

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK YÖNLÜ KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİAMİD 6
KOMPOZİTLERİN SIKIŞTIRMA KALIPLAMASINDA
PROSES-PERFORMANS İLİŞKİLERİNİN İNCELENMESİ

Canbek GİRAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Danışman

Prof. Dr. Mihriğül EKŞİ ALTAN

Temmuz, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK YÖNLÜ KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİAMİD 6
KOMPOZİTLERİN SIKIŞTIRMA KALIPLAMASINDA
PROSES-PERFORMANS İLİŞKİLERİNİN İNCELENMESİ

Canbek GİRAY tarafından hazırlanan tez çalışması 13.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mihriğül EKŞİ ALTAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mihriğül EKŞİ ALTAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Tülin ŞAHİN, Üye
Kocaeli Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Mihriğöl EKŞİ ALTAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Tek Yönlü Karbon Fiber Takviyeli Poliamid 6 Kompozitlerin Sıkıştırma Kalıplamasında Proses-Performans İlişkilerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Canbek GİRAY

TEŞEKKÜR

Bana destek olan birçok kişiye içten şükranlarımı ve takdirlerimi sunmak isterim. Bu çalışmanın ortaya çıkmasında bana yol gösteren saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Mihriğül EKŞİ ALTAN'a teşekkürlerimi sunmak isterim.

Bu çalışmanın testleri KU Leuven Malzeme Mühendisliği Kompozit Laboratuvarı'nda gerçekleşmiştir. Rehberliği için Prof. Dr. Ir. Jan Ivens'e en içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Teknik bilgisi ve iş birliği bu araştırmanın gerçekleştirilmesinde önemli rol oynamış Sepehr Simaafrookhteh'e de şükranlarımı sunarım. Laboratuvar çalışanlarına da içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Yardımları ve destekleri sayesinde bu araştırmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasında katkı sağladılar.

Ayrıca, sonsuz sevgi ve destekleri için aileme ve eşime en derin şükranlarımı sunarım. Akademik çaba boyunca beni cesaretlendirdikleri için teşekkür ederim.

Canbek GİRAY

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	3
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Konsolidasyon.....	5
2.2 Test Yöntemleri.....	12
2.3 Sonuç.....	21
3 MALZEME VE DENEYSEL PROSEDÜR	23
3.1 Malzeme ve Laminat Üretimi	23
3.2 Malzeme Karakterizasyonu.....	25
3.3 Numune Hazırlanması.....	25
3.4 Mekanik Testler	41
4 TEST SONUÇLARI VE TARTIŞMA	47
4.1 Kama Soyulma Test Sonuçları.....	47
4.2 Çift Konsol Kiriş Test Sonuçları.....	57
4.3 Çekme Test Sonuçları	61
4.4 Üç Nokta Eğme Test Sonuçları.....	71
4.5 Tartışma	76
5 SONUÇ	82
KAYNAKÇA	84
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	90

SİMGE LİSTESİ

σ, σ_{∞}	Arayüz mukavemeti ve nihai arayüz mukavemeti
D_b	Bağlanma derecesi
da	Çatlak uzunluğu
B	Düzlem dışı kalınlık
dU	Enerji değişimi
μ_{mf}	Fiber-matris karışımının viskozitesi
D_h	İyileşme derecesi
t_w	Kaynak süresi
α_w	Kama açısı
B_w	Kama kalınlığı
r_w	Kama ucunun yarıçapı
L_w	Kama uzunluğu
H_w	Kama yüksekliği
G_c	Kırılma tokluğu
$G_{Ic}, G_{IIc}, G_{IIIc}$	Kırılma tokluğu mod I, mod II ve mod III
t_f	Nihai bağlanma süresi
b	Numune genişliği
t_r	Reptasyon/Tekrarlama süresi
P_{app}	Uygulanan sıkıştırma basıncı
D_{ic}	Yakın temas derecesi
d	Yakın temas modeli için asperite genişliği
a	Yakın temas modeli için asperite yüksekliği
w	Yakın temas modeli için vadi genişliği
t	Zaman

KISALTMA LİSTESİ

ÇT	Çekme Testi
ÇKK	Çift Konsol Kiriş
KF	Karbon Fiber
KFTP	Karbon Fiber Takviyeli Polimer
KST	Kama Soyulma Testi
PA	Poliamid
SKFTT	Sürekli Karbon Fiber Takviyeli Termoplastikler
ÜNE	Üç Nokta Eğme



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Konsolidasyon: Bantlar temas ettirildikten sonra i. yakın temas gelişir ve ii. polimer zincirlerinin interdifüzyonu [9]	4
Şekil 2.2 İyileşme/otohesion şeması [14]	6
Şekil 2.3 Yakın temas modeli [9], [16]	7
Şekil 2.4 Bir polimer zincirinin reptasyonu ($0 < t_1 < t_{\text{kaynak}} \leq t_{\text{reptasyon}}$) [9], [19]	8
Şekil 2.5 Kaynak gelişimine katkıda bulunan arayüz yakınındaki küçük zincir hareketi. Kaynak süresi t_w ve reptasyon süresi t_r için gösterilmiştir. [9], [20]	9
Şekil 2.6 Kırılma modları [33]	13
Şekil 2.7 Kama darbe testi ISO 11343:2019 [38]	14
Şekil 2.8 Kama soyma test düzeneği [18]	15
Şekil 2.9 ASTM D5528'de önerildiği gibi çift konsol kiriş numunesi [40]	16
Şekil 2.10 Tipik çatlak büyüme direnci eğrisi (R-eğrisi) b) Fiber köprüleme [40]	17
Şekil 2.11 ASTM D3039'da önerildiği gibi çekme testi numunesi [42]	18
Şekil 2.12 Çekme test düzeneği [43]	18
Şekil 2.13 0° ve 90° için test numunelerinin boyutları [44]	19
Şekil 2.14 Polimer matrisli kompozit numunede çekme testi sırasında hata modları	19
Şekil 2.15 ISO 14125:1998'de önerildiği gibi üç noktalı bükme testi [45]	20
Şekil 2.16 Üç nokta eğme test düzeneği [47]	20
Şekil 3.1 A) Fontijne pres model TP 400 B) Pinette pres model Zenith 2	24
Şekil 3.2 KF/PA6'nın DTK taraması [52]	25
Şekil 3.3 Kama soyulma laminatı temsili görüntüsü	26
Şekil 3.4 KST laminat hazırlığı a) pres öncesi, b) işlem sonrası	27
Şekil 3.5 a) Kesim öncesi laminat boyutu b) Laminat 15 mm'lik genişlikte 6 eş parçaya kesilir	27
Şekil 3.6 Çift konsol kiriş test laminatı temsili görüntüsü	28
Şekil 3.7 Wazer® - Su jeti kesim işlemi	28
Şekil 3.8 a) Kesim öncesi laminat boyutu : Uzunluk 250 mm, genişlik 104 mm ve çatlak başlangıç alan uzunluğu 60 mm'dir. b) Laminat 15 mm'lik 5 parçaya kesilir. c) Kesilen numunenin laminattan çıkartılması.	29
Şekil 3.9 Yüzey hazırlığı: a) zımparalama b) yüzey temizleme c) yapıştırma	29
Şekil 3.10 Çekme test laminatın temsili görüntüsü	30
Şekil 3.11 a) Kesim öncesi laminat boyutu: uzunluk 250 mm, genişlik 104. b) Laminat 15 mm'lik 6 parçaya kesilir.	31

Şekil 3.12 Çekme test numuneleri için hazırlık. a) Sekme için zımparalama bölgesi ve ardından yapıştırıcı için yüzey temizliği b) Permabond® 792 yapıştırıcı işlemi c) Hazırlanan numuneler	31
Şekil 3.13 Üç nokta eğme test laminatı temsili görüntüsü	32
Şekil 3.14 a) laminatın boyutu: uzunluk 180 mm, genişlik 104 mm b) sıfır derece numunelerin boyutu: uzunluk 60 mm, genişlik 15 mm	33
Şekil 3.15 a) Nem alma işlemi için numunelerin hazırlanması b) Thermo Scientific™ vacutherm vakumlu ısıtma ve kurutma fırını	33
Şekil 3.16 Fontijne presi tarafından kaydedilen numune için sıcaklık-zaman eğrisi (5s tutma süresi). Temp 1 presin üst plakasını, Temp 2 presin alt plakasının sıcaklığını temsil etmektedir.	39
Şekil 3.17 Pinette ve Fontijne pres için veri kaydedici sıcaklık grafiği	40
Şekil 3.18 Kama geometrisi [48]	41
Şekil 3.19 Kama soyulma test düzeneği	42
Şekil 3.20 Instron 4467	43
Şekil 3.21 ÇKK test numunesi	44
Şekil 3.22 ÇKK test düzeneği	44
Şekil 3.23 5 MP kamera	45
Şekil 3.24 Çekme test numunesi	45
Şekil 3.25 Çekme testi düzeneği	46
Şekil 3.26 Üç nokta eğme test düzeneği	46
Şekil 4.1 Fontijne pres ile üretilen F-240-A ve F-240-B numuneleri (240°C, 5s, yavaş soğutma) için değerlendirilmiş bölgeyi gösteren soyulma kuvveti – pozisyon grafiği.	48
Şekil 4.2 Fırın + Fontijne pres ile üretilen OF-240-A (240°C, 5s, yavaş soğutma) numunesi için değerlendirilmiş bölgeyi gösteren soyulma kuvveti – pozisyon grafiği.	49
Şekil 4.3 Pinette pres ile üretilen P-240-A (240°C, 5s, hızlı soğutma) numunesi için değerlendirilmiş bölgeyi gösteren soyulma kuvveti – pozisyon grafiği.	49
Şekil 4.4 Fırın + Pinette pres ile üretilen P-240-A (240°C, 5s, hızlı soğutma) numunesi için değerlendirilmiş bölgeyi gösteren soyulma kuvveti – pozisyon grafiği.	49
Şekil 4.5 a) Kama soyulma testi sırasında uç kısım b) Değerlendirilmiş uzunluk c) Kama soyulma testinden sonra numunelerin arayüzeyleri	50
Şekil 4.6 Kama soyulma test sonuçları	55
Şekil 4.7 Soyulma dayanımı için ana etki grafikleri	55
Şekil 4.8 KST parametrelerinin pareto grafiği	56
Şekil 4.9 a) Su jeti kesim işlemi sırasında hata ile karşılaşılan OF220 b) Test sırasında kırılan OP240 numunesi	58

Şekil 4.10 a) OP260 numunesi için Çatlak boyu - G_I grafiği (R-eğrisi) ve b) Yük-uygulama noktaları arası açıklık grafiği	59
Şekil 4.11 F220-5 numunesinde oluşan fiber köprüleme	59
Şekil 4.12 ÇKK testinden sonra F260-4 numunesinin arayüzü.....	60
Şekil 4.13 Her bir laminat için ortalama G_{Ic} başlangıç ve yayılma değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.	60
Şekil 4.14 a) G_{Ic} başlangıç ve b) G_{Ic} yayılımı için ana etki grafikleri	60
Şekil 4.15 P5B-5 numunesinin gerilme-gerinim grafiği	66
Şekil 4.16 Her bir laminat için ortalama E modülü değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.	66
Şekil 4.17 E modülü için ana etkiyen parametre grafikleri	67
Şekil 4.18 E modülü için standartlaştırılmış etkilerin Pareto grafiği	67
Şekil 4.19 Her bir laminat için ortalama maksimum gerilimi değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.....	68
Şekil 4.20 Hata gerilimi için ana etki grafikleri	68
Şekil 4.21 Hata gerilimi için standartlaştırılmış etkilerin Pareto grafiği.....	68
Şekil 4.22 Her bir laminat için ortalama hata gerinim değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.	69
Şekil 4.23 Hata gerinim için ana etki grafikleri.....	69
Şekil 4.24 Hata gerinimi için standartlaştırılmış etkilerin Pareto grafiği.....	70
Şekil 4.25 Hata modları	70
Şekil 4.26 Her bir laminat için ortalama eğilme elastisite modülü değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.	73
Şekil 4.27 Eğilme modülü için ana etki grafikleri. A- 0° (boyuna), B- 90° (enine) numune sonuçlarını göstermektedir.....	73
Şekil 4.28 Her bir laminat için ortalama eğilme gerilmesi değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.....	74
Şekil 4.29 Maksimum eğilme gerilmesi için ana etki grafikleri. A- 0° (boyuna), B- 90° (enine) numune sonuçlarını göstermektedir.....	74
Şekil 4.30 Her bir laminat için ortalama maksimum gerinim değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.....	75
Şekil 4.31 Maksimum gerinim için ana etki grafikleri. A- 0° (boyuna), B- 90° (enine) numune sonuçlarını göstermektedir.	75
Şekil 4.32 P260 numunesi için hata modu	76

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1	Fontijne ve Pinette pres soğutma hızı tablosu	24
Tablo 3.2	Fontijne pres kullanılarak kama soyulma ve çekme test laminat üretim parametreleri (ön ısıtmasız)	34
Tablo 3.3	Fontijne pres kullanılarak kama soyulma ve çekme test laminat üretim parametreleri (ön ısıtmalı).....	35
Tablo 3.4	Pinette pres kullanılarak kama soyulma ve çekme test laminat üretim parametreleri (ön ısıtmasız)	35
Tablo 3.5	Pinette pres kullanılarak kama soyulma ve çekme test laminat üretim parametreleri (ön ısıtmalı).....	36
Tablo 3.6	Fontijne pres kullanılarak çift konsol kiriş ve üç nokta eğme test laminat üretim parametreleri	37
Tablo 3.7	Pinette pres kullanılarak çift konsol kiriş ve üç nokta eğme test laminat üretim parametreleri	37
Tablo 4.1	Fırın + Fontijne pres kama soyulma testi sonuçları.....	51
Tablo 4.2	Fontijne pres kama soyulma testi sonuçları.....	52
Tablo 4.3	Fırın + Pinette pres kama soyulma testi sonuçları	53
Tablo 4.4	Pinette pres kama soyulma testi sonuçları	54
Tablo 4.5	ÇKK test sonuçları.....	57
Tablo 4.6	Fırın + Fontijne pres çekme test sonuçları.....	62
Tablo 4.7	Fontijne pres çekme test sonuçları.....	63
Tablo 4.8	Fırın + Pinette pres çekme test sonuçları	64
Tablo 4.9	Pinette pres çekme test sonuçları	65
Tablo 4.10	0° (boyuna) numuneler için üç nokta eğme sonuçları.....	71
Tablo 4.11	90° (enine) numuneler için üç nokta eğme sonuçları.....	72

Tek Yönlü Karbon Fiber Takviyeli Poliamid 6 Kompozitlerin Sıkıştırma Kalıplamasında Proses-Performans İlişkilerinin İncelenmesi

Canbek GİRAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Mihrigül EKŞİ ALTAN

Termoplastikler, termoset polimerlere göre çeşitli avantajlar sunarak daha kısa proses döngüleri ile yüksek hacimli üretimi desteklemesi, otomatik fiber yerleştirme gibi tekniklerle karmaşık geometrilerin üretilmesi, geri dönüştürülebilirlik ile çevre dostu ve sürdürülebilir bir üretim sürecinin sağlanabilmesi ve mekanik bağlayıcı kullanılmadan kaynaklanabilme gibi faktörleri içermektedir. Sürekli karbon fiber takviyeli termoplastikler (SKFTT), son yıllarda araştırmacılar arasında büyük ilgi görmektedir. Yüksek mukavemet-ağırlık oranı, yüksek kırılma tokluğu, uzun kap ömrü ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajlı özellikleri, spor, ulaşım, havacılık ve otomobil endüstrileri gibi çeşitli sektörlerde kullanımları için ideal hale getirmektedir. SKFTT'ler arasında, tek yönlü karbon fiber takviyeli termoplastik poliamid 6 (KF/PA6), nispeten düşük maliyeti, iyi işlenebilirliği, kimyasal direnci ve yüksek mekanik performansı nedeniyle son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek yönlü KF/PA6 prepreg bantların konsolidasyon süreci geliştirmesi amaçlanan bu çalışma, interlaminar bağ mukavemetinin gelişimini anlama ve analiz etme üzerine odaklanmaktadır. Bu tez çalışmasında soğutma hızı, kalıplama süresi, proses sıcaklığı ve ön ısıtma gibi dört üretim parametresinin KF/PA6 numunelerinin bağlanma mukavemeti üzerindeki etkisini incelenmiştir. Kama soyulma testi, çift konsol kiriş testi, çekme testi ve üç nokta eğme

testi gibi dört test yöntemi kullanılarak bağ mukavemeti özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre soğutma hızı etkisi, hızlı soğutma kullanıldığında soyulma dayanımı %20.3, tabakalar arası kırılma tokluğu %27.2, 0° yönlü eğilme özellikleri maksimum gerilim %16.5, 90° yönlü maksimum gerilim %13.4 ve gerinim %27.3 oranında artmıştır.

Proses sıcaklığının etkisi, 220°C'deki değerlerine göre 240°C ve 260°C'ye yükseldikçe, soyulma dayanımı sırasıyla %89.9 ve %98.8, eğilme modülü %39.9 ve %31.8 oranında artmıştır.

Ön ısıtma uygulanmamış numunelerde 0° yön için eğilme modülü %20.8, 90° yön için eğilme modülü %20.8 artış göstermiştir.

Elde edilen sonuçlar, soğutma hızı, kalıplama süresi, proses sıcaklığı, ön ısıtma gibi faktörlerin doğru şekilde belirlenmesinin, karbon fiber termoplastik kompozitlerin mekanik özelliklerinin optimize edilmesinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Karbon fiber takviyeli poliamid 6, tek yönlü prepreg bant, konsolidasyon, sıkıştırma kalıplama.

Investigation of Process-Performance Relationships In Compression Molding of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Polyamide 6 Composites

Canbek GİRAY

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Mihrigül EKŞİ ALTAN

Thermoplastics provide various advantages over thermoset polymers, including the ability to support high-volume production with shorter process cycles, the ability to produce complex geometries with techniques such as automatic fibre placement, recyclability, an environmentally friendly and sustainable production process, and the ability to be welded without the use of mechanical fasteners. Continuous carbon fibre reinforced thermoplastics (CFRTP) have attracted great interest among researchers in recent years. Their advantageous properties such as high strength-to-weight ratio, high fracture toughness, long shelf life and recyclability make them ideal for use in various sectors such as sports, transport, aerospace and automobile industries. Among CFRTPs, unidirectional (UD) carbon fibre reinforced thermoplastic polyamide 6 (CF/PA6) has been widely used recently due to its relatively low cost, good processability, chemical resistance and high mechanical performance. Aiming to improve the consolidation process of unidirectional CF/PA6 prepreg tapes, this study focuses on understanding and analysing the development of interlaminar bond strength. In this thesis, the influence of four manufacturing parameters such as cooling rate, moulding time, process temperature and preheating on the bond strength of CF/PA6 specimens was investigated. Bond strength properties were evaluated using four test methods such as wedge peel test, double cantilever beam test, tensile test, three-point bending test. According to the results obtained from the study, the effect of cooling rate, peel strength increased by 20.3%, interlayer fracture toughness by 27.2%, 0° direction bending properties maximum stress

16.5%, 90° direction maximum stress 13.4% and strain 27.3% when fast cooling was used.

The effect of process temperature, peel strength increased by 89.9% and 98.8% respectively, interlayer fracture toughness by 89.9% and 98.8% respectively, flexural modulus by 39.9% and 31.8% respectively as the temperature increased to 240°C and 260°C compared to their values at 220°C.

In without preheating specimens flexural modulus for 0° direction by 20.8% and stress by 14.5%, flexural modulus for 90° direction by 20.8%.

The results obtained show that the correct determination of factors such as cooling rate, molding time, process temperature, preheating plays an important role in optimising the mechanical properties of carbon fiber thermoplastic composites.

Keywords: Carbon fiber reinforced polyamide 6, UD prepreg tape, consolidation, compression molding.

Kompozitler, benzersiz özellikleri ve çeşitli uygulamalarıyla çok sayıda endüstride devrim yaratan, dönüştürücü bir malzeme sınıfı olarak ortaya çıkmıştır. Bu malzemeler, gelişmiş performans özelliklerine sahip yeni bir malzeme oluşturmak için iki veya daha fazla farklı bileşenin birleştirilmesiyle oluşturulur. Kompozitler çok çeşitli olanaklar sunar ve havacılık, otomotiv, inşaat ve spor ekipmanları gibi sektörlerde geniş kullanım alanı bulmuştur [1]. Havacılık ve uzay endüstrisi, kompozit malzemelerin ilerlemesinin başlıca itici güçlerinden biri olmuştur. Uçak yapımında hafif ancak dayanıklı malzemelere olan talep, özellikle uçak bileşenlerinin ve yapılarının üretiminde kompozitlerin yaygın olarak kullanılmasına yol açmıştır. Kompozitlerin yüksek mukavemet/ağırlık oranı yakıt verimliliğine katkıda bulunmakta ve yük taşıma kapasitesinin artmasını sağlamaktadır. Uçak kanatları, gövdeleri ve motor parçaları, gelişmiş kompozitlerin kullanımı yoluyla ağırlık azaltımından faydalanabilecek kritik bileşenlerden bazılarıdır. Uçak endüstrisinin daha fazla verimlilik ve emisyon azaltımı için elyaf takviyeli plastiklere verdiği önem A350 XWB ve B787 gibi programlarda açıkça görülmektedir. Bu uçak modeli yapıları, toplam ağırlığın yaklaşık %50'sini oluşturan önemli oranda kompozit bileşen içermektedir [2]. Bununla birlikte, otoklav kütleme ve manuel montaj ile ilişkili yüksek üretim maliyetleri, geleneksel alüminyum tasarımlara kıyasla rekabet edebilirliklerini engellemektedir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, otoklav dışı süreçlerin ve termoplastik bileşenlerin kullanımını genişletmeye yönelik artan bir ilgi vardır [3].

Kompozitler, havacılığın ötesinde, ağırlık azaltmanın yakıt verimliliğini artırmada ve emisyonları azaltmada önemli bir faktör olduğu otomotiv endüstrisinde de uygulama alanı bulmuştur. Kompozit malzemeler, yapısal bütünlüğü ve güvenliği korurken ağırlık tasarrufu sağlamak için gövde panelleri, şasi parçaları ve iç elemanlar dahil olmak üzere çeşitli otomotiv bileşenlerinde kullanılmaktadır. Ulaşım sektörü, insan faaliyetlerinin neden olduğu sera gazı (GHG) emisyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve ulaşım, toplam GHG emisyonlarının %29'unu oluşturarak en büyük paydan sorumludur [4]. Araç ağırlığının azaltılması, yakıt tüketimini ve CO₂ emisyonlarını doğrudan etkilediği için umut verici bir çözüm gibi görünmektedir. Araç ağırlığının %10 oranında azaltılması

yakıt ekonomisini %7 oranında iyileştirmektedir [5]. Hyundai, otomobilleri için mekanik bağlantı elemanlarına ihtiyaç duymadan tüm KFTP bileşenlerini birleştirmek için yapısal yapışkan yapıştırma kullanan bir KFTP şasisi olan Intrado'yu geliştirmiştir. Bu KFTP şasi, geleneksel çelik yapılara eşdeğer güç ve sertlik gösterirken ağırlıkta %60'ın üzerinde kayda değer bir azalma sağlamıştır [6].

Çeşitli kompozit türleri arasında termoplastik kompozitler son yıllarda giderek artan bir önem kazanmıştır. Geri dönüşü olmayan kürlenme süreçlerinden geçen termoset kompozitlerin aksine, termoplastik kompozitler malzeme özelliklerini koruyarak tekrar tekrar eritilebilir ve katılaştırılabilir. Bu istisnai özellik onlara geri dönüştürülebilirlik, tamir edilebilirlik ve karmaşık şekillendirme ve birleştirme teknikleri için potansiyel gibi avantajlar sağlamaktadır.

Termoplastik matris kompozitler, işleme verimliliğini önemli ölçüde artıran uzun kürleme döngülerine olan ihtiyacı ortadan kaldırma avantajı nedeniyle son yıllarda giderek daha popüler hale gelmiştir. Ek olarak, termoplastik matrisin erime kabiliyeti, termoform, otomatik bant yerleştirme, 3D baskı, ekstrüzyon ve ultrasonik veya indüksiyon kaynağı gibi kaynak yöntemleri gibi çeşitli şekillendirme ve montaj teknikleri için yeni olanaklar yaratmıştır [7].

Otomasyon, üretim süreçlerini kolaylaştırırken, termoplastiklerin füzyonla bağlanması verimli birleştirme ve şekillendirme sağlar. Bu gelişmeler daha fazla üretkenlik, daha az atık ve gelişmiş mekanik özellikler sunarak yüksek performanslı kompozit yapılar üretmek isteyen çeşitli endüstriler için onları değerli kılmaktadır [8].

Sonuç olarak, termoplastik kompozitlerin malzeme teknolojilerini ilerletme ve modern endüstrilerin taleplerini karşılamadaki önemi önemli ölçüde artmıştır. Yüksek kaliteli termoplastik kompozitlerin elde edilmesi önemli zorluklar doğurmaktadır. Termoplastik kompozit üretme süreci, işleme koşulları, malzeme seçimi ve istenen yapısal performans dahil olmak üzere çeşitli faktörler arasında hassas bir denge gerektirir. Eldeki sorun, istenen özelliklere ve optimum performansa sahip termoplastik kompozitlerin nasıl etkili bir şekilde üretileceğinin anlaşılması etrafında dönmektedir. Bununla birlikte, yüksek kaliteli bir son ürün sağlamak için, tüm bu işlemler ısıtma ve konsolidasyon aşaması gerektirir.

Bu araştırma tek yönlü karbon elyaf takviyeli poliamid 6 (KF/PA 6) üzerine odaklanmakta ve termoplastik kompozitlerde proses-performans ilişkisine dair kapsamlı

bir anlayış oluşturmaya amaçlamaktadır. Çeşitli üretim parametrelerini araştırarak, ortaya çıkan yapıyı analiz ederek ve mekanik özellikleri karakterize ederek, bu çalışma üretim süreçlerini iyileştirmek ve termoplastik kompozitlerin genel performansını artırmak için değerli bilgiler sağlamayı amaçlamaktadır. Nihai hedef, çeşitli endüstrilerde hafif, dayanıklı ve sürdürülebilir malzeme çözümlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmak ve böylece termoplastik kompozitler alanını ilerletmektir.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tezin temel amacı, karbon elyaf takviyeli termoplastik (KF/PA6) bantların konsolidasyon sürecini, tabakalar arası bağ mukavemetinin gelişimini anlayarak ve analiz ederek geliştirmektir.

Çalışma, sıcaklık (220-240-260 °C), kalıplama süresi (5-15-30 s), soğutma hızı (normal ve hızlı) ve ön ısıtma (var ve yok) gibi temel işlem parametrelerini kullanarak laminatların üretimine odaklanmaktadır. Bu parametrelerin laminat kalitesi ve performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiş ve üretilen laminatların özelliklerini değerlendirmek için mekanik testler kama soyma, çekme, üç nokta eğme ve çift konsol kiriş metodu uygulanmıştır.

- KF/PA6 kompozit numuneler E modülü, hata gerilim ve gerinimi (çekme testi), eğilme elastisite modülü, maksimum eğilme gerilmesi ve gerinimi (üç nokta eğilme testi), laminarlar arası bağ mukavemeti (kama soyulma testi) ve tabakalar arası kırılma tokluğu (çift konsol kiriş) gibi test yöntemleri ile kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

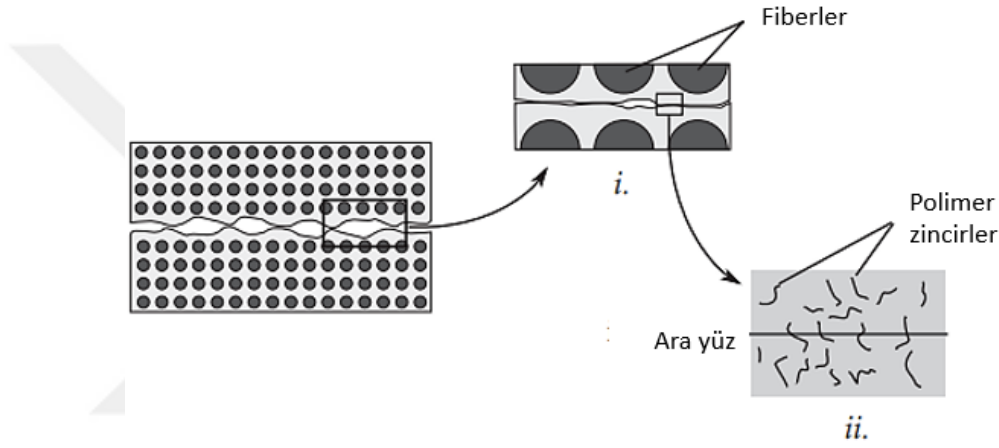
- Tez, işleme koşulları ve KF/PA6 laminatların özellikleri arasında korelasyonlar kurmayı hedeflemektedir. Deneysel verileri analiz ederek bu faktörler arasındaki ilişkileri ve bağımlılıkları tanımlamayı amaçlamaktadır.

Genel amaç, konsolidasyon sürecine ilişkin değerli bilgiler sağlayarak, termoplastik kompozitin tabakalar arası bağ mukavemetinin ve performansının artmasına yol açmaktır.

2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölüm termoplastik matrisli kompozitlerde konsolidasyon sürecine kapsamlı bir genel bakış sunmaktadır. Bu süreç iki ana olguyu içerir: kompozit alt tabakalar arasında yakın temasın gelişmesi ve polimer zincirlerinin arayüzey boyunca interdifüzyonu.

Şekil 2.1'de gösterildiği gibi konsolidasyon, interlaminar bağ mukavemetinin gelişimine katkıda bulunan iki temel olaydan etkilenir.



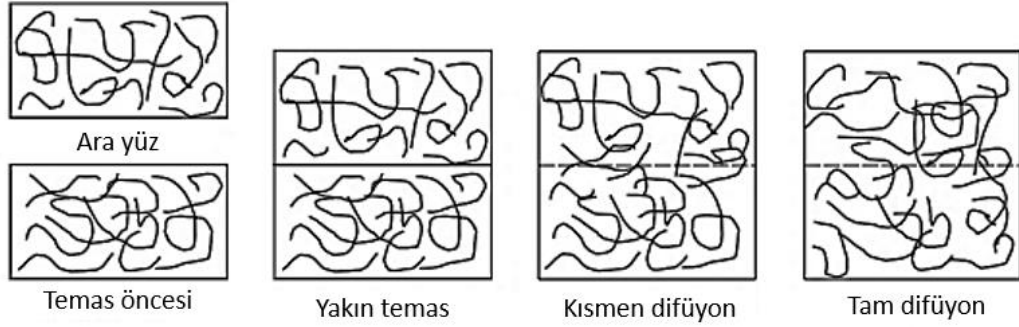
Şekil 2.1 Konsolidasyon: i. yakın temas gelişir ve ii. polimer zincirlerinin interdifüzyonu [9]

Otomotiv ve havacılık endüstrileri, yapıştırıcıların ve bunlarla ilişkili yapışma mekanizmalarının araştırılması konusunda uzun bir geçmişe sahiptir. Son 50 yılda, bu sektörlerde polimerler ve epoksi reçinelerdeki yapışmayı incelemeye yönelik artan bir ilgi olmuştur. Bu artan odaklanma, polimerlerin ve epoksi reçinelerin uygun kütle ve yüzey özelliklerine, düşük maliyetine ve arzu edilen mekanik özelliklerine bağlanabilir. Ayrıca termoplastiklerin yapışması üzerine yıllardır kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır. Yapışma, termoplastik malzemelerin bağlanma davranışını ve performansını anlamada kritik bir rol oynamaktadır. Yüzey hazırlığı, arayüzey etkileşimleri, işleme koşulları ve malzeme özellikleri de dahil olmak üzere çok sayıda faktör, termoplastik sistemlerde güçlü yapışma elde etmenin altında yatan mekanizmaları ve olayları ortaya çıkarmak için kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [10].

2.1 Konsolidasyon

Bağlanmayı kolaylaştırmak için, kompozit yüzeyler polimer matrisinin işleme sıcaklığının üzerinde belirli bir süre boyunca sıkıştırmaya tabi tutulur. Bu basınç ve sıcaklık uygulaması, arayüzde güç birikimine katkıda bulunan çeşitli olayları tetikler [7]. Bağlanma süreçleri alanında, Wool ve O'Connor beş farklı adım oluşan kapsamlı bir model önermiştir [11]: yüzey yeniden düzenlemesi, yüzey yaklaşımı, ıslatma, difüzyon ve rastgeleleştirme. İlk iki adım, ilk arayüz devam ettiği için mekanik güçten yoksundur. Mikroskobik düzeyde temas kurmak için, temas basıncı ve ıslanma ile kolaylaştırılan yüzey pürüzlülüğünün deformasyonu çok önemli hale gelir. Yakın temas olarak bilinen bu olgu, çeşitli imalat süreçlerinde çeşitli araştırmacılar tarafından kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve modellenmiştir. Moleküllerin difüzyonu başlayana kadar ilk üç adım yakın temas gelişimi olarak bilinir [3]. Yakın temas sağlandıktan sonra, ara yüzey kademeli olarak iyileşme sürecine girer (adım 4 - 5) ve bu da ilk ara yüzeyin kademeli olarak kaybolmasına yol açar. Sonuç olarak, arayüzdeki mekanik mukavemet gelişir ve sonunda yığın malzemeninkine yaklaşır. İki yüzey arasındaki ilk temas, yüzey pürüzlülüğü nedeniyle engellenir ve anında mükemmel bağlanmayı önler. Bunu ele almak için, yüzeylerin başlangıçtaki pürüzlülüğünü ve alt tabakalar arasındaki fiziksel temasın aşamalı gelişimini dikkate alan yakın temas kavramı ortaya atılmıştır. Yakın temas, yüzeylerin mikroskobik düzeyde deformasyonunu ve adaptasyonunu hesaba katarak daha yakın bir yakınlık ve gelişmiş arayüzey bağı sağlar. Bu kavram, temas oluşumunun dinamik doğasını kabul eder ve güçlü ve güvenilir yapışma elde etmenin arkasındaki mekanizmalar hakkında bilgi sağlar [11].

