

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN YÜKSEK  
MUKAVEMETLİ ÇELİKLER İÇİN SÜRTÜNME  
KARIŞTIRMA KAYNAĞI UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SEYFETTİN YEKTA HÜSÜNBEYİ**

**DENİZLİ, EYLÜL - 2021**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN YÜKSEK  
MUKAVEMETLİ ÇELİKLER İÇİN SÜRTÜNME  
KARIŞTIRMA KAYNAĞI UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SEYFETTİN YEKTA HÜSÜNBEYİ**

**DENİZLİ, EYLÜL - 2021**

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar  
Koordinasyon Birimi tarafından 2019FEBE043 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**SEYFETTİN YEKTA HÜSÜNBEYİ**

**İMZA**

## ÖZET

### OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER İÇİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI UYGULAMASI

SEYFETTİN YEKTA HÜSÜNBEYİ

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. CEMAL MERAN)

DENİZLİ, EYLÜL - 2021

Parçaları bir arada tutabilmek için günümüzde pek çok yöntem vardır. Bunlardan bazıları kaynak, lehim, cıvata, perçin ve yapıştırıcıdır. Bu tez çalışmasında bir arada tutabilmek için kullanılan yöntem sürtünme karıştırma kaynağı olmuştur. Kullanım alanı olarak sürtünme karıştırma kaynağı otomotiv sektöründe sıklıkla başvurulan bir yöntem halinde bulunmaktadır. Bu sıklıktaki en büyük neden ise sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan birleştirmelerin kazandırdığı avantajlardır.

Yapılan bu çalışmada alın altına birleştirme bağlantılarının, sabit takım baskı kuvvetinde (7 kN), sabit kaynak başlangıç sıcaklıklarında 950°C, farklı takım devirlerinde (900, 1180 ve 1500 min<sup>-1</sup>), farklı üç takım ilerleme hızında (60, 75, 150 mm/min) iki adet çift (dual) fazlı DP1000 çelik malzemeyi sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirerek oluşturulan kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerine etki eden faktörler incelenmiştir. DP1000 çelik malzeme için yüksek takım devrinde düşük ilerleme, düşük takım devrinde ise yüksek ilerleme hızının ihtiyacı görülmüştür. Optimum takım ilerleme hızı ve takım devri DP1000 çelik malzeme için irdelenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Birleştirme bağlantıları, mekanik dayanım, sürtünme karıştırma kaynağı, DP1000 çift fazlı çelik.

## ABSTRACT

### FRICION STIR WELDING APPLICATION FOR HIGH STRENGTH STEELS USED IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

SEYFETTİN YEKTA HÜSÜNBEYİ  
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
MECHANICAL ENGINEERING  
(SUPERVISOR:PROF. DR. CEMAL MERAN)

DENİZLİ, SEPTEMBER 2021

There are many methods available today to hold parts together. Some of these are welding, soldering, bolting, rivets and bonding. In this thesis, the method used to keep it together was friction stir welding. As a field of use, friction stir welding is a frequently used method in the automotive industry. The biggest reason for this frequency is the advantages of the joints made with friction stir welding.

In this study, the butt-to-nose lap joints have a constant tool pressure force (7 kN), 950°C at constant welding start temperatures, The factors affecting the mechanical properties of the welded joints formed by combining two dual-phase DP1000 steel materials at different tool speeds (900, 1180 and 1500 min<sup>-1</sup>), at different three tool feed speeds (60, 75, 150 mm/min) with friction stir welding were investigated. For DP1000 steel material, low feed rate at high tool speed and high feed rate at low tool speed are required. Optimum tool feed rate and tool speed are discussed for DP1000 steel material.

**KEYWORDS:** Combining connections, mechanical strength, friction stir welding, DP1000 dual phase steel.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR LİSTESİ .....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı .....	1
1.2 Tezin Önemi.....	2
1.3 Literatür Özeti .....	2
2. ÇİFT FAZLI ÇELİKLER VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK İŞLEMİ .....	12
2.1 Sürtünme Karıştırma Kaynak İşlemi ve Karıştırıcı Takım .....	12
2.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Uygulanan Kaynak Parametreleri	16
2.2.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Uygulanan Kaynak	
Parametrelerinden Kaynak Sıcaklıkları ve Ölçümlenmesi .....	17
2.2.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Uygulanan Kaynak	
Parametrelerinden Takım Baskı Kuvveti ve Ölçümlenmesi .....	18
2.3 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Birleştirme Şekilleri.....	19
2.4 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Alanları .....	20
2.5 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulandığı Malzeme Çeşitleri ...	24
2.5.1 Alüminyum Alaşımları .....	25
2.5.2 Magnezyum Alaşımları .....	26
2.5.3 Bakır Alaşımları .....	28
2.5.4 Titanyum Alaşımları.....	29
2.5.5 Çelikler .....	30
2.5.5.1 Yüksek Mukavemetli Otomotiv Çelikleri.....	32
2.5.5.2 Otomotiv Çelikleri.....	35
2.6 Çift Fazlı Çelikler .....	37
2.7 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Tekniği ile Birleştirmenin	
Avantajları .....	39
2.8 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Tekniği ile Birleştirmenin	
Dezavantajları .....	40
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	41
3.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılan Malzeme ve Özellikleri .....	42
3.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapan Takım.....	44
3.3 Levha Delik Delme Ekipmanı .....	46
3.4 Takım Baskı Kuvveti Ayarlayıcı Hidrolik Düzenek ve Takım Baskı	
Kuvveti Yük Ölçer .....	46
3.5 Sıcaklık Ölçümü İçin Kullanılan Ekipman .....	48
3.6 Sürtünme Karıştırma Kaynak Makinesine Kaynak Yapılacak	
Levhaların Sabitleme İçin Gerekli Ekipmanlar .....	49
3.7 Genel Sürtünme Karıştırma Kaynak İşlemi Yapılacak Ekipmanlar...51	
3.8 Çekme Deneyi Ekipmanları .....	52

3.9	Mikro Sertlik Ölçme Ekipmanı .....	53
3.10	Makro-Mikro Yapı Ekipmanları.....	54
<b>4.</b>	<b>DENEYSEL BULGULAR .....</b>	<b>55</b>
4.1	Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilecek Çift Fazlı DP1000 Çelik Malzemenin Mekanik Dayanımları .....	55
4.2	Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Çift Fazlı DP1000 Çelik Malzeme Çiftlerinin Çekme Dayanımları .....	56
4.2.1	Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile 900 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Birleştirmelere Takım İlerleme Hızının Etkisi .....	57
4.2.2	Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile 1180 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Birleştirmelere Takım İlerleme Hızının Etkisi .....	61
4.2.3	Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile 1500 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Birleştirmelere Takım İlerleme Hızının Etkisi .....	65
4.3	Çekme Grafiklerinden Elde Edilen Maksimum Bağlantı Dayanımların Karşılaştırılması .....	69
4.4	1180 min <sup>-1</sup> ve 75 mm/min Parametrelerinde Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Çift Fazlı DP1000 Çelik Malzemenin Çekme Deneyi Sonucu Görünümü, Makro ve Mikro Yapısı .....	70
4.5	1180 min <sup>-1</sup> ve 75 mm/min Parametrelerindeki Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Çift Fazlı DP1000 Çelik Malzemenin Mikro sertlik Ölçüm Değerleri.....	77
<b>5.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>79</b>
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>84</b>
<b>7.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>93</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Sürtünme Karıştırma Kaynak Takımları .....	12
Şekil 2.2: Sürtünme Karıştırma Kaynak İşlemi .....	13
Şekil 2.3: SKK Takımı Şematik Gösterim.....	14
Şekil 2.4: SKK Birleştirme Şekilleri.....	19
Şekil 2.5: SKK Gemilerde Uygulanması ve Alüminyum Gemi Panellerini Kaynak İçin Kullanılan Sürtünme Karıştırma Kaynak Makinesi ..	20
Şekil 2.6: SKK'lı Profilden Süspansiyon Kolunun Üretilmesi .....	22
Şekil 2.7: Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile İmalatı Yapılan Kaynak Dikişli Sac .....	23
Şekil 2.8: Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Kaynak Yapılan Yapılan Bir Jant ..	23
Şekil 2.9: Otomotiv Endüstrisinde Üretimde En Çok Kullanılan Çeliklerin Uzama (%) ve Çekme Mukavemeti Grafiği.....	36
Şekil 2.10: DP Çelik Malzemenin Isıl İşlemler Sırasındaki Durumu ve Mikro Yapısı .....	38
Şekil 2.11: SAAB İçin Çeşitli Çift Fazlı Çelik Sınıflarından İmal Edilen Otomobil Parçaları .....	39
Şekil 3.1: DP1000 Çift Fazlı Çeliğine Ait Sertifika .....	42
Şekil 3.2: Kaynak Levhaları Birleştirme Numuneleri ve Ölçüleri .....	43
Şekil 3.3: Kaynak Levhaları Birleştirme Numunesinin Üç Boyutlu Modellemesi. ....	43
Şekil 3.4: Çekme deney numuneleri ASTM-E8 standardında .....	44
Şekil 3.5: Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapan Takımın Teknik Çizimi .....	45
Şekil 3.6: Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapan Çift Tarafı Üçgen Pin Olarak Açılmış Takımlar .....	45
Şekil 3.7: Levha Delik Delme Ekipmanı .....	46
Şekil 3.8: Baskı Kuvveti Ayarlayıcı Hidrolik Düzenek .....	47
Şekil 3.9: Baskı Kuvveti Yük Ölçeri .....	47
Şekil 3.10: 3 Adet K Tipi Termokupl ve Testo 177-T4 .....	48
Şekil 3.11: 3 Adet K Tipi Termokupldan Alınan Veriler .....	48
Şekil 3.12: Sabitleme Ekipmanları ve Kaynak Yapılacak Levhalar .....	49
Şekil 3.13: Sabitleme Ekipmanları ile Kaynak İşleminin Başlangıcı .....	49
Şekil 3.14: Deney Parametreleri Belirlenirken Yapılan Ön Çalışmalarda Yapılmış Hatalı Kaynaklar .....	50
Şekil 3.15: SKK Yapılan Ekipmanların Genel Fotoğrafı .....	51
Şekil 3.16: Ekipmanlar ile yapılan bir SKK örneği .....	51
Şekil 3.17: 40000N Kapasiteli Alşa Çekme Deney Cihazı .....	52
Şekil 3.18: Çekme Cihazı Verilerini Anlık ve Kayıt Altına Alabildiğimiz Bilgisayar Düzenegi .....	53
Şekil 3.19: Metkon Mikro Sertlik Ölçme Cihazı .....	54
Şekil 4.1: Çalışmada Kullanılan DP1000 Çelik Malzemenin Çekme Deneyi Sonucunda Kopma Bölgesi .....	56
Şekil 4.2: SKK ile 900 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Birleştirme İşleminde 60 mm/min İlerleme Hızındaki Kaynak Bağlantısı a) üst görünüm b) alt görünüm .....	57

Şekil 4.3: SKK ile 900 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Birleştirme İşleminde 75 mm/min İlerleme Hızındaki Kaynak a) üst görünüm b) alt görünüm .....	58
Şekil 4.4: SKK ile 900 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Birleştirme İşleminde 150 mm/min İlerleme Hızındaki Kaynak a) üst görünüm b) alt görünüm .....	59
Şekil 4.5: 900 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Kaynaklı Birleştirme İşleminde Elde Edilen Maksimum Bağlantı Dayanımları .....	60
Şekil 4.6: SKK ile 1180 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Birleştirme İşleminde 60 mm/min İlerleme Hızındaki Kaynak a) üst görünüm b) alt görünüm .....	61
Şekil 4.7: SKK ile 1180 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Birleştirme İşleminde 75 mm/min İlerleme Hızındaki Kaynak a) üst görünüm b) alt görünüm .....	62
Şekil 4.8: SKK ile 1180 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Birleştirme İşleminde 150 mm/min İlerleme Hızındaki Kaynak a) üst görünüm b) alt görünüm .....	63
Şekil 4.9: 1180 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Kaynaklı Birleştirme İşleminde Elde Edilen Maksimum Bağlantı Dayanımları .....	64
Şekil 4.10: SKK ile 1500 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Birleştirme İşleminde 60 mm/min İlerleme Hızındaki Kaynak a) üst görünüm b) alt görünüm .....	65
Şekil 4.11: SKK ile 1500 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Birleştirme İşleminde 75 mm/min İlerleme Hızındaki Kaynak a) üst görünüm b) alt görünüm .....	66
Şekil 4.12: SKK ile 1500 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Birleştirme İşleminde 150 mm/min İlerleme Hızındaki Kaynak a) üst görünüm b) alt görünüm .....	67
Şekil 4.13: 1500 min <sup>-1</sup> 'de Yapılan Kaynaklı Birleştirme İşleminde Elde Edilen Maksimum Bağlantı Dayanımları .....	68
Şekil 4.14: DP1000 Çelik Malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağı İçin Elde Edilen Maksimum Bağlantı Dayanımları .....	69
Şekil 4.15: 1180 min <sup>-1</sup> ve 75 mm/min Parametresi İle SKK Yapılan Numunenin Çekme Deneyi Sonucu Kopma Bölgesi .....	71
Şekil 4.16: 1180 min <sup>-1</sup> ve 75 mm/min Parametresi İle SKK Yapılan Numunenin Makro Yapı Görüntüsü .....	71
Şekil 4.17: SKK Yapılan Optimum Numunenin İç Yapı 100X Görüntüleri ...	72
Şekil 4.18: SKK Yapılan Kaynak Bölgesinin Üst Bölümünden 200X ve 1000X Görüntülenme .....	73
Şekil 4.19: ITAB Bölgesinin 100X Görüntülenmesi .....	74
Şekil 4.20: ITAB Esas Metal Geçiş Bölgesi 100x Görüntüleme .....	74
Şekil 4.21: 1500 min <sup>-1</sup> ve 150 mm/min İle SKK Yapılan Numunenin Makro Yapı görüntüsü .....	75
Şekil 4.22: 1500 min <sup>-1</sup> ve 150 mm/min İle SKK Yapılan Numunenin Mikro Yapı görüntüsü çatlak başlangıcı .....	76
Şekil 4.23: 1500 min <sup>-1</sup> ve 150 mm/min İle SKK Yapılan Numunenin Mikro Yapı Görüntüsünde Kaynak Bölgesindeki Mikro Çatlaklar .....	76
Şekil 4.24: DP1000 Çelik Malzemenin 1180 min <sup>-1</sup> ve 75 mm/min İle Sürtünme Karıştırma Kaynağı İçin Elde Edilen Mikro Sertlik Değerleri .....	77

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 2.1: SKK yapılan malzeme çiftleri .....	26
Tablo 3.1: DP1000 çift fazlı çelik malzemesinin kimyasal bileşimi .....	44
Tablo 3.2: DP1000 çift fazlı çelik malzemesinin mekanik özellikleri .....	44
Tablo 4.1: Çalışmada DP1000 çeliği ile SKK yapılırken kullanılan deney parametreleri .....	57
Tablo 4.2: Çalışmada kullanılan DP1000 çelik malzemenin çekme deneyi sonuçları .....	58
Tablo 4.3: SKK Uygulanmış DP1000 Çelik Çiftlerinin Çekme Deneyi Sonuçları .....	72
Tablo 4.4 Çalışmada yapılan deneyler sonucunda en yüksek çekme dayanımı değeri elde edilen numunenin mikro sertlik değerleri .....	80

## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>APD</b>	:	Aşırı Plastik Deformasyon
<b>CMn</b>	:	Karbon-Mangan
<b>DP</b>	:	Çift Fazlı
<b>FSP</b>	:	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
<b>FSW</b>	:	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
<b>GYDÇ</b>	:	Gelişmiş Yüksek Dayanımlı Çelik
<b>GNS</b>	:	Grafen Nanosheets
<b>IF</b>	:	Arayer Atomuz Çelik
<b>IMC</b>	:	İntermetalik Bileşikler
<b>MS</b>	:	Martenzitik Çelikler
<b>PCBN</b>	:	Polikristal Kübik Bor Nitrür
<b>SKK</b>	:	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
<b>TMEB</b>	:	Termo Mekanik Olarak Etkilenmiş Bölge
<b>TRIP</b>	:	Dönüşüm Kaynaklı Plastisite
<b>TWIP</b>	:	İkizlenme Kaynaklı Plastisite
<b>SEM</b>	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>YDÇ</b>	:	Yüksek Dayanımlı Çelik
<b>WC</b>	:	Tungsten Karbür
<b>W-Ir</b>	:	Tungsten-İridyum
<b>W-Rh</b>	:	Tungsten Renyum
<b>YDÇ</b>	:	Yüksek Dayanımlı Çelikler
$\alpha$	:	Ferrit
$\gamma$	:	Ostenit

## ÖNSÖZ

Çalışmalarım esnasında her türlü desteği ile yanımda olan çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Cemal MERAN'a, her türlü yardımda bulunan ve çalışmalarda büyük emeği geçen Sayın Arş. Gör. Emre KORKMAZ'a, gece gündüz demeden her daim laboratuvar çalışmalarında ve her zaman her türlü konuda yardımcı olan Öğr. Gör. Bilge YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında görmüş olduğum maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkürlerimi sunarım.

Seyfettin Yekta HÜSÜNBEYİ

# 1. GİRİŞ

Yüksek mukavemetli çelikler günümüzde pek çok alanda sıkça kullanılmaktadır. Genel yapı çeliklerine kıyasla daha çok yeni kullanım alanı artan yüksek mukavemetli çeliklerin kullanım alanlarını genişletmek istenmektedir. Bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynağının yüksek mukavemetli çeliklerde uygulanması ve sonuçlarının tartışılması amaçlanmaktadır. Uygulanan diğer kaynak yöntemlerinde ilave malzemelerin kullanılması, kaynak dikişinin estetik görünmemesi, kaynak sonrasındaki mukavemet düşüşleri gibi dezavantajları giderebilmek açısından sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarının bu malzemeler için uygunluğunun araştırılması gerekmektedir.

İmal edilmek istenen bir makinenin görsel açıdan dikkat çeken bir noktasındaki kaynak dikişindeki düzgün olmayan durumlar imalatın değerini düşürmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK-FSP-FSW) ile yapılan kaynak dikişlerinin yüzey kalitesinin diğer kaynak türlerine göre çok daha iyi olması bu sorunu ortadan kaldırmaktadır.

## 1.1 Tezin Amacı

Kaynak işlemleri için ilave kaynak malzemesi kullanım gereksinimi olmaması üretim maliyetlerinin düşmesine olanak tanıyacaktır. Kaynak dikişine verilen ilave dolgu amaçlı elektrotun veya telin korunması, bozulması, nemlenmesi, dikkatsiz kullanımlarından kaynaklanan sarfiyatların fazla olması, tam kullanılmadan atılarak verilen firelerin önüne geçilmesi gibi sebeplerden dolayı SKK'nın uygulanabilirliği ve etkinliğinin araştırılması gerekmektedir.

Diğer kaynak yöntemleriyle yapılan kaynaklar sonucunda kaynak bölgesinde aşırı ısınma, ergime, hızlı soğuma, uygulanan tavlama işlemlerinin bozulması, malzemenin kaynak sonrası tokluğunu kaybetmesi, daha kırılğan bir hal alması vb. sıkıntılar yaşanabilmektedir. Fakat SKK uygulamalarında kaynak bölgesi ergitilmeden (hamurlaşmış bir kıvamda kaynak yapılarak) kaynak yapıldığı için malzemenin içyapı

özelliklerini fazla etkilememektedir. Bu sebeple SKK'nın etkinliğinin bu malzemeler için incelenmesi gerekmektedir.

Yapılan araştırmalar ve deneylerden alınan veriler, temel amaçlarından birisi olan yüksek lisans tezinin tamamlanması ve literatüre verilecek bilimsel yayınlara dönüştürölmek için değerlendirilecektir.

Bu tez çalışmasında DP1000 çift fazlı çeliği SKK yapılabilirliği deneysel olarak çalışılmıştır. Özellikle SKK kaynak yapılabilirlik üzerine etkili olan takım devri ve takım ilerleme hızının mekanik özelliklere ve iç yapıya etkisi incelenmiştir. Çalışmalar sonunda DP1000 çeliğinin SKK kaynağı için optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir.

## **1.2 Tezin Önemi**

Çift fazlı çelik malzemeler otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

SKK kaynağı ile yapılan kaynak dikişlerinde kaynak parametrelerin bağlı olarak bağlantı mukavemeti de değişkenlik göstermektedir.

Bu çalışmada otomotiv sektöründe da yaygın olarak tanınan DP1000 çelik malzeme farklı SKK parametrelerinde birleştirilmiş mekanik ve kopma/yırılma/ayrılma yüzey özellikleri optimum birleştirme koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu tip malzemenin birleştirilebilirliği üzerine farklı ilerleme, farklı takım devri ve sabit sıcaklık, sabit yük altında DP1000 çelik malzemesinin SKK yapılabilirliği incelenmiş hem sektörün bir ihtiyacı giderilmeye çalışılmış hem de literatüre özün katkılar sağlanmaya gayret edilmiştir.

## **1.3 Literatür Özeti**

Thomas (1999) çalışmasında düşük karbonlu bir çeliğin sürtünme karıştırma kaynağı yapılabilirliğini araştırmıştır. 12 mm kalınlığındaki 0,12 Cr içeren bu çeliği çift yönden ve 4 metre boyunca başarılı bir şekilde sürtünme kaynağı ile

birleştirebilmiştir. Kaynağın mekanik değerlerinin esas malzemeye yakın olduğu bulunmuştur.

Çam ve ark. (2003) yapmış oldukları çalışmalarında alüminyum alaşımı 6013-T4 ile paslanmaz çelik X5CrNi18-10'nun sürtünme karıştırma kaynak yapılabirliklerini incelemiştir. Buldukları veriler sonucunda bu iki farklı malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebildiğini göstermiştir.

Lienert ve ark. (2003) çalışmalarında AISI 1018 çeliğinin sürtünme karıştırma kaynağı yapılabirliğini incelemiştir. Bu çalışmada wolfram ve molibden alaşıma sahip takım malzemeleri kullanmışlardır. Ulaştıkları verilerde takımların yıpranma durumlarını da incelemiştir. En büyük yıpranmanın takımın ilk dalması sırasında ortaya çıktığını göstermiştir. Bu takım yıpranmasını azaltmak için ön ısıtma ve ön delik gibi uygulamalar olması gerektiğini vurgulamışlardır.

Boz ve ark. (2004) çalışmalarında sürtünme karıştırma kaynağında takım uç geometrilerinin mekanik dayanımlar üzerine etkilerini incelemiştir. En yüksek mekanik sonuçları kare geometriye sahip takımında elde etmişlerdir.

Kimapogon ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada sürtünme karıştırma kaynağında takım pinin çapını ve uzunluğunu araştırmışlardır. En yüksek dayanım değerlerinin pinin tabandan 0,2 mm mesafede olduğu pin uzunluğunda elde etmişlerdir. Pin çapının minimum olması gerektiği ve en iyi sonuçların pin çapının 2-4 mm olduğu denemelerde elde etmişlerdir.

Sorensen ve ark. (2004) çalışmalarında sürtünme karıştırma kaynağı yapılacak yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin kaynak işlemi esnasında tezgâhın yüksek ısıdan etkilenmemesi için soğutuculu tutucular kullanmışlardır ve bu konuda başarılı olmuşlardır.

Sterling ve ark. (2004) çalışmalarında AISI 304 paslanmaz çeliği ile sürtünme karıştırma kaynağı yapmışlardır. 15 mm takım çapı ve 2 mm pin uzunluğuna sahip polikristal kübik bor nitrür malzemeli takım kullanmışlardır. Kullanılan takımlarda çok düşük aşınmalar meydana geldiğini görmüşlerdir. Bu yüzden bu takım malzemesinin en optimum takım malzemesi olduğunu ileri sürmüşlerdir.



Feng ve ark. (2005) gelişmiş yüksek mukavemetli çelik sac metallerin sürtünme karıştırma kaynağının fizibilitesini araştırmak için bir çalışma yapmışlardır. 600MPa dayanımındaki çift fazlı bir çelik ile 1310MPa martenzitik bir çeliği kaynaklama çalışmalarında bulunmuşlardır. Çok kristalli kübik bor nitrürden yapılmış bir adet takım, gözle görülür bir bozulma ve aşınma olmaksızın yüzden fazla kaynak denemesini başarıyla yapmışlardır. Kaynak bölgelerinde iç yapı değişimlerini ve sertlik değişimlerini çalışmalarında konu edinmişlerdir.

Mandal ve ark. (2005) sürtünme karıştırma kaynağı yapılacak yüksek sertlik değerlerine sahip malzemelerde takımların kolay deforme olmasını önlemek için termomekaniksel sıcak kanal yaklaşımını çalışmışlardır. Yapılan çalışmalarda bu işlemin takımların daha az deforme olmasını sağladığı ve bu sayede daha uzun takım ömrünün olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Fuji ve ark. (2006) çalışmalarında yüksek karbonlu çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağını incelemişlerdir. Herhangi bir ön ısıtma veya sonradan ısıtmaya gerek duyulmaksızın başarılı kaynak dikişleri elde etmişlerdir.

Sato ve ark. (2007) sürtünme karıştırma kaynağı yapılan ferrit-sementit dubleks yapılı birçok yüksek karbonlu çeliklerin kaynak dikişi boyunca mikro yapısal içeriğini incelemişlerdir. Polikristal kübik bor nitrür takım malzemesi başarılı ve hatasız kaynak dikişleri elde etmişlerdir.

Meran ve ark. (2007) çalışmalarında AISI 304 paslanmaz çeliğin sürtünme karıştırma kaynak yapılabilirliklerini incelemişlerdir. Wolfram karbür takım malzemesini kullanmışlardır. 40-100 mm/min takım ilerleme hızında ve 1000 min<sup>-1</sup> takım devrinde hatasız kaynaklar oluşturmuşlardır.

Meran ve ark. (2008) AISI 304 ostenitik paslanmaz çeliğine uygulanan sürtünme karıştırma kaynak işleminde takım devir sayısının ve ilerleme hızının etkilerini incelemişlerdir. 750 min<sup>-1</sup> takım devir sayısı, 9 kN'luk baskı kuvveti ve 1,5° 'lik takım açısı ile yaptıkları kaynaklarda en yüksek mekanik dayanım değerlerinin 47,5 mm/min ilerleme hızında elde etmişlerdir. 900 min<sup>-1</sup> takım devir sayısı, 9 kN'luk baskı kuvveti ve 1,5° 'lik takım açısı ile yaptıkları kaynaklarda ise en yüksek mekanik dayanım değerlerinin 60 mm/min ilerleme hızında elde etmişlerdir.

Miles ve ark. (2009) çalışmalarında, kaynak koşullarının bir türü olan sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen çelik levhaların mekanik özelliklerine ve mikro yapılarına odaklanmışlardır. Takım devri ve ilerleme hızları, kaynakların mekanik özellikleri ve mikro yapıları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Sabit takım ilerleme hızlarında daha yüksek devir hızları, daha sert kaynaklar elde etmişlerdir. Bu sonuçlar, HSS ve UHSS alaşımları için farklı sürtünme karıştırma kaynak işlemi koşulları kullanılarak kaynak mekanik özelliklerinin ve mikro yapıların ayarlanabileceğini bulmuşlardır.

Chung ve ark. (2010), sürtünme karıştırma kaynak yöntemi için 6111-T4, 5083-H18, 5083-O alüminyum alaşımlarını ve çift fazlı çelik DP 590 sac malzemelerin SKK yapılan ana bölge ve ana malzeme için mekanik dayanımları ve şekillendirme kabiliyetleri incelenmiştir.

Kim ve ark. (2010), otomotiv sektöründe güncelde kullanımı bulunan dört ayrı çelik malzemenin şekillendirme kabiliyetleri üzerine çalışmışlardır. Bu çelik sac malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı sonrası şekillendirme kabiliyeti ve mekanik dayanımları büyük ölçüde kaynak hattındaki homojenliğe bağlıdır durumunu raporlamışlardır.

Bilgin (2011) AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin sürtünme karıştırma kaynak edilebilirliğini etkileyen faktörleri incelemiştir. Çalışmasında 3 mm kalınlığındaki levhaları kullanmıştır. Eşkenar üçgen uca sahip wolfram karbür takım malzemesi kullanmıştır. Elde ettiği sonuçlarda sürtünme karıştırma kaynağında ulaşılan sıcaklıkların diğer kaynak yöntemlerine göre daha düşük olmasından dolayı tane büyümesi gibi durumların oluşmasının önleneceğini bildirmiştir.

Ghosh ve ark. (2011) sürtünme karıştırma kaynağı ile yüksek mukavemetli çelik levhalar arasında bindirme bağlantıları oluşturmak için farklı ısı girdisi ve soğutma oranları ile birleştirmeler yapmışlardır. Kaynakların mikro yapısını ve mikro sertlik değerlerini incelemiştir. Bağlantı mukavemetlerini test etmişlerdir. Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında işlem parametrelerinde değişiklik toplam ısı girdisi, maksimum sıcaklık ve soğutma hızını olmuştur. Kaynak mikro yapısı büyük çoğunlukla soğutma hızına bağlı olduğunu bulmuşlardır. En yavaş soğutma hızı, ferrit-perlit oluşumunu arttırmış ve en hızlı soğutma hızı ile kaynak bölgesinde martenzit

oluşumuna neden olduğunu görmüşlerdir. Tüm birleştirmelerin en zayıf bölgesi, az miktarda perlit içeren ferritten oluşan ısıdan etkilenen bölge olduğunu bulmuşlardır.

