaka, 0.çevrim, 1.çevrim ve 2.çevrim numunlerinin basma testi sonuçları sırayla sunulmuş olup her numune için maksimum kuvvet, basma dayanımı, ve elastik modül değerleri raporlanmıştır. Çizelge 5-1'de termal çevrime uğramamış kompozit plakadan elde edilen ölçüm sonuçları raporlanmaktadır. 0. çevrimde incelenen numunelerin ortalaması alınmış olup; maksimum basma kuvveti 4660,4 N basma dayanımı 233,5 MPa ve elastik modül 13,4 GPa olarak bulunmuştur.

Çizelge 5-1: Laminat plaka numunelerin (ısıtılmış) basma test sonuçları.

Laminat Plaka (referans)	Maks. Kuvvet(N)	Basma Dayanımı (MPa)	Kiriş(chord) Modül (GPa)
Numune 7-1	4750,0	237,5	10,0
Numune 7-2	4429,8	221,5	14,1
Numune 7-3	4713,8	237,4	11,3
Numune 7-4	4748,0	233,5	18,1
Ortalama	4660,4	233,5	13,4

Çizelge 5-2’de 0.çevrime ait Rib-3 yapısal parçasından alınan numunelerin sonuçları raporlanmıştır. 0. çevrimde incelenen numunelerin ortalaması alınmış olup; maksimum basma kuvveti 4003,2 N, basma dayanımı 200,1 MPa ve elastik modül 16,1 GPa olarak bulunmuştur.

Çizelge 5-2:Rib-3 (0.Çevrim) numunelerin basma test sonuçları.

Rib-3 (0. Çevrim)	Maks. Kuvvet(N)	Basma Dayanımı (MPa)	Kiriş(chord) Modü(GPa)
Numune 3-1	3800,6	190,0	13,1
Numune 3-2	3795,4	189,7	17,3
Numune 3-3	4075,0	203,7	15,4
Numune 3-4	4342,0	217,1	18,6
Ortalama	4003,2	200,1	16,1

Çizelge 5-3’te 0. Çevrime ait olan Rib-6 yapısal parçasından alınan numunelerin sonuçları raporlanmıştır. İncelenen numunelerin ortalaması alınmış olup; maksimum basma kuvveti 4497,6 N, basma dayanımı 224,8 MPa ve elastik modül 11,2 GPa olarak bulunmuştur. Bu parçaya ait Numune 6-4 numaralı numunenin maksimum kuvvet değeri diğer üç numunenin ortalamasından yaklaşık %30,2 daha düşük bulunmuştur. Bu sebeple, 3139,2 N maksimum basma kuvveti ve buna karşılık gelen 156,9 MPa basma dayanımı aykırı ölçüm olarak değerlendirilmiştir. İlgili çevrim için ortalama değerler hesaplanırken Numune 6-4 değerleri hesaplama dahil edilmemiştir. Deneysel verilerin şeffaflığını sağlamak amacıyla, tüm ham ölçüm sonuçları EK-1’te sunulmuştur.

Çizelge 5-3: Rib-6(0.Çevrim) numunelerin basma test sonuçları.

Rib-6 (0. Çevrim)	Maks. Kuvvet(N)	Basma Dayanımı (MPa)	Kiriş(chord) Modül (GPa)
Numune 6-1	4258,1	212,9	10,2
Numune 6-2	4543,1	227,1	12,2
Numune 6-3	4691,7	234,5	11,4
Numune 6-4	3139,2	156,9	10,7
Ortalama	4497,6	224,8	11,2

Çizelge 5-4'te 1. Çevrime ait olan Rib-4 yapısal parçasından alınan numunelerin sonuçları raporlanmıştır. İncelenen numunelerin ortalaması alınmış olup; maksimum basma kuvveti 4641,5 N, basma dayanımı 232,0 MPa ve elastik modül 16,8 GPa olarak bulunmuştur. Rib-4 yapısal parçasındaki 4-3 numaralı numunenin maksimum kuvvet değeri 2979,5 N ve buna bağlı olarak basma dayanımı ise 148,9 MPa olarak ölçülmüştür. Maksimum kuvvet değeri, parçaya ait diğer üç numunenin ortalamasından yaklaşık %35,8 daha düşük bulunmuştur. Bu nedenle, Numune 4-3 ait veriler aykırı ölçümler olarak değerlendirilmiş ve ilgili çevrime ait ortalama değerlerin hesaplamasına dahil edilmemiştir.

Çizelge 5-4:Rib-4(1.Çevrim) numunelerin basma test sonuçları.

Rib-4 (1. Çevrim)	Maks. Kuvvet(N)	Basma Dayanımı (MPa)	Kiriş(chord) Modül (GPa)
Numune 4-1	4952,1	247,6	13,8
Numune 4-2	4024,0	201,2	13,7
Numune 4-3	2979,5	148,9	10,7
Numune 4-4	4948,4	247,4	23,0
Ortalama	4641,5	232,0	16,8

Çizelge 5-5'te 1. Çevrime ait olan Rib-5 yapısal parçasından alınan numunelerin sonuçları raporlanmıştır. İncelenen numunelerin ortalaması alınmış olup; maksimum basma kuvveti 4656,7 N basma dayanımı 232,8 MPa ve elastik modül 16,8 GPa olarak bulunmuştur.

Çizelge 5-5:Rib-5(1.Çevrim) numunelerin basma test sonuçları.

Rib-5 (1. Çevrim)	Maks. Kuvvet(N)	Basma Dayanımı (MPa)	Kiriş(chord) Modül (GPa)
Numune 5-1	4905,3	245,2	13,0
Numune 5-2	4989,6	249,4	16,8
Numune 5-3	4655,4	232,7	20,9
Numune 5-4	4076,4	203,8	16,8
Ortalama	4656,7	232,8	16,8

Çizelge 5-6'da, 2. Çevrime ait olan Rib-1 yapısal parçasından alınan numunelerin sonuçları raporlanmıştır. İncelenen numunelerin ortalaması alınmış olup; maksimum basma kuvveti 4295,1 N, basma dayanımı 214,7 MPa ve elastik modül 21,3 GPa olarak bulunmuştur.

Çizelge 5-6:Rib-1(2.Çevrim) numunelerin basma test sonuçları.

Rib-1 (2. Çevrim)	Maks. Kuvvet(N)	Basma Dayanımı (MPa)	Kiriş(chord) Modül (GPa)
Numune 1-1	3734,0	186,7	19,4
Numune 1-2	4657,9	232,9	31,3
Numune 1-3	4358,5	217,9	16,0
Numune 1-4	4430,0	221,5	18,6
Ortalama	4295,1	214,7	21,3

Çizelge 5-7'de 2. Çevrime ait olan Rib-2 yapısal parçasından alınan numunelerin sonuçları raporlanmıştır. İncelenen numunelerin ortalaması alınmış olup; maksimum basma kuvveti 4563,9 N basma dayanımı 228,7 MPa ve elastik modül 21,7 GPa olarak bulunmuştur.

Çizelge 5-7:Rib-2(2.Çevrim) numunelerin basma test sonuçları.

Rib-2 (2. Çevrim)	Maks. Kuvvet(N)	Basma Dayanımı (MPa)	Kiriş(chord) Modül (GPa)
Numune 2-1	4729,6	236,4	19,6
Numune 2-2	4646,8	232,3	22,6
Numune 2-3	4247,1	212,3	24,6
Numune 2-4	4632,1	231,6	20,0
Ortalama	4563,9	228,7	21,7

Basma Dayanımı Bulguları

Basma testinde laminat plaka, 0., 1., ve 2. çevrim numuneleri için kiriş (chord) modül ile basma dayanımı değerleri Çizelge 5-8’de sunulmuş; elastik modülü için hesaplamalar ASTM D6641/D3410 yaklaşımı ve 1000–3000 $\mu\epsilon$ aralığı esas alınarak yapılmıştır. Bulgular, çevrim sayısı arttıkça elastik modülün artma eğiliminde, basma dayanımının ise azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Şekil 5.1’de çevrimlerin elastik modül eğrileri sunulmuştur. Ayrıca, çevrimlerin basma testi sonuçlarına ait grafikler ve dayanım hesaplama adımlarına EK-1 ve EK-2’de yer verilmiştir.

Şekil verme işlemi uygulanmamış laminat plakadan alınan numunelerin değerleri, diğer işlem basamaklarında elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Malzemenin ilk şekil verme işlemine uğramasıyla basma dayanımının 233,5 MPa’ dan 200,1 MPa’ a düştüğü ve bu düşüşün %10,4 oranında olduğu tespit edilmiştir.

İlk çevrime ait olan Rib-4 numaralı numunelerden alınan ölçümlerden biri aykırı değer olarak değerlendirilmiştir. Bu aykırı değer basmaya dayanım ortalamasına dahil edilemediğinde, beklenen aksine dayanım değeri %15,9 oranı artış göstererek 232,0 MPa bulunmuştur. Ancak tüm ölçümler ortalamaya dahil edildiğinde, dayanım değeri %5 artışla 211,8 MPa olarak hesaplanmıştır. Ayrıca ortalamaya dahil edilmeyen bu numunenin, dayanım değeri en düşük olması beklenen flanş bölgesinden alınmış olması sebebiyle, bu çevrime ait beklenen düşüşün gözlenemediği değerlendirilmiştir.

Birinci çevrimden ikinci çevrime geçen numunelerden toplanan verilere göre, basma dayanımının %7,4 oranında azalarak 232,0 MPa’ dan 214,7MPa’ a düştüğü saptanmıştır. Şekil 5.2’de, her basamakta tespit edilen basma dayanım değerleri ile bu değerlerdeki değişimleri gösteren grafik sunulmuştur.

Kiriş(chord) modül ölçümlerinde her adımda ölçülen değerlerde işlem görmemiş plakaya göre sürekli bir artış olduğu tespit edilmiştir. Laminat plakada numunelerinde yapılan ölçümlerde kiriş(chord) modül ortalaması 13,4 GPa olarak hesaplanmıştır. İlk şekillendirme işleminde elastik modül değeri %20 artarak 16,1 GPa ulaşmıştır. İlk çevrim basamağında bir öncekine göre %4,3 oranında artış gözlenmiş ve elastik modül 16,8 GPa bulunmuştur. Son çevrimde ise birinci çevrime kıyasla %21,3 oranında artış göstererek 21,3 GPa olarak hesaplanmıştır. Elastik modüldeki bu artış eğilimin, DTK analizinde tespit edilen kristallenme oranlarıyla tutarlı olduğu değerlendirilmiştir.

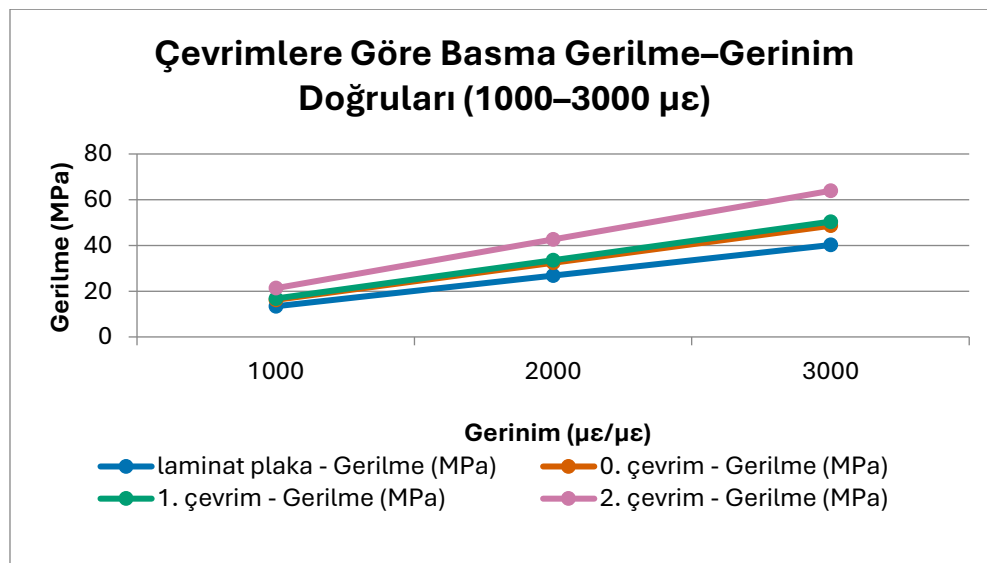
Bu sonuçlar, şekil verme ve termal çevrim işlemleri sırasında ısıya maruz kalan termoplastik PEKK matrisinin kristallenme derecesinin artmasıyla malzemenin rijitlik değeri artış görülmüştür. Buna karşılık, malzemenin süneklik özelliğinin azalarak daha sert bir forma dönüştüğü gözlenmiştir.

Ayrıca çevrim sayısı arttıkça numunelerin daha düşük gerinimde maksimum gerilmeye ulaştığı ve ilk anlamlı yük düşümünün daha erken zamanlarda gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum matris sertleşmesi (kristallenme) ve ara yüzey zayıflaması nedeniyle sünekliliğinin azalması ile açıklanmaktadır. SEM bulgularında artan çevrimlerle birlikte belirginleşen ve artan lif kırılmaları, matris çatlamları ve kalıntılar malzeme dayanımının zayıfladığını göstermektedir. Dolayısıyla mikro yapısal gözlem mekanik dayanımdaki azalışla tutarlı bir açıklama sunmaktadır.

Çizelge 5-8:Plaka ve çevrimlerin basma testi sonuçları.

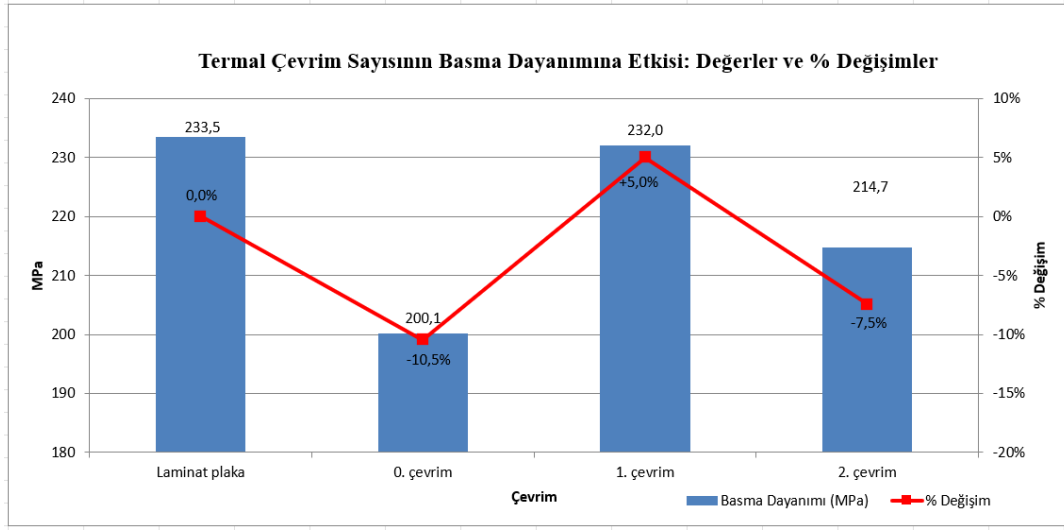
Çevrim Sayısı	Maks. Kuvvet (N)	Basma Dayanımı (MPa)	Kiriş(chord) Modül (GPa)
Laminat plaka	4660,4	233,5	13,4
0	4003,2	200,1	16,2
1	4641,5	232,0	16,8
2	4295,1	214,7	21,3

Isıl işlem görmemiş laminat plaka ile çevrimlere giren numunelerin 1000–3000 $\mu\epsilon$ aralığında değişim gösteren gerilme–gerinim değerleri Şekil 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1:Çevrimlerin gerilme-gerinim grafiği.

Laminat plakadan ısırl çevrime giren numunelerin ölçülen basma dayanımı değerleri ile bir önceki çevrime göre hesaplanan yüzde değişimleri Şekil 5.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Basma Dayanımı (MPa) ve bir önceki adıma göre değişimi.

5.2. Termogravimetrik Analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz (TGA) bir malzemenin sıcaklık veya zamanın fonksiyonu olarak gösterdiği kütle değişimlerini nicel olarak belirlemeye yarayan bir termal analiz tekniğidir. Test sürecinde numune önceden tanımlanmış sabit bir ısıtma hızıyla kontrollü biçimde ısıtılır ve bu sırada sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen kütle kaybı ya da kazanımı sürekli olarak kaydedilir. Bu sayede kompozit malzemede matrisin bozunma sıcaklığı, lif/matris oranı ve genel termal kararlılık gibi temel parametreler belirlenebilir. Kütle değişimlerine genellikle bozunma, oksidasyon veya bileşen buharlaşması gibi reaksiyonlar neden olur. Dolayısıyla TGA, kompozitlerin ısıl dayanımı ve üretim sonrası kalite değerlendirmesi açısından kritik öneme sahip bir yöntemdir. Termogravimetrik analizler (TGA), Resim 5.4’de gösterilen Perkin Elmer Pyris 1 TGA cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz metodu olarak ISO 11357 standartları kullanılmıştır. Cihaz, ± 0.1 mikrogram duyarlılığa sahip mikroterazi ve 950 °C’ye kadar çıkabilen fırın sistemi ile hem dinamik hem de izotermal modda ölçüm yapabilmektedir. Atmosfer kontrolü cihazın entegre gaz karıştırma ve akış kontrol modülü üzerinden sağlanmış, deneyler inert (azot) ve oksitleyici (hava/oksijen) ortamlarda gerçekleştirilmiştir.

Deney yaklaşık 15 mg katı numuneler kullanarak yapılmıştır. Deney koşulları;

dinamik (non-izotermal) deney: oda sıcaklığından 950 °C’ye kadar, 10 °C/dak ısıtma hızıyla, 50 mL/dak azot akışı altında gerçekleştirilmiştir.

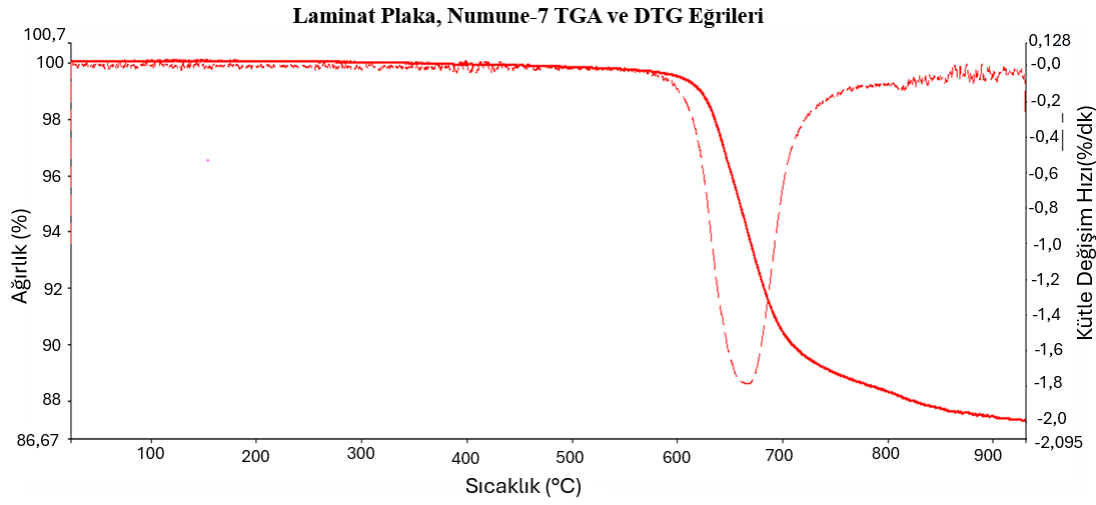
Deney süresince numunenin kütle değişimi (Δm %), sıcaklık ve zamanın fonksiyonu olarak Pyris Thermal Analysis yazılımı üzerinden sürekli olarak kaydedilmiş, ayrıca DTG (türev kütle eğrisi) analiz edilerek bozunma aşamaları belirlenmiştir.



Resim 5.4: TGA test cihazı.