Konsolidasyon döngüsü sırasında iki farklı, ancak aynı anda meydana gelen olay gerçekleşir: i. Yakın temasın gelişmesi ve ii. iyileşme/otohesion olarak da bilinen moleküller arası difüzyon. Süreç Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Moleküller arası difüzyondan önce, yakın temas geliştirilmelidir. Yakın teması geliştirmek için, bantların yüzeyindeki asperiteler yumuşatılmalı ve yayılmalıdır. Asperiteler ısı ve basınç uygulaması altında deforme olur. Yakın temas süreci, basınç, sıcaklık, zaman ve termoplastik yüzey asperitelerinin geometrisi gibi üretim süreci parametrelerinin bir fonksiyonudur [3], [12], [13].



Şekil 2.2 İyileşme/otohesion şeması [14]

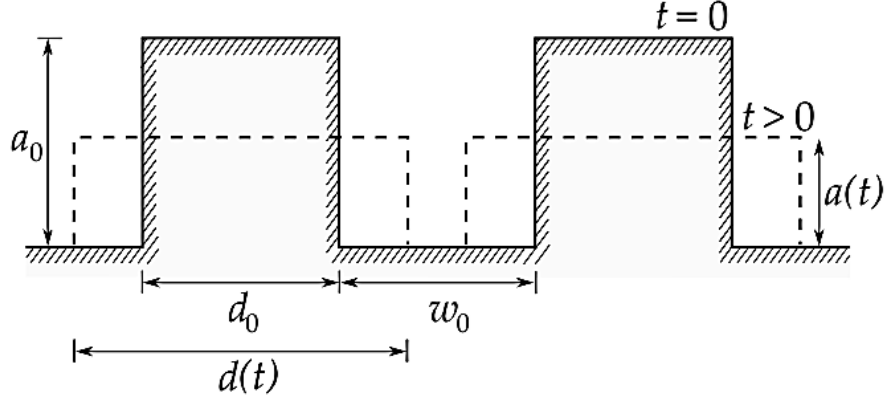
2.1.1 Yakın Temas

Yakın temas iki fikre dayalı olarak açıklanabilir: bant yüzeyinin pürüzlülüğünün tanımı ve matris akışı nedeniyle yüzey asperitelerinin düzleştirilmesi. Bu fikirlere dayanarak, yakın temasın gelişimini tanımlamak için farklı modeller geliştirilmiştir.

Yakın temas kavramı ilk olarak, bu kavramı kullanarak yüzeye yaklaşma ve ıslanma aşamalarını tanımlayan Dara ve Loos [15] tarafından ortaya atılmıştır. Lee ve Springer [16] daha sonra yüzey pürüzlülüğünü simüle etmek için bir dizi özdeş dikdörtgen kullanarak bu yaklaşımı basitleştirirken, Yang ve Pitchumani [17] yakın temas anlayışını daha da geliştirmek için fraktal bir model geliştirmiştir.

Yakın temas derecesi, Dic , genellikle çeşitli modeller tarafından temas halindeki toplam yüzey alanının fraksiyonu olarak tanımlanır. İki yüzey arasındaki sadece temas, bantlar üzerindeki yüzey asperitelerinin varlığı nedeniyle tam bir yakın temas kurmak için yetersizdir. Bununla birlikte, basınç uygulanması bu asperiteleri deforme ederek yakın temas derecesinin artmasına yol açabilir. Yakın temasın sağlanması için gereken süre yüzey pürüzlülüğü, uygulanan basınç ve termoplastik polimerin reolojik özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Ayrıca, polimerin viskozitesi sıcaklığa bağlı olduğundan, arayüz sıcaklığının artırılması yakın temasın gelişimini teşvik eder [18].

Lee ve Springer, yüzey pürüzlülüğünün basitleştirilmiş bir temsilini sunarak Dara ve Loos tarafından önerilen modeli daha da geliştirmiştir. Yüzey pürüzlülüğünü, Şekil 2-3'te gösterilen boyutlara sahip bir dizi özdeş dikdörtgen olarak tasvir etmişlerdir. Basınç uygulandığında, bu dikdörtgenler deformasyona uğrar ve şekildeki kesikli çizgi ile gösterildiği gibi düzleşir. Dikdörtgenlerin bu deformasyonu, yüzeyler arasında yakın temas sağlama sürecini yansıtmaktadır.



Şekil 2.3 Yakın temas modeli [9], [16]

t zamanındaki yakın temas derecesi şu şekilde tanımlanır [16]:

$$D_{ic}(t) = \frac{d(t)}{d_0 + w_0} \quad (2.1)$$

Buradan, yakın temas derecesi $D_{ic} = 1$ olduğunda, yapışanlar arasında tam yakın temasın sağlandığı sonucu çıkmaktadır. Bu durumda, mevcut temas alanının tamamı doğrudan temas halindedir ve bu da yüksek düzeyde yüzey etkileşimi ve bağlanma olduğunu gösterir.

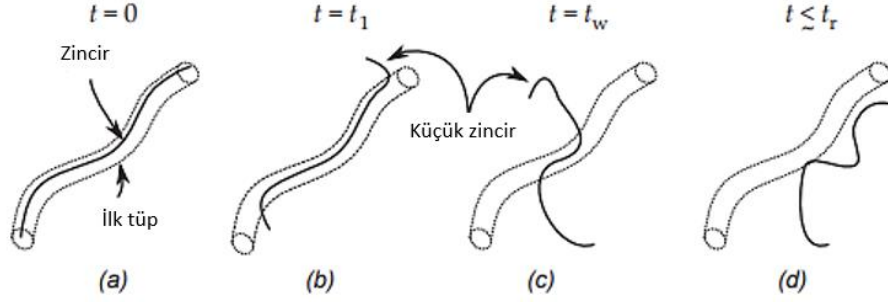
Bir dikdörtgenin kütle sinin korunumu kanunu göz önüne alındığında ve laminar akış varsayıldığında, izotermal D_{ic} için ifade aşağıdaki gibi türetilebilir [16]:

$$D_{ic} = \frac{1}{1 + \frac{w_0}{d_0}} \left[1 + \frac{5P_{app}}{\mu_{mf}} \left(1 + \frac{w_0}{d_0} \right) \left(\frac{a_0}{d_0} \right)^2 t \right]^{1/5} \quad (2.2)$$

Burada w_0 , a_0 ve d_0 , Şekil 2.3'te gösterildiği gibi $t=0$ için referans geometrik parametrelerdir. Uygulanan basınç P_{app} ile gösterilir ve fiber matrisin viskozitesi μ_{mf} ile gösterilir.

2.1.2 İnterdiffüzyon Süreci

Bir önceki bölümde, iki bant arasındaki yakın temasın ilerleyişi açıklanmıştı. İyileşme sürecinin gerçekleşebilmesi için önce yakın temasın sağlanması gerektiği belirtilmişti. Yakın temas sağlandıktan sonra, iyileşme oranı sıcaklıktan etkilene rek polimer zincirlerinin interdifüzyonu yoluyla gerçekleşir. Amaç, zincirler boyunca yayıldıkça ve karşı taraftaki polimer zincirleriyle iç içe geçtikçe orijinal arayüzü ortadan kaldırmaktır. Sonuç olarak, bantlar birbirinden ayırt edilemez hale gelir.

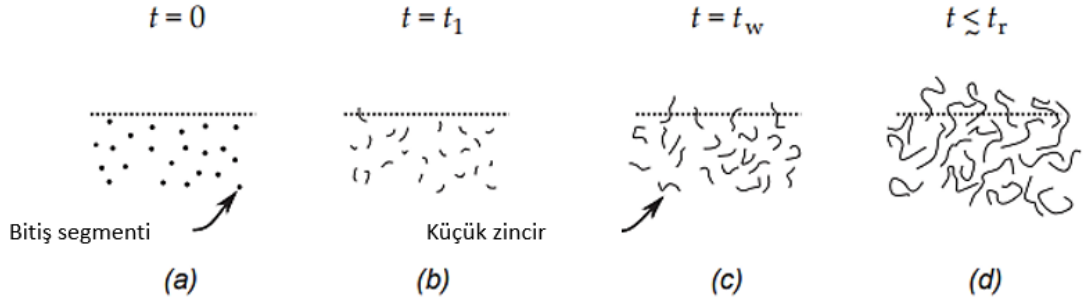


Şekil 2.4 Bir polimer zincirinin reptasyonu ($0 < t_1 < t_{\text{kaynak}} \leq t_{\text{reptasyon}}$) [9], [19]

İyileşme süreci genellikle de Gennes tarafından geliştirilen reptasyon teorisi kullanılarak açıklanmaktadır. Bu teori, malzemenin dolaşık polimer zincirlerinden oluşan bir ağ olarak kabul edildiği amorf polimerlere odaklanmaktadır. Bu ağda, tek bir zincirin hareketi, komşu zincirlerle olan dolaşıklıklar tarafından büyük ölçüde kısıtlanır [19], [20].

Polimer zincirleri arasındaki dolaşıklıklar, Şekil 2.4-a'da gösterildiği gibi, bireysel zincirlerin hareketini tüp benzeri bir bölge içinde sınırlar. Termal dalgalanmalar zincirin kıvrılmasına neden olarak tüp boyunca tek boyutlu rastgele bir hareketle sonuçlanır. Zincirin yapısal değişikliklere uğraması için kendisini tüpün kısıtlamalarından kurtarması gerekir. Zincir kıvrılarak ve sürünerek hareket ettikçe, zincirin uçları yönlerini rastgele seçer. Zamanla, zincir uçları orijinal tüp sınırlamalarından kaçarak Şekil 2.4-b,d'de gösterildiği gibi küçük zincirlerin oluşmasına yol açar. Bu küçük zincirler, zincirin artık ilk tüp içinde sınırlı olmayan kısımlarını temsil eder.

Ara yüzeydeki iyileşme süreci sırasında, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi minör zincirler ara yüzey boyunca harekete geçer ve diğer tarafa doğru iç içe geçer. Bu iç içe geçme, minör zincirlerin diğer taraftaki zincirlerle dolanmasını sağlar. Sonuç olarak, zincirler iç içe geçerek dolanır ve iki bant arasındaki arayüzeyin kaybolmasına neden olur. Arayüzey boyunca zincir dolaşıklıklarının oluşması, her iki banttaki zincirlerin birbirine bağlanması ve bütünleşmesi nedeniyle güçlü bir arayüzey bağının kurulmasına katkıda bulunur.



Şekil 2.5 Kaynak gelişimine katkıda bulunan arayüz yakınındaki küçük zincir hareketi.

Kaynak süresi t_w ve reptasyon süresi t_r için gösterilmiştir. [9], [20]

Şekil 2.4 ve Şekil 2.5 süreci iki farklı zaman noktasında göstermektedir: kaynak süresi t_w ve reptasyon süresi t_r . Reptasyon süresi, de Gennes tarafından tanımlandığı gibi, bir zincirin kendisini ilk tüp sınırlamasından ayırması için gereken süreyi temsil eder. Zincirin başlangıçtaki kısıtlamalarından kurtulması için tüp yapısı içinde yeterli hareket ve deformasyona uğraması için gereken sürenin bir ölçüsüdür [20].

De Gennes tarafından geliştirilen reptasyon modelinin öncelikle düşük moleküler ağırlığa sahip malzemelere dayandığını belirtmek önemlidir. Termoplastik kompozitler gibi yüksek moleküler ağırlıklı malzemeler söz konusu olduğunda Yang ve Pitchumani ilginç bir gözlemlerde bulunmuştur. Maksimum bağ mukavemetine ulaşmanın, zincirlerin ilk tüplerinden tamamen ayrılmasını gerektirmediğini bulmuşlardır. Bunun yerine, maksimum bağ mukavemetine aslında reptasyon süresinden (t_r) ziyade kaynak süresinde (t_w) ulaşıldığını ve t_w 'nin t_r 'den önce gerçekleştiğini keşfetmişlerdir ($t_w < t_r$) [21]. Bu, termoplastik kompozitlerde, polimer zincirlerinin optimum bağlanma ve iç içe geçmesinin, iyileşme sürecinin daha erken bir aşamasında, zincirlerin tamamen kopması ve çözülmesinden önce gerçekleştiğini göstermektedir.

Bir t zamanındaki iyileşme derecesi $D_h(t)$, elde edilen bağ mukavemetinin ulaşılacak maksimum bağ mukavemetine oranı olarak tanımlanır. İzotermal iyileşme derecesi için ifade şöyledir [21]:

$$D_h(t) = \frac{\sigma}{\sigma_{\infty}} = \left(\frac{t}{t_r} \right)^{1/4} \quad (2.3)$$

$D_h(t)$, reptasyon süresi ile elde edilebilir mukavemetin (σ) nihai mukavemete (σ_∞) oranı arasındaki korelasyonu temsil eder. Reptasyon süresi (t_r) sıcaklıktan etkilenir ve bir Arrhenius denklemi kullanılarak modellenenebilir [21].

2.1.3 Bağlanma Derecesi

İyileşme yalnızca yakın temas sağlanan arayüzey bölgelerinde gerçekleşir. Arayüzey bağ mukavemeti, hem yakın temasın hem de iyileşmenin birleşik etkisinin sonucudur. Etkin bağ mukavemeti, tüm artan alanlarda iyileşmenin alan ortalamasının hesaplanmasıyla ölçülebilir. D_b , bağlanma derecesi olarak bilinen bu ölçü, son bağlanma zamanı t_f 'deki bağlanma gücünün boyutsal olmayan ifadesini temsil eder [21]:

$$D_b(t_f) = D_{ic}(0) \cdot D_h(t_f) + \int_0^{t_f} D_h(t_f - t) \cdot \frac{dD_{ic}(t)}{dt} \cdot dt \quad (2.4)$$

Verilen denklemde, $D_{ic}(0)$ başlangıçtaki yakın temas derecesini, $D_h(t_f)$, t_f zamanındaki iyileşme derecesini, $(dD_{ic}(t)/dt)dt$, t_f zamanındaki yakın temastaki artışı temsil eder. $D_h(t_f - t)$ son bağlanma zamanı t_f 'de bu artımlı alan için iyileşme derecesi, burada $t_f - t$ iyileşmenin gerçekleşmesi için mevcut süreyi ifade eder.

2.1.4 İşleme Parametrelerinin Etkisi

Yukarıda tartışılan modellere göre, termoplastik kompozitlerde interlaminar bağ mukavemeti çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. İşlem sıcaklığı (T), konsolidasyon basıncı (P) ve işlem süresi (t) bağ mukavemetinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Öte yandan, yakın temasın gelişimi uygulanan basınç, sıcaklık ve zamandan etkilenir. Polimer zincirlerinin iç içe geçmesi ve ara yüzün kaybolması anlamına gelen iyileşme, basınç gibi diğer faktörlere önemli ölçüde bağlı olmaksızın, öncelikle sıcaklık geçmişi ve zamandan etkilenir.

Denklem 2.2, uygulanan basınç (P_{app}) arttıkça veya reçinenin viskozitesi (μ_{mf}) azaldıkça yakın temasın gerçekleşmesi için gereken sürenin azaldığını göstermektedir. Nispeten düşük bir viskoziteye sahip olan PA6 (poliamid 6) durumunda, erimiş yüzeyin basınç uygulanmadan önce bile düzleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, PA6'nın düşük viskozitesinin yüzeyin deformasyonunu ve düzleşmesini kolaylaştırarak yüzeyler arasında yakın temasın daha hızlı sağlanmasına olanak tanıdığını göstermektedir [22]. Yarı kristal polimerlerde otohezyon kristalleşme sıcaklığı ile ilişkilidir ve 338 - 345 °C (PEEK) erime sıcaklığı T_m 'yi aştığında başlar [23].

Termoplastik kompozitlerde dekonsolidasyon, uçucu maddelerin difüzyonu veya artık gerilmelerin gevşemesi nedeniyle meydana gelebilir. Nem difüzyonu bazı termoplastik laminatlarda dekonsolidasyona katkıda bulunan yaygın bir faktördür, hidrofobik termoplastik kompozitler ise öncelikle laminatlarda depolanan artık gerilmelerin gevşemesi yoluyla dekonsolidasyon yaşar [24]. Ayrıca, PA 6'nın mekanik özelliklerinde azalmaya yol açan önemli bir nem absorbe eğilimi vardır [25].

PA6'nın yarı kristal yapısı, hem kristal hem de amorf/camsı bölgelerden oluşan bir yapıyla sonuçlanır. Bu morfolojinin malzeme özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Otohezyon sırasında, arayüzeye yakın kristallerin varlığı polimer zincirlerinin hareketini kısıtlar. Ek olarak, polimer zincirinin bir kısmı kristal içinde hapsolür ve maksimum iç içe geçme uzunluğunu sınırlar. Bu gözlemler, camsı geçiş sıcaklığı yakınında amorf ve yarı kristal PET arasındaki bağlanmayı inceleyen Boiko ve arkadaşlarının bulgularıyla uyumludur. Boiko ve arkadaşları [26] kristallik derecesindeki bir artışın polimer zincirlerinin mevcut uzunluğunda bir azalmaya karşılık geldiğini ve bunun da bağ mukavemetinde bir azalmaya yol açtığını göstermiştir. Bu ilişki, kristallığın PA 6'nın mekanik özellikleri üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Soğutma işlemi sırasında kristaller oluşabilir ve spesifik soğutma hızı bunların özelliklerinin belirlenmesinde rol oynar. PA 6 söz konusu olduğunda, kristalitler ağırlıklı olarak iki ana formda bulunur: monoklinik α formu ve monoklinik veya yalancı altıgen γ formu. Bu farklı kristal formları malzemenin genel kristal yapısına katkıda bulunur ve özelliklerini etkiler [18], [26], [27].

PA6'nın γ -formu daha sünektir, yani daha iyi deformasyon ve uzama özellikleri sergilerken, α -formu daha yüksek bir modüle sahiptir, bu da daha fazla sertliği gösterir. α -formu, PA6'nın termodinamik olarak en kararlı formu olarak kabul edilir [28]. Kristalleşme sıcaklığı 420 K civarını aştığında veya soğutma hızı 5 K/s'den daha yavaş olduğunda α -kristallerinin oluşumu gözlenir. Öte yandan, PA 6 100 K/s'den daha hızlı soğutulursa, kristal yapıdan yoksun, tamamen amorf kalır [28], [29].

Guglhoer ve diğerleri ile Kolesov tarafından yürütölen çalışmalarda, karbon elyafların poliamid 6'nın (PA6) kristal yapısı üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Her iki çalışmadan elde edilen bulgular, karbon liflerinin dahil edilmesinin γ -kristallerinin oluşumunun hızlanmasına ve α -kristallerinin oluşumunda potansiyel bir azalmaya yol açtığını tutarlı bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, karbon fiberlerin PA 6'nın kristal yapısını şekillendirmede önemli bir rol oynadığını güçlü bir şekilde göstermektedir. Ayrıca, daha yüksek soğutma hızlarının α -kristallerinde bir

azalma ve γ -kristallerinde bir artış ile ilişkili olduğu gözlemlenmiştir, bu da soğutma koşullarının kristal oluşumu üzerindeki etkisinin altını çizmektedir. Önemli bir gözlem de soğutma hızının artmasının amorf fazın daha yüksek bir fraksiyonu ile sonuçlanmasıdır, bu da soğutma hızının genel malzeme yapısı üzerindeki etkisini gösterir [30], [31].

2.2 Test Yöntemleri

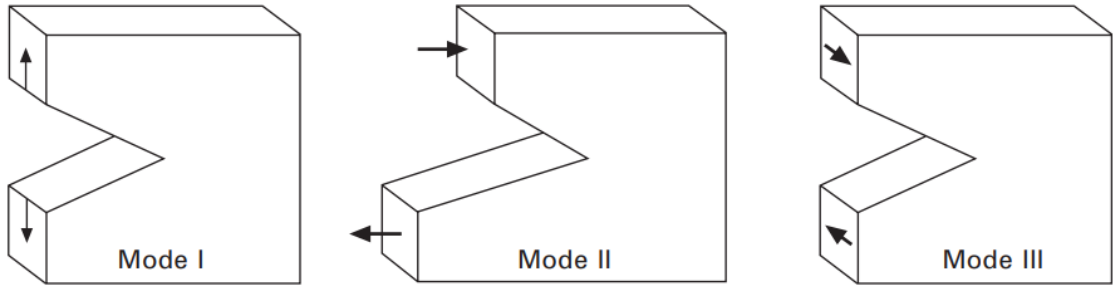
Termoplastik bantların yapışma mukavemetini ölçmek için yaygın olarak çeşitli test yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlar arasında soyulma testi, çekme testi, kesme testi, bindirme kesme testi ve yüzer silindir soyulma testi bulunmaktadır.

Kama soyulma testi, numunenin orta katmandan belirli bir açı ve hızda soyulmasını ve ayrılma için gereken kuvvetin ölçülmesini içerir. Çekme testi, numuneye kopana kadar çekme kuvveti uygulayarak bağ gücü hakkında fikir verir. Kesme testleri, bağ yönüne paralel gerilime neden olur ve numunenin ayrılması için gereken kuvveti ölçer. Bindirmeli kesme testleri, paralel kuvvetlere maruz kalan üst üste binmiş bant numunelerinin yapışma mukavemetini değerlendirir. Yüzen silindir soyma testi, kontrollü bir silindir kullanarak bandın sert bir alt tabakadan soyulma kuvvetini ölçer.

Çeşitli test yöntemlerinin amaçlarını kapsamlı bir şekilde anlamak için, farklı kırılma modlarının net bir şekilde anlaşılması önemlidir. Bu kırılma modları, uygulanan yüklere maruz kaldıklarında çatlakların yayılma ve malzemelerle etkileşime girme yollarını tanımlar. Bu kırılma modlarını ayırt ederek, uygun test yöntemleri seçilebilir ve elde edilen veriler doğru bir şekilde yorumlanabilir.

Kırılma modları, çatlak ucunda oluşan gerilmelerinin "modlar" olarak bilinen üç farklı yüklemeye kategorize edilmesini ifade eder [32]. Şekil 2.6, literatürde atıfta bulunulan farklı kırılma modlarını göstermektedir.

- Mod-I, açılma modu :gerilme çatlak yüzeyinin yerel düzlemine diktir (ortogonal). Çatlak yüzeylerini açma veya ayırma eğiliminde olan bir yönde hareket eder.
- Mod-II, kayma modu: gerilme çatlak yüzeyine paraleldir ancak çatlak ön yüzüne ortogondur. Çatlak yüzeyleri boyunca bir kayma veya kesme hareketine neden olur.
- Mod-III, yırtılma modu: gerilme hem çatlak yüzeyine hem de çatlak ön yüzüne paraleldir. Çatlak ön yüzü boyunca bir yırtılma veya yırtılma hareketine neden olur.



Şekil 2.6 Kırılma modları [33]

Mod I, mod II ve mod III için kırılma tokluğu değerleri sırasıyla G_I , G_{II} ve G_{III} olarak gösterilir. Özellikle mod III kırılma için testler yapmanın zor olduğunu belirtmek gerekir. Ek olarak, mod III'te kırılmaya karşı direnç genellikle mod I ve mod II'ye kıyasla daha yüksektir, bu da çatlakların daha zayıf modlar (mod I, mod II veya her ikisinin bir kombinasyonu) boyunca yayılma olasılığının daha yüksek olduğu anlamına gelir. Sonuç olarak, sınırlı ek bilgi sağladıkları için yalnızca kırılma modu III'e odaklanan test yöntemlerini kullanmak genellikle gerekli değildir.

G_c olarak ifade edilen kırılma tokluğu, bir çatlak yaymak ve yeni çatlak yüzey alanı oluşturmak için gereken enerjiyi ölçer. Tipik olarak metrekare başına Joule (J/m^2) gibi birim alan başına enerji birimleriyle ifade edilir. Kırılma tokluğu, malzemenin çatlak büyümesine karşı direncine ve çatlak ucunun yakınında uygulanan gerilme alanının bir ölçüsü olan gerilme yoğunluğu faktörüne bağlıdır.

$$G_c = \frac{dU}{Bda} \quad (2.5)$$

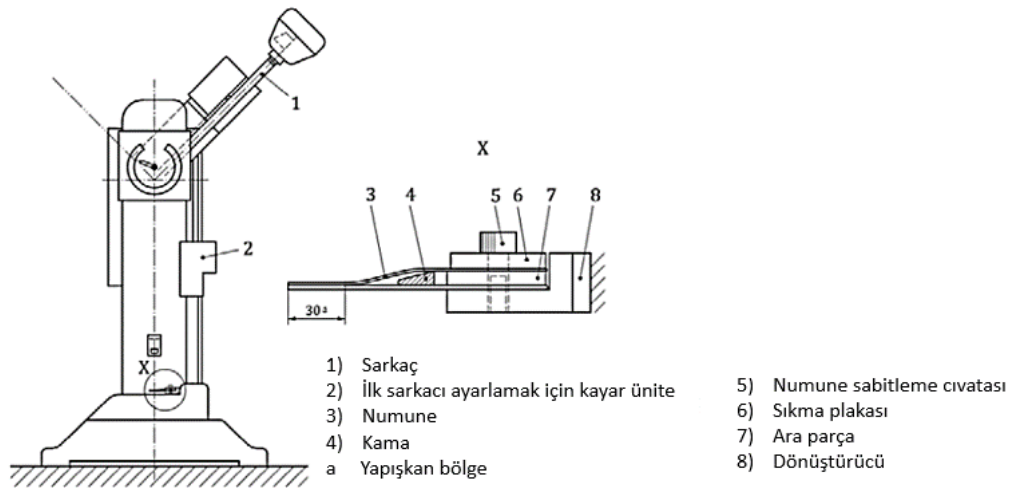
Burada a çatlak uzunluğu, kalınlık B için ve dU enerji değişimidir.

Bağ mukavemetini etkili bir şekilde karakterize etmek ve konsolidasyon kalitesini değerlendirmek için uygun bir test yöntemi aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır: iki farklı katman arasındaki bağ mukavemetini ölçmeli, içsel malzeme özelliğini temsil etmeli, minimum malzeme gerektirmeli, zaman açısından verimli olmalı, arıza modlarına karşı dayanıklı olmalı ve tekrarlanabilirlik sergilemelidir. Lamine yapıların mukavemeti, katmanlar arasındaki bağ mukavemetinden büyük ölçüde etkilenir. Bağlanma mukavemeti ölçümü, ince film kaplama, dental yapışma ve kompozit üretimi gibi çeşitli uygulamalarda mukavemeti değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. Lamine yapılarda bağ mukavemetini değerlendirmek için çeşitli deneysel yöntemler mevcuttur.

Bu yöntemler ayrışma moduna göre beş ana türe ayrılabilir: çekme testi, eğme testi, soyma testi, çizik testi ve ultrasonik test [35].

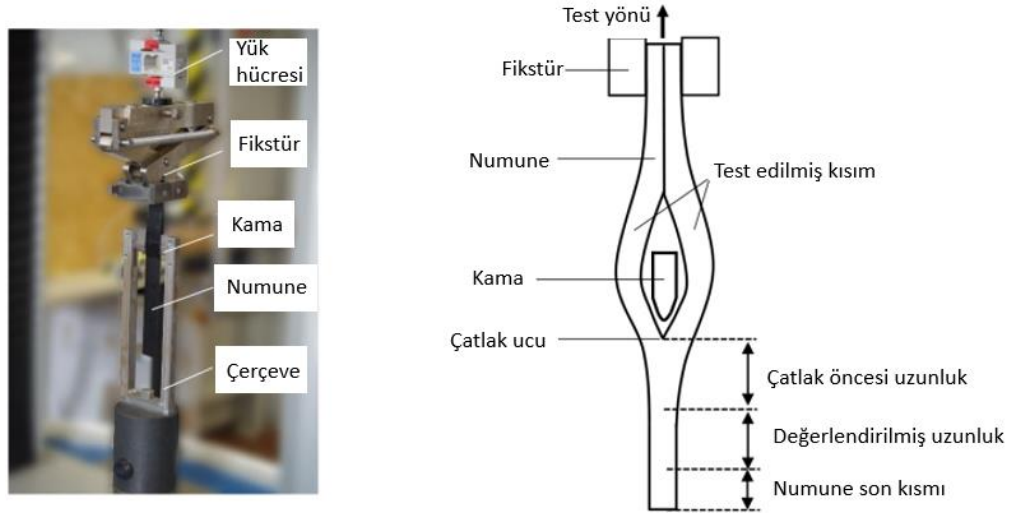
2.2.1 Kama Soyulma Testi

Kama soyulma testi, ince numuneler için uygunluğu, numune hazırlama kolaylığı ve hızlı test ve analiz nedeniyle interlaminar bağ mukavemeti değerlendirmesi için seçilmiştir [36]. Kama soyulma testi araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu testin farklı varyasyonları geliştirilmiştir. Şekil 2.7'de gösterilen kama soyma testinin bir varyasyonu, darbe kama koşulları altında yüksek mukavemetli yapışkan bağların bölünmesine karşı dinamik direnci değerlendirmek için bir darbe test makinesi ile birlikte bir kamanın kullanıldığı Avrupa standardı ISO 11343'te açıklanmaktadır. Kama darbe yöntemi olarak bilinen bu yöntem, özellikle sac metal veya fiber takviyeli plastikte yapışkan bağlı yüzeylerin dayanıklılığını belirlemek için bir araç sağlar [37].



Şekil 2.7 Kama darbe testi ISO 11343:2019 [38]

Kama soyulma testinin bir başka standartlaştırılmış versiyonu Amerikan standardı ASTM D3762'de özetlenmiştir. Bu test yöntemi, alüminyumun yapışkanla bağlanmış yüzey dayanıklılığını değerlendirmek için özel olarak geliştirilmiştir. Bununla birlikte, ASTM D3762 standardının 2019'da geri çekildiğini ve bu özel test yönteminin endüstri içinde kullanımında potansiyel bir değişime işaret ettiğini belirtmek gerekir [39].



Şekil 2.8 Kama soyma test düzeneği [18]

Bu çalışmada Şekil 2.8'de gösterilen şekliyle kullanılmıştır. İncelenen numunelerin soyulma mukavemetini değerlendirmek için kullanılmıştır.

Soyulma dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanır:

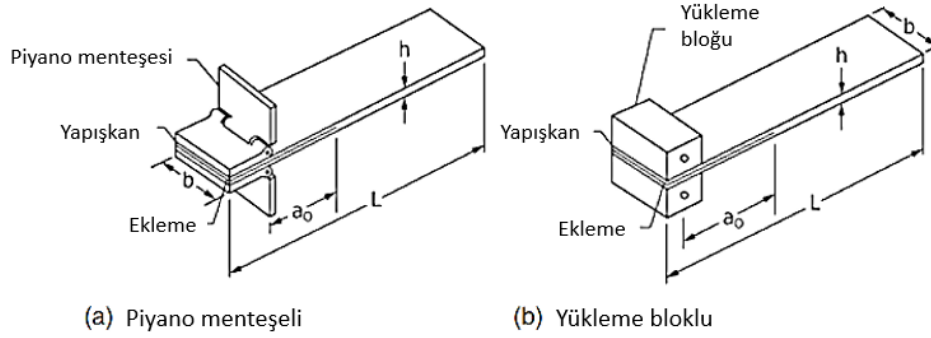
$$P_s = \frac{F}{b} \quad (2.6)$$

Burada F numuneye uygulanan ortalama çekme yükünü ve b numunenin soyulan ortalama genişliğini göstermektedir.

Kama soyulma testi, arayüzün açılma modu ile karakterize edilen mod I kırılması ile sonuçlanan bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Mod I kırılma, bağlanmış katmanların ayrılmasına esas olarak arayüze dik çekme kuvvetleri neden olduğunda meydana gelir. Bununla birlikte, Çift konsol kiriş testi gibi standart mod I test yöntemine kıyasla bazı farklılıklar olduğuna dikkat etmek önemlidir. Kama soyma testinde, açılma yer değiştirmesi kama kalınlığına aynı olacak şekilde sabit tutulur.

2.2.2 Çift Konsol Kiriş Testi

Çift konsol kiriş (ÇKK) testi kullanılarak sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerin açılma Modu I tabakalar arası kırılma tokluğunu (G_{IC}) belirlemek için test yöntemi hem Amerikan standardı ASTM D5528'de hem de Avrupa standardı EN 6033'te açıklanmıştır [40], [41].



Şekil 2.9 ASTM D5528'de önerildiği gibi çift konsol kiriş numunesi [40]

Bu test yöntemi, tek yönlü karbon fiber ve cam fiber bant laminatlardan oluşan kompozitler için özel olarak tasarlanmıştır. Kompozitler, kırılma ve sert özelliklerin bir kombinasyonunu sergileyen tek fazlı polimer matrislere sahip olmalıdır. Bu test yönteminin yalnızca yukarıda belirtilen kompozit malzemeler için geçerli olduğuna dikkat etmek önemlidir. Parametreler ve numune tasarımı, bu özel kompozit konfigürasyonlar için optimize edilmiştir.

Kırılma tokluğu, G_{IC} , delaminasyon uzunluğundaki küçük bir artış için test numunesinin birim genişliği başına iç enerjideki azalma, dU , olarak tanımlanır. Bu tanım, sabit bir yer değiştirme altında kendine benzer şekilde büyüyen bir delaminasyon için geçerlidir [40].

$$G_{IC} = -\frac{1}{b} \frac{dU}{da} \quad (2.7)$$

ASTM D5528 standardında, Mod I tabakalar arası kırılma tokluğu ve şekil değiştirme enerjisi yayılım hızı, Değiştirilmiş Kiriş Teorisi (Modified Beam Theory) kullanılarak hesaplanır. Bu hesaplama sırasında, denklemin 2.8'de kullanılan düzeltme faktörü (Δ), çift konsol kiriş numunelerin hazırlanması ve cihaza bağlanması sırasında oluşabilecek çarpılmaların etkisini gidermek amacıyla kullanılır.

