T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLEN PLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK VE METALÜRJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mehmet BOZU

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mümin ŞAHİN

EDİRNE-2020

MEHMET BOZU'nun hazırladığı "**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLEN PLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK VE METALÜRJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında bir **Doktora tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri:	İmza
Prof. Dr. Mümin ŞAHİN (Danışman)	……
Prof. Dr. Cem ÇETİNARSLAN	……
Prof. Dr. Muharrem Tolga SAKALLI	……
Prof. Dr. Erol TÜRKEŞ	……
Dr. Öğr. Üyesi Aytaç MORALAR	……

Tez Savunma Tarihi: 03/12/2020

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Mümin ŞAHİN
Tez Danışmanı ……

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

……

Doç. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI DOKTORA PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

03/12/2020
Mehmet BOZU
İmza

Doktora Tezi

Sürtünme Karıştırma Kaynağıyla Birleştirilen Plastik Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Metalürjik Özelliklerinin İncelenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu tez çalışması, çevreci ve ekonomik olan sürtünme karıştırma kaynağının hem plastik sektöründe hem de diğer sektörlerde yaygınlaşmasına, plastik ve plastik matrisli kompozit malzemelerin daha yaygın kullanılmasına ve bilime katkıda bulunmak için yapılmıştır. Bu çalışmada, kaynak yapılacak parçalar %30 cam elyaf takviyeli polipropilen malzemelerden plastik enjeksiyon yöntemi ile plaka halinde üretilmiş ve üretilen bu plakaların alın kaynağı, sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile yapılmıştır.

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak kalitesini etkileyen takım devir sayısı, ilerleme hızı ve takım alın profilinin plastik matrisli kompozit malzemelerin kaynak performansına etkileri incelenmiştir. Kaynak bölgesinde oluşan mikro yapılar, kaynak sıcaklığı, sertlik dağılımı ve kaynak yapılan parçaların mekanik özellikleri deneysel olarak belirlenerek kaynak performansı ile ilişkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Çekme deneyleri sonucunda, en düşük %4,283 (2,623 N/mm²) ve en yüksek %24,391 (14,939 N/mm²) sürtünme karıştırma kaynağı performansı elde edilmiştir. Kaynak bölgesi sıcaklığı ile çekme dayanımı arasındaki bağıntı incelenmiş ve sıcaklık artıkça çekme dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Kaynak bölgesi ortalama sıcaklığı ile kaynak bölgesi ortalama sertlik değeri arasındaki bağıntı incelenmiş ve sıcaklık artıkça sertliğin arttığı tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinden kaynaktan etkilenmeyen bölgeye (ana malzemeye) doğru gidildikçe sertlik değerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Kaynaktan etkilenmemiş bölge (ana malzeme), kaynaktan etkilenen bölge ve kaynak bölgesinin taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen görüntüleri karşılaştırma yapılarak incelenmiştir. Kaynaktan etkilenmeyen bölgeden (ana malzemeden) kaynak

bölgesine doğru yaklaştıkça cam elyaf takviye malzemelerinin küçüldüğü, azaldığı ve kaynak bölgesi sınırlarında cam elyaf takviye malzemelerinin biriktiği görülmüştür.

Yıl : 2020

Sayfa Sayısı : 300

Anahtar Kelimeler : Sürtünme karıştırma kaynağı, Kompozitlerin sürtünme karıştırma kaynağı, Plastiklerin kaynağı, Polipropilen kaynağı, Cam elyaf takviye, Plastik matrisli kompozit, Kaynak mekanik özellikleri, Kaynak mikro yapısı

Doctoral Thesis

Examining Mechanical And Metallurgical Properties Of Plastic Matrix Composite Materials Welded With Friction Stir Welding

Trakya University Institute of Natural Sciences

Mechanical Engineering Department

ABSTRACT

This research was conducted to contribute to science, helping the use of friction stir welding method which is environment friendly and economic to become widespread in both polymers industry and other industries as well as to help plastic matrix composite materials to be used more. In this study, the parts were manufactured in sheet form by plastic injection process from 30% glass fiber reinforced polypropylene matrix material and they have been butt-welded together using friction stir welding method.

The effect of the welding performance of polymer matrix composite materials with respect to the parameters affecting the quality of friction stir welding such as rotation speed, feed rate and butt-weld profile were examined. The microstructures formed in weld zone, welding temperature, hardness profile and mechanical properties of the welded parts were experimentally determined and the relation between those parameters with respect to weld performance were attempted to be identified.

As a result of tensile tests, a minimum of 4,283% (2,623 N/mm²) and a maximum of 24,391% (14,939 N/mm²) weld performance values were attained. The relation between weld zone temperature and tensile strength was examined and an increase in tensile strength has been observed as temperature of the weld zone increases. The correlation between the mean temperature and the mean hardness of the weld zone was examined and the increase on hardness was determined as the temperature of the weld zone increases. An increase of hardness was observed as hardness testing went from heat affected zone to unaffected zone (main material).

Scanning Electron Microscope (SEM) images of the unaffected zone (main material), heat affected zone and weld zone were comparatively examined. Size and quantity reduction of glass fiber reinforcement were observed from unaffected zone to weld zone, in addition to accumulation of glass fiber reinforcements on weld zone boundaries.

Year : 2020

Number of Pages : 300

Keywords : Friction Stir Welding, Friction Stir Welding of Composites, Welding of Polymers, Welding of Polypropylene, Glass Fiber Reinforcement, Polymer Matrix Composite, Mechanical Properties of Weld, Microstructure of Weld.

ÖNSÖZ

Hazırlanan bu doktora tezi %30 cam elyaf takviyeli polipropilen malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesiyle elde edilen numunelerin mekanik ve metalürjik özelliklerinin incelenmesini içermektedir. Plastik malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili araştırmaların yetersiz olmasından dolayı bu konuda araştırma yapmaya karar verilmiştir.

Çalışmalarımda bilimsel, manevi desteğini esirgemeyen, katkıları ve yönlendirmeleri ile doktora eğitimim boyunca çok yararlandığım tez danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mümin ŞAHİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezin izleme komitesinde yer alan bana verdikleri destek ve değerli katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Cem S. ÇETİNARSLAN ve Prof. Dr. Muharrem Tolga SAKALLI hocalarıma teşekkür ederim.

Kompozit malzemeler konusunda ve diferansiyel tarama kalorimetri incelemelerinin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER hocama teşekkür ederim.

Mikro yapı incelemelerinde yardımlarını esirgemeyen Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuarı (NABİLTEM) Müdürü Sayın Doç. Dr. Nurullah ÖZDEMİR ve Müdür Yardımcısı Sayın Doç. Dr. Muhammet AYDIN'a teşekkür ederim.

Sertlik ölçme cihazını sağlayan Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Rektör Yardımcısı Sayın Prof. Dr. Bülent EKER hocama teşekkür ederim.

Çekme deneylerini yapmamda yardımlarını esirgemeyen ve beni akademik olarak sürekli destekleyen Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Murat Tolga ÖZKAN hocama,

çekme deney cihazını kullanmama yardımcı olan İmalat Mühendisliği Bölümündeki Sayın hocalarıma ve Sayın Arş. Gör. Ömer BAYRAKTAR'a teşekkür ederim.

Cam elyaf takviyeli polipropilen malzemelerin hammaddesinin temin edilmesinde yardımcı olan PolyOne (Tekno Polimer Mühendislik) firmasından Sayın Şebnem BAŞAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Cam elyaf takviyeli polipropilen malzemelerin enjeksiyon yöntemi ile plaka şeklinde üretilmesinde yardımlarını esirgemeyen Öztepe Plastik Sanayi ve Ticaret Limitet Şirketi sahibi Sayın Seyit ALATEPE'ye teşekkür ederim.

Sürtünme karıştırma kaynaklarının yapılmasında, kaynak yapılacak parçaların hazırlanmasında, kaynak sonrası yapılacak deney numunelerinin hazırlanmasında, sürtünme karıştırma kaynağı takımlarının imalinde makinelerini kullanmama izin veren ve yardımlarını esirgemeyen Ali Şirin Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş. sahibi Sayın Ali ŞİRİN'e, firma çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim. Aynı şekilde yardımlarını esirgemeyen Dinçmaksan Makina Sanayi ve Ticaret Limitet Şirketi sahibi Sayın Dursun ERDİNÇ'e ve firma çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Tezin yazım aşamasında yardımlarını esirgemeyen Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Hüseyin Rıza BÖRKLÜ hocama ve Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Uzaktan Eğitim Araştırma ve Uygulama Merkezi Müdürü Sayın Doç. Dr. İhsan TOKTAŞ hocama teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca beni yalnız bırakmayan ve beni sürekli destekleyen Annem Fadime BOZU'ya, Babam Hüseyin BOZU'ya, Ablam Gülten BOZU'ya kardeşlerim Emine EKŞİ'ye, Muhammet BOZU'ya ve diğer aile fertlerime, minnetlerimi sunarım.

Maddi, manevi desteklerini esirgemeyen sevgili eşim Fatma BOZU'ya ve canım kızım Nehir BOZU'ya teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT vi
ÖNSÖZ viii
İÇİNDEKİLER x
SİMGELER DİZİNİ xiv
KISALTMALAR DİZİNİ xvi
ŞEKİLLER DİZİNİ xx
ÇİZELGELER DİZİNİ xxxiv
BÖLÜM 1 1
GİRİŞ 1
BÖLÜM 2 7
KOMPOZİTLER 7
2.1. Matris Türüne Göre Kompozitler 8
2.1.1. Metal Matrisli Kompozitler 9
2.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler 9
2.1.3. Plastik Matrisli Kompozitler 9
2.1.3.1. Termosetler 10
2.1.3.2. Termoplastikler 10
2.2. Takviye Türüne Göre Kompozitler 12
2.2.1. Tabakalı Kompozitler 12
2.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler 13

2.2.3. Elyaf Takviyeli Kompozitler 13
2.3. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri 19
2.3.1. Açık Kalıplama Yöntemleri 19
2.3.2. Kapalı Kalıplama Yöntemleri 20
2.3.2.1. Enjeksiyonla Kalıplama Yöntemi 20
2.4. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları 27
2.4.1. Havacılık Endüstrisi 28
2.4.2. Otomotiv Endüstrisi 31
2.4.3. Spor ve Eğlence Endüstrisi 32
2.4.4. Denizcilik Endüstrisi 33
2.4.5. Tüketici Eşya Endüstrisi 34
2.4.6. Diğer Uygulama Alanları 34
2.5. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları 36
2.5.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları 37
2.5.2. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları 38
BÖLÜM 3 41
PLASTİKLERİN BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ 41
3.1. Mekanik Birleştirme Yöntemleri 42
3.2. Yapıştırma Yöntemleri 44
3.3. Kaynak Yöntemleri 47
3.3.1. Termal Kaynak Yöntemleri 51
3.3.2. Elektromanyetik Kaynak Yöntemleri 57
3.3.3. Mekanik (Sürtünme) Kaynak Yöntemleri 61
BÖLÜM 4 67
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI 67

4.1. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağı 68
4.1.1. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulanışı 71
4.1.2. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağında Malzeme Akışı 72
4.1.3. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağının Metalürjik Yapısı 74
4.1.4. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlar 76
4.1.5. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağına Etki Eden Parametreler..... 79
4.1.6. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağının Kullanım Alanları 80
4.1.7. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantajları..... 82
4.1.8. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağının Dezavantajları 83
4.2. Dikey Hareketli Sürtünme Karıştırma Kaynağı 84
4.3. Titreşim Sürtünme Karıştırma Kaynağı 85
4.4. Çift Taraflı Sürtünme Karıştırma Kaynağı..... 86
4.5. Hibrit Sürtünme Karıştırma Kaynağı 88
4.6. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı 93
4.7. Plastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle İlgili Yapılmış Olan Çalışmalar. 97
BÖLÜM 5 113
PLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN BELİRLENMESİ VE İMALİ 113
5.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılacak Malzemelerin Belirlenmesi 113
5.1.1. Malzeme Temin Edilmesi İle İlgili Yapılan Çalışmalar 131
5.2. Malzeme Üretimi..... 137
BÖLÜM 6 148
DENEYSEL ÇALIŞMALAR 148
6.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapımında Kullanılan Bağlama Kalıbının Tasarlanması ve İmal Edilmesi 148

6.1.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Bağlama Kalıbında Yapılan Tasarım Değişiklikleri 151
6.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Karıştırıcı Takımların Tasarlanması ve İmal Edilmesi 154
6.2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılacak Karıştırıcı Takımların Belirlenmesi ve İmal Edilmesi 161
6.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi 165
6.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapımında ve Kaynak Yapılacak Parçaların Hazırlanmasında Kullanılan Makine Özellikleri 188
6.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılacak Parçaların Kaynak İçin Hazırlanması 189
6.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılışı 191
6.7. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılmış Parçalara Yapılan İncelemeler ve Deneyler 198
6.7.1. Görsel İncelemeler 198
6.7.2. Kaynak Bölgesi Sıcaklık Ölçümü 206
6.7.3. Çekme, Mikro Yapı İnceleme ve Sertlik Ölçme Numunelerinin Hazırlanması 211
6.7.4. Mikro Yapı İncelemeleri 215
6.7.5. Sertlik Ölçümleri 220
6.7.6. Çekme Deneyleri 228
BÖLÜM 7 244
SONUÇLAR VE TARTIŞMA 244
KAYNAKLAR 257
ÖZGEÇMİŞ 265

SİMGELER DİZİNİ

Al_2O_3	Alüminyum oksit
CO_2	Karbon dioksit
Cr	Krom
dak	Dakika
dev/dak	Devir/Dakika
GHz	Gigahertz
gr/cm³	Gram/Santimetreküp
Hz	Hertz
Kg	Kilogram
kHz	Kilohertz
kJ/m²	Kilojoule/Metrekare
kW	Kilowatt
MHz	Megahertz
mJ/mm²	Megajoule/Milimetrekare
mm	Milimetre
mm/dak	Milimetre/Dakika
MPa	Megapaskal
Ni	Nikel
N/mm²	Newton/Milimetrekare
Psi	Pounds per square inch
Rpm	Revolutions Per Minute

SiC	Silisyum karbür
SiO_2	Silisyum dioksit
W	Watt
W/mK	Watt/Metre Kelvin
°C	Derece santigrat
μ	Mikron
λ	Lambda (Isı iletkenliği katsayısı)
$	Dolar

KISALTMALAR DİZİNİ

A	Alkali
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
AS	İlerleme tarafı
BMW	Bayerische Motoren Werke AG
BYU	Brigham Young Üniversitesi
C	Korozyon
CAM	Computer aided manufacturing
CAD	Computer aided design
CCW	Saat ibresinin tersi yönde
CNC	Computer numerical control
CNT	Nano karbon tüp
CTP	Cam takviyeli plastikler
CW	Saat ibresi yönünde
ÇSKK	Çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı
DEB	Dinamik olarak etkilenen bölge
DHSKK	Dikey hareketli sürtünme karıştırma kaynağı
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNK	Direnç nokta kaynağı
DSC	Diferansiyel tarama kalorimetri
E	Elektrik
EDX	Elemental olarak spectrum detektörü

ETD	Everhardt Thornley ikincil elektron detektörü
F	Çekme kuvveti
F1	Formula 1
FT + PK	Fiber takviyeli polimer kompozit
FW	Friction welding
GF	Cam elyaf
GMT	Preslenebilir cam takviyeli termoplastik
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
HMWP	Yüksek moleküler ağırlıklı polietilen
HNT	Halloysite nanotube
HRc	Hardness Rockwell c
HSKK	Hibrit sürtünme karıştırma kaynağı
HT	Sertleştirme ve temperleme
ISO	International Organization for Standardization
ITAB	Isı tesiri altında kalan bölge
KB	Kaynak bölgesi
KEB	Kaynaktan etkilenen bölge
LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
LFD	Geniş alan düşük vakum ikincil elektron detektörü
LLDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
Lu	Bindirme uzunluğu
M	Kaynaktan etkilenmeyen bölge (ana malzeme)
M03	Saat ibresi yönünde
M04	Saat ibresinin tersi yönde
MDPE	Orta yoğunlukta polietilen

MKE	Makine Kimya Enstitüsü
MMK	Metal matrisli kompozit
NABİLTEM	Namık Kemal Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuarı
PA	Poliamid
PBT	Polibütilentereftalat
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PEEK	Polietereterketon
PLA	Polilaktik asit
PMMA	Polimetilmetakrilat
PP	Polipropilen
PP/CNT	Nano karbon tüp takviyeli polipropilen
PS	Polistiren
PTFE	Politetrafloroetilen
PVC	Polivinilklorür
RS	Geri çekme tarafı
s	Malzeme kalınlığı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SK	Sürtünme kaynağı
SKK	Sürtünme karıştırma kaynağı
SKNK	Sürtünme karıştırma nokta kaynağı
SMC	Hazır kalıplama plakası
S-R	Mukavemet
Te	Ergime sıcaklığı
TEB	Termodinamik olarak etkilenen bölge

Tg	Camsı geçiş sıcaklığı
TMA	Termomekanik analiz
TSKK	Titreşim sürtünme karıştırma kaynağı
TWI	İngiliz Kaynak Enstitüsü
UHMWPE	Aşırı yüksek moleküler ağırlıklı polietilen
ULDPE	Aşırı düşük ve çok düşük yoğunluklu polietilen
UV	Ultraviyole
VLDPE	Aşırı düşük ve çok düşük yoğunluklu polietilen

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kompozit malzeme fazları 8

Şekil 2.2. Takviye türüne göre kompozit malzemeler; a) Uzun fiber, b) Kısa fiber, c) Parçacık, d) Tabakalı 12

Şekil 2.3. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde takviyelerin dağılımı; a) Sürekli tek yönlü elyaflar, b) Rastgele yerleştirilmiş elyaflar, c) Ortagonal elyaflar, d) Açılı yerleştirilmiş elyaflar 15

Şekil 2.4. Enjeksiyon makinesi 21

Şekil 2.5. Enjeksiyonla kalıplama çevrimi; a) Ergitme, b) Enjeksiyon, c) Soğutma, d) Çıkartma 25

Şekil 2.6. Enjeksiyon çevrimindeki basıncın kalıp içindeki değişimi 25

Şekil 2.7. Plastik enjeksiyon kalıp parçalarının gösterimi 26

Şekil 2.8. Plastik matrisli kompozit malzemelerden imal edilmiş ürünler 36

Şekil 3.1. Plastik malzemelerin birleştirme yöntemleri 41

Şekil 3.2. Mekanik birleştirme yöntemleri 43

Şekil 3.3. Metalik birleştirme yöntemlerine ait örnekler; a) Cıvatalı bağlantı, b) Vidalı bağlantı, c) Perçinli bağlantı 44

Şekil 3.4. Yapıştırma yöntemleri 45

Şekil 3.5. Plastiklerin yapıştırma bağlantı örnekleri 46

Şekil 3.6. Plastiklerin kaynak yöntemleri 48

Şekil 3.7. Sıcak gaz kaynağının uygulanışı 52

Şekil 3.8. Sıcak kama kaynağının uygulanışı 53

Şekil 3.9. Sıcak elaman kaynağının işlem basamakları 54

Şekil 3.10. Ekstrüzyon kaynak yöntemleri; a) Hareketli ekstrüder, b) Arabalı ekstrüder 54

Şekil 3.11. Kızılötesi ısıtma kaynak yönteminin şematik gösterimi; a) Alın (küt) kaynağı, b) Bindirme kaynağı 55

Şekil 3.12. Lazer kaynak yönteminin şematik gösterimi; a) Silindirler arası film kaynağı, b) Alın (küt) kaynağı, c) Bindirme kaynağı 56

Şekil 3.13. Rezistans kaynak yönteminin şematik gösterimi 57

Şekil 3.14. İndüksiyon kaynağı; a) İndüksiyon kaynağının şematik gösterimi, b) İndüksiyon kaynak bobinleri 58

Şekil 3.15. Yüksek frekans kaynağının şematik gösterimi 59

Şekil 3.16. Mikrodalga kaynağının şematik gösterimi 60

Şekil 3.17. Yaygın olarak kullanılan sürtünme hareketleri; a) Dönel sürtünme, b) Lineer sürtünme, c) Yörüngesel sürtünme 61

Şekil 3.18. Sürtünme kaynağı yapılan parçaların kaynak bölgesinde oluşan metal fışkırması 62

Şekil 3.19. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağının şematik gösterimi 63

Şekil 3.20. Farklı şekillerde uygulanan titreşim hareketleri; a) Açısal titreşim, b) Doğrusal titreşim, c) Orbital titreşim 64

Şekil 3.21. Ultrasonik kaynak makinesinin şematik gösterimi 65

Şekil 4.1. Sürtünme karıştırma kaynak yöntemleri. 68

Şekil 4.2. Sürtünme karıştırma kaynağının şematik olarak gösterimi 69

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 71

Şekil 4.4. SKK işleminde; a) Sıcak metalin akış modeli, b) Farklı mekanik işlemlerin oluştuğu bölgeler 73

Şekil 4.5. SKK işleminde oluşan bölgelerin şematik gösterimi 74

Şekil 4.6. SKK işleminde külçe oluşumunun şematik gösterimi 75

Şekil 4.7.SKK yönteminde kullanılan değişik tipteki takım tasarımları..... 77

Şekil 4.8. Çeşitli uç geometrisine sahip WhorlTM takımlar..... 77

Şekil 4.9. TWI tarafından geliştirilmiş Flared-TrifluteTM takımlar; a) Düz (nötr) kanallı, b) Sol kanallı, c) Sağ kanallı, d) Vida dişlerinin düz, sağ ve sol yönlü olması.. 78

Şekil 4.10. MX-TrifluteTM tipi takım ucunun esin kaynağı deniz kabuklarıdır..... 78

Şekil 4.11. Skew-StirTM metodunun çalışma prensibi ve Skew-StirTM takım ucu..... 78

Şekil 4.12. SKK kaynak takımı alın yüzey geometrilerine ait örnekler..... 79

Şekil 4.13. Japonya'da SKK'nın kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntemle kaynak yapılmış alüminyum paneller..... 81

Şekil 4.14. SKK tekniği kullanılmış AAAV..... 82

Şekil 4.15. Dikey hareketli sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi 84

Şekil 4.16. Dikey hareketli sürtünme karıştırma kaynağı tasarımı 85

Şekil 4.17. Titreşim sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi..... 86

Şekil 4.18. Kalın plakalarda çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması..... 87

Şekil 4.19. Çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış 6082-T6 plakalar..... 87

Şekil 4.20. İki omuzlu takımlar ile çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları 88

Şekil 4.21. Çift omuzlu takımlar..... 88

Şekil 4.22. SKK'nın hibrit uygulaması; a) Şematik gösterim, b) Uygulama şekli..... 89

Şekil 4.23. Nelson vd. tarafından geliştirilen hibrit sürtünme karıştırma kaynak takımı 90

Şekil 4.24. Johns'un en son geliştirdiği HSKK takım tasarımı 91

Şekil 4.25. Sıcak pabuç takım tasarımının şematik gösterimi 91

Şekil 4.26. Sıcak pabuç HSKK takımı..... 92

Şekil 4.27. HSKK takım tasarımı; a) İzometrik görünüş, b) Detaylandırılmış görünüş. 92

Şekil 4.28. İçten ısıtmalı takım; a) Şematik Gösterim, b) Fotoğraf 92

Şekil 4.29. HSKK takımının ve uygulamanın gösterilişi 93

Şekil 4.30. Sürtünme karıştırma nokta kaynağının şematik olarak üç aşaması 95

Şekil 4.31. Tekrar doldurmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı 96

Şekil 4.32. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı teknikleri; a) SKNK, b) Dikişli SKNK, c) Salınımlı SKNK 97

Şekil 4.33. PP malzemeye ait çekme dayanım değerleri; a) 15° kanal açısı olan takım, b) 45° kanal açısı olan takım 100

Şekil 4.34. Ana malzeme, kaynak sınırı ve kaynak bölgesinden alınmış SEM görüntüsü 103

Şekil 4.35. Sabit omuzlu takım 106

Şekil 4.36. SKK'da oluşan kusurlar 110

Şekil 5.1. Sürtünme karıştırma kaynağı ön denemelerinde kullanılan takım örnekleri. 113

Şekil 5.2. PA 6 malzemeden hazırlanmış 10 mm kalınlığında parçalar. 114

Şekil 5.3. 10 mm kalınlığında PA 6 kaynak denemesi yapılmış parça; a) Kaynama olmamış parçalar, b) Kaynak esnasında talaş şeklinde küçük parçalar halinde kaynamış malzemeler. 116

Şekil 5.4. 10 mm kalınlığında PA 6 kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 116

Şekil 5.5. PTFE malzemeden hazırlanmış 10 mm kalınlığında parçalar. 117

Şekil 5.6. 10 mm kalınlığında PTFE kaynak denemesi yapılmış kaynama olmamış parçalar; a) Birinci kaynak denemesi, b) Üçüncü kaynak denemesi, c) Kaynak esnasında talaş şeklinde küçük parçalar halinde kaynamış malzemeler. 118

Şekil 5.7. PP/CNT malzemeden hazırlanmış 10 mm kalınlığında parçalar; a) Nispeten homojen dağılımlı, b) Homojen olmayan dağılımlı. 119

Şekil 5.8. PP/CNT nispeten homojen dağılımlı 10 mm kalınlığında kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 119

Şekil 5.9. PP/CNT homojen olmayan dağılımlı 10 mm kalınlığında kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş..... 120

Şekil 5.10. PA 6 olarak temin edilen PE ve PP özelliği gösteren malzemeden hazırlanmış 5 mm kalınlığında parçalar..... 120

Şekil 5.11. PA 6 olarak temin edilen PE ve PP özelliği gösteren malzeme DSC analiz grafiği..... 121

Şekil 5.12. PE - PP özelliği gösteren 5 mm kalınlığında kaynak denemesi yapılmış parça..... 124

Şekil 5.13. PMMA malzemeden hazırlanmış 5 mm kalınlığında parçalar. 125

Şekil 5.14. PMMA malzeme DSC analiz grafiği..... 126

Şekil 5.15. PMMA 5 mm kalınlığında kaynak denemesi yapılmış parça..... 127

Şekil 5.16. Ulpolen 1000 malzemeden hazırlanmış 10 mm kalınlığında parçalar..... 128

Şekil 5.17. PA 6 malzemeden hazırlanmış 5 mm kalınlığında parçalar. 129

Şekil 5.18. PA 6 5 mm kalınlığında kaynak denemesi yapılmış parça..... 129

Şekil 5.19. Hyundai Era ön tampon malzemesinden hazırlanmış parçalar..... 130

Şekil 5.20. Hyundai Era ön tampon malzemesi ile kaynak denemesi yapılmış parça.. 131

Şekil 5.21. PP matrisli %25 cam elyaf takviyeli kompozit malzeme. 132

Şekil 5.22. PP matrisli %25 cam elyaf takviyeli kompozit malzemeden hazırlanmış parçalar..... 134

Şekil 5.23. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli kompozit malzeme granül halinde. .. 135

Şekil 5.24. Plastik enjeksiyon kalıbı. 137

Şekil 5.25. Plastik enjeksiyon kalıp parçaları. 138

Şekil 5.26. Plastik enjeksiyon kalıp montajı. 138

Şekil 5.27. Plastik enjeksiyon yöntemi ile malzeme üretimi. 139

Şekil 5.28. Plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş olan malzemeler. 140

Şekil 5.29. Kaynaksız malzemelerden hazırlanmış çekme deney numuneleri. 140

Şekil 5.30. Kaynaksız malzemelerin çekme deney grafiği. 141

Şekil 5.31. Çekme deneyi sonrası kopmuş kaynaksız malzemelere ait çekme deney numuneleri; a) Önden görünüş, b) Yan görünüş. 142

Şekil 5.32. Kaynaksız malzemeden hazırlanmış mikro yapı inceleme ve sertlik ölçme numunesi. 143

Şekil 5.33. Kaynaksız malzeme; a) Hazırlanan numunelerin çıkartıldığı bölgeler, b) Mikro yapı inceleme ve sertlik ölçümünün yapıldığı bölgeler. 143

Şekil 5.34. Kaynaksız malzeme mikro yapı inceleme ve sertlik ölçümünün yapıldığı bölgeler. 144

Şekil 5.35. Kaynaksız malzeme SEM görüntüleri a) 150X, b) 250X, c) 500X, d) 1000X. 145

Şekil 5.36. Kaynaksız malzeme 500X SEM görüntüleri a) 1 Numaralı bölge, b) 2 Numaralı bölge, c) 3 Numaralı bölge. 145

Şekil 5.37. Kaynaksız malzeme bölgelere göre sertlik değişim grafiği. 146

Şekil 6.1. Bağlama Kalıbı (Kısa ve 10 mm Kalınlığında Parça Bağlanmış). 148

Şekil 6.2. Kalıp üzerindeki kanallar; a) Takım çıkma kanalı, b) Köşe boşaltma kanalları. 149

Şekil 6.3. SKK bağlama kalıbı alt plakası (5 mm kalınlığında parçalar için). 149

Şekil 6.4. Kalıp alt plakasının sürtünme karıştırma kaynağı bağlama kalıbına montajı (5 mm kalınlığında parçaların kalıba bağlanabilmesi için). 150

Şekil 6.5. SKK bağlama kalıbı kısa pabuçları. 150

Şekil 6.6. SSK bağlama kalıbı uzun pabuçları. 151

Şekil 6.7. Bağlama Kalıbı (Geniş – Uzun ve 5 mm Kalınlığında Parçaların Bağlanabilmesi İçin) 151

Şekil 6.8. Kalıp üzerindeki kanallar; a) Köşe boşaltma kanalları, b) Köşe boşaltma kanalları (ilk tasarlanan kalıptan kalan). 152

Şekil 6.9. SKK bağlama kalıbı alt plakası (5 mm kalınlığında geniş parçalar için). 152

Şekil 6.10. Kalıp alt plakasının bağlama kalıbına montajı (5 mm kalınlığında geniş parçaların kalıba bağlanabilmesi için) 153

Şekil 6.11. Sürtünme karıştırma kaynağı bağlama kalıbı ve kalıp parçaları. 153

Şekil 6.12. Ç 4140 çeliğinden imal edilen takımların imalat resimleri; a) Konik 2 adım diş açılmış, b) Konik 1,25 adım diş açılmış, c) Silindirik. 155

Şekil 6.13. Ç 4140 çeliğinden imal edilmiş takımlar. 155

Şekil 6.14. Ç 512200 çeliğinden imal edilen takımların tasarım resimleri. 157

Şekil 6.15. Ç 4140 çeliğinden imal edilen takım tasarım resmi. 158

Şekil 6.16. Ç 512200 çeliğinden imal edilmiş takımlar. 158

Şekil 6.17. Ç 4140 çeliğinden imal edilmiş takım. 158

Şekil 6.18. Ç 512200 çeliğinden imal edilen yeni takımların tasarım resimleri. 160

Şekil 6.19. Ç 512200 çeliğinden imal edilmiş yeni takımlar. 160

Şekil 6.20. Ön denemelerde kırılan takımlar. 163

Şekil 6.21. Taslak olarak işlenmiş takımlar. 164

Şekil 6.22. SKK deneylerinde kullanılan takımların tasarım resimleri. 164

Şekil 6.23. SKK deneylerinde kullanılan takımlar. 165

Şekil 6.24. PA 6 malzemeye B tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça; a) Kaynama olmamış parçalar, b) Kaynak esnasında talaş şeklinde küçük parçalar halinde kaynamış malzemeler. 167

Şekil 6.25. PA 6 malzemeye A tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 167

Şekil 6.26. PA 6 malzemeye C ve A tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 167

Şekil 6.27. PTFE kaynak denemesi yapılmış kaynama olmamış parçalar; a) Birinci kaynak denemesi, b) Üçüncü kaynak denemesi, c) Kaynak esnasında talaş şeklinde küçük parçalar halinde kaynamış malzemeler. 168

Şekil 6.28. PP/CNT nispeten homojen dağılımlı kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 169

Şekil 6.29. PP/CNT homojen olmayan dağılımlı kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 170

Şekil 6.30. PE ve PP özelliği gösteren kaynak denemesi yapılmış parça. 172

Şekil 6.31. PMMA kaynak denemesi yapılmış parça. 174

Şekil 6.32. Ulpolen 1000 gözenekli malzeme kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 175

Şekil 6.33. Hyundai Era ön tampon malzemesi ile kaynak denemesi yapılmış parça. . 176

Şekil 6.34. PE ve PP özelliği gösteren malzeme ve L tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça önden görünüş. 178

Şekil 6.35. PE ve PP özelliği gösteren malzeme ve P tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça önden görünüş. 178

Şekil 6.36. PA 6 malzeme ve L tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça. 180

Şekil 6.37. PA 6 malzeme ve P tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça. 181

Şekil 6.38. H tipi takım, 1250 dev/dak ve 75 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 182

Şekil 6.39. M tipi takım, 750 dev/dak ve 25 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 183

Şekil 6.40. M tipi takım, 1000 dev/dak ve 50 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 183

Şekil 6.41. M tipi takım, 1250 dev/dak ve 75 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 184

Şekil 6.42. O tipi takım, 750 dev/dak ve 25 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 184

Şekil 6.43. O tipi takım, 1000 dev/dak ve 50 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 185

Şekil 6.44. O tipi takım, 1250 dev/dak ve 75 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 185

Şekil 6.45. CNC Bed freze tezgâhı. 188

Şekil 6.46. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelerin imalat resmi. 189

Şekil 6.47. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelerin kenarlarının işlenmesi. 190

Şekil 6.48. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelerin çapaklarının alınması. 190

Şekil 6.49. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemeden hazırlanmış parçalar. ... 190

Şekil 6.50. Bağlama kalıbının makine tablasına sabitlenmesi. 191

Şekil 6.51. Bağlama kalıbının paralellik ve diklik kontrollerinin yapılması. 192

Şekil 6.52. Bağlama kalıbına göre makine sıfırlarının ayarlanışı; a) Z Eksen sıfırlaması, b) X eksen sıfırlaması..... 192

Şekil 6.53. a) Takımın takım tutucu ve makineye bağlanışı, b) Y eksen sıfırlaması.... 193

Şekil 6.54. Kaynak yapılacak parçaların kalıp üzerine bağlanışı. 193

Şekil 6.55. Sürtünme karıştırma kaynağının yapılışı; a) Takımın dalması, b) Ön ısıtma bölgesi ilerleme, c) Kaynak bölgesi ilerleme. 194

Şekil 6.56. SKK yapılmış parça soğuma için beklenirken. 195

Şekil 6.57. H tipi takım ile kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 196

Şekil 6.58. M tipi takım ile kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 196

Şekil 6.59. O tipi takım ile kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 197

Şekil 6.60. Kaynak yapılmış parçalar. 197

Şekil 6.61. H tipi takım ile en iyi görsel sonuç elde edilen SKK, 1000 dev/dak ve 60 mm/dak'da kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 199

Şekil 6.62. H tipi takım ile en kötü görsel sonuç elde edilen SKK, 1125 dev/dak ve 50 mm/dak'da kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 200

Şekil 6.63. M tipi takım ile en iyi görsel sonuç elde edilen SKK, 1000 dev/dak ve 60 mm/dak'da kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 200

Şekil 6.64. M tipi takım ile en kötü görsel sonuç elde edilen SKK, 1125 dev/dak ve 40 mm/dak'da kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 200

Şekil 6.65. O tipi takım ile en iyi görsel sonuç elde edilen SKK, 1125 dev/dak ve 60 mm/dak'da kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 201

Şekil 6.66. O tipi takım ile en kötü görsel sonuç elde edilen SKK, 1250 dev/dak ve 40 mm/dak'da kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 201

Şekil 6.67. H tipi takım ile 1250 dev/dak ve 50 mm/dak'da SKK yapılmış parça takımın kırıldığı bölge; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 202

Şekil 6.68. O tipi takım ile 1000 dev/dak ve 50 mm/dak'da SKK yapılmış parça takımın kırıldığı bölge; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş. 202

Şekil 6.69. H tipi takım ile 1250 dev/dak ve 50 mm/dak'da SKK yapılmış parça kaynak bölgesi renk değişimi; a) Önden görünüş, b) Kesit görünüş. 203

Şekil 6.70. Takım dalması, boşluk ve incelme (kalınlık düşmesi); a) Önden görünüş, b) Kesit görünüş. 203

Şekil 6.71. Geri çekme tarafı boşluk ve kademe oluşumu; a) Önden görünüş b) Kesit görünüş. 204

Şekil 6.72. İlerleme ve geri çekme tarafının gösterilişi. 204

Şekil 6.73. Kaynak bölgesi altında meydana gelen kalınlık artışı. 205

Şekil 6.74. Takım dalması ve ilerleme tarafı çapak oluşumu; a) Önden görünüş, b) Kesit görünüş. 206

Şekil 6.75. Anahtar deliği oluşumu. 206

Şekil 6.76. InfraRed termometre. 207

Şekil 6.77. Kaynak başlangıç noktasına uzaklığına göre SKK sıcaklık değişim grafiği. 208

Şekil 6.78. Takım dalmasından dolayı sıcaklık artışı. 209

Şekil 6.79. Takım tipine bağlı SKK ortalama sıcaklık değişim grafiği. 210

Şekil 6.80. Devir sayısına bağlı SKK ortalama sıcaklık değişim grafiği. 210

Şekil 6.81. İlerleme hızına bağlı SKK ortalama sıcaklık değişim grafiği. 211

Şekil 6.82. Çekme deney numunesi işleme. 212

Şekil 6.83. SKK yapılmış parçalardan çıkartılan numunelerin yerleşim şeklinin gösterilişi. 212

Şekil 6.84. ASTM D 638 Tip 4'e uygun çekme deney numune ölçüleri. 213

Şekil 6.85. SKK yapılmış parçalardan hazırlanmış çekme deney numuneleri. 213

Şekil 6.86. SKK yapılmış parçalardan hazırlanırken kırılan çekme deney numuneleri. 214

Şekil 6.87. Mikro yapı incelemesi ve sertlik ölçüm numunesi; a) Üst görünüş, b) Yan görünüş, c) Alt görünüş. 214

Şekil 6.88. Taramalı elektron mikroskobu (SEM). 215

Şekil 6.89. Mikro yapı numunesi; a) İşlenerek hazırlanmış numune, b) Mikro yapı görüntülerinin alındığı bölgeler 215

Şekil 6.90. Mikro yapı numuneleri; a) SEM tablasına yerleştirilmiş, b) SEM cihazına yerleştirilmiş. 216

Şekil 6.91. H tipi takım ile 1000 dev/dak ve 40 mm/dak'da yapılmış SKK kaynaktan etkilenmemiş bölge SEM görüntüleri; a) 150X, b) 250X, c) 500X, d) 1000X. 216

Şekil 6.92. H tipi takım ile 1000 dev/dak ve 40 mm/dak'da yapılmış SKK kaynaktan etkilenen bölge SEM görüntüleri; a) 150X, b) 250X, c) 500X, d) 1000X. 217

Şekil 6.93. H tipi takım ile 1000 dev/dak ve 40 mm/dak'da yapılmış SKK kaynak bölgesi SEM görüntüleri; a) 150X, b) 250X, c) 500X, d) 1000X. 217

Şekil 6.94. M tipi takım ile 1000 dev/dak ve 40 mm/dak'da yapılmış SKK 150X büyütmedeki SEM görüntüleri takviye malzemelerinin küçülmesi ve azalması; a) Kaynak bölgesi, b) Kaynaktan etkilenen bölge, c) Kaynaktan etkilenmeyen bölge.....218

Şekil 6.95. O tipi takım ile 1125 dev/dak ve 60 mm/dak'da yapılmış SKK 250X büyütmedeki SEM görüntüleri takviye malzemelerinin dağılımı; a) Kaynak bölgesi, b) Kaynaktan etkilenen bölge, c) Kaynaktan etkilenmeyen bölge. 218

Şekil 6.96. M tipi takım ile 1250 dev/dak ve 60 mm/dak'da yapılmış SKK 150X büyütmedeki SEM görüntüsü kaynak bölgesinde oluşan boşluklar. 219

Şekil 6.97. SKK Kaynak sınırı; a) 150X büyütmedeki SEM görüntüsü, b) SKK yapılmış parça kesiti, c) Şematik gösterim. 219

Şekil 6.98. SKK sonrası meydana gelen yapılar. 220

Şekil 6.99. Sertlik ölçüm cihazı. 221

Şekil 6.100. Sertlik ölçüm numunesi; a) İşlenerek hazırlanmış numune, b) Sertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgeler 222

Şekil 6.101. Sertlik ölçümünün yapılışı. 223

Şekil 6.102. Sıcaklığa bağlı SKK kaynak gölgesi sertlik değişim grafiği. 225

Şekil 6.103. SKK sertliğinin bölgelere göre değişim grafiği 226

Şekil 6.104. Takım tipine bağlı SKK kaynak bölgesi ortalama sıcaklık ve sertlik değişim grafiği; a) Sertlik, b) Sıcaklık. 227

Şekil 6.105. Devir sayısına bağlı SKK kaynak bölgesi ortalama sertlik değişim grafiği. 227

Şekil 6.106. İlerleme hızına bağlı SKK kaynak bölgesi ortalama sertlik değişim grafiği. 228

Şekil 6.107. Çekme test cihazı. 229

Şekil 6.108. Kaynaklı parçalardan hazırlanmış çekme deney numunesi. 229

Şekil 6.109. Çekme deneyleri; a) Çekme numunelerinin çekme test cihazına bağlanışı, b) Çekme numunelerinin çekme test cihazında kopana kadar çekilmesi. 231

Şekil 6.110. H tipi takım ile 1250 dev/dak ve 50 mm/dak'da yapılmış SKK çekme deney grafiği.....232

Şekil 6.111. En yüksek ortalama kopma uzaması elde edilen çekme deneyi sonrası kopmuş, H tipi takım ile 1000 dev/dak, 50 mm/dak'da SKK yapılmış çekme deney numuneleri; a) Önden görünüş, b) Yan görünüş.....233

Şekil 6.112. En düşük ortalama kopma uzaması elde edilen çekme deneyi sonrası kopmuş, H tipi takım ile 1250 dev/dak, 40 mm/dak'da SKK yapılmış çekme deney numuneleri; a) Önden görünüş, b) Yan görünüş.....233

Şekil 6.113. En yüksek ortalama çekme dayanımı elde edilen çekme deneyi sonrası kopmuş, H tipi takım ile 1250 dev/dak, 50 mm/dak'da SKK yapılmış çekme deney numuneleri; a) Önden görünüş, b) Yan görünüş.....234

Şekil 6.114. En düşük ortalama çekme dayanımı elde edilen Çekme deneyi sonrası kopmuş H tipi takım ile 1250 dev/dak, 60 mm/dak'da yapılmış SKK çekme deney numuneleri; a) Önden görünüş, b) Yan görünüş.....234

Şekil 6.115. İlerleme hızına göre çekme dayanımlarının değişimi; a) 1000 dev/dak, b) 1125 dev/dak, c) 1250 dev/dak. 236

Şekil 6.116. Devir sayısına göre çekme dayanımlarının değişimi; a) 40 mm/dak, b) 50 mm/dak, c) 60 mm/dak. 236

Şekil 6.117. Takım tipine göre çekme dayanımlarının değişimi; a) H tipi takım, b) M tipi takım, c) O tipi takım.....236

Şekil 6.118. Takım tipine bağlı SKK ortalama çekme dayanımı değişim grafiği. 237

Şekil 6.119. Devir sayısına bağlı SKK ortalama çekme dayanımı değişim grafiği.....238

Şekil 6.120. İlerleme hızına bağlı SKK ortalama çekme dayanımı değişim grafiği.....238

Şekil 6.121. Sıcaklığa bağlı SKK çekme dayanımının değişim grafiği.....239

Şekil 6.122. Kaynak bölgesi sertliğine bağlı SKK çekme dayanımının değişim grafiği. 239

Şekil 6.123. H tipi takım ile 1250 dev/dak ve 50 mm/dak'da SKK yapılmış parça en yüksek ortalama çekme dayanımı; a) Önden görünüş, b) Kesit görünüş, c) Kaynak bölgesi 150X SEM görüntüsü, d) Kaynaktan etkilenen bölge 160X SEM görüntüsü..240

Şekil 6.124. H tipi takım ile 1250 dev/dak ve 60 mm/dak'da SKK yapılmış parça en düşük ortalama çekme dayanımı; a) Önden görünüş, b) Kesit görünüş, c) Kaynak bölgesi 150X SEM görüntüsü, d) Kaynaktan etkilenen bölge 150X SEM görüntüsü..241

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. SKK ile birleştirilen plastiklerin çekme dayanımları..... 98

Çizelge 4.2. Plastiklerin SKK ile birleştirilmesi sonucu elde edilen çekme dayanımları 111

Çizelge 5.1. Poliamid 6 malzeme özellikleri 115

Çizelge 5.2. Teflon malzeme özellikleri 117

Çizelge 5.3. Polietilen malzeme özellikleri 122

Çizelge 5.4. Polipropilen malzeme özellikleri 124

Çizelge 5.5. Pleksiglas malzeme özellikleri..... 126

Çizelge 5.6. Gözenekli ulpolen 1000 malzeme özellikleri 128

Çizelge 5.7. PP matrisli %25 cam elyaf takviyeli malzeme özellikleri 133

Çizelge 5.8. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzeme özellikleri 136

Çizelge 5.9. Plastik enjeskiyon makinesi özellikleri..... 139

Çizelge 5.10. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemenin üretim sonrası özellikleri..... 144

Çizelge 6.1. Alüminyum tipi takım tiplerinin gösterilişi ve özellikleri. 154

Çizelge 6.2. Plastik için tasarlanan takım tiplerinin gösterilişi ve özellikleri. 156

Çizelge 6.3. Plastik için tasarlanan yeni takım tiplerinin gösterilişi ve özellikleri. 159

Çizelge 6.4. SKK deneylerinde kullanılacak takım tiplerinin gösterilişi ve özellikleri. 163

Çizelge 6.5. 10 mm kalınlığında PA 6 malzemelerde kullanılan SKK parametreleri. . 166

Çizelge 6.6. PTFE malzemelerde kullanılan SKK parametreleri. 168

Çizelge 6.7. PP/CNT nispeten homojen dağılımlı malzemelerde kullanılan SKK parametreleri. 169

Çizelge 6.8. PP/CNT homojen olmayan dağılımlı malzemelerde kullanılan SKK parametreleri. 170

Çizelge 6.9. PE ve PP özelliği gösteren malzemelerde kullanılan SKK parametreleri. 171

Çizelge 6.10. PMMA malzemelerde kullanılan SKK parametreleri. 173

Çizelge 6.11. Ulpolen 1000 gözenekli malzemede kullanılan SKK parametreleri. 174

Çizelge 6.12. Hyundai Era ön tampon malzemesinde kullanılan SKK parametreleri. . 175

Çizelge 6.13. PE ve PP özelliği gösteren malzemelerde kullanılan SKK parametreleri 177

Çizelge 6.14. PA 6 malzemelerde kullanılan SKK parametreleri. 179

Çizelge 6.15. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelerde kullanılan SKK parametreleri. 182

Çizelge 6.16. SKK deneylerinde kullanılan parametreler. 187

Çizelge 6.17. CNC Bed freze tezgâhı özellikleri. 189

Çizelge 6.18. SKK parametrelerine göre görsel inceleme sonuçları. 199

Çizelge 6.19. InfraRed termometre özellikleri. 207

Çizelge 6.20. Takım tiplerine göre en düşük ve en yüksek ortalama sıcaklıklar. 208

Çizelge 6.21. Takım tiplerine göre en düşük ve en yüksek ortalama sertlik değerleri . 224

Çizelge 6.22. Takım tiplerine göre en düşük ve en yüksek ortalama çekme dayanımları. 235

Çizelge 6.23. SKK parametreleri ve elde edilen sonuçlar. 242

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Plastiklerin 1900'lü yılların başında geliştirilmesinin ardından, 1930'lu yılların sonunda plastik malzemelerin özellikleri diğer malzeme çeşitleri ile yarışabilecek düzeye gelmeye başlamıştır. Metallere göre yoğunluğunun az ve yüzey kalitesinin daha iyi olması, kimyasallara ve korozyona karşı dayanıklılığı, kolay şekil verilebilmesi, karmaşık parçaların yapılabilmesi ve laboratuar ortamında istenilen özelliklerinin geliştirilebilmesi, plastik malzemelerin tercih ve kullanımını çok artırmıştır. Birçok üstün özelliği yanında sertlik ve dayanım özelliklerinin düşük olması bu malzemelerin güçlendirilmesi için çalışmalar yapılmasına sebep olmuştur. Bu eksikliği gidermek amacıyla 1950'li yıllarda plastik matrisli kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kompozitlerin, özellikle plastik matrisli kompozitlerin yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı dayanıklılık gibi pek çok avantajı vardır. Plastik matrisli kompozit malzemeler neredeyse metaller kadar dayanıklı, sert ve aynı zamanda çok hafif bir karaktere sahiplerdir (Arıcasoy, 2006; Bayraktar, 2016; Er, 2004; Karagöz, 2014; Mert, 2010; Mishra, Sahu, Mahto, Pal & Pal, 2019).

Günümüzde üreticiler bir malzemenin aynı anda birçok özelliğe sahip olmasını, yüksek performans sağlamasını istemektedir. Bir malzemede aynı anda sağlamlık, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, yüksek sertlik, darbe dayanımı, hafiflik vb. özelliklerin iyi olması istenilebilmektedir. Bu özelliklerin sadece metaller, seramikler veya plastiklerle elde edilmesi çok güçtür. Değişen ihtiyaçları karşılamak için bilimsel ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak sürekli yeni malzemeler geliştirilmeye ve iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bu yeni malzemelerden biri de plastik matrisli kompozit malzemelerdir. Özellikle son yıllardaki hafif ama yüksek dayanımlı malzemelere olan

talebin artmasından dolayı bu malzemeler üzerindeki araştırmalar da artmıştır (Bayraktar, 2016; Mishra vd., 2019).

Karayolu araçlarında ağırlık artmasıyla yakıt tüketiminin arttığı bilinmektedir. Son yıllarda doğal kaynakların azalması, karbon emisyonu, küresel ısınma vb. gibi çeşitli çevresel faktörler bu kaynakların uygun şekilde kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu da modern taşıtlarda kullanılan malzemeler ile aynı özelliklerde daha hafif malzemelere olan talebi arttırmıştır. Ayrıca geleceğin taşıtları olarak düşünülen elektrikli araçlarda, düşük ağırlığın akü ömürlerini ve kullanım süresini arttırmasından dolayı, dayanım / ağırlık oranı günümüzde çok önemlidir (Bayraktar, 2016; Kaştan, Yalçın, Ünal & Talaş, 2015; Mishra vd., 2019).

Plastikler ve plastik matrisli kompozitler, yüksek dayanım / ağırlık oranı, korozyon direnci, daha yüksek darbe dayanımı ve boyutsal kararlılık gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sayesinde otomotiv, demiryolları, havacılık, uzay, gemi inşası, tıp, ambalaj vb. gibi imalat sektörlerinde ve gelişmiş endüstriyel uygulamalarda kullanım alanı bulmaktadır (Karagöz, 2014; Mert, 2010; Panneerselvam, Aravindan & Noorul Haq, 2004).

Plastiklerin az ve basit şekillerde kullanılmalarından dolayı kullanılmaya başlandığı ilk yıllarda plastik kaynak teknikleri üzerinde pek fazla durulmamıştır. Ancak İkinci Dünya Savaşı sırasında metalik yapıların korozyondan dolayı ciddi hasarlara uğraması, plastik ve plastik matrisli kompozitlerin endüstriyel alanlarda kullanılan diğer mühendislik malzemelerine alternatif olarak kullanılmasını gündeme getirmiştir. Termoplastiklerin ısı ve basınç altındaki davranışları incelenerek bu malzemelerin kaynak özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Termoplastik malzemelerin kaynak yapılabilirliğinin anlaşılmasından sonra birçok kaynak yöntemi üzerinde çalışmalara başlanmıştır. Çalışmaların başlangıcından günümüze kadar sıcak eleman, sıcak gaz, ekstrüzyon, lazer, ultrasonik, sürtünme, yüksek frekans, indüksiyon, mikrodalga, öz dirençli implant, kızılötesi ısıtma, titreşim kaynak yöntemleri gibi birçok farklı yöntem geliştirilmiş ve termoplastiklerin kaynağında başarılı sonuçlar alınmıştır (Karagöz, 2014; Mert, 2010).

Zaman geçtikçe, dünya genelinde doğal kaynakların bulunabilirliğinde önemli bir değişiklik olmuştur. Karbon emisyonu, küresel ısınma, doğal kaynakların azalması

vb. gibi çeşitli çevresel faktörler ele alınması gereken sorunlar haline gelmiştir. Şu anda, otomotiv, demiryolları, havacılık, uzay, gemi inşası, tıp, ambalaj vb. gibi imalat sektörlerinde kaynak ve diğer imalat yöntemleri aktif olarak araştırılmaktadır. Devam eden imalat operasyonlarına yardımcı olmak için, endüstriyel donanımlar büyük oranda enerjiye (genelde yakıta) ihtiyaç duyar. Bu nedenle, hızlı sanayileşme sonucu yakıt tüketimi her geçen gün artmakta ve bunlara ait hammadde ve doğal kaynaklar da tükenmektedir. Yakıt tüketimini azaltacak hafif (alternatif) malzemeler ve ileri işleme (imalat) tekniklerin geliştirilmesi ile bu kapsamda verimliliği arttırmak için birçok araştırma yapılmalıdır (Karagöz, 2014; Mishra vd., 2019).

Yakıt gibi doğal kaynaklara olan talep ile arz arasındaki uyumsuzluk, üreticiler üzerinde kaynakların korunmasını sağlayacak verimli üretim yöntemleri geliştirilmesi konusunda baskı oluşturmuştur. Bu nedenle çeşitli hafif malzemeler geliştirilmiş, yeni işleme ve birleştirme teknikleri keşfedilmiştir. Yapıştırıcılar ile birleştirme, mekanik birleştirme ve füzyon birleştirme yöntemleri, plastik malzeme birleştirmelerinde kullanılmaktadır. Yapıştırıcılar ile birleştirme endüstriyel uygulamada çok kullanılmakla birlikte işlem yüzey hazırlığı gerekir ve kimyasal içeriklerden ötürü bazı olumsuz yan etkileri olabilir. Ayrıca, birleştirme dayanımlarını teorik veya deneysel olarak incelemek çok zor ya da mümkün değildir. Mekanik sabitleme bir başka alternatiftir ama burada da perçin, pim, kelepçe vb. elemanlar kullanıldığı için ağırlık artar ve artık gerilmeler oluşabilir. Böylece birleştirmede en fazla tercih edilen yöntem kaynak olabilir. Geleneksel kaynak yöntemleri malzemeyi bozduğu için, sadece ekonomik ve verimli değil aynı zamanda çevre dostu bir yönteme de ihtiyaç vardır. Bu soruna ait olası çözümlerden birisi de sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) olabilir. SKK'nın en önemli özelliği ana malzemeyi ergitmeden kaynak yapılabilir olmasıdır (Sahu vd., 2018).

Sürtünme karıştırma kaynağı 1970'li yıllarda sürtünme kaynağından geliştirilmeye başlanmış fakat İngiltere'nin Cambridge şehrinde Wayne Thomas'ın çalışmalarıyla İngiliz Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından 1991'de patenti alınmıştır. Termoplastiklere ait sürtünme karıştırma kaynağı konusunda ilk araştırmalar Brigham Young Üniversitesinde (BYU) ve TWI'da 1998 yılında başlanmış ve önemli mesafeler

alınmıştır (Hasçalık, Çaydaş, Ünal & Karaca, 2007; Karagöz, 2014; Mert, 2010; Strand, 2004; Şelale, 2006; Zengin, 2012).

Sürtünme karıştırma kaynağında, makine (freze, CNC dik işleme vb.) tablasına sabitlenen kaynatılacak parçaların birleşme yüzeyleri arasından dönerek geçen takım ve kaynak parçaları arasında sürtünme ile ısı oluşur. Bu ısı malzemeyi ergitmeden kaynak bölgesinde yumuşamış bir bölge oluşturur. Yumuşamış malzeme, takım ucu ile kaynak bölgesinin ön kısmından alınarak kaynak bölgesinin arka tarafına taşınır. Takım tarafından karıştırılarak sıkıştırılan malzemelerin soğuyarak tekrar eski sertliğine dönmesiyle kaynak yapılmış olur.

SKK'nın termoplastiklere uygulanması ile ilgili birçok araştırma yapılmış olmakla birlikte plastik matrisli kompozit malzemelerin SKK ile ilgi sadece birkaç tane araştırma bulunmaktadır. Termoplastiklerin SKK ile ilgili çok sayıda araştırma sonucu yayınlanmasına rağmen bunlarda plastiklerin mekanik özellikleri, makro ve mikro yapısal özellikleri hakkında henüz yeterli bilgi mevcut değildir. Dolayısıyla SKK'nın endüstriyel olarak kullanılabilmesi için gerekli olan standart kaynak prosedürleri ve kaynak sonrası yapılması gerekenler tam olarak ortaya konulamamıştır. Çevreci ve ekonomik olan SKK'nın hem plastik sektöründe hem de diğer sektörlerde yaygınlaşmasına, plastik ve plastik matrisli kompozit malzemelerin daha yaygın kullanılmasına ve bilime katkıda bulunmak amacıyla bu tez ile kapsamlı çalışma yapılmıştır.

Yapılacak çalışmayla, genellikle metal ve takviyesiz plastik malzemelerde denenmiş olan sürtünme karıştırma kaynağının, pek çok avantaja sahip olmalarından dolayı endüstride kullanımı oldukça yaygınlaşmakta olan plastik matrisli kompozit malzemelere de uygulanabilirliğinin ortaya konulması amaçlanmaktadır. Tekniğin takviyesiz plastikler ile yapılan uygulamalarında elde edilen başarılı sonuçlar göz önüne bulundurulduğunda, bu hedefe ulaşmanın mümkün olduğu görülmektedir.

Katı hal kaynak tekniği olan tez konusu SKK, metaller ve takviyesiz plastikler dışında, plastik matrisli kompozit malzemeler de denenmesine ait sonuçlar, tekniğin plastik matrisli bir malzemeye uygulanabilirliğinin ve tekniğe ait mekanizmanın belirlenmesi için bilime katkı sunacağından dolayı özgün bir çalışmadır. Sonuçların bilime katkısının yanında geniş bir kullanım alanı olan plastik matrisli kompozit

malzemelerden üretilen parçalarda, alternatif bir kaynak yöntemi olarak kullanılması mümkün olacaktır. Böylece plastik matrisli kompozit malzeme kullanıcıları ve üreticilerinin bu teknikten faydalanmaları söz konusu olacaktır.

Yaygın bir kullanım alanı olan SKK'nın %30 cam elyaf (GF) takviyeli polipropilen (PP) malzemelerin alın kaynağının yapılması için uygun bir teknik olduğunun ortaya çıkarılacağı bir çalışma yapılması amaçlanmaktadır. SKK'da kaynak kalitesini etkileyen parametreler, takım devir sayısı, ilerleme hızı, takım uç profili, takım alın (omuz) yüzey profili, takım eğim açısıdır. Kaynağın yumuşamış malzemenin karıştırılması ile gerçekleştiği düşünüldüğünde kaynak performansının, elde edilecek sürtünme ısısına olan bağlı olduğu açıktır. Sürtünme alanının arttırılması, devir sayısının yüksek ve ilerleme hızının düşük seçilmesiyle daha fazla ısı elde edilecektir. Fakat elde edilen ısının, kaynak bölgesi sıcaklığını ergime sıcaklığının üzerine çıkarmaması gerekmektedir. Bundan dolayı takım devir sayısı, ilerleme hızı ve takım alın (omuz) profilinin kaynak performansına etkileri incelenecektir.

Öncelikle SKK için gerekli olan bağlama kalıbının ve karıştırıcı takımların tasarımı yapılarak imal edilecektir. Plastik matrisli kompozit malzemelerde kullanılacak matris malzemesin belirlenmesiyle ilgili ön denemeler yapılacaktır. Matris malzemesi belirlendikten sonra plastik matrisli malzeme temin edilecektir. Kaynak yapılacak parçalar bağlama kalıbına uygun ölçülerde işlenerek hazırlanacak veya imal edilecektir. Daha sonra SKK'da kullanılacak kaynak parametrelerinin ve takımların belirlenmesi ile ilgili çalışmalar yapılacaktır. CNC Bed freze tezgâhı kullanılarak plan dâhilinde kaynakların yapılmasına başlanacaktır. Kaynak esnasında kaynak bölgesi üst yüzeyinden InfraRed termometre ile sıcaklık ölçümü yapılacaktır. Yapılacak sıcaklık ölçümleriyle kaynak esnasında kaynak bölgesinde elde edilen sıcaklık değerlerinin mekanik test sonuçlarıyla birlikte değerlendirmesi yapılarak kaynak performansına etkisi belirlenecektir.

Elde edilecek kaynaklı birleştirmelerin görsel incelemeleri yapıldıktan sonra, mikro yapı incelemeleri, sertlik ölçümleri ve çekme deneyleri gerçekleştirilerek kaynak performansı belirlenmeye çalışılacaktır. Görsel incelemelerde, SKK yapılmış fakat herhangi bir işlem yapılmamış parçaların, kaynak bölgesi incelenerek çapak, çatlak, boşluk vb. hataların olup olmadığı görsel olarak belirlenecektir. Mikro yapı incelemeleri

için taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınacak, kaynak bölgesinde oluşan yapılar ve takviye elemanlarının kaynak bölgesindeki dağılımı belirlenerek kaynak performansına etkileri ortaya konulacaktır. Sertlik ölçümleri, kaynak bölgesinin enine kesti alınarak Shore D cinsinden yapılacak ve kaynak bölgesi sertlik değerinin çekme dayanımı ile bağıntısı belirlenecektir. Kaynak performansı mekanik testlerden çekme deneyi ile belirlenecektir. Bunun için standartlara uygun olarak hazırlanacak deney numunelerine standartlarda belirtilen hızda çekme deneyi uygulanacaktır. Elde edilen çekme dayanımları karşılaştırılarak kaynak parametrelerinin kaynak performansına etkileri ve hangi parametrelerde en iyi sonuçların elde edildiği ortaya konulacaktır.

BÖLÜM 2

KOMPOZİTLER

Temel mühendislik malzemeleri genelde metaller, seramikler ve plastikler olmak üzere üç ana grupta toplanmaktadır. Bu gruplara ait malzemelerin en önemli karakteristik özellikleri bir birinden çok farklıdır. Yoğunluk, dayanım, tokluk, ısıl kararlılık gibi özellikler, malzemenin kullanım özelliklerini; biçimlendirme, birleştirme gibi özellikleri ise imalat özelliklerini belirtir. Bazı malzemelerin imalat özellikleri, bazılarının ise kullanım özellikleri daha iyi olabilmektedir. Örneğin; metallerin tokluğu daha iyi iken, seramiklerde ise tokluk iyi değildir. Sünek özelliğe sahip plastikler, kolay şekillendirilebilir ama aynı zamanda da dayanım açısından çok zayıflardır. Seramiklerin ısıl kararlılıkları iyi olmakla birlikte şekillendirme ve biçimlendirme gibi imalat özellikleri genelde kötüdür. Tüm bu özellikler dikkate alındığında genelde metaller ve metal alaşımları oldukça iyi mekanik özelliklere sahiplerdir. Bundan dolayı (yanlış yapma ihtimali düşük olduğu için) mühendisler uzun yıllar malzeme seçiminde genellikle metalleri tercih etmişlerdir (Aran, 2008).

Yukarıda belirtilen üç gruba ek olarak birden çok malzeme birleşimini içeren kompozitler dördüncü malzeme grubu olarak değerlendirilir. İki veya daha fazla malzemenin uygun özelliklerini tek malzemede birleştirmek veya yeni bir özellik elde etmek için makro düzeyde birleştirilmesiyle geliştirilmiş malzemeler, kompozit (karma malzeme) olarak adlandırılır (Aran, 2008).

Çağdaş uygulamalarda ileri düzey malzemeler olarak ön plana çıkan kompozitler iki veya daha çok malzemenin birleştirilmesi ve / veya kombine edilmesiyle elde edilir. Buradaki asıl amaç değişik malzemelerin çeşitli ve gelişmiş özelliklerinin en uygun

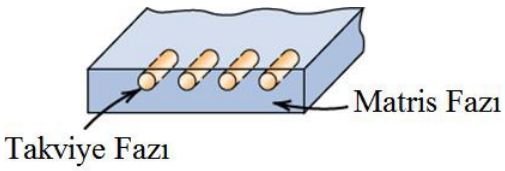
şekilde kullanılmasıyla elde edilen kompozitlerin daha iyi özelliklere sahip olmasıdır (Sınmazçelik, 2001).

Tasarımda hedeflenen (ısıl, mekanik, fiziksel, işletme vb.) özelliklerden istenen bir veya daha fazla özelliğe sahip bileşenin makro ve / veya mikro olarak birleştirilmesi ile elde edilen, istenilen özelliklerin daha baskın, istenilmeyen özelliklerin ise azaltılması veya ortadan kaldırılmasını sağlayan malzemelere kompozit malzeme adı verilir (Şahin, 2000).

Uzun yıllardır insanoğlu tarafından kullanılmakta olan kompozitlerden birisi betondur. Kum ve çimentodan oluşan matris malzemesine, takviye malzemesi olarak çelik çubuklar ilave edilir. Bilinen diğer kompozit malzeme ise kerpiçtir, çamura saman ilave edilmesi ile elde edilen bu malzeme çok eskiden beri bilinen belki de insanoğlu tarafından kullanılan en eski yapı malzemesidir. Kerpiç halen Türkiye'de bazı köylerde (kırsal kesimde) kullanılmaktadır (Arıcasoy, 2006; Yıldızhan, 2008).

Kompozit malzemeler insanlar tarafından icat edilmemişlerdir. Kompozit malzemelerin örnekleri doğada bulunmaktadır. Örneğin ağaçlar, lignin adı verilen doğal bir yapıştırıcı ile selüloz fiberlerden meydana gelen bir kompozit malzemedir. İstiridye kabuğu da bir kompozit malzemedir ve insanlar tarafından geliştirilen ileri kompozit malzemelerden daha dayanıklı ve serttir (Bayraktar, 2016).

Kompozitler, Şekil 2.1'de gösterilen şekilde bir sürekli bir de süreksiz olmak üzere iki fazdan oluşur. Sürekli olan faza matris, süreksiz olan faza da takviye denir (Bayraktar, 2016; Çağlarer, 2004; Ekşi, 2007; Sınmazçelik, 2001; Yıldızhan, 2008).



Şekil 2.1. Kompozit malzeme fazları (Bayraktar, 2016).

2.1. Matris Türüne Göre Kompozitler

Kompozit malzemeler matris türüne göre Metal Matrisli, Seramik Matrisli ve Plastik Matrisli olmak üzere üçe ayrılırlar. Bu tez çalışmasında sadece plastik matrisli

kompozit malzemeler kullanıldığından plastik matrisli kompozitler hakkında daha detaylı bilgiler verilmiştir (Bayraktar, 2016; Ekşi, 2007; Kalaycıoğlu, 2010; Sınmazçelik, 2001).

2.1.1. Metal Matrisli Kompozitler

Metal Matrisli Kompozit (MMK) malzemeler, istenilen, gereken özellikleri sağlayabilmek için en az bir tanesi metal olan iki veya daha çok değişik malzemenin sistematik olarak bileştirilmesiyle geliştirilen yeni malzemelerdir. Metal matrisli kompozit malzemelerde matris olarak, dökme demir, çelik, bakır, alüminyum, bronz vb. metal malzemeler kullanılabilir. Bu tür kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak, metal, plastik, seramik, ağaç tozu, pudra vb. malzemeler kullanılabilir (Ekşi, 2007; Sınmazçelik, 2001; Şahin, 2000).

Metal matrislerin büyük çaplı uygulamalar için kullanılması çok maliyetlidir ve çalışılmaları oldukça zordur (Bayraktar, 2016; Er, 2004; Tanboğa, 2007).

2.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Matris olarak seramik kullanılır. Aşırı yüksek sıcaklıklara uygundur, dayanımları oldukça yüksektir fakat çok gevrektirler. Seramiklere takviye malzemesi ilave edilerek toklukları arttırılmaya çalışılır. Bağlayıcı elemanlar kullanılmayabilir veya metal, seramik ve bağlayıcı olan kimyasal maddeler kullanılabilir. Takviye malzemesi olarak da metal, plastik, elyaf, seramik ve ağaç tozu gibi malzemeler kullanılabilir (Aran, 2008; Ekşi, 2007; Şahin, 2000).

Seramik matrislerin kırılganlık oranlarının çok yüksek olmasına bağlı olarak dayanımlarının düşük olmasından dolayı kullanım alanları sadece yüksek sıcaklığın olduğu yerler ile sınırlı kalmaktadır (Bayraktar, 2016; Er, 2004; Tanboğa, 2007).

2.1.3. Plastik Matrisli Kompozitler

Matris olarak plastikler kullanılır. Bağlayıcı olarak polimerlerin ve bağlayıcı olan kimyasalların kullanılması mümkündür. Takviye elemanı olarak ise cam, ağaç tozu, metal, pudra vb. malzemeler kullanılabilir (Ekşi, 2007; Şahin, 2000).

Ekşi (2007), Savaşçı, Uyanık ve Akovalı'ya göre (2002) "Polimerler, çok sayıda makro molekülün düzenli bir şekilde, kimyasal bağlarla bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. Poli kelimesi Latince birden fazla, çok anlamındadır. Mer adı verilen ünitelerin tekrarlanması sonrasında polimerler meydana gelir". Başka bir ifadeyle polimerler "monomer" adı verilen birimlerin bir araya gelmesiyle oluşurlar (Ekşi, 2007; Savaşçı, Uyanık & Akovalı, 2002).

Kompozit malzemelerde kullanılan plastik matris malzemeleri, termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılır (Akdoğan Eker, 2008; Arıcasoy, 2006; Bayraktar, 2016; Er, 2004; Yıldızhan, 2008).

2.1.3.1. Termosetler

Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak kimyasal tepkimelere girerek bir defaya mahsus sertleşir ve sağlamlaşırlar. Isıtma sırasında kovalent çapraz bağlar oluşur. Bu tür bağlar eğilme ve burulma hareketlerine engel olur. Termoset plastiklerin polimerizasyonu termoplastiklerinkinden farklı olarak, geri dönüşü olmayan bir işlemdir. Yüksek sıcaklıklar uygulandığında bile yumuşamazlar (tıpkı yumurta pişirildikten sonra katılaşıp yeniden yumuşamayacağı gibi). Termoset plastiklerin mukavemet ve sıcaklığa karşı direnç özellikleri termoplastiklerden daha üstündür. Birçok termoset matris malzemesinin sertleşme olmaması için dondurularak depolanması gerekir. Dondurucudan çıkarılarak oda sıcaklığında belli bir süre (1 - 4 hafta) bekletildiklerinde sertleşme oluşarak özelliklerini kaybedeceklerinden şekillendirilmeleri zorlaşır ve kullanılamazlar. Dondurucuda tutulduklarında 6 - 18 ay arasında raf ömürleri vardır. Termoset reçineler kimyasalların etkisi ile çözülmezler olağanüstü hava koşullarında bile uzun ömürlüdürler. Termosetlere örnek olarak polyester, epoksiler, poliüretan, silikon ve asetol verilebilir (Akdoğan Eker, 2008; Ay, 2012; Ekşi, 2007; Er, 2004; Hüner, 2014; Kocabaş, 2014; Yıldızhan, 2008).

2.1.3.2. Termoplastikler

Termoplastik polimerlerin çok fazla çeşidi bulunmasına rağmen matris malzemesi olarak kullanılabilen polimer sayısı çok azdır. Termoplastik malzemeler düşük sıcaklıklarda serttirler, ısıtılmaları durumunda yumuşarlar. Termoset malzemelere

kıyasla matris olarak kullanım alanları daha az olmasına rağmen kırılma tokluğunun yüksek olması, hammadde raf ömürlerinin daha uzun olması, geri dönüşümlerinin olması, sertleşme işleminde organik çözücüler kullanılmadığından çalışma ortamlarının daha güvenli olması vb. avantajları vardır. Ayrıca, şekil verilmiş olan termoplastikler tekrar ısıtma işlemine tabi tutularak yeniden şekillendirilebilirler. Termoplastikler oda sıcaklığında katı fazda bulunduklarından depolama için soğutucuya gerek yoktur. Termoplastiklerin sertlik ve darbe dayanım özellikleri çok yüksektir (Akdoğan Eker, 2008; Er, 2004).

Termoplastik malzemelerin kompozitlerde matris olarak tercih edilmemesinin başlıca sebebi üretimlerinin zor ve maliyetli olmasına dayanır. Oda sıcaklığında düşük işleme özelliğine sahip oldukları için üretimde yavaşlama ve zaman kaybına neden olurlar. Bazı termoplastiklerin şekillendirilmesinde çözücüler kullanılabilir. Termoplastiklerin hammaddesi termosetlere göre daha pahalıdır. Sürekli olarak 60 - 245 ºC sıcaklık aralığında kullanılabilen termoplastik reçineler vardır (Akdoğan Eker, 2008; Er, 2004).

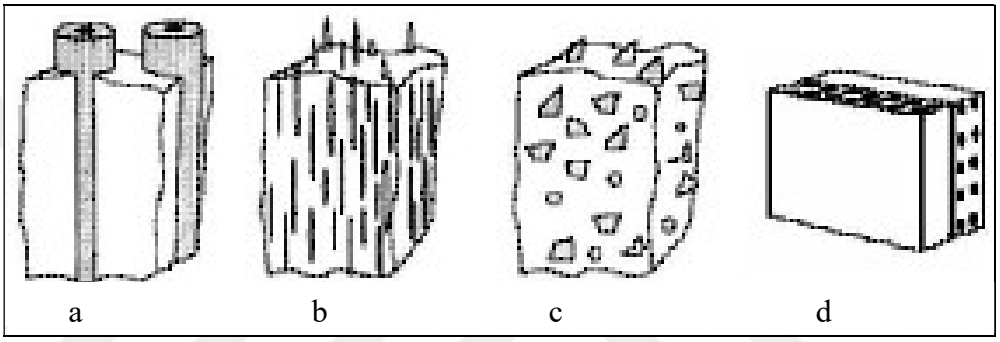
Termoplastik malzemeler şekil verildikten sonra ısıtma - soğutma işlemine tabi tutularak değişik şekiller verilerek tekrar kullanılabilirler. Termoplastiklerin molekülleri düz zincirli polimerler olduğundan termoplastik matrisler ısıtıldıklarında yapılarındaki atomlar birbiri üzerinde kayarlar ve bundan dolayı ısıtma - soğutma işlemlerinde termoplastiklerin sadece fiziksel özelliklerinde değişikli olur, kimyasal özelliklerinde herhangi bir değişim olmaz (Yıldızhan, 2008).

Termoplastikler, dünya çapında en yaygın kullanılan plastik türüdür. Karakteristik geçiş sıcaklıklarına göre amorf ve kristalin olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Camsı geçiş sıcaklığının üzerine çıkılınca modülüs hızla azalırken polimer sıvı gibi davranış sergiler. Camsı geçiş sıcaklığı (Tg) ile karakterize edilen amorf termoplastikler çoğunlukla bu sıcaklığın üzerinde işlenirler. Bu sıcaklık 65 °C gibi düşük olabilirken (PVC), 295 °C gibi yüksek değerlerde de olabilir. Kristalin ya da daha doğru ifade etmek gerekirse yarı kristalin termoplastikler %20 - 90 oranında kristalleşme gösterebilir. Bu tür termoplastikler Tg'yi de içeren ergime sıcaklığının (Te) üzerinde işlenirler (Hüner, 2014). Termoplastik grubunu oluşturan ve en çok kullanılan plastikler aşağıdaki gibidir;

Polimetilmetakrilat (Akrilik - Pleksiglas) (PMMA), Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), Politetra Floroetilen (Teflon) (PTFE), Poliamid (Naylon) (PA), Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil Klorür (PVC) (Kocabaş, 2014; Yıldızhan, 2008).

2.2. Takviye Türüne Göre Kompozitler

Kompozit malzemeler takviye türüne göre, Şekil 2.2'de gösterilen şekilde tabakalı kompozitler, parçacık ve elyaf takviyeli kompozitler olmak üzere üç grupta incelenebilirler (Aran, 2008; Ekşi, 2007; Kalaycıoğlu, 2010; *Vakumpompasi*, 2011).



Şekil 2.2. Takviye türüne göre kompozit malzemeler; a) Uzun fiber, b) Kısa fiber, c) Parçacık, d) Tabakalı (Kalaycıoğlu, 2010).

Bu tez çalışmasında sadece elyaf takviyeli kompozit malzemeler kullanıldığından elyaf takviyeli kompozitler hakkında daha detaylı bilgiler verilmiştir.

2.2.1. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit malzemeler, değişik özelliklere sahip tabakaların üst üste veya yan yana getirilmesiyle elde edilirler. Tasarlanmış olan tabakaların içeriğine bağlı olarak aşınma direnci, korozyon dayanımı, yük taşıma kapasitesi vb. özelliklere ihtiyaç duyulan alanlarda kullanılabilirler. Tabakaların imalatı, farklı malzemeler kullanılarak yapılabileceği gibi farklı tür ve şekillerde takviye edilmiş kompozit malzemeler kullanılarak da yapılabilir (Kalaycıoğlu, 2010).

Tabakalı kompozit malzemeler içindeki her tabaka istenilen doğrultuda yönlendirilebilen fiberlerle takviye edilir ve bu tabakalar birbirilerine istenilen açılarda birleştirilebilir. Örneğin, 10 tabakadan imal edilen bir tabakalı kompozit malzemede 6

adet tabaka aynı yönde ve diğer 4 adet tabaka ise bu tabakalara dik olacak şekilde (90°) yerleştirilmiş olsun. Her iki doğrultudaki uzama rijitlik oranı yaklaşık olarak 6 / 4'tür. Tabakalı kompozit malzemelerde her tabakanın yanındaki tabakaya bağlı olmadan deformasyon eğilimi olduğundan kayma gerilmeleri meydana gelebilir. Bu tabakalardaki ana malzeme doğrultularındaki farklı yönlenme kadar farklı malzeme özelliklerine bağlı olarak oluşabilir (Ekşi, 2007; Şahin, 2000).

Kullanıldığı yere uygun olarak değişik şekillerde tasarlanabilen tabakalı kompozitlerin kullanıldığı alanlara sandviç paneller, askeri ekipmanlar ve hafif zırhlar örnek gösterilebilir (Kalaycıoğlu, 2010).

2.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler bir yada iki boyutu olan makroskobik parçacık veya mikroskobik (sıfır boyutlu) parçacıkların matrisle oluşturdukları malzemelerdir. Gömülen parçacıkların ortalama boyutu 1 μ'dan büyük ve fiber hacim oranı %25'ten fazladır. Yaygın olarak kullanılan parçacık türleri Al_2O_3 ve SiC seramiklerdir (Ekşi, 2007; Şahin, 2000).

Takviye parçacıkları; küresel, kübik, tek tip veya değişik tiplerde olabilecekleri gibi kompozit malzeme içinde rastgele veya yönlendirilerek dağıtılabilir. Parçacıkların yönlendirilerek dağıtılmasıyla özel zorlamalara karşı istenilen yönlerde dayanım arttırılabilir (Kalaycıoğlu, 2010).

Kompozitlerin imalat süreçlerindeki gelişmelere bağlı olarak, parçacık takviyeli kompozit malzeme kullanım oranı her geçen gün daha da artmaktadır. Bu kompozit malzemeler özellikle maliyetlerinin düşük ve performanslarının iyi olmasından dolayı ön plana çıkmaktadır (Kalaycıoğlu, 2010; Şahin, 2000).

2.2.3. Elyaf Takviyeli Kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri sadece bileşen özelliklerine bağlı değildir. Buna ilave olarak elyafı çevreleyen ve ana malzemeyle bağ oluşumu sağlayan ara yüzey de mekanik özelliklerin belirlenmesinde önemli faktör oynar. Ana malzemeden elyafa olan yük (kuvvet, basınç, ısı, darbe) geçişi bu ara yüzey tarafından

sağlanırken bu görevi iyi bir şekilde yerine getirmesi kompozitin toplam dayanımını etkiler (Hüner, 2014).

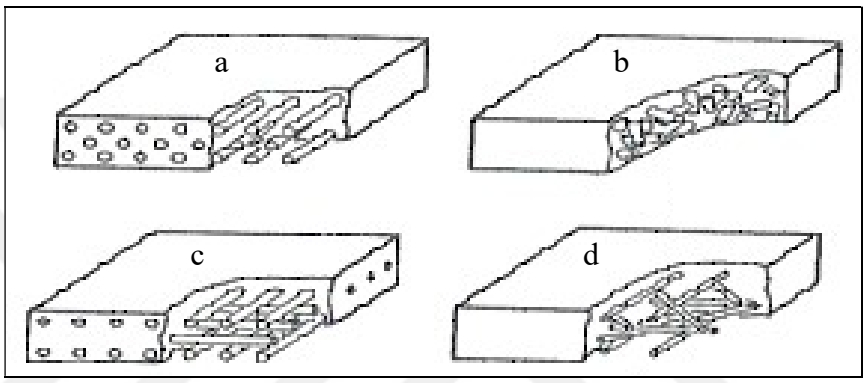
Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, elastikiyet modülü ve dayanımı düşük matris içerisine elastikiyet modülü ve dayanımı yüksek olan elyafların takviye malzemesi olarak ilave edilmesiyle elde edilir. Matris içerisine elyaf ilave edilmesi ile meydana gelen kompozitlerin çekme dayanımı, yorulma dayanımı, katılık ve bükülmezlik özellikleri iyi yönde gelişir. Kompozitlerdeki elyaf yoğunluğu kompozitlerin özelliklerini doğrudan etkiler. Elyaf takviyeli kompozitlerde malzemeye bir yük uygulandığında, matris malzemesi, bu yükü takviye malzemesine aktarır. Böylece yükün büyük bir bölümü takviye malzemesi tarafından karşılanmış olur. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan elyaflar, yeni malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmekle birlikte kompozit malzemenin çalışma sıcaklığının iyileşmesine de katkı sağlarlar. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan elyafların matris içindeki yönleri kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine doğrudan etki eder (Hüner, 2014; Ekşi, 2007; Şahin, 2000).

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde genellikle elyaflar yönlendiğinden elde edilen yeni malzeme anizotropik olur. Sürekli elyaflar yönlendirilebilme özelliğine sahip olduklarından diğer takviye çeşitlerine göre özellikleri daha iyidir. Tek yönde çekmeye zorlanan alanlarda yönlendirilmiş uzun elyaflarla en yüksek dayanım elde edilir ama elyaf eksenine dik doğrultudaki malzeme özellikleri çok zayıflar. Çünkü elyaf eksenine dik doğrultudaki çekmeye karşı direnç göstererek yükü taşıyan sadece matristir. Bu problemi ortadan kaldırarak elyaf eksenine dik ve / veya paralel doğrultularda kuvvet uygulanması durumundaki mekanik özellikleri geliştirmek için farklı açılarda elyaflar takviye edilerek (bu doğrultularda) daha iyi özellikler elde edilebilir (Ekşi, 2007; Şahin, 2000).

Elyaflar, kompozit malzeme içinde tek yönlü veya yönlendirilmiş olarak bulunurlar. Elyaflar genel olarak, matris içerisine malzemeye uygulanacak yük ile aynı doğrultuda olacak şekilde yerleştirilirler. Örme ve şerit fitil şeklinde elyaflar ile birlikte tabaka şeklinde yönlendirilmiş elyaflarda kullanılmaktadır. Özellikle, uzay ve havacılık sanayinde ihtiyaç duyulan yüksek dayanım, katılık ve hafiflik gibi özellikleri olan elyaf takviyeli kompozitler, bu sanayi dalları için vazgeçilmesi güç olan malzemelerdir. Şekil

2.3'de elyaf takviyeli kompozitlerde elyafların matris içerisindeki farklı yerleşimleri gösterilmiştir (Ekşi, 2007; Kalaycıoğlu, 2010).

Performansları yüksek olan kompozit malzemelerin üretiminde matrisin, takviye elyafları veya parçacıkları iyi ıslatabilmesi, iyi bir ara yüzey bağı oluşturması, mümkün olduğunca düşük basınç ve sıcaklıklarda hızlı bir şekilde katılaşabilmesi gerekir. Üretim ve sonrasındaki işlemler sırasında, matris - takviye malzemesi arasında kimyasal etkileşim olmamalı ve matris kararlı olmalıdır (Kalaycıoğlu, 2010; Şahin, 2000).



Şekil 2.3. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde takviyelerin dağılımı; a) Sürekli tek yönlü elyaflar, b) Rastgele yerleştirilmiş elyaflar, c) Ortagonal elyaflar, d) Açılı yerleştirilmiş elyaflar (Kalaycıoğlu, 2010).

Mekanik özellikleri önemli ölçüde geliştirilen ve en yaygın kullanılan kompozitler, elyaf takviyeli kompozitlerdir. Elyaflar, sürekli veya süreksiz olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Cam, karbon, aramid, bor, SiC, Al_2O_3, metal vb. malzemelerin elyaf olarak kullanımları oldukça yaygındır. Sürekli elyaflar, başlangıçta boron ve SiC'den imal edilmiş olup daha sonraları karbon ve alümina esaslı malzemeler uzun elyafların üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Kısa elyaflar, çapları ~3 - 5 μ, uzunlukları ise ~0,5 - 6 mm olacak şekilde imal edilirler (Ekşi, 2007; Şahin, 2000).

Elyafların kompozit malzeme içerisinde etkisinin olması için minimum kritik bir boyunun (uzunluğunun) olması gerekir. Eğer elyafların boyu kritik elyaf uzunluğundan daha kısa olursa çekme sırasında elyaflar bulunduğu yerden çıkar ve etkisi olmaz. Kritik uzunluğa uygun boyutta ve / veya daha uzun boyutlu elyaf içeren kompozitlerde, çekme sırasında elyaflar matris ile birlikte kopar. Bu da elyafların kompozit malzemelere sağladığı pozitif etkiden kaynaklanır ve çekme dayanımını artırır. Genellikle elyaflar 10

μ çapındadır. Elyaf çapını çok fazla küçültmek çok ince elyafların kullanımının zor olmasından ve maliyeti çok yükselteceğinden dolayı ticari olarak tercih edilmez (Güllü, Özdemir & Demir, 2001).

Bor elyaflar, esas olarak kendileri ayrı bir kompozit yapıdır. Çekirdek olarak isimlendirilen ince bir flaman üstüne bor kaplama yapılarak üretilirler. Çekirdekte genellikle tungsten kullanılır. Yeni bir uygulama olan karbon çekirdek de kullanılabilir (Akdoğan Eker, 2008; Yıldızhan, 2008).

Uçak imalatında kullanılmak üzere geliştirilmiş olan bor elyafların mekanik özellikleri oldukça iyidir. Fakat üretim maliyetlerinde çok yüksek olmasından dolayı, yerlerine son zamanlarda karbon elyaflar kullanılmaktadır (Akdoğan Eker, 2008).

Silisyum karbür elyaflar, bor elyaflardaki gibi, tungsten çekirdek üstüne silisyum karbür (SiC) kaplanarak 0,1 mm ile 0,14 mm arasındaki çaplarda imal edilirler. SiC elyaf genelde titanyum matrisler ile kullanılır. Jet motoru parçalarının imalatında titanyum, alüminyum ve vanadyum alaşımlı matrisler ile kullanılırlar (Akdoğan Eker, 2008; Yıldızhan, 2008).

Alüminanın açılımı, alüminyum oksittir (Al_2O_3). 0,02 mm çapında elyaf şeklindeki alümina flaman üzerine silisyum dioksit (SiO_2) kaplanarak üretilirler. Bu malzemeler yüksek sıcaklıklara dayandıkları için uçak motorlarında kullanılmaktadır (Akdoğan Eker, 2008; Yıldızhan, 2008).

Aramid elyaflar daha çok Kevlar (Du Pont) ve Twaron (Akzo Nobel) ticari isimleriyle tanınmaktadır. Endüstrideki farklı uygulamalarda ihtiyaç duyulan özellikleri sağlamak için değişik özelliklere sahip aramid elyaflar üretilebilmektedir. Basma dayımlarının düşük olmasından dolayı uçaklarda, karbon elyaflar ile birlikte hibrid kompozit olarak, kumanda panellerinde kullanılırlar (Arıcasoy, 2006; Er, 2004; Yıldızhan, 2008).

Karbon elyaf ilk olarak karbonun elektrik iletkenliğinin çok iyi olmasından dolayı imal edilmiştir. Cam elyafların sertlik değerinin metale göre çok düşük olması nedeniyle sertlik değerinin 3 ile 5 kat artırılması hedeflenmiştir. Karbon elyaflar çok yüksek sıcaklıklarda ısıl işleme tabi tutulduklarında elyaflar tam olarak karbonlaşır ve bu elyaflar grafit olarak adlandırılırlar. Son zamanlarda bu isim farkı ortadan kalkmış

olup artık hem karbon elyafı hem de grafit elyafı aynı malzemeyi ifade etmektedir. Karbon elyaflar epoksi matrisler ile birleştirildiklerinde olağanüstü dayanım ve sertlik özelliklerine sahip olurlar. Karbon elyaf imalatçılarının sürekli olarak bir gelişim içerisinde çalışmalarını sürdürmesinden dolayı karbon elyaf çeşitleri sürekli artmaktadır. Karbon elyaf üretiminin çok maliyetli olmasından dolayı uçak endüstrisinde, spor gereçlerinin ve tıbbi malzemelerin değeri yüksek olan uygulamalarında kullanılırlar (Arıcasoy, 2006; Er, 2004; Hüner, 2014).

Cam elyaflar, silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda gibi cam hammaddelerinden elde edilmektedir. Elyaf takviyeli kompozitlerde en çok tanınan ve kullanılanlar cam elyaflardır. Cam elyaflar özel olarak tasarlanmış, tabanında küçük delikleri bulunan bir ocaktan ergimiş camın itilerek deliklerden akmaya başlamasıyla birlikte belirli bir kuvvet ile çekilerek, demet şeklinde sarılmasıyla üretilir. Uygulamalarda cam elyafı fitil, dokuma ve keçe formunda olmak üzere üç farklı şekilde kullanılır. Cam fitil, elyaf demetlerinin fitil formunda sarılmasıyla, cam dokuma, cam fitillerin hasır formunda sarılmasıyla, cam keçe, cam demetlerinin kırpılmış olarak birim alana homojen olarak dağılmasıyla üretilirler. En yüksek çekme dayanımı cam fitil ile takviye edilmiş plastiklerde elde edilir. Çekme dayanımına göre değerlendirme yapıldığında bunu sırasıyla cam dokuma ve cam keçe takip eder. Cam fitiller, kompozit içinde sadece cam elyafların yönüne paralel doğrultuda (tek yönde) çekme dayanımını artırırken, cam dokuma iki doğrultuda, cam keçe ise bütün yönlerde malzemenin dayanımını artırır. Cam elyaflar genel olarak 3 ile 20 μ arasında değişen çaplarda üretilirler. Cam elyaf birçok nedenden dolayı kaplama işlemine tabi tutulur. Bu işlem kompozit dayanımını arttıran elyafların zarar görmesi ve kırılmasını önler. Özellikle cam elyaf ile matris arasındaki yapışmayı arttıran "silan" bazlı ve elyafların üstünde ince film tabakası oluşturan kimyasallar kullanılmaya başlandıktan sonra cam elyafların kullanıldıkları alanlar genişlemiştir (Arıcasoy, 2006; Bayraktar, 2016; Ekşi, 2007; Er, 2004; Hüner, 2014).

Cam amorf bir malzemedir. Cam elyaflar, plastik matrisli kompozit malzemelerde yaygın kullanım alanına ve en düşük maliyete sahip olan takviye elemanlarıdır. Cam elyaflar, en çok bilinen şişe camı başta olmak üzere yüksek

saflıktaki kuarts camına kadar çok değişik türlerde üretilebilirler. Dört farklı tipte cam elyaf vardır (Akdoğan Eker, 2008; Şahin, 2000; Yıldızhan, 2008).

A (Alkali) camı, yüksek oranda alkali içerdiğinden elektrik yalıtkanlığı kötü bir camdır. Kimyasallara karşı direnci yüksek olan A camı, en yaygın olarak kullanılan cam türüdür. En çok pencerelerde ve şişelerde kullanılırlar. Kompozitlerde çok fazla kullanılmazlar (Akdoğan Eker, 2008; Arıcasoy, 2006; Er, 2004).

C (Korozyon) camı, kimyasallara karşı dirençleri çok yüksektir, E camına göre mekanik özellikleri daha düşüktür ve maliyetleri de daha yüksektir. Depolama tankları gibi yerlerde kullanılırlar (Akdoğan Eker, 2008; Arıcasoy, 2006; Er, 2004; Hüner, 2014).

E (Elektrik) camı, alkali oranının düşük olmasından dolayı elektrik yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre daha iyidir. Dayanımı çok yüksek, maliyeti düşük ve suya karşı direnci ise çok yüksektir. Nem oranının çok yüksek olduğu alanlarda kullanılacak kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak genelde E camı kullanılır. Bu cam takviye elyaf imalatında en fazla kullanılan cam tipidir. Piyasada kullanılmakta olan cam elyaf takviye elemanları arasındaki pazar payı %90 civarındadır (Akdoğan Eker, 2008; Arıcasoy, 2006; Er, 2004; Kocabaş, 2014).

S - R (Mukavemet) camı, Amerika'da "S" camı, Avrupa'da "R" camı olarak adlandırılır. Yüksek dayanımlı ve yüksek maliyetli bir cam türüdür. Çekme dayanımı E camına göre %33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklardaki yorulma dayanımı çok iyidir. Bu özelliklerinden dolayı askeri alanlarda, havacılık ve uzay sanayinde tercih edilirler (Akdoğan Eker, 2008; Arıcasoy, 2006; Er, 2004; Kocabaş, 2014).

Cam elyafların özelliklerinden bazıları aşağıda verilmiştir;

- Çekme dayanımları çok yüksektir, birim ağırlık başına düşen dayanımı çelikten çok yüksektir.
- Isıya karşı dirençleri düşüktür, yanmazlar fakat yüksek sıcaklıklarda yumuşarlar. Isıya karşı dirençleri katkı malzemeleriyle iyileştirilebilir.
- Kimyasal malzemelere karşı yüksek dirence sahiplerdir.

- Nem absorbe etmezler fakat cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde nemin etkisiyle matrisle cam elyaflar arasında bir çözülme meydana gelebilir. Özel elyaf kaplama yöntemleri kullanılarak bu etki de yok edilebilir.
- Elektriği iletmezler. Bu özellikleri, elektrik yalıtımının önemli olduğu alanlarda cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kullanılmasına katkı sağlar.
- Cam elyafların üretiminde silis kumuna çeşitli katkı maddeleri eklenerek bu maddelerin etkisiyle yapıya farklı özellikler kazandırılabilir (Akdoğan Eker, 2008; Yıldızhan, 2008).

2.3. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

Kompozit malzeme üretilmeye başlandığı günden bugüne üretim yöntemlerine sürekli olarak yenileri eklenmektedir. Günümüzde çok sayıda plastik matrisli kompozit malzeme üretim yöntemi vardır. Üretilmek istenen kompozit malzemenin şekli, boyutu, mekanik özellikleri, kullanım yerine göre üretim işlemleri bazen çok karmaşık bazen de basit bir işlem ile (şekillendirme) yapılabilir. Ayrıca kullanılacak üretim yöntemi tercihinde üretim yöntemlerinin maliyet farkları ve bilgi birikimi de dikkate alınarak ihtiyacı karşılayacak en uygun yöntem seçilmelidir. Genelde belirtilen üretim yöntemleri, açık kalıplama ve kapalı kalıplama olarak ikiye ayrılmaktadır (Bayraktar, 2016).

2.3.1. Açık Kalıplama Yöntemleri

Açık kalıplama yönteminde kompozit malzemenin bir yüzeyi kalıp ile şekillendirilirken diğer yüzeyi açıkta kalır. Bu yöntemler kapalı kalıplama yöntemlerine göre genelde daha az maliyet ve tecrübe gerektiren şekillendirme yöntemleridir. Gemi tekneleri ve güverteleri, karavan parçaları, kamyon kabinleri ve kasaları, küvetler, duş kabinlerinin üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır (Bayraktar, 2016).

Açık kalıplama yöntemlerini; el yatırma, püskürtme, elyaf sarma, vakum torbası ve otoklav yöntemi olarak sınıflandırmak mümkündür (Akdoğan Eker, 2008; Arıcasoy, 2006; Bayraktar, 2016; Çağlarer, 2004; Er, 2004; Yıldızhan, 2008).

2.3.2. Kapalı Kalıplama Yöntemleri

Kapalı kalıplama yöntemi ile kompozit malzemelerin şekillendirme işleminde tüm yüzeyler şekil almaya zorlanmaktadır (Bayraktar, 2016).

Kapalı kalıplama yöntemlerini; reçine transfer yöntemi, profil çekme (pultruzyon) yöntemi, hazır kalıplama yöntemleri, savurma (santrifüj) kalıplama yöntemi, ekstrüzyon yöntemi ve enjeksiyonla kalıplama yöntemi olarak sınıflandırmak mümkündür (Akdoğan Eker, 2008; Arıcasoy, 2006; Bayraktar, 2016; Çağlarer, 2004; Er, 2004; Hüner, 2014; Karagöz, 2014; Yıldızhan, 2008).

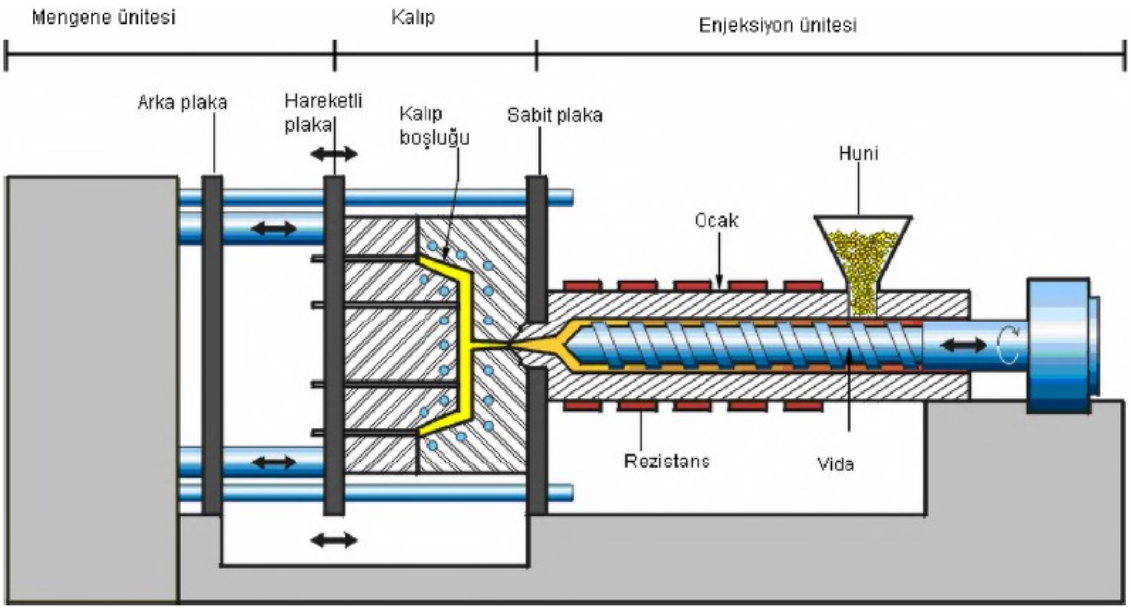
Bu çalışmada kullanılan malzemeler, enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile üretildiği için bu yöntem ile ilgili daha detaylı bilgiler verilmiştir.

