



SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ AA6061-T6, AA7075-T6 MALZEME ÇİFTLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN KİYASLANMASI

İbrahim ÜLKE

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İbrahim ÜLKE

02/07/2021

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ AA6061-T6, AA7075-T6 MALZEME ÇİFTLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN KIYASLANMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

İbrahim ÜLKE

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2021

ÖZET

Hafif olmalarıyla beraber üstün mukavemet özelliklerine de sahip olmaları alüminyum alaşımlı malzemeleri havacılık ve uzay sanayii için vazgeçilmez malzemeler haline getirmiştir. Ancak genel olarak kaynak kabiliyetlerinin düşük olması bu malzemelerin birleştirilmesinde perçinlerin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Perçinler mukavemet açısından oldukça dayanıklı elemanlar olmalarına rağmen, perçin ve perçinleme işleminin yorulma dayanımı gibi çok önemli bazı mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkileri ihmal edilemez. Bununla birlikte perçinlerin sıklıkla kullanıldıkları havacılık ve uzay sanayiinde imal edilen ürünlerin yapısal ağırlıklarına etkileri, kullanılan perçin sayıları dikkate alındığında ihmal edilemeyecek seviyelere ulaşmaktadır. Yeni geliştirilen bir kaynak yöntemi olan SKK (Sürtünme Karıştırma Kaynağı) özellikle alüminyum alaşımlı malzemeler gibi düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler için oldukça uygun bir yöntemdir. Farklı cinsten iki malzemenin kaynağını başarılı bir şekilde yapabilmesi, diğer kaynak yöntemlerindeki gibi büyük miktarlarda termal gerilmelere sebep olmaması bu yöntemin en önemli avantajlarından. Yapılan bu çalışma kapsamında her biri 2 mm kalınlığa sahip olan 100 mm × 125 mm boyutlarındaki AA6061-T6 ve AA7075-T6 alüminyum alaşımlı plakaların kendi aralarında ve birbirleriyle sürtünme karıştırma kaynak yöntemi kullanılarak alını alına birleştirilmesinde deney parametrelerinin kaynak kalitesine etkileri incelenmiştir. Her biri üçer seviyeden oluşan üç farklı kontrol değişkeni olarak, takım dönme devri 500 dev/dak, 710 dev/dak ve 1000 dev/dak, takım ilerleme hızı 20 mm/dak, 28 mm/dak ve 40 mm/dak ve takım eğim açısı 0°, 0,5° ve 1° seçilmiş ve bu kontrol faktörlerinin etki seviyeleri AA6061-AA6061, AA7075-AA7075 ve AA6061-AA7075 şeklindeki 3 farklı kombinasyon için kıyaslanmıştır. Yanıt yüzey yöntemi kullanılarak 3 tekrarlı olarak yapılan deney planına uygun olarak birleştirilen 135 çift plaka su jeti ile kesildikten sonra çekme dayanımlarının belirlenebilmesi için çekme testine tabi tutulmuşlardır. Çekme testlerinden elde edilen değerler kullanılarak Minitab19 programında yapılan analizler sonucunda kontrol faktörlerinin etki katsayıları hesaplanmış ve optimum işlem parametreleri belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Alüminyum, deney tasarımı, sürtünme karıştırma kaynağı, optimizasyon, çekme dayanımı

Sayfa Adedi : 139

Danışman : Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL

COMPARISON OF MECHANICAL PROPERTIES OF AA6061-T6, AA7075-T6
MATERIAL PAIRS COMBINED WITH FRICTION STIR WELDING

(M. Sc. Thesis)

İbrahim ÜLKE

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2021

ABSTRACT

Aluminum alloy materials have become indispensable materials for the aviation and space industry due to their lightness and superior strength. However, the generally low welding capabilities necessitate the use of rivets in joining these materials. Although rivets are highly durable elements in terms of strength, the negative effects of rivet and riveting process on some very important mechanical properties such as fatigue strength cannot be neglected. However, the effects of rivets on the structural weights of the products manufactured in the aviation and space industry, where rivets are frequently used, reach levels that cannot be neglected considering the number of rivets used. FSW (Friction Stir Welding), a newly developed welding method, is a very suitable method especially for materials with low melting temperature such as aluminum alloy materials. One of the most important advantages of this method is that it can successfully weld two materials of different types and does not cause large amounts of thermal stress as in other welding methods. Within the scope of this study, the effects of the test parameters on the welding quality were investigated in the friction stirring welding method of friction stirring welding method of AA6061-T6 and AA7075-T6 aluminum alloy plates of 100 mm × 125 mm dimensions, each of which has a thickness of 2 mm. As three different control variables, each of which consists of three levels, tool rotation speed 500rpm, 710rpm and 1000rpm, tool feed rate 20 mm / min, 28 mm / min and 40 mm / min and tool tilt angle 0°, 0.5° and 1° were selected and the effect levels of these control factors were compared for 3 different combinations as AA6061-AA6061, AA7075-AA7075 and AA6061-AA7075. 135 pairs of plates, which were joined in accordance with the test plan made in 3 repetitions by using the response surface method, were subjected to tensile test to determine their tensile strength after being cut with water jet. As a result of the analysis made in Minitab19 using the values obtained from the tensile tests, the effect coefficients of the control factors were calculated and the optimum process parameters were determined.

Science Code : 91438

Key Words : Aluminum, experimental design, friction stir welding, optimization, tensile strength

Page Number : 139

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca yardımları ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL'a, teşekkürü borç bilirim.

Yüksek Lisans sürecimin başından sonuna kadar 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında maddi desteklerini esirgemeyerek bana destek olan TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımın başından beri tüm hayatım boyunca olduğu gibi bütün güçleriyle bana destek olmuş değerli aile üyelerime, arkadaşlarıma ve hep yanımda olmuş dostlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	3
2.1. Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması.....	7
2.1.1. Dövme alüminyum alaşımları ve özellikleri	8
2.1.2. Döküm alüminyum alaşımları ve özellikleri.....	14
2.2. Alüminyum Alaşımlarda Temper Gösterimi	16
2.3. Alüminyum Alaşımlarda Uygulanan Birleştirme Yöntemleri	18
2.3.1. Alüminyum alaşımlarda uygulanan gelişmiş kaynak yöntemleri	19
3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI	21
3.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Kullanım Alanları	24
3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Oluşan İç Yapı Kusurları	25
3.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Proses Parametreleri.....	28
3.3.1. Takım ilerleme hızı	28
3.3.2. Takım dönme devri	30
3.3.3. Takım eğim açısı	32

	Sayfa
3.3.4. Takım omuz çapı.....	34
3.3.5. Takım geometrisi	37
3.3.6. Takım malzemesi	39
3.3.7. Penetrasyon derinliği.....	40
3.3.8. Eksenel kuvvet	41
3.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Proses Geliştirme Uygulamaları	43
3.4.1. Eş zamanlı, çift taraflı takım uygulaması.....	43
3.4.2. Paralel çiftli takım uygulaması.....	44
3.4.3. Tandem çiftli takım uygulaması.....	45
3.4.4. Kademeli çiftli takım uygulaması	46
3.4.5. Ultrasonik titreşimli sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları	47
3.4.6. Soğutucu akışkan içerisinde sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları .	48
3.4.7. Lazer destekli sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları	50
3.4.8. Takım çıkış deliği sorununun çözümü için geliştirilen uygulamalar	52
3.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları	54
3.5.1. Sürtünme karıştırma kaynağının avantajları	54
3.5.2. Sürtünme karıştırma kaynağının dezavantajları.....	58
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	61
4.1. Proses Parametresi Optimizasyon Uygulamaları	61
4.2. Proses Geliştirme Uygulamaları	69
5. MATERYAL VE YÖNTEM	75
5.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	75
5.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Karıştırıcı Takım	76
5.3. Kullanılan Cihaz ve Deney Düzeneği	77

	Sayfa
5.4. Deney Tasarımı ve İşlem Parametreleri	79
5.5. Tahribatlı ve Tahribatsız Muayene Yöntemleri	80
5.5.1. Çekme testi.....	80
5.5.2. Sertlik ölçümü	82
5.5.3. Optik inceleme için numune hazırlığı	83
5.5.4. Optik mikroskop ile inceleme	84
5.5.5. Eğme testi.....	84
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	85
6.1. AA6061-T6 Plakaların Birleştirilmesi	86
6.2. AA7075-T6 Plakaların Birleştirilmesi	87
6.3. AA6061-T6 - AA7075-T6 Plakaların Birleştirilmesi	88
6.4. Parametre Optimizasyon İşlemleri	91
7. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA.....	99
7.1. Optimizasyon Öncesi Deneysel Bulgular ve Tartışma	99
7.1.1. AA6061-T6 plaka çiftlerinin birleştirilmesine ait sonuçlar	99
7.1.2. AA7075-T6 plaka çiftlerinin birleştirilmesine ait sonuçlar	103
7.1.3. AA6061-T6 - AA7075-T6 plaka çiftlerinin birleştirilmesine ait sonuçlar	106
7.2. Optimizasyon Sonrası Deneysel Bulgular ve Tartışma.....	109
7.2.1. İşlem parametrelerinin çekme dayanımına etkileri	109
7.2.2. İşlem parametrelerinin sertliğe etkileri	113
7.2.3. İşlem parametrelerinin eğme dayanımına etkileri.....	117
7.2.4. İşlem parametrelerinin makro ve mikroyapı üzerindeki etkileri.....	119
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	125

Sayfa

KAYNAKLAR	127
ÖZGEÇMİŞ	139



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Saf alüminyumun bazı genel özellikleri	3
Çizelge 2.2. Dövme alüminyum alaşım serileri ve bu serilerin genel özellikleri	9
Çizelge 2.3. AA6061 malzemenin kimyasal bileşimi.....	10
Çizelge 2.4. AA6061 serisinde bazı ısıt işlemler türlerinin mekanik özelliklere etkisi	10
Çizelge 2.5. AA6061 (AlMg1SiCu) malzemenin genel özellikleri.....	11
Çizelge 2.6. AA7075 malzemenin kimyasal bileşimi.....	12
Çizelge 2.7. AA7075 serisinde bazı ısıt işlemler türlerinin mekanik özelliklere etkisi	12
Çizelge 2.8. AA7075 (AlZn5.5MgCu) malzemenin genel özellikleri.....	13
Çizelge 2.9. Döküm alüminyum alaşımlarda birinci basamaklar ve tanımlamaları	14
Çizelge 2.10. Döküm alüminyum alaşımlarda son basamak değerleri ve tanımları.....	15
Çizelge 2.11. Döküm alüminyum alaşımlarda ısıt işlemler kabiliyetleri.....	15
Çizelge 2.12. Alüminyum alaşımlarda temel temper tanımları	16
Çizelge 2.13. Alüminyum alaşımlarda “H” temperinde temel tanımlar	17
Çizelge 2.14. Alüminyum alaşımlarda “T” temperinde temel tanımlar	17
Çizelge 3.1. Farklı kombinasyonlarda ilerleme hızının mekanik özelliklere etkisi.....	29
Çizelge 3.2. SiC takviyesi yapılmış AA2024-T351 ve AA7075-T651 alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde takım dönme devrinin mekanik özelliklere etkisi.....	30
Çizelge 3.3. AA2014 plakada, takım eğim açısının mekanik özelliklere etkisi	33
Çizelge 3.4. Sürtünme karıştırma kaynağında omuz çapı, omuz yüzey eğriliği ve pim çapının etkisi	36
Çizelge 3.5. AA6063-T6 malzemede takım geometrisinin mekanik özelliklere etkisi ..	37
Çizelge 3.6. AZ61A magnezyum alaşımında farklı eksenel kuvvetlerde içyapı analizi ...	41
Çizelge 3.7. AA6061-T6’da su altı SKK uygulamasının tane çapına etkisi.....	49

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.8. AA5757-H111 malzemede lazer gücünün mekanik özelliklere etkisi	51
Çizelge 3.9. Aktif-pasif dolgulu sürtünme karıştırma tamiri işlem basamakları	53
Çizelge 3.10. Proses parametreleri ve çıkış deliği görünüşü	53
Çizelge 3.11. Alüminyum malzemede yaşam döngüsü etki değerlendirme sonuçları ...	56
Çizelge 5.1. AA6061-T6, AA7075-T6 plakaların kimyasal bileşimleri.....	75
Çizelge 5.2. AA6061-T6, AA7075-T6 plakaların mekanik özellikleri	75
Çizelge 5.3. Performans karakteristiğini en çok etkileyen faktörler ve seviyeleri	79
Çizelge 5.4. Sabit faktörler ve seviye değerleri	80
Çizelge 6.1. Plaka çiftlerine ait çekme deneyi sonuçları	92
Çizelge 6.2. 4 faktörlü deney tasarım modeli ve çekme dayanımı değerleri	93
Çizelge 6.3. Cevap yüzeyi regresyon analizinin model özeti	94
Çizelge 6.4. Malzeme çekme dayanımı için öngörülen faktörler	95
Çizelge 6.5. Bağımsız değişken optimizasyon işlem parametreleri	96
Çizelge 7.1. AA6061-T6 plakada takım eğim açısının ortalama maksimum çekme dayanımına etkisi	102
Çizelge 7.2. AA6061-T6 plakada takım dönme devri-takım ilerleme hızı ilişkisi.....	103
Çizelge 7.3. Farklı takım eğim açılarındaki ortalama maksimum çekme dayanımları.....	107
Çizelge 7.4. AA6061 – AA7075 plakada takım dönme devri-takım ilerleme hızı ilişkisi.....	108
Çizelge 7.5. İşlem parametrelerinin AA6061 – AA6061 çiftinin sertliğine etkileri.....	113
Çizelge 7.6. İşlem parametrelerinin AA6061 – AA7075 çiftinin sertliğine etkileri.....	114
Çizelge 7.7. İşlem parametrelerinin AA7075 – AA7075 çiftinin sertliğine etkileri.....	115
Çizelge 7.8. Numunelere ait eğme dayanımları	118

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Hall-Héroult hücresi şematik görünümü	7
Şekil 2.2. Alüminyum alaşımların genel sınıflandırması.....	8
Şekil 3.1. Sürtünme karıştırma kaynağının şematik görünümü	21
Şekil 3.2. Sürtünme karıştırma kaynağında oluşan kaynak bölgesi içyapısının şematik görünümü (A: ITAB, B: TEB, C: DKB)	22
Şekil 3.3. Farklı yatay düzlem derinliklerinde iz akışları (a) 0,35 mm, (b) 1,59 mm ve (c) 2,28 mm	23
Şekil 3.4. AISI 316L’de ilerleme hızının maksimum çekme dayanımına etkisi	28
Şekil 3.5. Ultrasonik titreşimli sürtünme karıştırma kaynağının CFD modelinde, omuz çapının; kaynak bölgesi tepe sıcaklığı, toplam ısı üretim miktarı ve kesme bölgesi hacmine etkisi	34
Şekil 3.6. Alın altına kaynaklanmış, 6 mm kalınlıktaki AA6061 plakalarda omuz çapının mekanik özelliklere etkisi. (a) Omuz çapı-Akma dayanımı, (b) Omuz çapı-Maksimum çekme dayanımı, (c) Omuz çapı-Uzama miktarı, (d) Omuz çapı-Bağlantı verimliliği	35
Şekil 3.7. AZ80A magnezyum alaşımında takım geometrisine bağlı olarak eksenel kuvvet çekme dayanımı ilişkisi	42
Şekil 3.8. Eş zamanlı, çift taraflı, zıt yönlü takım uygulaması şematik görünümü	43
Şekil 3.9. Paralel çiftli takım uygulamasının şematik görünümü	44
Şekil 3.10. Tandem çiftli takım uygulamasının şematik görünümü	45
Şekil 3.11. Kademeli çiftli takım uygulamasının şematik görünümü.....	46
Şekil 3.12. Ultrasonik titreşimli SKK uygulaması çeşitleri. (a) takıma ultrasonik titreşim uygulaması, (b) malzeme üst yüzeyine ultrasonik titreşim uygulaması.....	47
Şekil 3.13. Su altı sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması.....	48
Şekil 3.14. Lazer destekli sürtünme karıştırma kaynağı işlemi	50
Şekil 3.15. Üç aşamalı çıkış deliği tamir işlemi.....	52
Şekil 5.1. Çekme test numuneleri ölçüleri	80