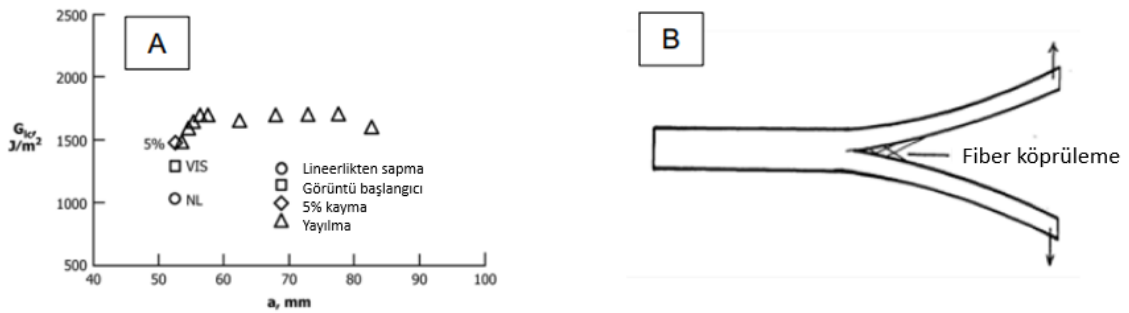
$$G_I = \frac{3P\delta}{2\omega(a+|\Delta|)} \quad (2.8)$$

Denklem 2.8'de G_I birim şekil değiştirme enerjisi yayılım hızı [kJ/m^2], P yük [N], δ Yük uygulama noktaları arası açıklık [mm], ω numune genişliği [mm], a toplam delaminasyon çatlağı uzunluğu [mm], Δ düzeltme faktörünü temsil etmektedir.

ASTM D5528'e göre, Şekil 2.9'da testte kullanılan ÇKK numunesini göstermektedir. Numune 3 ile 5 mm arasında değişen bir kalınlığa (h) sahip olmalıdır. ÇKK'da ilk delaminasyon uzunluğu minimum 50 mm olarak belirlenmiştir. Bu ölçüm, yük

noktasından çatlak başlangıcına kadar olan bölgedir. Bununla birlikte, alternatif laminat kalınlıklarının ve ilk delaminasyon uzunluklarının, testle ilgili özel gereksinimlere ve tartışmalara dayalı olarak seçilebileceğine dikkat etmek önemlidir. Bu alternatifler, yürütülen çalışma veya uygulamanın hedefleriyle uyumlu olacak şekilde seçilmelidir [40].

Teste uygun yük akışını sağlamak için Şekil 2.9-a'daki gibi bir yükleme bloğu veya Şekil 2.9-b'deki gibi bir piyano menteşesi numuneye güvenli bir şekilde tutturulmalıdır. Alüminyum yükleme bloğu ile kompozit numune arasında güçlü bir bağ sağlamak içinde numunenin test öncesi yüzey hazırlığının yapılması gerekir.



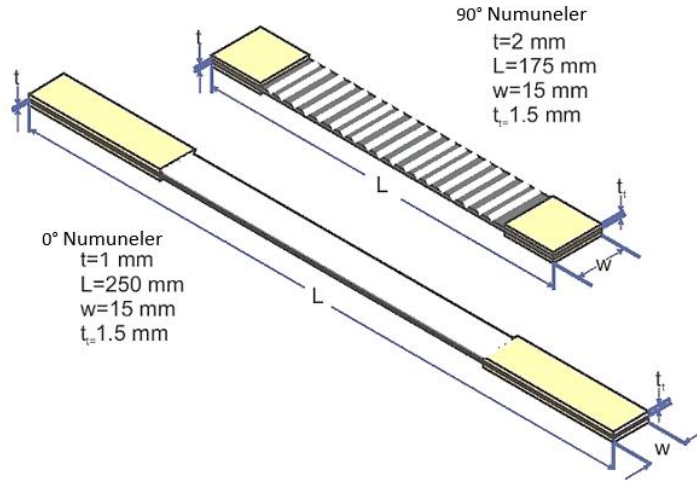
Şekil 2.10 Tipik çatlak büyüme direnci eğrisi (R-eğrisi) b) Fiber köprüleme [40]

Çift konsol kiriş testinden elde edilen sonuçlar, Şekil 2.10-b'de gösterildiği gibi fiber köprülemenin varlığı nedeniyle sorgulanabilir. Fiber köprüleme, kritik enerji salınım oranı G_{IC} 'nin hesaplanan değerini önemli ölçüde etkileyebilir. Şekil 2.10-a, tek yönlü bir ÇKK numunesi için R-eğrisi olarak da bilinen tipik bir çatlak büyüme direnci eğrisini göstermektedir. Kritik enerji salınım oranının çatlak başlangıcından sonra kademeli olarak arttığını ve daha sonra sabit bir durum seviyesine ulaştığını göstermektedir. Çatlak başlangıcından sonra G_{IC} 'teki bu artış, fiber köprüleme olgusuna bağlanmaktadır.

2.2.3 Çekme Testi

ASTM D3039, nihai gerilme mukavemeti, nihai gerilme gerilmesi, gerilme esneklik modülü, Poisson oranı ve geçiş gerilmesi dahil olmak üzere malzemelerin önemli gerilme özelliklerini belirlemek için tasarlanmıştır. Doğru ve güvenilir sonuçlar için rapor edilmesi gereken malzeme özellikleri, numune hazırlama, test koşulları ve takviye içeriği gibi faktörleri dikkate alır.

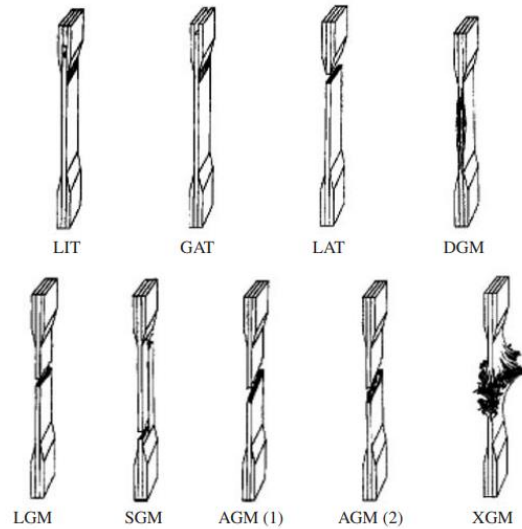
ve analizlere hizmet ederek malzemenin gerilim altındaki davranışına ilişkin değerli bilgiler elde edilebilir. Çekme testi düzeneği Şekil 2.12'de gösterilmektedir.



Şekil 2.13 0° ve 90° için test numunelerinin boyutları [44]

Çekme mukavemetinin analizi için standart test numuneleri Şekil 2.14'te şematik olarak gösterilmiştir. ASTM D3039, aşağıdaki kodları kullanarak arıza modunu kategorize eder [42]:

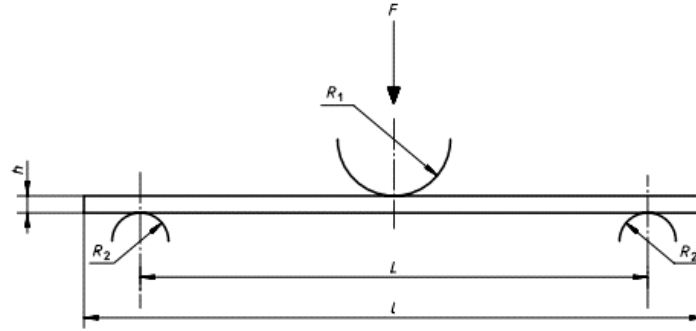
- Fiber kırılması: F
- Matris çatlaması: M
- Delaminasyon: D



Şekil 2.14 Polimer matrisli kompozit numunede çekme testi sırasında hata modları [10]

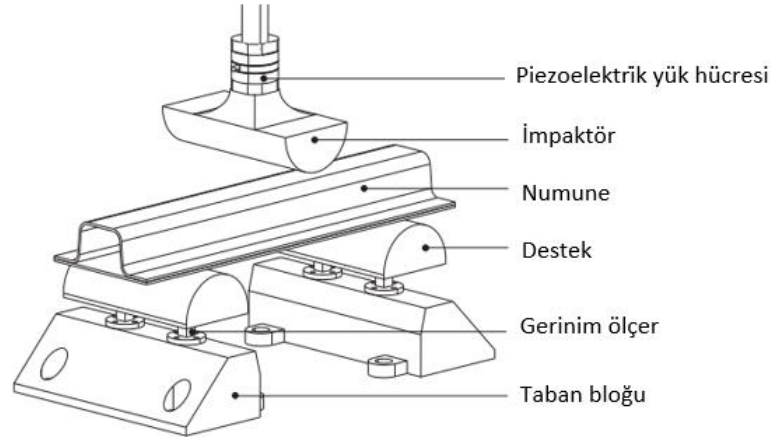
2.2.4 Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testi, polimer matrisli kompozit malzemelerin mukavemet, sertlik ve yük/sapma davranışı dahil olmak üzere eğilme özelliklerini belirlemek için kullanılır. İki prosedür belirtilmiştir: Üç noktalı yükleme için Prosedür A ve dört noktalı yükleme için Prosedür B. Test yöntemi, sürekli elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitler için özel olarak tasarlanmıştır ve 32:1'lik standart açıklık-kalınlık oranı gibi belirli yönlerden diğer eğme yöntemlerinden farklıdır.



Şekil 2.15 ISO 14125:1998'de önerildiği gibi üç noktalı bükme testi [45]

Üç nokta eğme testinin bir başka standartlaştırılmış versiyonu Amerikan standardı ASTM D7264/D7264M'de belirtilmiştir [46].



Şekil 2.16 Üç nokta eğme test düzeneği [47]

Bu prosedürler, daha fazla test gerektirebilecek temel tasarım faktörlerini belirlemek için farklı çevresel koşullar altında kompozit malzemelerin performansını değerlendirmek için değerlidir. Ayrıca, çeşitli yapıların eğilme özelliklerini belirlemek için de kullanılabilirler. Prosedür A'da, numunenin basitçe desteklenen bir kiriş üzerinde merkez yüklemeye tabi tutulduğu üç noktalı bir yükleme sistemi kullanılır. Sabit destekli ve

yükleme burunlu üç nokta yükleme konfigürasyonu Şekil 2.16'da gösterilmektedir. Bu yöntem, bu çalışmada polimer matrisli kompozitlerin eğilme davranışını değerlendirmek için kullanılmıştır.

Eğilme testinde açıklık-kalınlık oranının seçiminde, interlaminar kesme gibi istenmeyen hata modlarından kaçınılması göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tür hata modlarıyla karşılaşmadığı durumlarda, standart oranlar kullanılabilir. Bununla birlikte, standart oranlar kabul edilemez hata modlarıyla sonuçlanırsa, daha yüksek bir L / h değeri kullanılmalıdır. Kullanılabilecek kabul edilebilir oranlar, test durumunun özel gereksinimlerine bağlı olarak 16:1, 20:1, 40:1 ve 60:1'dir [45].

Eğilme gerilmesi (σ_f) aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir [45]:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (2.10)$$

Eğilme gerilmesi (σ_f), uygulanan yük (F), açıklık uzunluğu (L), numune kalınlığı (h) ve numune genişliği (b) temsili değişkenlerdir.

2.3 Sonuç

Bu çalışma, kama soyulma testi, çekme testi, üç nokta eğme testi ve çift konsol kiriş testi olmak üzere dört farklı test yöntemi kullanarak deneysel araştırmalar yaparak numunelerin yapışma mukavemeti özellikleri hakkında kapsamlı bilgi edinmeyi amaçlamıştır. Bu çeşitli test yöntemleri kullanılarak, işlem koşullarının bir fonksiyonu olarak numunelerin bağlanma mukavemeti ve mekanik özellikleri hakkında kapsamlı bir anlayış elde edilebilmiştir.

Bağlama işleminde konsolidasyon iki önemli olguyu gerektirir: yakın temas ve iyileşme. Yakın temas, ısı ve basınç uygulanarak elde edilir, çünkü iki yüzeyi bir araya getirmek yüzey düzensizlikleri nedeniyle tam temasla sonuçlanmayabilir. Malzeme ısıtılarak ve basınç uygulanarak yüzeyler düzleştirilir ve tam bir yakın temas sağlanır.

Yakın temas, iyileşmenin gerçekleşmesi için bir ön koşuldur. Yüksek sıcaklıklarda, yakın temas halinde olan iki bandın ara yüzeyinde moleküller arası difüzyon (iyileşme) gerçekleşir. Bu difüzyon, polimer zincirlerinin arayüzey boyunca hareket etmesini sağlayarak bağlı bir alanın oluşmasına neden olur. Sıcaklığa bağlı olarak iyileşme süreci oldukça hızlıdır.

Malzeme içindeki kristalitlerin varlığı polimer zincirlerinin hareketini kısıtlar. Bu nedenle, kristalitlerin getirdiği kısıtlamaların üstesinden gelmek ve iyileşme sürecini kolaylaştırmak için bantları erime sıcaklığının üzerinde ısıtmak gerekir.



Bölüm 3, deneysel test düzeneğinin, kullanılan malzemelerin ve numunelerin hazırlanmasının ayrıntılı bir açıklamasını sunmaktadır.

3.1 Malzeme ve Laminat Üretimi

Laminatlar tek yönlü karbon fiber poliamid 6 (KF/PA6) emdirilmiş bantlar kullanılarak üretilmiştir.

İki farklı pres makinesi kullanılarak test plakası üretimi gerçekleştirilmiştir.

1. Fontijne pres model TP 400

2. Pinette pres model Zenith 2

Şekil 3.1-a'da gösterilen Fontijne presi, laminatın başka bir prese aktarılmasına gerek kalmadan doğrudan pres plakaları arasında soğutulması avantajını sunmaktadır. Pinette presi ile karşılaştırıldığında, Fontijne presi ile üretilen laminatlar için Fontijne presinin nispeten düşük bir soğutma hızına sahip olduğu söylenebilir. Her test yöntemi için farklı kalınlıklarda numuneler kullanılmış, bu da laminatlar için değişen ısıtma ve soğutma hızlarına neden olmuştur.

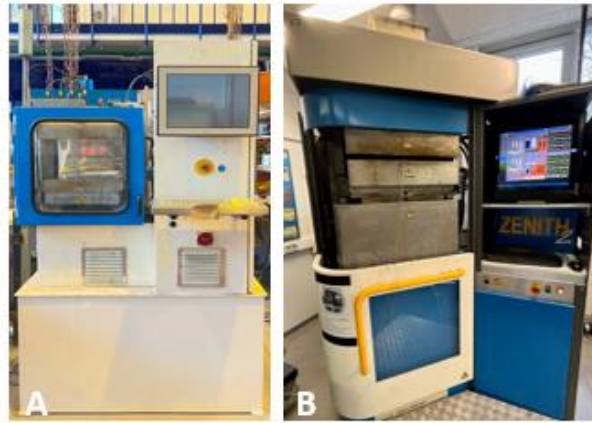
Ölçülen pres sıcaklıkları, pres plakalarının sıcaklıklarını temsil etmektedir. İşleme sırasında laminat sıcaklığını doğrulamak için bir LabJack U6 termometre kullanılmıştır. Termokupllar laminatın üst, alt ve orta kısımlarına yerleştirilmiştir. Düşük kalınlıktaki (4-6 kat) laminatlar için ölçülen ve pres plaka sıcaklığı arasında önemli bir fark gözlenmemiştir. Bu gözleme dayanarak, laminatın soğuma hızının pres plakalarının soğuma hızına eşdeğer olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım, düşük kalınlığa sahip plakaların soğutma işlemi sırasında pres plakalarının sıcaklık profilini yakından takip etmesi nedeniyle yapılmıştır.

Fontijne ve Pinette presleri kullanılarak üretilen laminatlar için ortalama soğutma hızları hesaplanmıştır. Tablo 3.1 Fontijne ve Pinette pres soğutma hızlarını göstermektedir. Üç nokta eğme (6 katlı) numuneleri için: ± 260 °C/dk (doğrudan ölçüm yapılmamıştır, ancak bilinen parametrelere dayanarak yaklaşık tahminler yapılmıştır)

Tablo 3.1 Fontijne ve Pinette pres soğutma hızı tablosu

Soğutma Hızları				
Ekipman	Kama soyulma testi (4 kat)	Çift konsol giriş testi (32 kat)	Çekme testi (8 kat)	Üç nokta eğme testi (6 kat)
Fontijne pres	23 °C/dk	41 °C/dk	43 °C/dk	44 °C/dk
Pinette pres	77 °C/dk	159 °C/dk	255 °C/dk	260 °C/dk

Tablo 3.1’de pres ve test bazlı soğutma oranları gösterilmektedir. Bu tabloda kama soyulma numunelerindeki soğutma oranının diğer testlere göre daha düşük soğutma oranının sahip olmasının nedeni üretim sırasında daha kalın bir alüminyum plaka kullanılmasıdır. Daha kalın plaka, ısının kalıptan numuneye aktarılma hızını azaltan bir termal bariyer görevi görmüştür.



Şekil 3.1 A) Fontijne pres model TP 400 B) Pinette pres model Zenith 2

Şekil 3.1-b’de gösterilen Pinette presi, laminatı üst bölmedeki iki sıcak plakadan alt bölmedeki iki soğuk plakaya aktararak daha yüksek soğutma hızlarına ulaşmak için kullanılır. Bu konfigürasyonda Pinette presi iki plaka setinden oluşur: üst plakalar ve alt plakalar. Üstteki iki plaka istenen işleme sıcaklığına kadar ısıtılırken, alttaki iki plaka bir soğutucu kullanılarak sabit bir oda sıcaklığında tutulur. Laminatın soğuma hızını doğrulamak için, ölçülen pres sıcaklıkları pres plakalarının sıcaklıklarına karşılık geldiğinden bir LabJack U6 termometresi kullanılmıştır. LabJack U6 termometre,

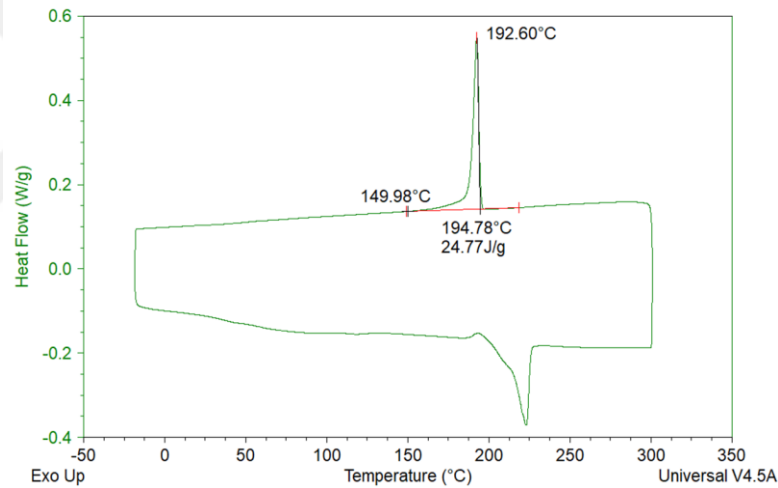
soğutma işlemi sırasında laminatın sıcaklığının ölçülmesini sağladı. Termokupl laminatın üstü, altı ve merkezi gibi çeşitli konumlara yerleştirilerek laminat içindeki sıcaklık değişimleri izlenebilmiş ve analiz edilebilmiştir. Bu doğrulama süreci, deneysel prosedür sırasında laminatın soğuma hızının doğru bir şekilde değerlendirilmesini sağlamıştır.

3.2 Malzeme Karakterizasyonu

Üretimde kullanılan tek yönlü bant ağırlıkça %60-63 reçine içeriğine sahiptir.

Kristalleşme ve erime sıcaklıkları bir diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK) kullanılarak belirlenmiştir. Bu cihaz, kristalleşme ve erime gibi faz geçişlerinin tanımlanması da dahil olmak üzere malzemelerin termal davranışlarının hassas bir şekilde ölçülmesini sağlar. Şekil 3.2'de bir DTK eğrisi gösterilmektedir [52]. Sıcaklıklar şöyledir:

- Kristalizasyon tepe sıcaklığı: $\pm 192^{\circ}\text{C}$
- Ergime tepe sıcaklığı: $\pm 220^{\circ}\text{C}$



Şekil 3.2 KF/PA6'nın DTK taraması [52]

Bu sonuçlar önceki çalışmalarda bildirilen sıcaklık bulgularıyla uyumludur [49], [51], [53]. Kristalleşme sıcaklığının sabit kaldığı ve soğutma hızından etkilenmediği varsayılmaktadır [18].

3.3 Numune Hazırlanması

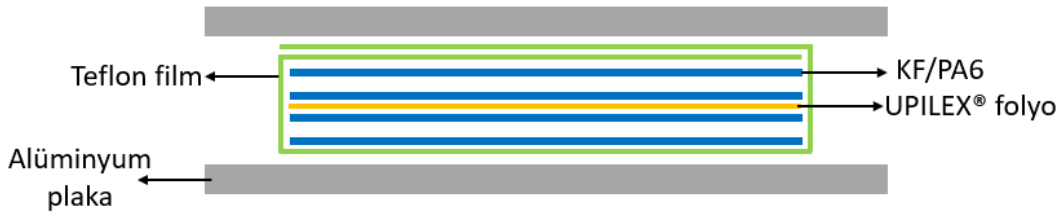
Sıkıştırılmalı kalıplamada test laminatları için hazırlık süreci benzer bir prosedür izler. Ancak, kalınlık, uzunluk ve yapışmamış alan gibi özel gereksinimler test standardına veya özel test yöntemlerine bağlı olarak değişebilir. Detaylar bu bölümde daha ayrıntılı olarak ele alınacak ve açıklanacaktır.

Kesme işleminden sonra numune plakasının kenar etkilerini azaltmak için, numuneleri merkezi bölgeden seçmek yaygın bir uygulamadır. Kama soyma ve çekme testlerinde, numuneler özellikle plakanın merkezinden seçilmiştir. İki laminat aynı anda üretilmiş ve her laminattan üç numune alınmış, bunların hepsi merkez bölgeden alınmıştır. Bir koşul için 6 numune test edilmiştir. Bu yaklaşım tutarlılığı sağlamış ve kenar etkilerinin test sonuçları üzerindeki potansiyel etkisini en aza indirmiştir.

3.3.1 Kama soyulma test numunesi

KST için numuneler 4 katlı KF/PA6 kullanılarak hazırlanmıştır. Laminatın ortalama kalınlığı 1 mm'dir. Bu hazırlık süreci şekil 3.3'de gösterilmiştir. Prosedürü adımları şu şekildedir:

1. Bantları belirlenen boyutlarda kesilir.
2. Bantları üst üste yerleştirilir ve çatlak başlangıcı bölge oluşturmak için 2. ve 3. kat arasına 60 mm uzunluğunda 12,5 µm kalınlığında UPILEX® folyo yerleştirilir.
3. İstiflenmiş dört kat KF/PA6 0,2 mm kalınlığında Teflon Kapton® HN film ile sarılır.
4. İşlenmeye hazır olan bu malzeme iki alüminyum plaka arasına yerleştirilir ve sıcak prese aktarılır.



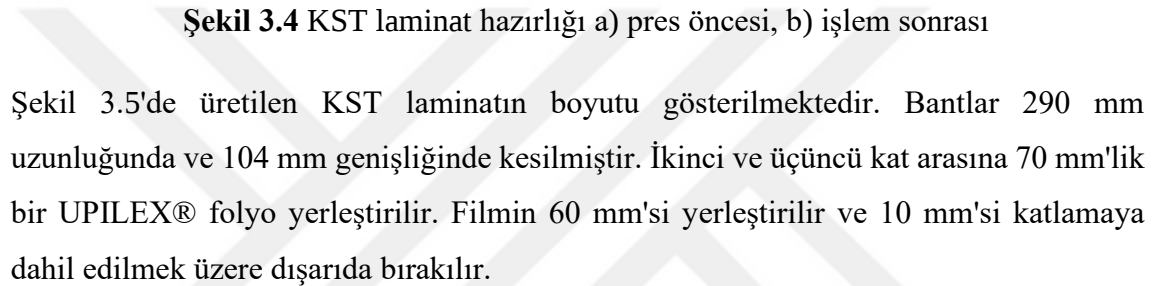
Şekil 3.3 Kama soyulma laminatı temsili görüntüsü

Önceki çalışmalar, erime sıcaklığında KF/PA 6'nın düşük viskozitesinden kaynaklanan işleme sırasında elyaf ve matris akışı sorununu tanımlamıştır. Bu sorunu ele almak için, farklı sarma yöntemlerinin uygulanmasını içeren uygun bir çözüm geliştirilmiştir. Laminatın her iki tarafında tek bir Teflon tabakası kullanılması ve yapışkan bant kullanılması test edilmiştir. Son olarak, Teflon filmin üst yüzeyde iki katman ve alt yüzeyde bir katman halinde katlanması uygun görülmüştür [18]. Bu tezde verimli sonuç alınan sarma yöntemi kullanılmıştır.

Şekil 3.4'te gösterildiği gibi hazırlanan KF/PA6 bantlar, teflon film kullanılarak titizlikle sarılmıştır. Sarma tekniği, laminatın üst yüzeyine iki kat teflon film gelecek şekilde, alt

Şekil 3.4 KST laminat hazırlığı a) pres öncesi, b) işlem sonrası

Şekil 3.5'de üretilen KST laminatın boyutu gösterilmektedir. Bantlar 290 mm uzunluğunda ve 104 mm genişliğinde kesilmiştir. İkinci ve üçüncü kat arasına 70 mm'lik bir UPILEX® folyo yerleştirilir. Filmin 60 mm'si yerleştirilir ve 10 mm'si katlamaya dahil edilmek üzere dışarıda bırakılır.

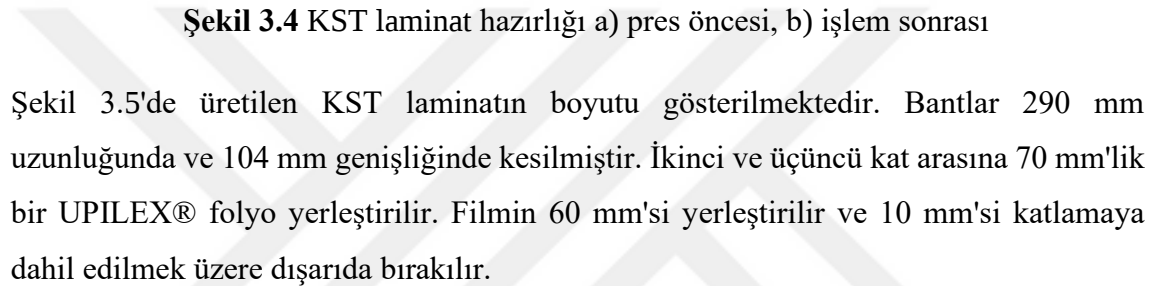


Şekil 3.4 KST laminat hazırlığı a) pres öncesi, b) işlem sonrası

Şekil 3.5'de üretilen KST laminatın boyutu gösterilmektedir. Bantlar 290 mm uzunluğunda ve 104 mm genişliğinde kesilmiştir. İkinci ve üçüncü kat arasına 70 mm'lik bir UPILEX® folyo yerleştirilir. Filmin 60 mm'si yerleştirilir ve 10 mm'si katlamaya dahil edilmek üzere dışarıda bırakılır.

Şekil 3.4 KST laminat hazırlığı a) pres öncesi, b) işlem sonrası

Şekil 3.5'de üretilen KST laminatın boyutu gösterilmektedir. Bantlar 290 mm uzunluğunda ve 104 mm genişliğinde kesilmiştir. İkinci ve üçüncü kat arasına 70 mm'lik bir UPILEX® folyo yerleştirilir. Filmin 60 mm'si yerleştirilir ve 10 mm'si katlamaya dahil edilmek üzere dışarıda bırakılır.



Şekil 3.4 KST laminat hazırlığı a) pres öncesi, b) işlem sonrası

Şekil 3.5'de üretilen KST laminatın boyutu gösterilmektedir. Bantlar 290 mm uzunluğunda ve 104 mm genişliğinde kesilmiştir. İkinci ve üçüncü kat arasına 70 mm'lik bir UPILEX® folyo yerleştirilir. Filmin 60 mm'si yerleştirilir ve 10 mm'si katlamaya dahil edilmek üzere dışarıda bırakılır.

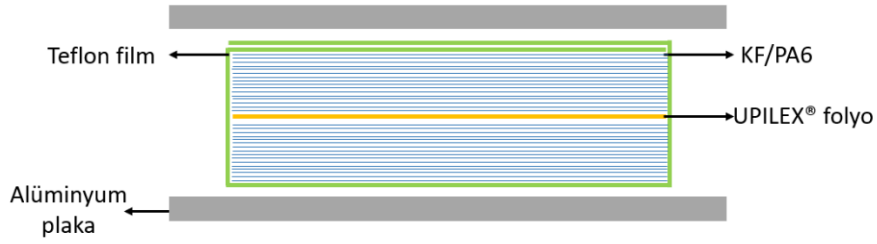
Şekil 3.4 KST laminat hazırlığı a) pres öncesi, b) işlem sonrası

Şekil 3.5'de üretilen KST laminatın boyutu gösterilmektedir. Bantlar 290 mm uzunluğunda ve 104 mm genişliğinde kesilmiştir. İkinci ve üçüncü kat arasına 70 mm'lik bir UPILEX® folyo yerleştirilir. Filmin 60 mm'si yerleştirilir ve 10 mm'si katlamaya dahil edilmek üzere dışarıda bırakılır.

göstermektedir. Şekil 3.5-b’de gösterildiği gibi laminat 15 mm genişliğe, 290 mm uzunluğa sahiptir ve bunun 60 mm’si çatlak başlangıç bölgesidir. Numune konumları ayırt edilebilmesi için şekil 3.5-c’de gösterildiği gibi her parça 1’den 6’ya kadar numaralandırılmıştır.

3.3.2 Çift Konsol Kiriş Test Numunesi

Çift konsol kiriş testi için numuneler 32 katlı KF/PA6 kullanılarak hazırlanmıştır. Laminatın ortalama kalınlığı 4,5 mm’dir.



Şekil 3.6 Çift konsol kiriş test laminatı temsili görüntüsü

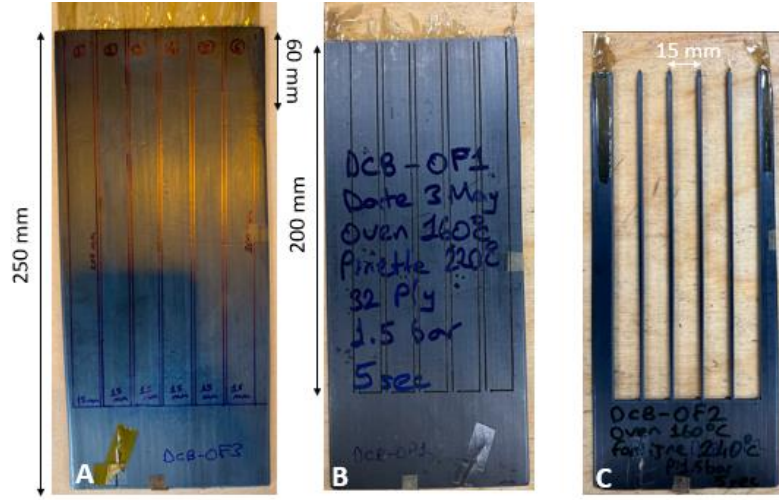
Bu hazırlık süreci şekil 3.6’de gösterilmiştir. Prosedürü adımları şu şekildedir:

1. Bantları belirlenen boyutlarda kesilir.
2. Bantları üst üste yerleştirilir ve çatlak başlangıcı bölge oluşturmak için 16. ve 17. kat arasına 60 mm uzunluğunda 12,5 µm kalınlığında UPILEX® folyo yerleştirilir.
3. İstiflenmiş 32 kat KF/PA6, 0,2 mm kalınlığında Teflon Kapton® HN film ile sarılır.
4. İşlenmeye hazır olan bu malzeme iki alüminyum plaka arasına yerleştirilir ve sıcak prese aktarılır.



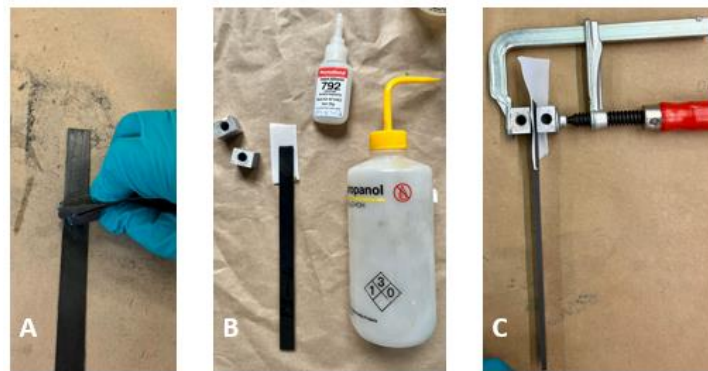
Şekil 3.7 Wazer® - Su jeti kesim işlemi

Laminat malzemeyi hassas bir şekilde kesmek için bir su jeti kullanılmıştır. Şekil 3.7 bu amaçla kullanılan su jetini göstermektedir.



Şekil 3.8 a) Kesim öncesi laminat boyutu : Uzunluk 250 mm, genişlik 104 mm ve çatlak başlangıç alan uzunluğu 60 mm'dir. b) Laminat 15 mm'lik 5 parçaya kesilir. c) Kesilen numunenin laminattan çıkartılması.