2.3.2.1. Enjeksiyonla Kalıplama Yöntemi

Enjeksiyonla kalıplama, hammaddenin ergitilerek akışkan hale getirilmesinden sonra soğuk veya ısıtılmış bir kalıpta basınçla şekillendirilip, daha sonra soğutma - katılaşma prensibiyle çalışan plastik üretim yöntemidir. Cep telefonu kapağı gibi çok detaylı ürünlerin yanında piknik sandalyesi vb. kaba ürünlerin imalatında kullanılmaktadır. Her kalıplama çeviriminde birkaç gramdan on kilograma kadar değişen ağırlıklarda ürünlerin kalıplanmasını sağlayacak kapasitede enjeksiyon makineleri kullanılmaktadır. Özellikle kısa sürede çok sayıda, yüksek boyut hassasiyetlerinde parça imal edilmesine olanak sağlaması ve tam otomatik olarak çalıştırılabilmesi gibi özelliklerinden dolayı plastik sanayinde oldukça yaygın kullanılır. Enjeksiyonla kalıplama, enjeksiyon makinesinin ve kalıp imalatının pahalı olmasına rağmen seri ve tam otomatik olarak çok sayıda parça imal edilmesi durumunda çok ekonomik bir yöntemdir (Akdoğan Eker, 2008; Ekşi, 2007; Kıralp vd., 2006; Kocabaş, 2014).

Üretim miktarlarının çok fazla olması durumunda ve / veya çok büyük hacimli karmaşık geometriye sahip parçaları imal etmek için tek hücreli veya çok hücreli kalıplar kullanılabilir. Değişik termoplastik malzemeler ile çok değişik mekanik, kimyasal, ısıl ve elektriksel özelliklere sahip malzemeler üretilebilir. Enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile elyaf takviyeli plastik matrisli kompozitler imal edilebilir. Plastik

matrisli kompozitler, elyaf; yani, takviye elamanı içeren in-situ yöntemiyle 3 - 6 mm boyutlarında elde edilmiş granüller, besleme ünitesine doldurularak veya matris malzemesi olan plastik granüller ve takviye elemanı olarak kullanılacak elyaf malzemeler ayrı ayrı besleme ünitesine konularak üretilir. Bu işlem normal plastik kalıplama için kullanılan yönteme benzemekle birlikte matris ve takviye malzemesinin ayrı beslendiği ve oranlarının ayarlandığı besleyici deposu bulunmaktadır. Kovan içine; matris, takviye elmanı, bağlayıcı ve diğer katkı maddeleri eklendikten sonra kovan dışında bulunan ısıtıcı bant veya ısıtıcı rezistanslarından elde edilen ısıyla matris malzemeleri ergir. Bu eriyik kovan içindeki karıştırıcı vidanın dönmesiyle karıştırılır. Böylece homojen bir karışım elde edilir. Kalıplanmaya uygun haldeki ergimiş hammadde yüksek basınçla kalıp boşluklarına basılır. Bu basınç hammaddenin özelliğine göre en yüksek 200 MPa değerine kadar çıkartılabilir. Kalıplanan ürün kontrollü olarak soğutulur. Kalıp açılarak elde edilen ürün kalıptan iticilerle çıkartıldıktan sonra ürün üzerinde yolluk ve diğer etkenlerle oluşan çapaklar temizlenir. Böylece enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile elyaf takviyeli kompozit malzeme üretilmiş olur. Şekil 2.4'de de gösterildiği gibi sistem, enjeksiyon ünitesi, kalıp ve mengene ünitesi olmak üzere üç ana kısımdan oluşur (Akdoğan Eker, 2008; Ekşi, 2007; Şahin, 2000; Turaçlı, 1999; Yıldızhan, 2008).



Şekil 2.4. Enjeksiyon makinesi (Kocabaş, 2014).

Doğrudan besleme ve dolaylı besleme olmak üzere iki çeşit besleme yöntemi vardır. Doğrudan beslemede, enjeksiyonda kullanılacak matris ve takviye malzemeleri ayrı ayrı besleme hunisine ilave edilir. Dolaylı beslemede ise enjeksiyonda kullanılacak in-situ yöntemiyle granül halinde üretilmiş matris ve takviye malzemelerinin besleme hunisine boşaltılmasıyla işlem gerçekleştirilir (Ekşi, 2007).

Besleme işleminde, elde edilmek istenilen malzemenin dayanımında çok önemlidir. Dolayısıyla besleme yönteminin belirlenmesi çok önemlidir. Doğrudan beslemede katı formdaki matris ve takviye malzemelerinin besleme hunisinden içeriye alındığı andaki, sıcaklık matris malzemesi ergime sıcaklık değerinden çok daha yüksek olsa bile ergimenin gerçekleşmesi için belirli bir süre gerekir. Ergimenin gerçekleşmesi esnasında geçen sürede takviye elamanı, kovan, vida ve matris malzemesi arasında çok farklı zorlanmalarla (eğilme, burulma vb.) karşı karşıya kalır. Takviye malzemesinin maruz kaldığı zorlanmalardan eğilme en yüksek değere ulaşır. Sonra takviye elemanı eğilme zorlanmasıyla ulaşabileceği en yüksek eğrilik yarıçapına gelerek hasar alırsa kırılabilir. Takviye elemanının boyunun kısalmasıyla, kompozit malzemenin dayanımında azalma olur. Dolaylı beslemede ise in-situ granüller besleme bölgesinde takviye elemanının karşılaşacağı mekanik zorlanmalara karşı takviye malzemesi boyunda oluşabilecek deformasyonu azaltır. Takviye elemanı çevresindeki matris malzemesinin, ergimesi esnasında geçen sürede takviye elemanını karşılaşacağı zorlamaların etkisinden korur (Ekşi, 2007).

Temel olarak pistonlu ve vidalı olmak üzere iki tip enjeksiyon makinesi vardır.

Pistonlu enjeksiyon makinesi; silindir çeperlerine temas ettiği zaman akışkan hale gelen hammadde, hidrolikle çalışan bir piston yardımıyla kalıba basılır. Bu makineler çok basit ve sade olmakla birlikte burada çok yüksek enjeksiyon basıncına ihtiyaç duyulur ve malzemenin akışkan hale gelmesi için gerekli süreden dolayı hızlı bir çevrim yapılamaz (Çağlarer, 2004).

Vidalı enjeksiyon makinesi (yaygın olarak kullanılır); huni yardımıyla beslenen hammadde, helisel bir vida üzerinde akışkan hale gelir. Bu helisel vida, hammaddeyi ısınmış silindir çeperlerine temas ettirerek, homojen bir şekilde karıştırmak ve kalıba doğru basmak (itmek) işlevine sahiptir. Biriken malzeme düzenli aralıklarla, piston gibi çalışan vida hareketiyle kalıba basılır (Çağlarer, 2004).

Her iki makinede de enjeksiyon ve soğutma işlemleri sonrasında arka bölümün geri çekilmesiyle kalıp açılır ve ürün kalıptan dışarı çıkarılır (Çağlarer, 2004).

Enjeksiyon kalıplama yönteminde, hammaddenin enjekte edilmesi sonrası beklemelerden dolayı kesikli çalışıldığından, işlem yavaş (üretim az) olur. İşlem hızını arttırmak için çoklu döner kalıplar kullanılarak bir çevrimde birden fazla kalıp doldurulabilir. Doldurulan kalıbın silindir ağzından çekilmesiyle diğer kalıplar seri bir şekilde doldurulabilmektedir. Hammaddeyi tek bir işlemle istenen şekilde kalıplayabilme ve birçok durumda elde edilen parça için son işlem gerekmemesi, seri üretimde bu yöntemin tercih edilmesine neden olmaktadır (Karagöz, 2014).

Ayrıca, enjeksiyon kalıplama yönteminde sistem kapalı olup imal edilecek parçanın son şekli kalıp içinde verilmektedir. Ekstrüzyona göre daha yüksek basınca ihtiyaç duyan bu yöntemde, mil sadece dönme hareketi değil aynı zamanda öteleme hareketi de yaparak basıncın artmasını sağlar (Hüner, 2014).

Enjeksiyon kalıplama yöntemi, sıcaklık, basınç ve çevrim süresi gibi üç ana parametreye bağlıdır. Birbirlerine doğrudan bağlı olan bu parametreler dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir. Çok yüksek basınçlar önce yükseltgenmeye, sonrada karbonlaşmaya neden olur. Bu da son ürün üstünde leke ve yanıklar oluşmasına neden olabilir (Çağlarer, 2004).

Enjeksiyon kalıplama yönteminde tek veya çok parçalı kalıplar kullanılabilir. Enjeksiyon kalıplama yöntemi daha çok termoplastik malzeme üretiminde kullanılır. Fakat termoset malzemeler için daha yüksek enjeksiyon basıncı ve ısı gerektiğinden özel ısıtma ve soğutma bölmeleri eklenmiş çeşitli makineler ile bazı termoset malzemeler enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilebilirler (Çağlarer, 2004; Ekşi, 2007; Karagöz, 2014; Şahin, 2000; Turaçlı, 1999; Yıldızhan, 2008).

Klasik üretim yöntemleriyle termoplastik kompozitler üretilmekle birlikte ticari olarak kullanılan en önemli yöntem enjeksiyon kalıplamadır. Termoplastik kompozit malzemelerin enjeksiyon ile kalıplanmasında bazı ilave zorluklar ortaya çıkmaktadır (*Vakumpompasi*, 2011).

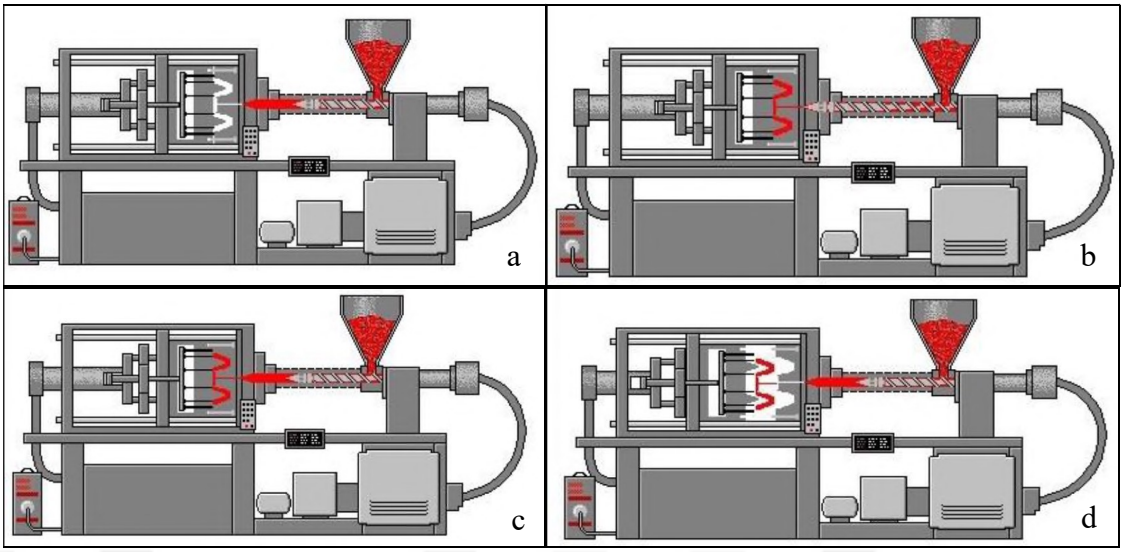
Malzeme akışkanlığının, enjeksiyon parametrelerinin seçiminde önemi oldukça fazladır. Takviye malzemesi, basma viskozitesini arttıracağı için enjeksiyon basıncının

termoplastiklere göre %80 artırılması gerekebilir (Çağlarer, 2004; *Vakumpompasi*, 2011).

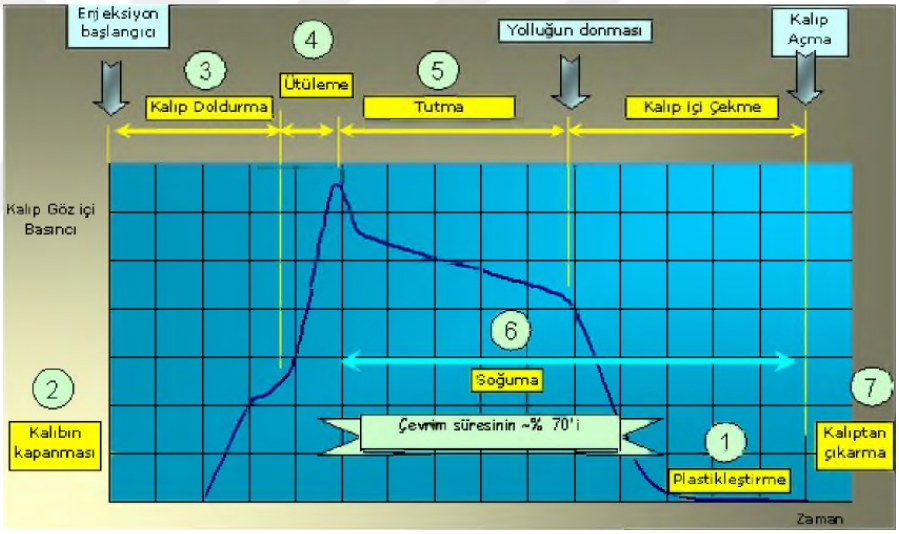
Kompozit malzemelerde rijitlik termoplastik malzemelerden daha yüksek olduğu için kalıptan çıkarma sıcaklığının daha yüksek olması gerekir bundan dolayı işlem zamanı kısa olmalıdır. Malzeme rijitliğin yüksek olması kalıp konikliği ve enjektör sayısının artmasına neden olur. Ayrıca pistonlu enjeksiyon makinesi yerine karışma, homojenleşme ölçüm ve sıcaklık kontrolünü daha iyi yapabilmek için vidalı enjeksiyon makinesi tercih edilir. Makinenin vida hızı ve geri basıncının elyaflara zarar vermeyecek şekilde olması gerekir. Elyafların aşındırıcı özelliğinden dolayı hem tezgâh hem de kalıpta hızlı aşınma meydana gelebilir. Cam elyaf takviyeli termoplastik imalatında daha kaliteli mil ve kovan kullanılması gerekir. Aksi durumda enjeksiyon makinesinin temelini oluşturan mil ve kovan yüzeyinde aşırı düzeyde aşınma olur. Isıl işlem yapılmış (sertleştirilmiş) kalıp çeliği kullanıldığında kalıp aşınmaları ihmal edilebilecek kadar az olur (Çağlarer, 2004; *Vakumpompasi*, 2011).

Enjeksiyon kalıplama yönteminde parçalar, ergitme, kalıp boşluğunu doldurma, soğutma ve parçaların kalıptan çıkartılması aşamaları tamamlanarak elde edilir (Şekil 2.5). Besleme hunisine doldurulan toz veya granül haldeki hammadde, huni titreşimi ve vida emme hareketiyle enjeksiyon makinesini besler. Isıtma, vidanın hareketi ile meydana gelen sürtünme ısısı ve basınçla ergitilen malzemeler silindirin çıkışındaki kalıba doğru itilir. Burada biriken ergimiş malzemenin vidanın eksenel hareketi (itme hareketi) ile meydana gelen yüksek basınçla meme vasıtasıyla yolluktan kalıp boşluğuna enjekte edilir. Bir süre yüksek basınç altında kalıpta tutulan ürün, soğutularak katıştıktan sonra hareketli plakanın geri çekilmesiyle açılan kalıptan itici pimler yardımıyla dışarı çıkartılır. Kalıbın açılmasıyla birlikte vida geriye çekilir, besleme hunisinden silindire tekrar hammadde beslenir, kalıp kapanır ve bir sonraki parçanın üretimine başlanır. Bu işlemin tamamına bir enjeksiyon çevrimi denir. Kalıp genellikle içine açılan kanallardan su geçirilerek soğutulur (Akkurt, 2007; Karagöz, 2014; Kocabaş, 2014). Şekil 2.6'da enjeksiyon kalıplama yönteminin bir çevrimi boyunca kalıp içindeki basıncın zamana göre değişim grafiği görülmektedir.

Plastik enjeksiyon makinesinin çalışma prensibi (çevrimi) en basit şekliyle aşağıdaki gibi açıklanabilir.



Şekil 2.5. Enjeksiyonla kalıplama çevrimi; a) Ergitme, b) Enjeksiyon, c) Soğutma, d) Çıkartma (Kocabaş, 2014).

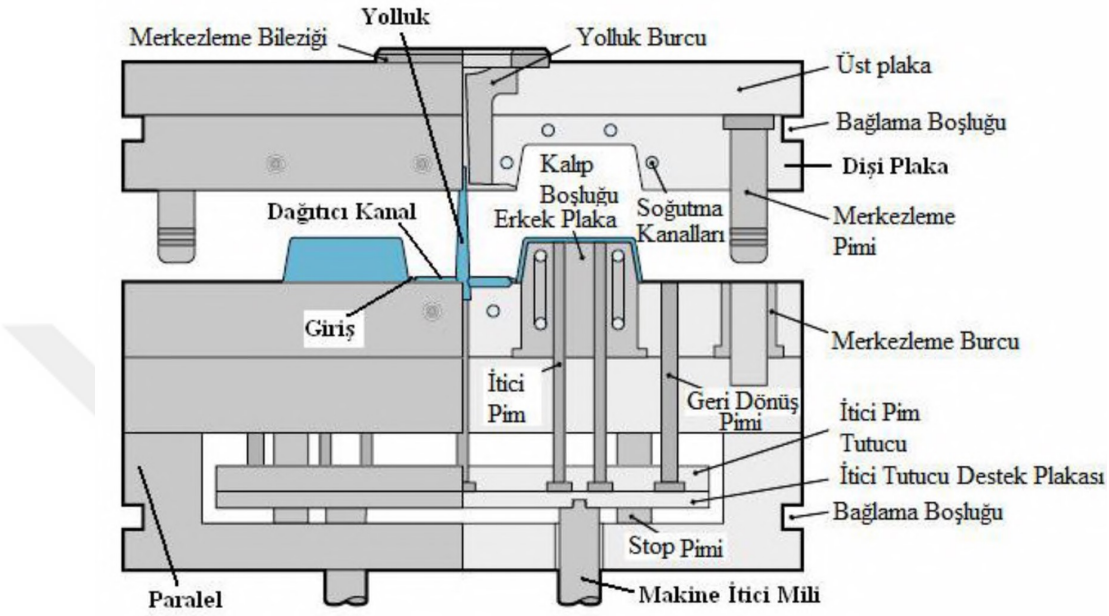


Şekil 2.6. Enjeksiyon çevrimindeki basıncın kalıp içindeki değişimi (Kocabaş, 2014).

Plastik enjeksiyon kalıpları, çok miktarda plastik parçanın seri bir şekilde üretilmesini sağlar. Kalıp tasarımı, imalatı ve kalıbın plastik enjeksiyon makinesine bağlama işlemlerinin çok maliyetli olmasına rağmen bir çevrimde kısa sürede çok sayıda ürün elde edilmesi parça maliyetini düşürmektedir (Kocabaş, 2014; Köse, 2006).

Plastik enjeksiyon kalıpları imal edilecek parça şekline göre çok farklı şekilde olabilirler. Ayrıca tüm kalıplarda bulunan ortak elemanlar vardır. Genellikle standart enjeksiyon kalıpları, dişi olarak bilinen sabit ve erkek olarak bilinen hareketli

parçalardan oluşurlar. Plastik enjeksiyon kalıpları birçok ana ve yardımcı parçadan meydana gelir (Akkurt, 2007; Kocabaş, 2014). Şekil 2.7'de plastik enjeksiyon kalıbının erkek ve dişi kısımlarında kullanılan parçalar gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Plastik enjeksiyon kalıp parçalarının gösterimi (Kocabaş, 2014).

Plastik enjeksiyon kalıplama yönteminde kaliteli ürünler imal etmek için işlem parametrelerinin yanında kalıp tasarımının da düzgün olması son derece önemli bir faktördür. Bununla birlikte, kalıp boşluğu kalıbın bir parçası olup, enjeksiyon ünitesinden gelen ergimiş hammaddeyi yolluk vasıtasıyla alıp soğutarak istenilen şeklide plastik parça elde edilmesini sağlar. Başka bir şekilde ifade etmek gerekirse, kalıp tasarımıyla parça modeli iç içedir. Bundan dolayı kalıp tasarımının iyi bir şekilde yapılabilmesi için plastik enjeksiyon makinesi özelliklerinin, kalıp yapısının, kalıptaki boşluk sayısının, yolluk sisteminin, ağız tasarımının, kalıp ısıtma veya soğutma yönteminin, parça çıkartma sisteminin, kalıpta kullanılacak malzeme kalitesinin, yüzey kalitesinin ve gaz çıkış sisteminin çok iyi bilinmesi gerekir (Akkurt, 2007; Kocabaş, 2014; Hüner, 2014).

Belirli bir ürüne uygun kalıp boşluğu tasarımı yapılırken bazı faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekir. Bu faktörlerden bazıları; kalıp boşluğunun mümkün olduğunca kolay doldurulması, elde edilen parçanın olası iç gerilmelerinin az olması ve

plastik soğuma sırasında çeker budan dolayı plastik parçanın açılan kalıptan kolayca çıkartılabilmesidir (Hüner, 2014).

Güllü, Özdemir ve Demir'e göre (2001),

> Çekme kuvveti elyafların uç noktalarından merkeze doğru artmakta ve merkezde maksimum değere ulaşmaktadır. Kesme kuvveti elyaf ucunda maksimum değerde iken merkezde sıfır olmaktadır. Elyafların plastiğin akma şartlarından dolayı yönlenmesi, kompozit özelliklerini etkiler. Buna rağmen enjeksiyon işlem parametreleri bu yönlenmeyi değiştirebilir. Yüzeysel akış, hemen hemen elyafları akış yönüne paralel yapmaktadır. Kompozitteki nem, yumuşatıcı gibi hareket etmekte ve kompozitte nem, ufak çatlaklar, mikro çatlaklar ve şişme gerilmesi elyafın zayıflamasına sebep olmaktadır (s.12) (Güllü vd., 2001).

Takviyesiz plastikler kullanılarak üretilen parçalarda karşılaşılan problemler cam elyaf takviyeli parçaların üretiminde de karşımıza çıkmaktadır. Ancak elyaf takviyeli plastik malzemeler kullanılarak yapılan tasarımlarda elyafların yönlenme doğrultusu ürünlerin mekanik özelliklerini direk olarak etkilemektedir. Yapı içerisindeki elyaf takviyeler, matrisin akış yönüne paralel doğrultuda yönlenmekte ve doğal olarak da parçaların farklı doğrultularda çeşitli dayanım özellikleri göstermesine neden olmaktadır. Dolayısıyla akış yönüne etki eden faktörler elyaf takviyeli plastiklerden üretilen parçaların dayanım özelliklerine de etki etmektedir. Bu faktörlerden en önemlisi yolluk girişinin pozisyonudur. Kısa elyaf takviyeli plastikler ile imalat yapılacaksa, kalıp tasarımında yolluk girişinin kozmetik, ekonomik ve verimlilik gibi etkileri yanında bu durumun da göz önüne bulundurulması gerekir. Yanlış tasarlanan yolluk yerlerinin seri üretim sırasında değiştirilmesi çok maliyetli bir işlemdir. Bundan dolayı, tasarım aşamasında bu durumun göz önünde bulundurulması oldukça önemlidir (Kocabaş, 2014).

2.4. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozitlerin kullanıldıkları alanlar oldukça geniştir. Kompozitlerin kullanılmadığı bir sektör bulmak çok zordur. Kompozitler birçok sektörde tercih edilirler. Kompozitlerin yaygın olarak kullanıldığı sektör havacılıktır. Kompozitler, son zamanlarda gittikçe artan oranlar ile farklı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Kompozit malzemelerin gelişimi, uzun yıllar havacılık endüstrisindeki ihtiyaçlara yönlendirilmiş olmasına rağmen son dönemlerde yeni birçok endüstri dalında ve farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Kompozitlerin bu kadar geniş kullanım alanına sahip

olmasının başlıca sebepleri hafiflik ve dayanım özelliklerinin çok iyi olmasıdır. Aşağıda değişik sektörlerde kullanılan kompozitler ile ilgili bilgiler verilmiştir (Arıcasoy, 2006; Er, 2004; Yıldızhan, 2008).

2.4.1. Havacılık Endüstrisi

Havacılık endüstrisinde, özellikle ileri kompozit malzemeler çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin hafif olmaları yanında üstün mekanik özellikleri, plastik matrisli kompozitlerin uçak ve helikopterlerde sadece içyapı parça imalatlarında değil yapısal parçaların imalatında da kullanılmasını sağlamıştır. Plastik matrisli kompozit malzemelerin en fazla kullanıldığı alan havacılık sektörüdür. Son zamanlarda, askeri ve sivil havacılık sektöründeki birçok imalatçı kompozitleri, uçak gövde ve motor parçaların imalatında etkin bir şekilde kullanmaktadır. Hava taşıtları genelde, gövde ağırlık kontrolü, emniyet, kullanım ömrünün uzun olması gibi, sistem tasarımının temel ilkeleri ve maliyetin yanı sıra uçuş mesafesi, seyir hızı, irtifa, navlun ağırlığı vb. performans kriterlerini sağlayacak şekilde tasarlanırlar. Koşulların tamamı eşit olduğunda, ağırlığı en düşük olan tasarım tercih edilecektir. Bu durumda uygun özellikli hafif metallerin en iyi performansı sağlayacağı düşünülebilir. Fakat bu amaçla kullanılabilecek en uygun malzemeler kompozitlerdir. Özgül mekanik özellikleri karşılaştırıldığında, düşük yoğunluklarından dolayı bor / epoksi ve karbon / epoksi gibi kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre daha üstün oldukları görülmektedir. Düşük yoğunluklu olan kompozitlerin uçak tasarımlarında kullanılmaya başlanmasıyla metalleri içeren tasarımlara oranla ağırlık kazancı sağlanmıştır. Bundan dolayı havacılık endüstrisinde kullanılan kompozitlerin oranı gün geçtikçe artmaktadır. Örneğin; kompozitlerin 1982 yılındaki kullanım oranı %6 iken 2000 yılındaki kullanım oranı %27'ye yükselmiştir (Arıcasoy, 2006; Er, 2004; Yıldızhan, 2008). Yine bu kapsamda:

- B2 bombardıman uçağı gövde panelleri; karbon elyaf + epoksi,
- F-14 uçaklarındaki yatay denge mekanizmaları; bor + epoksi,
- F-15 uçaklarında yatay ve dikey denge mekanizmaları; bor + epoksi,

- F-16 uçaklarında yatay ve dikey denge mekanizmaları, kontrol panelleri; karbon + epoksi,
- F/A-18 uçaklarındaki kanatların yüzeyleri, yatay ve dikey denge mekanizmaları, hız frenleri ve kontrol panelleri; karbon + epoksi,
- AV-8B uçaklarındaki kanat parçaları, yatay denge mekanizmaları, ön gövde ve kontrol panelleri; karbon + epoksi,
- F-29 uçağında kanatların yüzeyleri; grafit + epoksi,
- A380 yolcu uçağının kanat yüzeyleri ve flapler; karbon elyaf + epoksi,
- A380 yolcu uçağının burun parçaları (radome); cam elyaf takviyeli plastik (CTP),
- A380 yolcu uçağındaki dikey stabilizer; aramid elyaf + epoksi,
- Airbus 300/600 uçaklarındaki zemin plakası; karbon takviyeli Polieterimid,
- Boeing 757 ve 767 uçaklarının kontrol panelleri; karbon + epoksi,
- Boeing 757 ve 767 uçaklarının motor kaportası; karbon / aramid + epoksi,
- Uçak EAPS kapağı; karbon elyaf + polietereterketon (PEEK), kompozit malzemelerden imal edilmiştir.
- Boeing 767 uçaklarında; %3 fiber takviyeli polimer kompozit (FT + PK),
- Boeing 777 uçaklarında; %13 FT + PK,
- Askeri C-17 kargo uçağında; %6 FT + PK,
- Airbus A320 model uçağında; %15 FT + PK,
- Airbus un yeni modeli A340 ta; %15 FT + PK,
- Mirage 2000 uçağında; kompozit karbon + epoksi ve bor + epoksi,
- Airbus A320 uçaklarındaki; spaylerde, eleronlarda, kuyruk takımlarının imalatında, silindirik motor kaportalarında, karbon takviyeli, kompozit malzemeler kullanılmıştır (Arıcasoy, 2006; Er, 2004).

Stealth bombardıman uçağı (Hayalet uçak); Amerika tarafından üretilen bu uçaklar plastik matrisli kompozit malzemelerden imal edilmişlerdir. Gerek malzeme özellikleri (radar dalgalarını absorbe eden özel dokusu) gerekse uçak gövdesinin tasarımından dolayı bu uçaklar radara yakalanmamaktadır. Bu uçaklar körfez savaşında radara yakalanmadan uzun mesafeli uçmuş ve hedeflerini bombalamışlardır (Er, 2004).

F-16, F-22 vb. avcı uçaklarındaki parçaların büyük bir bölümü karbon elyaf takviyeli plastik matrisli kompozit malzemelerden imal edilmişlerdir. Bu uçaklar Alüminyum alaşımlı malzemeler kullanılarak üretilenlere oranla %25 - 40 daha hafif olurlar. Uçağın %40 hafif olmasından dolayı uçak genelinde her bir kilogramda 50 ila 500 $ arasında tasarruf sağlayabilir. Hafif bir uçakla, daha hızlı ve daha uzun menzilli uçabilir veya %40 daha fazla mühimmat taşınabilir. Çok katmanlı tabakalı sürekli elyaf takviyeli plastik matrisli kompozit gövdesi olan uçağın yakıt tankına kursun isabet etmiş olsa bile parçalanmaz. Malzeme özelliğinden dolayı oluşan mikro çatlaklar isabet eden kurşunun darbe enerjisini sönümler. Uçak iniş yaptıktan sonra isabet alan panel değiştirilerek uçuşa hazır hale getirilebilir (Er, 2004).

V-22 askeri helikopterlerinde %50 FT + PK kullanılmıştır. Bundan dolayı ağırlık yaklaşık olarak %20 azalmıştır. Kalıplanabilme ve yüksek teknolojiler ile karmaşık malzemelerin üretilebilmesinden dolayı helikopterlerde parça sayısı yaklaşık %85 azalmıştır. BK 117 helikopterinde yüksek oranda FT + PK kullanılmıştır. %75 karbon, %22 aramid, %3 cam elyaf takviye malzemesi kullanılmıştır. Ağırlığı yaklaşık 7 kat azaltılmış, parça adedi 745'ten 105'e düşürülmüştür. Parça sayısının azalması, imalat sürecini kısaltarak, montaj süresi, bakım süresi ve periyodik kontrol süresini düşürmüştür (Er, 2004).

Er'e göre (2004),

> Daha hızlı ve ağır uçakları durdurabilmek için yüksek performanslı uçak frenleri gerekmektedir Normal veya kısa mesafeli duruş gerektiren koşullara uygun, yüksek sıcaklık ve termal soka dirençli, düşük ısıl genleşmeye sahip, iyi ısı ileten, yüksek sıcaklık stabilesine sahip, mükemmel sürtünme ve aşınma direnci gösteren karbon - karbon kompozitler kullanılmaktadır. En iyi çelikten (çelik / sermet) 4 kat daha yüksek fren gücü sağlamaktadır (s.14) (Er, 2004).

2.4.2. Otomotiv Endüstrisi

Otomotiv endüstrisi, müşteri ihtiyaçlarını karşılamak ve çevresel şartlardan dolayı daha hafif otomobiller üretmek için çalışmaktadırlar. Otomobillerin ağırlıkları düştükçe, daha çabuk hızlanabilirler, daha çabuk durabilirler, hareket etmek için daha küçük bir motora ve böylece daha az yakıta ihtiyaç duyarlar (Arıcasoy, 2006; Er, 2004).

Otomotiv sektöründe kullanılan kompozitler, diğer malzemelere nazaran daha hafif ve daha sağlamdırlar. Kompozit malzemeler, günümüzde otomotiv sektöründe; spor arabalar, yolcu otobüsleri ve kamyonlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler yüksek maliyetlerinden dolayı çok fazla kullanılmazlar, genellikle cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler kullanılır (Yıldızhan, 2008). Yine bu sektör kapsamında:

- Cam silecekleri; %30 cam + polibütilen tereftalat (PBT),
- Mercedes, filtre kutuları; %35 cam + poliamid 66,
- Pedal parçaları; %40 cam + poliamid 6,
- Dikiz aynaları; %30 cam + ABS,
- Bayerische Motoren Werke AG (BMW), far gövdeleri; %30 cam + PBT,
- BMW, Ford, Mercedes, hava emiş manifoltları; %30 cam + poliamid 6,
- Gösterge panelleri; preslenebilir cam takviyeli termoplastik (GMT),
- Rüzgârlık (spoiler); CTP,
- Ford, yan gövde iskeleti; CTP,
- Corvette, kaportası; SMC CTP, kompozit malzemeler kullanılarak imal edilmiştir (Akdoğan Eker, 2009; Arıcasoy, 2006; Er, 2004).

Formula 1 (F1) araçlarının imalatındaki düzenlemeler çok özeldir ve özenle uygulanmaktadır. Aracın toplam ağırlığı maksimum 605 kilogram olabilir. Tasarım mühendislerinin en düşük ağırlığı ve en dayanıklı çözümü bulmaları gerekmektedir. Daha önceleri F1 araçlarında hafif bir metal olan alüminyum çok yaygın olarak kullanılırken artık kompozitler kullanılarak çok daha düşük ağırlıklar ile dayanım iki

katına çıkarılabilmektedir. Bunun yanı sıra karmaşık parçaların kompozit malzemeler kullanılarak üretilmesiyle F1 araçlarının imalatında ihtiyaç duyulan parça miktarı azaltılabilmektedir. Alüminyum ile 200'den fazla parça kullanılarak üretilebilen gövde ve şasi sadece 5 parça kullanılarak üretilmektedir. Kompozitler, metal cıvata vb. gibi bağlantı elemanları yerine epoksi reçine ile birleştirilebilmektedir. F1 araçlarında, motor kaplamaları, burun kapakları, ön ve arka kanat parçaları, spoiler, ana şasi, elektrik tesisat kutuları; CTP kompozit malzemelerden imal edilmiştir (Arıcasoy, 2006).

2.4.3. Spor ve Eğlence Endüstrisi

Kompozitlerin yaygın olarak kullanıldığı yeni sektörler içinde spor araç ve gereçleri gün geçtikçe daha ön planda yer almaktadır. Özellikle ağırlığın azalması, dolayısıyla hareket kabiliyetinin artması için dayanıklılığı artıran cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin, kano, sörf ve yat üretiminde çok önemli olan yorulma ve darbe dayanımları oldukça yüksektir. Dağ bisikletleri, maksimum dayanım / ağırlık oranı ve minimum ağırlık özelliğini kazandırabilmek için karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerden imal edilirler. Bu kompozit malzemeler korozyona dayanımı, şok emme ve dayanıklılık gibi üstün özellikler sağlarlar. Bunun yanı sıra golf sopaları, tenis raketleri vb. spor ürünleri de hafif olmaları için karbon elyaf takviyeli kompozitlerden imal edilirler (Er, 2004). Diğer bazı genel uygulama örnekleri ise şöyledir:

- Su kayakları; termoplastik prepreg,
- Kar kayakları; ahşap üstüne kaplama yapılmış karbon, aramid ve cam elyaf karışımı + epoksi,
- Kano kürekleri; %33 cam + poliftalamid,
- Su kaydırağı; CTP,
- Sörf tahtası; CTP,
- Bisiklet (ağırlığı ~1 Kg); karbon + poliamid 6,
- Reebook spor ayakkabılar; termoplastik poliüretan, petek (honeycomb),
- Golf sopaları; karbon elyaf + epoksi,

- Tenis raketleri; aramid (kevlar) + epoksi,
- Palet; karbon elyaf + epoksi,
- Zıpkın gövdesi; karbon elyaf + epoksi, kompozit malzemeler kullanılarak imal edilirler (Akdoğan Eker, 2009; Arıcasoy, 2006; Er, 2004).

London College of Furniture ve diğer bazı alanlarda ileri kompozitlerle müzik aletlerinin imal edilmesiyle ilgili çalışmalar yapılmaktadır. İleri kompozit malzemeler ile imal edilen yaylı sazlarda tellerin gerilmesine bağlı olarak boyun kısmının deforme olması karşılaşılan başlıca sorunlardır (Arıcasoy, 2006; Er, 2004).

- Kemanlar; karbon elyaf + epoksi,
- Gitarlar; karbon lamine tabakalar arası polimer köpük,
- Akustik gitarlar; grafit + epoksi,
- Çello; karbon + epoksi, kompozit malzemeler kullanılarak imal edilirler (Akdoğan Eker, 2009; Arıcasoy, 2006; Er, 2004).

2.4.4. Denizcilik Endüstrisi

Kompozitler, korozyon dirençlerinin yüksek olması, hafif olması, yakıttan tasarruf sağlaması, daha hızlı hareket kabiliyeti sunması ve daha konforlu olması gibi özelliklerinden dolayı denizcilik endüstrisinde çeşitli uygulama alanları bulur. Kompozitler, gemilerin, yatların, yolcu feribotlarının, deniz botlarının ve can simitlerinin imalatında kullanılır. Denizcilik sektöründe genelde cam elyaf takviyeli plastik matrisli kompozit malzemeler kullanılırlar (Yıldızhan, 2008). Bu bağlamda bazı uygulamalar:

- Yelkenli gövdeleri; CTP, balsa ve polimer köpük üzerine cam, aramid ve karbon elyaf dokumalarla kaplanmış,
- Yat ve teknelerin arkasındaki platformların basamakları; CTP,
- Yelken direkleri; kevlar + epoksi, kompozit malzemeler kullanılarak imal edilirler (Arıcasoy, 2006; Er, 2004).

2.4.5. Tüketici Eşya Endüstrisi

Kompozitler tüketici eşyalarının imalatında yaygın olarak kullanılırlar. Kompozitler, dikiş makinesi, kapı, küvet, masa, bilgisayar, yazıcı vb. ürünlerin imalatında kullanılır. Bu ürünlerdeki çoğu parçanın üretimi kısa elyaf takviyeli kompozitler kullanılarak yapılır ve imalat yöntemi olarak hazır kalıplama ya da enjeksiyon kalıplama yöntemi tercih edilir (Yıldızhan, 2008).

2.4.6. Diğer Uygulama Alanları

Kompozitlerin kullandıkları alanlar çok geniştir ve her geçen gün daha da genişlemektedir. Çünkü kullanım yerine ve kullanım alanında ihtiyaç duyulan özelliklere uygun kompozit malzemeler geliştirilebilir. Kompozitler, köprü yapımında, rüzgâr türbinlerinde, basınçlı gaz kaplarının imalatında, biomekanik alanlarda, nükleer reaktörlerde, boru tesisatlarında, dişli çarkların ve batarya ızgaralarının imalatında vb. yerlerde uygulama alanı bulurlar (Yıldızhan, 2008).

Korozyon dayanımı yüksek olan ürünler:

- Su tankları; CTP,
- Mazgal oluğu; CTP,
- Yeraltında kullanılan borular; CTP,
- Marketlerdeki dondurulmuş gıda reyon kaplamaları; CTP,
- Rasathane kubbeleri; CTP,
- Açık alanlarda kullanılan dolaplar; CTP,
- Çitler; CTP,
- İlan panoları; CTP, kompozit malzemeler kullanılarak imal edilirler (Arıcasoy, 2006; Er, 2004).

Sağlık sektöründe kullanılan ürünler:

- Tekerlekli sandalyeler; cam veya karbon elyaf takviyeli polyester,

- Tıbbi tetkik cihazlarının dış çerçevesi; CTP, kompozit malzemeler kullanılarak imal edilirler (Arıcasoy, 2006; Er, 2004).

İnşaat sektöründe kullanılan ürünler:

- Köprülerin tabanları, tırabzanları, yürüyüş yolları, taşıyıcı konstrüksiyonlar; CTP,
- Balkon korkulukları; CTP,
- Kapılar; CTP,
- Yüzme havuzu taşıyıcı konstrüksiyonları, kapı saçakları, yer döşemeleri; SMC,
- Bina kaplamasında kullanılan paneller; CTP,
- Küvetler; CTP,
- Lavabolar; CTP,
- Sokak lambaları; CTP, kompozit malzemeler kullanılarak imal edilirler (Akdoğan Eker, 2009; Arıcasoy, 2006; Er, 2004).

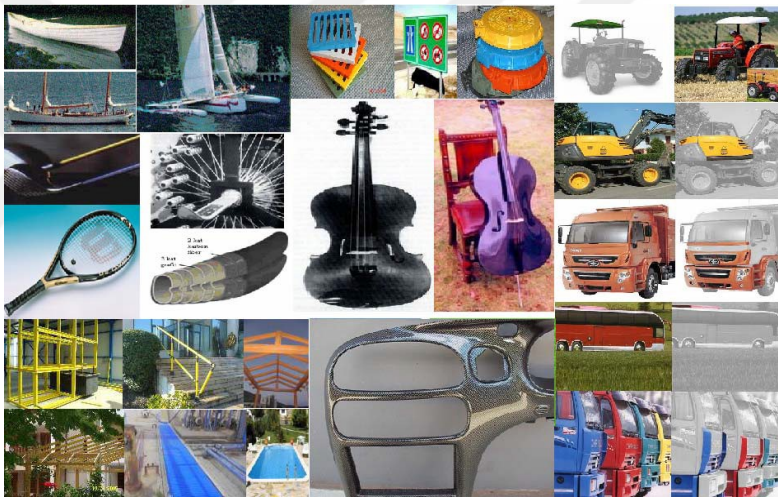
Ulaşım sektöründe kullanılan ürünler:

- Traktör kaportaları, kabinleri, koltukları; SMC,
- Toplu taşıma araçlarında kullanılan koltuklar; SMC,
- Konteynır taban döşemeleri; GMT,
- Otobüs havalandırmalarında kullanılan kanallar, port bagaj parçaları, gösterge panelleri; CTP,
- Açık alanlarda kullanılan (Golf arabası vb.) araçların kaportaları, tavanları; CTP,
- Teleferikler (Maçka Teleferiği); CTP, kompozit malzemeler kullanılarak imal edilirler (Akdoğan Eker, 2009; Arıcasoy, 2006; Er, 2004).

Tren: Kompozit prepreg ve dokuma malzemeler trenlerde maliyeti ve ağırlığı düşürmek için artan oranlarda kullanılmaktadır. İskelet ağırlığının azaltılması, enerji tasarrufu sağlamasının yanında daha hızlı trenlerin tasarlanmasına da katkı sağlar. Bunun yanı sıra kompozit malzemeler yüksek rijitlliğe sahip olduklarından iskeletin

desteklenmesi gerekmeyeceğinden yolculara ayrılan bölümler daha geniş yapılabilir. Trenlerde genellikle kolay ve hızlı değiştirilebilen prepreg levhalar kullanıldığından tekil olarak zarar gören parçalar hızlıca değiştirilebilir (Arıcasoy, 2006; Er, 2004).

Plastik matrisli kompozit malzemeler yukarıda belirtilenlerin yanı sıra kamyon - tır kasa kaplamaları, modern iskelelerde darbe ve aşınma plakası imalatı, buz pistlerinin yapımı, kimya sanayinde kullanılan tankların imalatı, atık su tesisine ait tankların imalatı, elektro ve galvano kaplama sanayinde kullanılan tankların imalatı, depolama ekipmanlarının imalatı, gıda ve giyim sektöründe kullanılan kesim masalarının imalatı gibi alanlarda kullanılmaktadır. Plastik matrisli kompozit malzemelerden imal edilmiş bazı ürünler Şekil 2.8'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Plastik matrisli kompozit malzemelerden imal edilmiş ürünler (Akdoğan Eker, 2008).

2.5. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler, metallerin birçok özelliğine göre farklı özelliklere sahip olmalarından dolayı, metallere göre daha önemli olmuşlardır. Kompozit malzemelerin özgül ağırlıklarının düşük olması hafif yapılardaki kullanımlarında önemli bir avantaj sağlar. Ayrıca, elyaf takviyeli kompozitlerin korozyon dayanımı, ısı, ses ve elektrik yalıtımı gibi özellikleri de farklı kullanım alanlarında avantaj sağlamaktadır (Arıcasoy, 2006).

Aşağıda kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajlarından kısaca bahsedilmiştir. Kompozit malzemelerin dezavantajlı olduğu özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik teorik çalışmalar yapılmaktadır, bu çalışmaların olumlu sonuçlandırılması durumunda kompozitler, metal esaslı malzemelerin kullanıldığı yerlerde daha yaygın olarak kullanılabileceklerdir (Arıcasoy, 2006).

2.5.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları

- Kompozit malzemelerin çekme ve eğilme dayanımları birçok metal esaslı malzemeye nazaran oldukça iyidir. Bunun yanı sıra kalıplanabilme özelliklerinden dolayı kompozit malzemelere istenilen doğrultuda ve bölgede ihtiyaç duyulan dayanım verilebilir. Böylelikle malzemeden tasarruf edilerek, daha hafif ve ucuz ürünler imal edilebilir.
- Değişik mekanik özelliklere sahip ürünler elde etmek için farklı katman ve çeşitli birleşimlere sahip kompozit malzemeler üretilebilir.
- Kompozit malzemeler yüksek dayanım özelliklerine sahiptirler. Dolayısıyla çekme, basma, darbe, yorulma dayanım değerleri oldukça iyidir.
- Bazı kompozitlerin akma sınır (akma gerilmeleri) değerleri çok yüksektir.
- Kompozit malzemelerin kopma uzamaları metallere nazaran çok daha yüksektir.
- Kompozit malzemelerin yorulma dayanımları çok yüksektir.
- Kompozitler dayanım / yoğunluk oranı yüksek malzemelerdir. Plastik matrisli kompozit malzemelerin yoğunluğu genellikle 1,5 - 2 gr/cm³ dür.
- Büyük ve karmaşık parçalar sadece bir işlemle tek parça olarak kolayca şekillendirilebilir. Böylece malzeme ve işçilikten tasarruf sağlanır.
- Karmaşık ürünlerin tek parça halinde üretilebilmesinden dolayı parça miktarı azaltılabilir. Bu da ara birleştirme detay ve parçaların sayısının azalmasını sağlayarak üretim sürelerini kısaltır.
- Uygun malzemeler seçilerek elektriksel özellikleri çok üstün olan kompozitler üretilebilir. Kompozitler günümüzde büyük enerji nakil hatlarında iyi bir iletken,

ihtiyaç duyulduğunda başka bir yapıda da iyi bir yalıtkan malzeme olarak kullanılabilir.

- Kompozitler, korozyondan, çoğu kimyasalların ve havanın etkilerinden zarar görmezler. Bu özelliklerinden dolayı kompozitler, kimyasal madde tanklarının, boru ve aspiratörlerin, tekne ve diğer deniz araçlarının imalatında güvenli bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle korozyon dayanımlarının iyi olması, birçok endüstri dalında avantaj sağlar. Bunda matris ve takviye malzemesinin uygun seçilmesi çok önemlidir. Aksi durumlarda birbirleri ile temas eden malzemeler pil oluşturacağından galvanik korozyon meydana gelecektir.
- Isı iletim katsayısı düşük malzemeler kullanılarak elde edilebilen kompozit malzemelerin ısı dayanımları, yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmelerini sağlar. Bazı özel katkı maddeleriyle kompozitlerin ısı dayanım özellikleri geliştirilebilir.
- Kompozit malzemelerin sünek olmalarından dolayı doğal bir titreşim absorbe etme ve şok emebilme özellikleri vardır. Çatlakların ilerlemesi böylece minimize edilmiş olur.
- Kompozitlere, kalıplama sırasında eklenen pigmentlerle istenilen renk kalıcı olarak verilebilir. Bu işlem için ek bir maliyet ve işçilik gerekmez.
- Kompozit malzemelerin gürültü iletim katsayıları çok düşüktür. Bu özelliklerinin metallerden iyi olmasından dolayı kompozit malzemeler, uçak parçalarından, tenis raketlerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptirler.
- Uçak ve otomobil parçalarında kompozitler kullanılarak, bu taşıtların ağırlıkları azaltılır ve böylece bu alanlarda yakıt tasarrufu sağlanır (Arıcasoy, 2006; Er, 2004; *Vakumpompasi*, 2011; Yıldızhan, 2008).

2.5.2. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin olumlu özellikleri yanında uygun olmayan özellikleri de aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kompozit malzemelerde oluşan hava kabarcıkları kompozitlerin yorulma özelliklerine olumsuz yönde etki eder.

- Kompozit malzemelerin kimyasal dirençleri matris malzemesine bağlıdır. Matris malzemesi olarak genellikle plastikler kullanılır ve bazı plastiklerin kimyasal dirençleri düşüktür.
- Bazı kompozitler nem emer. Bu da boyutsal kararlılığı etkiler.
- Kompozit malzemelerin sıcaklık direnci matris malzemesine bağlıdır. Matris malzemesi olarak genellikle plastikler kullanılır ve bazı plastiklerin sıcaklık dirençleri sınırlıdır.
- Kompozitler farklı eksenlerde farklı mekanik özelliklere sahip olabilirler.
- Aynı kompozit malzemede dahi çekme, basma, kesme ve eğilme dayanım özellikleri farklılık gösterebilir. Elyaf ekseni doğrultusundaki elastikiyet modülü, elyaf eksenine dik doğrultudaki elastikiyet modülünden daha yüksektir.
- Kompozit malzemelerde delik delme, kesme türü işlemler liflerin açılmasına neden olduğu için, bu tür malzemeler ile hassas parçaların üretimi yapılamaz. Fakat 3 boyutlu dokuma şeklindeki üretimlerde bu şekilde bir etki görülmez. Çünkü 3 boyutlu yapıdan kesilerek elde edilen ve 2,5 boyutlu yapı olarak adlandırılan malzemede iyi özellikler görülmektedir.
- Kompozit malzemelerin üretimi zor ve maliyetleri yüksektir. Uçak parçalarının imalatında kullanılabilecek kalitedeki karbon elyafların bir metrekaresinin maliyeti yaklaşık 50 $'dır.
- Lamine edilmiş kompozit malzemelerin sahip oldukları özellikler her zaman ideal değildir, kalınlık doğrultusunda düşük dayanım ve katlar arasında düşük kesme dayanım özellikleri gösterirler.
- Malzeme kalitesi imalat yönteminin kalitesine bağlıdır, standartlaştırılmış bir kalite yoktur.
- Kompozit malzemeler kırılgan (gevrek) olduklarından kolayca zarar görürler, tamirleri yeni problemlere yol açabilir.

- Kompozit malzemeler tamir edilmeden önce temizlik ve kurutma işlemleri özenle yapılmalıdır. Bazen bu işlem çok zor olabilir. Bazı kurutma yöntemleri çok uzun sürebilmektedir.
- Kompozit hammaddelerinin sınırlı raf ömürleri vardır. Bazı hammaddelerin soğutularak muhafaza edilmeleri gerekmektedir.
- Bazı kompozit malzemeler fırınlanmadan (pişirmeden) kullanılamazlar.
- Bazı kompozit malzemeler metallere yapışmazlar.
- Kompozit malzemelerin geri dönüşümü yoktur (Arıcasoy, 2006; Er, 2004; *Vakumpompasi*, 2011; Yıldızhan, 2008).

Kompozit malzemeler, metaller ile karşılaştırıldığında malzeme yorulması, malzeme yüzeyinde meydana gelen hasarların tolere edilmesi ve korozyona karşı dayanım özelliklerinden dolayı avantajlıdırlar. Tüm bu avantajlarına rağmen kompozit malzemelerin tam anlamıyla metallerin yerine kullanılamamasının dört ana sebebi vardır;

1. Bazı uygulamalarda ihtiyaç duyulan titanyum ve çelik gibi metallerin kritik düzeydeki ısı ve mekanik özelliklerini mevcut kompozitler sağlayamamaktadır.
2. Yeni geliştirilmiş olan matris malzemelerinin ve elyafların karakteristik özelliklerinin tamamı metaller kadar iyi bilinmemektedir.
3. Bazı karmaşık şekilli parçaların üretim maliyetleri çok yüksek çıkmaktadır.
4. Kompozitlerin kilogram başına düşen üretim maliyetleri metallere, özelliklede alüminyuma göre oldukça yüksektir (Er, 2004).

Görüldüğü üzere kompozitlerin, bazı dezavantajları olsa da çelik ve alüminyuma nazaran daha çok avantajı vardır. Bu özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler otomobil parçalarından, deniz tekne parçalarına, bina cephe kaplamalarından, banyo küvetlerine, ev eşyalarından, tarım makinelerine kadar birçok endüstri dalındaki problemleri çözebilecek malzemelerdir (Arıcasoy, 2006).

BÖLÜM 3

PLASTİKLERİN BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Endüstride plastik malzeme seçimi, üretim ve birleştirme yöntemleri tasarımcılar tarafından sürekli araştırılmaktadır. Müşteri beklentisinin ürüne iyi bir şekilde yansıtılabilmesi için yeni malzemeler ile birlikte üretim yöntemleri de sürekli gelişmektedir. Bu kapsamda plastik malzemelerin kullanımı da endüstrinin farklı alanlarında giderek yaygınlaşmaktadır. Günümüzde tasarımcılar müşteri beklentilerini basit bir şekilde ürüne dönüştürmek istemektedir, fakat bu çoğu zaman teknolojik kısıtlamalardan dolayı mümkün olmamaktadır (Ülker, 2015).

Sanayide, üretim veya tamir işlemleri gibi birçok uygulamada plastik malzemelerin kendi aralarında veya diğer malzemelerle birleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu malzemelerin birleştirilmesi için kullanım şartlarına uygun olarak çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Genel olarak plastik malzemelerin birleştirilme yöntemleri, mekanik bağlantı yöntemleri, yapıştırma yöntemleri ve kaynak yöntemleri olmak üzere Şekil 3.1'de görüldüğü gibi üç ana grubu ayrılmıştır (Balkan, 1999; Mert, 2010; Mishra vd., 2019; Ülker, 2015).



Şekil 3.1. Plastik malzemelerin birleştirme yöntemleri (Mishra vd., 2019).

Mekanik bağlamalar ve yapıştırıcılar ile birleştirme yöntemleri oldukça yararlı birleştirme teknikleridir, fakat kaynaştırma (fusion) birleştirmesi veya kaynaklı birleştirme, sürelerinin genellikle kısa olması, yüksek üretim kapasiteleri için daha uygundur. Ayrıca kaynaklı parçalar, kolayca geri dönüştürülür veya yakılır ve böylece atık problemleri hafifletilebilir. Bu durum, özellikle karmaşık yüzey aktivasyon teknikleri gerektiren PE ve PP gibi, düşük yüzey enerjili plastiklerin birleştirilmesinde önemli bir faktördür (Mert, 2010; Ülker, 2015).

Plastiklerin çentiğe karşı hassasiyetleri, perçinli veya cıvatalı birleştirme işlemlerini zorlaştırır. Plastik folyoların dikilmeleri durumunda, dikişlerdeki delikler, daha sonra oluşabilecek çatlakların başlangıcını oluşturabilir. Bundan dolayı birleştirme yöntemi olarak yapıştırma ve kaynak teknikleri ön plana çıkmaktadır (Anık, Oğur & Karakaya, 2003; Mert, 2010; Ülker, 2015; Zengin, 2012).

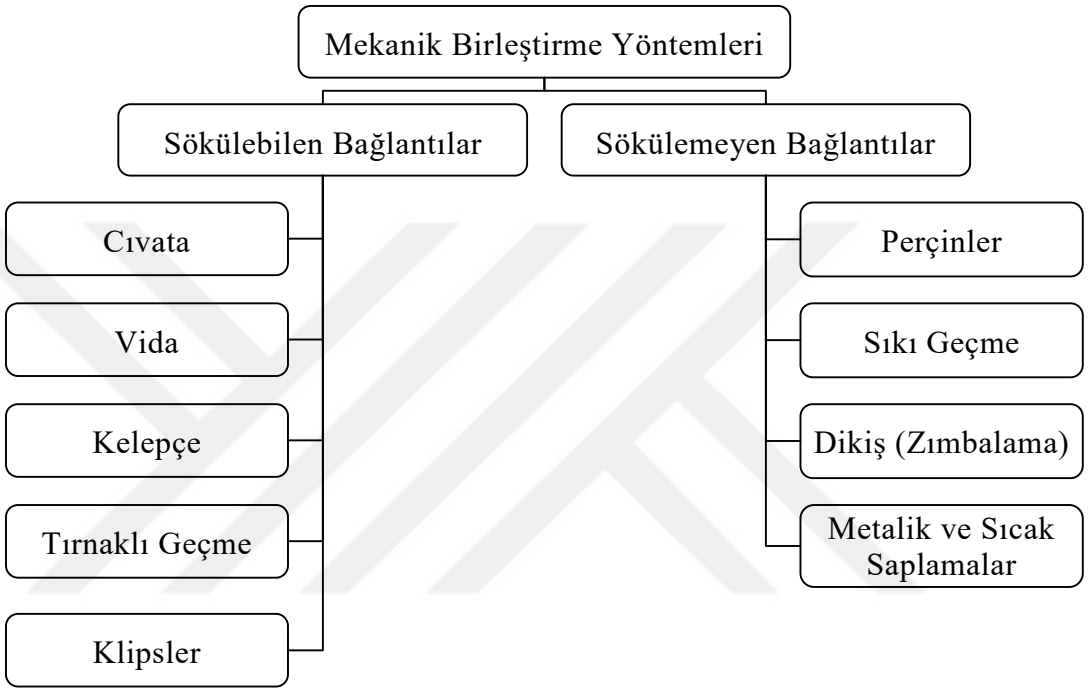
Mekanik bağlama ve bazı yapıştırma yöntemleri termoplastik ve termosetlere uygulanabilirler fakat kaynaklı birleştirmeler ısı karşısında gösterdikleri dirence göre sadece termoplastiklere uygulanabilirler (Akkurt, 2007; Karagöz, 2014).

Mekanik birleştirme yöntemlerinde, cıvata, perçin, vb. ara bağlantı elemanı kullanılırken, yapıştırıcı ve kaynak ile birleştirilecek olan parçalar, harici bir parça ile temas etmezler. Yapıştırıcı kullanılarak yapılan birleştirmeler de tıpkı kaynak gibi plastik parçaların çözülemeyen bir biçimde bağlanmasını sağlar. Son yıllarda kaynaklı bağlantılar plastik parçaların birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Karagöz, 2014).

3.1. Mekanik Birleştirme Yöntemleri

Mekanik birleştirme yöntemleri, sökülebilen ve sökülemeyen bağlantılar olmak üzere Şekil 3.2'de görüldüğü gibi iki gruba ayrılırlar. Cıvata, vida vb. kullanılan sökülebilen yöntemlerde, bağlama elemanına zarar verilmeden bağlantılar sökülebilir ve aynı bağlama elemanı ile tekrar bağlama gerçekleştirilebilir. Sökülemeyen yöntemlerde ise bağlama elemanı tahrip edilerek bağlantı söküldüğü için aynı bağlama elemanını kullanarak tekrar bağlantı yapmak mümkün değildir. Mekanik birleştirme yöntemlerinde birleştirilecek malzemelerin aynı türden malzemeler olmasına gerek yoktur ve metaller dahil olmak üzere her türlü malzemeye uygulanabilir. Bu

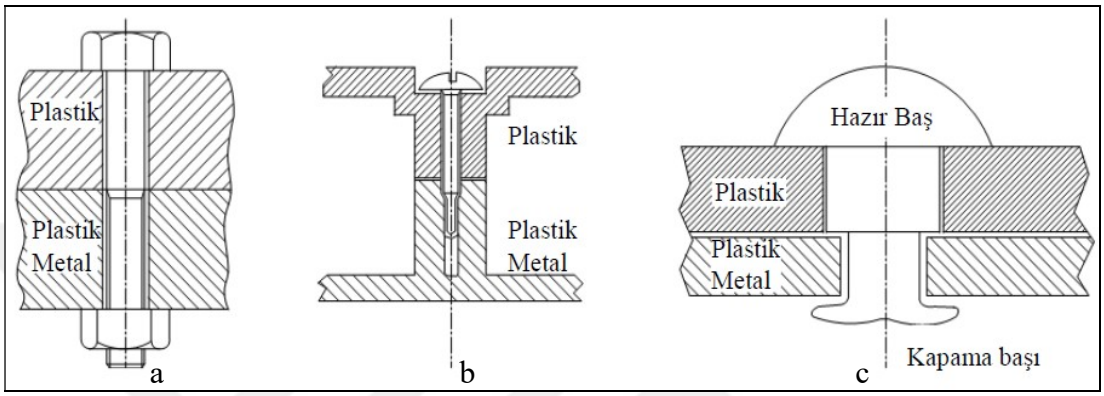
bağlantıların sökülebilirliği, montaj işlemlerinde bağlantıların hızlı yapılması, geniş uygulama alanlarının olması, işçiliğinin temiz ve basit oluşu ile yüksek teknoloji gerektirmemesi mekanik birleştirme yöntemlerinin diğer birleştirme yöntemlerine göre tercih sebeplerinden bazılarıdır (Akkurt, 2007; Balkan, 1999; Karagöz, 2014; Mert, 2010; Ülker, 2015).



Şekil 3.2. Mekanik birleştirme yöntemleri.

Plastik malzemelerin, çentik etkisine karşı fazla hassas olmaları, mekanik birleştirme yöntemlerinin, yapıştırma ve kaynak yöntemleri ile birleştirilmelerine göre taşıyabilecekleri yükleri sınırlandırmaktadır. Dolayısıyla mekanik bağlantı tasarımlarının dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Mekanik birleştirmeler, hatasız bir şekilde uygulanmış olsa bile bağlayıcı elemanlar ile bağlanan plastik malzemeler arasındaki termal genleşme katsayılarının farklı olması, ortam sıcaklığının değişmesi durumunda ciddi problemlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Sıcaklık değişimine bağlı olarak bağlantı bölgelerinde gevşemeler veya aşırı büzülmeler görülebilmektedir. Ayrıca, temas bölgesindeki plastik malzemenin gevrekliğine bağlı olarak, bağlantı elemanlarının plastik malzemelerden daha sert olmasından dolayı temas bölgelerinde çatlama ve kırılmalar meydana gelebilmektedir. Mekanik birleştirme

yöntemleri ile hızlı bir şekilde birleştirme işlemi yapılabilir. Bundan dolayı mekanik bağlama yöntemleri, az sayıdaki birleştirmeler için ekonomik olmasına rağmen seri üretimler için oldukça pahalı bir yöntemdir. Şekil 3.3'de mekanik birleştirme yöntemlerine ait örnekler gösterilmektedir (Balkan, 1999; Karagöz, 2014; Mert, 2010; Şelale, 2006; Ülker, 2015; Zengin, 2012).



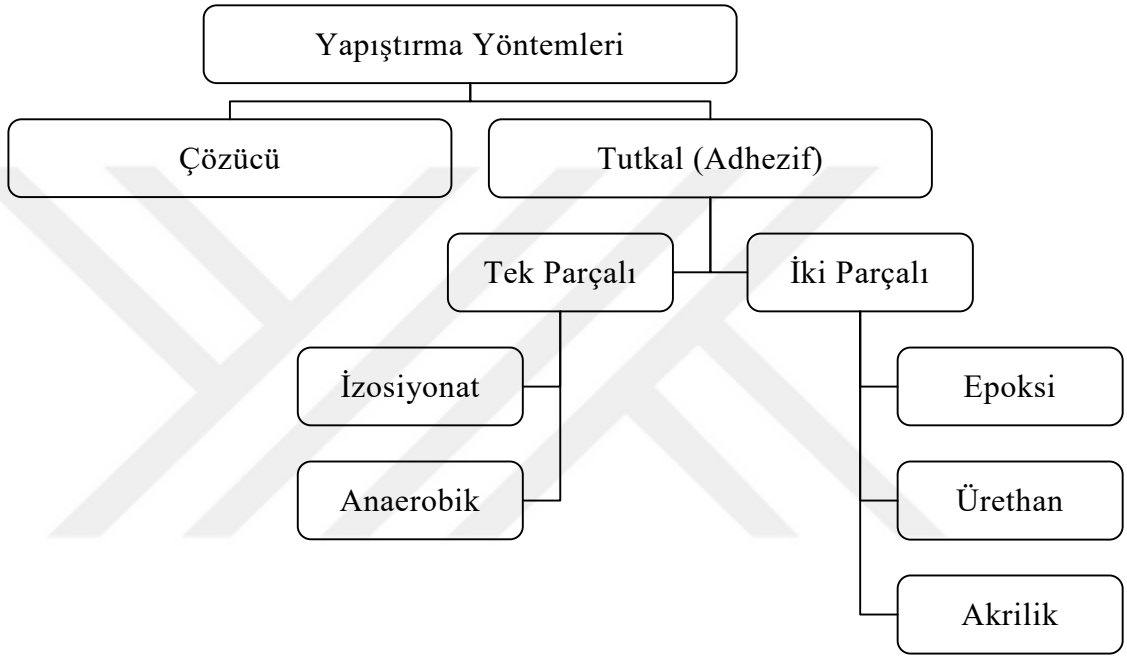
Şekil 3.3. Metalik birleştirme yöntemlerine ait örnekler; a) Cıvatalı bağlantı, b) Vidalı bağlantı, c) Perçinli bağlantı (Akkurt, 2007; Karagöz, 2014).

3.2. Yapıştırma Yöntemleri

Plastiklerin yapıştırma yöntemi ile birleştirilmesi çözücü ve tutkal (adhezif) olmak üzere Şekil 3.4'de görüldüğü gibi iki gruba ayrılır. Yapıştırma yöntemlerinde birleştirilecek parçalar, harici bir parça ile temas etmezler. Yapıştırıcı ile birleştirme yöntemlerinde, sürekli bağlantı için kimyasal reaksiyonlar kullanılır (Akkurt, 2007; Karagöz, 2014; Şelale, 2006; Zengin, 2012).

Herhangi türdeki iki benzer veya farklı malzemenin sökülemeyecek şekilde birleştirilmesi bu yöntem ile kolayca yapılabilir. Yapıştırıcılar, hem termoset hem de termoplastik malzemeleri birleştirmeye uygun olup, özellikle kaynak kabiliyeti olmayan termoset plastik malzemelerin birleştirilmelerinde kullanılabilirler. Geçmişte, yüksek dayanıma sahip plastik matrisli kompozit malzemeler sadece termoset malzemelerden üretilebildiği için bu birleştirme yöntemi oldukça önemliydi. Günümüzde termoplastik malzemelerin, mekanik özelliklerindeki gelişmeye bağlı olarak birçok alanda termoset malzemelerin yerine geçmesinden dolayı daha çok kaynak yöntemleri ile birleştirme tercih edilmektedir. Fakat yapıştırma yöntemleri, birleştirilecek malzemelerin değişen

çalışma sıcaklıkları altında kullanılmaları durumunda termal genleşme katsayıları arasındaki farka bağlı olarak, birleşim bölgesinde görülen termal gerilimlerin minimum seviyede tutulması amacıyla tercih edilirler. Ayrıca titreşimli çalışan alanlarda, birleşim yerlerindeki yapıştırma bağlantılarının sönümleme özelliğine sahip olmaları, esnek yapıdaki yapıştırma yöntemlerinin kullanılması fayda sağlayabilmektedir (Balkan, 1999; Mert, 2010; Strand, 2004; Ülker, 2015).



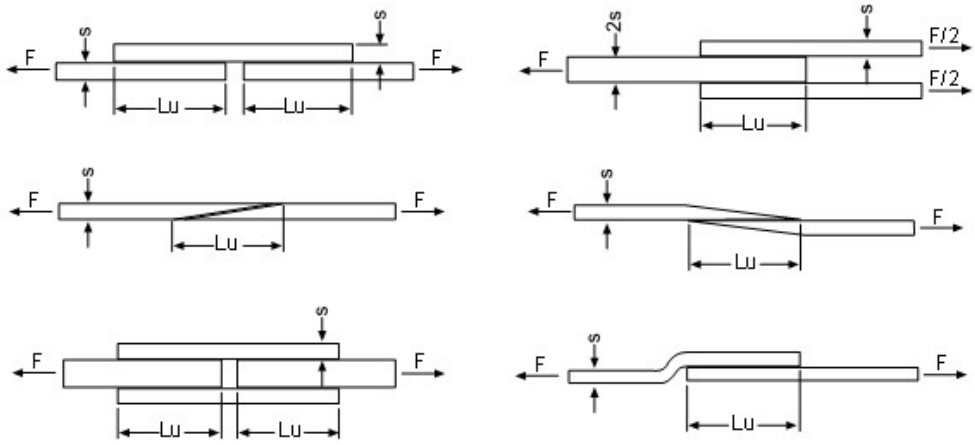
Şekil 3.4. Yapıştırma yöntemleri.

Yapıştırıcı kullanılarak yapılacak birleştirmelerde, yapıştırılacak malzemelerin kimyasal direnci çok önemlidir. PVC ve ABS gibi kimyasal bir madde ile çözünebilen plastikler yapıştırılabilirken, PE ve PP gibi kimyasal bir madde ile çözünemeyen plastikler yapıştırılamazlar (Akkurt, 2007; Karagöz, 2014; Strand, 2004; Şelale, 2006).

Birleşim yüzeylerine etki eden çekim kuvvetinin büyüklüğü, ara mesafenin artması ile azalmaktadır. Yapıştırma yöntemi ile birleştirmelerde, birleştirilecek yüzeylerin arasına ~ 0,1 mm kalınlığında yapıştırıcı veya çözücü madde sürülür ve belli bir süre basınç uygulanmadan veya basınç uygulanarak beklenerek birleştirme yapılır. Yapıştırma işlemi için hafif bir basınç uygulanması yeterlidir. Aşırı basınç uygulanması durumunda yapıştırıcı birleşim bölgesinden uzaklaşacağından aşırı basınç uygulanmaz.

Uygun bir yapıştırma işlemi için iki katı malzemenin kuru ve temiz olan yüzeyleri, en geniş alanda, mümkün olan en yakın mesafede birleştirilmelidir. Yapıştırıcı malzemenin zaman içerisinde katılaşması ile birleştirmenin mukavemetinin artmasıyla işlem tamamlanır. Yapıştırma işlemi, yapıştırıcı madde ile birleştirilecek malzemelerin yüzeyleri arasındaki ara fazda oluşan fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda gerçekleşir. Bağlantının dayanımı, yapıştırıcı moleküleriyle birleştirme yüzeyleri arasında meydana gelen adezyon (yapışma) kuvvet olayına bağlıdır (Akkurt, 2007; Balkan, 1999; Karagöz, 2014; Mert, 2010; Ülker, 2015).

Tutkallı (adhezif) yapıştırmalar, tamamen kusursuz birleştirmeler ve iyi özellikler sağlarlar, fakat bu birleştirmeyi sağlamak zordur ve onarımları uzun sürer. İyi bir yapıştırma işleminin yapılabilmesi için önemli olan bir husus da ön hazırlık işlemleridir. Parçalar arasındaki uygun temasın sağlanabilmesi için parçaların temizlenerek hazırlanması gerekir. Birleşim yüzeylerine mikroskobik ölçekte bakıldığında bölgede toz, kir veya yağ gibi istenmeyen maddelerin olduğu görülecektir. Yapıştırma işleminin dayanımına direkt olarak etki eden istenmeyen maddelerin bölgeden uzaklaştırılması çok önemlidir. En iyi performansın elde edilebilmesi için, yapıştırılacak yüzeyler yağdan arındırılarak temizlenmelidir. Temizleyiciler (çözücüler), birleştirme yüzeylerine buhar banyosu şeklinde uygulanabilir fakat pratikte daha çok fırça veya bez tampon kullanılarak ya da direkt numunenin daldırılması şeklinde uygulanmaktadır (Balkan, 1999; Mert, 2010; Strand 2004; Şelale, 2006; Ülker, 2015; Zengin, 2012).



Şekil 3.5. Plastiklerin yapıştırma bağlantı örnekleri (Karagöz, 2014).

Yapıştırmalı bağlantıların dayanımı, kaynaklı bağlantıların dayanımına göre daha düşüktür. İşlemde ısıya ihtiyaç duyulmaması, çok ince parçalarda çarpılma, şekil değiştirme vb. meydana gelmemesi kaynağa göre yapıştırmalı bağlantıların önemli bir üstünlüğüdür. Yapıştırma yöntemi ile birleştirmeler, günlük hayatımızda kullandığımız basit malzemelerden endüstriyel uygulamalara kadar çok geniş bir alanda üretim ve tamir işlerinde kullanılmaktadır. Yapıştırma yönteminde Şekil 3.5'de görülen bindirme tipi birleştirmeler kullanılmaktadır. Burada F= çekme kuvveti, Lu= bindirme uzunluğu, s= malzeme kalınlığı olarak verilmiştir. Genellikle bindirme bağlantılarında Lu= (15 - 29)s olarak alınır (Anık vd., 2003; Karagöz, 2014).

3.3. Kaynak Yöntemleri

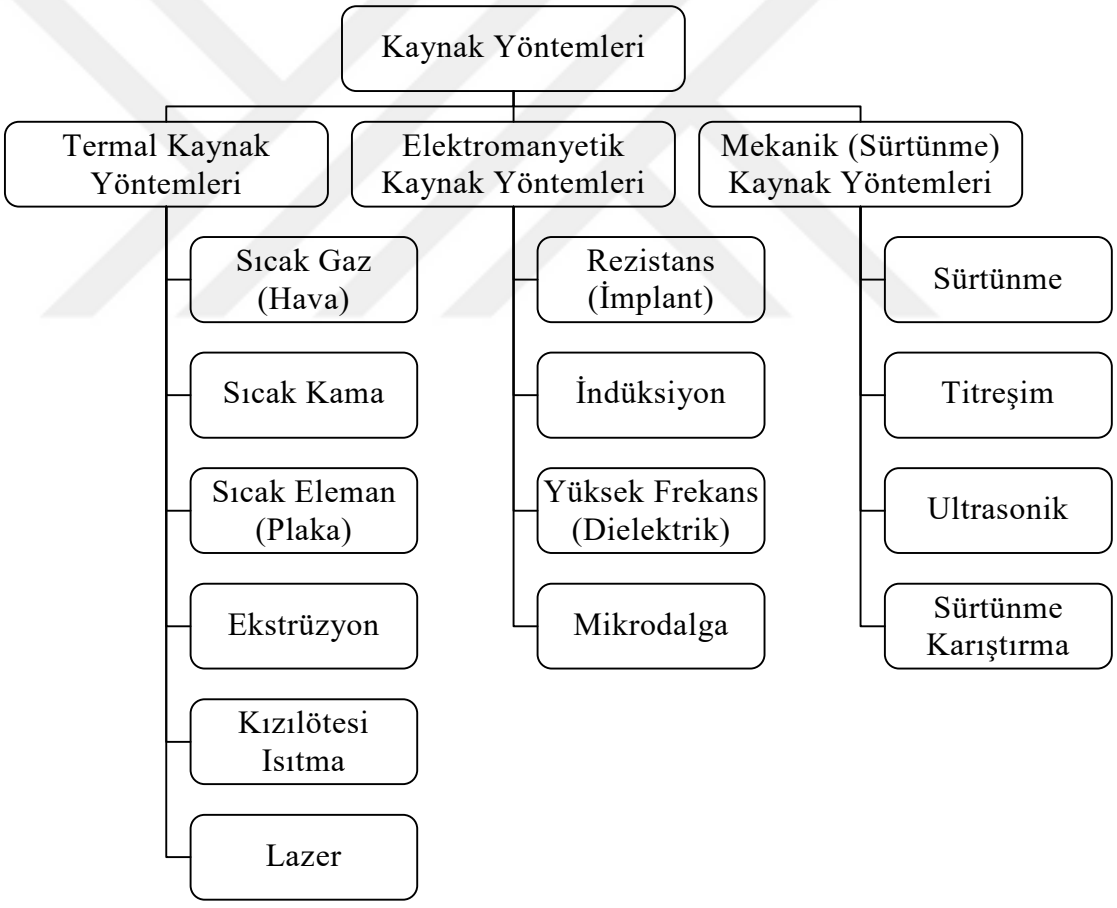
Kaynaklı birleştirmeler günlük hayatımızda her zaman kullandığımız veya karşılaştığımız bir birleştirme türüdür (Bozu, 2007).

Kaynak, birbirinin aynı veya ergime sıcaklıkları yakın olan iki ya da daha fazla metal esaslı veya termoplastik malzemeyi ergitmeli veya ergitmesiz, dolgu malzemesi kullanarak ya da kullanmadan birleştirme işlemidir (Bozu, 2007).

Kaynak yöntemleri, komşu malzeme ile mekanik özellikli yapışkan bir bağlantı oluşturmak için kullanılır. Kaynak esnasında malzemelerin ergimesi ve plastik bölgeden tersinir olarak yeniden katılaşması gerekir. Bundan dolayı plastiklerin kaynağı termoplastikler ile sınırlıdır çünkü sadece bu malzemeler ısı ile yumuşayabilirler. Termoplastikler, yumuşama sıcaklıklarının (Tg) üzerinde bozulmazlar, yanmazlar ve özelliklerini kaybetmezler ve kaynak yapılacak parçaların yüzeyleri ergime sıcaklığı altında ısıtılarak birleşme yüzeylerinin yumuşaması sağlanır. Bu yüzeylerin birbirlerine bastırılması ve sonra da soğutulması ile kaynak işlemi yapılır. Termoset plastikler sertleştikten sonra bir daha ısı ile yumuşamazlar. Termoplastik malzemelerin kaynağı için gerekli olan ısı metaller için gereken ısıdan daha azdır (Anık vd., 2003; Balkan, 1999; Mert, 2010; Strand 2004; Şelale, 2006; Ülker, 2015; Zengin, 2012).

Termoplastik malzemeler özelliklerinden dolayı ısıyı iyi iletmezler fakat ısıdan kolay etkilenirler. Isı iletkenliklerinin düşük olmasından dolayı geniş bölgelerde termal deformasyonlara uğramazlar. Özellikle kalın malzemelere kaynak işlemi uygulanması durumunda, kaynağın daha derine nüfuz etmesi oldukça zordur. Bu durumda kaynak

ısısının, kaynak yapılacak malzemelerin dışında değil, doğrudan doğruya malzemelerin içinde oluşturulması yoluna gidilir. Metallerde olduğu gibi plastiklerde, yeterli bölgesel ısıtma ile birleşim bölgesinin yumuşaması sağlanarak kaynak yapılırlar. Termoplastiklerin kaynağı için birçok kaynak yöntemi geliştirilmiştir. Bu kaynak yöntemleri arasındaki en önemli fark, ısının uygulanış şeklidir. Kaynak için gerekli olan ısı, ısı transfer yoluyla veya malzemenin içerisinde oluşturulmak suretiyle elde edilir. Termoplastiklerin kaynak yöntemleri, ısı transfer yöntemleri (termal yöntemler) ve ısının direkt malzeme içerisinde elde edildiği yöntemler (elektromanyetik yöntemler ve mekanik yöntemler) olmak üzere Şekil 3.6'da gösterilen şekilde sınıflandırılabilir (Akkurt, 2007; Balkan, 1999; Karagöz, 2014; Mert, 2010; Ülker, 2015).



Şekil 3.6. Plastiklerin kaynak yöntemleri (Ülker, 2015).

Plastiklerin az ve basit şekillerde kullanılmalarından dolayı kullanılmaya başlandığı ilk yıllarda plastiklerin kaynak teknikleri üzerinde pek fazla durulmamıştır.

Ancak İkinci Dünya Savaşından sonra plastik ve plastik matrisli kompozitlerin endüstriyel alanlarda kullanılmaya başlanmasından sonra gündeme getirmiştir. Termoplastiklerin ısı ve basınç altındaki davranışları incelenerek bu malzemelerin kaynak özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Termoplastik malzemelerin kaynak yapılabilirliğinin anlaşılmasından sonra birçok kaynak yöntemi üzerinde çalışmalara başlanmış, farklı yöntemler geliştirilmiş ve termoplastiklerin kaynağında başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Karagöz, 2014; Mert, 2010).

İlk olarak PVC üzerinde termoplastiklerin ısı ve basınç altındaki davranışları incelenmiş, bu malzemelerin kaynakla birleştirilebilme özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar, zamanla geliştirilen yeni plastik türleri ve ortaya çıkan ihtiyaçlar doğrultusunda bütün termoplastiklerin kaynak ile birleştirilebilmelerine öncülük etmiştir. Metal kaynağında olduğu gibi, kaynak yöntemine göre ilave malzeme (elektrot) kullanılır veya kullanılmaz. İlave malzeme kullanılan yöntemlerde kaynak ağzı açılmalıdır. Termoplastik malzemelerin kaynağında işlem sırası genel olarak birleştirilecek yüzeylerin yumuşatılması, basınç altında parçaların birleştirilmesi ve sertleşinceye kadar bekletilmesi şeklinde yapılmaktadır (Akkurt, 2007; Anık vd., 2003; Karagöz, 2014).

Termoplastiklerin kaynağında ergime olmadığından tüm bağlantı şekilleri kullanılabilir ve hemen hemen tüm pozisyonlarda başarıyla kaynak yapılabilir. İlave kaynak malzemesi (elektrot) kaynak yapılacak malzemeler ile aynı kompozisyonda olmalıdır. Plastiklerin kaynağında kullanılacak çubuklar yuvarlak, oval, üçgen veya düz şekillere sahip olabilir (Anık vd., 2003).

Termoplastik malzemelerin kaynak işlemlerinin temeli genel olarak şu şekilde açıklanabilir. Birleştirilecek yüzeylerin herhangi bir yöntemle ısıtılıp camsı geçiş sıcaklığının üzerine çıkartılarak yumuşamaları sağlanır. Bu yumuşamış bölgelerde bulunan makro moleküler zincirlerin ısı tesiri ile hareketlilik (Mikro - Brown) kazanmaları sonucunda zincirler arasındaki ikincil bağlarda (Van der Waals) zayıflama meydana gelir. Özellikle amorf yapıya sahip olan sınır yüzeylerdeki serbest ısıl hareketliliğe sahip makro moleküler zincirler, birleştirilecek yüzeylerin temas ettirilmesi ile karşılıklı olarak birbirleri içerisinde akarak karışırlar ve yumak haline gelirler. Kaynak bölgesindeki sıcaklığın biraz daha yükseltilmesi, basıncın arttırılması, bekleme

süresinin uzatılması ve titreşim hareketlerinin uygulanması ile makro moleküler zincirlerin birbirleri içerisindeki akış hızları arttırılabilir. Bu şekilde birleşim ara yüzeyindeki makro moleküler zincirlerin daha fazla karışmaları sağlanabilir. Dış görünüm itibariyle tasarlanan biçimde birleştirmenin sağlanmasından sonra kaynak bölgesi basınç altında ve hareketsiz bir şekilde soğutulur. Birleşim ara yüzeyinde yumak halini almış makro moleküler zincirler, sıcaklığın azalması ile ısıl hareketliliklerini kaybetmeye başlarlar. Aralarındaki mesafenin azalması ile iyice düğümlenirler. Zincirlerin birbirlerine yakınlaşmalarına bağlı olarak, sıcaklığın camsı geçiş sıcaklığının altına düşmesi ile makro moleküler zincirlerin arasında tekrar kurulan ikincil bağlar (Van der Waals), kaynak bölgesini katı hale getirir. Bu şekilde termoplastiklerin kaynağı istenilen sağlamlıkta yapılmış olur (Balkan, 1999; Mert, 2010).

Kaynak kalitesine etki eden faktörler genel olarak, kaynak bölgesinin sıcaklığı, tatbik edilen ısı miktarı, ısıtma süresi ve uygulanan basınç olarak sıralanabilir. Bu faktörler, kaynak yapılacak malzeme cinsine ve kaynak işleminden istenen dayanım özelliklerine göre farklı değerler alırlar. Kaynak için gerekli olan ısı miktarı, plastik malzemenin bileşimi, kalınlığı, ısıtılan alan, ısıtma süresi ve uygulanan basınç gibi bazı faktörlere bağlıdır. Herhangi bir termoplastik malzemenin kaynağında etkili olan faktörlerin (sıcaklık, zaman, basınç vb.) belirlenen değerlerinin altında olduğu zaman kaynak bölgesinde süreksizlikler, üzerinde çalışıldığı zaman ise polimerik zincirlerin parçalanması sonucu malzemenin bozulması ya da kaynak bölgesinde aşırı taşkınlıklar meydana gelebilir. İyi bir kaynak elde edebilmek için sıcaklık, basınç ve zaman gibi kaynak üzerinde etkili olan parametrelerin optimizasyonun çok iyi yapılması gerekir. Malzemenin yapısında bulunabilecek artık monomerler ile bazı plastikleştiriciler, kaynak yapılırken sıcaklığın etkisiyle buharlaşabilmektedir. Bunun önlenmesi çok zor olup, kaynak bölgesinde gaz kabarcıkları meydana getirerek kaynağın görünümünü bozarak dayanımını da düşürmektedir. Ayrıca plastik malzemelerin kaynak uygulamalarında termal bozulmalara (renk değişimleri, polimerik zincirlerin parçalanması, çözünmeler ve özellikle yanıcılığa) dikkat edilmelidir (Balkan, 1999; Mert, 2010).

Termoplastiklerin birleştirilmesinde en güçlü ve en temiz yöntem kaynaktır. Bazı yöntemler ile kaynak dayanımında ana malzemenin dayanımına çok yakın değerler elde edilebilmektedir (Balkan, 1999; Mert, 2010).

Kaynak dikiş kalitesini etkileyen faktörler şunlardır:

- Kaynak yapılacak malzemelerin kaynak edilebilirliği
- Kaynak elektrodu
- Kaynak dikiş formu
- Kaynak parametreleri (sıcaklık, hız, basınç)
- Kaynak pasosunun sayısı (az sayıda kalın paso daha iyidir)
- Yüzey temizliği
- Çentik oluşumu
- Kaynakçı kabiliyeti

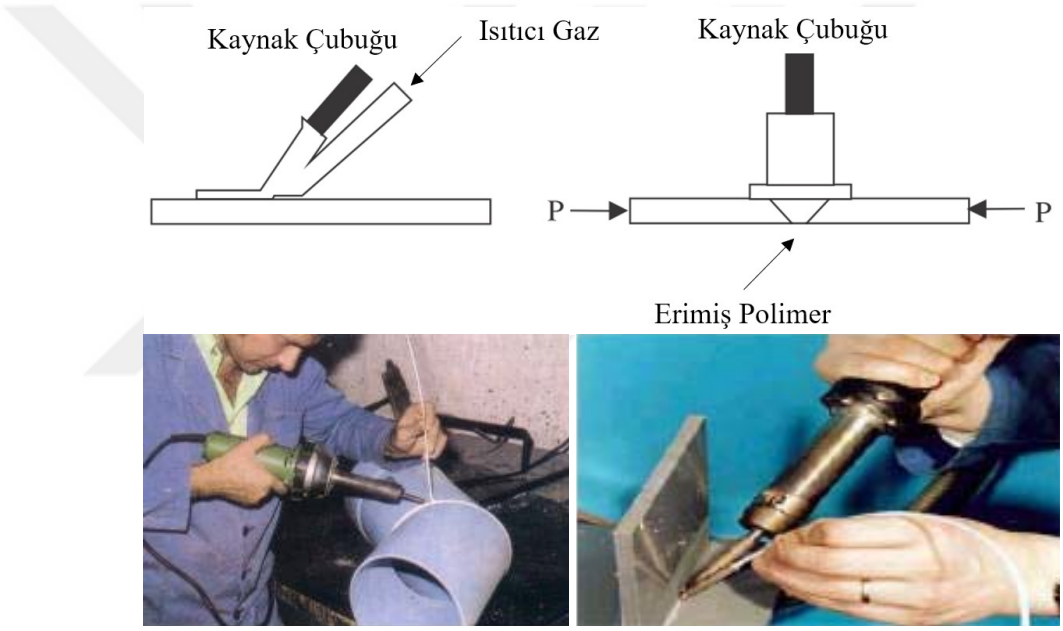
Kaynak kalitesi, kaynak dikişinin parçalara bağlanma derecesiyle ölçülebilir (Anık vd., 2003).

Plastik malzemeler için uygulanabilir bir birleştirme yöntemi olan SKK geliştirirken, bunu mevcut işlemlerle karşılaştırmak önemlidir. Bundan dolayı en yaygın kullanılan kaynak yöntemlerin güçlü ve zayıf yanlarının incelenebilmesi için kısaca bilgiler verilmiştir (Strand, 2004).

3.3.1. Termal Kaynak Yöntemleri

Sıcak gaz kaynağı, kaynak yapılacak yüzeylerin sıcak hava veya asal gaz jetiyle yumuşatılması ve basınç altında birleştirilme işlemidir. Genellikle ısıtma hava ile yapılır, bazı malzemelerde kaynak esnasında meydana gelen oksidasyonu önlemek için nadiren asal gazlar kullanılır. Metallerde kullanılan oksi-asetilen kaynağına benzerlik gösteren bu kaynak yönteminde geleneksel olarak ısıtma için hava kullanıldığından, bu yöntem "sıcak hava kaynağı" olarak da tanımlanır. Bu yöntemde ısı taşıyıcı olarak kullanılan gaz kaynak yapılacak parçaların yüzeyine üflenerek kaynak bölgesinin ısınarak plastikleşmesi sağlanır. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi kaynak torcu (meme)

yardımıyla ısıtıcı gaz gönderilmesi ile ana malzemenin kaynak yapılacak kenarları ve ilave kaynak malzemesi (elektrot) yumuşatılır. Yumuşayan ilave kaynak malzemesi üzerine uygulanan kuvvet sayesinde kaynak işlemi gerçekleştirilir. İlave kaynak malzemesi (sert) veya bant / ip (yumuşak) şeklinde olabilir. İlave kaynak malzemesinin yeterli sıcaklık ve basınçta, uygun kaynak hızı ve kaynak torcu pozisyonunda kaynak ağzı içine bastırılması gerekir. Kalın parçaların kaynağında kaynak ağzını tam olarak doldurmak için metallerdeki gibi birkaç pasolu kaynak yapılabilir (Akkurt, 2007; Anık vd., 2003; Balkan, 1999; Bilici, 2011; Karagöz, 2014; Strand, 2004; Şelale, 2006; Ülker, 2015).

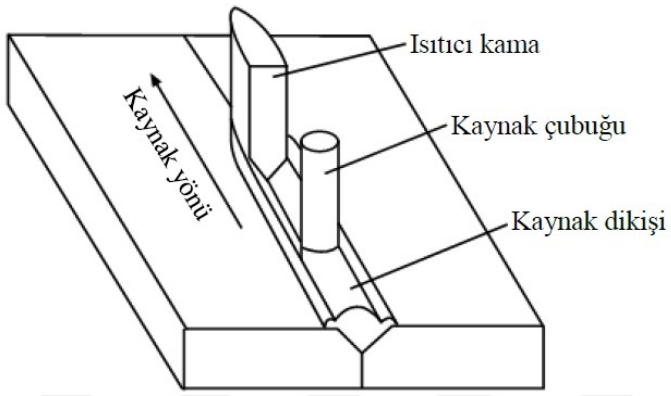


Şekil 3.7. Sıcak gaz kaynağının uygulanışı (Şelale, 2006; Ülker, 2015).

Sıcak gaz kaynağı, ilave kaynak malzemesi kullanılarak ve kullanılmadan yapılabilir. İlave kaynak malzemesi kullanılmadan yapılan kaynaklarda sıcak gaz, kaynak yapılacak yüzeylerin arasına uygulanır. Daha sonra basınç uygulanarak kaynak yapılmış olur (Anık vd., 2003).

Sıcak gaz kaynağının, basit ve geniş kullanım alanına sahip olması önemli bir avantajken, kaynak kalitesinin operatöre bağlı olması ve bazı durumlarda sınırlı kaynak dayanımının olması yöntemin dezavantajı olarak ön plana çıkmaktadır (Akkurt, 2007; Karagöz, 2014; Strand 2004; Şelale, 2006).

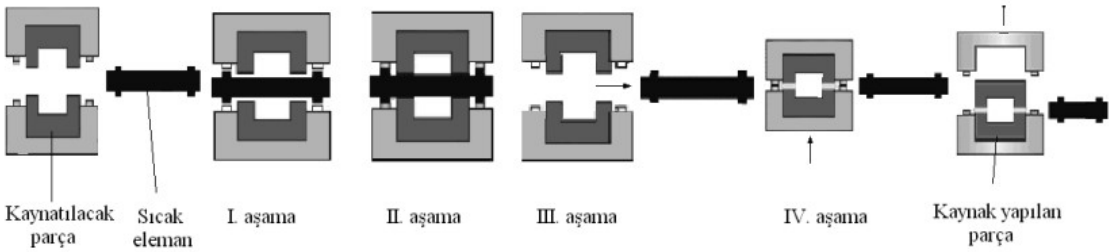
Sıcak kama kaynak yöntemi, sıcak gaz ve sıcak plaka kaynak yöntemlerine benzemektedir. Isıtıcı olarak Şekil 3.8'de görüldüğü gibi kama şeklinde bir eleman kullanılmaktadır. Kaynak hattı boyunca kama şeklindeki ısıtıcı eleman hareket ettirilerek hem kaynak ağzı açılıp hem de birleşim yüzeyleri ısıtılmaktadır. Daha sonra ilave kaynak malzemesi ile kaynak ağzı doldurulur. Kaynak bölgesinin yeterli derinlikte ve uygun olarak ısıtılmaması bu yöntemin diğer yöntemlere göre kullanım alanını kısıtlamıştır (Balkan, 1999; Karagöz, 2014).



Şekil 3.8. Sıcak kama kaynağının uygulanışı (Balkan, 1999; Karagöz, 2014).

Sıcak eleman (plaka) kaynağı, ısı transferine dayanan ve ilave kaynak malzemesi kullanılmadan yapılan bir kaynak yöntemidir. Sıcak plaka kaynağı olarak da bilenen sıcak eleman kaynağı termoplastiklerin birleştirilmesinde kullanılan en eski kaynak yöntemlerinden biridir. Termoplastiklerin kaynak yöntemlerinden biri olan sıcak eleman kaynağında, kaynak yapılacak plastik parçaların birleşme yüzeyleri iletim veya ışınım (radyasyon) yolu ile sıcak bir elaman tarafından ısıtılarak kaynak yapılır (Akkurt, 2007; Anık vd., 2003; Karagöz, 2014; Ülker, 2015).

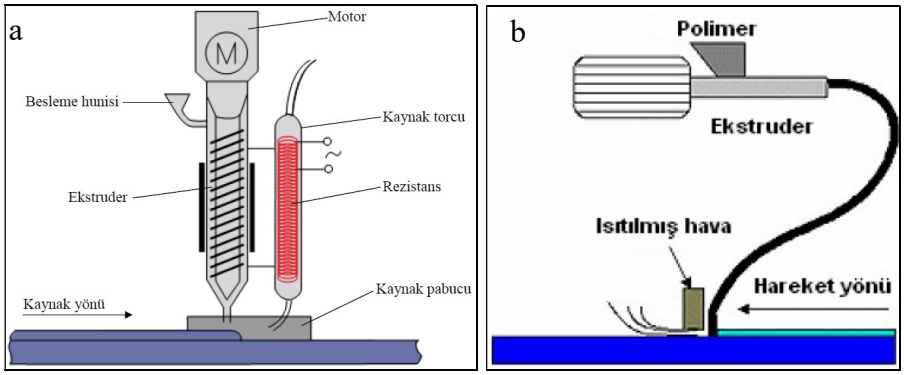
Sıcak eleman kaynağının işlem sırası, Şekil 3.9'da görüldüğü gibi dört aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, kaynak yapılacak yüzeyler sıcak elemanın yüzeylerine temas ettirilerek basınç kuvveti uygulanır. Basınç uygulamasına malzeme yüzeyleri yumuşayıncaya kadar devam edilir. İkinci aşamaya gelindiğinde kuvvet azaltılır ve üçüncü aşamada sıcak eleman kaynak bölgesinden uzaklaştırılır. Dördüncü aşamada ise yumuşamış yüzeyler basınç altında birleştirilir ve bu işleme kaynak bölgesi soğuyuncaya kadar devam edilir (Balkan, 1999; Bilici, 2011; Karagöz, 2014).



Şekil 3.9. Sıcak elaman kaynağının işlem basamakları (Bilici, 2011; Ülker, 2015).

Kaynak kalitesine etki eden parametreler, plaka sıcaklığı, kaynak süresi ve kaynak basıncı (her aşamadaki kaynak basıncının, kaynak işlemine ayrı etkisi vardır) olarak sayılabilir (Anık vd., 2003; Balkan, 1999; Bilici, 2011).

Ekstrüzyon kaynağı, sıcak gaz kaynağından geliştirilmiştir ve uygulama olarak da sıcak gaz kaynağına benzemektedir. Bu yöntemde ısıtma işlemi için ısıtılmış takımlar veya kızılötesi ısıtıcılar kullanılabilir. Sıcak gaz kaynağına göre, hacim olarak daha büyük parçaların kaynağında tercih edilen otomatik veya yarı otomatik kaynak yöntemdir. Sıcak gaz kaynağında olduğu gibi ısıtıcı gaz kullanılarak kaynak bölgesi ısıtılır. Ancak farklı olarak, çubuk şeklindeki ilave kaynak malzemesi yerine küçük bir ekstrüder kullanılır. Kaynak dolgu malzemesi bir ekstrüderden sağlanmaktadır. Sıcak gaz ile kaynak ağzına ön ısıtma işlemi yapıldıktan hemen sonra kaynak dolgu malzemesi, ekstrüder çıkışına monte edilmiş bir pabuç yardımıyla kaynak ağzına enjekte edilir. Ekstrüder üzerine monte edilen pabucun kaynak ağzına uygun olması ve kullanılmadan önce sıcak gaz ile ısıtılması gerekir (Akkurt, 2007; Anık vd., 2003; Balkan, 1999; Bilici, 2011; Karagöz, 2014; Strand, 2004; Şelale, 2006; Ülker, 2015).

