



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TERMOPLASTİKLERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK ÖZELLİKLERİ

İDRİS KARAGÖZ

DOKTORA TEZİ

Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Metal Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Mustafa ÖKSÜZ

İSTANBUL, 2014



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TERMOPLASTİKLERİN SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA KAYNAK ÖZELLİKLERİ

İDRİS KARAGÖZ
(141202220070029)

DOKTORA TEZİ
Metal Eğitimi Anabilim Dalı
Metal Programı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Mustafa ÖKSÜZ

İSTANBUL, 2014

TEŞEKKÜR

Öncelikle öğrenim hayatım boyunca, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme, minnet ve şükranlarımı sunarım.

Sayın Prof. Dr. İrfan YÜKLER hocama, tez çalışmasına yaptığı büyük katkılardan ve gösterdiği yakın ilgi ve özveriden dolayı şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmasının her aşamasında ve sonuca ulaştırılmasında söz ve fikir sahibi olan, sıkıntılı anlarımda; sıkıntılarımı paylaşma ve çözüm üretme inceliğini gösteren ve her türlü desteğini benden esirgemeyen tez danışmanım sayın Prof. Dr. Mustafa ÖKSÜZ' e teşekkürü bir borç bilirim.

FEN-C-DRP-280110-0010 ve FEN-E-040310-00 projeleri kapsamında maddi destek veren üniversitemizin BAPKO birimine, verdikleri maddi ve manevi destek nedeniyle, GSB OILLESS yöneticilerinden sayın Gianluca BERTONI ve Şengül BERTONI' ye minnetlerimi sunarım.

Çalışmalarımda bana yardımcı olan ÖZDEM TORNA' dan Gani ERDEM ve Oktay ERDEM'e, üniversitemiz yüksek lisans öğrencisi UMUT YERLEŞEN' e ve kardeşim İsa KARAGÖZ' e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmamı, kalbimin en büyük sahibi olan oğlum Emir Kayra KARAGÖZ' e ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	iii
ÖZET	ix
ABSTRACT	xi
YENİLİK BEYANI	xiii
SEMBOLLER	xv
KISALTMALAR	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
TABLO LİSTESİ	xxviii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. POLİMERLER	3
2.1. Polimerlerin Genel Özellikleri	3
2.1.1. Polimerlerin mekanik özellikleri	4
2.1.2. Polimerlerin ısı ve elektrik iletkenliği	6
2.1.3. Polimerlerin kimyasallara ve korozyona karşı direnci	7
2.1.4. Polimerlerin alevlenme (yanma) özellikleri	8
2.1.5. Polimerlerin işleme özellikleri	8
2.1.6. Polimerlerin görünüş ve yoğunlukları	10
2.1.7. Polimerlere katılan katkı ve dolgu maddeleri ve kazandırdığı özellikler	10
2.1.8. Polimerlerin termal davranışları	12
2.2. Polimerlerin Sınıflandırılması	14
2.2.1. Isı karşısında gösterdikleri dirence göre polimerlerin sınıflandırılması	15
2.2.2. Fiziksel ve mekanik özelliklerine göre polimerlerin sınıflandırılması	16
2.2.3. Kaynağına göre polimerlerin sınıflandırılması	19
2.2.4. Monomerlerin bileşimine göre polimerlerin sınıflandırılması	20
2.2.5. Zincir yapısına göre polimerlerin sınıflandırılması	21

2.2.6. Zincir yapısının geometrik şekline göre polimerlerin sınıflandırılması	23
2.2.7. Zincir konfigürasyonuna göre polimerlerin sınıflandırılması	27
2.2.8. Kullanım alanlarına göre polimerlerin sınıflandırılması	29
2.3. Yaygın Kullanılan Polimer Şekillendirme Yöntemleri	30
2.3.1. Enjeksiyon kalıp yöntemi	31
2.3.2. Ekstrüzyon kalıplama yöntemi	32
3. POLİMERLERE UYGULANAN BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	35
3.1. Mekanik Bağlama Yöntemleri	35
3.2. Yapıştırıcı Kullanılarak Yapılan Bağlama Yöntemleri	36
3.3. Termoplastiklere Uygulanan Başlıca Kaynak Yöntemleri	37
3.3.1. Sıcak gaz kaynağı	39
3.3.2. Sıcak kama kaynak yöntemi	40
3.3.3. Sıcak eleman kaynak yöntemi	40
3.3.4. Ekstrüzyon kaynağı	41
3.3.5. Infrared ısıtma kaynağı	42
3.3.6. Lazer kaynağı	43
3.3.7. Sürtünme kaynağı	44
3.3.8. Titreşim kaynağı	45
3.3.9. Sürtünme karıştırma kaynağı	47
3.3.10. Ultrasonik kaynak yöntemi	47
3.3.11. Rezistans kaynağı	48
3.3.12. İndüksiyon kaynağı	49
3.3.13. Dielektrik kaynağı	50
3.3.14. Mikrodalga kaynağı	51
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI VE UYGULAMALARI	53
4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Tarihsel Gelişimi	53
4.2. Kaynağın Uygulanması	54
4.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Oluşan Mikroyapılar	57
4.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Modellenmesi	59
4.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Parametreleri	62

4.5.1. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan kaynak takımları	62
4.5.2. Sürtünme karıştırma kaynağında takımın dönme ve ilerleme hızı	65
4.5.3. Sürtünme karıştırma kaynağında takımın batma derinliği	67
4.5.4. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak malzemesinin önemi	68
4.5.5. Sürtünme karıştırma kaynağında bağlantı tasarımı	69
4.6. Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Avantajları	70
4.7. Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Dezavantajları	70
4.8. Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Kullanım Alanları	71
4.8.1. Havacılık ve uzay sanayi	71
4.8.2. Gemi inşa sanayi	72
4.8.3. Otomotiv sanayi	72
4.8.4. Petrol ve gaz sanayi	73
4.8.5. Nükleer ve rafineri sanayi	73
4.8.6. Demiryolu sanayi	73
5. TERMOPLASTİKLERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI	75
5.1. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağı	76
5.2. Dikey Hareketli Sürtünme Karıştırma Kaynağı	83
5.3. Titreşim-Sürtünme Yöntemi İle Sürtünme Karıştırma Kaynağı	84
5.4. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı	86
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	89
6.1. Polimer Malzemeler	89
6.2. Bağlama Kalıbının Tasarımı	92
6.3. Kaynak Takımının Tasarımı	95
6.4. Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi	101
6.5. Termoplastik Malzemelerin SKK İle Birleştirilmesi	107
6.6. Fiziksel, Mekanik ve Isıl Deneylerin Yapılması	113
6.6.1. Çekme deneyi	113
6.6.2. Eğme deneyi	114
6.6.3. Sertlik deneyi	115
6.6.4. Hızlandırılmış ısı yaşlanma deneyi	116
6.6.5. Vicat yumuşama sıcaklığı deneyi	116

6.6.6. Isıl deformasyon (HDT) deneyi	117
6.6.7. Izod darbe deneyi	118
6.6.8. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) deneyi	119
6.6.9. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri	120
7. DENEYSEL SONUÇLAR	
7.1. PE ve PP Levhaların Çekme Deneyi Sonuçları	121
7.2. PE ve PP Levhaların Eğme Deneyi Sonuçları	129
7.3. PE ve PP Levhaların Sertlik Deneyi Sonuçları	136
7.4. Hızlandırılmış Isıl Yaşlandırma Deneyi Sonuçları	141
7.5. VICAT Yumuşama Sıcaklığı Deneyi Sonuçları	148
7.6. Isıl Deformasyon Deneyi (HDT) Sonuçları	150
7.7. Kaynak Parametrelerinin Etkisi	152
7.7.1. Takım Devir Hızının Etkisi	153
7.7.2. Kaynak Takımının Etkisi	153
7.7.3. Dalma ve Bekleme Süresinin Etkisi	155
7.7.4. Takım İlerleme Yönünün Etkisi	156
7.7.5. Takım Dönme Yönünün Etkisi	157
7.8. Birleştirme Esnasında Yapılan Isı Ölçümleri	157
7.9. Izod Darbe Deneyi Sonuçları	172
7.10. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Deneyi Sonuçları	174
7.11. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri	183
8. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	199
8.1. Genel Sonuçlar	199
8.1.1. Kaynak Takımı Dönme Devrinin Etkisi	200
8.1.2. Kaynak Takımı İlerleme Hızının Ve Dönme Yönünün Etkisi	200
8.1.3. Kaynak Takımı Dalma Ve Bekleme Süresinin Etkisi	201
8.1.4. Kaynak Takım Omzunun Etkisi	201
8.1.5. Kaynak Takım Geometrisinin Etkisi	202
8.1.6. Termoplastik Malzeme Ve Sıcaklığın Etkisi	203
8.1.7. Isıl Deney Sonuçları	203
8.2. Öneriler	204
KAYNAKLAR	205

EKLER
ÖZGEÇMİŞ

215

ÖZET

TERMOPLASTİKLERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynak özellikleri incelenmiştir. Çalışmalar yüksek devirlerde ve CNC dik işleme tezgâhında, 6 mm kalınlığında PE ve PP türü termoplastik malzemeler ve çok farklı kaynak parametreleri kullanılarak başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. İfade edilen kaynak parametreleri, kaynak takımı ilerleme hızı, takım dönme devri, kaynak takım geometrisi, kaynak takımı omuz ve pim çapları, kaynak takım omzunun dalma boyu, kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süreleri ve kaynakla birleştirilecek malzemelerin türüdür.

Termoplastik malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinden sonra kaynaklı malzemelere fiziksel, mekanik ve ısıl standart deneyler uygulanmıştır. Kaynak parametrelerine göre değişmekle birlikte; çekme deneyleri sonucunda % 96 – 68, eğme deneyi sonucunda % 131 – 55,7 oranında kaynak performansı elde edilmiştir. Ayrıca birleştirme işlemi sonrasında kaynak bölgesi üst yüzeyinde diğer bölgelere göre sertliğin arttığı gözlemlenmiştir.

Mikroyapı incelemelerinde dört farklı bölgenin varlığı belirlenmiştir. Bu bölgeler: (1) Isıdan etkilenmeyen bölge (ana malzeme), (2) Birleşme ara yüzeyi, (3) Termomekanik olarak etkilenen karışım bölgesi, (4) Birleştirilmeyen kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı altında kalan bölge.

ABSTRACT

PROPERTIES OF FRICTION STIR WELDED THERMOPLASTICS

In this study; friction stir welding of thermoplastics were investigated. Studies have been used conducted on 6 mm thick PE and PP type thermoplastics materials by employing different weld parameters in a CNC vertical machine. The weld parameters are as follows: welding tool forward speed, the tool rotational speed, welding tool geometry, welding tool shoulder and pin diameters, welding tool plunge shoulder depth, diving and waiting time at the beginning of the welding, type of the thermopastics materials.

After the joning, the samples were investigated by physical, mechanical and thermal methods. Depending on the welding parameters, tensile strength varied between % 68 and % 96 and bending strength varied between %55,7 and % 131, compared to reference sample. After the joining hardness in surface of welding was higher than that of unwelded areas.

Four microstructural zones were found to exist in the FSW joints. These were: 1) basic materials, 2) Joining interface, 3) thermo-mechanically affected zone (TMAZ) 4) bottom disturbance.

March, 2014

İdris KARAGÖZ

YENİLİK BEYANI

TERMOPLASTİKLERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK ÖZELLİKLERİ

Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynak tekniği (SKK) ile birleştirilmesi oldukça yenidir ve konu hakkında literatürde çok fazla çalışma yer almamaktadır. Ayrıca metallerin aksine plastiklerin SKK ile birleştirilmesi; plastiklerin termal ve viskoelastik özelliklerine bağlı olarak sınırlı olması nedeniyle henüz endüstriyel uygulamada çok fazla yer bulamamıştır. Bu çalışmanın orijinal özellikleri, literatürde fazla yer almayan ancak başarılı bir SKK için gerekli olan parametre değerlerinin, takım özelliklerinin, malzeme türüne göre kaynak sıcaklık aralığının belirlenmesi üzerine daha önce hiç denenmemiş bir yöntem olan CNC dik işleme merkezinde yüksek hızlarda SKK ile termoplastiklerin birleştirilmesi üzerine uluslararası alanda ve Türkiye’de termoplastiklerin tamamını kapsayan yüksek lisans ve doktora düzeyinde ilk çalışma olmasıdır. Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesi sırasında ortaya çıkan sorunlar aşağıdaki şekilde çözülmüştür:

- 1- Düşük devirlerde yeterli kaynak ısı elde edilemediği için, kaynak için gerekli olan ısıyı elde etmek amacıyla yüksek devirlerde kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.
- 2- Kaynak takımının SKK üzerindeki etkisi, takım geometrisi, pim ve omuz çapı, dalma derinliği gibi faktörler baz alınarak incelenmiş bunun sonucunda başarılı bir birleştirme işlemi için ideal takım ölçüleri arasındaki bağıntı oluşturulmuştur.
- 3- Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesi esnasında sıcaklık ölçümleri yapılmış ve kaynaklı malzemeye yapılan testlerin sonucu sıcaklık ölçümleri ile karşılaştırılmış ve malzemeler için ideal kaynak sıcaklık aralıkları belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmanın sonucunda SKK’nın endüstriyel olarak uygulanmasında ortaya çıkan sorunlara alternatif çözüm yöntemleri getirilmiş ve konuyla ilgili çalışanlar için bilinmeyen noktaların daha anlaşılır hale getirilmesi sağlanmıştır.

Mart, 2014

Prof.Dr. Mustafa ÖKSÜZ

İdris KARAGÖZ

SEMBOLLER

d	: Kaynak takımı omuz çapı (mm)
F	: Çekme kuvveti (N)
G	: Sürünme modülü (MPa)
IR	: Kızılötesi radyasyon
L	: Toplam boy (mm)
Lu	: Bindirme uzunluğu (mm)
m	: Kaynak takımı karıştırıcı uç çapı (mm)
Ohm	: Elektrik direnci
R	: Kaynak takımı omuz yarıçapı (mm)
T	: Sıcaklık (°C)
t	: Kaynak edilecek malzeme kalınlığı (mm)
Td	: Degredasyon sıcaklığı (°C)
Tg	: Camsı geçiş sıcaklığı (°C)
Tm	: Kristal erime noktası (°C)
λ	: Kristal lamel kalınlığı (nm)
α	: Kaynak koşuluna bağlı bir faktör
ΔH_m	: Erime entalpisi (J/g)
ΔH^o_m	: Kristal haldeki erime entalpisi (J/g)
ΔL	: Uzama miktarı (mm)
ε	: Yüzde uzama miktarı
σ_c	: Çekme mukavemeti (MPa)
δ_e	: Serbest yüzey enerjisi (mJ/m ²)
σ_v	: Akma mukavemeti (MPa)
w	: Takımın dönme yönü
X_c	: Kristallenme oranı (%)
SD	: Ölçülen sertlik değeri (Shore D)

KISALTMALAR

A.N	: Ara Nokta
ABS	: Akrlonitril-butadien-stiren termopolimeri
BS	: Bütadien-stiren kauçuğu
COI	: Kritik Oksijen İndeksi
CTP	: Cam Takviyeli Plastikler
EP	: Epoksi, epoksit
EKP	: Eğme Kaynak Performansı
EVA	: Etilen-vinilasetat kopolimeri
HDPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
IR	: Kızıl Ötesi Radyasyon
KP	: Kaynak Performansı
K.N	: Kenar Nokta
MF	: Melamin formaldehit reğinesi
MIG	: Metal Inert Gaz
PAN	: Poliakrlonitril
PC	: Polikarbonat
PE	: Polietilen
PET	: Polietilenteraftalat
PETP	: Polietilenteraftalat polyester
PMMA	: Polimetil metakrilat
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PTFE	: Politetrafloroetilen
PVC	: Polivinilklorür
SBR	: Stiren-butadien kauçuğu
SKK	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SKNK	: Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı
TALAT	: Alüminyum Uygulama Teknolojileri Eğitim Bildirileri
TEB	: Termomekanik Olarak Etkilenen Bölge
TIG	: Tungsten Inert Gaz

TWI : İngiliz Kaynak Enstitüsü

UV : Ultraviyole

ŞEKİL LİSTESİ

	SAYFA
Şekil 2.1. Lineer Polimerin Deformasyonu a) Isıl Deformasyon İşlemleri, b) Gerilme-Uzama Bağlantıları	4
Şekil 2.2. Çekme Mukavemeti Üzerine Cam Elyafın Etkisi	5
Şekil 2.3. Karbon Siyahı Katkılı Polimerin İç Yapı Görüntüleri, a) Karbon Siyahı Partikülleri, b) Karbon Siyahı Katkıların Elektrik İletkenliği	7
Şekil 2.4. Polimerik Malzemelerde Dolgu Ve Tipi Yönlenme İle Sertlik Arasındaki Bağlantı	9
Şekil 2.5. Kristallenebilen Polimerlerde Hacim-Sıcaklık Eğrileri	13
Şekil 2.6. Plastiklerin Molekül Yapısı a) Doğrusal Molekül Yapısı, b) Dallanmış molekül yapısı, c) Termoset polimerlerin sahip olduğu çapraz bağ yapısı	15
Şekil 2.7. Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri, a) Sentetik Fiber, b) Rijit ve Kırılğan Plastikler, c) Sert Plastikler, d)Elastomerler	17
Şekil 2.8. Gerilme Kuvveti Karşısında Elastomer, Fiber Ve Amorf Plastiklerde Oluşan Deformasyon, a)Çapraz Bağlı İdeal Elastomer, b)Fiber, c)Amorf Plastikler	18
Şekil 2.9. Elastomerler, Termoplastikler, Termosetler Ve Fiber Örneklerinin Gerilme - Gevşeme Eğrileri	19
Şekil 2.10. Homopolimerlerin Zincir Yapısı	20
Şekil 2.11. Kopolimerler, a) Gelişigüzel Kopolimerler, b) Seçenekli Kopolimerler, c) Blok Kopolimerler, d) Aşı Kopolimerler	21
Şekil 2.12. Zincir Yapısına Göre Polimerlerin Sınıflandırılması, a) Doğrusal Polimerler, b) Dallanmış Polimerler, c) Çapraz Bağlı Polimerler	22
Şekil 2.13. Amorf Polimerlerin Yapısında Isıtma Ve Soğutma Sonrası Meydana Gelen Değişiklikler, a) Amorf Polimerin Başlangıçtaki Yapısı, b) Isıtma Sonrası Yapıda Meydana Gelen Gevşeme, c) Soğutma Sonrası Yapıda Meydana gelen Büzülme	23
Şekil 2.14. Amorf Bir Termoplastiğin Gerilme Mukavemeti Ve Kırılma Uzaması	24
Şekil 2.15. Kristalin Polimerlerin Gösterilişi, a) Kristalin Polimerin “Fringedmicelle” gösterilişi, b) Polietilen Kristallerinin “Katlanmış-Zincir Lamel” Yapısı	25
Şekil 2.16. Yarı Kristalin ve Amorf Haldeki Polistirenin Sürünme Modülü Eğrileri	26

Şekil 2.17. Yarı Kristalin Bir Termoplastiğin Gerilme Mukavemeti Ve Kırılma Uzama Davranışı	26
Şekil 2.18. Kısmi Kristalin Polimerlerde “Saçaklı Misel” yapısı	27
Şekil 2.19. Zincir Konfigürasyonuna Göre Polimerlerin Dizilişi	28
Şekil 2.20. Plastik Enjeksiyon Sisteminin Basit Bir Gösterimi	31
Şekil 2.21. Ekstrüzyon Siteminin Şematik Gösterimi	33
Şekil 3.1. Polimer Bağlantılarının Sınıflandırılması	35
Şekil 3.2. Polimer Metalik Bağlantılarına Ait Örnekler a) Cıvatalı Bağlantı, b) Vidalı (Saplama Başlı) Bağlantı, c) Perçinli Bağlantı	36
Şekil 3.3. Polimerlerin Yapıştırma Bağlantılarına Ait Örnekler	37
Şekil 3.4. Sıcak Gaz Yönteminin Şematik Gösterimi	39
Şekil 3.5. Sıcak Kama Yönteminin Şematik Gösterimi	40
Şekil 3.6. Sıcak Eleman Kaynak Yönteminin Şematik Gösterimi a) Kaynak Bölgesinin Isıtılması, b) Isıtıcının Kaynak Bölgesinden Uzaklaştırılması, c) Isıtılmış Yüzeylerin Birbirine Bastırılması Ve Soğuyana Kadar Kuvvet Uygulanması	41
Şekil 3.7. Sıcak Eleman Kaynak Yönteminin Şematik Gösterimi Ve Zamana Bağlı Eksen Kaymasının Açıklanması	41
Şekil 3.8. Ekstrüzyon Kaynak Yönteminin Şematik Gösterimi	42
Şekil 3.9. Infrared Isıtma Kaynak Yönteminin Şematik Gösterimi a) Alın (Küt) Birleştirme Kaynağı, b) Alın Küt Kaynağı, c) Bindirme Kaynağı	43
Şekil 3.10. Lazer Kaynak Uygulamalarının Şematik Gösterimi	44
Şekil 3.11. Sürtünme Kaynak Yönteminin Şematik Gösterimi	45
Şekil 3.12. Titreşim Kaynak Yöntemi a) Titreşim Kaynak Yönteminin Şematik Gösterimi, b) Titreşim Kaynağının Dört Aşamasını Gösteren Eksenel Kayma-Zaman Grafiği	46
Şekil 3.13. Pnömatik Ultrasonik Kaynak Makinasının Şematik Gösterimi	48
Şekil 3.14. Rezistans Kaynağının Şematik Gösterimi	49
Şekil 3.15. İndüksiyon Kaynağı a) İndüksiyon Kaynağının Şematik Gösterimi, b) Kaynakta Kullanılan Bobin Örnekleri	50
Şekil 3.16. Dielektrik Kaynağı Uygulamasının Şematik Gösterimi	51
Şekil 3.17. Mikrodalga Kaynağı Uygulamasının Şematik Gösterimi	52

Şekil 4.1.	Sürtünme Karıştırma Kaynak Uygulamalarının Şematik Gösterimi a) İnce Parçalar İçin Tek Paso Uygulamasıyla Kaynak, b) Kalın Parçalar İçin İki Paso Uygulamasıyla Kaynak	54
Şekil 4.2.	SKK Tekniği Çalışma Prensibinin Şematik Gösterimi	55
Şekil 4.3.	SKK Kaynak Aşamalarının Şematik Gösterimi a) Parçaların Sabitlenmesi, b) Takımın Parçalara Dalması Ve Kaynak Hattı Boyunca İlerlemesi, c) Takımın Yukarı Çekilmesi Ve Kaynağın Sonlandırılması	56
Şekil 4.4.	SKK Kaynak Bölgesi Mikroyapısının Şematik Gösterimi	57
Şekil 4.5.	A356 Alüminyum Alaşımında Kaynak Parametrelerinin Kaynak Bölgesinin Şekli Üzerindeki Etkisi	59
Şekil 4.6.	a) SKK Metal Akış Modeli, b) SKK Esnasında Metalürjik Değişime Uğrayan Bölgeler	59
Şekil 4.7.	SKK Kaynak Esnasında Takım Çevresinde Meydana Gelen Akış	60
Şekil 4.8.	1S Alüminyum Alaşımında a) Kaynak Takımının Dönme Yönünde Ve Takımın Dönme Yönünün Tersinde, b) Takım İlerleme Yönünde Meydana Gelen Sıcaklık Değerlerinin 3D Olarak Modellenmesi	61
Şekil 4.9.	SKK Vida Uçlu Takımın, a) İş Parçası İçerisindeki, b) Takım Geometrisinin Şematik Gösterimi	63
Şekil 4.10.	SKK Kaynak Takımı Karıştırıcı Uç Kısmı Geometrilerine Ait Örnekler	63
Şekil 4.11.	SKK Kaynak Takımı Omuz Kısmı Geometrilerine Ait Örnekler	64
Şekil 4.12.	TWI Tarafından Geliştirilmiş Flared-Triflute™ Takımların Görünümleri, a) Düz (Nötr) Kanallı, b) Sol Kanallı, c) Sağ Kanallı, d) Vida Dişlerinin Düz, Sağ Ve Sol Yönlü Olması	65
Şekil 4.13.	AA2095 Alaşımı İçin 3,2, 4,2, ve 5,1 mm/sn İlerleme Hızlarında Ve 1000 Devir/dk. Dönme Hızında Kaynak Bölgesinde Oluşan Mikro Yapılar	66
Şekil 4.14.	AA2095 Alaşımı İçin 500, 750 ve 1000 Devir/dk. Dönme Hızlarında Ve 2,1 mm/sn. İlerleme Hızında Kaynak Bölgesinde Oluşan Mikro Yapılar	66
Şekil 4.15.	AA2095 Alaşımı İçin Farklı Dönme Ve İlerleme Hızında Malzeme Mikro Yapısında Meydana Gelen Değişiklikler	67
Şekil 4.16.	SKK' ında Takım Omuz, Karıştırıcı Uç Batma Derinliği Ve Kaynağın Uygulanmasının Şematik Gösterimi	68

Şekil 4.17. SKK Kaynak Yöntemi İle Kaynak Edilebilecek Birleştirme Türleri, a) Küt Alın, b) Köşe, c) T-Birleştirme, d) Bindirme, e) Çoklu Bindirme f) T-Bindirme, g) İç Köşe Birleştirmesi	69
Şekil 4.18. SKK Kaynak Takımının Çıkış Noktasında Pimin Yukarı Çekilmesiyle Oluşan Anahtar Deliği	71
Şekil 5.1. Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemleri	75
Şekil 5.2. Termoplastiklerin SKK İle Birleştirilmesinin Ve Oluşan Mikroyapıların Şematik Gösterimi	76
Şekil 5.3. PP Malzemeye Ait Kaynak Parametreleri Ve Çekme Mukavemeti Değerleri, a) 15° lik Takım Açısı, b) 45° lik Takım Açısı	78
Şekil 5.4. Kaynak Parametrelerinin SKK'ına Katkı Oranı	80
Şekil 5.5. Nelson Tarafından Geliştirilen SKK Kaynak Takımı	82
Şekil 5.6. Dikey Hareketli SKK Uygulamasının Şematik Gösterimi	83
Şekil 5.7. Titreşim-Sürtünme Yöntemi İle Plastiklere SKK Uygulamasının Şematik Gösterimi	85
Şekil 5.8. SKNK Uygulaması Kaynak İşlem Adımlarının Şematik Gösterimi	87
Şekil 6.1. Tek (a) ve Birleştirilmiş (b) Plakaların Şematik Gösterimi	91
Şekil 6.2. Kalıpta Kullanılan Hızlı Bağlantı Elemanının Şematik Gösterimi	92
Şekil 6.3. Bağlama Kalıbı Kaynak Takımı Kalıp Giriş Noktası Tasarımı Şematik Gösterimi	93
Şekil 6.4. Bağlama Kalıbı Kaynak Takımı Kalıp Çıkış Noktası Tasarımı Şematik Gösterimi	94
Şekil 6.5. SKK'ında Kullanılan Bağlama Kalıbının Genel Görünümü	94
Şekil 6.6. SKK'ında Kullanılan Kaynak Takımının Karıştırıcı Uç Kısmının Kaynağa Etkisi	95
Şekil 6.7. SKK'ında Kullanılan Kaynak Takım Omzunun Kaynağa Etkisi	97
Şekil 6.8. TWI Tarafından Metal ve Alaşımlarının SKK İçin Geliştirilen TheMultistage™ kaynak Takımı	98
Şekil 6.9. Plastiklerin SKK İçin Tasarlanan TheMultistage™ Benzeri Kaynak Takımları	99

Şekil 6.10. Termoplastiklerin SKK’ında Kullanılmak İçin tasarlanan Kaynak Takımları, a) Metrik Uçlu Takımlar, b) Silindirik Uçlu Takımlar, c) Kare Uçlu Takımlar, d) Tek parçalı Takım Omzu Olmayan Takımlar	100
Şekil 6.11. Takım Dönme Hızları 370/500 Devir/dk. Geleneksel Alüminyum Stili Kaynak Takımı İle Gerçekleştirilen SKK Uygulamalarına Ait Kaynak Görünümleri	103
Şekil 6.12. Termoplastiklerin SKK İle Birleştirilmesinde Kullanılan Konik Uçlu Takımlar	104
Şekil 6.13. Konik Uçlu Takımlarla Gerçekleştirilen SKK Uygulamalarına Ait Kaynak Görünümleri	105
Şekil 6.14. SKK Uygulamalarının Gerçekleştirildiği AWEA BM-850 Tezgahın Genel Görünümü ve Teknik Özellikleri	107
Şekil 6.15. Bağlama Kalıbı ve Kaynak Takımının CNC Dik İşleme Merkezine Bağlanması	108
Şekil 6.16. SKK Parametreleri (Takım Dönme Devri 500 Devir/dk., İlerleme 20 mm/dk., Dalma 5.74 mm) İçin programlanan Ekran Görüntüsü	109
Şekil 6.17. Sürtünme Karıştırma Kaynağı İşlem Adımları	110
Şekil 6.18. PE Termoplastik Levhalarda Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulamalarına Ait Örnekler	111
Şekil 6.19. Termoplastik Malzemelerin Birleştirilmesinde Kullanılan Takımlar	112
Şekil 6.20. SKK İle Birleştirme Sonrası ASTM D412 Tip A (UL-62-A)’ ya Göre Alınan Test Numuneleri	113
Şekil 6.21. a) SKK İle Birleştirme Sonrası Su Jeti İle Test Numunesinin Alınması, b) Alınan Numunelerin Çekme Test Cihazında Sabit Bir Hızda Kopuncaya Kadar Çekilmesi	114
Şekil 6.22. Kaynaklı Bağlantılardan Alınan Numunelere Eğme Deneyinin Uygulanması	115
Şekil 6.23. Sertlik Ölçüm Noktaları	115
Şekil 6.24. Sertlik Ölçümlerinin yapıldığı Durometre	116
Şekil 6.25. Isıl Deformasyon Deneyinin (HDT) Şematik Gösterimi	117
Şekil 6.26. Termoplastik Malzemeler İçin Izod Darbe Deney Numuneleri	118
Şekil 6.27. Izod Darbe Deney Cihazının Çalışma Prensibi	119

Şekil 7.1.	PE'nin Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Çekme Mukavemetine Etkisi	122
Şekil 7.2.	PE Numunelerin Çekme Deneyi Sonrası Kopma Görüntüleri	126
Şekil 7.3.	PP Numunelerin Çekme Deneyi Sonrası Kopma Görüntüleri	128
Şekil 7.4.	PP'nin Birleştirilmesinde Takım Omzu Dalma Derinliği Ve Kaynak Mukavemeti Arasındaki İlişki	128
Şekil 7.5.	PE Numunelerine Ait Eğme Mukavemet Değerinin Grafikselsel Gösterimi	130
Şekil 7.6.	Kaynak Parametrelerinin PE Numuneler Üzerindeki Etkisi	132
Şekil 7.7.	Takım Dönme Hızının Ve Karıştırıcı Uç Geometrisinin PE Numunelerin Eğme Mukavemeti Üzerindeki Etkisi	134
Şekil 7.8.	Takım Omzu Dalma Derinliğinin PP Numunelerin Eğme Mukavemeti Üzerindeki Etkisi	135
Şekil 7.9.	PE Ve PP Termoplastik Numunelerin Eğme Ve Çekme Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	136
Şekil 7.10.	Sertlik Ölçüm Noktaları	137
Şekil 7.11.	Birleştirme Bölgesi Yüzey Sertiği Ve Çekme Mukavemeti Arasındaki İlişki	141
Şekil 7.12.	PE Referans Numunelerin 50 °C Sabit Sıcaklıkta Zamana Bağlı Olarak Değişen Çekme Mukavemet Değerleri	142
Şekil 7.13.	Hızlandırılmış Isıl Yaşlandırma Deneyi Uygulanmış SKK Numunelerinin Zamana Bağlı Olarak Kaynak Performansında Meydana Gelen Değişimler	144
Şekil 7.14.	PE Hızlandırılmış Isıl Yaşlandırma Deneyine Ait DSC eğrileri	145
Şekil 7.15.	Hızlandırılmış Isıl Yaşlandırma Deneyi Uygulanmış SKK Numunelerinin Zamana Bağlı Olarak Çekme Mukavemetinde Takım Dönme Devrinin Etkisi	146
Şekil 7.16.	Hızlandırılmış Isıl Yaşlandırma Deneyi Uygulanmış SKK Numunelerinin Zamana Bağlı Olarak Çekme Mukavemetinde Dalma Ve Bekleme Süresinin Etkisi	147
Şekil 7.17.	Isıl Yaşlandırma Deneyi Uygulanmış 1 Kodlu Deneye Ait Çekme Numuneleri	148
Şekil 7.18.	PE Numuneler İçin Sabit Yük Altında Sıcaklığa Bağlı Olarak Oluşan Eğme Grafiği	151
Şekil 7.19.	Kaynak Parametrelerinin Etkisi	152

Şekil 7.20. Takım Devir Hızının Etkisi	153
Şekil 7.21. Spindle Ve Malzeme Arasındaki Uzun Takım Boyunun SKK Görüntüsü Üzerindeki Etkisi	155
Şekil 7.22. Takım Dönme Yönünün Etkisi	157
Şekil 7.23. Dalma Ve Bekleme Süresine Bağlı Olarak Birleşme Bölgesi Üst Yüzeyde Oluşan Isı Değerleri	159
Şekil 7.24. Dalma Ve Bekleme Süresine Bağlı Olarak Oluşan Isı Değerlerinin Grafikselsel Gösterimi	160
Şekil 7.25. Takım İlerleme Hızına Bağlı Olarak PE Levha Birleşme Bölgesi Üst Yüzeyde Oluşan Isı Değerleri	161
Şekil 7.26. SKK’ında Kaynak Takımı İlerleme Hızına Bağlı Olarak PE Levha Birleşme Bölgesi Üst Yüzeyde Oluşan Isı Değerlerinin Grafikselsel Gösterimi	162
Şekil 7.27. Karıştırıcı Uç Çapına Bağlı Olarak PE Levha Birleşme Bölgesi Üst Yüzeyde Oluşan Isı Değerleri	163
Şekil 7.28. Karıştırıcı Uç Çapına Bağlı Olarak PE Levha Birleşme Bölgesi Üst Yüzeyde Oluşan Isı Değerlerinin Grafikselsel Gösterimi	164
Şekil 7.29. Karıştırıcı Uç Geometrisine Bağlı Olarak PE Levha Birleşme Bölgesi Üst Yüzeyde Oluşan Isı Değerleri	165
Şekil 7.30. Karıştırıcı Uç Geometrisine Bağlı Olarak PE Levha Birleşme Bölgesi Üst Yüzeyde Oluşan Isı Değerlerinin Grafikselsel Gösterimi	165
Şekil 7.31. Kaynak Takımı Omuz Dalma Derinliğine Bağlı Olarak PP Levha Birleşme Bölgesi Üst Yüzeyde Oluşan Isı Değerleri	167
Şekil 7.32. Kaynak Takımı Omuz Dalma Derinliğine Bağlı Olarak PP Levha Birleşme Bölgesi Üst Yüzeyde Oluşan Isı Değerlerinin Grafikselsel Gösterimi	168
Şekil 7.33. Kaynak Takımı Omuz Dalma Derinliğine Bağlı kaynak Takımında Oluşan Isı Değerlerinin Grafikselsel Gösterimi	169
Şekil 7.34. Kaynak Takımı Dönme Devrine Bağlı Olarak PE Levha Birleşme Bölgesi Üst Yüzeyde Oluşan Isı Değerleri	170
Şekil 7.35. Kaynak Takımı Dönme Devrine Bağlı Olarak PE Levha Birleşme Bölgesi Üst Yüzeyde Oluşan Isı Değerleri	171
Şekil 7.36. Kaynak Takımı Dönme Devrine Bağlı Olarak Kaynak Takımında Oluşan Isı Değerleri	171

Şekil 7.37. DSC İçin Numune Alınan Bölgeler	174
Şekil 7.38. PE Malzemelerde Kristallenme Oranı Ve Kristal Lamel Kalınlıkları Arasındaki İlişki	178
Şekil 7.39. Polietilen Referans Numuneye Ait DSC Eğrisi	179
Şekil 7.40. Polipropilen Referans Numuneye Ait DSC Eğrisi	180
Şekil 7.41. Polietilen Ve Polipropilen Referans Numune ve Kaynaklı Bağlantı Numunelerine Ait DSC Erime Eğrileri	181
Şekil 7.42. Polipropilen Referans Numuneye Ait Çekme Deney Sonrası Kırılma Yüzeyi SEM Görüntüsü	184
Şekil 7.43. 29/09-01 Kodlu Numuneye Ait Çekme Deney Sonrası Birleşme Bölgesi Kırılma Yüzeyi SEM görüntüsü	185
Şekil 7.44. 29/09-02 Kodlu Numuneye Ait Çekme Deney Sonrası Birleşme Bölgesi Kırılma Yüzeyi SEM görüntüsü	186
Şekil 7.45. 29/09-02 Kodlu Numuneye Ait Çekme Deney Sonrası Birleşme Bölgesi Kırılma Yüzeyinde Oluşan Fibrillerin SEM görüntüsü	187
Şekil 7.46. 2 Deney Kodlu Birleştirme İşleminde SEM İçin Numune Alınması	188
Şekil 7.47. 2 Deney Kodlu Birleştirme İşleminde Alınan Numuneye Ait SEM Görüntüsü	189
Şekil 7.48. 2 Deney Kodlu Birleştirme İşleminde Alınan Numuneye Ait Birleşme Arayüzeyi SEM Görüntüsü	190
Şekil 7.49. Termoplastiklerin SKK Birleştirme Bölgesi Mikroyapısının Şematik Gösterimi	191
Şekil 7.50. Çift taraflı Birleştirme İşlemlerinde Birleştirme Bölgesinin Ortasında Meydana Gelen Boşluk	193
Şekil 7.51. KT-01 Deney Kodlu Birleştirme İşleminde Kaynak Takımı Karıştırıcı Uç Kısmı Altında Kalan Bölgeye Ait SEM Görüntüsü	194
Şekil 7.52. Kare Uçlu Takım Kullanılarak Birleştirilen KT-01 Deney Kodlu Numuneye Ait Kırık Yüzey SEM Görüntüsü	196
Şekil 7.53. Silindirik Uçlu Takım Kullanılarak Birleştirilen ST-01 Deney Kodlu Numuneye Ait Kırık Yüzey SEM Görüntüsü	197

TABLO LİSTESİ

	SAYFA
Tablo 2.1. Dolgu Maddelerinin Plastik Özellikleri Üzerindeki Etkisi	10
Tablo 2.2. Yağlayıcıların Toplam Tüketim İçindeki Yüzdeler Payları	11
Tablo 2.3. Polimerlerin Sınıflandırılması	14
Tablo 2.4. Bazı Termoplastik Ve Termoset Polimerlerin Son Kullanım Sıcaklıkları	30
Tablo 3.1. Termoplastiklerin Kaynağının Sınıflandırılması	38
Tablo 6.1. Yoğunluğa Bağlı Olarak PE'nin Sınıflandırılması	90
Tablo 6.2. Deneilerde Kullanılan Malzemelere Ait Teknik Özellikler	91
Tablo 6.3. Termoplastiklerin SKK'ında Kullanılmak İçin Tasarlanan Kaynak Takımlarına Ait Ölçüsel Değerler	100
Tablo 6.4. Termoplastiklerin SKK İle Birleştirilmesi İçin En İdeal Takım Dönme Hızının Ve Takım Geometrisinin Belirlenmesi Amacıyla Konik Uçlu Takımlar İçin Kullanılan Kaynak parametreleri	104
Tablo 6.5. Termoplastiklerin SKK İçin Belirlenen Ve Deneilerde Kullanılan Kaynak Parametreleri	106
Tablo 6.6. Polipropilen Malzemelerin SKK İçin Belirlenen Ve Deneilerde Kullanılan Kaynak Parametreleri	106
Tablo 7.1. PE Numunelere Ait Çekme Deney Sonuçları	121
Tablo 7.2. PP Numunelere Ait Çekme Deney Sonuçları	121
Tablo 7.3. PE Numunelere Ait Eğme Deney Sonuçları	129
Tablo 7.4. PP Numunelere Ait Eğme Deney Sonuçları	135
Tablo 7.5. PE Malzemeye Ait Sertlik Ölçüm Sonuçları	139
Tablo 7.6. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesinde Kullanılan Bazı Kaynak Parametreleri	140
Tablo 7.7. PE Numunelerin Isıl Yaşlandırma Deneyi Sonuçları	143
Tablo 7.8. PE Numuneler için VICAT Yumuşama Sıcaklık Değerleri	149
Tablo 7.9. PP Numuneler için VICAT Yumuşama Sıcaklık Değerleri	149
Tablo 7.10. PE Numuneler İçin Sabit Yük Altında Sıcaklığa Bağlı Oluşan Eğme Değerleri	151
Tablo 7.11. PE Levhalar İkinci Kez Aynı Doğrultuda SKK İle Birleştirildiğinde Çekme Mukavemetinde Meydana Gelen Değişimler	156

Tablo 7.12. Izod Darbe Deneyi Sonuçları	173
Tablo 7.13. Referans Numune Ve SKK İle Birleştirilmiş Numunelerdeki Kristal Yüzdeleri	177
Tablo 7.14. Referans Numune Ve SKK İle Birleştirilmiş Numunelerdeki Kristal Lamel Kalınlıkları	177
Tablo 7.15. SKK İle Birleştirilmiş Termoplastiklerde Kristallenme Oranı Ve Kristal Lamel Kalınlıklarıyla Çekme Ve Eğme Mukavemeti Arasındaki İlişki	178

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Geleceğin mühendislik malzemeleri olarak kabul edilen plastikler, hafif olmaları ve kolay işlenebilmeleri nedeniyle günlük yaşantımızın önemli bir parçası haline gelmiştir. Günümüzde otomotiv, medikal ve paketleme endüstrisi başta olmak üzere havacılık, savunma sanayi, elektrik, elektronik, tekstil, inşaat, gemi ve raylı taşımacılık gibi çok farklı sektörlerde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [1,2].

Metalik malzemelere göre mekanik özellikleri daha düşük olmasına rağmen, plastik yapıya çeşitli katkı ve dolgu maddelerinin (cam, karbon, talk, elyaf vb.) ilave edilmesiyle mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir.[2]. Korozyon ve kimyasallara karşı yüksek direnç göstermeleri, laboratuvar şartlarında istenilen özelliklerin geliştirilmesindeki sınırsızlık, kompleks şekilli ürünlerin kalıplanabilmesinde kullanılabilirlikleri plastikleri metalik malzemelere göre üstün bir konuma getirmiştir. Ancak parçaların kalıplanması her zaman yeterli olmamaktadır. Levha, profil, boru vb. şekillerde yarı mamul olarak üretilen plastik malzemeler kullanılarak daha kompleks parçaların üretilmesi için ikinci bir işlem (birleştirme) gerektirebilir [3]. Plastiklerin birleştirilmesi özellikle yenilikçi otomotiv, tıp, havacılık ve ambalaj sanayi gibi öncü sektörler için oldukça stratejik bir konudur [1].

Plastiklerin kullanılmaya başlandığı ilk yıllarda plastiklerin az miktarda ve basit biçimlerdeki kullanımları nedeniyle kaynak teknikleri üzerinde pek fazla durulmamıştır. Ancak II. Dünya savaşı sırasında metalik yapıların korozyon nedeniyle ciddi hasarlara uğraması, plastik ve plastik esaslı kompozit malzemelerin endüstriyel alanlarda kullanılan diğer mühendislik malzemelerine alternatif teşkil edebilme koşullarını gündeme getirmiştir [2,3]. Termoplastik malzemelerin ısı ve basınç altındaki davranışları incelenerek bu malzemelerin kaynakla birleştirilebilme esasları belirlenmeye çalışılmıştır. Termoplastik malzemelerin kaynak edilebilirliğinin anlaşılmasından sonra birçok kaynak yöntemi üzerinde ciddi çalışmalara başlanmıştır. Çalışmaların başlangıcından günümüze kadar sıcak eleman, sıcak gaz, ekstrüzyon, lazer, ultrasonik, sürtünme, dielektrik, indüksiyon, mikrodalga, öz dirençli implant, kızılötesi ısıtma, titreşim kaynak yöntemleri gibi çok farklı yöntemler geliştirilmiş ve termoplastiklerin kaynağında başarılı sonuçlar alınmıştır. 1970'li yıllarda sürtünme kaynağından geliştirilen ve 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü (TWI)'nde

W.Thomas'ın çalışmalarıyla patenti alınan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) 1998 yılından itibaren termoplastiklere uygulanması için üzerinde ciddi çalışmalar yapılan ve geliştirilmeye çalışılan metal ve alaşımlarına oranla plastikler için yeni bir kaynak tekniğidir [4-5].

Metallerin aksine termoplastikler için SKK yöntemi üzerinde yapılan çok fazla bilimsel çalışma olmaması nedeniyle henüz endüstriyel olarak kullanımı yaygınlaşmamıştır. SKK sonrası termoplastiklerde oluşan mikroyapı, fiziksel ve mekaniksel özellikler hakkında henüz yeterli bilgi elde edilememiştir. Gerek kaynak parametreleri, gerekse SKK esnasında iş parçası üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı hakkında detaylı bilgilere rastlanmamıştır. Yöntemin endüstriyel olarak yaygınlaşması ve kullanım alanının artması amacıyla termoplastiklerin SKK ile birleştirilebilirliği ve tekrarlanabilir kaynak parametrelerinin tespiti oldukça büyük önem arz etmektedir. Farklı özelliklere sahip ve kullanım alanı farklı binlerce termoplastik malzeme göz önünde bulundurulduğunda yapılan çalışma ile yöntemin gelişmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada polietilen (PE) ve polipropilen (PP) levhaların alın altına ve yatay pozisyonda birleştirilecektir. Farklı kaynak parametreleri (dönme hızı, ilerleme hızı, batma derinliği, ön ısıtma süresi) ve farklı kaynak takımları (farklı takım ve uç geometrileri) ile SKK uygulamaları gerçekleştirilecek ve SKK üzerindeki etkisi incelenecektir. Kaynak bölgesinde oluşan mikroyapı ve mekanik özellikleri ile birleştirme performansı arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılacaktır. Kaynak performansı pim devir ve ilerleme hızı, ısıtma ve soğutma süreleri, takım geometrisi gibi pek çok parametreden etkilenmektedir. Birleştirilen levhaların fiziksel ve mekaniksel özellikleri incelenerek optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesine çalışılacaktır.

2. POLİMERLER

Kelime anlamı olarak çok parçalı manasına gelen polimer, kimyasal olarak birbirine bağlı monomer denilen küçük moleküllerden oluşan bir malzemedir [2,6]. İlk kez 1832 yılında İsveçli kimyager Jöns Jacob Berzelius tarafından aynı ampirik formüle sahip fakat molekül ağırlıkları farklı iki bileşiği tanımlamak amacıyla kullanılmıştır [7]. Berzelius'un sunduğu örnek yanlış olmasına rağmen bu tarihten itibaren polimer kelimesinin kullanımı gittikçe yaygınlaşmıştır.

Isı ve basınç altında kolayca biçimlendirilebilen polimerler, üretimlerinin belirli bir aşamasında plastik kıvam aldıklarından, endüstride plastikler olarak isimlendirilirler [8]. Plastik kelimesi isim olarak bir malzeme türünü belirtmesine karşın, sıfat olarak kalıcı şekil değiştirebilen cisim anlamında kullanılmaktadır [8,9].

Plastiklerin tam olarak nasıl bir malzeme olduğu 1921' de Alman Kimyager Hermann Staudinger'in tüm plastikler, kauçuk ve selüloz gibi malzemelerin; küçük moleküllerin küçük bir yığılmayla değil, kimyasal etkileşimler sonucunda zincir yapısında uzun moleküller (polimer veya makromolekül) oluşturduğunu ileri sürdüğü "Makromolekül Hipotezi" ne kadar bilinmiyordu [2,10]. İlk başlarda pek çok bilim adamı tarafından kabul edilmemesine rağmen, Staudinger bu hipotezi ile plastiklerin üretimini deneme yanılma yaklaşımından kurtarmış ve plastik teknolojisine önemli bir ufuk kazandırmıştır [2]. II. Dünya savaşı ve savaş sonrası yıllarda plastik teknolojisi hızlı bir şekilde gelişmiş ve bu gelişmeler yeni kullanım alanları oluşturarak polimerlerin kullanım oranını arttırmıştır [2,10].

Bu bölümde polimer malzemelerin genel özellikleri, sınıflandırılması, mekanik özellikleri ve kullanım alanlarının yanı sıra tez çalışmasının temel malzemesi olan termoplastiklerin özellikleri, üretimleri ve kullanım alanları hakkında derlenen literatür bilgilerine yer verilecektir.

2.1. Polimerlerin Genel Özellikleri

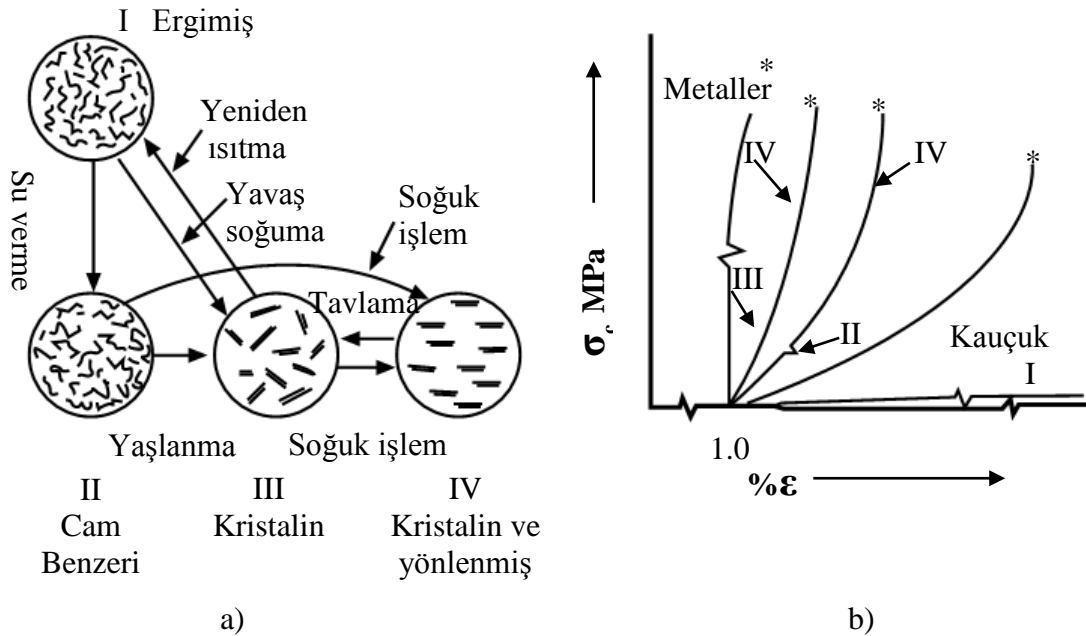
Küçük moleküllü maddeler genellikle gaz veya sıvı haldedir. Polimerler ise büyük moleküllü olduğu için katı ve genellikle serttirler. Polimerlerin genel özellikleri; ucuz olması, kolay şekillendirilebilmesi, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci,

yalıtkanlık (elektrik, ısı ve ses), yüksek esneklik ve darbe mukavemeti, yüksek tokluk, optik özellikler (seffalık), hijyen, nem almama ve üst kullanım sıcaklığının oda sıcaklığının pek üzerine çıkmamasıdır [2,6,11,12].

2.1.1. Polimerlerin mekanik özellikleri

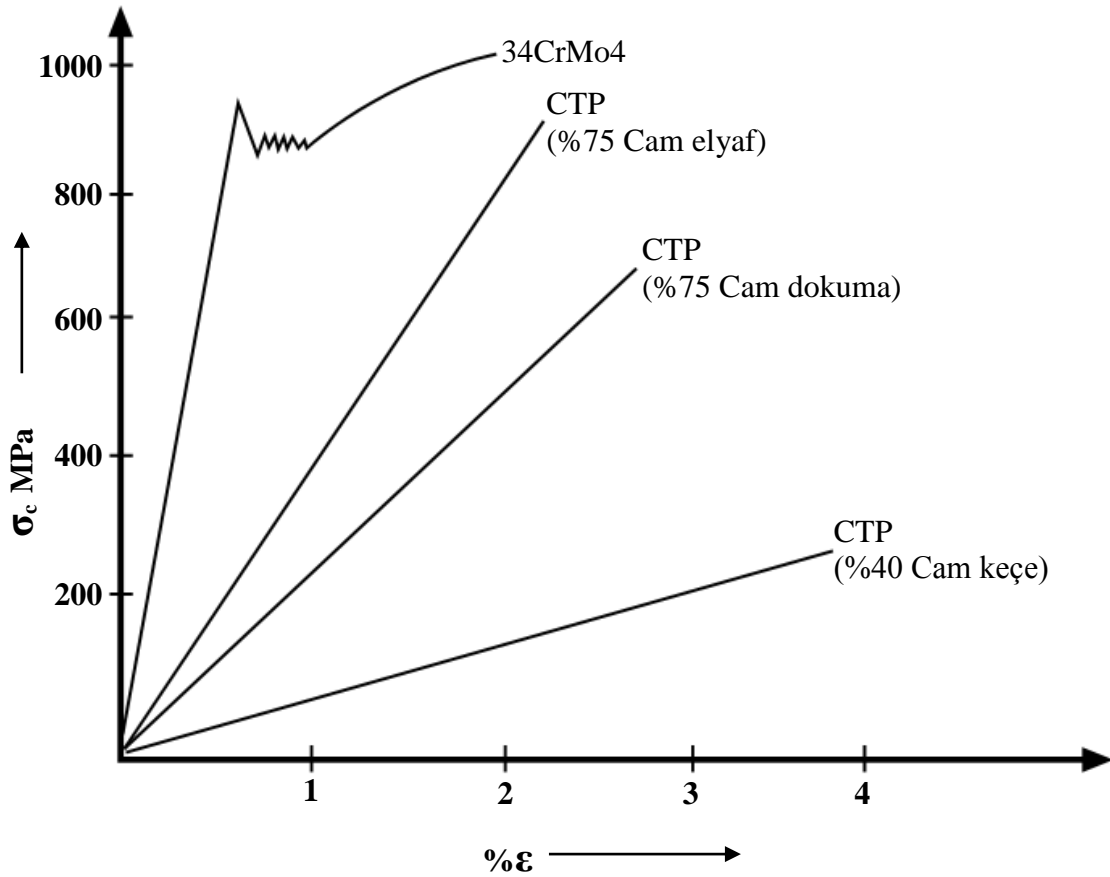
Polimerler, çok farklı mekanik özelliklere sahiptir ve mekanik davranışları önemli ölçüde molekül yapısına bağlıdır [8,12]. Polimerlerin mekanik özellikleri denilince sertlik, çekme dayanımı, elastisite modülü, sünekliliği, kırılma direnci, yorulma gibi özellikler akla gelmelidir [6]. Polimerlerin mekanik özellikleri sıcaklık ile bağlantılı olarak büyük farklılık gösterirler.

Ergimiş haldeki bir polimer amorf yapıdadır ve zincir yönlenmeleri rastgeledir. Şekil 2.1 a'da görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklarda elde edilen polimer yapısı, ani soğutmak (su vermek) suretiyle düşük sıcaklıklarda da elde edilebilir. Polimerlerde kuvvet ve uzama oranı metallerdeki gibi değildir. Şekil 2.1 b'deki II-IV numaralı eğride de görüldüğü gibi molekül yönelmesi olduktan sonra polimer zincirine gerilme kuvveti uygulanınca elastik modülü yükselir [13].



Şekil 2.1 Lineer polimerin deformasyonu, a) Isıl ve deformasyon işlemleri, b) Gerilme-uzama bağlantıları [13].

Polimerlerin sahip olduğu mekanik ve fiziksel özellikler cam, karbon, aramid vb. gibi liflerle kuvvetlendirilerek arttırılabilir [12]. Takviyeli plastikler olarak adlandırılan bu plastikler özellikle içten yanmalı motorların ve uçakların yapımında kullanılmaktadır [10]. Cam-elyaf takviyeli plastiklerin (CTP) çekme mukavemeti ve elastikiyet modülleri geniş sınır aralığındadır ve en hafif metallerden olan alüminyum ile yarışır hale gelmiştir [12]. Şekil 2.2' de 34CrMo4 çeliği ile farklı oranlarda cam ile takviye edilmiş plastiklerin (Sürekli elyaf takviyeli kompozitler) çekme mukavemetleri karşılaştırılmıştır. Elyafın mekanik özellikleri arttırmak amacıyla kullanıldığı durumlarda; elyafın matris tarafından iyi ıslanma kabiliyetine sahip olması (elyaf reçine tarafından ıslatılmazsa, temas yüzeylerinde oluşan boşluklar bağları zayıflatır), matris ile elyafın temas yüzeyleri arasında kimyasal reaksiyon oluşmamasına ve elyafın iyi yüzey özelliklerine sahip olması gibi özelliklere dikkat edilmesi gerekmektedir.



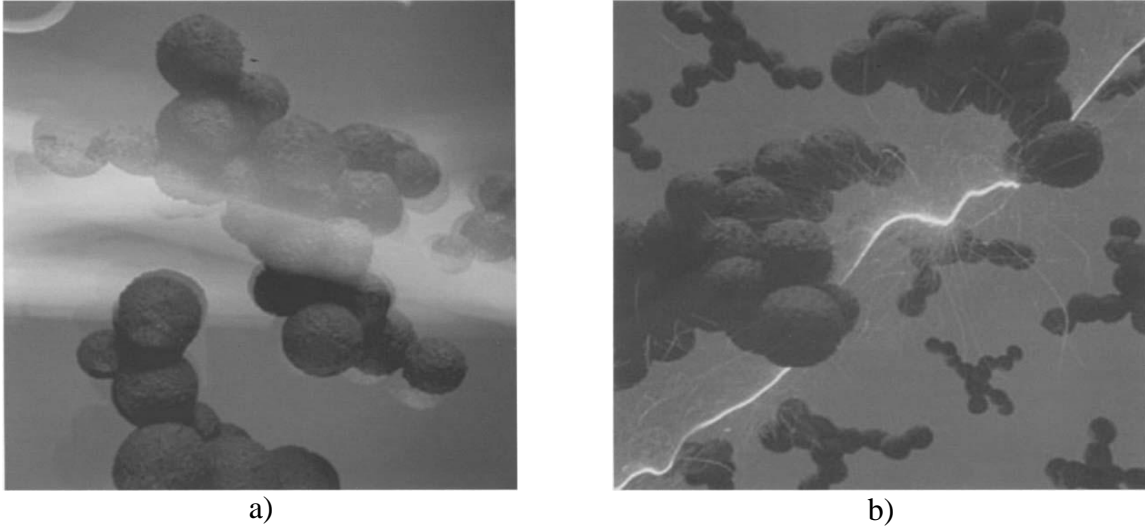
Şekil 2.2 Çekme mukavemeti üzerinde cam elyafın (sürekli elyaf) etkisi [9]

2.1.2. Polimerlerin ısı ve elektrik iletkenliği

Polimerlerin ısı iletkenliği metallere göre oldukça dūşüktür [2,6,10,12]. Isı iletkenliğinin dūşük olması plastikleri önemli ısı yalıtıcı malzemeler haline getirmiştir [12]. Metallerin ısı iletkenlikleri $200-10000 \text{ cal/cm.san.}^{\circ}\text{C}\times 10^4$ arasındayken, plastiklerin ısı iletkenlikleri $2,0-8,0 \text{ cal/cm.san.}^{\circ}\text{C}\times 10^4$ arasında değişmektedir [10]. Polimerin ısı iletkenliği üzerinde moleköl ağırlığı, kristalinite derecesi ve yönlenme gibi faktörlerin etkisi oldukça fazladır. Kristalinite derecesinin ve yönlenmenin artması ısı iletkenliği artırır. Moleköl ağırlığının artması polimerlerin ısıya karşı dayanıklılığını artırır [11]. Sürtünme veya tekrarlanan gerilmelerin sebep olduğu sıcaklık büyümesi plastik malzeme içerisinde ısı birikmesine sebep olur ve bu olay ısı yorulmaya yol açar [10]. Isıl yorulmayı azaltmak amacıyla metal tozları (alüminyum, bakır vb.) veya elyaflar (karbon elyaf, cam elyaf vb.) plastik malzemelere katkı maddesi olarak ilave edilirler [2,10].

Polimerlerin elektrik iletkenlikleri oldukça kötüdür. Sahip oldukları elektriksel özellikler nedeniyle bu tür polimerler, elektriksel yalıtkanlık, dielektrik kapasitörü ya da mikro-dalga aygıtlarının parçalarında yoğun olarak kullanılırlar [10,14]. Polimerlerin hacim elektrik dirençleri 107 ohm.m' den 1018 ohm.m' ye kadar farklılık gösterebilir. Hacim elektrik direnç değeri zamana bağlı olarak artar ancak sıcaklık ve nem miktarı ile azalır. Sıcaklığın artması elektriksel iletkenliği olumlu yönde etkiler. Polietilen ve PTFE gibi bazı plastiklerin dielektrik kayıp faktörleri oldukça dūşüktür ve yüksek frekans uygulamalarında yalıtkan olarak kullanılmaktadır [10].

Polimerin yapısındaki zincirlerin sert ve bükölmez olması, zincir yapılarının birbirini etkilemesi, yüksek oranda kristal yapının varlığı ve yönlenme olayları polimerin elektrik iletmesi için gerekli olan serbest elektronlar veya iyonların yapı içerisinde hareket etmesini engellemesi plastiklerde dūşük elektrik iletkenliğine neden olmaktadır. Polimerlerin elektrik iletmesi için yapıda serbest elektronlar veya serbest iyonların bulunması ve bunların yapı içerisinde hareket etmesi gereklidir [10]. Siyah karbon kullanımı plastiklerde elektrik iletkenliğini arttırmaktadır [2,10-15]. Őekil 2.3' te karbon siyahı katkılı polimerlerin içyapı ve elektrik iletkenliğine ait görüntüler yer almaktadır.



Şekil 2.3 Karbon siyahı katkılı polimerin içyapı görüntüleri, a) Karbon siyahı partikülleri b) Karbon siyahı katkılarının elektrik iletkenliği [15]

2.1.3. Polimerlerin kimyasallara ve korozyona karşı direnci

Polimerler metallere oranla kimyasallara karşı daha dayanıklıdırlar. Kimyasallara ve kimyasal ortama karşı olan dirençleri büyük bir pazar payı elde etmelerinde önemli bir rol oynamıştır [2,10-12]. Ayrıca sahip oldukları atomik yapı nedeniyle korozyondan metaller kadar etkilenmezler [12]. Polimerlerin kimyasal dayanımı üzerinde, kimyasalın cinsi ve konsantrasyonu, polimerin yapısı, ortamın sıcaklığı, uygulanan gerilme, polimerin yüzey pürüzlülüğü ve morfolojisi etkili olmaktadır.

Genel olarak termoplastikler zayıf asit ve tuzların sulu çözeltilerinden etkilenmez, ancak organik çözücülerin etkisi altında çözünme veya şişme göstererek kuvvetli asit veya alkalilerden kimyasal olarak etkilenirler [10]. Termosetler yapıları gereği termoplastiklere göre kimyasal çevreye daha az duyarlıdır. Eğme veya benzeri gerilmelerin malzeme yüzeyinde oluşturduğu çatlaklara sızan kimyasallar, polimer malzemeyi etkileyerek bozulmayı başlatır [10]. Çekme deneyleriyle kısa süreli polimer-kimyasal çevre etkileşimleri belirlenirken, sürünme deneyleriyle uzun süreli etkileşimler belirlenir.

2.1.4. Polimerlerin alevlenme (yanma) özellikleri

Plastikler ısıtılırken sıcaklık tutuşma noktasına geldiğinde plastikler düşük sıcaklıkta hızlı bir şekilde veya düşük bir hızda uzun süre yanarlar. Yapısında klor, fosfor ve azot gibi elementler bulunduran bazı polimerler yanmaya karşı dirençlidir [6]. Bazı polimerler ise karışım yapılırken veya üretimleri esnasında yanmazlık yapıcı maddeler ile takviye edilirler [11]. Plastik eşyada yanmazlık veya yanmanın geciktirilmesi istendiğinde, fosforik asit esterleri ve klor içeriği yüksek, klorlu parafinler yanmazlık sağlayıcı olarak kullanılır. Yanmazlık testi ile plastiklerin yanma sıcaklığı belirlenebilmektedir.

Polimerik malzemelerin düşük sıcaklıkta tutuşmalarını ve alev almışsa bile yayılmasını önlemek için polimerik malzemelere yanmazlık yapıcı maddeler (alev geciktiriciler) ilave edilir [11,15]. Ancak yanmazlık yapıcı madde seçilirken plastiğin özellikleri ve kullanılacağı yer göz önünde bulundurulmalıdır. Aksi takdirde yanmayı önleyici maddeler plastiğin; işleme, çekme direnci ve yumuşaklık gibi bazı özelliklerini olumsuz etkiler.

Plastiklerin yanma özelliklerinin karşılaştırılmasında en çok kullanılan yöntem ASTM 2863' e göre standartlaştırılan Kritik Oksijen İndeksi (COI) kavramına dayanan yöntemdir. Bu yöntemde bir tüp içerisinde yukarıya doğru akan oksijen-azot karışımında bir şerit plastik tutuşturulur ve aşağıya doğru yanan, kararlı mum gibi bir alev oluşturulur. Alev sönene kadar oksijen-azot gaz karışımının oranı yavaş yavaş azaltılır. Sabit yanmayı devam ettirebilen minimum oksijen miktarına COI denir. Eğer COI düşük olursa malzeme kolay alevlenebilir. Havada 0,21 O₂ bulunduğuna göre, COI değeri 0,21'den daha büyük olan polimerler kendi kendini söndürebilirler [10].

2.1.5. Polimerlerin işleme özellikleri

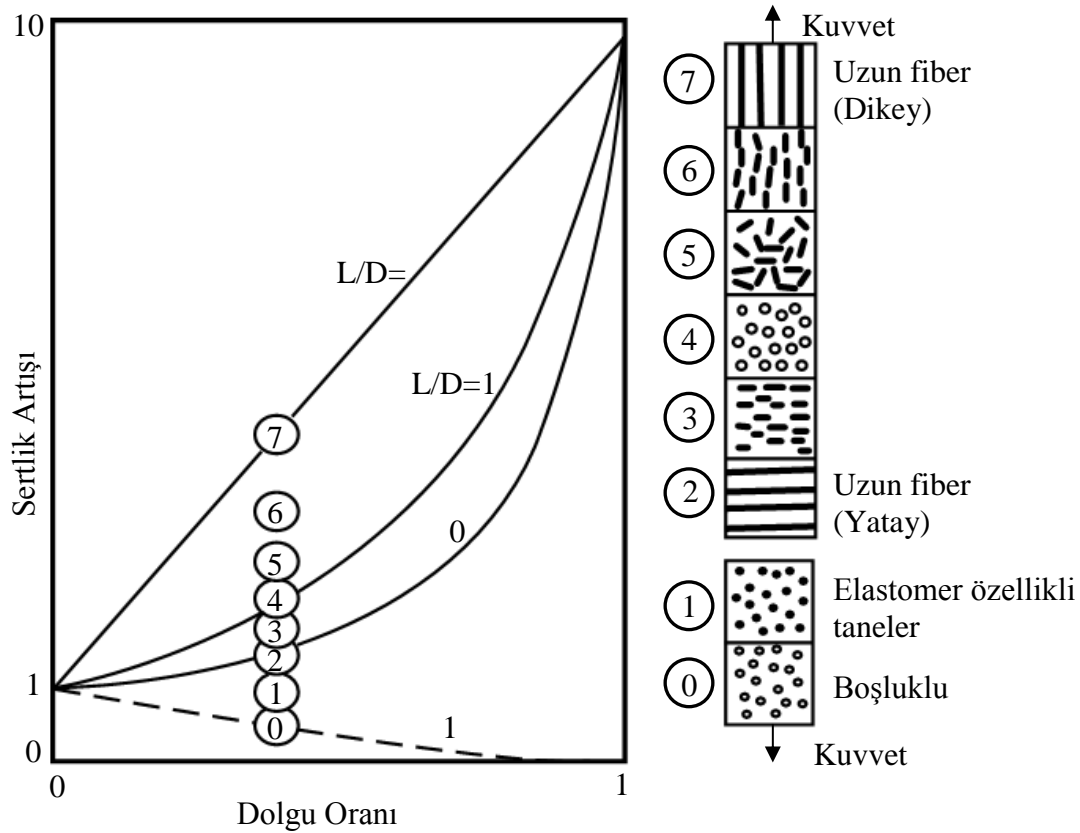
Polimerleri malzeme olarak kullanabilmek için işlemek gereklidir ve polimerler çok kolay işlenirler. İşleme sıcaklıkları 120 °C ile 320 °C arasında değişmektedir [12]. Polimerler genellikle tek başlarına işlenemezler ve son kullanıcının istediği özellikleri katkı ve dolgu maddesi ilavesi olmaksızın elde etmek mümkün değildir.

Plastik endüstrisinin başlangıcından itibaren, plastikleri işlenebilir hale getirmek ve son kullanıcının istediği fiziksel veya kimyasal özellikleri arttırmak veya azaltmak ya da

istenmeyen özelliklerini ortadan kaldırmak vb. gibi amaçlar için polimer reçinelerine katkı veya dolgu maddelerinin katılması bir zorunluluk olmuştur [2,11,15].

Polimerlerin sahip olduğu özelliklerin iyileştirilmesi ya da geliştirilmesi, üretimleri esnasında kolay işlenebilmeleri vb. gibi nedenlerden dolayı üretimleri esnasında içerisine farklı polimer reçineleri, cam veya karbon elyaflar, dolgu malzemeleri, yumuşatıcılar, renklendiriciler, plastikleştiriciler, stabilizatörler, yağlayıcılar, alev dayanımını arttıran ve çapraz bağ oluşturan malzemeler ilave edilir [2,6,11,15]. Şekil 2.4' te polimerik malzemelerin sertlik özelliklerini arttırmak amacıyla kullanılan dolgu tipi ve yönlenme ile sertlik arasındaki bağlantı gösterilmiştir.

Plastiklerin yüzeylerinin yumuşaklığı ve çizilmeye karşı direncinin az olması dezavantajlarından biridir. Cam, seramik ve metallere göre yumuşaktırlar. Termoplastiklerin sertliği sıcaklık ve plastifiyan miktarının artmasıyla azalır. Termosetler dolgu maddesi ilavesinden sonra sert bir hal alırlar ve sıcaklık artsa bile sertliğin azalması yok denecek kadar azdır [2,10,11].



Şekil 2.4 Polimerik malzemelerde dolgu tipi ve yönlenme ile sertlik arasındaki bağlantı [17]

2.1.6. Polimerlerin görünüş ve yoğunlukları

Polimerlerin çoğu renksizdir. Renklendirici olarak kullanılan ve sisteme toz veya sıvı şekilde eklenen pigmentler, organik boyalar, sıvı renklendiriciler, renk pastaları ve özel etkili boyalar sayesinde istenilen renk elde edilebilir [2-6-10].

Polimerler sahip oldukları düşük yoğunluk nedeniyle ($0,9 - 2,5 \text{ g/cm}^3$) ağırlık bakımından diğer malzemelere göre üstündür ve ağırlığın önemli olduğu yerlerde yoğun şekilde kullanılırlar [6,10-12].

2.1.7. Polimerlere katılan katkı ve dolgu maddeleri ve kazandırdığı özellikler

Katkı ve dolgu maddeleri kullanılarak polimerlerin ısı iletkenliğini, aşınma direncini, darbe mukavemetini, gerilme direncini, eğme mukavemetini, basma mukavemetini arttırmak veya azaltmak mümkündür. Ayrıca işlenebilirliğini arttırmak ve maliyeti azaltmak amacıyla da polimerlere katkı ve dolgu maddeleri ilave edilmektedir [11,12]. Kalsiyum karbonat, alüminyum veya bakır tozları, mika, cam partikülleri, bentonit, kil vb. gibi bazı örnek dolgu maddelerinin plastikler üzerindeki etkileri Tablo 2.1’ de gösterildiği gibidir.

Tablo 2.1 Dolgu maddelerinin plastik özellikleri üzerindeki etkisi [15]

Fiziksel ve Proses Özellikleri	Dolgu Maddeleri	Kalsiyum karbonat / Kalsiyum silikat / Alüminyum ve bakır tozları		Alümina, çakmaktaşı veya zımpara tozu, silika, molibden disülfid		Cam partikülleri	Mika, silika, toz veya pul şeklinde cam parçaları	Metalik veya alümina dolgu malzemeleri	Kolloidal silika, bentonit, kil
Fiziksel Özellikler									
Isı iletkenliği		+		+		+		+	--
Isısal sapma sıcaklığı		+		+		+		+	=
Aşınma direnci		=		+		+		--	--
Darbe dayanımı		--		--		+		+	=
Gerilme Mukavemeti		--		=		+		=	=
Eğme Mukavemeti		--		=		+		=	=
Basma mukavemeti		--		=		+		=	=
Dielektrik sabiti		+		+		+		+	=
Proses Özellikleri									
Ekzoterm		--		--		--		--	--
Yumuşama		=		=		=		=	+
İşlenebilirlik		+		--		--		+	+
Maliyet azaltma		--		--		=		--	+
+ : Arttırır / -- : Azaltır / = : Etki etmez									

Polimerik malzemelerin işlenebilirliği ve esnekliğini arttırmak amacıyla katılan plastikleştiriciler polimerin kimyasal yapısında herhangi bir değişikliğe neden olmaz. Malzemenin ergime ve camsı geçiş sıcaklıkları ile elastik modülünü düşürür [9-11,14,15]. Ayrıca malzemenin kopma dayanımı ve sertliğini azaltır. Plastikleştiriciler Polivinil klorür (PVC)' de yoğun olarak kullanılır ancak diğer polimerik malzemeler için sınırlı bir kullanım alanına sahiptir [11].

Yağlayıcılar, ergimiş polimerin akma özelliklerini iyileştirerek, makinelerin değişik aksanlarına yapışmasını önler ve plastiklerin işlenmesini kolaylaştırırlar [9,10,11]. Piyasada genellikle kolay akabilen, topaklaşma yapmayan toz maddelerin yanı sıra sıvı yağlayıcılarda bulunmaktadır [9]. Yağlayıcılar antistatik madde görevi görebilir ve son ürünün renginde ve yüzey görünümünde iyileşme sağlayabilir. Tablo 2.2' de yağlayıcıların polimer türü bazında toplam tüketim içindeki payları gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Yağlayıcıların toplam tüketim içindeki yüzdeleri [9]

Plastik Türü	Toplam Tüketim İçindeki Yağlayıcı Tüketim Payı (%)
PVC	65-70
PS ve kopolimerleri	13-18
Poliolefinler	10-11
Diğerleri	5-6

Mükemmel yalıtımlık özelliğinin bir sonucu olarak polimerler işleme sırasında ve kullanım esnasında yüklendikleri elektriği kolayca kaybedemezler ve elektrostatik olarak yüklenirler [10-11]. Elektrostatik yüklenme bazı uygulamalarda yangın çıkmasına neden olabildiği gibi, plastik madde üzerinde biriken toz, kir gibi maddelerin plastik tarafından çekilmesini sağlar [11]. Polimerik malzemelere granül içinde ilave etme ya da yüzeysel püskürtme işlemi ile katılan gliserin esterler gibi antistatik maddeler bu gibi durumların önlenmesine yardımcı olur[11].

Plastikler ısıl işlemle şekillendirilirken plastiğin molekül yapısında bir değişiklik meydana gelebilir. Plastiğin yapısının bozunması veya plastiğin molekül yapısındaki bağ değişikliği şeklinde gerçekleşen bu değişiklikler plastiklerden beklenen mekanik özellikleri etkiler [10-12]. Tüm ultraviyoler (UV) polimer yapıya fotokimyasal olarak

zarar verir. Polimerik malzemelere UV'le ışınların en belirgin etkileri beyazlama ve renk kaymasıdır. Ayrıca malzemenin yüzey yapısı kırılabilir. Plastik malzemelerin molekül yapısının ısı ve UV'le ışınlarla karşı korunması, mekanik özelliklerinin değişmesinin önlenmesi amacıyla plastiklerin üretimleri esnasında stabilizatörler ilave edilir [11].

2.1.8. Polimerlerin termal davranışları

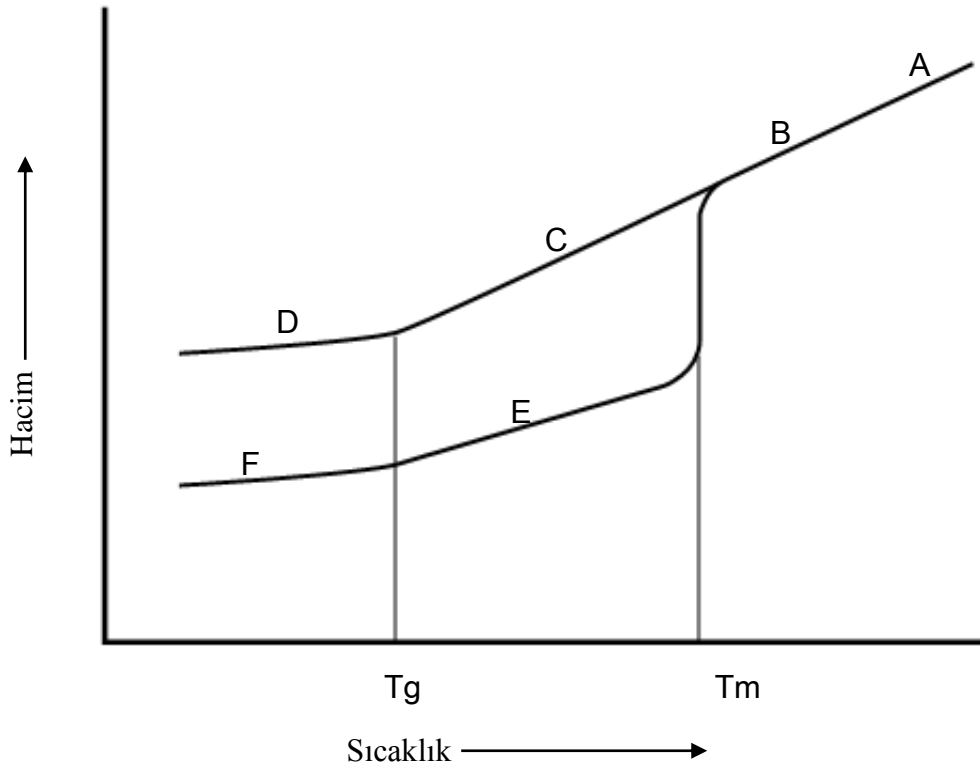
Doğrusal bir polimer yüksek sıcaklıklarda amorf, kauçuksu ve eriyiktir. Düşük sıcaklıklarda ise aynı polimer katı haldedir. Bir polimer soğutulduğu zaman birbirinden tamamen farklı iki mekanizma ile katılaştırabilir. Bunlardan biri kristallenme, diğeri ise camsılaşmadır. Bazı polimerler için kristallenme önemli iken, bazılarında camsılaşma önemli bir olaydır. Bir polimerik malzemenin hangi tür pratik uygulamaya elverişli olduğu *Kristal Erime Noktası* (T_m) ve *Camsı Geçiş Sıcaklığı* (T_g) ile belirlenir [14].

Termoplastik bir malzemenin sıcaklığı arttıkça yoğunluğu azalır, spesifik hacmi büyür. Yani molekül segmentleri birbirinden uzaklaşmaya başlar. Molekül segmentlerinin birbirinden uzaklaşmaya başladığı bu sıcaklık *Camsı Geçiş Sıcaklığı* (T_g) olarak ifade edilir [2]. T_g sıcaklığının üzerinde malzemelerin moleküllerini canlı moleküller olarak ifade edebiliriz. T_g sıcaklığının üzerinde malzemeyi kırmadan bükme ve malzeme üzerine tork uygulamak mümkündür [2]. Genelde T_g sıcaklığının altında termoplastikler sert bir yapıya sahip olduğu için kırılabilir özellik gösterirler. Ayrıca süne mukavemetleri yüksek, yorulma mukavemetleri düşüktür. T_g özellikle amorf malzemeler için oldukça önemlidir.

Düşük molekül ağırlıklı diğerkristal yapılmaddelerin aksine, polimerler için kristal yapılm bölgelerdeki yapıların tam ve mükemmel bir biçimde birbirinin aynı olmaması sonucu, keskin bir ergime sıcaklığı yerine, bir sıcaklık aralığı gözlemlenmektedir. Gözlenen bu sıcaklığa *Kristal Erime Noktası* (T_m) denilmektedir [2,14]. Kristalin malzemelerde erime sıcaklığına ulaşıldığında kristal yapı parçalanmaya başlaması yoğunlukta ani bir azalma meydana getirir. T_m 'nin üzerinde malzeme sıvı haldedir ve sıcaklığın viskoziteye etkisi oldukça azdır. Malzemenin kristallik oranı % 60'ın üzerinde ise T_g 'nin etkisi çok azdır ve malzeme sertliği fazla değişmez. Malzemenin kristallik oranı % 60'ın altında ise T_g 'nin etkisi daha fazladır ve malzemenin sertliği

daha hızlı azalır. Sürünme, yorulma ve darbe mukavemetleri amorf malzemelerde olduğu gibi kristalin malzemelerde de Tg sıcaklığından etkilenir. Kristalin malzemeler Tg ile Tm sıcaklıklarının arasında kullanılırlar [14].

Düzgün bir molekül yapısını gösteren bir organik polimerin hacim-sıcaklık davranışları Şekil 2.5’ de gösterildiği gibidir. Tg sıcaklığında polimer zincirlerinin hareketliliği hemen hemen donmakta ve hareketsiz hale gelmektedir [9]. Bu sıcaklığın üstünde malzemede polimer zincirlerinin bölgesel ve ondülamsı katlanma hareketlerine yetecek termal enerji bulunmaktadır. Amorf polimerler, bu özellik sayesinde plastik veya elastik özellik gösterebilmektedir. Tg’nin altında polimerin bütününe kapsayan tüm hareketler durduğundan aynı malzeme esnemez, sert ve genellikle kırılğan bir halde olmaktadır [2,14. Polimer malzemeler ısıtılıp belirli bir sıcaklığa geldiğinde malzemedeki katı haldeki kristal yapılar ergimiş kısımla denge haline gelir.



Şekil 2.5 Kristallenebilen polimerlerde hacim-sıcaklık eğrileri, A-Sıvı bölgesi, B-Bir miktar esneklik gösteren sıvı, C-Kauçuksu bölge, D-Camsı bölge, E-Kauçuk, F-Camsı matris içerisindeki kristaller [14].

2.2. Polimerlerin Sınıflandırılması

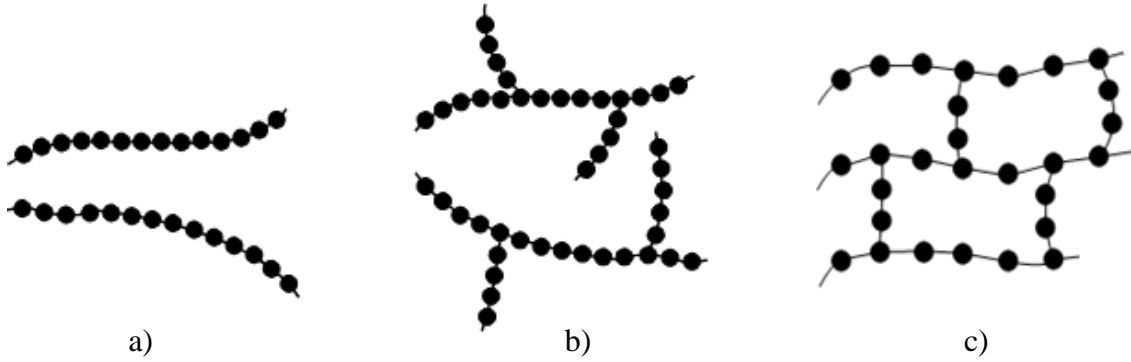
Polimerleri ısı karşısında gösterdikleri dirence, fiziksel ve mekaniksel özelliklerine, kaynağına, kullanım amacı ve kullanım alanı vb. gibi çok farklı yöntemlere göre sınıflandırmak mümkündür. En yaygın olarak kullanılan sınıflandırma yöntemi polimerlerin ısı karşısında gösterdikleri davranışa göre; termoplastikler ve termosetler olarak sınıflandırılmasıdır [2,6,8-12]. Polimerler için kullanılan en yaygın sınıflandırma yöntemleri Tablo 2.3' te gösterilmiştir.

Tablo 2.3 Polimerlerin sınıflandırılması [2,6,10,11].

Polimerlerin Sınıflandırılması		
POLİMERLER	1- Isı Karşısında Gösterdikleri Dirence Göre	1.1- Termoplastikler 1.2- Termosetler
	2- Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Göre	2.1- Plastikler 2.2- Fiberler 2.3- Elastomerler
	3- Kaynağına Göre	3.1- Doğal Polimerler 3.2- Sentetik Polimerler 3.3- Yarı Sentetik Polimerler
	4- Monomerlerin Bileşimine Göre	4.1- Homopolimer 4.2- Kopolimer
	5- Zincir Yapısına Göre	5.1- Doğrusal Polimerler 5.2- Dallanmış Polimerler 5.3- Çapraz Bağlı Polimerler
	6- Zincir Yapısının Geometrik Şekline Göre	6.1- Amorf Polimerler 6.2- Kristalin Polimerler 6.3- Kısmi Kristalin Polimerler
	7- Zincir Konfigurasyonuna Göre	7.1- İzotaktik Polimerler 7.2- Sindiotaktik Polimerler 7.3- Ataktik Polimerler
	8- Kullanım Alanına Göre	8.1- Plastikler 8.2- Elastomerler 8.3- Fiberler 8.4- Kaplamalar 8.5- Filmler 8.6- Köpükler 8.7- Yapıştırıcılar

2.2.1. Isı karşısında gösterdikleri dirence göre polimerlerin sınıflandırılması

Polimerler ısı karşısında gösterdikleri dirence göre; **termoplastikler** ve **termosetler** olarak ikiye ayrılır [2,6,8-12]. Termoplastik polimerler ısıtıldıklarında yumuşar, hatta sıvılaşır. Soğutulduklarında ise tekrar sertleşerek şekillerini korurlar. Özelliklerinde önemli değişiklikler olmadan defalarca ısıtılarak yeniden şekillendirilebilirler [2,4-6,8-12,18]. Kalıplama sırasında kimyasal değişime uğramazlar. Geri dönüştürülebilirler. Kullanılan plastiklerin % 90'ını termoplastikler oluşturmaktadır. Genellikle yumuşak ve sünektirler. Isı ve basınç altında eğme, bükme ve istenilen şekle getirilebilmesi gibi sahip olduğu özellikleri nedeniyle üreticiler için çok geniş kullanım alanları sağlar. Doğrusal veya dallanmış molekül yapısına (Şekil 2.6) sahiptirler.



Şekil 2.6 Plastiklerin molekül yapısı, a) Doğrusal molekül yapısı, b) Dallanmış molekül yapısı, c) Termoset polimerlerin sahip olduğu çapraz bağ yapısı [2,4,6-14,18]

Termoset polimerler katılaşıırken kimyasal değişime uğrarlar ve katılaştıktan sonra erimez ve çözünmez bir yapıya sahip olurlar [2,6,8,10]. Termoset polimerler ısıtıldıklarında yumuşamazlar, aksine degrade olurlar [2]. Bu nedenle termoset polimerlerin ısıtılıp tekrar şekillendirilmesine imkân yoktur ve bir defa eritilebildikleri için geri dönüşümsüzdürler [2,5,6,8-14]. Genellikle yoğunlaşma polimerizasyonu ile üretilirler. Molekül yapısında sık olarak çapraz bağlanma (Şekil 2-6) görülür. Çapraz bağ ağı sayesinde termosetler gevrek ve ısıya dayanıklı bir yapıdadırlar [2,18]. Termosetlerden üretilmiş çubuk, şerit ve levha gibi malzemeler tornalama ve frezeleme operasyonları ile işlenebilirler.

2.2.2. Fiziksel ve mekanik özelliklerine göre polimerlerin sınıflandırılması

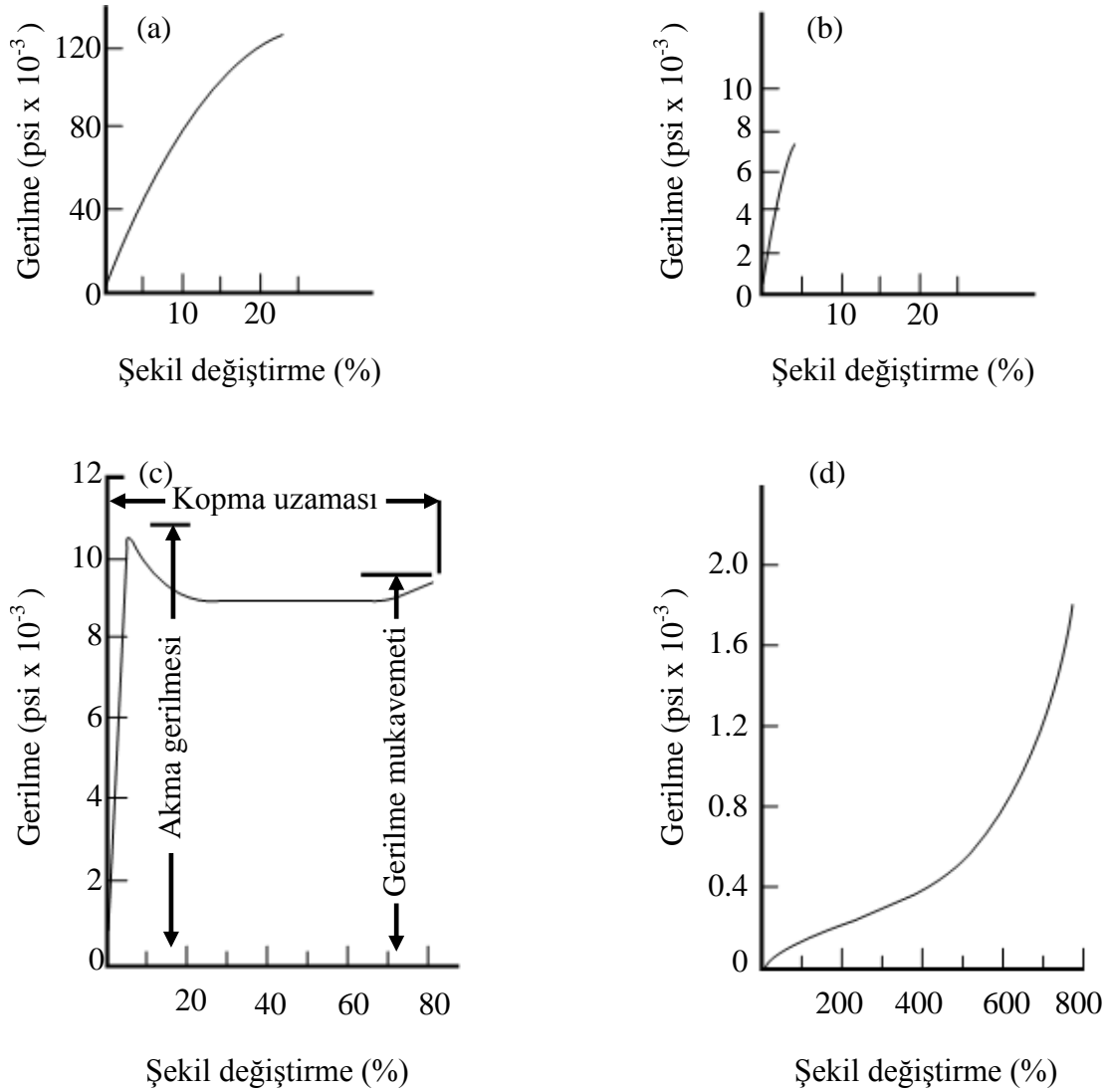
Fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olarak endüstride kullanılan polimerler; **plastikler, fiberler ve elastomerler** olmak üzere üç gruba ayrılırlar [6,10]. Plastikler, fiberler ve elastomerler gerilme-şekil değiştirme eğrileri yardımı ile kolayca tanımlanabilirler. Genel olarak gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 2,7'de gösterildiği gibidir. Kullanım amacına göre bu eğrilerde, test sıcaklığına, uzama hızı ve polimerin özelliklerine bağlı olarak değişen akmayı yok sayabiliriz [18].

En büyük malzeme grubunu oluşturan plastikler; belirli bir biçimde şekillendirilebilen veya kalıplanan polimerlerin genel adıdır [2,6,8]. Bir kısmı rijit ve gevrek olurken bir kısmı yük altında kırılmadan önce önemli oranda şekil değiştiren plastiklerin özellikleri çok geniş bir aralıkta değişir. Kristalin veya amorf yapıda olabilirler. Plastikler kendi aralarında termoplastik ve termoset olarak ikiye ayrılır. Termoset ve termoplastikler bir üst bölümde açıklanmıştır. Termoplastiklere örnek olarak; PE, PP, PS, PVC, naylon 6, naylon 6.6 ve polietilenteraftalat (PET) verilebilir. Termoset plastiklere ise, üre-formaldehit, fenol-formaldehit, melamin-formaldehit, doymamış poliester ve epoksi reçineleri örnek olarak gösterilebilir [2,11].

Fiberler tekstil endüstrisinde kumaş dokumada yoğun olarak kullanılmakla birlikte, kompozit malzeme üretiminde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Uzunluk ve çap oranı en az 100:1 olan fiberler ince tel halinde çekilerek üretilirler [6,9]. Bir polimerin fiber olarak kullanılabilmesi için, kristallik derecesinin çok yüksek olması ve zincirleri arasında büyük çekim kuvvetleri bulunan polar gruplu moleküllerden oluşması gerekir. Malzeme mukavemetini arttırması amacıyla; naylon 6, naylon 6.6, polipropilen, poliakrilonitril (PAN) ve polietilenteraftalat (PET) gibi kristal oranı yüksek polimerlerden üretilirler [2,6]. Fiberlerden, yüksek elastik modülü, çekme mukavemeti ve abrazyon direnç özelliklerine sahip olması beklenir.