Potansiyel kenar etkilerini en aza indirmek için, laminatın kenarları test için kasıtlı olarak örneklenmemiştir. Her bir plakadan beş numune kesilmiştir. Numuneler standart olarak 15 mm genişliğe ve 200 mm uzunluğa sahip olup, 60 mm'lik belirli kısmı çatlak başlangıç alanı olarak ayrılmıştır. Bu yapışmamış alan, istenen test konfigürasyonuna izin vermektedir. Şekil 3.8, çift konsol kiriş testi için laminat hazırlama sürecini göstermektedir. Laminat A) kesilmeden önce, B) su jeti ile kesildikten sonra ve C) kesilmiş numuneler çıkarıldıktan sonra gösterilmektedir.



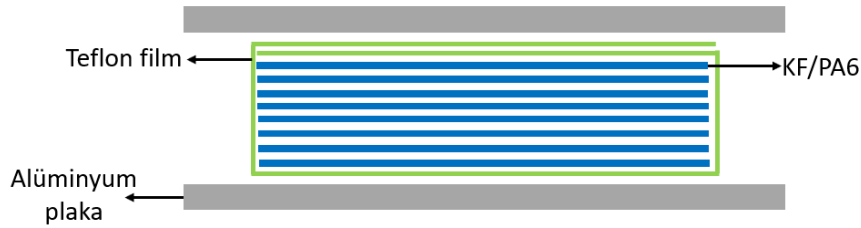
Şekil 3.9 Yüzey hazırlığı: a) zımparalama b) yüzey temizleme c) yapıştırma

Kesme işleminden sonra numune, teste hazırlanmak için yüzey hazırlığına tabi tutulur. Bu durumda, metal bloğu numuneye yapıştırmak için Permabond® 792 ultra hızlı süper

yapıştırıcı kullanılmıştır. Etkili bir yapışma sağlamak için, yapıştırma işleminden önce hem metal blok hem de KF/PA6 numune hafifçe G800 ile zımparalanmıştır. Şekil 3.9-a yüzey zımparalama işlemini göstermektedir. Zımparalama işleminden sonra, numunenin yüzeyi izopropanol ve metal yüzey ise aseton ile temizlenmiştir. Ultra hızlı yapıştırıcı işlemi sırasında yapıştırıcının numunenin yapıştırılmamış arayüzüne girmesini önlemek için bu arayüze Teflon film yerleştirilmiştir. Şekil 3-9-b Teflonun yerleştirilmesini göstermektedir. Yapıştırıcı sürüldükten sonra, test numunesi Şekil 3.9-c'de gösterildiği gibi stabiliteyi ve uygun yapışmayı sağlamak için bir F tipi mengene kullanılarak sıkıştırılmıştır. Yapıştırıcının tamamen sertleşmesi için yeterli zaman tanımak amacıyla yapıştırma işlemi sonrası 24 saat beklenilmiştir. Bu, yapıştırıcının düzgün bir şekilde kürlenmesini ve numune ile metal bloklar arasında güçlü bir bağ oluşmasını sağlamıştır.

3.3.3 Çekme Test Numunesi

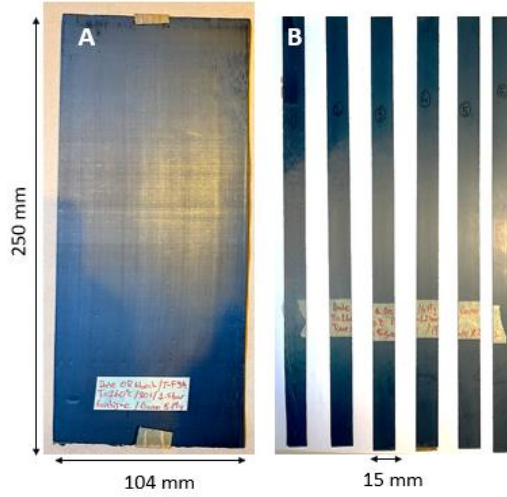
Çekme testi için numuneler 8 katlı KF/PA6 kullanılarak hazırlanmıştır. Laminatın ortalama kalınlığı 1 mm'dir.



Şekil 3.10 Çekme test laminatın temsili görüntüsü

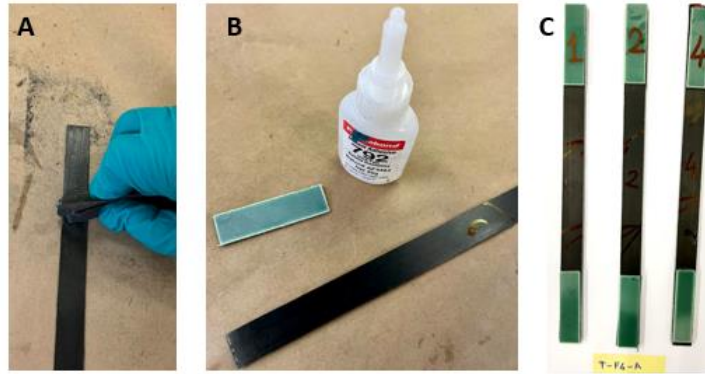
Bu hazırlık süreci şekil 3.10'de gösterilmiştir. Prosedürü adımları şu şekildedir:

1. Bantları belirlenen boyutlarda kesilir.
2. İstiflenmiş 8 kat KF/PA6, 0,2 mm kalınlığında Teflon Kapton® HN film ile sarılır.
3. İşlenmeye hazır olan bu malzeme iki alüminyum plaka arasına yerleştirilir ve sıcak prese aktarılır.



Şekil 3.11 a) Kesim öncesi laminat boyutu: uzunluk 250 mm, genişlik 104. b) Laminat 15 mm'lik 6 parçaya kesilir.

Numuneleri hazırlamak için, laminatı kesmek üzere giyotin kesme makinesi kullanılmıştır. Potansiyel kenar etkilerini en aza indirmek için numuneler plakanın orta bölgesinden seçilmiştir. Eş zamanlı olarak iki laminat üretilmiştir ve her laminattan üç numune seçilmiştir. Bu, test edilen her koşul için toplam altı numune anlamına gelmektedir. Numuneler Şekil 3.11-b'de gösterildiği gibi 1'den 6'ya kadar numaralandırılır. Numunelerin genişliği 15 mm ve uzunluğu 20 mm'dir.



Şekil 3.12 Çekme test numuneleri için hazırlık. a) Sekme için zımparalama bölgesi ve ardından yapıştırıcı için yüzey temizliği b) Permabond® 792 yapıştırıcı işlemi c)

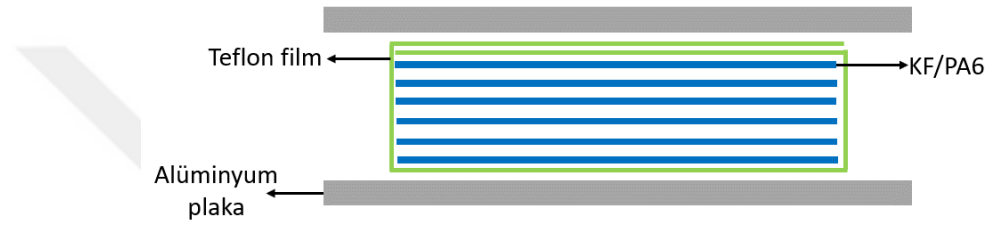
Hazırlanan numuneler

Kesme işleminden sonra numune, teste hazırlanmak için yüzey hazırlığına tabi tutulur. Bu durumda, kompozit sekme numuneye yapıştırmak için Permabond® 792 ultra hızlı yapıştırıcı kullanılmıştır. Etkili bir yapışma sağlamak için kompozit sekme aşındırıcı kumlamaya tabi tutulmuş ve kesilen numuneler G800 zımpara kağıdı ile hafifçe

zımparalanmıştır. Şekil 3.12-a yüzey zımparalama işlemini göstermektedir. Yüzey hazırlığından sonra, kompozit yüzeyler izopropanol ile temizlenmiştir. Şekil 3.12-b’de yapıştırma süreci gösterilmektedir. Yapıştırıcının tamamen sertleşmesi için yeterli zaman sağlamak için işleminden sonra 24 saat beklenmiştir. Bu, yapıştırıcının düzgün bir şekilde kürlenmesini ve numune ile kompozit tabla arasında güçlü bir bağ oluşmasını sağlamıştır. Şekil 3.12-c nihai hazırlanan numuneyi göstermektedir.

3.3.4 Üç Nokta Eğme Test Numunesi

Üç nokta eğme testi için numuneler 6 katlı KF/PA6 kullanılarak hazırlanmıştır. Laminatın ortalama kalınlığı 0,85 mm'dir.

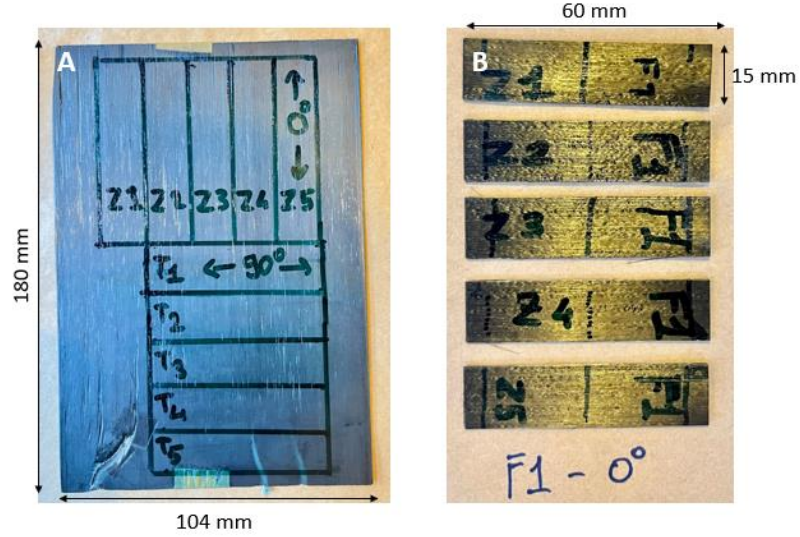


Şekil 3.13 Üç nokta eğme test laminatı temsili görüntüsü

Bu hazırlık süreci şekil 3.13’de gösterilmiştir. Prosedürü adımları şu şekildedir:

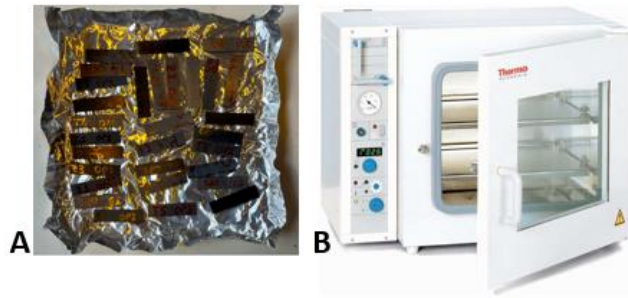
1. Bantları belirlenen boyutlarda kesilir.
2. İstiflenmiş 6 kat KF/PA6, 0,2 mm kalınlığında Teflon Kapton® HN film ile sarılır.
3. İşlenmeye hazır olan bu malzeme iki alüminyum plaka arasına yerleştirilir ve sıcak prese aktarılır.

Üç nokta eğme testi için, numuneler tipik olarak laminattan hem uzunlamasına (sıfır derece yönü) hem de enine (90 derece yönü) yönlerde kesilir. Numunelerin bu iki yönde kesilmesinin nedeni, farklı yükleme koşulları altında laminatın mekanik özelliklerini değerlendirmektir. Boyuna numuneler laminatın fiber hizalamasına paralel davranışı hakkında bilgi sağlarken, enine numuneler fiber hizalamasına dik performansını değerlendirir. Şekil 3.14 numune konumlarını göstermektedir.



Şekil 3.14 a) laminatın boyutu: uzunluk 180 mm, genişlik 104 mm b) sıfır derece numunelerin boyutu: uzunluk 60 mm, genişlik 15 mm

Numuneleri hazırlamak için, laminatı kesmek üzere giyotin kesme makinesi kullanılmıştır. Potansiyel kenar etkilerini en aza indirmek için numuneler plakanın merkez bölgesinden seçilmiştir. Laminat, hem sıfır derece (boylamasına) hem de 90 derece (enine) yönler için 60 mm uzunluğunda ve 15 mm genişliğinde numuneler halinde kesilmiştir. Laminattan her yönde beş numune kesilerek toplamda beş adet sıfır derece ve beş adet 90 derece numune elde edilmiştir. Numuneler Şekil 3.14-b'de gösterildiği gibi 1'den 5'e kadar numaralandırılmıştır. Z harfi sıfır derece numuneler için (Z1,Z2,Z3,Z4,Z5) ve T harfi enine numuneler için (T1,T2,T3,T4,T5) kısaltma olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.15 a) Nem alma işlemi için numunelerin hazırlanması b) Thermo Scientific™ vacuotherm vakumlu ısıtma ve kurutma fırını

Numuneler istenen boyutlarda kesildikten sonra standart gerekliliklere uygun olarak nem alma işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler, üst üste gelmemelerine dikkat edilerek

alüminyum folyo üzerine dikkatlice dizilmiş ve ardından nem alma işlemi için fırının içine yerleştirilmiştir. Şekil 3.15-a’da hazırlanan numuneleri göstermektedir. Bu işlemde Thermo Scientific™ Vacutherm Vakumlu Isıtma ve Kurutma Fırını kullanılmıştır. Şekil 3.15-b’de Thermo Scientific™ Vacutherm’i göstermektedir. Nem alma prosedürü, numunelerin 25°C sıcaklıkta tutulmasını ve 24 saat süreyle vakum uygulanmasını içermektedir. Bu kontrollü kurutma işlemi numunelerdeki nemi etkili bir şekilde uzaklaştırarak numunelerin uygun şekilde şartlandırılmasını ve sonraki testler için hazır olmasını sağlamıştır. Tutarlı bir sıcaklığın korunması ve vakum uygulanması sayesinde nem alma prosedürü, test sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini potansiyel olarak etkileyebilecek nem varlığının en aza indirilmesine yardımcı olmuştur.

3.3.5 Üretim Süreci ve Parametreler

Üretim sürecinde Fontijne ve Pinette preslerinde üç farklı kalıplama sıcaklığı kullanılmıştır: 220°C, 240°C ve 260°C. Her sıcaklık için üç farklı bekletme süresi seçilmiştir: 5 s, 15 s ve 30 s. Kalıplama işlemi sırasında, laminatlar seçilen bekletme süresi boyunca belirtilen işlem sıcaklığında tutulmuştur.

Tablo 3.2 Fontijne pres kullanılarak kama soyulma ve çekme test laminat üretim parametreleri (ön ısıtmasız)

Kalıp Sıcaklığı [°C]	Bekleme Süresi [s]	Soğutma Hızı [°C/dk]	Ön ısıtma	Sıkıştırma Basıncı [Bar]	Ekipman
220	5	Yavaş	Ön ısıtma yok	1.5	Fontijne Pres
	15				
	30				
240	5				
	15				
	30				
260	5				
	15				
	30				

Tablo 3.3 Fontijne pres kullanılarak kama soyulma ve çekme test laminat üretim parametreleri (ön ısıtmalı)

Kalıp Sıcaklığı [°C]	Bekleme Süresi [s]	Soğutma Hızı [°C/dk]	Ön ısıtma	Sıkıştırma Basıncı [Bar]	Ekipman
220	5	Yavaş	Ön ısıtma var	1.5	Fırın + Fontijne Pres
	15				
	30				
240	5				
	15				
	30				
260	5				
	15				
	30				

Tablo 3.4 Pinette pres kullanılarak kama soyulma ve çekme test laminat üretim parametreleri (ön ısıtmasız)

Kalıp Sıcaklığı [°C]	Bekleme Süresi [s]	Soğutma Hızı [°C/dk]	Ön ısıtma	Sıkıştırma Basıncı [Bar]	Ekipman
220	5	Hızlı	Ön ısıtma yok	1.5	Pinette pres
	15				
	30				
240	5				
	15				
	30				
260	5				
	15				
	30				

Tablo 3.5 Pinette pres kullanılarak kama soyulma ve çekme test laminat üretim parametreleri (ön ısıtmalı)

Kalıp Sıcaklığı [°C]	Bekleme Süresi [s]	Soğutma Hızı [°C/dk]	Ön ısıtma	Sıkıştırma Basıncı [Bar]	Ekipman
220	5	Hızlı	Ön ısıtma var	1.5	Fırın + Pinette pres
	15				
	30				
240	5				
	15				
	30				
260	5				
	15				
	30				

Fontijne presinin soğutma hızı, daha hızlı bir soğutma hızına sahip olan Pinnet presine ve daha yavaş bir soğutma hızına sahip olan otoklava kıyasla orta düzeyde kabul edilmektedir. Tüm laminatlar sabit 1.5 bar'lık basınç altında üretilmiştir.

Parametreler, kalıplama sıcaklığı, bekleme süresi, soğutma hızı, ön ısıtma dahil olmak üzere çeşitli üretim koşulları altında incelenmiştir. Bu parametre değişimlerinin etkilerini yakalamak için kapsamlı bir laminat üretim programı geliştirilmiştir.

Laminat üretim programı, kama soyulma ve çekme test numuneleri deney tasarımındaki (DOE) tüm varyasyonlar kapsamaktadır. Mevcut değişkenler ile 36 koşul oluşmaktadır. Kama soyulma ve çekme testi için Fontijne pres ile üretilen laminatların üretim parametreleri tablo 3.2 ve tablo 3.3'te , Pinette pres ile üretilen laminat üretim parametleri tablo 3.4 ve tablo 3.5'te gösterilmektedir.

Kama soyma ve çekme testi için;

Her koşul için 2 laminat üretilmiştir ve her bir test için toplam laminat sayısı 72'dir.

Her laminattan 3 numune test edilmiştir.

Her koşul için toplam 6 numune test edilmiştir.

Çift konsol kiriş ve üç nokta eğme testleri için yalnızca 5 saniyelik tek bir bekleme süresi koşulu dikkate alınmıştır. Bu karar, söz konusu test numuneleri için belirli bir koşula

odaklanmak amacıyla verilmiştir. ÇKK ve ÜNE testleri için üretilen laminatların Fontijne pres için üretim parametreleri Tablo 3.6 ve Pinette pres için üretim parametreleri tablo 3.7’de gösterilmektedir.

Tablo 3.6 Fontijne pres kullanılarak çift konsol kiriş ve üç nokta eğme test laminat üretim parametreleri

Kalıp Sıcaklığı [°C]	Bekleme Süresi [s]	Soğutma Hızı [°C/dk]	Ön ısıtma	Sıkıştırma Basıncı [Bar]	Ekipman
220	5	Yavaş	Ön ısıtma yok	1.5	Fontijne
240					
260					
220			Ön ısıtma var		Fırın + Fontijne
240					
260					

Tablo 3.7 Pinette pres kullanılarak çift konsol kiriş ve üç nokta eğme test laminat üretim parametreleri

Kalıp Sıcaklığı [°C]	Bekleme Süresi [s]	Soğutma Hızı [°C/dk]	Ön ısıtma	Sıkıştırma Basıncı [Bar]	Ekipman
220	5	Hızlı	Ön ısıtma yok	1.5	Pinette
240					
260					
220			Ön ısıtma var		Fırın + Pinette
240					
260					

Üç nokta eğme için:

- Her koşul için 1 laminat üretilmiştir ve toplam laminat sayısı 12'dir.
- Her plakadan 10 numune (5 adet 0° + 5 adet 90°) test edilmiştir.

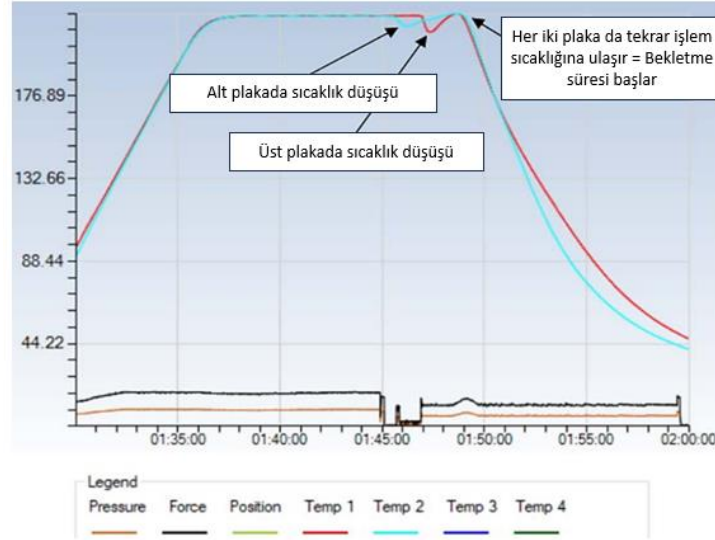
Çift konsol kiriş testi için:

- Her koşul için 1 plaka üretilmiştir ve toplam plaka sayısı 12'dir.

- Her laminattan 5 numune test edilmiştir.

Kalıplama sıcaklığı, kalıplama süresi, soğutma hızı ve basınç parametreleri sabit tutulurken, üretim sürecine ek bir adım olarak ön ısıtma eklenmiştir. Laminat, sıcak prese aktarılmadan önce bir fırına yerleştirilerek ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Ön ısıtmanın temel amacı, pres kalıplama işlemine başlamadan önce laminatın sıcaklığını poliamid 6'nın kristalleşme sıcaklığına yakın bir seviyeye yükseltmektir. Ön ısıtma, soğutma adımı sırasında oluşabilecek kristalleşme sorununu ele almak için süreçte kullanılmıştır. Soğutma sırasında oluşan kristal yapılar polimer zincirlerinin hareketliliğini engelleyebilir ve istenen malzeme özelliklerini elde etmek için önemli olan yeniden yönlendirme ve yeniden düzenleme yeteneklerini etkileyebilir. Ön ısıtma uygulayarak amaç, bu kristal yapıları eritmek, daha iyi polimer reptasyonunu teşvik etmek ve daha düzgün ve arzu edilen malzeme davranışına izin vermektir. Bu amaçla 160°C'lik bir ön ısıtma sıcaklığı belirlenmiştir. Laminat fırında tutulurken bu sıcaklık seviyesine ulaştığında, laminat içinde eşit bir sıcaklık dağılımının elde edilmesini sağlamak için 10 dakikalık ek bir süreye izin verilmiştir.

Ön ısıtmanın olduğu durum: Fırın 160°C'ye ayarlanmış ve bu sıcaklıkta sabit beklemektedir. Fırına istiflenme işlemi tamamlanan bantlar basınç uygulanmadan ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Bunun için preslerin yanında bulunan harici fırınlar kullanılmıştır. Malzeme istenen hedef sıcaklığa ulaşana kadar fırında bekletilmiş yani ısıtılmıştır. Malzeme 160°C'ye ulaştığında ve yeterli süre beklendikten sonra ön ısıtılan bantlar üretim sıcaklığında hazır bekleyen (220-240-260 °C) prese aktarılmıştır. Öte yandan, ön ısıtmanın olmadığı durum istiflenmiş bant ısıtılmış pres kalıpları kullanılarak doğrudan basınç altında ısıtılmıştır. Bu koşulda ayrı bir ön ısıtma adımı uygulanmamıştır.



Şekil 3.16 Fontijne presi tarafından kaydedilen numune için sıcaklık-zaman eğrisi (5s tutma süresi). Temp 1 presin üst plakasını, Temp 2 presin alt plakasının sıcaklığını temsil etmektedir.

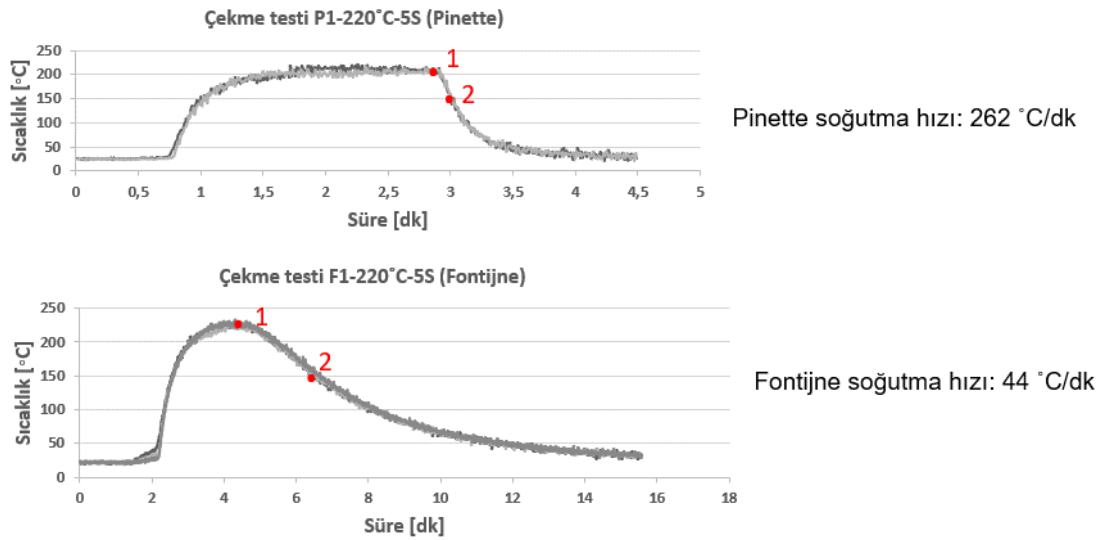
Şekil 3.16 Fontijne pres tarafından kaydedilen plaka sıcaklıklarını göstermektedir. Laminat ve alüminyum plaka Fontijne presine kalıplarının arasına yerleştirildiğinde, alt plakada (Temp2) başlangıçta bir sıcaklık düşüşü olur. Bu düşüş, laminat ile yerleştirilen alüminyum plakanın ortam sıcaklığında yani pres plakasına göre soğuk olmasından kaynaklanmaktadır. İlk temasın presin alt plakasıyla olması nedeniyle bu düşüş meydana gelir. Fontijne presi kapatıldığında, üst plakada (Temp1) daha sonra bir sıcaklık düşüşü olur. Bu düşüş, üst plakanın alüminyum plaka ile temas halinde olması ve ısı kaybetmesi nedeniyle gerçekleşir. Fontijne presinin her iki plakası da tekrar istenen işleme sıcaklığına ulaştıktan sonra bekletme süresi başlar. Belirtilen bekletme süresi tamamlandığında, pres sıcaklıkları düşürülerek soğutma işlemi başlatılır. Bu süreç boyunca sabit basınç olan 1.5 bar korunur. Soğutma, laminat malzemenin sıcaklığı 30°C'nin altına düşene kadar devam eder. Bu noktada, pres plakaları açılır ve laminat dikkatlice alüminyum plakadan çıkarılır.

Pinette presi yüksek bir soğutma hızı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Her zaman oda sıcaklığında bulunan ek bir soğutma bölümü bulunur. İstenen bekletme süresi tamamlandığında, sıcak pres plakaları açılır ve sıcak laminat hızlıca alt kademede bulunan soğuk plakalar arasına aktarılır. Soğutma işlemi aynı basınç altında, ancak soğuk plakaların yardımıyla çok daha hızlı gerçekleşir.

Bu çalışmada, laminatların farklı sıcaklıklarda üretimi sırasında sıcaklık verilerini kaydetmek için bir sıcaklık veri kaydedici kullanılmıştır. Bununla birlikte, sıcaklık veri

kaydedicisinin kullanılmadığı durumlarda, üretim programından elde edilen mevcut verilere dayanarak yaklaşık tahminler yapılmıştır. Örneğin, 220 °C kalıp sıcaklığı ve 5 saniye bekletme süresi içeren üretim, sıcaklık veri kaydedici kullanılarak kaydedilmiş ve işlem sırasında doğru sıcaklık bilgisi sağlanmıştır. Kalıp sıcaklığı 220 °C ve bekletme süresi 15 saniye olan üretim durumunda, sıcaklık veri kaydedicisi kullanılmadığından, bekletme süresi daha önce kaydedilen verilere dayanarak 10 saniye daha artırılmıştır.

Bir laminattaki reçine kristalleşme sıcaklığına ulaştığında, kristalit oluşumunun durduğu varsayılır. Poliamid 6 (PA 6), DTK analizi ile belirlendiği üzere, kristalleşme sıcaklık aralığının tipik olarak 200 °C civarında başladığı ve 150 °C'de sona erdiği gözlemlenmektedir. Bu nedenle, laminatın soğuma hızı hesaplanırken, kristalleşme davranışında önemli değişikliklerin meydana geldiği bu aralıkta olduğu için 150 °C'ye kadar olan sıcaklık aralığına özellikle dikkat edilir. Bu sıcaklık aralığında soğutma hızı doğru bir şekilde belirlenebilir ve PA 6 reçinesinin kristalleşme süreciyle ilişkili olarak analiz edilebilir. Şekil 3.17'te her iki preste ön ısıtmanın olmadığı durum için sıcaklık veri grafiği gösterilmektedir.



Şekil 3.17 Pinette ve Fontijne pres için veri kaydedici sıcaklık grafiği

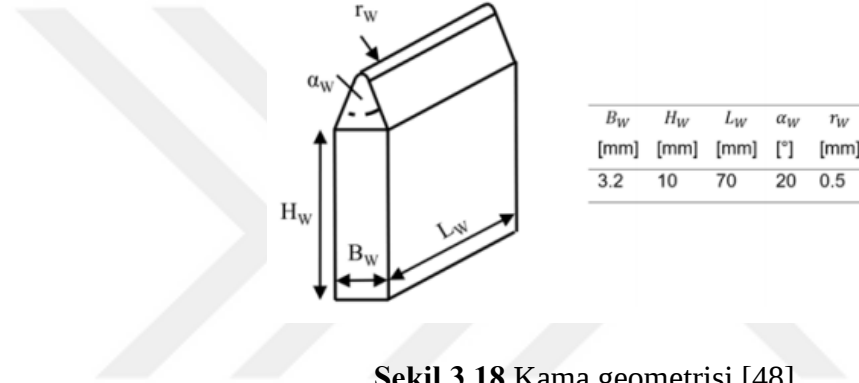
Nokta 1, soğutma işleminin başlangıcını, özellikle de malzemenin hedef sıcaklıktayken bekletme süresinin sonunu temsil eder. Nokta 2, malzemenin 150 °C'ye ulaştığı sıcaklığı gösterir ve PA 6 için kristalleşme sıcaklık aralığının sonunu işaret eder. Soğutma hızını hesaplamak için Nokta 1 ve Nokta 2 arasındaki sıcaklık değişimi ölçülür ve ilgili zaman aralığına dikkate alınarak hesaplanır. Bu hesaplama, malzemenin işleme sıcaklığından kristalleşme sıcaklık aralığının sonuna kadar soğuma hızı hakkında bilgi vermektedir.

3.4 Mekanik Testler

3.4.1 Kama Soyulma Testi

Deney düzeneği, malzemeye herhangi bir zarar vermeden istikrarlı bir delaminasyon ilerlemesi sağlayan Şekil 3.18'de gösterilen geometriyi kullanılmıştır.

Deney düzeneği 6082 alüminyumdan yapılmış bir çerçeve ve dubleks 2205 paslanmaz çelikten yapılmış bir kamadan oluşmaktadır. Bu malzemeler, özellikleri ve deney düzeneğindeki uygunlukları nedeniyle özellikle seçilmiştir. 6082 alüminyum yapısal stabilite ve dayanıklılık sağlarken, dubleks 2205 paslanmaz çelik mükemmel mukavemet ve korozyon direnci sunmaktadır.



Şekil 3.18 Kama geometrisi [48]

Çalışmada kullanılan kama soyma test düzeneği Şekil 3.19'de gösterilmektedir. Test için kullanılan numuneler dört katlı CF/PA6 ile üretilmiştir.

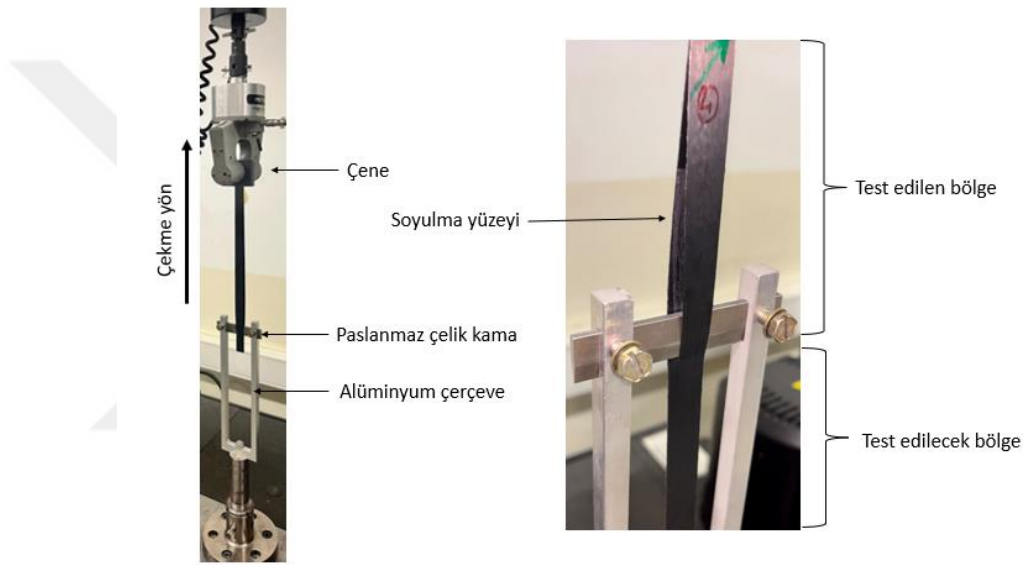
Bu çalışmada, kama ikinci ve üçüncü kat arasındaki ara yüzeyden 60 mm/dk hızla çekilmiştir. Satheesh ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışma gibi önceki çalışmaların farklı çekme hızlarının etkisini araştırdığını belirtmek gerekir. Özellikle, 30 ve 45 mm/dk çekme hızlarını karşılaştırmışlardır [49]. Elde ettikleri bulgular, çekme hızındaki artışın kama soyulma mukavemetinde artışa yol açtığını göstermiştir.