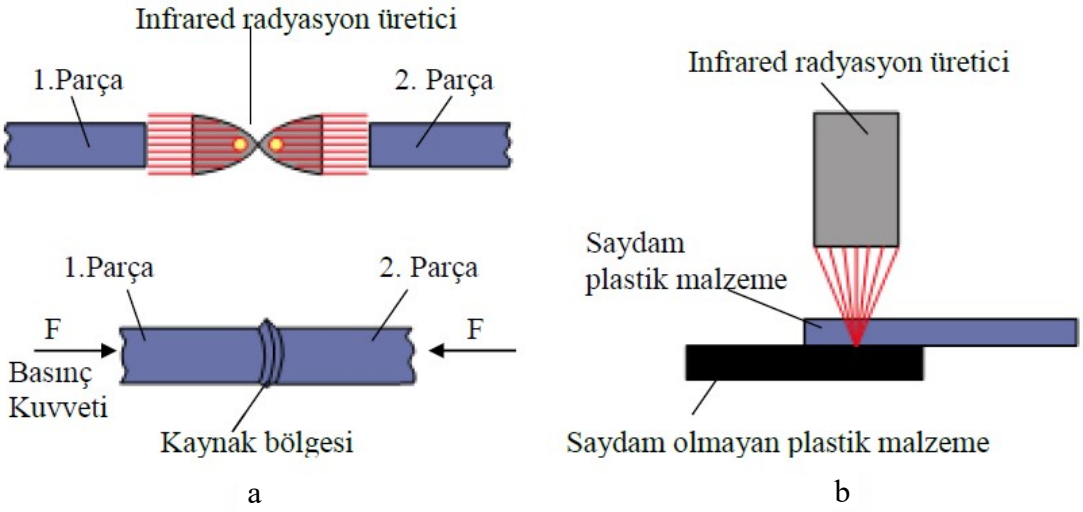


Şekil 3.10. Ekstrüzyon kaynak yöntemleri; a) Hareketli ekstrüder, b) Arabalı ekstrüder (Balkan, 1999; Bilici, 2011; Karagöz, 2014; Şelale, 2006).

Kaynak hattı boyunca hareket edebilen bir araba üzerine ısıtıcı gaz torcu ve ekstrüder dikey olarak yerleştirilir veya ekstrüderden çıkan viskoz haldeki kaynak ilave malzemesi teflon kaplı spiral ısıtıcılı hortumlarla Şekil 3.10'da gösterilen şekilde kaynak bölgesine (kaynak pabucuna) gönderilir (Anık vd., 2003; Balkan, 1999; Bilici, 2011; Ülker, 2015).

Ekstrüzyon kaynak yöntemi özellikle küçük ölçekli kaynaklar için fazla ekonomik değildir. Ancak bu yöntem, kaynak bölgesinde daha yüksek dayanım değerlerinin elde edilmesi ve termal deformasyonların oldukça düşük olmasından dolayı tercih edilmektedir (Anık vd., 2003; Balkan, 1999; Bilici, 2011; Ülker, 2015).

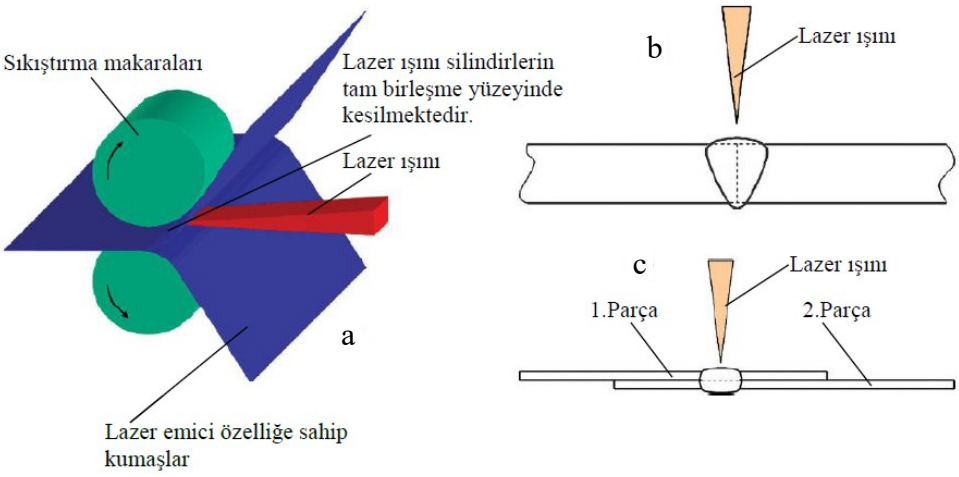
Kızılötesi ısıtma (infrared) kaynağı, ısıtıcı cihazların kaynak bölgesine yeterince yaklaşamadığı durumlar için sıcak elaman kaynağına alternatif bir yöntem olarak temassız bir ısı kaynağı şeklinde ki kızılötesi radyasyonu plastiklerin kaynağında kullanılmaktadır. Kuvars ısı lambalarından elde edilen, dalga boyu yaklaşık 1 μ olan yüksek yoğunluklu kızılötesi radyasyon kaynak bölgesine uygulanır. Birleştirme yüzeylerine çarpan ışınların soğurulması ile kaynak için gerekli olan ısı elde edilir, yüzeylerin uygun derinlikte homojen olarak yumuşaması veya ergimesi sağlanır daha sonra birleştirme yüzeyleri sıcak eleman kaynağında olduğu gibi birbirine bastırılır. Kızılötesi ısıtma kaynak yöntemi Şekil 3.11'de şematik olarak gösterilmiştir (Anık vd., 2003; Balkan, 1999; Karagöz, 2014; Şelale, 2006).



Şekil 3.11. Kızılötesi ısıtma kaynak yönteminin şematik gösterimi; a) Alın (küt) kaynağı, b) Bindirme kaynağı (Karagöz, 2014; Şelale, 2006).

Sıcak gaz kaynağında olduğu gibi kaynak bölgesine oksitleyiciler ve nem taşınmaz. Kullanılan teçhizat hafiftir. Kullanılan teçhizatın ve işlemin maliyeti oldukça düşüktür, kısa sürede sağlam kaynaklar yapılabilir (Karagöz, 2014; Şelale, 2006).

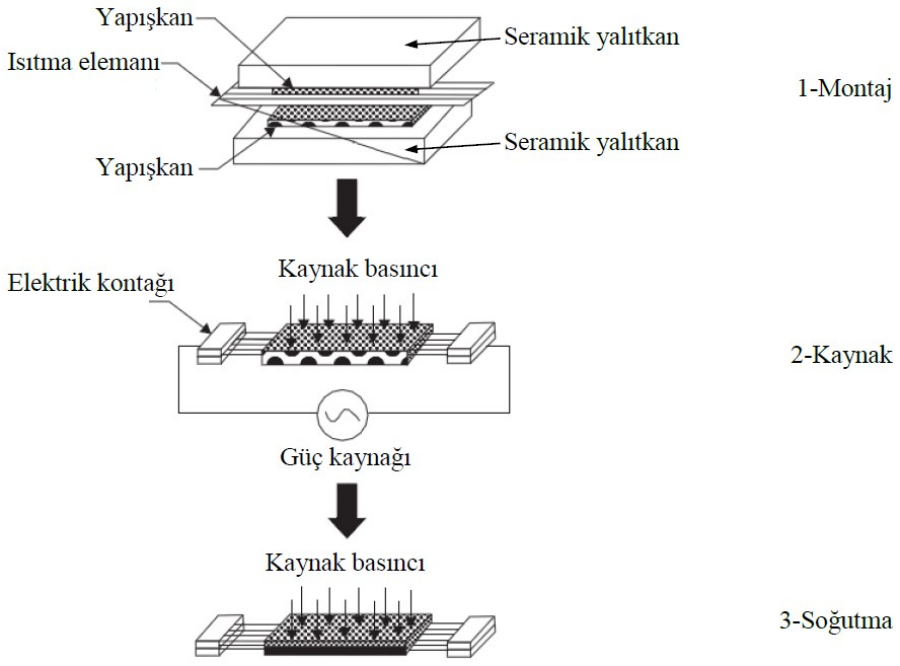
Lazer kaynağı, plastik malzemelerin lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ilk olarak 1970'li yıllarda gerçekleştirilmiştir. Ambalaj sektöründe olduğu gibi diğer endüstri dallarında da plastik malzemelerin giderek yaygınlaşması, bu malzemelerin kısa sürede yapılmasını sağlayan yöntemlere olan ilgiyi arttırmıştır. Yakın temas ısıtıcı cihazların kullanılması uygun olmayan hassas ve çok küçük boyutlardaki kaynaklar için bu yöntem tercih edilmektedir. Plastiklerin kaynağında, CO_2, Nd-YAG ve Diyot gibi birçok lazer çeşidi kullanılmaktadır. 40 W gücündeki (λ=10,6) lazer cihazından sağlanan ve uzunluğu 800 - 1100 μ arasında olan lazer ışını kaynak bölgesine gönderilir. Moleküller üzerinde yankı frekansı oluşmasını sağlayan ışın kaynak bölgesini ısıtarak yumuşatır. Lazer kaynağı, plastik malzemelerin ergime sıcaklığının üstünde ve termal bozunma sıcaklığının altında bir sıcaklık değerinde yapılır. Lazer kaynak yöntemi Şekil 3.12'de şematik olarak gösterilmiştir (Balkan, 1999; Bilici, 2011; Karagöz, 2014; Şelale, 2006; Ülker, 2015).



Şekil 3.12. Lazer kaynak yönteminin şematik gösterimi; a) Silindirler arası film kaynağı, b) Alın (küt) kaynağı, c) Bindirme kaynağı (Karagöz, 2014; Ülker, 2015).

3.3.2. Elektromanyetik Kaynak Yöntemleri

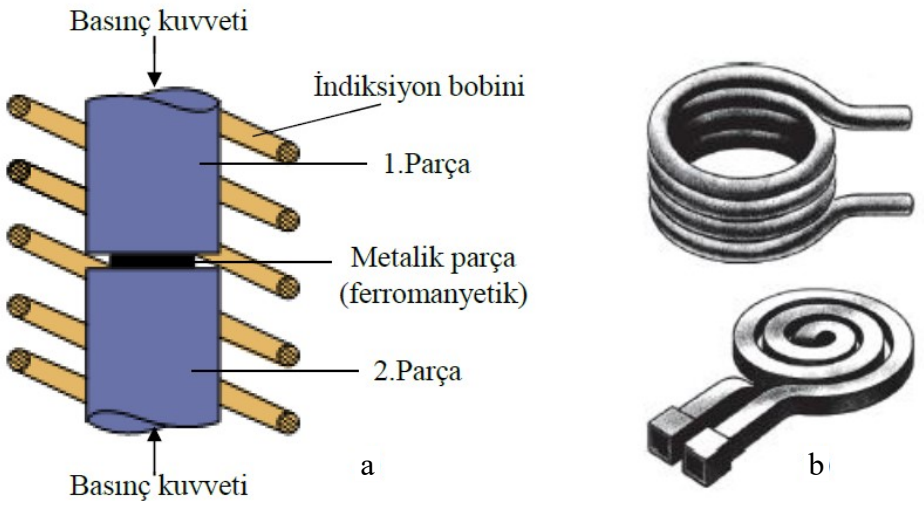
Rezistans (implant) kaynağı, sürekli karbon elyaflar ile takviye edilmiş yüksek performanslı plastikler için geliştirilmiş bir tekniktir. İmplant veya elektro-füzyon kaynak yöntemi olarak da adlandırılan bu kaynak yönteminde, kaynak yapılacak plastiklerin birleşme yüzeyleri arasına yerleştirilen metalik tellerden elektrik akımı geçirilerek kaynak bölgesi ısıtılır. Kaynak bölgesinin yumuşayarak birleştirilmesi esnasında ısıtıcı teller kaynak bölgesi içerisinde kalmaktadır. Bu durum, kaynak dayanımını etkilemekte ve üretim maliyetini arttırmaktadır. Kullanılan telin kaynak bölgesinde zamanla korozyona uğrayarak kaynak dayanımını düşürmesini engellemek için Cr-Ni teller kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan metalik teller kaynak bölgesinde bırakılarak ekstra dayanım sağlanabilmektedir. Yöntem oldukça basit olup, büyük ve karmaşık şekillere sahip, kapalı devre içermeyen parçaların kaynağı için oldukça uygundur. Kaynak işlemi çok kısa sürede yapılabilmektedir. Büyük parçaların kaynağı bile 30 saniyeden daha az sürede yapılabilmektedir. Bu kaynak yönteminde etkili olan parametreler; voltaj, kaynak bölgesindeki tel uzunluğu, tel direnci, basınç kuvveti ve kaynak işlem süresi olarak sayılabilir (Anık vd., 2003; Balkan, 1999; Bilici, 2011; Karagöz, 2014; Şelale, 2006; Ülker, 2015).



Şekil 3.13. Rezistans kaynak yönteminin şematik gösterimi (Karagöz, 2014).

Rezistans kaynağı, Şekil 3.13'de gösterilen şekilde kaynak üç aşamada yapılmaktadır. İlk aşamada kaynak yapılacak plastiklerin birleşme yüzeyleri arasına Cr-Ni alaşımlı metal teller yerleştirilir. İkinci aşamada tellerden elektrik akımı geçirilmesiyle kaynak bölgesi ısıtılır ve parçalara baskı uygulanır. Son aşama olarak ısı etkisiyle ergiyen plastiğin soğutulmasıyla kaynak işlemi tamamlanır (Akkurt, 2007; Karagöz, 2014; Şelale, 2006).

İndüksiyon kaynağı, birleştirilecek yüzeylerin arasına konulan bir metalin, Şekil 3.14'deki gibi indüksiyon bobini yardımıyla 1 - 5 kW arasındaki yüksek frekanslı elektrik akımı ile oluşturulan 200 - 500 kHz'lik bir manyetik alanın etkisi ile ısıtılarak kaynak bölgesinin yumuşatılmasıyla yapılır. Kaynak bölgesinde yeterli sıcaklık elde edildiğinde elektrik akımı kesilir. Kaynak yapılacak malzemeler ısıtılan metal parça kaynak bölgesinde kalacak şekilde 0,7 MPa basınç altında 3 - 30 saniye arasında birbirine bastırılarak kaynak işlemi gerçekleştirilir (Balkan, 1999; Bilici, 2011; Karagöz, 2014; Ülker, 2015).

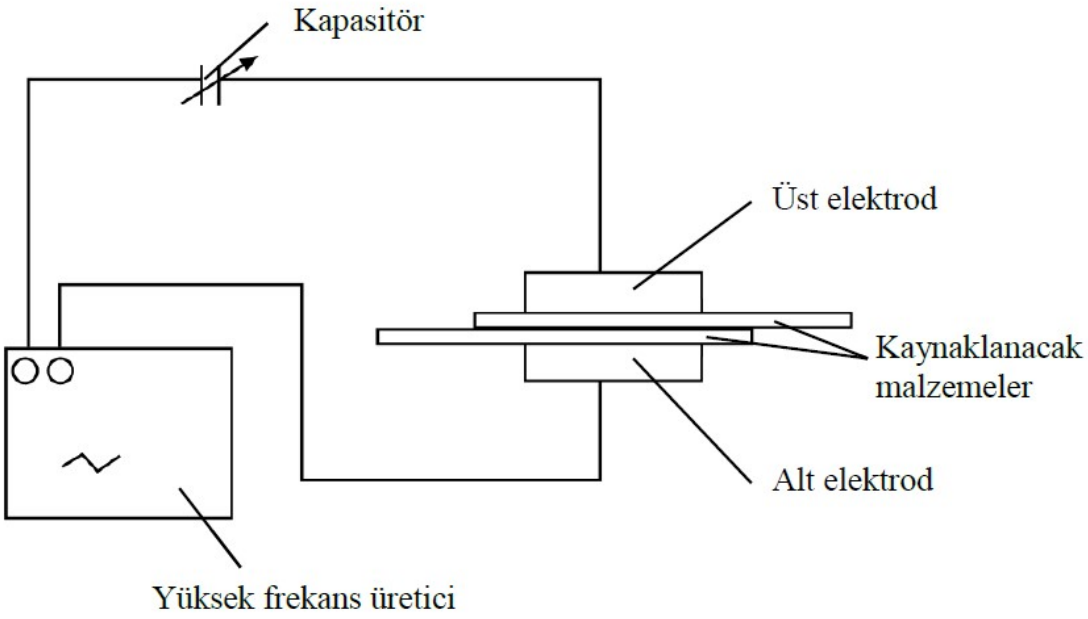


Şekil 3.14. İndüksiyon kaynağı; a) İndüksiyon kaynağının şematik gösterimi, b) İndüksiyon kaynak bobinleri (Karagöz, 2014).

PE ve PMMA'da %50 kaynak dayanım oranlarına ulaşılabilmektedir. Bu kaynak yönteminde etkili olan parametreler; indüksiyon bobinin şekli, akım şiddeti, frekans, basınç kuvveti ve kaynak çevrim süresi olarak sıralanabilir (Balkan, 1999; Bilici, 2011; Ülker, 2015).

Yüksek frekans kaynağı, büyük çaplı üretimlerde ve direk ısıtmanın kullanılamayacağı durumlarda uygulanan ve radyo frekans veya dielektrik kaynağı olarak da adlandırılan bir kaynak yöntemidir (Akkurt, 2007; Balkan, 1999; Karagöz, 2014).

Yüksek frekans kaynak yönteminde ilk olarak iki metal plaka (elektrot) arasına sıkıştırılan plastik levhaların (filmlerin) içerisinde yüksek frekans alanı oluşturulmaktadır. Oluşturulan yüksek frekans enerjisinin etkisi ile kaynak bölgesinde meydana gelen moleküler ısı ve titreşim hareketleri sonucunda birleştirme yüzeyleri ısınarak yumuşamaktadır. Yumuşayan kaynak yüzeyleri birbirine bastırılır ve elektromanyetik alan kesilir. Parçaların soğuması ve katılaşması ile kaynak yapılmış olur. Yüksek frekans kaynağı Şekil 3.15'de şematik olarak gösterilmiştir (Anık vd., 2003; Balkan, 1999; Karagöz, 2014; Şelale, 2006; Ülker, 2015).



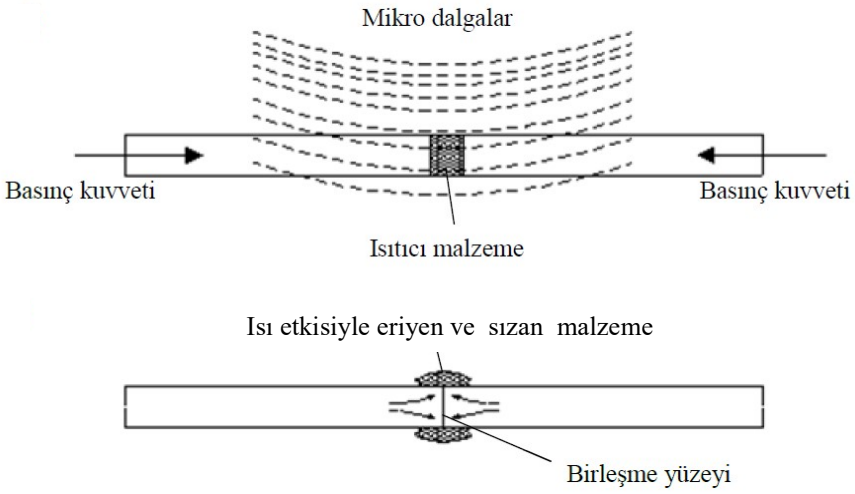
Şekil 3.15. Yüksek frekans kaynağının şematik gösterimi (Karagöz, 2014).

Yüksek frekans etkisi ile meydana gelen ısı malzemenin dielektrik özelliklerine bağlıdır. Dielektrik kayıp faktörü malzemenin polaritesini gösteren bir büyüklüktür. Bir malzemenin kayıp faktör değeri, plastik malzemenin yüksek frekans kaynağına uygun olup olmadığının göstergesidir. Yüksek frekans kaynağı; PVC, PA ve poliüretan gibi kuvvetli dielektrik kayıpları yüksek olan plastiklerin kaynağında kullanışlıdır. PE, PS ve

PTFE gibi kutupsal (polarize) olmayan plastikler için uygun değildir (Anık vd., 2003; Balkan, 1999; Karagöz, 2014; Şelale, 2006; Ülker, 2015).

Mikrodalga kaynağı, geliştirilmekte olan bir teknolojidir. İndüksiyon ve yüksek frekans kaynaklarından daha yüksek frekansta çalışırlar. Yöntem olarak dielektrik kaynağına benzemektedir. Yüksek frekans kaynağına benzer şekilde, dipoller ile etkileşimden dolayı ısı meydana gelir ve bu ısı sayesinde kaynak işlemi gerçekleştirilir. Kaynak yapılacak plastik malzemeler arasına elektromanyetik enerji soğurabilme özelliğine sahip bir malzeme olan HDPE yerleştirilir ve basınç altında yaklaşık 70 MHz - 100 GHz frekansta mikrodalgalar kullanılarak kaynak işlemi yapılır. Kaynak yapılacak yüzeyler arasında bulunan malzeme sayesinde yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar ısı enerjisine dönüştürülür. Isınarak ergiyen ara malzeme, uygulanan basıncın etkisiyle kaynak ara yüzeylerinden sızarak atılır. Bu ara malzemenin kaynak bölgesinde oluşturduğu sıcaklık artışı ile yumuşayan kaynak yüzeyleri, uygulanan basıncın etkisi ile birbirleri ile temas eder ve kaynak bölgesinin soğutulması ile de kaynak yapılmış olur. Mikrodalga kaynağı Şekil 3.16'da şematik olarak gösterilmiştir (Anık vd., 2003; Balkan, 1999; Bilici, 2011; Karagöz, 2014; Şelale, 2006; Ülker, 2015).

Mikrodalga kaynak yönteminde etkili parametreler; güç, ısıtma süresi, kaynak basıncı, ara malzeme kompozisyonu, yer değişimi ve kaynak süresi olarak sıralanabilir (Balkan, 1999; Bilici, 2011; Ülker, 2015).



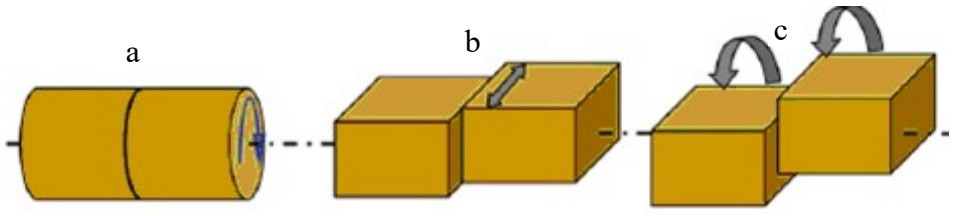
Şekil 3.16. Mikrodalga kaynağının şematik gösterimi (Karagöz, 2014).

3.3.3. Mekanik (Sürtünme) Kaynak Yöntemleri

Plastiklerin ısı iletim katsayılarının düşük olmasından dolayı özellikle kalın kesitli plastiklerde dışarıdan ısı uygulanarak kaynak bölgesinin tamamının ısıtılması mümkün olmamaktadır. Bu durumlarda ısının doğrudan malzemenin içinde oluşturulması istenir. Bundan dolayı sürtünme esasına dayanan değişik sürtünme kaynak yöntemleri geliştirilmiştir. Mekanik kaynak yöntemleri; sürtünme (döndürme), titreşim (lineer sürtünme), ultrasonik ve sürtünme karıştırma kaynağı olmak üzere 4 gruba ayrılır (Bilici, 2011; Ülker, 2015).

Sürtünme (döndürme) kaynağı, özel kaynak teknikleri arasında yer alan ve 1950'den sonra imalatta hızı bir şekilde yerini alan sürtünme diğer adıyla döndürme kaynağı, diğer kaynak tekniklerine göre sanayide önemli bir yere sahiptir. Sürtünme kaynağı, elektrik enerjisi veya diğer enerji kaynakları kullanılmadan, kaynak yapılacak parçaların birleşme yüzeyleri arasında mekanik olarak oluşturulan sürtünmeyle elde edilen ısıdan faydalanılarak yapılan katı hal kaynak yöntemidir (Akata, Şahin & İpekçi, 2003).

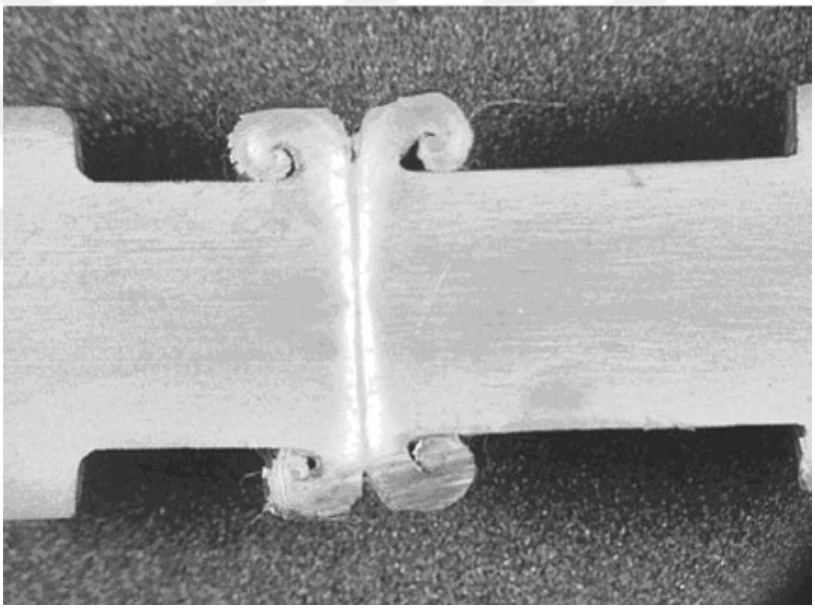
Sürtünme kaynağı (SK) (Friction Welding - FW) birçok endüstri alanında ekonomik olarak kullanılan bir kaynak yöntemidir. Kaynak yapılacak parçalarda ısı oluşturmak için yaygın olarak kullanılan dönel, lineer ve yörüngesel olmak üzere üç çeşit sürtünme hareketi vardır. Bu sürtünme hareketleri Şekil 3.17'de şematik olarak gösterilmiştir (Bilici, 2011; Ülker, 2015).



Şekil 3.17. Yaygın olarak kullanılan sürtünme hareketleri; a) Dönel sürtünme, b) Lineer sürtünme, c) Yörüngesel sürtünme (Bilici, 2011; Şahin, 2001).

Bu yöntem genel olarak dairesel kesitli çubuklara ve borulara uygulanmaktadır. Kaynak yapılacak parçalardan biri dönebilen çeneye bağlanır. Diğer parça ise ileri geri hareket edebilen çeneye bağlanır. Dönen çenedeki parça belli bir devir sayısında

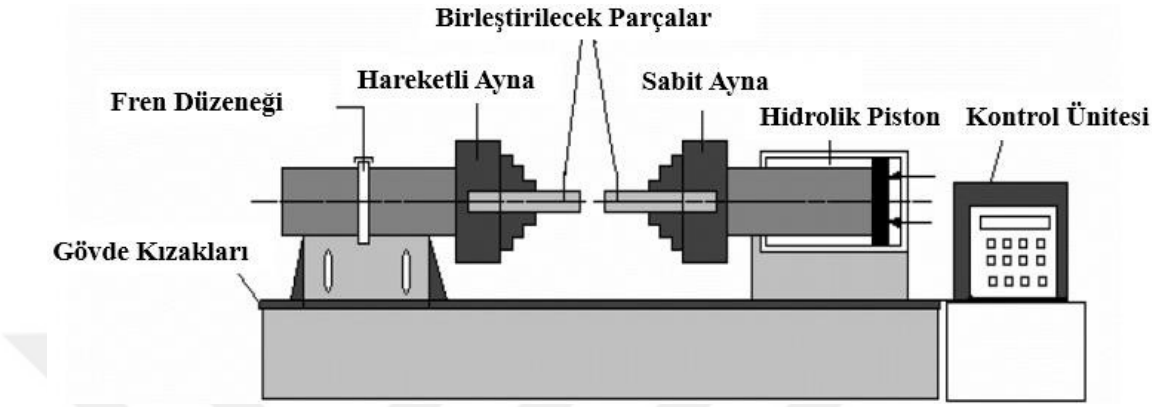
döndürülerek hareketli çenedeki parça belli bir basma gerilmesi oluşturacak bir kuvvet ile dönen parçaya doğru bastırılır. Kaynak parçalarının yüzeylerinde sürtünme ile ısı oluşur ve kaynak parçalarının temas yüzeyleri ısınır. Dönme süresine bağlı olarak parçaların sıcaklığı artar. Kaynak yapılan parçaların temas yüzeylerinde sıcaklık hiçbir zaman malzemenin ergime sıcaklığına ulaşmaz. Kaynak yapılan parçalarda yeterli ısı girdisi meydana gelince dönme hareketi durdurularak basma gerilmesi arttırılır. Bu aşamaya kaynağın dövme aşaması denir. Dövme aşamasında sıcak malzemelerin dayanımları çok düşmüştür. Yüksek dövme basıncı ile parçaların birbirine katı halde birleşmesi sağlanır. Kaynak yapılırken kaynak bölgesinde bir miktar metal fışkırmasının oluştuğu Şekil 3.18'de görülmektedir (Akata & Şahin, 2003; Bilici, 2011; Şahin, 2005).



Şekil 3.18. Sürtünme kaynağı yapılan parçaların kaynak bölgesinde oluşan metal fışkırması (Bilici, 2011; Şahin, 2005).

Sürtünme kaynağında parametrelerin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Optimum kaynak parametreleri kullanılarak kaliteli kaynaklar elde edilebilir. Bu kaynak yöntemine etki eden parametrelerden en önemlilerinin; sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığma süresi, yığma basıncı ve devir sayısı olduğu bilinmektedir. Parçalara kaynak yapılmadan önce parçaların birleşme ara yüzeylerindeki yağ ve oksitlerin temizlenmesi kaynak kalitesini iyi yönde etkilemektedir (Akata vd., 2003; Şelale, 2006; Ülker, 2015).

Sürtünme kaynak tekniği, klasik (sürekli tahrikli) sürtünme kaynağı ve volanlı (atalet) sürtünme kaynağı olmak üzere iki gruba ayrılır. Klasik sürtünme kaynağı Şekil 3.19'da şematik olarak gösterilmiştir (Akata vd., 2003; Şahin, 2001).

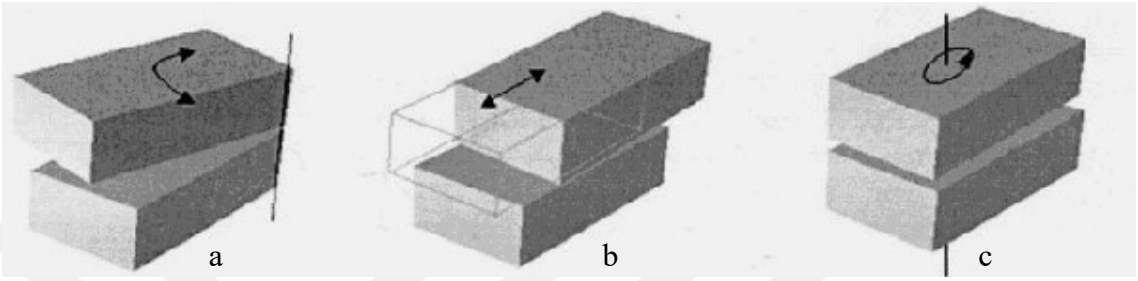


Şekil 3.19. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağının şematik gösterimi (Ülker, 2015).

Plastiklerin sürtünme kaynağı metallere uygulanan ile aynı prensip üzerine kurulu olan bir yöntemdir. Plastiklerde bu yöntem ile yapılan kaynakların dayanımı, ana malzemenin dayanımının %90'ı kadar olabilir. Kaynak süresi 1 ile 5 saniye arasındadır (Karagöz, 2014; Şelale, 2006).

Titreşim kaynağı, aynı zamanda doğrusal (lineer) sürtünme ve vibrasyon kaynağı olarak ta adlandırılır. Bu kaynak yönteminde iki plastik parçanın basınç altında, uygun frekans ve genlikte, plastiklerin yumuşayarak kaynak için yeterli ısı elde edilene kadar sürtünmesi gerekir. Titreşim durdurulduktan sonra paçalar hizaya getirilerek soğumaya bırakılır ve böylece kaynak yapılmış olur. Bu kaynak yöntemi sürtünme (döndürme) kaynağına çok benzemektedir. Aralarındaki tek fark hareketin dönel değil doğrusal olmasıdır. Uygulama oldukça hızlıdır, titreşim 80 – 300 Hz frekans aralığında ve genlik 0,25 - 5 mm arasında uygulanabilmektedir. 5 mm genlik ve 100 Hz frekans değerlerinde yapılan bir uygulamada toplam bağıl hareket yaklaşık olarak saniyede 2 metreye eşit olabilmektedir. Titreşim kaynağı, Şekil 3.20'de gösterilen şekilde uygulamada sadece doğrusal olarak değil bunun haricinde açısal ve orbital (kendi ekseni etrafında dönen) olarak ta yapılabilir (Anık vd., 2003; Balkan, 1999; Bilici, 2011; Karagöz, 2014; Şelale, 2006; Ülker, 2015).

Kaynak işlemi genellikle 1 - 10 saniye içerisinde yapılabilmektedir. Büyük geometrik parçaların bile kaynağı 10 saniyeden kısa bir sürede yapılabilmektedir. Makinelerdeki titreşim hareketleri, elektromanyetik veya kütle sistemi ile sağlanmaktadır. Bu nedenle titreşim genliğinin değiştirilmesi titreşim kütlesine bağlı olarak yapılmaktadır (Balkan, 1999; Ülker, 2015).

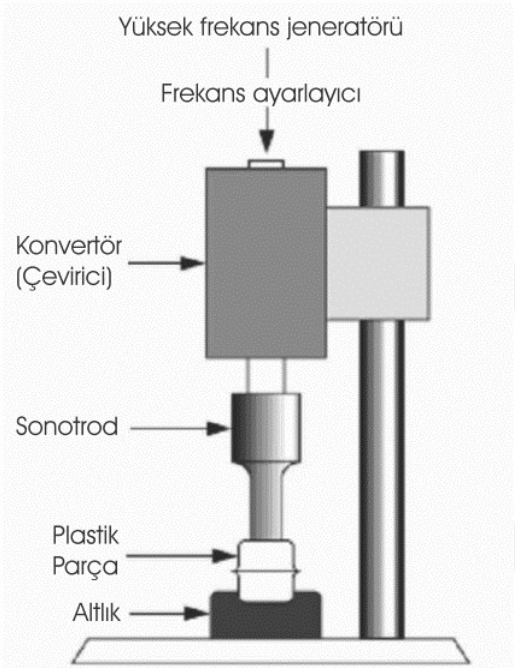


Şekil 3.20. Farklı şekillerde uygulanan titreşim hareketleri; a) Açısal titreşim, b) Doğrusal titreşim, c) Orbital titreşim (Bilici, 2011; Şelale, 2006).

Titreşim kaynağı, dört aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada, titreşim hareketi ile malzemelerin ara yüzeylerinde ısı oluşturularak malzemelerin viskoz akış sıcaklığına gelmesi sağlanır. İkinci aşamada, ara yüzeylerin iyice yumuşamasıyla kaynak nüfuziyeti oluşmaya başlar. Üçüncü aşamada, yumuşama, akış düzenlidir ve nüfuziyet kaynak süresi ile doğru orantılı olarak artar. Son aşamada, kaynak makinesi kapatılır ancak kaynak bölgesine basınç uygulanmaya devam edildiğinden kaynak nüfuziyeti azalarak devam eder (Balkan, 1999; Karagöz, 2014).

Ultrasonik kaynak, esas itibari ile sürtünme kaynağının bir çeşidi olup, en sık ve en yaygın kullanılan yöntemlerdendir. Bu yönteminin temeli düşük frekanslı elektrik enerjisinin yüksek frekanslı mekanik enerjiye (mekanik titreşimlere) dönüştürülmesine dayanmaktadır. Mekanik titreşimler özel bir düzenekle kaynak yapılacak plastik parçalara uygulanır. Mekanik titreşimler plastik malzemelerin kaynak bölgesinde kuvvetli bir iç sürtünmeyi (moleküller arası), dolayısıyla ani bir ısı artışını ve birleşme bölgesindeki malzemenin yumuşayarak ergimesini sağlar. Kısa sürede oluşan ergimeden sonra basınç uygulanarak plastik parçaların soğutulmasıyla kaynak yapılmış olur. Bu işlem için genellikle küçük genlikli (10 - 250 μ) ve yüksek frekanslı (10 - 70 kHz) ultrasonik titreşim enerjisi kullanılmaktadır. Kaynak esnasında parçalardan biri sabit tutulur, diğer parçaya ise temas yüzeyine dik olarak sinüzoidal şeklinde değişen

ultrasonik titreşimler verilir. Yöntem oldukça hızlı (1 - 2 saniye) bir yöntemdir ve diğer kaynak yöntemlerine nazaran parlak ışıklar çıkarmadan kaynaklar yapılabilir. Ultrasonik kaynak makinesi Şekil 3.21'de şematik olarak gösterilmiştir (Anık vd., 2003; Karagöz, 2014; Strand, 2004; Şelale, 2006; Ülker, 2015).



Şekil 3.21. Ultrasonik kaynak makinesinin şematik gösterimi (Ülker, 2015).

Bu yöntem ile yapılan kaynakların dayanımı ana malzeme dayanımının %70 - 80'i arasındadır. Kaynak birleşim yüzeylerinin durumu, kaynak dayanımı üzerinde oldukça etkilidir. Birleşim yüzeylerinde bulunan yağ, boya ve zayıf kaplamalar kaynak dayanımını oldukça düşürmektedir. Birleşim yüzeylerinde enerji direktörü olarak isimlendirilen küçük çıkıntıların bulundurulmasıyla ultrasonik enerjinin daha küçük alanlarda yoğunlaşması ve kaynak bölgesinin kısa zamanda ısınarak yumuşaması sağlanmış olur (Balkan, 1999; Bilici, 2011; Karagöz, 2014).

Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanması oldukça basittir. Kaynak yapılmak üzere sabitlenmiş parçaların kaynak bölgesine sabit bir devir sayısında karıştırıcı takım daldırılır ve kaynak süresince sabit bir hızda ilerletilir. Kaynak yapılacak parçalar ve karıştırıcı takım arasında oluşan sürtünmeyle kaynak için gerekli olan ısı elde edilir ve bu ısı sayesinde malzeme yumuşar. Karıştırıcı takımının alın yüzeyi (omuz) ve takım

ucu tarafından karıştırılarak arka tarafa taşınan malzemeye baskı uygulanarak kaynak gerçekleştirilir (Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014). Sürtünme karıştırma kaynağı, bu tez çalışmasının konusu olduğundan ileriki bölümlerde daha detaylı bilgiler verilmiştir.

BÖLÜM 4

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

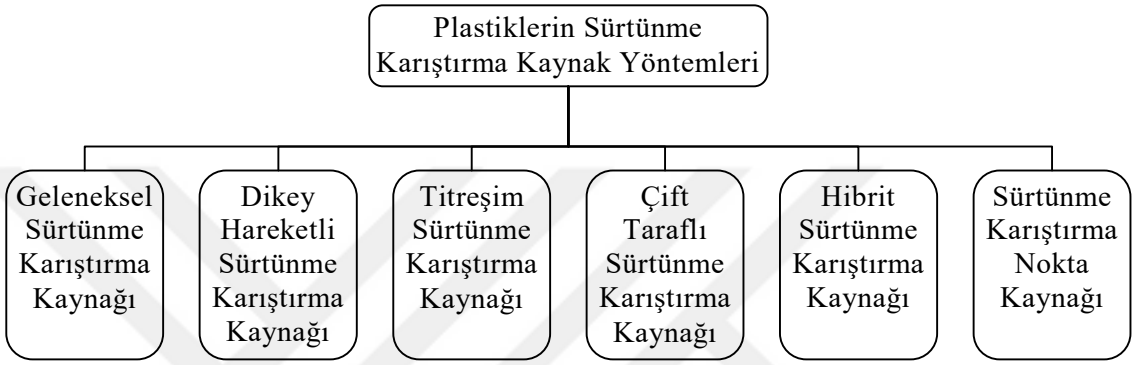
Mühendislik plastiklerinin artan dinamik gelişimi ile eş zamanlı olarak, hızlı, güvenilir ve yüksek verimli kaynak yöntemlerine (metallerde kullanılanlara benzer) olan talep de artmaktadır. Kaynak teknolojileri sadece üretim esnasında değil, onarım veya geri dönüşüm sırasında da kullanıldığı için yeni, ekonomik, çevre dostu teknikler geliştirilmektedir (Kiss & Czigány, 2007).

Plastiklerin kaynağında kullanılan kaynak teknikleri, metallerde kullanılan kaynak teknikleriyle benzerlik göstermektedir. Metal ve plastiklerin özellikleri birbirinden çok farklı olduğundan metallerde kullanılan bir kaynak tekniğinin plastiklerde de kullanılabilmesi için çok fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Metal kaynak tekniklerinden olan SKK, ilk zamanlarda alüminyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılmak üzere geliştirilerek patenti alınan, plastik esaslı malzemelerde de kullanılmasıyla ilgili üzerinde çalışmalar yapılmakta olan bir kaynak tekniğidir (Karagöz & Öksüz, 2018; Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014).

SKK'nın geliştirilmesine, sürtünme kaynağının termomekanik prensibi önemli bir temel oluşturmuştur (Ülker, 2015).

Sürtünme karıştırma kaynağı, ilk kez 1991 yılında İngiltere'nin Cambridge şehrinde İngiliz Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından alüminyum ve alaşımlarında başarılı bir şekilde uygulanan nispeten yeni bir birleştirme tekniğidir. Plastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı konusunda ilk araştırmalar Brigham Young Üniversitesi ve TWI'da 1998 yılında başlanmış ve önemli gelişmeler kaydedilmiştir (Hasçalık vd., 2007; Karagöz, 2014; Mert, 2010; Strand, 2004; Şelale, 2006; Zengin, 2012).

SKK'nın nispeten yeni bir kaynak tekniği olmasına rağmen, son yıllarda yapılan yoğun araştırmaların sayesinde bu yöntemle ilgili hızlı bir ilerleme süreci yaşanmıştır. Bu ilerleme, uygulamanın güç olduğu durumlar ve ihtiyaçların yönlendirmesiyle yeni SKK tekniklerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Bu tekniklerin de bir çeşit SKK türü olduğu kabul edilerek yöntem Şekil 4.1'de gösterilen şekilde altı gruba ayrılabilir (İpekoğlu, 2011; Ülker, 2015).



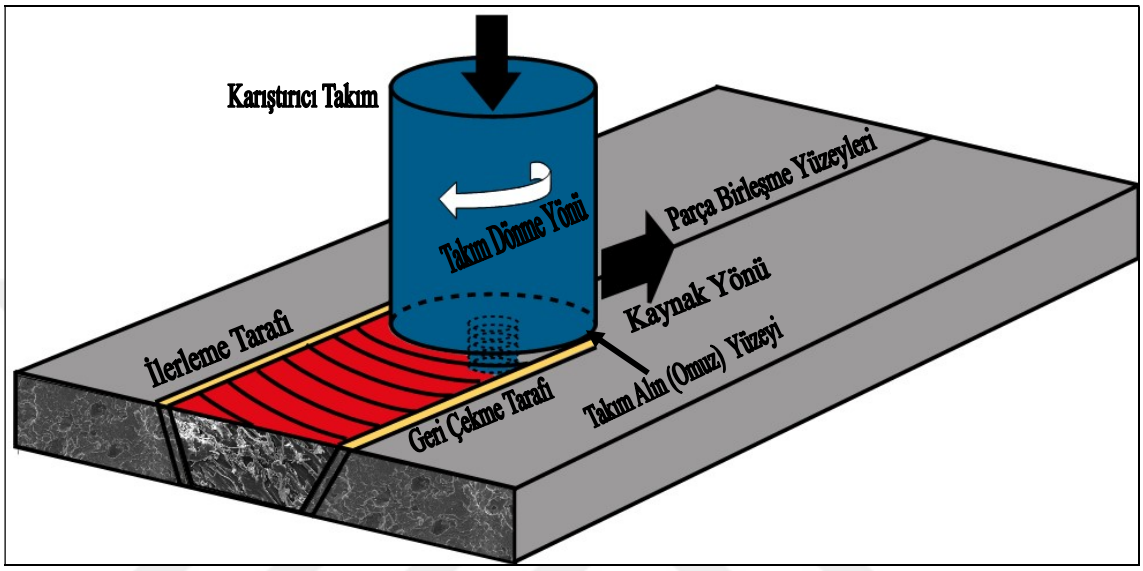
Şekil 4.1. Sürtünme karıştırma kaynak yöntemleri.

4.1. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağı

SKK yönteminin uygulanması Şekil 4.2'de de görüleceği üzere oldukça basittir. Kaynak yapılamak için sabitlenmiş parçaların kaynak bölgesine sabit devirde dönen takımın ucu daldırılır ve kaynak hattı boyunca sabit bir ilerleme hızıyla hareket ettirilir. Kaynak takımının malzemelere sürtünmesiyle kaynak için gereken ısı elde edilir ve bu ısı sayesinde malzeme yumuşar. Kaynak takımının alın (omuz) yüzeyi, takım ucu (pim) tarafından yumuşatılarak geriye aktarılan (sıkıştırılan) malzemeye baskı uygulayarak ve kontrol ederek malzemelerin kaynak yapılmasına yardımcı olur (Karagöz & Öksüz, 2018; Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014; Strand, 2004; Şelale, 2006).

SKK üç aşamada gerçekleşir; daldırma, ilerleme ve geri çekme. Karıştırıcı takım, makine iş miline sabitlenmiştir. Kaynak yapılacak parçalar, temas eden kenarların ayrılmasını önlemek için makine tablasına sıkıca bağlanır. İş parçaları sıfır kök boşluğunda tutulur. Takım, devir sayısı olarak adlandırılan açısal bir hızda döner. Karıştırıcı takım ucu kaynak parçaları içerisinde hareket eder ve bu ilerleme hızı olarak adlandırılır. Kaynağın ilerleme yönünün vektörü ile dönme yönü vektörünün aynı

olduğu taraf, ilerleme tarafı (AS) olarak, zıt oldukları diğer taraf ise geri çekme tarafı (RS) olarak adlandırılır. Burada dikkat edilmesi gereken husus kaynak esnasında makinenin özelliğine göre takımda hareket edebilir kaynak yapılan plakalarda hareket edebilir bundan dolayı kaynak yönüne bakılmalıdır (Mishra vd., 2019).



Şekil 4.2. Sürtünme karıştırma kaynağının şematik olarak gösterimi (Karagöz & Öksüz, 2018; Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014).

SKK'daki çeşitli kuvvetler; X yönünde etki eden öteleme (ilerleme) kuvveti, Y yönünde enine kuvvet ve Z yönünde eksenel kuvvettir. Dönme ekseni etrafındaki moment, tork olarak adlandırılır. Karıştırıcı takıma, daha iyi dalması ve yumuşamış malzemeyi daha iyi dövmesi için bir açı verilebilir ve bu açı eğim açısı olarak adlandırılır. Karıştırıcı takımın kaynak parçalarına düzgün bir şekilde daldığından emin olmak için takıma dalma derinliği de verilir. Takım alın (omuz) yüzeyinin iş parçasına dokunduğu andaki derinlik olarak belirlenebilir (Mishra vd., 2019).

Bu yöntemde kaynak yapılan malzemeler ergimez budan dolayı bu teknik katı hal kaynak tekniği olarak adlandırılır. Kaynak tekniği alın alına sabitlenmiş iki plakanın birleştirme bölgesine yüksek devir sayısında döndürülen kaynak takımı daldırılarak kaynak yapılmak istenen bölge boyunca sabit bir ilerleme hızında hareket ettirilmesinden ibarettir. Kaynak yapılacak parçalar başlangıçta düzgün bir yüzey üzerine sabitlenir. Yöntem iki farklı şekilde uygulanabilir; birinci yöntemde takım

sadece dönme hareketi yapar ilerleme hareketini parçalar yapar, ikinci yöntemde takım hem dönme hem de ilerleme hareketini yapar. Karıştırıcı takım, takım ucu (pim) ve daha büyük çaplı bir gövdeden (omuz) oluşur. Karıştırıcı takım ucu kaynak bölgesine daldırıldığında geniş çaplı olan takım alın (omuz) yüzeyi birleştirilecek parçaların üst yüzeyine temas eder. Takım ucunun dalma derinliği kaynak nüfuziyetini ifade edebilir. Takım alın (omuz) yüzeyinin malzemelere teması kaynak bölgesine ilave ısı sağlar ve bu işlemin sonunda karıştırıcı takım kaynak bölgesinden çıkartılarak SKK gerçekleştirilir (Şelale, 2006).

Sürtünme kaynak yöntemlerinin teknik temeli, yüzey sürtünmesi ile elde edilen ısıdır. Bu ısı kaynak yapılacak malzemelerin moleküler yapısında yoğun bir harekete neden olarak kaynak için uygun bir duruma getirir. SKK bu ailenin yeni bir üyesidir ve temel prensibi mekanik sürtünmeye dayanır. Bu yöntem hafif metallere başarıyla uygulanmıştır. Yöntem, yüksek verimlilikte büyük kaynaklı bağlantıların bile yapılmasına izin verir, ancak gerçek avantajı basit olmasıdır. Uygun bir takıma ek olarak ihtiyaç duyulan tek şey bir freze tezgâhıdır, herhangi bir kaynak makinesi olmadan ve hatta ilave dikiş malzemesi olmadan kaynaklı birleştirmeler yapılabilir (Kiss & Czigány, 2007).

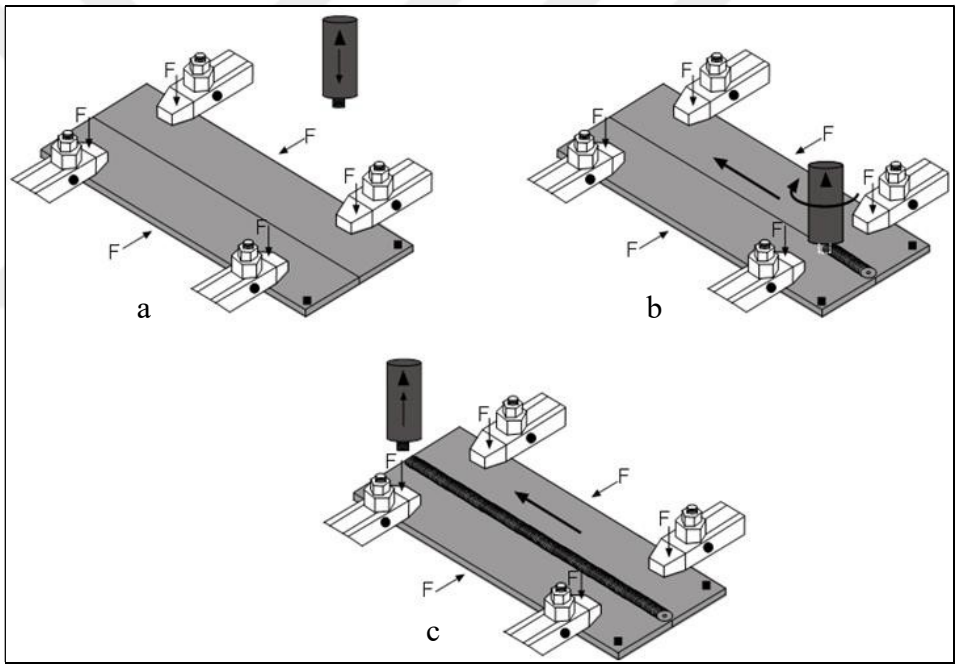
SKK hem manüel hem de bilgisayar kontrollü tezgâhlarda (CNC) uygulanabilir. Bilgisayar kontrollü tezgâhlarda CAM uygulamaları da kullanılabilir. CAD/CAM programları sayesinde otomatik olarak kaynak işlemini gerçekleştirebilir. Ayrıca bu tür sistemlerde kaynak işleminde kullanılan karıştırıcı takımlar kaynak yapılacak parçalara uygun olarak otomatik değiştirilebilir (Şelale, 2006).

SKK yönteminde malzemelerin özellikleri, mümkün olduğunca değişmeden kalmaktadır. Kaynak edilemeyen ve kaynaklanabilir alaşımlar bu kaynak yöntemiyle ergime ve yeniden katılaşma olmadan birleştirilebilirler. SKK'da gözeneklilik ve sıcak çatlama gibi kaynak hataları oluşmamaktadır. Bu yöntem ile yapılan birleştirmelerde düşük kalıntı gerilmeler, geliştirilmiş boyutsal kararlılık, iyi mekanik özellikler sağlanmaktadır ve kaynak bölgesinde yüksek yüzeylerin ve çapakların temizlenmesine gerek kalmamaktadır. Ergime olmadığından zehirli duman ve ergimiş cüruf oluşmaması SKK'nın güvenilirliğini artırır. Koruyucu gaz, dolgu malzemesi gibi sarf malzeme gereksinimlerinin olmaması ve kaynak havuzu oluşmamasından dolayı her pozisyonda

kaynak işlemi gerçekleştirilebilir (Payganeh, Mostafa Arab, Dadgar Asl, Ghasemi & Saeidi Boroujeni, 2011).

4.1.1. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulanışı

SKK uygulamak için kaynak yapılacak parçaların, kaynak sırasında yana, yukarıya ve ileriye doğru hareketini engellemek, birleşme yüzeylerinin birbirine sıkı şekilde temasını sağlamak için, destek parçası üstüne sıkıca bağlanması ve sabitlenmesi gerekir. Çünkü kaynak sırasında parçalar yukarı kalkmaya, yana kaymaya ve ileri itilmeye çalışılacaktır. Bu bağlama işlemleri çeşitli hidrolik baskı pabuçlarıyla yapılabilir (Bozu, 2007; Ülker, 2015).



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 (■ Kaynak yapılacak malzeme, ● Sabitleme elemanları, ▲ Kaynak takımı) (Karagöz, 2014).

SKK Şekil 4.3'de gösterilen şekilde üç aşamada uygulanır:

1. İşlem öncesinde kaynak yapılacak malzemelerin birleştirilecek yüzeylerinin birbirine uyumlu olması ve tam temas etmesi gerekir. Yüzeyler arasında herhangi bir

boşluk olmamalıdır. Yüzeylerin düzgünlüğü sağlandıktan sonra SKK yapılacak parçaların kaynak esnasında hareket etmemesi için çok iyi sabitlenmesi gereklidir.

2. Parçalar sabitlendikten sonra karıştırıcı takım ucu kaynak bölgesine doğru daldırılır ve takımın kaynak hattı boyunca belirli bir ilerleme hızında hareket etmesiyle kaynak işlemine başlanır.

3. Kaynak bölgesinden takım yukarı çekilerek kaynak işlemi tamamlanmış olur (Karagöz, 2014; Ülker, 2015).

Fakat karıştırıcı takım ucu parçaların içine doğru hemen daldırılırsa karıştırıcı takım hasara uğrayabilir. Bunun olmaması için karıştırıcı takım ucunun parçalara ilk teması esnasında sürtünme enerjisinden faydalanılarak parçaların ısınıp yumuşamalarını sağlamak için ön delik delinmelidir (Ülker, 2015).

Plastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı kesinlikle katı hal kaynak işlemi değildir. Çünkü polimerler farklı uzunluklardaki moleküller ve farklı moleküler ağırlıklardan oluştuğu için, malzemelerin tek erime noktaları yoktur, erime aralıkları vardır. Böylece, katı malzeme parçacıkları karışımın taşınmasını ve şekillendirilmesini kolaylaştırmak için yeterli ergimiş malzeme içinde tolere edilir. Bununla birlikte, işlemin plastik mikro yapısı üzerindeki etkisi hakkında çok az şey bilinmektedir (Strand, 2004).

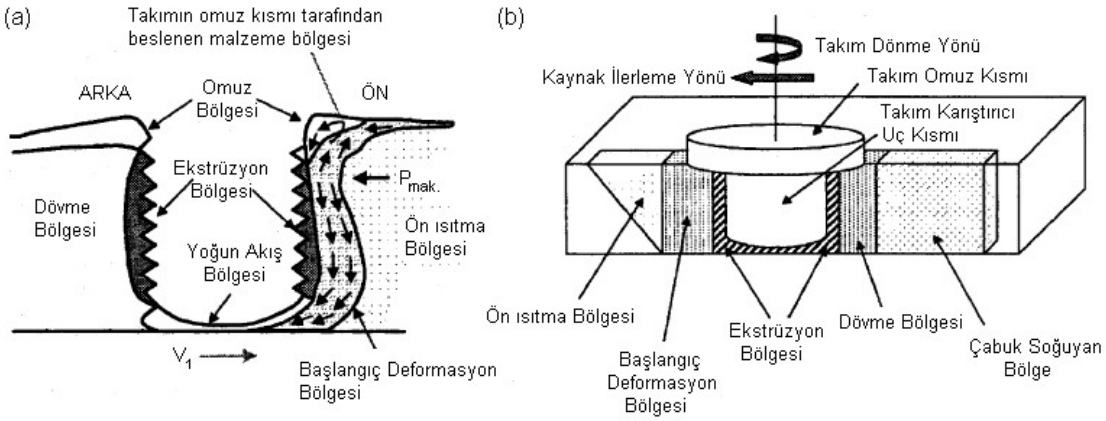
4.1.2. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağında Malzeme Akışı

SKK işleminde karıştırıcı takım ve kaynak yapılan parçaların sürtünmesiyle oluşan ısı karışım bölgesinde artmakta ve parçaların diğer bölgelerine nazaran daha yoğun bir plastik deformasyon oluşturmaktadır. Bu durum tane boyutu, tane sınırı özelliği, çökeltilerin çözünmesi ve irileşmesi, dispersiyon çökelmesi ve yeniden dağıtılması gibi yapıyı da içine alan önemli mikro yapısal değişikliklere neden olmaktadır (Karagöz, 2014).

SKK esnasındaki malzeme akışı, kaynak yapılan parçaların kimyasal bileşimi ve malzemenin kaynak kabiliyeti, karıştırıcı takım geometrisi ve kaynak parametrelerine bağlı olarak deşiklik göstermektedir. Sürtünme karıştırma kaynağına uygun karıştırıcı takım tasarımın ve yüksek dayanıma sahip kaynakların yapılabilmesi için malzeme akış

karakteristiğinin anlaşılması oldukça önemlidir. Kaynak bölgesinde oluşan son mikro yapı kaynak özellikleri ile malzeme akışına bağlı olarak değişmektedir. Malzeme akışını inceleyen araştırmacılar farklı yöntemler kullanarak ana hatlarıyla aynı olmasına rağmen detayda birbirinden ayrılan modeller geliştirmişlerdir (Karagöz, 2014; Ülker, 2015).

Arbegast tarafından yapılan çalışmada, SKK'da oluşan mikro yapı ve malzeme akış özelliklerinin, alüminyumun sıcak ekstrüzyonu ve dövme sonrası özelliklere benzediği belirtilmiştir. Bu çalışmaya göre SKK'da malzeme akışı, Şekil 4.4'de de görüldüğü gibi Ön ısıtma, Başlangıç deformasyonu, Ekstrüzyon, Dövme ve Soğuma olmak üzere beş kademede gerçekleşmektedir (Bilici, 2011; Karagöz, 2014; Ülker, 2015).



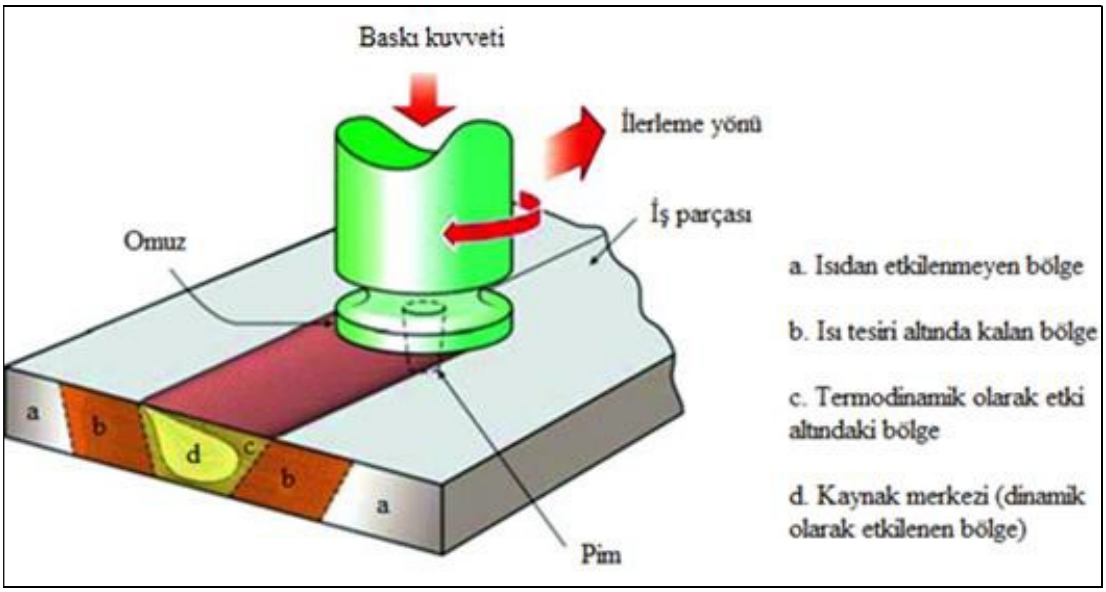
Şekil 4.4. SKK işleminde; a) Sıcak metalin akış modeli, b) Farklı mekanik işlemlerin oluştuğu bölgeler (Bilici, 2011; Karagöz, 2014; Ülker, 2015).

Karıştırıcı takım ucunun dönme yönünde ana malzeme ile sürtünmeye başladığı anda ön ısıtma bölgesinde ilk ısı oluşumu başlamaktadır. Karıştırıcı takım ucunun kopardığı malzeme, ısı ve takım omzunun oluşturduğu basınç altında yumuşamaktadır. Takım ucunun çevresindeki malzeme, dönme hareketi ile karıştırılır. Takımın ilerleme hareketiyle birlikte plastikleşmiş malzeme takımın ön kısmından arka kısmına doğru karıştırılarak taşınırken ekstrüzyon bölgesi ve kaynak bölgesi üst yüzeyine doğru malzeme akışı da başlamaktadır. Takım ucunun alt kısmında kalan malzeme Şekil 4.4.a' da görüldüğü gibi girdaba benzeyen yoğun bir akış meydana getirmektedir. Soğuk

malzeme ve karıştırıcı takım ekstrüzyon işleminin kalıbını oluşturmaktadır. Kalıbın boşluğunu karıştırıcı ucun vida boşlukları oluşturur. Böylece SKK takımı ileri giderken karıştırıcı ucun boşalttığı boşluğa plastikleşmiş malzeme ekstrüzyon yöntemi ile dolar. Ucun arkasına geçen sıcak malzeme takım alın (omuz) yüzeyinin hidrostatik basıncı ile sıkıştırılır. Bu sıkıştırma bir nevi dövme işlemidir. Bu safhada katı faz kaynak birleştirmesi tamamlanmış olur. En son olarak takımın ilerlemesi ile omuz basıncından kurtulan birleştirme bölgesi soğumaya başlar (Bilici, 2011; Karagöz, 2014; Ülker, 2015).

4.1.3. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağının Metalürjik Yapısı

Şekil 4.5'de de görüldüğü üzere SKK'da oluşan simetrik olmayan kaynak bölgesinin kesit görünüşündeki içyapının şekli şematik olarak gösterilmiştir. SKK'da kaynak bölgesinde, değişik mikro yapıların meydana geldiği belirgin üç bölge vardır. Bu bölgeler, dinamik olarak etkilenen bölge (DEB), termodinamik olarak etkilenen bölge (TEB) ve ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) olarak adlandırılırlar. Bu bölgelerin şekli kaynak parametrelerine, birleştirilen malzemelerin özelliğine ve kullanılan karıştırıcı takım uç şekline bağlı olarak değişmektedir (Bozu, 2007; Zengin, 2012).

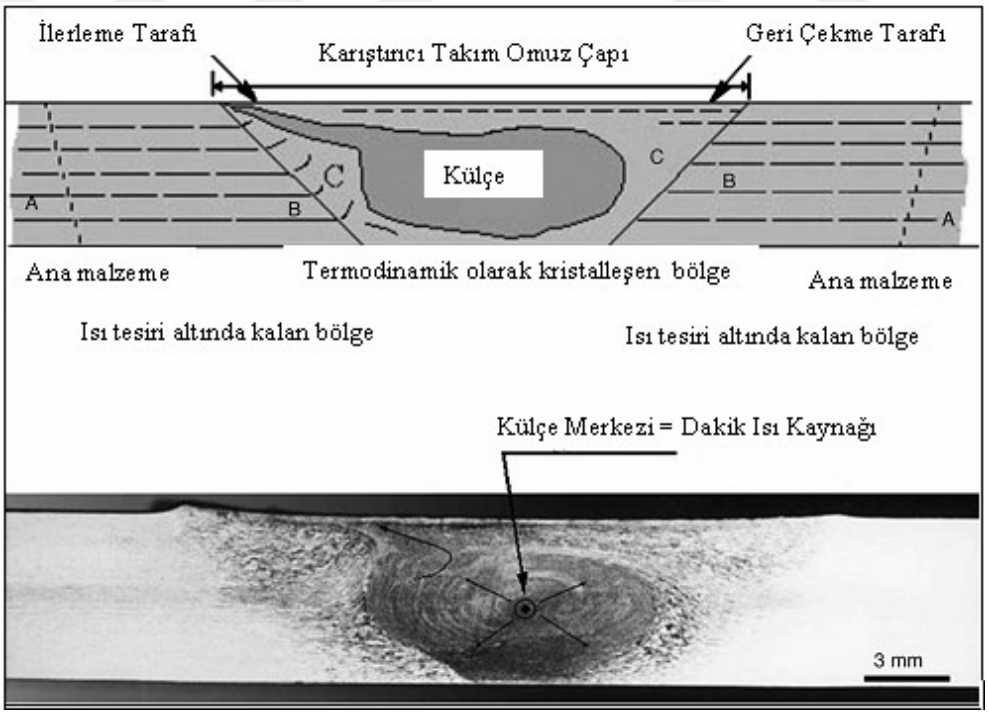


Şekil 4.5. SKK işleminde oluşan bölgelerin şematik gösterimi (Zengin, 2012).

Isıdan etkilenmeyen bölge veya ana malzeme; Kaynaktan bölgesinden uzakta olup karıştırma esnasında oluşan ısı ve mekanik zorlamalardan etkilenmez. Bu bölgede plastik şekil değiştirme olmadığından malzemenin mikro yapı özelliklerinin değişmediği ana metal bölgesidir (Bozu, 2007; Karagöz, 2014; Zengin, 2012).

Isı tesiri altında kalan bölge; Kaynak merkezine daha yakın, ısıdan etkilenmeyen ana metal ile komşu olan bölgedir. Bu bölgede bulunan malzemeler karıştırma sırasında oluşan ısıdan etkilenir ve malzemenin mikro yapısı değişir ama plastik şekil değiştirme olmaz. Ergitme kaynak teknikleri ile karşılaştırıldığında ITAB daha dardır (Bozu, 2007; Zengin, 2012).

Termodinamik olarak etkilenmiş bölge; Karıştırma esnasında plastik şekil değiştirmenin olduğu ve ITAB'la komşu olan bölgedir. TEB'de karıştırmanın oluşturduğu etkiyle hem plastik deformasyon hem de oluşan ısının etkisiyle kısmi ince taneli bir yapı meydana gelmektedir. SKK tekniği ile birleştirilen alüminyumun termodinamik olarak etkilenen bölgesinde yeniden kristalleşme görülmez (Bozu, 2007; Zengin, 2012).



Şekil 4.6. SKK işleminde külçe oluşumunun şematik gösterimi (Bozu, 2007).

Dinamik olarak etkilenen bölge; Karışım bölgesi olarak da adlandırılan bu bölge yeniden kristalleşmenin ve termodinamik etkinin çok şiddetli olduğu kaynağın merkezidir. Bu bölge işlem esnasında kaynak takımının ucu ile ana malzeme arasındaki sürtünme sonucu oluşan ısı ve karıştırmadan dolayı yoğun plastik deformasyona maruz kalmaktadır. Çok ince ve eş eksenli şekilde yeniden kristalleşen taneler genellikle düşük dislakasyon yoğunluğuna sahiptir, alüminyum kaynağında çok net bir şekilde belli olur. Fakat diğer metallerde çok net değildir. Alüminyum alaşımlarında yeniden kristalleşen bölgedir. Genellikle yapısı soğanın içyapısına benzer. Şekil 4.6'da da görüldüğü üzere çok dar aralıklarla birbirini takip eden halkaların dizilişi şeklinde bir kesite sahiptir (Bozu, 2007; Karagöz, 2014; Zengin, 2012).

4.1.4. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlar

SKK'da mikro yapı ve dayanıma etki eden en önemli parametrelerden biriside, karıştırıcı ucun yapısı ve tasarımıdır. Karıştırıcı takım, omuz ve pim olarak adlandırılan iki bölümden meydana gelir. Karıştırıcı takımın ısınma ve malzeme akışının sağlanması gibi önemli görevleri vardır. Karıştırıcı takımın sahip olduğu geometri malzeme akışında kritik bir rol oynar (Karagöz, 2014; Ülker, 2015).

SKK yönteminin ilk geliştirildiği yıllarda kullanılan karıştırıcı uçlar helisel diş açılmış, uzunluğu kaynak yapılacak plaka kalınlığından biraz daha kısa olan silindirik takımlardı. Son zamanlarda yapılan çalışmalar ile sürtünme sonucu açığa çıkan ısı ile plastikleşen malzemenin kaynak bölgesinde tutulmasını sağlayacak takımlar, hatta bilgisayarla kontrol edilerek otomatik olarak çalışabilen ve kaynak bölgesine sadece karıştırıcı ucun girdiği iki parçalı kaynak takımları geliştirilmiştir. Geliştirilen takımlar sayesinde yöntemin uygulandığı malzemeler ve kullanıldığı sanayi dalları genişleyerek, SKK yönteminde kullanılmak üzere yeni ve modern makineler üretilmiştir (Karagöz, 2014; Zengin, 2012).

Kaynak kabiliyeti düşük ya da çok kalın malzemelerde, plastik şekil değiştiren bölgenin, karıştırıcı uç çevresindeki akışı, dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur. Eğer, çapı büyük olan karıştırıcı uçlara gerek duyulursa çok büyük hacimli malzeme hareketi meydana gelecektir. Plastik olarak şekil değiştiren malzemenin, karıştırıcı ucun

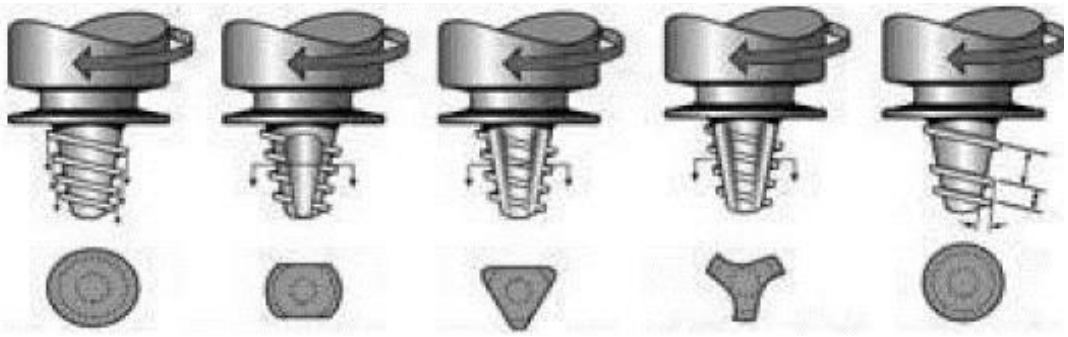
çevresindeki akış oranını artıracak şekilde, geniş hacme sahip, içi boş karıştırıcı uçlar tasarlanmalıdır (Karagöz, 2014; Mert & Kaluç, 2003).

SKK yönteminde özellikle kalın plakaların kaynağında kaynak dikişinde boşluk oluşmasını engellemek ve işlemin verimini arttırmak için ince plakalarda kullanılan geleneksel silindirik uçlu takımlar yerine hacminin ~ %60 - 70'i boşaltılmış olan konik uçlu takımlar kullanılabilir. Böylece SKK esnasında gerekli olan kuvvet de azaltılmış olur. Karıştırıcı uç geometrisi ve ebadı kaynak yapılacak plakaların kalınlığına ve kaynağın türüne bağlıdır. Şekil 4.7 - Şekil 4.11'de SKK'da kullanılan takım tiplerine ait örnekler verilmiştir (Çam, 2005; Zengin, 2012).

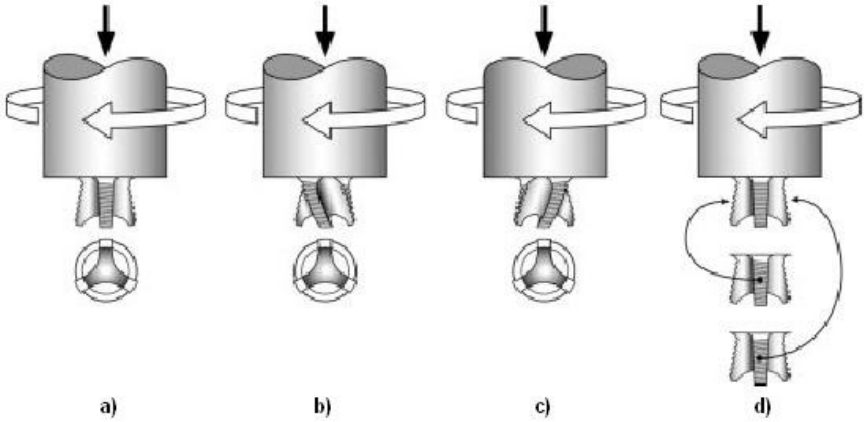
Karıştırıcı takım ucunun kaynak yapılacak parçalara daldırılmasıyla, ucun parçalarda meydana getirdiği sürtünme ve deformasyondan kaynaklı bir ısınma meydana gelir. Takımın alın (omuz) yüzeyi parçaların üst yüzeyine temas edinceye kadar takım ucu dalmaya devam eder. Takım alın yüzeyi ve malzeme üst yüzeyinin sürtünmesiyle kaynak için gerekli olan ısının büyük kısmı elde edilir (Karagöz, 2014).



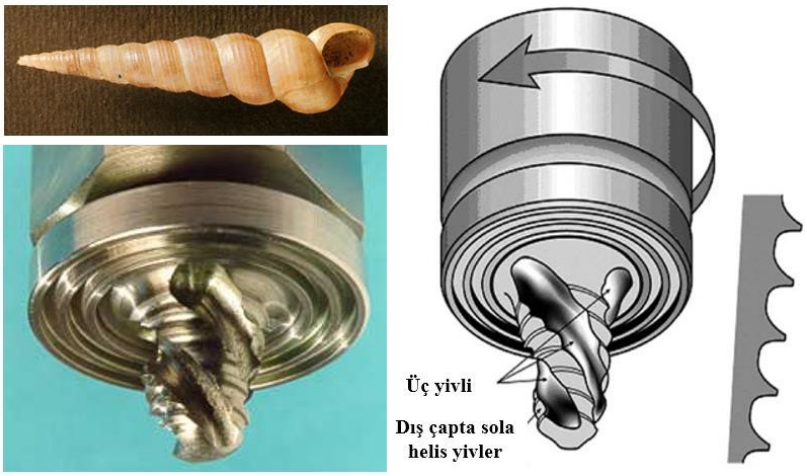
Şekil 4.7.SKK yönteminde kullanılan değişik tipteki takım tasarımları (Ülker, 2015).



Şekil 4.8. Çeşitli uç geometrisine sahip WhorlTM takımlar (Ülker, 2015).



Şekil 4.9. TWI tarafından geliştirilmiş Flared-TrifluteTM takımlar; a) Düz (nötr) kanallı, b) Sol kanallı, c) Sağ kanallı, d) Vida dişlerinin düz, sağ ve sol yönlü olması (Karagöz, 2014).



Şekil 4.10. MX-TrifluteTM tipi takım ucunun esin kaynağı deniz kabuklarıdır (Çam, 2005; Ülker, 2015; Zengin, 2012).

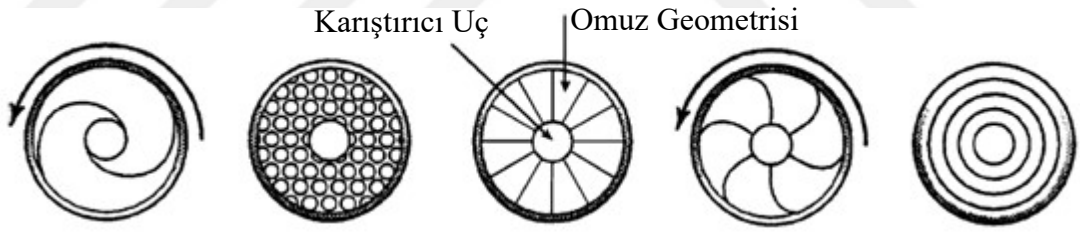


Şekil 4.11. Skew-StirTM metodunun çalışma prensibi ve Skew-StirTM takım ucu (Bilici, 2011; Ülker, 2015; Zengin, 2012).

SKK'da karıştırıcı takımın alın (omuz) yüzeyi, kaynak için gerekli olan ısı girdisinin bölgesel olarak oluşmasını sağlamaktadır. Karıştırıcı takımın ucu ise, ısı etkisi ile plastikleşen malzemenin kaynak bölgesinde karıştırılmasını ve birleştirilmesini sağlamaktadır (Ülker, 2015).

Isı oluşumu açısından karıştırıcı uç ve takım alın yüzeyinin büyüklüğü oldukça önemlidir. Takım omzunun çap ölçüsü ne kadar büyükse oluşan ısı da o kadar fazla olacaktır. Takım alın yüzeyi tarafından uygulanan baskı ile plastik deformasyona uğrayan malzemenin kontrolsüz ve üst yüzeyin biçimini bozacak şekilde dışarı çıkması engellenir (Karagöz, 2014).

Takım alın (omuz) yüzeyinin geometrisi kaynak sonuçlarına direk etki etmektedir. Araştırmacılar tarafından alın yüzeyine yiv açılmış ve açılmamış takımlarla SKK uygulamaları gerçekleştirilerek alın yüzeyine yiv açılmış takımlarla yiv açılmamış takımlara göre iki kat daha hızlı ve yüksek kaliteli kaynak sonuçlarının elde edildiği ifade edilmiştir. Şekil 4.12'de farklı geometrilerde tasarlanmış takım alın yüzeyine ait şekiller gösterilmiştir (Karagöz, 2014; Mert & Kaluç, 2003).



Şekil 4.12. SKK kaynak takımı alın yüzey geometrilerine ait örnekler (Bilici, 2011; Karagöz, 2014; Mert & Kaluç, 2003; Ülker, 2015; Zengin, 2012).

4.1.5. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağına Etki Eden Parametreler

SKK'da kaynak kalitesine takım devir sayısı, ilerleme hızı, takım uç profili, takım alın (omuz) yüzey profili, takım eğim açısı ve dalma derinliği gibi parametreler etki etmektedir. Araştırmaların çoğu, takım devir sayısı, ilerleme hızı ve takım eğim açısının etkisini belirlemek için yapılmıştır. Termoplastik malzemeler, moleküller arası enerji, erime noktası, termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı vb. bakımından

metallerden önemli ölçüde farklıdır. Bu nedenle, iki malzemenin işlem parametreleri değişik olacaktır (Mishra vd., 2019).

Yüksek takım devir sayısı kullanılması durumunda polimerik malzemeyi ergiterek tamamen deforme edecek yüksek ısı elde edileceğinden yumuşayan malzemenin kaynak bölgesinde tutulması zorlaşır, daha düşük bir takım devir sayısı ile ise yetersiz ısı elde edilir ve dolayısıyla plastik deformasyon sağlanamaz (Mishra vd., 2019).

İlerleme hızının (kaynak hızının) yüksek olması durumunda, takım ucu tarafından kopartılan parçanın plastikleşmesi gerçekleşmeyeceğinden frezeleme işlemi şeklinde gerçekleşecektir ya da takım kırılacaktır. Kullanılan ilerleme hızları kaynak bölgesinin şeklini ve mikro yapısını etkileyecektir (Karagöz, 2014).

Takım alın (omuz) yüzeyinin dalma derinliği kaynak yüzey kalitesini ve kaynak kalitesini etkileyen önemli parametrelerdendir. Takım ucunun dalma derinliği malzeme akışını kontrol etmek için parça kalınlığından daha düşük seçilmelidir (Karagöz, 2014).

Takım eğim açısının etkisi incelenmiş ve işlem için gerekli ısının sağlanmasına yardımcı olduğu görülmüştür. Aynı zamanda takıma verilen yüksek eğim açıları iş parçasına zarar vermiştir (Mishra vd., 2019).

0°, 1°, 2°, 3°, 4° ve 5° eğim açıları ile SKK yapılmış, en iyi sonuçlar 0° ve 1° ile yapılan kaynaklardan elde edilmiş olup 5° ile yapılan kaynakların dayanımında ani bir düşüş meydana gelmiştir (Şelale, 2006).

4.1.6. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağının Kullanım Alanları

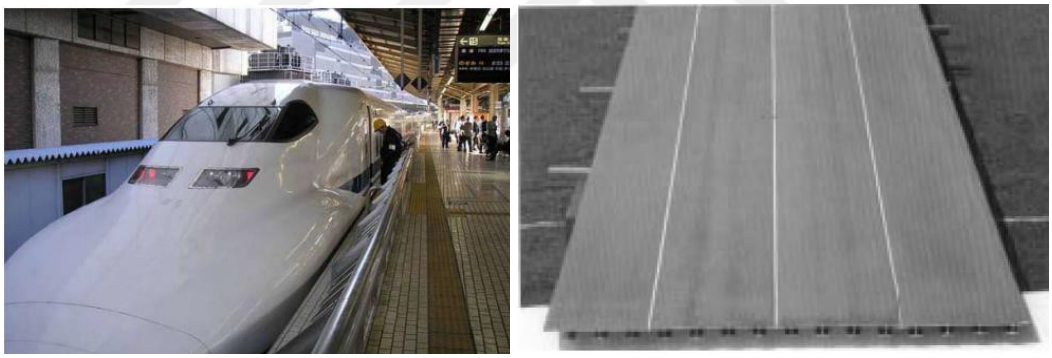
SKK tekniği 1991'de TWI tarafından geliştirildikten sonra üzerinde pek çok araştırma ve geliştirme çalışması yapılmış ve teknik hızla yaygınlaşarak uzay – havacılık endüstrisinden, gemi inşa sanayine, otomotiv endüstrisinden, petrol ve gaz sanayine kadar geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur.

Gemi ve denizcilik endüstrisinde; yolcu gemilerinde kullanılan hafif yapıların üretiminde, gemilerin yan yüzeylerinde, ana gövde ve zeminde, deniz otobüslerinin güvertelerinde, feribotların alüminyum güverte imalatında, deniz ve taşımacılık

yapılarında, helikopter iniş platformlarında uygulanan bir tekniktir (Bozu, 2007; Karagöz, 2014; Zengin, 2012).

Havacılık ve uzay endüstrisinde; uçak gövdesi ve kanatların üretiminde, uzay mekiklerinde kullanılan yakıt tankı imalatında, askeri ve bilimsel roketlerin imalatında uygulanan bir tekniktir. Sivil havacılıkta küçük tip yolcu uçaklarının üretilmesinde, kargo uçaklarının zemin sistemlerinin üretiminde SKK kullanılmaya devam etmektedir. Son yıllarda savaş uçaklarının gövde ve kanatlarında SKK yönteminin kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır (Bozu, 2007; Karagöz, 2014; Zengin, 2012).

Demiryolu ve taşımacılık endüstrisinde; alüminyum ve alaşımlarından imal edilen yüksek hızlı trenlerdeki parçalar, tren vagonları, tramvay ve metro vagonları, demiryolu tankerleri, konteynır gövdeleri SKK tekniği ile birleştirilmeye başlanmıştır. Şekil 4.13'de Japonya'da SKK kullanılan hızlı tren ve bu yöntemle kaynak yapılmış alüminyum paneller görülmektedir (Bozu, 2007).



Şekil 4.13. Japonya'da SKK'nın kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntemle kaynak yapılmış alüminyum paneller (Çam, 2005; Ülker, 2015).

Nükleer enerji ve rafineri endüstrisinde; korozyona dayanıklı paslanmaz çelikten üretilen tüp ve boruların birleştirilmesinde, LEU yakıt plakalarının üretiminde, SKK kullanılmaktadır. SKK tekniği ile kaynak yapılan parçaların sahip olduğu yüksek dayanım ve düşük sertlik özellikleri, kaynak sonrası metal yorgunluğunun az olması SKK'nın tercih edilme nedenlerindendir (Karagöz, 2014).

Otomotiv endüstrisinde; yakıt tasarrufu ve yüksek hız elde etmek amacıyla otomobil imalatında alüminyum ve alaşımları içeren parçaların yoğun bir şekilde kullanılması SKK uygulamaları için mükemmel bir alan sağlamaktadır. Gövde, şasi,

kapılar, tampon, çarpma kutuları, alaşımlı jantlar, hava süspansiyon sistemleri, arka akslar, tahrik milleri, emme manifoldu vb. parçaların üretiminde SKK kullanılmaktadır. Kara yolu taşımacılığında kullanılan ağır vasıta nakliye araçlarının gövde, kasa, motor, taşıma asansörleri vb. parçaların üretiminde SKK kullanılmaktadır (Bozu, 2007; Çam, 2005; Karagöz, 2014).

Savunma sanayinde; zırhlı taşıt üretiminde, alt ve yan panellerinin birleştirilmesinde SKK yönteminden faydalanılmaktadır. Şekil 4.14'de SKK tekniği kullanılarak üretilmiş AAAV zırhlı aracı görülmektedir (Karagöz, 2014).



Şekil 4.14. SKK tekniği kullanılmış AAAV (Ülker, 2015).

4.1.7. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantajları

SKK'nın geleneksel füzyon kaynak tekniklerine göre oldukça avantajlıdır. Katılaşma çatlaması ve gözeneklilik gibi geleneksel füzyon kaynak yöntemlerinde sıvı fazın soğutulması sırasında ortaya çıkan sorunlar SKK'da ortadan kaldırılmaktadır. Bunun nedeni, SKK'nın yalnızca katı halde gerçekleşmesidir. İşlemin çeşitli avantajları aşağıda verilmiştir;

- Alüminyumun çeliğe, magnezyumun çeliğe, alüminyumun bakıra vb. benzer olmayan malzemeler kaynak yapılabilir.
- İşlem sadece katı halde gerçekleştiğinden, füzyon kaynak yöntemlerine kıyasla kusurlar minimum değerdedir.
- Kaynak parametreleri doğru ayarlandığı sürece operatörün kaynağa herhangi bir etkisi söz konusu olmamaktadır, bu nedenle kaynak operatörü için ek bir eğitim gerektirmemektedir.

- Otomasyona ve robotik uygulamaya çok uygundur.
- Kaynak işlemi sırasındaki düşük ısı girdisi nedeniyle kaynaklı yapıda çarpılma çok azdır. Özellikle ince plakalarda meydana gelen büzülme, distorsiyon ve kalıntı gerilmeler oldukça azdır.
- Yüksek verimlilikle birlikte tutarlı kaynak kalitesi elde edilebilir. Uygun malzeme kombinasyonlarında, uygun takım ve parametrelerin belirlenmesi durumunda, daha kısa sürede yüksek kaliteli kaynaklar elde etmek mümkündür.
- Dolgu malzemesi ihtiyacı olmadığından kaynak işleminde ekstra ağırlık ilavesi yoktur.
- Duman üretmediği için SKK çevreci bir kaynak yöntemdir. İşlem sırasında herhangi bir çapak veya ultraviyole ışını oluşmaz.
- Kaynak öncesindeki yüzey hazırlama işlemleri çok önemli değildir, yüzeydeki ince oksit tabakaları tolere edilebilir.
- SKK sonrasında oluşan kaynak yüzeyi işlenmiş gibi düzgündür ve yüzey işlemlerine gerek duyulmaz.
- İşlem, ultrasonik, lazer vb. tekniklere göre basit ve enerji tasarrufludur.
- Külçe bölgesinde dinamik yeniden kristalleşmenin bir sonucu olarak eşit eksenli tanelerin meydana gelmesi nedeniyle malzeme özellikleri geliştirilmiştir (Çam, 2005; Karagöz, 2014; Mishra vd., 2019).

4.1.8. Geleneksel Sürtünme Karıştırma Kaynağının Dezavantajları

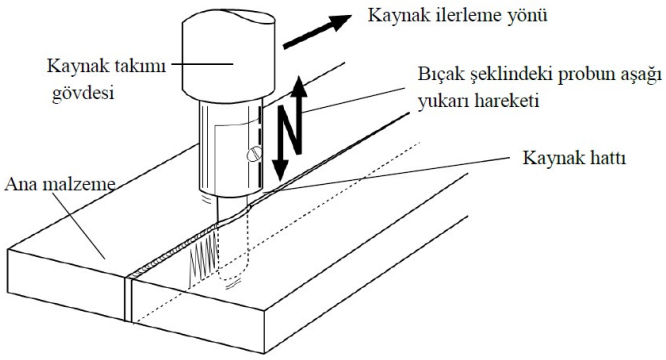
Çok sayıda avantajının yanı sıra, SKK'nın aşağıda verilen bazı dezavantajları da vardır.

- Takımı kaynak hattında tutmak için yüksek reaktif kuvvetler gereklidir. Özellikle kalın plakaların kaynak yapılabilmesi için çok kuvvetli makinelere ihtiyaç duyulur.
- Kaynak yapılan parçaların ayrılmasını önlemek için sağlam bağlama sistemi gereklidir.

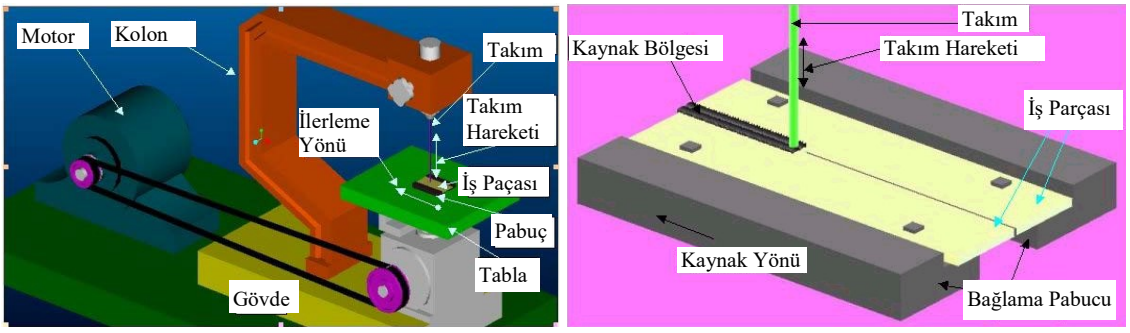
- SKK tekniğiyle tek pasoda 18 mm derinliğinde kaynak yapılmasına rağmen, bazı alaşımlarda tek pasolu kaynak hızları makineleştirilmiş ark kaynak tekniklerinden daha yavaştır.
- Takım kaynak hattından geri çekilirken, kaynak bölgesinin sonunda bir anahtar (pim) deliği oluşur.
- Kaynak esnasında destek plakası gereklidir.
- İlk yatırım maliyeti çok yüksektir (Çam, 2005; Mishra vd., 2019; Ülker, 2015).

4.2. Dikey Hareketli Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Dikey hareketli sürtünme karıştırma kaynağında (DHSKK) karıştırıcı takım, geleneksel SKK olduğu gibi silindirik değildir. Bu yöntemde dikey yönde hareket eden bıçak şekelinde yassı bir takım kullanılır. Yassı takım sabitlenmiş olan parçaların kaynak bölgesine testere gibi salınım yaparak daldırılır ve kaynak hattı boyunca sabit bir hızda hareket ettirilir. Kaynak için gereken ısı, yassı takımın parçalar arasındaki salınım hareketi ile oluşan sürtünmeden elde edilir ve bu ısı sayesinde yumuşayan malzeme takım tarafından karıştırılarak kaynak yapılmış olur. Bu tekniğin ana sorunu yumuşamış malzemeyi kaynak bölgesi içinde tutacak bir sistemin olmamasıdır. Yumuşamış malzeme kaynak bölgesi içinde tutulamadığı için kaynakta boşluklar meydana gelmekte ve buna bağlı olarak da kaynak performansı düşük olmaktadır. Dikey hareketli sürtünme karıştırma kaynağı Şekil 4.15 - Şekil 4.16'da şematik olarak gösterilmiştir (Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014).



Şekil 4.15. Dikey hareketli sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi (Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014; Şelale, 2006; Thomas vd., 1995; Zengin, 2012).



Şekil 4.16. Dikey hareketli sürtünme karıştırma kaynağı tasarımı (Panneerselvam vd., 2004).

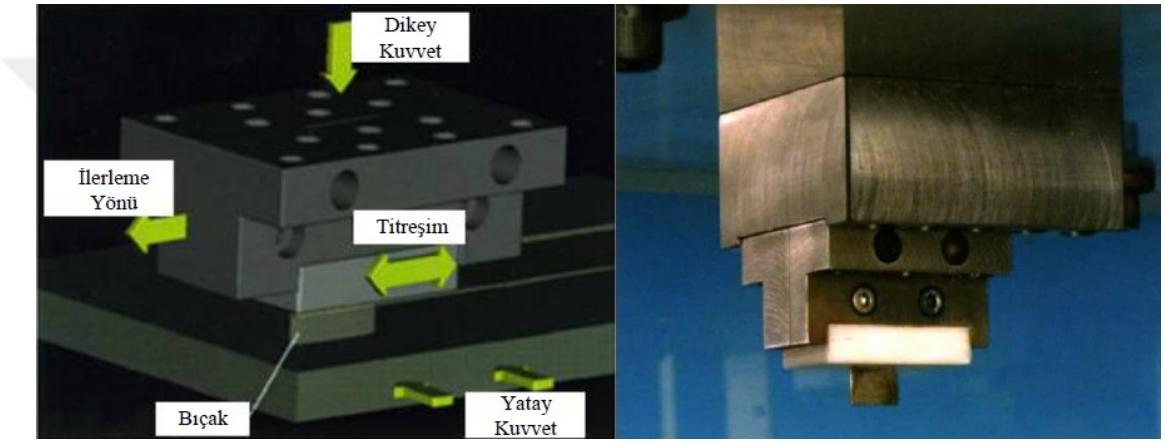
Panneerselvam, Aravindan ve Noorul Haq tarafından 2 mm kalınlığındaki Akrilik malzemelere DHSKK uygulanmış, kaynaklar mekanik ve metalürjik inceleme yöntemleri ile incelenmiştir. Araştırmacılar tarafından malzeme kalınlığının, kaynak ucunun kalınlığının ve kesitinin, takımın salınım frekansının ve ilerleme hızının kaynağa etki eden parametreler olduğu ifade edilmiştir. Bazı uygulamalarda ergimeden dolayı gözenekli bir yapı meydana geldiğini bunun da kaynak dayanımını azalttığını, yapılan mekanik testlerde ana malzeme dayanımının %80'i oranında kaynak performansı elde edildiğini belirtmişlerdir (Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014; Panneerselvam vd., 2004).

4.3. Titreşim Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Titreşim sürtünme karıştırma kaynak (TSKK) yöntemi TWI tarafından plastiklere uygulanmak için geliştirilmiştir. Çalışma prensibi dikey hareketli sürtünme karıştırma kaynağına benzemektedir. Bu teknikte takım, bıçak şeklinde yassı bir uç ve omuzdan oluşur. Takım hızlı bir şekilde ileri - geri hareketi yaparak titreşim oluşturur ve kaynak dikişi boyunca ilerler. Kaynak için gerekli olan ısı, yassı takımın parçalar arasındaki titreşim hareketi ve omuzun parçalara teması ile oluşan sürtünmeden elde edilir. Bu ısı sayesinde yumuşayan malzeme takım tarafından karıştırılarak kaynak yapılmış olur. Titreşim sürtünme karıştırma kaynağı Şekil 4.17'de şematik olarak gösterilmiştir (Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014).

Omuz tarafından uygulanan dikey yük, birleştirilmek üzere sabitlenmiş parçaların üst yüzeylerinde malzemeyi yumuşatmak için bir ısı girdisi oluşturur, fakat takım omzu tarafından oluşturulan ısının parçaların birleşme yüzeylerine direkt bir

etkisi yoktur. Bundan dolayı kaynak için gerekli ısının hemen hemen hepsi bıçak şeklindeki yassı takım tarafından oluşturulmalıdır. Kaynak yapılmak için sabitlenmiş kaynak parçalarının birleşme yüzeyleri arasındaki baskı kuvveti yalnızca bıçak formundaki yassı takımın ilerleme hareketi ve buna bağlı olarak meydana gelen ısıl genleşmenin etkisiyle oluşur. Bu tekniğin en önemli avantajı bıçak şeklindeki yassı takımın kaynak esnasında sürekli olarak kaynak bölgesi içinde olması ve ergimiş malzemenin rahat bir şekilde kaynak bölgesi içinde tutulmasıdır (Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014).

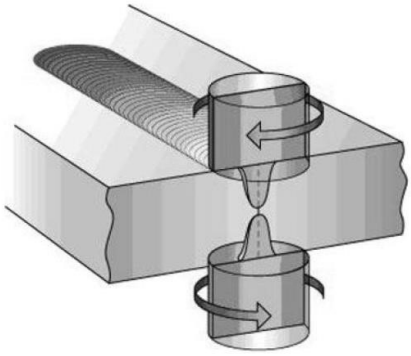


Şekil 4.17. Titreşim sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi (Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014).

