



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
POLİMER MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**POLİAMİD MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

AYŞE DANIŞ BEKDEMİR

DANIŞMAN: DOÇ. DR. İDRİS KARAGÖZ

**YALOVA
Eylül 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
POLİMER MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

POLİAMİD MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

AYŞE DANIŞ BEKDEMİR
195301001

DANIŞMAN: DOÇ. DR. İDRİS KARAGÖZ

YALOVA
EYLÜL 2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez/Proje Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “POLİAMİD MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Ayşe DANIŞ BEKDEMİR



ÖNSÖZ

Akademik hayatımın en önemli dönüm noktalarından biri olan doktora sürecimde, bilgi birikimi, vizyoner yaklaşımı, özverili emeği ve değerli destekleriyle bana her zaman yol gösteren kıymetli danışmanım Doç. Dr. İdris KARAGÖZ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Tez komitesinde yer alan değerli hocalarım Prof. Dr. Yahya BOZKURT ve Prof. Dr. Hamit ERDEMİ hocalarıma desteklerinden ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Benim kadar emeklerinin geçtiğine inandığım DANIŞ ailesi; annem, babam ve ablalarım, her konuda beni destekleyen ve hep yanımda olan kıymetli eşim Hakan BEKDEMİR'e, doktora başlangıcından bitişine kadar her sürecin içinde olan canım kızım Ada BEKDEMİR'e ve hep yanımda olan canım arkadaşım Pelin KOTAS'a teşekkürlerimi sunarım.

Eylül – 2025

Ayşe DANIŞ BEKDEMİR



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	4
1.2. Literatür İncelemeleri	4
2. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI YÖNTEMİ.....	13
2.1. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (CFSSW).....	13
2.1.1. Titreşim destekli sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSVW).....	14
2.1.2. Salınlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SFSSW).....	15
2.1.3. Yürüyen (ilerlemeli) sürtünme karıştırma nokta kaynağı (WFSSW).....	16
2.2. Pimsiz Takım ile Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (PLT-FSSW)	17
2.2.1. Düz takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı	18
2.2.2. Profilli takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı	18
2.2.3. İç bükey/dış bükey takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı	19
2.2.4. Ara katmanlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (IL-FSSW).....	20
2.2.5. Dolgu sürtünme karıştırma nokta kaynağı (RFSSW)	20
2.2.6. Çıkıntılı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (PFSSW)	21
2.2.7. Düz yüzeyli sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FFSSW).....	22
3. DENEYSEL YÖNTEMLER.....	23
3.1. Malzeme	24
3.2. Kalıp Tasarımı	25
3.3. Kaynak Takımı	27
3.4. Proses Parametreleri	28
3.4.1. Dönme hızı.....	28
3.4.2. Bekleme süresi.....	28
3.4.3. Dalma hızı.....	29
3.4.4. Dalma derinliği	29
3.4.5. Ön ısıtma süresi	29

3.4.6. Soğutma süresi.....	30
3.4.7. Takım omuzu ve pim çapı	30
3.5. Termoplastik Malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi.....	30
3.6. Fiziksel, Mekanik ve Termal Deneylerin Yapılması.....	36
3.6.1. Çekme testi	36
3.6.2. Eğme testi	38
3.6.3. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC).....	39
3.6.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri	41
3.6.5. Termal kamera	43
3.6.6. Tam faktöriyel tasarım (FFD).....	44
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	45
4.1. Çekme Testi Sonucu.....	45
4.2. Üç Nokta Eğilme Mukavemetine Bekleme Süresinin Etkisi	54
4.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Deneyi Sonucu.....	55
4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İnceleme Sonuçları	68
4.5. Termal Kamera İnceleme Sonuçları	76
4.6. Tam Faktöriyel Tasarım Analiz Sonuçları	85
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	89
5.1. Sonuçlar	89
5.1.1. 762 dev/dk ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması	95
5.1.2. 1146 dev/dk ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması	96
5.1.3. 1560 dev/dk ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması	97
5.1.4. M10 pim ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması	97
5.1.5. M12 pim ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması	98
5.1.6. 15 s bekleme süresi ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması.....	98
5.1.7. 30 s bekleme süresi ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması.....	99
5.1.8. 45 s bekleme süresi ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması.....	99
5.1.9. 60 s bekleme süresi ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması.....	99
5.2. Sonuç ve Tartışma	100
5.3. Genel Değerlendirme.....	101
KAYNAKLAR.....	102
ÖZGEÇMİŞ	108

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

ΔH_m	: Erime entalpisi (J/g)
E_t	: Elastik Modül (MPa)
T_g	: Camlı geçiş sıcaklığı (°C)
T_m	: Kristal erime noktası (°C)
X_c	: Kristallenme oranı (%)
σ_B	: Kopma dayanımı (MPa)
σ_Y	: Çekme mukavemeti (MPa)
ΔH_0	: Kristal haldeki erime entalpisi (J/g)
ΔL	: Uzama miktarı (mm)
μV	: Sıcaklık farkı
d	: Kaynak takımı omuz çapı (mm)
df	: Serbestlik derecesi
F	: Çekme kuvveti (N)
L	: Toplam boy (mm)
MS	: Kareler ortalaması
R	: Kaynak takımı omuz yarıçapı (mm)
SS	: Kareler toplamı
t	: Kaynak edilecek malzeme kalınlığı (mm)
T	: Sıcaklık (°C)
λ	: Kristal lamel kalınlığı (nm)

KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril-butadien-stiren termopolimeri
Al	: Alüminyum
CFRP	: Karbon fiber takviyeli polimer
Cu	: Bakır
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetri
FFSSW	: Düz yüzeyli sürtünme karıştırma nokta kaynağı
FSAMP	: Sürtünme karıştırma destekli üretim süreçleri
FSSVW	: Titreşim destekli sürtünme karıştırma nokta kaynağı
HDPE	: Düşük yoğunluklu polietilen
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
IL-FSSW	: Ara katmanlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı
PA6	: Poliamid 6
PC	: Polikarbonat
PE	: Polietilen
PFSSW	: Çıkıntılı sürtünme karıştırma nokta kaynağı
PLA	: Polilaktik asit
PLT-FSSW	: Pimsiz takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı
PMMA	: Polimetil metakrilat
PP	: Polipropilen
RFSSW	: Dolgu sürtünme karıştırma nokta kaynağı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SFSSW	: Salınlımlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı
SKK	: Sürtünme karıştırma kaynağı

SKNK : Sürtünme kartrma nokta kaynağı
Ti : Titanyum
TWI : İngiliz kaynak enstitüsü
WFSSW : Yürüyen (ilerlemeli) sürtünme kartrma nokta kaynağı



TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Sürtünme karıştırma destekli üretim süreçlerinin sınıflandırılması	13
Tablo 3.1. PA6 teknik özellikleri.....	25
Tablo 3.2. Tam faktöriyel tasarım kaynak parametreleri	28
Table 3.3. PA6 için SKNK kaynak parametreleri	33
Tablo 4.1. Çekme deneyi sonuçları	45
Tablo 4.2. DSC testinden elde edilen sayısal veriler	55
Tablo 4.3. DSC testinden elde edilen sayısal veriler sonucunda hesaplanan kristallik yüzdeleri	66
Tablo 4.4. PA6-01, PA6-02 numunelerin termal kamera ölçümleri.....	83
Tablo 4.5. PA6-01, PA6-02, PA6-05, PA6-06 numunelerin termal kamera ölçümleri.....	83
Tablo 4.6. PA6-07, PA6-09, PA6-08, PA6-10 numunelerin termal kamera ölçümleri.....	83
Tablo 4.7. PA6-07, PA6-08, PA6-09, PA6-10 numunelerin termal kamera ölçümleri.....	84
Tablo 4.8. PA6-11, PA6-13 numunelerin termal kamera ölçümleri.....	84
Tablo 4.9. PA6-01, PA6-07, PA6-11 numunelerin termal kamera ölçümleri	84
Tablo 4.10. PA6-05, PA6-09, PA6-13 numunelerin termal kamera ölçümleri	84
Tablo 4.11. PA6-06, PA6-10, PA6-14 numunelerin termal kamera ölçümleri	84
Tablo 4.12. PA6-06, PA6-10, PA6-14 numunelerin termal kamera ölçümleri	85
Tablo 4.13. Tam faktöriyel tasarım için ANOVA	86

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	SKNK’da kullanılan polimer malzemeler	5
Şekil 1.2.	SKNK’da kullanılan polimer ve metal malzemeler	5
Şekil 1.3.	Takım dönme hız aralıkları	6
Şekil 1.4.	Bekleme süresi	6
Şekil 1.5.	SKNK’da kullanılan takım profilleri.....	9
Şekil 2.1.	CFSSW sürecinin şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.2.	FSSVW işlemi için kullanılan makinenin şematik gösterimi	15
Şekil 2.3.	SFSSW işlem adımlarının şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.4.	WFSSW işlem adımlarının şematik gösterimi	17
Şekil 2.5.	PLT-FSSW işlem adımlarının şematik gösterimi	17
Şekil 2.6.	Düz takım tasarımı görüntüsü	18
Şekil 2.7.	Takım geometrileri	19
Şekil 2.8.	Takım omuz profilleri	19
Şekil 2.9.	IL-FSSW işlem adımlarının şeması	20
Şekil 2.10.	RFSSW süreçlerinin şematik gösterimi	21
Şekil 2.11.	Çıkıntılı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (PFSSW) işlem adımları.....	22
Şekil 2.12.	Düz FSSW yöntemiyle birleştirilmesini gösteren şematik diyagram	22
Şekil 3.1.	Deneysel çalışmanın işlem adımları.....	23
Şekil 3.2.	PA6’nın kimyasal yapısı	24
Şekil 3.3.	Numunelerin testere kesilme işlemi	25
Şekil 3.4.	Numune boyutları.....	25
Şekil 3.5.	Kalıp boyutları.....	26
Şekil 3.6.	Numunenin kalıba bağlanması	26
Şekil 3.7.	Dışli pim kaynak takımı	27
Şekil 3.8.	SKNK sürecinin şematik gösterimi.....	31
Şekil 3.9.	Masaüstü freze tezgahı	31
Şekil 3.10.	Numunelerin tezgaha bağlanması	32
Şekil 3.11.	Dönme devrinin ayarlanması.....	32
Şekil 3.12.	Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlem adımları.....	33
Şekil 3.13.	Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmiş numune örnekleri.....	35
Şekil 3.14.	Kaynaklı birleşimlerin kesit ve yüzey görünimleri	35
Şekil 3.15.	Çekme testi cihazı şematik gösterimi.....	36
Şekil 3.16.	Yarı kristalin polimerik malzemelerin gerilme-gerinim grafiği.....	37
Şekil 3.17.	Zwick marka Z020 üniversal tip çekme testi cihazı.....	38

Şekil 3.18. Üç nokta eğme testinin şematik gösterimi	38
Şekil 3.19. Kaynaklı bağlantılardan alınan numunelere eğme testinin uygulanması.....	39
Şekil 3.20. DSC şematik gösterimi.....	39
Şekil 3.21. DSC eğrisi	40
Şekil 3.22. DSC numunelerinin hazırlanması	41
Şekil 3.23. Perkin Elmer marka DSC cihazı	41
Şekil 3.24. SEM cihazının şematik gösterimi.....	42
Şekil 3.25. FEI quanta 450 SEM cihazı.....	43
Şekil 3.26. Flir marka E5 model termal kamera ve Ebro marka TFI 650 model kızılötesi termometre.....	43
Şekil 4.1. Çekme mukavemeti ve elastik modül dağılım grafiği.....	46
Şekil 4.2. Çekme mukavemeti ve kopma uzaması dağılım grafiği	47
Şekil 4.3. Çekme mukavemeti ve kopma dayanımı dağılım grafiği	48
Şekil 4.4. Elastik modül ve kopma dayanımı dağılım grafiği	49
Şekil 4.5. Elastik modül ve kopma uzaması dağılım grafiği	50
Şekil 4.6. Laboratuvar çekme testinin şematik gösterimi.....	52
Şekil 4.7. Farklı bekleme sürelerinde kaynaklı PA6 bağlantılarının arıza yolları.....	53
Şekil 4.8. SKNK ile birleştirilen PA6 levhaların eğilme özellikleri üzerinde bekleme süresinin etkisi	54
Şekil 4.9. Saf PA6 ve FSSW ile birleştirilmiş PA6 numunelerinin DSC eğrileri	56
Şekil 4.10. PA6-00 Referans numunesinin DSC grafiği	56
Şekil 4.11. PA6-01 DSC grafiği	58
Şekil 4.12. PA6-02 DSC grafiği	59
Şekil 4.13. PA6-06 DSC grafiği	60
Şekil 4.14. PA6-08 DSC grafiği	61
Şekil 4.15. PA6-10 DSC grafiği	62
Şekil 4.16. PA6-11 DSC grafiği	63
Şekil 4.17. PA6-15 DSC grafiği	64
Şekil 4.18. DSC eğrileri.....	65
Şekil 4.19. Kristallik yüzdeleri	66
Şekil 4.20. Kristallik yüzdeleri	67
Şekil 4.21. PA6-01 Sem görüntüsü	68
Şekil 4.22. PA6-01 Sem görüntüsü	68
Şekil 4.23. PA6-02 Sem görüntüsü	69
Şekil 4.24. PA6-03 Sem görüntüsü	70
Şekil 4.25. PA6-04 Sem görüntüsü - 1	71

Şekil 4.26. PA6-04 Sem görüntüsü - 2	71
Şekil 4.27. PA6-06 Sem görüntüsü - 1	72
Şekil 4.28. PA6-06 Sem görüntüsü - 2	72
Şekil 4.29. PA6-10 Sem görüntüsü - 1	73
Şekil 4.30. PA6-10 Sem görüntüsü - 2	73
Şekil 4.31. PA6-13 Sem görüntüsü - 1	74
Şekil 4.32. PA6-13 Sem görüntüsü - 2	75
Şekil 4.33. PA6-14 Sem görüntüsü - 1	75
Şekil 4.34. PA6-14 Sem görüntüsü - 2	76
Şekil 4.35. PA6-01 Termal Kamera Görüntüleri.....	77
Şekil 4.36. PA6-02 Termal Kamera Görüntüleri.....	77
Şekil 4.37. PA6-03 Termal Kamera Görüntüleri.....	78
Şekil 4.38. PA6-04 Termal Kamera Görüntüleri.....	78
Şekil 4.39. PA6-05 Termal Kamera Görüntüleri.....	79
Şekil 4.40. PA6-06 Termal Kamera Görüntüleri.....	79
Şekil 4.41. PA6-07 Termal Kamera Görüntüleri.....	80
Şekil 4.42. PA6-08 Termal Kamera Görüntüleri.....	80
Şekil 4.43. PA6-09 Termal Kamera Görüntüleri.....	81
Şekil 4.44. PA6-10 Termal Kamera Görüntüleri.....	81
Şekil 4.45. PA6-11 Termal Kamera Görüntüleri.....	82
Şekil 4.46. PA6-13 Termal Kamera Görüntüleri.....	82
Şekil 4.47. Bekleme süresine göre sıcaklık değişimi	85
Şekil 4.48. PA6 numunelerinin çekme mukavemeti (MPa) için ana etki grafiği.....	87
Şekil 4.49. PA6 numunelerinin çekme mukavemeti (MPa) için etkileşim grafiği.....	87
Şekil 4.50. Çekme mukavemetinin yüzey grafiği.....	88

POLİAMİD MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan bir mühendislik plastiği olan PA6'nın mekanik, termal ve mikro yapısal özellikleri üzerinde Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağının (SKNK) etkileri araştırılmıştır. PA6 plakalar (5 mm kalınlığında, 30 mm genişliğinde, 150 mm uzunluğunda) Optimum BF20L freze makinesi kullanılarak kaynak yapılmış ve temel parametreler incelenmiştir: dönme hızı (762, 1146, 1560 dev/dk), pim çapı (M10, M12) ve bekleme süresi (15 s, 60 s). Etkilerini analiz etmek için tam faktöriyel bir tasarım kullanılmıştır. Dönme hızı, çekme dayanımını etkileyen en önemli faktör olarak ortaya çıkmış olup, 1146 dev/dk'lık optimum hız 72,4 MPa sağlamıştır. Bekleme süresi de önemli bir rol oynamış ve 15 saniyeden 60 saniyeye (40,6 MPa'dan 64,2 MPa'a) çıkarak eğilme dayanımını %56,5 oranında artırmıştır. Pim çapının çekme performansı üzerinde sınırlı bir etkisi olmasına rağmen, daha büyük pimler (M12) daha yüksek kristallik (%27,66'ya kadar) ve daha iyi termal dağılım sağlamıştır. Yüksek dayanım, yüksek kopma ve kabul edilebilirlik süneklik ile mekanik, termal, morfolojik özellikler bakımından en iyi ve dengeli olarak öne çıkan numune PA6-09 (1146 dev/dk, M10, 60 s). Bunun yanı sıra PA6-10 da mekanik açıdan çekme ve kopma dayanımı açısından öne çıkmaktadır. Numunenin dengeli ve tok bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. SEM görüntülerinin, mekanik ve termal verilerle uyumlu olduğu görülmektedir. Bu bulgular ışığında SKNK'nın PA6'nın performans özelliklerini iyileştirme potansiyelini vurgulayarak, onu otomotiv, havacılık ve elektronik endüstrilerinde, yüksek performanslı uygulamalar için uygulanabilir bir birleştirme yöntemi haline getirmekte hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, PA6, polimer birleştirme, plastik kaynak, kaynak parametreleri

JOINING OF POLYAMIDE MATERIAL BY FRICTION STIR SPOT WELDING

ABSTRACT

This study investigates the effects of Friction Stir Spot Welding (FSSW) on the mechanical, thermal, and microstructural properties of PA6, a widely used engineering plastic. PA6 plates (5 mm thick, 30 mm wide, 150 mm long) were welded using an Optimum BF20L milling machine, examining key parameters: rotational speed (762, 1146, 1560 rpm), pin diameter (M10, M12), and dwell time (15 s, 60 s). A full factorial design was employed to analyze their effects. Rotational speed emerged as the most significant factor influencing tensile strength, with an optimal speed of 1146 rpm yielding 72.4 MPa. Dwell time also played a major role, improving flexural strength by 56.5% as it increased from 15 to 60 seconds (40.6 MPa to 63.6 MPa). Although pin diameter had limited influence on tensile performance, larger pins (M12) promoted higher crystallinity (up to 26.77%) and better thermal distribution. The specimen PA6-09 (1146 rpm, M10, 60 s) stands out as the most balanced and optimal sample in terms of mechanical, thermal, and morphological properties, demonstrating high strength, high fracture resistance, and acceptable ductility. In addition, PA6-10 also exhibits superior performance in terms of tensile and fracture strength, indicating that the specimen possesses a balanced and tough structure. The SEM micrographs are observed to be consistent with the mechanical and thermal data. These findings highlight the potential of friction stir spot welding (FSSW) to enhance the performance characteristics of PA6, thereby rendering it a promising joining technique for high-performance applications in the automotive, aerospace, and electronics industries.

Keywords: Friction stir spot welding, PA6, polymer joining, plastic welding, welding parameters

1. GİRİŞ

Poliamid 6 (PA6), yüksek çekme ve darbe dayanımı, geniş bir sıcaklık aralığında yapısal kararlılığı koruma yeteneği ve yağlara, greslere, alifatik hidrokarbonlara ve birçok çözücüyeye karşı güçlü direnci nedeniyle mühendislik plastikleri arasında öne çıkmaktadır [1]. Bu özellikler PA6'yı otomotiv, elektrik ve elektronik, paketlenme ve tekstil gibi endüstrilerde popüler bir seçim haline getirir. Örneğin, otomotiv endüstrisinde PA6, motor bileşenleri, yakıt sistemleri, dişliler ve boru hatları gibi farklı uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik ve elektronik sektöründe ise genellikle konektörler, fişler ve terminallerde tercih edilmektedir. Düşük oksijen geçirgenliği, PA6'yı ambalajlama uygulamaları için uygun bir polimer haline getirirken; tekstil alanında elyaf formunda sağladığı esneklik, dayanıklılık ve aşınma direnci sayesinde önemli bir kullanım potansiyeli sunmaktadır. Ayrıca, üstün mekanik özellikleri nedeniyle PA6, kompozit yapıların üretiminde sıklıkla tercih edilen mühendislik polimerlerinden biridir [2].

Bu avantajlara rağmen, PA6 için üretim süreci, özellikle karmaşık parçalar üretilirken zorluklar ortaya koymaktadır. Enjeksiyon kalıplama gibi yöntemler birçok PA6 bileşeninin üretimine izin verse de daha karmaşık tasarımların oluşturulması için her zaman yeterli değildir. Genellikle, levhalar, profiller veya borular gibi PA6'nın yarı mamul formlarının daha karmaşık parçalar oluşturmak için birleştirilmesi gerekir [3]. Bu nedenle, özellikle PA6 olmak üzere plastiklerin birleştirilmesi, yapısal bütünlüğün ve hassasiyetin çok önemli olduğu otomotiv, tıp, havacılık ve paketlenme gibi endüstrilerde kritik öneme sahiptir [4]. Kaynak, plastik bileşenleri birleştirmek için en yaygın yöntemlerden biridir. PA6 bileşenleri, genellikle sıcak plaka kaynağı, ultrasonik kaynak ve sürtünme karıştırma kaynağı gibi yöntemler kullanılarak birleştirilir; bunların tümü, malzemenin özelliklerini tehlikeye atmadan güçlü ve güvenilir bağlantılar üretir [5].

Ancak bu geleneksel kaynak yöntemleri bazen, malzeme işlem sırasında eridiği için deformasyon ve yapısal bozulma gibi istenmeyen etkilere neden olabilir. Son yıllarda, Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK), plastiklerle kullanım için metal endüstrisinden başarıyla uyarlanmış yenilikçi bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntem yalnızca yüksek kaliteli kaynak bölgeleri üretmekle kalmaz, aynı zamanda enerji verimliliği, düşük termal darbe ve çevre dostu bir işlem gibi ek avantajlar da sunar.

Yüksek performanslı uygulamalarda PA6 kullanımının artması göz önüne alındığında, etkili birleştirme yöntemlerinin geliştirilmesi esastır. Plastikler için SKNK'nin benimsenmesi

arttıkça, PA6'ya uygulanabilirliği üzerine araştırmalar kritik bir odak alanı haline gelmiştir [6-11]. Kaynak kalitesini etkileyen parametreleri anlamak, bu süreci optimize etmek için hayati öneme sahiptir. SKNK kullanılarak PA6'nın birleştirilmesinde, çok sayıda faktör kaynak mukavemetini ve kalitesini etkiler. Bunlara takım dönüş hızı [10-12], ön ısıtma (bekleme süresi), karıştırma ve soğutma süresi [10, 11-15], dalma derinliği [10], takım omuzu ve pim çapı [16-18] ve takım pim geometrisi [9, 12, 14] dahildir. Ek olarak, dolgu malzemelerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir [12, 18]. Ancak, bu araştırmalara rağmen, araştırmacılar, özellikle PA6 olmak üzere termoplastikler için SKNK'ye ilişkin mevcut anlayışın hala yetersiz olduğu ve tekniği ilerletmek ve yaygın endüstriyel kullanım elde etmek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu konusunda hemfikirdir [4, 6-8].

SKNK performansını etkileyen parametreler arasında, dalma oranı özellikle kritik olarak tanımlanmıştır. Yan ve diğ. [11], yüksek kaynak mukavemeti elde etmek için optimum dalma oranının belirlenmesinin önemli olduğunu öne sürmüşlerdir. Düşük dalma oranları, malzemenin etkileşim süresini ve kaynaklı bölgenin boyutunu azaltarak kaynak mukavemetini olumsuz yönde etkiler ve bu da yük taşıma kapasitesini düşürür. Tersine, aşırı yüksek dalma oranları, malzemenin karıştırılması ve ısıtılması arasındaki dengeyi bozabilir ve ayrıca daha zayıf kaynaklara yol açabilir. Bir diğer önemli faktör olan dalma derinliği, kaynağın penetrasyonunu ve geometrisini kontrol eder. Dalma derinliği arttıkça, malzemeler arasındaki bağlanma alanı genişler. Ancak hem çok sıkı hem de çok derin dalma derinlikleri çekme mukavemetini azaltabilir ve bu da güçlü, iyi biçimlendirilmiş kaynaklar için optimum bir aralığın bulunması gerektiğini gösterir [19]. Ek olarak, SKNK işlemi sırasında, polimerin nem içeriği ve dalma fazı sırasında sıkışan hava nedeniyle kaynak bölgesinde kabarcık oluşumu gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Daldırma sırasında uygulanan eksenel kuvvet, malzemeyi sıkıştırır, kabarcık oluşumunu azaltır ve yük taşıma kapasitesini artırarak kaynağın mekanik performansını iyileştirir [20].

Araştırmalar, ön ısıtma süresinin genel kaynak kalitesi üzerinde minimal bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ön ısıtma öncelikle kaynak takımının altındaki üst yüzey bölgesini etkilerken, polimerlerin düşük termal iletkenliği nedeniyle alt katmanlar üzerindeki etkisi sınırlıdır [21-23]. Daha önemlisi, kaynağın derinliğini ve boyutunu belirleyerek kaynak mukavemetini etkileyen bekleme süresidir. Daha uzun bekleme süreleri, kaynak derinliğini artırarak kaynak mukavemetini artırabilir, ancak çok uzun süre uzatılırsa, polimer zincirlerinin mekanik bozulması nedeniyle malzeme atılması, boşluk oluşumu ve azalan moleküler ağırlık gibi olumsuz etkilere neden olabilir [11]. Bu nedenle, istenen kaynak mukavemetini elde etmek

için bekleme süresini dengelemek esastır. Daldırma ve karıştırma işleminin sonunda, kaynak bölgesinde üretilen ısı polimerleri yumuşatarak elastik bir yapı oluşturur. Bu yapı, polimerlerin düşük termal difüzivitesi nedeniyle belirli bir soğutma süresi gerektirir [8]. Soğutma süresi, kaynak işlemi sırasında ulaşılan maksimum sıcaklık ve cam geçiş sıcaklığı (T_g) dahil olmak üzere malzemenin termal özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Malzeme soğudukça, kaynak bölgesinin zayıflamasını önlemek için uygun bir anda takım geri çekilmelidir.

Omuz ve pimin boyutu da kaynak kalitesini belirlemede önemli bir rol oynar. Daha büyük takım omuz çapları karıştırılan bölgeyi genişleterek çekme dayanımını artırırken, daha büyük takım pimi çapları karıştırılan bölgenin özelliklerindeki olumsuz değişiklikler nedeniyle kaynak dayanımını azaltabilir [8]. Ek olarak, takım piminin geometrisi kritik bir faktördür. Çalışmalar, dişli silindirik bir pimin, alüminyum gibi metallerin SKNK'sinde görülen aynı prensipleri izleyerek daha güçlü kaynaklar üretmede düz silindirik bir pimden daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir [23].

Özetle, PA6'nın SKNK'sindeki en etkili parametreler bekleme süresi ve dönme takımıdır. Ancak, literatür, alet dönme hızının etkisi konusunda çelişkili sonuçlar sunmaktadır; bazı çalışmalar yüksek hızlarda minimum etki veya hatta kaynak mukavemetinde azalma olduğunu öne sürerken, diğerleri optimum dönme hızının kaynak kalitesini artırdığını belirtmektedir [11, 24]. Lambiase ve diğ. [8], takım dönme hızı ile kaynak kalitesi arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi vurgulayarak bunu polimerlerin sıcaklık hassasiyetine bağlamıştır. Malzeme kalınlığı, takım boyutları ve polimerin termal özellikleri gibi faktörlerin tümü ideal kaynak koşullarının belirlenmesinde rol oynar.

PA6 gibi gelişmiş polimerlerin yüksek performanslı uygulamalarda kullanımı, mükemmel mekanik özellikleri, çok çeşitli kimyasallara karşı direnci ve termal kararlılığı nedeniyle hızla artmaktadır. Otomotiv, havacılık ve elektronik gibi endüstrilerde, yapısal bütünlüğü sağlamak için güvenilir ve etkili birleştirme yöntemleri esastır. PA6 genellikle enjeksiyon kalıplama yoluyla işlenirken, birleştirme teknikleri daha karmaşık montajlar için çok önemlidir. Ancak, geleneksel kaynak yöntemleri, malzemenin performansını etkileyen bozulmaya ve yapısal değişikliklere yol açabilir. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK), özellikle PA6 gibi termoplastikler için umut verici bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu teknik, geleneksel yöntemlere göre daha düşük termal etkiye sahip yüksek kaliteli bağlantılar üretir. Potansiyeline rağmen, SKNK parametrelerinin PA6 kaynakları üzerindeki etkisine ilişkin kapsamlı araştırmalar sınırlı kalmaktadır ve bu da daha geniş bir şekilde benimsenmesini engellemektedir. Çalışmalar, takım dönme hızı, bekleme süresi ve pim geometrisi gibi

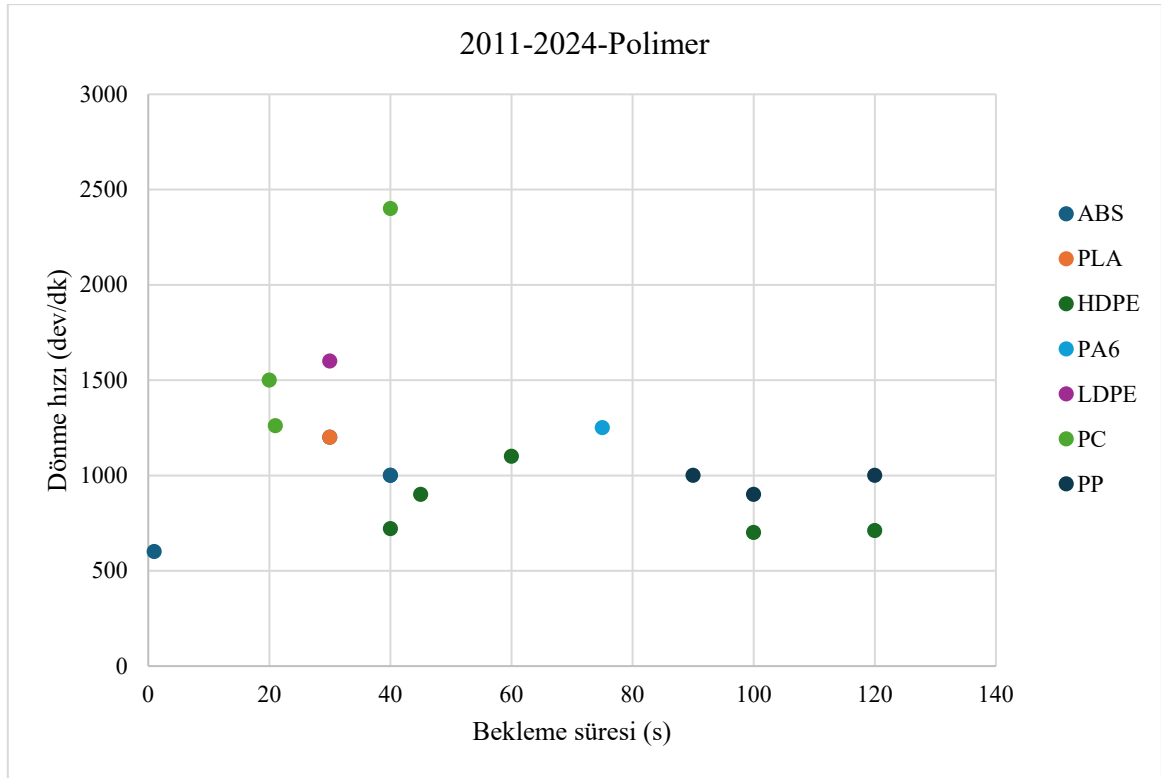
faktörlerin kaynak kalitesini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Yine de, PA6 kaynağı için optimum koşullar iyi belirlenmemiştir ve bu da literatürde çelişkili sonuçlara yol açmaktadır.

1.1. Tezin Amacı

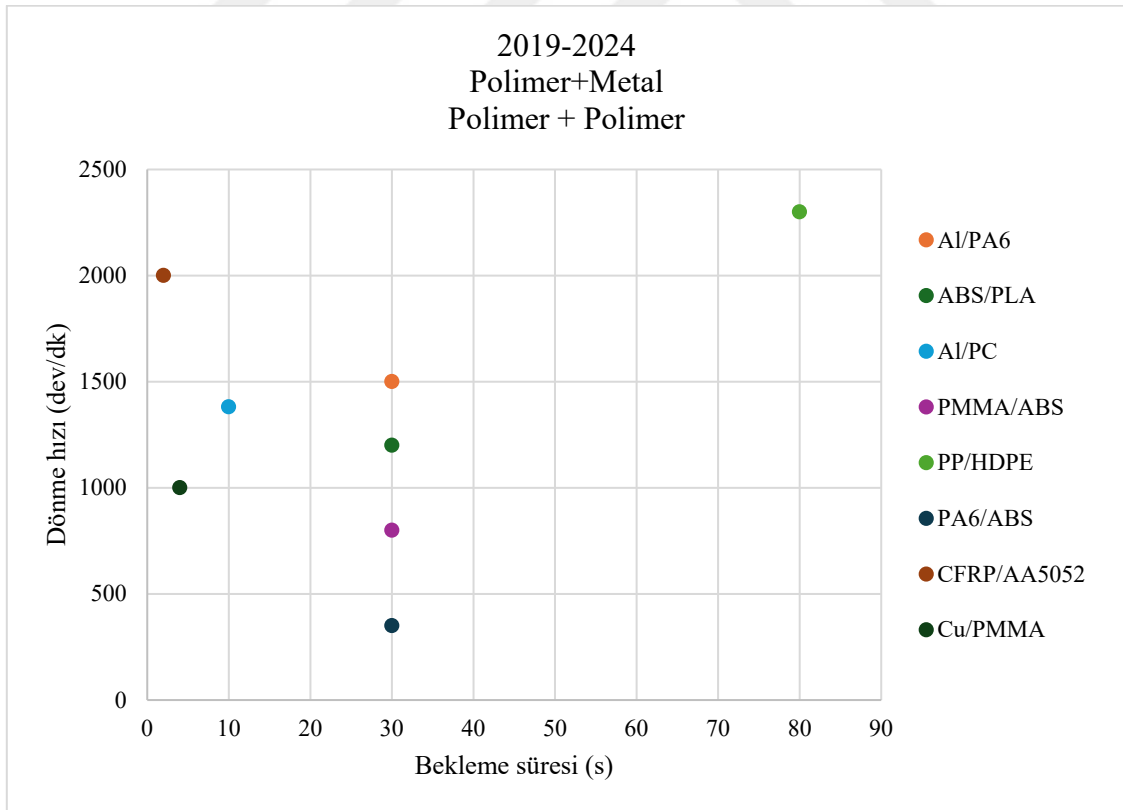
PA6 malzemeleri, değişen takım dönüş hızları, bekleme süreleri ve pim çapları ile SKNK yöntemi kullanılarak birleştirilecektir. Genellikle küçük pim çapları ve büyük omuz çapları kullanan geleneksel SKNK takımlarının aksine, bu çalışma, daha büyük pim çaplarına (M10 ve M12) ve pim çapının iki katı büyüklüğünde omuz çaplarına sahip yeni bir takım tasarımı sunmaktadır. Bu benzersiz takım tasarımının kaynak performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için, ortaya çıkan kaynakların mekanik, termal ve mikro yapısal özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenecektir. Bu araştırma, parametrelerin potansiyelini araştırarak PA6 için SKNK sürecini optimize etmek için değerli bilgiler sağlamayı ve böylece yüksek performanslı, dayanıklı bağlantıların hayati önem taşıdığı endüstrilerde uygulanmasını amaçlamaktadır.

1.2. Literatür İncelemeleri

Son yıllarda sürtünme karıştırma nokta kaynağı, endüstriyel taleplerin artması ve akademik araştırmacıların katkılarıyla hızla gelişmeye devam etmektedir. İlk çalışmalar; aynı tür polimerlerin birleştirilmesi için prosesin uygulanabilirliğini kanıtlamayı ve uygun işleme yöntemlerini belirlemeyi amaçlarken, son çalışmalar polimer ve metallerin birleşimi üzerine yoğunlaşmıştır. Literatür taraması yapılırken, polimerlerin SKNK işlemleri üzerine yapılan mevcut çalışmaların ana bulgularını özetlemek hedeflemiştir. Çalışmalarda, kaynakların morfolojisi, takım dönme hızı, bekleme süresi, takım geometrik özellikleri, dalma hızı, dalma oranı gibi proses parametreleri kategorize edilmiş ve etkileri araştırılmıştır.

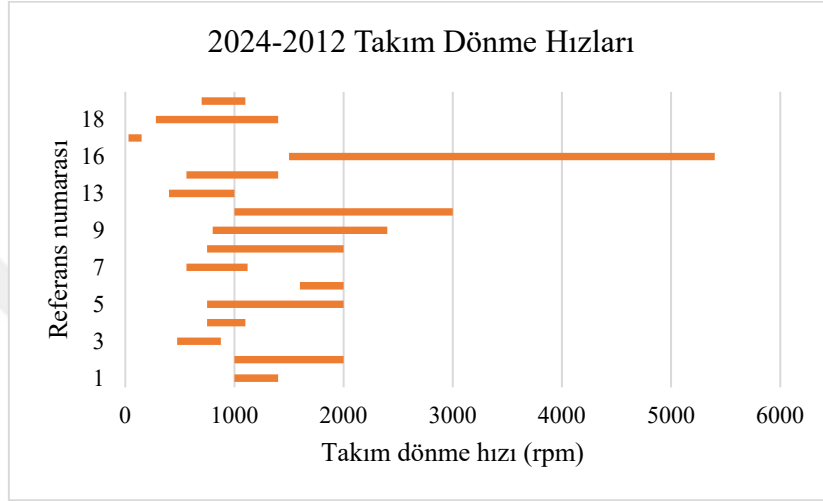


Şekil 1.1. SKNK’da kullanılan polimer malzemeler

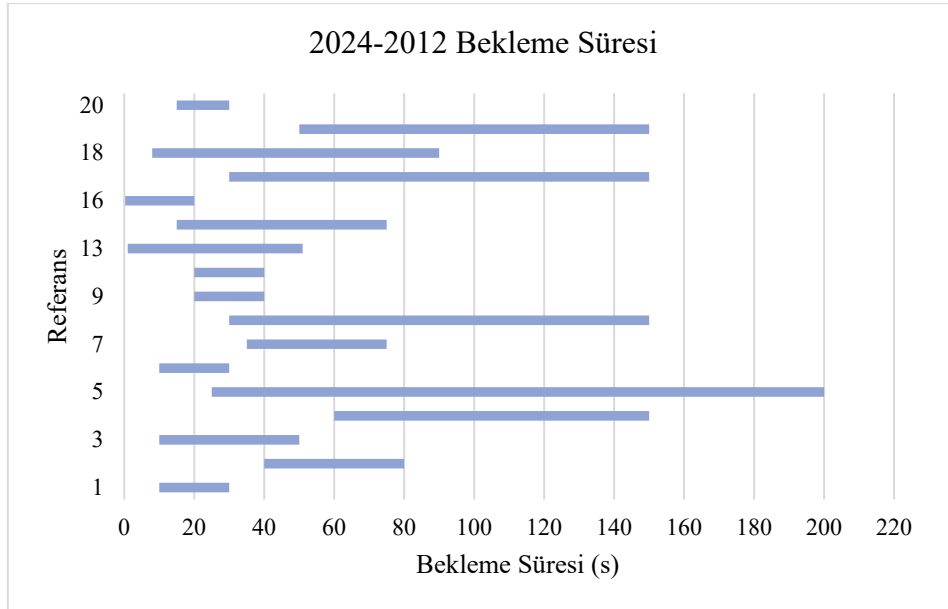


Şekil 1.2. SKNK’da kullanılan polimer ve metal malzemeler

Literatür taraması yapılırken proses parametrelerinden takım dönme hızı ve bekleme süresi üzerinde yapılan çalışmalar incelenmiştir. İncelediğimiz çalışmalarda 500-5000 dev/dk arası takım dönme hızı 1 s’den 200 s’e kadar bekleme süreleri kullanılmıştır. Yüksek dönme hızı ile yapılan çalışmalarda, genellikle kaynak işlemi kısa bekleme sürelerinde gerçekleşmiştir. Bunun nedeni, yüksek dönme hızının daha fazla sürtünme ısısı üretmesidir. Polimerlerin SKNK ile ilgili farklı çalışmalarda analiz edilen işlem parametrelerinden takım dönme hızı ve bekleme süresi Şekil 1.3 ile Şekil 1.4’te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Takım dönme hız aralıkları



Şekil 1.4. Bekleme süresi

Sidhom ve dig. [33], çalışmalarında yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemesinin SKNK yöntemiyle birleştirilmesinde takım dönme hızı parametresinin mukavemet üzerindeki

etkilerini incelenmişlerdir. Çalışmada, düşük hızlarda (800 devir/dk) başarılı kaynağın mümkün olmadığını vurgulamaktadır. Genel olarak bu durumun düşük ısı üretimi ve HDPE malzemesinin mekanik özelliklerinden kaynaklandığı bu nedenler de bağlantı bölgesinin daha zayıf performans gösterdiği işaret edilmiştir.

Mert ve diğ. [34], çalışmalarında poliamid 6 (PA6) malzemesinin SKNK yöntemiyle birleştirilmesinde bekleme süresi parametresinin mukavemet üzerindeki etkilerini incelenmişlerdir. 100 saniyeden sonra bekleme süresinin artmasıyla mukavemette düşüş gözlenmiş, bunun nedeninin aşırı ısınma - termal bozulma, malzeme degradasyonu, fazla malzeme akışı ve kötüleşen bağlantı yapısı olabileceği sonucuna varılmıştır. Uzun süreli ısınmanın, polimer malzemede moleküler zincirlerin kopmasına ve oksidasyona yol açabileceği, mekanik özelliklerinin de zayıflamasına neden olacağı vurgulanmıştır. Ayrıca, uzun bekleme süresi boyunca yumuşayan malzemenin kaynak havuzundan dışarı doğru fazla akması, kaynak bölgesindeki malzemenin azalmasına ve kaynak bağlantısının mekanik dayanımını olumsuz yönde etkileyeceği sonucu tespit edilmiştir.

Bilici ve diğ. [35], çalışmalarında, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemesinin SKNK yönteminin levhalarda uygulanabilirliği ve kaynak parametrelerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. En iyi kaynak parametrelerinin belirlenmesi için takım dönüş hızı, takım dalma derinliği ve bekleme süresi değerlendirilmiştir. Optimum kaynak parametreleri, bakır takım kullanımı, 710 dev/dk. takım dönüş hızı, 45 saniye bekleme süresi ve 0,2 mm dalma derinliği olarak belirlenmiştir. Bu parametreler ile %22 oranında bir kaynak mukavemeti artışı sağlanmıştır. ANOVA analizine göre, takım dönüş hızı ve ısı transfer katsayısı kaynak mukavemetine en fazla etki eden parametreler olarak tespit edilmiştir.

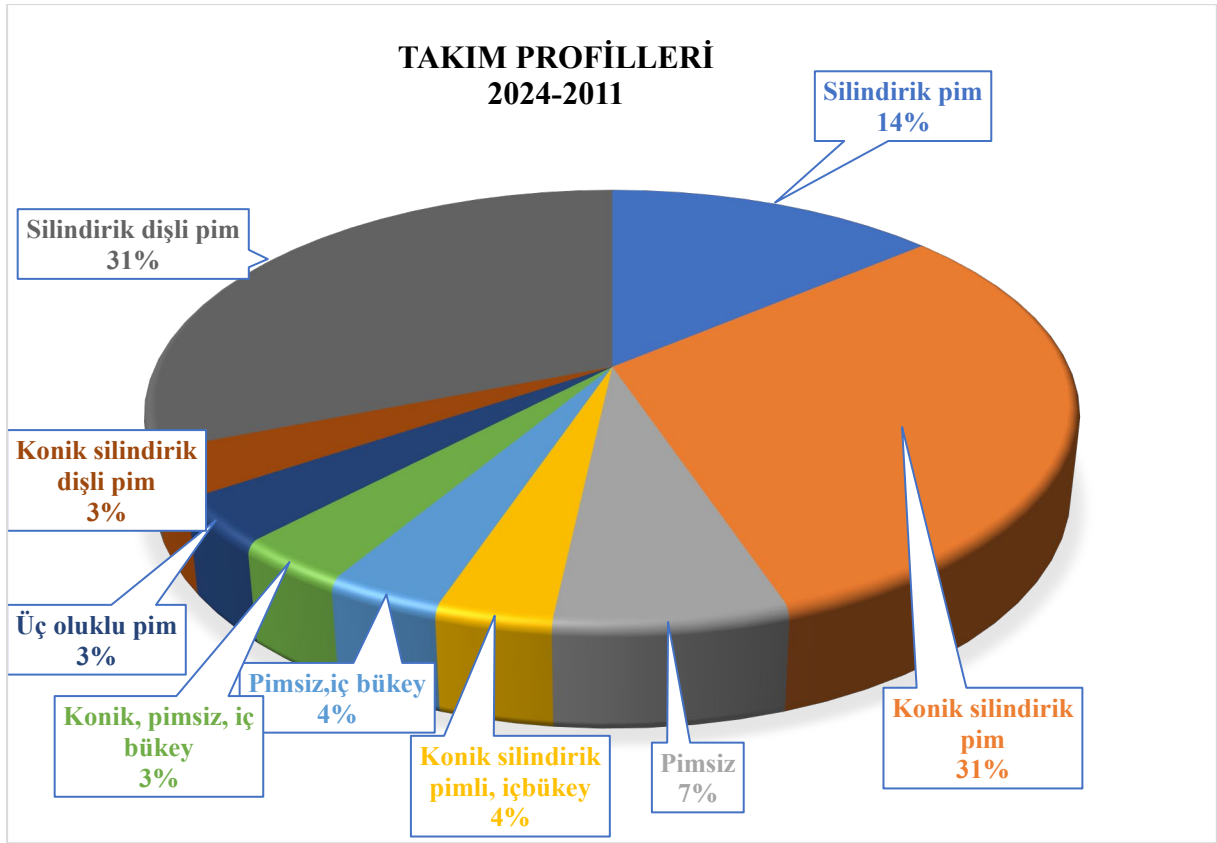
Pereira ve diğ. [9], çalışmalarında, poliamid ve alüminyum malzemelerinin birleştirilmesinde dalma derinliğinin etkilerini incelenmişlerdir. Dalma derinliğindeki ve bekleme süresindeki artışın, kaynak mukavemetinde artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Dönme hızının, dalma derinliğinin ve bekleme süresinin optimize edilmesi, ısının daha kontrollü bir şekilde uygulanmasının gözenek oluşumunu azalttığı belirtilmiştir. Yüzey işlemlerinin alüminyumun pürüzlülüğünü artırdığı ve bunun da poliamid malzemenin metal içine daha iyi geçmesini ve mikro-mekanik kilitlenmenin oluşmasına olanak tanıdığı vurgulanmıştır.

Nagarajan ve Manoharan [37], polikarbonat ve alüminyum malzemelerinin birleştirilmesi üzerine yapılan çalışmada dalma derinliği ve takım profili etkileri incelenmiştir. Dalma derinliğinin artmasının, kaynak bölgesindeki malzeme karışımını ve dolayısıyla mekanik

bağlantıları iyileştirdiği vurgulanmıştır. Mikroyapısal incelemeler, yüksek dalma derinliklerinde polimer ve alüminyum arasındaki mikro-mekanik kilitlemenin daha etkin olduğunu göstermiştir. Bu durum, doğru dalma derinliği ayarının kaynak performansını önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. Takım profili olarak silindirik konik dişli profile sahip takım kullanılmıştır. Bu profil, kaynak sırasında malzemenin daha etkin bir şekilde karıştırılmasını ve homojen bir kaynak bölgesi oluşturulmasını sağlamıştır. Takımın omuz kısmının, yüzeyde sürtünme ısısı oluşturarak malzemeyi yumuşattığını ve karıştırdığını, pim kısmının ise daha derinlemesine malzeme karışımı ve mekanik kilitleme sağladığı vurgulanmıştır.

Mishra ve diğ. [38], çalışmalarında, ABS malzemelerinin birleştirilmesinde dalma derinliği ve bekleme süresinin kaynak mukavemetine etkilerini incelenmişlerdir. Sonuç olarak, düşük dalma derinlikleri veya yetersiz/daha fazla bekleme sürelerinin, kaynak mukavemetinde düşüşe yol açtığı vurgulanmıştır.

Kullanılan takımlar üzerinden yapılan çalışmalar incelendiğinde, araştırmalar, konik-silindirik ve içbükey pimlerin, malzeme sıkışmasını ve tutunmasını artırarak yüksek mukavemet elde ettiğini göstermiştir. Dişli pimler ise malzeme karışımını daha da iyileştirerek en yüksek mukavemet değerlerini sağlamıştır. Bu çalışmalar sonucunda konik-silindirik ve dişli pimler, polimer malzemelerde kaynak kalitesini artırmak için kritik öneme sahip olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 1.5. SKNK’da kullanılan takım profilleri

Pereira ve diğ. [9], yüzey analizi çalışmalarında, pimsiz bir takım kullanılarak yapılan kaynaklarda genellikle daha düzgün yüzeyler gözlemlenirken, konik pimli araç kullanıldığında yüzeylerde düzensizlikler ve yükselmeler tespit edilmiştir. Gözenek boyutunun ve miktarının artmasıyla kaynakların mekanik performansında azalma olduğunu göstermiştir. Maksimum mukavemet pimsiz takımda gözlenmektedir.