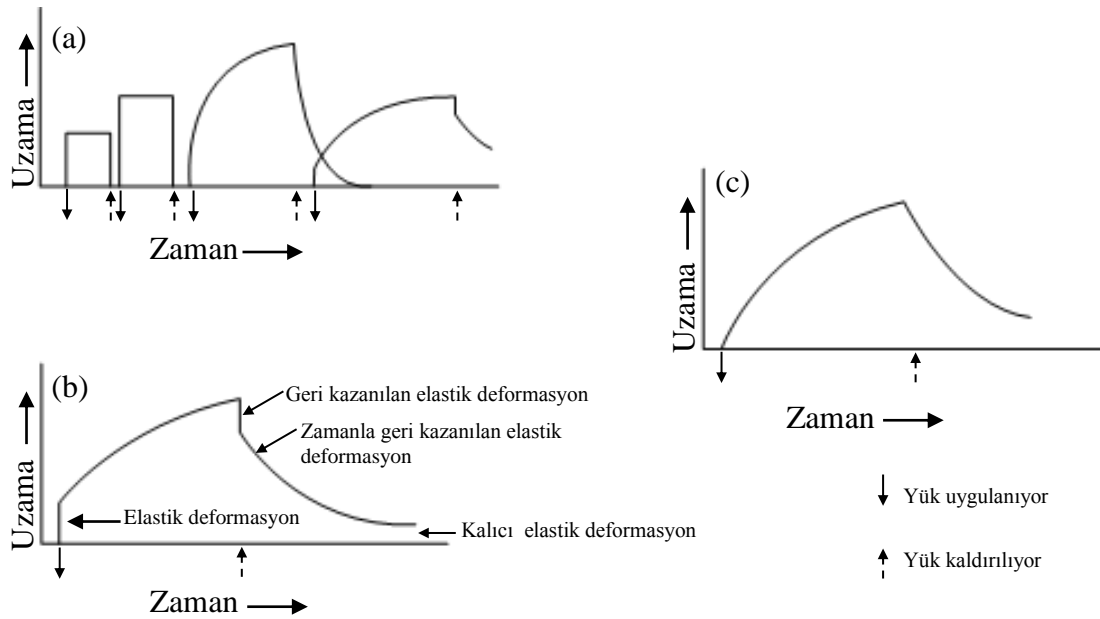
Lastik gibi şekil değiştirebilmeleri ve oldukça küçük gerilmelerle esnek bir uzama göstermeleri elastomerlerin en önemli özelliğidir [6]. Dış yük altında çok fazla elastik şekil değişimi gösteren elastomerler, bu yükün kalkmasıyla eski boyutlarına dönerler [6]. İlk olarak doğal kauçukta görülen bu durumun sebebi elastomerlerin sahip olduğu molekül yapısı olarak açıklanabilir. Elastomerlerde doğrusal molekül yapısı vardır ve vulkanizasyon işlemi ile bu zincirler belirli noktalardan çapraz bağ ile birbirine

bağlanmıştır. Az miktardaki bu çapraz bağlar, esnekliğin tersinir olmasını sağlar. Polimerlerin elastomer özellikleri gösterebilmesi için camsı geçiş sıcaklığının düşük ve zincir yapısının tümü ile amorf olması gerekir. Doğal lastik, polikloropren, silikon, polibütadien, bütadien-stiren (BS), bütadien-akrilonitril (SBR), nitril kauçuğu, klor kauçuğu elastomerlere örnek olarak gösterilebilir[2-6].



Şekil 2.7 Gerilme-şekil değiştirme eğrileri, a) Sentetik fiber (nylon 66 vb.), b) Rijit ve kırılğan plastikler (polistiren vb.), c) Sert plastikler (nylon 66 vb.), d) Elastomerler (vulkanize edilmiş doğal kauçuk vb.) [18]

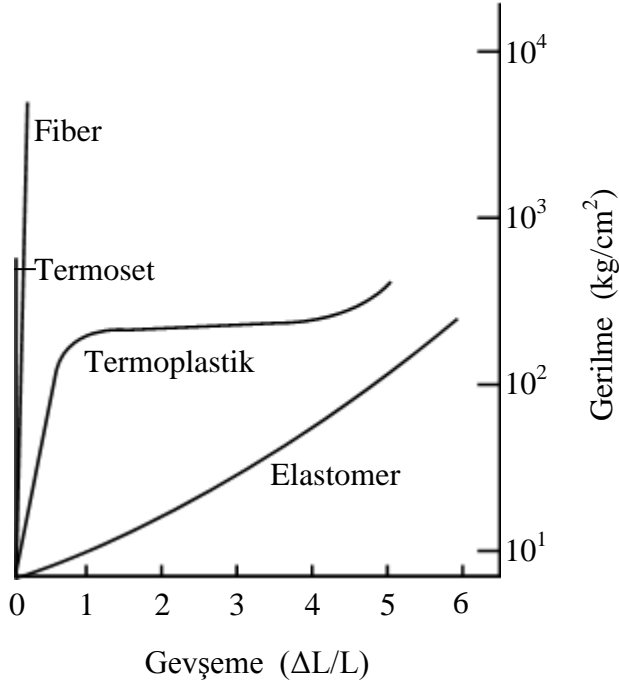
Plastiklerin gerilme modülü $3,5 \times 10^2$ ile 3×10^3 MPa arasındadır [18]. Plastiklerin deformasyonu oldukça değişkendir. Elastomerlerin gerilme modülü 7 MPa gibi oldukça düşüktür. Elastomerin gerilme modülü sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle elastomerlerden beklenen özelliklerin değişmemesi için belirlenen çalışma sıcaklıklarının altına veya üstüne çıkılmamalıdır. Elastomerlerin gösterdiği elastik deformasyon fiberlere göre daha az önemlidir. Şekil 2.8 a’da elastomere gerilme kuvveti uygulandığında ve kaldırıldığında oluşan elastik deformasyon gösterilmiştir. Fiberlerin gerilme modülü 3×10^3 ile 14×10^3 MPa arasındadır [18]. Ticari olarak kullanılan bazı sentetik fiberlerin -50 ile 150 °C sıcaklık değerleri arasında mekanik özelliklerinde çok fazla değişiklik olmamaktadır [18]. Fiberler kullanılırken belirlenen sıcaklık değerleri aşılmamalıdır aksi takdirde kendilerinden beklenen özelliklerini kaybederler. Bazı kimyasal yapıya sahip polimerler fiber ve plastik olarak her iki şekilde de tanımlanabilir [18].



Şekil 2.8 Gerilme kuvveti karşısında elastomer, fiber ve amorf plastiklerde oluşan deformasyon. a) Çapraz bağlı ideal elastomer, b) Fiber, c) Amorf plastikler [12]

Şekil 2.9’ da elastomer, termoset, termoplastik ve fiber olarak nitelendirilen polimerlerin örnek gerilme-gevşeme eğrileri çizilmiştir. Bu eğrilerin başlangıçtaki

eğimleri modül değerini (biçim değiştirmeye karşı direnci) verir. Eğrilerin son noktalarından kopma kuvveti ve kopma uzaması belirlenebilir.



Şekil 2.9 Elastomerler, termoplastikler, termosetler ve fiber örneklerinin gerilme-gevşeme eğrileri [14]

2.2.3. Kaynağına göre polimerlerin sınıflandırılması

Polimerler kaynağına göre; sentetik, doğal ve yarı sentetik polimerler olmak üzere üçe ayrılır [2,18]. İlk kez 18. yüzyılın sonlarında elde edilen yapay polimerler, günümüze kadar gelen süreçte çeşitli amaçlarda kullanılmak üzere endüstriyel ölçülerde yapıldı.

Sentetik yüksek polimerlerin oluşmasını düzenleyen bilimsel ilkeler 1925-1935 yıllarında bulunabildi. Sentetik polimerlerin üstün özellikleri veya yetersizlikleri, bu tür maddelerin kullanım şartlarındaki veya üretim sırasındaki mekanik özelliklerine dayanır. Sentetik plastiklerin genel olarak mekanik davranışları elastomerler ile fiberler arasında yer alır [18]. Sentetik polimerlerden yapılan maddeler camsı reçineler (resin), yapıştırıcılar (adhesive), sağlam dokuma lifleri (fiber); kauçuk davranışları gösteren elastomerler, dayanıklı kaplayıcılar gibi çok değişik uygulamalarda kullanılır [2].

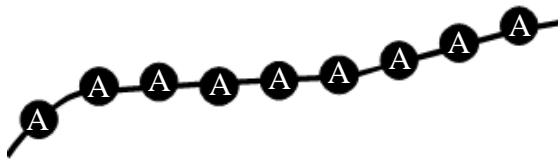
Sentetik polimerlere monomerlerin birleşmesiyle oluşan PE, PP, PS, PMMA, ABS vb. gibi polimerler örnek olarak verilebilir [2,11].

Doğal polimerik maddeler, nişasta, selüloz, yün, protein ve doğal kauçuk gibi tabiattaki canlı varlıkların bünyelerinde olan, yiyeceklerin, giyeceklerin, yapı ve taşıt malzemesinin temel ögesidir [2,6,10,11]. Yapıları son derece karmaşık moleküllerden oluşur ve moleküllerinin büyüklüğü ve karmaşık oluşu bu maddelerin son derece değişik ve üstün özellik göstermelerinin sebebidir. 1950'lerden sonra fiziksel ve kimyasal analiz yöntemlerinin gelişmesi ile doğal organik polimerlerin yapıları aydınlatılmış ve bu polimerlerin özelliklerini düzenleyen bilimsel ilkeler bulunmuştur [14,18].

Yarı sentetik polimerler doğal polimerlerin modifikasyonu ile elde edilirler. Selüloz asetat gibi doğal selülozdan elde edilen rejenere selüloz ve diğer selüloz türevleri yarı sentetik polimerlere örnek olarak verilebilir [2].

2.2.4. Monomerlerin bileşimine göre polimerlerin sınıflandırılması

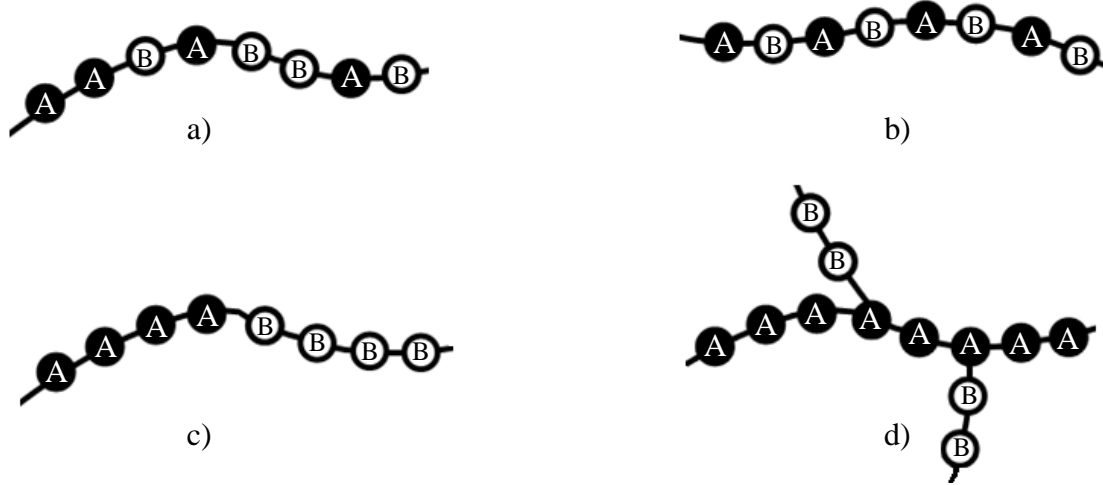
Homopolimer ve kopolimer olarak monomer bileşimine göre polimerler iki gruba ayrılır [2]. Homopolimerler; PE, PP, PS, PMMA vb. gibi tek bir monomerden meydana gelen plastiklerdir. Homopolimerler de polimer zinciri boyunca tekrar eden birim(mer) aynıdır. Bir mer Şekil 2.10' dakine benzer bir yapı gösterir.



Şekil 2.10 Homopolimerlerin zincir yapısı

Kopolimerlerde ise polimer zinciri boyunca tekrarlanan birim türü birden fazladır. Etilen-vinilasetat (EVA), stiren-metil metakrilat, akrilonitril-butadien-stiren (ABS), gibi iki veya daha fazla monomerden oluşan polimerlere kopolimer denir. Kopolimerlerin özellikleri homopolimerlerden farklıdır. 1911 yılında olefin ve diolefinlerden elde edilen ve kauçuksu özellikler gösteren maddeler ilk kopolimerlerdir. Monomerlerin

polimer zincirinde diziliş şekline göre kopolimerler: 1- Gelişigüzel (Random) Kopolimerler, 2- Seçenekli (Alternatif) Kopolimerler, 3- Blok Kopolimerler, 4- Aşılı (Graft) Kopolimerler olmak üzere Şekil 2.11’ de görüldüğü gibi dört gruba ayrılırlar.



Şekil 2.11 Kopolimerler, a) Gelişigüzel (random) kopolimerler, b) Seçenekli (alternatif) kopolimerler, c) Blok kopolimerler, d) Aşılı (graft) kopolimerler [2]

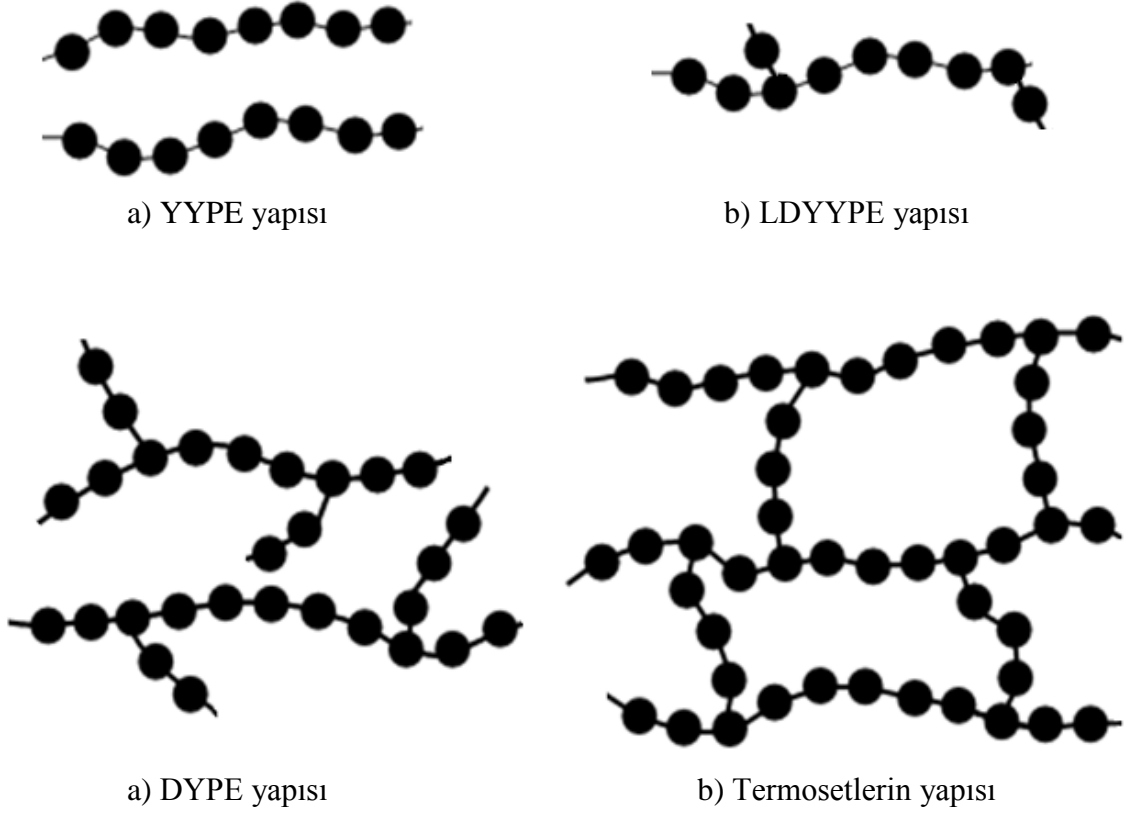
2.2.5. Zincir yapısına göre polimerlerin sınıflandırılması

Şekil 2.12’de görüldüğü gibi zincir yapısına göre polimerler; doğrusal, dallanmış ve çapraz bağlı polimerler olmak üzere üçe ayrılırlar.

Monomerlerin iki tarafından birbirine eklenerek zincir çizgisi oluşturan polimer yapılarına doğrusal yapı polimerler denir. Doğrusal yapı polimer zincirini oluşturan monomerler arasında kuvvetli valans bağları vardır. Zincirler arasında ise zayıf Van der Waals bağları oluşur [6].

Bazı doğrusal zincirlere bağlı yan kısa zincirler oluşturarak dallanmış polimerler meydana gelir. Ana zincir molekülünün bir parçası olan dallar, polimerin sentezi sırasında meydana gelen yan reaksiyonların sonucunda oluşur. Dallanmış yapıya sahip polimerin paketleme verimi azaldığı için polimerin yoğunluğu azalır. Örnek olarak, doğrusal zincir yapısına sahip polietilene yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), dallanmış yapıya sahip olana ise düşük yoğunluklu polietilen (DYPE) (Şekil 2.12 c) denir. Yüksek yoğunluklu polietilende 1000 karbon atomunda 4-10 dal varken (Şekil

2.12 b), lineer dallanmış yüksek yoğunluklu polietilende (LDYYPE) her 1000 karbon atomuna 10-35 dal (Şekil 2.12 c) vardır. Dallanmanın artmasına bağlı olarak polimer yapısında kristallenme oranı azalır [2,6].

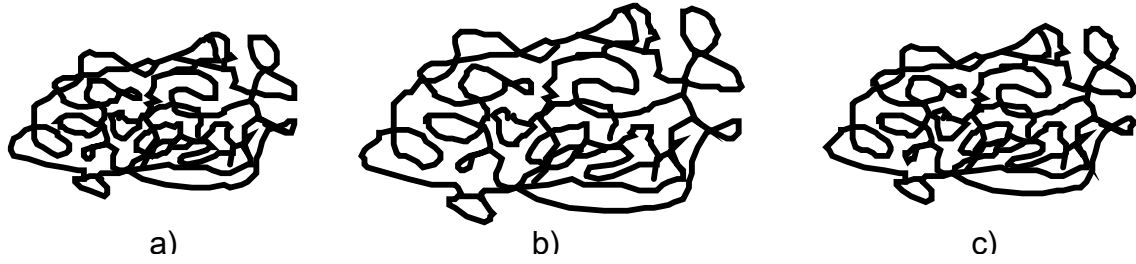


Şekil 2.12 Zincir yapısına göre polimerlerin sınıflandırılması, a,b) Doğrusal polimerler, c) Dallanmış polimerler, d) Çapraz bağlı polimerler [2,6]

Polimerlerin sentezi veya yüksek sıcaklıkta gerçekleşen geri dönüşümü olmayan bir kimyasal reaksiyon sonucunda polimerlerin yapısında çapraz bağlanma olayı meydana gelmektedir [6]. Çapraz bağlı polimerlerde komşu doğrusal çizgiler bazı noktalarda birbirine valans bağı ile bağlanmıştır. Birçok lastik malzemesinde çapraz bağ oluşmasına vulkanizasyon işlemi adı verilir. Isı ve kükürt kullanılarak yapılan vulkanizasyon işleminde, ısıyla birlikte doymamış karbon bağları kopar ve kükürt atomları yeni bağlar oluşturarak zincirlerin belli noktalarda çapraz bağ oluşturmasını sağlar.

2.2.6. Zincir yapısının geometrik şekline göre polimerlerin sınıflandırılması

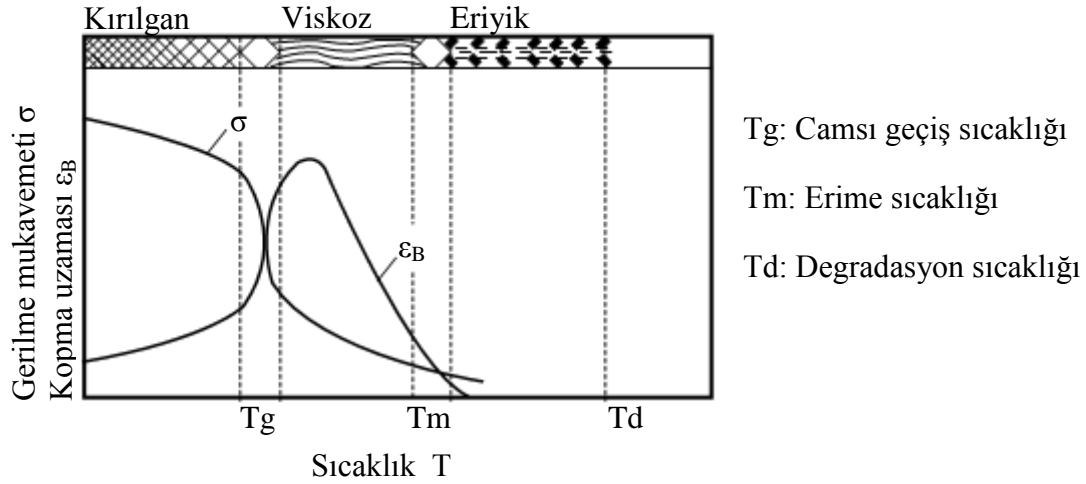
Amorf polimerler, kristalin polimerler, kısmi kristalin polimerler olmak üzere zincir yapısının geometrik şekline göre polimerler üç gruba ayrılır. Bazı polimerler kristallendirilebilir, bazıları ise amorfudur [14]. Düzgün bir geometrik şekle sahip olmayan amorf polimerde zincirler gelişigüzel dizilmiştir, yumuşak ve tok bir yapıya sahiptirler. Amorf yapı polimerlerin; ergime sıcaklığı, çekme mukavemeti, yoğunluğu ve kimyasal dayanımı düşük, darbe mukavemeti yüksektir [2]. Çekme kuvvetinin etkisiyle amorf yapı polimerlerin molekül zincirleri çekme yönünde bir yönelme göstermektedir [10]. Yönelme özelliği olarak ifade edilen bu özelliğe sahip, amorf polimerlerin çekme mukavemeti daha yüksek olmaktadır. Kalıptaki çekme oranları düşüktür ve geniş bir yumuşama aralığına sahiptirler. Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) olmak üzere tek bir termal davranış gösterirler [2]. Şekil 2.13’ de gösterildiği gibi amorf polimerlerin yapısında ısıtma ve soğutma sonrası değişiklikler meydana gelmektedir.



Şekil 2.13 Amorf polimerlerin yapısında ısıtma ve soğutma sonrası meydana gelen değişiklikler, a) Amorf polimerin başlangıçtaki yapısı, b) Isıtma sonrası yapıda meydana gelen gevşeme, c) Soğutma sonrası yapıda meydana gelen büzülme [2]

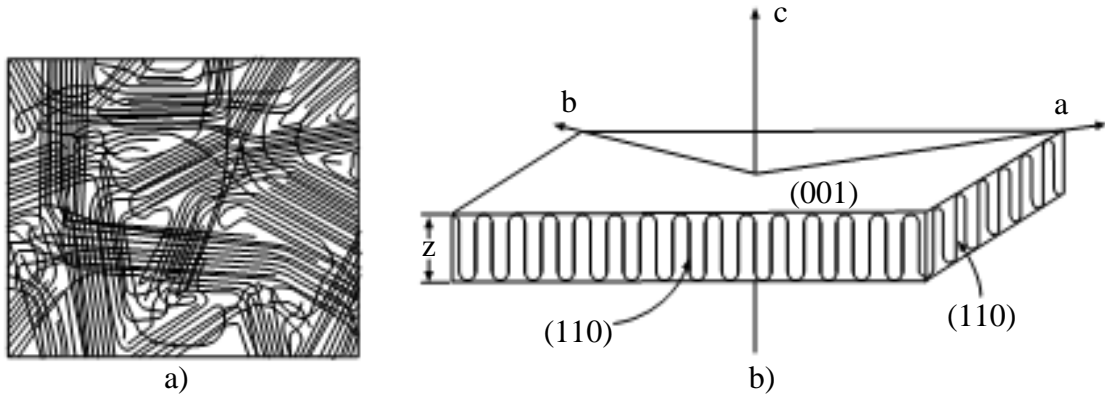
Şekil 2.14’ de tipik bir amorf termoplastiğin gerilme mukavemeti (MPa) ve kopma uzaması (ϵ_B) gösterilmiştir. Camsı geçiş sıcaklığının altında gerçekleşen bu uygulamada, normalde rijit ve kırılman olan plastik çarpma gerilimine tabi tutulduğunda yarıp parçalara ayrılmakta ve kopma uzaması ise düşük olmaktadır. T_g ve T_m sıcaklıkları arasındaki kopma bölgesinde uzama miktarının artması ve malzeme mukavemetinin hızla düşmesi sonucu “Mikro-Browniyan” diye isimlendirilen molekül hareketi meydana gelir. T_m üzerindeki akış bölgesi sıcaklıklarında termal molekül

hareketin etkileri, Mikro-Brovniyan faaliyetinin yüksek olması yani ilmiklerin açılması şeklinde kendini gösterir. Plastik malzeme elastik özelliklerini kaybederek daha çok plastik özellik göstererek bu sıcaklığın üzerinde kalıba basılır. Degradasyon veya ayrışma sıcaklığının üzerinde kimyasal olaylardan dolayı malzeme tersinir bir şekilde ayrışır ve bozulur [12].



Şekil 2.14 Amorf bir termoplastiğin gerilme mukavemeti ve kırılma uzaması [12]

Kristal yapı genellikle polimer eriğin veya çözeltinin soğutulmasıyla elde edilir. Kristalin polimerler düzgün bir geometrik şekle sahiptirler. Polimer zincirlerinin tamamı belli bir düzene girmiş veya kristallenmiştir. Diğer bir ifadeyle molekül zincirleri birbirlerine göre üç boyutlu bir düzeni andıran düzenli bir yapıdadır [10]. Kristalin yapının özellikleri, amorf yapının özelliklerinden oldukça farklıdır. Kristalin yapı, amorf yapıya göre daha rijittir. Yüksek erime sıcaklığına ve yüksek ısı mukavemetine sahiptirler. Kimyasal dayanımları, çekme ve sürünme mukavemeti daha yüksektir [2]. Kristalin yapı polimerlerin kalıptaki çekme oranları yüksektir. Erime Sıcaklığı (Tm) olmak üzere tek bir termal davranış gösterirler [2]. Şekil 2.15' te kristalin polimerlerin fringed micelle ve katlanmış zincir lamel yapısı şeklindeki gösterimine yer verilmiştir.

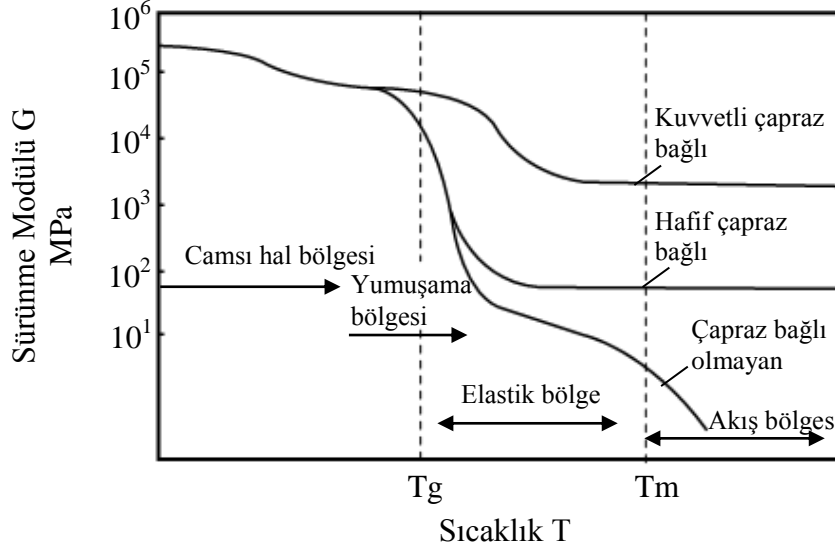


Şekil 2.15 Kristalin polimerlerin gösterilişi [9,20], a) Kristalin polimerin “fringed micelle” gösterilişi, b) Polietilen kristallerinin “katlanmış-zincir lamel” yapısı [2,10,14]

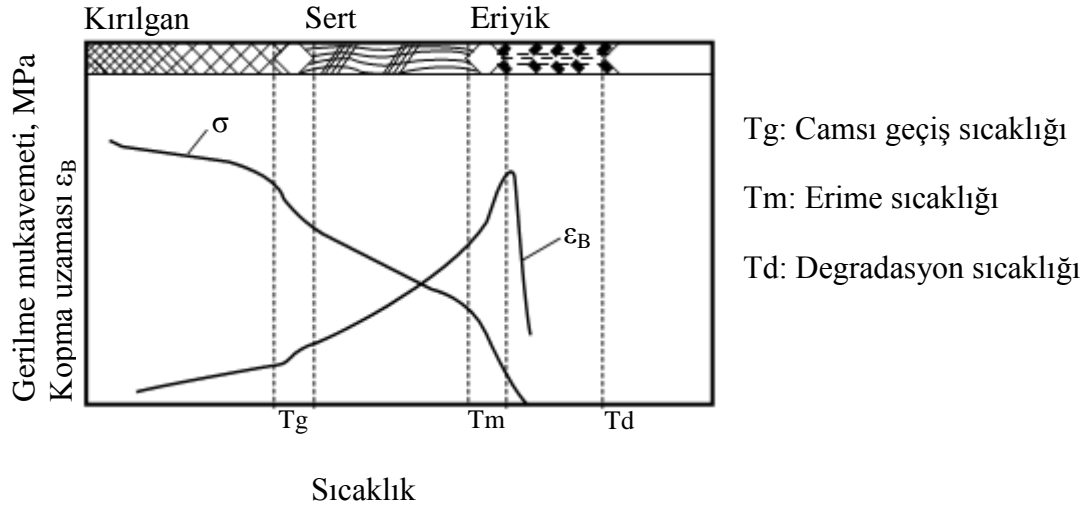
Polimerlerde kristalleşme, molekül zincirinin dizilme düzenine bağlıdır [6,10]. Polimer % 100 amorf ile % 95 kristalin arasında bir yapıya sahip olur [2]. Yani polimerin belli bir kısmı kristalin, kalan kısmı ise amorf yapıdadır. Kısmen kristalin kısmense amorf yapı içeren polimerlere kısmi kristalin polimerler denir. Kısmi kristalin polimerler aynı kimyasal bileşime sahip fakat lineer (YYPE) ve dallanmış (DYPE) molekül zincirlerine sahip olan polimerlerdir. Kısmi kristalin polimerlerde camsı geçiş sıcaklığındaki (T_g) elastik modülünün değeri, amorf polimerlerdeki gibidir. Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığı (T_m) olmak üzere iki termal davranış gösterirler [2].

Sıcaklığa bağlı sürünme modülü, yarı kristal termoplastiklerin davranış şekillerini en iyi anlatan değerdir [12]. Şekil 2.16’ da değişik zincir yapılarına sahip ve farklı polimerizasyon işlemi ile elde edilen polistirenin (PS) sürünme ve sıcaklık eğrileri verilmiştir. Şekildeki A eğrisi malzemenin yarı kristal halinin, B eğrisi ise malzemenin amorf malzemenin sürünme modülünü, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak göstermektedir. T_g sıcaklığında A eğrisinin sürünme modülü B eğrisine göre daha yüksektir. T_g sıcaklığının üzerinde kristal bölgelerin yapısı malzemeye yüksek mukavemet sağlarken, amorf bölgeler ise malzemenin daha değişken mukavemet değerlerine sahip olmasına neden olabilmektedir. Bu durum şekil 2.17’de görülmektedir [12]. Amorf bölgeler T_g sıcaklığının altında katı halde bulunurlar. Polimer malzeme bu bölgede rijit ve kırılğan özellik gösterir ayrıca kopma uzaması bu bölgede düşüktür. Bundan dolayı bu malzemeyi T_g sıcaklığında birçok uygulama için kullanmak uygun değildir. T_g

sıcaklığının üzerinde amorf bölgeler yumuşarken, kuvvetli ikincil değerlik bağlarına sahip kristal bölgelerde bir değişiklik bir bozulma olmaz.

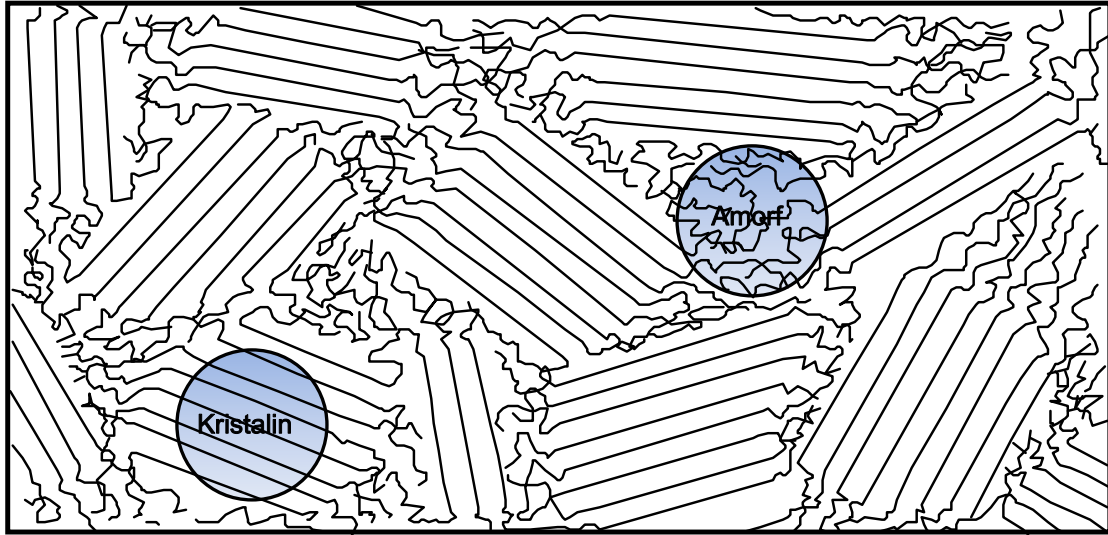


Şekil 2.16 Yarı kristalin ve amorf haldeki polistirenin sürünme modülü eğrileri [12]



Şekil 2.17 Yarı kristalin bir termoplastiğin gerilme mukavemeti ve kırılma uzama davranışı [12]

Erimiş halde bulunan bir polimer soğutularak kristallendirilirse, elde edilen katının yoğunluğu amorf polimer ile yetkin kristalin birim hücre boyutlarından hesaplanan kuramsal yoğunluğu arasında bir değer alır. Bu durumu açıklamak üzere Şekil 2.18’ de gösterilen “saçaklı misel” modelinden yararlanılmaktadır. Buna göre katı polimerde kristalin ve amorf bölgeler iki ayrı faz oluşturmaktadır. Polimer zincirleri birçok kristal ve amorf bölgeden geçmektedir. Kısmi kristalin polimerlerin özellikleri yapıda mevcut olan kristal faz yüzdesine bağlıdır. Polimer molekülleri arasındaki önemli çekim kuvvetleri polimer zincirlerinin kristalleşmesini kolaylaştırır.

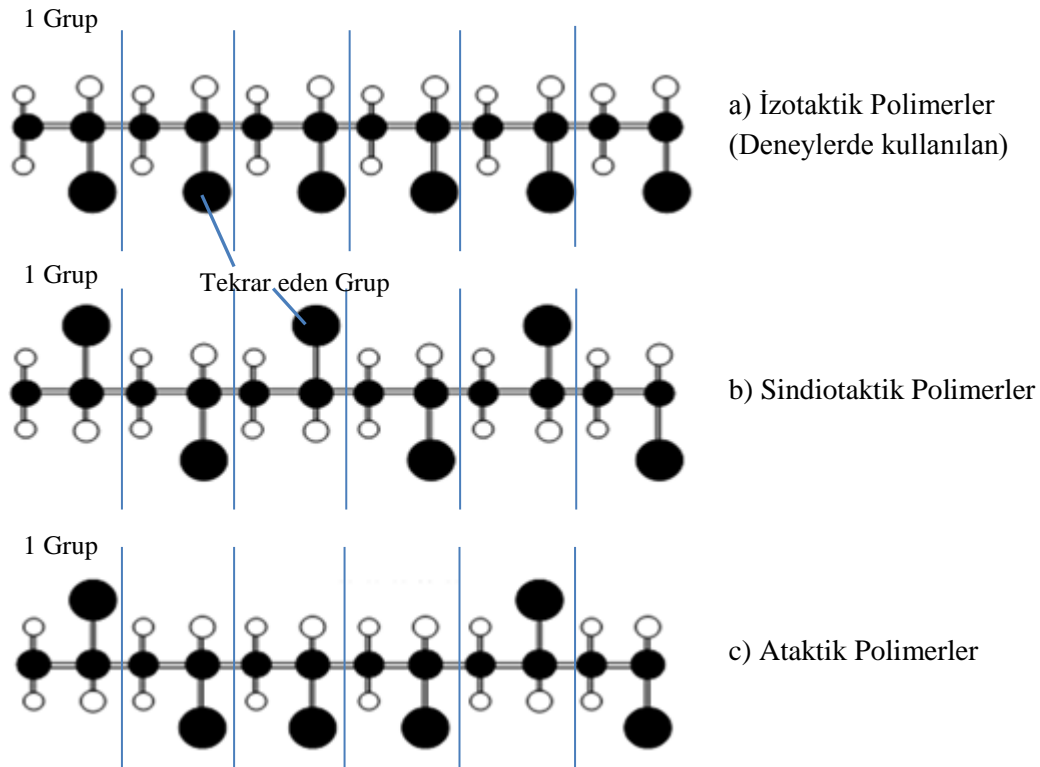


Şekil 2.18 Kısmi kristalin polimerlerde “saçaklı misel” yapısı [14]

2.2.7. Zincir konfigürasyonuna göre polimerlerin sınıflandırılması

Polimer moleküllerinde çeşitli izomer olanakları vardır. İzomer monomerlerin polimerizasyonu ile, zincir yapıları birbirinden tamamen farklı olan polimerler elde edilir. Farklı polimerizasyon yöntemleri ile bir tek monomerden bile izomer polimerler yapılabilir. Bütün organik bileşiklerde olduğu gibi, polimer moleküllerinde de, moleküldeki atomların veya takılı grupların değişik biçimde düzenlenmeleri (konfigürasyon) ile, geometrik izomerlik ve optik izomerlik olmak üzere iki farklı izomerlik ortaya çıkar [9].

Polimer zincirinde kimyasal yapı aynı olsa bile yerleşme şekillerine bağlı olarak polimer zincir yapısında farklılıklar oluşacaktır. Böylece polimer zincirinin değişik dizilme şekillerinden yani konfigürasyonundan söz edilebilmektedir [9]. Bir polimer zincirinin konfigürasyonu, polimer zincirinde atomlar arasındaki bağ kopartılmadıkça ve polimer zinciri yeniden düzenlenmedikçe değiştirilemez. Vinyl polimerlerinde asimetrik karbon karbon atomlarına bağlı olan R grupları, polimerdeki düzlemsel zigzag ana zincirinin üstünde ve altında olmak üzere gelişigüzel dağılırsa, polimer belirli bir düzen göstermez. Böyle bir zincire ataktik denir [10]. Polimer zincirinin yinelenen birimleri aynı konfigürasyonda bulunmak üzere bağlanırsa, izotaktik bir polimer yapısı elde edilir. Polimerde birbirini izleyen birimler ters konfigürasyonda olmak üzere sıralanırsa sindiotaktik bir polimer yapısı ortaya çıkar [2,10]. Şekil 2.19’da izotaktik, sindiotaktik ve ataktik polimer yapıları görülmektedir. İzotaktik ve sindiyotaktik konfigürasyonlar polimer yapısında kristallenmeyi artırır. Ataktik düzende ise kristalin yapı meydana gelmez [10].



Şekil 2.19 Zincir konfigürasyonuna göre polimerlerin dizilişi [2,19]

2.2.8. Kullanım alanına göre polimerlerin sınıflandırılması

Kullanım alanına göre polimerler, plastikler, elastomerler, fiberler, kaplamalar, filmler, köpükler ve yapıştırıcılar olarak yedi ana gruba ayrılmaktadır [2,6,8-12]. Bir polimer özelliklerine göre iki veya daha fazla grupta yer alabilmektedir. Örnek olarak tel haline getirilmemiş bir fiber, plastik malzeme olarak kullanılabilir [6].

Plastikler, elastomerler ve fiberlerden, fiziksel ve mekanik özelliklerine göre polimerlerin sınıflandırılmasında anlatıldığı için burada anlatılmayacaktır.

Kaplama malzemelerinin çoğu organik olup boya, vernik vb. içerisinde polimerik maddeler içerirler. Kaplamalar genellikle; 1- *Ortamdaki korozif ve zarar verici reaksiyonlardan malzemeyi korumak*, 2- *Malzemeye estetik bir görüntü vermek*, 3- *Elektriğe karşı yalıtım sağlamak* amacıyla uygulanır [6].

0,025 – 0,125 mm kalınlığa sahip olan filmler, başta gıda sanayi olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Kullanıldığı yere göre filmlerden; düşük yoğunluk, yüksek esneklik, yüksek çekme ve yırtılma dayanımı, nem ve kimyasallara karşı yüksek direnç, düşük gaz geçirgenliği gibi özellikler beklenir. Film yapımında en çok kullanılan polimerler polietilen ve polipropilendir [6].

Termoplastik ve termoset malzemelerin her ikisinden de üretilebilen ve çok gözenekli bir yapıya sahip olan köpük malzemeleri, koltuk üretiminde, eşya paketlemesinde ve ısı yalıtım malzemesi olarak çok değişik alanlarda kullanılmaktadır. Köpük malzemelerinin içerisine kolayca buharlaşan katkı maddeleri ilave edilir. Malzemeler ısıtılırken bu maddeler buharlaşır ve geriye sünger gibi çok gözenekli köpük maddesi kalır [6].

Yapıştırıcı olarak kullanılan bazı polimerler, birleşme bölgesinde yüksek kayma dayanımı oluşturarak iki katı malzemenin yüzeyini birleştiren maddelere yapıştırıcı denir. Metal-metal, metal-plastik, metal-seramik vb. gibi çok farklı malzemeyi birbirine bağlayan yapıştırıcıların sıcaklığa bağlı olarak belirli bir kullanım sınırı vardır. Yapıştırıcı olarak organik polimerlerin kullanıldığı bazı uygulamalarda düşük sıcaklıklarda yapıştırmanın dayanımı düşüktür, ancak sıcaklık artışına bağlı olarak mukavemet hızla azalır [6].

2.3. Yaygın Kullanılan Polimer Şekillendirme Yöntemleri

Polimerik malzemeler genellikle oda sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta basınç uygulanarak çok farklı yöntemler ile şekillendirilmektedir. Polimer malzemenin şekillendirilmesi esnasında malzemenin termoplastik veya termoset olması (termoplastik ise yumuşama sıcaklığı), ürünün geometrisi ve boyutları, şekillendirilen malzemenin atmosferik kararlılığı gibi bazı faktörler oldukça önemlidir [6].

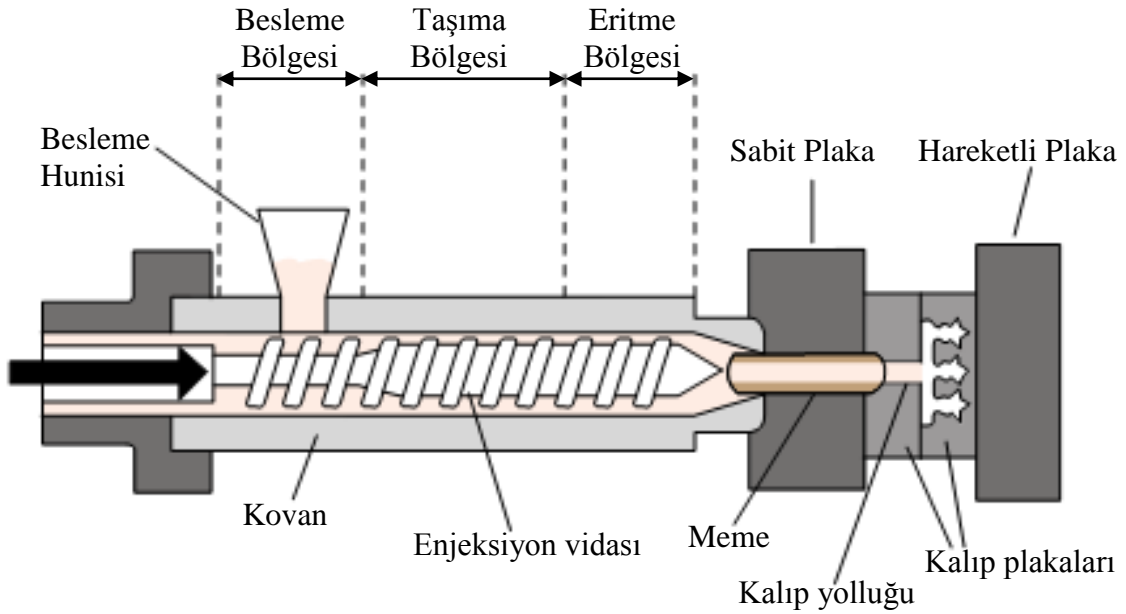
Termoplastikler camlaşma sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta şekillendirilir. Sıvı veya hamur hale gelmiş plastik malzeme bir kalıba dökülür ve kalıp içerisine basınçla sokulur. Bir süre kalıp içerisinde tutulan malzeme kalıptan aldığı şekli kaybetmeyeceği sıcaklığa soğuduktan sonra kalıptan çıkarılır. Termoset polimerlerin şekillendirilmesi sıvı halde ve molekül ağırlığı düşük lineer yapıları polimerlerin hazırlanması ve sertleştirme işlemi denilen sıvı ürünün kalıp içerisinde son şeklinin verilmesi şeklinde olmak üzere iki adımda gerçekleştirilir. Sertleştirme adımında moleküler seviyede kimyasal ve yapısal değişimler meydana gelir. Sertleşme işlemi gerçekleşince malzemeler geri kazandıkları geometriyi kaybetmediklerinden kalıptan sıcak olarak çıkarılır. Termoplastik malzemeler geri dönüşümlüdür ve hurdaları tekrar tekrar üretimde kullanılabilir [2,6,9,10]. Termoset malzemeler tekrar kullanılamazlar ve eritilemezler. Termoplastik malzemelere göre termoset malzemelerin kullanım sıcaklığı daha yüksektir [6]. Tablo 2.4’ te bazı termoplastik ve termoset polimerlerin son kullanım sıcaklıkları örnek olarak verilmiştir.

Tablo 2.4 Bazı termoplastik ve termoset polimerlerin son kullanım sıcaklıkları [6]

Termoplastik	°C	Termoset	°C
Naylon 6/6	80	Melamin	120
YY Polietilen	100	Fenol	150
Polipropilen	105	Polyester	150
Polivinilklorür	110	Alkit	160
Polimetil metakrilat	125	Epoksi	180

2.3.1 Enjeksiyon kalıp yöntemi

Esas olarak termoplastiklerin şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Ancak özel ısıtma ve soğutma bölmeleri eklenmiş bazı makinelerde bazı termoset malzemelerde enjeksiyon yöntemi ile şekillendirilmektedir [6,9]. Enjeksiyonla kalıplama sırasında polimerik malzemenin enjektisi sonrası beklenen süreler nedeniyle kesikli olarak çalışan bir tekniktir [9,22]. Şekil 2.20’ de gösterildiği gibi sistem besleme hunisi, polimerin ergitildiği ve içinde hareketli bir sonsuz vidanın bulunduğu silindir ile kalıp olmak üzere üç kısımdan oluşur.



Şekil 2.20 Plastik enjeksiyon sisteminin basit bir gösterimi [20]

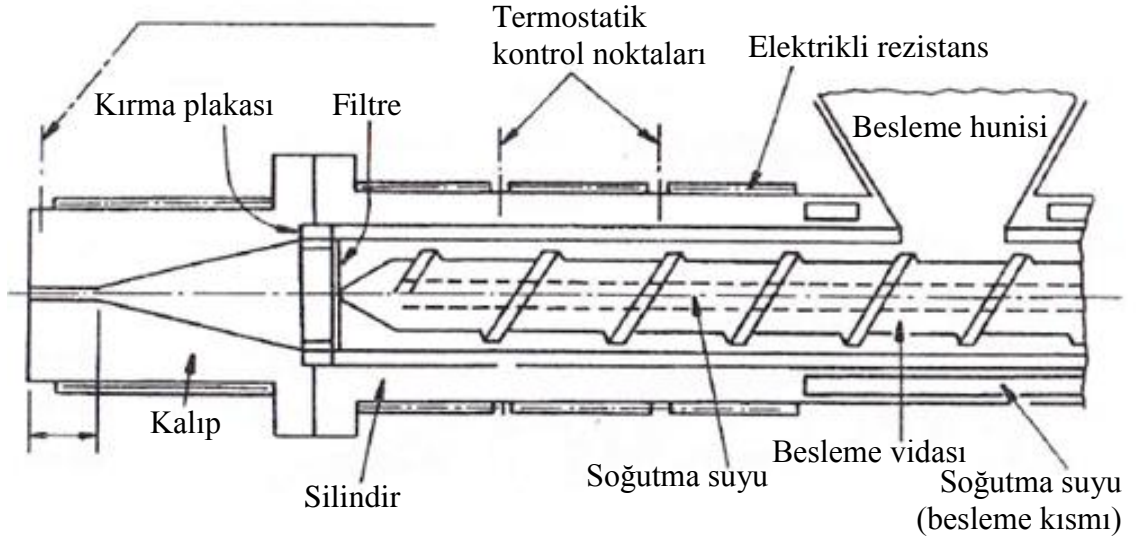
Enjeksiyonla kalıplamada plastik parçalar, eritme, kalıp boşluğuna doldurma, soğutma ve parçaların kalıptan çıkartılması kademeleri sonucu elde edilir. Besleme hunisine konulan toz veya granül haldeki polimer huninin titreşimleri ve vidanın emme hareketiyle enjeksiyon makinesini besler. Isıtma ve vidanın hareketi ile oluşturulan sürtünme ısı ve basınçla eritilen polimerik malzemeler silindirin çıkışına kalıba doğru iletilir. Ergimiş polimer vidanın ileri doğru ani olarak itilmesi ile silindirin çıkışında takılı olan kalıbın içine sıvı halde enjekte edilir. Yüksek basınç altında bir süre

kalıpta tutulan ürün, soğutularak kalıbın hareketli kısmının açılmasıyla katı halde dışarı alınır. Bu arada vida tekrar geri çekilir, besleme hunisinden silindire tekrar reçine aktarılır ve bir sonraki parçanın üretimine geçilir. Kalıbın soğutulması genellikle kalıp içerisine açılan kanallardan su geçirilmek suretiyle gerçekleştirilir.

İşleme hızını arttırmak amacıyla çoklu döner kalıplar kullanılmakta ve bir basmada birden fazla kalıp doldurulabilmektedir. Doldurulan kalıbın silindir ağzından çekilmesiyle diğer kalıpların doldurulması seri şekilde gerçekleştirilebilmektedir [9]. Hammaddenin tek bir işlemle istenilen şekilde kalıplanabilmesi ve birçok durumda imal edilen ürün için son işlem uygulamalarını gerektirmemesi, bu yöntemi seri üretim için oldukça uygun bir hale getirmektedir [12].

2.3.2 Ekstrüzyon kalıplama yöntemi

Ekstrüzyon işlemi plastik malzemelerin ısı ve basınç altında vida baskısı ile bir sonraki işlem için kafa ve kalıptan geçirilerek mamül veya yarımamül olarak üretilmesi işlemidir [23]. 3000 yıldır bilinen bu yöntem ile profil, levha, boru, çubuk, yassı veya yuvarlak film, kablo kılıflama vb. termoplastik malzemeler elde edilir [6,9,10,23]. Ekstrüderin çalışma mantığı temel olarak kasaplarda kullanılan kıyma makinasının çalışma prensibine benzerdir [9]. Ekstrüzyon ünitesinde besleyiciden sürekli olarak gelen katı hammadde dönen vida yardımıyla ileri doğru itilir. Vidanın ilerleme hareketi ile eriyen polimer basınç altında belli şekildeki bir boşluktan zorlanarak dışarıya çıkartılır. Kalıptan çıkan plastik malzeme hava üflenerek ya da su haznesinden geçirilerek camsı geçiş sıcaklığının altına kadar soğutulur [6,23]. Sistemde bir besleme hunisi, sonsuz vida, vidanın içinde hareket ettiği ve 400 °C' ye kadar yüksek sıcaklıklarda, uygulanacak yüksek basınca dayanıklı bir silindir gövde; silindirin çıkış kısmına yerleştirilen kafa olmak üzere başlıca dört kısım bulunur [9]. Şekil 2.21' de ekstrüzyon sisteminin şematik bir gösterimi yer almaktadır.

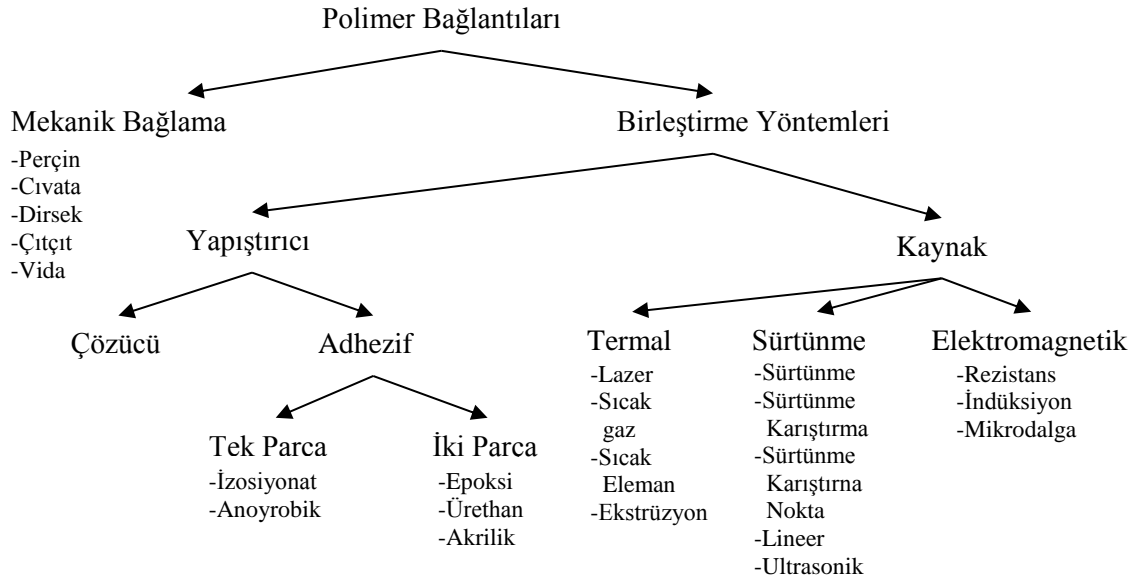


Şekil 2.21 Ekstrüzyon sisteminin şematik gösterimi [9]

Ekstrüzyon ile kalıplama yönteminin aynı kesitte hassas ölçülerde ve istenilen uzunlukta kesiksiz ürünler elde edebilmesi avantajının yanında, ekstrüder sistemlerinin pahalı olması, ürüne ekstrüder çıkışından sonra ek işlemlerin uygulanması gereği gibi dezavantajları bulunmaktadır [23]. Ayrıca ekstrüderde her tür plastik işlenemez [9].

3. POLİMERLERE UYGULANAN BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Polimer bağlantılarını Şekil 3.1’ de görüldüğü gibi mekanik bağlama ve birleştirme yöntemleri olarak iki ana gruba ayırmak mümkündür [4,5]. Mekanik bağlama yöntemleri termoplastik ve termosetlere uygulanabilirken, kaynaklı birleştirmeler ısı karşısında gösterdikleri dirence göre yalnızca termoplastiklere uygulanabilmektedir [10].



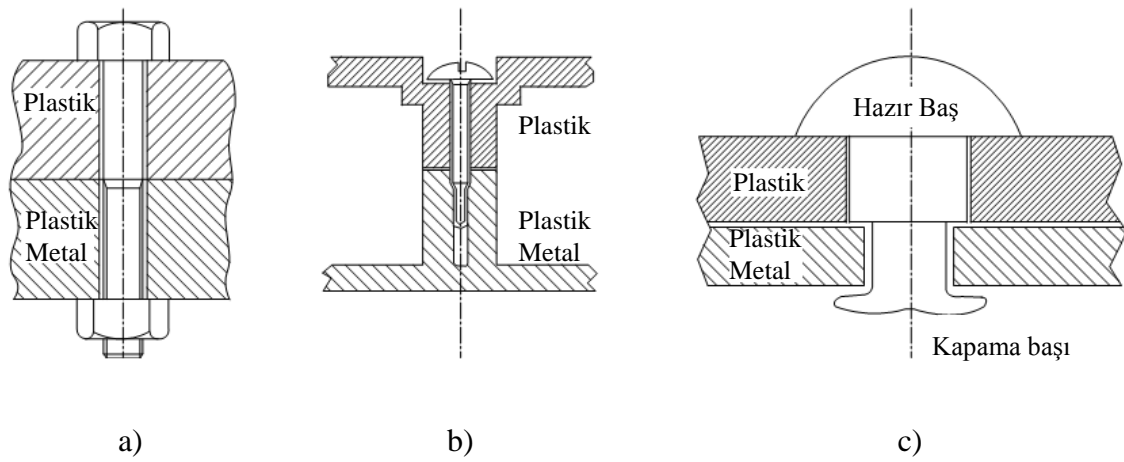
Şekil 3.1 Polimer bağlantılarının sınıflandırılması [4,5]

Mekanik bağlama yöntemlerinde cıvata, perçin, vb. gibi ara bağlantı elemanı kullanılırken birleştirme yöntemlerinde birleştirilecek olan parçalar, harici bir parça ile temas etmezler. Yapıştırıcı kullanılarak yapılan birleştirmelerde tıpkı kaynak gibi plastik parçaların çözülemeyen bir biçimde bağlanmalarını sağlar. Son yıllarda kaynak işlemi plastik parçaların birleştirilmesi işleminde yaygın olarak kullanılmaktadır [25].

3.1. Mekanik Bağlama Yöntemleri

Mekanik bağlama yöntemleri çözülebilen ve çözülemeyen olmak üzere iki gruba ayrılır [10]. Mekanik bağlama yöntemleri ile hızlı bir şekilde birleştirme işlemi gerçekleştirilir. Ancak boşluklu bağlantı şeklinde yapılan bu birleştirmeler sıkı bir bağlantı sağlamadığı için bölgesel gerilimlere neden olarak polimerik malzemede mukavemet azaltıcı etkilere

neden olurlar [5]. Cıvata vb. kullanılan çözülebilen bağlama yöntemlerinde, bağlama elemanı tahrip edilmeden bağlama çözülebilir ve tekrar aynı bağlama elemanı ile bağlama gerçekleştirilebilir. Çözümeyen mekanik bağlama yöntemlerinde ise bağlama elemanı tahrip edilerek bağlantı çözüldüğü için tekrar aynı bağlama elemanını kullanarak bağlantı yapmak mümkün değildir [10]. Mekanik bağlama yönteminde birleştirilecek malzemelerin aynı tür malzemeler olmasına gerek yoktur ve metaller dâhil olmak üzere her türlü malzemeye uygulanabilir [25]. Şekil 3.2’ de metalik bağlamaya ait örnekler gösterilmektedir.



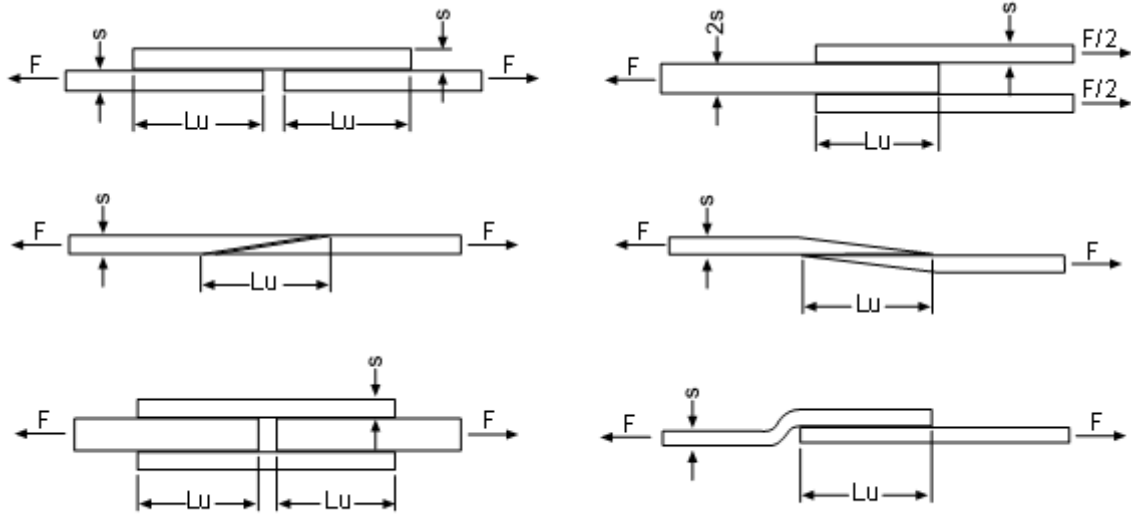
Şekil 3.2 Polimer metalik bağlantılarına ait örnekler a) Cıvatalı bağlantı, b) Vidalı (Saplama başlı) bağlantı, c) Perçinli bağlantı [10]

Plastiklerin çentiğe karşı hassasiyetleri perçin veya cıvata ile birleştirilmelerini zorlaştırır ve bazı durumlarda kısıtlar. Bu nedenle birleştirme bağlama yöntemleri olan yapıştırma ve kaynak yöntemleri günümüzde daha ön plana çıkmıştır [29].

3.2. Yapıştırıcı Kullanılarak Yapılan Bağlama Yöntemleri

Plastiklerin yapıştırma ile bağlanması çözücü ve adhezif olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilir [10]. Yapıştırıcı kullanılarak yapılan bağlantılarda, yapıştırılan malzemelerin kimyasal direnci oldukça önemlidir [4,5,10]. PVC ve ABS gibi kimyasal bir madde ile çözünen plastikler yapıştırılırken, PE ve PP gibi kimyasal bir madde ile çözülmemeyen plastikler yapıştırılamaz [10]. Yapıştırırmalı bağlantılarda birleştirilecek yüzeylerin arasına ~ 0,1 mm kalınlığında yapıştırıcı veya çözücü bir madde sürülür ve belli bir süre basınçsız veya basınç altında tutularak bağlantı sağlanır. Bağlantının

mukavemeti, yapıştırıcı molekülleriyle birleştirme yüzeyleri arasında meydana gelen adezyon kuvvet olayına dayanır [10]. Yapıştırırmalı bağlantıların mukavemeti kaynaklı bağlantıların mukavemetine göre daha düşüktür. İşlem için ısı gerektirmemesi ve çok ince parçalarda çarpılma, şekil değiştirme vb. meydana gelmemesi kaynağa göre yapıştırırmalı bağlantıların önemli bir üstünlüğü sayılabilir. Yapıştırıcılar günlük hayatımızda kullandığımız basit malzemelerden endüstriyel uygulamalara kadar çok geniş bir alanda üretim ve tamir işlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yapıştırma işleminde bindirme tipi birleştirmeler kullanılmaktadır [29]. Şekil 3.3’ de yapıştırırmalı bağlantılara ait örnek bağlama şekilleri gösterilmiştir. Burada L_u =bindirme uzunluğu, s =malzeme kalınlığı olarak verilmiştir. Genellikle bindirme bağlantılarında $L_u=(15-29)s$ olarak alınır.



Şekil 3.3 Polimerlerin yapıştırma bağlantılarına ait örnekler [10,31]

3.3. Termoplastiklere Uygulanan Başlıca Kaynak Yöntemleri

Polimer teknolojisinin gelişmeye başladığı ilk yıllarda plastiklerin az miktarlarda ve basit biçimlerde kullanımları sebebiyle kaynak teknikleri üzerinde pek fazla durulmamıştır. II. Dünya savaşı yıllarında özellikle metalik yapıların korozyon sebebiyle ciddi hasarlara uğraması, plastik ve plastik esaslı kompozit malzemelerin

endüstriyel alanlarda kullanılan diğer mühendislik malzemelerine alternatif teşkil edebilme koşullarını gündeme getirmiştir [26].

İlk olarak PVC (polivinilklorür) üzerinden termoplastiklerin ısı ve basınç altındaki davranışları incelenmiş ve bu malzemelerin kaynakla birleştirilebilme esasları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar zamanla geliştirilen yeni plastik türleri ve ortaya çıkan ihtiyaçlar doğrultusunda bütün termoplastiklerin kaynak işlemleri ile birleştirilebilmelerine öncülük etmiştir [26]. Termoplastiklerin kaynağında işlem sırası genel olarak birleştirme yüzeylerinin yumuşatılması, basınç altında parçaların birleştirilmesi ve sertleşinceye kadar tutma şeklinde gerçekleştirilmektedir [29].

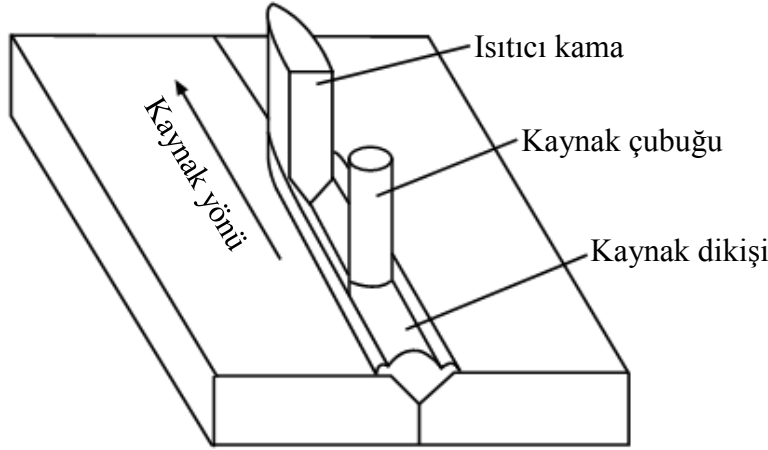
Kaynak için gerekli olan ısı, ısı transfer yoluyla ya da malzemenin kendi bünyesinde oluşturulmak suretiyle elde edilir. Isı polimerlerin birleştirilecek yüzeylerini yumuşatır ya da eritir. Metal kaynak yöntemlerinde olduğu gibi, kaynak yöntemine göre ek malzeme (elektrot) kullanılır ya da kullanılmaz. Ek malzeme kullanılan durumlarda kaynak ağzı açılmalıdır [10]. Ek malzeme kullanılmayan durumlarda yumuşatılmış yüzeyler birbirine bastırılmak suretiyle kaynak işlemi gerçekleştirilir. Tablo 3.1' de günümüzde termoplastiklerin kaynağında kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin özellikleri kısaca belirtilmiştir.

Tablo 3.1 Termoplastiklerin kaynağının sınıflandırılması [26,27]

Isı Transfer Yöntemleri		Isının Direkt Malzemede Oluşturulduğu Yöntemler	
Isıl Yöntemler		Mekanik Yöntemler (Sürtünme Esaslı)	Elektromanyetik Yöntemler
<ul style="list-style-type: none">• Sıcak Gaz Kaynağı• Sıcak Kama Kaynağı• Sıcak Eleman Kaynağı• Ekstrüzyon Kaynağı• İnfrared Isıtma Kaynağı• Lazer Kaynağı	<ul style="list-style-type: none">• Sürtünme Kaynağı• Sürtünme Karıştırma Kaynağı• Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı• Titreşim Kaynağı (100-250 Hz)• Ultrasonik Kaynak (20-40 kHz)	<ul style="list-style-type: none">• Rezistans (Elektro-füzyon, Implant) Kaynağı• İndüksiyon Kaynağı (5-25 MHz)• Dielektrik (Yüksek Frekans) Kaynağı (1-100 MHz)• Mikro-dalga Isıtma Kaynağı (1-100 GHz)	

3.3.2. Sıcak kama kaynak yöntemi

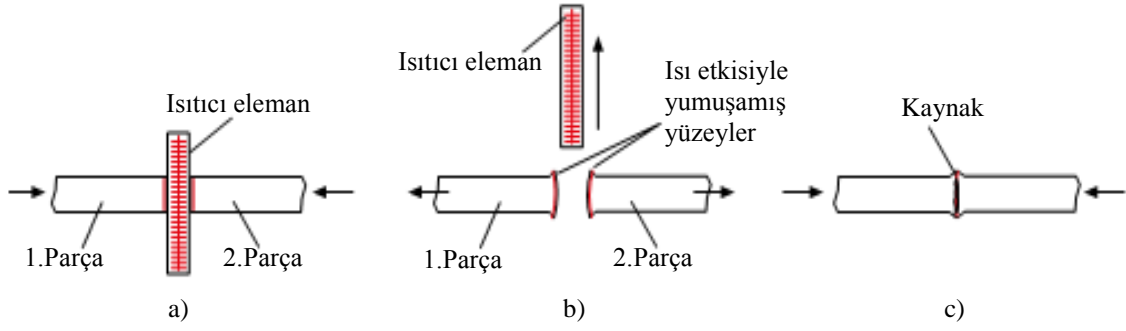
Sıcak gaz ve sıcak eleman yöntemlerine benzemektedir. Isıtıcı olarak kama şeklinde bir eleman kullanılmaktadır [26,29]. Kaynak yüzeylerinin yeterli derinlikte uygun olarak ısıtılmaması gibi sebepler bu yöntemin diğer yöntemlere göre kullanım alanını oldukça sınırlamıştır [26]. Şekil 3.5’ te sıcak kama yöntemi şematik olarak gösterilmektedir.



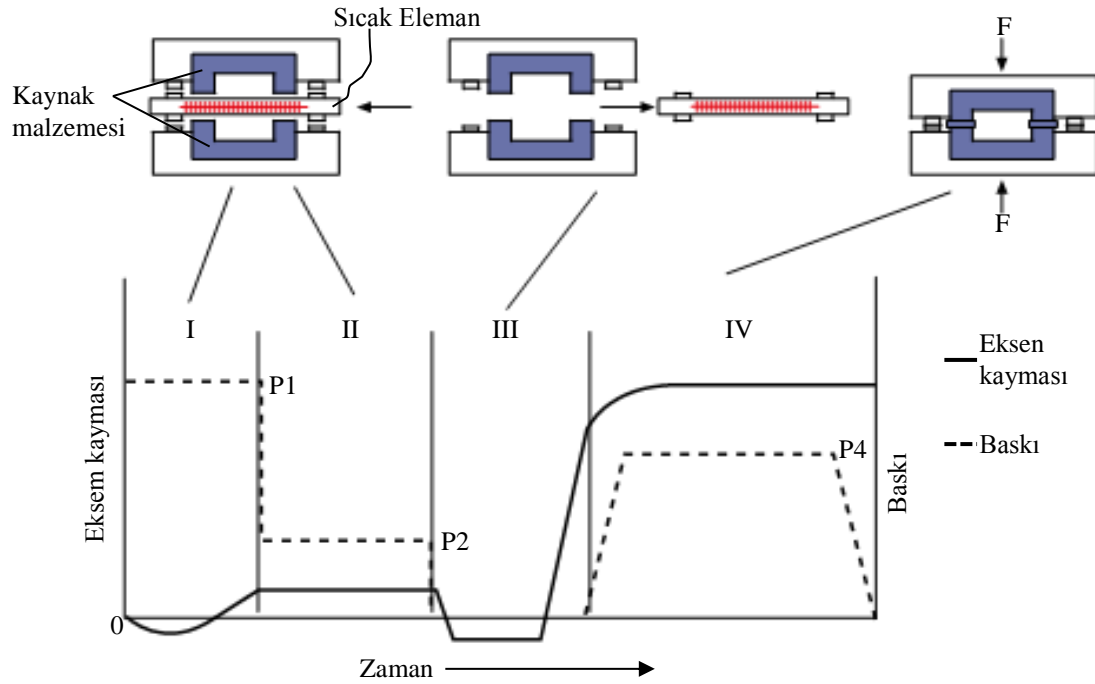
Şekil 3.5 Sıcak kama yönteminin şematik gösterimi [16]

3.3.3. Sıcak eleman kaynak yöntemi

Isı transferine dayanan ve ek malzemesiz olarak gerçekleştirilen bir kaynak yöntemidir [10,26,28]. Bu yöntemde birleştirilecek parçaların birleştirme yüzeylerine bir ısıtıcı eleman ile bastırılır ve yüzeyler ısıtılarak yumuşamış bir hale gelinceye kadar beklenir. Daha sonra ısıtıcı eleman kaynak bölgesinden uzaklaştırılır ve birleştirme yüzeyleri birbirine bastırılarak kaynak bölgesi soğuyuncaya kadar tutulur. Yöntemin basit ve ucuz olması, çoklu adetlere uygulanabilmesi yöntemin en önemli avantajlarıdır. Kaynak için gerekli zamanın uzun olması, yumuşamış polimerin hava etkisiyle oksidasyona uğraması yöntemin dezavantajları olarak öne çıkmaktadır [10,27,28]. Bu yöntem genellikle, sert ve yumuşak PVC, PE, PP, PA gibi malzemelerin birleştirilmesinde kullanılmaktadır [5,29]. Kaynak için kullanılan sıcaklık genellikle kaynaklanacak malzemenin cinsine göre değişiklik göstermekle birlikte 180-230 °C arasında değişmektedir [5]. Şekil 3.6’da sıcak eleman kaynak yönteminin uygulanması şematik olarak gösterilmektedir. Şekil 3.7’ de sıcak eleman kaynak yönteminin işlem basamakları ve zamana bağlı olarak oluşan aksel kayma gösterilmektedir.



Şekil 3.6 Sıcak eleman kaynak yönteminin şematik gösterimi, a) Kaynak bölgesinin ısıtılması, b) Isıtıcının kaynak bölgesinden uzaklaştırılması, c) Isıtılmış yüzeylerin birbirine bastırılması ve soğuyana kadar kuvvet uygulanması [10, 29]



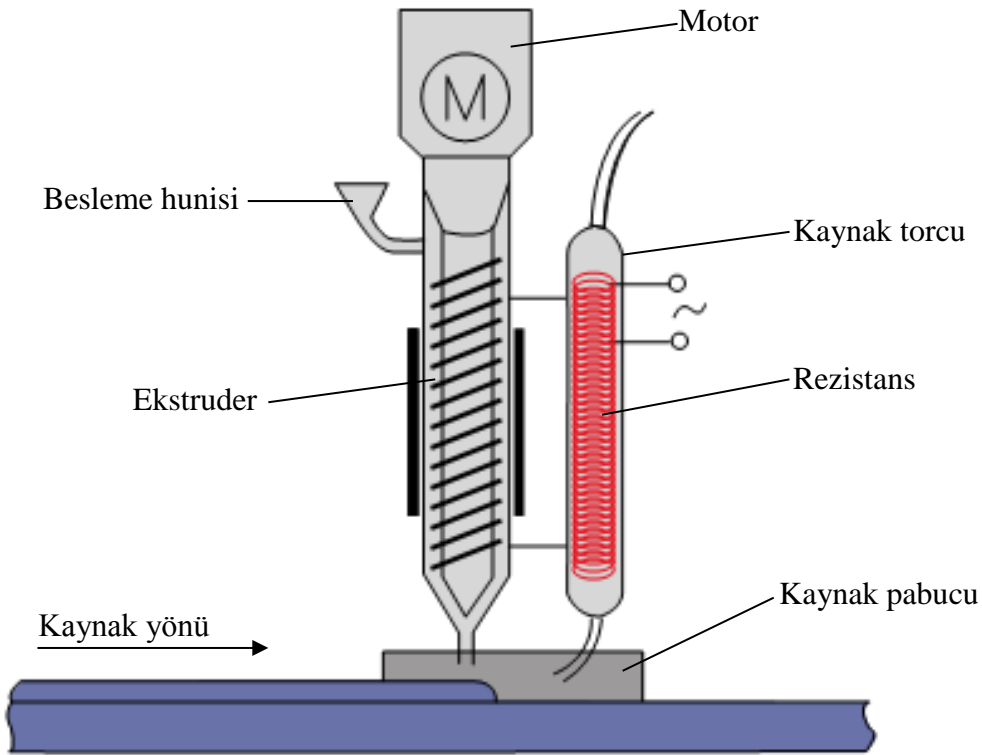
Şekil 3.7 Sıcak eleman kaynak yönteminin şematik gösterimi ve zamana bağlı eksen kaymasının açıklanması [30,32]

3.3.4. Ekstrüzyon kaynağı

Sıcak gaz kaynağından geliştirilmiş bir yöntemdir ve uygulama olarak sıcak gaz kaynağına benzemektedir [4,30]. Sıcak gaz kaynağından farkı, ilave malzemenin eritilmiş halde kaynak bağlantısına enjekte edilmesidir. Bu yöntemde ekstrüder içinde

ısıtılan ilave malzeme, ilerleme hareketiyle birlikte sıcak gaz ile önceden ısıtılan kaynak bölgesine sevk edilir ve basınç altında tutularak kaynak işlemi gerçekleştirilir [5,10,29].

Genellikle uzun birleştirmelerde kullanılan bu yöntemle çok kalın olmadığı sürece parçalar tek pasoda kaynak edilebilir. Ufak yolcu gemilerinin ek yerleri ve termoplastik hava kanallarının montajı gibi yerlerde bu yöntem kullanılmaktadır [5,29,32]. Şekil 3.8' de ekstrüzyon kaynağı uygulaması şematik olarak gösterilmiştir.

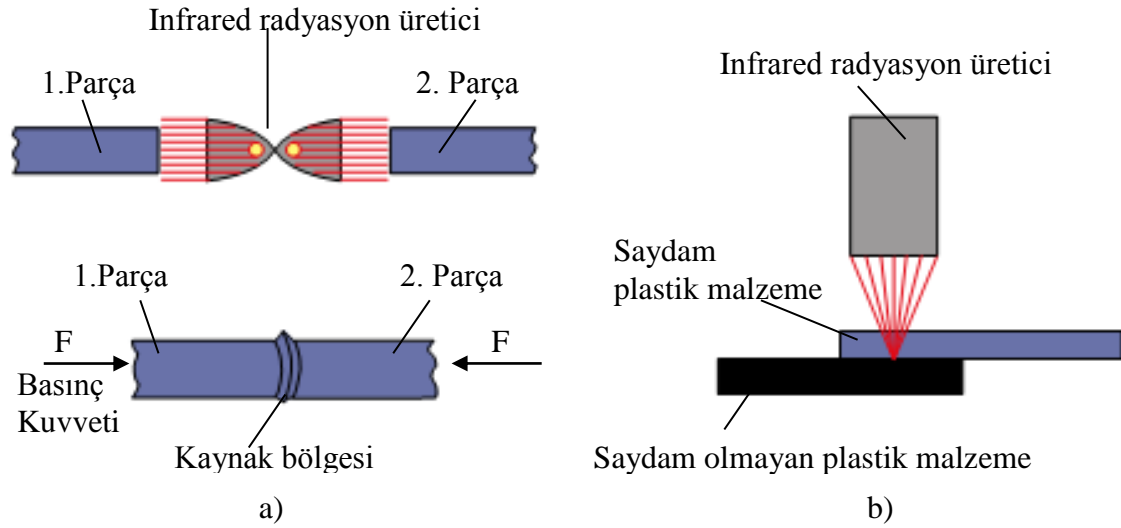


Şekil 3.8 Ekstrüzyon kaynak yönteminin şematik gösterimi [16]

3.3.5. Infrared ısıtma kaynağı

Isıtıcı cihazların kaynak bölgesine yeterli mesafede yaklaşamadığı durumlarda kızılötesi radyasyon (IR) polimerlerin kaynağı için temassız bir ısı kaynağı şeklinde alternatif bir yöntem olarak kullanılmaktadır [32]. Kuvars ısı lambalarından elde edilen ve dalga boyu $\sim 1\mu$ olan infrared, radyasyon halinde kaynak bölgesine uygulanır. Birleştirme yüzeylerine çarpan ışınların soğurulması ile kaynak için gerekli sıcaklık elde edilir ve yüzeylerin uygun derinlikte üniform olarak yumuşamaları sağlanır [5,29,32].

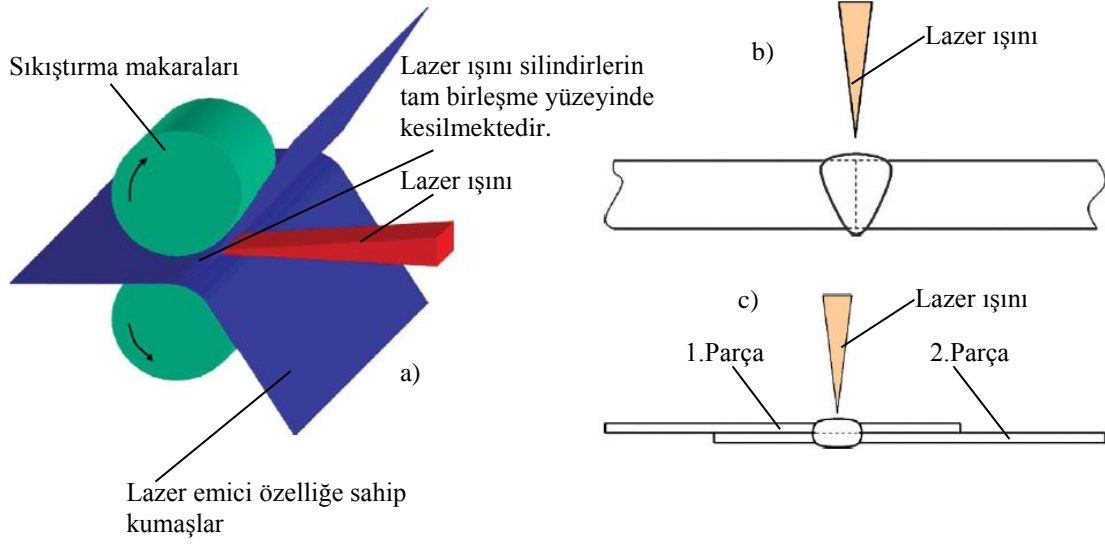
Kullanılan teçhizatın ve işlem maliyetinin düşük olması, kısa zaman içerisinde sağlam kaynaklı birleştirmeler yapılabilmesi yöntemin en önemli avantajlarıdır [32-35]. Şekil 3,9' de infrared kaynak yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Infrared ısıtma kaynak yönteminin şematik gösterimi a) Alın (küt) birleştirme kaynağı, b) Bindirme kaynağı [5,32]

3.3.6. Lazer kaynağı

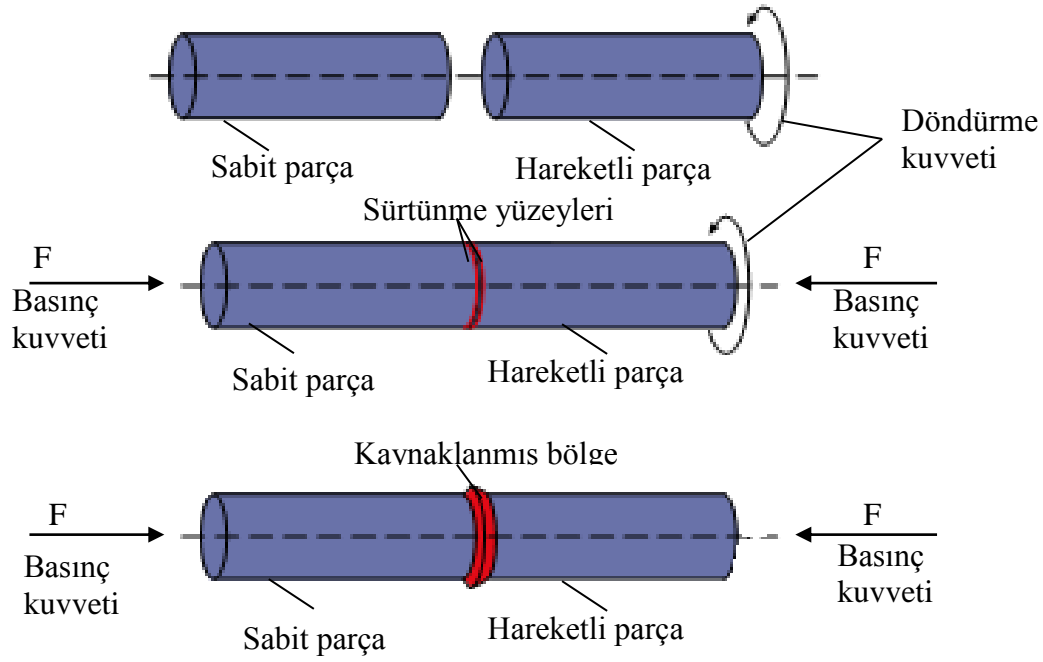
Termoplastiklerin kaynak bölgesini eritmek için lazer ışığı kullanılan bu yöntem ilk olarak 1970'li yıllarda bulundu ve 1990'ların sonuna kadar seri üretim için yaygın bir şekilde kullanıldı [32]. Yakın temas ısıtıcı cihazların kullanıldığı bu yöntem, hassas ve minimum boyutlardaki kaynak işlemleri için tercih edilmektedir. 40 W gücündeki ($\lambda=10,6 \mu$) Nd-YAG veya CO₂ tip cihazlardan sağlanan ve uzunluğu 800-1100 μ arasında olan lazer ışını kaynak bölgesine gönderilir. Moleküller üzerinde yankı frekans oluşmasına yol açan ışın kaynak bölgesini ısıtarak yumuşatır [5,32-35]. Titreşimsiz olması ve minimum kaynak çıkıntısı meydana getirmesi lazer kaynağının en önemli avantajıdır. Kaynak bölgesinin minimum boyutlarda olması sebebiyle malzemelerde taşma, şişme gibi deformasyonlar görülmez. Lazer kaynağı, elektronik, otomotiv, tekstil, yiyecek ve gıda sanayi, biomedikal aletler gibi çok farklı sektörlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [32]. Şekil 3.10' da lazer kaynak uygulamaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Lazer kaynak uygulamalarının şematik gösterimi, a) Makaraların birleşme yüzeylerinde kaynak, b) Alın küt kaynağı, c) Bindirme kaynağı [32]

3.3.7. Sürtünme kaynağı

Termoplastiklere uygulanabilen ve metaller için uygulanan ile aynı prensip üzerine kurulu olan bir kaynak yöntemidir [85]. Şekil 3.11’ de görüldüğü gibi bu yöntemde parçalardan biri, diğer parça onun üzerinde açısız hız ile dönerken sabit olacak şekilde tutulur. Daha sonra parçalar üzerine basınç uygulayarak sıkıştırılır. Sürtünmeden dolayı meydana gelen ısı polimerin ergimesine neden olur ve parçalar soğutularak kaynaklı bağlantılar oluşturulur [4]. Yapılan deneysel çalışmalarda kaynak bölgesi mukavemetinin ana malzeme mukavemetinin % 90’ına kadar çıkabildiği gözlemlenmiştir [5]. Yüksek kaynak kalitesi ve işlemin tekrarlanabilirliği yöntemin en önemli avantajıdır. Parçalardan en az birinin dairesel olması gerekliliği yöntemin dezavantajıdır.



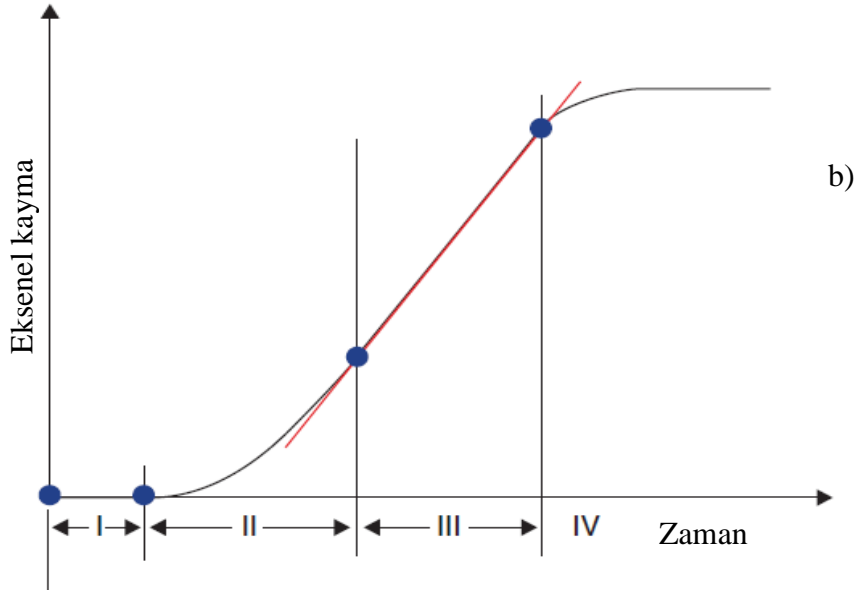
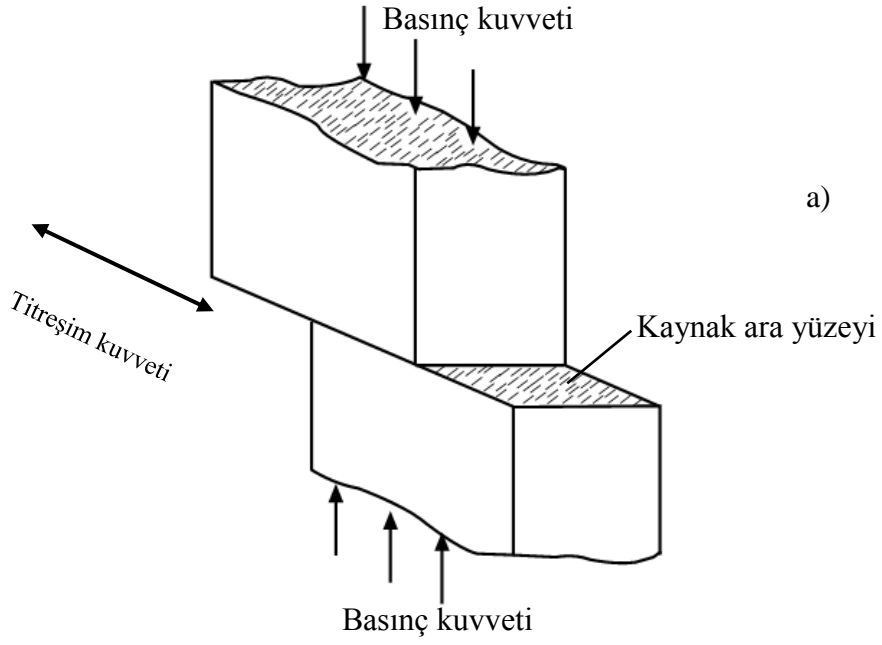
Şekil 3.11 Sürtünme kaynak yönteminin şematik gösterimi [36]

3.3.8. Titreşim kaynağı

Titreşim kaynağı düşük ısı iletkenliğine sahip termoplastiklerin kaynağı için uygun olup doğrusal (lineer) sürtünme kaynağı olarak isimlendirilmektedir. Yöntem itibari ile ultrasonik kaynak yöntemine benzemektedir [10]. Titreşim kaynağında kaynak dört aşama şeklinde gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.12 b'de gösterildiği gibi ilk aşamada titreşim hareketi ile malzeme ara yüzeylerinde ısı oluşturulması ve malzemenin viskoz akış sıcaklığına gelmesi sağlanır. İkinci aşamada ara yüzey bölgelerinin iyice yumuşaması ve kaynak nüfuziyetinin oluşumu başlar. Üçüncü aşamada ergime ve akış düzenli bir durumdadır ve nüfuziyet kaynak süresi ile doğrusal olarak artar. Son aşamada kaynak makinası kapatılır ancak kaynak bölgesine uygulanan basınç devam ettiği için kaynak nüfuziyet artışı azalarak devam eder [29,32].

Ucuz ve işlem zamanının kısa olması, birkaç parçanın aynı anda kaynak edilebilmesi, tüm termoplastik malzemelere uygulanabilmesi yöntemin en önemli avantajıdır [5]. Farklı plastik malzemelerinde de kaynak işlemlerinin yapılabilmesine rağmen kaynak bölgesine, ana malzemeye göre % 50'den daha az oranlarda mukavemet kazandırılabilmesi yöntemin dezavantajıdır. Otomotiv sanayi ve ev aletleri üretiminde

yaygın kullanım alanına sahiptir. Şekil 3.12 a’da titreşim kaynağı uygulaması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Titreşim kaynak yöntemi, a) Titreşim kaynak yönteminin şematik gösterimi, b) Titreşim kaynağının dört aşamasını gösteren eksenel kayma-zaman grafiği [32]

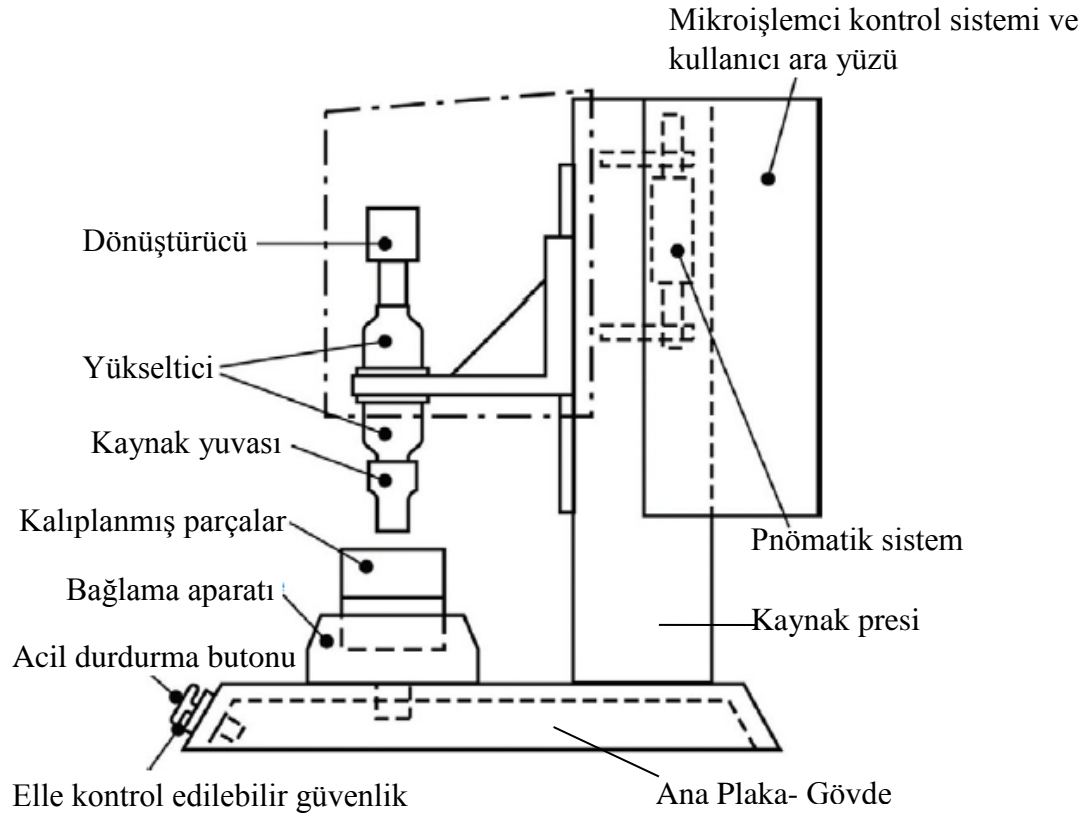
3.3.9. Sürtünme karıştırma kaynağı

Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) yönteminin uygulanması oldukça basittir. Birleştirilmek üzere sabitlenmiş plaka, boru vb. malzemelerin kaynak bölgesine sabit devirde silindirik omza sahip bir takım daldırılır ve kaynak yapılacak hat boyunca sabit ilerleme hızı ile hareket ettirilir. Kaynak bileşenlerinin (kaynak takımı ve malzeme) sürtünmesiyle kaynağının gerçekleştirilmesi için gerekli olan ısı meydana gelir ve oluşan bu ısı malzemeyi yumuşatır. Kaynak takımının omzu, pim tarafından yumuşatılarak geriye atılan malzemelere baskı uygulayıp kontrol ederek malzemelerin kaynaklanmasında rol oynar [4,5,37-39]. Tez konusunu oluşturan kaynak yöntemi olduğu için ileriki bölümlerde detaylı olarak anlatılacaktır.