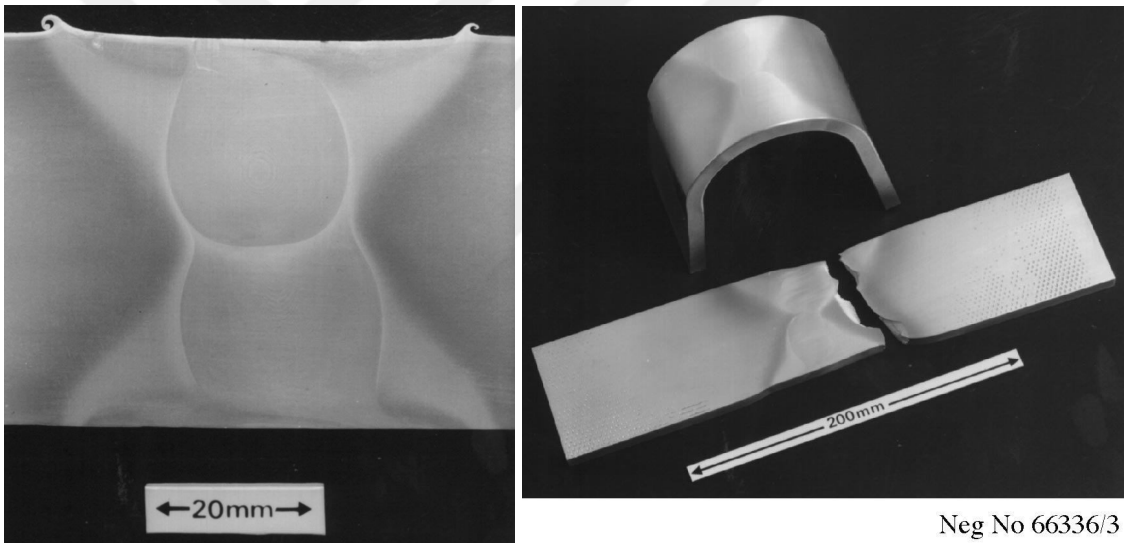
4.4. Çift Taraflı Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Alüminyum ve alaşımları gibi ergime sıcaklık değerleri düşük olan malzemelerin birleştirilmesinde SKK başarılı bir şekilde uygulanabilmesine rağmen kaynak yapılan plaka kalınlık ölçülerinin artmasıyla uygulamada sorunlar yaşanmakta ve daha dayanıklı kaynak makinelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Plaka kalınlık ölçüleri arttığında çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı (ÇSKK) kullanılabilmektedir. Bu yöntemde, aynı anda plakaların alt ve üst yüzeyinden ayrı ayrı karıştırma işlemi yapan iki adet takım kullanılabilmektedir. Bu teknik şematik olarak Şekil 4.18'de gösterilmiş olup takımlar işlem esnasında ters yönde dönerler. Alüminyum ve alaşımlarının tek taraflı kaynağında kalınlığı en fazla 50 mm, çift taraflı kaynağında ise kalınlığı en fazla 100 mm olan plakalara SKK uygulanabilmektedir. Şekil 4.19'da ÇSKK yapılmış 50

mm ve 75 mm kalınlığında 6082-T6 plakalar gösterilmektedir (İpekoğlu, 2011; Ülker, 2015).



Şekil 4.18. Kalın plakalarda çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması (İpekoğlu, 2011; Ülker, 2015).

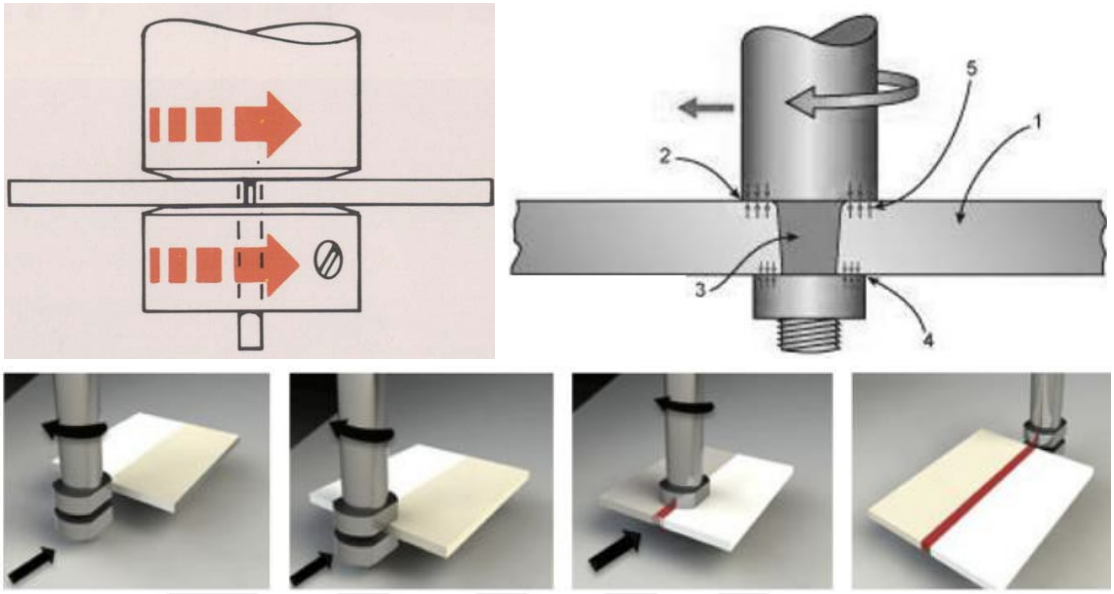


Şekil 4.19. Çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış 6082-T6 plakalar (İpekoğlu, 2011; Ülker, 2015).

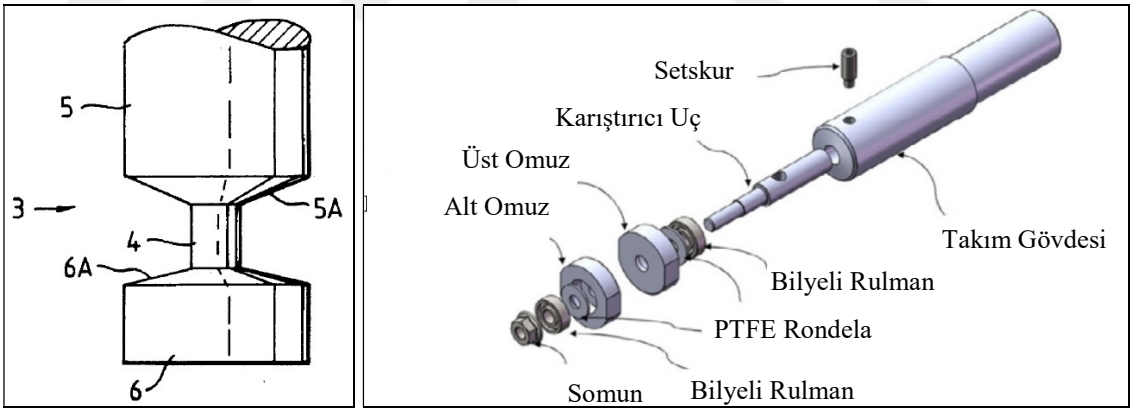
PE plakalara uygulanan ÇSKK'nın dayanımı tek taraflı SKK'dan daha yüksek olmaktadır. Takımın 1° eğime sahip olmasının da SKK mukavemetini arttırdığı tespit edilmiştir. Şekil 4.20'de çift omuzlu takımlar ile ÇSKK uygulamalarına ait örnekler Şekil 4.21'de de çift omuzlu takım örnekleri verilmiştir (Arıcı & Sınmazçelik, 2005; Bilici, 2011; Şelale, 2006; Ülker, 2015).

Genel olarak ÇSKK'da karıştırıcı takım ve parçalar arasındaki sürtünme alanın daha fazla olmasından dolayı daha çok sürtünme ısısı elde edilir dolayısıyla malzeme

daha homojen karıştırılabildiği için daha yüksek gerilme dayanımları elde edilebilir (Eslami vd., 2017).



Şekil 4.20. İki omuzlu takımlar ile çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları (Bilici, 2011; Eslami, Tavares & Moreira, 2017; Şelale, 2006; Ülker, 2015).

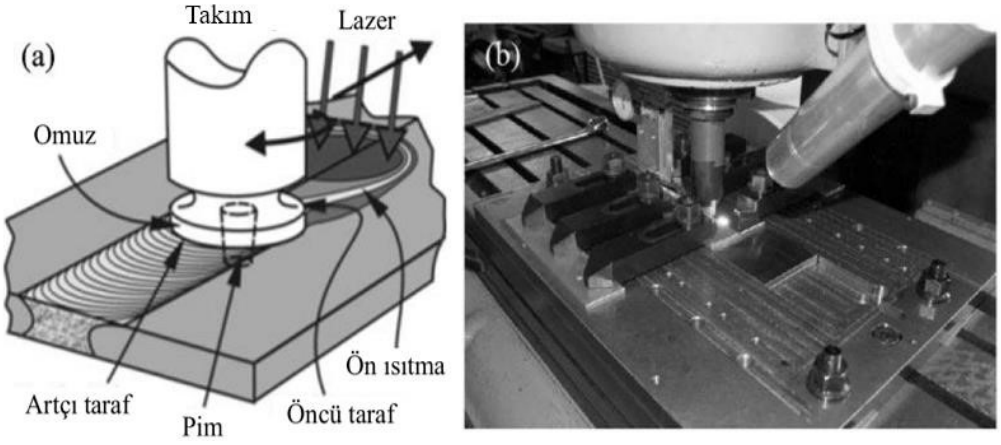


Şekil 4.21. Çift omuzlu takımlar (Banjare, Sahlot & Arora, 2017; Eslami vd., 2017; Nelson, Sorenson & Johns, 2004; Thomas vd., 1995).

4.5. Hibrit Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Ergime dereceleri yüksek olan malzemelerin (çelik vb.) SKK'da bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Çünkü takımın sürtünmesi ile elde edilen ısı, kaynak yapılacak malzemelerin karıştırılabilmesi için gereken yumuşaklığa erişmesine ve hatasız kaynak

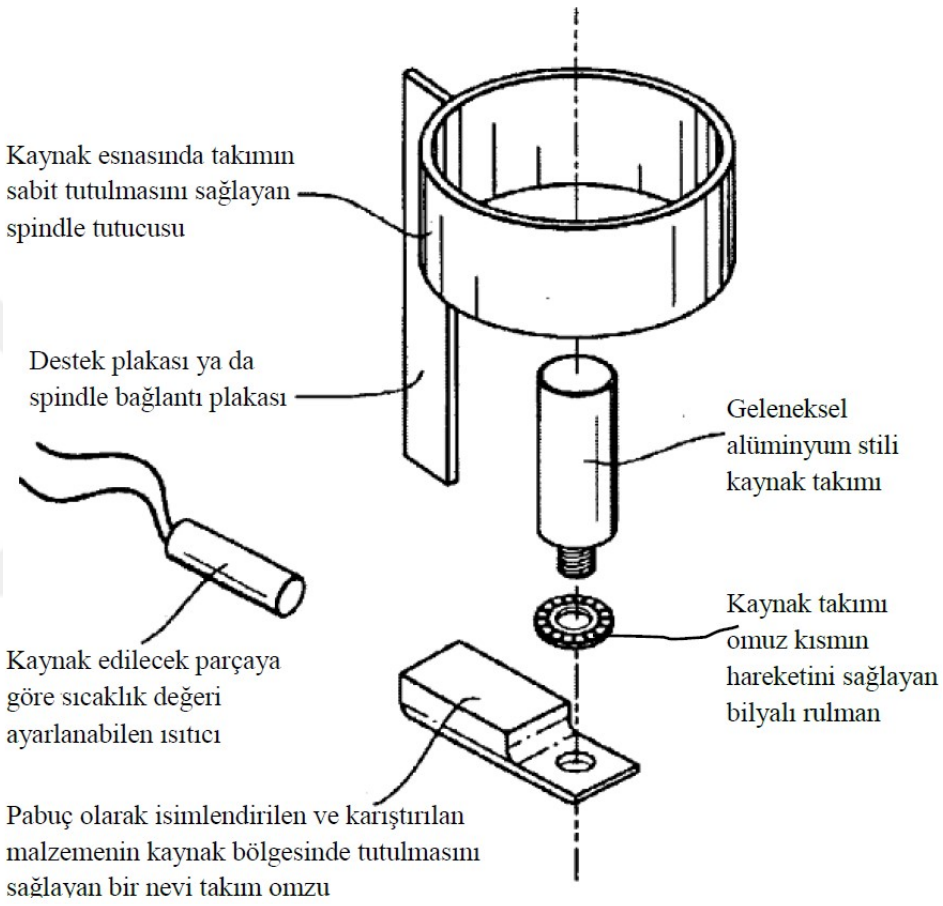
yapılmasına yeterli gelmemektedir. Ayrıca takımlar ne kadar dayanıklı malzemelerden imal edilmiş olsalar bile aşınma meydana gelmektedir. Bu gibi sıkıntıları ortandan kaldırmak için hibrit sürtünme karıştırma kaynağı (HSKK) uygulamaları kullanılmaktadır. Lazer ışını, sıcak gaz (hava) veya sıcak pabuç vasıtası ile kaynak yapılacak plakalara ön ısıtma işlemini uygulanmakta ve bu işlem karıştırıcı takımın işini mümkün olduğunca kolaylaştırmaktadır. HSSK'nın lazer ışını ile uygulanması Şekil 4.22'de görülmektedir. Özellikle ısı iletim katsayısı yüksek olan malzemelerin kaynak işleminde kaynak için yeterli ısının elde edilebilmesi için takım, kaynak yapılacak plakaların içinde yüksek devir sayılarında çalışır durumda bir süre bekletilmekte ve kaynak için yeterli ısısının oluşmasını müteakip kaynak yapılacak bölge boyunca ilerletilerek kaynak yapılmaktadır. Hibrit kaynak uygulamalarında ise bu beklemelere gerek kalmadan lazer ışını, sıcak gaz (hava) veya sıcak pabuç ile ön ısıtma yapılmakta ve böylece takım ile kaynak yapılan plaklar arasında meydana gelecek olan sürtünme minimum seviyeye indirilerek paslanmaz çelik gibi ergime sıcaklığı yüksek olan malzemelerin kaynağında takım ömürleri uzatılabilmektedir. Bunun yanı sıra hibrit kaynak uygulaması, henüz araştırma aşamasında olup toplam maliyeti oldukça yüksektir (İpekoğlu, 2011; Ülker, 2015).



Şekil 4.22. SKK'nın hibrit uygulaması; a) Şematik gösterim, b) Uygulama şekli (İpekoğlu, 2011; Ülker, 2015).

Nelson, Sorenson ve Johns (2004), tarafından takım omuz yüzeyinin sabit tutulması veya pim (uç) veya takımın bağımsız hareket etmesi, sisteme takım ve malzeme arasındaki sürtünme ısısından bağımsız ısı verilmesi olmak üzere iki farklı

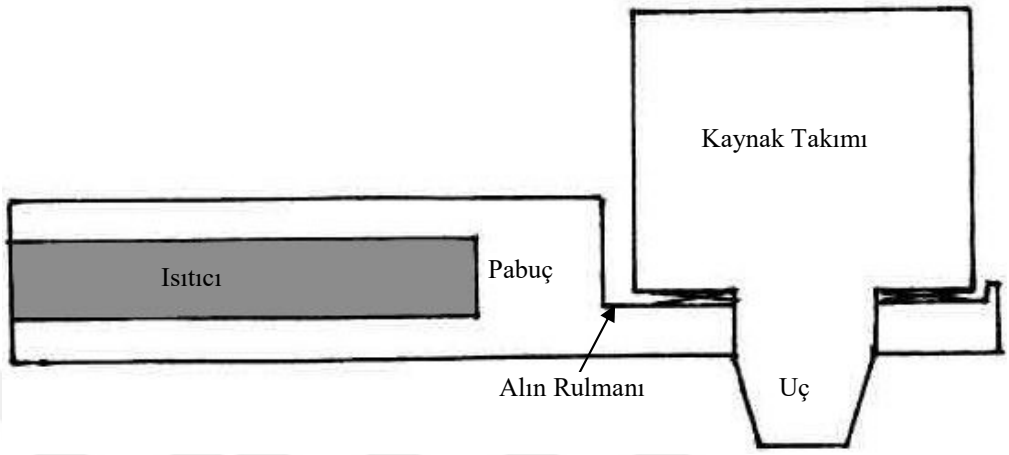
çözüm yolu geliştirilmiştir. Nelson vd. kendi geliştirdikleri çözüm önerilerine paralel olarak "sıcak-pabuç" olarak isimlendirilen ve kaynak bölgesine dışarıdan ısı veren, takım omzu ile parça temasını engelleyen Şekil 4.23'de şematik olarak gösterilen kaynak takımının tasarımı yapmış ve patentini almıştır (Banjare vd., 2017; Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014; Nelson vd., 2004; Şelale, 2006).



Şekil 4.23. Nelson vd. tarafından geliştirilen hibrit sürtünme karıştırma kaynak takımı (Banjare vd., 2017; Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014; Nelson vd., 2004; Şelale, 2006).

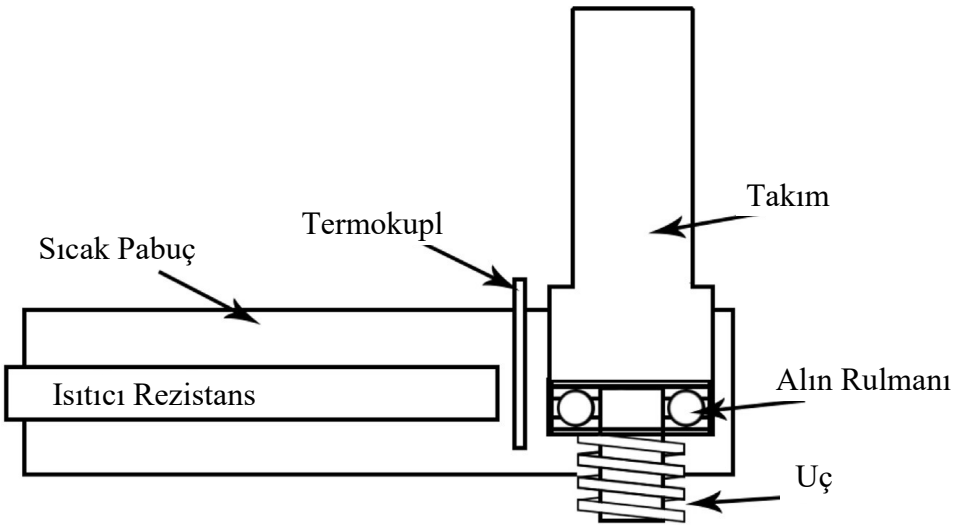
Strand (2004), Şekil 4.24'de şematik olarak gösterilen Johns tarafından en son geliştirilen takım tasarımının çok başarılı olduğunu ve BYU'da kullanılan mevcut takımların modelini oluşturduğunu bildirmiştir. Bu takım dönen bir pim (uç), bir alın rulmanı ve sabit bir pabuçtan oluşur. Pabuç, soğuyan kaynağın geniş bir bölgesine basınç uygulayarak boşlukların oluşmasını önler. Kaynağın düzgün bir şekilde yapılması için ek enerjiye ihtiyaç duyulması durumunda ısıtılabilir. Johns, takım

ömrünün uzun olması için pim (uç) boyunun mümkün olduğunca kısa tutulması gerektiği sonucuna varmıştır. Bu takıma etki eden momenti en aza indirir ve kaynak anındaki yüklerin etkisinin azalmasına yardımcı olur (Strand, 2004; Şelale, 2006).

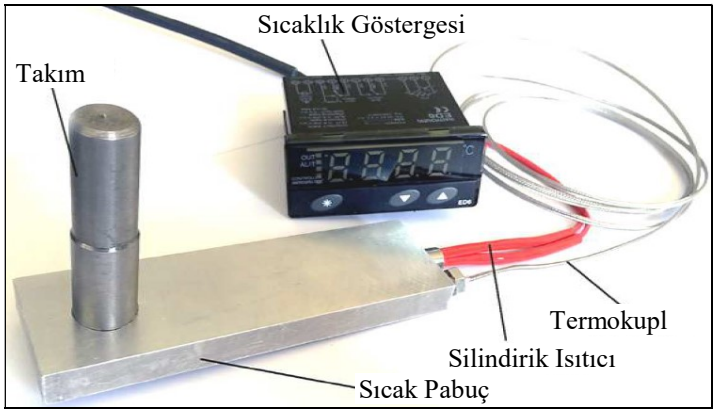


Şekil 4.24. Johns'un en son geliştirdiği HSKK takım tasarımı (Bilici, 2011; Strand, 2004; Şelale, 2006).

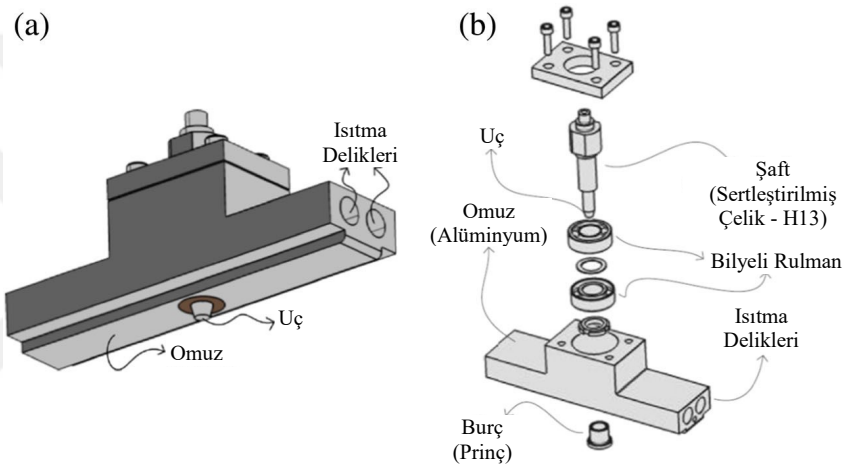
Araştırmacılar tarafından Johns'un takım tasarımı model alınarak geliştirilen çeşitli HSKK takım tasarımları Şekil 4.25 - Şekil 4.29'da verilmiştir. Şekil 4.26'da gösterilen HSKK takımında sıcak alüminyum ile polimer yüzey arasında oluşabilecek yapışmayı önlemek için takım omuz yüzeyi PTFE (Teflon) ile kaplanmıştır (Hajideh, Shapurgan, Ramzani & Nejad, 2017).



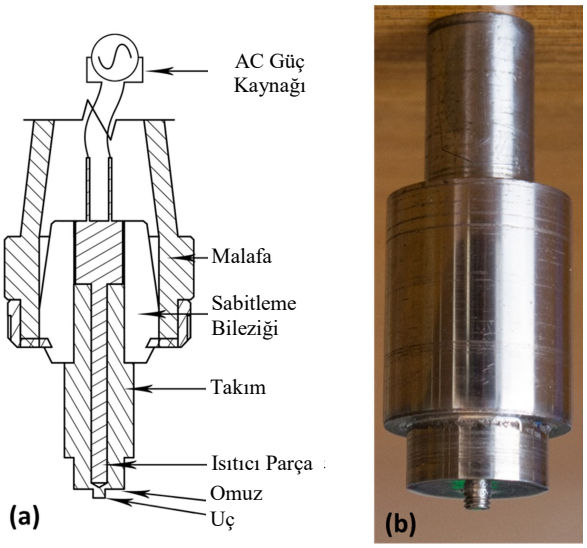
Şekil 4.25. Sıcak pabuç takım tasarımının şematik gösterimi (Banjare vd., 2017).



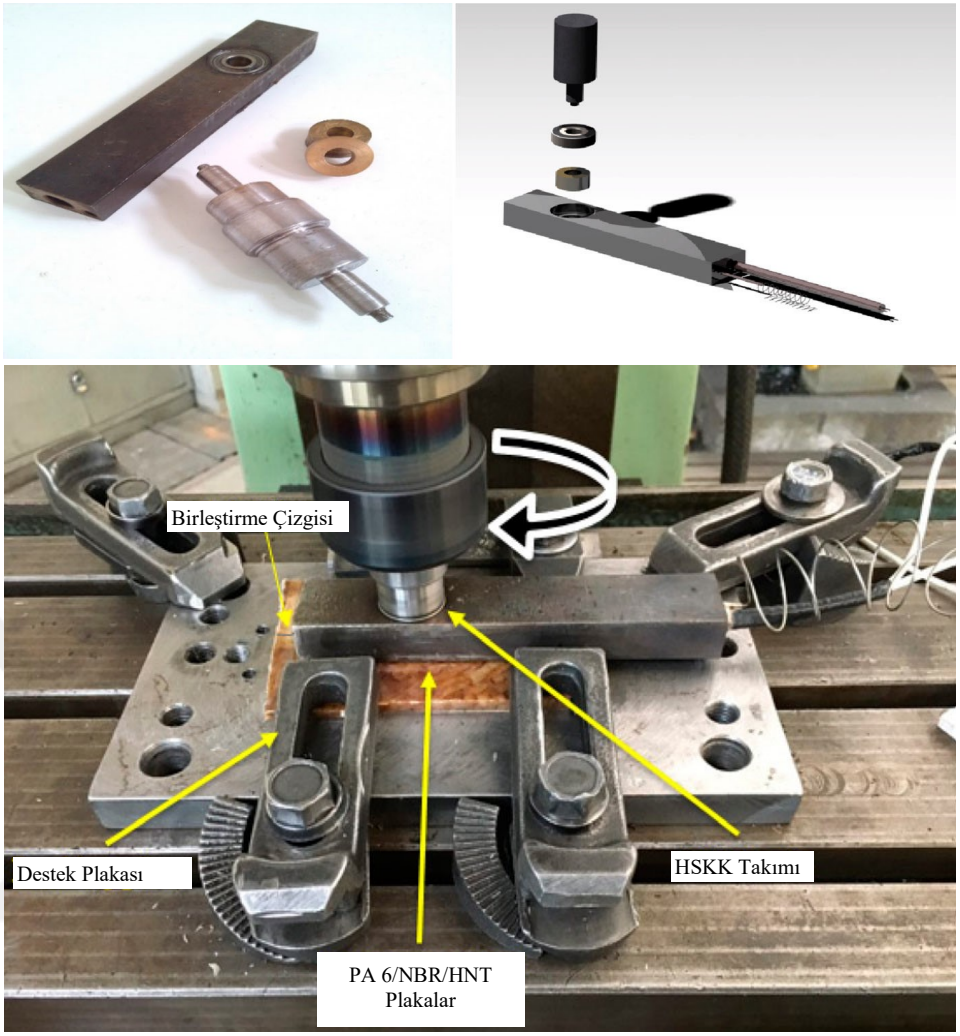
Şekil 4.26. Sıcak pabuç HSKK takımı (Hajideh vd., 2017).



Şekil 4.27. HSKK takım tasarımı; a) İzometrik görünüş, b) Detaylandırılmış görünüş (Eslami vd., 2017).



Şekil 4.28. İçten ısıtmalı takım; a) Şematik Gösterim, b) Fotoğraf (Banjare vd., 2017).



Şekil 4.29. HSKK takımının ve uygulamanın gösterilişi (Laieghi, Alipour & Mostafapour, 2020).

4.6. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

Direnç nokta kaynağı (DNK), özellikle otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmakta olan bir kaynak tekniğidir. Araba ebatlarına bağlı olarak her bir arabada 7000 – 12000 arasında nokta kaynağı kullanılabilir. DNK, kaynak hızı, yetişmiş kaynak elemanına ihtiyaç duyulmaması, otomasyona uyun olması vb. özelliklerinden dolayı otomotiv sektöründeki çelik plakaların kaynağında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat otomotiv endüstrisi enerji sarfiyatını azaltmak için hafif malzemeleri tercih etmektedir. DNK, çelik plakaların kaynak işlemlerinde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, hafif metallerde kullanımları, bu malzemelerin iletkenliklerinin yüksek, yüksek

sıcaklıklardaki dayanım değerlerinin düşük olması ve kaynak elektrotlarının ömrünü azaltmalarından dolayı oldukça zordur. Kaynak elektrotlarının zamanla iş göremez duruma gelmesi, seri üretim sırasında DNK ile yapılan kaynakların kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun yanı sıra, kendinden delmeli perçin vb. alternatif nokta birleştirme yöntemlerindeyse sarf malzeme tüketiminin fazla olması maliyetleri yükseltmektedir. Katı hal kaynak tekniği olan sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) ise, 1993 yılında Mazda firmasında kullanılmış ve DNK yöntemiyle karşılaştırma yapıldığında enerjiden yaklaşık %90 tasarruf edildiği ve yatırım maliyetlerinin %40 azaltılabileceği görülmüştür (Bilici, 2011; İpekoğlu, 2011; Mert, 2010; Ülker, 2015).

SKNK ilk olarak Mazda firması tarafından, önce Mazda RX-7 model spor arabaların, sonrasında ise Mazda RX-8 model spor arabaların imalatında kullanılmıştır. Tek parça olan alüminyum arka kapının kaynak işlemi SKNK ile yapılmaktadır. Başka otomobil firmaları da örneğin Ford, bazı modelleri için alüminyum gövde parçalarının kaynak işlemlerini SKNK ile gerçekleştirdiklerini bildirmişlerdir (Mert, 2010).

SKNK, geleneksel yöntemler ile birleştirilmesi zor ve maliyetli olan demir dışı metal malzemelerin kaynatılması amacıyla geliştirilen ve son yıllarda plastiklere de başarıyla uygulanan bir kaynak yöntemidir (Bilici, Yükler & Fidaner, 2012; Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014).

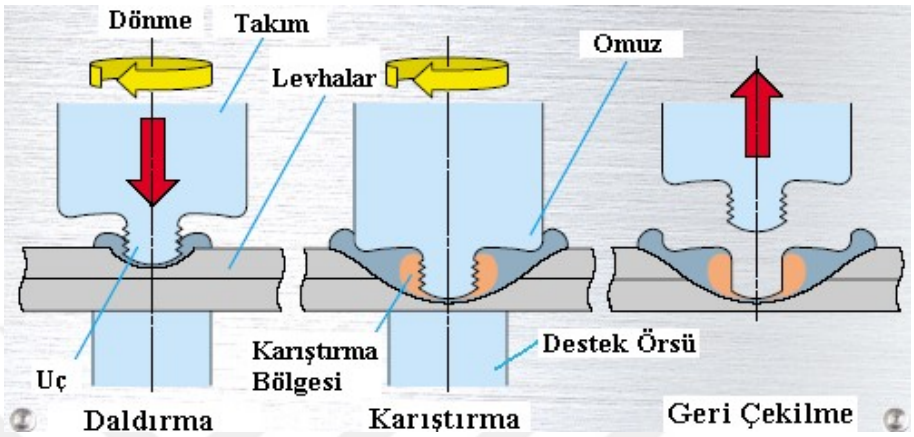
SKNK bir SKK türü olmakla beraber geleneksel SSK'dan farklı olarak, kaynak takım ucunun kaynak çizgisi boyunca doğrusal hareketiyle değil, üst üste koyulmuş plakaların bir noktasına düşey yönde hareket ederek daldırılıp sonra aynı noktadan geri çıkartılmasıyla yapılır. SKNK'da, takım bindirme kaynak pozisyonunda örs üzerine sağlam bir şekilde sabitlenen plaklardan üstte olana daldırılır, bu daldırma esnasında aşağı yönde oluşan kuvvet, örs tarafından plakların desteklenmesiyle karşılanır. SKNK yönteminde takımın yatay ilerleme hareketi yoktur (Bilici, 2011; İpekoğlu, 2011; Ülker, 2015).

Bilici, Yükler ve Kurtulmuş'a göre (2012; 2011),

> Kaynak işleminde kullanılan takım uç ve omuz adı verilen iki kısımdan oluşmaktadır. Belli bir hızda dönen kaynak takımının üst üste yerleştirilmiş iş parçalarına belli bir derinliğe kadar dalması, belirlenen derinlikte kaynak takımının belli bir süre dönmesi ve dönme süresi bittiğinde kaynak takımının geri çekilmesi ile iş parçalarının SKNK

birleştirmesi gerçekleşir. Yapılan tanımdan anlaşıldığı gibi bu kaynak yönteminin dalma, dönme ve geri çekme adı verilen 3 safhası mevcuttur (s.439, s.112) (Bilici, Yükler & Kurtulmuş, 2012; Bilici, Yükler & Kurtulmuş, 2011).

SKNK'nın aşamaları Şekil 4.30'da şematik gösterilmiştir.



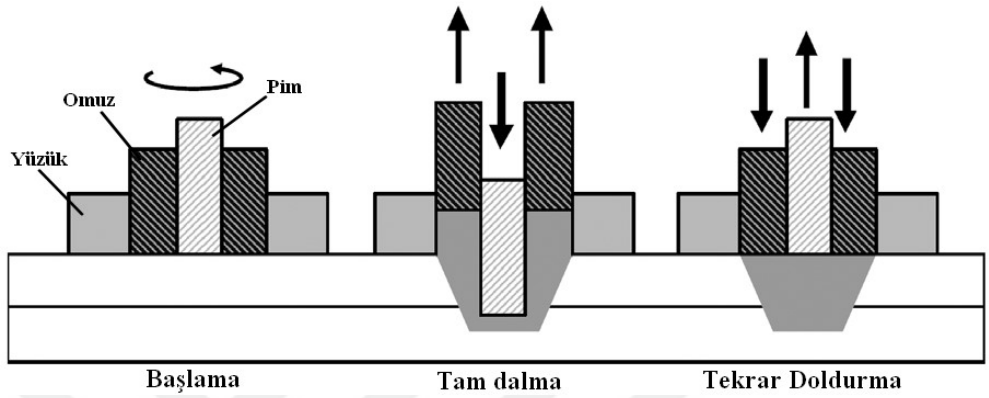
Şekil 4.30. Sürtünme karıştırma nokta kaynağının şematik olarak üç aşaması (Mert, 2010).

SKNK tekniğiyle yapılmış olan çalışmaların incelenmesi sonucunda araştırmacıların takım devir sayısının arttırılmasıyla kaynak bölgesi sıcaklığının yükseldiğini, belli bir süre sonra sürtünme katsayısının azalmasıyla kaynak bölgesi sıcaklığının sabit hale geldiğini, kaynak bölgesindeki bekleme süresinin kaynak dayanımı ve kaynak kalitesini etkilediğini ifade ettikleri görülmüştür (Bilici vd., 2012; Bilici, 2011; Karagöz & Öksüz, 2016; Yıldırım, Kara, Çolak & Aksu, 2017).

SKK ile benzer avantajlara sahip bir katı hal kaynak yöntemidir. Kısa işlem zamanı ile etkili bir bindirme bağlantısı yapılmasını sağlar. Günümüzde sadece otomotiv ve genel taşımacılık sektöründe değil aynı anda diğer sanayi dallarında da oldukça dikkat çekmektedir. Ticari amaçlı otomotiv üretiminde başarı ile kullanılmaktadır (Mert, 2010).

SKNK'nın dezavantajı 2 - 5 saniye olan kaynak çevrim süresinin nispeten daha uzun olmasıdır. Otomotiv sektöründe bu sürenin 1 saniyenden daha düşük olması beklenir. Bunun yanı sıra SKNK yönteminde kaynak kesiti tam olarak doldurulamadığından istenilmeyen bir delik oluşur. Kaynak sonrasında oluşan deliği ortadan kaldırmak için Almanya'da yerleşik Helmholtz-Zentrum Geesthacht araştırma

merkezi tekrar doldurmalı SKNK adını verdikleri bir teknik bulmuştur. Bu teknikte takım, klasik SKNK'dan farklı bir şekilde yüzük, omuz ve pimden oluşur. Bu parçalar birbirlerinden bağımsız olarak yukarı ve aşağı yönlerde hareket etmektedir. Bu işlem Şekil 4.31'de şematik olarak gösterilmiştir (İpekoğlu, 2011; Ülker, 2015).

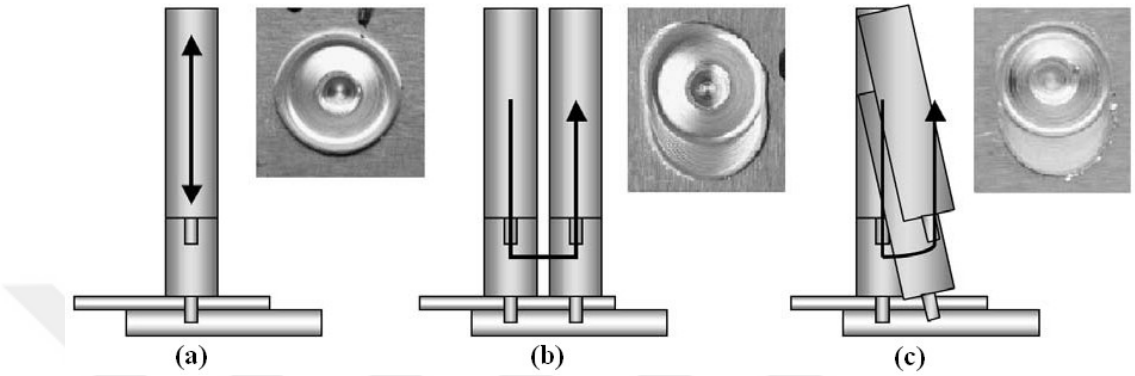


Şekil 4.31. Tekrar doldurmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (İpekoğlu, 2011; Ülker, 2015).

SKNK işleminde omuz ve pim aynı doğrultuda ve aynı devir sayısında dönerler. Yüzük ise kaynak esnasında sabit bir pozisyonda kaynak parçalarını sabit bir şekilde tutarken plastikleşen malzemelerin hareket alanını kısıtlar. Pim (uç) ve omuz sabit devir sayısında dönerek, sürtünmeyle plakları ısıtabilmek için plakaların yüzeyine doğru hareket ederler. Yeterli ısı oluşup malzemeler plastikleşmeye başladıktan sonra pim aşağı doğru hareketine devam eder omuz ise dışarıya çıkan malzemeyi aşağı doğru itebileceği konuma (yukarı) doğru hareket eder. Son aşamadaysa omuz, yüzük tarafından hapsedilmiş yani yukarıya doğru çıkmış olan malzemeyi aşağıya doğru bastırarak tekrar doldurmayı yapar. Kaynak sonrası delik içermeyen oldukça düzgün bir yüzey elde edilir (İpekoğlu, 2011; Ülker, 2015).

Hitachi firması tarafından kaynak dayanımını artırmak için yeni bir SKNK yöntemi bulunmuştur. Bu yöntemde, SKNK'dan farklı olarak takım malzemeye daldırıldıktan sonra çok kısa bir mesafe SKK'daki gibi doğrusal olarak ilerleyerek kaynak işlemini gerçekleştirir. Böylece kaynak bölgesi dairesel değil eliptik bir şekle sahip olur. Kaynak dikişi daha büyük olduğundan kaynak dayanımını da daha iyi olur. Dikişli SKNK olarak adlandırılan bu teknikte, dönme, dalma ve ilerleme hareketlerini

sağlamak için üç eksende harekete ihtiyaç duyulur. Ama daha sonra geliştirilmiş salınımlı SKNK'da dönme, geniş çaplı ve küçük açılı salınım için iki eksende hareket yeterlidir. Bu SKNK teknikleri Şekil 4.32'de gösterilmiştir (İpekoğlu, 2011; Ülker, 2015).



Şekil 4.32. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı teknikleri; a) SKNK, b) Dikişli SKNK, c) Salınımlı SKNK (İpekoğlu, 2011; Ülker, 2015).

4.7. Plastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle İlgili Yapılmış Olan Çalışmalar

Plastiklere uygulanan SKK yöntemlerinin prensipleri daha önceki bölümlerde detaylı olarak açıklandığından bu bölümde sadece SKK ile ilgili yapılan araştırmalar ve elde edilen sonuçlar hakkında bilgiler verilmiştir.

Plastiklerin SKK ile birleştirilmesi üzerine ilk çalışma, bu kaynak yöntemini geliştiren TWI bünyesinde başlatılmıştır. Daha sonra Brigham Young Üniversitesindeki (BYU) araştırmacılar plastiklerin SKK ile ilgili çalışmaları genişletmiştir. Bu çalışmalarda HSKK'da kullanılan sıcak pabuçlu takımlar kullanılmıştır.

Strand (2004), çalışmalarında çeşitli SKK parametreleri ile kaynaklı birleştirmede ortaya çıkan mikro yapısal ve eğilme özellikleri arasındaki ilişkileri incelemiştir. Alın kaynakları yapılırken, 6 mm kalınlığında gerilim giderme yapılmış ekstrüzyon ile üretilmiş PP plakalar kullanılmıştır. 6,35, 9,52 ve 12,7 mm takım uç çapları, 51, 102, 203 ve 305 mm/dak ilerleme hızları, 110, 127, 143, 160 ve 177 °C pabuç sıcaklıkları, 30, 60, 90 ve 120 saniye bekleme süreleri ve 1080 dev/dak takım devir sayısı kullanarak SKK deneylerini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada yapılan kaynakların, ana malzeme eğilme dayanımının %80 - 92'sini ve ana malzeme çekme

dayanımının %85 - 90'ını sağladığını ifade etmiştir. SKK'da dört farklı mikro yapısal bölgenin bulunduğunu gözlemlemiş ve bunların; ilerleme yönü ara yüzü, geri çekme yönü ara yüzü, altta kalan bölge ve kaynak merkezi olduğunu belirtmiştir. SKK'da yaygın birkaç mikro yapı tipi ve kusuru tespit etmiş bunların kürecikler, boşluklar, kök kusurları, akış çizgileri ve geçiş çizgisi olduğunu bildirmiştir (Strand, 2004).

Takım çapı, bükülme açısı arasında önemli bir bağlantı vardır. Çapı 6,35 mm olan takım ile yapılan kaynaklar için ortalama eğilme açısı, 46,2° olarak tespit edilmiştir. Çapı 9,52 ve 12,7 mm olan takımlar ile yapılan tüm kaynaklarda 160°'lik eğilme açısı elde edilmiştir. İlerleme hızının, kaynakların eğilme açısı üzerinde kademeli olarak etkisi vardır. Düşük ilerleme hızlarında (51 ve 102 mm/dak) yüksek eğilme açıları oluşurken, daha yüksek ilerleme hızlarında (203 ve 305 mm/dak) çok daha düşük eğilme açıları elde edilmiştir. İncelenen dört parametreden üçünün, kaynağın mikro yapısına önemli etkileri olmuştur. Büyük çaplı takımla (12,7 mm) yapılan kaynaklarda her parametrede iyi mikro yapı özellikleri görülmüştür. İncelenen beş mikro yapıdan üçünde, pabuç sıcaklığının etkisinin çok az olduğu gözlemlenmiştir. Akış hatlarında ve ilerleme yönü ara yüzünde yüksek (160 - 177 °C) pabuç sıcaklığının etkilerinin çok yüksek olduğu görülmüştür (Strand, 2004).

Çizelge 4.1. SKK ile birleştirilen plastiklerin çekme dayanımları (Strand, 2004).

Malzeme	Ana Malzeme	Sürtünme Karıştırma Kaynağı Sonuçları	
	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	% Ana Malzeme Çekme Dayanımına Oranı
ABS	34,1	32,7	96
HDPE	22,5	21,5	95
PA	72,4	28,4	39
PC	68,3	57,1	83
PMMA	42,0	21,5	51
PP	31,3	30,6	98
UHMWPE	28,8	20,0	69

Strand'ın aktardığına göre TWI, PP'nin kaynağında %90'ın üzerinde gerilme dayanımı performansı ile başarılı olduğunu bildirmiştir. Johns, ABS'nin SKK ile

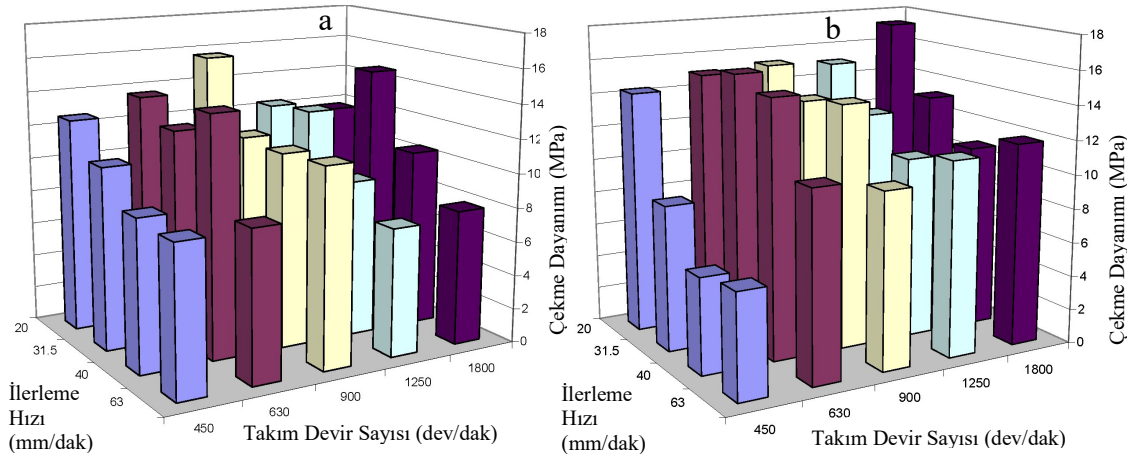
kolaylıkla birleştirilebileceğini ve temel malzeme gerilme dayanımının %75'i oranında kaynak performansı elde edebileceğini bildirmiştir. Bununla birlikte, mevcut teknoloji ile PTFE'nin SKK ile kaynak yapılamayacağı sonucuna ulaşmıştır. Diğer malzemelerin SKK ile birleştirilmesinden elde edilen çekme deney sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir (Strand, 2004).

Arıcı ve Sınmazçelik (2005), çalışmalarında 3 ve 5 mm kalınlığında 80x200 mm ölçülerinde MDPE plakalar kullanmışlar. 3 ve 5 mm kalınlığında plakaların SKK işlemlerinde uç çapı 5 mm, uç boyu 2,8 mm ve omuz çapı 16 mm olan kaynak takımı kullanmışlardır. 3 mm kalınlığında plakalara, 600, 800 ve 1000 dev/dak devir sayıları, 12,5, 25, 40 ve 60 mm/dak ilerleme hızları, 0 ve 1° takım eğim açları kullanarak geleneksel SKK uygulamışlar. 5 mm kalınlığında plakalara, 1000 dev/dak devir sayısı, 12,5, 25 ve 40 mm/dak ilerleme hızları, 0 ve 1° takım eğim açları kullanarak ÇSKK uygulamışlardır. Tek pasolu geleneksel SKK'da takımın 0,2 mm kısa olmasına bağlı olarak kaynak bölgesi altında meydana gelen kaynak yapılmamış bölgedeki kök hatasından dolayı parçaların dayanımının el ile rahatlıkla kopacak kadar düşük çıktığını ifade etmişlerdir. ÇSKK'da kaynak performansını ana malzemenin akma dayanımı olan 20 MPa göre değerlendirmişler, %79 kaynak performansının 15,81 MPa olarak 25 mm/dak ilerleme hızı ve 1° takım eğim açısı ile elde edildiğini bildirmişlerdir (Arıcı & Sınmazçelik, 2005).

Şelale (2006), yapmış olduğu çalışmalarda 5x80x200 mm ölçülerinde PE plakalar kullanmıştır. SKK'da uç çapı 5 mm, omuz çapı 16 mm olan silindirik vida açılmış uç geometrisine sahip kaynak takımları ve 12,5, 25 ve 40 mm/dak ilerleme hızları kullanmıştır. Tek taraflı kaynakları, 4,8 mm uç boyu, 630 dev/dak devir sayısı ve 0, 1° takım eğim açısı kullanarak, çift taraflı kaynakları, 2,8 mm uç boyu, 1000 dev/dak devir sayısı ve 0, 1, 2, 3, 4, 5° takım eğim açısı kullanarak gerçekleştirmiştir. Kaynak kalitesini, çekme ve üç nokta eğme deneyleri yaparak değerlendirmiştir. Kaynak performansını ana malzemenin akma dayanımına (20 MPa) göre değerlendirmiş ve tek taraflı kaynaklarda %41,285, çift taraflı kaynaklarda %100,375 kaynak performansı elde ettiğini bildirmiştir. Çift taraflı kaynaklarda en yüksek kaynak performansına sahip olan kaynakların 12,5 mm/dak ilerleme hızı ve 1° eğim açısında elde edildiğini ifade etmiştir. Tek taraflı kaynaklarda takım boyundan dolayı kaynak

nüfuziyeti tam sağlanamadığından, takım omuzu parça yüzeyine fazla daldırıldığında da paçaları oyarak kaynak bölgesi kenarında çapak oluşturduğundan dayanımın düştüğünü tespit etmiştir (Şelale, 2006).

Kiss ve Czigány (2007), çalışmalarında ticari olarak temin edilebilen 8 mm çapında 15° ve 45°'lik kanal açısı olan geleneksel freze takımları kullanılarak, takımları ana malzemenin kesilmesini önlemek ve karıştırmayı sağlamak için takım kesme yönünün tersi yönde çalıştırmışlar. Freze takımını tezgâha sabitlemek için kullanılan pens kovanını, takım alın yüzeyi (omuz) olarak kullandıklarını bildirmişlerdir. 15 mm kalınlığında PP plakalara, SKK'nın uygulanabilirliğini, devir sayısı ve ilerleme hızının kaynak dayanımı üzerindeki etkilerini analiz etmişler. Kaynak dikişi ve çevresinin kristalliğini DSC ile kaynak dikiş sınırının yapısını ise optik ve taramalı elektron mikroskobu ile incelemişler. SKK sonrası elde edilen numunelere çekme testi uygulamışlar, kaynak dayanımının, ana malzemenin yaklaşık %50'sine tekabül eden 11,5 MPa olduğu ve SKK yapılan parçaların ana malzemeden çok daha kırılgan olduğu sonucuna varmışlardır. Çekme deneyi sonucunda elde etikleri sonuçlara ait grafikler Şekil 4.33'de verilmiştir. Kaynak parametrelerinin uygun seçilmesine ek olarak, doğru kaynak takım tasarımının da çok önemli olduğunu ifade etmişler ve kaynak dikişinde hızlı soğumadan dolayı kristalliğin azaldığı, yani amorf yapının kaynak dikişinde ana malzemeden daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır (Kiss & Czigány, 2007).



Şekil 4.33. PP malzemeye ait çekme dayanım değerleri; a) 15° kanal açısı olan takım, b) 45° kanal açısı olan takım (Kiss & Czigány, 2007).

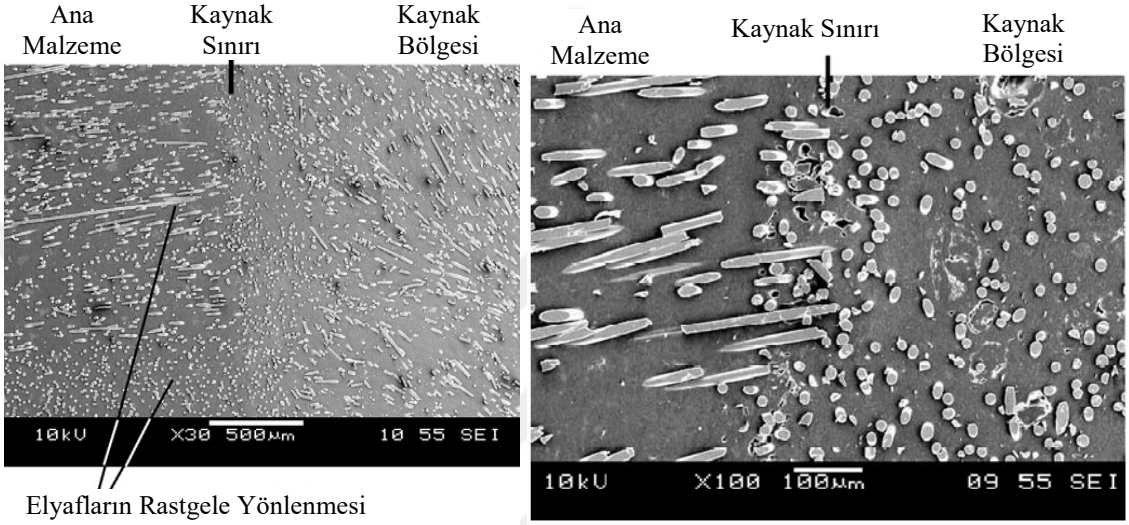
Arıcı ve Ertürk (2007), tarafından yapılan çalışmada 5x80x200 mm ölçülerinde giyotin makas ile kesilmiş PE plakalar kullanılmıştır. SKK işlemini üniversal frezede uç çapı 5 mm, uç boyu 2,8 mm ve omuz çapı 16 mm olan kaynak takımı, 1000 dev/dak devir sayısı, 12,5, 25 ve 40 mm/dak ilerleme hızları, 0 ve 1° takım eğim açıları kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar termomekanik analizler (TMA) sonucunda camsı geçiş sıcaklığının 1° eğim açısı verilerek ve 25 mm ilerleme hızı kullanılarak kaynak yapılan plakalarda daha yüksek değerde olduğunu ifade etmiştirler. Bunu takıma verilen eğim nedeni ile takımın arka kısmı tarafından 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 ısıdan etkilenen bölgede ulaştıklarını ve bu bölgede kristal yapısında artış olduğunu, ifade etmişlerdir (Arıcı & Ertürk, 2007).

Squeo, Bruno, Guglielmotti ve Quadrini (2009), çalışmalarında 3 mm kalınlığındaki HDPE plakalar, 3000 - 20000 dev/dak aralığında devir sayıları, 10 - 44 mm/dak aralığında ilerleme hızları, uç çapı 1 ve 3 mm olan silindirik uçlu SKK takımları kullanmışlar. Ayrıca, geleneksel SKK işleminin bir modifikasyonu şeklinde, takım ucuna ve birleştirilecek numunelere oda sıcaklığı ile 150 °C arasında ısıtma aşaması eklemişlerdir. Farklı kaynak parametreleri, takım çaplarının kaynak kalitesi ve dayanımı üzerindeki etkilerini çekme testleri ve termal analiz yöntemi ile değerlendirmişler. Kaynak dayanımına, kaynak parametrelerinin özellikle takım ilerleme hızının etkili olduğunu, kaynak bölgesinin beslenmesinin takım uç çapına bağlı olarak değiştiğini ifade etmişlerdir. DSC analizleri sonucunda takım ucunun geçişinden sonra, art arda yığılan malzeme sıcaklığının polimerin yeniden kristalleşmesini sağlayamayacak kadar düşük olduğunu tespit etmişlerdir. 6000 dev/dak devir sayısında ve 28 mm/dak ilerleme hızında en iyi sonuçların elde edilgini bildirmişlerdir. Genellikle büyük çaplı takım ucu ile daha kötü sonuçlar elde edildiğini gözlemişler ve en yüksek çekme dayanımı olarak yaklaşık 10 MPa elde edilmiş olup bu sonucun ana malzeme çekme dayanımı olan 23 MPa'a göre çok düşük olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca 150 °C ısıtıcı plaka sıcaklığında ve uzun temas sürelerinde çok yüksek yani ana malzeme dayanım değerine çok yakın sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir (Squeo, Bruno, Guglielmotti & Quadrini, 2009).

Payganeh, Mostafa Arab, Dadgar Asl, Ghasemi ve Saeidi Boroujeni (2011), çalışmalarında 5x50x100 mm ölçülerinde PP matrisli ağırlıkça %30 kısa (kırpılmış) cam elyaf takviyeli kompozit plakalara SKK'nın uygulanabilirliğini ve kaynak parametrelerinin etiklerini incelemiştir. Büyük çapı 5 mm olan konik, 5 mm çapında üçgen, üçgen üzerine diş açılmış ve silindirik takım uç çapları, 8, 16 ve 20 mm/dak ilerleme hızları, 400, 600 ve 1000 dev/dak devir sayıları, 0°, 1° ve 2° takım eğim açıları kullanarak SKK deneylerini gerçekleştirmişler. Takım geometrisinin kaynak yüzey kalitesini belirleyen en önemli parametre olduğunu ve kaynak mukavemeti üzerinde oldukça etkili olduğunu ifade etmişler. Araştırmacılar tarafından en iyi sonuç 630 dev/dak devir sayısı, ilerleme hızı 8 mm/dak ve konik takım ucu kullanılan kaynak parametrelerinde elde edilmiştir. Bu çalışmada en yüksek 9 MPa ile ana malzeme çekme dayanımının %25'i oranında performans elde edilmiştir. Düşük devir sayılarında (400 dev/dak) yapılan kaynakların çekme dayanımının oldukça düşük olduğu, kaynak için gerekli olan ısının elde edilemediği, yüksek devir sayılarında (1000 dev/dak) ise parça yüzeyinde aşırı deformasyon meydana geldiği araştırmacılar tarafından bildirilmiştir. İlerleme hızı 8 mm/dak'dan 20 mm/dak'ya yükseltildiğinde çekme dayanımın düştüğü, takım eğim açısı 0 °'den 2°'ye çıkarıldığında kaynakların çekme dayanımın artığı ifade edilmiştir (Payganeh vd., 2011).

Czigány ve Kiss (2011), tarafından 10 mm kalınlığında ağırlıkça %30 kısa (kırpılmış) cam elyaf takviyeli PP matrisli kompozit plakalar basınçlı kalıplama yöntemiyle 160x160 ölçülerinde üretilmiş ve ortadan ikiye kesilerek SKK uygulamasında kullanılmıştır. SKK uygulamalarında 8 mm çapında 4 ve 8 kanallı geleneksel freze takımları kullanılmıştır. Kompozit malzemelerin alın kaynağı yapılmış kaynak parametrelerinin kaynak dayanımına etkileri, çekme ve üç nokta eğme testleri yapılarak incelenmiştir. Araştırmacılar tarafından, SKK'nın plastik matrisli kompozitlere başarılı bir şekilde uygulanabildiği ifade edilmiştir. Plastik matrisli kompozitlerin kaynak dayanımının, kaynak takımının devir sayısı, elyafların uzunluğu ve malzeme içerisindeki dağılımı, matris malzemesinin viskozitesi ve kullanılan takımın geometrisi gibi parametrelere bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir. Kaynak sonrası yapılan SEM incelemelerinde Şekil 4.34'de gösterilen şekilde kaynak bölgesindeki cam elyafların kaynak öncesine göre kesme kuvvetinin etkisiyle boyunun kısaldığı, kaynak sınırı ve kaynak bölgesinde rastgele dağıldığı gözlemlenmiştir. Kaynak yapılacak

kompozit plakalardaki elyafların daha uzun olması durumunda, dikişteki ortalama elyaf uzunluğu daha fazla olacağından daha sağlam birleştirmelerin elde edilebileceğini ifade etmişlerdir. Kaynaklı bağlantıların üç nokta eğme deneyleri sonucunda elde edilen en iyi eğilme dayanımın, kaynak üst bölgesinden eğme testi uygulanan parçalarda ana malzeme eğme dayanımının %64'üne karşılık geldiğini bildirmişlerdir (Czigány & Kiss, 2011).



Şekil 4.34. Ana malzeme, kaynak sınırı ve kaynak bölgesinden alınmış SEM görüntüsü (Czigány & Kiss, 2011).

Ahmadi, Mostafa Arab, Ashenai Ghasemi ve Eslami Farsani (2012), tarafından 4x50x101 mm ölçülerinde %20 karbon elyaf takviyeli PP matrisli kompozit plakalara bindirme SKK sabit kaynak parametrelerinde uygulanarak, takım uç geometrisinin kaynağa etkileri incelenmiştir. SKK işlemlerinde en büyük çapı 4 mm, uç boyu 7,7 mm ve omuz çapı 12 mm olan diş açılmış silindirik, diş açılmış konik, diş açılmış ve diş açılmamış konik/silindirik uç geometrisine sahip takımlar kullanılmıştır. Araştırmacılar tarafından SKK'da, kaynak dayanımı ve görünümüne takım uç geometrisinin etkili olduğu, çekme makaslama deneylerinde en iyi sonuçların diş açılmış silindirik/konik uç geometrisine sahip takım ile 5,70 MPa olarak elde edildiği ifade edilmiştir (Ahmadi, Mostafa Arab, Ashenai Ghasemi & Eslami Farsani, 2012).

Zengin (2012), yapmış olduğu çalışmalarda 6x90x100 mm ölçülerinde PVC plakalar kullanmıştır. SKK işlemlerini uç çapı 6 mm, omuz çapı 20 mm olan kare, üçgen ve silindirik vida açılmış uç geometrisine sahip kaynak takımları, 60, 90 ve 120

mm/dak ilerleme hızları, 1600 ve 1750 dev/dak devir sayıları kullanarak gerçekleştirmiştir. Kaynakların mekanik özelliklerini, çekme dayanımı ve sertlik ölçümleri yaparak değerlendirmiştir. En yüksek kaynak dayanımının, 1750 dev/dak devir sayısı, 120 mm/dak ilerleme hızı ve silindirik vida açılmış uç geometrisine sahip takım ile 11,39 MPa olarak elde edildiğini bildirmiştir. Deneysel çalışmalarda, çekme dayanımı ve mikro sertliğin takım ilerleme hızı, takım devri, uç geometrisi gibi kaynak parametrelerinden etkilendiğini tespit etmiştir. Kaynak merkezinde sertlik değerinde artış olduğunu ve devir sayısı sabit tutulup ilerleme hızı arttırıldığında kaynak bölgesi sertliğinin düştüğünü ifade etmiştir (Zengin, 2012).

Jaiganesh, Maruthu ve Gopinath (2014), tarafından yapılan çalışmada 5x50x100 mm ölçülerinde PP plakalar kullanılmıştır. SKK işlemlerini en büyük çapı 5 mm, uç boyu 4,8 mm, omuz çapı 15 mm olan silindirik, silindirik üzerine kanal açılmış ve konik uç geometrisine sahip kaynak takımları, 5, 10 ve 12 mm/dak ilerleme hızları, 900, 1000 ve 1200 dev/dak devir sayıları kullanarak gerçekleştirmişler. Kaynağın kalitesi, çekme dayanımı ve mikro yapısal analiz ile değerlendirilmiştir. En yüksek kaynak performansına sahip olan kaynakların 1000 dev/dak devir sayısı, 10 mm/dak ilerleme hızı ve 1° eğim açısında elde edildiğini, konik uç geometrisine sahip takımların uygun olduğunu belirlemişlerdir. Kaynaklı malzemenin akma dayanımını, ana malzeme dayanımının ve karakteristiğinin neredeyse %45'i olan 10 MPa olarak tespit etmişlerdir. Kaynak esnasında bir miktar malzemenin çapak ve talaş şeklinde dışarı atıldığı dolayısıyla boşlukların oluştuğu görülmüştür (Jaiganesh vd., 2014).

Karagöz (2014), yapmış olduğu çalışmada 6x75x400 mm ölçülerinde PE ve PP plakalar kullanmıştır. PE malzemelerin SKK işlemlerinde uç ölçüsü M8, M10, M12, Ø8, Ø10, Ø12 ve □6,5, omuz çapı 16 ve 25 mm olan silindirik, vida açılmış ve kare uç geometrisine sahip takımlar kullanmıştır. Kaynak parametresi olarak da 20, 30, 40, 50, 80 ve 126 mm/dak ilerleme hızları, 4000, 5000 ve 6000 dev/dak devir sayıları, 30, 60, 90 ve 120 saniye bekleme (ön ısıtma) süreleri kullanmıştır. PP malzemelerin SKK işlemlerinde uç ölçüsü M12, omuz çapı 25 mm olan silindirik vida açılmış uç geometrisine sahip takım, 25 mm/dak ilerleme hızı, 5400 dev/dak devir sayısı, 90 saniye bekleme (ön ısıtma) süresi ve 0, 0,25, 0,75 ve 1 mm omuz dalma derinliği kullanmıştır. Kaynak özelliklerini belirleyebilmek için sertlik, çekme, eğme, hızlandırılmış ısıl

yaşlanma, vicat yumuşama sıcaklığı, ısıl deformasyon, izod darbe deneyleri, DSC ve SEM görüntü analizleri yapmıştır. PE malzemelerde en yüksek kaynak dayanımını, devir sayısı 6000 dev/dak, ilerleme hızı 20 mm/dak, ön ısıtma süresi 30 saniye, takım uç ölçüsü M8, omuz çapı 25 mm olan kaynak parametrelerinde ana malzeme çekme dayanımının %96'sına karşılık gelen 22,02 MPa olarak tespit etmiştir. PP malzemelerde en yüksek kaynak dayanımının, devir sayısı 5400 dev/dak, ilerleme hızı 25 mm/dak, ön ısıtma süresi 90 saniye, takım uç ölçüsü M12, omuz çapı 25 mm olan kaynak parametrelerinde ana malzeme çekme dayanımının %84'üne karşılık gelen 30,11 MPa olarak elde edildiğini bildirmiştir. Kaynak bölgesi sertliğinin, ana malzeme sertlik değerine göre PE malzemelerde %12, PP malzemelerde %18 daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. PP malzemelerde takım omuz dalma derinliği artırıldıkça ilerleme tarafında boşluk oluştuğunu ve kopmanın bu bölgeden başladığını gözlemlemiştir. Mikro yapı incelemeleri sonucunda dört farklı bölgenin oluştuğunu ve bu bölgelerin; ısıdan etkilenmeyen bölge (ana malzeme), birleşme ara yüzeyi, termomekanik olarak etkilenen karışım bölgesi, birleştirilemeyen kaynak takımı karıştırıcı uç kısmının altında kalan bölge olduğunu ifade etmiştir (Karagöz, 2014).

Ülker (2015), yapmış olduğu çalışmada 5x150x275 mm ölçülerinde HDPE plakalar kullanmıştır. SKK'da uç ölçüsü M5, omuz çapı 16, 20 ve 24 mm olan silindirik vida açılmış uç geometrisine sahip takımlar, 12,5, 20 ve 40 mm/dak ilerleme hızları, 800, 1250 ve 1600 dev/dak devir sayıları, 2° takım eğim açısı ve 50 saniye ön ısıtma süresi kullanmıştır. Optimum kaynak parametrelerini ayarlamak için istatistiksel deney tasarım tekniği olan Taguchi yaklaşımını kullanmıştır. Maksimum kaynak dayanımının elde edilebilmesi için kullanılması gereken optimum kaynak parametrelerinin, devir sayısı 1600 dev/dak, ilerleme hızı 20 mm/dak ve takım omuz çapı 20 mm olarak belirlendiğini ifade etmiştir. Kaynak dayanımının başlangıçtaki kaynak parametreleri ile elde edilen dayanım değerlerine göre yaklaşık %25 oranında iyileştirildiğini ve sonuç olarak, kaynak performansının %57'den %71'e kadar iyileştirilebildiğini bildirmiştir. Elde edilen en yüksek kaynak dayanımının, 12,2 MPa olduğunu ve bu değerin ana malzeme çekme dayanımı olan 17,25 MPa'nın %71'ine karşılık geldiğini belirtmiştir. Deneysel çalışmada, 800 dev/dak'dan daha düşük devir sayılarında ve 40 mm/dak'dan daha yüksek ilerleme hızlarında, düşük sürtünme ısısı ve yetersiz malzeme karışımı oluştuğundan kaynak dayanımının daha düşük olduğunu ifade etmiştir (Ülker, 2015).

Eslami, Ramos, Tavares ve Moreira (2015), çalışmalarında yeni geliştirdikleri Şekil 4.35'de gösterilen sabit omuzlu takım ile PP ve PE plakaların bindirme kaynağını SKK yöntemi ile yapmışlar. SKK işlemlerinde çapı 6 mm, uç boyu 2,4 ve 2,8 mm olan silindirik ve üçgen uç geometrisine sahip kaynak takımları, 20 ve 100 mm/dak ilerleme hızları, 1500 ve 2500 dev/dak devir sayıları kullanmışlardır. PP ve PE plakaların bir biri ile bindirme kaynağında kaynak parametrelerin etkilerini araştırmışlar, 2500 dev/dak devir sayısı ve 100 mm/dak ilerleme hızı ile yapılan kaynaklarda maksimum gerilme dayanımı elde etmişlerdir. Bununla birlikte üçgen uç geometrisine sahip takımlar ile daha sert karıştırma özelliğinden dolayı daha iyi sonuçlar elde edildiğini ve sabit takım omuzu sayesinde daha düzgün yüzeye sahip kaynaklar yapılabildiğini bildirmişlerdir. Bununla birlikte, plastik malzemeleri kaynak yapabilmek için, uçların yumuşatılmış malzemenin etkili bir şekilde türbülans ile akmasını sağlayacak kanallara veya dişlere sahip olması gerektiği ve kanallar olmadan, malzemenin kaynağın ilerleme tarafına yapışarak sağlam bir birleştirme sağlayacak kadar karıştırılamadığını vurgulamışlardır. Takım geometrisi ile birlikte kaynak kalitesini etkileyen en önemli parametrelerin devir sayısı ve ilerleme hızı olduğunu tespit etmişlerdir. SKK esnasında dışarı atılan malzemelerden dolayı kaynağın geri çekme tarafında kök hatası meydana gelmiştir (Eslami, Ramos, Tavares & Moreira, 2015).



Şekil 4.35. Sabit omuzlu takım (Eslami vd., 2015).

Hajideh, Shapurgan, Ramzani ve Nejad (2017), PMMA ve PC plakaların bir biri ile alın birleştirmesinde HSKK yönteminin uygulanabilirliğini, devir sayısı, ilerleme hızı ve ısıtıcı sıcaklığı gibi işlem parametrelerinin kaynakların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelenmişlerdir. HSKK işlemlerinde, 8, 12 ve 20 mm/dak ilerleme hızları, 750, 1540 ve 2100 dev/dak devir sayıları, 30, 70 ve 120 °C pabuç sıcaklıkları kullanmışlar. 2100 dev/dak devir sayısı, 8 mm/dak ilerleme hızı ve

120 °C pabuç sıcaklığı ile yapılan HSKK'da en iyi mekanik özellikleri elde etmişlerdir. Optimum birleştirme durumunda, Polikarbonat'ın %98'ine eşit dayanıma ve polikarbonat'dan daha yüksek sertliğe sahip kaynaklı bağlantı elde edildiğini bildirmişlerdir. Her ne kadar yüksek devir sayıları kaynak malzemesinin daha iyi karışmasını ve daha yüksek gerilme mukavemeti elde edilmesini sağlasa da, aşırı yüksek devir sayılarının (2100 dev/dak'dan fazla) kaynaklarda, PC-PMMA'nın bölgesel olarak ergimesine dolayısıyla gözenek oluşumuna ve sonuç olarak kaynak mekanik özelliklerinin bozulmasına neden olduğunu bildirmişler. Yüksek ilerleme hızlarının da sıcak pabucun ve dönen takım ucunun kaynak bölgesini yeterince ısıtamamasına, malzemenin zayıf karışmasına ve sonuç olarak kaynak çekme dayanımının azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek devir sayılarında daha fazla ısı elde edilmesinden dolayı kaynak bölgesi sertlik değerlerin de daha yüksek çıktığını tespit etmişlerdir (Hajideh vd., 2017).

Banjare, Sahlot ve Arora (2017), tarafından yapılan çalışmada 3x50x150 mm ölçülerinde PP plakalar kullanılmıştır. SKK işlemlerinde uç çapı 3,5 mm, uç boyu 2,75 mm, omuz çapı 18 ve 20 mm olan silindirik vida açılmış kaynak takımları, 360, 540, 720 ve 840 dev/dak devir sayıları, 20 ve 30 mm/dak ilerleme hızları, 110 °C ısıtma ve 2° takım eğim açısı kullanmışlardır. En yüksek çekme dayanımı performansının, ana malzeme çekme dayanımının %55,51'i olan 14,57 MPa olarak 720 dev/dak devir sayısı ve 110 °C ön ısıtma ile elde edildiğini bildirmişlerdir (Banjare vd., 2017).

Sahu vd. (2018), tarafından yapılan çalışmada 6x100x120 mm ölçülerinde PP plakalar kullanılmıştır. SKK işlemlerini CNC dik işleme tezgâhında uç çapı 6 mm, omuz çapı 12 ve 16 mm olan silindirik, kare ve konik uç geometrisine sahip kaynak takımları, 5, 15 ve 25 mm/dak ilerleme hızları, 500, 750 ve 1000 dev/dak devir sayıları kullanarak gerçekleştirmişler. Takım uç geometrisinin, takım omuz çapının ve kaynak parametrelerinin etkisini analiz etmek için çekme deneyleri yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar, kare takım ucu ile daha kaliteli kaynaklar elde edilebileceğini ve işlem parametrelerinin, kaynakların çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Konik uçlu takım ile PP malzemenin iyi karıştırılamadığı, kare uçlu takım ile PP malzemenin başarılı bir şekilde kaynak yapıldığı sonucuna varmışlar ve ana malzeme dayanımına göre maksimum %59,82 performansta kaynak dayanımı

elde etmişlerdir. Omuz çapı büyük olan takım malzemeye daha fazla temas ettiğinden, sabit uçlardan malzemeyi kaldırarak çarpılmasına neden olduğunu bildirmişlerdir. Çekme numuneleri, kaynağın geri çekme tarafından kırıldığından en zayıf bölgenin geri çekme tarafı olduğu belirtmişlerdir (Sahu vd., 2018).

Goli Bidgoli, Ranjbaran, Mirzavand, Shajari, Seyedraoufi ve Porhonar (2019), tarafından yapılan çalışmada 5x30x70 mm ölçülerinde %12 sürekli karbon elyaf takviyeli termoplastik matrisli kompozit plakalar kullanılmıştır. SKK işlemlerinde uç çapı 4 ve 6 mm, omuz çapı 22 ve 26 mm olan vida açılmış özel bir tasarım geometrisine sahip kaynak takımları, 250 ve 355 dev/dak devir sayıları, 6,5 ve 9 mm/dak ilerleme hızları ve değişik açılı bağlama şekilleri kullanmışlardır. Giriş sıcaklığının arttırılmasının, boşlukların oluşmasına, büyümesine ve bunların tünel boşluklarına dönüştürülmesine neden olduğunu ifade etmişlerdir. Takım devir sayısı arttıkça, alt tabaka içinde ezilmiş elyafların erimiş polimer tarafından süspanse edildiğini, karbon elyafların kaynak bölgesinin diğer kısımlarına aktarılarak dağıtıldığını ve polimerin ergidiğini tespit etmişlerdir. Polimerik alanda karbon nanowhisker'in kaynak yapılması ve dağıtılması için 355 dev/dak devir sayısının ve 9 mm/dak ilerleme hızının en uygun parametre olduğunu bildirmişlerdir (Goli Bidgoli vd., 2019).

Nath, Maji ve Barma (2019), tarafından yapılan çalışmada 3x60x100 mm ölçülerinde PP plakalar kullanılmıştır. SKK işlemlerinde uç çapı 3 mm, uç boyu 2,8 mm, omuz çapı 12 mm olan, silindirik sağ diş vida açılmış geleneksel SKK takımı ve üzerinde fren şeklinde ısıtma sistemi olan kendinden ısıtmalı takım kullanmışlardır. Ayrıca, 1600 dev/dak devir sayısı, 6, 12 ve 18 mm/dak ilerleme hızları ve 1° takım eğim açısı kullanılmıştır. SKK sonucunda elde edilen en yüksek çekme dayanımı performansının, ana malzeme çekme dayanımının %71,4'ü olan 16,13 MPa olduğunu ve bu değerin yeni geliştirilen kendinden ısıtmalı takım ile elde edildiğini bildirmişlerdir (Nath, Maji & Barma, 2019).

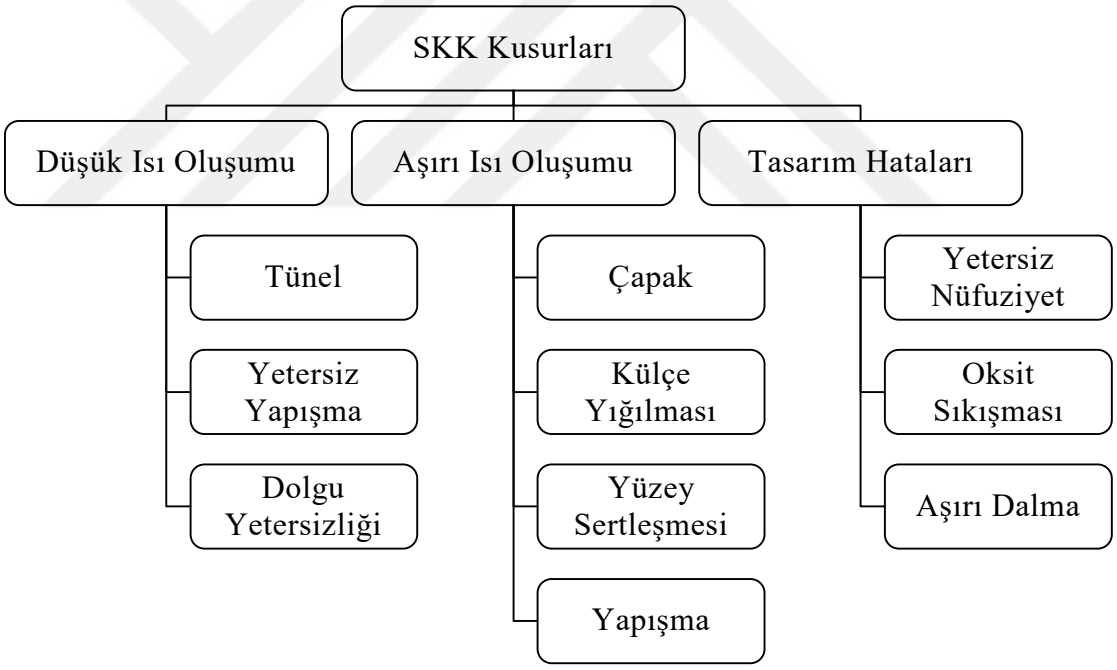
Derazkola, Simchi ve Lambiase (2019), tarafından yapılan çalışmada 4x100x150 mm ölçülerinde lazer ile kesilmiş PC plakalar kullanılmıştır. Bindirme SKK işlemlerinde büyük çapı 6 mm, uç boyu 3,8 mm ve omuz çapı 18 mm olan konik kaynak takımı, 1400, 1800, 2200 ve 2600 dev/dak devir sayıları, 70, 105 ve 170 mm/dak ilerleme hızları kullanmışlardır. Ayrıca 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5 ve 4° takım eğim açıları

ve 0,3, 0,6, 0,9, 1,2, 1,5 ve 1,8 mm takım dalma derinliği kullanılmıştır. Araştırmacılar kaynak kalitesini belirlemek için, eğilme, çekme, çentik darbe, sertlik deneyleri ve DSC analizleri yapmışlardır. En yüksek çekme dayanımı performansını, ana malzeme çekme dayanımının %82'si olan 55 MPa, en yüksek eğilme dayanımı performansını, ana malzeme eğilme dayanımının %76'sı olan 61 MPa olarak tespit etmişlerdir. Bu değerlerin 2200 dev/dak devir sayısı, 105 mm/dak ilerleme hızı, 1,2 mm takım dalma derinliği ve 2,5° takım eğim açısı ile elde edildiğini bildirmişlerdir. En yüksek çentik darbe dayanımının 19 kJ/m² olarak elde edildiğini ve ısı girdisi artıkça sertlik değerinin düştüğünü ifade etmişlerdir (Derazkola, Simchi & Lambiase, 2019).

Lambiase, Grossi ve Paoletti (2019), tarafından yapılan çalışmada 3x60x90 mm ölçülerinde PC plakalar kullanılmıştır. SKK işlemlerinde uç ölçüsü M4, uç boyu 2,7 mm ve omuz çapı 16 mm olan kaynak takımı, 2000, 4000 ve 6000 dev/dak devir sayıları, 20, 40, 60, 80 ve 100 mm/dak ilerleme hızları ve 0,15 mm takım dalma derinliği kullanmışlardır. SKK sonucunda elde edilen en yüksek çekme dayanımı performansının, ana malzeme çekme dayanımının %54'ü olan 32 MPa olduğunu bildirmişlerdir. Yüzeyde kopmuş malzeme birikmesi, boşluk, kabarcık, v çentik ve tünel gibi hataların oluştuğunu ifade etmişlerdir (Lambiase, Grossi & Paoletti, 2019).

Mishra, Sahu, Mahto, Pal ve Pal (2019), tarafından yapılan çalışmada 6 mm kalınlığında HDPE plakalar kullanılmıştır. SKK işlemlerini uç çapı 6 mm, omuz çapı 18 ve 24 mm olan kaynak takımları, 10, 20 ve 30 mm/dak ilerleme hızları, 500, 600 ve 800 dev/dak devir sayıları ve 1° takım eğim açısı kullanarak gerçekleştirmişler. Kaynağın kalitesi, çekme dayanımı, makro - mikro yapı analizleri ve görsel incelemeler yapılarak değerlendirilmiştir. En yüksek kaynak performansına sahip olan kaynakların 800 dev/dak devir sayısı, 10 mm/dak ilerleme hızı ve 1° eğim açısında elde edildiğini belirlemişlerdir. Kaynaklı malzemenin dayanımını, ana malzeme dayanımının (33 MPa) %44,34'ü olan 14,63 MPa olarak tespit etmişlerdir. Takım devir sayısının artmasıyla kaynak dayanımının attığı fakat 900 dev/dak'dan sonra elde edilen ısının dolayısıyla deformasyonun fazla olmasının kaynak dayanımını düşürdüğünü, 500 dev/dak'dan daha düşük devir sayılarında ise elde edilen ısının malzemenin plastik deformasyona uğramasını sağlamaya yetmediği için kaynak dayanımının düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı şekilde düşük ilerleme hızlarında malzemenin çok fazla

ısındığı ve ergimeye başladığını, yüksek ilerleme hızında da kaynak için yeterli ısının elde edilemediğini belirtmişlerdir. Omuz çapı büyük olan takımlar kullanıldığında meydan gelen deformasyon ve sürtünmenden dolayı kaynak bölgesinde malzeme kaybı oluştuğundan büyük omuz çaplarının plastikler için uygun olmadığı sonucuna varmışlardır. Kaynaklı parçaların çekme deneylerinde kopmanın genellikle geri çekme tarafından meydana geldiğini ve gevrek bir kopma özelliği göstererek gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Geleneksel SKK takımlarının, takım alın yüzeyi (omuz) sürtünme hareketinden dolayı elyaf moleküllerine zarar verdiğinden plastiklerin kaynağında kullanılmasının uygun olmadığını, bunun yerine sabit omuzlu takımların kullanılmasının daha uygun olduğunu bildirmişlerdir. Araştırmacılar, yaptıkları araştırmalar soncunda SKK'da oluşabilecek kusurları Şekil 4.36'da gösterilen şekilde ifade etmişlerdir (Mishra vd., 2019).



Şekil 4.36. SKK'da oluşan kusurlar (Mishra vd., 2019).

Çizelge 4.2'de araştırmacılar tarafından elde edilen kaynak mukavemet performansları, deneylerde kullanılan malzemeler, kullanılan kaynak parametreleri ve kaynaklarda kullanılan takımlar gösterilmektedir (Mishra vd., 2019).

Çizelge 4.2. Plastiklerin SKK ile birleştirilmesi sonucu elde edilen çekme dayanımları (Mishra vd., 2019).

Ana Malzeme	Sürtünme Karıştırma Kaynağı Sonuçları		
	Kullanılan Takım	Kullanılan Parametreler	% Ana Malzemeye Göre Kaynak Performansı
HDPE	Silindirik omuz ve uç	3000 - 20000 (dev/dak) 10 - 44 (mm/dak)	88
UHMWPE	Silindirik omuz ve vida açılmış uç	960 ve 1960 (dev/dak) 10 ve 20 (mm/dak)	89
%30 GF-PP	Konik kanallı, üçgen vida açılmış, üçgen ve silindirik kanallı uç	400 - 1000 (dev/dak) 8 - 20 (mm/dak) 0 ve 1°	25
%20 GF-PP	Silindirik vida açılmış, konik vida açılmış ve konik uç	1000 (dev/dak) 16 (mm/dak) 1°	19
PP	Sıcak pabuç (sabit omuzlu)	1080 (dev/dak) 51, 102, 203, 305 (mm/dak) 110, 127, 143, 160 ve 177 °C	95
PA 6	Sol diş vida açılmış uç	1000 (dev/dak) 10 (mm/dak)	19,7 (M03) 47,4 (M04)
ABS	Sıcak pabuç (sabit omuzlu)	800 - 1600 (dev/dak) 20 - 80 (mm/dak) 50 - 100 °C	88
PC	Silindirik omuz ve vida açılmış uç	1000 - 1850 (dev/dak) 20 ve 40 (mm/dak) 1 ve 3°	30,78
ABS	Sabit omuz ve konik uç	1000 - 1500 (dev/dak) 50 - 200 (mm/dak) 0,75 - 4 kN	67
ABS	Sabit omuzlu, konveks ve silindirik uç	400 - 800 (dev/dak) 20 - 60 (mm/dak)	60,63
MDPE	Silindirik omuz ve uç	1000 - 1800 (dev/dak) 12, 16 ve 20 (mm/dak) 1 ve 2°	75

Laieghi, Alipour ve Mostafapour (2020), tarafından yapılan çalışmada 5x40x80 mm ölçülerinde ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş ağrılıkça %20 NBR, %80 (ağırlıkça %3, 5 ve 7 Halloysite nanotube (HNT) takviyeli) PA 6 plakalar kullanılmıştır. HSKK işlemlerinde uç çapı 5 mm, uç boyu 3,9 mm ve omuz çapı 10 mm olan vida açılmış

sabit omuzlu (pabuçlu) kaynak takımı kullanmışlardır. Ayrıca 900, 1120 ve 1400 dev/dak devir sayıları, 14 mm/dak ilerleme hızı, 140 °C pabuç sıcaklığı ve 0,9 mm takım dalma derinliği kullanılmıştır. Araştırmacılar kaynak kalitesini belirlemek için, çekme, çentik darbe ve sertlik deneyleri yapmışlardır. Ekstrüzyon yöntemi ile üretilen PA 6/NBR/HNT malzemelerin çekme dayanımının 66,4 MPa, çentik darbe dayanımının 8,6 kJ/m² ve sertlik değerinin 68 Shore D olduğunu bildirmişlerdir. Kaynaklı parçalardan elde edilen en yüksek çekme dayanımının 61 MPa, en yüksek çentik darbe dayanımının 13,2 kJ/m² ve kaynak bölgesi sertlik değerinin 66 Shore D olduğunu belirtmişlerdir. Bu değerlerin 900 dev/dak devir sayısı, 14 mm/dak ilerleme hızı, 0,9 mm takım dalma derinliği ve 140 °C pabuç sıcaklığı ile %5 HNT katkılı malzemelerde elde edildiğini ifade etmişlerdir (Laieghi vd., 2020).

Sharma, Choudhury ve Debnath (2020), tarafından yapılan çalışmada 6x100x200 mm ölçülerinde basınçlı kalıplama yöntemi ile üretilmiş polilaktik asit (PLA) plakalar kullanılmıştır. SKK işlemlerinde en büyük çapı 6 mm, uç boyu 5,7 mm, omuz çapı 18 mm olan, silindirik, vida açılmış ve konik uç geometrisine sahip kaynak takımları, 700, 1400 ve 2000 dev/dak devir sayıları, 20, 30 ve 40 mm/dak ilerleme hızları kullanmışlardır. SKK sonucunda elde edilen en yüksek çekme dayanımı performansının, ana malzeme çekme dayanımının %65,92'i olan 27,04 MPa olduğunu, bu değerin 1400 dev/dak devir sayısı, 30 mm/dak ilerleme hızı ve silindirik uç geometrisine sahip takım ile elde edildiğini bildirmişlerdir. Konik uç geometrisine sahip takım ile yapılan kaynaklarda yüzeyde çapakların oluştuğunu ve vida açılmış uç geometrisine sahip takım ile yapılan kaynaklarda da yetersiz malzeme akışından dolayı boşlukların oluştuğunu ifade etmişlerdir (Sharma, Choudhury & Debnath, 2020).

BÖLÜM 5

PLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN BELİRLENMESİ VE İMALİ

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi literatür araştırmalarında kaynak edilebilirliği ile ilgili olarak çalışmalar yapılmış olan PA 6, PMMA, PE, PP, PTFE vb. malzemeler temin edilerek SKK uygulamalarında kullanılacak plastik matrisli kompozit malzemelerin matris malzemesinin, kullanılacak takımların ve kaynak parametrelerinin belirlenmesine yönelik SKK ön çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra belirlenen matris malzemeleri kullanılarak plaka olarak üretilmiş plastik matrisli kompozit malzemeler araştırılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda plastik matrisli kompozit malzemelerin daha çok son ürün olarak imal edildiği tespit edilerek SKK uygulamalarında kullanılacak malzemelerin üretilmesine karar verilerek imalatı yapılmıştır.

5.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılacak Malzemelerin Belirlenmesi

Sürtünme karıştırma kaynağı ön denemelerinde kullanılan takımlara ait örnekler Şekil 5.1'de verilmiştir.

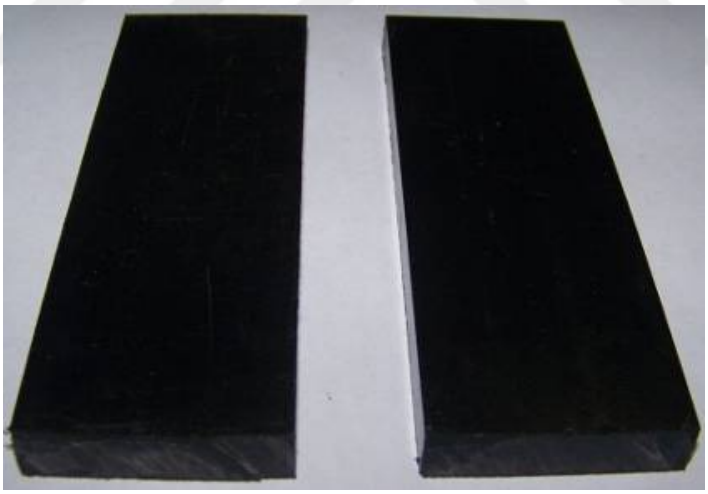


Şekil 5.1. Sürtünme karıştırma kaynağı ön denemelerinde kullanılan takım örnekleri.

Sürtünme karıştırma kaynağı ön denemelerini yapmak için ilk olarak PA 6 malzemeler temin edilmiştir. Bağlama kalıbına uygun şekilde imalat resimleri çizilmiş ve kesildikten sonra imalat resmine uygun şekilde işlenmiştir.

PA 6 malzemeden 10 mm kalınlığında ve 100 mm boyunda hazırlanmış parçalar Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Malzemelere yapılan sertlik ölçümlerinde sertlik değerlerinin 63 - 65 Shore D olduğu tespit edilmiş olup PA 6 malzeme için düşük bir sertlik değeri olduğu düşünülmektedir.

Poliamidler, yüksek kristal yapıya sahip, yapısı içinde amid grubu bulunan ve molekül ağırlığı yüksek olan lineer plastiklerdir. Sertlik ve dayanımı yüksek olan poliamidlerin PA 6, PA 6.6, PA 6.10, PA 11 ve PA 12 gibi birçok çeşidi vardır. Mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı en önemli olan poliamidler PA 6 ve PA 6.6'dır. Çünkü sertlik, sağlamlık ve sıcaklık dayanımları diğer poliamidlerden daha iyidir. Bu poliamidlerden başka özel amaçlar için üretilmiş olan PA 4.6 ve PA 8 gibi poliamidler de vardır (Kocabaş, 2014).



Şekil 5.2. PA 6 malzemeden hazırlanmış 10 mm kalınlığında parçalar.

Doğal poliamidler protein, yün ve ipek formlarında bulunabilirler. Yapay olarak elde edilen poliamidler ticari olarak Naylon ve Kevlar olarak da adlandırılırlar. Yapay poliamidler yaygın olarak araç lastiklerindeki kord bezlerinde, tekstil ürünlerinde, diş fırçası kıllarında, olta iplerinde, ağ ve filelerde, hava yastıklarında, manifold ve benzin tankları gibi otomotiv yedek parçalarında, tırmanma iplerinde, çeşitli makine

parçalarında, paraşütlerde, gitar tellerinde, tenis ve squash raket tellerinde kullanılmaktadırlar (Akdoğan Eker, 2009; Kıralp vd., 2006; Kocabaş, 2014).

Takviye edilmemiş PA 6'nın sertlik, tokluk, sürünme ve ısıl deformasyon dayanımı oldukça yüksektir. Poliamidin kullanım alanını genişletmek ve özelliklerini daha da iyileştirmek için bazı dayanımı artıran malzemeler, toklaştırıcılar ve maliyeti düşürmek için dolgu malzemeleri eklenebilir. PA 6, homopolimer, darbe dayanımlı, cam fiber takviyeli ve elyaf / mineral karışımlı olmak üzere dört ana gruba ayrılır (Yalçın & Gürü, 2007).

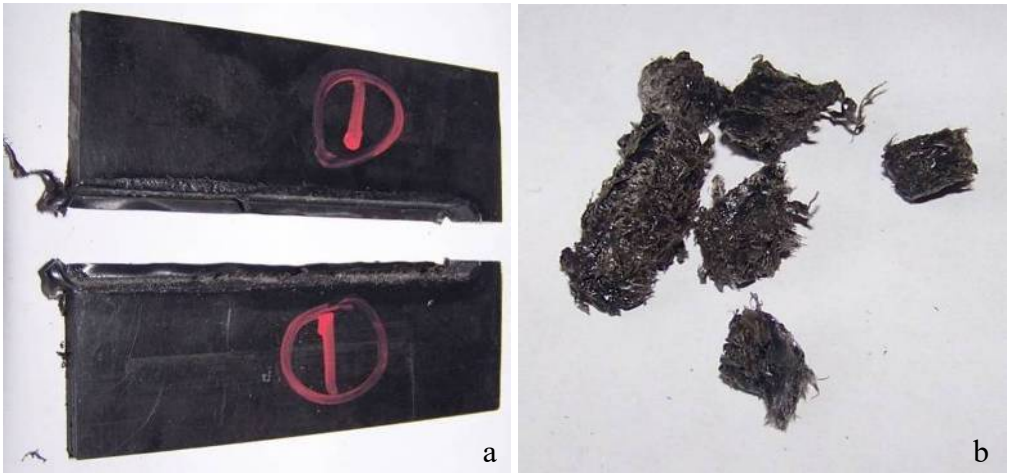
Su emme oranının yüksek olması poliamidin en kötü özelliğidir. Tüm poliamid türleri fiber ile takviye edilebilirler. Poliamid 6, döküm yapılabilen bir yapıya sahiptir. Diğer poliamid türleri zor aktığından yüksek basınç uygulanabilen enjeksiyon ve ekstrüzyon yöntemleri kullanılarak üretilirler (Ay, 2012). Poliamid 6 malzeme özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Poliamid 6 malzeme özellikleri (*Aydınlar*, 2020a).

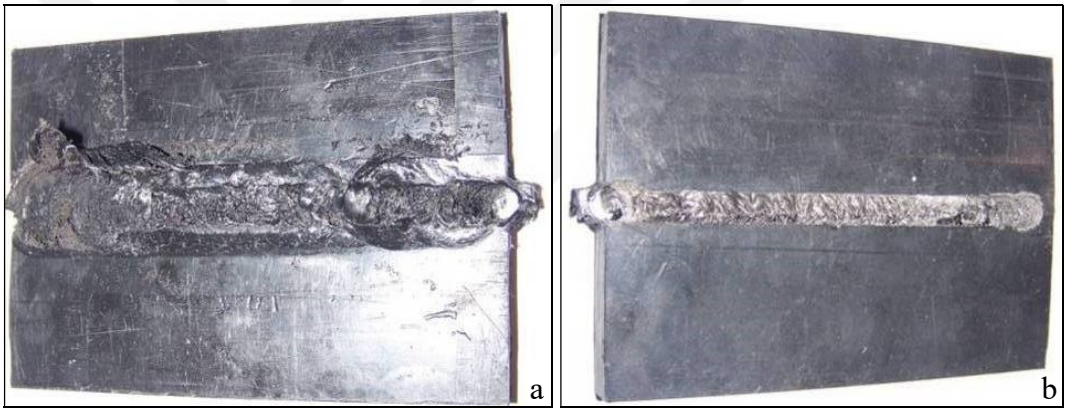
Yoğunluk	1,15 gr/cm³
Kopma Dayanımı	80 MPa
Kopmadaki Uzama	%40
Sertlik	85 Shore D
Ergime Sıcaklığı	220 ºC

PA 6 malzemelere farklı takımlar ve farklı kaynak parametreleriyle SKK yapılmaya çalışılmıştır. Bazı takımlar ve kaynak parametreleri ile yapılan çalışmalarda malzemelerin Şekil 5.3'de gösterilen şekilde talaş formuna geldiği fakat küçük parçalar halinde bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir.

Bazı takımlar ve kaynak parametreleri ile yapılan çalışmalarda malzemelerin Şekil 5.4'de gösterilen şekilde aşırı şekilde yumuşayarak çapak olarak veya takım tarafından kesilerek talaş halinde dışarı atıldığı dolayısıyla kaynak bölgesinde boşlukların oluştuğu ve parçaların kısmen de olsa bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3. 10 mm kalınlığında PA 6 kaynak denemesi yapılmış parça; a) Kaynama olmamış parçalar, b) Kaynak esnasında talaş şeklinde küçük parçalar halinde kaynamış malzemeler.

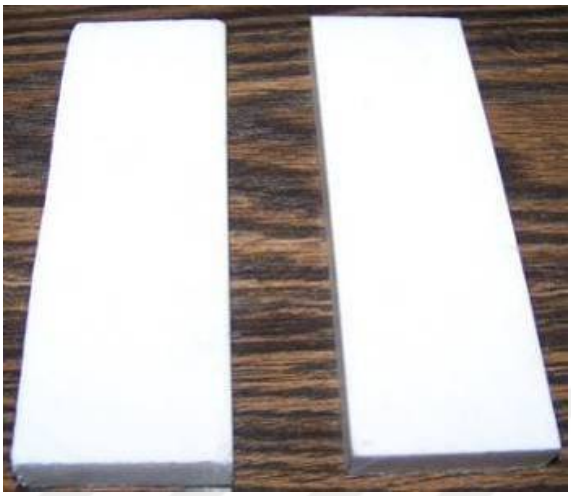


Şekil 5.4. 10 mm kalınlığında PA 6 kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

Sürtünme karıştırma kaynağı ön denemelerini yapmak için PTFE malzemeler temin edilmiştir. Bağlama kalıbına uygun şekilde imalat resimleri çizilmiş ve kesildikten sonra imalat resmine uygun şekilde işlenmiştir. PTFE malzemeden 10 mm kalınlığında, 100 mm boyunda hazırlanmış parçalar Şekil 5.5'de gösterilmiştir. Malzemelere yapılan sertlik ölçümlerinde sertlik değerlerinin 55 - 57 Shore D olduğu tespit edilmiş olup PTFE malzeme özelliklerine uygun bir sertlik değeridir.

Bir sanayi plastiği olan PTFE, Flor atomlarıyla doymuş uzun ve düz bir karbon zincirinden oluşmuş moleküler yapıya ve atomları arasında kuvvetli bağların olmasından dolayı inert özelliklere sahiptir. Isı, kimyasal madde, nem, elektrik atlama

(dielektrik), sürtünme dayanımı iyi olan Teflon hiçbir maddeye yapışmaz ve sürtünme katsayısı diğer katı cisimlerden daha düşüktür (“Teflon”, 2020).



Şekil 5.5. PTFE malzemeden hazırlanmış 10 mm kalınlığında parçalar.