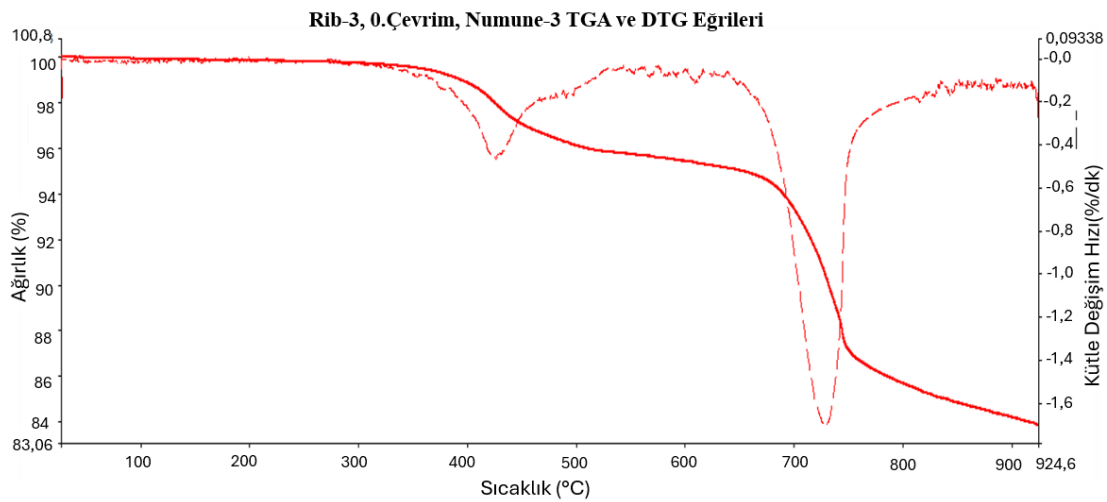
TGA testinin temel çıktısı olan TGA eğrisi, kütlenin sıcaklığa veya zamana karşı değişimini gösterir. Bu eğri üzerinden malzemenin termal kararlılığı, bozunma sıcaklık aralıkları ve kütle kaybı yüzdesi analiz edilir. Ayrıca TGA grafiğinde, hem TGA eğrisi (kütle yüzdesi – sıcaklık) hem de DTG eğrisi (kütle değişim hızı – sıcaklık) birlikte değerlendirilir. DTG eğrisi, bozunma olaylarının hızını ve birden fazla bileşenden oluşan sistemlerde her bir bileşenin bozunma davranışını daha net şekilde ortaya koyar. Bu analiz sonucunda, bozunma başlangıç sıcaklığı, pik sıcaklıkları, kütle kaybı oranları, DTG pik konumları, termal kararlılık ve kalıntı oranları tespit edilmiştir.

Şekil 5.3'te, termoform işlemine girmemiş numunenin TGA test sonuç grafiği verilmiştir. N-7 kodlu numune, yaklaşık 550 °C'ye kadar termal stabilitesini koruduğu ölçülmüştür. 550–700 °C aralığında DTG (kesik çizgi) eğrisinde gözlenen tek belirgin pik, malzemenin tek basamaklı bir bozunma mekanizmasına sahip olduğunu göstermektedir. Yaklaşık 650 °C'deki pik sıcaklığı ana polimer zincirinin (PEKK matrisi) termal parçalanma sıcaklığı olarak tanımlanabilir. Bu sıcaklıkta başlayan bozunma sonucunda toplam kütle kaybı %12,7 olarak ölçülmüştür.



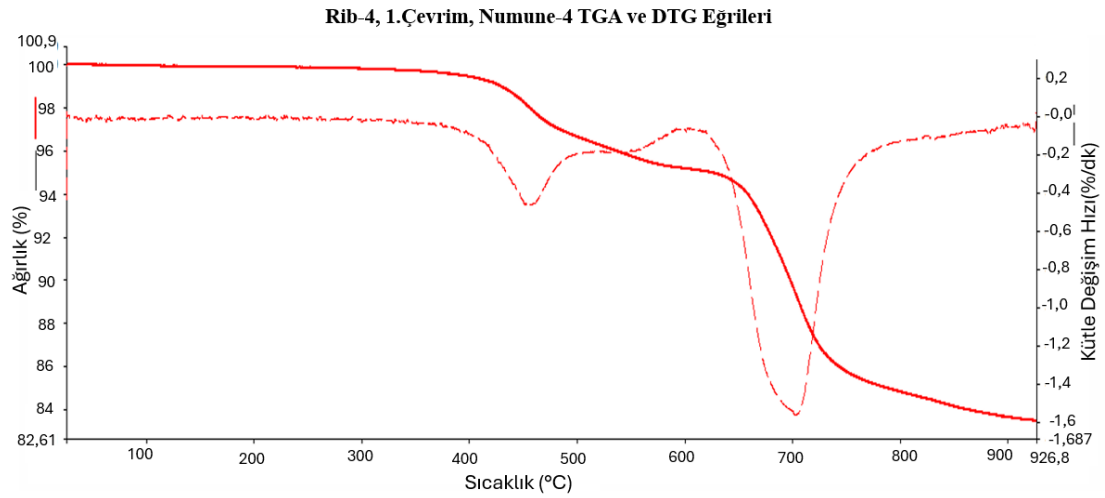
Şekil 5.3:İşlem görmemiş laminat plaka, N-7 TGA grafiği.

Şekil 5.4'te, 0.termal çevrime ait Rib-3'den alınan N-3 kodlu numunenin TGA sonuç grafiği gösterilmektedir. N-3 yaklaşık 400 °C'ye kadar termal stabilitesini korumuştur. 430–570 °C aralığında DTG eğrisinde gözlenen kütle kaybı eğilimi bu bölgede yapıda meydana gelen soğuk kristallenme sürecinden kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir. Ancak bu sıcaklık aralığı malzemenin ana bozunma bölgesi değildir. 650–780 °C aralığında DTG eğrisinde belirgin şekilde ortaya çıkan pik, bu bölgede polimer matrisinin termal bozunmasının gerçekleştiğini göstermektedir. Ölçüm sonucunda toplam kütle kaybı %16,1 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.4:Rib-3, 0.Çevrim, N-3 TGA grafiği.

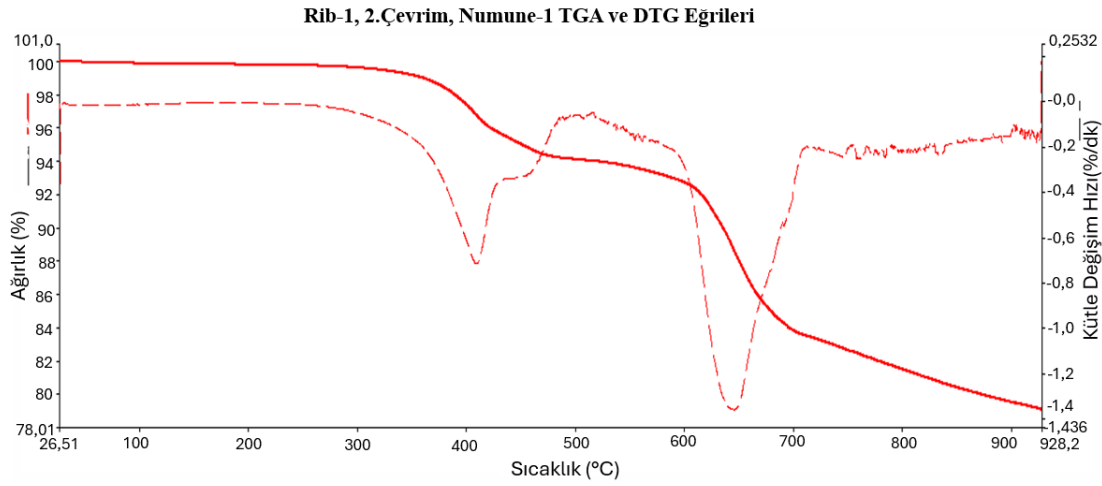
Şekil 5.5'te, 1.thermal çevrime ait Rib-4 parçasından alınan N-4 kodlu numunenin TGA sonuç grafiğidir. N-4,yaklaşık 400 °C'ye kadar termal stabilitesini korumuştur. 430–550 °C aralığında DTG eğrisinde gözlenen kütle değişimi bu bölgede kristalin yapıların çözünmesi veya yeniden düzenlenmesiyle ilgili olduğu tahmin edilmektedir. 650–790 °C aralığında gerçekleşen ana kütle kaybı polimer matrisinin termal bozunmasını temsil etmektedir. DTG eğrisindeki maksimum pik sıcaklığı yaklaşık 705 °C olup bu değer PEKK ana zincirinin parçalanma sıcaklığı olarak tanımlanabilir. Ölçüm sonucunda toplam kütle kaybı %16,5 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.5:Rib-4, 1.Çevrim, N-4 TGA grafiği.

Şekil 5.6'da, 2.thermal çevrime ait Rib-1 parçasından alınan N-1 kodlu numunenin TGA sonuç grafiği gösterilmektedir. N-1, yaklaşık 350 °C'ye kadar termal stabilitesini korumuştur. DTG eğrisi 350–520 °C aralığında gözlenen küçük pik yarı kristal yapıdaki zincirlerin yeniden düzenlenmesi veya düşük molekül ağırlıklı bileşenlerin parçalanması ile ilişkilendirilmektedir.

Ana bozunma 580–750 °C aralığında gerçekleşmiş olup DTG eğrisindeki maksimum pik sıcaklığı yaklaşık 640 °C'dir. Bu sıcaklık ana polimer zincirinin termal parçalanma sıcaklığı olarak değerlendirilmektedir. Testin sonucunda toplam kütle kaybı %20,9 olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.6:Rib-1, 2.Çevrim, N-1 TGA grafiği.

Çizelge 5-9’da TGA sonuçları özetlenmiştir.Sonuçlara ilgili değerlendirmeler aşağıda maddeler halinde verilmiştir. Şekil 5.7’de, TGA verilerinden elde edilen çevrim sayısı ile toplam kütle kaybı arasındaki ilişkisi sunulmuş olup çevrim sayısı arttıkça kütle kaybının arttığı görülmektedir..

Tüm numunelerde 500–700 °C arasında kütle hızla azalmaktadır. Bu davranış, PEKK matrisinde ana zincir yapısının bu sıcaklık aralığında bozulmasından kaynaklanır.

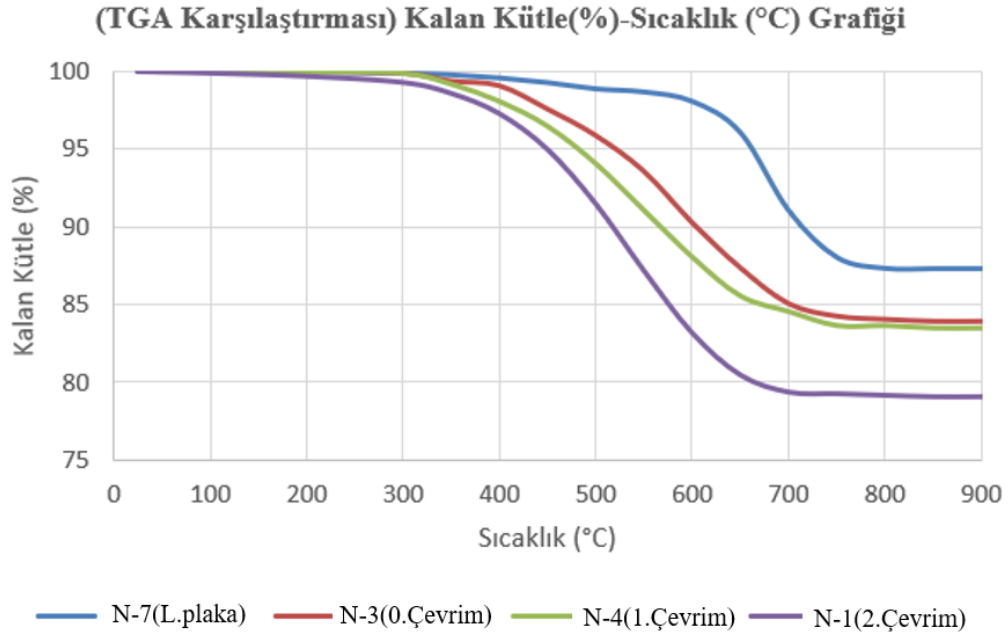
- Numune-7: Malzeme 550°C’ye kadar termal stabilitesini korumuştur. Ana polimer malzemesinin termal parçalanma sıcaklığı pik sıcaklık verisi olan 650°C olarak kaydedilmiştir. Termal işlem görmemiş numunede ölçülen kütle kaybı %12,719 olarak kaydedilmiştir.
- Numune-3: ilk termal çevrime giren malzemenin başlangıç bozulma sıcaklığı bir önceki çevrime göre %21,82 oranında azalarak 430°C olmuştur.
- Pik sıcaklık verisi 720°C kaydedilmiştir. Bu çevrimdeki kütle kaybı bir önceki çevrime göre %26,79 oranında artarak %16,127 olarak ölçülmüştür.
- Numune-4: başlangıç bozulma sıcaklığı 400°C olup önceki çevrime göre %6,98 oranında artış göstermiştir. Ana polimer malzemesinin bozulmaya başladığı sıcaklık ise 705°C olarak bulunmuştur. Önceki çevrime göre kütle kaybındaki artış %2,67 olup, %16,588 olarak ölçülmüştür.
- Numune-1: Bu çevrimde başlangıç bozulma sıcaklığının ilk çevrime göre fark edilir şekilde düştüğü tespit edilmiştir. Bir önceki çevrime göre bu sıcaklık değeri %12,50 oranında düşmüş olup 350°C olarak ölçülmüştür. En düşük pik bozulma

sıcaklığının bu çevrim için 640°C olarak ölçülmüştür. Kütle kaybı bir önceki çevrime göre %26.17 oranında artarak, %20.892 olarak raporlanmıştır.

Çizelge 5-9:Laminat plaka ve 0.,1.,2.Çevrimlerin TGA sonuçları

Numune No ve çevrim	Termofor m Çevrim Sayısı	Başlangıç Bozunma Sıcaklığı (°C)	Pik Bozunma Sıcaklığı (°C)	Toplam Kütle Kaybı (%)	Kalıntı Miktarı (%)	Durum
N-7(Laminat plaka)	0	550	650	12.719	87.281	Stabil
N-3(0.çevrim)	1	430	720	16.127	83.873	Bozunma başlangıcı
N-4(1.çevrim)	2	400	705	16.558	83.442	Bozunma artışı
N-1(2.çevrim)	3	350	640	20.892	79.108	Bozunma artışı

Termoplastik kompozit malzemenin termal çevrimler altındaki kararlılığını değerlendirmek amacıyla numunelerin sıcaklık-kütle kaybı davranışlar Şekil 5.7’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 5.7:L.plaka,0.,1.,2. Çevrimlerin kütle kaybı oranı.

5.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri Analizi (DTK)

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DTK) analizleri TA Instruments DSC250 ve Perkin Elmer Diamond DSC cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler ISO EN 11357-1 (Genel Prensipler), ISO EN 11357-2 (Camsı Geçiş Sıcaklığı Tayini) ve ISO EN 11357-3 (Erime ve Kristallenme Sıcaklığı ile Entalpi Tayini) standartlarına uygun şekilde yürütülmüştür.

Tüm numuneler 0°C – 400 °C sıcaklık aralığında, 10 °C/dakika ısıtma hızında ve azot atmosferi altında analiz edilmiştir. Azot akış ortamı, oksidatif etkileri ortadan kaldırarak yalnızca fiziksel geçişlerin (T_C , T_K , T_E) gözlenmesine olanak sağlamıştır.

Elde edilen DTK eğrilerinde, camsı geçiş, soğuk kristallenme ve erime davranışlarına karşılık gelen karakteristik ısı akışı değişimleri belirlenmiş; ilgili geçiş sıcaklıkları ve entalpi değerleri, cihaz yazılımı üzerinden normalize edilmiş entalpi (J/g) cinsinden hesaplanmıştır. Bu veriler, PEKK matrisli kompozitlerin termal geçiş davranışlarının ve kristallenme özelliklerinin karşılaştırılmasına temel oluşturmuştur.

Deney sonucunda elde edilen erime (ΔH_e) ve soğuk kristallenme (ΔH_{kk}) entalpileri kullanılarak numunelerin kristallik dereceleri (X_k) aşağıda verilen denkleme 5.1'e göre hesaplanmıştır:

$$X_k(\%) = \frac{\Delta H_e - \Delta H_{kk}}{\Delta H_{100\%} \times \alpha_M} \times 100 \quad (5.1)$$

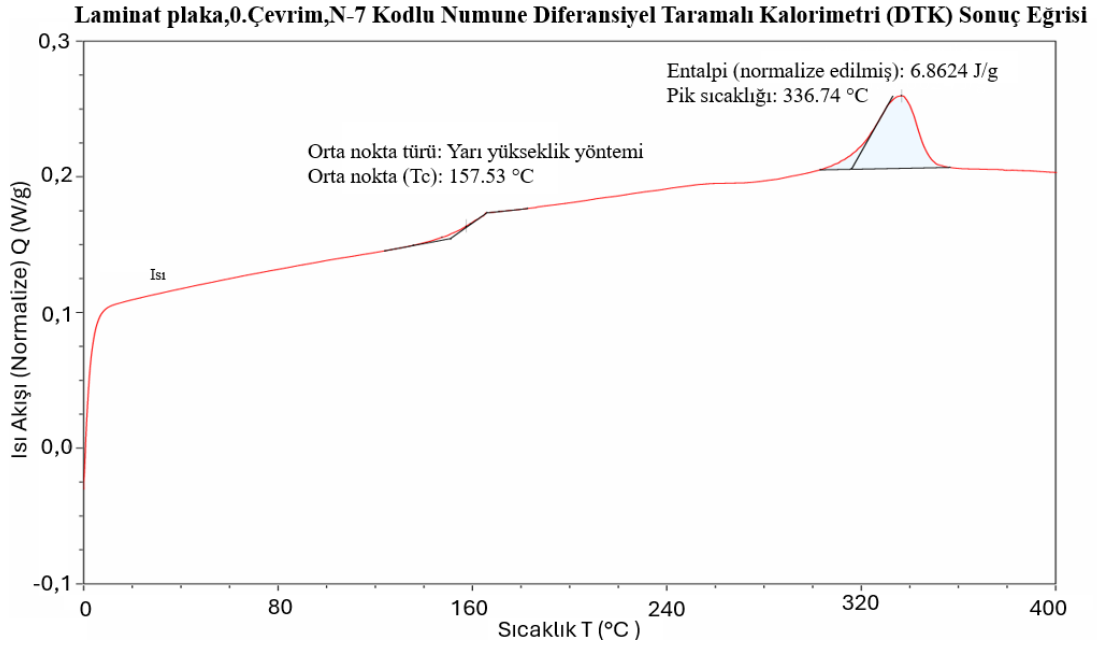
Denklemden kullanılan ifadeler; ΔH_e : erime entalpisi (J/g)

, ΔH_{kk} : soğuk kristallenme entalpisi (J/g)

$\Delta H_{100\%}$: 130 J/g: tamamen kristalize PEKK polimerine ait referans entalpi değeri [55]
ve α_M : kompozitin içindeki matris oranıdır.

Laminat plakaya ait N-7 kodlu numunesinin DTK sonuç raporu Şekil 5.8'te verilmiştir. Cam geçiş (T_C) ve erime (T_E) sıcaklıkları grafikten okunmuş; erime entalpisi (ΔH_m) kullanılarak kristallik oranı hesaplanmıştır. Kristallik hesabında PEKK için tam kristal entalpi ($\Delta H_{100} = 130$ J/g) değeri kullanılmış ve numunedeki reçine oranı (%34) dikkate alınarak işlemler yapılmıştır. Çizelge 5-10'de deneysel sonuçlar tedarikçi verileriyle

karşılaştırması sunulmuştur. Termal çevrim görmemiş numunede hesaplanan kristallik değeri %15,5 bulunmuştur.

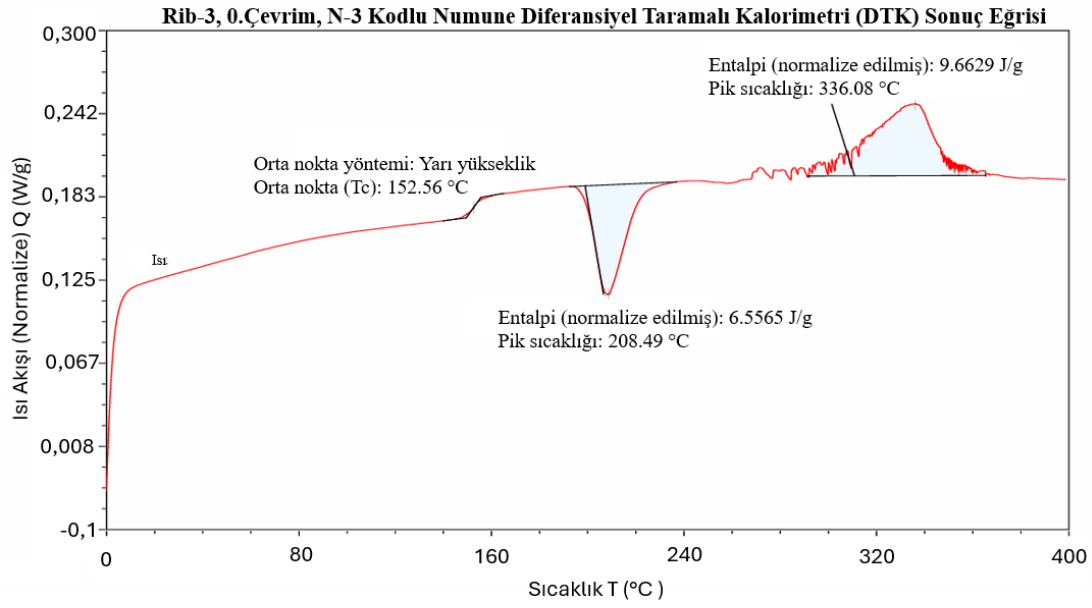


Şekil 5.8:Laminat plaka, N-7 kodlu numune DTK grafiği.