D.M. Sekban ve ark. (2017) çalışmalarında düşük karbonlu bir yapı çeliğine, yüzeyden 4 mm kalınlıkta sürtünme karıştırma prosesi ile yüzey sertleştirilmesi yapmışlardır. SKK'dan sonra alaşımın sertliği 140 HV0,1'den yaklaşık 240 HV0,1'e yükseldi. Bu gelişme hem ciddi plastik deformasyon hem de dinamik yeniden kristallendirme nedeniyle önemli mikro yapısal incelmeden gelmiştir. SKK'dan sonra süneklikte önemli bir azalma olmadan, alaşımın hem akma hem de çekme mukavemeti artmıştır. Hem sertlik hem de akma dayanımındaki önemli artış, uygulanan basınca bağlı olarak alaşımın aşınma direncinde kayda değer bir artışa neden olduğu bulunmuştur.

Hemendra Patle ve ark. (2018) sürtünme karıştırma işlemindeki takım pin profilinin AZ91 magnezyum alaşımının mikroyapılarındaki değişim, korozyon ve işleme özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Basit konik, dişli konik ve kare konik olarak üç farklı pin profili seçilmiştir. SKK 1400 min<sup>-1</sup>'de ve 25 mm/min takım ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Tüm SKK örneklerinde, işlenmemiş numuneninkine kıyasla azalmış miktarda sekonder faz gözlenmiştir. X-ışını kırınım analizinden, kare konik pin aracının diğer iki SKK takımı ile karşılaştırıldığında daha yüksek doku etkisi yarattığı gözlenmiştir. Elektrokimyasal çalışmalardan, kare konik pin aleti ile işlenen numunenin korozyon direncinin, diğer numunelerinkine kıyasla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

M.K. Mishra ve ark. (2018) sürtünme karıştırma kaynağı uygulanmış 2507 süper dubleks paslanmaz çeliğin mikro yapılarını ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Deney sonuçları, minimum tane boyutu veren belirli bir dönme hızı için optimum bir dönüş olduğunu ortaya çıkarmıştır. Malzemenin tane büyüklüğü üzerindeki ısı girdisi ve gerilme oranı gibi SKK parametrelerinin etkileri değerlendirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı malzemenin karıştırma bölgesindeki ikiz sınırları temel malzemeye kıyasla önemli ölçüde azalmıştır. Hem temel malzeme hem de elde edilen en küçük tane büyüklüğüne sahip sürtünme karıştırma prosesi ile işlenmiş malzeme, farklı gerilme oranlarında ortam sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda gerilme testine tabi tutulmuştur. Her iki durum içinde SKK uygulanmış malzeme daha iyi sonuçların alındığını bulmuşlardır.

H.G.Tehrani ve ark. (2018) çalışmalarında sürtünme karıştırma prosesinin (SKP), 50-150 mm/min'lik çeşitli enine kaynak hızları ile Fe-24Ni-0.3C TRIP çeliğinin mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, hatasız SKP numunesinin 100 mm/min enine hızda elde edildiğini göstermiştir. Enine hızın artırılmasıyla, karıştırma bölgesinde daha belirgin bir tane incilmesi görüldüğü bulunmuştur. Ayrıca SKP'ye maruz kalan alanda deformasyona bağlı martenzit gözlenmemiştir. Çekme testi sonuçları, SKP örneklerinde akma dayanımının 145 MPa'dan 210 MPa'ya yükseltildiğini bulmuşlardır.

Mostafa Akbari ve ark. (2018) çalışmalarında SKK parametrelerinin sürecin eksenel ve uzunlamasına kuvvetleri ve sıcaklık geçmişi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. SKK işleminde sıcaklık ve kuvvetle, işlem girdisi parametrelerinin neden olduğu başarılı kaynaklarda önemli bir rol oynar. SKK sırasındaki sıcaklık dağılımı, iş parçasına termokulplar yerleştirilerek ve işlem sırasında sıcaklığın ölçülmesiyle belirlenmiştir. Pin şekli, dönüş hızı ve ilerleme hızı dikkate alınan parametrelerdir. Takım ilerleme hızındaki artışın ya da dönme hızındaki azalmanın takım eksenel kuvvetlerinde artışa neden olduğunu görmüşlerdir.

Mahmoudıniya ve ark. (2018) bu çalışmalarında, 2 mm kalınlığındaki DP700 çelik saclara 600, 800 ve 1000 min<sup>-1</sup> takım devrinde sürtünme karıştırma kaynağı uygulamışlardır. Kaynakların mikro yapısı ve mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Artan devir hızında karıştırma alanında tane irileşmesine neden olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca kritik ısıdan etkilenen bölgede devir hızının artmasının yumuşama olayını arttırdığını da bulmuşlardır. Sonuçlar ayrıca karıştırma bölgesinde takım aşınmasından kaynaklanan WC parçacıklarının varlığının, 600 min<sup>-1</sup> dönüş hızında yumuşak bir ferrit bandının oluşumunun yanı sıra çekme dayanımlarını azaltırken, HAZ bölgesinde ki yumuşama ise 800 ve 1000 min<sup>-1</sup> parametrelerinde mukavemet ve sünekliğin azalmasına sebep olduğunu bulmuşlardır.

Nguyen ve ark. (2018) yaptığı çalışmada otomotiv sektöründe sürekli ağırlık azaltma konusundaki ihtiyaç ile otomotiv endüstrisi, farklı alüminyum-çelik kaynağına artan bir ilgi olmasından dolayı 2 mm kalınlığındaki AA6351 alaşımları ile 1 mm kalınlığındaki DP800 gelişmiş yüksek mukavemetli çift fazlı çelik arasında bindirme bağlantısını denemiş ve farklı parametreler ile sürtünme karıştırma kaynağı ile başarılı bir şekilde birleştirmeler yapmışlardır. Bu araştırma çalışmasının deneysel

sonuçları, gelişmiş yüksek dayanımlı çelik ve alüminyumun bindirmeli bağlantı birleştirilmesinin sürtünme karıştırma kaynağı ile oldukça uygun olduğunu bulmuşlardır. Çelik ve alüminyumun ara yüzeyinde kalınlığı 7 µm'den az olan bir intermetalik bileşik tabakası bulunmuş ve XRD yöntemi ile Al<sub>2</sub>Fe ve Al<sub>3</sub>Fe olarak tanımlanmıştır. Termal döngü ölçülmüş ve mikro yapı ile ilişkilendirilmiştir. Farklı parametre kombinasyonları için maksimum çekme dayanımını belirlemek için kesme çekme deneyi yapmışlardır. Son olarak, mekanik özellikleri ve mikro yapısal gözlem birbiriyle ilişkilendirmişlerdir.

Küçükömeroğlu ve ark. (2019) çalışmalarında, sürtünme karıştırma kaynaklı DP600 çelik levhaların mikro yapı, sertlik ve çekme özelliklerini araştırmışlardır. 1,5 mm kalınlığındaki DP600 çelik plakalar, 14 mm çapında içbükey bir takımdan ve 5 mm çapında ve uzunlukta bir konik pinden oluşan bir tungsten karbür takım ile sürtünme karıştırma kaynağı yapmışlardır. Yapılan kaynak denemelerinde takım 2° eğilmiş ve takımın baskı yükü 6 kN'de sabit tutulmuştur. Sürtünme karıştırma kaynağı denemelerinde kullanılan takım devri ve takım ilerleme hızları sırasıyla 1600 min<sup>-1</sup> ve 170 mm/min<sup>-1</sup> dir. Martenzit, beynit ve ferriten oluşan sürtünme karıştırma kaynaklı bölgenin iç yapısıdır. Karıştırma bölgesinin ortalama sertliği yaklaşık 400 HV<sub>0,1</sub>'ye yükselmiştir. Çekme numuneleri kaynaklı plakaların yüksek bir çekme mukavemeti, 640 MPa elde etmişlerdir.

Lin ve ark. (2019) çalışmalarında 1,2 mm kalınlığındaki QP980 çelik sac üzerinde sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yapıldı ve SKK için W-Re karıştırma takımını kullanmışlardır. Bu çalışma, QP980 FSW bağlantılarının mikro yapı özellikleri ve mekanik özelliklerine odaklanmıştır. 400 mm/min<sup>-1</sup> kaynak parametresi altında hatasız SKK bağlantıları elde etmişlerdir. Martenzit, karıştırma bölgesindeki esas olarak mikro yapıydı ve kaynak bölgesinin mikro sertliği yaklaşık 480 HV<sub>0,1</sub>'ye yükselmiştir. Çekme deneyi sonuçları, SKK mukavemetlerinin mükemmel performansa sahip olduğunu gösteren ana metalde bağlantıların kırıldığını göstermişlerdir.

Pouriamanesh ve ark. (2019) sürtünme karıştırma kaynağı ile yüksek mukavemetli düşük alaşımlı X70 çelik/TiO<sub>2</sub> kompoziti elde edilmiştir. X70 çeliğinin oluşuna, birincil TiO<sub>2</sub> parçacıklarının (~300 µm boyutunda) ve X70 çelik parçacıklarının (~200 µm boyutunda) homojen bir karışımı yerleştirilmiştir. TiO<sub>2</sub>

partikülleri mikron ve mikron altı boyutlu partiküllere parçalandı ve kaynak bölgesinde dağılarak kaynak bölgesinde farklı mikro yapısal özellikler elde etmişlerdir. Mikro yapının gelişimi, optik ve taramalı elektron mikroskopunun yanı sıra elektron geri saçılım kırınımı tekniği kullanılarak araştırılmıştır. 370 HV0,1 sertliğe sahip mikron altı parçacıkların varlığında dinamik geri kazanım süreci nedeniyle çok ince iğneli bir ferrit mikro yapı oluşmuştur. Sertlikteki bu artış, TiO<sub>2</sub> eklenmemiş ve alınan alt tabaka olmadan 195 ve 165 HV0,1 FSW katmanından çok daha fazladır. Mikron boyutlu parçacıkların varlığında, 180 HV0,1 sertliğe sahip dinamik yeniden kristalleşme işlemi nedeniyle poligonal ferrit mikroyapısı gelişmiştir. Parçacıkların kaynak bölgesindeki sertliği iyileştirme üzerindeki etkisi, çok ince bir ferrit mikro yapıya eşlik eden yaklaşık 80 HV0,1'dir demişlerdir.

Yoon ve ark. (2019) bu çalışmada, yüksek mukavemetli çeliğe uygulanmak ve esnekliği sağlamak için koaksiyel endüksiyon ısıtma kullanan hibrit bir SKK tasarlanmıştır. SKK işleminin performansı ve özellikleri, 590 ve 980 çift fazlı yüksek mukavemetli çelik üzerinde denemişlerdir. SKK işleminin üretkenliğini değerlendirmek için SKK işlemleri için yeterli kaynak hızları aralığı araştırılmıştır. SKK sırasında, süreç davranışını anlamak için dikey baskı kuvveti ve tork ölçülmüştür. SKK'de 590 DP ve 980 DP çelikler için kaynak hızları geleneksel FSW proseslerine göre sırasıyla %75 ve %50 oranında artırılmıştır. Ayrıca, nispeten daha derin bir ısıdan etkilenen bölge elde edilmiştir. Daha derin ısıdan etkilenen bölge, azaltılmış sistem sapması nedeniyle daha derin takım dalma derinliği ile üretilmiştir. Dikey yük ve torkun daha erken dengelenmesi, ön ısıtma etkisi nedeniyle SKK'nın başka bir özelliğidir. Basit sistem seçimleri ve süreç esnekliği ile SKK sürecini kullanmak, yüksek mukavemetli çeliklerin kaynağı için üretkenliği ve kaliteyi artırabilir demişlerdir.

Okazaki ve ark. (2020) çalışmada, TRIP çeliği ve yumuşak çeliği optimum koşullar altında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir. Benzer olmayan bağlantıların yorulma mukavemeti, monolitik ve SKK ana metalin yorulma mukavemetine göre değerlendirmişlerdir. Dijital görüntü korelasyon teknolojisi kullanılarak spesifik yorulma davranışını belirlemek için farklı eklemlerdeki yorulma çatlağı büyümesini de incelemişlerdir.

Sameer ve ark. (2020) bu çalışmada, çift fazlı (DP) 600 çelik ve AA6082-T6 Alüminyum (Al) alaşımı gibi birbirine benzemeyen malzemeleri, azaltılmış bir intermetalik bileşik (IMC) tabakası ile sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) işlemi ile birleştirmeyi denemişlerdir. Bağlantıları imal etmek için 0°, 0,5°, 1°, 1,5° ve 2°'lik beş farklı takım eğim açısı seçmişlerdir. Çekme mukavemeti, sertlik, makro yapı ve mikro yapı gibi kaynak özelliklerini incelemişlerdir. Kaynak ara yüzü, enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDS) ve X-ışını kırınımı (XRD) teknikleri ile donatılmış bir optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. 0,5° eğim açısıyla üretilen bağlantı, 240 MPa'lık en yüksek nihai çekme mukavemetine (UTS) ulaşmıştır.

Sameer ve ark. (2021) bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynaklı DP600 çeliğinin mekanik ve mikro yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Saclar tek paso ve 700, 800 ve 900 min<sup>-1</sup> gibi üç farklı dönme hızı ile alın kaynağı ile kaynaklanmıştır. Takım ilerleme hızı, takım eğim açısı ve dalma derinliği gibi diğer parametreler sabit tutuldu (sırasıyla 50 mm/min, 2 ve 0,2 mm). En yüksek çekme mukavemeti 528 MPa (birleştirme veriminin %82,6'sı) 800 min<sup>-1</sup> ile hazırlanmış bir kaynak numunesi için, en düşük çekme mukavemeti ise 350 MPa (birleşim veriminin %54,7'si) ile 700 min<sup>-1</sup> üretilen birleştirme için elde edilmiştir. Mikro yapısal karakterizasyon, EDAX ile birleştirilmiş bir optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik testlerinde en yüksek sertlik 345,2 HV0,1 ve en düşük sertlik 145,9 HV0,1 sırasıyla 800 ve 700 min<sup>-1</sup> karıştırma bölgesinde bulunmuşlardır.

Vıcharapu ve ark. (2021) çalışmada, çeliklerin SKK'sı için WC-Ni takımlarının aşınması ve buna bağlı hasarları hakkında ayrıntılı bir rapor oluşturmuşlardır. Sonuçlar, WC-Ni takımlarının ömrünün, yüksek karbonlu çeliklerin SKK'sı sırasında nispeten daha yüksek kaynak hızında ve daha düşük takım dönüş hızında iyileştiğini göstermektedir. Buna karşılık, daha yüksek takım dönüş hızları ve daha düşük kaynak hızları, daha yüksek ısı üretimi oranı ve yüksek sıcaklık ile sonuçlanır ve bu da takımların yapışma aşınmasına ve oksidasyonuna neden olur. Tipik 3 mm kalınlığındaki yüksek karbonlu çelik plakaların SKK'sında, 300 min<sup>-1</sup>'lik bir takım dönüş hızı ve 150 mm/min<sup>-1</sup> kaynak hızı, minimum takım aşınması ile sonuçlanmıştır.

ve 1000 mm'ye kadar tek bir takımın herhangi bir işlem gerektirmeden kullanılmasına izin vermiştir.

You ve ark. (2021) çalışmalarında, katı faz kaynak işlemi olan sürtünme karıştırma kaynağına tabi tutulmuş, 590 MPa ile 1500 MPa arasında değişen dayanımlara sahip yüksek mukavemetli otomotiv çeliklerinin malzemeleri ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yüksek mukavemetli çelikler yüksek martenzit oranıyla sertleştirilmiştir ve kaynaklar yeniden kristalize bölge (RZ), kısmen yeniden kristalize bölge (PRZ), temperlenmiş bölge (TZ) ve etkilenmeyen bir ana metalden (BM) oluşmuştur. RZ, BM'den daha yüksek bir sertlik göstermiştir ve BM gücü 980 MPa veya daha yüksek olduğunda tamamen martenzitiktir. BM mukavemeti 780 MPa veya daha yüksek olduğunda, PRZ ve TZ, temperlenmiş martenzitik oluşum nedeniyle yumuşamıştır. Yumuşatılmış bölgenin sertliği ve genişliği ile belirlenen bağlantı mukavemeti, BM mukavemetindeki bir artışla artmıştır. Sonuçlardan, otomotiv çeliklerinin bağlantı mukavemetini arttırmak için PRZ ve TZ'nin termal geçmişinin ve boyutunun kontrol edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

DP1000 çift fazlı çeliğin SKK kaynağı üzerine literatür çalışmalarının tümü değerlendirildiğinde farklı takım ilerleme hızları, takım devirleri, farklı yükler ve sıcaklık gibi parametrelerin sınırlı sayıda çalışıldığı görülmüştür. Özellikle çift fazlı çelikler ile ilgili bir tarama yapıldığında henüz yeterli sayıda çalışmanın yapılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada DP1000 çift fazlı çeliğin SKK yapılarak mekanik ve iç yapı özellikleri incelenerek literatüre katkı sağlanmaya çalışılmıştır.



## 2. ÇİFT FAZLI ÇELİKLER VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK İŞLEMİ

Sürtünme karıştırma kaynak işlemini tanımlarken malzemeleri birbirine aynı anda hem sürtünme hem de karıştırma yoluyla kaynaklama işlemi diyebiliriz. Kaynak işleminin tanımını ise ergime sıcaklıkları benzer veya birbirine yakın malzemelerin sürtünme sonucu oluşan ısı veya takım baskı kuvveti sonucu oluşan basınçla veya her bunların bir arada kullanarak kaynak edilecek malzeme ile neredeyse aynı ergime sıcaklıklarında ekstra bir girdi olarak kaynak metali kullanarak ya da hiçbir ek malzeme kullanmadan yapılan bir tür birleştirme yöntemidir.

Çift fazlı çeliklere dual faz çeliklerde denmektedir. Martenzit ve ferrit fazlarından oluşurlar. Bu sistemde martenzit yüksek mukavemet sağlarken ferrit ise iyi bir şekil alma (uzama) kabiliyeti kazandırır. Bu çelikler yüksek mukavemet ve uzama özellikleri nedeniyle, otomotiv sektöründe otomobil parçası üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır.

### 2.1 Sürtünme Karıştırma Kaynak İşlemi ve Karıştırıcı Takım

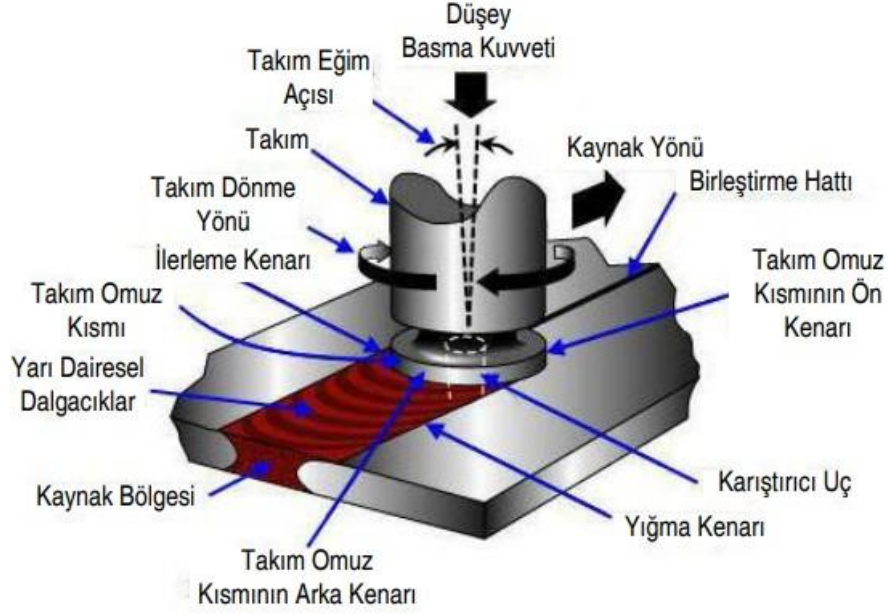
Sürtünme karıştırma kaynak işlemi kaynak yapılacak malzemelerden genelde daha sert bir materyalden üretilmiş sürtünme karıştırma takımı ile kaynak yapılacak malzemelerin birleştirilen bölgede sürtünme ile yüksek düzeyde ısı meydana getirip karıştırma ile de parçaların birbirine mekanik olarak bağlanması prensibine dayanır.

Karıştırma takımı genellikle ucuna göre daha geniş çaplı bir metal gövdeye bağlı daha küçük çapta bir uç ile sonlandırılmış bir şekildedir. (Şekil 2.1)



Şekil 2.1: Sürtünme karıştırma kaynak takımları (Miranda 2013)

Karıştırıcı takımın ucu birleşme yapılacak kaynak bölgesine girer ve belli bir basma kuvveti altında belli bir takım eğim açısı ile dönerek kaynak yapılacak yön boyunca ilerlemeye başlar bu sayede sürtünme karıştırma kaynak işlemi gerçekleşir. (Şekil 2.2)



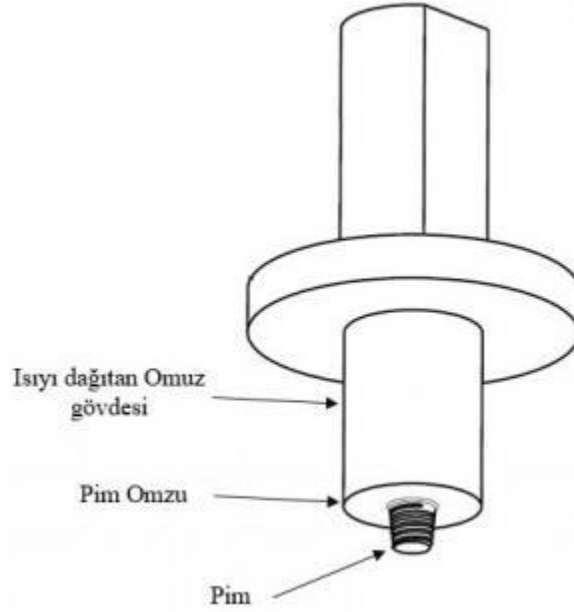
Şekil 2.2: Sürtünme karıştırma kaynak işlemi (bilginform.com 2021)

Sürtünme karıştırma kaynağı son dönemlerde metallerin birleştirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Metallerin birleştirilmesinde önemli bir adım olarak görülebilir. Bu kaynak işleminin çevreye karşı diğer kaynak yöntemlerine göre görece daha duyarlı oluşu bir adım öne çıkmasına sebep olmaktadır. Klasik yöntemlere kıyasla birleştirilen parçaların ergitilmemesi daha az enerji harcaması anlamına gelir. Aynı zamanda çevreye zararlı gaz ve toz gibi materyaller yaymadığından çevreci bir birleştirme işlemidir denilebilir. (Mishra 2005)

SKK yöntemi koruyucu toz, gaz ve kaynak teli gibi ek malzemelere ihtiyaç duymadığı için, aynı zamanda kaynak yapılacak bölge için kaynak ağız hazırlığının gerekmemesi ve neredeyse bütün kaynak pozisyonlarında kaynak yapılabilir olması gibi olanaklarının bulunması ve otomatik sistemlerde kullanılabilmesi yöntemin son derece geliştirilebilir ve geniş uygulama alanları bulmasını sağlamaktadır. (Şık 2003)

Çeliklerin ergime sıcaklıkları yüksek olduğu için SKK yöntemi sırasında karıştırıcı takımın sıcaklıkları 1000°C gibi sıcaklıklara çıkabilmektedir. Çeliklerde kullanılan SKK takımının bu sıcaklıkların üzerinde dayanım göstermesi gerekmektedir.

SKK yönteminde takım geometrisi, SKK'yı geliştirmenin en önemli yönlerinden birisidir. Takım geometrisi, malzeme akışında kritik bir rol oynar ve SKK'nın oluşabilmesini belirler. Bir SKK takımı, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi bir omuz ve bir pinden oluşur.



Şekil 2.3: SKK takımı şematik gösterim (Thomas 1997)

Takımın iki temel işlevi vardır: sürtünme ile ısıtma ve malzeme akışını sağlamak. Takım batırma işleminin ilk aşamasında, ısıtma, esas olarak takım ucu (pin) ve iş parçası arasındaki sürtünmeden dolayı oluşur. Takım, Şekil 2.3'te gösterilen pin omuzu iş parçasına dokunana kadar daldırılır. Omuz ve iş parçası arasındaki sürtünme, ısınma durumu ile sonuçlanır. Isıtma açısından, pin ve omuzun boyutu önemlidir ve diğer tasarım özellikleri kritik değildir. Omuz ayrıca ısıtılmış malzeme hacmi için sınırlama sağlar. Takımın ikinci işlevi, malzemeyi yüzeye bulaştırarak kaynak ile birleştirmeyi sağlamaktır.

Sürtünme karıştırma kaynağı kullanılmaya başladığı zamanlarda yüksek sıcaklıklara dayanabilen çelikleri bulamaç haline getirebilecek bu yüksek sıcaklıklara dayanıklı takım malzemesinin olmaması bu yöntemin çelik ve benzer şekilde sıcaklıklara dayanıklı malzemelerde kullanılmasını engellemiştir (Çam 2017). Fakat giderek artan deneysel çalışmalar ile birlikte, çeliklerin ve benzer malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı için takım malzemeleri bulunmaya ve giderek iyileştirmeye başlamıştır (Hanke 2017, Meshram 2014, Dabeer 2018). Yapılan deneyler sayesinde silisyum nitrür (SiN), tungsten karbür (WC), tungsten renyum (W-Rh) ve polikristal kübik bor nitrür (PCBN) gibi pek çok ihtiyaca cevap verebilen ve özellikle çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağında etkili şekilde kullanılmıştır (Hovanski 2007, Santella 2010, Miles 2017).

Amerika'da 13 farklı üniversitenin ve birçok endüstriyel kuruluşun katkı verdiği projede Al, Cu, Mn ve Fe içerikli malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynak yapılabirlikleri araştırılmış ve bu kaynaklar sırasında takım malzemesi olarak PCBN kullanılmıştır. Takım malzemesi seçiminde dayanıklılık aranır. Bu yüzden en önemli takım malzemelerinden bir tanesi PCBN'dir. PCBN dünyadaki bilinen en sert ikinci malzemedir. Elbette sert olmaları oldukça gevrek ve kırılğan olmalarına neden olmaktadır. Titreşimli ve darbeli çalışmalara karşı oldukça dayanıksızdırlar. Bu takım malzemesinin kullanılacağı sürtünme karıştırma kaynak makineleri titreşim önleyici olarak tasarlanmalı ve çalışmalıdır. Çok sert olmalarının bir başka dezavantajı ise oldukça zor işlenmeleridir. Bu durumda takım geometrisi oluşturmada ciddi problemler yaratmaktadır. PCBN malzemeli bu takımlar yüksek mukavemetli ve yüksek aşınma direncine sahiptirler (uslularhadde.com 2021).

Takım seçimine baktığımızda sadece çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağında problem yoktur. Titanyum ve alaşımlarının kaynağında PCBN malzemeli takımlar ile yüksek verimlilikte sonuçlar alınamamaktadır. Titanyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılmak üzere W-Re malzemeli takımlar ve önerilmiştir ancak Ti-6Al-4V alaşımının kaynağı sırasında pinin aşınmayla karşı karşıya kaldığı ve aşırı metal yapışması yaşandığı görülmüştür. Buna sebep olan durumun titanyum alaşımında bulunan vanadyumun ve takım malzemesinde bulunan renyumun reaksiyonu ile olduğu sonucuna varılmıştır. Başka bir sürtünme karıştırma kaynak malzemesi olarak tungsten-iridyum (W-Ir) önerilmektedir. W-Ir malzemeli takımlar ile yapılan

deneylerde Ti-6Al-4V alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı denemeleri yapılmıştır. Kaynak sırasında takıma herhangi bir metal yapışması olmadan uzun kaynak dikişleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlantılar sonucu birleştirmeler üzerinde yapılan mekanik deneylerde çok yüksek verimlilik bildirilmiştir (uslularhadde.com 2021).

Sürtünme karıştırma kaynağında takımın malzemesi kadar takımın geometrik yapısı da büyük önem taşımaktadır. Pek çok takım ucu geometrisi denenmiştir ve denenmeye devam etmektedir. Farklı takım geometrilerinin denenmesinde ki en önemli neden ise kaynak sonunda takımın tekrar tekrar kullanılabilirliğini arttırmak ve kaynak bölgesindeki karıştırma işleminin kalitesini arttırmaktır. Literatürde konik uçlu takımların düz silindirik uçlu takımlara oranla daha iyi bir karıştırma ve sıvama sağladığı aynı zamanda daha az takım baskı kuvvetine ihtiyaç duyduğu bildirilmiştir (Mohanty 2012).