Clancy ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda, kama soyma testleri 20 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir [50]. Hulcher ve arkadaşları ise kama soyma testlerini 25 mm/dk çekme hızında gerçekleştirmişlerdir.

Stokes ve arkadaşları, ilgili çalışmalarında 60 mm/dk çekme hızı kullanmışlardır [51]. Schäfer, 15 mm/dk ile 60 mm/dk arasında değişen çekme hızlarıyla ön testler gerçekleştirmiş ve daha yavaş testlerin elde edilen sonuçlar açısından herhangi bir avantaj

sağlamadığını tespit etmiştir. Bu nedenle, 60 mm/dk'lık bir çekme hızının deneysel amaçları için yeterli olduğu sonucuna varmışlardır [18], [48].

Deney düzeneğinde, kama soyulma testi sırasındaki kuvvet, test boyunca uygulanan kuvvetin doğru bir şekilde ölçülmesini 1kN yük hücresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test ilerlemesini gösteren çapraz kirişin yer değiştirmesi Instron 4467 Çekme Test Cihazı tarafından kaydedilmiştir. Bu test cihazı, çekme testleri yapmak için özel olarak tasarlanmıştır ve çapraz kirişin yer değiştirmesini 10Hz hızında kaydetme özelliği vardır. Bu yüksek örnekleme frekansı, test ilerlemesinin ve numunenin davranışının ayrıntılı olarak izlenmesini ve analiz edilmesini sağlar.



Şekil 3.19 Kama soyulma test düzeneği

Şekil 3.20’de deney düzeneğinde kullanılan Instron 4467 Çekme Test Cihazı gösterilmektedir.

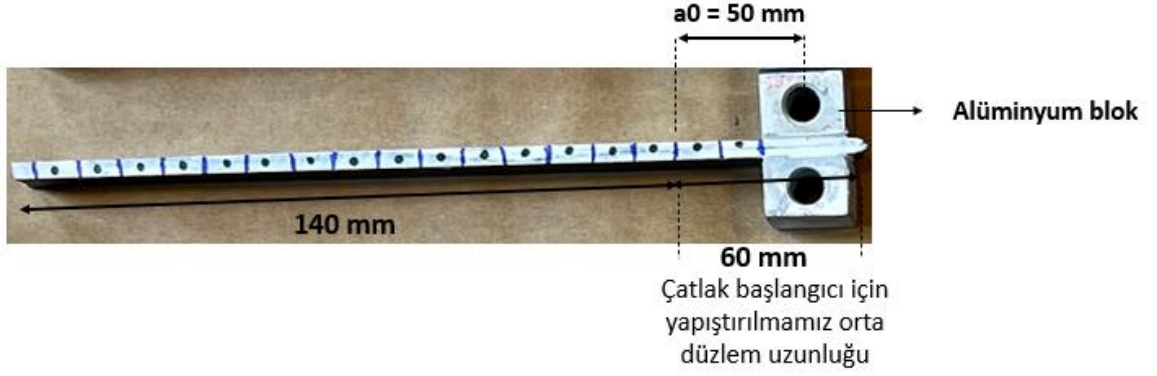


Şekil 3.20 Instron 4467

3.4.2 Çift Konsol Kiriş Testi

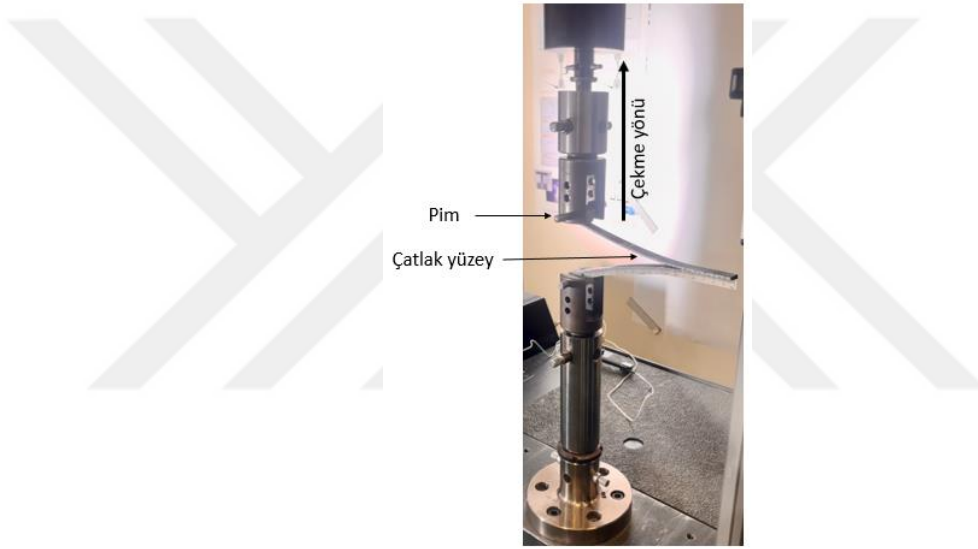
Çift konsol kiriş (ÇKK) testi 1kN yük kapasitesine sahip bir Instron 5567 üniversal test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numune boyutları ASTM D5528 standardına göre, 15 mm × 200 mm boyutlarında ve 60 mm'lik bir ön çatlak uzunluğu ile oluşturulmuştur. ÇKK testinde numune kalınlığı için önerilen aralık genellikle 3 ila 5 mm arasındadır. Bu çalışmada, laminat 32 kat CF/PA6'dan oluşmuş ve numunenin ortalama kalınlığı 4,5 mm olarak ölçülmüştür.

ÇKK testinde numuneler alüminyum bloklar kullanılarak test makinesine bağlanır. Alüminyum bloklar, test sırasında ÇKK numunelerini güvenli bir şekilde yerinde tutmak ve uygulanan yükün numune genişliği boyunca eşit bir şekilde dağılmasını sağlamak için tasarlanmıştır. Tipik olarak ÇKK numunelerinin boyutlarına ve geometrisine uyacak şekilde işlenir veya üretilir, böylece numune ile doğru hizalama ve temas sağlanır. Bloğu numuneye yapıştırmak için Permabond® 792 ultra hızlı yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcının tamamen sertleşmesi için yeterli süreyi sağlamak üzere 24 saat beklenmiştir. Şekil 3.21 ÇKK test numunesini göstermektedir. Test sırasında kolay tanımlama için numunenin uzun bir yüzü beyaz renk ile boyanmış ve üzerine mavi bir kalem kullanılarak 10 mm'lik mesafeler işaretlenmiştir. Ayrıca, çift doğrulama amacıyla testten hemen önce numunenin aynı tarafına bir cetvel kağıdı yapıştırılmıştır.



Şekil 3.21 ÇKK test numunesi

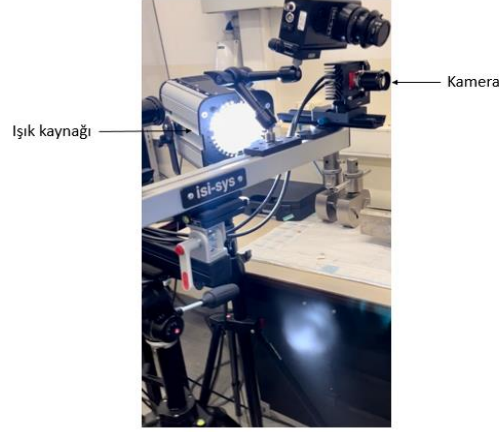
Çalışmada kullanılan ÇKK test düzeneği Şekil 3.22'te gösterilmektedir.



Şekil 3.22 ÇKK test düzeneği

ÇKK testinde numune, Instron 5567 test cihazı kullanılarak 5 mm/dk'lık sabit bir çapraz kafa hızı ile test edilmiştir. Bu kontrollü yükleme hızı, numuneye tutarlı bir kuvvet uygulanmasını sağlayarak merkez hattı boyunca çatlak ilerlemesinin doğru bir şekilde gözlemlenmesini sağlamıştır.

Çatlak ilerlemesi gözle kolayca görülemediğinden, çatlak ilerlemesinin ayrıntılı görüntülerini yakalamak için yüksek çözünürlüklü bir kamera kullanılmıştır. Bu, test boyunca çatlak uzunluğunun doğru bir şekilde kaydedilmesine ve ölçülmesine olanak sağlamıştır. Kamera, DCB deneyi sırasında çatlak davranışının daha fazla analizi ve değerlendirilmesi için değerli görsel veriler sağlamıştır. 5 Mp kamera kurulumu Şekil 3.23'da gösterilmektedir.



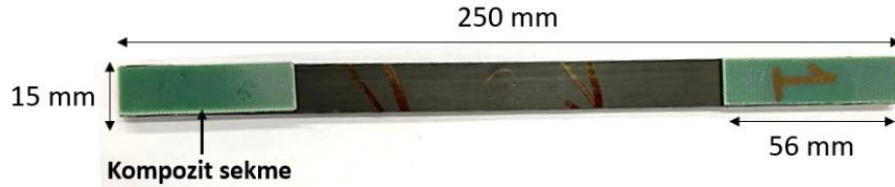
Şekil 3.23 5 MP kamera

3.4.3 Çekme Testi

Çekme deneyi, ZwickRoell Z 100 test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ASTM D3039 standardına göre, çekme testi için numune boyutları 15 mm × 250 mm olarak belirlenmiştir.

Laminat 8 kat KF/PA6'dan oluşmakta ve numunenin ortalama kalınlığı 1 mm olarak ölçülmüştür.

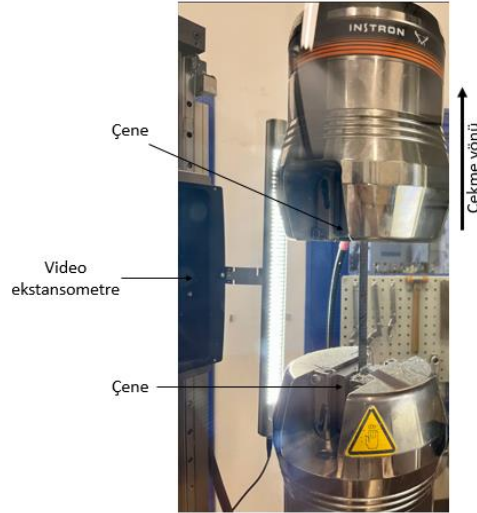
Tek yönlü malzemeleri test etmek için sekmelerin kullanılması önerilir. Numuneye yapıştırılan tırnaklar, yükün kavrama alanı boyunca eşit olarak dağıtılmasına yardımcı olur ve stres konsantrasyonlarını en aza indirir. Bu uygulama, kavrama arayüzünde erken arıza riskini azaltır ve güvenilir test sonuçları sağlar. Numuneyi kavramak için kullanılan uzatılmış bölümler olan sekme uzunlukları 56 mm'dir. Çekme testi numunesi Şekil 3.24'de gösterilmektedir.



Şekil 3.24 Çekme test numunesi

Gerçekleştirilen çekme testinde numune, Instron ZwickRoell Z100, 100 kN test cihazı kullanılarak 2 mm/dk'lık sabit bir çene yer değiştirme hızına tabi tutulmuştur.

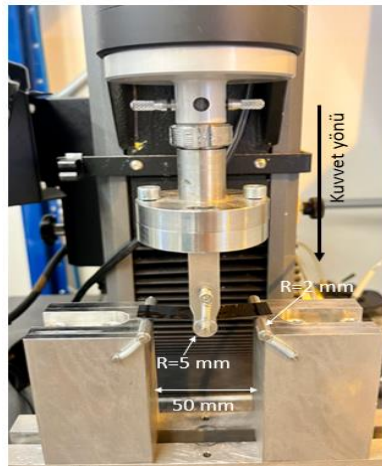
Uzama ölçümleri, test makinesindeki video ekstansometre kullanılarak elde edilmiştir. Test sırasında numunenin gerilim-gerinim verileri kaydedilmiştir. Çalışmada kullanılan Çekme testi düzeneği Şekil 3.25'de gösterilmiştir.



Şekil 3.25 Çekme testi düzeneği

3.4.4 Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testi deneyi, 1 kN yük kapasitesine sahip bir Instron 5943 test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test için numune boyutları 15 mm × 60 mm olarak belirlenmiş ve laminat için 6 kat CF/PA6 kullanılarak 0,85 mm'lik bir numune kalınlığı elde edilmiştir. Doğru testi sağlamak için, açıklık-kalınlık oranı 60:1 olarak ayarlanmış ve eğme testi sırasında numune için uygun destek sağlanmıştır. Üç nokta eğme testi, 50 mm açıklık uzunluğu, 5 mm yükleme burun yarıçapı ve 2 mm yarıçapında iki destek ile gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme testi düzeneği Şekil 3.26'da gösterilmektedir.



Şekil 3.26 Üç nokta eğme test düzeneği

Bu bölümde, dört farklı test yönteminin sonuçları ve tartışmaları sunulmaktadır. Bu testler kama soyulma, çift konsol kiriş, çekme ve üç nokta eğme testidir. Testler sonucu tek yönlü karbon fiber PA6 malzemesinin proses-performans ilişkisini anlamaya çalışılmıştır.

Bu test yöntemleri, tek yönlü karbon fiber PA6 malzemesinin proses-performans ilişkisini bulmak için seçilmiştir. Termoplastik bantların yapışma ve interlaminar bağlanma mukavemetini değerlendirmek için.

Kama soyulma testi, soyulma mukavemetini ve bağlı arayüzün mod I kırılma davranışını değerlendirmek için yapılmıştır. Test sonuçları, konsolide laminatın kompozit orta düzleminin soyulma kuvvetlerine karşı koyma kabiliyeti hakkında fikir vermektedir.

Çift konsol kiriş testi, bantların mod I tabakalar arası kırılma tokluğunu işleme koşullarının bir fonksiyonu olarak değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Bu test yöntemi, kritik enerji salınım oranının ve direnç eğrisinin (R-eğrisi) belirlenmesini sağlayarak bandın mod I yüklemesinde delaminasyona karşı direnci hakkında bilgi verir.

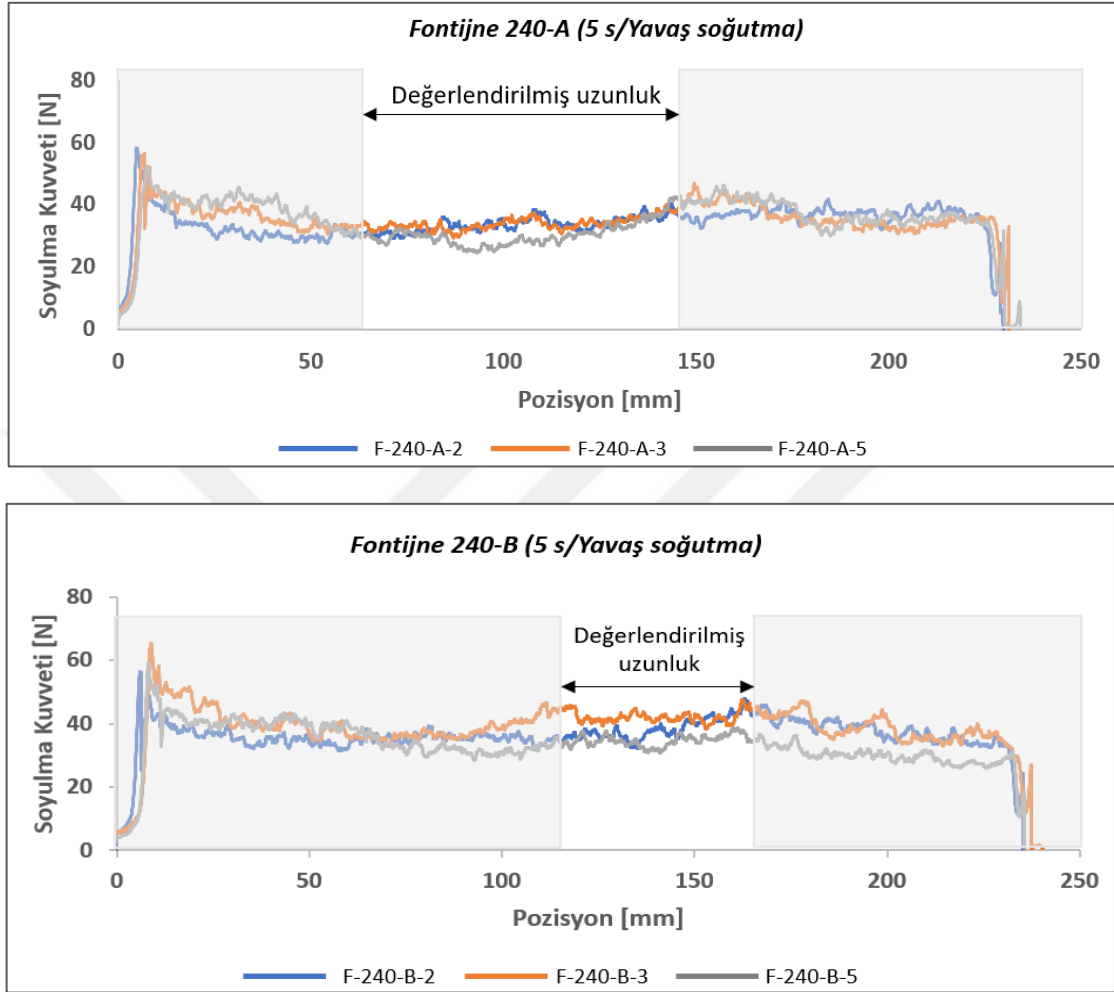
Çekme testi, bantların nihai çekme mukavemetini ve kopma anındaki uzamasını ölçmek için kullanılmıştır. Bu test, genel mekanik özellikler ve bandın çekme kuvvetlerine dayanma kabiliyeti hakkında bir gösterge sağlar.

Üç nokta eğme testi, polimer matrisli kompozit malzemelerin mukavemet, sertlik ve yük davranışı dahil olmak üzere eğilme özelliklerini belirlemek için kullanılır.

4.1 Kama Soyulma Test Sonuçları

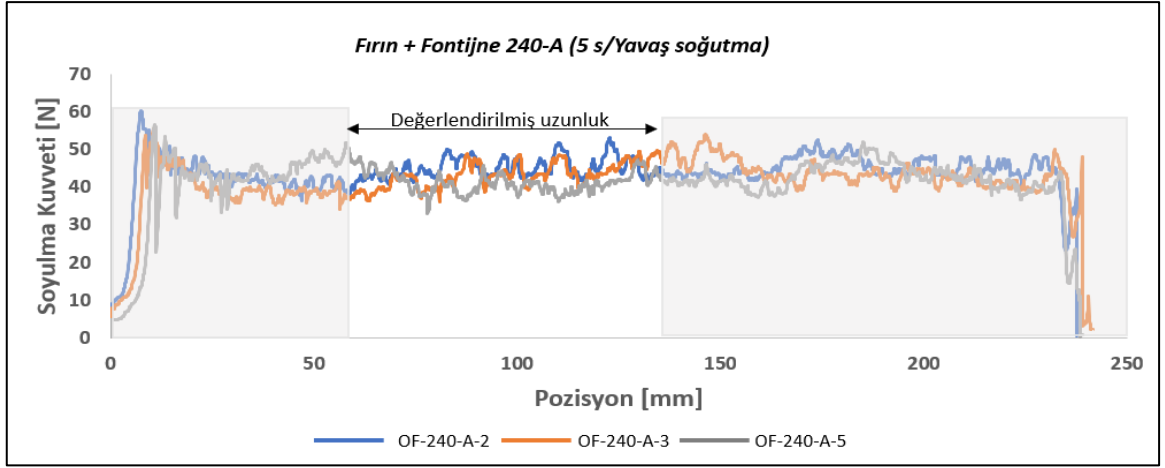
Kama soyulma testinin analizi sırasında, soyulma kuvveti kararlı bir duruma ulaştıktan sonra değerlendirme için belirli bir bölge yani uzunluk seçilmiştir. Bu uzunluk, analizin soyulma kuvvetinin tutarlı ve güvenilir bir ölçümünü sağlamak için yapılmıştır. Bu uzunluğun her numune için farklı değerlere sahip olduğu görülmektedir. Kontrollü ve standartlaştırılmış bir bölgede soyulma kuvvetinin belirlenmesine olanak tanıyarak farklı numuneler ve test koşulları arasında güvenilir karşılaştırmalar yapılmasını sağlar.

KST için, her koşul için aynı anda iki laminant üretilmiştir. Şekil 4.1’de Fontijne pres 240°C işlem sıcaklığı olan F240-A ve F240-B numuneleri için grafikteki değerlendirilen uzunluk bölgesini göstermektedir.

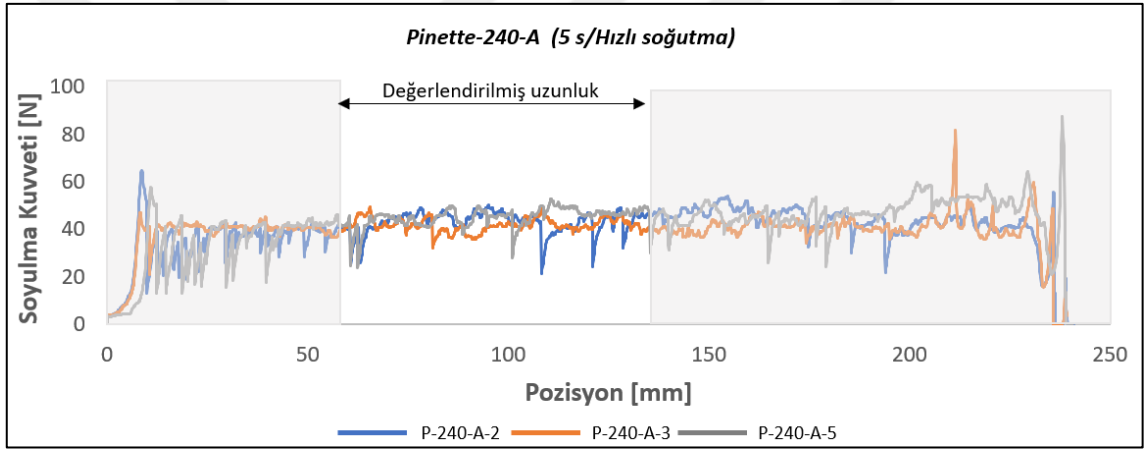


Şekil 4.1 Fontijne pres ile üretilen F-240-A ve F-240-B numuneleri (240°C, 5s, yavaş soğutma) için değerlendirilmiş bölgeyi gösteren soyulma kuvveti – pozisyon grafiği.

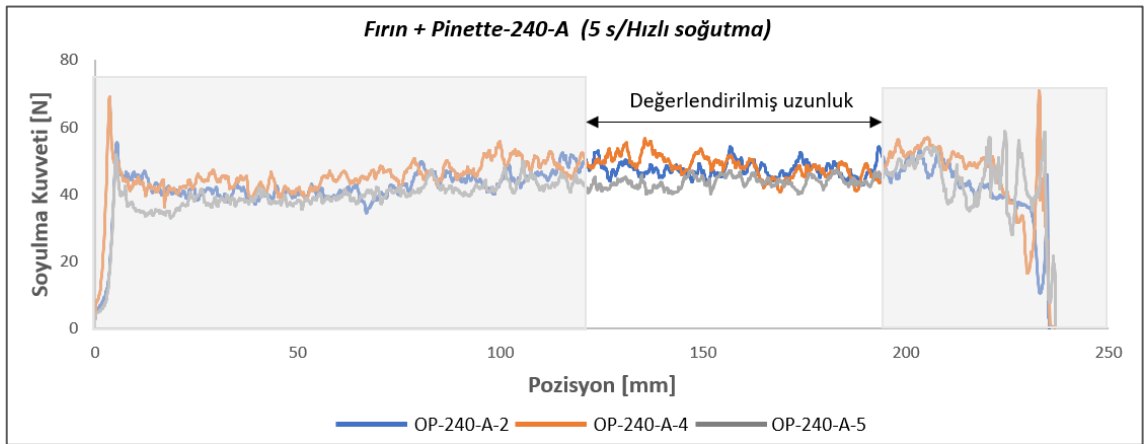
Şekil 4-2, Şekil 4-3 ve Şekil 4-4 sırasıyla Fırın + Fontijne pres, Pinette pres ve Fırın + Pinette pres için tipik kuvvet – pozisyon grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.2 Fırın + Fontijne pres ile üretilen OF-240-A (240°C, 5s, yavaş soğutma) numunesi için değerlendirilmiş bölgeyi gösteren soyulma kuvveti – pozisyon grafiği.

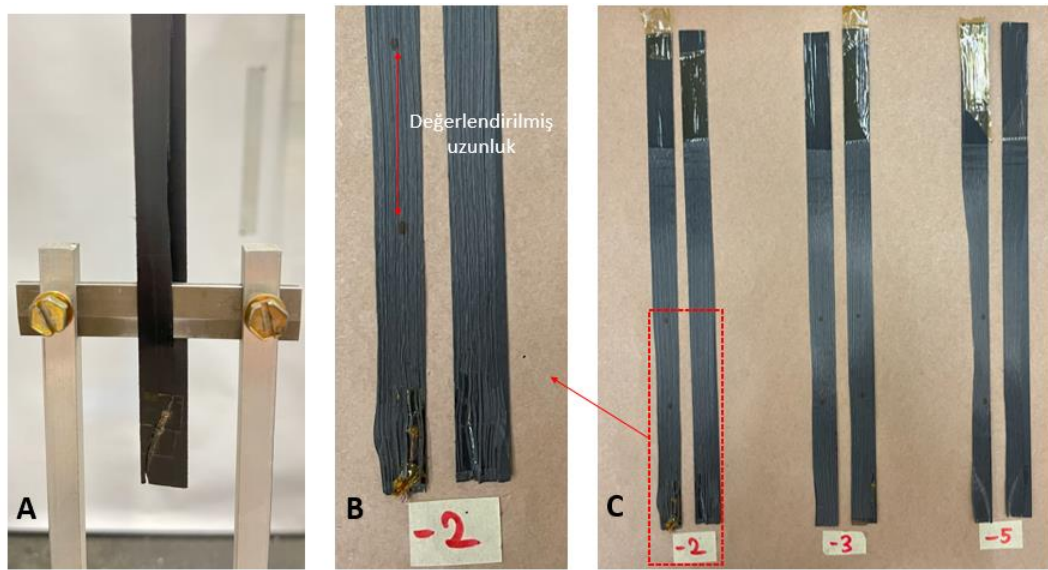


Şekil 4.3 Pinette pres ile üretilen P-240-A (240°C, 5s, hızlı soğutma) numunesi için değerlendirilmiş bölgeyi gösteren soyulma kuvveti – pozisyon grafiği.



Şekil 4.4 Fırın + Pinette pres ile üretilen P-240-A (240°C, 5s, hızlı soğutma) numunesi için değerlendirilmiş bölgeyi gösteren soyulma kuvveti – pozisyon grafiği.

Testteki değerlendirme uzunluğu sabit bir değer olarak önceden belirlenmemiştir. Bunun yerine, daha doğru analiz için test verilerinin belirli bölgelerini hariç tutmak için seçici bir yaklaşım benimsenmiştir. Çatlak başlangıcının etkisini ortadan kaldırmak için, testin başlangıcındaki belirli bir uzunluk atılmıştır. Bu karar, Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, ilk 50-60 mm içinde çatlak ilerlemesinde kararsızlıkların gözlemlenmesine dayanıyordu. Bu kısmın hariç tutulmasıyla analiz, testin daha güvenilir ve tutarlı bir bölgesine odaklanmıştır. Benzer şekilde, uçların etkisini en aza indirmek için testin sonundaki belirli bir uzunluk hariç tutulmuştur. Bu belirli bölge, termokuplların yerleşimi ve potansiyel üretim etkileri gibi hususlar nedeniyle seçilmemiştir.



Şekil 4.5 a) Kama soyulma testi sırasında uç kısmı b) Değerlendirilmiş uzunluk
c) Kama soyma testinden sonra numunelerin arayüzeyleri

OF8A-2 numunesi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Şekil 4.5-a,b'de uç noktadaki termokupl izleri gözlemlenebilir. Bu bölgeler, doğru ölçümleri sağlamak için test değerlendirmesinin dışında tutulmuştur. Testin ardından, sabit bir alan belirlenir ve değerlendirilecek mesafe buna göre işaretlenir. Bu işaretli noktalar arasındaki numunenin genişliği genellikle beş noktadan ölçülür ve ortalama genişlik tekrar hesaplanır. Stabil alandaki soyulma mukavemeti hesaplaması daha sonra bu ortalama genişliğe göre belirlenir.

Bu çalışmanın bir parçası olarak 36 farklı üretim koşulu üzerinde kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Güvenilir ve kapsamlı bulgular elde etmek amacıyla her koşul için altı numune test edilmiştir. Ancak, bant genişliğindeki sınırlamalar nedeniyle, tek bir laminattan altı numunenin test edilmesinin uygun sonuçlar vermeyeceği belirlenmiştir.

Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için her koşul için iki laminat üretilmiş ve her laminatın merkez bölgesinden üç numune seçilmiştir. Bu titiz yaklaşım, toplam 211 numunenin dikkatle incelenmesi ve analiz edilmesiyle sonuçlanmıştır.

Tablo 4.1 Fırın + Fontijne pres kama soyulma testi sonuçları.

Laminat No	Kama Soyulma Dayanımı [N/mm]	Standart Sapma	Test edilen numune sayısı	Tüm genişlikte kesilen numune sayısı
OF220-5-A	0,24	0,27	3	3
OF220-15-A	0,19	0,05	2	2
OF220-15-B	0,16	0,02	3	3
OF220-30-A	0,06	0,02	3	3
OF220-30-B	0,28	0,21	3	3
OF240-5-A	3,13	0,14	3	0
OF240-5-B	2,63	0,42	3	0
OF240-15-A	2,87	0,29	3	0
OF240-15-B	2,86	0,15	3	0
OF240-30-A	2,68	0,06	3	2
OF240-30-B	2,60	0,11	2	0
OF260-5-A	2,51	0,05	3	0
OF260-5-B	2,95	0,23	3	0
OF260-15-A	2,76	0,14	3	0
OF260-15-B	2,85	0,10	3	1
OF260-30-A	2,65	0,14	3	0

Bir sonraki bölümde, elde edilen test sonuçlarının ayrıntılı bir analizi sunulmaktadır. Tablo 4.1-2-3-4 kama soyulma test sonuçlarını göstermektedir. Kama soyulma dayanım değeri laminat numunelerin ortalama değerini göstermektedir.

Tablo 4.2 Fontijne pres kama soyulma testi sonuçları

Laminat No	Kama Soyulma Dayanımı [N/mm]	Standart Sapma	Test edilen numune sayısı	Tüm genişlikte kesilen numune sayısı
F220-5-A	1,46	0,11	3	2
F220-5-B	1,18	0,13	5	0
F220-15-A	1,83	0,19	3	0
F220-15-B	1,57	0,12	3	0
F220-30-A	1,75	0,21	3	0
F220-30-B	1,50	0,11	3	0
F240-5-A	3,08	0,77	3	2
F240-5-B	2,85	0,31	3	3
F240-15-A	2,67	0,16	3	2
F240-15-B	2,81	0,17	3	3
F240-30-A	3,27	0,27	3	2
F240-30-B	2,87	0,15	3	3
F260-5-A	3,10	0,14	3	3
F260-5-B	3,40	0,36	3	3
F260-15-A	3,01	0,05	2	2
F260-15-B	3,44	0,11	3	3
F260-30-A	3,08	0,26	3	3

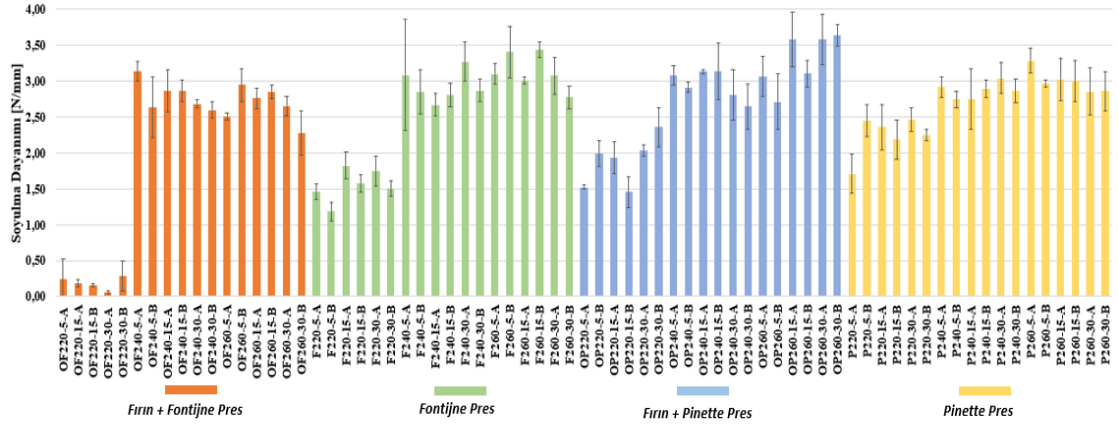
Tablo 4.3 Fırın + Pinette pres kama soyulma testi sonuçları

Laminat No	Kama Soyulma Dayanımı [N/mm]	Standart Sapma	Test edilen numune sayısı	Tüm genişlikte kesilen numune sayısı
OP220-5-A	1,52	0,02	3	3
OP220-5-B	1,99	0,18		1
OP220-15-A	1,93	0,22		2
OP220-15-B	1,46	0,22		0
OP220-30-A	2,03	0,07		3
OP220-30-B	2,36	0,27		0
OP240-5-A	3,08	0,14		0
OP240-5-B	2,91	0,07		0
OP240-15-A	3,13	0,03		1
OP240-15-B	3,14	0,40		0
OP240-30-A	2,81	0,35		2
OP240-30-B	2,64	0,32		3
OP260-5-A	3,07	0,28		3
OP260-5-B	2,71	0,39		0
OP260-15-A	3,58	0,38		0
OP260-15-B	3,11	0,18		3
OP260-30-A	3,58	0,35		1

Tablo 4.4 Pinette pres kama soyulma testi sonuçları

Laminat No	Kama Soyulma Dayanımı [N/mm]	Standart Sapma	Test edilen numune sayısı	Tüm genişlikte kesilen numune sayısı
P220-5-A	1,71	0,27	3	0
P220-5-B	2,46	0,22		2
P220-15-A	2,36	0,32		0
P220-15-B	2,19	0,27		0
P220-30-A	2,47	0,17		0
P220-30-B	2,25	0,08		0
P240-5-A	2,92	0,15		1
P240-5-B	2,75	0,11		0
P240-15-A	2,75	0,42		0
P240-15-B	2,90	0,12		2
P240-30-A	3,04	0,21		0
P240-30-B	2,86	0,17		1
P260-5-A	3,29	0,17		1
P260-5-B	2,97	0,05		1
P260-15-A	3,03	0,29		3
P260-15-B	3,00	0,29		2
P260-30-A	2,86	0,33		2

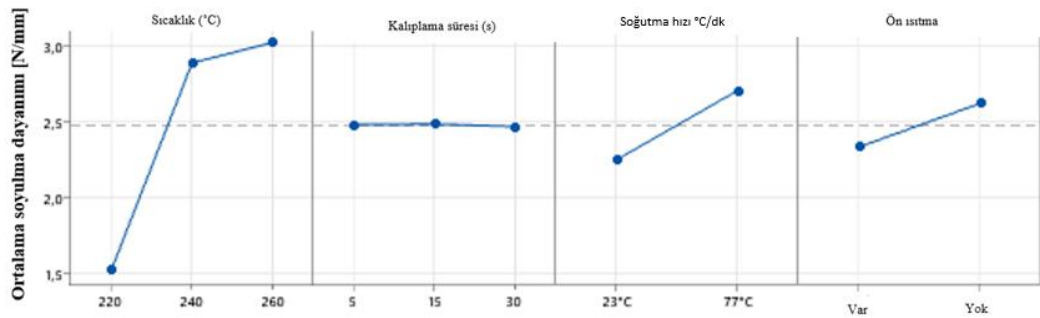
Test sonuçlarına göre, tüm genişlikte kesiminin gözlemlenme oranı Fırın+Fontijne, Fontijne, Fırın+Pinnette ve Pinette presleri için sırasıyla %38, %38, %57 ve %70'tir. Tüm genişlikte kesim test öncesi genişlik değerleri değişmediği için kararlı durumdaki soyulma kuvveti için genişlik tekrar ölçülmemiştir. Şekil 4.6 tüm koşullar için kama soyulma test sonuçlarını göstermektedir. Sütunlardaki farklı renk grupları, kullanılan pres tipi ve ön ısıtma koşulundaki varyasyonları temsil etmektedir.