Çizelge 5-10:: Laminat plaka, N-7 DTK deneysel sonuçlar ve tedarikçi verileri.

Parametre	Deneysel Sonuçlar	Üretici Verisi
Camsı geçiş sıcaklığı (T _C)	157,53 °C	160 °C
Erime sıcaklığı (T _E)	336,74 °C	370 °C

Şekil 5.9’da 0. çevrime ait N-3 kodlu numunenin DTK sonuç raporu verilmiştir. Deneyde beklenmeyen bir durum oluşmuş ve soğuk kristallenme olayı gerçekleşmiştir. Proses sırasında sıcaklık ve soğuma hızından kaynaklanan bu olay sebebiyle kristallik oranı beklenenin çok altında bulunmuştur. Bu malzeme için ideal kristallik oranının $\pm\%5$ olması gerekirken, 1. çevrimdeki numune için bu değer %7,0 bulunmuştur. Bu çevrim için deneysel değerler tedarikçi verileriyle Çizelge 5-11’de verilmiştir.

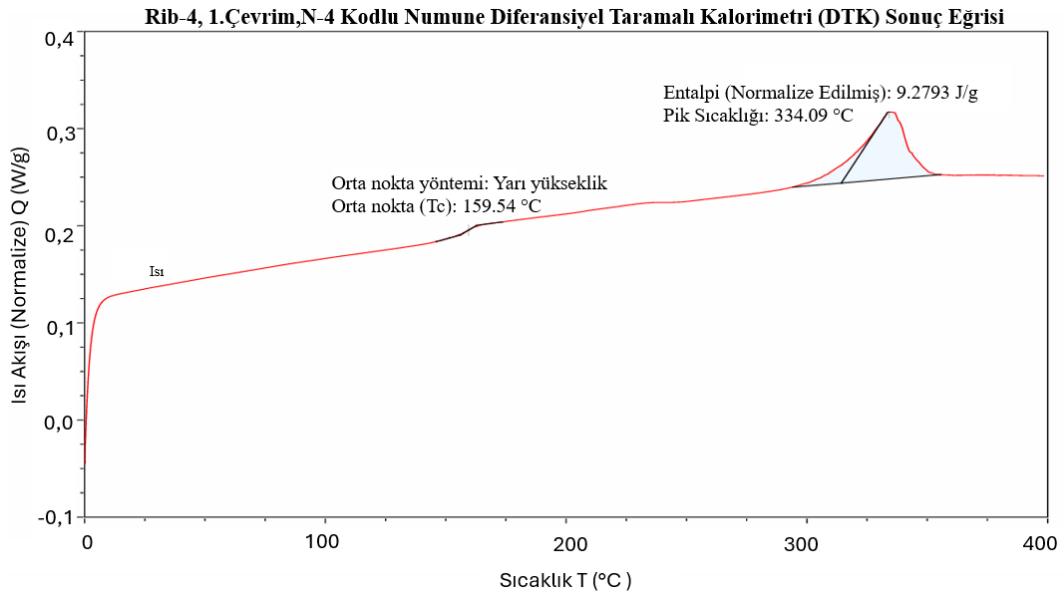


Şekil 5.9:0.Çevrim, N-3 kodlu numune DTK grafiği.

Çizelge 5-11:0.Çevrim, N-3 DTK deneysel sonuçlar ve tedarikçi verileri

Parametre	Deneysel Sonuçlar	Üretici Verisi
Camsı geçiş sıcaklığı (T_C)	152,56 °C	160 °C
Erime sıcaklığı (T_E)	336,08 °C	370 °C
Kristallenme sıcaklığı (T_K)	208,49 °C	265 °C

1.Çevrime ait N-4 kodlu numunesinin DTK sonuç raporu Şekil 5.10’da verilmiştir. Grafikten erime entalpisi 9,2793 (ΔH_E) kullanılarak kristallik oranı %20,99 olarak hesaplanmıştır. Kristallik oranı ideal aralığında bulunmuştur. Çizelge 5-12’da deneyde bulunan cam geçiş (T_C) ve erime (T_E) sıcaklık değerleri ve tedarikçi verileri karşılaştırılmıştır.

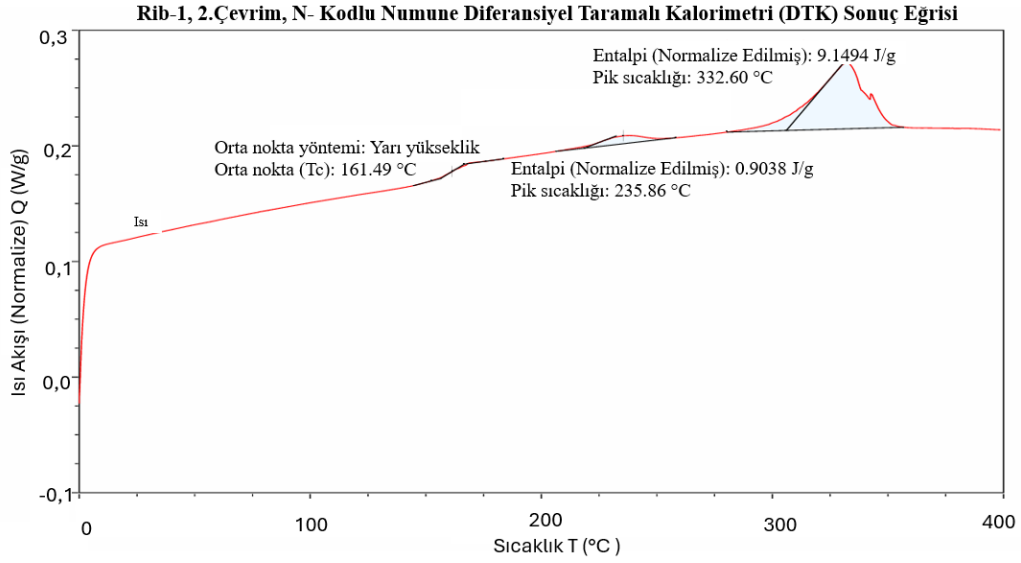


Şekil 5.10:1.Çevrim, N-4 kodlu numune DTK grafiği.

Çizelge 5-12:1.Çevrim, N-4 DTK deneysel sonuçları ve tedarikçi verileri.

Parametre	Deneysel Sonuçlar	Üretici Verisi
Camsı geçiş sıcaklığı (T_C)	159,54°C	160 °C
Erime sıcaklığı (T_E)	334,09 °C	370 °C
Kristallenme sıcaklığı (T_K)	-	265 °C

Şekil 5.11’de 2.Çevrime ait N-1 kodlu numunesinin DTK sonuç raporu verilmiştir.Grafikten erime entalpisi 9,1494(ΔH_E) kullanılarak kristallik oranı ideal aralıkta %20,9 bulunmuştur. Sadece beklenmeyen küçük bir endotermik bir tepkime olduğu görülmüştür. Nedeninin numunelere kodlama yapmak için yapıştırılmış banttan kalan atık adezif olduğu tahmin edilmektedir. Çizelge 5-13’de deneyde elde edilen ve tedarikçiden sağlanan cam geçiş (T_C) ve erime (T_E) kristallenme (T_K) sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.11:2.Çevrim, N-1 kodlu numune DTK grafiği.

Çizelge 5-13:2.Çevrim, N-1 DTK deneysel sonuçları ve tedarikçi verileri.

Parametre	Deneysel Sonuçlar	Üretici Verisi
Camsı geçiş sıcaklığı (T_C)	161,49°C	160 °C
Erime sıcaklığı (T_E)	332,60 °	370 °C
Kristallenme sıcaklığı (T_K)	235,95°C	265 °C

Çizelge 5-14’de özetlenen DTK sonuçlarına ilişkin bulguların açıklamaları aşağıda maddeler hâlinde verilmiştir.

- N-7, için DSC analizinde 336,74 °C’de erime piki gözlenmiş ve erime entalpisi 6,824 J/g olarak ölçülmüştür. Grafikten okunan entalpi değerleri %34 reçine oranı dikkate alınarak düzeltilmiş; bu yaklaşımla Numune-7’nin kristallik oranı %15,52 olarak hesaplanmıştır.
- Numune-3: DSC ölçümünde, cam geçiş sıcaklığı (T_C) ile erime sıcaklığı (T_E) arasındaki bölgede belirgin bir ekzotermik pik gözlenmiştir. Bu olgu soğuk kristallenme olup malzemenin üretim sırasında yeterince kristallenmediğine işaret eder. Sebebin proseste yetersiz ya da aşırı hızlı soğutma uygulanmasından kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle Numune-3’ün kristallik oranı %7,03 olarak düşük bulunmuştur.
- Numune-4: $T_E = 334,09$ °C’de ölçülen erime entalpisi 9,2793 J/g olup, %34 reçine oranı dikkate alınarak kristallik %20,99 hesaplanmıştır.

- Numune-1: Yaklaşık 235 °C’de beklenmedik bir endotermik sinyal görülmüştür. Bunun numunelerin üzerine tanımlama amacıyla yapıştırılan bantların deney öncesi tamamen uzaklaştırılmamasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Bu sinyal, erime entalpisinden önce gerçekleştiğinden hesaplamaya dâhil edilmemiştir. $T_E = 332,60$ °C’de erime entalpisini 9,1494 J/g ölçülmüş ve %34 reçine oranı ile kristallik oranı %20,7 bulunmuştur.

Tedarikçi firma Toray metodolojisine göre kullanılan PEKK-TP için hedef kristallik değeri $\%20 \pm 5$ aralığındadır. Numune-3’teki proses kaynaklı istisna dikkate alınmadığında, ölçülen kristallik değerlerinin istenen aralıkla uyumlu olduğu söylenebilir.

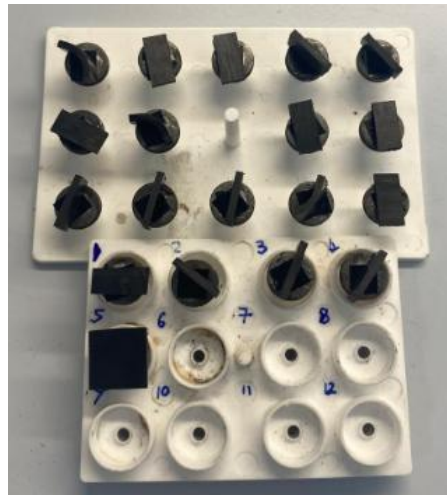
Çizelge 5-14:Laminat plaka ve 0.,1.,2.Çevrimlerin DTK sonuçları.

Numune No ve çevrim	Reçine Oranı(%)	$T_C(^{\circ}C)$	$T_E(^{\circ}C)$	Kristallik (%)
N-7(Laminat plaka)	34	157.53	336.74	15.52
N-3(0. çevrim)	34	152.56	336.08	22.624
N-4(1. çevrim)	34	159.54	334.09	20.99
N-1(2. çevrim)	34	161.49	332.60	20.7

5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Malzemenin mekanik performansında gözlenen değişimlerin mikroyapısal nedenlerini incelemek ve üretim sürecinden kaynaklanabilecek kusurları belirlemek amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile numune yüzeylerinde oluşan lif-matris etkileşimi, delaminasyon, matris çatlakları, boşluklar ve yüzey bütünlüğü gibi termoformlama parametrelerine bağlı mikro ölçekteki morfolojik değişimler değerlendirilmiştir.

SEM incelemesi için numuneler yaklaşık $1 \times 1.5 \text{ cm}^2$ boyutlarında hazırlanmıştır. Termoplastik kompozitlerin elektriksel iletkenliği bulunmadığından, elektron taraması sırasında yüzey yüklenmesini önlemek amacıyla numuneler vakum altında çalışan ince film kaplama cihazı (sputter coater) ile yaklaşık 3 nm kalınlığında altın/paladyum (Au/Pd) alaşımı ile kaplanmıştır. Kaplama işlemine girmek için hazırlanan ve düzeneğe yerleştirilen numunelerin görüntüsü Resim 5.5'te verilmiştir.

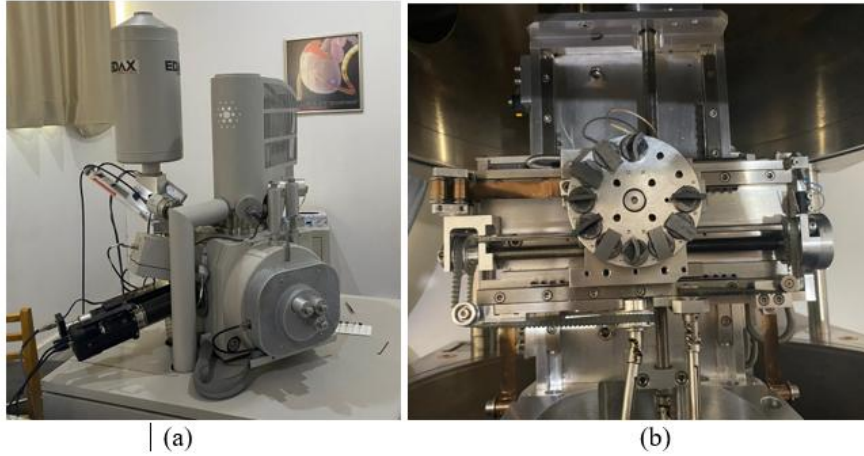


Resim 5.5: Au/Pd Kaplama işlemine hazırlanan numuneler.

Kaplama işlemi sonrasında mikroyapı analizleri FEI Quanta 400F Field Emission Gun (FEG) Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. TEM ölçümlerinde kullanılan cihazın genel görünümü Resim 5.6(a)'da verilmiştir. Resim 5.6(b)'de cihazın numune yerleştirme ve odaklama mekanizması gösterilmiştir. Ölçümler, ikincil elektron (SE) dedektörü kullanılarak yapılmıştır; cihazın maksimum çözünürlüğü 1.2 nm, hızlandırma gerilimi 30 kV, ve çalışma mesafesi yaklaşık 8.9–16 mm olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, elektron demetinin çapı 3.0 spot boyutunda (spot size)

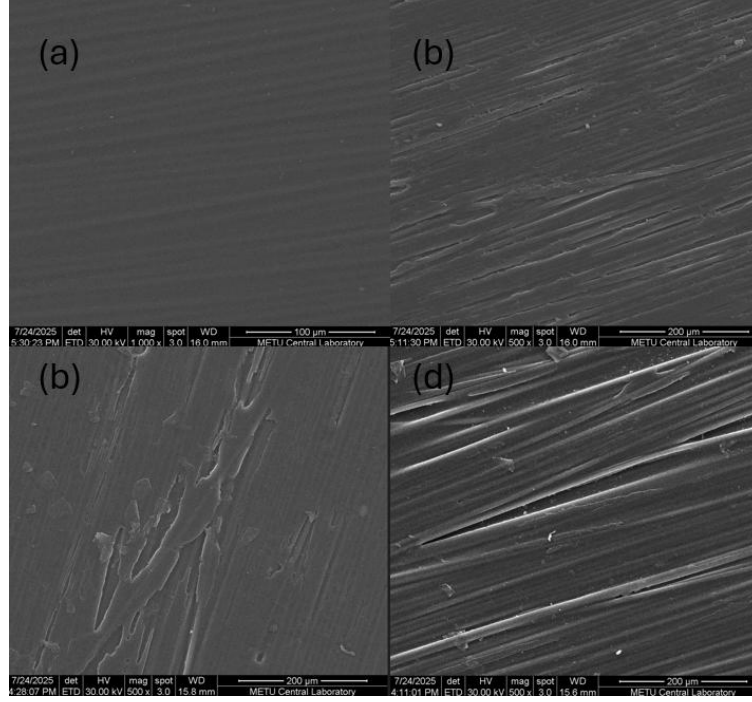
ayarlanmış olup, görüntüler $100\times$ ile $5000\times$ büyütme (magnification) aralığında elde edilmiştir.

Bu parametrelerle elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler, termoformlama çevrimleri sonrasında lif-matris arayüzü, mikroskobik boşluk oluşumu ve yapısal bütünlük gibi mikroyapısal özelliklerin ayrıntılı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.



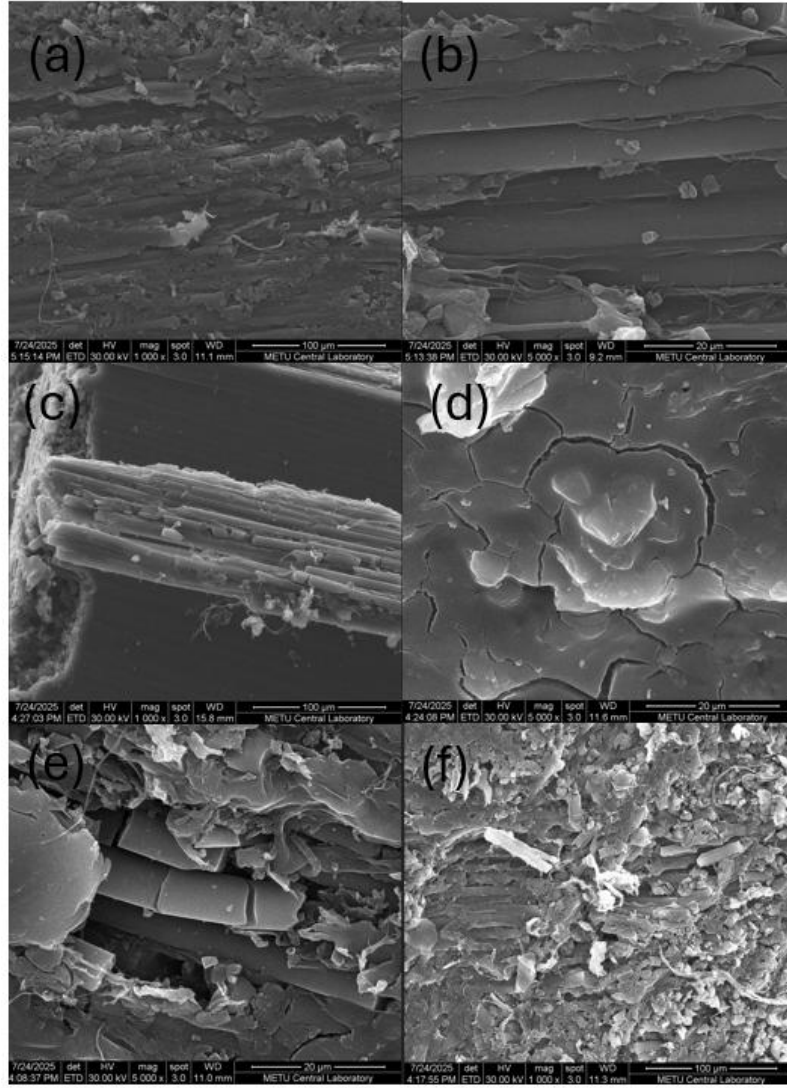
Resim 5.6:(a) Ölçümde kullanılan TEM cihazı, (b) Numune yerleştirme ve ölçüm bölümünün iç kısmı.

Resim 5.7’de sırayla laminat plaka, 0., 1. ve 2. termal çevrim numunlerinin yüzeyinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. İlk çevrimde lif-matris bütünlüğü korunmuş ve homojen bir görüntü gözlemlenmiştir. Çevrim sayısının artmasıyla yüzeyde yönsel deformasyon izlerinin belirlendiği, liflerin yüzeye yaklaştığı ve lif izleri (fiber imprints) tespit edilmiştir. Çevrim sayısının artmasıyla belirginleşen kusurların matris fazında yeniden kristallenme ve termomekanik gerilmelerden kaynaklı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla sonuçlar mekanik performans düşüşlerinin mikroyapısal göstergesi olarak değerlendirilmektedir.



Resim 5.7:PEKK/KF kompozit yüzeylerinin SEM görüntüleri: (a) laminat plaka, (b) 0. çevrim, (c) 1. çevrim, (d) 2. Çevrim.

Resim 5.8’de Farklı termoformlama çevrimlerine ait PEKK/KF kompozit numunelerin mikroyapı morfolojisine ilişkin SEM görüntüleri: (a–b) 0. çevrim, (c–d) 1. çevrim ve (e–f) 2. Çevrim gösterilmiştir. Lokal fiber kırılması ve küçük parçacık kalıntıları(debris) tespit edilse de diğer çevrimlere kıyaslandığında, ilk çevrimde yüzeyin homojen ve lif-matris arayüz bütünlüğü korunmuştur. İkinci çevrimde fiber kırılmalarının artışı, yüzey ve matris çatlaklarının olduğu görülmektedir. Üçüncü çevrimde toplu fiber kırılmalarına rastlanmıştır. Ayrıca matris yapısının gevrekleşmesiye yüzeyde mikroçatlak ağlarının ve parçacık kalıntıları(debris) belirgin bir şekilde arttığı tespit edilmiştir.



Resim 5.8:PEKK/CF kompozitlerin SEM mikroyapı görüntüleri: (a–b) 0. çevrim, (c–d) 1. çevrim, (e–f) 2. Çevrim.

6. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ

6.1. LCA ve LCC Hesaplamaları

Bu bölümde tez araştırmasında kullanılan sürdürülebilirlik göstergelerinden yaşam döngüsü analizi (LCA) ve yaşam döngüsü maliyeti (LCC) hesapları sunulmuştur.

LCA değerleri fonksiyonel birimi kilogram cinsinden değişen malzeme üretimi olacak şekilde hazırlanmıştır. Çizelge 6-1’de seçilen kompozit malzeme grupları için yaşam döngüsü analiz sonuçları sunulmuştur. Üç farklı malzeme grubu incelenmiştir: karbon fiber takviyeli termoplastik kompozit, geri dönüştürülmüş karbon fiber takviyeli termoplastik kompozit ve termoset kompozit. Bu malzemelerin yaşam döngüsü analizinde (LCA) üretim sürecinin farklı aşamalarındaki girdi ve çıktıların çevresel etkileri CO₂ eşdeğeri ve enerji tüketimi etki kategorileri altında değerlendirilmiştir. Belirlenen senaryolara göre yapılan çevresel etki değerlendirmesi sonucunda geri dönüşüm katkısı sayesinde termoplastik ve dönüştürülmüş termoplastik malzemeler avantajlı seçenekler olarak öne çıkmıştır. Dönüştürülmüş malzemenin üretim döngüsüne yeniden dâhil edilmesiyle hammadde üretim aşamasında 179 MJ enerji ve 11,93 kg CO₂ kazanımı sağlandığı saptanmıştır. Çevresel etki değerlendirmesi genelinde en avantajlı seçeneğin dönüştürülmüş termoplastik en dezavantajlı seçeneğin ise 221 MJ enerji tüketimi ve 15,87 kg CO₂ salımıyla termoset olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6-1: TP, TS ve GTP yaşam döngüsü analizinden (LCA) elde edilen çevresel etki değerleri.

Aşama	Termoplastik	Termoset	Geri Dönüşmüş TP
Hammadde üretim	250 MJ 15 kg CO ₂	180 MJ 14.3 kg CO ₂	150 MJ 7.0 kg CO ₂
Şekillendirme Üretim	20 MJ 1 kg CO ₂	20 MJ 1.5 kg CO ₂	20 MJ 1.0 kg CO ₂
Nakliye	1 MJ 0.07 kg CO ₂	1 MJ 0.07 kg CO ₂	1 MJ 0.07 kg CO ₂
Geri Dönüşüm	-350 MJ -20 kg CO ₂	0 MJ 0 kg CO ₂	-350 MJ -20 kg CO ₂
Toplam	-79 MJ -3.93 kg CO ₂	221 MJ 15.87 kg CO ₂	-179 MJ -11.93 kg CO ₂

LCC değerleri fonksiyonel birimi bir kilogram malzeme üretimi esas alınarak hazırlanmıştır. Üç farklı malzeme grubu değerlendirmeye alınmış olup: karbon fiber takviyeli termoplastik kompozit, geri dönüştürülmüş karbon fiber takviyeli termoplastik kompozit ve termoset kompozit şeklindedir. Bu malzemelerin üretiminden başlayarak kullanım süreci ve nihai bertarafına kadar uzanan tüm yaşam döngüsü aşamaları dikkate alınmıştır. Hesaplama kapsamı; malzeme temini, üretim, yeniden kullanım ve depolama aşamalarını içermektedir. Çizelge 6-2’de, LCC yaşam döngüsü maliyet analizi değerleri sunulmuştur. Termoset en düşük başlangıç maliyetine sahip olması nedeniyle maliyet açısından en avantajlı seçenektir. Ancak belirli sıcaklıklarda yapısal bozulma gösterdiğinden, depolama sürecinde en yüksek maliyete sahip malzeme konumundadır. Dönüştürülebilir yapıya uygun olmaması, geri dönüşüm maliyetinin de yüksek olmasına neden olmuştur. Buna karşılık kilogram başına 108 USD ile en yüksek maliyetli seçenek termoplastiktir. Ancak geri dönüşüm uygulandığında 62,0 USD/kg toplam maliyet değeriyle termoplastik, 52,0 USD/kg maliyetli termoset malzemeye kıyasla ekonomik açıdan güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Çizelge 6-2:TP, TS ve GTP yaşam döngüsü maliyeti (LCC) elde edilen çevresel etki değerleri.

Malzeme	Başlangıç Maliyeti (USD/kg)	Operasyon Maliyeti (USD/kg)	Geri Dönüşüm Maliyeti (USD/kg)	Depolama & Yangın Maliyeti (USD/kg)	Toplam LCC (USD/kg)
Termoset	35	10	5	1.5	52,0
Termoplastik	90	15	3	0.5	108
Geri Dönüşmüş TP	50	10	2	0.5	62,5

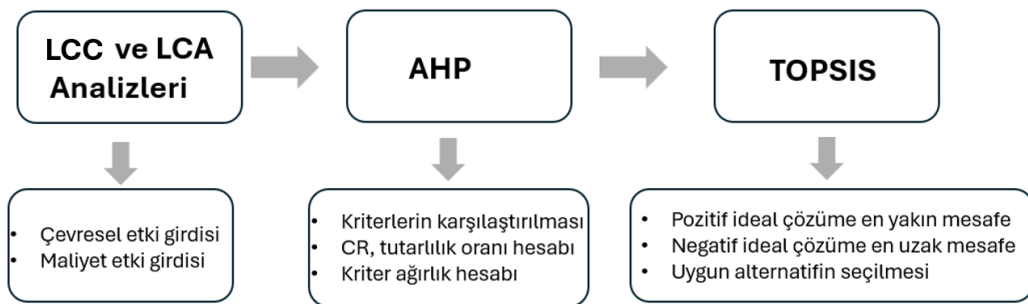
LCA ve LCC değerlendirmeleri tek başına bir sonuç analizi olmayıp, ilerleyen aşamalarda gerçekleştirilecek sürdürülebilirlik hesaplamaları için girdi oluşturmak amacıyla yapılmıştır. Bu analizler sürdürülebilirlik değerlendirmesinde karşılaştırılan malzeme gruplarının çevresel ve maliyet yönünden karşılaştırılmasında veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Ayrıca sürdürülebilirlik değerlendirmesini gerçekleştirecek uzmanların kullanacağı kriter setine de dahil edilmiştir. LCC ve LCA değerleri geri dönüştürülmüş termoplastik malzeme için birinci çevrim verilerini temsil etmektedir. Bu çalışma kapsamında termoplastik malzeme için sunulan geri dönüştürülmüş TP

değerleri, ikinci çevrim malzemesi için de baz alınarak katılımcılara girdi olarak sunulmuştur.

6.2. Sürdürülebilirlik Değerlendirme Yöntemleri

Bu çalışmada sürdürülebilirlik; mekanik, çevresel, ekonomik ve döngüsellik boyutlarıyla birlikte çok boyutlu bir problem olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle, çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve TOPSIS birlikte kullanılmıştır. Bu çalışmada dört farklı unsur olan karbon fiber takviyeli TP, iki kez termal çevrime girmiş karbon fiber takviyeli TP, üç kez termal çevrime girmiş karbon fiber takviyeli TP ve karbon fiber takviyeli TS arasında değerlendirme yapılmıştır. İlk üç malzeme için mekanik ve malzeme performansına ilişkin değerler, bu çalışmada gerçekleştirilen farklı test ve deneysel yöntemlerle elde edilmiştir.

Karşılaştırılan malzeme grupları için çevresel ve maliyet odaklı değerlendirmeler LCA ve LCC analizleriyle sağlanmıştır. Sürdürülebilirlik hesaplamasında çok sayıda ve birbiriyle çelişen kriterlerin bulunduğu problemlerin çözümünde kullanılan çok kriterli karar verme yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem kapsamında kullanılan AHP ve TOPSIS teknikleriyle kriter ağırlıkları belirlenmiş ve en uygun alternatif sıralaması yapılmıştır.. Sürdürülebilirlik analizi Şekil 6.1’ de verilen şematik akış izlenerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.1:Sürdürülebilirlik analiz akışı.

6.3. AHP ve TOPSIS' in Seçilme Gerekçesi

Sürdürülebilirlik değerlendirmesi mekanik performans, çevresel etki, maliyet ve döngüsellik gibi çok boyutlu ve birbiriyle çelişebilen kriterleri içeren karmaşık bir problemdir. Bu nedenle kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesi ve alternatiflerin objektif biçimde sıralanabilmesi için çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Aynı seviyedeki unsurlar uzman görüşlerine dayalı olarak oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi aracılığıyla değerlendirilir ve her kriterin ağırlığı özvektör tekniği ile hesaplanır. Bu sayede alternatiflerin öncelik sıralaması yapılabilir. AHP metodunun önemli özelliklerinden biri de CR (tutarlılık oranı) değerini hesaplayarak karar vericilerin tutarlılığını ölçmesi ve sonuçların güvenilirliğini kontrol etmesidir. Farklı kriterleri hiyerarşik biçimde modelleme kolaylığı ve kabul edilebilir düzeyde tutarlılık oranı sağlama, sonuçların güvenilirliği açısından önemlidir.

TOPSIS, AHP'den gelen ağırlıkları kullanarak alternatiflerin pozitif ve negatif ideal çözüme yakınlığı esasına dayanır. Bu yöntem, hem kolay uygulanabilirliği hem de yorumlanabilirliği bakımından sürdürülebilirlik analizlerinde tercih edilmektedir. Sonuç olarak, AHP yöntemi kriter ağırlıklarını belirlemek TOPSIS yöntemi ise bu ağırlıkları kullanarak alternatifleri sürdürülebilirlik performansına göre sıralamak amacıyla birlikte kullanılmıştır.

6.4. AHP ile Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

Sürdürülebilirlik analiz kapsamında toplam üç uzman değerlendirmeye katılmıştır. Uzmanların sırayla; kompozit malzeme , uçak ve havacılık ve makine mühendisliği alanlarında doktora derecesi bulunmaktadır. Her bir uzman belirlenen kriterler ve alternatifler arasında karşılaştırma yaparak AHP ve TOPSIS matrislerini doldurmuştur.

Uzmanlar tarafından oluşturulan ikili karşılaştırma matrisleri kriterlerin birbirlerine göre önem derecelerini belirlemek amacıyla Saaty'nin 1–9 ölçeği kullanılarak doldurulmuştur. Her uzman için elde edilen matrislerden özvektör yöntemiyle kriter

ağırlıkları hesaplanmıştır. Çizelge 6-3, Çizelge 6-4 ve Çizelge 6-5'te uzmanların doldurduğu AHP değerleri sunulmuştur. Örneğin,uzmanlardan gelen AHP değerlerinin tutarlılık oranı hesaplanmış olup, bu değerler Çizelge 6-6'da verilmiştir. Her uzmandan alınan AHP matrislerinin ağırlık değerleri hesaplanmıştır ve bu değerler Çizelge 6-6'da verilmiştir. Her AHP için bulunan ağırlık değerlerinin ortalaması alınarak TOPSIS hesaplamasına girdi olacak ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Uzman-1'in AHP tablosunda mekanik performans satırında sunulan 5,6 ve 3 değerleri, meknaik performansın sırayla maliyetten 5 kat, çevresel etkiden 6 kat ve döngüsellikten 3 kat daha önemli olduğunu göstermektedir.

Uzman-1 tarafından doldurulan ikili karşılaştırma tablosu Çizelge 6-3'te sunulmuştur.

Çizelge 6-3:Uzman-1 AHP tablosu.

	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
Mekanik Performans	1	5	4	3
Maliyet	1/5	1	1/2	1/3
Çevresel Etki	1/4	2	1	2
Döngüsellik	1/3	3	1/2	1

Uzman-2 tarafından doldurulan ikili karşılaştırma tablosu Çizelge 6-4'te sunulmuştur.

Çizelge 6-4:Uzman-2 AHP tablosu.

	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
Mekanik Performans	1	5	6	3
Maliyet	1/5	1	3	1/2
Çevresel Etki	1/6	1/3	1	1/5
Döngüsellik	1/3	2	5	1

Uzman-3 tarafından doldurulan ikili karşılaştırma tablosu Çizelge 6-5'te sunulmuştur.

Çizelge 6-5:Uzman-3 AHP tablosu.

	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
Mekanik Performans	1	7	8	6
Maliyet	1/7	1	4	2
Çevresel Etki	1/8	1/4	1	2
Döngüsellik	1/6	1/4	1/2	1

Uzmanların doldurduğu AHP matris değerlerinin tutarlılık oranı %10'un altında çıkmış ve böylece kabul edilebilir düzeyde oldukları hesaplanmıştır. Bulunan tutarlılık oranı değerleri Çizelge 6-6'da gösterilmiştir. Ayrıca, aşağıdaki çizelgede verilen ağırlık matris verilerine ait tutarlılık oranı ve tutarlılık endeksi değerlerinin hesaplaması EK-3'te sunulmuştur.

Çizelge 6-6:Uzmanların AHP sonuçları.

Uzman	Ağırlıklar $w=[w_{mek}, w_{mal}, w_{cev}, w_{don}]$	λ_{max}	CI (Tutarlılık indeksi)	CR (Tutarlılık oranı)
Uzman-1	[0.557,0.136,0.062,0.246]	4,081	0,027	0,03
Uzman-2	[0.664,0.173,0.092,0.068]	4,197	0,065	0,072
Uzman-3	[0.538,0.084,0.200,0.174]	4,171	0,057	0,063

Uzmanlar tarafından doldurulan AHP matrisleri sonucunda elde edilen kriter ağırlıkları aşağıdaki Çizelge 6-7'de verilmiştir. Bu ağırlıklar, bir sonraki aşamada gerçekleştirilen TOPSIS hesaplamasında kullanılmıştır.

Çizelge 6-7:Kriterlerin ağırlıkları (uzman ağırlıkları ortalaması).

Kriterler	Kriter ağırlıkları
Mekanik Performan	0,587
Maliyet	0,132
Çevresel Etki	0,118
Döngüsellik	0,163

Uzmanlardan gelen AHP değerlendirmesi sonucu kriterlerin ağırlıkları; mekanik performans için 0,587, maliyet için 0,132, çevresel etki için 0,118 ve döngüsellik için 0,163 olarak hesaplanmıştır. Katılımcıların yaptığı değerlendirmede en yüksek kriter ağırlığının mekanik performans kriterine verildiği görülmüştür.

6.5. TOPSIS ile Alternatiflerin Sıralanması

Üç farklı uzmanın yaptığı TOPSIS matris değerlerinin ortalaması Çizelge 6-8’de verilmiştir. Ortalama karar matrisinin normalize edilmiş değerleri Çizelge 6-9’da sunulmuştur. Ortalama karar matrisi, normalize edilmiş ve ağırlıklı normalize TOPSIS değerlerinin elde edilmesine ilişkin hesaplama adımları EK-3’te yer almaktadır.

Çizelge 6-8:Uzman Değerlendirmeleri Ortalama Karar Matrisi.

Malzeme	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
TP (0. Çevrim)	7,41	5,07	5,17	6,17
DTP (1. Çevrim)	6,14	5,53	6,08	6,75
DTP (2. Çevrim)	5	5,33	6,33	7,33
Termoset	8,33	5,33	2,33	2,33

Kriterlerin analizde eşdeğer şekilde değerlendirilebilmesi için karar matrisi normalize edilmiş TOPSIS değerleri üzerinden hesaplamalar yapılır. Uzmanların ortalama karar matrisinin normalize değerleri Çizelge 6-9’da verilmiştir.

Çizelge 6-9:Normalize edilmiş TOPSIS matris tablosu.

Malzeme	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
TP (0. Çevrim)	0,541	0,476	0,494	0,516
DTP (1. Çevrim)	0,449	0,520	0,581	0,564
DTP (2. Çevrim)	0,365	0,501	0,605	0,613
Termoset	0,609	0,501	0,222	0,195

AHP yönteminden gelen kriterlerin ağırlık değerlerinin normalize edilmiş TOPSIS değerleriyle çarpılarak her kriter sütunu kendi önem derecesiyle ölçeklenir. Bu ağırlıklı normalize TOPSIS matris değerleri Çizelge 6-10’da sunulmuştur.

TOPSIS değerlendirmesinde katılımcıların termoset malzemeye mekanik performans kriterinde en yüksek puanı verdiği görülmüştür. Katılımcıların en yüksek puanlamayı bu malzemeden yana yapmaları termoset malzemenin proses ve üretim açısından kendini kanıtlamış ,güvenilir bir malzeme olması sebebiyle açıklanabilir.

Çizelge 6-10:Ağırlıklı normalize TOPSIS matris tablosu.

Malzeme	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
TP (0. Çevrim)	0,308	0,062	0,058	0,084
DTP (1. Çevrim)	0,263	0,068	0,068	0,092
DTP (2. Çevrim)	0,214	0,066	0,071	0,100
Termoset	0,357	0,066	0,026	0,031

Pozitif ideal nokta her bir kriterin en yüksek değere ulaştığı alternatifleri; negatif ideal nokta ise ilgili kriterlerin en düşük değerlere sahip olduğu alternatifler ağırlıklandırılmış normalize karar matrisinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda bulunur.Çizelge 6-10'daki tabloya göre ideal pozitif ve ideal negatif değerlerinin olduğu Çizelge 6-11 oluşturulmuştur.

TOPSIS maliyet kriterinde termoset malzemenin rekabetçi özelliğini korumaktadır. Termosetten daha maliyetli olan termoplastik ancak dönüştürülerek yeniden kullanılması, hammadde maliyetini düşürebilme potansiyeli sayesinde avantajlı konuma geçebilmektedir. Bu sebeple uzmanlarında maliyet değerlendirmesinde ilk tercihleri dönüştürülmüş TP olurken, sonrasında termosetten yana olmuştur.

TP ve dönüştürülmüş TP malzemelerin çevresel etki ve döngüsellik kriterleri değerlendirildiğinde belirgin farkla termoset malzemenin önüne geçtiği tespit edilmiştir. Katılımcıların karar matrislerinde çevresel etki ve döngüsellikte TP malzemelere yüksek puan vermeleri, değerlendirmede bu malzemeleri avantajlı hale getirmiştir.

Çizelge 6-11:Pozitif ve negatif ideal çözüme yakınlık değerlendirme tablosu.

Kriter	Pozitif İdeal (D^+)	Negatif İdeal (D^-)
Mekanik Performans	0,357 (TS)	0,214(2.DTP)
Maliyet	0,068(1. DTP)	0,062(0.TP)
Çevresel Etki	0,071(2. DTP)	0,026(TS)
Döngüsellik	0,100(2. DTP)	0,031(TS)

TOPSIS yöntemi yaklaşımında en iyi alternatifin en ideal çözüme en yakın, negatif idele de en uzak olması şeklindedir. Bu ifadenin TOPSIS hesabında karşılığı D^+ değerinin en küçük ve D^- değerinin de en büyük olması şeklinde yorumlanabilir. Birinci sırada yer alan TP (0. Çevrim) seçeneğinin pozitif ideal çözüme 0,044 değeriyle en yakın ve 0,120

değeriyle de negatif değere en uzak olduğu saptanmıştır. TP (0. çevrim) alternatifi kriterlerin hiçbirinde pozitif ideale en yakın olmasa da maliyet kriteri haricinde en kötü seçenek olarak değerlendirilmemiştir. Ayrıca maliyet değerlendirmesinde diğer alternatiflerle arasındaki farkın yakın olması onu açık ara farkla dezavantajlı duruma getirmedeği görülmüştür.

İkinci sırada yer alan Termoset (TS) seçeneğinin pozitif ideal çözüme yakınlığı 0,082 ve ideal negatife yakınlığı da 0,143 bulunmuştur. Termoset malzeme ise döngüsellik değerlendirmesinde negatif ideale en yakın alternatif olmasına rağmen yüksek mekanik performans değeri ve katılımcıların ağırlıklandırma sonuçlarında mekanik performans kriterinin en yüksek ağırlığa sahip olması nedeniyle ikinci sırada yer almıştır.

Üçüncü sırada yer alan TP(1.çevrim) ile ikinci sırada yer alan termosetin pozitif ideale yakınlık katsayısı, ikinci sırada yer alan termoset malzemeye yakın olmasına rağmen, negatif ideale olan uzaklığının düşük olması TP(1.çevrim)'in termosetten sonra gelmesine neden olmuştur. TP(1. Çevrim)'in TP(2. Çevrim)'e göre pozitif ideale daha yakın ve negatif idealden uzak olması ise TP(2. Çevrim)'nin ardından sıralanmasını açıklamaktadır.

Üçüncü sırada yer alan TP(1. Çevrim) ve son sırada yer alan TP(2. Çevrim) alternatiflerinin pozitif ideal çözüme yakınlık katsayılarının, ilk sırada yer alan TP(0. Çevrim) ile karşılaştırıldığında farkın açıldığı saptanmıştır. Ayrıca bu iki alternatfin negatif ideal noktaya diğer alternatiflerden daha yakın olması, onların sıralamada sonlarda yer almalarına neden olmuştur. Karşılaştırılan malzemelerin TOPSIS yakınlık katsayıları ve sıralamaları Çizelge 6-12'de özetlenmiştir.