Yapılan araştırmalar sonucunda takımların omuz çapı ölçüsünün, takım ucu çapının yaklaşık 3 katı olduğunda kaynak hatalarının azaldığı ve birleştirme bölgesinde homojen bir iç yapının oluştuğu aynı zamanda mekanik özelliklerinin yüksek verimlilikte olduğu görülmüştür (Khan 2015, Saravanan 2016).

## **2.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Uygulanan Kaynak Parametreleri**

SKK işlemi için parametreler denildiğinde akla en büyük belirleyici olan takım ucu ile ilgili durumlar gelir. Elbette kaynak söz konusu olduğu için sıcaklık değerleri de çok önemlidir. SKK parametrelerini 5 ana başlıkta toplayabiliriz:

- Takım baskı kuvveti,
- Takım dönme devri,
- Takım ilerleme hızı,
- Takım ucu geometrisi,
- Kaynak bölgesindeki sıcaklık değerleri.

Kaynak parametrelerinde genelde bazı değerler sabit tutulup belirli bir değer değiştirilerek ideal parametre kaynak yapılacak malzeme için bulunmaya çalışılır.

Literatürde özellikle kaynak yapılacak malzemeye dik yönde kaynak yapılmasının mekanik özellikleri arttırdığı bulunmuştur (Mosleh 2015).

Literatüre bakıldığında alüminyum ve alaşımları için takım baskı kuvvetinin 3 veya 4 kN, takım dönme devrinin 500, 630, 900, 1120 min<sup>-1</sup>, ilerleme hızlarının 40, 63, 67, 86, 92, 100 mm/min, çelikler için ise takım baskı kuvvetinin 5, 6, 7 kN, takım dönme devrinin 900, 1180, 1250, 1500, 1600 min<sup>-1</sup>, ilerleme hızlarının 45, 65, 115, 150, 170 mm/min olduğu parametreler denenmiştir.

Takım ucu geometrisi için her malzemede pek çok geometri denenmiştir. Vida formunda açılan takım ucu geometrisi en iyi sonuçların elde edilmesine olanak sağlamıştır.

Kaynak bölgesindeki sıcaklık değerleri için her malzemede farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu doğal bir sonuçtur. Çünkü her malzeme farklı sıcaklık değerlerinde hamurlaşma gösterir SKK için malzemenin hamur kıvamına gelmesi gerekmektedir. Bu değer çeliklerde 750-800°C'de iken alüminyum ve alaşımlarında 450-480°C'lerde olması gerekmektedir.

### **2.2.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Uygulanan Kaynak Parametrelerinden Kaynak Sıcaklıkları ve Ölçümlenmesi**

Sürtünme karıştırma kaynağının yapılabilmesi için gerekli bazı şartlar vardır. Bu şartlardan birisi kaynaklanan iş parçalarının ergime sıcaklıklarının maksimum %80'ine kadar ulaşılması gerektiğidir. Bu sıcaklık seviyelerine dönen takım ucunun kaynaklanacak malzemelere sürtünmesi ile ulaşılır.

Elbette her malzeme için bu sıcaklık değerleri farklılık göstermektedir. Ergime sıcaklığının yaklaşık %60-80 aralığına karşılık gelen bu değer çeliklerde 750-800°C'de iken alüminyum ve alaşımlarında 450-480°C'lerde, magnezyum alaşımları için 430-460°C, pirinç için 600-650°C olması gerekmektedir.

Sürtünme karıştırma kaynak bölgesi için yapılan denemeler belirli malzemeler için bazı sıcaklık değerlerini vermiştir. Ancak buradaki önemli faktörlerden biriside

bu sıcaklıkların nasıl ölçüldüğüdür. Genel yaklaşımlara bakıldığında farklı bazı ölçüm şekilleri görülmüştür.

- Termal kamera ile kaynak bölgesinin anlık gözlemi ve kayıt altına alınması,
- Kaynak yapılan bölgeye yerleştirilen K tipi termokupllar ile,
- Infrared lazerli ısı ölçerler ile,
- Ya da bu sıcaklık ölçerlerden ikisinin bir arada kullanılması ile sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Tek cihazdan yapılan ölçümler en sık görülen türleridir. Ancak literatürde karşılaşılan bazı araştırmalarda iki cihazın bir arada kullanıldığı gözlenmiştir (Aktarer 2019). Burada iki cihazın bir arada kullanılmasında ki amacın özellikle güvenilirlik düzeyini arttırmak olduğu görülmüştür. Aynı zamanda ilerlemeye başlamadan önce ulaşılması gereken sıcaklık değeri ile ilerleme sırasındaki kaynak bölgesinde ve çevresindeki ısı dağılımını ve soğumayı grafiklestirebilmek adına da iki farklı cihaz kullanımını yapılmaktadır.

### **2.2.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağında Uygulanan Kaynak Parametrelerinden Takım Baskı Kuvveti ve Ölçümlenmesi**

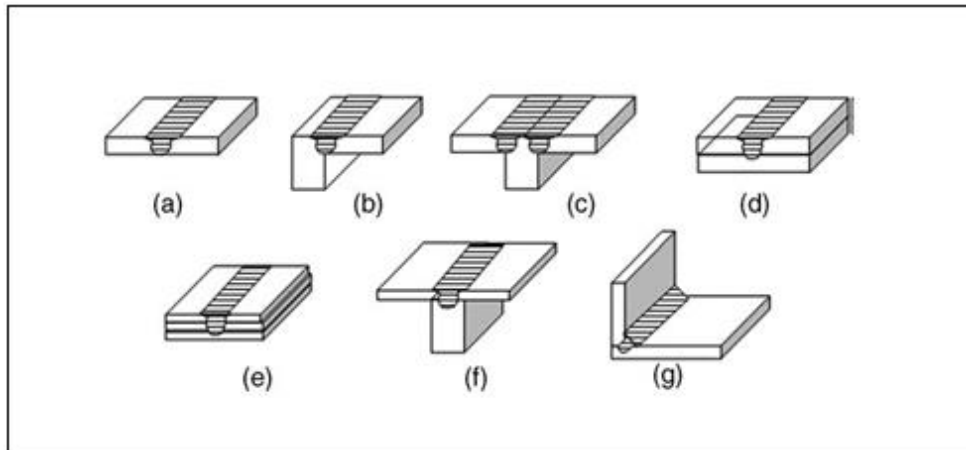
Başarılı bir SKK için gerekli takım baskı kuvvetindeki değişim kaynak yapılan alandaki sıcaklıkları ve sıcaklığın etkisiyle malzeme iç yapısında değişimlere sebep olmaktadır (Mishra 2005, Long 2017). SKK sırasında takım baskı kuvveti son derece değerli bir etkidir ve başarılı bir sürtünme karıştırma kaynağı için takım baskı kuvvetinin, kaynak bölgesinde hamur haline getirebilecek sıcaklık seviyelerine çıkılmasını sağlayacak ve hamur haline gelen malzemeyi homojen şekilde dağılmadan kaynak bölgesi boyunca yayabilecek bir kuvvette olması gerektiği Langlade ve ark tarafından çalışmalarında gösterilmiştir.

Takım baskı kuvvetini ayarlayabilmek için mekanik ya da hidrolik sistemlerde kullanılmaktadır ve istenilen seviyede takım baskı kuvveti ayarlanabilmektedir. Özellikle takım baskı kuvvetini SKK işlemi sırasında sabit tutabilmek çok önemlidir ve hidrolik sistemler ile bu başarılabilir (Aktarer 2019).

Takım baskı kuvvetleri SKK işleminin yapılacağı tablaların altına yerleştirilen yük ölçerler ile takip edilebilmektedir (Aktarer 2019).

### 2.3 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Birleştirme Şekilleri

Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılabilecek birleştirme şekilleri incelendiğinde en optimum sonuçları veren durumlar alın ve bindirme kaynağı birleştirme işlemidir. Dikdörtgen kesiti alınmış iki levha alın altına getirilerek birleştirme Şekil 2.4a’de verilmiştir. Birbiri ile benzer et kalınlığına sahip iki sac veya levha kaynak yapılacak olan birleşme alanlarından ayrılmasını engellemek için bu malzemeleri kaynak yapılmadan önce destek bir malzeme üzerine sıkıca montajlama işlemi yapılmıştır. Hızla dönen takım ve takım ucu kaynak yapılacak birleşme hattı içine batırılır ve bu kaynak hattı çizgisi boyunca ilerleme verilir. Bu esnada takım omzunun levhaların yüzeyine temasıyla ortaya çıkan ısı ile alın hattı boyunca bir kaynak ortaya çıkar. Başka bir birleştirmede bir bindirme kaynağı için bindirilmiş iki sac veya plaka alt tablası üzerine sabitlenmiştir. Döner bir takım alt plaka içine kadar üst plaka üzerinden düşey olarak daldırılır ve istenilen yön boyunca ilerletilir (Şekil 2.4d). Diğer birçok konumlandırma alın ve bindirme birleştirmelerinin kombinasyonu ile üretilebilir. Alın ve bindirme birleştirme konumlarından ayrı, diğer birleştirme tasarımları köşeli birleştirme gibi (Şekil 2.4g) bazı mühendislik gereksinimleri olarak ayrıca üretimi mümkündür (Mishra 2005).



Şekil 2.4: SKK birleştirme şekilleri a) alın altına birleştirme, b) 90° birleştirme, c) T alın altına birleştirme, d) bindirme ile birleştirme, e) çoklu bindirme ile birleştirme, f) T bindirme ile birleştirme, g) köşeli 90° birleştirme (Mishra 2005).



## 2.4 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Alanları

Sürtünme karıştırma kaynağı günümüzde geniş uygulama alanları bulmaktadır. İlk ticari uygulamaları gemi sektöründe özellikle balıkçı gemilerinin yakalanan balıkları koydukları dondurucu bölümlerinde ki alüminyum panellerde kullanılmıştır, Şekil 2.5.



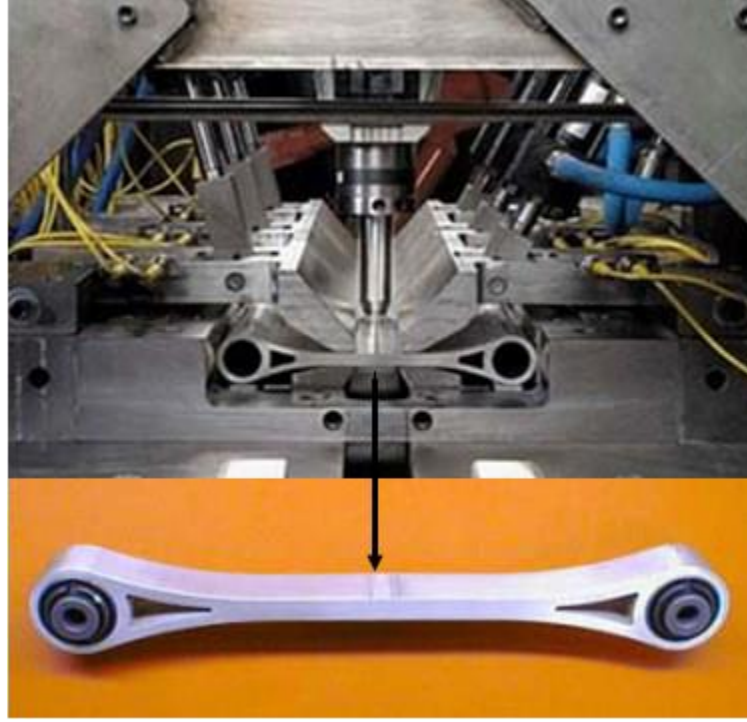
Şekil 2.5: SKK Gemilerde Uygulanması ve Alüminyum Gemi Panellerini Kaynak İçin Kullanılan Sürtünme Karıştırma Kaynak Makinesi (bilginform.com 2021)

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemindeki çok az miktarda distorsiyon ve yüksek mukavemet değerleri, teknik ve özellikle maddi açıdan bakıldığında sert panel üretiminde SKK yöntemini değerli hale getirmektedir. Bu kaynak ile üretilen alüminyum panel levhaları ile Japonya'da deniz suyunun korozyon etkisine dayanıklı panellerin üretimleri yapılmaktadır (Çam 2003).

Alüminyum ve alaşımları sağladıkları hafiflik ile havacılık ve uzay sektörlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Havacılık ve uzay sektöründe kullanılmak üzere geliştirilen hafif Al-Li 2195 alüminyum alaşımının ergitme kaynağı çok zor olmakta ve kaynak bölgesinin mukavemeti göz ardı edilemeyecek kadar düşmektedir. Fakat bu sektörlerde hafiflik kadar yüksek mukavemet değerleri de bir zorunluluktur. Bu yüzden, bu alaşımın mukavemet düşüşünün minimum seviyede olacağı bir birleştirme yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı ideal bir birleştirme yöntemidir. Bu alaşım günümüzde üretilen ve son derece yüksek hassasiyet gerektiren uzay mekiklerinin yakıt tanklarının ucunda bulunan çıkıntı bölümlerinin birleştirme kaynağında bu SKK yöntemi etkili ve verimli bir şekilde yapılmaktadır (Çam 2003).

Günümüzde SKK uygulamaları özellikle otomotiv sektörü için üç genel madde oluşturmuştur. Bu üç ana madde, otomobillerde yapılan birleştirme işlemlerinde (montaj), özellikle farklı kalınlıktaki sacların montajında (Tailor Welded Blank) ve ‘geniş ekstrüzyon’ şekillendirilmesi için profillerin (karmaşık şekilli parçaların imalat güçlüğünü gidermek amacıyla birkaç ayrı parça halinde üretilerek parçaların tekrar kaynak ile birleştirilip tek bir ürün haline getirilmesi) birleştirilmesini içerir. Bu oluşan üç kategoride de sürtünme karıştırma kaynağı üretim maliyetinin düşmesi gibi belirli faydalarının yanında yüksek mukavemetli birleştirmelere ve aynı parçalardan üretilebilecek alternatif üretimlere imkân sağlamaktadır (Smith 2008).

Sürtünme karıştırma kaynağı uygulamasıyla profillerin kaynaklanması büyük ekstrüzyonlu profil imal etmek için imkân sağlayan bir teknoloji olarak görülür. Otomotiv sektöründe bu madde 200 mm’nin üzerindeki ölçülerde yapılan imalat yöntemi olarak anılmaktadır. Bu yöntem ile yapılan üretimde profil boyutunun artması harcanan malzeme miktarının artmasına sebep olur, bunun sonucu olarak her kütle başına maliyet artmaktadır. Ayrıca büyük ekstrüzyonların ölçülerinin büyümesiyle üretimde dikkat edilmesi zorunlu olan parça tolerans değerlerinin negatif anlamda artmasına ve bu yüzden parça hassasiyetinin kötüleşmesine sebep olur. Sürtünme karıştırma kaynağı ile büyük profiller imal edebilmek için iki veya daha çok küçük profil çeşitleri farklı birleştirme açılarında ve yerlerinde kaynaklı birleştirme ile farklı ürünlerin daha ekonomik üretimini yapılabilir boyuta getirmektedir. Bu ve benzeri yapılan imalatlarda sürtünme karıştırma kaynağı parçanın akış yönüne paralel yapılan doğrusal bir kaynaktır. Bu durumu net şekilde Şekil 2.6’da bulunan süspansiyon bağlantı elemanıdır. Bu bağlantı elemanı bir kol görevindedir ve birkaç metre boyutunda kaynak ile birleştirilerek oluşturulan profilden istenilen boyutta kesilerek ayrılan parçalardan oluşmaktadır (Smith 2008, ESAB 2004).

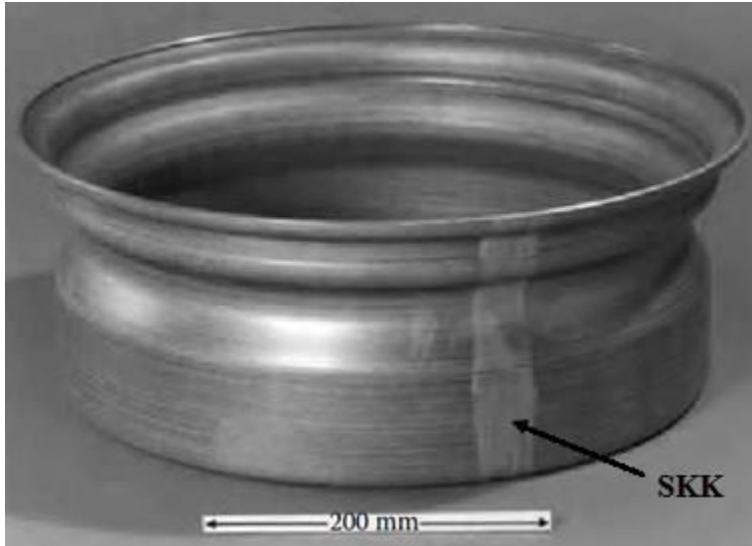


Şekil 2.6: SKK'lı profilden süspansiyon kolunun üretilmesi (Smith 2008, ESAB 2004).

Sürtünme karıştırma kaynağının elbette başka uygulama alanları da bulmaktadır. Bu alanlardan birisi de kaynak dikişi bulunan saclardır (Şekil 2.7). Üzerinde kaynak dikişi bulunduran sac malzemelerin aynı olmayan kesit alanlarının kaynaklanmasıyla oluşturulurlar. Bu sac parçaları birbirine uyum işlemleri gördükten sonra ancak birbirleriyle bir bütün olarak bir araya getirilirler. Bir araya getirilen bu sac malzemelere son geometrik hallerini oluşturabilmek için bir defa daha şekillendirme yapılmaktadır. Kaynak dikişe sahip malzemelerin amacı sadece esas malzemeden yararlanmayı iyileştirmek değil bununla birlikte birleşmenin son halinin kütlece minimum halde olmasını sağlayarak malzeme kullanımını en düşük hale getirmektir. Bu tip malzemeler özellikle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. Bu sektörde kaynak robotu ile farklı kalınlığa sahip malzemelerin birleştirilmesinde özellikle tercih edilmektedir (Smith 2008). Otomotiv endüstrisinde derin çekme ile anlatılan ve en önemli sebebi bu özelliği olan çeliklerin kaynaklanmasında ciddi bir arayış vardır. Bu durumu anlatabilecek geleneksel bir örneği Şekil 2.8'de verilen SKK ile kaynak yapılmış bir birleştirme jant imalatında önümüze gelmektedir. Bu gibi yapılan birleşme alanlarında esas malzemede görülen şekil değiştirme kabiliyetinin oluşmasına gerek duyulmaktadır. Kaynaklanan bu elemanların kaynak bölgelerinin sünek yapıda olması bu şekil değiştirme kabiliyetinin olmasına imkan vermektedir.



Şekil 2.7: Sürtünme karıştırma kaynağı ile imalatı yapılan kaynak dikişli sac (ESAB 2004).



Şekil 2.8: Sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynak yapılan bir jant (ESAB 2004).

Tüm bu durumlara bakıldığında otomotiv sektöründe kullanılması için üretilen çeliklerin (Çift fazlı çelikler, YMDA, KDS ve IF çeliği) sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle yapılabilmesinin çalışmalarının yapılması ve ihtiyaca karşılık verecek seviyede bulunması zaman içerisinde yeni yapılabilirliklerin mümkün kılınması açısından otomotiv sektörü için bir elzem durum olarak görülmektedir.

## 2.5 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulandığı Malzeme Çeşitleri

SKK ilk kullanıma başladığında alüminyum, çinko, magnezyum gibi göreceli olarak yumuşak malzemelerin kaynağında kullanılırken zamanla düşük karbonlu çelik, alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler ve yüksek mukavemetli çelikler gibi malzemelerde kullanılmaya başlanmıştır. Teorik olarak, sıcak işlem görebilen bütün malzemeler bu yöntemle kaynaklanabilmektedir. Fakat, SKK'da kaynak yapılan malzemelerden daha sınırlayıcı bir tek şey vardır o da karıştırıcı takım olarak adlandırılan takımın malzemesi ve dayanımıdır. Son zamanlarda özellikle freze bıçağı takım uçlarının malzeme seçiminde araştırmalar ve bazı kaplama tekniklerinin yapılması ile sürtünme karıştırma kaynak takımlarından yüksek verim alınmasının önü açılmaya başlamıştır.

SKK'da kullanılan malzeme çiftleri için tarama yapılmıştır. Kaynaklanan malzemelerden bazıları Tablo 2.1'de verilmiştir:

**Tablo 2.1:** SKK yapılan malzeme çiftleri (Hirata 2007, Yong-Jai 2009, Sadeesh 2014, Bayazid 2015, Huang 2017, Geçmen 2020, Commin 2009, Harikrishna 2010, Fuji 2006, Baillie 2014, Zhu 2004, Yazdipour 2016, Hernandez 2017, Hartman 2015, Küçükömeroğlu 2017, Nguyen 2018, Liu 2015, Torganchuk 2019)

Alüminyum ve alaşımları	Pirinç alaşımları	Magnezyum alaşımları	Çelikler	Paslanmaz Çelikler	Yüksek Mukavemetli Çelikler	DP çelikler
AlMg4.5Mn0.7 5083, AlMg2.5 5052, AlCu4Mg1 2024, AlMg0.7Si 6063, AlZn5.5MgCu 7075, AlMg1SiCu 6061	CuZn63	AZ31, ZM21	Çok düşük karbonlu IF çelikleri, S275 JR	304L, 316L	TRIP780, TWIP	DP600, DP800, DP980

Bu malzemelerin tamamı belirli parametrelerde yeterli düzeyde kaynaklanabilmişlerdir. Elbette sadece kaynaklanmış olması önemli değildir. Çünkü ne kadar kaynak yapılabilir durumda da olsa bu kaynağın ekonomik koşulları, kaynak yapılan bölgenin boyutu, kaynak parametrelerinin gerçek hayatta uygulanabilirliği her zaman mümkün olmamaktadır. Yapılan araştırmalarda zaten her zaman daha optimum ve uygulanabilir hale getirmek üzere SKK'yı geliştirmek için yapılmaktadır. SKK

yapılabilen malzemelerin sayıları sektörlerin ihtiyaçları ve istenilen özelliklere göre gittikçe artmaktadır ve kullanımı artan malzemelerinde bilim insanları tarafından yapılan araştırmaları da her sene literatüre katkı sağlamaktadır.

### 2.5.1 Alüminyum Alaşımları

Sürtünme karıştırma kaynağın Al ve alaşımlarında kullanılabilirliği üzerine yapılan çok sayıda araştırma olmuştur ve yapılmaya devam etmektedir, bunun sebebi sürtünme karıştırma kaynağına çok uygun bir malzeme olmasıdır. Yapılan araştırmaların sonuçlarında, bu yöntemin ısı işleme karşı hassasiyeti görülmeyen (1xxx, 5xxx vb.) Al ve alaşımlarında oldukça iyi bir şekilde kullanılabildiği görülmüştür. SKK yöntemi ile oluşturulan kaynaklı birleştirmelerin yüzey pürüzlülük durumları ark kaynağı ile olan birleştirmelere göre neredeyse mükemmeldir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile oluşturulan kaynaklı birleştirmelerin mekanik dayanımları genellikle, geleneksel kaynak imalat yöntemleri ile yapılan birleştirmelere göre daha fazladır. Ayrıca, sürtünme karıştırma kaynağında takımın ilerleme hızını artırarak mukavemet azalmasının daha da azaltılması ve takım ucundaki pinin çapının küçük belirlenmesi ile dayanım değerlerinin olumsuz etkilendiği bölgenin daha dar bir alana sığdırılması sağlanabilir. Ayrıca, sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynak edilen 5454 alüminyum alaşımının korozyon etkilerine karşı gösterdiği dayanım değerinin de çok fazla olduğu tespit bulunmuştur, ayrıca klasik diyebileceğimiz kaynaklar ile kaynak yapılması oldukça zor olan 7075 alüminyum alaşımı bu birleştirme kaynağı ile yüksek verimlilikte birleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar oldukça yüksek mekanik özellikler göstermiştir (Kaluç 2007, Çam 2003). Bilinen pek çok alüminyum alaşımı tabii ve suni yaşlandırma ile yapılan çökelme sertleşmesiyle mukavemetlendirilebilmektedir. Kaynak ile birleştirme işlemi yapılırken açığa çıkan ısıya ve bunun sonucu bölgesel olarak iç yapıda değişiklikler olmaktadır. Kaynak esnasında oluşan yüksek ısı ile sıcaklıkların artmasıyla sertlik değerlerinde belirgin oranda bir düşüşe neden olur. Bunun nedeni çökelme sıcaklıklarının yeterince fazla olması ve bu yüzden çökeltilerin çözünmesidir. En az olan sertlik değerleri ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) oluşan ısı işleme yapılabilen ve sertleştirilebilir AA 6082'nin tersine ısı işleme ile sertleştirilemeyen AA 5082'nin sürtünme karıştırmada kaynak hattında sertlik değerleri homojen olarak dağılmıştır. Takribi %6,3 ağırlığında Cu ihtiva eden bakır

çökelti sertleştirilmesi AA 2219 alaşımı, az seviyelerdeki sönümlenme kabiliyeti ve sertliğinden dolayı farklı çeşitlerde roketlerdeki sıvılaştırılmış gazları bir arada tutabilmek için kullanılır (Nandan 2008, Mishra 2005). Genelde alaşımlardaki yüksek mukavemet içeriğindeki çökeltilerden dolayı olmaktadır. Bu yüzden çökeltiyle mukavemetlendirilmiş bu alaşımlardaki sürtünme karıştırma kaynaklarının dayanıksız bir kaynağa sebep olması normal bir durumdur. Takım ucundaki pinin geometrisinin ve sürtünme karıştırma kaynak parametrelerindeki bir değişikliğin merkezi bölgedeki ya da ITAB'daki sertliğin bir miktar artmasına yardımcı olduğu araştırmalar sonucunda bulunmuştur (Nandan 2008, Mishra 2005). Dökme Al-Si alaşımlarında, SKK dikişteki ve termo mekanik olarak etkilenmiş bölgedeki (TMEB) büyük taneleri parçalar. Yapılan pek çok kaynak çekme testleri esnasında kırık esas sac malzemede bulunur, bunun asıl sebebi kötü durumu belirleyen şey kaba tanelerdir. Sürtünme karıştırma kaynağı malzeme içerisindeki üretim sırasında oluşan boşluk vb. bazı döküm hatalarını düzeltir. (Nandan 2008).

### **2.5.2 Magnezyum Alaşımları**

Magnezyum alaşımlarının pek çoğunda üretim yöntemi olarak döküm seçilir. Magnezyum alaşımlarının özgül mukavemet değerleri çok yüksektir. Bu yüzden özellikle hafiflik istenilen parçaların üretiminde malzeme seçiminde ön plana çıkarlar. Hafiflik ve yüksek mukavemette özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde aranan kriterdir. Sıklıkla bu endüstrilerde kullanım alanı bulmuştur. Bu alaşımlar yüksek hızlar için düşük yoğunlukları nedeniyle tercih edilmektedirler. Bu alaşımlarda ki birleştirmelerde sürtünme karıştırma kaynağının öne çıkmasındaki en büyük sebebi kaynak işlemi sırasında geleneksel yöntemlerinde aksine herhangi bir zehirli gazın açığa çıkmamasıdır. Başka bir sebep ise kaynak esnasında buharlaşma nedeniyle yok olan madde kayıplarının minimum olması ve döküm ile üretilen magnezyum alaşımlarının döküm sırasındaki boşluklarının sürtünme karıştırma kaynağı sırasında neredeyse oluşmamasıdır (Nandan 2008, Mishra 2005).

Magnezyum alaşımlarından arzu edilen mukavemet değerleri SKK sonrası da neredeyse tamamen korunabilmektedir. SKK yöntemi ile kaynak edilen bir magnezyum alaşımında (AZ31, Mg-3Al-1Zn) ciddi seviyede çökelti sertleşmesi

tespit edilmez ve kaynak ile yapılan birleşme bölgesindeki Vickers Sertlik Değeri (HV0,1) hareketleri esas materyalin sertliğinden daha az 45 ila 65 HV0,1 değerleri içinde olmak zorundadır (Nandan 2008, Mishra 2005).

