



Poliamid 66 Malzemelerin Alttan
Isıtma Yardımıyla Sürtünme
Karıştırma Nokta Kaynağı Proses
Parametrelerinin Optimizasyonu

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Koray Kara

ORCID 0000-0001-7979-2351

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Aydın Ülker

Ocak 2022

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi Koray Kara tarafından hazırlanan Poliamid 66 Malzemelerin Alttan Isıtma Yardımıyla Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Proses Parametrelerinin Optimizasyonu başlıklı bu çalışma tarafımızca okunmuş olup, yapılan savunma sınavı sonucunda kapsam ve nitelik açısından başarılı bulunarak jürimiz tarafından YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

ONAYLAYANLAR:

Tez Danışmanı: **Dr. Öğr. Üyesi Aydın Ülker**
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Kutlay Sever
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Prof. Dr. Sami Sayer
Ege Üniversitesi

Savunma Tarihi: 27.01.2022

Yazarlık Beyanı

Ben, **Koray Kara**, başlığı **Poliamid 66 Malzemelerin Alttan Isıtma Yardımıyla Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Proses Parametrelerinin Optimizasyonu** olan bu tezimin ve tezin içinde sunulan bilgilerin şahsıma ait olduğunu beyan ederim.

Ayrıca:

- Bu çalışmanın bütünü veya esası bu üniversitede Yüksek Lisans / Doktora derecesi elde etmek üzere çalıştığım süre içinde gerçekleştirilmiştir.
- Daha önce bu tezin herhangi bir kısmı başka bir derece veya yeterlik almak üzere bu üniversiteye veya başka bir kuruma sunulduysa bu açık biçimde ifade edilmiştir.
- Başkalarının yayımlanmış çalışmalarına başvurduğum durumlarda bu çalışmalara açık biçimde atıfta bulundum.
- Başkalarının çalışmalarından alıntıladığımda kaynağı her zaman belirttim. Tezin bu alıntılar dışında kalan kısmı tümüyle benim kendi çalışmamdır.
- Kayda değer yardım aldığım bütün kaynaklara teşekkür ettim.
- Tezde başkalarıyla birlikte gerçekleştirilen çalışmalar varsa onların katkısını ve kendi yaptıklarımı tam olarak açıkladım.

Tarih: 27.01.2021

Poliamid 66 Malzemelerin Alttan Isıtma Yardımıyla Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Proses Parametrelerinin Optimizasyonu

ÖZ

Bu çalışmada katı haldeki malzemelerin kaynağında kullanılan sürtünme karıştırma kaynağının bir çeşidi olan sürtünme karıştırma nokta kaynağına özgü tasarlanmış bir parça bağlama aparatı yardımıyla ve alttan ısıtma kullanılarak farklı proses parametre değerleri için katkısız poliamid 66 (PA66) ve cam elyaf katkılı poliamid 66 levhaların kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Geçmişte yapılan çalışmalara bakıldığında bu kaynak yöntemi çeşitli metal malzemelere uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu yöntemin termoplastikler ile olan çalışmalarına bakıldığında ise yapılan çalışma sayısı metallere göre daha azdır. Yüksek erime sıcaklığı ve dayanım, sıcaklık artışında sertliğini koruma, alev geciktiricilik gibi sebeplerden dolayı seçilen poliamid 66 malzemelerin kaynak bağlantısına dönme hızı, cam elyaf katkısı ve alttan ısıtma sıcaklığının etkisini görmek için oluşturulan deney gruplarının bindirme kaynağı kesme kuvveti sonuçları analiz edilmiştir.

Optimum kaynak parametreleri katkısız poliamid 66 bağlantıları için 1500 d/d dönme hızı, 120 °C alttan ısıtma sıcaklığı, %15 cam elyaf katkılı poliamid 66 (PA66GF15) bağlantıları için 2500 d/d dönme hızı, 120 °C alttan ısıtma sıcaklığı, %30 cam elyaf katkılı poliamid 66 (PA66GF30) malzemeler için 2500 d/d dönme hızı, 150 °C alttan ısıtma sıcaklığı olarak tespit edilmiştir. Bütün deneylerde 3 mm dalma derinliği, 60 saniye ön ısıtma süresi, 20 saniye karıştırma süresi 10 mm/dk dalma hızı ön denemeler neticesinde sabit parametreler olarak seçilmiştir.

Çekme testleri sonucunda bindirme kaynağı bağlantı kuvvetleri karşılaştırıldığında %30 cam elyaf katkılı PA66 bağlantılarında en yüksek kaynak dayanımı görülürken cam elyaf katkısının %15 olduğu malzemelerin kaynak bağlantılarının dayanımının

%30 cam elyaf katkılı bağlantılara göre daha az katkısız PA66 bağlantılara göre ise daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Çekme testi uygulanmış bağlantıların alt ve üst numunelerinde parametre farklılıkları sonucu oluştuğu belirlenen görsel kopma modları da katkısız ve cam elyaf katkılı poliamid 66 numunelerinin kaynak bağlantıları incelenerek analiz edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, poliamid 66, kaynak bağlantı kuvveti, kaynak proses parametreleri, polimer

Optimization of Friction Stir Spot Welding Process Parameters of Polyamide 66 Materials with Bottom Heating Process

Abstract

In this study polyamide 66 (PA66) and glass-fiber reinforced PA66 sheets have been welded by using a bottom heating process for different process parameter values with the help of a specifically designed fixture for friction stir spot welding (FSSW) which is a type of friction stir welding (FSW) used for welding of solid materials. This welding process had been applied successfully on various metal materials in past studies. On the other hand, existing studies of this process for thermoplastics are fewer than metals. Tensile shear strengths of lap joints were analyzed to determine the effect of rotational speed, additive of glass-fiber and bottom heating temperature on welding joint of polyamide 66 materials chosen for high melting temperature and thermal resistance, preservation of rigidity during temperature increasing, flame retardant reasons. Optimal welding parameters were found as the rotational speed of 1500 rpm, the bottom heating temperature of 120 °C for natural polyamide 66 joints, the rotational speed of 2500 rpm, the bottom heating temperature of 120 °C for 15% glass-fiber reinforced polyamide 66 joints and rotational speed of 2500 rpm, the bottom heating temperature of 150 °C for 30% glass-fiber reinforced polyamide 66 joints. 3 mm plunge depth, 60 second preheating time, 20 second dwelling time, and 10 mm/min plunge rate have been selected as constant parameters.

As a result of the tensile tests, when the lap weld joint strengths are compared, it is observed that the highest weld strength is observed in the 30% glass-fiber reinforced PA66 joints, while the strength of the welding joints of the materials with 15% glass-fiber additive is less than the 30% glass-fiber reinforced joints, and higher than the natural PA66 joints.

Keywords: Friction stir spot welding, polyamide 66, welding strength, welding process parameters, polymer.

Aileme,

Teşekkür

Öncelikle çalışmalarım sürecinde bana göstermiş olduğu destek, rehberlik ve sabırdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Aydın ÜLKER'e en içten dileklerle teşekkür ederim. Tez çalışması sürecinde vermiş olduğu tavsiye ve destek için Prof. Dr. Sami SAYER'e teşekkür ederim. Tez çalışmamda kullandığım bağlama aparatı desteği için Makina Yüksek Mühendisi Mustafa BOZKURT'a teşekkür ederim.

Hayatımın her anında desteğini hissettiğim hayat arkadaşım Dilek TOMRUK KARA'ya, hayatım boyunca bana destek olan ve cesaretlendiren annem Arife KARA, babam Süleyman KARA ve ablam Filiz KARA SAYGIDEĞER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İçindekiler

Yazarlık Beyanı	ii
Öz	iii
Abstract	v
Teşekkür	viii
Şekiller Listesi.....	xiv
Tablolar Listesi.....	xviii
Kısaltmalar Listesi	xix
Semboller Listesi.....	xxi
1 Giriş	1
2 Polimerler ve Poliamid	3
2.1 Polimer Malzemeler.....	3
2.2 Polimerlerin Molekül Yapıları.....	5
2.3 Polimerlerin Isıl Özellikleri	6
2.3 Polimerlerin Fiziksel Özelliklerine Göre Sınıflandırılması	8
2.4.1 Elastomerler.....	8
2.4.2 Termosetler	9
2.4.3 Termoplastikler.....	9
2.5 Poliamid	9
2.6 Poliamidin Sınıflandırılması	11
2.6.1 Poliamid 66.....	12
2.7 Cam Elyaf Katkısının Etkisi	14
3 Polimerlerin Birleştirilme Yöntemleri.....	17

3.1	Mekanik Bağlantı Yöntemleri.....	18
3.2	Yapıştırma (Adezyon) Yöntemleri	18
3.3	Kaynak Yöntemleri.....	19
3.3.1	Termal (Isıl) Yöntemler.....	20
3.3.1.1	Sıcak Eleman Kaynağı	20
3.3.1.2	Sıcak Gaz Kaynağı	22
3.3.1.3	Kızılötesi Isıtma Kaynağı	23
3.3.1.4	Lazer Kaynağı	23
3.3.1.5	Ekstrüzyon Kaynağı	24
3.3.2	Elektromanyetik Yöntemler	25
3.3.2.1	Rezistans Kaynağı	25
3.3.2.2	İndüksiyon Kaynağı	26
3.3.2.3	Mikrodalga Kaynağı	27
3.3.2.4	Yüksek Frekans Kaynağı	28
3.3.3	Mekanik Olarak Isının Oluşturulduğu Yöntemler.....	29
3.3.3.1	Döndürme Kaynağı	29
3.3.3.2	Lineer Kaynak	31
3.3.3.3	Ultrasonik Kaynak	31
4	Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ...	33
4.1	Sürtünme Karıştırma Kaynağı	33
4.2	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı.....	35
4.2.1	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Tipleri	38
4.2.1.1	Daldırmalı Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı.....	38
4.2.1.2	Tekrar Doldurmalı Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı.	39
4.2.1.3	Salımlı Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı	41
4.2.1.4	Dikişli Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı	41
4.2.1.5	Pimsiz Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı	42

4.2.2	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Proses Parametreleri	43
4.2.3	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Takım Tasarımı.....	44
4.2.4	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağının Mekanik Özellikleri.....	45
4.2.5	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında Malzeme Akışı	45
4.2.6	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağının Mikroyapısı.....	46
4.2.7	SKNK Avantajları ve Uygulama Alanları.....	47
5	Polimerlerin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı	49
6	Deney Tasarımı ve Ön Çalışmalar	61
6.1	Ön Çalışmalar	61
6.1.1	Ön Isıtma Süresinin Belirlenmesi.....	63
6.1.2	Dalma Hızı ve Karıştırma Süresinin Belirlenmesi	63
6.1.3	Dalma Derinliğinin Belirlenmesi.....	63
6.1.4	Dönme Hızının Belirlenmesi	64
6.1.5	Altın Isıtma Sıcaklığının ve Süresinin Belirlenmesi.....	64
6.1.6	Rezistanslı Pim Çapının Belirlenmesi	65
6.2	Deney Tasarımı	67
7	DeneySEL Çalışmalar	71
7.1	Malzeme ve Kullanılan Ekipmanlar	71
7.1.1	Katkısız ve Cam Elyaf Katkılı PA66.....	71
7.1.2	SKNK'a Özgü Bağlama Aparatı	72
7.1.3	SKNK Prosesi için Freze Tezgâhı ve Takımı.....	75
7.2	SKNK Parametrelerinin ve Seviyelerinin Belirlenmesi	77
7.3	Proses Hazırlıkları.....	78
7.3.1	SKNK için Plakaların Hazırlanması.....	78
7.3.2	Plaka Bağlama Aparatının Sabitlenmesi	78
7.3.3	SKNK Takımının Ayarlanması	79
7.3.4	Kaynak Yapılacak Plakaların Sabitlenmesi.....	79

7.3.5	Tezgâh Parametrelerinin Ayarlanması	80
7.3.6	Alt Isıtıcının Ayarlanması	81
7.4	Kaynaklı Bağlantıların Yapılması.....	82
7.4.1	Alttan Isıtma	82
7.4.2	Takım Dönme	82
7.4.3	Ön Isıtma	82
7.4.4	Dalma.....	83
7.4.5	Karıştırma	83
7.4.6	Takımın Geri Çekilmesi ve Kaynağın Tamamlanması	83
7.4.7	Sıcaklık Ölçümü	83
7.4.8	Soğuma ve Takımın Temizlenmesi	85
7.4.9	Deney Tasarım Matrisindeki Deneilerin Tamamlanması.....	85
7.5	Kaynaklı Bağlantıların Karakterizasyonu – Bindirme Kaynağı Bağlantı Kuvvet Testleri.....	86
7.5.1	Çekme Testi Numunelerinin Hazırlanması	86
7.5.2	Çekme Testi Numunelerinin Ölçüm Noktalarının İşaretlenmesi	87
8	Sonuçlar.....	89
8.1	Bindirme Kaynağı Bağlantı Kuvvetleri için Çekme Testi Sonuçları.....	89
8.2	Sonuçların Tekrarlanabilirliği	91
8.3	Kaynak Plakalarının Görsel İncelemesi ve Morfolojik Analizi.....	91
8.4	Proses Parametrelerinin Kaynak Kuvvetine Etkisi	99
8.4.1	Takım Dönme Hızının Etkisi	99
8.4.2	Alttan Isıtma Sıcaklığının Etkisi	102
8.5	Bağlantı Kesme Bölgesi Analizi.....	105
9	Tartışma	109
10	Öneriler	111
	Kaynaklar	112

Özgeçmiş	120
----------------	-----

Şekiller Listesi

Şekil 2.1	Monomer ve polimer	3
Şekil 2.2	Etilenin polimerizasyonu.....	4
Şekil 2.3	Polimer zincir şekillerinin gösterimi	5
Şekil 2.4	Polimer yapılarının camsı geçiş (Tg) – erime (Te) sıcaklıkları ve özgül hacim ilişkileri.....	7
Şekil 2.5	Polimerlerin fiziksel özelliklerine göre sınıflandırılması.....	8
Şekil 2.6	Poliamidlerin tekrarlı grubu	10
Şekil 2.7	Poliamidlerin sınıflandırılması	11
Şekil 2.8	PA66 sentezi.....	12
Şekil 3.1	Sıcak eleman kaynağı aşamaları	21
Şekil 3.2	Sıcak gaz kaynağı uygulaması	22
Şekil 3.3	Lazer kaynağının şematik gösterimi	24
Şekil 3.4	Ekstrüzyon kaynak yönteminin uygulaması	25
Şekil 3.5	Rezistans kaynağı.....	26
Şekil 3.6	İndüksiyon kaynağı	27
Şekil 3.7	Mikrodalga kaynağı.....	28
Şekil 3.8	Yüksek frekans kaynağı	29
Şekil 3.9	Sürtünme (Döndürme) kaynağı.....	30
Şekil 3.10	Farklı şekillerde uygulanan titreşim kaynağı	31
Şekil 3.11	Ultrasonik kaynak yöntemi uygulaması.....	32
Şekil 4.1	Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi.....	33
Şekil 4.2	Sürtünme karıştırma kaynağının aşamaları	34
Şekil 4.3	Sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulaması.....	36
Şekil 4.4	Sürtünme karıştırma nokta kaynağı prensibi.....	37
Şekil 4.5	Birleştirme mekanizması.....	38
Şekil 4.6	Daldırılmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağının şematik gösterimi, (a) Dalma, (b) Birleşme, (c) Geri Çekilme	39

Şekil 4.7	Daldırmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağının kesit görünümü.....	39
Şekil 4.8	Yeniden doldurmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağının şematik gösterimi.....	40
Şekil 4.9	Salınlı sürtünme karıştırma nokta kaynağının şematik gösterimi.....	41
Şekil 4.10	Dikişli sürtünme karıştırma nokta kaynağının şematik gösterimi.....	42
Şekil 4.11	Pimsiz sürtünme karıştırma nokta kaynağının şematik gösterimi, (a) Dalma, (b) Karıştırma, (c) Çekilme	42
Şekil 4.12	Çeşitli takım omuz ve uç profilleri.....	44
Şekil 4.13	Sürtünme karıştırma nokta kaynağının esnasında malzeme akışının şematik gösterimi	45
Şekil 4.14	Sürtünme karıştırma nokta kaynağı numunesinin kesit görüntüsü	46
Şekil 6.1	Deneylerde kullanılan sıcaklık değerleri için ısıl dengeye ulaşma grafiği	65
Şekil 6.2	7 mm yuva çapına sahip rezistanslı pim ölçüleri	66
Şekil 6.3	5 mm yuva çapına sahip rezistanslı pim ölçüleri	67
Şekil 6.4	3 mm yuva çapına sahip rezistanslı pim ölçüleri	67
Şekil 6.5	Yabancı malzeme girişinin gerçekleştiği numune	68
Şekil 7.1	Deney numuneleri, (a) Katkısız PA66, (b) PA66GF15, (c) PA66GF30.	71
Şekil 7.2	Altan ısıtmasız sürtünme karıştırma nokta kaynağı aparatı	73
Şekil 7.3	Altan ısıtmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı aparatı	73
Şekil 7.4	Malzeme akış bloğu	74
Şekil 7.5	Altan ısıtma kiti.....	75
Şekil 7.6	Altan ısıtma kiti için aparata bağlama parçası	75
Şekil 7.7	Chiron Magnum FZ12 freze tezgâhı	76
Şekil 7.8	Kullanılan takım ve ölçüleri.....	77
Şekil 7.9	Birleştirilecek numune boyutları ve bindirme bağlantı ölçüleri.....	78
Şekil 7.10	Plakaların bağlama kalıbına sabitlenmesi	79
Şekil 7.11	Tezgâh parametrelerinin programa girilmesi	80
Şekil 7.12	Isı kontrol modülü	81
Şekil 7.13	Fluke Ti401 PRO termal kamera	84
Şekil 7.14	Termal kamera ile sıcaklık ölçümü	84

Şekil 7.15	PA66 malzemesi sürtünme karıştırma nokta kaynağı bağlantısı	85
Şekil 7.16	PA66GF15 malzemesi sürtünme karıştırma nokta kaynağı bağlantısı ...	86
Şekil 7.17	PA66GF30 malzemesi sürtünme karıştırma nokta kaynağı bağlantısı ...	86
Şekil 7.18	Çekme testi yapılacak bağlantı.....	86
Şekil 7.19	Shimadzu AGS-X Universal masaüstü modeli	87
Şekil 7.20	Kaynaklı numunelerin sıkma çenelerine bağlanması.....	88
Şekil 8.1	PA66 üst plaka çapak formu, (a) 2500 d/d ve 100 °C, (b) 1500 d/d ve 120 °C.....	92
Şekil 8.2	PA66GF15 üst plaka çapak formu, (a) 2500 d/d ve 120 °C, (b) 1000 d/d ve 100 °C.....	93
Şekil 8.3	100 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF30 üst plaka çapak formu, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d.....	94
Şekil 8.4	120 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF30 üst plaka çapak formu, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d.....	94
Şekil 8.5	150 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF30 üst plaka çapak formu, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d.....	94
Şekil 8.6	100°C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF15 anahtar deliği oluşumu, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d	95
Şekil 8.7	120 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF15 anahtar deliği oluşumu, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d.....	95
Şekil 8.8	150 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF15 anahtar deliği oluşumu, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d.....	96
Şekil 8.9	100 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF30 anahtar deliği görseli, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d.....	96
Şekil 8.10	120 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF30 anahtar deliği görseli, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d.....	97
Şekil 8.11	150 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF30 anahtar deliği görseli, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d.....	97
Şekil 8.12	1000 d/d dönme hızı için PA66GF30 alt numune karıştırma bölgesi, (a) 100 °C, (b) 120 °C (c) 150 °C	98
Şekil 8.13	1500 d/d dönme hızı için PA66GF30 alt numune karıştırma bölgesi, (a) 100 °C (b) 120 °C (c) 150 °C	98

Şekil 8.14	2500 d/d dönme hızı için PA66GF30 alt numune karıştırma bölgesi, (a) 100 °C (b) 120 °C (c) 150 °C	99
Şekil 8.15	PA66 bağlantılarının bindirme bağlantı kesme kuvvetine takım dönme hızı etkisi	100
Şekil 8.16	PA66GF15 bağlantılarının bindirme bağlantı kesme kuvvetine takım dönme hızı etkisi	101
Şekil 8.17	PA66GF30 bağlantılarının bindirme bağlantı kesme kuvvetine takım dönme hızı etkisi	102
Şekil 8.18	PA66 bağlantılarının bindirme bağlantı kesme kuvvetine alttan ısıtma sıcaklığının etkisi.....	103
Şekil 8.19	PA66GF15 bağlantılarının bindirme bağlantı kesme kuvvetine alttan ısıtma sıcaklığının etkisi.....	104
Şekil 8.20	PA66GF30 bağlantılarının bindirme bağlantı kesme kuvvetine alttan ısıtma sıcaklığının etkisi.....	105
Şekil 8.21	PA66 bağlantılarının kopma modları, (a) 1. kopma modu, (b) 2. kopma modu, (c) 3. kopma modu	107
Şekil 8.22	PA66GF15 bağlantılarının kopma modu	108
Şekil 8.23	PA66GF30 bağlantılarının kopma modu	108

Tablolar Listesi

Tablo 2.1	Poliamid 66 mekanik ve fiziksel özellikleri	13
Tablo 2.2	Poliamid 66 tribolojik özellikleri	14
Tablo 2.3	PA66 ve PA66GF30'un mekanik özellikleri	15
Tablo 2.4	Katkısız PA66 ve cam elyaf katkı PA66 malzemelerin karşılaştırılması	16
Tablo 3.1	Polimerlerin birleştirme yöntemleri	17
Tablo 3.2	Plastiklerin kaynak yöntemleri.....	20
Tablo 4.1	SKNK uygulama alanları	48
Tablo 6.1	Dalma derinliği ön çalışma sonuçları.....	62
Tablo 6.2	Dönme hızı ön çalışma sonuçları	62
Tablo 6.3	PA66 malzeme deney tasarımı.....	69
Tablo 6.4	PA66GF15 malzeme deney tasarımı.....	69
Tablo 6.5	PA66GF30 malzeme deney tasarımı.....	70
Tablo 7.1	PA66 malzeme özellikleri	72
Tablo 7.2	Proses faktörleri ve seviyeleri	78
Tablo 8.1	PA66 malzemelerin çekme testi sonuçları	89
Tablo 8.2	PA66GF15 malzemelerin çekme testi sonuçları	90
Tablo 8.3	PA66GF30 malzemelerin çekme testi sonuçları	90

Kısaltmalar Listesi

ABS	Akrilonitril bütadien stiren
Al	Alüminyum
CNC	Computer numerical control
DNK	Direnç Nokta Kaynağı
DYPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen
d/d	Devir/Dakika
FBE	Fen Bilimleri Enstitüsü
İKÇÜ	İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi
Mg	Magnezyum
PFD-T	Poliparafenilentereftalamid
GF15	% 15 Glass-fiber reinforced
GF30	% 30 Glass-fiber reinforced
GHz	Gigahertz
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
kW	Kilowatt

MHz	Megahertz
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
PA6	Poliamid 6
PA66	Poliamid 66
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
PVC	Polivinil Klorür
rpm	Revolution per minute
SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SKNK	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı
TWI	The Welding Institute
ORCID	Open Researcher and Contributor ID
W	Watt

Semboller Listesi

n	Polimerizasyon Derecesi
°C	Santigrat Derece
T _g	Camsı Geçiş Sıcaklığı
T _e	Erime sıcaklığı
%	Yüzde

Bölüm 1

Giriş

Bu çalışma polimer ve metallerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan, birçok metal ve polimer türünde başarılı çalışmalar elde edilmiş sürtünme karıştırma nokta kaynağının etkisi görülmek istenen parametrelerinin optimizasyonu üzerine gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar görsel inceleme ile analiz edilmiştir.

Optimize edilmek ve etkisi görülmek istenen parametreler olarak sürtünme karıştırma nokta kaynağıyla birleştirilecek malzemenin türü, takımın dönme hızı ve birleşmeyi kolaylaştırma amacıyla uygulanan harici alttan ısıtmanın sıcaklığı seçilmiştir. Deneyleerde dalma derinliği, ön ısıtma süresi, karıştırma süresi, dalma hızı sabit parametreler olarak tutulmuştur.

Malzemeleri sınıflandırdığımızda dört ana malzeme olan metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler düşünülebilir. Bunlardan metalleri demir, alüminyum, çinko, bakır gibi elementleri içine alan, iki veya daha fazla elementin karıştırılıp alaşım şeklinde kullanılabilir hale getirildiği, dayanım, rijitlik, darbe direnci gibi özelliklere sahip malzeme grubu olarak tanımlayabiliriz. Seramikler ise basma dayanımları yüksek, metallere göre kırılğan ve ergime sıcaklıkları yüksek genellikle metal ve metal olmayan elementlerin oluşturduğu bileşiklerdir. Kompozitler matris ve takviye malzeme şeklinde iki veya daha fazla malzemenin istenmeyen özelliklerin giderilip dayanıklılık, hafiflik, esneklik gibi ihtiyaç duyulan özelliklerin elde edilmesi amacıyla birleştirilmesiyle oluşan malzeme grubudur. Polimerler yani bu çalışmada kullanacağımız ve üzerinde duracağımız malzeme grubu ise genellikle ısı ve elektrik yalıtkanlığı, korozyon direnci, hafiflik gibi özelliklere sahip tarım ve petrol ürünlerinin polimerizasyonu işlemi sonucu elde edilen, genelde plastik ve lastik malzemelerin oluşturduğu malzeme grubudur. Deneyleerde sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilecek numuneler

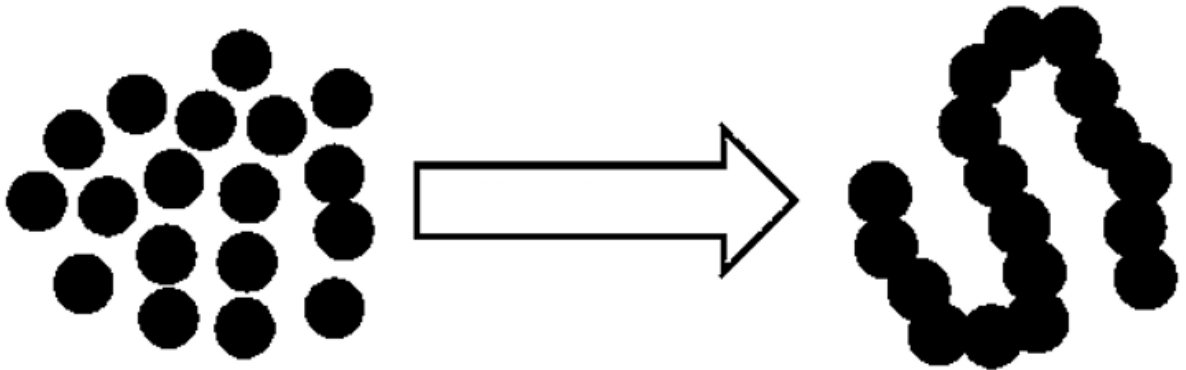
katkısız poliamid 66, %15 cam elyaf katkılı poliamid 66 ve %30 cam elyaf katkılı poliamid 66 malzemelerinden üretilmiştir.

Bölüm 2

Polimerler ve Poliamid

2.1 Polimer Malzemeler

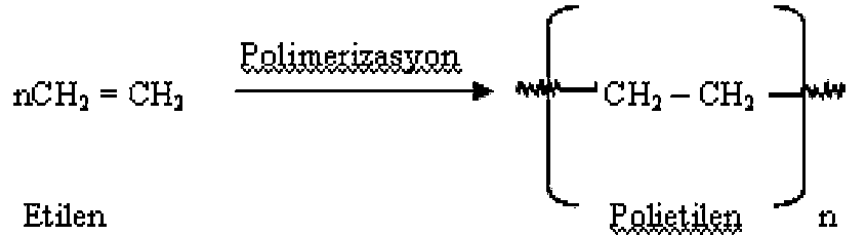
Polimerler Yunanca'da çok parçalı anlamına gelen ve monomer adı verilen moleküllerin sıralı birleşerek uzun zincir şeklinde oluşturduğu moleküllerdir (bakınız Şekil 2.1). Bir diğer polimer tanımı olarak yüzün üzerinde kimyasal bağ ile uygun reaksiyon koşullarında monomer birleşmesinin gerçekleşmesiyle meydana gelen madde söylenebilir. Çok sayıda monomerin kimyasal prosesler neticesinde etkileşime girip birleşmesiyle oluşturdukları makromoleküllerin oluşum işlemine polimerleşme adı verilir. Katılma ve basamaklı polimerleşme adı verilen iki tip polimerleşme prosesinden katılma polimerleşmesi monomerlerin kovalent bağ oluşumuyla makromolekül zincirlerini meydana getirmesidir [1].



Şekil 2.1: Monomer ve polimer

Monomer olarak isimlendirilen ufak moleküllerin kovalent bağlarla birleşmesi sonucu oluşan büyük moleküller olmaları polimerlerin diğer malzemelere göre üstün özelliklere sahip olmasının en büyük nedenidir. Üretim maliyetlerinin az olması, kolay şekil verilebiliyor olmaları ve amaca uygun üretilebilmeleri gibi sebeplerden dolayı her alanda yaygınlaşmıştır [2].

Kullanımları sanayi alanında çok eskiye dayanan doğal polimerlerden doğal kauçuk, selüloz ve nişasta buldukların grubun en yaygın üyeleridir. Ancak doğal polimerlerin gerek fiziksel ve mekanik niteliklerinin yeterli olmaması kaynaklı işleme prosesinde ortaya çıkan zorluklar gerek ise daha iyi termal ve kimyasal özellik oluşturabilmek amacıyla üretilen yarı sentetik ve sentetik polimerler doğal polimerlerin yerini almışlardır. Tarihsel oluşum ve gelişim sürecindeki bu değişikliği nedeni olarak polimerizasyon işlemi yapılan monomerlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin oluşturdukları sentetik polimerlerin özelliklerini belirlemede çok ciddi rol oynaması doğrultusunda daha iyi özelliklere sahip polimerlerin eldesi ve kullanımı söylenebilir [3, 4].



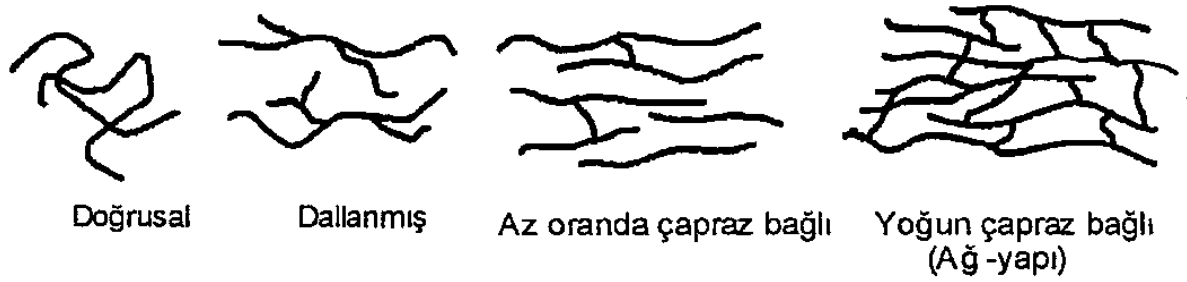
Şekil 2.2: Etilenin polimerizasyonu [3, 4]

Sentetik polimer grubunun üyelerinden biri olan polietilenin polimerizasyon işlemi Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Polimerizasyon işleminin sol tarafında bağlanacak etilen formülü ve içerdiği atomların bağ şekli gösterilirken her iki tarafta da bulunan ‘n’ monomer sayısının belirtildiği polimerizasyon derecesidir [3, 4].

2.2 Polimerlerin Molekül Yapıları

Diğer kimyasal maddelerle kıyaslandığında polimerlerin molekül ağırlığı fazla olan maddeleri içermesinin nedeni olarak gösterilen molekül boyutunun makro seviyelerde olmasıdır. Bu makromolekül yapısı polimerlerin karakterizasyon anlamında avantajlarının en önemli nedenlerinden biri olmakla beraber polimer davranışını da belirler [5].

Polimer zincirlerinin boyutu mekanik özellikleri belirlemede en önemli etkenlerden biridir. Zincir boyutunun belli büyüklüğü aşması istenen özelliklerin birleşme sonrası elde edilmesi açısından önemlidir. Boyutun dışında polimer zincir şekilleri de çeşitli özelliklere etki eder [5].



Şekil 2.3: Polimer zincir şekillerinin gösterimi [5]

Polimer molekül yapılarının çeşitlerine ve etkilerine baktığımızda Şekil 2.3’de gösterilen polimer erimesinin veya çözünmesinin mümkün kılmayan çapraz bağ niceliğinin yüksek olduğu durumda oluşan ağ yapılı polimer, niceliğin düşük olduğu durumlarda oluşan çapraz bağlı polimer ve polimer ergimesi ile elverişli çözücü kullanımıyla çözünmenin mümkün olduğu doğrusal veya dallanmış yapılı polimerler mevcuttur [5].

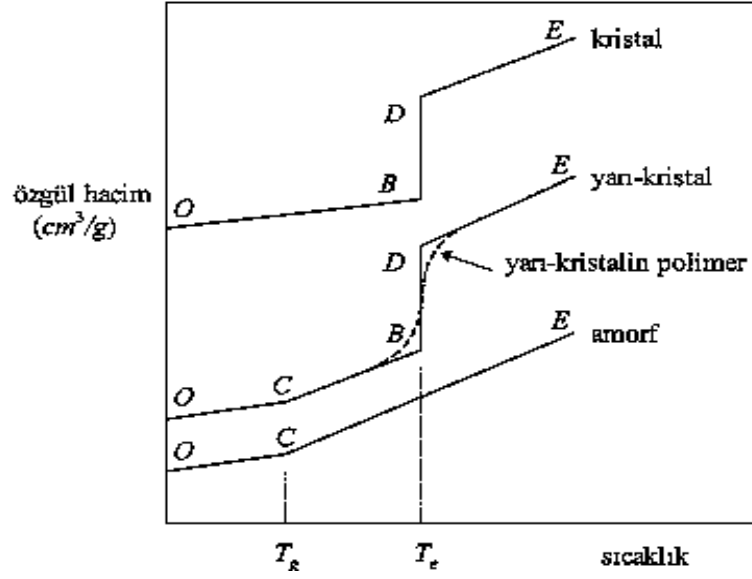
2.3 Polimerin Isıl Özellikleri

Polimerlerin düşük sıcaklık koşullarında molekül yapısının doğrusal ve düşük seviyede çapraz bağlı olması sert katı formunda gevrek ve kırılğan özellik göstermesine neden olur. Bu yapıdaki polimerler sıcaklık artışıyla polimer davranışını etkileyen ısıl geçişler içerir [5].

Özellikle termoplastik polimer grubunda ayrımı belirtilen polimer zincir yapılarını incelediğimizde amorf yapı, sıvı kristalik de denilen kristalin yapı ve çoğunlukla kristalin yapıya dahil edilen hem amorf hem kristalin yapıyı beraber içinde barındıran yarı kristalin yapılarının varlığı görülmektedir.

Bu yapılardan kristalin yapının kimyasal ve geometrik düzgünlüğünün olduğu ve bunun da en büyük nedeni kristalleşme ile molekül yapı düzenliliğinin doğrusal ilişkisi olmasıdır. Amorf yapıda ise polimer zincir gruplarının rastgele bir diziliş oluşturdukları kristalin yapıdaki gibi bir düzenin olmadığı görülür. Yarı kristalin yapıda amorf ve kristalin yapı dizilimlerinin her ikisinin de varlığı söylenebilir [4, 5].

Burada dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri amorf ve kristalin yapıların ayrımının belirlenmesinde ve polimerlerin davranışının analizinde faydalı olan erime ve camsı geçiş sıcaklıklarıdır. Şekil 2.4'te görüleceği üzere kristalin malzemelerde erime sıcaklığı (T_e) mevcutken amorf yapıda camsı geçiş sıcaklığı (T_g) kesin bir şekilde görülür. Yarı kristalin polimerlerde ise her iki yapının mevcudiyeti dolayısı ile camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığının (T_e) her ikisini de gösterirler [5, 6].



Şekil 2.4: Polimer yapılarının camı geçiş (T_g) – erime (T_e) sıcaklıkları ve özgül hacim ilişkileri [5]

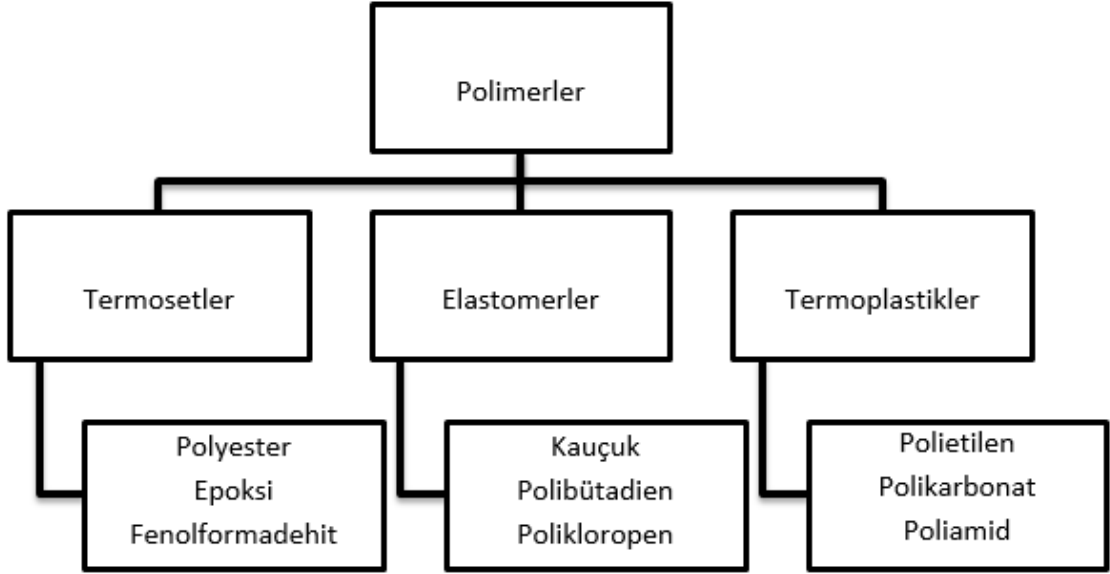
Amorf malzemelerin zincir düzeni olmadığından T_g noktasına kadar zincir hareketinin sınırlı olduğu hatta neredeyse hareketsiz davranışın gözlemlendiği kırılkan özellik gösterirken T_g noktasından itibaren malzeme deformasyonunun kolaylaştığı esnek özellik göstermeye başlar. Sıcaklığın daha da fazla artış göstermesi malzemenin sıvı hale doğru geçişi gözlenir [5, 6].

Sıvı kristal yapıya sahip polimerler T_e noktasındaki sıcaklık değerine kadar zincir düzenini koruyan bariz hareketlenmenin olmadığı bir davranış sergilerken T_e noktasından itibaren akma kabiliyetine sahip olması ve zincir düzeninin kaybolmasıyla sıvı duruma geçer [5, 6].

Yarı kristalin yapıdaki malzemeler içerdiği amorf ve kristalin yapı oranının değişimiyle farklı olabilmesiyle beraber davranışı olarak T_g noktasına kadar amorf yapı davranışıyla benzerlik gösterir. Kristalin yapıyla davranış olarak T_e noktası aşıldığında düzenli molekül yapısının bozulmasıyla sıvı özellik gösterme anlamında benzer davranış gösterse de kristalin malzemelere göre T_e değerinin daha düşük olmasıyla ayrılır [5, 6].

2.4 Polimerin Fiziksel Özelliklerine Göre Sınıflandırılması

Polimerler fiziksel özelliklerine göre en yaygın sınıflandırmada termoplastikler, termosetler, elastomerler olmak üzere Şekil 2.5'te görüldüğü gibi üç farklı gruba ayrılırlar.