3.3.10. Ultrasonik kaynak yöntemi

Ultrasonik kaynak yöntemi esas itibari ile sürtünme kaynağının bir çeşididir [10]. En yaygın ve en sık kullanılan bir kaynak yöntemidir [4,29]. Kalıp gövdeleri, folyo, şerit ve ip şeklindeki plastiklerin kaynağı mümkündür. Oyuncak sanayi, ev eşyası yapımı, elektrik-elektronik, otomotiv, gıda, kırtasiye gibi çok farklı sektörlerde yoğun olarak kullanılmaktadır [29]. Tüm termoplastikler ultrasonik kaynak yöntemi ile kaynak etmeye uygun değildir. Çünkü termoplastiklerin bu yöntem ile kaynak edilebilmesinin temel esaslarından biri kimyasal uygunluk şartıdır. Genel olarak PS, PE, Sert PVC ve PMMA gibi malzemelerin kaynağında tercih edilir [10,29].

Proses için genellikle küçük genlikli ve yüksek frekanslı ultrason titreşim enerjisi kullanılmaktadır. Kaynak esnasında parçalardan biri sabit tutulurken, diğer parça temas yüzeyine dik olarak sinüzoidal şekilde değişen ultrason titreşimler verilir. Parçalar arası sürtünme ve iç sürtünmenin bir sonucu olarak oluşan ısı temas yüzeylerini eritir. Titreşim durdurulduğunda kaynak yeri soğur ve katılarak kaynak bağlantısını meydana getirir. Oldukça hızlı (bir iki saniye) bir yöntemdir ve diğer kaynak yöntemlerine nazaran parlak ışıklar çıkarmayan kaynaklar elde edilir [10,29,42]. Şekil 3.13' te pnomatik ultrasonik kaynak makinası şematik olarak gösterilmiştir.

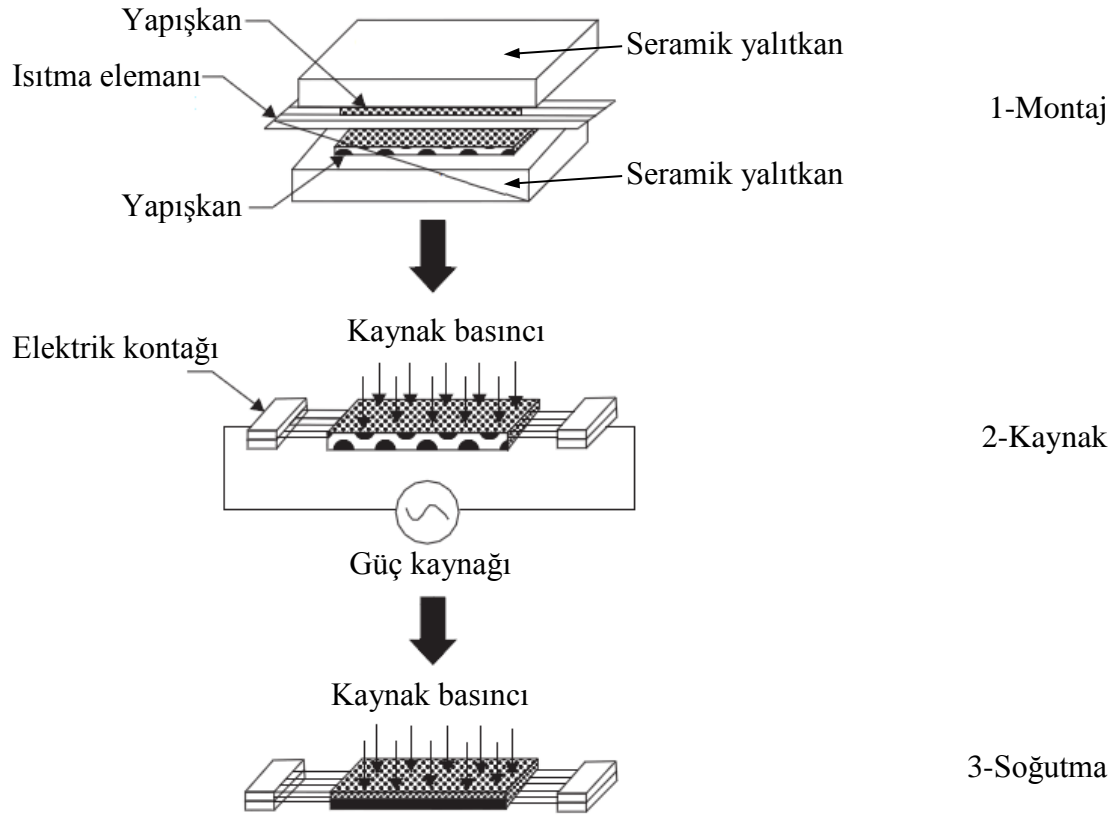


Şekil 3.13 Pnömatik ultrasonik kaynak makinasının şematik gösterimi [32]

Bu yöntem ile elde edilen bağlantı mukavemetleri ana malzeme mukavemetinin % 70 – 80’ i arasındadır [4]. Ultrasonik kaynak yöntemi ile aynı veya farklı cins hammaddelere sahip plastik parçaların birleştirilmesi mümkün olduğu gibi, çeşitli formlardaki metallerin ve somunların plastiklerin içine gömülmesi, metallerin plastiğe perçinlenmesi imkânı da vardır.

3.3.11. Rezistans kaynağı

Sürekli karbon fiberlerle güçlendirilmiş yüksek performanslı termoplastikler için geliştirilmiş bir yöntemdir [32]. İmplant veya elektro füzyon kaynağı olarak ta isimlendirilmektedir. Yöntem oldukça basit olup, karmaşık şekillere sahip parçaların kaynağı için oldukça uygundur. Şekil 3.14’te rezistans kaynağı uygulaması şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.14 Rezistans kaynağının şematik gösterimi [32]

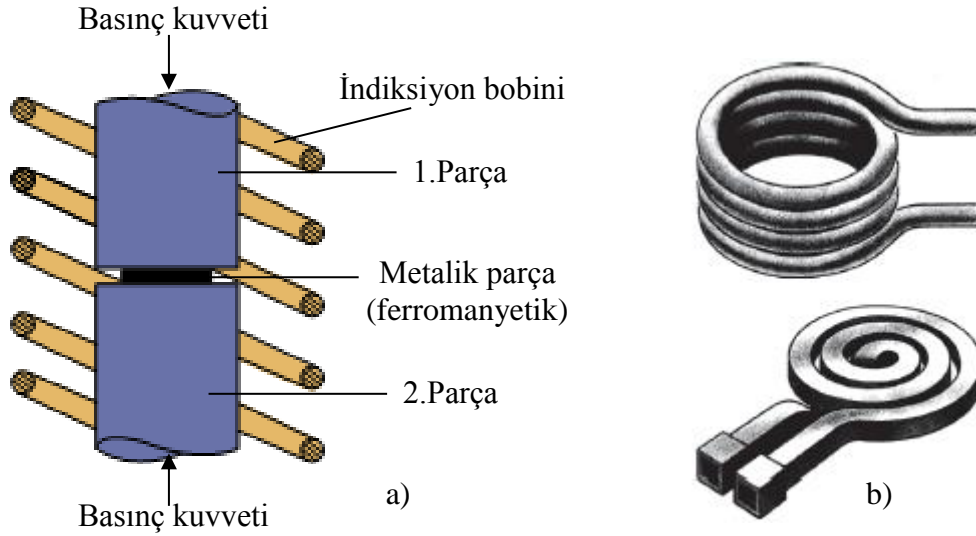
Şekil 3.14’ de gösterildiği gibi kaynak üç aşamada yapılmaktadır. İlk aşamada birleştirilecek plastik malzemelerin birleşim ara yüzeylerine Cr-Ni alaşımli metal tellerden yerleştirilir. İkinci aşamada tellerden elektrik akımı geçirilerek kaynak bölgesi ısıtılır ve parçalara baskı uygulanır. Son aşamada ısı etkisiyle ergitilen plastiğin soğutulmasıyla kaynak işlemi tamamlanmış olur [5,10,32]. Bu yöntemde kullanılan metal teller kaynak bölgesi içerisinde bırakılarak ekstra mukavemet sağlanır.

Havacılık sektöründe kullanımı giderek artmaktadır. Günümüzde yoğun olarak denizcilikte bot ve tekne yapımında, plastik boru ve direklerin birleştirilmesinde, otomotiv sektöründe iki parçalı tamponların kaynağında kullanılmaktadır [5,32].

3.3.12. İndüksiyon kaynağı

İndüksiyon kaynağı Şekil 3.15’de görüldüğü gibi indüksiyon bobini kullanılarak birleştirilecek yüzeylerin arasına konulan bir metalin, 1-5 kW arasında yüksek frekanslı

elektrik akımı oluşturup 200-500 Hz'lik bir manyetik alanın etkisi ile ısıtılarak kaynak bölgesinin yumuşatılması esasına dayanır. Kaynak bölgesi yeterli sıcaklığa ulaştığında elektrik akımı kesilir ve birleştirilecek malzemeler ısıtılan metal parça içerisinde kalacak şekilde 0,7 MPa basınç altında 3-30 saniye arasında birbirine bastırılır ve kaynak işlemi gerçekleştirilir [4,5,10,32].



Şekil 3.15 İndüksiyon kaynağı, a) İndüksiyon kaynağının şematik gösterimi, b) Kaynakta kullanılan bobin örnekleri [5,32]

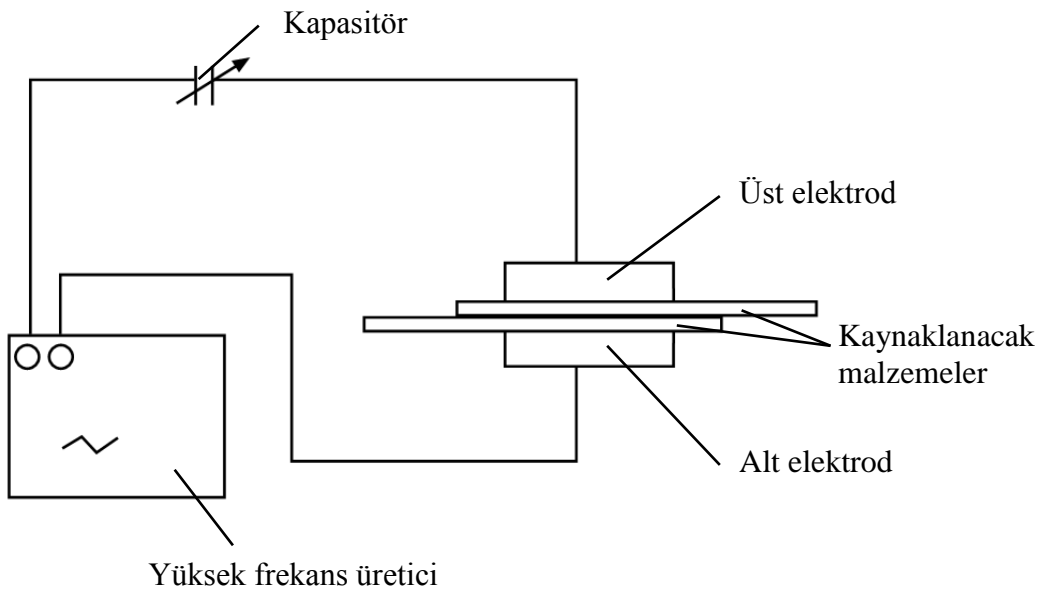
3.3.13. Dielektrik kaynağı

Dielektrik kaynağı büyük çaplı üretimlerde ve direk ısıtmanın kullanılmayacağı durumlarda uygulanan ve radyo frekans veya yüksek frekans kaynağı olarak da isimlendirilen bir kaynak yöntemidir [5,10,32].

Yöntem kaynatılacak yüzeylerin bir yüksek frekans alanıyla açığa çıkan ısıyla yumuşatılmasına ve basınç altında birleştirilmesi işlemine dayanmaktadır [5,10,32]. Şekil 3.16' da gösterildiği gibi ilk olarak iki metal plaka (elektrüd) arasına sıkıştırılan plastik levhaların (filmlerin) içerisinde yüksek frekans alanı oluşturulmakta ve oluşturulan yüksek frekans enerjisinin etkisi ile kaynak bölgesinde oluşan moleküler ısı

ve türbülans hareketleri sonucunda ara yüzey bölgesi ısınarak yumuşamaktadır. Yumuşayan parçalar birbirine bastırılır ve elektromanyetik alan kesilir. Parçaların soğuması ve katılaşması ile kaynak işlemi gerçekleştirilmiş olur.

Yöntemin pahalı olması, PE, PS ve PTFE gibi kutupsal (polarize) olmayan plastikler için uygun olmaması yöntemin dezavantajlarıdır. Yöntem seri üretimler için oldukça uygundur. Özellikle tıp alanında ve tüketim mallarının çok iyi paketlenmesinde kullanılan polimer filmlerinin bağlanmasında kullanılır [5,10].

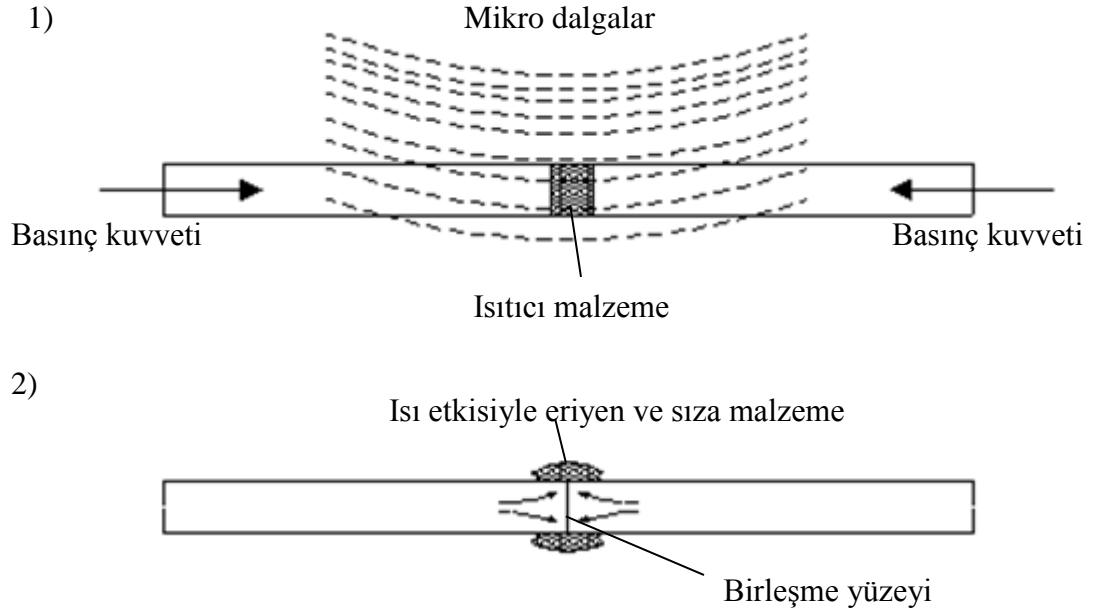


Şekil 3.16 Dielektrik kaynağı uygulamasının şematik gösterimi [16]

3.3.14. Mikrodalga kaynağı

Mikrodalga kaynağı halen geliştirilmekte olan bir teknolojidir. İndüksiyon ve dielektrik kaynaklarından daha yüksek frekansa (Amerika’da kullanılan frekans aralıkları 915 MHz, 2,45 GHz) sahiptir [5]. Yöntem olarak dielektrik kaynağına benzemektedir. Birleştirilecek yüzeyler arasında elektromanyetik enerjiyi absorbe etmeyen bir malzeme (HDPE, PANI vb.) yerleştirilir. Basınç altında mikrodalgalar kullanılarak birleştirme işlemi gerçekleştirilir. Birleşim yüzeyleri arasında bulunan malzeme tarafından yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar ısı enerjisine dönüştürülür. Isınarak eriyen ara malzeme, uygulanan basıncın etkisi ile birleşim ara yüzeylerinden sızarak ayrılır. Bu ara

malzemenin ayrılması ile kaynak bölgesinde oluşturduğu sıcaklık artışı ile yumuşayan birleşim yüzeyleri, uygulanan basıncın etkisi ile birbirleri ile temas eder. Bölgenin soğutulması ile de kaynak işlemi gerçekleştirilmiş olur [32]. Şekil 3.17’ de mikrodalga kaynağının uygulanması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.17 Mikrodalga kaynağı uygulamasının şematik gösterimi [16]

4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI VE UYGULAMALARI

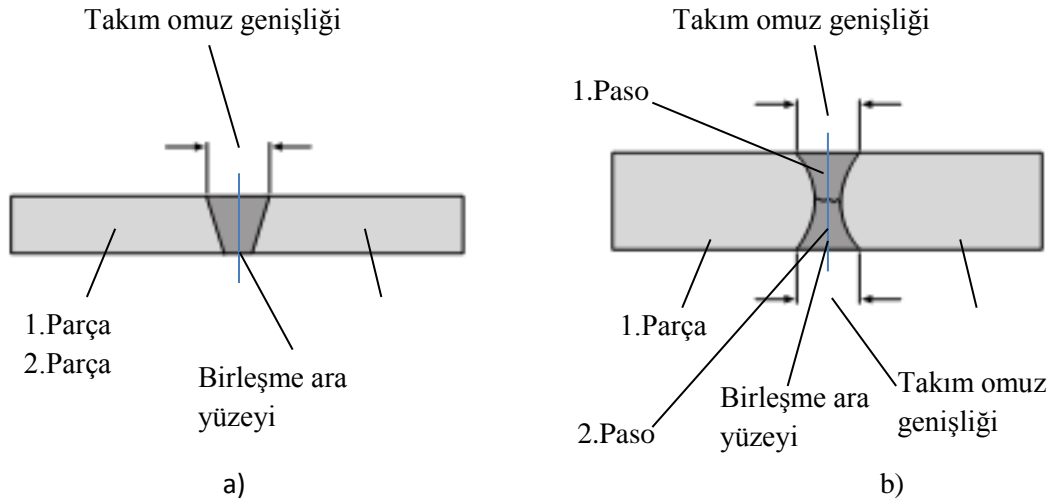
Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü (TWI)’nde W.M. Thomas’ın çalışmalarıyla alüminyum alaşımlarının problemsiz ve kolay bir şekilde birleştirilmesi amacıyla klasik sürtünme kaynağından geliştirilerek patenti alınan ve endüstriyel uygulamalarına başlanmış olan bir katı hal kaynak yöntemidir [37-39,43,44]. SKK yöntemi kaynak sonrası çok az deformasyonlu, çatlak veya boşluk meydana getirmeksizin güvenli bir kaynak yapmanın çok zor olduğu birçok malzemenin kaynağını basitleştirmiştir [60].

Diğer birleştirme teknikleriyle kıyaslandığında daha az enerji tüketimi ve koruyucu bir gaz kullanımına ihtiyaç duyulmaması, yöntemin basit ve uygulanabilir olması gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır [37]. Günümüzde havacılıktan, kara, deniz ve demiryolu taşımacılığına kadar pek çok endüstriyel alanda geniş uygulama alanına sahip olan SKK, farklı geometrilerdeki parçaların kaynağına imkân sağlayan bir yöntemdir [37,43,44,60]. Bu bölümde SKK yönteminin tanımı, gelişim serüveni, çalışma prensibi, avantaj ve dezavantajları, yöntemdeki yeni gelişmeler ve uygulama alanları hakkında bilgi verilecektir.

4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Tarihsel Gelişimi

Sürtünme karıştırma kaynağı, 1991 yılında İngiltere Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından bulunarak patenti alınan ve halen geliştirilmeye devam edilen bir katı hal kaynak yöntemidir [37-39,43,44]. 1999 yılında TWI tarafından yayımlanan "Alüminyum Uygulama Teknolojileri 4410" (TALAT 4410) konferans bildirisinde başlangıçtaki amacın alüminyum alaşımlarının kaynağında karşılaşılan zorluklar nedeniyle SKK'nın verimliliğinin belirlenmesi ve yöntemin geliştirilmesi olarak açıklanmaktadır [44].

TWI tarafından yapılan ilk çalışmalar 1,6-10 mm kalınlığa sahip malzemelerin tek pasoda birleştirilmesi üzerine olmuş ve çalışma sonuçlarından 50 mm kalınlığa kadar malzemelerin tek paso ile 75 mm kalınlığa kadar malzemelerin ise çift paso ile birleştirilebildiği ifade edilmiştir [44]. Şekil 4.1’de tek ve çift paso uygulamaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Sürtünme karıştırma kaynak uygulamalarının şematik gösterimi, a) İnce parçalar için tek paso uygulamasıyla kaynak, b) Kalın parçalar için iki paso uygulamasıyla kaynak

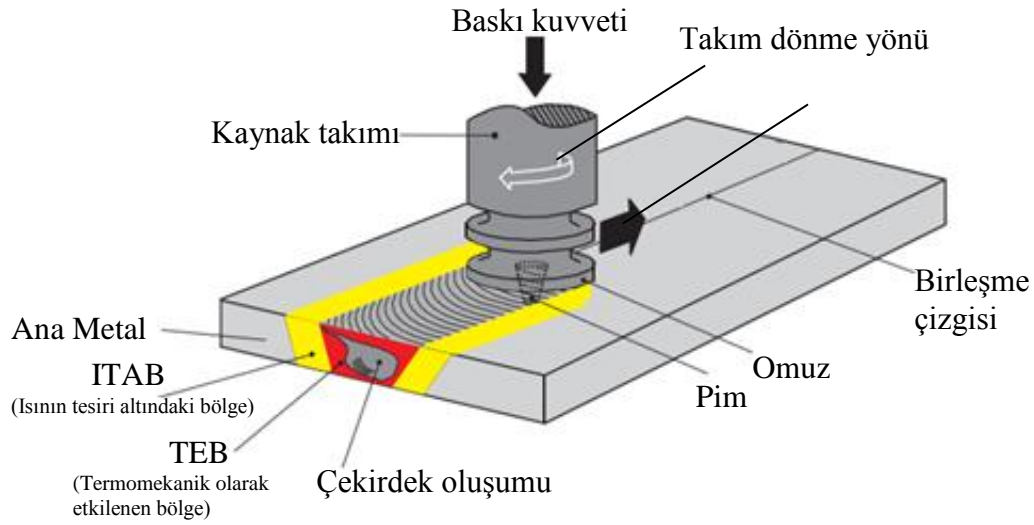
TALAT 4410'da, TWI'da yapılan çalışmalar kapsamında 1,2-6,4 mm'ye kadar kalınlık için özel kaynak takımlarının geliştirildiği, 2xxx (Al-Cu), 5xxx (Al-Mg), 6xxx (Al-Mg-Si), 7xxx (Al-Zn) ve 8xxx (Al-L) serilerinin çeşitli alaşımlarına düzenli olarak kaynak uygulamaları yapıldığı ve çalışmalardan yüksek kalitede kaynak ve prosesin uygulanabilirliği sonuçlarının gözlemlendiği ifade edilmiştir [44].

Son yıllarda SKK ile metallerin birleştirilmesinde çok önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Günümüzde SKK yöntemi üzerine yapılan araştırmalar devam etmekle birlikte, alüminyum ve alaşımları başta olmak üzere, bakır ve alaşımları, magnezyum ve alaşımları, titanyum ve alaşımları, nikel ve alaşımları, çinko alaşımları, kurşun alaşımları, paslanmaz çelikler, karbonlu az alaşımlı çelikler, metal matrisli kompozitlere uygulanmaktadır [43]. 1998 yılından itibaren de SKK'nın termoplastik malzemelere uygulanması için çalışmalar yapılmaktadır.

4.2. Kaynağın Uygulanması

SKK yönteminin uygulanması oldukça basittir. Birleştirilmek üzere sabitlenmiş plaka, boru vb. malzemelerin kaynak bölgesine sabit devirde silindirik omza sahip bir takım daldırılır ve kaynak yapılacak hat boyunca sabit ilerleme hızı ile hareket ettirilir.

Kaynak bileşenlerinin (kaynak takımı ve malzeme) sürtünmesiyle yüksek kalitede katı hal kaynağının gerçekleştirilmesi için gerekli olan ısı meydana gelir ve oluşan bu ısı malzemeyi yumuşatır. Kaynak takımının omzu, pim tarafından yumuşatılarak geriye atılan malzemelere baskı uygulayıp kontrol ederek katı hal kaynağı şeklinde malzemelerin kaynaklanmasında rol oynar [4,5,37-39]. Şekil 4.2’de SKK tekniğinin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir.

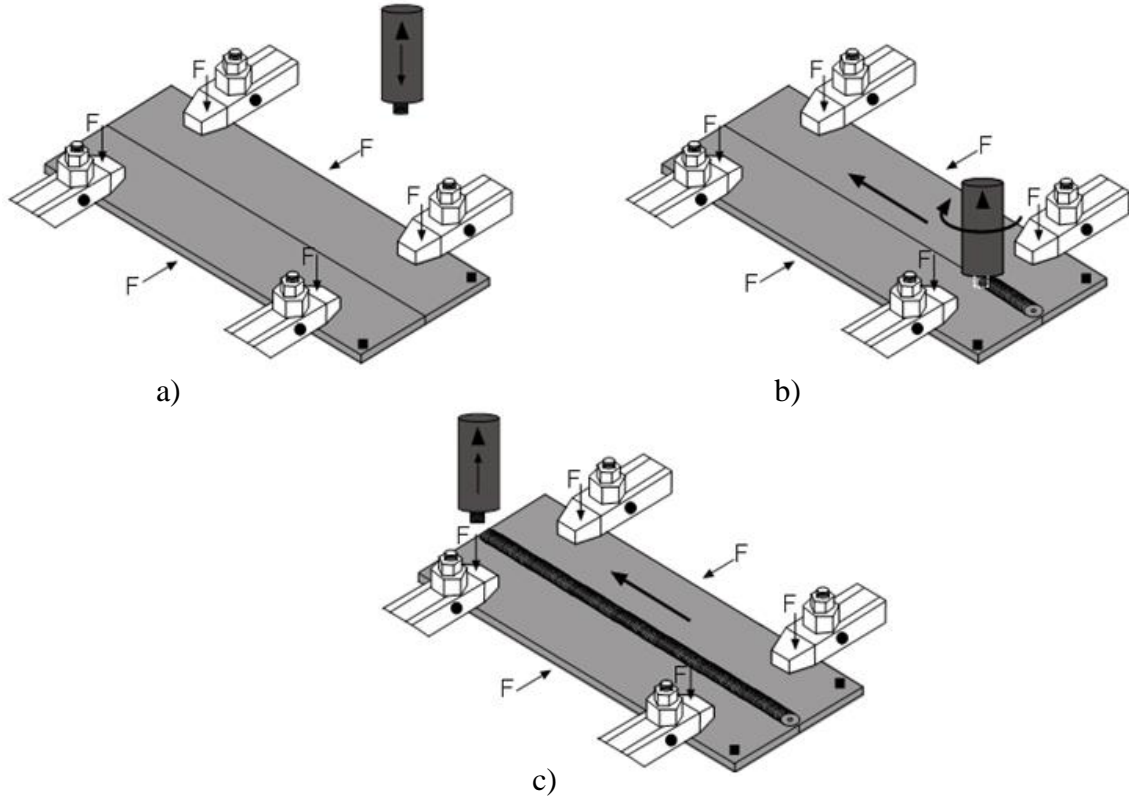


Şekil 4.2 SKK tekniği çalışma prensibinin şematik gösterimi [40,41]

Pek çok tanım kendiliğinden anlaşılmakta fakat ilerleme ve geri dönme yönünün tanımı kısa bir açıklama gerektirmektedir. SKK takımı saat yönünde dönmekte ve sağdan sola doğru ilerlemektedir. Şekil 4-2’de ilerleme sağa doğru ve takımın dönmesi ilerleme ile aynı yönlü olarak (metalın akış yönüne ters) gerçekleşmekte ve geri dönme sola doğru yani takımın dönmesi ilerleme yönüne ters (metalın akış yönüne paralel) olarak gerçekleşmektedir [39].

SKK üç aşamada uygulanır. Şekil 4.3’ te gösterildiği gibi birinci aşamada (Şekil 4.3-a); kaynak edilecek malzemeler birleştirme yüzeyleri arasında herhangi bir boşluk bırakmadan birbirine temas ettirilerek sabitlenir. İkinci aşamada (Şekil 4.3-b); punta deliği açılmış yüzeyden kaynak takımı kaynak bölgesine daldırılır ve kaynak hattı boyunca belirli bir hızda ilerleyen takımın hareketi ile kaynak işlemine başlanır. Son

aşamada (Şekil 4.3-c); kaynak bölgesinden takım yukarı çekilerek kaynak işlemi tamamlanmış olur.



■Kaynak yapılacak malzeme, ●Sabitleme elemanları, ▼Kaynak Takımı

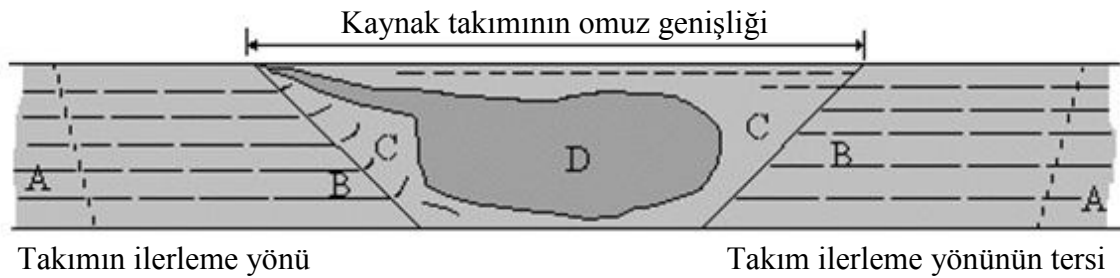
Şekil 4.3 SKK kaynak aşamalarının şematik gösterimi, a) Parçaların sabitlenmesi, b) Takımın parçalara dalması ve kaynak hattı boyunca ilerlemesi, c) Takımın yukarı çekilmesi ve kaynağın sonlandırılması

Yöntemin uygulanmasında sarf malzeme, ek kaynak metali, gaz, toz gibi kaynaklı parçanın maliyetini arttıran giderler yoktur [43]. Kaynak esnasında bir ark oluşmadığı ve yanma meydana gelmediği için kaynak ortamı ergitme esaslı kaynaklara göre daha rahattır. SKK ile ergitme esaslı kaynaklı bağlantıların özelliklerine yakın hatta daha üstün özelliklere sahip kaynaklar elde edilmektedir. SKK yöntemi; yüksek bağlantı mukavemeti, artan yorulma ömrü, düşük açısız çarpılma, çok az kalıntı gerilme, çok düşük korozyon hassasiyeti ve en önemlisi hatasız bağlantılar elde edilmesi gibi üstün özelliklere sahiptir.

Alüminyum, bakır ve NiAl bronzu alaşımlarının SKK yöntemi ile kaynağında ergime oluşmadığından koruyucu bir gaz kullanımına gerek yoktur. Ancak demir ve nikel esaslı alaşımlar için yüksek sıcaklıklarda yapılan uygulamalarda seramik veya refrakter malzemelerden yapılmış pimin oksitlenmesini önlemek amacıyla koruyucu gaz olarak argon gazı kullanılabilir. Titanyum ve titanyum alaşımlarının SKK yöntemi ile kaynağında sıcaklığı yüksek olan kaynak bölgesine bağlantının mukavemetini etkileyen azot ve karbon katılmasını önlemek ve çökelmelerden dolayı meydana gelen kirliliği önlemek amacıyla argon gazı kamarası içinde sürekli koruyucu gaz ile beslenerek kaynak işlemi gerçekleştirilir [43].

4.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Oluşan Mikroyapılar

Birçok yeni teknoloji gibi SKK yönteminde de gözlemleri doğru tanımlamak için yeni bir terminoloji gereklidir. SKK'da oluşan mikroyapılarla ilgili olarak ilk sınıflandırma denemesi Threadgill tarafından yapılmıştır [37,44]. Bugüne kadar ki yapılan çalışmalarda, yaygın olarak bu ilk tanımlama üzerinde küçük değişiklikler yapılmış ve referans olarak kullanılmaya devam edilmiştir. Şekil 4.4' te Threadgill tarafından yapılan SKK sonrası oluşan farklı mikroyapısal bölgeler tanımlanmış ve kısa bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 4.4 SKK kaynak bölgesi mikroyapısının şematik gösterimi, A- Isıdan etkilenmeyen bölge, B- Isının etkisi altında kalan bölge, C- Termomekanik olarak etkilenen bölge, D- Yeniden kristalleşmiş bölge [37,44]

Bu sistem kaynak alanını kaynak metali ya da ısıdan etkilenmeyen bölge, ısının etkisi altında kalan bölge, termomekanik olarak etkilenmiş bölge ve yeniden kristalleşmiş bölge olarak dört farklı bölgeye bölmektedir [37-39,44].

Kaynak Metali ya da ısıdan etkilenmeyen bölge (A): Bu bölge kaynaktan uzaktır ve deforme olmamıştır. Her ne kadar kaynak bölgesinde bir termal döngü görülse de, mikroyapı ya da mekanik özellikleri açısından ısıdan etkilenmez [39,43].

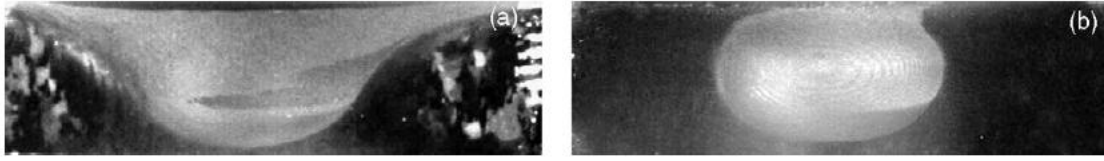
Isıdan Etkilenmiş Bölge (B): Bu bölge kaynak bölgesine daha yakındır. Malzeme mikroyapısı ve/veya mekanik özelliklerinin termal döngüden etkilenmesine rağmen bu bölgede plastik deformasyon meydana gelmez [37,39].

Termomekanik olarak etkilenmiş bölge (C): Bu bölgede SKK kaynak takımı malzemeyi plastik deformasyona uğratmaktadır [43]. Proses sırasında meydana gelen ısı malzeme yüzeyinde biraz malzeme kaybı etkisi yapabilir. Alüminyumlarda bu bölgede genellikle yeniden kristalleşen bölge ve termomekanik olarak etkilenmiş bölge arasında önemli bir plastik gerilme olabilir [37,39].

Yeniden kristalleşmiş bölge (D): Karışım bölgesi olarakta isimlendirilen bu bölge yeniden kristalleşmenin ve termomekanik etkinin çok şiddetli olduğu kaynak bölgesinin merkezini teşkil etmektedir [37,43]. Bu bölgede proses esnasında kaynak takımının pimi ile ana malzeme sürtünmesi sonucu oluşan ısı neticesinde yoğun plastik deformasyon, yüksek mekanik mukavemet ve süneklığe maruz kalmaktadır. Çok ince ve eş eksenli şekilde yeniden kristalleşen taneler genellikle düşük dislokasyon yoğunluğuna sahiptir [39].

Yukarıda belirtilen bölgeler genel bir tanımı içermektedir. Kaynak parametrelerine, kullanılan takımın geometrisine, kaynak sıcaklığına, ana malzemenin ısı iletkenliğine bağlı olarak kaynak esnasında farklı şekillerde karışım bölgeleri görülebilmektedir. Pek çok araştırmacı yaptıkları çalışmalarda havuza benzer ya da eliptik şekilli bir karışım bölgesi elde ettiklerini ifade etmiştir [37,38,43].

Şekil 4.5'te Mishra ve Ma'nın A 356 alüminyum alaşımında farklı kaynak parametreleri ve geleneksel alüminyum stili takım kullanılarak elde ettikleri karışım bölgesine ait şekiller verilmiştir.

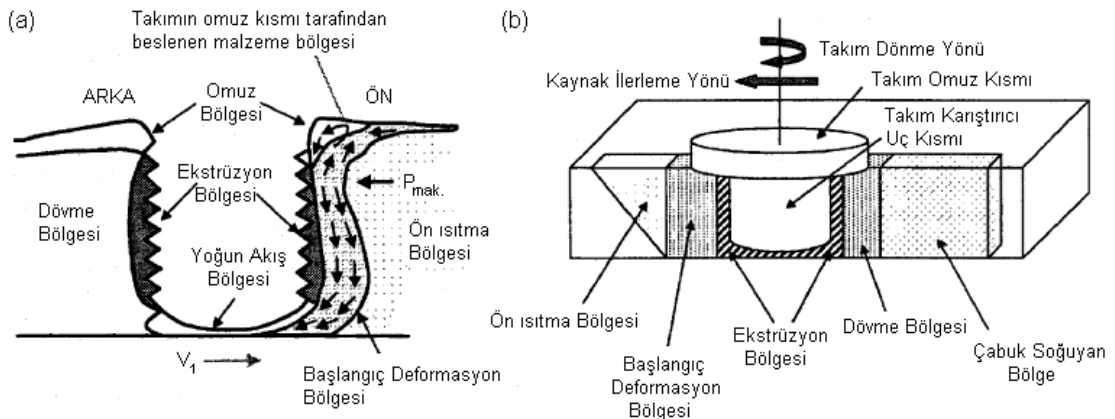


Şekil 4.5 A 356 Alüminyum alaşımında kaynak parametrelerinin kaynak bölgesinin şekli üzerindeki etkisi, a) 300 devir/dk., 51 mm/dk. ilerleme, b) 900 devir/dk., 203 mm/dk ilerleme [38]

4.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Modellenmesi

SKK prosesinde takım ve iş parçasının sürtünmesiyle oluşan sıcaklık karışım bölgesinde artmakta ve iş parçasının diğer bölgelerine kıyasla daha yoğun bir plastik deformasyon meydana getirmektedir. Bu durum tane boyutu, tane sınırı özelliği, çökeltilerin çözünmesi ve irileşmesi, dispersiyon çökmesi ve yeniden dağıtılması gibi yapıyı da içine alan önemli mikroyapısal değişikliklere neden olmaktadır [37].

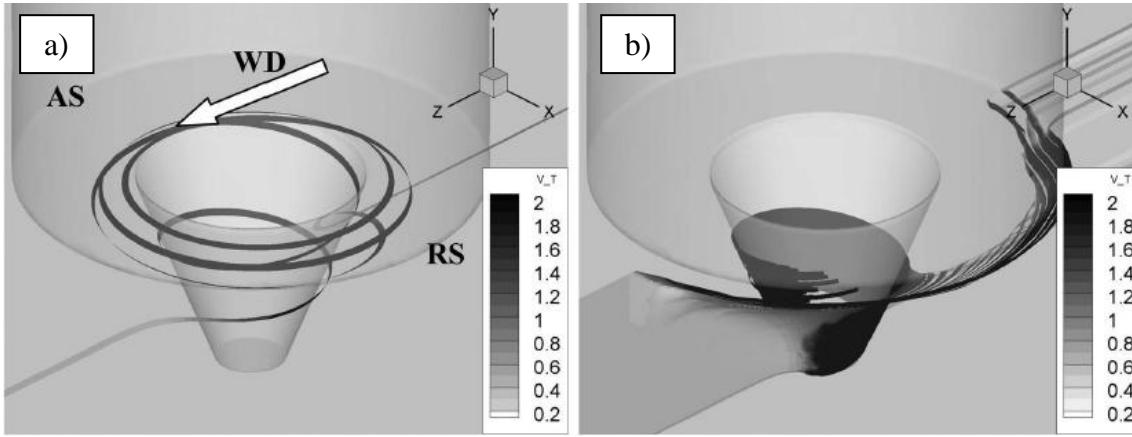
SKK esnasında malzeme akışı; takım geometrisi, kaynak parametreleri, malzemenin kaynak kabiliyeti gibi oldukça karmaşık faktörlere bağlıdır. Malzeme akış karakteristiğinin anlaşılması, SKK için gerekli uygun kaynak takım tasarımı ve yüksek mukavemetli kaynakların yapılabilmesi için oldukça önemlidir.



Şekil 4.6 SKK metal akış modeli, b) SKK esnasında metalürjik değişime uğrayan bölgeler [37,38].

Arbegast tarafından yapılan çalışmada, SKK sonrasında meydana gelen mikroyapı ve malzeme akış özelliklerinin tipik alüminyum ekstrüzyonu ve dövme sonrası özelliklere benzediği belirtilmiştir [37]. Bu çalışmaya göre SKK tekniği geleneksel metal işlemeye benzer şekilde Şekil 4.6' te görüldüğü gibi **1-Ön ısıtma, 2- Başlangıç deformasyonu, 3-Ekstrüzyon, 4-Dövme, 5-Soğuma** olmak üzere beş bölge şeklinde modellenebilmektedir [37-39].

Karıştırıcı ucun takımın dönme yönünde ana malzeme ile sürtünmeye başladığı ön tavlama bölgesinde ilk ısı oluşumu başlamaktadır. Oluşan ısı karıştırıcı ucun kopardığı malzemeyi ısı ve takım omzunun oluşturduğu basınç altında yumuşatmaktadır. Takımın dönme hareketi pimin çevresindeki malzemeyi karıştırır. Takımın ilerlemesiyle birlikte plastikleşmiş malzeme takımın ön kısmından arka kısmına doğru taşınarak ve karıştırılarak ekstrüzyon bölgesi ve kaynak bölgesi üst yüzeyine doğru malzeme akışı başlamaktadır. Takım ucunun alt kısmında kalan malzeme Şekil 4.6 a' da görüldüğü gibi girdaba benzeyen yoğun bir akış meydana getirmektedir. [37-39,43]. Şekil 4.7' de Santiago ve ark. tarafından 3D olarak modellenen takım çevresinin aerodinamiği (Şekil 4.7 a) ve kaynak esnasında oluşan malzeme akışı (Şekil 4.7 b) görülmektedir.



Şekil 4.7 SKK Kaynak esnasında takım çevresinde meydana gelen akış [45].

SKK için gerekli olan ısı girdisi; 1- Kaynak takımının omuz kısmı ile iş parçası üst yüzeyinin sürtünmesinden, 2- Kaynak takımının karıştırıcı uç kısmının kaynak bölgesindeki birleşme yüzeyleri ile sürtünmesinden, 3- Karışım bölgesindeki kesme deformasyonundan oluşan plastik enerji dağılımından sağlanmaktadır. En büyük ısı

girdisini kaynak takımının omuz kısmı ile iş parçası üst yüzeyinin sürtünmesi oluşturmaktadır. Karıştırıcı uç ve kaynak bölgesindeki deformasyonun toplam ısıya olan katkısı % 1-2 arasında olmaktadır. Bu ana ısı kaynağı toplam ısı kaynağı olarak aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir [37]:

$$Q = \frac{\alpha}{3} \sigma_v \cdot \omega \cdot R^3 \quad (3.1)$$

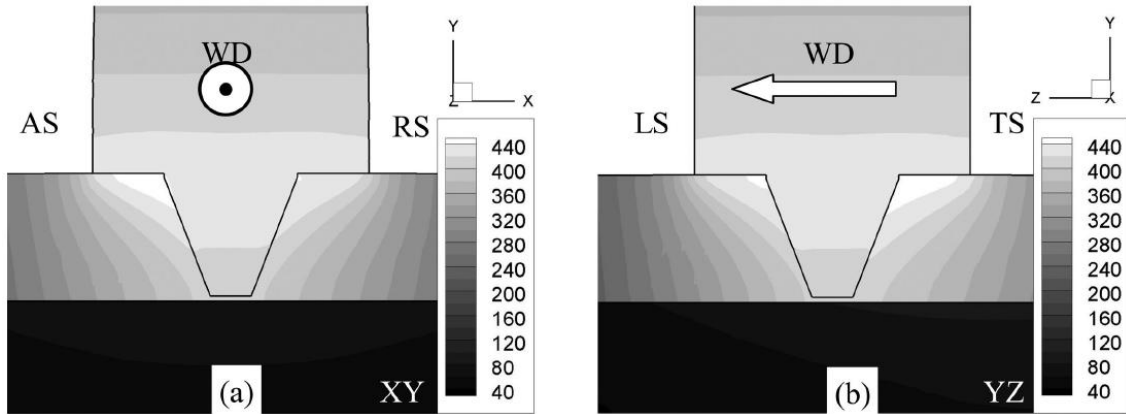
ω = Takımın dönme hızı,

R = Kaynak takımını omuz yarıçapı,

σ_v = İş parçasının akma mukavemeti,

α = Kaynak koşuluna bağlı bir faktör (Genelde % 5 olarak alınır.)

Şekil 4.8’de 1S alüminyum alaşımları için Santiago ve ark. tarafından 3D olarak modellenen takım çevresinde meydana gelen ısı değerleri gösterilmektedir.



WD: Kaynak ilerleme yönü, AS: Takım dönme yönü RS: Takım dönme yönünün tersi

Şekil 4.8 1S alüminyum alaşımlarında; a) Kaynak takımını dönme yönünde ve takımın dönme yönünün tersinde ve b) Takım ilerleme yönünde, iş parçası üzerinde meydana gelen sıcaklık değerlerinin 3D olarak modellenmesi [45].

Şekilde (Şekil 4.8) en yüksek ısı değerleri karışım bölgesinde elde edilmiştir. Karışım bölgesinden uzaklaştıkça sıcaklık giderek azalmakta ve bir süre sonra ana malzeme sıcaklığına eşit olmaktadır. Takım omuz kısmına yakın üst yüzeylerde sürtünme arttığı için ısı diğer bölgelere kıyasla daha fazla olmaktadır [45].

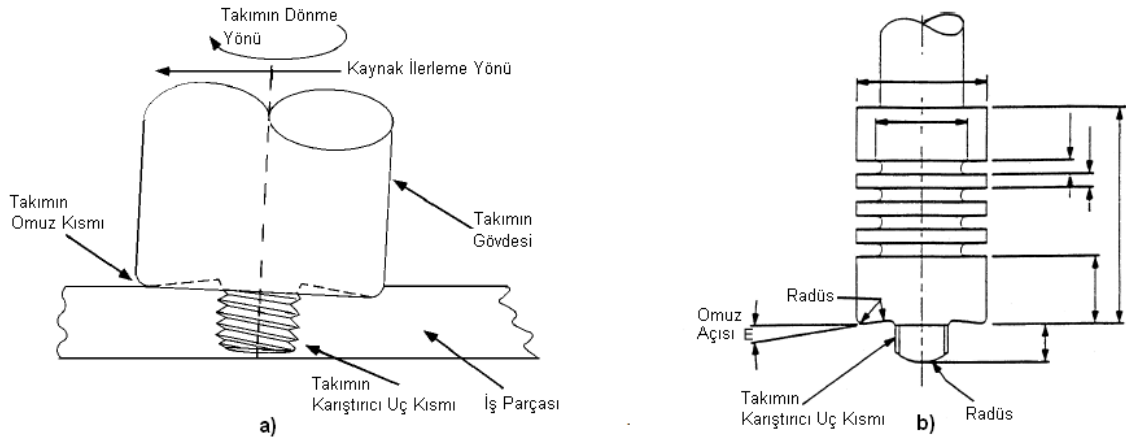
4.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Parametreleri

Düzgün yüzeyli ve yüksek mukavemetli bir kaynak yapmak için kaynak parametrelerinin doğru seçilmesi oldukça önemlidir. Kaynak için önemli olan ısı değerinin elde edilmesi, ısı oluşumuna etki eden kaynak takımının omuz çapı, takımın dönme devri, takımın ilerleme hızı, takımın batma derinliği, kaynak malzemesinin özellikleri, bağlantı tasarımı gibi parametre değerlerine bağlıdır [50].

4.5.1 Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan kaynak takımları

Kaynakta kullanılan takım yöntemin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için gerekli ve doğru tasarlanması kaynak sonuçlarını etkileyen en önemli parametredir [46]. Takımın bölgesel ısınma ve malzeme akışının sağlanması gibi iki önemli görevi vardır [37,43]. Takımın sahip olduğu geometri malzeme akışında ve dönme yönünde kritik bir rol oynar.

Yöntemin uygulanmaya başladığı ilk yıllarda Şekil 4.9’da gösterildiği gibi vida biçimli kaynak takımları kullanılırken zamanla üç yivli ve helezonik takımlar geliştirilmiştir. Son yıllarda bilgisayarla kontrol edilebilen, otomatik olarak çalışabilen ve kaynak bölgesine sadece karıştırıcı ucun girdiği iki parçalı kaynak takımları geliştirilmiştir [50]. Günümüzde yöntemden beklenenler sonucunda geliştirilen takımlar sayesinde yöntemin uygulandığı malzemeler ve kullanıldığı endüstri alanları genişlemiş ve kaynakta kullanılmak üzere yeni ve modern tezgâhlar geliştirilmiştir [43].



Şekil 4.9 SKK vida uçlu takımın; a) İş parçası içerisindeki, b) Takım geometrisinin şematik gösterimi [47,48]

Kaynağı zor veya daha kalın malzemelerde plastik şekil değiştiren kısmın karıştırıcı uç kısmı etrafındaki akışı oldukça önemlidir. Bu tür malzemelerin kaynağında kullanılacak takımlar plastik şekil değiştirebilen malzemenin karıştırıcı uç kısım etrafındaki akışını arttıracak şekilde geniş hacimli, uç kısmının içi boş şekilde tasarlanmalıdır.

Takımın karıştırıcı uç kısmının ana işlevi, kaynak bölgesine yeterli malzeme girişini sağlamak ve doyurucu bir kaynak dikişini takımın etrafındaki malzemenin akışı ile kontrol etmektir [50]. Takım ucunun kırılmasını önlemek ve toplam gerilmeyi azaltmak için çaplar iyi seçilmelidir. Karıştırıcı uç ile omuz arasında kalan bölümdeki değişim ve giriş özelliklerinin tamamı göz önünde bulundurularak takım geometrisi tasarlanmalıdır. Örnek olarak kaynak bölgesinden etkili bir şekilde malzeme akışını sağlamak için her bir çıkıntı arasındaki uzaklık, çıkıntının kendi kalınlığından daha büyük olarak seçilmelidir. Şekil 4.10' de karıştırıcı uç kısmı geometrilere ait örnekler verilmiştir.

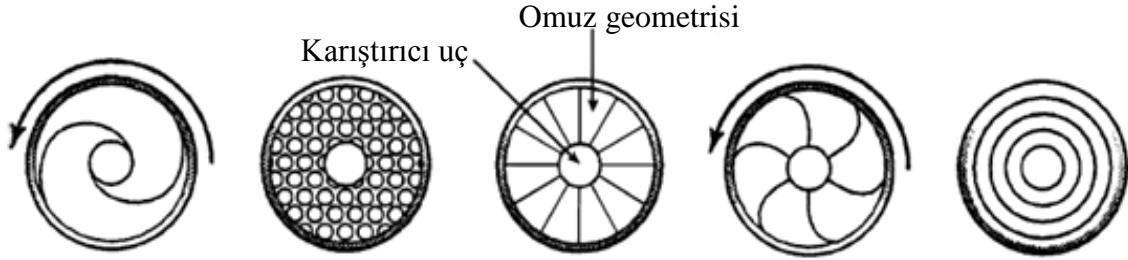


Şekil 4.10 SKK kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı geometrilere ait örnekler [49].

Takımın iş parçasına batmasıyla, karıştırıcı uç kısmının iş parçasında meydana getirdiği deformasyondan ve sürtünmeden dolayı bir ısınma meydana gelir. Takım ucu takım omuz çıkıntısı ana malzeme üst yüzeyine değinceye kadar batmaya devam eder. Takım omuz kısmının ve malzeme üst yüzeyinin sürtünmesiyle kaynak için gerekli olan ısının büyük çoğunluğu elde edilir.

Isı oluşumu açısından karıştırıcı uç ve takım omuz kısmının büyüklüğü oldukça önemlidir. Takım omuz çıkıntısı malzemenin ısıtma hacminin hapsedilmesini sağlamaktadır. Takım omuz kısmının çap ölçüsü ne kadar büyükse elde edilen ısı miktarı da o kadar fazla olacaktır [53]. Omuz kısmı tarafından uygulanan baskı ile plastikleşen malzemenin kontrolsüz ve üst yüzeyin biçimini bozacak şekilde çıkması engellenir.

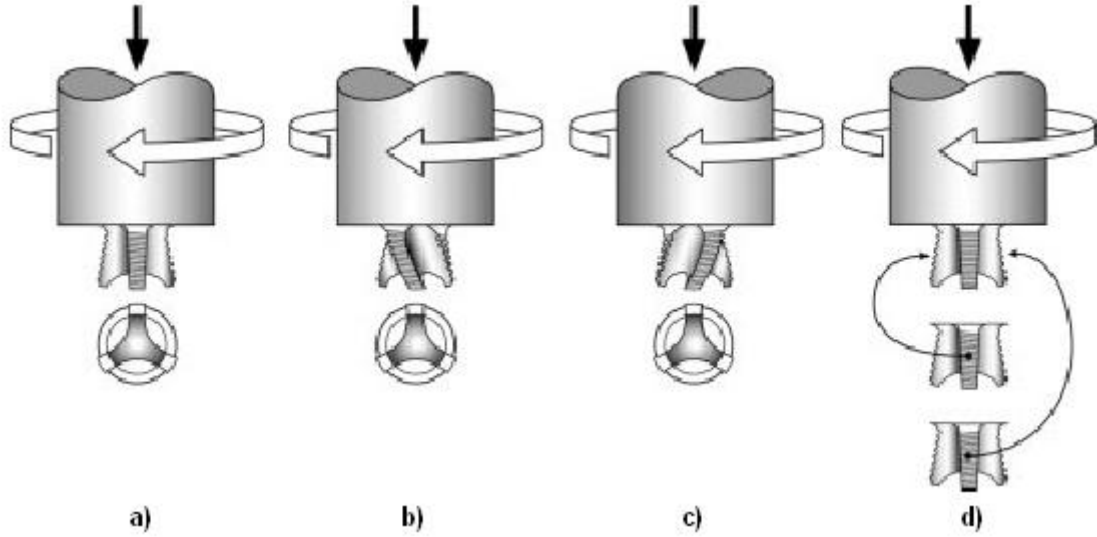
Omuz kısmının sahip olduğu geometri kaynak sonuçlarına direk etki etmektedir. Araştırmacılar tarafından omuz kısmına yiv açılmış ve açılmamış takımlarla kaynak uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Omuz kısmına yiv açılmış takımların yiv açılmamış takımlara göre iki kat daha hızlı ve yüksek kaliteli kaynak sonuçlarının elde edildiği ifade edilmiştir [46]. Şekil 4.11’ de farklı geometrielerde üretilmiş takım omzuna ait şekiller gösterilmektedir.



Şekil 4.11 SKK kaynak takımı omuz kısmı geometrilerine ait örnekler [49-50].

SKK yönteminin sürekli gelişmesi, yöntemde kullanılan takımlar üzerinde deneyimlerin artması ve malzeme akışının daha iyi anlaşılması daha iyi bir kaynak gerçekleştirmek için takım geometrisinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Malzeme akışını kolaylaştıran ve yöntem yüklerini azaltan karmaşık unsurlar gibi pek çok problem takım omuz veya uç geometrisindeki değişiklikler ile çözülebilmektedir [43]. Şekil 4.12’de TWI

tarafından SKK'da karşılaşılan problemlerin çözümüne yönelik olarak geliştirilen ve Flared-Triflute™ ismiyle markalaştırılan takımlara ait görünümlere yer verilmiştir.



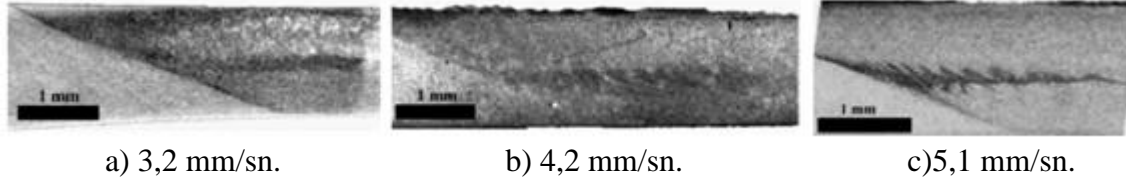
Şekil 4.12 TWI tarafından geliştirilmiş Flared-Triflute™ takımların görünümleri a) Düz (nötr) kanallı, b) Sol kanallı, c) Sağ kanallı, d) Vida dişlerinin düz, sağ ve sol yönlü olması [43,51]

4.5.2 Sürtünme karıştırma kaynağında takımın dönme ve ilerleme hızı

Takımın dönme ve ilerleme hızı SKK'nı etkileyen en önemli parametrelerdendir. Takımın saat yönünde veya ters yöndeki dönme yönü, dönme ve ilerleme hızı kontrol edilebilir parametrelerdir. Üiversal, CNC ya da NC kontrollü tezgâhlarda bu parametreler ayarlanabilmektedir. Malzemenin sahip olduğu mekaniksel ve kimyasal özelliğine göre takımın dönme ve ilerleme hızı değişiklik gösterebilmektedir.

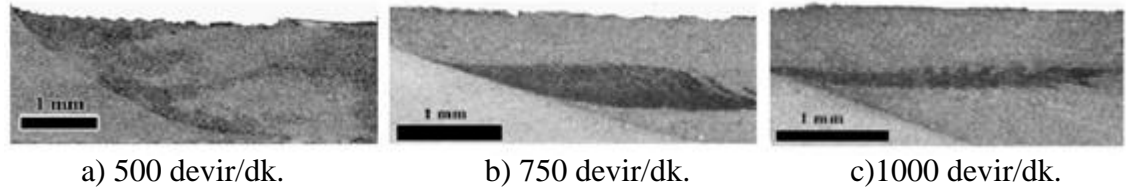
Takımın dönmesiyle plastikleşen malzeme karıştırıcı uç tarafından karıştırılarak karıştırıcı ucun ön kısmından arka kısmına doğru taşınır. Eğer takımın dönme devri ve ilerleme hızı doğru ayarlanmazsa karıştırıcı ucun ön kısmından arkaya doğru malzeme taşınmaz kaynak bölgesinde takımın dönme yönünde veya ters yönde malzeme yığılması meydana gelir. Ayrıca kaynak hattının gerisi için yeterli besleme sağlanmadığından mukavemeti zayıf ve yer yer boşluklu bir kaynak meydana gelir. Takımın ilerleme hızının fazla verilmesi, takım ucu tarafından kopartılan parçanın

plastikleşmesi gerçekleşmediği için frezeleme işlemi şeklinde gerçekleşecektir ya da takımın kırılmasıyla sonuçlanacaktır. Verilen ilerleme hızları kaynak bölgesinin şeklini ve mikroyapısını da etkileyecektir. Şekil 4.13’ de AA2095 alaşımı için 3,2, 4,2 ve 5,1 mm/sn farklı ilerleme hızlarında ve 1000 devir/dk. dönme hızında kaynak bölgesinde oluşan mikro yapılar verilmektedir.



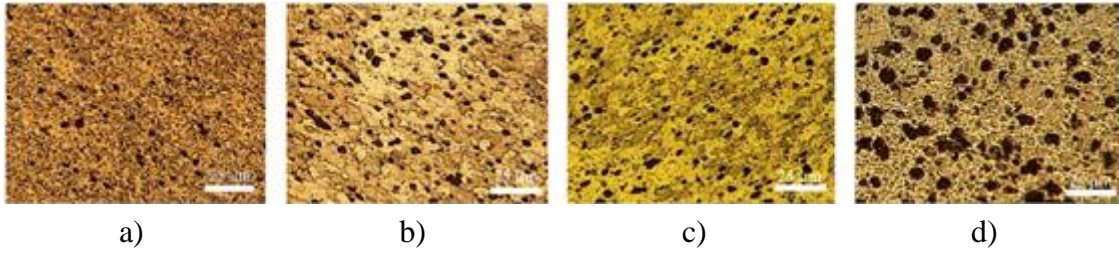
Şekil 4.13 AA2095 alaşımı için 3,2, 4,2 ve 5,1 mm/sn. farklı ilerleme hızlarında ve 1000 devir/dk. dönme hızında kaynak bölgesinde oluşan mikro yapılar [52].

Takımın dönme hızı kaynak ısısının oluşturulması için en önemli faktördür ve kaynak için gerekli ısı girdisini etkilemektedir. Gerekenden fazla düşük devrin kullanılması yeterli ısıyı sağlayamayacağı için iyi bir kaynak gerçekleşmeyecektir. İhtiyaç duyulandan fazla devir verilerek yüksek ısı elde edilmesi kaynak bölgesindeki malzemenin akışkanlığını ve miktarını arttıracak ve takım omzu tarafından kontrol edilmesini zorlaştıracaktır. Şekil 4.14’ de AA2095 alaşımı için 500, 750 ve 1000 devir/dk. dönme hızlarında ve 2,1 mm/sn. sabit ilerleme hızında kaynak bölgesinde oluşan mikro yapıların şekline ait resimler verilmektedir.



Şekil 4.14 AA2095 alaşımı için 500, 750 ve 1000 devir/dk. dönme hızlarında ve 2,1 mm/sn. ilerleme hızında kaynak bölgesinde oluşan mikro yapılar [52].

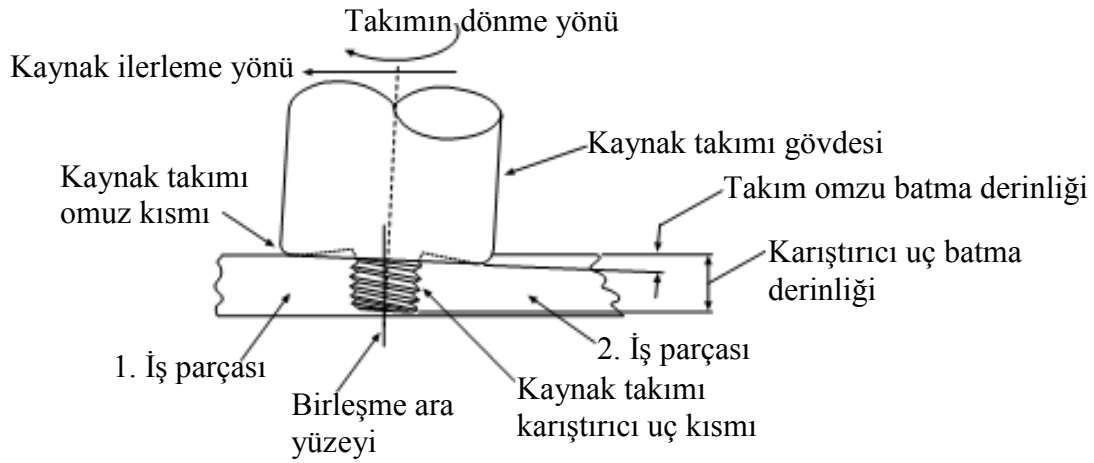
SKK'ında takımın dönme ve ilerleme hızı ısı girdisini etkilediği için girilen değerlere bağlı olarak kaynak sonrası mikroyapılarda, sertlik ve çekme gibi mekanik özelliklerde farklılıklar meydana gelmektedir. Yüksek ilerleme hızlarında kaynak metalinin yönlenmesi artmakta, düşük ilerleme hızlarında kaynak metalinin yönlenmesi fazla belirgin olmamaktadır [52]. Şekil 4.15' de AA2095 alaşımı için farklı devir ve ilerleme hızlarında malzeme mikroyapısında meydana gelen değişikliklere ait resimler verilmiştir.



Şekil 4.15 AA2095 alaşımı için farklı dönme ve ilerleme hızında malzeme mikroyapısında meydana gelen değişiklikler, a) 500 devir/dk.-2,1 mm/sn. ilerleme, b) 1000 devir/dk.-2,1 mm/sn., c) 1000 devir/dk.-5,1 mm/sn. ilerleme, d) Ana metal [52].

4.5.3 Sürtünme karıştırma kaynağında takımının batma derinliği

Takım omzu ve karıştırıcı ucun batma derinliği kaynak yüzey kalitesini belirleyen ve kaynak kalitesini etkileyen önemli parametrelerdendir. Parça yüzeyindeki girinti ve çıkıntılara bağlı olarak batma derinliğinin kontrol edilmesi güçtür. Tek pasolu kaynaklarda batma derinliği malzeme akışını kontrol etmek için parça kalınlığından daha düşük olarak ayarlanmalıdır. Çift pasolu kaynaklarda ise parça kalınlığının yarısından fazla batma derinliği verilmelidir. Takım uç kısmı ile orantılı olarak, takım omzu malzeme üst yüzeyine sürtünmeye başlayacak şekilde batma derinliği verilmelidir. Aksi takdirde takım omzu tarafından kaynak bölgesine aşırı baskı olacak ve takım omzu frezeleme yaparak kaynak bölgesindeki malzeme kalınlığını düşürecektir. Ayrıca kaynak yüzey kalitesi oldukça kötü gözükülecektir.



Şekil 4.16 SKK'ında takımın omuz ve karıştırıcı uç batma derinliği ve kaynağın uygulanmasının şematik gösterimi [48].

4.5.4 Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak malzemesinin önemi

Yöntemin farklı malzeme türlerine uygulanmasıyla ilgili çalışmalar ve yöntemin daha verimli kullanılması üzerine yapılan çalışmalar günümüzde halen devam etmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı alüminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımları, magnezyum ve alaşımları, az karbonlu alaşımlı çelikler, nikel ve alaşımları, çinko alaşımları, metal matrisli kompozitler ve bazı tür paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Termoplastiklerin bazı türlerine uygulanması ile ilgili çalışmalar devam etmektedir [43].

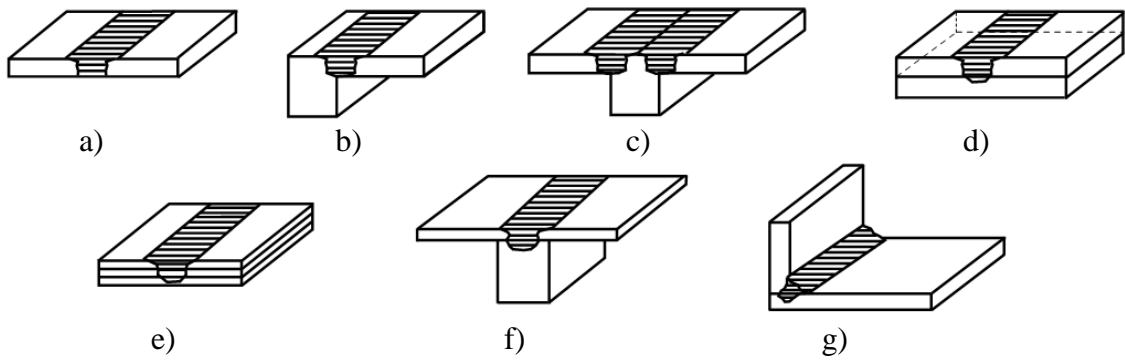
Malzeme türüne göre SKK'nın uygulanabilirliğinin yanında diğer kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında SKK'nın ne gibi üstünlükler ya da sınırlamalar getirdiği, kaynağın kullanılabilirliği için kaynak teknolojisi ve ekonomik anlamda yapılan değerlendirmeleri göz önünde bulundurmak gerekmektedir.

SKK'ında ısı kaynak takımının yüzeyi ile iş parçası yüzeyi arasındaki sürtünmeden meydana gelmektedir. Bu nedenle malzemenin sürtünme katsayısı, ergime noktası ve ısı iletkenliği, malzemenin türü ve malzeme kalınlığı gibi faktörler, kaynak özelliklerini etkilemektedir. Örnek olarak SKK'nın çelikler, titanyum ve bakır alaşımlarında kaynak öncesi yapılan ön tavlama ve kaynağın soğuma hızı önemli bir etken olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek ergime notasına sahip çelikler, titanyum ve titanyum alaşımları ile

yüksek ısı iletkenliğine sahip bakır ve bakır alaşımlarında oluşan ısı dönen takımın çevresindeki malzemenin yumuşamasında ve plastikleşmesinde yeterli olmamakta, bu nedenle sürekli ve hatasız kaynak bağlantıları yapılamamaktadır. [43].

4.5.5 Sürtünme karıştırma kaynağında bağlantı tasarımı

SKK yöntemi için en uygun birleştirme alın veya bindirme kaynağı şeklinde gerçekleştirilmektedir. Ayrıca Şekil 4.17’ de verilen tüm kaynak pozisyonlarında SKK başarılı şekilde gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.17 SKK yöntemi ile kaynak edilebilecek birleştirme türleri, a) Küt alın, b) Köşe, c) T-birleştirme, d) Bindirme, e) Çoklu bindirme, f) T-bindirme ve g) İç köşe birleştirmesi [37,39].

SKK yönteminde kaynak ağzı hazırlanmasına gerek yoktur. Kaynak edilecek malzemelerin birleştirme yüzeylerinin temiz ve kaynak edilecek konumda bağlanması ya da bağlama için gerekli kalıpların ve aparatlara bağlanması kaynak işlemini gerçekleştirmek için yeterli olmaktadır. Genel olarak birleşme yüzeylerinin kaynak edilecek malzemeye uygun seçilmiş taşlarla ince taşlama yapılması ve uygun çelik fırçalarla temizlenmesi kaynak kalitesini olumlu yönde etkileyecektir [43].

4.6. Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Avantajları

Kaynak esnasında koruyucu gaz ve ek malzemeye ihtiyaç duyulmaması, kaynak için ön hazırlık gerektirmemesi, kaynak sonrası çok az deformasyonlu, çatlak veya boşluk meydana getirmeksizin güvenli bir kaynak yapmaya imkân sağlaması yöntemin en önemli avantajlarından biri olarak ön plana çıkmaktadır [4,5,37-40,43]. Ayrıca SKK yöntemi çok farklı metallerin kaynağına imkân vermektedir.

SKK'nın iş yerine maliyeti azdır. Kaynak parametreleri doğru ayarlandığı sürece operatörün kaynağa herhangi bir etkisi söz konusu olmamaktadır, bu nedenle kaynak operatörü için ek bir eğitim gerektirmemektedir. Yöntemde UV ışınlar, kaynak dumanı veya elektromanyetik radyasyon oluşmadığı için insan sağlığına ve çevreye bir zararı yoktur. Bu gibi durumlar oluşmadığı için de ekstra önlemler gerektirmez.

Ekonomik bir kaynak yöntemidir. TIG ve MIG kaynak yöntemlerine oranla daha az enerji gerektirir [55]. Genellikle kullanılan enerji kaynak edilecek parçanın büyüklüğüne, kalınlığına, tekli veya çoklu paso uygulamalarına bağlı olarak değişmektedir.

4.7. Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Dezavantajları

Bazı uygulamalar için kaynak hızının diğer kaynak yöntemlerine oranla düşük olması, kaynak yüzeylerinin iyi temizlenmediği ve sabitlemenin düzgün yapılmadığı durumlarda malzemelerde atık gerilmeler oluşturması SKK yönteminin dezavantajları olarak ön plana çıkmaktadır [37]. Kaynak başlangıç ve bitişinde başlama ve bitiş için ek bir plaka kullanımı gerektirmektedir. Aksi halde başlangıçta oluşan kalitesiz dikiş görünümü ve şekil 4.18'de gibi kaynak sonunda pimin yukarı çekilmesiyle oluşan anahtar deliği oluşumu kaynak kalitesi ve görünümünü olumsuz yönde etkilemektedir. Kaynak işlemi için ekipmanların taşınmasındaki zorluklar ve farklı uygulamalar için alternatif ekipman tasarımları gerektirmesi SKK yönteminin dezavantajlarından biridir.



Şekil 4.18 SKK kaynak takımının çıkış noktasında pimin yukarı çekilmesiyle oluşan anahtar deliği [54].

4.8. Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Kullanım Alanları

Son yıllarda yöntem üzerinde yapılan pek çok araştırma ve geliştirme sayesinde yöntem hızla yaygınlaşmış havacılıktan, gemi inşa sanayine, otomotiv endüstrisinden petrol ve gaz sanayine kadar geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur.

4.8.1. Havacılık ve uzay sanayi

Havacılık ve uzay sanayindeki SKK uygulamalarının öncüsü Boeing firması olmuştur. SKK yönteminin 1997 yılında Schweissen & Scheiden fuarındaki tanıtımından sonra, Boeing firması tarafından araştırma ve laboratuvar çalışmaları yapmak amacıyla telif hakkı ödenerek satın alınmıştır [55,58]. Havacılık alanında ilk uygulamalar uçaklarda kullanılan iniş takımlarının kapaklarında gerçekleştirildi. Yöntemin başarılı olması ve olumlu sonuçlar alması üzerine uçakların gövde ve kanat parçalarının üretiminde de SKK kullanılmaya başlanmıştır [57]. NASA talebi üzerine Boeing firması tarafından Delta II ve Delta IV programlarında gövde ve yakıt tanklarının kaynağında SKK kullanılmıştır [43,55,58,60]. Eski usul üretim yöntemlerine kıyasla üretim zamanı ve maliyeti (perçinleme maliyeti % 20) önemli oranda azaltmıştır [55].

Sivil havacılıkta küçük tip yolcu uçaklarının üretilmesinde, kargo uçaklarının zemin sistemlerinin üretiminde SKK kullanılmaya devam etmektedir [57,58]. Son yıllarda

savaş uçaklarının gövde ve kanatlarında SKK yönteminin kullanılması yönünde çalışmalar yapılmaktadır [43,57].

4.8.2. Gemi inşa sanayi

Gemi yapımındaki ilk uygulamalar 1995 yılında İsveç ve Norveç’ te alüminyum alaşımlarından yapılmış levhaların ve ekstrüzyon ürünlerinin birleştirilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir [55]. SKK yöntemi ile deniz taşıtlarında alüminyum alaşımlarından yapılmış paneller, güverteler, derin dondurucu panelleri, depolama tankalarının ara bölmeleri, tavan ve taban elemanları ilk ticari uygulamalar şeklinde gerçekleşmiştir [43,55-58,60].

Friction Stir Links Inc.ve Marinette marine tarafından üretilen Littoral savaş gemisinin yapımında SKK yöntemi kullanılmıştır [43,55]. Yolcu gemilerinde kullanılan hafif yapıların üretiminde, katamaran türü hızlı feribotların hava yastıklı hovercraft türü feribotların yapımında, deniz otobüslerinin güverteleri, yan paneller, ara bölmeleri vb. yerlerde SKK yöntemi kullanılmaktadır [55-58]. Yöntemin gemi inşa sanayinde kullanımı hızla artmakta ve yaygınlaşmaktadır.

4.8.3. Otomotiv sanayi

Otomotiv endüstrisinde yoğun bir şekilde kullanılan alüminyum ve magnezyum alaşımları içeren parçalar SKK uygulamaları için mükemmel bir alan sağlamaktadır. Gövde, şaşı, kapılar, tampon, çarpma kutuları, alaşımlı jantlar, hava süspansiyon sistemleri, arka akslar, tahrik milleri, emme manifoldu vb. parçaların üretiminde SKK kullanılmaktadır [37,57,60]. Kara yolu taşımacılığında kullanılan ağır vasıta nakliye araçlarının gövde, kasa, motor, taşıma asansörlerinin vb. parçaların üretiminde SKK kullanılmaktadır. Zırhlı taşıt yapımında alt ve yan panellerinin birleştirilmesinde SKK yönteminden faydalanılmaktadır [57].

4.8.4. Petrol ve gaz sanayi

SKK kaynağı için kullanılan ekipmanın kendine özgü ve taşınabilir olması, diğer ark ve lazer yöntemleriyle karşılaştırıldığında son derece verimli ve mukavemetli bir kaynak sağlaması kara ve denizde doğalgaz ve petrol borularının birleştirilmesinde yöntemin kullanılmasını sağlamaktadır [55]. Ayrıca boru hatlarının tamir ve bakım maliyetlerinin diğer kaynak yöntemlerine göre düşük olması nedeniyle tercih edilmektedir [58].

4.8.5. Nükleer ve rafineri sanayi

SKK yöntemi nükleer ve rafineri sanayinde korozyona dayanıklı paslanmaz çelikten imal edilen tüp ve boruların birleştirilmesinde, LEU yakıt plakalarının üretiminde, kullanılmaktadır [58,59]. SKK yöntemi ile kaynak edilen parçaların sahip olduğu yüksek mukavemet ve düşük sertlik özellikleri, kaynak sonrası metal yorgunluğunun az olması SKK yönteminin tercih edilmesini sağlamaktadır [55].

4.8.6. Demiryolu sanayi

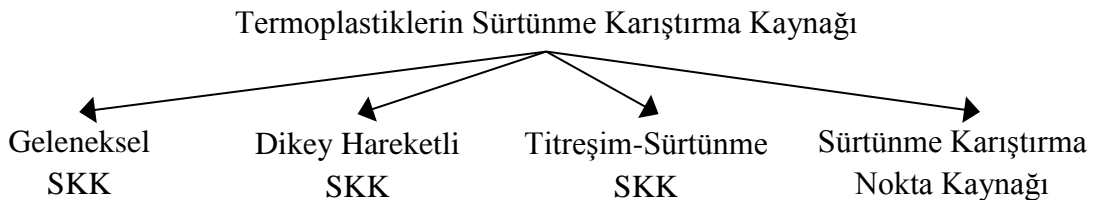
Alüminyumun ve alaşımları kullanılarak imal edilen yüksek hızlı trenlerin üretiminde SKK yöntemi kullanılmaktadır. Demiryolunda kullanılan araçların imalinde, metro vagonları, konteyner ve tramvayların üretiminde, rayların birleştirilmesinde SKK yönteminden faydalanılmaktadır [37,57,58].

5. TERMOPLASTİKLERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Termoplastiklerin kaynağında kullanılan bazı kaynak teknikleri sıcak gaz kaynağında olduğu gibi metal kaynak tekniklerine benzemektedir. Metal ve plastiklerin sahip olduğu özellikler birbirinden farklılık göstermekte ve metallere uygulanan bir kaynak yönteminin plastiklere uygulanabilir hale getirilmesi için pek çok çalışma yapılmaktadır. Bölüm 3'te bu kaynak yöntemleri detaylı olarak açıklanmıştır. Metal kaynak teknikleri arasında yer alan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK), başlangıçta alüminyum alaşımlarının kaynağı için geliştirilerek patenti alınan ve plastiklere uygulanması için üzerinde çalışmalar yapılan bir kaynak yöntemidir.

Günümüzde Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) ile metal ve alaşımlarının birleştirilmesi üzerinde pek çok çalışma yapılmış, bu alanda çok önemli gelişmeler kaydedilmiş ve birçok sektörde endüstriyel olarak uygulanmaya başlanmıştır. Ancak metallerin aksine plastiklere SKK uygulanması, plastiklerin termal ve viskoelastik özelliklerine bağlı olarak sınırlı kalmaktadır [61]. Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar 1998'den beri Brigham Young Üniversitesi (BYU) ve İngiliz Kaynak Enstitüsü (TWI)' da sürdürülmektedir [4,5]. 2009 yılı itibari ile de Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Bölümünde termoplastiklerin SKK ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) ile birleştirilmesi üzerine çalışmalara başlanmıştır.

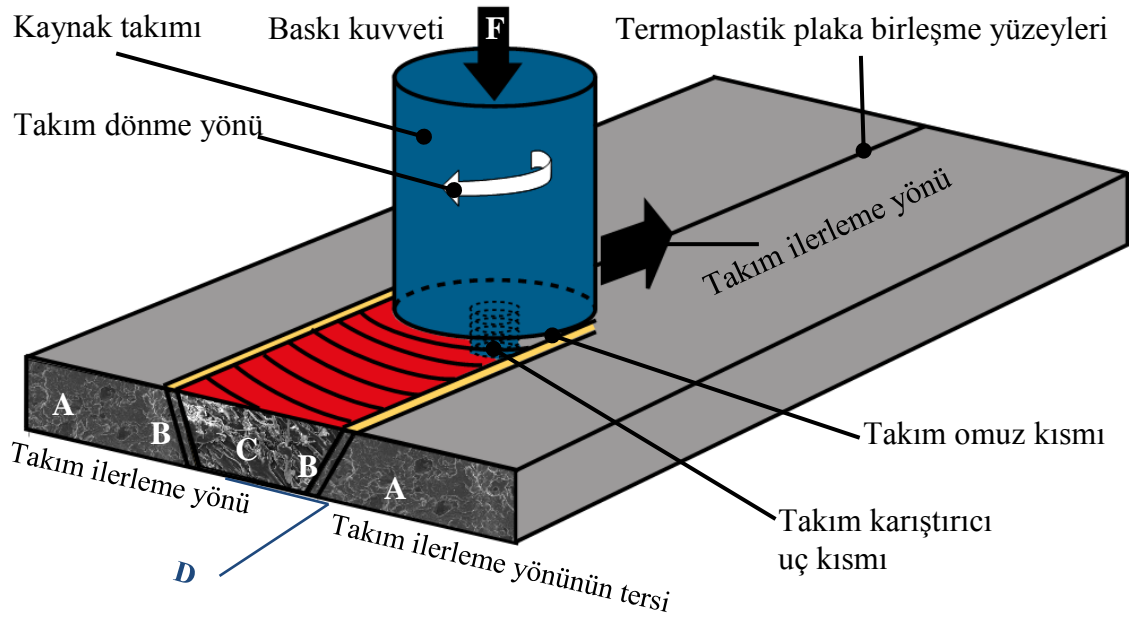
Metallerden farklı olarak Şekil 5,1'de görüldüğü gibi termoplastiklere SKK bir kaç farklı yöntemle uygulanmaktadır. Termoplastiklere uygulanan sürtünme karıştırma kaynağını, Geleneksel SKK, Dikey Hareketli SKK, Titreşim-Sürtünme SKK ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) şeklinde sınıflandırmak mümkündür.



Şekil 5.1 Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemleri

5.1. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Tıpkı metallerde olduğu gibi plastikler içinde SKK yönteminin uygulanması oldukça basittir. Birleştirilmek üzere sabitlenmiş plaka, boru vb. malzemelerin kaynak bölgesine sabit devirde silindirik omza sahip bir takım daldırılır ve kaynak yapılacak hat boyunca sabit ilerleme hızı ile hareket ettirilir. Kaynak bileşenlerinin (kaynak takımı ve malzeme) sürtünmesiyle kaynağının gerçekleştirilmesi için gerekli olan ısı meydana gelir ve oluşan bu ısı malzemeyi yumuşatır. Kaynak takımının omzu, pim tarafından yumuşatılarak geriye atılan malzemelere baskı uygulayıp kontrol ederek malzemelerin kaynaklanmasında rol oynar [4,5,37-39]. Şekil 5.2’ de termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesi ve oluşan mikroyapılar şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.2 Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinin ve oluşan mikroyapıların şematik gösterimi, A- Isıdan etkilenmeyen bölge (ana malzeme), B- Birleşme ara yüzeyi, C- Termomekanik olarak etkilenen karışım bölgesi, D- Birleştirilmeyen kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı altında kalan bölge

SKK esnasında dikkat edilmesi gereken en önemli konulardan biri; birleştirilecek parçaların kaynak prosesi boyunca oluşan baskı kuvvetinden dolayı birleştirilmek amacıyla alın altına bitleştirilmiş yüzeylerin birbirinden ayrılmaması için sıkı bir şekilde

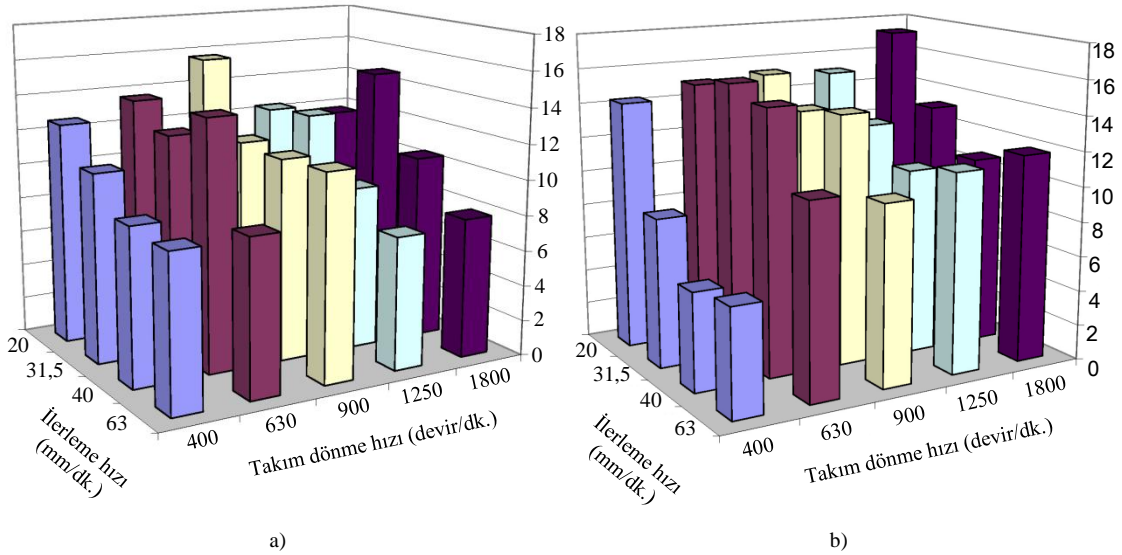
sabitlenmesidir. Aksi takdirde, dönen takım tarafından fırlatılan parçalar iş kazalarına sebebiyet verebilir.

Termoplastiklerin geleneksel SKK yöntemi ile kaynak edilebilmesi için ısı girdisinin iyi sağlanması gerekmektedir. Düşük devirde takım tarafından yüksek basınç kuvveti uygulanmazsa ya da ilerleme hızı yüksek seçilmiş ise etkin ısı girdisi sağlanamamaktadır. Bu durumda yeterli sıcaklığa ulaşamadığı için malzeme yumuşatılamamakta ve pim tarafından arka tarafa taşınmadığı için ve kaynak mukavemeti zayıf olmaktadır. Yüksek ısı girdisi, takım omzunun malzeme yüzeyine daha fazla baskı uygulaması, yüksek devir ve düşük ilerleme hızı ile sağlanabilmektedir. Takım omzu tarafından malzemeye daha yüksek baskı kuvveti uygulanması ısı girdisini arttırdığından düşük devirlerde kaynak yapılabilen ancak kaynaklı bölgede aşırı deformasyon meydana gelmektedir. Kaynak bölgesindeki deformasyona bağlı olarak meydana gelen boşluklardan takım ucu tarafından karıştırılan yumuşamış haldeki plastik malzemeler kaynak bölgesinden dışarı atılmakta ve kaynak bağlantı mukavemeti zayıflatmaktadır. Devir sayısının yükseltilmesi ve ilerleme hızının azaltılması yüksek baskı kuvveti ile elde edilen ısı girdisini sağlamak ve kaynaklı bölgede malzeme yüzeyi daha az deformasyona uğramaktadır. Düşük ilerleme hızlarında kaynak yapma süresinin artması ile kaynak maliyeti de artmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken malzeme kalınlığına göre takım omuz ve pim çapının seçimi, dalma derinliğinin, kaynak ilerleme ve takım dönme hızının kaynak için gerekli olan sıcaklığı elde edecek şekilde ayarlanmasıdır. Malzeme cinsi termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynağında oldukça önemlidir.

A.Arıcı ve ark. tarafından yapılan çalışmada 5x80x200 mm ölçülerinde giyotin makas ile kesilmiş polietilen levha kullanılmıştır [5,62,78,79]. Kaynak işlemini universal frezede pim çapı 5 mm, pim boyu 2,8 mm ve omuz çapı 16 mm olan kaynak takımı kullanılarak dönme hızı 1000 devir/dk. ve üç farklı ilerleme hızı (12,5–25–40 mm/dk.) parametre değerlerinde dik konumda ve 1° eğim verilerek gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar TMA analizlerinde camsı geçiş sıcaklığının 1° eğim verilerek kaynaklanan levhalarda daha yüksek değerde olduğunu ifade etmişlerdir. Bunu verilen eğim nedeni ile takımın arka kısmında malzemeye yüksek basınç uygulanması ve bu sayede daha iyi bir ısı girdisinin ortaya çıkması olarak açıklamışlardır. Araştırmacılar takım ilerleme hızının camsı geçiş sıcaklığına etki eden bir parametre olduğunu, en

yüksek camsı geçiş sıcaklığına termomekanik olarak etkilenen bölgede (TEB) ulaştıklarını ve bu bölgede kristal yapısında artış olduğunu, ifade etmişlerdir.

Kiss Z. ve Czigány T. tarafından 12 mm kalınlığındaki PP levhalara 15 ve 45° 'lik takım kullanılarak SKK uygulaması gerçekleştirilmiş ve dönme ve ilerleme hızının kaynak mukavemeti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [63]. Kaynak sonrası alınan numunelere çekme testi uygulanmış ve ortalama kaynak mukavemetinin, ana malzemenin yaklaşık % 50'si oranında (11,5 MPa) olduğunu ifade etmişlerdir. Şekil 5.3' te Kiss Z. ve Czigány T. tarafından yapılan deneylere ait parametreler ve çekme testine ait sonuçlar verilmiştir. Kiss Z. ve Czigány T. tarafından yapılan değerlendirmelerde takım geometrisinin SKK üzerinde oldukça etkili olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 5.3 PP malzemeye ait kaynak parametreleri ve çekme mukavemeti değerleri, a) 15° takım açısı b) 45° takım açısı [63].

Rezgui ve arkadaşları tarafından 15 mm kalınlığındaki PE levhalara, takım dönme hızı 910, 1280 ve 1700 devir/dk., takım ilerleme hızı 16, 29 ve 44 mm/dk., başlangıçta dalma sonrası bekleme 9,15 ve 20 sn., farklı kaynak parametre değerleri ve M10, M12 ve M14 gibi üç farklı geometrideki takımlar ile SKK uygulanmıştır [64]. Kaynak esnasında kaynak takımı parçaya daldırıldıktan sonra belirli bir süre beklenmiş ve sonra takım ilerlemesi verilerek kaynak gerçekleştirilmiştir. Kaynakta kullanılan takım bilyalı

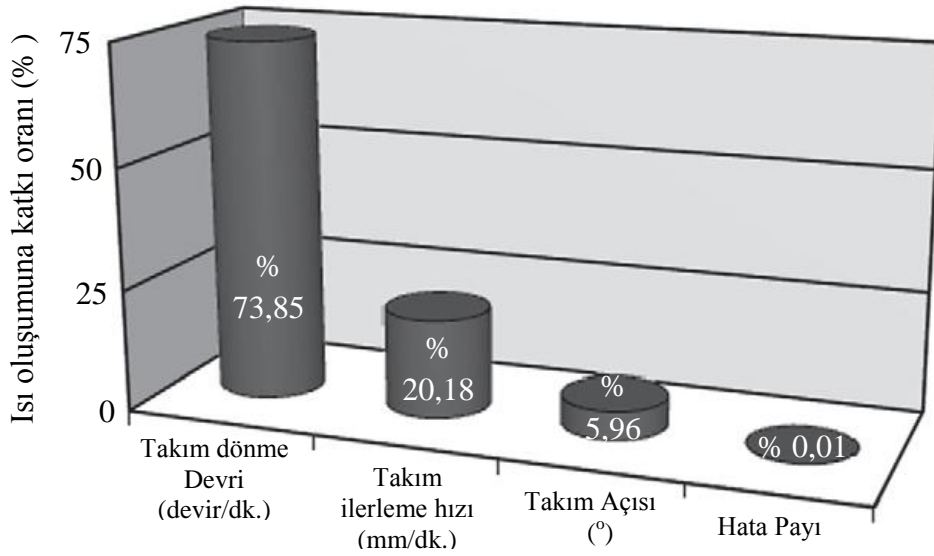
bir sistem ile takım omuz kısmı kaynak hattı boyunca malzeme yüzeyine temas etmeyecek şekilde tasarlanmıştır. Kaynak takımının devir hızı 910 devir/dk., ilerleme hızı 29 mm/dk. ve başlangıçta bekleme süresi 9 sn. şeklinde gerçekleşen kaynakta en yüksek akma mukavemeti (28,7 MPa) elde edilmiştir. Kaynak takımının dönme devrinin artmasına bağlı olarak kaynak mukavemetinin azaldığı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [64].

Squeo ve arkadaşları tarafından 3 mm kalınlığındaki PE levhaya 3000 ile 20,000 devir/dk. takım dönme hızında ve 10 ila 44 mm/dk. takım ilerleme hızlarında, 1 ve 3 mm'lik pim çapına sahip silindirik uçlu bir kaynak takımı kullanılarak SKK uygulanarak farklı kaynak parametreleri ve takım geometrilerinin kaynak kalitesi ve mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir [65]. Kaynak mukavemeti üzerinde, kaynak parametrelerinin özellikle takım ilerleme hızının etkili olduğu, kaynak bölgesinin beslenmesinin pim çapına bağlı olarak değiştiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca kaynak başlangıcında bekleme süresinin artmasıyla birlikte, kaynak bölgesine ısı girişinin arttığını ve buna bağlı olarak kaynak mukavemetinin arttığını belirtmişlerdir [65].