Sürtünme karıştırma kaynağı yapılan magnezyum alaşımları üzerine yapılan çalışmalarda pek çok dikkat çekici bilgiler elde edilmiştir. Bu bulgulardan birisi sürtünme karıştırma kaynağı yapılan magnezyum alaşımlarının birleştirme bölgelerindeki kalitesi kaynak parametrelerinden olan takım dönme hızı ve takım ilerleme hızına son derece hassas bir şekilde bağlıdır. Nakata, AZ91D sac malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı için en optimum parametre değerlerinin kısıtlı bir aralıkta, yavaş ilerleme ve çok hızlı takım dönme hızlarıyla olabileceğini bulmuşlardır (Nandan 2008, Mishra 2005). Bir başka bulgu ise, magnezyum alaşımlarının birleştirilmesinde kullanılan sürtünme karıştırma kaynak yönteminin yapılışında herhangi bir katı faz dışında fazın bulunmaması istense de alaşımın çeşidine göre bazı durumlarda katı faz dışında sıvı faz bulunumu görülebilmektedir. Bu duruma misal gösterilecek olursa Nagasawa., AZ31'in sürtünme karıştırma kaynağında karıştırma alanında maksimum sıcaklığın 460°C'ye çıktığını bildirmişlerdir (Nandan 2008). Bu durumla aynı olarak Lee, karıştırma alanının mikro yapı özelliklerini temel alarak sürtünme karıştırma kaynağı sırasında maksimum sıcaklığın 370°C ile 500°C aralığında tespit edildiği raporlamışlardır (Nandan 2008, Mishra 2005). Diğer bir bulguda, magnezyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağında da ekseriyetle alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağında olduğu gibi benzer olmayan 3 mikro yapı alanının oluşturmakta olduğu, aslında karıştırma alanının, TMEB ve ITAB olarak bulunmaktadır. Başka bir bulgu, magnezyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağında genellikle kaynak karıştırma alanında yeniden kristalleşmiş küçük tane gelişimleri raporlanmaktadır. Nakata ve ark., ve Park ve ark., takım devri dönme hızının yükselmesi ve takım ilerleme hızının düşmesi ile birlikte ısı miktarının yükselmesinden sebebiyetle kaynak dikisinde yeniden oluşan tanelerde değişimler olduğu ve değişimlerin bu tane ölçülerinde ciddi boyutlarda büyümelere sebep olduğu bildirilmiştir (Nandan 2008, Mishra 2005). Diğer bulguda ise, karıştırma alanındaki iç yapı değişmesi sebebiyle karıştırma alanının sertliği çoğu zaman gerçek materyalin sertliğinden daha fazla olmaktadır. İç yapıdaki bu farklılığın sertlikte meydana getirdiği durum Hall Petch bağıntısıyla benzer şekilde olduğu raporlanmıştır. Bu durumun açıklaması ise iç



yapıdaki küçülen tane yapılarının oluşumu ile birlikte sertlik değerleri yükselmektedir. Son bulgu diyebileceğimiz, AZ31, B-H24 ve AZ61 gibi dövme ile üretilen magnezyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynak yönteminden sonra gerçekleştirilen çekme mukavemetlerinde belirgin azalma bulunurken AZ91 gibi dökme ile üretilen magnezyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynak işleminden sonra gerçekleştirilen çekme mukavemetlerinde bir yükselme raporlanmaktadır (Nandan 2008, Mishra 2005).

### 2.5.3 Bakır Alaşımları

Bakır ve alaşımları geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle kaynağı oldukça zordur ve çeliğe kıyasla daha yüksek ısı iletim katsayısına sahiptirler. Kaynak yapılacak malzemenin her yönüne doğru ısı yayılımı çok fazla olduğu için sürtünme karıştırma kaynağında ki ısı miktarı da diğer bilinen sürtünme karıştırma kaynağına göre oldukça yüksektir. Teknolojinin gelişimi ile birlikte nükleer malzemelerden oluşan atık maddelerin sızıntılarını önlemek için kullanılan 50 mm et kalınlığındaki bakır blokların birleştirilmesinde sürtünme karıştırma kaynağı etkin bir biçimde kullanılmıştır (Nandan 2008, Mishra 2005).

SKK yapılan bakır alaşımları diğer malzemelerde ki durumlara benzer olarak geleneksel diyebileceğimiz benzerlikteki kaynak alanlarına sahiptir. Bu bölgeler karıştırma bölgesi, termo mekanik olarak etkilenmiş bölge, ısı tesiri altındaki bölge ve esas malzemedir. Karıştırma alanı ince denilebilecek boyutlarda tanelerden meydana gelmektedir ve bu bölgenin sertlik değeri esas materyalin tane inceliğine veya büyüklüğüne göre değişmekle birlikte esas malzemedan az veya fazla olabilmektedir. Bu alan elde edilen bulgulardan bazı önemli deneyimler ve sonuçları bulunmuştur. Bunların en başında, sürtünme karıştırma yapılacak takımın malzemesi ve bu takımın uç geometrisinin ince olmayan bakır plakalara sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin yapılabilirliği durumuna ciddi bir verisi elde edilmiştir. Andersson ve ark., 3 mm'lik bakır sac malzemeyi kaynaklamak amacıyla yüksek sıcaklık dayanımlı takım çeliğinden imalatı gerçekleştirilmiş takım kullanmışlardır (Mishra 2005). Ne yazık ki bu kullanılan malzeme 540°C üzerinde istenilen sertlik değerini kaybederek verilen kaynak işlemini doğru ve optimum bir şekilde yapamadığı için 10 mm kalınlığındaki

plakaların sürtünme karıştırma kaynağı için uygun değildir. 10-25 mm boyutlarındaki bakır alaşım plakaların sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin uygulanması için tungsten alaşımlı çok yüksek dayanımlı ve ayrıntılı denilebilecek geometrik yapılara sahip takımlar çok daha yüksek değerde bir sonuç vermektedir. Diğer bulgu ise, kaynak yapabilmek için oluşturulan özelliklerin bakırın sürtünme karıştırma kaynak yapılabilirliğinde son derece önemli olduğudur. Son bulgu ise sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirilen bakır alaşımının çekme mukavemeti esas malzemeyle karşılaştırılabilir. Sürtünme karıştırma kaynağıyla kaynaklanan bakır alaşımlı malzemelerin çekme dayanımı takım ilerleme hızının yüksek olması ile veya takım dönme hızının düşük olması ile ve takım omuz çapının azalmasıyla paralel olarak yükselmektedir (Nandan 2008, Mishra 2005).

#### **2.5.4 Titanyum Alaşımları**

Günümüzde kullanımda en çok olan ve bilinen titanyum alaşımı Ti-6Al-4V'dır. Bu yaygın kullanım bulmuş alaşım hegzogonal paket  $\alpha$  ve hacim merkezli kübik  $\beta$  fazlarını bir arada tutan bir mikro yapıya barındırır. Bu karışımın mikro yapısı çok fazla ısı girdilerinde bile stabil durumdadır. Bu alaşım o kadar fazla yaygındır ki üretilen titanyumların neredeyse yarısına denktir. Elbette yaygın kullanımda ki en büyük etken olarak çok yüksek mukavemet değerlerine sahip olması en başta gelmektedir (1100MPa) (Nandan 2008, Mishra 2005).

Katı bir biçimde uygulandığı için ve süreç boyunca sınılaşma neredeyse olmadığı için katı hal olarak adlandırabileceğimiz sürtünme karıştırma kaynak yönteminin sonrasında ısıl işlem gereklilik durumunun olmaması durumu ihtimali söz konusudur. Fakat titanyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile elde edilen bulguları çok az miktardadır ve bu durum kısıt getirmektedir. Juhas ve ark., ve Lienert ve ark., Ti-6Al-4V sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirme yönteminin pratiği ile iç yapı ve parametreleri ile ilgili birtakım çalışmalar yapmışlardır (Nandan 2008, Mishra 2005). Yapılan çalışma sonucunda bir dizi bulgular elde edilmiştir. İlk bulgu, Ti-6Al-4V sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle kusursuz kaynaklar yapılmıştır. Diğer, sıklıkla alüminyum alaşımlarında bildirilen sarı bir termo mekanik olarak etkilenmiş bölge olmaması durumu vardır. Ramirez ve Juha'a göre

termo mekanik olarak etkilenmiş bölge 30  $\mu\text{m}$ 'lik kısıtla bir alan olarak bildirilmiştir (Nandan 2008, Mishra 2005). Üçüncüsü, omuz üzerindeki 3.2 mm'lik takımın dış çerçevesiyle bağlantısı bulunan termo kupllar maksimum 990°C olarak sıcaklığı ölçümlenmişlerdir. Bunun sonucunda kaynak alanındaki sertliğin 1000°C den yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bu değer  $\beta$ ' nin dönüşüm değeri diyebileceğimiz 995°C'den fazladır. Dördüncüsü, titanyum alaşımındaki ayrı biçimli faz değişimi alüminyum alaşımlarına oranla kompleks kaynak iç mikro yapısına sahip olması süregelen soğuma prosesi ve biçimsizleşme ile bağlantılıdır. Bir diğeri Ti-6Al-4V sürtünme karıştırma kaynağında ısı tesiri altındaki bölgede sertlik azalımı bildirilmiştir. Sertlik azalımı sıklıkla titanyum alaşımlarının ergitme kaynağındaki ısı tesiri altındaki bölgede bulunmaktadır. Bu alan önceki  $\beta$  tanelerinin alansal boyutlanmasıyla açığa vurulan yumuşama görülür. Bir başka bulguda, takımındaki deformasyonun çok fazla gerçekleştiği an ilk batırılma sırasında açığa çıkan ani darbe ve deformasyonla oluşmaktadır. Bu neticeler titanyum alaşımında dikkatle belirlenmesi durumu söz konusu olan temel iki özelliğin bilinmesi gerekliliğini vurgulamıştır. Bu, ideal iç mikro yapı için  $\beta/\alpha$  titanyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı için istenilen ve gerekli duyulan soğuma süresi ve sıcaklık durumunun belirli koşullarda tutulmasıdır. Diğeri, ideal takım pini geometrisini belirlemek ve sürtünme karıştırma kaynak işlemi için belirlenecek takım malzemesinin çok yüksek ergime sıcaklıklarına mukavemetli yapıda elde edilmesidir (Nandan 2008, Mishra 2005).

### 2.5.5 Çelikler

Sürtünme karıştırma kaynağı son yıllarda hızla gelişen bir kaynak türüdür. Özellikle alüminyum ve alaşımlarında son derece hızlı bir gelişim gözlenmiştir. Fakat bu gelişim süreci bazı nedenlerden dolayı çeliklerde bu denli hızlı olmamıştır. Bu nedenlerde ilki ve en dikkat çeken elbette ki çeliklerin yüksek mukavemetine karşın takım malzemesinin bu yüksek mukavemetli malzemeleri birleştirmesindeki yaşadığı zorlu şartlara dayanabilme kabiliyetidir. İkinci bir neden ise halihazırda çeliklerin kaynağında yeterli denilebilecek düzeyde geleneksel kaynak yöntemleri vardır. Üçüncüsü, sürtünme karıştırma kaynağı sonucu ortaya çıkan kaynakların ve kaynak bölgelerinde oluşan faz dönüşümü sonuçları yeterli çeşitlilikte ve ayrıntıda deneysel olarak çalışılmamış ve raporlanmamıştır. Son neden olarak ise diğer malzeme

alaşımına kıyasla çeliklerin türleri çok daha fazladır. Çok fazla türü olduğundan her bir çelik türü için yapılacak olan kaynağın optimizasyonları ve deneysel çalışmaları eksik kalmıştır. Bu çalışmaların yapılmasına ihtiyaç vardır (Nandan 2008, Mishra 2005).

Çeliklerin mukavemet değerleri olarak oldukça yüksektirler. Bu oldukça fazla sert olmalarını sağlar. Aynı zamanda çeliklerin sıcaklık dayanımları da çok yüksektir. Bu yüzden sürtünme karıştırma kaynağı için kullanılacak takım malzemesinin en az 1000°C ve daha fazla sıcaklarda yüksek aşınma direncine ve yüksek darbe emme kabiliyeti bulundurması dikkate alınmalıdır. Bu sebeple bu malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımın seçilen malzemesi olarak tungsten alaşımları (WC), molibden alaşımları ve çok kristalli kübik bor nitrür (PCBN) gibi birçok deneysel çalışma ile raporlanmıştır (Nandan 2008, Mishra 2005).

Sürtünme karıştırma kaynağı için ilk kullanımlarda daha çok gemi, çekici, demiryolu vagonları vb. materyallerin üretiminde bir uygulama alanı bulacağı düşünülmüştür. Çelikler için sürtünme karıştırma kaynağı tatbikleri birkaç aykırılık haricinde yalnızca ana mekanik özellikleri optimize edilmiştir. Yapılan pek çok çalışmada sade eğme, çekme ve sertlik deneyleri bulunmaktadır (Nandan 2008, Mishra 2005).

Bazı sürtünme karıştırma kaynağı deneysel raporlamalar az karbonlu çelikler, %12 krom alaşımlı çelikler, yumuşak çelikler AISI 1010, ostenitik paslanmaz çeliklerden 304L ve 316L, süper ostenitik paslanmaz çelikler AL6XV, Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı Çelikler (YMDA) C-Mn çelikleri üzerine yapılmıştır. Deneylerde belirlenen dikkat edilmesi gereken sonuçları şöyledir.

1. Sac malzemelerin sürtünme karıştırma kaynak alanını ve takımını korozyondan muhafaza etmek için koruyucu gaz olarak argon gazı ihtiva edilmiştir.

2. Thomas ve ark., sürtünme karıştırma kaynağı takımındaki omuz sıcaklığının 1000°C'den fazla miktarda ölçüldüğünü ve sürtünme karıştırma kaynağı takımının diğer yüzünden ölçülen kaynağın sıcaklığını yaklaşık olarak 900°C olduğunu bildirmişlerdir. Aynı durumda Lienert ve ark., kızılötesi kamera ve termo kupllar

yardımıyla sürtünme karıştırma kaynağı takımı omuzundan maksimum sıcaklığın 1000°C den fazla olduğunu raporlamışlardır.

3. 3,2 ile 6,4 mm kalınlığındaki birçok çelik sac malzemeler bir seferde ideal bir şekilde optimum olarak kaynak edilebilirken 6,4 mm kalınlığındaki 304L paslanmaz çelik ve 6,4 mm'den büyük çelik sac malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı sıklıkla hem iki taraflı hem de birden fazla seferde kaynaklanmıştır. Bu duruma sebep olan en büyük neden alüminyuma göre çelikler malzemelerde takımın tesir gücü oldukça küçüktür.

4. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılırken sıcaklık döngüsü sırasında dönüşüm sebebiyle çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağında çoğunluk alüminyumların sürtünme karıştırma kaynağında raporlanan geleneksel termo mekanik olarak etkilenmiş bölge belirsizdir.

5. Sürtünme karıştırma kaynağı esnasında çeliklerin mikro yapı ilerlemesi alüminyum alaşımlarına göre kompleks durumdadır. Sebebi ise dönüşümün olması, yeniden kristalleşme, 1000°C ve daha fazla sıcaklıklarda iç yapıda gözlemlenen tane irileşmesi durumundan oluşmaktadır (Nandan 2008, Mishra 2005).

### **2.5.5.1 Yüksek Mukavemetli Otomotiv Çelikleri**

Yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı son yıllarda giderek artmıştır. Özellikle hafiflik ve yüksek mukavemetin önemli olduğu otomotiv endüstrisinde geleneksel çeliklerin yerine son derece hızlı bir şekilde geçiş durumu vardır. Geleneksel yüksek mukavemetli çelikler esas olarak karbon mangan çeliği (C-Mn), yüksek mukavemetli (HSS-IF) çelik ve yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çelik içerir. Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler (GYDÇ) 500 Mpa ila 1500 Mpa arasında çekme dayanımı değerleri göstermektedir ve hafif ve artan güvenliği nedeniyle otomotiv endüstrisinde çok önemli bir rol oynamaktadırlar. (Hilditch 2015). Bu çeliklerinin en bilenen çeşitleri, ikizlenme yoluyla plastisite kazanan çelikler (TWIP), transformasyona bağlı plastisite çelikleri (TRIP), martenzitik çelikler (MS), iki fazlı çelikler (DP) ve kompleks fazlı çeliklerden (CP) oluşmaktadır (Mallick 2012). Elbette yüksek dayanım değerleri ve hafiflik kullanım alanı bulmada çok önemlidir

ancak otomotiv sektöründe bir malzemenin kullanılabilmesi için onun son derece iyi şekillenebilirliğe sahip olması gerekmektedir. Çift fazlı çelikler yani hem ferrit hem de martenzit iç yapılarından meydana gelen (Dual Phase, DP) çelikler çok iyi dayanım ve yüksek şekil alma kabiliyetleri sebebiyle gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler içerisinde en çok kullanım alanı bulanlarıdır (Lesch 2017). Az miktarda biçimsizleşme ile çabuk pekleşme beklenen bu malzemeler az miktarda akma dayanımına ve fazla miktarda çekme mukavemetlerine sahiptirler. Yüksek mukavemetli çeliklerin gösterdikleri hususiyetleri nedeniyle şekil alma kabiliyetleri ve darbe emme enerjileri genel olarak diğer çeliklere kıyasla son derece daha iyidir (Rashid 1981). Bu yüzden bu çelikler sıklıkla aşırı bir şekil değişiminin istendiği ve buna bağlı olarak seri üretimlerinde yapıldığı imalat yöntemlerinde kullanım alanı bulmaktadır.

Sektörün yaptığı büyük çaptaki işlemlerde çeşitli dayanım ve şekillenebilirlik ihtiyaçlarını karşılamak istemiyle iki fazdan meydana gelen DP çelikler imal edilmektedir. Çeşitli ihtiyaçlara göre üretilen farklı mukavemet hususiyetlerine sahip iki fazdan meydana gelen DP çelikler başta karbon olmak üzere mangan, krom, molibden, vanadyum ve nikel gibi alaşım elementlerini barındıran çeliğin stabil bir ısıl işlem işlemine tabi tutulması sayesinde imal edilmektedirler (Rashid 1981). DP çeliklerde istenilen ve beklenen yüksek mekanik dayanım değerleri, yapısında bulunan martenzit miktarını ancak yükselterek imal edilebilirler. DP çeliklerdeki fazla mukavemeti bize veren martenzit miktarı, alaşım element miktarına ve yapılacak ısıl işlemin parametrelerine bağlıdır. Fakat, mukavemette arzu edilen bu yükselme süneklikte elbette ki biraz da olsa azalmaya sebep olur (Rashid 1981).

Çift fazlı çeliklerin kimyasal içeriğini farklılaştırmadan iç mikro yapı ve mukavemet dayanımlarını, termo mekanik kontrollü işlem (TMKİ) (Sarwar 1996, Xiong 2017, Zhao 2018) ve aşırı plastik deformasyon (APD) (Son 2005, Park 2005) teknikleri ile ilerletilebilmektedir. Fakat, termo mekanik kontrollü işlem ile bulunan en küçük tanenin 3-4 µm kadar bulunduğu raporlandığından (Thompson 2001, Li 2015) bu termo mekanik kontrollü işlem çeliklerde tane küçültme ve enerji emme kapasitesini ilerletmek gibi alanlarda kullanılmaktadır (Shen 2017). Aşırı plastik deformasyon yönteminin büyük miktarda tane küçültme yeteneği dikkate alınırsa mukavemet dayanımlarını yükseltmede en değerli bulgulardan olacağı tahmin edilmektedir (Purcek 2008, Azushima 2008, Toth 2014)

Bilinen başlıca aşırı plastik deformasyon çeşitleri; birikimli bağ haddesi (Saito 1999), yüksek basınç altında burma (Edalati (2016), eş kanallı açılmal ekstrüzyon (Valie 2006) ve sürtünme karıştırma işlemidir (SKİ) (Ma 2008). Fazla miktardaki sac gibi malzemelerin alansal olarak etkilenmesi gerektiği durumlarda, ihtiyaca yönelik materyallerin mukavemet değerlerinin artırılmasında sürtünme karıştırma işleminin başka yöntemlere göre bir adım önde olduğu görülebilir. Sürtünme karıştırma işleminin temel pratiğinin ilkesi yakın geçmişte geliştirilmiş katı durum kaynak yöntemlerinden sürtünme karıştırma kaynağına kadar gitmektedir (Mishra 2005). Sürtünme karıştırma işlemi yapılan materyalde mühim miktarda plastik biçimsizlik durumu oluşmakta ve dinamik şekilde yeniden kristalleşmiş küçük taneli dengeli bir mikro yapı görülmektedir (Aktarer 2015). Sürtünme karıştırma işlemi yapıldıktan sonra mikro yapıdaki farklılaşma materyallerin dayanım miktarlarında yüksek düzeyde kazanımlar vermektedir. Bu sebeple sürtünme karıştırma işlemi tamamen farklı bir mikro yapısal değişim tekniği olarak metallerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde önemli ölçüde tesirli bir teknik olarak görülmüştür. Sürtünme karıştırma işlemi ilk yapılmaya başladığı andan günümüze kadar hususiyetle dökme ve dövme alüminyum alaşımlarına, bakır alaşımlarına, magnezyum alaşımlarına, titanyum alaşımlarına ve diğer bunlar gibi benzeri pek çok alaşımlara uygulanmıştır (Weglowski 2018). Sürtünme karıştırma işlemi yapılan bu metallerin dayanım miktarlarının, oksidasyon mukavemetlerinin, aşınma miktarlarının ve döküm boşlukları gibi kusurlarının giderilmesinde gelişmeler sağladığı bilinmektedir (Weglowski 2018). Özellikle, sürtünme karıştırma işlemi uygulanan metallerin mukavemet ve şekillendirilebilirliklerinde ciddi iyileşmeler olduğu birçok deneysel çalışma tarafından rapor edilmiştir (Ma 2006, Karthikeyan 2010, Tsai 2012, El-Rayes 2012). Alüminyum alaşımları ve bu alaşımlara benzer şekilde nispeten nicelik olarak az ergime sıcaklığı olan metallerin sürtünme karıştırma işlemi için yapılan deneylerle derinlemesine oluşturulmuş bir deneysel geçmişin elde edilmesi ve yüksek miktarda literatüre katkısı yapılmıştır. Fakat çelik gibi fazla miktarlarda ergime sıcaklığı olan metal malzemelerin sürtünme karıştırma işleminde takım malzemesinin ve kullanım parametrelerinin meydana getirdiği teknik durumlar alandaki araştırmaların son derece yavaş ilerlemesine neden olmuştur. Yakın geçmişte, yüksek sıcaklığa mukavemetli seramik esaslı malzemeye sahip takımlar kullanıldıkça yöntemin çeliklere tatbik edilmesi ilerlemiştir. Bulunan sonuçlar sürtünme karıştırma işlemi sonrası çeliklerde de tane boyutunun önemli ölçüde küçüldüğünü ve ince taneli bir yapıda mekanik

özelliklerinde son derece gelişmiş olduğunu göstermiştir (Mironov 2008, Chen 2009, Chabok 2010).

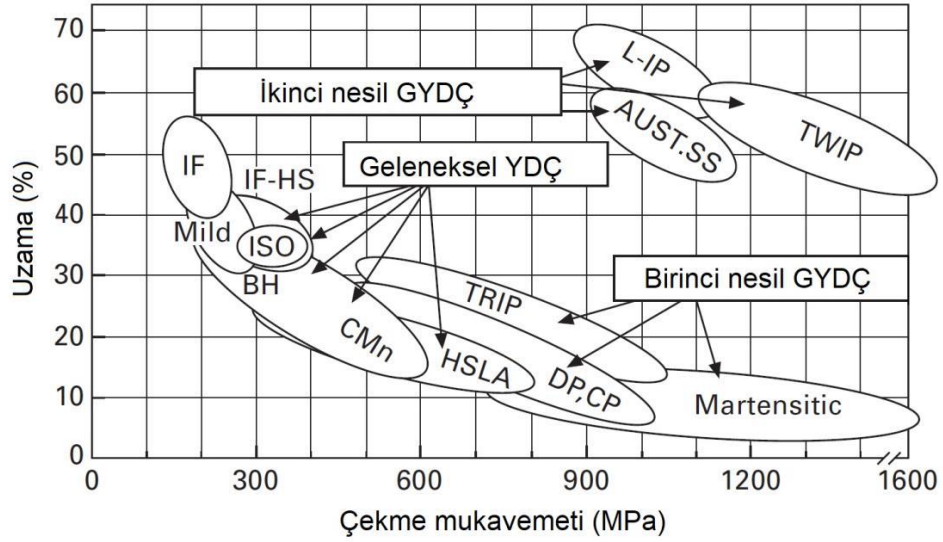
Yüksek mukavemet, iyi süneklik ve son derece yüksek tokluk gibi hususları barındıran malzemelerin intihabı otomotiv sektöründeki kullanımlarda yüksek önem göstermektedir. Farklı türlerde aşırı plastik deformasyon metotlarına bulunan mukavemet miktarlarındaki yükselme ile birlikte materyalin şekillendirilebilirlik durumlarında ciddi miktarda düşmeye sebep olabilmektedir. Aynı zamanda bu işlemlerin imalat ve yapılabilirliği belirli kısıtlamalar nedeniyle zorlaşmaktadır. Fazla miktarda dayanım ve fazla şekillendirilebilirlik arasında son derece ince bir durum vardır. Küçük ve eşit dağılmış iç yapısı olan materyaller ile ancak bu olabilir. Bu sebeple, dayanım ve şekillendirilebilirlik ihtiyacını aynı anda veren küçük taneli malzeme imal edecek üretim yöntemi ihtiyacı vardır. SKİ küçük taneli malzemeler imal etmek ve kullanmak için oldukça verimlidir.

Tüm bu durumlara bakılırsa, otomotiv sektöründe GYDÇ'lerin kimyasal bileşimini değiştirmeden APD ile dayanım değerlerinin yükseltilmesi çok önemlidir. Yapılan deneylere bakıldığında, benzeri malzemeler ile APD ile dayanım değerlerinin artırılmasını hedefleyen deneylerin yetersiz olduğu, otomotiv sektöründe sıkça kullanım alanı bulan DP çelikler için ise derinlemesine ve ayrıntılı bir deneysel ortamın sonuçlarının olmadığı gözlenmiştir.

#### **2.5.5.2 Otomotiv Çelikleri**

Otomotiv sektöründe ihtiyaç duyulan ve en çok kullanımı bulunan sac tipindeki çelikler, yüksek dayanımlı çelikler (YDÇ) ve gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler (GYDÇ) olarak Şekil 2.9'da verildiği şekilde kategorize edilebilir (Mallick 2012).





**Şekil 2.9:** Otomotiv endüstrisinde üretimde en çok kullanılan çeliklerin uzama (%) ve çekme mukavemeti grafiği (MPa) (Mallick 2012).

20. yüzyılın sonlarından itibaren araçların ve yayaların güvenliği ve çevreye olan duyarlılık konusunda yasaların ciddiyetini arttırması ve yaptırımların tek tek başlaması ile birlikte daha yüksek dayanıma sahip daha hafif malzemelerin ihtiyacı belirmiş ve bu bir rekabeti açığa çıkarmıştır. Tüm bunların sonucunda GYDÇ adı verilen yepyeni bir çelik sınıfı diye tabir edebileceğimiz türler geliştirilmiştir. GYDÇ, fazla miktarda dayanım ve süneklik gibi ana karakterleri bir araya getiren “çok fazlı çelikler” dir (Rana 2017). İlk nesil GYDÇ’lerin dayanım değerleri 500 MPa'dan daha fazladır, dual faz (DP) çelikler, transformasyona bağlı plastisite (TRIP) çelikler, kompleks faz (CP) çelikler ve martenzitik (MS) çelikleri kapsamaktadır (Mallick 2012). Çift fazlı (DP) çelikler GYDÇ sınıfına bakıldığında sıklık olarak en fazla olan gruptur.

TRIP çelikleri sınır değer olan uzamaya kadar oldukça belirgin ve çok miktarda pekleşme oranı verir. Bu sebeple otomotiv sektöründe çok önemli olan çarpışma esnasındaki açığa çıkan tokluk isteğine yüksek miktarda cevap verebilirler. İç yapıdaki kalıntı ostenit yaşanan büyük deformasyon sırasında martenzite dönüşür. TRIP çeliklerindeki fazların kompleks birleşimleri, sıkıştırma yapılmanın başlarında ostenitin fazla miktardaki süneklik kabiliyetini, sonra şekillenme kabiliyeti süreci bitiminde martenzitin fazla miktardaki dayanımını verir. Transformasyona bağlı plastisite çeliklerinin çok iyi şekil alma kabiliyeti, fazla miktarda mukavemet değerleri ile bir araya geldiğinde enerji emme kabiliyetini son derece arttırır (Mallick 2012).

Kompleks fazlılar (CP) küçük ferrit mikro yapısı ve çok miktarda hacimsel oranda dayanıklı yapılardan meydana gelirler. CP'lerdeki dayanım yükselmesi küçük çökelti sebebiyle olur. Kompleks fazlı çelikler kimyasal bileşimlerine bakıldığında DP ve TRIP malzemeler ile örtüşmektedir. CP'ler fazla miktarda şekil verilebilirlik ve fazla enerji emme kabiliyeti ile bilinirler. Tüm bunlar sayesinde otomotiv sektöründe darbe emme yeteneği istenilen yerlerde kullanılabilir (Mallick 2012).

Martenzitik çelikler (MS), mikro yapıda sertleştirilebilirliğe etki eden, silisyum, nikel, mangan, vanadyum, krom, molibden ve bor vb. nedeniyle fazla miktarda martenzit içerir. Sıcaklık ile yapılan şekillendirme veya materyalin ısı işlemi esnasında içeriğinde bulunan ostenit, su verme ve şekillendirme ile birlikte ısı işlem esnasında martenzite dönüşmektedir. MS çelikler, 1400 MPa değerine kadar çekme mukavemetlerinde iyi bir şekil alma kabiliyeti verir (Mallick 2012).