Nagarajan ve Manoharan [37], çalışmalarında, silindirik konik dişli profile sahip bir takım kullanmışlardır. Bu profil, kaynak sırasında malzemenin daha etkin bir şekilde karıştırılmasını ve homojen bir kaynak bölgesi oluşturulmasını sağlar. Takımın omuz kısmı, yüzeyde sürtünme ısısı oluşturarak malzemeyi yumuşatır ve karıştırır, pim kısmı ise daha derinlemesine malzeme karışımı ve mekanik kilitleme sağlar.

Mishra ve diğ. [38], çalışmalarında silindirik pim kullanmışlardır. Bu takımın, malzeme içine düzgün bir şekilde ısı yayarak yumuşatma ve iyi bir karışımı sağladığı vurgulanmıştır. Silindirik pimlerin malzemenin eksenel ve radyal yönlerde akışını sağlayarak kaynak bölgesinde homojen bir malzeme karışımı ve iyi bir kaynak kalitesi elde edilmesine yardımcı olduğunu, böylece boşluk veya hataların oluşmasını engellediklerini belirtilmiştir. Düzgün ve homojen bir

kaynağın çekirdek (karışım bölgesi) oluşumunu, çekirdek büyüklüğünü ve şeklini ayrıca kaynak mukavemetini doğrudan etkilediğini vurgulanmışlardır.

Arif ve diğ. [39], çalışmalarında yüksek yoğunluklu PMMA ve ABS malzemelerinin SKNK yöntemiyle birleştirilmesinde takım piminde, karışım yeteneğini ve dönme sırasında sürtünme ısını artırmak için silindirik dişli profile sahip takım kullanılmıştır. Kullanılan takımın mukavemete olumlu etkisi olduğu vurgulanmış fakat dalma hızındaki artışın kaynak dayanımını azalttığı görülmüştür.

Yan ve diğ. [14], çalışmalarında akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve Poliamid 6 (PA6) malzemelerinin yeni bir tasarım ile diş şekilli düz pim kullanılarak SKNK yöntemiyle birleştirilmesinde optimum kaynak parametreleri ve mikroyapı analizleri incelenmiştir. H13 çelikten yapılmış ve uzun diş şekilli düz pin ile tasarlanmış araç kullanılmıştır. Takım profilinden kaynaklı yer yer zayıf bağlantı bölgeleri ve mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. 350 dev/dk dönüş hızının ABS ve PA6 arasındaki en iyi mekanik bağlantı performansı sağladığı vurgulanmıştır.

Abdallah ve diğ. [41], çalışmalarında yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzeme kullanılarak SKNK yöntemiyle birleştirilmesinde sıcaklık dağılımının, kaynak bölgesindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Analizler plakalara yerleştirilen termokupllar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Takım dönme hızlarının 475 ve 580 dev/dk, olarak kullanmışlar fakat kaynak sırasında üretilen ısı miktarının yetersiz olduğunu vurgulamışlardır. HDPE'nin erime sıcaklığına ulaşamamış ve kaynak kalitesi düşük olmuştur. Düşük miktarda sürtünme ile oluşan ısı ve malzeme karışımının yetersizliği, kaynak noktasının mekanik dayanımını olumsuz etkilemiştir.

Kalaf ve diğ. [42], çalışmalarında Al-Mg-C ve karbon fiber (CFRP) ara tabakası kullanılarak yapılan SKNK birleştirmelerinde SEM-EDS analizleri değerlendirildiğinde yüksek ısı girdisinin kaynak bölgesinde mikro çatlaklar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra yüksek dönme hızları ve bekleme sürelerinin, karbon fiber (CFRP) ara tabakasını eriterek birleşme bölgesinden dışarı itilmesine neden olduğunu bu durumun da bağlantı bölgesinde mikro-mekanik kilitlenmeyi artırarak mekanik performansı yükselttiğini vurgulamışlardır.

Adibeig ve diğ. [43], çalışmalarında düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) malzeme kullanılarak SKNK yöntemiyle birleştirilmesinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi sonuçlarına bakıldığında en yüksek mukavemetli numunede homojen ve yoğun bir mikro yapı

gözlemlendiği vurgulanmıştır. Sayısal simülasyon sonuçlarının, deneysel verilerle uyumlu olduğu da ayrıca belirtilmiştir.

Kumar ve diğ. [44], çalışmalarında 3D baskılı akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve poliamid 6 (PA6) malzeme kullanılarak SKNK yöntemiyle birleştirilmesinde DSC analizleri sonuçlarına bakıldığında yüksek dönme hızının daha iyi moleküler yönlenme ve termal kararlılık sağladığını ortaya koymuştur. Termal görüntülemelerde, yeterli ısı üretimi ve malzeme akışı sağladığı görüntülenmiş olup, SEM analiz sonuçlarında kaynak numunesinin düzgün bir yapıya sahip olduğunu ve mikro çatlak içermediğini göstermiştir. Bu sonuçlar, yüksek dönme hızı ve uzun karıştırma süresinin daha üstün mekanik ve termal özellikler sağladığını doğrulamaktadır.

Literatürdeki mekanik, termal ve morfolojik bulgular, parametreler bağımsız olarak ele alınarak genel bir değerlendirme yapıldığında, takım dönme hızının yüksek olması, daha yüksek ısı oluşmasına ve polimer malzemenin daha iyi eriyip karışacağı sonucunu doğurmaktadır. Bu durum kaynak bölgesinde de güçlü ve homojen bir yapı meydana getirecektir. Fakat aşırı yüksek dönme hızı, polimerlerin termal olarak bozunmaya uğratacağından, kaynak bölgesinde mekanik mukavemet düşüklüğüne sebep olacaktır. Takım dönme hızının düşük olması daha az ısı oluşmasına bu durum sonucunda da polimerin erimemesine ve karışmamasına sebebiyet verecektir. Bu yetersiz ısı girdisi kaynak bölgesinde iyi bir bağlanma olmamasına ve düşük mukavemete neden olacaktır. Aynı durum bekleme süreleri içinde geçerlidir. Eğer uzun bekleme süreniz var ise kaynak bölgesinde fazla ısı birikmesi olacak, malzeme çok iyi eriyecektir. Sonuçta güçlü bir kaynak bağı oluşturacaktır. Fakat çok uzun bekleme süresi aynı etkiyi vermeyecek, malzemenin bozunmasına ve mekanik mukavemetin düşmesine neden olacaktır. Kısa bekleme sürelerinde de durum tam tersidir. Daha az ısı, polimerin eriyememesi, zayıf bağlantı ve düşük mukavemet ile sonuçlanacaktır. Dalma derinliği kaynak bölgesindeki daha çok malzemenin karışmasında etkili olduğu için, güçlü bir kaynak bağı oluşturacaktır. Bununla birlikte, dalma derinliğinin fazla olması aşırı ısınmaya sebep olarak polimerin termal bozunmasına neden olur. Bunun yanı sıra yüzeysel dalma yapılırsa daha az malzeme karışacağından zayıf kaynak bağlantısı oluşacak, bu da mekanik mukavemetin düşük olmasına neden olacaktır. Kaynak bölgesinin morfolojisi incelendiğinde, iyi erimiş bir polimer malzemenin, homojen bir yapıya sahip olması yüksek mekanik mukavemetli bir kaynak gerçekleştiği anlamına gelmektedir. Kaynak bölgesinde mikro gözenekler, boşluklar yoğunluktaysa yetersiz ısı ve homojen olmayan bir karışım gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Sonuç olarak bu durum da mekanik mukavemetin düşük olacağına işaret edecektir. Malzeme akışının iyi olması kaynak bağlantısının güçlü ve dayanıklı olacağını işaret eder. Eğer yetersiz ve

düzensiz bir akış varsa, zayıf bağlantı olma olasılığı yüksektir. İki farklı polimerin birleşim bölgelerinden kaynaklı morfolojik yapıda katmanlar görülebilmektedir. Kaynak bağlantısının kalitesini bu bölgelerin mikroyapısal bütünlüğü belirleyecektir. Polimerlerin kristal yapıları yüksek basınç ve sıcaklık nedeniyle değişmektedir. Kristal yapının yoğunluğu malzemenin mukavemetini artırırken, amorf bölgelerin yoğunluğu daha düşük mukavemete sebep olacaktır. Polimerin kimyasal yapısının değişmesi termal bozunma nedeniyle olabilir bu durum da mekanik mukavemeti düşürecektir. Yetersiz kaynak parametreleri veya malzeme özellikleri SEM görüntülerinde gözlenebilen ve mukavemeti olumsuz etkileyen mikro çatlaklar ve çatlaklara neden olabilir [45]. Polimerlerin kristal yapısında değişiklikler kaynak sırasında oluşan ısıdan kaynaklanabilir, bu durum malzemenin camsı geçiş sıcaklığında değişikliğe neden olacaktır. Bu değişiklikler polimer malzemenin mekanik özelliklerinden esneklik ve sertlik durumunu etkileyecektir. Camsı geçiş sıcaklığının yükselmesi polimerin esnekliğini arttırırken, camsı geçiş sıcaklığının düşmesi sert ve kırılgan bir yapıya bürünmesine neden olacaktır. Polimerin daha geniş bir sıcaklık aralığında esnek kalması camsı geçiş sıcaklığı düşük ise gerçekleşir. Düşük sıcaklıkta darbe dayanımı azalırken, malzemenin çatlama olasılığı artabilir. SKNK işlem sırasında gerçekleşen ısı termal stabilite ve bozunmaya neden olabilmektedir. Bu durumu görebilmek için DSC analizleri ile değerlendirmek gerekir [8].

2. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI YÖNTEMİ

1991 yılında sürtünme karıştırma kaynağı (SKK-FSW) İngiliz Kaynak Enstitüsü (TWI -The Welding Institute) tarafından bulunmuş ve patenti alınmıştır [47]. FSW'nin temel prensibi kullanılarak, farklı sürtünme karıştırma destekli üretim süreçleri (FSAMP) geliştirilmiştir. FSAMP 6 kategoriye ayrılmıştır. Bu çalışmada FSAMP süreçleri içerisinde, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ve çeşitleri incelenecektir.

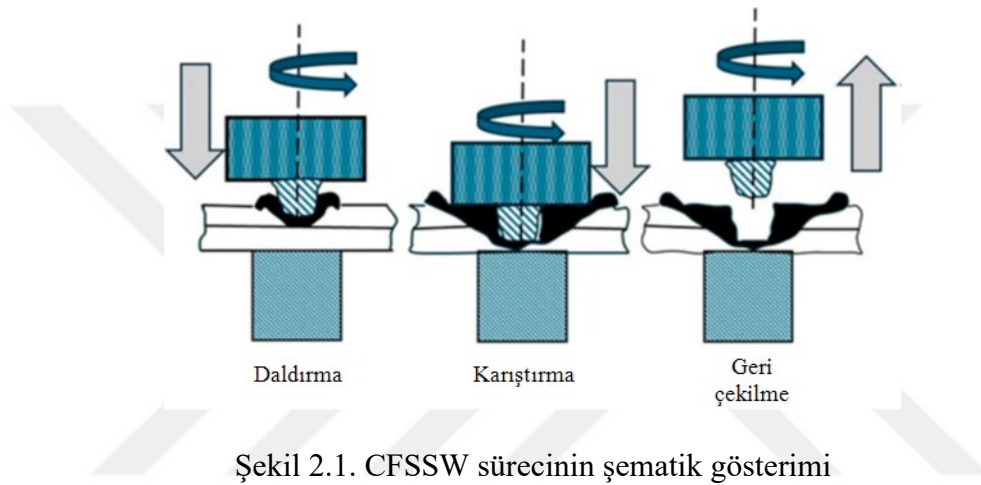
Tablo 2.1. Sürtünme karıştırma destekli üretim süreçlerinin sınıflandırılması

1.	Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK-FSW)	- Geleneksel sürtünme karıştırma kaynağı (CFSW) - Kendinden tepkili (bobin tip) sürtünme karıştırma kaynağı (SR-FSW) - Mikro sürtünme karıştırma kaynağı (μFSW) - Sıvı ortamda sürtünme karıştırma kaynağı (SFSW) - Çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı (DS-FSW)
2.	Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK-FSSW)	- Geleneksel sürtünme karıştırma nokta kaynağı - Titreşim destekli sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSVW) - Salınlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SFSSW) - Yürüyen (ilerlemeli) sürtünme karıştırma nokta kaynağı (WFSSW) - Pimsiz takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı (PLT-FSSW) - Düz takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı - Profilli takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı - İçbükey/dışbükey takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı - Ara katmanlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (IL-FSSW) - Dolgu sürtünme karıştırma nokta kaynağı (RFSSW) - Çıkıntılı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (PFSSW) - Düz yüzeyli sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FFSSW)
3.	Sürtünme karıştırma işlemi (FSP)	- Mikroyapısal modifikasyon için sürtünme karıştırma işlemi - Sürtünme karıştırma yüzey kaplama işlemi (FSS) - Sürtünme yüzey kaplama (kaplama-biriktirme) işlemi (FSCI) - Toz metalurjisinde homojenleştirme için sürtünme karıştırma işlemi (FSP for PM)
4.	Sürtünme Karıştırma Kanallaştırma İşlemi (FSC)	- Geleneksel sürtünme karıştırma kanallaştırma işlemi (FSC) - Modifiye (değiştirilmiş) sürtünme karıştırma kanallaştırma işlemi (MFSC) - Hibrit sürtünme karıştırma kanallaştırma işlemi (HFSC)
5.	Sürtünme Karıştırma Perçinleme İşlemi (FSR)	- Geleneksel sürtünme karıştırma perçinleme işlemi (FSR) - Kör (tek taraflı) sürtünme karıştırma perçinleme işlemi (FSBR) - Çift taraflı sürtünme karıştırma perçinleme işlemi
6.	Sürtünme Karıştırma Artımlı Şekillendirme İşlemi (FSIF)	

2.1. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (CFSSW)

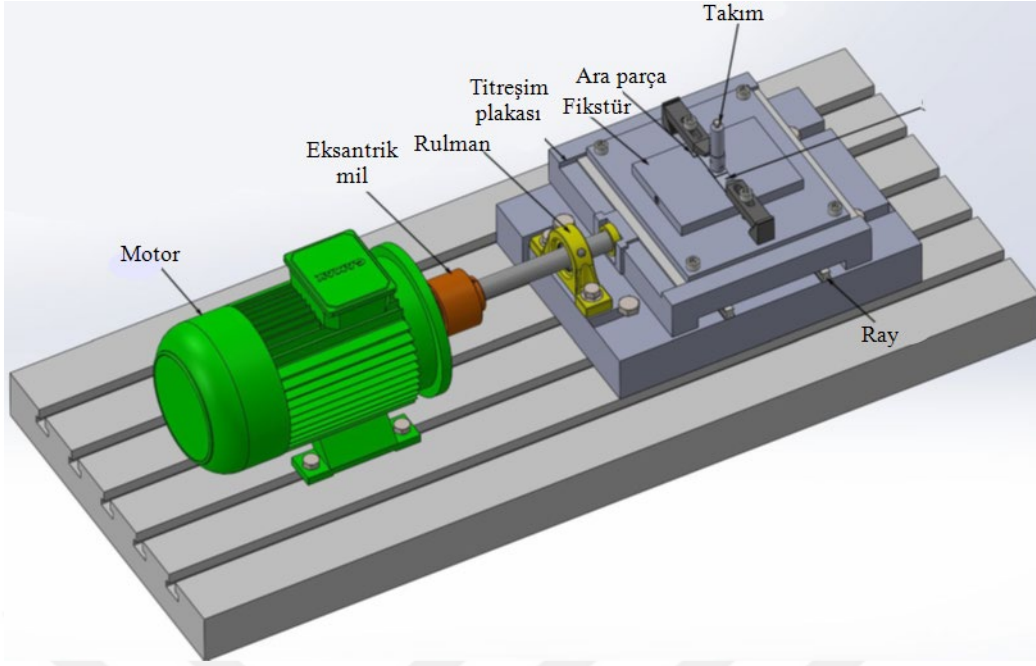
Geleneksel sürtünme karıştırma nokta kaynağı (Conventional Friction Stir Spot Welding-CFSSW), döner takım; omuz ve pimden (prob) oluşan bir sisteme sahiptir. Şekil 2.1'de

gösterildiği gibi bu sistem daldırma, karıştırma ve bekleme olacak şekilde üç aşamadan oluşmaktadır [36]. Takımın sürekli dönme hareketi yapması, takım ile iş parçası arasında sürtünmeye neden olur ve ısı oluşturarak malzemenin yumuşamasına neden olur. Daldırma ve karıştırma esnasında üretilen ısı, takımın dönme hareketi, aşağı doğru eksenel yük plastik akışını kolaylaştırır ve üst tabaka ile alt tabaka malzemelerini birbirine karıştırır. Önceden belirlenmiş dalma derinliğinde takım yine önceden belirlenmiş bekleme süresi kadar beklettirilir. Bu aşamada alt ve üst tabaka malzemesinin karışması gerçekleşmiş olur. Bekleme süresi dolduğunda takım geri çekilir takım iş parçasında pimin şekline bağlı olarak bir anahtar deliği oluşur ve sonrasında soğuma bağlar [49].



2.1.1. Titreşim destekli sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSVW)

Titreşim destekli sürtünme karıştırma nokta kaynağı (Friction Stir Spot Vibration Welding - FSSVW), sürtünme karıştırma nokta kaynağına titreşimin dahil edilmesi ile elde edilen gelişmiş bir katı birleştirme tekniğidir. FSSVW, sürtünme karıştırma nokta kaynağı tekniğinde olduğu gibi daldırma, karıştırma ve geri çekilme olacak şekilde üç aşamadan oluşur. FSSVW'nin temel çalışma prensibi, takımın sürekli dönme hareketi yaparak, takım ile iş parçası arasında sürtünmeye neden olması, ısı oluşturarak malzemenin yumuşaması ve bu aşamada takım eksenine dik açıyla titreşim uygulanmasını içerir, bu aşamada takım dönmeye devam eder. Bu durum malzemenin etkili bir şekilde karışmasını sağlar. Malzeme plastik olarak deforme olmaya devam ederken takımın geri çekilmesi, güçlü bir bağlantı oluşmasını sağlar. Titreşim malzemenin akış özelliklerinde gelişmeye, yeniden kristalleşmeye neden olarak karıştırma bölgesinde ince taneli boyutların oluşmasını sağlar. Ayrıca malzemenin daha çok gerilmesi, tane azalması ile de daha gelişmiş mikroyapısal özelliklere sahip olmasını sağlar [50].

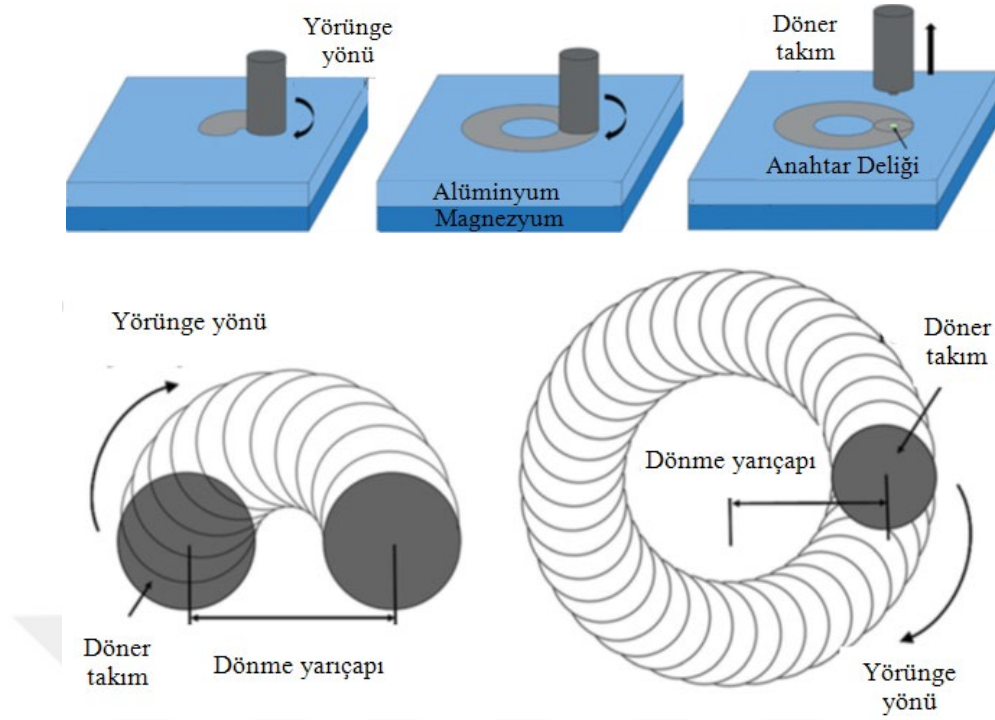


Şekil 2.2. FSSVW işlemi için kullanılan makinenin şematik gösterimi

2.1.2. Salınlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SFSSW)

Salınlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (Swing Friction Stir Spot Welding - SFSSW), bağlantı kalitesini ve performansını artırmak için geleneksel sürtünme karıştırma nokta kaynağına (CFSSW) takımın salınım hareketinin dahil edilmesi ile elde edilen gelişmiş bir katı birleştirme tekniğidir.

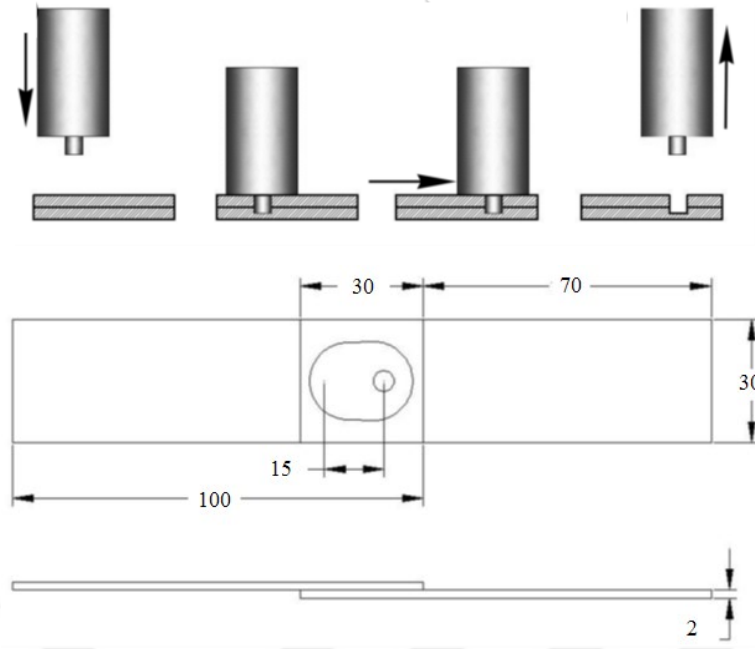
SFSSW işlemi, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama geleneksel sürtünme karıştırma kaynak (CFSSW) işleminin gerçekleşmesidir. Takım belirli bir süre tutulduktan sonra belirli bir mesafede dışa doğru kaydırılır. İkinci aşamada, takım dönme yarı çapı olarak bu mesafeyi kullanır. Anahtar deliği etrafında hareket edip, anahtar deliğinin yanında konumlanır. Üçüncü aşamada, takım üst plakadan ayrılır. Yüzey morfolojisi açısından SKNK'na birleştirme yüzeyine benzer. Ofset yörüngesinin yay şekilde olması, malzeme ekstrüzyonunu en aza indirerek, daha düzgün bir kaynak oluşturmaya yardımcı olacaktır. Bu hareket, takımın anahtar deliği kademeli olarak doldurmasına izin vererek etrafında dairesel bir halka kaynak yörüngesi oluşturur [51].



Şekil 2.3. SFSSW işlem adımlarının şematik gösterimi

2.1.3. Yürüyen (ilerlemeli) sürtünme karıştırma nokta kaynağı (WFSSW)

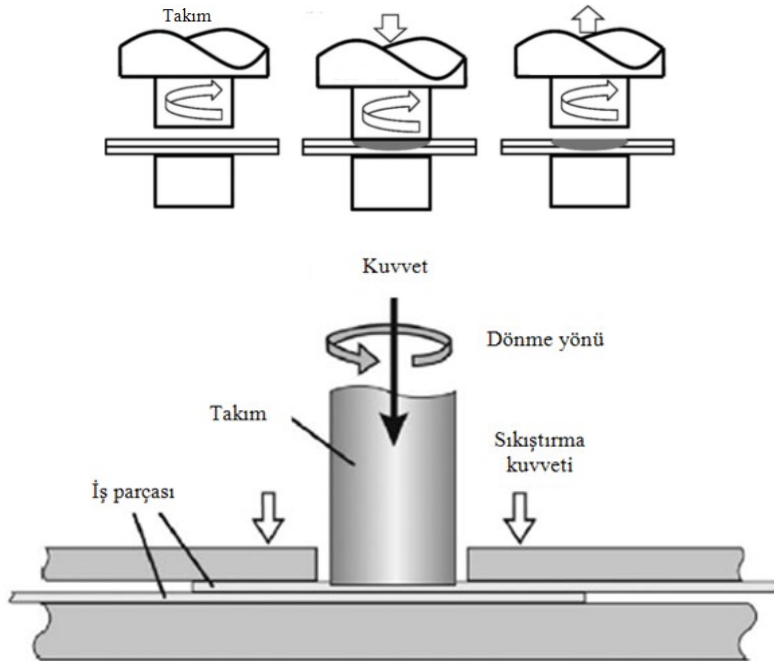
Yürüyen (ilerlemeli) sürtünme karıştırma nokta kaynağı (Walking Friction Stir Spot Welding - WFSSW), geleneksel sürtünmeli karıştırma nokta kaynağı (CFSSW) işlemlerine, takımın hareketi dahil edilerek geliştiren bir kaynak tekniğidir. Kaynak mukavemetini artırarak bir bağ alanı sağlamak için, takım yürüme uzunluğu ile adlandırılan bir hareket gerçekleştirir. Önceden belirlenmiş mesafe boyunca yaptığı bu hareket, malzemelerin etkili bir şekilde karışmasına katkıda bulunduğu gibi, birleşme noktasının mekanik özelliklerini de geliştiren bir etkiye neden olmaktadır. Takım hareketini tamamladıktan sonra kaynak bölgesinde bir anahtar deliği oluşturarak geri çekilir. Takımın uzunlamasına yaptığı bu hareket WFSSW'yi diğer SKNK işlemlerinden ayırt eden en önemli özelliktir [52].



Şekil 2.4. WFSSW işlem adımlarının şematik gösterimi

2.2. Pimsiz Takım ile Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (PLT-FSSW)

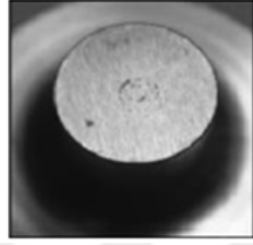
Pimsiz sürtünme karıştırma noktası kaynağı (Friction Stir Spot Welding With Pinless Tool- p-FSSW), kendi içerisinde düz, profilli, iç bükey/dış bükey, ara katman, yeniden doldurmalı ve çıkıntılı takımlardan oluşan, altı çeşidi vardır. Dönen takım iş parçasına temas ettiğinde, arayüzde üretilen sürtünme, malzemenin sıcaklığını yükseltir ve sıvı faza geçişe neden olmadan yumuşatır [53].



Şekil 2.5. PLT-FSSW işlem adımlarının şematik gösterimi

2.2.1. Düz takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı

Düz takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı (Friction Stir Spot Welding With a Flat Tool) sabit omuz geometrisine sahip dönen takım, iş parçasına daldırılması sonucunda sürtünme ısısı ile malzemenin yumuşamasına ve plastik deformasyonun oluşmasına neden olur. Önceden belirlenen sabit derinlikte ve yine önceden belirlenen bekleme süresi boyunca bekletilen dönen takım bekleme süresi bitiminde yukarı çekilerek kaynak işlemi tamamlanmış olur. Düz takım, sınırlı malzeme akışı ve homojen ısı dağılımı sağlar, bu nedenle ince levhaların birleştirilmesinde uygundur. Ancak, kaynak bölgesinde anahtar deliği oluşabilir ve ısı ile deformasyon dağılımı kaynak kalitesini etkileyebilir. Şekil 2.6. Düz takım tasarımı görüntüsü gösterilmiştir [47].

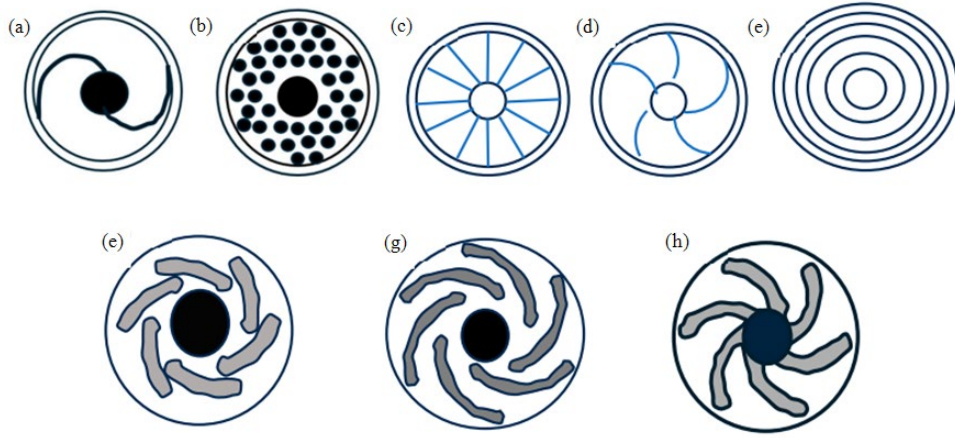


Şekil 2.6. Düz takım tasarımı görüntüsü

2.2.2. Profilli takımla sürtünme karıştırma nokta kaynağı

Şekillendirilmiş takıma sahip sürtünme karıştırma nokta kaynağı (Friction Stir Spot Welding With a Profiled Tool) işlemi, dönen bir takımın, profilli omuz ve pim geometrisi ile kaynak bölgesine daldırılarak gerçekleştirilen katı hâl birleştirme yöntemidir. Döner takımın üst levha yüzeyine temas etmesiyle başlar. Temas yüzeyinde, takımın dönme hareketiyle birlikte uygulanan aksel kuvvet, sürtünme ısısı üretir ve malzemenin plastik hale gelmesine neden olur. Profilli takım, malzeme akışını yönlendirerek daha etkin bir karıştırma sağlamak amacıyla özellikle omuz ve pim üzerinde oluklar, çıkıntılar veya kanallar şeklinde tasarlanmıştır. Tasarlanmış farklı takım geometrileri Şekil 2.7’de (a) helezon kanallı, (b) sırtlı (çıkıntılı), (c) tırtıklı, (d) oluklu, (e) eş merkezli dairesel, (f) kısa kanallı düzleyici, (g) uzun kanallı düzleyici ve (h) çıkıntılı düzleyici gösterilmiştir [48]. Takımın iş parçasına batmasıyla, profilli pim malzeme içerisine girerek hem aşağı hem de çevresel yönde malzeme akışını kontrol eder. Bu durum, kaynak bölgesinde yoğun ve homojen bir karıştırma sağlar. Önceden belirlenmiş bekleme süresinde dönen takım, çekirdek bölgesinin oluşmasını sağlar. Ardından, takım geri çekilir ve genellikle anahtar deliği şeklinde bir iz kalır. Şekillendirilmiş takım

geometrisi, kaynak bölgesinde oluşan termomekanik etkileşimleri artırarak mukavemet, tane boyutu ve mikro yapı üzerinde olumlu etkilere neden olmaktadır.

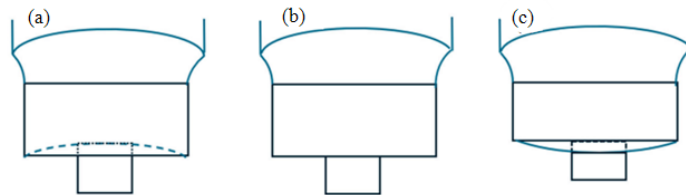


Şekil 2.7. Takım geometrileri

2.2.3. İç bükey/dış bükey takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı

Omuz geometrisi, iç bükey ve dış bükey (Friction Stir Spot Welding With Concave/Convex Tool) olan SKNK takımlarının malzeme akışı ve ısı dağılımı açısından kaynak sürecine etkisi oldukça büyüktür. İç bükey geometriye sahip takımlar, omuz altında daha fazla malzeme biriktirirler. Bu şekilde plastikleşmiş malzemenin aşağıya doğru etkin bir şekilde akması sağlanmış olur ve pim etrafındaki malzeme ile birleşerek yoğun bir karışım bölgesi (stir zone) oluşturur. İç bükey geometri kullanılan SKNK işlemlerinde, kaynak bölgesinde sıcaklık dağılımı homojen, bağlanma alanı büyük ve mekanik mukavemet yüksek olmaktadır.

Dış bükey omuzlu takımlar, malzemeyi dışa doğru iterek deformasyon direncinin artırmasına neden olur. Bu nedenle başlangıç kuvvetinin yüksek olması gerekir. Bu durum da kaynak bölgesinde, malzeme karışımının sınırlı olmasına, düzensiz ısı dağılımına sebep olacağından mukavemetin düşmesi söz konusu olacaktır. Literatürde, iç bükey omuzlu takımların düz ve dış bükey takımlara göre, yüksek kaynak dayanımına sahip olduğunu ve çatlak oluşumlarının da minimum seviyede olduğu vurgulanmıştır [48]. Şekil 2.8’de takım omuz profilleri (a) iç bükey, (b) düz ve (c) dış bükey olarak gösterilmiştir.



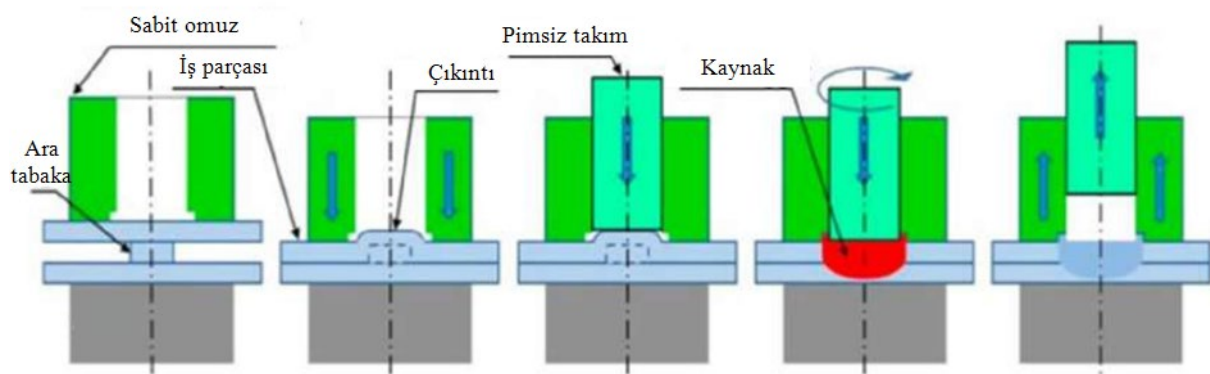
Şekil 2.8. Takım omuz profilleri

2.2.4. Ara katmanlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (IL-FSSW)

Ara tabakalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (Interlayer-Assisted Friction Stir Welding - IL-FSSW) işlemi, geleneksel SKNK sistemine ara tabaka (interlayer) eklenmesi ile gerçekleştirilmiş bir birleştirme tekniğidir. Ara tabaka üst ve alt tabaka arasına yerleştirilir. Ara tabaka malzemesi olarak genellikle CFRP, Ti plaka, PP film veya Al folyo kullanılır. Isı ve mekanik etki ile plastikleşir ve ergiyerek diğer parçalarla birleşir. Ara katman koyulmasındaki ana amaç kaynak bölgesindeki ısı ve mekanik etkinin iyileştirilmesi ve bağ kalitesinin artırılmasıdır.

Kaynak işleminin çalışma prensibi SKNK ile aynıdır. Dönen takımın kaynak yüzeyine batırılmasıyla, sürtünme ve kuvvet etkisiyle ısının oluşması, üst, ara katman ve alt parçanın yumuşamasına neden olur. Önceden belirlenen süre kadar beklenilir. Bu aşamada karışım ve difüzyon gerçekleşmiş olur. Bekleme süresi bittikten sonra takım geri çekilir, kaynak bölgesinin soğumasıyla birleşme tamamlanmış olur.

IL-FSSW, heterojen malzemelerde örneğin metal ve polimer birleşimlerinde ısı iletiminin gerçekleşmesi, ara bağ kuvvetinin artırılması ve mikroyapısal açıdan yüksek mukavemetli birleştirmeler yapılmasını sağlamaktadır [54]. IL-FSSW işlem adımlarının şeması Şekil 2.9'da gösterilmiştir [55].

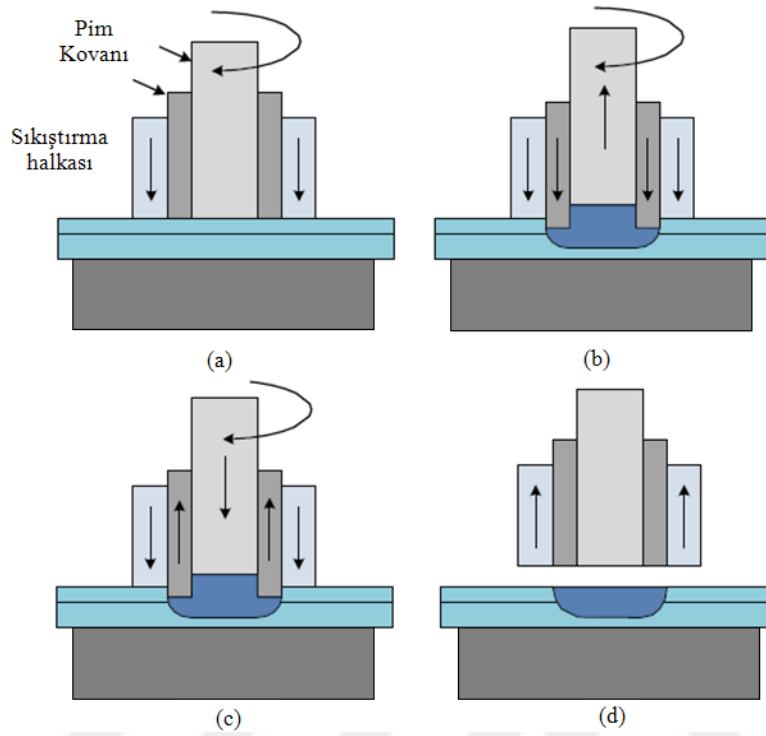


Şekil 2.9. IL-FSSW işlem adımlarının şeması

2.2.5. Dolgu sürtünme karıştırma nokta kaynağı (RFSSW)

Dolgu sürtünme karıştırma nokta kaynağı (Refill Friction Stir Spot Welding- RFSSW), sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yönteminin bir çeşididir. RFSSW'nin en önemli özelliği, geleneksel SKNK işlemleri sonrası oluşan anahtar deliklerinin bu teknikte oluşmamasıdır. Sistem pim, manşon ve sıkıştırma halkasından oluşur. Bu üç bileşen, farklı üç aktüatör tarafından kontrol edilir. Sıkışan plastik malzeme, her bir aktüatör farklı hareketler

uygulanması sayesinde kaynak bölgesinin yeniden doldurulmasını sağlar. Şekil 2.10’da proses süreçleri gösterilmiştir [40].



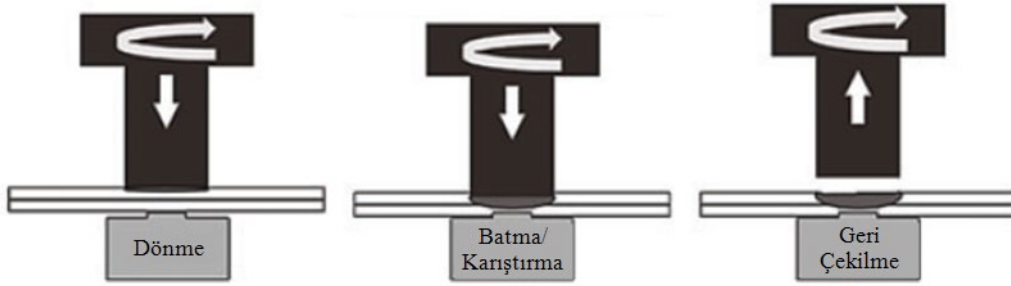
(a) birinci aşama, (b) ikinci aşama, (c) üçüncü aşama ve (d) dördüncü aşama

Şekil 2.10. RFSSW süreçlerinin şematik gösterimi

2.2.6. Çıkıntılı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (PFSSW)

Çıkıntılı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (Protrusion Friction Stir Spot Welding - PFSSW), geleneksen SKNK yönteminden farklı olarak çıkıntılı bir örs yüzeyi ve pimsiz bir kaynak takımı kullanılarak uygulanan bir katı hal birleştirme yöntemidir. Küçük bir çıkıntı örs yüzeyine entegre edilir. Alt levha çıkıntı üzerine yerleştirilir ve dönen takım üst levhaya basınç uygulamasıyla daldırma aşaması başlar. Sürtünme ısısı ile kaynak bölgesinde plastikleşme gerçekleşir. Takım önceden belirlenen derinliğe kadar batırılır ve dönmeye devam ederken, ısı ve basınç etkisiyle malzeme akışı sağlanır ve iki malzemede kaynak işlemi gerçekleşmiş olur. Son aşamada takım geri çekilir alttan uygulanan çıkıntı nedeniyle kaynak yüzeyinde anahtar deliği oluşmaz. SKNK gibi dönme, batma-karıştırma ve geri çekilme şeklinde üç aşama gerçekleşmiş olur. Kaynak bölgesinin şekillenmesi mekanik karıştırma ve sürtünme ısısı etkisiyle viskoplastik akış ve difüzyon mekanizmaları sayesinde gerçekleşir. PFSSW yönteminde, daha yönlü ve kontrollü bir malzeme hareketi; çıkıntı geometrisinin etkisiyle

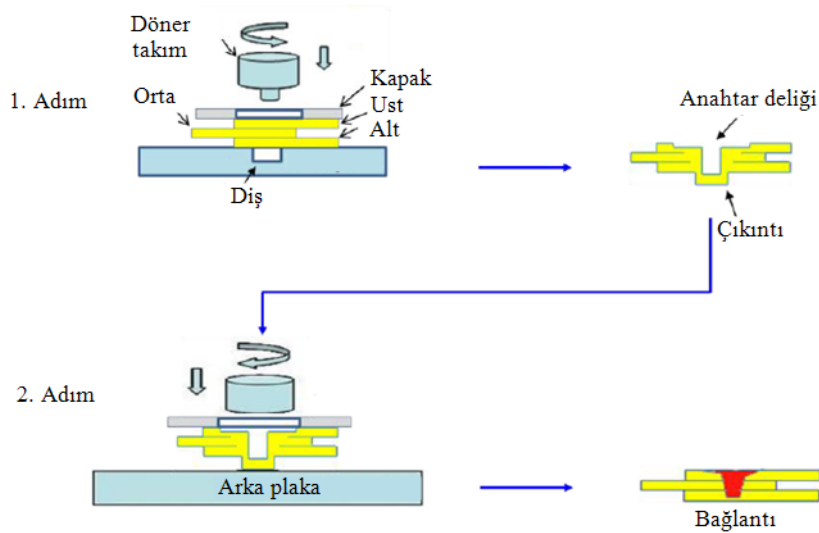
gerçekleşmiş olur. Bu durum da birleşmenin geometrisini ve yapısını doğrudan etkiler [56]. Şekil 2.11’de PFSSW’nin işlem adımları görülmektedir.



Şekil 2.11. Çıkıntılı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (PFSSW) işlem adımları

2.2.7. Düz yüzeyli sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FFSSW)

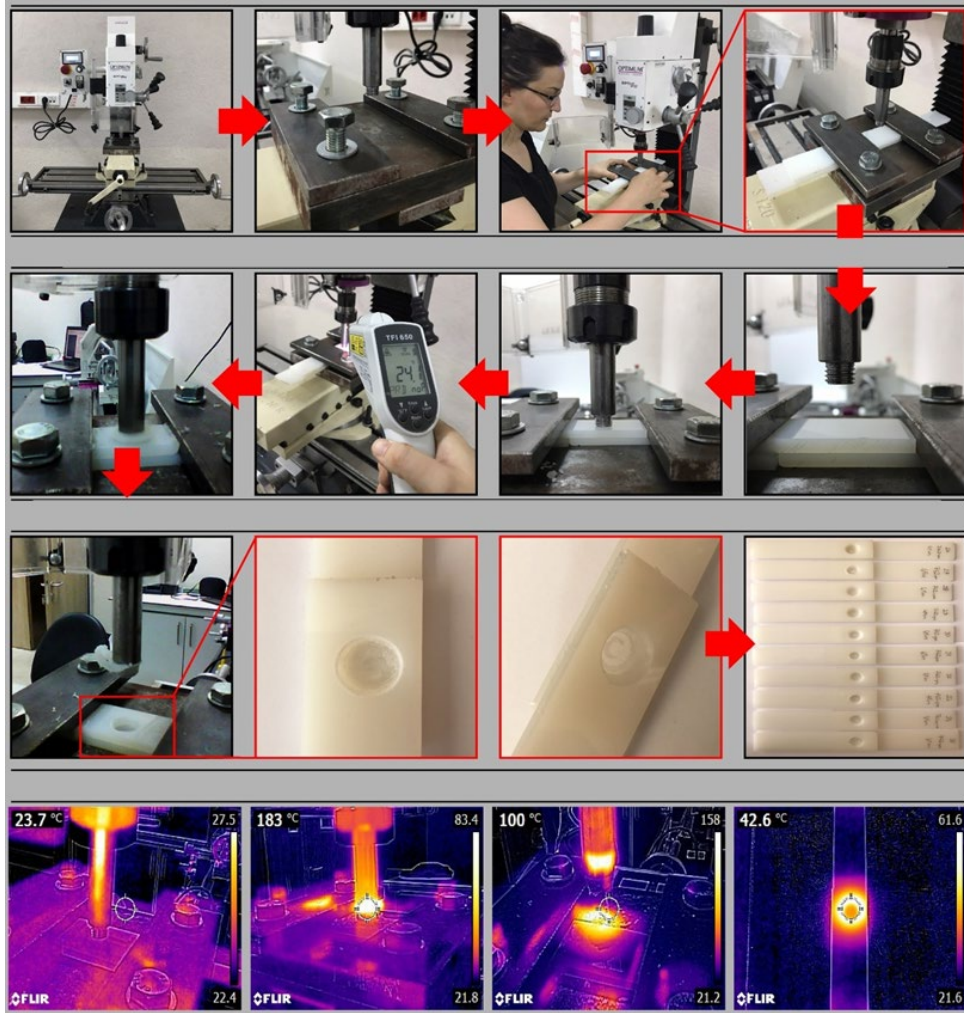
Düz yüzeyli sürtünme karıştırma nokta kaynağı (Flat Friction Stir Spot Welding-FFSSW) işlemi, iki adımdan oluşan bir katı hal kaynak yöntemidir. Birinci adımda, özel olarak tasarlanmış bir arka plaka ve pimli bir kaynak takımı kullanılarak, üst yüzeyde bir boşluk, alt yüzeyde de bir çıkıntı oluşturulur. İkinci adımda ise pimsiz düz omuzlu bir kaynak takımı kullanılır. Ayrıca boşluksuz, düz yüzeyli bir arka plaka kullanılır. Bu durumda üstteki boşluk doldurulmuş olup, alttaki çıkıntı da ortadan kaldırılmış olur. Hem kaynak bölgesi üst yüzeyi hem de alt yüzey düz bir hale getirilmiş olur. Bu kullanılan yöntem ile yapısal bozuklukları ve yüzey kusurları önlenir. Yüksek homojenlik ve güçlü birleştirmeler elde edilir [57].



Şekil 2.12. Düz FSSW yöntemiyle birleştirilmesini gösteren şematik diyagram

3. DENEYSEL YÖNTEMLER

Deneyisel çalışmalar PA6 polimer malzeme üzerinde farklı kaynak parametreleriyle SKNK tekniğinin kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Planlama yapılırken öncelikle endüstriyel açıdan ön planda olan PA6 malzeme tercihi yapılmıştır. Malzemelerinin ölçüleri ve kalınlıkları belirlenerek modellenip, kaynak bölgesi için ön hazırlık yapılmıştır. Malzemelerin kaynak uygulanırken, kolayca sökülüp takılabilmesi için gerekli olan kalıp tasarımı yapılmıştır. Literatürde ışığında, kaynak takımı olarak silindirik dişli pime karar verilmiş olup, 2 farklı pim çapı tasarımı yapılmıştır. Kaynak parametreleri, Minitab yazılımı kullanılarak ANOVA analizi ile değerlendirilmiş ve optimizasyon süreci yürütülmüştür. Birleştirmelerin ardından mekanik, termal ve morfolojik analizler gerçekleştirilerek en uygun kaynak parametreleri belirlenmiştir. Deneyisel çalışmanın işlem adımlarının özeti Şekil 2.1’de verilmiştir.