Payganeh ve arkadaşları tarafından 5x50x100 mm ölçülerinde PP kompozit levhalara SKK uygulanabilirliğinin ve kaynak parametrelerinin etkilerini incelemek amaçlı SKK uygulanmıştır [66]. Araştırmacılar tarafından kaynak parametreleri, takım dönme devri 400, 600 ve 1000 devir/dk., ilerleme hızları 8,16 ve 20 mm/dk., takım açısı 0,1, ve 2° olarak uygulanmıştır. Takım geometrisinin kaynak yüzey kalitesini belirleyen en önemli parametre olduğu ve kaynak mukavemeti üzerinde oldukça etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Araştırmacılar tarafından en iyi sonuç kaynak parametreleri 630 devir/dk. ve ilerleme hızı 8 mm/dk. olarak uygulamada 7 MPa olarak alınmıştır. Düşük devirlerde (400 devir/dk.) yapılan kaynakların mukavemetinin oldukça düşük olduğu, kaynak için gerekli olan ısının elde edilemediği, yüksek devirlerde (1000 devir/dk.) dönme hızında ise parça yüzeyinde aşırı deformasyon meydana geldiği araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir [66].

Bozkurt Y. tarafından 4x50x130 mm ölçülerinde HDPE plakalar kullanılarak SKK uygulanmış ve takım dönme hızı, takım ilerleme hızı ve kaynak takımı omuz açısı olmak üzere üç farklı kaynak parametresinin SKK üzerindeki etkileri incelenmiştir [68]. Kaynakta omuz çapı 18 mm, pim çapı 6 mm ve batma derinliği 3,8 mm olan SAE 1050

çeliğinden yapılmış ve ısıtıl işlem (HRc:40) uygulanmış bir takım kullanılmıştır. Takım dönme hızı 1500, 2100 ve 3000 devir/dk., takım ilerleme hızı 45, 75, 115 mm/dk. ve takım omuz açısı 1, 2, 3° olarak üç farklı kademe belirlenmiştir. Şekil 5.4' te görüldüğü gibi araştırmacı tarafından kaynak parametrelerine takım dönme hızının etkisi % 73,85, takım ilerleme hızının etkisi, % 20,18 ve takım açısının etkisi % 5,96 olarak belirtilmiştir [68].



Şekil 5.4 Kaynak parametrelerinin SKK'ına katkı oranı [68]

Ahmadi ve arkadaşları tarafından 4 mm kalınlığındaki karbon fiber takviyeli polipropilen kompozit levhalara bindirme kaynağı şeklinde SKK uygulanarak, kaynak takımı pim profilinin SKK üzerindeki etkileri incelenmiştir [69]. Kaynak takımı pim profili dış açılmış ve dış açılmamış konik ve silindirik uçlu takımlardan oluşmaktadır. Kaynakta kullanılan parametreler (kaynak ilerleme hızı, takım dönme hızı, takım eğim açısı, malzeme kalınlığı vb.) tüm takımlar için aynıdır. Araştırmacılar tarafından SKK kaynağında, kaynak mukavemeti ve görünümü üzerinde kaynak takımı pim geometrisinin etkili olduğu, en iyi sonuçların dış açılmış silindirik ve konik uçlu takımlarla elde edildiği ifade edilmiştir [69].

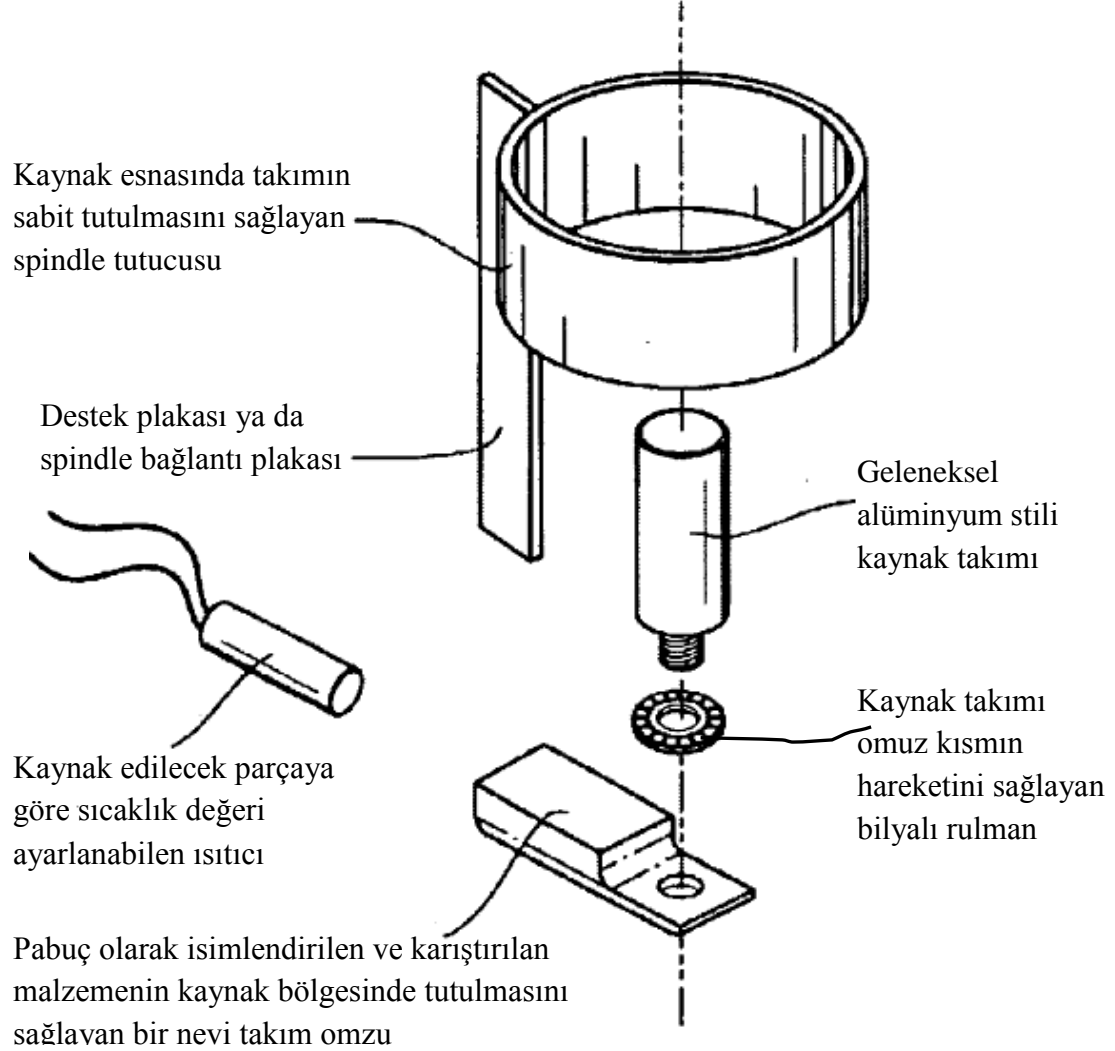
Czigány ve Kiss tarafından 10 mm kalınlığındaki PP levhalara [70] ve cam fiber takviyeli polipropilen kompozit levhalara [71] alın kaynağı şeklinde SKK uygulanarak, kaynak parametrelerinin SKK üzerindeki etkileri incelenmiştir [70,71]. Araştırmacılar tarafından; polimer matrisli kompozitlere SKK'nın başarılı bir şekilde uygulanabildiği ifade edilmiştir. PP levhaların kaynağında kaynak takımı devrinin etkili olduğu yüksek ve düşük devir hızlarında kaynak bölgesi mikro yapı özelliklerinin farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir [70]. Polimer matrisli kompozitlerin kaynak mukavemetinin, kaynak takımının devri, fiberlerin uzunluğu ve malzeme içerisindeki dağılımı, matris malzemesinin viskozitesi ve kullanılan takımın geometrisine bağlı olarak değişmekte olduğu, kaynak parametrelerinin SKK üzerinde oldukça etkili olduğu araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir. Kaynak sonrası yapılan SEM incelemelerinde kaynak bölgesinde yer alan cam fiberlerin kaynak öncesine göre kesme kuvvetinin etkisine bağlı olarak boyunun kısaldığı gözlemlenmiştir [71].

Pek çok araştırmacı tarafından geleneksel SKK yönteminin plastiklere uygulanmasında aşağıdaki problemlerle karşılaşıldığı ifade edilmiştir [4,5,61-72].

- Birleştirme bölgesinde malzeme tutulmasındaki zorluk nedeniyle kaynak yapısında boşluk meydana gelmesi
- Kaynak hızlarının oldukça düşük olması
- Kaynak bölgesinde polimerin düzgün bir şekilde karıştırılmasının zorluğu
- Üniform olmayan bir kaynak yüzeyi ya da plastiğin küçük yuvarlak parçalar şeklinde birbiri ile kaynaması
- Zayıf kaynak mukavemeti
- Kaynak için gerekli olan ısının elde edilmesinde ve taşınmasındaki zorluklar

Nelson tarafından yukarıda ifade edilen problemlerin çözülmesi amacıyla (1) omuz yüzeyinin sabit tutulması veya pim veya takımın bağımsız hareket etmesi, (2) Sisteme takım ve malzeme arasındaki sürtünme ısısından bağımsız ısı verilmesi olmak üzere iki farklı çözüm yolu geliştirilmiştir [5,72]. Nelson kendi geliştirdiği çözüm önerilerine paralel olarak “sıcak-pabuç” olarak isimlendirilen ve kaynak bölgesine dışarıdan ısı

veren, takım omzu ile parça temasını engelleyen bir kaynak takımı (Şekil 5.5) tasarımı yapmış ve patentini almıştır.



Şekil 5.5 Nelson tarafından geliştirilen SKK kaynak takımı [72]

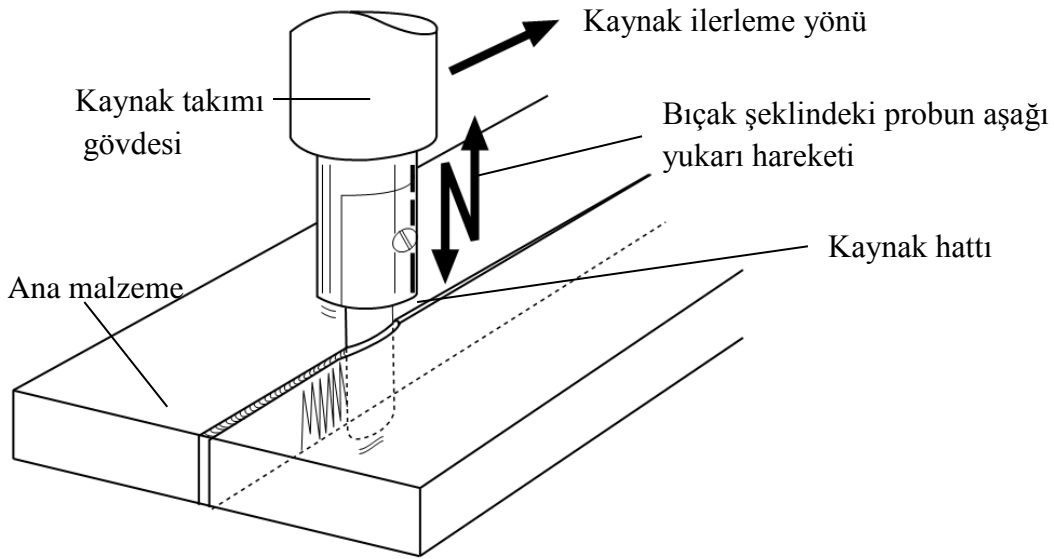
Strand tarafından Nelson'un geliştirdiği takım tasarımı ile benzerlik gösteren ve Johns tarafından geliştirilen bir takımla PP levhalara SKK uygulanarak, kaynak parametrelerinin (pabuç sıcaklığı, ilerleme hızı, basınç süresi ve pim çapı) SKK üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır [4]. Araştırmacı tarafından;

- 1- Pim çapının artmasına paralel olarak, kaynak bağlantı mukavemetinin arttığı,

- 2- İlerleme hızının artmasıyla bağlantı mukavemetinin arttığı ancak belli bir ilerleme hızından sonra (305 mm/dk.) bağlantı mukavemetinde bir artış sağlanamadığı
- 3- Pabuç sıcaklığının artmasıyla kaynak mukavemetinin arttığı
- 4- Malzeme yüzeyine uygulanan basınç süresi ile ilgili olarak net bir veri elde edilemediği ifade edilmiştir.

5.2. Dikey Hareketli Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Dikey Hareketli Sürtünme Karıştırma Kaynağının uygulanması Şekil 5.6' da şematik olarak gösterilmiştir. Sistemde kaynak takımı pim ve omuzdan oluşan silindirik bir takım yerine aşağı ve yukarı olmak üzere dikey yönde hareket eden bıçak şeklinde yassı bir takımdan oluşur [67]. Bıçak şeklindeki takım birleştirilmek üzere sabitlenmiş plaka, boru vb. malzemelerin kaynak bölgesine daldırılır ve kaynak yapılacak hat boyunca sabit ilerleme hızı ile hareket ettirilir. Kaynak için gerekli olan ısı plastik malzeme ve bıçak şeklindeki yassı takımın sürtünmesi ile elde edilir. Kaynak bileşenlerinin (kaynak takımı ve malzeme) sürtünmesiyle kaynağının gerçekleştirilmesi için gerekli olan ısı meydana gelir ve oluşan bu ısı malzemeyi yumuşatır.



Şekil 5.6. Dikey hareketli SKK uygulamasının şematik gösterimi [5,67]

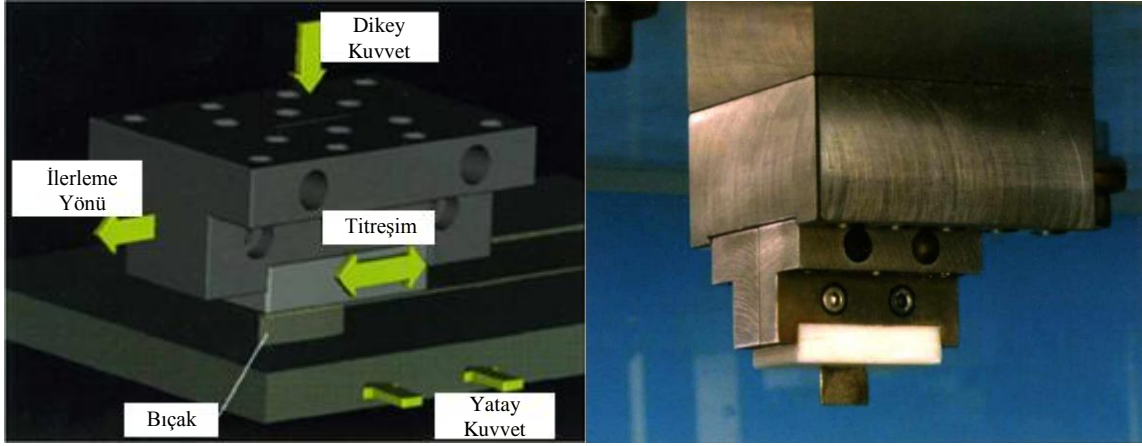
Bu yöntemin temel problemi erimiş malzemeyi kaynak bölgesinde tutacak bir mekanizmanın olmamasıdır [67]. Erimiş malzeme kaynak bölgesinde tutunamadığı için kaynakta boşluklar meydana gelmekte ve buna bağlı olarak kaynak dayanımı zayıf olmaktadır. Erimiş plastiği kaynak bölgesinde tutacak bir mekanizmanın geliştirilmesi, erimiş plastiği kaynak bölgesinde tutacağı için kaynak mukavemetini arttıracaktır.

Panneerselvam ve arkadaşları tarafından 2 mm kalınlığında Akrilik malzemelere Dikey Hareketli SKK uygulanmış ve kaynak bağlantısının mukavemeti ve kalitesi yapısal ve mekanik çalışmalarla analiz edilmiştir [77]. Araştırmacılar malzeme kalınlığının, kaynak probunun (bıçağının) kalınlığının ve geometrisinin, kaynak ilerleme hızının kaynağa etkileyen parametreler olduğu ifade edilmiştir. Bazı uygulamalarda termomekanik olarak etkilenen bölgede gözenekli bir yapı ve malzeme akışının yetersiz olduğu bunun da kaynak mukavemetini azalttığını, yapılan mekanik testlerde ana malzeme mukavemetinin % 80'i oranında kaynak mukavemeti elde edildiğini belirtmişlerdir [77].

5.3. Titreşim-Sürtünme Yöntemi ile Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Titreşim-Sürtünme yöntemiyle plastiklere SKK uygulamaları için TWI tarafından geliştirilmiş yeni bir yöntemdir [61,73]. Yöntem olarak dikey hareketli sürtünme karıştırma kaynağına benzemektedir. Bu proseste ileri geri hareket yaparak titreşim oluşturan ve kaynak hattına paralel ilerleyen bıçak şeklinde yassı bir takım ve bir omuzdan oluşan kaynak takımı kullanılır. Kaynak için gerekli olan ısı, plastik malzeme ile bıçak şeklindeki yassı takım ve omuzun birbiri ile sürtünmesinden elde edilir. Sürtünme sonucu elde edilen ısı dikey kuvvet altında takımın hareket ettiği kenarların kalınlığı boyunca malzeme ara yüzeyini eritir ve takımın ilerleme hareketiyle arkada kalan bölgede kaynak meydana gelir. Yöntemin uygulanması Şekil 5.7' de şematik olarak gösterilmiştir.

Kaynak başlangıcında plastiklerin sahip olduğu düşük ısı iletkenliğinden dolayı omuz tarafından üretilen ısı, kaynak merkezine yakın malzemenin eritilmesi için yeterli değildir. Bu yüzden alın altına yapılan kaynaklarda yüzeylerin birleştirilmesi için ihtiyaç duyulan ısının hemen hemen hepsi bıçak şeklindeki yassı takım tarafından oluşturulmalıdır [73].



Şekil 5.7 Titreşim-Sürtünme yöntemi ile plastıklere SKK uygulanmasının şematik gösterimi [61]

Titreşim-Sürtünme yöntemi ile sürtünme karıştırma kaynağının uygulanabilmesi için gerekli olan iki temel adım vardır: İlk olarak, kaynak için gerekli olan ısı, bıçak şeklindeki yassı takım ve omuzdan oluşan kaynak takımı ile plastik levhalar arasındaki sürtünmeden dolayı elde edilir. İkinci adımda ise plastik levhaların kaynaklanabilmesi ve elde edilen ısının korunması için parçalar ile temasın devam ettirilmesi yani sürekli olması gerekmektedir [73]. Omuz tarafından uygulanan dikey yük, birleştirilmek üzere sabitlenmiş malzemelerin üst kısımlarında malzemeyi eritmek için bir ısı girdisi oluşturur, fakat takım omzunun kaynaklanan parçaların birbiri ile temas ettiği yüzeylere direkt olarak etkisi yoktur. Yatay kuvvet üç farklı bileşenle tanımlanır: yatay kuvvetin uygulanmasına bağlı olarak, kaynak için malzemenin ısıtılmasıyla ısıl genişleme meydana gelir ve bıçağın ilerleme hareketiyle bıçak şeklindeki yassı takımın çevresinde açığa çıkan ergimiş haldeki plastik malzemeler birbiri ile kaynaklanır. Yatay kuvvetin uygulanması, bıçağın ilerleme hareketi ve bıçak şeklindeki yassı takımın yüzeyleri ile plastik malzemenin sürtünmesinin sonucu olarak doğrudan ısı üretir. Birleştirilmek üzere sabitlenmiş parçaların temas yüzeyleri arasındaki baskı kuvveti yalnızca bıçak şeklindeki yassı takımın ilerlemesi ve buna bağlı olarak yatay kuvvetin oluşması ve ısıl genişlemenin etkisi ile oluşturulur.

Bu yöntemin en önemli avantajı bıçak şeklindeki yassı takımın kaynak esnasında sürekli olarak kaynak bölgesinde olması ve erimiş malzemenin kolayca kaynak bölgesinde tutulmasıdır. Titreşim-Sürtünme yöntemi ile dikey hareketli sürtünme karıştırma

kaynağı ile karşılaştırıldığında titreşim-sürtünme yönteminde ortalama sıcaklık daha yüksektir ve sistemdeki ısı kayıpları önemli derecede azaltılmıştır.

Scialpi ve arkadaşları tarafından titreşim-sürtünme yöntemi ile düşük (1270 N) ve yüksek (2400 N) dikey kuvvet etkisi altında PP malzemeye SKK uygulamaları gerçekleştirilmiş ve kaynak parametrelerinin kaynak üzerindeki etkileri incelenmiştir [61,67,73]. Araştırmacıların ifade ettiğine göre;

1-Kaynakta kullanılan bıçağın sahip olduğu özellikler (boyu ve kalınlığı) mekanik özellikleri etkilemektedir. Bıçak kalınlığının azaltılması diğer parametrelerden bağımsız olarak mekanik özelliklerde artış sağlamaktadır.

2-Yatay kuvvet kaynak görünümü üzerinde oldukça etkilidir. Aşırı yatay kuvvet uygulanması kaynak hattı üzerinde malzemeyi şişirerek baloncuk (gaz boşluğu) oluşturmaktadır.

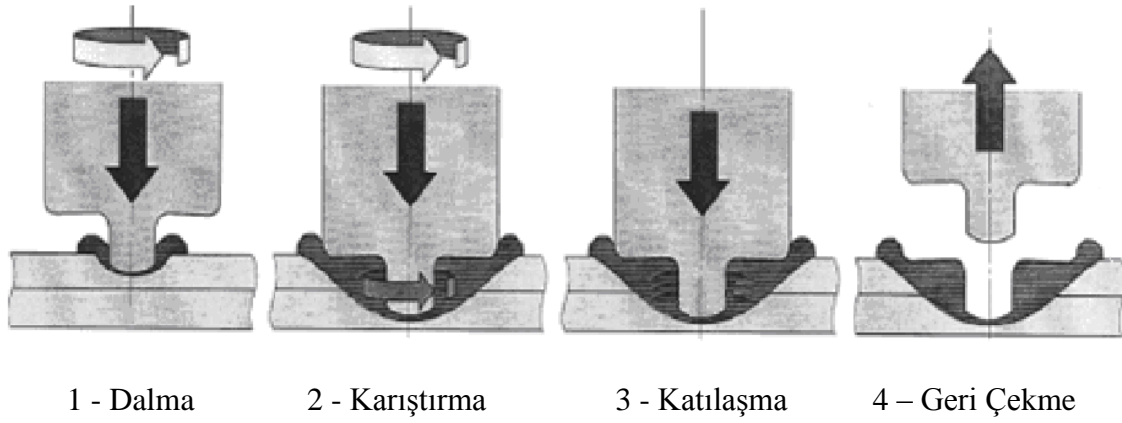
3-Yatay kuvvet ve bıçak boyu kaynak bölgesinde oluşan sıcaklık üzerinde etkilidir. Aşırı yatay kuvvet uygulanması ve bıçak boyunun doğru ayarlanmaması kaynak hattı üzerinde aşırı baloncuk oluşmasına sebep olacaktır.

4- Yapılan eğme deneylerinde, kaynak kök bölgesinde bıçak uzunluğu hariç diğer tüm parametrelerin (bıçak kalınlığı, düşey yük ve yatay kuvvet) etkisi olumsuzdur.

5-Dikey kuvvetin yüksek olması, sürtünmeyle birlikte kaynak bölgesindeki ısıyı artmasıyla birlikte eriyen malzeme miktarını arttıracaktır.

5.4. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK), geleneksel yöntemlerle birleştirilmesi zor ve masraflı olan demir dışı metallerin birleştirilmesi amacıyla ortaya çıkan ve son zamanlarda plastikler içinde başarılı bir şekilde uygulanan bir birleştirme yöntemidir [74,75]. Uygulama şekli itibari ile SKK'na benzemektedir [74]. 2001 yılında alüminyum alaşımlarının nokta kaynak yöntemi ile birleştirilmesi amacıyla otomotiv endüstrisi tarafından geliştirilmiştir [76].



Şekil 5.8 SKNK uygulaması kaynak işlem adımlarının şematik gösterimi [75]

SKNK kullanılan kaynak takım omuz çapı daha geniş, karıştırıcı uç (pim) çapı ise daha küçük olacak şekilde tasarlanmaktadır [73]. SKNK plastiklere Şekil 5.8’ de gösterildiği gibi 1-Dalma, 2-Karıştırma, 3-Katılaşma, 4- Geri Çekme adı verilen dört aşmada gerçekleştirilmektedir [75]. Bu aşamalar aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

- 1- **Dalma:** Belirli bir hızda dönen kaynak takımı, uygulanan basma kuvvetinin etkisiyle iş parçası içerisinde belirlenen derinliğe kadar daldırılır.
- 2- **Karıştırma:** Kaynak için gerekli ısıyı elde etmek ve malzemenin erimesini sağlamak amacıyla kaynak takımı malzeme içerisinde belirli bir süre döndürülür. Bu esnada kaynak takımı omuz ve pim kısmı tarafından eriyen malzeme karıştırılır.
- 3- **Katılaşma:** Plastik malzemenin erimesi ve kaynak takımı tarafından karıştırılmasından sonra, takımın dönme hareketi durdurulur ve kaynak bölgesindeki sıvı malzeme katılaşmaya kadar kaynak takımı kaynak bölgesinde bekletilir.
- 4- **Geri Çekme:** Kaynak bölgesinin katılaşmasından sonra iş parçası üzerindeki baskı kuvveti kaldırılarak kaynak takımı yukarı doğru çekilir.

Bilici ve arkadaşları tarafından 4 mm kalınlığında PP ve PE levhalar kullanılarak SKNK uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Deneylerde SAE 1040 çeliğinden yapılmış ve sertleştirilmiş (40 HRC) kaynak takımı kullanılmıştır. Kaynak parametreleri, dalma hızı 0,33 mm/sn., dalma derinliği 5,70 mm ve katılaşma için bekleme süresi 45 saniye olarak

verilmiştir. Araştırmacılar tarafından takımın dönme hızının artması ile kaynak bölgesindeki ısının arttığı, belirli bir süre sonra sürtünme katsayısının azalmasına bağlı olarak kaynak bölgesinde sıcaklığın sabit hale geldiği ifade edilmiştir [75].

Kurtulmuş tarafından 4 mm kalınlığında PP levhalara, takım dönme hızı 900 devir/dk., Batma derinliği 5,7 mm, bekleme süresi 120 saniye ve takım dalma hızı 0,3 mm/sn. kaynak parametreleri kullanılarak SKNK uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Araştırmacı tarafından kaynak mukavemetinin, kaynak bölgesinde katılma esnasında takımın bekleme süresiyle arttığı ve en yüksek kaynak mukavemetinin 20 saniye bekleme süresi ile elde edildiği, 20 saniyeden sonraki bekleme sürelerinin kaynak kaynak mukavemeti üzerinde etkili olmadığı ifade edilmiştir [76].

Arıcı ve Mert tarafından 5 mm kalınlığında PP levhalara SKNK uygulanmış ve kaynak parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Araştırmacılar tarafından bekleme süresinin ve takım batma derinliğinin kaynak mukavemeti üzerinde etkili olduğu ve kaynak kalitesini etkilediği ifade edilmiştir. Araştırmacılar yaptıkları uygulamalarda kaynak bekleme süresinin 80 saniye ve % 80-85 penetrasyon derinliğini optimum değerler olarak ifade etmişlerdir [80].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar PE ve PP olmak üzere iki polimer malzeme üzerinde farklı kaynak parametreleriyle SKK tekniğinin uygulanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Deneylein planlanması, ilk olarak en çok kullanılan polimer malzeme türleri seçilmiş, deneyleerde kullanılmak üzere kaynaklanacak malzeme ölçü ve kalınlıkları belirlenmiş ve kaynağa hazır hale getirilmeleri sağlanmıştır. İkinci olarak belirlenen ölçülerdeki malzemelerin kaynak uygulamalarının gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan ve malzemelerin kolayca sökülüp takılabileceği kalıp tasarımı yapılmıştır. Üçüncü aşamada; literatür taramalarından elde edilen bilgiler ışığında deneyleerde kullanılmak üzere farklı geometri ve ölçülerde kaynak takımı tasarımları yapılmış ve kaynakta kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Dördüncü aşamada; kaynak parametreleri oluşturulmuş ve parametrelerin optimizasyonu sağlanmaya çalışılmıştır. Optimizasyonu sağlanan farklı kaynak parametreleri ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş, farklı mekanik ve kimyasal deneylelerle kaynak performansı test edilmiştir. Son olarak kaynaklı bölgeye ait mikroyapısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

6.1. Polimer Malzemeler

Endüstrideki kullanım oranları göz önüne alınarak PE ve PP malzemeler deneyleerde kullanılmak üzere seçilmiştir. PE ve PP hakkında burada kısaca bilgi vermek, kaynakta kullanılacak malzemelerin tanınması ve ileriki aşamalarda buradaki bilgilerden faydalanılması açısından faydalı olacaktır.

Polietilen 1930'lu yıllarda İngiltere'de Imperial Chemical Industries (ICI) laboratuvarında çok yüksek basınç altında etilenin çok az oksijen yardımı ile polimerleştirilmesi şeklinde üretilmiştir [81-83]. Başlangıçta 2000 bar gibi çok yüksek basınç altında gerçekleştirilen bu tepkimenin teknolojisinin uygulanabilir hale getirilmesi uzun yıllar içinde gerçekleştirilmiştir. İlk üretilen polietilen alçak yoğunluklu olarak adlandırılan gruptur. Çok geçmeden mekanik ve elektriksel özelliklerinin farkına varılan polietilen birçok farklı uygulamada kullanılmaya başlanmıştır [83].

1950’li yıllarda Ziegler-Natta adıyla anılan yeni bir katalizörün bulunması ile etilenin düşük basınç altında polimerleştirme tepkimesi geliştirildi [81-83]. 1970’li yıllardan itibaren yöntem polietilenin bütün çeşitlerine uygulandı ve bu tarihten itibaren PE dünya çapında çok kullanılan plastik madde haline geldi. Polietilenin sınıflandırılmasında en yaygın kullanılan özellik yoğunluktur [81]. Yoğunluğa bağlı olarak PE sınıflandırılması Tablo 6,1’de verildiği gibidir.

Tablo 6.1 Yoğunluğa bağlı olarak PE’nin sınıflandırılması [81].

Yoğunluk (gr/cm ³)	Kullanılan yaygın isim	Sembölü	PE Sınıflandırılan dünya standardı		
			ASTM 1248	ISO DIS 1872	DIN 16776
0,910-0,925	Alçak Yoğunluklu Polietilen	AYPE	I	14,18,23	15,20,25
0,926-0,940	Orta Yoğunluklu Polietilen	OYPE	II	27,33,40	30,35,40
0,941-0,959	Yüksek Yoğunluklu Polietilen	YYPE	III	45,50,57	45,50,55
0,96 ve üzeri	Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen	UYYMA-PE	IV	62	60,65

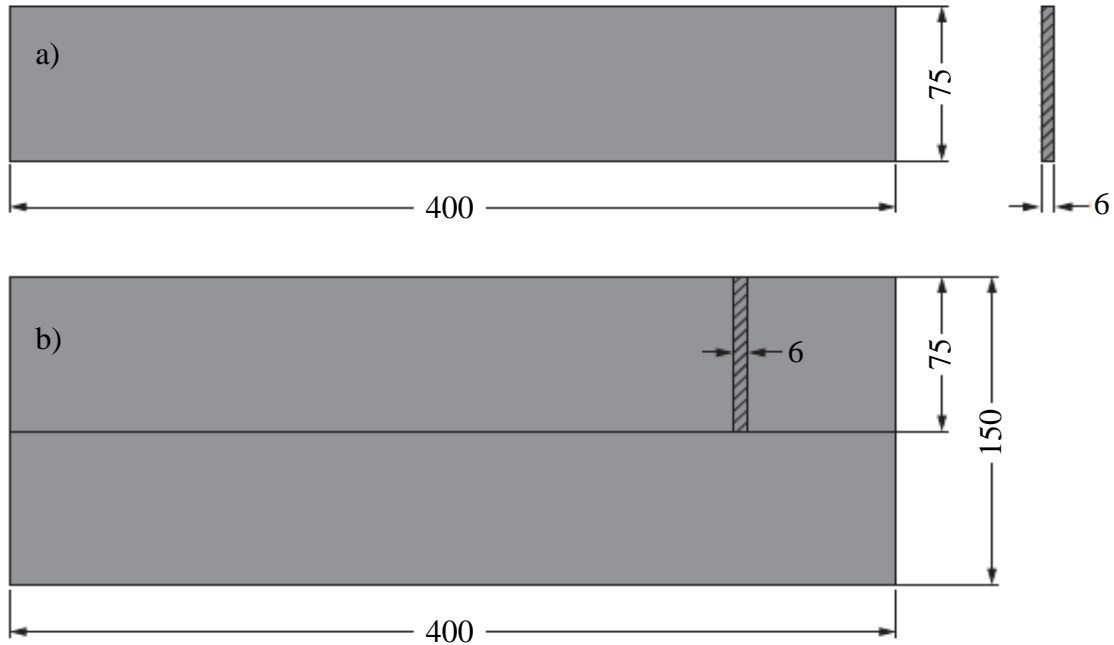
Polipropilen 1954 yılında Natta tarafından bulunmuştur [81,84]. Polimerizasyon sırasında Ziegler-Natta katalizörlerinin aktivitesine bağlı olarak izotaktik, sindiyotaktik ve ataktik polimerler oluşabilir. Genel olarak ortalama % 93 izotaktik, % 5,5 sindiyotaktik ve %1,5 civarında da ataktik polimerlerden oluşur [81]. Polipropilenin yoğunluğu ticari olarak kullanılmakta olan tüm plastik malzemelere oranla daha düşüktür. Sıcaklıkta genişmesi ve soğudukça büzülmesi PE’ne göre çok düşüktür. Bundan dolayı nadiren deforme olurlar veya çatlaklar. Polipropilen oldukça iyi kimyasal dirence sahiptir. PP genellikle; homopolimer, kopolimer ve random kopolimer olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır [81].

Malzemeler seçilirken alanında uzman olan ve ürünleri en çok kullanılan firmalar belirlenmiş ve sürekli aynı kalitede ürün üreten ve referansları güvenilir olan Simona firmasına ait ticari adları PE-HWST (polietilen) ve PP-DWST (polipropilen) plakaların kullanılmasına karar verilmiştir. Ürünlerle ilgili teknik özellikler Tablo 6.2’ de verilmiştir.

Tablo 6.2 Deneylerde kullanılan malzemelere ait teknik özellikler [85,86].

Teknik Özellikler	PE-HWST	PP-DWST
Ekstruder kalıp bileşimi	PE,EN,45 T 003/6	PP-H,EHN, 16-09-003
Ekstruder kalıplama standardı	TS EN ISO 1872, Teil 1	TS EN ISO 1873, Teil 1
Kalıplama basıncı	PE, QN,45 T 003/6	PP-H,QHN, 16-09-003
Yoğunluk (TS EN ISO 1183)	0,947 g/cm ³	0,905 g/cm ³
Çekme mukavemeti (TS EN ISO 527)	22 MPa	32 MPa
Akma uzaması (TS EN ISO 527)	%9	%8
Elastik çekme modülü (TS EN ISO 527)	900 MPa	1400 MPa
Çentik darbe dayanımı (TS EN ISO 179)	21 kJ/m ²	7 kJ/m ²
Sertlik (TS EN ISO 868)	50 Shore D	55 Shore D
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-50 / +80 °C	0 / +100 °C

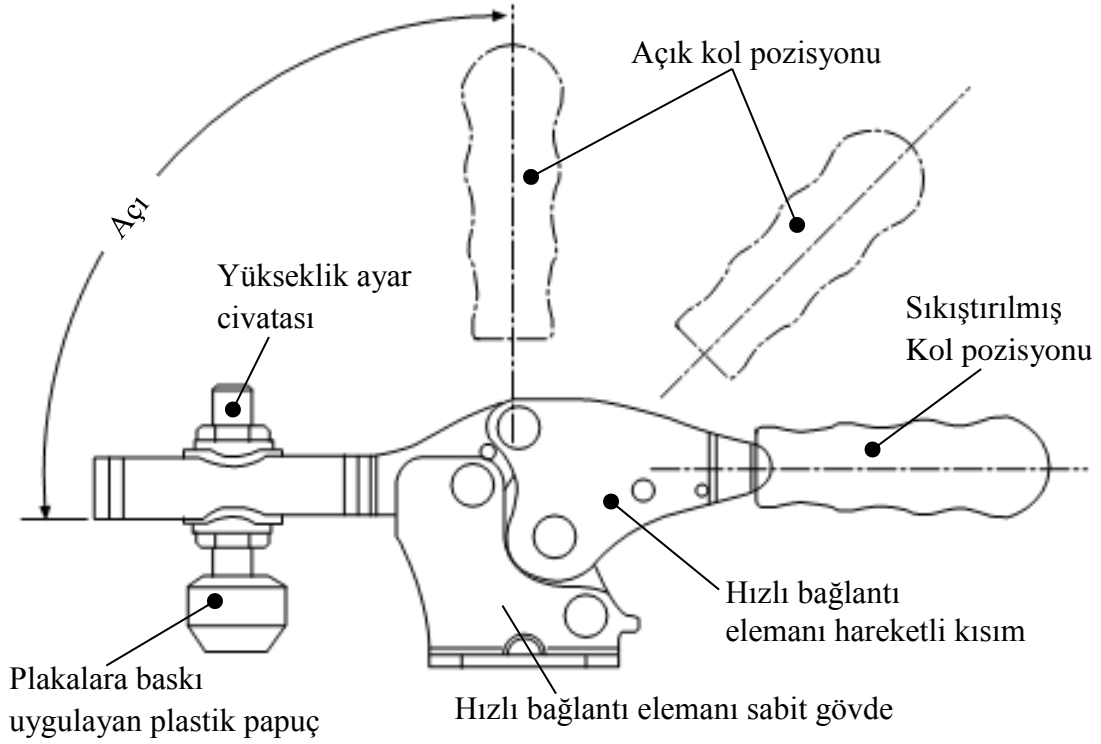
6 mm kalınlığındaki PE ve PP plakalar ASTMD-412-A' ya göre numune alınması planlandığı için 75x400 mm ölçülerinde kesilmiş ve düzgün bir birleştirme yüzeyi için frezelenmiştir. Kaynak sonrası 6x150x400 mm ölçülerinde birleştirilmiş bir plaka elde edilmiştir. Tek plaka ve birleştirilmiş plakalara ait şematik çizimler Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Tek (a) ve birleştirilmiş (b) plakaların şematik gösterimi.

6.2. Bağlama Kalıbının Tasarımı

Bağlama kalıbı tasarlanırken, kalıbın hafif ve taşınabilir olması, parçaların seri olarak bağlanıp sökülebilmesine imkân vermesi gibi özellikler göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenle kalıp malzemesi olarak Assan Alüminyum tarafından üretilen, yoğunluğu düşük ($2,71 \text{ gr/cm}^3$), atmosferik korozyona dayanıklı, şekillendirilme kabiliyeti iyi, ısı ve elektrik iletkenliği yüksek 1050 H14 Standardı alüminyum levha (Al 99,5) kullanılmıştır. Kaynaklı parçaların hızlı olarak çıkartılması ve yeniden bağlama esnasında zaman kaybı olmaması amacıyla Kukamet firması tarafından üretilen ve Şekil 6,2’de gösterilen kalıp üzerine monte edilebilen hızlı bağlantı elemanları kullanılmıştır.

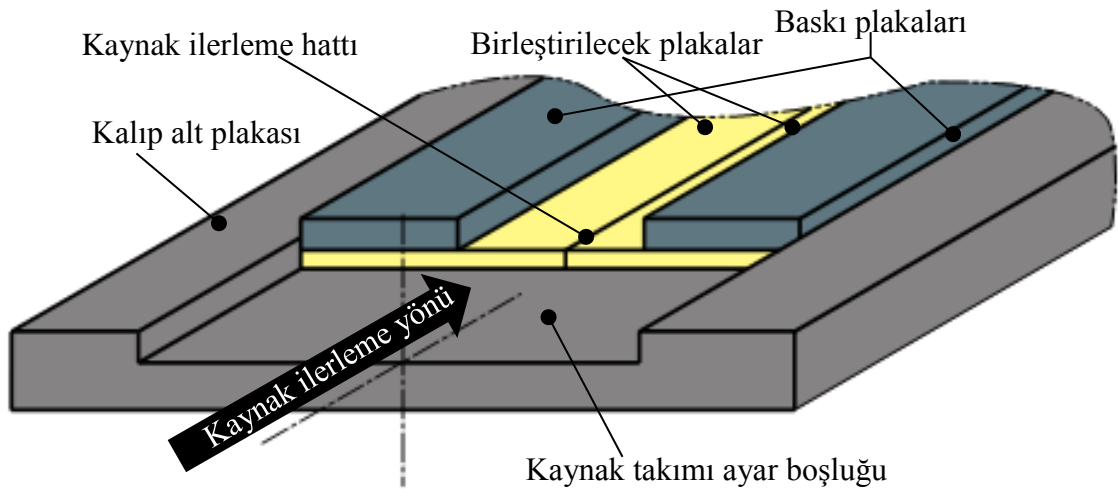


Şekil 6.2 Kalıpta kullanılan hızlı bağlantı elemanının şematik gösterimi [87].

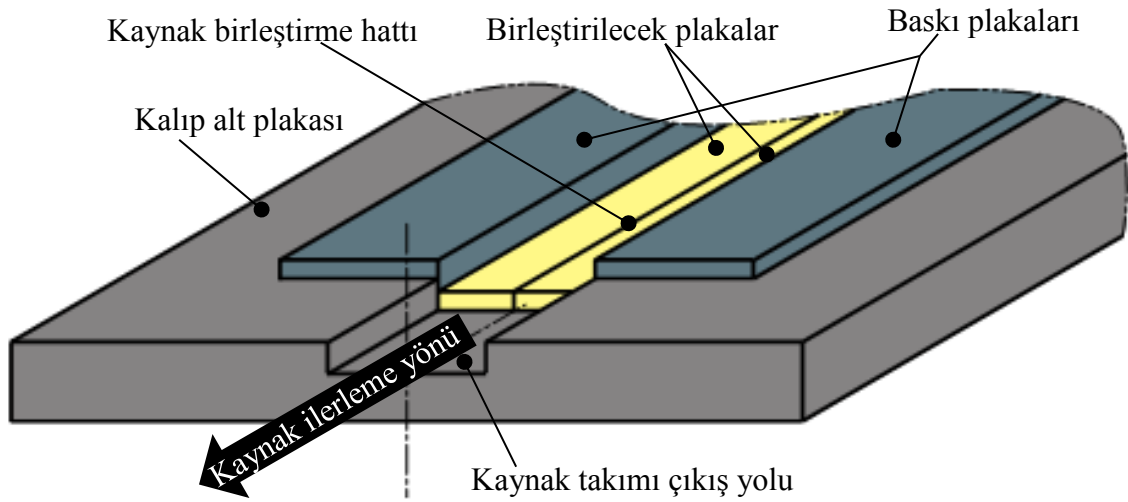
Optimum kaynak parametreleri için, aynı parametrelerle yapılan uygulamalarda aynı sonucun alınması açısından kalıp tasarımının doğru yapılması ve parçaların kalıba doğru, sürekli aynı şekilde ve konumda bağlanması oldukça önemlidir. Kaynak uygulamalarında yüksek devirli, torku yüksek güçlü bir makina kullanılacağı için kalıp tasarımı esnasında iş kazasına sebep vermeyecek ve operatörün yaralanmasına neden olmayacak bir tasarım yapılmaya çalışılmıştır. Tasarımda iş kazalarının oluşmaması ve

doğru bir kaynak uygulamasının gerçekleştirilmesi amacıyla alınan önleyici tedbirler aşağıdaki gibidir:

- 1- Kaynak takımı tarafından iş parçalarının fırlatılmaması amacıyla kaynaklanacak plakalar kalıp içerisinde gömülü kalmalı ve kaynak dönme yönlerinden parçayı sıkıştırarak parçaların birleştirme esnasında birleştirme yüzeylerinin birbirinden uzaklaşmasına engel olmalıdır.
- 2- Kaynaklanacak plakalar üzerine 10x50x400 mm ölçülerinde alüminyum plakalar konulmuş, hızlı bağlantı elemanları baskısı bu alüminyum plakalar ile kaynaklanacak malzeme yüzeylerine eşit olarak dağıtılmıştır.
- 3- Kaynak takımının kalıba ve parçalara giriş yönünde herhangi bir önleyici engel ya da çıkıntı ile karşılaşmaması amacıyla giriş yönünde kaynaklanacak plakaların toplam genişliği kadar kalıp boşluğu bırakılmıştır (şekil 6.3).
- 4- Kalıbın ıkış noktasında birleştirilecek plakaların kaynak takımı tarafından dışarı itilmesini ya da çekilmesini önleyici bir set oluşturulmuştur. Birleştirme hattı üzerinde kaynak takımının çıkış yapacağı kadar takım çıkış yolu bırakılmıştır (şekil 6.4). Bu sayede kaynak takımı parçalara ve kalıba zarar vermeden kalıp içerisinden çıkış yapacaktır.
- 5- Hızlı bağlantı elemanlarının sabitleme noktaları kaynak takımının bağlandığı pensin genişliğiyle orantılı olarak ayarlanmıştır. Uzun kalan kısımlar kesilmiş ve birleştirme hattı üzerinde bir pens ilerleme yolu bırakılmıştır.

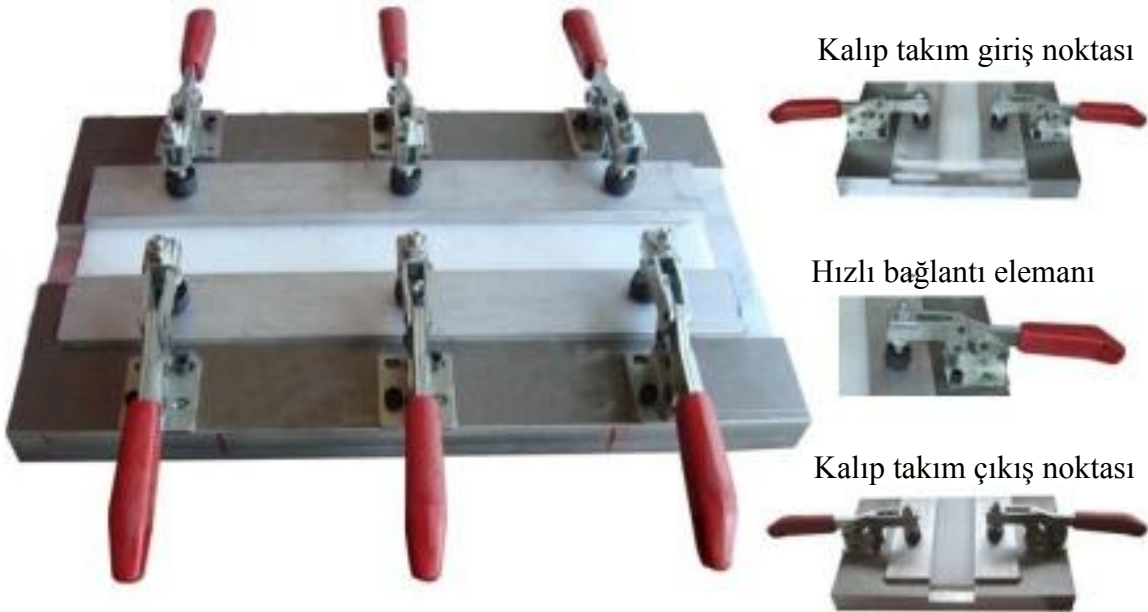


şekil 6.3 Bağlama kalıbı kaynak takımı kalıp giriş noktası tasarımı şematik gösterimi



Şekil 6.4 Bağlama kalıbı kaynak takımı kalıp çıkış noktası tasarımı şematik gösterimi

Bağlama kalıbının dış hat ölçüleri 25x250x450 mm'dir. Kaynaklanacak malzemelerin sabitlenmesi amacıyla 10 mm derinliğinde kalıp üst yüzeyine Şekil 6.3 ve Şekil 6.4' te görüldüğü gibi parmak freze ile kanal açılmıştır. Kaynaklanacak parçaların kalıba yerleştirilmesi ve çıkartılmasında kolaylık sağlaması amacıyla kaynak takımı çıkış yönündeki keskin köşelere Ø2 mm delikler açılmıştır. Bağlama kalıbının genel görünümü şekil 6.5' te gösterildiği gibidir.

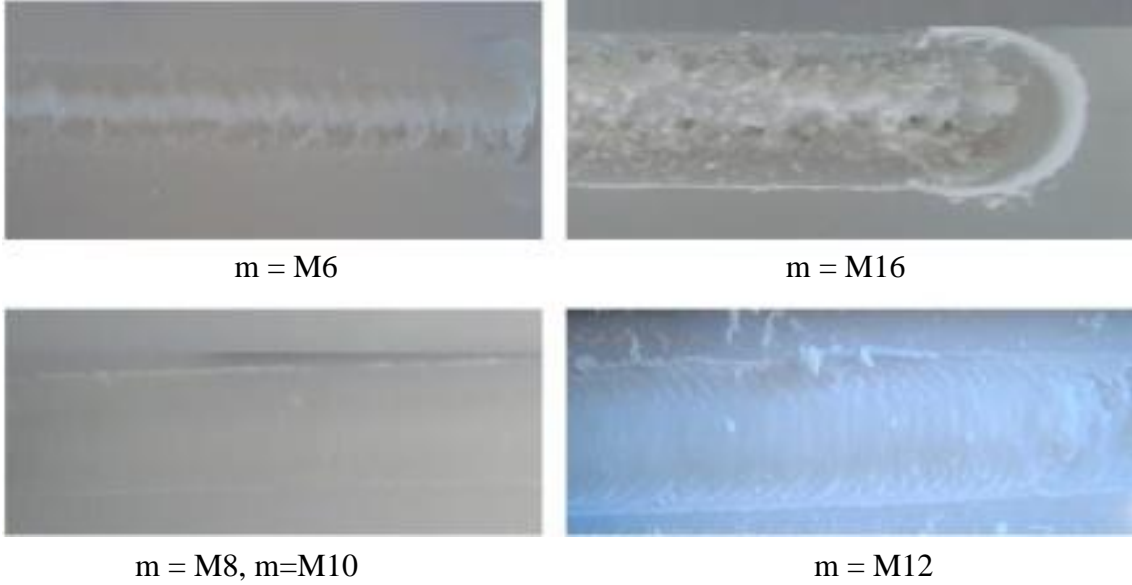


Şekil 6.5 SKK' ında kullanılan bağlama kalıbının genel görünümü

6.3. Kaynak Takımı Tasarımı

Pek çok araştırmacı tarafından da ifade edildiği gibi başarılı bir kaynak uygulaması için doğru takım tasarımı oldukça önemlidir [37,38,41,43,45-47,51-53]. Esas olarak kaynak esnasında takımın bölgesel ısınma ve malzeme akışının sağlanması gibi iki önemli görevi vardır [37,43]. Ayrıca takımın sahip olduğu geometri dönme yönüne bağlı olarak malzeme akışı üzerinde kritik bir rol oynamaktadır.

Termoplastiklerin (PE,PP) SKK ile birleştirilmesinde kullanılacak en ideal birleştirme (kaynak) takımını belirlemek için, karıştırıcı uç kısmının birleştirme bölgesine yeterli malzeme girişini sağlaması göz önünde bulundurulmuştur. 6 mm kalınlığındaki PE levhalara omuz çapın etkisinden bağımsız olmak üzere farklı karıştırıcı uç çapları (m) ile SKK uygulanmış ve Şekil 6.6' da görüldüğü gibi 8 mm den düşük çaplarda oluşan ısıya bağlı olarak termoplastik levhaların (PE,PP) birleştirme bölgesine yeterli malzeme girişinin sağlanamadığı görülmüştür.



Şekil 6.6 SKK' ında kullanılan kaynak takımının karıştırıcı uç kısmının kaynağa etkisi

Şekil 6.6'da görüldüğü gibi karıştırıcı uç kısmının çapı 8,10,12,15 mm olarak seçildiğinde termoplastiklerin kaynak bölgesine giren ısı miktarına bağlı olarak kaynak bölgesine giren malzeme miktarı artmış ve düzgün bir kaynak yüzeyi elde edilmiştir. Karıştırıcı uç kısmının çapı 15 mm den büyük seçildiğinde kaynak bölgesinden

malzeme taşınması daha fazla olduğu için takım omuz kısmının altından malzeme kaynak bölgesi dışına taşınmış ve yeterli ısı elde edilmesine rağmen kaynak hattı üzerinde boşluklar meydana gelmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar baz alındığında tek taraflı yapılan birleştirmeler için malzeme kalınlığı (t) ile karıştırıcı uç çapı (m) arasında **KARÖK-1** bağıntısı olarak isimlendirdiğimiz aşağıdaki bağıntı gözlemlenmiştir:

$$1,3 \leq \frac{m}{t} \leq 2,5 \quad [\text{KARÖK-1}] \quad (6.1)$$

t: Kaynak edilecek malzeme kalınlığı,

m: Kaynak takımı karıştırıcı uç kısmının çapı

Kaynak takımı omuz kısmı ile ilgili olarak literatür bilgileri incelendiğinde bir çok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda omuz kısmı hareketsiz ve parça yüzeyi ile temas etmeyen kaynak takımları kullanılmıştır [4,64,70,72]. Aynı şekilde omuz kısmının hareketli olduğu ve birleştirilecek parçaların üst yüzeyleri ile temas eden takımlarla yapılan çalışmalarda da olumlu sonuçlar alınmıştır [5,62,63,65,66,68,69]. Santiago ve arkadaşları tarafından SKK 3 boyutlu modellenmesi ile ilgili yapılan çalışmada takım omuz kısmına yakın üst yüzeylerde sürtünme arttığı için ısı girdisinin diğer bölgelere göre daha fazla olduğu ifade edilmiştir [45]. Takım omuz çıkıntısı malzemenin ısıtma hacminin hapsedilmesini sağlamaktadır. Takım omuz kısmının çap ölçüsü ne kadar büyükse elde edilen ısı miktarı da o kadar fazla olacaktır [53]. Omuz kısmı tarafından uygulanan baskı ile plastikleşen malzemenin kontrolsüz ve üst yüzeyin biçimini bozacak şekilde çıkması engellenir.

Omuz çapının kaynak mukavemeti ve görüntüsü üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Kaynak bölgesindeki ısının büyük kısmı kaynak takımının omuz kısmı ile iş parçasının üst yüzeyinin sürtünmesinden elde edilmektedir. 6 mm kalınlığındaki PE levhalara kaynak takımı omuz çapı (d) 16,18 ve 20 mm olan takımlarla yapılan kaynaklarda yeterli ısı sağlanamadığı için olumlu kaynak sonuçları elde edilememiştir. Kaynak takımı omuz çapının 24 – 32 mm arasında olduğu takımlarla yapılan kaynaktan olumlu sonuçlar alınmıştır. Kaynak takımı omuz kısmı artırılarak yapılan deneylerde omuz çapı 34 mm den büyük takımlarda ise kaynak bölgesinde malzeme akışını kontrol etmek

zorlaşmıştır. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar baz alındığında tek taraflı yapılan birleştirmeler için, malzeme kalınlığı ile takım omuz kısmı arasında **KARÖK-2** bağıntısı olarak isimlendirdiğimiz aşağıdaki bağıntı gözlemlenmiştir:

$$4 \leq \frac{d}{t} \leq 5,5 \quad [\text{KARÖK-2}] \quad (6.2)$$

t: Kaynak edilecek malzeme kalınlığı,

d: Kaynak takımı omuz kısmının çapı

Omuz çapı d/t oranının 4'ten küçük olduğu takımlarla yapılan çalışmalarda kaynak için gerekli olan ısının elde edilmesi ve taşınmasındaki zorluklar nedeniyle kaynak mukavemeti zayıf olmuş ve kaynak görüntüsü oldukça dalgalı bir hal almıştır. Omuz çapı d/t oranının 5,5'ten büyük olduğu durumlarda ise oluşan aşırı ısıdan dolayı plastik malzemenin kontrolü zorlaşmış ve neredeyse tamamına yakın kısmı kaynak bölgesinden dışarı taşınmıştır. Şekil 6,7' de omuz kısmının SKK üzerindeki etkisine örnekler gösterilmektedir.



a) t= 6mm, d=32 mm

b) t= 6 mm , d=35

c) t=6 mm, d=40 mm



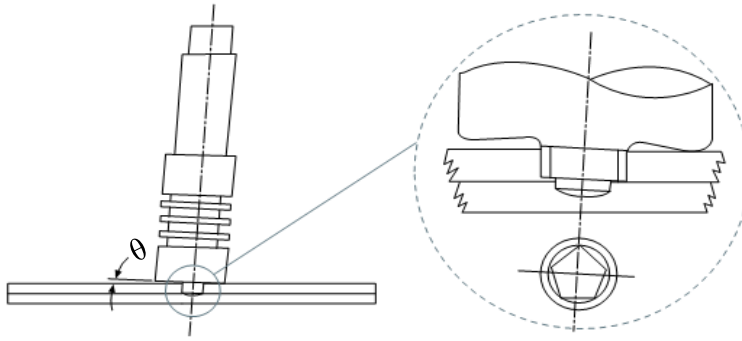
d) t= 6mm, d=16 mm

e) t= 6mm, d=22 mm

Şekil 6.7 SKK' ında kullanılan kaynak takım omzunun kaynağa etkisi

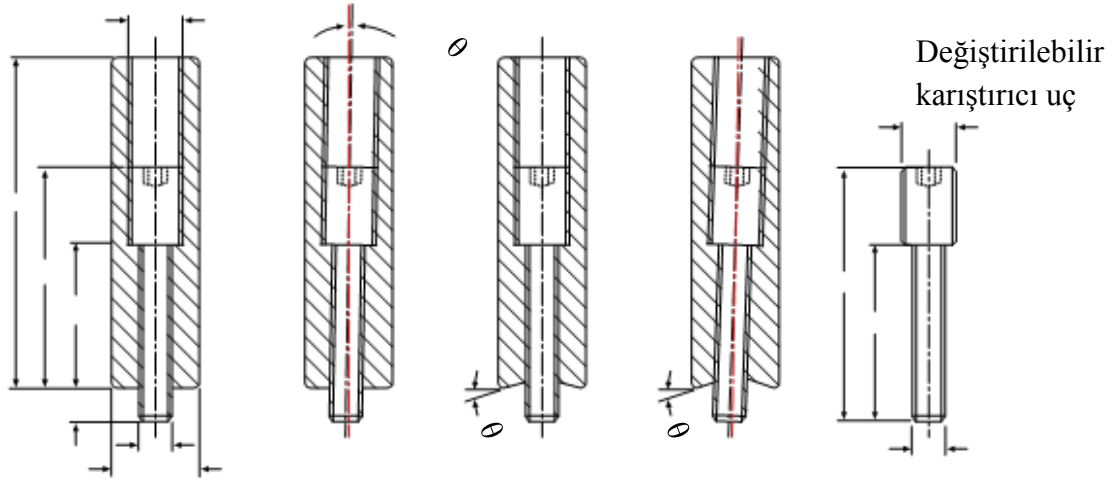
Şekil 6.7’ de gösterilen bu duruma plastik levhaların düşük ısı iletim katsayısı nedeniyle birleştirme işlemi esnasında oluşan düşük ısının polimer zincirleri tarafından yeterince absorbe edilemediği için diğer bölgelere iletilmediği ve ısının birleştirme hattı boyunca taşınmamasının sebep olduğu düşünülmektedir.

Şekil 6.8 ’de gösterilen ve TWI tarafından metal ve alaşımları için geliştirilen The Multistage™ benzeri takımlar kullanılarak gerçekleştirilen SKK uygulamalarında, metal ve alaşımlarının aksine plastikler için omuz kısmına ya da karıştırıcı uca açı verilerek yapılan uygulamalardan olumlu sonuçlar alınamamıştır. Kaynak, çoğu uygulamada katı hal kaynağı şeklinde gerçekleşmediği için takım omuz kısmına açı verildiği durumlarda ergiyen malzemenin taşınması, plastik kıvamına getirilmesi ve sıvanması esnasında takım ilerleme hızına bağlı olarak zorlaşmakta ya da verilen açının oluşturduğu boşluktan merkezkaç kuvvetinin etkisiyle yoğun bir şekilde kaynak bölgesinin dışına savrulmaktadır.



Şekil 6.8 TWI tarafından metal ve alaşımlarının SKK için geliştirilen The Multistage™ kaynak takımı

Bazı uygulamalarda ise omuz çapı ve karıştırıcı uç çapının artırılması, kaynak bölgesine ısı girişini arttırmıştır. Kaynak bölgesindeki ısı artışı plastikleşen malzeme miktarını arttırmış ve daha fazla malzeme taşınması gerçekleştirerek omuz kısmının altında aşırı malzeme birikmesine neden olmuştur. Bu durumlarda karıştırıcı uç kısmı sıkışmaya ve zorlamaya bağlı olarak kırılmıştır. Şekil 6.9’ da kaynak uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanan uçlar görülmektedir.

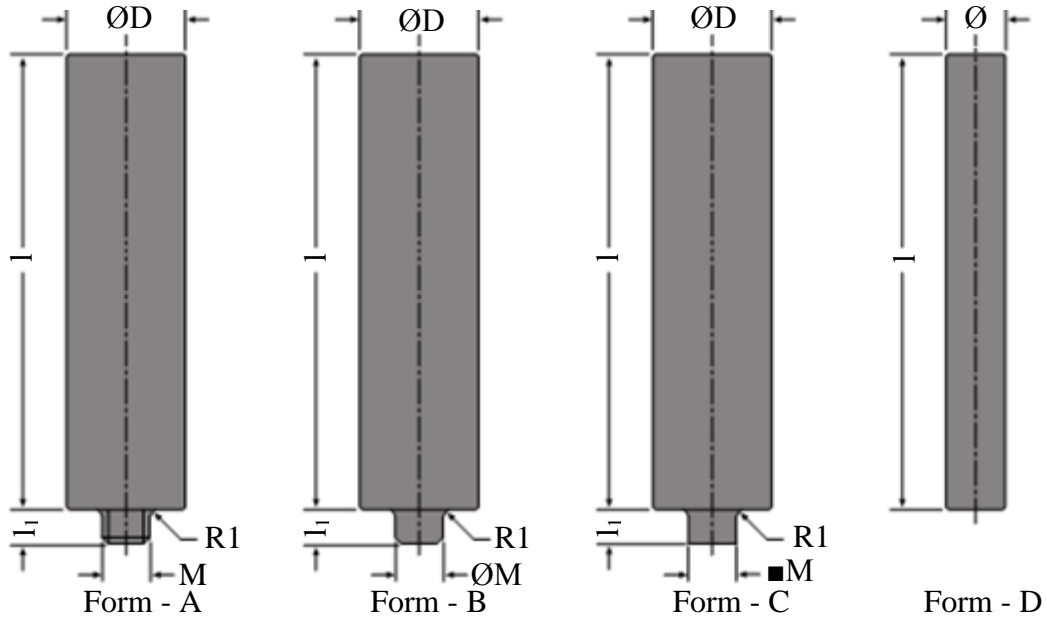


Şekil 6.9 Plastiklerin SKK için tasarlanan The Multistage™ benzeri kaynak takımları.

Yapılan çalışmalar değerlendirilerek kaynak uygulamalarında kullanılmak üzere SAE 1045 (1.0503) imalat çeliğinden Şekil 6,10' da verilen ve ölçüleri Tablo 6.3'te gösterilen kaynak takımları tasarlanmıştır. Kaynak takımları tasarlanırken;

- Kaynak takımı karıştırıcı uç çapının kaynak parametreleri ve SKK üzerindeki etkileri
- Kaynak takımı omuz çapının kaynak parametreleri ve SKK üzerindeki etkileri
- Kaynak takımı karıştırıcı uç geometrisinin kaynak parametreleri ve SKK üzerindeki etkileri
- Takım omzunun SKK kaynağı için önemi

vb. hususlar göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 6.10 Termoplastiklerin SKK'ında kullanılmak için tasarlanan kaynak takımları. a) Metrik uçlu takımlar, b) Silindirik uçlu takımlar, c) Kare uçlu takımlar, d) Tek parçalı takım omzu olmayan takımlar

Tablo 6.3. Termoplastiklerin SKK'ında kullanılmak için tasarlanan kaynak takımlarına ait ölçüsel değerler

Metrik Uçlu Takımlar					
Takım Kodu	Form	M	d	l_1	l
1M	A	M8	16	5.75	80
2M	A	M8	25	5.75	80
3M	A	M10	16	5.75	80
4M	A	M10	25	5.75	80
5M	A	M12	25	5.75	80
Silindirik Uçlu Takımlar					
6S	B	8	16	5.75	80
7S	B	8	25	5.75	80
8S	B	10	16	5.75	80
9S	B	10	25	5.75	80
10S	B	12	25	5.75	80
Tek parçalı takım omzu olmayan takımlar					
11S	D	-	8	-	80
12S	D	-	10	-	80
13S	D	-	12	-	80
Kare uçlu takımlar					
14K	C	■6,5	25	5.75	80

6.4. Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi

Kaynak parametreleri belirlenirken daha önceki yapılan çalışmalara ait literatür bilgileri incelenmiş ve en uygun kaynak parametreleri oluşturulmaya çalışılmıştır.

Şelale, Arıcı ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda universal freze tezgâhında M5 karıştırıcı uca sahip geleneksel alüminyum stili kaynak takımı kullanılmıştır. Takım dönme hızı olarak 630 ve 1000 devir/dk., takım ilerleme hızları 12,5/25/40 mm/dk., kaynak takımı eğim açısı 0-5° kaynak parametreleri ile SKK uygulamaları gerçekleştirilmiştir [5,62,78,79].

Kiss Z. ve Czigány T. tarafından yapılan çalışmalarda, takım açısı 15 ve 45° olan özel geliştirilmiş kaynak takımları kullanılmıştır. Takım dönme hızı olarak 400/630/900/1250/1800 devir/dk., takım ilerleme hızları 20/31.5/40/63 mm/dk., kaynak parametreleri ile SKK uygulamaları gerçekleştirilmiştir [63].

Rezgui ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda universal freze tezgâhında M10/M12/M14 karıştırıcı uca sahip geleneksel alüminyum stili kaynak takımı kullanılmıştır. Takım dönme hızı 910/1280/1700 devir/dk., takım ilerleme hızı 16/29/44 mm/dk., başlangıçta dalma sonrası bekleme 9/15/20 sn., kaynak parametreleri ile SKK uygulamaları gerçekleştirilmiştir [64].

Squeo ve arkadaşları tarafından CNC tezgâhında 3000 ile 20,000 devir/dk. takım dönme hızında ve 10 ila 44 mm/dk. takım ilerleme hızlarında, 1 ve 3 mm'lik pim çapına sahip geleneksel alüminyum stili kaynak takımına benzer silindirik uçlu bir kaynak takımı kullanılarak SKK uygulamaları gerçekleştirilmiştir [66].

Payganeh ve arkadaşları tarafından kaynak parametreleri, kaynak ilerleme hızı 400/600/1000 devir/dk., ilerleme hızları 8/16/20 mm/dk., takım açısı 0/1/2° olarak uygulanmıştır [66].

Bozkurt Y. tarafından yapılan uygulamalarda omuz çapı 18 mm, pim çapı 6 mm ve batma derinliği 3,8 mm olan SAE 1050 çeliğinden yapılmış ve ısıl işlem (HRc:40) uygulanmış geleneksel alüminyum stili bir takım kullanılmıştır. Takım dönme hızı 1500/2100/3000 devir/dk., takım ilerleme hızı 45./75/115 mm/dk. ve takım omuz açısı 1/ 2/3° olarak üç farklı kademe belirlenmiştir [68].

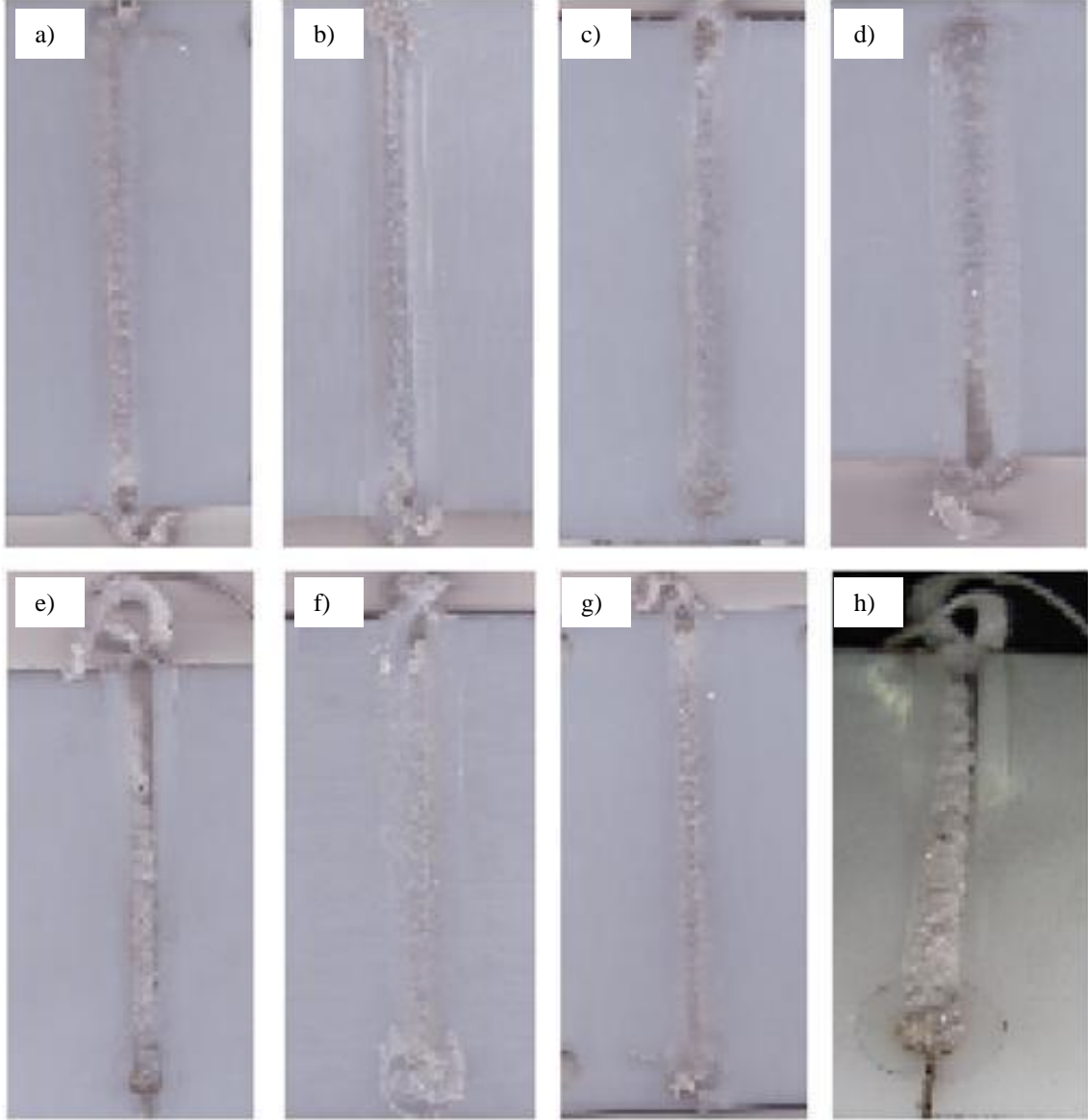
SKK uygulamaları için ilk çalışmalar üniversal freze tezgahında yukarıdaki bilgiler doğrultusunda Şekil 6.9 ve Şekil 6.10' daki kaynak takımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.9' daki takımlarla 8 mm kalınlığındaki PE levhalarla gerçekleştirilen kaynak uygulamalarında kaynak parametreleri: takım omuz çapları 12/16/20 mm, karıştırıcı uç ölçüleri M6/M8/M10/M12, takım ilerleme hızları 25,4/44,45/50,8/62,5 mm/dk., takım dönme hızları 370/500 devir/dk., kaynak dalma derinliği 5 mm ve kaynak başlangıcında bekleme 180 sn. şeklindedir.

Genel olarak yukarıdaki parametre değerleri ile yapılan birleştirme işlemlerinden olumsuz sonuçlar alınmıştır. Kaynak üst yüzeylerinde nispeten diğer bölgelere oranla bir birleşme (Şekil 6.11 a,b,c ve f) söz konusu iken yüzeyin ~1 mm altında Nelson'un patent başvurusunda [72] belirttiğine benzer şekilde birbirine yapışmış farklı boyutlarda bilye şeklinde plastik malzeme yapısı meydana gelmektedir. Takım eğim açısı 0° olan kaynak takımları ile yapılan kaynaklarda kaynak takımı tarafından kaynak bölgesinden ince uzun tel şeklinde talaş parçaları (Şekil 6.11 e ve h) kaldırılmaktadır. Pim çapının artmasına bağlı olarak kaynak ilerleme yönünde yığılan malzeme miktarı artmakta (Şekil 6.11 d), ancak iki parça birleştirme üst yüzeyleri haricinde kaynak oluşturulacak kadar güçlü bir bağ bulunmamaktadır.

Takım eğim açısı verilmiş olan kaynak takımları ile yapılan kaynaklarda kaynak takımı tarafından kaynak bölgesinden birbiri ile kaynamamış küçük parçalar şeklinde talaş kaldırılmaktadır. Ancak kaynak başlangıcından 100-125 mm arasındaki mesafelere gelindiğinde kaynak bölgesinde yığılan ve erimeyen parçaların kaynak takımı uç kısmının hareketini kısıtlayarak kesme kuvveti uygulaması ve makinenin uyguladığı baskı sonucu kaynak takımının karıştırıcı uç kısmı kırılmaktadır.

Takım eğim açısı ve takım omuz kısmına açı verilmiş kaynak takımları ile yapılan çalışmalarda; pim çapının küçük olduğu uygulamalarda kaynak takımı kaynak bölgesinden ince uzun tel şeklinde talaş kaldırmaktadır. Karıştırıcı uç çapının artmasıyla talaş kaldırma miktarı artmış, takım ilerleme hızının arttırılmasına bağlı olarak (50,8 ve 62,5 mm/dk.) kaynak takımı uç kısmı, omuz açısı 0° olan ve takım eğim açısı verilmiş olan kaynak takımlarındakine benzer şekilde kaynak başlangıcından 100-125 mm arasındaki mesafelere gelindiğinde kırılmaktadır.

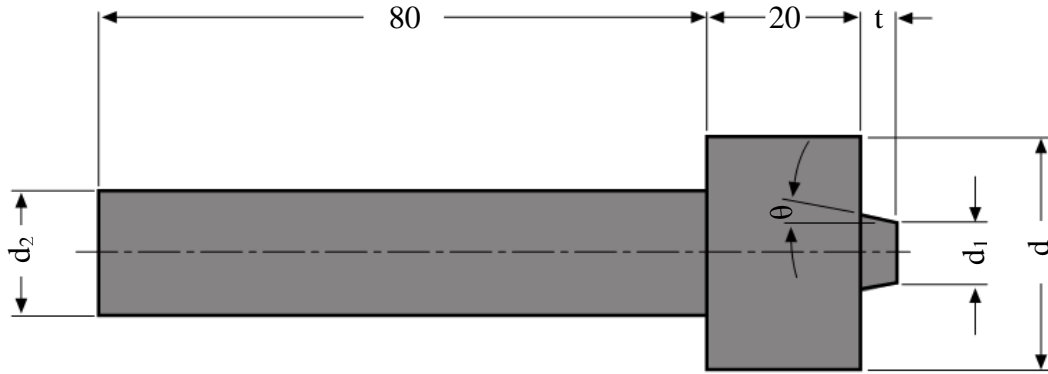
Genel olarak tüm malzemelerden çekme deneyi için numune alınmaya çalışıldığında yetersiz kaynak nüfuziyeti, ve zayıf kaynak mukavemetine bağlı olarak parçalar endiliğinden ya da küçük bir kuvvet uygulamasıyla (<7 MPa) kopmuştur.



Şekil 6.11 Takım dönme hızları 370/500 devir/dk., geleneksel alüminyum stili kaynak takımı ile gerçekleştirilen SKK uygulamalarına ait kaynak görünüşleri

En ideal kaynak takım dönme hızının ve takım geometrisinin belirlenmesi amacıyla, Şekil 6.10' da gösterilen kaynak takımları ve Şekil 6.12'de gösterilen farklı ölçülerdeki konik uçlu kaynak takımı kullanılarak yapılan ikinci grup çalışmalarda Tablo 6.4'te verilen kaynak parametreleri kullanılarak 5 mm kalınlığında PE ve PP levhalara

başlangıçta takım daldıktan sonra 180 sn. beklenmiş ve sonra kaynak takımının ilerlemesiyle tek taraflı ve çift taraflı SKK uygulamaları gerçekleştirilmiştir.



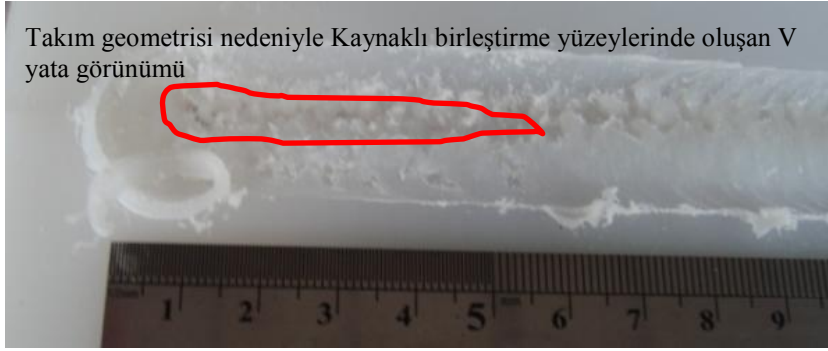
d	t	d ₁	d ₂	θ
20/25/30/35 mm	3,25 / 4,75 mm	Ø8 / Ø10	Ø18	1-10°

Şekil 6.12 Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde kullanılan konik uçlu takımlar

Tablo 6.4. Termoplastiklerin SKK birleştirilmesi için en ideal takım dönme hızının ve takım geometrisinin belirlenmesi amacıyla konik uçlu takımlar için kullanılan parametre değerleri

Sıra No	Kaynak Şekli	Devir (devir/dk.)	İlerleme (mm/dk.)	Bekleme (sn.)	Dalma Derinliği (mm)	Malzeme Ölçüleri (mm)
1	Tek Taraflı	370	45	180	4,75	75x150x5
2		535				
3		740				
4		1110				
5		1295				
6		1480				
7	Çift Taraflı	370			3,25	75x150x6
8		535				
9		740				
10		1110				
11		1295				
12		1480				
13		370				

Çalışma sonuçları incelendiğinde ilk gruptaki çalışmalara (Şekil 6.11) benzer sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 6.4’ te verilen parametrelerle kaynak bölgesinde oluşan en yüksek ısı ~ 80 °C civarında ölçülmüştür. Kaynak takımı pim kısmının birleştirilecek malzemelerin yüzeyine daldırılması ile parçalara uygulanan basınç artırılmış ancak Şekil 6.13’de görüldüğü gibi yer yer iyi kaynak bağlantıları elde edilmesine rağmen kaynak hattı boyunca takım uç geometrisinden kaynaklı ergimiş malzemenin kaynak bölgesinden dışarı savrulması sonucu süreklilik elde edilememiştir. Takım ucunun alt kısmının üst yüzey alan farkından dolayı üst yüzeyden daha fazla malzeme koparılarak kaynak bölgesine taşınmış ve takımının omuz kısmı frezeleme işlemi yaparak kaynak bölgesine taşınan bu malzemelerden talaş kaldırarak parça kalınlığını düşürmüştür.



Şekil 6.13 Konik uçlu takımlarla gerçekleştirilen SKK uygulamalarına ait kaynak görünümleri

Takım ilerleme hızının düşük olması, birleştirilecek parçaların uzunluğunun artması durumunda oldukça uzun sürmekte ve düşük ilerleme hızlarında yapılan kaynaklar için gerekli olan kaynak zamanı ve maliyetini de arttırmaktadır.

Elde edilen veriler değerlendirildiğinde kaynak için gerekli olan zamanın azaltılması amacıyla kaynak ilerleme hızının artırılması, kaynak için gerekli olan ısının elde edilmesi amacıyla, takım omuz çapı ve pim arasındaki bağlantının belirlenmesi ve takım dönme hızının artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu bilgiler değerlendirilerek Tablo 6.5’ te belirlenen kaynak parametreleri oluşturulmuş ve 6.1 ve 6.2 de verilen bağıntı formülleri elde edilmiştir. Üçüncü grup çalışmalar için belirlenen parametrelerle SKK uygulamaları gerçekleştirilmiş ve SKK istenilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6.5. Termoplastiklerin SKK için belirlenen ve deneylerde kullanılan kaynak parametreleri

Deney Kodu	Takım Kodu	Malzeme Kalınlığı (mm)	Takım Dalma (mm)	Dalma Bekleme (sn.)	Kaynak Takımının Dönme Devri (devir/dk.)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk.)
1	2M	6 mm	5,75	30	5000	20
2	2M	6 mm	5,75	30	6000	20
3	2M	6 mm	5,75	30	4000	20
4	2M	6 mm	5,75	60	4000	20
5	2M	6 mm	5,75	120	4000	20
12-1	5M	6 mm	5,75	60	4000	20
12-2	5M	6 mm	5,75	90	4000	20
12-3	5M	6 mm	5,75	90	4000	30
12-4	5M	6 mm	5,75	90	4000	40
12-5	5M	6 mm	5,75	90	4000	50
KT-01	14K	6 mm	5,75	90	4000	20
ST-01	9S	6 mm	5,75	90	4000	20
ST-02	9S	6 mm	5,75	90	4000	80
ST-03	9S	6 mm	5,75	90	4000	126

Tablo 6.6. Polipropilen malzemelerin SKK için belirlenen ve deneylerde kullanılan kaynak parametreleri

Deney Kodu	Takım Kodu	Malzeme Kalınlığı (mm)	Omuz Dalma (mm)	Dalma Bekleme (sn.)	Kaynak Takımının Dönme Devri (devir/dk.)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk.)
29/09-01	5M	6	0	90	5400	25
29/09-02			0,25			
29/09-03			0,75			
29/09-04			1,0			

6.5. Termoplastik Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi

Üniversal freze tezgâhında takım dönme hızlarının sınırlı olması, yüksek devirlerde gerçekleştirilmesi planlanan kaynak uygulamaları için yeterli olmamaktadır. Bu nedenle malzemelerin sürtünme karıştırma kaynak işlemi ile birleştirilmesi yüksek dönme ve ilerleme hızlarına çıkabilen Tayvanlı bir CNC tezgâh üreticisi olan AWEA firmasının BM-850 modeli CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Tezgâhın genel görünümü ve teknik özellikleri Şekil 6.14’de gösterilmiştir.



Tabla ölçüleri :	1050 x 600 mm
Hareket :	X Eksen-850 mm Y Eksen-600 mm Z Eksen-600 mm
Mil (spindle) HP :	15/10
Mil (spindle) hızı:	10000 devir/dk.
Magazin:	24 Takım Yeri
Program:	Fanuc Oi-MateMC

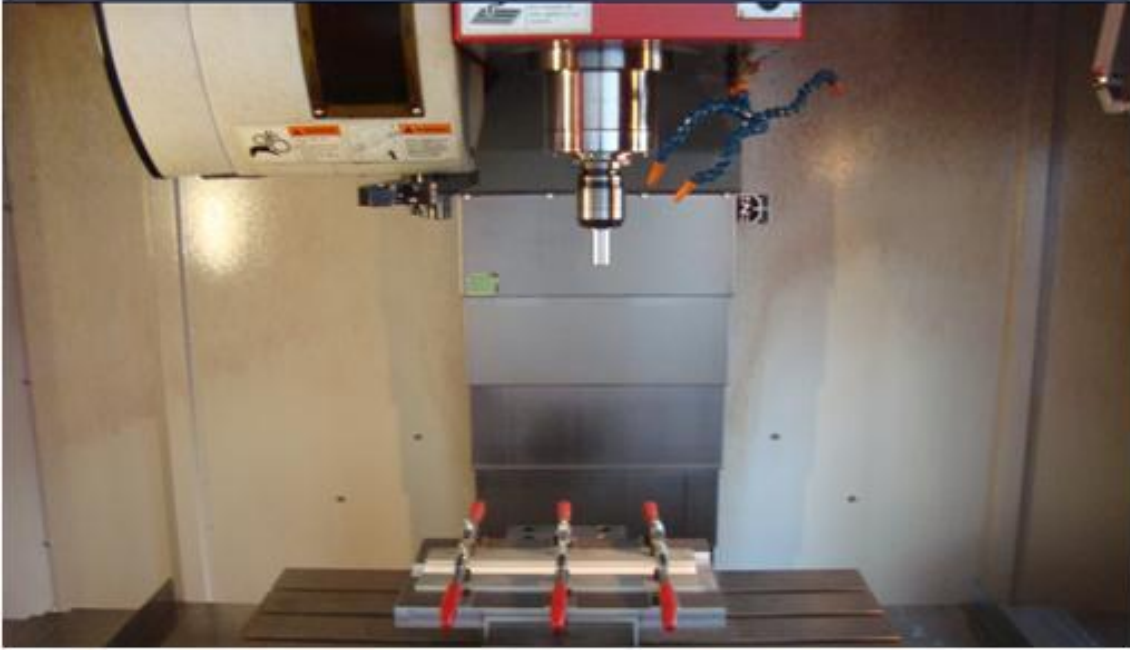
Şekil 6.14 SKK uygulamaların gerçekleştirildiği AWEA BM-850 tezgâhın genel görünümü ve teknik özellikleri

Birleştirilecek plakaların bağlanması amacıyla hazırlanan bağlama kalıbı CNC dik işleme merkezinin üzerindeki mengene tezgâhına Şekil 6.15’ te gösterildiği gibi bağlanmıştır. Plakalar bağlama kalıbına bağlanıp hızlı bağlantı elemanı yardımı ile kalıba sabitlenmiştir. Kaynak takımı pens yardımıyla Şekil 6.14’te gösterildiği gibi hareket miline (spindle) bağlanmıştır. SKK uygulanmasına başlamadan önce makinanın ve hareketli kısımların ısınması amacıyla makine beş dakika kadar sabit devirde çalıştırılmıştır.



a) Bağlama kalıbı

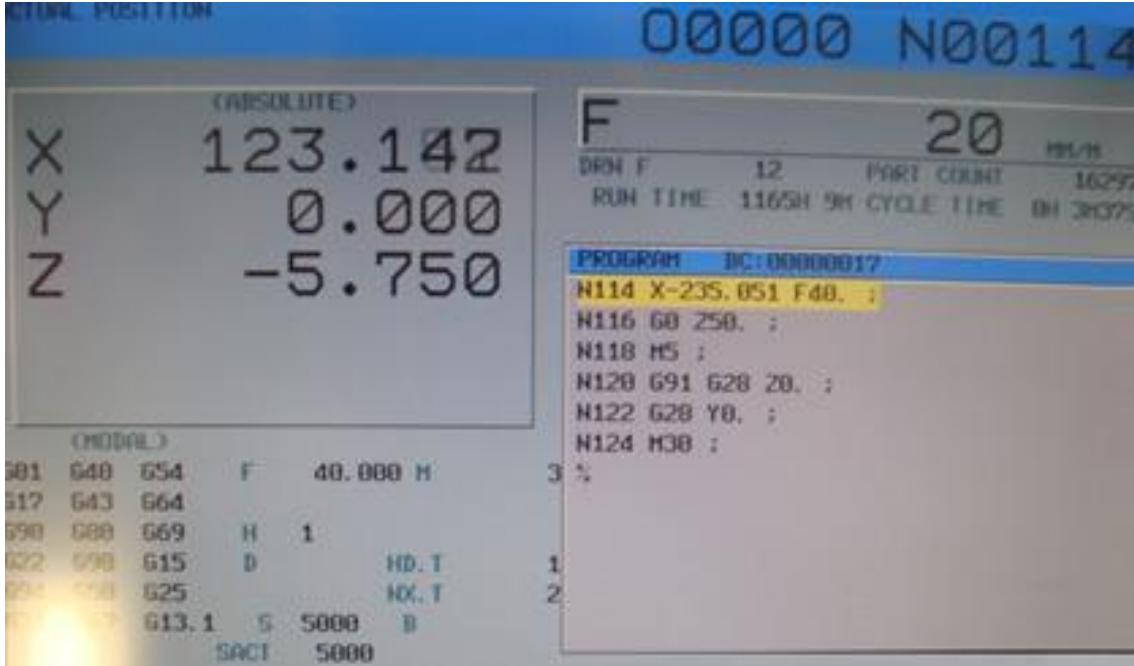
b) Kaynak takımı



c) Bağlama kalıbı ve Kaynak takım bağlanmış makine'nin genel görünümü

Şekil 6.15 Bağlama kalıbı ve kaynak takımının CNC dik işleme merkezine bağlanması

Daha sonra makinanın programlama dili olan ve Tabla 6.5'te verilen parametre değerlerine göre programlanan "Fanuc 0i-MateMC" programı yardımıyla bilgisayar kontrollü olarak SKK ile termoplastik levhalar birleştirilmiştir. "Fanuc 0i-MateMC" programının CNC tezgâhındaki sabit ekran üzerinde genel görüntüsü Şekil 6.16'da gösterilmiştir.