Termal işlem görmemiş termoplastik malzeme 0,729 değeriyle en yüksek yakınlık katsayısı değeri olarak en iyi alternatif olarak seçilmiştir. İkinci sırada 0,633 yakınlık katsayısı değeriyle termoset alırken sıralamayı 0,485 puanıyla birinci çevrime girmiş termoplastik ve sıralamadaki son sırayı 0,364 yakınlık katsayısı ile 2. çevrime giren termoplastik almıştır.

Çizelge 6-12:TOPSIS sonuçları: pozitif/negatif ideale uzaklıklar.

Alternatif	D_i^+	D_i^-	$C_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)}$	Sıralama
TP (0. Çevrim)	0,044	0,120	0,729	1
Termoset (TS)	0,082	0,143	0,633	2
TP(1. Çevrim)	0,094	0,088	0,485	3
TP(2. Çevrim)	0,143	0,081	0,364	4

Ağırlık matrisinde mekanik performans kriteri tek başına en yüksek kriter ağırlığı olsa da sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımla diğer diğer kriterler birlikte değerlendirildiğinde bu analiz kapsamında termal çevrime girmemiş TP 0,729 yakınlık katsayısı ile en uygun alternatif olarak seçilmiştir.

Katılımcıların yaptığı değerlendirmeler sonucunda TP kompozitleri sürdürülebilir odaklı yaklaşımla termosetten üstün gördüğü yorumu yapılabilir. Ancak çoklu çevrimlerde düşen mekanik dayanım ve mikroyapısal bozulmalar mekanik performans değerlendirmesinde bu malzemeleri daha az tercih edilir duruma getirir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, termal çevrime (0.-2. çevrim) giren PEKK/KF termoplastik kompozitlerin mekanik ve malzeme performansları; havacılık uygulamalarında kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden ultrasonik tarama, çok darbeli yankı yöntemi ve bilgisayarlı tomografi uygulanarak hasar analizi ile incelenmiştir. Tahribatlı muayene yöntemlerinden ise basma testi ile elastik/chord modülü ve basma dayanımı; diferansiyel taramalı kalorimetri (DTK) yöntemiyle kristallenme oranı; termogravimetrik analiz (TGA) yöntemiyle de ısıl bozulma ve kütle değişimi değerleri saptanmıştır. Sürdürülebilir odaklı tasarım karşılaştırması kapsamında, 0. çevrimden 2. çevrime kadar termoplastik kompozit ve termoset malzemeler alternatif olarak karşılaştırılmıştır. Alternatif malzemeler mekanik performans, maliyet, çevresel etki ve döngüsellik kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Sürdürülebilirlik analizi AHP ve TOPSIS yardımcı yöntemleriyle 3 farklı uzman katılımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmada yapılan deneysel çalışmalar, mekanik değerlendirme girdisi olarak sunulmuştur. Amaç termoplastiklerin sürdürülebilir tasarım ilkeleri doğrultusunda, havacılıkta yaygın kullanılan termoset kompozitlere karşı mühendislik açısından uygulanabilir bir seçenek olup olmadığını ortaya koymaktır. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Çevrim sayısının artmasıyla basma testindeki bulgular: 0. çevrimde maksimum basma kuvveti 4660,4 N, basma dayanımı 233,5 MPa, elastik modül 13,4 GPa bulunmuştur. 0., 1. ve 2. çevrimlerde sırasıyla elastik modül 16,1 GPa, 16,8 GPa ve 21,3 GPa; basma dayanımı 200,1 MPa, 232,0 MPa ve 214,7 MPa olarak ölçülmüştür. 0. çevrimden 2. çevrime elastik modül yaklaşık %58,9 oranında artarken, basma dayanımı %8,5 oranında azalmış; basma kuvveti de %7,8 azalarak 4295,1 N bulunmuştur.

0. çevrimde kristallik oranı %15,52 iken, diğer çevrimlerde sırasıyla %22,62, %20,99 ve %20,70 aralığına yükselmiştir. Malzemeyi sağlayan üretici verisinin sunduğu değerlere göre %20'nin ± 5 değer aralığındaki oran ideal kristallik oranıdır ve bu değer aralığının sağlandığı saptanmıştır.

TGA testinde başlangıç bozunma sıcaklığı termal çevrimle birlikte 550 °C (laminat plaka)’den 350 °C (2. çevrim)’e gerilemiştir. Toplam kütle kaybı ilk çevrimden son çevrime %12,72’den %20,89’a artış göstermiştir. Bu veriler, çevrim sayısı arttıkça malzemenin ısıl kararlılığının azaldığı anlamına gelmektedir.

Çevrim sayısı arttıkça kiriş(chord) modülün arttığı saptanmıştır. Kristallik artışı, mekanik rijitlik artışını desteklemektedir. Genel eğilimle uyumlu olarak çevrim sayısı arttıkça basma dayanımı azalmıştır. Çoklu çevrimler, ısıl kararlılığı olumsuz etkilemektedir.

Uzman katılımcılarla yapılan AHP–TOPSIS değerlendirmesinde, alternatif sunulan malzemeler arasında en sürdürülebilir odaklı alternatifin 0,729 katsayısı ile termoplastik malzeme olduğu test edilmiştir.

Bu çalışmayı devam ettirmek isteyen araştırmacılar, mekanik testlerin kapasitesini genişletmek için çekme, bükme, kayma ve yorulma gibi çeşitli testlerini çalışmaya dâhil edebilir. Ayrıca, kompozit malzemelerin yapısı gereği proses ve uygulama hataları ölçüm sonuçlarını etkileyebileceğinden, kupon sayısının artırılması yapılan ölçümlerin güvenilirliği açısından daha uygun olacaktır. Doğrulanmış kalıp profilinin kullanılması ve sıcaklık, kalıp basıncı, ısınma-soğuma süreleri gibi proses parametrelerinin doğrulanması, üretim ve deneysel ölçümlerde oluşabilecek hata ihtimallerini azaltacaktır. Buna ek olarak, araştırılan kriteri ve uygulama amacına göre LCA ve LCC senaryoları çeşitlendirilerek karşılaştırmalar derinleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Metz, B.** (2021). *Climate Change 2001: Mitigation: Contribution of Working Group III to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- [2] **Balasubramanian, M.** (2014). *Composite Materials and Processing*, Boca Raton, FL, CRC Press.
- [3] **Montagna, L.S., Kondo, M.Y., Callisaya, E.S., Mello, C., de Souza, B.R., Lemes, A.P., Botelho, E.C., Costa, M.L., de Sampaio Alves, M.C., Ribeiro, M.V., Rezende, M.C.** (2022). A review on research, application, processing, and recycling of PPS based materials, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 32(1).
- [4] **Shinde, D.D.** (2022). A review on types of radar absorbing materials, *Global Business Management Strategies Conference Proceedings*.
- [5] **Ngo, T.D.** (2020). Introduction to composite materials, *Composite Materials, IntechOpen*, <https://doi.org/10.5772/intechopen.91285>.
- [6] **Abbassi, F., Elfaleh, I., Mistou, S., Zghal, A., Fazzini, M., Djilali, T.** (2011). Experimental and numerical investigations of a thermoplastic composite (carbon/PPS) thermoforming, *Structural Control and Health Monitoring*, 18, 728–743.
- [7] **Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., Elharfi, A.** (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review, *Composite Structures*, 113640.
- [8] **Agarwal, B.D., Broutman, L.J., Chandrashekara, K.** (2006). *Analysis and Performance of Fiber Composites*, Hoboken, NJ, USA, Wiley.
- [9] **Clyne, T.W., Hull, D.** (2019). *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- [10] **Gibson, R. F.** (2016). *Principles of Composite Material Mechanics*, Boca Raton, FL, USA, CRC Press.
- [11] **Liu, M., Guo, Y., Wang J. et. al.** (2018). Corrosion avoidance in lightweight materials for automotive applications, *NPJ Materials Degradation*, 24.
- [12] **Brandt, J.** (2012). *Specific Strength and Stiffness Values of Conventional Materials and Composites*, NetComposites.
- [13] **Khan, N.I., Halder, S.** (2020). *Self-healing fiber-reinforced polymer composites for their potential structural applications*, Self-Healing Polymer-Based Systems, Elsevier
- [14] **Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., Elharfi, A.** (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review, *Composite Structures*, 113640.
- [15] **Agarwal, B.D., Broutman, L.J., Chandrashekara, K.** (2018). *Analysis and Performance of Fiber Composites*, Hoboken, NJ, USA, Wiley.

- [16] **Gibson, R.F.** (2016). *Principles of Composite Material Mechanics*, Boca Raton, FL, USA, CRC Press.
- [17] **Shrivastava, A.** (2018). *Introduction to Plastics Engineering*, Oxford, Elsevier.
- [18] **Advani, S.G., Sozer, M.** (2003), *Process Modeling in Composites Manufacturing*, Boca Raton, FL, USA, CRC Press.
- [19] **Nardi, D., Sinke, J.** (2021). Design analysis for thermoforming of thermoplastic composites: Prediction and machine learning-based optimization, *Composites Part C: Open Access*.
- [20] **Çobanoğlu, M., Ece, R.E., Öztürk, F.** (2021). Thermoforming process parameter optimization of thermoplastic PEKK/CF and PPS, *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering*, 198–210.
- [21] **Xiong, H., Hamila, N., Boisse, P.** (2019). Consolidation modeling during thermoforming of thermoplastic composite prepregs, *Materials*, 2853.
- [22] <<https://analyzing-testing.netzsch.com/tr/application-literature/crystallization-of-a-high-performance-semi-crystalline-polymer-peek>>, alındığı tarih: 11.03.2025.
- [23] <<http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/FILES/polymers/orient/Orient.htm>>, alındığı tarih: 11.03.2025.
- [24] **Nicholson, J.W.** (2006). *The Chemistry of Polymers*, Cambridge, UK, RSC Publishing.
- [25] **Lampman, S.** (2003). *Characterization and Failure Analysis of Plastics*, Materials Park, OH, ASM International.
- [26] **Kassapoglou, C.** (2013). *Good Design Practices and Design “Rules of Thumb”*, Hoboken, NJ, USA, Wiley.
- [27] **An, H., Chen, S., Huang, H.** (2019). Stacking sequence optimization and blending design of laminated composite structures, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 193–207.
- [28] **Zein, S., Madhavan, V., Dumas, D., Ravier L., Yague, I.** (2016). From stacking sequences to ply layouts: An algorithm to design manufacturable composite structures, *Composite Structures*, 1-11.
- [29] **Jodhani, J., Handa, A., Gautam, A., Ashwni, A., Rana, R.** (2023). Ultrasonic non-destructive evaluation of composites: A review, *Materials Today: Proceedings*, 1134.
- [30] **Xiao, Z., Xu, C., Xiao, D., Liu, F., Yin, M.** (2017). An optimized robotic scanning scheme for ultrasonic NDT of complex structures, *Experimental Techniques*, 389–398.
- [31] **Boopathy, G., Surendar, G., Nema, A., Anand, T. P. P.** (2017). Review on non-destructive testing of composite materials in aircraft applications, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*.
- [32] **Dilonardo, E., Nacucchi, M., de Pascalis, F., Zarrelli, M., Giannini, C.** (2020). High-resolution X-ray computed tomography: A versatile non-destructive tool to characterize CFRP-based aircraft composite elements, *Composites Science and Technology*, 108093.
- [33] **Böhm, R., Stiller, J., Behnisch, T., Zscheyge, M., Protz, R., Radloff, S., Gude, M., Hufenbach, W.** (2015). A quantitative comparison of the capabilities of in situ

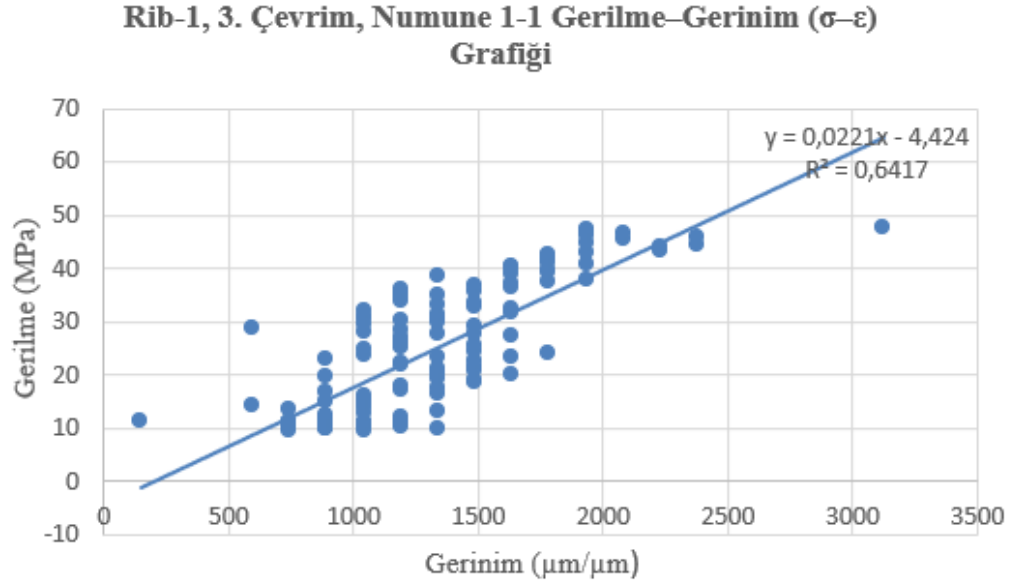
computed tomography and conventional computed tomography for damage analysis of composites, *Composites Science and Technology*, 134–141.

- [34] Garcea, S.C., Wang, Y., Withers, P.J. (2018). X-ray computed tomography of polymer composites, *Composites Science and Technology*, 305–319.
- [35] Kessler, M.R. (2004). *Advanced Topics in Characterization of Composites*, Trafford Publishing.
- [36] Drzeżdżon, J., Jacewicz, D., Sielicka, A., Chmurzyński, L. (2019). Characterization of polymers based on differential scanning calorimetry based techniques, *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 191–200.
- [37] Kong Y., Hay, J.N. (2002). The measurement of the crystallinity of polymers by DSC, *Polymer*, 3873–3878.
- [38] Umar, M., Ofem, M. I., Anwar, A.S., Salisu, A.G. (2022). Thermo gravimetric analysis (TGA) of PA6/G and PA6/GNP composites using two processing streams, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 123–130.
- [39] Martins, M., Duque, J., Soares, K., Orlando, M. (2021). *Thermal analysis of recycled plastics*, Recent Developments in Plastic Recycling, Singapore, Springer.
- [40] Drzeżdżon, J., Jacewicz, D., Sielicka, A., Chmurzyński, L. (2019). A review of new approaches to analytical methods to determine the structure and morphology of polymers, *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 103902.
- [41] Kuhlman, T., Farrington, J. (2010). What is sustainability? *Sustainability*, 3436–3448.
- [42] Keeble, B.R. (1988). The brundtland report: Our common future, *Medicine and War*, 17–25.
- [43] Wu, J. (2013). Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes, *Landscape Ecology*, 999–1023.
- [44] Özdemir, E.D., Härdtlein, M., Jenssen, T., Zech, D., Eltrop, L. (2011). A confusion of tongues or the art of aggregating indicators: Reflections on four projective methodologies on sustainability measurement, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2381–2395.
- [45] Emovon, I., Oghenenyerovwho, O.S. (2020). Application of MCDM method in material selection for optimal design: A review, *Results in Materials*, 100115.
- [46] Greeff, G., Ghoshal, R. (2004). *Practical e-manufacturing and Supply Chain Management*, Oxford, UK, Butterworth-Heinemann.
- [47] Balpetek, F.G., Alay, E., Özdoğan, E. (2012). Sürdürülebilir kalkınma için yaşam döngüsü değerlendirmesi ve tekstil sanayi, *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 37–49.
- [48] Saaty, R.W. (1987). The analytic hierarchy process—What it is and how it is used, *Mathematical Modelling*, 161–176.
- [49] Ünal, N., Öz, Y. (2022). Helikopter ürün konumlandırma ve AHP/TOPSIS yöntemi, *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 117–125.
- [50] Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, New York, McGraw-Hill.
- [51] Samut, P.K. (2014). İki aşamalı çok kriterli karar verme ile performans değerlendirmesi: AHP ve TOPSIS yöntemlerinin entegrasyonu, *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 57–67.

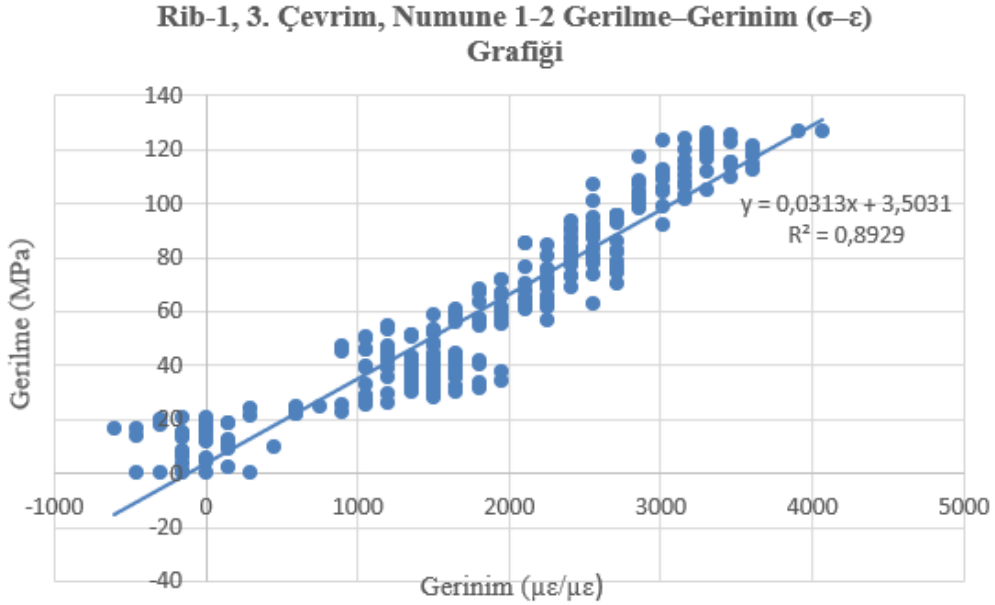
- [52] **Biswas, P., Pramanik, S., Giri, B.C.** (2016). TOPSIS method for multi-attribute group decision-making under single-valued neutrosophic environment, *Neural Computing and Applications*, 727–737.
- [53] **Balioti, V., Tzimopoulos, C., Evangelides, C.** (2018). *Multi-criteria decision making using TOPSIS method under fuzzy environment*. Application in Spillway Selection, 2018.
- [54] **Kazakidis, V.N., Mayer, Z., Scoble, M.J.** (2004). Decision making using the analytic hierarchy process in mining engineering, *Mining Technology* (Trans. Inst. Min. Metall. A), p. A30–A42, 2004.
- [55] **Blundell, D.J. ve Osborn, B.N.** (1983). The morphology of poly(aryl-ether-ether-ketone), *Polymer*, 953–958.
- [56] **Kosicka, E., Borowiec, M., Kowalczyk, M., Krzyzak, A., Szczepaniak, R.** (2020). Influence of the selected physical modifier on the dynamical behavior of the polymer composites used in the aviation industry, *Materials*, 13, 5279.
- [57] **Firm, M.** (n.d.). Sprouting growth of thermoplastic composites in aerospace, <https://www.marketresearchfirm.com/report-link>, alındığı tarih: 11.03.2025.
- [58] **Yavuz, M.** (2012). Madencilik faaliyetlerinde bazı karar verme problemlerinin çözümünde TOPSIS yönteminin uygulanması, **MT Bilimsel**, 21–34.