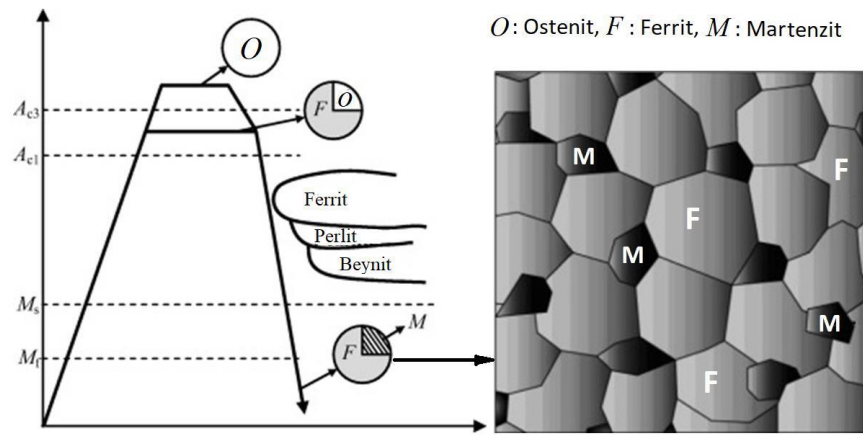
Yüksek mekanik dayanım değerlerine ve yüksek süneklik veren ikinci nesil gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler adı altında başka bir çelik grubu daha vardır. Bu gruptaki çeliklerden ikizlenme yoluyla plastisite kazanan çelikleri (TWIP) olarak adlandıracağız. TWIP, mikro yapısı 20°C sıcaklıkta tam ostenitik yapması için ortam oluşturan yaklaşık %18 civarında Mn bulundurmaktadır. Soğuk bir biçimde şekil verilmesi esnasında, ikizlenme sayesinde plastisite kazanımı, ostenit parçacıklarının küçük taneler meydana getirmesine ve bu sayede küçük tanelerle birlikte mukavemet artışı olmaktadır. (Mallick 2012).

Ostenitik paslanmaz çelikleri sertleştirilebilmek için herhangi bir ısı işlem yapılamaz ancak sertleşme istenmesi durumunda soğuk şekillendirme yöntemleri kullanılmaktadır. Deformasyon kaynaklı ostenit-martenzit dönüşümü ile yüksek dayanımlar elde edilebilmektedir (Mallick 2012).

## **2.6 Çift Fazlı Çelikler**

Çift fazlı çelikler 1960'lar da geliştirilmiş ve ilk nesil GYDÇ sınıfında yer almışlardır. Otomotiv endüstrisinin daha hafif ve daha dayanıklı araçlar üretme istekleri üzerine bulunmuşlardır. İsimlendirmedeki çift faz ifadesi ferrit-martenzit iç yapısını tanımlamak için kullanılmıştır. Fakat bu çelikler sadece ferrit-martenzit iç

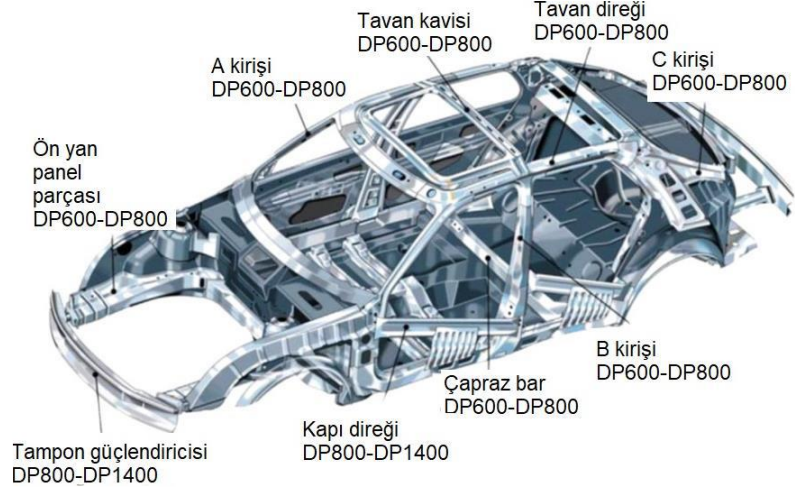
yapılarından meydana gelmez ve çift fazlı çelikler eser miktarda perlit, beynit ve kalıntı ostenit bulundurabilirler (Rashid 1981, Rana 2017). Ferritik ve perlitik bir mikro yapı bulunduran çelik malzeme ferrit + ostenit ( $\alpha + \gamma$ ) çift faz alanın bölge tavlamasından sonra ostenitin martenzite dönüşebileceği soğuma miktarında bir anda soğuma ile ferritik-martenzitik çift fazlı çelik oluşturulur. Çift fazlı çeliklerinin, ostenit ve ferrit + ostenit alanlarından bilinçli ve istikrarlı soğuma ile imal edilmesinin gösterimi diyagram ile Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Burada  $A_{c1}$  ısıtma esnasında ostenitleşmenin başladığı başlama,  $A_{c3}$  ostenitleme bitiş,  $M_s$  martenzit dönüşüm başlangıcı ve  $M_f$  bitiş sıcaklıklarıdır (Rashid 1981, Rana 2017). Böyle bir işlem ile elde edilen sonuç yaklaşık %20'lik sapma ile 70-90 aralığında ferrit ve yaklaşık %15-30 aralık değerinde taneler arasındaki sınırlarda rastgele olan martenzit fazı elde edilmektedir.



**Şekil 2.10:** DP çelik malzemenin ısıtma işlemleri sırasında durumu ve mikro yapısı (Zhao 2018, Kuziak 2008).

DP çeliklerinin dayanım ve şekil alma kabiliyetlerine gerekli katkıyı veren ferrit ve mukavemet yükselmesini sağlayan martenzit durumunun verdiği karışık mikro yapı ile bilinmektedir. Optimum miktarlardaki martenzit ve ferrit fazlarına sahip DP çeliği çok iyi dayanım hususlarını içerir (Rashid 1981, Rana 2017). Bu yüksek dayanım değerlerinin ve yüksek şekil alma kabiliyetlerinin optimum oranını bulması sebebiyle çift fazlı çelikler otomotivde pek çok malzemedeki kullanılmaktadır (Rashid 1981, Rana 2017). Mukavemet değerlerindeki artış sıklıkla çelik yapısında bulunan karbon miktarını ayarlayarak yapılmaktadır. (Rashid 1981, Rana 2017). Genellikle, çift fazlı çeliklerdeki mukavemet değerleri kontrollü termo-mekanik ısıtma işlem

sayesinde arttırabilmektedir (Zhao 2018). Şekil 2.11 otomotiv imalatında çift fazlı çeliklerinin kullanım alanlarını ve kullanılan çelik türlerini göstermektedir.



Şekil 2.11: SAAB için çeşitli çift fazlı çelik sınıflarından imal edilen otomobil parçaları (Fonstein 2017).

## 2.7 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Tekniği ile Birleştirmenin Avantajları

- Geniş ölçekli levhalara uygulanabilir.
- Homojen ve ince taneli iç yapı oluşturur.
- Kaynak bölgesinde iç yapıda kararlılık.
- Otomasyon sistemlerine uygundur.
- Kaynak bölgelerinde yüksek mukavemet.
- Kaynak yapılan malzeme başka bir işleme gerek duymadan kullanılabilir.
- Kaynak işlemi sırasında çevreye zararlı herhangi bir koruyucu gaz ya da başka bir donanıma ihtiyaç duymaz.
- Kaynak işlemi için harcanan enerji diğer kaynak yöntemlerine göre daha azdır.

## 2.8 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Tekniği ile Birleştirmenin Dezavantajları

- Diğer kaynak yöntemlerinden farklı olarak takım ucunun kaynak bölgesi boyunca sabit aşınmaması nedeniyle kaynağın başlangıç noktası ile kaynak yönü boyunca kaynak dolgusunun homojen olmaması en ciddi problemlerden birisidir.
- Özellikle sert malzemelerin kaynağında takım ucu ciddi derecede aşınmaktadır. Takım uçlarındaki açılan geometrinin başlangıçtaki halinde olmaması kaynağın farklı sonuçlar vermesine hatta kaynak yapılamamasına yol açar. Örneğin üçgen pinli bir uç kullanımı sırasında kaynak başlangıcındaki geometri korunurken belirli bir kaynak uygulaması yapıldıktan sonra uç geometrisinin yavaş yavaş küçülmesi ve başlangıçtaki dayanım değerlerinden farklı kaynak sonuçlarının elde edilmesine sebep olur.
- SKK kaynağında gerekli baskı kuvveti kaynak yapılan bölgenin ısı tesiriyle birlikte yumuşaması ile değişebilmektedir. Baskı kuvveti sabit olmadığında ise bölgesel olarak kaynak problemleri yaşanabilmektedir Baskı kuvvetini sabit tutabilmek için hidrolik sistemler kullanılmaktadır (Aktarer 2019).
- SKK uygulaması yapılacak malzemelerin kaynaktaki ilerleme işlemine başlanabilmesi için sürtünme sırasında açığa çıkan sıcaklığın ölçülmesi gerekmektedir. Bu durum kaynak işlemi için ekstra bir araca ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada her bir deney parametresi için en az üç adet malzeme çifti kaynaklanmıştır. Deneyler esnasındaki işlem süreci aşağıda sırasıyla verilmiştir;

- Kaynaklanacak malzemelerin kaynak makinesinde kullanımı için uygun ölçüde kesilmesi.
- Kaynak yapılacak çelik levhaların kaynak öncesi yüzeylerinde birleşme bölgesine olumsuz etki edecek herhangi bir malzeme kalmayacak şekilde mekanik olarak temizlenmesi.
- Kaynak yapılacak çelik levhalara takım pininin kırılmadan girmesi için mekanik olarak yarım halkalar açılması.
- Kaynak makinesinde çelik levhaların sürtünme karıştırma kaynağı esnasında sabitlenmesi için düzenek kurulması.
- Çelik tablaların alt bölümlerine kaynak esnasındaki sıcaklıkların K tipi termokupullar ile ölçülebilmesi için termokupulların yerleştirilmesi.
- İnfrared lazer sıcaklık ölçme cihazının kaynak bölgesini görecektir şekilde tripod ile sabitlenmesi.
- Kaynaklanacak çelik levhaların sürtünme karıştırma kaynak makinesi üzerine eksen kaçıklıkları olmayacak şekilde sabitlenmesi.
- Takım baskı kuvvetinin sabit kalması için hidrolik sistemin aktif edilmesi.
- Her iki ısı ölçer cihazın aktif edilmesi.
- Belirlenen kaynak parametrelerine göre kaynak makinesinin çalıştırılması, sabit sıcaklık ve sabit takım baskı kuvveti altında kaynak işleminin yapılması.
- Kaynaklanan çelik malzemelerin üzerinden varsa artık kaynakların temizlenmesi.
- Su jeti ile kaynakla birleştirilmiş malzemenin üzerinden çekme ve sertlik ölçme işlemleri için numunelerin çıkarılması.
- Çekme deneyi, Sertlik ölçme, Makro yapı ve Mikro yapı.

### 3.1 Sürünme Karıştırma Kaynağı Yapılan Malzeme ve Özellikleri

Çalışmada sürtünme karıştırma kaynak işlemi için DP1000 çift fazlı çelik kullanılmıştır.

Sürtünme karıştırma kaynağı yapılacak malzemenin kimyasal ve mekanik dayanımları sırasıyla Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de gösterilmiştir ayrıca ürünlerin temin edildiği firmadan DP1000 çeliğine ait sertifikada Şekil 3.1’de bulunmaktadır.


**Tablo 3.1:** DP1000 çelik malzemesinin kimyasal bileşimi (SSAB)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Al
0,14	0,19	1,52	<0,01	<0,01	0,02	<0,08	0,07	0,04

**Tablo 3.2:** DP1000 çelik malzemesinin mekanik özellikleri (SSAB)

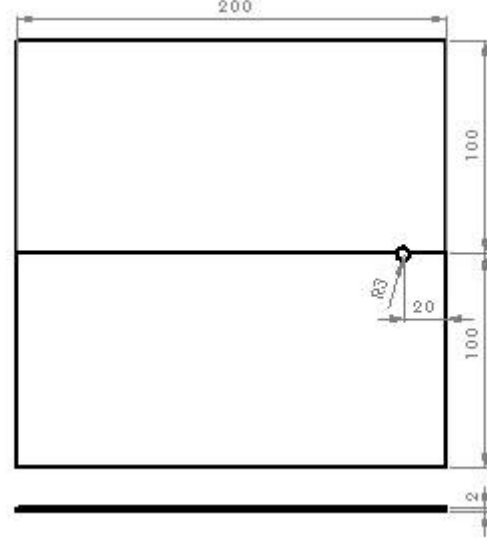
Akma Sınırı Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>	Çekme Dayanımı N/mm <sup>2</sup>	% Uzama	Elastisite Modülü kN/mm <sup>2</sup>
700-950	950-1100	11	200

**SSAB** Page 1 (1)

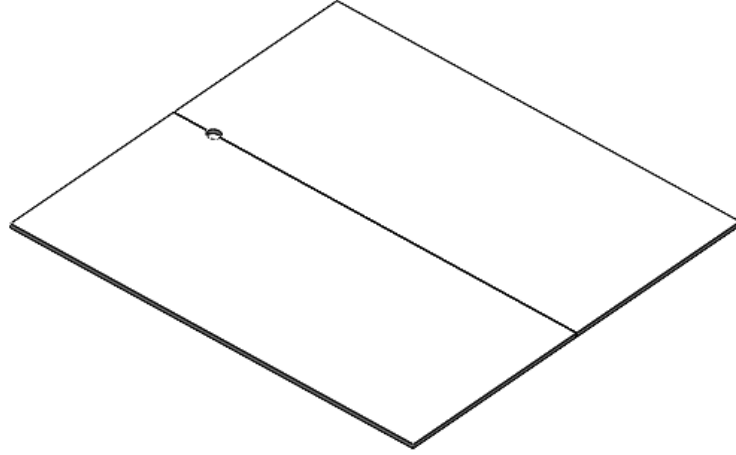
SSAB EMEA AB, SE-781 84 BÖRLÄNGE, Sweden A01																	
Inspection certificate EN 10 204 - 3.1	A02	Issuing department Quality inspection	A05	Purchaser order no.	A07	Our order no. 222925-2	A08	Invoice no. 3143121	A19	Certificate no and date 18683579 2020-03-23	A03						
Purchaser A11 15841 A-TEKSMUH TEKSTIL INS. TUR. MAD PAZ. İM. TAAN. İC VE OVA MAH. 44346 SK. MEHMET BASTANAR ORTA ÖLÇEKLI SAN. SİT. NO 2/2 TR-01000 ADANA TÜRKİYE		Product Cold rolled coils B01			Marking Manufacturer, MATERIAL ID B08			Customer marks B15									
Quantity 1		Dimensions [mm] T2 W 1200 L 0			Weight [kg] 7090		Deliv. Cond.		Internal code		B16						
Consignee A-TEKSMUH TEKSTIL INS. TUR. MAD. PAZ. İM. TAAN. İC VE OVA MAH. 44346 SK. MEHMET BASTANAR ORTA ÖLÇEKLI SAN. SİT. NO 2/2		A06			Standard/notes SSAB Steelgrade Stren 700 CR (DP1000)		B02										
MATERIAL ID 61-9564-CC5935											B07						
Chemical composition										C71-Cp2	Carbon equivalents C85-C86						
Heat no 61-9564	C 143	Si 19	Mn 152	P 013	S 001	Cr 08	Ni 07	Mo 03	V 01	Ti 00	Cu 06	Al 044	Nb 015	B 0002	N 003	Ceqv 43	Ceqv = C + Mn/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5
Test type	C04	Millicode C05	Specimen position C06	Dirrec- tion C07	Treat- ment C08	Specimen type C09	Temp [degr C] C10	Test results			C11	C12	C13				
Tensile test	FNW302	Top end	Longitudinal	Delivery condition	Rectangular 250x25						RP0.2 [MPa] 798	Rm [MPa] 1076	AS0 [%] 11,0				
Production time: 2020-03-12																	
This certificate is produced with EDP and valid without signature					It is hereby certified that the material described above complies with the requirements of the order.					A22		A04					
Material Testing / H. Lew / M. Modig Eriksson / V. Ekelund / M. Staple												 www.strenx.com					

**Şekil 3.1:** DP1000 çift fazlı çeliğine ait sertifika

Kaynak yapılan malzemelerin boyutları ve SKK sonucu oluşan deney birleşmeler, su jeti ile kesim sonucu ortaya çıkacak çekme deneyi için numuneler, iç yapı ve mikro sertlik numuneleri çizilerek Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

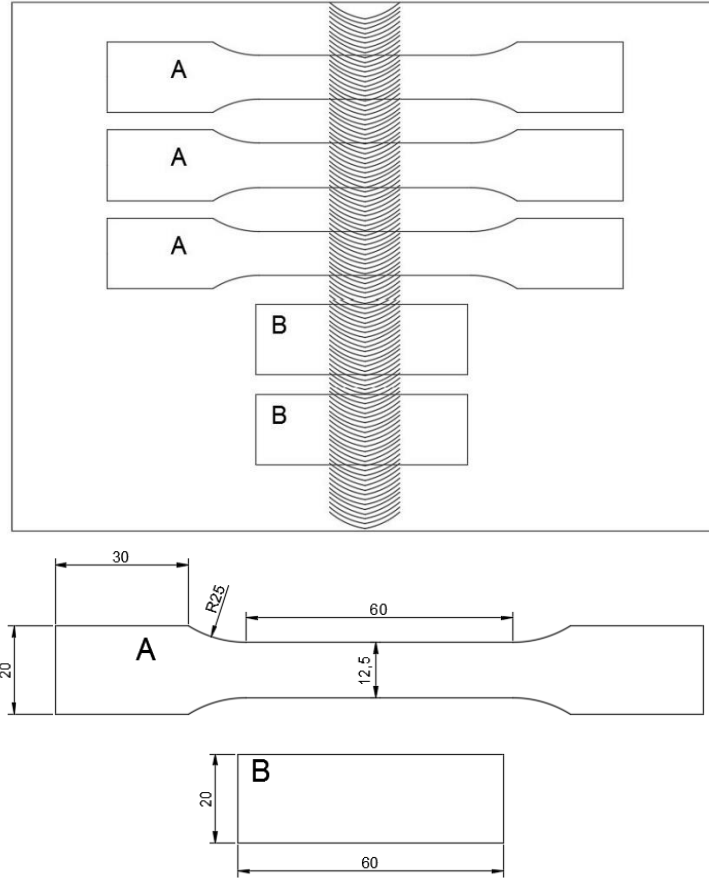


Şekil 3.2: Kaynak levhaları birleştirme numuneleri ve ölçüleri



Şekil 3.3: Kaynak levhaları birleştirme numunesinin üç boyutlu modellemesi





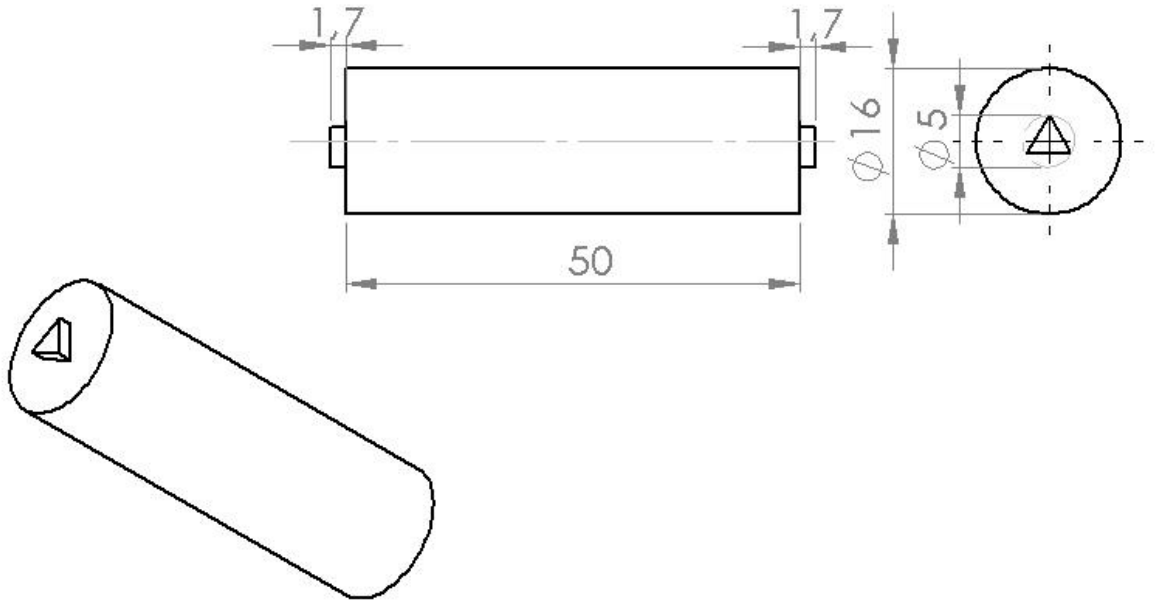
- A: Çekme Numunesi  
B: Mikroyapı Numunesi

Şekil 3.4 Çekme deney numuneleri ASTM-E8 standardında

Mikro yapı numuneleri, standart metalografik numune hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Numune 320-400-600-800-1000-1200 zımparaları ile zımpara işlemine tabi tutulmuş ve ardından parlatma yapılmıştır. Bu numune daha sonra %5'lik nital çözeltisi içinde 20 s süreyle dağlanmış ve mikro yapı incelemesi için hazır hale getirilmiştir.

### 3.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapan Takım

Takım malzemelerin pek çok çeşidi vardır. Bu çalışma kapsamında üçgen pin geometrisine sahip WC takım kullanılmıştır. Kullanılan takımın teknik çizim ve görseli Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Sürtünme karıştırma kaynağı yapan takımın teknik çizimi



Şekil 3.6: Sürtünme karıştırma kaynağı yapan çift tarafi üçgen pin olarak açılmış takımlar

### 3.3 Levha Delik Delme Ekipmanı

Bu tez kapsamındaki deneyler için kullanılacak olan levhalarda mekanik olarak takım ucu pini giriş delikleri açılmıştır.

Delik delme işlemi için Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Kaynak Laboratuvarında ve Denizli sanayi bölgesinde bir işletmede bulunan dikey matkaplar kullanılmıştır, Şekil 3.7.

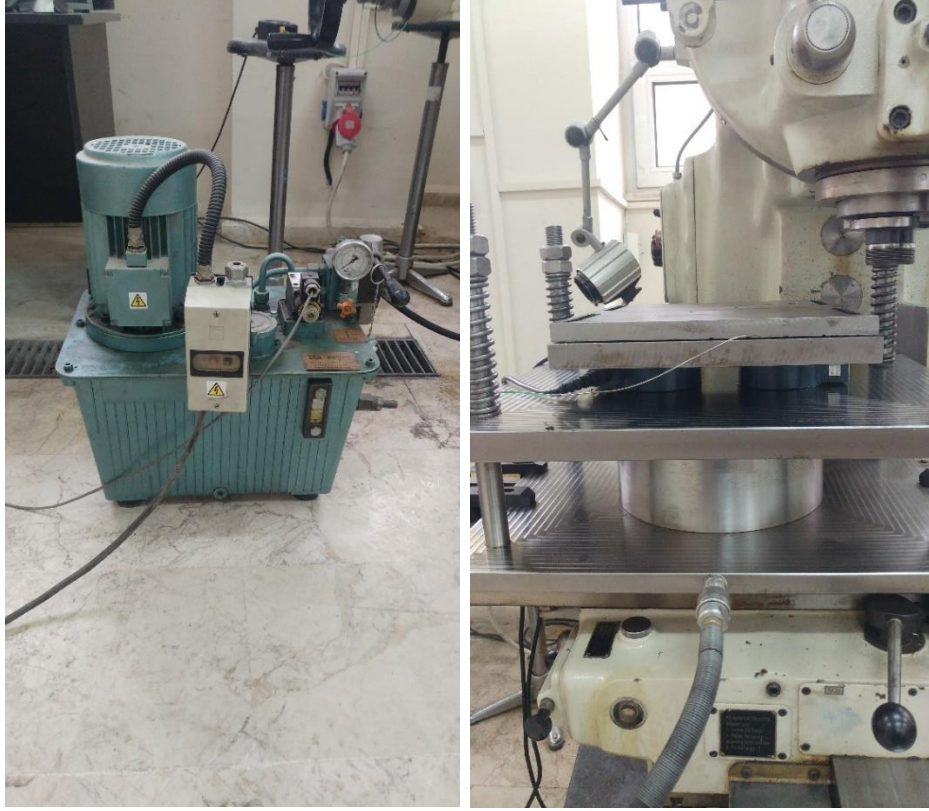


Şekil 3.7: Levha Delik Delme Ekipmanı

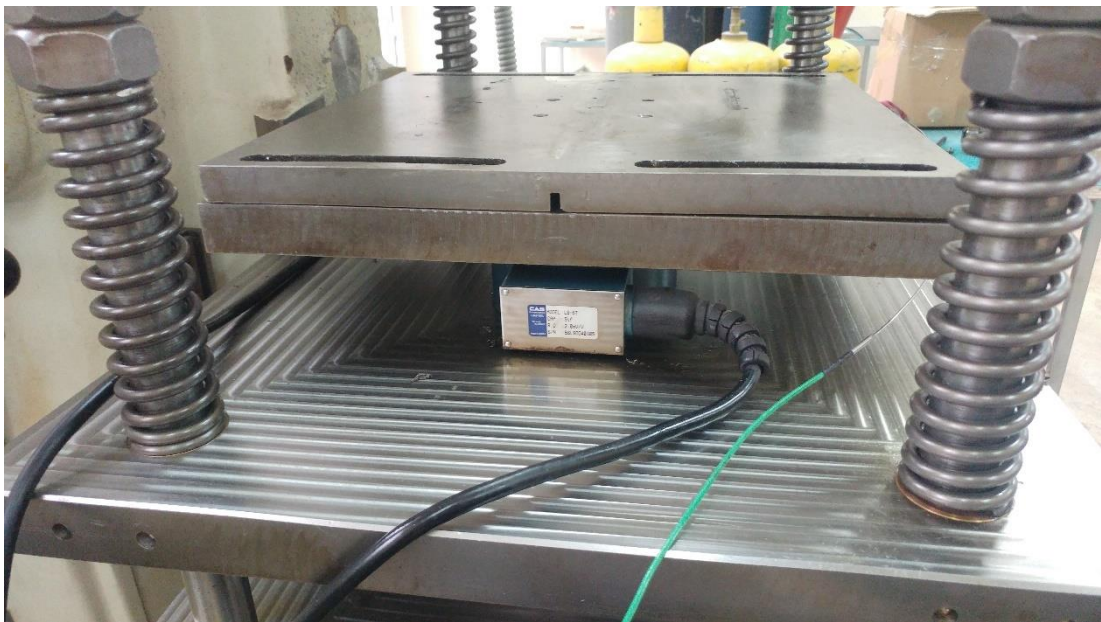
### 3.4 Takım Baskı Kuvveti Ayarlayıcı Hidrolik Düzenek ve Takım Baskı Kuvveti Yük Ölçer

Takımlar kaynak yapılacak levhalara sürtünmeye başladığında ısı açığa çıkar. Isınan malzemede yumuşamaya başlar. Takımın levhalara yaptığı ilk andaki baskı kuvveti yumuşamanın etkisi ile azalır ve düzensiz bir kaynağa sebep olur. Bu durumu engellemek için takım baskı kuvvetini kaynak boyunca sabit tutmak çok önemlidir.

Bunu ya manuel olarak yapmak gerekir ya da hidrolik bir sistem ile otomatik olarak yapmak gerekir. Bu çalışmada hidrolik olarak takım baskı kuvveti sabitlenmiştir. Pamukkale Üniversitesi Kaynak Laboratuvarında bulunan hidrolik düzenek ile bu işlem gerçekleştirilmiştir, Şekil 3.8.