Şekil 2.5: Polimerlerin fiziksel özelliklerine göre sınıflandırılması [7]

2.4.1 Elastomerler

Yaygınlaşan ilk elastomer olarak doğal kauçuk söylenebilir. Günümüzde pazar payına baktığımızda ise doğal kauçuğun kauçuk pazarının sadece çeyreğini kapsadığını kalan pazar payına sahip kısım ise İkinci Dünya Savaşı öncesindeki süreçte ticari olarak kullanılmayan ve kimyasal prosesler aracılığıyla sentetik halde üretilen kauçuklardır. Esnek ve elastik polimer grubunu oluşturan elastomerler çekme sonucu ilk boylarının neredeyse yüz katı büyüklüğüne kadar uzama gösterebilirler. Bu açıdan bakıldığında yüksek oranda uzama özelliğine sahiptirler ve çekme kuvvetinin kaldırılması sonucu ilk boylarına geri dönerler. Ayrıca yumuşatıldığında kolayca şekil alabilmesi ve sertleştiğinde sıcaklık değişimi ile baskı gibi etkenlerden etkilenmeyen bu polimer grubu çizilmeye ve darbelere karşı çok dayanıklıdır. Silikon, stiren-bütadien, polibütadien ve akrilonitril-bütadieni bazı elastomerler olarak örnek verebiliriz [7, 8].

2.4.2 Termosetler

Dr. Leo Baekeland tarafından 1909 yılında geliştirilen ilk termoset bakalit adı verilen ısı ve basınç gibi faktörlere rağmen şeklini koruyan malzemelerdir. Bazı ev eşyalarında yalıtım malzemesi olarak yaygın bir biçimde kullanılan bu malzeme telefon kulaklıkları ve elektrik muhafazaları gibi alanlarda da yerini almıştır. Isıtıldıklarında şekillerinin yanında dayanıklılıklarını da muhafaza eden bu malzemeler kalıcı olması istenen malzeme uygulamaları için çok elverişlidir. Zamanla iyi özellikler elde etmek amacıyla geliştirilen yeni termosetler de elektronik çip, kompozitler, gözlük mercekleriyle beraber diş dolguları gibi alanlarda kullanılmaktadır. fenol-formaldehit reçineleri, epoksi reçineler, doymamış polyester reçineler bazı önemli termoset çeşitlerindedir [7, 8].

2.4.3 Termoplastikler

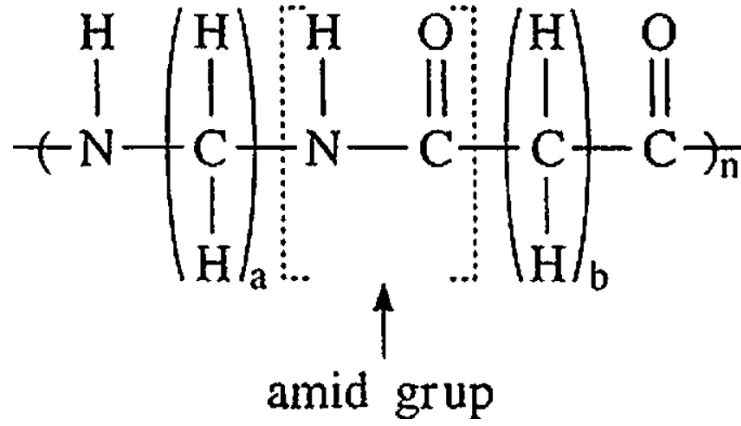
İlk termoplastik olarak kabul edilen selüloit ilk olarak 1800'lerin ortasında kullanılmış ve yüzyıla yakın bir süre içerisinde endüstride önemli bir yer edinmiştir. Adını ciddi anlamda duyurmasıyla beraber fildişinin alternatifi olarak kullanılmıştır. Sonraki dönemlerde farklı amaçlarla yeni termoplastik türleri geliştirilmiştir. Termoplastikler günlük kullanımda polimerlerin büyük bir kısmını oluştururlar. En önemli özellikleri olarak gösterebileceğimiz ısıtıldıklarında yumuşayıp akışkanlıkları artması ve soğuyunca yeniden sertleşmesi esnasındaki şekil değiştirmelerde hiçbir kimyasal değişime uğramıyor olmaları sayesinde geri dönüştürülebilirler. Böylelikle enerji geri kazanımına katkıda bulunurlar. Bilinen yaygın termoplastiklerden bazılarına poliamid, polietilen teraftalat, polikarbonat, polietilen, polipropilen ve akrilonitril bütadien stireni örnek verilebilir [9].

2.5 Poliamid

Poliamidler naylon olarak da bilinen yüksek dayanıma, iyi kimyasal ve elektriksel özelliklere sahip olan termoplastik polimerlerdir. Yarı kristalin yapıdaki poliamidler yüksek erime

sıcaklığına ve sıcaklık artışıyla sertliğini koruma özelliğine sahiptir. Zincir yapıları kristalleşmeye eğilimlidir. Yapılarındaki kristalin bölgenin amorf yapıya oranıyla nem alma ölçüsü mekanik karakterizasyonlarının belirlenmesinde etkin rol oynar [10-11].

Yaygın olarak diamin ve diasitin polikondenzasyon reaksiyonları yoluyla sentezlenmesi sonucu ortaya çıkan poliamidler Şekil 2.6'da gösterilen amid grubunu içerir. Yapılarında birleşme sonucu oluşan birincil ve ikincil bağlardan kristalizasyonu arttırmaları sayesinde molekül diziliminin düzgünleşmesine neden olur. Bu sayede dayanım artışı, gaz geçirgenliğinin azalımı ve sıcaklık artımıyla işleme kolaylığı sağlanmış olur [5, 12, 13].

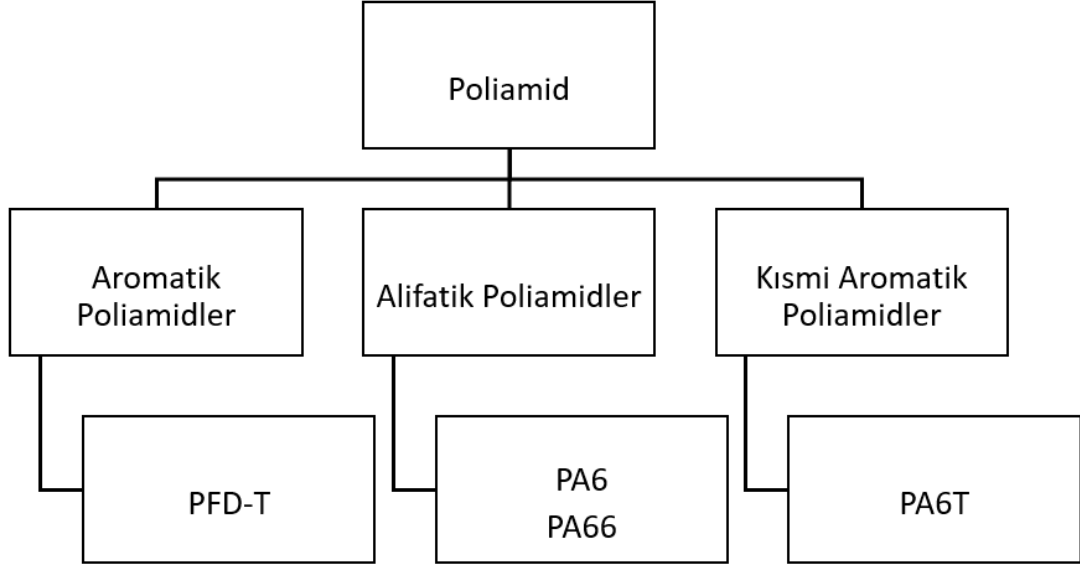


Şekil 2.6: Poliamidlerin tekrarlı grubu [12]

Wallace Carothers ve ekibi tarafından lif imalatında yine kendisinin bulmuş olduğu poliesterlerin elverişli olmadığını fark etmesiyle 1935 yılında keşfedilen poliamid yüksek dayanıma ve sürtünmenin az olduğu bir malzeme olmasıyla otomotiv alanında birçok ekipmanın imalatında metallere alternatif olarak kullanılmaktadır. Bunun dışında keşfedildiği günden itibaren birçok karakteristik avantajıyla yüksek ısı dayanımının gerektiği kişisel kullanım eşyaları, askeri teçhizatlar ve birçok endüstri alanında tercih edilmektedir [5, 10, 12].

2.6 Poliamidin Sınıflandırılması

Poliamid ailesinin alt grupları incelendiğinde Şekil 2.7’de gösterildiği üzere alifatik diaminler ve alifatik diasitlerin tepkime sonucu sentezlenmeleriyle oluşan alifatik poliamidler, diasit klorür ve aromatik diaminlerin düşük sıcaklık koşullarında polikondenzasyon tepkimesiyle oluşan aramid adıyla da bilinen aromatik poliamidler ile alifatik diamin ve aromatik diasitin sentezlenmesiyle meydana gelen kısmi aromatik poliamidler söylenebilir [10].



Şekil 2.7: Poliamidlerin sınıflandırılması

Isıl direnç dikkate alındığında en önemli poliamidlerden olan aromatik poliamid grubu 1950’ler sonrası naylonun ticari anlamıyla ehemmiyet edinmiş ve 1960’ların ilk yıllarında Dupont firmasının HT-1 ve Nomex ismiyle ticari olarak sentezlediği ve sonraki gelişmelerle yaygın olarak bilinen kevlar adıyla endüstriyel gelişmelere dahil olmuştur. Çoğunlukla renksiz olan bu grup 300 °C’nin üstünde erime sıcaklığı ve 250 °C’nin üstünde camsı geçiş sıcaklıklarına sahiptir. Kristal yapıdaki bu poliamidler diğer gruplarla karşılaştırıldığında alevlenme dayanımı ve sertliklerinin yanı sıra yüksek kimyasal direnç özelliği de vardır [10, 14].

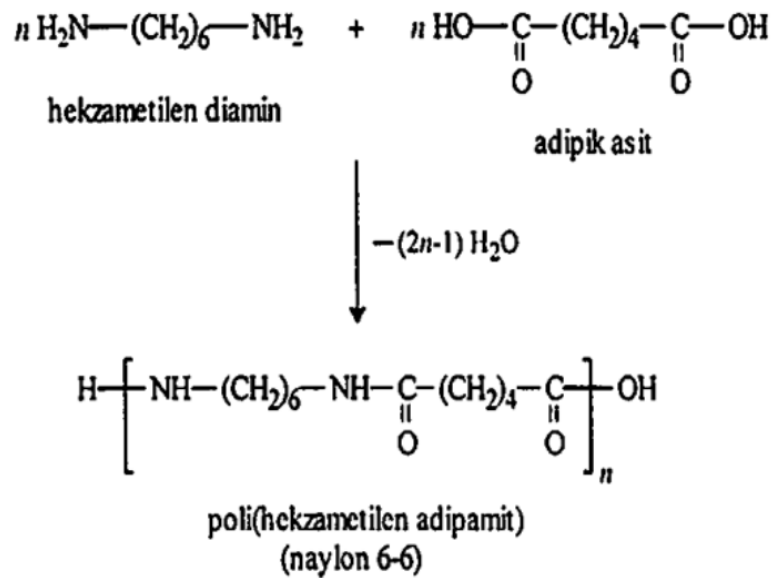
Kimyasal ve ısı direnç yönünden aromatik poliamidlere göre dezavantajı bulunan alifatik poliamid grubunun yüksek dayanım ve özellikli yoğunluk gibi avantajları mevcuttur. En yaygın olanları mühendislik plastiklerinden olan PA66 ve PA6 söylenebilir.

Ticari isimleri Nylon 6,6 ve Nylon 6 olan bu poliamidlerin isimlerindeki rakam sayısı meydana geldikleri monomer adedini belirtmektedir. PA66 iki adet monomerden oluşurken sentezlenen diamin ve diasit grupları altışar karbonludur [14].

Poliamid ailesinin diğer grubu olan kısmi aromatik poliamidler ise diğer iki gruba kıyaslandığında ara özellikler göstermektedir. Örnek olarak alifatik poliamidlere göre daha yüksek ısı dirence sahipken aromatik poliamidlerle kıyaslandığında ısı direnci düşük kalmaktadır [14].

2.6.1 Poliamid 66

Endüstriyel gelişmelere bakıldığında 1939 yılında Carothers tarafından poliamid grubunun en yaygın üyelerinden biri olan poliamid 66 ilk kez üretilmiştir. Nylon elyaf imalatı için en elverişli malzemelerin başında geldiği ispatlanmıştır. Ticari adı olan Nylon 6,6 ismindeki birinci rakam poliamid sentezindeki diaminin yapısındaki karbon adedini ikinci rakam ise dikarbosilik asitteki karbon adedini belirtir [5, 9, 15, 16, 17].



Şekil 2.8: PA66 sentezi [17]

Görsel olarak katı ve opak olmalarının yanı sıra nadir de olsa saydam görünüşe sahiptirler. Termoplastik polimer grubunun bu üyeleri yapılarında amorf ve kristal yapıyı birlikte bulundursalar da kristal yapı yoğunluğu ve molekül ağırlıkları fazla olması nedenleriyle çoğunlukla düzgün dizilime ve darbe direnci dışında kalan iyi mekanik özelliklere sahiptirler. Darbe dayanımının iyileştirilmesi için bir miktar nem absorbesi için uygulamalar gerçekleştirilebilir ancak nem emmenin kopma dayanımı ve sertliğe olumsuz etkisi olacaktır. Şekil 2.8’de görüleceği üzere yoğun hidrojen bağlarına sahip olması PA66’nın yüksek erime sıcaklığına sahip olmasını sağlar. PA66 malzemesinin mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir [9, 17, 18].

Tablo 2.1: PA66 mekanik ve fiziksel özellikleri [12]

Malzeme Özellikleri	PA66
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	1.12-1.14
Gerilme Kuvveti (MPa)	85-100
Elastik Modülü (MPa)	3000-3500
Darbe Dayanımı (kJ/m ²)	4-10
Deformasyon Sıcaklığı (°C)	75
Erime Sıcaklığı (°C)	255-265

Tribolojik özellikleri incelendiğinde düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direncinin gerektiği dişli ve kam mili gibi birçok makine elemanı uygulamasında tercih edilmektedir. Uzun süreli kullanımlarda da yüksek yorulma dayanımı ve yağlayıcılara karşı yapısının bozulmamasının etkisi nedeniyle avantajlıdır. Çeşitli takviye malzemelerinin etkisiyle daha iyi kayma ve aşınma niteliği elde edilmektedir. PA66 malzemesinin tribolojik özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir. Elektriksel yalıtkanlıklarının yüksek olması ve düzenli akım geçişi ile devrelerde biriken yük kaynaklı sıcaklık artışlarında ihtiyaç duyulan ısı direnci özellikleri sayesinde elektriksel uygulamalarda tercih nedenidir [9, 18].

Tablo 2.2: PA66 tribolojik özellikleri [12]

Özellik	Yağlanmış	MoS2	PTFE	%30 Cam Elyafı
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	1.15	1.18	1.23	1.47
Sertlik (Rockwell)	M60	M85	M65	R 120
Statik Sürtünme	0.05	0.17	0.20	0.12
Dinamik Sürtünme	0.06	0.09	0.06	0.14

2.7 Cam Elyaf Katkısının Etkisi

Kompozit sanayinde sıklıkla kullanılan elyaf türlerinin başında gelen cam elyaf polimer kompozitler için etkili takviye malzemelerdir. İçerdikleri kimyasal kompozisyona göre az maliyetli olarak genel kullanım amaçlı cam elyaflar ve bunların dışında özel yapısal kullanım hedefli olarak sınıflandırılırlar. Kimyasal içerikleri ve çeşitli şartlardaki dayanım performansına göre isimlendirilirler [11].

Cam elyaf takviyeli PA66 malzemesinin deneysel çalışmalarla desteklenen analizleri sonucunda cam elyaf eklenmesinin malzemenin mekanik karakteristiğine olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir. Soğutma amaçlı sıvıların kullanıldığı yüksek basınç ve sıcaklık direnci gerektiren uygulamalar için de bu katkı malzemeyi elverişli hale getirmektedir [18].

PA66 malzemesine cam elyaf ilavesiyle mukavemet ve sertlik gibi özelliklerin yanında yorulma ömrü ve sürtünme dayanımı özelliklerinin geliştirilmesi sağlanır. Isıl niteliklere etkisine bakıldığında cam elyaf takviyesi malzemenin termal genleşme katsayısının azalmasına neden olurken özellikle elektriksel uygulamalarda avantaj oluşturan sıcaklık artışının belli seviyelere ulaşmasıyla sertliğin artmasını da sağlar. Cam elyafın erime sıcaklık noktasını arttırma yönündeki etkisiyle molekül yapılarının bozunmasını önleme ve mekanik özelliklerini yüksek sıcaklıklarda koruma eğilimi vardır. Güneş ışınlarına karşı direnç gösterme durumunda da cam elyaf katkısının olumlu etkisi vardır [13, 16, 17].

Tablo 2.3: PA66 ve PA66GF30'un mekanik özellikleri [9]

Özellik	PA66	PA66GF30
Yoğunluk (g/cm ³)	1,13-1,15	1,37-1,39
Çekme Kopma Dayanımı (MPa)	65-86	160-210
Çekme Elastisite Modülü (GPa)	2-2,8	10-11
Çekme Kopma Dayanımı (%)	60-300	2-3
Eğilme Kopma Dayanımı (MPa)	80-105	200-260
Eğilme Elastisite Modülü (GPa)	2,8	7,8-9,1
Çentikli Darbe (N/mm)	15-20	-
Eğilmede Bükülme Sıcaklığı (°C)	66-110	245-260
Lineer Isıl Genleşme (°C x10 ⁻⁵)	8-10	2,3-4,0
Isıl İletkenlik (W/mK)	0,17-0,24	0,5
Su Emme (%/gün)	0,8-1,6	0,6-0,8

Yapılan çalışmalarda katkısız PA66 malzemesinde çekme mukavemetinin cam elyaf katkısıyla daha yüksek seviyelere çıktığı ve bunun yanında yoğunluğun arttığı gözlenmiştir. PA66 ve PA66GF30'un mekanik özellikleri Tablo 2.3'de verilmiştir. Farklı testlerle incelenen başka bir deneysel çalışmada ise darbe dayanımının cam elyaf ilavesiyle arttığı görülmüştür [10, 18].

Tablo 2.4: Katkısız PA66 ve cam elyaf katkılı PA66 malzemelerin karşılaştırılması [18]

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
PA66	75	1,14
PA66 + %20 Cam elyaf	120	1,45

PA66 matrisine cam elyaf ekleyerek oluşturulan kompozit materyallerin katkısız materyallerle kıyaslandığında çekme mukavemetinin yanında elastisite modülüne fazla olmasa da bir artış kazandırdığı gözlenmiştir. Katkısız PA66 ve cam elyaf katkılı PA66 malzemelerin karşılaştırılması Tablo 2.4'de verilmiştir [16].

Bölüm 3

Polimerlerin Birleştirilme Yöntemleri

Fabrikasyon imalatı gerçekleştirilen alanlarda süreci iyileştirmek için malzeme araştırması düzenli olarak yapılmaktadır. Özellikle otomotiv alanında ürün ağırlığını azaltmak, üretim döngü sürelerini kısaltmak ve müşteri taleplerini karşılayabilmek amacıyla metal malzemelerin alternatifi olarak polimer malzemeler tercih edilmektedir.

Polimer malzemelerde de diğer malzemelerde olduğu gibi tek parça halinde üretimin kalıp ve işlem maliyetlerinin yüksek olması, imalat süreçlerinin uzaması gibi sebeplerden dolayı birleştirme yöntemine yönelim gerekmektedir. Bunun dışında yeniden kullanım amaçlı onarım gerektiren proseslerde de birleştirme yöntemi tercih edilmektedir. Polimerlerin birleştirme yöntemleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Polimerlerin birleştirme yöntemleri [19]

Mekanik Bağlantılar		Yapıştırma (Adezyon) Yöntemleri	Kaynak Yöntemleri
Sökülebilir	Sökülemez	Tek Bileşenli	Dışarıdan Isı Verilen Kaynak Yöntemleri
Civatalar	Perçinler		
Somunlar	Metalik ve Sıcak Saplamlar	Çift Bileşenli	Isının Malzeme Üzerinde Oluşturulduğu Kaynak Yöntemleri
Klipsler	Geçmeler		
Yaylı Kelepçeler	Dikiş		

Polimer materyallerin birleştirme prosesleri yaygın sınıflandırmada mekanik bağlantı, yapıştırma ve kaynak yöntemleri olarak ayrılabilir. Her ne kadar mekanik bağlantı ve yapıştırma yöntemleri birleştirme için elverişli olsa da kaynak yöntemleri özellikle seri imalat sürecinde ihtiyaç duyulan kısa çevrim süresi, yapıştırma yöntemleri gibi temiz yüzey gerektirmeme ve mekanik yöntemlerin plastik malzemelerde oluşturduğu birleşme hatalarının önüne geçmesi nedenlerinden dolayı öne çıkmaktadır [6].

3.1 Mekanik Bağlantı Yöntemleri

Sökülebilir ve sökülemez olmak üzere ikiye ayrılan bu yöntemler uygulama açısından kolaylık sağlasa da el işçiliğindeki kabiliyetin birleştirme kalitesine fazlasıyla etki ettiği ve birleştirme için harici malzeme kullanımının gerektiği yöntemlerdir. Sökülebilir bağlantı yöntemleri uygulama kolaylığı ve yeniden kullanım anlamında avantajlıdır [19, 20].

Plastik malzemelerin mekanik bağlantıları çentik etkisine fazla duyarlı olması diğer yöntemlere göre bağlantı bölgesinin dayanabildiği yük miktarının daha düşük olmasına neden olur. Yine birleştirilecek malzeme plastik olması ve bağlantı elemanlarıyla farklı ısıl genleşme katsayısına sahip olması sıcaklık değişiminden farklı etkilenmeleri kaynaklı sorunlara yol açmaktadır. Bunun dışında özellikle kırılğan yapıya sahip gevrek plastik malzemelerin mekanik bağlantılarında daha sert bir malzemeyle birleştirme deneneceğinden kırılma ve çatlamların oluşması muhtemeldir [6, 19].

3.2 Yapıştırma (Adezyon) Yöntemleri

Malzeme türünün benzer ya da farklı olmasının bir kısıt olmadan basit bir şekilde birleşmenin gerçekleşebildiği yapıştırma yöntemleri plastik özelinde kaynak yapılamayan polimerlere de uygulanabilmesi açısından tercih edilmektedir. Adezyon yöntemleri yüksek dayanımın gerektiği uygulamalarda termoset malzemelerin kullanıldığı zamanlarda yaygınlaşsa da termoplastik materyallerin mekanik karakteristiklerindeki iyileşme sonucu termosetlerin yerini almasıyla popülerliğini kaynak yöntemlerine bırakmıştır [6, 19].

Yapıştırma işlemi birleştirilecek malzeme yüzeylerine yapıştırıcının uygulanması sonrası bekleme gerektirmektedir. Bu bekleme süresinde bağlantı dayanımının artışı amacıyla yapıştırıcı katılaşır. Yapıştırıcı malzemenin yüzeylere uygulanmasıyla ilgili ise birleştirilecek malzemeler arasındaki mesafe artması durumunda bağlantı performansı azalacağından yöntemin uygulanabilirlik seviyesi de dikkate alınarak çekim kuvvetinin artması yönünde geniş alan ve yakın mesafe tercih edilerek optimize edilmelidir. Yapışmanın verimliliğini arttırmak üzere birleşme yüzeylerine yapıştırıcı uygulanması sonrası malzemelerin birleşme yönünde uygulanacak basınç yapıştırıcıyı birleşme alanının dışına çıkarmayacak seviyede olmalıdır [19].

Uygulama esnasındaki dikkat edilmesi gereken konuların yanında adezyon birleştirmeleri için temiz yüzey gerekliliği vardır. Temiz yüzey eldesi için adezyon yönteminin uygulanacağı malzeme yüzeylerinin ön hazırlık sürecinden geçmesi ve kontrolü şarttır. Birleşme alanında tespit edilen yağ ve toz gibi bağlantı performansını olumsuz etkileyecek her türlü harici maddenin temizliği için uygun temizleyiciler uygulanmalıdır [19].

3.3 Kaynak Yöntemleri

Polimer bazlı gereçlerden, insanlar tarafından günlük yaşamlarında kullanılan kullandığı pek çok üründe sıkça faydalanılmaktadır. Polimerlerin düşük ağırlıkları, basit şekillendirilebilirlik, yalıtkanlık ile aşınma dayanımı gibi tipik nitelikleri mevcuttur. Polimer materyaller, son yıllarda kimi işkollarında metal malzemelerin yerine geçmektedir. Teknolojideki ilerlemelerle beraber polimer işleme yöntemleri de gelişim göstermektedir. Kaynak tekniklerinde de birçok inovasyon gerçekleşmekte olup plastik materyallerin kaynak kabiliyetiyle ilgili çalışmalar sürmektedir [21].

Polimer kaynağı ısıtılan ve basınç uygulanan termoplastik materyallerin molekülleri arasında çapraz bağ oluşumuyla meydana gelen birleşme işlemidir. Kaynak işlemi gerçekleştirilecek parçalar dolgu malzemesi kullanılarak veya dolgu malzemesiz şekilde ergitme yapılarak birleştirilebilir. Yüzey hazırlama, sıcaklık ve basıncın uygulanması ile soğutma işlemleri polimer kaynağının birbirini takip eden aşamalarıdır. Polimerlerin kaynağı için kullanılan yöntemleri dışarıdan ısı verilen ve ısının malzeme üzerinde oluşturulduğu yöntemler olarak iki gruba ayrılabilir. Plastiklerin kaynak yöntemleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Plastiklerin kaynak yöntemleri [6]

Plastiklerin Kaynak Yöntemleri		
Dışarıdan Isı Verilen Kaynak Yöntemleri	Isının Malzeme Üzerinde Oluşturulduğu Kaynak Yöntemleri	
Termal (Isıl) Yöntemler	Mekanik Olarak Isının Oluşturulduğu (Sürtünme) Yöntemler	Isının Kaynak Yüzeyine dışarıdan verildiği (Elektromanyetik) Yöntemler
Sıcak Eleman Kaynağı	Döndürme Kaynağı	Rezistans Kaynağı
Sıcak Gaz Kaynağı	Lineer Kaynak	İndüksiyon Kaynağı
Kızılötesi Isıtma Kaynağı	Ultrasonik Kaynak	Mikrodalga Kaynağı
Lazer Kaynağı	Sürtünme Karıştırma Kaynağı	Yüksek Frekans Kaynağı
Ekstrüzyon Kaynağı	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı	

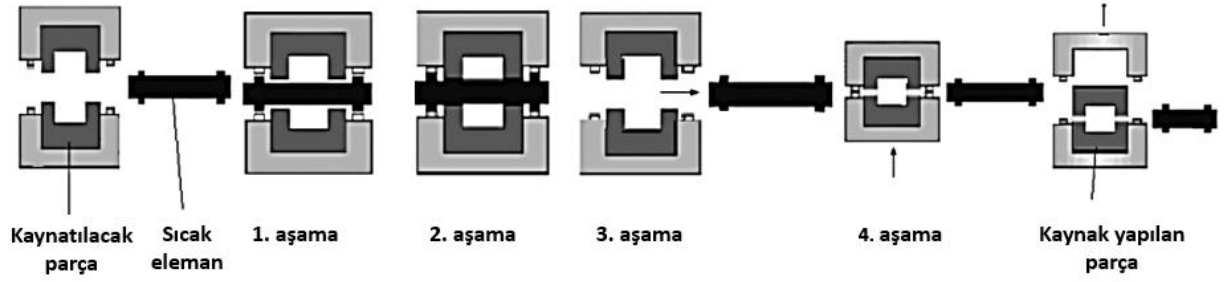
3.3.1 Termal (Isıl) Yöntemler

Malzemeye dışarıdan açık bir şekilde ısı uygulanarak birleştirme işleminin gerçekleştiği kaynak yöntemleridir [22].

3.3.1.1 Sıcak Eleman Kaynağı

Plastiklerin birleştirilmesinde kullanılan bu yöntemin tercih edilme nedenleri arasında basit, sağlam ve ekonomik olması yer almaktadır. İlk olarak 1930'lu yıllarda yarı mamul ürünlerin kaynakla birleştirilmesinde kullanılan bu yöntem 1960'lı yıllardan itibaren günümüze kadar bu kolaylıklarından dolayı sıkça tercih edilmektedir. Genellikle sert ve yumuşak PVC, PE, PP, PA malzemelerin kaynakla birleştirmesinde tercih edilir.

Bu yöntemde birleştirilecek yüzeyler sıcak plaka temas ettirilerek veya radyasyon yolu ile yeterli yumuşama sağlanana kadar ısıtılır. Sonrasında belirli bir kuvvet ile basınç uygulanarak ve sonrasında soğuma öncesi basınç kuvveti azaltılarak birleştirme işlemi gerçekleştirilir [23].



Şekil 3.1: Sıcak eleman kaynağı aşamaları [6]

Şekilde görüldüğü gibi birinci aşamada sıcak plakanın temasıyla malzeme yüzeyleri yumuşayana kadar ısı ve basınç kuvveti uygulanır. İkinci aşamada uygulanan kuvvet azaltılır ve üçüncü aşamada sıcak plaka malzemelerden uzaklaştırılır. Son aşamada kaynaklı kısım soğuyana kadar basınçla birleştirme işlemi gerçekleştirilir (bakınız Şekil 3.1). Bazı kaynak hatalarının önüne geçmek için ısıtma kontrollü bir şekilde aşırıya kaçmadan gerçekleştirilmelidir. Ayrıca uygulanan basınç kuvveti, sıcak plakanın sıcaklığı ile kaynak yapılacak bölgede kalma süresi ve malzeme türü kaynak mukavemetini etkileyen parametrelerdir. Plastik boruların ve seri ambalaj malzemelerinin birleştirilmesinde sıkça kullanılır [23-24].

3.3.1.2 Sıcak Gaz Kaynağı

Oksi-asetilen kaynağı ile benzerlik gösteren bu yöntem sıkıştırılmış sıcak hava ve asal gaz jeti ısı taşıyıcı olarak kullanılarak birleştirilecek malzeme yüzeyleri yumuşatılır ve basınç altında birleştirilir (bakınız Şekil 3.2). Genellikle büyük parçalar için çok elverişli olan bu yöntemde plastik kaynağı yapılacak parçalara önce parçanın konumuna göre V, T şeklinde ağız açılır ve kaynak torcundan çıkan sıcak gaz sayesinde ana malzemenin birleşim kısımları ile harici kaynak çubuğu yumuşatılır. Kaynak edilecek parçaları 120-180 °C arasında ısıtan gazın sıcaklığı malzemenin türüne bağlı olarak 200-350 °C arasında değişir. Sert termoplastikler için elektrotlar düz materyal ile preslenir, yumuşak plastikler silindirler tarafından aynı işlemi görürler. İlave kaynak çubuğu ve ana malzemenin yapısının aynı olması ile kullanılacak gazların kuru ve temiz olması önemlidir. Özellikle polietilen ve polipropilen için kaynak çubuğu ile ana malzemenin yoğunluklarının aynı olması gerekir. Kaynak boşluğunu tamamen doldurmak için elektrotların basınç bölgesine akması arzu edilir. Bu durumda kaynak hızını, sıcak gazın sıcaklığını ve dolayısıyla kaynak alanını, kaynak girişinin şeklini ve hacmini, uygulanan basıncı, kaynak elektrotlarının kesit alanını ve kalınlığını birçok faktör belirler. Bu kriterlerin güvenli aralıkta sürdürülmesi, özellikle bu kaynak prosesinde kaynağı uygulayacak kişinin yatkınlığına ve gösterdiği özenle ilgilidir [6, 22, 25].



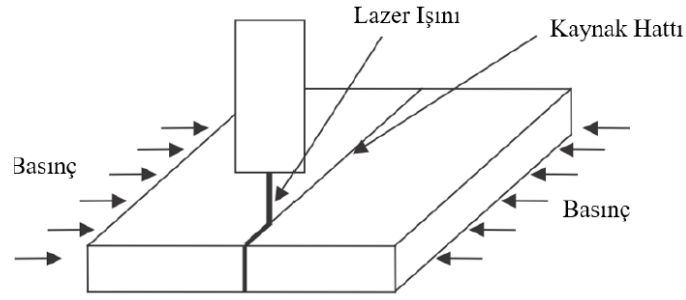
Şekil 3.2: Sıcak gaz kaynağı uygulaması [25]

3.3.1.3 Kızılötesi Isıtma Kaynağı

Sıcak plaka kaynağının yanında farklı bir seçenek olan kızılötesi ısıtma kaynağında kuvars ısı lambalarından sağlanan kızılötesi radyasyonu birleştirilecek malzemelere uygulanarak malzemede erimenin gerçekleşmesi ve sonrasında basınç uygulanması sonucu birleşme işlemi gerçekleştirilir. Kızılötesi, bilhassa ısı kaynağına dokunması mümkün olmayan yüksek erime sıcaklığı olan polimerlerin birleştirmelerine bir çözüm olmaktadır. Daha önce yapılan bir çalışmayı göz önüne aldığımızda cam takviyeli polimerin kızılötesi kaynağında iyi dayanım elde edildiği görülmektedir. Hızlı olmasının avantajıyla polimerlere çabuk bir şekil etki edebilen kızılötesi kaynak yöntemi bu yönüyle de verimlidir. İletkenlik polimer alanının gerekli ısıya ulaştırılmasıyla birleştirilecek ısınmış bölgenin yeterli seviyede oluşması için önemlidir [22].

3.3.1.4 Lazer Kaynağı

Lazer kaynağı benzer veya farklı malzemenin bölümlerini birleştirme prosesidir. Lazer kaynağı prosesinin plastik materyaller özelinde kullanımını Ruffler ve Gürs düşük yoğunluklu polietilen plakaları 1972 tarihinde birleştirerek gerçekleştirmiştir. Şematik olarak Şekil 3.3'te gösterilen lazer kaynağı yoğun sıcaklık uygulaması, çabuk tatbik edilebilmesi, yüksek nüfuziyet, kaynak genişliğinin azlığı ve az miktarda termal bozulma ile yüksek dayanıma sahip bağlantılar oluşturur. Seri bir şekilde uygulanabiliyor olması, otomasyona kolaylıkla adapte edilebilmesi ve proses takip imkânı ile sürecin yönetilebilirliği, lazer kaynağını çağdaş endüstri imalatı için sıkça tercih edilen bir proses olmasını sağlamıştır [6, 26]

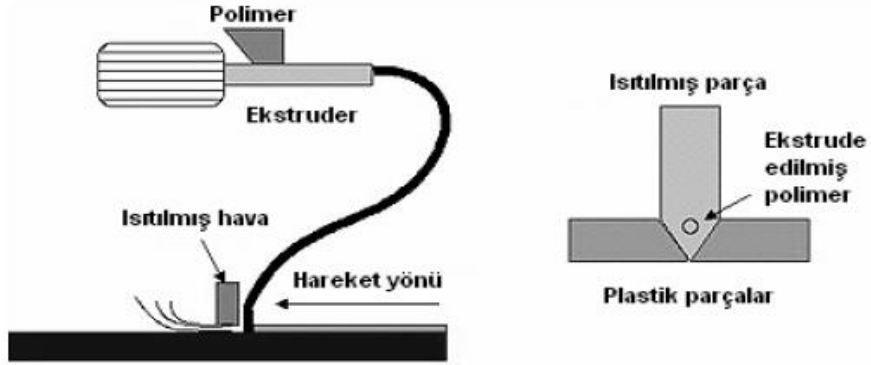


Şekil 3.3: Lazer kaynağının şematik gösterimi [6]

Lazerler, minimum ısı girdisi ile maksimum penetrasyon için mükemmel kaynaklanabilirlik sunan yüksek güç yoğunluklu proseslerdir. Penetrasyon derinliği temin edilen güçle orantılıdır ancak odak konumu da bir etkidir. Benzer şekilde kaynağın hızı da temin edilen güçle paralellik gösterdiği gibi parçanın tipi ile kalınlığı tesir edebilir. Türlü uygulama alanındaki örnekler lazer kaynak prosesinin farklı materyaller ve kombinasyonlarının kaynaklanabilirliği açısından yüksek kabiliyetli olduğunu kanıtlamaktadır [26].

3.3.1.5 Ekstrüzyon Kaynağı

Isıtma prosesi olarak düşünüldüğünde sıcak gaz kaynağıyla benzerlik göstermekte ve sıcak gaz kaynak yönteminin özelleştirilmiş şekli sayılabilecek bu yöntemde kaynak dolgu materyali bir ekstruderden temin edilmektedir. Sıcak gaz kaynağından farklı olarak bu yöntemde ilave malzeme eritilmiş durumda kaynak bağlantısına bütünüyle ekstruder vasıtası ile enjekte edilmektedir. Sıcak gaz aracılığıyla kaynak ağız bölümüne ilk ısıtmanın gerçekleştirilmesinin sonrasında kaynak dolgu materyali, ekstruderin çıkış kısmına montajlanmış bir pabuç aracılığıyla kaynağın ağız bölümüne yüklenir. Ekstrudere montajlanan pabuç, kaynak ağız bölümüyle uyumlu olmasının yanı sıra uygulama öncesi sıcak gaz yardımıyla ısıtılması sağlanmalıdır. İlave malzeme bir ekstruder içinde sıcak gaz yardımıyla ısıtılarak hareket ederken birleşme ağızına aktarılır ve basınç bir kaynak baskısıyla temin edilir. Yöntemin uygulandığı Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Bu yöntem genellikle uzun birleştirmelerde kullanılır. Genellikle, parçalar çok kalın olmadığı sürece tek pasoda kaynak edilir [6, 25].



Şekil 3.4: Ekstrüzyon kaynak yönteminin uygulanışı [25]

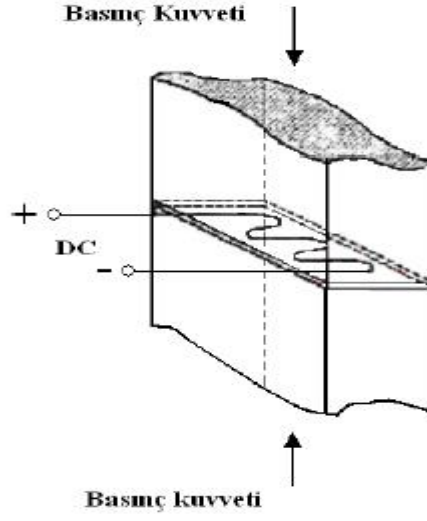
Ekstrüzyon kaynak yöntemi küçük boyutlu kaynak uygulamalarına göre çok ekonomik sayılmaz. Kaynak sonucu güçlü dayanımlar sağlaması bu dezavantaja rağmen kullanım için tercih nedenidir [25].

3.3.2 Elektromanyetik Yöntemler

Kaynak yapılacak malzemeler üzerinde oluşturulacak ısının kaynak yüzeyine dışardan verilmesi suretiyle birleştirme işleminin gerçekleştiği yöntemlerdir [22].

3.3.2.1 Rezistans Kaynağı

İmplant veya elektro-füzyon kaynak yöntemi isimleriyle de tanınan kaynak tekniğinde, birleştirilecek parçaların birbirlerine karşılıklı olarak hizalanan kaynaklanacak bölgelerin arasına Şekil 3.5'te gösterildiği gibi metal teller konulur ve bu tellerden akım geçişi sağlanır. Akım geçişi bölgenin ısınmasını sağlar Kaynak alanınının ısı etkisiyle birleşmesi esnasında ısıyı sağlayan teller kaynaklı bölgede kalmaktadır, bu konu kaynak mukavemetine etki ettiği gibi ekstra maliyet oluşturmaktadır [25].

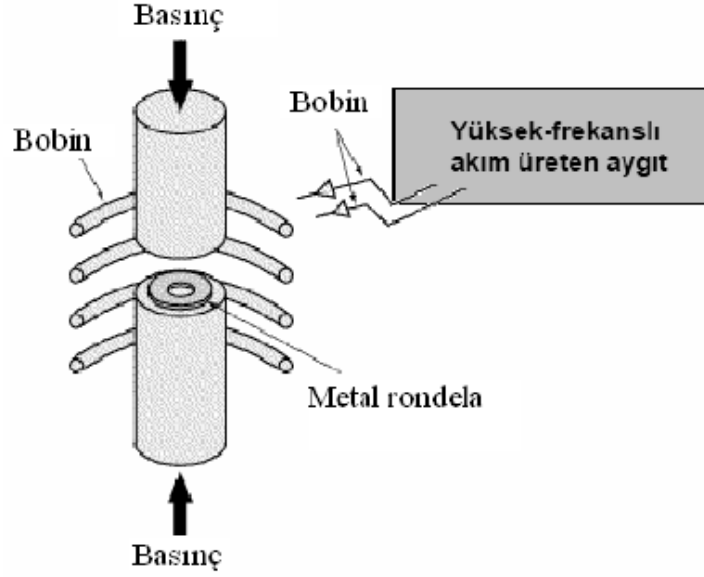


Şekil 3.5: Rezistans kaynağı [25]

Prosesin uygulama kolaylığının yanında büyük parçaların birleştirilmesinde efektif olması tercih nedenidir. Kaynak tekniğinin pratik olmasının yanında çok vakit almaması büyük avantajlarından birisidir. Büyük boyutlu malzemelerin birleştirilmesi bile 30 saniye gibi kısa bir zaman diliminde tamamlanabilmektedir. Yöntemde sürece etki eden temel değişkenler, tel boyutu ve dayanımı, voltaj değeri, basınç kuvveti ile tamamlanma zamanıdır [25].