EKLER

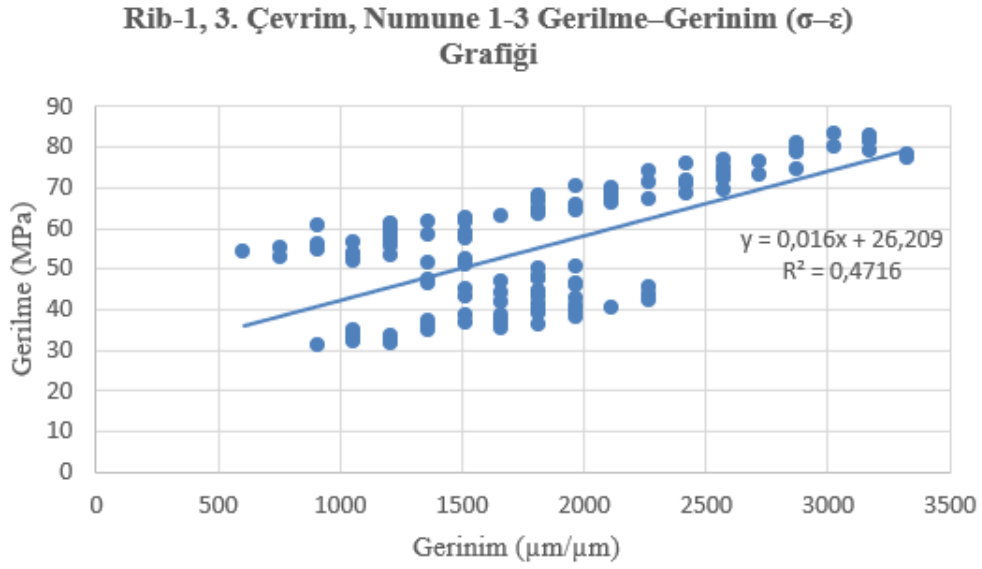
EK 1: Her Çevrime Ait Numunelerin Basma Test Sonuçları Verilmiştir



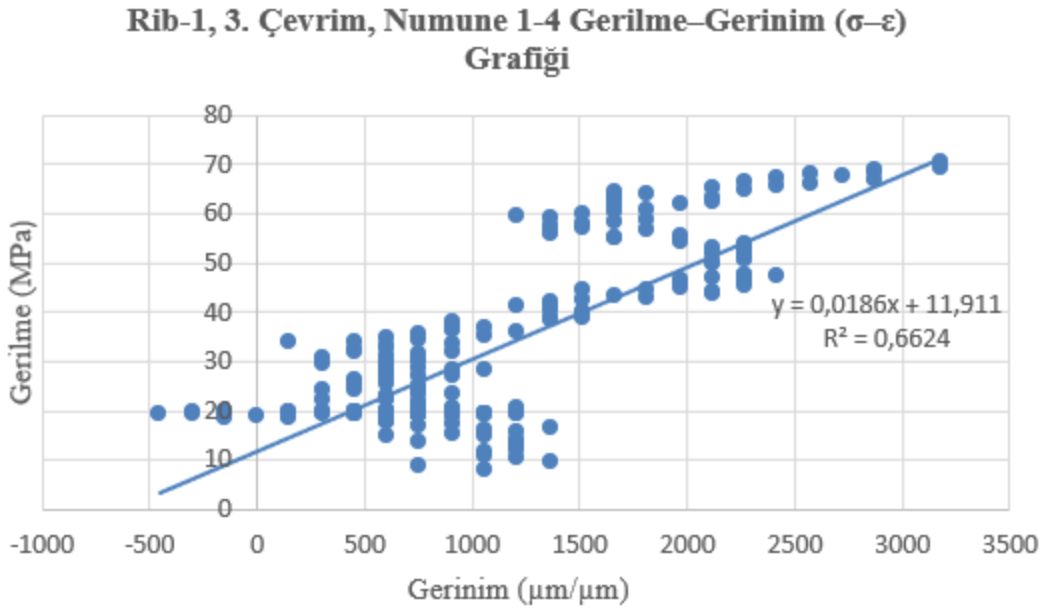
Şekil Ek. 1: Rib-1, 3. Çevrim, numune 1-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.



Şekil Ek. 2: Rib-1, 3. Çevrim, numune 1-2 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.

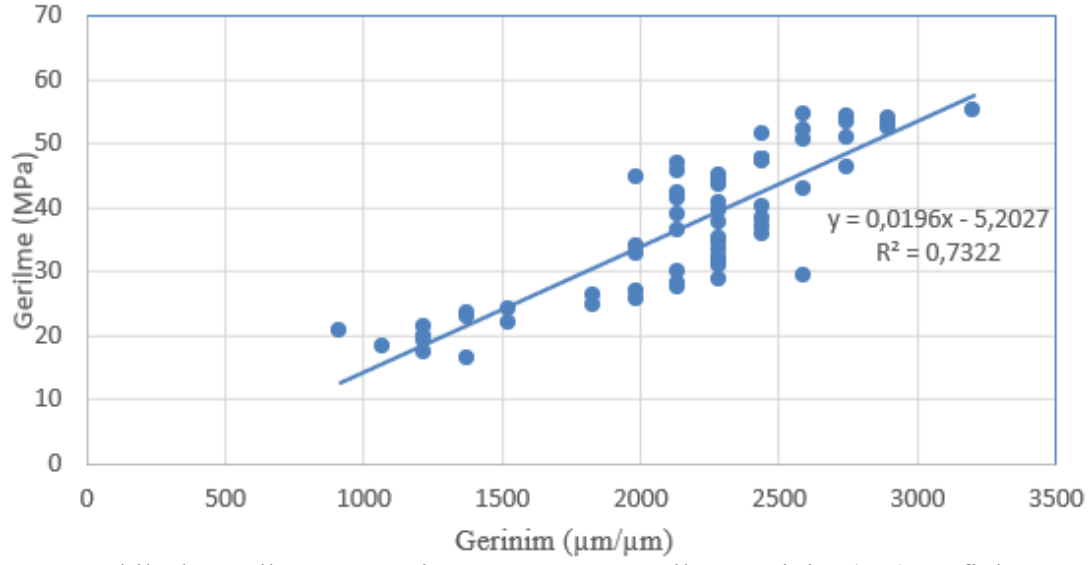


Şekil Ek. 3: Rib-1, 3. Çevrim, numune 1-3 gerilme-gerinim (σ – ϵ) grafiği.



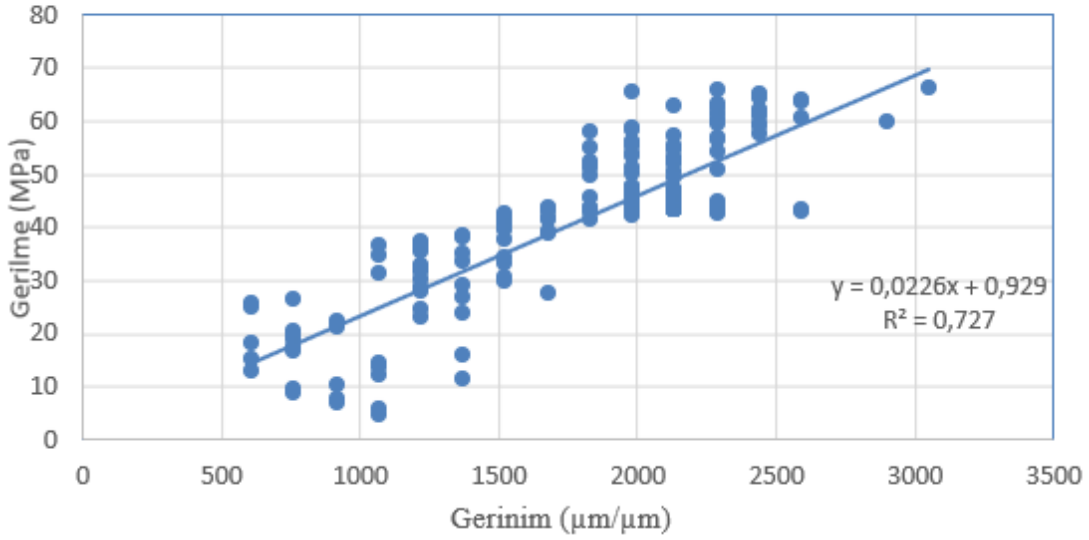
Şekil Ek. 4: Rib-1, 3. Çevrim, numune 1-4 gerilme-gerinim (σ – ϵ) grafiği.

Rib-2, 3. Çevrim, Numune 2-1 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği



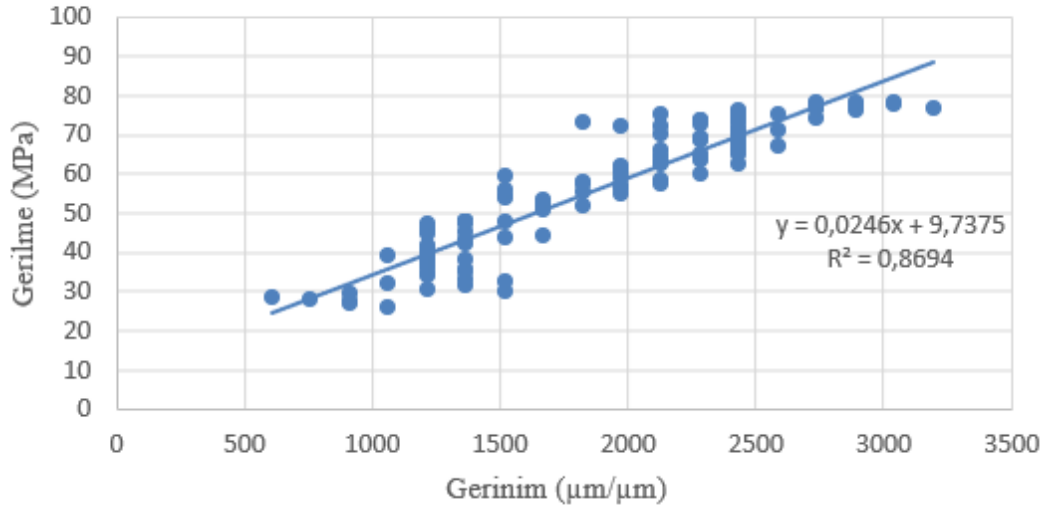
Şekil Ek. 5: Rib-2, 3. Çevrim, numune 2-1 gerilme-gerinim (σ – ϵ) grafiği.

Rib-2, 3. Çevrim, Numune 2-2 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği



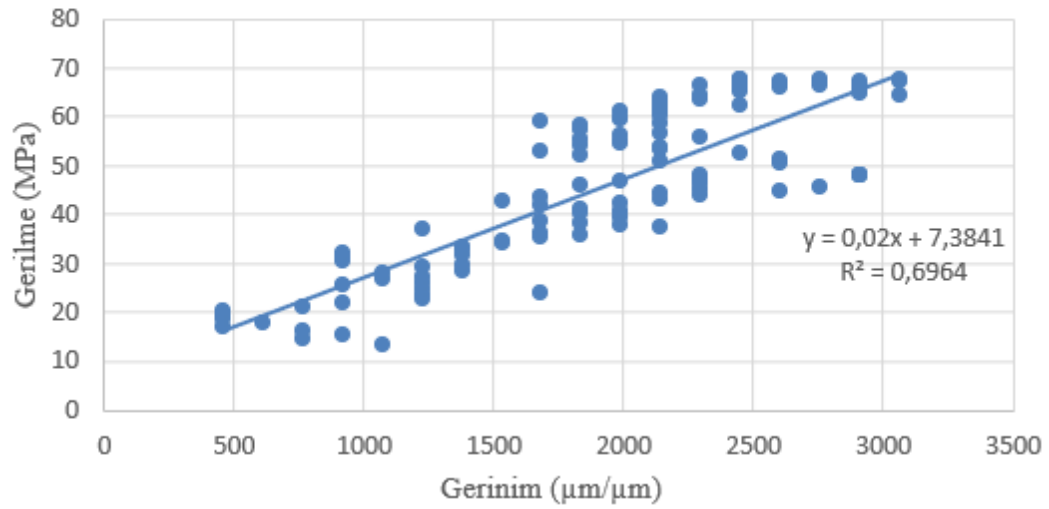
Şekil Ek. 6: Rib-2, 3. Çevrim, numune 2-2 gerilme-gerinim (σ – ϵ) grafiği.

Rib-2, 3. Çevrim, Numune 2-3 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği



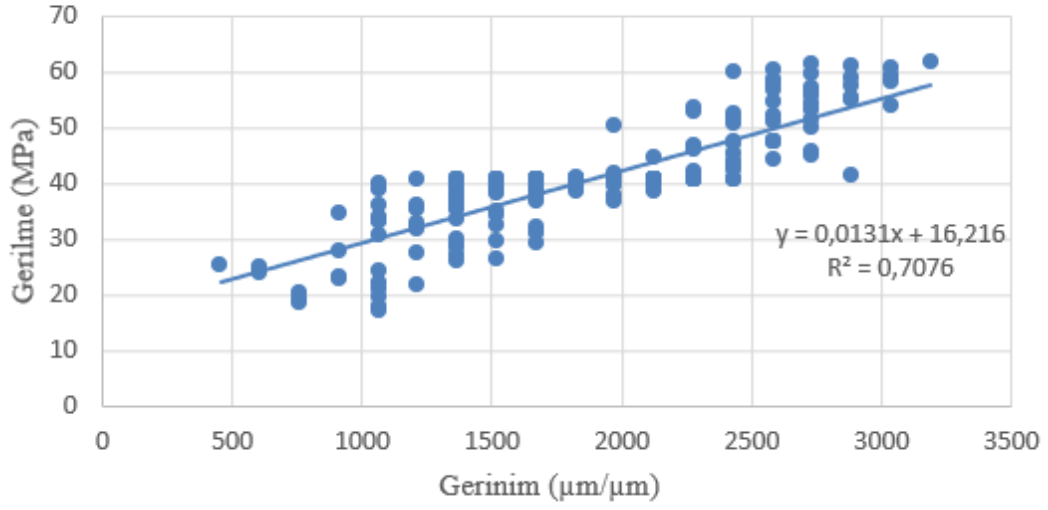
Şekil Ek. 7: Rib-2, 3. Çevrim, numune 2-3 gerilme-gerinim (σ – ϵ) grafiği.

Rib-2, 3. Çevrim, Numune 2-4 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği



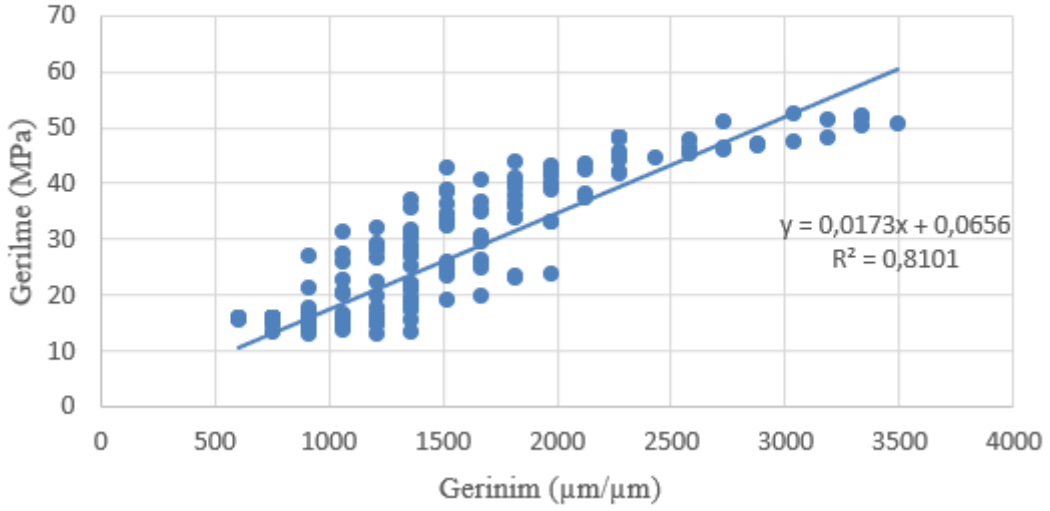
Şekil Ek. 8: Rib-2, 3. Çevrim, numune 2-4 gerilme-gerinim (σ – ϵ) grafiği.

Rib-3, 1. Çevrim, Numune 3-1 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği

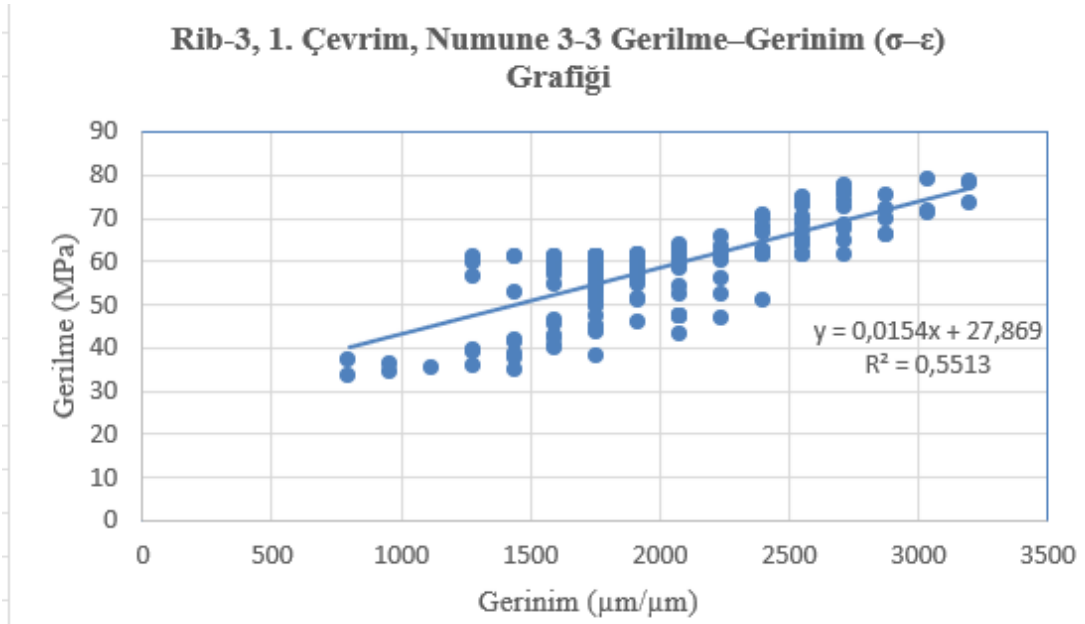


Şekil Ek. 9:Rib-3, 1. Çevrim, numune 3-1 gerilme-gerinim (σ – ϵ) grafiği.

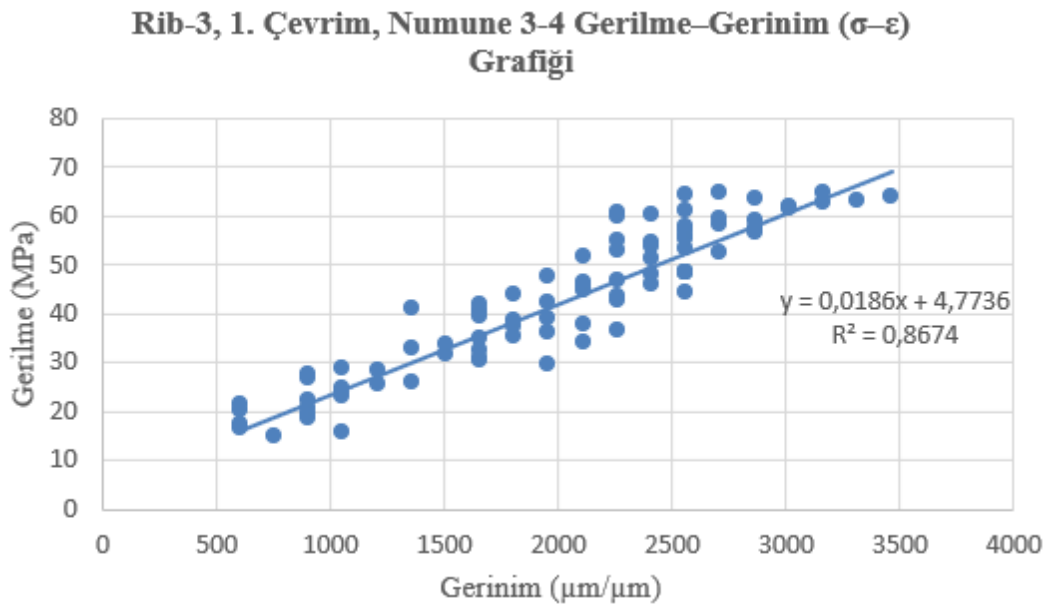
Rib-3, 1. Çevrim, Numune 3-2 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği



Şekil Ek. 10:Rib-3, 1. Çevrim, numune 3-2 gerilme-gerinim (σ – ϵ) grafiği.

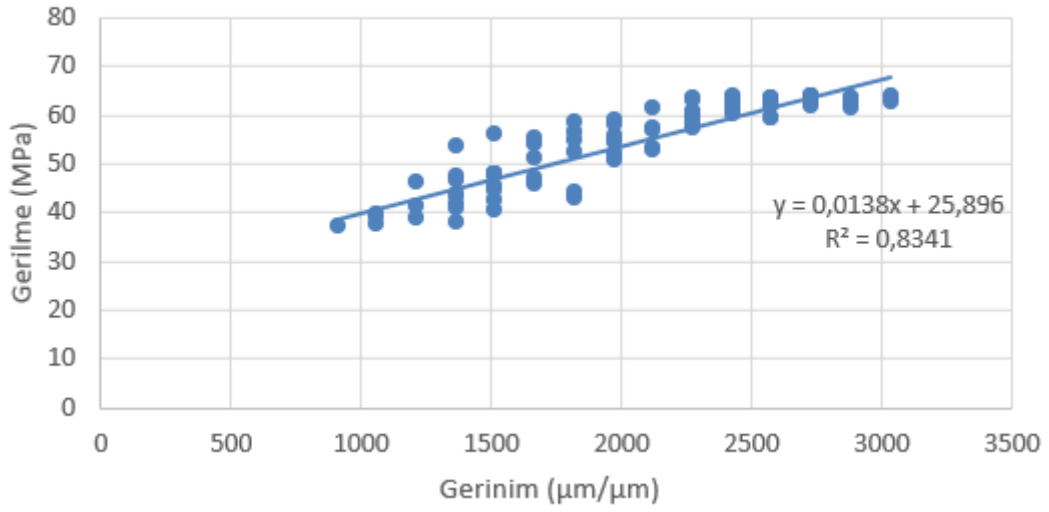


Şekil Ek. 11: Rib-3, 1. Çevrim, numune 3-3 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.