Şekil 3.8: Baskı kuvveti ayarlayıcı hidrolik düzenek



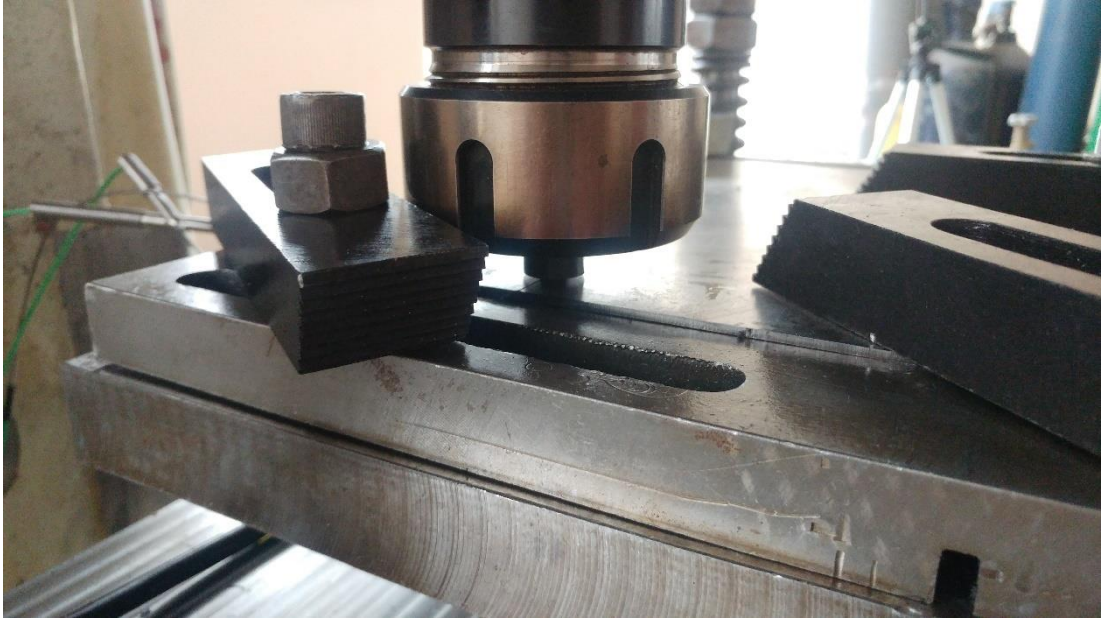
Şekil 3.9: Baskı kuvveti yük ölçeri





### 3.6 Sürtünme Karıştırma Kaynak Makinesine Kaynak Yapılacak Levhaların Sabitleme İçin Gerekli Ekipmanlar

Sürtünme karıştırma kaynak makinesinde bazı ek aparatlar yardımı ile 2 adet 200x100x2 mm'lik ölçülerdeki levhalar tabla üzerine sabitlenmektedir, Şekil 3.12. Bu sayede kaynak işlemi sırasında herhangi bir şekilde açılma olması engellenmektedir ve stabil bir kaynak akışı sağlanabilmektedir, Şekil 3.13.



Şekil 3.12: Sabitleme ekipmanları ve kaynak yapılacak levhalar



Şekil 3.13: Sabitleme ekipmanları ile sabitlenmiş levhalarda kaynak işleminin başlangıcı



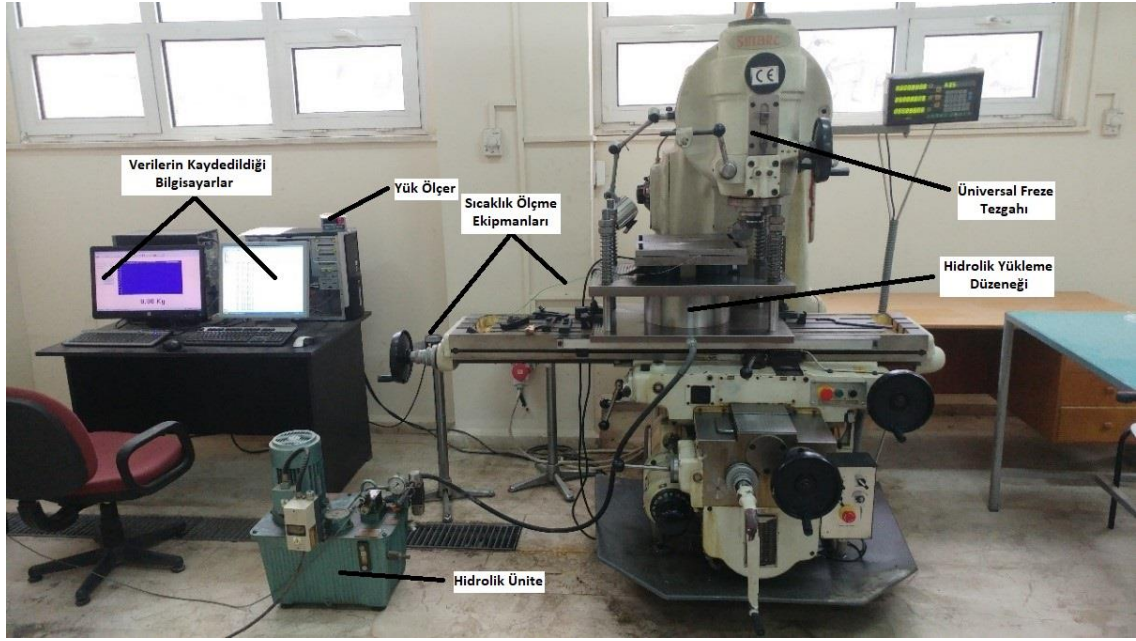
**Şekil 3.14:** Deneş parametreleri belirlenirken yapılan ön çalışmalardaki yapılmış hatalı kaynaklar

Deneş parametrelerini bulabilmek için ön deneşler gerçekleştirilmiştir. Bu ön deneşler yaklaşık olarak hangi sıcaklıklara çıkılması gerektiği ve bu sıcaklıklarda ne kadar zaman geçmesi gerektiğinde kaynak işleminin daha iyi olduğu, hangi takım ilerleme hızı ve takım devri kullanımının uygun olduğu ve takım baskı kuvvetinin hangi aralıklarda olması gerektiği anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu ön deneşler sonucunda elik malzemenin çok yüksek devirlerde yeterli dolgu malzemesi oluşturamadığı ve düşük devirlerde de yeterli sıcaklıkların oluşturulmasının çok zor olduğu ve sıvamanın düzgün yapılamadığı belirlenmiştir, Şekil 3.14.

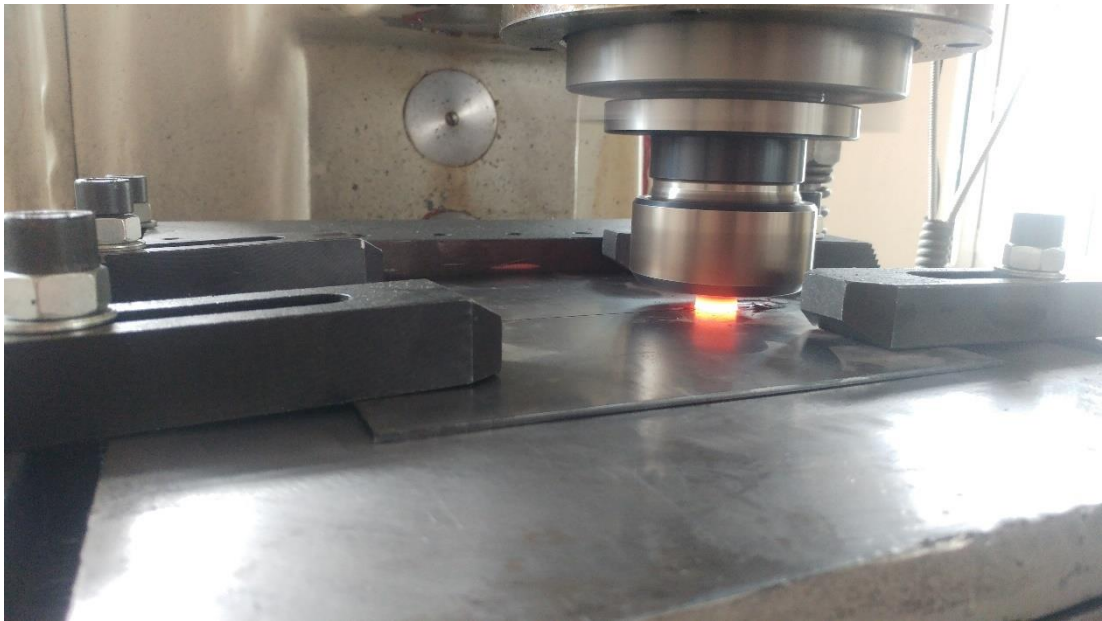


### 3.7 Genel Sürtünme Karıştırma Kaynak İşlemi Yapılacak Ekipmanlar

Sürtünme karıştırma kaynak işlemi için kullanılan ekipmanlar genel olarak Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Hidrolik takım baskı kuvveti ayarlama ekipmanı, sürtünme karıştırma kaynağı cihazı dik başlı freze (bilgisayar kontrollü) (SMARC X5032 7,5 kW), yük ölçer, sıcaklık algılayıcı ve kayıt cihazları görülmektedir. Bu ekipmanlar ile yapılan bir kaynak Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.15: SKK yapılan ekipmanların genel fotoğrafı



Şekil 3.16: Ekipmanlar ile yapılan bir SKK örneği



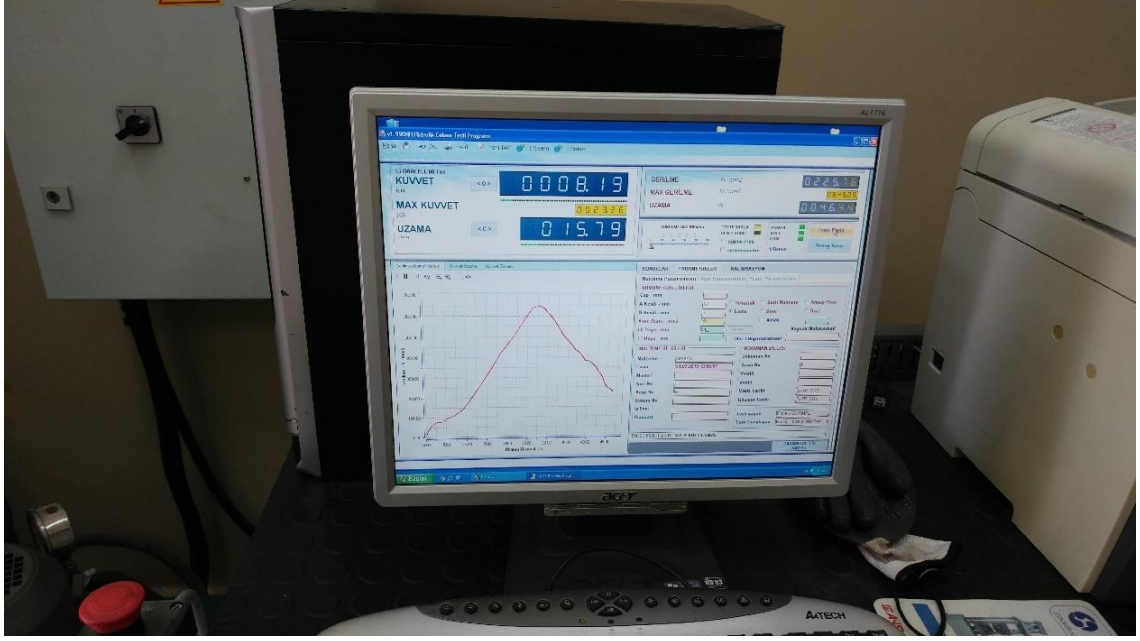
### 3.8 Çekme Deneyi Ekipmanları

DP1000 çift fazlı çelik malzemeler SKK ile kaynaklanıp çekme işlemine tabii tutulmuşlardır. Bu yapılan deney sıklıkla aranan ve başvuru olan bir mekanik ölçüm deneyidir. Bu deneylerden alınan veriler, bize ve literatüre katkı vermektedir. Çekme sonuçları, malzemelerin kalitelerinin bilinmesinde çok önemli veriler vermektedir. Bulunan bilgiler ile daha farklı materyallerin üretilmesi ve geliştirilmesine katkı sağlanmaktadır.

Çekme deneyinde en büyük sebep malzemenin dayanıklılığının bilinmek istenmesidir. Deneylerde Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Tahribatlı Malzeme Muayene Laboratuvarında bulunan 40000N kapasiteli Alşa dinamik çekme/basma/eğilme deney cihazı kullanılmıştır, Şekil 3.17. Çekme deneyleri EN ISO 6892 standardına göre yapılmıştır.



Şekil 3.17: 40000N kapasiteli Alşa çekme deney cihazı



**Şekil 3.18:** Çekme cihazı verilerini anlık olarak alabildiğimiz ve kayıt altına alabildiğimiz bilgisayar düzeneği

Çekme cihazındaki parça çekme işlemi esnasında anlık olarak verilerin okunduğu ekrandan takip edilebilmektedir. Gerekli görülen veriler ekrandan anlık olarak alınabildiği gibi sonradan da alınabilmektedir, Şekil 3.18.

### 3.9 Mikro Sertlik Ölçme Ekipmanı

DP1000 malzemesinin ve SKK sonrasında ITAB ve kaynak bölgesinin sertliklerini HV0,1 cinsinden ölçebilmek ve yorumlayabilmek için Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Tahribatsız Malzeme Muayene laboratuvarında bulunan Micro Vickers Sertlik Ölçüm Cihazı (METKON MH-3) kullanılmıştır, Şekil 3.19.



Şekil 3.19: Metkon mikro sertlik ölçme cihazı

### 3.10 Makro-Mikro Yapı Ekipmanları

SKK yapılmış DP1000 çelik malzemeden su jeti ile kesim yapılarak iç yapı numunesi alınmıştır. Alınan numunenin önce makro yapı incelemesi için Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Tahratsız Malzeme Muayene laboratuvarında bulunan Stereo Mikroskop (NIKON SMZ 1500) kullanılmıştır.

Skk yapılmış DP1000 çelik malzemeden alınan iç yapı numunesi makro yapı görüntülerinin alınmasından sonra mikro yapı görüntüleme için Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Tahratsız Malzeme Muayene laboratuvarında bulunan Metal Mikroskobu, NIKON Eclipse LV150 (CLEMEX Vision Lite Görüntü Analiz Sistemi) kullanılmıştır.

## 4. DENEYSEL BULGULAR

Deneysel çalışmalarla çift fazlı çelik levhaların sürtünme karıştırma kaynağı ile alın altına birleştirme işleminde farklı takım devri, takım ilerleme hızı ile sabit takım baskı kuvveti, kaynak sıcaklığı ve aynı geometride takım kullanılarak bağlantı mukavemeti etkisi incelenmiştir. Deney parametreleri Tablo 4.1’de görülmektedir.

Bağlantı dayanımları için diğer parametreler sabit tutularak tek bir parametre değiştirilerek Alşa cihazında çekme deneyine tabi tutulmuştur. En yüksek dayanım değeri veren numune için mikro sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Her bir belirlenen özellikler için en az üç farklı deneme gerçekleştirilmiştir. Denemelerden elde edilen verilerin ortalamaları sonuç olarak dikkate tabii tutulmuştur. Herhangi bir deney sonucunda tutarsızlık yaşanması durumunda deney işlemleri en baştan tekrarlanmış ve tutarlı sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.

**Tablo 4.1:** Çalışmada DP1000 çeliği ile SKK yapılırken kullanılan deney parametreleri

Başlangıç Sıcaklığı (°C)	Takım Baskı Kuvveti (kN)	Takım İlerleme Hızı (mm/min)	Takım Devri (min <sup>-1</sup> )
950	7	60	900
950	7	75	900
950	7	150	900
950	7	60	1180
950	7	75	1180
950	7	150	1180
950	7	60	1500
950	7	75	1500
950	7	150	1500

### 4.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilecek Çift Fazlı DP1000 Çelik Malzemenin Mekanik Dayanımları

DP1000 çift fazlı çelik malzemenin kaynak yapılmadan mekanik dayanım değerleri gözlenmek istenmiştir. Dayanım değerlerinin belirlenmesi için çekme testleri yapılmıştır. Çekme testinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.2’de gösterilmektedir.

**Tablo 4.2:** Çalışmada kullanılan DP1000 çelik malzemenin çekme deneyi sonuçları

Akma Sınırı Rp0,2 (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Kopma Uzaması A (%)	Elastisite Modülü (kN/mm <sup>2</sup> )	Kopmaz Büzülmesi Z (%)
860	1010	19,5	200	8,3



**Şekil 4.1:** Çalışmada kullanılan DP1000 çelik malzemenin çekme deneyi sonucunda kopma bölgesi

DP1000 çift fazlı çelik malzemenin çekme testleri sonucunda kopma yaşanan bölge Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Esas malzeme yüksek mukavemeti ve yüksek şekil alma kabiliyeti ile dikkat çekmiştir.

#### **4.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Çift Fazlı DP1000 Çelik Malzeme Çiftlerinin Çekme Dayanımları**

900, 1180 ve 1500 min<sup>-1</sup> olmak üzere üç farklı takım devrinde, 60, 75 ve 150 mm/min olmak üzere üç farklı takım ilerleme hızında, 7 kN sabit takım baskı kuvveti ile birleştirilen DP1000 çift fazlı çelik levhalardan oluşan malzemelerin çekme testleri yapılmıştır.



#### 4.2.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile 900 min<sup>-1</sup>'de Yapılan Birleştirmelere Takım İlerleme Hızının Etkisi

İlk olarak 900 min<sup>-1</sup>'de yapılan sürtünme karıştırma kaynağı işlemlerinde takım ilerleme hızının bağlantı dayanımına etkileri incelenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağında takım baskı kuvveti 7 kN da sabit tutularak sıcaklık değeri 950°C ye ulaştığında ilerleme verilmiş ve kaynak bağlantıları Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.



a



b

**Şekil 4.2:** SKK ile 900 min<sup>-1</sup>'de yapılan birleştirme işleminde 60 mm/min ilerleme hızındaki kaynak bağlantısı a) üst görünüm b) alt görünüm



a



b

**Şekil 4.3:** SKK ile  $900 \text{ min}^{-1}$ 'de yapılan birleştirme işleminde  $75 \text{ mm/min}$  ilerleme hızındaki kaynak bağlantısı a) üst görünüm b) alt görünüm



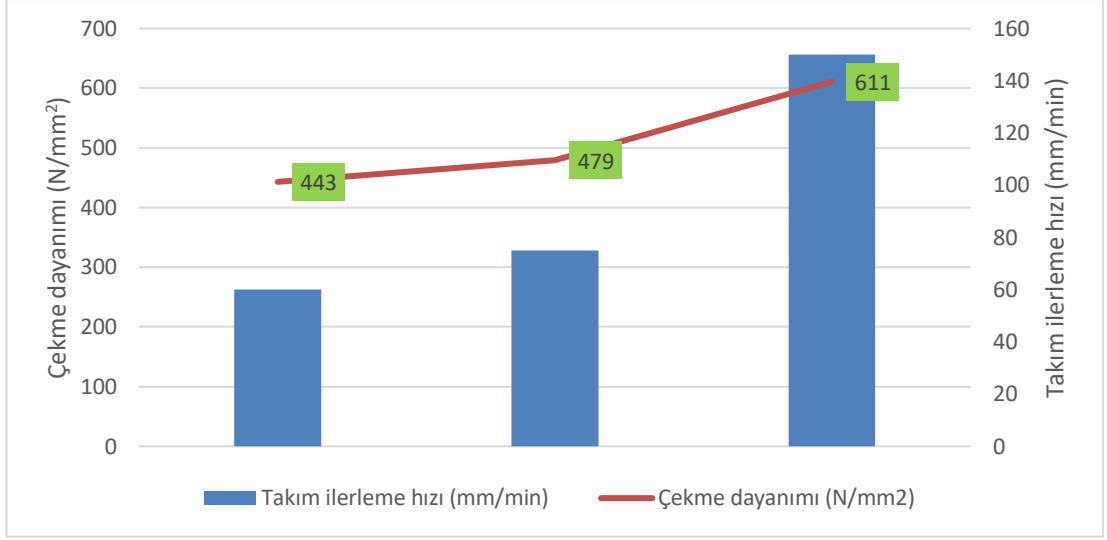
a



b

**Şekil 4.4:** SKK ile  $900 \text{ min}^{-1}$ 'de yapılan birleştirme işleminde  $150 \text{ mm/min}$  ilerleme hızındaki kaynak bağlantısı a) üst görünüm b) alt görünüm





**Şekil 4.5:** 900 min<sup>-1</sup>'de yapılan kaynaklı birleştirme işleminde elde edilen maksimum bağlantı dayanımları

Bu parametrelerde elde edilen maksimum bağlantı dayanımları Şekil 4.5'te görülmektedir. Sabit takım baskı kuvveti altında sürtünme karıştırma kaynağı yapıldığında takım devri 900 min<sup>-1</sup> için 60, 75 ve 150 mm/min ilerleme hızlarında kaynak bağlantılarının resimleri görülmektedir. Bu takım devri kullanıldığında ve diğer parametreler ilerleme hızı hariç sabit tutulduğunda 150 mm/min ilerleme hızının en yüksek dayanım değerini verdiği görülmüştür. 900 min<sup>-1</sup> takım devri için yüksek ilerleme hızlarının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Düşük ilerleme hızlarında bu devirde yeterli kaynak dolgusu oluşturamadığı ve tam olarak homojen birleşmelerin yapılamadığı görülmüştür.

Bu durumlara göre DP1000 çift fazlı çelik malzeme çiftlerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirildiği durumda 900 min<sup>-1</sup> takım devrinde yapılan birleşme işleminde en yüksek bağlantı dayanımı 611 N/mm<sup>2</sup> ile 150 mm/min takım ilerleme hızında elde edilmiştir. DP1000 çift fazlı çelik malzeme çiftlerinin 900 min<sup>-1</sup> takım devrinde en düşük bağlantı dayanımı ise 60 mm/min takım ilerleme hızında 443 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Genel olarak 900 min<sup>-1</sup> takım devrinde yüksek ilerleme hızlarında daha yüksek mukavemet sonuçları elde edilmiştir.

#### 4.2.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile 1180 min<sup>-1</sup>'de Yapılan Birleştirmelere Takım İlerleme Hızının Etkisi

İlk olarak 1180 min<sup>-1</sup>'de yapılan sürtünme karıştırma kaynağı işlemlerinde takım ilerleme hızının bağlantı dayanımına etkileri incelenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağında takım baskı kuvveti 7 kN'da sabit tutularak sıcaklık değeri 950°C ye ulaştığında ilerleme verilmiş ve kaynak bağlantıları Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir.



a



b

Şekil 4.6: SKK ile 1180 min<sup>-1</sup>'de yapılan birleştirme işleminde 60 mm/min ilerleme hızındaki kaynak bağlantısı a) üst görünüm b) alt görünüm



a



b

**Şekil 4.7:** SKK ile  $1180 \text{ min}^{-1}$ 'de yapılan birleştirme işleminde  $75 \text{ mm/min}$  ilerleme hızındaki kaynak bağlantısı a) üst görünüm b) alt görünüm



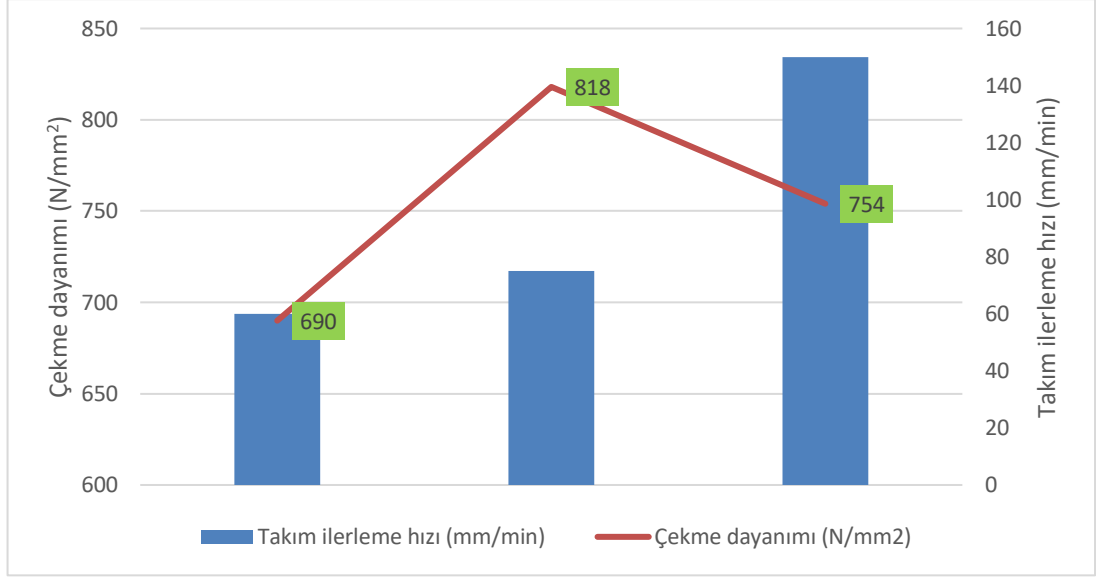


a



b

**Şekil 4.8:** SKK ile  $1180 \text{ min}^{-1}$ 'de yapılan birleştirme işleminde  $150 \text{ mm/min}$  ilerleme hızındaki kaynak bağlantısı a) üst görünüm b) alt görünüm



**Şekil 4.9:** 1180 min<sup>-1</sup>'de yapılan kaynaklı birleştirme işleminde elde edilen maksimum bağlantı dayanımları

Bu parametrelerde elde edilen maksimum bağlantı dayanımları Şekil 4.9'da görülmektedir. Sabit takım baskı kuvveti altında sürtünme karıştırma kaynağı yapıldığında takım devri 1180 min<sup>-1</sup> için 60, 75 ve 150 mm/min ilerleme hızlarında kaynak bağlantılarının resimleri görülmektedir. Bu takım devri kullanıldığında ve diğer parametreler ilerleme hızı hariç sabit tutulduğunda 75 mm/min ilerleme hızının en yüksek dayanım değerini verdiği görülmüştür. 1180 min<sup>-1</sup> takım devri için optimum ilerleme hızının bu deney sonuçlarına göre belirlenen parametreler içerisinde orta seviyede daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Düşük ilerleme hızlarında bu devirde yeterli kaynak dolgusu oluşturamadığı ve tam olarak homojen birleşmelerin yapılamadığı görülmüştür, aynı şekilde yüksek ilerleme hızlarının da sıvamada kötü bir sonuç verdiği ve dayanım değerinin düşmeye başladığı görülmüştür.

Bu durumlara göre DP1000 çift fazlı çelik malzeme çiftlerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirildiği durumda 1180 min<sup>-1</sup> takım devrinde yapılan birleşme işleminde en yüksek bağlantı dayanımı 818 N/mm<sup>2</sup> ile 75 mm/min takım ilerleme hızında elde edilmiştir. DP1000 çift fazlı çelik malzemenin 1180 min<sup>-1</sup> takım devrinde en düşük bağlantı dayanımı ise 60 mm/min takım ilerleme hızında 690 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Genel olarak 1800 min<sup>-1</sup> takım devrinde en yüksek değer yapılan deneyler içerisindeki orta seviyedeki bir ilerleme hızında elde edilmiştir.