Şekil 4.6 Kama soyulma test sonuçları. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.

Test sonuçların analizi, laminat üretim koşullarını incelemek için yapılandırılmış bir deney tasarımı (DOE) yöntemi ile parametrik değerlendirme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DOE yöntemi, ilgili sonuçlar üzerindeki etkileri araştırmak için parametrelerin ve seviyelerin sistemli bir şekilde değiştirilmesini sağlamıştır. Bu çalışmada, Minitab 21 istatistik yazılımı kullanılarak farklı faktörlerin etkileri incelenmiştir. Analiz, sonuçların etkilerini değerlendirmek için sıcaklık, kalıplama süresi, soğutma hızı ve ön ısıtma başlıkları altında gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirme sayesinde, laminat üretimi için en uygun koşulların belirlenmesi ve faktörler arasındaki etkileşimlerin anlaşılması mümkün olmuştur. Böylelikle, elde edilen sonuçlarla içgörüler elde edilmiştir.

Şekil 4.7'de soyulma dayanımı ana etkilerin grafikleri gösterilmektedir.



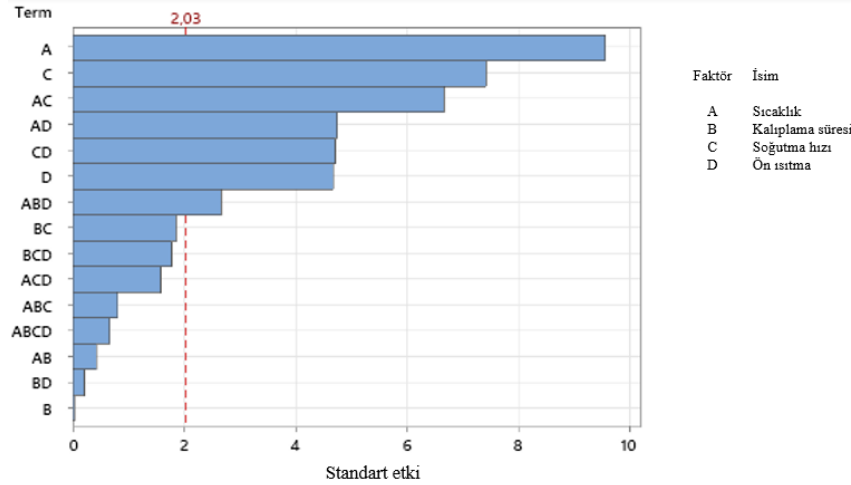
Şekil 4.7 Soyulma dayanımı için ana etki grafikleri

- Sıcaklık: Soyulma dayanımı sıcaklık ile pozitif bir korelasyon göstermekte ve yukarı yönlü bir eğilim sergilemektedir. Soyulma dayanımı 220°C ile 240°C

arasında hızlı ve önemli bir artış gösterirken, 240-260°C'lik sonraki sıcaklık aralığında soyulma direncinde daha yavaş ve daha az belirgin bir artış görülmektedir. ($p < 0,05$)

- Kalıplama Süresi: Test edilen kalıplama süresi aralığında (5-30 saniye) zamanın soyulma dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermektedir. ($p > 0,05$)
- Soğutma hızı: Daha yavaş soğutma hızları α -kristal oluşumunu desteklerken, daha hızlı soğutma hızları γ -kristallerini teşvik eder ve PA 6'daki amorf fazı artırır. Bu faktörler göz önüne alındığında, artan bir soğutma hızı, γ -kristallerinin sünekliliğinden ve amorf fazın varlığından yararlanarak soyulma direncini artırır. ($p < 0,05$)
- Ön ısıtma: Ön ısıtmanın soyulma mukavemeti üzerinde marjinal bir etkiye sahip olabileceğini ancak genel bağ performansını önemli ölçüde ($p < 0,05$) etkilemediğini göstermektedir.

Şekil 4.8 KST etkilerinin pareto grafiğini göstermektedir. Sıcaklık (A) ve soğutma hızı (C) soyulma dayanıma etkileyen birincil faktörlerdir; daha yüksek sıcaklıklar ve hızlı soğutma daha yüksek soyulma dayanım değeri ile sonuçlanır. Ön ısıtma (D) soyulma dayanımı üzerinde nispeten daha küçük etkiler gösterirken, kalıplama süresi (B)'nin etkisi oldukça düşüktür.



Şekil 4.8 KST parametrelerinin pareto grafiği

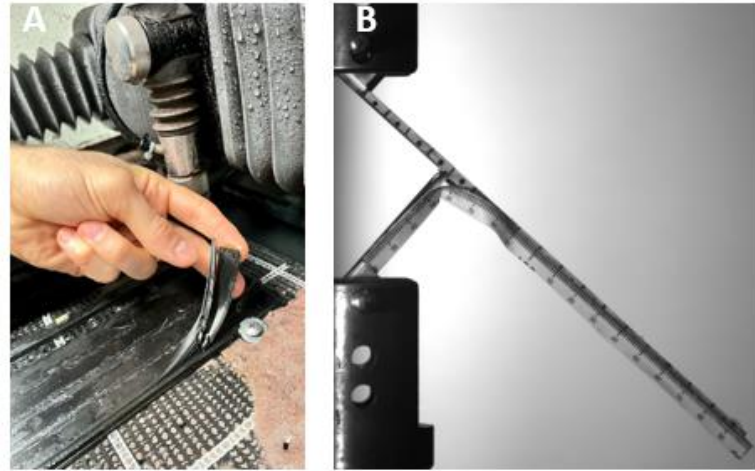
4.2 Çift Konsol Kiriş Test Sonuçları

ÇKK testi toplam 51 numune üzerinde gerçekleştirilmiş, her bir laminat belirli bir koşul için bir adet üretilmiş ve su jeti kullanılarak kesilmiştir. ÇKK testlerinden elde edilen test sonuçları Modifiye Kiriş Teorisi (MKT) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu teori mod I delaminasyon testlerinde kırılma davranışını ve enerji salınım oranlarını değerlendirmek için yaygın olarak kabul gören bir yaklaşımdır. Analizin ana odak noktası, her bir numune için GI başlangıç ve GI yayılma değerlerinin belirlenmesiydi. Bu değerler, her bir laminat numunesinin interlaminar kırılma tokluğunu temsil eder; başlangıç değeri çatlak ilerlemesine karşı ilk direnci ve yayılma değeri sonraki çatlak büyüme davranışını gösterir. Tablo 4.5, her bir laminat için ortalama GI başlangıç ve GI yayılma değerlerini göstermektedir.

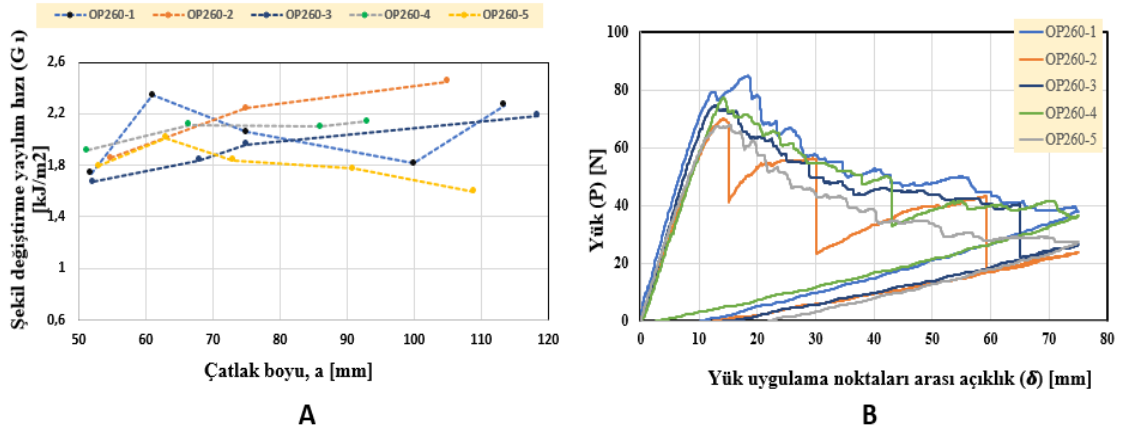
Tablo 4.5 ÇKK test sonuçları

Laminat No	GI başlangıç [kJ/m ²] ± standart sapma	GI yayılma [kJ/m ²] ± standart sapma	Test edilen numune sayısı
OF220-5	1,7 ± 0	1,5 ± 0	1
OF240-5	1,7 ± 0,3	1,8 ± 0,4	5
OF260-5	1,8 ± 0,2	1,8 ± 0,1	5
F220-5	1,1 ± 0,7	0,9 ± 0,6	4
F240-5	2,1 ± 0,2	1,9 ± 0,2	4
F260-5	1,7 ± 0,3	1,5 ± 0,4	5
OP220-5	2,2 ± 0,5	1,6 ± 0,1	5
OP240-5	1,7 ± 0,4	2,1 ± 0,3	4
OP260-5	1,8 ± 0,1	2,1 ± 0,2	5
P220-5	2,3 ± 0,3	2,0 ± 0,1	5
P240-5	2,2 ± 0,1	2,4 ± 0,1	3
P260-5	2,4 ± 0,6	2,4 ± 0,4	5

Test sürecinde karşılaşılan çeşitli hatalar nedeniyle bazı numuneler değerlendirme dışı bırakılmıştır. Bu hatalar arasında metal bloğun ayrılması, su jeti kesimi sırasında meydana gelen arızalar ve test sırasında numunenin kırılması gibi sorunlar yer almaktadır. Sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak için, yalnızca bu tür hatalardan arınmış numuneler değerlendirmeye alınmış, bu hatalardan etkilenen vakalar ise analizden çıkarılmıştır. Şekil 4.9-a, su jeti kesiminde başarısız sonuçlanan OF220 numunesini göstermektedir. Bu numune kesme işleminde sadece bir numune başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Laminatın zayıf bağlanma mukavemeti iki faktöre bağlanabilir: ÇKK numunesinin daha kalın numune gerektirmesi (32 kat – 4,5 mm) ve 220 °C'de kalıplama sıcaklığı. Kesme işlemi sırasında katmanlar arasında bağlanmanın verimli olmadığını işaret eden delaminasyonlar meydana gelmiştir. Şekil 4.9-b test sırasında çatlak başlangıç kökünden kırılan OP240 numunesini göstermektedir. Bu durumlara ek metal bloğun test sırasında yerinden çıktığı 2 test gözlemlenmiştir.

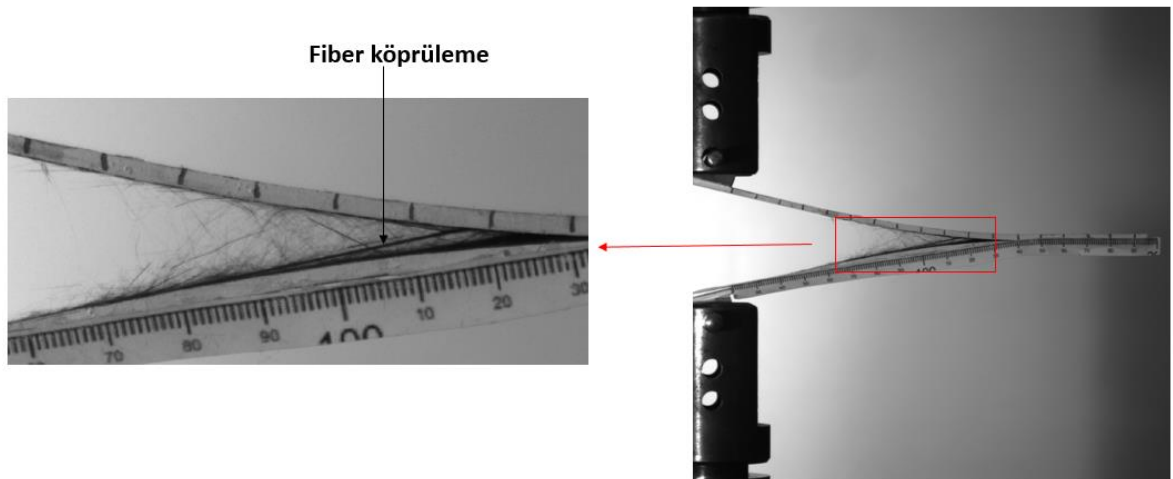


Şekil 4.9 a) Su jeti kesim işlemi sırasında hata ile karşılaşılan OF220 b) Test sırasında kırılan OP240 numunesi



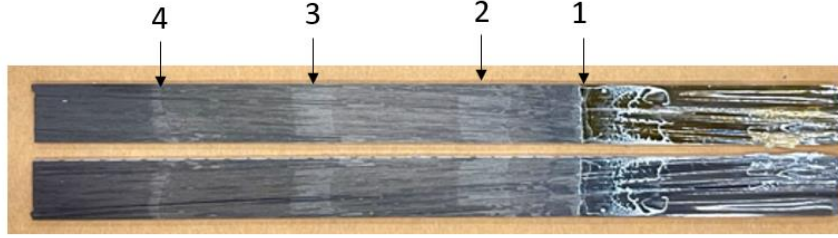
Şekil 4.10 a) OP260 numunesi için Çatlak boyu - G_I grafiği (R-eğrisi) ve b) Yük-uygulama noktaları arası açıklık grafiği

Karbon fiber takviyeli kompozitlerle yapılan ÇKK testlerinde, çatlak büyümesine fiber köprü oluşumu eşlik eder. Tabakalar arası kırılma süreci, matris malzemesinin yoğun olduğu bölgelerinde başlar ve çatlak ilerledikçe takviye liflere yapışır. Bu yapışma, liflerin tiftiklenmesine neden olur. Bu tiftiklenen mikro lifler, takviye liflerden ayrılarak kırılma yüzeyleri arasında köprü oluşturur. Bu köprüleme lifleri, yük aktarımı için bir mekanizma görevi görerek uygulanan yükü yeniden dağıtır ve çatlakın daha fazla ilerlemesini (delaminasyon gelişimine karşı direnç) engeller. Ayrıca, şekil değiştirme enerjisinin yayılım değerini (G_I) artırır [15][54]. Şekil 4.11, test sırasında F220-4 numunesinin fiber köprülemesini göstermektedir.



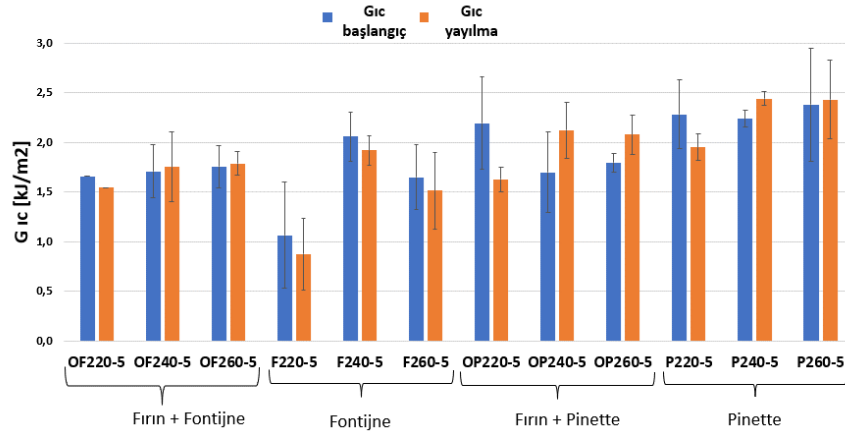
Şekil 4.11 F220-5 numunesinde oluşan fiber köprüleme

Şekil 4.12, ÇKK testinden sonra F260-4 numunesinin arayüzünü göstermektedir. Kırılma değerleri yüksek olan bölgelerde numaralandırılmış açık renkli bölgeler oluşmuştur.

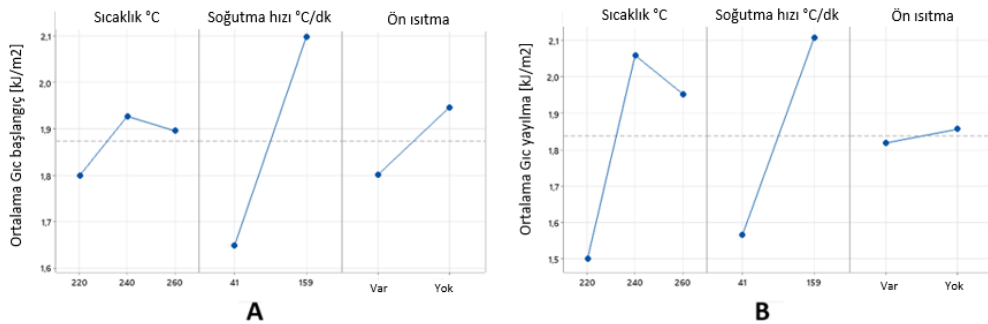


Şekil 4.12 ÇKK testinden sonra F260-4 numunesinin arayüzü.

Şekil 4.13, her bir laminat için G_{IC} başlangıç ve ortalama yayılma değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.13 Her bir laminat için ortalama G_{IC} başlangıç ve yayılma değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.



Şekil 4.14 a) G_{IC} başlangıç ve b) G_{IC} yayılımı için ana etki grafikleri

Şekil 4.14, a-Gıc başlangıç ve b-Gıc yayılımı için ana etkilerin grafiklerini göstermektedir. Başlangıç ve yayılım grafiklerindeki ana etki eğilimleri benzerdir. Başlangıç ve ilerleme grafikleri arasındaki sonuçlardaki bu tutarlılık, çatlak büyümesi gerçekleştikçe KF/PA6 numunelerinin tabakalar arası kırılma tokluğunu koruduğunu göstermektedir. Bu durum, KF/PA6'nın çatlak ilerlemesine karşı kararlı ve öngörülebilir bir tepki sergilediğini ve test süreci boyunca tabakalar arası kırılma tokluğunun güvenilir bir şekilde tahmin edilmesine olanak sağladığını göstermektedir.

- Gıc başlangıç ve yayılım değerini etkileyen en önemli faktör soğutma hızıdır ($p < 0,05$). Gıc yayılımını etkileyen diğer önemli faktör ise sıcaklıktır ($p < 0,05$). Ön ısıtmanın Gıc üzerinde nispeten küçük bir etkisi vardır ($p < 0,05$). Gıc en yüksek değerini oluşturan parametreler sırasıyla hızlı soğutma hızı, 240°C kalıplama sıcaklığı ve ön ısıtmanın olduğu durumdur.

4.3 Çekme Test Sonuçları

Çekme testi, eksenel yükleme koşulları altında numunenin mekanik özelliklerini ve performansını değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Her koşul için eş zamanlı olarak iki laminat üretilmiş ve toplam 204 numune test edilmiştir. Aşağıdaki parametreler ölçülmüş ve analiz edilmiştir: E modülü, kırılma gerilimi ve kırılma gerinimi. Tablo 4.6-7-8-9 sırasıyla her bir laminat için ortalama E modülü, kopma gerilimi ve gerinimi değerlerini göstermektedir.

Tablo 4.6 Fırın + Fontijne pres çekme test sonuçları

Laminat No	Ortalama E Modülü (%0,1 - 0,3) [Gpa] ± Standart sapma	Ortalama Kopma Gerilmesi [Mpa] ± Standart sapma	Ortalama Kopma Gerinimi [mm/mm] ± Standart sapma	Test edilen numune sayısı
OF220-5-A	96,0 ± 0,6	908,4 ± 40	0,0104 ± 0,0004	2
OF220-5-B	92,2 ± 2,7	991,9 ± 65	0,0103 ± 0,0009	3
OF220-15-A	89,7 ± 5,9	821,2 ± 31,6	0,0112 ± 0,0010	3
OF220-15-B	91,5 ± 2,3	1003,1 ± 50,1	0,0112 ± 0,0001	2
OF220-30-A	89,5 ± 2,8	978,9 ± 57,6	0,0112 ± 0,0013	3
OF220-30-B	87,8 ± 10,2	1057,9 ± 44,8	0,0107 ± 0,0007	3
OF240-5-A	92,4 ± 0	1189,9 ± 0	0,0131 ± 0	1
OF240-5-B	92,9 ± 5,7	1247,9 ± 118,8	0,0138 ± 0,0004	3
OF240-15-A	85,1 ± 15,4	1192,0 ± 72,1	0,0123 ± 0,0007	3
OF240-15-B	98,7 ± 5,9	1264,7 ± 76,6	0,0129 ± 0,0006	3
OF240-30-A	97,0 ± 11	1059,1 ± 251,7	0,0131 ± 0,0009	3
OF240-30-B	93,5 ± 5,1	1267,6 ± 116,4	0,0138 ± 0,0002	3
OF260-5-A	92,8 ± 2,9	942,5 ± 52,5	0,0125 ± 0,0005	2
OF260-5-B	87,9 ± 3,7	769,8 ± 0,4	0,0104 ± 0,0010	2
OF260-15-A	87,7 ± 1,1	1140,1 ± 137,9	0,0136 ± 0,0010	3
OF260-15-B	83,8 ± 4,8	1094,0 ± 270,8	0,0130 ± 0,0012	3
OF260-30-A	91,1 ± 3,9	952,9 ± 43,9	0,0113 ± 0,0007	2
OF260-30-B	97,2 ± 8,7	1056,9 ± 22,8	0,0115 ± 0,0004	3

Tablo 4.7 Fontijne pres çekme test sonuçları

Laminat No	Ortalama E Modülü (%0,1 - 0,3) [Gpa] ± Standart sapma	Ortalama Kopma Gerilmesi [Mpa] ± Standart sapma	Ortalama Kopma Gerinimi [mm/mm] ± Standart sapma	Test edilen numune sayısı
F220-5-A	101,7 ± 3,0	1164,7 ± 69,7	0,0108 ± 0,0006	3
F220-5-B	105,8 ± 10,4	1201,8 ± 35,1	0,0117 ± 0,0006	
F220-15-A	100,0 ± 5,6	1125,6 ± 27,5	0,0114 ± 0,0008	
F220-15-B	102,6 ± 4,4	1089,2 ± 16,3	0,0104 ± 0,00001	
F220-30-A	97,0 ± 1,5	894,8 ± 118,0	0,0091 ± 0,0008	
F220-30-B	93,0 ± 6,4	787,9 ± 70,9	0,0087 ± 0,0004	
F240-5-A	94,8 ± 5,5	988,7 ± 156,0	0,0109 ± 0,0010	
F240-5-B	94,0 ± 3,8	949,5 ± 111,9	0,0108 ± 0,0014	
F240-15-A	98,4 ± 3,6	1189,8 ± 76,6	0,0117 ± 0,0007	
F240-15-B	79,2 ± 10,9	780,3 ± 259,5	0,0108 ± 0,0021	
F240-30-A	89,9 ± 9,3	956,6 ± 272,6	0,0116 ± 0,0021	
F240-30-B	90,0 ± 2,7	823,9 ± 230,1	0,0100 ± 0,0018	
F260-5-A	96,4 ± 2,5	1123,9 ± 34,2	0,0128 ± 0,0005	
F260-5-B	94,7 ± 6,7	1064,6 ± 176,0	0,0129 ± 0,0013	
F260-15-A	93,4 ± 5,0	1001,3 ± 272,0	0,0122 ± 0,0014	
F260-15-B	98,0 ± 3,5	959,1 ± 91,7	0,0108 ± 0,0018	
F260-30-A	92,4 ± 3,3	906,0 ± 27,7	0,0106 ± 0,0008	
F260-30-B	90,7 ± 7,1	872,5 ± 181,5	0,0119 ± 0,0011	

Tablo 4.8 Fırın + Pinette pres çekme test sonuçları

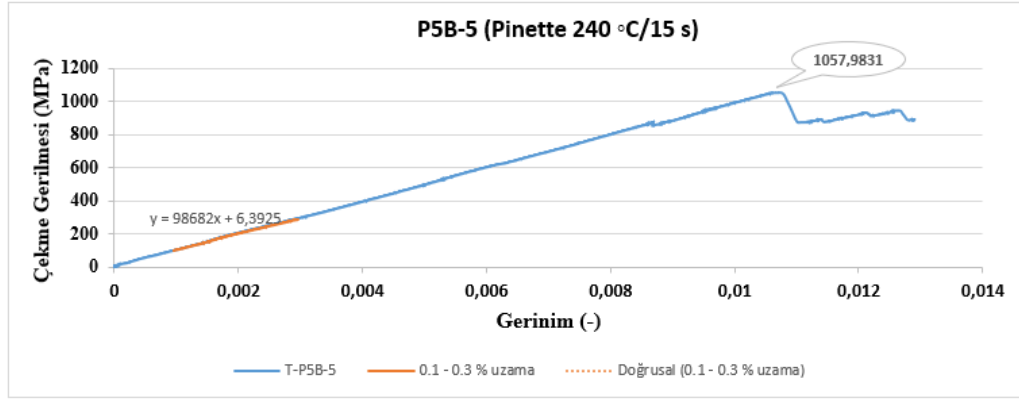
Laminat No	Ortalama E Modülü (%0,1 - 0,3) [Gpa] ± Standart sapma	Ortalama Kopma Gerilmesi [Mpa] ± Standart sapma	Ortalama Kopma Gerinimi [mm/mm] ± Standart sapma	Test edilen numune sayısı
OP220-5-A	95,8±2,7	1300,7 ± 76,4	0,0130±0,0005	3
OP220-5-B	86,1±0,9	1234,7±28,9	0,0134±0,0003	3
OP220-15-A	86,3±16,2	1190,7±75,3	0,0116±0,0013	3
OP220-15-B	95,9±4,9	1292,1±42,8	0,0132±0,0006	3
OP220-30-A	96,3±5,1	1247,6±134,1	0,0120±0,0017	3
OP220-30-B	90,1±3,5	1156,4±58,1	0,0127±0,0005	3
OP240-5-A	102,7±0	1155,0±94,8	0,0131±0,0009	2
OP240-5-B	90,5±4,6	1266,0±140,7	0,0133±0,0011	3
OP240-15-A	90,3±8,9	1248,8±81,2	0,0127±0,0004	3
OP240-15-B	94,2±3,3	1222,3±78,1	0,0129±0,0007	3
OP240-30-A	76,2±19,8	1221,2±77,8	0,0125±0,0010	3
OP240-30-B	77,9±20,0	1195,2±81,8	0,0133±0,0008	3
OP260-5-A	90,7±8,1	897,9±157,6	0,0111±0,0011	3
OP260-5-B	75,6±36,9	1352,7±72,9	0,0134±0,0004	3
OP260-15-A	82,5±1,4	915,7±112,3	0,0113±0,0013	3
OP260-15-B	87,5±5,1	1190,5±155,5	0,0121±0,0006	3
OP260-30-A	99,4±9,1	1456,4±97,2	0,0136±0,0003	3
OP260-30-B	88,1±9,9	1136,8±121,2	0,0124±0,0005	3

Tablo 4.9 Pinette pres çekme test sonuçları

Laminat No	Ortalama E Modülü (%0,1 - 0,3) [Gpa] ± Standart sapma	Ortalama Kopma Gerilmesi [Mpa] ± Standart sapma	Ortalama Kopma Gerinimi [mm/mm] ± Standart sapma	Test edilen numune sayısı
P220-5-A	93,3 ± 6,6	1067,7 ± 54,6	0,0119 ± 0,0010	3
P220-5-B	88,5 ± 2,8	1039,9 ± 54,8	0,0116 ± 0,0011	3
P220-15-A	100,1 ± 8,1	1358,6 ± 234,0	0,0129 ± 0,0011	2
P220-15-B	98,3 ± 2,7	915,2 ± 13,6	0,0102 ± 0,0008	3
P220-30-A	94,1 ± 5,3	1166,6 ± 22,6	0,0120 ± 0,0005	3
P220-30-B	83,2 ± 2,6	951,4 ± 62,8	0,0116 ± 0,0008	3
P240-5-A	93,4 ± 1,4	1272,7 ± 33,1	0,0129 ± 0,0004	2
P240-5-B	83,4 ± 9,8	995,4 ± 75,4	0,0125 ± 0,0019	3
P240-15-A	94,1 ± 5,6	1195,0 ± 100,1	0,0128 ± 0,0007	3
P240-15-B	92,4 ± 7,2	953,6 ± 84,6	0,0116 ± 0,0006	3
P240-30-A	98,4 ± 3,3	1301,2 ± 56,7	0,0126 ± 0,0003	3
P240-30-B	96,6 ± 2,3	1145,6 ± 112,1	0,0121 ± 0,0010	3
P260-5-A	94,7 ± 6,6	1106,8 ± 93,3	0,0118 ± 0,0004	3
P260-5-B	90,7 ± 8,7	872,0 ± 103,5	0,0115 ± 0,0006	3
P260-15-A	84,4 ± 4,6	861,5 ± 70,9	0,0111 ± 0,0014	3
P260-15-B	94,7 ± 3,0	849,4 ± 73,6	0,0103 ± 0,0009	2
P260-30-A	91,3 ± 6,0	1093,7 ± 238,1	0,0115 ± 0,0012	2
P260-30-B	101,2 ± 2,4	1290,4 ± 40,2	0,0129 ± 0,0003	3

Young modülü olarak da adlandırılan E modülü, bir malzemenin sertliğini ve esnekliğini karakterize eden temel bir özelliktir. Çekme gerilimine maruz kaldığında malzemenin deformasyona direnme kabiliyetini ölçer. Gerilme-gerinim eğrisi çizilmiş ve %0,1-0,3 gerinim aralığındaki doğrusal bölgenin eğrisi hesaplanmıştır. Bu eğri malzemenin E modülünü temsil etmektedir. Şekil 4.15'te, P240-15 numunesinin çekme testi verilerinden

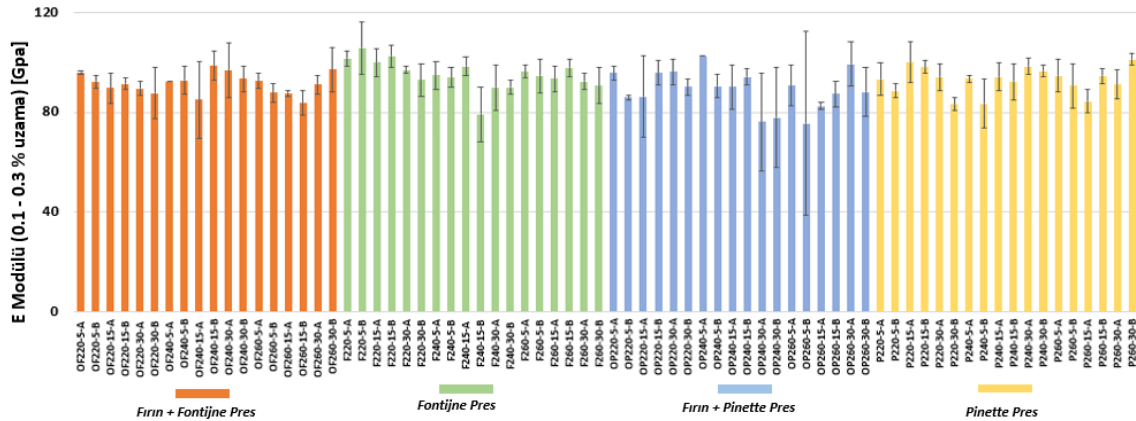
oluşturulan gerilme-gerinim grafiği sunulmuştur. Bu eğri numune için uygulanan gerilim ve ortaya çıkan gerinim arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir. Aynı yöntem kullanılarak her bir çekme testi numunesi için gerilme-gerinim eğrileri elde edilmiştir.