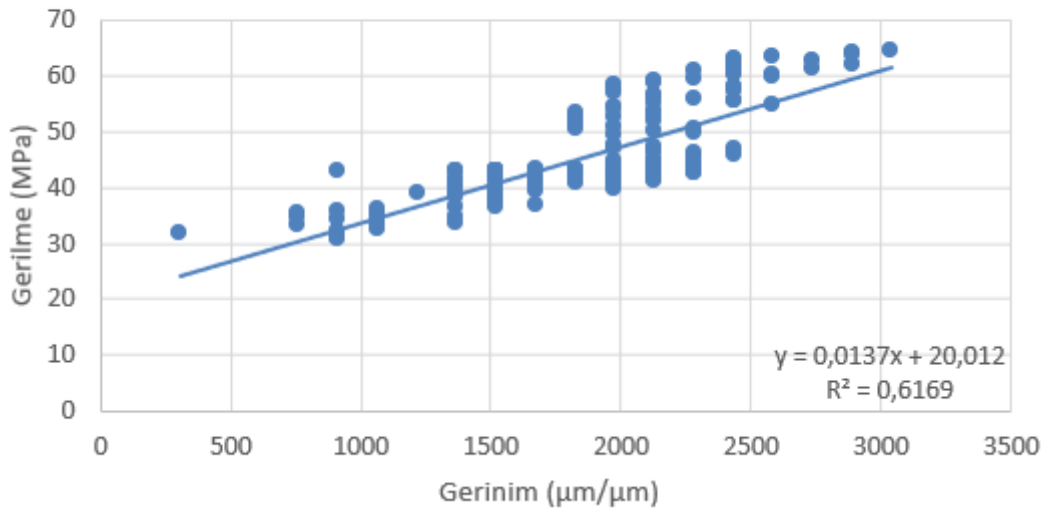
Şekil Ek. 12: Rib-3, 1. Çevrim, numune 3-3 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.

Rib-4, 2. Çevrim, Numune 4-1 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği



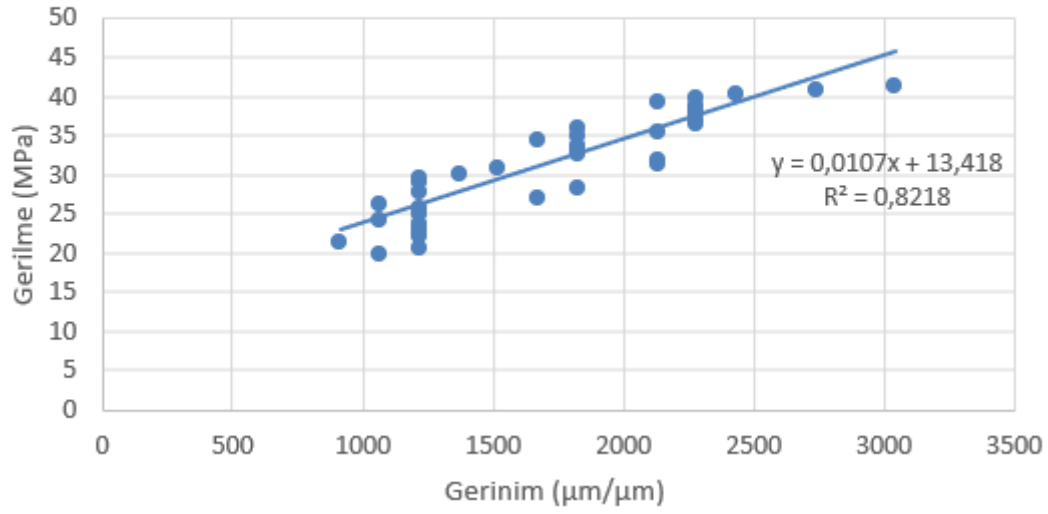
Şekil Ek. 13: Rib-4, 2. Çevrim, numune 4-1 gerilme-gerinim (σ – ϵ) grafiği.

Rib-4, 2. Çevrim, Numune 4-2 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği



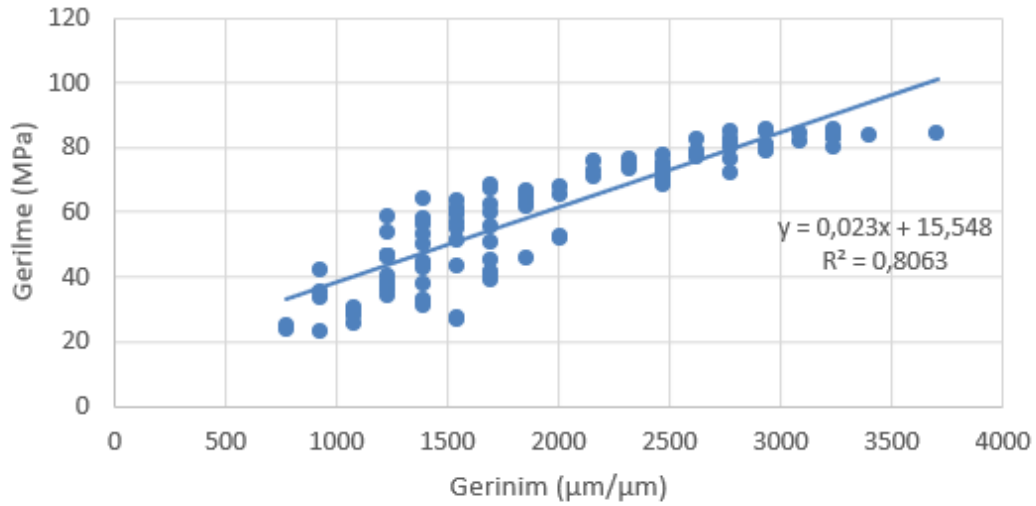
Şekil Ek. 14: Rib-4, 2. Çevrim, numune 4-2 gerilme-gerinim (σ – ϵ) grafiği.

Rib-4, 2. Çevrim, Numune 4-3 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği



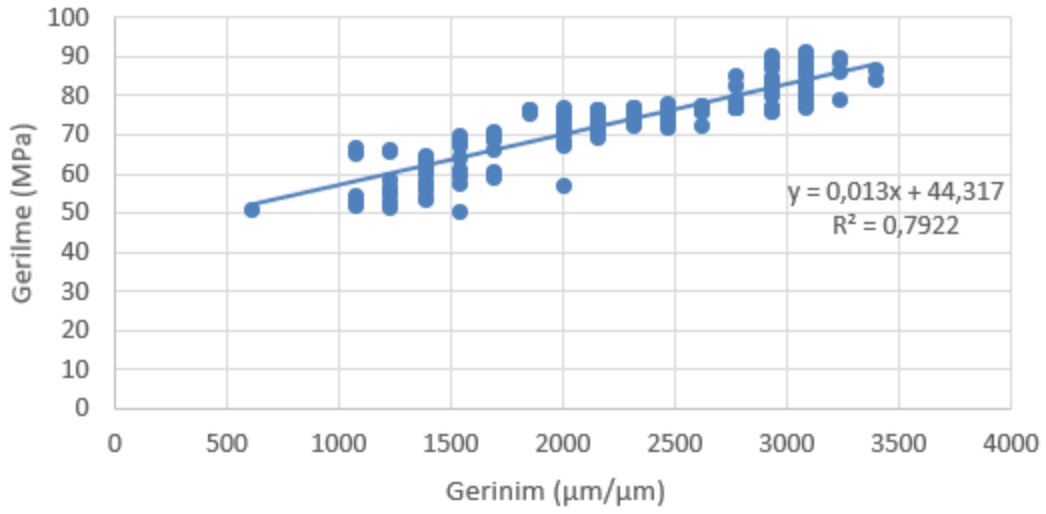
Şekil Ek. 15: Rib-4, 2. Çevrim, numune 4-3 gerilme-gerinim (σ – ϵ) grafiği.

Rib-4, 2. Çevrim, Numune 4-4 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği



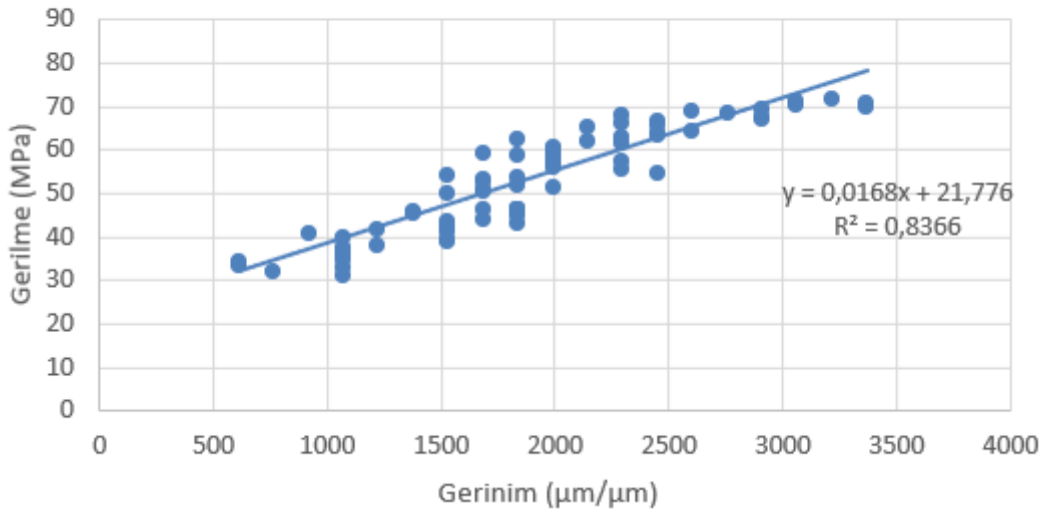
Şekil Ek.16: Rib-4, 2. Çevrim, numune 4-4 gerilme-gerinim (σ – ϵ) grafiği.

Rib-5, 2.Çevrim, Numune 5-1 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği



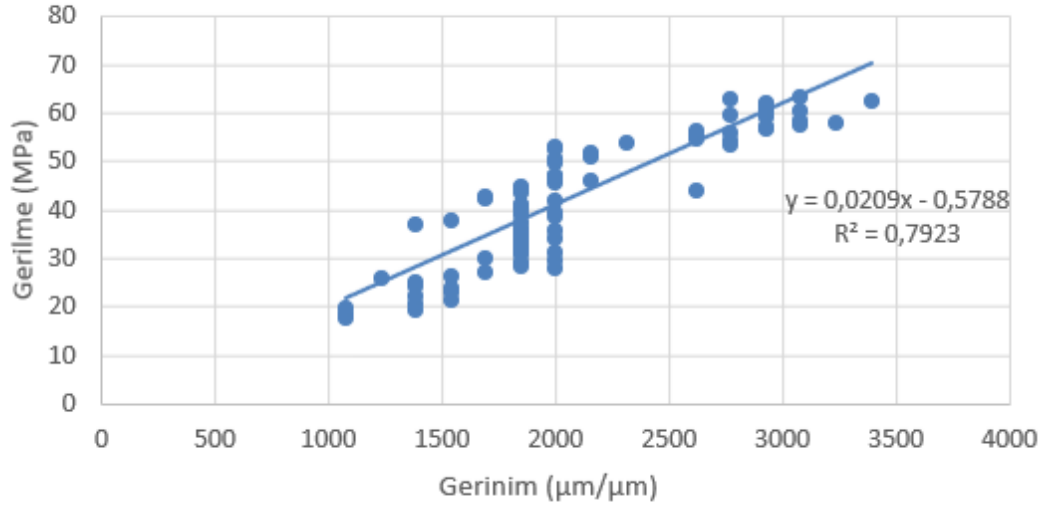
Şekil Ek. 16:Rib-5, 2. Çevrim, numune 5-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.

Rib-5, 2.Çevrim, Numune 5-2 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği



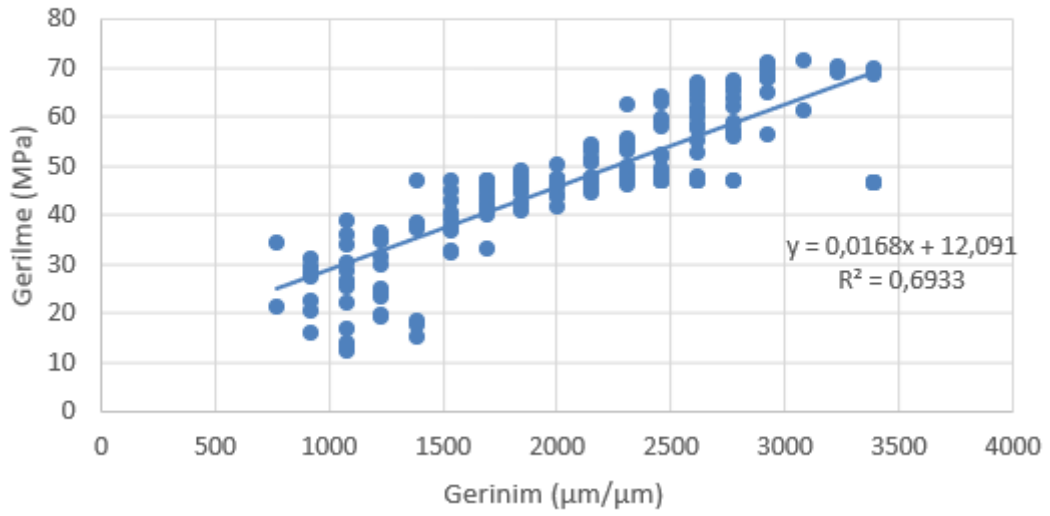
Şekil Ek. 17:Rib-5, 2. Çevrim, numune 5-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.

Rib-5, 2.Çevrim, Numune 5-3 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği

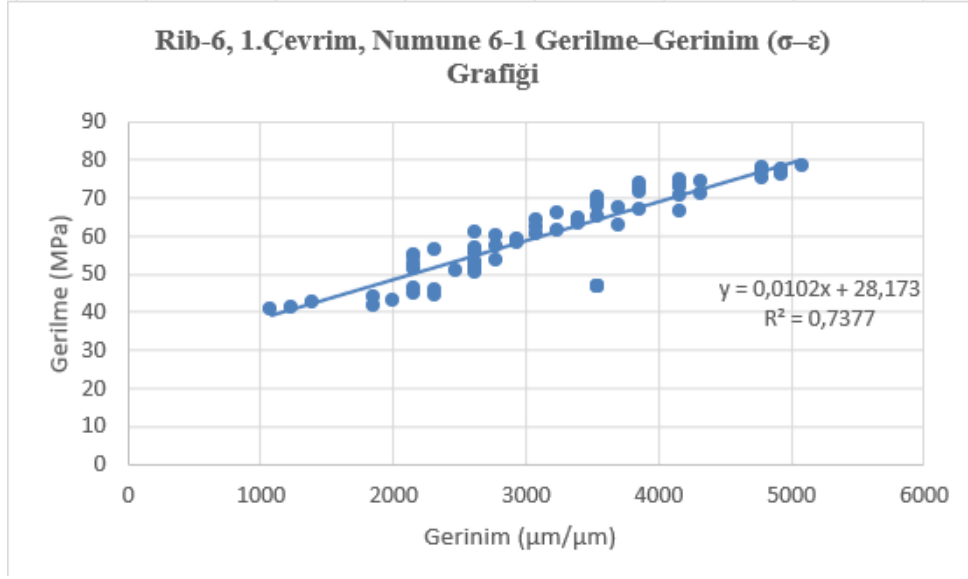


Şekil Ek. 18:Rib-5, 2. Çevrim, numune 5-3 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.

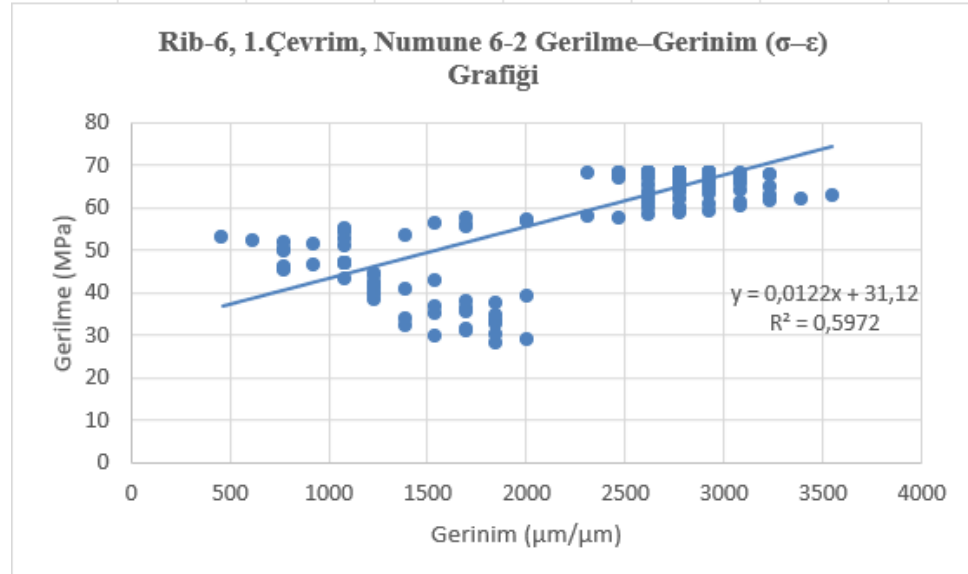
Rib-5, 2.Çevrim, Numune 5-4 Gerilme–Gerinim (σ – ϵ) Grafiği



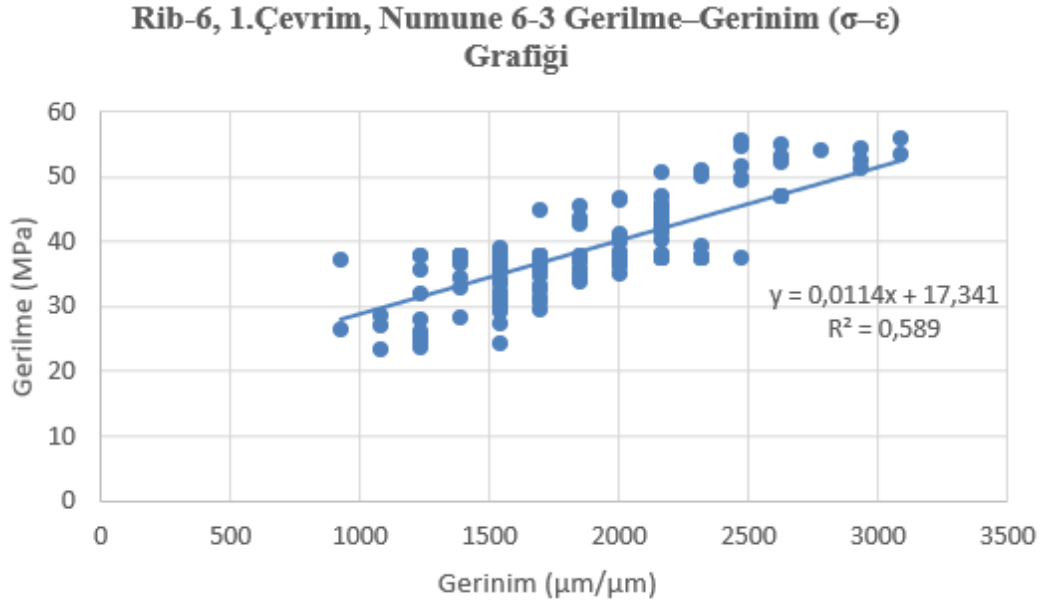
Şekil Ek. 19:Rib-5, 2. Çevrim, numune 5-4 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.