### 4.2.3 Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile 1500 min<sup>-1</sup>'de Yapılan Birleştirmelere Takım İlerleme Hızının Etkisi

İlk olarak 1500 min<sup>-1</sup>'de yapılan sürtünme karıştırma kaynağı işlemlerinde takım ilerleme hızının bağlantı dayanımına etkileri incelenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağında takım baskı kuvveti 7 kN da sabit tutularak sıcaklık değeri 950°C ye ulaştığında ilerleme verilmiş ve kaynak bağlantıları Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir.



a



b

**Şekil 4.10:** SKK ile 1500 min<sup>-1</sup>'de yapılan birleştirme işleminde 60 mm/min ilerleme hızındaki kaynak bağlantısı a) üst görünüm b) alt görünüm



a



b

**Şekil 4.11:** SKK ile  $1500 \text{ min}^{-1}$ 'de yapılan birleştirme işleminde  $75 \text{ mm/min}$  ilerleme hızındaki kaynak bağlantısı a) üst görünüm b) alt görünüm





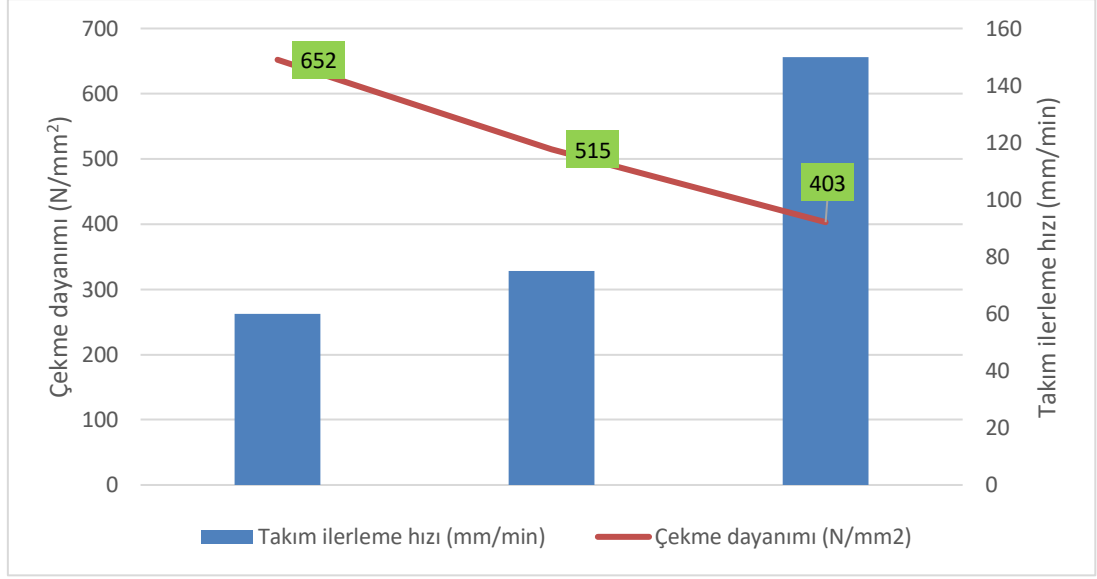
a



b

**Şekil 4.12:** SKK ile  $1500 \text{ min}^{-1}$ 'de yapılan birleştirme işleminde  $150 \text{ mm/min}$  ilerleme hızındaki kaynak bağlantısı a) üst görünüm b) alt görünüm





**Şekil 4.13:** 1500 min<sup>-1</sup>'de yapılan kaynaklı birleştirme işleminde elde edilen maksimum bağlantı dayanımları

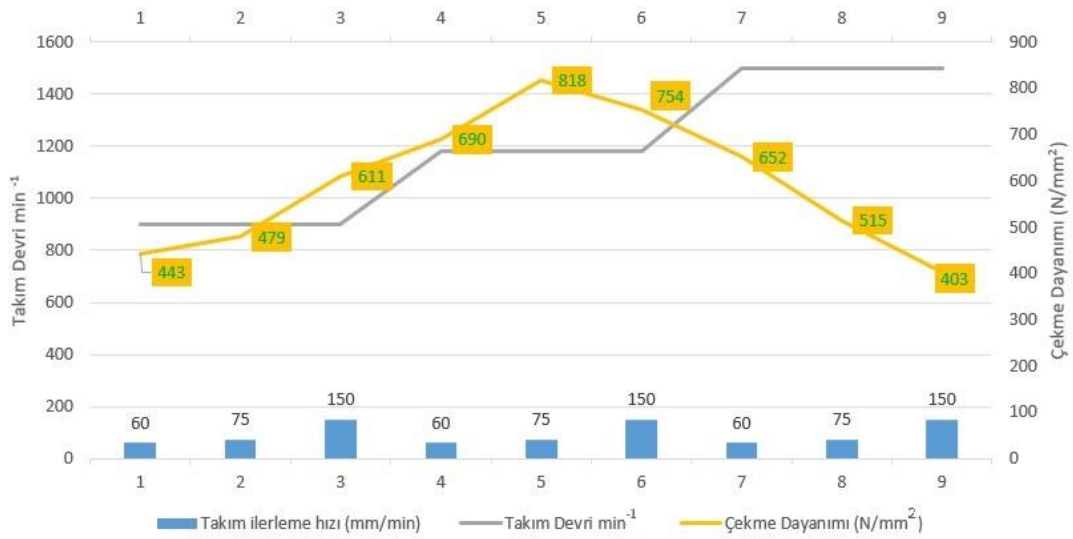
Bu parametrelerde elde edilen maksimum bağlantı dayanımları Şekil 4.13'te görülmektedir. Sabit takım baskı kuvveti altında sürtünme karıştırma kaynağı yapıldığında takım devri 1500 min<sup>-1</sup> için 60, 75 ve 150 mm/min ilerleme hızlarında kaynak bağlantılarının resimleri görülmektedir. Bu takım devri kullanıldığında ve diğer parametreler ilerleme hızı hariç sabit tutulduğunda 60 mm/min ilerleme hızının en yüksek dayanım değerini verdiği görülmüştür. 1500 min<sup>-1</sup> takım devri için optimum ilerleme hızının bu deney sonuçlarına göre belirlenen parametreler içerisinde en yavaş ilerleme hızında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yüksek ilerleme hızlarının bu takım devri için ciddi bir dezavantaj olmaya başladığı dayanım değerinin oldukça hızlı bir şekilde düşmeye başladığı görülmüştür.

Bu durumlara göre DP1000 çift fazlı çelik malzeme çiftlerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirildiği durumda 1500 min<sup>-1</sup> takım devrinde yapılan birleşme işleminde en yüksek bağlantı dayanımı 652 N/mm<sup>2</sup> ile 60 mm/min takım ilerleme hızında elde edilmiştir. DP1000 çift fazlı çelik malzemenin 1500 min<sup>-1</sup> takım devrinde en düşük bağlantı dayanımı ise 150 mm/min takım ilerleme hızında 403 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Genel olarak 1500 min<sup>-1</sup> takım devrinde yüksek ilerleme hızlarında oldukça fazla bir mukavemet düşüşü elde edilmiştir.

### 4.3 Çekme Grafiklerinden Elde Edilen Maksimum Bağlantı Dayanımların Karşılaştırılması

900, 1180 ve 1500 min<sup>-1</sup> olmak üzere üç farklı takım devrinde, 60, 75 ve 150 mm/min olmak üzere üç farklı takım ilerleme hızında, 7 kN sabit takım baskı kuvveti ile birleştirilen DP1000 çift fazlı çelik levhalardan oluşan malzemelerin çekme testlerinden elde edilen maksimum bağlantı dayanımları karşılaştırılmıştır.

- Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılan Birleştirmelere Uygulanan Parametrelerin Etkisi



Şekil 4.14: DP1000 çelik malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı parametreleri için elde edilen maksimum bağlantı dayanımları

Bu durumlara bakılırsa DP1000 çift fazlı çelik malzeme çiftlerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirildiği durumda 3 farklı takım devri ve 3 farklı ilerleme hızında en yüksek bağlantı dayanımı 818 N/mm<sup>2</sup> ile 1180 min<sup>-1</sup> takım devri, 75 mm/min takım ilerleme hızında 7 kN sabit takım baskı kuvveti ile elde edilmiştir, Şekil 4.14. Çift fazlı DP1000 çelik malzeme çiftlerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirildiği durumda 3 farklı takım devri ve 3 farklı ilerleme hızında en düşük bağlantı dayanımı ise 1500 min<sup>-1</sup> takım devri, 150 mm/min takım ilerleme hızında 7 kN sabit takım baskı kuvveti ile 403 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.

**Tablo 4.3:** SKK uygulanmış DP1000 çelik çiftlerinin çekme deneyi sonuçları

Takım İlerleme Hızı (mm/min)	Takım Devri ( $\text{min}^{-1}$ )	Kopma Uzaması A (%)	Kopma Büzülmesi Z (%)	Akma Sınırı $R_{p0,2}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	Çekme Dayanımı ( $\text{N/mm}^2$ )
60	900	10	2	357	443
75	900	11	2,5	386	479
150	900	13	2,8	492	611
60	1180	18	4	556	690
75	1180	22	6,4	659	818
150	1180	21	5	608	754
60	1500	17	3,7	525	652
75	1500	15	3	415	515
150	1500	12	1	325	403

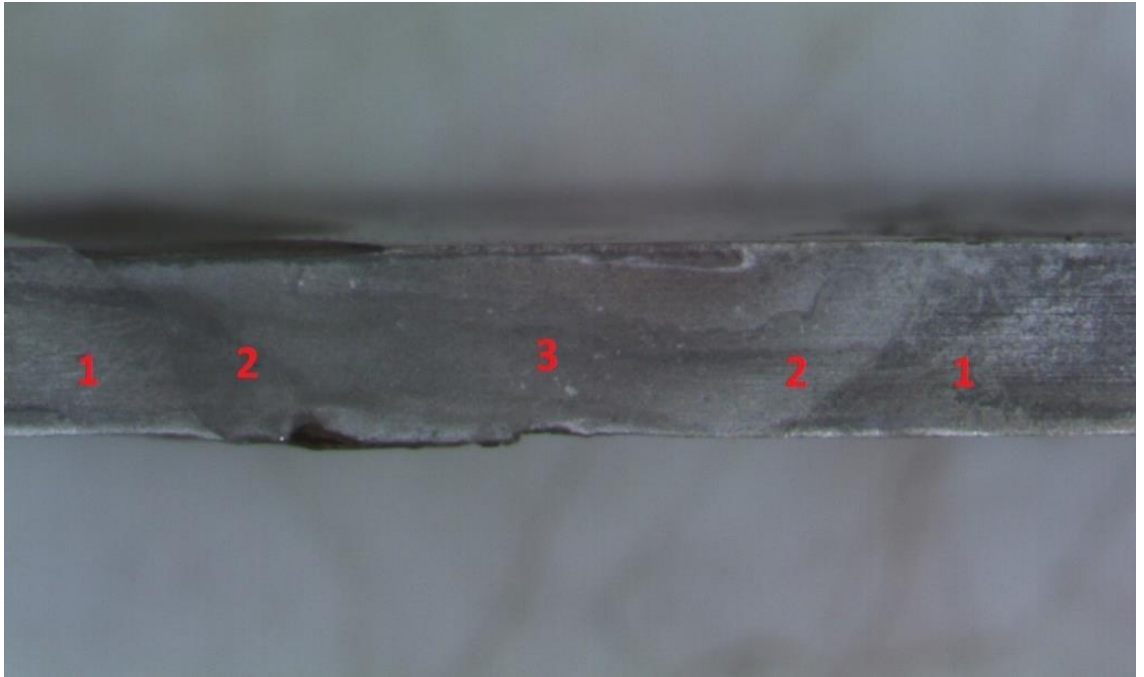
Genel olarak düşük takım devrinde düşük hızların yüksek takım devrinde ise yüksek hızların dayanım değerlerini olumsuz etkilediği görülmüştür. Bunun sebebi de homojen bir kaynak birleştirme bölgesinin oluşturulamamasıdır. Belirlenen parametrelere bakıldığında ortalama en yüksek dayanım değerinin  $1180 \text{ min}^{-1}$  takım devrinde elde edilmiştir.  $900$  ve  $1500 \text{ min}^{-1}$  takım devirlerinde ise ortalama alındığında birbirine oldukça yakın değerler görülmektedir, Tablo 4.3.

#### **4.4 $1180 \text{ min}^{-1}$ ve $75 \text{ mm/min}$ Parametrelerinde Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Çift Fazlı DP1000 Çelik Malzemenin Çekme Deneyi Sonucu Görünümü, Makro ve Mikro Yapısı**

En yüksek dayanım değerini sağlayan  $1180 \text{ min}^{-1}$  ve  $75 \text{ mm/min}$  parametresi için su jeti ile kesilen ve iç yapısına zarar verilmeyen numunenin çekme deneyi sonucundaki kopması ve Stereo Mikroskop ile alınan makro görüntüsü sırasıyla Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



**Şekil 4.15:** 1180 min<sup>-1</sup> ve 75 mm/min parametresi ile SKK yapılan numunenin çekme deneyi sonucu kopma bölgesi

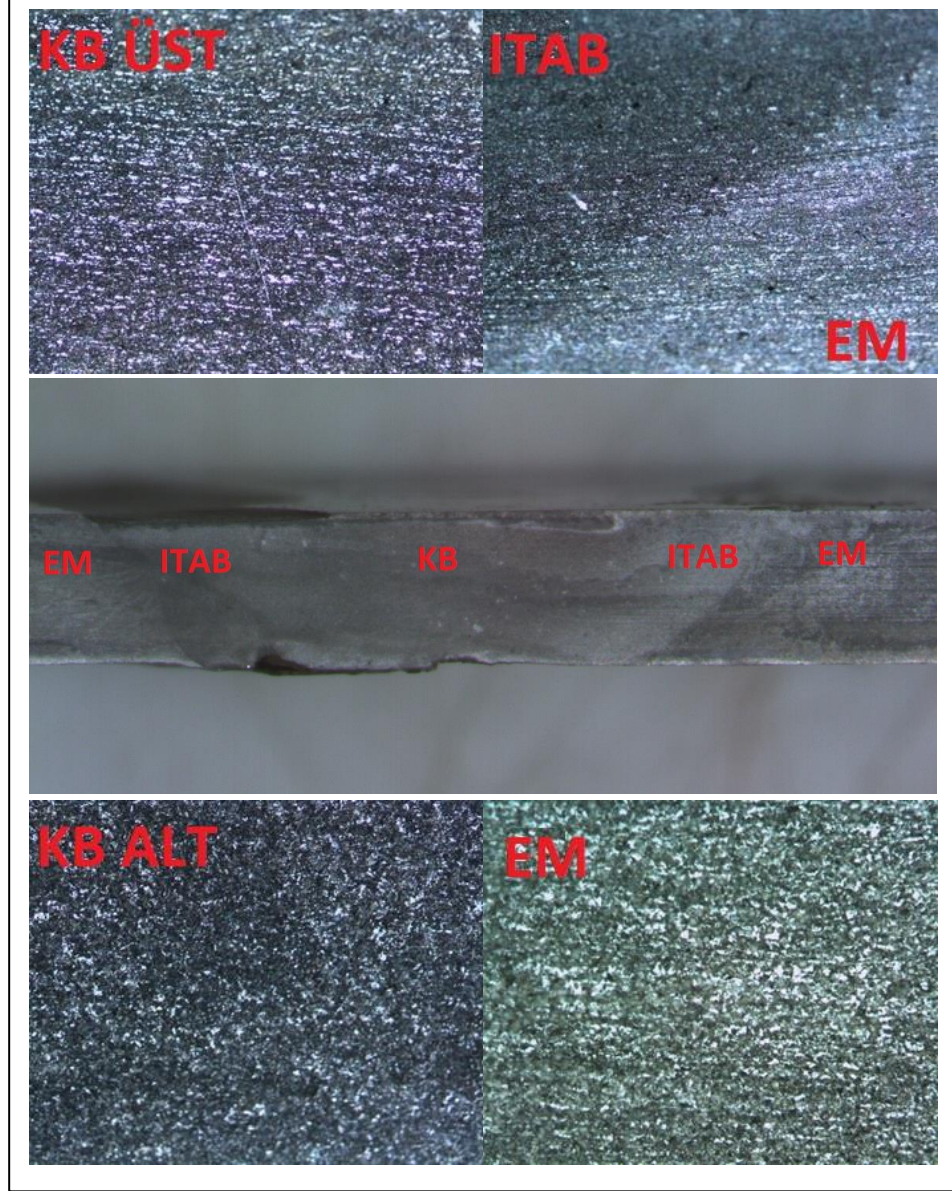


**Şekil 4.16:** 1180 min<sup>-1</sup> ve 75 mm/min parametresi ile SKK yapılan numunenin makro yapı görüntüsü

En iyi mukavemet değerine sahip olan 1180 min<sup>-1</sup> ve 75 mm/min parametresi ile yapılan çekme testi sonucunda kopma kaynak bölgesinden değil ITAB bölgesinden olmuştur, Şekil 4.15. Bu bize kaynak bölgesinin iyi bir şekilde kaynak olduğunu göstermektedir. Kaynak bölgesinden kopma olmaması istenilen bir durumdur. Aynı zamanda yüksek kopma uzaması gösterdiği de görülmektedir.

Makro yapı incelemesinde SKK yapılan bölgenin homojen bir şekilde kaynak olduğu ve DP1000 çelik malzemenin alana oldukça iyi bir şekilde sıvandığı görülmektedir. Çekme deneyi sonucunda Şekil 4.16'da gösterilen 3 numaralı kaynak

bölgesinin 818 N/mm<sup>2</sup> değerini verdiği görülmektedir. 1 numaralı bölge esas malzeme olan DP1000 çeliğidir. 2 numaralı bölgeler ise ITAB alanıdır.



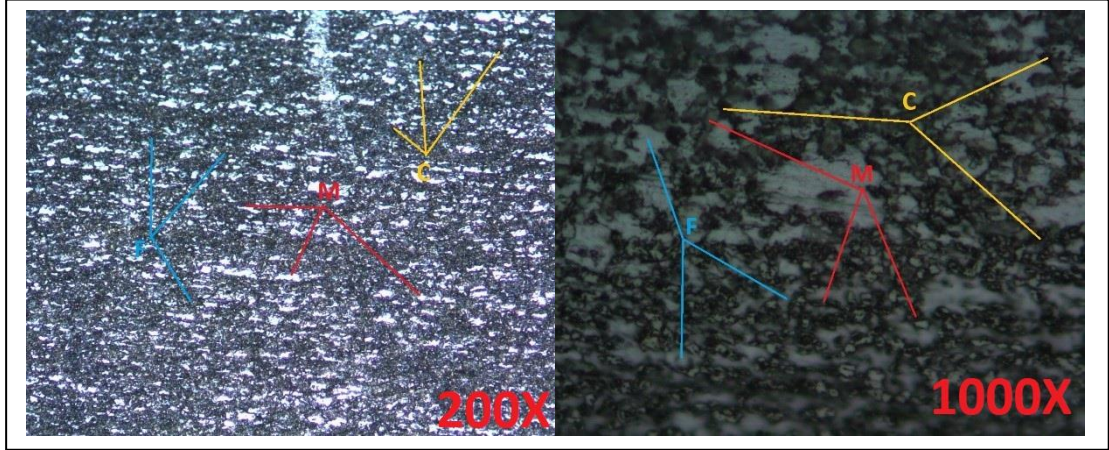
Şekil 4.17: SKK yapılan optimum numunenin iç yapı 100X görüntüleri

Makro yapı incelemesinde numune 3 ana bölüme ayrılmıştır. Şekil 4.17 iç yapı görüntülerini 100X olarak vermektedir. Bu şekilde sol üst köşedeki görüntü kaynak bölgesinin (KB) üst bölgesinden alınmış bir 100X görüntüleme. Martenzit ve ferrit yapıları esas malzeme ile benzerlik göstermektedir. Aynı şekilde sol alt köşede ise yine KB seçilmiş fakat alt bölüme yakın noktalardan görüntü alınmıştır. Üst bölüm ile benzer bir iç yapı söz konusudur. Fark olarak ise iç yapıda ferrit-martenzit dağılımının daha homojen olduğu gözlenmiştir. Aynı şeklin sağ üst bölgesindeki görsel ısı tesiri



altında kalmış alan ile esas metal arasındaki geçiş bölgesini net bir şekilde göstermektedir. Sağ alt köşede ise DP1000 çelik malzemenin esas metal bölümünün iç yapısı görülmektedir. Dengeli bir martenzit dağılımı söz konusudur. Bu martenzit varlığı bu çeliğin bu kadar yüksek dayanımlar vermesindeki en büyük etkidir.

KB'nin üst bölümünün 200X ve 1000X görüntülemeleri Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18: SKK yapılan kaynak bölgesinin üst bölümünden 200X ve 1000X görüntülenme

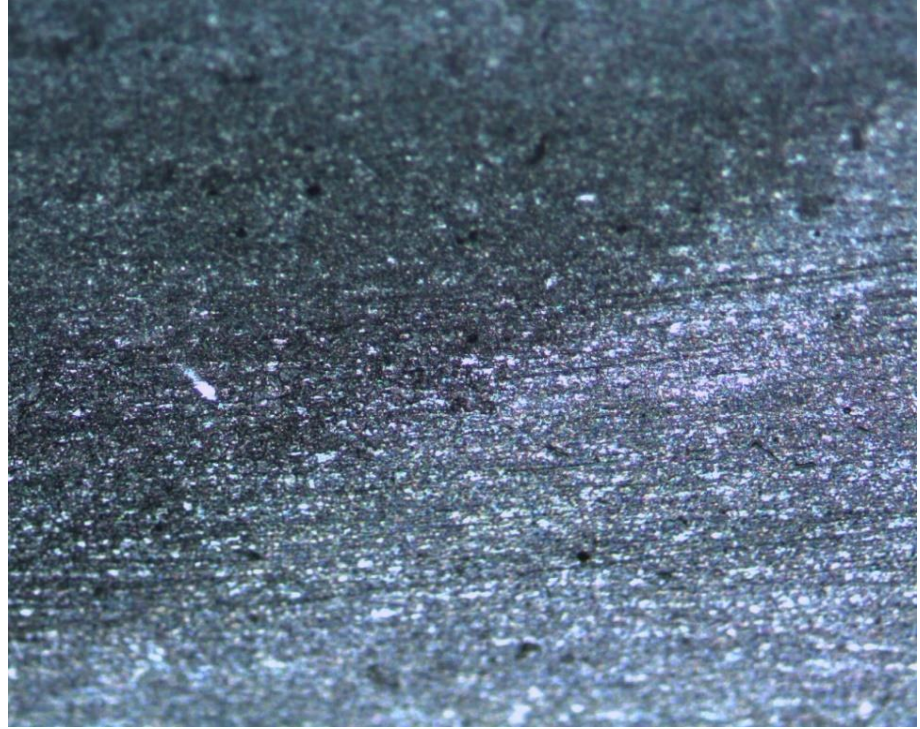
Görüntülerde mavi renkle gösterilen kısımlar ferrit yapıları, kırmızı renkli gösterilen kısımlar ise martenzitik yapıları göstermektedir. Turuncu renk ile gösterilenler ise karbürlerdir. Bu bölgede iç yapının esas metal ile biraz benzerliklerinin bulunduğu fakat esas metale oranla kaynak bölgesindeki martenzit yapıların iğnemi olmaya başladığı ve oranının arttığı gözlenmiştir.

Şekil 4.16'da bulunan makro yapı incelemesindeki 2 numaralı ITAB bölgesinin 100X olarak bölgenin görüntüsü Şekil 4.19'de verilmiştir. Bu bölgede ince taneli bir yapı dikkat çekmektedir.



**Şekil 4.19:** ITAB bölgesinin 100X görüntülenmesi

Makro yapı incelemesinde 2-3 numaralı ITAB-esas metal geçiş bölgesinin 100X görüntülenmesinde bölgenin görüntüsü Şekil 4.20’de verilmiştir.



**Şekil 4.20:** ITAB esas metal geçiş bölgesi 100X görüntüleme



En düşük çekme dayanımı değerini sağlayan  $1500 \text{ min}^{-1}$  ve  $150 \text{ mm/min}$  parametresi için su jeti ile kesilen ve iç yapısına zarar verilmeyen numunenin Stereo Mikroskop ile alınan makro görüntüsü Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.21:**  $1500 \text{ min}^{-1}$  ve  $150 \text{ mm/min}$  parametresi ile SKK yapılan numunenin makro yapı görüntüsü

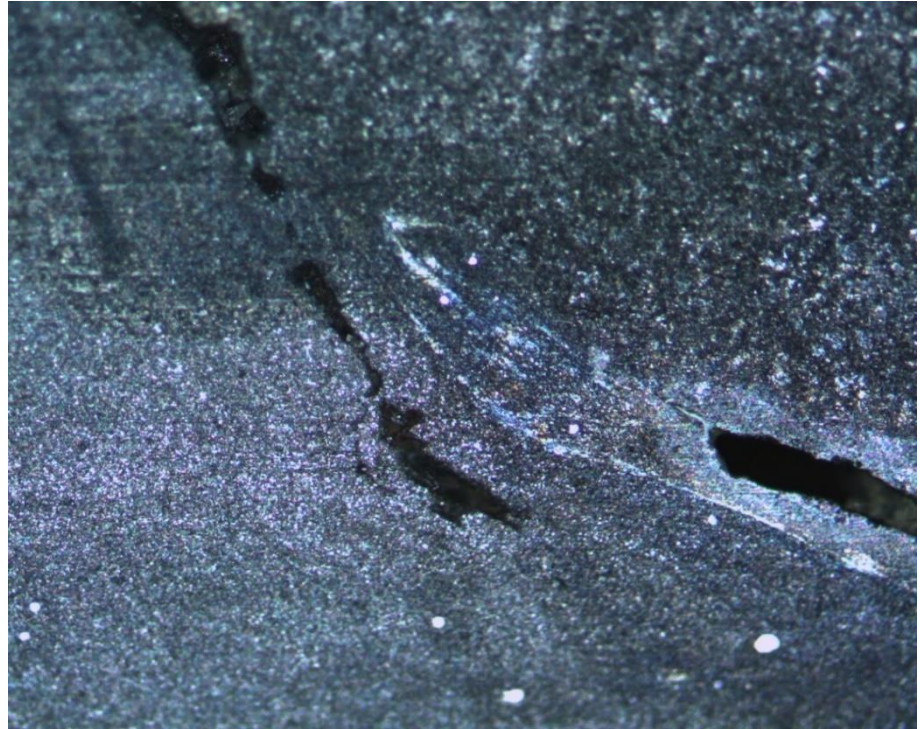
Makro yapı incelemesinde SKK yapılan bölgenin homojen bir şekilde kaynak yapılamadığı hızlı ilerlemenin ve yüksek devrin birleşmesi ile kaynak bölgesinde mikro çatlakların olduğu gözlenmiştir. Çekme deneyi sonucunda da kaynaklı birleştirmenin  $403 \text{ N/mm}^2$  değerini verdiği görülmektedir.

En düşük çekme dayanımı değerini sağlayan parametrenin mikro çatlaklarının  $100X$  görüntülemesi Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’te verilmiştir.





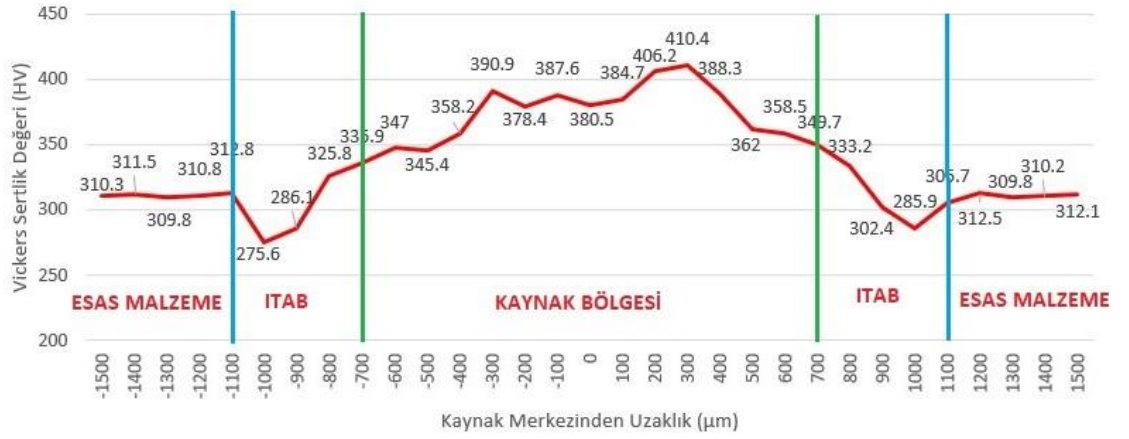
**Şekil 4.22:** 1500 min<sup>-1</sup> ve 150 mm/min parametresi ile SKK yapılan numunenin mikro yapı görüntüsü çatlak başlangıcı



**Şekil 4.23:** 1500 min<sup>-1</sup> ve 150 mm/min parametresi ile SKK yapılan numunenin mikro yapı görüntüsünde kaynak bölgesindeki mikro çatlaklar

#### 4.5 1180 min<sup>-1</sup> ve 75 mm/min Parametrelerindeki Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Çift Fazlı DP1000 Çelik Malzemenin Mikro sertlik Ölçüm Değerleri

Bu çalışma için en yüksek çekme dayanımı değerini veren 1180 min<sup>-1</sup> ve 75 mm/min parametresi için mikro sertlik ölçümü yapılmıştır. Kaynak bölgesi ve çevresindeki sertlik dağılımları Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.24: DP1000 çelik malzemenin 1180 min<sup>-1</sup> ve 75 mm/min parametrelerindeki sürtünme karıştırma kaynağı için elde edilen mikro sertlik değerleri

Sertlik ölçümlerinin yapıldığı hat boyunca kaynak bölgesi, ITAB ve esas malzeme bölgelerinde farklı sertlik değerleri ölçülmüştür. Kaynak bölgesindeki sertlik artışının nedeni başlangıç mikro yapısında bulunan düşük sertlik değerine sahip ferritinin azalması ve yapının oransal olarak büyük çoğunluğunun iğneli martenzite dönüşmesi olarak görülebilir. Numunede ITAB ile esas malzeme arasında dar bir bölgede esas malzemenin temperlenmiş martenzitlerden dolayı bir sertlik düşüşü ile yumuşama meydana gelmiştir. Esas malzemenin sertlik değeri yaklaşık olarak 310 HV<sub>0,1</sub> ölçülmüştür. Kaynak bölgesinde ölçülen en yüksek sertlik değeri ise yaklaşık olarak 390-400 HV<sub>0,1</sub> olarak ölçülmüştür. Ölçülen tüm sertlik değerleri Tablo 4.4'te listelenmiştir.

**Tablo 4.4:** Çalışmada yapılan deneyler sonucunda en yüksek çekme dayanımı değeri elde edilen numunenin mikro sertlik değerleri

Bölge	Kaynak Merkezinden Uzaklık ( $\mu\text{m}$ )	Vickers Sertlik Değeri (HV0,1)
Esas Malzeme	-1500	310,3
Esas Malzeme	-1400	311,5
Esas Malzeme	-1300	309,8
Esas Malzeme	-1200	310,8
Esas Malzeme	-1100	312,8
ITAB	-1000	275,6
ITAB	-900	286,1
ITAB	-800	325,8
ITAB	-700	336,9
Kaynak Bölgesi	-600	347
Kaynak Bölgesi	-500	345,4
Kaynak Bölgesi	-400	358,2
Kaynak Bölgesi	-300	390,9
Kaynak Bölgesi	-200	378,4
Kaynak Bölgesi	-100	387,6
Kaynak Bölgesi	0	380,5
Kaynak Bölgesi	100	384,7
Kaynak Bölgesi	200	406,2
Kaynak Bölgesi	300	410,4
Kaynak Bölgesi	400	388,3
Kaynak Bölgesi	500	362
Kaynak Bölgesi	600	358,5
ITAB	700	349,7
ITAB	800	333,2
ITAB	900	302,4
ITAB	1000	285,9
Esas Malzeme	1100	306,7
Esas Malzeme	1200	312,5
Esas Malzeme	1300	309,8
Esas Malzeme	1400	310,2
Esas Malzeme	1500	312,1

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilen metallerin mekanik özelliklerini etkileyen takım devri ve takım ilerleme hızı gibi faktörlerin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla;

Sürtünme karıştırma kaynak bağlantılarında 900, 1180 ve 1500 min<sup>-1</sup> üç farklı takım devri parametresi, 60, 75 ve 150 mm/min olmak üzere üç farklı takım ilerleme parametresi belirlenmiştir. Her bir durum DP1000 çift fazlı çelik malzemelerin alın altına kaynak bağlantısında üçgen profilli WC takımlar kullanılmıştır.