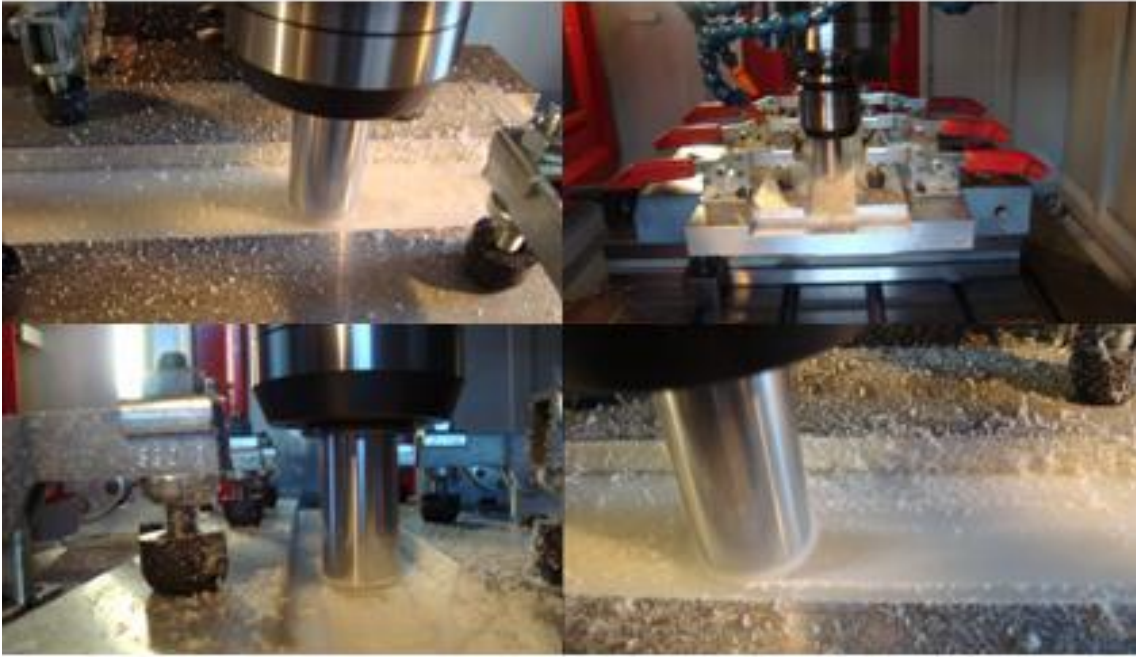
Şekil 6.16 SKK parametreleri (takım dönme devri 5000 devir/dk., ilerleme 20 mm/dk., dalma 5.74 mm) için programlanan ekran görüntüsü

CNC dik işleme merkezinde SKK aşağıdaki işlem basamakları ile gerçekleştirilmiştir:

- 1- **Dalma:** Şekil 6.17 a'da gösterildiği gibi sabit bir dalma hızında (5 mm/dk.) birleştirilecek levhalara kaynak takımının dalması
- 2- **Bekleme:** Takımının dalmasından sonra kaynak için gerekli ısıyı elde etmek amacıyla belirli bir süre (~30 – 120 sn.) dalma bölgesinde bekleme
- 3- **İlerleme:** Şekil 6.17 b'de gösterildiği gibi takıma ilerleme hareketinin verilmesiyle birlikte birleştirme işleminin başlaması ve takımın kaynak hattı boyunca sabit bir hızda ilerlemesi
- 4- **Kaynağın sonlandırılması:** Kaynak takımının birleştirme hattı boyunca ilerlemesi ve birleştirme son noktasında takımın bağlama kalıbından çıkması
- 5- **Takımın yukarı çekilmesi:** Takımın yukarı çekilmesi ve birleştirme işleminin sonlandırılması



a) Dalma ve bekleme



b) İlerleme



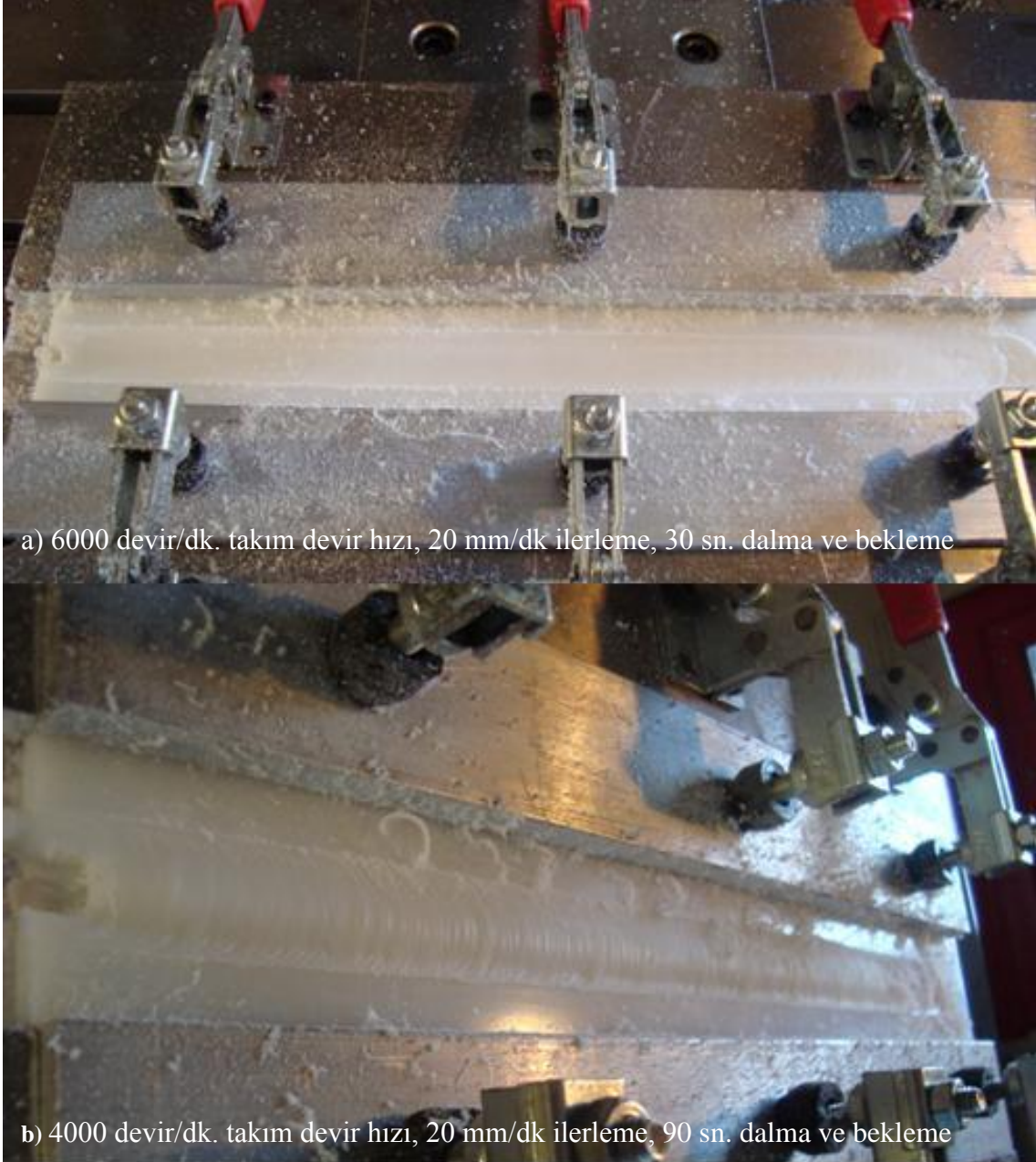
c) Takımın bağlama kalıbından çıkması

d) Takımın yukarı çekilmesi

Şekil 6.17 Sürtünme karıştırma kaynağı işlem adımları

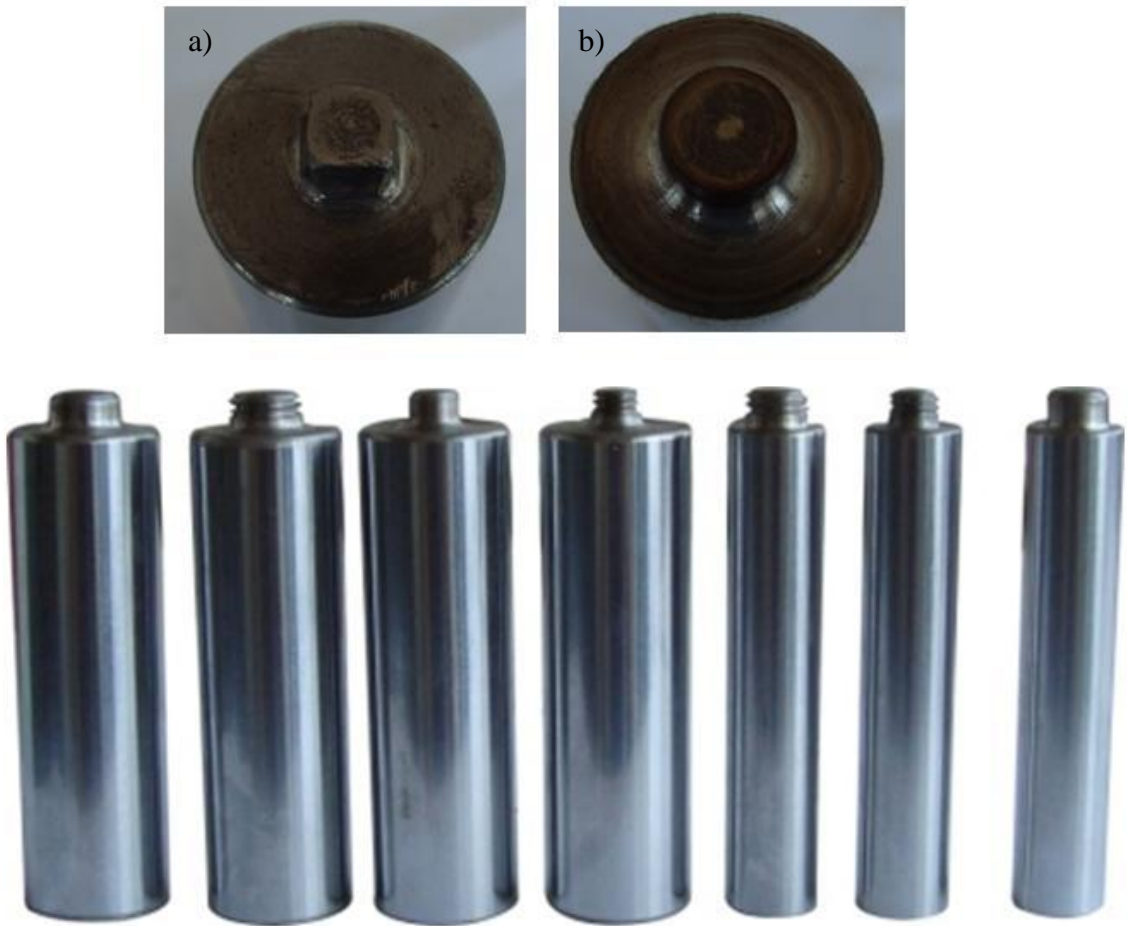
Birleştirme işleminin başlangıcında dalma ve bekleme sonrası oluşan ısının taşınması ve sabit bir şekilde korunmasındaki zorluk ilk 75~100 mm'lik kısımda kaynak görüntüsü

üzerinde bir dalgalanma şeklinde kendini göstermektedir. Bekleme sürelerinin arttırılıp azaltılmasıyla oluşan ısının kaynak hattı boyunca taşınması ya da malzemenin aşırı ergimesinden kaynaklı plastikleşen malzemenin kontrol zorluğundan kaynaklı diğer problemler çözülebilmektedir. Şekil 6.18’ de farklı parametrelerle gerçekleştirilmiş SKK uygulamalarına ait kaynak görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.18 PE termoplastik levhalarda sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarına ait örnekler

Sürtünme karıştırma kaynağı üzerinde takım geometrisinin etkisi oldukça fazladır. Kaynak sonrası kaynaklı bölgenin yüzeyinde meydana gelen dalgalanmalar ve oluşan yüzey görüntüsü üzerinde (Şekil 6.18) takımın uç geometrisinin oldukça büyük etkisi vardır. Plastik kıvamına gelen malzemelerin taşınması takım omzu tarafından yapılmaktadır. Malzemelere takım omzu tarafından aşırı baskı uygulanması ya da baskının doğru ayarlanamaması sonucu, kaynak bölgesinde oluşan malzeme kaybı kaynak mukavemetini oldukça zayıflatmaktadır. Şekil 6.19’ da SKK ile termoplastiklerin birleştirilmesinde kullanılan takımlara ait örnekler gösterilmektedir.



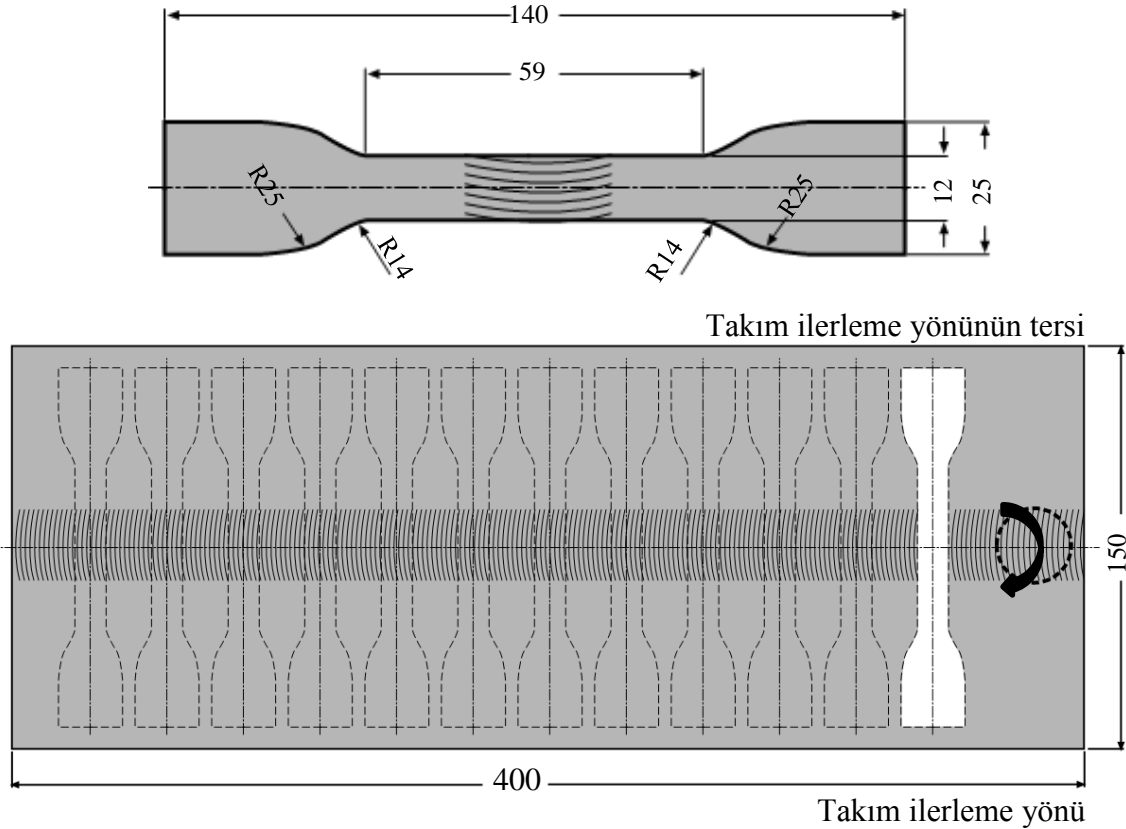
Şekil 6.19 Termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan takımlar, a) Kare karıştırıcı uçlu takım, b) Silindirik karıştırıcı uçlu takım

6.6. Fiziksel, Mekanik ve Isıl Deneylerin Yapılması

Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesi sonrası, kaynak mukavemeti, oluşan mikroyapısal değişiklikler vb. hakkında bilgi edinebilmek amacıyla birleştirme sonrası malzemelerden alınan numuneler bazı testlere tabi tutulmuştur.

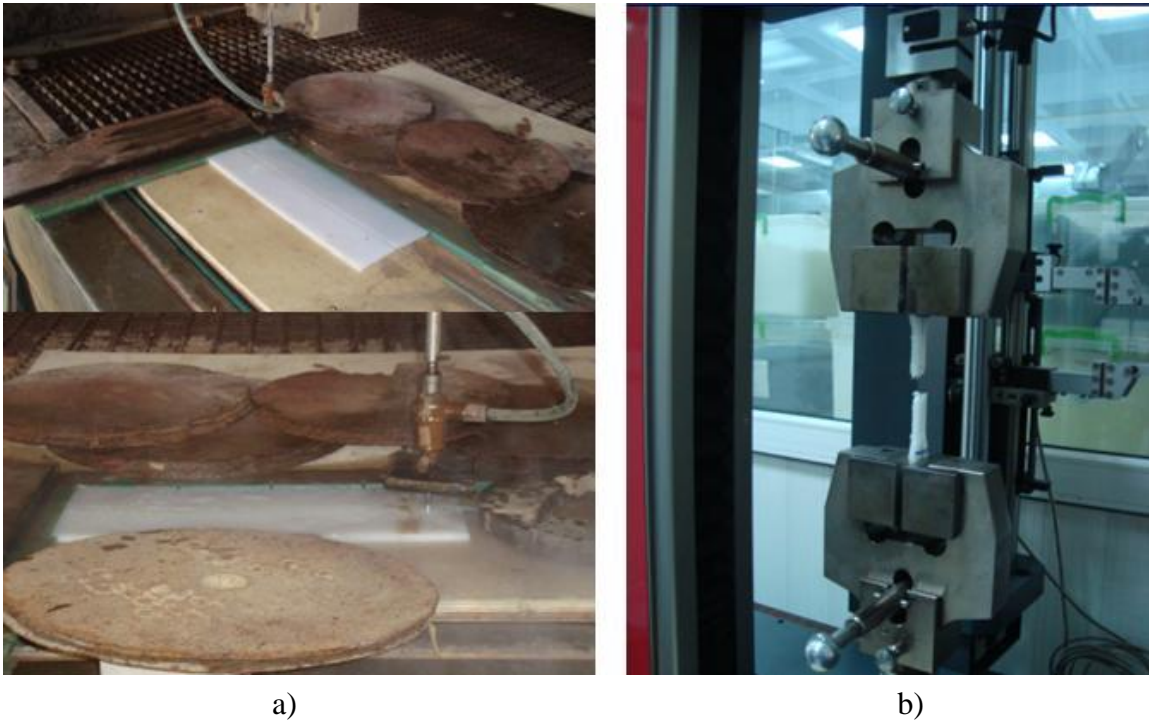
6.6.1. Çekme deneyi

Çekme deneyleri, plastik malzemelerin mekanik dayanımını gösterir. Bu deneyde, kopma mukavemeti, uzama miktarı, uygulanan çekme kuvvetine bağlı olarak esneklik veya kırılma hakkında bilgiler elde edilebilmektedir. Yapılan deneylerde elastik yapıdaki plastiklerin fazla, sert ve kırılma olanların ise birim uzama miktarı az olduğu dikkate alınmıştır. Uzama miktarı darbe dayanımının bir göstergesidir. Çekme testleri için şekil 6.20’de gösterilen numuneler Şekil 6.21 a’ da gösterildiği gibi su jeti ile kesilmek suretiyle alınmıştır.



Şekil 6.20 SKK ile birleştirme sonrası ASTM D412 Tip A (UL-62-A)’ ya göre alınan test numuneleri

ASTM D412 Tip A (UL-62-A)' ya göre SKK ile birleştirilmiş malzemelerden alınan numuneler Zwick marka Z010 üniversal tip cihazda, standart deney sisteminde çeneler arasına sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminden sonra çeneler birbirinden 5 mm/dk., sabit bir hızla uzaklaştırılırken test numunesi iki ucundan belirli bir hızla Şekil 6.21 b'de gösterildiği gibi numuneler kopuncaya kadar gerdirilmiştir. Her parametre değeri için minimum beş deney yapıp ortalaması alınmıştır. Test numunelerinin ilk boyu ve çekme hızı dikkate alınarak, elde edilen veriler (çekme gerilmesi, uzama yüzdesi) kullanılarak yük-uzama eğrileri çizilmiştir.

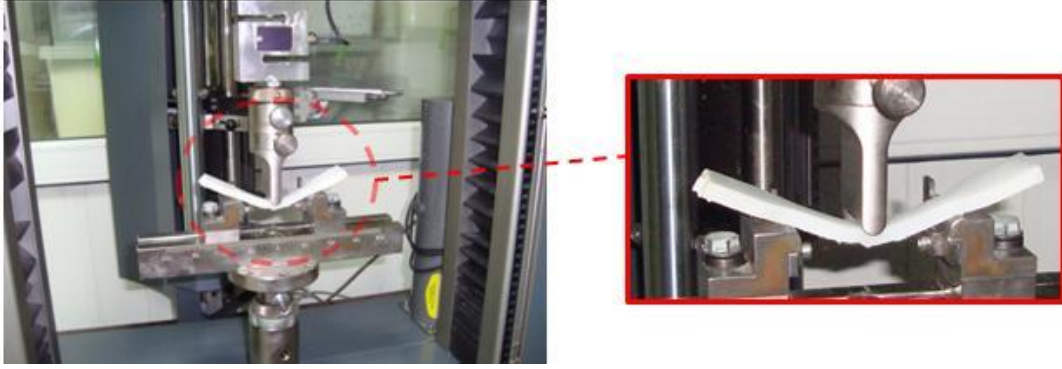


Şekil 6.20 a) SKK ile birleştirme sonrası su jeti ile test numunesinin alınması, b) Alınan numunelerin çekme test cihazında sabit bir hızda kopuncaya kadar çekilmesi

6.6.2. Eğme deneyi

Eğme deneyinde kullanılan numuneler, çekme deneylerinde kullanılan ASTM D412 Tip A (UL-62-A)' ya göre alınmış olan numunelerdir. Deneyler Zwick marka Z010 üniversal tip cihazda gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında kullanılan test numuneleri hem gerilmeye hem de basmaya maruz bırakılmıştır. Şekil 6.22'de görüldüğü gibi numuneler aralarında 100 mm açıklık olan iki destek plakasının ortasına

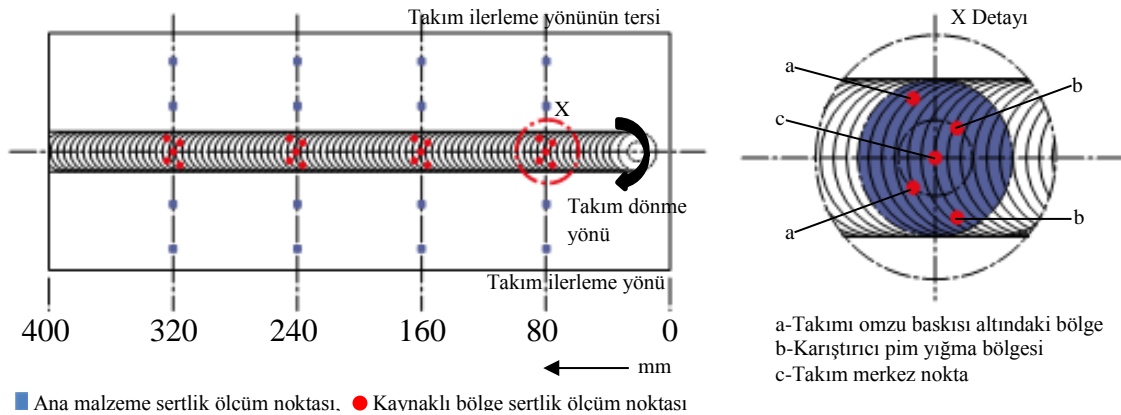
yerleştirilmiştir. Daha sonra standart başlıklı ve belirli bir hızda (5 mm/dk.) malzemeler kırılıncaya kadar yük uygulanmıştır. Numunelerin kırılmasına neden olan kuvvet, en yüksek eğme kuvveti olarak kayıt edilmiştir. Test numunelerinin kırılmadığı durumlarda %5 esneme kaydedilen kuvvet eğme kuvveti olarak kabul edilmiştir.



Şekil 6.22 Kaynaklı bağlantılardan alınan numunelere eğme deneyinin uygulanması

6.6.3. Sertlik deneyi

Sertlik malzeme yüzeyinden itibaren kalıcı bir boşluk oluşturmaya karşı malzemenin gösterdiği direnç olarak ifade edilebilir. Kaynak sonrası kaynaklı bölgenin sertliği (Şekil 6.23) durometre aracılığıyla ölçülmüştür. ASTM D2240 Shore D tipi skala yardımıyla ölçülen sertlik değerleri kontrol edilmiştir. Durometre'nin basınç uygulanan kısmında 30° açılı bir iğne benzeri bir ayağın malzeme yüzeyine degecek şekilde bastırıldığında göstergede okunan değer sertlik olarak alınmıştır.



Şekil 6.23 Sertlik ölçüm noktaları

Şekil 6.23’de gösterildiği gibi sertlik ölçümleri 400 mm’lik kaynak hattı boyunca, kaynak başlangıcından itibaren her 80 mm’lik mesafelerde (80,160,240,320 mm) ana malzemedan başlanarak tüm kaynak hattı boyunca, kaynak takımı omuz çapı altında kalan kaynaklı bölgeden 5 farklı noktadan sertlik değerinin ölçülmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı bölgenin sertlik değeri hesaplanırken tüm yapılan ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Şekil 6.24’ de ASTM D2240 Shore D tipi skala yardımıyla sertlik ölçümlerinin yapıldığı durometreye ait resim gösterilmektedir.



Şekil 6.24 Sertlik ölçümlerinin yapıldığı Durometre

6.6.4. Hızlandırılmış ısı yaşlanma deneyi

Hızlandırılmış yaşlanma deneyi sabit sıcaklık ve zamana bağlı olarak kaynak mukavemetinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla ASTM D-412-A’ ya göre numune alınmış malzemeler 50 °C sabit sıcaklıkta, 24 – 720 saat arasında tutulmuştur. Elde edilen verilerden faydalanılarak zamana bağlı yaşlanma özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

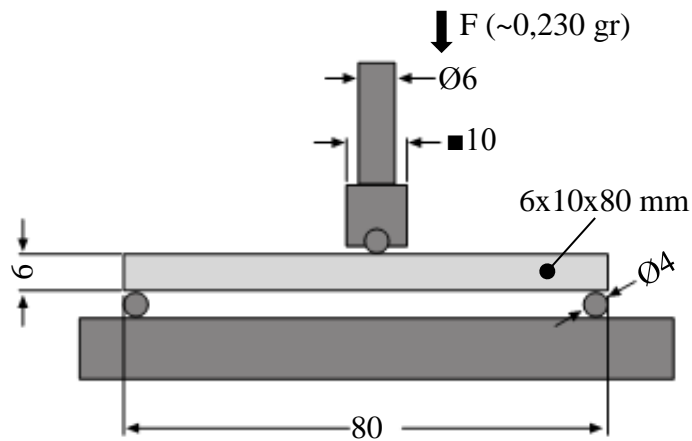
6.6.5. Vicat yumuşama sıcaklığı deneyi

Deneyler Gotech Testing Machine Inc firmasına ait HV2000-MSN marka universal tip cihazda ASTM D-648’ e göre gerçekleştirilmiştir. Vicat yumuşama sıcaklığı deneyi yağ banyosu, ucunda batma iğnesinden oluşan bir batırma kolu ve batırma kolu üzerinde yer alan iğnenin batma miktarını gösteren bir düzenekten oluşmaktadır. Deney plastiklerin

sıcaklık etkisi ile yumuşama özelliklerinin kıyaslanması açısından oldukça yararlı olan bir deneydir. Vicat yumuşama noktası deneyi için hazırlanan 6 mm kalınlığında 10 mm² olan kare numuneler batma iğnesi yüzeyinde serbestçe duracak şekilde cihaza yerleştirilmiştir. 50 °C altına ısıtılmış yağ banyosuna numuneler daldırıldıktan sonra sıcaklık arttırılmıştır. Batma kolu üzerindeki göstergelerden kontrol edilen batma iğnesinin 1 mm battığı sıcaklık Vicat yumuşama sıcaklığı olarak belirlenmiştir.

6.6.6. Isıl deformasyon (HDT) deneyi

Deneysel Gotech Testing Machine Inc firmasına ait HV2000-MSN marka üniversal tip cihazda ASTM D-648' e göre gerçekleştirilmiştir. Isıl deformasyon deneyi yağ banyosu, ucunda baskı aparatı olan bir batırma kolu ve batırma kolu üzerinde yer alan iğnenin batma miktarını gösteren bir düzenekten oluşmaktadır. 6x10x80 mm ölçülerinde hazırlanan dikdörtgen plakalar aralarında belli bir açıklık olan destek plakaları üzerine yerleştirilmiştir. 50 °C altına ısıtılmış yağ banyosuna numuneler daldırıldıktan sonra sıcaklık arttırılmıştır. Numuneler yağ banyosunda iken ~230 gr kuvvet ile numuneler üzerine baskı uygulanarak ısı ve kuvvet etkisiyle eğmesi sağlanmıştır. Batma kolu üzerindeki göstergelerden kontrol edilen eğmenin 0,35 mm olduğu sıcaklık ısıyla deformasyon sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Şekil 6.25'de deneyin uygulanması şematik olarak gösterilmiştir.

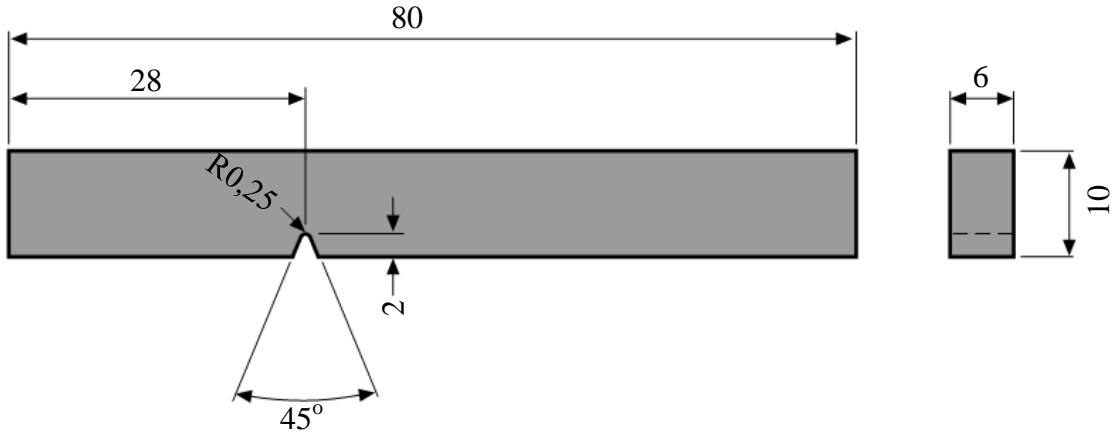


Şekil 6.25 Isıl derformasyon deneyinin (HDT) şematik gösterimi

6.6.7. Izod darbe deneyi

PE ve PP ana malzeme ve SKK ile birleştirilmiş termoplastik malzemelerin dinamik yüklere karşı kırılma enerjisini (darbe direncini) belirlemek için Zwick marka cihazda izod darbe deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan SKK uygulanmamış ana malzeme ile SKK uygulanmış termoplastik malzemelerin kaynak sonrası kırılma etkisinin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

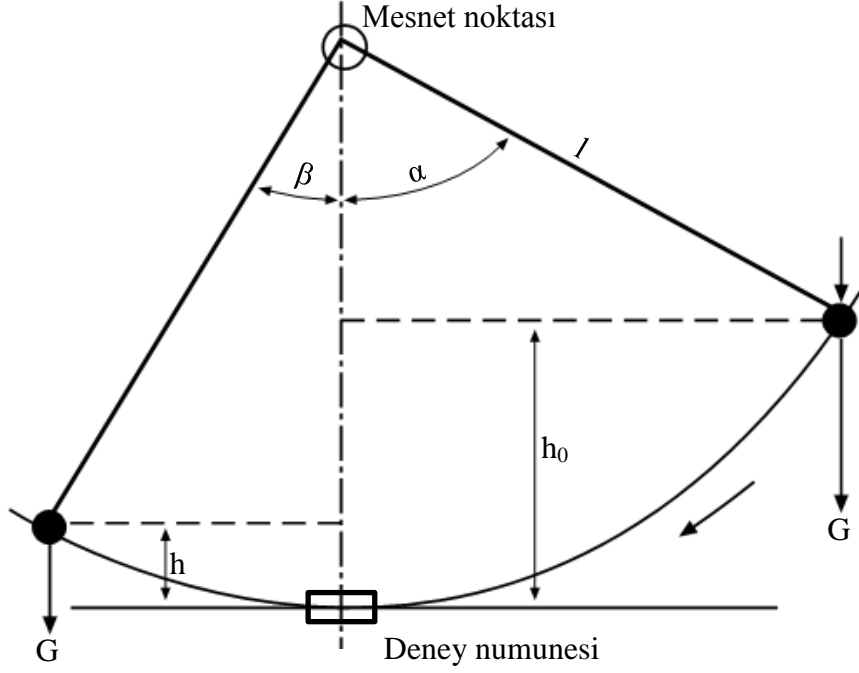
Deneyler oda sıcaklığında (22 °C) gerçekleştirilmiştir. Izod darbe deneyi için ana malzemelerden (PE,PP) ve SKK ile birleştirilmiş plakalardan (PE, PP) 6x10x80 mm ölçülerinde hazırlanan deney numunelerine kırılmayı kolaylaştırmak amacıyla Şekil 6.26' da gösterilen şekilde V-çentik açılmıştır.



Şekil 6.26 Termoplastik malzemeler için izod darbe deney numuneleri

Şekil 6.27' de deneyin temel prensibi şematik olarak gösterilmektedir. Sarkaç tipi bir cihaz kullanılan izod darbe deneyinde öncesinde G ağırlığına sahip l uzunluğundaki bir çekiç potansiyel enerji kazanacağı bir h yüksekliğine çıkartılmıştır. Daha sonra Şekil 6.26 da gösterilen şekilde hazırlanan numune çekicinin salınım düzlemi ile çentiğin simetri düzlemi birbiriyle çakışacak şekilde yerleştirilmiştir. Numune uygun şekilde yerleştirildikten sonra sarkaç düzgün bir şekilde çeneler arasına yerleştirilen numuneyi kırması için serbest bırakılmıştır. Sarkacın numune ile temas ettiği andaki potansiyel enerji ile numune kırıldıktan sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji farkı o numunenin kırılması için gerekli olan kırılma enerjisini (darbe direncini) verir. Kırılma sonrası

cihazın ekranında görünen değer okunarak kırılma enerjisi (darbe direnci kJ/m^2) olarak kayıt edilmiştir.



Şekil 6.27 Izod darbe deney cihazının çalışma prensibi

6.6.7. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) deneyi

DSC kontrollü bir atmosfer ortamında sıcaklığın ve zamanın fonksiyonu olarak malzemedeki camsı geçiş sıcaklığı, erime ve kaynama noktası, kristalleşme zamanı, sıcaklığı vb. gibi geçişlerin ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu geçişler sıcaklık ve ısı akışına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. DSC ile yaptığımız bu ölçümler bize endotermik, ekzotermik ve ısı kapasitesindeki değişiklikleri içeren fiziksel ve kimyasal değişimler hakkında kantitatif ve kalitatif bilgileri vermektedir [92].

Bu deneyde; SKK sonrası kaynaklı bölgeden alınan örneklerin ve ana malzemenin Setaram DSC 151 cihazında 50 ml/dk, N_2 akımı altında, $20\text{ }^\circ\text{C/dk}$ ısıtma hızında erime termogramları kaydedilmiştir. DSC erime piklerinin analiziyle, farklı parametre değerlerinde SKK ile birleştirilmiş örneklerin erime davranışları incelenmiş, kristal lamel kalınlıkları ve kristalizasyon yüzdeleri hesaplanmıştır.

6.6.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzeyin taranması prensibiyle çalışır. SKK ile birleştirilmemiş termoplastik ana malzemelerden (PP,PE) ve SKK ile birleştirilmiş bölgelerden alınan numunelerin JSM 5600 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.

7. DENEYSEL SONUÇLAR

7.1. PE ve PP Levhaların Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme deneyleri oda sıcaklığında her bir parametre için beş adet deney gerçekleştirilmiş ve ortalamaları alınmıştır. PE numunelerin çekme deney sonuçları Tablo 7.1, PP numunelerin çekme deney sonuçları ise Tablo 7.2 ' de verildiği gibidir.

Tablo 7.1 PE numunelere ait çekme deney sonuçları

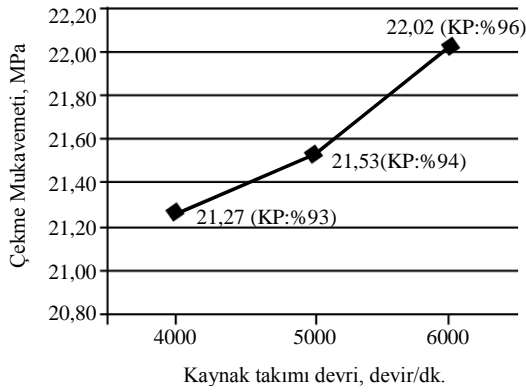
Deneş Kodu	Akma Mukavemeti MPa	Akma Muk. Standart Sapması	Akma Uzaması %	Elastik Çekme Modülü MPa	Çekme Mukavemeti MPa	Çekme Muk. Standart Sapması	Çekme Uzaması %	SKK Kaynak Performansı %	Kristal Yüzdeleri X_c
PE Referans Numune	22,13	0,56	11,18	919	22,97	0,49	103,56	100	54,6
1	20,73	1,05	12,33	861	21,53	1,13	18,47	94	52,2
2	20,97	0,40	12,28	881	22,02	0,92	18,41	96	49,1
3	20,41	0,09	12,44	851	21,27	0,58	18,65	93	50,2
4	19,65	0,44	13,32	833	20,83	0,39	19,98	91	47,4
5	19,78	0,52	12,87	842	21,04	0,57	19,30	92	49,1
12-1	20,88	0,38	11,16	847	21,18	0,39	36,37	92	52,6
12-2	20,22	1,75	10,51	836	20,89	0,93	29,20	91	55,3
12-3	20,56	0,28	10,52	825	20,64	0,26	17,15	90	52,9
12-4	13,82	1,36	8,32	711	17,78	0,36	10,13	77	48,8
12-5	17,15	1,19	8,43	669	16,72	3,41	16,60	73	56,0
KT-01	16,07	0,55	9,33	726	18,15	1,58	21,03	79	47,1
ST-01	11,40	0,35	2,93	625	15,62	0,48	3,41	68	52,6
ST-02	12,79	0,52	6,07	783	19,57	1,18	12,75	85	-
ST-03	18,89	0,68	9,12	775	19,38	1,62	16,01	84	-

Tablo 7.2 PP numunelere ait çekme deney sonuçları

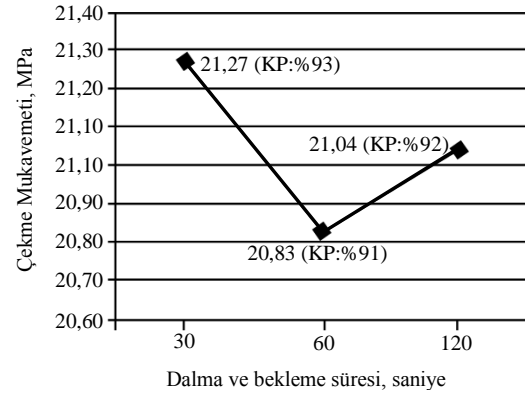
Deneş Kodu	Akma Mukavemeti MPa	Akma Uzaması %	Elastik Çekme Modülü MPa	Çekme Mukavemeti MPa	Çekme Mukavemeti Standart Sapması	Çekme Uzaması %	SKK Kaynak Performansı %	Kristal Yüzdeleri X_c
PP Referans Numune	33,41	13,34	1404	35,11	0,49	5,29	100	41,2
29-09/01	-	11,40	1200	30,11	0,55	2,10	84	30,0
29-09/02	-	-	-	12,93	1,31	3,36	37	32,0
29-09/03	-	-	-	6,06	0,92	1,97	17	31,3
29-09/04	-	-	-	4,28	0,53	1,76	12	31,6

Farklı kaynak parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen SKK numunelerinde Tablo 7.1 ve Tablo 7.2’ de görüldüğü gibi değişik mekanik özellikler ve % uzama değerleri elde edilmiştir. SKK kaynak performansı açısından karşılaştırıldığında PE ve PP için oldukça başarılı sonuçlar alınmıştır.

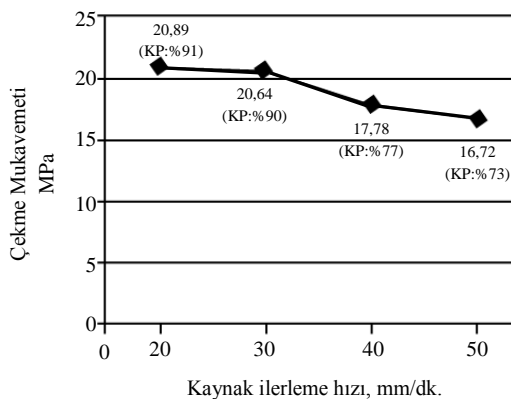
Şekil 7.1’ den görüldüğü gibi, PE numunelerin SKK uygulamalarında en yüksek kaynak performansı % 96 ile, takım dönme devri 6000 devir/dk., takım ilerleme hızı 20 mm/dk. olan ve M8 uçlu kaynak takımı kullanılan 2 Kodlu deneyde elde edilmiştir. Takım dönme devri arttıkça SKK kaynak performansında artış meydana gelmiştir. Dalma ve bekleme süresi açısından en iyi sonuç kaynak başlangıcında 30 sn. bekleme ile elde edilmiştir.



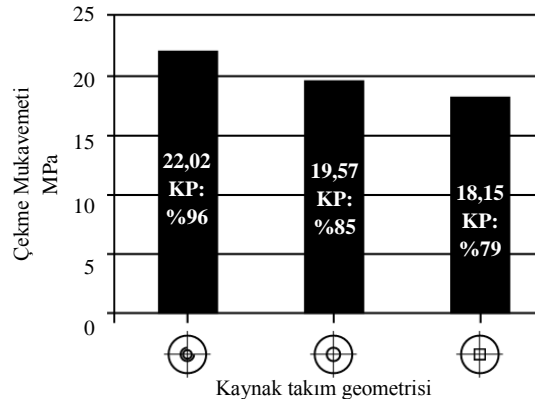
a) PE’ nin SKK’ nda kaynak takımı devir hızının kaynak mukavemeti üzerindeki etkisi



b) PE’ nin SKK’ nda kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süresinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkisi



c) PE’ nin SKK’ nda Kaynak takımı ilerleme hızının kaynak mukavemeti üzerindeki etkisi



d) PE’ nin SKK’ nda kaynak takım geometrisinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkisi

KP: Kaynak performansı

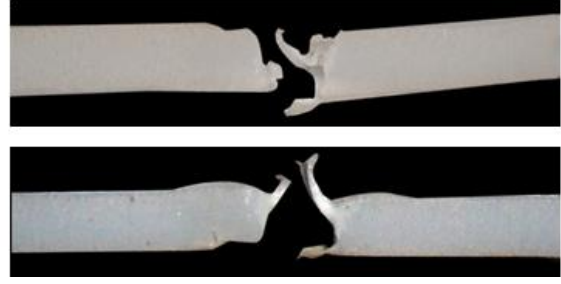
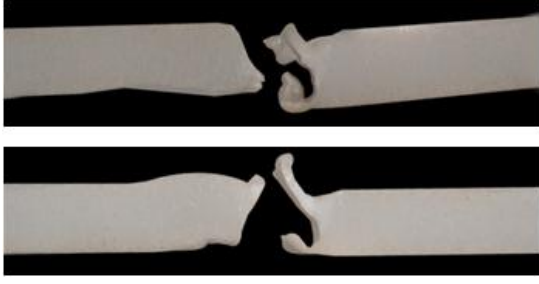
Şekil 7.1 PE’ nin birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin çekme mukavemetine etkisi

PE'nin SKK uygulamalarında Şekil 7-1 c' den de görülebileceği gibi çekme mukavemeti ve kaynak performansı düşük takım ilerleme hızlarında daha yüksek olmuştur. Burada kaynak esnasındaki sıcaklığın kaynak mukavemeti üzerindeki etkisi açıkça görülebilmektedir. Kaynak parametrelerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkisi ilerleyen kısımlarda daha detaylı olarak açıklanacaktır.

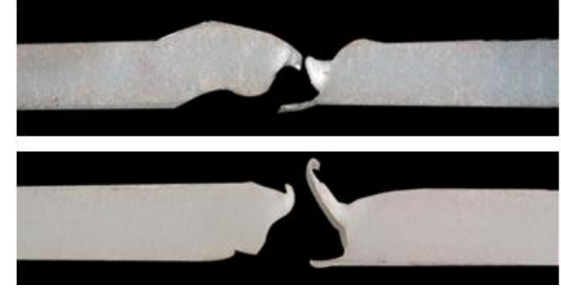
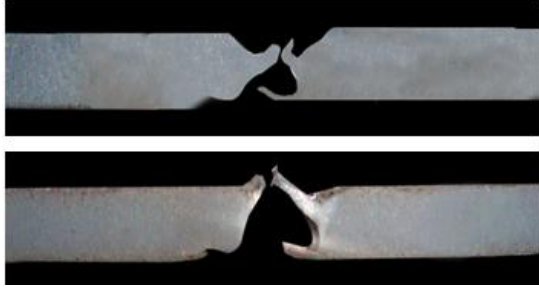
PE'nin SKK kaynağında takım geometrisinin kaynak mukavemeti üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Daha iyi karıştırılan ve kaynak bölgesini daha iyi besleyen takımlarla yapılan SKK uygulamalarından daha iyi sonuçlar elde edilmiş ve diğer takımlara kıyasla daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 7.1 d incelendiğinde klasik alüminyum stili kaynak takımları ile yapılan SKK uygulamalarından en iyi sonuçlar alındığı gözlemlenmiştir. Şekil 7.2' de SKK uygulanmış PE malzemenin çekme deneyine ait kopma görüntüleri yer almaktadır. Ana malzemeye ait referans numunelerde çekme deneyi kopma gerçekleşmemiş parçalarda gittikçe artan bir uzama meydana gelmiştir. Ancak SKK ile birleştirilen polietilen numunelerde kaynaklı bölgeden kopma meydana gelmiştir. Ana malzeme mukavemetinin, kaynaklı bölgenin mukavemetinden yüksek olmasının bunda etkili olduğu düşünülmektedir.



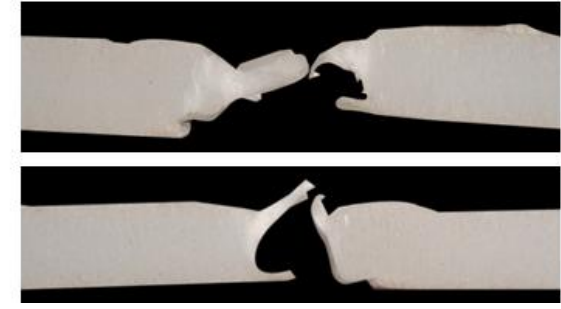
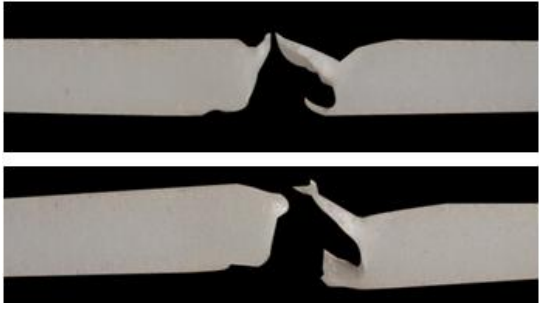
a) PE Kodlu referans numuneye ait çekme numune görüntüleri



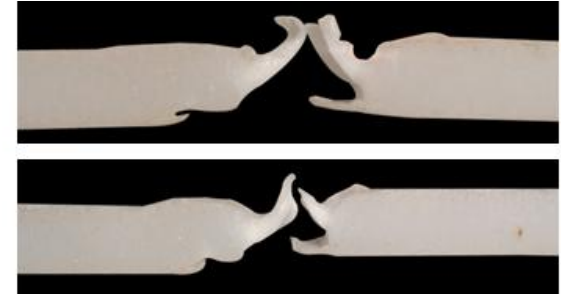
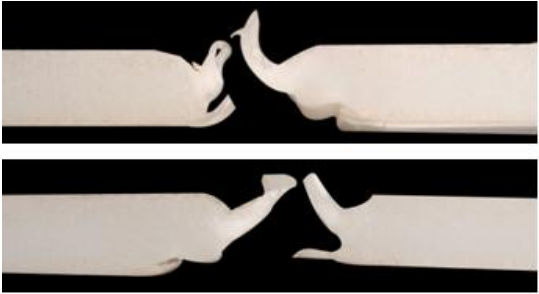
b) 1 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri (Yan)



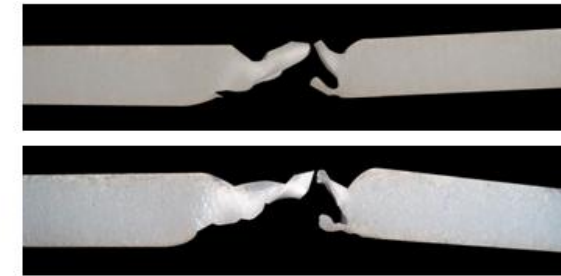
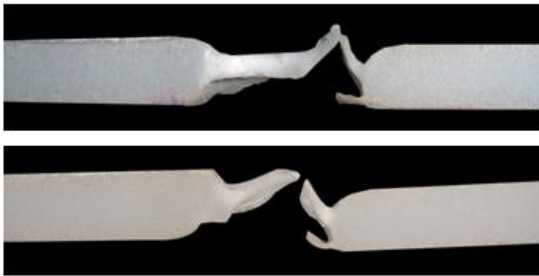
c) 2 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri (Yan)



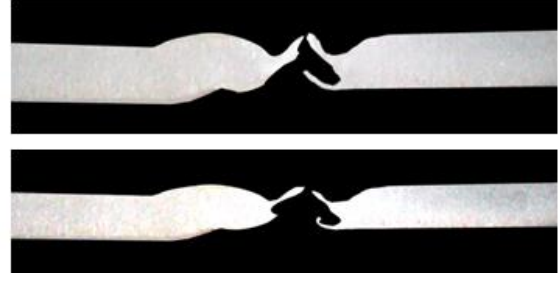
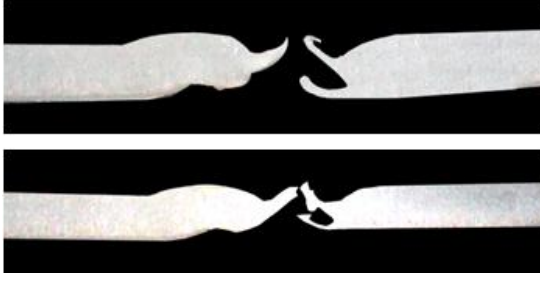
d) 3 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri (Yan)



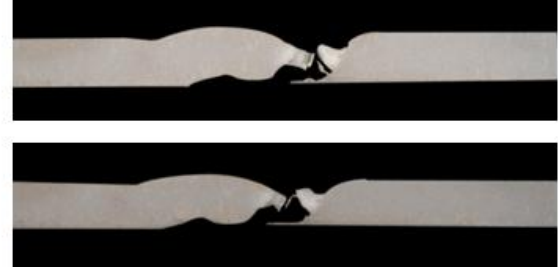
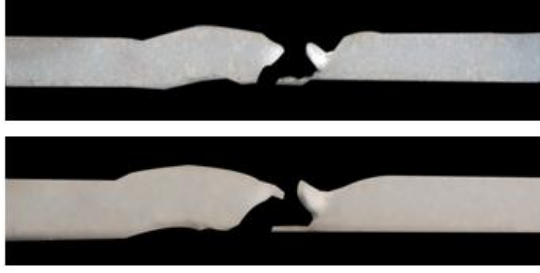
e) 4 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri (Yan)



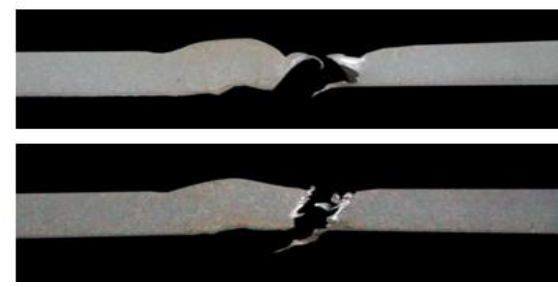
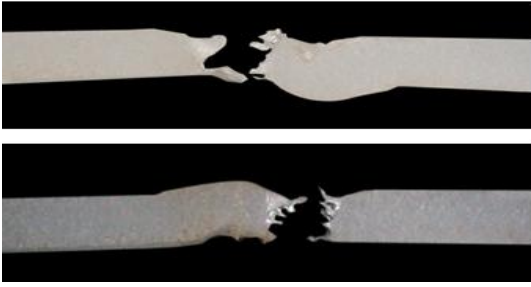
f) 5 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri (Yan)



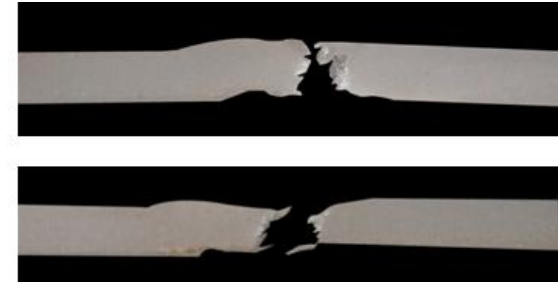
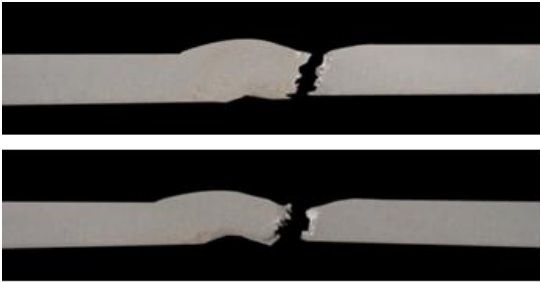
g) 12-1 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri (Yan)



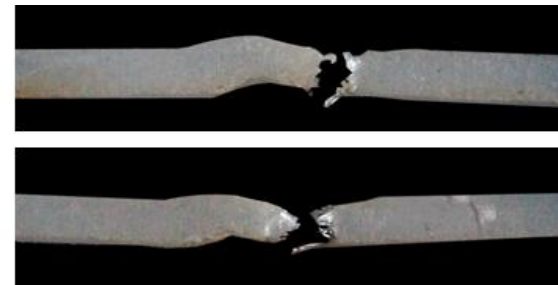
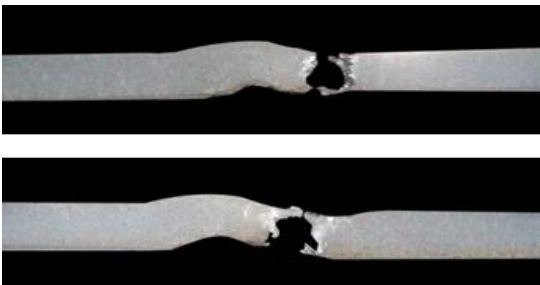
h) 12-2 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri (Yan)



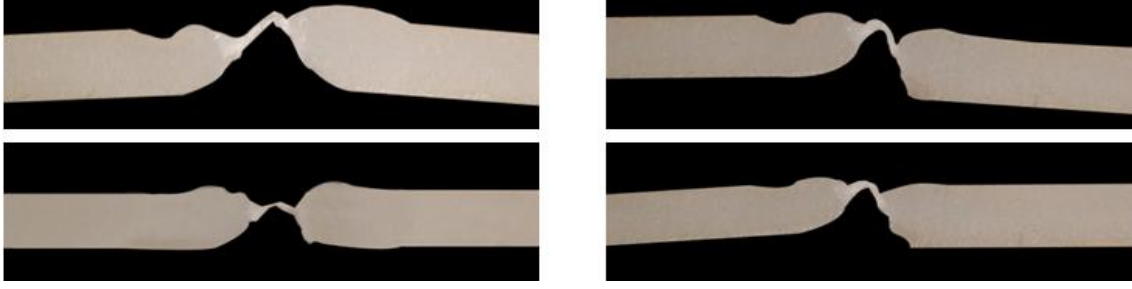
i) 12-3 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri (Yan)



j) 12-4 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri (Yan)



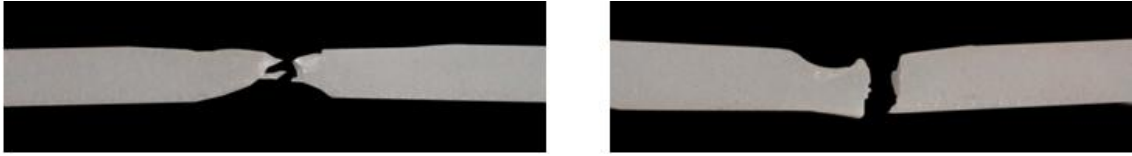
k) 12-5 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri (Yan)



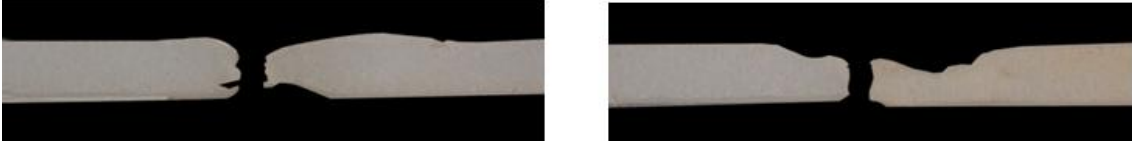
l) KT-01 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri (Yan)



m) ST-01 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri (Yan)



n) ST-02 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri (Yan)



o) ST-03 Kodlu deneye ait çekme numuneleri kopma görüntüleri

Şekil 7.2 PE numunelerin çekme deneyi sonrası kopma görüntüleri

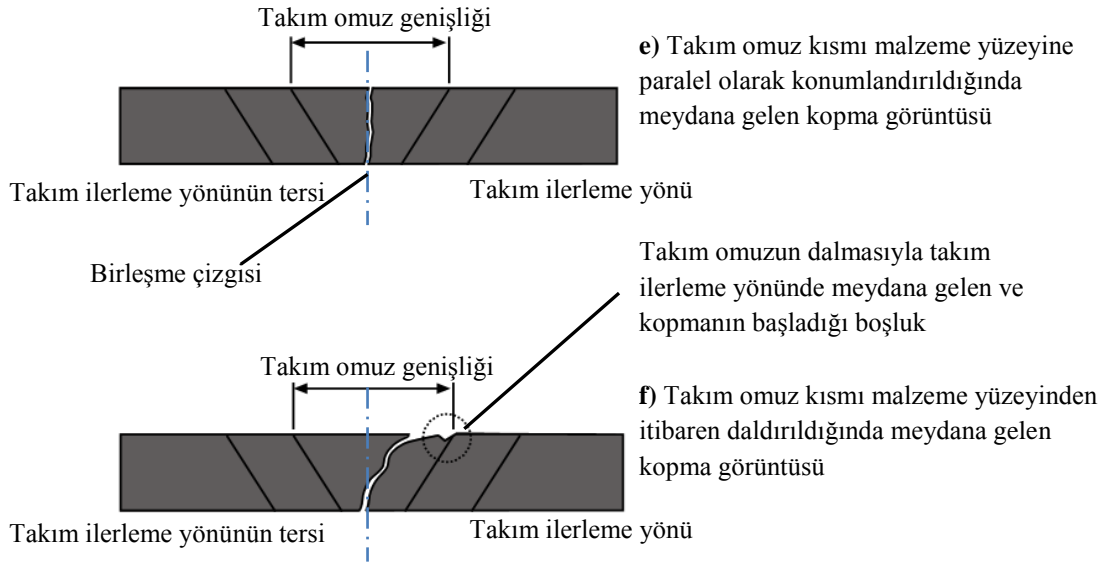
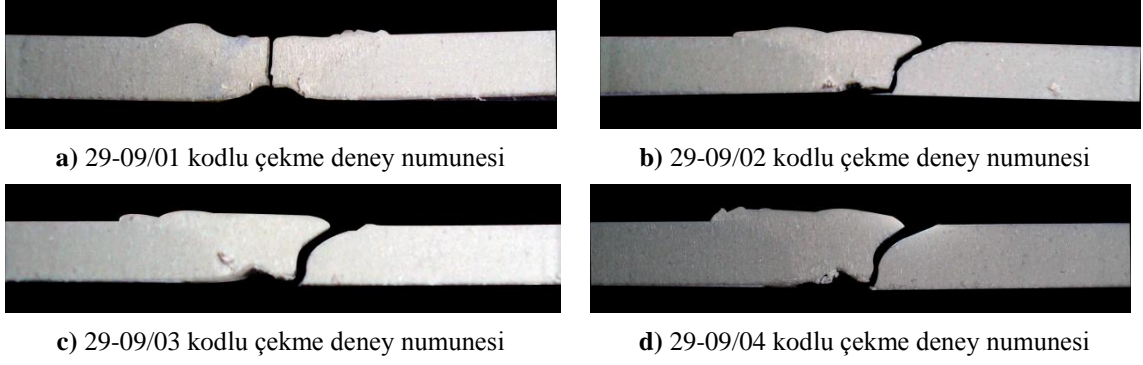
PP'nin SKK uygulamalarında PE'den farklı olarak omuz baskısının kaynak mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmeye çalışılmıştır. İlk olarak takım omzu malzeme üst yüzeyine paralel olacak şekilde SKK uygulamaları gerçekleştirilmiş, sonraki uygulamalarda kaynak takımının omuz kısmı malzeme üst yüzeyinden itibaren 0,25, 0,75 ve 1 mm daldırılarak SKK uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

PP'nin SKK uygulamalarında M12 karıştırıcı uca sahip ve takım omuz çapı 25 mm olan bir kaynak takımı kullanılmıştır. Kaynak başlangıcında takım 5 mm/sn. hızla birleştirilecek parçalara daldırılmış ve yeterli ısının oluşumunu sağlamak amacıyla dalma bölgesinde beklenmiştir. Takım ilerleme hızı 25 mm/dk. ve dönme hızı 5400 devir/dk. verilerek SKK uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında

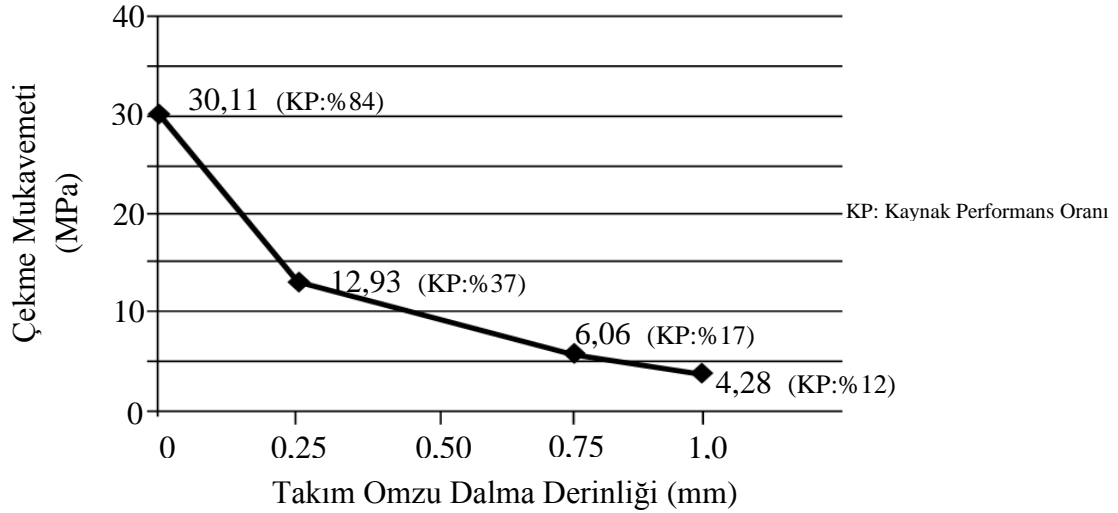
gerçekleştirilen PP'nin SKK uygulamalarına ait çekme deney sonuçları Tablo 7.2' de gösterildiği gibidir.

Tablo 7,2'den de görüldüğü gibi PP için en yüksek SKK kaynak mukavemet değeri ve en yüksek SKK kaynak performansı % 84 ile 29-09/01 kodlu SKK uygulamasında elde edilmiştir. Takım omuz kısmının malzeme yüzeyine dalma derinliğinin artmasıyla birlikte SKK kaynak mukavemeti ve SKK kaynak performansında çok belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Takım omuz kısmının malzeme yüzeyine daldırılmasıyla kaynak bölgesinde takım dönme yönü kısmında belirgin kaynak boşlukları oluşmuş ve çekme deneylerinde kopmalar genelde bu bölgeden gerçekleşmiştir. PP malzemelerin SKK uygulamalarına ait çekme deney numuneleri ve kırık yüzey görüntüleri Şekil-7.3' de gösterildiği gibidir. Kaynak görüntüsünün normal görünmesine rağmen takım ilerleme yönünde meydana gelen boşluk çekme deneyi esnasında çentik etkisi yapmış ve kopma bu bölgeden başlayarak birleşme çizgisine doğru ilerlemiştir. Kaynak bölgesine daldırılan takım omzunun oluşturduğu baskı, takım ilerleme yönünden daha fazla ergitilmiş malzemeyi takım ilerleme yönünün tersine taşımıştır. Takım ilerleme yönünün tersinde malzeme yığılması oluşurken, takım ilerleme yönünde boşluklar meydana gelmiştir. Takım omuz kısmının malzeme yüzeyine dalma derinliği ile kaynak mukavemeti arasındaki ilişki Şekil-7.4' de gösterilmiştir.

Şekil 7-4' de görüldüğü gibi dalma derinliğinin artmasıyla kaynak mukavemetinde ciddi kayıplar söz konusudur. 1 mm'lik bir omuz baskısı sonucu ilk duruma göre ~80 oranında bir mukavemet kaybı meydana gelmiştir. Omuz baskısının malzeme yüzeyine yaptığı baskı sonucu takım ilerleme yönünde malzeme yüzeyinde oluşan boşluk kaynak mukavemeti için bir dezavantaj oluşturarak mukavemet kaybına neden olmuştur. Çekme deneyi esnasında çentik etkisi gösteren bu boşluktan başlayan kopma Şekil 7.3'te de gösterildiği gibi kaynak birleştirme çizgisine doğru ilerlemiştir.



Şekil 7.3 PP numunelerin çekme deneyi sonrası kopma görüntüleri



Şekil 7.4 PP'nin birleştirilmesinde takım omzu dalma derinliği ve kaynak mukavemeti arasındaki ilişki

7.2. PE ve PP Levhaların Eğme Deneyi Sonuçları

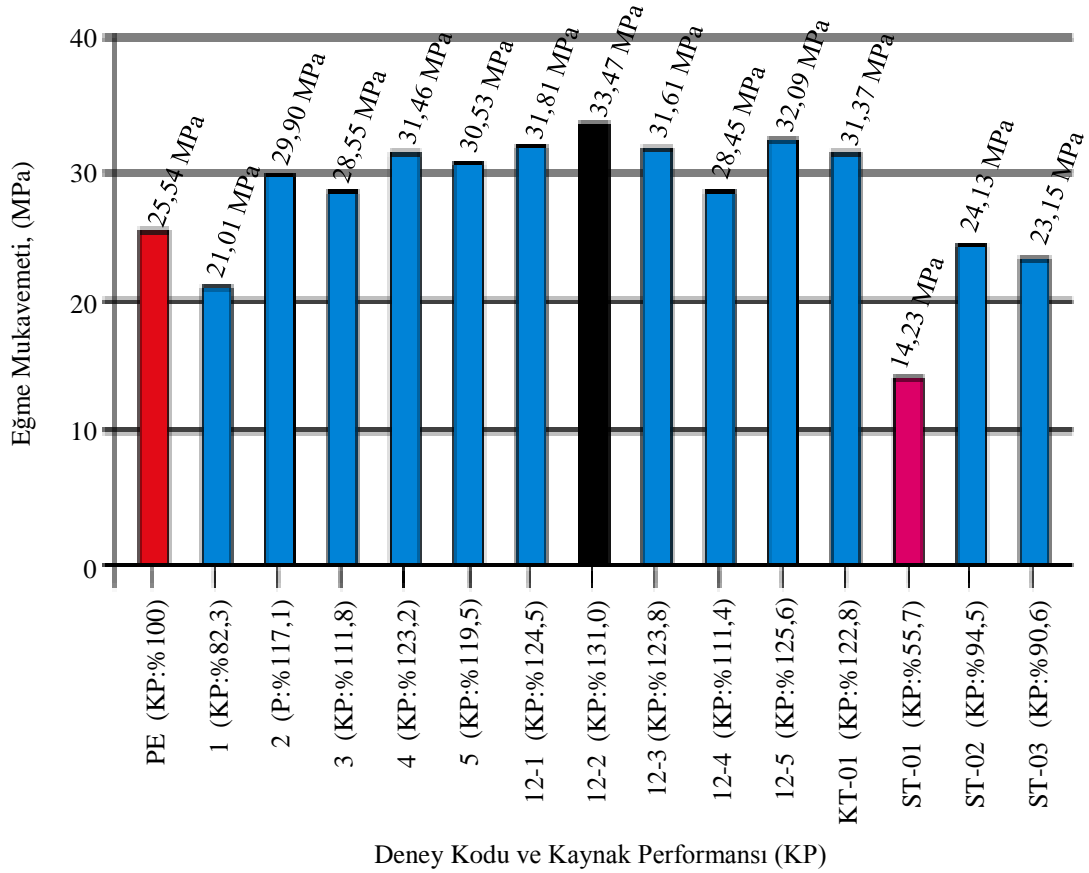
Eğme deneyi sonuçları için Tablo 7.3 ve Tablo 7.4 oluşturulurken her bir grup test numunesi için elde edilen bütün değerlerin aritmetik ortalaması hesap edilmiş ve ortalama değer olarak tabloda belirtilmiştir.

Tablo 7.3 PE numunelere ait eğme deney sonuçları

Deney Kodu	Eğme Mukavemeti (MPa)	Eğme Performansı (%)	Standart Sapma	Eğme Akma Mukavemeti (MPa)	Akma Uzaması (%)	Kristal lamel Kalınlığı (λ nm)	Kristallenme (%) X_c
PE Referans Numune	25,54	100	0,96	22,43	9,13	14,5	54,6
1	21,01	82,3	0,77	19,44	9,17	12,9	52,2
2	29,90	117,1	0,68	27,75	5,10	15,5	49,1
3	28,55	111,8	1,04	23,70	10,38	14,7	50,2
4	31,46	123,2	2,95	29,03	5,09	13,8	47,4
5	30,53	119,5	0,70	27,88	6,18	12,5	49,1
12-1	31,81	124,5	1,00	29,23	8,42	14,3	52,6
12-2	33,47	131,0	0,88	29,86	8,35	11,9	55,3
12-3	31,61	123,8	0,32	27,28	8,34	14,3	52,9
12-4	28,45	111,4	0,91	25,66	8,57	18,5	48,8
12-5	32,09	125,6	1,05	28,87	9,17	16,4	56,0
KT-01	31,37	122,8	3,06	28,83	5,08	21,1	47,1
ST-01	14,23	55,7	2,15	13,94	4,64	12,8	52,6
ST-02	24,13	94,5	1,17	23,31	4,63	-	-
ST-03	23,15	90,6	4,03	20,64	4,63	-	-

PE malzemelerin eğme deneyi sonuçları incelendiğinde SKK uygulanmış malzemelerin genel olarak ana malzeme mukavemetinden daha yüksek eğme mukavemetine sahip olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek eğme mukavemeti % 131'lik artışla 12-2 kodlu deneyde (4000 devir/dk., 20 mm/dk. ilerleme ve M12 karıştırıcı uçlu takım) elde edilmiştir. En düşük eğme mukavemeti % 55,7 ile ST-01 kodlu deneyde (4000 devir/dk., 20 mm/dk. ilerleme ve Ø10 karıştırıcı uçlu silindirik takım) elde edilmiştir. Şekil 7-5' te PE'nin SKK uygulamalarına ait sonuçlar açıkça görülebilmektedir. Şekilde kırmızı renk ile belirtilen PE referans numuneye ait eğme mukavemeti değerini, siyah

ile belirtilen elde edilen en yüksek çekme mukavemet değerini, macenta ile gösterilen ise en düşük eğme mukavemet değerini ifade etmektedir.

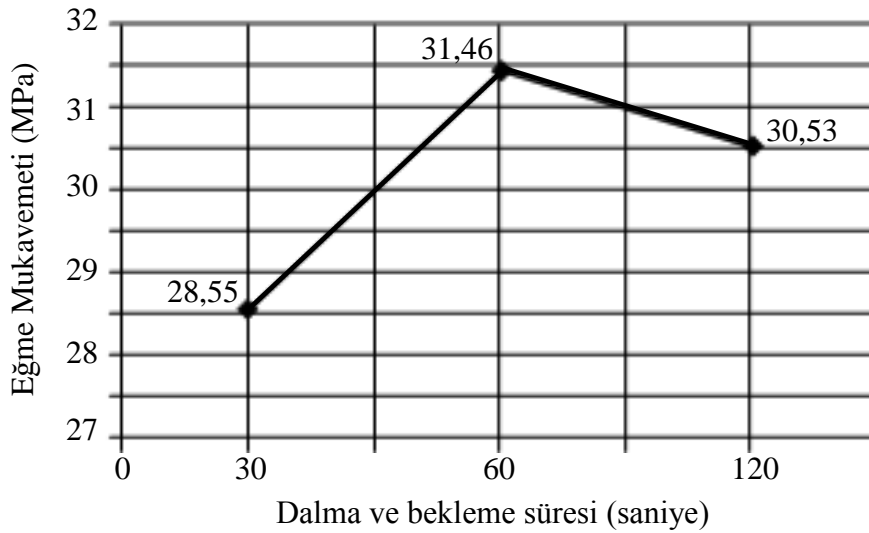


Şekil 7.5 PE numunelerine ait eğme mukavemet değerlerinin grafiksel gösterimi

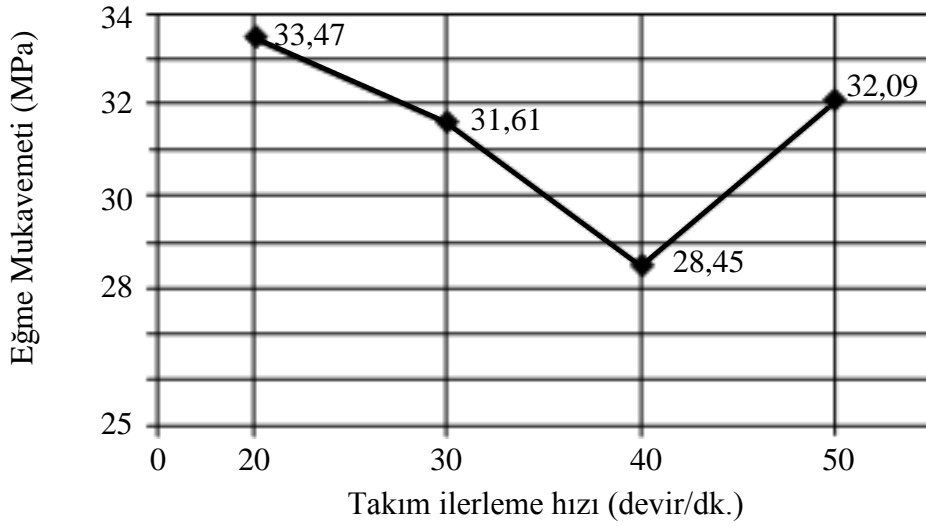
Dalma ve bekleme süresinin termoplastiklerin SKK üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla takım dönme devri 4000 devir/dk., takım ilerleme hızı 20 mm/dk. sabit olmak üzere; 30,60 ve 120 sn. gibi üç farklı bekleme ve dalma süresi verilerek PE malzemeler SKK ile birleştirilmiştir. Kaynakta M8 karıştırıcı uca sahip, omuz çapı Ø25 mm olan 2M nolu geleneksel alüminyum stili kaynak takımı (Şekil 6.10, Tablo 6.3) kullanılmıştır. Kaynak sonrası dalma ve bekleme süreleri açısından eğme mukavemeti sonuçları incelendiğinde (Şekil 7.6 a), çok düşük ve çok yüksek dalma ve bekleme sürelerinin eğme mukavemetini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Düşük bekleme sıcaklıklarında kaynak için gerekli olan ısının elde edilmesi ve taşınması zorlaşmakta bu nedenle kaynak takım ucu tarafından ana malzemeden koparılan parçaların ısı etkisiyle plastik kıvamına getirilmesi ve kaynak bölgesini doldurması daha uzun bir çevrimde

gerçekleşmektedir. Yine çok yüksek bekle sürelerinde ise ısının etkisiyle plastik malzeme daha akışkan bir hale gelmekte ve takım omzu tarafından eriyen malzemenin kontrolü zorlaşmaktadır.

Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde, takım ilerleme hızının önemli bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7.6 b' de 4000 devir/dk. takım dönme hızında, sabit dalma ve bekleme süresinde (90 sn.), 20, 30, 40 ve 50 mm/dk. takım ilerleme hızlarında SKK ile birleştirilen PE numunelere ait eğme mukavemet değerleri verilmiştir. Şekilden takım ilerleme hızının artmasına bağlı olarak 20-40 mm/dk. ilerleme hızları arasında eğme mukavemet değerinin düştüğü, 40 mm/dk. ilerleme hızından sonra tekrar yükseldiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar çekme deney sonuçlarıyla benzerlik göstermesi açısından beklenen bir durumdur. Bu durumun takım ilerleme hızına bağlı olarak kaynak esnasında ortaya çıkan ısı ve kaynak bölgesinin karışımına bağlı olarak oluşan termal davranış farkından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7.6 a) Dalma ve bekleme süresinin PE'nin eğme mukavemeti üzerindeki etkisi



Şekil 7.6 b) Kaynak takımı ilerleme hızının PE'nin eğme mukavemeti üzerindeki etkisi

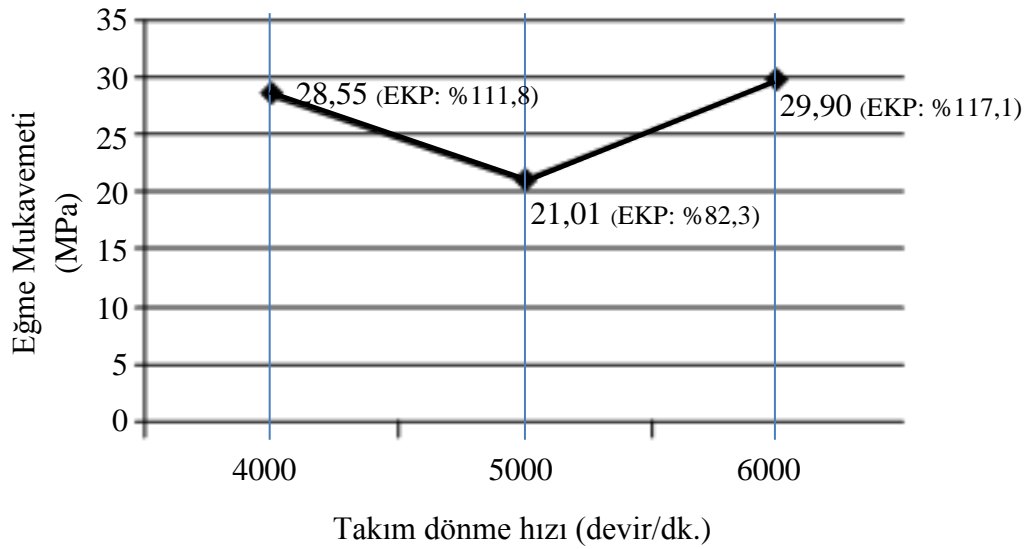
Şekil 7.6 Kaynak parametrelerinin PE mnumuneler üzerindeki etkisi

Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde, takım dönme hızı ve takım geometrisinin SKK kaynak eğme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Takım dönme hızının etkisini belirlemek amacıyla 2M takımı (Şekil 6.10, Tablo 6.3) kullanılarak, sabit parametre değerlerinde (başlangıçta 5,75 mm dalma derinliğinde 30 sn. dalma ve bekleme, 20 mm/dk. takım ilerleme hızında) takım dönme devirleri sırasıyla 4000, 5000 ve 6000 devir/dk. artırılarak PE malzemelerin SKK birleştirilmesi sonrasında elde edilen mukavemet değerleri Şekil 7.7 a' da gösterilmiştir. Birleştirme işlemi sonunda en yüksek eğme mukavemet değeri (29,90 MPa) 6000 devir/dk., en düşük mukavemet değeri (21,01 MPa) 5000 devir/dk.' da elde edilmiştir. Takım ilerleme hızlarındakine benzer bir şekilde dönme devrinin artırılmasıyla eğme mukavemet değeri düşmüş, sonrasında ise yükselmiştir. Bu durumun takım ilerleme hızıyla dönme devri arasındaki ilişkiden kaynaklandığı ve buna bağlı olarak kaynak bölgesinde oluşan sıcaklık değerlerinin kaynak bölgesinin karışımı ve nüfuziyeti üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde takım dönme hızının artması ya da azaltılmasıyla kaynak mukavemet değerlerinin artıp, azalacağı gibi genel bir değerlendirme yapmak tek başına yeterli olmamaktadır. Daha sağlıklı bir değerlendirme yapılabilmesi için, takım ilerleme hızı, takım geometrisi,

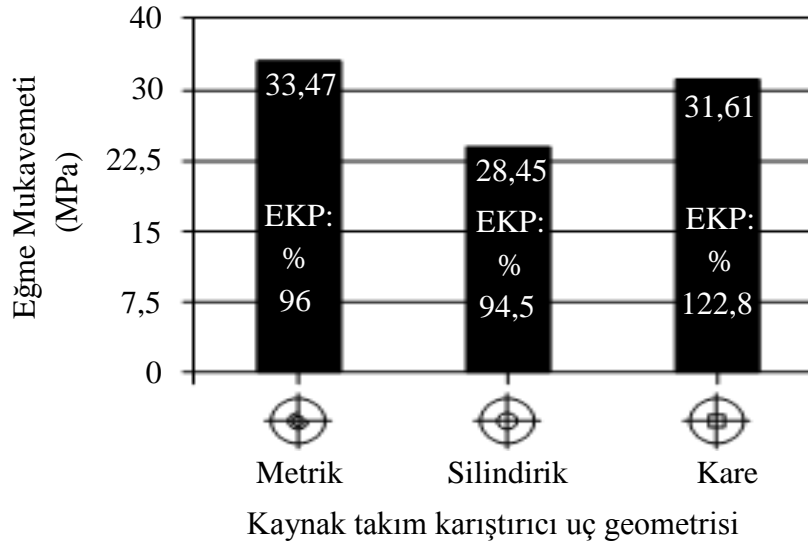
takım uç ve omuz çapı, dalma ve bekleme süresi gibi diğer parametrik değerlerinde göz önünde bulundurulması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Şekil 7.7 b' de takım geometrisinin etkisi açısından elde edilen eğme mukavemet değerleri karşılaştırılmıştır. En yüksek eğme mukavemet değeri (33,47 MPa) geleneksel alüminyum stili takımlarla yapılan birleştirme işlemlerinden, en düşük eğme mukavemet değeri (28,45 MPa) silindirik uçlu takımlarla yapılan birleştirme işlemlerinden elde edilmiştir. Bu durumun birleştirme bölgesindeki karışım ve kaynak nüfuziyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Birleştirme bölgesinde daha iyi karışım sağlayan takımlarla yapılan birleştirme işlemlerinden daha yüksek kaynak performansları elde edileceği bir tez olarak öne sürülebilir. Metrik ve kare uçlu takımlar, silindirik uçlu takımlara göre birleştirme bölgesinde daha iyi bir karışım sağlamaktadır. Metrik ve kare uçlu takımlarla yapılan birleştirmelerin eğme mukavemet değerleriyle, silindirik uçlu takımlarla yapılan birleştirmelerin eğme mukavemet değerlerinin karşılaştırılması (Şekil 7.7 b) öne sürdüğümüz tezi destekler niteliktedir.



Şekil 7.7 a) Takım dönme hızının PE'nin eğme mukavemeti üzerindeki etkisi



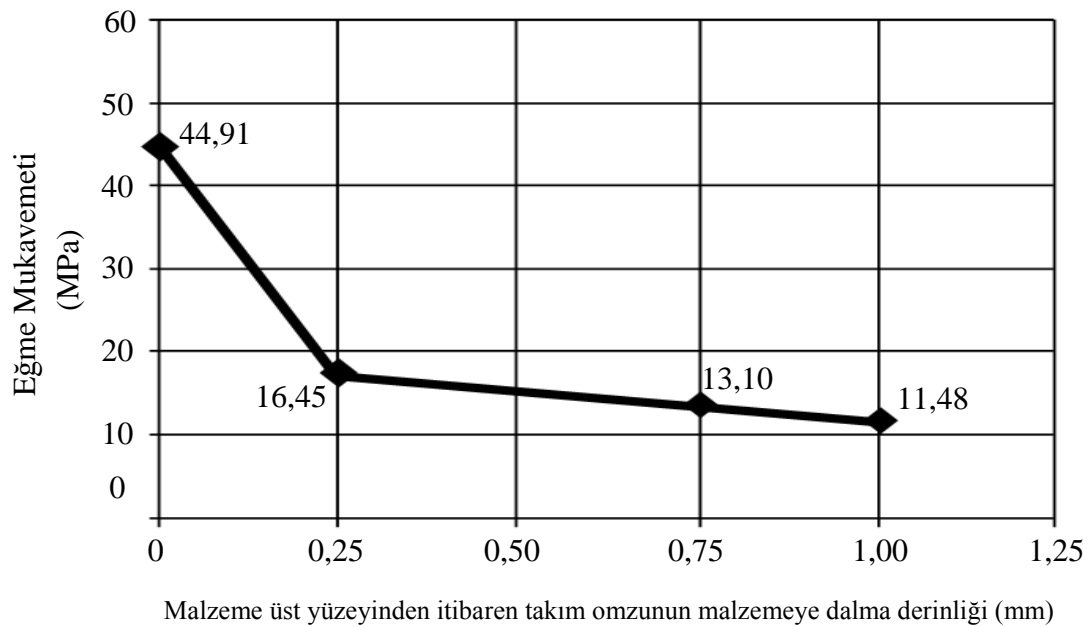
Şekil 7.7 b) Kaynak takım geometrisinin PE'nin eğme mukavemeti üzerindeki etkisi

Şekil 7.7 Takım dönme hızının ve karıştırıcı uç geometrisinin PE numunelerin eğme mukavemeti üzerindeki etkisi

Tablo 7.4' te 5400 devir/dk. takım dönme devri, 25 mm/dk. takım ilerleme hızı ve takım omzu dalma derinliği artırılarak (0/0,25/0,75/1 mm) SKK ile birleştirilmiş PP numunelere ait eğme deney sonuçları verilmiştir. Şekil 7.8' de, Tablo 7.4' te verilen eğme mukavemet değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Takım omzu malzeme yüzeyine paralelken (dalma derinliği=0 mm) yapılan birleştirme işleminden % 83 oranında bir kaynak performansı ile en yüksek eğme mukavemet değeri (44,90 MPa) elde edilmiştir. % 21,2' lik bir kaynak performansı ile en düşük eğme mukavemet değeri (11,48 MPa), takım omzunun 1 mm olduğu birleştirme işleminden elde edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında referans numuneye ait eğme mukavemet değerinin (54,10 MPa), takım omzu batma derinliğinin artmasına bağlı olarak azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum takım omzu dalma derinliğinin artmasıyla birleştirme bölgesinden daha fazla malzeme kaybı oluşması ve takım omzunun birleştirme bölgesinde yaptığı baskının artmasıyla takım ilerleme yönünün tersinde meydana gelen kaynak boşluğunun (Şekil 7.3) PP levhaların SKK ile birleştirilmesinde bir dezavantaj oluşturduğu şeklinde açıklanabilir.

Tablo 7.4 PP numunelere ait eğme deney sonuçları

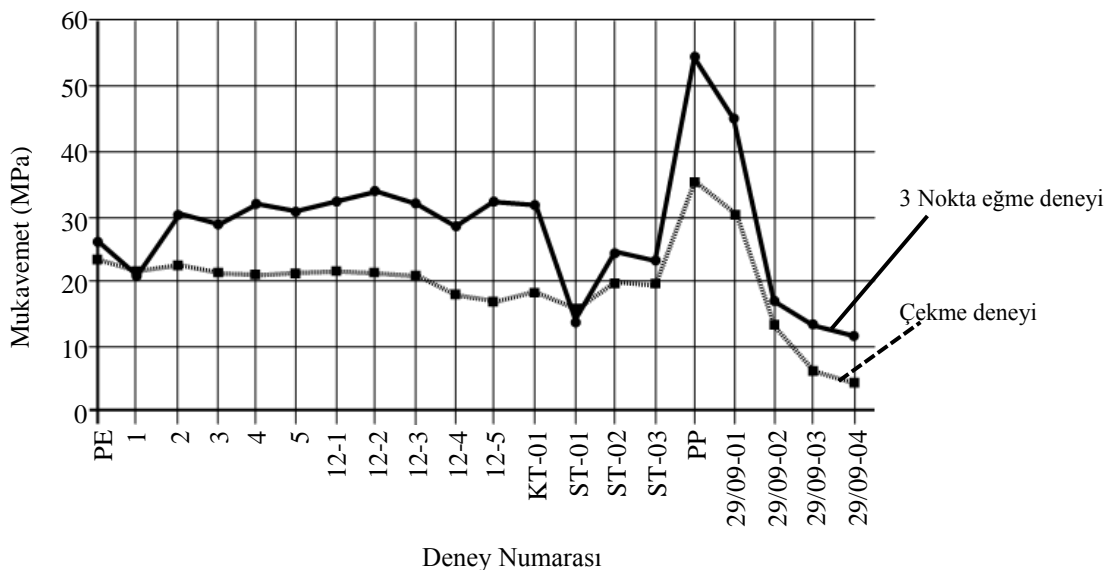
Deney KoDU	Eğme Mukavemeti MPa	Eğme Performansı %	Standart Sapma	Eğme Akma Mukavemeti MPa	Akma Uzaması %	Kristal lamel Kalınlığı (λ nm)	Kristallenme % X_c
PP Referans Numune	54,10	100	0,48	47,10	7,50	37,5	41,2
29/09-01	44,91	83,0	1,35	31,70	5,10	55,1	30,0
29/09-02	16,45	30,4	2,22	22,61	1,32	49,1	32,0
29/09-03	13,10	24,2	2,02	18,51	0,95	63,5	31,3
29/09-04	11,48	21,2	0,96	14,77	0,87	63,5	31,6



Şekil 7.8 Takım omzu dalma derinliğinin PP numunelerin eğme mukavemeti üzerindeki etkisi

Tablo 7.5 ve Tablo 7.6 ve Şekil 7.10' dan da görüldüğü gibi; PP malzemenin kaynak sonrası yapısının PE' ye göre daha sert olması ve PE eğme mukavemetiyle benzer sonuçları göstermemesi, termoplastiklerin SKK' ında malzeme türünün kaynak performansı üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 7.9' da SKK uygulanmış PE ve PP 'ne ait 3 nokta eğme ve çekme deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Grafikten de görülebileceği gibi malzemelerin eğme mukavemeti,

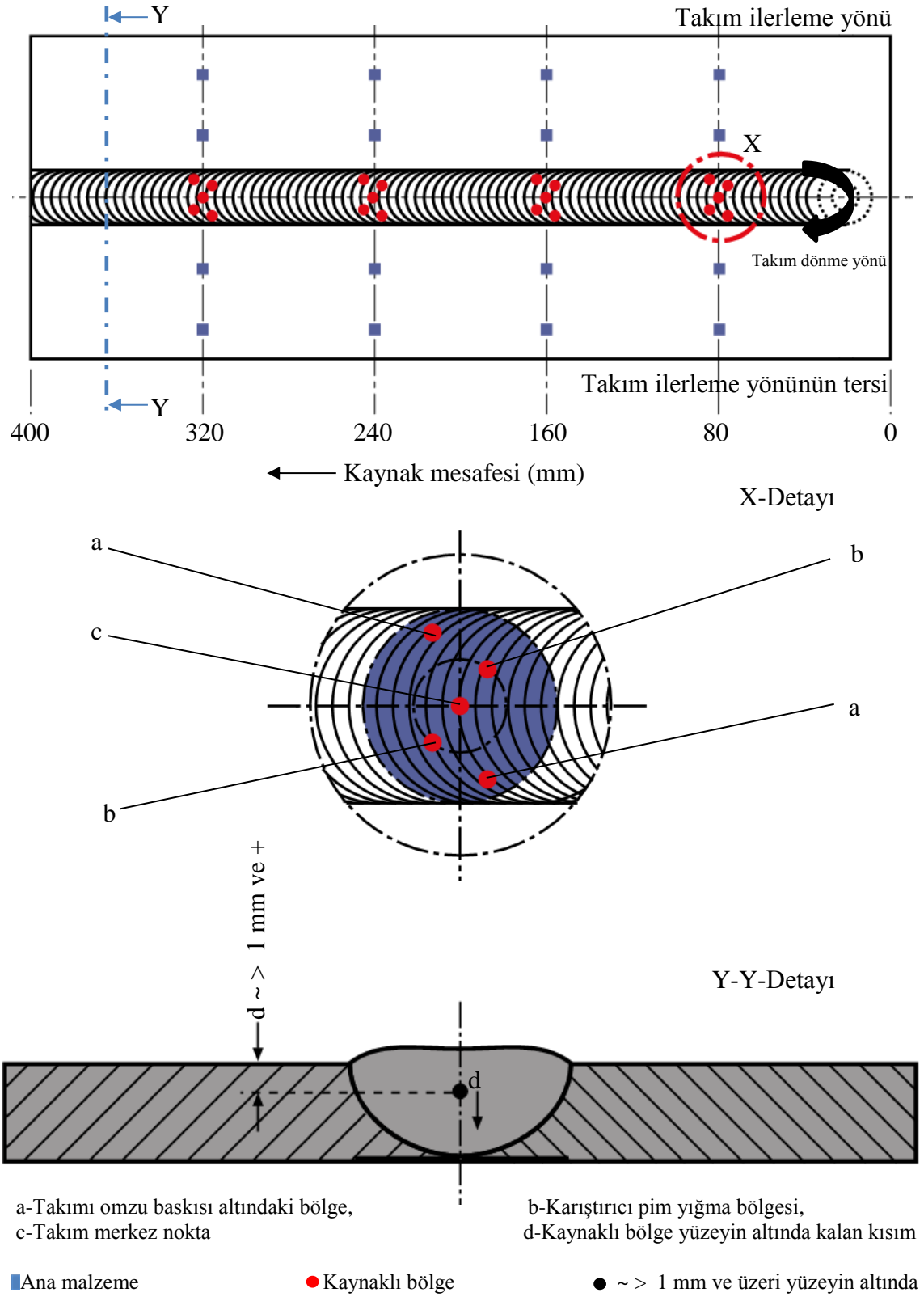
çekme mukavemetine göre yüksek olarak gerçekleşmektedir. Genel olarak SKK uygulanmış PE ve PP numunelerin çekme mukavemeti referans numunelerin çekme mukavemetinden daha düşük değerlere sahiptir. Eğme mukavemeti açısından incelendiğinde; PE için eğme mukavemeti genellikle ana malzemenin eğme mukavemetinden yüksek olurken, PP için mukavemeti genellikle ana malzemenin eğme mukavemetinden düşük değerlere sahip olmaktadır. Bu durum PP malzemenin, PE ' den daha sert ve gevrek bir malzeme olması şeklinde açıklanabilir.



Şekil 7.9 PE ve PP termoplastik numunelerin eğme ve çekme deney sonuçlarının karşılaştırılması

7.3. PE ve PP Levhaların Sertlik Deneyi Sonuçları

Kaynaklı bölge ve ana malzeme üzerinde kaynak sonrası sertlik ölçümleri Şekil 7.10'da gösterildiği gibi ASTM D2240 Shore D tipi skala takılı durometre aracılığıyla ölçülmüştür. Ölçüm öncesi kalibre mastar yardımıyla skalanın kalibrasyonu kontrol edilmiş ve mastara uygun değerler elde edilmiştir.



Şekil 7.10 Sertlik ölçüm noktaları

Tablo 7.5' te PE ve PP malzemeler için takım omzunun altında kalan bölgeden ve yüzeyin 1 mm altında ana malzeme ve kaynaklı bölgeye ait Şekil 7.10' da gösterildiği şekilde ölçülen ve aritmetik ortalaması alınan sertlik değerleri yer almaktadır. Tablo 7.5' de verilen sonuçlara göre birleştirme bölgesinde takım omzu altında kalan yüzeylerde PP malzemeler için kaynak sonrası minimum % 13, maksimum % 18, PE malzemeler içinse minimum % 6, maksimum % 12 gibi bir sertlik artışı söz konusudur. SKK ile yapılan birleştirme sonrası kaynaklı bölgenin üst yüzeylerinde sertlikte bir artış meydana gelmektedir. Ancak sertlik artışı, kaynak parametreleri ve takım geometrisi gibi özelliklere bağlı olarak değişmektedir. Örnek olarak KT-01 ve ST-02 nolu deneylerde PE malzeme için en yüksek sertlik artışı meydana gelmiştir. Tablo 7.6' da gösterildiği gibi kaynak parametreleri karşılaştırıldığı zaman takım ilerleme hızı ve takım geometrisinin farklı olmasına rağmen sertlik artışındaki sonuç aynı olmaktadır. Yine aynı şekilde ST-01 ve ST-02 nolu deneyler karşılaştırıldığında takım ilerleme hızı harici tüm parametre değerlerinin aynı olmasına rağmen kaynaklı bölgenin üst yüzey sertliğindeki artış miktarları farklılık göstermektedir.

Tablo 7.5' de görüldüğü gibi yapılan sertlik ölçümlerinde sertlik değerinin yüzey ve yüzeyin 1 mm altında farklı olduğu tespit edilmiştir. İşlem görmemiş PE ve PP termoplastik levhalarda bu duruma hızlı soğutmanın neden olduğu düşünülmektedir. Hızlı soğutmanın malzeme yüzeyinde sertleşmeye neden olması beklenen bir durumdur ve ölçüm sonuçları da bunu desteklemektedir. SKK ile birleştirilen termoplastik levhalarda ise yüzey ve yüzeyin 1 mm altında daha fazla fark olmasının kaynak takımı omuz kısmının malzeme üst yüzeyine yaptığı baskıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 7.52 ve Şekil 7.53' te verilen SEM görüntüleri bu durumu desteklemektedir. Görüntülerde birleştirme bölgesi üst yüzeyine yakın kısımlarda daha gevrek ve daha sert bir yapının varlığı görülmektedir. Birleştirme bölgesi üst yüzeyinden aşağıya doğru alt kısımlarda ise gevrek ve sünek yapıların bir arada olduğu bölgeler görülmektedir.

Elde edilen sertlik ölçüm sonuçları, DSC sonuçlarından elde edilen kristallenme oranları (Tablo 7.12) ile karşılaştırıldığında birleştirme bölgesindeki kristallenme oranlarının sertlik üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Kristallenme oranındaki artışın sertliği arttırdığı bilinen bir durumdur. Birleştirme bölgesindeki kristallenme oranlarına göre sertlikte değişmelerin olması beklenen bir durumdur.