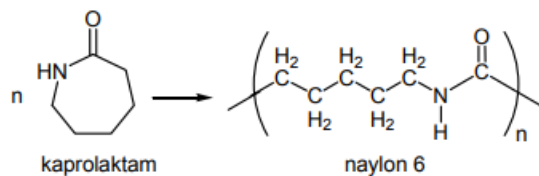


Şekil 3.1. Deneyisel çalışmanın işlem adımları

3.1. Malzeme

Poliamid 6 mühendislik polimerleri arasında en çok bilinen ve en çok kullanılan malzemelerdendir [65]. Yapısal olarak incelendiğinde hem amorf hem de kristal bölgelere sahiptir. Kristal yapı, amorf yapıya oranla fazla olduğunda mekanik özelliklerinde, darbe dayanımı haricinde olumlu sonuçlar elde edilir [66]. Kimyasal yapısı nedeniyle nem alan bir malzemedir bu durum camsı geçiş sıcaklığının düşmesine neden olur [66]. Bu durum darbe dayanımını artırsa da çekme, kopma dayanımı ve sertliği azaltabilmektedir. Kristal yapı ergimiş polimerin soğutma hızı ile bağlantılıdır. İşlem sonrası hızlı soğutulma mevcut ise kristal yapılarda azalma görülebilir [67].

PA6, çoğunlukla kaprolaktamın halka açılma polimerizasyonu ile üretilir [68]. Reaktör, sodyum hidrür (NaH, başlatıcı), n-asetilkaprolaktam ve polioksietilen ile gerçekleştirilir. Başlama, çoğalma ve sonlanma aşamaları ile polimerizasyon oluşur. Rekasiyon başlatıcı Sodyum hidrürdür. Kaprolaktamla reaksiyona girerek, kaprolaktam sodyum tuzunu oluşturur. Kaprolaktama göre bu bileşik daha nükleofiliktir. Kopma, kaprolaktam sodyum tuzundaki sodyum iyonunu Polioksietilenin içine almasıyla gerçekleşir. Geride kalan amid anyonunun reaktivitesi çok yüksektir. Yenilen aktif yapı amid anyonu n-asetilkaprolaktamla reaksiyona girilmesiyle tekrar oluşur. Çoğalma kademesinde, bir kaprolaktam monomerindeki amid hidrojenini başlama aşamasında meydana gelen amid anyonunu alır ve bir kaprolaktam amid iyonu oluşur. Bu şekilde büyük aktif zincirler oluşması sağlanır. Bu reaksiyonların tekrarlanmasıyla uzun Poliamid 6 zincirler oluşur. Polimerizasyonun sonlanma aşamasında, büyümekte olan aktif zincirlerin uçlarındaki reaktif gruplar, ortamda bulunan ara ürünler veya safsızlıklarla tepkimeye girerek etkinliklerini kaybeder. Bu sayede zincir büyümesi durur. Kararlı yapıya sahip Poliamid-6 zincirleri oluşmuş olur [69, 70]. Toplam reaksiyon aşağıdaki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.2. PA6'nın kimyasal yapısı

Çalışmada kullanılacak PA6 malzeme, sürtünme karıştırma nokta kaynağı prosesinde 5 mm kalınlığında, 50 mm genişliğinde ve 150 mm uzunluğunda levhalar şeklinde, Demiriz Mig 400 testere tezgahında kesilerek hazırlanmıştır.

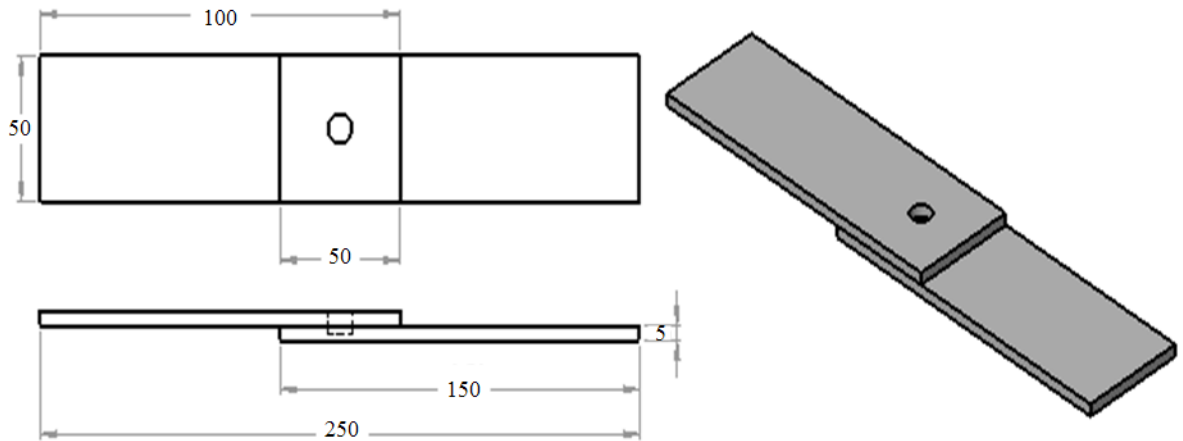
Tablo 3.1. PA6 teknik özellikleri

	Yoğunluk (gr/cm ³)	Su Oranı (%)	Emme	Sertlik	Sürtünme Katsayısı	Ergime Sıcaklığı (°C)	Çentik Darbe Dayanımı (kJ/m ²)
PA6	1,13	9		82	0,4	220	6



Şekil 3.3. Numunelerin testrede kesilme işlemi

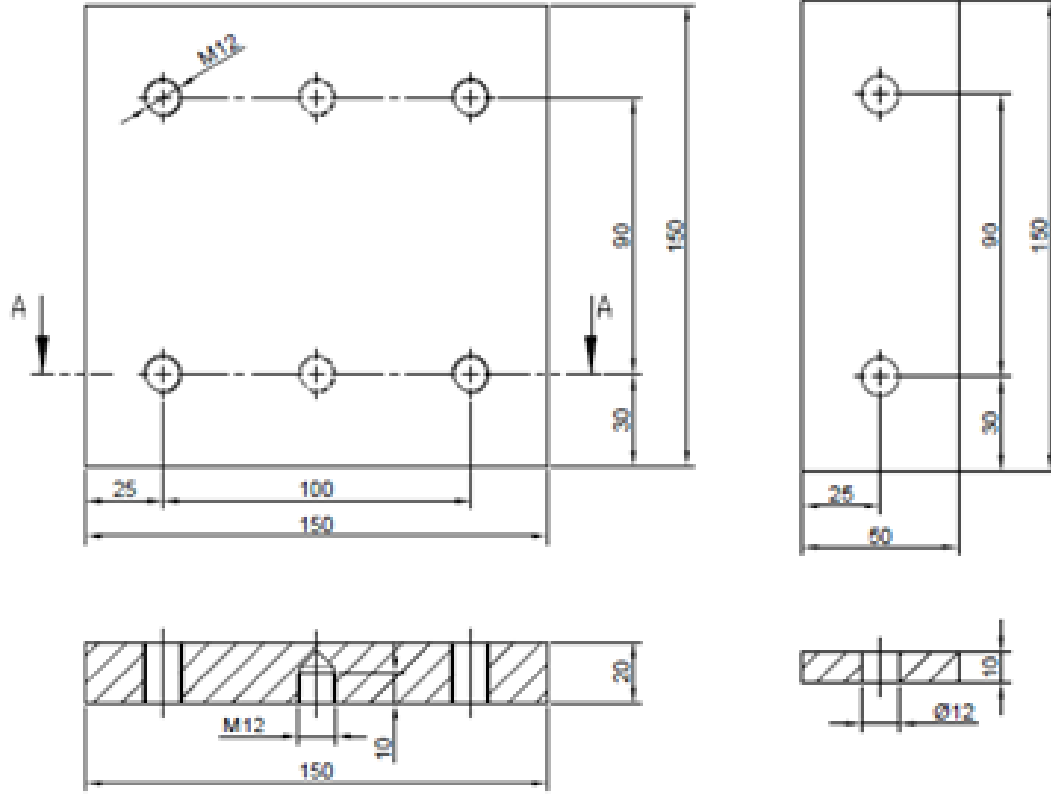
Şekil 3.4'te görüldüğü gibi tüm deneylerde, levhaların 50x50 mm ölçülerindeki kısımları kaynak bölgesi olarak standartlaştırılmıştır.



Şekil 3.4. Numune boyutları

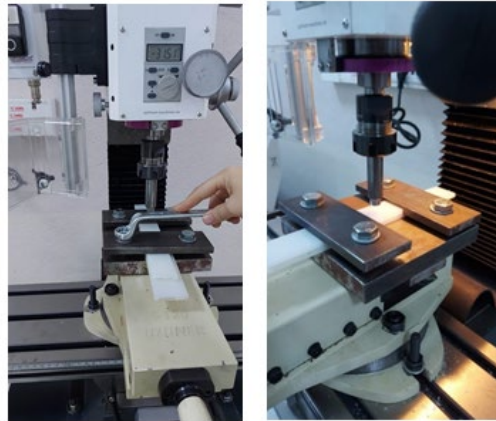
3.2. Kalıp Tasarımı

Kalıp olarak 150x150x20 mm ölçülerinde kalıp gövdesi, 150x50x10 mm ölçülerinde 2 tane baskı plakası kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Kalıp boyutları

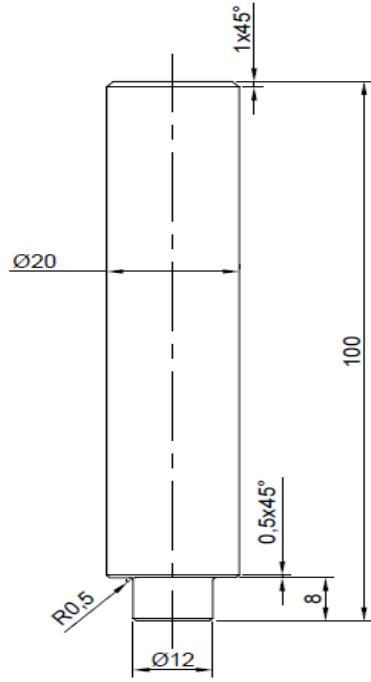
Optimum kaynak parametrelerinin uygulanabilirliğinin ve tekrarlanabilirliğinin sağlanabilmesi için, parçaların kalıba her seferinde aynı konumda ve doğrulukta yerleştirilmesi için kalıp tasarımı büyük önem taşımaktadır.



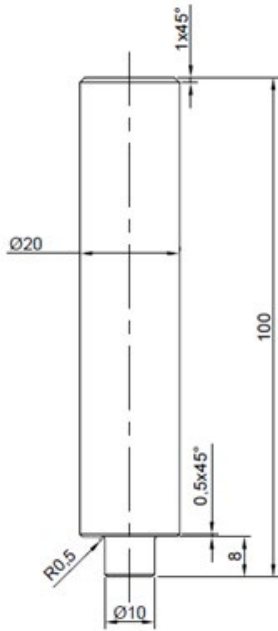
Şekil 3.6. Numunenin kalıba bağlaması

3.3. Kaynak Takımı

Kaynak prosesinde 42CrMo4 (1,7225) malzemeden omuz çapı: $\varnothing 20$ mm, pim çapı M10 ve M12, Şekil 3.7a ve Şekil 3.7b’de görüldüğü gibi pim uzunluğu 8 mm olarak belirlenmiştir. Malzeme olarak geleneksel alüminyum tipi kaynak takımı kullanılmıştır.



(a) M12 pim



(b) M10 pim

Şekil 3.7. Dişli pim kaynak takımı

3.4. Proses Parametreleri

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı için kullanılan proses parametreleri, takım dönüş hızı, bekleme süresi ve pim çapıdır.

Tablo 3.3.'de özetlenen tam faktöriyel deney tasarımı, PA6 levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağında (SKNK) takım dönüş hızı, bekleme süresi ve pim çapının mukavemetleri üzerindeki ana etkilerini ve etkileşimlerini değerlendirmek için geliştirilmiştir. Tasarım üç faktörden oluşur: dönme hızı (762 devir/dk, 1146 devir/dk ve 1560 devir/dk), bekleme süresi (15 s ve 60 s) ve pim çapı (10 mm ve 12 mm).

Tablo 3.2. Tam faktöriyel tasarım kaynak parametreleri

Faktör	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Dönme Hızı	Devir/dk	762	1146	1560
Bekleme Süresi	s	0	15	60
Pim Çapı	M	0	10	12

Literatürde proses parametreleri belirlenirken dönme hızı, bekleme süresi, dalma hızı, dalma derinliği, ön ısıtma süresi, soğutma süresi, takım omuzu ve pim çapı gibi parametreler göz önünde bulundurulmuştur.

3.4.1. Dönme hızı

Takım dönme hızı etkisi üzerine yapılan araştırmalarda, farklı sonuçlar mevcuttur [58, 59]. Takım dönme hızının etkisinin az olduğunu gösteren çalışmalar olduğu gibi, proses içerisinde takım dönme hızının optimal bir değer olduğunu ve kaynak mukavemetini artıran önemli bir parametre olduğunu savunan çalışmalar da mevcuttur [24]. Bunun yanı sıra takım dönüş hızının artmasının mukavemeti arttırdığını gösteren çalışmalar olduğu da vurgulanmıştır [11].

Bu farklı sonuçların nedeni, polimerlerin mekanik davranışlarındaki sıcaklığa olan duyarlılığı olabilmektedir. Malzemelerin camsı geçiş sıcaklıkları, erime noktası, işlem sırasında oluşan ısı, takım boyutu ve şekli, gibi faktörler de dönme hızındaki etkiyi bütünsel değerlendirmek gerekliliğini doğurmaktadır. Takım dönme hızı ile üretilen sürtünme ısısının doğru orantılı olduğu vurgulanmaktadır [8, 72].

Çalışmada üç dönme hızı (762 dev/dk, 1560 dev/dk, 1146 dev/dk) parametresi kullanılmıştır.

3.4.2. Bekleme süresi

Dalma derinliğine ulaşıldıktan sonra bekleme aşamasında kaynak sırasında oluşan ısının süresi, kaynak boyutunu belirleyen önemli bir parametredir. Yüksek yük taşıma kapasitesi için uzun

bekleme süreleri gereklidir [21]. Fakat, çok uzun süreler moleküler zincirlerin mekanik kopmasına neden olabilir bu da molekül ağırlığının azalmasına ve dayanıklılığın zayıflamasına neden olmaktadır [11]. Bu nedenle, kaynak mukavemeti ile bekleme süresi arasında güçlü bir bağ vardır.

Çalışmada 15, 30, 45, 60 saniye bekleme süreleri ile birleştirmeler yapılmıştır. 762 dev/dk olan dönme hızında 15-30-45-60 s'lik bekleme süreleri kullanılırken, optimizasyon sonrası 1146 dev/dk ve 1560 dev/dk dönme hızlarına sahip parametrelerde 15 s ve 60 s bekleme süresi ile birleştirmelere devam edilmiştir. Masaüstü freze tezgahının çalıştırılmasında yaklaşık 300 s takım boş olarak çalıştırılmış. Tezgahın kaynak işlemi öncesi 5 dakika boyunca boşta çalıştırılması, sistemin çalışma koşullarını kararlı hale getirmek istenmiştir. Bu sayede motor ve kontrol ünitesinin termal ve elektronik olarak dengesi sağlanıp, kaynak sırasında oluşabilecek zorlanmaların önüne geçilebilmektedir. Böylelikle tezgâh, güvenilir ve tekrarlanabilir performans sunacaktır.

3.4.3. Dalma hızı

Yan ve diğ. [11], tarafından elde edilen sonuçlar, kaynak işlemlerinde kullanılan dalma hızının önemli olduğu ifade edilmiştir. Çalışmalarda en iyi dalma hızının bulunması gerektiği vurgulanmaktadır. Çok düşük dalma hızları dayanıklılığı olumsuz etkilerken, çok yüksek dalma hızları ise karıştırma homojenizasyonunu ve malzemenin moleküler yapısını bozabilmektedir. Bunun yanı sıra, düşük dalma hızları daha kısa etkileşim süresi, daha küçük kaynak boyutları ve daha düşük yük taşıma ile sonuçlanabilmektedir.

3.4.4. Dalma derinliği

Dalma derinliğinin, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile yapılan kaynakların geometrisi ve dayanımı üzerinde etkisi bulunmaktadır. Yüksek dalma derinliği üst levhanın etkilediği alanı azaltır, alt levha alanı artar. Düşük ve yüksek oranlar zayıf kaynaklara ve düşük mukavemete neden olur. Literatürde en yüksek çekme kuvvetinin orta seviye dalma derinliğinde olduğu gözlemlenmiştir [21].

Çalışmada, dalma derinliği her numune için sabit tutulmuş olup, 8 mm olarak belirlenmiştir.

3.4.5. Ön ısıtma süresi

Yapılan çalışmalarda ön ısıtma süresinin kaynak bağlantılarının kalitesi üzerinde etkisinin az olduğu vurgulanmıştır. Ön ısıtma malzemenin önceden ısıtılıp sonra birleştirilmesi üzerine

kurulan bir sistemdir. Bu durum lokal olarak ısınmaya neden olduğu için, diğer bölgelerde sıcaklık artışı olmamaktadır. Polimerlerin düşük termal difüzyona sahiptirler bu nedenle ön ısıtmanın mukavemet üzerinde herhangi bir önemi olmadığı belirtilmiştir [21, 22, 64]. Çalışmada, ön ısıtma yapılmamıştır.

3.4.6. Soğutma süresi

Karıştırma işlemi bittikten sonra kauçuk, macunsu bir oluşum olduğunda polimerlerin düşük termal difüzyon özelliği göz önünde bulundurularak malzemenin soğutulması için belirli bir süreye ihtiyaç olduğu öngörülmektedir [8]. Sıcaklık düştüğü anda takımın geri çekilmesi önerilmektedir. Maksimum sıcaklık, malzeme boyutu, termal özellikler (camsı geçiş sıcaklığı vb) özellikler soğutma süresini etkileyen faktörlerdir.

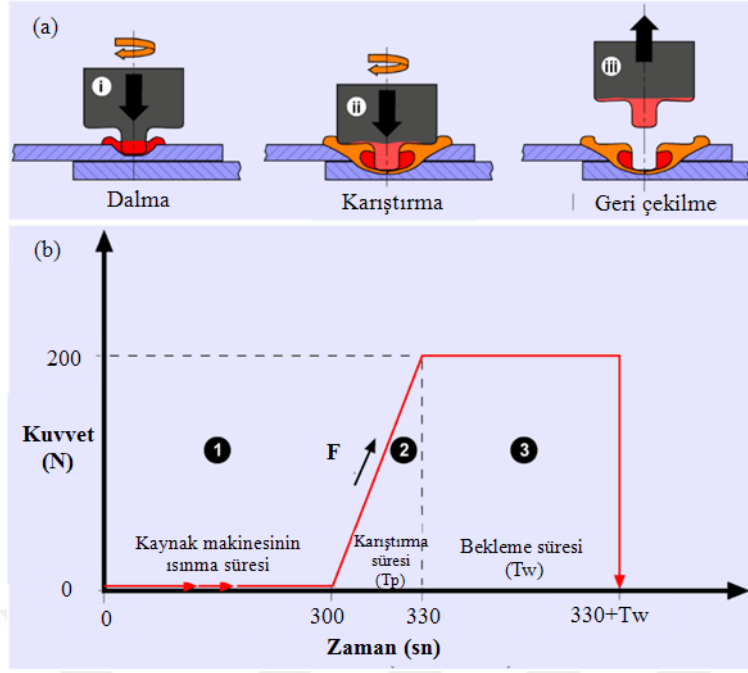
3.4.7. Takım omuzu ve pim çapı

Takım omuzu sürtünme yoluyla ısı üretimini sağlarken, pim malzemenin iç kısmında karıştırma ve plastik akışını yönlendirmektedir. Çalışmalar omuz çapı ile pim çapı arasındaki oranın 2,5-3,0 aralığında seçilmesi durumunda en iyi mekanik performans elde edildiğini vurgulamışlardır. Bu oran yeterli ısı girdisi sağlanmak için ve malzeme iç yapısında etkin bir karıştırma gerçekleştirmek için gerekli olduğu vurgulanmaktadır [71]. Takım omuz çapı arttıkça kaynakların çekme gerilmesi artar, takım pim çapı arttıkça azalır. Bu durum, karıştırılan bölge ve karakteristik alan boyutlarındaki değişimlerden kaynaklanır [8].

Çalışmada iki farklı kaynak takımı kullanılmıştır. Pim çapları M10 ve M12 seçilmiş olup, iki kaynak takımının da omuz çapı da yaklaşık 2 kat olacak şekilde sabit 20 mm belirlenmiştir. Büyük pim çaplarının etkisini görmek hedeflenmiştir.

3.5. Termoplastik Malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, dönen bir aletin iş parçasının yüzeyiyle temas ederek sürtünme ısısı ürettiği, mekanik karıştırma yoluyla birleştirmek için malzemeye daldığı ve son olarak yukarı doğru geri çekilerek işlemi tamamladığı katı hal kaynak yöntemidir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, kullanılarak yapılan birleştirme işlemleri, Şekil 3.8a'da gösterilen işlem adımlarına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8.b'e bakıldığında dönen takım freze makinesinin kalibre edilmiş aksenal kuvvet kontrol sistemi ile işlem boyunca 200 N'luk ± 2 N sabit bir kuvvetle malzeme yüzeyine daldırılıp 0,267 mm/s hızda çalıştırılmıştır.



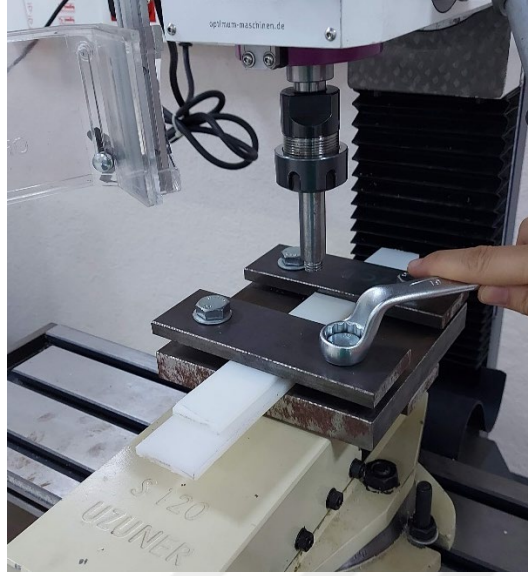
Şekil 3.8. SKNK sürecinin şematik gösterimi

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulamaları Optimum marka BF20L model masaüstü freze tezgahı (Almanya) ile yapılmıştır.



Şekil 3.9. Masaüstü freze tezgahı

Birleştirilecek numuneler şekil 3.10'deki gibi bağlama kalıbına bağlanmıştır.

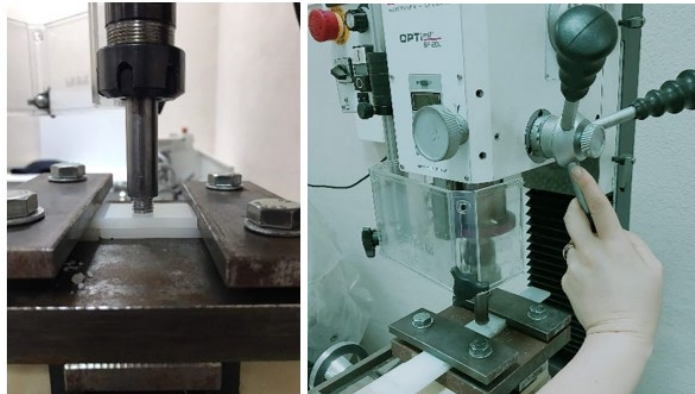


şekil 3.10. Numunelerin tezgaha bağlanması



şekil 3.11. Dönme devrinin ayarlanması

Üç dönme devri ile birleştirme gerçekleştirilmiştir. 762 dev/dk, 1146 dev/dk ve 1560 dev/dk.



a) Dalma ve Bekleme



b) Geri çekilme

Şekil 3.12. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlem adımları

Masaüstü dik işleme freze tezgahında sürtünme karıştırma nokta kaynağı aşağıdaki işlem basamakları ile gerçekleştirilmiştir:

Dalma; Şekil 3.12a'da gösterildiği gibi sabit bir dalma hızında (5 mm/dk.) birleştirilecek levhalara, kaynak takımının dalması

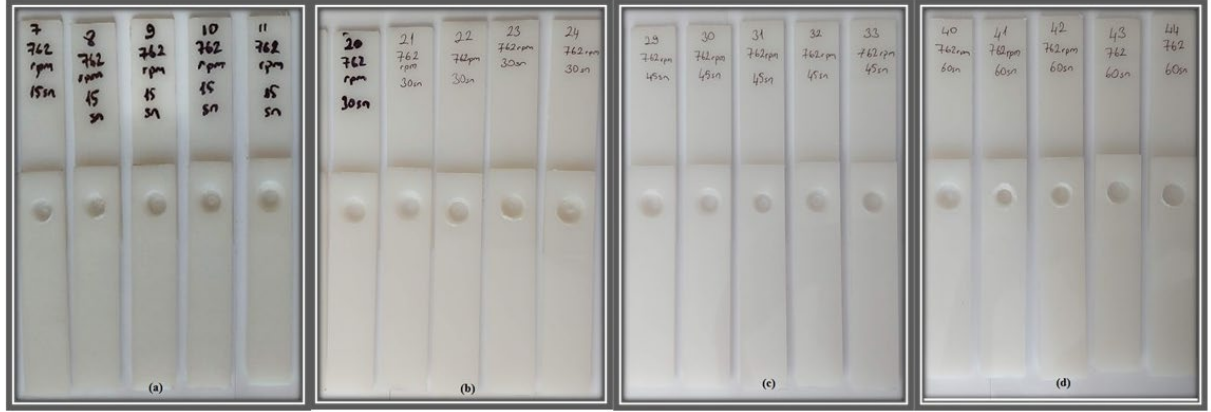
Bekleme; takımının dalmasından sonra kaynak için gerekli ısıyı elde etmek amacıyla belirli bir süre (15 s, 30 s, 45 s ve 60 s) dalma bölgesinde bekleme gerçekleştirilmesi (Şekil 3.12 a).

Geri çekilme; Şekil 3.12.b'de gösterildiği gibi takımın yukarı çekilmesi ve birleştirme işleminin sonlandırılması şeklindedir.

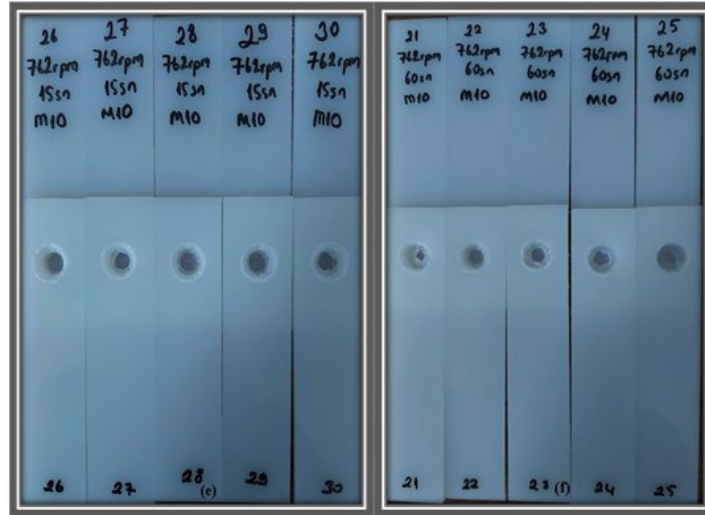
Table 3.3. PA6 için SKNK kaynak parametreleri

Deney Kodu	Takım Dönme Devri (dev/dk)	Pim Çapı (Ø mm)	Bekleme Süresi (s)
PA6-00 (Referans)	-	-	-
PA6-01	762	M10	15
PA6-02	762	M12	15
PA6-03	762	M12	30
PA6-04	762	M12	45
PA6-05	762	M10	60
PA6-06	762	M12	60
PA6-07	1146	M10	15
PA6-08	1146	M12	15
PA6-09	1146	M10	60
PA6-10	1146	M12	60
PA6-11	1560	M10	15
PA6-12	1560	M12	15
PA6-13	1560	M10	60
PA6-14	1560	M12	60

Kaynak parametreleri Tablo 3.3'te görüldüğü gibi Minitab 17 programında ANOVA analizi kullanılarak belirlenmiştir.



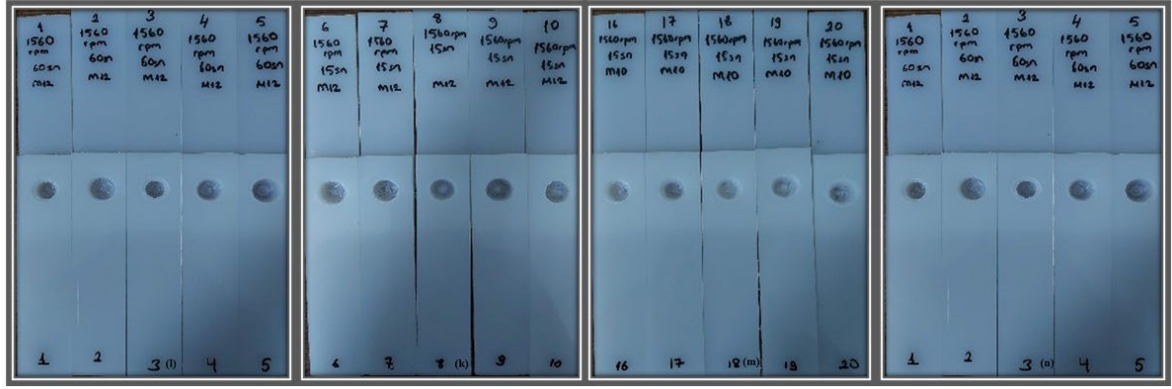
a) 762/M12/15 b)762/M12/30 c)762/M12/45 d)762/M12/60



e) 762/M10/15 f)762/M10/60



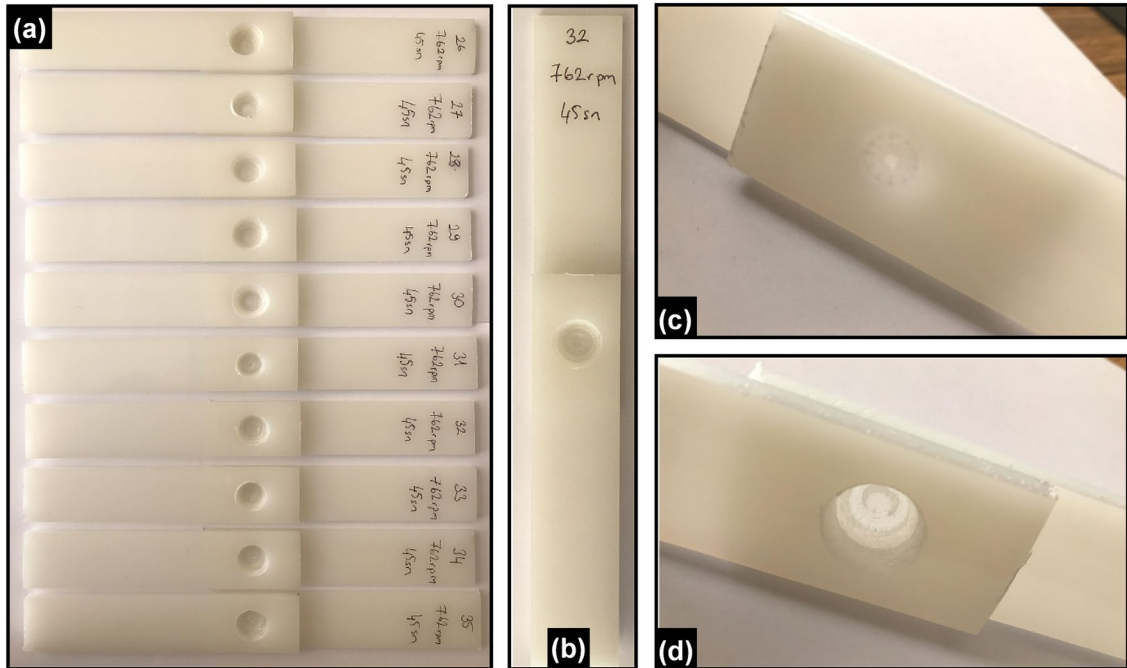
g)1146/M10/15 h) 1146/M10/60 i) 1146/M12/15 j) 1146/M12/60



k) 1560/M12/15 l) 1560/M12/60 m) 1560/M10/15 n) 1560/M10/60

Şekil 3.13. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmiş numune örnekleri

Kaynaklı bağlantıların temsili kesit ve yüzey görüntüleri Şekil 3.14'te verilmiştir. Bu görüntüler kaynak geometrisi ve morfolojisi hakkında tamamlayıcı kanıtlar sunarak mekanik test sonuçlarının yorumlanmasını desteklemektedir.



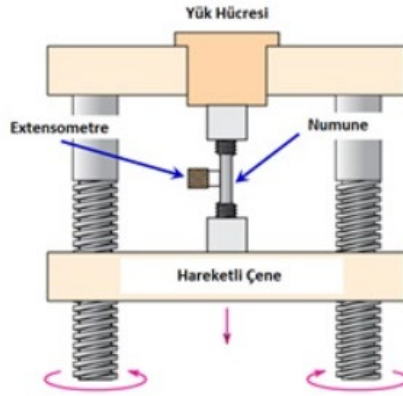
Şekil 3.14. Kaynaklı birleşimlerin kesit ve yüzey görüntüleri (a) seçilen işlem parametreleri altında üretilen birleşimlerin genel görünümü, (b) tek bir kaynaklı birleşim, (c) birleşimin arka yüzeyi ve (d) birleşimin ön yüzeyi.

3.6. Fiziksel, Mekanik ve Termal Deneylerin Yapılması

Sürtünme karıştırma kaynak tekniği ile birleştirilen PA6 levhaların birleştirme ile ilgili bilgi edinebilmek amacıyla çekme testi, eğme testi, DSC ve SEM uygulanmıştır.

3.6.1. Çekme testi

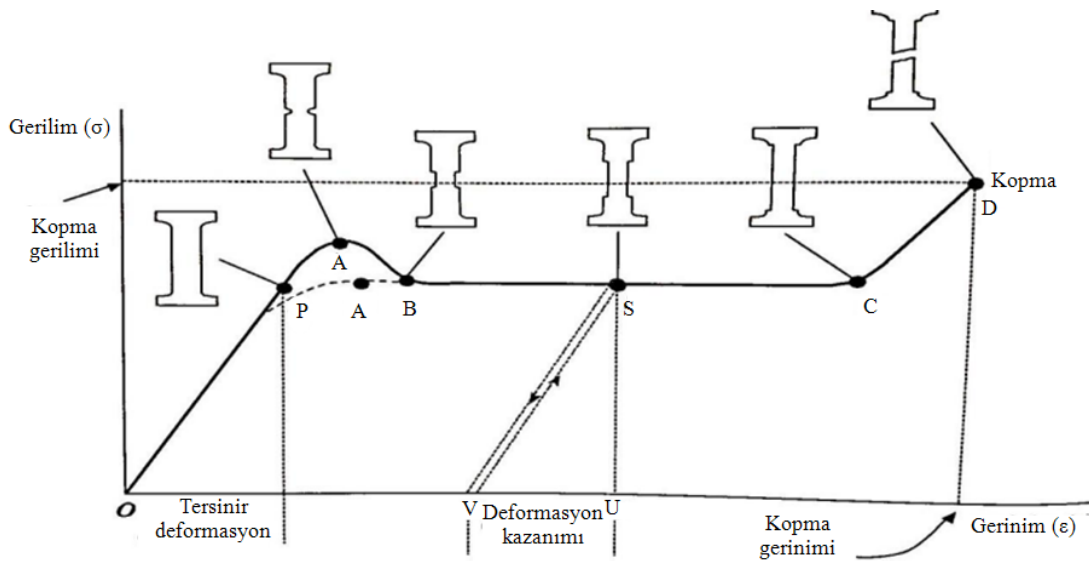
Mekanik özelliklerin tespiti için kullanılan çekme testi cihazı, üç bölümden oluşur. Hareketli üst çene, sabit alt çene ve ekstansometredir. Şekil 3.15, çekme test cihazının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.15. Çekme testi cihazı şematik gösterimi

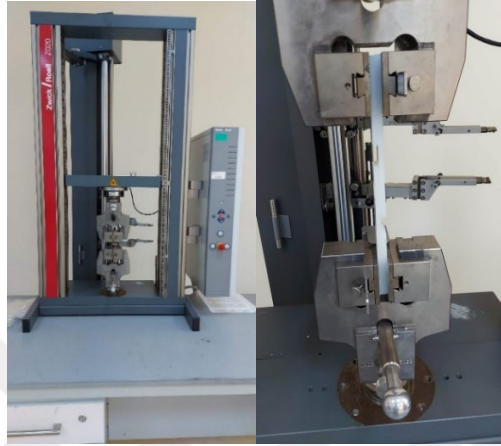
Çekme testinde, iki çene arasına yerleştirilen malzeme sıkıştırılır ve çekme kuvveti uygulanır. Çekme mukavemeti, elastisite modülü, kopma dayanımı ve kopmadan önce uzama değerlerinin ölçümü yapılabilmektedir. Çekme mukavemeti, plastiğe, akma veya kopma gerçekleşmeden önce uygulanabilecek kuvvet miktarıdır. Elastisite modülü, malzemenin sertliğinin ölçümüdür, malzemenin akma gerçekleşmeden gerilmeye karşı ne kadar deforme olacağını gösterir. Kopma uzaması, kopma gerçekleşmeden uzunluktaki artışı gösterir. Daha fazla uzama, ya da yüksek süneklik göstergesidir [46]. Ölçüm sonucunda, gerinim-gerilim eğrileri elde edilir ve malzemenin karakteristiği incelenebilir. Malzemenin kopmaya kadar soğurabileceği enerji, gerilme-gerinim eğrilerinde, eğri altında kalan toplam alanda görülmektedir. Bu özellik malzemenin tokluğunun da göstergesidir. Elastik davranışlar düşük gerilimler altında sergilenir. Bu bölgede gerçekleşen şekil değişimleri kalıcı değildir. Malzemenin en yüksek elastik özellik gösterdiği nokta orantısal limit olarak ifade edilir. Malzeme orantısal limit sonrası plastik bölgeye geçiş yapar. Bu bölgede gerçekleşen deformasyonlar ve şekil değişimleri kalıcıdır. Birim alana uygulanan kuvvet; gerilme, uzamada meydana gelen boy farkının başlangıç boyuna oranı da gerinim olarak ifade edilir. Elastisite modülü, orantısal limit noktasına kadar olan bölgedeki doğrunun eğimi ile elde edilir. Doğrunun altında kalan alan numunenin kalıcı

deformasyon öncesindeki absorplayabileceği enerji miktarını gösterir. Viskoelastik deformasyon orantısal limit noktasından akma noktasına kadar olan bölümde meydana gelir. Bu alanda çok az kalıcı deformasyon oluşur. Malzemenin kalıcı değişimi başlamadan ulaştığı uzama miktarı, akma noktasının yatay eksenini kestiği değerdir, malzemenin elastik sınırını aşmadan taşıyabileceği maksimum yük düşey eksen ile kesişim noktasında görülebilmektedir. X eksenini üzerindeki kesişim değeri akma uzaması olarak ifade edilir. Bu aşama, malzemenin plastik deformasyona geçiş eşiği olarak görülebilir. Akma noktasından sonra gerinim değeri yükselme olurken, gerilme değeri bir artış gözlenmez. Bu durum soğuk akma olarak adlandırılır. Birbirine sıkıca bağlı polimer zincirlerinin çözülerek ayrışmaları ve birbirleri üzerinde kayma hareketi yaptığı bir durumdur. Viskoz karakterli plastik deformasyon olduğu söylenebilir. Akma noktası civarında boyun oluşumu olarak ifade edilen eğride tepe şekilde görülen bir olay meydana gelir. Bu olay mekanik deneyler, yarı kristalin polimerlerde malzemenin camsı geçiş sıcaklığının üzerinde, amorf polimerlerde de camsı geçiş sıcaklığının altında ise plastik akmanın başlamadan hemen önce meydana gelmektedir. Boyunlanma aslında sıcaklık koşullarına bağlı olarak ve polimer zincirlerinin düzenlenme biçimine göre farklı sıcaklık aralıklarında oluşmaktadır. Kopma noktası, numunenin yük altında uzama sınırına ulaştıktan sonra daha fazla deformasyon gösteremeyecek durum söz konusu olduğunda kırıldığı noktadır. Eğri üzerinde kopma uzaması, x eksenini üzerinde, kopma gerilmesi ise y eksenini üzerindeki kesişim noktası ile gösterilebilir. Malzemenin en yüksek yük kapasitesi kopma noktasında gerçekleşir. Gerilme-gerinim eğrisinin altında kalan alan küçük ise malzemenin gevrek eğilim göstermesi muhtemeldir [57, 61]. Şekil 3.12’de yarı kristalin polimerik malzemelerin gerilme-gerinim grafiği verilmiştir [61].



Şekil 3.16. Yarı kristalin polimerik malzemelerin gerilme-gerinim grafiği

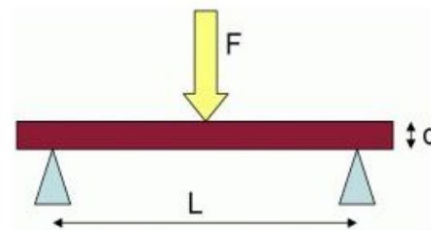
Çalışmada yapılan çekme testleri, her bekleme süresi için 5 deney yapıp ortalaması alınmıştır. Deneyler Zwick marka Z020 çekme cihazında yapılmıştır. Sıkıştırma işleminden sonra çeneler birbirinden 50 mm/dk., sabit hızla uzaklaştırılmıştır. Bu deneyle, kopma mukavemeti, uzama miktarı, çekme kuvvetine bağlı olarak esneklik veya kırılmalık bilgilerine ulaşılmıştır. Optimum SKNK parametresi için önemli veriler elde edilmiştir. Şekil 3.17’de deneylerin yapıldığı Zwick marka çekme test cihazı görülmektedir.



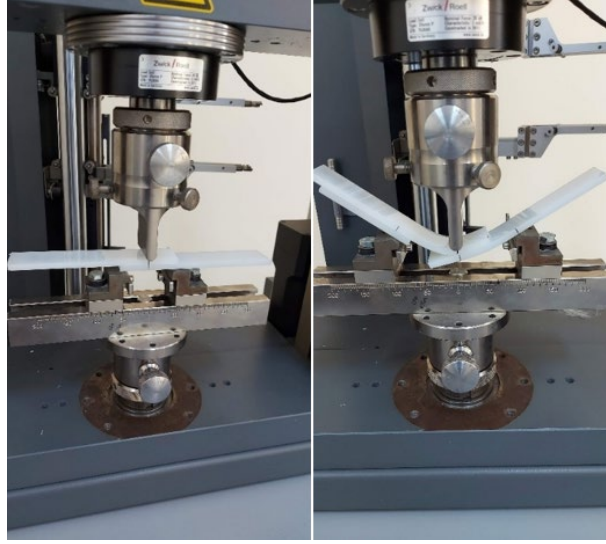
Şekil 3.17. Zwick marka Z020 üniversal tip çekme testi cihazı

3.6.2. Eğme testi

Mekanik testler arasında yer alan eğme testi sonucunda eğme gerilimi veya kopma gerilimi, eğmeden önce katlanabileceği en yüksek gerilim, eğme modülü gibi veriler elde edilir. Bu test malzemenin dış yükler altında deformasyona karşı gösterdiği direnç hakkında önemli veriler sunmaktadır. Test sırasında numuneye uygulanan kuvvet belirli bir hızda gerçekleştirilir. Deformasyon oranı %5 oluncaya kadar kuvvet uygulanmaya devam ettirilir %5’e ulaşıldığı noktada okunan değer eğme gerilimi olarak tanımlanır. Sert malzemeler %5 seviyesine ulaşmadan kırılırlar. Malzemenin kırıldığı andaki kuvvet ise kopma gerilimi olarak adlandırılır [61]. Üç nokta eğme testi en çok kullanılan eğilme deneylerindendir. Bu yöntemde iki ucu destekler üzerine yerleştirilen numunenin, tam ortasına yük uygulanarak eğilme davranışı incelenir. Şekil 3.17’de üç nokta eğilme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir [61].



Şekil 3.18. Üç nokta eğme testinin şematik gösterimi

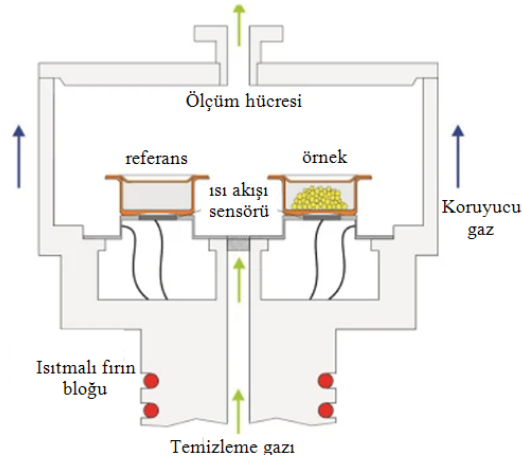


Şekil 3.19. Kaynaklı bağlantılardan alınan numunelere eğme testinin uygulanması

Çalışmada üç noktalı eğme testi kullanılmıştır. Deneyleri her bekleme süresi için 5 numunenin ortalaması alınarak eğilme verileri oluşturulmuştur. Deneyler Zwick marka Z020 çekme cihazında yapılmıştır. Şekil 3.19’da numunelere uygulanan eğme testinin görüntüleri verilmiştir.

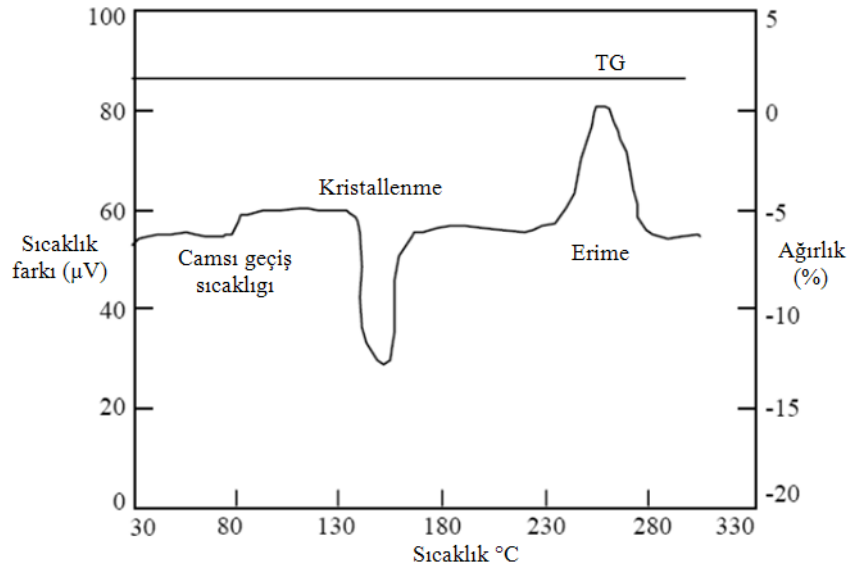
3.6.3. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC)

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) yöntemi ile malzemenin camsı geçiş sıcaklığı (T_g), kristallenme sıcaklığı (T_{cc}), entalpi değişimleri (ΔH), erime sıcaklığı (T_m) gibi değerler elde edilen bir ısı analiz yöntemidir. Polimer örneği, geniş bir sıcaklık aralığında ısı geçiş göstermeyen referans madde ile sabit hızla ısıtılması yöntemiyle ölçümler yapılmaktadır. Sıcaklık değişimi kontrollü olarak gerçekleştirilir. Ölçüm süresince hem numune hem de referans aynı sıcaklıkta tutulmaktadır [61].



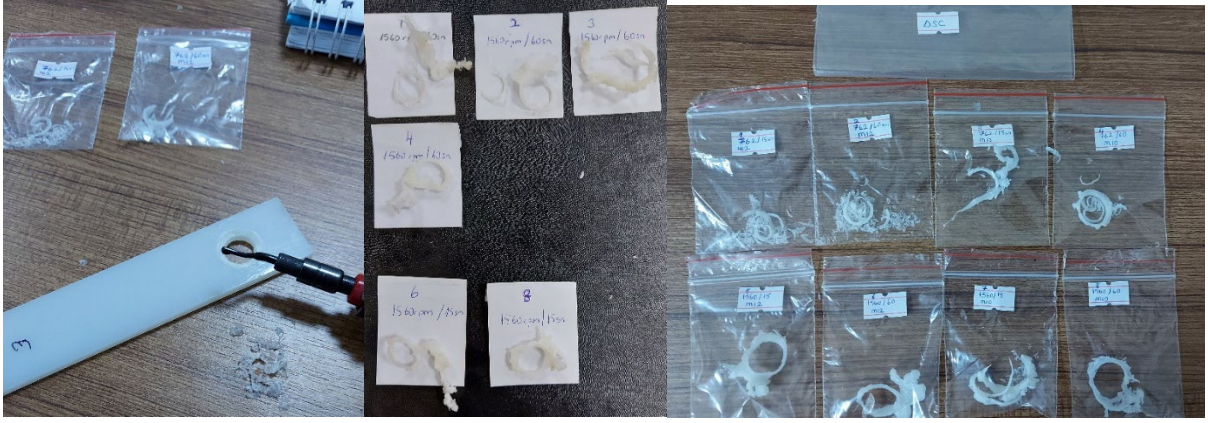
Şekil 3.20. DSC şematik gösterimi

Şekil 3.20 Şematik gösteriminde de görüldüğü gibi cihazda referans ve numune için iki hazne bulunur. Referans olan hazneye boş bir kap (polimerler için alüminyum), diğer hazneye numune yerleştirilir. Ulaşılmak istenen sıcaklık için her iki hazne aynı anda ısıtılır veya soğutulur. Referans ile numune arasında farklı sıcaklık oluşması durumunda numunenin bulunduğu hazneye elektrik akımının aktarılması ile sıcaklık eşitlenir. Numune ve referans arasında sıcaklığın birbirinden farklı olması durumunda negatif ve pozitif sinyaller elde edilir. Pozitif (endotermik) sinyal numunenin referanstan daha yüksek olduğu durumlarda, tersi durumda ise negatif (egzotermik) sinyal elde edilir [61]. Şekil 3.20’de camsı geçiş sıcaklığı (T_g), kristallenme sıcaklığı (T_{cc}), entalpi değişimleri (ΔH), erime sıcaklığı (T_m) noktalarının görüldüğü DSC eğrisi verilmiştir.