3.3.2.2 İndüksiyon Kaynağı

Kaynak tekniğini diğer kaynaklardan ayıran kısım ısının uygulanma şeklidir. Şekil 3.6’da gösterildiği gibi birleştirilecek malzemelerin birleşme yüzeylerinin arasında kalacak şekil yerleştirilen metal yüksek frekans değerine sahip akım sayesinde meydana gelen manyetik alanın bileşme bölgelerinin ısıtması şeklinde uygulanır. Isıtma sonrası istenen yumuşama sağlandığında birleştirilmek istenen her iki materyalin üzerinde 0,7 MPa değerinde basınç kuvveti uygulanmasıyla kaynak işlem tamamlanır. Plastik malzemeler için kısa sayılabilecek sürede kaynak işleminin gerçekleştiği bu yöntemde genellikle 3 ile 30 saniye arasında işlem gerçekleştirilir [6, 25].

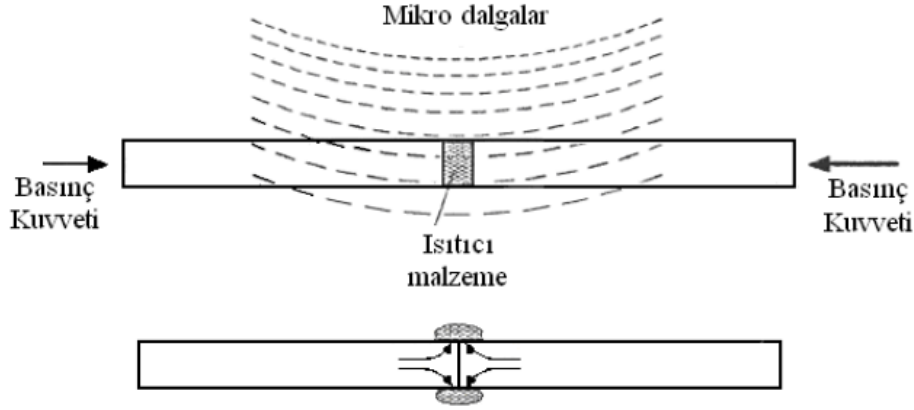


Şekil 3.6: İndüksiyon kaynağı [25]

Birleşme bölgesine konulan ısıtıcıya bağlı olarak oluşan manyetik alan frekansı değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle frekans artırıcı etkisi fazla olan metal materyaller ile ağ biçiminde teller seçenekler arasında öne çıkar. Daha geniş bir bölgede sıcaklık artışının sağlanması ile büyük kaynak hacmi elde edilir. Dolayısıyla kaynak hacminin büyümesiyle daha yüksek dayanıma sahip bağlantı oluşumu gerçekleşmiş olur [6, 25].

3.3.2.3 Mikrodalga Kaynağı

Kaynaklanacak polimer materyallerin birleşme yüzey aralığına elektromanyetik enerji emme kabiliyeti olan yüksek yoğunluğa sahip polietilen konular ve Şekil 3.7’de gösterildiği üzere basınç uygulamasıyla beraber 70 MHz ile 100 GHz aralığında frekans değerine sahip mikrodalgalar vasıtasıyla kaynak prosesi gerçekleşir [25].

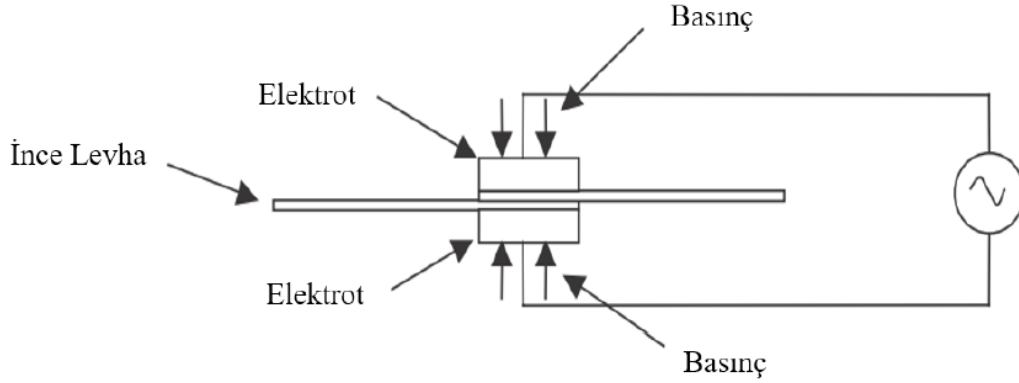


Şekil 3.7: Mikrodalga kaynağı [25]

Kaynak işlemi esnasında ısının temin edilmesi yüksek frekans değerine sahip elektromanyetik dalgaların vasıtasıyla olur. Isıtılan bölgedeki malzeme çift taraflı birleşme bölgesine doğru uygulanan basınç kuvvetiyle kaynaşır. Son olarak kaynak yapılan bölgenin soğuması ile kaynak prosesi biter. Isıtma zamanı, uygulanan basınç değeri, kullanılan ısıtıcı malzemenin içeriği, manyetik alan frekansı kaynağa etki eden değişkenlerden bazılarıdır [25].

3.3.2.4 Yüksek Frekans Kaynağı

Kaynak prosesinde 100 ile 400 kHz aralığında değişen frekans değerinde elektromanyetik güç uygulaması vardır. Şematik gösterimi Şekil 3.8’de verilen yöntemin ilkesi incelendiğinde, malzeme içerisinde bulunan polar maddelerin yüksek frekans sonucu meydana gelen elektrik akımı ile eş tarafta olmasıdır. Kaynaklı bağlantısı yapılacak polimerlerin iletken olmaması tekniğin temel mantığında önemlidir. Birleştirilmesi düşünülen polimer levhalar iki adet elektrot arasına yerleştirilerek yüksek frekans değerine sahip elektromanyetik oluşur. Polimerlerin iletkenliğinin olmaması enerji kaybına neden olur. Polimer malzemelerin içerisindeki maddelerin dipol moment yapısında olmasıyla erime gerçekleşene kadar titreşirler ve bu sayede ısı meydana gelir. Levhalar oluşan bu ısı ile yumuşatılır, sonraki aşamada da elektrotlarla baskı uygulanır. Elektromanyetik alanın etkisini durdurmasıyla birleşim bölgesi soğuyarak katılaşma gerçekleşir [27]



Şekil 3.8: Yüksek frekans kaynağı [6]

Polimer levhaların çok kısa bir sürede birleştirilebiliyor olması bu yöntemin en büyük üstünlüklerindedir. Uygulama alanlarına bakıldığında yaygın olarak tıp ve tüketim ürünlerinin paketlenmesi için tercih edilen filmlerin kaynağında görülmektedir.

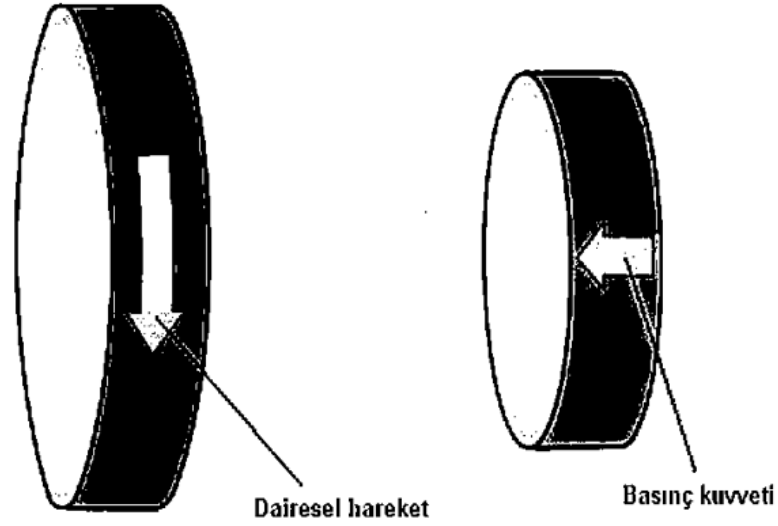
3.3.3 Mekanik Olarak Isının Oluşturulduğu Yöntemler

3.3.3.1 Döndürme Kaynağı

Sürtünme kaynağı olarak da anılan bu teknikte metal ve polimer malzemelerin birleştirilmesi uygulama yönünden aynı mantıkla ilerler. Birleştirilecek parçalardan biri sabit pozisyonda bekletilirken öteki parça sabit parçanın üstünde belirli bir açısal hızda döndürülür. Bu pozisyonda gerçekleştirilen bu harekette meydana gelen sürtünme enerjisi sayesinde ısınma ve bu ısınmanın sonucunda da plastik parçaların ergiyerek birleşmesi gerçekleşir. Parça hareketleri Şekil 3.9’da verilmiştir. Dönme hızı, sürtünme esnasında oluşan basınç değeri, kaynağın gerçekleşme süresi ve kaynak esnasında oluşan ısının tesir ettiği bölgenin boyutu değişkenlerden bazılarıdır. Süre olarak bakıldığında 1 ve 5 saniye arasında değişen kısa bir sürede oluşan bağlantı mukavemeti ana malzemeyle karşılaştırıldığında %10 kadar zayıflama görülür [23].

Isıtmanın tesiri göreceli olarak yüzey hızı ile ilgili olmasından en yüksek ısı değeri katı parçalar için dış kısımlarda meydana gelebilir. Eşit olmayan ısı yayılımı kaynak alanında stres oluşumuna neden olabilir [23].

Matkap presi kullanılarak da sürtünme kaynağı yapılabilir fakat iyi sonuç talebi mevcutsa dönen parçaya kontrollü olarak enerji sağlayabilen bir tertibat kullanılarak kaynak yapılmalıdır. Çoğunlukla volan türünde bir ekipman kullanılarak hareketli parça sabit parçayla temas ettirilir. Bunun sonucunda enerji kaynak bölgesinde yayılım gösterir. Farklı tasarımlar için sabit değerde enerjiyi sağlayabilen sistemler kullanılabilir [23].

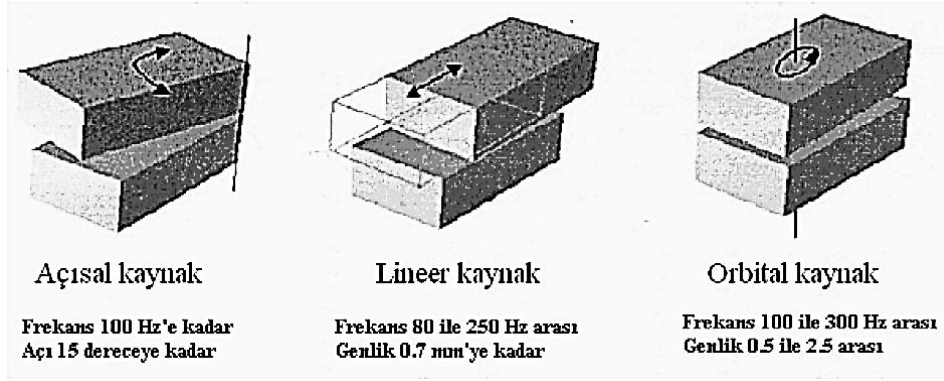


Şekil 3.9: Sürtünme (Döndürme) kaynağı [23]

Kaynak kalitesinin iyi seviyede eldesi ve tekrarlanabilirliği bu tekniğin üstünlüğü olarak göze çarparken zayıf yönü ise birleştirilecek parçalardan minimum bir tanesinin açılma konumuna gerektirmeyen şekilde olması gerekliliğidir [23].

3.3.3.2 Lineer Kaynak

Doğrusal titreşim sürtünme kaynağı olarak da adlandırılan bu yöntem iki termoplastik alanın baskı uygulamasıyla polimer malzemenin eritmeye yetecek seviyede sürtünme yoluyla ısıtılmasını içerir. Faydalanılan 80 ile 300 Hz arasındaki frekansların sağladığı titreşimler durduğunda kaynak bölümleri konumlandırılarak soğumanın gerçekleşmesi beklenir. Bu işlem sürtünme (döndürme) kaynağıyla çok benzerdir. Sürtünme kaynağından işlem esnasındaki hareketin doğrusal olması yönüyle ayrılır. Şekil 3.10'da gösterildiği üzere lineer olarak uygulanmasının yanında açısal olabildiği gibi orbital olarak da uygulanabilir [23, 25].



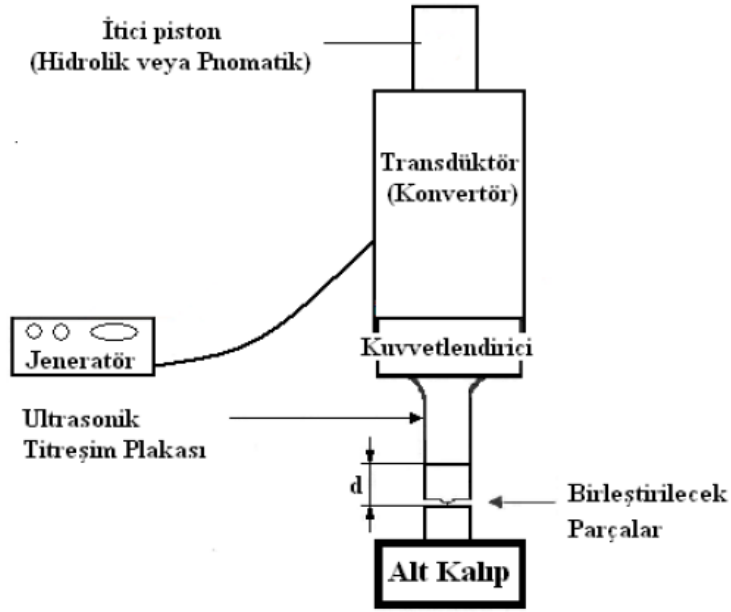
Şekil 3.10: Farklı şekillerde uygulanan titreşim kaynağı [23, 25]

Büyük ve karmaşık şekilli lineer kaynakların fazla miktarlarda gerçekleştirilebiliyor olması tekniğin belirgin üstünlüğüken pratik olması, birden fazla parçayı beraberinde birleştirebilmesi ve geniş yelpazede polimer materyallere uygulanabiliyor olması diğer avantajlarından. Kullanım alanlarına bakıldığında otomotiv sanayi öne çıkmaktadır [25].

3.3.3.3 Ultrasonik Kaynak

Yüksek frekanslı elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi temeline dayanan yöntemde oluşan mekanik enerjinin sağladığı dikey titreşimler sayesinde birleştirilecek plastik malzemelerin kaynağı için yeterli ısı oluşumu gerçekleşir. Oluşan ısıyla yumuşatılan malzemeye ek olarak basınç uygulanmasıyla kaynak işlemi gerçekleşir. 1960 tarihinde kullanılmaya başlayan yöntemde kaynak prosesi malzeme yüzeyleri ve moleküllerde meydana

gelen sürtünmelerin ortak etkisiyle oluşur. Malzemenin ısınmasına ek olarak uygulanan basınç değeri 1 MPa değerindedir. Malzeme yapısı ve kaynaklanacak alanın boyutuna bağlı olarak değişen kaynak süresinin 0,2 ile 5 saniye arasında olması kaynak prosesinin üstünlüklerindedir [25, 28].



Şekil 3.11: Ultrasonik kaynak yöntemi uygulaması [25]

Yöntemde enerji tedariginde kullanılan sistem elemanları yüksek frekansa sahip elektrik enerjisi temin eden jeneratör ve bu enerjiden mekanik titreşimler üreten transdüktördür (bakınız Şekil 3.11). Jeneratör özellikleri genellikle 300 ile 1000 W arasında güç değerinde ve 20 ile 50 kHz arasında frekans değerindedir. Yukarı aşağı yönde hareket edebilen ultrasonik titreşim plakaları da sistemde sürtünme oluşumuna sağlayan elemandır. Yöntem kısıtlarına bakıldığında düşük elastisite modülüne sahip malzemeler için elverişli olmaması ve malzemelerin yumuşama sıcaklıklarının farklılık göstermesi nedeniyle benzer malzeme kullanım gerekliliğidir [25].

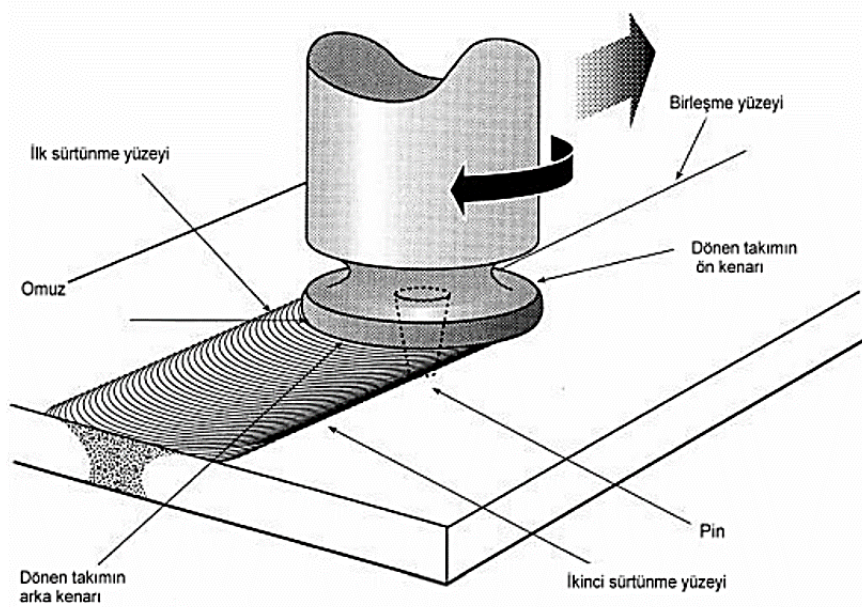
Ultrasonik kaynak tekniği, son dönemde polimer malzemelerin ve demir harici metal parçaların kaynağında tercih edilen proseslerden biridir. Harici bir sabitleyici, solvent esaslı kimyasal ve silikon gerektirmemesiyle yöntem çevre dostu olarak yorumlanabilir [29].

Bölüm 4

Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

4.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı

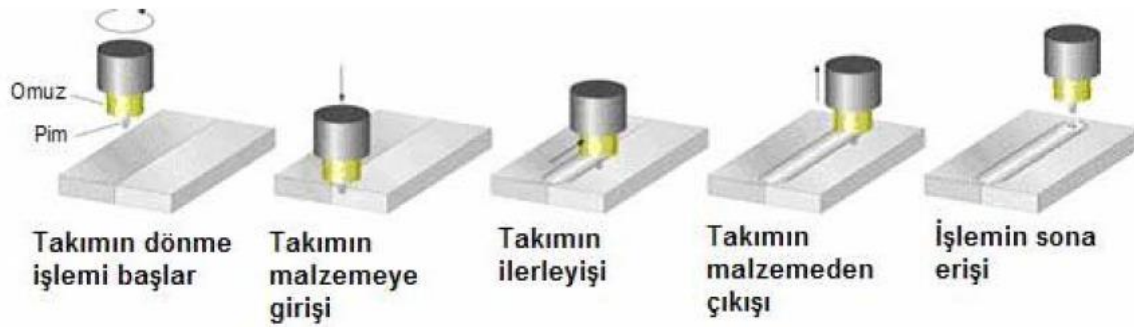
1991 yılının Aralık ayında Wayne Thomas ve onun iş arkadaşlarından oluşan bir takım tarafından icat edilip deneysel olarak kanıtlanmıştır. Patenti, İngiltere Cambridge'deki The Welding Institute (TWI)'a aittir [25].



Şekil 4.1: Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi [30]

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) işlemi metallerin füzyon ya da dolgu maddeleri olmadan birleştirilmesini içerir. Diğer sürtünme kaynaklarında kaynaklanacak parçalar birbiri üzerinde hareket ettirilirken, bu yöntemde tablaya alın altına sabitlenmiş parçalar birbirine sürtünmezler [30].

Proses, karıştırıcı uç olarak adlandırılan ve yüksek devirde dönen omuzlu bir pimin, kaynak edilecek parçalar bir tabla üzerinde alın altına getirilip sabitlendikten sonra, bu parçaların içine daldırılarak sürtünmeden dolayı oluşan ısının tesiriyle parçaları yumuşatması ve çamurumsu bir kıvama gelen malzemenin karıştırılması ve pimin omuz kısmı tarafından sıvanması yoluyla, kaynak yapılacak parçalar boyunca ilerletilmesi sayesinde parçaların birleştirildiği bir sürtünme kaynağı yöntemidir (bakınız Şekil 4.1). Prosesin aşamaları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Yöntemde kaynak yapılacak parçalar ergimediğinden dolayı katı hal kaynağı adını alır. Ulaşılan en yüksek sıcaklık erime sıcaklığının 0,8 katıdır [30].



Şekil 4.2: Sürtünme karıştırma kaynağının aşamaları [23]

İlk olarak metal parçaların birleştirilmesi için denemelerin yapıldığı bu yöntemde metaller üzerinde yapılan çalışmalara yoğun bir şekilde devam edilmiştir. Metallerin yanı sıra çeşitli termoplastik esaslı plastik malzemeler üzerindeki çalışmalara konu olan bu yöntem gelişmeye açıktır ve konuyla ilgili çalışmalar devam etmektedir. Bu kaynak işlemi şu ana kadar magnezyum, titanyum, bakır alaşımları, paslanmaz çelikler, çelikler ve termoplastiklerin birleştirilmesinde kullanılmıştır.

Geleneksel ark kaynak yöntemleriyle kıyaslandığında yüksek mukavemet, yorulma ömrünün fazla olması, uzun kaynaklarda da geçerli olan düşük deformasyon, enerji bakımından verimli olması, temiz ve çevreci olması, düşük artık gerilme oluşumu ile korozyona karşı dirençli olması gibi avantajlar bu yöntemin kullanımdaki tercih sebebidir. Kaynak kalitesi ve mukavemeti gibi özellikleri etkileyen takım devir hızı ve ilerleme hızı, takımın eğimi ve dalma

derinliği ve takım tasarımı önemli kaynak parametreleridir. Gemi yapımı ve denizcilik sanayisi, havacılık sanayisi, demiryolu sanayisi, kara taşımacılığı, soğutma panelleri, gaz tankları ve silindirleri, mobilyalar, beyaz eşyalar bu yöntemin kullanım alanlarındandır.

4.2 Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK), dönen takımın temas ettiği parçalara batırıldığı ve bağlantı oluşumunun, dinamik olarak yeniden kristalize edilmiş malzemeyi içeren bir karıştırma bölgesinin oluşumu yoluyla meydana geldiği bir kaynak çeşididir. Kaynak işleminin sonunda dönen takım bir anahtar deliği bırakarak çekilir. Sürtünme karıştırma nokta kaynak işlemi çevrim süreleri tipik olarak 5 saniyeden az olduğu için oldukça hızlı bir şekilde tamamlanır. Kaynak esnasında aktarılan enerji eksenel kuvvet, dalma derinliği, takım dönme hızı ve torku ile takım dalmasından 200 kat daha fazla olan takım dönmesinin katkısı ile belirlenir [31].

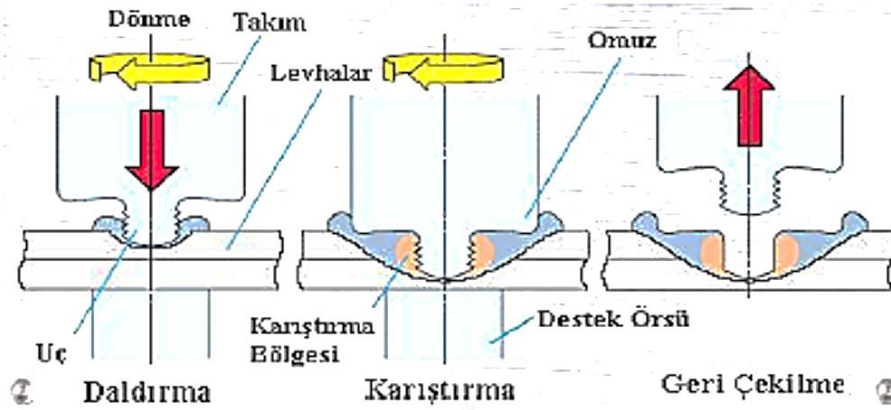
Sürtünme nokta birleştirmesi olarak da adlandırılan sürtünme karıştırma nokta kaynağı 1991 yılında TWI tarafından geliştirilen Sürtünme karıştırma kaynağının bir türevidir. Mazda firmasının 1993 yılında geliştirdiği yöntem modern ve malzemenin ergimesine ihtiyaç duyulmayan katı hal kaynak tekniğidir. Mazda şirketinin öncelikle Mazda RX-7 model araçlarında kullandığı proses RX-8 model araçların imalatında da tercih edilmiştir. Yöntemin üretimde kullanıldığı kısım aracın arka kapısıdır. Bunun dışında farklı araç markalarının da aracın gövdesinde bu yöntemi tercih ettiği görülmüştür. İşlem esnasında birleştirilen materyalle de ergime gerçekleememesi özellikle metallerde sıkça görülen çarpılmaları, çarpılma hatalarını fazlasıyla azaltırken daha kaliteli kaynak oluşumunun elde edilmesine neden olur. SKNK prosesinde oluşan kaynak otomotiv endüstrisinde sıkça tercih edilen direnç nokta kaynağı (DNK) ile benzerlik göstermektedir. Kaynak tekniğinde oluşan bağlantıların özelliklerine tesir eden değişkenler takım geometrisi ve hızı, takımın dalma derinliği ve hızı ile katılma süresidir [19, 32,33].

SKNK tekniği sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile benzer bir işlem içermektedir. Sürtünme karıştırma kaynağından farklı olarak takım kaynak dikişi üzerinde hareket etmek yerine burada takım birleştirilecek parçalara nokta şeklinde girinti yapar. İşlem süresince takım piminin birleştirilecek parçalarla takım omzuna göre daha uzun zaman aralığında teması

mevcuttur. Pim ile iş parçası arasındaki sürtünme vasıtasıyla elde edilen ısı enerjisi kaynakta meydana gelen enerjinin büyük bir bölümünü kapsar.

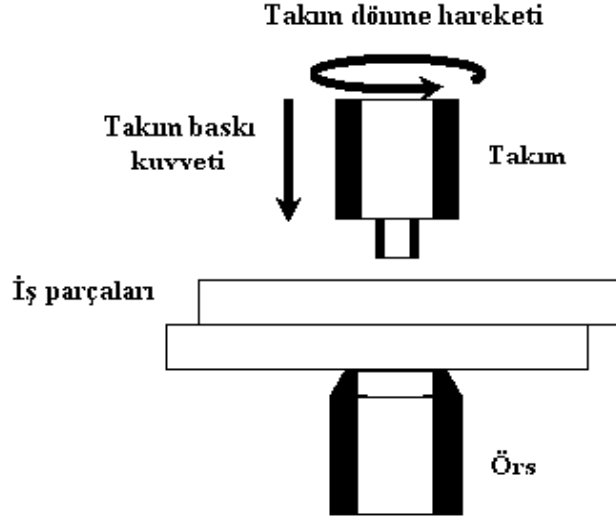
Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile sürtünme karıştırma kaynağı arasındaki fark incelendiğinde birçok yönü aynı olan iki proses arasında ısı oluşumunu gerçekleştiren kısımların ayrımı göze çarpmaktadır. SKK prosesinde takım omzu bu anlamda büyük bir etken iken SKNK yönteminde takım omzu bu görevin ciddi bir bölümünü takım pimine bırakır. SKNK prosesi için yumuşamayı gerçekleştiren sürtünme enerji miktarı birleştirilecek malzeme türü, takım geometrisi ve proses değişkenlerinden etkilenmektedir [19, 25, 34].

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı dalma, karıştırma ve geri çekilme olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır (bakınız Şekil 4.3). İşlem takımının yüksek hızda dönmesi ve takım omzunun üst numunenin üst yüzeyine temas edene kadar kaynak yerine dalmasıyla başlar (bakınız Şekil 4.4). Sonraki aşamada karıştırma kısmı birleştirilecek malzemelerin kaynak bölgelerini karıştırmasıyla homojenlik sağlar. Basınç kuvveti ve sıcaklığın tesiri ile atom düzeyinde malzeme yayılımını sağlanmasıyla birleşme gerçekleşir. İşlem takımının belirli dalma derinliği değeri kadar ilerlemesi sonucu takımın geri çekilmesiyle tamamlanır [34].



Şekil 4.3: Sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulaması [34]

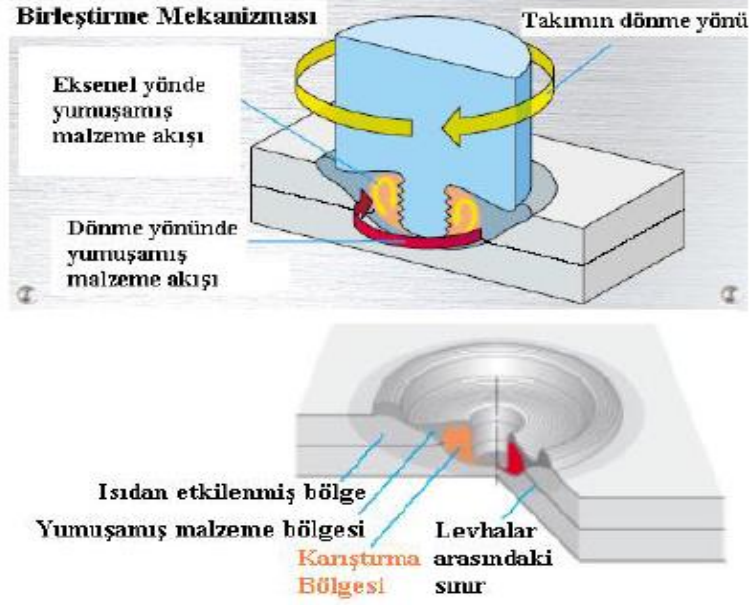
Elektrik direnç nokta kaynağından %40 daha ucuz bir teçhizatla ve %99 daha az enerji ile sacların birleştirilebilmesi bu kaynak yöntemine büyük bir avantaj sağlamaktadır. Alüminyum alaşımlarının SKNK ve nokta kaynak yönteminin mekanik özelliklerinin karşılaştırılmasında da SKNK yönteminin avantajlı olduğu tespit edilmiştir. SKNK birleştirmelerinin statik mukavemeti genellikle çekme makaslama deneyi ile dinamik mukavemeti ise yorulma deneyi ile tespit edilmektedir [19].



Şekil 4.4: Sürtünme karıştırma nokta kaynağı prensibi [25]

SKNK prosesinin zayıf yönü olarak kaynak dikişin merkezinde anahtar deliğinin bırakılmasıdır. Metal parçalarda boyama esnasında bu anahtar deliğinin iç kısmı bütünüyle boyanamaması nedeniyle pas oluşumu meydana gelmektedir. Deliği içerisine yağmur suyunun kaçması pas oluşumunun yaygın nedenidir. Tekrar doldurmalı SKNK prosesi bu sorunun önüne geçmeyi sağlamaktadır [19].

SKNK prosesinden demir harici birçok metal ile çelik saçlarda verimli sonuçlar verecek şekilde yararlanılmıştır. Tekniğin benzer ve benzer olmayan metalik malzemelerin birleştirilmesine olanak sağlamasının yanında son dönemde polimer materyaller üzerine uygulamaların ve araştırmaların fazlalaşması dikkat çekmektedir [35].



Şekil 4.5: Birleştirme mekanizması [36]

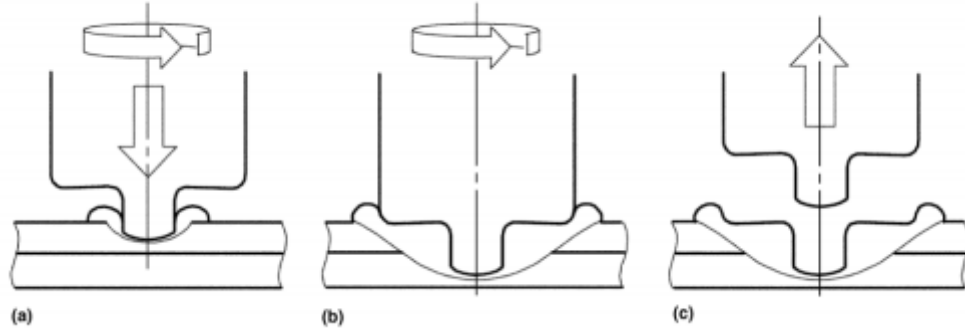
Malzeme hareketi incelendiğinde Şekil 4.5'te gösterildiği üzere takımın uç kısmının etrafında yumuşayan malzemenin eksenel yani malzemenin kalınlığı yönünde hareketi görülürken dönme etkisiyle de malzemenin sürüklenme hareketi yaptığı gözlenmiştir [36].

4.2.1 Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Tipleri

SKNK üzerine zaman içerisinde yapılan araştırmalar sonucu geliştirme süreçlerinin tamamlanmasıyla yeni çeşitler keşfedilmiştir. SKNK tiplerini sınıflandırdığımızda daldırmalı, tekrar doldurmalı, salınımlı, dikişli ve pimsiz SKNK olmak üzere beş kategoriye ayrılabilir.

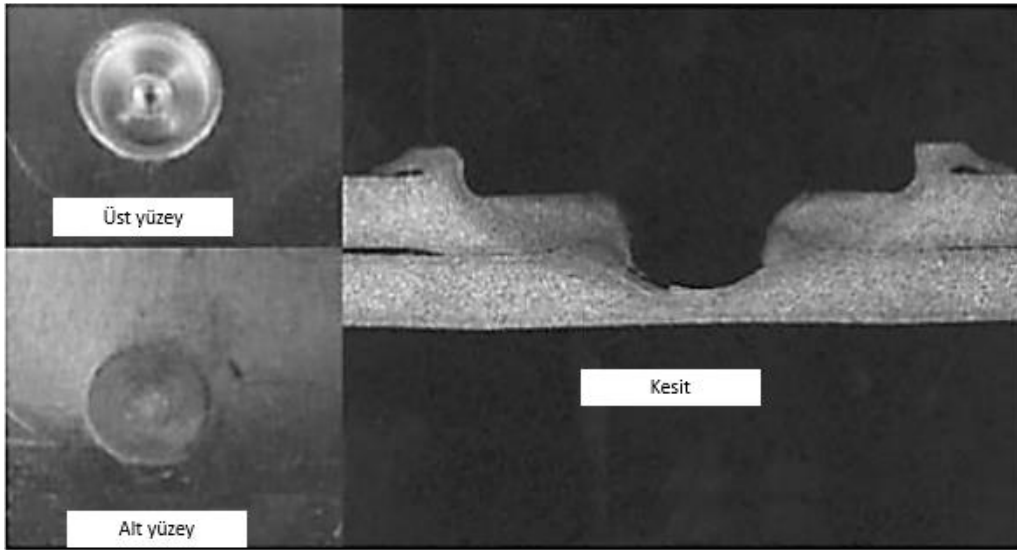
4.2.1.1 Daldırmalı Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

En yaygın kullanılan SKNK yöntemlerinden olan daldırmalı SKNK'da işlem takım omzundan dışarı uzanan daha küçük çaplı bir pime sahip takımın dönerek önceden belirlenmiş mesafeye kadar malzemeye dalmasıyla başlar. Tanımlı mesafe ulaştığında takım omzuyla bindirme kaynağı şeklinde bağlanmış numunelerden üstte kalan malzeme arasında sürtünme oluşur. Bu esnada takım omzu üstteki numuneye basınç uygulayarak birleşme şeklinin belirlenmesini sağlar. İstenilen karıştırma süresine ulaşıldığında takımın geri çekilmesiyle delik oluşumuyla beraber kaynak işlemi tamamlanmış olur. Şekil 4.6'da daldırmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.6: Daldırmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağının şematik gösterimi, (a) Dalma, (b) Birleşme, (c) Geri Çekilme [20]

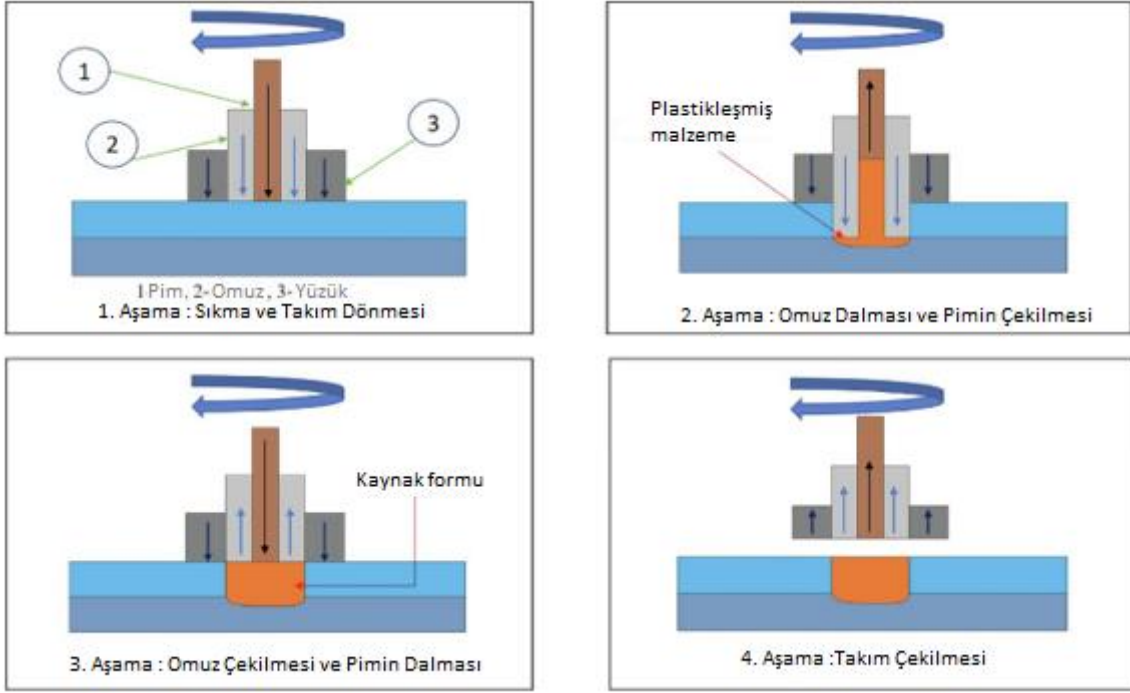
Birleşme aşamasındaki pim rolü önemlidir. Malzeme akış yönünü de belirleyerek numunelerin birleşme bölgesindeki yumuşamış malzemeyi karıştırarak bölgedeki homojenliği artırır. Şekil 4.7’de kaynağın kesit görünümünde takıma bağlı pim ilerleme mesafesi ve bıraktığı delik görülebilir. Benzer şekilde birleştirilen numunelerin birleşme yüzeyleri de kesit görüntüsünde bellidir.



Şekil 4.7: Daldırmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağının kesit görünümü [37]

4.2.1.2 Tekrar Doldurmalı Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

Helmholtz tarafından 2004 yılında Almanya’da geliştirilen tekrar doldurmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağının takımı sıkıştırma yüzüğü, pim ve omuzdan meydana gelmektedir [38].