Şekil	Sayfa
Şekil 6.1. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkene ana etki grafikleri	96
Şekil 6.2. Çekme dayanımı optimizasyon grafikleri.....	97
Şekil 6.3. İşlem parametrelerinin çekme dayanımına etkileri.....	98
Şekil 7.1. AA6061-AA6061 plaka kombinasyonuna ait “Takım İlerleme Hızı – Takım Dönme Devri” etkileşim grafiği.....	102
Şekil 7.2. AA7075-AA7075 plaka kombinasyonuna ait “Takım İlerleme Hızı – Takım Dönme Devri” etkileşim grafiği.....	106
Şekil 7.3. AA6061-AA7075 plaka kombinasyonuna ait “Takım İlerleme Hızı – Takım Dönme Devri” etkileşim grafiği.....	109
Şekil 7.4. AA6061 – AA6061 optimizasyon sonrası çekme dayanımı.....	110
Şekil 7.5. AA6061 – AA7075 optimizasyon sonrası çekme dayanımı.....	111
Şekil 7.6. AA7075 – AA7075 optimizasyon sonrası çekme dayanımı.....	112
Şekil 7.7. AA6061 – AA6061 çiftinde kaynak merkezine uzaklıkla sertliğin değişimi.	113
Şekil 7.8. AA6061 – AA7075 çiftinde kaynak merkezine uzaklıkla sertliğin değişimi.	114
Şekil 7.9. AA7075 – AA7075 çiftinde kaynak merkezine uzaklıkla sertliğin değişimi.	115
Şekil 7.10. Farklı kombinasyonlar için kaynak merkezine uzaklıkla sertlik değişimi ...	116
Şekil 7.11. Üç nokta eğme test sonuçları.....	117

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. AlSi12’de aşırı ısı girişi nedeniyle kaynak hattında oluşan ilave yüzey	25
Resim 3.2. a) AA2024-T6’da kaynak kökünde penetrasyon eksikliği, b)AA5083’te kaynak kökünde penetrasyon eksikliği.....	26
Resim 3.3. AlSi12’de yetersiz ısı girişi nedeniyle kaynak hattında oluşan boşluk	26
Resim 3.4. 2A12-T4 malzemede oluşmuş öpüşen yüzeyler	27
Resim 3.5. AA7075-T6 ve AZ31B-H24 alaşımlarında oluşan yüzey çatlağı.....	27
Resim 3.6. SiC takviyesi yapılmış AA2024-T351 ve AA7075-T651 alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde takım dönme devrinin kaynak kalitesine etkisi (a) 400-1100 dev/dak, (b) 1100-1800 dev/dak	31
Resim 3.7. Alın altına üç farklı takım eğim açısında birleştirilmiş AISI 316L paslanmaz çelik plakalar. (a) 0°, (b) 1,5°, (c) 3°	32
Resim 3.8. 316L çelikte takım eğim açısına bağlı olarak kaynak bölgesi tane yapısı (a) Ana malzeme, (b) 0° takım eğim açısı, (c) 1,5° takım eğim açısı, (d) 3° takım eğim açısı	33
Resim 3.9. Bakır plakada farklı penetrasyon derinliklerinde kaynak yüzeyi görünümü (İşlem parametreleri; dönme devri: 700 dev/dak, ilerleme hızı: 40 mm/dak, takım açısı: 10).....	40
Resim 3.10. Yan yana paralel çiftli takım.....	44
Resim 3.11. Tandem çiftli takım uygulaması ile kaynaklanmış 2,5 mm plaka	46
Resim 3.12. AA6061-T6’da iki farklı hızda kaynak bölgesi ve içyapı kusurları (Solda) geleneksel SKK, (Sağda) takımına dikey olarak ultrasonik etki uygulanmış SKK.....	48
Resim 3.13. (Solda) SKK ile bakır-bakır birleşimi, (Sağda) SKK ile bakır-alüminyum birleşimi	54
Resim 3.14. Deneysel çalışmalarda kullanılan ESAB Rosio FSW robotu	55
Resim 3.15. Crawford Swift Power Stir firmasına ait tek pasoda 150 mm kalınlıkta kaynak yapabilen FSW makinası.....	57
Resim 3.16. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak uzunluğunun takım aşınmasına etkisi (Kaynak uzunlukları ve aşınma oranları soldan sağa doğru; 0 m, 100 m & %2, 200 m & %4, 300 m & %10, 400 m & %12).....	58

Resim	Sayfa
Resim 3.17. KUKA ve TWI tarafından geliştirilmiş robot FSW kol	59
Resim 3.18. SKK'da sıkma durumuna bağlı olarak plakalar arasında oluşan boşluk (a) yanal basınç olmadan, (b) yanal basınç varken	59
Resim 3.19. AA2024-T3'te çıkış deliği hasarı	60
Resim 5.1. 100 mm × 125 mm × 2 mm boyutlarında kesilmiş AA6061-T6 plakalar ...	76
Resim 5.2. AISI H13 HSS malzemeden imal edilen karıştırıcı takım.....	76
Resim 5.3. Deneylerde kullanılan dik başlı üniversal freze tezgâhı	77
Resim 5.4. Plakaların tezgâh tablasına bağlanması	78
Resim 5.5. Dartec çekme test cihazı	81
Resim 5.6. Çekme testine hazırlanmış AA7075-T6 plaka çiftine ait 26. numune.....	81
Resim 5.7. TIME TH-500 analog manuel sertlik ölçüm cihazı.....	82
Resim 5.8. Optik inceleme numunesi hazırlama sürecinde kullanılan cihazlar a) Abrasif kesme cihazı, b) Sıcak bakalite alma cihazı, c) Manyetik zımparalama cihazı, d) Otomatik parlatma cihazı	83
Resim 5.9. Makro ve mikroyapı analizlerinde kullanılan optik mikroskoplar a) Leica DMC2900, b) Leica DM 4000M.....	84
Resim 5.10. INSTRON 3369 üniversal test cihazı	84
Resim 6.1. AA7075-T6 plakalarda kontrolsüz titreşimlerin kaynak kalitesine etkisi (solda) titreşimli, (sağda) titreşimsiz	85
Resim 6.2. Kodlama farklılıklarını gösteren örnekler	86
Resim 6.3. AA6061-T6 malzeme kullanılarak birleştirilmiş çeşitli plaka çiftleri.....	87
Resim 6.4. AA7075-T6 malzeme kullanılarak birleştirilmiş çeşitli plaka çiftleri.....	88
Resim 6.5. AA6061-AA7075 plaka çiftlerinin tezgâh tablasına yerleştirilmesi	89
Resim 6.6. AA6061-AA7075 plaka çiftlerinin birleştirilmesi esnasında aşınan bir takım	90
Resim 6.7. AA6061-AA7075 plakalar kullanılarak birleştirilmiş yeni plakalar	90
Resim 6.8. Su jeti ile kesilmiş plaka çifti.....	91

Resim	Sayfa
Resim 6.9. Kapalı tünel oluşumuna sahip kaynak kesiti	91
Resim 7.1. AA6061-T6 plakada 1° takım açısında dalga formu oluşumlu yüzeyler	99
Resim 7.2. AA6061-T6 plakada ilerleme hızına bağlı çapak oluşumu	100
Resim 7.3. İlk daldırma noktasının plaka kenarlarına olan uzaklığına bağlı olarak oluşan form bozukluğu	100
Resim 7.4. Takım dönme devrine bağlı kaynak yüzeyi kalitesi	101
Resim 7.5. Takım dönme devrinin çapak oluşumuna etkisi	101
Resim 7.6. Ergime noktası farklılığına bağlı olarak aynı işlem parametrelerinde değişen çapak oluşumu (500 dev/dak, 28 mm/dak, 0°).....	104
Resim 7.7. AA7075-T6 plakada kaynak başlangıç kenarında oluşan form bozulmaları	104
Resim 7.8. Düz yüzeyli takımda takım eğim açısına bağlı dalga formu oluşumu.....	105
Resim 7.9. Takım dönme devrine ve takım eğim açısına bağlı çıkış deliği kenar form bozukluğu	105
Resim 7.10. AA6061-AA7075 plaka çiftinde ilerleme hızının yüzey kalitesine etkisi..	107
Resim 7.11. Aynı işlem parametrelerinin farklı kombinasyonlarda yüzey kalitesine etkisi (710 dev/dak, 20 mm/dak, 0°)	108
Resim 7.12. AA6061 – AA6061 çiftinde kaynak kökünde meydana gelen çatlak.....	119
Resim 7.13. AA6061 – AA6061 çiftinde kaynak kökünde öpüşen yüzeyler	120
Resim 7.14. AA6061 – AA7075 çiftinde oluşan ilave yüzeyler a) AA7071, b) AA6061.....	120
Resim 7.15. AA6061 – AA7075 çiftinde füzyon eksikliğine bağlı oluşan öpüşen yüzeyler a) Başlangıç kenarına uzaklık = 20 mm, b) Başlangıç kenarına uzaklık 40 mm	121
Resim 7.16. AA6061 – AA7075 plakada oluk oluşumu ve kesit incelmesi a) Kaynak yüzeyi, b) Kaynak kesiti	121
Resim 7.17. AA7075 – AA7075 çiftine ait kesit görünümü.....	122
Resim 7.18. AA7075 – AA7075 çiftinde mikro tünel oluşumu	123
Resim 7.19. AA7075 – AA7075 çiftinde tane yönlenmesi	123

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
°	Derece (Açı)
°C	Santigrat
%	Yüzde
α	Alfa
ρ	Ro
σ	Sigma
ω	Omega
cm ³	Santimetreküp
Cr	Krom
Cu	Bakır
dev/dak	Devir/Dakika
Fe	Demir
g	Gram
GPa	Giga Paskal
HRC	Rockwell C Sertlik Birimi
J	Joule
kg	Kilogram
kJ	Kilojoule
kN	Kilonewton
Li	Lityum
mm/dak	Milimetre/Dakika
Mn	Mangan
MPa	Mega Paskal
Ti	Titanyum
W	Watt
μm	Mikrometre

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AA	Aluminum Alloy (Alüminyum Alaşım)
ANOVA	Analysis of Variance (Varyans Analizi)
ASRM	Gelişmiş Katı Roket Motoru
DKB	Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge
DB	Difusion Bonding (Difüzyon Kaynağı)
EBW	Electron Beam Welding (Elektron Işın Kaynağı)
ESA	Avrupa Uzay Ajansı
FSW	Friction Stir Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding (Gaz Metal Ark Kaynağı)
HLAW	Hybrid Laser Arc Welding (Hibrit Lazer Ark Kaynağı)
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
LBW	Laser Beam Welding (Lazer Işın Kaynağı)
MIGW	Metal Inert Gas Welding (Metal İnert Gaz Kaynağı)
MIRDC	Tayvan Metal Endüstrileri Araştırma ve Geliştirme Merkezi
PCBN	Polikristalin Kübik Bor Nitrür
SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
TEB	Termomekanik Olarak Etkilenen Bölge
TWI	İngiliz Kaynak Enstitüsü (The Welding Institute)
VPPAW	Değişken Kutuplu Plazma Ark Kaynağı
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

1. GİRİŞ

Havacılık ve savunma sanayii müşterilerinin her geçen gün artan performans talepleri üretimde kullanılan malzeme ve proseslerin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Özellikle havacılıkta kullanılan malzemeler üzerine yapılan Ar-Ge çalışmaları neticesinde geçmişte kullanılan malzemelere oranla yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı, korozyon dirençleri ve mukavemet değerleri daha yüksek ve aynı zamanda çok daha hafif malzemelerin üretimi günümüz şartlarında mümkündür. Ancak malzemeler ne kadar gelişirse gelişsin her makinada olduğu gibi uçaklarda da çalışma limitlerini kısıtlayan en önemli faktörlerden birisi çözülebilen ya da çözilemeyen bağlantı elemanlarının mukavemetidir.

AA6XXX ve AA7XXX serisi alaşımlar daha çok otomotiv, havacılık ve uzay sanayiinde tercih edilen düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli malzemelerdir. Bu malzemeler yoğunluk ve dayanım açısından yüksek kabiliyetlere sahip olsa da düşük kaynak kabiliyetleri en büyük dezavantajlarından biridir. Uygulamada pek çok alanda kullanılan bu alaşımlar kaynak kabiliyetlerinin kötü olmasının yanı sıra farklı malzemelere geleneksel yöntemlerle kaynaklı birleştirmelerinin yapılamamasından, yapılsa bile büyük termal gerilmeler oluşmasından dolayı kaynaklı bağlantı yerine perçin, somun gibi bağlantılar tercih edilmektedir.

Özellikle havacılıkta çözilemeyen bağlantıları sağlamak için termal gerilmelere sebep olmaları ve farklı türden bazı malzemelerin birleştirilmelerinde yetersiz kalmalarından dolayı geleneksel kaynak yöntemleri yerine perçinler tercih edilmektedir. Ancak perçinler ve perçinleme prosesi sebebiyle oluşan çatlaklar ve diğer bazı mukavemet kusurlarının yanı sıra perçinleme işleminin uçakların toplam maliyetine etkisi ve perçinlerin ağırlığından dolayı uçakların artan yakıt tüketimleri farklı birleştirme türlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Her ne kadar günümüz modern uçaklarında halen büyük oranlarda perçin kullanılıyor olsa da uçak parçalarında yapılan optimizasyonlarla ve geliştirilen yeni proseslerle toplam ağırlığı azaltmaya yönelik çalışmalar, perçinlere alternatif birleştirme yöntemlerinin araştırılmasını da zorunlu kılmaktadır.

1991 yılında İngiltere merkezli araştırma kuruluşu olan TWI (The Welding Institute) tarafından sürtünme karıştırma kaynağının (FSW) geliştirilmesiyle perçin ve kaynak arasındaki rekabette yeni bir boyut kazanmış oldu. Geleneksel kaynak yöntemlerinde oluşan büyük termal gerilmelerin bu yöntemde oluşmaması, elektrik iletken olan ya da olmayan malzemeleri birleştirebilme yeteneğine sahip olması, kaynak ağzı açılması gibi işlemlere ihtiyaç duymaması gibi diğer kaynak yöntemlerine kıyasla birçok üstün özelliğe sahip olması sürtünme karıştırma kaynağının havacılıkta yapılan birleştirmelerde perçin yerine kullanılabilirliğinin değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Sürtünme karıştırma kaynağı üzerine yapılan çalışmalar neticesinde alınmış patentler incelendiğinde patentlerin büyük bölümünün havacılık ve uzay sanayiinde faaliyet gösteren firmalara ait olduğu görülmektedir. Literatür tarandığında ise akademik çalışmaların, patent çalışmalarından farklı olarak büyük ölçüde proses parametrelerinin optimizasyonuna odaklandığı görülmektedir. Yapılan bu çalışma sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş AA6061-T6 – AA6061-T6, AA7075-T6 – AA7075-T6 ve AA6061-T6 – AA7075-T6 plakaların mekanik özelliklerinin kıyaslanmasıyla beraber üç farklı kombinasyonda deney parametrelerinin etki derecelerinin incelenmesini içermektedir.

2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Tabiatta en çok bulunan metallere biri olmasına bağlı olarak oldukça uygun fiyatlara satılan alüminyum, kendi kullanım alanlarında tercih edilen diğer metaller ve kompozit malzemelerle kıyaslandığında oldukça iyi mekanik özelliklere de sahiptir. Yerkabuğunun yaklaşık %8'ini oluşturan alüminyum, bu oranıyla doğada oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü element konumundadır. Alüminyum doğada bol miktarda bulunmasına rağmen serbest halde çok az bulunması, rafine edilmesinin çok zor olması gibi çeşitli sebeplerden dolayı insanlık tarihi boyunca son birkaç yüzyıla kadar geniş bir kullanım alanı bulamamıştır. Amerikalı Charles Martin Hall ve Fransız Paul Héroult'un birbirlerinden habersiz olarak 1886 yılında alüminyum cevherinden saf alüminyumu elektrolitik bir prosesle elde etmeyi başarımından sonra yaygınlaşmaya başlayan alüminyum, günümüzde çelikten sonra en çok kullanılan metal konumundadır. Saf alüminyumun bazı özellikleri Çizelge 2.1'de görüldüğü gibidir [1].