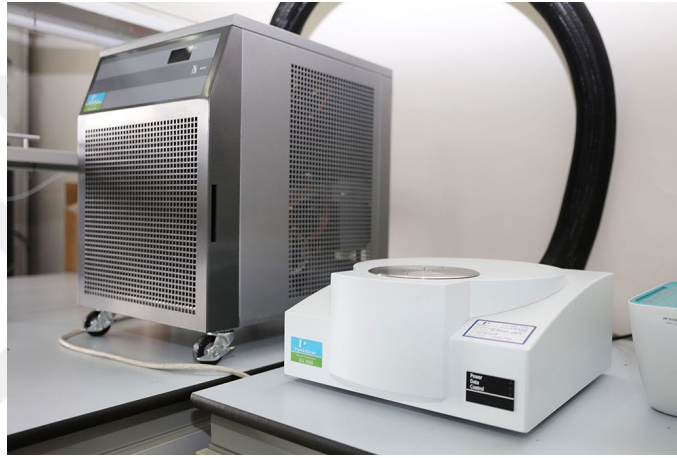


Şekil 3.21. DSC eğrisi

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmiş Poliamid 6 örneklerinin ve işlem görmemiş Poliamid 6’nın, birleştirme sırasında farklı devir, pim çapı ve bekleme süresi gibi parametrelerin nihai ürün özelliklerine olası etkilerini değerlendirmek için Diferansiyel Tarama Kalorimetre analizi yapılmıştır. Minimum 4 mg’lık örnekler üzerinden gerçekleştirilen deneyde, Perkin Elmer marka DSC cihazı kullanılmıştır. Test esnasında kullanılan sıcaklık hızı 10°C/dk olup sıcaklık -30/300°C arasındadır. Bu testte kullanılan azot gazı akışı ise 20 ml/dk’dır. Analiz hem soğutma hem de ısıtma şeklinde yapılmıştır. Test numunelerinin hazırlanma aşaması Şekil 3.18’de gösterilmektedir.



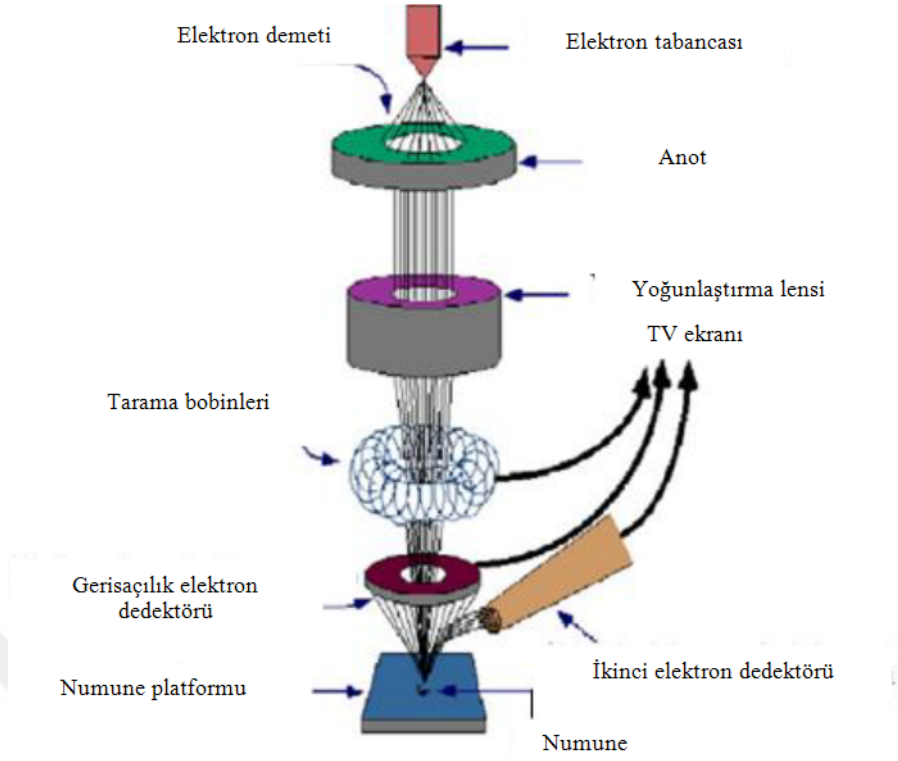
Şekil 3.22. DSC numunelerinin hazırlanması



Şekil 3.23. Perkin Elmer marka DSC cihazı

3.6.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri

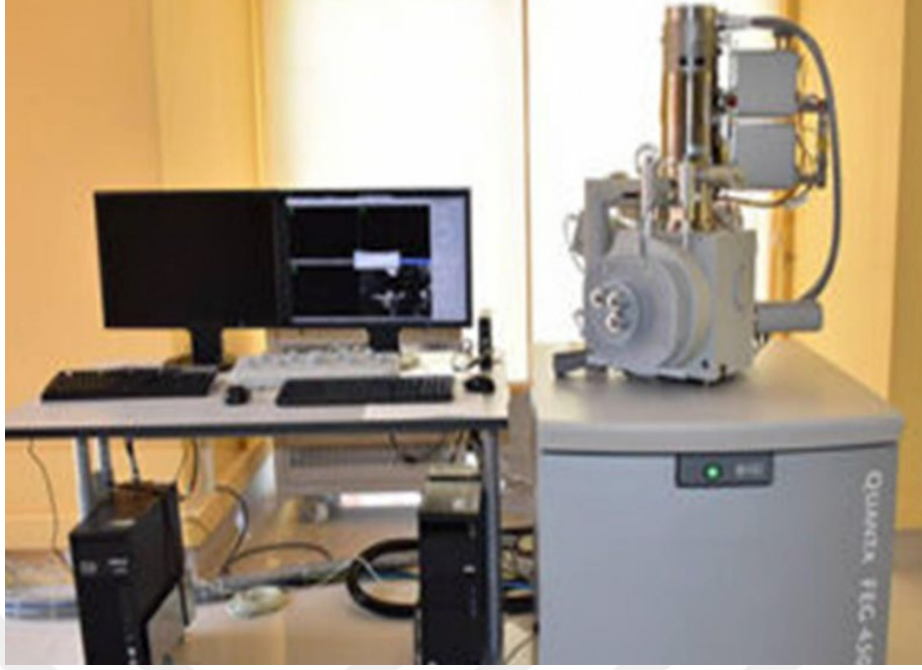
Taramalı elektron mikroskobu, yüzey görüntülerinin elde edilmesi için, numune yüzeyinin elektron demetleri ile taranarak yüksek çözünürlükte görüntülerin oluşturulmasını sağlayan bir görüntüleme tekniğidir.



Şekil 3.24. SEM cihazının şematik gösterimi

Şekil 3.24'te SEM cihazının şematik gösterimine bakıldığında, elek tabancası ile elektron demetleri üretilir. Vakum altında elektron demetleri dikey şekilde ilerler. Demetler, sırasıyla elektromanyetik alandan, toplayıcı mercekten geçerek numunenin yüzeyine çarpar ve yüzeyden elektron koparır. Bu şekilde numune uyarılmış olur. Uyarılan numunede, gelen ışın ile bir ışınım oluşur. Dedektör tarafından toplanan ışınım sinyal olarak algılanır ve yükseltilir. Ardından ikincil elektron ışınlarına geçiş amacıyla kullanılır ve ekrana yansır. Yüksek çözünürlüklü ve üç boyutlu görüntüler elde edilir. SEM analizlerinde bir vakum ortamı hazırlanır. Elektronlar aracılığıyla görüntüler elde edilir. Vakum ortamında numunelerin buharlaşmasının önlenmesi için numunelerin kuru olması önemlidir [62].

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzeyin taranması prensibiyle çalışır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmemiş termoplastik ana malzemeden (PA6) ve SKNK ile birleştirilmiş bölgelerden alınan numunelerin FEI quanta 450 SEM modeli taramalı elektron mikroskobu yardımıyla yüksek çözünürlüklü görüntüleri alınmış ve elde edilen görüntüler karşılaştırılarak oluşan mikroyapılar incelenmiştir. Mikro yapı incelemeleri sonucunda kaynak parametrelerinin fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 3.24'te deneylerin yapıldığı SEM cihazı görülmektedir.



Şekil 3.25. FEI quanta 450 SEM cihazı

3.6.5. Termal kamera



Şekil 3.26. Flir marka E5 model termal kamera ve Ebro marka TFI 650 model kızılötesi termometre

Kaynak işlemi bittikten hemen sonra parça kalıptan ayrılmadan termal kamera ile yüzeysel olarak ölçümler yapılmıştır. Her deney için 5 adet numune kullanılarak ortalaması alınmıştır.

3.6.6. Tam faktöriyel tasarım (FFD)

Deneysel çalışmada devir, bekleme süresi ve pim çapının çekme dayanımı üzerindeki etkisini görmek için kullanılan deneysel tasarımda istatistiksel bir metodoloji olan FFD kullanılmıştır. Tam faktöriyel tasarım, deneysel tasarımda birden fazla faktörün ayrı ve birbirlerine olan etkilerini değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yaklaşım, kontrol faktörlerinin yanıt değişkeni üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için tam faktöriyel regresyon yapılmasını içerir [60].

Bu çalışmada devir, bekleme süresi ve pim çapı kontrol faktörleri olarak alınırken, çekme makaslama değerleri yanıt olarak alınmıştır. Bu kontrol faktörlerinin yanıtı olan çekme makaslama gerilimi üzerindeki ayrı ve ikili ilişkileri ortaya çıkarmak için FFD gerçekleştirilmiştir. Ardından ana faktörlerin ve etkileşimlerinin istatistiksel etkisini değerlendirmek için %95 güven aralığında Anova F-testi varyans analizi kullanılmıştır. Tam faktöriyel deneysel tasarım için ANOVA yanıt tablosunda; serbestlik derecesi (df), kareler toplamı (SS) ve kareler ortalamasını (MS) değerleri değerlendirilmiştir. SS değeri, parametrenin sonuç üzerindeki etkisini temsil eder; yani bir parametre düşük SS değerine sahipse, sonuç üzerinde düşük bir etkiye sahiptir [61].

4. DENEYSEL SONUÇLAR

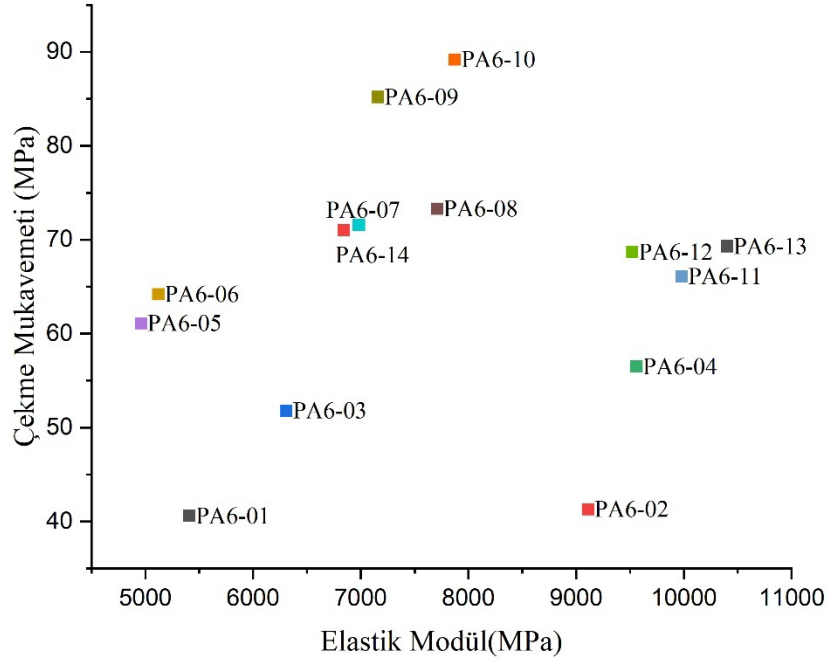
4.1. Çekme Testi Sonucu

SKNK işlemine tabi tutulan PA6 levhaların elastiklik modülü, çekme dayanımı, kopma dayanımı ve kopma anında uzama gibi çekme testi sonuçları, Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Sonuçlar önemli farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar, işleme parametrelerinin (bekleme süresi, dönme hızı ve pim çapı) malzemenin mekanik performansı üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır. Genel olarak, SKNK işlemiyle kaynaklanmış PA6 levhaların mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler gözlemlenmiştir.

PA6-00 (referans) numunesi, diğer numunelere kıyasla daha yüksek elastik modül, çekme dayanımı, kopma dayanımı ve kopma uzaması ile çok iyi bir performans göstermiştir. SKNK işlemi uygulanmış numunelerin mekanik özelliklerinde belirgin bir düşüş olduğu gözlenmiştir. PA6-00 referans numunesinin üstün uzaması, kaynak kaynaklı kusurların olmaması ve polimerin doğal sünekliğinin korunmasıyla açıklanabilir.

Tablo 4.1. Çekme deneyi sonuçları

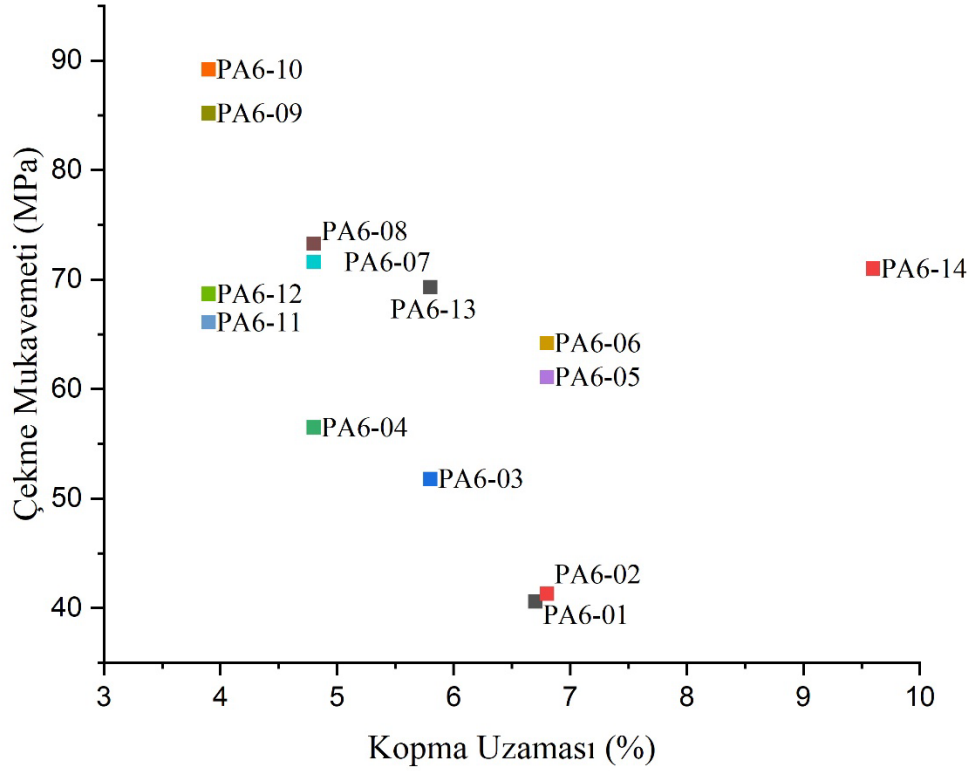
Deney Kodu	Elastik Modül (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
PA6-00 (Reference)	3200 (±264)	73.4 (±1.0)	70.4 (±1.0)	540 (±63.4)
PA6-01	5410 (±342)	40.6 (±2.0)	8.8 (±1.4)	6.7 (±0.9)
PA6-02	9110 (±509)	41.3 (±3.0)	8.2 (±0.6)	6.8 (±0.9)
PA6-03	6310 (±174)	51.8 (±0.5)	10.3 (±0.1)	5.8 (±0.8)
PA6-04	9560 (±315)	56.5 (±2.0)	11.2 (±0.4)	4.8 (±0.6)
PA6-05	4960 (±420)	61.1 (±0.1)	12.2 (±0.2)	6.8 (±0.9)
PA6-06	5120 (±312)	64.2 (±1.0)	12.8 (±0.2)	6.8 (±0.9)
PA6-07	6983 (±304)	71.6 (±1.1)	14.3 (±0.3)	4.8 (±0.6)
PA6-08	7710 (±230)	73.3 (±0.6)	14.6 (±0.1)	4.8 (±0.6)
PA6-09	7160 (±431)	85.2 (±1.6)	18.3 (±3.3)	3.9 (±0.5)
PA6-10	7873 (±337)	89.2 (±1.1)	17.6 (±0.8)	3.9 (±0.5)
PA6-11	9980 (±627)	66.1 (±0.7)	13.1 (±0.2)	3.9 (±0.5)
PA6-12	9520 (±223)	68.7 (±1.3)	13.7 (±0.3)	3.9 (±0.5)
PA6-13	10400 (±465)	69.3 (±0.8)	13.8 (±0.2)	5.8 (±0.8)
PA6-14	6840 (±530)	71.0 (±0.7)	14.2 (±0.2)	9.6 (±1.3)



Şekil 4.1. Çekme mukavemeti ve elastik modül dağılım grafiği

Şekil 4.1’de, numunelerin elastik modül ve çekme mukavemeti değerleri rijitlik ve dayanım korelasyonu açısından değerlendirilmek üzere grafikleştirilmiştir. On dört numune incelendiğinde çekme mukavemeti ve elastik modül arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu görülmektedir. PA6-01 numunesi düşük elastik modülüne sahip iken PA6-02 numunesi ise çok yüksek elastik modülüne sahip olduğu görülmektedir. PA6-02, çekme mukavemeti bakımından zayıf bir performans göstermiş olup yaklaşık 40 MPa seviyesinde kalmıştır. PA6-03 ile PA6-06 numunelerinde çekme mukavemetin kademeli olarak arttığı (52-64 MPa) görülmektedir. PA6-07, PA6-08, PA6-14, 6800-7700 MPa aralığında orta elastik modül değerlerine sahip olup dengeli bir davranış sergilemişlerdir. Bu numuneleride çekme mukavemeti PA6-00 referans numunesinin çekme mukavemetine yakın değerler elde edilmiştir. 85-89 MPa aralığında en yüksek çekme mukavemetine sahip olan PA6-09 ve PA6-10 numuneleri orta düzeyde elastik modül aralığına (7160-7873 MPa) sahip olduğu görülmüştür. PA6-11, PA6-12 ve PA6-13 numunelerinde çok yüksek elastik modül (9500-10400 MPa) orta seviyelere gerilemiş çekme mukavemeti (66-69 MPa) gözlemlenmiştir.

Elastik modül aralığı yüksek seviyede olan numunelerin sırayla PA6-13, PA6-11, PA6-04, PA6-12 ve PA6-02 oldukça rijit olduğu görülmektedir. Dayanım açısından bakıldığında PA6-10 ve PA6-09 iki numunenin en yüksek dayanıma sahip olduğu söylenebilir.



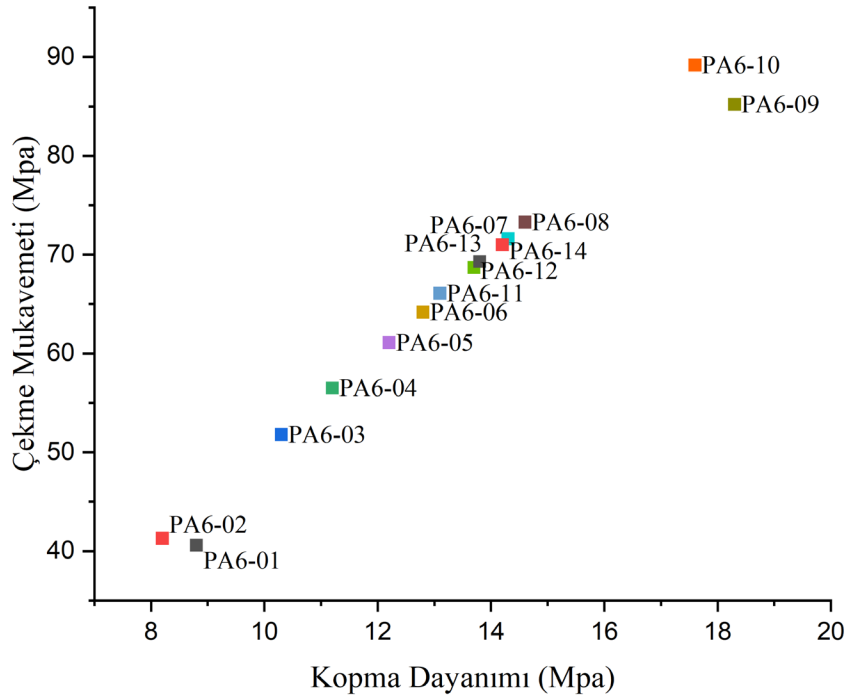
Şekil 4.2. Çekme mukavemeti ve kopma uzaması dağılım grafiği

Çekme mukavemeti ve uzama verileri doğrultusunda oluşturulan grafik ile numunelerin değerlendirilmesi için Şekil 4.2'deki grafik oluşturulmuştur. PA6-09 ve PA6-10 numuneleri yaklaşık 85–89 MPa ile en yüksek çekme dayanımına ulaşmış, ancak kopma uzamalarının yalnızca %3,9 seviyesinde kalması bu numunelerin yüksek mukavemet ile gevrek karakter sergilediğini göstermiştir. Bu durum, yüksek dayanımın sağlandığı fakat sünekliğin sınırlı olduğu parametre kombinasyonlarını işaret etmektedir. Literatürde de benzer şekilde, yüksek mukavemet değerlerine ulaşılan durumlarda uzamanın azaldığı ve kopmanın daha gevrek karakterde gerçekleştiği görülmektedir [20].

PA6-01 ve PA6-02 numuneleri 40–41 MPa seviyesinde oldukça düşük dayanım göstermiş, ancak uzama değerleri %6,7–6,8 aralığında gerçekleşmiştir. Bu numuneler düşük mukavemetle birlikte görece daha sünek bir davranış ortaya koymuştur. PA6-05 ve PA6-06 numuneleri ise orta seviyede dayanım (61–64 MPa) ile %6,8 uzama göstermiş, bu da onların dayanım ve sünekliği daha dengeli şekilde bir arada sunduğunu ortaya koymaktadır. PA6-07 ve PA6-08 numuneleri (71–73 MPa) %4,8 uzama ile nispeten sınırlı süneklik göstermiş, buna karşılık PA6-11 ve PA6-12 de benzer şekilde orta dayanım (66–69 MPa) ile düşük uzama (%3,9) kombinasyonu sergilemiştir.

Özellikle dikkat çeken PA6-14 numunesi, yaklaşık 71 MPa dayanım ile en yüksek uzama değerine (%9,6) ulaşarak, yüksek sünekliği sayesinde daha tok bir kırılma davranışı sergilemiştir. Bu sonuç, optimum parametrelerin yalnızca yüksek dayanımı değil, aynı zamanda sünekliği de göz önünde bulundurması gerektiğini ortaya koymaktadır. Literatürde de benzer şekilde, uzamanın artış göstermesiyle malzemenin daha fazla enerji absorbe edebilme kapasitesine ulaştığı, bunun ise darbe dayanımı ve tok davranış açısından kritik olduğu vurgulanmaktadır [76].

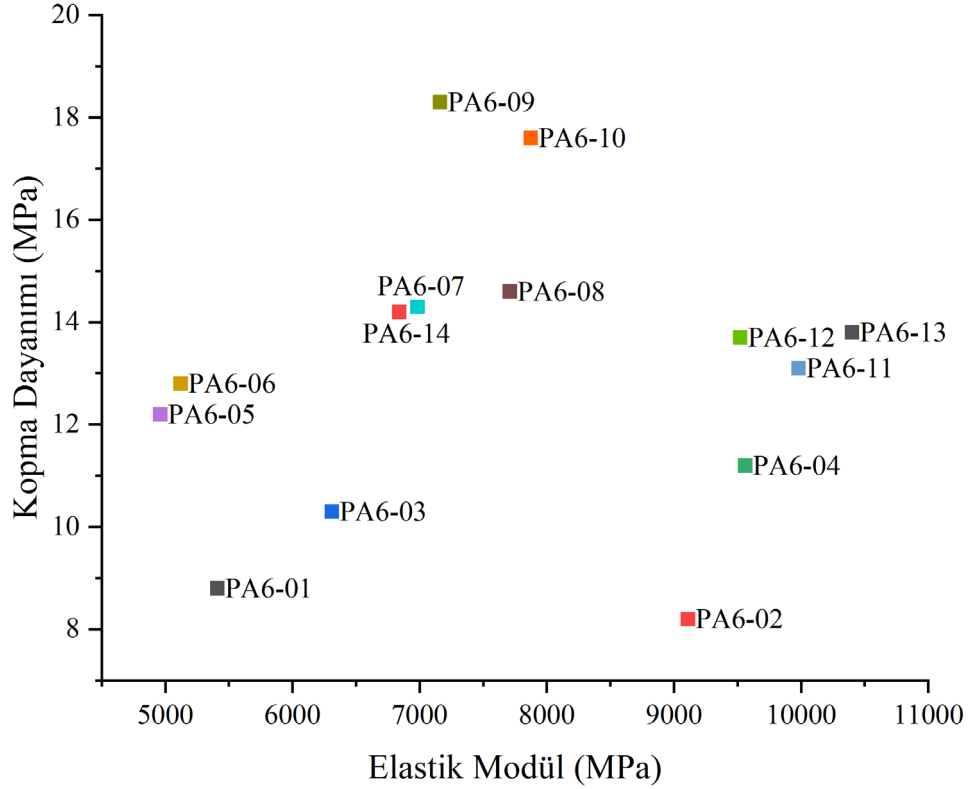
Özet olarak, grafik numunelerin gevrek, sünek ve tok davranışlarını açık bir şekilde ortaya koymakta; yüksek dayanım ile sınırlı sünekliği temsil eden PA6-09 ve PA6-10 numunelerinin yanı sıra, yüksek süneklik ile orta mukavemeti bir arada sunan PA6-14 numunesi optimum parametrelerin belirlenmesinde öne çıkan numune olarak değerlendirilebilmektedir.



Şekil 4.3. Çekme mukavemeti ve kopma dayanımı dağılım grafiği

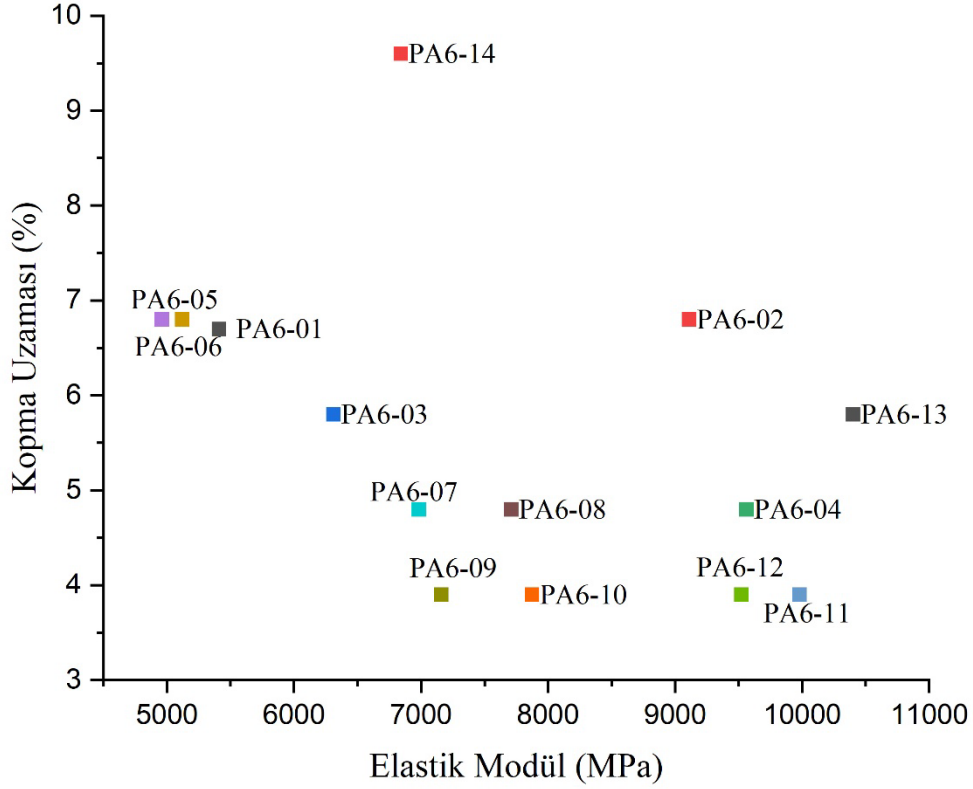
Şekil 4.3'te çekme mukavemeti ve kopma dayanımı verileri ile oluşturulan grafikte de görüldüğü gibi çekme mukavemeti ile kopma dayanımı arasındaki artış doğrusal bir çizgi üzerinde olmasa da çekme mukavemeti yükseldikçe kopma dayanımı genellikle artmıştır. Yüksek çekme mukavemetine sahip numunelerde kopma dayanımı daha düşük seyretmiştir. Bu da malzemenin yük altında sünek davranış sergilediğini ve boyun verme sonrasında koptuğunu gösterir. Çekme mukavemeti ile kopma dayanımı birbirine yakın olan numuneler, gevrek kopma eğilimi gösterirken, aradaki farkın büyük olduğu numuneler sünek kopma eğilimi

sergileyecektir. Dağılım grafiği sadece maksimum dayanımı değil, kopma karakterini de gösterdiği için optimum parametrelerin belirlenmesinde önemli bir araç olarak kullanılabilmektedir.



Şekil 4.4. Elastik modül ve kopma dayanımı dağılım grafiği

Şekil 4.4'te elastik modül ile kopma dayanımı verilerini dağılım grafiğinde incelediğimizde, 5000-6000 MPa arasında düşük elastik modüle sahip olan numunelerin kopma dayanımı (8-12 MPa) sınırlı kalmaktadır. Bu da malzemenin yeterince rijit olmadığı için zayıf bağlantı gerçekleştiğini gösterir. Elastik modülün orta seviyede (7000-8000 MPa) iken kopma dayanımının (17-18 MPa) en yüksek seviyelerde olduğu görülmektedir. Rijitlik ile dayanım arasında dengeli bir ilişki olduğu söylenebilir. Bunu yanı sıra elastik modülün çok yüksek (9500-10400 MPa) olduğu numunelerde kopma dayanımı 13-14 MPa seviyelere düştüğü görülmüştür. Bu durum, rijitliğin aşırı olmasının malzemeyi gevreklettiğini ve sünek davranıştan uzaklaştırdığını göstermektedir. Rijitlik ve kopma dayanımı açısından en uygun performansı orta düzeydeki elastik modül değerlerini veren numuneler olduğu söylenebilir.



Şekil 4.5. Elastik modül ve kopma uzaması dağılım grafiği

Şekil 4.5'te verilen grafikte elastik modül ile kopma uzaması arasındaki ilişki değerlendirildiğinde, elastik modül ile kopma uzaması arasında ters yönlü bir ilişki görülmektedir; düşük elastik modül değerlerinde (%6,7-6,8) yüksek kopma uzamaları elde edilirken, orta elastik modül seviyesinde (6840 MPa) en yüksek değer olan %9,6'ya ulaşılmış ve bu durum malzemenin en dengeli süneklik-sertlik performansı sunduğunu göstermiştir. Buna karşılık yüksek elastik modül aralığında (9500–10400 MPa) kopma uzaması %3,9-5,8 seviyelerine kadar düşerek malzemenin daha gevrek bir davranış sergilediği görülmüştür. Bu sonuç dayanım-süneklik arasındaki klasik karşıtlığı doğrulamakta ve optimum kullanım için orta elastik modül bölgesinin avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Yukarıdaki verileri ışığında çekme testi sonucunda elde edilen verileri devir, bekleme süresi ve pim çapı ile elastik modül, çekme dayanımı, kopma dayanımı, kopma uzaması arasındaki bağlantı üzerinde değerlendirilirse; elastik modül açısından, PA6-00 (referans) numunesi 3200 MPa'da en düşük değeri gösterirken, PA6-13 numunesi 10400 MPa'da en yüksek değere ulaşmaktadır. Dönme hızı arttıkça, elastik modül değerlerinde genel bir artış gözlemlenmektedir. Yüksek dönme hızıyla (1560 dev/dk) elde edilen PA6-13'teki en yüksek elastik modül, malzemenin daha sert ve deformasyona karşı daha dirençli hale geldiğini

göstermektedir. Diğer numunelerde, özellikle pim çapı ve karıştırma süresi değiştiğinde, elastik modül değerleri 7000 MPa ile 10000 MPa arasında değişmektedir ve bu da işleme parametrelerinin malzemenin elastikiyetini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

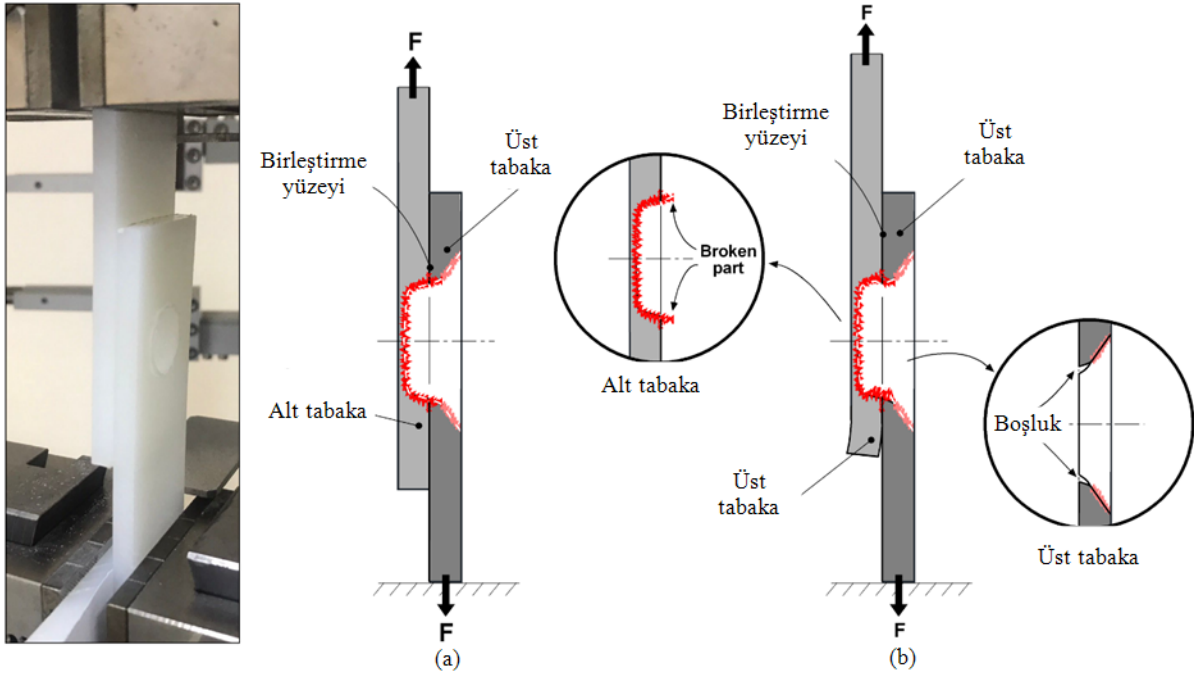
Çekme dayanımı açısından PA6-00 numunesi 73,4 MPa ile yüksek dayanımı sergilerken, PA6-01 ve PA6-02 gibi numuneler yaklaşık 40 MPa'ya düşüş göstermektedir. Bu düşüş, özellikle düşük pim çapı ve kısa karıştırma süreleriyle bağlantılıdır; bu koşullar FSSW işlemi sırasında malzeme yapısının yeterince homojenleşmemesine yol açarak çekme dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Ancak, dönme hızı ve pim çapının artırıldığı ve karıştırma sürelerinin uzatıldığı PA6-09, PA6-10 ve PA6-14 gibi numunelerde çekme dayanımı 70 MPa'nın üzerinde kalır ve bu da daha iyi performansa işaret eder. Özellikle, PA6-14'teki yüksek dönme hızı ve uzun karıştırma süresinin birleşimi, dayanımını artırır.

Kopma dayanımı için PA6-00 yine 70,4 MPa ile en yüksek değeri gösterirken, PA6-01 ve PA6-02 gibi örnekler önemli ölçüde daha düşük kopma dayanıklılığına sahiptir (yaklaşık 8 MPa). Bunun nedeni, kısa karıştırma süreleri ve küçük pim çapları tarafından üretilen yetersiz termal etkilerdir. Kısa karıştırma süreleri, malzemenin düzgün karışmasını önleyerek kopma dayanıklılığının azalmasına neden olur. Buna karşılık, daha uzun karıştırma süreleri ve yeterli dönme hızı bu sorunun üstesinden gelir ve PA6-03 ve PA6-04 gibi örneklerde daha iyi kopma dayanıklılığı elde edilir. PA6-09 ve PA6-10 en yüksek kopma dayanımına sahip numunelerdir.

Kopma uzaması açısından PA6-14 numunesi %9,6 ile en yüksek değeri sergilerken, diğer örnekler PA6-01 için %6,7 ve PA6-02 için %6,8, PA6-09 ve PA6-10 için ise yalnızca %3,9 gibi daha düşük değerler göstermektedir. Uzamadaki bu azalma, pim çapındaki, dönme hızındaki ve karıştırma süresindeki değişikliklerden etkilenen kaynak bölgesinin esnekliğinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek dönme hızları ve uzun karıştırma süreleri daha yoğun bir malzeme yapısına yol açarak esneklik kaybına neden olabilir. Buna karşılık, uygun parametre kombinasyonuna sahip olan PA6-01, PA6-02 ve özellikle PA6-14 numunelerinde kopma uzaması nispeten daha yüksek kalmış, bu da bu numunelerin daha sünek bir kırılma davranışı sergilediğini göstermiştir. Yan ve dig. [14] çalışmasında, yüksek dönme hızı ve agresif kaynak koşulları altında PA6 bölgesindeki deformasyon kabiliyetinin düştüğü ve uzamanın azaldığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık, PA6-14 gibi numunelerde daha kısa bekleme süresi ve uygun dönme hızı koşulları altında hem mukavemet hem de kopma uzaması yönünden daha iyi bir denge sağlanabilmektedir.

Genel olarak, SKNK işlemiyle kaynaklanmış PA6 levhaların mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler gözlemlenmiştir. PA6-00 (referans) numunesi, diğer numunelere kıyasla daha yüksek elastik modül, çekme dayanımı, kopma dayanımı ve kopmada uzama ile daha iyi performans gösterirken, FSSW ile işlenmiş numuneler mekanik özelliklerde belirgin bir düşüş göstermektedir.

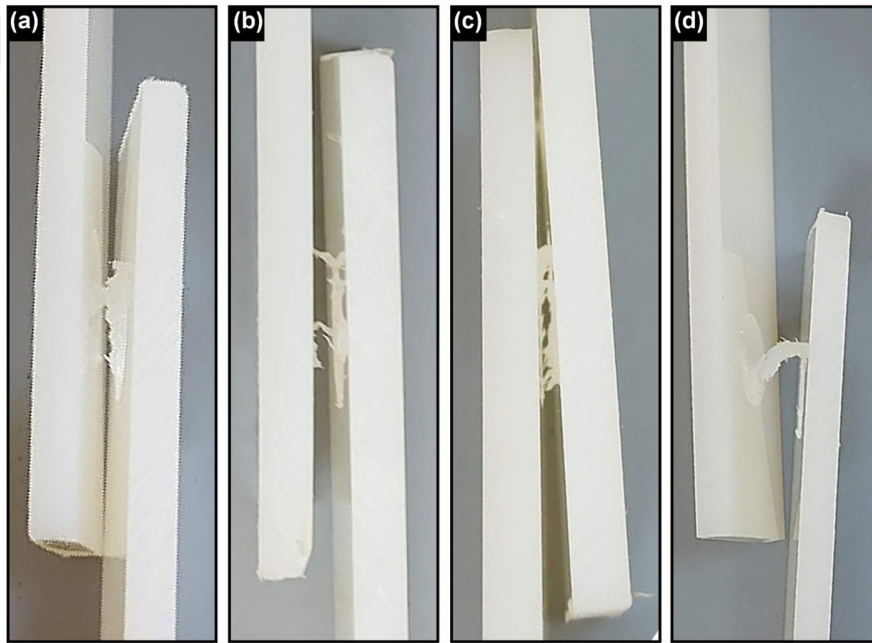
Bu bulgular, SKNK işlemiyle kaynaklanmış PA6 levhaların mekanik özelliklerinin kaynak parametrelerine (örneğin bekleme süresi, dönme hızı ve pim çapı) bağlı olduğunu ve bu parametrelerin malzemenin genel performansı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Özellikle, dönme hızı ve karıştırma süresi arttıkça, malzemenin sertliği ve mukavemeti artar, ancak esnekliği ve kopma anındaki uzaması azalır. Bu, SKNK ile işlenmiş malzemeleri belirli uygulamalar için daha uygun hale getirmek için parametreleri optimize etmenin önemini vurgular.



Şekil 4.6. Laboratuvar çekme testinin şematik gösterimi

Şekil 4.6'da, laboratuvar çekme testinin başlangıcı (Şekil 4.6a) ve testten sonraki görüntüler (Şekil 4.6b) şematik olarak gösterilmiştir. Testin başlangıcında, birleştirme yüzeyi üst ve alt plakalar arasında sıkıştırılır ve test kuvveti (F) her iki plakaya zıt yönlerde uygulanır. Bu aşamada, malzeme elastik veya plastik deformasyon bölgesindedir ve herhangi bir kopma veya boşluk gözlenmez. Ancak, testin sonunda, kaynak bölgesinde kopma meydana gelir. Kopma yolunu (kırık parça) temsil eden kırmızı çizgi, birleştirme yüzeyinde kopmanın meydana geldiği noktayı (zayıf nokta) işaret eder. Ayrıca, üst plakanın birleştirme yüzeylerinde boşluklar

gözlenir. Bu boşluklar, kaynak bölgesindeki malzemenin temel malzemeye yeterince homojen bir şekilde bağlanmadığını ve mekanik performansını olumsuz etkilediğini gösterebilir. Kaynak bölgesindeki zayıflık, ağırlıklı olarak bu alanda kopmaya yol açarak malzemenin mukavemetini azaltmıştır. Yetersiz kaynak sıcaklığı, düşük basınç veya malzemede gazların hapsolması gibi faktörler boşlukların oluşmasına neden olabilir. Genel olarak, bu noktada plaka birleştirme yüzeylerinin üst üste gelmesi ve kaynak bölgesindeki ısıdan kaynaklanan gazların birleştirme hattından kaçmaya çalışmasıyla açıklanabilir. Bu, bölgede boşluk oluşumuna yol açar ve kaynak mukavemetini olumsuz etkiler. Birleştirme bölgesindeki bu tür kopmalar ve boşluklar, kaynak bölgesinin mekanik mukavemetinin düşük olduğunu ve kaynak parametrelerinin (örneğin basınç, sıcaklık ve süre) uygun şekilde optimize edilmesi gerektiğini gösterir [19, 21-23].



(a) PA6-02, (b) PA6-03, (c) PA6-04 ve (d) PA6-06.

Şekil 4.7. Farklı bekleme sürelerinde kaynaklı PA6 bağlantılarının arıza yolları

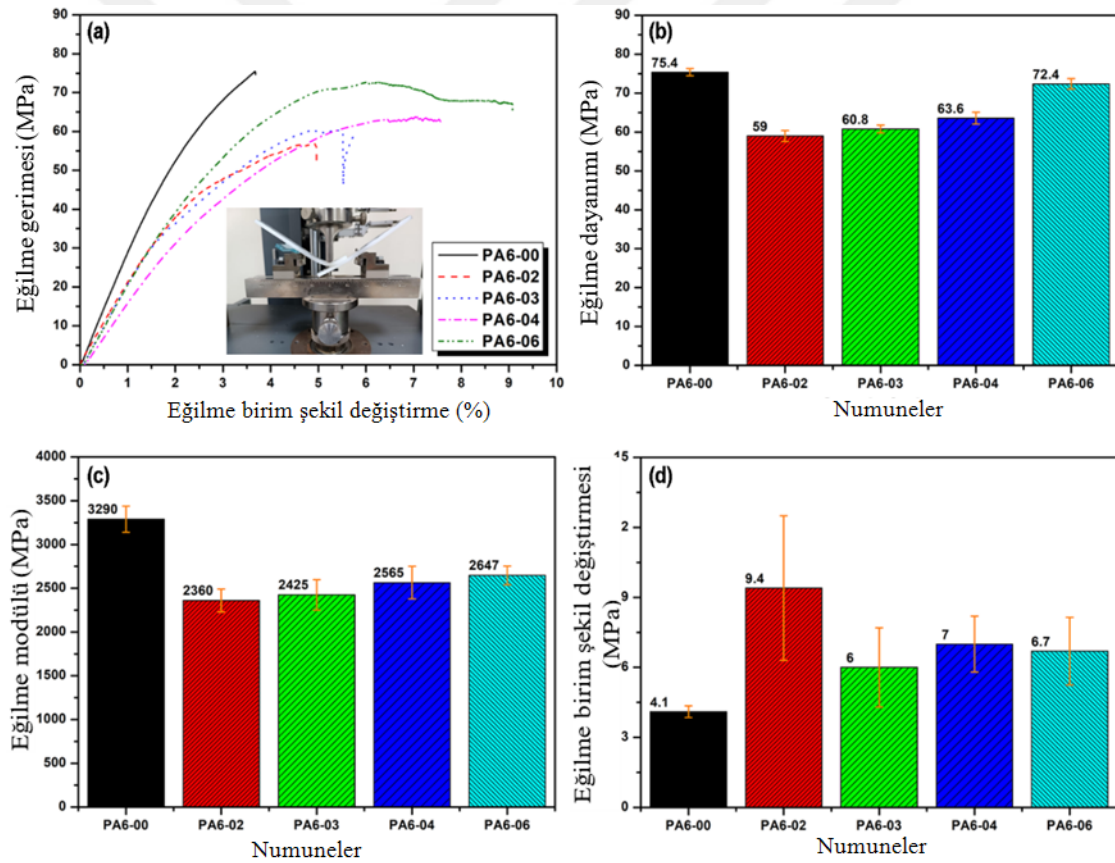
Çatlaklar, bekleme süresine bağlı olarak farklı şekillerde yayılmıştır ve arayüz ayrılmasından karıştırma bölgesi içindeki kohezif kırılmaya kadar değişkenlik göstermişlerdir.

Kopma mekanizmalarını daha ayrıntılı olarak açıklamak için, kaynaklı bağlantıların temsili kopma yolları Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Şekil 4.7a'da (PA6-02) görüldüğü gibi, çatlaklar esas olarak zayıf bağlı arayüz boyunca yayılmış ve yapıştırıcı tipi kopma olduğunu göstermiştir. Şekil 4.7b ve 4.7c'de (PA6-03 ve PA6-04), daha uzun bekleme süreleri daha iyi karışımı teşvik

etmiş ve çatlaklar karıştırma bölgesinden yayılmış, bu da daha kohezif kopma davranışını ortaya koymuştur.

4.2. Üç Nokta Eğilme Mukavemetine Bekleme Süresinin Etkisi

Bekleme süresinin kaynaklı bağlantıların eğilme özellikleri (eğilme mukavemeti, modül ve gerilme) üzerindeki etkisi Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Bekleme süresinin artırılması, mukavemet, modül ve deformasyon davranışı dahil olmak üzere eğilme özelliklerini önemli ölçüde etkilemiştir. PA6-00 referans numunesi (SKNK'na tabi tutulmamış), en yüksek eğilme mukavemeti (75,4 MPa) ve modülü (3290 MPa) sergilemiştir, bu da saf PA6'nın yüksek mukavemete sahip ancak sınırlı deformasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, SKNK'na tabi tutulmuş PA6 numunelerinin mekanik performansı, bekleme süresinin artmasıyla belirgin şekilde değişmiştir.



a) eğilme eğrileri, b) mukavemet, c) modül ve d) gerilme

Şekil 4.8. SKNK ile birleştirilen PA6 levhaların eğilme özellikleri üzerinde bekleme süresinin etkisi

15 saniyelik bekleme süresine sahip PA6-02 numunesi için eğilme mukavemeti azalmış, ancak deformasyon kapasitesi (gerinim) önemli ölçüde artmıştır. Bu durum, kısa bekleme süresinin

kaynak bölgesinde homojen bir yapının oluşmasını engellediğini ve daha esnek bir yapıya yol açarak daha fazla enerji emilimine izin verebileceğini göstermektedir. Daha uzun bekleme süreleri için (PA6-03 ve PA6-04), eğilme mukavemeti sırasıyla 60,8 MPa ve 63,6 MPa'ya yükselmiş ve deformasyon kapasitesi daha dengeli bir davranış göstermiştir (sırasıyla %6 ve %7).