E Modülü [Gpa]	Maksimum gerinim [mm/mm]	Maksimum stress [Mpa]
98,68	0,011	1057,9831

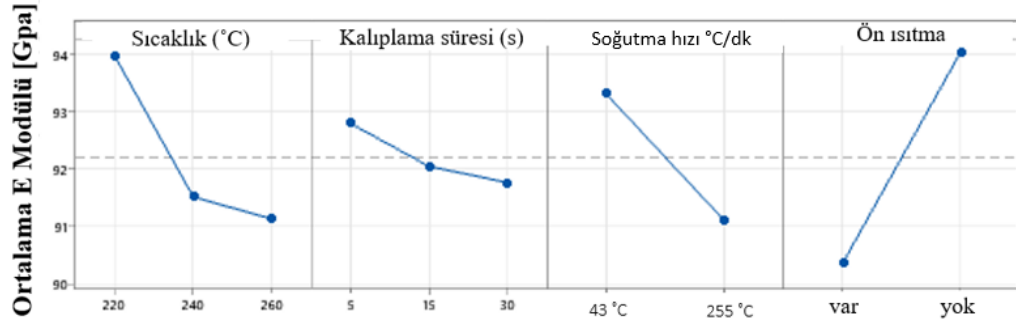
Şekil 4.15 P5B-5 numunesinin gerilme-gerinim grafiği

Şekil 4.16'da her bir laminat için ortalama E modülü ve standart sapma değerleri gösterilmektedir. Sütunlardaki farklı renk grupları, kullanılan pres tipindeki ve ön ısıtma koşulundaki değişiklikleri temsil etmektedir.

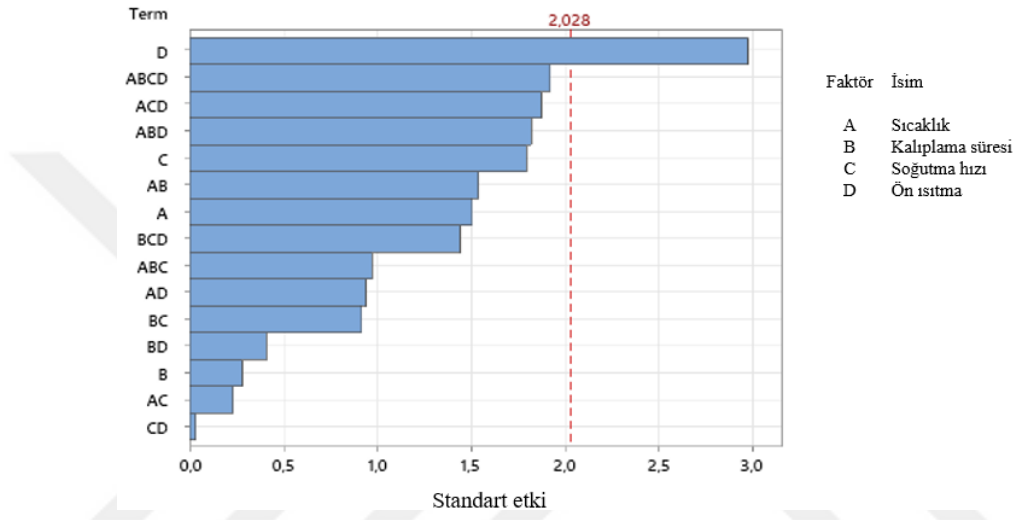


Şekil 4.16 Her bir laminat için ortalama E modülü değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.

Ortalama E modülü, kırılma gerilimi ve kırılma gerinimi değerleri DOE analizi için yanıt değişkenleri olarak kabul edilmiştir. DOE analizi, önemli faktörlerin ve bunların laminatların gerilme özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesine yardımcı olmuştur. Şekil 4-17'de E modülü için ana etkilerin grafikleri sunulurken, Şekil 4-18'de ilgili Pareto grafiği gösterilmektedir.



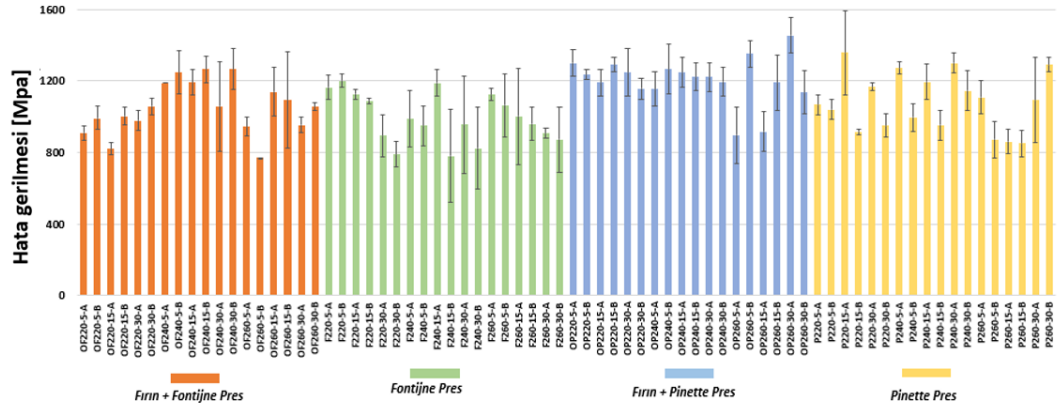
Şekil 4.17 E modülü için ana etkiyen parametre grafikleri



Şekil 4.18 E modülü için standartlaştırılmış etkilerin Pareto grafiği

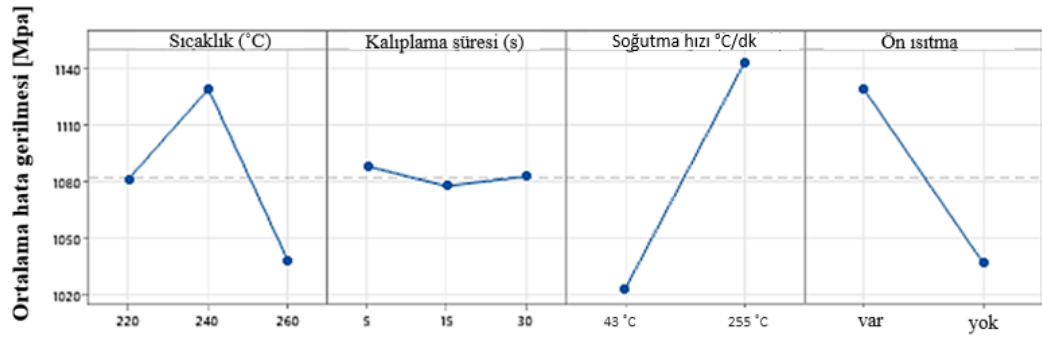
- E modülünü etkileyen faktörler önem sırasına göre ön ısıtma ($p < 0,05$), soğutma hızı ($p > 0,05$) ve sıcaklıktır ($p > 0,05$). İncelenen 5-15-30s kalıplama süresinin ($p > 0,05$) E modülü üzerinde düşük bir etkisi vardır.

Hata gerilmesi, laminatın kırılmadan veya kopmadan önce maruz kaldığı maksimum gerilmedir. Şekil 4.19'da her bir laminat için ortalama kopma gerilimi ve standart sapma değerleri gösterilmektedir.

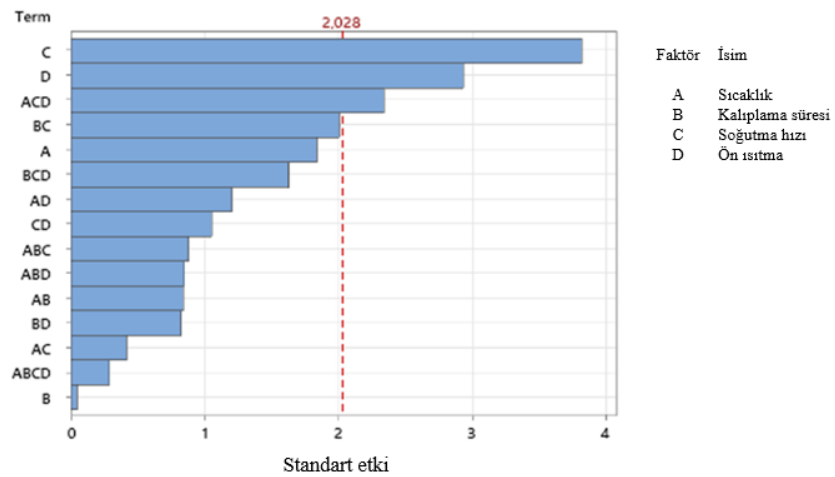


Şekil 4.19 Her bir laminat için ortalama maksimum gerilimi değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.

Şekil 4.20'de maksimum stres için ana etki grafikleri sunulurken, Şekil 4.21'de ilgili Pareto grafiği gösterilmektedir.



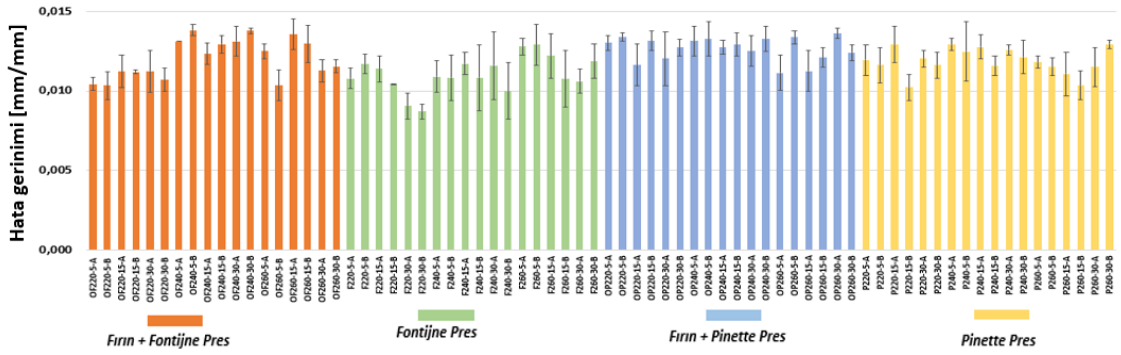
Şekil 4.20 Hata gerilimi için ana etki grafikleri



Şekil 4.21 Hata gerilimi için standartlaştırılmış etkilerin Pareto grafiği

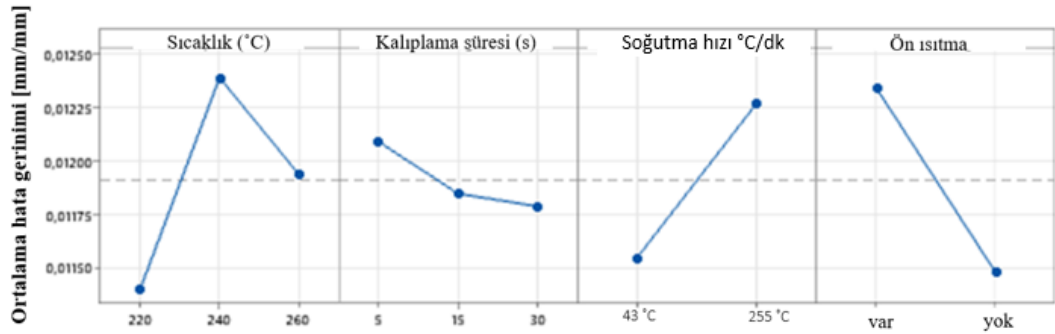
- Hata gerilimini etkileyen faktörler önem sırasına göre soğutma hızı ($p < 0,05$), ön ısıtma ($p < 0,05$) ve sıcaklıktır ($p > 0,05$). İncelenen 5-15-30s kalıplama süresinin ($p > 0,05$) hata gerilmesi üzerinde düşük bir etkisi vardır.

Hata gerinimi, bir malzemenin kırılmadan veya kopmadan önce maruz kaldığı deformasyon miktarını temsil eder. Malzemenin sünekliği ve uzamaya dayanma kabiliyeti hakkında bilgi sağlar. Şekil 4.22'de her bir laminat için ortalama hata gerinimi ve standart sapma değerleri gösterilmektedir.

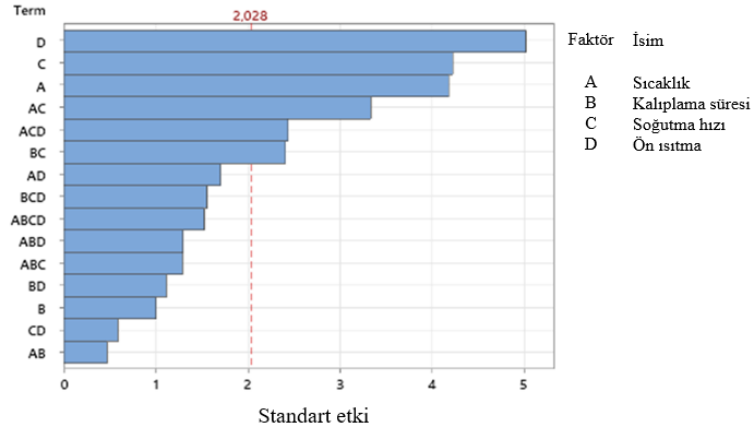


Şekil 4.22 Her bir laminat için ortalama hata gerinim değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.

Şekil 4.23 hata gerinimi için ana etkilerin grafiklerini sunarken, Şekil 4.24 ilgili Pareto grafiğini göstermektedir.

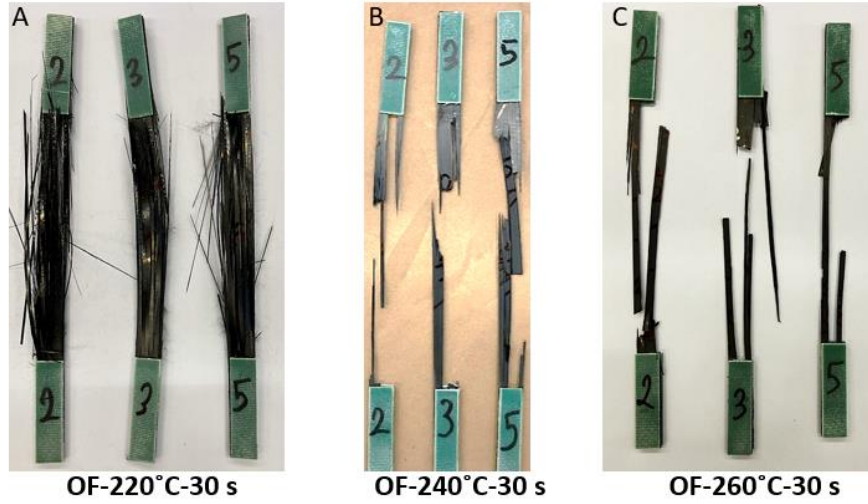


Şekil 4.23 Hata gerinim için ana etki grafikleri



Şekil 4.24 Hata gerinimi için standartlaştırılmış etkilerin Pareto grafiği

- Hata gerinimini etkileyen faktörler önem sırasına göre ön ısıtma ($p < 0,05$), soğutma hızı ($p < 0,05$) ve sıcaklıktır ($p < 0,05$). İncelenen 5-30 s aralığındaki kalıplama süresinin ($p > 0,05$) hata gerinimi üzerinde nispeten küçük bir etkisi vardır. Ön ısıtma, hızlı soğutma hızı ve orta sıcaklık daha yüksek hata gerinimine neden olmaktadır.



Şekil 4.25 Hata modları

Şekil 4.25, Fırın+Fontijne presinde farklı sıcaklıklarda üretilen numunelerin çekme testinden sonraki hata türlerini göstermektedir. Şekil 4.25-a'da gösterildiği gibi, 220°C'de üretilen numuneler genellikle patlamalı bir hata modu (XMV) sergilemiştir. Bu hata modu daha yüksek sıcaklıklarda üretilen numunelerde gözlenmemiştir. Bu durum, malzeme davranışının ve kırılma mekanizmalarının işleme sıcaklığına bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

4.4 Üç Nokta Eğme Test Sonuçları

Üç nokta eğme testi için toplam 115 numune kullanılmıştır. Toplam 12 koşul için birer laminat üretilmiştir. Her bir laminattan beş adet 0° (boyuna) ve beş adet 90° (enine) numune kesilmiştir. Bu, laminatın farklı yönlerden bükülme davranışının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Test sonuçları daha sonra maksimum eğilme gerilmesi (σ), maksimum gerinim (ϵ) ve eğilme elastisite modülü dahil olmak üzere önemli mekanik parametreleri belirlemek için analiz edilmiştir. Bu değerler, laminatın eğilme yükleri altındaki mukavemeti, deformasyon kapasitesi ve rijitliği hakkında bilgi sağlar.

Tablo 4.10 ve Tablo 4.11 sırasıyla her bir laminat için ortalama eğilme elastisite modülü, maksimum eğilme gerilmesi (σ) ve maksimum gerinim (ϵ) değerlerini göstermektedir.

Tablo 4.10 0° (boyuna) numuneler için üç nokta eğme sonuçları

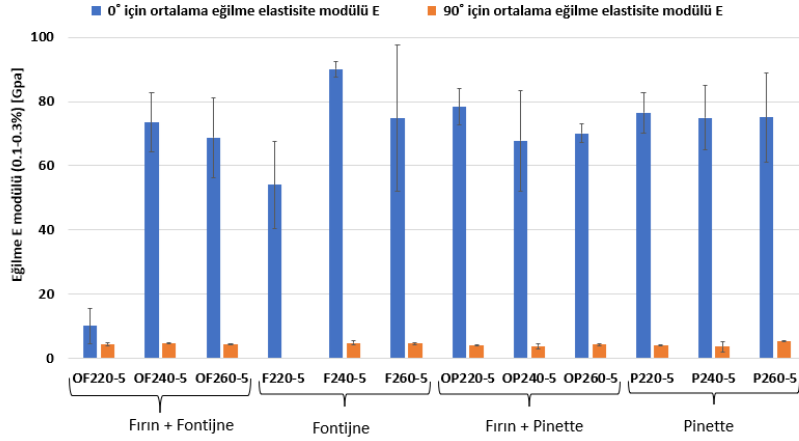
Laminat No	Ortalama Eğilme E Modülü (%0,1 - 0,3) [Gpa] $\pm$ Standart sapma	Ortalama Maksimum Gerilme (σ) [Mpa] $\pm$ Standart sapma	Ortalama Maksimum Gerinim (ϵ) [mm/mm] $\pm$ Standart sapma	Test edilen numune sayısı
OF220-5	10,1 $\pm$ 5,6	36,1 $\pm$ 4,0	0,022 $\pm$ 0,006	5
OF240-5	73,5 $\pm$ 9,3	1131,9 $\pm$ 58,2	0,013 $\pm$ 0,001	5
OF260-5	68,7 $\pm$ 12,5	1172,8 $\pm$ 48,8	0,014 $\pm$ 0,0009	5
F220-5	54,0 $\pm$ 13,5	115,2 $\pm$ 16,0	0,006 $\pm$ 0,004	5
F240-5	90,0 $\pm$ 2,5	1118,8 $\pm$ 80,4	0,013 $\pm$ 0,0009	5
F260-5	74,8 $\pm$ 22,8	1007,3 $\pm$ 87,5	0,013 $\pm$ 0,001	5
OP220-5	78,3 $\pm$ 5,7	689,3 $\pm$ 117,3	0,009 $\pm$ 0,001	5
OP240-5	67,8 $\pm$ 15,6	1076,6 $\pm$ 97,6	0,014 $\pm$ 0,001	5
OP260-5	70,1 $\pm$ 2,9	1297,9 $\pm$ 83,7	0,016 $\pm$ 0,002	5
P220-5	76,5 $\pm$ 6,4	1165,5 $\pm$ 93,6	0,013 $\pm$ 0,001	5
P240-5	74,9 $\pm$ 10,0	1285,5 $\pm$ 52,3	0,018 $\pm$ 0,002	5
P260-5	75,0 $\pm$ 14,0	1504,6 $\pm$ 177,4	0,016 $\pm$ 0,0008	5

Tablo 4.11 90° (enine) numuneler için üç nokta eğme sonuçları

Laminat No	Ortalama Eğilme E Modülü (%0,1 - 0,3) [Gpa] ± Standart sapma	Ortalama Maksimum Gerilme (σ) [Mpa] ± Standart sapma	Ortalama Maksimum Gerinim (ϵ) [mm/mm] ± Standart sapma	Test edilen numune sayısı
OF220-5	4,4 ± 0,5	32,0 ± 3,6	0,010 ± 0,001	5
OF240-5	4,7 ± 0,1	42,3 ± 1,7	0,009 ± 0,010	5
OF260-5	4,5 ± 0,2	54,6 ± 4,1	0,011 ± 0,001	5
F220-5	-	-	-	0
F240-5	4,9 ± 0,6	37,5 ± 2,5	0,009 ± 0,009	5
F260-5	4,6 ± 0,5	36,0 ± 4,6	0,009 ± 0,0007	5
OP220-5	4,0 ± 0,2	24,7 ± 4,0	0,008 ± 0,001	5
OP240-5	3,8 ± 0,8	28,1 ± 1,8	0,008 ± 0,010	5
OP260-5	4,3 ± 0,3	56,6 ± 3,8	0,015 ± 0,001	5
P220-5	4,2 ± 0,2	27,1 ± 3,0	0,008 ± 0,001	5
P240-5	3,7 ± 1,6	56,1 ± 1,9	0,014 ± 0,014	5
P260-5	5,4 ± 0,3	64,0 ± 4,3	0,017 ± 0,002	5

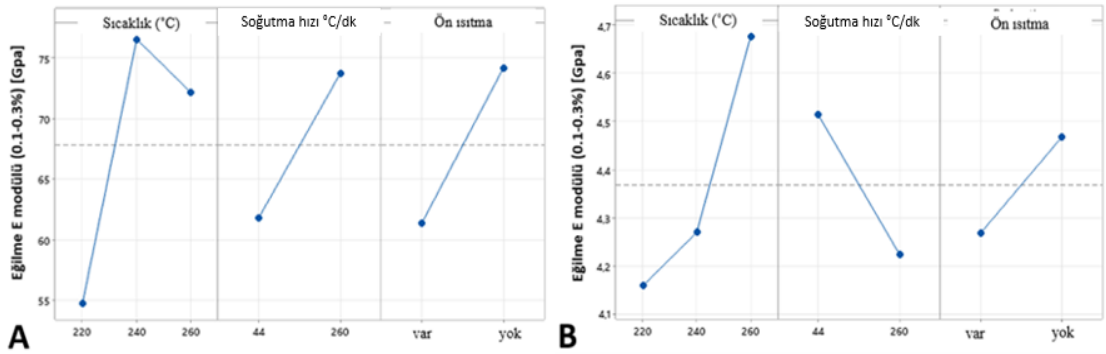
0° (boyuna) ve 90° (enine) numuneler için maksimum eğilme gerilmesi (σ), maksimum gerinim (ϵ) ve eğilme elastisite modülü değerlerinin grafiklerde karşılaştırılması aşağıda sunulmuştur, iki yön arasındaki özellik farkının olduğu net bir şekilde anlaşılmaktadır.

Şekil 4.26, 0° ve 90° numuneler arasındaki eğilme elastisite modülü değerlerini karşılaştırmak için sütun grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.26 Her bir laminat için ortalama eğilme elastisite modülü değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.

Şekil 4.27'de eğilme modülü için ana etkilerin grafikleri sunulmaktadır.

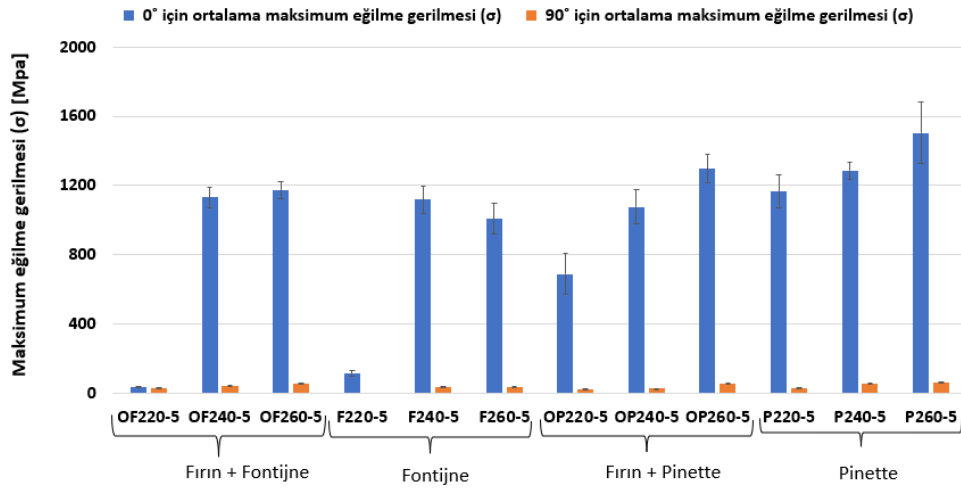


Şekil 4.27 Eğilme modülü için ana etki grafikleri. A- 0° (boyuna), B- 90° (enine) numune sonuçlarını göstermektedir.

- 0° (boyuna) numuneler için eğilme modülünü iyi yönde etkileyen faktörler: Kalıplama sıcaklığı orta 240 °C ($p<0,05$), soğutma hızı hızlı ($p<0,05$), ön ısıtma yok ($p<0,05$).
- 90° (enine) numuneler için eğilme modülünü iyi yönde etkileyen faktörler: Kalıplama sıcaklığı yüksek 260 °C ($p>0,05$), soğutma hızı yavaş ($p>0,05$), ön ısıtma yok ($p>0,05$).

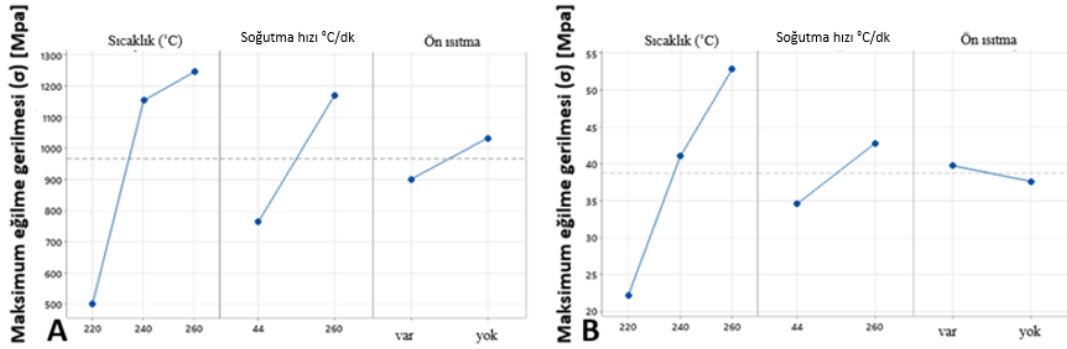
0° (boyuna) ve 90° (enine) arasındaki temel fark, soğutma hızı gereksinimlerinde yatmaktadır.

Şekil 4.28'de, 0° (boyuna) ve 90° (enine) numuneler arasındaki maksimum eğilme gerilmesi (σ) değerlerini karşılaştırmak için bir sütun grafiği oluşturulmuştur. Bu grafik, üç nokta eğme testi sırasında iki farklı yöndeki numunelerin maruz kaldığı gerilme seviyelerinin görsel olarak karşılaştırılmasını sağlar.



Şekil 4.28 Her bir laminat için ortalama eğilme gerilmesi değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.

Şekil 4.29 maksimum eğilme gerilmesi için ana etkilerin grafikleri sunulmaktadır.

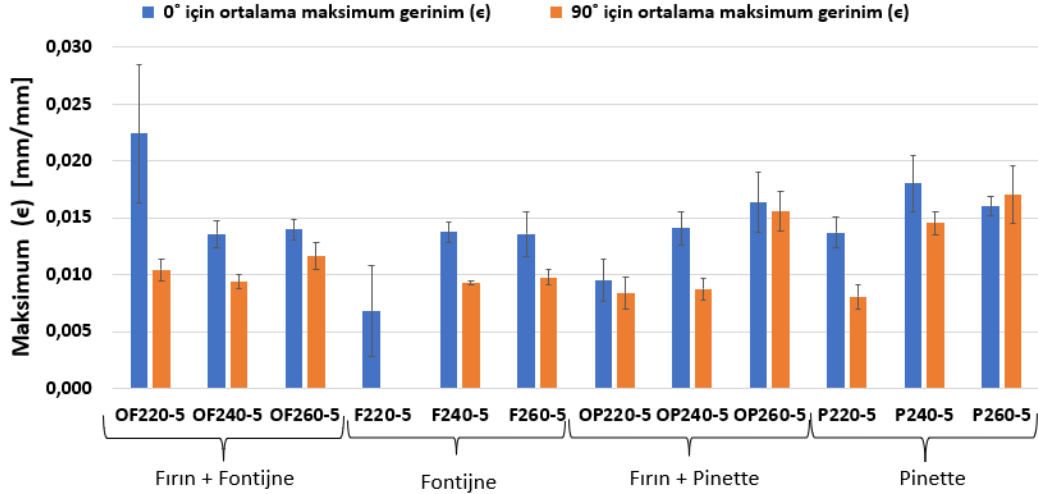


Şekil 4.29 Maksimum eğilme gerilmesi için ana etki grafikleri. A- 0° (boyuna), B- 90° (enine) numune sonuçlarını göstermektedir.

- 0° (boyuna) numuneler için maksimum eğilme gerilmesini iyi yönde etkileyen faktörler: Kalıplama sıcaklığı yüksek 260 °C ($p < 0,05$), soğutma hızı hızlı ($p < 0,05$), ön ısıtma yok ($p < 0,05$).
- 90° (enine) numuneler için maksimum eğilme gerilmesini iyi yönde etkileyen faktörler: Kalıplama sıcaklığı yüksek 260 °C ($p > 0,05$), soğutma hızı hızlı ($p > 0,05$), ön ısıtma yok ($p > 0,05$).

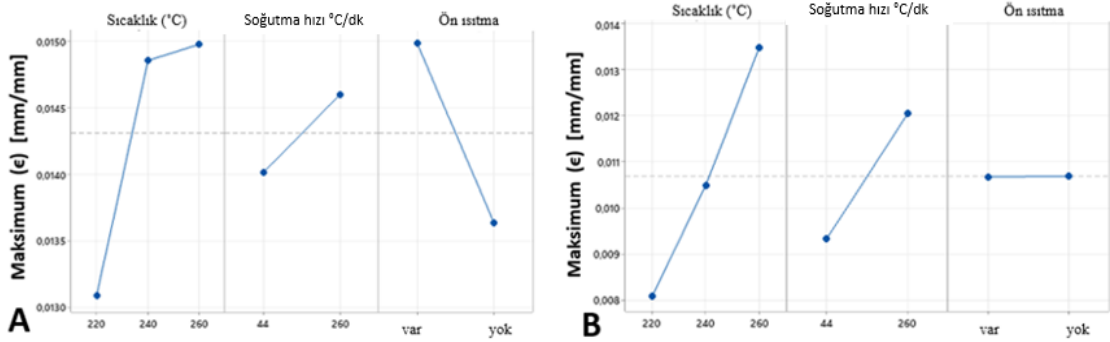
En çok etkilendiği parametreler sıcaklık ve soğutma hızı olduğu gözükmemektedir. 0° (boyuna) ve 90° (enine) arasındaki temel fark, ön ısıtma durum gereksiniminde yatmaktadır.

Şekil 4.30'da, 0° (boyuna) ve 90° (enine) numuneler arasındaki maksimum gerinim (ε) değerlerini karşılaştırmak için bir sütun grafiği oluşturulmuştur. Bu grafik, numunelerin iki yönde sergilediği gerinim seviyelerinin görsel bir temsilini sunmakta ve eğilme altındaki deformasyon özelliklerindeki farklılıkları vurgulamaktadır.



Şekil 4.30 Her bir laminat için ortalama maksimum gerinim değerleri. Hata çubukları standart sapmayı göstermektedir.

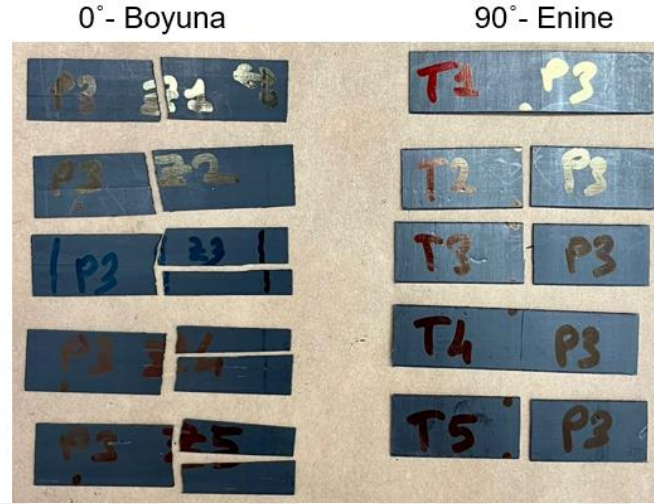
Şekil 4.31 maksimum gerinim için ana etkilerin grafikleri sunulmaktadır.



Şekil 4.31 Maksimum gerinim için ana etki grafikleri. A- 0° (boyuna), B- 90° (enine) numune sonuçlarını göstermektedir.

- 0° (boyuna) numuneler için maksimum gerinimi iyi yönde etkileyen faktörler: Kalıplama sıcaklığı yüksek 260 °C ($p < 0,05$), soğutma hızı hızlı ($p < 0,05$), ön ısıtma var ($p < 0,05$).
- 90° (enine) numuneler için maksimum gerinimi iyi yönde etkileyen faktörler: Kalıplama sıcaklığı yüksek 260 °C ($p > 0,05$), soğutma hızı hızlı ($p > 0,05$), ön ısıtma etkisiz ($p > 0,05$).