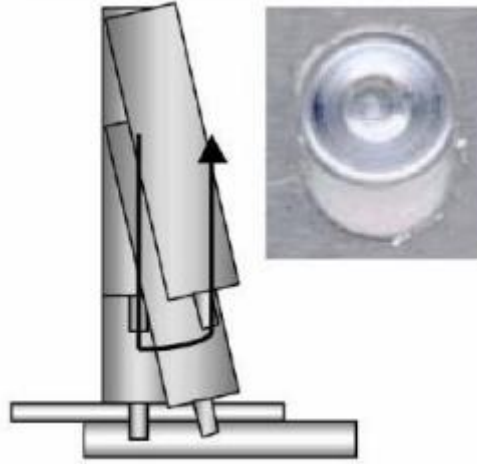


Şekil 4.8: Yeniden doldurmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağının şematik gösterimi [38]

İlk aşamada sıkıştırma yüzüğü yardımıyla takım üstteki iş parçasına kenetlenir ve omuz dönmeye başlayarak üstteki iş parçasıyla harekete gösterdiği direnç sonucu oluşan sürtünme ısısını meydana getirir. Sonraki aşamada takım omzu malzemenin yumuşamasını sağlayacak şekilde önceden belirlenen dalma derinliğine ulaşana kadar iş parçasına dalma işlemine başlar ve bu sırada pim geri çekilerek boşluk oluşturur. Takım kolunun geri çekilmesiyle pimin oluşturduğu boşlukta biriken malzemenin takım kolunun oluşturduğu boşluğu doldurması sonucu üçüncü aşama tamamlanır. Son aşamada takımın düz bir kaynak yüzeyi bırakacak şekilde tamamen geri çekilmesiyle yüzey hatasının oluşmadığı kaynak işlemi tamamlanır (bakınız Şekil 4.8). Burada önemli nokta standart SKNK'da istenmeyen deliğin oluşumu engellenmiş olur [38].

4.2.1.3 Salınlı Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

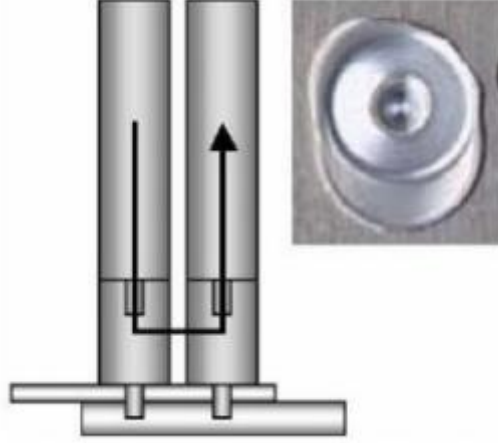
Hitachi tarafından geliştirilen bu yöntemde standart SKNK'dan farklı olarak takımın dalma sonrası yok sayılabilecek seviyede yukarı kalkarak salınım hareketinde olduğu gibi büyük yarıçap yörüngesinde küçük bir açıyla salınım yapar (bakınız Şekil 4.9). Salınım esnasında karıştırma işlemi gerçekleşir ve takım dalma adımı esnasında numuneleri birleştirmek için omuz yardımıyla basınç uygular. Takımın bu salınım hareketi daha büyük bir kaynak alanı oluşturduğundan kaynak dayanımının da daha iyi seviyede olmasını sağlar [20, 37].



Şekil 4.9: Salınlı sürtünme karıştırma nokta kaynağının şematik gösterimi [37]

4.2.1.4 Dikişli Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

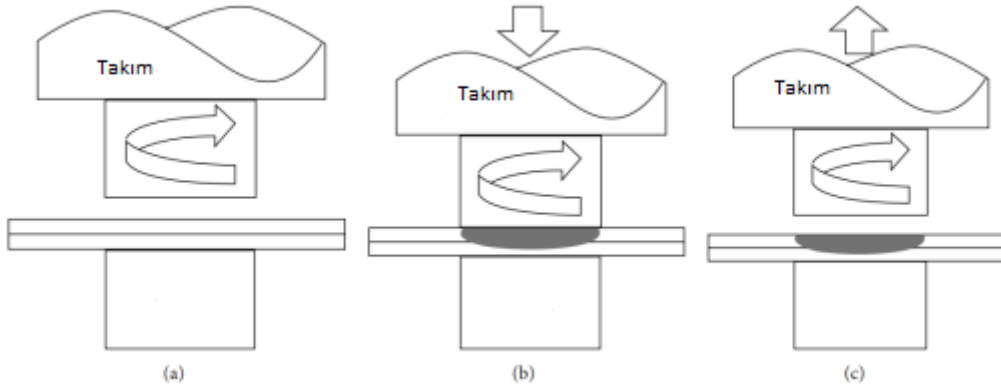
SKK'daki takım dalması sonrası lineer hareketin çok kısıtlı bir sürede de olsa uygulandığı bir diğer SKNK çeşidi olan dikişli SKNK yönteminde tıpkı salınlı SKNK olduğu gibi daha büyük kaynak bölgesi ve dayanımı elde edilir (bakınız Şekil 4.10). Salınlı SKNK'a göre dezavantajı ise bu yöntemde takım hareketi için üç adet motora ihtiyaç duyulurken salınlı SKNK yönteminde iki adet motor kaynak işlemi için yeterli olmaktadır [6].



Şekil 4.10: Dikişli sürtünme karıştırma nokta kaynağının şematik gösterimi [20]

4.2.1.5 Pimsiz Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

Tazoki tarafından geliştirilen pimsiz SKNK'nın yönteminin diğer yöntemlerden ayrıldığı yönü kaynak işleminin pimsiz bir takım ile gerçekleştirilmesidir. Şekil 4.11'de gösterildiği üzere standart SKNK'da olduğu gibi dalma karıştırma ve geri çekilme adımlarıyla kaynak işlemi gerçekleştirilir [6]



Şekil 4.11: Pimsiz sürtünme karıştırma nokta kaynağının şematik gösterimi, (a) Dalma, (b) Karıştırma, (c) Çekilme [37]

Bu yöntemde kaynak sonrası pim nedeniyle oluşan delik oluşumu gerçekleşmediği için daha iyi bir kaynak görünümü elde edilir. İşlem basit olmasının yanında yapılan çalışmalarla düşük karıştırma sürelerinde dayanımı daha yüksek kaynak bağlantıları elde edilmiştir [37].

4.2.2 Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Proses Parametreleri

Kaynak esnasında malzeme yumuşaması ve kaynak havuzu meydana getirmek amacıyla takım ile parça arasındaki sürtünme takımın belli bir hızda dönmesiyle gerçekleşir. Dönme hızının artmasıyla kaynak havuzunun oluşma süresi kısalır. Daha önce yapılan çalışmalara bakıldığında kaynak kalitesi ve mukavemeti için dönme hızının önemli kaynak parametrelerden biri olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada da en yüksek bağlantı kuvvetini sağlayan dönme hızı değerinin belirlenmesi amacıyla denemeler yapılmıştır ve dönme hızı parametresi değişken olarak belirlenmiştir [22, 37].

Dalma hızı kaynak takımının kaynak edilecek parça yüzeyinden dalma derinliğine ulaşıncaya kadar olan ilerleme hızıdır. Kaynak bağlantısının kalitesi ve mukavemetini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulamalarında malzeme seçimine ve diğer parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu çalışmada en iyi kaynak kuvvetini gösteren parametrelerin elde edilmesi için farklı dalma hızları ön deneylerde kullanılmıştır ve en uygun değer sabit parametre olarak seçilmiştir [22, 37].

Dalma derinliği belirli dönme hızına sahip kaynak takımının karıştırıcı uç tabanının kaynaklanacak üst numune yüzeyine temas ettiği ilk nokta ile malzemenin üst yüzeyine dik doğrultuda belli bir ilerleme ile dalma yaptığı son nokta arasındaki mesafedir. Genellikle kaynak takımının omuz kısmı malzemenin üst yüzeyinden bir miktar içeri girmesi ile dalma hareketi sonlandırılır. Önceki çalışmalara bakıldığında kaynak bağlantısının mekanik özellikleri ve kalitesini etkileyen önemli parametrelerden biri olarak vurgulanmıştır. Yine parametrelerden biri olarak bu çalışmada ön deneylerde kullanılmıştır ve en uygun değer sabit parametre olarak seçilmiştir [22, 37].

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı esnasında dalma işlemi gerçekleşip takım dalma yaptığı son noktaya ulaştıktan sonra geri çekilmeden işlemi öncesi bir süre döner pozisyonda bekler. Bu süreye bekleme (karıştırma) süresi adı verilir. Bekleme süresi kaynak mukavemetini etkileyen en önemli kaynak parametresidir. Bu süre esnasında takımın pim ve omuz kısımlarının malzemeyi karıştırıcı etkisiyle kaynak havuzu oluşturulur. Ayrıca ısının da etkisiyle yumuşayan ve akıcı haldeki bu kısımdaki malzeme birbiriyle karışarak kaynak dayanımının artmasını sağlar. Literatürdeki yapılan çalışmalara bakıldığında daha uzun bekleme süresinin daha yüksek ısı oluşumuyla beraber çekmedeki kesme dayanımı arttırdığı görülmüştür. Bu çalışmada ön deneylerde kullanılmıştır ve en uygun değer sabit parametre olarak seçilmiştir [22].

4.2.3 Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Takım Tasarımı

Kaynak parametreleri ve takım geometrisi sürtünme karıştırma nokta kaynağının karıştırma bölgesinin oluşumuna ve kaynak mukavemetine etki etmektedir. Takım omuz ve pim olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Pim sürtünme ısısını üretme yoluyla malzemeyi deforme eder ve ısınmış malzemenin karışımını sağlar. Takım omzu kaynak süresince ısı oluşumunu sağlar, malzemenin dışarı atılmasını önler ve takımın çevresinde malzeme hareketine yardımcı olur [39].

Birleştirme takımı genellikle silindirik bir takımın merkezinden dışarı çıkıntı yapmış küçük bir vidalı veya yivli takım ucu tasarımına sahiptir. Çeşitli takım şekilleri ve boyutları, birleştirme koşullarına bağlı olarak kullanılabilir (bakınız Şekil 4.12). SKK ve SKNK'nın birçok farkı bulunmaktadır. Bunlardan biri sürtünme karıştırma nokta kaynağında takım ilerlemesi olmamasıdır. SKK kalın alın kaynaklarında uygulanırken, SKNK daha az kalın olan numunelerin bindirme kaynağında uygulanır [19, 32].



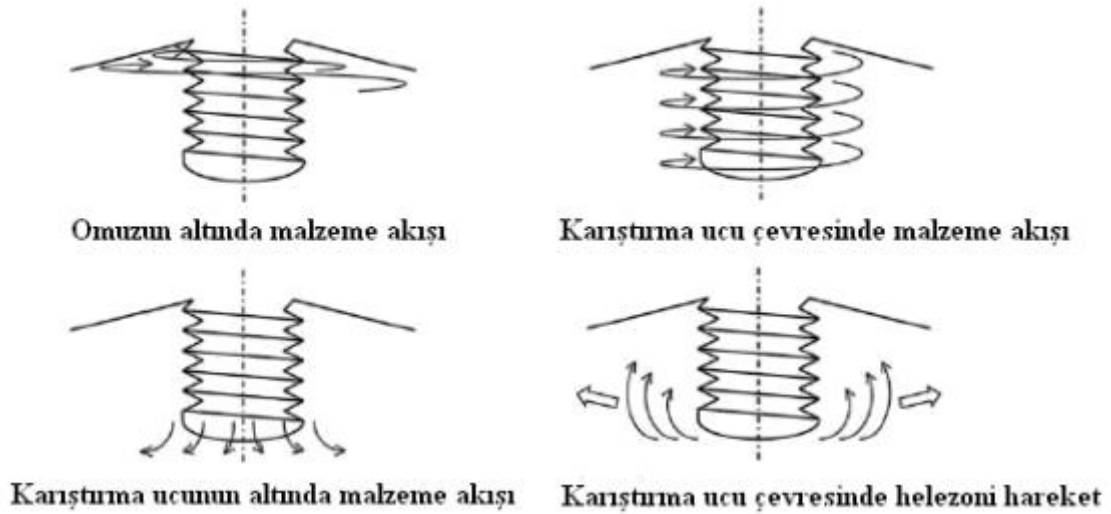
Şekil 4.12: Çeşitli takım omuz ve uç profilleri [19]

4.2.4 Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Mekanik Özellikleri

Çoğu birleştirme tekniğinde olduğu gibi SKNK'nın mekanik özellikleri kaynak dayanımını ciddi oranda etkilemektedir. Çekme, eğme ve çentik darbe testleri gibi mekanik testlerle kaynak dayanımı belirlenmektedir [20]. Dalma hızı, dalma derinliği, ilerleme hızı, karıştırma süresi ve ön ısıtma süresi gibi SKNK proses parametreleri ile takım geometrisi kaynağın mekanik özelliklerinin değişiminde önemli ölçüde rol oynamaktadır.

4.2.5 Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında Malzeme Akışı

Dalma aşaması sonrası takıma bağlı pim yuvarlayan malzemeyi dönme yönünde karıştırmasıyla malzeme akışı meydana gelir. Bu karıştırma bölgesinde sürtünme sonucu oluşan yüksek sıcaklığın etkisiyle yumuşayan ve plastik deformasyona uğrayan malzeme bulunur. Takım omzunun yaptığı basınç birleşmede büyük rol oynarken pimin etkisiyle malzeme meydana gelen malzeme akışıyla beraber katı halde malzeme birleşmesi gerçekleşir [25].

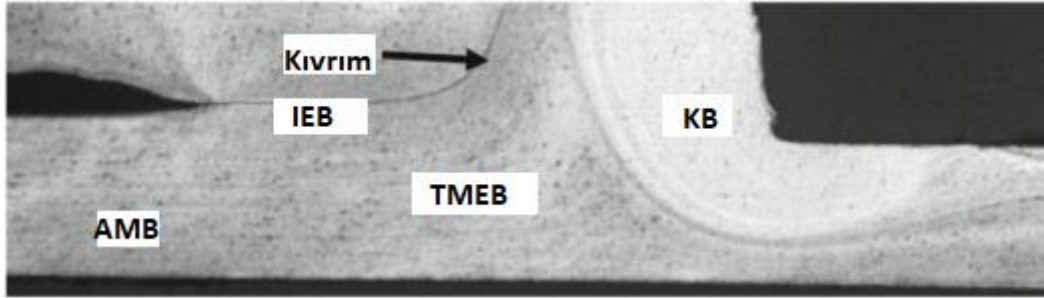


Şekil 4.13: Sürtünme karıştırma nokta kaynağının esnasında malzeme akışının şematik gösterimi [25]

SKNK prosesinde kaynak mukavemetine doğrudan etki eden karıştırma bölgesi Şekil 4.13'te gösterildiği gibi dört aşamada oluşmaktadır. Takım omzunun baskısıyla taşan malzeme pim vidanın boşluklarına yerleşerek dönme hareketiyle aşağı ilerler ve pim altında kalan malzeme yan taraflara doğru taşma göstererek dairesel hareket etkisiyle yukarı doğru hareket eder. Bu sayede birleştirilecek malzemelerin homojenliği sağlanır.

4.2.6 Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağının Mikroyapısı

Kaynak metalürjisi hakkında değerlendirme sonuçlarını belirlemek için mikroyapı incelemesi gereklidir. Kesit görüntüsü kaynak derinliği ve karıştırma bölgesinin yapısı hakkında fikir verir (bakınız Şekil 4.14). Ana malzeme, karıştırma, termomekanik olarak etkilenen ve ısıdan etkilenen bölgeler kaynak karakteristiğini belirleyen mikroyapısal bölgelerdir [20].



Şekil 4.14: Sürtünme karıştırma nokta kaynağı numunesinin kesit görüntüsü [25].

Kaynak malzemelerinin arayüzü kaynaklı geometrik bir hata olan Kıvrım bölümü SKNK'a özgü bir niteliklerdir. Yeniden kristalleşmenin gerçekleştiği takıma bağlı pimin hemen yanındaki karıştırma bölgesi (KB) takımın geri çekilmesi sonrası soğur ve az da olsa tanecik büyümesi gerçekleşir. Karıştırma bölgesinin ince taneye sahip olmasıyla daha iri tanelerden oluşan ısıyla mekanik özelliklerin ve mikroyapısının değişime uğramadığı ana malzeme bölgesinden (AMB) dayanımı daha fazladır. Kaynağın uygulandığı kısmın dışında kalan ana malzeme bölgesi ısınsa da plastik deformasyona uğramamıştır. Ana malzemeden kaynak merkezine daha yakın bölgeyi kapsayan plastik deformasyona uğramasa da mikroyapının ısı kaynaklı değişime uğradığı bölgeye ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) adı verilir. Termomekanik olarak etkilenen (TMEB) bölge karıştırma bölgesindeki gibi yeniden kristalleşme meydana gelmediği ancak plastik deformasyona uğrayan bölgedir [20, 25].

4.2.7 SKNK Avantajları ve Uygulama Alanları

Öncelikle alternatifi olduğu direnç nokta kaynağıyla kıyaslandığında enerji sarfiyatının çok düşük olması ve düşük bakım maliyetine sahip olması en büyük avantajlarından birisidir. Bunun yanında ayırım fark etmeksizin aynı ya da değişik malzemelerin kaynağının yapılabilmesi malzemelere göre uygulama kısıtını fazlasıyla azaltmaktadır. Kaynak sonunda malzeme kaybının az olması malzeme tasarrufu olarak yöntemin kolay ve hızlı uygulanabilmesi seri imalat koşullarına yatkınlık olarak ve dışarıdan malzeme eklemesi olmadığından kaynak bölgesinin ana malzeme özelliklerine yakınlık olarak avantajları mevcuttur. SKNK özellikle metal malzemelerde ergime olmadan birleştirmeyi sağlaması yönüyle ergitmeli kaynak yöntemlerine göre avantajlıdır. Benzer şekilde ergitme olmaması çarpılma ve artık gerilimi oluşma ihtimalini fazlasıyla düşürür [15, 25, 40].

SKNK tam otomatik sistemlerinin entegre edilmesi açısından uygun olmasının yanında kaynak bölgesinde gözenek ve sıçramanın olmaması diğer önemli avantajlarındanıdır. Yöntemde dolgu malzemesi kullanmaya gerek olmadığı gibi erimeyen uç kullanımı da tasarruf sağlar. Plastiklerle birleştirmede gereken yüzey temizliğine SKNK yönteminde ihtiyaç yoktur. Bunun dışında gaz kaynaklarında kullanılan koruyucu gaz kullanım gereksinimi bu yöntemde yoktur [40, 41].

Tablo 4.1: SKNK uygulama alanları [25]

Endüstri kolu	Uygulama Şekli	SKNK yönteminin sağladığı avantajlar
Otomotiv	Alüminyum sac birleştirmeleri	Hatasız kaynak Düşük maliyet
Vagon sanayi	Sac birleştirmeleri	Daha az çarpılma Yüksek kaynak kalitesi
Uzay-Havacılık	İskelet, Kanat kirişleri	Daha kaliteli birleştirme Düşük maliyet
Golf arabaları Kar araçları	Şasi, süspansiyon	Daha az çarpılma Uzun yorulma ömrü
Savunma sanayi	Gemi paletleri	Düşük maliyet
Gemi inşaat	Omurga, Depolar	Yüksek mukavemet Daha az çarpılma
Akü üretimi	Kurşunlarda	Yüksek kaliteli birleştirme Korozyon koruma tabakası mevcutken kaynak yapabilme
Elektrik	Kutular, Isı giderme kanatları	Düşük maliyet Yüksek ısı iletimi

SKNK birçok sektörde artan bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle kaynağı hızlı gerçekleşmesi ve ilk kurulum maliyetinin az olması sanayide yatırım ve uygulama için yöntemi tercih edilir kılmaktadır. Diğer yöntemlerde yaşanan birçok kaynak hatası elimine edildiği gibi homojenlik nedeniyle daha kaliteli kaynakların eldesi seri üretim koşullarında istenen sürekli kalite ve düşük hata oluşumunu sağlar. Tablo 4.1’de Yöntemin uygulama alanları ve avantajlar gösterilmiştir.

Bölüm 5

Polimerlerin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

Literatürde çeşitli plastiklerle ilgili farklı değişkenlerin kaynak üzerine etkisini araştırmak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda bazı parametrelerin özellikle kaynak mukavemetine etkisinin olduğu belirtilmiştir.

Arıcı ve Şenol polipropilen malzeme kullanarak takım bekleme süresi ve dalma derinliğinin bindirme kaynağı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu iki parametrenin farklı değerlerini deneylerde kullanarak kaynak mukavemetinin değişimini saptamışlardır. Çekme, kayma ve kırılma testleri sonucunda her iki parametrenin de kaynak bağlantısının dayanımını etkilemiş olduğunu gözlemlemişlerdir ve bu iki parametre için optimum değerler belirlemişlerdir. Karıştırma süresinin sürtünme sonucu oluşan enerjinin artması ve yumuşayan malzeme alanının genişlemesi yönünde doğru orantılı bir etki yaptığı gözlenmiştir. Dalma derinliğinin ise ideal değere kadar bağlantı mukavemetine olumlu etki yaptığı ancak ideal değer üstüne çıkıldığında malzeme kalınlığının da azalması nedeniyle bu etkinin olumsuz dönüşümü görülmüştür [32].

Sonraki çalışmalarında Arıcı ve Şenol yine polipropilen malzeme için farklı bekleme süresi, devir sayısı, dalma derinliği ve dalma hızı değerlerini kullanarak bindirme kaynak işlemini gerçekleştirmiştir. Deneylerin sonucunda bu dört parametrenin en iyi kaynak özelliğini gösterdiği optimum değerler belirlenmiştir. Bekleme süresi ve dalma derinliğinin artışıyla çekme kuvvetlerinin arttığı gözlenmiştir. Bekleme süresinin veya dalma derinliğinin artması ile kaynak bölgesi iz çapı artmış olduğu, iz çapının artmasına paralel olarak da çekme kuvveti değerleri artmış olduğu sonucuna varılmıştır. Takım devrinin artışıyla belli bir çekme kuvveti değerine daha kısa bekleme süresinde ulaşılması artan devir sayısı ile ortaya çıkan sürtünme

ısısı girdisinin artışı, dolayısıyla kaynak bölgesinde yumuşamış malzeme miktarının artması nedeniyle olduğunu belirlemişlerdir. Tüm deney parçalarındaki kaynak noktalarının adeta bulamaç veya çamur gibi sıvandığı ve özellikle düşük bekleme sürelerinde, devir sayılarında ve dalma derinliklerinde daha belirgin olan yönteme ait karakteristik bir boşluğun oluştuğu görülmüştür. Ancak artan devir sayısı, bekleme süresi ve dalma derinliklerinde kaynak bölgesine olan ısı girdisine bağlı olarak artan yumuşamış malzeme miktarıyla bu boşluğun dolduğunu gözlemlenmiştir. 800 d/d dönme hızı için karakteristik boşluğun hep oluştuğu görülürken 1250 d/d dönme hızı ve 125 saniye bekleme süresinde bu boşluğun dolduğu görülmüştür. Hem gözenekli yapının oluşmadığı, hem de tekrarlanan deneylerde elde edilen çekme kuvveti değerlerinde geniş salınımlar olmayan 1250 d/d devir sayısı optimum dönme hızı olarak belirlenmiştir. Takım omzunun bir miktar malzeme yüzeyinden içeri daldırılması sayesinde omuz altındaki karışım gösteren malzemede daha yüksek bir basma etkisi ile daha iyi yumuşama sağlanıp, kaynak bağlantısının daha iyi bir metalürjik bağa sahip olması ve daha iyi performans göstermesi sağlanmıştır [19].

Oliveira ve diğ. sürtünme nokta kaynağının termoplastikler üzerine uygulanabilirliğine dair bir çalışma yapmıştır. 3 mm kalınlığında polimetil metakrilat (PMMA) malzeme için kaynak özellikleri incelenmiştir. Mikroyapı yansıtıcı ışık optik mikroskopisi ile değerlendirilmiştir. Bölgesel mekanik özellikler Vickers mikro sertliği ile analiz edilmiş ve bağlantı dayanımının belirlenmesi için çekme testi uygulanmıştır. Dalma derinliği, bekleme süresi ve dönme hızı arttırıldığında daha dayanıklı bağlantılar elde edildiği gözlenmiştir. Bunun sebebinin de daha yüksek ısı girdisi ve ısı sonucu karışan malzeme hacminin artmasıyla açıklanmışlardır. Sonuç olarak mevcut sürtünme nokta kaynak kuvvetinin mevcut diğer kaynak teknikleriyle karşılaştırılabilir olduğu görülmüştür [42].

Arıcı ve Şenol polipropilen malzemenin 3 farklı bindirme tiplerini deneyerek yapıştırmalı bağlantı, sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantı ve iki bağlantı yönteminin beraber kullanıldığı hibrit bağlantıyı karşılaştırmıştır. Yapılan test ve gözlemlerin sonucunda sürtünme karıştırma nokta kaynaklı ve hibrit bağlantının yapıştırmalı bağlantıya göre daha dayanıklı olduğunu ve en iyi dayanımın sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantıya ait olduğunu belirlemişlerdir [43].

Bilici ve Yükler yüksek yoğunluklu polietilen malzemelerin sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemiyle birleştirilmesine kaynak parametreleri ve takım geometrilerinin etkilerini araştırmışlardır. Polietilenin sürtünme karıştırma nokta kaynak birleştirmesi ile yüksek kaynak dayanım değerleri elde etmenin mümkün olduğu görülmüştür. Birleştirme esnasında kaynak bölgesinin sürtünme ısıyla birleştiği görülmüştür. Takım dönme hızı, dalma derinliği ve dönme sonrası bekleme süresinin kaynak dikişi oluşumunda ve dolayısıyla kaynak dayanımı üzerinde önemli tesirleri olduğu bulunmuştur. Benzer Şekilde takım geometrisinin de kaynak dayanımına etkisi görülürken takım dalma hızının polietilenin sürtünme karıştırma nokta kaynağı özellikleri üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür. Kaynak optimum değerlerin altında seğilmesi halinde küçük dikiş boyutu ve düşük kaynak dayanımı elde edildiği tespit edilirken optimum değerlerin seğilmesiyle büyük dikiş boyutu ve yüksek kaynak dayanımı elde edildiği tespit edilmiştir. Optimum değerlerin üzerinde ise büyük dikiş boyutu elde edilmesine rağmen dikişte mekanik bölünme gerçekleştiğinden kaynak dayanımının düştüğü görülmüştür. Konik takımlar ile en yüksek dayanım elde edilirken optimum koniklik açısı 15° olarak bulunmuştur [25].

Bilici polipropilen levhaların takım geometrisi ve özelliklerinin sürtünme karıştırma nokta kaynağı özelliklerine etkisini incelemek için bir çalışma yapmıştır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı için farklı pim açıları, pim uzunlukları, omuz çapları ve omuz açıları ile dört farklı takım pimi geometrisi kullanmıştır. Kaynak dayanımını ölçmek için bindirme çekme testleri uygulamıştır. En büyük çekme dayanımı, dişli takım için uzunluğu 0,8 mm adım uzunluğu, 7,5 mm pim çapı, 5,5 mm pim uzunluğu, 30 mm omuz çapı ve 6° omuz açısı ile elde edilmiştir. Takım geometrisinin karıştırma bölgesi oluşumu ve bindirme kayma kaynağının kırılma yüküne etki ettiği gözlenmiştir. Kaynak bölgesinde aşırı yüksek sürtünme ısıtması meydana gelirse, polipropilen sürtünme karıştırma nokta kaynağında zincir kırılması meydana gelebileceği ile aşırı sıcaklık ve basınç zincir yapısının bozulmasına neden olacağı belirtilmiştir. Böylece aşırı ısı ve basıncı kontrol etmenin önemi ortaya konulmuştur. Bir dişli pimle elde edilen kaynak kuvvetinin, vida adımı ile azalacağı belirtilmiştir. Dişli pimlerin vida adımı uzunluğu kaynak kalitesi ve kaynak gücü için çok önemli olduğu sonucuna varılmıştır [39].

Bilici ve Yükler polietilen levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynaklarında önemli kaynak parametrelerinin ve statik dayanıma etkili takım özelliklerinin etkisi incelemek için bir çalışma yapmıştır. Deneylerde, pim profili, pim uzunluğu, pim açısı, bekleme süresi ve takım dönme hızının sürtünme karıştırma noktası kaynak oluşumu ve kaynak gücü üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Tüm deneyler sonucunda optimum kaynak parametreleri (takım dönüş hızı 710 d/d, takım dalma derinliği 5,7 mm, bekleme süresi 45 saniye, takım gecikme süresi 30 saniye) belirlenmiştir. Takım pimi geometrisinin, kaynak dolgusu kalınlığını ve kaynak gücünü önemli ölçüde etkilediği ve ayrıca kaynağın makroyapısı ve kaynak gücünün optimum kaynak parametrelerine bağlı olduğu belirtilmiştir. Gecikme süresi, takım pimi açısı, omuz kıvrım açısı ve omuz çapının, sürtünme karıştırma noktası kaynak dolgu kalınlığını ve bağlantının kaynak kuvvetini etkilediği sonucu ortaya çıkmıştır. Çalışmada kullanılan altı farklı takım pimi profilinden en iyi kaynak kalitesini konik silindirik pim profili sağlamıştır. Aynı dalma derinliğinde diğer pim profillerine göre konik silindirik pim daha yüksek kaynak dayanımı sağlamıştır [44].

Dashatan ve ark. sürtünme karıştırma nokta kaynağının polimetil metakrilat (PMMA) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) için uygulanabilirliğini incelemek üzere bir çalışma yapmıştır. Bu amaçla, bindirme bağlantı kaynaklı numuneleri yapmak için ek bir plaka ile donatılmış gelişmiş bir takım kullanılmıştır. Deneysel testler, takım dönme hızının, takım dalma hızının ve bekleme süresinin proses parametreleri olarak belirlendiği 33 tam faktörlü deney tasarımına göre yapılmıştır. Proses parametrelerinin mekanik dayanım olarak kaynak dayanımı üzerindeki etkisinin elde edilmesi için sinyal-gürültü oranı ve varyans analizi kullanılmıştır. Çalışma yeni tasarlanan takımla bu iki termoplastiğin kaynağının mümkün olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, takım dönme hızı, takım dalma hızı ve bekleme süresi gibi değişken işlem parametrelerinin kaynak kuvvetini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Kaynak mukavemeti için en etkili parametrenin takım dalma hızı olduğu görülmüş ve takım dalma hızının artmasının kaynak kuvvetini azalttığı belirlenirken karıştırma süresinin arttırılmasının da kaynak kuvvetini arttırdığı belirlenmiştir [45].

Junior ve ark. ticari bir polimetil metakrilat ve silis katkılı bir polimetil metakrilat nanokompozitinin sürtünme nokta kaynağına uygunluğunu araştırmışlardır. 1000, 2000 ve 3000 d/d dönme hızlarında kaynaklı tek nokta bağlantılar üretilmiştir. 1000 d/d'da üretilen bağlantı, yetersiz ısı girişini gösteren keskin kaynak çizgileri (zayıf bağlantılar) sergilerken, 3000 d/d'da üretilen kaynaklar aşırı plastik deformasyon (alt levhanın şişmesi), daha yüksek ısı girişi ile ilişkili olarak hacimsel kusurlar ve malzemenin içinde karıştığı malzemenin eksikliğini göstermiştir. 2000 d/d bir dönme hızında üretilen kaynak, daha doğru ısı girişi nedeniyle kaynak çizgileri ve hacimsel kusurların bulunmamasıyla gösterilen, geliştirilmiş malzeme karışımına yol açmıştır. Bu kaynak durumu, daha ileri mekanik testler için seçilmiştir. Sonuç olarak 2000 d/d dönme hızında hatasız ve güçlü kaynak bağlantısı elde edilmiştir [46].

Başka bir çalışmada Junior ve ark. ticari bir polimetil metakrilat ve işlevselleştirilmiş silika katkılı PMMA nanokompozitlerinin sürtünme nokta kaynağının uygulanabilirliğini araştırmıştır. Birleştirilen numunelere her malzeme kombinasyonuna ayrı ayrı olmak üzere bindirme kopma testi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada oluşturulan nokta kaynaklarının mikrodalga kaynaklı PMMA bağlantılarından daha zayıf, ultrasonik kaynak ve termal yapıştırma tekniklerinden daha güçlü olduğunu göstererek gerçekleştirilmiştir [47].

Bilici yüksek yoğunluklu polipropilenin sürtünme nokta karıştırma nokta kaynağını Taguchi yaklaşımı vasıtasıyla kaynak parametrelerinin kombinasyonuna göre deneysel bir çalışmayla incelemiştir. Takım dönme hızı, dalma derinliği ve başlangıç kaynağında durma süresi gibi proses faktörlerinin kombinasyonlarına göre yapılan deneysel testler, Taguchi L9 ortogonal dizilimi kullanılarak yapılmıştır. Taguchi yaklaşımı, en iyi kaynak parametrelerini ayarlamak için deney tekniğinin istatistiksel tasarımı olarak kullanılmıştır. Sonuçlar, farklı kaynak mukavemet durumlarında sayısal tahminler ve deneysel gözlemler arasındaki tutarlılığı göstermiştir. Sürtünme karıştırma noktası kaynak parametrelerinin kaynak dayanımı üzerindeki etkisinin elde edilmesi için sinyal-gürültü oranı ve varyans analizi kullanılmıştır. Bekleme süresi, takım dalma derinliği ve takım dönme hızı, polipropilen sürtünme karıştırma nokta kaynağının birleşme kuvvetinde etkili olmuş ve en etkili parametrenin karıştırma süresi, en az etki eden parametrenin ise takım dönme hızı olduğu belirlenmiştir. Optimum parametre değerleri 100 sn karıştırma süresi, 5,7 mm dalma derinliği ve 900 d/d takım dönme hızı olarak ortaya çıkmıştır [48].

Çevik yüksek yoğunluklu polietilen malzemenin sürtünme karıştırma nokta kaynağıyla kaynaklanabilirliğine takım karıştırma süresinin etkisini araştıran bir çalışma yapmıştır. Deneylede 900 d/d takım dönme hızı ve beş farklı karıştırma süresi (20, 40, 60, 80, 100 saniye) deney parametreleri olarak seçilmiştir. Kaynaklı numunelere çekme makaslama testi uygulanmış ve mekanik performansları test edilmiştir. Polietilen malzemeler SKNK yöntemi ile birleştirilebildiği belirlenmiştir. Karıştırma süresindeki artış kaynak merkezlerindeki sürtünme sıcaklıklarını artırmıştır. 20 saniye karıştırma süresinde kaynak merkezinde ergime derecesinin altında bir sıcaklık oluşmuşken, daha yüksek karıştırma sürelerinde ergime derecesinin üzerinde sürtünme sıcaklıkları oluşmuştur. Karıştırma sürelerine bağlı olarak sürtünme sıcaklığının artması kaynak genişliklerini de artırmıştır. Ayrıca, yüksek sürtünme sıcaklıkları nokta kaynak dikişinin merkezinde oluşan anahtar deliğinin kapanmasına neden olmuştur. Kaynak genişliklerinin artması bağlantının performansını artırmıştır ancak, yüksek karıştırma sürelerinde ergiyen malzeme karıştırıcı takımın yanlarından fıskırmıştır ve dönmenin etkisiyle kaynak bölgesinden uzaklaşmıştır ve bu durum bağlantı performansını azaltmıştır [21].

Başka bir çalışmada Çevik polietilen malzemelerin sürtünme karıştırma nokta kaynağına bakalit ara tabaka tozunun etkisini araştırmıştır. Kaynak işlemlerinde 900 d/d dönme devri, 70, 100 ve 130 saniye karıştırma süresi ve 60 saniye takım bekleme süresi deney parametreleri olarak seçilmiştir. Kaynaklı numunelere çekme-makaslama testi uygulanmıştır ve bağlantı performansları belirlenmiştir. Bakalit ara tabaka tozu kullanılarak üretilen kaynaklı numunelerin mekanik özellikleri bakalit tozu katkısız olanlara kıyaslandığında daha düşük olduğu görülmüştür. Bakalit ara tabaka tozu kaynaklı birleştirmelerin % kopma uzamalarını olumsuz etkilediği belirlenmiştir [35].

Gonçalves ve ark. sürtünme nokta kaynağının karbon fiber takviyeli poliamid 66 üzerindeki uygulanabilirliğini bindirme kesme testi ve optik mikroskop ile değerlendiren bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sürtünme nokta kaynağının karbon fiber takviyeli polimer kompozitleri için iyi bir bağlantı tekniği olduğunu destekleyen sonuçlar elde edilmiştir. Poliamid 66 polimerinin kaynağının yüzey kalitesinin iyi olduğu, hacimsel kusurların olmadığı, bindirme kayma dayanımının yeterli seviyede olduğu görülmüştür [49].

Goushegir ve ark. yaptıkları çalışmada alüminyum alaşımı ve karbon fiber katkılı polifenilen malzemelerinin sürtünme nokta birleştirme işlemi parametrelerinin bağlanma alanı ve tek nokta ek yerlerinin mekanik performansı üzerindeki etkilerini, deneylerin tam faktörü tasarımı ve varyans analizi kullanarak incelemiştir. Bir yandan birleşme alanına önemli etkisi olan ana proses parametreleri birleşme basıncı, takım dönme hızı ve birleşme süresiyken diğer yandan takım dalma derinliğini takım eden birleştirmeler boyunca bindirme kayma mukavemetine en çok etkinin takım dönme hızı ve birleşme basıncı olduğu, birleşme süresinin ise istatistiksel olarak önemli olmadığı görülmüştür [50].

Lambiase ve diğ. proses hızlarının ve işlem sürelerinin polikarbonat levhalar üzerinde oluşturulan sürtünme karıştırma nokta kaynağı bağlantılarının mekanik davranışları üzerindeki etkisini analiz etmek üzere bir çalışma yapmıştır. Analiz, dönme hızının, takım dalma hızının, ön ısıtma süresinin, karıştırma süresinin ve bekleme süresinin değişimini içerirken bağlantıların mekanik karakterizasyonu tek nokta kesme testi ile yapılmıştır. Sonuçlar, işlem sürelerini ve işlem hızlarını optimize ederek kaynak kuvvetinde neredeyse on kat artış sağladığını göstermiştir. Takım dönme hızının bağlantı kuvvetine etkisi minimum seviyede olduğu, dönme hızındaki artışın çekmedeki kayma mukavemetinde küçük bir azalmaya neden olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Ön ısıtma süresinin bağlantıların mekanik davranışına etkisi ihmal edilecek seviyede görülmüştür. Dalma hızı, karıştırma ve bekleme süreleri polikarbonat SKNK'nın bağlantı kuvvetini büyük ölçüde etkilerken, en etkili parametre karıştırma süresi olmuştur [51].

Paoletti ve diğ. ana proses parametreleri değişen polikarbonat levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) sırasında gelişen kuvvet ve torku analiz eden bir çalışma yapmıştır. Ek olarak, SKNK sırasındaki kuvvet değişimlerini ve bağlantıların kalitesini daha iyi anlamak için takım sıcaklığının ve kaynak bölgesine yakın olan malzemenin ölçümleri yapılmıştır. Çalışma, bekleme süresinin, takım dalma hızının ve dönme hızının değişimini içermektedir. Proses parametrelerinin, belirtilen işleme koşullarında bağlantı kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, mekanik karakterizasyon ve bağlantıların boyutsal analizi yapılmıştır. Dalma hızındaki artış, takım malzeme etkileşimi süresinin azalmasına ve dolayısıyla düşük işlem sıcaklığına neden olmuştur. Sonuç olarak, az oranda malzeme yumuşatıldığından, hem işleme kuvveti hem de tork arttırılırken, kaynak bölgesinin mekanik mukavemetinin kaynak bölgesinin alt uzantısından itibaren azaldığı görülmüştür. Takımın dönüş hızının arttırılması, işlem kuvvetlerinin azalmasına ve daha yüksek malzeme karıştırma ve sıcaklığına neden olduğu belirtilmiştir. Ek olarak, aşırı takım dönme hızı değerleri, kaynak

alanının boyutunu azaltan malzeme fırlamasına neden olacağı görülmüştür. Karıştırma süresinin arttırılması, dalma kuvveti ve torku önemli ölçüde etkilemeden kaynaklı alanın maksimum sıcaklığını ve uzatılmasını arttırdığı ve sonuç olarak, kaynakların mukavemetinin karıştırma süresi ile neredeyse doğrusal olarak artarken, tokluğun doğrusal olarak daha fazla arttığı gözlenmiştir [52].