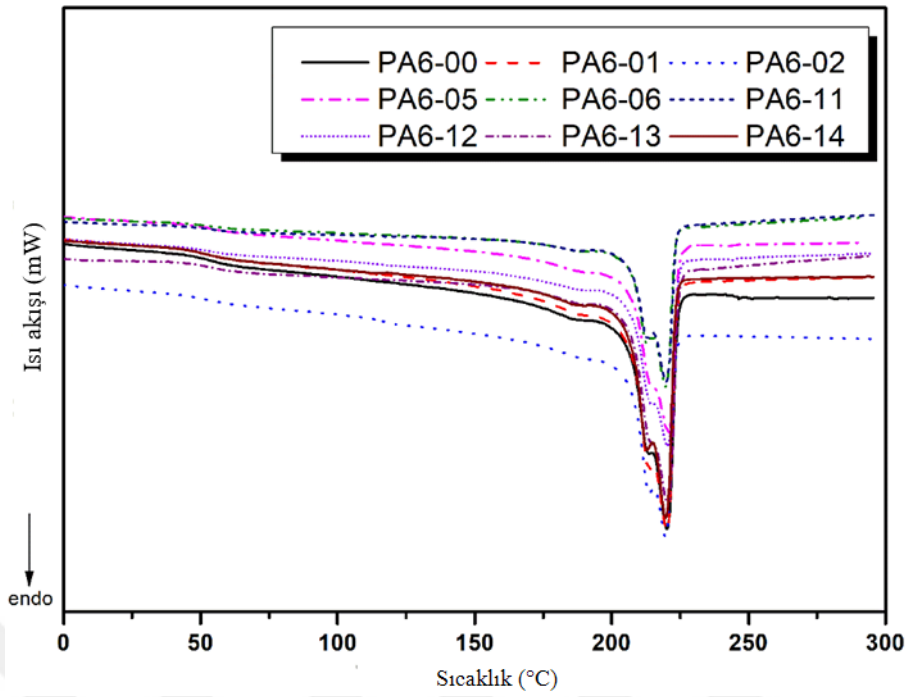
Uzun bekleme sürelerinin malzeme yapısının, daha iyi homojenleşmesini sağlayarak mekanik özellikleri iyileştirdiğini göstermektedir. En uzun bekleme süresi (60 saniye) ile kaynaklanan PA6-06 numunesinde, eğilme mukavemeti ve modülü sırasıyla 72,4 MPa ve 2647 MPa'ya ulaşmıştır. Bu arada, deformasyon kapasitesi %6,7 olarak ölçülmüş ve bu numune genel olarak dengeli bir mekanik performans sergilemiştir. Kısa bekleme sürelerinin ve yetersiz termomekanik işlemenin kaynak bölgesinde homojen bir yapı oluşumunu engellediği ve mekanik özellikleri olumsuz etkilediği bulunmuştur. Buna karşılık, bekleme süresinin artırılması PA6 malzemelerinde daha dengeli mukavemet ve deformasyon kapasitesi ile sonuçlanmış ve kaynak performansının optimize edilmesine yol açmıştır [8, 11, 24].

4.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Deneyi Sonucu

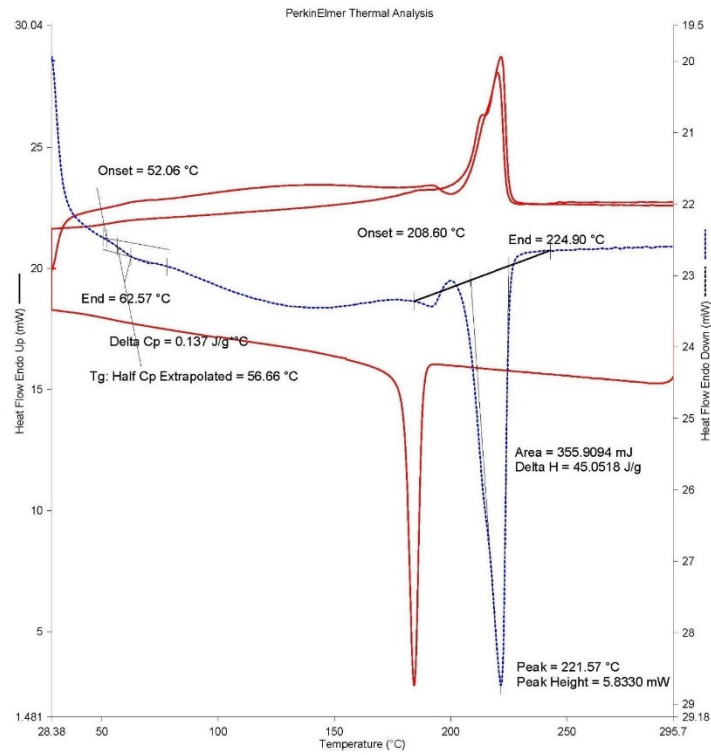
DSC analiz sonuçları Tablo 4.2'de, grafiksel karşılaştırması ise Şekil 4.1'de sunulmuştur. Farklı SKNK parametreleri kullanılarak birleştirilen PA6 numunelerinin sonuçları, uygulanan kaynak koşullarının malzemenin termal özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Herhangi bir kaynak işlemine tabi tutulmayan referans numunesi PA6-00, karşılaştırma amacıyla dahil edilmiş ve %19,59 kristallik derecesiyle orta düzeyde kristal bir yapı sergilemiştir. Bulgular, özellikle karıştırma süresi ve pim çapının kristalleşme davranışını belirgin bir şekilde etkilediğini göstermektedir [45, 16-18].

Tablo 4.2. DSC testinden elde edilen sayısal veriler

Deney Kodu	ΔH (J/g)	T_g (°C)	T_m (°C)
PA6-00 (Referans)	45.05	56.66	221.57
PA6-01	56.93	56.25	223.07
PA6-02	58.25	33.71	220.22
PA6-05	50.23	51.28	222.44
PA6-06	56.60	50.25	220.96
PA6-07	51.30	48.90	220.64
PA6-08	50.29	52.63	220.77
PA6-09	48.91	47.87	221.43
PA6-10	51.49	38.30	221.09
PA6-11	51.92	68.31	221.13
PA6-12	50.96	41.89	222.26
PA6-13	53.21	49.04	222.59
PA6-14	39.12	44.45	222.24



Şekil 4.9. Saf PA6 ve FSSW ile birleştirilmiş PA6 numunelerinin DSC eğrileri

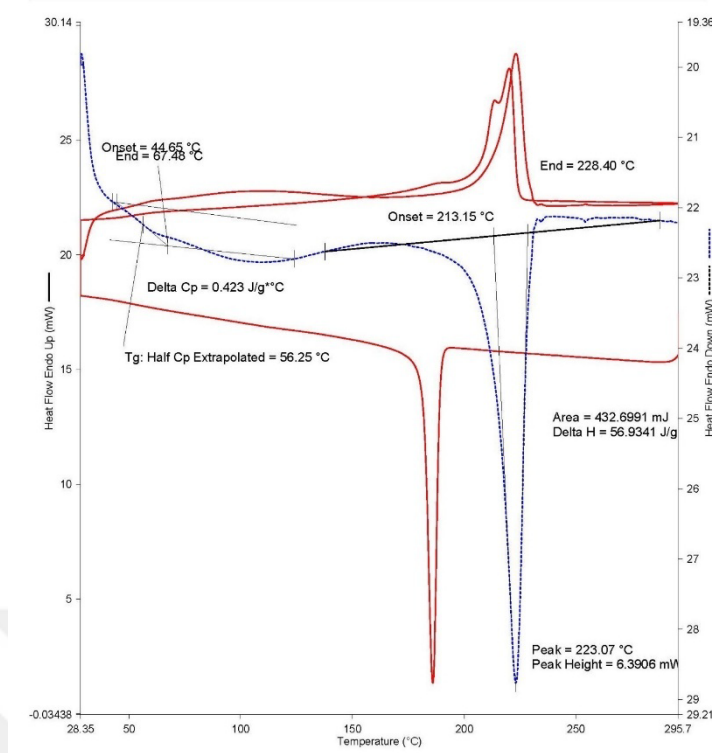


Şekil 4.10. PA6-00 Referans numunesinin DSC grafiği

İşlem görmemiş Poliamid 6 (PA6), PA6-00 referans numunesine ait DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri) analizi, malzemenin ısı geçiş davranışlarını ortaya koymaktadır. 56,66 °C’de belirlenen camsı geçiş sıcaklığı (T_g), polimer zincirlerinin amorf bölgelerinde segmental

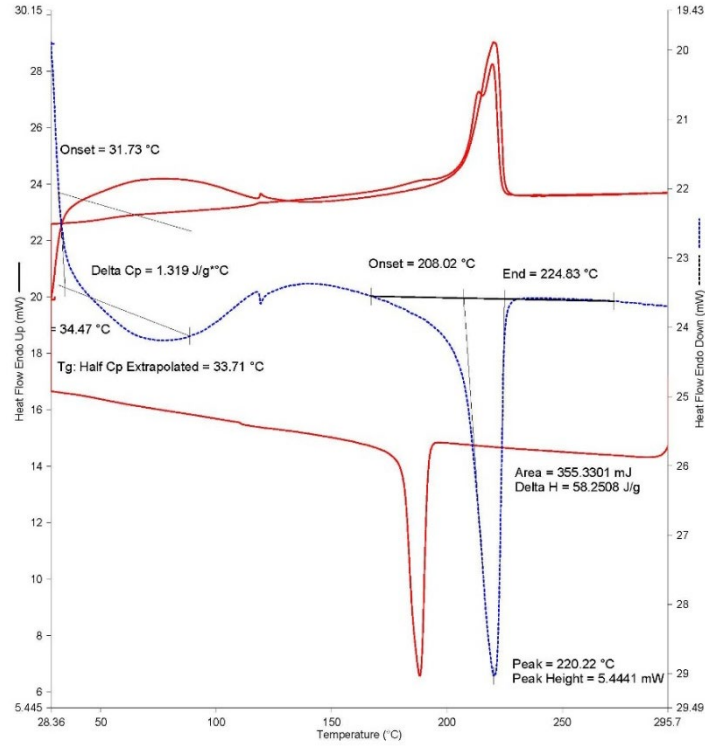
hareketliliğin başladığı noktayı göstermektedir. Zincir hareketliliği, bu sıcaklığın üzerinde artış gösterir. Malzeme sert ve gevrek davranıştan sünek davranışa geçer. Şekil 4.10'da eğrinin ilk bölgesinde 52,06 °C'de başlayan ve 62,57°C'de sonlanan küçük değişim değerleri T_g sırasında ısı kapasitesi farklılıklarını göstermektedir. PA6'nın kristalin bölgelerinin erime davranışı eğrinin ikinci bölgesinde 208,60 °C'de başlayan ve 224,90 °C'de sonlanan endotermik olay ile gözlenmektedir. Polimer zincirleri bu sıcaklık aralığında kristal yapılardan, düzensiz amorf yapıya geçmektedir. Erime piki (T_m) 221,57 °C'de gerçekleşmiştir. PA6'nın literatürde gösterilen erime sıcaklığı 220-225 °C aralığındadır ve burada ölçülen değer ile tam uyum içinde olduğu görülmektedir [63]. 45,05 J/g olarak hesaplanan ve erimeye karşılık gelen entalpi değişimi (ΔH_m), kristalin bölgelerin erimesi için gereken enerji miktarıdır. Literatürde PA6'nın erime entalpisi $\Delta H_m^0 = 230$ J/g'dır [64]. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda numunenin kristallik derecesinin %20 olduğu söylenebilir. Malzemenin mekanik özelliklerini de kristalin ve amorf faz dengesinin belirleyeceği görülmektedir. Camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı ve kristallik derecesi açısından bakıldığında sonuçların literatür ile uyumlu olduğu söylenebilir. Kaynak sırasında yeniden kristallenme etkisinin önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Kristallik derecesi (X_c) teorik erime entalpisi ($\Delta H_m^0 = 230$ J/g) dikkate alınarak hesaplanır:

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100 \approx \frac{45,05}{230} \times 100 \approx 19,59\% \quad (4.1)$$



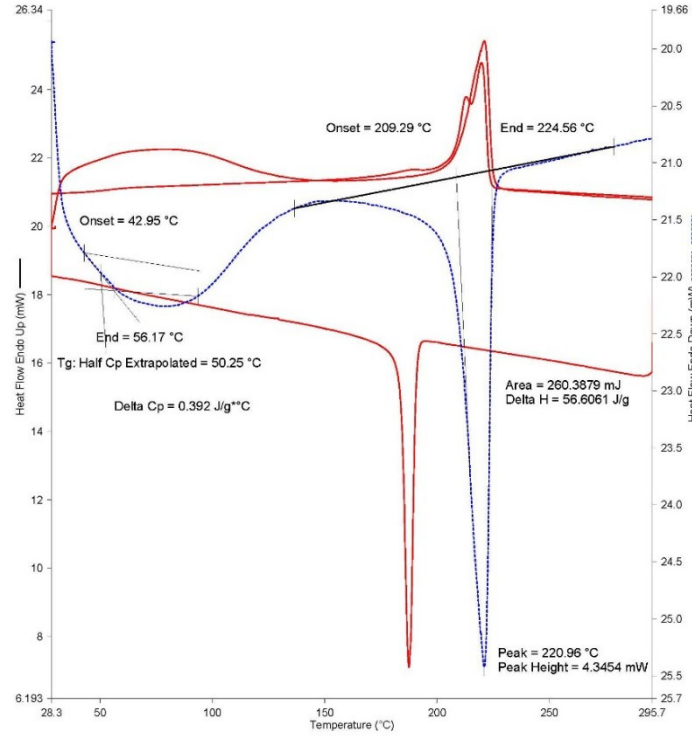
Şekil 4.11. PA6-01 DSC grafiği

Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) 56,25 °C değerinde olan PA6-01 numunesinde kaynak işlemi sonrası malzemenin yapısında amorf bölgelerin mevcut olduğunu işaret etmektedir. Bu numune işlem görmemiş PA6-00 referans numunesine en yakın camsı geçiş sıcaklığına sahip numunedir, zincir hareketliliği bu noktada başlamıştır. T_g sırasında ısı kapasitesindeki değişimde $C_p = 0,423$ J/g·°C zincir hareketliliğinin arttığını göstermektedir. İlk termal olay 44,65-67,48 °C aralığında olmuştur. Yapısal gevşemeler ve amorf segmentlerin düzenlenmeleri bu bölgede gerçekleşmektedir. Kaynak sırasında meydana gelen termomekanik etkinin amorf faza katkısı olacağı görülmektedir. İkinci termal olay olan erime 213,15 °C’de başlamış ve 228,40 °C’de sonlanmıştır. Endotermik geçiş kristalin bölgelerinin bozulması ve erimeye uğraması, bu sıcaklık aralığında kristalin bölgelerin bozulması ve erimeye başladığını göstermektedir. Erime piki (T_m), 223,07°C’de oluşmuştur. PA6’nın erime sıcaklığı ile uyumludur. Bu değerler doğrultusunda kristalin bölgelerin korunduğu da söylenebilir. Kristal bölgelerin çözünmesi için gerekli enerji (ΔH_m) 56,93 J/g olarak hesaplanmıştır. Kaynak sonrası malzemenin yaklaşık %24,75 kristallik oranına sahip olduğu görülmektedir. Bu oran, saf PA6-00 ile karşılaştırıldığında bir miktar artış göstermektedir. SKNK sırasında oluşan sürtünme ısısının kristal yapı oluşumunu artırdığını ve zincir düzenlenmesine neden olduğu düşünülmektedir.



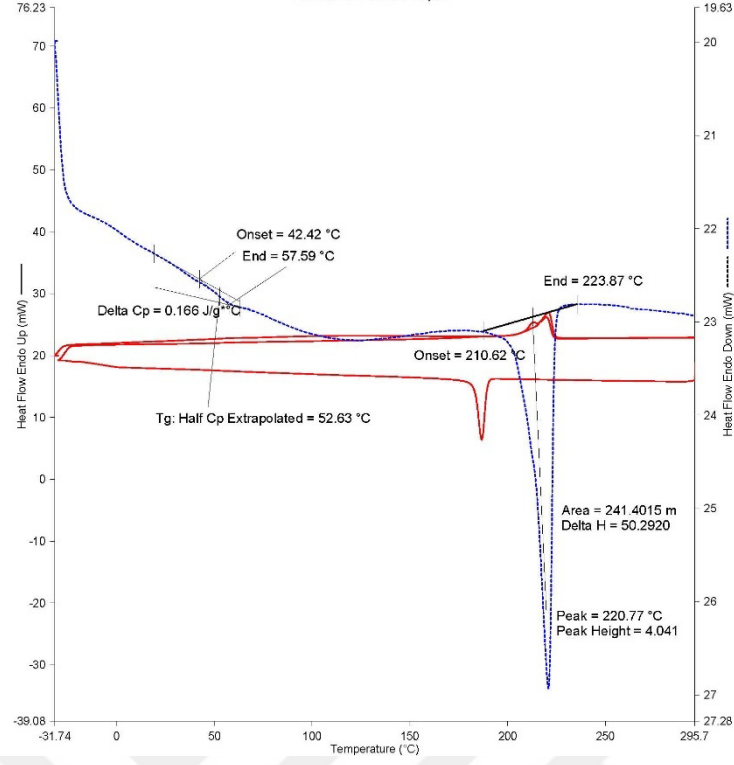
Şekil 4.12. PA6-02 DSC grafiği

PA6-02 numunesine ait DSC eğrisi incelendiğinde, ilk termal olay 31,73-34,4 °C aralığında olmuştur. Bu bölgede görülen küçük geçişler, amorf fazın yeniden düzenlenmesi olarak düşünülebilir. Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) 33,7 °C ölçülmüştür. Isı kapasitesi ($C_p \approx 1,319 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$) bu noktada bir artış göstermiştir. PA6-02, numuneler arasında en yüksek ısı kapasitesi değerine sahip olan numunedir. Bu durum oldukça ilginçtir. Kristallığın yüksek olduğu ama aynı zamanda amorf fazında yüksek olduğu görülmektedir. Bir başka açıdan düşünüldüğünde hem kristalin bölgeler güçlü hem de amorf faz hareketlidir. Daha dengeli ama muhtemelen tok ve esnek bir yapı olduğu düşünülebilir. Erime 208 °C’de başlamış, 224,8 °C’de son bulmuştur. Pik noktası 220,2 °C’de oluşmuştur. Erime entalpisi $\Delta H_m = 58,25 \text{ J/g}$ olarak hesaplanmıştır. Bu veriler kristal fazın korunduğunu göstermektedir. PA6-02, numuneler içerisinde en yüksek erime entalpisine sahiptir ve kristalin faz yapısını koruyan bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Polimer zincirlerinde, SKNK işleminin bozunmaya yol açmadığı görülmektedir. Genel olarak bakıldığında, ısıl kararlılık ve mekanik performansın iyi olması, malzemenin hem amorf yapıyı hem de kristalin faz yapıyı dengeli bir şekilde korumasından kaynaklanmaktadır.



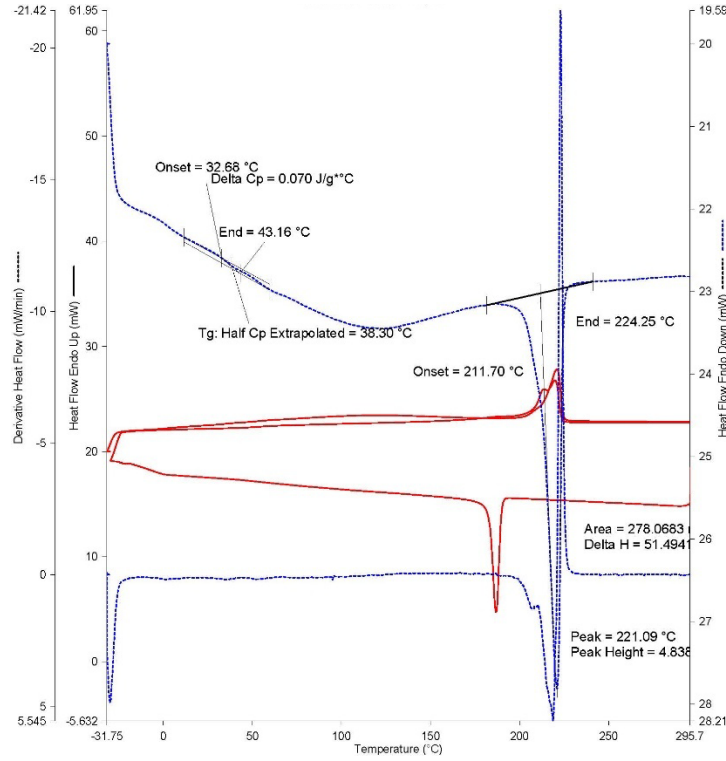
Şekil 4.13. PA6-06 DSC grafiği

PA6-06 numunesine ait diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) eğrisinde ilk termal olay 42,95-56,17 °C aralığında olmuştur. Camsı geçiş sıcaklık (T_g) değeri 50,25 °C olarak ölçülmüştür. Polimerin amorf yapılarında zincir hareketliliğinin başladığı anlaşılmaktadır. 0,392 J/g·°C'lik C_p , değeri ile kristalin ve amorf fazın daha dengeli bir dağılımı sergilediği görülmektedir. İkinci termal olayda 209,29 °C'de başladığı ve 224,56 °C'de sonlanan endotermik piklerin erime davranışına geçişini göstermektedir. Entalpi (ΔH_m) 56,61 J/g ile numuneler arasında üçüncü en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Bu değer kristalin fazın da önemli bir oranda korunduğu anlamına gelmektedir. Genel olarak bakıldığında SKNK sonrası numunede termal stabilitenin yüksek olduğu ve malzemenin kristalizasyon karakteristiğinin korunduğu görülmektedir.



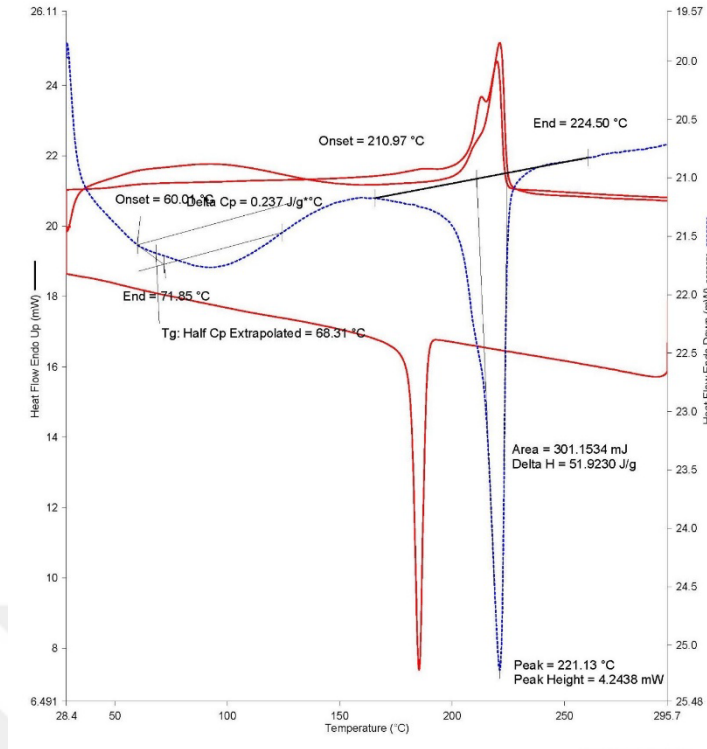
Şekil 4.14. PA6-08 DSC grafiği

PA6-08 numunesine ait DSC eğrisi incelendiğinde, ilk termal olay 42,42 °C’de başlayıp ve 57,59 °C’de sonlanmıştır. Camı geçiş sıcaklık (T_g) değeri 52,63 °C olarak ölçülmüştür. 0,166 J/g·°C’lik (C_p) ısı kapasitesi düşük bir değer olarak görülmektedir. Bu durum, malzemenin amorf faz miktarının sınırlı yani zincir hareketliliğinin kısıtlı olduğu anlamına gelmektedir. İkinci termal olay 210,62 °C’de başlamış ve 223,87 °C’de sona ermiştir. Ortaya çıkan endotermik pik, 220,77 °C olarak ölçülen erime sıcaklığıdır (T_m). Entalpi değişimi (ΔH_m) ise 50,29 J/g olarak ölçülmüş ve %21,87 kristalliğe sahip olduğu görülmüştür. Genel olarak bakıldığında SKNK sonrası hem amorf hem de kristalin bölgelerinde termal geçişlerin mevcut olduğu görülmektedir.



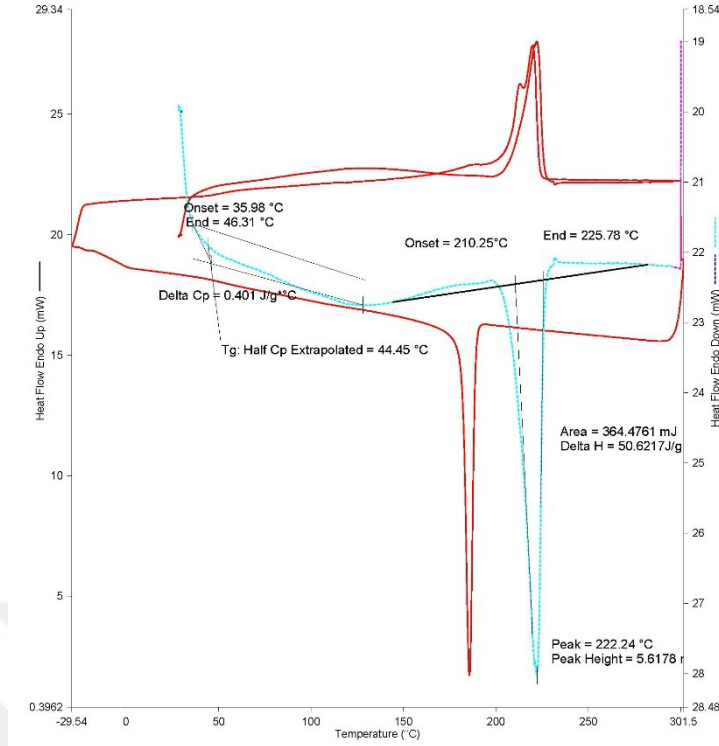
Şekil 4.15. PA6-10 DSC grafiği

PA6-10 numunesine ait DSC eğrisi incelendiğinde, ilk termal olay 32,68 °C’de başlayıp ve 43,16 °C’de sonlanmıştır. T_g değeri 38,30 °C olarak belirlenmiştir. Numuneler arasında en düşük ikinci camsı geçiş sıcaklığına sahip numunedir. 0,07 J/g·°C’lik (C_p) ısı kapasitesi oldukça düşük bir değer olarak görülmektedir. C_p değeri, amorf fazın camsı geçiş sıcaklığı (T_g) civarında ne kadar serbest hacim kazandığını gösterir. C_p değerinin düşük olması, zincir hareketliliğinin düşük olmasına ve amorf fazın sınırlı olması anlamına gelir. İkinci termal olay 211,70 °C’de başlayıp ve 224,25 °C’ye son bulmuştur. Erime, 221,09 °C’de gerçekleşmiştir. Erime entalpisi (ΔH_m) 51,49 J/g bulunmuştur. Erime entalpisinin büyük olması kristalitenin korunduğu anlamına gelmektedir. Genel olarak bakıldığında SKNK işleminin termal kararlılık ve kristalin yapısı üzerinde etkisi olduğu görülmektedir.



Şekil 4.16. PA6-11 DSC grafiği

PA6-11 numunesine ait DSC eğrisi incelendiğinde, numuneler arasında en yüksek camsı geçiş sıcaklığı (T_g 68,31°C) değeri bu numunede görülmüştür. Bu değer, polimer zincirlerinin segmental hareketliliğinin başladığını ve malzemenin camsı halden kauçuksu hale geçtiğini göstermektedir. 0,02 J/g·°C'lik (C_p) ısı kapasitesi oldukça düşük bir değer olarak görülmektedir. Numuneler arasında en düşük C_p 'e sahip olan numunedir. İkinci termal olay 210,97 °C'de başlayıp ve 224,25 °C'ye son bulmuştur. Erime, 221,13 °C'de gerçekleşmiştir. Erime entalpisi (ΔH_m) 51,92 J/g bulunmuştur. Malzemenin kristalin yapısının büyük ölçüde korunduğunu göstermektedir.

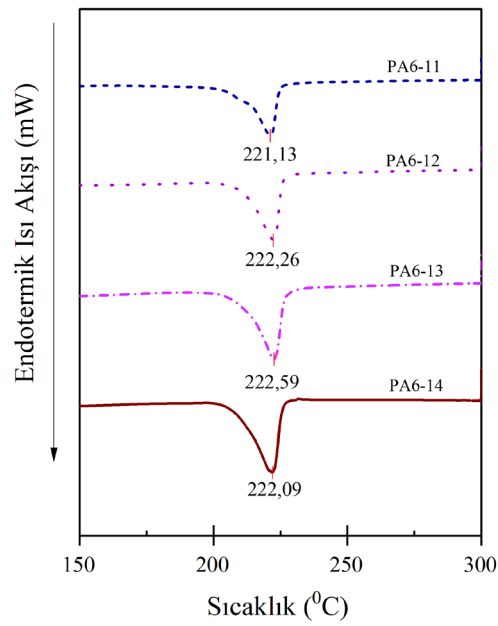
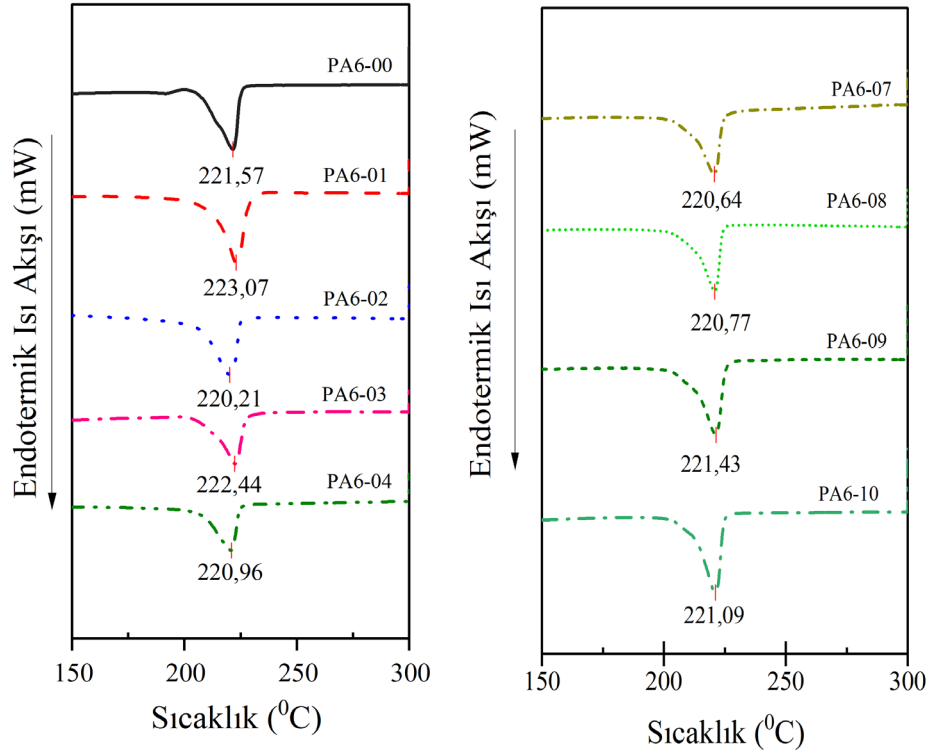


Şekil 4.17. PA6-14 DSC grafiği

PA6-14 numunesine ait DSC eğrisi incelendiğinde, 44,45 °C’de cam geçiş sıcaklığı (T_g), bu sıcaklıkta ısı kapasitesinde $C_p \approx 0,401 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ görülmektedir. Polimer zincirlerinin segmental hareketliliğinin başladığı anlaşılr. İkinci termal olayda, 210,25-225,78 °C aralığında polimerin erime davranışı gerçekleşmiştir. T_m değeri ve 222,24 °C’de olarak erime piki oluşmuştur. Erime entalpisi (ΔH_m) 50,62 J/g’ dır. Erime pikinin dar ve simetrik olması homojen kristal bölgelerin varlığını ifade eder. Genel olarak bakıldığında, SKNK sonrası hem camsı geçiş hem de kristalin erime davranışlarının korunduğu, malzemenin termal stabilitesinin ve kristal yapısının kayda değer oranda sürdürüldüğünü görülmektedir.

DSC grafikleri değerlendirildiğinde, saf PA6 ve SKNK uygulanmış PA6 numunelerinin termal davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İlk olarak saf PA6’da elde edilen DSC eğrisi, T_g ’nin yaklaşık 50-56 °C arasında gerçekleştiğini, T_m ’nin ise 220-223 °C aralığında sabit kaldığını göstermiştir. SKNK uygulanmış numunelerde T_g değerlerinde küçük artışlar gözlenmiş, bu da kaynak sırasında polimer zincir hareketliliğinin kısmen kısıtlanmasına bağlanmıştır. T_m değerlerinin sabit kalması, polimerin kristal faz yapısının bozulmadığını, yalnızca kristal düzen derecesinin etkilendiğini ortaya koymaktadır. Erime entalpisi (ΔH_m) ve buna bağlı kristallik oranı (X_c) numuneler arasında belirleyici farkları ortaya çıkarmıştır; özellikle orta devir ve orta bekleme sürelerinde işlenen numunelerde ΔH_m ve X_c değerleri daha

yüksek çıkmış, bu da kaynak işleminin optimum koşullarında kristal yapının daha yoğun ve düzenli geliştiğini göstermiştir. Lamel kalınlığı hesaplamaları da bu bulguları desteklemiş ve kristal düzenin en kararlı şekilde bu parametrelerde sağlandığını ortaya koymuştur.



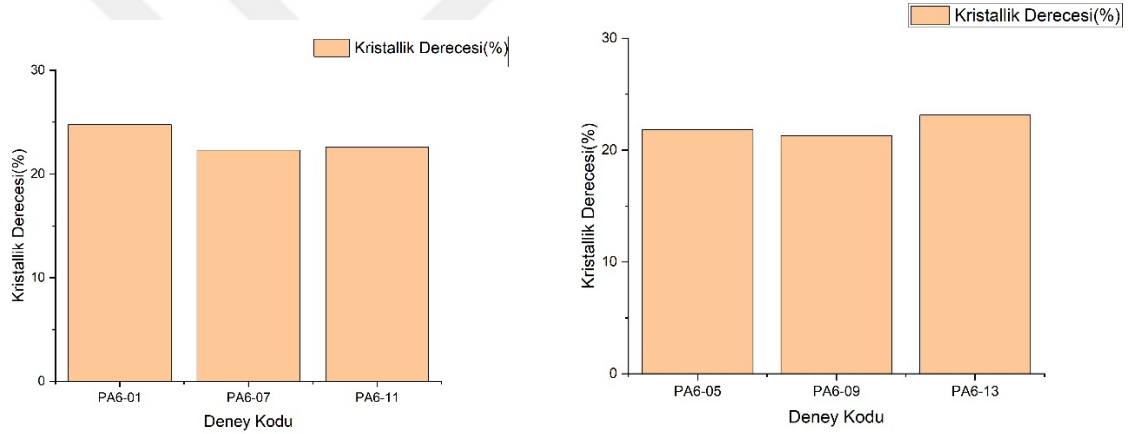
a) 762 – TM b) 1146-TM c) 1560-TM

Şekil 4.18. DSC eğrileri

4.1 denklem kullanılarak tüm numunelerin kristallik yüzdeleri hesaplanmıştır. PA6 malzeme için $\Delta H_m^0 = 230 \text{ J/g}$ kullanılmıştır.

Tablo 4.3. DSC testinden elde edilen sayısal veriler sonucunda hesaplanan kristallik yüzdeleri

Deney Kodu	ΔH_m (J/g)	ΔH_m^0 (J/g)	X_C (%)	λ (nm)
PA6-00 (Reference)	45.05	230	19.59	16.08
PA6-01	56.93	230	24.75	19.55
PA6-02	58.25	230	25.33	13.86
PA6-05	50.23	230	21.84	17.93
PA6-06	56.60	230	24.61	14.99
PA6-07	51.30	230	22.30	
PA6-08	50.29	230	21.87	
PA6-09	48.91	230	21.27	
PA6-10	51.49	230	22.38	
PA6-11	51.92	230	22.57	15.28
PA6-12	63.63	230	27.66	17.51
PA6-13	55.52	230	24.14	18.29
PA6-14	39.12	230	17.01	17.46



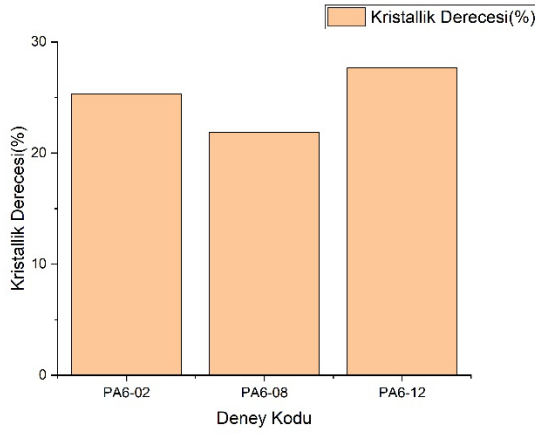
a) M10 – 15 s

b) M10 – 60 s

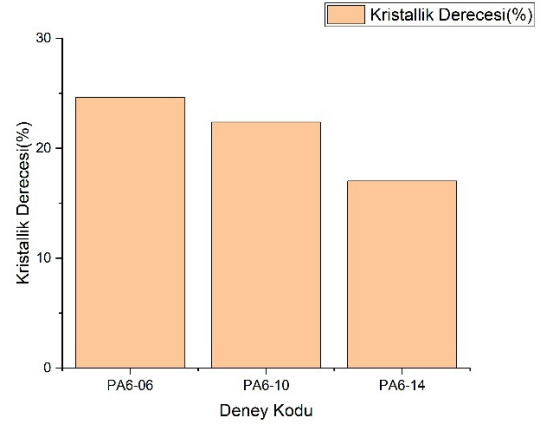
Şekil 4.19. Kristallik yüzdeleri

Şekil 4.19a’da Farklı devirlerde olan numunelerin M10 pim çapı ve 15 s bekleme sürelerine göre kristallik derecelerine bakıldığında en düşük devire sahip PA6-01 (762 dev/dk-M10-15 s) numunede kristallik değerinin en yüksek olduğu görülmüştür. Kısa işlem süresine rağmen yüksek derecede kristalinite (%24,75) göstermesi, pim çapının ve uygun dönme hızının tek başına kristalin yapı oluşumunu önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir.

Şekil 4.18b’de M10 pim çapı ve 60 saniye bekleme süresi koşullarında, farklı devirlerde kaynaklanan numuneler karşılaştırıldığında en yüksek kristallik değerinin, 1560 dev/dk hızında üretilen PA6-13 (1560 dev/dk-M10-60 s) numunesine ait olduğu belirlenmiştir.



M12 – 15 s



b) M12 – 60 s

Şekil 4.20. Kristallik yüzdeleri

Şekil 4.20’de, M12 pim çapı ve 15 saniye bekleme süresi koşullarında en yüksek kristallik değerinin, en yüksek devir hızına sahip PA6-12 (1560 dev/dk-M12-15 s) numunesinde elde edildiği görülmektedir. Buna karşılık, M12 pim çapı ve 60 saniye bekleme süresinde en yüksek kristallik değerinin, en düşük devir hızına sahip PA6-06 (762 dev/dk-M12-60 s) numunesinde elde edildiği belirlenmiştir.

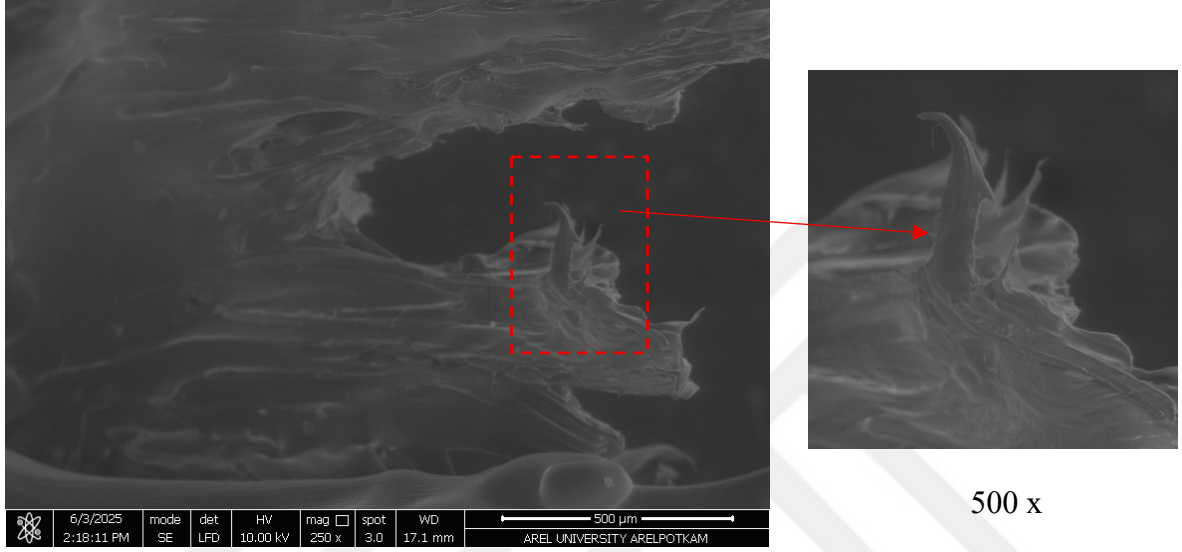
Karıştırma süresinin artırılması bazı numunelerde kristaliniteyi artırırken, diğerlerinde bu etki sınırlıdır. İlginç bir şekilde, PA6-02 (762 dev/dk-M12-15 s), kısa işlem süresine rağmen yüksek derecede kristalinite (%25,33) göstermiştir. Bu durum, pim çapının ve uygun dönme hızının tek başına kristalin yapı oluşumunu önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermiştir. Tersine, dönme hızı tek başına kristalinite için belirleyici bir faktör gibi görünmese de, camsı geçiş sıcaklığını (T_g) etkilediği görülmektedir. Örneğin, 1560 dev/dk’da işlenen PA6-11 (M10, 15 s), en yüksek T_g değerini (68,31 °C) sergilemiş; daha yüksek dönme hızlarının moleküler hareketliliği kısıtladığını ve dolayısıyla T_g ’yi artırdığı gözlenmiştir [32].

Genel olarak, SKNK parametrelerinin PA6’nın kristalleşme davranışını ve termal özelliklerini önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Özellikle, karıştırma süresi, pim çapı ve dönme hızı, ortaya çıkan yapı üzerinde hem bireysel hem de birleşik etkilere sahiptir. Bu parametrelerin optimize edilmesi, polimerik malzemelerde istenen termal ve yapısal özelliklerin uyarlanması sağlayabilir.

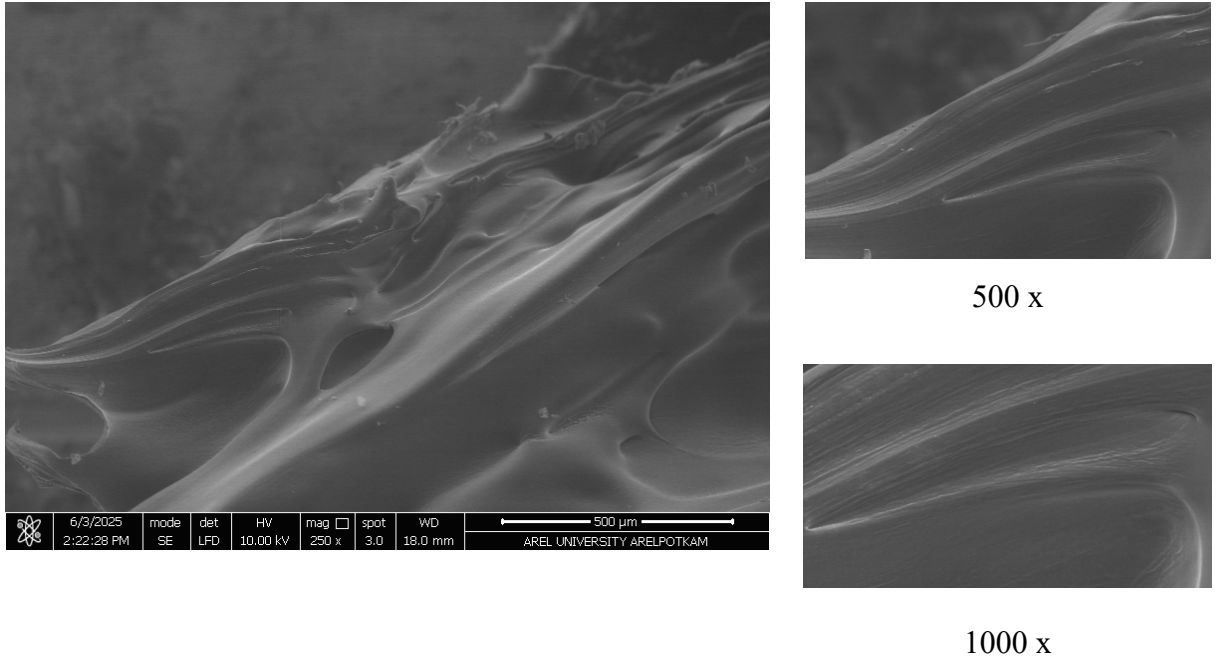
4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İnceleme Sonuçları

Levhaların birleştirme bölgelerine ve referans numuneye ait mikroyapı incelemeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır.

Görüntüler fibril yapılar, mikro gözenekler, yönelmiş malzeme akışı izleri, plastik deformasyon izleri, katmanlı yapı (laminasyon izleri), kopma yüzeyi pürüzlülük farkları açısından değerlendirilmiştir.