Tablo 7.5. PE malzemeye ait sertlik ölçüm sonuçları

Malzeme	Deney Kodu	Referans Numune Sertliği (Shore D)		Kaynaklı Bölge Sertliği (Shore D)			
		Yüzey	1 mm yüzeyin altında	Yüzey	Sertlik Artışı (%)	1 mm yüzeyin altında	Sertlik Artışı (%)
PE	1	50	47	54	7	45	- 4
	2			54	7	42	-11
	3			53	6	43	-9
	4			56	11	41	-13
	5			55	9	42	-11
	12-1			55	9	45	-4
	12-2			56	11	48	+2
	12-3			55	9	46	-2
	12-4			54	7	42	-11
	12-5			55	9	48	+2
	KT-01			57	12	41	-13
	ST-01			54	7	45	-4
	ST-02			57	12	48	+2
	ST-03			56	11	42	-11
PP	29/09-01	55	51	63	18	37	-27
	29/09-02			67	18	40	-22
	29/09-03			63	13	39	-24
	29/09-04			65	15	39	-24

PP malzeme için yapılan 29/09-01, 29/09-02, 29/09-03 ve 29/09-04 kodlu deneylere ait sertlik ölçüm değerleri karşılaştırıldığı zaman takım omzu dalma derinliğinin kaynak bölgesinin sertliği üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Ancak daha sağlıklı bir değerlendirme yapılabilmesi için malzemenin yönlenmesi, kaynaklı bölgenin karışımı gibi faktörleri de göz önünde bulundurmamak gerekmektedir. SEM incelemelerinde (Şekil-7.42) PP malzemelerin SKK ile birleştirilmesi öncesinde kırık yüzeyler sert ve gevrek bir yapıdadır. Kırık yüzeylerinde belirgin bir yönlenme olmadığı ve kayda değer deformasyonlar oluşmadığı görülmektedir. Şekil 7.43, Şekil 7.44 ve Şekil 7.45' de gösterilen 29/09-01 ve 29/09-02 kodlu deneylere ait kaynak sonrası mikroyapı görüntülerinde, kaynak öncesi çekilen mikro yapı görüntüsünden farklı olarak, birleştirme bölgesinde meydana gelen sıcaklık ve basıncın etkisiyle mikroyapıların farklılaştığı ve fibrillerde yönlenme olduğu gözlemlenmektedir. Takım omzu dalma derinliğinin artmasının fibril yönlenmesi üzerinde etkili olduğu ve fibril boylarında

belirgin bir azalma meydana getirdiği görülmüştür. Bu durumun kaynak sonrası oluşan sertlik değerleri üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Tablo 7.6 Sertlik ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan bazı kaynak parametreleri

Deney No	Takım No	Malzeme Kalınlığı (mm)	Takım dalma (mm)	Dalma Bekleme (sn)	Kaynak takımının dönme devri (devir/dk)	Takım İlerleme hızı (mm/dk)
KT-01	14K	6 mm	5,75 mm	90	4000	20
ST-02	9S	6 mm	5,75 mm	90	4000	80
ST-01	9S	6 mm	5,75 mm	90	4000	20
ST-02	9S	6 mm	5,75 mm	90	4000	80
ST-03	9S	6 mm	5,75 mm	90	4000	126
29/09-01	5M	6 mm	5,75 mm	90	5400	25
	29/09-01 nolu birleştirme işleminde takım omzu malzeme yüzeyine paraleldir.					
29/09-02	5M	6 mm	5,5 mm	90	5400	25
	29/09-02 nolu birleştirme işleminde takım omzu malzeme yüzeyine 0,25 mm daldırılmıştır.					
29/09-03	5M	6 mm	5,00 mm	90	5400	25
	29/09-03 nolu birleştirme işleminde takım omzu malzeme yüzeyine 0,75 mm daldırılmıştır.					
29/09-04	5M	6 mm	4,75 mm	90	5400	25
	29/09-04 nolu birleştirme işleminde takım omzu malzeme yüzeyine 1 mm daldırılmıştır.					

Malzeme türü açısından sertlik ölçüm değerleri karşılaştırıldığında, polipropilene ait maksimum ve minimum sertlik artış değerlerinin polietilenden daha yüksek olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu duruma PE'ne göre PP'nin sahip olduğu sert ve gevrek yapısının neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca PP malzemelerin birleştirilmesinde takım omzunun malzeme yüzeyine yaptığı baskının sertlik artışında etkili olduğu görülmektedir.

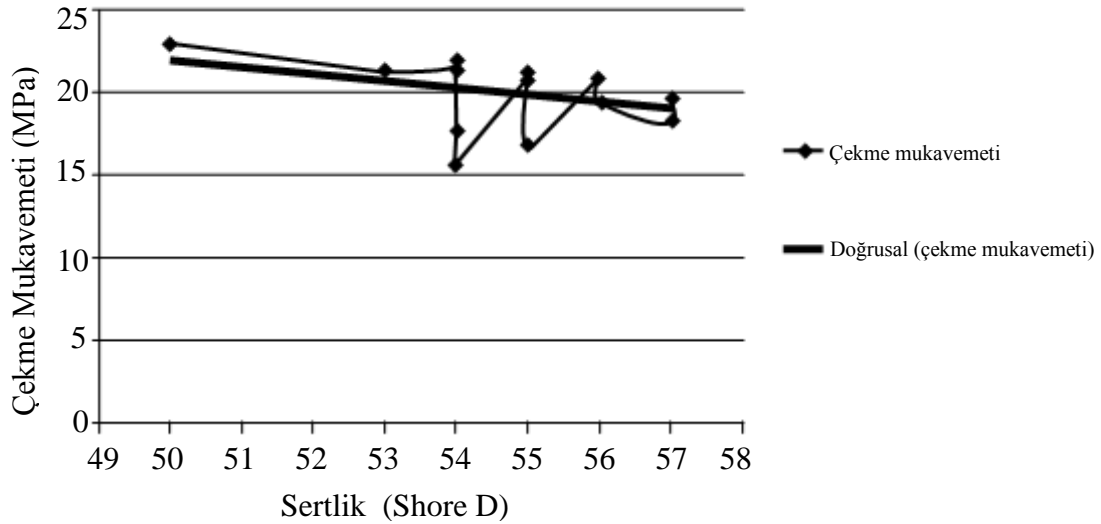
SKK'nın etkisi sertlik ve mukavemet açısından incelendiğinde çeliklerin aksine sertlik değeri arttıkça termoplastikler için çekme mukavemeti azalmaktadır. Tablo 7.5' te yer alan değerlerden faydalanılarak sertlik ve çekme mukavemeti arasındaki ilişki

belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 7.11’de çekme mukavemeti ve sertlik arasındaki bağlantı incelenmiş, ölçülen sertlik değeri ve çekme mukavemet değerlerinden faydalanılarak doğrusal çekme mukavemeti elde edilmiştir. KARÖK-3 olarak isimlendirdiğimiz bu bağıntı ile kaynaklı bölgenin üst yüzey sertliği ölçülerek elde edilecek olan çekme mukavemeti yaklaşık olarak tahmin edilebilmektedir. Söz konusu bağlantı aşağıdaki gibidir:

$$\delta\sigma \text{ (MPa)} = - 0,4176 \times \text{SD} + 42,85 \quad [\text{KARÖK-3}] \quad (7.1)$$

$\delta\sigma$ = Çekme mukavemeti (MPa)

SD = Ölçülen sertlik değeri (Shore D)



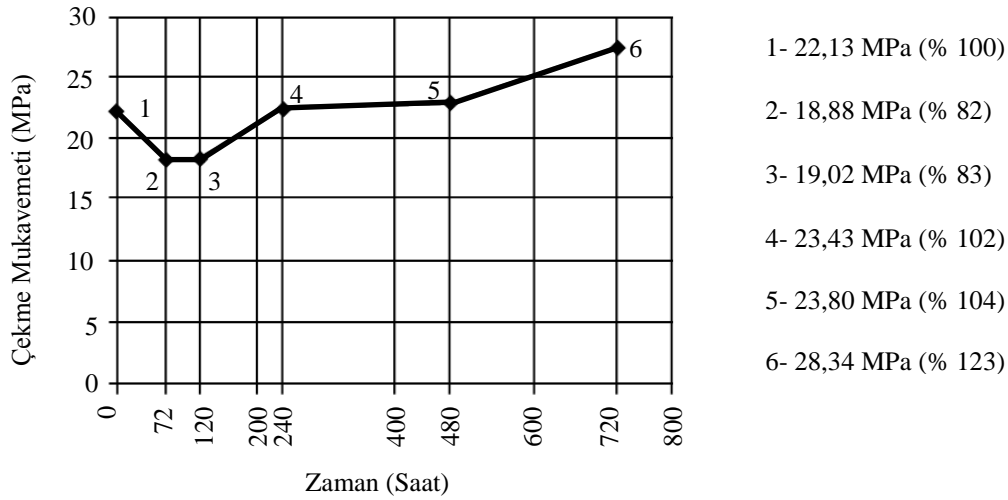
Şekil 7.11 SKK sonrası kaynaklı bağlantı üst yüzey kaynak sertliği ve çekme mukavemeti arasındaki bağıntı

7.4. Hızlandırılmış Isıl Yaşlandırma Deneyi Sonuçları

Genel olarak ısıl yaşlandırma deneyinin sonuçları incelendiğinde, PE malzemeler için standart koşullarda gerçekleştirilen deneylerin oldukça iyi ve tekrarlanabilir sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

SKK uygulaması açısından kıyaslandığında, SKK uygulanmış numuneler ile ana malzeme özellikleri açısından paralellik sağlanabilmektedir. Ancak burada elde edilen sonuçlardan tüm SKK uygulanmış plastikler için genel bir yargıya varılmamalıdır. Sadece diğer plastik türlerinin sıcaklık karşısında gösterebileceği davranışlar için bir referans çalışma olarak kullanılmalıdır.

Şekil 7.12’ de SKK uygulanmamış PE referans numunelerin hızlandırılmış ısı yaşlandırma deney sonuçlarına ait grafik yer almaktadır. PE ana malzemeden alınan numunelerde 50 °C sıcaklıkta ilk 72 saat içerisinde % 18 civarında bir mukavemet kaybı söz konusudur. Ancak zamanla çekme mukavemeti artmaya başlamış 240 saate gelindiğinde başlangıçtaki mukavemet değerlerinin üzerinde çekme mukavemet değerleri elde edilmiştir. 720 saatin sonunda çekme mukavemetinde ısı işlem öncesi duruma göre % 23’lük bir artış meydana gelmiştir.



Şekil 7.12 PE referans numunelerin 50 °C sabit sıcaklıkta zamana bağlı olarak değişen çekme mukavemet değerleri

1,2,3,4 ve 5 kodlu SKK ile birleştirilmiş numunelerin 50 °C sabit sıcaklıkta, hızlandırılmış ısı yaşlandırma deneylerine ait elde edilen sonuçlar Tablo 7.7’ de gösterildiği gibidir. SKK uygulanmış numuneler ile PE referans numunelere ait hızlandırılmış ısı yaşlandırma deneyleri, sonuçlar açısından karşılaştırıldığında SKK

uygulanmış numunelerin referans numuneler ile benzer sonuçlar gösterdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 7.7 PE numunelerin ısıtılma yaşlandırma deneyi sonuçları

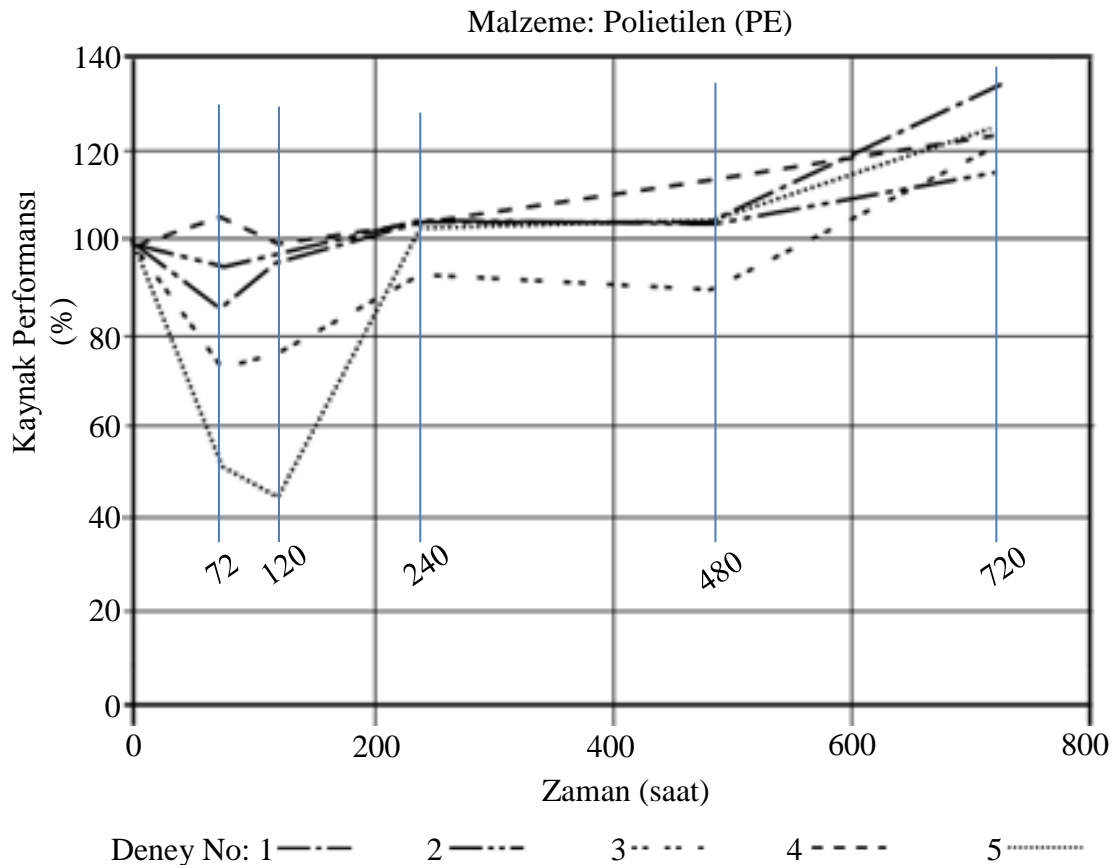
Deney Kodu	İlk Durum	72 Saat	120 Saat	240 Saat	480 Saat	720 Saat
1	21,53 MPa (% 100)	18,28 MPa (% 85)	20,61 MPa (% 96)	22,71 MPa (% 105)	22,54 MPa (% 105)	28,59 MPa (% 133)
2	22,01 MPa (% 100)	21,00 MPa (% 95)	21,45 MPa (% 97)	23,17 MPa (% 105)	22,94 MPa (% 104)	25,23 MPa (% 115)
3	21,27 MPa (% 100)	15,58 MPa (% 73)	16,14 MPa (% 76)	19,92 MPa (% 94)	19,10 MPa (% 90)	25,66 MPa (% 121)
4	20,83 MPa (% 100)	22,05 MPa (% 106)	20,84 MPa (% 100)	21,50 MPa (% 103)	23,65 MPa (% 114)	25,55 MPa (% 123)
5	21,04 MPa (% 100)	10,84 MPa (% 52)	9,47 MPa (% 45)	21,57 MPa (% 103)	22,12 MPa (% 105)	26,34 MPa (% 125)

Tablo 7.7 ve Şekil 7.13' te de görüldüğü gibi 72 saat boyunca hızlandırılmış ısıtılma yaşlandırma deneyine tabii tutulan tüm SKK uygulanmış numuneler, 4 kodlu deney haricinde başlangıçtaki mukavemet değerlerine göre daha düşük bir değere sahip olmuştur. 120 saate gelindiğinde 4 ve 5 kodlu deneylerde çekme mukavemetinde düşme, 1,2 ve 3 kodlu deneylerde ise ilk 72 saate oranla çekme mukavemetinde artış meydana gelmiştir. 240 saate gelindiğinde çekme mukavemet değeri tüm deneyler için (1-5) artmış ve 720 saat sonunda minimum % 115 (2 kodlu deney) ve maksimum % 133 (1 kodlu deney) bir artış söz konusudur. Hızlandırılmış ısıtılma yaşlandırma deneyi uygulanmış numunelerin zaman bağılı olarak kaynak performansındaki değişimler Şekil 7.13' te gösterildiği gibidir.

PE referans numunelere ve 2 kodlu deneye ait kaynaklı bağlantı numunelerine ısıtılma işlem uygulanmadan önce, 120, 240 ve 720 saat sonunda DSC deneyi uygulanmıştır. Isıtılma işlem uygulanmadan önce referans numunelerin kristallenme oranı % 54,6 ve kristal lamel kalınlığı 14,5 nm olarak ölçülmüştür. 2 kodlu deneye ait numunede ise kristallenme oranı % 49, kristal lamel kalınlığı ise 15,5 nm olarak ölçülmüştür. Isıtılma işlem öncesi ana malzemenin kristallenme oranı kaynaklı bağlantıya göre daha yüksek, kristal lamel kalınlığının ise düşüktür.

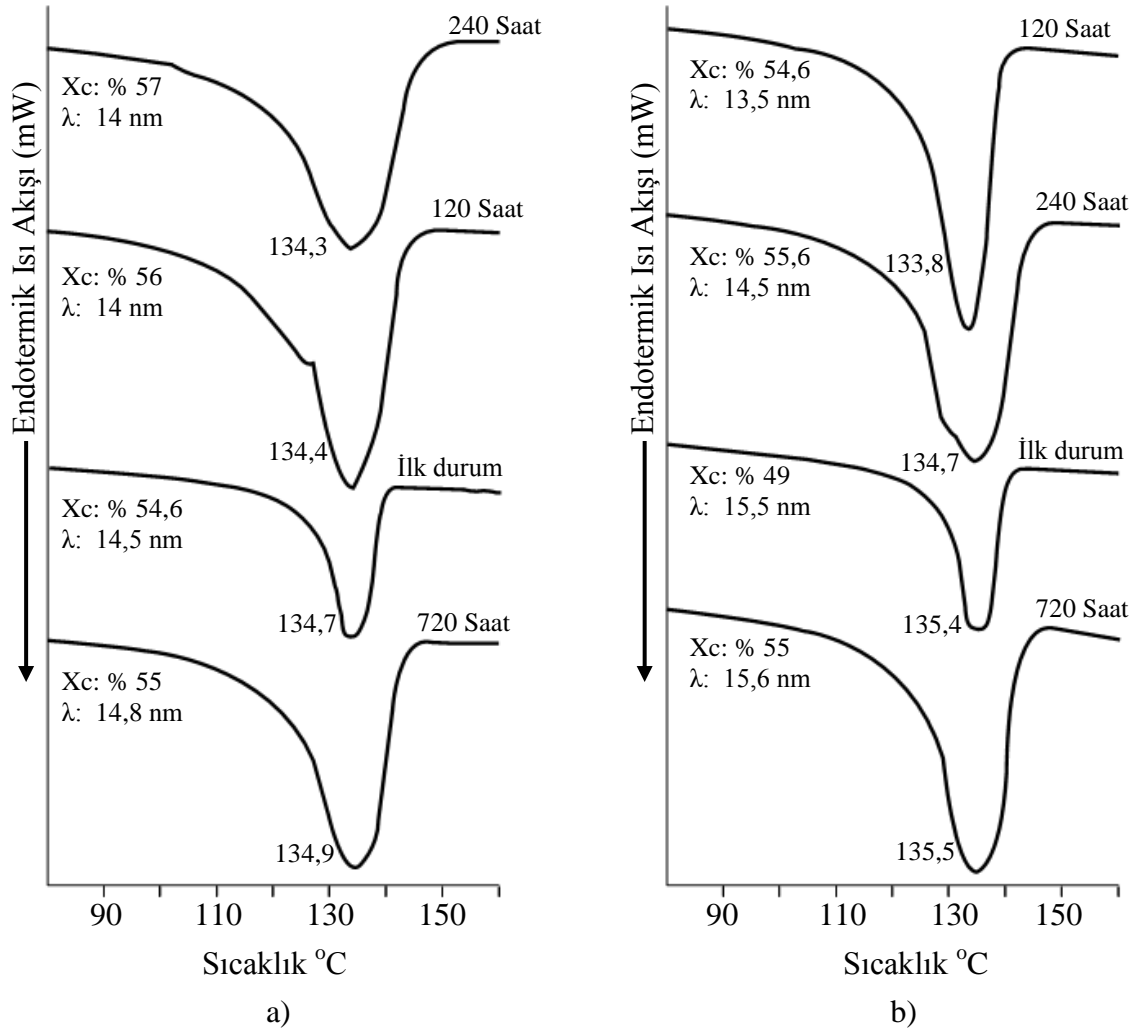
50 °C' de uygulanan ısı yaşlandırma işleminde 120 saat sonunda her iki numune grubu içinde kristallenme oranının artmış ve kristal lamel kalınlığı ise düşmüştür. 120 saat sonunda kaynaklı bağlantıda kristallenme oranının artışı ve kristal lamel kalınlığının azalması ana malzemeye oranla daha yüksek olarak gerçekleşmektedir. 240 saate gelindiğinde referans numunelerde ve kaynaklı bağlantıdan alınan numunelerde, kristallenme oranlarındaki ve kristal lamel kalınlıklarındaki artış devam etmiştir. 720 saat sonunda her iki numune grubu içinde kristallenme oranı ve kristal lamel kalınlığı ısı işlem uygulanmadan önceki duruma yakın olarak gerçekleşmiştir.

Sıcaklığın etkisi ile kristallenme oranında ve kristal lamel kalınlıklarında meydana gelen değişiklikler; ısı etkisiyle amorf bölgelerdeki molekül zincirlerinin hareketlenmeye başlaması ve sonrasında malzemede yeni kristal yapıların oluşmasıyla açıklanabilir.



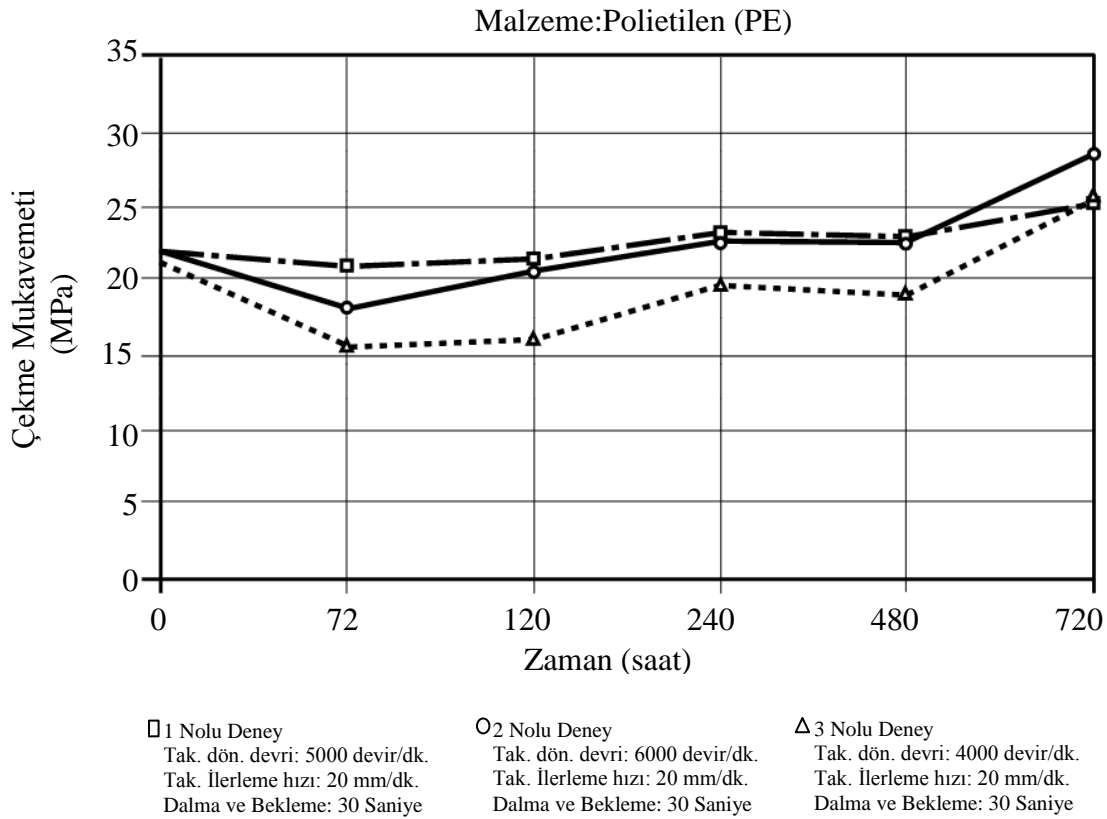
Şekil 7.13 Hızlandırılmış ısı yaşlandırma deneyi uygulanmış SKK numunelerinin zamana bağlı olarak kaynak performansında meydana gelen değişimler

Şekil 7.14' te verilen DSC eğrilerinde erime sıcaklıkları açısından PE referans numuneler ve kaynaklı bağlantı numuneleri karşılaştırıldığında erime sıcaklıklarındaki değişimlerin her iki numune grubu içinde aynı şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Isıl işlem uygulanmadan önce referans numunenin erime sıcaklığı 134,7 °C, 2 kodlu deneye ait kaynaklı bağlantının erime sıcaklığı ise 135,4 °C'dir. 120 ve 240 saat sonunda erime sıcaklıklarında düşme, 720 saat sonunda ise her iki numune grubu içinde artış meydana gelmiştir. Erime sıcaklık değerleri (T_m), kristallenme oranları (X_c) ve kristal lamel kalınlıkları (λ) ile uyumluluk göstermektedir. Kristallenme oranlarında ve kristal lamel kalınlıklarında meydana gelen değişimlerin erime sıcaklığını etkilemesi beklenen bir durumdur.

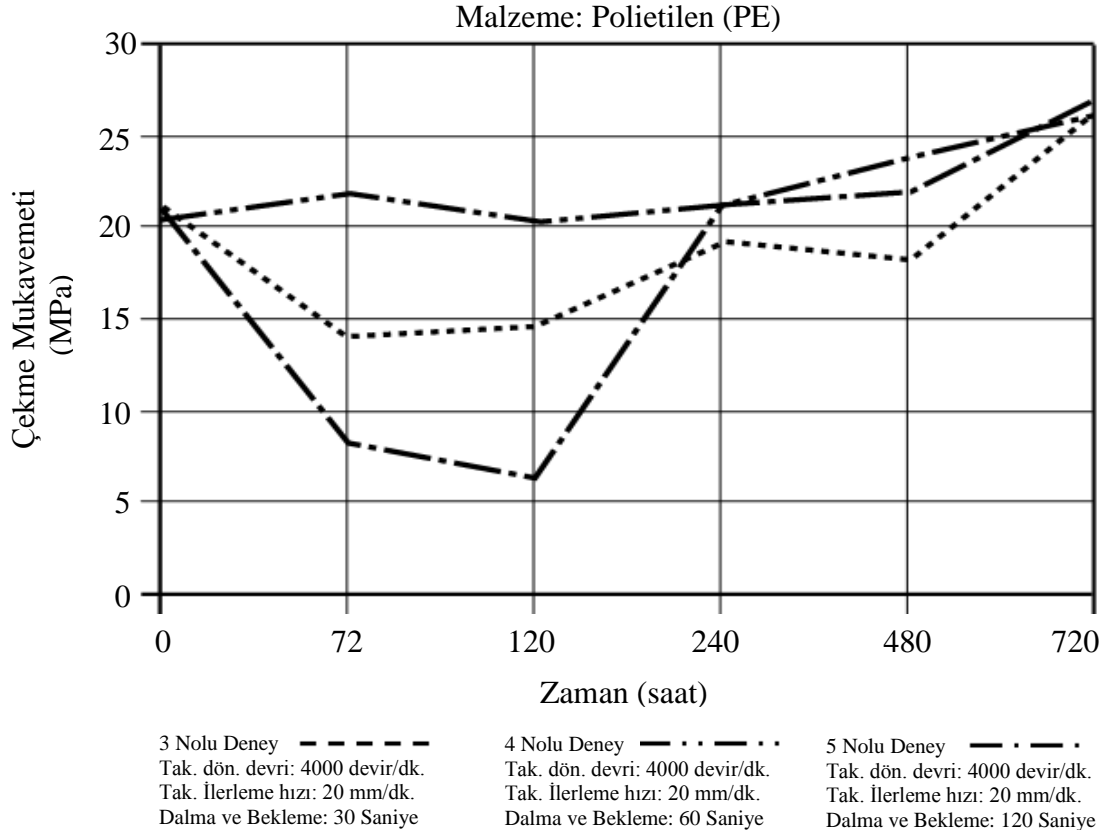


Şekil 7.14 PE hızlandırılmış ısıl yaşlandırma deneyine ait DSC eğrileri, a) Referans numuneler, b) 2 kodlu deneye ait kaynaklı bölgeden alınmış numuneler

Isıl yaşlandırma deneyi uygulanmış numuneler SKK performansı açısından takım dönme devrine (devir/dk.) göre incelendiğinde 5000 devir/dk. için en yüksek SKK kaynak performansı elde edilmiştir. Tüm deneyler (1,2 ve 3 kodlu deneyler) 50 °C sabit sıcaklıkta, takım ilerleme hızı 20 mm/dk. ve kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süresi 30 mm sabit kalacak şekilde devir hızı değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süresi açısından incelendiğinde, dalma ve bekleme süresinin artmasına bağlı olarak SKK performansının da arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 7.15’ te SKK kaynağında takım dönme hızının SKK performansı üzerindeki etkisi, Şekil 7.16’da ise SKK kaynağında dalma ve bekleme süresinin SKK ile birleştirilmiş ve hızlandırılmış ısıl yaşlandırma deneyi uygulanmış çekme numuneleri üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

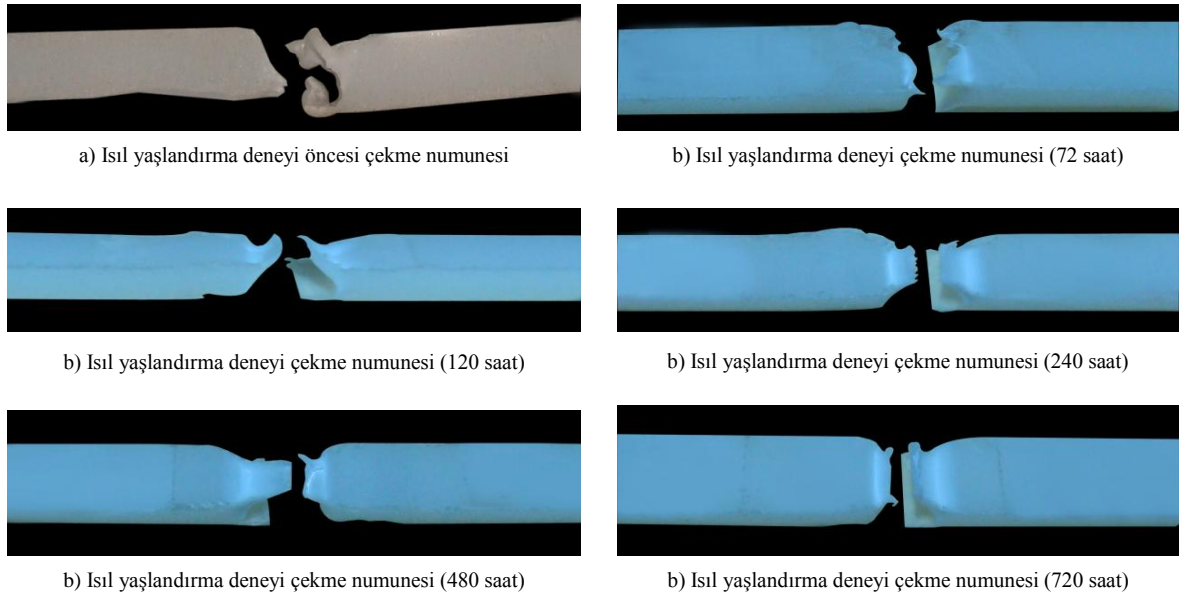


Şekil 7.15 Hızlandırılmış ısıl yaşlandırma deneyi uygulanmış SKK numunelerinin zamana bağlı olarak çekme mukavemetinde takım dönme devrinin etkisi



Şekil 7.16 Hızlandırılmış ısı yaşlandırma deneyi uygulanmış SKK numunelerinin zamana bağlı olarak çekme mukavemetinde dalma ve bekleme süresinin etkisi

Hızlandırılmış ısı yaşlandırma deneyi uygulandıktan sonra çekme testine tabi tutulan 1 kodlu deney numunelerine ait kopma şekilleri Şekil 7.17’ de gösterildiği gibidir. Isıl işlem sonrası genel olarak tüm deneyler için (Deney Kodu:1,2,3,4,ve 5) ısıl deney süreleri eşit olan çekme deney numunelerinin kopma şekilleri Şekil-7.17’ de olduğu gibi birbiri ile benzerlik göstermektedir. Isıl yaşlandırma deneyi öncesi birleştirme bölgesinin orta kısmından başlayarak alt kısımlara doğru ilerleyen kopma şekli, ısıl işlem sonrası birleştirme bölgesinin orta kısmından her iki yöne uzayarak gerçekleşmektedir. Kopma şekillerindeki bu değişiklik birleştirme işlemi sonrası yarı-stabil kristallerde mevcut olan gerilmelerin, ısının etkisiyle giderildiği ve birleştirme bölgesindeki kristal yapının daha düzenli bir hal alması şeklinde açıklanabilir. Isıl ortamda kalma süresiyle paralel olarak mekanik özelliklerdeki iyileşmenin kristal yapının daha düzenli bir hal almasından kaynaklandığını ve SKK ile yapılan birleştirme işlemleri sonrasında termoplastiklerin ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda tavllanmasıyla mekanik özelliklerinin iyileştirilebileceğini öngörüyoruz.



Şekil 7.17 Isıl yaşlandırma deneyi uygulanmış 1 kodlu deneye ait çekme numuneleri

7.5. VICAT Yumuşama Sıcaklığı Deneyi Sonuçları

Termoplastiklerin katı halden sıvı hale geçerken kesin bir erime sıcaklıkları yoktur. Bu nedenle erime sıcaklığı yerine VICAT kullanılmaktadır. VICAT termoplastiğin yumuşamaya başladığı sıcaklıktır. Standart batma ucunun yük altında SKK ile birleştirilmiş test numunesine 1 mm battığı sıcaklık VICAT sıcaklığı olarak kayıt edilmiştir. VICAT deneyi ile SKK uygulanmış PE numunelerin SKK öncesi ve SKK sonrası yumuşama sıcaklıkları ölçülmüş ve oluşan farklılıklar belirlenmeye çalışılmıştır.

PE referans numuneler için birleştirme öncesi yapılan testlerde VICAT yumuşama sıcaklığı 130 °C olarak (Tablo 7.8) ölçülmüştür. SKK ile birleştirilen PE numunelerde birleştirme sonrası yapılan testlerde VICAT yumuşama sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Meydana gelen bu artış çok yüksek olmamakla birlikte 2-4 °C arasında değişiklik göstermektedir. Tablo 7.8’ de SKK ile birleştirilen PE numunelere ait ölçülen VICAT yumuşama sıcaklık değerleri yer almaktadır. Deneyler esnasında batma iğnesi sıcaklık ~90 °C ye geldiğinde numune yüzeyine batmış ve 120 °C’ye gelinceye kadar batma hızı normal bir seyir izlemiş, sıcaklık 130 °C’ yi geçtikten sonra batma hızı artmıştır.

Tablo 7.8 PE numuneler için VICAT yumuşama sıcaklık değerleri

Deney No	Ortalama VICAT Sıcaklık Değeri (°C)	1.Numune (°C)	2.Numune (°C)	3.Numune (°C)
Referans Numune	132,0	132,0	132,0	132,0
1	132,5	132,6	132,4	132,5
2	133,6	133,6	133,7	133,5
3	132,3	132,3	132,3	132,3
4	132,1	132,3	131,8	132,2
5	132,1	132,0	132,2	132,1
12-1	132,2	132,4	132,0	132,2
12-2	132,3	132,3	132,5	132,1
12-3	132,2	132,5	132,0	132,1
12-4	128,6	128,4	128,6	128,8
12-5	128,7	128,7	128,7	128,7
KT-01	132,0	132,2	131,8	132,0
ST-01	133,0	133,0	133,0	133,0
ST-02	133,5	133,5	133,7	133,3

PP referans numuneler için birleştirme öncesi yapılan testlerde VICAT yumuşama sıcaklığı 158,8 °C olarak (Tablo 7.9) ölçülmüştür. SKK ile birleştirilen PP numunelerde birleştirme sonrası yapılan testlerde VICAT yumuşama sıcaklığının düştüğü gözlemlenmiştir. Meydana gelen bu düşüş çok yüksek olmamakla birlikte 2-4 °C arasında değişiklik göstermektedir. Tablo 7.9’ da SKK ile birleştirilen PP numunelere ait ölçülen VICAT yumuşama sıcaklık değerleri yer almaktadır.

Tablo 7.9 PP numuneler için VICAT yumuşama sıcaklık değerleri

Deney No	Ortalama VICAT Sıcaklık Değeri (°C)	1.Numune (°C)	2.Numune (°C)	3.Numune (°C)
Referans Numune	158,8	158,7	158,9	158,8
29/09-02	153,5	153,3	153,6	153,6
29/09-03	155,9	155,9	156,0	155,8
29/09-04	154,9	154,9	154,8	155,0

PP numuneler için VICAT yumuşama sıcaklığı deneylerinde batma iğnesi sıcaklık 130 °C ye geldiğinde numune yüzeyine batmaya başlamış ve sıcaklık 150 °C’ yi geçtikten

sonra ise batma derinliği hızlanarak artmıştır. SKK ile birleştirilmiş PP numuneler için VICAT yumuşama sıcaklığı deneylerinde batma iğnesi sıcaklık 126 °C ye geldiğinde numune yzeyine batmış, sıcaklık 145 °C' yi geçtikten sonra ise batma derinliği hızlanarak artmıştır.

7.6. Isıl Deformasyon Deneyi (HDT) Sonuçları

PE malzemeden birleştirme işlemi nncesinde alınan referans numuneler ve birleştirme sonrası kaynaklı bağlantıdan alınan numuneler ısı ve sabit bir yk altında HDT testine tabi tutulmuş ve numunelerin 0,35 mm eğme gsterdiği sıcaklık HDT sıcaklığı olarak kayıt altına alınmıştır.

HDT testi sıcaklığa, uygulanan kuvvete, numune geometrisine, ısıtma hızına ve seçilen eğme değerine bağlı olarak değişiklik gstermektedir. PE numunelere HDT testi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar birbiri ile karşılaştırılarak SKK' nın termal ozellikler üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. HDT testi ile termal ozellikler kesin olarak belirlenebildiği için HDT testinde elde edilen sonuçlar oldukça nemilidir.

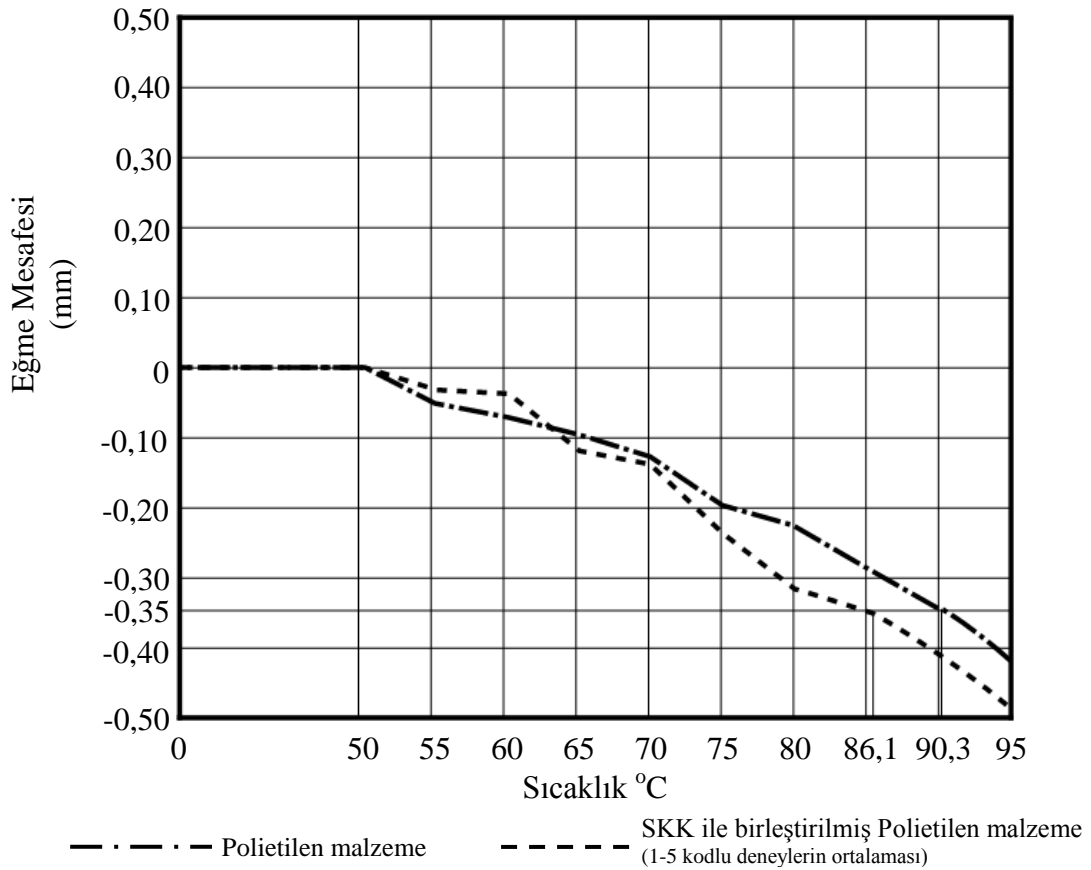
SKK ile birleştirme nncesi PE referans numuneler ısı ile sabit yk altında ortalama 90,3 °C' de 0,35 mm eğilmiştir. SKK ile birleştirme işlemi sonrasında 1,2,3,4 ve 5 kodlu deneylerden alınan numuneler için, ısı ile sabit yk altında 0,35 mm eğme ortalama 86,1 °C' de meydana gelmiştir. SKK ile birleştirme işlemi sonrası kaynaklı bnlgenin sabit yk altında deformasyon sınırında ~4 °C'lik bir azalma söz konusudur.

HDT testi ile elde edilen sonuçlara göre; SKK ile birleştirilen malzemelerde, SKK ile birleştirme işlemi nncesine göre termal ozelliklerinde kkte olsa bir değişme olduğu ve ısıya bağlı olarak deformasyon sınırı ana malzemeye göre daha düşük olabileceği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan termoplastiklerin tamamı için genel bir yargıya varılması söz konusu değildir. Ancak SKK ile birleştirme yapılması düşünülen tasarımlarda malzemelerin termal ozelliklerinde bir değişme olduğunun göz nnde bulundurulmasının gerekliliğini gstermiştir. Tablo 7.10' da SKK ile birleştirme işlemi nncesi ve sonrasında HDT testine tabi tutulan PE numunelerin sıcaklığa bağlı olarak ollen eğme değerleri verilmiştir. Tabloda SKK ile birleştirilmiş numuneler için ortalama sıcaklık değerleri belirtilmiştir. Ortalama sıcaklık değerleri 1-5 nolu deneylerin HDT testinden elde edilmiştir. şekil 7.18' de ise Tablo 7.10'a göre çizilen eğme grafiği

gösterilmiştir. SKK ile birleştirilmiş polietilen malzemenin 55-65 °C arasındaki sıcaklıklarda eğme mesafesi 1 ve 5 kodlu deneyler için farklılık göstermiş, 65 °C üzerindeki sıcaklıklarda ise benzer bir seyir izlemiştir.

Tablo 7.10 PE numuneler için sabit yük altında sıcaklığa bağlı olarak oluşan eğme değerleri

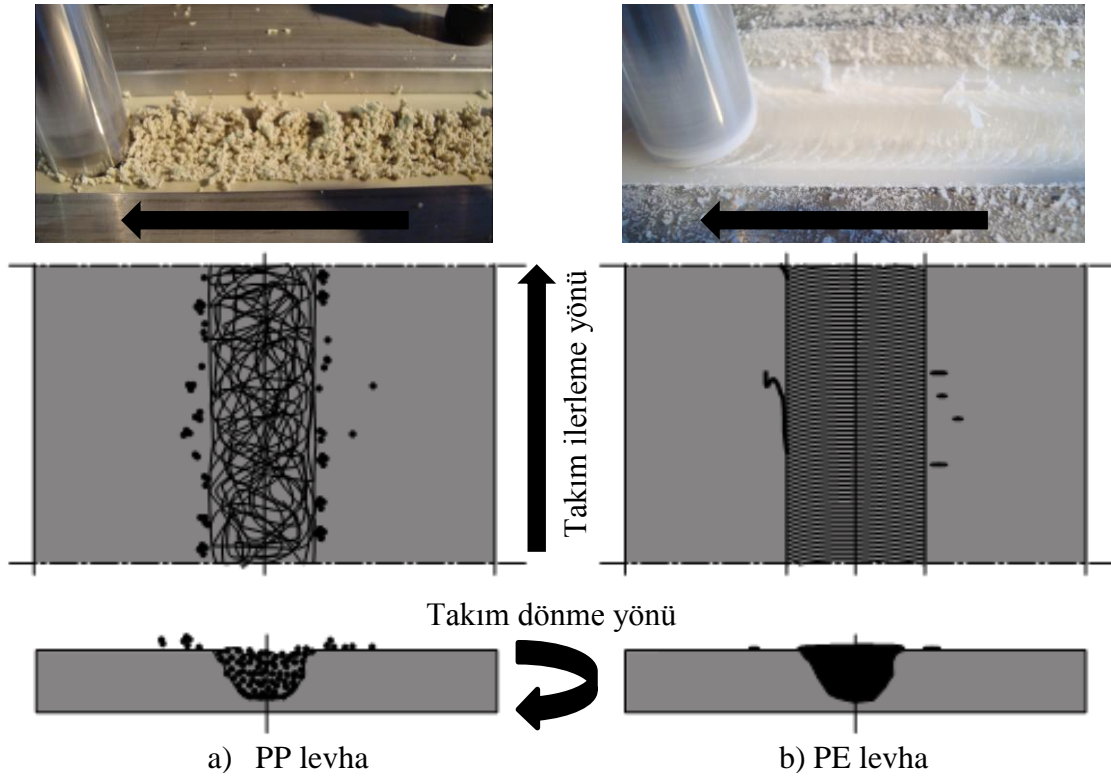
Malzeme	Eğme (mm)	Sıcaklık °C											
		50	55	60	65	70	75	80	85	86,1	90	90,3	95
PE Referans Numune	0	0,001	0,048	0,071	0,095	0,127	0,197	0,224	0,288	0,344	0,350	0,432	
SKK-PE	0	0,001	0,030	0,035	0,119	0,137	0,233	0,318	0,350	0,420	0,460	0,586	



Şekil 7.18 PE numuneler için sabit yük altında sıcaklığa bağlı olarak oluşan eğme grafiği

7.7. Kaynak Parametrelerinin Etkisi

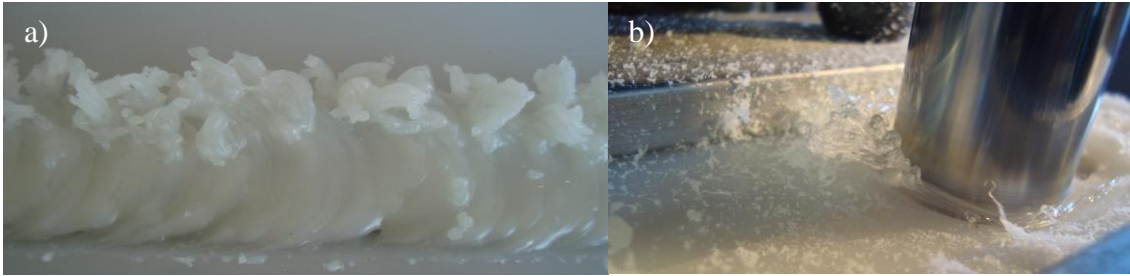
Kaynak parametre değerlerinin doğru seçilmesi, termoplastiklerin SKK ile başarılı bir şekilde birleştirilmesi için oldukça önemlidir. Kaynak için gerekli ısının elde edilmesi, taşınması, birleştirme yüzeyinin görünümü, kaynak mukavemeti, kaynak parametreleri ve birleştirilecek malzeme ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 7,19'da kaynak parametresi ve birleştirilecek malzeme türünün SKK kaynağı üzerindeki etkisi şematik olarak gösterilmiştir. Kullanılan parametre değerlerinin aynı olmasına rağmen Şekil 7.19 a' da PP kaynak malzemesinde yeterli kaynak ısı elde edilemediği için kaynak yüzeyi oldukça girintili ve çıkıntılı bir yapıya sahiptir. Polimer molekülleri birbiri ile yapışmış bir halde kaynak bölgesinde yer almaktadır. Burada elde edilen sonuçlar Nelson'un çalışmasında [72] belirttiği sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Şekil 7.19 b' de PE kaynak malzemesinde kaynak bölgesinde yeterli ısı elde edildiği için daha düzgün bir kaynak dikişi ve komple erimiş ana malzeme ile aynı görünüme sahip bir yapı elde edilmiştir. Şekil 7.19'da görüldüğü gibi yanlış parametre seçimi SKK uygulamasını başarısız kılmaktadır.



Şekil 7.19 Kaynak parametrelerinin etkisi (takım dönme devri 4000 devir/dk, takım ilerleme hızı 20 mm/dk)

7.7.1. Takım Devir Hızının Etkisi

Kaynak devir hızının belirlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda CNC dik işleme merkezinde 4000 devir/dk. 'nın altındaki kaynak devir hızları ile yapılan SKK uygulamalarında optimum parametre değerleri elde edilememiştir. Metallerin aksine termoplastiklerin SKK ile birleştirilebilmesi için takım dönme devri yüksek seçilmelidir. Düşük devirlerde, Strand [4] ve Nelson [72] tarafından da belirtildiği gibi ek bir ısıtma olmadan ya da kaynak bölgesine dışarıdan ısı verilmeden yapılan kaynaklardan Şekil 7.19 a 'da gösterildiği gibi olumsuz sonuçlar elde edilmektedir. Düşük devirlerde kaynak bölgesinde erime meydana gelmediği için bir birleştirmeden söz etmek mümkün değildir. Çok yüksek devirlerde ise kaynak bölgesinde aşırı ergime meydana geldiği için kaynak bölgesinde sıvılaştıran malzeme takım omzu tarafından kaynak bölgesinin dışına doğru savrulurken kaynak bölgesinden malzeme kaybına neden olmaktadır. Bu tür kaynaklardan alınmış numunelerle yapılan çekme testlerinde kaynak mukavemeti ana malzemeye oranla daha düşük değerlerde elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda termoplastikler için en uygun kaynak devirlerinin 4000 – 6000 devir/dk. arasında olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7-20' de devir hızının SKK üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 7.20 Takım devir hızının etkisi, a) Silindirik uçlu takım 4000 devir/dk, b) Metrik uçlu takım 7000 devir/dk.

7.7.2. Kaynak Takımının Etkisi

Kaynak takımı en önemli parametrelerden biridir. Takımın sahip olduğu geometri ile kaynak yüzey görünümü arasında doğrudan bir ilişki vardır. Takım omuz çapının gereğinden fazla büyük ya da küçük seçilmesi hem kaynak için gereken ısının elde

edilmesi hem de kaynak yüzey görünümü ve kaynak mukavemeti üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Takım omzunun malzeme yüzeyine yaptığı baskı kaynak kalitesini etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar baz alındığında tek taraflı birleştirme için, kaynak takımının karıştırıcı uç kısmı ve takım omuz çapı ile malzeme kalınlığı arasında bir bağlantı olduğu görülmüştür. **KARÖK-1** ve **KARÖK-2** bağıntısı olarak isimlendirdiğimiz bu bağıntılar aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir:

$$1,3 \leq \frac{m}{t} \leq 2,5 \quad [\text{KARÖK-1}] \quad (7.2)$$

t: Kaynak edilecek malzeme kalınlığı, m: Kaynak takımı karıştırıcı uç kısmının çapı

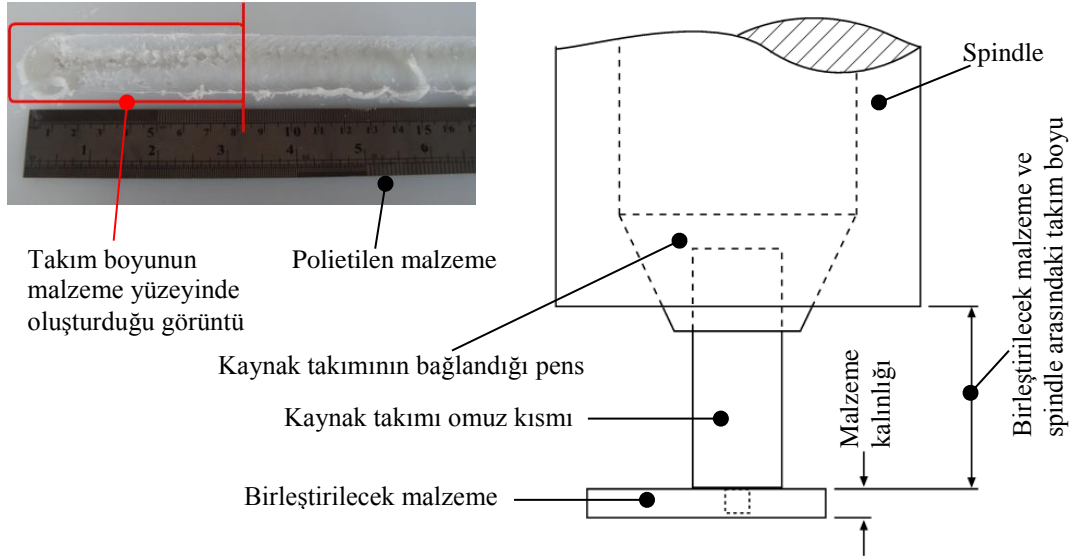
$$4 \leq \frac{d}{t} \leq 5,5 \quad [\text{KARÖK-2}] \quad (7.3)$$

t: Kaynak edilecek malzeme kalınlığı, d: Kaynak takımı omuz kısmının çapı

Takım omuz çapının ölçüsü kaynak ilerleme hattının genişliğini belirlemektedir ve kaynak performansı üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Takım omzunun SKK kaynak performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla takım omzu malzeme yüzeyinden itibaren 0,25/0.75 ve 1 mm daldırılarak PP malzemeler SKK ile birleştirilmiştir. Tablo 7.2 de verilen çekme deneyi sonuçlarına göre takım omzunun malzeme yüzeyine dalma derinliğinin artmasıyla doğru orantılı olarak kaynak performansında ciddi oranlarda bir düşüş meydana gelmiştir. Bu durum takım omuz kısmının malzeme yüzeyinde yaptığı baskı ile takım ilerleme yönünün tersinde oluşan boşluğun deneyler esnasında çentik etkisi oluşturması ve kaynak performansını olumsuz yönde etkilemesi olarak açıklanabilir. Şekil 7.3' te bu durum gösterilmiştir.

Birleştirilecek malzemeler ile kaynak takımının bağlandığı pens arasında kalan mesafe SKK esnasında gerekli ısının elde edilmesi ve kaynaklı bölgenin yapısı üzerinde etkilidir. Bu mesafenin kısa tutulduğu durumlarda spindle tarafından dönme devrinin hızına bağlı olarak kaynak bölgesi soğutulmakta ve kaynak için gerekli olan ısı elde edilememektedir. Ayrıca kaynak bölgesinden dışarıya pens ve takımın dönmesiyle oluşan hava akımının etkisiyle daha çok malzeme taşınmaktadır. Bu mesafenin uzun

tutulduğu durumlarda takımın ısınması daha uzun sürede gerçekleşmekte ve kaynak başlangıcından itibaren ~80-120 mm'lik kısımda kaynak nüfuziyeti ve kaynak performansı oldukça düşük olmakta ve kaynak yüzey görünümü oldukça kötü bir görüntü oluşturmaktadır. Şekil 7.20' de uzun takım boyunun kaynak başlangıcında malzeme yüzeyine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 7.21 Spindle ve malzeme arasındaki uzun takım boyunun SKK görüntüsü üzerindeki etkisi

7.7.3. Dalma ve Bekleme Süresinin Etkisi

SKK ile termoplastiklerin birleştirilmesinde kaynak takımının malzemeye dalması ve kaynak için gerekli ısının elde edilmesine kadar dalma bölgesinde takımın bekletilmesi kaynak ısısının oluşumu ve kaynak yüzey görünümü üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Gereğinden az bekleme süresi yeterli ısı oluşumu sağlayamadığı için kaynak başlangıcından itibaren ortalama ~100 mm'lik mesafede kaynak yüzey görünümü ve kaynak kalitesi düşmektedir. Uzun bekleme sürelerinde ise oluşan aşırı ısıdan dolayı malzeme daha akışkan bir hal almakta ve kaynak bölgesinde eriyen malzemenin kontrolü zorlaşmaktadır. Kaynak hattı boyunca eriyen malzeme takım omzu tarafından kaynak ilerleme yönünün tersine yığılmakta ve kaynak hattı üzerinden aşırı malzeme kaybına sebep olmaktadır. Kaynak başlangıcında ideal bekleme süresi kullanılan takım

omuz çapına, takım geometrisine, karıştırıcı uç çapına, malzeme türüne ve kalınlığına göre değişiklik gösterebilmektedir.

7.7.4. Takım İlerleme Yönünün Etkisi

Malzeme yönlenmesi ile takım ilerleme yönü arasında bir ilişkiden söz etmek mümkündür. Bu amaçla SKK ile birleştirilmiş PE levhalar daha önceki takım ilerleme yönünün tersine tekrar kaynak işlemine tabi tutulmuş ve birleştirilmiş parçalar bu şekilde yapılan birleştirme işleminde birbirinden ayrılarak başarılı bir SKK uygulaması gerçekleştirilememiştir.

Aynı şekilde SKK ile birleştirilmiş PE levhalar daha önceki takım ilerleme yönüyle aynı doğrultuda ikinci kez kaynak işlemine tabi tutulmuş ve birleştirme işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu durum SKK ile yapılan ilk birleştirmede malzemede bir yönlenme gerçekleştiği, ikinci defa takım ilerleme yönünün tersine yapılan kaynakta ise bu yönlenmenin parçalandığı ve bunun da kaynak mukavemetini olumsuz şekilde etkilediği şeklinde açıklanabilir. Yapılan SEM incelemelerinde elde edilen fibril yönlenmelerine ait görüntüler (Şekil 7.42, Şekil 7.43 ve Şekil 7.44) bu tezimizi destekler niteliktedir.

Her iki uygulama sonrası malzemelerden alınan çekme numuneleri karşılaştırıldığında ise aynı bölgeye ikinci kez yapılan SKK uygulamasının başlangıçtaki kaynak mukavemetini ~%10 oranında düşürdüğü gözlemlenmiştir. 6 mm kalınlığındaki PE levha ile gerçekleştirilen ve deneylerde elde edilen sonuçlar Tablo 7.11’ de gösterildiği gibidir.

Tablo 7.11 PE levhalar ikinci kez aynı doğrultuda SKK ile birleştirildiğinde çekme mukavemetinde meydana gelen değişimler

Deney No	Takım No	Dalma ve Bekleme	Takım Dönme Devri	Takım İlerleme Hızı	Çekme Mukavemeti MPa	
					1. Birleştirme	2. Birleştirme
1	2M	30 sn.	5000 dev./dk.	20 mm/dk.	21,53	19,41
2			6000 dev./dk.		22,06	19,89

7.7.5. Takım Dönme Yönünün Etkisi

Takım dönme yönünün saat dönme yönü doğrultusunda SKK ile yapılan tüm birleştirme işlemlerinden başarılı sonuçlar alınmıştır. Takım dönme yönünün saat dönme yönü doğrultusunda olduğu SKK birleştirmelerine ait çekme deneyi sonuçları Tablo 7.1 ve Tablo 7.2 de gösterilmiştir. Ancak takım dönme yönünün saat dönme yönünün tersinde olduğu birleştirme işlemlerinde ilerleme yönüyle malzeme akış yönünün farklılaşması nedeniyle SKK uygulamaları başarılı şekilde gerçekleştirilememiştir. Kaynak hattı boyunca Şekil 7.22' de gözüktüğü gibi malzeme kaynak hattının dışına yığılmıştır.



a) Saat ilerleme yönünde
b) Saat ilerleme yönünün tersinde
Takım dönme devri: 4000 devir/dk, takım ilerleme hızı: 20 mm/dk.

Şekil 7.22 Takım dönme yönünün etkisi

7.8. Birleştirme Esnasında Yapılan Isı Ölçümleri

Polimerlerin sahip olduğu düşük ısı iletkenliği ($2,0 - 8,0 \text{ cal/cm. san. } ^\circ\text{C} \times 10^4$) nedeniyle birleştirme işlemi için gerekli olan ısıyı elde etmek farklı parametrelerin en ideal şekilde oluşturulmasıyla mümkün olmaktadır.

Polimerlerin ısıl iletkenlikleri, molekül ağırlığı, kristalinite derecesi ve yönlendirme gibi yapısal faktörlere bağlıdır. Klasik alüminyum stili kaynak takımlarının kullanıldığı termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynağında, kaynak takımının pimi ile termoplastik levhaların birleşme yüzeyleri arasında oluşan sürtünme ve kaynak takımının omuz kısmının dönmesiyle sürekli olarak plaka yüzeylerinde tekrarlanan gerilmelerin sebep olduğu sıcaklık artışı sayesinde kaynak bölgesinde meydana gelen ısı birikmesi, kaynak ısını oluşturmuştur.

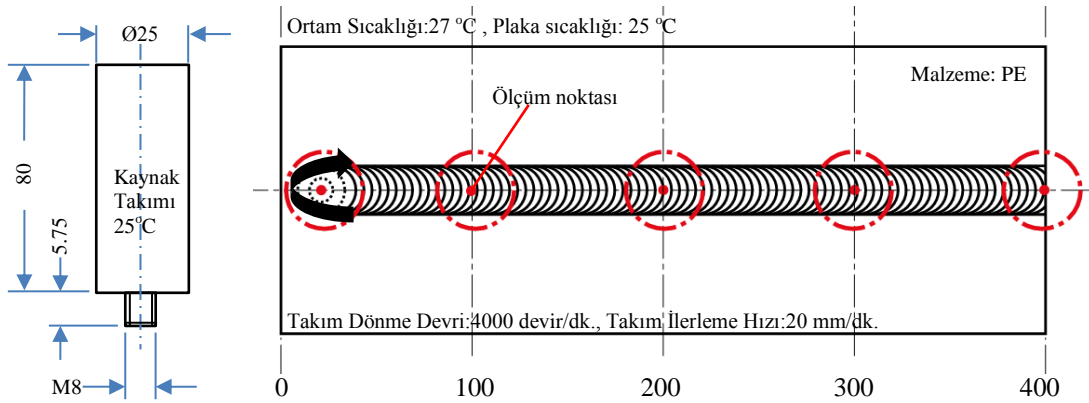
Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesi esnasında sıcaklık ölçümleri maksimum ölçme sıcaklığı 550 °C olan marka kızılötesi termometre kullanılarak yapılmıştır. Her bir parametre değerinde elde edilen sıcaklıklar birbirinden farklılık göstermektedir. SKK esnasında oluşan sıcaklıkların belirlenmesi amacıyla belirli aralıklarla sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sürtünme Karıştırma Kaynağı başlangıcında yapılan dalma işlemi ve arkasından yapılan bekleme işleminde bekleme süresinin artmasıyla beraber başlangıçta elde edilen ısı daha yüksek olarak ölçülmüştür.

Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde polietilen (PE) için, üst yüzey sıcaklığının yaklaşık 104 °C' olduğu bölgeden itibaren kaynak yüzey görüntüsü daha düzgün bir hal almakta ve takım omzu tarafından yapılan sıvama işleminde plastikleşen parçalar kaynak bölgesinde kalmakta ve kaynak yüzey görüntüsü daha kaliteli olmaktadır. Bu nedenle polietilen malzemelerin SKK'ında düzgün bir yüzey görüntüsü elde edebilmek için dalma ve bekleme sonrası yaklaşık olarak elde edilmesi gereken sıcaklık 90 – 100 °C arasında olmalıdır. Aynı şekilde polipropilen malzemeler içinse bu sıcaklık değeri 120-125 °C arasında olmalıdır. Daha düşük ısılarda ideal kaynak sıcaklığına ulaşılan kadar yüzey kalitesi ısının taşınmamasından dolayı dalgalı olurken, yüksek sıcaklıklarda ise aşırı plastikleşme işlemi nedeniyle kaynak takım omzu tarafından kaynak bölgesinin dışına doğru savrulmaktadır.

Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan birleştirme işleminde birleştirme başlangıcından 100 mm'lik kısma kadar dalma işlemi sonrası oluşan ilk ısının yaklaşık olarak aynı ısı değerleri arasında seyrettiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle dalma ve bekleme sonrası elde edilecek olan ısı termoplastiklere başarılı bir SKK uygulaması için önemli olmaktadır. Termoplastiklerin sahip olduğu düşük ısı iletim katsayısının ısıyı belirli bir bölgede hapsediği ve birleştirme bölgesinde yeterli ısı oluşuncaya kadar bu durumun etkili olduğu ve bu nedenle ilk başlarda ısı artışının olmadığı düşünülmektedir. Birleştirme bölgesindeki elde edilen ısı (termoplastiğin türüne göre değişiklik gösterebilir) kristalleşme sıcaklığı geçildiğinde ısı artışının başladığı düşünülmektedir. Bu verilerden, ölçülen sıcaklık değerlerinden ve çekme deneyi sonrası malzemelerin mekanik özelliklerinden yola çıkarak sürtünme karıştırma kaynağında polietilen (PE) malzeme için ideal üst yüzey kaynak ısısının 104 - 114 °C, polipropilen (PP) malzemeler içinse 145 - 155 °C arasında olduğunu söyleyebiliriz.

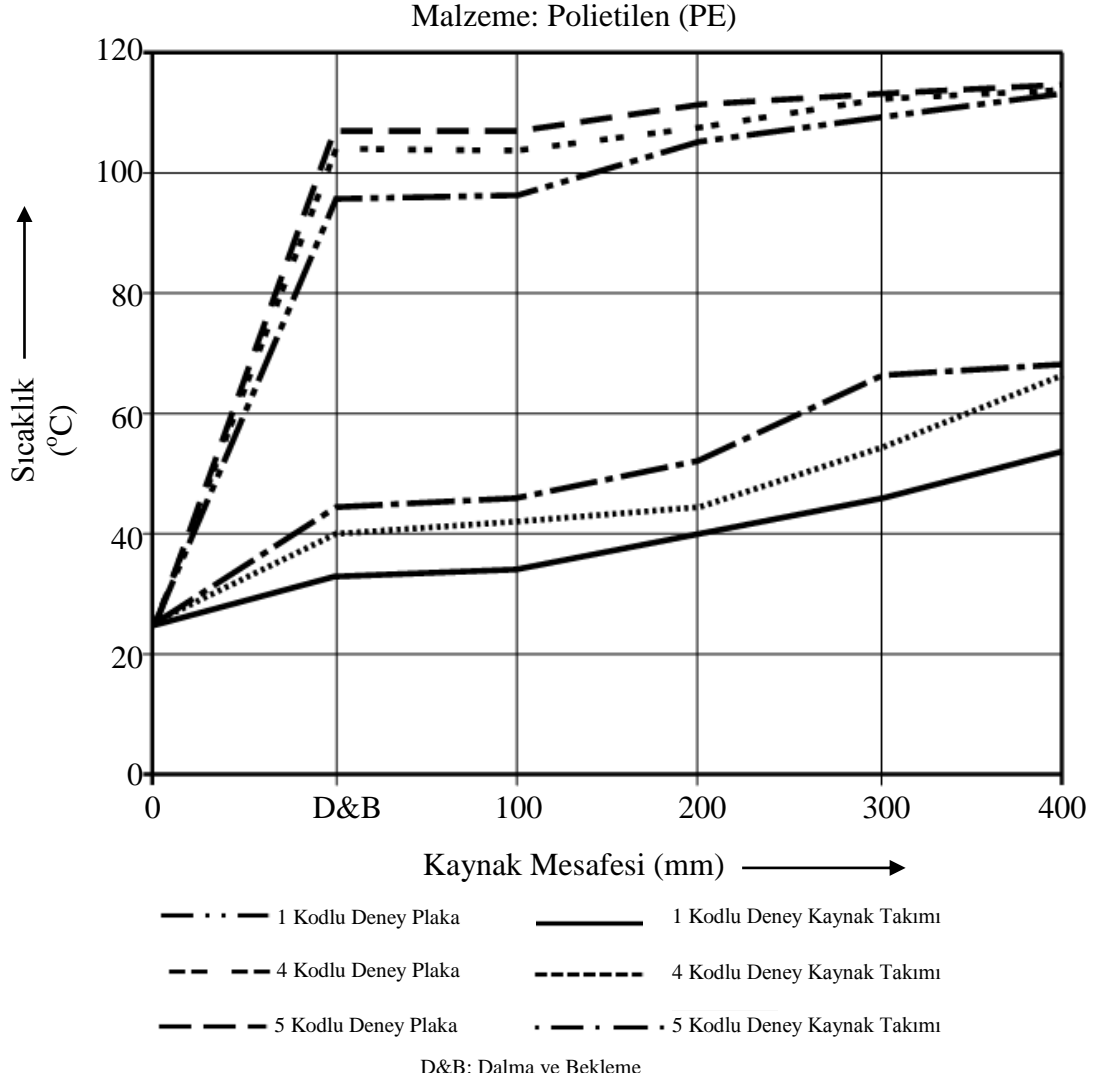
Yüzeyin altında kalan karışım bölgesinde, bu sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu düşünülmektedir.

Şekil 7.23’ te takım dönme devri 4000 devir/dk., takım ilerleme hızı 20 mm/dk. ve ortam sıcaklığı 27 °C ‘ de dalma ve bekleme süresinin kaynak ısısı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla üst yüzeyden yapılmış ısı ölçümlerine ait değerler ve ölçüm noktaları gösterilmiştir. Şekil 7.23 ve Şekil 7.24’ ten de görüldüğü gibi dalma ve bekleme süresinin artmasıyla birlikte başlangıçta oluşan sıcaklık değerleri artmış ve bu artış birleştirilecek plakalar boyunca devam etmiştir. Aynı şekilde kaynak takımı da kaynak bölgesindeki ısıdan etkilenmiş ve kaynak hattı boyunca sıcaklık değeri artmıştır. Şekil 7.24’ te 1, 4 ve 5 kodlu deneylerde plaka ve kaynak takımlarında oluşan sıcaklık değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekildeki grafiklerden (Şekil 7.23, Şekil 7.24) dalma ve bekleme süresinin artmasıyla kaynak takım sıcaklığının arttığını ve termoplastik malzemelerde ısı taşınması işleminin daha kolay gerçekleştiğini gözlemlemekteyiz. Elde edilen verilerden yola çıkarak birleştirme işlemi başlangıcında dalma ve bekleme süresinin birleştirme bölgesindeki ısının birleştirme hattı boyunca taşınması üzerinde etkili olduğunu söyleyebiliriz.



Deney Kodu	Açıklama	Dalma ve Bekleme	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm
			96 °C	105 °C	109 °C	113 °C
1	PE Plaka	30 Sn.	34 °C	40 °C	46 °C	54 °C
	Kaynak Takımı					
4	PE Plaka	60 Sn.	104 °C	108 °C	113 °C	114 °C
	Kaynak Takımı		40 °C	44 °C	54 °C	66 °C
5	PE Plaka	120 Sn.	107 °C	111 °C	114 °C	117 °C
	Kaynak Takımı		44 °C	52 °C	66 °C	68 °C

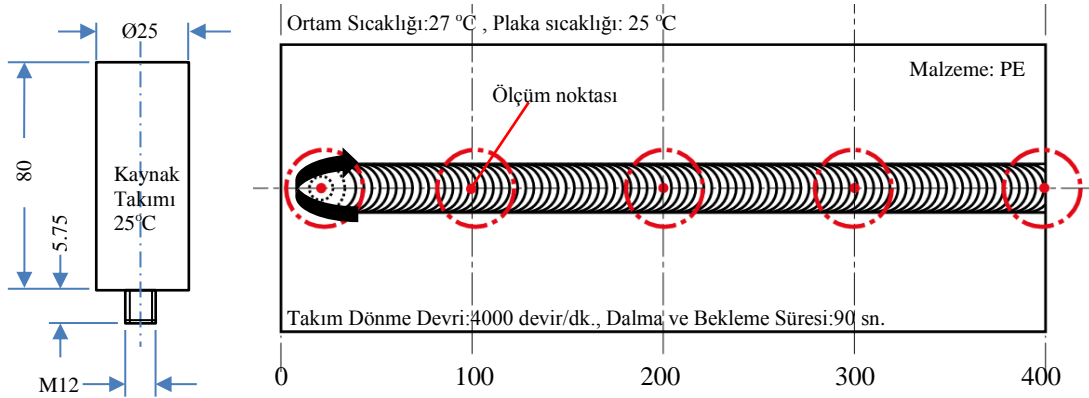
Şekil 7.23 Dalma ve bekleme süresine bağlı olarak birleştirme bölgesi üst yüzeyde oluşan ısı değerleri



Şekil 7.24 Dalma ve bekleme süresine bağlı olarak birleştirme bölgesi üst yüzeyde oluşan ısı değerlerinin grafiksel gösterimi

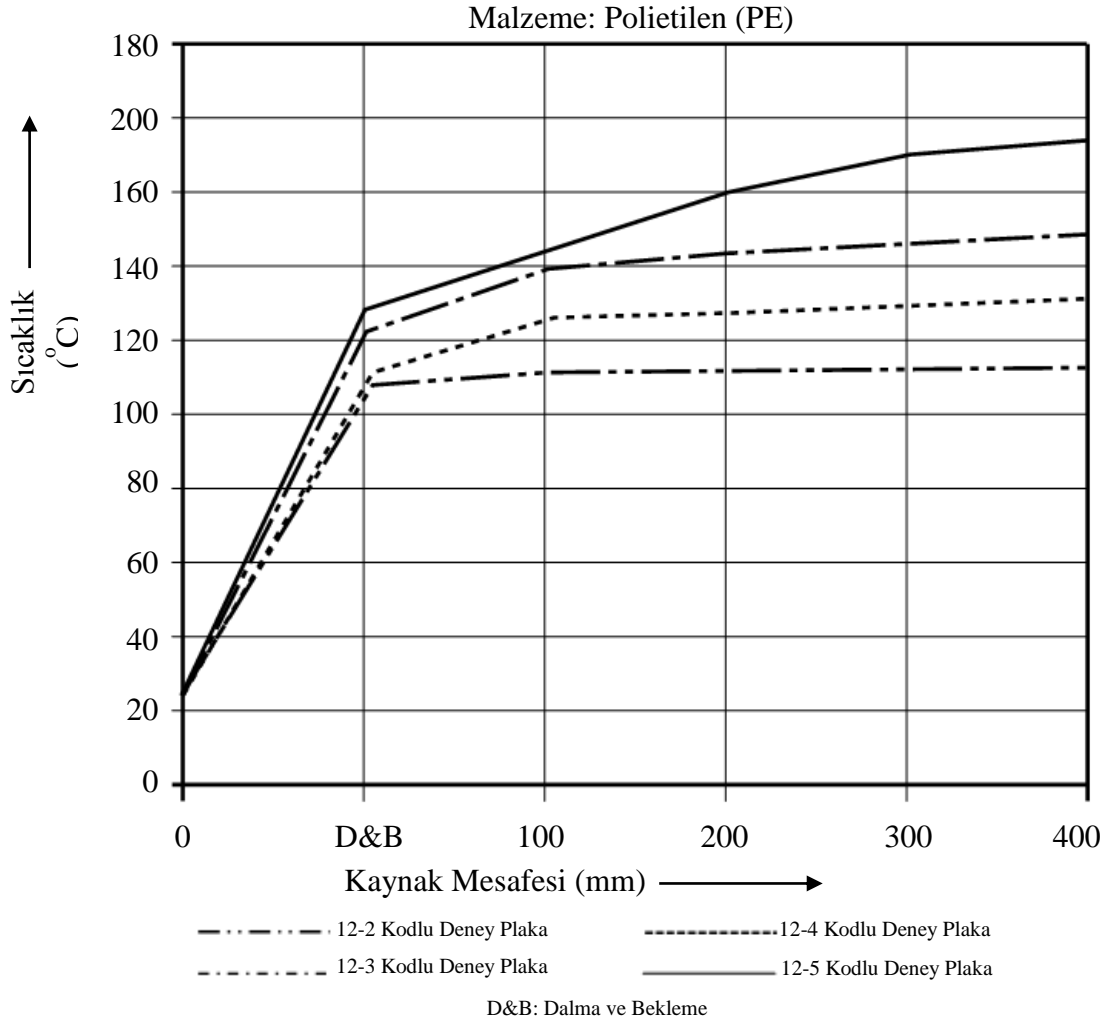
Kaynak ilerleme hızının kaynak sıcaklığı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla ortam sıcaklığında, takım dönme devri 4000 devir/dk., dalma ve bekleme süresi 90 sn. ve takım ilerleme hızı 20, 30,40 ve 50 mm/dk. verilerek SKK ile termoplastik levhalar (PE) birleştirilmiştir. Şekil 7.25 ve Şekil 7.26' da görüleceği gibi ilerleme hızının artmasına bağlı olarak ölçülen sıcaklık değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Birleştirme bölgesinin üst yüzey sıcaklığının ~160 °C' yi geçtiği noktadan itibaren birleştirme bölgesinde bulunan PE malzemenin sıvı hale geldiği ve birleştirme bölgesinin soğumasının daha uzun bir çevrimde gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Şekil 7.25’ te deneyler sırasında kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynak bölgesindeki plaka sıcaklıklarına ait ölçüm değerleri gösterilmiştir. Deneylerde M12 karıştırıcı uca sahip, takım omuz çapı Ø25 mm olan 5M numaralı kaynak takımı kullanılmıştır. Tablo 7.1’ de ilgili deneylere ait çekme deney sonuçları verilmiştir. Şekil 7.26’ te SKK’ında dalma ve bekleme süresine bağlı olarak oluşan ısı değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 7.25 ve Şekil 7.26’da da görüldüğü gibi en yüksek kaynak sıcaklığı takım ilerleme hızınının 50 mm/dk. olduğu 12-5 kodlu deneyde elde edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde; takım ilerleme hızının artırılmasının birleştirme bölgesinde oluşan ısı miktarını ve birleştirme hattı boyunca ısı iletimini arttırdığını söyleyebiliriz. Tablo 7.1’deki çekme deney sonuçları incelendiğinde yüksek sıcaklıklarda yapılan kaynaklarda ısı artışı ile ters orantılı olarak kaynak mukavemetinde düşüşlerin meydana geldiğini gözlemlemekteyiz. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde malzemenin ergime sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda yapılan birleştirme işlemlerinin kaynak performansı ve mukavemeti üzerinde olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Kaynak bölgesindeki yüksek sıcaklığa bağlı olarak birleştirme bölgesinde kristallenme oranının arttığını (Tablo 7.13) ve kristal lamel kalınlıkları üzerinde (Tablo 7.14) yüksek sıcaklıkların etkili olduğunu söyleyebiliriz.



Deney Kodu	Kaynak Takımı İlerleme Hızı	Dalma ve Bekleme	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm
12-2	20 mm/dk.	108 °C	111 °C	112 °C	112 °C	113 °C
12-3	30 mm/dk.	108 °C	126 °C	127,7 °C	130 °C	132 °C
12-4	40 mm/dk.	108 °C	123 °C	144 °C	146 °C	149 °C
12-5	50 mm/dk.	108 °C	129 °C	160 °C	170 °C	174 °C

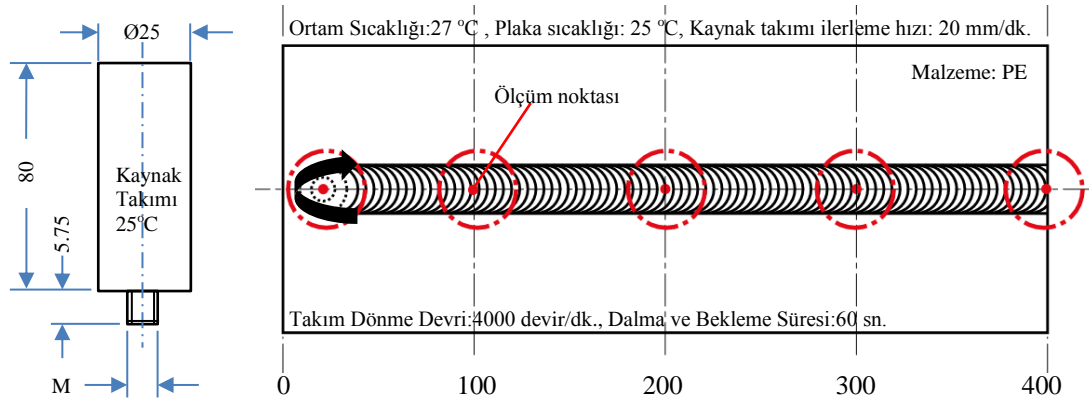
Şekil 7.25 Takım ilerleme hızına bağlı olarak PE levha birleşme bölgesi üst yüzeyde oluşan ısı değerleri



Şekil 7.26 Takım ilerleme hızına bağlı olarak PE levha üst yüzeyde oluşan ısı değerlerinin grafiksel gösterimi

Karıştırıcı ucun kaynak sıcaklığına etkisinin incelenmesi amacıyla 4 kodlu ve 12-1 kodlu deneylere ait sıcaklık ölçümleri Şekil 7.27’ de karşılaştırılmıştır. Kaynak takımının PE levhalara dalması ve 60 sn. beklemesi sonrasında pim çapının etkisiyle 12-1 kodlu deneyde 4 °C ‘lik bir sıcaklık artışı meydana gelmiştir. 4 °C ‘lik sıcaklık artışı kaynak mesafesi 200 mm ye gelinceye kadar devam etmiş ve korunmuştur. M12 karıştırıcı uç kullanılan 12-1 kodlu deneyde sıcaklık 200-400 mm’lik kaynak mesafesi boyunca sabit bir seyir izlemiştir. M8 karıştırıcı uç kullanılan 4 kodlu deneyde sıcaklık artışı tüm kaynak hattı boyunca devam etmiştir. Çekme mukavemet değerlerine göre kaynak performansları karşılaştırıldığında 12-1 kodlu deneye ait kaynak performansı (% 92) 4 kodlu deneyin kaynak performansına (% 91) göre daha yüksek olmuştur.

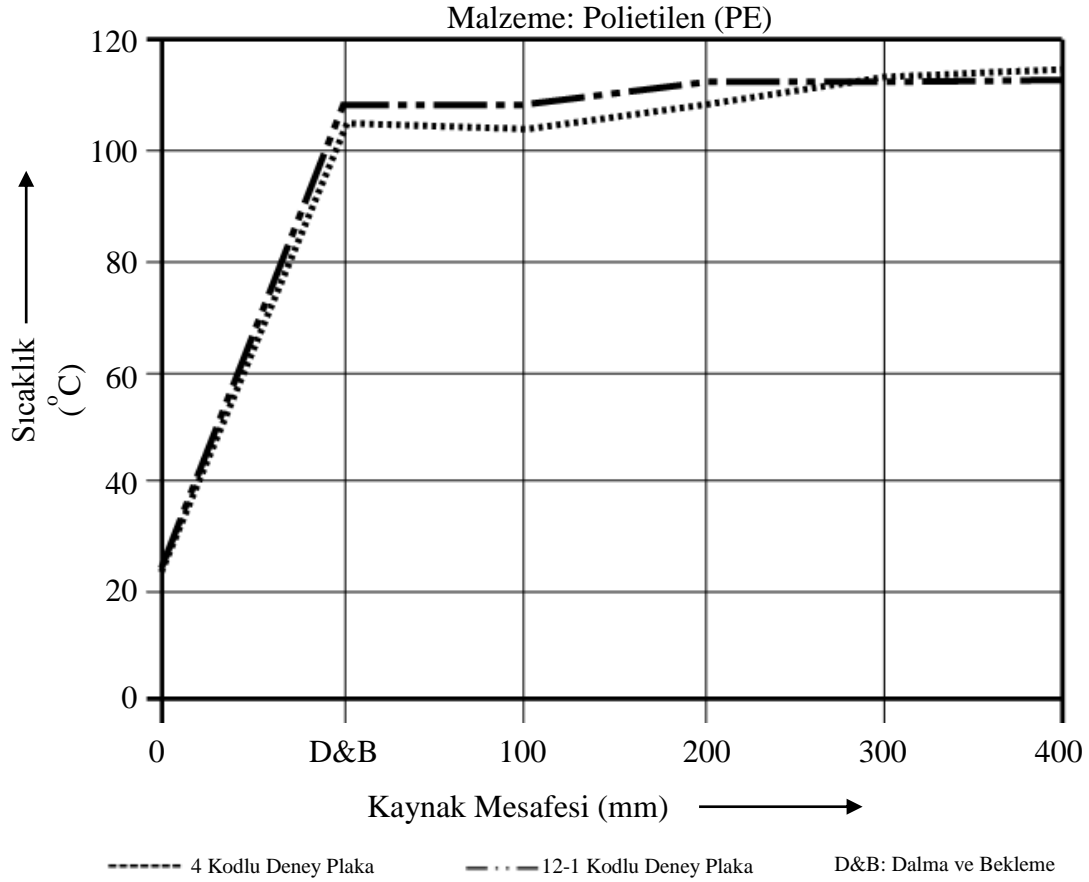
Termoplastiklerin SKK'ında karıştırıcı uç çapının kaynak bölgesinde oluşan sıcaklık değerleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Büyük uç çapına sahip takımlarla kaynak başlangıcında dalma ve bekleme aşamasında, küçük uç çaplarına oranla daha yüksek sıcaklık değerleri elde etmek mümkündür. Karıştırıcı uç tasarımında uç çapı ile malzeme kalınlığı arasında KARÖK-1 bağıntısı göz önünde bulundurularak uç çapı seçilmelidir. Uç çapı kaynak performansına ve kaynak sonrası oluşan mikroyapıya etki etmektedir. Kristallenme oranı ve kristal lamel kalınlıkları üzerinde etkili olmaktadır.



Deney Kodu	Pim Çapı (M)	Dalma ve Bekleme	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm
4	M8	104 °C	104 °C	108 °C	113 °C	114 °C
12-1	M12	108 °C	108 °C	112 °C	112 °C	113 °C

Şekil 7.27 Karıştırıcı uç çapına bağlı olarak PE levha birleşme bölgesi üst yüzeyde oluşan ısı değerleri

Şekil 7.28' de SKK'ında kaynak takımı karıştırıcı uç çapına bağlı olarak PE levha üst yüzeyinde oluşan ısı değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafiktende görüldüğü gibi her iki farklı parametre değerinde sıcaklık değerlerinde benzer davranışlar gözlemlenmiştir. Büyük uç çapının ana malzemeden kopardığı parça daha fazla olduğu ve ısınan parçaların plastikleştirilmesi için daha fazla ısı gerektiğinden kaynak boyu uzadıkça sıcaklık artışının daha az yükseldiği gözlemlenmiştir. Ancak küçük uç çapında bu durum tam tersi şekilde kaynak boyunun uzamasıyla daha kararlı seyreden bir davranış şeklinde kendini göstermiştir. Uzun kaynak boyları için bu durumun göz önünde bulundurulması yüksek kaynak performansı elde etmek için faydalı olacaktır.



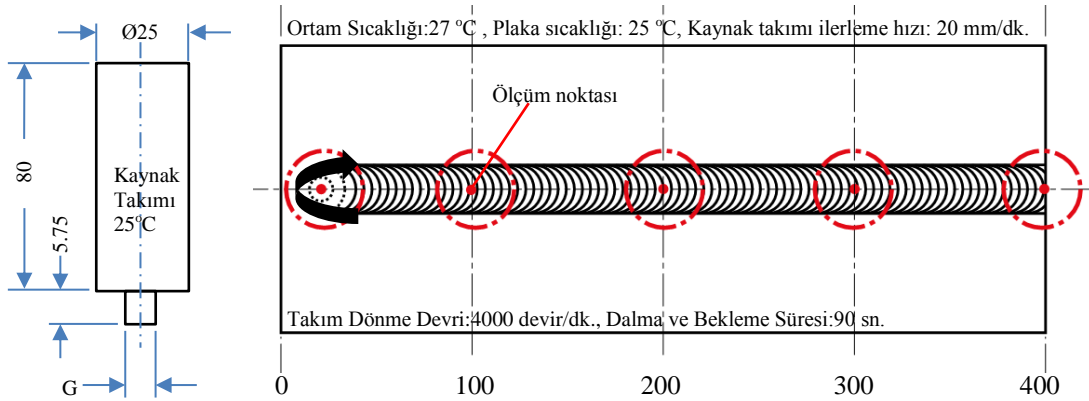
Şekil 7.28 Karıştırıcı uç çapına bağlı olarak PE levha birleşme bölgesi üst yüzeyde oluşan ısı değerlerinin grafiksel gösterimi

Kaynak takımı karıştırıcı uç geometrisinin etkisinin incelenmesi amacıyla aynı parametre değerlerine sahip 12-2, KT-01 ve ST-01 kodlu deneylere ait üst yüzey sıcaklık ölçüm değerleri Şekil 7.29 ve grafiksel olarak Şekil 7.30’ da karşılaştırılmıştır. Deneylerde tüm kaynak parametreleri aynı olurken sadece karıştırıcı uç kısmının geometrisi değiştirilerek SKK uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

En yüksek sıcaklık değerleri karıştırıcı ucun kare geometriye sahip olduğu KT-01 kodlu deneyde ölçülmüştür. En düşük sıcaklık değerleri karıştırıcı ucun metrik geometriye sahip olduğu 12-2 kodlu deneyde ölçülmüştür. Çekme deney sonuçlarından elde edilen kaynak performansı açısından karşılaştırıldığında en yüksek kaynak performansı (% 91) 12-2 kodlu deneyde elde edilmiştir. 12-2 kodlu deneyin sıcaklık değerleri incelendiğinde 108-114 °C arasında seyrettiği gözlemlenmiştir. Karıştırıcı uç kısmı kare olan takımla yapılan KT-01 kodlu SKK’ının kaynak performansı (% 79),

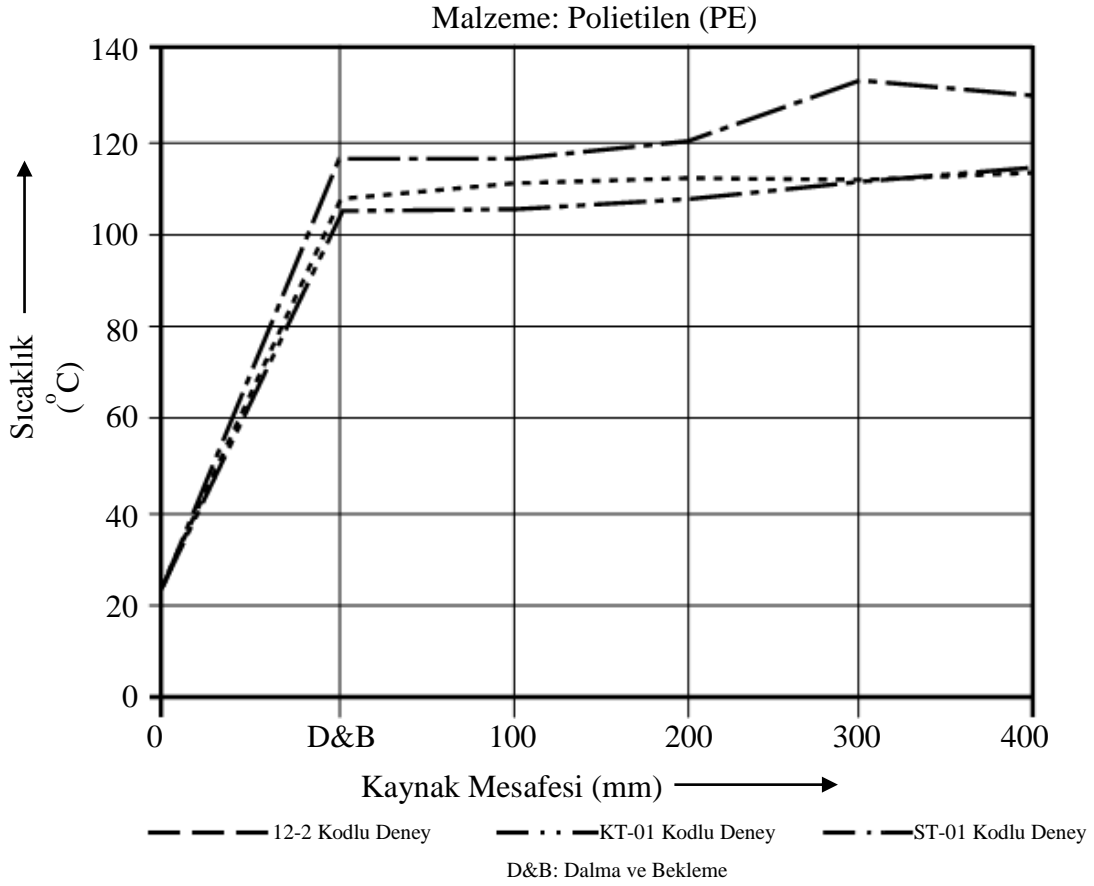
karıştırıcı uç kısmı silindirik olan takımla yapılan ST-01 kodlu SKK'nın kaynak performansına (% 68) göre daha yüksek olmuştur. Termoplastiklerin SKK yüksek sıcaklık değerinden ziyade ideal üst yüzey birleştirme sıcaklığı ile yapılan birleştirme işlemlerinden daha yüksek kaynak performansları elde edilmiştir.

Termoplastiklerin SKK birleştirme işlemlerinde yüksek sıcaklık elde etmek yerine ideal kaynak sıcaklık değerlerinin belirlenmesi ve birleştirme işlemlerinin bu aralıkta yapılması önem arz etmektedir. Karıştırıcı uç geometrisi fibril yönlenmeleri, birleştirme yüzey görünümü üzerinde etkili olmaktadır. Birleştirme bölgesininin karışımını daha iyi sağlayan takım geometrileri kaynak performansını arttırmaktadır. Birleştirme bölgesinde kare ve silindirik uçlu takımlara nazaran metrik uçlu takımlar daha iyi bir karışım sağlamaktadır.