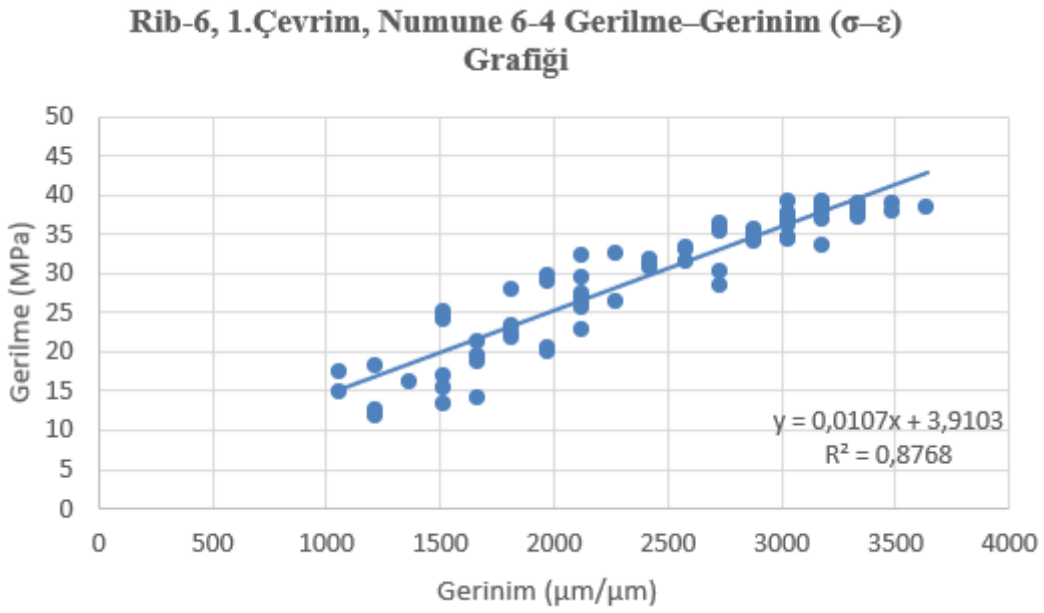
Şekil Ek. 20:Rib-6, 1. Çevrim, numune 6-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.



Şekil Ek. 21:Rib-6, 1. Çevrim, numune 6-2 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.

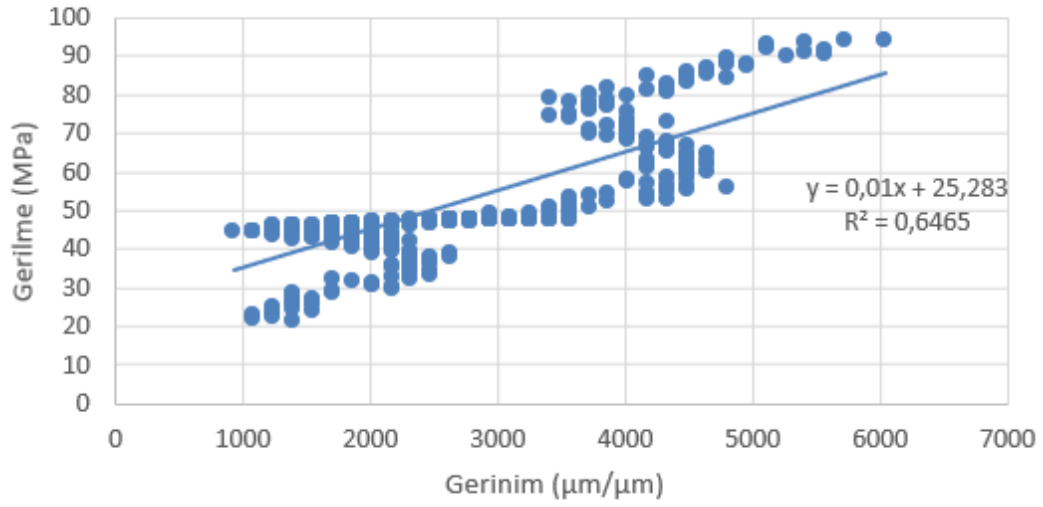


Şekil Ek. 22:Rib-6, 1. Çevrim, numune 6-3 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.



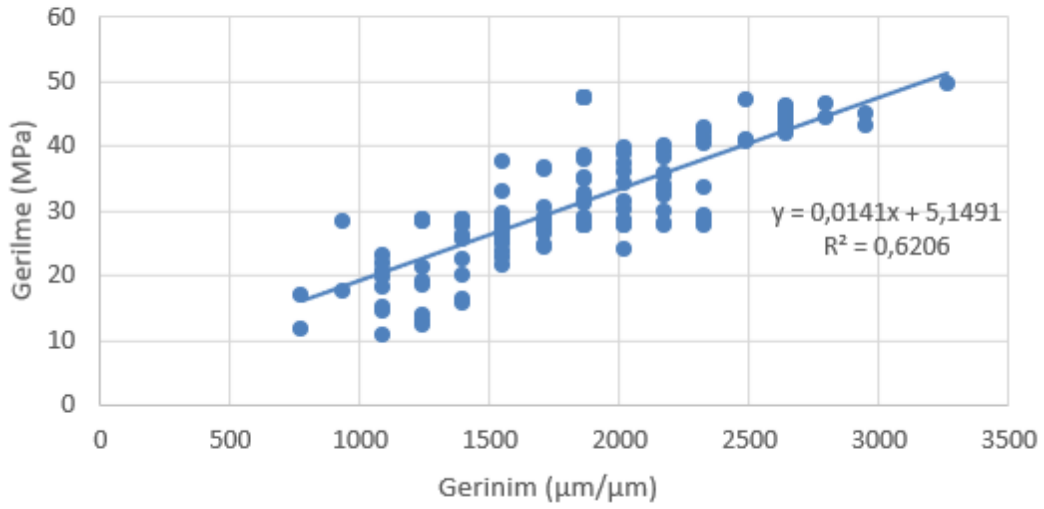
Şekil Ek. 23:Rib-6, 1. Çevrim, numune 6-4 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.

**Laminat Plaka, 0.Çevrim, Numune 7-1 Gerilme–Gerinim
(σ – ϵ) Grafiği**

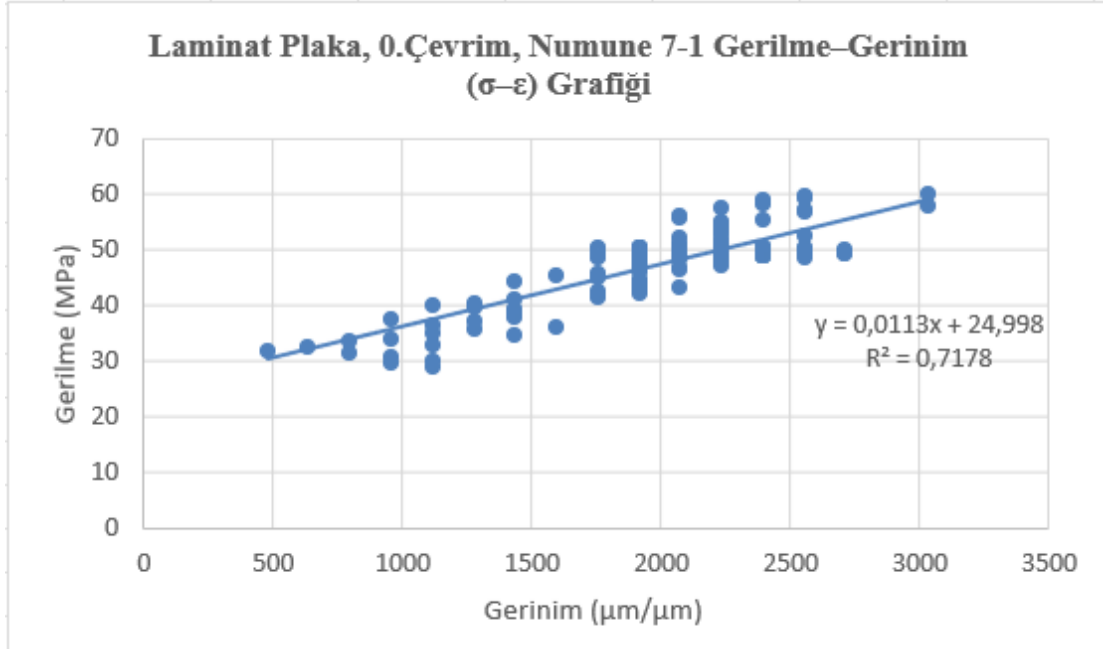


Şekil Ek. 24:Laminat plaka, 0.Çevrim, numune 7-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.

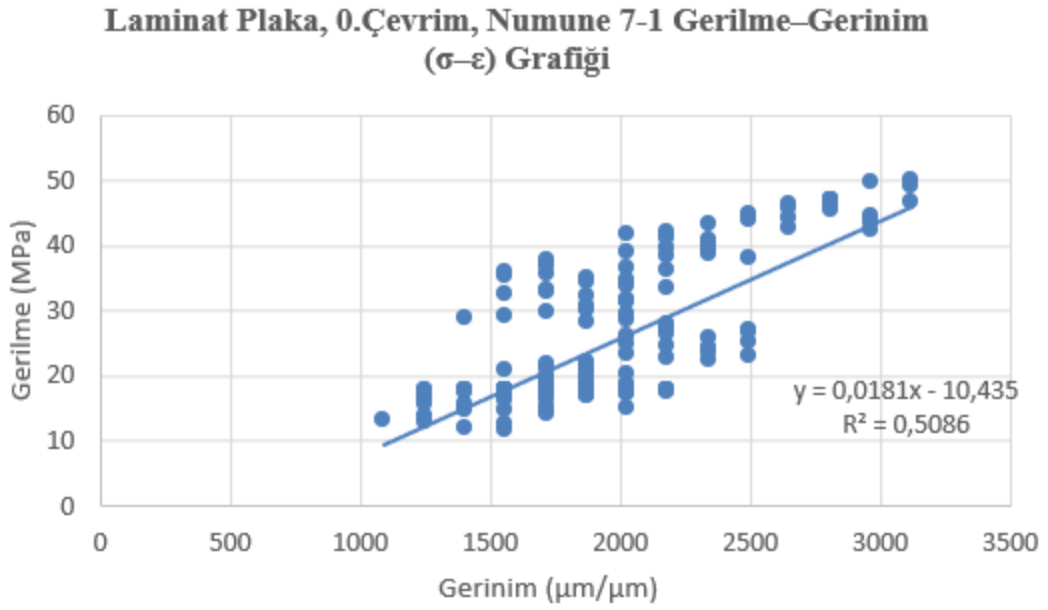
**Laminat Plaka, 0.Çevrim, Numune 7-1 Gerilme–Gerinim
(σ – ϵ) Grafiği**



Şekil Ek. 25:Laminat plaka, 0.Çevrim, numune 7-1 gerilme-gerinim (σ - ϵ) grafiği.



Şekil Ek. 26:Laminat plaka, 0.Çevrim, numune 7-1 gerilme-gerinim (σ-ε) grafiği.



Şekil Ek. 27:Laminat plaka, 0.Çevrim, numune 7-1 gerilme-gerinim (σ-ε) grafiği.

EK 2: Basma Testi İşlemi

Basma dayanımı hesabı basma kuvvetlerinin ortalaması alınarak kesit alanına bölünerek bulunmuştur. $A=20 \text{ cm}^2$, numunlerin ortalama basma kuvvet değerleri 4660,39N, 4003,28N, 4226,06N, 4295,16N ve 4295,16 N ölçülmüştür. Yüzey alanı 20 cm^2 lerin dayanım değerleri 233,52MPa, 200,16 MPa 211,80 MPa ve 214,26 MPa hesaplanmıştır. Örnek hesaplama aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_b = \frac{P_{\max}}{A} = \frac{4660.39 \text{ N}}{20 \text{ cm}^2} = 233.52 \text{ MPa}$$

EK 3: Uzmanların AHP ve TOPSIS matrisleri

Çizelge Ek. 1: Uzman-1 AHP tablosu

	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
Mekanik Performans	1	5	4	3
Maliyet	1/5	1	1/2	1/3
Çevresel Etki	1/4	2	1	2
Döngüsellik	1/3	3	1/2	1

Çizelge Ek. 2:Uzman-1 TOPSIS tablosu

Malzeme	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
TP	5,23	5,20	4,50	4,50
1.DTP	3,43	6,60	6,25	6,25
2.DTP	1,00	8,00	8,00	8,00
Termoset	8,00	1,00	1,00	1,00

Çizelge Ek. 3:Uzman-2 AHP tablosu

	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
Mekanik Performans	1	5	6	3
Maliyet	1/5	1	3	1/2
Çevresel Etki	1/6	1/3	1	1/5
Döngüsellik	1/3	2	5	1

Çizelge Ek. 4:Uzman-2 TOPSIS tablosu.

Malzeme	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
Termoplastik	8	5	3	6
1.DTP	7	6	4	6
2.DTP	7	5	3	6
Termoset	8	6	3	5

Çizelge Ek. 5:Uzman-3 AHP tablosu.

	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
Mekanik Performans	1	7	8	6
Maliyet	1/7	1	4	2
Çevresel Etki	1/8	1/4	1	2
Döngüsellik	1/6	1/4	1/2	1

Çizelge Ek. 6:Uzman-3 TOPSIS tablosu.

Malzeme	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
Termoplastik	9	5	8	8
1.DTP	8	4	8	8
2.DTP	7	3	8	8
Termoset	9	9	3	1

EK 4: AHP ve TOPSIS işlem basamakları

Bir uzmanın AHP matrisi üzerinden hesaplar gösterilmiştir.

Her hücre kendi sütun değerleri toplamına bölünürrek normalize matris bulunur.

Çizelge Ek. 7:AHP ve TOPSIS işlem basamakları.

	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
Mekanik Performans	1	5	6	3
Maliyet	1/5	1	3	1/2
Çevresel Etki	1/6	1/3	1	1/5
Döngüsellik	1/3	2	5	1
Toplam	1.700	8.33	15	4.7

Her hücre kendi sütun değerleri toplamına bölünerek normalize matris bulunur.

$$A_n = \begin{bmatrix} 0.588 & 0.600 & 0.400 & 0.638 \\ 0.118 & 0.120 & 0.200 & 0.106 \\ 0.098 & 0.040 & 0.067 & 0.043 \\ 0.196 & 0.240 & 0.333 & 0.213 \end{bmatrix}$$

Kriter	Ortalama	Ağırlık
Mekanik performans	$\frac{0.588 + 0.600 + 0.400 + 0.688}{4} = 0.557$	%55.7
Maliyet	$\frac{0.118 + 0.120 + 0.200 + 0.106}{4} = 0.136$	%13.6
Çevresel etki	$\frac{0.098 + 0.040 + 0.067 + 0.043}{4} = 0.062$	%6.2
Döngüsellik	$\frac{0.196 + 0.240 + 0.333 + 0.213}{4} = 0.246$	%24.6

Uzman-1'in AHP ağırlık matrisi

$$w = \begin{bmatrix} \text{Mekanik Performans} \\ \text{Maliyet} \\ \text{Çevresel Etki} \\ \text{Döngüsellik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,557 \\ 0,136 \\ 0,062 \\ 0,246 \end{bmatrix}$$

AHP hesaplamasındaki bölümde bundan sonra yapılan işlemler, AHP matrisinin tutarlı olup olmadığını kontrol etmek için yapılmıştır.

$$[A] \times [w] = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 6 & 3 \\ 1/5 & 1 & 3 & 1/2 \\ 1/6 & 1/3 & 1 & 1/5 \\ 1/3 & 2 & 5 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,557 \\ 0,136 \\ 0,062 \\ 0,246 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,29 \\ 0,56 \\ 0,25 \\ 1,00 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_i = \frac{([A]x[w])_i}{w_i} = \begin{bmatrix} 4,11 \\ 4,12 \\ 4,03 \\ 4,065 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_1 = \frac{2,29}{0.557} = 4,11$$

$$\lambda_2 = \frac{0,56}{0.136} = 4,12$$

$$\lambda_3 = \frac{0,25}{0.062} = 4,03$$

$$\lambda_4 = \frac{1,00}{0.246} = 4,065$$

$$\lambda_{max} = \frac{4,11 + 4,12 + 4,03 + 4,065}{4} = 4,081$$

$$CI, \text{ Tutarlılık indeks hesabı; } CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = 0,027$$

$$CR, \text{ Tutarlılık oranı; } CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.027}{0.90} = 0,03$$

CR değeri %10'dan küçük olduğu için karşılaştırmalı matrisin tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu bölümdeki işlemler üç uzman için de yapılmıştır. Aşağıda uzmanların kendi ağırlık matris değerleri verilmiştir. Bu ağırlıkların ortalaması da alınarak analizde ağırlık matrisi olarak kullanılmıştır.

Uzman-1 AHP ağırlık= [0,557,0.136,0.062,0,246]

Uzman-2 AHP ağırlık= [0,664,0,173,0.092,0,068]

Uzman-3 AHP ağırlık= [0,538,0,084,0.200,0,174]

Uzmanlar tarafından doldurulan AHP matrisleri sonucunda elde edilen kriter ağırlıkları (TOPSIS'te kullanılan ağırlıktır.)

$$w = \begin{bmatrix} \text{Mekanik Performans} \\ \text{Maliyet} \\ \text{Çevresel Etki} \\ \text{Döngüsellik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,587 \\ 0,132 \\ 0,118 \\ 0,163 \end{bmatrix}$$

Uzman-1 ait TOPSIS Matrisi üzerinden TOPSIS adımları gösterilmiştir.

Çizelge Ek. 8:Uzman TOPSIS ortalama değerleri.

Malzeme	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
Termoplastik	7,41	5,07	5,17	6,17
1.DTP	6,14	5,53	6,08	6,75
2.DTP	5	5,33	6,33	7,33
Termoset	8,33	5,33	2,33	2,33

Normalize etmek için her her kriter için vektör normu bulunur.

$$\text{Mekanik P:} \sqrt{(7,41^2) + (6,14^2) + (5,00^2) + (8,33^2)} = 13,674$$

$$\text{Maliyet:} \sqrt{(5,07^2) + (5,53^2) + (5,33^2) + (5,33^2)} = 10,635$$

$$\text{Çevresel etki:} \sqrt{(5,17^2) + (6,08^2) + (6,33^2) + (2,33^2)} = 10,449$$

$$\text{Döngüsellik:} \sqrt{(6,17^2) + (6,75^2) + (7,33^2) + (2,33^2)} = 11,949$$

Çizelge Ek. 9:Uzmanların TOPSIS normalize matris işlemi-1.

Malzeme	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
Termoplastik	7,41/13,674	5,07/10,635	5,17/10,449	6,17/11,949
1.DTP	6,14/13,674	5,53/10,635	6,08/10,449	6,75/11,949
2.DTP	5/13,674	5,33/10,635	6,33/10,449	7,33/11,949
Termoset	8,33/13,674	5,33/10,635	2,33/10,449	2,33/11,949

Çizelge Ek. 10:Uzmanların TOPSIS normalize matris işlemi-2.

Malzeme	Mekanik Performans	Maliyet	Çevresel Etki	Döngüsellik
Termoplastik	0,541	0,476	0,494	0,516
1.DTP	0,449	0,520	0,581	0,564
2.DTP	0,365	0,501	0,605	0,613
Termoset	0,609	0,501	0,222	0,195

$$w = \begin{bmatrix} \text{Mekanik Performans} \\ \text{Maliyet} \\ \text{Çevresel Etki} \\ \text{Döngüsellik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,587 \\ 0,132 \\ 0,118 \\ 0,163 \end{bmatrix}$$

AHP ağırlık matrisi ile normalize TOPSIS matris çarpılmış, bulunan değerlerden faydalanarak, pozitif ve negatif ideal çözüm hesabı yapılmıştır.

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij}$$

$$\begin{bmatrix} 0,541 & 0,476 & 0,494 & 0,516 \\ 0,449 & 0,520 & 0,581 & 0,564 \\ 0,365 & 0,501 & 0,605 & 0,613 \\ 0,609 & 0,501 & 0,222 & 0,195 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,587 \\ 0,132 \\ 0,118 \\ 0,163 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,318 & 0,062 & 0,058 & 0,084 \\ 0,263 & 0,068 & 0,068 & 0,092 \\ 0,214 & 0,066 & 0,071 & 0,100 \\ 0,357 & 0,066 & 0,026 & 0,031 \end{bmatrix}$$

Ağırlıklı normalize TOPSIS matris tablosundaki değerler yukarıda yapılan işlemde gelmiştir.

Termoplastik (0.çevrim) değerleri için yakınlık katsayısı hesabı:

$$\begin{aligned} D^+ \\ &= \sqrt{(0,318 - 0,357)^2 + (0,062 - 0,0686)^2 + (0,0584 - 0,0715)^2 + (0,0842 - 0,100)^2} \\ &= 0,0445 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D^- \\ &= \sqrt{(0,318 - 0,214)^2 + (0,062 - 0,062)^2 + (0,0584 - 0,0261)^2 + (0,0842 - 0,0318)^2} \\ &= 0,1203 \end{aligned}$$

Yakınlık katsayısı formülüyle TOPSIS değerleri bulunmuştur.

$$RC_i = \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)} = \frac{0,1203}{0,0445 + 0,1203} = 0,729$$

EK 4: Kristallik oranı hesabı işlem basamakları

1.Çevrim, Rib-4 için DTK grafiğindeki değerlerden hesaplanan kristallik oranı bulma adımları verilmiştir.

$$(9.2793*100)/34= 27.293 \text{ J/g}$$

$$(\Delta H_{f(100)} - \Delta H_{KK(100)}) = 27.293 \text{ J/g}$$

$$(\Delta H_{100})_{PEKK} = 130 \text{ J/g}$$

$$\alpha = \frac{27.293 \text{ J/g}}{130 \text{ J/g}} * 100 = 20,99$$

$\alpha = \%20,99$ kristallik oranıdır.