Teflon, kullanım sıcaklığı 260 °C’nin üzerine çıktığında bozulmaya başlar, sıcaklık 350 °C’ye ulaştığında yapısı bozulur. Yüksek ısı dayanımı gerektiren conta, keçe, bant, vana seti, salmastra, taşıyıcı bantların ve merdanelerin, kimyasal maddelere dayanıklı boruların, karıştırıcıların, laboratuar cihazlarının, filtrelerin, diyaframların, elektrik gerilimlerine dayanıklı kablo yalıtkanlarının, izolatörlerin, elektrikli aletlerdeki muhtelif yalıtkan parçaların imalatında kullanılmaktadır. Ayrıca makine sanayinde sürtünme dayanımı yüksek yağsız yatakların ve burçların, köprü ve binalardaki kayar yatakların, segmanların ve yağ sıyırma siğillerinin, pnömatik ve hidrolik parçaların, bilgisayar mouse altlarının üretiminde kullanılmaktadır (“Teflon”, 2020). Teflon malzemenin özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Teflon malzeme özellikleri (*Aydınlar*, 2020b).

Yoğunluk	2,13 - 2,23 gr/cm³
Kopma Dayanımı	25 - 30 MPa
Kopmadaki Uzama	%250 - 300
Sertlik	53 - 57 Shore D
Ergime Noktası	325 - 330 ºC

PTFE malzemelere farklı kaynak parametreleriyle SKK yapılmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmaların tamamında malzemelerin Şekil 5.6'da gösterilen şekilde talaş formuna geldiği fakat küçük parçalar halinde azda olsa bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir.

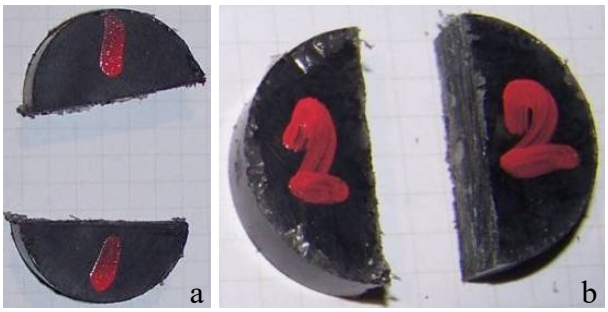
PTFE gibi flor içerikli plastiklerin sürtünme katsayısı düşük olduğundan sürtünme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi oldukça zordur. PTFE'nin sürtünme katsayısı diğer termoplastiklere göre çok düşüktür (Ülker, 2015).



Şekil 5.6. 10 mm kalınlığında PTFE kaynak denemesi yapılmış kaynama olmamış parçalar; a) Birinci kaynak denemesi, b) Üçüncü kaynak denemesi, c) Kaynak esnasında talaş şeklinde küçük parçalar halinde kaynamış malzemeler.

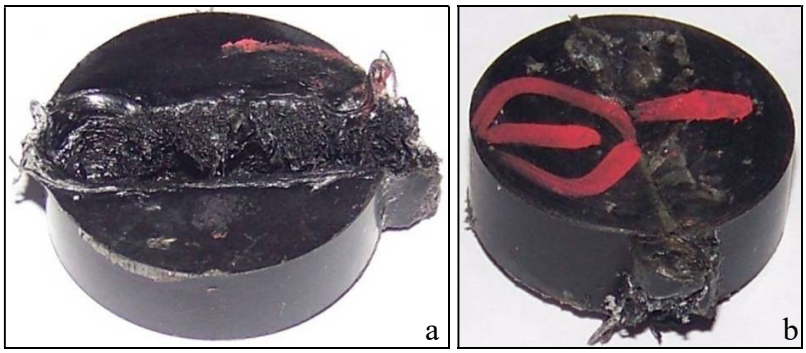
Sürtünme karıştırma kaynağı ön denemelerini yapmak için Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Öğretim Üyesi Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER hocamız tarafından silindirik olarak temin edilmiş olan homejen ve homejen olmayan dağılımlı nano karbon tüp takviyeli polipropilen (PP/CNT) kompozit malzemeler kullanılmıştır. Şekil 5.7.a'da nispeten homojen dağılımlı PP/CNT ve Şekil 5.7.b'de homojen olmayan dağılımlı PP/CNT malzemelerden kesilerek SKK deneylerine uygun olarak hazırlanmış parçalar gösterilmiştir. Malzemelere yapılan sertlik ölçümlerinde, nispeten homojen dağılımlı PP/CNT için 68 - 71 Shore D, homojen olmayan dağılımlı PP/CNT için 68 - 74 Shore D sertlik değerleri ölçülmüştür. Nispeten homojen dağılımlı PP/CNT malzemede takviye malzemesinin daha homojen dağılmasından dolayı sertlik dağılımının daha homojen olduğu görülmüştür. Homojen olmayan dağılımlı PP/CNT malzemede takviye malzemesinin homojen dağılmamasından dolayı sertlik dağılımının

homojen olmadığı ve sertlik farkının çok fazla olduğu görülmüştür. Ölçülen Sertlik değerlerinin PP malzeme özelliklerine uygun olduğu görülmüştür.



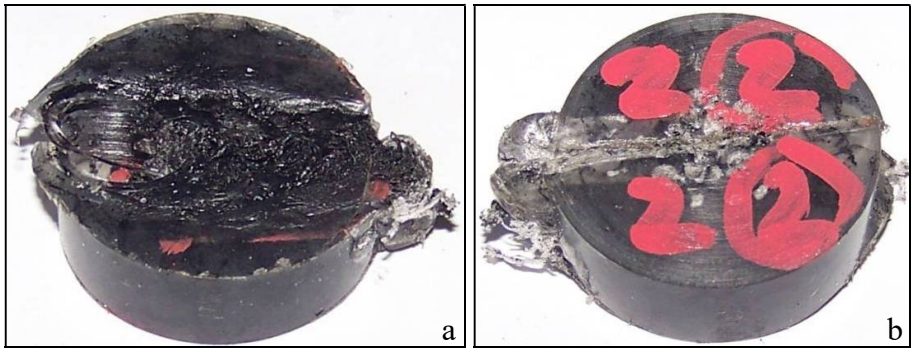
Şekil 5.7. PP/CNT malzemeden hazırlanmış 10 mm kalınlığında parçalar; a) Nispeten homojen dağılımlı, b) Homojen olmayan dağılımlı.

PP/CNT nispeten homojen dağılımlı malzemelere farklı takımlar ve farklı kaynak parametreleriyle SKK yapılmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmaların hepsinde malzemelerin Şekil 5.8'de gösterilen şekilde aşırı şekilde yumuşayarak çapak formunda veya takım tarafından kesilerek talaş olarak dışarı atıldığı dolayısıyla kaynak bölgesinde boşlukların oluştuğu ve parçaların kısmen de olsa bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.8. PP/CNT nispeten homojen dağılımlı 10 mm kalınlığında kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

PP/CNT homojen olmayan dağılımlı malzemelere farklı kaynak parametreleriyle SKK yapılmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmaların hepsinde malzemelerin Şekil 5.9'da gösterilen şekilde aşırı yumuşayarak çapak olarak veya takım tarafından kesilerek talaş halinde dışarı atıldığı dolayısıyla kaynak bölgesinde boşlukların oluştuğu ve parçaların kısmen de olsa bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir.

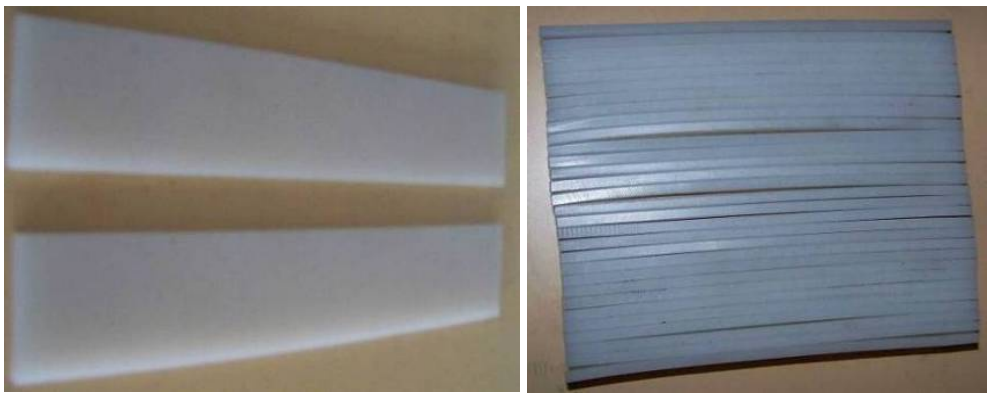


Şekil 5.9. PP/CNT homojen olmayan dağılımlı 10 mm kalınlığında kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

PP/CNT malzemelere yapılan sürtünme karıştırma kaynak denemelerinde parçaların çok küçük olmasından dolayı kaynak esnasında kaynak parametrelerin etkisini belirlemeye yetecek kadar deneme yapılamamıştır. Daha büyük numuneler ile farklı kaynak parametreleri ve karıştırıcı takımlar kullanılarak yapılacak SKK denemelerinden daha iyi sonuçlar alınabileceği düşünülmektedir.

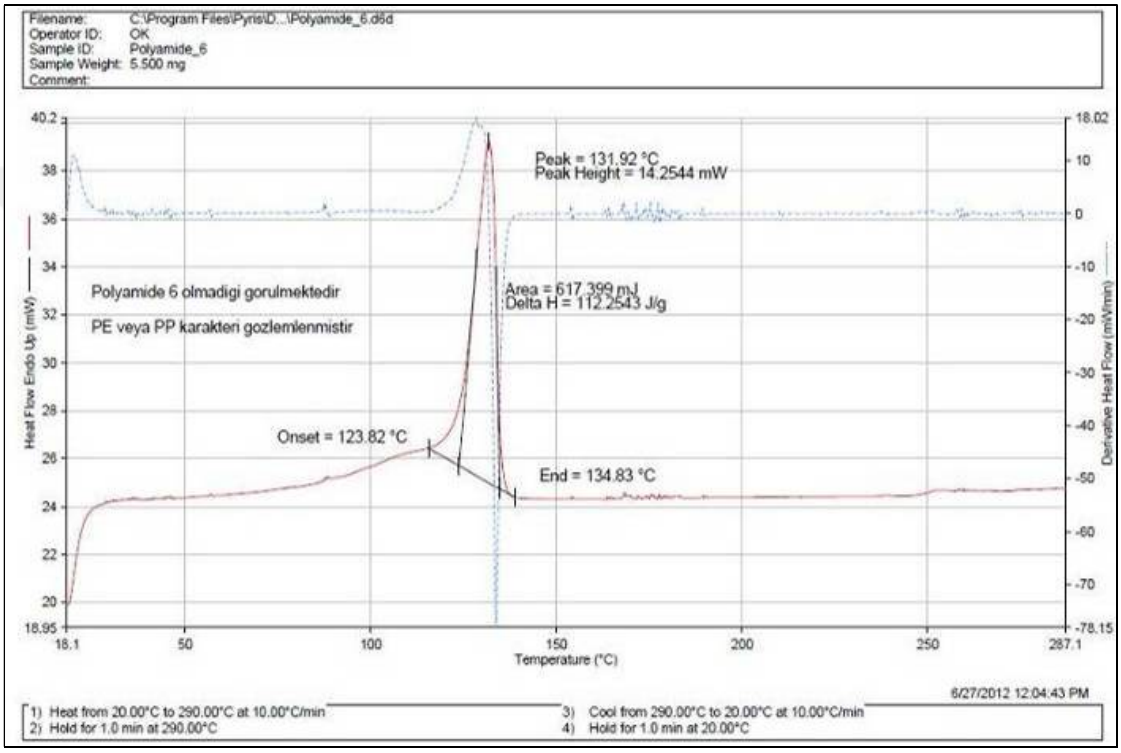
Başlangıçta kullanılan kaynak takımlarının talaş kaldırmasından dolayı daha yuvarlak hatlı takımlar kullanılarak, farklı kalınlıklarda ve farklı özelliklerde malzemeler ile SKK denemelerine devam edilmiştir.

Sürtünme karıştırma kaynağı denemelerini yapmak için 5 mm kalınlığında PA 6 malzemeler temin edilmiştir. Bağlama kalıbına uygun şekilde imalat resimleri çizilmiş ve kesildikten sonra imalat resmine uygun olarak işlenmiştir. PA 6 malzemeden 5 mm kalınlığında, 200 mm boyunda hazırlanmış parçalar Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. PA 6 olarak temin edilen PE ve PP özelliği gösteren malzemeden hazırlanmış 5 mm kalınlığında parçalar.

PA 6 olarak temin edilen malzemelerin Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuarlarında yapılan Şekil 5.11'de gösterilen Diferansiyel Tarama Kalorimetri (DSC) analizi sonucunda PE ve PP özelliği gösterdiği tespit edilmiştir. Malzemelere yapılan sertlik ölçümlerinde sertlik değerlerinin 63 - 66 Shore D olduğu tespit edilmiş olup PA 6 malzeme için düşük bir sertlik değeri olduğundan bu sonucu doğrulamaktadır.



Şekil 5.11. PA 6 olarak temin edilen PE ve PP özelliği gösteren malzeme DSC analiz grafiği.

Etilen monomerinin polimerizasyon işlemi sonrası elde edilen uzun zincirli bir yapısı olan makro moleküllü polimere "polietilen" denilir. Polietilen homopolimer bir plastiktir. İnsanoğlunun ilk ürettiği polietilen, düşük yoğunluklu polietilen olarak bilinen LDPE'dir (Ekşi, 2007).

Genel olarak cazip fiyat, kolay dönüşüm, kimyasal asallık, darbe dayanımı, düşük su emme, düşük yoğunluklu (yüksek yoğunluklu dahil), iyi bir elektrik yalıtkanlığı, düşük sürtünme katsayısı, gıda ile temas için uygunluğu, kaynak kolaylığı ve sert sınıfları için iyi işlenebilirlik, yüksek enerjili radyasyona karşı iyi direnç,

fizyolojik tepkisizliği ve aşırı yüksek moleküler ağırlıklı (UHMWPE) hariç işleme yöntemlerinin çok yönlülüğü gibi avantajları vardır. Fakat kullanım sıcaklığının düşük olması, UV ışınları, yorulma çatlağı, sürünme, düşük rijitlik, önemli derecede büzülme, sınırlı şeffaflık gibi dezavantajları bulunmaktadır. Polietilen malzemeler moleküler ağırlığı ve yoğunluğuna göre sınıflandırılırlar (Bayraktar, 2016).

- Aşırı düşük ve çok düşük yoğunluklu (ULDPE ve VLDPE)
- Düşük yoğunluklu (LDPE ve LLDPE)
- Orta yoğunlukta (MDPE)
- Yüksek yoğunluklu (HDPE)
- Yüksek moleküler ağırlıklı (HMWPE)
- Aşırı yüksek moleküler ağırlıklı (UHMWPE)

Polietilenin yaygın olarak tercih edilen türleri düşük ve yüksek yoğunluklu olanlarıdır (Ekşi, 2007; Hüner, 2014).

Polietilen malzemeler kapların, mutfak eşyalarının, plastik kutuların, plastik tüplerin, boruların, oyuncakların, kaplamaların, kabloların yalıtkan katmanlarının, ambalaj filmlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. İşlevsel olduğu kadar, maliyetinin düşük olmasından dolayı tercih edilirler. Ayrıca, ucuz süpermarket çantalarının, poşetlerin ve torbaların imalatında, plastik şişe imalatında geniş kullanım alanı bulur (Akdoğan Eker, 2009). Polietilen malzemenin özellikleri Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Polietilen malzeme özellikleri (*Aydınlar*, 2020c).

Yoğunluk	0,94 - 0,95 gr/cm³
Kopma Dayanımı	22 - 28 MPa
Sertlik	60 - 65 Shore D
Ergime Sıcaklığı	95 - 140 ºC

Polipropilen çok amaçlı bir plastiktir. Son kullanım alanlarına uygun hale getirmek için polipropilenin mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Uygun maliyetli mekanik özellikler elde etmek için mika, cam elyaf, karbon elyaf gibi çeşitli takviye ve dolgu malzemeleri polipropilenin içine katılabilmektedir. Elyaf şeklindeki takviye malzemeleri eğilme dayanımı, çekme dayanımı, ısıl çarpılma dayanımı, darbe dayanımı gibi mekanik ve ısıl özellikleri arttırabilir. Talk ve kalsiyum karbonat gibi dolgular malzeme maliyetini düşürürken bazı dayanım ve darbe özelliklerinin gelişmesine katkı sağlayabilir (Hüner, 2014).

Polipropilenler, oda sıcaklığında iyi mekanik özellik, kolay şekillenebilme, yüksek yorulma direnci, kimyasal inertlik, düşük su emme, düşük yoğunluklu, ıslak ortamlarda iyi elektriksel yalıtım, işleme yöntemlerinin çok geniş olması, geniş akışkanlık oranlarına sahip olması ve ucuz olmaları nedeniyle oldukça talep edilen ürünlerdir. Fakat kullanım sıcaklığının düşük olması, UV ışınları, kırılgan, düşük rijitlik ve çekme oranları olması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Polipropilen ürünlerde şeffaflığın sağlanması sınırlıdır. Yüzey gerilimleri nedeniyle, yüzey işlemleri yapılmadan boyanma, baskı, yapışma özellikleri düşüktür (Bayraktar, 2016).

Polipropilen yıpranır fakat birçok kimyasal çözücü, baz ve aside alışılmadık şekilde dayanıklıdır. Hem plastik hem de fiber olarak uygulamalarda kullanılan çok yönlü polimerlerden biridir. Bu tür özellikler polipropilenin mühendislik plastiği olarak kullanılmasına izin verir. Polipropilen, diğer plastik malzemelere kıyasla süneklik, kırılma tokluğu dayanımı ve yorulma dayanımı açısından daha iyi sonuçlar verir (Jaiganesh, Maruthu & Gopinath, 2014).

PP malzemeler piyasada, ambalaj filmlerinin, otomobil parçalarının, çeşitli el aletlerinin ve ev eşyalarının üretiminde, tel ve kablo kaplamalarında, gıda maddelerinin paketlenmesinde, kaplama ve laminasyon malzemesi olarak, baskı plakalarının, halı ve yer döşemelerinin imal edilmesinde, halat ve çuval lifi yapımında, akü kabı, meşrubat şişesi kasalarının, laboratuar donanımlarının, oyuncakların, radyatör ızgaralarının ve hassas cihaz kutularının üretiminde, yapay çim imalatında, plastik boruların, özel giysilerin, balık ağlarının ve şeritlerin üretiminde, sentetik kağıt imalatında, mühendislikteki plastik uygulamalarında, değiştirilebilir filtrelerin, optik ve elektrik malzemelerinin, seyahat eşyalarının, profillerin, levhaların, keçe ve paspasların

üretiminde ve ilaç ambalaj sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır (Çağlarer, 2004). Polipropilen malzemenin özellikleri Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Polipropilen malzeme özellikleri (*Aydınlar*, 2020d).

Yoğunluk	0,92 gr/cm³
Kopma Dayanımı	30 MPa
Sertlik	70 Shore D
Ergime Sıcaklığı	130 - 171 ºC

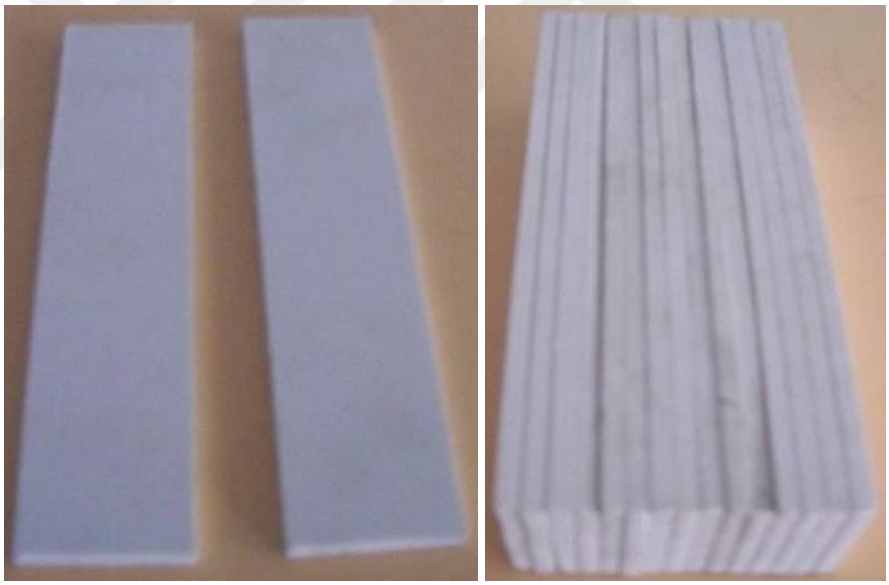
PA 6 olarak temin edilen PE ve PP özelliği gösteren malzemelere farklı takımlar ve farklı kaynak parametreleriyle SKK denemeleri yapılmıştır. PA 6 olarak temin edilen PE ve PP özelliği gösteren malzemelerin SKK denemelerinde karıştırıcı takım alın yüzeyinin (omuz) parçaların üst yüzeyine temas ettiği yerlerde kullanılan bütün kaynak parametrelerinde genel olarak kaynama olduğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takımın parçaların üst yüzeyine temas etmediği yerlerde kaynamanın kısmi olduğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların yüzeyine daldığı durumlarda sıcaklığın aşırı yükselmesinden dolayı yüzeylerde ergime oluşmasına bağlı olarak malzeme kaynak bölgesinde tutulamadığından karıştırıcı takımın alın yüzeyinin temas ettiği yüzeylerde oyukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların yüzeyine dalma miktarı azaldıkça yüzeyde oluşan oyukların azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.12. PE - PP özelliği gösteren 5 mm kalınlığında kaynak denemesi yapılmış parça.

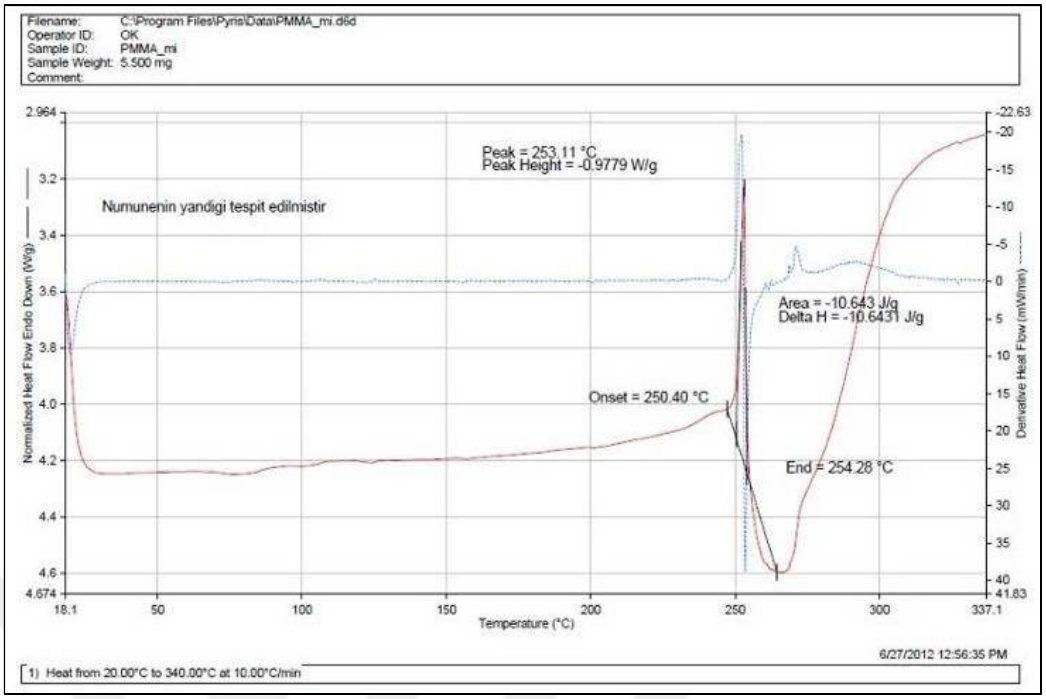
Bazı takımlar ve kaynak parametreleri ile yapılan çalışmalarda malzemelerin talaş şekline geldiği fakat kaynak bölgesinde küçük parçalar halinde bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir. Bazı takımlar ve kaynak parametreleri ile yapılan çalışmalarda malzemelerin Şekil 5.12'de gösterilen şekilde aşırı yumuşayarak çapak olarak veya takım tarafından kesilerek talaş formunda dışarı atıldığı dolayısıyla kaynak bölgesinde boşlukların oluştuğu ve parçaların kısmen de olsa bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir.

Sürtünme karıştırma kaynağı denemelerini yapmak için 5 mm kalınlığında PMMA malzemeler temin edilmiştir. Bağlama kalıbına uygun şekilde imalat resimleri çizilmiş ve kesildikten sonra imalat resmine uygun olarak işlenmiştir. PMMA malzemeden 5 mm kalınlığında, 165 mm boyunda hazırlanmış parçalar Şekil 5.13'de gösterilmiştir.



Şekil 5.13. PMMA malzemeden hazırlanmış 5 mm kalınlığında parçalar.

PMMA olarak temin edilen malzemelerin Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuarlarında yapılan Şekil 5.14'de gösterilen DSC analizi sonucunda malzemenin yandığı tespit edilmiştir. Malzemelere yapılan sertlik ölçümlerinde sertlik değerlerinin 49 - 52 Shore D olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.14. PMMA malzeme DSC analiz grafiği.

Akrilik olarak da adlandırılan PMMA sentetik boya ve elyaflarda kullanmaktadır. Çok sert ve camdan daha saydam bir özelliğe sahiptirler. PMMA ticari olarak pleksiglas, lucite olarak da adlandırılır ve bazı sektörlerde cam olarak da kullanılır. II. Dünya Savaşı esnasında uçak güneşlikleri ve denizaltı periskopları pleksiglas malzemeler kullanılarak imal edilmiştir, son zamanlarda özellikle açık hava reklamcılık, mobilya ve dekorasyon endüstrisinde, basketbol potalarında, mutfak malzemelerinde, denizcilik, otomotiv yan sanayinde ve camın kullanıldığı her yerde alternatif malzeme olarak kullanılabilmektedir (Akdoğan Eker, 2009).

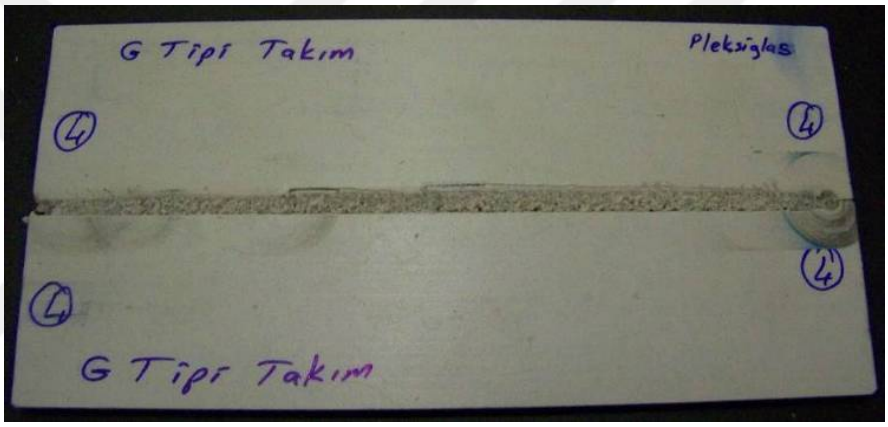
Kristal gibi parlak bir görünüme sahip, açık alanda yıpranma dayanımı yüksek, ağırlık olarak camdan %50 daha hafif olan bu plastik malzemenin darbe dayanımı da yüksektir (Ay, 2012). Pleksiglas malzemenin özellikleri Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Pleksiglas malzeme özellikleri (*Teknolüks, 2020*).

Yoğunluk	1,19 gr/cm³
Kopma Dayanımı	83 MPa
Kopmadaki Uzama	%5

PMMA malzemelere farklı takımlar ve farklı kaynak parametreleriyle SKK denemeleri yapılmıştır. Yapılan çalışmaların tamamında malzemelerin talaş şekline geldiği bir kısmının kaynak bölgesinden dışarı atıldığı büyük bir kısmının da kaynak bölgesinde küçük parçalar halinde bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir.

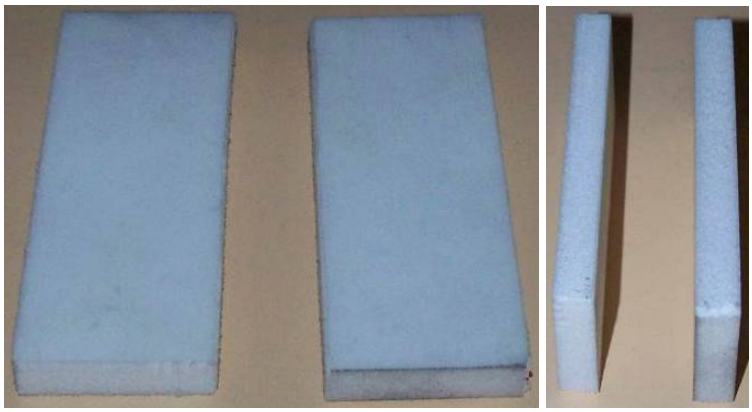
Malzemelerin Şekil 5.15'de gösterilen şekilde takım tarafından kesilerek talaş formunda dışarı atıldığı dolayısıyla kaynak bölgesinde boşlukların oluştuğu ve parçaların az da olsa bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir. PMMA malzemenin sürtünme karıştırma kaynağının yapılabilmesi için farklı takım tipleri ve kaynak parametreleri kullanılması gerektiği düşünülmektedir.



Şekil 5.15. PMMA 5 mm kalınlığında kaynak denemesi yapılmış parça.

Sürtünme karıştırma kaynağı denemelerini yapmak için 10 mm kalınlığında Ulpolen 1000 (PE 1000) malzemeler temin edilmiştir. Bağlama kalıbına uygun şekilde imalat resimleri çizilmiş ve kesildikten sonra imalat resmine uygun olarak işlenmiştir. Ulpolen 1000 malzemeden 10 mm kalınlığında, 100 mm boyunda hazırlanmış parçalar Şekil 5.16'da gösterilmiştir.

Ulpolen 1000 (PE 1000) gözenekli malzeme, demir çelik sektöründe kullanılan kireç silolarının altında bulunan silo kapağının içinden geçen azot gazı yardımıyla kirecin silo tabanında karıştırılması amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanında filtre elemanı olarak kullanım alanı bulmaktadır. Gözenekli ulpolen 1000 malzeme sinterleme yöntemiyle üretilmektedir. Ulpolen 1000 gözenekli malzemenin özellikleri Çizelge 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.16. Ulpolen 1000 malzemeden hazırlanmış 10 mm kalınlığında parçalar.

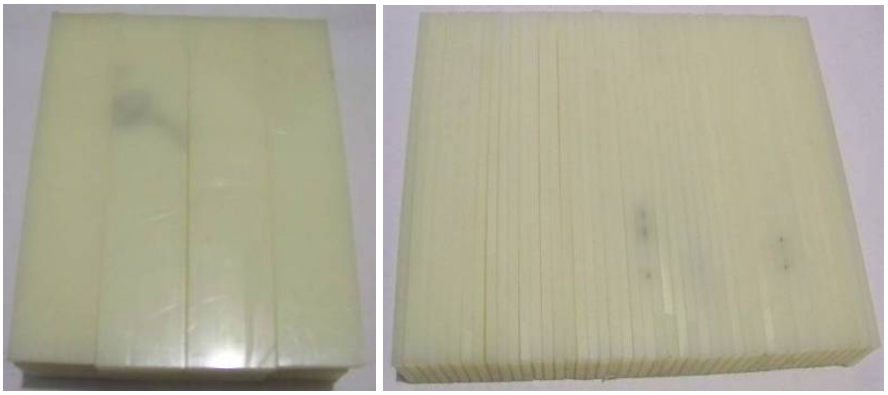
Çizelge 5.6. Gözenekli ulpolen 1000 malzeme özellikleri.

Yoğunluk	0,57 gr/cm³
Kopma Dayanımı	2,5 N/mm²
Gözenek Boyutu (Ortalama)	35 µ
Gözeneklilik Oranı	%34

Ulpolen 1000 gözenekli malzeme ile farklı kaynak parametreleriyle SKK denemesi yapılmıştır. Yapılan çalışmada malzemelerin talaş şekline geldiği bir kısmının kaynak bölgesinden dışarı atıldığı ve büyük bir kısmının da kaynak bölgesinde küçük parçalar halinde bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir. Ulpolen 1000 gözenekli malzemenin, kaynak esnasındaki sıkıştırmanın etkisiyle ile gözeneklerinin kapanmasından dolayı kaynak bölgesinde malzeme yetersiz kalmış ve kaynak yapılamamıştır. Ulpolen 1000 gözenekli malzemenin bu yöntem ile kaynak yapılamayacağı düşünülmektedir.

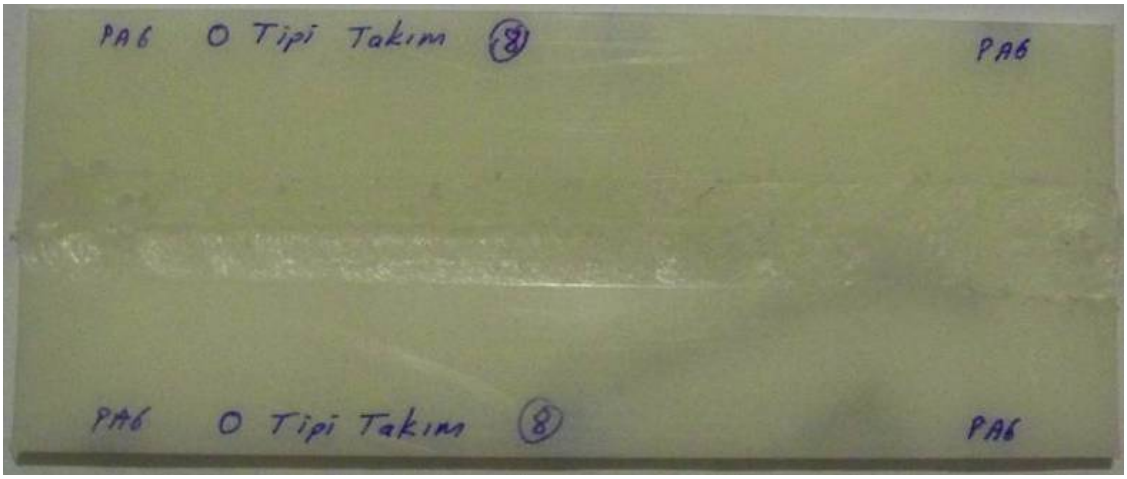
Farklı takımlar imal edilerek ve farklı özelliklerde malzemeler temin edilerek SKK denemelerine devam edilmiştir.

Sürtünme karıştırma kaynağı denemelerini yapmak için farklı bir tedarikçiden tekrar 5 mm kalınlığında PA 6 malzemeler temin edilmiştir. Kesildikten sonra imalat resmine uygun olarak işlenmiştir. PA 6 malzemeden 5 mm kalınlığında, 200 mm boyunda hazırlanmış parçalar Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Malzemelere yapılan sertlik ölçümlerinde sertlik değerlerinin 66 - 69 Shore D olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.17. PA 6 malzemeden hazırlanmış 5 mm kalınlığında parçalar.

PA 6 malzemelere farklı takımlar ve sabit kaynak parametreleriyle SKK denemeleri yapılmıştır. PA 6 malzemelerin SKK denemelerinde karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların üst yüzeyine temas ettiği yerlerde kullanılan bütün takımlarda genel olarak kaynama olduğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takımın parçaların üst yüzeyine temas etmediği yerlerde kaynamanın kısmi olduğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların yüzeyine daldığı durumlarda sıcaklığın aşırı yükselmesinden dolayı yüzeylerde ergime oluşmasına bağlı olarak malzeme kaynak bölgesinde tutulamadığından karıştırıcı takımın alın yüzeyinin temas ettiği yüzeylerde Şekil 5.18'de gösterilen şekilde oyukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların yüzeyine dalma miktarı azaldıkça yüzeyde oluşan oyukların azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.18. PA 6 5 mm kalınlığında kaynak denemesi yapılmış parça.

Bazı takımlar ile yapılan çalışmalarda malzemelerin talaş şekline geldiği fakat kaynak bölgesinde küçük parçalar halinde bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalarda malzemelerin aşırı yumuşayarak çapak şeklinde veya takım tarafından kesilerek talaş halinde dışarı atıldığı dolayısıyla kaynak bölgesinde boşlukların oluştuğu ve parçaların kısmen de olsa bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir.

Sürtünme karıştırma kaynağı denemelerini yapmak için Hyundai Era marka otomobilin ön tamponu temin edilmiştir. Bağlama kalıbına uygun şekilde kesilerek işlenmiştir. 3 mm kalınlığında, 160 - 180 mm boylarında hazırlanmış parçalar Şekil 5.19'da gösterilmiştir.



Şekil 5.19. Hyundai Era ön tampon malzemesinden hazırlanmış parçalar.

Hyundai Era marka otomobilin ön tampon malzemesinin teknik özellikleri ile ilgili bilgi elde edilememiştir. Fakat genel olarak araç tamponlarının cam elyaf veya karbon elyaf takviyeli malzemelerden üretildiği bilinmektedir. Malzemelere yapılan sertlik ölçümlerinde sertlik değerlerinin 64 - 67 Shore D olduğu tespit edilmiştir.

Hyundai Era ön tampon malzemesine tek tip takım ve farklı kaynak parametreleriyle SKK denemeleri yapılmıştır. SKK denemelerinde kullanılan bütün kaynak parametrelerinde genel olarak parçaların üst yüzeyinde kaynama olduğu fakat alt yüzeylerde kaynama olmadığı gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların yüzeyine daldığı durumlarda ısınmanın etkisiyle yüzeylerde ki aşırı yumuşamadan dolayı malzeme kaynak bölgesinde tutulamadığından karıştırıcı takımın alın yüzeyinin temas ettiği yüzeylerde Şekil 5.20'de gösterilen şekilde oyukların ve çapakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Hyundai Era Ön Tampon malzemesinin sürtünme

karıştırma kaynağının yapılabilmesi için farklı takım tipleri ve kaynak parametrelerinin kullanılması gerektiği düşünülmektedir.



Şekil 5.20. Hyundai Era ön tampon malzemesi ile kaynak denemesi yapılmış parça.

Sürtünme karıştırma kaynağı denemelerinde kullanılan malzemelerden PP, PE ve PA malzemeler ile yapılmış olan kaynak denemelerinden daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Plastik matrisli kompozit malzemeler ile ilgili yapılmış olan araştırmaların incelenmesi, yukarıda yapılan çalışmalar ve plastik matrisli kompozit malzeme temin eden, üreten firmalar ile yapılan görüşmeler sonucunda plaka halinde bulunabilecek olan plastik matrisli kompozit malzemelerde PP, PE ve PA malzemelerin matris olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Diğer bir sebep ise PP, PE ve PA malzemeler ile yapılan SKK denemelerinde kullanılan takımlar ile ilgili farklı araştırmalara veya tasarımlara ihtiyaç duyulmayacağının düşünülmesidir.

5.1.1. Malzeme Temin Edilmesi İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Sürtünme karıştırma kaynağı deneylerinde kullanılacak olan plastik matrisli kompozit malzemelerin matris malzemesinin belirlenmesinden sonra plastik matrisli kompozit malzemenin plaka olarak imal edilmesinin bu çalışmanın konusu olmaması ve zor olmasından dolayı belirlenen matris malzemesi ile imal edilmiş piyasada hazır plaka olarak bulunabilen malzemeler araştırılmıştır.

Yurt içinde yapılan araştırmalar, yurt dışı kaynaklı ve yerli üretim yapan bazı firmalar ile yapılan görüşmeler sonucu temin edilebilecek malzemelerin PP, PE ve PA

matrisli kompozit malzemeler olduğu görülmüştür. Fakat malzeme boyutlarının hem SKK deneylerinin yapılmasına hem de deney sonrası yapılacak incelemelerde kullanılacak numune (çekme deney) boyutlarına uygun olmamasından (çok küçük ebatlarda) dolayı tercih edilmemiştir.

Yurt dışındaki firmalar ile yapılan araştırmalar ve firmalar ile yapılan görüşmeler sonucunda plastik matrisli kompozit malzeme temin edilmiştir. Fakat sürtünme karıştırma kaynağı deneylerine uygun olmayan kompozit malzeme gönderilmiş olup firma yetkilileri ile yapılan görüşmelerde talep edilen malzemeyi minimum 5 ton sipariş verilmesi durumunda üretebileceklerini bildirmişlerdir.

Yurtiçinde, yurtdışında yapılan araştırmalar ve firmalar ile yapılan görüşmeler sonucunda istenilen ebatlarda plaka halinde hazır malzeme bulunamamasından dolayı malzemelerin hammadde temin edilerek kendi imkânlarımız ile üretilmesine karar verilmiştir. Daha sonra plastik matrisli kompozit malzeme imalatı ile ilgili yapılması gerekenler ve izlenecek yol belirlenmiştir.

PP matrisli %25 cam elyaf takviyeli kompozit malzeme Röchling (Almanya) firmasından 4x1500x3000 mm ebatlarında bulunmuştur. Nakliye probleminden dolayı malzeme, deneylerde kullanılacak numune ebatları ve kesme payları da göz önünde bulundurularak maksimum sayıda deney parçası elde edilecek şekilde optimize edilerek 4x630x745 mm 8 adet ve 4x210x745 mm 4 adet olacak şekilde kesilmiş olarak temin edilmiştir. Fakat malzeme matris içerisinde homojen dağılmış kısa elyaf takviyeli olarak talep edilmesine rağmen Şekil 5.21'de görüldüğü gibi cam elyaf takviyenin matris malzemesinin altında kalacak şekilde tabakalı olarak imal edildiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.21. PP matrisli %25 cam elyaf takviyeli kompozit malzeme.

PP matrisli %25 cam elyaf takviyeli malzemenin özellikleri Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. PP matrisli %25 cam elyaf takviyeli malzeme özellikleri (*Röchling*, 2020).

Yoğunluk	1,1 gr/cm³
Erime Akış Hızı	0,5 gr/10 dak
Sertlik	74 Shore D
Akma Sınırındaki Gerilme Direnci	60 N/mm²
Akma Sınırındaki Uzama	%3
Elastikiyet Modülü	4500 N/mm²
Çentik Darbe Dayanımı	10 mJ/mm²
Erime Noktası	162 - 165 ºC
Isı İletim Katsayısı	0,25 W/mK

Kullanım alanları;

- Kimya Endüstrisi,
- Tank İmalatı,
- Galvaniz Kaplama,
- Havalandırma ve Ekipman İmalatı,
- Laboratuar (*Röchling*, 2020).

Genel özellikleri;

- Yüksek Mukavemet,
- Çok Yüksek Isı Dayanımı,
- Mükemmel Kaynak Edilebilirlik,
- Yüksek Kimyasal ve Korozyon Dayanımı (*Röchling*, 2020).

Röchling firmasından temin edilen PP matrisli %25 cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler, zaman kaybetmemek için sürtünme karıştırma kaynağında

kullanılmak üzere bağlama kalıbına uygun olarak kesilip Şekil 5.22'de gösterilen şekilde kenarları işlenerek hazırlanmıştır. Fakat malzemenin matris içerisinde homojen dağılmış kısa elyaf takviyeli olmamasından dolayı sürtünme karıştırma kaynağının sağlıklı olarak yapılamayacağına karar verilmiştir. Tabakalı elyaf takviye malzemesinin SKK esnasında takım tarafından koparılarak parçalanacak olması ve kaynaktan sonra ana malzeme dayanımın elde edilemeyecek olmasından dolayı sürtünme karıştırma kaynağı yapmaya uygun olmadığı düşünülmüştür.

Röchling firması ile yapılan görüşmelerde talep edilen malzemenin sipariş mektubunda ve öncesinde yapılan görüşmelerde de belirtildiği gibi matris içerisinde homojen dağılmış kısa elyaf takviyeli olmadığı, cam elyaf takviyenin matris malzemesinin altında kalacak şekilde tabakalı olarak üretilmiş olduğu belirtilmiştir. Tedarikçi firma yetkilisi, Türkiye temsilcisi ile Almanya çalışanı arasında yapılan görüşmelerde yanlış anlaşılma olduğunu, talep edilen homojen dağılımlı malzemenin stoklarında bulunmadığını ve minimum 5 ton sipariş verilmesi durumunda üretilebileceğini bildirmiştir.



Şekil 5.22. PP matrisli %25 cam elyaf takviyeli kompozit malzemeden hazırlanmış parçalar.

Farklı firmalar ile yapılan görüşmelerde istenilen kalınlık ve ebatlarda plaka halinde hazır malzeme bulunamamasından dolayı sürtünme karıştırma kaynağında

kullanılacak kompozit malzemelerin hammadde temin edilerek kendi imkânlarımız ile üretilmesi kararlaştırılmıştır.

Yurt içinde yapılan araştırmalarda PolyOne (Tekno Polimer) firması ile yapılanan görüşmelerde PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli kompozit malzeme üretimi yaptıklarını ve minimum 300 Kg sipariş verilmesi durumunda üretim yapabileceklerini bildirdiler. Belirtilen minimum üretim miktarının doktora tez çalışmasında kullanılacak malzeme gereksiniminin çok üstünde olduğu ve konu malzemenin başka bir alanda kullanılamayacağı firma yetkililerine açıklanarak daha önce ürettikleri müşterileri ile görüşerek 25 Kg temin etmeleri talep edilmiştir. Firma yetkililerinin de girişimleriyle 25 Kg olarak paketlenmiş, açıklaması "30% glass fiber reinforced, heat stabilized PP homopolymer resin for injection molding" olan HX GFR30 H1 N00 - EM10007099BZ kodlu, PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzeme Şekil 5.23'de gösterilen şekilde granül halinde temin edilmiştir.



Şekil 5.23. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli kompozit malzeme granül halinde.

Kullanım alanları;

- Genel Uygulamalar,
- Endüstriyel Uygulamalar,
- Tüketici Uygulamaları,
- Otomotiv,

- Ev Aletleri (*Polyone*, 2020).

Genel özellikleri;

- Akış - Orta,
- Dayanım ve Rijitlik - İyi,
- Darbe Dayanımı - Çok İyi,
- Isı Dayanımı - İyi,
- İşlenebilirlik - İyi,
- Yüksek Kimyasal ve Korozyon Dayanımı - İyi (*Polyone*, 2020).

Polipropilen (PP) matrisli %30 cam elyaf takviyeli granül halindeki malzemenin özellikleri Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzeme özellikleri (*Polyone*, 2020).

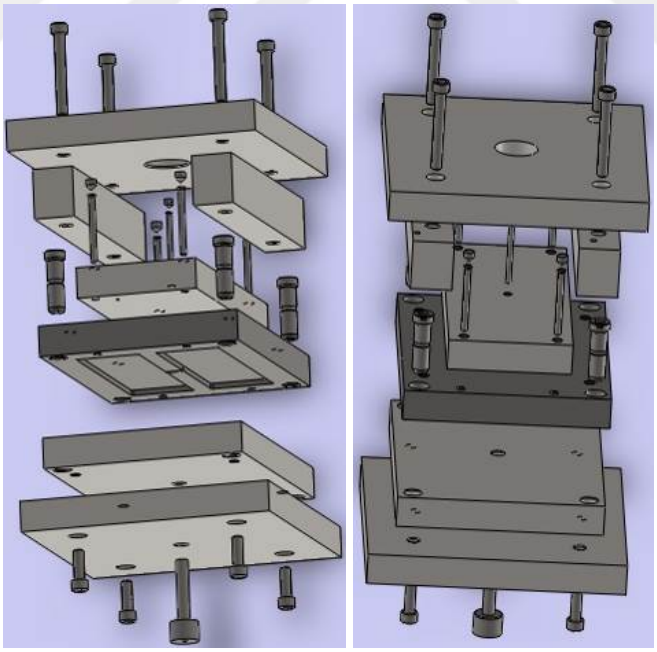
Yoğunluk	1,12 gr/cm³
Erime Akış Hızı	6 gr/10 dak
Sertlik	- Shore D
Çekme Dayanımı	95 N/mm²
Kopma Uzaması	%3,5
Elastikiyet Modülü	5500 N/mm²
Çentik Darbe Dayanımı	12 kJ/m²
Erime Noktası	160 - 165 ºC
İşlem Sıcaklığı	180 - 200 ºC

Bu malzeme, granül halinde, doğal renginde ve ısı düzenleyici katılmış olarak piyasaya sunulmaktadır. Granül halindeki malzeme enjeksiyon kalıplama yöntemiyle istenilen parça ebatlarında şekillendirme yapılabilmektedir. Üretici firma tarafından malzemenin enjeksiyon kalıplama yöntemiyle şekillendirilmesi tavsiye edildiğinden plaka malzemelerin enjeksiyonla kalıplanarak üretilmesine karar verilmiştir.

5.2. Malzeme Üretimi

Plastik enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmesi planlanan sürtünme karıştırma kaynağı deneylerinde kullanılacak malzemelerin imalatında kullanılacak kalıbın tasarımından önce imal edilecek malzeme ebatları kaynak çekme deneylerinde kullanılacak malzemelerin ASTM D 638 Tip 4 standardında belirtilen ölçüleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Malzeme ebatları belirlendikten sonra plastik enjeksiyon sektöründe faaliyet gösteren firmalar ile görüşülerek makinelerindeki kullanım şekline uygun olacak şekilde kalıp üretiminde kullanılacak malzeme ölçüleri ve malzeme kalitesi belirlenmiştir.

Kalıp imalatında kullanılacak malzemeler Mavi Çelik firmasından temin edilmiş olup kalıp imalinde kullanılan malzemenin DIN normuna göre adlandırılışı "Ck 45" ve MKE normuna göre adlandırılışı "Ç 1045" olup malzeme numarası 1.1191'dir. Taşıt, motor, aparat, kalıp setlerinin ve orta zorlamalı parçaların imalatında kullanılmaktadır (*Mavicelik*, 2020a).



Şekil 5.24. Plastik enjeksiyon kalıbı.

Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılacak malzemelerin düzgün bir şekilde imal edilebilmesi için, Öztepe Plastik firması ile görüşülerek malzemeler üzerinde iz

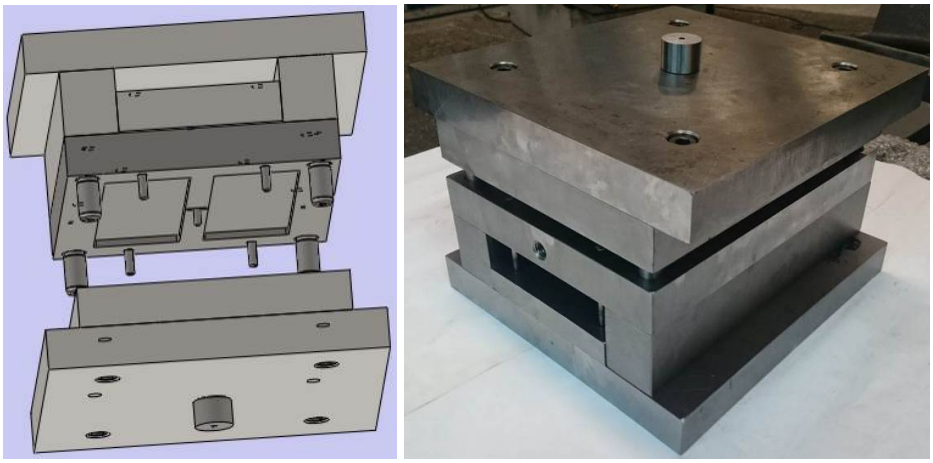
olması istenmediğinden çift hücreli kalıp tasarımı yapılmıştır. Kalıp tasarımı yapılırken Şekil 5.24'de gösterildiği gibi plastik enjeksiyon makinesinin bağlantı düzeneğine uygun ve üretilen malzemelerin kalıptan kolayca çıkmasını sağlayacak şekilde olmasına dikkat edilmiştir.

Plastik enjeksiyon kalıp parçaları, Şekil 5.25'de gösterilen şekilde montaj yapılmadan önce temizlenmiş ve parçaların son kontrolleri yapılmıştır.



Şekil 5.25. Plastik enjeksiyon kalıp parçaları.

Plastik enjeksiyon kalıp montajının, plastik enjeksiyon makinesine bağlanmadan önce yapılması gerektiğinden tasarıma uygun olarak Şekil 5.26'da gösterilen şekilde kalıp montajı yapılmıştır. Kalıp montajının uygun şekilde yapılıp yapılmadığı, kalıp makineye bağlanmadan önce manüel olarak hareket ettirilerek kontrol edilmiştir.



Şekil 5.26. Plastik enjeksiyon kalıp montajı.

Malzeme üretiminde, Borche marka BS 150 plastik enjeksiyon makinesi kullanılmıştır. Plastik enjeksiyon makinesinin teknik özellikleri Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Plastik enjeskiyon makinesi özellikleri (*Borchenorthamerica*, 2020).

Enjeksiyon Basıncı (Psi)	26831
Enjeksiyon Kurs Boyu (inç)	8,46
Maksimum Vida Dönme Hızı (Rpm)	206
Nozul Temas Kuvveti (ton)	3
Nozul Kurs Boyu (inç)	9,84
Sıkma Kuvveti (ton)	165
Tabla Ebatları (inçxinç)	26,37x26,37

Plastik enjeksiyon makinesinin ayarları PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli granül malzemelerin kalite sertifikasında verilen değerlere uygun olarak yapılmıştır. Plastik enjeksiyon makinesi rezistanslarının sıcaklık değerleri sırasıyla 200 - 200 - 190 - 190 - 180 °C olacak şekilde ayarlanmıştır. Çalışma basıncı 45 bar, çalışma hızı %45 olacak şekilde ayarlamalar yapılmıştır. Ütüleme basıncı 25 bar, ütüleme hızı %25 ve ütüleme süresi 2 sn olacak şekilde ayarlamalar yapılmıştır. Kalıpta bekletme (soğutma) süresi 40 sn ve toplam çevirim süresi 65 sn olarak ayarlanarak Şekil 5.27'de gösterilen şekilde üretimine başlanmıştır.



Şekil 5.27. Plastik enjeksiyon yöntemi ile malzeme üretimi.

Plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilen malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında kullanılacak malzeme ebatları göz önünde bulundurularak belirlenen malzeme ölçülerine uygun olduğu gözlemlenmiştir. Plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş olan malzemeler Şekil 5.28'de gösterilmiştir.



Şekil 5.28. Plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş olan malzemeler.

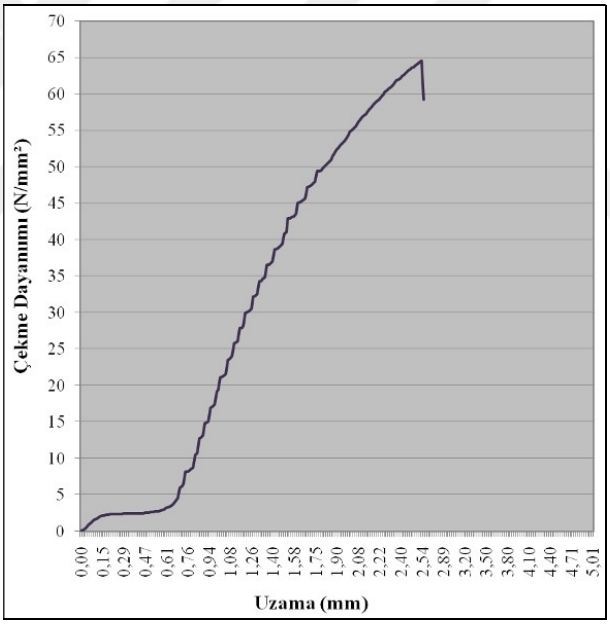
Plastik enjeksiyon yöntemi ile malzeme üretimi yapıldıktan sonra malzemelerin dayanım, sertlik ve mikro yapı özelliklerinin belirlenmesi için çekme deneyi, sertlik ölçümü ve mikro yapı incelemeleri yapılması kararlaştırılmıştır. Deneylerde kullanılan cihazların özellikleri ve ayarlarda kullanılan parametreler ile ilgili bilgiler Bölüm 6'da detaylı olarak verildiğinden bu bölümde verilmemiştir.



Şekil 5.29. Kaynaksız malzemelerden hazırlanmış çekme deney numuneleri.

Granül halindeki mekanik özellikleri malzeme sertifikasında belirtilen PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelerin plastik enjeksiyon yöntemiyle şekillendirildikten sonra elde edilen mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için kaynaksız malzemelerden ASTM D 638 Tip 4 standardında verilen çekme deney numune ölçülerine uygun olarak makinede işlenerek Şekil 5.29'da gösterilen şekilde 9 adet test numunesi hazırlanmıştır. Fakat 5 adet numuneye çekme deneyi uygulanmış ve sonuçların aritmetik ortalaması alınarak çekme dayanımı belirlenmiştir.

Kaynaksız numunelere yapılan çekme deneyleri sonucunda en yüksek çekme dayanımının 67,951 N/mm², en düşük çekme dayanımının ise 53,238 N/mm² ve 5 numunenin çekme dayanımlarının ortalamasının ise 61,246 N/mm^2 olduğu tespit edilmiştir. Kaynaksız malzemelere ait çekme deney grafiği Şekil 5.30'da verilmiştir.



Şekil 5.30. Kaynaksız malzemelerin çekme deney grafiği.

Kaynaksız parçaların, tedarikçi firma sertifikasında belirtilen çekme dayanımına (95 N/mm²) göre performansı değerlendirildiğinde en yüksek performans değerinin %71,527 (67,951 N/mm²), en düşük performans değerinin %56,040 (53,238 N/mm²) ve ortalama performans değerinin ise %64,469 (61,246 N/mm^2) olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda hammadde sertifika değerlerine göre çekme dayanım değerlerinde ortalama %35 değer kaybı olduğu söylenebilir.

Kaynaksız parçaların, tedarikçi firma sertifikasında belirtilen kopma uzaması (%3,5) ile imalat sonrası elde edilen ortalama kopma uzaması (%10,848) karşılaştırıldığında, tedarikçi firma sertifikasında belirtilen değere göre daha sünek bir yapıya sahip malzeme elde edildiği söylenebilir. Çekme deneyi sonrası numuneler incelendiğinde kopmaların Şekil 5.31'de gösterilen şekilde boyun vermeden meydana geldiği ve yaklaşık olarak aynı bölgelerden koptuğu tespit edilmiştir. Çekme deneyi sonrası çekme deney numunelerin kopma şekilleri incelendiğinde, boyun verme olmadığından imal edilmiş parçaların uzama oranı tedarikçi firma sertifikasında belirtilen değerlere göre yüksek olsa da gevrek bir yapıya sahip olduğu söylenebilir.

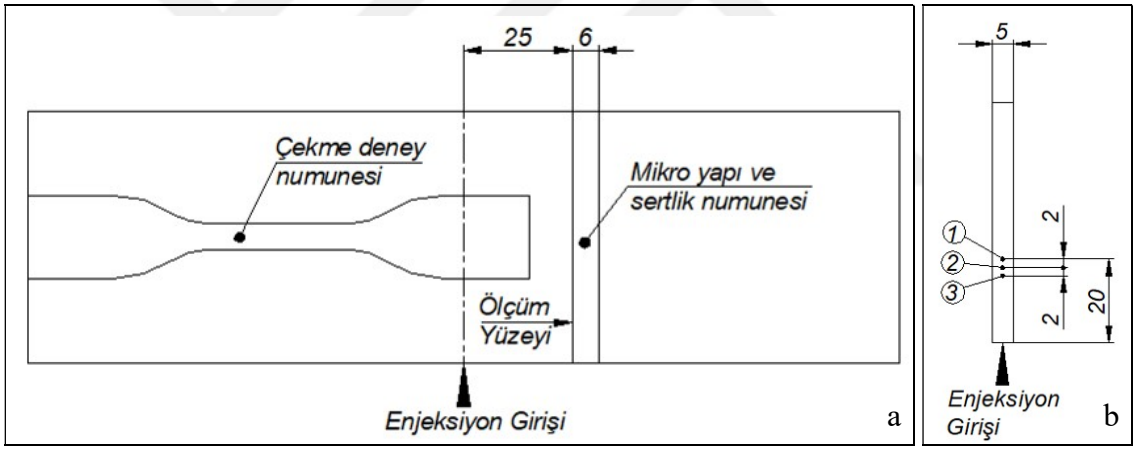


Şekil 5.31. Çekme deneyi sonrası kopmuş kaynaksız malzemelere ait çekme deney numuneleri; a) Önden görünüş, b) Yan görünüş.

Mikro yapı incelemesi, sertlik ölçümleri için standart bir numune olmadığı için mikro yapı incelemesine ve sertlik ölçümüne uygun olarak makinede işlenerek kaynaksız malzemelerden Şekil 5.32'de gösterilen şekilde 2 adet test numunesi hazırlanmıştır. Kaynaksız parçalardan hazırlanan çekme deney, mikro yapı inceleme ve sertlik ölçüm numuneleri Şekil 5.33.a'da gösterilen şekilde çıkartılmıştır. Mikro yapı incelemesi ve sertlik ölçümleri yapılırken enjeksiyon giriş yönü de göz önünde bulundurularak mikro yapı görüntüleri ve sertlik ölçümleri Şekil 5.33.b'de gösterilen şekilde yaklaşık olarak aynı bölgelerden alınmıştır.



Şekil 5.32. Kaynaksız malzemeden hazırlanmış mikro yapı inceleme ve sertlik ölçme numunesi.



Şekil 5.33. Kaynaksız malzeme; a) Hazırlanan numunelerin çıkartıldığı bölgeler, b) Mikro yapı inceleme ve sertlik ölçümünün yapıldığı bölgeler.

Kaynaksız numunelere Şekil 5.34'de gösterilen bölgelerden yapılan sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertlik değeri 80 Shore D, en düşük sertlik değeri ise 77 Shore D olarak ölçülmüştür. Bu bölgelerin her birinden 5 ölçüm yapılarak her bölgenin ayrı ayrı ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır. Her iki numunede yapılan ölçümler de 1 numaralı bölgeden 3 numaralı bölgeye gittikçe (enjeksiyon giriş bölgesine yaklaştıkça) sertliğin arttığı tespit edilmiştir. Bu 3 noktadan yapılan sertlik ölçümlerinin (toplam 30 adet) ortalamasının 78,8 Shore D olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.34. Kaynaksız malzeme mikro yapı inceleme ve sertlik ölçümünün yapıldığı bölgeler.

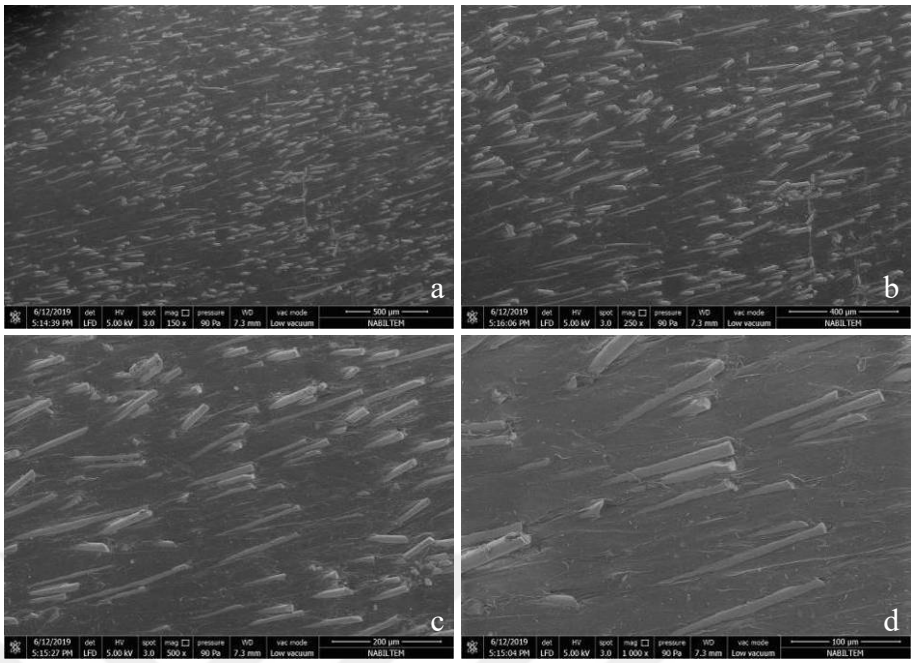
Kaynaksız numunelere işlenmemiş (dış) yüzeylerden yapılan sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertlik değeri 84 Shore D, en düşük sertlik değeri ise 78 Shore D olarak ölçülmüştür. İki numunenin her birinden 5 ölçüm yapılarak ayrı ayrı ortalaması alınmıştır. Her iki numuneye yapılan sertlik ölçümlerinin (toplam 10 adet) ortalamasının 81,6 Shore D olduğu tespit edilmiştir. Kaynaklı parçalarda sertlik ölçümleri iç bölgelerden yapıldığından yüzey sertliği yerine iç bölgelerden yapılan ölçümlerin değerlendirmelerde kullanılmasının daha doğru olduğuna karar verilmiştir.

PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemenin üretim sonrası tespit edilen özellikleri Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemenin üretim sonrası özellikleri.

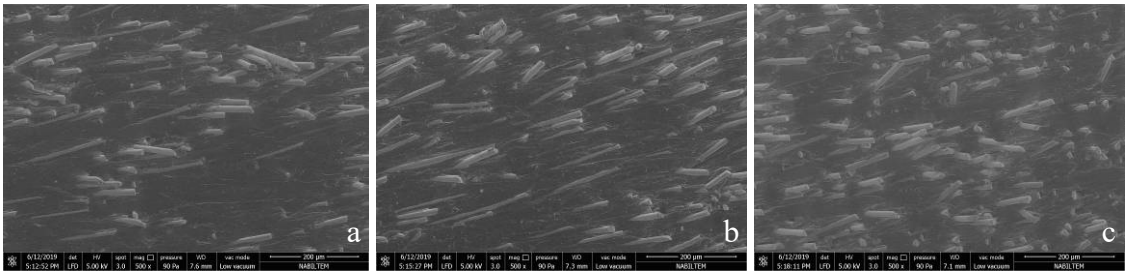
Sertlik	78,8 Shore D
Çekme Dayanımı	61,246 N/mm²
Kopma Uzaması	%10,848
Elastikiyet Modülü	1309 N/mm²

Mikro yapı incelemesi, 1 adet kaynaksız numuneden sertlik ölçümleri yapılmadan önce sertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgelerden Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) Şekil 5.35'de gösterilen şekilde 150X, 250X, 500X ve 1000X büyütmedeki toplamda 12 adet SEM görüntüsü alınarak yapılmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde cam elyaf takviye malzemelerinin çoğunlukla enjeksiyon giriş eksenine paralel olarak yönlendiği ve çok azda olsa kırılmaların olduğu görülmektedir.



Şekil 5.35. Kaynaksız malzeme SEM görüntüleri a) 150X, b) 250X, c) 500X, d) 1000X.

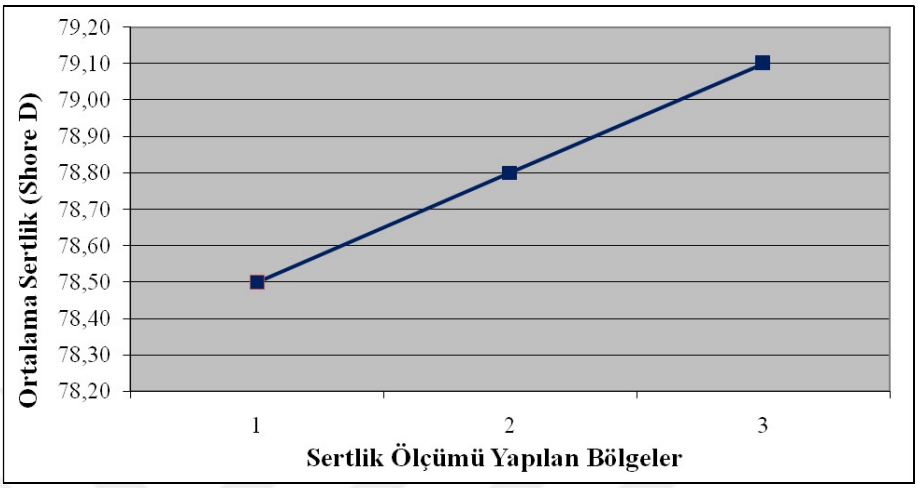
Farklı bölgelerden alınan 500X büyütmedeki SEM görüntüleri karşılaştırıldığında 1 numaralı bölgeden 3 numaralı bölgeye gittikçe (enjeksiyon giriş bölgesine yaklaştıkça) cam elyaf takviye malzemelerinin yoğunluğunun Şekil 5.36'da gösterilen şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla elyaf takviye malzemelerinin homojen olarak dağılmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.36. Kaynaksız malzeme 500X SEM görüntüleri a) 1 Numaralı bölge, b) 2 Numaralı bölge, c) 3 Numaralı bölge.

Farklı bölgelerden alınan 500X büyütmedeki SEM görüntüleri ile Şekil 5.37'de gösterilen sertlik ölçüm grafiği birlikte incelendiğinde, 1 numaralı bölgeden 3 numaralı bölgeye gittikçe (enjeksiyon giriş bölgesine yaklaştıkça) sertliğin artmasının, 1 numaralı

bölgeden 3 numaralı bölgeye gittikçe (enjeksiyon giriş bölgesine yaklaştıkça) cam elyaf takviye malzemelerinin yoğunluğunun artmasından kaynaklandığı görülmektedir.



Şekil 5.37. Kaynaksız malzeme bölgelere göre sertlik değişim grafiği.

Güldaş, Çankaya, Güllü ve Gürü'ye göre (2014),

> Plastiklerin yapıları gereği üretim aşamasındaki en ufak bir değişiklik bile çok ciddi yapısal değişimlere sebep olmaktadır. Böylece, elde edilen yeni plastiğin birçok fiziksel özelliği değişmektedir. Bu özellikler, plastik içerisine katılan katkı elemanının oranı, boyutu ve yapı içerisindeki özdeş dağılımı ve üretim şekline bağlı olarak değişmektedir (s.228) (Güldaş, Çankaya, Güllü & Gürü, 2014).

Güllü vd.'ne göre (2001),

> Aynı yönde yönlendirilmiş kısa elyaflarla doldurulmuş kompozitin çekme kuvveti, uygulanan kuvvetle elyaf ekseni arasındaki açı arttıkça azalmaktadır. Küçük açılı kuvvet uygulandığında kompozitteki bozulma elyaf çekme kuvvetiyle kontrol edilmektedir. Uygulanan kuvvetle elyaf arasındaki açı arttırıldığında; elyaf ve matris yüzeyinin her ikisinde de kesme kuvvetleri ve gerilmeler artmaktadır. Elyaf uzunluğu yük tasıma kapasitesinde kritik faktördür. Maksimum yük tasıma kapasitesini sağlamak için yük transfer uzunluğu olarak bilinen en azından kritik bir minimum uzunluk gerekmektedir (s.12) (Güllü vd., 2001).

Ekşi (2007) ve Hüner'e göre (2014) "Elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan elyafların malzeme içerisindeki yönlenmeleri kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini direkt olarak etkilemektedir." (Ekşi, 2007; Hüner, 2014).

Kocabaş'a göre (2014),

> Elyaf takviyeli plastikler kullanılarak gerçekleştirilen tasarımlarda elyafın yönlenme doğrultusu ürünün mekanik özelliklerini etkilemektedir. Yapıdaki elyaf takviyeleri malzemenin akış yönü doğrultusunda yönlenmekte ve böylece doğal olarak parçanın

> farklı eksenlerde farklı mukavemet özellikleri göstermelerine sebep olmaktadırlar. Bu durumda akış yönünü belirleyen etkenler elyaf takviyeli polimerlerden üretilmiş parçaların dayanım özelliklerini de belirlemektedir (s.38) (Kocabaş, 2014).

Akdoğan Eker'e göre (2008),

> Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür (s.3) (Akdoğan Eker, 2008).

Yaşar ve Arslan'a göre (2000) kompozit malzeme özelliklerini etkileyen faktörler; "Matrisin türü, takviye malzemesi türü, takviye elemanının yapı içerisindeki dağılımı, elyaf hacim oranı, elyaf şekli, elyaf kalınlığı, elyafın matris içerisindeki yönlenmesi, karşı yüzey malzemenin özellikleri ve takviye malzemesinin matrise göre sertliği gibi özelliklerdir" (Yaşar & Arslan, 2000).

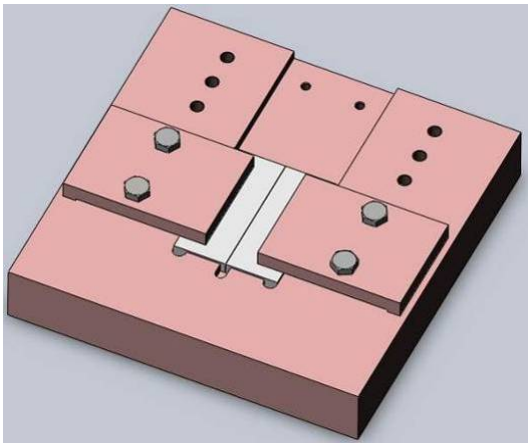
Takviye malzemelerinin kırılması ve yönlenmesi ile ilgili olarak yapılan araştırmalarda yukarıda verilen bilgiler elde edilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda mikro yapı görüntüleri ile çekme deney sonuçlarının birlikte incelenmesi sonucunda cam elyaf takviye malzemelerinin enjeksiyon giriş eksenine hemen hemen paralel yönlenmesi, enjeksiyon giriş ekseninin çekme doğrultusuna dik olmasından ve cam elyaf takviye malzemelerinin azda olsa kırılmasından kaynaklı olarak çekme dayanımının sertifika değerlerine göre daha düşük çıktığı sonucuna varılmıştır.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

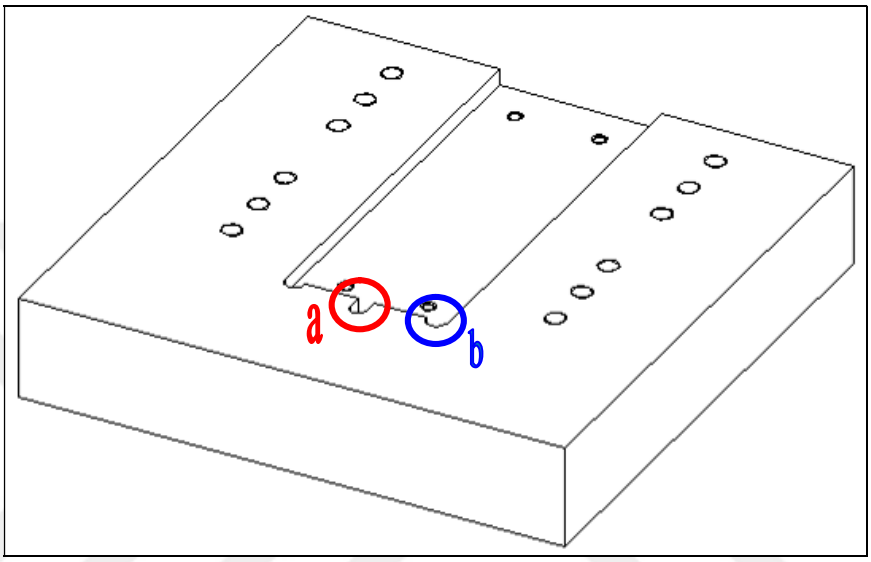
6.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapımında Kullanılan Bağlama Kalıbının Tasarlanması ve İmal Edilmesi

Sürtünme karıştırma kaynağının düzgün bir şekilde yapılabilmesi için parçaların x, y, z eksenlerinde hareket etmeyecek biçimde sabitlenmesi gerekmektedir. Ayrıca parçaların rahat bir şekilde kalıba oturması için kalıba bağlanacak parçaların boy, uzunluk ve enleri dikkate alınarak bu boyutlardaki parçaların rahat bir şekilde takılıp sökülmesine izin verecek şekilde olması gerekmektedir. Bu şartlar göz önünde bulundurularak aynı zamanda sürtünme karıştırma kaynağı yapılacak parçaların, kaynak esnasında kolayca sabitlenmesini ve kolayca sökülmesini saylayacak Şekil 6.1'de gösterilen şekilde kalıp tasarlanmıştır. Kalıp imalatında kullanılacak Ck 45 malzemeler Mavi Çelik firmasından temin edilmiştir.



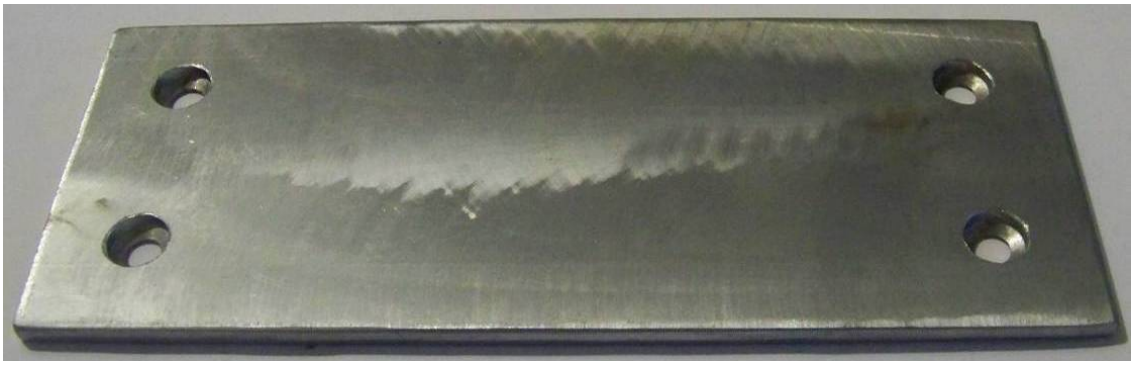
Şekil 6.1. Bağlama Kalıbı (Kısa ve 10 mm Kalınlığında Parça Bağlanmış).

Karıştırıcı takımın, SKK yapılacak parçadan kaynak bitiminde dışarı çıkması için Şekil 6.2.a'da gösterilen kanal açılmıştır. SKK yapılacak malzemenin bağlama kalıbına düzgün bir şekilde yerleştirilebilmesi için kalıbın iç köşeleri dik işlenemeyeceğinden kalıbın iç köşelerine freze çakısı ile freze çakısının yarıçapından biraz daha fazla olacak şekilde Şekil 6.2.b'de gösterilen kanallar açılmıştır.



Şekil 6.2. Kalıp üzerindeki kanallar; a) Takım çıkma kanalı, b) Köşe boşaltma kanalları.

Tasarım yapılırken sürtünme karıştırma kaynağı ön denemelerinde kullanılacak piyasada bulunabilen hazır malzeme ebatları kalınlık, en ve boy göz önünde bulundurularak çeşitli kalınlıkta (5 ve 10 mm) ve boyda (100 - 200 mm) kaynak parçaların bağlanabilecek şekilde kalıp tasarımı yapılmıştır.



Şekil 6.3. SKK bağlama kalıbı alt plakası (5 mm kalınlığında parçalar için).

Bağlama kalıbına 5 mm kalınlığında parçaların bağlanabilmesi için kalıp kanalının içine yerleştirilmek üzere Şekil 6.3'de gösterilen 5 mm kalınlığında plaka imal edilmiştir. Parçanın ince olmasından dolayı freze ile işlenerek kalınlığın her tarafta eşit olarak sağlanması çok zor olduğundan parça kalınlığının her tarafta eşit olması için parça işlendikten sonra yüzey taşlama yaptırılmıştır.

Plaka üzerine ve kalıp kanalının içine plakayı sabitleyebilmek için delikler delinmiştir. Kalıp kanalının içine delinen deliklere kılavuz çekilmiştir. 5 mm kalınlığında parçaların bağlanabilmesi için tasarlanan kalıp alt plakasının bağlama kalıbına montajı Şekil 6.4'de gösterilen şekilde havşa başlı cıvatalar ile yapılmıştır.



Şekil 6.4. Kalıp alt plakasının sürtünme karıştırma kaynağı bağlama kalıbına montajı (5 mm kalınlığında parçaların kalıba bağlanabilmesi için).

Kaynak yapılacak kısa (Boy= 100 mm) parçaların, SKK esnasında yukarı doğru hareket etmesini önlemek için kaynak kalıbının üst kısmına Şekil 6.5'de gösterilen kısa bağlama pabuçları tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır.



Şekil 6.5. SKK bağlama kalıbı kısa pabuçları.

Kaynak yapılacak uzun (Boy= 200 mm) parçaların, SKK esnasında yukarı doğru hareket etmesini önlemek için kaynak kalıbının üst kısmına Şekil 6.6'da gösterilen uzun bağlama pabuçları tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır.

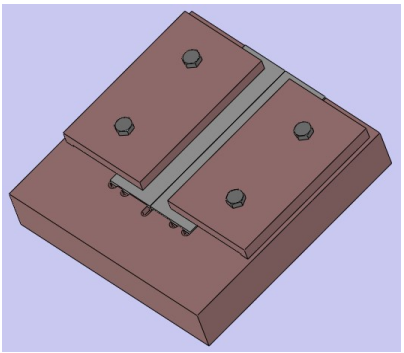


Şekil 6.6. SSK bağlama kalıbı uzun pabuçları.

Kalıbın kolay ve gayet düzgün olarak makine tablasına sabitlenebilmesi için kalıbın bütün kenarları işlenerek imal edilmiştir. Bağlama kalıbı ve parçalarının bütün yüzeyleri aşınma, paslanmalara karşı 0,02 mm kalınlığında sert krom kaplama yaptırılmıştır.

6.1.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Bağlama Kalıbında Yapılan Tasarım Değişiklikleri

Başlangıçta piyasada kolay bulunabilen genişliklere uygun olarak tasarımı ve imalatı yapılmış olan SKK bağlama kalıbının kanal genişliğinde, belirlenen çekme numune standardında belirtilen çekme numune boyuna uygun olarak Şekil 6.7'de gösterilen şekilde tasarım değişikliği yapılmıştır.

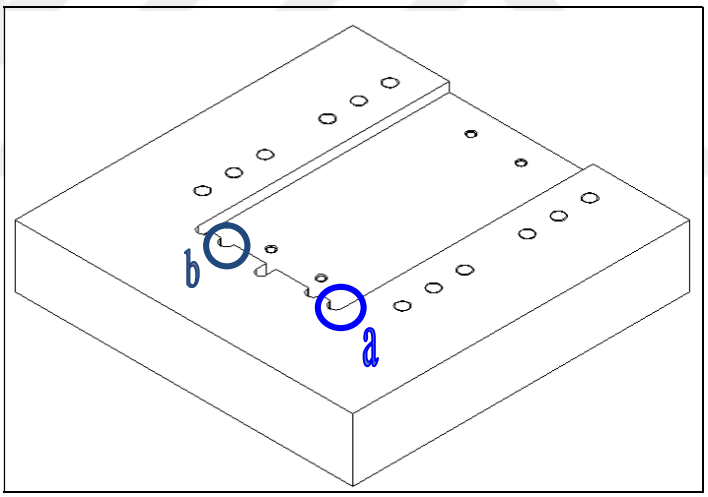


Şekil 6.7. Bağlama Kalıbı (Geniş - Uzun ve 5 mm Kalınlığında Parçaların Bağlanabilmesi İçin)

Mevcut kalıp 5 ve 10 mm kalınlığında kaynak parçalarının bağlanabilmesi için tasarlanmış olduğundan yeni kalıp tasarımı da 5 ve 10 mm kalınlığında kaynak parçalarının bağlanmasına uygun olarak yapılmıştır.

Yeni kalıp tasarımında mevcut kalıbın kanal genişliği çekme numune boyuna uygun olarak genişletilmiştir. Genişleşme esnasında kanalın alt yüzeyinden de 0,05 – 0,10 mm civarında talaş kaldırılarak kalıp kanalının alt yüzeyinde kademe olmaması hedeflenmiştir.

SKK yapılacak malzemenin bağlama kalıbına düzgün bir şekilde yerleştirilebilmesi için kalıbın iç köşeleri dik işlenemeyeceğinden freze çakısı ile freze çakısının yarıçapından biraz daha fazla olacak şekilde Şekil 6.8.a'da gösterilen kanallar açılmıştır. İlk tasarlanan kalıptan kalan Şekil 6.8.b'de gösterilen köşe boşaltmaları kaynağa etkisi olmayacağından ilk imalatı yapılan kalıptaki şekliyle bırakılmıştır.

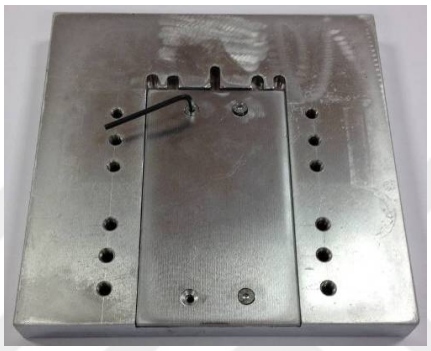


Şekil 6.8. Kalıp üzerindeki kanallar; a) Köşe boşaltma kanalları, b) Köşe boşaltma kanalları (ilk tasarlanan kalıptan kalan).



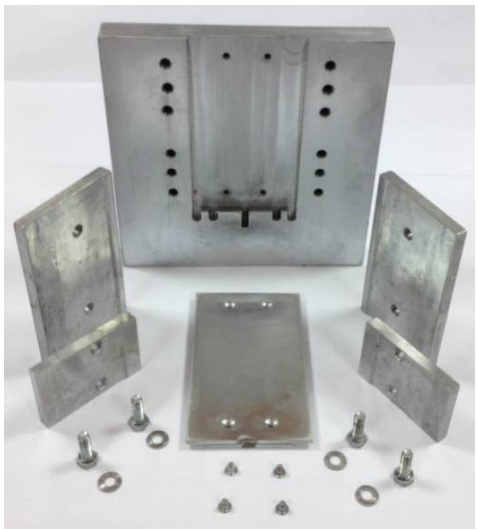
Şekil 6.9. SKK bağlama kalıbı alt plakası (5 mm kalınlığında geniş parçalar için).

Bağlama kalıbına 5 mm kalınlığında parçaların bağlanabilmesi için kalıp kanalının içine yerleştirilmek üzere imal edilmiş olan 5 mm kalınlığında plaka tekrar kullanılmayacağından Şekil 6.9'da gösterilen kalıp alt plakası imal edilmiştir. Parçanın ince olmasından dolayı freze ile işlenerek kalınlığın her tarafta eşit olarak sağlanması çok zor olduğundan parça kalınlığının her tarafta eşit olması için parça işlendikten sonra yüzey taşlama yaptırılmıştır. Bağlama kalıbı alt plakasının bağlama kalıbına montajı Şekil 6.10'da gösterilen şekilde havşa başlı cıvatalar ile yapılmıştır.



Şekil 6.10. Kalıp alt plakasının bağlama kalıbına montajı (5 mm kalınlığında geniş parçaların kalıba bağlanabilmesi için)

Bağlama kalıbı ve parçalarının bütün yüzeyleri aşınma ve paslanmalara karşı Şekil 6.11'de gösterilen şekilde yeniden 0,02 mm kalınlığında sert krom kaplama yaptırılmıştır.

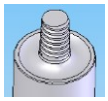
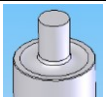


Şekil 6.11. Sürtünme karıştırma kaynağı bağlama kalıbı ve kalıp parçaları.

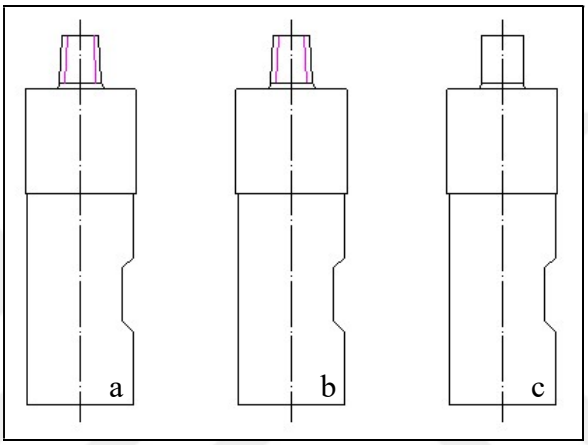
6.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Karıştırıcı Takımların Tasarlanması ve İmal Edilmesi

Kaynak takımının kaynak bölgesini ısıtma ve karıştırma gibi iki önemli görevi vardır. Ayrıca takım uç geometrisinin takım dönüş yönüyle bağlantılı olarak malzeme akışı üzerinde kritik bir rolü vardır. Araştırmalar sonuncunda plastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili daha önce yapılmış olan çalışmaların bazılarında klasik Alüminyum tipi karıştırıcı takımların kullanılmasından dolayı ilk denemelerde Alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlarla benzer özelliklerde takımlar kullanılmasına karar verilmiştir (Karagöz & Öksüz, 2018; Karagöz & Öksüz, 2016; Karagöz, 2014; Squeo vd., 2009; Strand, 2004). Karıştırıcı takımların uç uzunluğunun kaynak esnasında ucun bağlama kalıbının tabanına temas etmemesi için kaynak yapılacak parçaların uç uzunluğundan kısa olması gerekmektedir. Karıştırıcı takımların uç uzunluğunun çok kısa olması durumunda kaynak bölgesinin alt kısmında kaynak yapılmamış (karıştırılmamış) bölgenin minimum olması için daha önce bu konuda yapılmış çalışmalarda göz önünde bulundurularak karıştırıcı takımların uç uzunluğu kaynak yapılacak parçaların kalınlığı dikkate alınarak 9,8 mm olarak belirlenmiştir. Karıştırıcı takımların uç geometrileri üç farklı şekilde tasarlanmıştır. Bu takımlar A, B ve C tipi olarak adlandırılmıştır takım tipi ve özellikleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Alüminyum tipi takım tiplerinin gösterilişi ve özellikleri.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Malzemesi*	*Takım Sertlik Değeri (HRc)*	*Takım Uç Özellikleri*				
				Düz	*3° Açılı*	*1,25 Adım*	*2 Adım*	*Uç Boyu (mm)*
A		42CrMo4	58,37	-	√	√	-	9,8
B		42CrMo4	59,00	-	√	-	√	9,8
C		42CrMo4	59,50	√	-	-	-	9,8

Karıştırıcı takımın makineye yani takım tutuculara (veldon - pens) bağlanabilmesi için takım tutucuya geçecek kısmı Ø20 çapında, takımın kaynak esnasında ileri geri hareketini önlemek için takımın takım tutucuya geçeceği kısmına bir yuva ve takımın tutucuya dayanarak geri kaçmasını önlemek için takıma Ø21 çapında bir kademe tasarlanmıştır. Tasarıma uygun olarak Şekil 6.12'de gösterilen şekilde imalat resimleri çizilmiştir. İmalat resminde belirtilen ölçü ve toleranslara uygun olarak Şekil 6.13'de gösterilen takımlar imal edilmiştir.



Şekil 6.12. Ç 4140 çeliğinden imal edilen takımların imalat resimleri; a) Konik 2 adım diş açılmış, b) Konik 1,25 adım diş açılmış, c) Silindirik.

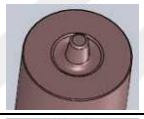
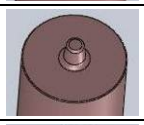
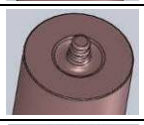
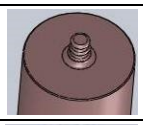
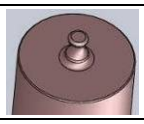
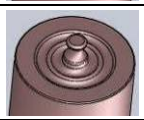
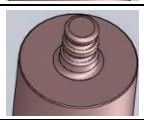


Şekil 6.13. Ç 4140 çeliğinden imal edilmiş takımlar.

Yukarıda gösterilen takımlarla yapılan ilk SKK denemelerinin görsel olarak incelenmesi sonucunda kaynakların takım tasarımından dolayı düzgün bir şekilde yapılmadığı gözlemlenmiştir. Keskin köşeli ve vida dişi olan takımların kaynak

parçalarını keserek talaş haline getirdiği, bazı takımların alın (omuz) yüzeyinin parçaların üst yüzeyine temasından kaynaklı olarak yüzeylerde plastiğin aşırı yumuşayarak kaynak bölgesinde tutulamadığı ve çapak formunda dışarı atıldığı görülmüştür. Literatür araştırmalarınki takım tasarımları da dikkate alınarak karıştırıcı takımların uç ve alın yüzeylerinde tasarım değişiklikleri yapılmıştır. Karıştırıcı takımlar da uç çaplarının küçültülmesi ve kesme etkisinin ortadan kaldırılması için yuvarlak hatlı kanalların açılması tasarım değişikliklerinin başında gelmektedir (Ahmadi vd., 2012; Arıcı & Ertürk, 2007; Arıcı & Sınmazçelik, 2005; Banjare vd., 2017; Jaiganesh vd., 2014; Payganeh vd., 2011; Squeo vd., 2009; Şelale, 2006).

Çizelge 6.2. Plastik için tasarlanan takım tiplerinin gösterilişi ve özellikleri.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Malzemesi*	*Takım Sertlik Değeri (HRc)*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*			
				Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*
D		X210Cr12	59,18	Var	Yok	Tek Küçük	4,9
E		X210Cr12	58,5	Var	Yok	Yok	4,9
F		X210Cr12	58,27	Var	İki Küçük	Tek Küçük	4,9
G		X210Cr12	59,23	Var	İki Küçük	Yok	4,9
H		X210Cr12	58,63	Var	Tek Büyük	Tek Küçük	4,9
L		X210Cr12	58,93	Var	Tek Büyük	Yok	4,9
M		X210Cr12	59,25	Var	Tek Büyük	İki Küçük	4,9
N		42CrMo4	58,37	Var	İki Küçük	Yok	9,9

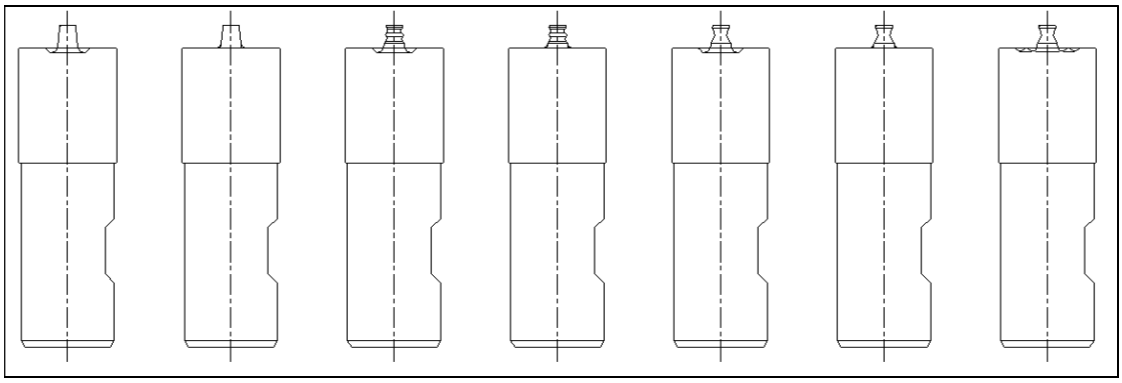
SKK denemelerinde karıştırıcı takım uç çapının büyük olmasından dolayı kaynak işleminin düzgün bir şekilde yapılamadığı gözlemlendiğinden D, E, F, G, H, L ve M tipi takımlar, takım uçların en küçük ölçüsü Ø3,5 olacak şekilde konik olarak tasarlanmıştır.

SKK denemelerinde keskin köşeli takımların kaynak parçalarından talaş kaldırmasından dolayı radüslü kanallar açılmış ve kanalların kenarlarında oluşan keskin köşeler radüs yapılmıştır.

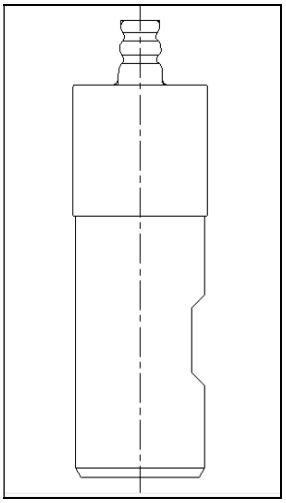
N tipi karıştırıcı takım, takım ucunun en küçük ölçüsü Ø6 olacak şekilde konik olarak tasarlanmıştır. Diğer takımlarda olduğu gibi radüslü kanallar açılmış ve kanalların kenarlarında oluşan keskin köşeler radüs yapılmıştır. N tipi karıştırıcı takım daha önce imal edilmiş olan A tipi takımın uç kısmının tasarımı değiştirilerek A tipi takımdan işlenerek imal edilmiştir.

Karıştırıcı takımların uç uzunluğu plaka kalınlığı dikkate alınarak 9,9 mm ve 4,9 mm olarak belirlenmiştir. Karıştırıcı takımın uç ve alın (omuz) yüzey geometrileri 8 farklı şekilde tasarlanmıştır. Bu karıştırıcı takımlar D, E, F, G, H, L, M ve N tipi olarak adlandırılmıştır takım tipi ve özellikleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Tasarıma uygun olarak Şekil 6.14 - Şekil 6.15'de gösterilen şekilde imalat resimleri çizilmiştir. İmalat resminde belirtilen ölçü ve toleranslara uygun olarak Şekil 6.16 - Şekil 6.17'de gösterilen takımlar imal edilmiştir.



Şekil 6.14. Ç 512200 çeliğinden imal edilen takımların tasarım resimleri.



Şekil 6.15. Ç 4140 çeliğinden imal edilen takım tasarım resmi.



Şekil 6.16. Ç 512200 çeliğinden imal edilmiş takımlar.



Şekil 6.17. Ç 4140 çeliğinden imal edilmiş takım.

Yeni tasarlanan takımlarla yapılan SKK denemelerinin görsel olarak incelenmesi sonucunda kaynakların daha düzgün olmasından dolayı benzer ölçülerde ve geometrilerde, literatür araştırmalarınki takım tasarımları da dikkate alınarak, akademisyenlerin tavsiyeleri doğrultusunda yeni karıştırıcı takımlar tasarlanmış ve imal edilmiştir.

SKK denemelerinde kullanılan H, L ve M tipi takımlardan daha iyi kaynak sonuçları elde edilmiş olmasından dolayı yeni tasarlanan karıştırıcı takımların sadece alın yüzeylerinde tasarım değişiklikleri yapılmıştır.

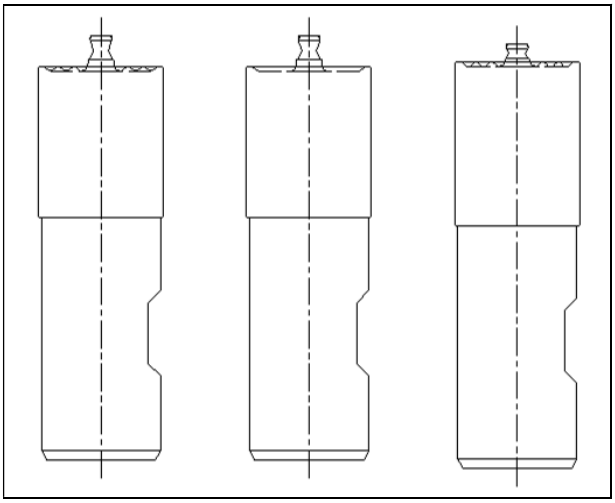
Karıştırıcı takımların uç uzunlukları plaka kalınlıkları da dikkate alınarak 4,9 mm ve 2,8 mm olarak belirlenmiştir.