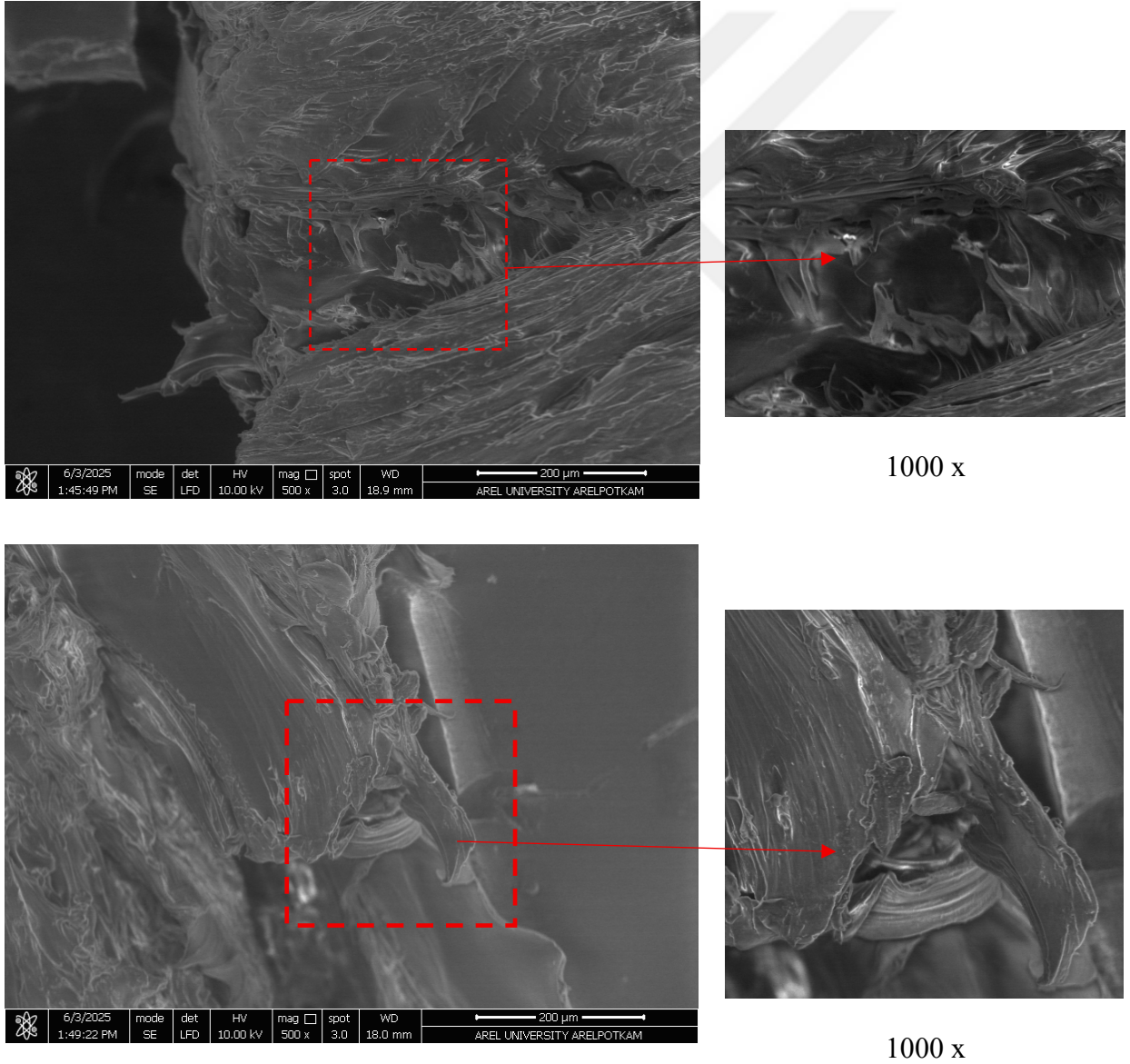
Şekil 4.21. PA6-01 Sem görüntüsü



Şekil 4.22. PA6-01 Sem görüntüsü

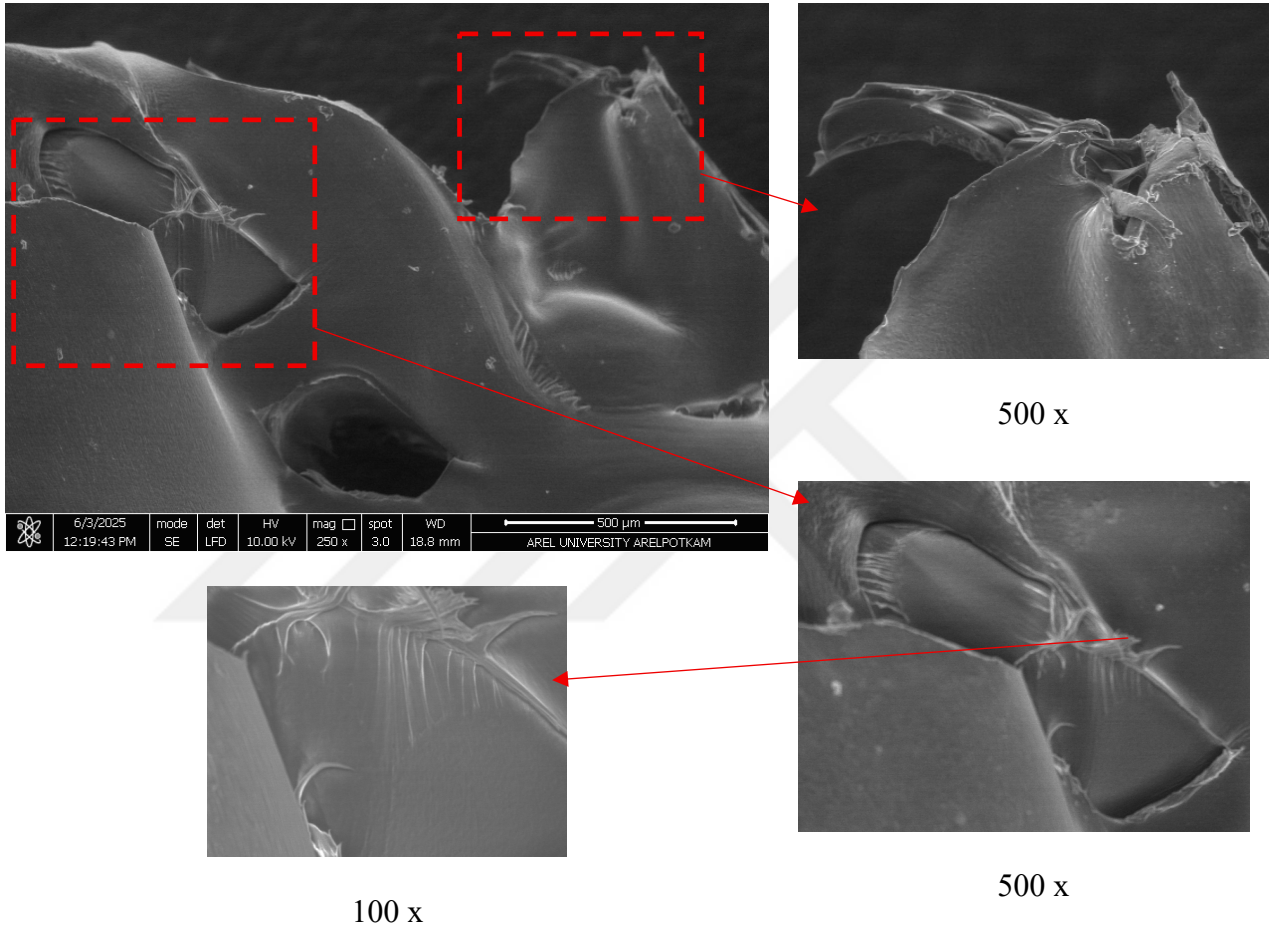
Şekil 4.21’de SKNK işlemi sonrası kaynak yüzeyinde morfolojik heterojenlik gözlenmiştir. Yoğun fibril oluşumu, sivri çıkıntılar polimer zincirlerin termomekanik etkilere maruz kaldığını göstermektedir. Polimer fraktografisinde uzamış fibriller sünek, düzgün/özelliksiz görünümler gevrek davranış sergilemektedir [2]. Fibril ve sivri çıkıntıların varlığı, genellikle sünek davranışın baskın olduğu karma kopma mekanizmasını göstermekte; ancak yer yer gevrek yapıların da ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Birleşim bölgesinde, ısı ve mekanik olarak heterojenliğin varlığından söz edilebilir.

Şekil 4.22’te aynı numunenin farklı açıdan sem görüntüleri incelendiğinde akış izleri belirgin şekilde görülmektedir. Takım omuz ve pimin dönerken malzemeyi belirli bir yönde kaydırması ve polimer zincirlerinin hizalandığı görülmektedir.



Şekil 4.23. PA6-02 Sem görüntüsü

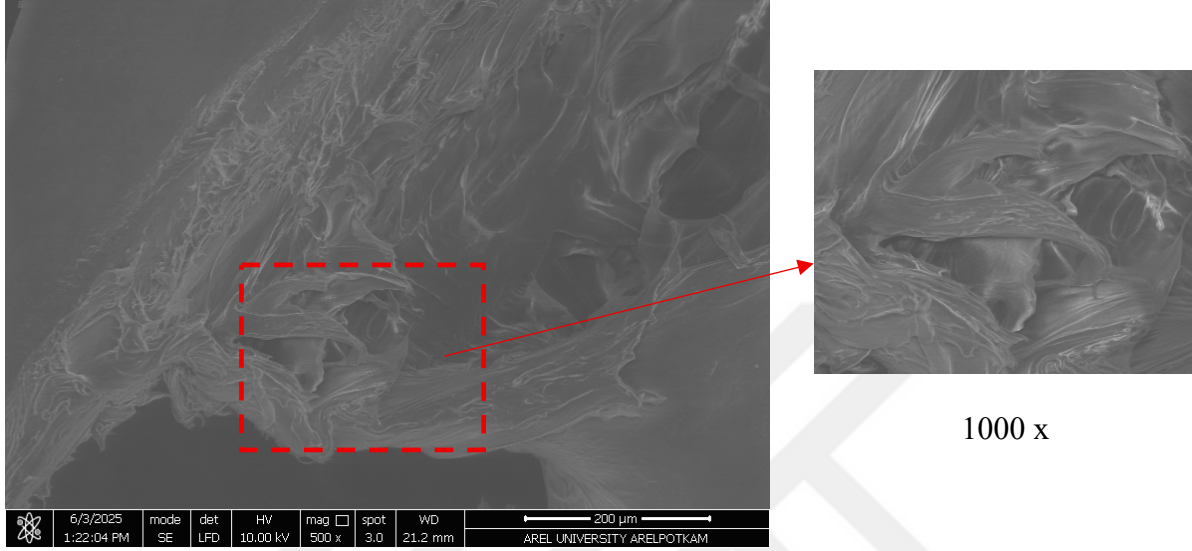
Şekil 4.23'te yönelmiş polimer yapıları, tabaka (lameller) ve soyulma (delaminasyon) benzeri ayrılımlar mevcuttur. Akış yönü, lamel oluşumu; takımın dönme hareketi ve basıncıyla malzemenin belirli yönde uzadığını göstermektedir. Kristal-amorf bölgeler arasında ayrışma soyulma olduğu düşünürebilir. Düz ve parlak alanların olması, ara ara nehir desenlerinin gözlenmesi karakterdeki gevrek kopmayı desteklemektedir. Akış çizgilerinin zayıf, fibrillerin kısa ve seyrek olduğu görülmektedir.



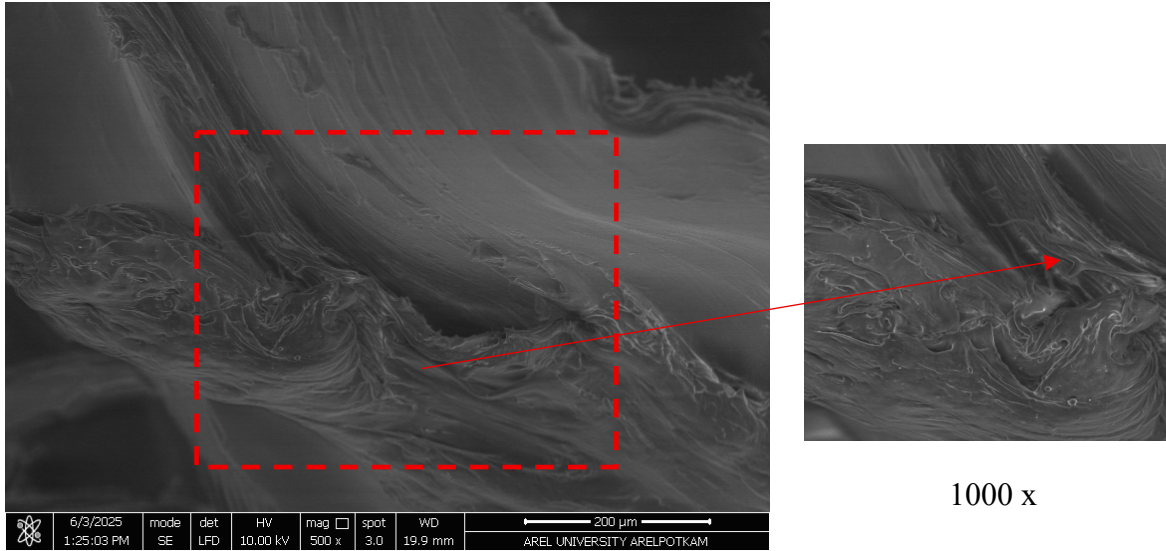
Şekil 4.24. PA6-03 Sem görüntüsü

Şekil 4.24'te fibril benzeri lifsi yapılar, keskin ve pürüzlü kenarlar ile köprü yapılar gözlenmektedir. Fibril oluşumlarının, polimer zincirlerinin uzayarak kopması sonucunda meydana geldiği ve bu durumun malzemenin plastik deformasyona uğradığını gösterdiği düşünülmektedir. Bu tür yapılar, malzemenin sünek karakter kazandığının göstergesidir. Buna karşılık, keskin ve pürüzlü yüzeylerin varlığı, ilgili bölgelerde gevrek karakterin hâkim olduğunu işaret etmektedir. Köprü yapılar ile yırtılma izleri, polimer zincirlerinin kopmadan önce inceldiğine kanıt oluşturmakta ve sünek mekanizmaya işaret etmektedir. Dolayısıyla hem sünek hem de gevrek kırılma özellikleri sergileyen bu numunede hibrit kopma modu meydana

gelmiş olup, bu durum yarı kristalin polimerlerde sıkça gözlenen bir kopma davranışıdır. Ayrıca akış çizgileri, orta ve kısa boy fibrillerin varlığı, malzeme içerisinde homojen bir karışımın mevcut olduğunu göstermektedir. Ancak, yer yer gözlenen düz ve parlak yüzeyler, kırılma modunun tamamen sünek olmadığını ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra, ince kayma dudakları (shear lips) ile az sayıda mikro-void yapıları da tespit edilmiştir.



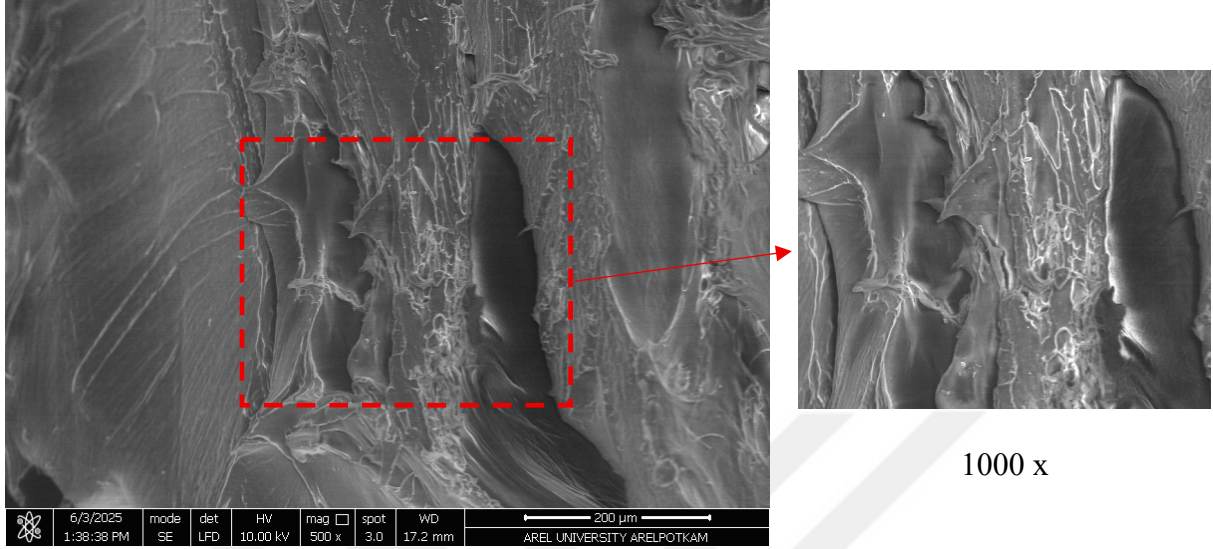
Şekil 4.25. PA6-04 Sem görüntüsü - 1



Şekil 4.26. PA6-04 Sem görüntüsü - 2

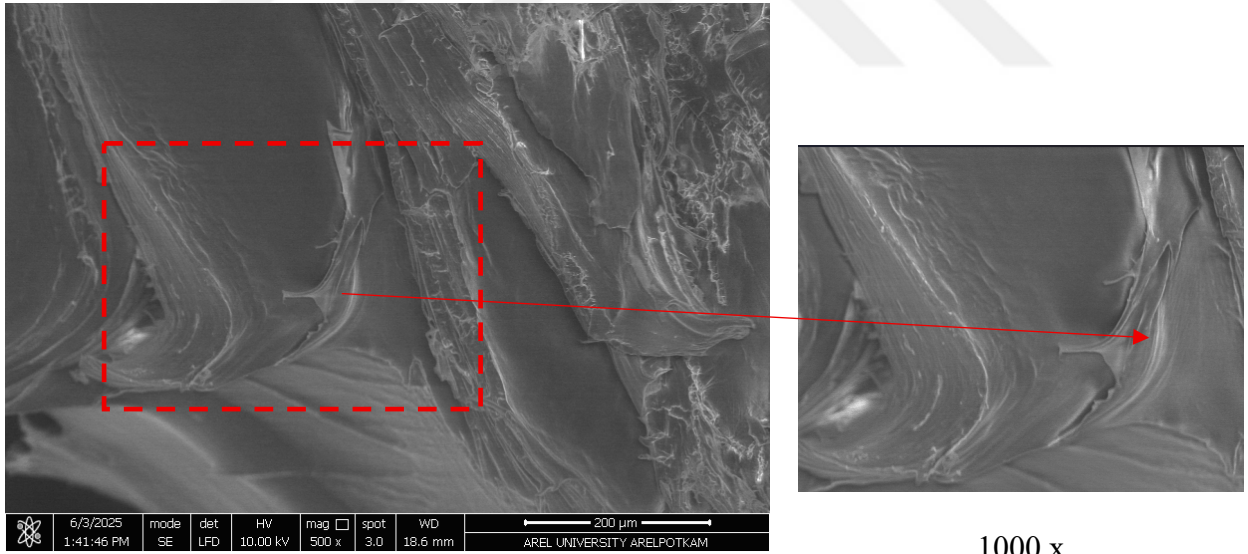
Şekil 4.25 ve 4.26'daki SEM görüntüleri incelendiğinde, akış çizgilerinin belirgin olduğu görülmektedir. Fibril oluşumlar mevcuttur ve ince kayma dudaklar (shear lips) gözlenmiştir.

Parlak düz yapıların varlığı da gevrek oluşumun varlığını desteklemektedir. Numunenin, rijit, kısmen sünek, ve kısmen gevrek davranışı nedeniyle yarı dengeli ve gevrek eğilimli bir yapıya sahip olduğu söylenebilir.



1000 x

Şekil 4.27. PA6-06 Sem görüntüsü - 1



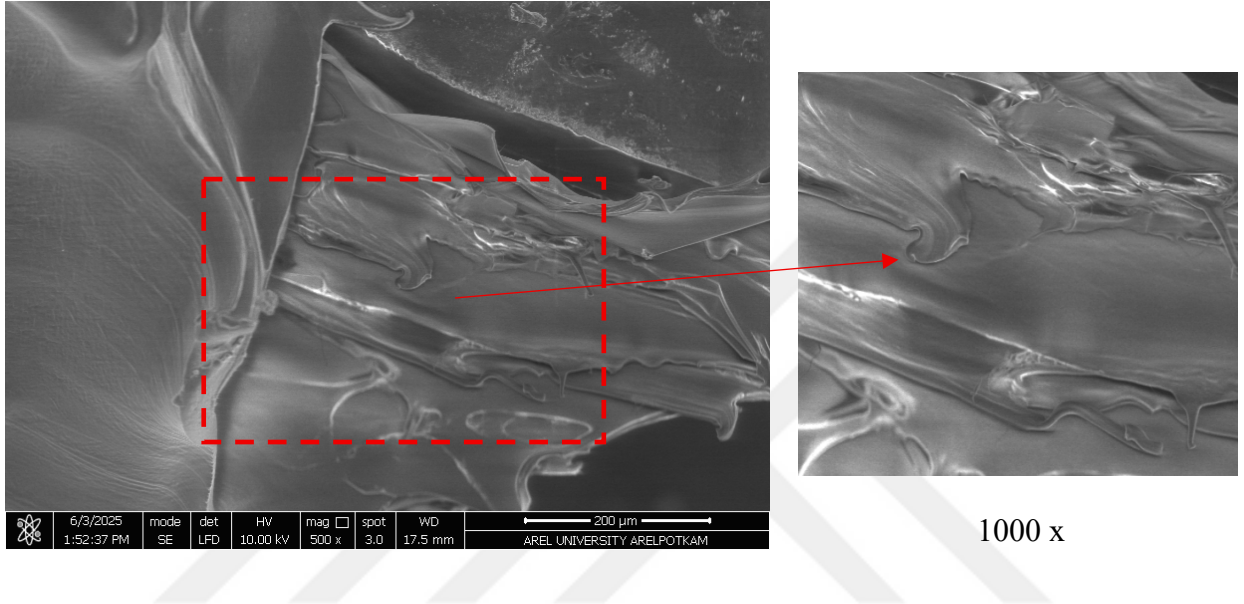
1000 x

Şekil 4.28. PA6-06 Sem görüntüsü - 2

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’da PA6-06 numunesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, malzeme akışı ve plastik izler belirgin bir şekilde görülmektedir. Omuz etkisi ile iyi bir karışım sağlandığı düşünülebilir. Boşluk oranı düşük olduğu gözlenmiştir. Görüntülerde fibril ve çekme yönünde uzayan lif benzeri yapılar mevcuttur. Bu durumdan, numunenin yük altında plastik

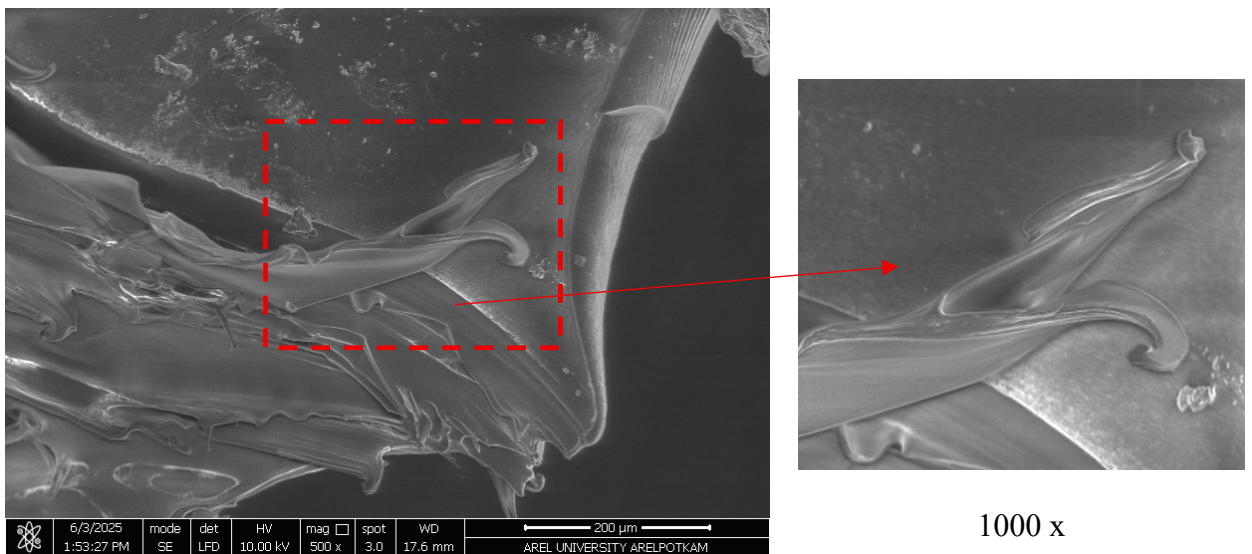
deformasyona uğradığı yani sünek davranış gösterebileceği anlamı çıkarılabilir. Bazı bölgelerde keskin hatlı, düz kopma yüzeyleri ve mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Bu bölgelerde malzemenin kısmi kristalin yapısından kaynaklanan gevrek davranış gösterebileceği düşünülebilir.

Genel olarak bakıldığında süneklik baskın ama yer yer gevrek davranış sergilediği düşünülebilir. Bağlantı tamamen sünek değildir.



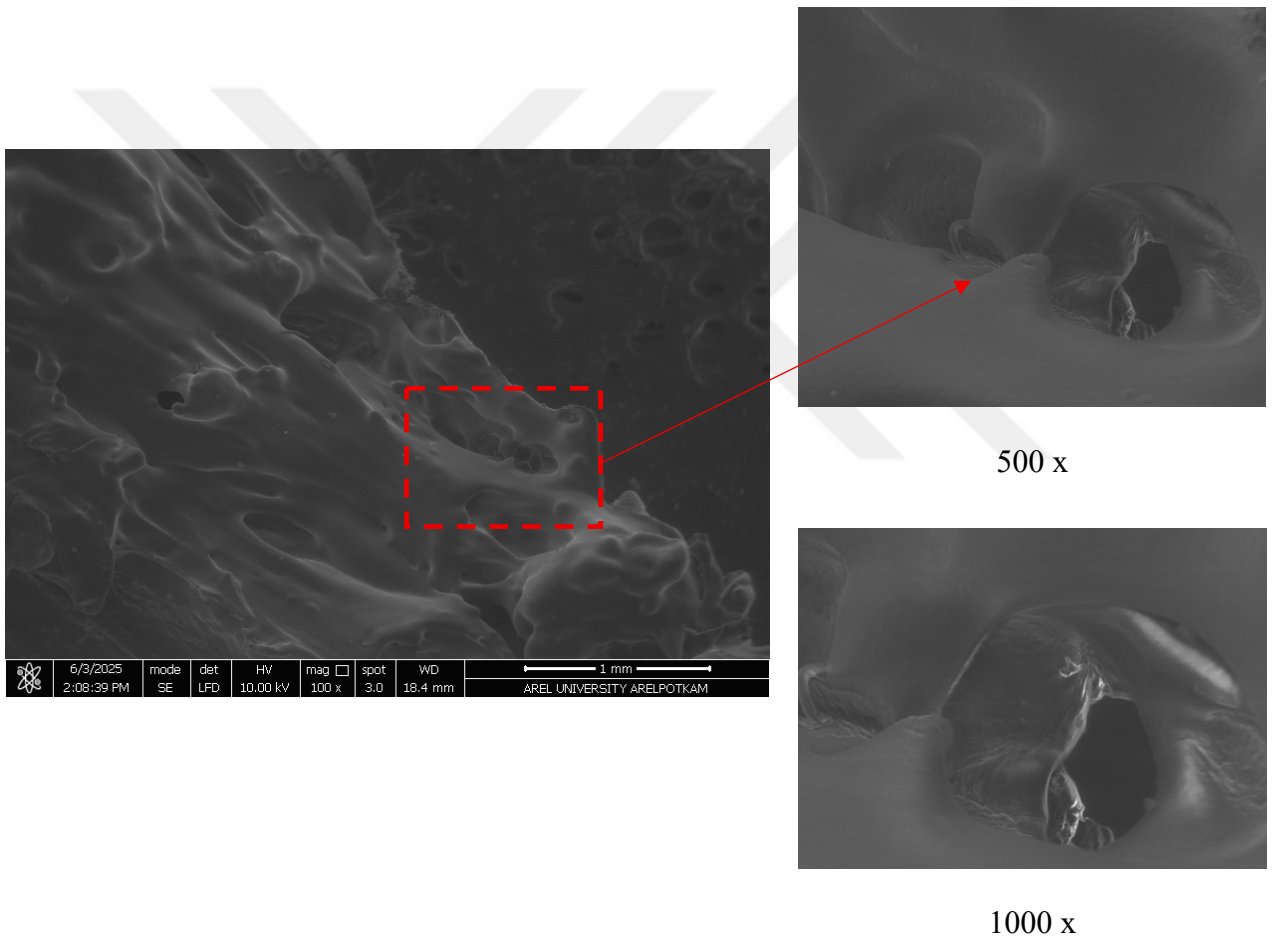
Şekil 4.29. PA6-10 Sem görüntüsü - 1

Yüzeyde katmanlı ve dalgalı bir morfoloji, yönlenmiş tabakalar, plastik akış izleri ve katmanlı bir yapı görüntüsü mevcut.



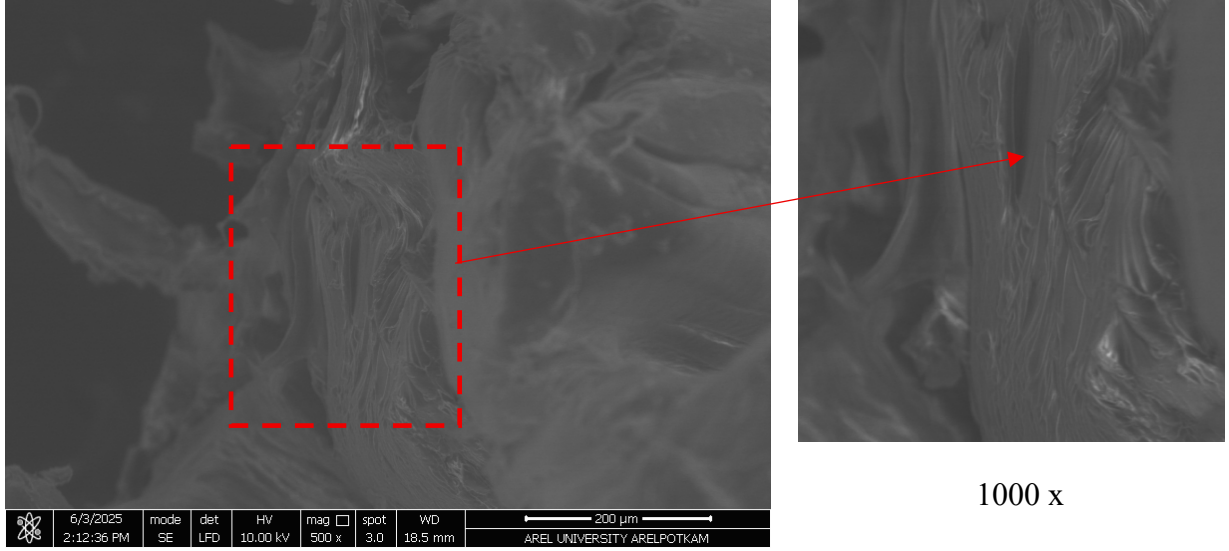
Şekil 4.30. PA6-10 Sem görüntüsü - 2

PA6-10 numunesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, omuz ve pim etkisi ile oluşan akış çizgileri belirgin bir şekilde görülmektedir. Katmanlı bir karışım dokusunu, ara yüzeyde sürekliliğin yüksek olduğu, boşluk ve ayrışmanın sınırlı olduğunu düşündürmektedir. Bu da numunenin yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğuna işaret eder. Fibril köprüler yoğun, uzamış mikro fibriller ve yırtılma izleri, yük altında plastik deformasyon ve enerji depolandığını gösterir ki, bu durumda sünekliğin yüksek olduğu düşünülebilir. Küçük alanlarda daha pürüzsüz, düz kesitli yüzeyler görülmekte, süreksiz ve sınırlı yayılım nedeniyle numunenin yer yer gevrek davranış sergileyebileceği düşünülebilir. Genel yüzey topografına bakıldığında sünek kopma karakterindedir.



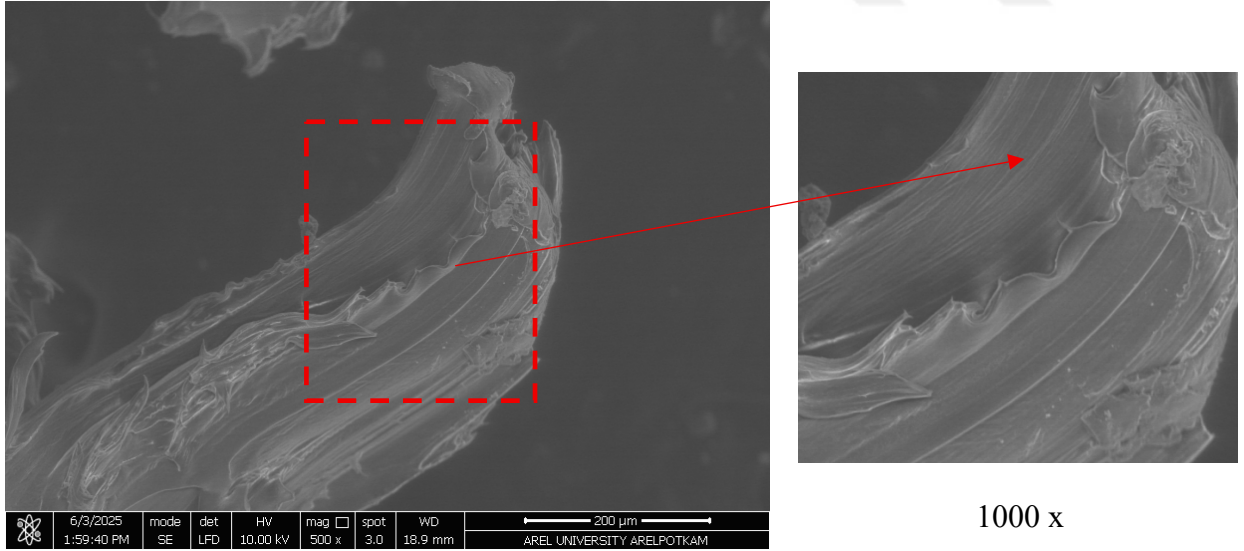
Şekil 4.31. PA6-13 Sem görüntüsü - 1

Çukur (void) gözenek yapı, yetersiz malzeme akısı nedenlerinden kaynaklanmaktadır. Bu boşluklar malzemede lokal gerilme yığılmasına neden olabilmektedir.



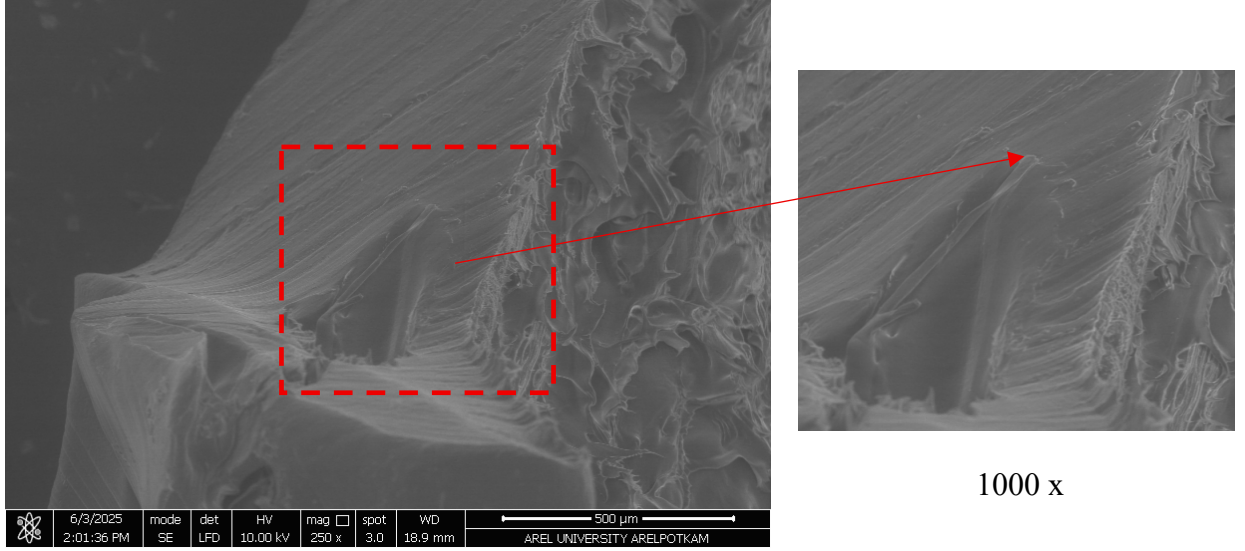
Şekil 4.32. PA6-13 Sem görüntüsü - 2

Şekil 4.32’te SEM görüntüleri incelendiğinde, kesintili akış izleri mevcuttur bu durum yetersiz karışımı işaret eder. Düz parlak alanlar, nehir desenleri ve kısa, seyrek fibriller gevrek modun baskın olduğunu, sünek modun ikincil kaldığını göstermektedir. Dar shear-lipler gözlenmiştir. Bu numune dayanıklı ama gevrek olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4.33. PA6-14 Sem görüntüsü - 1

Basamaklı kopma hatları oluşmuştur. Gerilmenin malzeme içinde lokal olarak dağılıp kademeli kopma bölgesi oluşturduğu görülmüştür.



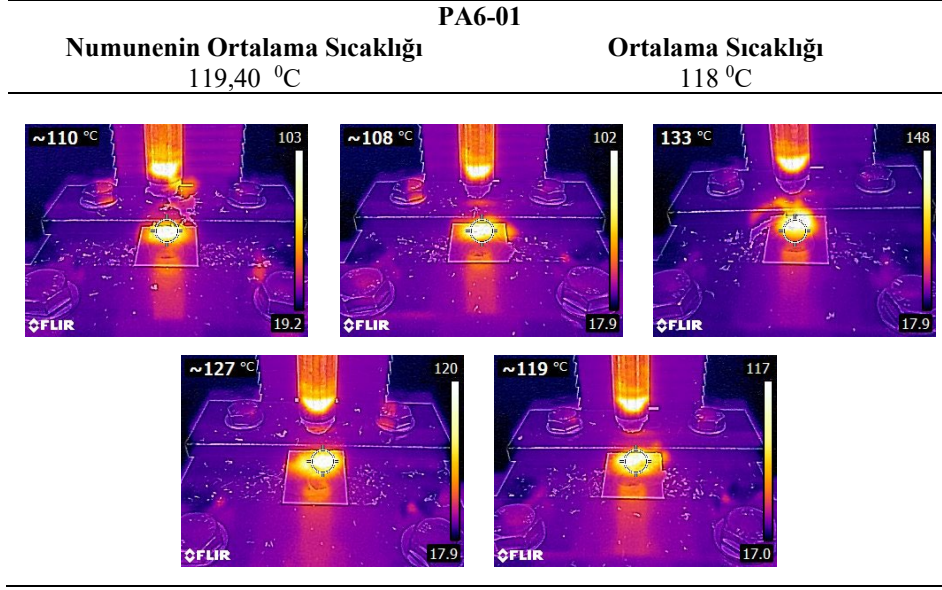
Şekil 4.34. PA6-14 Sem görüntüsü - 2

Şekil 4.34’te belirgin akış izleri ve omuz etkisi ile oluşmuş bir yapı gözlenmektedir. Malzeme akışı sürekli ve boşluk olmadığı görülür. Fibril oluşumu, kaynak bölgesinde oluşan köprüler, yırtılma sırtları (dalgalı, kabarık, sırt şeklindeki çıkıntılar) oluştuğu görülmektedir. Bu yapılar süneklik ve enerji absorpsiyon kapasitesinin mikroyapısal kanıtı olarak yorumlanabilir. Yer yer düz, pürüzsüz alanlar gözlenmiştir. Bu alanlar gevrek izlere işaretler fakat sürekli olmadıkları için, genel yapı sünek karakter özelliği taşımaktadır. Liflenme, yönlendirilmiş fibrillerin sürekliliği homojen bir karışımın ve bağ bütünlüğünün olumlu olduğunu gösterir.

4.5. Termal Kamera İnceleme Sonuçları

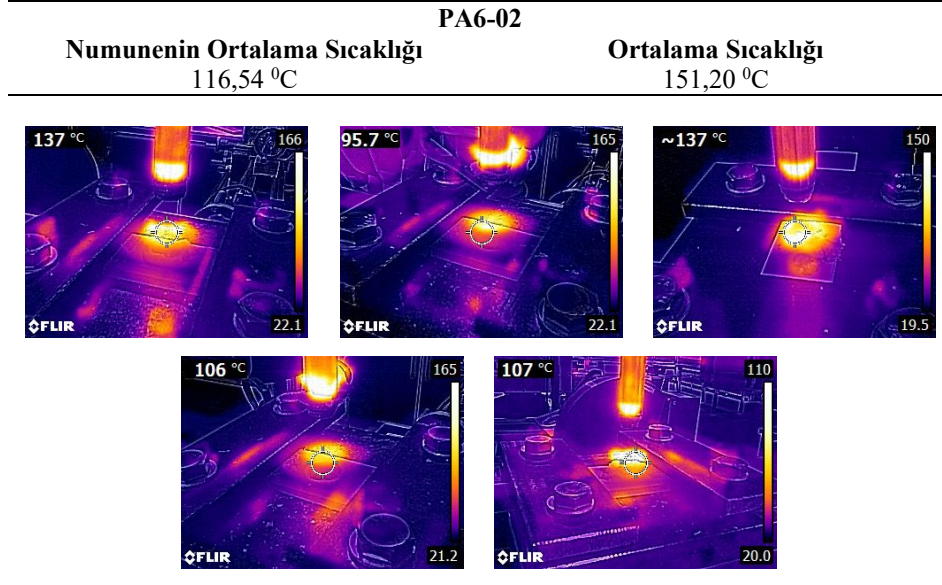
Kaynak işlemi bitikten sonra tezgah üzerinde ölçülen sıcaklık değerleri 5, bazı numuneler için 4 sıcaklık değerinin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Termal kameranın gösterdiği en düşük ve en yüksek değerlerin de ortalaması tabloya eklenmiştir.

Sıcaklık ölçümleri, yüzeyden alınan değerler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Kaynak bölgesinde oluşacak tepe sıcaklığı ölçümleri için farklı yöntemler kullanılmaktadır ve tepe sıcaklık değeri için daha doğru sonuçlar alınabilir. Ancak, yüzey üzerinden ölçülen bu veriler de farklı takım geometrileri ve parametreleri ile kaynaklanmış numunelerdeki ısınmayı anlamaya ve karşılaştırmaya yardımcı olacaktır.



Şekil 4.35. PA6-01 Termal Kamera Görüntüleri

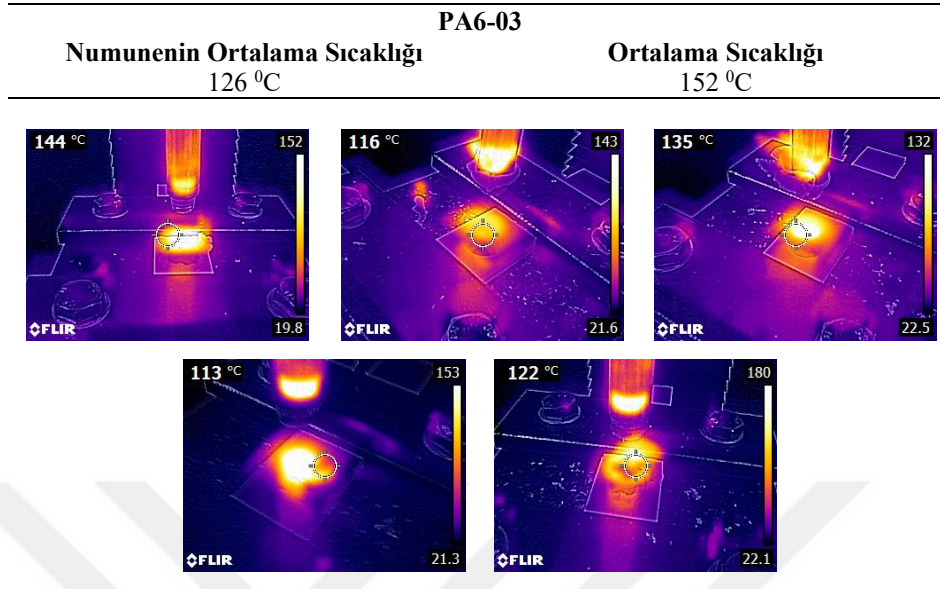
Şekil 4.35'te görüldüğü gibi 762 dev/dk dönme devri, M10 pim çapı ve 15 s bekleme süresi ile yapılan birleştirmede takımın uzaklaşması sonrasında, numuneler tezgahta iken termal kamera ile ölçümler yapılmış olup, ölçülen sıcaklıkların ortalamaları alınmıştır. Numunelerin ortalama sıcaklıkları 119,40 °C hesaplanmıştır. Bu sıcaklıklar yüzey ölçümleri sonucu elde edildiği için, camsı geçiş sıcaklığından (T_g 56,25 °C) oldukça yüksek, erime sıcaklığından (T_m 223,07 °C) düşük değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.36. PA6-02 Termal Kamera Görüntüleri

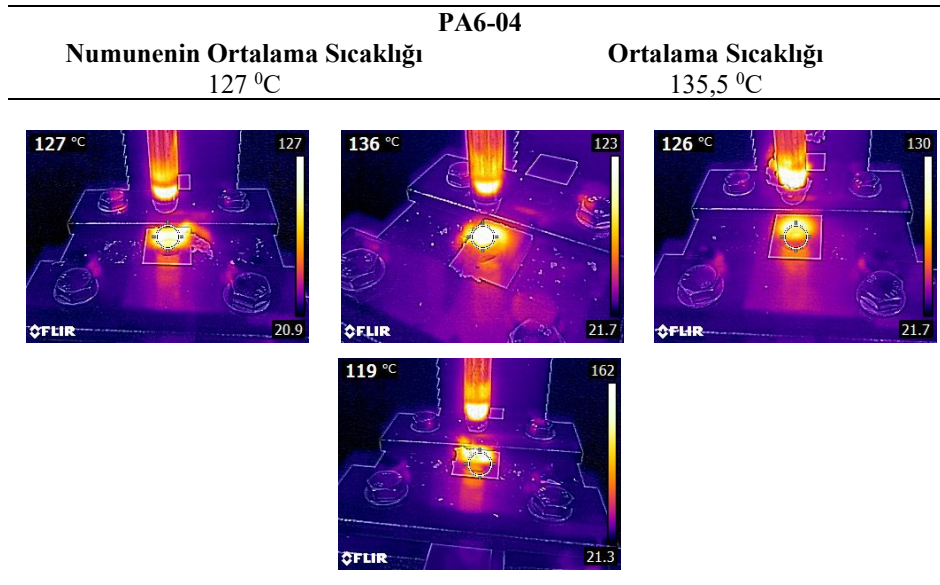
Şekil 4.36'de görüldüğü gibi 762 dev/dk dönme devri, M12 pim çapı ve 15 s bekleme süresi ile yapılan birleştirmede ölçülen numunenin ortalama sıcaklık değeri 116,54 °C hesaplanmıştır.

Bu sıcaklıklar yüzey ölçümleri sonucu elde edildiği için, camsı geçiş sıcaklığından (T_g 33,71 °C) oldukça yüksek, erime sıcaklığından (T_m 220,21 °C) düşük değerler elde edilmiştir.



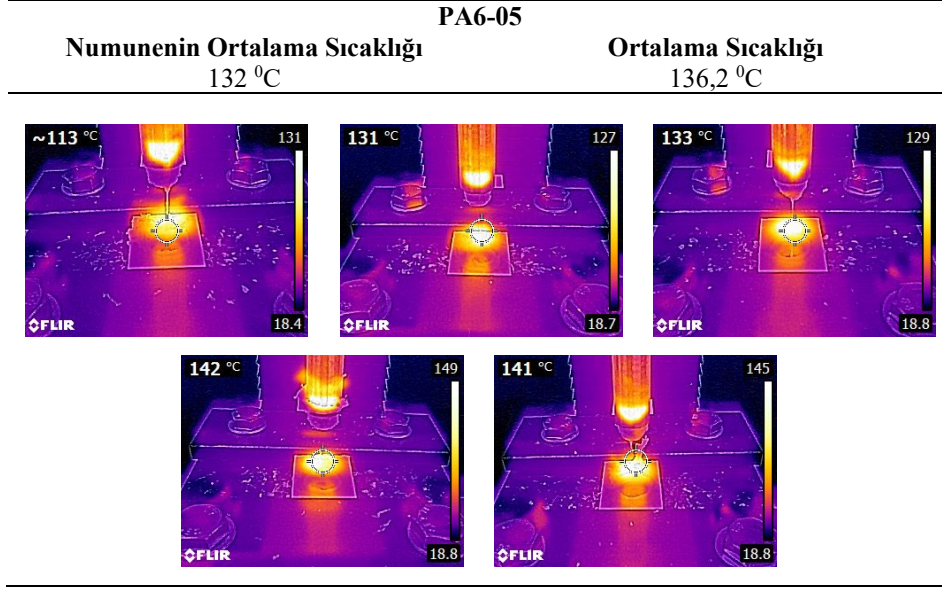
Şekil 4.37. PA6-03 Termal Kamera Görüntüleri

Şekil 4.37’de görüldüğü gibi 762 dev/dk dönme devri, M12 pim çapı ve 30 s bekleme süresi ile yapılan birleştirmede ölçülen numunenin sıcaklık değeri 126 °C hesaplanmıştır.



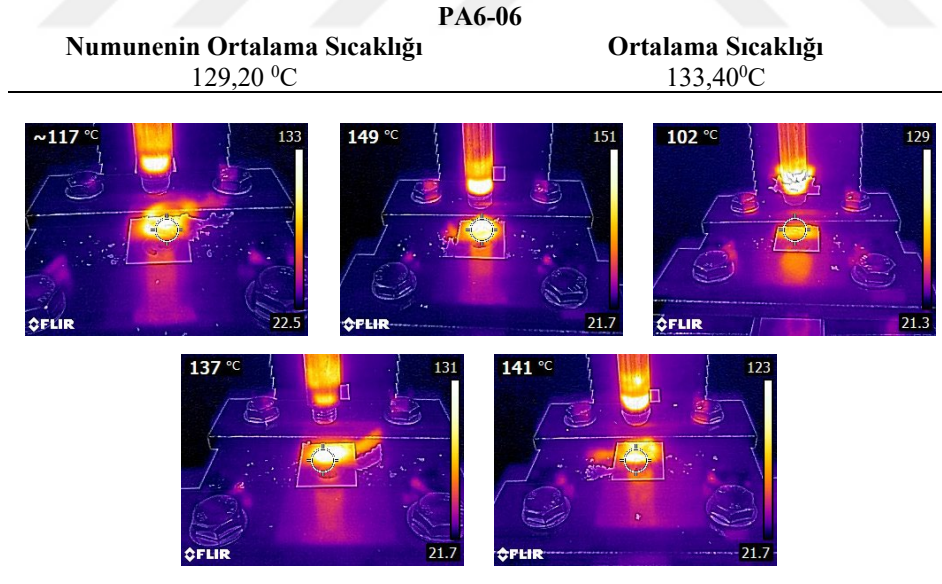
Şekil 4.38. PA6-04 Termal Kamera Görüntüleri

Şekil 4.38’de görüldüğü gibi 762 dev/dk dönme devri, M12 pim çapı ve 45 s bekleme süresi ile yapılan birleştirmede ölçülen numunenin sıcaklık değeri 127 °C hesaplanmıştır.