Movahedi ve diğ. yaptıkları çalışmada AA5052 alüminyum ile kısa karbon fiber takviyeli polipropilen (PP-KKF) kompozit levhaların birleştirilmesi için Dişli Delik Sürtünme Nokta Kaynağı (DDSNK) adı verilen yeni bir yeniden doldurmalı sürtünme noktası kaynak işlemi uygulamıştır. Proses, önceden yivli deliğin erimiş ve yeniden katılmış polimer ile doldurulmasına dayanmaktadır. Sonuçlar, DDSNK'nin alüminyumu polimer levhalara birleştirmede başarılı olduğunu ve deliğin tamamen eritilmiş polimerle uygun takım dönme hızlarında (1000 d/d) doldurulduğunu göstermiştir. Çoğunlukla alüminyum, karbon ve oksijenden oluşan bir reaksiyon katmanının oluşumu ve ayrıca dişli delik ile katılmış polimer arasında kenetlenme ana bağlama mekanizmaları olarak kabul edilmiştir. Bağlantıların mekanik dayanımı ve kırılma enerjisi, takım dönme hızının arttırılmasıyla artmıştır [53].

Bozkurt yapmış olduğu çalışmada polikarbonat ve %30 cam elyaf katkılı polipropilen levhaların bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi referans alınarak tasarlanan kaynak aparatı kullanılarak benzer ve hibrit kaynakları üzerine çalışmıştır. Kaynak uygulamaları, kaynak malzemesi tipine bağlı üç farklı dalma derinliği kullanılarak ve diğer parametreler sabit tutularak yapılmıştır. Kaynaklı numunelerde dalma derinliğinin kaynak dayanımına, makroyapıya ve kaynak sonrası oluşan kubbe yapısına etkisi mekanik testler ve boyutsal ölçümler ile incelenmiştir. Çekme testlerinden elde edilen kuvvet dağılımlarına göre alüminyum ve polikarbonat levhaların benzer kaynaklarında dalma derinliği arttıkça maksimum ortalama kuvvetin arttığı görülmüştür [37].

Ogawa ve diğ. alüminyum alaşımı ve karbon fiber takviyeli polipropilen levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağının yorulma ve kırılma mekanizmasına kaynak süresinin etkisini incelemek için bir çalışma yapmıştır. Anodik oksidasyonla üretilen alüminyum levha ve enjeksiyon döküm ile üretilen polipropilen levhanın sürtünme karıştırma nokta kaynağı deneylerinde 3 farklı kaynak süresi için araştırma yapılmıştır. Çekmede kesme ve yorulma testleri servo hidrolik test makinesi ile yapılmıştır. Kaynak süresi uzadıkça bağlantıların statik ve yorulma dayanımı artmıştır. Bu kazanç, daha büyük bir kaynak alanından ve reçine

erimesinin artmasından etkilenmiştir. Bu nedenle kaynak süresinin arttırılması, bağlantı mukavemetini arttırmada etkili olduğu belirtilmiştir [54].

Huang ve diğ. yaptıkları çalışmada karbon fiber takviyeli polietermid levhaların sürtünme nokta kaynağı ile birleştirilmesini ve bağlantıların fizibilite ve kırılma mekanizmasını araştırmıştır. Dönme hızının arttırılması, ara yüzdeki karbon fiberin karışım derecesini arttırmıştır ve gerilme kayma özelliklerini iyileştiren bağlanma ara yüzünü güçlendirmiştir. Sürtünme nokta kaynağının karbon fiber takviyeli polietermid için uygun olduğu görülmüş ve bağlantının 66,4 mm²'lik bir birleştirme alanına sahip maksimum gerilme kayma yükü son teknoloji kaynak yöntemiyle karşılaştırılabilir olduğu belirtilmiştir [55].

Çakır polipropilen numuneleri sürtünme nokta karıştırma kaynağı ile birleştirerek kaynak parametrelerinin kaynak dayanımına etkisini belirlemek ve optimum kaynak parametrelerini elde etmek amacı ile bir çalışma yapmıştır. Farklı omuz ve karıştırıcı uçlu, dört farklı takım imal edilerek takım geometrisinin kaynak dayanımına etkisi araştırılmıştır. Kaynaklanan numunelere çekme testi uygulanmıştır. Dalma derinliğinin kaynak dayanımına etkisi araştırılmış olup 5,75 ve 6 mm dalma değerlerinde en yüksek çekme kuvvetleri elde edilmiştir. Özellikle 5,5 mm ve altındaki değerlerde omuz malzemeye temas etmediği için kaynak takımı omzunun SKNK işlemine herhangi bir faydası olamadığı görülmüştür. Bunun yanı sıra edinilen sonuçlar itibarı ile dalma derinliğinin fazla olması kaynak takımının omuz kısmının malzemeye daha fazla dalmasına neden olarak kaynak havuzunun hacmini azaltmıştır. Omuz ne kadar çok malzemeye daldırılır ise omuzun girmiş olduğu bölgedeki malzemenin boşaldığı ve takım geri çekildiğinde malzemeye dalmış olan omuz profili kadar bir hacim boşluk olarak kaldığı görülmüştür. Üretilen numuneler üzerinde yapılan testlerden elde edilen sonuçlara göre boşluk olarak kalan bu bölge kaynak dayanımını olumsuz olarak etkilemiştir ve maksimum çekme kuvveti değerinin daha düşük çıkmasına yol açmıştır. Karıştırma süresinin kaynak dayanımına etkisi araştırılarak, farklı takım geometrileri, farklı dalma derinlikleri ve farklı devir sayıları için en yüksek çekme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Özellikle 30 sn ve altındaki karıştırma sürelerinde çok düşük maksimum çekme kuvvetleri elde edilmiştir [22].

Pandey ve diğ. takım dönme hızı, bekleme süresi ve takım pimi uzunluğunun kaynak üzerindeki etkilerini analiz ederek kaynağın çekme yükü taşıma kapasitesini geliştirme amacıyla bakır ve polimetil metakrilat (PMMA), sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi kullanılarak kaynaklanmıştır. Takım dönüş hızı ve takım pimi uzunluğu, üretilen kaynağın dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Optimize edilmiş takım dönüş hızı ile

daha yüksek güç elde edildiği ve bununla birlikte, kaynak gücü, incelenen parametre aralığında takım pimi uzunluğundaki artışla arttığı belirtilmiştir. Taramalı elektron mikroskop görüntüleri çalışmasından, iş parçası malzemelerinin karıştırılmasının sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında gerçekleştiği ve polimer malzemenin metal yüzeye itildiği görülmüştür. Malzemenin karıştırılmasının kaynağa güç verdiği belirtilmiştir. Bakır levha bükme alanı boyunca polimer birikimi gözlenmiştir ve bunun kaynak esnasında malzeme karışımı için polimere yüksek mukavemet sağladığı vurgulanmıştır [56].

Kurtulmuş yaptığı çalışmada takım dönme hızı, dalma derinliği, dalma hızı, bekleme süresi ve takım geri çekilme gecikmesi kaynak parametrelerinin polipropilenin sürtünme nokta karıştırma kaynağının bağlantı oluşumu ve kaynak mukavemetine etkisini araştırmıştır. Bağlantı oluşumuna etki metalografik çalışmalarla, kaynak mukavemeti de bindirme kesme testiyle belirlenmiştir. Bekleme süresi, takım dönme hızı ve dalma derinliğinin kaynak dolgu oluşumu ve bağlantı mukavemetine etki ettiği tespit edilmiştir. Dalma hızının kaynak mukavemetine ihmal edilebilir bir etkisi olduğu görülmüştür. Pim etrafında polipropilen erimesi görülmüştür [57].

Çevik yaptığı çalışmada sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile polietilen malzemelerin birleştirilebilirliğine karıştırıcı takım dönme yönü ve karıştırma süresinin etkisini araştırmıştır. Kaynak işlemlerinde iki farklı takım dönme yönü (sağ ve sol) ve üç farklı karıştırma süresi (60, 90 ve 120 saniye) kullanılmıştır. Kaynaklı numunelere çekme makaslama testi uygulanarak kaynak parametrelerinin bağlantının mekanik performansına etkileri belirlenmiştir. Karıştırıcı takımın dönme yönünün kaynaklı bağlantının oluşumuna etki ettiği ve bazı karıştırma sürelerinde mekanik performansını etkilediği tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada en ideal bağlantı performansı, karıştırıcı takımın sağa (saat ibresi yönü) döndürülmesi ve 90 saniyelik karıştırma süresinde elde edilmiştir. Yüksek karıştırma sürelerinde karıştırıcı takımın temas ettiği bölgedeki malzeme ergimiştir. Yüksek karıştırma hızlarında ergiyen malzeme karıştırıcı takımın yanlarından fışkırmış ve dönmenin etkisiyle kaynak bölgesinden uzaklaşmıştır. Bu durum bağlantı performansını olumsuz etkilemiştir. Düşük ve yüksek sürtünme ısıları oluşturan kaynak parametrelerinde çalışılması halinde kaynaklı bağlantıda düşük mekanik performans görülmüştür [58].

Shen ve diğ. akrilonitril bütadien stiren (ABS) levhaların sürtünme nokta kaynağı için dönme hızı, dalma derinliği ve bekleme süresi parametrelerinin kaynak morfolojisi ve boyutları ile mekanik performansını incelemek amacıyla bir çalışma yapmıştır. Kaynak mikro morfolojisi optik mikroskop ile belirlenmiş ve bindirme kesme testiyle de kaynak kalitesi değerlendirilmiştir. Aşırı bekleme süresi boşlukların boyutunun ve sayısının artmasına neden olmuştur. Dönme hızının artışı bağlantının birleşen alan çapını başlangıçta belli bir değere kadar arttırırken belirli dönme hızı değerinin üzerine çıkıldığında azaltmıştır [59].

Gonçalves ve diğ. poliamid 6 ve karbon fiber takviyeli poliamid 66 malzemelerin sürtünme nokta kaynağına uygunluğunu göstermek üzere bir çalışma yapmıştır. Bağlantıların yüzey pürüzlülüğü, kaynaklı bölgenin mikroyapısı ve mekanik kopma mukavemeti araştırılmıştır. Sonuç olarak kaynak kalitesi ve mekanik özellikler açısından bu malzemelerin sürtünme nokta kaynağı için uygun olduğu belirtilmiştir [60].

Lambiase ve diğ. yaptıkları bir çalışmada dalma kuvvetinin polikarbonat levhaların sürtünme nokta karıştırma kaynağının mekanik davranışına etkisini araştırmıştır. Deneysel testlerde takım geometrisi ve dalma kuvveti değişkenler olarak kullanılmıştır. Tek nokta bindirmeli kopma testi uygulanarak bağlantıların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Dalma kuvvetinin kaynak geometrisi ve hatalarına etkisini görmek için kaynakların morfolojik analizi yapılmıştır. Dalma derinliğinin kontrolü sayesinde elde edilen ilave enerjiyle karıştırılmış bölge ve çevreleyen malzeme arasındaki gözenekler azalmıştır ve böylelikle kaynak mukavemeti artmıştır. Ancak aşırı dalma kuvvetinin uygulanması levhaların kuvvet uygulanan tarafında aşırı incelmeye neden olmasından dolayı zayıf kaynakların oluşmasıyla sonuçlanmıştır [61].

Aliashgari ve diğ. AA5052 alüminyum alaşımı ve polipropilen sürtünme karıştırma nokta kaynak bağlantısına plazma elektrolit oksidasyonunun etkisini görmek için bir çalışma yapmıştır. Bağlantı kuvvetleri bindirme kopma testiyle belirlenirken hata modları için tarayıcı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda oksidasyon uygulanan bağlantılardan daha yüksek bağlantı kuvveti elde edildiği görülmüştür [62].

Rana ve diğ. AA5052-H32 alaşımı ve yüksek yoğunluklu polipropilen sandviç levhaların farklı dalma hızlarında sürtünme nokta karıştırma kaynağını incelemek üzere bir çalışma yapmıştır. Dalma hızı aralığı olarak 2-12 mm/dk kullanılmıştır. Bağlantı performansını incelerken bağlantı geometrisi, tanecik boyutu, sertlik ve sıcaklık dağılımı dikkate alınmıştır. Hata modları deneysel sonuçlarla eşleşen sonlu eleman simülasyonu ile belirlenmiştir. Yapılan bindirme kopma ve gerilme testlerinden en iyi bağlantı performansının 6 ve 8 mm/dk dalma hızlarında olduğu sonucu çıkarılmıştır. Sıyırma testinde ise kırılma yükünün dalma hızıyla beraber arttığı belirtilmiştir. Benzer şekilde dalma hızının artmasıyla deformasyon oranının artmasından kaynaklı daha yüksek sıcaklığı ve bağlantı sertliği elde edildiği belirtilmiştir [63].

Ülker yapmış olduğu çalışmada ABS ve PC malzemelerinin sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemiyle birleştirilmesinde dönme hızı, karıştırma süresi ve dalma derinliğinin etkisini araştırmıştır. Birleştirilen farklı konfigürasyonlardaki ABS ve PC numunelere makroyapı analizi ve bindirme bağlantı kopma testlerini yapması sonucu her konfigürasyon için ayrı ayrı optimum dönme hızı, karıştırma süresi ve dalma derinliğini elde etmiştir [33]. Ayaz, ABS-ABS bağlantıları için en etkili parametreyi dalma hızı, PC-PC bağlantılar için dönme hızı ve ABS-PC bağlantıları için ise karıştırma süresi olarak belirlemiştir [20].

Üçüncü PA6 malzemesini SKNK yöntemiyle birleştirilmesinde iki ayrı geometriye sahip takım, farklı bekleme süreleri, dönme hızları ve dalma derinlikleri kullanmıştır. Analiz için uyguladığı çekme testleri sonucunda her takım için en yüksek bağlantı kuvveti değerlerini veren optimum proses parametrelerini elde etmiştir [15].

Bölüm 6

Deney Tasarımı ve Ön Çalışmalar

6.1 Ön Çalışmalar

Deneylerde gerekli ekipman ve materyalin hazırlanması sonrası deney tasarımı için parametrelerin sabit ve değişken olarak sınıflandırılması gereklidir. Bu nedenle bu sınıflandırmada daha önce yapılan deneysel çalışmalardan faydalanmak amacıyla literatür araştırması ve ön hazırlık deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Daha önce yapılan çalışmalara bakıldığında metallerin ve polimerlerin kaynak özelliklerine önemli ölçüde etki eden başlıca proses parametreleri mevcuttur. Polimerlerin SKNK yöntemiyle birleşmesine literatürde takım ve pim geometrisiyle beraber dalma hızı ve derinliğinin, dönme hızının, karıştırma ve ön ısıtma sürelerinin etkileri ciddi anlamda gözlenmiştir.

Yapılan deneylerde kullanılacak sabit ve değişken parametrelerin belirlenmesi için ana deneyler öncesi denemeler gerçekleştirilmiştir. Sabit tutulacak proses parametrelerinden bazıları literatürde yapılan çalışmalardan örnek alınarak belirlenmiştir. Sabit parametrelerin belirlenmesinde alttan ısıtmasız denemeler gerçekleştirilmiştir. Ön Çalışmalarda her PA66, PA66GF15 ve PA66GF30 malzemelerinin her üçü içinde denemeler gerçekleştirilmiş olup Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de verilen kuvvet değerleri üç malzemenin ortalamalarıdır.

Tablo 6.1: Dalma derinliği ön çalışma sonuçları

Kaynak Parametreleri			
Dalma Derinliği	Takım Donme Hızı	on Isıtma Suresi	Bindirme Bağlantı Kesme Kuvveti
(mm)	(d/d)	(saniye)	(N)
1	1000	60	0
1	1500	60	0
1	2500	60	0
2	1000	60	0
2	1500	60	0
2	2500	60	0
3	1000	60	322
3	1500	60	355
3	2500	60	436
4	1000	60	272
4	1500	60	278
4	2500	60	241

Tablo 6.2: Donme hızı ön çalışma sonuçları

Kaynak Parametreleri			
Dalma Derinliği	Takım Donme Hızı	on Isıtma Suresi	Bindirme Bağlantı Kesme Kuvveti
(mm)	(d/d)	(sn)	(N)
3	1000	60	322
3	1500	60	355
3	2000	60	156
3	2500	60	436
3	3000	60	274

6.1.1 Ön Isıtma Süresinin Belirlenmesi

Daha önce plastikler üzerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde PA66 malzemesinin sürtünme karıştırma nokta kaynağıyla ilgili bir çalışma gerçekleştirilmediğinden PA6 ve polikarbonat malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda 60 saniye ve 75 saniye süreleri referans alınarak denemeler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda 60 saniye ön ısıtma süresinde yeterli yumuşama ve ısıtma sağlanmıştır. Ancak 60 saniye ön ısıtma süresinden 120 saniyeye kadar diğer parametrelerin sabit tutulduğu denemelerde kaynak kuvvetinde bir değişiklik görülmediğinden 60 saniye ön ısıtma süresi deneylerde kullanılmak üzere sabit parametre olarak belirlenmiştir [15, 20].

6.1.2 Dalma Hızı ve Karıştırma Süresinin Belirlenmesi

Takım omzu ile birleştirilecek numunelerin teması anlık sıcaklık artışıdaki en etkili nedenlerden biri olduğundan takım ilerleme hızı önemli değişkenlerden biridir. Takım ilerleme hızı düşük tutulduğunda yumuşama miktarında artış olmuştur [64]. Bu hız arttırıldığında ise yumuşama miktarında azalma olurken ısınma oranında artış olmuştur. Deneylerde literatürde kullanılan 8 mm/dk dalma hızı dikkate alınarak yapılan ön çalışmalarda bu hızın 10 mm/dk hızına çıkartılarak kullanılmasının birleşme için daha olumlu değerler sağlaması nedeniyle 10 mm/dk değeri sabit dalma hızı değeri olarak belirlenmiştir.

Takımın dalma derinliğine ulaşması sonrası birleştirilecek malzemelerin bağlantı yüzeyinde homojenliği sağlaması ve plastik deformasyona önemli etkisi olan karıştırma (geri çekilme öncesi bekleme) süresi literatürde yapılan çalışmalar dikkate alınarak ön çalışmalarda 20 sn olarak uygulanmıştır.

6.1.3 Dalma Derinliğinin Belirlenmesi

Kaynak kuvvetine önemli tesiri olduğu bilinen dalma derinliğinin düşük olması durumunda yeterli ısınma ve yumuşama gerçekleşmemesi nedeniyle birleşmeye olumsuz etkisi olmaktadır. Derinliğin fazla olması durumunda ise bağlantı bölgesindeki malzeme az miktarda kalacağından kaynak kuvvetine olumsuz etkisi olacaktır. Yapılan ön çalışmalarda dört farklı dalma derinliği (1, 2, 3 ve 4 mm) kullanılmıştır. Çalışma sonucunda en iyi sonuçlar 3 mm dalma derinliğinde elde edilmiştir. Daha düşük dalma derinliği değerleri olan 1 ve 2 mm dalma

değerlerinin uygulandığı denemelerde kaynaklı bağlantı oluşmazken derinlik 4 mm değerine arttırılarak uygulandığından ise kaynak kuvvetinde düşme gözlenmiştir. Bu nedenlerden dolayı 3 mm dalma derinliği sabit parametre olarak belirlenmiştir.

6.1.4 Dönme Hızının Belirlenmesi

Kaynak esnasında kullanılan takımın dönme hızı takım ilerlemesi esnasında sıcaklık oluşumunda en önemli etkenlerden biridir. Takım dönme hızının kaynak esnasında malzemenin yumuşaması için yeterli sıcaklık oluşumunun ve yumuşayan malzemenin sertleşmeden homojenliği sağlayacak seviyede olması gerekmektedir. Düşük devirlerde yeterli sıcaklık oluşumu gerçekleşmeyebileceği gibi yüksek devirlerde de kaynak bölgesi birleşme kuvvetini olumsuz etkileyecek şekilde zarar görebilmektedir. Plastik malzemelerin sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile ilgili çalışmalara bakıldığında devir hızı aralığı genellikle 750 d/d ile 3000 d/d arasında kullanılmıştır. Yapılan ön çalışmalarda 1000 d/d dönme hızı seviyesinin altında yeterli sıcaklık oluşumu sağlanamadığından kaynak kuvvetine etkisi olumsuz olmuştur. Bu nedenle dönme hızı aralığı değişken parametre olarak 1000 d/d ile 3000 d/d arasında kullanılmıştır. Dönme hızı 2000 ve 3000 d/d değerlerinde kullanıldığında kaynak kuvvetinde düşme gözleendiği için ana deneylerde dönme hızı değerleri olarak 1000, 1500 ve 2500 d/d kullanılmıştır [15, 20, 25, 32, 38, 40, 65, 66].

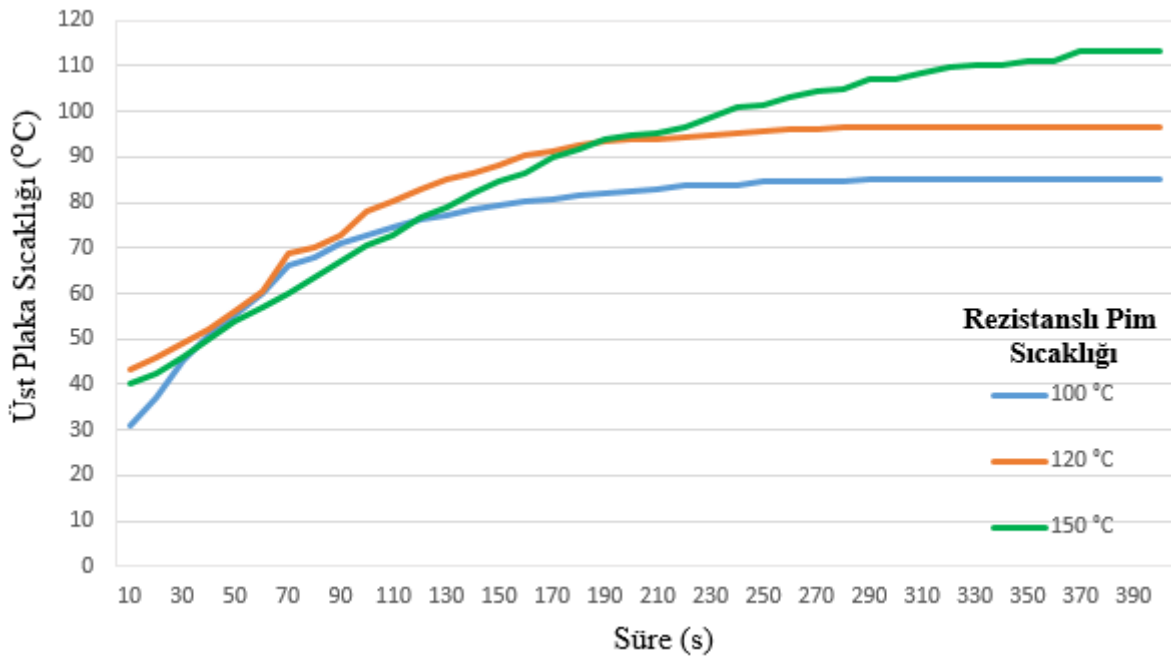
6.1.5 Alttan Isıtma Sıcaklığının ve Süresinin Belirlenmesi

Genellikle SKNK yönteminde alttaki numuneye yeterli ısının iletilmemesi nedeniyle kaynağın özellikleri olumsuz etkilenebilmektedir. Çift taraflı kaynak yöntemi bu soruna çözüm olarak uygulansa da uygulamanın maliyetli ve zor olması nedenleriyle alttan ısıtma yöntemiyle bu sorunun çözülmesi amaçlanmıştır.

Kaynak esnasında alttaki numunenin gerekli ısıyı alarak yumuşamanın gerçekleşmesi için uygulanan alttan ısıtma yönteminde alttan ısıtma süresi sabit parametre olarak ve alttan ısıtma sıcaklığı değişken parametre olarak belirlenmiştir. Buradaki amaç malzemeyi alttan ısıtma sıcaklığıyla ergiterek birleşme olmadığından malzemenin ergime sıcaklığı değerinin altındaki sıcaklıklar seçilmiştir. Öncelikle 30, 60 ve 90 °C ısıtıcı sıcaklığıyla yapılan denemelerde iletim yoluyla ısı transferinde denge sıcaklığına ulaşana kadar gerçekleşecek ısı kaybının da etkisiyle alt numuneye iletilen sıcaklık yeterli görülmemiştir. Alt numune yüzeyinde termal kamerayla

yapılan ölçümlerle 100, 120 ve 150 °C ısıtıcı sıcaklıkları kullanıldığında oluşan ısı uygun bulunmuştur ve deneylerde değişken parametre olarak kullanılmasına karar verilmiştir (bakınız Şekil 6.1).

Deneyler öncesinde rezistanslı pim ile alt numunenin ısı dengeye gelme süresi ön çalışmalarla belirlenerek alttan ısıtma süresi 360 saniye olarak seçilmiştir. Her üç malzeme üzerinde yapılan sıcaklık ölçümlerinde 100, 120 ve 150 °C sıcaklığı ayarlanan ısıtıcı (rezistanslı pimin üzerinden termokupl ile ölçülen sıcaklık değerleri) ile alt numunenin ısıl dengeye gelme süresi olan 360 saniye sonrasında ısı iletiminin durduğu ve sıcaklığın sabit kaldığı gözlenmiştir.



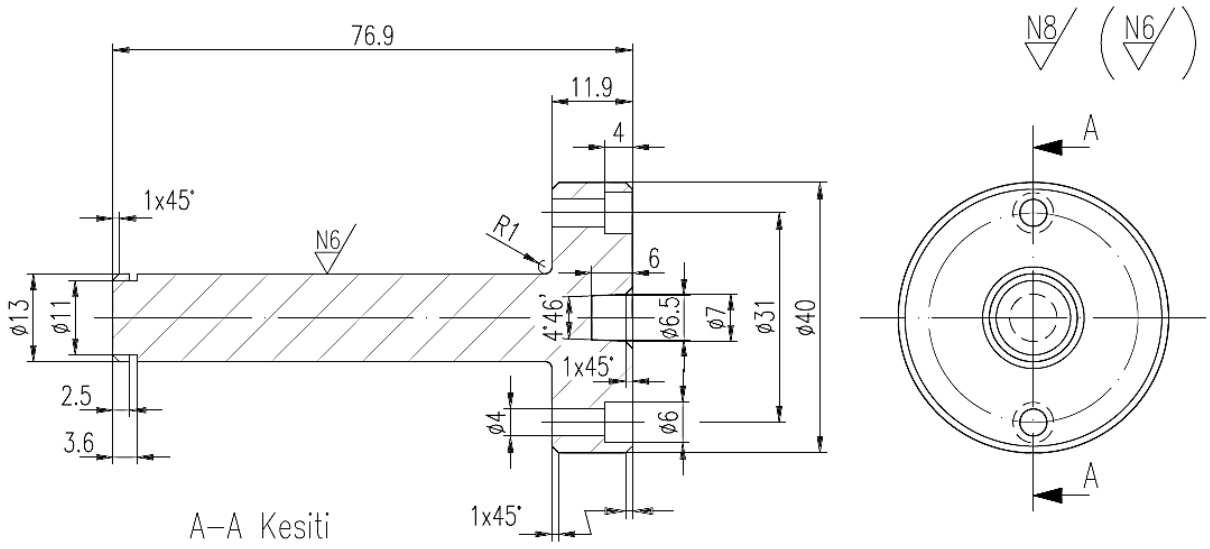
Şekil 6.1: Deneysel olarak kullanılan sıcaklık değerleri için ısıl dengeye ulaşma grafiği

6.1.6 Rezistanslı Pim Çapının Belirlenmesi

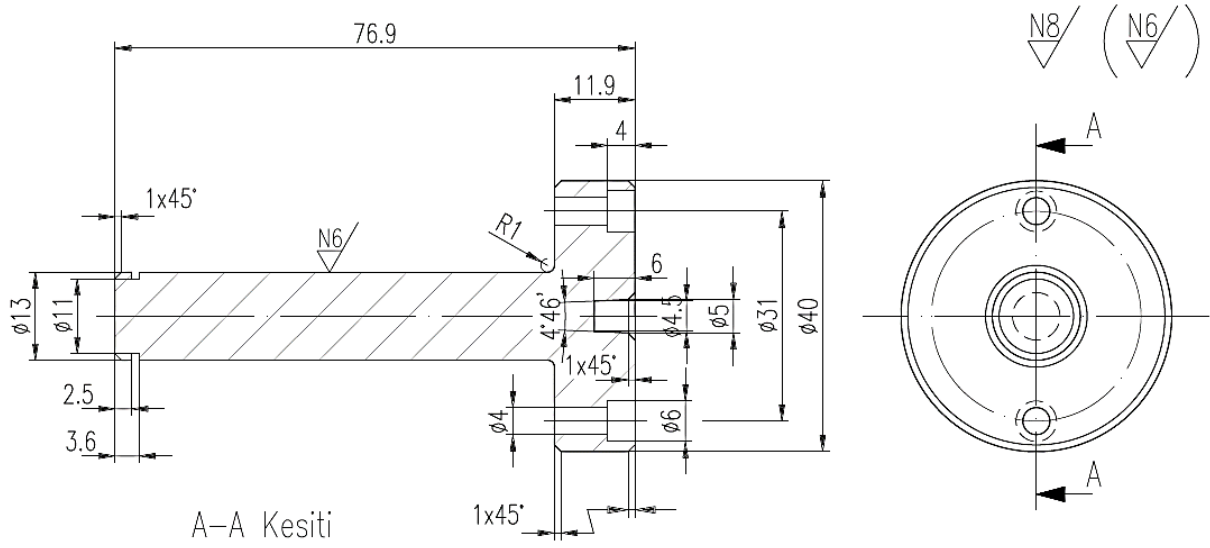
Alttan ısıtmanın iletim yoluyla sağlanmasına karar verildikten sonra alt numuneye temas edecek rezistanslı pim tasarımları gerçekleştirilmiştir. SKNK yöntemine özgü tasarlanmış bağlama aparatı da rezistanslı pimin iki adet M3 alyan başlı cıvata yardımıyla sabitlenebileceği şekilde tasarlanmıştır. Rezistanslı pim alt numuneye temas eden yüzeyinden farklı çaplarda konik delikler açılacak şekilde yeniden tasarlanmıştır. Bunun nedeni yuvasız rezistanslı pim ile yapılan ön deneylerde birleşmenin gerçekleşmemesidir. Kaynak esnasında akan malzemenin

birikeceği bir anahtar deliği formunun yuvasız rezistanslı pimde olmaması kaynak işlemini olumsuz yönde etkilemiştir. Yeniden tasarlanan rezistanslı pimdeki yuvaların konik olmasının nedeni işlem sonrası birleştirilen numunelerinin sıkışmadan çıkarılmak istenmesidir.

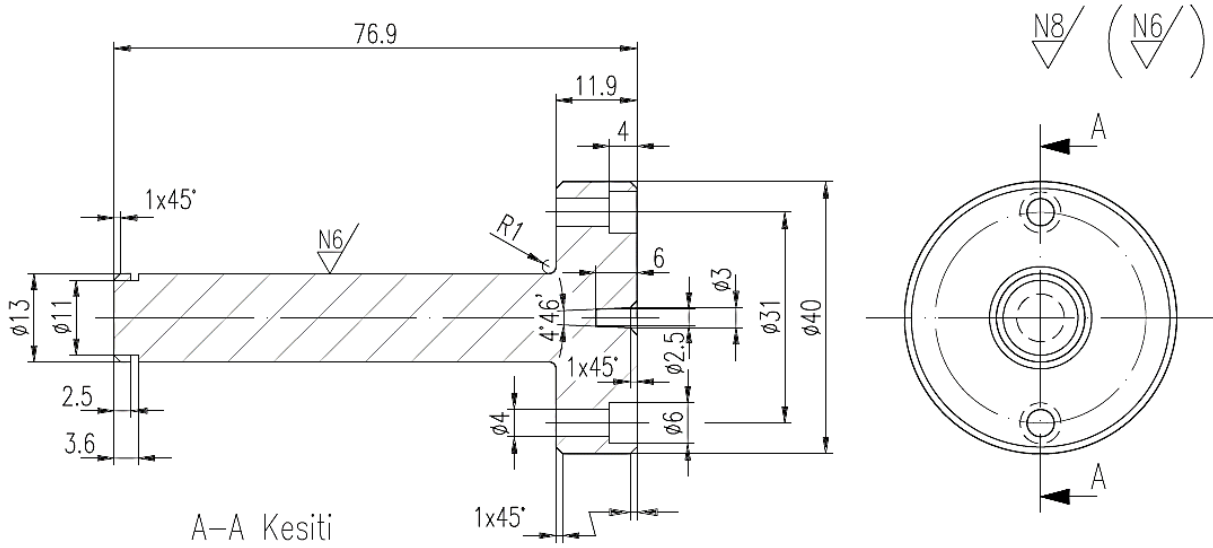
Kaynak esnasında takımın dalması esnasında aşağıya doğru akan malzemenin birikme miktarı kaynak kuvveti olarak önemlidir. Bu amaçla ısıtmayı gerçekleştiren rezistanslı pimin merkezine 3, 5 ve 7 mm olmak üzere farklı çaplarda yuva açılarak 3 farklı rezistanslı pimin imalatı ve bu pimlerle ön denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu denemelerin sonucunda optimum değerlerin elde edildiği 7 mm çapında yuvaya sahip rezistanslı pimin kullanılmasına karar verilmiştir. Şekil 6.3, 6.4 ve 6.5'te farklı yuva çaplarındaki rezistanslı pimin teknik resimleri verilmiştir.



Şekil 6.2: 7 mm yuva çapına sahip rezistanslı pim ölçüleri



Şekil 6.3: 5 mm yuva çapına sahip rezistanslı pim ölçüleri



Şekil 6.4: 3 mm yuva çapına sahip rezistanslı pim ölçüleri

6.2 Deney Tasarımı

Yapılan ön deneylerde en yüksek kaynak kuvvetini sağlayan değerler olan karıştırma süresi 20 saniye, ön ısıtma süresi 60 saniye, dalma hızı 10 mm/dk, dalma derinliği 3 mm, alttan ısıtma süresi 360 saniye ve rezistanslı pim çapı 7 mm sabit parametreler olarak belirlenmiştir. Daha

önceki çalışmalarda da en baskın parametrelerden olan dönme hızı (1000, 1500 ve 2500 d/d) ve alttan ısıtma sıcaklığı (100, 120 ve 150 °C) değişken parametreler olarak seçilmiştir.

Ana deney setleri planlanmadan önce en yüksek kaynak kuvvetini sağlayan parametrelerle ve ön deney grubuyla sonuçların tekrarlanabilirliği kontrol edilmiştir. Bu esnada enjeksiyon kalıplama prosesiyle üretilmiş birleştirilecek numunelerin yolluk pozisyonlarının tekrarlanabilirliği olumsuz etkilediği gözlenmiş ve deneyler bu sorunun önüne geçmek için numuneler yolluk pozisyonu birleşme yönünde olmayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bunun dışında üst numunenin sabitlenmesinde yeterli üst baskı olmadığında alt ve üst numunenin birleşme yüzeylerine malzeme girişinin gerçekleştiği ve bunun da deney tekrarlanabilirliğini olumsuz etkilediği görülmüştür (bakınız Şekil 6.6). Prosesteki sorunlar giderildikten sonra aynı parametrelerle gerçekleştirilen adet deney sonucundaki tekrarlanabilirlik uygun görüldükten sonra prosesin uygunluğuna karar verilip ana deneyler planlanmıştır.



Şekil 6.5: Malzeme girişinin gerçekleştiği numune

Ana deneylerin sonuçlarının standart sapmasının kontrolü amacıyla her parametre seti için üçer adet tekrarlı deney planlanmıştır. Deney sonuçları analiz edilirken de aynı parametrelerle birleştirilen üç numunenin bindirme kaynağı kesme kuvveti sonuçlarının ortalaması alınmıştır. Değişken parametrelerin hepsini kapsayacak şekilde her üç malzeme için de deney planlaması gerçekleştirilmiştir. Her üç malzeme için de planlanan deneyler Tablo 6.3, 6.4 ve 6.5'te verilmiştir.

Tablo 6.3: PA66 malzeme deney tasarımı

Deney Numarası	Kaynak Parametreleri		
	A	B	C
	Malzeme	Takım Dönme Hızı	Alttan Isıtma Sıcaklığı
#		(d/d)	(°C)
1	PA66	1000	100
2	PA66	1500	120
3	PA66	2500	150
4	PA66	1000	120
5	PA66	1500	150
6	PA66	2500	100
7	PA66	1000	150
8	PA66	1500	100
9	PA66	2500	120

Tablo 6.4: PA66GF15 malzeme deney tasarımı

Deney Numarası	Kaynak Parametreleri		
	A	B	C
	Malzeme	Takım Dönme Hızı	Alttan Isıtma Sıcaklığı
#		(d/d)	(°C)
1	PA66GF15	1000	100
2	PA66GF15	1500	120
3	PA66GF15	2500	150
4	PA66GF15	1000	120
5	PA66GF15	1500	150
6	PA66GF15	2500	100
7	PA66GF15	1000	150
8	PA66GF15	1500	100
9	PA66GF15	2500	120

Tablo 6.5: PA66GF30 malzeme deney tasarımı

Deney Numarası	Kaynak Parametreleri		
	A	B	C
	Malzeme	Takım Dönme Hızı	Altta Isıtma Sıcaklığı
#		(d/d)	(°C)
1	PA66GF30	1000	100
2	PA66GF30	1500	120
3	PA66GF30	2500	150
4	PA66GF30	1000	120
5	PA66GF30	1500	150
6	PA66GF30	2500	100
7	PA66GF30	1000	150
8	PA66GF30	1500	100
9	PA66GF30	2500	120

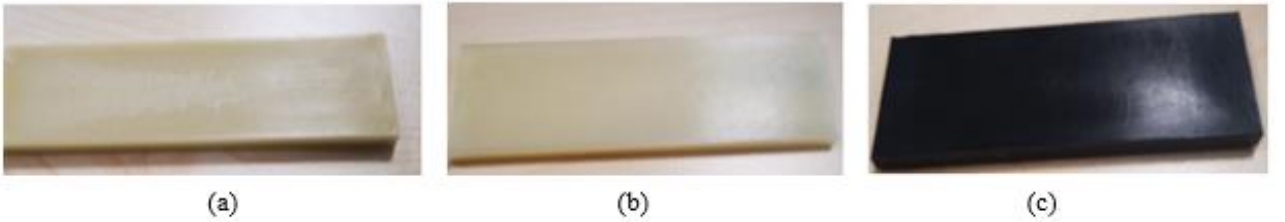
Bölüm 7

Deneysel Çalışmalar

7.1 Malzeme ve Kullanılan Ekipmanlar

7.1.1 Katkısız ve Cam Elyaf Katkılı PA66

Bu çalışmada kaynak uygulaması için 4 mm kalınlığında 100 mm boyunda ve 25 mm genişliğinde katkısız ve cam elyaf katkılı PA66 numuneler kullanılmıştır (bakınız Şekil 7.1). Katkısız PA66 numunelerinin üretiminde Teklamid firmasının natürel granülleri kullanılırken, %15 cam elyaf katkılı PA66 numunelerinin üretiminde Tecomid firmasının granülleri ve %30 cam elyaf katkılı PA66 numunelerinin üretiminde de Technyl firmasına ait granüller kullanılmıştır.



Şekil 7.1: Deneysel numuneleri: (a) PA66, (b) PA66GF15, (c) PA66GF30

Cam elyaf katkısının olumlu etkileri birçok çalışmada deneylerle doğrulanmıştır. Bu takviyenin SKNK yöntemiyle birleştirilen PA66 malzemelerin bağlantıları üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir.

Plakaların imalatı için seçilen PA66 malzemelerin mekanik, fiziksel ve termal özellikleri Tablo 7.1’de verilmiştir.