Deney Kodu	Pim geometrisi (G)	Dalma ve Bekleme	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm
			12-2	Metrik (M12)	108 °C	111 °C
KT-01	Kare (■6,5x6,5)	116 °C	116 °C	120 °C	133 °C	130 °C
ST-01	Silindirik (Ø10)	105 °C	106 °C	108 °C	112 °C	115 °C

Şekil 7.29 Karıştırıcı uç geometrisine bağlı olarak PE levha birleşme bölgesi üst yüzeyde oluşan ısı değerleri

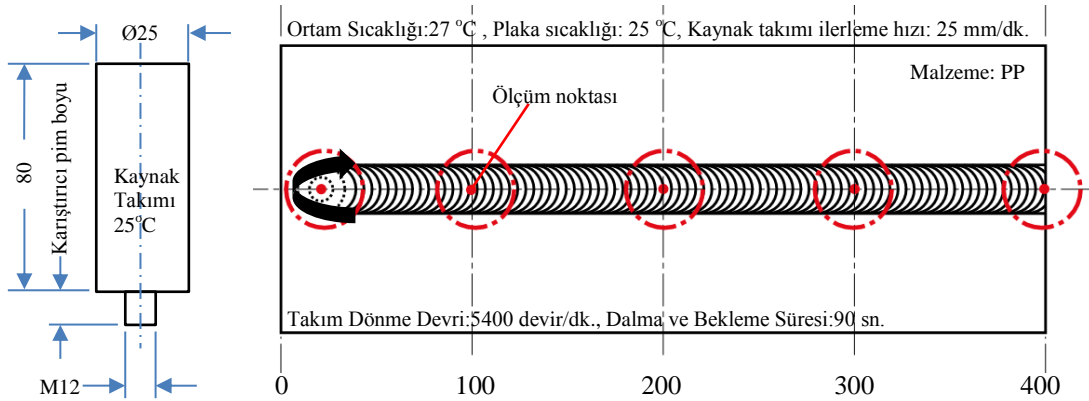


Şekil 7.30 Karıştırıcı uç geometrisine bağlı olarak PE levha birleşme bölgesi üst yüzeyde oluşan ısı değerlerinin grafiksel gösterimi

Omuz baskısının etkisinin incelenmesi amacıyla PP levhalara plaka üst yüzeyinden itibaren 0,25, 0,75 ve 1 mm takım omzu daldırılarak SKK uygulamaları gerçekleştirilmiştir. SKK uygulamalarına ait plaka ve kaynak takımı sıcaklık ölçüm değerleri Şekil 7.31’ de gösterilmiştir. Şekil 7.32’de plakalara, Şekil 7.33’ de ise kaynak takımına ait sıcaklık ölçüm değerleri grafiksel olarak verilmiştir.

Takım omzunun malzeme yüzeyinden itibaren dalma derinliğinin artmasıyla birlikte kaynak bölgesinde oluşan basıncın etkisiyle sıcaklık artışı meydana gelmiştir. Yapılan ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde PP levhalar için ideal üst yüzey kaynak sıcaklığı olarak 145-155 °C gözlemlenmiştir. Omuz dalma derinliğinin artması kaynak hattı boyunca dalma derinliğine bağlı olarak kaynak ilerleme yönünün tersinde boşluk oluşturmuş ve çekme deneylerinde bu boşluk çentik etkisi yaparak kaynak mukavemetini zayıflatmıştır.

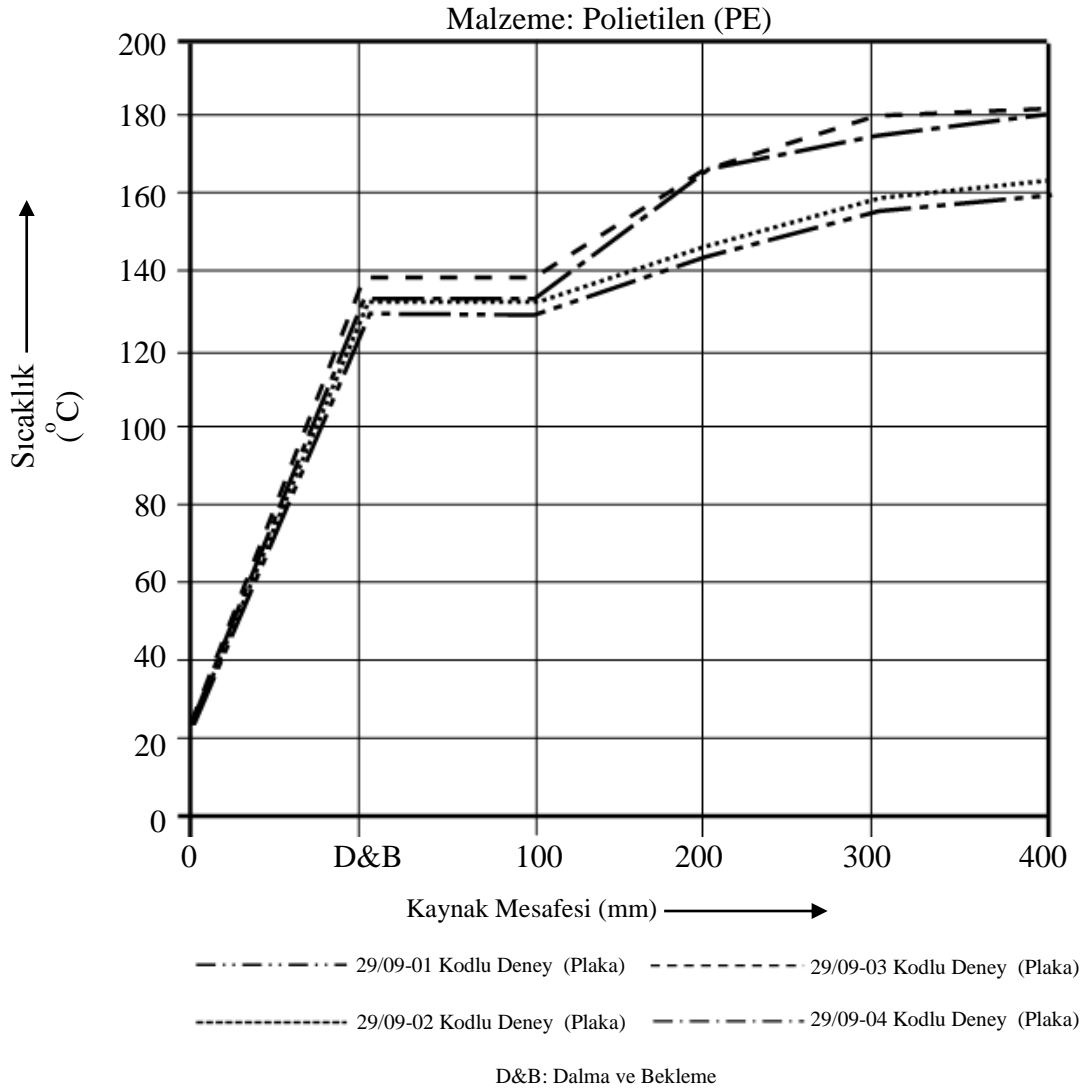
Omuz dalma derinliğinin artması plakada oluşan ısı değerlerine benzer şekilde kaynak takımında da sıcaklık artışına neden olmuştur. Kaynak sonrası kaynak bölgesinin soğuması yavaş bir şekilde gerçekleşmiştir. Ergimiş haldeki polipropilen malzemenin görüntüsü çamurumsu bir görünüm kazanmıştır. Dalma derinliğinin artmasıyla birleştirme bölgesine yapılan baskı daha da artmış ve bunun neticesinde birleştirme bölgesinin sıcaklık değerleri yükselmiştir. Polipropilenin kaynak sonrası kristallenme oranı, dalma derinliğinin artmasıyla yükselmiştir. En yüksek kristallenme oranı (%32) dalma derinliği 0,25 mm iken elde edilmiştir. Kristal lamel kalınlıkları dalma derinliğinin artışıyla paralel olarak artış göstermiştir. Dalma derinliğinin artmasıyla, kaynak bölgesinde takım ilerleme yönünde çentik etkisi gösteren bir akış boşluğu meydana gelmiştir. Bu boşluğun oluşmasında birleştirme bölgesinde plastikleşen malzemenin takım omzu tarafından takım dönme yönünde savrulmasının etkili olduğu düşünülmektedir.



Deney Kodu	Karıştırıcı pim Boyu	Açıklama	Dalma ve Bekleme	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm
29/09-01	5,75 mm	Plaka	129 °C	129 °C	144 °C	156 °C	160 °C
		K. Takımı	92 °C	92 °C	113 °C	130 °C	137 °C
29/09-02	5,50 mm	Plaka	132 °C	133 °C	147 °C	159 °C	164 °C
		K. Takımı	93 °C	95 °C	114 °C	136 °C	139 °C
29/09-03	5,25 mm	Plaka	139 °C	139 °C	166 °C	181 °C	182 °C
		K. Takımı	111 °C	111 °C	142 °C	145 °C	147 °C
29/09-04	4,75 mm	Plaka	133 °C	133 °C	166 °C	175 °C	181 °C
		K. Takımı	115 °C	115 °C	131 °C	167 °C	171 °C

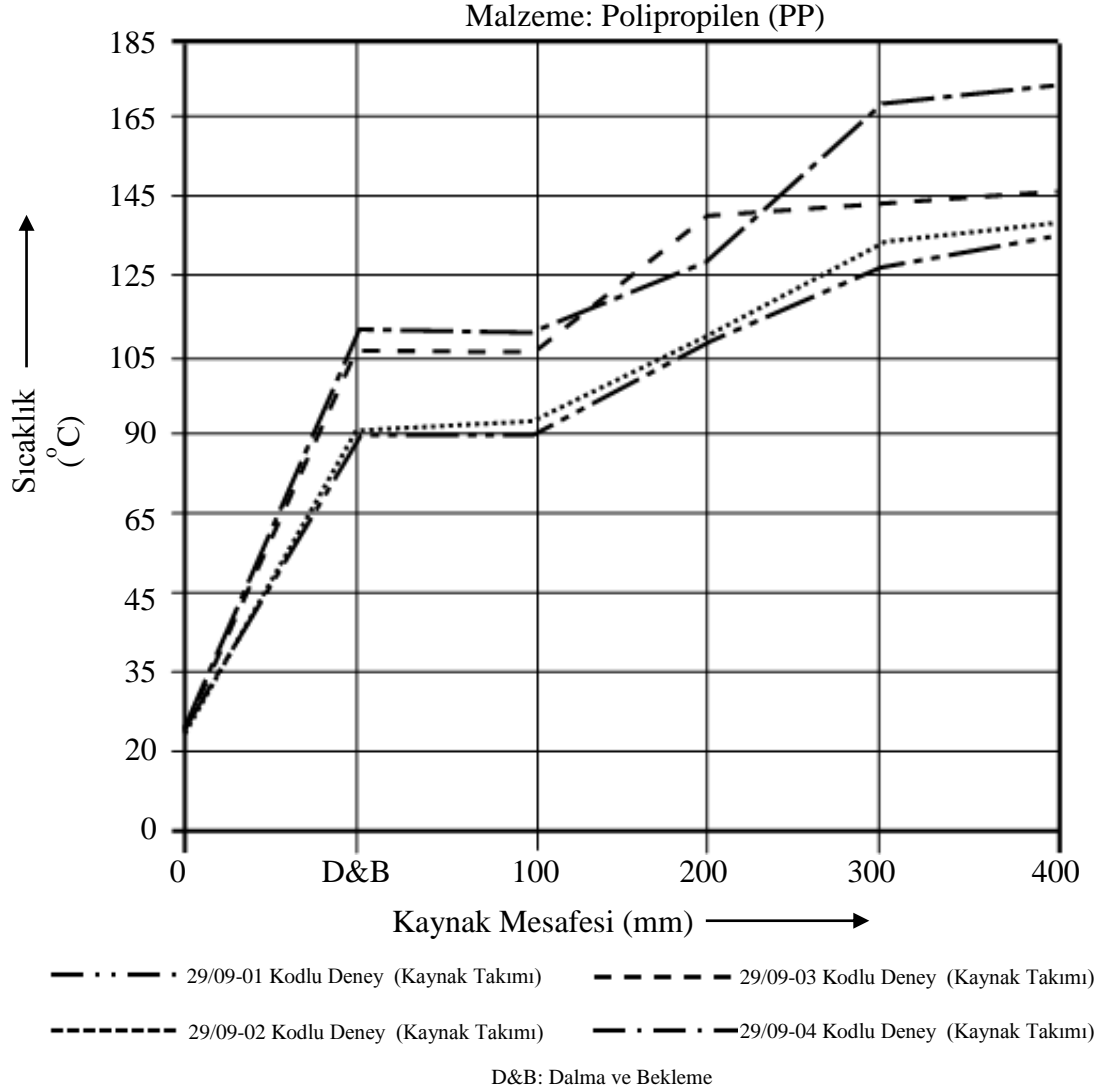
Şekil 7.31 Kaynak takımı omuz dalma derinliğine bağlı olarak PP levha birleşme bölgesi üst yüzeyde oluşan ısı değerleri

Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde omuz dalma derinliğinin artmasına bağlı olarak kaynak performansında düşebileceği PP levhalara yapılan birleştirme işlemi sonrasında gözlemlenmiştir. Yüzeyden itibaren 1 mm dalma derinliğine erişildiğinde başlangıçta elde edilen kaynak performansına oranla % 72'lik bir düşme (Tablo 7.2) meydana gelmiştir. Aşağıdaki şekillerde (Şekil 7.32, Şekil 7.33) görüldüğü gibi termoplastiklerin SKK'ında takım omuz kısmının birleştirilecek yüzeyden itibaren dalma derinliğinin artmasıyla birleştirme işleminin başlangıcında dalma ve bekleme sonrası birleştirme bölgesinin sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde dalma ve bekleme sonrası takım sıcaklıkları da gittikçe artan bir şekilde seyretmiştir.



Şekil 7.32 Kaynak takımı omuz dalma derinliğine bağlı olarak PP levha birleşme bölgesi üst yüzeyde oluşan ısı değerlerinin grafiksel gösterimi

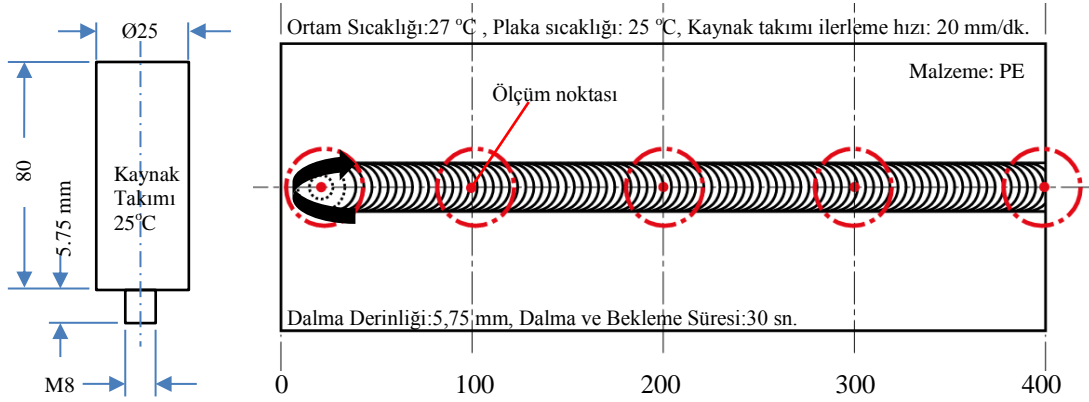
Bu birleştirme işlemlerinden gözlemlenen diğer bir husus ise polipropilen (PP) malzemenin polietilen' e (PE) göre birleştirme hattı boyunca ısı taşınmasının (Şekil 7.32) daha yüksek değerlerde olduğudur. Bu durumun birleştirme işlemi sonunda daha yüksek olan kristal lamel kalınlığından ve fibril yönlenmelerinden kaynaklandığını düşünmekteyiz.



Şekil 7.33 Kaynak takımı omuz dalma derinliğine bağlı olarak kaynak takımında oluşan ısı değerlerinin grafiksel gösterimi

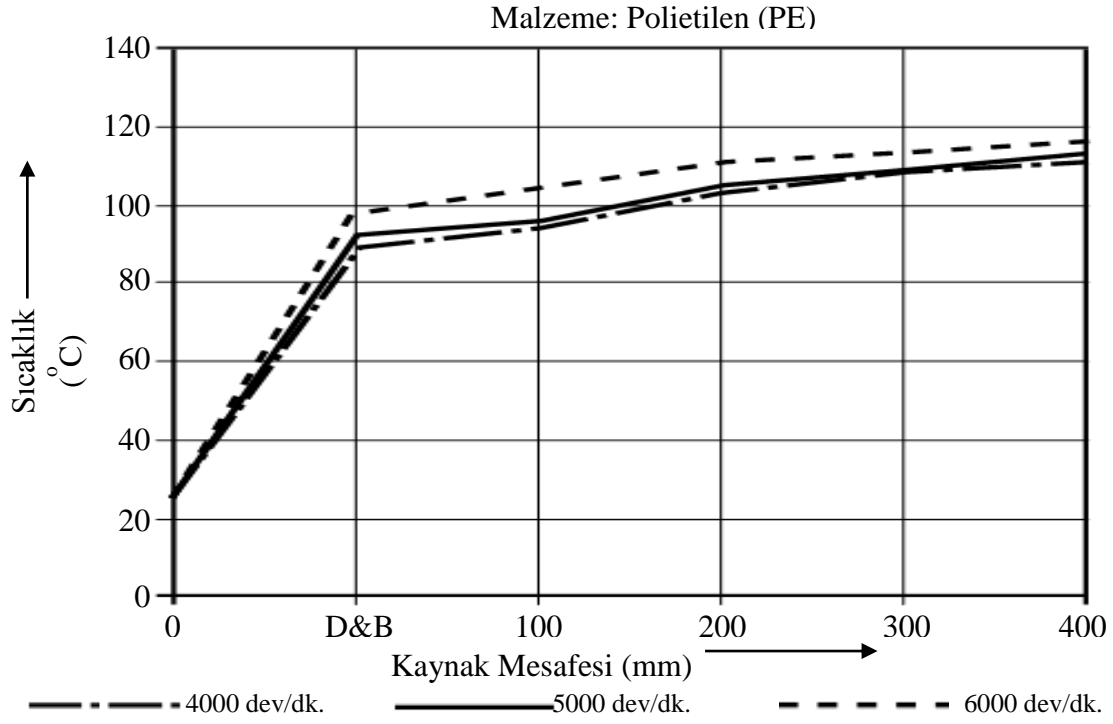
Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde takım devir hızının etkisinin belirlenmesi amacıyla, 4000, 5000 ve 6000 devir/dk. takım dönme hızlarında PE malzemeler SKK

ile birleştirilmiştir. 2M takımını (Şekil 6.10, Tablo 6.3) kullanılarak yapılan birleştirme işleminde sabit parametreler (Tablo 6.5 1,2 ve 3 Kodlu deneyler), 5,75 mm dalma derinliğinde 30 sn. dalma ve bekleme süresinde, 20 mm/dk. takım ilerleme hızıdır. En yüksek kaynak mukavemeti (22,02 MPa) 6000 devir/dk., en düşük kaynak mukavemeti (21,27 MPa) 4000 devir/dk. ile elde edilmiştir. SKK uygulamalarına ait plaka ve kaynak takımı sıcaklık ölçüm değerleri Şekil 7.34’ te gösterilmiştir. Şekil 7.35’de plakalara, Şekil 7.36’ da ise kaynak takımına ait sıcaklık ölçüm değerleri grafiksel olarak verilmiştir. Şekillerden takım devir hızının artışına bağlı olarak birleştirme bölgesinde oluşan sıcaklık değerlerinin arttığı görülmektedir. Takım devir hızının artırılmasıyla birleştirme bölgesindeki kaynak mukavemeti artmış ve kaynak performansı ana malzemeye yakın değerlerde elde edilmiştir. Bu durum, takım karıştırıcı uç çapı ve takım geometrisine bağlı olarak artan takım devir hızının termoplastik malzemelerde ısı taşınmasını kolaylaştırdığı ve daha iyi bir karışım sağlayarak kaynak nüfuziyeti ve mukavemetini arttırdığı şeklinde açıklanabilir.

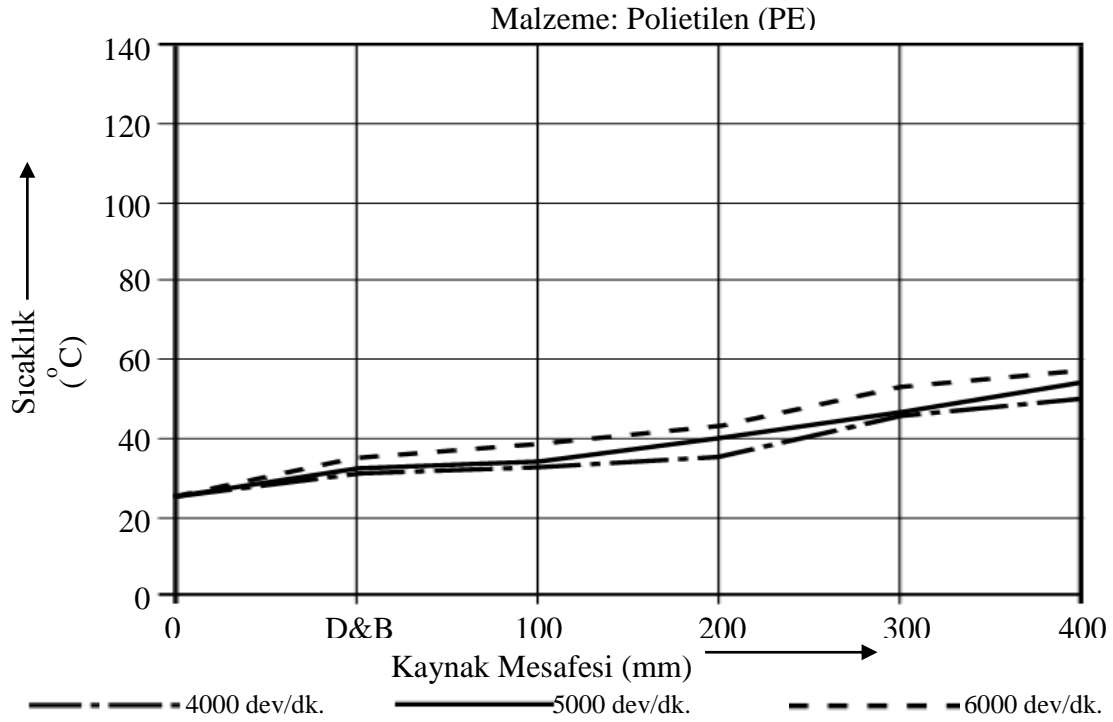


Deney Kodu	Takım Dönme Devri	Açıklama	Dalma ve Bekleme	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm
				1	5000 dev./dk	Plaka	92 °C
K.Takımı	32 °C	34 °C	40 °C	46 °C		54 °C	
2	6000 dev./dk	Plaka	98 °C	103 °C	111 °C	113 °C	116 °C
		K.Takımı	35 °C	38 °C	43 °C	53 °C	57 °C
3	4000 dev./dk	Plaka	89 °C	94 °C	103 °C	108 °C	111 °C
		K.Takımı	31 °C	32 °C	35 °C	45 °C	50 °C

Şekil 7.34 Kaynak takımı dönme devrine bağlı olarak PE levha birleşme bölgesi üst yüzeyde oluşan ısı değerleri



Şekil 7.35 Kaynak takımı dönme devrine bağlı olarak PE levha üst yüzeyde oluşan ısı değerleri



Şekil 7.36 Kaynak takımı dönme devrine bağlı olarak kaynak takımında oluşan ısı değerleri

7.9. Izod Darbe Deneyi Sonuçları

Izdo darbe deneyine ait sonuçlar tablo 7.12 de verilmiştir. Izod darbe deneyinde SKK ile birleştirilmiş termoplastik levhalarda ana malzemenin darbe direncine yakın değerlerde oldukça başarılı sonuçlar alınmıştır. PE referans numunenin darbe direnci 21,3 kJ/m², PP referans numunenin darbe direnci ise 6,9 kJ/m², olarak ölçülmüştür. Elde edilen değerler üreticinin belirttiği sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Kaynaklı bağlantılardan en yüksek darbe direnci (19,2 kJ/m²) % 90' lık darbe performansı ile takım dönme devri 6000 devir/dk., takım ilerleme hızı 20 mm/dk. olan 2 kodlu SKK ile birleştirilen PE kaynaklı bağlantıda elde edilmiştir. Takım dönme devri açısından elde edilen karşılaştırıldığında dönme devrinin artmasıyla darbe direncinin arttığı görülmüştür. Bu sonuç takım devri açısından diğer mekanik özelliklerle benzerlik göstermektedir. Bu durum takım dönme devrinin artmasıyla kaynak bölgesinde oluşan ısının iyi bir nüfuziyet ve karışım sağladığı ve kaynak performansı ve darbe direnci üzerinde etkili olduğu şeklinde açıklanabilir.

Takım ilerleme hızı açısından elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında takım dönme devri 4000 devir/dk., takım ilerleme hızı 20 mm/dk. olan 12-1 kodlu numunenin darbe direnci (17,9 kJ/m²), takım dönme devri 4000 devir/dk., takım ilerleme hızı 30 mm/dk. olan 12-2 kodlu numunenin darbe direncinden (17,3 kJ/m²), yüksek olmaktadır. Takım ilerleme hızının artmasına bağlı olarak darbe direncinde düşüşler meydana geldiği görülmüştür. Bu durum takım ilerleme hızının artırılmasıyla birleştirme bölgesinde yeterli karışım ve nüfuziyet sağlanamadığı ve buna bağlı olarak kaynak mukavametinin zayıfladığı şeklinde açıklanabilir.

M12 karıştırıcı uca sahip 12-1 kodlu SKK ile birleştirme işleminde elde edilen darbe direnci (18,2 kJ/m²), M8 karıştırıcı uç çapına sahip 4 kodlu SKK ile birleştirme işleminden elde edilen darbe direncinden (17,6 kJ/m²), yüksektir. Kaynak takımı karıştırıcı uç çapı açısından sonuçlar karşılaştırıldığında uç çapının artmasıyla darbe mukavemetinde artma meydana gelmiştir. Bu durum karıştırıcı uç çapının artmasıyla birleştirme bölgesine giren malzeme miktarının arttığı ve daha iyi bir karışım ve nüfuziyet sağlandığı şeklinde açıklanabilir. Tablo 7.13 te verilen kristallenme oranları bu durumu doğrulamaktadır.

Takım dönme devri 4000 devir/dk., takım ilerleme hızı 20 mm/dk. ve kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süresi 90 sn. parametre değerlerinde metrik, kare ve

silindirik uçlu takımlarla SKK birleştirmeleri gerçekleştirilmiştir. Takım geometrisi açısından sonuçlar karşılaştırıldığında geleneksel alüminyum stili kaynak takımı ile yapılan 12-2 kodlu birleştirme işleminde en yüksek darde direnci (17,9 kJ/m²), elde edilmiştir. Kare uçlu takım kullanılarak yapılan KT-01 kodlu birleştirme işleminde darbe direnci 12,8 kJ/m² silindirik uç geometrisine sahip takımla yapılan ST-01 kodlu birleştirme işleminde 9,5 kJ/m² darbe direnci elde edilmiştir. Takım geometrisi açısından metrik uçlu takımlarla yapılan birleştirme işlemlerinde kaynaklı bağlantının mukavemeti kare ve silindirik uçlu takımlardan daha yüksek olarak gerçekleşmektedir. Takım omzu dalma derinliği verilmeden SKK ile birleştirilen 29-09/01 kodlu PP numuneden % 84 oranında darbe performansı elde edilmiştir. Takım omzunun dalma derinliğinin artmasıyla malzeme yüzeyinde takım ilerleme yönünde kaynak takımı tarafından oluşturulan boşluk, darbe deneyinde ikinci bir çentik etkisi göstermiştir. Kırılmalar PP kaynaklı bağlantıya Şekil 6.26' da gösterilen Şekilde açılan çentikten ilerleyerek malzeme yüzeyinde takım omzu tarafından oluşturulan boşluğa doğru ilerlemiş ve Şekil 7.3 f' dekine benzer bir kırılma meydana gelmiştir. Bu durum takım ilerleme yönünde oluşan bu boşluğun kaynaklı bağlantının darbe mukavemetini azalttığı Şeklinde açıklanabilir.

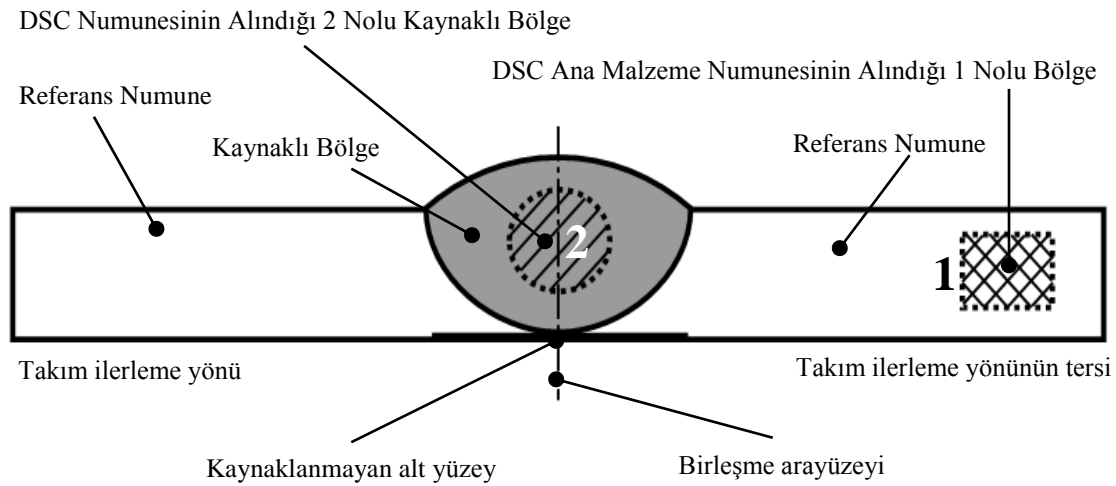
Tablo 7.12 Izod darbe deneyi sonuçları

Deney No	Darbe Direnci kJ/m ²	Darbe Performansı %	Açıklama
PE (Referans Numune)	21,3	100	Kırılma entik açılmış bölgeden başlayarak doğrusal olarak ilerlemiştir. Kırılma yüzeyi sünek bir yapı görüntüsüne sahip.
1	18,3	86	
2	19,2	90	
3	17,9	84	
4	17,6	82	
KT-01	12,8	60	
ST-01	9,5	45	
12-1	18,2	85	
12-2	17,9	84	
12-3	17,3	81	
PP (Referans Numune)	6,9	100	
29-09/01	5,8	84	Kırılma entik açılmış bölgeden başlamış, takım omzunun malzeme yüzeyinde oluşturduğu boşluğa doğru ilerlemiştir. Kırılma yüzeyi lifli bir yüzey görüntüye sahip.
29-09/02	5,3	77	
29-09/03	4,2	61	
29-09/04	3,1	45	

7.10. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Deneyi Sonuçları

DSC için numuneler Şekil 7.37’ de gösterilen 1 ve 2 nolu bölgelerden alınmıştır. Alınan numuneler hassas terazide ölçülerek kontrol edilmiştir. Kristalizasyon yüzdeleri, örneklerin DSC erime eğrileri altında kalan alanın hesaplanmasıyla elde edilen erime entalpilerinin (ΔH_m , J/g), polietilen ve polipropilenin %100 kristal haldeki erime entalpisine (PE için ΔH°_m : 293 J/g PP için: ΔH°_m : 209 J/g) oranlanmasıyla hesaplanmaktadır [89,90]. Tablo 7.13’ de referans numune ve SKK ile birleştirilmiş bölgelerdeki kristal yüzdeleri verilmiştir. Kristal hesaplamalarında kullanılan bağıntı aşağıdaki gibidir [89].

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H^{\circ}_m} \times 100 \quad (7.4)$$



Şekil 7.37 DSC için numune alınan bölgeler

Farklı parametre değerleri kullanılarak SKK ile birleştirilmiş polietilen ve polipropilen malzemelerden alınan örneklerin DSC erime eğrilerinden elde edilen erime pik sıcaklıkları (T_m) ve erime entalpileri kullanılarak, aşağıda belirtilen Gibbs-Thomson eşitliğiyle kristal lamel kalınlıkları hesaplanmıştır [89,90].

$$\frac{T_m}{T^{\circ}_m} = 1 - \frac{2\delta e}{\lambda \Delta H_m} \quad (7.5)$$

Denklemden T_m^0 denge erime sıcaklığını (PE:146 °C, PP:174 °C), δe kristallerin serbest yüzey enerjisini (PE:90 mJ/m², PP:29 mJ/m²), λ kristal lamel kalınlığını (nm), ΔH_m erime entalpisini (J/g) ifade etmektedir [89-91]. Tablo 7.14’ te örneklere ait hesaplanan kristal lamel kalınlıkları verilmiştir.

Polietilen ve polipropilen referans numuneye ait DSC erime eğrileri sırasıyla Şekil 7.39 ve Şekil 7.40’ da gösterilmiştir. DSC eğrilerinden polietilen malzemenin erime sıcaklığı (T_m) 134,7 °C, polipropilen malzemenin ergime sıcaklığı (T_m) ise 159,6 °C olarak ölçülmüştür.

Gibbs-Thomson eşitliğinden PE ve PP referans numune örneğinin erime pik değerleri kullanılarak hesaplanan lamel kalınlıkları sırasıyla 14,5 ve 37,5 nm’dir (Tablo 7.14). Yüksek sıcaklıklarda yapılan birleştirme işlemi sonrası, birleştirme bölgesinin yavaş soğuması ve buna bağlı olarak kristallenme oranının artışı beklenen bir durumdur. Ancak PE’ ne ait 1,2 ve 3 kodlu SKK ile birleştirme sırasında birleştirme bölgesinde ölçülen sıcaklık değerleri (Şekil 7.35) ve kristallenme oranları karşılaştırıldığında, kaynak takımı devir sayısının artmasıyla artan sıcaklığın kaynak bölgesinde kristal yüzdelere (X_c) azalttığı ve kristal lamel kalınlıklarını (λ nm) arttırdığı tespit edilmiştir (Tablo 7.13, Tablo 7.14). Beklentinin aksine bir sonuç elde edilmesinin, kaynak esnasında kısa karıştırma süreleriyle ilgili olduğu düşünülmektedir. Çünkü kısa karıştırma sürelerinde (Tablo 7.1, Şekil 7.35) artan sıcaklığın, ideal kaynak sıcaklığının altında ya da üstünde olması plastik kaynak bölgesinde nüfuziyeti ve buna bağlı olarak plastik kaynak mukavemetini negatif olarak etkilemektedir.

Çalışmalar esnasında yapılan deneysel incelemelerde sıcaklık artışının SKK ile birleştirilmiş bölgenin kristal miktarını ve kaynak performansını ana malzemeye yakınlaştırdığı tespit edilmiştir. İdeal üst yüzey kaynak sıcaklığı olarak belirlenen aralıklarda geçerli yapılan birleştirme işlemlerinden en iyi sonuçlar elde edilmektedir. PE numuneler için en yüksek kristallenme oranı (% 56) elde edilen 12-5 kodlu birleştirme işlemiyle, 2 kodlu birleştirme işlemine ait sonuçlar (% 49,1) karşılaştırılmıştır. Kristal oranı düşük olmasına rağmen ideal üst yüzey kaynak sıcaklık aralığında (104-115 °C) gerçekleştirilen 2 kodlu birleştirme işlemine ait çekme mukavemetinin (22,02 MPa) daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum kristallenme miktarındaki artışın, kaynaklı bağlantının uzama oranlarını düşürdüğü ve bu nedenle daha düşük çekme mukavemet değerleri elde edildiği şeklinde açıklanabilir. Bu aslında

beklenen bir durumdur. Çünkü plastik malzemelerde uzama önce amorf bölgelerden başladığı için, haliyle uzama miktarları da artmaktadır.

Tablo 7.13, Tablo 7.14 ve Tablo 7.15' ten M12 (12-1 kodlu deney) ve M8 (4 kodlu deney) karıştırıcı uç çapı kullanılarak SKK ile birleştirilen PE numunelere ait deney sonuçları karşılaştırıldığında, karıştırıcı uç çapının birleştirme bölgesindeki kristallenme oranı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Karıştırıcı uç çapının artmasına bağlı olarak kristallenme oranının arttığı, kristal lamel kalınlıklarının düştüğü görülmüştür. Karıştırıcı uç çapı kaynaklı bağlantının performansını etkilemektedir (Tablo 7.15). Karıştırıcı uç çapının artması kaynak bağlantı performansını arttırmaktadır. Bu durum büyük seçilen karıştırıcı uç çapının birleştirme bölgesinde daha iyi karışım sağladığı ve buna bağlı olarak kaynak nüfuziyetini arttırdığı şeklinde açıklanabilir.

Aynı şekilde kaynak takımı karıştırıcı uç kısmının sahip olduğu geometri ile kristallenme ve kristal lamel kalınlıkları arasında bir ilişki vardır. Aynı parametre değerleri (Tablo 6.5) kullanılarak, metrik (12-2 kodlu deney), kare (KT-01 kodlu deney) ve silindirik (ST-01 kodlu deney) uç geometrilerine sahip takımlarla yapılan birleştirme işlemlerinden en iyi sonuç metrik uçlu takımlarla (% 55,3) elde edilmiştir (Şekil 7.38). Birleştirme bölgesinde daha iyi karışım sağlayan, eriyen ve plastik kıvamına gelen malzemeyi kaynak bölgesine daha yoğun taşıyan ve sıvama işlemini yapan uç geometrisine sahip takımlarla yapılan birleştirme işlemlerinden en iyi sonuçlar elde edilmektedir. Bu nedenle termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde kullanılmak üzere kaynak takımları tasarlanırken, karıştırıcı uç çapının kaynak performansı üzerinde etkili olduğu göz önünde bulundurulmalı ve kaynak bölgesinde karışım sağlayacak şekilde bir uç tasarımı yapılmalıdır. Tablo 7.15' te kristallenme oranı ve kristal lamel kalınlıklarının eğme ve çekme mukavemeti üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Şekil 7.38' de ise kaynak parametrelerine bağlı olarak PE numunelerde SKK ile birleştirme sonrasında oluşan kristallenme oranı ile kristal lamel kalınlıkları arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 7.13 Referans numune ve SKK ile birleştirilmiş numunelerdeki kristal yüzdeleri

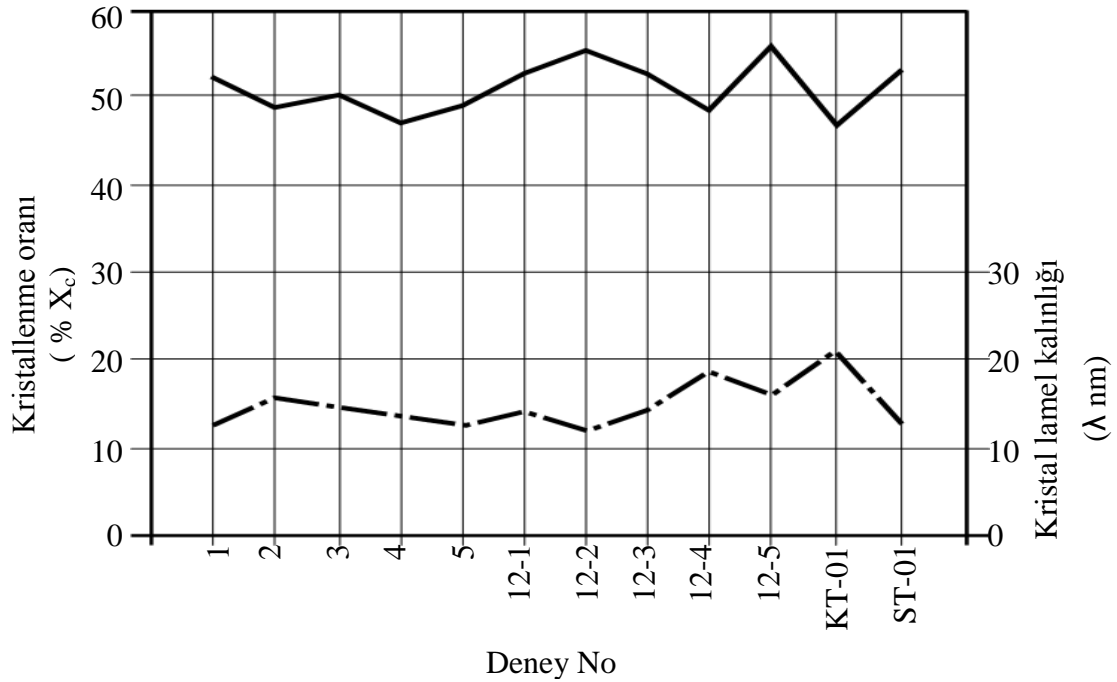
Deney Kodu	ΔH_m (J/g)	ΔH°_m (J/g)	Açıklama	(%) X_c
PE Referans Numune	160	293	PE Referans Numune (1 Nolu Bölge)	54,6
1	153	293	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	52,2
2	144	293	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	49,1
3	147	293	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	50,2
4	139	293	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	47,4
5	144	293	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	49,1
12-1	154	293	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	52,6
12-2	162	293	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	55,3
12-3	155	293	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	52,9
12-4	143	293	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	48,8
12-5	164	293	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	56,0
KT-01	138	293	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	47,1
ST-01	154	293	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	52,6
PP Referans Numune	86,2	209	PP Referans Numune (1 Nolu Bölge)	41,2
29/09-01	62,6	209	PP Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	30,0
29/09-02	66,8	209	PP Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	32,0
29/09-03	65,4	209	PP Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	31,3
29/09-04	66,01	209	PP Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	31,6

Tablo 7.14 Referans numune ve SKK ile birleştirilmiş numunelerdeki kristal lamel kalınlıkları

Deney Kodu	ΔH_m (J/g)	δe (mJ/m ²)	T_m (°C)	T°_m (°C)	Açıklama	λ (nm)
PE Referans Numune	160	90	134,7	146	PE Ana Malzeme (1 Nolu Bölge)	14,5
1	153	90	133,3	146	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	12,9
2	144	90	135,4	146	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	15,5
3	147	90	134,8	146	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	14,7
4	139	90	134,1	146	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	13,8
5	144	90	132,9	146	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	12,5
12-1	154	90	134,5	146	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	14,3
12-2	162	90	132,2	146	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	11,9
12-3	155	90	134,5	146	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	14,3
12-4	143	90	137,1	146	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	18,5
12-5	164	90	136,0	146	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	16,4
KT-01	138	90	138,2	146	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	21,1
ST-01	154	90	133,2	146	PE Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	12,8
PP Referans Numune	86,2	29	159,6	174	PP Ana Malzeme (1 Nolu Bölge)	37,5
29/09-01	62,6	29	164,2	174	PP Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	55,1
29/09-02	66,8	29	163,0	174	PP Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	49,1
29/09-03	65,4	29	165,5	174	PP Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	63,5
29/09-04	66,01	29	165,5	174	PP Kaynak Bölgesi (2 Nolu Bölge)	63,5

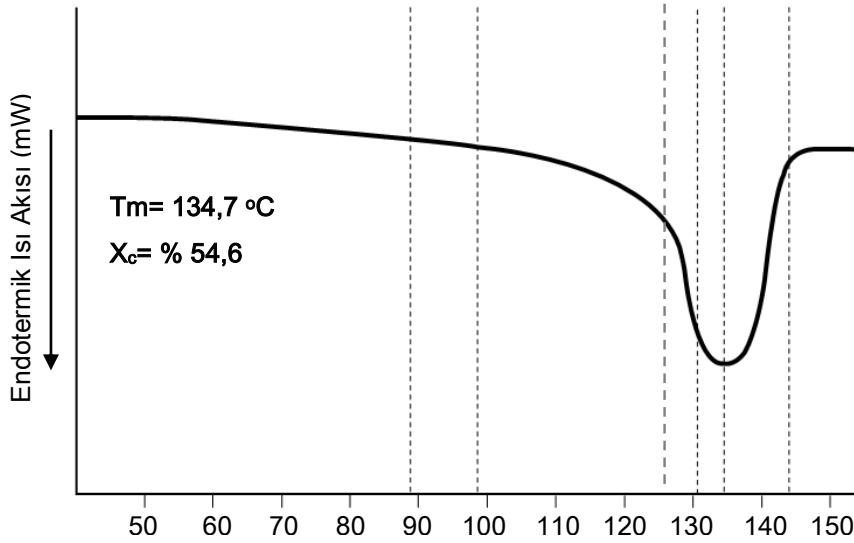
Tablo 7.15 SKK ile birleştirilmiş termoplastiklerde kristallenme oranı ve kristal lamel kalınlıklarıyla, çekme ve eğme mukavemeti arasındaki ilişki

Deney Kodu	Kristallenme Oranı (% X_c)	Kristal Lamel Kalınlığı (λ nm)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Eğme Mukavemeti (MPa)
PE (Referans Numune)	54,6	14,5	22,97	25,84
1	52,2	12,9	21,53	21,01
2	49,1	15,5	22,02	29,90
3	50,2	14,7	21,27	28,55
4	47,4	13,8	20,83	31,46
5	49,1	12,5	21,04	30,53
12-1	52,6	14,3	21,18	31,81
12-2	55,3	11,9	20,89	33,47
12-3	52,9	14,3	20,64	31,61
12-4	48,8	18,5	17,78	28,45
12-5	56,0	16,4	16,72	32,09
KT-01	47,1	21,1	18,15	31,37
ST-01	52,6	12,8	15,62	14,23
PP (Referans Numune)	41,2	37,5	35,11	54,10
29/09-01	30,0	55,1	30,11	44,91
29/09-02	32,0	49,1	12,93	16,45
29/09-03	31,3	63,5	6,06	13,10
29/09-04	31,6	63,5	4,28	11,48

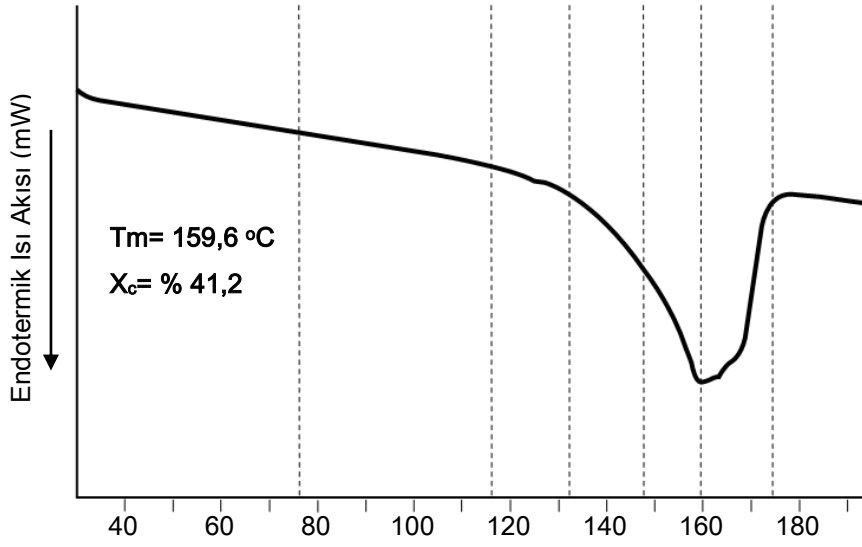


Şekil 7.38 PE numunelerde kristallenme oranı ve kristal lamel kalınlıkları arasındaki ilişki

Şekil 7.39’ da PE referans numuneye, Şekil 7.40’ da ise PP referans numuneye ait DSC eğrileri gösterilmiştir. Polietilen’e ait kristallenme oranı % 54,6 ve kristal erime sıcaklığı 134,7 °C olarak bulunmuştur. Literatürde PE için kristallenme oranı % 55-77 ve kristal erime sıcaklığı 135 °C olarak ifade edilmiştir [93]. Polipropilen’ e ait kristallenme oranı % 41,2 ve kristal erime sıcaklığı 159,6 °C olarak bulunmuştur. Literatürde izotaktik PP için kristallenme oranı % 40-70 ve kristal erime sıcaklığı 160 °C olarak ifade edilmiştir [94,95]. Elde edilen sonuçlar literatürde belirtilen değerlerle benzerlik göstermekte ve üreticinin verdiği diğer değerlere uymaktadır [85,86]. PE’nin kristalleşme oranının PP’ den yüksek olması beklenen bir durumdur. Soğuma hızının kristalleşme üzerinde etkili olduğu ve yavaş soğuma hızının kristallenme oranını arttırdığı bilinmektedir (Şekil 2.1). DSC sonucunda referans numunelerde elde edilen kristallenme oranları alt sınıra yakın olarak gerçekleşmiştir. Bu durumun termoplastik levhaların üretimi esnasında proses sıcaklığından hızlı olarak soğutuldukları ve daha fazla kristalleşme için soğuma zamanının yeterli olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar bunu desteklemektedir. Kristalleşme oranı termoplastiklerin mekanik özellikleri ve yumuşama sıcaklıkları üzerinde etkili olmaktadır. Bu nedenle termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde kristalleşme oranının önemi büyüktür.

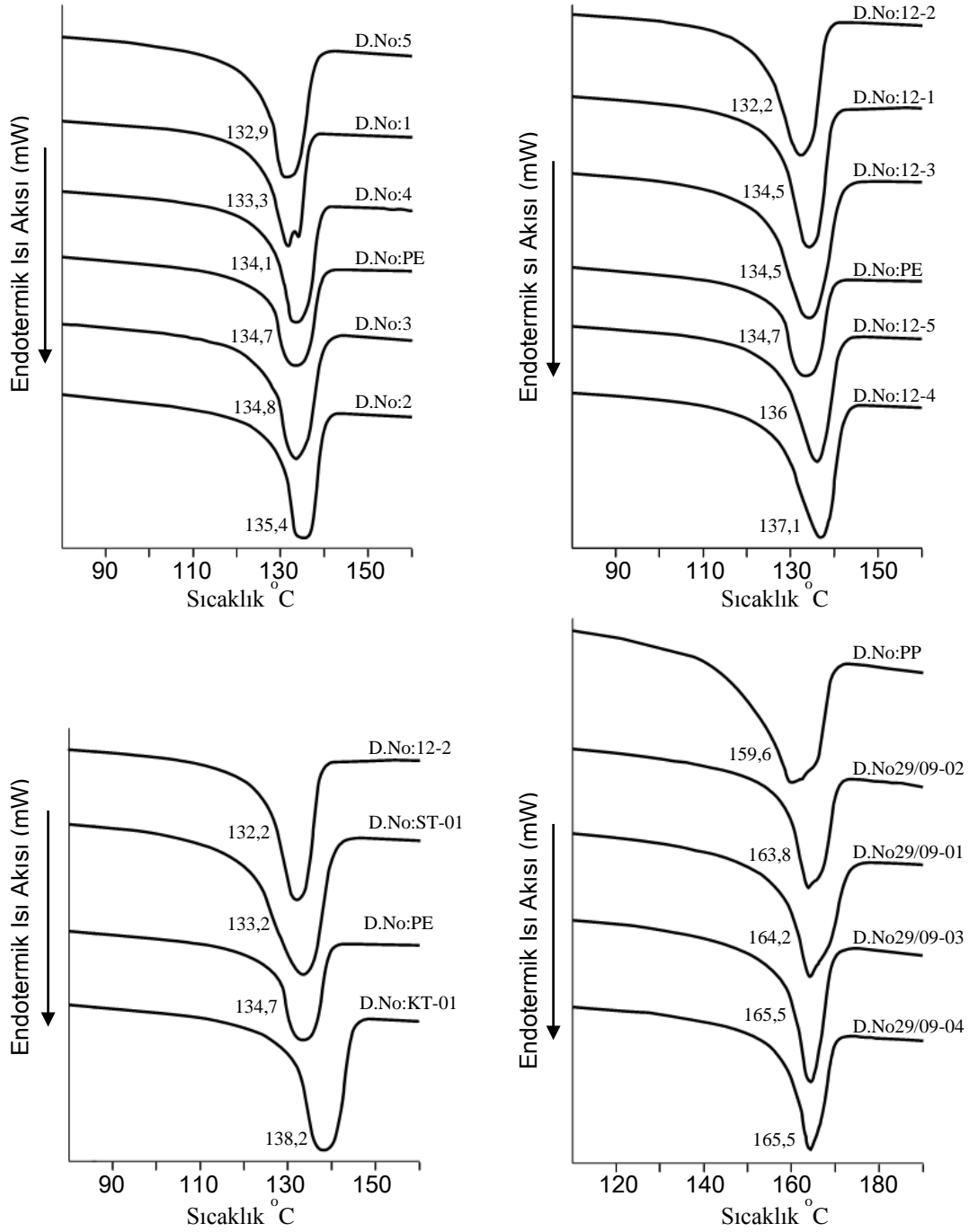


Şekil 7.39 Polietilen referans numuneye ait DSC eğrisi



Şekil 7.40 Polipropilen referans numuneye ait DSC eğrisi

Şekil 7.41’ de SKK ile birleştirilmiş numunelerinin karşılaştırma yapmak amacıyla toplu şekilde DSC erime eğrileri verilmiştir. Erime eğrilerine ait grafiklerin tamamı EK-1’ de tek bir grafik şeklinde verilmiştir. DSC eğrileri incelendiğinde 1 kodlu birleştirme işlemine ait DSC eğrisinde (Malzeme: PE) SKK ile birleştirilmiş bölgeden alınan örneğin ikili erime tepesi ($T_{m1}:133,3\text{ °C} / T_{m2}:136,8\text{ °C}$) gösterdiği gözlemlenmiştir. 1 kodlu numuneye ait PE malzemenin kaynak parametreleri incelendiğinde, 5000 devir/dk. dönme devrinde, 20 mm/dk. takım ilerleme hızında ve 105 °C sıcaklık ortalaması (ideal birleştirme üst yüzey sıcaklığı aralığında) ile SKK ile birleştirme işleminin gerçekleştirildiğini görmekteyiz. İkili erime tepesi oluşmasının PE malzemenin SKK ile birleştirilmesi esnasında, kristal tabakalar (lamel) arasındaki amorf bölgelerde bulunan molekül zincirlerinin hareketlilik kazanmasıyla malzemede yeni kristal yapıların oluştuğu ve bunların daha düşük sıcaklıklarda eriyen ince tabakalar şeklinde düzenlenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [89]. DSC grafikleri ve elde edilen sonuçlar (Tablo 7.13, Tablo 7.14, Tablo 7.15) karşılaştırıldığında, termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesi esnasında polimer zincirlerinin oldukça dinamik bir davranış gösterdiği, birleştirme bölgesinde oluşan ısı ve soğuma süresine bağlı olarak yeniden kristallenme ve erime olaylarının birlikte gerçekleştiği düşünülmektedir [89].



Şekil 7.41 Polietilen ve Polipropilen referans numune ve kaynaklı bağlantı numunelerine ait DSC erime eğrileri

DSC sonuçları incelendiğinde, SKK kaynak parametrelerinin termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde erime sıcaklığı, kristallenme oranı ve kristal lamel kalınlıkları ve kaynak sonrası mekanik özellikler üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu

gözlemlenmiştir. Kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süresinin arttırılması, kaynaklı bölgenin kristal yüzdeleri ve lamel kalınlıklarını düşürmüştür. Takım ilerleme hızının etkileri açısından elde edilen sonuçlar incelendiğinde, takım ilerleme hızının artması kaynak bölgesinde kristal lamel kalınlıklarını arttırırken, kristal yüzdeleri ise azaltmıştır. Bu durum birleştirme esnasında yeterli karıştırma ve nüfuziyet olmamasıyla açıklanabilir. Kristal yüzdeleri ile kristal lamel kalınlıkları arasında takım ilerleme hızı açısından karşılaştırıldığında ters bir ilişki söz konusudur. Bu ilişki kristal lamel kalınlıklarının artışı, kristal yüzdeleri azalması şeklinde gerçekleşmektedir (Şekil 7.38). Ayrıca SKK esnasında takım ilerleme hızının arttırılmasıyla kaynak bölgesinde meydana gelen sıcaklığın kaynak sonrası oluşan kristal lamel kalınlığı ve kristal yüzdeleri üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 7.34, Şekil 7.35, Tablo 7.15).

Takım geometrisi ve karıştırıcı uç çapı açısından sonuçlar karşılaştırıldığında, karıştırıcı uç çapının artmasıyla kristal yüzdeleri arttığı, kristal lamel kalınlıklarının ise azaldığı gözlemlenmiştir. Takım geometrisinin kaynak sonrası oluşan kristal yüzdeleri, kristal lamel kalınlıkları ve ergime sıcaklıkları üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Kare uçlu takımlarla yapılan birleştirme işlemlerinin silindirik ve metrik uç geometrisine sahip takımlara oranla kristal lamel kalınlığını arttırdığı, kristal yüzdeleri ise azalttığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.19, Şekil 7.29, Şekil 7.38).

SKK ile birleştirilen PP numuneler üzerinde omuz dalma derinliğinin etkisi incelendiğinde, dalma derinliğinin artmasıyla ergime sıcaklığı ve kristal yüzdeleri artmıştır (Tablo 7.15, Şekil 7.41). Kristal lamel kalınlığı 0,25 mm dalma derinliğinde azalmış, 0,75 ve 1 mm dalma derinliklerinde ise birleştirme bölgesinde oluşan sıcaklık değerlerine (Şekil 7.31, Şekil 7.32) bağlı olarak artmıştır. Omuz dalma derinliğinin artmasıyla birleştirme bölgesinde artan basınç sıcaklığı arttırmış ve yüksek sıcaklıklarda birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklıktan yavaş olarak soğuyan kaynaklı bölgede buna bağlı olarak kristal oranları artmıştır. Bu beklenen bir durumdur. SKK ile birleştirme işlemi sonrasında kaynak bölgesinde oluşan kristal yüzdeleri ve kristal lamel kalınlıklarının kaynaklı birleştirmelerin mekanik özellikleri ve SKK kaynağı kaynak performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 7.15).

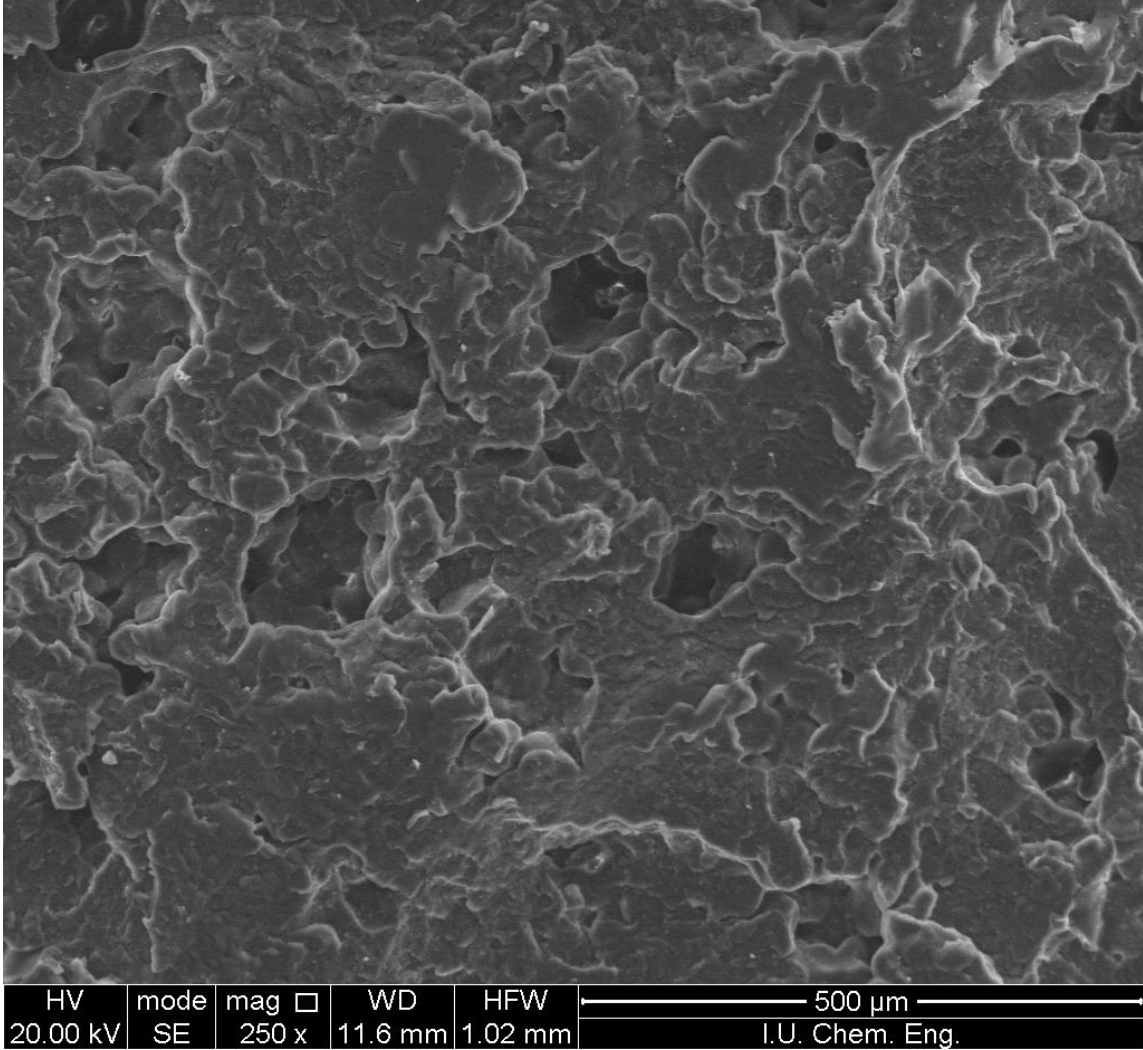
7.11. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

Polietilen ve polipropilen termoplastik levhaların birleştirme bölgelerine ve referans numuneye ait mikroyapı incelemeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır. Şekil 7.42' de polipropilen levhaların birleştirme bölgesi dışındaki referans numuneye ait SEM fotoğrafı gösterilmektedir. Şekil 7.42' de gösterilen mikroyapıdan da anlaşılacağı üzere, birleştirme işlemi öncesi PP levha içyapısındaki izotaktik bloklar doğası gereği PE' den daha sert bir yapı oluşturmakta ve malzemenin dayanımını arttırmaktadır. PP'nin birleştirme öncesi sahip olduğu sert yapısı nedeniyle, PE' ne göre kaynak performansı daha düşük olmaktadır. SKK ile birleştirme işlemi öncesinde Polipropilen levhaya ait molekül zincirlerinde belirgin bir yönlenme gözlemlenmemektedir. Polipropilen mikroyapısının daha düzgün ve daha fazla hücre yoğunluğuna sahip bir görüntü sergilemesi, Tablo 7.13 ve Tablo 7.14 te verilen kristal yüzdeleri ve kristal lamel kalınlıkları ile uyumluluk göstermektedir.

Şekil 7.42' de verilen PP referans numunenin çekme kopma kırık yüzey SEM görüntüsünde, yapının sert gevrek ve yüzey şekillerinde belirgin bir yönlenme olmadığı görülmektedir. Aynı şekilde kırık yüzeyinde kayda değer deformasyonlar oluşmamıştır. Bu durum PE'ne göre daha sert ve gevrek (Tablo 7.5) olan PP'nin yapısı ile ilişkilidir. PP'nin daha düzgün ve daha fazla hücre yoğunluğuna sahip bir görüntü sergilemesi Tablo 7.13 ve Tablo 7.14' te verilen kristal yüzdeleri ve kristal lamel kalınlıkları ile uyumluluk göstermektedir.

Şekil 7.43, Şekil 7.44 ve Şekil 7.45' de 29/09-01 ve 29-09-02 kodlu birleştirme işlemlerine ait SKK ile birleştirme işlemi sonrası çekme kopma kırık yüzey SEM görüntüsü verilmektedir. Bu görüntülerde Şekil 7.42' de gösterilen birleştirme öncesi referans numuneye ait mikroyapı görüntüsünden farklı olarak, kaynak esnasında uygulanan sıcaklık ve basınca bağlı oluşan mikroyapıların farklılaştığı ve fibrillerde yönlenme olduğu gözlemlenmektedir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi uygulanan parametre değerlerine (Tablo 6.6) bağlı olarak kırık yüzey fibril boyutlarında belirgin bir şekilde kısalma meydana gelmektedir. Termoplastiklerin birleşmesinde kullanılan takım omzu dalma derinliğinin artırılmasının fibril boylarında kısalmaya neden olduğu düşünülmektedir. Fibril boylarındaki bu yoğunluk azalmasının ürün performansını ve mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Fibril boyutlarındaki yoğunluk azalmasının SKK ile birleştirilmiş PP malzeme üzerindeki etkisi Tablo 7.2 ve

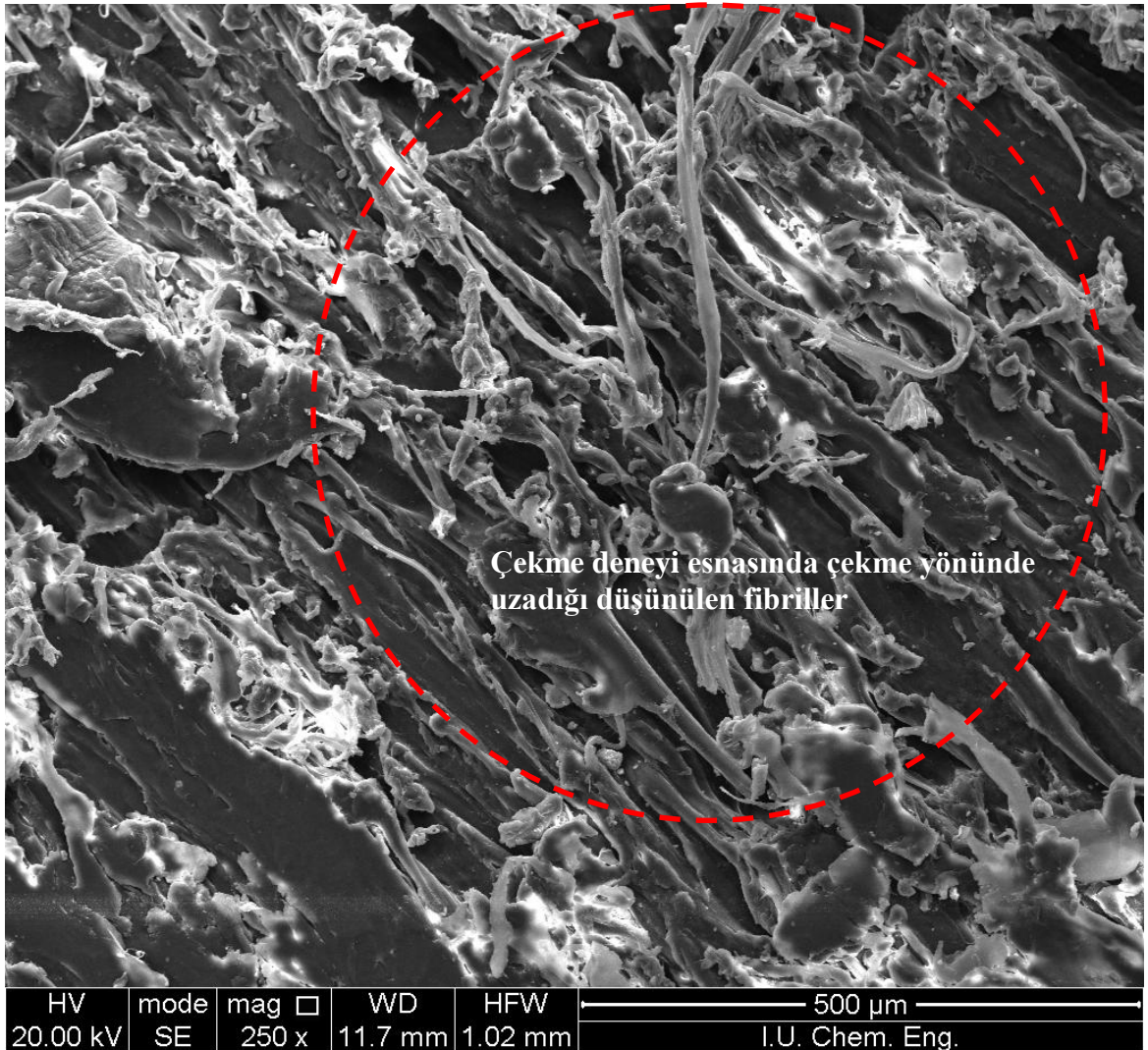
Tablo 7.4' te verilen çekme ve eğme deney sonuçlarından da gözlemlenebilmektedir. Şekil 7.42, Şekil 7.43 ve Şekil 7.44' te verilen mikroyapı görüntüleri (Sünek kopma yüzeyi) Tablo 7.13, Tablo 7.14 ve Tablo 7.15' teki DSC sonuçlarıyla da uyumluluk göstermektedir.



Şekil 7.42 Polipropilen referans numuneye ait çekme deney sonrası kırılma yüzeyi SEM görüntüsü

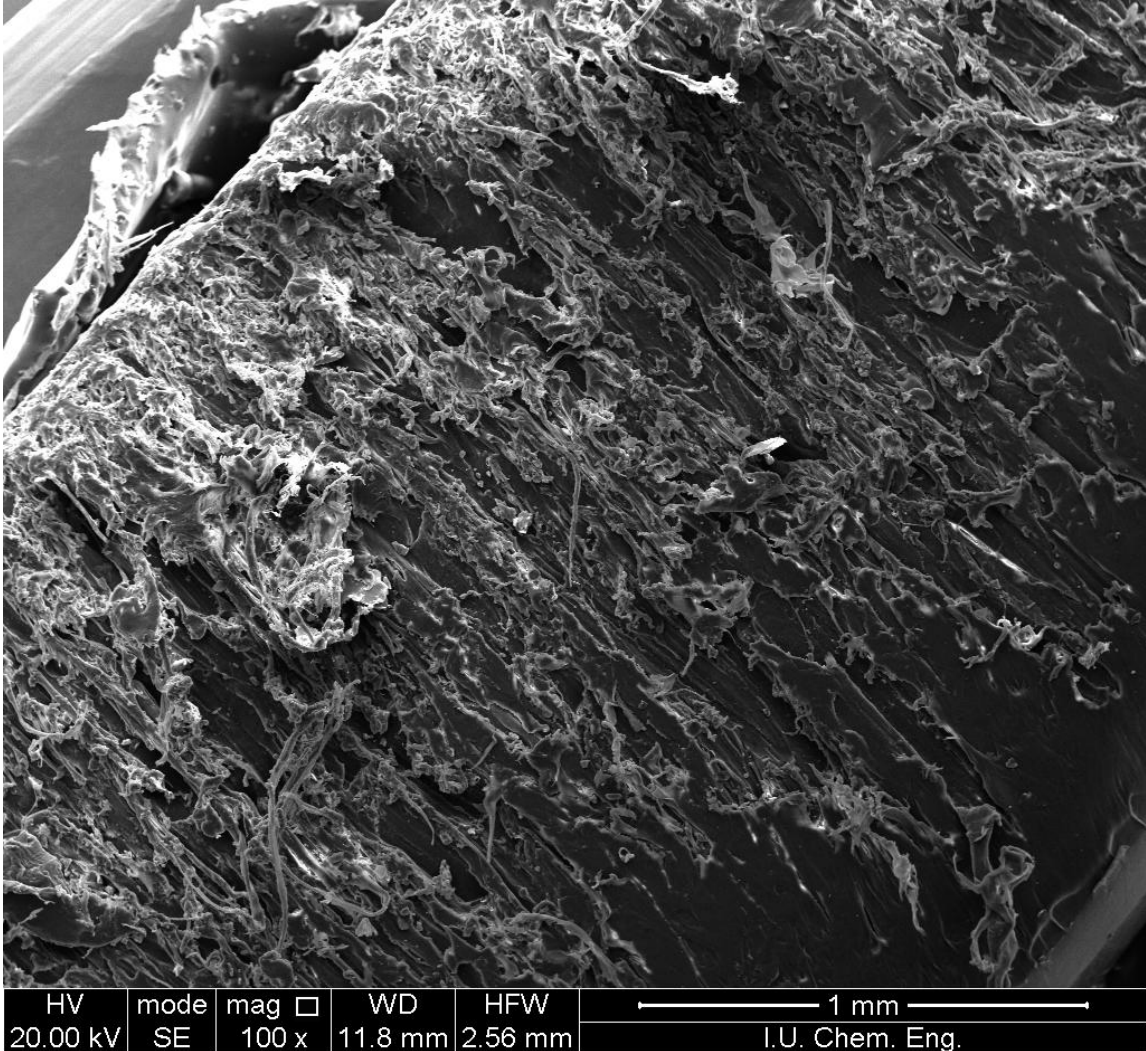
Takım omzu dalma derinliğinin SKK ile birleştirme işlemi sonrası mikoyapıda değişikliklere neden olduğu düşünülmektedir. Omuz dalma derinliği verilmeden yapılan 29/09-01 kodlu birleştirme işleminde PP'nin çekme mukavemeti 30,11 MPa olarak tespit edilmiştir. Dalma derinliği 0,25 mm olarak verilen 29/09-02 kodlu birleştirme işleminde çekme mukavemeti 12,90 MPa, 0,75 mm verilen 29/09-03 kodlu birleştirme

işleminde 6,06 ve 1 mm verilen 29/09-04 kodlu birleştirme işleminde 4,28 MPa olarak ölçülmüştür (Şekil 7.4, Tablo 7.2). Verilen sonuçlardan ve kırık yüzeye ait SEM mikroyapı görüntülerinden de anlaşılacağı gibi dalma derinliğinin artması plastik kaynak birleştirme bölgesinde fibril boylarında farklılıklara neden olmaktadır. Takım omzu dalma derinliğinin artmasıyla sıcaklık ve basınca bağlı olarak fibril boylarında meydana gelen kısalmanın, birleştirme bölgesinde daha gevrek bir yapı neden olduğunu düşündürmektedir. Nispeten oluşan bu gevrek yapı sonucu kaynak bölgesinde nüfuziyet azalmakta ve buna bağlı olarak kaynak mukavemeti düşmektedir. PP'ne ait SEM yüzey görüntüleri (Şekil 7.43, Şekil 7.45), çekme ve eğme deney sonuçları (Tablo 7.2, Tablo 7.4) bu durumu doğrulamaktadır.

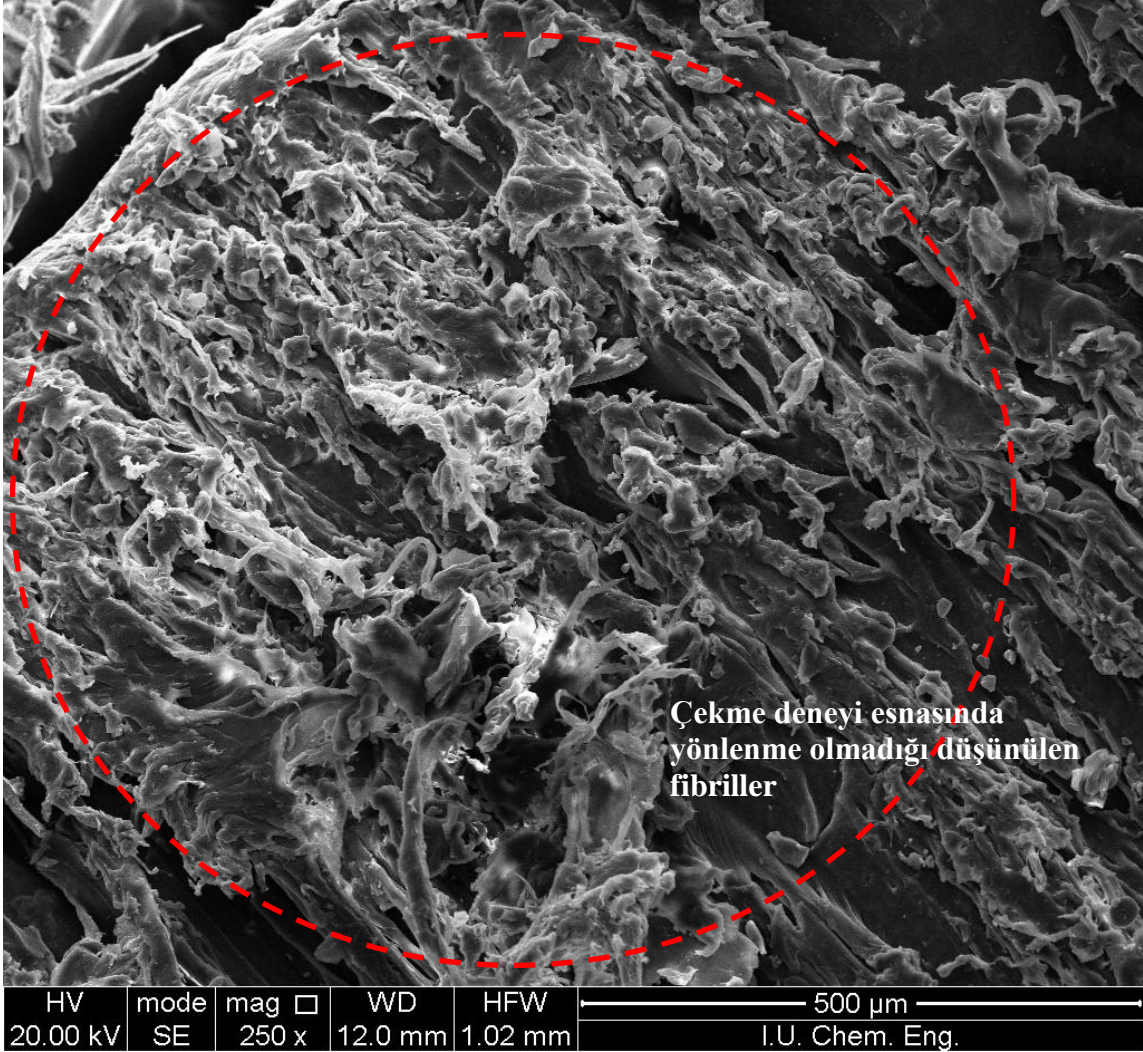


Şekil 7.43 29/09-01 kodlu numuneye ait çekme deney sonrası birleşme bölgesi kırılma yüzeyi SEM görüntüsü (Sünek kopma)

Şekil 7.43’ de verilen kırık yüzey SEM görüntüsünde uzun olan fibrillerin çekme deneyi esnasında uygulanan çekme kuvveti doğrultusunda yönlenecek malzemede sünek bir kopma meydana getirdiği gözükmektedir. 7.43’ de kırmızı daire içinde verilen fibrillere ait görüntülerde fibrillerde oluşan yönlenme bunu doğrular niteliktedir. Şekil 7.45’ te verilen kırık yüzey SEM görüntüsünde ise fibril boylarındaki uzamanın kısa ve sınırlı olması, çekme deneyi esnasında malzemede nispeten gevrek bir kopma meydana geldiğini düşündürmektedir. Şekil 7.45’ te kırmızı daire içinde verilen kısa fibriller nispeten gevrek bir kopma meydana geldiğini doğrulamaktadır.



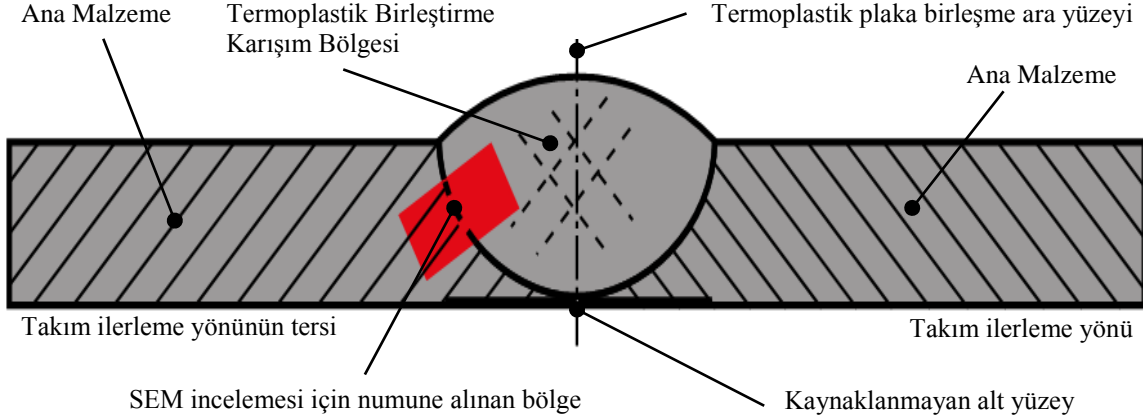
Şekil 7.44 29/09-02 kodlu numuneye ait çekme deney sonrası birleşme bölgesi kırılma yüzeyi SEM görüntüsü



Şekil 7.45 29/09-02 kodlu numuneye ait çekme deney sonrası birleşme bölgesi kırılma yüzeyinde oluşan fibrillerin SEM görüntüsü (Fibrillerde yönlenme yok)

Şekil 7.47' de gösterilen 2 kodlu SKK ile birleştirilen termoplastik (polietilen) numuneye ait SEM görüntüsü kaynak bölgesinden Şekil-7.46' te gösterilen şekilde kesilerek alınmış ve SEM incelemesine tabi tutulmuştur. Şekil 7.47' de ana malzeme ile birleştirme bölgesinin birbirinden belirgin bir şekilde ayrıldığı gözlemlenmektedir. Metallerdeki yapının aksine termoplastikler için çok geniş bir ITAP aralığı olarak ifade edilebilecek bir bölge söz konusu değildir. Bunun yerine Şekil 7.48' de daha belirgin bir şekilde görülen çok ince bir çizgi şeklinde bir birleşme ara yüzeyinden söz etmek mümkündür. Bu birleşme ara yüzeyinin her iki tarafında kalan bölgeler (ana malzeme ve termoplastik karışım bölgesi) makro ölçülerde homojen görünmesine rağmen mikro

ölçüde (SEM) yapılan incelemelerde birbirinden oldukça farklı bir yapı sergilemektedir. Bu farklılığın termoplastiklerin birleştirme esnasında birleştirme bölgesinde oluşan sıcaklık ve basıncın etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

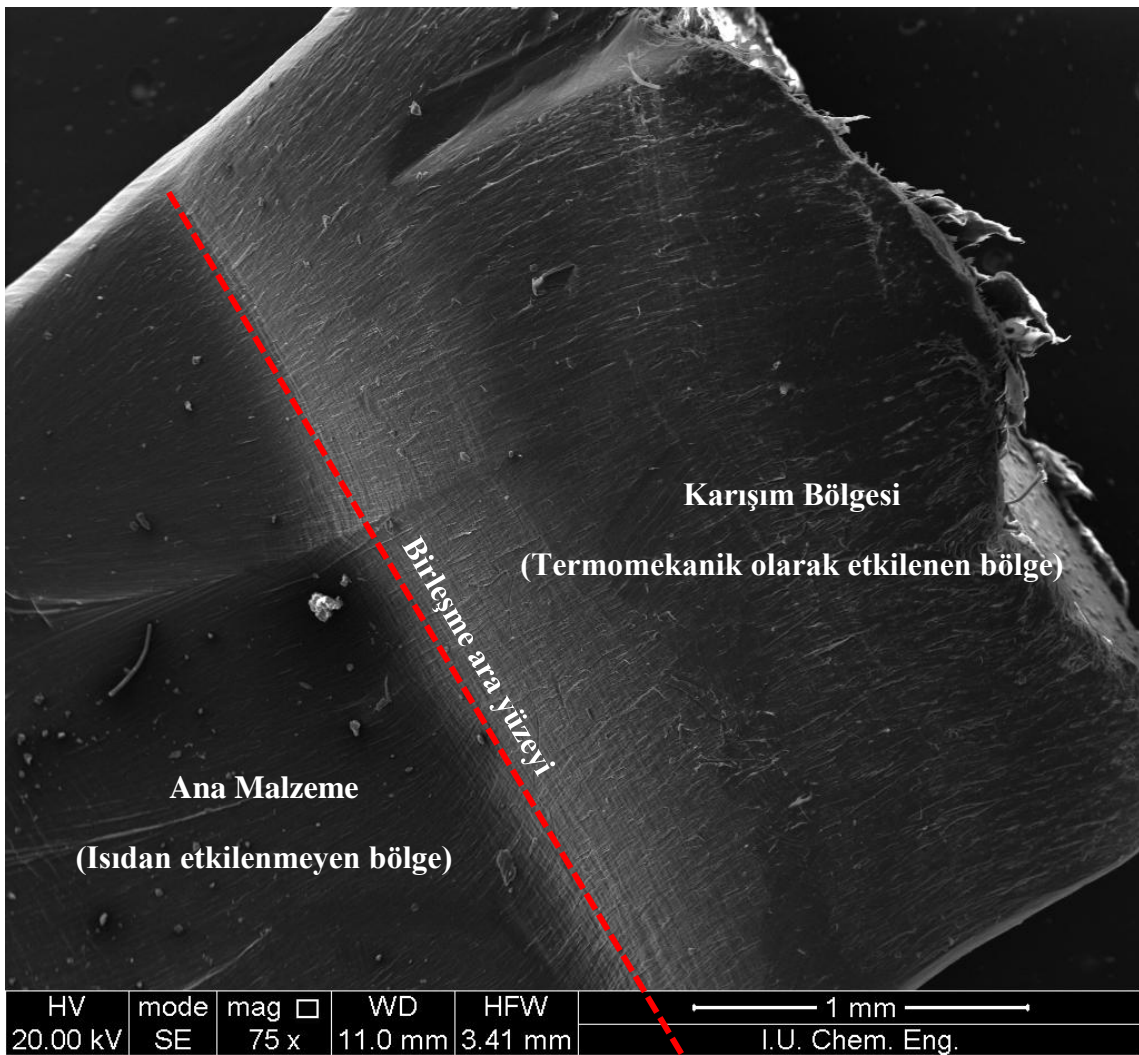


Şekil 7.46 2 deney kodlu birleştirme işleminden SEM için numune alınması

Şekil 7.47’ de gösterilen bölgeye biraz daha yakından bakıldığında (Şekil 7.48) birleşme arayüzeyi ince bir çizgi şeklinde daha belirgin olarak görülmektedir. Birleşme arayüzeyi’nin oluşmasında karışım bölgesinden ana malzemeye doğru taşınan ısı iletiminin etkili olduğu düşünülmektedir. Isı iletiminin termoplastik malzemenin ergimesi için yeterli olmadığı ana malzeme ile kaynak takımı tarafından ertirilerek plastik kıvamına getirilmiş malzemenin sıcaklık farkının oluşturduğu bir sınır noktası şeklinde oluştuğu düşünülmektedir. Yapılan pek çok farklı numuneye ait SEM incelemelerinde aynı şekilde birleşme ara yüzeyi görüntüsüne rastlanmıştır. Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinden sonra kaynak bölgesinde oluşan mikroyapılarla ilgili literatürde daha önce ifade edilenlerin aksine yeni bir tanımlama yapılması gerektiği düşünülmektedir. Elde edilen SEM görüntülerinden ve incelemelerden sonra yaptığımız sınıflandırma denemesi Şekil 7.49’ da verilmiştir. Sınıflandırma denemesi yapılırken birleştirilmeyen kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı altında kalan bölgeye (D) ait SEM görüntüsü Şekil 7.51’ de verilmiştir.

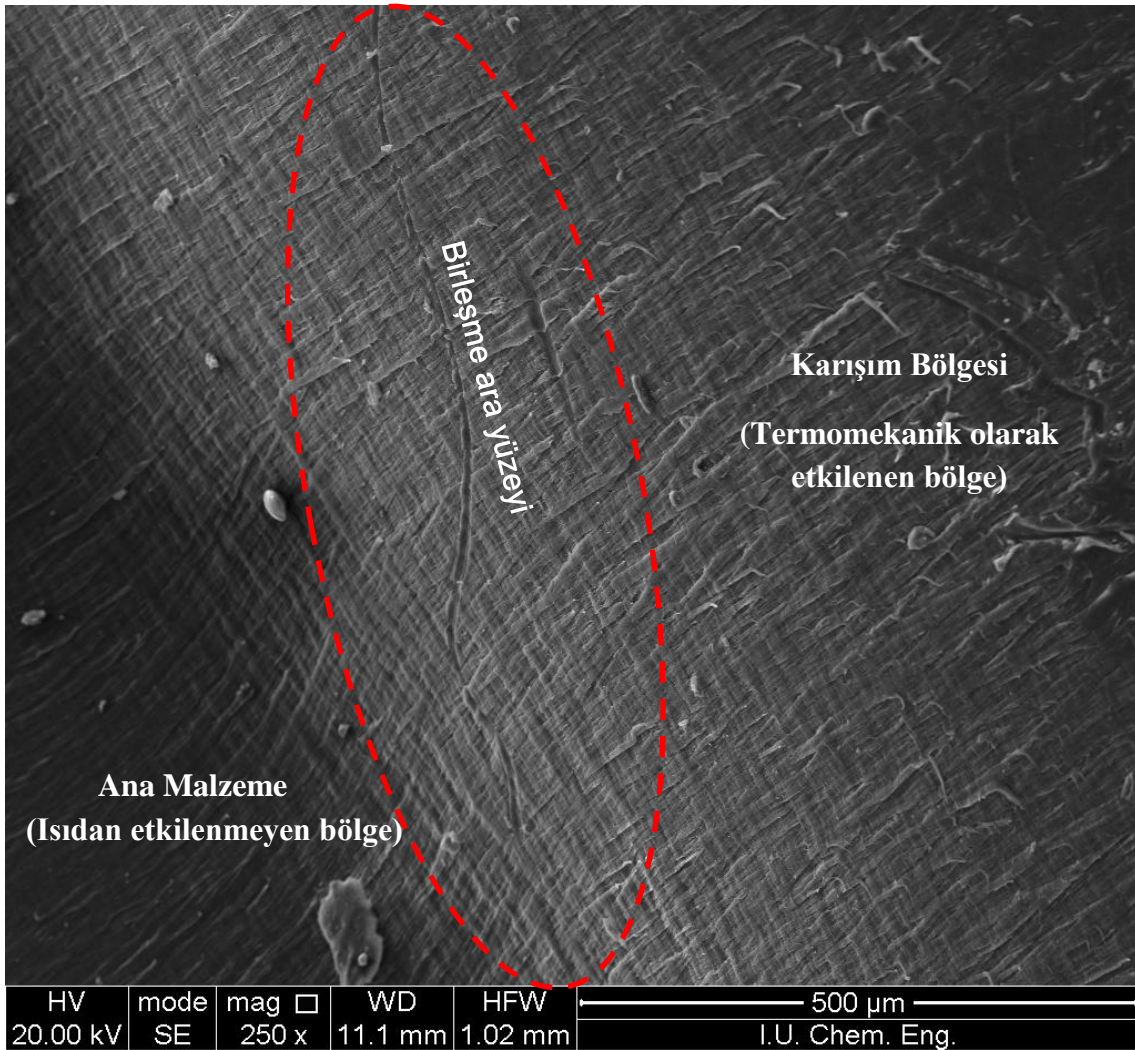
Şekil 7.47’ da SKK ile birleştirilmiş 2 kodlu deneye ait PE malzemenin Şekil 7.46’ da gösterilen şekilde birleştirme ve ana malzeme bölgesinden alınan numuneye ait SEM

yüzey görüntüsü verilmiştir. Ana malzeme ile deformasyona uğrayarak tekrar katılaştıran karışım bölgesi birbirinden belirgin bir şekilde ayrılmaktadır. Birleşme arayüzünün her iki tarafında kalan termoplastik malzeme renginde belirgin bir fark söz konusudur. Bu farkın SKK ile birleştirme esnasında karışım bölgesinde ergitilerek plastik kıvamına getirilen ve takım ucu tarafından karıştırılıp yeniden katılaştıran plastik malzemenin deformasyona uğraması nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca renk değişimi üzerinde kristallanma oranlarının ve kristal lamel yönelmelerinin etkili olduğu kabul edilmektedir.

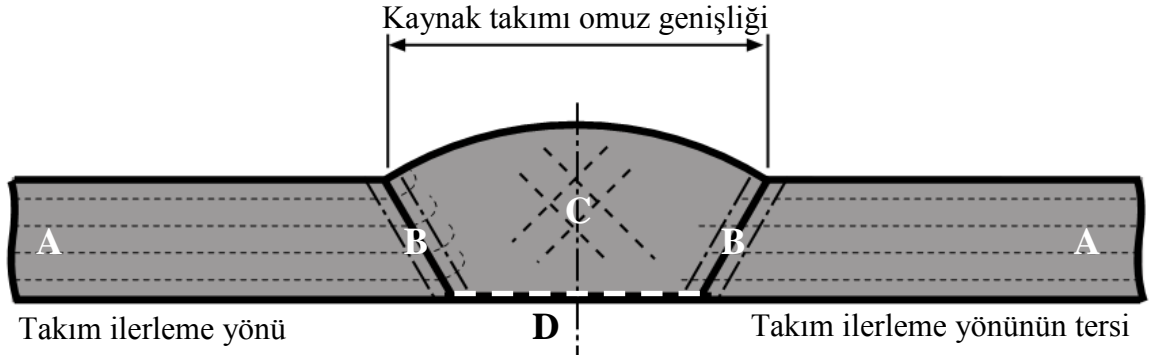


Şekil 7.47 2 deney kodlu birleştirme işleminden alınan numuneye ait SEM görüntüsü

Şekil 7.48’ de ana malzeme ile karışım bölgesindeki kristal lamellerin birbirinden farklı doğrultuda yönlendiği görülmektedir. SKK ile birleştirme işlemi sonrasında yeni oluşan kristal lamellerin kaynak takımının dönme yönünde oluştuğu ve kaynak takımının karıştırıcı uç kısmı ve takım omzunun kristal lamellerin yönlenmesi üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Yukarıda ifade edilen ana malzeme ve karışım bölgesi arasındaki renk farkında bu durumda etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.48 2 deney kodlu birleştirme işleminden alınan numuneye ait birleşme arayüzeyi SEM görüntüsü



Şekil 7.49 Termoplastiklerin SKK birleştirme bölgesi mikroyapısının şematik gösterimi, A- Isıdan etkilenmeyen bölge (ana malzeme), B- Birleşme ara yüzeyi, C- Termomekanik olarak etkilenen bölge, D- Birleştirilmeyen kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı altında kalan bölge

Şekil 7.49'da gösterilen mikroyapıların daha iyi anlaşılması amacıyla bölgeler hakkında biraz bilgi verilmesi sınıflandırmanın daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.