O, P ve S tipi takımlar, takım uçlarının en küçük ölçüsü Ø3,5 olacak şekilde konik olarak tasarlanmıştır. Yeni tasarlanan karıştırıcı takımların uçları ve alın yüzeyleri (omuz) ile ilgili özellikleri Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.3. Plastik için tasarlanan yeni takım tiplerinin gösterilişi ve özellikleri.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Malzemesi*	*Takım Sertlik Değeri (HRc)*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*			
				Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*
O		X210Cr12	60,92	Var	Tek Büyük	Üç Küçük	4,9
P		X210Cr12	59,55	Var	Tek Büyük	Tek Büyük	4,9
S		X210Cr12	26,83	Var	Tek Büyük	Üç Küçük	2,8

Yeni yapılan tasarıma uygun olarak Şekil 6.18'de gösterilen şekilde imalat resimleri çizilmiştir. İmalat resminde belirtilen ölçü ve toleranslara uygun olarak Şekil 6.19'da gösterilen takımlar imal edilmiştir.



Şekil 6.18. Ç 512200 çeliğinden imal edilen yeni takımların tasarım resimleri.



Şekil 6.19. Ç 512200 çeliğinden imal edilmiş yeni takımlar.

Piyasada "Islah çeliği" olarak adlandırılan malzemenin DIN normuna göre adlandırılışı "42CrMo4" ve MKE normuna göre adlandırılışı "Ç 4140" olup malzeme numarası 1.7225'dir. Yüksek dayanımlı makine parçalarının krank millerinin, şaftların, ask mili ve kovanlarının, biyel kollarının, dişlilerin, cıvataların imalatında kullanılmaktadır (*Mavicelik*, 2020a).

Ç 4140 çeliğinden imal edilmiş olan takımlar, imalat aşamasında sertleştirme ve temperleme (HT) ısıl işlemine (su verme işlemine) tabi tutulmuş ve uygulanan ısıl işlem sonrası malzeme 58 - 62 HRc sertlik değerine ulaşmıştır. Isıl işlem AKDAĞ Isıl İşlem Sanayi Ticaret Ltd. Şti tarafından yağda yapılmıştır.

Ç 512200 çeliğinin Krom oranının fazla olmasından dolayı aşınma dayanımı yüksek bir malzemedir. İlk imal edilen takımlarda piyasada yaygın olarak kullanılmasından dolayı Ç 4140 malzeme kullanılmıştır fakat aşınma dayanımının yüksek olmasından dolayı sonradan tasarlanan ve imal edilen bütün takımlarda Ç 512200 malzemeler kullanılmıştır.

Takım imalatında kullanılacak malzemeler Mavi Çelik firmasından temin edilmiştir. Piyasada "Yağ çeliği" olarak adlandırılan malzemenin DIN normuna göre adlandırılışı "X210Cr12" ve MKE normuna göre adlandırılışı "Ç 512200" olup malzeme numarası 1.2080'dir. Fazla tokluk istenmeyen kesme, basma, delme takımlarının, ağaç bıçaklarının, kesme bıçaklarının, diş taraklarının, derin çekme takımlarının, ekstrüzyon takımlarının, ölçme takımlarının, soğuk çekme makaralarının, tel çekme haddelerinin, plastik, tuğla kalıplarının ve broşların imalatında kullanılmaktadır (*Mavicelik*, 2020b).

Ç 512200 çeliğinden imal edilmiş olan takımlardan D, E, F, G, H, L, M, O ve P tipi takımlar, imalat aşamasında sertleştirme ve temperleme (HT) ısıl işlemine (su verme işlemine) tabi tutulmuş ve uygulanan ısıl işlem sonrası malzeme 58 - 62 HRc sertlik değerine ulaşmıştır. Isıl işlem AKDAĞ Isıl İşlem Sanayi Ticaret Ltd. Şti. tarafından yağda yapılmıştır.

Ç 512200 çeliğinden imal edilmiş olan takımlardan S tipi takıma imalat aşamasında sertleştirme ve temperleme (HT) ısıl işlemi (su verme işlemi) yapılmamıştır. S tipi takım sadece 3 mm kalınlığında Hyundai Era tamponundan kesilerek temin edilen malzemelerde deneme amaçlı olarak kullanıldığı için ve sonrasında konu malzemelerin kaynağında çok başarılı olunmadığından ısıl işlem yaptırılmamıştır.

Takımların sertlik değerleri, her takımdan 6 ölçüm yapılarak aritmetik ortalamaları alınarak belirlenmiştir.

6.2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılacak Karıştırıcı Takımların Belirlenmesi ve İmal Edilmesi

Klasik Alüminyum tipi A, B ve C tipi takımlar ile yapılan SKK denemelerinin görsel olarak incelenmesi sonucunda kaynakların takım tasarımından dolayı düzgün bir

şekilde yapılmadığı gözlemlenmiştir. Keskin köşeli ve vida dişi olan takımların kaynak parçalarını keserek talaş haline getirdiği, bazı takımların alın (omuz) yüzeyinin parçaların üst yüzeyine temasından kaynaklı olarak yüzeylerde plastiğin aşırı yumuşayarak kaynak bölgesinde tutulamadığı ve çapak formunda dışarı atıldığı görülmüştür. Literatür araştırmalarınki takımlarda dikkate alınarak kullanılacak karıştırıcı takımların daha küçük çaplı olmasına ve kesme etkisinin ortadan kaldırılması için yuvarlak hatlı kanalları olan takımların kullanılmasına karar verilmiştir (Ahmadi vd., 2012; Arıcı & Ertürk, 2007; Arıcı & Sınmazçelik, 2005; Banjare vd., 2017; Jaiganesh vd., 2014; Payganeh vd., 2011; Squeo vd., 2009; Şelale, 2006).

Plastiklerin SKK için tasarlanan D, E, F, G, H, L, M, N, O, P ve S tipi takımlardan N ve S tipi takımlar 10 mm ve 3 mm kalınlığında parçaların SKK denemelerinde kullanıldığından ve deneylerde kullanılacak parçaların kalınlığına uygun olmadığından kullanılmamıştır.

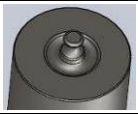
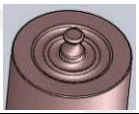
D, E, F, G, H, L, M, O ve P tipi takımlar ile yapılan SKK denemelerinin görsel olarak incelenmesi sonucunda takım ucunda 1 adet büyük kanal olan takımlardan (H, L, M, O) yapılan takımlar ile yapılan kaynakların daha az boşluklu ve daha düzgün kaynak yüzeyine sahip olduğu tespit edilmiştir. Fakat takım ucunda 1 adet büyük kanal olan takımlardan P tipi takımın alın (omuz) yüzeyinde 1 adet büyük kanal olan takım ile yapılan SKK denemelerinde alın temas yüzeyinin az olmasından dolayı kaynak bölgesinde yeterli ısı oluşmamış ve tam olarak bir kaynama olmamıştır. Dolayısıyla H, L, M ve O tipi takımların SKK deneylerinde kullanılmasın daha uygun olacağına karar verilmiştir.

H, L, M ve O tipi takımlardan L tipi takımın alın (omuz) yüzeyinde hiç kanal olmadığından alın yüzeyinde kanal olan takımların alın yüzeyindeki kanal sayısının sürtünme karıştırma kaynağına etkisini tespit edebilmek için H, M ve O tipi takımların kullanılmasına karar verilmiştir. H, M ve O tipi takımların özellikleri Çizelge 6.4'de verilmiştir.

Takım ucu kaynak bölgesindeki malzemeyi karıştırırken aynı zamanda kaynak bölgesinin ısınmasını sağlar. Takım alın (omuz) yüzeyi kaynak esnasında kopan küçük parçaların dışarı atılmadan kaynak bölgesinde kalmasını sağlar ve kaynak bölgesinin ısıtılmasına yardımcı olur. Ayrıca takım ucu tarafından yumuşatılarak geriye atılan

malzemeye baskı uygulayarak malzemenin kaynak yapılmasına yardımcı olur (Karagöz & Öksüz, 2018; Karagöz & Öksüz, 2016; Şelale, 2006).

Çizelge 6.4. SKK deneylerinde kullanılacak takım tiplerinin gösterilişi ve özellikleri.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Malzemesi*	*Takım Sertlik Değeri (HRc)*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*			
				Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*
H		X210Cr12	43,80	Var	Tek Büyük	Tek Küçük	4,9
M		X210Cr12	44,12	Var	Tek Büyük	İki Küçük	4,9
O		X210Cr12	43,87	Var	Tek Büyük	Üç Küçük	4,9

SKK deneylerinde kullanılacak takım tiplerinin belirlenmesinden sonra plastik enjeksiyon yöntemi ile üretimi yapılmış olan PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemeler ile SKK deneylerinde kullanılacak kaynak parametrelerinin belirlenmesi için denemeler yapılmıştır. Bu denemeler esnasında Şekil 6.20'de gösterilen H ve O tipi iki adet takım kırılmıştır.



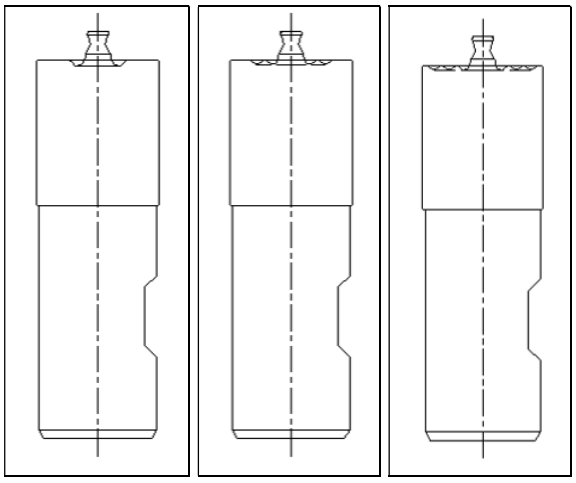
Şekil 6.20. Ön denemelerde kırılan takımlar.

Kırılan takımların yerine aynı tipte yeni takımların imal edilmesi için yeni malzeme temin edilmiş ve Şekil 6.21'de gösterilen şekilde taslak olarak işlenerek hassas işlemeye hazırlanmıştır. Taslak işleme sonrası takımlar Şekil 6.22'de gösterilen imalat resimlerine ve kırılan takım geometrilerine uygun olarak CNC torna tezgâhında işlenerek ısıl işlem yaptırılmıştır. Isıl işlem sonrası takımın tutucuya (veldon - pens) bağlanacağı kısmı imalat resminde belirtilen toleranslara uygun olarak taşlama yaptırılmıştır.



Şekil 6.21. Taslak olarak işlenmiş takımlar.

Ç 512200 çeliğinden imal edilmiş H, M ve O tipi takımlar, imalat aşamasında sertleştirme ve temperleme (HT) ısıl işlemine (su verme işlemine) tabi tutulmuş ve uygulanan ısıl işlem sonrası malzeme 43 - 45 HRc sertlik değerine ulaşmıştır. Isıl işlem AKDAĞ Isıl İşlem Sanayi Ticaret Ltd. Şti. tarafından yağda yapılmıştır. Takımların sertlik değeri, kırılganlığın azaltılarak tokluk değerinin artırılması istendiği için düşürülmüştür.



Şekil 6.22. SKK deneylerinde kullanılan takımların tasarım resimleri.

SKK deneylerinde kullanılacak her tip takımdan Şekil 6.23'de gösterilen şekilde 2'şer adet imal edilmiştir.



Şekil 6.23. SKK deneylerinde kullanılan takımlar.

6.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi

SKK'da kaynak kalitesini etkileyen, takım devir sayısı, ilerleme hızı, takım uç geometrisi, takım alın (omuz) yüzey profili, takım eğim açısı vb. parametreler olmasına rağmen bu çalışmada kaynak kalitesini en çok etkileyen takım devir sayısı, ilerleme hızı ve takım alın geometrisinin kaynak performansına etkilerinin incelenmesine karar verilmiştir. Dolayısıyla kaynak parametrelerinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda bu doğrultuda yapılmıştır.

Şelale (2006), çalışmalarında 0°, 1°, 2°, 3°, 4° ve 5° takım eğim açıları kulanmış olup 0° ve 1° takım eğim açıları ile yapılan SSK uygulamalarının diğer takım eğim açılarında yapılan çalışmalara göre daha üstün olduğunu bildirmiştir (Şelale, 2006).

Daha önce yapılan çalışmalar değerlendirilerek, takım eğim açısının kaynak parametresi olarak kullanılmasının gerekli olmadığı görülmüş sonuç olarak SKK deneylerinde takım eğim açısının 0° olarak kullanılmasına karar verilmiştir (Czigány & Kiss, 2011; Karagöz, 2014; Strand, 2004; Şelale, 2006).

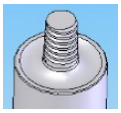
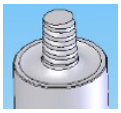
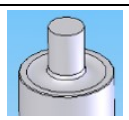
Bir önceki bölümde de bahsedildiği üzere farklı takım uç geometrileri tasarlanıp imal edilmiş olmasına ve ön denemelerde kullanılmış olmasına rağmen ön denemelere yapılan görsel incelemeler sonucunda daha iyi sonuçlar elde edilen takım ucunda bir

adet büyük kanal olan takım uç geometrisi ve üç farklı alın (omuz) geometrisi olan H, M ve O tipi takımların kullanılmasına karar verilmiştir.

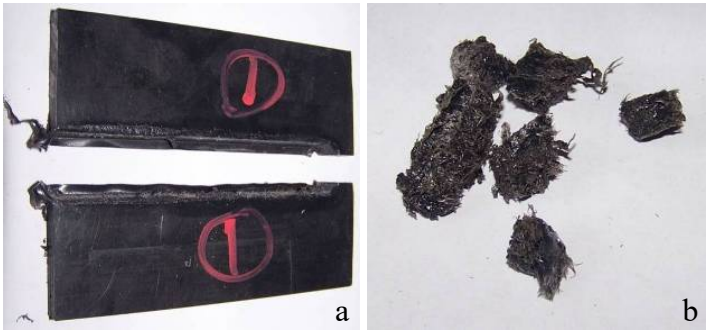
Daha önce plastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde çok farklı takım devir sayılarının ve ilerleme hızlarının kullanıldığı görülmüştür (Arıcı & Sınmazçelik, 2005; Payganeh vd., 2011; Şelale, 2006). Konu çalışmalardaki kaynak performansları da göz önünde bulundurularak SKK ön denemelerinde takım devir sayısı olarak 800 dev/dak, ilerleme hızı olarak ise 25 mm/dak kullanılmasına karar verilmiştir. Fakat kaynak esnasında kaynama durumuna göre farklı takım devir sayıları ve ilerleme hızları denenmiştir.

PA 6 malzemelere farklı takımlarla ve kaynak parametreleriyle SKK yapılmaya çalışılmıştır. Kullanılan takım ve kaynak parametreleri Çizelge 6.5'de verilmiştir. SKK denemeleri esnasında takım, saat ibresi yönünde (CW) (M03) ve saat ibresinin tersi yönde (CCW) (M04) çalıştırılmıştır (döndürülmüştür).

Çizelge 6.5. 10 mm kalınlığında PA 6 malzemelerde kullanılan SKK parametreleri.

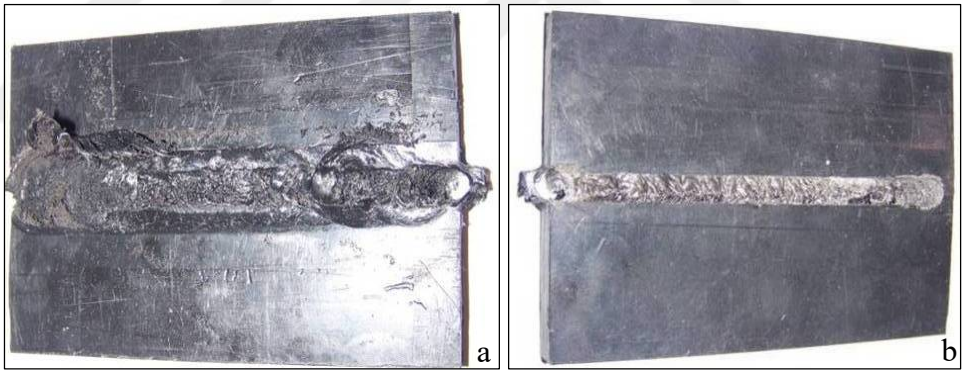
Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*				*Kaynak Parametreleri*		
		Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*
A		Var	1,25 Adım Vida	Yok	9,8	M03	680	25
						M04	700	10, 20, 50
						M03	1280	50
B		Var	2 Adım Vida	Yok	9,8	M04	800	25
								50
C		Yok	Yok	Yok	9,8	M03	700	10
								25

B tipi takım ile yapılan çalışmalarda malzemelerin Şekil 6.24'de gösterilen şekilde talaş formuna geldiği fakat küçük parçalar halinde bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir.

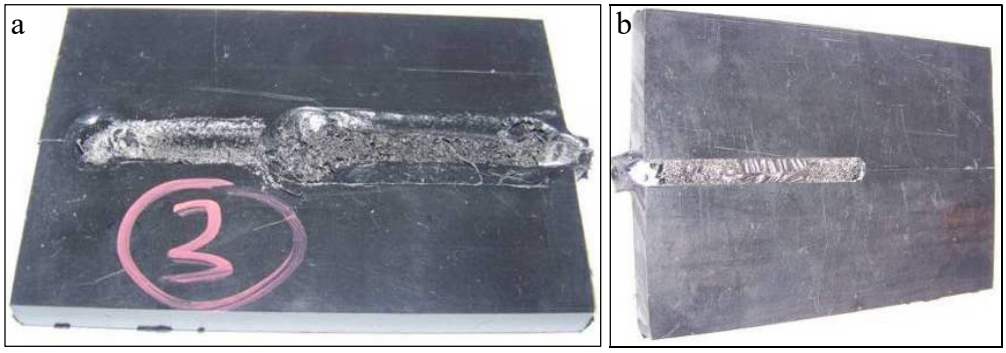


Şekil 6.24. PA 6 malzemeye B tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça; a) Kaynama olmamış parçalar, b) Kaynak esnasında talaş şeklinde küçük parçalar halinde kaynamış malzemeler.

A ve C tipi takımlar ile yapılan çalışmalarda malzemelerin Şekil 6.25 - Şekil 6.26'da gösterilen şekilde aşırı şekilde yumuşayarak çapak olarak veya takım tarafından kesilerek talaş halinde dışarı atıldığı dolayısıyla kaynak bölgesinde boşlukların oluştuğu ve parçaların kısmen de olsa bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir.



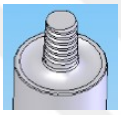
Şekil 6.25. PA 6 malzemeye A tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.



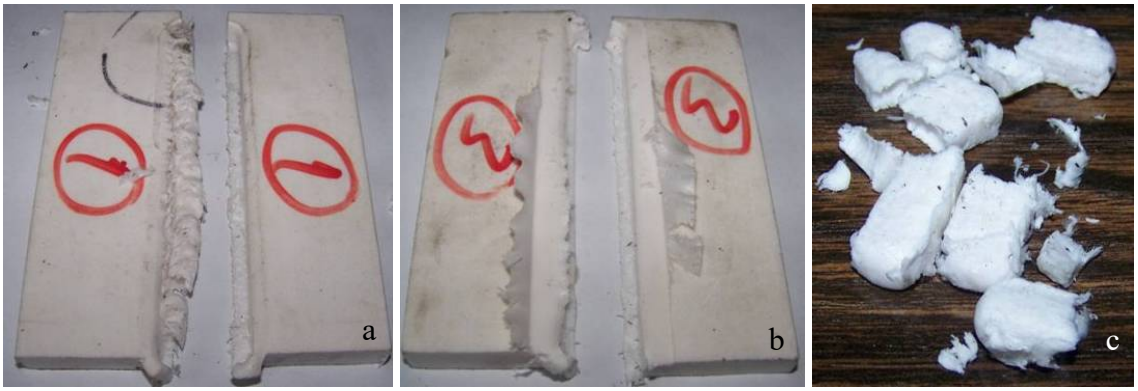
Şekil 6.26. PA 6 malzemeye C ve A tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

PTFE malzemelere A tipi takım ve farklı kaynak parametreleriyle SKK yapılmaya çalışılmıştır. Kullanılan takım ve kaynak parametreleri Çizelge 6.6'da verilmiştir. SKK denemeleri esnasında takım, saat ibresi yönünde (M03) ve saat ibresinin tersi yönde (M04) çalıştırılmıştır (döndürülmüştür).

Çizelge 6.6. PTFE malzemelerde kullanılan SKK parametreleri.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*				*Kaynak Parametreleri*		
		Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*
A		Var	1,25 Adım Vida	Yok	9,8	M03	800	10, 20
							900	15
							1000	10, 25, 50, 75
						M03	1480	10
						M04		

A tipi takım ile yapılan çalışmalarda malzemelerin Şekil 6.27'de gösterilen şekilde talaş formuna geldiği fakat küçük parçalar halinde azda olsa bir biri ile kaynadığı ve parçaların bir biri ile birleşmediği gözlemlenmiştir.

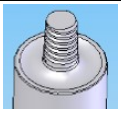
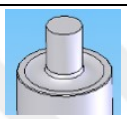


Şekil 6.27. PTFE kaynak denemesi yapılmış kaynama olmamış parçalar; a) Birinci kaynak denemesi, b) Üçüncü kaynak denemesi, c) Kaynak esnasında talaş şeklinde küçük parçalar halinde kaynamış malzemeler.

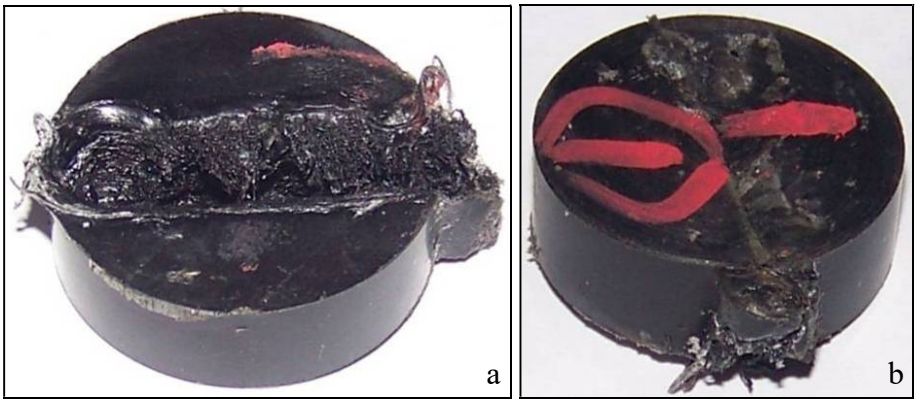
PP/CNT nispeten homojen dağılımlı malzemelere farklı takımlarla ve kaynak parametreleriyle SKK yapılmaya çalışılmıştır. Kullanılan takım ve kaynak parametreleri

Çizelge 6.7'de verilmiştir. SKK denemeleri esnasında takım, saat ibresi yönünde (M03) çalıştırılmıştır (döndürülmüştür).

Çizelge 6.7. PP/CNT nispeten homojen dağılımlı malzemelerde kullanılan SKK parametreleri.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*				*Kaynak Parametreleri*		
		Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*
A		Var	1,25 Adım Vida	Yok	9,8	M03	750	10
C		Yok	Yok	Yok	9,8	M03	700	5

PP/CNT nispeten homojen dağılımlı malzemeler ile yapılan çalışmaların hepsinde malzemelerin Şekil 6.28'de gösterilen şekilde aşırı şekilde yumuşayarak çapak formunda veya takım tarafından kesilerek talaş olarak dışarı atıldığı dolayısıyla kaynak bölgesinde boşlukların oluştuğu ve parçaların kısmen de olsa bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir.

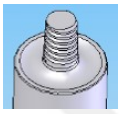


Şekil 6.28. PP/CNT nispeten homojen dağılımlı kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

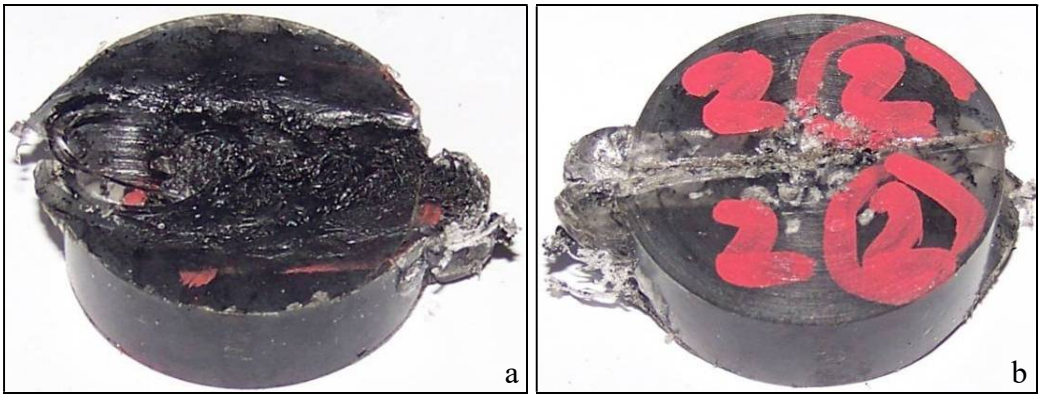
PP/CNT homojen olmayan dağılımlı malzemelere A tipi takımla ve farklı kaynak parametreleriyle SKK yapılmaya çalışılmıştır. Kullanılan takım ve kaynak

parametreleri Çizelge 6.8'de verilmiştir. SKK denemeleri esnasında takım, saat ibresi yönünde (M03) ve saat ibresinin tersi yönde (M04) çalıştırılmıştır (döndürülmüştür).

Çizelge 6.8. PP/CNT homojen olmayan dağılımlı malzemelerde kullanılan SKK parametreleri.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*				*Kaynak Parametreleri*		
		Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*
A		Var	1,25 Adım Vida	Yok	9,8	M04	600	10
						M03	700	20

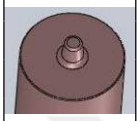
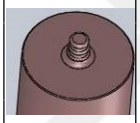
PP/CNT homojen olmayan dağılımlı malzemeler ile yapılan çalışmaların hepsinde malzemelerin Şekil 6.29'da gösterilen şekilde aşırı yumuşayarak çapak olarak veya takım tarafından kesilerek talaş halinde dışarı atıldığı dolayısıyla kaynak bölgesinde boşlukların oluştuğu ve parçaların kısmen de olsa bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.29. PP/CNT homojen olmayan dağılımlı kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

PE ve PP özelliği gösteren malzemelere farklı takımlar ve farklı kaynak parametreleriyle SKK denemeleri yapılmıştır. Kullanılan takım ve kaynak parametreleri Çizelge 6.9'da verilmiştir. SKK denemeleri esnasında takım, saat ibresi yönünde (M03) çalıştırılmıştır (döndürülmüştür).

Çizelge 6.9. PE ve PP özelliği gösteren malzemelerde kullanılan SKK parametreleri.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*				*Kaynak Parametreleri*		
		Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*
D		Var	Yok	Tek Küçük	4,9	M03	800	5, 7, 10, 15, 20, 27
							1200	27, 37, 52, 72
E		Var	Yok	Yok	4,9	M03	800	20, 52
							900	27, 37
							1000	20
							1200	52, 72
F		Var	İki Küçük	Tek Küçük	4,9	M03	800	10, 20, 37, 52
							1000	37, 52, 72
							1200	52
G		Var	İki Küçük	Yok	4,9	M03	800	27
							1000	20, 37, 52, 72
							1200	27, 37
H		Var	Tek Büyük	Tek Küçük	4,9	M03	1000	20, 52
L		Var	Tek Büyük	Yok	4,9	M03	800	52
							1000	20, 52
							1100	52
M		Var	Tek Büyük	İki Küçük	4,9	M03	1000	20, 37, 52, 72, 100

PE ve PP özelliği gösteren malzemelerin SKK denemelerinde karıştırıcı takım alın yüzeyinin (omuz) parçaların üst yüzeyine temas ettiği yerlerde kullanılan bütün kaynak parametrelerinde genel olarak kaynama olduğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takımın parçaların üst yüzeyine temas etmediği yerlerde kaynamanın kısmi olduğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların yüzeyine daldığı durumlarda sıcaklığın aşırı yükselmesinden dolayı yüzeylerde ergime veya aşırı yumuşama oluşmasına bağlı olarak malzeme kaynak bölgesinde tutulamadığından

karıştırıcı takımın alın yüzeyinin temas ettiği yüzeylerde oyukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların yüzeyine dalma miktarı azaldıkça yüzeyde oluşan oyukların azaldığı görülmüştür.

Bazı takımlar ve kaynak parametreleri ile yapılan çalışmalarda malzemelerin talaş şekline geldiği fakat kaynak bölgesinde küçük parçalar halinde bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir. Bazı takımlar ve kaynak parametreleri ile yapılan çalışmalarda malzemelerin Şekil 6.30'da gösterilen şekilde aşırı yumuşayarak çapak olarak veya takım tarafından kesilerek talaş formunda dışarı atıldığı dolayısıyla kaynak bölgesinde boşlukların oluştuğu ve parçaların kısmen de olsa bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.30. PE ve PP özelliği gösteren kaynak denemesi yapılmış parça.

PE - PP özelliği gösteren malzemelere, karıştırıcı takım ucu konik, takım ucunda kanal olmayan D ve E tipi takımlar ile yapılmış olan SKK denemelerinde, D tipi takım kullanılması durumunda az da olsa takım dalması ve çapak olmasına rağmen daha az boşluk ve daha iyi birleşmenin olduğu kaynakların yapıldığı tespit edilmiştir.

Karıştırıcı takım ucu konik, takım ucunda iki adet küçük kanal olan F ve G tipi takımlar ile yapılmış olan SKK denemelerinde, G tipi takım ile az da olsa takım dalması ve çapak olmasına rağmen daha az boşluk ve daha iyi birleşmenin olduğu kaynakların yapıldığı tespit edilmiştir.

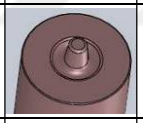
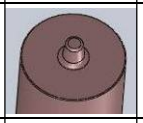
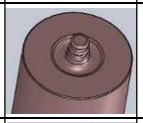
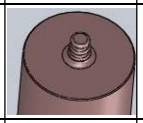
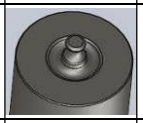
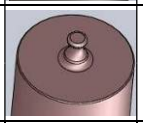
Karıştırıcı takım ucu konik, takım ucunda bir adet büyük kanal olan H, L ve M tipi takımlar ile yapılmış olan SKK denemelerinde, M tipi takım ile yapılan kaynak denemelerinde daha az boşluk, takım dalması, çapak ve daha iyi birleşmenin olduğu tespit edilmiştir.

PE - PP özelliği gösteren malzemelere, karıştırıcı takım ucu konik, takım ucunda bir adet büyük kanal olan H, L ve M tipi takımlar ile daha az boşluk, takım dalması, çapak ve daha iyi birleşmenin olduğu kaynakların yapıldığı tespit edilmiştir.

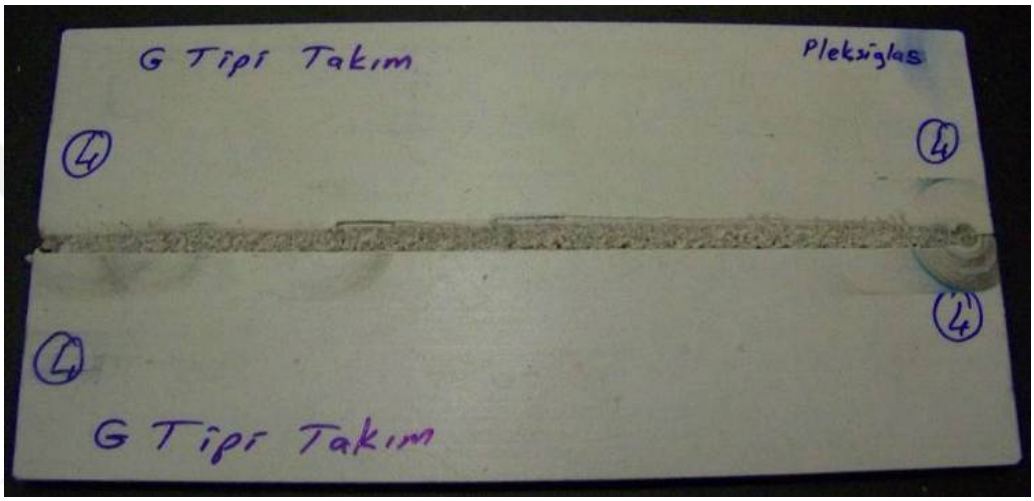
PE - PP özelliği gösteren malzemelere, 1000 dev/dak ve 52 mm/dak ile yapılan SKK denemelerinde az da olsa takım dalması olmasına rağmen daha az boşluk, çapak ve daha iyi birleşmenin oluştuğu tespit edilmiştir.

PMMA malzemelere farklı takımlar ve farklı kaynak parametreleriyle SKK denemeleri yapılmıştır. Kullanılan takım ve kaynak parametreleri Çizelge 6.10'da verilmiştir. SKK denemeleri esnasında takım, saat ibresi yönünde (M03) çalıştırılmıştır (döndürülmüştür).

Çizelge 6.10. PMMA malzemelerde kullanılan SKK parametreleri.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*				*Kaynak Parametreleri*		
		Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*
D		Var	Yok	Tek Küçük	4,9	M03	2000	100
E		Var	Yok	Yok	4,9	M03	2000	100, 200, 270
F		Var	İki Küçük	Tek Küçük	4,9	M03	2000	37, 52, 72
G		Var	İki Küçük	Yok	4,9	M03	2000	37, 52, 72, 100
H		Var	Tek Büyük	Tek Küçük	4,9	M03	1000	270, 370, 520
L		Var	Tek Büyük	Yok	4,9	M03	700	20, 72
							1200	20, 72
M		Var	Tek Büyük	İki Küçük	4,9	M03	1000	20, 52, 140

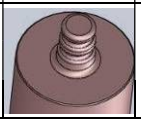
PMMA malzemeler ile yapılan SKK denemelerinin tamamında malzemelerin Şekil 6.31'de gösterilen şekilde takım tarafından talaş formuna getirildiği bir kısmının kaynak bölgesinden dışarı atıldığı dolayısıyla kaynak bölgesinde boşlukların oluştuğu ve büyük bir kısmının da kaynak bölgesinde küçük parçalar halinde bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir. PMMA malzemenin sürtünme karıştırma kaynağının yapılabilmesi için farklı takım tipleri ve kaynak parametreleri kullanılması gerektiği düşünülmektedir.

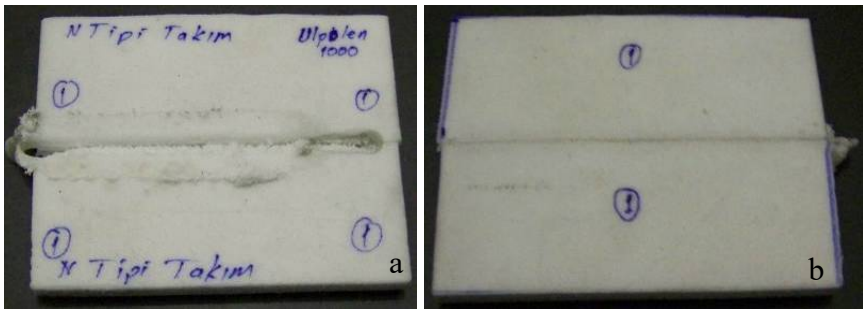


Şekil 6.31. PMMA kaynak denemesi yapılmış parça.

Ulpolen 1000 gözenekli malzemeye N tipi takımla ve farklı kaynak parametreleriyle SKK denemeleri yapılmıştır. Kullanılan takım ve kaynak parametreleri Çizelge 6.11'de verilmiştir. SKK denemeleri esnasında takım, saat ibresi yönünde (M03) çalıştırılmıştır (döndürülmüştür).

Çizelge 6.11. Ulpolen 1000 gözenekli malzemede kullanılan SKK parametreleri.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*				*Kaynak Parametreleri*		
		Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*
N		Var	İki Küçük	Yok	9,9	M03	1200	20
								37
								52



Şekil 6.32. Ulpolen 1000 gözenekli malzeme kaynak denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

Ulpolen 1000 gözenekli malzeme ile yapılan SKK denemelerinin tamamında malzemelerin Şekil 6.32'de gösterilen şekilde takım tarafından talaş formuna getirildiği bir kısmının kaynak bölgesinden dışarı atıldığı dolayısıyla kaynak bölgesinde boşlukların oluştuğu ve büyük bir kısmının da kaynak bölgesinde küçük parçalar halinde bir biri ile kaynadığı gözlemlenmiştir. Ulpolen 1000 gözenekli malzemenin, kaynak esnasındaki sıkıştırmanın etkisiyle ile gözeneklerinin kapanmasından dolayı kaynak bölgesinde malzeme yetersiz kalmış ve kaynak yapılamamıştır. Ulpolen 1000 gözenekli malzemenin bu yöntem ile kaynak yapılamayacağı düşünülmektedir.

Hyundai Era ön tampon malzemesine S tipi takımla ve farklı kaynak parametreleriyle SKK denemeleri yapılmıştır. Kullanılan takım ve kaynak parametreleri Çizelge 6.12'de verilmiştir. SKK denemeleri esnasında takım, saat ibresi yönünde (M03) çalıştırılmıştır (döndürülmüştür).

Çizelge 6.12. Hyundai Era ön tampon malzemesinde kullanılan SKK parametreleri.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*				*Kaynak Parametreleri*		
		Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*
S		Var	Tek Büyük	Üç Küçük	2,8	M03	1000	10
								20
								30
								50

Hyundai Era ön tampon malzemesi ile yapılan SKK denemelerinin tamamında genel olarak parçaların üst yüzeyinde kaynama olduğu fakat alt yüzeylerde kaynama

olmadığı gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların yüzeyine daldığı durumlarda ısınmanın etkisiyle yüzeylerde ki aşırı yumuşamadan dolayı malzeme kaynak bölgesinde tutulamadığından karıştırıcı takımın alın yüzeyinin temas ettiği yüzeylerde Şekil 6.33'de gösterilen şekilde oyukların ve çapakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Hyundai Era Ön Tampon malzemesinin sürtünme karıştırma kaynağının yapılabilmesi için farklı takım tipleri ve kaynak parametrelerinin kullanılması gerektiği düşünülmektedir.



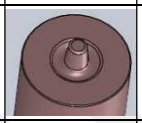
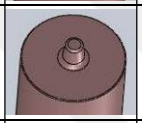
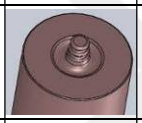
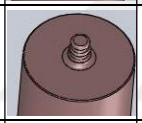
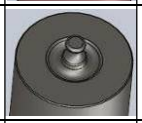
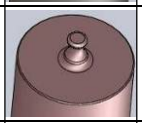
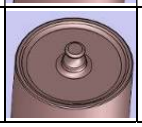
Şekil 6.33. Hyundai Era ön tampon malzemesi ile kaynak denemesi yapılmış parça.

Daha farklı takımlar ilave edilerek PE ve PP özelliği gösteren malzemelere farklı kaynak parametreleriyle tekrar SKK denemeleri yapılmıştır. Kullanılan takım ve kaynak parametreleri Çizelge 6.13'de verilmiştir. SKK denemeleri esnasında takım, saat ibresi yönünde (M03) çalıştırılmıştır (döndürülmüştür).

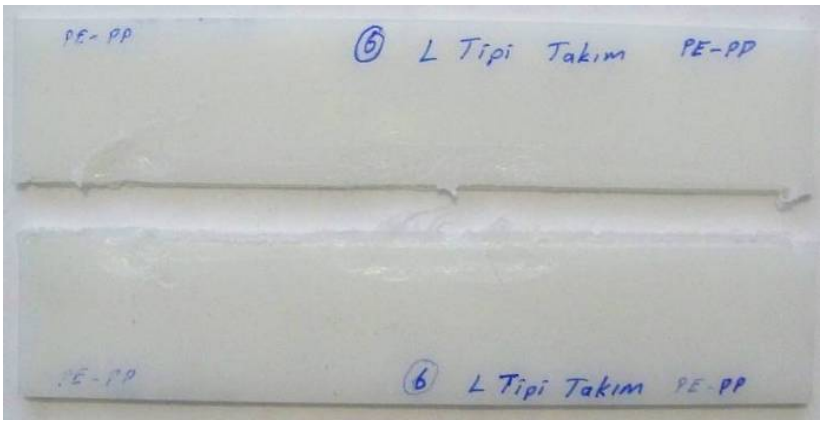
PE ve PP özelliği gösteren malzemeler ile farklı takımlar ve farklı parametrelerle yapılan SKK denemelerinde karıştırıcı takım alın yüzeyinin (omuz) parçaların üst yüzeyine temas ettiği yerlerde kullanılan bütün kaynak parametrelerinde genel olarak (P tipi takım hariç) kaynama olduğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takımın parçaların üst yüzeyine temas etmediği yerlerde kaynamanın kısmi olduğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların yüzeyine daldığı durumlarda sıcaklığın aşırı yükselmesinden dolayı yüzeylerde ergime veya aşırı yumuşama oluşmasına bağlı olarak malzeme kaynak bölgesinde tutulamadığından karıştırıcı takımın alın yüzeyinin temas

ettiği yüzeylerde oyukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların yüzeyine dalma miktarı azaldıkça yüzeyde oluşan oyukların azaldığı görülmüştür.

Çizelge 6.13. PE ve PP özelliği gösteren malzemelerde kullanılan SKK parametreleri.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*				*Kaynak Parametreleri*		
		Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*
D		Var	Yok	Tek Küçük	4,9	M03	1000	25, 50
E		Var	Yok	Yok	4,9	M03	1250	20, 25, 40, 50
F		Var	İki Küçük	Tek Küçük	4,9	M03	1000	25, 50
G		Var	İki Küçük	Yok	4,9	M03	1000	20, 25, 40, 70
H		Var	Tek Büyük	Tek Küçük	4,9	M03	1000	25, 50, 80
L		Var	Tek Büyük	Yok	4,9	M03	1000	10, 25, 50, 80
M		Var	Tek Büyük	İki Küçük	4,9	M03	1000	10, 50, 80
O		Var	Tek Büyük	Üç Küçük	4,9	M03	1000	10, 50, 70
P		Var	Tek Büyük	Tek Büyük	4,9	M03	1000	10, 50

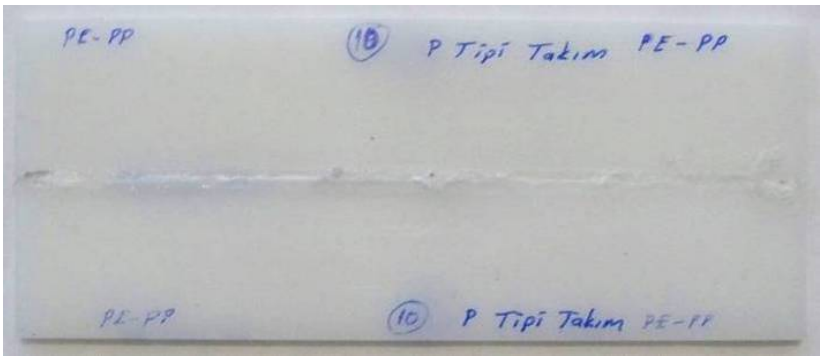
L tipi takımla yapılan SKK denemesinde karıştırıcı takımın kaynak parçalarının üst yüzeyine temas etmemesinden dolayı Şekil 6.34'de gösterilen şekilde tam bir kaynama olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.34. PE ve PP özelliği gösteren malzeme ve L tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça önden görünüş.

D, M ve O tipi takımlar ile yapılan SKK denemelerinde karıştırıcı takım yüzeyinin kaynak parçalarının üst yüzeyine temas etmesinden dolayı kaynak parçalarının üst yüzeyinde kaynama olduğu gözlemlenmiştir. Fakat kaynak parçalarının alt tarafında kaynama olmadığı görülmüştür.

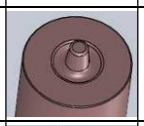
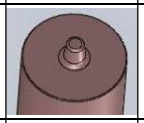
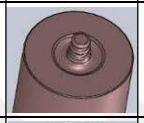
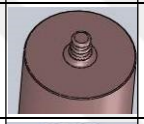
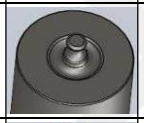
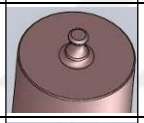
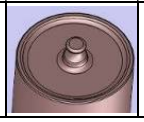
Ucu konik karıştırıcı takım ucunda bir adet büyük kanal olan ve karıştırıcı takım alın yüzeyinde bir adet büyük kanal olan P tipi takımla yapılan SKK denemesinde Şekil 6.35'de gösterilen şekilde herhangi bir kaynama olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.35. PE ve PP özelliği gösteren malzeme ve P tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça önden görünüş.

PA 6 malzemelere farklı takımlar ve farklı kaynak parametreleriyle SKK denemeleri yapılmıştır. Kullanılan takım ve kaynak parametreleri Çizelge 6.14'de verilmiştir. SKK denemeleri esnasında takım, saat ibresi yönünde (M03) çalıştırılmıştır (döndürülmüştür).

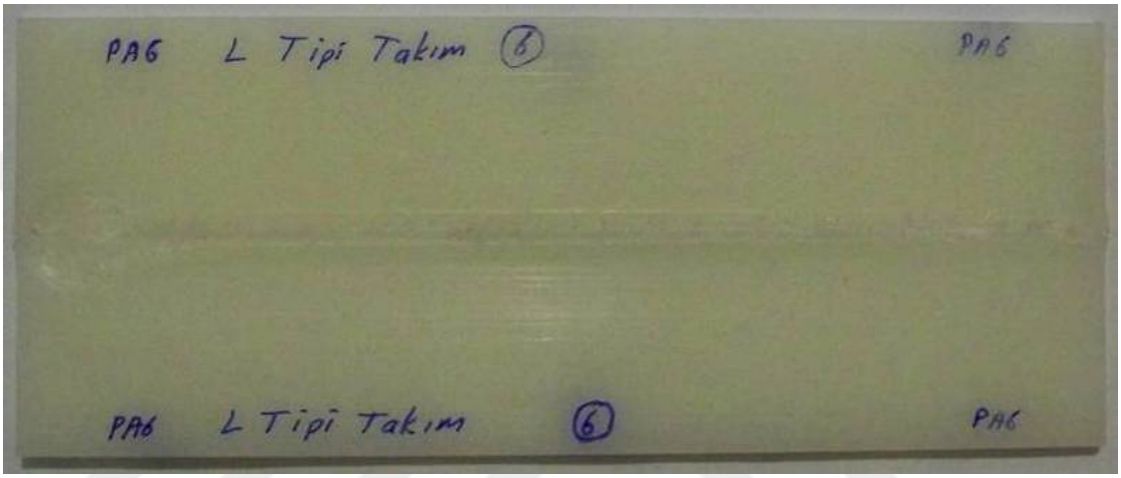
Çizelge 6.14. PA 6 malzemelerde kullanılan SKK parametreleri.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*				*Kaynak Parametreleri*		
		Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*
D		Var	Yok	Tek Küçük	4,9	M03	1000	10, 50
E		Var	Yok	Yok	4,9	M03	1000	10, 50
F		Var	İki Küçük	Tek Küçük	4,9	M03	1000	10, 50
G		Var	İki Küçük	Yok	4,9	M03	1000	10, 50
H		Var	Tek Büyük	Tek Küçük	4,9	M03	1000	10, 50
L		Var	Tek Büyük	Yok	4,9	M03	1000	10, 50
M		Var	Tek Büyük	İki Küçük	4,9	M03	1000	10, 50
O		Var	Tek Büyük	Üç Küçük	4,9	M03	1000	10, 50
P		Var	Tek Büyük	Tek Büyük	4,9	M03	1000	10, 50

PA 6 malzemeler ile yapılan SKK denemelerinde karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların üst yüzeyine temas ettiği yerlerde kullanılan bütün takımlarda (P tipi takım hariç) genel olarak kaynama olduğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takımın parçaların üst yüzeyine temas etmediği yerlerde kaynamanın kısmi olduğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların yüzeyine daldığı durumlarda sıcaklığın aşırı yükselmesinden dolayı yüzeylerde ergime veya aşırı yumuşama oluşmasına bağlı olarak malzeme kaynak bölgesinde tutulamadığından karıştırıcı takımın alın yüzeyinin temas

ettiği yüzeylerde oyukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Karıştırıcı takım alın yüzeyinin parçaların yüzeyine dalma miktarı azaldıkça yüzeyde oluşan oyukların azaldığı görülmüştür.

L tipi takımla yapılan SKK denemesinde karıştırıcı takımın kaynak parçalarının üst yüzeyine temas etmemesinden dolayı üst yüzeylerde Şekil 6.36'da gösterilen şekilde kaynama olmadığı alt yüzeylerde kısmen kaynama olduğu gözlemlenmiştir.

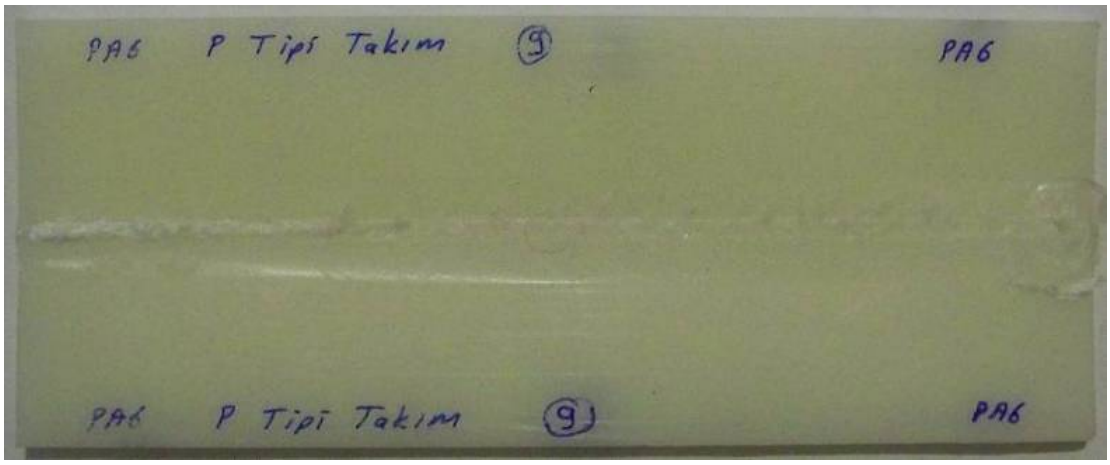


Şekil 6.36. PA 6 malzeme ve L tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça.

Ucu konik karıştırıcı takım ucunda bir adet büyük kanal olan ve karıştırıcı takım alın yüzeyinde bir adet büyük kanal olan P tipi takımla yapılan SKK denemesinde Şekil 6.37'de gösterilen şekilde üst yüzeylerde bir miktar kaynama olduğu fakat alt yüzeylerde herhangi bir kaynama olmadığı gözlemlenmiştir.

PE - PP özelliği gösteren malzemelere ve PA 6 malzemelere, karıştırıcı takım ucu konik, takım ucunda kanal olmayan D, E tipi takımlar ile yapılmış olan SKK denemelerinde, D tipi takım ile daha az boşluk, takım dalması, çapak ve daha iyi birleşmenin olduğu kaynakların yapıldığı tespit edilmiştir.

PE - PP özelliği gösteren malzemelere ve PA 6 malzemelere, karıştırıcı takım ucu konik, takım ucunda iki adet küçük kanal olan F, G tipi takımlar ile yapılmış olan SKK denemelerinde, F tipi takım ile daha az boşluk, takım dalması, çapak ve daha iyi birleşmenin olduğu kaynakların yapıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.37. PA 6 malzeme ve P tipi takım ile kaynak denemesi yapılmış parça.

PE - PP özelliği gösteren malzemelere ve PA 6 malzemelere, H, L, M, O, P tipi takımlar ile yapılan SKK denemelerinde, O tipi takım ile az da olsa takım dalması olmasına rağmen daha az boşluk, çapak ve daha iyi birleşmenin olduğu kaynakların yapıldığı tespit edilmiştir.

PE - PP özelliği gösteren malzemelere ve PA 6 malzemelere yapılan SKK denemelerinin hepsi görsel olarak incelendiğinde, H, M, O tipi takımlar ile takım dalmaları olmasına rağmen daha az boşluk, çapak ve daha iyi birleşmenin olduğu kaynakların yapıldığı tespit edilmiştir.

PE - PP özelliği gösteren malzemelere ve PA 6 malzemelere, H, L, M, O, P tipi takımlar ile yapılan SKK denemelerinde, takımın alın yüzeyinde bir adet büyük kanal olan P tipi takım ile yapılan kaynaklarda birleşmenin tam olarak sağlanamadığı tespit edilmiştir. Takımın alın yüzeyindeki kanalın çok büyük olmasından dolayı sürtünme yüzeyinin azalmasına bağlı olarak kaynak için gerekli ısının elde edilemediği düşünülmektedir.

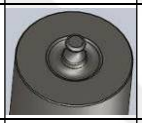
PE - PP özelliği gösteren malzemelere ve PA 6 malzemelere, 1000 dev/dak, 50 mm/dak ile yapılan SKK denemelerinde takım dalmaları olmasına rağmen daha az boşluk, çapak ve daha iyi birleşmenin oluştuğu tespit edilmiştir.

PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelere, H, M, O tipi takımlar ve farklı kaynak parametreleriyle SKK denemeleri yapılmıştır. Kullanılan takım ve kaynak

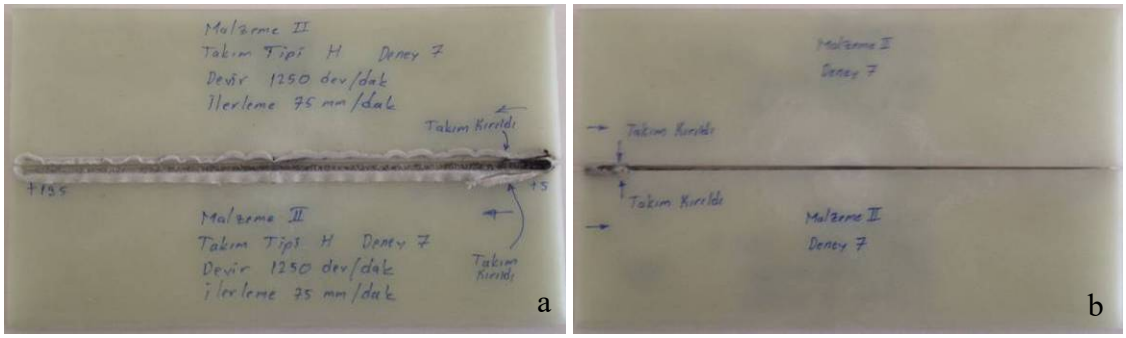
parametreleri Çizelge 6.15'de verilmiştir. SKK denemeleri esnasında takım, saat ibresi yönünde (M03) çalıştırılmıştır (döndürülmüştür).

En iyi sonuçların yukarıda detayları verilen SKK denemelerinde H, M ve O tipi takımlar ile yapılan kaynak denemelerinden alınmasından dolayı SKK deneylerinde H, M ve O tipi takımların kullanılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 6.15. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelerde kullanılan SKK parametreleri.

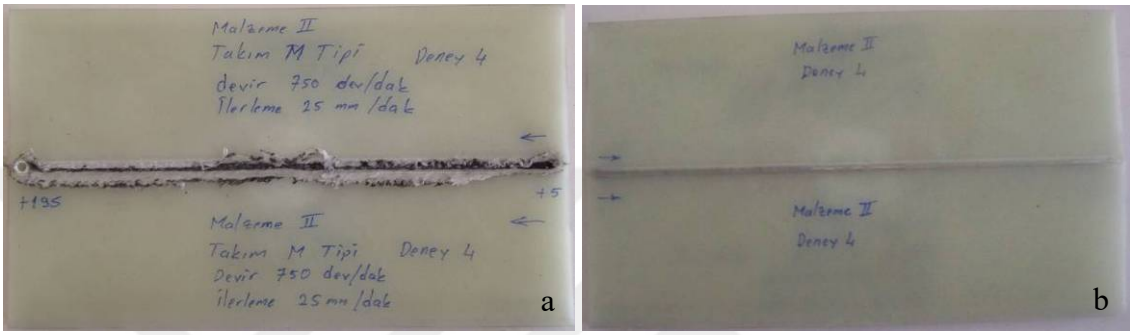
Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*				*Kaynak Parametreleri*		
		Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*
H		Var	Tek Büyük	Tek Küçük	4,9	M03	1250	75
M		Var	Tek Büyük	İki Küçük	4,9	M03	750	25
							1000	50
							1250	75
O		Var	Tek Büyük	Üç Küçük	4,9	M03	750	25
							1000	50
							1250	75

H tipi takımla yapılan SKK denemesinde devir sayısının 1250 dev/dak, ön ısıtma için ilk 10 mm'lik kaynak bölgesinde ilerleme hızının 15 mm/dak daha sonraki kaynak bölgesinde ilerleme hızının 75 mm/dak olmasına karar verilmiştir. Fakat ilk 10 mm'lik bölgeden hemen sonra Şekil 6.38'de gösterilen şekilde takım kırılmıştır.



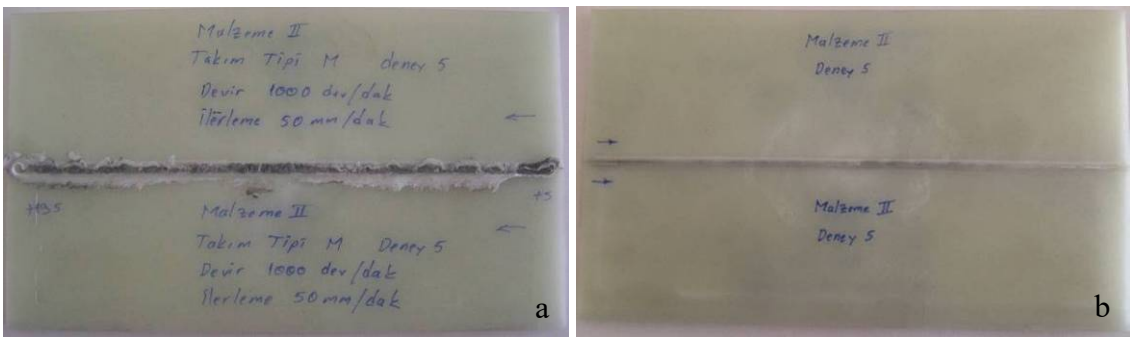
Şekil 6.38. H tipi takım, 1250 dev/dak ve 75 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

M tipi takımla yapılan SKK denemesinde devir sayısının 750 dev/dak, ön ısıtma için ilk 10 mm'lik kaynak bölgesinde ilerleme hızının 10 mm/dak daha sonraki kaynak bölgesinde ilerleme hızının 25 mm/dak olmasına karar verilmiştir. Bu kaynak deneyinde karıştırıcı takım alın (omuz) yüzeyi kaynak parçaları üst yüzeyine temas etmediğinden kaynak parçaları üst yüzeyinde Şekil 6.39'da gösterilen boşlukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Görsel incelemeler sonucunda kaynama olduğu görülmüştür.



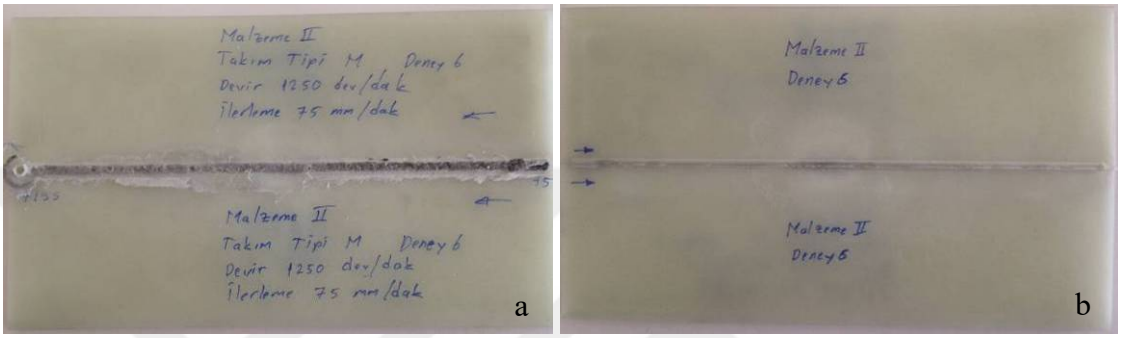
Şekil 6.39. M tipi takım, 750 dev/dak ve 25 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

M tipi takımla yapılan SKK denemesinde devir sayısının 1000 dev/dak, ön ısıtma için ilk 10 mm'lik kaynak bölgesinde ilerleme hızının 15 mm/dak daha sonraki kaynak bölgesinde ilerleme hızının 50 mm/dak olmasına karar verilmiştir. Bu kaynak deneyinde karıştırıcı takım alın (omuz) yüzeyi kaynak parçaları üst yüzeyine temas etmediğinden kaynak parçaları üst yüzeyinde Şekil 6.40'da gösterilen boşlukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Görsel incelemeler sonucunda kaynama olduğu görülmüştür.



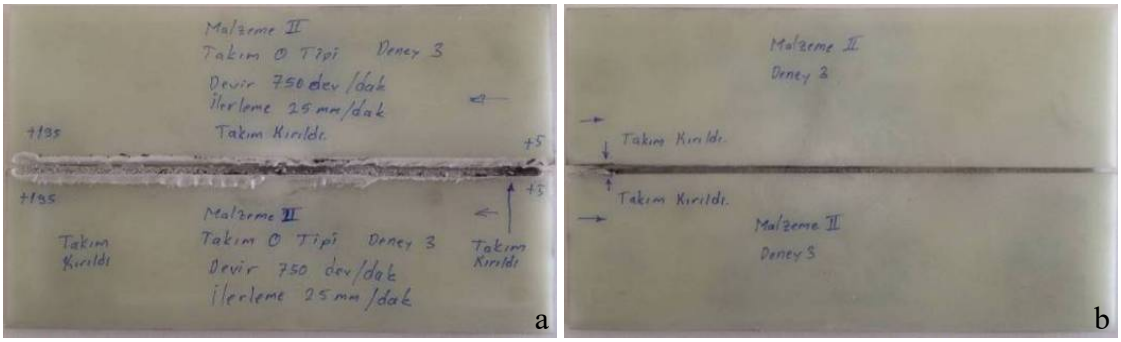
Şekil 6.40. M tipi takım, 1000 dev/dak ve 50 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

M tipi takımla yapılan SKK denemesinde devir sayısının 1250 dev/dak, ön ısıtma için ilk 10 mm'lik kaynak bölgesinde ilerleme hızının 15 mm/dak daha sonraki kaynak bölgesinde ilerleme hızının 75 mm/dak olmasına karar verilmiştir. Bu kaynak deneyinde de karıştırıcı takım alın (omuz) yüzeyi kaynak parçaları üst yüzeyine temas etmediğinden kaynak parçaları üst yüzeyinde Şekil 6.41'de gösterilen boşlukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Görsel incelemeler sonucunda kaynama olduğu görülmüştür.



Şekil 6.41. M tipi takım, 1250 dev/dak ve 75 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

O tipi takımla yapılan SKK denemesinde devir sayısının 750 dev/dak, ön ısıtma için ilk 10 mm'lik kaynak bölgesinde ilerleme hızının 15 mm/dak daha sonraki kaynak bölgesinde ilerleme hızının 25 mm/dak olmasına karar verilmiştir. Fakat ilk 10 mm'lik bölgeden hemen sonra Şekil 6.42'de gösterilen şekilde takım kırılmıştır.

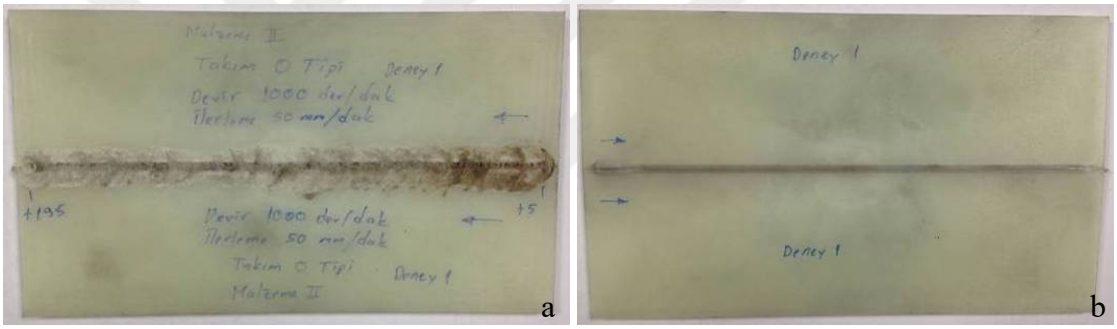


Şekil 6.42. O tipi takım, 750 dev/dak ve 25 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

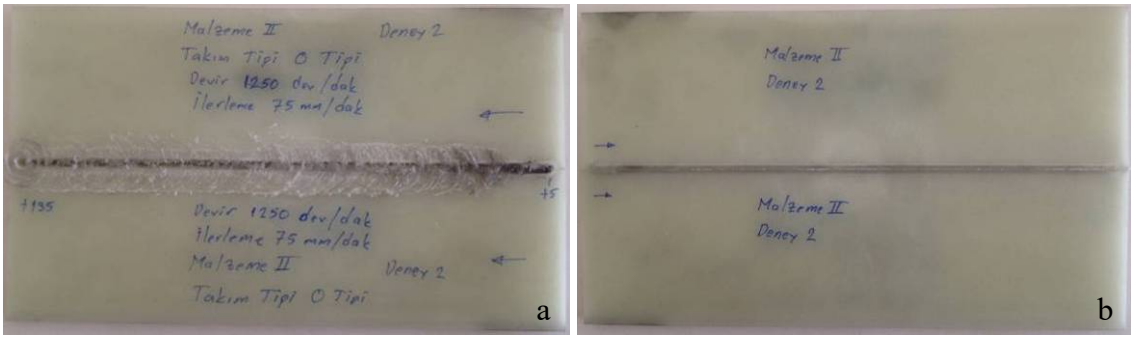
O tipi takımla yapılan SKK denemesinde devir sayısının 1000 dev/dak, ön ısıtma için ilk 10 mm'lik kaynak bölgesinde ilerleme hızının 10 mm/dak daha sonraki kaynak

bölgesinde ilerleme hızının 50 mm/dak olmasına karar verilmiştir. Bu kaynak deneyinde karıştırıcı takım alın (omuz) yüzeyi kaynak parçaları üst yüzeyine aşırı temas ettiğinden kaynak parçaları üst yüzeyinde Şekil 6.43'de gösterilen oyukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Görsel incelemeler sonucunda kaynama olduğu görülmüştür.

O tipi takımla yapılan SKK denemesinde devir sayısının 1250 dev/dak, ön ısıtma için ilk 10 mm'lik kaynak bölgesinde ilerleme hızının 15 mm/dak daha sonraki kaynak bölgesinde ilerleme hızının 75 mm/dak olmasına karar verilmiştir. Bu kaynak deneyinde de karıştırıcı takım alın (omuz) yüzeyi kaynak parçaları üst yüzeyine aşırı temas ettiğinden kaynak parçaları üst yüzeyinde Şekil 6.44'de gösterilen oyukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Görsel incelemeler sonucunda kaynama olduğu ve kaynak yüzeyinde boşlukların oluştuğu görülmüştür.



Şekil 6.43. O tipi takım, 1000 dev/dak ve 50 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.



Şekil 6.44. O tipi takım, 1250 dev/dak ve 75 mm/dak ile SKK denemesi yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelere, H tipi takım ile yapılan ilk kaynak denemesinin başlangıcında takım kırılmıştır.

PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelere, M tipi takım ile SKK yapılmış parçalar görsel olarak incelendiğinde 1000 dev/dak ve 50 mm/dak'da yapılan kaynak denemelerinde çapak olmasına rağmen daha az boşluk, renk değişimi ve daha iyi birleşmenin oluştuğu tespit edilmiştir.

PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelere, O tipi takım ile SKK yapılmış parçalar görsel olarak incelendiğinde 1000 dev/dak ve 50 mm/dak'da yapılan kaynak denemelerinde takım dalması ve çapak olmasına rağmen daha az boşluk, renk değişimi ve daha iyi birleşmenin oluştuğu tespit edilmiştir.

PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelere, M ve O tipi takımlar ile SKK yapılmış parçalar görsel olarak incelendiğinde, takımın alın yüzeyinde üç adet küçük kanal olan O tipi takım ile takım dalması ve çapak olmasına rağmen daha az boşluk, renk değişimi ve daha iyi birleşmenin oluştuğu tespit edilmiştir.

PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelere, 25 mm/dak ve 75 mm/dak ilerleme hızlarında yapılan SKK denemelerinde kullanılan takımların kırılmasından dolayı bu ilerleme hızlarının kullanılmamasına karar verilmiştir. 50 mm/dak ilerleme hızında daha iyi kaynakların elde edilmesinden dolayı, ilerleme hızının sürtünme karıştırma kaynağına etkisini belirleyebilmek için 40 mm/dak, 50 mm/dak ve 60 mm/dak ilerleme hızlarının kullanılmasına karar verilmiştir.

PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemeye, 750 dev/dak devir sayısında yapılan SKK denemesinde kullanılan takımın kırılmasından dolayı düşük devir sayılarının kullanılmamasına karar verilmiştir. 1000 dev/dak devir sayısında daha iyi kaynakların elde edilmesinden dolayı, devir sayısının sürtünme karıştırma kaynağına etkisini belirleyebilmek için 1000 dev/dak, 1125 dev/dak ve 1250 dev/dak devir sayılarının kullanılmasına karar verilmiştir.

SKK deneyleri esnasında vida dişi (helisi) olan takımlar kullanılmadığından takımın, saat ibresi yönünde (CW) (M03) veya saat ibresinin tersi yönde (CCW) (M04) çalıştırılmasının (döndürülmesinin) bir etkisi olmayacağından takımın saat ibresi yönünde (M03) yönünde çalıştırılmasına karar verilmiştir.

İlk yapılan SKK denemeleri esnasında giriş ve çıkışlarda karıştırıcı takım parçalarda boşluklar oluşturmuştur. Bundan dolayı kaynak işleminin parçaların içinde

bir yerde başlatılıp aynı şekilde parçaların içinde bir yerde sonlandırılması kararlaştırılarak parçanın iki ucunda oluşması muhtemel boşlukların en aza indirilmesi hedeflenmiştir.

Çizelge 6.16. SKK deneylerinde kullanılan parametreler.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*				*Kaynak Parametreleri*		
		Koniklik	*Uç Kanalı*	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Uç Boyu (mm)*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*
H		Var	Tek Büyük	Tek Küçük	4,9	M03	1000	40
								50
								60
							1125	40
								50
								60
							1250	40
								50
								60
M		Var	Tek Büyük	İki Küçük	4,9	M03	1000	40
								50
								60
							1125	40
								50
								60
							1250	40
								50
								60
O		Var	Tek Büyük	Üç Küçük	4,9	M03	1000	40
								50
								60
							1125	40
								50
								60
							1250	40
								50
								60

Bazı SKK denemelerinde takım ile parçalara dalmadan önce başlangıç noktasına ön delikler delinmiştir. Fakat plastik malzemelere SKK yapılacağından ön delik delme işlemi yapılmadan takım ile direk parçalara dalarak kaynak yapılmasına karar

verilmiştir. Ön delik delinmemesinin diğer bir sebebi de kaynak için gerekli olan ısıya dalma esnasında oluşan ısınında faydasının olacağının düşünülmesidir.

Dalma ilerleme hızı ve ön ısıtma ilerleme hızı olarak 15 mm/dak belirlenmiştir. Dalma derinliği 4,9 mm ve ön ısıtma bölgesi uzunluğu 10 mm olduğundan toplamda ~15 mm boyunca takım ön ısıtma için çalışmış olacaktır. İlerleme hızı da 15 mm/dak olduğundan ön ısıtma veya bekleme süresi ~1 dakika (60 saniye) olarak belirlenmiştir.

İlerleme verilerek ön ısıtmanın sebebi takımın malzeme üzerine yaptığı baskıyla daha iyi bir ısınmanın sağlanarak daha kısa sürede daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılması hedeflenmiştir.

SKK deneylerinde kullanılmasına karar verilen takımların özellikleri ve kaynak parametreleri Çizelge 6.16'da verilmiştir.

6.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapımında ve Kaynak Yapılacak Parçaların Hazırlanmasında Kullanılan Makine Özellikleri

SKK işleminin yapılmasında 1990 model, Şekil 6.45'de gösterilen BUTLER NEWALL marka TE-4000 CNC Bed freze tezgâhı kullanılmıştır. CNC Bed freze tezgâhın teknik özellikleri Çizelge 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.45. CNC Bed freze tezgâhı.

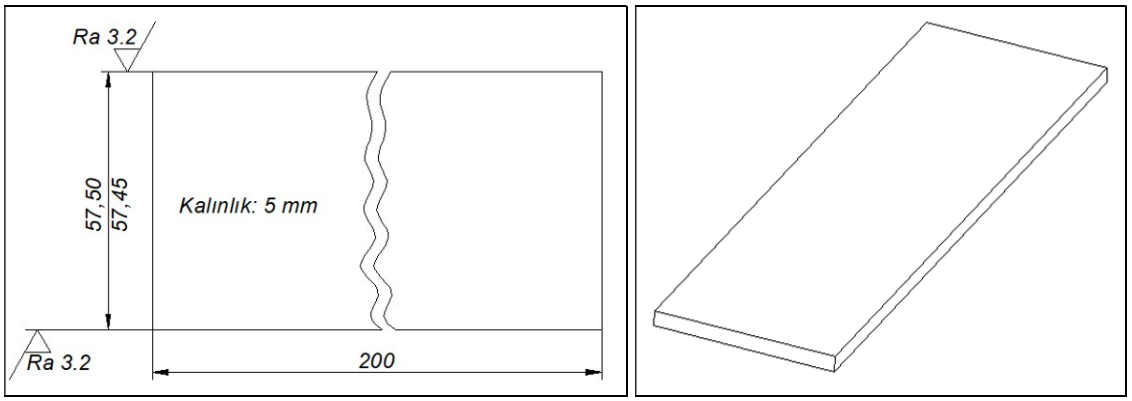
Çizelge 6.17. CNC Bed freze tezgâhı özellikleri.

Makine Hareketleri	Boyuna Hareket (X ekseni) (mm)	4000
	Yatay Hareket (Z ekseni) (mm)	1000
	Geri Çıkma (Dikey) Hareketi (Y ekseni) (mm)	1600 / 2100
İş Mili Özellikleri	İş Mili Koniği Takım Tipi Standardı	ISO 50
	İş Mili Devir Sayısı Aralığı (dev/dak)	0 - 2000
	İş Mili Gücü (kW)	20
İlerleme Hızı Özellikleri	Kesme Hızı (mm/dak)	2 - 6000
	Hızlı İlerleme (mm/dak)	6000

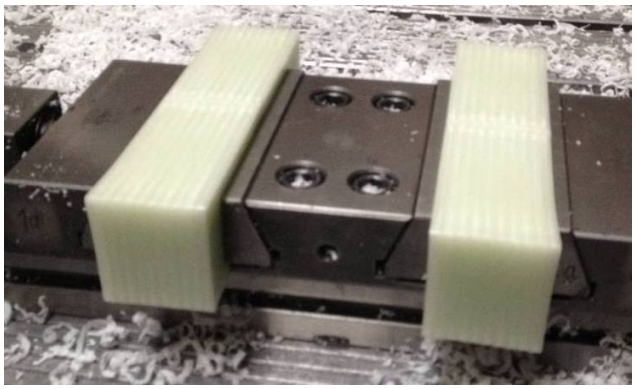
Makinenin standart donanımı; indeksli iki eksende dönebilen kafa, CNC HEIDENHAIN TNC 415 kontrol ünitesi, elektronik el çarkı, takım tutucu, hidrolik tabla frenleri, hızlı iş mili durdurma ve soğutma sıvısı siteminden oluşmaktadır.

6.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılacak Parçaların Kaynak İçin Hazırlanması

Plaka halinde üretilen PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelerin, SKK kalıbına bağlamaya uygun olarak Şekil 6.46'da gösterilen şekilde imalat resimleri çizilmiştir. Malzemeler, imalat resimlerine uygun olarak Şekil 6.47'de gösterilen şekilde CNC Bed freze tezgâhında kenarları işlenerek SKK kalıbına bağlamaya uygun hale getirilmiştir.



Şekil 6.46. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelerin imalat resmi.

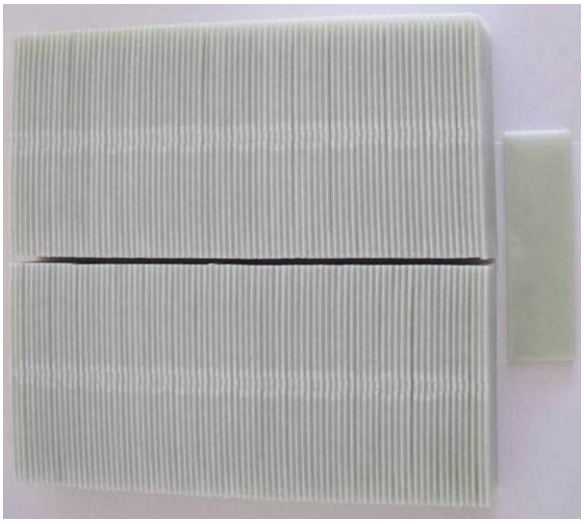


Şekil 6.47. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelerin kenarlarının işlenmesi.

Kaynak yapılacak parçalar işlendikten sonra çapakları alınarak Şekil 6.48 - Şekil 6.49'da gösterilen şekilde kaynak için hazırlanmıştır.



Şekil 6.48. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemelerin çapaklarının alınması.



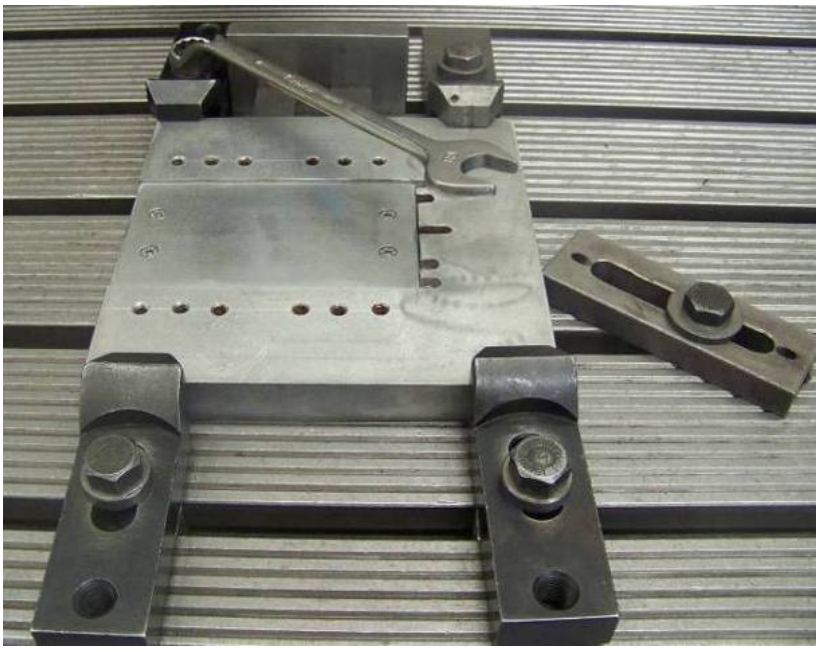
Şekil 6.49. PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemeden hazırlanmış parçalar.

6.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılışı

Sürtünme karıştırma kaynağının yapılmasındaki işlem sırası aşağıdaki gibidir;

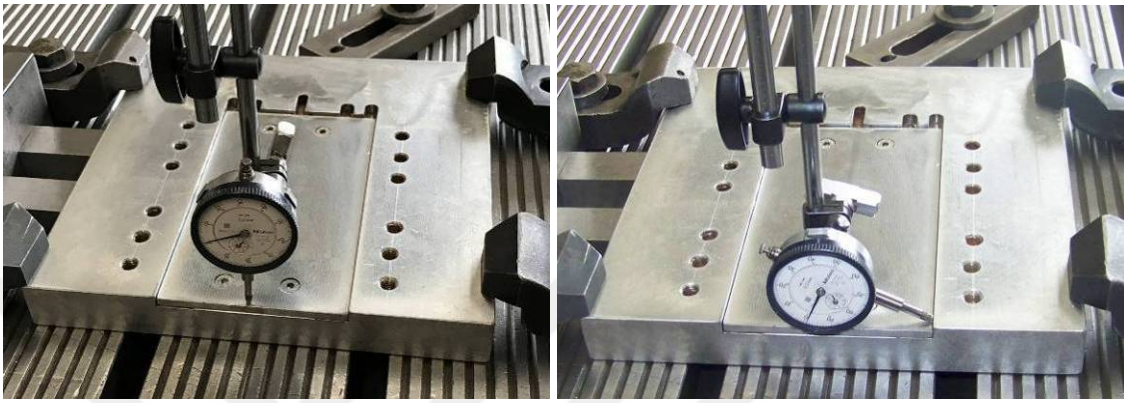
- Kaynak kalıbının hazırlanması ve makineye bağlanması,
- Kalıba göre x ve z eksenlerinde sıfırlamanın yapılması,
- Karıştırıcı takımların hazırlanması ve makineye bağlanması,
- Karıştırıcı takıma göre makinenin y sıfırının ayarlanması,
- Makinenin CNC programının yapılması,
- Sürtünme karıştırma kaynak işleminin başlatılması ve yapılması.

Bağlama kalıbının makine tablasına sabitlenmesi, gayet düzgün ve sağlam olmalıdır. Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında kalıbının hareket etmemesi gerekir. Aksi takdirde, sürtünme karıştırma kaynağı istenilen şekilde yapılamaz. Bağlama kalıbının makine tablasına Şekil 6.50'de gösterilen şekilde bağlama pabuçları, altlıklar, saplamalar ve somunlar ile sabitlenmesi gerekmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağının düzgün bir şekilde yapılabilmesi için kalıp, CNC Bed freze tezgâhına düzgün bir şekilde bağlanmıştır.

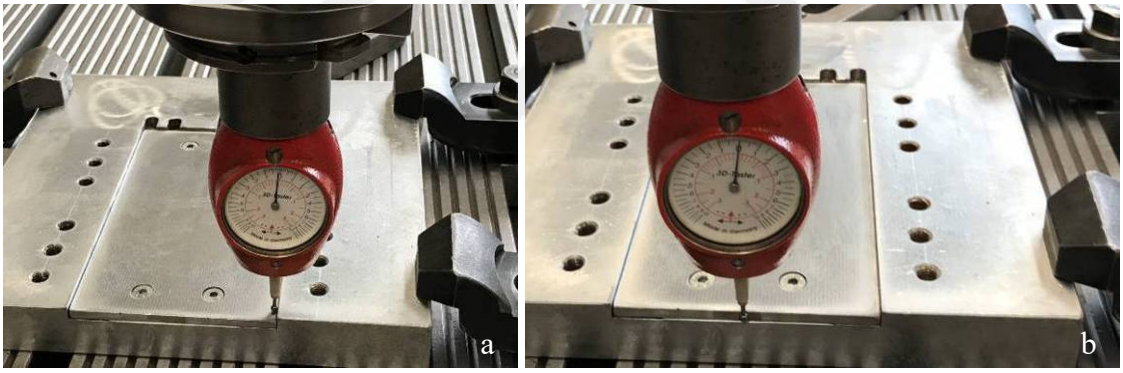


Şekil 6.50. Bağlama kalıbının makine tablasına sabitlenmesi.

Bağlama kalıbının makine tablasına bağlanması esnasında kalıbın makine tablasına paralel olmasına, iş mili eksenine dik olmasına ve y eksenine paralel olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bağlama kalıbının komporatör saati yardımıyla Şekil 6.51'de gösterilen şekilde paralellik ve diklik kontrollerinin yapılması gerekmektedir.



Şekil 6.51. Bağlama kalıbının paralellik ve diklik kontrollerinin yapılması.

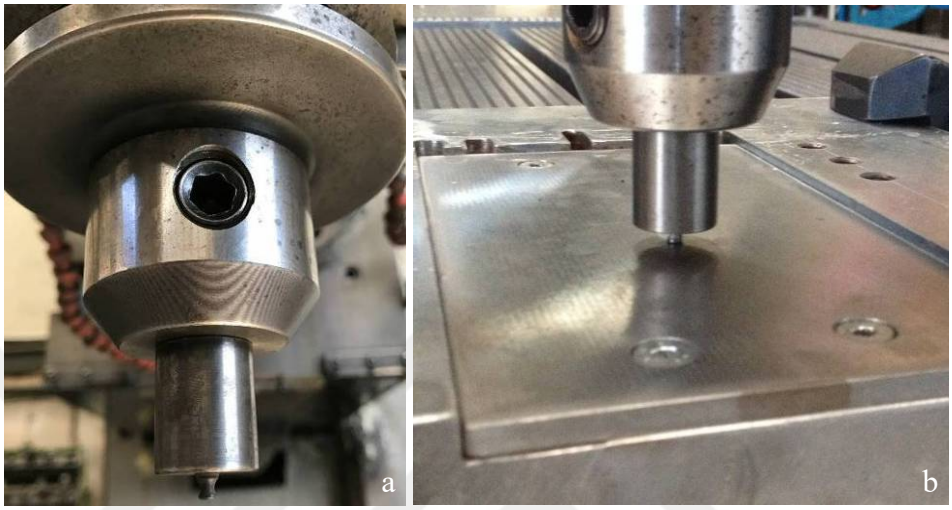


Şekil 6.52. Bağlama kalıbına göre makine sıfırlarının ayarlanışı; a) Z Eksen sıfırlaması, b) X eksen sıfırlaması.

Kalıp bağlama işlemi tamamlandıktan sonra makinenin x ve z eksenlerinde sıfırları kalıba göre ayarlanmıştır. Z ekseninde sıfırlama yapılırken kalıp içindeki kanalın orta noktası sıfır kabul edilmiştir. X ekseninde sıfırlama yapılırken ise kalıp içindeki kanalın açık ucundaki (ön taraftaki) kenar sıfır kabul edilmiştir. Bu sıfırlar Şekil 6.52'de gösterilen tezgâh sıfırlama takımı (prob) yardımıyla bulunmuştur.

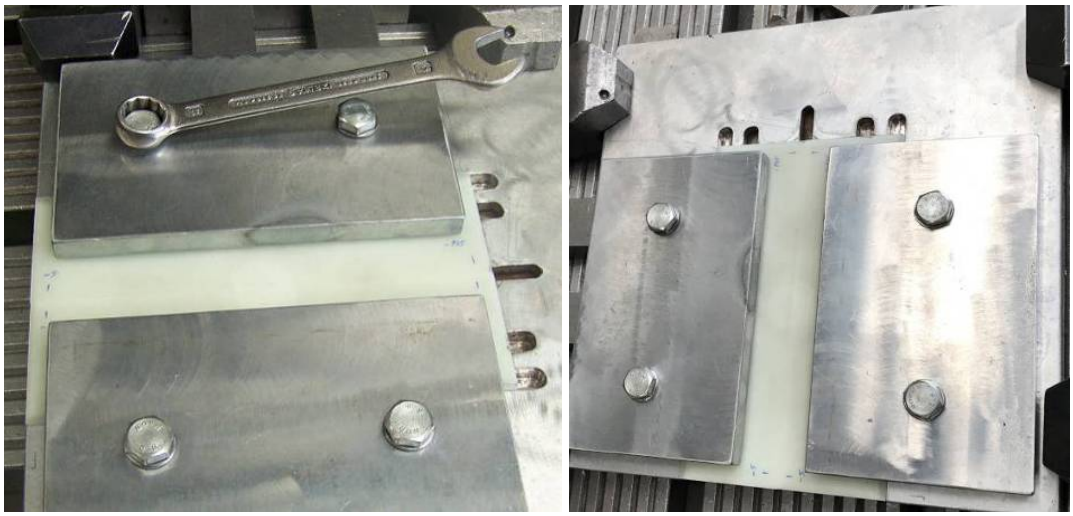
Kalıp bağlama işlemi ve sıfırlama tamamlandıktan sonra kullanılacak olan takım, Şekil 6.53'de gösterilen takım tutucu (veldon) üzerine yerleştirilmiştir. Takım tutucu makineye bağlandıktan sonra makinenin elektronik el çarkı yardımıyla y

ekseninde yavaş yavaş ilerleyerek takım kalıp içerisindeki taban plakası üzerine hafif dokundurulduktan sonra makine kontrol panelinden y eksenine “0” ölçüsü girilerek y ekseni de sıfırlanmıştır. H, M ve O tipi takımların kullanılmasına karar verildiğinden bu takımlar kullanılarak sürtünme karıştırma kaynakları yapılmıştır.



Şekil 6.53. a) Takımın takım tutucu ve makineye bağlanışı, b) Y eksen sıfırlaması.

Sıfırlama işlemi tamamlandıktan sonra sürtünme karıştırma kaynağı yapılacak olan parçalar, kalıba yerleştirilip kalıp üzerine bağlanabilen pabuçlar yardımıyla Şekil 6.54’de gösterilen şekilde sabitlenmiştir.



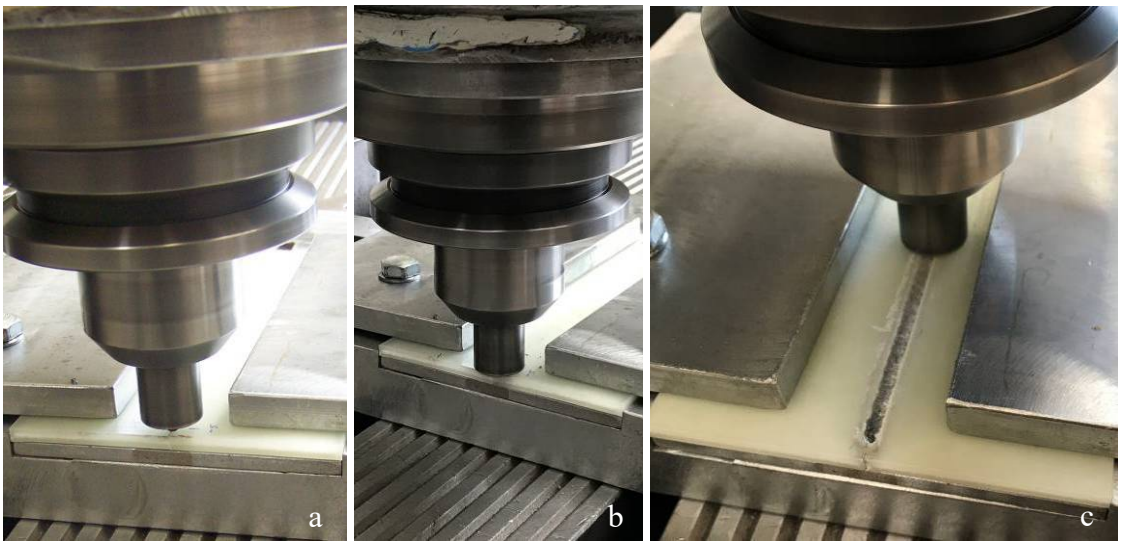
Şekil 6.54. Kaynak yapılacak parçaların kalıp üzerine bağlanışı.

Sürtünme karıştırma kaynağı yapılacak parçalar bağlama kalıbına bağlanırken, enjeksiyon giriş yüzeylerinin birleştirilmesine dikkat edilmiştir. Enjeksiyon giriş yüzeylerinin bir biri ile kaynatılmasının sebebi, enjeksiyon hatalarına bağlı olarak ortaya çıkabilecek hataların en düşük seviyede tutulmak istenmesidir.

SKK işlemine başlamadan önce CNC Bed freze tezgâhı için gerekli olan CNC programları Bölüm 6.3'de belirlenen parametrelere uygun olarak yapılmıştır. Takım dönüş yönü saat ibresi yönünde (M03), dalma ve ön ısıtma ilerlemesi 15 mm/dak, geri çekilme ilerlemesi 40 mm/dak olacak şekilde, devir sayısı ve kaynak ilerleme hızı her deney için belirlenen parametreler göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

SKK deneylerinde kaynak işlemi, parçaların içinde bir yerde başlatılıp aynı şekilde parçaların içinde bir yerde sonlandırılmıştır. SKK deneylerinin başlangıcında ön delik delme işlemi yapılmamıştır.

Dalma ve ön ısıtma bölgesinde kullanılan düşük ilerleme hızının düşük kullanılmasından dolayı ön ısıtma veya bekleme süresi ~1 dakika (60 saniye) olduğundan kaynak başlangıcında ön ısıtma için ayriyeten bir bekleme yapılmamıştır.



Şekil 6.55. Sürtünme karıştırma kaynağının yapılışı; a) Takımın dalması, b) Ön ısıtma bölgesi ilerleme, c) Kaynak bölgesi ilerleme.

SKK esnasında karıştırıcı takım alın yüzeyinin kaynak parçalarının üst yüzeyine tam olarak temas etmemesi durumunda kaynak için yeterli ısı oluşmamasından dolayı

tam bir kaynama elde edilemeyeceğinden karıştırıcı takım alın yüzeyinin kaynak parçalarının üst yüzeyine tam olarak temas etmesine dikkat edilmiştir.

Bütün ayarlamalar yapıldıktan sonra CNC Bed freze tezgâhı, herhangi bir yanlış programlama yapılıp yapılmadığını kontrol etmek için program satır satır çalıştırılmıştır. Çalışan makine parça yüzeyine yaklaşırken yavaşlatılmıştır. Ön ısıtma bölgesi geçildikten sonra makine, ayarlanan ilerleme hızlarında otomatik olarak çalıştırılarak kaynak işlemi tamamlandıktan sonra durmuştur. Şekil 6.55'de gösterilen şekilde sürtünme karıştırma kaynağı deneyleri yapılmıştır.

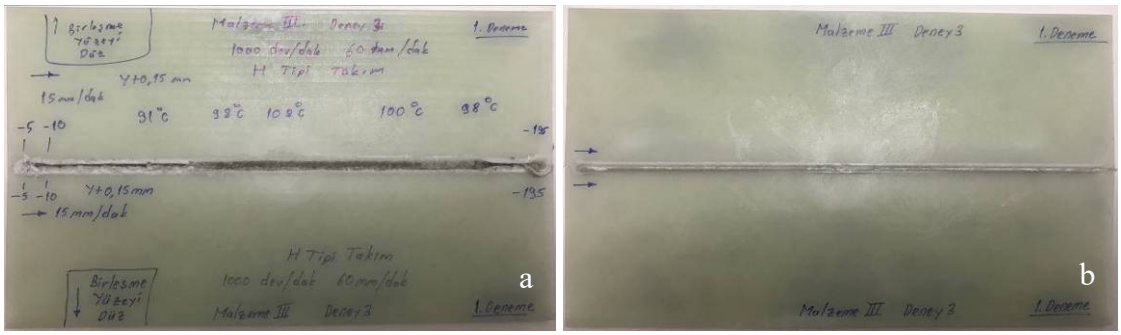
Sürtünme karıştırma kaynak işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 6.56'da gösterilen şekilde soğuma için bir süre beklendikten sonra kaynak yapılmış parçalar bağlama kalıbından sökülmüştür.



Şekil 6.56. SKK yapılmış parça soğuma için beklenirken.

1 - 9 numaralı kaynaklarda ucu konik, karıştırıcı takım ucunda bir adet büyük kanal olan ve karıştırıcı takım alın yüzeyinde bir adet küçük kanal olan H tipi takım kullanılmıştır.

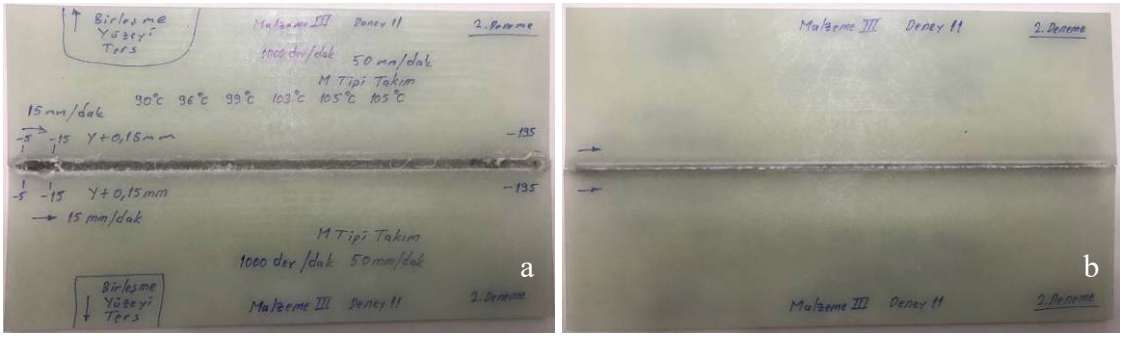
H tipi takım ile yapılan kaynaklarda karıştırıcı takım alın (omuz) yüzeyinin kaynak parçalarının üst yüzeyine fazla temas ettiği yerlerde kaynak parçaların üst yüzeyinde oyuklar oluştuğu, temas etmediği yerlerde Şekil 6.57'de gösterilen şekilde kaynağın tam olarak gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Görsel incelemeler sonucunda kaynama olduğu görülmüştür.



Şekil 6.57. H tipi takım ile kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

10 - 18 numaralı kaynaklarda ucu konik, karıştırıcı takım ucunda bir adet büyük kanal olan ve karıştırıcı takım alın yüzeyinde iki adet küçük kanal olan M tipi takım kullanılmıştır.

M tipi takım ile yapılan kaynaklarda karıştırıcı takım alın (omuz) yüzeyinin kaynak parçalarının üst yüzeyine fazla temas ettiği yerlerde kaynak parçaların üst yüzeyinde oyuklar oluştuğu, temas etmediği yerlerde Şekil 6.58'de gösterilen şekilde kaynağın tam olarak gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Görsel incelemeler sonucunda kaynama olduğu görülmüştür.