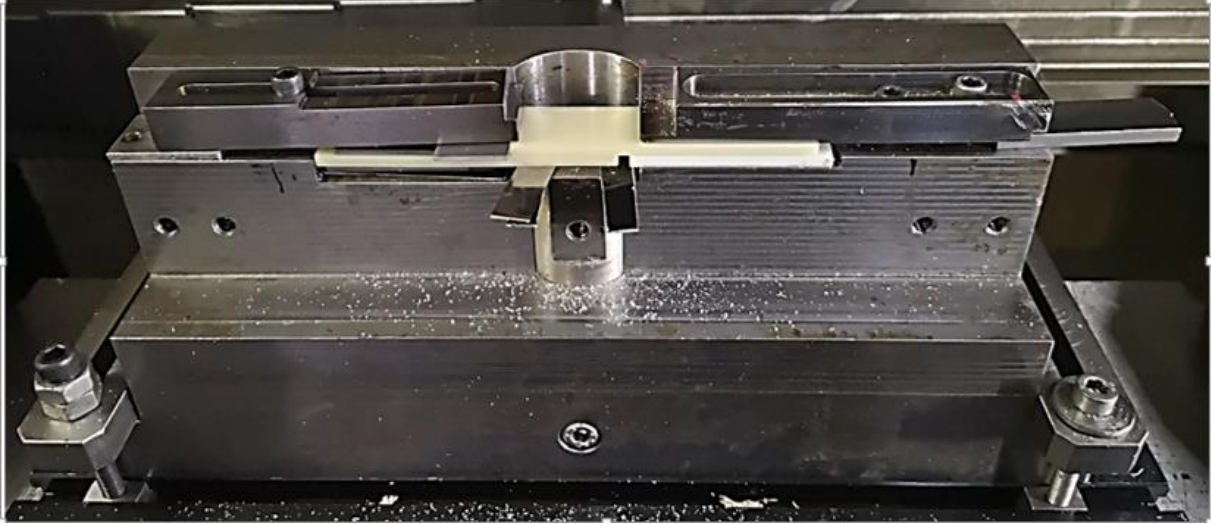
Tablo 7.1: PA66, PA66GF15 ve PA66GF30 malzeme özellikleri

Özellik	Teklamid PA66	Tecomid PA66GF15	Technyl PA66GF30	Test Standartı
Çekme Modülü (MPa)	3500	6250	10000	ISO 527
Kırılma Gerilmesi (MPa)	85	130	190	ISO 527
Kırılma Şekil Değişimi (%)	7	3	3	ISO 527
Erime Sıcaklığı (°C)	258	242	263	ISO 11357-1/-3
Nem Alma (%)	0,2/0,4	2,3	0,8	ISO 62
Yoğunluk (g/cm ³)	1,15	1,23	1,37	ISO 1183

7.1.2 SKNK’a Özgü Bağlama Aparatı

Deneylerde numuneleri sabitlemek için SKNK yöntemine özgü tasarlanmış patentli bağlama aparatı kullanılmıştır. Aparatın numuneleri sıkmadan önce kolayca yerleştirebilmek için kademe verecek şekilde hassas işlenmiş kısımları mevcuttur. Alt ve üst numunenin bindirme bağlantısı yapılacak şekilde yerleştirilebilmesi için numune kalınlığı kadar mesafe işleme esnasında ayarlanmıştır [37].

Yerleştirilen numunelerin takımın dalması esnasında plakaların sabit tutulması amacıyla aparata her iki numune için de baskı uygulayacak pabuçların bağlantısı için yuva açılmıştır. Bu açılan yuvalar cıvata yardımıyla numunelere baskı pabuçlarının üstten sabitleme yapabilmesine olanak sağlamaktadır. Aparatın SKNK için kullanılacak CNC tezgâhının bağlama kalıbına sabitlenmesi amacıyla her iki yanında kademesi mevcuttur (bakınız Şekil 7.2).

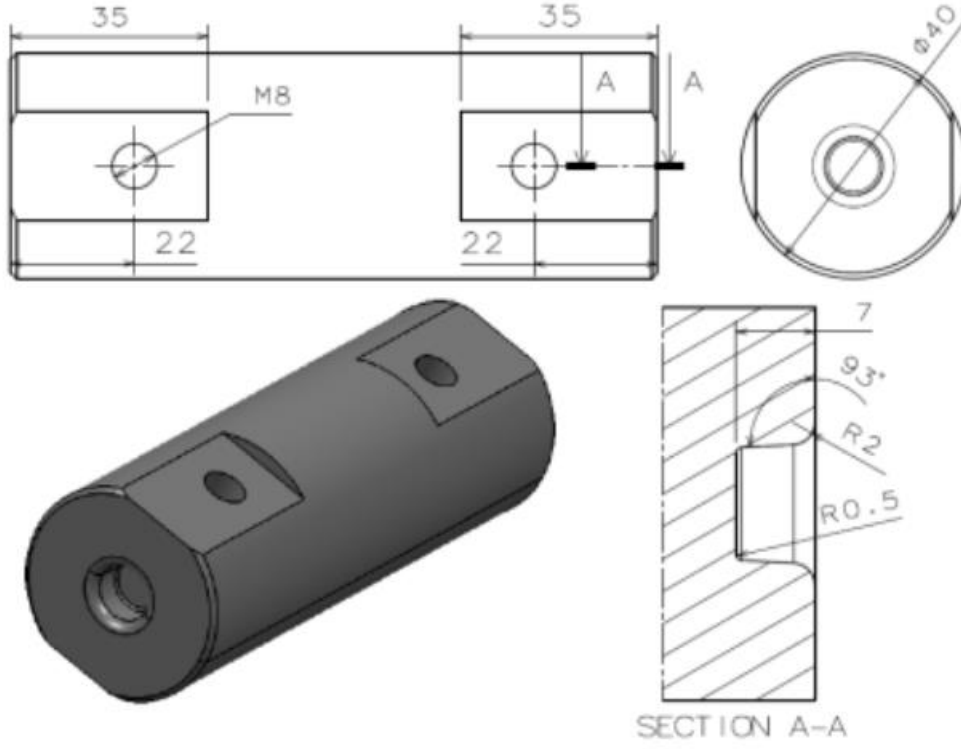


Şekil 7.2: Alttan ısıtmasız sürtünme karıştırma nokta kaynağı aparatı



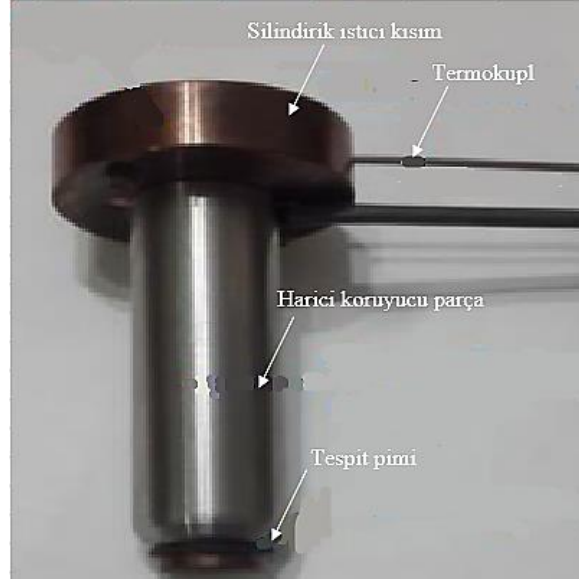
Şekil 7.3: Alttan ısıtmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı aparatı

Aparat, takımın dalması esnasında aşağıya akan malzemenin gidebileceği boşluğu sağlayan silindirik malzeme akış bloğunun yerleştirilebileceği şekilde tasarlanmıştır (bakınız Şekil 7.4). Alttan ısıtmanın yapılmadığı durumda kullanılan bu blokla aynı çapa sahip ısı iletimini gerçekleştiren rezistanslı pim yerleştirilmesiyle aparat ön ısıtmanın gerçekleştirileceği durumda da kullanılabilir (bakınız Şekil 7.3). Rezistanslı pim sabitlenmesini sağlayan bağlama aparatı Şekil 7.6'da gösterilmiştir.



Şekil 7.4: Malzeme akış bloğu [37]

Alttan ısıtma amacıyla kullanılmak üzere kullanılan alttan ısıtma proses kiti üretilmiştir. Isı kaynağı ve kontrolü amacıyla Opkon marka ısı modülü kullanılmıştır. Isıtıcı kitin malzemeyi alttaki kaynaklanacak numuneye iletmesi için bakır berilyumdan rezistanslı pim imal edilmiştir. Sıcaklık ölçümü için kaynağa en yakın bölgeden ısı değeri alınabilmesi amacıyla silindirik pime termokupl deliği açılmıştır. Pimin küçük çaplı kısmına ısıtıcı pimin vidalı olarak bağlanması için tasarlanan parçaya yerleştiğinde yüksek sıcaklık iletiminin önüne geçilmesi amacıyla ısı iletimini kesecek koruyucu parça takılmıştır (bakınız Şekil 7.5).



Şekil 7.5: Alttan ısıtma kiti [37]



Şekil 7.6: Alttan ısıtma kiti için aparata bağlama parçası [37]

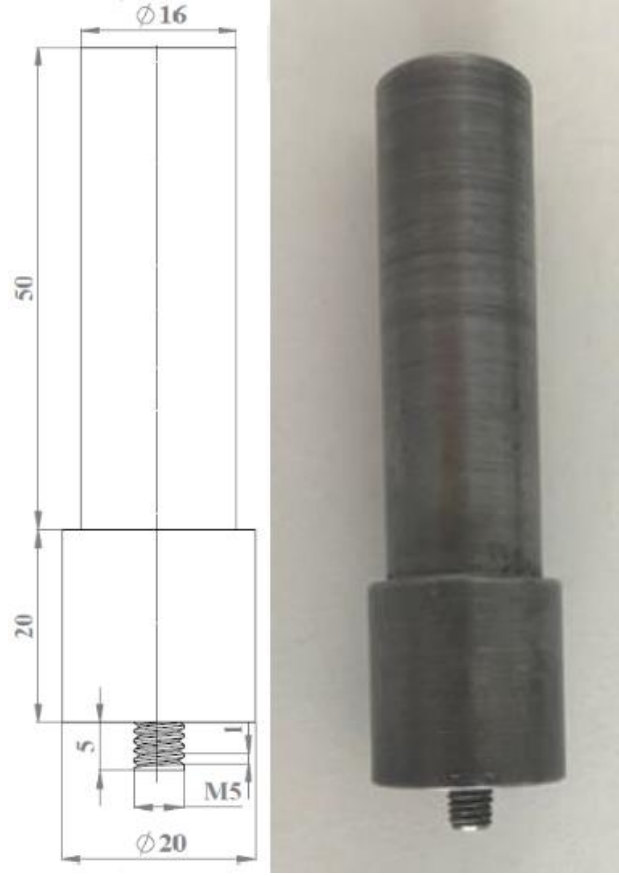
7.1.3 SKNK Prosesi için Freze Tezgâhı ve Takımı

Deneylerde CNC freze tezgâhı kullanılmıştır. Freze tezgâhı olarak Chiron markasının 5 eksenli Magnum FZ12 modeli tercih edilmiştir (bakınız Şekil 7.7). Özel tasarlanmış bağlama aparatı freze tezgâhının gövdesine harici aparatlarla sabitlenmiştir. Bu sayede aparatın işlem esnasında hareketinin tam anlamıyla önüne geçilmiştir ve olası kayma kaynaklı hataların önüne geçilmiştir. Yapılacak parametrelerin ayarlanabileceği ana program yazılarak kaynak işleminin kontrollü ve hatasız şekilde gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 7.7: Chiron Magnum FZ12 freze tezgâhı [67]

Takım olarak sıcak ve soğuk iş uygulamalarında yüksek tokluğa ve yorulma direncine sahip olması nedeniyle tercih edilen H13 krom sıcak iş çeliğinden yapılmış silindirik M5 dişli pime sahip 20 mm omuz çapına sahip takım kullanılmıştır. Takım boyu pim ve omuz hariç 50 mm Pim boyu 5 mm ve omuz yüksekliği 20 mm olarak tasarlanmıştır (bakınız Şekil 7.8). Freze tezgâhının takım koluna bağlanmak üzere konik pens kullanılmıştır. Takımın pense bağlandığı kısım 16 mm çapındadır.



Şekil 7.8: Kullanılan takım ve ölçüleri [20, 68]

7.2 SKNK Parametrelerinin ve Seviyelerinin Belirlenmesi

Deney çalışmalarında PA66, PA66GF15 ve PA66GF30 malzemeleri için farklı alttan ısıtma sıcaklığı ve dönme hızları kullanılmıştır. Bu sayede her malzemenin çekme kesme dayanımları üzerinde dönme hızı ve alttan ısıtma sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. Alttan ısıtma sıcaklığı kaynak esnasında altta kalan numunenin yeterince ısınmaması nedeniyle ortaya çıkan olumsuz kaynak özelliklerinin önüne geçmek amacıyla denenen ve literatürde daha önce kullanılmamış bir uygulama olması açısından önemli bir parametredir. Proses faktörleri ve bunların seviyelerinin tablosu Tablo 7.2’te verilmiştir.

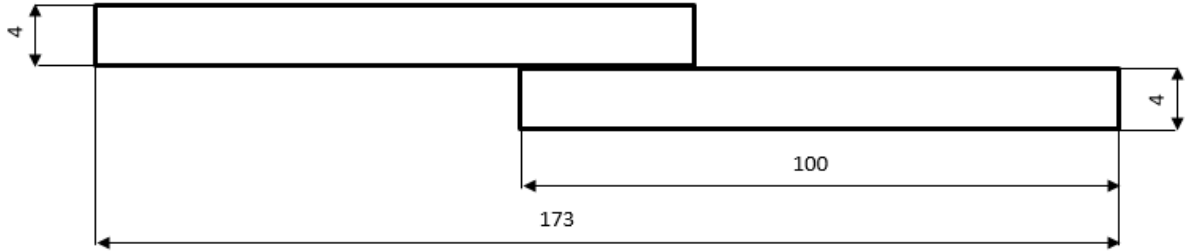
Tablo 7.2: Proses faktörleri ve seviyeleri

Kaynak Parametresi	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Takım Dönme Hızı	d/d	1000	1500	2500
Altın Isıtma Sıcaklığı	°C	100	120	150

7.3 Proses Hazırlıkları

7.3.1 SKNK için Plakaların Hazırlanması

SKNK işlemi için kullanılacak numuneler katkısız PA66, %15 ve %30 cam elyaf katkılı PA66 granüllerinden plastik enjeksiyon yöntemiyle imal edilmiştir. Plastik enjeksiyon kalıbı 4 mm kalınlık, 100 mm uzunluk ve 25 mm genişliğe sahip numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelere bir hafta süreyle nem aldırma işlemi uygulanmıştır. Numunelerin aparata bağlanmasıyla ilgili bindirme kaynak mesafesi 27 mm olarak ayarlanmıştır (bakınız Şekil 7.9).



Şekil 7.9: Birleştirilecek numune boyutları ve bindirme bağlantı ölçüleri

7.3.2 Plaka Bağlama Aparatının Sabitlenmesi

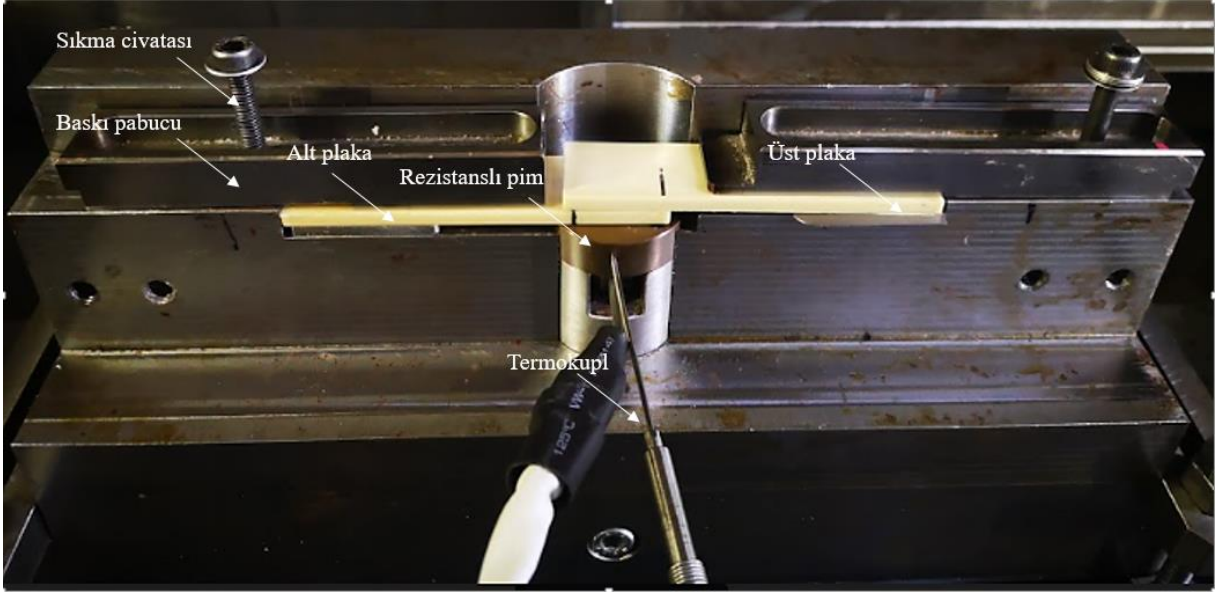
Kaynak esnasında herhangi bir şekilde bağlama aparatının hareket etmemesi amacıyla aparat her iki kenarındaki kademelerden baskı pabuçları ve civatalar yardımıyla CNC freze tezgâhı üzerinde bağlama kalıbına sabitlenmiştir. Kaynak esnasında aparatın oynamaması takımın dalma ve karıştırma yapacağı bölgelerin değişmemesi açısından kritik öneme sahiptir.

7.3.3 SKNK Takımının Ayarlanması

Tüm deneylerde aynı takım kullanılması nedeniyle bağlama aparatı ayarlanıp sabitlendikten sonra takım bağlandıktan sonra herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Takım freze tezgâhının takım koluna bağlanmak üzere öncelikle konik pense sıkı geçme olarak bağlanmıştır. Sonrasında da freze tezgâhında ayarı yapılması amacıyla pense beraber ölçüsü alınmıştır.

7.3.4 Kaynak Yapılacak Plakaların Sabitlenmesi

Kaynak işlemi gerçekleştirilen her üç malzeme grubunun numuneleri aynı boyutlarda üretildiğinden tüm deneylerde aynı bağlama pozisyonu ayarlanmıştır. İki adet baskı pabucu alt ve üst plakayı sıkma civataları yardımıyla sabitleyecek şekilde üstten sıkılmaktadır. Alt plaka ısı iletimi için rezistanslı pim ile temas halindedir (bakınız Şekil 7.10).



Şekil 7.10: Plakaların bağlama kalıbına sabitlenmesi

7.3.5 Tezgâh Parametrelerinin Ayarlanması

CNC freze tezgâhında istenilen parametrelerde değişiklik yapabilmek amacıyla ana program oluşturulmuştur. Bu yazılan program üzerinden ön deneylerde değişiklik yapılması için dalma derinliği, dalma hızı, ön ısıtma süresi ve karıştırma süresi değerleri değiştirilebilmektedir (bakınız Şekil 7.11). Bu değerler belirlendikten sonra 1000, 1500, 2500 d/d dönme hızları 3 farklı malzeme (PA66, PA66GF15 ve PA66GF30) ve 3 farklı alttan ısıtma sıcaklığına (100, 120 ve 150 °C) göre her deney seti için değiştirilmiştir.



Şekil 7.11: Tezgâh parametrelerinin programa girilmesi

7.3.6 Alt Isıtıcının Ayarlanması

Alt numunenin ısıtılması için kullanılan alttan ısıtma kitinin rezistanslı pimi numune bağlama aparatına sabitlendikten sonra sıcaklık ölçümü için termokupl rezistanslı pimin üzerindeki deliğe takılır. Opkon HCC1 ısı kontrol modülü elektrik bağlantısı yapıldıktan sonra sarılı bobin ısı iletimine gerçekleştirecek olan rezistanslı pime bağlanır. Isı kontrolü ise ısı kontrol modülünün ekranı üzerinden ayarlanır (bakınız Şekil 7.12).

Isı kontrol modülüne ayarlanan sıcaklık değeri sabitlenene kadar beklendikten sonra deneylere başlanmıştır. Bu süre zarfında sonuçlara etki etmemesi için numune bağlanmamıştır, sabit sıcaklık değerine ulaşıldığında ısıya dayanıklı eldivenler kullanılarak plakalar aparata bağlanmıştır.



Şekil 7.12: Isı kontrol modülü

7.4 Kaynaklı Bağlantıların Yapılması

Gerekli tezgâh ayarları, aparatın tezgâha bağlanması ve freze programı ayarlama işlemlerinden sonra SKNK işlemine başlanmıştır. Kaynak adımları aşağıdadır.

- Alttan ısıtma işlemi
- Takımın dönmeye başlaması
- Ön ısıtma işlemi
- Takımın dalması
- Karıştırma işlemi
- Takımın geri çekilmesi

7.4.1 Alttan Isıtma

Isı kontrol modülü istenen sıcaklık değerini rezistanslı pime sabit bir şekilde iletmeye başladıktan sonra numuneler aparata bağlanır ve baskı pabucuyla sıkılarak sabitlenir. Rezistanslı pim ile alttaki plaka temasa başladıktan sonra freze tezgâhında işlem başlatılır ve tezgâh programına girilen ısıl dengeye gelme süresi olan 6 dakikalık süre tamamlandığında alttan ısıtma işlemi tamamlanır.

7.4.2 Takım Dönme

Alttan ısıtma süresinin tamamlanmasından itibaren takım deney setine göre girilen dönme hızı değerinde dönmeye başlar. Döngü süresinde zaman kaybetmemek amacıyla numuneye temas etmediği durumlarda takım 10 mm/dk sabit hızla dikey ekseninde hareket etmektedir.

7.4.3 Ön Isıtma

Takımın piminin üst numuneye temasından itibaren takım dikey ekseninde hızı dalma hızı olan 1 mm/dk sabit hızla hareket etmeye başlar. Omuz üst numunenin 1 mm dalma derinliğine ulaşana kadar ilerler ve takım dikey eksenindeki hareketini geçici olarak durdurur. Takım bu derinlikte belirlenen dönme hızında optimum değer olarak belirlenen 60 saniye ön ısıtma süresi boyunca dönmesiyle omuz ve üst numune arasındaki sürtünmeden kaynaklı gerekli ısı enerjisi

oluşur. Bu sayede malzeme yumuşar ve takım ön ısıtma süresini tamamladıktan sonra dikey ekseninde ilerlenmesine devam eder.

7.4.4 Dalma

Ön ısıtma süresi tamamlandıktan sonra takım ön deneylerle optimum olarak belirlenen 1 mm/dk sabit hızla 3 mm dalma derinliğine kadar ilerler. Bu aşamada takımın dalmasıyla yumuşayan polimer belirgin bir şekilde takım omzunu sararak yukarı yönlü hareketlenir.

7.4.5 Karıştırma

Takım optimum derinlik olarak belirlenen 3 mm dalma derinliğine ulaştıktan sonra dikey eksenindeki hareketini sonlandırır ancak dönme hareketi devam eder. İşlem boyunca takıma bağlı olarak dönen dişli pim bu adımda birleşme bölgesinde ana görevini yapar. Ön deneyler ve literatür araştırması sonucunda uygun görülen 20 saniye karıştırma süresi bitene kadar pim birleştirilecek iki numunenin plastik deformasyona uğrayan malzemelerini birleşme bölgesinde homojenleştirecek şekilde karıştırır.

7.4.6 Takım Geri Çekilmesi ve Kaynağın Tamamlanması

Karıştırma adımının da tamamlanmasıyla takım işlem boyunca merkez pozisyonunu kaybetmemesi için sadece dikey ekseninde hareket etmesi gerektiğinden geri çekilme adımında da dikey ekseninde temas öncesi ilerleme hızında yukarı doğru başlangıç pozisyonuna döner.

Plastik deformasyonla katı halde birleşme gerçekleştiğinden takımın hızlı çıkması önemlidir. Takımın geri çekilmesi sonrası pim SKNK yöntemine özgü istenmeyen bir delik bırakır.

7.4.7 Sıcaklık Ölçümü

Deney süresi boyunca her birleştirilecek numune için termal kamera yardımıyla birleşme bölgesinin sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Sıcaklık ölçümü için termal kamera olarak Fluke Ti401 PRO kullanılmıştır (bakınız Şekil 7.13).



Şekil 7.13: Fluke Ti401 PRO termal kamera [69]



Şekil 7.14: Termal kamera ile sıcaklık ölçümü

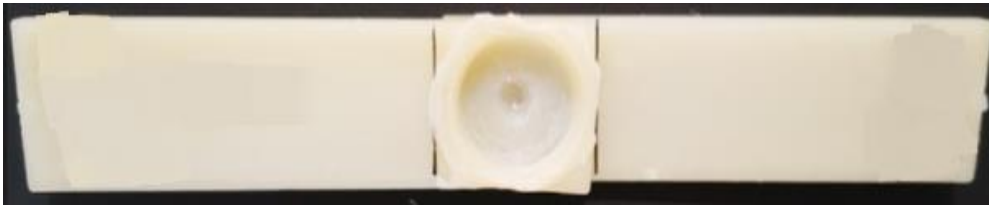
Ölçüm için sıcaklık değerlerinde yanılma olmaması için termal kamera 0,5 metre mesafede sabit uzaklıkta tutulmuştur (bakınız Şekil 7.14). Kaynak esnasında ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Yapılan ölçümler esnasında en yüksek sıcaklık değerlerine dalma ve karıştırma adımlarında ulaşılmıştır. Özellikle ön ısıtma ve dalma adımlarında sıcaklıkta sürtünme kaynaklı ani artışlar gözlenmiştir.

7.4.8 Soğuma ve Takımın Temizlenmesi

İşlem sonrasında sürtünme kaynaklı yüksek sıcaklık oluşumu nedeniyle işlem sonrasında normal ortam şartlarında sıcaklık farkından takımın soğuması hızlı bir şekilde gerçekleşir. Soğuma sonrası takım, pim ve aparat üzerinde kalan çapak pnömatik sisteme bağlı hava püskürtme tabancalarıyla temizlenebilir. Omuzu saran malzemenin işlem sonrasında takıma yapışması durumunda soğuyan plastik mekanik ekipmanlar yardımıyla kırılarak çıkarılabilir.

7.4.9 Deneysel Tasarım Matrisindeki Deneylerin Tamamlanması

Farklı parametrelerdeki deney setlerinin her biri için birinci tekrarlar tamamlandıktan sonra ikinci ve üçüncü tekrarlar gerçekleştirilir. Kaynak işlemi her malzeme için dönme hızı ve alttan ısıtma sıcaklığı parametrelerinin etkilerini analiz etmek amacıyla değiştirilerek deney tasarım matrisindeki deneyler tamamlanmıştır. PA66, PA66GF15 ve PA66GF30 malzemelerinin SKNK bağlantıları Şekil 7.15, 7.16 ve 7.17’de verilmiştir. Deneylerde ilk olarak dönme hızı değişimi, sonrasında alttan ısıtma sıcaklığı değişimi ve son olarak malzeme değişimi yapılarak tüm deneyler tekrarlarıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.15: PA66 malzemesi sürtünme karıştırma nokta kaynağı bağlantısı



Şekil 7.16: PA66GF15 malzemesi sürtünme karıştırma nokta kaynağı bağlantısı

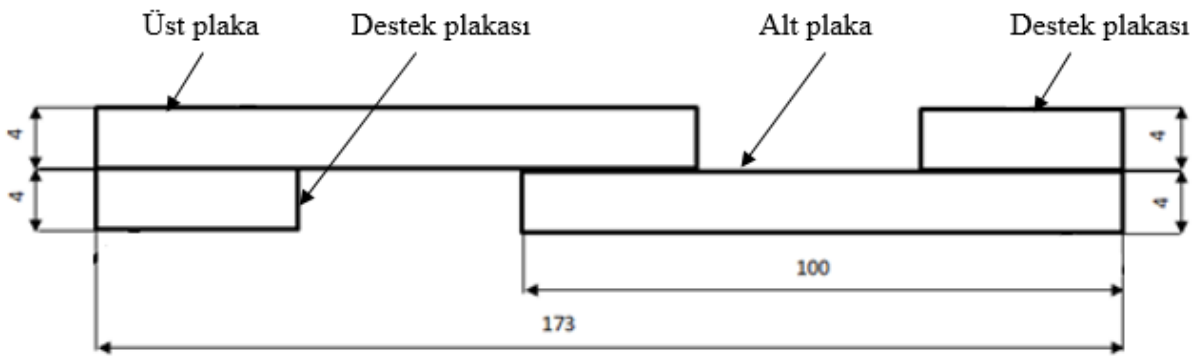


Şekil 7.17: PA66GF30 malzemesi sürtünme karıştırma nokta kaynağı bağlantısı

7.5 Kaynaklı Bağlantıların Karakterizasyonu – Bindirme Kaynağı Bağlantı Kuvvet Testleri

7.5.1 Çekme Testi Numunelerinin Hazırlanması

Birleştirilen numuneler sınıflandırılarak çekme testi öncesi makroyapı incelemesi amacıyla fotoğraflanmıştır. Numuneler çekme testi yapılmadan önce minimum 3 gün olacak şekilde uygun ortam koşullarında bekletilmiştir.



Şekil 7.18: Çekme testi yapılacak bağlantı

Çekme testi esnasında çenelerden kaymanın ve moment oluşmasının önüne geçilmesi amacıyla destek plakalar kullanılmıştır. Destek plakalar birleştirilmiş numunelerin çekme yapılacak her iki ucuna çenelerin tutma mesafesi uzunluğunda olacak şekilde üretilip eklenmiştir (bakınız Şekil 7.18).

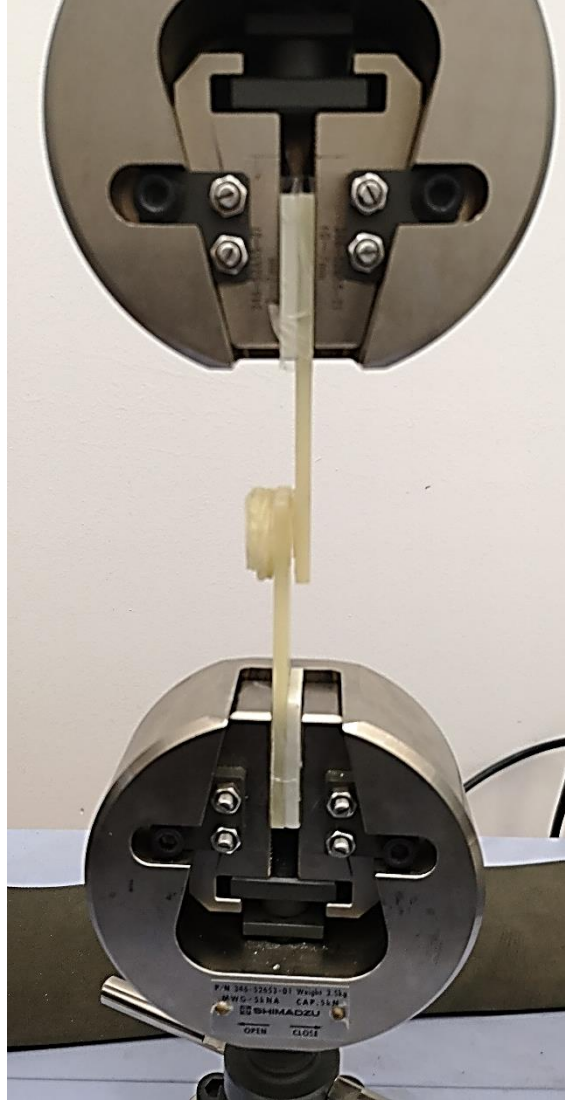
7.5.2 Çekme Testi Numunelerinin Ölçüm Noktalarının İşaretlenmesi

Bağlantı dayanımlarını ölçmek üzere hazırlanan birleştirilmiş numunelerin çekme testleri Shimadzu AGS-X serisinin universal masa üstü modeliyle gerçekleştirilmiştir (bakınız Şekil 7.19). Universal elektromekanik test cihazı 10 kN yük hücreğine ve numuneyi sıkmak için kaydırılmaz tutucu çenelere sahiptir.



Şekil 7.19: Shimadzu AGS-X Universal masaüstü modeli [70]

Çekme testi yapılacak numunelere çenenin sıkmasında problem yaşamamak için destek plakaları bağlanarak çeneler destek plakalarının boy mesafesinden numuneleri sıkacak ve test öncesi ön gerilme oluşturmayacak şekilde servo motorla her numune için sabit aralık mesafesinde ayarlanmıştır (bakınız Şekil 7.20). Ölçüm grafikleri ve sonuçları anlık olarak Shimadzu AGS-X Universal çekme testi cihazıyla entegre Trapezium yazılımıyla elde edilmiştir. Kopma kuvveti – şekil değiştirme grafiği için başlangıç boyu bindirme mesafesi olan 27 mm olarak alınmıştır. Çekme testleri 5 mm/dk çekme hızıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.20: Kaynaklı numunelerin sıkma çenelerine bağlanması

Bölüm 8

Sonuçlar

8.1 Bindirme Kaynağı Bağlantı Kuvvetleri için Çekme Testi Sonuçları

Deney tasarım matrisinde yer alan her parametre seti için tekrar deneylerinin dışında kalan üçer adet kaynaklı bağlantının çekme testi sonucunda bindirme kaynağı kesme kuvvetleri (kesme kuvvetleri) ölçülmüştür. Üç tekrar deneyi sonucunda elde edilen kaynak kuvvetlerinin ortalama değeri kullanılmıştır. Çekme testi sonucu elde edilen kaynak kuvvet değerleri Tablo 8.1, Tablo 8.2 ve Tablo 8.3’de verilmiştir.

Tablo 8.1: PA66 malzemelerin çekme testi sonuçları

Deney Numarası	Malzeme	Takım Dönme Hızı	Altın Isıtma Sıcaklığı	Bindirme Bağlantı Kesme Kuvveti (N)			
				Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
#		d/d	°C				
1	PA66	1000	100	254	215	243	237
2	PA66	1500	120	661	681	696	679
3	PA66	2500	150	234	283	204	240
4	PA66	1000	120	326	311	350	329
5	PA66	1500	150	307	304	297	303
6	PA66	2500	100	225	214	210	216
7	PA66	1000	150	256	229	265	250
8	PA66	1500	100	257	254	255	255
9	PA66	2500	120	317	320	321	319

Tablo 8.2: PA66GF15 malzemelerin çekme testi sonuçları

Deney Numarası	Malzeme	Takım Dönme Hızı	Alttan Isıtma Sıcaklığı	Bindirme Bağlantı Kesme Kuvveti			Ortalama
				(N)			
#		d/d	°C	Numune 1	Numune 2	Numune 3	
1	PA66GF15	1000	100	370	378	352	367
2	PA66GF15	1500	120	455	500	484	480
3	PA66GF15	2500	150	496	590	522	536
4	PA66GF15	1000	120	480	446	415	447
5	PA66GF15	1500	150	475	463	447	462
6	PA66GF15	2500	100	511	480	496	496
7	PA66GF15	1000	150	417	407	410	412
8	PA66GF15	1500	100	405	422	420	416
9	PA66GF15	2500	120	682	755	609	682

Tablo 8.3: PA66GF30 malzemelerin çekme testi sonuçları

Deney Numarası	Malzeme	Takım Dönme Hızı	Alttan Isıtma Sıcaklığı	Bindirme Bağlantı Kesme Kuvveti			Ortalama
				(N)			
#		d/d	°C	Numune 1	Numune 2	Numune 3	
1	PA66GF30	1000	100	525	518	473	505
2	PA66GF30	1500	120	601	604	654	620
3	PA66GF30	2500	150	881	828	851	853
4	PA66GF30	1000	120	603	646	574	608
5	PA66GF30	1500	150	783	804	830	806
6	PA66GF30	2500	100	504	627	595	575
7	PA66GF30	1000	150	672	662	680	672
8	PA66GF30	1500	100	493	627	564	561
9	PA66GF30	2500	120	579	624	818	674

8.2 Sonuçların Tekrarlanabilirliği

Tablo 8.1, 8.2 ve 8.3'teki deneyler öncesinde ön çalışmalarla prosesin uygunluğu tekrarlı olarak doğrulansa da, Tablo 8.1, 8.2 ve 8.3'teki deneylerde de her parametre seti için beşer adet kaynaklı birleştirme gerçekleştirilmiştir. Aynı parametre grubundaki beş adet numunenin üçü sonuçların analizi için kullanılırken diğerleri deney grubunun kontrolü amacıyla incelenmiştir.

8.3 Kaynak Plakalarının Görsel İncelemesi ve Morfolojik Analizi

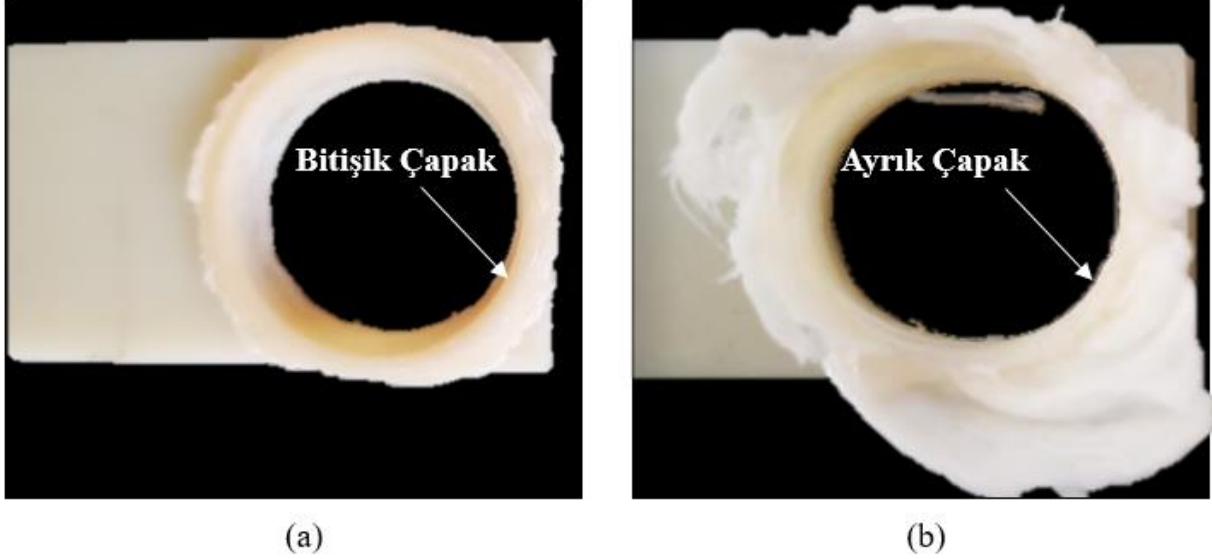
PA66, PA66GF15 ve PA66GF30 bağlantılarının oluşturulması sonrasında çekme testleri uygulanmıştır. Oluşturulan bağlantıların makroyapısının özellikle kaynak kuvveti başta olmak üzere çeşitli mekanik özelliklerinin değerlendirilmesinde açıklayıcı olacağı bilindiğinden çekme testi öncesi oluşturulan kaynak bağlantılarının ve çekme testi sonrası kopan numunelerin görsel incelemesi gerçekleştirilmiştir.

Her üç malzeme için yapılan ayrı incelemelerde bindirme bağlantı kesme kuvvetiyle açıklanabilen görsel farklılıklar gözlenmiştir. Etkileri analiz edilmek istenen alttan ısıtma sıcaklığı ve dönme hızı proses parametrelerinin bindirme bağlantı kesme kuvvetine etkisinin yanında kaynak morfolojisinde de değişiklik meydana getirdiği gözlemlenmiştir. İncelemelerin sonucunda parametreler ile aralarında yakın bir bağ olduğu belirlenmiştir.

Her üç malzemede ortak olarak görülen değişken bindirme bağlantı kesme kuvvetiyle ilişkili üst plakada oluşan çapak oluşum farklılığıdır. Bu oluşum farklılığının nedeninin takımın dalma esnasında takım omuzun çevresinde birikip yapışan malzemenin geri çekilme adımında ayrılma koşulları olduğu fark edilmiştir. Dönme hızı ve alttan ısıtma sıcaklığının bu koşulları değiştirdiği gözlenmiştir. Bindirme bağlantı kesme kuvvetinin yüksek olduğu bağlantılarda üst plakaya bitişik görünüme sahip çapak oluşumu belirlenmiştir. Bunun yanında düşük bindirme bağlantı kesme kuvvetine sahip bağlantılarda takımın sıvanmasıyla ilgili olduğu belirlenen ayırık çapak oluştuğu gözlenmiştir.