Çizelge 2.1. Saf alüminyumun bazı genel özellikleri [1]

Kristal Yapısı	YMK
Ergime Noktası (°C)	660,4
Kaynama Noktası (°C)	2494
Yoğunluğu (20 °C'de) (g/cm ³)	2,6989
Termal genişleme katsayısı (20 °C – 200 °C aralığında) (μ/(m · K))	24,5
Özgül ısısı (25 °C'de) (J/(kg.K))	900
Ergime gizli ısısı (kJ/kg)	397
Buharlaşma Gizli ısısı (MJ/kg)	10,78
Yanma ısısı (MJ/kg)	31,05
Isıl iletkenliği (20 °C'de) (W/(m.K))	247
Çekme mukavemeti (Tavlanmış) (MPa)*	40-50
Akma mukavemeti (Tavlanmış) (MPa)*	15–20
Uzama (%)*	50–70
Elastikiyet modülü (GPa)	62
Kayma modülü (25 °C'de) (GPa)	25
Sertlik (O ısıtım işlem için) (HV)	15
Elektrik iletkenliği (20 °C'de) (IACS)	%65-66
Katılaşma esnasında kendini çekme (%)	6,5
Elektrik direnci (nΩ.m)	26,2
Yansıtıcılık (tungsten flamanı gelen beyaz ışık için) (%)	90

*Malzemenin soğuk şekillendirme oranına göre değişmektedir. %90 oranında soğuk şekillendirilmiş saf alüminyum malzemenin; çekme mukavemeti:120-140 MPa, akma mukavemeti:110-120 MPa, uzama: %8-12

Alüminyum çelikten çok daha hafif olmasına rağmen saf halde çeliklere kıyasla oldukça düşük mukavemet özelliklerine sahiptir. Ancak, alaşımlı alüminyumlar, saf alüminyumun yaklaşık 15 katı kadar daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir ki bu değerler birçok çeliğin sahip olduğu mukavemet değerlerinden daha yüksektir [2]. Kolaylıkla dövülebilir, makinede işlenebilir olmasının yanında geri dönüşümünün çok kolay olması, korozyon direncinin çok yüksek olması, manyetik olmaması gibi birçok üstün özelliğe sahip olmasından dolayı alüminyum, bugün dünya sanayisinin vazgeçilmez metallerinden biridir.

Alüminyumun genel özellikleri aşağıdaki gibidir;

Alüminyum birçok çelik türüne göre oldukça hafiftir: Saf alüminyum yaklaşık $2,6989 \text{ g/cm}^3$ 'lük özgül ağırlığı ile dökme demirden ($\rho_{\text{dökme demir}} = 7,874 \text{ g/cm}^3$), çelikten ($\rho_{\text{çelik}} = 7,850 \text{ g/cm}^3$), bakırdan ($\rho_{\text{bakır}} = 8,933 \text{ g/cm}^3$) ve diğer pek çok metalden çok daha hafif bir malzemedir.

Alüminyum yüksek mukavemete sahiptir: Saf alüminyum çelikte kıyaslandığında oldukça düşük dayanıma sahip olmasına rağmen çeşitli alaşım elementleri kullanılarak elde edilen alüminyum alaşımlı malzemeler çok yüksek dayanım değerlerine ulaşmaktadırlar. Özellikle bazı alaşımlı alüminyum türleri oldukça yüksek mukavemet değerlerine sahiptirler ki bu değerler pek çok çelik türünün sahip olduğu dayanım değerinden daha yüksektir.

Alüminyum yüksek oranda yansıtıcılığa sahiptir: Parlak enerji, görünür ışık, radyant ısı ve elektromanyetik dalgalar alüminyum yüzeylerde verimli bir şekilde yansıtılırken, eloksallı ve koyu eloksallı yüzeyler yansıtıcı veya emici olabilir [3].

Alüminyum yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe sahiptir: Alüminyumun elektrik iletkenliği (36 megasiemens/m), bakırın elektrik iletkenliğinin (59 megasiemens/m) %62'si kadardır ki bu değer pek çok metalin sahip olduğu değerlerin üstündedir. Bununla beraber alüminyum sahip olduğu yüksek dayanım sayesinde özellikle uzun elektrik hatlarında da tercih edilmektedir. Yüksek elektriksel iletkenliğinin yanında alüminyum oldukça iyi bir termal iletken olduğu için radyatörler, ısı eşanjörleri, buharlaştırıcılar ve mutfak aletleri gibi pek çok alanda vazgeçilmez bir malzemedir.

Alüminyumun sahip olduğu korozyon dayanımı: Alüminyum yüzeyler atmosfer koşullarında oksijenle temas ettiğinde görünmez bir oksit tabakasıyla kaplanır. Oluşan bu oksit tabakası alt katmanlarının oksijenle temasını keserek alüminyum malzemenin daha fazla oksitlenmesinin önüne geçer. Bu sebepten dolayı saf alüminyum malzeme pek çok korozif ortamda kullanılabilir ancak alüminyumun bazı metallerle temasının galvanik korozyon meydana getirerek korozyon dayanımını azalttığı da unutulmamalıdır.

Alüminyum, saf halde çeşitli üstün özelliklere sahip olmasıyla beraber bazı spesifik özelliklerin elde edilebilmesi amacıyla çeşitli alaşım elementleriyle de alaşımlandırılmaktadır. Alüminyum alaşımlarda mekanik dayanımı artırmak, korozyon dayanımını artırmak, yüksek sıcaklık dayanımını artırmak ve talaşlı işleme kabiliyetini artırmak gibi çeşitli amaçlarla kullanılan başlıca alaşım elementleri; magnezyum, silisyum, bakır, çinko, mangan ve lityumdur. Bu alaşım elementleri ve diğer bazı alaşım elementlerinin saf alüminyuma etkileri şu şekildedir [1];

Magnezyum (Mg): Alaşımın ergime noktasını düşürür. Alüminyum alaşıma eklenen magnezyum oranı %8'e kadar arttıkça korozyon dayanımı artar. Bu değerden sonra cüruflaşma meydana getireceği için alaşımın dökümünü zorlaştırır.

Silisyum (Si): Döküm alaşımlarda %13'e kadar silisyum alaşımın akıcılığını ve yüksek sıcaklık dayanımını artırır. Bu değerden sonra işlenmesini zorlaştırır.

Bakır (Cu): Alüminyum alaşıma eklenen bakır, alaşımın çekme dayanımını, setliğini ve döküm esnasındaki akıcılığını artırır. Bakır, Alüminyum alaşımın işlenebilme kabiliyetini artırır ancak sıcak yırtılmaya karşı mukavemeti azalttığından dökümü zorlaştırır.

Çinko (Zn): Alaşımın dayanımını artırır. Çökelme sertleşmesinin oluşumuna izin verir. Haddelenebilme kabiliyetini artırır. Artan çinko miktarlarında alaşımın akıcılığı artmakla beraber yüksek sıcaklık dayanımı azalır ve soğuma esnasında oluşan çekilmeler artar.

Mangan (Mn): Alaşımının tanelerinin küçülmesini ve dayanımının artmasını sağlar. Ergime noktasını yükseltir. Süneklik ve tokluğu artırır.

Lityum (Li): Malzeme yoğunluğunu azaltırken dayanımını artırır.

Titanyum (Ti): Tanelerin küçülmesini sağlar. Çekme mukavemetini ve sünekliği artırır, ısı iletkenliğini azaltır. Döküm esnasında akıcılığın azalmasına sebep olur.

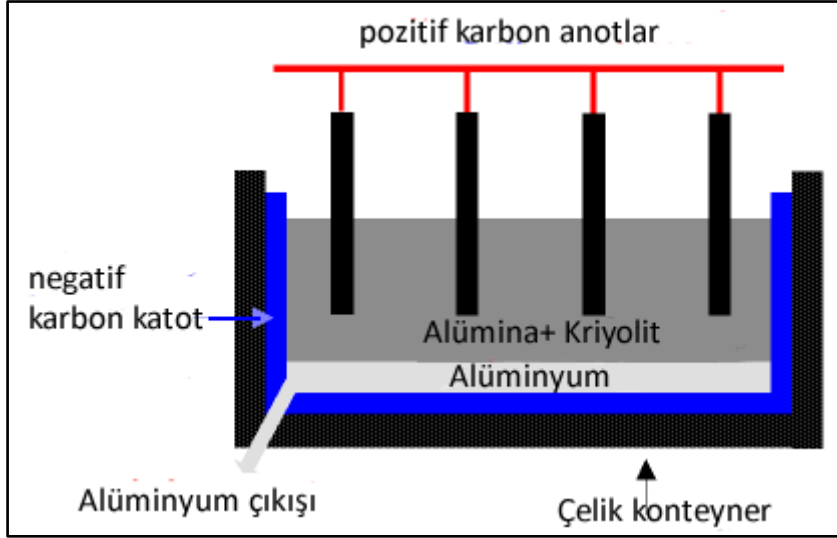
Demir (Fe): Tanelerin küçülmesini sağlar. Yüksek sıcaklıklarda sertliği artırır ancak Alüminyum alaşımlarda tercih edilmezler.

Nikel (Ni): Düşük miktarlarda (%0,5-3,0) eklenmesi yüksek sıcaklıklardaki dayanım ve sertliğini, alaşımın parlaklığını ve yansıtıcılığını artırır.

Krom (Cr): Tanelerin küçülmesini sağlar. Bazı alaşımlarla beraber korozyon dayanımını artırmak ve gerilim çatlaklarını azaltmak için kullanılır. Malzemenin ısıl işlem kabiliyetini azaltır.

Alüminyumun üretimi ve yaygınlaşması dünyadaki siyasi, askeri, bilimsel ve ekonomik gelişmelerden doğrudan etkilenmiştir. Çok miktarda rezervi bulunmasına rağmen rafinesinin zor olmasından dolayı insan hayatına saf halde girdikten hemen sonra altından daha pahalı bir metal olan alüminyum zenginliğin simgesi olarak görülürken, yeni rafine yöntemlerinin geliştirilmesiyle endüstride de kullanılmaya başlanmıştır. İkinci Dünya Savaşı 'nın bütün dünyada savunma sanayii sektörünü tetiklemesi sonucunda özellikle havacılık alanında alüminyuma rağbet büyük ölçüde artmıştır. İlerleyen yıllarda azalan üretim maliyetleri sonucunda gıda paketlenme alanında da oldukça geniş bir kullanım alanı bulan alüminyum, dayanım, hafiflik ve düşük maliyet gibi avantajları sayesinde bugün savunmadan gıdaya, ulaşımdan iletişime pek çok alanda vazgeçilmez bir metaldir.

Alüminyuma üretim açısından bakılacak olursa tüm alüminyum üretiminin Hall-Héroult sürecine dayanmakta olduğu görülmektedir. Boksitten rafine edilmiş alümina, bir kriyolit banyosunda, banyo sıcaklığını, yoğunluğunu, öz direncini ve alümina çözünürlüğünü kontrol etmek için yapılan çeşitli florür tuzu ilaveleri ile çözülür. Daha sonra banyodan, çözünmüş alüminayı karbon anotunda oluşan ve karbon anodu ile reaksiyona giren, katotta metal bir ped olarak toplanan oksijen ile elektrolize etmek için banyodan elektrik akımı geçirilir. Ayrılan metal, sifon veya vakum yöntemleriyle periyodik olarak potalara çıkarılır ve daha sonra eriyik veya imalat külçelerinin üretildiği döküm tesislerine aktarılır [3]. Hall-Héroult prosesi olarak bilinen bu prosese ait şema Şekil 2.1'de görüldüğü gibidir [4].

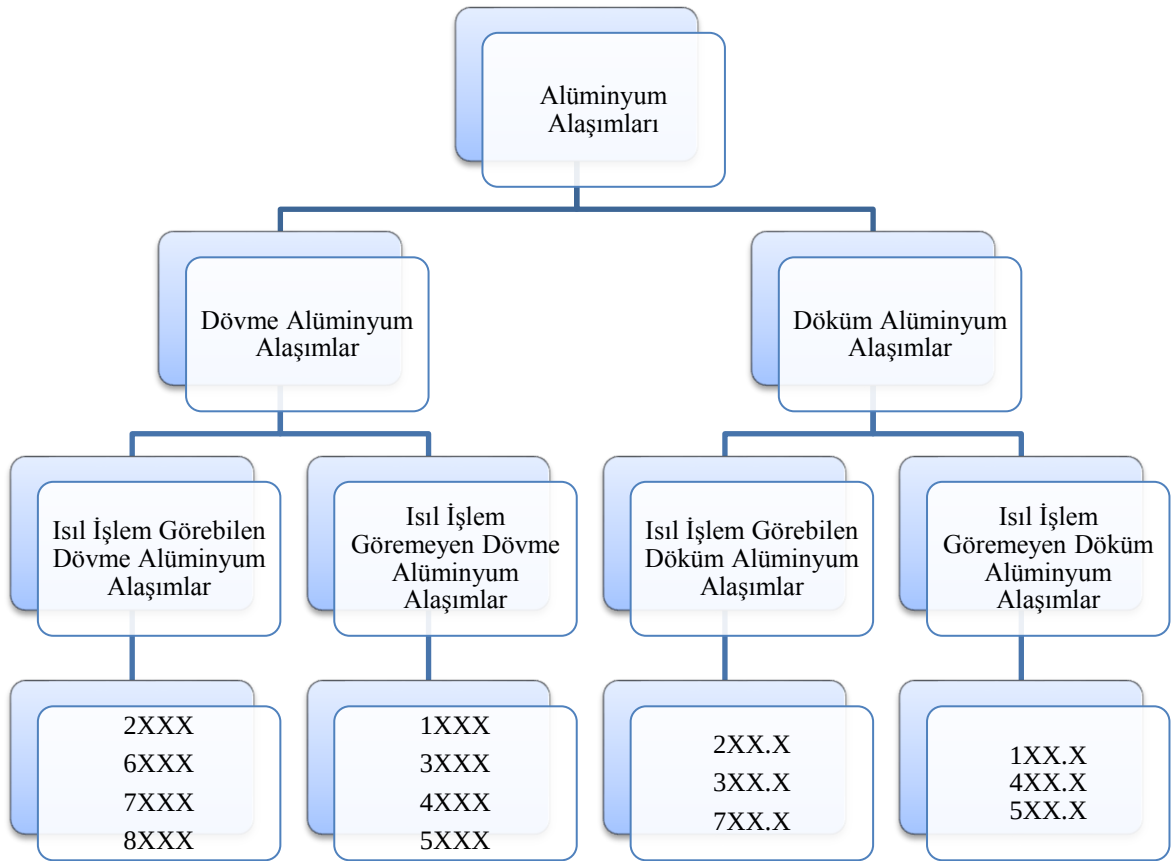


Şekil 2.1. Hall-Héroult hücresi şematik görünümü [4]

2.1. Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması

Üretim metotları dikkate alındığı zaman alüminyum alaşımları; dövme ve döküm olarak iki ana alt başlığa ayrılmaktadır. Isıl işlem durumları dikkate alındığında ise alüminyum alaşımlar; ısıl işlem yapılabilen alüminyum alaşımlar ve ısıl işlem yapılamayan alüminyum alaşımlar olmak üzere iki alt başlığa ayrılır. Alüminyum alaşımların bu şekilde alt başlıklara ayrılması üretim yöntemlerinin farklı ihtiyaçları olduğunu göstermektedir. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alaşımları, döküm alaşımlardan oldukça farklı mikroyapı ve kimyasal bileşime sahiptirler. Alüminyum alaşımlarda ısıl işlem, dayanımı arttırmak için uygulanan bir prosestir. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlarının dayanımlarının artırılması ise ancak soğuk işlemeyle mümkündür [5].

Üretim metotları iki ana alt başlığa ayrılrsa da her iki yöntemde uygulamada kullanılan teknikler ve araçlar dikkate alındığında kendi içlerinde pek çok alt başlığa ayrılmaktadır. Uygulamalarda kullanılacak alüminyum alaşımın seçimi ise tamamen malzemenin mekanik özelliklerindeki beklentiyle alakalıdır. Alüminyum alaşımların genel sınıflandırması Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Alüminyum alaşımların genel sınıflandırması

2.1.1. Dövme alüminyum alaşımları ve özellikleri

Dövme alüminyum alaşımları sadece sıcak ya da soğuk şekillendirme ile şekillendirilebilen alaşımlardır. Amerikan Alüminyum Birliği'ne göre dövme alüminyum alaşımları dört basamaklı sayılarla sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmada her bir rakamın açıklaması şu şekildedir [6];

Soldan 1. Rakam (Xxxx): Alaşımdaki ana elementleri simgeler.