Tüm parametrelerde 7 kN sabit takım baskı kuvveti ve 950°C kaynak başlangıç sıcaklığı belirlenmiştir. Aynı durumda ve aynı kişinin uygulaması ile parametreler uygulanmıştır.

Bu tez, sadece deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar çekme deneyi için iki farklı şekilde aşağıda özetlenmiştir;

- **Takım devri**

Uygulanan durumlara bakıldığında 900 min<sup>-1</sup> takım devri için yüksek takım ilerleme hızlarının gerekliliği görülmüştür. Bu takım devrinde düşük hızlarda takım ilerlemesi dayanıklı bir kaynak bağlantısının oluşmamasına sebebiyet vermiştir. Yeterince akma ve sıvama sağlanamadığı için düşük mukavemet değerleri alınmıştır.

1500 min<sup>-1</sup> takım devri için düşük takım ilerleme hızlarını gerekmektedir. Yine de güvenilirlik açısından bu takım devri değeri çok dikkatle takip edilmesi gerekir. Çünkü özellikle çekme sonuçları dikkate alındığında hızlı bir mukavemet düşüşü görülmektedir. Bu durum kaynak bölgesindeki homojen yapının çok hızlı bir şekilde bozulduğunu göstermektedir. Düşük takım ilerleme hızlarında görece yüksek mukavemet elde edilse de birleştirme durumu homojen değildir ve kaynak bölgesinde boşluklar oluşturmuştur. Mikro yapı incelemelerinde de açıkça çatlaklar görülmektedir.

1180 min<sup>-1</sup> takım devri için kaynak bölgesinin çok daha homojen bir yapıda olduğu aynı zamanda da yüksek dayanım değerleri gösterdiği açıktır. Yine de bu sıcaklık içinde belirli birtakım ilerleme hızına ihtiyaç vardır. Çok düşük veya çok yüksek ilerleme hızları dayanıma negatif etki göstermektedir. Makro yapı incelemelerinde kaynak bölgesinin homojen bir şekilde sıvandığı görülmüştür. Mikro yapı incelemelerinde bu takım devrinde kaynak bölgesindeki iç yapının martenzit ağırlıklı olduğu ve mikro sertlik değerinin de bu yüzden yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

- **Takım ilerleme hızları**

Uygulanan parametreler içinde üç farklı takım ilerleme hızı bulunmaktadır. Bu ilerleme hızlarından 60 mm/min için yüksek takım devri gerektiği görülmüştür. Parametreler içindeki düşük ilerleme hızları 60 mm/min için yüksek dayanım değerleri vermemektedir. Bu takım ilerleme hızları için düşük takım devri birleşimi ile birlikte elde edilen parametrelerde yeterli bağlantı olmadığı görülmüştür.

150 mm/min takım ilerleme hızı düşük takım devri gerektiği bulunmuştur. Çünkü düşük takım devrinde yüksek ilerleme hızı birleşimi iyi bir birleşme sağlamaktadır. Ve dayanım değerleri bu sebeple daha iyidir. Ancak bu ilerleme hızı ile yüksek devir birleşimleri kaynak durumu için birleşme bölgelerinde yapısal bozulmalara ve homojen olmayan birleşme mekanizmalarına sebebiyet vermektedir.

75 mm/min takım ilerleme hızı kullanılan ilerleme hızları içindeki ortalama ilerleme hızıdır aynı zamanda. Ve tıpkı devirde olduğu gibi bu ilerleme hızı ile birleşimde düşük devir yeterli birleşme olmamasına, yüksek devir ise yapısal bozunma ve homojen olmayan duruma yol açmıştır. Parametrelerdeki ortalama takım devri değeri ve bu ilerleme hızı ikilisi bize hem ideal bir dayanım hem de homojen bir yapı sunmaktadır.

Tüm bu çalışmalara bakıldığında sonuç olarak;

Sürtünme karıştırma kaynak işlemi pek çok bilinmeyen durum içeren bir süreç olduğu için deney parametrelerinin çoklu numunelerle denenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

Tüm deney süreçlerinde tek araştırmacının elinde tüm deneylerin yapılmasının minimum değişikliklerin elde edilmesinde önemli olduğu görülmüştür.

Tüm deney numunelerinin eşit bir şekilde delinmesi ve montajlanması eşit bir takım ilerleme alanı elde edilmesinde çok önemli bir faktördür.

Deney parametrelerinin uygulanabilmesi için gerekli ekipmanların hazırlanması gerekliliği bu deneyde takım montajı, kullanılan alt tablanın üzerine kaynak yapılacak malzemelerin montajı ve sıcaklık ölçüm cihazlarının doğru konumlandırılması olarak görülmüştür. Kullanılan alt tabla tüm numunelerin eşit bir hizada durması ve homojen bir kaynak oluşması için hassas yapıda olması sağlanmış ve eşit birleştirme kaynak alanı elde edilmiştir.

Takım baskı kuvveti için kullanılacak hidrolik sistemin baskı kuvvetini sabit tutabilmesi çok önemlidir. Çünkü bu çalışmanın ön deneylerinde küçük değişimlerin kaynak dolgusu olmamasına ve takımın kaynak bölgesine batmasına açtığı görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan hidrolik sistem çok hassas bir şekilde yaklaşık  $\pm 100$  N olarak takım baskı kuvvetini sabit sıcaklıkta tutabilmiştir.

Çift fazlı yüksek mukavemetli DP1000 çelik malzeme tüm parametrelerde sürtünme karıştırma kaynak yapılabilişliliği ve mekanik değerleri karşılaştırılmıştır. Ve otomotiv sektöründe kullanım alanı bulan bu özel çelik için sürtünme karıştırma kaynağı yapılabileceği aldığı yüksek mukavemet değerleri ve mikro yapı görüntülemelerinde görülmüştür.

Bu çalışmada yüksek takım devrinin de düşük takım devrinin de gerek homojen kaynak birleşmesi gerekse de sıvamada negatif etkile verdiği bulunmuştur. Kullanılacak alanların bu konuda çok önemli olduğu görülmüştür. Fakat yine de bu şartlarda yüksek mukavemet istenilen durumlarda DP1000 çeliğine eşkenar üçgen profilli wolfram karbür malzemeli takım için 7 kN baskı yükünde  $1180 \text{ min}^{-1}$  takım

devrinin uygun olduğu görülmüştür. Yüksek takım devri kullanılıyorsa ilerleme hızlarını düşürmenin, düşük takım devri kullanılıyorsa da ilerleme hızlarını arttırmanın iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur.

1500 min<sup>-1</sup> ve daha yüksek takım devirlerinde bu çalışmadaki DP1000 çeliğinin ve WC takımın kullanılmasının uygun olmadığı sonucu elde edilmiştir. Çok ciddi sorunların oluşabileceği takımın her bir deney sonucunda tükenmesinden ve tekrar kullanılamaz duruma gelmesinden net bir şekilde görülmüştür.

Mikro sertlik ölçümlerinin yapıldığı optimum parametrede kaynak bölgesi, ITAB ve esas malzeme bölgelerinde farklı sertlik değerleri ölçülmüştür. Kaynak bölgesindeki sertlik artışının nedeni oransal olarak büyük çoğunluğunun iğneli martenzite dönüşmesi olarak görülebilir. Numunede ITAB bölgesinde temperlenmiş martenzitlerden dolayı bir sertlik düşüşü ile yumuşama meydana geldiği görülmüştür.

Yapılan bu çalışma için elde edilen mekanik dayanım değerleri dikkate alındığında uygulanan parametreler içerisinde 1180 min<sup>-1</sup> takım devri ve 75 mm/min takım ilerleme hızı ile gerçekleştirilen deneylerin en yüksek mekanik dayanım değerini verdiği bulunmuştur. Çekme deneyi sırasında ITAB bölgesinden kopma gerçekleşmiştir ve asıl kaynak bölgesinden kopma olmaması istenilen bir durumdur. Bu tez çalışmasına başlandığında gerçekleştirilen literatür taramasında DP1000 çift fazlı çelik için sürtünme karıştırma kaynağı uygulamasının çok az denenmiş olduğu görülmüştür. Bu kapsamda 2 mm kalınlığındaki DP1000 çelik levhalar sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş ve ardından çekme deneyinde esas malzemenin yaklaşık %80'i kadar bir çekme dayanımı değeri elde edilmiştir. Literatürde gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler ile karşılaştırıldığında elde edilen sonucun iyileştirilebilir olduğu ancak yine de elde edilen 818 N/mm<sup>2</sup> 'lik değer son derece iyi olduğu görülmektedir. Yapılan literatür araştırmasında bilinen en iyi takım malzemesi (PCBN) ve şimdiye kadar ki en uygun denilebilecek olan takım geometrisi (Vida formunun geliştirilmiş versiyonu MX Triflute serisi uç geometrisi) ile bu parametrenin tekrarlanması önerilmiştir.

Tüm çalışmada başlangıç hedeflerinden olan takım devri ve takım ilerleme hızı için istikrarlı ve kararlı verilere ulaşılmıştır ve çalışma bu sonuçlar ışığında sonuca erdirilmiştir. Başlangıçta durumu merak edilenlerden biri olan takım uç profili ve



malzemesi için takımların yetersiz sayıda olması ve takımların maddi açıdan yüksek maliyetlerinin olması nedeniyle daha sonraki çalışmalarda daha farklı takım geometrileri ve daha farklı takım malzemeleri ile tekrar çalışılabilir.

Bu çalışma sadece deneysel sonuçlar üzerinden değerlendirme yapmaktadır. Bu yüzden bu çalışmanın devamı niteliğinde ve eklenerek sonlu elemanlar ile sayısal modellemelerde sonuçların görülmesi ve karşılaştırmaların yapılması gerekmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

Aktarer, S.M., Sekban, D.M., Saray, O., Kucukomeroglu, T., Ma, Z.Y. ve Purcek, G., Effect of two-pass friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of as-cast binary Al-12Si alloy, Mater. Sci. Eng. A., 636 (2015) 311–319.

Aktarer, S.M. Sürtünme karıştırma işleminin DP 600 çeliğine uygulanması iç yapı ve şekillendirilebilirlik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2019.

Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D.Y., Micari, F., Lahoti, G.D., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N., Rosochowski, A. ve Yanagida, A., Severe plastic deformation (SPD) processes for metals, CIRP Ann. - Manuf. Technol., 57 (2008) 716–735.

Baillie, Philip, et al. "A comparison of double sided friction stir welding in air and underwater for 6mm S275 steel plate." International Journal of Chemical, Nuclear, Metallurgical and Materials Engineering 8.8 (2014): 651-655.

Bayazid, S. M., Farhangi, H., and Ghahramani, A. (2015). Investigation of friction stir welding parameters of 6063-7075 aluminum alloys by Taguchi method. Procedia Materials Science, 11, 6-11.

Bilgin, M. B. (2011). Ferritik paslanmaz çeliklerin sürtünme karıştırma kaynak yapılabilirliğini etkileyen faktörlerin incelenmesi.

[bilginform.com/surtunme-karistirma-kaynagi.html](http://bilginform.com/surtunme-karistirma-kaynagi.html), son erişim tarihi: 07.06.2021.

Boz, M., Kurt, A., 2004. The Influence of Stirrer Geometry on Bonding and Mechanical Properties in Friction Stir Welding Process, Institute of Science and Technology, Materials and Design 25, 343-347.

Chen, Y.C. ve Nakata, K., Evaluation of microstructure and mechanical properties in friction stir processed SKD61 tool steel, Mater. Charact., 60 (2009) 1471–1475.

Chabok, A. ve Dehghani, K., Formation of nanograin in IF steels by friction stir processing, Mater. Sci. Eng. A., 528 (2010) 309–313.

Chung, K, Lee, W, Kim, D., Kim J., Chung, K. H., Kim, C., Okamoto, K. Ve Wagoner, R. H., Macro-Performance Evaluation of Friction Stir Welded Automotive Tailor-Welded Blank Sheets: Part I – Material Properties, *International Journal of Solids and Structures*, 47 (2010) 1048–1062.

Commin, Lorelei, et al. "Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy rolled sheets: Influence of processing parameters." *Acta materialia* 57.2 (2009): 326-334.

Çam, G., Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi, Bildiriler Kitabı: (2003) 47- 63.

Çam, G İpekoğlu G Küçükömeroğlu T ve Aktarer S M Applicability of friction stir welding to steels *J Achiev Mater Manuf Eng.*, 2 (2017) 65-85.

Dabeer P ve Shinde, G Perspective of friction stir welding tools, *Mater. Today Proc.*, 5 (2018) 13166-13176.

Edalati, K. ve Horita, Z., A review on high-pressure torsion (HPT) from 1935 to 1988, *Mater. Sci. Eng. A.*, 652 (2016) 325–352.

El-Rayes, M.M. ve El-Danaf, E.A., The influence of multi-pass friction stir processing on the microstructural and mechanical properties of aluminum alloy 6082, *J. Mater. Process. Technol.*, 212 (2012) 1157–1168.

ESAB, Friction Stir Welding- The ESAB Way, XA00123720, London, 2004.

FENG, Z., et al. Friction stir spot welding of advanced high-strength steels—a feasibility study. *SAE Transactions*, 2005, 592-598.

Fonstein, N., Dual-phase steels, in: R. Rana, S.B. Singh (Eds.), *Automot. Steels*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2017.

Fujii, Hidetoshi, et al. "Friction stir welding of carbon steels." *Materials Science and Engineering: A* 429.1-2 (2006): 50-57.

Geçmen, İnan, and Zarif CATALGOL. (2020) "Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniği ile Birleştirilen Pirinç (CuZn63) Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi." *El-Cezeri Journal of Science and Engineering* 8.2: 533-543.

Ghosh, M.; Kumar, K.; Mishra, R. S. Friction stir lap welded advanced high strength steels: Microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528.28: 8111-8119.

Hanke, S Lemos G V B Bergmann, L Martinazzi D dos Santos, J F ve Strohaecker T R Degradation mechanisms of PCBN tool material during friction stir welding of Ni base alloy 625, *Wear.*, 376-377 (2017) 403-408.

Harikrishna, K. L., et al. "Friction stir welding of magnesium alloy ZM21." *Transactions of the Indian institute of metals* 63.5 (2010): 807-811.

Hartman, T., et al. "Effect of PCBN tool grade on joint strength and tool life in friction stir spot welded DP 980 steel." *Wear* 328 (2015): 531-536.

Hernández, C. A., et al. "Three-dimensional numerical modeling of the friction stir welding of dissimilar steels." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 93.5 (2017): 1567-1581.

Hilditch, T.B., de Souza, T. ve Hodgson, P.D., Properties and automotive applications of advanced high-strength steels (AHSS), *Weld. Join. Adv. High Strength Steels.*, (2015) 9–28.

Hirata, T., Oguri, T., Hagino, H., Tanaka, T., Chung, S. W., Takigawa, Y., and Higashi, K. (2007). Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy *Materials Science and Engineering A*, 456(1-2) 344-349.

Hovanski Y Santella M L ve Grant, G J Friction stir spot welding of hot stamped boron steel, *Scr. Mater.*, 57 (2007) 873-876.

<https://www.uslularhadde.com/sürtünme-karistirma-kaynagi-donanimi> son erişim tarihi 05 05 2021.

Huang, Y Meng, X Zhang, Y Cao, J., and Feng, J (2017). Micro friction stir welding of ultra thin Al 6061 sheets *Journal of Materials Processing Technology*, 250 313 319 doi 10 1016 /j jmatprotec. 2017.07.031

Kaluç, E. ve Taban, E., Sürtünen Eleman ile Kaynak (FSW) Yöntemi (Sürtünme Karıştırma Kaynağı), *TMMOB Makine Mühendisleri Odası MMO*, 2007, 460.

Karthikeyan, L., Senthilkumar, V.S. ve Padmanabhan, K.A., On the role of process variables in the friction stir processing of cast aluminum A319 alloy, *Mater. Des.*, 31 (2010) 761–771.

Khan, N Z Khan, Z A ve Siddiquee A N Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/ ratio on tensile strength of friction stir welded 6063 aluminium alloy, Mater. Today Proc., 2 (2015) 1450-1457.

Kim, D., Lee, W., Kim, J, Chung, K. H., Kim, C., Okamoto, Wagoner, R. H. ve Chung, K., Macro-Performance Evaluation of Friction Stir Welded Automotive Tailor-Welded Blank Sheets: Part II – Formability, International Journal of Solids and Structures, 47 (2010) 1063–1081.

Kimapogon, K., Watanabe, T., 2004. Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel, Welding Journal, 277-282.

Kuziak, R., Kawalla, R. ve Waengler, S., Advanced high strength steels for automotive industry, Arch. Civ. Mech. Eng., 8 (2008) 103–117.

Küçükömeroğlu, T., ve ark. "Sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilen çift fazlı çeliğin mikro yapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi." Ankara 2017.

Küçükömeroğlu, Tevfik; Aktarer, Semih Mahmut; Çam, Gürel. Investigation of mechanical and microstructural properties of friction stir welded dual phase (DP) steel. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019. p. 012010.

Lesch, C., Kwiaton, N. ve Klose, F.B., Advanced high strength steels (AHSS) for automotive applications – Tailored properties by smart microstructural adjustments, Steel Res. Int., 88 (2017) 1–21.

Lienert, T. J., Stellwag, W.L., Grimmert Jr., And Warke R.W., 2003. Friction Stir Welding Studies on Mild Steel, Welding Journal, 82 (1), 1-7.

Liu, Xun, Shuhuai Lan, and Jun Ni. "Electrically assisted friction stir welding for joining Al 6061 to TRIP 780 steel." Journal of Materials Processing Technology 219 (2015): 112-123.

Li, C., Yuan, G., Ji, F., Kang, J., Misra, D. ve Wang, G., Mechanism of microstructural control and mechanical properties in hot rolled plain C–Mn steel during controlled cooling, ISIJ Int., 55 (2015) 1721–1729.

Lin, Hongtao, et al. Microstructure gradient characteristics and mechanical properties of friction stir welded high strength QP980 steel. Materials Research Express, 2019, 6.12: 126584.

Long, L Chen, G Zhang, S Liu, T and Shi, Q Finite element analysis of the tool tilt angle effect on the formation of friction stir welds, *J. Manuf. Process.*, 30 (2017) 562-569.

Ma, Z.Y., Sharma, S.R. ve Mishra, R.S., Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum, *Mater. Sci. Eng. A.*, 433 (2006) 269–278.

Ma, Z. Y., Friction stir processing technology: A Review, *Metall. Mater. Trans. A.*, 39 (2008) 642–658.

Mahmoudiniya, Mahdi, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded ferrite-martensite DP700 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 737: 213-222.

Mallick, P.K., Advanced materials for automotive applications: an overview, in: J. Rowe (Ed.), *Adv. Mater. Automot. Eng.*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2012.

Mandal, S., Williamson, K., 2005. A thermomechanical hot channel approach for friction stir welding *Journal of Materials Processing Technology* 174, 190–194.

MD, Sameer; Birru, Anil Kumar. Selection of friction stir welding tool rotational speed for joining dual phase DP600 steel sheets—an experimental approach. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2021, 35.7: 751-776.

Meran, C., Kovan, V., Alptekin, A., 2007. Friction stir welding of AISI 304 austenitic stainless steel *Material- wissenschaft und Werkstofftechnik*. 38 (10), 829-835.

Meran, C., Canyurt, O.E., 2008. The effect of tool rotational speed and traverse speed on welding of AISI 304 austenitic stainless steels by friction stir welding method. VII'nci Ulusal Kaynak Teknolojisi Kongresi. 157-170.

Meran, C, et al. Çeliklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı. *Engineer & the Machinery Magazine*, 2009, 599.

Meshram M P Kodli B K ve Dey, S R Friction stir welding of austenitic stainless steel by pcbn tool and its joint analyses, *Procedia Mater. Sci.*, 6 (2014) 135-139.

Miles, M. P., et al. Effect of friction stir welding conditions on properties and microstructures of high strength automotive steel. *Science and technology of welding and joining*, 2009, 14.3: 228-232.

Miles, M P Ridges C S Hovanski Y Peterson J Santella M L ve Steel, R Impact of tool wear on joint strength in friction stir spot welding of DP 980 steel *Sci Technol. Weld. Join.*, 16 (2017) 642-647.

Miranda, R M Gandra J Vilaça P 2013. "Surface Modification by Friction Based Processes," In *Modern Surface Engineering Treatments*, Mahmood Aliofkhaezai (Ed ISBN 978 953 51 1149 8 In Tech Science, Technology and Medicine open access Publisher.

Mironov, S., Sato, Y.S. ve Kokawa, H., Microstructural evolution during friction stirprocessing of pure iron, *Acta Mater.*, 56 (2008) 2602–2614.

Mishra, R.S. and Ma Z.Y., *Friction Stir Welding and Processing*, *Mater. Sci. And Eng.* R50, (2005) 1-78.

Mohanty, H K Mahapatra, M M Kumar, P Biswas, P ve Mandal, N R Effect of tool shoulder and pin probe profiles on friction stirred aluminum welds a comparative study, *J. Mar. Sci. Appl.*, 11 (2012) 200-207.

Mosleh A.O. 2015 F.H. Mahmoud T.S. Mahmoud And T.A. Khalifa 2015 *Microstructure And Static Immersion Corrosion Behavior Of Aa 7020 O Al Plates Joined By Friction Stir Welding.*

Nandan, R., Debroy, T. and Bhadeshia, H. K. D. H., Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment Structure and Properties, *Progress in Materials Science*, 53 (2008) 980–1023.

Nguyen, Van Nhat, et al. "Investigation on lap-joint friction stir welding between AA6351 alloys and DP800 steel sheets." *Sādhanā* 43.10 (2018): 1-7.

Okazaki, Masakazu; Agarwal, Ranjak; Hirano, Satoshi. Fatigue Strength of Dissimilar Metal Friction Stir Welded Joint between TRIP Steel and Mild Steel. In: *The Proceedings of Conference of Hokuriku-Shinetsu Branch 2020.57*. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2020. p. B014.

Park, K.T., Lee, Y.K. ve Shin, D.H., Fabrication of ultrafine grained ferrite/martensite dual phase steel by severe plastic deformation, *ISIJ Int.*, 45 (2005) 750–755.



Pouriamanesh, Rasoul; Nasırı, Babak; Dehghanı, Kamran. The effect of TiO<sub>2</sub> particles on microstructural evolutions of HSLA steels subjected to friction stir welding. *Materials Research Express*, 2019, 6.8: 086593.

Purcek, G., Saray, O., Karaman, I. ve Kucukomeroglu, T., Effect of severe plastic deformation on tensile properties and impact toughness of two-phase Zn-40Al alloy, *Mater. Sci. Eng. A.*, 490 (2008) 403–410.

Rana, Radhakanta and Singh, S.B., *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*, Cambridge, 2017.

Rashid, M.S., Dual phase steels, *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 11 (1981) 245–267.

Sadeesh P Kannan, M V Rajkumar, V Avinash P Arivazhagan N Ramkumar, K D Narayanan, S. (2014), Studies on friction stir welding of AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals *Procedia Engineering*, 75, 145-149.

Saito, Y., Utsunomiya, H., Tsuji, N. ve Sakai, T., Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process, *Acta Mater.*, 47 (1999) 579–583.

Sameer, M. D.; Birru, Anil Kumar. Effect of Tool Tilt Angles on Mechanical and Microstructural Properties of Friction Stir Welding of Dissimilar Dual-Phase 600 Steel and AA6082-T6 Aluminum Alloy. *SAE Technical Paper*, 2020.

Santella, M., Hovanski, Y., Frederick, A., Grant, G.ve Dahl, M., Friction stir spot welding of DP780 carbon steel,*Sci. Technol. Weld. Join.*, 15 (2010) 271–278.

Saravanan, V Rajakumar S Banerjee, N ve Amuthakkannan R Effect of shoulder diameter to pin diameter ratio on microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded AA 2024 T 6 and AA 7075 T 6 aluminum alloy joints, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 87 (2016) 3637-3645.

Sarwar, M. ve Priestner, R., Influence of ferrite-martensite microstructural morphology on tensile properties of dual-phase steel, *J. Mater. Sci.*, 31 (1996) 2091–2095.

Sato, Y.S., Nelson, T.W., Sterling, C.J., Steel, R.J., Pettersson, C.O., 2005. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded SAF 2507 super duplex stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, Volume 397, 376-384.

Shen, X.J., Tang, S., Wu, Y.J., Yang, X.L., Chen, J., Liu, Z.Y., Misra, R.D.K. ve Wang, G.D., Evolution of microstructure and crystallographic texture of microalloyed steel during warm rolling in dual phase region and their influence on mechanical properties, *Mater. Sci. Eng. A.*, 685 (2017) 194–204.

Smith, B., Crusan, W., Hootman, J., Hinrichs, J., Heidemman and Noruk, J, Friction Stir Welding in the Automotive Industry, Tower Automotive Technology Application, 2008.

Son, Y. Il, Lee, Y.K., Park, K.T., Lee, C.S. ve Shin, D.H., Ultrafine grained ferritemartensite dual phase steels fabricated via equal channel angular pressing: Microstructure and tensile properties, *Acta Mater.*, 53 (2005) 3125–3134.

Sorensen, C.D., 2004. Progress in friction stir welding high temperature materials, Brigham Young University.

Sterling, C.J., Nelson, T.W., Sorensen, C.D., and Posada, M., 2004. Effects of Friction Stir Processing on the Microstructure and Mechanical Properties of Fusion Welded 304L Stainless Steel, Brigham Young University.

Şık, A. ve Kayabaş, Ö., Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Yapılan Alüminyumun Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi*, 11, 12 (2003) 30-43.

Thomas, W M and Nicholas, E D Friction stir welding for the transportation industries, *Materials and Design*, 18 (1997) 269-273.

Thomas, W.M., Threadgill, P.L., Nicholas, E.D., 1999. *Sci. Tech. Weld. Joining* 4, 365.

Thompson, M., Ferry, M. ve Manohar, P.A., Simulation of hot-band microstructure of c-mn steels during high speed cooling, *ISIJ Int.*, 41 (2001) 891–899.

Torganchuk, Vladimir, et al. "Microstructure evolution and strengthening mechanisms in friction-stir welded TWIP steel." *Materials Science and Engineering: A* 746 (2019): 248-258.

Toth, L.S. ve Gu, C., Ultrafine-grain metals by severe plastic deformation, *Mater. Charact.*, 92 (2014) 1–14.

Tsai, F.Y. ve Kao, P.W., Improvement of mechanical properties of a cast Al-Si base alloy by friction stir processing, *Mater. Lett.*, 80 (2012) 40–42.

Valiev, R.Z. ve Langdon, T.G., Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Prog. Mater. Sci.*, 51 (2006) 881–981.

Vicharapu, Buchibabu, et al. Degradation of nickel-bonded tungsten carbide tools in friction stir welding of high carbon steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 1-13.

Węglowski, M.S., Friction stir processing – State of the art, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, 18 (2018) 114–129.

Xiong, Z.P., Saleh, A.A., Kostryzhev, A.G. ve Pereloma, E. V., Strain-induced ferrite formation and its effect on mechanical properties of a dual phase steel produced using laboratory simulated strip casting, *J. Alloys Compd.*, 721 (2017) 291–306.

Yazdipour, Alireza, and Akbar Heidarzadeh. "Dissimilar butt friction stir welding of Al 5083-H321 and 316L stainless steel alloys." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 87.9 (2016): 3105-3112.

Jinyoung Yoon. Characteristic evaluation of coaxial high-frequency induction heating hybrid friction stir welding process on high strength carbon steel sheets. *Journal of Welding and Joining*, 2019, 37.6: 585-590.

Yong Jai, K. W. O. N., Seong-Beom, S. H. I. M., and Dong-Hwan, P. A. R. K. (2009). Friction stir welding of 5052 aluminum alloy plates. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19, s23-s27.

You, HyeonJeong, et al. Comprehensive Analysis of the Microstructure and Mechanical Properties of Friction-Stir-Welded Low-Carbon High-Strength Steels with Tensile Strengths Ranging from 590 MPa to 1.5 GPa. *Applied Sciences*, 2021, 11.12: 5728.

Zhao, J. ve Jiang, Z., Thermomechanical processing of advanced high strength steels, *Prog. Mater. Sci.*, 94 (2018) 174–242.

Zhu, X. K., and Y. J. Chao. "Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel." *Journal of materials processing technology* 146.2 (2004): 263-272.