Maksimum gerininin değeriendirilmesi, hem 0° hem de 90° numuneler için en uygun koşulların hızlı bir soğutma oranıyla birlikte 260°C sıcaklıkta elde edildiğini göstermektedir. İlginç bir şekilde, ön ısıtma koşulu enine numuneler üzerinde ihmal edilebilir bir etki gösterirken, 0° numuneler üzerinde faydalı bir etki yaratmaktadır. Bu gözlemler, ön ısıtmanın ağırlıklı olarak sıfır yönünde maksimum gerinim özelliklerinin geliştirilmesine katkıda bulunduğunu göstermektedir.



Şekil 4.32 P260 numunesi için hata modu

Şekil 4.32, P260-5s numunesinin üç nokta eğme testinden sonraki kırılma modlarını göstermektedir. Boyuna numuneler, fiberde hem basma kırılması hem de çekme kırılması gözlenmiştir. Testin sonuna doğru bu numuneler orta bölge başta olmak üzere 2'den daha fazla parça olacak şekilde kırılmıştır. Enine numunelerde kırılma 260 °C üretilen numunelerde gözlemlenmiş ve bu kırılma sadece orta bölgegesinde gerçekleşmiştir.

4.5 Tartışma

4.5.1 Soğutma Hızının Etkisi

Test sonuçları ve değerlendirme kriterleri, soğutma hızı ile çeşitli mekanik özellikler arasında açık bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Değerlendirmeler DOE sonuç tabloları dikkate alınarak yapılmıştır. Şekil 4-7 kama soyulma, şekil 4-14 çift konsol giriş, şekil 4-17,20,23 çekme, şekil 4-27,29,31 üç nokta eğme testleri için soğutma hızının test sonuçlarına verdiği eğilimleri göstermektedir.

Hızlı soğutma olduğunda, kama soyulma testi kama soyulma dayanımı ($p<0.05$), çift konsol giriş testi Gıc değeri ($p<0.05$), çekme testi hata gerilimi ve gerinimi ($p<0.05$) ve üç nokta eğme testi boyuna numuneler için eğilme özellikleri modül, maksimum gerilme

ve gerinim ($p < 0.05$) değerlerinde artış olmakta ve istatistiksel olarak ($p < 0.05$) anlamlı olduğunu göstermektedir. Üç nokta eğme testi enine numuneler için maksimum gerilme ve gerinim ($p > 0.05$) değerlerinde artış olmaktadır fakat istatistiksel olarak ($p > 0.05$) anlamlı değildir.

Yavaş soğutma olduğunda, çekme testi E modülü ($p > 0.05$) ve üç nokta eğme testi enine numuneler için eğilme modülü ($p > 0.05$) değerlerinde artış olmaktadır fakat istatistiksel olarak ($p > 0.05$) anlamlı değildir.

İstatistiksel değerin $p < 0.05$ olması test sonuçlarında gözlemlenen farklılıkların anlamlı olduğunu ve rastgele şansa bağlı olmadığını göstermektedir. Bu nedenle, soğutma hızının CF/PA6 kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde, soyulma dayanımı, çekme maksimum gerilim ve gerinim, tabakalar arası kırılma tokluğu (G_{1c}) ve boyuna numuneler için eğilme özelliklerindeki gösterdiği önemli bir etkisi olduğu söylenebilir.

Bu gözlemler, soğutma hızının neden olduğu kristalinite değişiklikleri ışığında yorumlanabilir. Literatür bölümünde açıklandığı gibi, kristallik derecesindeki bir artış, polimer zincirlerinin mevcut uzunluğunda bir azalmaya neden olarak bağ mukavemetinde bir azalmaya yol açar. PA 6'da kristalit oluşumu soğutma hızından etkilenir ve α -formu ve γ -formu olmak üzere iki ana form gözlenir. γ -formu daha sünektir, α -formu ise daha kırılğan, yüksek bir modül sergiler. Daha yüksek soğutma hızlarında, α -kristallerinin oluşumu, önceki çalışmalarla da desteklendiği üzere, yerini γ -kristallerinin gelişimine bırakmaktadır. Ayrıca, artan soğutma hızı PA 6'da amorf fazın varlığını teşvik etmektedir. Bu bulgular mekanik özelliklerde gözlenen değişiklikleri açıklamaktadır. Hızlı soğutmada artan soyulma dayanımı, G_{1c} değeri, çekme maksimum gerilimi ve gerinimi, 0° yönlü eğilme özellikleri γ -kristalleri ile ilişkili daha yüksek süneklığe ve amorf fazın artan fraksiyonuna bağlanabilir. Öte yandan yavaş soğutmada artan çekme E modülü ve 90° yönlü eğilme modülü α -kristallerinin daha yüksek oranda olmasıyla açıklanabilir.

Deneyisel sonuçlar, kristalinite ve soğutma hızının PA 6'nın mekanik özellikleri üzerindeki etkisine ilişkin mevcut literatürle uyumludur. Soyulma dayanımı, tabakalar arası kırılma tokluğu, çekme özellikleri ve eğilme özelliklerindeki değişiklikler, kristalinite ve farklı soğutma hızlarının neden olduğu amorf faz fraksiyonundaki değişikliklere bağlanabilir.

4.5.2 Kalıplama Süresinin Etkisi

Test sonuçları ve değerlendirme kriterleri kalıplama süresi ile çeşitli mekanik özellikler arasında ilişkisi incelenmiştir. Şekil 4-7 kama soyulma, şekil 4-17,20,23 çekme testleri için kalıplama süre parametresinin test sonuçlarına verdiği eğilimleri göstermektedir. Çift konsol kiriş ve üç nokta eğme testleri için 15s ve 30s kalıplama süreleri uygulanmamıştır. Bu bölüm kama soyulma ve çekme test sonuçlarını içermektedir.

Kama soyulma testinde, soyulma dayanım değeri kalıplama süresinden bağımsız olarak değişmeden kaldığı gözlemlenmiştir ($p>0.05$). Bu, 4 katlı CF/PA6 numuneleri için 5 saniyelik bir kalıplama süresinin istenen soyulma mukavemetini elde etmek için yeterli olduğunu göstermektedir. İstatistiksel olarak ($p>0.05$) verilerin anlamlı olmadığı kabul edilmektedir.

Öte yandan, çekme testi sonuçlarına göre kalıplama süresi ile E modülü ve hata gerinim değerleri arasında bir korelasyon olduğunu göstermektedir ($p>0.05$). Kalıplama süresi arttıkça bu değerler düşüş göstermişlerdir. Bu, daha uzun bir kalıplama süresinin CF/PA6 malzemesinin sertlik kaybına yol açtığını göstermektedir. Bununla birlikte, çekme testinden elde edilen diğer bir değer hata gerilimi kalıplama süresinden oldukça düşük seviyede etkilenmektedir ($p > 0.05$). Bu da malzemenin dayanabileceği maksimum gerilimin kalıplama süresinden (5-30s) bağımsız olmaya yaklaştığını göstermiştir. İstatistiksel olarak ($p>0.05$) verilerin anlamlı olmadığı kabul edilmektedir.

Sonuçlar, kalıplama süresinin kama soyulma ve çekme testi sonuçları üzerinde farklı etkileri olduğunu göstermektedir. Kama soyulma testindeki soyulma mukavemeti kalıplama süresi 5 ile 30 saniye aralığında etkilenmezken, çekme testindeki E modülü ve hata gerinimi düşüş göstermektedir. Bu bulgular, kalıplama süresinin özellikle çekme testi bağlamında CF/PA6 malzemelerinin mekanik özelliklerini etkileyebilecek bir parametre olarak dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

4.5.3 Proses Sıcaklığının Etkisi

Test sonuçları ve değerlendirme kriterleri, proses sıcaklığı ile çeşitli mekanik özellikler arasında açık bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Şekil 4-7 kama soyulma, şekil 4-14 çift konsol kiriş, şekil 4-17,20,23 çekme, şekil 4-27,29,31 üç nokta eğme testleri için proses sıcaklığının test sonuçlarına verdiği eğilimleri göstermektedir.

Yüksek sıcaklık, polimer matrisin viskozitesini düşürerek akışkanlık özelliğini artırır. Poliamid 6 daha kolay akması, kompozit malzemenin daha homojen bir yapıya sahip olmasını ve içindeki takviye lif dağılımını iyileştirmiştir.

Kama soyulma testinde soyulma dayanımı artan sıcaklıkla birlikte artmış ve 260°C'de maksimum değere ulaşmıştır ($p<0.05$). Bununla birlikte, 240°C ile 260°C arasında önemli bir artış gözlenmemektedir. Bu, KF/PA6 için daha yüksek sıcaklıkların belirli bir noktaya kadar soyulma dayanımının artmasına katkıda bulunabileceğini belirtmektedir. İstatistiksel olarak ($p<0.05$) verilerin anlamlı olduğu görünmektedir.

Çift konsol kiriş testinde, tabakalar arası kırılma tokluğunu temsil eden Gıc değeri 220°C'den 240°C'ye geldiğinde en yüksek değere ulaşmış ancak 260°C'de bu değer düşüş gerçekleştirmiştir. Bu, maksimum kırılma tokluğunu elde etmek için 240°C üstünde optimum bir sıcaklık aralığı olduğunu ve bu aralığın aşılmasının bu tabakalar arası kırılma tokluğunda bir azalmaya yol açtığını göstermektedir ($p<0.05$). İstatistiksel olarak ($p<0.05$) verilerin anlamlı olduğu görünmektedir.

Çekme testindeki E modülü değerleri ile ilgili olarak, en yüksek değer 220°C'de ve en düşük değer 260°C'de gözlenmiştir ($p>0.05$). KF/PA6'nın erime noktası 220°C'dir. Malzemenin erime sıcaklığında veya yakınında işlenmesi, laminatın maksimum E modülünün elde edilmesini sağlayacağı göstermektedir. Çekme testindeki hata gerilimi ($p>0.05$) ve gerinim ($p<0.05$) değerleri benzer bir eğilim gösterir. Maksimum değerlerine 240°C'de ulaşırlar ve sıcaklık 260°C'ye yükseldikçe azalırlar. Bu durum yüksek gerilim ve gerinim için malzemenin 240°C ile 260°C arasında optimal bir sıcaklık noktası olduğunu işaret etmektedir. İstatistiksel olarak E modülü ve gerilim ($p>0.05$) verilerinin anlamlı olmadığı, gerinim verilerinin ($p<0.05$) anlamlı olduğu görünmektedir.

Üç nokta eğme testinde, eğilme modülü 0° için 240°C'de en yüksek değere sahip ancak 260°C'de yavaş düşüş göstermiş olup ($p<0.05$), 90° için 260°C'de en yüksek değere ulaştığı gözlemlenmektedir ($p >0.05$). Bu, malzemenin 0° ve 90° yönündeki eğilme deformasyonuna karşı direncin 240 C°'ye kadar ortak olduğunu üzerindeki sıcaklıkta zıt özellikler gösterdiklerini belirtmektedir. Öte yandan, eğilme gerilim ve gerinim değerleri 0° ($p<0.05$) ve 90° ($p>0.05$) için sıcaklık arttıkça artmakta, 260°C'de maksimuma ulaşmaktadır. Bu durum, daha yüksek sıcaklıkların eğilme gerilmesi ve gerinim özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunduğunu göstermektedir. İstatistiksel analizler bu

verilerin anlamlı 0° yönü için anlamlı olduğunu 90° yönü için anlamlı olmadığını göstermiştir.

İşleme sıcaklığının mekanik özellikler üzerindeki etkisi test yöntemine bağlı olarak değişmektedir. E modülü için proses sıcaklığı 220°C iyi sonuçlar sağlarken diğer malzeme özellikleri için daha yüksek sıcaklıklar gerekmektedir. Daha yüksek sıcaklıklar genellikle belirli bir optimum sıcaklığa kadar soyulma dayanımı, gerilim-gerinim, kırılma tokluğu ve eğilme özelliklerinde iyileşmeye yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, CF/PA6 malzemelerinde istenen mekanik özellikleri elde etmek için işleme sıcaklığının dikkatlice seçilmesinin önemini vurgulamaktadır.

4.5.4 Ön Isıtmanın Etkisi

Test sonuçları ve değerlendirme kriterleri ön ısıtma ile çeşitli mekanik özellikler arasında ilişkisi incelenmiştir. Şekil 4-7 kama soyulma, şekil 4-14 çift konsol kiriş, şekil 4-17,20,23 çekme, şekil 4-27,29,31 üç nokta eğme testleri için ön ısıtma'nın test sonuçlarına verdiği eğilimleri göstermektedir.

Ön ısıtma, sıkıştırma kalıplamadan önce işlenmemiş malzemenin 160 °C'ye kadar ek bir basınç altında olmadan ısıtılması işlemidir. Poliamid 6'nın kristal yapılarını eritmek için ön ısıtma yapılmıştır. Bu, polimer zincirlerinin daha serbest hareket etmesini sağlar, malzemenin akışkanlığını artırır ve kalıplanan parçanın homojen olmasını sağlamaya yardımcı olur. Ön ısıtma, polimer zincirlerinin katı bir polimer matrisi boyunca hareket ettiği süreç olan reptasyonu teşvik etmeye de yardımcı olur. Bu süreç, polimer eriyiklerinin akışı ve moleküllerin polimerlerden difüzyonu için önemlidir.

Ön ısıtma uygulanmadığı durumda, soyulma dayanımı ($p < 0.05$), tabakalar arası kırılma tokluğunu kırılma tokluğu ($p < 0.05$), E modülü ($p < 0.05$), 0° yönü numuneler için eğilme modülü ve gerilmesi ($p < 0.05$) ve 90° yönü numuneler için eğilme modülü ($p > 0.05$) artış göstermiştir. Ön ısıtma durumunun olmaması en çok E modülü değerini etkilediği görülmektedir. İstatiksel olarak 90° eğilme özellikleri ($p > 0.05$) hariç diğer veriler anlamlı kabul edilebilir.

Ön ısıtma uygulandığı durumda, hata gerilmesi ve gerinimi ($p < 0.05$), 0° yönü numuneler için eğilme gerinim ($p < 0.05$) ve 90° yönü numuneler için eğilme gerilmesi ($p < 0.05$) için daha yüksek değerler gözlenmiştir. Ön ısıtmanın uygulandığı durum çekme testi özelliklerini hata gerilmesi ve gerinimi oldukça etkilediğini görülmüştür. İstatistiksel analizler bu verilerin anlamlı olduğunu göstermiştir ($p < 0.05$).

Ön ısıtmanın uygulanmadığı durumda soyulma dayanımı, Gıc değeri, E modülü ve eğilme modülü dahil olmak üzere çeşitli mekanik özelliklerde iyileşmeler göstermiştir. Bu bulgular, KF/PA6 malzemelerinde istenen mekanik özellikleri elde etmek için ön ısıtma durumunun olup olmamasının önemini vurgulamaktadır.



Termoplastiklerin kısa proses döngüsü ve hacimli üretim, karmaşık geometriler otomatik fiber yerleştirme tekniğinde uygulanabilirliği, kendi aralarında kaynaklanabilme gibi özellikleri termoset polimerlere göre avantaj sağlamaktadır. Bu çalışma KF/PA 6 termoplastik bantların proses döngüsü içinde bulunan konsolidasyon sürecini geliştirmeyi amaçlamıştır. İnterlaminar bağ mukavemetinin gelişimini anlama ve analiz etme üzerine odaklanmaktadır. Konsolidasyon süreci, malzeme katmanları arasında yakın temas ve iyileşme içermektedir. Sıkıştırılmalı kalıplama yöntemiyle laminat üretimi sıcaklık, kalıplama süresi, soğutma hızı ve ön ısıtma gibi temel işlem parametreleri değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Bu parametrelerin laminat kalitesi ve performansı üzerindeki etkileri mekanik testler aracılığıyla değerlendirilmiştir. Bu test yöntemleri kama soyulma testi, çift konsol kiriş testi, çekme testi ve üç nokta eğme testi olmak üzere dört deneysel test yöntemi kullanılmıştır.

Laminat kalitesi ve performansı üzerindeki etkileri belirlemek amacıyla dört üretim parametresi ele alınmış olup bu parametreler üç farklı proses sıcaklığı, üç farklı kalıplama süresi, iki farklı soğutma hızı ve iki farklı ön ısıtma durumundan oluşmaktadır. Bu parametreleri kombinasyonu ile toplam 36 üretim durumu oluşturulmuştur. Kama soyulma ve çekme testlerinde 36 üretim koşulu incelenmiş olup bu testlerde sırasıyla 211 ve 204 numune test edilmiştir. Çift konsol kiriş ve üç nokta eğme testlerinde tek bir kalıplama süresi seçildiği için bu testlerde 12 üretim koşulu incelenmiş olup sırasıyla 51 ve 115 numune test edilmiştir. Bu kapsamlı deneysel çalışma çok sayıda numune ve değişen üretim koşullarını içermiş ve KF/PA 6 kompozitlerinin farklı senaryolar altında bağlanma mukavemeti özelliklerinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamıştır.

Elde edilen sonuçlar aşağıda madde madde verilmiştir:

- Soğutma hızı: Aynı sıcaklık ve ön ısıtma durumunda olup farklı soğutma hızlarında üretilmiş olan numuneler karşılaştırılmıştır. Hızlı soğutma kullanıldığı durumda soyulma dayanımı %20.3, tabaklar arası kırılma tokluğu %27.2, 0° (boyuna) yönü eğilme özellikleri eğilme modülü %0.9, maksimum gerilim %16.5 ve gerilim %4.2, 90° (enine) yönü maksimum gerilim %13.4 ve gerilim %27.3,

çekme hata gerilim %11,6 ve gerinim %6.3 oranlarında pozitif etkiye sahiptir. Çekme modülü %2.4 ve 90° (enine) eğilme modülü %7.8 oranlarında negatif etkilenebilmektedir olduğu belirlenmiştir ve bunun sebebinin amorf faz fraksiyonundaki değişikliklerle ilişkilendirilmiştir.

- Kalıplama süresi: Soyulma dayanımı açısından en düşük kalıplama süresi olan 5 saniye yeterli olduğu anlaşılmıştır. Bu süre, yeterli bir konsolidasyon süreci sağlamaktadır ve daha uzun kalıplama sürelerinin soyulma dayanımını etkilemediği gözlemlenmiştir. Poliamid 6'nın düşük viskoziteye sahip olması, konsolidasyon sürecinin hızlı olmasına teşvik ettiğini göstermektedir. Kalıplama süresi 5 saniye'den 15 ve 30 saniye uzatıldığında çekme modülü için sırasıyla %0.81 ve %1.11 , hata gerinim için sırasıyla %2.1 ve %6.9 oranlarında düşüş gözlemlenmiştir.
- Proses sıcaklığı: 220°C'deki değerlerine göre 240°C ve 260°C'ye yükseldikçe soyulma dayanımı sırasıyla %89.9 ve %98.8 , tabakalar arası kırılma tokluğu sırasıyla %7.1 ve %5.3 ve eğilme modülü %39.9 ve %31.8 oranlarında proses sıcaklığının artmasıyla birlikte artmaktadır. Ancak, kırılma tokluğu ve 0° yönlü numunelerde 240°C'nin üzerinde bir düşüş gözlenmiştir, bu da optimum sıcaklık aralığının aşıldığını düşündürmektedir. E modülü ise sırasıyla %2.61 ve %3.02 oranlarında sıcaklık artışıyla ters orantılı olarak azalmaktadır.
- Ön ısıtma: Ön ısıtma uygulaması olmadan yapılan testlerde, soyulma dayanımı %12.3, tabakalar arası kırılma tokluğu %8.06, çekme modülü %4.07, 0° yön için eğilme modülü %20.8 ve gerilmesi %14.5, 90° yön için eğilme modülü %20.8 özelliklerinde artış görülürken, hata gerilmesi %8.1, hata gerinimi %6.8 ve 90° yön için eğilme gerilmesi %20.9 oranlarında azaldığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre KF/PA6 kompozitlerinin bağ mukavemeti özelliklerini ve konsolidasyon sürecinin optimize edilmesinde soğutma hızı, kalıplama süresi, proses sıcaklığı ve ön ısıtma gibi üretim parametrelerin doğru seçiminin önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Spor, ulaşım, havacılık gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılan karbon fiber termoplastik kompozitlerin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar için, bu tez çalışmasından elde edilen sonuçların etkili bir referans olabileceği kanaatine varılmıştır.

- [1] S. Rana and R. Figueiro, “Advanced composites in aerospace engineering,” *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*, pp. 1–15, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100037-3.00001-8.
- [2] K. Kozaczuk, “Automated fiber placement systems overview,” *Transactions of the Institute of Aviation*, vol. 245, no. 4, pp. 52–59, Dec. 2016, doi: 10.5604/05096669.1226355.
- [3] J. Weber and J. Schlimbach, “Co-consolidation of CF/PEEK tape-preforms and CF/PEEK organo sheets to manufacture reinforcements in stamp-forming process,” <https://doi.org/10.1080/20550340.2019.1673961>, vol. 5, no. 4, pp. 172–183, Oct. 2019, doi: 10.1080/20550340.2019.1673961.
- [4] “Fast Facts on Transportation Greenhouse Gas Emissions | US EPA.” <https://www.epa.gov/greenvehicles/fast-facts-transportation-greenhouse-gas-emissions> (accessed May 17, 2023).
- [5] “The Potential Contribution of Light-Weighting to Reduce Transport Energy Consumption.” https://www.researchgate.net/publication/237262528_The_Potential_Contribution_of_Light-Weighting_to_Reduce_Transport_Energy_Consumption (accessed May 17, 2023).
- [6] “Hyundai’s hydrogen crossover employs CFRP chassis | plasticstoday.com.” <https://www.plasticstoday.com/hyundais-hydrogen-crossover-employs-cfrp-chassis> (accessed May 21, 2023).
- [7] J. Avenet, A. Levy, J. L. Bailleul, S. Le Corre, and J. Delmas, “Adhesion of high performance thermoplastic composites: Development of a bench and procedure for kinetics identification,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 138, p. 106054, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.106054.
- [8] K. Yassin and M. Hojjati, “Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods: A review,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 31, no. 12, pp. 1676–1725, Dec. 2018, doi: 10.1177/0892705717738305.

- [9] W. J. B. Grouve, “Weld strength of laser-assisted tape-placed thermoplastic composites,” Phd Thesis University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2012. doi: 10.3990/1.9789036533928.
- [10] F. Awaja, M. Gilbert, G. Kelly, B. Fox, and P. J. Pigram, “Adhesion of polymers,” *Prog Polym Sci*, vol. 34, no. 9, pp. 948–968, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2009.04.007.
- [11] R. P. Wool and K. M. O’Connor, “A theory crack healing in polymers,” *J Appl Phys*, vol. 52, no. 10, pp. 5953–5963, Oct. 1981, doi: 10.1063/1.328526.
- [12] A. Khodaei and F. Shadmehri, “Intimate contact development for automated fiber placement of thermoplastic composites,” *Composites Part C: Open Access*, vol. 8, p. 100290, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jcomc.2022.100290.
- [13] F. Yang and R. Pitchumani, “A Model for Nonisothermal Healing of Thermoplastic Polymers During Fusion Bonding,” in *Heat Transfer: Volume 6 — Heat Transfer in Materials Processing*, American Society of Mechanical Engineers, Nov. 2001, pp. 299–307. doi: 10.1115/imece2001/htd-24363.
- [14] M. Balasubramanian, “Composite materials and processing,” *Composite Materials and Processing*, pp. 1–599, Jan. 2013, doi: 10.1201/b15551/composite-materials-processing-balasubramanian.
- [15] P. Dara and A. Loos, “Thermoplastic matrix composite processing model,” 1985.
- [16] W. Il Lee and G. S. Springer, “A Model of the Manufacturing Process of Thermoplastic Matrix Composites,” *J Compos Mater*, vol. 21, no. 11, pp. 1017–1055, 1987, doi: 10.1177/002199838702101103.
- [17] F. Yang and R. Pitchumani, “A fractal Cantor set based description of interlaminar contact evolution during thermoplastic composites processing,” *J Mater Sci*, vol. 36, no. 19, pp. 4661–4671, Oct. 2001, doi: 10.1023/A:1017950215945.
- [18] Jaime Van Loock, “Experimental study of the effect of process parameters on C-PA laminate consolidation,” MSc thesis, KU Leuven Campus De Nayer Sint-katelijne-waver, Belgium, 2021.
- [19] Y. H. Kim and R. P. Wool, “A Theory of Healing at a Polymer Polymer Interface,” *Macromolecules*, vol. 16, no. 7, pp. 1115–1120, 1983, doi: 10.1021/ma00241a013.

- [20] P.G. de Gennes, “Entangled Polymers,” *Phys Today*, vol. 36, no. 6, pp. 33–47, 1983.
- [21] F. Yang and R. Pitchumani, “Nonisothermal healing and interlaminar bond strength evolution during thermoplastic matrix composites processing,” *Polym Compos*, vol. 24, no. 2, pp. 263–278, Apr. 2003, doi: 10.1002/PC.10027.
- [22] P. M. Schaefer, T. Guglhoer, M. G. R. Sause, and K. Drechsler, “Development of intimate contact during processing of carbon fiber reinforced Polyamide-6 tapes,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 36, no. 8, pp. 593–607, Apr. 2017, doi: <https://doi.org/10.1177/0731684416687041>.
- [23] C. M. Stokes-Griffin and P. Compston, “Investigation of sub-melt temperature bonding of carbon-fibre/PEEK in an automated laser tape placement process,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 84, pp. 17–25, May 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.12.019.
- [24] L. Amedewovo *et al.*, “A methodology for online characterization of the deconsolidation of fiber-reinforced thermoplastic composite laminates,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 167, p. 107412, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.compositesa.2022.107412.
- [25] H. Shinzawa and J. Mizukado, “Water absorption by polyamide (PA) 6 studied with two-trace two-dimensional (2T2D) near-infrared (NIR) correlation spectroscopy,” *J Mol Struct*, vol. 1217, p. 128389, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.molstruc.2020.128389.
- [26] Y. M. Boiko, G. Guérin, V. A. Marikhin, and R. E. Prud’homme, “Healing of interfaces of amorphous and semi-crystalline poly(ethylene terephthalate) in the vicinity of the glass transition temperature,” *Polymer*, vol. 42, no. 21, pp. 8695–8702, Oct. 2001, doi: 10.1016/S0032-3861(01)00406-2.
- [27] M. Ito, K. Mizuochi, and T. Kanamoto, “Effects of crystalline forms on the deformation behaviour of nylon-6,” *Polymer*, vol. 39, no. 19, pp. 4593–4598, Sep. 1998, doi: 10.1016/S0032-3861(97)10132-X.
- [28] N. Dencheva, Z. Denchev, M. J. Oliveira, and S. S. Funari, “Relationship between crystalline structure and mechanical behavior in isotropic and oriented polyamide 6,” *J Appl Polym Sci*, vol. 103, no. 4, pp. 2242–2252, Feb. 2007, doi: 10.1002/APP.25250.
- [29] D. Cavallo, L. Gardella, G. C. Alfonso, G. Portale, L. Balzano, and R. Androsch, “Effect of cooling rate on the crystal/mesophase polymorphism of polyamide 6,” *Colloid Polym Sci*, vol. 289, no. 9, pp. 1073–1079, Jun. 2011, doi: 10.1007/s00396-011-2428-6.

- [30] T. Guglhoer, M. Korkisch, and M. G. R. Sause, "Influence of carbon fibres on the crystallinity of polyamide-6," in *20th International Conference on Composite Materials (ICCM20), 19 - 24th July 2015, Copenhagen, Denmark*, O. T. Thomsen, C. Berggreen, and B. F. Sørensen, Eds., 2015, pp. 2203–2206. [Online]. Available: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM20proceedings/papers/paper-2206-3.pdf>
- [31] I. Kolesov, D. Mileva, R. Androsch, and C. Schick, "Structure formation of polyamide 6 from the glassy state by fast scanning chip calorimetry," *Polymer*, vol. 52, no. 22, pp. 5156–5165, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.polymer.2011.09.007.
- [32] A. T. Zehnder, "Modes of Fracture," *Encyclopedia of Tribology*, pp. 2292–2295, 2013, doi: 10.1007/978-0-387-92897-5_258.
- [33] M. J. Laffan, "Testing the toughness of polymer matrix composites," *Failure Mechanisms in Polymer Matrix Composites*, pp. 110–128, Jan. 2012, doi: 10.1533/9780857095329.1.110.
- [34] D. (David R.) Moore, A. Pavan, and J. G. (James G. Williams, "Fracture mechanics testing methods for polymers, adhesives, and composites," p. 375, 2001.
- [35] C. Zhang, A. Deceuster, and L. Li, "A method for bond strength evaluation for laminated structures with application to ultrasonic consolidation," *J Mater Eng Perform*, vol. 18, no. 8, pp. 1124–1132, Nov. 2009, doi: 10.1007/s11665-008-9342-1.
- [36] S. Simaafrookhteh, S. Lomov, and J. Ivens, "Characterization and interfacial bond strength analyses of carbon fibre reinforced polyamide6 (CF/PA6) laminated composites," in *18th European Mechanics of Materials Conference (EMMC18)*, Oxford, UK 2022.
- [37] "ISO 11343:2019 - Adhesives — Determination of dynamic resistance to cleavage of high-strength adhesive bonds under impact wedge conditions — Wedge impact method." <https://www.iso.org/standard/75628.html> (accessed May 26, 2023).
- [38] "Adhesives-Determination of dynamic resistance to cleavage of high-strength adhesive bonds under impact wedge conditions-Wedge impact method," 2019, Accessed: May 26, 2023. [Online]. Available: www.iso.org
- [39] "D3762 Standard Test Method for Adhesive-Bonded Surface Durability of Aluminum (Wedge Test) (Withdrawn 2019)." <https://www.astm.org/d3762-03r10.html> (accessed May 26, 2023).

- [40] “D5528 Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites.” <https://www.astm.org/standards/d5528> (accessed May 26, 2023).
- [41] “EN 6033 - European Standards.” <https://www.en-standard.eu/csn-en-6033-aerospace-series-carbon-fibre-reinforced-plastics-test-method-determination-of-interlaminar-fracture-toughness-energy-mode-i-gic/> (accessed May 26, 2023).
- [42] “D3039/D3039M Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.” https://www.astm.org/d3039_d3039m-17.html (accessed May 26, 2023).
- [43] “ASTM D3039 Tensile Testing of Composite Laminates | Instron.” <https://www.instron.com/en-ie/testing-solutions/astm-standards/astm-d3039> (accessed May 26, 2023).
- [44] R. Acosta Ortiz, J. de J. Ku Herrera, A. O. Garcia Santos, A. E. García Valdez, and G. Soria Arguello, “Tensile strength and fracture mode I toughness of photocurable carbon fiber/polyether-polythioether composites,” *Journal of Polymer Research*, vol. 28, no. 2, pp. 1–13, Feb. 2021, doi: 10.1007/s10965-020-02374-0.
- [45] “ISO 14125:1998(en), Fibre-reinforced plastic composites — Determination of flexural properties.” <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14125:ed-1:v1:en> (accessed May 26, 2023).
- [46] “D7264/D7264M Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials.” https://www.astm.org/d7264_d7264m-15.html (accessed May 26, 2023).
- [47] M. Nebe, T. Schmack, T. Schaefer, and F. Walther, “Experimental and numerical investigation on the impact response of CFRP under 3-point-bending,” *Composites Part C: Open Access*, vol. 4, p. 100079, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jcomc.2020.100079.
- [48] P. M. Schäfer, “Consolidation of carbon fiber reinforced Polyamide 6 tapes using laser assisted tape placement,” PhD Thesis, Technical University of Munich, 2017.
- [49] B. Satheesh *et al.*, “Peel strength characterisation on ply/ply interface using wedge and T-peel/pull-type tests,” *Polymers and Polymer Composites*, vol. 26, no. 8–9, pp. 431–445, Oct. 2018, doi: 10.1177/0967391118809205/format/epub.

- [50] G. Clancy, D. Peeters, V. Oliveri, D. Jones, R. M. O'Higgins, and P. M. Weaver, "A study of the influence of processing parameters on steering of carbon Fibre/PEEK tapes using laser-assisted tape placement," *Compos B Eng*, vol. 163, pp. 243–251, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.11.033.
- [51] C. M. Stokes-Griffin, A. Kollmannsberger, P. Compston, and K. Drechsler, "The effect of processing temperature on wedge peel strength of CF/PA 6 laminates manufactured in a laser tape placement process," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 121, pp. 84–91, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.02.011.
- [52] Sepehr Simaafrookhteh, "Modeling and experimental characterization of consolidation behavior during the processing of thermoplastic composites PhD thesis (ongoing)," KU Leuven, Belgium, 2023.
- [53] C. Millot, L. A. Fillot, O. Lame, P. Sotta, and R. Seguela, "Assessment of polyamide-6 crystallinity by DSC: Temperature dependence of the melting enthalpy," *J Therm Anal Calorim*, vol. 122, no. 1, pp. 307–314, Oct. 2015, doi: 10.1007/S10973-015-4670-5.
- [54] F. Darıcık ve K. Çelebi , "Karbon Lifi/Epoksi Tabakalı Kompozit Malzemelerin Farklı Ortam Şartlarındaki Mod I Kırılma Davranışı", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 32, sayı. 1, ss. 223-234, Mar. 2017, doi:10.21605/cukurovaummfd.310102

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Giray C., Ekşi Altan M. "Investigation of process-performance relationships in compression molding of unidirectional carbon fiber reinforced polyamide 6 composites," Cukurova 10th International Scientific Researches Conference, Adana, Turkey, pp 20-21., 2023