Soldan 2. Rakam (xXxx): Orijinal alaşımdaki değişimi (modifikasyonu) tanımlar. Orijinal alaşım için “0” kullanılır.

Soldan 3. ve 4. Rakam (xxXX): 1XXX serisi alaşımlarda alüminyumun safiyetini gösterir. Diğer tüm serilerde çeşitli özelliklerdeki alaşımları tanımlar.

Çizelge 2.2. Dövme alüminyum alaşım serileri ve bu serilerin genel özellikleri [3]

Alaşım Serisi	Temel Alaşım Elementi	Serinin Genel Özelliği
1XXX	Alüminyum (En az %99)	Kontrollü alaşımsız (saf) bileşimler.
2XXX	Bakır	Bakır ana alaşım elementidir fakat magnezyum gibi diğer elementler belirtilebilir.
3XXX	Manganez	Manganezin ana alaşım elementi olduğu alaşımlar.
4XXX	Silikon	Silikonun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar.
5XXX	Magnezyum	Magnezyumun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar.
6XXX	Magnezyum ve Silikon	Magnezyum ve Silikonun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar.
7XXX	Çinko	Çinkonun ana alaşım elementi olduğu, ancak bakır, magnezyum, krom ve zirkonyum gibi diğer elementlerin belirlendiği alaşımlar belirtilebilir.
8XXX	Lityum ve diğer elementler	Kalay ve çeşitli bileşimleri karakterize eden bazı lityum bileşimleri içeren alaşımlar.
9XXX	-	Şu an için tanımlanmamış seri.

Şekil 2.2’de de görüldüğü gibi 1XXX, 3XXX, 4XXX ve 5XXX serisi alüminyum alaşımlar ısıtıl işlem göremeyen dövme alüminyum alaşımlardır. Bu alaşımlar yalnızca sıcak ya da soğuk şekil değiştirme yöntemi ile sertleştirilebilen alaşımlardır. Diğer dövme alüminyum alaşım serisi malzemeler ise ısıtıl işlem görebilen, ısıtıl işlemle mekanik özellikleri değiştirilebilen dövme alüminyum alaşımlardır. Çalışmanın devamında her bir seri detaylı olarak açıklanmamış, sadece deneylerin yapıldığı seriler detaylı açıklanmıştır.

- AA6061 alaşımın özellikleri

AA6061 (AlMg1SiCu) orta seviye dayanıma sahip havacılık-uzay sanayii malzemesidir [7]. Isıl işlem görebilen bir malzeme olan AA6061, orta üst düzey dayanımla beraber yüksek tokluk da istenilen havacılık uygulamaları için oldukça idealdir. Deniz suyunda iyi bir korozyon dayanımı gösteren bu malzeme, atmosfer şartlarında ise çok daha mükemmel bir korozyon dayanımına sahiptir.

AA6061 alaşıımı oldukça iyi son işlem kalitesine ve eloksallama yeteneğine sahip olmasına rağmen yüzey kalitesinin çok önemli olduğu uygulamalarda AA6063 kadar tercih edilmemektedir. AA6061 için en yaygın eloksal yöntemleri arasında berrak, berrak ve renkli boya ve sert kaplama yöntemleri bulunmaktadır [8]. AA6061 alüminyum alaışımının içeriği Çizelge 2.3'te görölmektedir [8].

Çizelge 2.3. AA6061 malzemenin kimyasal bileşimi

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğerleri		Al
0,7	0,40-0,80	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,15	Her bir 0,05	Toplam 0,15	Kalan

Genel olarak iyi bir korozyon dayanımına sahip olan AA6061 malzemenin kaynak kabiliyeti de diğer alüminyum alaşımlara göre oldukça iyi olmasına rağmen farklı metallerle doğrudan teması galvanik korozyona neden olabilir [8]. Isıl işlem görebilen bir alaşım olan AA6061 malzemede de uygulanan ısıl işleme bağlı olarak mekanik özelliklerde büyük farklılıklar gözlemlenmektedir. Çizelge 2.4'te AA6061 serisinde bazı ısıl işlem türlerinin mekanik özelliklere etkisi görölmektedir [7]. Yapılan çeşitli ısıl işlem türlerine göre AA6061 malzemenin mekanik dayanımı ısıl işlem görmemiş haline göre oldukça artarken kaynak kabiliyeti azalabilmektedir.

Çizelge 2.4. AA6061 serisinde bazı ısıl işlem türlerinin mekanik özelliklere etkisi [7]

6061 Alüminyum Alaşım Isıl İşlem Türüne Göre Mekanik Özellikler					
Isıl İşlem Türü (Temper)	Çekme Dayanımı (Rm MPa)	Akma Dayanımı (Rp0,2 MPa)	Uzama (%)	Kesme Dayanımı (MPa)	Elastisite (GPa)
O	130	90	16	83	69
T4	180	145	13	240	70
T451	230	120	20	260	69
T6	310	270	15	207	69
T651	310	270	15	207	69

AA6061 alaışımının pratikteki çeşitli kullanım alanlarından bazıları ise uçak armatürleri, kamera mercek yuvaları, kaplinler, denizcilik armatürleri ve donanımları, elektrik armatürleri ve konektörleri, çeşitli dekoratif donanımlar, menteşe pimleri, manyeto parçaları, fren pistonları, hidrolik pistonlar, cihaz parçaları, vanalar ve vana parçaları

şeklindedir [9]. Bunlarla birlikte yüksek dayanım ve hafifliğin çok önemli olduğu havacılık ve uzay sanayiinde de pek çok alanda tercih edilen bir malzemedir.

Çizelge 2.5. AA6061 (AlMg1SiCu) malzemenin genel özellikleri [7, 9]

Alaşım Özellikleri		
Alaşım	ISO AlMg1SiCu	
Alaşım Tipi	Isıl işlem uygulanabilir	
Temper	O / T4 / T42 / T451 / T6 / T62 / T651	
Mekanik Özellikler		
Akma Dayanımı	90 MPa	AA; Tipik
Çekme Dayanımı	130 MPa	AA; Tipik
Kesme Dayanımı	83 MPa	AA; Tipik
Kopma Uzaması	%25	AA; Tipik; 1,6 mm kalınlık
Kopma Uzaması	%30	AA; Tipik; 12,7 mm çap
Elastisite Modülü	68,9 GPa	AA; Tipik
Kesme Modülü	26 GPa	AA; Tipik
Poisson Oranı	0,33	
Brinell Sertliği	30	AA; Tipik; 500 g yükleme; 10 mm çaplı bilye
Fiziksel Özellikler		
Yoğunluk	2,63 g/cm³	AA; Tipik
Erime Sıcaklığı	650 °C	AA; Tipik
Isıl Genleşme Katsayısı	$23,3 \times 10^{-6} \cdot K^{-1}$	
Elektrik İletkenliği	%46,5 IACS	
Termal İletkenliği	180 W/m.K	AA; Tipik 77°F 'de
Spesifik Isı Kapasitesi	0,896 J/g.°C	
Proses Özellikleri		
Çözelti Sıcaklığı	529 °C	
Yaşlandırma Sıcaklığı	160 °C	Haddelenmiş veya çekilmiş ürünler; 18 saat boyunca
Yaşlandırma Sıcaklığı	177 °C	Ekstrüzyona ya da dövmeyle tabii tutulmuş ürünler; 8 saat boyunca

- AA7075 alaşımlarının özellikleri

7XXX serisi alüminyum alaşımlar yüksek mukavemetleri yanında ısıtılma işleminde görebilmeleri sayesinde çok daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşabilirler. Çinkonun ve magnezyumun alüminyum içerisinde yüksek çözünürlüğü yüksek yoğunluklu çökeltilerin oluşmasını, bu da malzeme dayanımının oldukça yükselmesini sağlar.

Yüksek mukavemetleriyle birlikte sahip oldukları çok düşük yoğunluk değeri sayesinde özellikle havacılık ve taşımacılık sektörlerinin vazgeçilmez malzemeleridir. Bu malzemelerinin en olumsuz yönleri ise kaynak kabiliyetlerinin çok kötü olması ve korozyon dayanımlarının düşük olmasıdır. Bu seride en çok tercih edilen alaşımlardan birisi de AA7075'dir. AA7075 alüminyum alaşımlarının içeriği Çizelge 2.6'da görülmektedir [8].

Çizelge 2.6. AA7075 malzemenin kimyasal bileşimi

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0,00-0,50	0,00-0,40	1,20-2,00	0,00-0,30	2,10-2,90	0,18-0,28	5,10-6,10	0,00-0,20	Kalan

Isıl işlem görebilen bir alaşım olan AA7075 alaşımlarında ısıtılma işlem çeşidine göre de mekanik özellikler büyük farklar göstermektedir. Isıl işlem görmemiş AA7075 malzemede akma dayanımı 120MPa seviyelerinde iken ısıtılma işlem ile bu değer 503MPa değerine ulaşabilmektedir. Çizelge 2.7'de AA7075 serisi malzemede bazı ısıtılma işlem türlerinin mekanik özelliklere etkisi görülmektedir [7].

Çizelge 2.7. AA7075 serisinde bazı ısıtılma işlem türlerinin mekanik özelliklere etkisi [7]

7075 Alüminyum Alaşım Isıl İşlem Türüne Göre Mekanik Özellikler					
Isıl İşlem Türü (Temper)	Çekme Dayanımı (Rm MPa)	Akma Dayanımı (Rp0,2 MPa)	Uzama (%)	Kesme Dayanımı (MPa)	Elastisite (GPa)
0	240	120	12	150	71,7
T6	560	480	8	330	71,7
T651	572	503	11	331	71,7
T7351	503	434	13	303	71,7
T7651	503	434	13	303	71,7

AA7075 malzeme içerik olarak alüminyum, çinko, magnezyum ve bakır içeren bir malzemedir. 7XXX serisinin genel özelliklerinden biri olarak AA7075 alaşımında da kaynak kabiliyeti kötüdür. Bunun sebebi geleneksel kaynak yöntemlerinin bu malzemeye uygulanması esnasında malzeme içeriğindeki alüminyum, çinko, magnezyum ve bakırın homojen olmayan bir şekilde ergimesidir. Faz ayrılması olarak bilinen bu olay sonucunda malzemede kaynak bölgesinde boydan boya uzanan çatlaklar oluşmaktadır [10].

Çizelge 2.8. AA7075 (AlZn5.5MgCu) malzemenin genel özellikleri [9, 11, 12]

Alaşım Özellikleri		
Alaşım	EN AW 7075 (AlZn5,5MgCu) DIN EN 573-3 / 3.4365	
Alaşım Tipi	Isıl işlem uygulanabilir	
Temper	O / T6 / T651 / T6511 / T73 / T735	
Mekanik Özellikler		
Akma Dayanımı	103 MPa	AA; Tipik
Çekme Dayanımı	228 MPa	AA; Tipik
Kesme Dayanımı	152 MPa	AA; Tipik
Kopma Uzaması	%17	AA; Tipik; 1,6 mm kalınlık
Kopma Uzaması	%16	AA; Tipik; 12,7 mm çap
Elastisite Modülü	71,7 GPa	AA; Tipik
Kesme Modülü	26,9 GPa	AA; Tipik
Poisson Oranı	0,33	
Brinell Sertliği	60	AA; Tipik; 500 g yükleme; 10 mm çaplı bilye
Fiziksel Özellikler		
Yoğunluk	2,81 g/cm³	AA; Tipik
Erime Sıcaklığı	477 °C	AA; Tipik
Isıl Genleşme Katsayısı	$23 \times 10^{-6} \cdot K^{-1}$	
Elektrik İletkenliği	%33 IACS	
Termal İletkenliği	173 W/m.K	AA; Tipik 77°F 'de
Spesifik Isı Kapasitesi	0,96 J/g.°C	
Proses Özellikleri		
Tavlama Sıcaklığı	413 °C	
Çözelti Sıcaklığı	466-482 °C	
Gıdayla Temas	Hayır (EN 602 ye göre)	

2.1.2. Döküm alüminyum alaşımları ve özellikleri

Döküm alüminyum alaşımların sınıflandırılmasında 3 basamaktan oluşan ve birde bu üç basamaktan ayrı olarak ondalık basamağa sahip olan bir sistem (xxx.x) kullanılmaktadır. Bu gösterimlerde alüminyum döküm alaşımları, alaşımın içerdiği elementler dikkate alınarak sınıflandırılmaktadır. Her alaşımda bulunmamakla beraber bazı döküm alaşımlarda kodun en başında bulunan harf ise alaşımdaki minör element varyasyonlarını temsil eder [13].

1. *Basamak (Xxx.x)*: Alaşımın özelliklerini ve döküm kabiliyetini etkileyen temel alaşım elementlerini, yani majör (ana) alaşım elementlerini tanımlar. Bu basamaktaki seriler ve içerdikleri temel alaşım elementleri Çizelge 2.9’da görüldüğü gibidir [13].

Çizelge 2.9. Döküm alüminyum alaşımlarda birinci basamaklar ve tanımlamaları [13]

Alaşım Serisi	Temel Alaşım Elementi
1xx.x	En az %99 saflıkta alüminyum
2xx.x	Alüminyum – bakır alaşımları
3xx.x	Alüminyum – silisyum ve bakır ve/veya magnezyum alaşımları
4xx.x	Alüminyum – silisyum alaşımları
5xx.x	Alüminyum – magnezyum alaşımları
6xx.x	Kullanılmayan kodlama
7xx.x	Alüminyum – çinko alaşımları
8xx.x	Alüminyum – kalay alaşımları
9xx.x	Alüminyum – diğer elementlerin alaşımları

2. ve 3. *Basamak (xXX.x)*: Döküm alüminyum alaşımın detaylarını tanımlar. 1xx.x serisinde 2. ve 3. basamaklar alaşımdaki alüminyum oranını temsil ederler. Diğer serilerde ise bu basamaklar özel alaşımları ifade eder.

4. *Basamak (xxx.X)*: Döküm alüminyum alaşımların kodlanmasında ayrı olarak yazılan son basamak alaşımın döküm ya da külçe halde olduğunu gösterir ve 3 farklı rakam olabilir. Bunlar “0, 1 ve 2” rakamlarıdır. Bu basamaktaki kodlama ihtiyacı ergitme sırasında alaşımın kompozisyonunda olabilecek değişimleri de dikkate almak amacıyla yapılmaktadır [13]. Bu rakamlar ve tanımlamaları Çizelge 2.10’da verilmiştir [13].

Çizelge 2.10. Döküm alüminyum alaşımlarda son basamak değerleri ve tanımları

Alaşım Serisi	Tanımı
xxx.0	Döküm parça olarak üretilen alaşım (pratikte yazılmaz)
xxx.1	Standart külçe (son döküm parçanın kompozisyonunun değil, dökümde kullanılacak külçenin kompozisyonunun belirtildiği anlaşılır)
xxx.2	Standart külçeden daha dar kompozisyon aralığına sahip külçe (son döküm parçanın kompozisyonunun değil, dökümde kullanılacak külçenin kompozisyonunun belirtildiği anlaşılır)

Döküm alüminyum alaşımlarda dövme alüminyum alaşımlar gibi ısıtılma işlemi görebilen ve ısıtılma işlemi göremeyen alaşımlar olarak iki gruba ayrılır. Dövme ve döküm alüminyum alaşımlar arasındaki en büyük fark; döküm alüminyum alaşımların büyük miktarlarda silikon içermesidir. Silikon, yüksek hacimli alüminyum döküm endüstrisinin ticari olarak uygulanabilirliğini mümkün kılan alaşım elementidir. Döküm alaşım içerisindeki silikon, alaşımın akışkanlığını artırır, çatlamayı azaltır ve büzülme gözenekliliğini en aza indirir. Bu sayede çok daha karmaşık yapıların döküm alüminyum ile üretilebilmeleri mümkün olur [14].

Çoğu dökme alüminyum ürünün dayanımı, özellikle de yorulma dayanımı dövme alüminyumdan daha düşüktür. Yine de dövme alüminyum alaşımlarda olduğu gibi döküm alüminyum alaşımlarda da ısıtılma işlemi gibi çeşitli yöntemlerle alaşımın özelliklerini değiştirmek mümkündür. Isıtılma işlemi görebilen ve ısıtılma işlemi göremeyen döküm alüminyum alaşım serileri Çizelge 2.11’de belirtilmiştir [6].