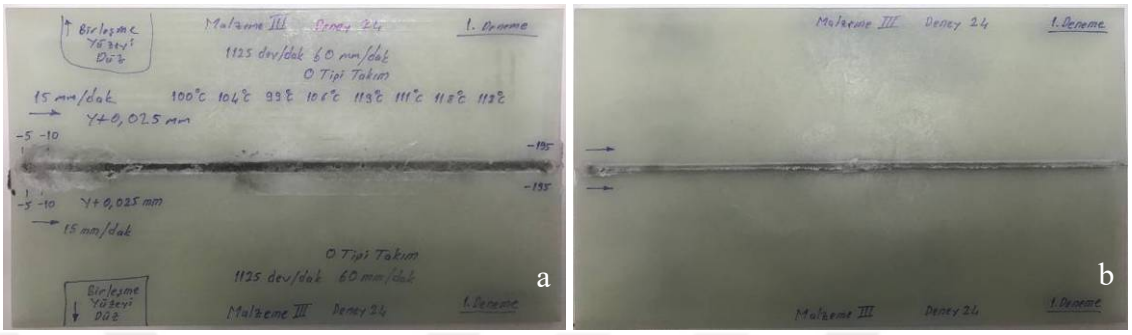


Şekil 6.58. M tipi takım ile kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

19 - 27 numaralı kaynaklarda ucu konik, karıştırıcı takım ucunda bir adet büyük kanal olan ve karıştırıcı takım alın yüzeyinde üç adet küçük kanal olan O tipi takım kullanılmıştır.

O tipi takım ile yapılan kaynaklarda karıştırıcı takım alın (omuz) yüzeyinin kaynak parçalarının üst yüzeyine fazla temas ettiği yerlerde kaynak parçaların üst

yüzeyinde oyuklar oluştuğu, temas etmediği yerlerde Şekil 6.59'da gösterilen şekilde kaynağın tam olarak gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Görsel incelemeler sonucunda kaynama olduğu görülmüştür.



Şekil 6.59. O tipi takım ile kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.



Şekil 6.60. Kaynak yapılmış parçalar.

Şekil 6.60'da gösterilen şekilde 27 farklı parametrede toplamda 40 deney yapılmıştır. Bazı parametrelerde yapılan deneyler görsel olarak iyi sonuçlar elde edilene kadar tekrar edilmiştir. Takımların alın (omuz) yüzeylerinin, parçalardaki çok azda olsa eğilme ve kalınlık farklılıklarından dolayı parçaların yüzeyine çok fazla temas etmesi veya hiç temas etmemesine bağlı olarak SKK deneylerini etkilememesi için deney tekrarları yapılmıştır.

6.7. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılmış Parçalara Yapılan İncelemeler ve Deneyler

Sürtünme karıştırma kaynağı yapılan PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli paçalara kaynak esnasında ve kaynak sonrasında incelemeler, ölçümler ve deneyler yapılmıştır. SKK yapılmış parçalara, görsel, mikro yapı incelemeleri, sıcaklık, sertlik ölçümleri ve çekme deneyleri yapılmıştır.

6.7.1. Görsel İncelemeler

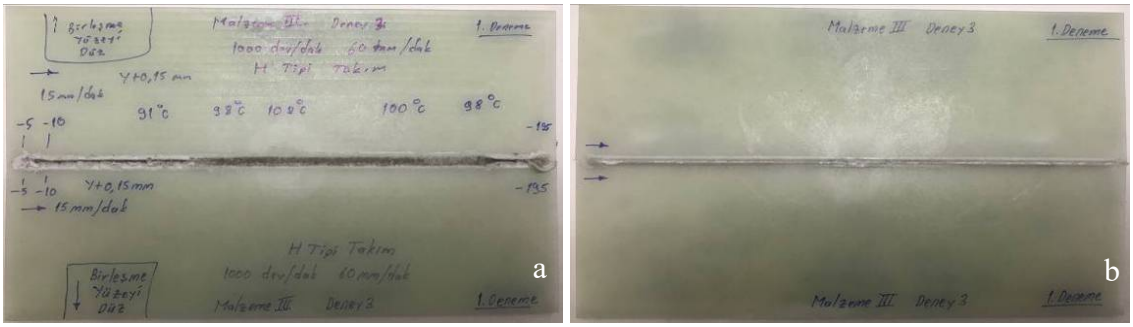
PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemeler ile SKK yapılmış parçalara herhangi bir kesme veya ölçüm yapılmadan kaynağın genel görünüşünün, takım dalması, boşluk, çapak oluşumu vb. açısından görsel olarak incelenmesi ile ilgili yapılan tespitler aşağıdaki gibidir;

Değerlendirmeler Çizelge 6.18'de verilen kriterlere uygun olarak yapılmıştır.

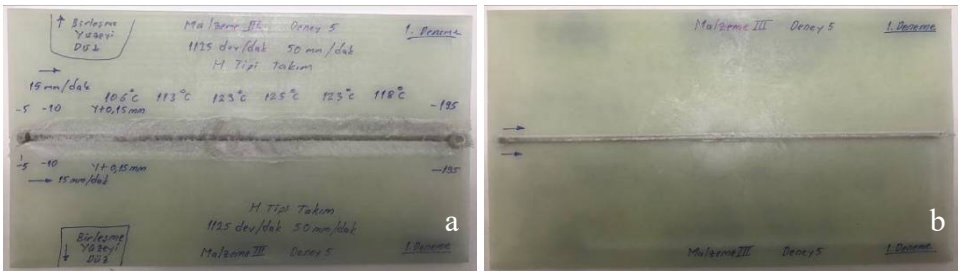
Karıştırıcı takım ucu konik, takım ucunda bir adet büyük kanal ve takımın alın yüzeyinde bir adet küçük kanal olan H tipi takım ile SKK yapılan parçaların, görsel olarak incelemesi yapılmıştır. Sonuç olarak 1000 dev/dak ve 60 mm/dak'da SKK yapılan parçaların Şekil 6.61'de gösterilen şekilde takım dalması, kalınlık düşmesi olmaması, daha az boşluk, çapak, renk değişimi ve daha iyi birleşmenin oluşmasından dolayı diğerlerinden daha iyi olduğu tespit edilmiştir. 1125 dev/dak ve 50 mm/dak'da SKK yapılan parçalarda, Şekil 6.62'de gösterilen şekilde daha çok boşluk, takım dalması, kalınlık düşmesi, çapak ve daha zayıf birleşmenin oluşmasından dolayı iyi olmayan sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 6.18. SKK parametrelerine göre görsel inceleme sonuçları.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Kaynak Parametreleri*			*Görsel İnceleme Kriterleri*				
		Takım Dönüş Yönü	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*	*Kaynak Bölgesi Takım Dalması*	*Kaynak Bölgesi Kalınlık Düşmesi*	*Kaynak Bölgesi Çapak Oluşumu*	*Kaynak Bölgesi Boşluk Oluşumu*	*Kaynak Bölgesi Renk Değişimi*
H		M03	1000	40	Çok az	0,5 mm	Çok	Orta	Az
				50	Çok fazla	0,2 mm	Az	Çok fazla	Çok az
				60	Yok	Yok	Çok az	Az	Az
			1125	40	Çok fazla	0,8 mm	Çok	Çok fazla	Az
				50	Çok fazla	0,2 mm	Çok fazla	Çok Fazla	Yok
				60	Yok	Yok	Orta	Orta	Çok az
			1250	40	Çok fazla	0,3 mm	Orta	Çok fazla	Çok az
				50	Çok fazla	0,8 mm	Çok fazla	Çok fazla	Çok fazla
				60	Yok	Yok	Yok	Az	Çok
M		M03	1000	40	Yok	Yok	Orta	Orta	Orta
				50	Yok	Yok	Çok az	Az	Az
				60	Yok	Yok	Yok	Çok az	Az
			1125	40	Çok fazla	0,5 mm	Orta	Az	Çok az
				50	Yok	Yok	Yok	Az	Çok az
				60	Çok az	0,1 mm	Çok az	Az	Çok az
			1250	40	Çok fazla	0,8 mm	Çok fazla	Çok fazla	Yok
				50	Yok	Yok	Az	Orta	Çok az
				60	Çok fazla	0,3 mm	Çok	Orta	Yok
O		M03	1000	40	Çok az	Orta	Var	Orta	Çok
				50	Çok az	0,2 mm	Az	Orta	Orta
				60	Yok	Yok	Çok az	Az	Çok
			1125	40	Yok	Yok	Çok az	Orta	Orta
				50	Çok az	Yok	Az	Orta	Orta
				60	Az	0,2 mm	Çok az	Az	Az
			1250	40	Orta	0,7 mm	Orta	Çok	Az
				50	Yok	Yok	Az	Az	Çok az
				60	Yok	Yok	Az	Orta	Az

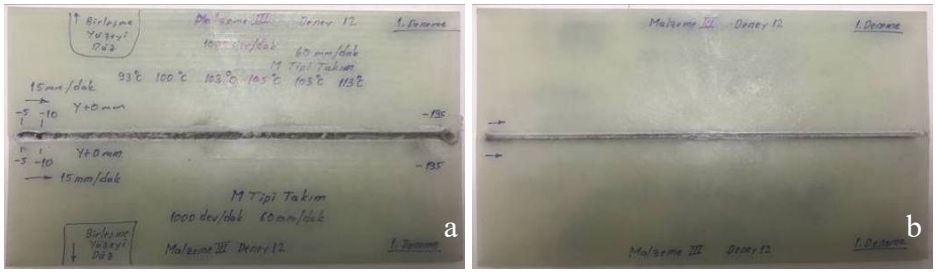


Şekil 6.61. H tipi takım ile en iyi görsel sonuç elde edilen SKK, 1000 dev/dak ve 60 mm/dak'da kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

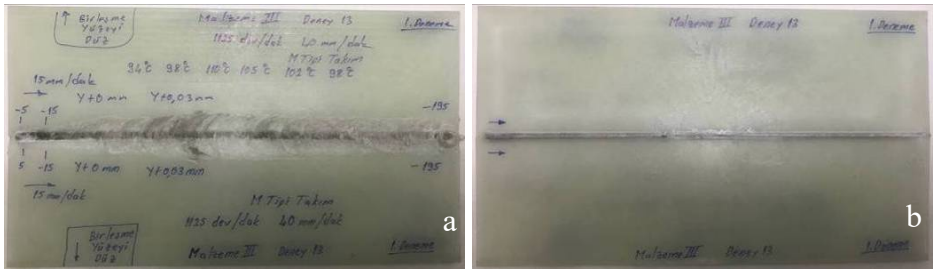


Şekil 6.62. H tipi takım ile en kötü görsel sonuç elde edilen SKK, 1125 dev/dak ve 50 mm/dak'da kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

Karıştırıcı takım ucu konik, takım ucunda bir adet büyük kanal ve takımın alın yüzeyinde iki adet küçük kanal olan M tipi takım ile SKK yapılan parçaların, görsel olarak incelemesi yapılmıştır. Sonuç olarak 1000 dev/dak ve 60 mm/dak'da SKK yapılan parçaların Şekil 6.63'de gösterilen şekilde çapak, takım dalması, kalınlık düşmesi olmaması, daha az boşluk, hafif renk değişimi ve daha iyi birleşmenin oluşmasından dolayı diğerlerinden daha iyi olduğu tespit edilmiştir. 1125 dev/dak ve 40 mm/dak'da SKK yapılan parçalarda, Şekil 6.64'de gösterilen şekilde daha çok boşluk, takım dalması, kalınlık düşmesi, çapak, renk değişimi ve daha zayıf birleşmenin oluşmasından dolayı iyi olmayan sonuçlar elde edilmiştir.

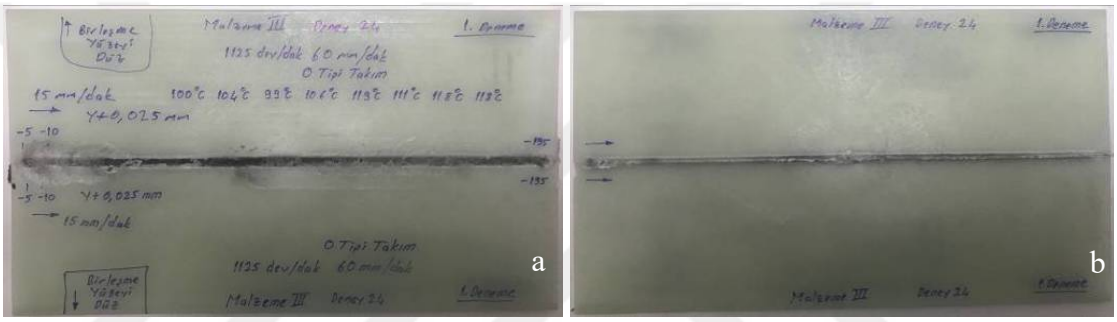


Şekil 6.63. M tipi takım ile en iyi görsel sonuç elde edilen SKK, 1000 dev/dak ve 60 mm/dak'da kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

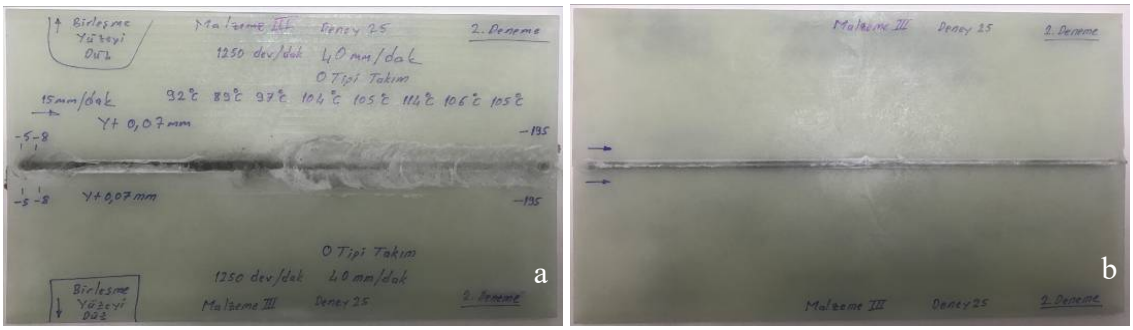


Şekil 6.64. M tipi takım ile en kötü görsel sonuç elde edilen SKK, 1125 dev/dak ve 40 mm/dak'da kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

Karıştırıcı takım ucu konik, takım ucunda bir adet büyük kanal ve takımın alın yüzeyinde üç adet küçük kanal olan O tipi takım ile SKK yapılan parçaların, görsel olarak incelemesi yapılmıştır. Sonuç olarak 1125 dev/dak ve 60 mm/dak'da SKK yapılan parçaların Şekil 6.65'de gösterilen şekilde az da olsa takım dalması, kalınlık düşmesi, çapak ve renk değişimi olmasına rağmen daha az boşluk ve daha iyi birleşmenin oluşmasından dolayı diğerlerinden daha iyi olduğu tespit edilmiştir. 1250 dev/dak ve 40 mm/dak'da SKK yapılan parçalarda, Şekil 6.66'da gösterilen şekilde daha çok boşluk, takım dalması, kalınlık düşmesi, çapak, renk değişimi ve daha zayıf birleşmenin oluşmasından dolayı iyi olmayan sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 6.65. O tipi takım ile en iyi görsel sonuç elde edilen SKK, 1125 dev/dak ve 60 mm/dak'da kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.



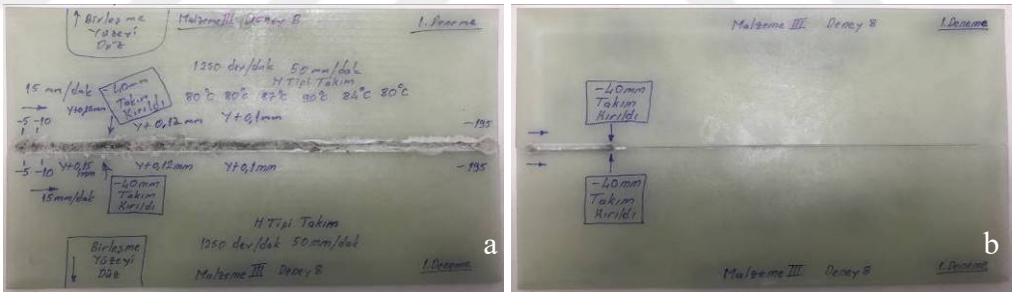
Şekil 6.66. O tipi takım ile en kötü görsel sonuç elde edilen SKK, 1250 dev/dak ve 40 mm/dak'da kaynak yapılmış parça; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

1000, 1125 ve 1250 dev/dak'da SKK yapılan parçalardan, M tipi takım ile SKK yapılan parçalarda, daha az boşluk, çapak, takım dalması, kalınlık düşmesi ve renk değişiminin olmasından dolayı daha iyi birleştirmelerin oluştuğu tespit edilmiştir. H tipi takım ile daha çok boşluk, takım dalması, kalınlık düşmesi, çapak, renk değişimi ve daha zayıf birleştirmelerin oluşmasından dolayı iyi olmayan sonuçlar elde edilmiştir.

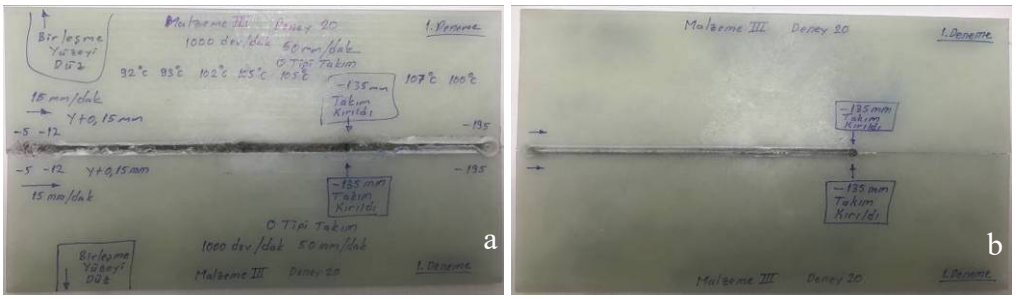
40, 50 ve 60 mm/dak'da SKK yapılan parçalardan, 50, 60 mm/dak'da M tipi takım, 40 mm/dak'da O tipi takım ile SKK yapılan parçalarda, takım dalması, kalınlık düşmesi olmaması ve daha az boşluk, çapak, renk değişimi olmasından dolayı daha iyi birleştirmelerin oluştuğu tespit edilmiştir. H tipi takım ile daha çok boşluk, takım dalması, kalınlık düşmesi, çapak, renk değişimi ve daha zayıf birleştirmelerin oluşmasından dolayı iyi olmayan sonuçlar elde edilmiştir.

SKK yapılmış parçaların, görsel olarak incelenmesi sonucu 1000 dev/dak, 60 mm/dak'da M tipi takım ile SKK yapılan parçalarda, takım dalması, kalınlık düşmesi, çapak olmaması ve daha az boşluk, renk değişimi olmasından dolayı daha iyi birleştirmelerin oluştuğu tespit edilmiştir. 1125 dev/dak, 50 mm/dak'da H tipi takım ile daha çok boşluk, takım dalması, kalınlık düşmesi, çapak ve daha zayıf birleştirmelerin oluşmasından dolayı iyi olmayan sonuçlar elde edilmiştir.

Karıştırıcı takım ucu konik, takım ucunda bir adet büyük kanal ve takımın alın yüzeyinde bir adet küçük kanal olan H tipi takım ile yapılan 8. deneyin 1. denemesinde (1250 dev/dak ve 50 mm/dak) Şekil 6.67'de gösterilen bölgede takım kırılmıştır.



Şekil 6.67. H tipi takım ile 1250 dev/dak ve 50 mm/dak'da SKK yapılmış parça takımın kırıldığı bölge; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

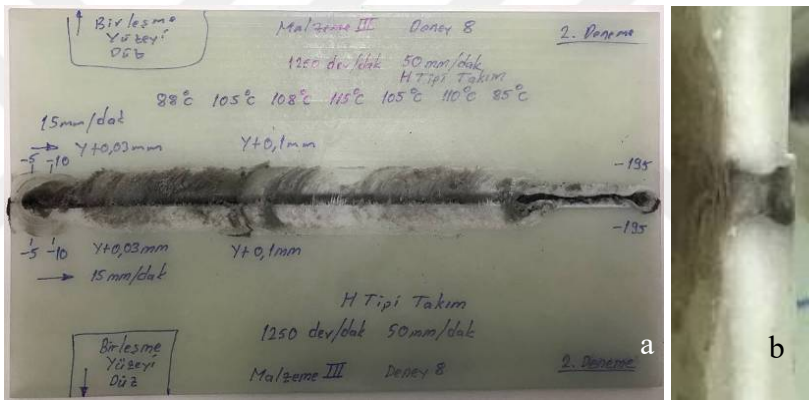


Şekil 6.68. O tipi takım ile 1000 dev/dak ve 50 mm/dak'da SKK yapılmış parça takımın kırıldığı bölge; a) Önden görünüş, b) Arkadan görünüş.

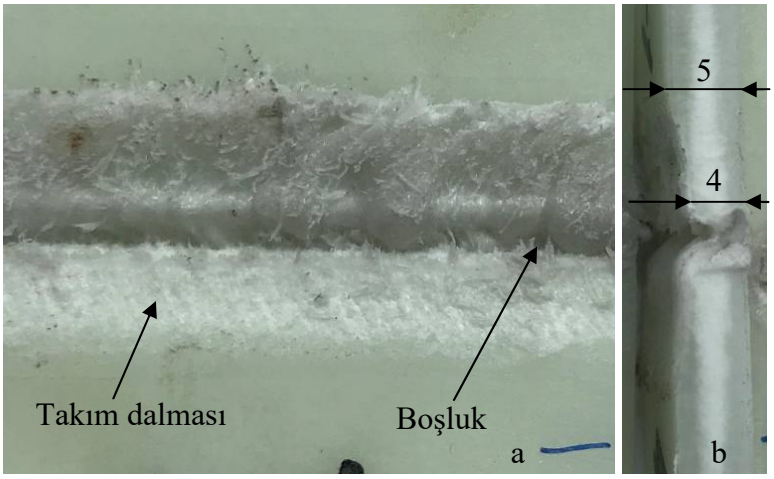
Karıştırıcı takım ucu konik, takım ucunda bir adet büyük kanal ve takımın alın yüzeyinde üç adet küçük kanal olan O tipi takım ile yapılan 20. deneyin 1. denemesinde (1000 dev/dak, 50 mm/dak) Şekil 6.68'de gösterilen bölgede takım kırılmıştır.

PP matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemeler ile SKK yapılmış parçalardan çekme deney ve mikro yapı numunelerinin çıkarılması esnasında kesilerek elde edilen parçaların kaynak kesitlerinin görsel olarak incelenmesi ile ilgili tespitler aşağıdaki gibidir;

Kaynak bölgesinde, azda olsa renk değişiminin olduğu tespit edilmiştir. Bazı kaynaklarda Şekil 6.69'da gösterilen şekilde aşırı renk değişimi (kararma - yanma) oluşmuştur.



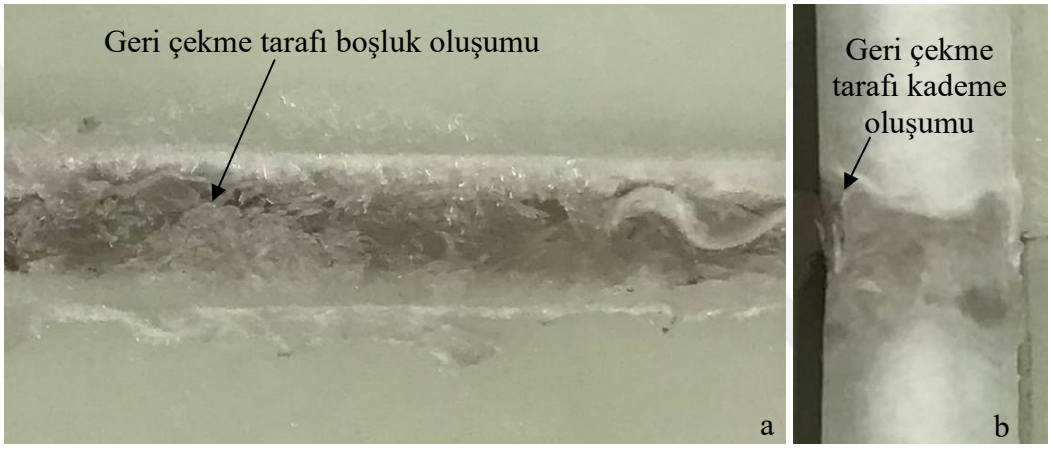
Şekil 6.69. H tipi takım ile 1250 dev/dak ve 50 mm/dak'da SKK yapılmış parça kaynak bölgesi renk değişimi; a) Önden görünüş, b) Kesit görünüş.



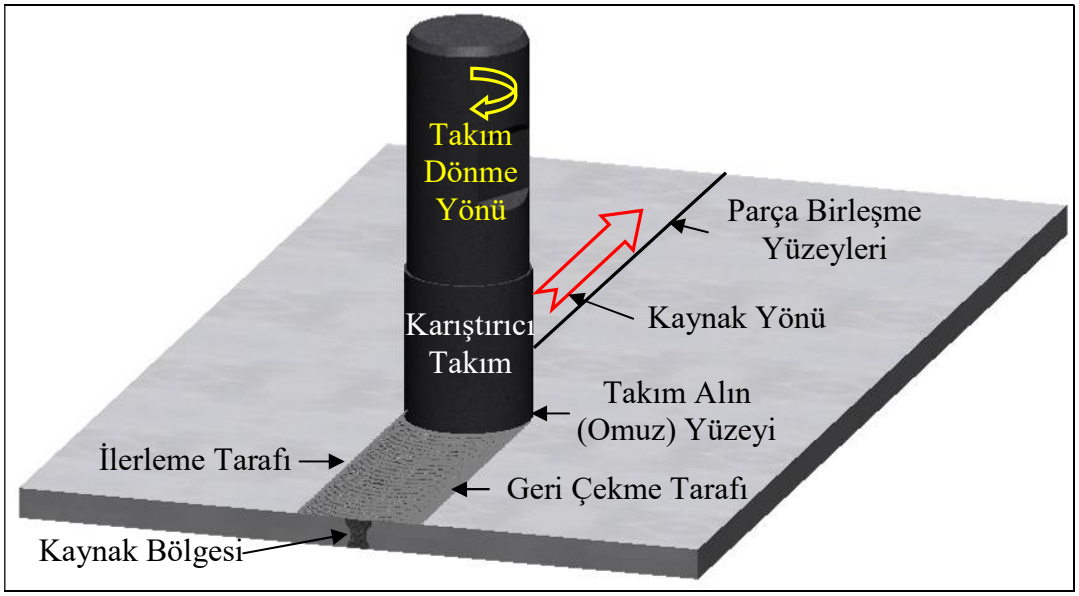
Şekil 6.70. Takım dalması, boşluk ve incelme (kalınlık düşmesi); a) Önden görünüş, b) Kesit görünüş.

Bazı parçalarda kaynak bölgesinin üst yüzeyine, takım alın (omuz) yüzeyinin aşırı dalmasından dolayı boşluk ve kaynak bölgesinde Şekil 6.70'de gösterilen şekilde incelme (kalınlık düşmesi) olduğu tespit edilmiştir. En fazla incelme (kalınlık düşmesi) 1 mm'dir.

Parçaların çoğunda geri çekme tarafında boşluk oluştuğu tespit edilmiştir. Geri çekme tarafında oluşan boşluklar, genellikle kaynak yapılmamış yüzeyden kaynak bölgesine doğru gidildikçe Şekil 6.71'de gösterilen şekilde bir kademe oluşturmuştur. Bazı parçalarda bu boşlukların kaynak tabanına doğru ilerlediği tespit edilmiştir.



Şekil 6.71. Geri çekme tarafı boşluk ve kademe oluşumu; a) Önden görünüş b) Kesit görünüş.



Şekil 6.72. İlerleme ve geri çekme tarafının gösterilişi.

Kaynağın ilerleme yönünün vektörü ile dönme yönü vektörünün aynı olduğu taraf, ilerleme tarafı (AS) olarak, zıt oldukları diğer taraf ise geri çekme tarafı (RS) olarak adlandırılır. Burada dikkat edilmesi gereken husus kaynak esnasında makinenin özelliğine göre takımda hareket edebilir kaynak yapılan plakalarda hareket edebilir bundan dolayı kaynak yönüne bakılmalıdır. Şekil 6.72'de ilerleme, geri çekme taraflarının kaynak yönü ve takım dönüş yönü ile ilişkisi gösterilmiştir.

Takım alın (omuz) yüzeyinin dalması ve boşluklardan dolayı kaynak bölgesinde oluşan incelmenin (kalınlık düşmesinin), genellikle geri çekme tarafında oluştuğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi takımın ilerleme tarafından aldığı malzemeyi karıştırdıktan sonra tekrar ilerleme tarafında yığarak sıkıştırması ve karıştırma esnasında dışarı atılan malzemeden dolayı kaynak bölgesindeki malzemenin yetersiz kalmasıdır. Yığma ilerleme tarafından başladığından dışarı atılan malzemelerden ve oluşan çapaklardan dolayı geri çekme tarafına yeteri kadar malzeme kalmıyor.

Takım dalması olmayan parçalarda kalınlık düşmesinin, genellikle geri çekme tarafında oluşan boşluklardan dolayı oluştuğu tespit edilmiştir. Geri çekme tarafında oluşan kademe derinliğinin en fazla 0,2 mm olduğu tespit edilmiştir.

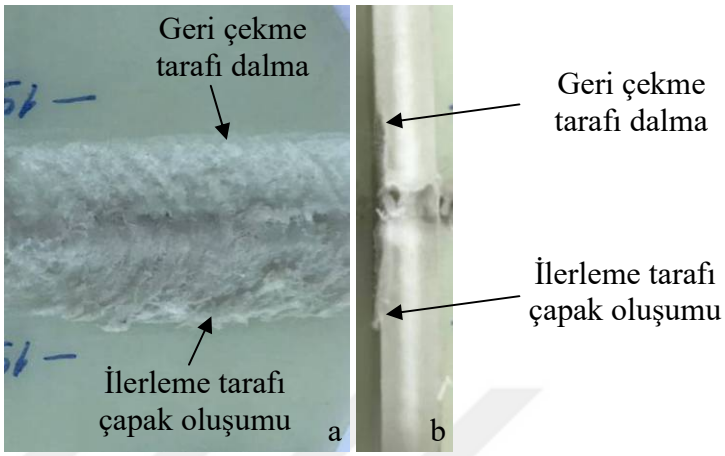
İki parçada kaynak bölgesinin alt yüzeyinde, takımın malzemeyi iterek kaynak bölgesi altında biriktirmesinden dolayı Şekil 6.73'de gösterilen şekilde en fazla 0,3 mm kalınlık artışı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.73. Kaynak bölgesi altında meydana gelen kalınlık artışı.

İki parçada kaynak bölgesinin alt yüzeyinde, takım uç boyunun 0,1 mm kısa yapılmasına bağlı olarak oluştuğu düşünülen boşluk tespit edilmiştir. Boşluk derinliği kademe şeklinde en fazla 0,2 mm'dir. Takım dalması olduğunda, genellikle Şekil

6.74’de gösterilen şekilde ilerleme tarafında malzeme birikmesi ve çapak oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.74. Takım dalması ve ilerleme tarafı çapak oluşumu; a) Önden görünüş, b) Kesit görünüş.

Bütün parçalarda kaynak sonunda takımın çıktığı bölgede Şekil 6.75’de gösterilen anahtar deliği olarak adlandırılan boşluk oluşmuştur.



Şekil 6.75. Anahtar deliği oluşumu.

6.7.2. Kaynak Bölgesi Sıcaklık Ölçümü

SKK işleminin yapılması esnasında sıcaklık ölçümü için, Şekil 6.76’da gösterilen CEM DT-8865 InfraRed termometre kullanılmıştır. InfraRed termometrenin özellikleri Çizelge 6.19’da verilmiştir.



Şekil 6.76. InfraRed termometre.

Çizelge 6.19. InfraRed termometre özellikleri.

Sıcaklık Ölçüm Aralığı (ºC)	-50 / +1000
Kullanım Sıcaklık Aralığı (ºC)	0 / +50
Doğruluk (ºC)	± 1
Tekrar Edilebilirlik (ºC)	± 0,5
İşaretleme	Lazer

Sıcaklık ölçümleri, kaynak bölgesi üst yüzeyinden, yaklaşık olarak parçaların birleştiği ara yüzey çizgisinden ve kaynak yüzeyine ~20 - 25 cm uzaklıktan InfraRed termometre ile yapılmıştır.

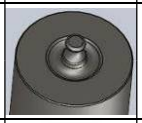
Sıcaklık ölçümleri yapılırken her parametrede yapılan kaynaktan, minimum 4 adet ölçüm yapılarak ve her kaynağın sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak kaynak bölgesi sıcaklık değeri tespit edilmeye çalışılmıştır.

SKK esnasında ölçülen en düşük sıcaklık değerinin 80 °C, en yüksek sıcaklık değerinin ise 129 °C olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca her SKK için ortalama sıcaklık değerleri hesaplanarak incelemeler yapılmıştır. En düşük ortalama kaynak sıcaklığının 96,12 °C olduğu ve bu kaynağın H tipi takım ile 1000 dev/dak, 40 mm/dak'da yapıldığı tespit edilmiştir. En yüksek ortalama kaynak sıcaklığının 113,83 °C olduğu ve bu kaynağın H tipi takım ile 1125 dev/dak, 40 mm/dak'da yapıldığı tespit edilmiştir.

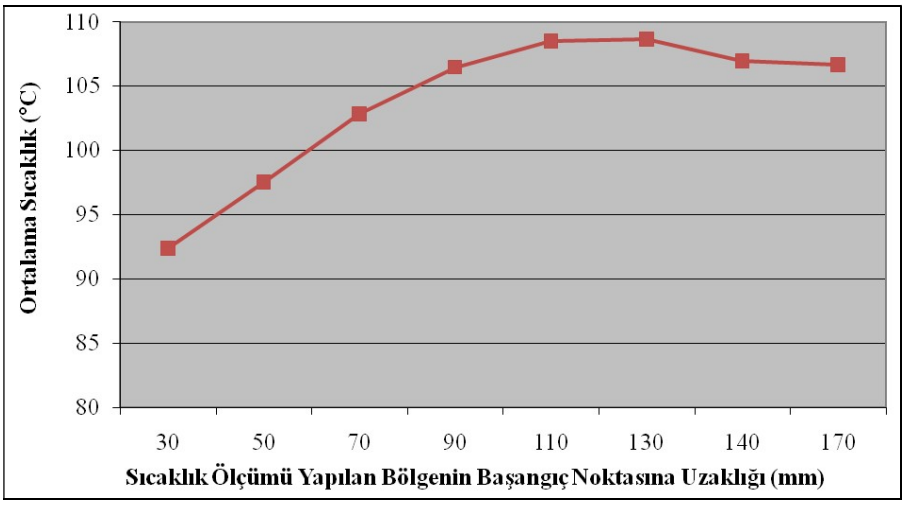
H, M ve O tipi takımlar ile yapılan SKK ortalama sıcaklık değerleri incelendiğinde en düşük sıcaklık değerlerinin 1000 dev/dak ve 40 mm/dak'da yapılan kaynaklarda oluştuğu tespit edilmiştir. En yüksek sıcaklık değerlerinin her takım için

farklı parametrelerde yapılan SKK deneylerinde oluştuğu tespit edilmiştir. Her takım için en düşük ve en yüksek ortalama sıcaklık değerleri Çizelge 6.20'de verilmiştir.

Çizelge 6.20. Takım tiplerine göre en düşük ve en yüksek ortalama sıcaklıklar.

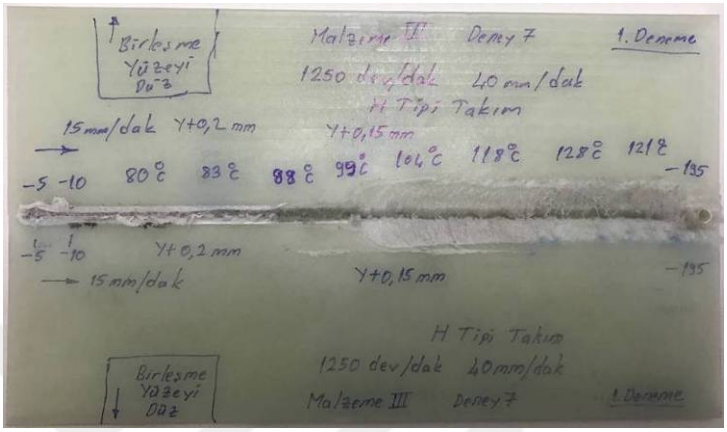
Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*		*Kaynak Parametreleri*			*Ölçülen Ortalama Sıcaklık Değerleri (°C)*	
		Uç Kanalı	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*		
H		Tek Büyük	Tek Küçük	M03	1000	40	En Düşük	96,12
					1125	40	En Yüksek	113,83
M		Tek Büyük	İki Küçük	M03	1000	40	En Düşük	97,83
					1250	60	En Yüksek	109,00
O		Tek Büyük	Üç Küçük	M03	1000	40	En Düşük	99,13
					1125	60	En Yüksek	109,38

SKK yapılan bütün parçaların sıcaklık ölçümü yapılan bölgelerindeki ölçülen sıcaklıkların ayrı ayrı ortalaması hesaplandığında kayak başlangıç noktasından kaynak bitiş noktasına doğru gidildikçe kaynak sıcaklığının arttığı bir noktadan sonra az da olsa bir miktar düşüş gösterdiği tespit edilmiştir. Kaynak başlangıç noktasına uzaklığına göre SKK sıcaklığının değişim grafiği Şekil 6.77'de verilmiştir.



Şekil 6.77. Kaynak başlangıç noktasına uzaklığına göre SKK sıcaklık değişim grafiği.

SKK yapılırken takım alın (omuz) yüzeyinin kaynak yapılan parçaların üzerine daldığı bölgelerde sıcaklığın daha çok yükseldiği, dalma olmayan bölgelerde sıcaklıkta çok fazla değişim olmadığı tespit edilmiştir. Takım alın (omuz) yüzeyinin parçaların üzerine daldığındaki sıcaklık değişimi Şekil 6.78'de gösterilmiştir.

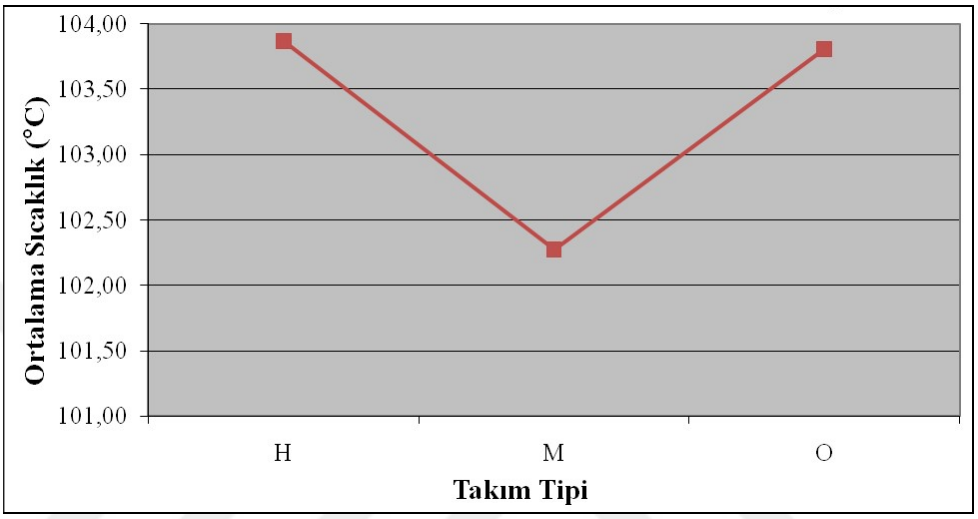


Şekil 6.78. Takım dalmasından dolayı sıcaklık artışı.

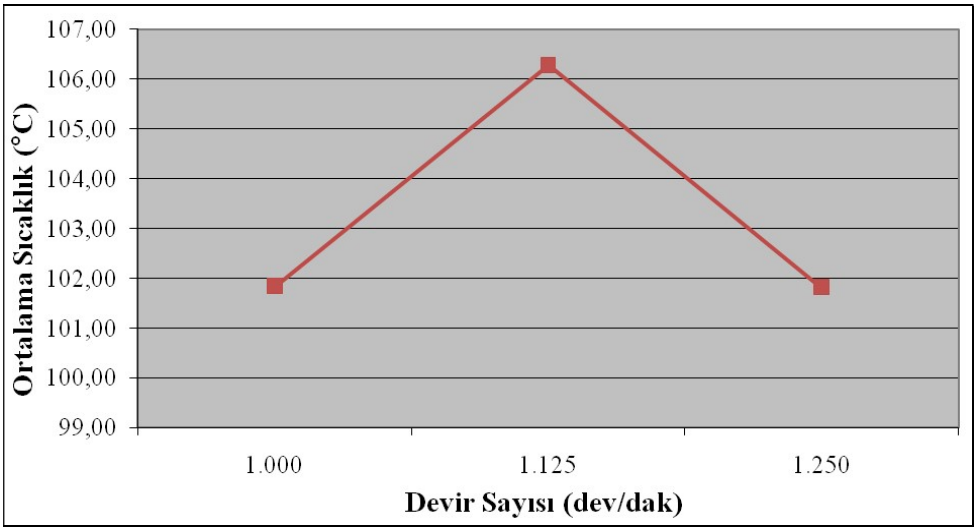
Sıcaklık değerinin düşük olduğu kaynaklar incelendiğinde takım alın (omuz) yüzeyinin parçaların yüzeyine tam olarak temas etmediği parçalarda kaynak bölgesi sıcaklığının düşük olduğu, temasın veya takım dalmasının fazla olduğu kaynaklarda kaynak bölgesi sıcaklığının yüksek olduğu görülmüştür. Kaynak bölgesinin üst yüzeyinden sıcaklık ölçümleri yapıldığından takım alın (omuz) yüzeyinin sürtünmesinden kaynaklı sıcaklık değişiminin fazla olduğu ve kaynak sıcaklığından ziyade takım alın (omuz) yüzeyinin parçalar üzerinde oluşturduğu sıcaklığın ölçüldüğü anlaşılmaktadır. Bu sıcaklığın plastik malzemelerin ısı iletkenliğinin düşük olmasından dolayı kaynak bölgesi üst yüzeyi haricinde kaynak bölgesi alt yüzeyine direk olarak iletilmesi mümkün değildir fakat takımın ısınmasına bağlı olarak kaynak sıcaklığına etkisi olmaktadır. Takımların kırıldığı SKK deneylerindeki parçalarda ölçülen sıcaklık değerleri incelendiğinde takımın kırıldığı bölgeden sonra sıcaklığın çok aşırı düşmediği görülmüştür. Bu da ölçülen sıcaklığın, takım alın (omuz) yüzeyinin parçalar üzerinde oluşturduğu sıcaklık değerleri olduğunu yani kaynak bölgesi sıcaklığı olmadığını doğrulamaktadır.

H, M ve O tipi takımlar ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen sıcaklık değerlerinin, takım tipine göre ayrı ayrı ortalaması alınarak takım tipine bağlı

sıcaklık değişimi incelenmiştir. H ve O tipi takımlar ile yapılan kaynakların sıcaklık değerlerinin ortalamalarının neredeyse aynı olduğu, M tipi takım ile yapılan kaynakların sıcaklık değerlerinin ortalamasının diğer takımlara göre ~1,6 °C daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Takım tipine göre SKK sıcaklığının değişim grafiği Şekil 6.79'da verilmiştir.



Şekil 6.79. Takım tipine bağlı SKK ortalama sıcaklık değişim grafiği.

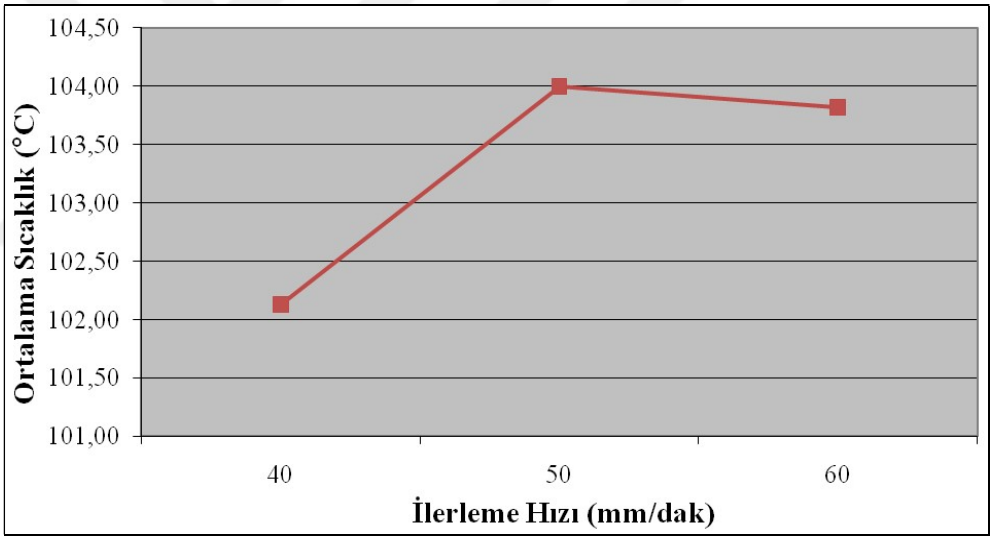


Şekil 6.80. Devir sayısına bağlı SKK ortalama sıcaklık değişim grafiği.

1000, 1125 ve 1250 dev/dak devir sayıları ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen sıcaklık değerlerinin, devir sayılarına göre ayrı ayrı ortalaması alınarak devir sayısına bağlı sıcaklık değişimi incelenmiştir. 1000 ve 1250 dev/dak devir

sayıları ile yapılan kaynakların sıcaklık değerlerinin ortalamalarının neredeyse aynı olduğu, 1125 dev/dak devir sayısı ile yapılan kaynakların sıcaklık değerlerinin ortalamasının diğer devir sayılarına göre ~4,5 °C daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Devir sayısına bağlı SKK sıcaklığının değişim grafiği Şekil 6.80'de verilmiştir.

40, 50 ve 60 mm/dak ilerleme hızları ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen sıcaklık değerlerinin, ilerleme hızına göre ayrı ayrı ortalaması alınarak ilerleme hızına bağlı sıcaklık değişimi incelenmiştir. 50 ve 60 mm/dak ilerleme hızları ile yapılan kaynakların sıcaklık değerlerinin ortalamalarının neredeyse aynı olduğu, 40 mm/dak ilerleme hızı ile yapılan kaynakların sıcaklık değerlerinin ortalamasının diğer ilerleme hızlarına göre ~1,8 °C daha düşük olduğu tespit edilmiştir. İlerleme hızına bağlı SKK sıcaklığının değişim grafiği Şekil 6.81'de verilmiştir.



Şekil 6.81. İlerleme hızına bağlı SKK ortalama sıcaklık değişim grafiği.

6.7.3. Çekme, Mikro Yapı İnceleme ve Sertlik Ölçme Numunelerinin Hazırlanması

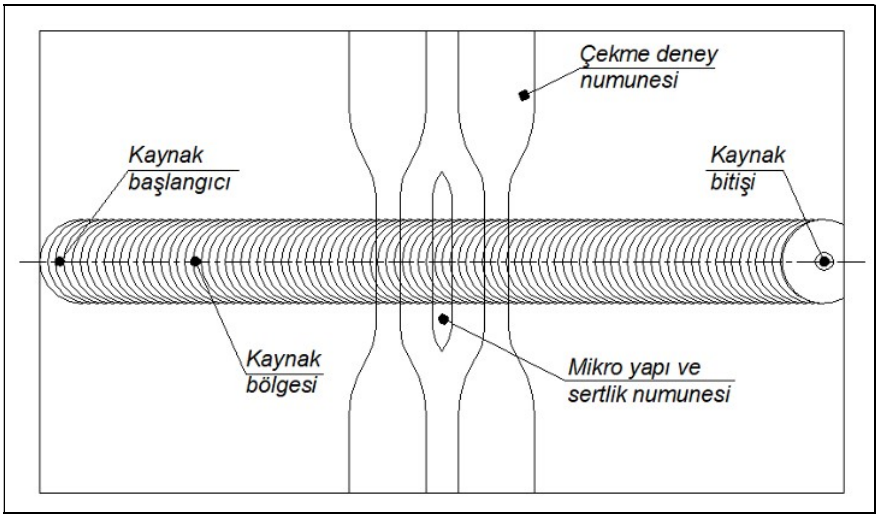
Numunelerin hazırlanmasında 1985 model, CHIRON-WERKE marka FZ26-L CNC dik işleme tezgâhı kullanılmıştır. Makinenin standart donanımı; CNC FAGOR M8055 kontrol ünitesi, elektronik el çarkı, hidrolik takım tutucu, hidrolik tabla frenleri, hızlı iş mili durdurma, soğutma sıvısı siteminden oluşmaktadır.

Test numunelerinin işlenmesi için bağlama aparatı hazırlanarak makine tablasına bağlanmıştır. Bağlama aparatının makine tablasına sabitlenmesi, gayet düzgün ve sağlam olmalıdır. Aksi takdirde, test numuneleri istenilen şekilde çıkartılamaz. Sıfırlama işlemi tamamlandıktan sonra numune çıkartılacak parçalar, yerleştirilip pabuçlar yardımı ile sabitlenmiştir.

Bütün bu ayarlamalar yapıldıktan sonra CNC dik işleme tezgâhı, otomatik olarak ilerletilerek Şekil 6.82'de gösterilen şekilde numune çıkartma işlemi tamamlanarak durdurulmuştur. Bütün test numunelerinin kalınlığı çekme deney numune standardına uygun olacak şekilde yüzeyinden işleme yapılarak 4 mm'ye düşürülmüştür. Mikro yapı inceleme, sertlik ölçme ve çekme deney numuneleri SKK yapılmış parçalardan Şekil 6.83'de gösterilen şekilde makinede işlenerek hazırlanmıştır.

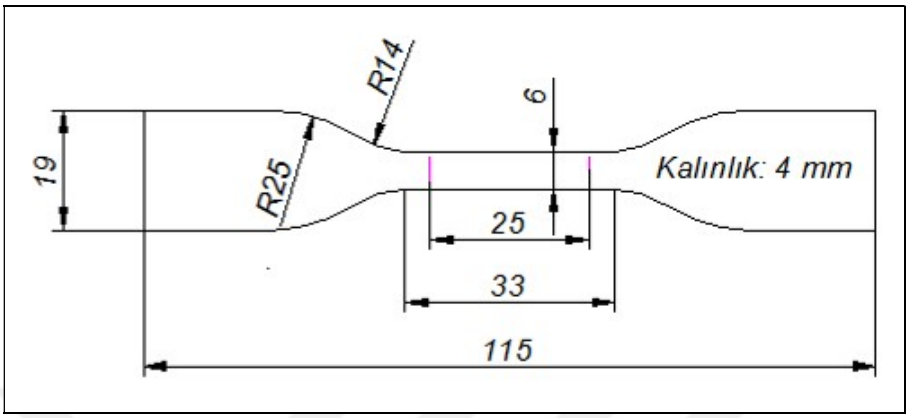


Şekil 6.82. Çekme deney numunesi işleme.



Şekil 6.83. SKK yapılmış parçalardan çıkartılan numunelerin yerleşim şeklinin gösterilişi.

Çekme deney numuneleri, ASTM D 638 Tip 4'e uygun olarak Şekil 6.84'de gösterilen ölçülerde işlenerek hazırlanmıştır.



Şekil 6.84. ASTM D 638 Tip 4'e uygun çekme deney numune ölçüleri.

27 farklı parametrede SKK yapılan her kaynaktan minimum 3 adet olacak şekilde 33 adet SKK deneyinden mekanik özelliklerin belirlenebilmesi için standart çekme deney numune ölçülerine uygun olarak makinede işlenerek Şekil 6.85'de gösterilen şekilde toplamda 81 adet test numunesi hazırlanmıştır.



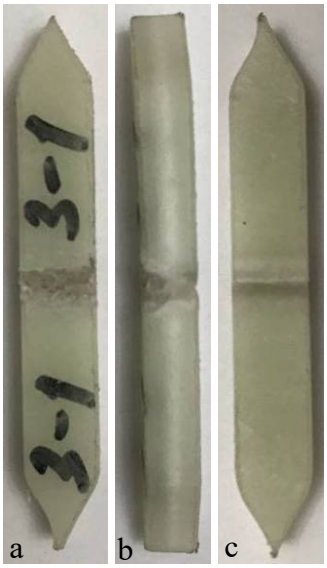
Şekil 6.85. SKK yapılmış parçalardan hazırlanmış çekme deney numuneleri.

SKK yapılmış parçalardan makinede işlenerek numune hazırlanırken toplamda 4 adet test numunesi işleme esnasında Şekil 6.86'da gösterilen şekilde kırılmıştır.



Şekil 6.86. SKK yapılmış parçalardan hazırlanırken kırılan çekme deney numuneleri.

Mikro yapı incelemesi, sertlik ölçümleri için standart bir numune olmadığı için mikro yapı incelemesine ve sertlik ölçümüne uygun olarak Şekil 6.87'de gösterilen şekilde makinede işlenerek toplamda 28 adet test numunesi hazırlanmıştır. Toplam 27 farklı parametrede SKK yapılmış olmasından dolayı her kaynak parametresinde yapılan kaynaktan 1 adet mikro yapı ve sertlik ölçüm numunesi hazırlanmış olup sadece aynı parametrede kaynak yapılan 2 farklı SKK deneyinden karşılaştırma amaçlı 2 adet numune hazırlanmıştır. Bundan dolayı toplamda hazırlanan numune sayısı 1 adet fazla olmuştur.



Şekil 6.87. Mikro yapı incelemesi ve sertlik ölçüm numunesi; a) Üst görünüş, b) Yan görünüş, c) Alt görünüş.

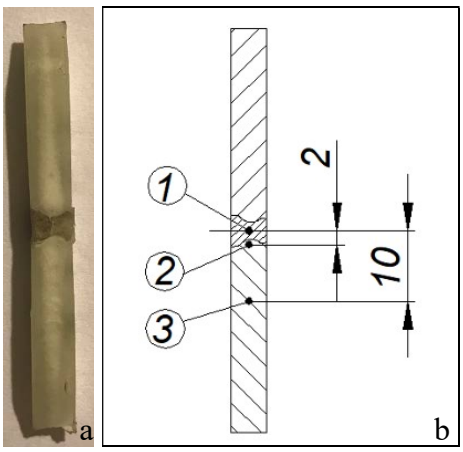
6.7.4. Mikro Yapı İncelemeleri

Mikro yapı incelemeleri için gerekli olan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, Namık Kemal Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuarında (NABİLTEM), FEI marka QUANTA FEG 250 Şekil 6.88'de gösterilen taramalı elektron mikroskobu ile elde edilmiştir.

Cihazın standart donanımı, Geniş alan düşük vakum ikincil elektron detektörü (LFD), Everhardt Thornley ikincil elektron detektörü (ETD), STEM detektörü, Elemental olarak spectrum detektöründen (EDX) oluşmaktadır (*Merkezlab*, 2020).



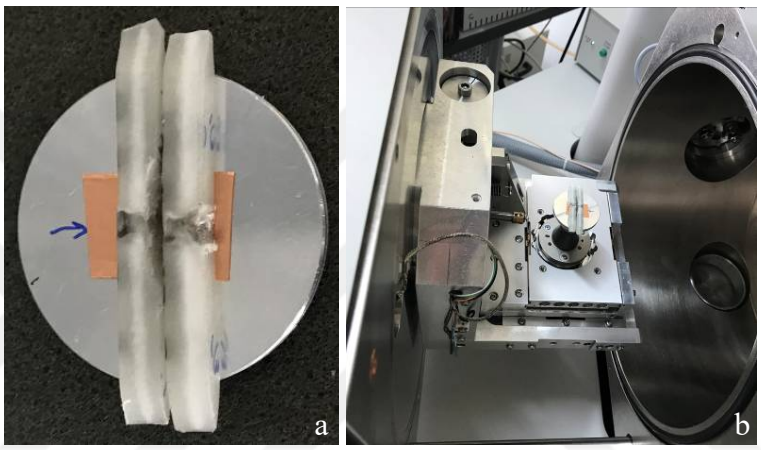
Şekil 6.88. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).



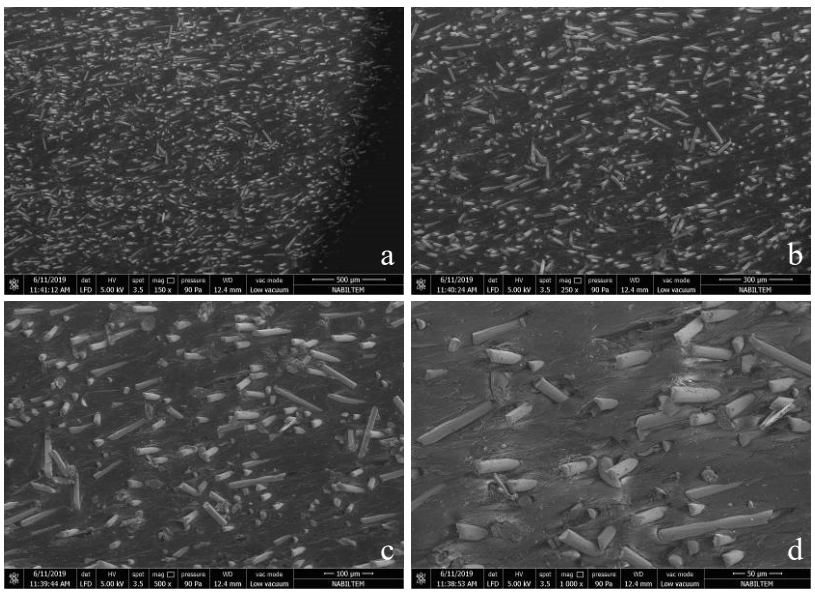
Şekil 6.89. Mikro yapı numunesi; a) İşlenerek hazırlanmış numune, b) Mikro yapı görüntülerinin alındığı bölgeler (1- Kaynak bölgesi, 2- Kaynaktan etkilenen bölge, 3- Ana malzeme).

SKK yapılmış parçaların mikro yapı inceleme ve sertlik ölçüm numuneleri Şekil 6.89.a'da gösterilen şekilde hazırlanmıştır. Mikro yapı incelemesi, sertlik ölçümleri yapılırken kaynak bölgesi (KB), kaynaktan etkilenen bölge (KEB), kaynaktan etkilenmeyen bölge (ana malzeme) (M) göz önünde bulundurularak mikro yapı görüntüleri ve sertlik ölçümleri Şekil 6.89.b'de gösterilen şekilde yaklaşık olarak aynı bölgelerden alınmıştır.

Mikro yapı numuneleri taramalı elektron mikroskobu tablasına ve cihaza Şekil 6.90'da gösterilen şekilde yerleştirilmiştir.

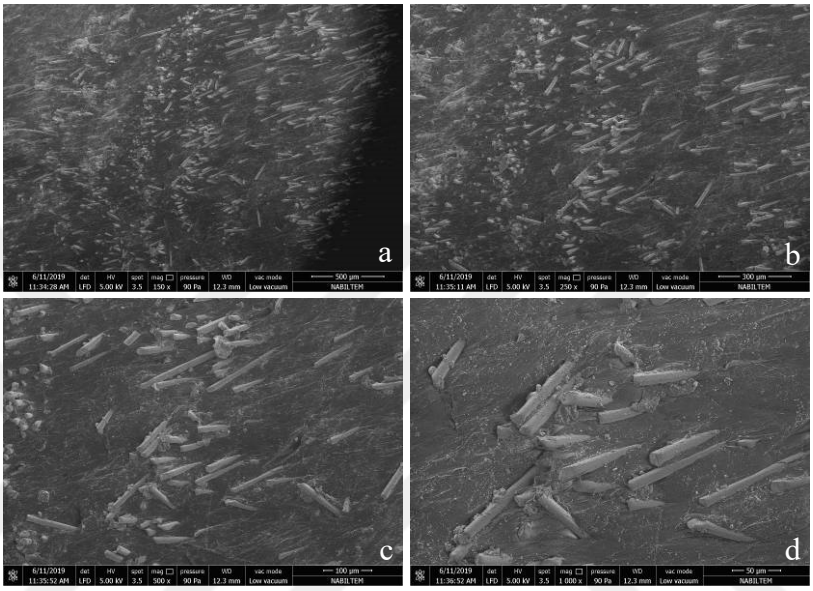


Şekil 6.90. Mikro yapı numuneleri; a) SEM tablasına yerleştirilmiş, b) SEM cihazına yerleştirilmiş.

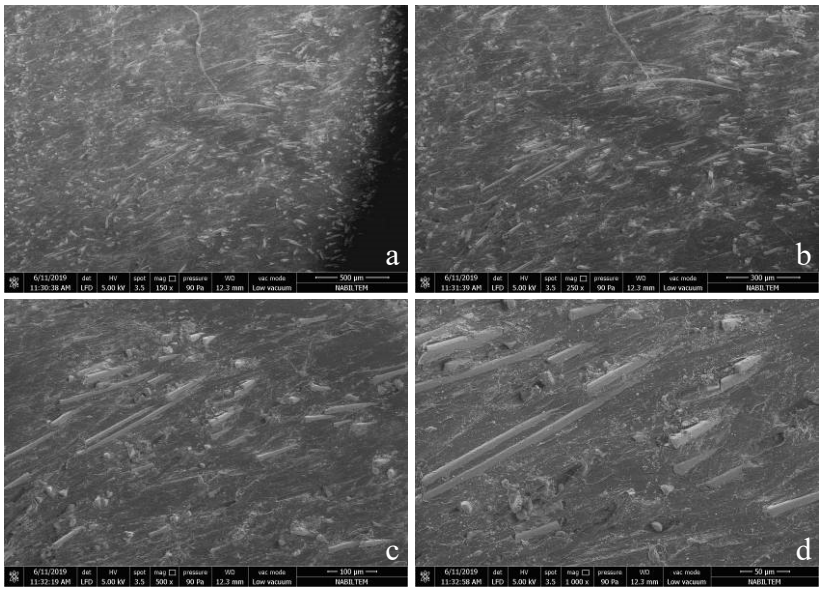


Şekil 6.91. H tipi takım ile 1000 dev/dak ve 40 mm/dak'da yapılmış SKK kaynaktan etkilenmemiş bölge SEM görüntüleri; a) 150X, b) 250X, c) 500X, d) 1000X.

Mikro yapı incelemesi, 28 adet SKK yapılmış numuneden sertlik ölçümleri yapılmadan önce, kaynaktan etkilenmemiş bölge, kaynaktan etkilenen bölge ve kaynak bölgesinden taramalı elektron mikroskobunda Şekil 6.91 - Şekil 6.93'de gösterilen şekilde 150X, 250X, 500X ve 1000X büyütmedeki toplamda 336 adet SEM görüntüsü alınarak yapılmıştır.

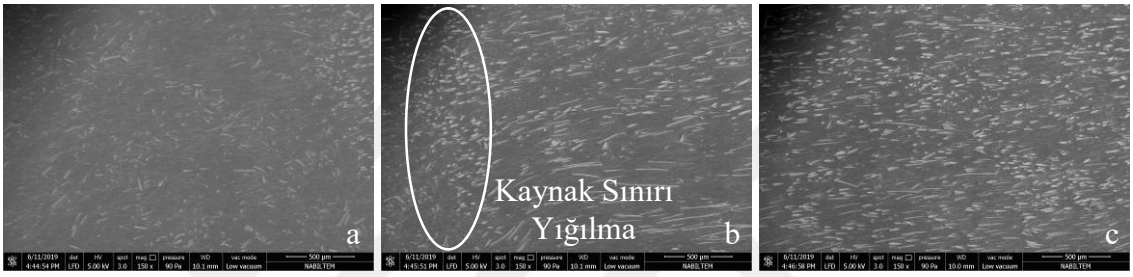


Şekil 6.92. H tipi takım ile 1000 dev/dak ve 40 mm/dak'da yapılmış SKK kaynaktan etkilenen bölge SEM görüntüleri; a) 150X, b) 250X, c) 500X, d) 1000X.



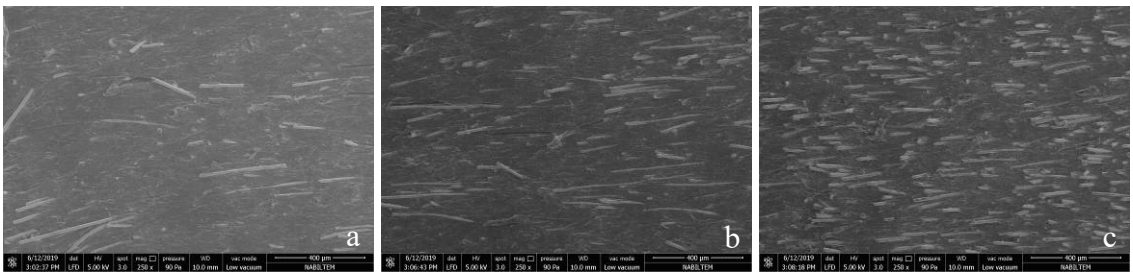
Şekil 6.93. H tipi takım ile 1000 dev/dak ve 40 mm/dak'da yapılmış SKK kaynak bölgesi SEM görüntüleri; a) 150X, b) 250X, c) 500X, d) 1000X.

Kaynaktan etkilenmemiş bölge, kaynaktan etkilenen bölge ve kaynak bölgesinin taramalı elektron mikroskobunda 150X, 250X, 500X ve 1000X büyütmedeki SEM görüntüleri karşılaştırma yapılarak incelenmiştir. Şekil 6.94'de gösterilen şekilde kaynaktan etkilenmeyen bölgeden kaynak bölgesine doğru yaklaştıkça cam elyaf takviye malzemelerinin küçüldüğü ve azaldığı görülmüştür. Kaynak bölgesi sınırlarında da cam elyaf takviye malzemelerinin biriktiği görülmüştür. Buradan SKK takımının karıştırma esnasında cam elyaf takviye malzemelerini parçaladığı, bir kısmını toz halinde dışarı attığı ve bir kısmını da kaynak sınırına yığdığı anlaşılmaktadır.



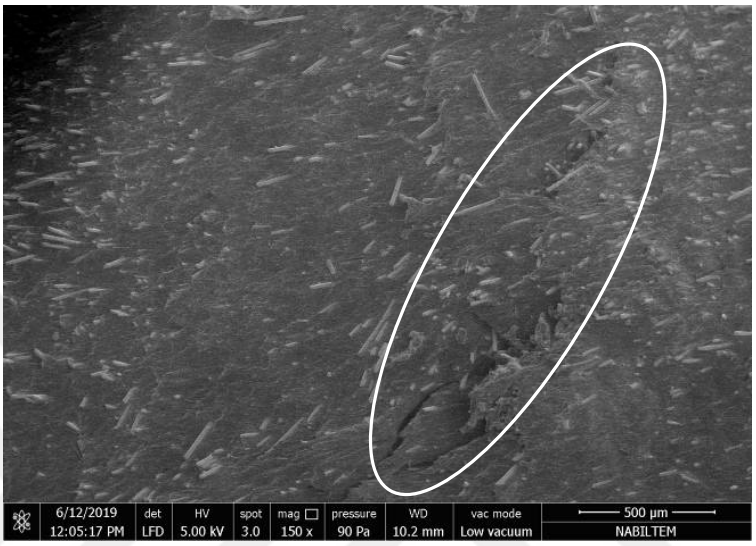
Şekil 6.94. M tipi takım ile 1000 dev/dak ve 40 mm/dak'da yapılmış SKK 150X büyütmedeki SEM görüntüleri takviye malzemelerinin küçülmesi ve azalması; a) Kaynak bölgesi, b) Kaynaktan etkilenen bölge, c) Kaynaktan etkilenmeyen bölge.

Şekil 6.95'de gösterilen şekilde kaynak bölgesinde cam elyaf takviye malzemelerinin dağılımının düzensiz olduğu kaynaktan etkilenmeyen bölgeye doğru ilerledikçe cam elyaf takviye malzemelerinin dağılımının daha düzenli olduğu görülmüştür. Buradan sürtünme karıştırma kaynak takımının karıştırma esnasında cam elyaf takviye malzemelerinin dağılımını değiştirdiği anlaşılmaktadır.



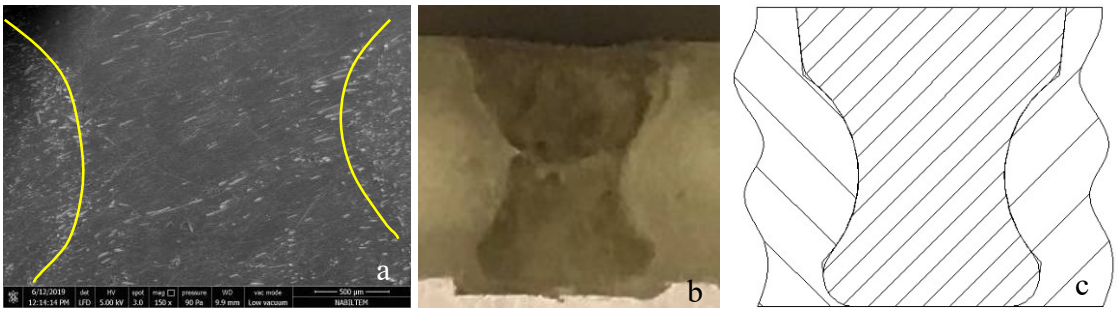
Şekil 6.95. O tipi takım ile 1125 dev/dak ve 60 mm/dak'da yapılmış SKK 250X büyütmedeki SEM görüntüleri takviye malzemelerinin dağılımı; a) Kaynak bölgesi, b) Kaynaktan etkilenen bölge, c) Kaynaktan etkilenmeyen bölge.

Kaynak bölgesinde Şekil 6.96'da gösterilen boşlukların olduğu görülmüştür. Buradan sürtünme karıştırma kaynak takımının karıştırma esnasında bir miktar malzemeyi kaynak bölgesi dışına attığı anlaşılmaktadır. SKK yapılırken malzemelerin dışarı atıldığı gözlemlenmiş olup, görsel incelemelerde de bu tür boşlukların oluştuğu tespit edilmiştir.



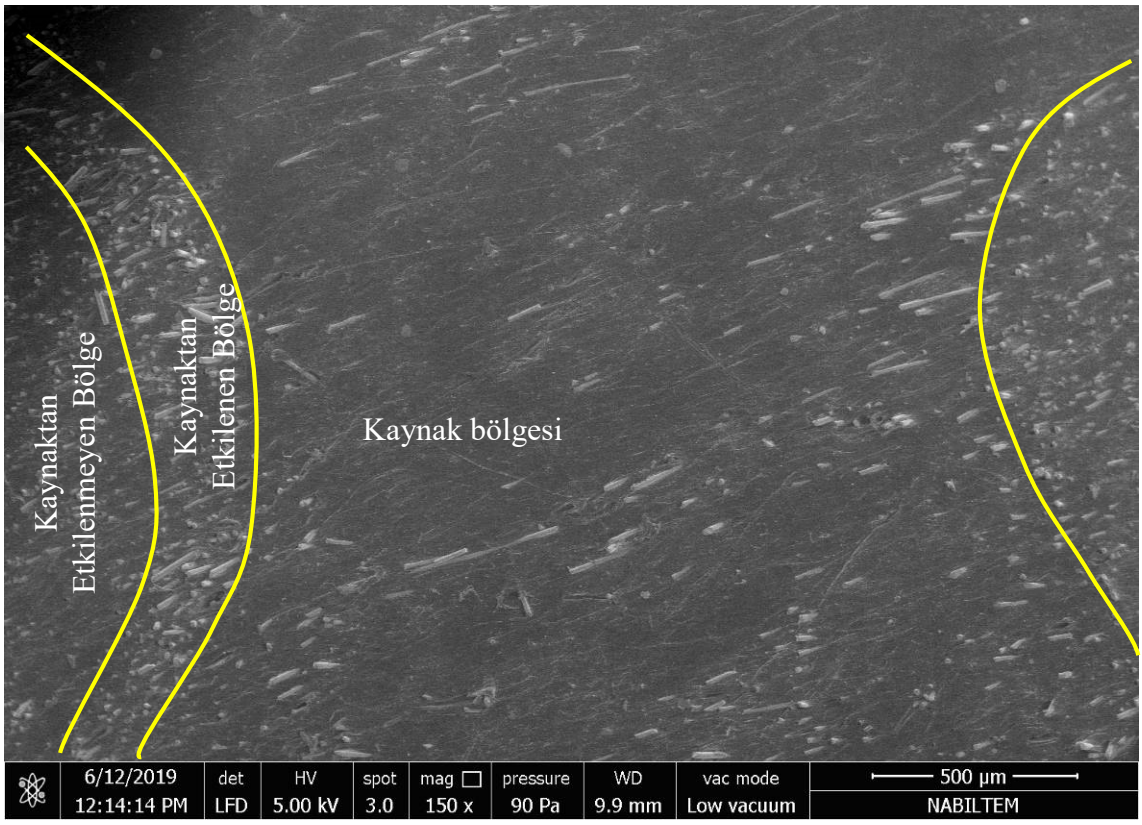
Şekil 6.96. M tipi takım ile 1250 dev/dak ve 60 mm/dak'da yapılmış SKK 150X büyütmedeki SEM görüntüsü kaynak bölgesinde oluşan boşluklar.

SKK sonrası oluşan kaynak sınırlarının şeklinin yaklaşık olarak SKK takımının uç şekli ile aynı olduğu tespit edilmiştir. SEM görüntülerinde belirlenen kaynak sınırı, SKK yapılan parçaların kesildikten sonraki görüntüsü ve SKK takım ucunun oluşturduğu şematik görünüş Şekil 6.97'de verilmiştir.



Şekil 6.97. SKK Kaynak sınırı; a) 150X büyütmedeki SEM görüntüsü, b) SKK yapılmış parça kesiti, c) Şematik gösterim.

SKK sonrası meydana gelen yapıda kaynaktan etkilenmeyen bölge (ana malzeme) ile deformasyona uğrayarak tekrar sertleşen kaynak bölgesi birbirinden Şekil 6.98'deki gibi belirgin bir şekilde ayrılmaktadır. Kaynak bölgesinin her iki tarafında kalan bölgedeki cam elyaf takviye malzemelerinin yoğunluğu belirgin bir şekilde fark edilmektedir. Bu farkın SKK esnasında kaynak bölgesinde yumuşayan ve takım ucu tarafından karıştırıldıktan sonra yeniden sertleşen kompozit malzemenin deformasyona uğramasından dolayı meydana geldiği düşünülmektedir.



Şekil 6.98. SKK sonrası meydana gelen yapılar.

Mikro yapı incelemeleri yapılırken, mikro yapısı ana malzeme mikro yapısına en yakın olan sürtünme karıştırma kayaklarının, sertlik ölçüm değerlerinin ve çekme deney sonuçlarının ana malzeme değerlerine daha yakın olacağı düşünülmüştür.

6.7.5. Sertlik Ölçümleri

Kaynak bölgesi sertlik dağılımı için, Mikro Shore ölçümleri ile ilgili araştırmalar yapılmış olup bu araştırmalar sonucunda plastik malzemeler için metalik malzemelerde

olduğu gibi tarama şeklinde Mikro Shore sertlik ölçümlerinin yapılamadığı ve belirlenen bölgelerden sertlik ölçümleri yapılarak sertlik değerlerinin belirlendiği sonucuna varılmıştır.

Plastik malzemelerin sertlikleri, Rockwell, Durometre, Bacrol, Shore ve Küre basma sertliği, olmak üzere beş metotla ölçülür. Shore sertlik ölçme metodunda sert koni ucun yük altında malzemeye girmesine karşı direnç olarak ifade edilir. Lastik gibi yumuşak plastiklerde Shore A, diğer plastiklerde ise Shore D yöntemi kullanılır. Deneylerin 20 °C'de yapılması gerekir. Ölçme cihazı darbesiz bastırılmalı ve ölçme süresi 3 saniye olmalıdır (Arıcıoğlu, Mert & Soydan, 2000).

Durometre sertlik ölçme testi genellikle sertlikleri birbirlerine yakın yumuşak malzemelerin sertliklerini ölçmek için kullanılır. Durometre sertlik ölçme cihazının basınç uygulama kısmına bağlı ince uçlu bir ayağı vardır. Bu ayak tabanı tam olarak yüzeye temas edecek şekilde bastırıldığında göstergede okunan değer sertlik değeri olarak kaydedilir. Deney sonuçları 0'dan 100'e kadar bölünmüş bir göstergeden okunmakta olup elde edilen değerlerin bir birimi yoktur. Durometreye basınç uygulanır uygulanmaz okunan değerler, basınç uygulanmasından sonra bir süre bekleyip okunan değerlerden farklıdır. Bu durum plastik malzemelerin sürünme özelliğinden kaynaklanmaktadır (Arıcıoğlu vd., 2000).

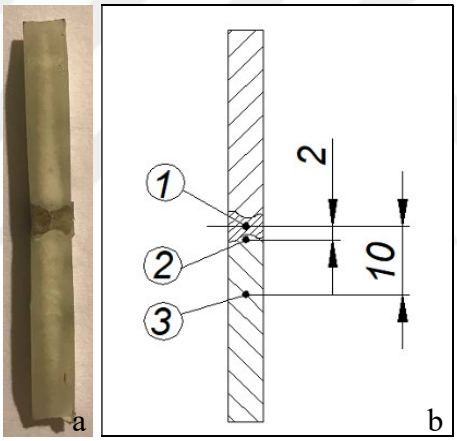
Sertlik ölçümünde Şekil 6.99'da gösterilen TRONIC marka PD 801 Analog Shoremetre Shore D cihazı kullanılmıştır. Cihaz ile ISO 868, JIS K6253, ASTM D2240 ve DIN 53505 standartlarına uygun ölçümler yapılabilmektedir. Cihazın standart donanımı, 30º sivri uç, Çift ibreli, PEAK (Tepe) değeri ibresi ve uç yükseklik (kalibrasyon) mastarından oluşmaktadır (*Teskon*, 2020).



Şekil 6.99. Sertlik ölçüm cihazı.

Sertlik ölçümleri ISO 868 ve ASTM D2240 standartlarına uygun olarak Shore D cinsinden yapılmıştır. Ölçüm öncesi kalibrasyon mastarı yardımıyla sertlik ölçüm cihazının, kalibrasyonu kontrol edilmiş ve sertlik ölçme cihazının kalibrasyonu doğrulandıktan sonra sertlik ölçümleri yapılmıştır.

Sertlik ölçümleri için mikro yapı incelemesinde kullanılan numuneler mikro yapı incelemesinden sonra kullanılmıştır. SKK yapılmış parçaların mikro yapı inceleme ve sertlik ölçüm numuneleri Şekil 6.100.a'da gösterilen şekilde hazırlanmıştır. Sertlik ölçümleri yapılırken kaynak bölgesi (KB), kaynaktan etkilenen bölge (KEB), kaynaktan etkilenmeyen bölge (ana malzeme) (M) göz önünde bulundurularak sertlik ölçümleri ve mikro yapı görüntüleri Şekil 6.100.b'de gösterilen şekilde yaklaşık olarak aynı bölgelerden alınmıştır.



Şekil 6.100. Sertlik ölçüm numunesi; a) İşlenerek hazırlanmış numune, b) Sertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgeler (1- Kaynak bölgesi, 2- Kaynaktan etkilenen bölge, 3- Ana malzeme).

Sertlik değerleri, 28 adet SKK yapılmış numuneden mikro yapı görüntüleri alındıktan sonra, kaynaktan etkilenmemiş bölge (ana malzeme), kaynaktan etkilenen bölge ve kaynak bölgesinden Şekil 6.101'de gösterilen şekilde 5'er adet olmak üzere toplam 420 adet ölçüm yapılıp her bölgeden yapılan ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

SKK yapılmış numunelere Şekil 6.100'de gösterilen bölgelerden yapılan sertlik ölçümleri sonucunda kaynak bölgesinde ölçülen en yüksek sertlik değerinin 79 Shore D, en düşük sertlik değerinin ise 68 Shore D olduğu tespit edilmiştir. Kaynaktan etkilenen

bölgede ölçülen en yüksek sertlik değerinin 79 Shore D, en düşük sertlik değerinin ise 70 Shore D olduğu tespit edilmiştir. Kaynaktan etkilenmeyen bölgede ölçülen en yüksek sertlik değerinin 80 Shore D, en düşük sertlik değerinin ise 71 Shore D olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.101. Sertlik ölçümünün yapılışı.

Bu bölgelerin her birinden 5 ölçüm yapılarak her bölgenin ayrı ayrı ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır. Kaynak bölgesinde en yüksek ortalama sertlik değerinin 76,2 Shore D olduğu, en düşük ortalama sertlik değerinin ise 72 Shore D olduğu tespit edilmiştir. Kaynaktan etkilenen bölgede en yüksek ortalama sertlik değerinin 77,4 Shore D, en düşük ortalama sertlik değerinin ise 72,8 Shore D olduğu tespit edilmiştir. Kaynaktan etkilenmeyen bölgede en yüksek ortalama sertlik değerinin 78,6 Shore D, en düşük ortalama sertlik değerinin ise 75,2 Shore D olduğu tespit edilmiştir.

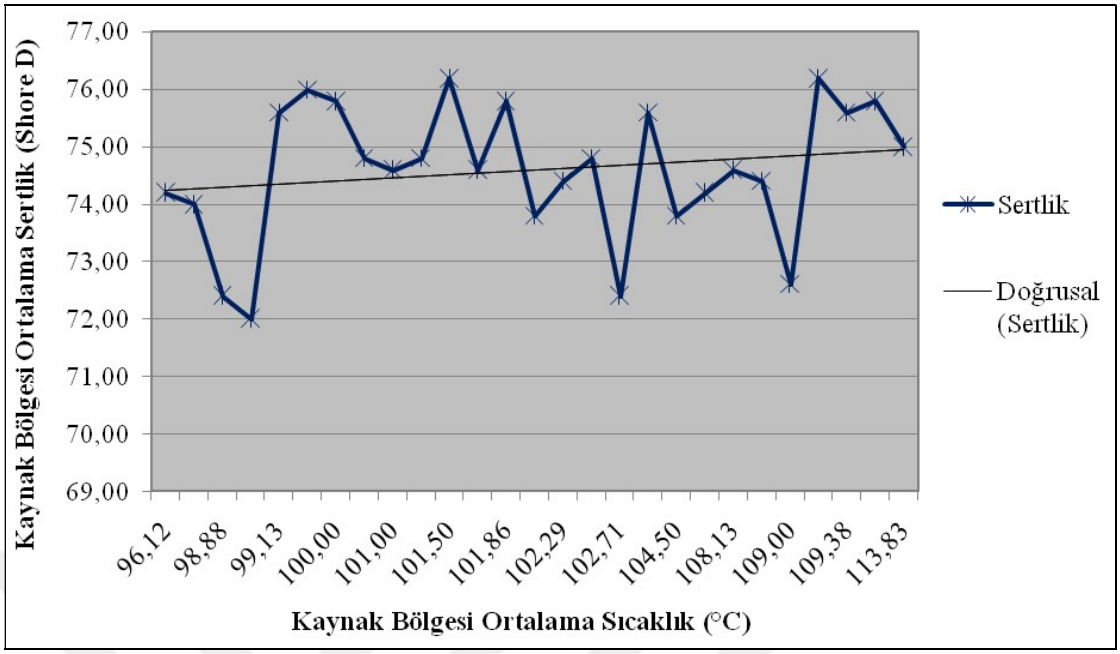
Kaynak bölgesindeki en yüksek ortalama sertlik değeri olan 76,2 Shore D'nin, H tipi takım ile 1125dev/dak, 50 mm/dak'da ve O tipi takım ile 1250 dev/dak, 40 mm/dak'da yapılan kaynaklarda elde edildiği tespit edilmiştir. Kaynak bölgesindeki en düşük ortalama sertlik değeri olan 72 Shore D'nin, H tipi takım ile 1000 dev/dak, 60 mm/dak'da yapılan kaynakta elde edildiği tespit edilmiştir.

H, M ve O tipi takımlar ile yapılan SKK kaynak bölgesi ortalama sertlik değerleri incelendiğinde en düşük sertlik değerlerinin her takım için farklı parametrelerde yapılan SKK deneylerinde oluştuğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde en yüksek sertlik değerlerinin de her takım için farklı parametrelerde yapılan SKK deneylerinde oluştuğu tespit edilmiştir. Her takım için en düşük ve en yüksek ortalama sertlik değerleri Çizelge 6.21'de verilmiştir

Çizelge 6.21. Takım tiplerine göre en düşük ve en yüksek ortalama sertlik değerleri (Kaynak Bölgesi: KB, Kaynaktan Etkilenen Bölge: KEB, Kaynaktan Etkilenmeyen Bölge (Ana Malzeme): M).

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*		*Kaynak Parametreleri*		*Sertlik Ölçüm Bilgileri*		
		Uç Kanalı	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*	*Sertlik Ölçüm Bölgesi*	*Ortalama Sertlik Değerleri (Shore D)*	
H		Tek Büyük	Tek Küçük	1000	60	KB	En Düşük	72,00
				1125	50		En Yüksek	76,20
				1250	60	KEB	En Düşük	73,80
				1250	50		En Yüksek	77,00
				1000	40	M	En Düşük	75,80
				1125	40		En Yüksek	78,20
M		Tek Büyük	İki Küçük	1000	50	KB	En Düşük	72,40
				1250	40			
				1250	50		En Yüksek	75,80
				1000	40	KEB	En Düşük	72,80
				1125	50		En Yüksek	75,80
				1000	60	M	En Düşük	75,60
				1125	40		En Yüksek	78,60
O		Tek Büyük	Üç Küçük	1125	50	KB	En Düşük	74,20
				1250	40		En Yüksek	76,20
				1000	40	KEB	En Düşük	75,40
				1250	40		En Yüksek	77,40
				1000	40	M	En Düşük	75,20
					50			
				1125	50		En Yüksek	78,60

Şekil 6.102'de SKK yapılmış parçaların kaynak bölgesi ortalama sıcaklığı ile kaynak bölgesi ortalama sertlik değeri arasındaki bağıntı incelenmiş, sertlik ve sıcaklık değerlerinden faydalanılarak doğrusal sertlik çizgisi elde edilmiştir. Doğrusal sertlik çizgisi incelendiğinde sıcaklık artıkça sertliğin artığı görülmektedir.



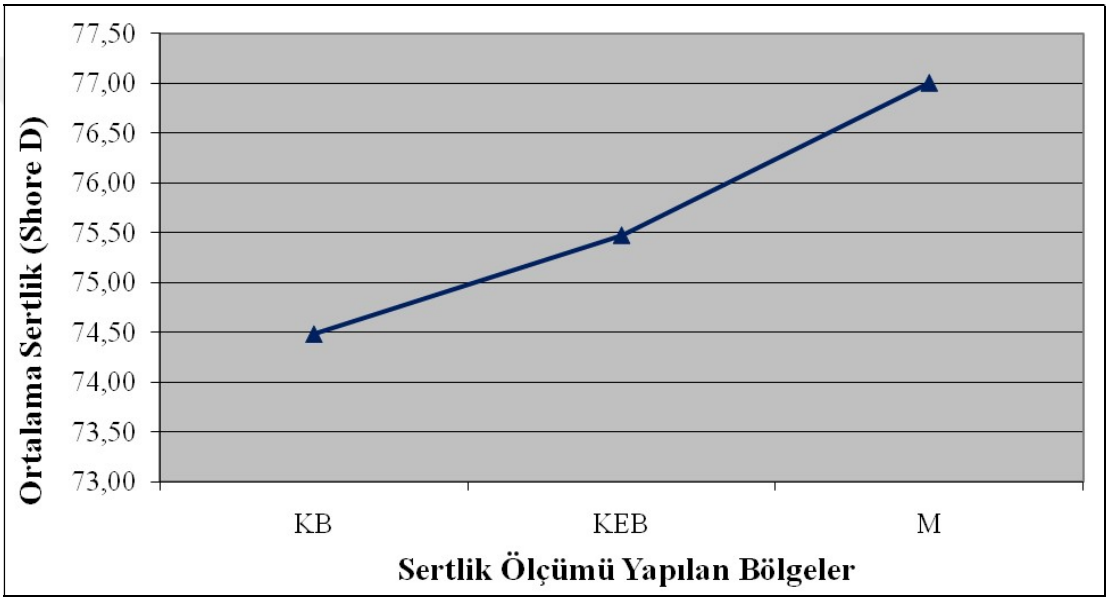
Şekil 6.102. Sıcaklığa bağlı SKK kaynak gölgesi sertlik değişim grafiği.

İncelemeler sonucunda genel olarak kaynak bölgesinde sertlik değerlerinin en düşük, kaynaktan etkilenen bölgede daha yüksek, kaynaktan etkilenmeyen bölgede en yüksek olduğu görülmüştür.

SKK yapılan bütün parçaların sertlik ölçümü yapılan bölgelerindeki sertlik değerlerinin, bölgelere göre ayrı ayrı ortalaması hesaplandığında kaynak bölgesinden kaynaktan etkilenmeyen bölgeye doğru gidildikçe ortalama sertlik değerinin arttığı tespit edilmiştir. Bölgelere göre SKK sertlik değişim grafiği Şekil 6.103'de verilmiştir. Kaynak bölgesi sertliğinin düşük çıkması ile Bölüm 6.7.4'deki mikro yapı incelemelerinde belirlenmiş olan kaynaktan etkilenmeyen bölgeden kaynak bölgesine doğru yaklaştıkça cam elyaf takviye malzemelerinin küçülerek azalmasının bağlantılı olduğu söylenebilir.

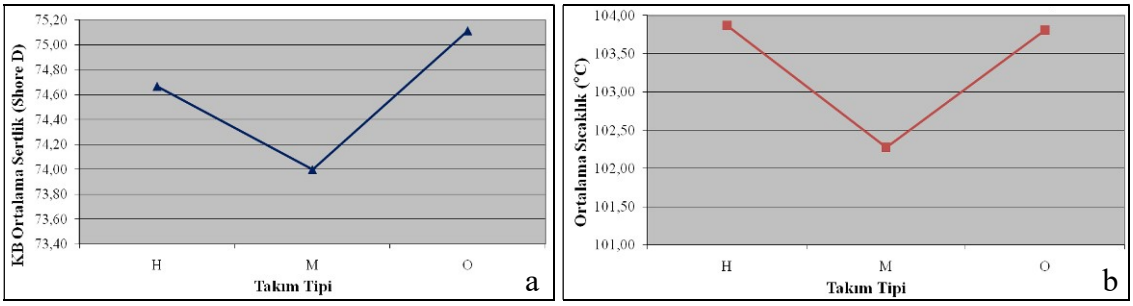
Kaynak bölgesi ile kaynaktan etkilenen bölge arasındaki en yüksek sertlik farkının 4,6 Shore D olduğu tespit edilmiştir. Kaynaktan etkilenen bölge ile kaynaktan etkilenmeyen bölge arasındaki en yüksek sertlik farkının 4,6 Shore D olduğu tespit edilmiştir. Kaynak bölgesi ile kaynaktan etkilenmeyen bölge arasındaki en yüksek sertlik farkının 5,6 Shore D olduğu tespit edilmiştir.

Sadece bir kaynak numunesinde kaynak bölgesinden kaynaktan etkilenmeyen bölgeye ilerledikçe sertliğin düştüğü görülmüştür. En yüksek sertlik düşünün 0,4 Shore D olduğu tespit edilmiştir. İki kaynak numunesinde kaynaktan etkilenen bölgeden kaynaktan etkilenmeyen bölgeye ilerledikçe sertliğin düştüğü görülmüştür. En yüksek sertlik düşünün 0,4 Shore D olduğu tespit edilmiştir. Az sayıda kaynak numunesinde de kaynak bölgesinden kaynaktan etkilenen bölgeye ilerledikçe sertliğin düştüğü görülmüştür. Bu incelemede en yüksek sertlik düşünün 2 Shore D olduğu tespit edilmiştir.



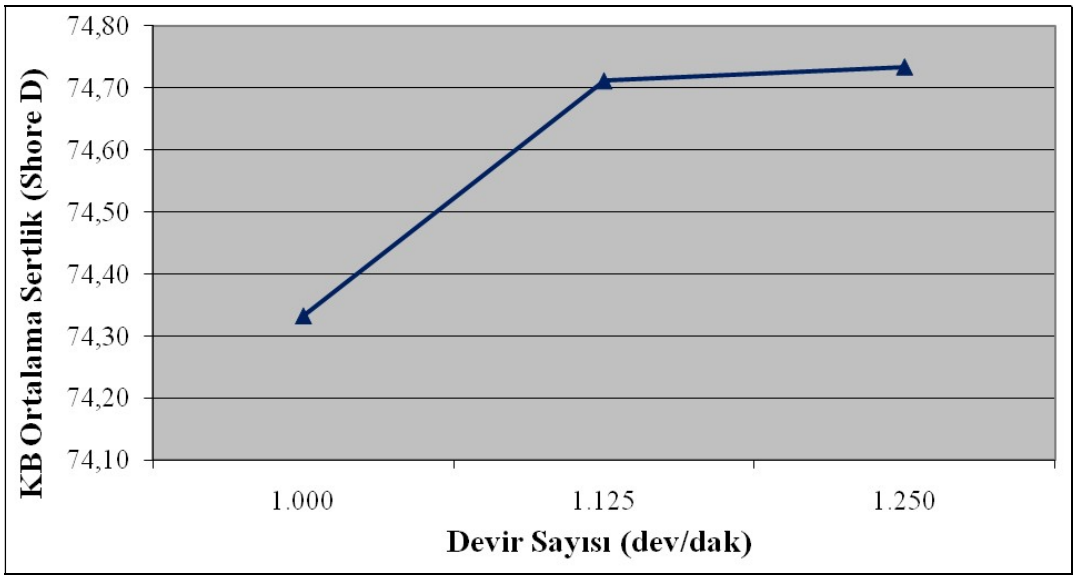
Şekil 6.103. SKK sertliğinin bölgelere göre değişim grafiği (Kaynak Bölgesi: KB, Kaynaktan Etkilenen Bölge: KEB, Kaynaktan Etkilenmeyen Bölge (Ana Malzeme): M).

H, M ve O tipi takımlar ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen kaynak bölgesi sertlik değerlerinin, takım tipine göre ayrı ayrı ortalaması alınarak takım tipine bağlı sertlik değişimi incelenmiştir. H ve O tipi takımlar ile yapılan kaynakların kaynak bölgesi ortalama sertlik değerlerinden, M tipi takım ile yapılan kaynakların kaynak bölgesi ortalama sertlik değerlerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Takım tipine göre SKK kaynak bölgesi sertlik ve sıcaklık değişim grafikleri Şekil 6.104'de verilmiştir. Burada SKK kaynak bölgesi sıcaklık ortalamasının, düşük olduğu takımda kaynak bölgesi sertlik ortalamasının da düşük olduğu görülmektedir.



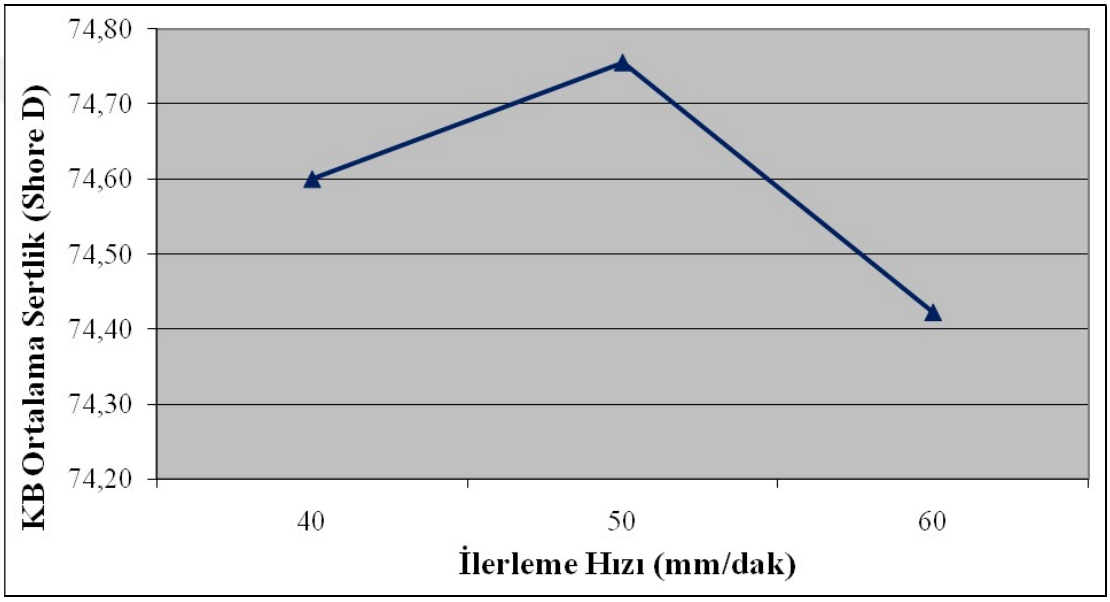
Şekil 6.104. Takım tipine bağlı SKK kaynak bölgesi ortalama sıcaklık ve sertlik değişim grafiği; a) Sertlik, b) Sıcaklık.

1000, 1125 ve 1250 dev/dak devir sayıları ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen kaynak bölgesi sertlik değerlerinin, devir sayılarına göre ayrı ayrı ortalaması alınarak devir sayısına bağlı sertlik değişimi incelenmiştir. 1125 ve 1250 dev/dak devir sayıları ile yapılan kaynakların kaynak bölgesi sertlik değerleri ortalamalarının neredeyse aynı olduğu, 1000 dev/dak devir sayısı ile yapılan kaynakların kaynak bölgesi sertlik değerlerinin ortalamasının diğer devir sayılarına göre ~0,40 Shore D daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Devir sayısına bağlı SKK kaynak bölgesi sertlik değişim grafiği Şekil 6.105'de verilmiştir. Burada SKK kaynak bölgesi sertlik ortalamasının en yüksek, 1250 dev/dak devir sayısı ile yapılan kaynaklarda elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6.105. Devir sayısına bağlı SKK kaynak bölgesi ortalama sertlik değişim grafiği.

40, 50 ve 60 mm/dak ilerleme hızları ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen kaynak bölgesi sertlik değerlerinin, ilerleme hızlarına göre ayrı ayrı ortalaması alınarak ilerleme hızına bağlı sertlik değişimi incelenmiştir. Bütün ilerleme hızları ile yapılan kaynakların kaynak bölgesi sertlik değerleri ortalamalarının neredeyse aynı olduğu, aralarındaki farkın en fazla 0,33 Shore D olduğu tespit edilmiştir. İlerleme hızına bağlı SKK kaynak bölgesi sertlik değişim grafiği Şekil 6.106'da verilmiştir. Burada SKK kaynak bölgesi sertlik ortalamasının en yüksek, 50 mm/dak ilerleme hızı ile yapılan kaynaklarda elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6.106. İlerleme hızına bağlı SKK kaynak bölgesi ortalama sertlik değişim grafiği.

6.7.6. Çekme Deneyleri

Çekme deneyleri, SKK yapılmış plastik matrisli kompozit malzemelerin kaynak dayanımını belirlemek için yapılmıştır. Çekme deneyleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Araştırma Laboratuarında yapılmıştır. Çekme deneylerinin yapılmasında, Şekil 6.107'de gösterilen UTEST marka çekme cihazı kullanılmıştır.