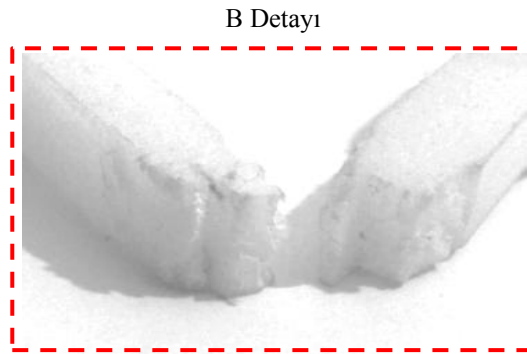
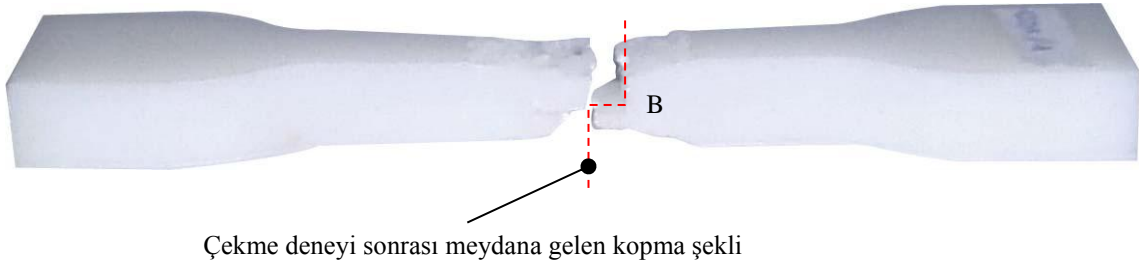
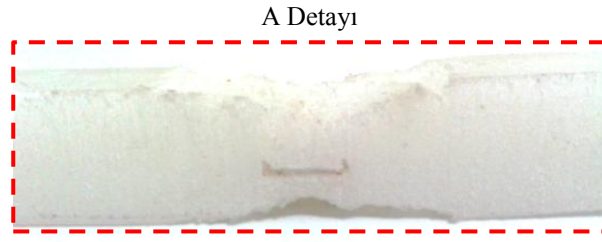
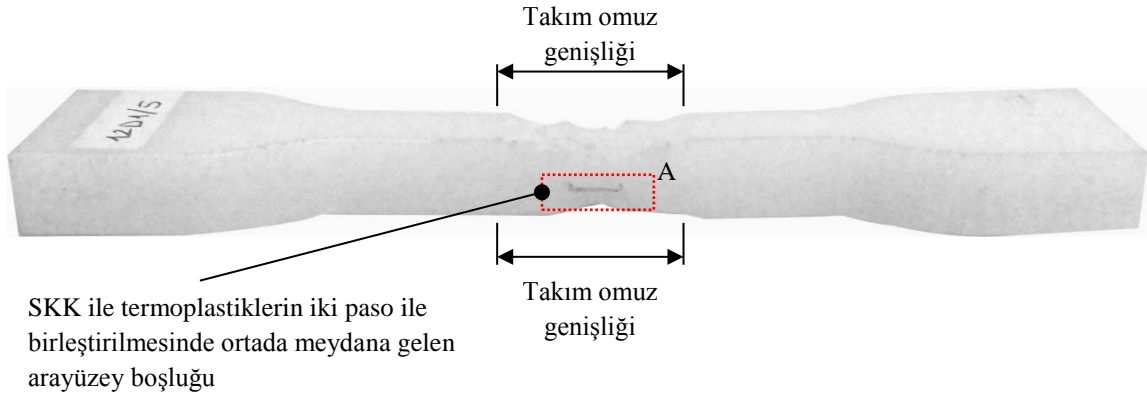
A- Isıdan etkilenmeyen bölge (ana malzeme) : Bu bölge birleştirme işleminden uzaktır ve deforme olmamıştır. Her ne kadar birleştirme bölgesinde termoplastikler için yüksek sayılabilecek sıcaklıklara çıkan termal döngüler görülsede, plastiklerin sahip olduğu düşük ısı iletim katsayısı ($2,0-8,0 \text{ cal/cm.san.}^{\circ}\text{C} \times 10^4$) nedeniyle, mikroyapı ve mekanik özellikler açısından ısıdan etkilenmezler [39,43]. Şekil 7.47' de ana malzeme ve birleştirme bölgesinin birbirinden belirgin şekilde ayrıldığı görülmektedir.

B- Birleşme ara yüzeyi: Karışım bölgesi ile ana malzeme arasında bir geçiş noktası özelliği taşır. Tıpkı kompozit malzemelerdeki arayüzey gibidir. Ana malzeme tarafında kaynak takımı karıştırıcı uç kısmının etkisiyle çok ince bir film şeklinde (Şekil-7.48) ortaya çıkar. Karışım bölgesindeki malzeme sirkülasyonuna, karıştırıcı uç kısmının geometrisine ve çapına göre oluşum şekillerinde değişiklik gösterebilir. Şekil 7.47' de birleşme arayüzeyi karışım bölgesi ve ana malzeme arasında takım geometrisine bağlı olarak girintili çıkıntılı şekilde oluşmuştur. Şekil 7.48' de aynı bölgede takım uç geometrisine

bağlı olarak oluşan ara yüzey girintileri 250 büyütme oranında daha detaylı olarak görülmektedir.

C- Termomekanik olarak etkilenen (karışım bölgesi) bölge: Termomekanik olarak etkilenen bölge ya da diğer bir ifade ile karışım bölgesinde SKK kaynak takımı termoplastik malzemeyi deformasyona uğratmaktadır. Bu bölgede kristalleşme ve termomekanik etki gerçekleşmektedir. Polimer zincirlerinin yönlenmeleri, kristallenme oranı, molekül yoğunlukları, kristal lamel kalınlıkları birleştirme işlemi öncesine göre; kaynak takımının sahip olduğu geometri, karıştırıcı uç kısmın özellikleri, takım ilerleme ve takımın dönme yönü, hızı gibi parametrik faktörlerin birleşimiyle oluşan ısı etkisi ile farklılık gösterebilir. Ayrıca kaynak takımı tarafından koparılan parçalar az miktarda da olsa birleştirme bölgesi dışına doğru savrulduğu için birleştirilen malzemelerin birleştirme bölgesi üst yüzeyinden biraz malzeme kaybı söz konusu olabilir. Şekil 7.48’ de ana malzeme ve karışım bölgesindeki kristal lamellerin farklı yönlendiği görülmektedir. Karışım bölgesinde meydana gelen yönlenmeler üzerinde kaynak takımının karıştırıcı uç kısmı ve takım omzunun etkili olduğu düşünülmektedir.

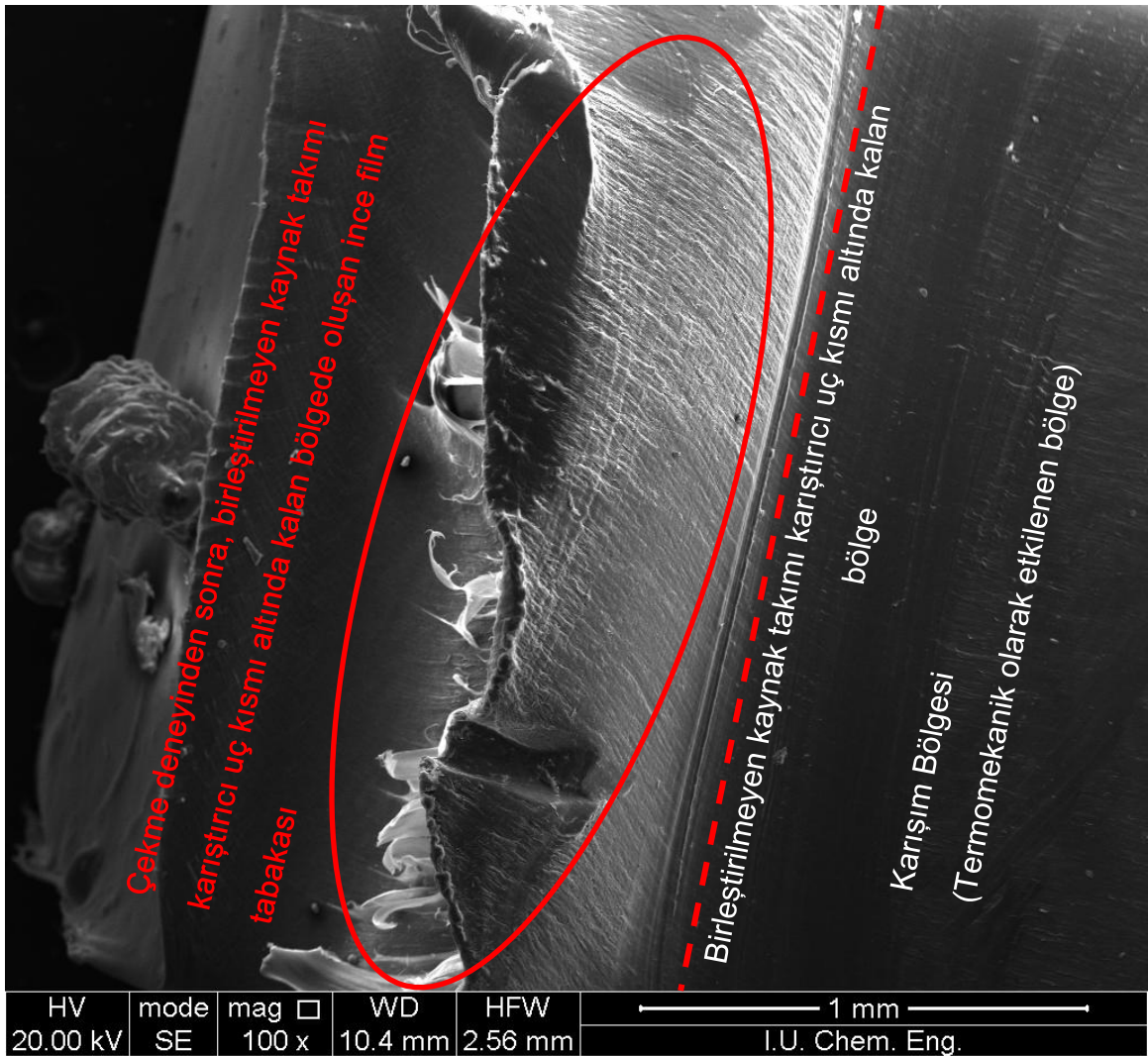
D- Birleştirilmeyen kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı altında kalan bölge: Bu bölge tek taraflı kaynaklarda birleştirilecek plaka kalınlığı ile kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı farkı kadar karıştırıcı uç kısmının altında kalan kısımdır. Karıştırıcı ucun alt tarafında kaldığı için herhangi bir fiziksel değişime uğramadan ince bir film tabakası şeklinde birleştirme hattı boyunca, karıştırıcı uç kısmının alanı kadar alt yüzeyden bir hat şeklinde ilerler. Ancak birleştirme bölgesinde oluşan ısıdan etkilenerek karışım bölgesine yapışmış gibi gözükür. Ancak arada çok ince bir boşluk vardır. Çift taraflı birleştirme denemelerinde de tam orta noktada aynı boşluk gözlemlenmiştir. Şekil 7.49’ da bu boşluk gösterilmektedir. Çift taraflı birleştirmelerde, çekme deneyinde kopma bu boşluğun olduğu yerden gerçekleşmektedir (Şekil 7.50 b). Kopmanın olduğu her iki yüzeyde oldukça düzgün bir yüzey görünümüne sahip olmaktadır. Şekil 7.50 a’ da çekme deneyi öncesi su jeti ile kesilerek alınan numunede bu boşluk belirgin şekilde gözükmektedir.



b)

Şekil 7.50 Çift taraflı birleştirme işlemlerinde birleştirme bölgesinin ortasında meydana gelen boşluk

Şekil 7.52, Şekil 7.53 ve Şekil 7.48'deki ana malzemeye ait SEM görüntüleri karşılaştırıldığında takım geometrisinin kaynak sonrası oluşan mikroyapıya etki ettiği gözlemlenmiştir. Daha çok hücre yapısı ve fibril yönlenmeleri üzerinde bu etki belirgin şekilde gözlemlenmektedir. Metrik uçlu takımlarla yapılan birleştirme işlemleri sırasında daha iyi bir karışım bölgesi ve tok bir yapı şeklinde etki ederken, silindirik ve kare uçlu takımlarla (Şekil 7.52) yapılan birleştirme işlemleri sırasında daha az karışmış ve yer yer boşluklu rijit bir yapı şeklinde etki etmektedir.



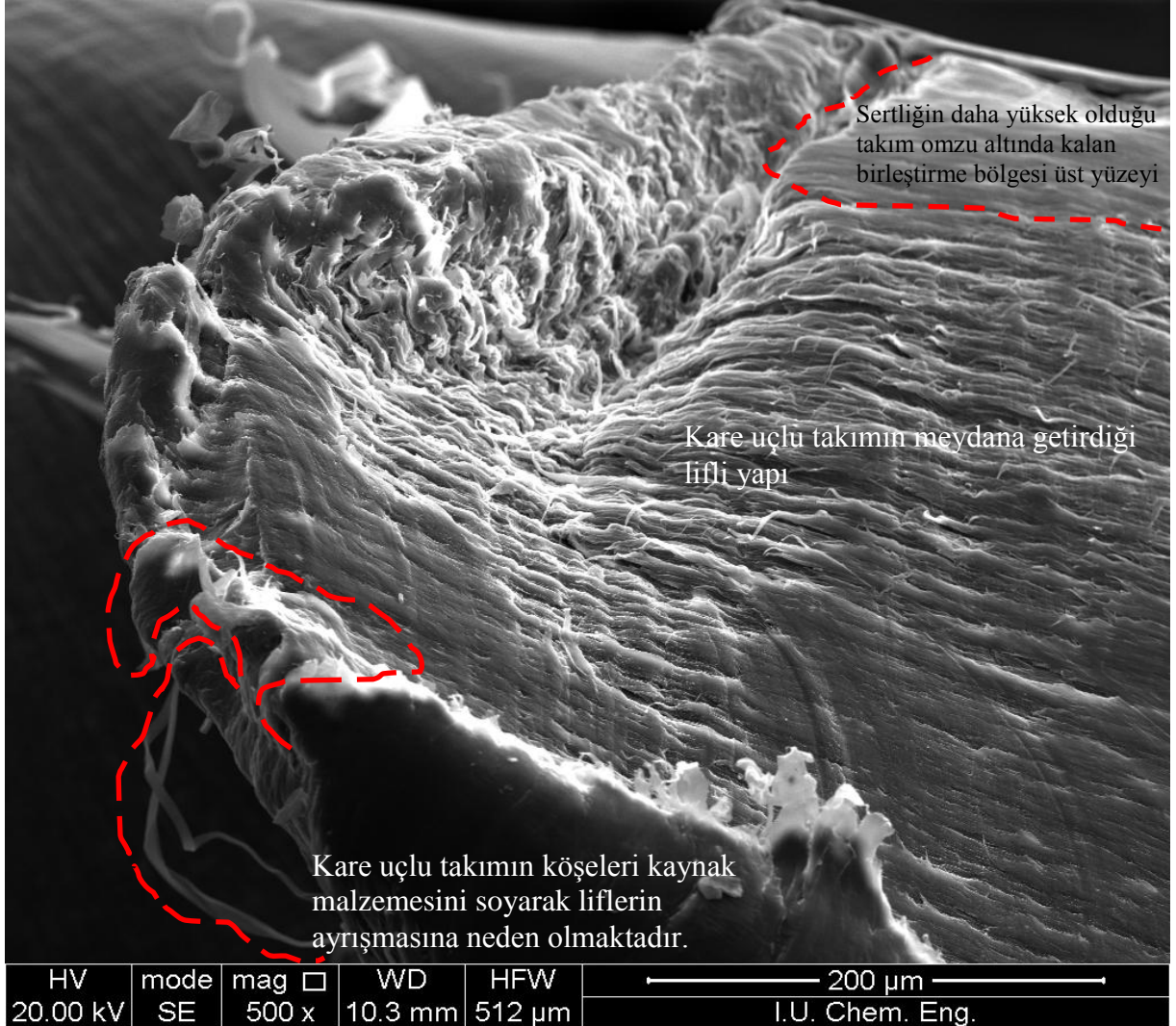
Şekil 7.51 KT-01 deney kodlu birleştirme işleminde kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı altında kalan bölgeye ait SEM görüntüsü

Şekil 7.52' de KT-01 kodlu birleştirme işleminde kare uçlu takım kullanılarak, Şekil 7.53' de ise ST-01 kodlu birleştirme işleminde silindirik uçlu takım kullanılarak SKK ile birleştirilen PE levhaların birleştirme bölgesine ait SEM kırık yüzey görüntüleri verilmiştir. Kare uçlu takımla yapılan birleştirme işlemi sonrası silindirik takımla yapılan levhalara göre daha tok ve rijit bir yapı elde edilmiştir. Kare uçlu takımla yapılan birleştirme işleminde kristal lamel yönlenmeleri gerçekleşmiştir. Silindirik uçlu takımla yapılan birleştirme işlemi sonrası birleştirme bölgesindeki mikroyapı oluşumu daha gevrek, kırılğan bir yapı şeklinde (Şekil 7.53) oluşmuştur. Elde edilen SEM kırık yüzey görüntüleri Tablo 7.1, Tablo 7.2, Tablo 7.16' daki veriler incelendiğinde oluşan bu yapı beklenen bir yapıdadır.

KT-01 kodlu birleştirme işleminde karıştırıcı uç kısmı kare olan (Şekil 6.19 a) 14K kodlu kaynak takımı (Tablo 6.3) kullanılarak SKK ile birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaynak sonrası kaynaklı bölgede birleştirme işlemi öncesi 14,5 nm olan kristal lamel kalınlıkları 21,1 nm olarak gerçekleşmiştir. Kaynaklı birleştirme işlemi öncesi PE referans numunede % 54,6 olarak belirlenen kristallenme oranı birleştirme işlemi sonrası % 47,1 olarak belirlenmiştir. Tablo 7.16' da verilen sonuçlar karşılaştırıldığında, kare uçlu takımla yapılan birleştirme işleminden en yüksek kristal lamel kalınlığı (21,1 nm) ve en düşük kristallenme oranı (% 47,1) elde edildiği görülmektedir. Kristallenme oranının düşmesiyle mekanik özelliklerin azalması beklenen bir durumdur. SKK ile birleştirme işlemi öncesi PE referans numuneye çekme mukavemeti 22,97 MPa, kare uçlu takımla yapılan SKK birleştirme işlemi sonrası çekme mukavemeti 18,15 MPa olarak gerçekleşmiştir. İlk duruma göre yaklaşık % 21 oranında bir performans kaybı gözlemlenmektedir. Meydana gelen bu performans kaybı üzerinde kristallenme oranının, kristal lamel kalınlıklarının ve karıştırıcı uç geometrisinin etkili olduğu düşünülmektedir. Kaynak bölgesinde karışım ve buna bağlı olarak nüfuziyet üzerinde karıştırıcı uç geometrisinin büyük bir etkisi görülmüştür.

ST-01 kodlu birleştirme işleminde karıştırıcı uç kısmı silindirik geometriye (Ø10 mm) sahip 9S kodlu kaynak takımı (Şekil 6.19 b) kullanılarak SKK ile birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaynak sonrası kristal lamel kalınlıkları (12,8 nm) ve kristallenme oranı (% 52,6) azalmıştır. Çekme mukavemet değeri 15,62 MPa olarak gerçekleşen ST-01 kodlu birleştirme işleminden alınan numuneye, PE referans numune karşılaştırıldığında ~ % 32'lik bir performans kaybı görülmektedir. Bu durum üzerinde

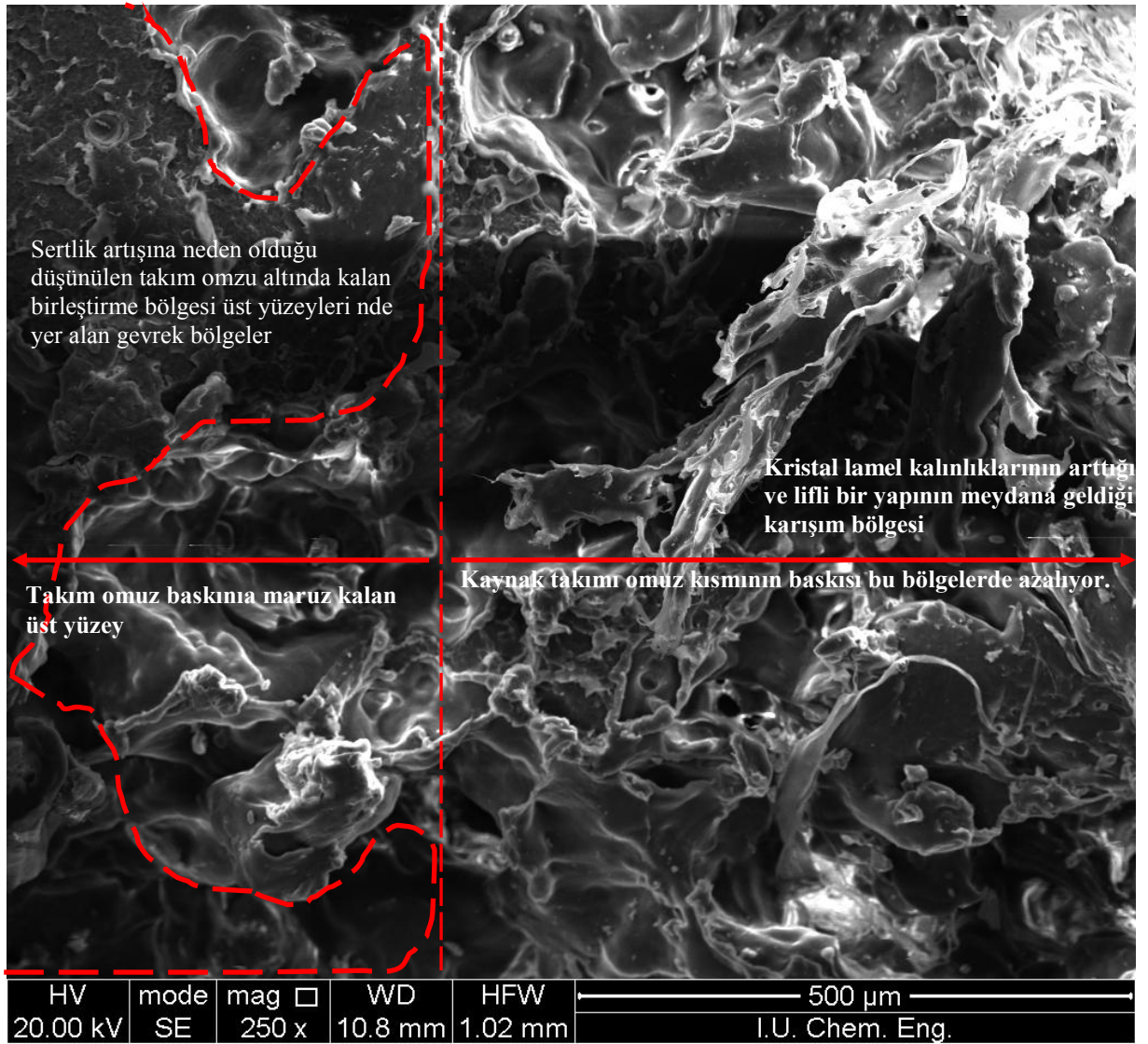
gevrek bir yapı şeklinde katılaştan mikroyapının etkili olduğu düşünülmektedir. Karıştırıcı uç geometrisinin kaynak sonrası oluşan mikroyapılar, fibril yönlenmeleri, birleştirme yüzey görünümü üzerinde etkili üzerinde etkili olduğu ve kaynak performansını belirleyen unsurlardan biri olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.52 Kare uçlu takım kullanılarak birleştirilen KT-01 deney kodlu numuneye ait kırık yüzey SEM görüntüsü

Takım uç geometrisinin kaynak mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 7.1, Tablo 7.2, Tablo 7.3, Tablo 7.4). Kaynak bölgesini daha iyi karıştırarak daha iyi nüfuziyet sağlayan ve kaynak bölgesini daha iyi besleyen takımlarla yapılan SKK uygulamalarından yüksek mukavemet değerleri elde edilebilmektedir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde birleştirme bölgesinde kare

ve silindirik uçlu takımlara nazaran metrik uçlu takımlar daha iyi bir karışım sağlamaktadır. Kare uçlu takımların köşeli kısımları Şekil 7.52’ de de görüldüğü gibi termoplastik kaynak malzemesini soymakta ve liflerin ayrışmasına neden olmaktadır. Bu durumda kaynaklı bağlantının mukavemet değerlerinde düşme kaçınılmaz bir hale gelmektedir (Tablo 7.1, Tablo 7.2). Oysa silindirik uçlu takımlarda uygun parametre değerlerinde kare uçlu takımlara nazaran daha yüksek bağlantı mukavemet değerleri elde edilmektedir.



Şekil 7.53 Silindirik Uçlu Takım Kullanılarak Birleştirilen ST-01 Deney Kodlu Numuneye Ait Kırık Yüzey SEM Görüntüsü

8. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

8.1. Genel Sonuçlar

PE ve PP termoplastik malzemeler, SKK yöntemi ile oldukça başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesi esnasında polimer zincirlerinin oldukça dinamik bir davranış gösterdiği, birleştirme bölgesinde oluşan ısı ve soğuma süresine bağlı olarak yeniden kristalleşme ve erime olaylarının birlikte gerçekleştiği düşünülmektedir. SKK ile birleştirme işlemi sonrası yapılan SEM incelemelerinde kaynaklı bölgede dört farklı mikroyapı (bölge) tespit edilmiştir. Bu yapılar:

- 1- Isıdan etkilenmeyen bölge (Ana malzeme)
- 2- Birleşme arayüzeyi
- 3- Termomekanik olarak etkilenen karışım bölgesi
- 4- Birleştirilmeyen kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı altında kalan bölge

şeklinde sınıflandırılmıştır. Termoplastiklerin birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin SKK kaynak performansı üzerinde çok büyük bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak sonrası kaynaklı bölgenin mekanik özellikleri, kristallenme oranı, kristal lamel kalınlıkları, erime pik sıcaklıkları, mikroyapısı, fibril yönelmeleri kaynak parametrelerine göre değişiklik göstermektedir. Kristallenme oranları ve kristal lamel kalınlıklarına göre yukarıda belirtilen bölgeler arasında makro ölçülerde belli olmayan ancak mikro ölçülerde fark edilen renk farklılıkları meydana gelmektedir.

SKK ile birleştirilen termoplastik malzemelerin birleştirme sonrası eğme mukavemet değerleri, çekme mukavemet değerlerinden yüksek olarak gerçekleşmiştir. PE malzemelerin SKK ile birleştirilmesinden sonra eğme mukavemet değerleri ana malzemenin eğme mukavemetinden daha yüksek olmaktadır. Farklı kaynak parametrelerine bağlı olarak değişmekle birlikte, ana malzeme ve SKK ile birleştirme işlemi sonrasında termoplastiklerin çekme mukavemetleri karşılaştırıldığında PE için maksimum % 96, PP için maksimum % 84 oranında SKK kaynak performansı elde edilmiştir. Aynı şekilde eğme mukavemet değerleri karşılaştırıldığında PE için

maksimum % 131, minimum % 55,7 ve PP için maksimum % 83, minimum % 21,2 oranında SKK kaynak performansı elde edilmiştir.

8.1.1. Kaynak takımı dönme devrinin etkisi

Kaynak takımı dönme devri kaynak bölgesinde oluşan sıcaklık, kristal yüzdeleri, kristal lamel kalınlıkları ve kaynak sonrası mekanik özellikler üzerinde etkili olmaktadır. Kaynak takımı dönme devrinin artmasına bağlı olarak birleştirme bölgesinde oluşan sıcaklık değerlerinin arttığı, kristal yüzdelерinin azaldığı, kristal lamel kalınlıklarının ise arttığı görülmüştür. Tek parametre değeri olarak takım dönme devrinin arttırılması ya da azaltılmasıyla, kaynak mukavemet değeri artıp azalacağı gibi bir yargıya varmak zordur. Ancak takım dönme devrinin artmasıyla, birleştirme bölgesinin kaynak sonrası mukavemeti artmış ve kaynak performansı ana malzemeye yakın değerlerde elde edilmiştir. Kaynak takımı dönme devri, birleştirme hattı boyunca ısı taşınmasına yardımcı olmakta, kaynak nüfuziyeti ve buna bağlı olarakta kaynak mukavemetini arttırmaktadır.

8.1.2. Kaynak takımı ilerleme hızının ve dönme yönünün etkisi

Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde kaynak takımı ilerleme hızının diğer parametrelerden bağımsız olarak arttırılıp azaltılması kaynak performansını düşürmektedir. Takım ilerleme hızının arttırılması kaynak bölgesinde kristal yüzdelерini düşürmüş, kristal lamel kalınlıklarını ise arttırmıştır. Bu durum birleştirme esnasında ilerleme hızının artmasıyla yeterli karışım ve nüfuziyet olmamasıyla açıklanabilir.

Takım dönme yönünün kristal lamellerin ve fibrillerin yönleneşmesi, kaynak sonrası mekanik özellikler üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Kaynaklı bağlantının tamiri vb. gibi durumlarda karşılaşılabacak olan sorunların tespit edilmesi amacıyla saat ilerleme yönünde ve saat ilerleme yönünün tersinde PE levhalar SKK ile birleştirme işlemine tabi tutulmuşlardır. Saat yönünün tersine SKK ile birleştirilmeye çalışılan PE levhaların birleştirme işlemi başarısız olmuştur. Aynı şekilde daha önce saat ilerleme yönüyle aynı doğrultuda SKK ile birleştirilmiş PE levhalar saat ilerleme yönünün tersinde yeniden birleştirme işlemine tabi tutulduklarında bir önceki birleştirme işleminde oluşan moleköl zincirleri koparak birleştirme bölgesinden ayrılmışlardır. SKK ile saat

yönünde dönen bir takım ile birleştirilen PE levhalar ikinci kez aynı yönde 5000 ve 6000 devir/dk. takım dönme devrinde ve 20 mm/dk. takım ilerleme hızında birleştirilmişlerdir. Birinci birleştirmede 5000 devir/ dk. için 21,53 MPa, 6000 devir/dk. için 22,06 MPa Çekme mukavemet değerleri elde edilmiştir. İkinci birleştirme sonrası elde edilen çekme mukavemet değerleri sırasıyla 19,41 MPa ve 19,93 MPa olarak gerçekleşmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında aynı bölgeye ikinci kez yapılan SKK uygulamasının başlangıçtaki kaynak mukavemetini ~ % 10 oranında düşürdüğü gözlemlenmiştir.

8.1.3. Kaynak takımı dalma ve bekleme süresinin etkisi

Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süresi birleştirme işlemi için gerekli olan ısının elde edilmesi ve taşınması üzerinde etkilidir. Çok yüksek ya da çok düşük dalma ve bekleme süreleri SKK kaynak performansını düşürmektedir. Plastik malzeme türüne göre dalma ve bekleme süreleri farklı şekilde gerçekleşebilmektedir.

Kaynak başlangıcında yüksek dalma ve bekleme sürelerinde kaynak bölgesinde oluşan ısı artmaktadır. Kaynak bölgesindeki yüksek ısının etkisiyle plastik malzeme daha akışkan bir hale gelmekte ve takım omzu tarafından eritilen malzemenin kontrolü zorlaşmaktadır. Düşük dalma ve bekleme sürelerinde kaynak için gerekli olan ısının elde edilmesi ve taşınması zorlaşmaktadır. Buna bağlı olarak kaynak bölgesinde kaynak takım ucu tarafından ana malzemedan koparılan parçaların ısı ve basınç etkisiyle plastik kıvamına getirilmesive kaynak bölgesini doldurması daha uzun bir çevrimde gerçekleşmektedir. Yetersiz nüfuziyet ve kaynak ısısı kaynak performansını olumsuz yönde etkilemekte ve kaynaklı bağlantının mukavemetini zayıflatmaktadır.

8.1.4. Kaynak takım omzunun etkisi

Takım omzunun malzeme yüzeyine dalma derinliğinin artması SKK kaynak mukavemeti ve SKK kaynak performansını düşürmektedir. Dalma derinliğinin artmasıyla ergime pik sıcaklıkları ve kristal yüzdeleri artmakta, Mikroyapılar farklılaşmakta ve fibrillerde yönelme meydana gelmektedir. Dalma derinliğinin artmasıyla kısalan fibril boyları ve kaynak bölgesinden azalan malzeme kayıpları

kaynaklı bağlantının performansını ve mekanik özelliklerini olumsuz olarak etkilemektedir.

8.1.5. Kaynak takım geometrisinin etkisi

Kaynak takım geometrisi kaynak için gerekli olan ısının elde edilmesi, ısının ve ergimiş haldeki malzemenin kontrolü ve kaynak sonrası oluşan mikroyapı üzerinde etkilidir. Daha çok fibril yönlenmeleri üzerinde bu etki belirgin şekilde gözlemlenmektedir.

SKK kaynak bölgesinde daha iyi bir karışım sağlayan ve kaynak bölgesini daha iyi besleyen takımlarla yapılan birleştirmelerde daha yüksek kaynak performansları elde edilmekte ve daha iyi sonuçlar alınmaktadır. Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesi takım geometrisi açısından karşılaştırıldığında klasik alüminyum stili takımlarla yapılan birleştirmelerden en yüksek kaynak performans değerleri elde edilmiştir.

SKK sonrası kaynaklı bölgenin yüzeyinde meydana gelen dalgalanmalar ve oluşan yüzey görüntüsü üzerinde takım uç geometrisinin oldukça büyük bir etkisi vardır. Takım uç geometrisi kristallenme oranı ve kristal lamel kalınlıkları üzerinde etkilidir. Karıştırıcı uç çapının artması kristal yüzdelerini arttırmakta, kristal lamel kalınlığını ise düşürmektedir. Karıştırıcı uç geometrisi açısından birleştirme bölgesinde kare ve silindirik uçlu takımlara nazaran metrik uçlu takımlar daha iyi bir karışım sağlamaktadır. Ancak kare uçlu takımlar silindirik ve metrik uç geometrisine sahip takımlara oranla kristal lamel kalınlığını arttırmakta, kristal yüzdelerini ise azaltmaktadır.

Kaynak takım geometrisi kaynak sonrası mekanik özellikler üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Metrik uçlu takımlarla yapılan birleştirme işlemlerinde kaynak bölgesinde daha iyi bir karışım ve tok bir yapı elde edilirken, silindirik ve kare uçlu takımlarla yapılan birleştirme işlemlerinde daha az karışmış, yer yer boşluklu daha rijit bir yapı elde edilmektedir.

8.1.6. Termoplastik malzeme ve sıcaklığın etkisi

Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde plastik malzemenin türü kaynak performansı üzerinde oldukça önemli olmaktadır. Malzeme türüne göre kaynak parametreleri ve gerekli olan kaynak ısısı değişiklik gösterebilmektedir. Yapılan çalışmalarda termoplastik malzemelerin başarılı şekilde kaynak edilebilmesi için ideal

üst yüzey kaynak ısısı olarak isimlendirilen birleştirme bölgesi sıcaklığının kristalleşme sıcaklığına yakın ya da üzerindeki sıcaklık değerlerinde olması gerekmektedir. PE malzemelerin SKK ile birleştirilmesi için ideal üst yüzey kaynak ısısı 104-115 °C, PP malzemelerin SKK ile birleştirilmesi için ideal üst yüzey kaynak ısısı 145-155 °C arasında olmalıdır.

Birleştirme bölgesinde ideal üst yüzey sıcaklık değerlerinin çok üzerindeki sıcaklıklarda oluşan aşırı ısıya bağlı olarak plastik malzeme aşırı derecede ergiyerek sıvılaşmaktadır. Bu durum takım omzu tarafından malzemenin kaynak bölgesinde tutulmasını ve kontrolünü zorlaştırmaktadır. Takım dönme devrinin yüksek olduğu bu durumlarda kaynak bölgesinden dışarı doğru malzeme savrulması kaybolmaktadır. Kaynak bölgesinden malzeme kaybı kaynak performansında düşüğe neden olmaktadır. Aynı şekilde ideal üst yüzey sıcaklık değerlerinin altında yapılan birleştirme işlemlerinde ise malzeme tam olarak plastik kıvamına getirilemediği için birleştirme bölgesinde karışım az olmakta ve buna bağlı olarak yetersiz nüfuziyet ve boşluklu bir yapı meydana gelerek kaynak performansını olumsuz yönde etkilemektedir.

8.1.7. Isıl deney sonuçları

Isıl deformasyon deneyi sonunda termoplastik malzemelerin yumuşama sıcaklıklarında küçüğe olsa bir düşüş görülmüştür. Isıl deformasyon deneyine tabi tutulan PE referans numunenin 0,35 mm'lik eğme sınırı 90,3 °C' de gerçekleşirken, SKK ile birleştirilmiş numunelerin 0,35 mm'lik eğme sınırı 86,11 °C' de gerçekleşmiştir. Bu durum SKK ile yapılan birleştirme işlemi sonrası kaynaklı bağlantının, ana malzemeye göre termal özelliklerinde küçüğe olsa bir değişim olduğunu ve ısıya bağlı olarak deformasyon sınırının ana malzemedan daha düşük olarak gerçekleşebileceğini göstermiştir.

PE ana malzemedan alınan referans numune ve kaynaklı bağlantıdan alınan numunelere uygulanan VICAT yumuşama sıcaklığı sonrasında, kaynaklı bağlantının VICAT yumuşama sıcaklığının 2-4 °C arasında arttığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde PP ana malzemedan alınan referans numune ve kaynaklı bağlantıdan alınan numunelere uygulanan VICAT yumuşama sıcaklığı sonrasında, kaynaklı bağlantının VICAT yumuşama sıcaklığının 2-4 °C arasında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun kaynak sonrası birleştirme bölgesinde oluşan mikroyapı, fibril yönelmeleri, kristal lamel kalınlıkları ve kristallenme oranlarıyla ilgili olduğu düşünülmektedir.

SKK ile birleştirilmiş PE kaynaklı bağlantılardan alınan numunelere ve PE ana malzemedan alınan referans numunelere hızlandırılmış ısı yaşlandırma deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları karşılaştırıldığında ana malzeme ve kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri arasında benzer ve paralel sonuçlar gözlemlenmiştir. Isıl ortamda kalma süresiyle bağlantılı olarak SKK ile birleştirme işlemi sonrasında mekanik özelliklerde gerçekleşen iyileşmeler birleştirme bölgesindeki yarı-stabil kristallerde mevcut olan gerilmeler giderilmesiyle elde edildiği şeklinde açıklanabilir. SKK ile birleştirme işlemi sonrasında termoplastiklerin ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta tavlansak kristal yapının daha düzenli bir hale getirilmesi ve mekanik özelliklerin iyileştirilebilmesi mümkündür.

8.2. Öneriler

SKK ile PE ve PP termoplastik levhaların birleştirilmesi CNC dik işleme tezgâhında tek taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Diğer malzeme türleri içinde deneyde kullanılan parametreler göz önünde bulundurularak yeni parametreler oluşturulmalıdır. Aynı şekilde farklı kalınlıklarda levhalar için aynı kaynak parametreleri kullanılarak tek taraflı ve çift taraflı yeni birleştirme işlemleri yapılabilir ve elde edilen sonuçlar bu tez sonuçları ile karşılaştırılabilir.

PE ve PP levhalar için SKK ile birleştirilmesi için tespit edilen sıcaklık aralığını sağlayacak parametre değerleri elde edilerek çift taraflı SKK uygulamaları gerçekleştirilebilir ve elde edilen sonuçlar bu tez sonuçları ile karşılaştırılabilir.

Termoplastik kompozitler için SKK ile birleştirme koşulları incelenmeli ve termoplastik malzemeler ile benzer özellikler gösterip göstermedikleri karşılaştırılmalıdır.

SKK ile birleştirilen levhaların kaynak bitiş noktasında karıştırıcı ucun ilerleyip kaynak birleştirme çizgisinden çıkmasıyla belli bir miktarda malzeme ileri doğru taşınmakta ve bir boşluk oluşmaktadır. Aynı şekilde bölgesel kaynaklarda karıştırıcı ucun yukarı kaldırılmasıyla bir boşluk oluşmaktadır. Oluşan bu boşlukların kapanması ya da geliştirilebilecek farklı aparat ya da takımlarla bu boşluğun önlenmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.

SKK ile birleştirilen termoplastik malzemelerin kimyasallara karşı dayanıklılığı, aşınma ve korozyon özellikleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Mistry, K. (1997) *Plastics Welding Technology for Industry*. Assembly Automation, Vol.17(3), 196-200.
- [2] Öksüz, M., Yıldırım, H. (2009) *Plastik Malzemeler Ve Kullanımı*. Yazılmış Yayınlanmamış Ders Notu, Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- [3] Crawford, R.J., Tam, Y. (1981) *Friction Welding of Plastics*. Journal of Materials Science, 16, 3275-3282.
- [4] Strand, S.R. (2004) *Effects of Friction Stir Welding On Polymer Microstructure*. Master of Science, Brigham Young University Department of Mechanical Engineering, Utah, USA.
- [5] Şelale, S. (2006) *Polietilen Malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye.
- [6] Yükler, İ. (2002) *Malzeme Bilgisi II*, Yazılmış Yayınlanmamış Ders Notu, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- [7] Morris, J. T. (1990) *Polymer Pioneers*, 2nd Printing, Beckman Center for the History of Chemistry, Philadelphia, USA.
- [8] Kayalı, E. S., Çimenoglu, H. (1986) *Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları*, İ.T.Ü., Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- [9] Savaşçı, Ö.T., Uyanık, N., Akovalı, G. (2005) *Ana Hatları İle Plastikler Ve Plastik Teknolojisi*, Güncelleştirilmiş 2. Baskı, Pagev Yayınları, İstanbul, Türkiye.
- [10] Akkurt, S. (2007) *Plastik Malzeme Bilimi Teknolojisi ve Kalıp Tasarımı*, Birsan Yayınevi, İstanbul, Türkiye
- [11] Öksüz, M., Yıldırım, H. (2009) *Polimerlere Katılan Katkı Maddeleri ve Kazandırdığı Özellikler*, Yazılmış Yayınlanmamış Ders Notu, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, İstanbul, Türkiye.

- [12] Akyüz, Ö.F. (2011) Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş, PAGEV, PAGYAY, İstanbul, Türkiye.
- [13] VLACK L.H.V. (1990) Malzeme Bilimine Giriş, Michigan Üniversitesi, Çeviri.: SAFOĞLU R.A., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [14] Baysal, B. (1994) Polimer Kimyası, Genişletilmiş 2.Baskı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- [15] Murphy, J. (2001) Additives for Plastics Handbook, 2nd Edition, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK.
- [16] Öksüz, M. (2009) Plastik Kaynak Yöntemleri, Yazılmış Yayınlanmamış Ders Notu, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- [17] Xanthos, M. (2010) Functional Fillers for Plastics, Second updated and enlarged edition, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, , Weinheim, Germany.
- [18] Rudin, A. (1999) The Elements Of Polymer Science and Engineering, 2nd Edition, Academic Pres, San Diego, USA.
- [19] Harper, C. (2006) Handbook of Plastics Technologies, The Mc-Graw-Hill Companies Technology Seminars, Maryland, USA.
- [20] http://www.beechmontcrest.com/plastic_injection_molding_1.htm 30.12.2012
- [21] <http://www.powermakine.com/page2.html> 30.12.2012
- [22] Öksüz, M., Yıldırım, H. (2009) Enjeksiyon Kalıplama Teknolojisi, Yazılmış Yayınlanmamış Ders Notu, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- [23] Öksüz, M., Yıldırım, H. (2009) Ekstrüzyon Kalıplama Teknolojisi, Yazılmış Yayınlanmamış Ders Notu, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- [24] <http://www.cncteknoloji.net/kalipcilik-teknikleri/sisirme-kaliplari.html>
30.12.2012
- [25] Endemann, U., Glaser, S., Völker, M. (2002) Strong Joint Between Plastic and Metal, Kunststoffe Plast Europe Composites, Vol. 92 Germany.

- [26] Öksüz, M. (2012) Kişisel Görüşme, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi.
- [27] Stokes, V.K. (1989) Joining Methods for Plastics and Plastics Composites, An Overview. Polymer Engineering and Science, Volume 29(19), 1310-1324.
- [28] Collister, Q., S. (1981) Plastic Joining Techniques. National Radiation Laboratory Report, NRL 1981/10 ISSN 0111-753X, Ministry of Health, New Zealand.
- [29] Anık, S., Oğur. A., Karakaya, Ç. (2003) Plastik Malzeme Kaynağının Memleketimizdeki Uygulamaları Ve Önemi. TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi, 2003 Kocaeli, Türkiye.
- [30] Filho, A., Santos, J.,F. (2009) Joining of Polymers and Polymer-Metal Hybrid Structures: Recent Developments and Trends, Polymer Engineering and Science, DOI 10(1002/pen), 1461-1476.
- [31] Anık, S. (1991) Kaynak Tekniği El Kitabı Yöntemler ve Donanımlar, Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [32] Troughton, M. (2008) Handbook of Plastic Joining, 2nd Edition.,William Andrew Inc., Norwich, USA.
- [33] Grewell, D., Benatar, A. (2007) Welding of Plastics: Fundamentals and New Developments , Intern. Polymer Processing XXII, Carl Hanser Verlag, Munich, Germany.
- [34] Sercer, M., Raos, P. Joining of Plastics and Composites, <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-171-07-00.pdf> 04.01.2013
- [35] Novalas Technical Brochure, Laser Welding of Plastics: Innovative and Flexible, http://www.leister.com/uploads/pdf/en/leister_laser_eng.pdf 04.01.2013
- [36] Joshi, A.,M. Welding of Plastics, <http://www.metalwebnews.com/howto/plastics/welding-plastics.pdf> 04.01.2013.

- [37] Bozkurt, Y. (2008) Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniği İle Birleştirilen AA2124/SiCp/25 Kompozit Levhaların Mekanik Özellikleri ve Mikroyapı Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [38] Mishra, R.S. Ma, Z.Y. (2005) Friction Stir Welding an Processing, Materials Science and Engineering, 50(R50), 1-78.
- [39] Mishra, R.S. Mahoney, M.W. (2007) Friction Stir Welding an Processing, ASM International, USA.
- [40] Feng, Z. (2003) F. Friction Stir Processing of Advanced Materials, Oak Ridge National Laboratory, High Strenght Weight Reduction Materials FY 2003 Progress Report.
- [41] Doğan, S. (2006) AA5754-H22 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- [42] Karahasanoğlu, C., Erkul, M. (1999) Termoplastiklerin Ultrasonik Kaynağı ve Kaynak Parametreleri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Plastik Malzemeler ve Teknolojileri Konferansı, 4-5 Aralık 1999, İstanbul, Türkiye.
- [43] Kaluç, E., Taban, E. (2007) Sürtünen Eleman İle Kaynak (FSW) Yöntemi, Makine Mühendisleri Odası, Ankara, Türkiye.
- [44] Dawes, C.J. (1999) Friction Stir Welding, TALAT Lecture 4140, TWI Training in Aluminium Application Technologies, Birmingham, UK.
- [45] Santiago, D., Uguiza, S., Lombera, G., Vedia, L. (2009) 3D Modelling of Material Flow and Temperature in Friction Stir Welding, Soldagem Insp. Sao Paulo, Vol 14(3), 248-256.
- [46] Şenol, M., Kaluç, E. (2003). Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlardaki Gelişmeler. Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi III. Oturum, 24-25 Ekim, Kocaeli, Türkiye.

- [47] Colegrove, P.A., Shercliff, H.R. (2005) 3 Dimensional CFD of Modelling Flow Round a Threaded Friction Stir Welding Tool Profile, *Journal of Material Processing Technology*, 169(2005), 320-327.
- [48] Soundararajan, V., Valant, M., Kovacevic, R., (2005) An Overview of R&D Work in Friction Stir Welding at SMU, *Journal of Material Processing Technology* 169(UDC:669.141.243.046.516=20), 320-327.
- [49] Khaled, T. (2005) An Outsider Looks at Friction Stir Welding, Report :ANM_112N_05_06
- [50] Çam, G. (2003) Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler, *Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi, II. Oturum Bildiri Kitabı*, 24-25 Ekim 2003, Kocaeli, Türkiye.
- [51] Thomas, W.M., Johnson, K.I., Wiesner, C.S. (2003) Friction Stir Welding – Recent Developments in Tool and Process Technologies, *Advanced Engineering Materials*, 5(7), 485-490.
- [52] Attallah, M.M., Salem, H.G. (2005) Friction Stir Welding Parameters a Tool for Controlling Abnormal Grain Growth During Subsequent Heat Treatment, *Materials Science and Engineering A391*, 51-59.
- [53] Sarsılmaz, F., Özdemir, N., Özel, S. (2008) Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen AA6061/AA7075 Çiftinde Karıştırıcı Uç Omuz Genişliğinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi, *Selçuk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Teknik-Online Dergi Cilt 7(1)* 51-61
- [54] Dickerson, T., Shercliff, H.R., Schmidt, H. (2003) A Weld Marker Technique for Allow Visualization in Friction Stir Welding. 4th International Symposium on Friction Stir Welding, 14-16 May, Park City, Utah, USA.
- [55] Shah, S., Tosunoğlu, S. (2012) Friction Stir Welding: Current State of The Art and Future Prospects. 16th World Multi-conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, 17-20 July, Orlando, Florida, USA.
- [56] Kallee, S. (2000) Application of Friction Stir Welding in The Shipbuilding Industry. <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/published-pers/application-of-friction-stir-welding-in-the-shipbuilding-industry-february-2000> (11.01.2013)

- [57] İngiliz Kaynak Enstitüsü (TWI), <http://www.twi.co.uk/technologies/welding-coating-and-material-processing/friction-stir-welding/> 11.01.2013
- [58] ESAB, Friction Stir Welding Technical Handbook.
<http://www.esab.de/de/de/support/upload/FSW-Technical-Handbook.pdf>
11.01.2013
- [59] Cole, J.I., Clark, C.R., Jue, J.F., Cullen. D.A. (2006) Use of Friction Stir Welding and friction Stir Processing for Advanced Nuclear Fuels and Materials Joining Application. The Department of Energy's Lead Nuclear R&D Facility Idaho National Laboratory INL/CON-06-01096, Idaho Falls, USA.
- [60] Çam, G., (2005) Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK): Al-Alaşımları İçin Geliştirilmiş Yeni Bir Kaynak Teknolojisi. Mühendis ve Makine Dergisi, Teknoloji Dünyası, 46(541), 30-39.
- [61] Scialpi, A., Troughton, S., Andrews, S., Filippis L. (2009) Viblade™ : Friction Stir Welding For Plastic, Welding International, 23(11), 846-855.
- [62] Arıcı, A.A., Ertürk, A.T., (2007) Sürtünme Karıştırma kaynağı ile Birleştirilen Polietilen Levhalarda Kaynak Bölgesi Özelliklerinin Belirlenmesi. 8. Uluslararası Kırılma Konferansı, 7-9 Kasım, İstanbul, Türkiye.
- [63] Kiss, Z., Czigány, T., (2007) Applicability of Friction Stir Welding in Polymeric Materials. Mechanical Engineering, 51(1), 15-18.
- [64] Rezgui, M.A., Ayadi, M., Cherouat, A., Hamrouni, K., Zghal, A., Bejaoui, S., (2010). Application of Taguchi approach to Optimize Friction Stir Welding Parameters of Polyethylene. EPJ Web of Conferences 6, (07003)
- [65] Squeo, E.A., Bruno, G., Guglielmotti, A., Qudrini, F., (2009) Friction Stir Welding of Polyethylene Sheets. The Annals of Dunărea De Jos University of Galati, Fascicle V Technologies in Machine Building 1221 (4566), 241-246.
- [66] Payganeh, G.H., Arab, M., Asl, Y.D., Ghasemi, F.A., Broujeni, M.S., (2011) Effects of Friction Stir Welding Process Parameters on Appearance and Strength of Polypropylene Composite Welds. International Journal of The Physical Sciences, 6(19), 4595-4601.

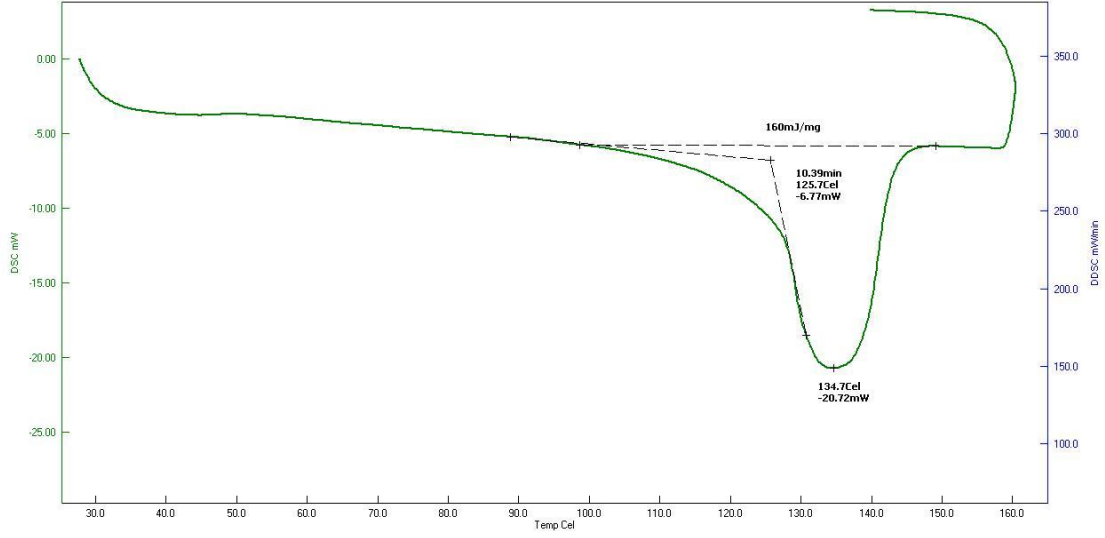
- [67] Troughton, M. (2008) Handbook of Plastics Joining A Practical Guide , 2nd Edition, Published William Andrew Inc., USA.
- [68] Bozkurt, Y., (2011) The Optimization of Friction Stir Welding Process Parameters to Achieve Maximum Tensile Strength in Polyethylene Sheets. *Material and Design*, 35(2012), 440-445.
- [69] Ahmadi, H., Arab, N.B.M., Ghasemi, F.A., Farsani, R.E., (2012) Influence of Pin Profile on Quality of Friction Stir Lap Welds in Carbon Fiber Reinforced Polypropylene Composite. *International Journal of Mechanics and Applications*, 2(3), 24-28.
- [70] Czigány, T., Kiss, Z., (2011) Microscopic Analysis of The Morphology of Seams in Friction Stir Welded Polypropylene. *eXPRESS Polymer Letters*, 6(1), 54-62.
- [71] Czigány, T., Kiss, Z., (2011) Friction Stir Welding Of Fiber Reinforced Polymer Composites. 18th International Conference On Composite Materials, 21-26 August, Jeju Island, Korea.
- [72] Nelson, W.T., Sorenson, C.D., Johns, C.J. (2004) Friction Stir Welding of Polymeric Materials. United States Patent US 6, 811,632 B2, November 2.
- [73] Scialpi, A., Troughton, S., Andrews, S., Filippis L. (2007) In-line reciprocating Friction Stir Welding of Plastics. *Published in Joining Plastics/Fügen von Kunststoffen Magazine, Issue 1,* (2007), <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/published-papers/in-line-reciprocating-friction-stir-welding-of-plastics-may-2007/?locale=en> (21.01.2013)
- [74] Kaçar, R., Emre, H.E., Demir, H., Gündüz, S., (2011) Al-Cu-Al Malzeme Çiftinin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Kabiliyeti. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(2), 349-357.
- [75] Bilici, M.K., Yükler, A.İ., Fidaner, O., (2012) Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Etkileri. 3. Ulusal tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 29-30 Kasım 2012, Balıkesir, Türkiye.

- [76] Kurtulmuş, M., (2012) Friction Stir Spot Welding Parameters for Polypropylene Sheets. Scientific Research and Essays, 7(8), 947-956.
- [77] Panneerselvam, K., Aravindan, S., Haq, A.N., (2004) Joining of Plastics By Frictional Vibration. International Symposium of Research Students on Materials Science and Engineering, 20-22 December, Chennai, India.
- [78] Arıcı, A., Sınmazçelik, T., (2005) Effects of Double Passes of The Tool on Friction Stir Welding of Polyethylene. Journal of Materials Science, 40(2005), 3313-3316.
- [79] Arıcı, A., Şelale, S., (2007) Effects of Tool Tilt Angle on Tensile Strength and Fracture Locations of Friction Stir Welding of Polyethylene. Science and Technology of Welding and Joining 12(6), 536-539.
- [80] Arıcı, A., Mert, Ş., (2008) Friction Stir Spot Welding of Polypropylene. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 00 (2008), 1-4.
- [81] Ezdeşir, A., Erbay, E., Taşkıran, İ., Yağcı, M.A., Cöbek, M., Bilgic, T. (1999) Polimerler I, Pagyay Yayıncılık Turizm ve Ticaret Limited Şirketi, İstanbul.
- [82] New World Encyclopedia™, Polyethylene, <http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Polyethylene>, 01.02.2013.
- [83] Prados, J., (2010) Engineering Education “Today in History” Blog: Polyethylene is discovered. <http://www.k-grayengineeringeducation.com/blog/index.php/2010/03/27/engineering-education-today-in-history-blog-polyethylene-is-discovered-3/> , (01.02.2013).
- [84] Spaniol, J., Rulander, J., Leo, M., (2007) Polypropylene. <http://www.personal.psu.edu/users/j/m/jms5157/Polypropylene%20Paper%20Part%20I.pdf> (01.02.2013).
- [85] Technical Data Sheet PE-HWST, (2009) Trade name: PE-HWST. www.simona.de 22.11.2012.
- [86] Technical Data Sheet PP-DWST, (2009) Trade name: PE-DWST. www.simona.de 22.11.2012.

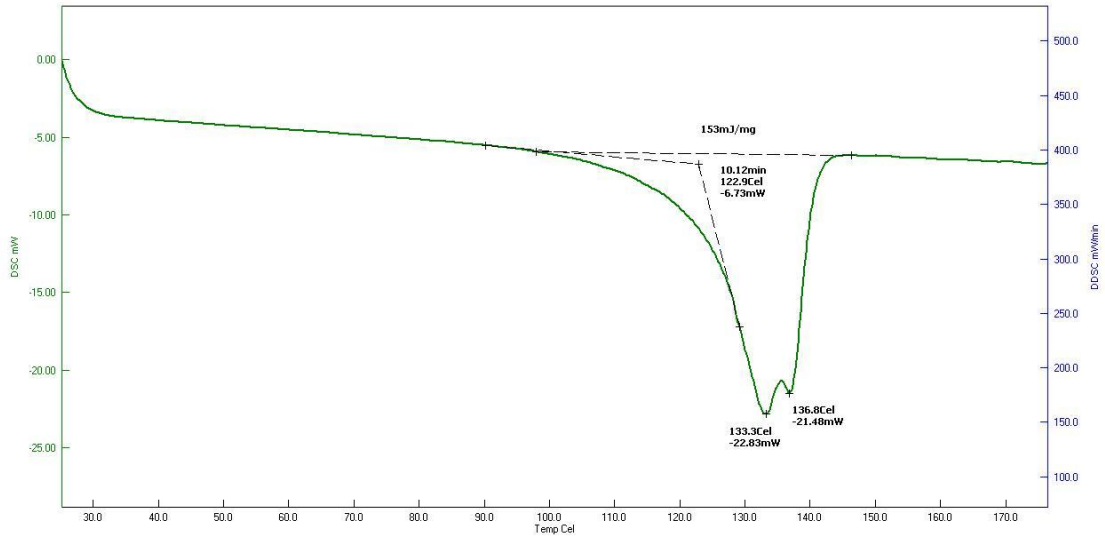
- [87] Yatay Tabanlı Hızlı Bağlantı Elemanları, <http://www.kukamet.com.tr> 02.02.2013.
- [88] Kallew, S.W., Nicholas, E.D., Thomas, W.M., (2002) Friction Stir Welding: Invention, Innovations and Industrialisation. <http://www.twi.co.uk/content/spswkmar2002.html>, (28.02.2010).
- [89] Durmuş, A., Yalçinyuva, T. (2004) Şekillendirme Sonrası Isıl Süreçlerin Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Boruların Mekanik Özelliklerine Etkisi, 6. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, 7-10 Eylül, Bornova, İzmir, Türkiye.
- [90] Durmuş, A. (2014) Kişisel Görüşme, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği.
- [91] Şekercioğlu, T., Kaner, S. (2014) Plastiklerin Yapıştırılmasında Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin İncelenmesi. Mühendis ve Makine, 55(648), 37-43.
- [92] YTÜ Metalurji:Differansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) <http://yildizmetalurji.blogspot.com.tr/2012/08/diferansiyel-taramal-kalorimetre-dsc.html> 22.04.2014
- [93] Peacock, A.J. (2000) Handbook of Polyethylene Structures, Properties and Applications, Marcel Dekker Inc., New York, USA.
- [94] Reiter, G., Strobl, G.R. (2007) progress in Understanding of Polymer Crystallization, Springer Berlin Heidelberg, New York, USA.
- [95] White, E.E.B. (2011) Extensional-Flow-Induced Crystallization of Polypropylene, Master of Science, University of Massachusetts Department of Mechanical and Industrial Engineering, Boston, USA.

EKLER

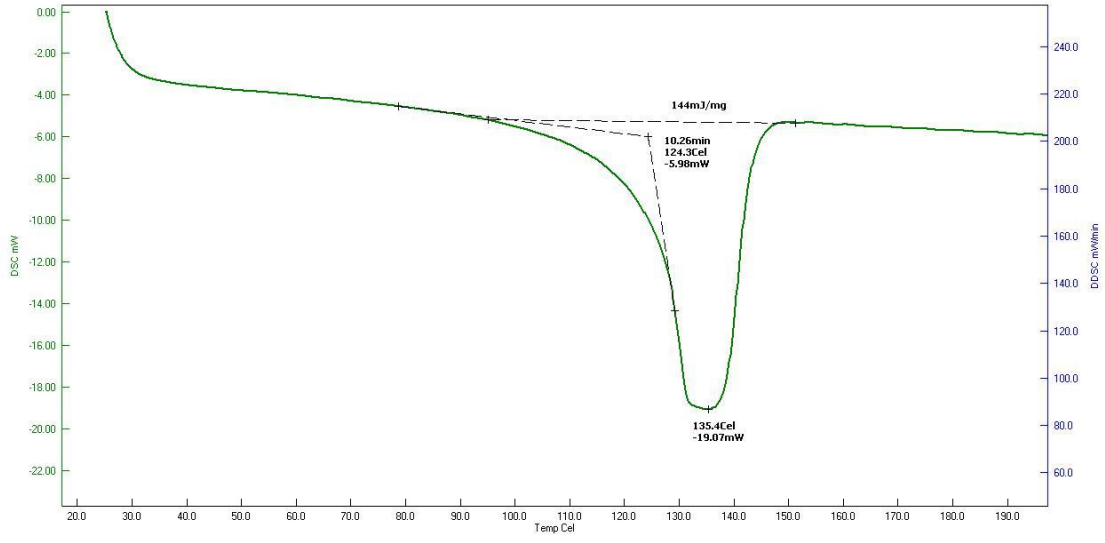
EK-1 DSC Erime Grafikleri



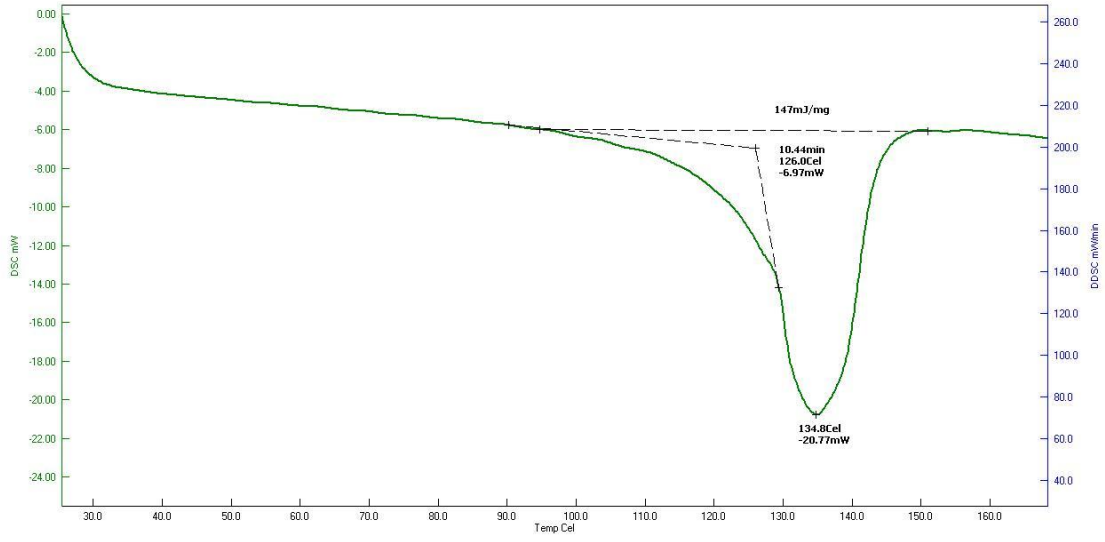
Şekil 1. PE referans numuneye ait DSC erime eğrisi



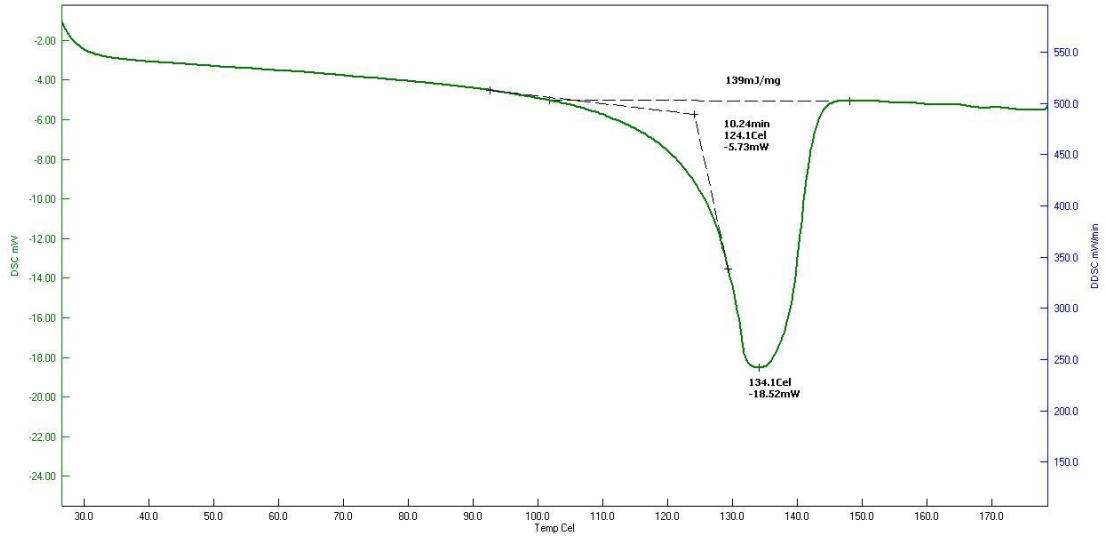
Şekil 2. 1 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



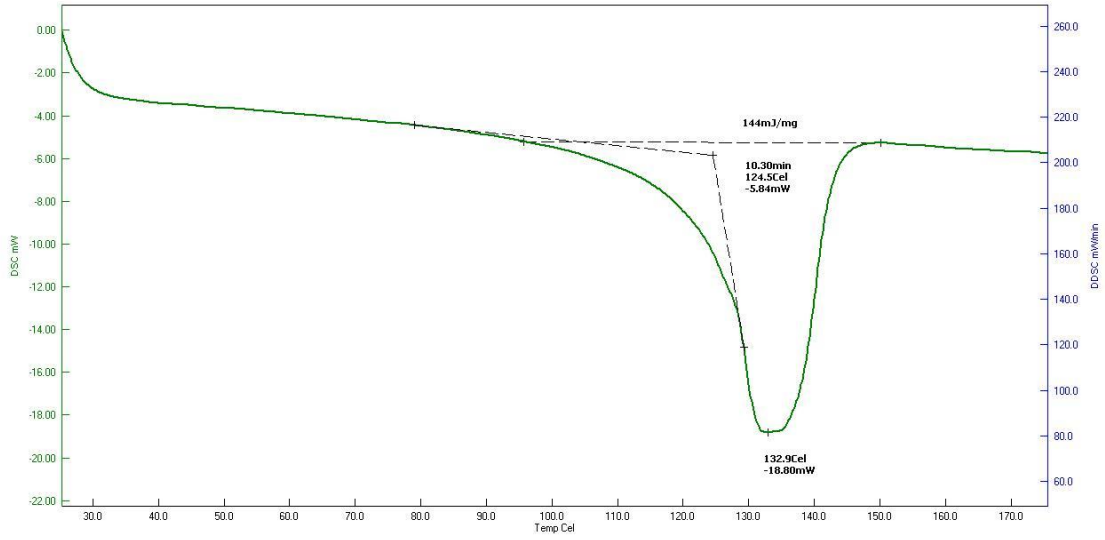
Şekil 3. 2 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



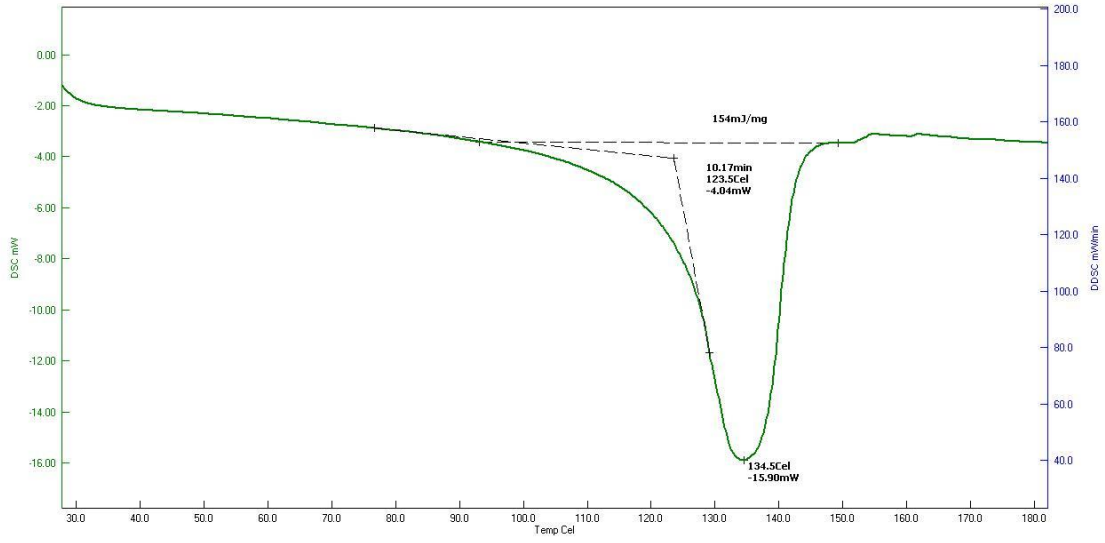
Şekil 4. 3 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



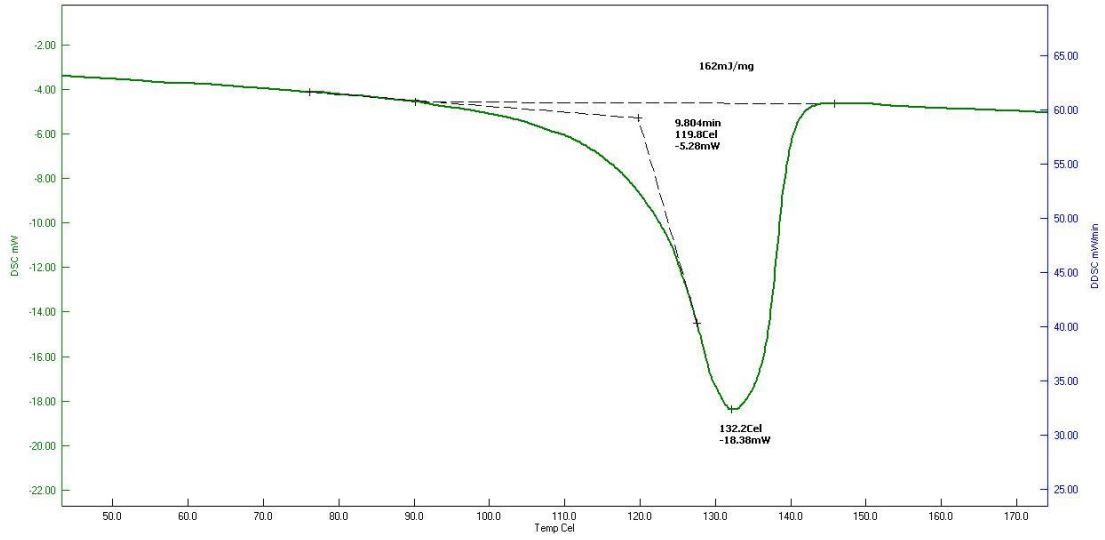
Şekil 5. 4 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



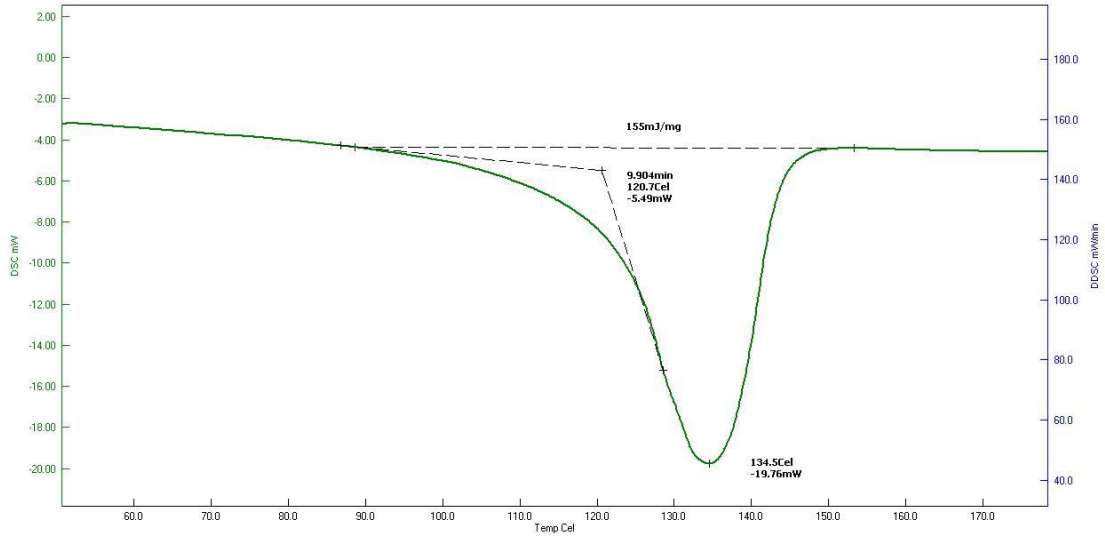
Şekil 6. 5 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



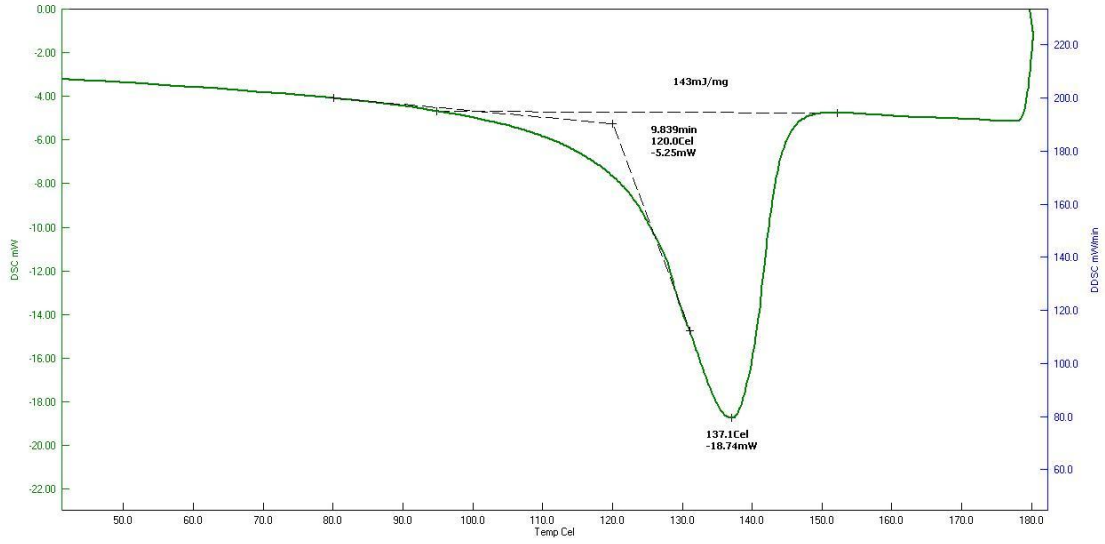
Şekil 7. 12-1 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



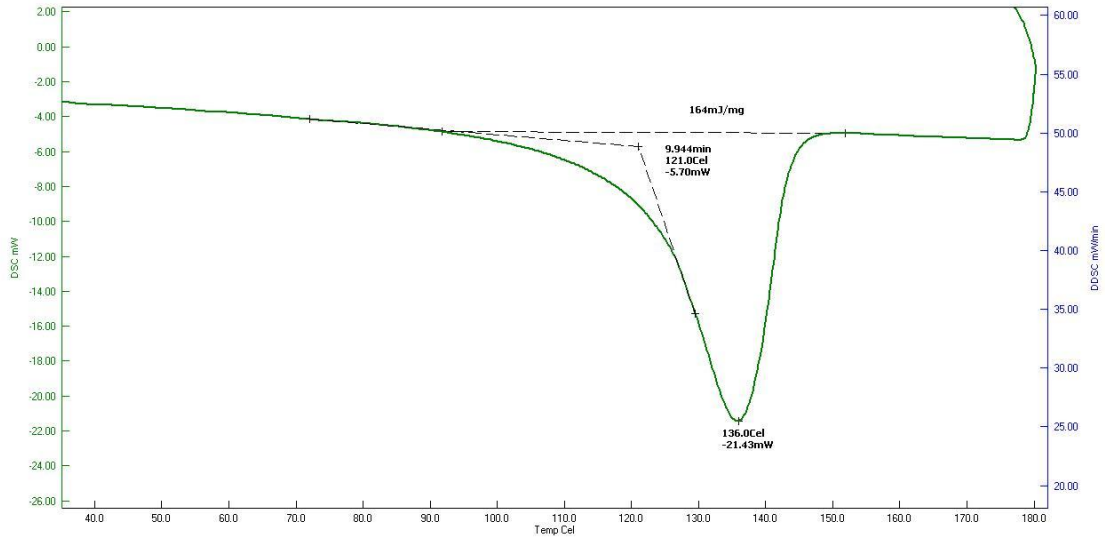
Şekil 8. 12-2 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



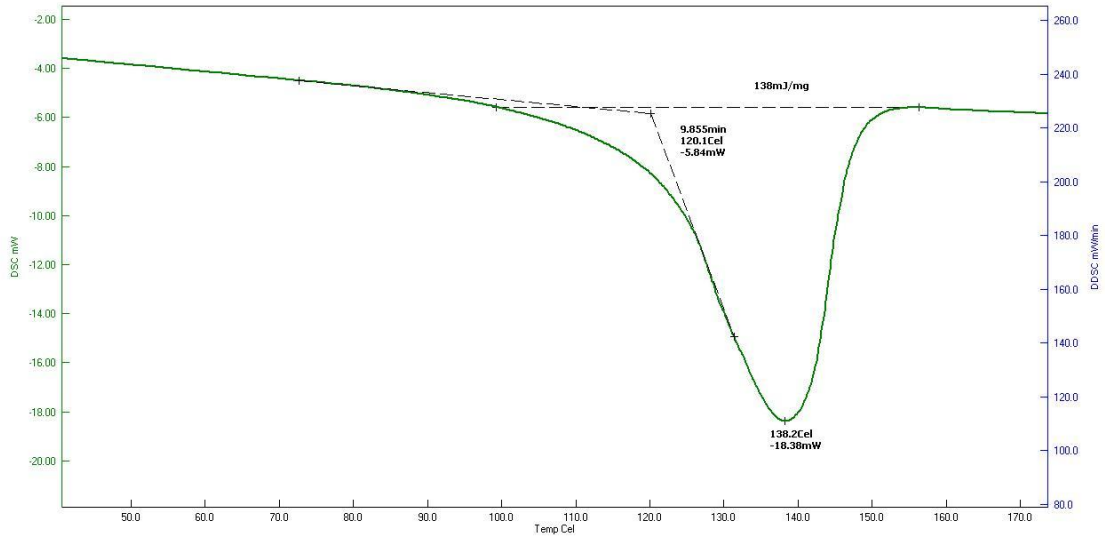
Şekil 9. 12-3 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



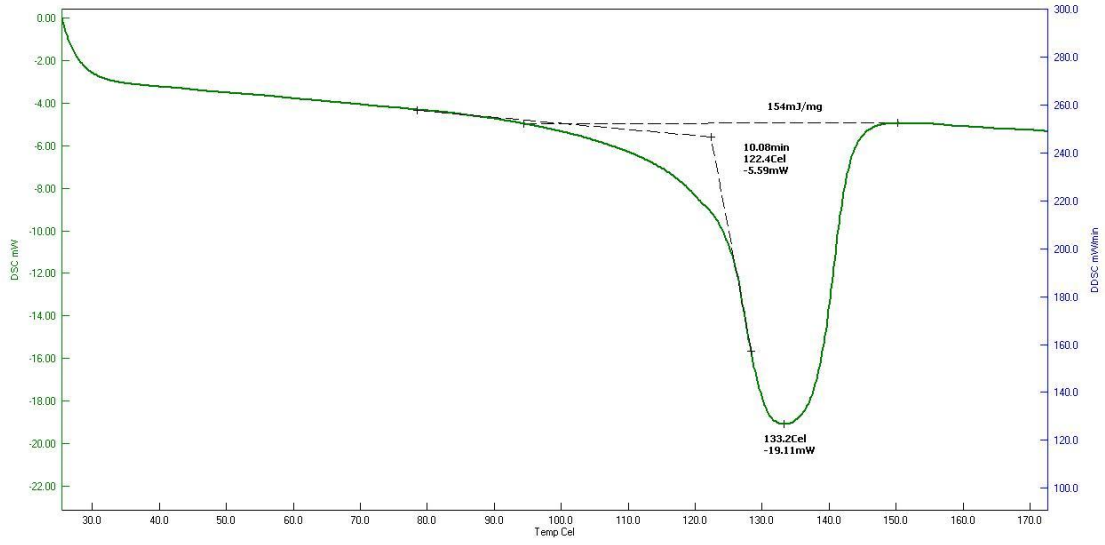
Şekil 10. 12-4 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



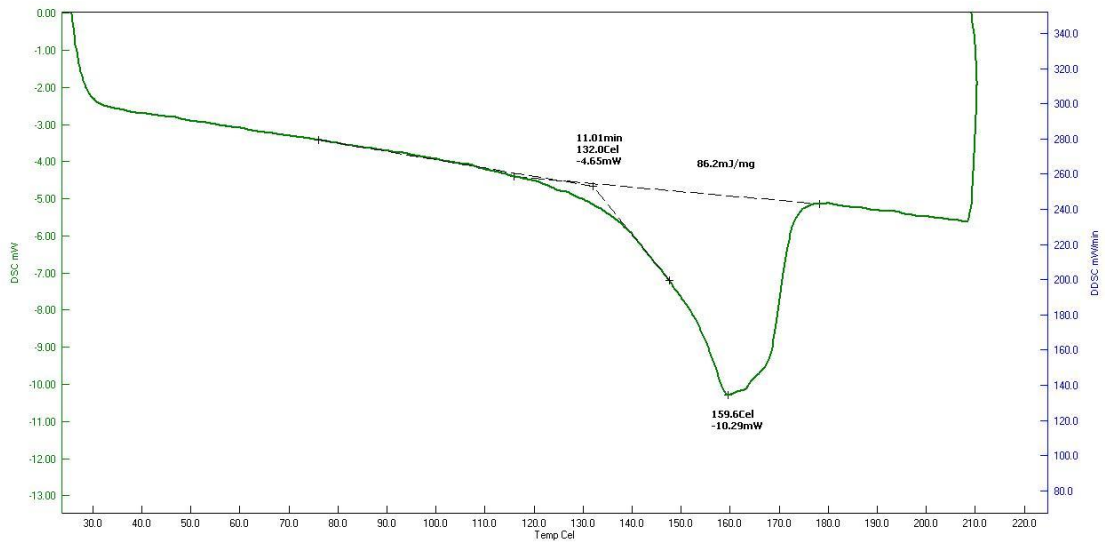
Şekil 11. 12-5 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



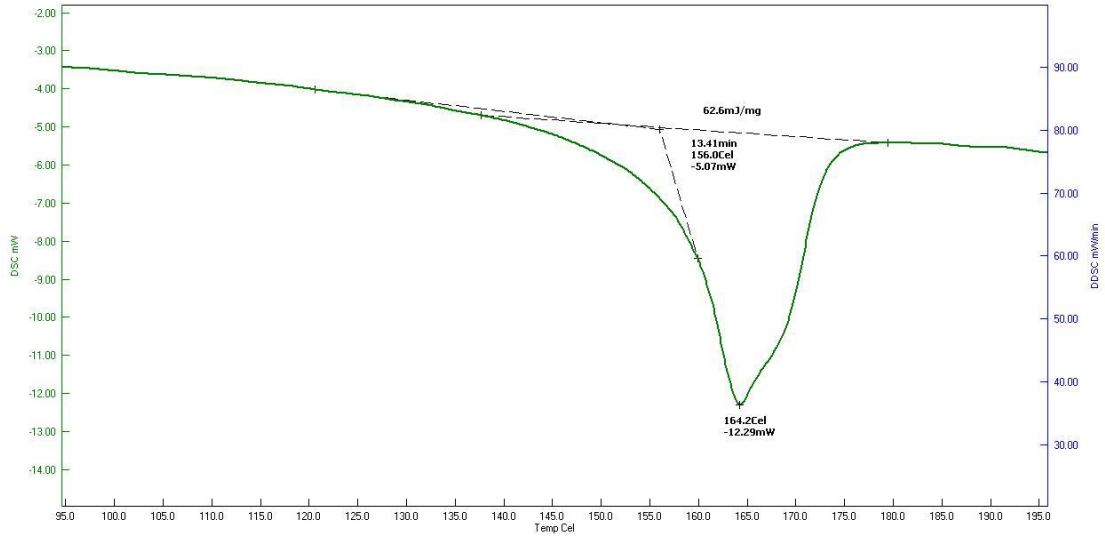
Şekil 12 KT-01 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



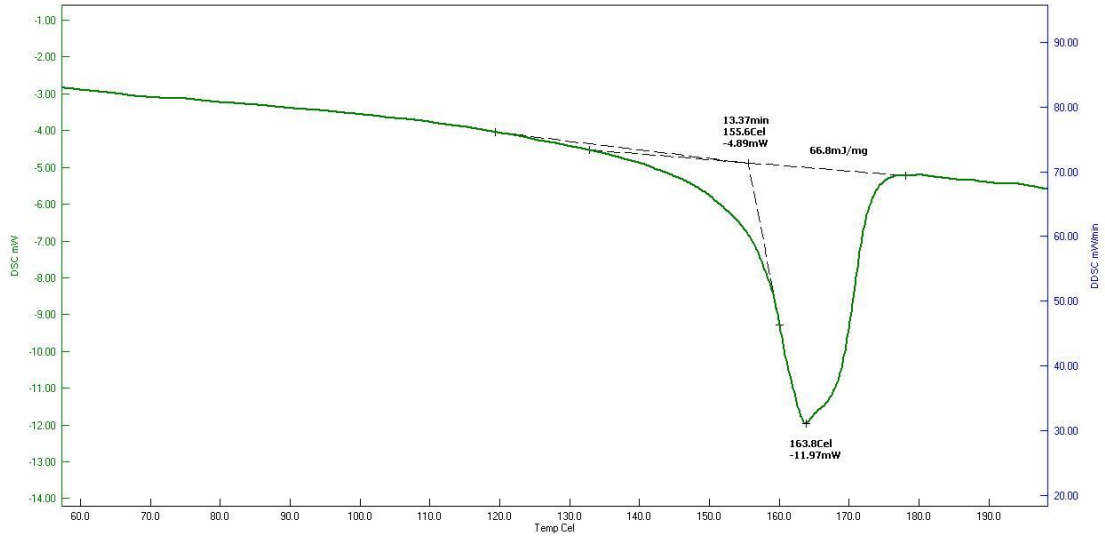
Şekil 13 ST-01 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



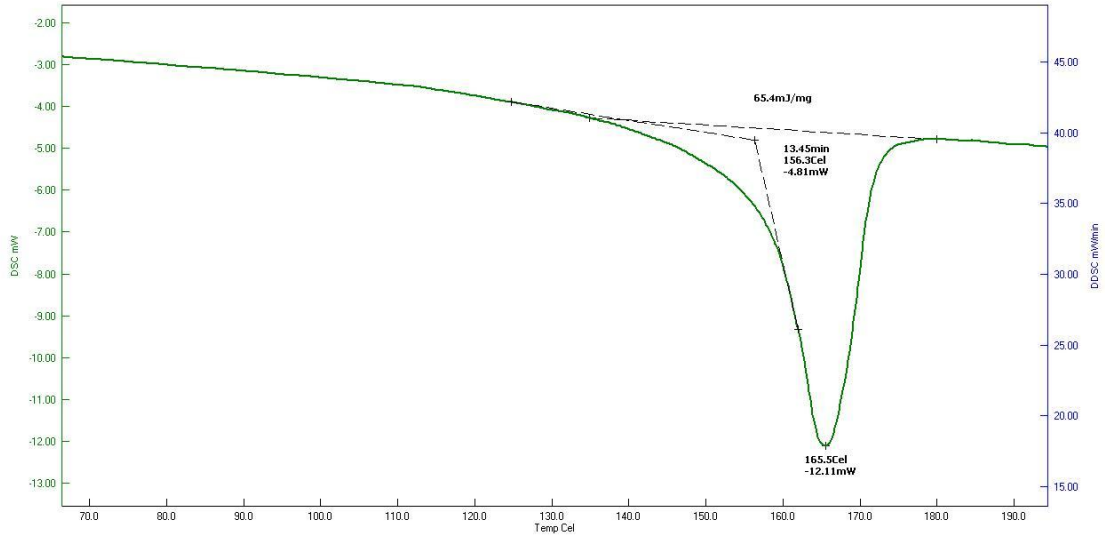
Şekil 14. Şekil 1. PP referans numuneye ait DSC erime eğrisi



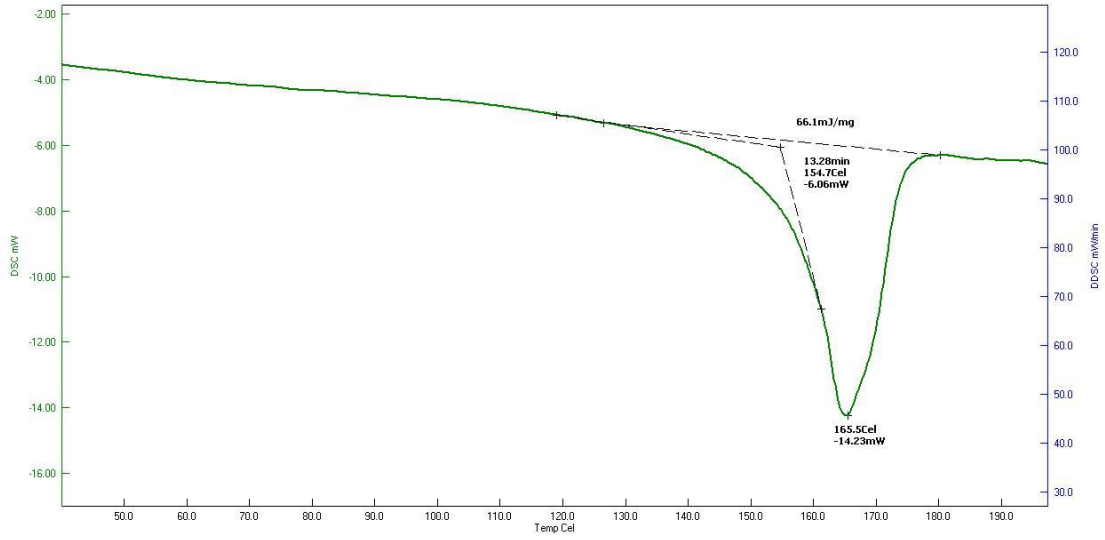
Şekil 15 29/09-01 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



Şekil 16 29/09-02 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



Şekil 17 29/09-03 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi



Şekil 18 29/09-04 kodlu deneye ait kaynaklı bölge DSC erime eğrisi

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İdris KARAGÖZ
Doğum Yeri ve Tarihi : Kahramanmaraş - 1982
Yabancı Dili : İngilizce
E-Posta : idris_karagoz@hotmail.com

Öğrenim Durumu

Derece	Bölüm/Program	Üniversite/Lise	Mezuniyet Yılı
Lise	Metal Eğitimi	Göksun 60. Yıl Cumhuriyet Endüstri Meslek ve Teknik Meslek Lisesi	1999
Üniversite	Metal Eğitimi	Marmara Üniversitesi	2003
Y. Lisans	Metal Eğitimi	Marmara Üniversitesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2008-2013	GSB OILLESS	Ar-Ge Müdürü
2010-2013	İMALAT SAN. VE	Yönetim Temsilcisi
2005-2008	PAZ. LTD. ŞTİ	Üretim ve Planlama Müdürü
2003-2005	YILDIZ ISIL İŞLEM A.Ş.	Üretim Müdürü

Bilimsel Eserler:

1. Karagöz, İ. (2012) Kesici Takım Malzemesi Seçiminin Kesici Takım Kaynaklı Hatalar Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, Kalıp Dünyası, Sayı:76, Temmuz-Agustos 2012

Projelerde Yaptığı Görevler:

1. Araştırmacı. Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynak Özellikleri, Marmara Üniversitesi, BAPKO birimi tarafından desteklenmektedir. (Proje No:FEN-C-DRP-280110-0010)