Çizelge 2.11. Döküm alüminyum alaşımlarda ısıtılma işlemi kabiliyetleri [6]

Döküm Alüminyum Alaşımlar		
Alaşım Serisi	Alaşım Elementi	Isıtılma İşlem Durumu
1xx.x	Al	Isıtılma işlemi yapılamaz
2xx.x	Cu	Isıtılma işlemi yapılabilir
3xx.x	Si+Cu+Mg	Isıtılma işlemi yapılabilir
4xx.x	Si	Isıtılma işlemi yapılabilir
5xx.x	Mg	Isıtılma işlemi yapılamaz
7xx.x	Zn	Isıtılma işlemi yapılabilir
8xx.x	Sn	Isıtılma işlemi yapılamaz

2.2. Alüminyum Alaşımlarda Temper Gösterimi

Temper gösterimi önce bir harf arkasından da bir ya da birkaç sayının eklenmesi ile gösterilen, ait olduğu alaşımın bir nevi kısa geçmişini ve buna bağlı olarak yeni özelliklere sahip olduğunu ifade eden kodlama biçimidir. Temper gösteriminde ilk harf, alaşımın en temel durumunu ifade eder. Alüminyum alaşımlarda temel temper tanımları 5 ana guruba ayrılmaktadır. Bu guruplar Çizelge 2.12’de görüldüğü gibidir [15].

Çizelge 2.12. Alüminyum alaşımlarda temel temper tanımları

Temper	Tanımı
F	Fabrikasyon halinde-kontrollü gerinim sertleştirmesi veya ısıtıl işlem yapılmamıştır. Belirlenmiş mekanik özellikler yoktur ve mukavemet seviyeleri büyük ölçüde değişebilir.
O	Sertliği ve mukavemeti azaltmak için tamamen tavlanan bu tür dövme ürünler, en yüksek süneklik temperidir. Biçimlendirilebilen alüminyum alaşımlarının en yumuşak halidir.
H	Sadece sertleştirilmiş işlenmiş ürünler. Mukavemetin bir miktar azalmasını sağlamak için ilave termal işlemlerle veya bunlar olmadan gerinim sertleşmesiyle mukavemetin artırıldığı yerlerde geçerlidir. (H'yi her zaman iki veya daha fazla basamak takip eder.)
W	Çözelti ısıtıl işlem görmüş. Çözelti ısıtıl işleminden sonra sadece kendiliğinden oda sıcaklığında yaşanan alaşımlar için geçerli olan kararsız bir tavlama, bu gösterim sadece doğal yaşlanma periyodu belirtildiğinde spesifiktir.
T	F, O veya H dışında kararlı sıcaklıklar üretmek için termal olarak işleminden geçirilir. T'yi her zaman bir veya daha fazla basamak takip eder.

Temel temper kodlaması olan ilk harften sonraki rakamlar ise alaşımın geçirdiği durumlar hakkında daha detaylı bilgi verir. “H” temperinde 1’den 4’e kadar toplam 4 temel kodlama bulunmaktadır. Bu kodlamalar ve açıklamaları ise Çizelge 2.13’te görüldüğü gibidir [15]. “T” temperde ise temel olarak 1’den 10’a kadar toplam 10 temel durum vardır. Bu durumlar ve açıklamaları Çizelge 2.14’te görüldüğü gibidir [15]. 1’den 10’a kadar olan ilk kodlamadan sonraki rakamlar ise daha özel durumları tanımlamak için kullanılmaktadır.

Çizelge 2.13. Alüminyum alaşımlarda “H” temperinde temel tanımlar [15]

Temper	Tanımı
H1	Gerinim sertleştirilmiş
H2	Gerinim sertleştirilmiş ve kısmen tavlanmış
H3	Gerinim sertleştirilmiş ve stabilize edilmiş
H4	Gerinim sertleştirilmiş ve verniklenmiş veya boyanmış

Çizelge 2.14. Alüminyum alaşımlarda “T” temperinde temel tanımlar [15]

Temper	Tanımı
T1	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden soğutulmuş ve doğal yaşlanmış
T2	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden soğutulmuş soğuk işlenmiş ve doğal yaşlanmış
T3	Çözelti ısıl işlemi yapılmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlanmış
T4	Çözelti ısıl işlemi yapılmış ve doğal yaşlanmış
T5	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden soğutulmuş ve sonra yapay olarak yaşlanmış
T6	Çözelti ısıl işlemi görmüş ve yapay olarak yaşlanmış
T7	Çözelti ısıl işlemi yapılmış ve sonra yapay olarak aşırı yaşlanmış
T8	Çözelti ısıl işlemi yapılmış, soğuk işlenmiş ve yapay olarak yaşlanmış
T9	Çözelti ısıl işlemi yapılmış, suni olarak yaşlanmış ve sonra soğuk işlenmiş
T10	Yüksek sıcaklıkta şekillendirme işleminden sonra soğutulup, yapay olarak yaşlandırıldıktan sonra soğuk işlenmiş

Çizelgelerde belirtilen bazı temper terimlerinin açıklamaları ise şu şekildedir:

- *Çözelti ısıl işlemi:* Alüminyum alaşımı bünyesindeki alaşım elemanlarını katı çözeltiliye almak için malzemenin 520°C veya üzerindeki bir sıcaklıkta belirli bir süre tutulup ani olarak soğutulmasıdır. Bazı alüminyum alaşımlarında (örneğin AA6060/AA6063) ekstrüzyon gibi sıcak bir işlemde sonra malzemenin hava ya da su ile ani soğutulması, solüsyona alma ısıl işlemi sonucunu verir [16].

- *Doğal yaşlandırma:* Alüminyum alaşımının oda sıcaklığında bekletilmesiyle, katı çözeltili içindeki alaşım elementlerinin katı çözeltiliden ayrılıp çökerek “çökeltme sertleşmesi” mekanizması ile malzemenin sertliğinin artmasıdır [17].

- *Yapay yaşlandırma*: Doğal yaşlandırma ile elde edilemeyecek kadar yüksek sertlik değerlerinin bir ısıtma işlemi fırınında belirli bir sıcaklık ve sürede yapılmasıdır [17].

- *Tavlama*: Sünekliği artırırken mukavemeti ve sertliği azaltan bir işlem olan tavlama ısıtma işlemi göremeyen ya da görebilen dövme ve döküm alaşımları için kullanılabilir [15].

2.3. Alüminyum Alaşımlarda Uygulanan Birleştirme Yöntemleri

Alüminyum alaşımlarının en çok tercih edildiği sektörlerden biri olan havacılık ve uzay sanayiinde parça birleştirmek için kullanılan perçin, vida gibi bağlantı elemanları günümüz ihtiyaçlarını karşılama açısından oldukça eksik kalmaktadır. Bu tip bağlantı elemanlarının uygulanmasında bindirmeli bağlantı kullanımının sebep olduğu yapısal ağırlık artışı, deliklerin mukavemet, yorulma dayanımı, sızdırmazlık gibi parametrelere olumsuz etkileri incelendiğinde geliştirme potansiyellerinin bulunmadığı anlaşılmaktadır [18].

Alüminyumun diğer metallere çözülemez şekilde bağlanmasında tercih edilen yollardan biri de hem alüminyumun hem de diğer metalin kolaylıkla birleşebileceği bir intikal parçası kullanımıdır. Bu yöntem, alüminyum redükleme tesislerinde alüminyumla çelik malzemelerin birleştirilmesi, alüminyum güverte kamaralarının çelik güvertelere birleştirilmesi gibi uygulamalarda sık sık kullanılmaktadır [19]. Ancak bu tarz bağlantılarda yapısal ağırlık artışına sebep olduğundan dolayı sıklıkla tercih edilmemektedir.

Özellikle havacılık ve uzay sanayii dikkate alındığı zaman alüminyum alaşımların birleştirilmesi için perçinlerin en çok tercih edilen elemanlar oldukları görülmektedir. Günümüzde uçaklarda yapısal bileşenlerde perçin kullanımını azaltmak için genel bir eğilim vardır. Bu sektördeki malzemelerin birleştirilmesi için lazer ve elektron ısıtma kaynakları sıklıkla kullanılmaktadır. Askeri uçaklarda, titanyum alaşımların birleşmesinde elektron ısıtma kaynağının kullanımı giderek yaygınlaşırken, ticari uçaklarda lazer ısıtma kaynakları, gövdenin büyük bölümlerindeki perçinlerin yerini alacak şekilde kullanılmaktadır [20].

2.3.1. Alüminyum alaşımlarda uygulanan gelişmiş kaynak yöntemleri

Özellikle havacılık ve uzay sanayiinde havayla temas eden dış gövdelerde alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde perçin gibi mekanik bağlantı elemanlarının kullanımı hem hava sürtünmesini arttırdığından dolayı hem de bindirmeli bağlantı yapılacağı için yapısal ağırlık artışından dolayı yakıt tüketiminde artışa sebep olur. Bunlarla birlikte bu tür bağlantılar pek çok talaşlı imalat işlemi içerir.

Alüminyum alaşımlı plakalardaki genelde talaşlı imalat işlemlerinde, özelde ise perçin delme işleminde pek çok problem vardır. Bütün bu durumlar dikkate alındığında alüminyum alaşımlı plakaların kullanıldığı sektörlerde, özellikle de havacılık ve uzay sanayiinde hafif, yüksek dayanımlı, uzun ömürlü, otomasyona uygun yapıların imalatı için modern kaynak teknolojilerinin kullanımı zorunludur [18].

Alüminyum alaşımların çeşitli özelliklerinden dolayı özel tip kaynak işlemleri ile kaynaklandığı bilinmektedir. Alüminyum alaşımların kaynaklanmasında kullanılan başlıca modern kaynak yöntemleri aşağıda verilmiştir [21].

- Difüzyon Kaynağı (DB)
- Değişken Kutuplu Plazma Ark Kaynağı (VPPAW)
- Metal İnert Gaz Kaynağı (MIG) / Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAW)
- Lazer Işın Kaynağı (LBW)
- Elektron Işın Kaynağı (EBW)
- Hibrit Lazer Ark Kaynağı (HLAW)
- Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW)

Difüzyon kaynağı (diffusion bonding), benzer veya farklı metaller arasında yüksek kaliteli bağlar üretmek için basınç altında yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen önemli bir katı hal birleştirme işlemidir. Bu yöntem beklenmedik faz oluşumlarına sebep olmadığı için ve ısıdan etkilenen bölge oluşturmadığı için çoğu durumda geleneksel kaynak yöntemlerine tercih edilmektedir. Yöntemdeki bağlanma sıcaklığı malzemelerin ergime sıcaklıklarının 0,5-0,8 katı kadardır [22].

Plazma ark kaynağı (PAW), tüketilemeyen bir elektrot ile kaynak havuzu (aktarılan ark) arasında veya elektrot ile daraltıcı nozul (aktarılmamış ark) arasında daraltılmış bir ark kullanır. Plazmanın ısı yoğunluğu yeterince yüksekse, bu işlem daha az maksimum penetrasyona sahip olsa da lazer veya elektron demeti kaynağına benzer bir anahtar deliği modunda çalışabilir [20].

Metal iner gaz kaynağı ya da diğer adıyla gaz metal ark kaynağı, bir tel elektrot ile metal iş parçası elektrik ark oluşturarak erimelerine ve birleşmelerine neden olan bir kaynak işlemidir. Tel elektrotla birlikte kaynak tabancası aracılığıyla kaynak bölgesinin hava ile temasını kesen bir koruyucu gaz kullanılır.

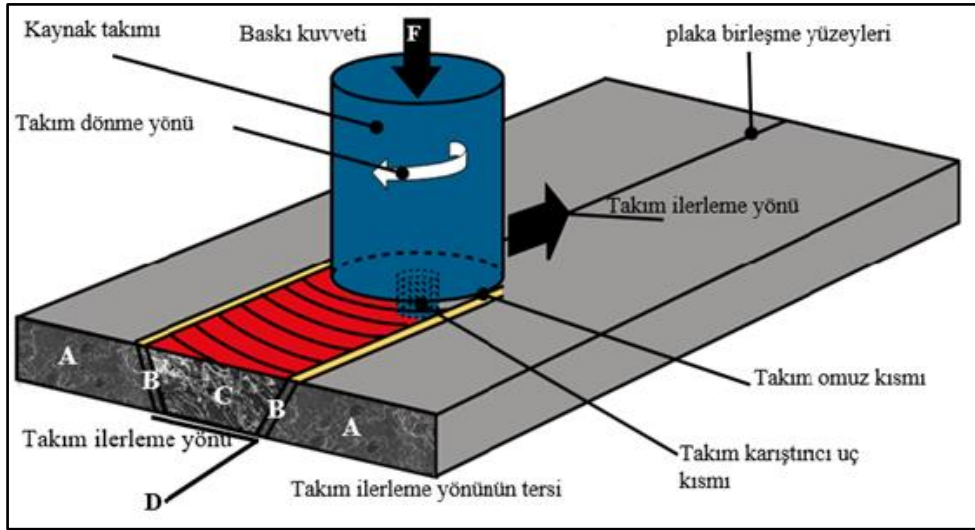
Lazer ışın kaynağı (LBW), düşük çarpılma, yüksek dayanım ve yüksek kaynak hızları sağlayan düşük sınırlandırılmış enerji girişi nedeniyle yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları için uygun bir birleştirme teknolojisidir [23]. Bu yöntemde lazer ortamından çıkan ışın demeti pek çok yönlendirici aynadan yansarak odaklama merkezine gelir. Odaklama merkezindeki merceklerle çok küçük bir alana toplanan ışın kaynak bölgesine yansıtılır. Bu bölgede yerel bir ergimeye sebep olan ışın buharlaşmış malzeme ve koruyucu gazdan oluşan bir plazma oluşumuna sebep olur. Yoğunlaşan bu plazma sayesinde daha yüksek oranda lazer ışını emilimi gerçekleşir ve malzeme üzerinde anahtar deliği adı verilen akıcı fazlı bir buhar deliği oluşturur.

Elektron ışın kaynağı, yüksek enerjili elektronlardan oluşan çok iyi odaklanmış ışını kullanan bir birleştirme yöntemidir. Odaklanmış elektron demeti, iş parçasına 105 W/mm^2 veya daha fazla güç yoğunluğuna çarpar. Yüksek güç yoğunluğu, erimiş metalin buharlaşmasına neden olarak elektron ışın kaynağının karakteristiği olan “anahtar deliği” oluşumuna yol açar. Oluşan bu anahtar deliğinden sonra eriyik çukuru oluşur. Hem vakum ortamında hem de vakumsuz ortamlarda uygulanabilmektedir [24].

Lazer ışın kaynağı (LBW) ile gaz metal ark kaynağının (GMAW) kombinasyonu olan hibrit lazer ark kaynağı (HLAW) alüminyum alaşımları başta olmak üzere hemen hemen bütün hafif metaller için yüksek potansiyele sahip bir yöntemdir. İki ayrı bileşenine kıyasla en temel avantajları; derin ve kararlı kaynak penetrasyonu, gelişmiş boşluk köprüleme kabiliyeti, düşük çarpılma ve kolay dolgu metali eklenebilmesidir.

3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), kaynak kabiliyetleri düşük olan birbirinden farklı malzemeleri kaynaklayabilmek için yapılan çalışmalar sırasında 1991 yılında İngiltere-Cambridge'deki The Welding Institute (TWI)'de çalışmakta olan Wayne Thomas ve iş arkadaşları tarafından icat edilerek patentlenmiş bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu kaynak yöntemi birbirinin aynı ya da birbirinden farklı metallerin füzyon olmadan ve dolgu malzemeleri kullanılmadan birleştirilmesini içermektedir [25]. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 3.1'de görüldüğü gibidir [26].