Şekil 4.39. PA6-05 Termal Kamera Görüntüleri

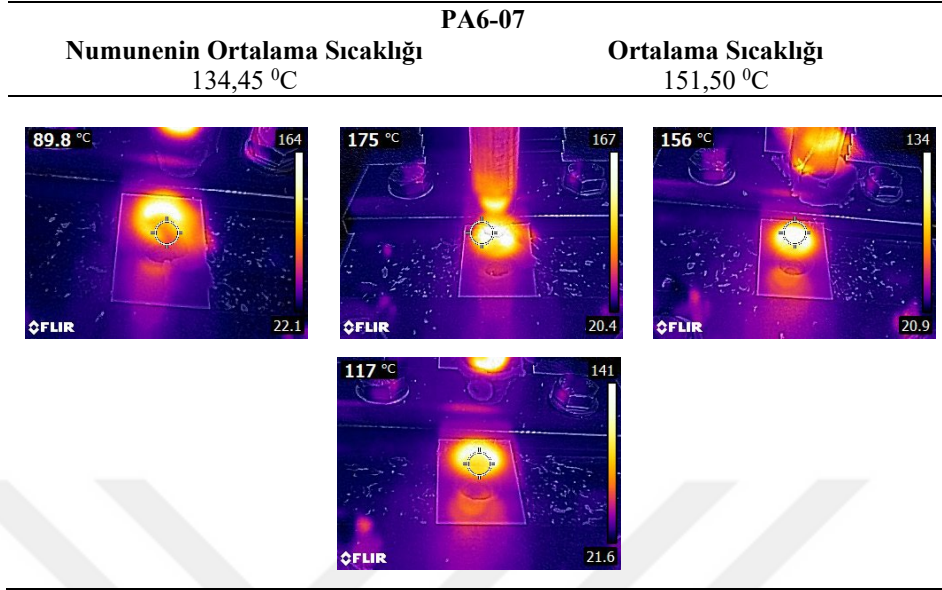
Şekil 4.39’de görüldüğü gibi 762 dev/dk dönme devri, M10 pim çapı ve 60 s bekleme süresi ile yapılan birleştirmede ölçülen numunenin ortalama sıcaklık değeri 132 °C hesaplanmıştır. Bu sıcaklıklar yüzey ölçümleri sonucu elde edildiği için, camsı geçiş sıcaklığından (T_g 51,28 °C) oldukça yüksek, erime sıcaklığından (T_m 222,44 °C) düşük değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.40. PA6-06 Termal Kamera Görüntüleri

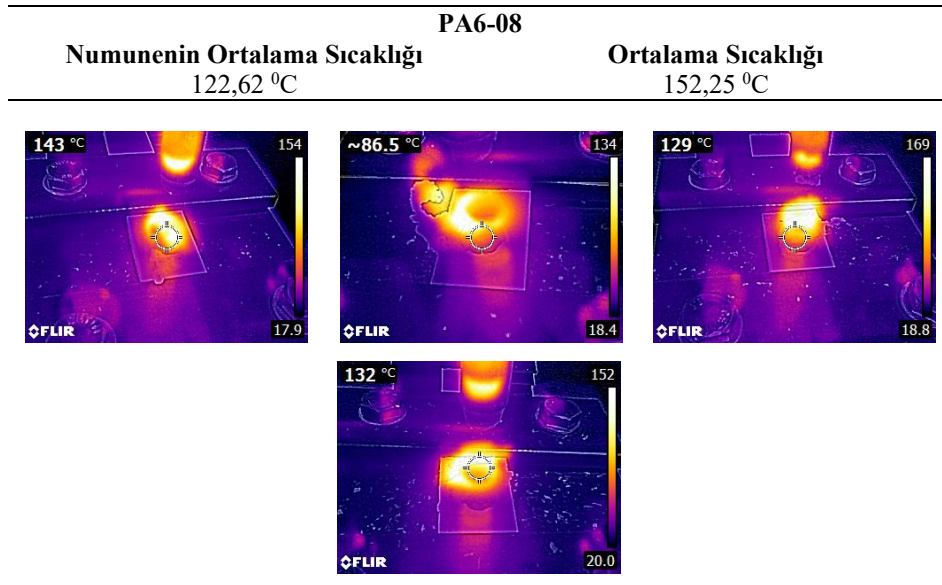
Şekil 4.40’ta görüldüğü gibi 762 dev/dk dönme devri, M12 pim çapı ve 60 s bekleme süresi ile yapılan birleştirmede ölçülen numunenin ortalama sıcaklık değeri 129,20 °C hesaplanmıştır. Bu

sıcaklıklar yüzey ölçümleri sonucu elde edildiği için, camsı geçiş sıcaklığından (T_g 50,25 °C) oldukça yüksek, erime sıcaklığından (T_m 220,96 °C) düşük değerler elde edilmiştir.



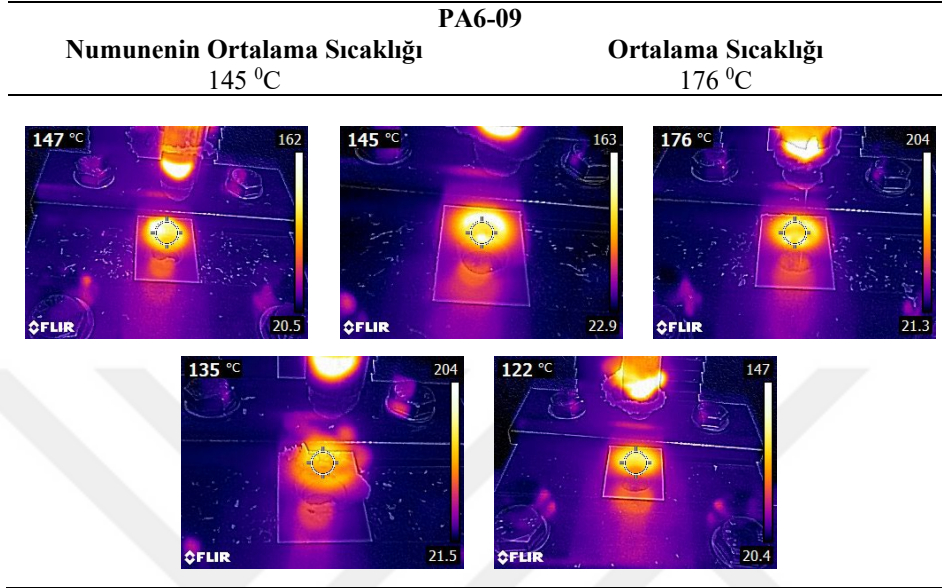
Şekil 4.41. PA6-07 Termal Kamera Görüntüleri

Şekil 4.41’da görüldüğü gibi 1146 dev/dk dönme devri, M10 pim çapı ve 15 s bekleme süresi ile yapılan birleştirmede ölçülen numunenin ortalama sıcaklık değeri 134,45 °C hesaplanmıştır. Bu sıcaklıklar yüzey ölçümleri sonucu elde edildiği için, camsı geçiş sıcaklığından (T_g 48,90 °C) oldukça yüksek, erime sıcaklığından (T_m 220,64 °C) düşük değerler elde edilmiştir.



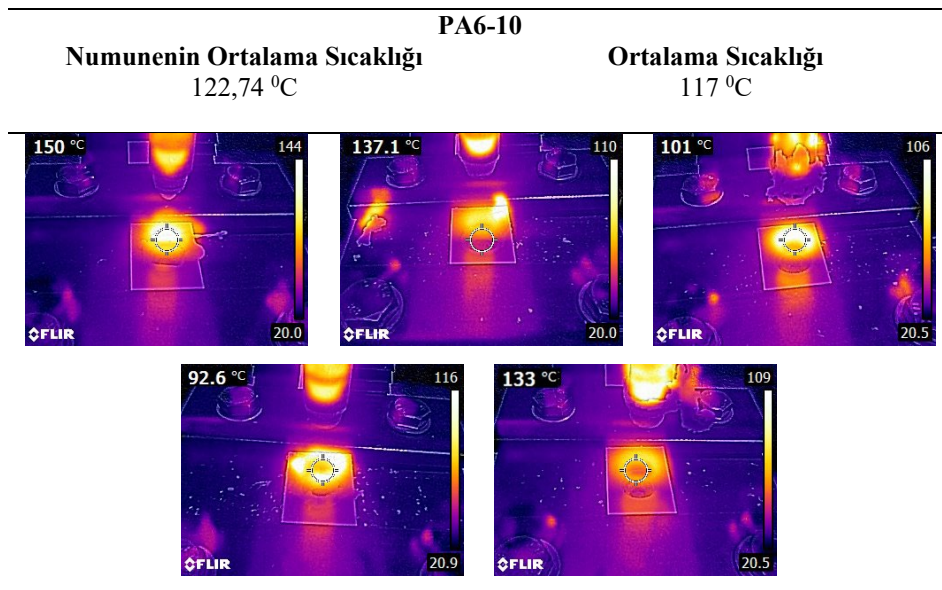
Şekil 4.42. PA6-08 Termal Kamera Görüntüleri

Şekil 4.42’de görüldüğü gibi 1146 dev/dk dönme devri, M12 pim çapı ve 15 s bekleme süresi ile yapılan birleştirmede ölçülen numunenin ortalama sıcaklık değeri 122,62 °C hesaplanmıştır. Bu sıcaklıklar yüzey ölçümleri sonucu elde edildiği için, camsı geçiş sıcaklığından (T_g 52,63 °C) oldukça yüksek, erime sıcaklığından (T_m 220,77 °C) düşük değerler elde edilmiştir.



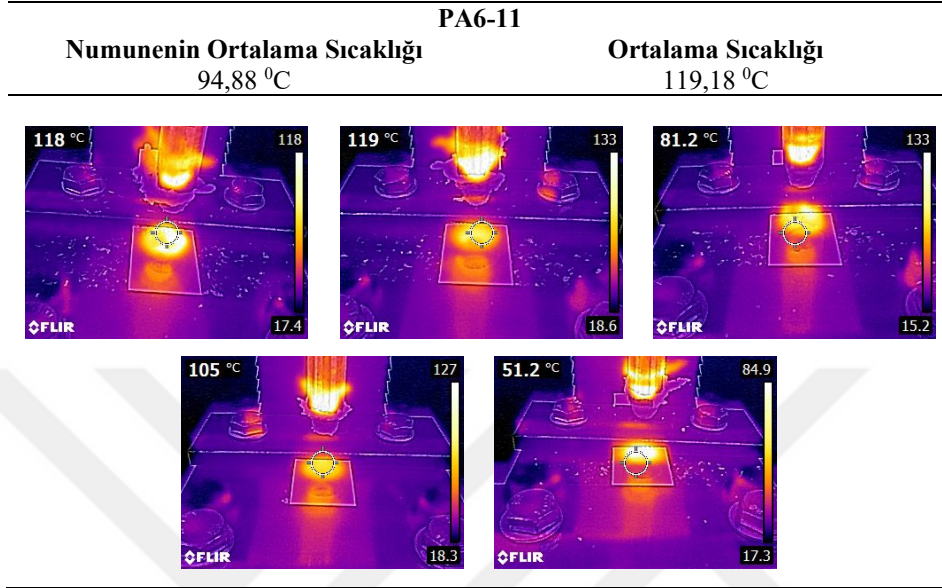
Şekil 4.43. PA6-09 Termal Kamera Görüntüleri

Şekil 4.43’te görüldüğü gibi 1146 dev/dk dönme devri, M10 pim çapı ve 60 s bekleme süresi ile yapılan birleştirmede ölçülen numunenin ortalama sıcaklık değeri 145 °C hesaplanmıştır. Bu sıcaklıklar yüzey ölçümleri sonucu elde edildiği için, camsı geçiş sıcaklığından (T_g 47,87 °C) oldukça yüksek, erime sıcaklığından (T_m 221,43 °C) düşük değerler elde edilmiştir.



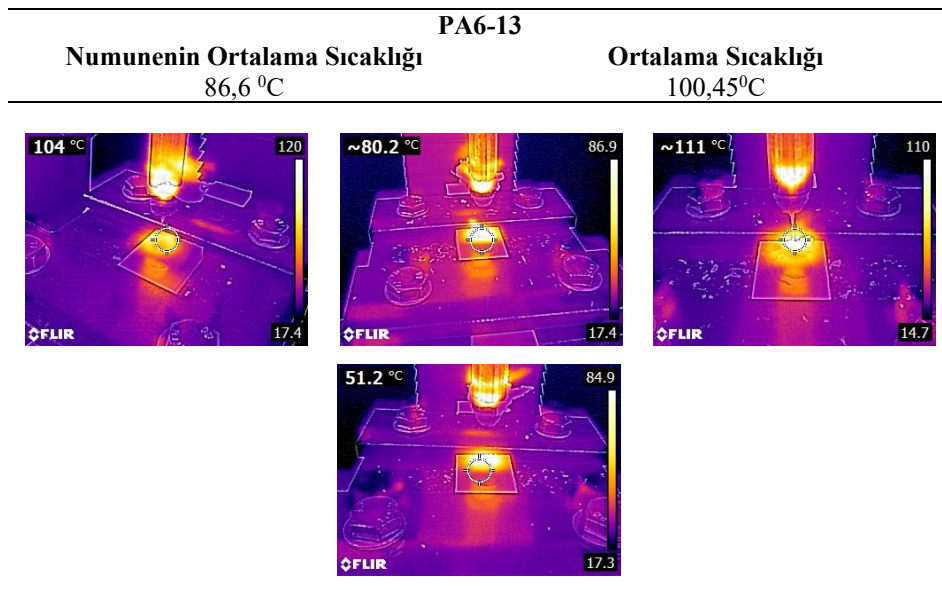
Şekil 4.44. PA6-10 Termal Kamera Görüntüleri

Şekil 4.44'te görüldüğü gibi 1146 dev/dk dönme devri, M12 pim çapı ve 60 s bekleme süresi ile yapılan birleştirmede ölçülen numunenin ortalama sıcaklık değeri 122,74 °C hesaplanmıştır. Bu sıcaklıklar yüzey ölçümleri sonucu elde edildiği için, camsı geçiş sıcaklığından (T_g 38,30 °C) oldukça yüksek, erime sıcaklığından (T_m 221,09 °C) düşük değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.45. PA6-11 Termal Kamera Görüntüleri

Şekil 4.45'te görüldüğü gibi 1560 dev/dk dönme devri, M10 pim çapı ve 15 s bekleme süresi ile yapılan birleştirmede ölçülen numunenin ortalama sıcaklık değeri 94,88 °C hesaplanmıştır. Bu sıcaklıklar yüzey ölçümleri sonucu elde edildiği için, camsı geçiş sıcaklığından (T_g 68,31 °C) yüksek, erime sıcaklığından (T_m 221,13 °C) düşük değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.46. PA6-13 Termal Kamera Görüntüleri

Şekil 4.46’de görüldüğü gibi 1560 dev/dk dönme devri, M10 pim çapı ve 60 s bekleme süresi ile yapılan birleştirmede ölçülen numunenin ortalama sıcaklık değeri 86,6 °C hesaplanmıştır. Bu sıcaklıklar yüzey ölçümleri sonucu elde edildiği için, camsı geçiş sıcaklığından (T_g 49,04°C) oldukça yüksek, erime sıcaklığından (T_m 222,24°C) düşük değerler elde edilmiştir.

Tablo 4.4. PA6-01, PA6-02 numunelerin termal kamera ölçümleri

762 dev/dk					
M10	15 s	119,40 °C	M10	60 s	132,00
M12	15 s	116,54 °C	M12	60 s	129,00

Tablo 4.4’te bekleme süresi 15 ve 60 s olarak sabit tutulduğunda, farklı pim çapları ile gerçekleştirilen birleştirmelerde, daha küçük pim çapı kullanıldığında kaynak bölgesinde daha yüksek sıcaklık olduğu gözlemlenmiştir. SKNK’de pim çapı küçüldükçe temas alanının daraldığını ve bunun, kaynak bölgesinde daha yüksek lokal sıcaklık piklerine neden olduğunu gözlemlenmiştir.

Tablo 4.5. PA6-01, PA6-02, PA6-05, PA6-06 numunelerin termal kamera ölçümleri

762 dev/dk					
M10	15 s	119,40 °C	M12	15 s	116,54 °C
M10	60 s	132,00 °C	M12	60 s	129,00 °C

Tablo 4.5’te görüldüğü gibi, pim çapı M10 ve M12 ayrı ayrı olarak sabit tutulduğunda, bekleme süresi arttıkça kaynak bölgesinde ölçülen sıcaklık değerlerinin artış gösterdiği gözlemlenmiştir. SKNK’da bekleme süresinin artmasının, sürtünme ve plastik deformasyon süresini uzatarak kaynak bölgesinde sıcaklıkları yükselttiğini görülmektedir.

Tablo 4.6. PA6-07, PA6-09, PA6-08, PA6-10 numunelerin termal kamera ölçümleri

1146 dev/dk					
M10	15 s	134,45 °C	M12	15 s	122,62 °C
M10	60 s	145,00 °C	M12	60 s	122,74 °C

Tablo 4.6’de görüldüğü gibi, pim çapı M10 ve M12 ayrı ayrı olarak sabit tutulduğunda, bekleme süresi arttıkça kaynak bölgesinde ölçülen sıcaklık değerlerinin artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.7. PA6-07, PA6-08, PA6-09, PA6-10 numunelerin termal kamera ölçümleri

1146 dev/dk					
M10	15 s	134,45 °C	M10	60 s	145,00 °C
M12	15 s	122,62 °C	M12	60 s	122,74 °C

Tablo 4.7’de Bekleme süresi 15 s ve 60 ve olarak sabit tutulduğunda, farklı pim çapları ile gerçekleştirilen birleştirmelerde, daha küçük pim çapı kullanıldığında kaynak bölgesinde daha yüksek sıcaklık oluştuğu gözlemlenmiştir.

Tablo 4.8. PA6-11, PA6-13 numunelerin termal kamera ölçümleri

1560 dev/dk		
M10	15 s	94,88 °C
M10	60 s	86,60 °C

Tablo 4.8’de diğer devirlerden farklı olarak göre 1560 dev/dk’da pim çapı sabit tutulduğunda, bekleme süresinin artmasıyla kaynak bölgesinde ölçülen sıcaklık değerlerinde azalma gözlemlenmiştir.

Tablo 4.9. PA6-01, PA6-07, PA6-11 numunelerin termal kamera ölçümleri

762	M10	15 s	119,40 °C
1146	M10	15 s	134,45 °C
1560	M10	15 s	94,88 °C

Tablo 4.10. PA6-05, PA6-09, PA6-13 numunelerin termal kamera ölçümleri

762	M10	60 s	132,00 °C
1146	M10	60 s	145,00 °C
1560	M10	60 s	86,60 °C

Tablo 4.9 ve Tablo 4.10’da pim çapı sabit tutulduğunda, 15–60 saniye bekleme sürelerinde 1146 dev/dk dönüş hızında daha yüksek sıcaklık değerleri elde edilirken, en yüksek devirde ise en düşük sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir.

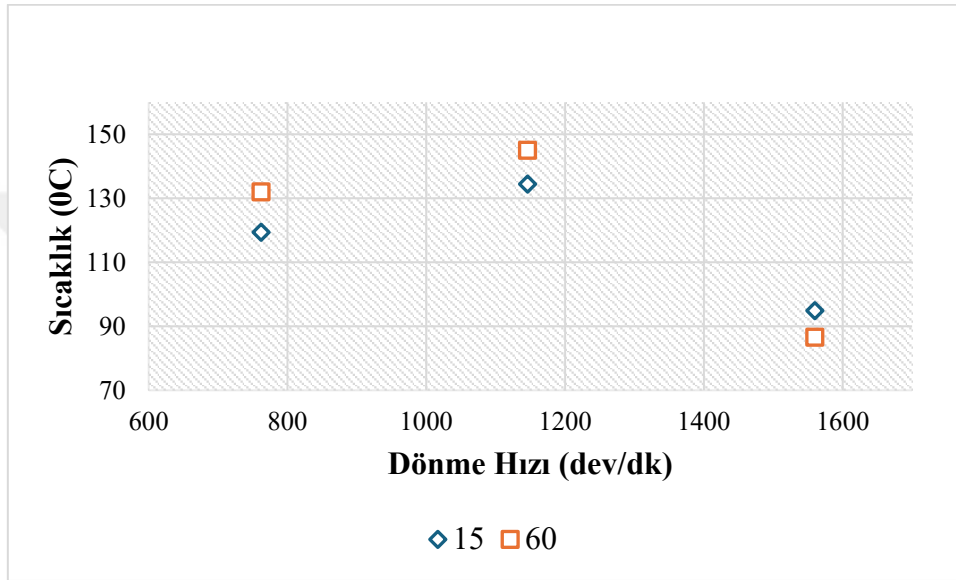
Tablo 4.11. PA6-06, PA6-10, PA6-14 numunelerin termal kamera ölçümleri

762	M12	15 s	116,54 °C
1146	M12	15 s	122,62 °C
1560	M12	15 s	- °C

Tablo 4.12. PA6-06, PA6-10, PA6-14 numunelerin termal kamera ölçümleri

762	M12	60 s	129,20 °C
1146	M12	60 s	122,74 °C
1560	M12	60 s	- °C

Tablo 4.11 ve Tablo 4.12’de görüldüğü üzere, pim çapı M10 ve 15 saniye bekleme süresi koşullarında 1146 dev/dk dönüş hızında daha yüksek sıcaklık değerleri elde edilirken, pim çapı M12’de ise 762 dev/dk ve 60 s’de dönüş hızında daha yüksek sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir.



Şekil 4.47. Bekleme süresine göre sıcaklık değişimi

Şekil 4.47’de dönme hızının bir fonksiyonu olarak sıcaklık değerlerine bakıldığında, M10 pim çapı ile birleştirilen numunelerde, düşük devirde yüksek sıcaklık, orta devirde daha yüksek sıcaklık, yüksek devirde daha düşük sıcaklık elde edilmiştir. Bekleme süreleri arttıkça sıcaklık arttığı görülmektedir (762-1146 dev/dk). Fakat 1560 dev/dk gibi yüksek devirde sıcaklık düştüğü gibi, düşük bekleme süresinde (15 s) yüksek sıcaklık, yüksek bekleme süresinde (60 s) düşük sıcaklık ölçülmüştür. Yüksek devirlerde düşük sıcaklık ölçülmesini takımın çok hızlı dönmesi nedeniyle temas yüzeyinin azalmasına bu durumda, malzeme yüzeyinden ısıнын daha hızlı uzaklaşmasına neden olduğu söylenebilir [47].

4.6. Tam Faktöriyel Tasarım Analiz Sonuçları

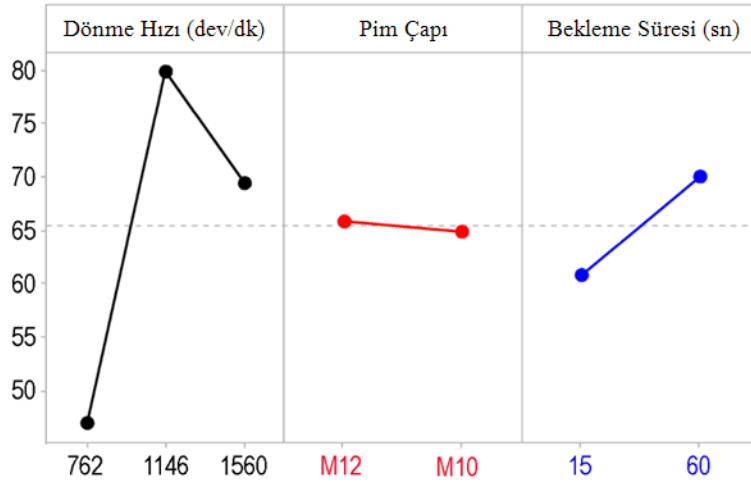
Kaynak parametrelerinin (dönme hızı, bekleme süresi, pim çapı) birleştirme mukavemeti üzerindeki etkileri tam faktöriyel deneysel tasarım kullanılarak analiz edilmiş ve ANOVA sonuçları Tablo 4.13’te sunulmuştur. Bu sonuçlar, seçilen faktörlerin birleştirme mukavemetini önemli ölçüde etkilediğini ve genel modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu

göstermektedir (P değeri: 0,001, F değeri: 15,46). Parametreler arasında, dönme hızı (dev/dk), 0,000'lik P değeri, 27,78'lik F değeri ve toplam varyasyonun en büyük kısmını oluşturan 2227,73'lük ayarlanmış kareler toplamı (Adj SS) ile kanıtlandığı gibi en önemli etkiye sahiptir. Bekleme süresi birleştirme mukavemeti üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahiptir (P değeri: 0,041, F değeri: 6,22, Adj SS: 249,34), ancak katkısı dönme hızına kıyasla daha az belirgindir. Buna karşılık, pim çapı (Ø mm) yüksek P değeri (0,780) ve düşük F değeri (0,08) ile gösterildiği gibi istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip değildir. Hata teriminin ayarlanmış ortalama karesi (Adj MS) 40,10, açıklanamayan değişkenliğin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu gösterir. Genel olarak, dönme hızı en kritik parametre olarak belirlenir, bunu bekleme süresi takip eder, pim çapı ise bu çalışmada birleştirme mukavemetini önemli ölçüde etkilemez.

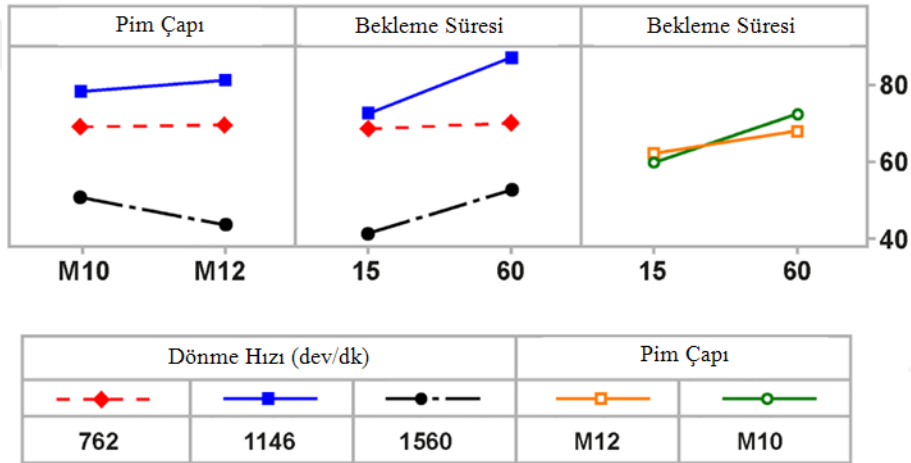
Tablo 4.13. Tam faktöriyel tasarım için ANOVA

	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj Ms	F-Value	P-Value
Dönme Hızı (dev/dk)	2	2227.73	80.68%	2227.73	1113.86	27.78	0.000
Pim Çapı (M)	1	3.37	0.12%	3.37	3.37	0.08	0.780
Bekleme Süresi (s)	1	249.34	9.03%	249.34	249.34	6.22	0.041
Error	7	280.69	10.17%	280.69	40.10		
Total	11	2761.12	100.00%				

Şekil 4.48'te ana etki grafikleri sunulmaktadır. Çekme dayanımı (MPa) için ana etki grafiği, dönme hızı, pim çapı ve bekleme süresinin birleştirme performansı üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu parametreler arasında, dönme hızı en önemli etkiyi göstermektedir ve çekme dayanımı 762 dev/dk'dan 1146 dev/dk'ya kadar keskin bir şekilde artmakta ve maksimum dayanım elde edilmektedir. Ancak, 1560 dev/dk'da dayanım azalmaktadır ve bu da daha yüksek çekme dayanımı elde etmek için 1146 dev/dk'nın en uygun hız olduğunu göstermektedir. Bekleme süresi de önemli bir etki göstermektedir ve çekme dayanımı, süre 15 saniyeden 60 saniyeye çıktıkça önemli ölçüde iyileşmektedir ve bu da daha uzun karıştırma sürelerinin malzeme bağlama kalitesini artırdığını göstermektedir. Buna karşılık, pim çapı (M10 ve M12) çekme dayanımı üzerinde minimum etkiye sahiptir çünkü iki çap arasında çok az değişiklik vardır. Bu bulgular ANOVA sonuçlarıyla uyumludur ve dönme hızı ve bekleme süresinin çekme dayanımı için kritik parametreler olduğunu, pim çapının ise birleştirme performansını önemli ölçüde etkilemediğini doğrulamaktadır.

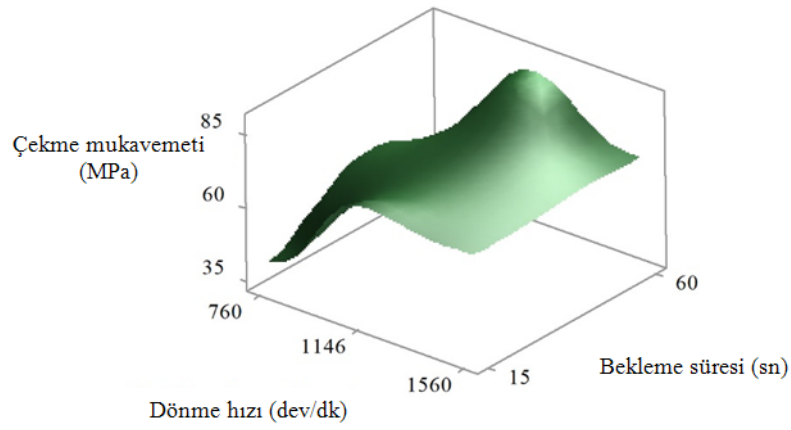
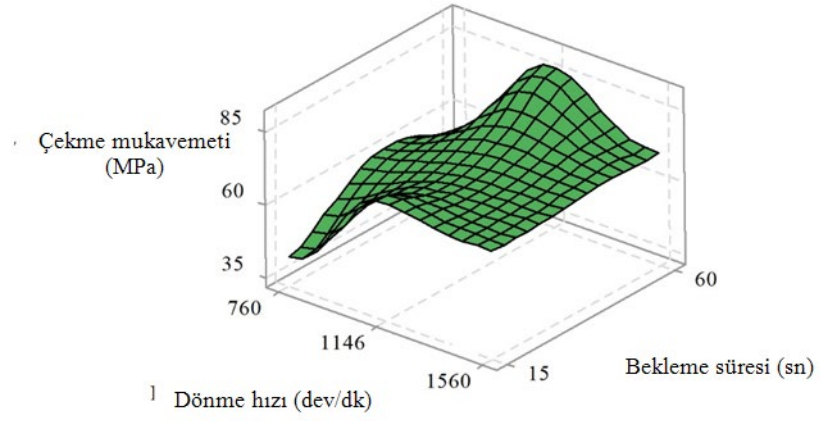


Şekil 4.48. PA6 numunelerinin çekme mukavemeti (MPa) için ana etki grafiği



Şekil 4.49. PA6 numunelerinin çekme mukavemeti (MPa) için etkileşim grafiği

Şekil 4.49, çekme dayanımının (MPa) dönme hızı (dev/dk) ve karıştırma süresi (saniye) fonksiyonu olarak yüzey grafiğini göstererek, birleştirme performansı üzerindeki birleşik etkilerine dair üç boyutlu bir perspektif sağlar. Grafik, maksimum çekme dayanımının 1146 dev/dk dönme hızı ve 60 saniye karıştırma süresinde elde edildiğini ortaya koyarak bunların optimum parametreler olduğunu doğrular. Daha düşük (760 dev/dk) veya daha yüksek (1560 dev/dk) dönme hızlarında, çekme dayanımı azalır ve bu da uygun bir hız seçmenin kritik rolünü gösterir. Benzer şekilde, karıştırma süresi çekme dayanımını önemli ölçüde etkiler; daha uzun süreler (60 saniye) iyileştirilmiş bağlama kalitesiyle sonuçlanırken, daha kısa süreler (15 saniye) daha düşük çekme dayanımına yol açar. Bu parametreler arasındaki etkileşim, çekme dayanımının dönme hızı ve karıştırma süresinin aynı anda optimize edilmesiyle en üst düzeye çıkarılabileceğini gösterir.



Şekil 4.50. Çekme mukavemetinin yüzey grafiği

Dönme hızı ve karıştırma süresinin bir fonksiyonu olarak çekme mukavemetinin yüzey grafikleri Şekil 4.50’de verilmiştir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Değerlendirilmeler yapılırken, testlerden alınan sonuçlara göre numuneler karşılaştırılmıştır. Numunelerin en düşük ve en yüksek verileri çekme dayanımı $\sigma_Y=40-90$ MPa, elastik modül $E_t=4000-11000$ MPa, kopma dayanımı $\sigma_B =8-19$ MPa, kopma uzaması $\varepsilon_Y= \%3-10$, Erime entalpisi $\Delta H_m=45-59$ J/g, camsı geçiş sıcaklığı $T_g=30-70^\circ\text{C}$, erime pik sıcaklığı $T_m=220-224^\circ\text{C}$, ısı kapasitesi $C_p = 0,02-0,45$, kristallik $X_C= \%17-28$, PA6-00 referans numunesinin kristallik derecesi $\%19,6$ 'dır. Bu nedenle $\%21-23$ bandı orta kristallik derecesi olarak kabul edilmiştir. Yüzey sıcaklığı $IR=80-145^\circ\text{C}$ aralığındadır.

5.1. Sonuçlar

PA6-01 (762 dev/dk-M10-15 s) numunesi, mekanik, termal ve morfolojik inceleme sonucunda kısa bekleme süresi ve düşük ısıl girdi nedeniyle zincirler arası difüzyonun sınırlı kaldığı bir yapı sergilemiştir. Mekanik verilere bakıldığında $\sigma_Y=40,6$ MPa ve $\sigma_B =8,8$ MPa verileri ile en düşük değerlere sahip olması zayıf, $\varepsilon_Y= \%6,7$ bu numunenin tamamen gevrek değil, kısmi süneklik gösterebildiğini ortaya koymaktadır. DSC sonuçları, $\Delta H_m=56,93$ J/g, $X_C=\%24,75$ ile orta kristallik değerinin numunenin gevrek davranış sergileyebileceğini açıklamaktadır [73]. $T_g=56,25^\circ\text{C}$ 'nin yüksek değerlerde olması ise zincir hareketliliğinin kısıtlandığını ve gevrek yapının oluşmasını desteklemektedir [74]. SEM görüntüleri incelendiğinde; zayıf akış izleri ve tam homojen karışım olmadığı, aralıklarla fibril yapıların oluştuğu görülmektedir. Bu durumda yine sınırlı sünekliği açıklar niteliktedir [75]. Sonuç olarak PA6-01, orta düzeyde kristallığe sahip, kısmi süneklik gösteren fakat tam sünekliğe ulaşamamış bir profil sergilemektedir.

PA6-02 (762 dev/dk-M12-15 s) numunesi, mekanik, termal ve morfolojik inceleme sonucunda gevrek bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Mekanik verilere bakıldığında $\sigma_Y=41,3$ MPa ve $\sigma_B =8,2$ MPa verileri ile düşük değerlere sahip, $\varepsilon_Y= \%6,8$ seviyesinde gerçekleşen kopma uzaması bu numunenin tamamen gevrek olmadığını, belirli bir oranda plastik deformasyon kapasitesi koruyabildiğini göstermektedir. DSC sonuçları, $\Delta H_m=58,25$ J/g, $X_C=\%25,33$ ile yüksek kristallik değerinin olması gevrek davranışı destekler niteliktedir. $T_g=33,71^\circ\text{C}$ gibi düşük bir değerde olması, polimer zincirlerinin hareketinin daha kolay olacağını gösterir [76], fakat bekleme süresinin kısalığı ve düşük devir kullanımı bu potansiyeli ortaya çıkaramamıştır. Bunun yanı sıra $E_t=9110$ MPa oldukça yüksektir, bu da malzemenin rijitlik derecesinin yüksek olduğunu göstermektedir [77]. SEM görüntüleri incelendiğinde; düz, pürüzsüz alanlar ve nehir desenleri (river pattern) oluşumu gözlenmiştir. Bu durum, gevrek kopmayı destekler niteliktedir

[78]. Ancak, kısa ve seyrek fibrillerin varlığı, numunenin sınırlı da olsa sünek bir deformasyon kabiliyeti sergilediğini ortaya koymaktadır.

PA6-03 (762 dev/dk-M12-30 s) numunesi, mekanik, morfolojik inceleme sonucunda mekanik verilere bakıldığında, kısa bekleme süresine sahip PA6-01 ve PA6-02 numunelerine kıyasla daha yüksek dayanım göstermiştir. Mekanik verilere göre $\sigma_Y=51,8$ MPa ve $\sigma_B=10,3$ MPa değerleri, bekleme süresinin artmasıyla malzeme performansının yükseldiğini ortaya koymaktadır. Kopma uzamasının $\varepsilon_Y = \%5,8$ seviyesinde gerçekleşmesi, bu numunenin belirgin ölçüde sünek bir davranış sergilediğini göstermektedir [79]. Ayrıca $E_t=6310$ MPa değeri, orta düzeyde bir rijitliği işaret etmektedir. DSC verileri mevcut olmadığından morfolojik gözlemler üzerinden yapılan değerlendirmelerde; akış çizgilerinin belirgin olması ve kısa-orta seviyede fibril oluşumunun varlığı, plastisitenin geliştiğini ve karışımın homojenleştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, yüzeyde düz ve parlak alanların varlığı, kırılmanın tamamen sünek bir şekilde gerçekleşmediğini; kısmi gevrek bölgelerin de mevcut olduğunu düşündürmektedir. Kenarlarda ince kayma dudakları (shear lips) ve mikro-void birleşimlerinin görülmesi ise, malzemenin kırılma öncesinde plastik deformasyona uğradığını ortaya koymakta, bu da mekanik veriler ile öne sürülen sünek yapı olgusunu desteklemektedir [80, 81].

PA6-04 (762 dev/dk-M12-45 s) numunesi, mekanik ve morfolojik verilere bakıldığında kısa bekleme sürelerine sahip numunelere kıyasla daha yüksek dayanım göstermiştir. Mekanik açıdan değerlendirildiğinde $\sigma_Y=56,5$ MPa ve $\sigma_B=11,5$ MPa değerleri, bekleme süresinin artırılmasının malzeme mukavemetini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır [9, 82]. Kopma uzamasının $\varepsilon_Y = \%4,8$ seviyesinde olması, bu numunenin sınırlı fakat kısmi süneklığe sahip olduğunu, tamamen gevrek davranmadığını göstermektedir. Orta düzeydeki bu uzama, kaynak bölgesinde zincirler arası difüzyonun PA6-01 ve PA6-02'ye kıyasla daha etkin gerçekleştiğini işaret etmektedir. $E_t=6983$ MPa elastik modül değeri, malzemenin orta-yüksek düzeyde rijitlik sergilediğini göstermektedir. Morfolojik açıdan SEM görüntülerinde, belirgin akış çizgilerinin ve homojen karışım bölgelerinin varlığı, malzemenin bir miktar plastisite kazanabildiğini doğrulamaktadır. Bununla birlikte, yüzeyde gözlenen parlak ve düz alanlar, kırılmanın yalnızca sünek mekanizmalarla değil, kısmen gevrek mekanizmalarla da gerçekleştiğini ortaya koymaktadır [83]. Kenarlarda kayma dudakları (shear lips) ve mikro-void birleşimlerinin bulunması, kırılma öncesinde malzemenin plastik deformasyona uğradığını desteklemektedir. Dolayısıyla PA6-04 numunesi, dayanım açısından yükseliş gösterirken, süneklik bakımından kısmi fakat sınırlı bir performans sergilemiştir.

PA6-05 (762 dev/dk-M10-60 s) numunesi, mekanik ve termal inceleme sonucunda; $\sigma_Y=61,1$ MPa ve $\sigma_B =12,6$ MPa değerleri ölçülmüştür. Kopma uzamasının $\epsilon_b =\%6,8$ seviyesinde gerçekleşmesi, bu numunenin hem dayanım hem de süneklik açısından dengeli bir davranış sergilediğini göstermektedir. $E_t=4960$ MPa ile elastik modülün düşük çıkması, malzemenin rijitlik derecesinin sınırlı olduğunu ancak deformasyon kabiliyetinin korunduğunu ortaya koymaktadır. SEM gözlemlerinde belirgin akış çizgileri ve orta yoğunlukta fibril yapılar, homojen karışımın sağlandığını ve plastisitenin arttığını göstermektedir [84]. Bu bulgular, dayanım ile sünekliğin birlikte korunabildiğini doğrulamaktadır. DSC sonuçları, $\Delta H_m=50,23$ J/g, $X_C=\%21,84$ $T_g=51,28^\circ\text{C}$, $T_m=222,44^\circ\text{C}$ kristallik derecesinin orta düzeyde olması sünekliği desteklemektedir. $C_p=0,24$ J/gK'lık ısı kapasitesi de camsı geçiş sıcaklığı etrafında amorf faza katkı sağladığı düşünülmektedir. Uzun bekleme süresiyle sağlanan artan ısı girişi, karışımın daha homojen olmasına yol açmış; kristallik derecesinin orta düzeyde kalması ve kopma uzamasının yüksekliği, mekanik ve termal verilerin tutarlı şekilde tok ve sünek bir kırılma davranışını kanıtladığını ortaya koymuştur [85, 86].

PA6-06 (762 dev/dk-M12-60 s) numunesinin mekanik, termal ve morfolojik inceleme sonucunda mekanik verilere bakıldığında $\sigma_Y=64,2$ MPa, $\sigma_B =12,8$ MPa ve $\epsilon_Y = \%6,8$ 'dir. Bu numunenin belirgin ölçüde sünek davranış sergilediğini ortaya koymaktadır. $E_t=5120$ MPa'ın düşük kalması rijitliğin sınırlı olduğunu göstermekte, bu da deformasyon kapasitesinin korunmasını desteklemektedir. DSC sonuçlarında $\Delta H_m=56,60$ J/g ve $X_C=\%24,41$ değerleri orta-yüksek kristallik düzeyini göstermektedir. $T_g=50,25$ °C'nin orta seviyede oluşu zincir hareketliliğinin belirli ölçüde kısıtlandığını ve gevrek eğilimi destekleyebileceğini işaret etmektedir. SEM görüntülerinde omuz ve pimin etkisiyle belirgin akış çizgileri gözlenmiş, bekleme süresinin yüksekliği sayesinde homojen karışımın sağlandığı doğrulanmıştır. Bununla birlikte, düz ve parlak alanlar ile mikro çatlaklar gevrek davranışı desteklemektedir. Buna karşın fibril oluşumları, köprü yapılar ve mikro-void boşlukların varlığı, malzemenin sünek karakterini güçlendirmektedir. $C_p=0,30$ J/gK'lık ısı kapasite, amorf fazın katkısını işaret etmekte ve sünekliği desteklemektedir [87]. Genel olarak, PA6-06 numunesi mekanik açıdan yüksek süneklik ve iyi dayanım sergilerken, mikroyapısal bulgular orta kristallik nedeniyle kısmi gevrek eğilimi göstermektedir. Bu nedenle numune yarı dengeli ancak sünekliği baskın bir karaktere sahip olarak değerlendirilebilir.

PA6-07 (1146 dev/dk-M10-15 s) numunesi, mekanik ve termal inceleme sonucunda; $\sigma_Y=71,6$ MPa ve $\sigma_B =14,3$ MPa ile yüksek dayanım gösterdiği görülmektedir. $\epsilon_b =\%4,8$ seviyesinde gerçekleşen kopma uzaması bu numunenin sınırlı fakat kısmen sünek davranış sergilediğini göstermektedir. $E_t=6983$ MPa değeri ise orta-yüksek düzeyde rijitliği işaret etmektedir. Bekleme süresinin düşük olması, zincirler arası difüzyon ve malzeme akışını sınırlamış, bu nedenle uzama kapasitesi beklenenden düşük kalmıştır. DSC sonuçlarında $\Delta H_m=51,30$ J/g ve $X_C=\%22,30$ değerleri, malzemenin orta kristallik bandında olduğunu göstermektedir. Bu kristallik derecesi, aşırı gevrekleşmeyi önlese de sünekliği belirgin şekilde artırmaya yeterli olmamıştır. Dönme hızının 1146 dev/dk olması, ısı girişinin yeterli düzeye ulaşmasını sağlamış ve dayanımın artışı desteklemiştir. Ancak, kısa bekleme süresi nedeniyle zincirlerin yeniden düzenlenmesi kısıtlanmış ve sünekliğin düşük seviyede kalmasına yol açmıştır. Genel olarak PA6-07 numunesi, yüksek dayanımına karşın düşük uzama kapasitesi nedeniyle kısmen gevrek eğilimli bir davranış sergilemiş; mekanik açıdan güçlü fakat sünekliği sınırlı bir yapı ortaya koymuştur [88].

PA6-08 (1146 dev/dk-M12-15 s) numunesi, mekanik ve termal inceleme sonuçlarına göre yüksek dayanım sergilemiştir. Mekanik verilere bakıldığında $\sigma_Y=73,3$ MPa ve $\sigma_B =14,6$ MPa değerleri, bu numunenin oldukça yüksek mukavemete sahip olduğunu göstermektedir. Kopma uzamasının $\epsilon_b =\%4,8$ seviyesinde gerçekleşmesi, sünekliğin sınırlı olduğunu ancak tamamen kaybolmadığını ortaya koymaktadır. $E_t=7710$ MPa değeri, numunenin orta-yüksek rijitlik gösterdiğini doğrulamaktadır. Bekleme süresinin düşük olması zincirler arası difüzyon ve karışımı sınırlamış, bu nedenle uzamanın daha yüksek seviyelere ulaşması engellenmiştir. DSC sonuçlarına göre $\Delta H_m=50,29$ J/g ve $X_C=\%21,87$ değerleri, malzemenin orta kristallik bandında ($\%21-23$) yer aldığını göstermektedir. Bu durum, gevrek davranışın tamamen baskın olmadığını, kısmi sünekliğin korunduğunu işaret etmektedir. Orta devir (1146 dev/dk) ve büyük pim çapının sağladığı yüksek ısı girişi, dayanımın yükselmesine katkıda bulunmuş; ancak kısa bekleme süresi, zincirlerin yeniden düzenlenmesini sınırlayarak sünekliği azaltmıştır [89]. Genel olarak PA6-08 numunesi, yüksek dayanımına karşın düşük uzama kapasitesi nedeniyle kısmen gevrek davranış göstermiştir; mekanik açıdan güçlü fakat süneklik bakımından sınırlı bir yapı ortaya koymuştur.

PA6-09 (1146 dev/dk-M10-60 s) numunesi, mekanik ve termal inceleme sonuçlarına göre en yüksek dayanımı sergileyen örnek olmuştur. Mekanik verilere göre $\sigma_Y=85,2$ MPa ve $\sigma_B =18,3$ MPa değerleri, bu numunenin oldukça yüksek mukavemete sahip olduğunu göstermektedir. Kopma uzamasının $\epsilon_b =\%3,9$ seviyesinde kalması ise sünekliğin oldukça sınırlı olduğunu ve

kırılma davranışında gevrek eğilimin öne çıktığını ortaya koymaktadır. $E_t=7760$ MPa değeri orta-yüksek rijitlik göstermekte, malzemenin sertliğinin belirgin olduğunu işaret etmektedir. DSC sonuçlarında $\Delta H_m=48,91$ J/g ve $X_c=\%21,27$ değerleri, malzemenin orta kristallik bandında (%21–23) yer aldığını göstermektedir. Bu değerler, gevrek eğilimin çok baskın olmadığını ancak yüksek dayanımla birleştiğinde sünekliğin sınırlı kaldığını doğrulamaktadır. Ayrıca $T_g=47,87$ °C'nin görece düşük oluşu, segmental zincir hareketliliğini desteklese de uzun bekleme süresi ve yüksek ısı girişi, yoğun bir yapı oluşumuna neden olarak uzamanın düşmesine yol açmıştır [77]. Sonuç olarak PA6-09 numunesi, yüksek dayanım–düşük süneklik dengesi ile öne çıkmakta; mekanik açıdan güçlü bir bağlantı sağlarken sünekliğin sınırlı kalması nedeniyle tok davranıştan çok gevrek eğilimin baskın olduğu bir karakter sergilemektedir.

PA6-10 (1146 dev/dk-M12-60 s) numunesi, mekanik, termal ve morfolojik olarak incelendiğinde yüksek dayanım değerleri göstermiştir. Mekanik açıdan, $\sigma_Y=89,2$ MPa ve $\sigma_B=17,6$ MPa bu numunenin tüm örnekler arasında en yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Ancak kopma uzamasının $\epsilon_b=\%3,9$ seviyesinde kalması, sünekliğin oldukça sınırlı olduğunu ve kırılma davranışında gevrek eğilimin baskın olduğunu göstermektedir. $E_t=7760$ MPa değeri, malzemenin orta-yüksek rijitlikte olduğunu işaret etmektedir. Termal açıdan, DSC sonuçları $\Delta H_m=51,49$ J/g ve $X_c=\%22,39$ değerleriyle orta kristallik bandında yer almakta olup, bu da malzemenin yüksek dayanımına katkıda bulunurken sünekliği sınırlamaktadır [86, 90]. $T_g=38,3$ °C'nin düşük olması segmental zincir hareketliliğini işaret etse de uzun bekleme süresi ve büyük pim çapı nedeniyle oluşan yoğun yapı bu avantajı sınırlamış ve uzama değerlerinin düşük kalmasına yol açmıştır [91, 92]. $T_m=221,09$ °C değeri düzen–süneklik dengesinin kısmen korunduğunu göstermektedir. Morfolojik açıdan SEM görüntülerinde akış çizgileri, fibril oluşumları, köprü yapılar ve şeritli liflenmeler gözlenmiştir [84]. Bu yapılar karışımın homojen olduğunu ve kısmen sünek mekanizmaların devrede olduğunu gösterse de yer yer görülen düz ve parlak alanlar lokal gevrek bölgelerin varlığını doğrulamaktadır [78]. SEM bulguları mekanik verilerle uyumludur. Sonuç olarak PA6-10 numunesi, yüksek dayanım ve düşük uzama kombinasyonu nedeniyle gevrek eğilimli fakat kısmen tok bir karakter sergilemektedir.