Çekme deney numuneleri, ASTM D 638 Tip 4 e uygun olarak hazırlanmıştır. SKK yapılmış parçaların çekme deney numuneleri Şekil 6.108'de gösterilen şekilde

hazırlanmıştır. Numune hazırlama ve numune ölçüleri ile ilgili bilgiler Bölüm 6.7.3'de detaylı olarak verildiğinden bu bölümde tekrar verilmemiştir.



Şekil 6.107. Çekme test cihazı.



Şekil 6.108. Kaynaklı parçalardan hazırlanmış çekme deney numunesi.

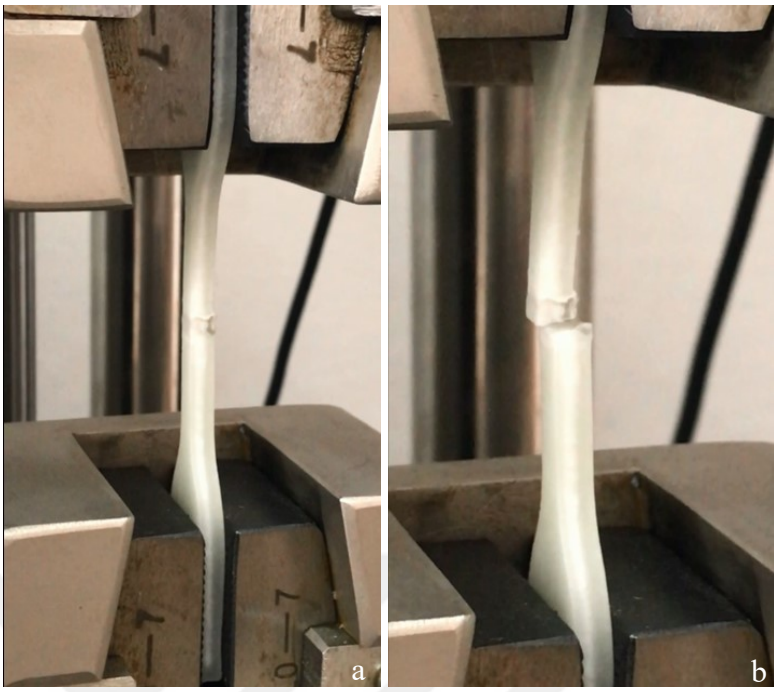
ASTM D 638 standartlarına göre dört değişik çekme deneyi test hızı vardır. Bunlar; 0,2 (5,08), 0,5 (12,7), 2,0 (50,8) ve 20,0 (508) in/dak (mm/dak)'dır. Testlerde en çok kullanılan hız ise 0,2 in/dak (5,08 mm/dak)'dır. Çekme numunesi cihazın çeneleri arasına dikey olarak yerleştirilir. Çekme numunesinin kaymasını önlemek için tutucuların gergin ve sıkı olmalı gerekir. Hız ayarlanarak makine çalıştırılır. Çekme numunesinin boyundaki uzama ve numunenin gösterdiği dirence karşılık gelen yük

değeri makineye bağlı bilgisayar tarafından kaydedilir. Çekme numunesi kopana kadar işleme devam edilir. Kopma anındaki ölçülen uzama, numunenin kopmadaki uzama değeridir. Kopma altında uygulanan yük değeri de makineye bağlı bilgisayar tarafından kaydedilir. Akmadaki ve kopmadaki çekme dayanımı değerleri hesaplanır (Arıcıoğlu vd., 2000).

Çekme deney cihazının ayarları yapılırken plastik malzemelerin çekme deneylerinde kullanılan parametreler göz önünde bulundurulmuştur. ASTM D 638 standardına uygun çekme deney hızlarından en yaygın olarak kullanıldığı literatür araştırmalarında da tespit edilen 5 mm/dak çekme deney hızının kullanılmasına karar verilmiştir. Çekme deney numune boyutları (Genişlik, Kalınlık, İlk Boy), deneylerden elde edilmesi istenilen sonuçlar (Gerilme Dayanımı, Akma Dayanımı, Kopma Dayanımı, Maksimum Yük, Elastikiyet Modülü, Deformasyon, Son Boy, Uzama Oranı, Kopma Uzaması) dikkate alınarak çekme deney cihazının gerekli ayarları yapıldıktan sonra çekme deneylerine başlanmıştır.

Çekme deney numunelerinin çok düzgün ve dikkatli bir şekilde çekme test cihazına bağlanması gerekmektedir. Çekme deney numuneleri Şekil 6.109.a'da gösterilen şekilde çeneler arasına sıkıştırılmıştır. Çeneler arasına sıkıştırma esnasında oluşan ön gerilimler daha hassas sonuçlar elde edebilmek için çekme test cihazı kontrol ünitesinden manüel olarak alınarak cihaz otomatik moda ayarlanmıştır. Otomatik olarak çalıştırılan çekme cihazı Şekil 6.109.b'de gösterilen şekilde test numuneleri kopana kadar çekme işlemine devam etmiş ve test numuneleri koptuktan sonra otomatik olarak durmuştur. Elde edilen sonuçlar bilgisayara kayıt edilerek çekme testleri tamamlanmıştır.

SKK yapılmış her deneyden minimum 3 adet çekme deney numunesi çıkartılmıştır. Deney numunelerinin işlenerek çıkartılması esnasında ve çekme test cihazına bağlama esnasında bazı numuneler kırılmıştır. Çekme deneyi esnasında bazı çekme numunelerinin çok düşük çekme gerilmelerinde kopmasından dolayı cihaz herhangi bir değer kayıt edemediğinden bu numuneler hesaplamalarda dikkate alınmamıştır. Hesaplamalar yapılırken sağlam olarak çekme deneyi yapılan numunelerden elde edilen değerlerin ortalaması alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.

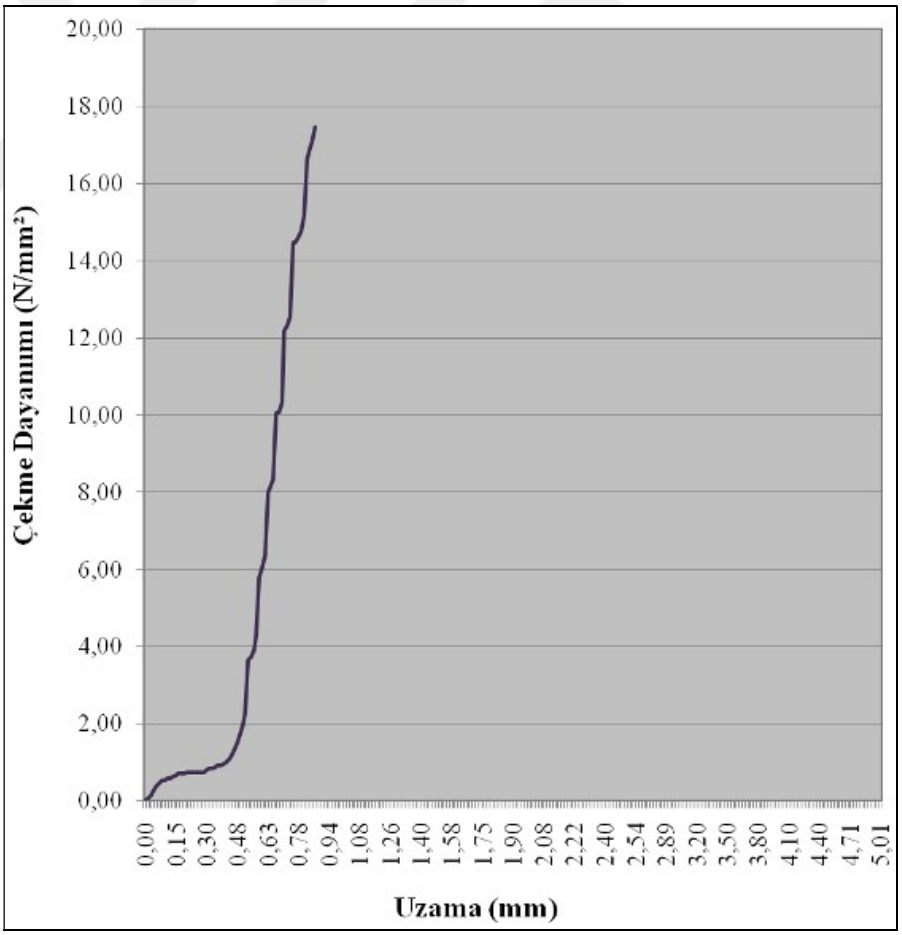


Şekil 6.109. Çekme deneyleri; a) Çekme numunelerinin çekme test cihazına bağlanışı, b) Çekme numunelerinin çekme test cihazında kopana kadar çekilmesi.

Plastik matrisli kompozit malzemelerin, enjeksiyon yöntemi ile üretiminden sonra kaynaksız plaka malzemelere yapılan çekme deneyleri sonrasında elde edilen değerlerin tedarikçi firma sertifikasında belirtilen çekme dayanım değerlerine göre daha düşük olmasından dolayı SKK yapılmış parçaların çekme dayanımları, plastik matrisli kompozit malzemelerin imalatından sonra elde edilen çekme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Tedarikçi firma sertifikasında belirtilen değerlere göre karşılaştırma yapılması durumunda, enjeksiyon yöntemi ile üretim yapılırken meydana gelen dayanım düşmeleri göz önünde bulundurulmamış olacaktır. Bundan dolayı SKK kaynak performanslarının doğru değerlendirilebilmesi için enjeksiyon yöntemiyle üretilen malzemelerin çekme değerleri baz alınarak SKK kaynak performansları değerlendirilmiştir.

Çekme deney numunelerinin genelinde Şekil 6.110'da gösterilen şekilde belirgin akma görülmediğinden Akma dayanımı tespit edilememiştir. Genellikle numunelerin gevrek olduğu yani sünek bir kopma özelliği göstermediği tespit edilmiştir. Kopma uzama değerleri incelendiğinde de kaynaklı numunelerin çekme uzama yüzdesinin plakaların imalatından sonra elde edilen kopma uzamasına (%10,848) göre çok düşük

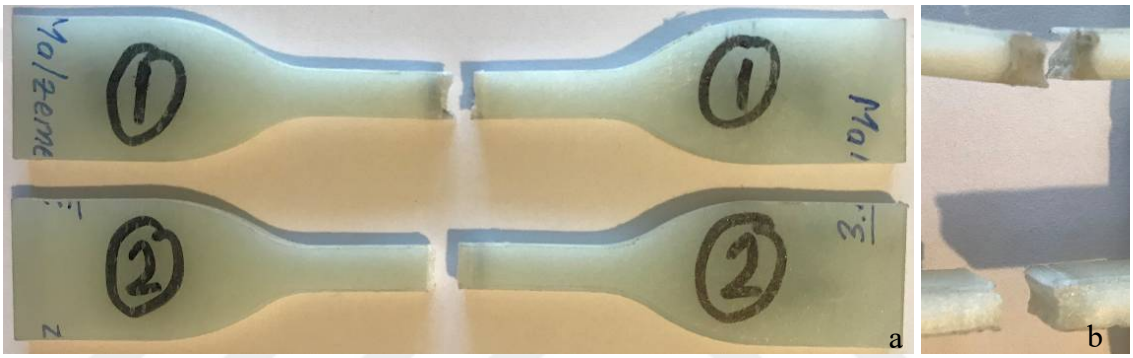
olduğu tespit edilmiştir. Çekme deneyleri sonrası en yüksek kopma uzamasının %3,855 olduğu ve H tipi takım ile 1000 dev/dak, 50 mm/dak'da yapılan kaynakta elde edildiği tespit edilmiştir. En yüksek ortalama kopma uzamasının tespit edildiği çekme numunelerinin, çekme deneyi sonrası görüntüleri Şekil 6.111'de verilmiştir. Çekme deneyleri sonrası en düşük kopma uzamasısın %2,055 olduğu ve H tipi takım ile 1250 dev/dak, 40 mm/dak'da yapılan kaynakta elde edildiği tespit edilmiştir. En düşük ortalama kopma uzamasının tespit edildiği çekme numunelerinin, çekme deneyi sonrası görüntüleri Şekil 6.112'de verilmiştir. Çekme numunelerinin çekme deneyleri sonrasında kopma bölgeleri incelendiğinde de Şekil 6.113'de gösterilen şekilde kopmanın genellikle kaynak sınırlarından başladığı ve herhangi bir boyun verme olmadan gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu da yine kaynakların gevrek bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.110. H tipi takım ile 1250 dev/dak ve 50 mm/dak'da yapılmış SKK çekme deney grafiği.



Şekil 6.111. En yüksek ortalama kopma uzaması elde edilen çekme deneyi sonrası kopmuş, H tipi takım ile 1000 dev/dak, 50 mm/dak'da SKK yapılmış çekme deney numuneleri; a) Önden görünüş, b) Yan görünüş.

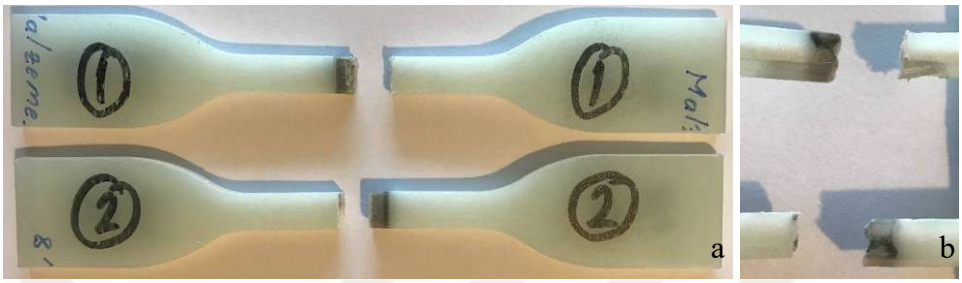


Şekil 6.112. En düşük ortalama kopma uzaması elde edilen çekme deneyi sonrası kopmuş, H tipi takım ile 1250 dev/dak, 40 mm/dak'da SKK yapılmış çekme deney numuneleri; a) Önden görünüş, b) Yan görünüş.

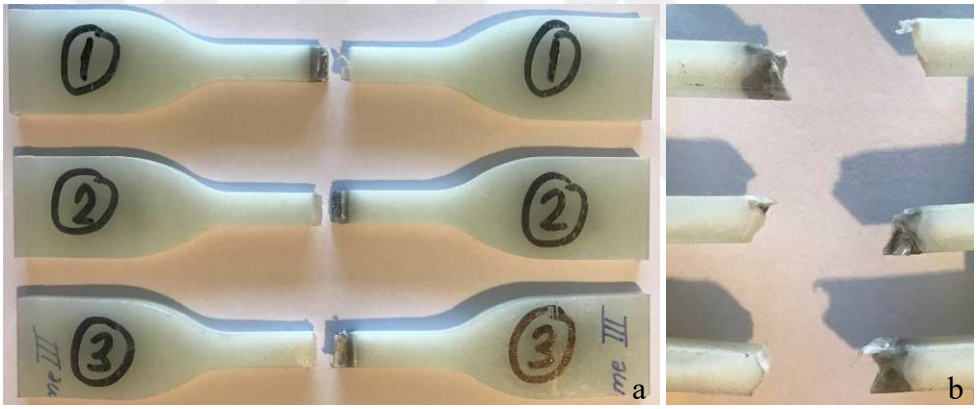
SSK yapılmış numunelere yapılan çekme deneyleri sonucunda en yüksek çekme dayanımının 17,459 N/mm² olduğu ve H tipi takım ile 1250 dev/dak, 50 mm/dak'da yapılan kaynakta elde edildiği tespit edilmiştir. En düşük çekme dayanımının ise 2,582 N/mm² olduğu ve O tipi takım ile 1250 dev/dak, 50 mm/dak'da yapılan kaynakta elde edildiği tespit edilmiştir.

Her kaynak parametresinde yapılan SKK deneylerinden elde edilen çekme dayanımlarının ayrı ayrı aritmetik ortalaması hesaplandığında en yüksek çekme dayanımı ortalamasının 14,939 N/mm² olduğu ve H tipi takım ile 1250 dev/dak, 50 mm/dak'da yapılan kaynakta elde edildiği tespit edilmiştir. En yüksek ortalama çekme dayanımının tespit edildiği çekme numunelerinin, çekme deneyi sonrası görüntüleri Şekil 6.113'de verilmiştir. En düşük çekme dayanımı ortalamasının ise 2,623 N/mm² olduğu ve H tipi takım ile 1250 dev/dak, 60 mm/dak'da yapılan kaynakta elde edildiği

tespit edilmiştir. En düşük ortalama çekme dayanımının tespit edildiği çekme numunelerinin, çekme deneyi sonrası görüntüleri Şekil 6.114'de verilmiştir. Bu durumda en yüksek ve en düşük çekme dayanımı ortalamasının, H tipi takım ile yapılan SKK deneylerinden elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6.113. En yüksek ortalama çekme dayanımı elde edilen çekme deneyi sonrası kopmuş, H tipi takım ile 1250 dev/dak, 50 mm/dak'da SKK yapılmış çekme deney numuneleri; a) Önden görünüş, b) Yan görünüş.



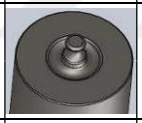
Şekil 6.114. En düşük ortalama çekme dayanımı elde edilen Çekme deneyi sonrası kopmuş H tipi takım ile 1250 dev/dak, 60 mm/dak'da yapılmış SKK çekme deney numuneleri; a) Önden görünüş, b) Yan görünüş.

SKK yapılmış paçaların çekme dayanımları, plastik enjeksiyon yöntemi ile üretimi yapılan kaynaksız plakaların çekme dayanım değerleri ile karşılaştırıldığında SKK yapılmış parçaların çekme dayanımlarının çok düşük çıktığı gözlemlenmiştir. SKK yapılmış parçaların, plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş olan malzemelerin çekme dayanımına (61,246 N/mm²) göre performansı değerlendirildiğinde en düşük performans %4,283 (2,623 N/mm²), en yüksek performans %24,391 (14,939 N/mm²) çıkmıştır. Bu durumda plastik enjeksiyon yöntemi ile üretimi yapılan kaynaksız plakaların çekme dayanım değerlerine göre SKK yapılmış parçaların çekme dayanım

değerlerinde, en düşük ~%76, en yüksek ise ~%96 performans kaybı olduğu söylenebilir.

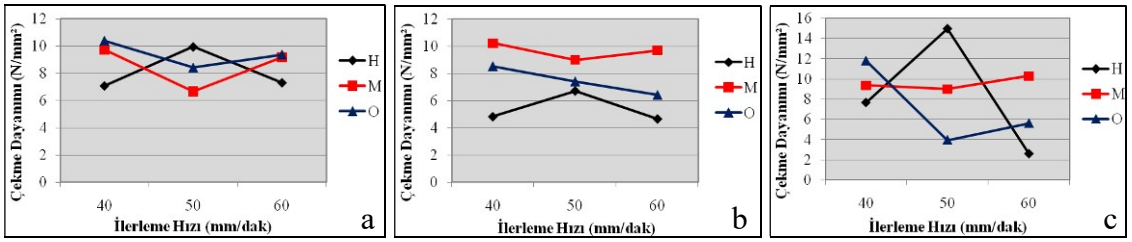
H, M ve O tipi takımlar ile yapılan SKK ortalama çekme dayanım değerleri incelendiğinde en düşük çekme dayanım değerlerinin her takım için farklı parametrelerde yapılan SKK deneylerinde oluştuğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde en yüksek çekme dayanım değerlerinin de her takım için farklı parametrelerde yapılan SKK deneylerinde oluştuğu tespit edilmiştir. Her takım için en düşük ve en yüksek ortalama çekme dayanım değerleri Çizelge 6.22'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde farklı ilerleme hızlarında da olsa her takım için en yüksek ortalama çekme dayanımının 1250 dev/dak devir sayısı ile yapılan SKK deneylerinden elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.22. Takım tiplerine göre en düşük ve en yüksek ortalama çekme dayanımları.

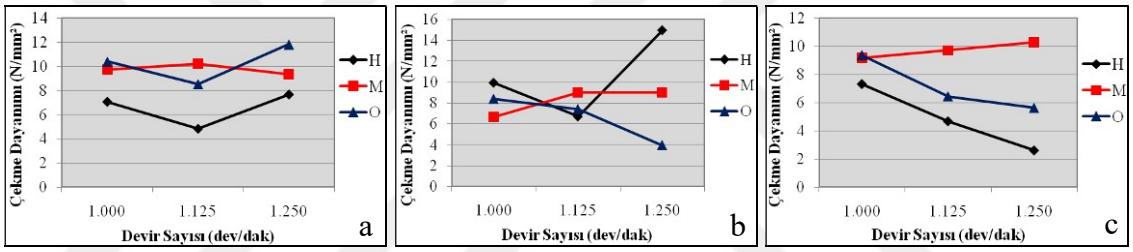
Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*		*Kaynak Parametreleri*			*Ortalama Çekme Dayanımı Değerleri (N/mm²)*	
		Uç Kanalı	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Takım Dönüş Yönü*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*		
H		Tek Büyük	Tek Küçük	M03	1250	60	En Düşük	2,623
					1250	50	En Yüksek	14,939
M		Tek Büyük	İki Küçük	M03	1000	50	En Düşük	6,639
					1250	60	En Yüksek	10,273
O		Tek Büyük	Üç Küçük	M03	1250	50	En Düşük	3,948
					1250	40	En Yüksek	11,817

Çekme dayanımları ile ilgili SKK kaynak parametreleri bir bütün olarak karşılaştırılarak değerlendirme yapıldığında Şekil 6.115 - Şekil 6.117'de görüldüğü üzere, takım tipine, ilerleme hızına, devir sayısına bağlı olarak bir artış veya azalma olduğunu söylememiz mümkün değildir. Yani bir takım tipine göre değerlendirme yaptığımızda devir sayısı artıkça çekme dayanımı artarken diğer takım tipinde ise devir sayısı artıkça çekme dayanımı azalmaktadır. Sadece H tipi takım ile (takım alnında bir adet küçük kanal olan) 50 mm/dak ilerleme hızlarında yapılan kaynaklarda çekme dayanımın arttığı ve M tipi takım ile (takım alnında iki adet küçük kanal olan) 50 mm/dak ilerleme hızlarında yapılan kaynaklarda çekme dayanımın azaldığı

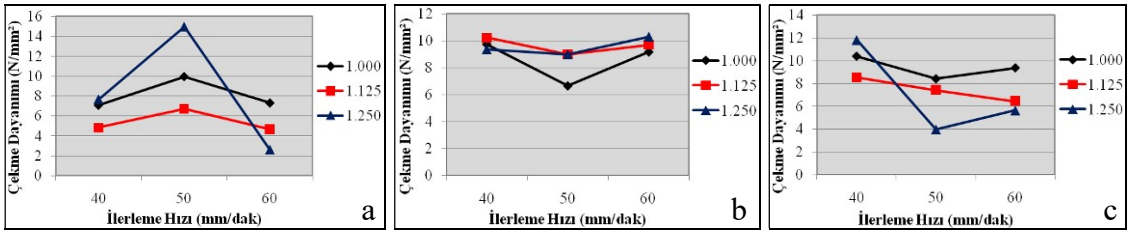
söylenebilmektedir. Çekme dayanımları, bir bütün olarak değil de ayrı ayrı değerlendirildiğinde bazı kaynaklarda devir sayısı arttıkça çekme dayanımının arttığı, bazı kaynaklarda da devir sayısı artıkça çekme dayanımının düştüğü söylenebilir. Aynı şekilde bazı kaynaklarda ilerleme hızı arttıkça çekme dayanımının düştüğü söylenebilir.



Şekil 6.115. İlerleme hızına göre çekme dayanımlarının değişimi; a) 1000 dev/dak, b) 1125 dev/dak, c) 1250 dev/dak.



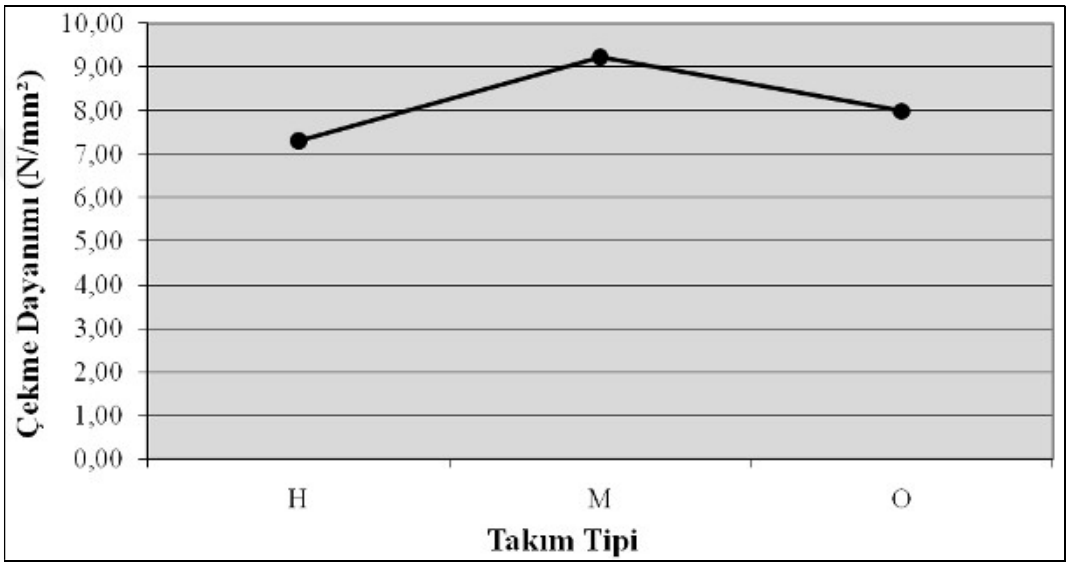
Şekil 6.116. Devir sayısına göre çekme dayanımlarının değişimi; a) 40 mm/dak, b) 50 mm/dak, c) 60 mm/dak.



Şekil 6.117. Takım tipine göre çekme dayanımlarının değişimi; a) H tipi takım, b) M tipi takım, c) O tipi takım.

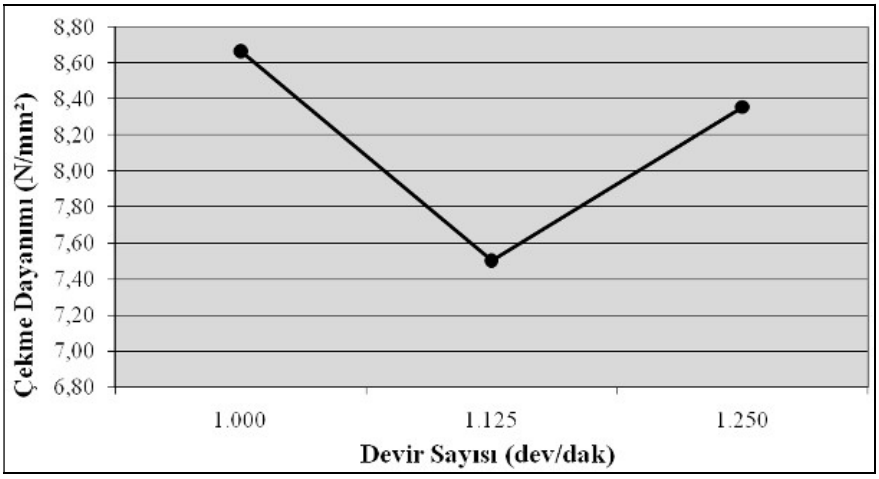
H, M ve O tipi takımlar ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen çekme dayanım değerlerinin, takım tipine göre ayrı ayrı ortalaması alınarak takım tipine bağlı çekme dayanımı değişimi incelenmiştir. M tipi takım ile yapılan kaynakların çekme dayanım değerlerinin ortalamasının diğer takımlar ile yapılan kaynaklara göre daha yüksek olduğu, H tipi takım ile yapılan kaynakların çekme dayanım değerlerinin ortalamasının diğer takımlar ile yapılan kaynaklara göre daha düşük olduğu tespit

edilmiştir. Takım tipine göre SKK ortalama çekme dayanımı değişim grafiği Şekil 6.118'de verilmiştir. Bölüm 6.7.1'de detaylı olarak anlatılan görsel incelemelerde de en düzgün kaynakların M tipi takım ile iyi olmayan kaynakların da H tipi takımla yapıldığı tespit edilmiştir. Ortalama çekme dayanım değerlerine ve takım tipine göre inceleme yapıldığında görsel olarak iyi sonuçlar elde edilen kaynakların çekme dayanımlarının ortalamasının daha yüksek olduğu, görsel olarak iyi olmayan sonuçların elde edildiği kaynakların çekme dayanımlarının ortalamasının daha düşük olduğu söylenebilir.



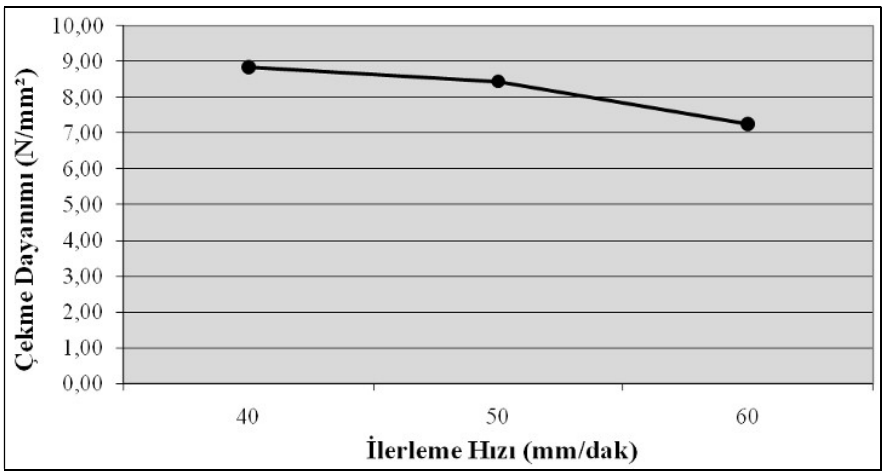
Şekil 6.118. Takım tipine bağlı SKK ortalama çekme dayanımı değişim grafiği.

1000, 1125 ve 1250 dev/dak devir sayıları ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen çekme dayanım değerlerinin, devir sayılarına göre ayrı ayrı ortalaması alınarak devir sayısına bağlı çekme dayanımı değişimi incelenmiştir. 1000 dev/dak devir sayısı ile yapılan kaynakların çekme dayanım değerlerinin ortalamasının diğer devir sayıları ile yapılan kaynaklara göre daha yüksek olduğu, 1125 dev/dak devir sayısı ile yapılan kaynakların çekme dayanım değerlerinin ortalamasının diğer devir sayıları ile yapılan kaynaklara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Devir sayısına göre SKK ortalama çekme dayanımı değişim grafiği Şekil 6.119'da verilmiştir. Bölüm 6.7.1'de detaylı olarak anlatılan görsel incelemelerde de en düzgün kaynakların 1000 dev/dak devir sayısı ile iyi olmayan kaynakların da 1125 dev/dak devir sayısı yapıldığı tespit edilmiştir.



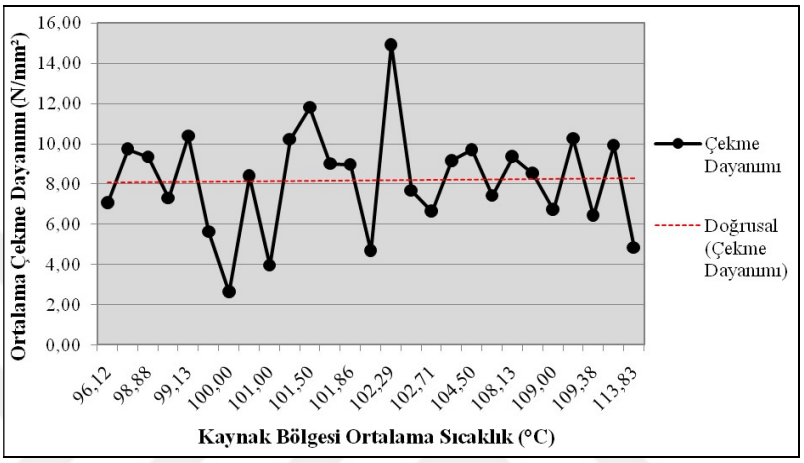
Şekil 6.119. Devir sayısına bağlı SKK ortalama çekme dayanımı değişim grafiği.

40, 50 ve 60 mm/dak ilerleme hızları ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen çekme dayanım değerlerinin, ilerleme hızlarına göre ayrı ayrı ortalaması alınarak ilerleme hızına bağlı çekme dayanımı değişimi incelenmiştir. 40 mm/dak ilerleme hızı ile yapılan kaynakların çekme dayanım değerlerinin ortalamasının diğer ilerleme hızları ile yapılan kaynaklara göre daha yüksek olduğu, 60 mm/dak ilerleme hızı ile yapılan kaynakların çekme dayanım değerlerinin ortalamasının diğer ilerleme hızları ile yapılan kaynaklara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. İlerleme hızına göre SKK ortalama çekme dayanımı değişim grafiği Şekil 6.120'de verilmiştir. Ortalama çekme dayanım değerlerine ve ilerleme hızına göre inceleme yapıldığında ilerleme hızı arttıkça ortalama çekme dayanımın azaldığı söylenebilir.



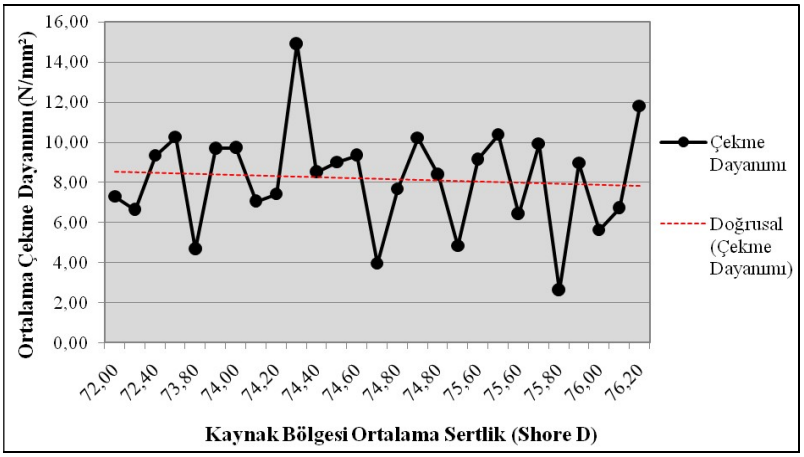
Şekil 6.120. İlerleme hızına bağlı SKK ortalama çekme dayanımı değişim grafiği.

Şekil 6.121'de SKK yapılmış parçaların kaynak bölgesi ortalama sıcaklığı ile ortalama çekme dayanımı arasındaki bağıntı incelenmiş, çekme dayanımı ve sıcaklık değerlerinden faydalanılarak doğrusal çekme dayanımı çizgisi elde edilmiştir. Doğrusal çekme dayanımı çizgisi incelendiğinde sıcaklık artıkça çok azda olsa çekme dayanımının artığı tespit edilmiştir.



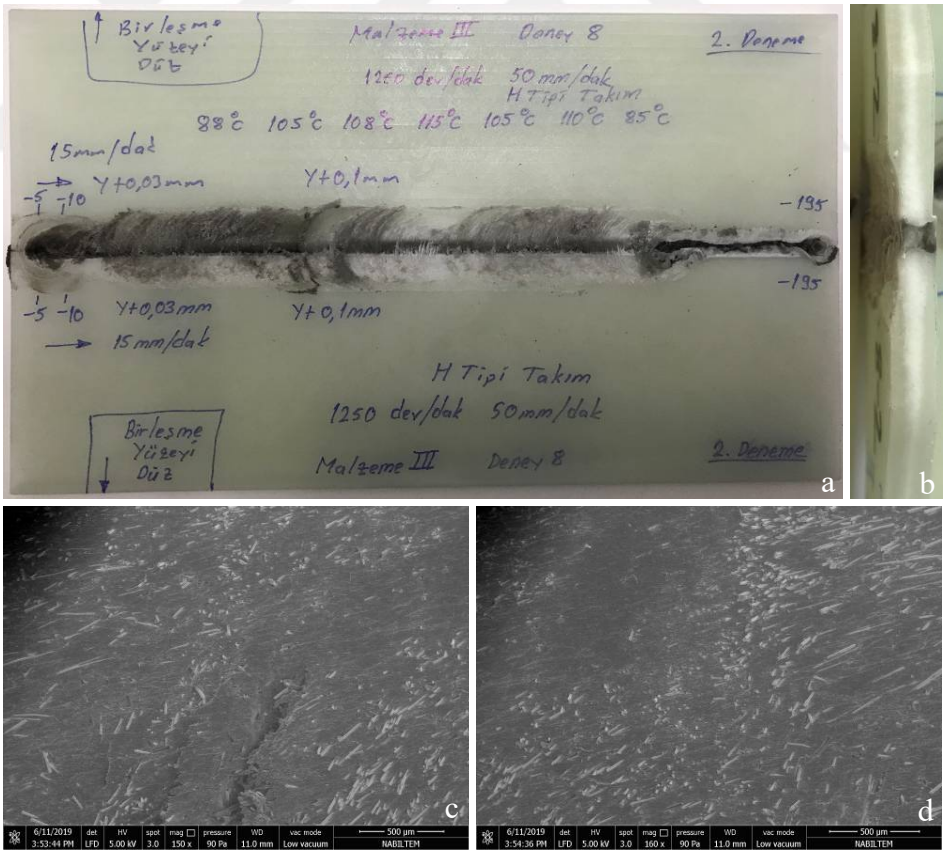
Şekil 6.121. Sıcaklığa bağlı SKK çekme dayanımının değişim grafiği.

Şekil 6.122'de SKK yapılmış parçaların kaynak bölgesi ortalama sertlik ve ortalama çekme dayanımı değerleri arasındaki bağıntı incelenmiş, çekme dayanımı ve kaynak bölgesi sertlik değerlerinden faydalanılarak doğrusal çekme dayanımı çizgisi elde edilmiştir. Doğrusal çekme dayanımı çizgisi incelendiğinde kaynak bölgesi sertlik değeri artıkça çekme dayanımının azaldığı görülmüştür.



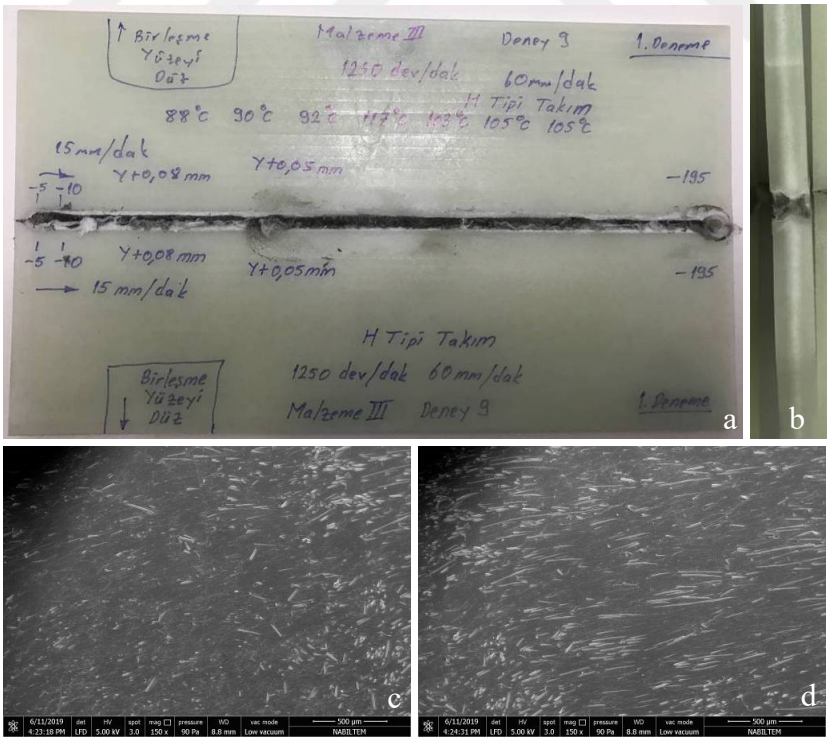
Şekil 6.122. Kaynak bölgesi sertliğine bağlı SKK çekme dayanımının değişim grafiği.

En yüksek ortalama çekme dayanımı, H tipi takım ile 1250 dev/dak, 50 mm/dak'da yapılan sürtünme karıştırma kaynağında 14,939 N/mm² olarak tespit edilmiştir. En yüksek ortalama çekme dayanımının tespit edildiği SKK yapılmış parçaların kaynak sonrası görüntüleri ve mikro yapı görüntüleri Şekil 6.123'de verilmiştir. Çekme dayanımı, kaynak bölgesi sertlik değeri, kayak bölgesi sıcaklığı, mikro yapı görüntüleri ve SKK sonrası görüntüleri birlikte incelenmiştir. En yüksek ortalama çekme dayanımı elde edilen SKK deneyinin, görsel incelemelerinde çok fazla boşluk, takım dalması, kalınlık düşmesi, çapak ve renk değişiminin olmasından dolayı iyi olarak değerlendirilemeyecek bir kaynak olduğu düşünülmektedir. Aynı şekilde mikro yapı incelemelerinde de kaynak bölgesinde boşluk olduğu, kaynak bölgesinde takviye elemanının düzensiz dağıldığı ve azaldığı, kaynak sınırında takviye malzemesinin yığıldığı gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesi sertliğinin 74,40 Shore D, kaynak bölgesi sıcaklığının ise 102,29 °C olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.123. H tipi takım ile 1250 dev/dak ve 50 mm/dak'da SKK yapılmış parça en yüksek ortalama çekme dayanımı; a) Önden görünüş, b) Kesit görünüş, c) Kaynak bölgesi 150X SEM görüntüsü, d) Kaynaktan etkilenen bölge 160X SEM görüntüsü.

En düşük ortalama çekme dayanımı, H tipi takım ile 1250 dev/dak, 60 mm/dak'da yapılan sürtünme karıştırma kaynağında 2,623 N/mm² olarak tespit edilmiştir. En düşük ortalama çekme dayanımının tespit edildiği SKK yapılmış parçaların kaynak sonrası görüntüleri ve mikro yapı görüntüleri Şekil 6.124'de verilmiştir. Çekme dayanımı, kaynak bölgesi sertlik değeri, kayak bölgesi sıcaklığı, mikro yapı görüntüleri ve SKK sonrası görüntüleri birlikte incelenmiştir. En düşük ortalama çekme dayanımı elde edilen SKK deneyinin, görsel incelemelerinde iyi olarak değerlendirilebilecek bir kaynak olduğu, mikro yapı incelemelerinde kaynak bölgesinde boşluk olmadığı, kaynak bölgesinde takviye elemanının düzensiz dağıldığı ve çekme dayanımı yüksek çıkan SKK deneyine göre takviye elamanının daha az olduğu, kaynak sınırında takviye malzemesinin yığıldığı gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesi sertliğinin 75,80 Shore D, kaynak bölgesi sıcaklığının ise 100 °C olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlere göre çekme dayanımı en yüksek çıkan SKK deneyine göre kaynak bölgesi sertliğinin daha yüksek olduğu, kaynak bölgesi sıcaklığının ise daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 6.124. H tipi takım ile 1250 dev/dak ve 60 mm/dak'da SKK yapılmış parça en düşük ortalama çekme dayanımı; a) Önden görünüş, b) Kesit görünüş, c) Kaynak bölgesi 150X SEM görüntüsü, d) Kaynaktan etkilenen bölge 150X SEM görüntüsü.

SKK çekme deneylerinde kaynak çekme dayanımı performanslarının ana malzemeye göre düşük çıkmasının, mikro yapı incelemelerinde kaynak bölgesindeki cam elyaf takviye malzemelerinin düzensiz dağılmasına ve küçülerek azalmasına bağlı olduğu söylenebilir. Takviye malzemesinin küçülmesi, azalması ve düzensiz dağılması kompozit malzemelerde çekme dayanımına ve sertliğe etki eden en önemli faktörlerdir.

Çizelge 6.23. SKK parametreleri ve elde edilen sonuçlar.

Takım Tipi	*Takım Görünüşü*	*Takım Uç - Alın (Omuz) Özellikleri*		*Kaynak Parametreleri*		*Ortalama Sıcaklık Değerleri (°C)*	*Kaynak Bölgesi Ortalama Sertlik Değerleri (Shore D)*	*Ortalama Çekme Dayanımı Değerleri (N/mm²)*
		Uç Kanalı	*Alın (Omuz) Kanalı*	*Devir Sayısı (dev/dak)*	*İlerleme Hızı (mm/dak)*			
H		Tek Büyük	Tek Küçük	1000	40	96,12	74,20	7,063
					50	110,25	75,80	9,939
					60	99,00	72,00	7,295
				1125	40	113,83	75,00	4,836
					50	109,00	76,20	6,721
					60	102,00	73,80	4,672
				1250	40	102,31	74,80	7,664
					50	102,29	74,40	14,939
					60	100,00	75,80	2,623
M		Tek Büyük	İki Küçük	1000	40	97,83	74,00	9,740
					50	102,71	72,40	6,639
					60	102,83	75,60	9,167
				1125	40	101,17	74,80	10,218
					50	101,67	74,60	9,003
					60	104,50	73,80	9,699
				1250	40	98,88	72,40	9,344
					50	101,86	75,80	8,975
					60	109,00	72,60	10,273
O		Tek Büyük	Üç Küçük	1000	40	99,13	75,60	10,390
					50	100,57	74,80	8,402
					60	108,13	74,60	9,365
				1125	40	108,38	74,40	8,525
					50	106,63	74,20	7,418
					60	109,38	75,60	6,434
				1250	40	101,50	76,20	11,817
					50	101,00	74,60	3,948
					60	99,50	76,00	5,615

SKK deneylerinde kullanılan takım tipleri, kaynak parametreleri, SKK ortalama sıcaklık ölçüm değerleri, kaynak bölgesi ortalama sertlik değerleri ve ortalama çekme dayanımı değerleri Çizelge 6.23'de verilmiştir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Polipropilen matrisli %30 cam elyaf takviyeli malzemeler ile yapılmış olan sürtünme karıştırma kaynaklarına yapılan görsel incelemelerde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

Görsel olarak, H tipi takım ile 1000 dev/dak devir sayısı, 60 mm/dak ilerleme hızı kullanılan kaynaklarda iyi, 1125 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak ilerleme hızında iyi olmayan sonuçlar elde edilmiştir.

M tipi takım ile 1000 dev/dak devir sayısı, 60 mm/dak ilerleme hızı kullanılan kaynaklarda iyi, 1125 dev/dak devir sayısı ve 40 mm/dak ilerleme hızı kullanılan kaynaklarda iyi olmayan sonuçlar elde edilmiştir.

O tipi takım ile 1125 dev/dak devir sayısı, 60 mm/dak ilerleme hızı kullanılan kaynaklarda iyi, 1250 dev/dak devir sayısı ve 40 mm/dak ilerleme hızı kullanılan kaynaklarda iyi olmayan sonuçlar elde edilmiştir.

1000, 1125 ve 1250 dev/dak devir sayılarında SKK yapılan parçalardan, M tipi takım ile iyi, H tipi takım ile iyi olmayan sonuçlar elde edilmiştir.

40, 50, 60 mm/dak ilerleme hızlarında SKK yapılan parçalardan, 50, 60 mm/dak'da M tipi takım ile iyi, 40 mm/dak'da O tipi takım ile iyi ve 40, 50, 60 mm/dak'da H tipi takım ile iyi olmayan sonuçlar elde edilmiştir.

Görsel olarak en iyi sonuç, M tipi takım ile 1000 dev/dak devir sayısı, 60 mm/dak ilerleme hızında, en kötü sonuç ise H tipi takım ile 1125 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir.

Kaynak bölgesinde, azda olsa renk değişimi oluşmuştur. Bazı kaynaklarda ise aşırı renk değişimi (kararma - yanma) meydana gelmiştir.

Kaynak bölgesi üst yüzeyinde, takım alın (omuz) yüzeyinin aşırı dalmasından dolayı bazı parçalarda boşluk ve kaynak bölgesinde incelme (kalınlık düşmesi) olmuştur. En fazla incelme (kalınlık düşmesi) 1 mm'dir. Takım dalmasına bağlı olarak meydana gelen aşırı ısınma, yumuşamadan dolayı malzemenin kaynak bölgesinde tutulması zorlaşmış ve bir miktar malzeme kaynak bölgesi dışına taşınmıştır. Takım dalması olduğunda, genellikle ilerleme tarafında malzeme birikmesi (yığılma) ve çapak oluşmuştur. Geri çekme tarafında da boşluk oluşmuştur. Geri çekme tarafında oluşan boşluklar, genellikle kaynak yapılmamış yüzeyden kaynak bölgesine doğru gidildikçe bir kademe oluşturmuştur. Bazı parçalarda bu boşluklar kaynak tabanına doğru ilerlemiştir. Eslami vd. (2017), Karagöz (2014), Laieghi vd. (2020), Mishra vd. (2019), Sharma vd.'nin (2020) plastik malzemeler ile yapmış oldukları çalışmalarda da benzer hataların oluştuğu görülmüştür. Bu tür hataların oluşmaması için SKK takımının alın yüzeyinin parça yüzeyine çok iyi sıfırlanması ve kaynak yapılan parçaların sadece takım alın yüzeyi geçecek kadar boşluk bırakılarak kaynak bölgesine mümkün olduğunca yakın bölgelerden sabitlenmesi gerekmektedir.

Takım alın (omuz) yüzeyinin dalması ve boşluklardan dolayı kaynak bölgesinde oluşan incelme (kalınlık düşmesi), genellikle geri çekme tarafında meydana gelmiştir. Bunun sebebi takımın ilerleme tarafından aldığı malzemeyi karıştırdıktan sonra tekrar ilerleme tarafında yığarak sıkıştırması ve karıştırma esnasında dışarı atılan malzemeden dolayı kaynak bölgesindeki malzemenin yetersiz kalmasıdır. Yığma ilerleme tarafından başladığından dışarı atılan malzemelerden ve oluşan çapaklardan dolayı geri çekme tarafına yeteri kadar malzeme kalmaması bu boşlukların oluşmasına sebep olmaktadır. Eslami vd. (2015), Nelson vd. (2004), Strand'ın (2004) çalışmalarında kullandığı Bölüm 4'de detaylı olarak anlatılan sabit omuzlu takımlarla benzer özelliklere sahip takımlar kullanılarak malzemelerin dışarı atılması ve takım dalmaları önlenecektir.

Bütün parçalarda kaynak sonunda takımın çıktığı bölgede anahtar deliği olarak adlandırılan boşluk oluşmuştur. Eslami vd. (2017), Karagöz (2014), Mishra vd. (2019), Sharma vd. (2020) ve Ülker'in (2015) plastik malzemeler ile yapmış oldukları çalışmalarda da konu boşluğun oluştuğu görülmüştür. Kaynak başlangıç ve bitişine aynı

özellikli malzemenden küçük parçalar sabitlenip SKK bu parçalar içerisinde başlatılıp aynı şekilde parçalar içinde bitirilerek sorun ortadan kaldırılabilir. Maliyeti daha yüksek olan bir çözüm ise Almanya'da yerleşik Helmholtz-Zentrum Geesthacht araştırma merkezi tarafından geliştirilen İpekoğlu (2011) ve Ülker'in (2015) çalışmalarında bahsetmiş olduğu tekrar doldurmalı takımlar ile benzer özelliklere sahip takımların geliştirilmesidir.

Sürtünme karıştırma kaynaklarına yapılan sıcaklık ölçümlerinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

SKK esnasında kaynak bölgesi üst yüzeyinden ölçülen sıcaklık değerlerinin her SKK için aritmetik ortalaması hesaplandığında en düşük ortalama kaynak sıcaklık değeri 96,12 °C olarak H tipi takım ile 1000 dev/dak devir sayısı ve 40 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynaktan elde edilmiştir. En yüksek ortalama kaynak sıcaklık değeri ise 113,83 °C olarak H tipi takım ile 1125 dev/dak devir sayısı ve 40 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynaktan elde edilmiştir.

SKK başlangıç noktasından kaynak bitiş noktasına doğru gidildikçe kaynak sıcaklığı artmış bir noktadan sonra azda olsa bir miktar düşüş göstermiştir. Karagöz (2014) doktora çalışmasında PP ve PE malzemelere SKK uygulamış ve bu deneyler esnasında yapmış olduğu sıcaklık ölçümlerinde benzer sonuçlar elde etmiştir.

SKK yapılırken takım alın (omuz) yüzeyinin kaynak yapılan parçaların üzerine daldığı bölgelerde sıcaklık çok yükselmiş, dalma olmayan bölgelerde sıcaklıkta çok fazla değişim olmamıştır. Sıcaklık değerinin düşük olduğu kaynaklar incelendiğinde takım alın (omuz) yüzeyinin parçaların yüzeyine tam olarak temas etmediği parçalarda kaynak bölgesi sıcaklığının düşük olduğu, temasın veya takım dalmasının fazla olduğu kaynaklarda kaynak bölgesi sıcaklığının yüksek olduğu görülmüştür. Kaynak bölgesinin üst yüzeyinden sıcaklık ölçümleri yapıldığından takım alın (omuz) yüzeyinin sürtünmesinden kaynaklı sıcaklık değişiminin fazla olduğu ve kaynak sıcaklığından ziyade takım alın (omuz) yüzeyinin parçalar üzerinde oluşturduğu sıcaklığın ölçüldüğü anlaşılmaktadır. Bu sıcaklığın plastik malzemelerin ısı iletkenliğinin düşük olmasından dolayı kaynak bölgesi üst yüzeyi haricinde kaynak bölgesi alt yüzeyine direk olarak iletilmesi mümkün değildir fakat takımın ısınmasına bağlı olarak kaynak sıcaklığına etkisi olmaktadır. Takımların kırıldığı SKK deneylerindeki parçalardaki sıcaklık

ölçümleri incelendiğinde takımın kırıldığı bölgeden sonra sıcaklığın çok aşırı düşmediği görülmüştür. Buradan ölçülen sıcaklığın takım alın (omuz) yüzeyinin parçalar üzerinde oluşturduğu sıcaklık değerleri olduğu yani kaynak bölgesi sıcaklığı olmadığı anlaşılmaktadır.

H, M ve O tipi takımlar ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen sıcaklık değerlerinin, takım tipine göre ayrı ayrı ortalaması alınarak takım tipine bağlı sıcaklık değişimi incelenmiştir. H ve O tipi takımlar ile yapılan kaynakların sıcaklık değerlerinin ortalaması neredeyse aynı, M tipi takım ile yapılan kaynakların sıcaklık değerlerinin ortalaması diğer takımlara göre 1,6 °C daha düşüktür.

1000, 1125 ve 1250 dev/dak devir sayıları ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen sıcaklık değerlerinin, devir sayılarına göre ayrı ayrı ortalaması alınarak devir sayısına bağlı sıcaklık değişimi incelenmiştir. 1000 ve 1250 dev/dak devir sayıları ile yapılan kaynakların sıcaklık değerlerinin ortalaması neredeyse aynı, 1125 dev/dak devir sayısı ile yapılan kaynakların sıcaklık değerlerinin ortalaması diğer devir sayılarına göre 4,5 °C daha yüksektir.

40, 50 ve 60 mm/dak ilerleme hızları ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen sıcaklık değerlerinin, ilerleme hızına göre ayrı ayrı ortalaması alınarak ilerleme hızına bağlı sıcaklık değişimi incelenmiştir. 50 ve 60 mm/dak ilerleme hızları ile yapılan kaynakların sıcaklık değerlerinin ortalaması neredeyse aynı, 40 mm/dak ilerleme hızı ile yapılan kaynakların sıcaklık değerlerinin ortalaması diğer ilerleme hızlarına göre 1,8 °C daha düşüktür.

Sürtünme karıştırma kaynaklarına yapılan mikro yapı incelemelerinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

Kaynaktan etkilenmemiş bölge, kaynaktan etkilenen bölge ve kaynak bölgesinin taramalı elektron mikroskobunda 150X, 250X, 500X ve 1000X büyütmedeki SEM görüntüleri karşılaştırma yapılarak incelenmiştir. Kaynaktan etkilenmeyen bölgeden kaynak bölgesine doğru yaklaştıkça cam elyaf takviye malzemelerinin küçüldüğü, azaldığı ve kaynak bölgesi sınırlarında cam elyaf takviye malzemelerinin biriktiği görülmüştür. Buradan SKK takımının karıştırma esnasında cam elyaf takviye malzemelerini parçaladığı, bir kısmını toz halinde dışarı attığı ve bir kısmını da kaynak

sınırına yığdığı anlaşılmaktadır. Czigány ve Kiss (2011), tarafından 10 mm kalınlığında ağırlıkça %30 kısa (kırpılmış) cam elyaf takviyeli PP matrisli kompozit plakalara SKK uygulanmış ve kaynak sonrası yapılan SEM incelemelerinde kaynak bölgesindeki cam elyafların kaynak öncesine göre kesme kuvvetinin etkisiyle boyunun kısaldığı, kaynak sınırı ve kaynak bölgesinde rastgele dağıldığı gözlemlenmiştir. Kaynak yapılacak kompozit plakalardaki elyafların daha uzun olması durumunda, dikişteki ortalama elyaf uzunluğu daha fazla olacağından daha sağlam birleştirmelerin elde edilebileceğini ifade etmişlerdir. Bu bir çözüm olabilir fakat ana malzeme yapısından ziyade kaynak parametreleri ve takım geometrisi değiştirilerek bu sorunun çözülebileceği düşülmektedir. Bölüm 4'de detaylı olarak anlatılan MX-TrifluteTM tipi takımlara benzer keskin köşeleri olmayan kanallı takımlar tasarlanarak cam elyaf takviye malzemelerinin kırılmadan karıştırılması sağlanabilir. Daha yüksek devir sayıları veya daha düşük ilerleme hızları kullanılarak daha yüksek sıcaklıklar elde edilebilir bu sayede yumuşayan matris malzemesi içerisinde cam elyaf takviye malzemelerinin kırılmadan karıştırılması sağlanabilir.

Kaynak bölgesinde cam elyaf takviye malzemelerinin dağılımının düzensiz olduğu kaynaktan etkilenmeyen bölgeye doğru ilerledikçe cam elyaf takviye malzemelerinin dağılımının daha düzenli olduğu görülmüştür. Buradan sürtünme karıştırma kaynak takımının karıştırma esnasında cam elyaf takviye malzemelerinin dağılımını değiştirdiği anlaşılmaktadır.

Kaynak bölgesinde boşlukların olduğu görülmüştür. Buradan sürtünme karıştırma kaynak takımının karıştırma esnasında bir miktar malzemeyi kaynak bölgesi dışına attığı anlaşılmaktadır. SKK yapılırken malzemelerin dışarı atıldığı gözlemlenmiş olup, görsel incelemelerde de bu tür boşlukların oluştuğu görülmüştür. Eslami vd. (2015), Nelson vd. (2004), Strand'ın (2004) çalışmalarında kullandığı sabit omuzlu takımlara benzer takımlar tasarlanarak malzemelerin dışarı atılması önlenebilir.

SEM görüntüleri, SKK yapılan parçaların kesildikten sonraki görüntüsü ve SKK takım ucunun şekli birlikte incelendiğinde SKK sonrası SEM görüntülerinde oluşan kaynak sınırlarının şeklinin yaklaşık olarak SKK takımının uç şekli ile aynı olduğu görülmüştür. SKK sonrası meydana gelen yapıda kaynaktan etkilenmeyen bölge (ana malzeme) ile deformasyona uğrayarak tekrar sertleşen kaynak bölgesi birbirinden

belirgin bir şekilde ayrılmaktadır. Kaynak bölgesinin her iki tarafında kalan bölgedeki cam elyaf takviye malzemelerinin yoğunluğu belirgin bir şekilde fark edilmektedir. Bu farkın SKK esnasında kaynak bölgesinde yumuşayan ve takım ucu tarafından karıştırıldıktan sonra yeniden sertleşen kompozit malzemenin deformasyona uğramasından dolayı meydana geldiği düşünülmektedir.

Sürtünme karıştırma kaynaklarına yapılan sertlik ölçümlerinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

SKK yapılmış numunelere kaynak bölgesi, kaynaktan etkilenen bölge ve kaynaktan etkilenmeyen bölgeden (ana malzeme) sertlik ölçümleri yapılmıştır. Bu bölgelerin her birinden 5 ölçüm yapılarak her bölgenin ayrı ayrı ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır. Kaynak bölgesinde en yüksek ortalama sertlik değeri 76,2 Shore D, en düşük ortalama sertlik değeri ise 72 Shore D'dir. Kaynaktan etkilenen bölgede en yüksek ortalama sertlik değeri 77,4 Shore D, en düşük ortalama sertlik değeri ise 72,8 Shore D'dir. Kaynaktan etkilenmeyen bölgede en yüksek ortalama sertlik değeri 78,6 Shore D, en düşük ortalama sertlik değeri ise 75,2 Shore D'dir.

Kaynak bölgesindeki en yüksek ortalama sertlik değeri olan 76,2 Shore D, H tipi takım ile 1125dev/dak devir sayısı, 50 mm/dak ilerleme hızında ve O tipi takım ile 1250 dev/dak devir sayısı, 40 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynaklarda elde edilmiştir. Kaynak bölgesindeki en düşük ortalama sertlik değeri olan 72 Shore D, H tipi takım ile 1000 dev/dak devir sayısı ve 60 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynakta elde edilmiştir.

Kaynak bölgesi ortalama sıcaklığı ile kaynak bölgesi ortalama sertlik değeri arasındaki bağıntı incelenmiş, sertlik ve sıcaklık değerlerinden faydalanılarak doğrusal sertlik çizgisi elde edilmiştir. Doğrusal sertlik çizgisi incelendiğinde sıcaklık artıkça sertlik artmaktadır.

SKK yapılan bütün parçaların sertlik ölçümü yapılan bölgelerindeki sertlik değerlerinin, bölgelere göre ayrı ayrı ortalaması hesaplandığında kaynak bölgesinden kaynaktan etkilenmeyen bölgeye (ana malzemeye) doğru gidildikçe ortalama sertlik değeri artmaktadır. Kaynak bölgesi sertliğinin düşük çıkması ile mikro yapı incelemelerinde belirlenmiş olan kaynaktan etkilenmeyen bölgeden kaynak bölgesine

doğru yaklaştıkça cam elyaf takviye malzemelerinin küçülerek azalmasının bağlantılı olduğu anlaşılmaktadır.

H, M ve O tipi takımlar ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen kaynak bölgesi sertlik değerlerinin, takım tipine göre ayrı ayrı ortalaması alınarak takım tipine bağlı sertlik değişimi incelenmiştir. H ve O tipi takımlar ile yapılan kaynakların kaynak bölgesi sertlik değerlerinin ortalamasından, M tipi takım ile yapılan kaynakların kaynak bölgesi sertlik değerlerinin ortalaması daha düşüktür. SKK kaynak bölgesi sıcaklık ortalamasının, düşük olduğu takımda kaynak bölgesi sertlik ortalamasının da düşük olduğu görülmüştür.

1000, 1125 ve 1250 dev/dak devir sayıları ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen kaynak bölgesi sertlik değerlerinin, devir sayılarına göre ayrı ayrı ortalaması alınarak devir sayısına bağlı sertlik değişimi incelenmiştir. 1125 ve 1250 dev/dak devir sayıları ile yapılan kaynakların kaynak bölgesi sertlik değerlerinin ortalaması neredeyse aynı, 1000 dev/dak devir sayısı ile yapılan kaynakların kaynak bölgesi sertlik değerlerinin ortalaması diğer devir sayılarına göre ~0,40 Shore D daha düşüktür. SKK kaynak bölgesi sertlik ortalaması en yüksek, 1250 dev/dak devir sayısı ile yapılan kaynaklardan elde edilmiştir.

40, 50 ve 60 mm/dak ilerleme hızları ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen kaynak bölgesi sertlik değerlerinin, ilerleme hızlarına göre ayrı ayrı ortalaması alınarak ilerleme hızına bağlı sertlik değişimi incelenmiştir. Bütün ilerleme hızları ile yapılan kaynakların kaynak bölgesi sertlik değerlerinin ortalaması neredeyse aynı olup, aralarındaki fark en fazla 0,33 Shore D'dir. SKK kaynak bölgesi sertlik ortalaması en yüksek, 50 mm/dak ilerleme hızı ile yapılan kaynaklardan elde edilmiştir.

Sürtünme karıştırma kaynaklarına yapılan çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

Çekme deney numunelerinin genelinde belirgin akma görülmediğinden Akma dayanımı tespit edilememiştir. Genellikle numunelerin gevrek olduğu yani sünek bir kopma özelliği göstermediği tespit edilmiştir. Kopma uzama değerleri incelendiğinde de kaynaklı numunelerin çekme uzama yüzdesi plakaların imalatından sonra elde edilen kopma uzamasına (%10,848) göre çok düşüktür. Çekme deneyleri sonrası en yüksek

kopma uzaması %3,855 olarak H tipi takım ile 1000 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynakta elde edilmiştir. Çekme deneyleri sonrası en düşük kopma uzaması %2,055 olarak H tipi takım ile 1250 dev/dak devir sayısı ve 40 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynakta elde edilmiştir. Çekme numunelerinin çekme deneyleri sonrasında kopma bölgeleri incelenmiş, kopma genellikle kaynak sınırlarından başlayıp herhangi bir boyun verme olmadan gerçekleşmiştir. Bu da yine kaynakların gevrek bir yapaya sahip olduğunu göstermektedir.

SSK yapılmış numunelere her kaynak parametresinde yapılan SKK deneylerinden elde edilen çekme dayanımlarının ayrı ayrı aritmetik ortalaması hesaplandığında en yüksek çekme dayanımı ortalaması 14,939 N/mm² olup H tipi takım ile 1250 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynakta elde edilmiştir. En düşük çekme dayanımı ortalaması ise 2,623 N/mm² olup H tipi takım ile 1250 dev/dak devir sayısı ve 60 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynakta elde edilmiştir. En yüksek ve en düşük çekme dayanımı ortalaması, H tipi takım ile yapılan SKK deneylerinden elde edilmiştir. En yüksek ve en düşük çekme dayanımı elde edilen SKK numunelerinin kaynak bölgesi mikro yapıları ve sıcaklık değerleri karşılaştırma yapılarak incelenmiştir. Çekme dayanımı yüksek çıkan numunelerde cam elyaf takviye malzemelerinin daha yoğun olduğu ve daha uzun olduğu aynı zamanda kaynak bölgesi üst yüzeyinden ölçülen sıcaklığın daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kaynak bölgesi sıcaklığı arttıkça daha iyi yumuşayan matris malzemesi içerisinde cam elyaf takviye malzemelerinin kırılmadan karıştırılabildiği anlaşılmaktadır. Eslami vd. (2017), Hajideh vd. (2017), Karagöz (2014), Nath vd. (2019), Sahu vd. (2018), Sharma vd. (2020) ve Strand (2004) plastik esaslı malzemeler ile yaptıkları çalışmalarda daha yüksek sıcaklıklarda daha iyi SKK performansları elde ettiklerini bildirmişlerdir.

SKK yapılmış parçaların, plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş olan malzemelerin çekme dayanımına (61,246 N/mm²) göre performansı değerlendirildiğinde en düşük performans %4,283 (2,623 N/mm²), en yüksek performans %24,391 (14,939 N/mm²) olarak elde edilmiştir. Payganeh vd. (2011), PP matrisli ağırlıkça %30 kısa (kırpılmış) cam elyaf takviyeli kompozit plakalara SKK uygulayarak, çalışmalarında en yüksek 9 N/mm^2 çekme dayanımı ile ana malzeme çekme dayanımının %25'i oranında performans elde etmişlerdir. Ahmadi vd. (2012),

%20 karbon elyaf takviyeli PP matrisli kompozit plakalara bindirme SKK uygulayarak, çalışmalarında en yüksek 5,70 N/mm^2 çekme makaslama dayanımı ile ana malzeme çekme dayanımının %19'u oranında performans elde etmişlerdir.

H, M ve O tipi takımlar ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen çekme dayanım değerlerinin, takım tipine göre ayrı ayrı ortalaması alınarak takım tipine bağlı çekme dayanımı değişimi incelenmiştir. M tipi takım ile yapılan kaynakların çekme dayanım değerlerinin ortalaması diğer takımlar ile yapılan kaynaklara göre daha yüksek, H tipi takım ile yapılan kaynakların çekme dayanım değerlerinin ortalaması ise diğer takımlar ile yapılan kaynaklara göre daha düşüktür. Görsel incelemelerde de en düzgün kaynakların M tipi takım ile iyi olmayan kaynakların da H tipi takımla yapıldığı tespit edilmiştir. Ortalama çekme dayanım değerlerine ve takım tipine göre inceleme yapıldığında görsel olarak iyi sonuçlar elde edilen kaynakların çekme dayanımlarının ortalamasının daha yüksek olduğu, görsel olarak iyi olmayan sonuçların elde edildiği kaynakların çekme dayanımlarının ortalamasının daha düşük olduğu söylenebilir.

1000, 1125 ve 1250 dev/dak devir sayıları ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen çekme dayanım değerlerinin, devir sayılarına göre ayrı ayrı ortalaması alınarak devir sayısına bağlı çekme dayanımı değişimi incelenmiştir. 1000 dev/dak devir sayısı ile yapılan kaynakların çekme dayanım değerlerinin ortalaması diğer devir sayıları ile yapılan kaynaklara göre daha yüksek, 1125 dev/dak devir sayısı ile yapılan kaynakların çekme dayanım değerlerinin ortalaması ise diğer devir sayıları ile yapılan kaynaklara göre daha düşüktür. Görsel incelemelerde de en düzgün kaynakların 1000 dev/dak devir sayısı ile iyi olmayan kaynakların da 1125 dev/dak devir sayısı yapıldığı tespit edilmiştir.

40, 50 ve 60 mm/dak ilerleme hızları ile yapılan SKK deneylerinin tamamından elde edilen çekme dayanım değerlerinin, ilerleme hızlarına göre ayrı ayrı ortalaması alınarak ilerleme hızına bağlı çekme dayanımı değişimi incelenmiştir. 40 mm/dak ilerleme hızı ile yapılan kaynakların çekme dayanım değerlerinin ortalaması diğer ilerleme hızları ile yapılan kaynaklara göre daha yüksek, 60 mm/dak ilerleme hızı ile yapılan kaynakların çekme dayanım değerlerinin ortalaması ise diğer ilerleme hızları ile yapılan kaynaklara göre daha düşüktür. Ortalama çekme dayanım değerlerine ve ilerleme hızına göre inceleme yapıldığında ilerleme hızı arttıkça ortalama çekme

dayanımının düştüğü söylenebilir. Payganeh vd. (2011), PP matrisli ağırlıkça %30 kısa (kırpılmış) cam elyaf takviyeli kompozit plakalara SKK uygulamışlar ve ilerleme hızını arttırdıkça çekme dayanımının düştüğünü ifade etmişlerdir. Daha önce Karagöz (2014), Strand (2004) ve Şelale (2006) tarafından plastik esaslı malzemeler ile SKK yapılan çalışmalarda da benzer şekilde düşük ilerleme hızlarında daha iyi mekanik değerler elde edildiği görülmüştür.

Kaynak bölgesi ortalama sıcaklığı ile ortalama çekme dayanımı arasındaki bağıntı incelenmiş, çekme dayanımı ve sıcaklık değerlerinden faydalanılarak doğrusal çekme dayanımı çizgisi elde edilmiştir. Doğrusal çekme dayanımı çizgisi incelendiğinde sıcaklık artıkça çok azda olsa çekme dayanımı artmaktadır. Daha önce Eslami vd. (2017), Hajideh vd. (2017), Karagöz (2014), Nath vd. (2019), Sahu vd. (2018), Sharma vd. (2020) ve Strand (2004) tarafından plastik esaslı malzemeler ile yapılan çalışmalarda da daha yüksek sıcaklıklarda daha iyi mekanik değerler elde edildiği görülmüştür.

Kaynak bölgesi ortalama sertlik ile ortalama çekme dayanımı değerleri arasındaki bağıntı incelenmiş, çekme dayanımı ve kaynak bölgesi sertlik değerlerinden faydalanılarak doğrusal çekme dayanımı çizgisi elde edilmiştir. Doğrusal çekme dayanımı çizgisi incelendiğinde kaynak bölgesi sertlik değeri artıkça çekme dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Daha önce Karagöz (2014) tarafından yapılan doktora çalışmasında PP ve PE malzemelere SKK uygulanmış ve yapılan sertlik ölçümlerinde benzer şekilde kaynak bölgesi sertlik değeri düştükçe mekanik değerlerin arttığı görülmüştür.

En yüksek ortalama çekme dayanımının elde edildiği SKK yapılmış parçaların çekme dayanımı, kaynak bölgesi sertlik değeri, kayak bölgesi sıcaklığı, mikro yapı görüntüleri ve SKK sonrası görüntüleri birlikte incelenmiştir. En yüksek ortalama çekme dayanımı elde edilen SKK deneyinin, görsel incelemelerinde çok fazla boşluk, takım dalması, kalınlık düşmesi, çapak ve renk değişiminin olmasından dolayı iyi olarak değerlendirilemeyecek bir kaynak olduğu düşünülmektedir. Aynı şekilde mikro yapı incelemelerinde de kaynak bölgesinde boşluk olduğu, kaynak bölgesinde takviye elemanının düzensiz dağıldığı ve azaldığı, kaynak sınırında takviye malzemesinin yığıldığı gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesi sertliği 74,40 Shore D, kaynak bölgesi

sıcaklığı ise 102,29 °C'dir. En yüksek ve en düşük çekme dayanımı elde edilen SKK numunelerinin kaynak bölgesi mikro yapıları ve sıcaklık değerleri karşılaştırma yapılarak incelenmiştir. Çekme dayanımının yüksek çıktığı numunelerde görsel olarak iyi olmayan sonuçlar elde edilmiş olsa da mikro yapıdaki cam elyaf takviye malzemelerinin daha yoğun olduğu ve daha uzun olduğu aynı zamanda kaynak bölgesi üst yüzeyinden ölçülen sıcaklığın daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi de kaynak bölgesi sıcaklığı arttıkça daha iyi yumuşayan matris malzemesi içerisinde cam elyaf takviye malzemelerinin kırılmadan karıştırılmasıdır.

En düşük ortalama çekme dayanımının tespit edildiği SKK yapılmış parçaların çekme dayanımı, kaynak bölgesi sertlik değeri, kayak bölgesi sıcaklığı, mikro yapı görüntüleri ve SKK sonrası görüntüleri birlikte incelenmiştir. En düşük ortalama çekme dayanımı elde edilen SKK deneyinin, görsel incelemelerinde iyi olarak değerlendirilebilecek bir kaynak olduğu, mikro yapı incelemelerinde kaynak bölgesinde boşluk olmadığı, kaynak bölgesinde takviye elemanının düzensiz dağıldığı ve çekme dayanımı yüksek çıkan SKK deneyine göre takviye elamanının daha az olduğu, kaynak sınırında takviye malzemesinin yığıldığı gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesi sertliği 75,80 Shore D, kaynak bölgesi sıcaklığı ise 100 °C'dir. En yüksek ve en düşük çekme dayanımı elde edilen SKK numunelerinin kaynak bölgesi mikro yapıları ve sıcaklık değerleri karşılaştırma yapılarak incelenmiştir. Çekme dayanımının düşük çıktığı numunelerde görsel olarak iyi sonuçlar elde edilmiş olsa da mikro yapıdaki cam elyaf takviye malzemelerinin daha az olduğu ve daha kısa olduğu aynı zamanda kaynak bölgesi üst yüzeyinden ölçülen sıcaklığın daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Kaynak bölgesi sıcaklığı düştükçe daha az yumuşayan matris malzemesi karıştırma esnasında içerisindeki cam elyaf takviye malzemelerinin kırılmadan karıştırılmasını sağlayamamıştır.

Kaynak bölgesindeki takviye elemanının boyutu ve dağılımının kaynak performansını çok fazla etkilemesine rağmen kaynak yüzeyinde oluşan boşluk ve çapakların kaynak performansını daha az etkilediği tespit edilmiştir. Daha iyi kaynak yüzey kalitesinin elde edilebileceği ve kaynak bölgesindeki takviye elemanlarını kırmadan karıştırabilecek takım tasarımının sağlanması gerekmektedir. Bölüm 4'de detaylı olarak anlatılan MX-TrifluteTM tipi takımlara benzer keskin köşeleri olmayan

kanallı takımlar tasarlanarak cam elyaf takviye malzemelerinin kırılmadan karıştırılması sağlanabilir. Tasarlanacak takıma kaynak yüzey kalitesini sağlamak için Eslami vd. (2015), Nelson vd. (2004), Strand'ın (2004) çalışmalarında kullandığı sabit omuzlu takımlara benzer şekilde bir sabit omuz eklenebilir.

SKK çekme deneylerinde kaynak çekme dayanımı performanslarının ana malzemeye göre düşük çıkmasının, mikro yapı incelemelerinde kaynak bölgesindeki cam elyaf takviye malzemelerinin düzensiz dağılmasına ve küçülerek azalmasına bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Kompozit malzemeler ile ilgili daha önce Akdoğan Eker (2008), Ekşi (2007), Güllü vd. (2001), Hüner (2014), Kocabaş (2014), Yaşar ve Arslan (2000) tarafından yapılmış olan çalışmalarda, kompozit malzemelerde çekme dayanımına ve sertliğe etki eden en önemli faktörlerin takviye malzemesinin küçülmesi (boyunun kısalması), azalması ve düzensiz dağılmasının olduğu görülmüştür.

Farklı kaynak parametreleri (ilerleme hızı, devir sayısı, takım eğim açısı vb.) ve farklı SKK takım uç geometrileri (cam elyaf takviye malzemelerini kırmadan daha iyi karıştırabilecek) kullanılarak SKK yapılabilir ve elde dilecek sonuçlar bu çalışmadaki sonuçlar ile karşılaştırabilir. Daha yüksek takım devir sayısı veya daha düşük ilerleme hızı kullanılması durumunda sürtünmeye bağlı olarak daha fazla ısı elde edilebileceği için matris malzemesi daha fazla yumuşayacaktır takviye malzemelerinin daha iyi yumuşayan matris malzemesi içerisinde kırılmadan karıştırılası sağlanabilir. Ayrıca değişik takım uç geometrilerine sahip MX-TrifluteTM tipi takımlara benzer keskin köşeleri olmayan kanallı takımlar tasarlanarak cam elyaf takviye malzemeleri, kırılmadan veya daha az hasar görerek karıştırılabilir. Daha büyük çaplı takım uçları kullanılması durumunda takviye elemanı eğilme zorlanmasıyla ulaşabileceği en yüksek eğrilik yarıçapına (kırılma yarıçapı) ulaşmadan yani hasar almadan karıştırılabilir. Bölüm 4.5'de detaylı olarak açıklaması yapılan hibrit sürtünme karıştırma kaynağı uygulanması durumunda da kaynak bölgesi önceden başka bir ısı kaynağı ile ısıtılacağından matris malzemesi daha yumuşak olacaktır ve takviye malzemesi matris malzemesi içerisinde kırılmadan karıştırılabilecektir. Böylece daha iyi kaynak performansları elde edilebilecektir. Burada dikkat edilmesi gereken husus kaynak bölgesi sıcaklığının ana malzeme camsı geçiş sıcaklığının (Tg) üzerinde bir sıcaklık değerinde ve ergime sıcaklığının (Te) altında bir sıcaklık değerinde tutulmasıdır.

SKK takım alın (omuz) geometrisi, kaynak esnasında yumuşayan ve takım ucu tarafından dışarı atılmaya çalışılan malzemelerin kaynak bölgesinde tutulmasını sağladığından buna uygun takım alın (omuz) geometrileri kullanılarak SKK yapılabilir ve elde edilecek sonuçlar bu çalışmadaki sonuçlar ile karşılaştırabilir. Yumuşayan plastik malzemeyi kaynak bölgesi içerisinde tutmak için sabit omuzlu takımların kullanılması durumunda kaynak bölgesinden dışarı malzeme atılmayacağından daha iyi kaynak performansları elde edilebilecektir.

Farklı oranlara sahip plastik matrisli kompozit malzemeler ve farklı kalınlıklarda kompozit malzemeler kullanılarak SKK yapılabilir ve elde edilecek sonuçların bu çalışmadaki sonuçlar ile benzerlik gösterip göstermediği incelenebilir.

Bu yöntemin endüstride yaygın olarak kullanılabilmesi için oldukça zor olsa da her malzeme için kaynak parametrelerinin takım şekillerinin ve ölçülerinin net belirlenmesi kaynaklar için gerekli kaynak prosedürlerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu bilgilerin elde edilebilmesi için de daha fazla deneysel çalışmanın yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Ahmadi, H., Mostafa Arab, N. B., Ashenai Ghasemi, F. & Eslami Farsani, R. (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.

Akata, E. H., Şahin, M. & İpekçi, M. T. (2003 Ekim). *Atık Parçaların Değerlendirilmesinde Sürtünme Kaynak Yönteminin Kullanılması Üzerine Bir Çalışma.* Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresinde sunulan bildiri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Kocaeli.

Akata, E. H. & Şahin, M. (2003). An Investigation on The Effect of Dimensional Differences in Friction Welding of AISI 1040 Specimens. *Industial Lubrication & Tribology, 55*(5), 223-232.

Akdoğan Eker, A. (2009). Plastiklerin Başlıca Kullanım Alanları [PDF belgesi]. Ders Notu: 28 Mart 2020 tarihinde https://docplayer.biz.tr/2203802-Plastiklerin-baslica-kullanim-alanlari-05-03-2009-prof-dr-aysegul-akdogan-eker.html adresinden erişildi.

Akdoğan Eker, A. (2008). Plastik Matrisli Kompozitler [PDF belgesi]. Ders Notu: 28 Mart 2020 tarihinde https://www.scribd.com/document/92505225/Plastik-Matrisli-Kompozitler adresinden erişildi.

Akkurt, S. (2007). *Plastik Malzeme Bilimi Teknolojisi ve Kalıp Tasarımı.* İstanbul: Birsen.

Anık, S., Oğur, A. & Karakaya, Ç. (2003 Ekim). *Plastik Malzeme Kaynağının Memleketimizdeki Uygulamaları ve Önemi.* Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresinde sunulan bildiri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Kocaeli.

Aran, A. (2008). Mal 201 – Malzeme Bilgisi [PDF belgesi]. Ders Notu: 27 Mart 2020 tarihinde http://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/mal201.pdf adresinden erişildi.

Arıcasoy, O. (2006). *Kompozit Sektör Raporu* (İstanbul Ticaret Odası, 4) İstanbul: İTO

Arıcı, A. A & Ertürk, A. T. (2007 Kasım). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Polietilen Levhalarda Kaynak Bölgesi Özelliklerinin Belirlenmesi.* 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansında sunulan bildiri, İstanbul.

Arıcı, A. & Sınmazçelik, T. (2005). Effects of Double Passes of The Tool on Friction Stir Welding of Polyethylene. *Journal of Material Science, 40*, 3313-3316.

Arıcıoğlu, M. K., Mert, B. & Soydan, Y. (2000). Polimer Malzemelerin Mekanik Analiz Yöntemleri. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4*(1-2), 51-58.

Ay, İ. (2012). Plastik Malzemeler [PDF belgesi]. Ders Notu: 28 Mart 2020 tarihinde http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/pm/plastikte.mek2.pdf adresinden erişildi.

Aydınlar. (2020a). 10 Mart 2020 tarihinde http://www.aydinlarmakmet.com.tr/menudetay.asp?ids=79&menu=CAST%20POLYAM%DDD%20%C7UBUK%20VE%20LEVHA adresinden erişildi.

Aydınlar. (2020b). 10 Mart 2020 tarihinde http://www.aydinlarmakmet.com.tr/menudetay.asp?ids=77&menu=PTFE%20%C7UBUK%20VE%20LEVHA adresinden erişildi.

Aydınlar. (2020c). 10 Mart 2020 tarihinde http://www.aydinlarmakmet.com.tr/menudetay.asp?ids=75&menu=POL%DDET%DDLEN%20%C7UBUK%20VE%20LEVHA adresinden erişildi.

Aydınlar. (2020d). 10 Mart 2020 tarihinde http://www.aydinlarmakmet.com.tr/menudetay.asp?ids=82&menu=POL%DDPROPLEN%20(P.P)%20%C7UBUK%20VE%20LEVHA adresinden erişildi.

Balkan, O. (1999). *Sıcak Gaz Kaynağı İle Plastiklerin Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Banjare, P. N., Sahlot, P. & Arora, A. (2017). An Assisted Heating Tool Design For FSW of Thermoplastics. *Journal of Materials Processing Technology, 239*, 83-91.

Bayraktar, Ö. (2016). *Öngerilimli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretimi İçin Sistem Tasarımı, İmalatı ve Kompozit Malzeme Üretimi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Bilici, M. K., Yükler, A. İ. & Fidaner, O. (2012 Kasım). *Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Etkileri.* 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresinde sunulan bildiri, TİMAK, Balıkesir.

Bilici, M. K., Yükler, A. İ. & Kurtulmuş, M. (2012). Polietilen Levhaların Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Performansına Etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27*(2), 439-445.

Bilici, M. K. (2011). *Polietilenin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Özellikleri.* (Yayımlanmamış doktora tezi). Marmara Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Bilici, M. K., Yükler, A. İ. & Kurtulmuş, M. (2011). Yüksek Yoğunluklu Polietilen Levhaların Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında Kaynak Ucu Geometrisinin Kaynak

Mukavemetine Etkisi. *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 23*(3), 111-122.

Borchenorthamerica. (2020). 18 Mayıs 2020 tarihinde https://www.borchenorthamerica.com/images/pdf/BSseries.pdf adresinden erişildi.

Bozu, M. (2007). *Sürtünme Karıştırma Kaynağında Farklı Kaynak Parametrelerinin Deneysel Olarak İncelenmesi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Czigány, T. & Kiss, Z. (2011 Ağustos). *Friction Stir Welding of Fiber Reinforced Polymer Composites.* 18th International Conference on Composite Materials sunulan bildiri, Jeju Island, Korea.

Çağlarer, E. (2004). *Plastik Esaslı Kompozit Malzemelerde Takviye Türü ve Oranına Bağlı Olarak Çeşitli Ortam Koşullarında Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Trakya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Çam, G. (2005). Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK): Al-Alaşımları İçin Geliştirilmiş Yeni Bir Kaynak Teknolojisi. *Mühendis ve Makine Dergisi, 46*(541), 30-39.

Derazkola, H. A., Simchi, A. & Lambiase, F. (2019). Friction Stir Welding of Polycarbonate Lap Joints: Relationship Between Processing Parameters and Mechanical Properties. *Polymer Testing 79,* 1-9.

Ekşi, O. (2007). *Plastik Esaslı Malzemelerin Isıl Şekil Verme Özelliklerinin İncelenmesi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Trakya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Er, U. (2004). Havacılık Sanayinde Kullanılan Plastik Matrisli Kompozit Malzemeler. 27.06.2011 tarihinde http://www.hho.edu.tr/huten/2003-2004/havacılık sanayinde kullanılan plastik matrisli_kompozit malzemeler.html adresinden erişildi.

Eslami, S., Tavares, P. J. & Moreira, P. M. G. P. (2017). Friction Stir Welding Tooling For Polymers: Review and Prospects. *Int J Adv Manuf Technol, 89*, 1677-1690.

Eslami, S., Ramos, T., Tavares, P. J. & Moreira, P. M. G. P. (2015). Effect of Friction Stir Welding Parameters With Newly Developed Tool For Lap Joint of Dissimilar Polymers. *Science Direct Procedia Engineering, 114*, 199-207.

Goli Bidgoli, M., Ranjbaran, A., Mirzavand, K., Shajari, Y., Seyedraoufi, Z. S. & Porhonar, M. (2019). Investigation of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Welding with a New Tool in Friction Stir Welding Method. *International Journal of Engineering, 32*(6), 860-865.

Güldaş, A., Çankaya, A. Güllü, A. & Gürü, M. (2014). Çinko Borat Katkılı Polipropilen'in Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29*(2), 227-234.

Güllü, A., Özdemir, E. & Demir, H. (2001). Enjeksiyon Parametrelerinin Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen (PP) ve Naylon 6 (PA6) Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5*(1), 11-19.

Hajideh, M. R., Shapurgan, O., Ramzani, N. M. & Nejad, E. H. (2017). Friction Stir Welding of Dissimilar Poly Methyl Methacrylate and Polycarbonate Sheets. *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, *6*(4), 35-46.

Hasçalık, A., Çaydaş, U., Ünal, E. & Karaca, F. (2007). AA 5251 Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilebilirliğine Uç Geometrisinin Etkisi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 4*, (1-7).

Hüner, Ü. (2014). *Çeşitli Elyaflarla Takviye Edilmiş Termoplastik Kompozitlerin Levha Ekstrüzyonunun ve Özelliklerinin İncelenmesi.* (Yayımlanmamış doktora tezi). Trakya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

İpekoğlu, G. (2011). *Kaynak Sonrası Isıl İşlemin Sürtünme Karıştırma Kaynaklı AA6061 ve AA7075 Alüminyum Alaşımı Levhalarda İçyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi*. (Yayımlanmamış doktora tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi /Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Jaiganesh, V., Maruthu, B. & Gopinath, E. (2014). Optimization of Process Parameters on Friction Stir Welding of High Density Polypropylene Plate. *Science Direct Procedia Engineering, 97*, 1957-1965.

Kalaycıoğlu, A. S. (2010). *SiC Tane Katkılı Aluminyum Kompozitlerin Toz Metalurjisi İle Üretimi ve Karakterizasyonu.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Karagöz, İ. & Öksüz, M. (2018). Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilmesinde Kaynak Bölgesinde Meydana Gelen Mikroyapılar. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33*(2), 503-515.

Karagöz, İ. & Öksüz, M. (2016). Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kullanılan Yöntemler. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31*(1), 19-27.

Karagöz, İ. (2014). *Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynak Özellikleri.* (Yayımlanmamış doktora tezi). Marmara Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kaştan, A., Yalçın, Y., Ünal, H. & Talaş, Ş. (2015). PA 6/ YYPE / Nanokil Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 015702*, 9-20.

Kıralp, S., Özkoç, G., Erdoğan, S., Çamurlu, P., Baydemir, T. & Doğan, M. (2006). *Plastikler*. Ankara: ODTÜ.

Kiss, Z. & Czigány, T. (2007). Applicability of Friction Stir Welding in Polymeric Materials. *Rperiodica Polytechnica Mechanical Engineering 51*(1), 15-18.

Kocabaş, G. B. (2014). *Cam Elyaf Takviyeli PA 6.6 nın Enjeksiyon Prosesinin Simülasyon Yoluyla Analizi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Hitit Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.

Köse, E. (2006). *Plastik Enjeksiyonda Proses ve Kalıp Kaynaklı Sorunların Giderilmesi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi).İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Laieghi, H., Alipour, S. & Mostafapour, A. (2020). Heat-assisted Friction Stir Welding of Polymeric Nanocomposite. *Science and Technology of Welding and Joining, 25*(1), 56-65.

Lambiase, F., Grossi, V. & Paoletti, A. (2019). Advanced Mechanical Characterization of Friction Stir Welds Made on Polycarbonate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104,* 2089-2102.

Mavicelik. (2020a). 18 Mayıs 2020 tarihinde http://www.mavicelik.com.tr/celik-cesitleri/islah-celikleri/ adresinden erişildi.

Mavicelik. (2020b). 29 Mayıs 2020 tarihinde http://www.mavicelik.com.tr/celik-cesitleri/takim-celikleri/ adresinden erişildi.

Merkezlab. (2020). 15 Haziran 2020 tarihinde http://merkezlab.nku.edu.tr/Taramal%C4%B1ElektronMikroskobu(SEM)/0/s/5472/5923 adresinden erişildi.

Mert, Ş. (2010). *Polipropilen Malzemenin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı İle Birleştirilmesi.* (Yayımlanmamış doktora tezi). Kocaeli Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Mert, Ş. & Kaluç, E. (2003 Ekim). *Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlardaki Gelişmeler.* Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi sunulan bildiri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Kocaeli.

Mishra, D., Sahu, S. K., Mahto, R. P., Pal, S. K. & Pal, K. (2019). Friction Stir Welding For Joining of Polymers. *Springer Nature Singapore Pte Ltd., 6*, 123-162.

Nath, R. K., Maji, P. & Barma, J. D. (2019). Development of a Self-Heated Friction Stir Welding Tool For Welding of Polypropylene Sheets . *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41*(553), 1-13.

Nelson, W. T., Sorenson, C. D. & Johns, C. J. (2004). Friction Stir Welding of Polymeric Materials. *United States Patent, US 6,811,632 B2*, 1-35.

Panneerselvam, K., Aravindan, S. & Noorul Haq, A. (2004). Joining of Plastics By Frictional Vibration. *International Symposium of Research Students on Materials Science and Engineering,* 1-5.

Payganeh, G. H., Mostafa Arab, N. B., Dadgar Asl, Y., Ghasemi, F. A. & Saeidi Boroujeni, M. (2011). Effects of Friction Stir Welding Process Parameters on Appearance and Sstrength of Polypropylene Composite Welds. *International Journal of the Physical Sciences, 6*(19), 4595-4601.

Polyone. (2020). 17 Mayıs 2020 tarihinde https://catalog.ides.com/Datasheet.aspx?I=19843&FMT=PDF&E=281710&SKEY=19843.1484624.208164951%3Ad875c9a4-dc97-4c1b-b655-59ff1f02b613&CULTURE=en-US& adresinden erişildi.

Röchling. (2020). 16 Mayıs 2020 tarihinde https://www.roechling-industrial.com/materials/thermoplastics/showpdf?selectedUid=1663&cHash=38b9bc48e06f3dac28afe268106fe8b1 adresinden erişildi.

Sahu, S. K., Mishra, D., Mahto, R. P., Sharma, V. M., Pal, S. K., Pal, K., Banerjee, S. & Dash, P. (2018). Friction Stir Welding of Polypropylene Sheet. *Engineering Science and Technology, an International Journal, 21*, 245-254.

Savaşçı, Ö. T., Uyanık, N. & Akovalı, G. (2002). *Ana Hatları ile Plastikler ve Plastik Teknolojisi*. İstanbul: Pagev.

Sharma, A. K. R., Choudhury, M. R. & Debnath, K. (2020). Experimental İnvestigation of Friction Stir Welding of PLA. *Welding in the World, 64*, 1011-1021.

Sınmazçelik, T. (2001 Kasım). *Makina Elemanlarında Kompozit Malzeme Kullanımı, Özellikleri ve Tasarım İlkeleri.* Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresinde sunulan bildiri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Konya.

Squeo, E. A., Bruno, G., Guglielmotti, A. & Quadrini, 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.

Strand, S. R. (2004). *Effects of Friction Stir Welding On Polymer Microstructure.* (Master of Science). Brigham Young University Department of Mechanical Engineering, Utah, USA.

Şahin, M. (2005). An Investigation into Joining of Austenitic Stainless Steels (AISI 304) with Friction Welding. *Assembly Automation, 25*(2), 140-145.

Şahin, M. (2001). *Sürtünme Kaynağıyla Birleştirmede Parça Boyutları ve Plastik Şekil Değiştirmenin Etkilerinin Araştırılması.* (Yayımlanmamış doktora tezi). Trakya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Şahin, Y. (2000). *Kompozit Malzemelere Giriş*. Ankara: Gazi.

Şelale, S. (2006). *Polietilen Malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Kocaeli Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Tanboğa, B. (2007). *Darbe Altındaki Elyaf Takviyeli Kompozit Tüpün Sonlu Elemanlar Modellemesi İle İncelenmesi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Teknolüks. (2020). 10 Mart 2020 tarihinde http://www.teknoluks.com.tr/wp-content/uploads/2015/04/PMMA.pdf adresinden erişildi.

Teflon. (2019, 8 Aralık). Vikipedi, özgür ansiklopedi içinde. 11 Mart 2020 tarihinde https://tr.wikipedia.org/wiki/Teflon adresinden erişildi.

Teskon. (2020). 18 Haziran 2020 tarihinde http://www.teskon.com/shoremetre-sertlik-kaucuk-plastik-cihazi-urun305.html adresinden erişildi.

Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Templesmith, P. & Dawes, C. J. (1995). Friction Welding. *United States Patent, US 5,460,317 A*, 1-19.

Turaçlı, H. R. (1999). *Enjeksiyon Hataları ve Çözümleri.* İstanbul: Pagev.

Ülker, A. (2015). *Yüksek Yoğunluklu Polietilen Polimer Malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynak Mukavemeti Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ve Kaynak Parametrelerinin Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi İle Optimizasyonu.* (Yayımlanmamış doktora tezi). Ege Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Vakumpompasi. (2011). 28 Mart 2020 tarihinde https://vakumpompasi.tr.gg/Kompozit-Malzemeler-Hakkinda.htm adresinden erişildi.

Yalçın, H. & Gürü M. (2007). *Malzeme Bilgisi.* Ankara: Palme.

Yaşar, İ. & Arslan, F. (2000). Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozitlerde Elyaf Hacim Oranı ve Elyaf Doğrultusunun Tribolojik Özelliklere Etkisi. *Turk J Engin Environ Sci, 24*, 181-191.

Yıldırım, G., Kara, R., Çolak, F. & Aksu, H. F. (2017). Polietilen Levhaların Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında Takım Bekleme Süresinin Bağlantının Kopma Mukavemetine Etkileri. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 6*, 106-113.

Yıldızhan, H. (2008). *Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Zengin, B. (2012). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş PVC Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Mersin Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet BOZU, İlköğrenimini Karapınar İsmet Büyükyaylacı İlkokulunda 1992 yılında tamamladı. Orta öğrenimini Lüleburgaz Ortaokulu ve Lüleburgaz Teknik Lisesinde 1999 yılında tamamladı. 1999 yılında kazandığı Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Resim ve Konstrüksiyon Öğretmenliği bölümünden 2004 yılında bölüm birincisi olarak mezun oldu. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında 2004 yılında başladığı Yüksek lisans öğrenimini 2007 yılında tamamladı. Askerliğini 2012 yılında bedelli olarak yaptı. 2004 - 2005 yılları arasında Gazi Üniversitesi Atatürk Meslek Yüksek Okulunda sözleşmeli Öğretim Görevlisi olarak çalışmıştır. 2004 - 2007 yılları arasında Şirinler Makine Sanayi - Ankara firmasında Teknik Müdür olarak, 2007 - 2008 yılları arasında Den Plastik Makine Sanayi Ticaret Ltd. Şti. - Ankara firmasında Fabrika Müdürü olarak görev yapmıştır. 2008 - 2014 yılları arasında Anadolu Metalurji ve Makine Sanayi Ticaret A.Ş. - Ankara firmasında Proses ve Teklif Hazırlama Sorumlusu - Teklif Hazırlama Ekibi Teknik Lideri olarak çalışmıştır. 2014 - 2019 yılları arasında Ali Şirin Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş. - Ankara firmasında Fabrika Müdür Yardımcısı olarak görev yapmıştır.