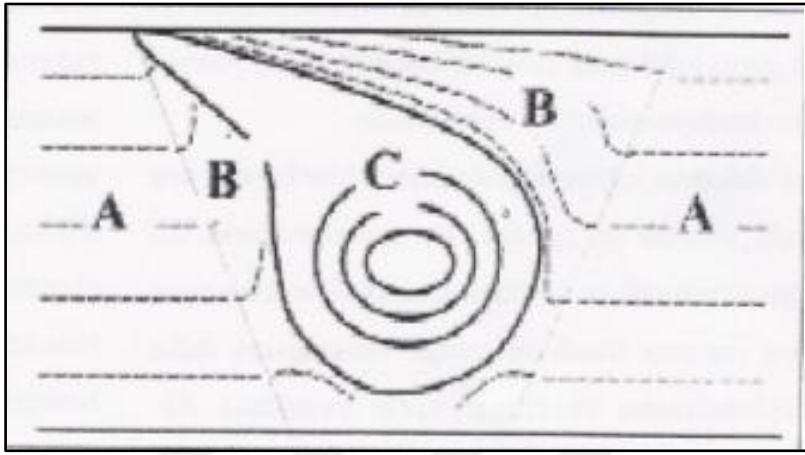


Şekil 3.1. Sürtünme karıştırma kaynağının şematik görünümü

Yöntemin genel çalışma prensibi aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır;

- Birleştirilecek plakalar kaynaklama pozisyonuna getirildikten sonra işlemin yapılacağı tablaya sabit bir şekilde bağlanır.
- Karıştırıcı takım devri, takım açısı, baskı kuvveti, takım dönme yönü ve takım ilerleme hızı gibi işlem parametreleri ayarlanır.
- Takım çalıştırılarak plaka birleşme yüzeyinde istenilen başlangıç yerine battıktan sonra belirlenen süre kadar ilerlemeden bekleyerek ilk ısıtma işlemini gerçekleştirir.
- Yeterince beklenildikten sonra (kaynaklanacak malzemenin ergime sıcaklığının altındaki bir değere ulaşıncaya kadar) karıştırıcı uç, plaka birleşme yüzeyleri boyunca ilerler.
- Kaynaklama işlemi bittikten sonra karıştırıcı uç ilk baştaki gibi bekletilmeden geri çekilir.

TWI tarafından geliştirilen, sürtünme karıştırma kaynağı sonucunda kaynak bölgesinde oluşan içyapıyı gösteren şema hala tartışılmaya devam edilse de Sürtünme Karıştırma Kaynağı Ruhsatları Kurumu (FSW Licensees Association) tarafından da kabul edilmiştir. Bu şemaya göre alüminyum alaşımların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi esnasında kaynak bölgesinde 3 farklı oluşum gözlemlenmektedir. Bu 3 oluşum; Isı tesiri altındaki bölge (ITAB), Termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB) ve Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) şeklindedir [25]. TWI tarafından geliştirilen bu şema Şekil 3.2’de görüldüğü gibidir [25].



Şekil 3.2. Sürtünme karıştırma kaynağında oluşan kaynak bölgesi içyapısının şematik görünümü (A: ITAB, B: TEB, C: DKB)

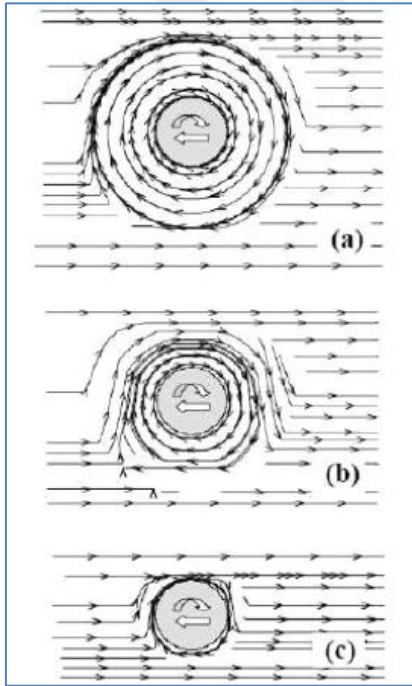
Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan bu 3 yapı kısaca şöyle açıklanmaktadır;

Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB): Plastik deformasyonun oluşmadığı bu bölgede kaynak merkezinde oluşan ısıнын etkisiyle meydana gelen bir etkilenme söz konusudur [25].

Termomekanik Olarak Etkilenen Bölge (TEB): Hem ısı oluşumundan hem de mekanik etkilerden dolayı plastik deformasyonun yaşandığı bu bölgede kaynak bölgesi gibi plastik deformasyona maruz kalmadığı için plastik gerilmeden dolayı yeniden kristalleşme meydana gelmez. Fakat bazı durumlarda bu bölgede kısmen de olsa dinamik yeniden kristalleşme meydana geldiği bazı çalışmalarda tespit edilmiştir [27].

Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (DKB): SKK'da en yüksek sıcaklık bu bölgede meydana gelir. Yüksek deformasyon ve nispeten yüksek sıcaklık nedeniyle, bu bölgenin mikro yapısını değiştiren dinamik bir yeniden kristalleşme gerçekleşir [28].

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak işleminin gerçekleşmesini sağlayan takım, kaynaklanacak malzemeleri ergime noktalarının hemen altındaki bir sıcaklığa ulaştırdıktan sonra kaynak bölgesindeki plastik haldeki malzeme, karıştırıcı uç etrafında takım ilerleme yönünden takım ilerleme yönünün tersine doğru hareket eder. Karıştırıcı uçun (pim) sahip olduğu basınç ve tork, malzemeyi görünür bir viskoziteye ulaştırmak için gerekli enerjiyi sağlar [21]. Sürtünme karıştırma kaynağında farklı yatay düzlem derinliklerinde iz akışları da farklı formlarda olmaktadır. Bu formlardan bazıları Şekil 3.3'te görüldüğü gibidir [21].



Şekil 3.3. Farklı yatay düzlem derinliklerinde iz akışları (a) 0,35 mm, (b) 1,59 mm ve (c) 2,28 mm

Sürtünme karıştırma kaynağı ile geleneksel sürtünme kaynaklarını birbirinden ayırın en önemli özelliklerden biri ise; geleneksel yöntemde ısı oluşumu kaynaklanacak parçaların hareketiyle oluşurken, sürtünme karıştırma kaynağında takım hareketiyle oluşmasıdır. Bu sayede çok farklı geometrilerdeki iş parçalarının hareket ettirilmeden kaynaklanabilmesi mümkün olmaktadır.

3.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Kullanım Alanları

Sürtünme karıştırma kaynağı ark kaynağına olan bazı potansiyel üstünlüklerinden dolayı alüminyumla çalışan pek çok sektörde ilgi görmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağında ana malzemede ergime gerçekleşmez, bu sayede bazı alüminyum alaşımlarında ark kaynağı yaparken genellikle büyük bir sorun olarak ortaya çıkan katılaşma çatlama olasılığını ortadan kaldırılır [21]. Sürtünme karıştırma kaynağı başlıca aşağıdaki kullanım alanlarına sahiptir.

Gemi yapımı ve denizcilik sanayii: Sürtünme karıştırma kaynağı genel olarak; güverte panellerinde, bordalarda, gemi bölmelerinde ve zeminlerde, alüminyum ekstrüzyonlarında, büyük yük gemilerinde ve üstyapılarda, gemilerdeki helikopter iniş alanlarında, gemi direklerinde ve bumbalarda, gemilerdeki soğutma tesisatlarında ve diğer pek çok bölümde kullanılmaktadır [21].

Havacılık ve uzay sanayii: Boeing tarafından, Delta II roketinin kademeler arası modülünde SKK'nın başarıyla uygulaması ve bu roketin Ağustos 1999'da başarıyla fırlatılması yöntemin havacılıktaki kabulünü arttırmıştır [25]. Sürtünme karıştırma kaynağı günümüzde uzay sanayiinde uzay mekiklerinin en büyük elemanı olan harici yakıt tanklarındaki kaynaklı birleştirme işlemlerini gerçekleştirebilmek için tercih edilen en modern birleştirme yöntemidir [21, 29].

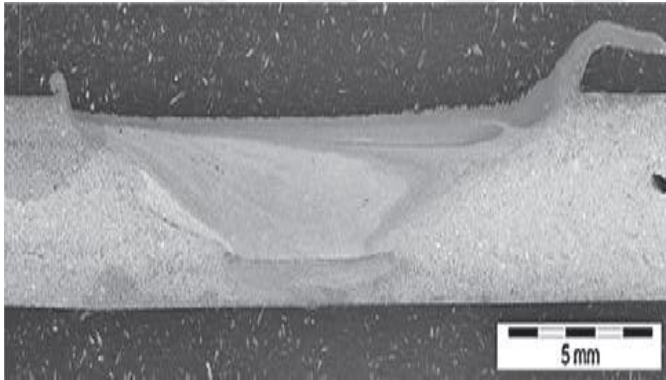
Karayolu taşımacılığı ve savunma sanayii: Sürtünme karıştırma kaynağının otomotiv sektöründe de çeşitli uygulamaları bulunmaktadır. Örneğin; Tayvan Metal Endüstrileri Araştırma ve Geliştirme Merkezi (MIRDC) tarafından 5000 serisi alüminyum alaşımdan imal edilmiş spor araba jantı sürtünme karıştırma kaynağı ile başarıyla birleştirilmiştir [30].

Sürtünme karıştırma işlemi ve hemen arkasından haddeleme bazı alüminyum alaşımlarında mükemmel süper plastik davranış sağlayan tane boyutunu önemli ölçüde azaltabilir. Alüminyum alaşımlarda kalın plakanın sürtünme karıştırma işleminden sonra yuvarlanarak levha haline getirilmesi bu alaşımların süper plastiklik özelliklerini ciddi oranda artırır. Bu yüzden SKK yöntemi ticari araç panel şekillendirilmesinde sıklıkla tercih edilmektedir [31].

3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Oluşan İç Yapı Kusurları

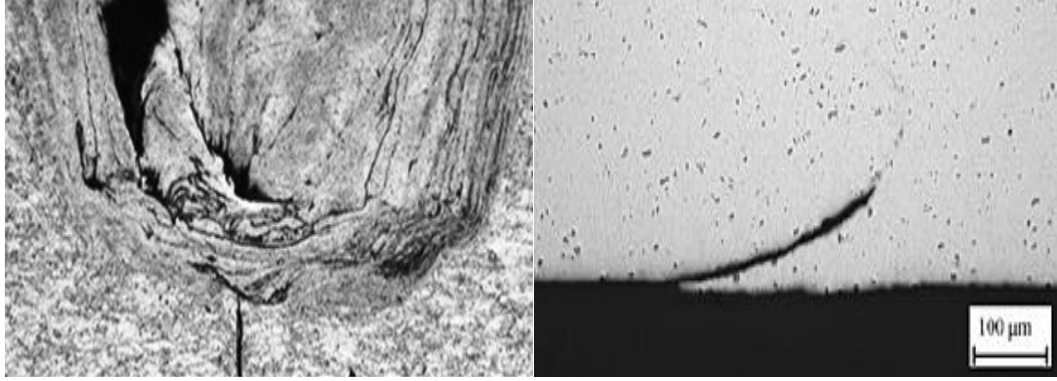
Sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin doğru ayarlanamamasına, doğru ölçülerde karıştırıcı uç kullanılmamasına ve bunlar gibi sebeplere bağlı olarak çeşitli içyapı kusurları oluşabilmektedir. İşlem parametrelerine bağlı olarak oluşan yetersiz ısıtma sonucunda; penetrasyon eksikliği, füzyon eksikliği, tüneller, boşluklar, yüzey olukları, aşırı parlama, külçe çökmesi ve öpüşme bağları gibi sürtünme karıştırma kaynak kusurları oluşmaktadır [32]. Bu kusurlardan bazıları aşağıda açıklanmaktadır.

SKK'da devir sayısının çok yüksek olması, ilerleme hızının çok düşük olması gibi sebeplere bağlı olarak kaynak bölgesinde artan sıcaklık kaynak dikişinde çökerek incelmeye, dikiş kenarlarında ise çapak oluşumuna sebep olur [33]. Bu kusura sahip bir kaynak, kabul edilebilir kaynak gücüne sahip olmasına rağmen kabul edilemez bir görsel görünüme sahiptir. Ancak bu kaynak hatası aynı makinede frezeleme ile kolayca giderilebilmektedir [34]. Resim 3.1'de AlSi12'de aşırı ısı girişi nedeniyle kaynak hattında oluşan ilave yüzey görülmektedir [32].



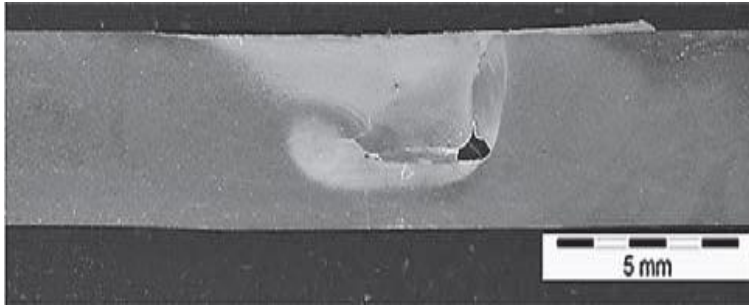
Resim 3.1. AlSi12'de aşırı ısı girişi nedeniyle kaynak hattında oluşan ilave yüzey

SKK'da çok kısa pim kullanılmasına bağlı olarak kaynak kökünde çeşitli kusurlar oluşabilmektedir. Pim uzunluğunun yetersiz olduğu durumlarda penetrasyon derinliği de düşük olduğu için kaynak kök bölgesinde tam birleşmeler meydana gelmemektedir. Bu yetersiz birleşme malzemede çentik etkisi yaparak çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. Resim 3.2'de yetersiz pim uzunluğuna bağlı olarak AA2024-T6 ve AA5083'te kök bölgelerinde oluşan penetrasyon eksikliği kusurları açıkça görülmektedir [35-36].



Resim 3.2. a) AA2024-T6'da kaynak kökünde penetrasyon eksikliği [35], b) AA5083'te kaynak kökünde penetrasyon eksikliği [36]

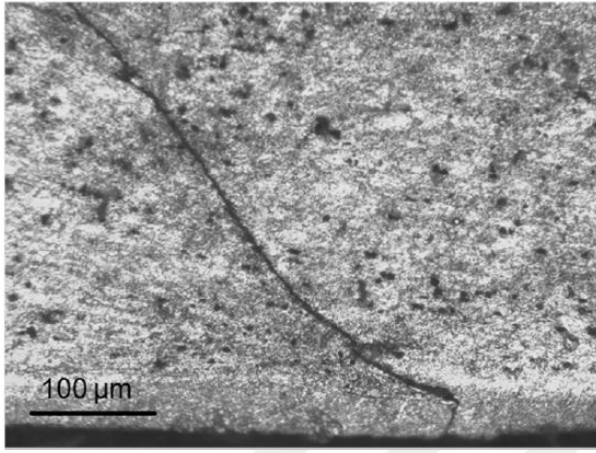
SKK'da en çok karşılaşılan hatalardan biri de solucan deliği adı verilen, kaynak yüzeyinin tamamen altında yer aldığı için doğrudan görülemeyen kaynak içi boşluklardır. Kaynak içerisinde bu boşlukların oluşmasının en temel sebebi anormal malzeme akışıdır. Tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri ile kolaylıkla tespit edilebilen bu kusur, birleştirilen parçalar arasındaki temas yüzeyinin azalmasına sebep olarak malzeme dayanımını ciddi oranda azaltır [37]. Malzeme akışını olumsuz yönde etkileyen en temel sebep ise işlem parametrelerinin doğru ayarlanamamasına bağlı olarak oluşan yetersiz ergimedir. AlSi12'de düşük ısı girişi ve uygun olmayan takım geometrisi seçimi gibi sebeplerden dolayı ortaya çıkan boşluk Resim 3.3'te görülmektedir [38].



Resim 3.3. AlSi12'de yetersiz ısı girişi nedeniyle kaynak hattında oluşan boşluk

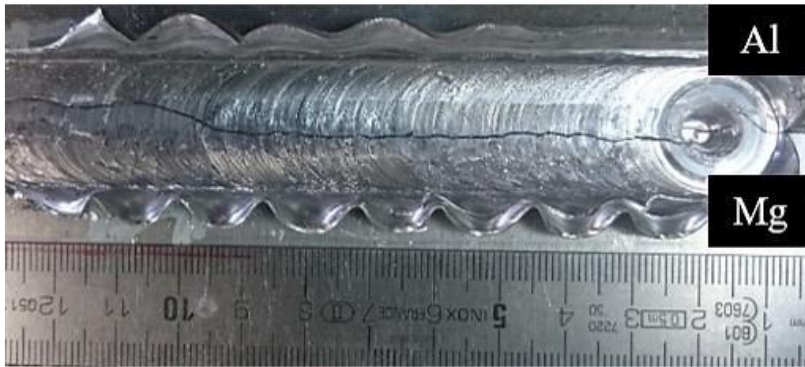
Bir diğer içyapı kusuru olan öpüşen yüzeyler (kissing bond) de solucan deliğinde olduğu gibi yetersiz ısı girişi sebebiyle genellikle kaynak kökünde meydana gelir. Bu kusurda kaynaklanan malzemeler birbirlerine çok yakın konumda olmasına rağmen aralarında kimyasal ya da mekanik bir bağ yoktur ve kaynak içindeki oksitlenme sonucunda meydana gelir [39].