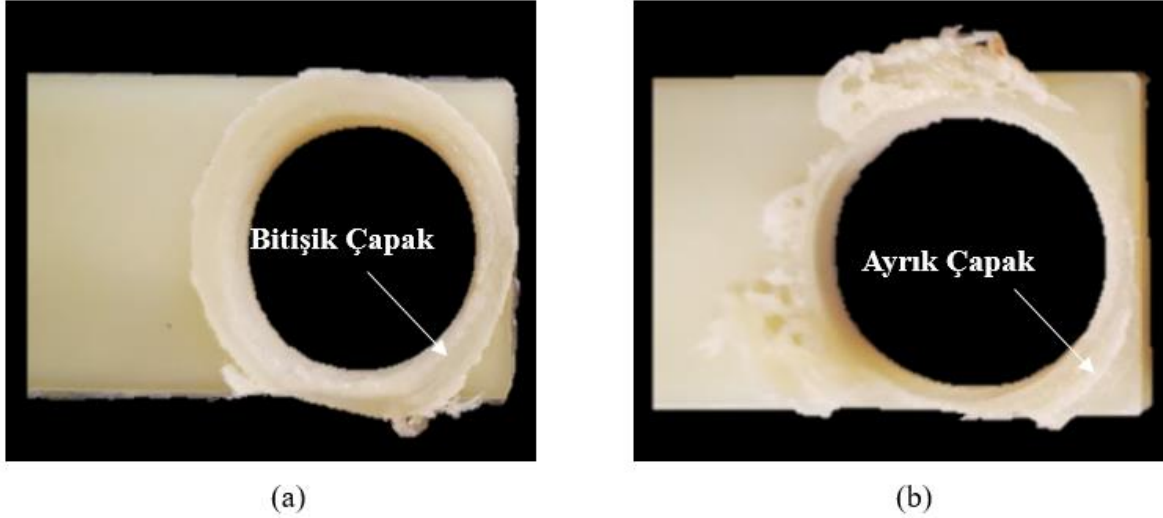
PA66 bağlantılarının görsel incelemelerin sonucu en yüksek bindirme bağlantı kesme kuvvetinin elde edildiği 1500 d/d takım dönme hızı ve 120°C alttan ısıtma sıcaklığı parametrelerinde üst plakayla bitişik çapak oluşumu görülürken en düşük bindirme bağlantı

kesme kuvvetinin oluştuğu 2500 d/d takım dönme hızı ve 100 °C alttan ısıtma sıcaklığı parametrelerinde ayırık çapak oluşumu mevcuttur. Şekil 8.1’de PA66 üst plakalarındaki çapak oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 8.1: PA66 üst plaka çapak formu, (a) 2500 d/d ve 100 °C, (b) 1500 d/d ve 120 °C

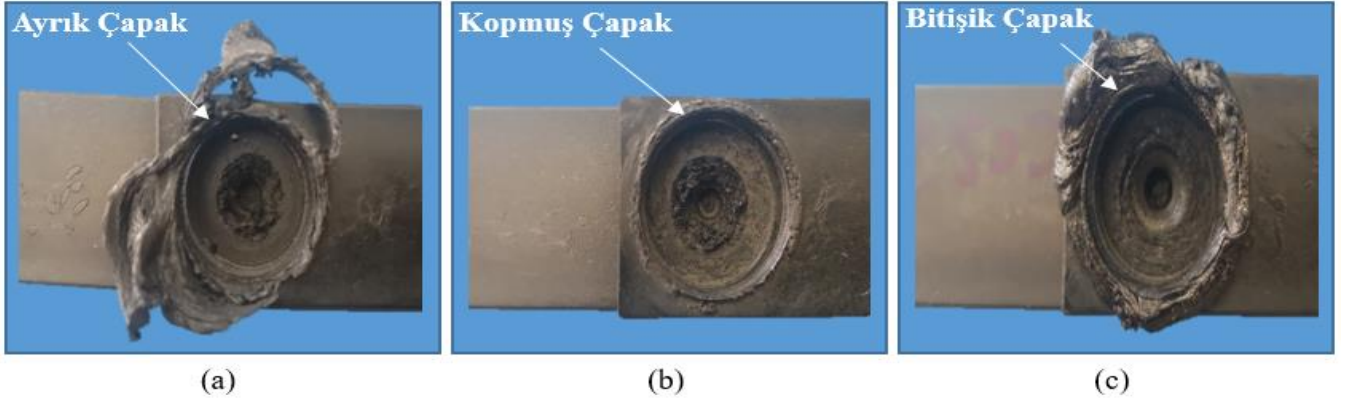
PA66GF15 bağlantılarının görsel incelemelerinde katkısız PA66 bağlantılarındaki bindirme bağlantı kesme kuvveti ve üst plaka çapak formu ilişkisi görülmüştür. En yüksek bindirme bağlantı kesme kuvvetinin ölçüldüğü 2500 d/d takım dönme hızı ve 120 °C parametrelerinde üst plakayla bitişik çapak görülürken en düşük bindirme bağlantı kesme kuvvetinin ölçüldüğü 1000 d/d takım dönme hızı ve 100°C alttan ısıtma sıcaklığın parametrelerinde oluşturulan bağlantılarda üst plakada ayırık çapak oluşumu gözlenmiştir. Şekil 8.2’de PA66GF15 üst plakalarındaki çapak oluşumu gösterilmiştir.



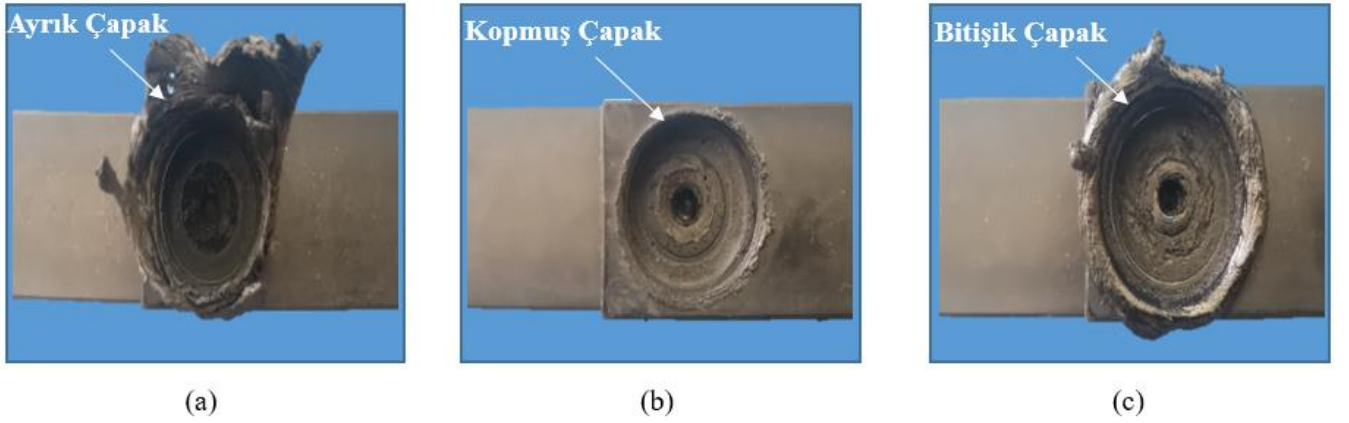
Şekil 8.2: PA66GF15 üst plaka çapak formu, (a) 2500 d/d ve 120 °C, (b) 1000 d/d ve 100 °C

PA66GF30 bağlantıları görsel olarak incelendiğinde çapak oluşum formunun bindirme bağlantı kesme kuvvetiyle ilişkisi PA66 ve PA66GF15 bağlantılarıyla benzerdir. En yüksek kuvvet değerlerinin elde edildiği 2500 d/d takım dönme hızı değerinde üst plakaya bitişik çapak görülürken en düşük kuvvete sahip 1000 d/d takım dönme hızı değerinde ayrık çapak oluşumu gözlenmiştir. Bunun yanında ara bindirme bağlantı kesme kuvveti değerinin ölçüldüğü 1500 d/d dönme hızında ise üst plakada çapak kalmadığı çapağın takım omzuyla beraber koptuğu gözlenmiştir. Şekil 8.3, 8.4 ve 8.5’de her üç alttan ısıtma sıcaklığı için farklı dönme hızlarındaki üst plakadaki çapak formları gösterilmiştir.

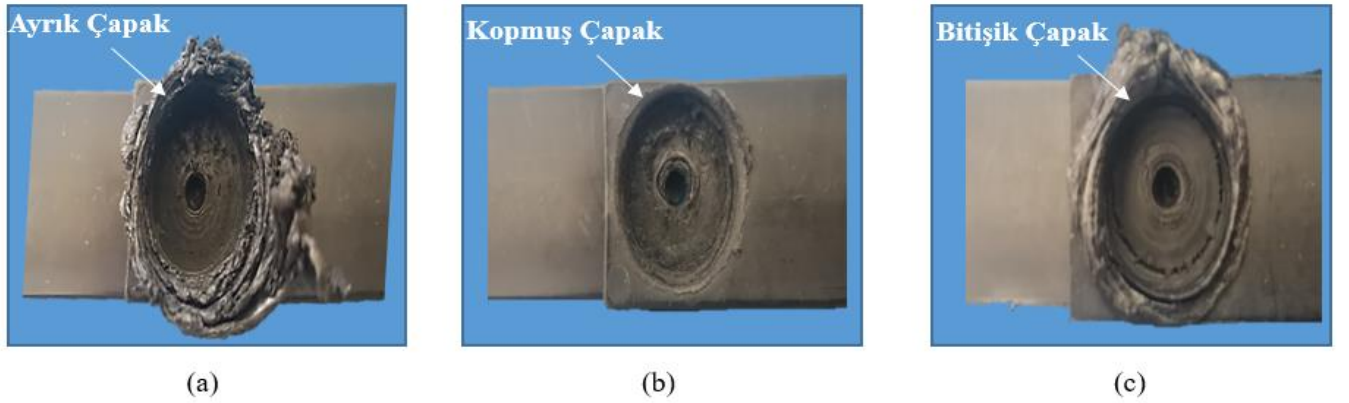
Her üç malzemedeki çapak formunun oluşmasında etkili olan faktörler yorumlandığında takım dönme hızının ve alttan ısıtma sıcaklığının birleştirecek plakaların ergime seviyesinde etkisi belirlenmiştir. Farklı dönme hızlarında plakanın takım ile temasında oluşan sürtünme ısıyla ergime derecesi de farklı olmaktadır. Buna paralel olarak farklı ergime seviyelerindeki plaka malzemelerinin takıma sıvanma ve üst plakadan ayrılma seviyeleri de değişmektedir. Bu farklı seviyelerdeki ergime sonucunda çapak takım ile beraber kopabildiği gibi kaynak bağlantı bölgesinde de kalabilmektedir. Bunun dışında takım ile ayrılmayan çapağın bağlantı bölgesinden dışarı doğru saçıldığında ayrık çapak formu da oluşturabildiği gözlenmiştir.



Şekil 8.3: 100 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF30 üst plaka çapak formu, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d



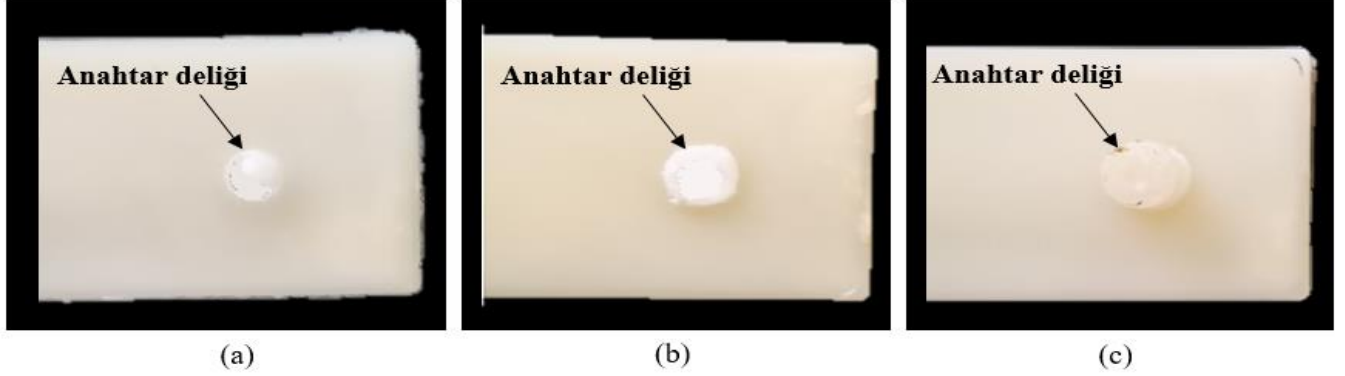
Şekil 8.4: 120 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF30 üst plaka çapak formu, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d



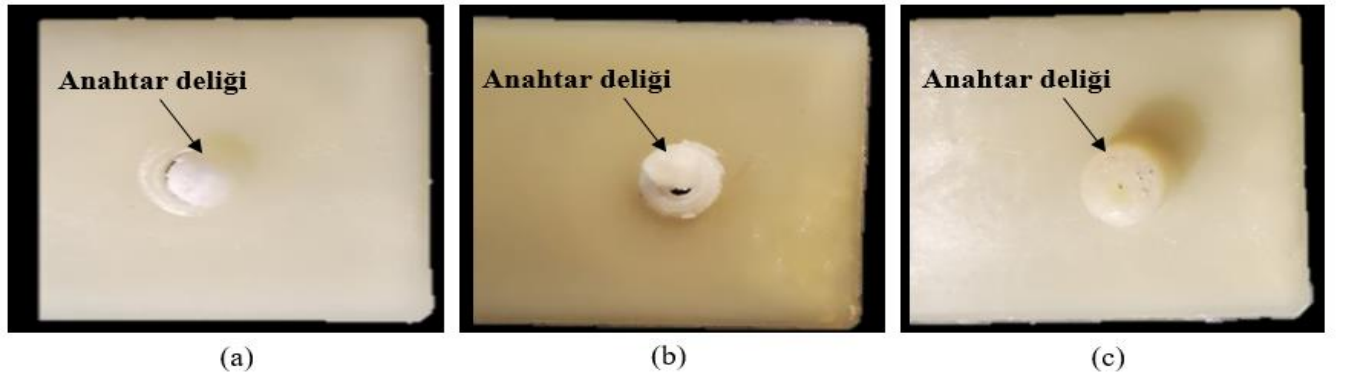
Şekil 8.5: 150 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF30 üst plaka çapak formu, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d

Bunun yanı sıra sürtünme karıştırma nokta kaynağında prosese özgü şekilde alt plakada meydana gelen anahtar deliği formunun bindirme bağlantı kesme kuvveti ve takım dönme hızıyla ilişkisi tespit edilmiştir. Kaynak esnasında anahtar deliğinde biriken malzeme miktarının

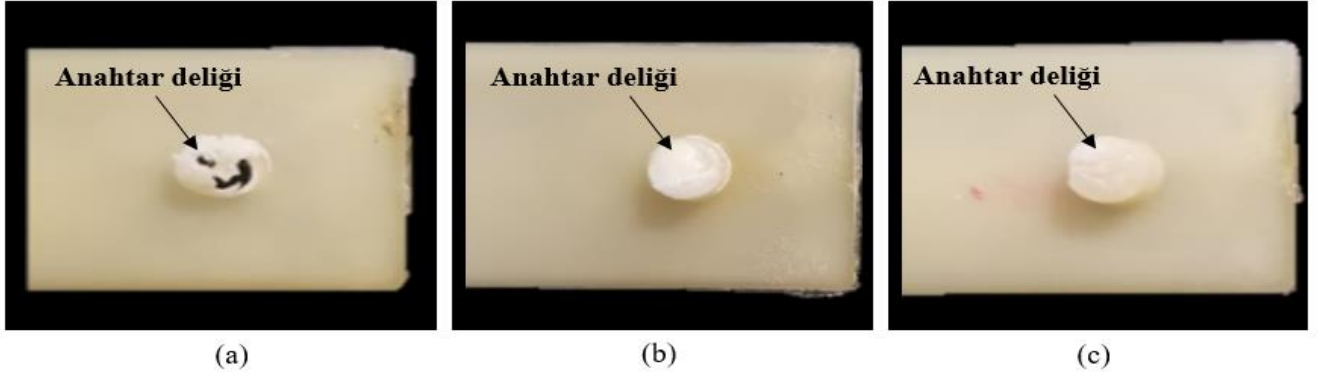
dönme hızıyla arttığı gözlenirken benzer şekilde anahtar deliği formunun boyutu arttıkça bindirme bağlantı kesme kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 8.6, 8.7 ve 8.8’de PA66GF15 alt numunelerinin üç alttan ısıtma sıcaklığı için de farklı takım dönme hızlarındaki anahtar deliği boyutları gösterilmiştir.



Şekil 8.6: 100°C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF15 anahtar deliği oluşumu, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d

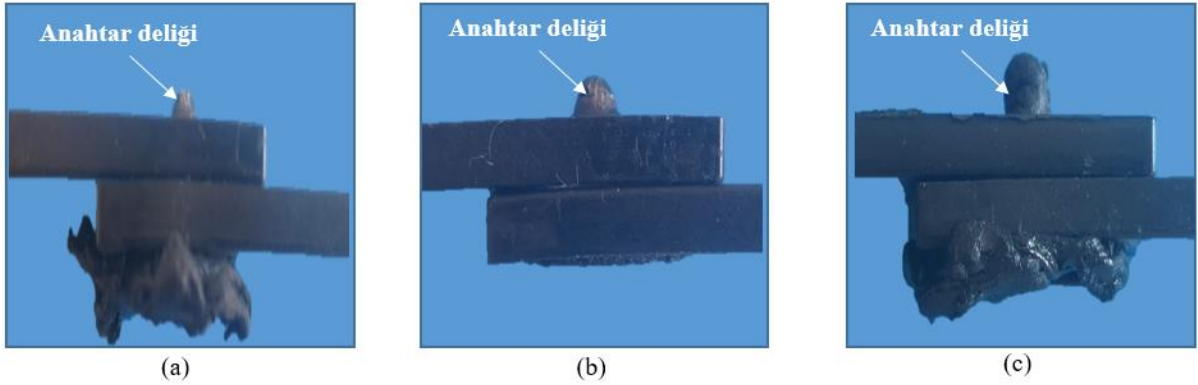


Şekil 8.7: 120 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF15 anahtar deliği oluşumu, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d

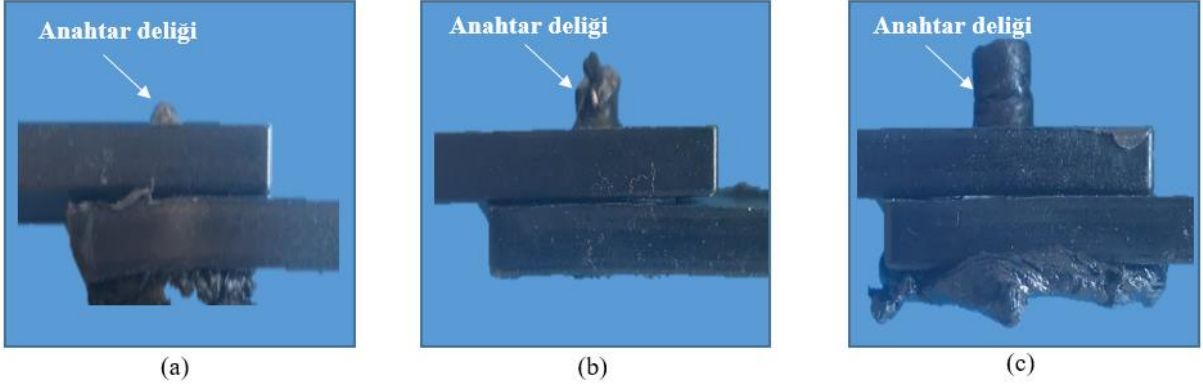


Şekil 8.8: 150 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF15 anahtar deliği oluşumu, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d

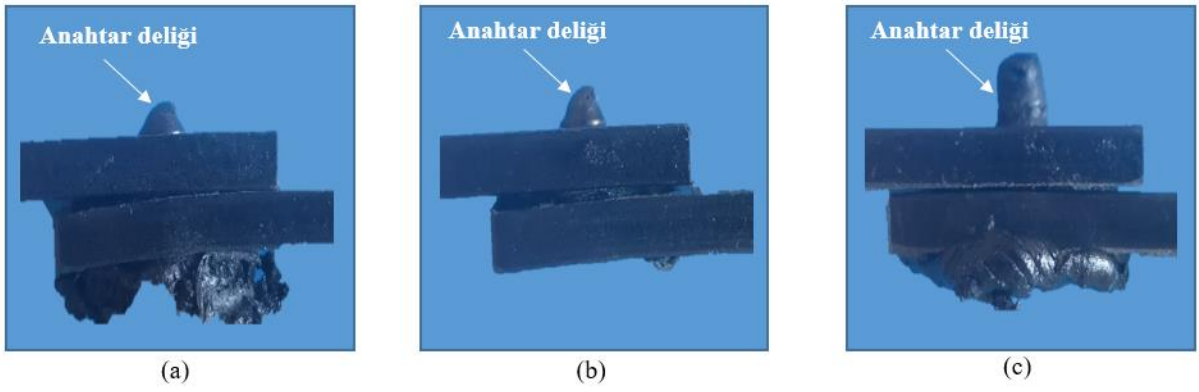
PA66 GF30 bağlantıları için takım dönme hızının neden olduğu görsel farklılıklardan birisi de PA66GF15 bağlantılarında olduğu gibi anahtar deliği boyutlarındaki farklılıktır. Yine benzer şekilde anahtar deliğinde biriken malzeme miktarı takım dönme hızı ve kaynak kuvvetiyle doğru orantılı olarak artmıştır. Şekil 8.9, 8.10 ve 8.11’de PA66GF30 alt numunelerinin üç alttan ısıtma sıcaklığı için de farklı takım dönme hızlarındaki anahtar deliği boyutları gösterilmiştir.



Şekil 8.9: 100 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF30 anahtar deliği görseli, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d



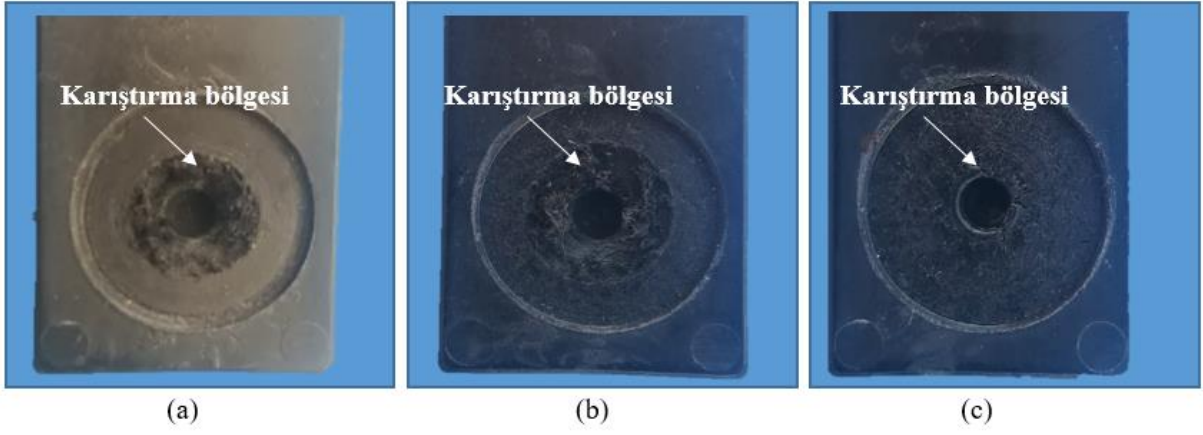
Şekil 8.10: 120 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF30 anahtar deliği görseli, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d



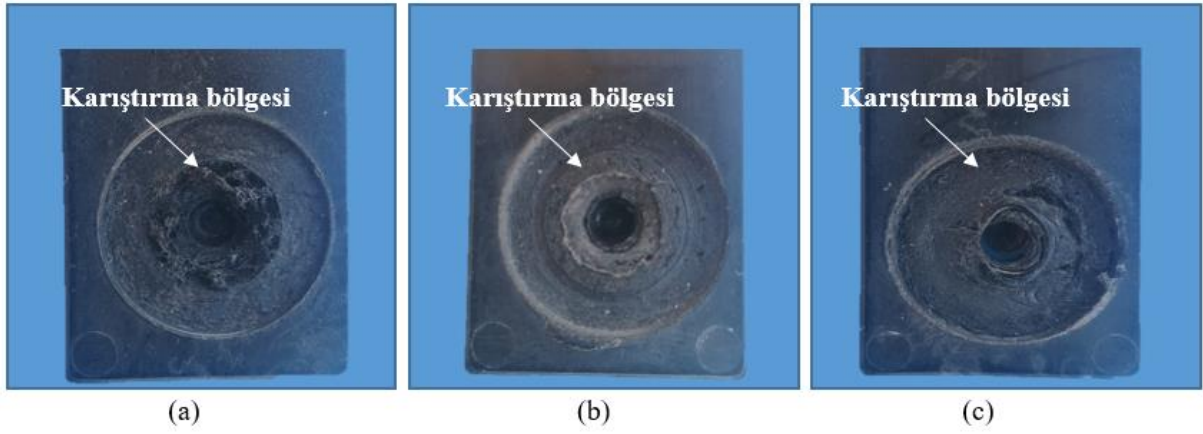
Şekil 8.11: 150 °C alttan ısıtma sıcaklığı için PA66GF30 anahtar deliği görseli, (a) 1000 d/d, (b) 1500 d/d, (c) 2500 d/d

PA66GF30 malzemesi için anahtar deliğindeki birikmenin artış değerlendirildiğinde yüksek takım dönme hızlarında daha fazla miktarda malzemenin ergidiği ve takım geri çekilmesi adımıında pimin bıraktığı boşluğa aktığı gözlenmiştir. Bu birikmenin fazla olması da bağlantı bölgesindeki malzeme miktarını arttırdığından bindirme bağlantı kesme kuvvetinin artmasını sağlamıştır.

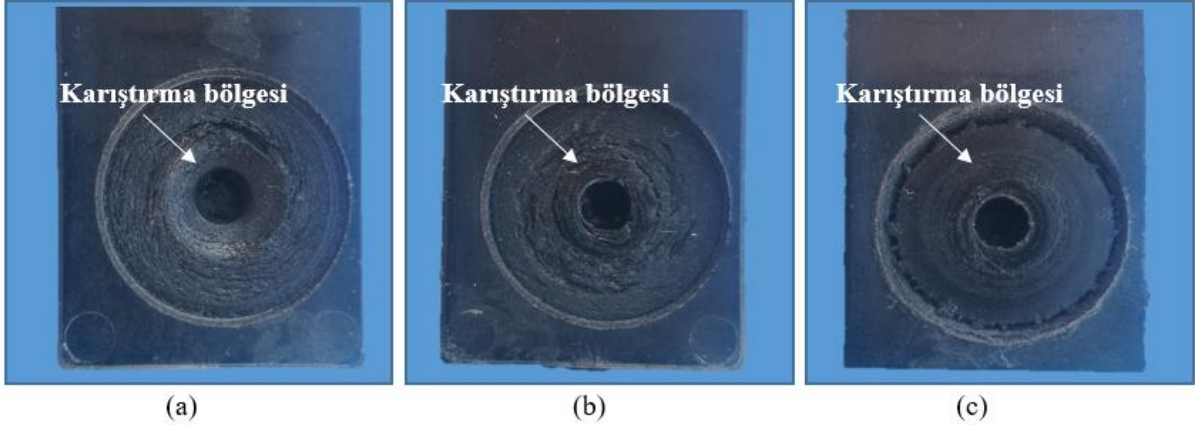
Alttan ısıtma sıcaklığının PA66GF30 bağlantılarındaki görsel ilişkisi analiz edildiğinde alttan ısıtma sıcaklığıyla beraber alt plakada pim karıştırma bölgesindeki pim etrafında yayılan malzemenin yayılma çapının değiştiği görülmüştür. Alttan ısıtma sıcaklığındaki artışla pim etrafındaki malzemenin daha geniş bir çapta dağıldığı gözlenmiştir. Bunun da alt plakadaki ergiyen malzeme miktarının sıcaklıkla arttığı ve bu sayede pim bindirme bağlantı kuvvetini arttıracak şekilde daha fazla miktarda malzemeyi karıştırdığı gözlenmiştir. Şekil 8.12, 8.13 ve 8.14'te üç takım dönme hızı için de farklı alttan ısıtma sıcaklıklarındaki alt plaka karıştırma bölgesi görselleri verilmiştir.



Şekil 8.12 : 1000 d/d dönme hızı için PA66GF30 alt numune karıştırma bölgesi, (a) 100 °C, (b) 120 °C, (c) 150 °C



Şekil 8.13: 1500 d/d dönme hızı için PA66GF30 alt numune karıştırma bölgesi, (a) 100 °C, (b) 120 °C, (c) 150 °C



Şekil 8.14: 2500 d/d dönme hızı için PA66GF30 alt numune karıştırma bölgesi, (a) 100 °C, (b) 120 °C, (c) 150 °C

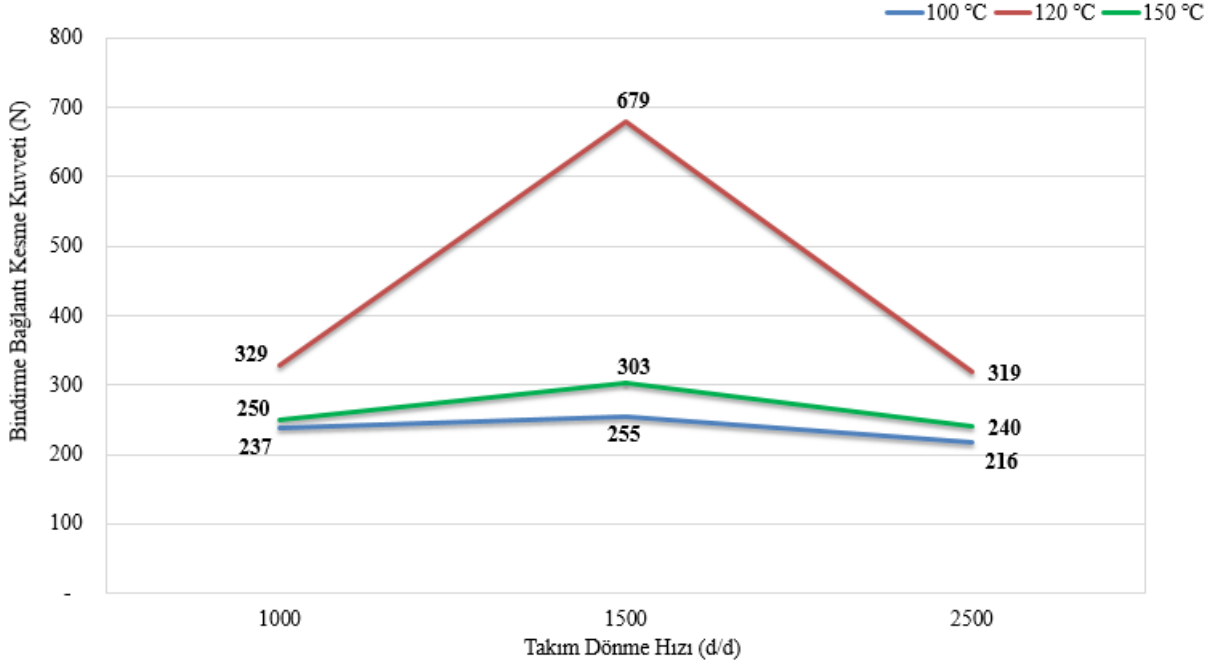
8.4 Proses Parametrelerinin Kaynak Kuvvetine Etkisi

Deney sonuçlarının analizinde en önemli konulardan birisi değişken parametrelerin değerlendirme kriterlerine olan etkisidir. Bu çalışmada üç farklı malzeme grubunda farklı kaynak parametreleri (takım dönme hızı ve alttan ısıtma) uygulanarak, kaynak parametrelerinin kaynak mukavemetine etkisi incelenmiştir. Deneyler üç malzeme için de ayrı ayrı uygulandığından kaynak parametrelerinin her üç malzemenin (PA66, PA66GF15 ve PA66GF30) bindirme bağlantı kesme kuvvetine etkisi ayrı olarak incelenmiştir. Malzeme odaklı bir değerlendirme yapıldığında ise cam elyaf katkısının uygulanan kaynak prosesinin koşullarında bindirme bağlantı kesme kuvvetine olumlu etkisinin olduğu gözlenmiştir.

8.4.1 Takım Dönme Hızının Etkisi

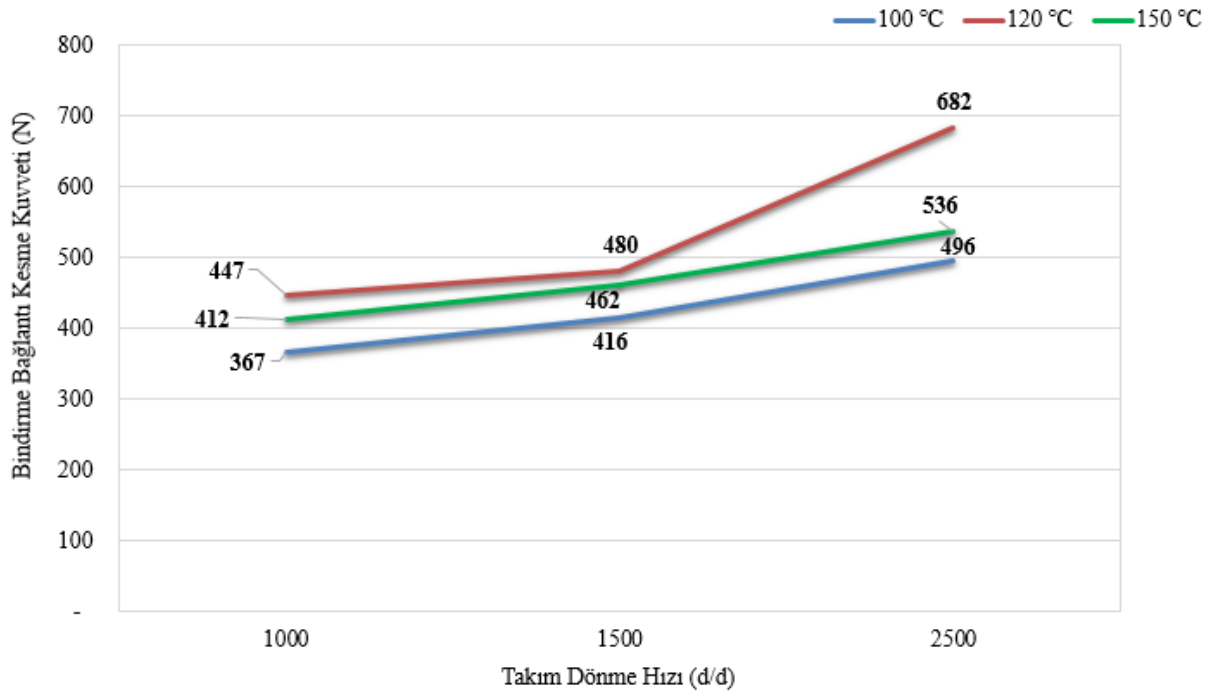
Takım dönme hızı kaynak esnasında birleştirilecek numuneler ile takımın arasındaki sürtünmeden kaynaklı oluşan ısıya önemli oranda etki etmektedir. Yapılan deneyler esnasında termal kamera incelemeleri sonucu takım dönme hızındaki artışın kaynak bölgesinde sıcaklık artışına neden olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak takım ve malzeme arasındaki sürtünmenin daha kısa sürede daha fazla sayıda temas ile oluşmuş olması söylenebilir. Bu sıcaklık artışı daha fazla miktarda malzemenin ergimesini ve birleşme bölgesinde karışan malzeme alanının büyümesini sağlamıştır. Bunun sonucu olarak PA66GF15 ve PA66GF30 plakalarının bindirme bağlantı kesme kuvvetinde artış sağlamıştır. PA66 plakaları için 1500 d/d

dönme hızı değerinde en yüksek bindirme bağlantı kesme kuvveti elde edilirken 2500 d/d dönme hızı kullanıldığında en düşük bindirme bağlantı kesme kuvveti ölçülmüştür. PA66 plakalarındaki bu durumun nedeni olarak cam elyaf katkısının daha yüksek sıcaklıklarda bozunmayı engellemiş olmasıdır. PA66, PA66GF15 ve PA66GF30 kaynak bağlantılarının bindirme bağlantı kesme kuvvetine takım dönme hızının etkisini gösteren grafikler Şekil 8.15, 8.16 ve 8.17’de verilmiştir.



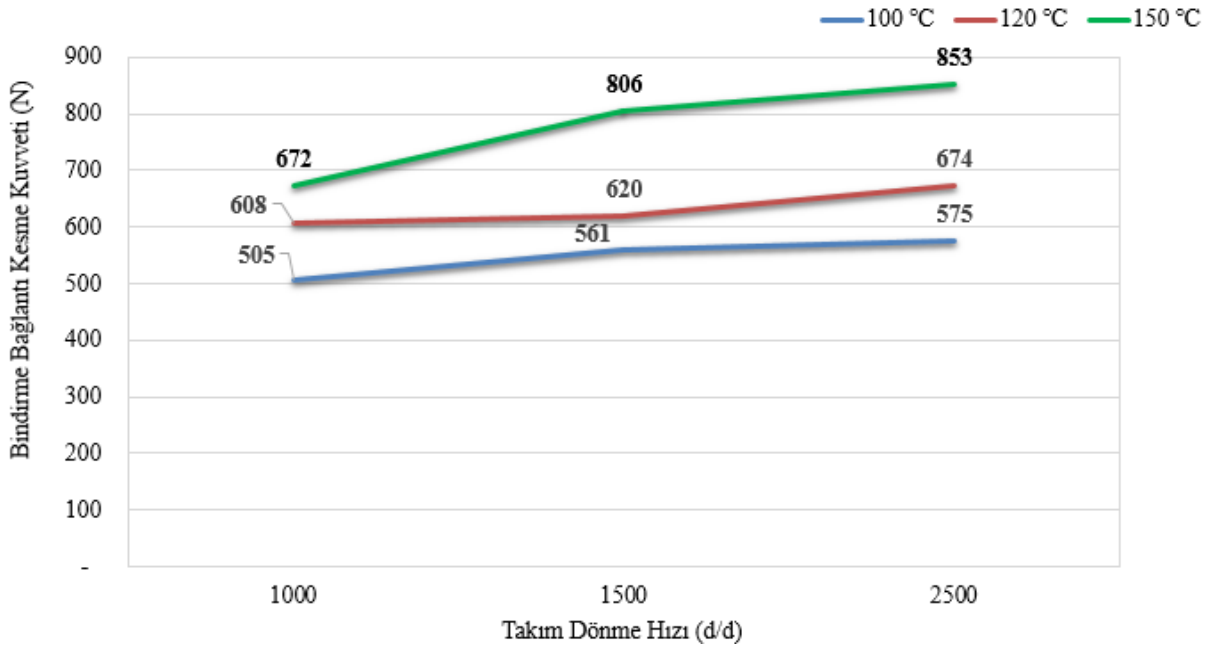
Şekil 8.15: PA66 bağlantılarının bindirme bağlantı kesme kuvvetine takım dönme hızı etkisi

PA66 malzemelerinin sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi ile birleştirilmesiyle oluşturulan bağlantıların çekme testi sonuçları incelendiğinde dönme hızının 1500 d/d değerine arttırılmasının bindirme bağlantı kesme kuvvet artışı yönünde etkisi görülürken bu değer üstündeki artışın bindirme bağlantı kesme kuvvetinin azalmasına neden olduğu ve 2500 d/d değeri kullanılarak oluşturulan bağlantıların bindirme bağlantı kesme kuvvet değerinin 1000 d/d değeri kullanılarak oluşturulan bağlantıların bindirme bağlantı kesme kuvvet değerinin de altında kaldığı gözlenmiştir. Burada dönme hızının 1000 d/d değerinden 1500 d/d değerine arttırılmasının bağlantı bölgesindeki ısı oluşum miktarını arttırarak bağlantı kuvvetini arttıracak şekilde etki ettiği, 2500 d/d değerine çıkarıldığında ise kaynak bölgesine yüksek hız nedeniyle ayrışmaya neden olabilecek etki yarattığı gözlenmiştir. Her üç alttan ısıtma sıcaklık değerinde oluşturulan bağlantı için en yüksek bindirme bağlantı kesme kuvvetini veren dönme hızı 1500 d/d olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 8.16: PA66GF15 bağlantılarının bindirme bağlantı kesme kuvvetine takım dönme hızı etkisi

Dönme hızının PA66GF15 kaynak bağlantıları üzerindeki etkisi incelendiğinde kaynak kuvvetinin dönme hızıyla doğru orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. PA66GF15 malzemesinin PA66 malzemesine nazaran cam elyaf katkısı ile kazandığı düşünülen termal ve mekanik özellikleri kaynaklı dönme hızı değerinin 2500 d/d seviyesine çıkarılmasının kaynak kuvvetini artırıcı etki yarattığı düşünülmektedir. Yapılan deneyler sonucunda her üç alttan ısıtma sıcaklığı değerinde de en yüksek bindirme bağlantı kesme kuvvetini veren dönme hızının 2500 d/d olduğu gözlenmiştir.