PA6-11 (1560 dev/dk-M10-15 s) numunesi, mekanik ve termal inceleme sonuçlarına göre orta düzey dayanım sergilemiştir. Mekanik verilere bakıldığında $\sigma_Y=66,1$ MPa ve $\sigma_B=13,1$ MPa değerleri, bu numunenin yeterli mukavemete sahip olduğunu göstermektedir. Kopma uzamasının $\epsilon_b=\%3,9$ seviyesinde kalması ise sünekliğin oldukça sınırlı olduğunu ve kırılma davranışında gevrek eğilimin baskın olduğunu ortaya koymaktadır. $E_t=9980$ MPa gibi yüksek

elastik modül değeri, malzemenin rijit bir yapıya sahip olduğunu doğrulamaktadır. Termal açıdan, DSC sonuçlarında $\Delta H_m=51,92$ J/g ve $X_c=\%22,57$ değerleri orta-yüksek kristallik düzeyini göstermektedir. Bu değerler dayanımın korunmasına katkı sağlarken sünekliğin kısıtlı kalmasına neden olmuştur. Ayrıca $T_g=68,3$ °C'nin yüksek oluşu, zincir hareketliliğinin önemli ölçüde sınırlandığını ve malzemenin gevrek davranış sergileyeceğini işaret etmektedir [76]. Genel olarak PA6-11 numunesi, mekanik açıdan orta dayanımlı ancak yüksek rijitlik ve düşük süneklik nedeniyle gevrek karakterin baskın olduğu bir yapı ortaya koymuştur.

PA6-12 (1560 dev/dk-M12-15 s) numunesi, mekanik ve termal inceleme sonuçlarına göre orta düzey dayanım göstermiştir. Mekanik verilere bakıldığında $\sigma_Y=68,7$ MPa ve $\sigma_B=13,7$ MPa değerleri, bu numunenin yeterli mukavemete sahip olduğunu göstermektedir. Kopma uzamasının $\epsilon_b=\%3,9$ seviyesinde kalması ise sünekliğin oldukça sınırlı olduğunu ve kırılma davranışında gevrek eğilimin baskın olduğunu ortaya koymaktadır. $E_t=9520$ MPa gibi yüksek elastik modül değeri, malzemenin rijit bir yapıya sahip olduğunu doğrulamaktadır [93]. Termal veriler incelendiğinde, DSC sonuçlarında $\Delta H_m=50,96$ J/g ve $X_c=\%27,67$ değerleri, PA6-12 numunesinin en yüksek kristallik derecesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yüksek kristallik oranı, gevrek davranış eğilimini kuvvetle desteklemektedir. $T_g=41,89$ °C'nin düşük oluşu segmental zincir hareketliliğini artırabilecek bir etken olsa da yüksek kristallik derecesi bu avantajı baskılayarak sünekliğin açığa çıkmasını engellemiştir. Sonuç olarak PA6-12 numunesi, orta dayanım, yüksek rijitlik ve düşük süneklik kombinasyonu ile öne çıkmış; genel karakteri itibarıyla rijit ve gevrek eğilimli bir yapı sergilemiştir.

PA6-13 (1560 dev/dk-M10-60 s) numunesi, mekanik, termal ve morfolojik incelemeler sonucunda orta-yüksek dayanım sergilemiştir. Mekanik verilere göre $\sigma_Y=69,3$ MPa ve $\sigma_B=13,8$ MPa değerleri bu numunenin mukavemet açısından güçlü olduğunu göstermektedir. Kopma uzamasının $\epsilon_b=\%5,8$ seviyesinde gerçekleşmesi, sünekliğin daha belirgin olduğunu ve malzemenin sınırlı da olsa plastik deformasyon kapasitesi kazandığını ortaya koymaktadır. Ancak, $E_t=10,400$ MPa gibi yüksek elastik modül değeri, malzemenin yüksek rijitliğe sahip olduğunu ve deformasyon kabiliyetinin kısıtlandığını göstermektedir. Termal incelemelerde DSC sonuçları, $\Delta H_m=53,21$ J/g ve $X_c=\%23,13$ değerleri ile kristallik derecesinin orta bandın üzerinde olduğunu ve bu durumun gevrek eğilimi artırabileceğini ortaya koymaktadır. $T_g=49,04$ °C, zincir segmentlerinin hareketliliğinin kısmen kısıtlandığını işaret etmektedir. Bu nedenle süneklik potansiyeli tam anlamıyla açığa çıkamamıştır. Morfolojik olarak SEM görüntülerinde kesintili akış izleri, yetersiz karışımı işaret etmektedir [94]. Düz ve parlak alanlar ile nehir desenlerinin varlığı gevrek kırılma modunun baskın olduğunu, ancak kısa ve

seyrek fibriller ile dar shear-lip bölgelerinin oluşumu sünek mekanizmaların ikincil düzeyde de olsa mevcut olduğunu göstermektedir. Genel olarak PA6-13 numunesi, dayanımı yüksek, rijitliği fazla ve sünekliği kısmi olan, yani dayanıklı fakat gevrek eğilimli bir yapı sergilemektedir. Mekanik, termal ve mikroyapısal veriler birbiriyle tutarlı olup bu karakterizasyonu desteklemektedir.

PA6-14 (1560 dev/dk-M12-60 s) numunesi, mekanik, termal ve morfolojik incelemeler sonucunda en dengeli performanslardan birini sergilemiştir. Mekanik verilere göre $\sigma_Y=71,0$ MPa ve $\sigma_B=14,2$ MPa değerleri, bu numunenin yüksek mukavemete sahip olduğunu göstermektedir. Kopma uzamasının $\epsilon_b = \%9,6$ gibi oldukça yüksek bir seviyede gerçekleşmesi, tüm numuneler arasında en sünek davranışa sahip örnek olduğunu ortaya koymaktadır. $E_t=6840$ MPa değeri ise PA6-11 ve PA6-13 numunelerine göre daha düşük rijitliği işaret ederek, malzemenin sünek ve tok karakterini desteklemektedir. Termal açıdan, DSC sonuçlarında $\Delta H_m=50,62$ J/g ve $X_c=\%17,01$ değerleri, tüm numuneler içinde en düşük kristallik derecesini göstermektedir. Bu düşük kristallik seviyesi, polimer zincirlerinin düzenliliğinin azalmasına ve amorf fazın artmasına yol açarak sünekliği desteklemektedir [86]. Ayrıca $T_g=44,45$ °C değeri, zincir hareketliliğinin arttığını ve plastik deformasyon kabiliyetinin güçlendiğini işaret etmektedir. Morfolojik olarak SEM görüntülerinde yoğun fibrillenme, belirgin akış çizgileri ve köprü yapılar gözlenmiştir. Bu oluşumlar, düşük kristallik derecesinin etkisiyle kaynak bölgesinde daha fazla plastisite ve homojen karışım sağlandığını ortaya koymaktadır. Uzun bekleme süresi (60 s) ve büyük pim çapı (M12) ile sağlanan yeterli ısı girişi, kristalliğin düşmesine ve sünekliğin artmasına katkı sağlamıştır. Sonuç olarak PA6-14 numunesi, yüksek süneklik, iyi dayanım ve düşük rijitlik kombinasyonu ile en tok ve dengeli karaktere sahip numune olarak değerlendirilmektedir.

5.1.1. 762 dev/dk ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması

PA6-01 ve PA6-02 numuneleri, düşük çekme dayanımı ve nispeten sınırlı kopma uzaması ile en zayıf performansı göstermiştir. Bu numunelerde DSC verilerinde kristallik oranının orta-yüksek düzeyde olması ve SEM’de zayıf akış izleri ile “river pattern” yapıların gözlenmesi, gevrek karakterin baskın olduğunu doğrulamaktadır. PA6-03 ve PA6-04 numunelerinde bekleme süresinin artırılmasıyla dayanım değerleri belirgin şekilde yükselmiş, ancak kopma uzaması $\%5,8-4,8$ seviyelerine düşerek süneklik kısıtlanmıştır. SEM incelemelerinde akış çizgilerinin daha belirgin, kısmi fibril oluşumunun varlığı ve shear lip izlerinin gözlenmesi, bu numunelerde kısmen sünek fakat gevrek eğilimli bir kırılma davranışının hakim olduğunu

göstermektedir. Buna karşılık PA6-05 ve PA6-06 numuneleri, daha uzun bekleme süresi ve uygun parametre kombinasyonları sayesinde hem yüksek dayanım hem de daha yüksek kopma uzaması ile öne çıkmaktadır. Elastik modül değerlerinin nispeten düşük olması rijitliğin sınırlı kaldığını, bu durumun sünekliği desteklediğini göstermektedir. DSC verilerinde orta kristallik ve belirgin amorf faz katkısı, zincir hareketliliğini artırarak mekanik sünekliği desteklemiştir. SEM incelemelerinde yoğun fibril oluşumu, akış çizgilerinin belirginliği ve mikro-voidlerin varlığı, bu numunelerde plastisitenin baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, PA6-01 ve PA6-02 gevrek karakterleriyle en zayıf numuneler olurken, PA6-03 ve PA6-04 kısmi süneklik ve orta dayanım ile yarı dengeli davranış sergilemiştir. En iyi performans ise PA6-05 ve PA6-06 numunelerinde elde edilmiş; bu numuneler, yüksek dayanım ile yüksek süneklik sergileyerek tok davranışa en yakın örnekler olarak öne çıkmıştır.

5.1.2. 1146 dev/dk ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması

PA6-07 ve PA6-08 numuneleri, 1146 dev/dk dönme hızı ve kısa bekleme süresi (15 s) ile birleştirilmiş olup yüksek çekme dayanımına rağmen sınırlı kopma uzaması göstermiştir. Bu durum, yüksek rijitlik değerleri ile değerlendirildiğinde, her iki numunenin de gevrek eğilimli fakat kısmen sünek davranış sergilediğini ortaya koymaktadır. DSC sonuçları, bu numunelerde orta düzey kristallik derecesini işaret etmekte, dolayısıyla gevrek karakterin tamamen baskın olmadığını göstermektedir. SEM incelemelerinde ise akış çizgilerinin kısıtlı, parlak alanların belirgin olması ve sınırlı fibril oluşumu, sünekliğin baskılandığını ve gevrek kırılma eğiliminin ön plana çıktığını desteklemiştir. PA6-09 ve PA6-10 numuneleri ise daha uzun bekleme süreleri (60 s) sayesinde en yüksek mekanik dayanım seviyelerine ulaşmıştır. PA6-09 ve PA6-10 numuneleri tüm seri içerisinde en yüksek mukavemet değerlerini temsil etmiştir. Ancak kopma uzamasının her iki numunede de eşit olması, dayanım artışının süneklik pahasına gerçekleştiğini göstermektedir. Rijitlik değerlerinin yüksek olması bu yorumu desteklemektedir. DSC sonuçları orta kristallik derecesini işaret etmekte; PA6-10'da gözlenen homojen karışım, fibril ve köprü oluşumları sünek davranışı desteklese de parlak yüzey alanlarının varlığı lokal gevrekliği ortaya koymaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, PA6-07 ve PA6-08 yüksek dayanım ile sınırlı süneklik sunarak kısmen gevrek karakterli, PA6-09 ve PA6-10 ise en yüksek dayanımı sağlamalarına karşın düşük süneklikleriyle dayanımı yüksek fakat gevrek eğilimli numuneler olarak öne çıkmaktadır. Bu numuneler arasında PA6-10, homojen karışım ve yüksek dayanım değerleriyle en tok yapıya en yakın örnek olarak değerlendirilebilir, ancak süneklik bakımından sınırlı kalmıştır.

5.1.3. 1560 dev/dk ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması

PA6-11 ve PA6-12 numuneleri, 1560 dev/dk dönme hızı ve kısa bekleme süresi (15 s) ile üretilmiş olup orta düzey dayanım göstermiştir. Kopma uzamasının her iki numunede eşit seviyede kalması, sünekliğin sınırlı olduğunu ve kırılma davranışında gevrek eğilimin baskın hale geldiğini ortaya koymaktadır. Özellikle PA6-11 numunesinde yüksek elastik modül (ve yüksek T_g zincir hareketliliğinin kısıtlandığını ve rijit bir yapının oluştuğunu göstermektedir. PA6-12’de ise en yüksek kristallik derecesinin gözlenmiş olması, gevrek davranış eğilimini pekiştirmiştir. SEM incelemelerinde her iki numunede de parlak alanlar, keskin kırık yüzeyleri ve sınırlı fibril oluşumları gözlenmiş; bu bulgular mekanik ve termal verilerle uyumlu olarak gevrek yapıyı doğrulamıştır. PA6-13 ve PA6-14 numuneleri ise uzun bekleme süreleri (60 s) ile birleştirilmiş olup dayanım ve süneklik açısından birbirinden farklı davranışlar sergilemiştir. PA6-13 numunesinde orta-yüksek mukavemeti gösterirken, $\epsilon_y = \%5,8$ ile kısmi süneklik sergilemiştir. Ancak yüksek elastik modül ve artan kristallik malzemenin rijitliğini artırarak gevrek eğilimi baskın kılmıştır. SEM incelemelerinde kesintili akış izleri, parlak alanlar ve nehir desenleri gevrek kırılmanın öne çıktığını, ancak dar shear-lip bölgeleriyle sınırlı sünek mekanizmaların da devrede olduğunu göstermiştir. Buna karşılık PA6-14 numunesi, en düşük kristallik derecesi ve en yüksek kopma uzaması ile tüm numuneler arasında en sünek ve tok davranışı sergilemiştir. Mekanik açıdan yüksek dayanımı ortaya koyarken, düşük rijitlik ve düşük kristallik amorf fazın katkısını güçlendirmiştir. SEM’de yoğun fibrillenme, belirgin akış çizgileri ve köprü oluşumları bu bulguları desteklemiş ve PA6-14’ün en dengeli numune olduğunu ortaya koymuştur. Genel olarak değerlendirildiğinde, PA6-11 ve PA6-12 rijit ve gevrek, PA6-13 dayanımı yüksek fakat gevrek eğilimli, PA6-14 ise hem yüksek dayanım hem de en yüksek süneklik ile tok ve dengeli bir yapı sergilemiştir. Bu nedenle PA6-14, serinin optimum parametrelerini temsil eden en başarılı numune olarak öne çıkmaktadır.

5.1.4. M10 pim ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması

M10 pimli numuneler (PA6-01, PA6-05, PA6-07, PA6-09, PA6-11 ve PA6-13) karşılaştırıldığında, 762 dev/dk’da kısa bekleme süresiyle üretilen PA6-01 düşük dayanım ve orta süneklik gösterirken, dwell süresinin 60 s’e çıkarıldığı PA6-05 hem dayanımını artırmış hem de sünekliğini koruyarak (%6,8) rijitliği düşürmüştür ve en dengeli-tok yapı ortaya çıkmıştır. 1146 dev/dk’da kısa bekleme süresi ile PA6-07 yüksek dayanım sağlamış ancak süneklik sınırlı kalmıştır. Uzun bekleme süresi ile PA6-09 en yüksek dayanımı elde etmiş fakat süneklik baskılanmış ve rijitlik artmıştır, bu da onu dayanım odaklı fakat gevrek eğilimli yapıya

taşımıştır. 1560 dev/dk'da kısa bekleme süresi ile PA6-11 orta dayanım ve düşük süneklik sergileyerek rijit ve gevrek bir karakter gösterirken, uzun bekleme süresi ile PA6-13 numunesi, çekme dayanımında artış ve süneklik göstergelerinde sınırlı bir iyileşme sergilemekle birlikte, yüksek elastik modülü (rijitliği) nedeniyle kırılma davranışı açısından hâlen gevrek eğilimlidir. Genel olarak düşük devirde uzun bekleme süresi (PA6-05) tokluk açısından optimum, orta devirde uzun bekleme süresi (PA6-09) dayanım açısından optimum, yüksek devirde uzun bekleme süresi (PA6-13) ise rijitlik açısından optimum seçeneği temsil etmektedir.

5.1.5. M12 pim ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması

M12 pimli numuneler (PA6-02, PA6-03, PA6-04, PA6-06, PA6-08, PA6-10, PA6-12 ve PA6-14) karşılaştırıldığında, 762 dev/dk'da kısa bekleme süresi ile üretilen PA6-02 düşük dayanım ve sınırlı süneklik sergilerken, bekleme süresinin 30-60 s'ye çıkarıldığı PA6-03 ve PA6-04 numunelerinde dayanımı yükselmiş ancak sünekliği kademeli olarak azalmıştır. Uzun bekleme ve büyük pim çapı ile birleştirilen PA6-06 numunesinin ise hem dayanımı artırmış hem de sünekliği koruyarak en dengeli yapıyı göstermiştir. 1146 dev/dk'da kısa bekleme süresi ile PA6-08 yüksek dayanım sergilemiş ancak sünekliği düşük kalmıştır, uzun bekleme süresi ile PA6-10 en yüksek dayanımı vermiş fakat süneklik belirgin biçimde azalmış ve gevrek eğilim artmıştır. 1560 dev/dk'da kısa bekleme süresi ile PA6-12 yüksek kristallik nedeniyle rijit ve gevrek bir yapı göstermiş, uzun bekleme süresi ile PA6-14 ise dayanımı korurken çok yüksek süneklik ve düşük kristallik ile en tok ve dengeli karaktere ulaşmıştır. Genel olarak M12 pimli numuneler içinde PA6-06 sünek ve dengeli, PA6-10 dayanımı en yüksek, PA6-14 ise tokluk açısından optimum numune olarak öne çıkmaktadır.

5.1.6. 15 s bekleme süresi ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması

15 s bekleme süresiyle birleştirilen PA6-01, PA6-02, PA6-07, PA6-08, PA6-11 ve PA6-12 numuneleri karşılaştırıldığında, düşük devirli (762 dev/dk) PA6-01 ve PA6-02 düşük dayanım ve sınırlı süneklik sergileyerek en zayıf mekanik performansı göstermiştir. Orta devir hızında (1146 dev/dk) birleştirilen PA6-07 ve PA6-08 numunelerinde, dayanım değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiş, ancak süneklik düzeyinde azalma meydana gelmiştir. Dolayısıyla, elde edilen dayanım artışının süneklikten ödün verilerek sağlandığı görülmüştür. Yüksek devirde (1560 dev/dk) birleştirilen PA6-11 ve PA6-12 ise orta dayanım seviyelerinde kalmış fakat çok yüksek elastik modül ve düşük süneklik ile rijit ve gevrek bir karakter sergilemiştir. Genel olarak, 15 s bekleme süresinde devir yükseldikçe dayanım artarken süneklik sürekli azalmış, rijitlik belirgin şekilde yükselmiş; bu nedenle kısa bekleme süresi koşullarında elde edilen tüm

numuneler arasında en dengeli sayılabilecek numuneler düşük devirli PA6-01 ve PA6-02 olmuş, ancak genel mekanik performans açısından 15 s bekleme süresi optimum bir sonuç vermemiştir.

5.1.7. 30 s bekleme süresi ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması

30 s bekleme süresiyle birleştirilen tek numune PA6-03 olduğu için gerçek bir karşılaştırma yapılamamaktadır. 15 s ile birleştirilen numunelere göre hem dayanım hem de süneklikte belirgin artış görülmektedir. Bekleme süresinin 15 s'den 30 s'ye artırılmasıyla bağın güçlendiğini ve sünekliğin iyileştiği söylenebilir. Daha sağlıklı bir 30 s karşılaştırması için aynı süreyle farklı devir 1146 dev/dk ve 1560 dev/dk ayrıca farklı pim M10 gibi verilerin olması gereklidir.

5.1.8. 45 s bekleme süresi ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması

45 s bekleme süresiyle birleştirilen tek numune PA6-04 olduğu için gerçek bir karşılaştırma yapılamamaktadır. 15 ve 30 s ile birleştirilen numunelere göre hem dayanım hem de süneklikte belirgin artış görülmektedir. Bekleme süresinin 30 s'den 45 s'ye artırılmasıyla bağın güçlendiğini ve sünekliğin iyileştiği söylenebilir. Daha sağlıklı bir 45 s karşılaştırması için aynı süreyle farklı devir 1146 dev/dk ve 1560 dev/dk ayrıca farklı pim M10 gibi verilerin olması gereklidir.

5.1.9. 60 s bekleme süresi ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması

60 s bekleme süresiyle birleştirilen numuneler karşılaştırıldığında, düşük devir (762 dev/dk) grubunda PA6-05 (M10) ve PA6-06 (M12) hem dayanımı hem de sünekliği birlikte koruyarak düşük–orta rijitlikle tok ve dengeli bir davranış göstermiştir; orta devir (1146 dev/dk) grubunda PA6-09 (M10) ve PA6-10 (M12) en yüksek dayanımlara ulaşmış ancak kopma uzamasının gerilemesi ve rijitliğin artması nedeniyle gevrek eğilim belirginleşmiştir; yüksek devir (1560 dev/dk) grubunda PA6-13 (M10) orta-yüksek dayanımı ve nispeten artmış uzamayı çok yüksek rijitlik ile birleştirerek rijit ama kısmen sünek bir karakter sergilerken, PA6-14 (M12) düşük kristallik ve yüksek zincir hareketliliğinin etkisiyle hem iyi dayanımı hem de serideki en yüksek sünekliği sunarak en tok ve dengeli numune olmuştur. Bu bağlamda 60 s bekleme süresi altında dayanım odaklı optimum PA6-10, tokluk/süneklik odaklı optimum PA6-14, genel denge için ise düşük devirli PA6-05/PA6-06 tercih edilebilmektedir.

5.2. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada bekleme süresinin uzatılması ve pim/omuz çapının büyütülmesiyle numunelerde daha yüksek ısı girişi, daha etkin karıştırma/akış ve sonuçta daha güçlü kaynak bölgeleri elde edildiği görülmüştür. Polimerlerde SKK/SKNK üzerine yapılan çalışmalarda, ısı girdinin artmasıyla kaynak boyutunun ve mekanik yük taşıma kapasitesinin yükseldiğini; omuz/pim çapının ve bekleme süresinin ısı üretimini arttırdığı vurgulanmaktadır [95]. Bu bulgu, çalışılan numunelerde uzun bekleme ve büyük pim çapı koşulunun dayanımı yükseltmesiyle uyumludur. Ayrıca, kısa bekleme sürelerinde ısı iletimi ve karıştırma için ayrılan zaman kısıtlı kaldığında, kaynakta düzensiz, kesintili akış izleri ve boşluklar görülebilir; bu da homojen karışımın yetersizliğine ve daha düşük dayanım/uzamaya yol açmaktadır. Bu durum, kısa bekleme süreleri koşullarında gözlenen morfolojik ve mekanik zayıflıkla örtüşmektedir [84].

SEM’de belirgin akış çizgileri (streamlines) ve bunlara paralel tabakalı kristallenme; kaynakta karıştırma-kesme etkisinin güçlü olduğuna ve malzeme akışının etkinleştiğine işaret eder. Kiss ve Czigány [84], FSW ile birleştirilen polipropilende SEM’de akış çizgilerine karşılık gelen kristal tabakalar ve kaynak kesitinde homojen sferülit dağılımı rapor etmiştir; bu, bu çalışmada uzun bekleme/büyük pim koşullarında gözlediğimiz homojen morfolojiyle uyumludur.

Kopma yüzeyinde fibril/köprü yapılarının varlığı, plastik uzama eşliğinde sünek mekanizmaların devreye girdiğini gösterir; buna karşılık düz, parlak (“mirror”) bölgeler lokal gevrek bileşeni işaret eder. Parrington [78], plastik fraktografisi, “mirror zone”u “origin”i çevreleyen düz ve özelliiksiz bölge, yavaş çatlak büyümesi evresiyle ilişkili” olarak tanımlar; aynı kaynakta sünek kırılmanın fibrillerle karakterize edildiği vurgulanır. Bu ikili fibril ve mirror durumu, çalışmamızda kısmen sünek fakat yer yer gevrek eğilimli yorumunu desteklemektedir.

Numuneler arasında dayanımın artmasına eşlik eden süneklik toparlanması, fakat bazı durumda yüksek rijitlik nedeniyle gevrek eğilim gözlemlenmesi, yarı-kristal polimerlerde beklenen bir davranıştır. Literatür, kristallik arttıkça rijitlik, çekme dayanımının yükseldiğini, fakat süneklik ve darbe dayanımının azaldığını net biçimde bildirir; PA6 literatürü, kristallik derecesindeki artışın kopma tokluğunu ve darbe dayanımını azalttığını göstermektedir. Bu nedenle “orta kristallik” bandında bile, işleme geçmişine bağlı olarak kısmi süneklik yanında gevrek eğilim kalabilir [73]. Ayrıca, elastik modülü malzemenin rijitliğinin ölçüsüdür; dolayısıyla elastik modülün yükselmesi, numunede artan rijitliğe işaret eder. Bu temel ilişki, yüksek rijitlik ve gevrek eğilim sonucunun dayanağıdır.

Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ile zincir hareketliliği arasında ters yönlü bir ilişki vardır. Hızlı rotasyon ve segmental hareketlilik kısıtlandıka T_g yükselir. T_g ’nin üstünde polimer daha sünek ve yumuşak; altında ise camsı, sert ve gevrek eğilimlidir. PA6 için hidrasyon ve plastikleşme örneklerinde T_g ’nin düşmesiyle hareketlilik artar, akma gerilmesi düşer ve kopma uzaması artar; tersinden bakıldığında yüksek ve orta T_g , hareketliliğin sınırlanması ve gevrek eğilimin güçlenmesi anlamına gelmektedir (sıcaklık T_g ’nin altında ise) [76]. Bu açıklayıcı çerçeve, T_g yorumumuzun deneysel olarak saptanan kopma modlarıyla uyumlu olduğunu göstermektedir.

Birçok SKNK alışması, ısı girişin optimum bir aralığında (yeterli bekleme süresi ve uygun pim ve omuz geometrisiyle) dayanım, eğilme ve darbe gibi tokluk göstergelerinin birlikte yükseldiği dengeli bir mekanik tablo bildirir. Isıl giriş aşırı arttığında ise malzeme taşması ve aşırı yeniden kristallenme gibi nedenlerle performans düşebilir [95]. Bu, uzun bekleme ve büyük pim çapıyla hazırlanan numunenin hem dayanımı arttırıp hem de sünekliği koruyarak en dengeli davranışı göstermesiyle örtüşmektedir.

Sonuç olarak, işlem parametrelerinin (bekleme süresi, pim ve omuz çapı) ayarıyla kaynakta ısı, karışım ve morfolojinin kontrol edildiği; bunun da kristallik, rijitlik, süneklik dengesini belirlediği görülmüştür. Uzun bekleme ve büyük pim çapı kombinasyonu, akış çizgileri ve katmanlaşma ile homojenlik sağlarken, fibril ve köprü yapıları sünek katkıyı; mirror ve düz alanlar ise yer yer gevrek bileşeni işaret etmiştir [73, 84]. Mekanik verilerdeki dayanım artışı ve süneklik, toparlanma bu morfolojiyle uyumlu olup, literatürde bildirilen eğilimlerle yakın bir paralellik göstermektedir.

5.3. Genel Değerlendirme

Parametreler mekanik, termal, morfolojik üçlemesi birlikte değerlendirildiğinde; M10-762 dev/dk-60 s (PA6-05) ve M12-762 dev/dk-60 s (PA6-06) denge ve tokluk için, M12-1146 dev/dk-60 s (PA6-10) maksimum dayanım için, M12-1560 dev/dk-60 s (PA6-14) ise maksimum süneklik ve tokluk için öne çıkan numunelerdir; buna karşılık kısa bekleme süresi (15 s) ve/veya yüksek kristallik ve yüksek T_g kombinasyonları sünekliği sınırlayıp gevrek davranışı artırmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Lu, Y., Feng, J., Yi, D., Xie, H., Xu, Z., Cao, C. F., ... & Song, P. (2024). Strong synergistic effects between P/N-containing supramolecular microplates and aluminum diethylphosphinate for fire-retardant PA6. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 176, 107834.
- [2] Marais, S., Lozay, Q., Follain, N., Soulestin, J., Couvrat, N., & Dargent, E. (2024). Multinanolayered PA6/Cloisite and PE/PA6/Cloisite composites: Structure, mechanical and barrier properties. *Composites Part B: Engineering*, 271, 111167.
- [3] Karagöz, İ., & Öksüz, M. (2018). Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak bölgesinde meydana gelen mikroyapılar. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(2), 503-516. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416359>
- [4] Karagöz, İ. (2022). Welding of polymeric materials in aircrafts. *Aerospace Polymeric Materials*, 29-59.
- [5] Karagöz, İ., & Öksüz, M. (2016). Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kullanılan yöntemler. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(ÖS1), 19-28.
- [6] Gonçalves, J., Dos Santos, J. F., Canto, L. B., & Amancio-Filho, S. T. (2015). Friction spot welding of carbon fiber-reinforced polyamide 66 laminate. *Materials Letters*, 159, 506-509.
- [7] Gonçalves, J., dos Santos, J. F., Canto, L. B., & Filho, S. T. A. (2016). Improvement of friction spot welding (FSpW) to join polyamide 6 and polyamide 66/carbon fibre laminate. *Welding International*, 30(4), 247-254.
- [8] Lambiase, F., Derazkola, H. A., & Simchi, A. (2020). Friction stir welding and friction spot stir welding processes of polymers—state of the art. *Materials*, 13(10), 2291.
- [9] Pereira, M. A. R., Galvão, I., Costa, J. D., Leal, R. M., & Amaro, A. M. (2024). Friction stir spot welding of thin aluminium sheets to polyamide 6: a study of the welding parameters and strategies. *Journal of Composites Science*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/jcs8010021>
- [10] Kumar, R., Singh, R., Ahuja, I. P. S., & Fortunato, A. (2020). Thermo-mechanical investigations for the joining of thermoplastic composite structures via friction stir spot welding. *Composite Structures*, 253, 112772.
- [11] Yan, Y., Shen, Y., Zhang, W., & Guan, W. (2017). Effects of friction stir spot welding parameters on morphology and mechanical property of modified cast nylon 6 joints produced by double-pin tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 2511-2523. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0306-1>
- [12] Kumar, S., Medhi, T., Roy, B.S. (2019). Friction stir welding of thermoplastic composites. *Advances in Industrial and Production Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6412-9_21
- [13] Xie, Y. Huang, Y., Meng, X., Li, J., Cao, J. (2020). Friction stir spot welding of aluminum and wood with polymer intermediate layers. *Construction and Building Materials*, 240, 117952. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117952>
- [14] Yan, Y., Shen, Y., Huang, G., Hou, W., & Ni, R. (2021). Friction stir spot welding of dissimilar ABS and PA6 by a tool with newly designed tooth-shaped flat pin. *Journal of Manufacturing Processes*, 66, 521-531.
- [15] Guo, Y., Zhao, H., Ai, C., Zhao, J., Su, H., Chen, J., & Zhao, G. (2024). Parameter optimization of friction stir spot welded Al 6061 and CFRTP PA6 with surface treatment and interfacial adhesion. *Thin-Walled Structures*, 197, 111585.

- [16] Al-Sabur, R., Khalaf, H. I., Świerczyńska, A., Rogalski, G., & Derazkola, H. A. (2022). Effects of noncontact shoulder tool velocities on friction stir joining of polyamide 6 (PA6). *Materials*, 15(12), 4214.
- [17] Vidakis, N., Mountakis, N., Moutsopoulou, A. *et al.* (2023). The impact of process parameters and pin-to-shoulder diameter ratio on the welding performance of polycarbonate in FSW. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128, 4593–4613. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12192-5>
- [18] Meyer, S. P., Jaeger, B., Wunderling, C., & Zaeh, M. F. (2019). Friction stir welding of glass fiber-reinforced polyamide 6: Analysis of the tensile strength and fiber length distribution of friction stir welded PA6-GF30. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 480(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/480/1/012013>.
- [19] Lambiase, F., Paoletti, A., & Di Ilio, A. (2017). Effect of tool geometry on mechanical behavior of friction stir spot welds of polycarbonate sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 3005-3016.
- [20] Lambiase, F., Paoletti, A., & Di Ilio, A. (2017). Friction spot stir welding of polymers: control of plunging force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90, 2827-2837.
- [21] Lambiase, F., Paoletti, A., & Di Ilio, A. (2015). Mechanical behaviour of friction stir spot welds of polycarbonate sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80, 301-314.
- [22] Paoletti, A., Lambiase, F., & Di Ilio, A. (2016). Analysis of forces and temperatures in friction spot stir welding of thermoplastic polymers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 1395-1407.
- [23] Paoletti, A., Lambiase, F., & Di Ilio, A. (2015). Optimization of friction stir welding of thermoplastics. *Procedia Cirp*, 33, 562-567.
- [24] Kurtulmus, M. (2012). Friction stir spot welding parameters for polypropylene sheets. *Scientific Research and Essays*, 7(8), 947-956.
- [25] Yuan, R., Zhang, L., Zhang, J., Wang, X., Yu, J., & Li, F. (2024). Facile characterization of isothermal crystallization and microphase separation kinetics of polyamide 6 (PA6) - based thermoplastic elastomers. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 225(15), 2400058.
- [26] Yuan, R., Fan, S., Wu, D., Wang, X., Yu, J., Chen, L., & Li, F. (2018). Facile synthesis of polyamide 6 (PA6)-based thermoplastic elastomers with a well-defined microphase separation structure by melt polymerization. *Polymer Chemistry*, 9(11), 1327-1336.
- [27] Millot, C., Fillot, L. A., Lame, O., Sotta, P., & Seguela, R. (2015). Assessment of polyamide-6 crystallinity by DSC: Temperature dependence of the melting enthalpy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 122, 307-314.
- [28] Liang, J., Xu, Y., Wei, Z., Song, P., Chen, G., & Zhang, W. (2014). Mechanical properties, crystallization and melting behaviors of carbon fiber-reinforced PA6 composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 115, 209-218.
- [29] Kim, Y. S., Kim, J. K., & Jeon, E. S. (2019). Effect of the compounding conditions of polyamide 6, carbon fiber, and Al₂O₃ on the mechanical and thermal properties of the composite polymer. *Materials*, 12(18), 3047.
- [30] Bakırcı, H., Karagöz, İ., & Kaya, M. A. (2022). Investigation and optimization of resistance implant welding of polypropylene sheets. *Welding Journal*, 101.
- [31] Arif, M., Kumar, D., & Siddiquee, A. N. (2023). Mechanical properties and defects in friction stir welded acrylonitrile butadiene styrene polymer. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 237(9), 1897-1909.

- [32] Nasserli, R., Moresoli, C., Yu, A., Yuan, Z., & Xu, C. C. (2021). Structural dependence of the molecular mobility in acetylated starch. *Polymer*, 215, 123371.
- [33] Sidhom, A. A. E., Naga, S. A. R., & Kamal, A. M. (2022). Friction stir spot welding of similar and dissimilar high density polyethylene and polypropylene sheets. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100076>
- [34] Mert, Ş., Üçüncü, A., & Mert, S. (2020). Friction stir spot welding of polyamide 6 material. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*.
- [35] Bilici, M. K., Yukler, A. I., Kurtulmus, M., & Kastan, A. (2018). The optimization of welding tool material and welding parameters in friction stir spot welding of plastics using taguchi experimental design. *International Journal Of Engineering Science And Application* (Vol. 2, Issue 2).
- [36] Davison Cox, C. (2014). Friction stir spot welding process: *Engineering Analysis and Design*.
- [37] Nagarajan, B. M., & Manoharan, M. (2024). Enhancement of joint strength of dissimilar aluminum/polymer hybrid joints by friction stir spot welding by surface textures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 38(8), 1284–1311. <https://doi.org/10.1080/01694243.2023.2256557>
- [38] Mishra, A., Potnis, M. S., Sapre, M. S., & Jatti, V. S. (2023). Fracture analysis of friction stir spot welded acrylonitrile butadiene styrene sheet in butt configuration. *Materials Research Express*, 10(5). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acd1d6>
- [39] Arif, M., Kumar, D., & Noor Siddiquee, A. (2022). Friction stir welding and friction stir spot welding of polymethyl methacrylate (PMMA) to other materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 62, 220–225. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.621>
- [40] Schäfer, H., Blaga, L. A., Stöver, E., & Klusemann, B. (2023). Refill friction stir spot welding of thermoplastic composites: Case study on Carbon-fiber-reinforced polyphenylene sulfide. *Thin-Walled Structures*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.>
- [41] Abdallah, L., Chikh El Bahri, O., Kaddour, H., & Hadj Miloud, M. (2023). Evolution of temperature and microhardness in polymer plates welded by friction stir spot welding (FSSW) using a welding tool without pin (Vol. 23, Issue 2).
- [42] Kalaf, O., Nasir, T., Asmael, M., Safaei, B., Zeeshan, Q., Motallebzadeh, A., Hussain, G., & Gruyter, D. (2021). Friction stir spot welding of AA5052 with additional carbon fiber-reinforced polymer composite interlayer. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0017/html>
- [43] Adibeig, M. R., Vakili-Tahami, F., & Saeimi-Sadigh, M. A. (2020). Parametric study of the load carrying capacity of polyethylene FSSW single strap joints. *Polymer*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122434>
- [44] Kumar, R., Singh, R., Ahuja, I. P. S., & Hashmi, M. S. J. (2022). Friction-stir-spot welding of 3D printed ABS and PA6 composites: flexural, thermal and morphological investigations. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(1), 909–916. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1835014>
- [45] Yan, Y., Shen, Y., Zhang, W., & Guan, W. (2017). Effects of friction stir spot welding parameters on morphology and mechanical property of modified cast nylon 6 joints produced by double-pin tool. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5–8), 2511–2523. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0306-1>
- [46] Sepetçioğlu, H., & Aydemir, B. (2021). Plastik malzemelerin çekme testinde hızın sonuçlar üzerinde etkisinin araştırılması. 6th *International Mediterranean Science and Engineering Congress* (IMSEC 2021).
- [47] Arumugam, A., Basak, A. K., Pramanik, A., & Littlefair, G. (2025). Tool geometries and design of friction stir spot welding (FSSW) tools and effect on weld properties—a comprehensive review. In *materials* (Vol. 18, Issue 14). *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ma18143248>

- [48] Gerlich, A., Su, P., Yamamoto, M., & North, T. H. (2007). Effect of welding parameters on the strain rate and microstructure of friction stir spot welded 2024 aluminum alloy. *Journal of Materials Science*, 42(14), 5589–5601. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-1103-7>
- [49] Bagheri, B., Mahdian Rizi, A. A., Abbasi, M., & Givi, M. (2019). Friction stir spot vibration welding: improving the microstructure and mechanical properties of Al5083 joint. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 8(5), 713–725. <https://doi.org/10.1007/s13632-019-00563-y>
- [50] Wu, S., Sun, T., Shen, Y., Yan, Y., Ni, R., & Liu, W. (2021). Conventional and swing friction stir spot welding of aluminum alloy to magnesium alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116(7–8), 2401–2412. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06548-4>
- [51] Venukumar, S., Baby, B., Muthukumaran, S., & Kailas, S. v. (2014). Microstructural and mechanical properties of walking friction stir spot welded AA 6061-T6 sheets. *Procedia Materials Science*, 6, 656–665. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.081>
- [52] Park, H. (2022). Pinless friction stir spot welding of Ti-6Al-4V alloy for aerospace pinless friction stir spot welding of Ti-6Al-4V alloy for aerospace application application. https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss
- [53] Ibrahim, I. J., & Yapici, G. G. (2019). Optimization of the intermediate layer friction stir spot welding process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(1–4), 993–1004. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03952-3>
- [54] Khader, H. B. (2022). Effect of intermediate layer friction stir spot welding parameters on microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar aluminum alloys.
- [55] Farmanbar, N., Mousavizade, S. M., & Ezatpour, H. R. (2019). Protrusion friction stir spot welding: A simple novel method to produce dissimilar joints of galvanized steel/aluminum sheets with high mechanical performance. *Materials Research Express*, 6(2). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaf1ff>
- [56] Sun, Y., Fujii, H., Zhu, S., & Guan, S. (2019). Flat friction stir spot welding of three 6061-T6 aluminum sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 264, 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.09.031>
- [57] Pişkin, E. (1987). Polimer Teknolojisi Giriş. *İnkılap Kitapevi*.
- [58] Bilici, M. K. (2012). Application of Taguchi approach to optimize friction stir spot welding parameters of polypropylene. *Materials and Design*, 35, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.033>
- [59] Athreya, S., & Venkatesh, Y. D. (2012). Application of taguchi method for optimization of process parameters in improving the surface roughness of lathe facing operation. In *International Refereed Journal of Engineering and Science* (Vol. 1, Issue 3). www.irjes.com
- [60] Gürbüz, H., & Baday, Ş. (2023). Investigating the relationship between chuck and tailstock pressure in turning by using full factorial design. *European Journal of Technic*. <https://doi.org/10.36222/ejt.1359803>
- [61] Saçak, M. (2017). Polimer Teknolojisi. *Gazi Kitapevi*.
- [62] Charles, E. and C. Jr. (2003). *Polymer Chemistry*.
- [63] Charlet, K., Mathot, V., & Devaux, J. (2011). Crystallization and dissolution behaviour of polyamide 6-water systems under pressure. *Polymer International*, 60(1), 119–125. <https://doi.org/10.1002/pi.2920>
- [64] Sridhara, P. K., & Vilaseca, F. (2021). High performance PA 6/cellulose nanocomposites in the interest of industrial scale melt processing. *Polymers*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/polym13091495>

- [65] Fu, X., Yao, C., & Yang, G. (2015). Recent advances in graphene/polyamide 6 composites: A review. In RSC Advances (Vol. 5, Issue 76, pp. 61688–61702). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c5ra09312k>
- [66] Najem, J. F. (2009). Study of take-up velocity in enhancing tensile properties of aligned electrospun Nylon 6 Fibers.
- [67] Cavallo, D., Gardella, L., Alfonso, G. C., Portale, G., Balzano, L., & Androsch, R. (2011). Effect of cooling rate on the crystal/mesophase polymorphism of polyamide 6. *Colloid and Polymer Science*, 289(9), 1073–1079. <https://doi.org/10.1007/s00396-011-2428-6>
- [68] Jiang, M., Tan, H., Jiang, L., Duan, J., Gu, X., Feng, L., & Zhang, C. (2024). Anionic ring-opening polymerization of ϵ -caprolactam above the crystallization temperature of Polyamide 6: A study on the effects of the activator and catalyst. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 63(45), 19476–19485.
- [69] Salehi, M. M., & Moini, O. (2015). Particle science and technology synthesis of polyamide 6 by anionic polymerization of ϵ -caprolactam in an internal mixer: Effect of polymerization reaction time. *Journal of Particle Science and Technology*, 91–98. <https://doi.org/10.22104/jpst.2015.114>
- [70] Dennis, K. (1969). Anionic polymerization and termination process.
- [71] Vidakis, N., Mountakis, N., Moutsopoulou, A., David, C., Nasikas, N. K., & Petousis, M. (2023). The impact of process parameters and pin-to-shoulder diameter ratio on the welding performance of polycarbonate in FSW. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(9–10), 4593–4613. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12192-5>
- [72] Bozkurt, Y. (2008). Sürtünme karıştırma kaynak tekniği ile birleştirilen AA2124/SiCP/25 kompozit levhaların mekanik özellikleri ve mikroyapı karakterizasyonu, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi.
- [73] Odrobina, M., Deák, T., Székely, L., Mankovits, T., Keresztes, R. Z., & Kalácska, G. (2020). The effect of crystallinity on the toughness of cast polyamide 6 rods with different diameters. *Polymers*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/polym12020293>
- [74] Jogi, B. F., Sawant, M., Brahmanekar, P. K., Ratna, D., & Tarhekar, M. C. (2014). Study of mechanical and crystalline behavior of Polyamide 6/Hytrel/Carbon Nanotubes (CNT) based polymer composites. *Procedia Materials Science*, 6, 805–811. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.097>
- [75] Kiss, Z., & Czigány, T. (2007). Applicability of friction stir welding in polymeric materials. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 51(1), 15–18. <https://doi.org/10.3311/pp.me.2007-1.02>
- [76] Parodi, E., Peters, G. W. M., & Govaert, L. E. (2018). Structure-properties relations for Polyamide 6, Part 1: Influence of the thermal history during compression moulding on deformation and failure kinetics. *Polymers*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/polym10070710>
- [77] Schrauwen, B. A. G. (2003). Deformation and failure of semi-crystalline polymer systems : influence of micro and molecular structure. Mechanical Engineering, Technische Universiteit Eindhoven <https://doi.org/10.6100/IR563142>
- [78] Parrington, R. J. (2002). Fractography of metals and plastics. IMR Test Labs. *Practical Failure Analysis*, Cilt 2, Sayı 5.
- [79] Clark, E. J. (1985). Molecular and microstructural factors affecting mechanical properties of polymeric cover plate materials cating and cooling division.
- [80] Hiltz, J. (1991). The application of fractography and other examination methods to the failure analysis of polymeric components. <https://www.researchgate.net/publication/277889990>
- [81] Kita, H., Higuchi, M., & Miura, A. (2001). Chapter 4 Morphology and fractography fractography of ABS.

- [82] Sidhom, A., Naga, S., & Kamal, A. (2022). An approach to weld dissimilar polycarbonate and high-density polyethylene by friction stir spot welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(3–4), 1457–1466. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09995-3>
- [83] Goushegir, S. M., dos Santos, J. F., & Amancio-Filho, S. T. (2016). Failure and fracture micro-mechanisms in metal-composite single lap joints produced by welding-based joining techniques. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 81, 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.11.001>
- [84] Kiss, Z., & Czigány, T. (2012). Microscopic analysis of the morphology of seams in friction stir welded polypropylene. *Express Polymer Letters*, 6(1), 54–62. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2012.6>
- [85] Mohammed, R. K., Mohammed, S. S., & Mahmoud, T. S. (2020). Study of peak temperatures in friction stir spot welding of AA2024-Al/polycarbonate and AA2024-Al/polypropylene systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 973(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/973/1/012018>
- [86] Hocker, S. J. A., Kim, W. T., Schniepp, H. C., & Kranbuehl, D. E. (2018). Polymer crystallinity and the ductile to brittle transition. *Polymer*, 158, 72–76. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.10.031>
- [87] Wang, W., Fenni, S. E., Ma, Z., Righetti, M. C., Cangialosi, D., Laura, M., Lorenzo, D., & Cavallo, D. (2021). Glass transition and aging of the rigid amorphous fraction in polymorphic poly(butene-1).
- [88] Brostow, W., Lobland, H. E. H., & Narkis, M. (2011). The concept of materials brittleness and its applications. In *Polymer Bulletin* (Vol. 67, Issue 8, pp. 1697–1707). <https://doi.org/10.1007/s00289-011-0573-1>
- [89] Sharma, R., & Singh, O. P. (2007). Effect of FSW process parameters on mechanical properties of polypropylene: an experimental study. In *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* (An ISO (Vol. 3297). www.ijirset.com
- [90] Beauson, J., Schillani, G., van der Schueren, L., & Goutianos, S. (2022). The effect of processing conditions and polymer crystallinity on the mechanical properties of unidirectional self-reinforced PLA composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106668>
- [91] Nandan, R., DebRoy, T., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2008). Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties. In *Progress in Materials Science* (Vol. 53, Issue 6, pp. 980–1023). <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.05.001>
- [92] Chivers, R. A., & Moore, D. R. (1994). The effect of molecular weight and crystallinity on the mechanical properties of injection moulded poly(aryl-ether-ether-ketone) resin.
- [93] Raharjo, Y., Wafiroh, S., Nayla, M., Yuliana, V., & Fahmi, Z. (2017). Primary study of cellulose acetate hollow fiber as a green membrane applied to hemodialysis. In *Journal of Chemical Technology and Metallurgy* (Vol. 52).
- [94] Khan, S. A., & Sohail, M. (2025). Characteristics of friction stir welding of 3 mm thick ABS and PC thermoplastic polymers: An experimental approach. *PLOS One*, 20 (5MAY). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322456>
- [95] Benyerou, D., Chikh, E. B. O., Khellafi, H., Meddah, H. M., Benhamena, A., Hachelaf, K., & Lounis, A. (2021). Parametric study of friction stir spot welding (FSSW) for polymer materials case of high density polyethylene sheets: Experimental and numerical study. *Frattura Ed Integrita Strutturale*, 15(55), 145–158. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.55.11>

ÖZGEÇMİŞ

ilk ve orta öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 2005 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi - Tasarım ve Konstrüksiyon Öğretmenliğinden, 2010 yılında Karabük Üniversitesi - Makine Eğitimi Bölümünde Yüksek Lisans, 2016 yılında Karabük Üniversitesi - İmalat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2014 yılından beri İstanbul Topkapı Üniversitesinde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Danış Bekdemir, A., & Karagöz, İ. (2025). Optimizing Friction Stir Spot Welding Parameters for Enhanced Mechanical, Thermal, and Microstructural Properties of PA6. *Polymers*, 17(18), 2508. <https://doi.org/10.3390/polym17182508>