Diğer bazı kaynak yöntemlerinde de görülebilen bu hatanın konumuna ve boyutlarına bağlı olarak malzemenin yorulma dayanımı düşer. Tahribatsız muayene yöntemleriyle tespiti çoğu zaman mümkün olmayan bu hata, SKK yönteminin havacılıkta kritik hassasiyetler istenilen parçalarda yeterince kullanılamamasına sebep olmaktadır [40]. Resim 3.4'te 2A12-T4'te füzyon eksikliğine bağlı olarak oluşmuş öpüşen yüzey kusuru görülmektedir [37].



Resim 3.4. 2A12-T4 malzemedede oluşmuş öpüşen yüzeyler

SKK'da kaynak hızını artırmak için ilerleme hızının çok yüksek miktarlara çıkarılması özellikle ergime noktaları çok farklı olan metallerin kaynaklanmasında çeşitli kusurlara sebep olmaktadır. Artan ilerleme hızıyla beraber dönme devri yeteri kadar artırılmadığı zaman malzemelerde mekanik ve kimyasal birleşme tam olarak gerçekleşmemekte ve bunun sonucunda kaynak bölgesinde çatlaklar oluşmaktadır. Bu tür çatlaklar Resim 3.5'te görüldüğü gibi çoğu zaman kaynak hattı boyunca uzanmaktadır.



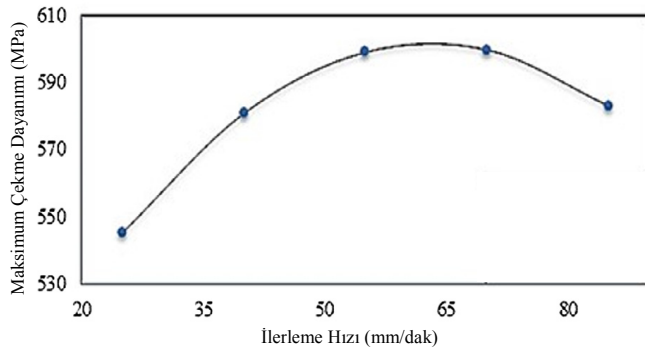
Resim 3.5. AA7075-T6 ve AZ31B-H24 alaşımlarında oluşan yüzey çatlakları [41]

3.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Proses Parametreleri

Sürtünme karıştırma kaynağında pek çok işlem parametresi bulunmakla beraber henüz bütün parametreleri içeren ve bu parametreleri kullanarak kaynak dayanımının hesaplanmasını gerçekleştirebilen bir formülasyon geliştirilememiştir. Kaynak dayanımını en çok etkileyen parametreler deneysel olarak belirlenmiş olsa da takım geometrisi gibi sınırsız değişkene sahip olan parametreler için genel kabul gören bir matematiksel yaklaşım henüz mevcut değildir. Bununla birlikte malzemeye ısı girişi kaynak kalitesini doğrudan etkilediğinden buradan yola çıkarak bazı malzeme ve proses türleri için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu tezde yukarıda anlatılan çalışmalar aktarılmayacak olup, deneysel çalışmalarda elde edilen bulgular neticesinde SKK'da malzeme dayanımını en çok etkileyen işlem parametreleri açıklanmıştır.

3.3.1. Takım ilerleme hızı

Bilindiği üzere sürtünme karıştırma kaynağı, bir katı hal birleştirme yöntemidir. Bu yöntemi geleneksel kaynak yöntemlerinden ayıran en önemli özellik, malzemenin ergime noktasının altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılıp kaynak işleminin gerçekleştirilmesidir. SKK'da takım ilerleme hızının artması ya da azalmasıyla malzemeye birim zamanda aktarılan toplam ısı miktarı değişmese de birim alana etki eden enerji miktarı değişir. Malzeme türü, malzeme kalınlığı, takım dönme devri vb. parametrelere bağlı olarak ideal takım ilerleme hızı değerleri değişiklik gösterse de diğer işlem parametreleri sabit tutulurken ideal takım ilerleme hızından uzaklaştıkça malzemenin dayanımı Şekil 3.4'te görüldüğü gibi azalır [42].



Şekil 3.4. AISI 316L'de ilerleme hızının maksimum çekme dayanımına etkisi [42]

Çok düşük ilerleme hızları birim alana etkiyen ısı miktarını artırır. Artan ısı miktarı malzemenin ergiyerek takıma sıvanmasına, çapak oluşumuna ve ısıdan etkilenmiş bölgenin genişlemesine dolayısıyla da malzeme dayanımının azalmasına sebep olur. Çok yüksek ilerleme hızları ise malzemeye yeterli ısı girişini engellediği için uygun sıcaklığa ulaşmasına engel olur. Bu sebepten dolayı ilk başlarda tünel oluşumları, füzyon eksiklikleri öpüşen yüzeyler gibi içyapı kusurları oluşurken, ilerleme hızı daha da arttıkça karıştırıcı uçta veya takımda hasarlar oluşmaya başlar.

Bu durumlar dışında takım ilerleme hızının dar aralıklardaki değişimleri incelendiği zaman, belirli bir bölgeye kadar ilerleme hızının artması sonucu azalan ısı girdisi nedeniyle kaynak bölgesindeki tane boyutları küçüldüğü görülür. Tane boyutlarındaki küçülme malzeme akma ve çekme dayanımlarının artmasını sağlar [43]. Ancak ilerleme hızının değişimi aynı oranda olsa bile her malzemede aynı etkiye sebep olmaz. Çizelge 3.1’de de görüldüğü gibi ilerleme hızının artması aynı malzemeden oluşan parçaların kombinasyonlarında maksimum çekme dayanımını artırırken, birbirleriyle olan kombinasyonda azaltmıştır [43].

Çizelge 3.1. Farklı kombinasyonlarda ilerleme hızının mekanik özelliklere etkisi [44]

Örnek	Takım dönme devri (dev/dak)	İlerleme hızı (mm/dak)	Akma dayanımı (MPa)	Maksimum çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Ana malzeme AA5083	-	-	150	295	8,4
Ana malzeme AA7075	-	-	362	545	21
AA5083-AA5083	1400	45	112,7	175	2,17
AA5083-AA5083	1400	20	121,7	166,7	1,70
AA7075-AA7075	1400	45	144,8	295,7	12,3
AA7075-AA7075	1400	20	140,8	273,7	6,21
AA5083-AA7075	1400	45	143,2	206,6	2,55
AA5083-AA7075	1400	20	135,3	237,4	3,86

Sürtünme karıştırma kaynağında sertlik, baz metalden ısıdan etkilenen bölgeye, termomekanik olarak etkilenen bölgeye ve daha sonra en düşük sertliğin elde edildiği karıştırma bölgesine kademeli olarak azalır. Daha yüksek kaynak hızları, karıştırma bölgesinde sertliğini çok azda olsa artırır [45].

3.3.2. Takım dönme devri

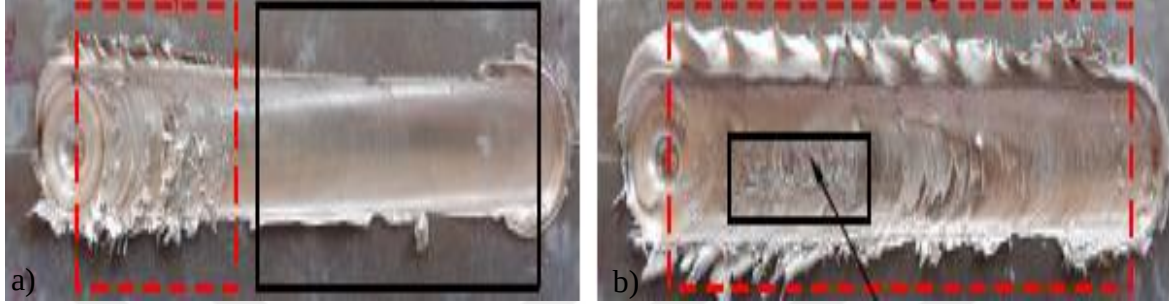
Sürtünme karıştırma kaynağında en önemli işlem parametrelerinden biri de takım dönme devridir. Malzemede ideal plastik akışı sağlamak için takımdan malzemeye yeterli ısı girdisi sağlanması gerekmektedir. Yeterli ısı girdisi sağlanamadığı zaman malzemede içyapı kusurları ve daha uç noktalarda takımda hasarlar oluşabilmektedir. Genel olarak takım dönme devri arttıkça malzemeye aktarılan ısı miktarı da artmaktadır ancak ideal dönme devirleri geçildiği zaman da çeşitli sorunlar oluşmaktadır. Bu yüzden takım dönme devrinin malzemede plastik akışı sağlayacak kadar çok ancak çeşitli kusurlara sebep olmayacak ve malzeme özelliklerini azaltmayacak kadar da az olması gerekir.

Çizelge 3.2’de yukarıda anlatılan durumun bir örneği görülmektedir. SiC takviyesi yapılmış AA2024-T351 ve AA7075-T651 alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde takım dönme devrinin mekanik özelliklere etkisinin incelendiği bir çalışmada diğer işlem parametreleri sabit tutulurken takım dönme devri artırıldığında, 1012 dev/dak değerine kadar malzeme maksimum çekme dayanımının da arttığı, bu değerden sonra ise azaldığı belirlenmiştir [46].

Çizelge 3.2. SiC takviyesi yapılmış AA2024-T351 ve AA7075-T651 alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde takım dönme devrinin mekanik özelliklere etkisi [46]

Takım dönme devri (dev/dak)	Maksimum çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Uzama (%)
450	299	80	6,56
530	300	102	6,95
620	290	120	5,32
700	286	112	5,97
780	366	150	9,67
880	374	160	10,15
925	369	152	9,23
1012	380	190	13,5
1150	379	180	10,6
1275	345	135	8,62
1360	287	127	6,25
1450	192	91,8	3,52
1535	184	97	3,08

Resim 3.6’da ise kaynak hızının yaklaşık 800 dev/dak’nın üzerine çıktığı zaman malzeme yüzeyinin delamine olduğu görülmektedir. 1100 dev/dak’dan sonra ise kaynak hattında çapak oluşumunun gerçekleştiği, 1500 dev/dak’dan sonra ise gözle görülebilir kaynak kusurlarının olduğu görülmektedir [46].



Resim 3.6. SiC takviyesi yapılmış AA2024-T351 ve AA7075-T651 alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde takım dönme devrinin kaynak kalitesine etkisi.
(a) 400-1100 dev/dak, (b) 1100-1800 dev/dak

Sürtünme karıştırma kaynağında genel olarak kaynak bölgesi sertliğinin ana metalden daha yüksek olduğu ve takım dönme devri arttıkça kaynak bölgesinin sertliğinin de arttığı yapılan çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir [47]. Bunun yanında çeşitli malzemelerde bu durumun tam tersi görülebilmekte, sürtünme karıştırma kaynak işleminden sonra kaynak bölgesi sertliğinde azalma oluşmaktadır.

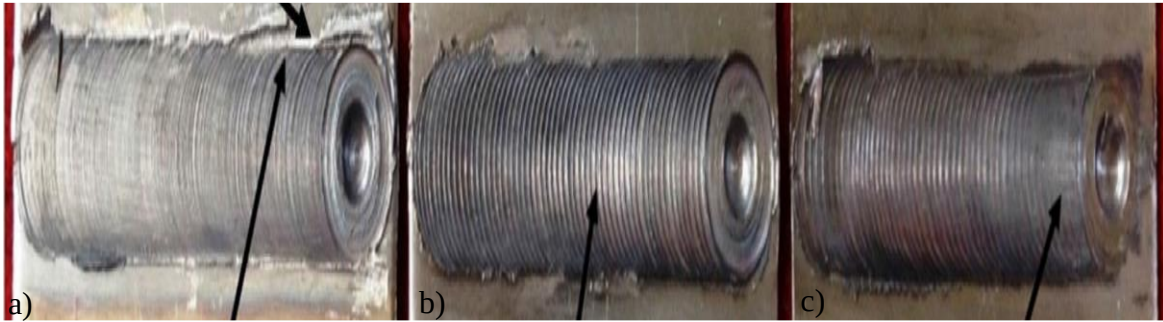
Sürtünme karıştırma kaynağında takım dönme devrinin içyapıya etkisi incelendiğinde ise düşük dönme devirlerinden ideal dönme devrine yaklaştıkça tanelerin küçüldüğü tespit edilmiştir [48]. Ancak ideal dönme devrinden sonra takım dönme devri arttıkça kaynak bölgesindeki tanelerin büyüdüğü görülmektedir. İri taneli yapı ise daha düşük mukavemet ile sonuçlanmaktadır [47,49].

P9 çelik plakada takım dönme devrinin etkilerinin incelendiği bir çalışmada ise düşük dönme devirlerinin takım aşınmasını azalttığı ve bu sayede takım ömrünü arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte düşük dönme hızının kaynak bölgesinde ulaşılan tepe sıcaklığının azalmasına sebep olarak, zararlı martenzitik faz oluşumunu sınırladığı da çalışma sonuçlarındandır [50].

3.3.3. Takım eğim açısı

Takım eğim açısı, sürtünme karıştırma kaynağındaki en önemli proses parametrelerinden biridir [51]. Bu alanda yapılan çalışmalar takım eğim açısının, karıştırma bölgesinin dinamik hacmi, maksimum sıcaklığı ve kaynak bölgesindeki kesme bandının yoğunluğu gibi çok önemli değerleri doğrudan etkilediğini göstermektedir [52].

Bilindiği üzere kaynak kalınlığı azaldıkça malzeme dayanımı da azalır. Genel bir bilgi olan bu durum sürtünme karıştırma kaynağında da geçerlidir. SKK'da kaynak işleminin gerçekleştirilebilmesi için takıma düşey yönlü bir kuvvet uygulanması gerekir. Uygulanan bu düşey kuvvet, eriyik haldeki kaynak bölgesindeki malzemenin kenarlara taşınarak Resim 3.7'de de görülen, C eğrileri adı verilen malzeme yığılmalarını oluşturur. Aralıklı plakaların birleştirilmesinde bir avantaj olan bu durum genel itibariyle kaynak kalınlığının azalmasına sebep olur. Diğer parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterse de ilerlenen tarafa doğru belirli bir takım eğim açısı değeri ilerleme yönünden geriye doğru malzeme akışını artırarak, kaynak kalınlığının artmasına sağlar [53]. Ancak ideal değerden sonra takım eğim açısının daha da artırılması kaynak bölgesinin incelmesine ve buna bağlı olarak da malzeme dayanımının azalmasına sebep olur [54].

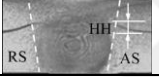


Resim 3.7. Alın altına üç farklı takım eğim açısında birleştirilmiş AISI 316L paslanmaz çelik plakalar. (a) 0° , (b) $1,5^\circ$, (c) 3° [52]

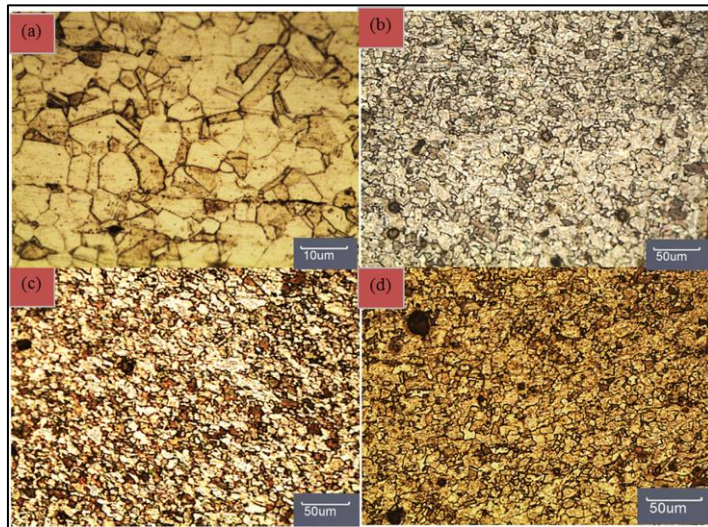
Takım eğim açısının bir diğer avantajı ise takım etrafında daha güçlü bir karıştırma kuvveti sağlayarak malzemelerin daha iyi karıştırılmasını, dolayısıyla da kaynak kalitesinin artmasını sağlamasıdır [55].