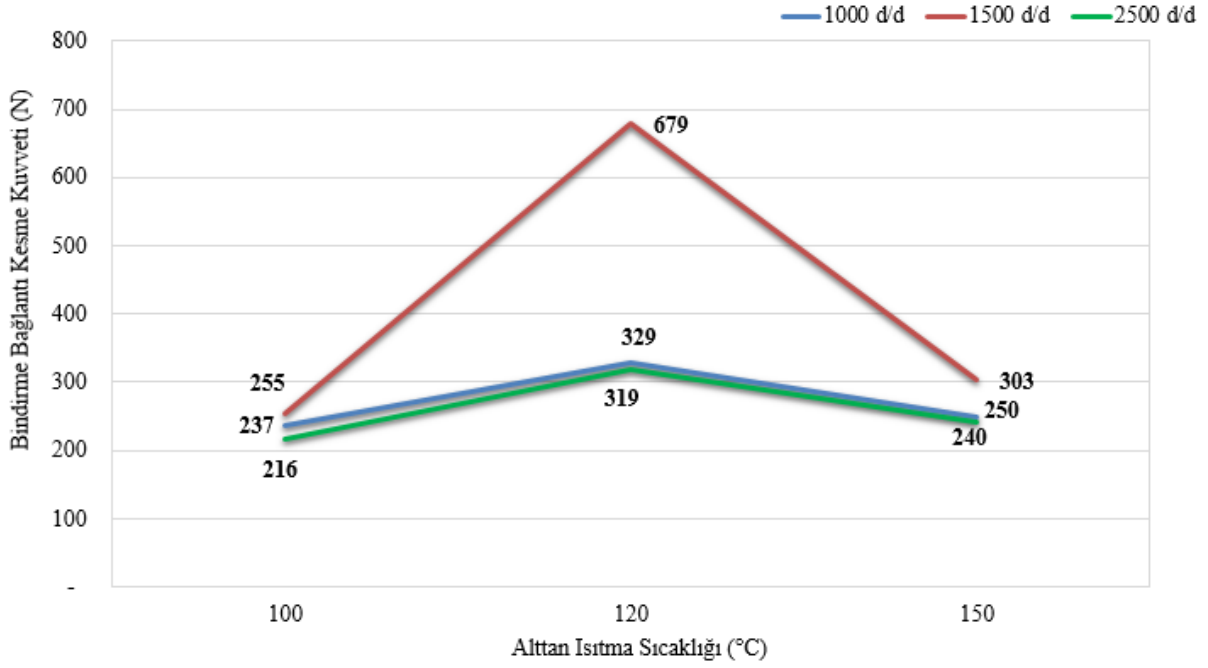


Şekil 8.17: PA66GF30 bağlantılarının bindirme bağlantı kesme kuvvetine takım dönme hızı etkisi

PA66GF30 kaynak bağlantılarının da dönme hızının etkisiyle kaynak kuvveti değişiminin PA66GF15 bağlantılarındaki gibi doğru orantılı olduğu gözlenmiştir. Burada dikkat çeken dönme hızı artışının kaynak kuvvetine etkisinin PA66GF15 bağlantılarında PA66GF30 bağlantılarına göre daha belirgin olduğudur. Dönme hızının en yüksek bindirme bağlantı kesme kuvvetini veren değeri her üç alttan ısıtma sıcaklığı için de 2500 d/d olarak gözlenmiştir.

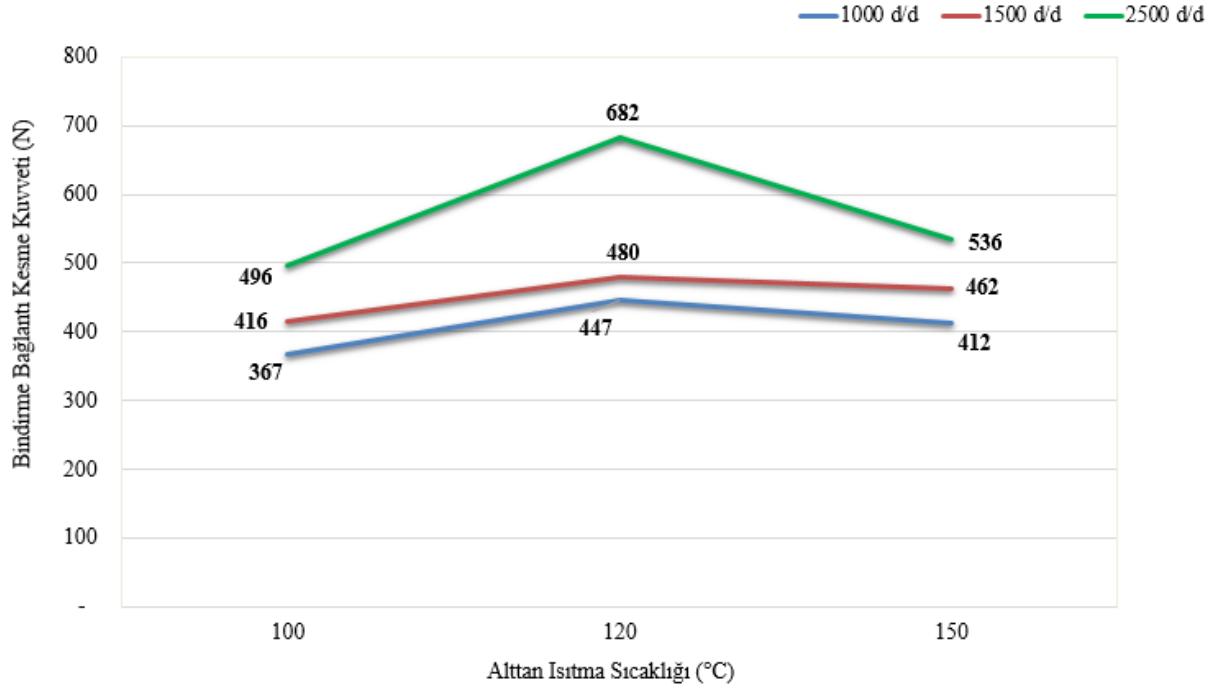
8.4.2 Altan Isıtma Sıcaklığının Etkisi

Altan ısıtma bu çalışmayla beraber SKNK için uygulama anlamında yeni bir prosestir. Bu yöntemle kullanılarak özellikle plastiklerin SKNK ile birleştirilmeleri esnasında takımla birebir temasa girmemesi kaynaklı yeterli seviyede ısınmayan alt plakanın ısınması amaçlanmıştır. İletim yoluyla ısıtılan alt plakanın yumuşaması ve ergimesi kolaylaştırılmaya çalışılmıştır. Altan ısıtma sıcaklığındaki artışın malzemenin termal özelliklerine göre etkisinin değişebileceği gözlemlenmiştir.



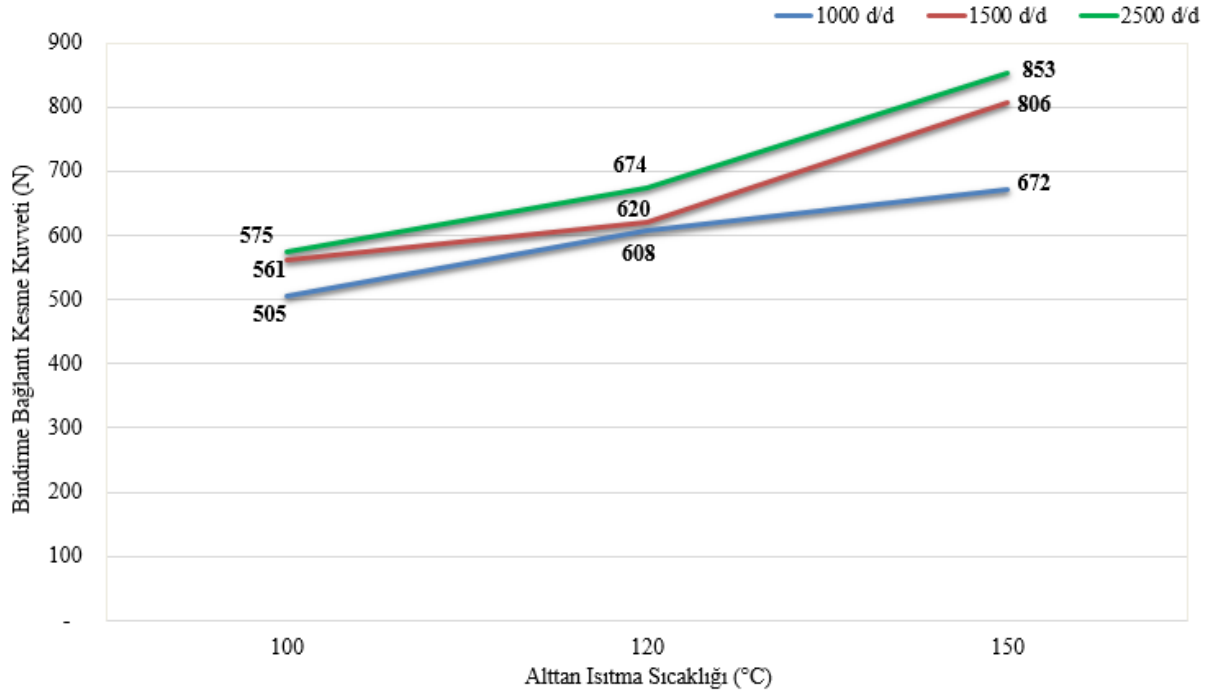
Şekil 8.18: PA66 bağlantılarının bindirme bağlantı kesme kuvvetine alttan ısıtma sıcaklığının etkisi

PA66 bağlantılarının dayanımında alttan ısıtma sıcaklığındaki değişimin analizi için yapılan incelemelerde en yüksek bindirme bağlantı kesme kuvvetini veren alttan ısıtma sıcaklık değeri 120°C olarak belirlenmiştir. Sıcaklık 150 °C değerine çıkarıldığında kaynak kuvvetinde düşüş gözlenirse de 100°C alttan ısıtma sıcaklığı ile oluşturulan bağlantıların kaynak kuvvetinden daha yüksek değerlerde sonuçlar elde edilmiştir. Deney sonuçlarından alttan ısıtma sıcaklık değerindeki artışın alttaki plakanın ergimesini kolaylaştırdığı ancak 120°C seviyesinin üstüne çıkıldığında alttan ısıtma ve kaynak esnasındaki sürtünme kaynaklı oluşan sıcaklığın malzeme yapısındaki birleşmenin kuvvetini azaltıcı etkisi gözlemlenmiştir. 1500 d/d dönme hızı değerinde alttan ısıtma sıcaklığının daha belirgin etki gösterdiği gözlenmiştir (bakınız Şekil 8.18).



Şekil 8.19: PA66GF15 bağlantılarının bindirme bağlantı kesme kuvvetine alttan ısıtma sıcaklığının etkisi

Alttan ısıtma sıcaklığının %15 cam elyaf katkılı PA66 bağlantılarının kaynak kuvvetine etkisi incelendiğinde katkısız PA66 bağlantılarıyla benzer sonuçlar gözlenmiştir. Optimum alttan ısıtma sıcaklığı aynı şekilde 120°C olarak belirlenirken en düşük bağlantı kuvvet değerleri 100°C alttan ısıtma sıcaklığıyla oluşturulan bağlantılarda elde edilmiştir. 2500 d/d dönme hızı değerinde alttan ısıtma sıcaklığındaki artışın kaynak kuvvetinde daha keskin düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir (bakınız Şekil 8.19).



Şekil 8.20: PA66GF30 bağlantılarının bindirme bağlantı kesme kuvvetine alttan ısıtma sıcaklığının etkisi

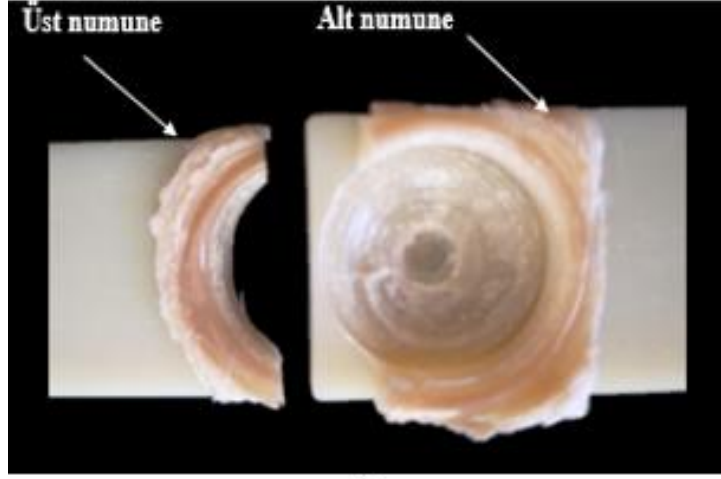
Alttan ısıtma sıcaklığındaki artışın PA66GF30 bağlantıları için kaynak kuvvetiyle doğru orantılı olduğu gözlenmiştir. Cam elyaf katkısının PA66 malzemesinin termal ve mekanik özelliklerinde neden olduğu değişimin yüksek kaynak sıcaklıklarının bağlantı kuvvetine artırıcı etki sağladığı gözlemlenmiştir. En yüksek bindirme bağlantı kesme kuvvetleri 150 °C alttan ısıtma sıcaklığında elde edilmiştir (bakınız Şekil 8.20).

8.5 Bağlantı Kesme Bölgesi Analizi

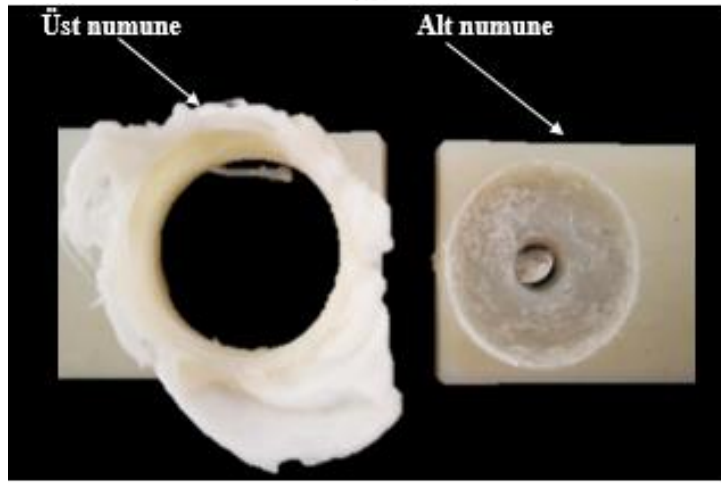
Kaynak kuvveti ve bağlantı görünümüne etki eden birçok faktörün yanında kaynak bölgesindeki veya kopan numunelerdeki görsel farklılıklar sonuçların yorumlanmasında kullanılır. Kaynaklı bağlantıların kopma şekli dikkate alınması gereken önemli hususlardan birisidir. Bağlantının koptuğu kısım kaynak bölgesindeki dayanım farklılıkları hakkında yorum yapılmasını sağlar.

PA66 bağlantılarda üç farklı kopma modu gözlenmiştir. Bunlardan ilki kaynak kuvvetinin en yüksek olduğu üst plakada gözlemlenen kopmadır. Burada kaynak bölgesindeki kuvvet daha yüksek olduğundan üst plakanın alt plakayla birleştirildiği kısımda herhangi bir kopma gözlemlenmezken üst plakanın birleşme alanı dışındaki kısmında kopma meydana gelmiştir.

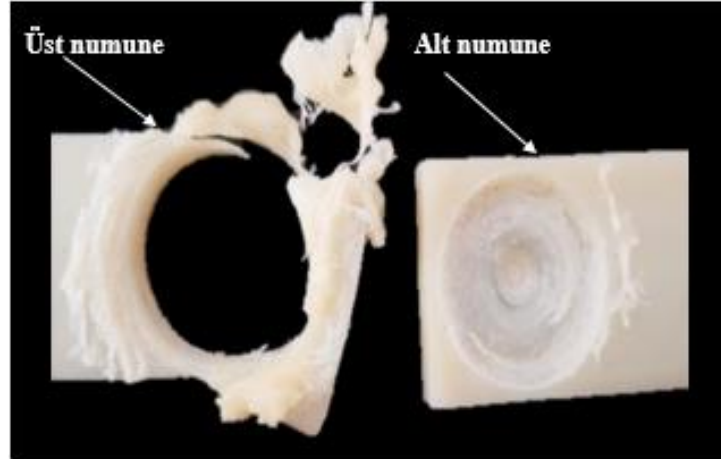
İlk kopma modunda daha yüksek bindirme bağlantı kesme kuvveti sağlanmıştır. İkinci kopma modu olarak kaynak bağlantısından kopmanın gerçekleştiği üst plaka ile alt plakanın tam olarak ayrıldığı kopma modudur. Ancak bu malzeme özelinde en düşük kaynak kuvvetinin elde edildiği kopma modu ikinci kopma modudur. Üçüncü kopma modu ise kaynak bağlantısından kopmanın gerçekleştiği ancak kaynak bağlantısının dayanımının üst plakanın dairesel kesitini kısmen zorlamasıyla üst plakada da kısmen kopmanın gerçekleştiği kopma modudur. Kaynak kuvveti anlamında da diğer iki kopma modunun ortasında yer almaktadır. Şekil 8.21’de PA66 bağlantılarının kopma modları gösterilmiştir.



(a)



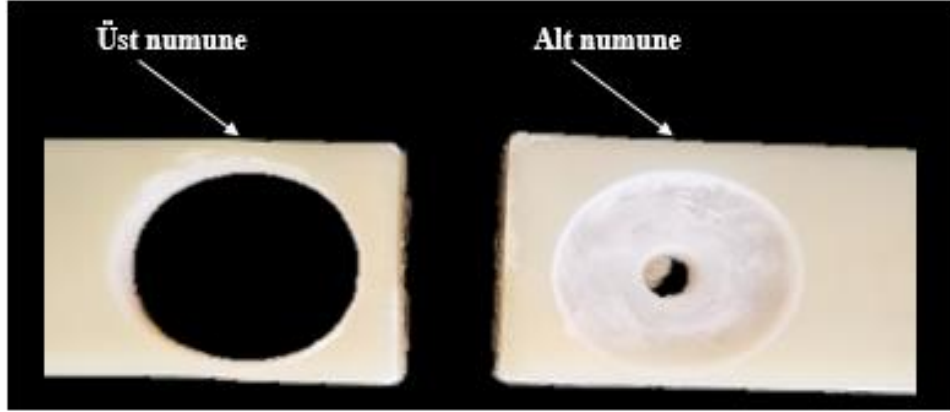
(b)



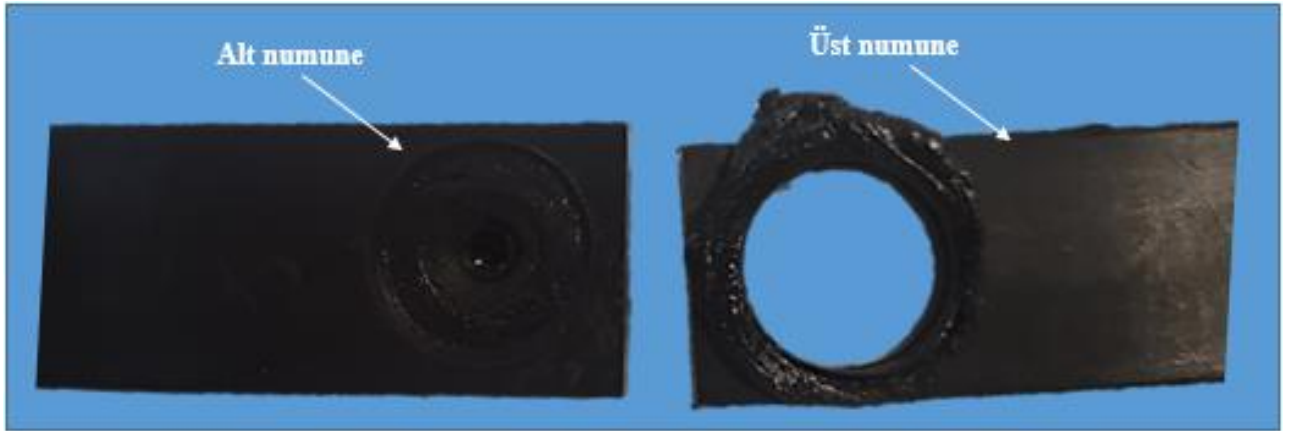
(c)

Şekil 8.21: PA66 bağlantılarının kopma modları, (a) 1. kopma modu, (b) 2. kopma modu, (c) 3. kopma modu

Tek kopma modu görülen PA66GF15 bağlantılarında kaynak dayanımıyla ilgili bir farklılık gözlenmemiştir. Benzer durum PA66GF30 bağlantılarında da mevcuttur. Bu malzemelerin bağlantılarında görülen kopma modu çekme testinde üst numunenin alt numuneden tam anlamıyla ayrılması şeklinde gerçekleşmiştir. Sadece kaynak bölgesinden kopmanın gerçekleşmiş olması sonuçların aynı durum için değerlendirilmesinde faydalı olmuştur. Şekil 8.22 ve 8.23'de PA66GF15 ve PA66GF30 bağlantılarının kopma modu gösterilmiştir.



Şekil 8.22: PA66GF15 bağlantılarının kopma modu



Şekil 8.23: PA66GF30 bağlantılarının kopma modu

Bölüm 9

Tartışma

Bu çalışmada katkısız PA66, %15 cam elyaf katkılı PA66 ve %30 cam elyaf katkılı PA66 malzemeleri sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemiyle herhangi bir harici dolgu malzemesine ihtiyaç duyulmadan başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Bu çalışmaya özgü olarak sürtünme karıştırma nokta kaynağı alttan ısıtma prosesi yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalarda etkisi görülmek istenen proses parametrelerinin her üç malzeme için de farklı seviyeleri denenerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Bağlantıların çekme testi sonuçları değerlendirildiğinde ve görsel incelemeler yapıldığında aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- PA66GF15 ve PA66GF30 bağlantıları kıyaslandığında en yüksek bağlantı dayanımları PA66GF30 malzemesinde görülürken en düşük bağlantı dayanımları katkısız PA66 bağlantılarında görülmüştür. Cam elyaf katkısının kaynak kuvvetine olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir.
- PA66 bağlantıları için en yüksek bağlantı bindirme kesme kuvvetini veren kaynak parametreleri 120 °C alttan ısıtma sıcaklığı ve 1500 d/d takım dönme hızı olarak belirlenmiştir.
- PA66GF15 bağlantıları için en yüksek bağlantı bindirme kesme kuvvetini veren kaynak parametreleri 120 °C alttan ısıtma sıcaklığı ve 2500 d/d takım dönme hızı olarak belirlenmiştir.
- PA66GF30 bağlantıları için en yüksek bağlantı bindirme kesme kuvvetini veren kaynak parametreleri 150 °C alttan ısıtma sıcaklığı ve 2500 d/d takım dönme hızı olarak belirlenmiştir.
- En yüksek kaynak kuvvetleri katkısız PA66 bağlantıları için 679 N, PA66GF15 bağlantıları için 682 N ve PA66GF30 bağlantıları için 853 N olarak elde edilmiştir.

- Her üç malzeme için bitişik çapak oluşumunun kaynak kuvvetine olumlu etkisi görülürken malzemenin proses esnasında takım etrafına sarılmasıyla gerçekleşen ayrık çapak oluşumunun kaynak kuvvetini azaltıcı etkisi görülmüştür.
- PA66GF15 ve PA66GF30 bağlantılarında anahtar deliği boyutunun dönme hızıyla doğru orantılı olarak arttığı ve bu artışın kaynak kuvvetinde iyileşme sağladığı gözlenmiştir.
- PA66GF30 bağlantılarında pimin karıştırdığı alan çapının alttan ısıtma sıcaklığının arttırılmasıyla doğru orantılı olarak arttığı ve bu artışın kaynak kuvvetinde pozitif etki sağladığı belirlenmiştir.

Bölüm 10

Öneriler

Tez çalışmasının sonuçları ve değerlendirmelerden yapılacak yeni çalışmalarda faydalanılabilir. Yapılacak çalışmalar için fikir vermesi açısından öneriler aşağıda belirtilmiştir.

- Deneylede SKNK ile birleştirmek üzere 100 mm yükseklik, 25 mm genişlik, 4 mm kalınlığa sahip katkısız ve cam elyaf katkılı PA66 malzemeleri kullanılmıştır. Farklı boyutlardaki numuneler, farklı ölçülerde ve profillerde takım kullanılarak çalışma yapılabilir.
- Alttan ısıtma metodu farklı polimer malzemelerin SKNK metoduyla birleştirilmesinde kullanılabilir.
- Çalışmada görsel inceleme yapılmıştır, yapılacak yeni çalışmalarda mikroyapı incelemesi gerçekleştirilerek kaynak kalitesi analiz edilebilir.
- Kaynak bağlantısının iyileştirilmesine yönelik olarak farklı deney tasarım yöntemleri kullanılabilir.

Kaynaklar

- [1] Koçak, G. Morfolin, Piperazin ve Dietilamin grupları içeren monomerlerin ve polimerlerin üretimi, karakterizasyonu ve çözelti davranışlarının incelenmesi (doktora tezi). Eskişehir: Osmangazi Üniversitesi; 2017
- [2] Özer, K. Vinil grubu içeren monomerin elektrokimyasal atom transfer radikal polimerizasyonu (E-ATRP) (yüksek lisans tezi). Niğde: Ömer Halisdemir Üniversitesi; 2017. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [3] Baysal B. Polimer Kimyası, 2. Baskı. ODTÜ Yayınları; 1994.
- [4] Beşergil, B. Polimer Kimyası, 1. Baskı. Gazi Kitabevi Yayınları; 2008
- [5] Saçak M. Polimer Kimyasına Giriş, 2. Baskı. Gazi Kitabevi Yayınları; 2004
- [6] Ülker, A. Yüksek yoğunluklu Polietilen polimer malzemenin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak parametrelerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkilerinin araştırılması ve kaynak parametrelerinin Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile optimizasyonu (doktora tezi). İzmir: Ege Üniversitesi; 2015
- [7] Doğu, Salih. Eva esaslı elastomer ile uyumlaştırılmış ve silika nanotüp katkılı polipropilen/termoplastik elastomer alaşım nanokompozitlerin üretilmesi (yüksek lisans tezi). Yalova: Yalova Üniversitesi; 2020. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [8] Pagev[İnternet][Erişim Tarihi 06.03.2019] <https://pagev.org/>
- [9] Kocabaş, GB. Cam elyaf takviyeli PA 6.6'nın enjeksiyon prosesinin simülasyon yoluyla analizi (yüksek lisans tezi). Çorum: Hitit Üniversitesi; 2014. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [10] Karabacak, K. Düşük sıcaklıkta yüksek darbe dayanımına sahip cam ve karbon elyaf takviyeli iletken poliamid 6 ve poliamid 66 karışımlarının hazırlanması (yüksek lisans tezi). Yalova: Yalova Üniversitesi; 2018. <https://tez.yok.gov.tr/>

- [11] Yerleşen, U. Sürekli cam elyaf takviyeli poliamid 6 levhaların şekillendirilmesi ve karakterizasyonu (yüksek lisans tezi). İstanbul: Marmara Üniversitesi; 2015. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [12] Şimşek, A. Güçlendirilmiş döküm poliamidin otomotiv jantı olarak incelenmesi (yüksek lisans tezi). Karabük: Karabük Üniversitesi; 2020. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [13] Yılmaz İE, Taşdelen MA. Cam elyaf katkılı Poliamid 66/Poliftalamid karışımlarının hazırlanması. 2018; 23(1): 285-294: doi.org:10.17482/uumfd.350589
- [14] Deligöz, H. Aromatik poliamidlerin sentezi ve yüzey örtü maddesi olarak kullanımının incelenmesi (yüksek lisans tezi). İstanbul: İstanbul Üniversitesi; 1997. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [15] Üçüncü, A. Poliamid 6 malzemenin sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesi (yüksek lisans tezi). Düzce: Düzce Üniversitesi; 2021. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [16] Erbay, K. Silah gövdeleri için polimer esaslı kompozit malzeme üretimi ve özelliklerinin incelenmesi (yüksek lisans tezi). Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi; 2009. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [17] Erzurumluoğlu L. Poli(hekzametilen adipamit) (poliamid 66) esaslı karbon lifi üretimi sırasında antioksidan kullanımının termal stabilizasyon ve karbonizasyon aşamalarına etkilerinin araştırılması, yapısal ve mekanik özelliklerin karakterize edilmesi (yüksek lisans tezi). Kayseri: Erciyes Üniversitesi; 2015. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [18] Gür, AO. Poliamid 66/sepiyolit kompozitlerin üretimi ve özelliklerinin karakterize edilmesi (yüksek lisans tezi). Sakarya: Sakarya Üniversitesi; 2011. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [19] Arıcı, A. Polipropilen malzemenin sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesi (doktora tezi). Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi; 2010
- [20] Ayaz, A. Optimization of friction stir spot welding parameters with experimental design method and investigation of the effects of process parameters on the lap joint strength and weld morphology of similar and dissimilar thermoplastics: acrylonitrile butadiene styrene and polycarbonate (yüksek lisans tezi). İzmir: Katip Çelebi Üniversitesi; 2019. <https://tez.yok.gov.tr/>

- [21] Çevik B. Termoplastik polimerlerin SKNK yöntemi ile kaynaklanabilirliğine karıştırma süresinin etkisi. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi 2014; 3(2): 69-74.
- [22] Çakır, G. Polipropilen levhaların CNC tezgâhında sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesi (yüksek lisans tezi). Düzce: Düzce Üniversitesi; 2018. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [23] Şelale, S. Polietilen malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi (yüksek lisans tezi). Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi; 2006. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [24] Akkurt A, Ertürk İ. Sıcak Eleman Alın Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen PE Doğalgaz Borularının Güvenirliklerinin Araştırılması. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2010; 16(2): 221-233.
- [25] Bilici, MK. Polietilenin sürtünme karıştırma nokta kaynak özellikleri (doktora tezi). İstanbul: Marmara Üniversitesi; 2011.
- [26] Laseral [İnternet][Erişim Tarihi 21.03.2019] <https://www.laseral.com.tr/>
- [27] Orhan, S. Yüksek frekans kaynağı ile birleştirilen çelik profillerin mekanik özelliklerinin incelenmesi (yüksek lisans tezi). Sakarya: Sakarya Üniversitesi; 2008. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [28] LülePlastik[İnternet][Erişim Tarihi 23.03.2019]<https://luleplastik.com.tr/index.php/ultrasonik-kaynak>
- [29] Sonikel Ultrasonik[İnternet][Erişim Tarihi 23.03.2019]<http://www.sonikel.com.tr/ultrasonik-plastik-kaynak-teknolojisi,28.html%20>
- [30] Bulut, R. Magnezyum AZ31 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliğinin incelenmesi (yüksek lisans tezi). Kütahya: Dumlupınar Üniversitesi; 2009. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [31] Su P, Gerlich A, North TH, Bendzsak GJ. Energy utilization and generation during friction stir spot welding. Science and Technology of Welding and Joining 2006; 11(2): 163-169. doi.org/10.1179/174329306X84373

- [32] Arıcı A, Mert Ş. Friction Stir Spot Welding of Polypropylene. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2008; 27(18): 2001-2004. doi.org:10.1177/0731684408089134
- [33] Ülker A, Ayaz A. Joint strength optimization and morphological analysis for friction stir spot welding of the dissimilar thermoplastics ABS and PC. *Materials Testing* 2020; 62: 1109-1117.
- [34] Awang, M. Simulation of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process. *Study of Friction Phenomena (doktora tezi)*. Virginia: West Virginia University; 2007
- [35] Çevik B. Termoplastik polimerlerin sürtünme karıştırma nokta kaynağına bakalit ara tabaka tozunun etkisi. *Ejovoc* 2014; 4(1): 76-80. doi.org/10.1501/OTAM_0000000397
- [36] Mert Ş, Mert S. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Yönteminin İncelenmesi. *Journal of Advanced Technology Sciences* 2013; 2(1): 26-35.
- [37] Bozkurt M. Investigation of mechanical properties of friction spot welded similar and hybrid joints between aluminum alloys and polymers (yüksek lisans tezi). İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi; 2017. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [38] Suryanarayanan R, Sridhar VG. Studies on the influence of process parameters in friction stir spot welded joints – A review. *Materials Today: Proceedings* 2021; 37(2): 2695-2702. doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.532
- [39] Bilici MK. Effect of tool geometry on friction stir spot welding of polypropylene sheets. *eXPRESS Polymer Letters* 2012; 6(10): 805-813. doi.org/10.3144/expresspolymlett.2012.86
- [40] Oruç, E. Ara katmanlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (yüksek lisans tezi). İstanbul: Marmara Üniversitesi; 2020. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [41] Koyuncu, F. Metal matrisli kompozitlerin sürtünme karıştırma nokta kaynağı (yüksek lisans tezi). İstanbul: Marmara Üniversitesi; 2019. <https://tez.yok.gov.tr/>
- [42] Oliveira PHF, Amancio-Filho ST, dos Santos JF, Hage Jr E. Preliminary study on the feasibility of friction spot welding in PMMA. *Materials Letters* 2010; 64: 2098-2101. doi.org/10.1016/j.matlet.2010.06.050

- [43] Mert Ş, Arıcı A. Design of optimal joining for friction stir spot welding of polypropylene sheets. *Science and Technology of Welding and Joining* 2013; 16(6): 522-527. doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000034
- [44] Bilici MK, Yüklér Aİ. Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets. *Materials & Design* 2012; 33: 145-152. doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.059
- [45] Dashatan SH, Azdast T, Ahmadi SR, Bagheri A. Friction stir spot welding of dissimilar polymethyl methacrylate and acrylonitrile butadiene styrene sheets. *Materials & Design* 2013; 45: 135-141. doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.071
- [46] Junior SW, Handge UA, Dos Santos JF, Abetz V, Amancio-Filho ST. Feasibility study of friction spot welding of dissimilar single-lap joint between poly(methyl methacrylate) and poly(methyl methacrylate)-SiO₂ nanocomposite. *Materials & Design* 2014; 64: 246-250. doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.050
- [47] Junior WS, Emmler T, Abetz C, Handge UA, dos Santos JF, Amancio-Filho ST, Abetz V. Friction spot welding of PMMA with PMMA/silica and PMMA/silica-g-PMMA nanocomposites functionalized via ATRP. *Polymer* 2014; 55: 5146-5159. doi.org/10.1016/j.polymer.2014.08.022
- [48] Bilici MK. Application of Taguchi approach to optimize friction stir spot welding parameters of polypropylene. *Materials & Design* 2012; 35: 113-119. doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.033
- [49] Gonçalves J, dos Santos JF, Canto LB, Amancio-Filho ST. Friction stir spot welding of carbon fiber reinforced polyamide 66 laminate. *Material Letters* 2015; 159: 506-509. doi.org/10.1016/j.matlet.2015.08.036
- [50] Goushegir SM, Dos Santos JF, Amancio-Filho ST. Influence of process parameters on mechanical performance and bonding area of AA2024/carbon-fiber-reinforced poly(phenylene sulfide) friction spot single lap joints. *Materials & Design* 2015; 83: 431-442. doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.044

- [51] Lambiase F, Paoletti A, Di Ílio A. Mechanical behaviour of friction stir spot welds of polycarbonate sheets. *Int J Adv Manuf Technol* 2015; 80: 301-314. doi.org/10.1007/s00170-015-7007-4
- [52] Paoletti, A, Lambiase F, Di Ílio A. Analysis of forces and temperatures in friction spot stir welding of thermoplastic polymers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2016: 1395-1407.
- [53] Pabandi HK, Mohavedi M, Kokabi AH. A New Refill Friction Spot Welding Process For Aluminum/Polymer Composite Hybrid Structures. *Composite Structures* 2017; 174: 59-69. doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.053
- [54] Ogawa Y, Akebono H, Tanaka Kojiro, Sugeta A. Effect of welding time on fatigue properties of friction stir spot welds of Al to carbon fibre-reinforced plastic. *Science and Technology of Welding and Joining* 2018; 24(3): 1-8. doi.org/10.1080/13621718.2018.1535781
- [55] Huang Y, Meng X, Xie Y, Wan L, Lv Z, Cao J, Feng J. Friction spot welding of carbon fiber-reinforced polyetherimide laminate. *Composite Structures* 2018; 189: 627-634. doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.004
- [56] Pandey AK, Nayak KC, Mahapatra SS. Characterization of friction stir spot welding between copper and poly-methyl-methacrylate (PMMA) sheet. *Material Today Communications* 2019; 19: 131-139. doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.01.010
- [57] Kurtulmuş M. Friction stir spot welding for polypropylene sheets. *Scientific Research And Essays* 2012; 7: 947-956. doi.org/10.5897/sre11.1909
- [58] Çevik B. Polietilen Levhaların Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ile Birleşebilirliğine Karıştırıcı Takım Dönme Yönü ve Karıştırma Süresinin Etkisi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi* 2013; 2(3): 28-33
- [59] Shen Y, Yan Y, Zhang W, Hou W. Friction stir spot welding ABS using triflute-pin tool: Effect of process parameters on joint morphology, dimension, and mechanical property. *Journal of Manufacturing Processes* 2018; 32: 269-279. doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.02.015

- [60] Gonçalves J, dos Santos JF, Canto LB, Amancio-Filho ST. Improvement of the friction spot welding (FSpW) to join polyamide 6 and polyamide 66/carbon fiber laminate. *Welding International* 2016; 19(1): 1-8. doi.org/10.1080/09507116.2015.1096466
- [61] Lambiase F, Paoletti A, Di Ílio A. Friction spot stir welding of polymers: control of plunging force. *Int J Adv Manuf Technol* 2017; 90: 2827-2837. doi.org/10.1007/s00170-016-9586-0
- [62] Aliasghari S, Skeldon P, Zhou X, Ghorbani M. Influence of PEO and mechanical keying on the strength of AA 5052 alloy/polypropylene friction stir spot welded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2019; 92: 65-72. doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.04.002
- [63] Rana PK, Narayanan RG, Kailas SV. Friction stir spot welding of AA5052-H32/HDPE/AA5052-H32 sandwich sheets at varying plunge speeds. *Thin Walled Structures* 2019; 138: 415-429. doi.org/10.1016/j.tws.2019.02.016
- [64] Kumar R, Singh R, Ahuja IPS, Penna R, Fortunato A. Thermo-mechanical investigations for the joining of thermoplastic composite structures via friction stir spot welding. *Composite Structures* 2020; 253. doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112772
- [65] Bilici MK, Yükler Aİ, Fidaner O. Termoplastiklerin sürtünme karıştırma nokta kaynak birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin etkileri. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*; 2012 Kasım 29-30; Balıkesir, Türkiye. 355-365.
- [66] Ayaz A, Ülker A. Effect of process parameters on the lap joint strength and morphology in friction stir spot welding of ABS sheets. *Journal of Elastomers and Plastics* 2020; 53(6): 612-631.
- [67] Chiro [Internet]. [erişim Tarihi 21.03.2019]. <https://chiron.de/tr/ueruenler/takim-tezgahlari/12-serisi>
- [68] Ülker A, Ayaz A. Optimization of process parameters of friction stir spot welding of polycarbonate sheets and morphological analysis. *Materialwissenschaft und Wekstofftechik* 2020; 51: 1640-1652.

- [69] Fluke [İnternet]. [erişim Tarihi 21.03.2019]. <https://www.fluke.com/tr-tr/urun/termal-kameralar/ti401-pro>
- [70] Shimadzu [İnternet]. [erişim tarihi 14.11.2021]. Autograph AGS-X Series: SHIMADZU (Shimadzu Corporation)

Özgeçmiş

Adı Soyadı: Koray Kara
E-mail (1): Y180228004@ogr.ikcu.edu.tr
E-mail (2): koray-kara@windowslive.com

Eğitim:
2011–2015 Dokuz Eylül Üniversitesi, Makine Müh. Bölümü
2018–2022 İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Makine Müh.

İş Deneyimi:
2015 – 2016 LAV – Ar-Ge Mühendisi
2016 – 2019 Delphi Diesel Systems – Vardiya Mühendisi
2019 – 2021 Borgwarner – Proses Mühendisi
2021 – Maxion Jantaş – Üretim Mühendisi