AA2014-T6 plakada, 0^0 , 1^0 , 2^0 , 3^0 ve 4^0 takım eğim açılarının içyapıya ve mekanik özelliklere etkisinin incelendiği bir çalışmada, takım eğim açısı 0^0 iken doldurma eksikliği ve tünel oluşumu gibi hatalarla karşılaşmıştır. Çizelge 3.3'te de görüldüğü gibi takım eğim açısı 4^0 iken ise efektif kalınlıktaki yüksek oranlı azalma sonucu malzeme dayanımının düştüğünü belirlenmiştir. Bu sebeplerden dolayı bu iki açı arasındaki üç açıyı detaylı incelemişler ve 2^0 'ye kadar takım eğim açılarında açı arttıkça efektif kalınlığın, mikro sertliğin ve malzeme dayanımının arttığı, 2^0 'den sonra ise azaldıkları tespit edilmiştir.

Çizelge 3.3. AA2014 plakada, takım eğim açısının mekanik özelliklere etkisi [51]

Takım Eğim Açısı	Makroyapı	Efektif Kalınlık (mm)	Karıştırma Bölgesi Alanı (mm ²)	Mikrosertlik 0,5N-15s (HV)	Maksimum Yük (kN)	Kopma Yeri
1^0		1,71	7,2	128	12,60	SZ
2^0		1,81	8,2	132	14,42	TMAZ/SZ
3^0		1,73	9,3	129	13,10	TMAZ/SZ

AISI 316L paslanmaz çelikte takım eğim açısına bağlı olarak tane yapısının değişiminin incelendiği bir başka çalışmada ise Resim 3.8'de görüldüğü gibi $1,5^0$ takım eğim açısına kadar, eğim açısı arttıkça kaynak bölgesi tane yapısının küçüldüğü, bu değerden sonra ise büyümeye başladığı görülmektedir [52].



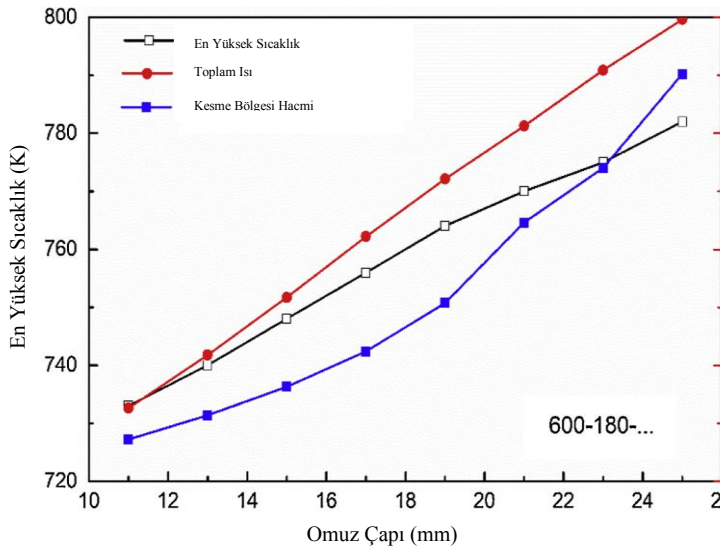
Resim 3.8. 316L çelikte takım eğim açısına bağlı olarak kaynak bölgesi tane yapısı.

(a) Ana malzeme, (b) 0^0 takım eğim açısı, (c) $1,5^0$ takım eğim açısı, (d) 3^0 takım eğim açısı

3.3.4. Takım omuz çapı

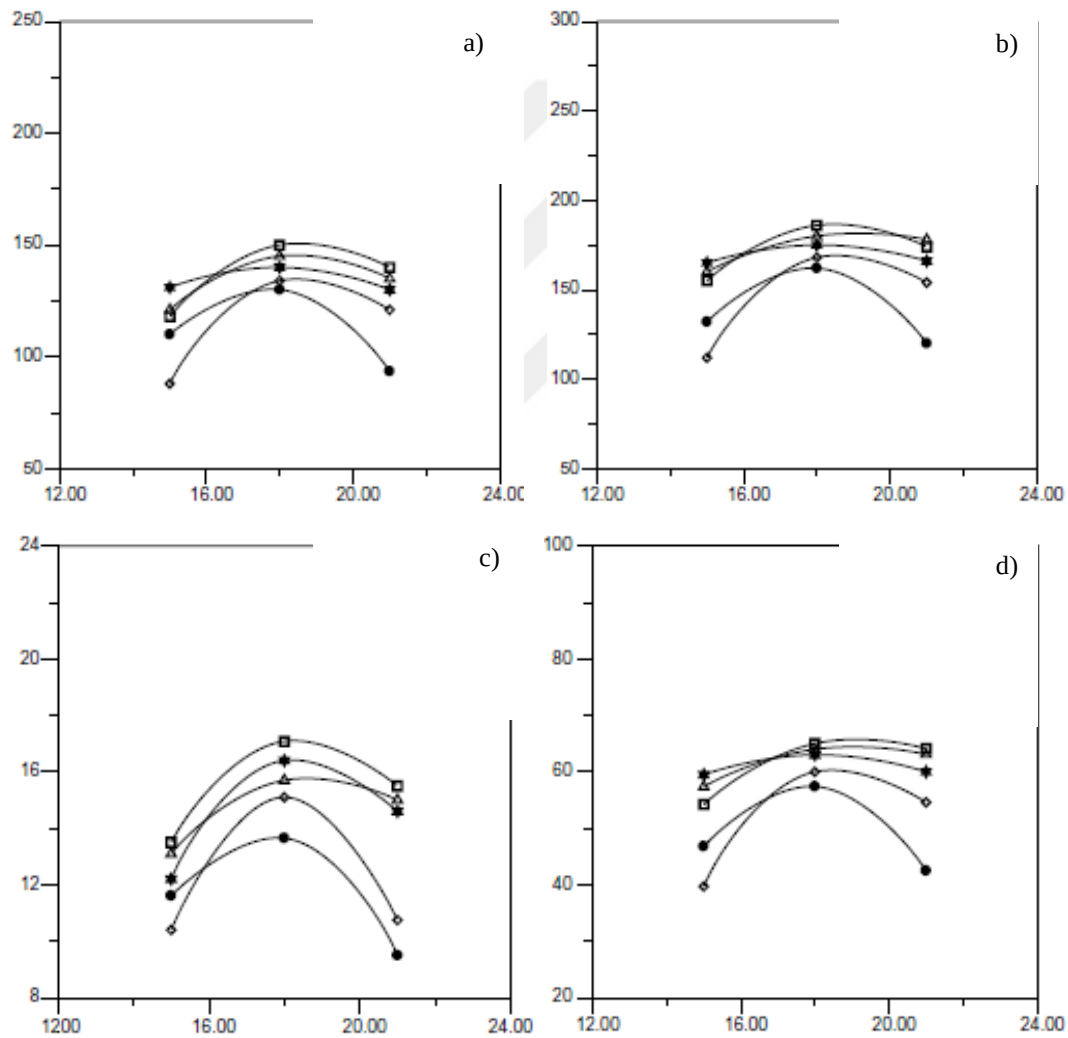
Sürtünme karıştırma kaynağında takım omzu karıştırıcı ucun önünde ve çevresinde ısıtma işlemi yaparak takımın daha kolay ilerlemesini, bu sayede de karıştırıcı uçta oluşabilecek hasarların önlenmesini sağlar [56]. Bununla birlikte iş parçasının alt yüzeyindeki kesme bölgesinin minimum genişliği takım omuz çapına duyarsız olsa da üst yüzeyindeki kesme bölgesinin maksimum genişliği, takım omuz çapına büyük ölçüde bağlıdır [57].

Kaynak bölgesine aktarılan ısı miktarını en çok etkileyen işlem parametrelerinden biri olan takım omuz çapının daha önce incelenen 3 işlem parametresiyle (takım ilerleme hızı, takım dönme devri, takım eğim açısı) doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağında malzemeyi ergime noktasının altındaki ideal sıcaklığa ulaştırabilmek ancak bu seviyeyi aşmamak, kaynak kalitesi açısından oldukça önemlidir. Yapılan çalışmalar sonucunda, optimum omuz çapının, takım dönüş hızının artmasıyla azaldığı, kaynak hızının artmasıyla ise arttığı belirlenmiştir [58]. Diğer işlem parametreleri sabit tutularak sadece omuz çapı arttırıldığında, temas alanının artmasına bağlı olarak Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, kaynak bölgesi tepe sıcaklığı, toplam ısı üretim miktarı ve kesme bölgesi hacmi sürekli arttığı için ideal omuz çapının belirlenmesi oldukça önemlidir [57-59].



Şekil 3.5. Ultrasonik titreşimli sürtünme karıştırma kaynağının CFD modelinde, omuz çapının; kaynak bölgesi tepe sıcaklığı, toplam ısı üretim miktarı ve kesme bölgesi hacmine etkisi [59]

6 mm kalınlıktaki AA6061 malzemede omuz çapı ve takım geometrisinin etkilerinin incelendiği bir çalışmada ise, daha önce incelenen 3 işlem parametresinde olduğu gibi omuz çapında da ideal bir değer olduğu, ideal değerden + ya da - yönde uzaklaştıkça malzemenin mekanik özelliklerinin kötüleştiği görülmektedir. Ancak incelenen diğer işlem parametrelerinde bulunmayan daha belirgin bir özellik olarak takım omuz çapında ideal değerde (bu çalışma için 18 mm) Şekil 3.6'da görüldüğü gibi hem akma dayanımı hem maksimum çekme dayanımı hem yüzde uzama oranı hem de bağlantı verimliliği maksimumdur [60].



Şekil 3.6. Alın altına kaynaklanmış, 6 mm kalınlıktaki AA6061 plakalarda omuz çapının mekanik özelliklere etkisi. (a) Omuz çapı-Akma dayanımı, (b) Omuz çapı-Maksimum çekme dayanımı, (c) Omuz çapı-Uzama miktarı, (d) Omuz çapı-Bağlantı verimliliği [60]

AA6061'e göre daha sert bir malzeme olan AA7039'da omuz çapının mekanik özelliklere etkilerini incelendiği ve ideal omuz çapını bulunmaya çalışıldığı bir çalışmada Çizelge 3.4'ten de görüldüğü gibi pim çapı ve omuz yüzey eğriliği ne olursa olsun maksimum çekme dayanımı hep 19 mm omuz çaplı takımın kullanıldığı çalışmalarda elde edilmiştir. Bununla birlikte en yüksek dayanım 19 mm takım omuz çaplı, 7 mm pim çaplı ve 2° omuz yüzeyli takımda elde edilmiştir.

Çizelge 3.4. Sürtünme karıştırma kaynağında omuz çapı, omuz yüzey eğriliği ve pim çapının etkisi [61]

Deney No	Takım Omuz Çapı (mm)	Pim Çapı (mm)	Omuz Yüzey Eğriliği	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%)	Kesit Kalınlığı (mm ²)
1	22	6	3	146,58	2,12	46,76
2	22	6	2	158,06	2,51	47,25
3	22	6	1	150,33	1,91	46,26
4	19	6	3	180,32	3,03	46,90
5	19	6	2	181,39	3,50	46,22
6	19	6	1	166,70	3,13	44,37
7	16	6	3	136,78	2,11	46,93
8	16	6	2	180,66	3,40	45,23
9	16	6	1	151,22	3,02	45,81
10	22	7	3	212,00	5,16	48,98
11	22	7	2	258,13	6,09	52,88
12	22	7	1	208,52	4,51	50,52
13	19	7	3	243,06	5,67	52,22
14	19	7	2	290,12	7,02	52,07
15	19	7	1	238,71	5,67	52,22
16	16	7	3	242,95	4,58	49,13
17	16	7	2	238,54	5,60	49,27
18	16	7	1	241,00	6,05	51,99
19	22	8	3	190,94	3,34	45,91
20	22	8	2	175,20	3,30	46,70
21	22	8	1	165,77	2,23	48,80
22	19	8	3	219,13	3,76	47,26
23	19	8	2	225,55	4,33	48,55
24	19	8	1	170,67	2,80	48,25
25	16	8	3	168,58	2,59	45,42
26	16	8	2	174,55	3,10	49,10
27	16	8	1	168,73	2,99	48,33

Yapılan bu çalışmalar ve diğer çalışmalar incelendiğinde 18-20 mm takım omuz çap aralığında en yüksek çekme dayanımlarının ve hemen hemen en yüksek sünekliğin elde edildiği görülmektedir. Takım omuz çapı 20 mm'nin üzerine çıktığında fazla ısı aktarımından dolayı tane büyümesi gerçekleşirken, 18 mm değerinin altında yetersiz ısı girişi olduğu görülmektedir. Tane büyümesine bağlı olarak 20 mm takım omuz çapından sonra pek çok metal malzemede maksimum çekme dayanımı azalmaktadır [60-62].

3.3.5. Takım geometrisi

Sürtünme karıştırma kaynağında takım geometrisi sadece kaynaklı malzemelerin gerilme mukavemetini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda birçok kusur ve mikro bileşenle de bağlantılıdır [63]. Deformasyon direnci nispeten düşük malzemeler üzerinde yapılan çeşitli çalışmalarda, takım geometrisinin kaynak bölgesi mikro yapısını ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemediği ancak deformasyon direnci nispeten yüksek malzemelerde, kaynak kalitesinin özellikle yüksek dönme hızlarında takım geometrisinden önemli ölçüde etkilendiğini belirlemişlerdir. Karıştırıcı takımda bulunan pim malzemeye ısı aktarımı dışında, plastik malzemenin akışını güçlü bir şekilde etkilediği de bilinmektedir [64,65].

İşlem parametreleri olarak; takım açısının $1,5^{\circ}$, omuz çapının 20 mm, pim uzunluklarının 4,5 mm, dönme devrinin 900 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak olarak belirlendiği, 4,75 mm kalınlığındaki AA6063-T6 plakada en uygun takım geometrisinin incelendiği bir çalışmada konik silindir, düz silindir, üçgen, kare ve altıgen takımlar incelenmiştir. Çalışma sonucunda Çizelge 3.5'te de görüldüğü gibi maksimum çekme dayanımı konik silindir profilli takımda elde edilmiş ancak düz silindirik profilli takımda oldukça yüksek başarı göstermiştir. Bununla birlikte üçgen profilli takımda yetersiz karıştırmaya bağlı olarak tünel kusurları olduğu gözlenmiştir [63].

Çizelge 3.5. AA6063-T6 malzemede takım geometrisinin mekanik özelliklere etkisi [63]

Karıştırıcı Uç Profili	Kritik Yük (N)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Darbe Dayanımı (J)
Konik Silindir	4432	162	7,95	26
Düz Silindir	4080	160,2	11,16	23,5
Üçgen	3392	115,6	4,61	20
Kare	4482	158	7,15	21
Altıgen	3510	116,9	5,27	22,2

Bu çalışma takım geometrisi hakkında genel bilgi verse de takımın yivli olup olmama durumunu değerlendirmeye katmadığı için kıyaslama bakımından eksiktir. AZ91 magnezyum alaşımlı malzemede düz silindir, konik silindir ve dişli düz silindirik profilli takımların kıyaslandığı bir çalışmada ise maksimum çekme dayanımı dişli düz silindirik profilli takımla birleştirilen numunede elde edilmiştir [66].

Sürtünme karıştırma kaynağında karıştırıcı uç sadece erimiş malzeme hareketlerini belirlemekle kalmaz aynı zamanda da oksit tabakasının kırılarak kaynak mukavemetini ve özelliklerini belirler [67]. Bununla birlikte sürtünme karıştırma kaynağında sadece karıştırıcı uç geometrisi değil, aynı zamanda takım omuz geometrisi de büyük öneme sahiptir. Örneğin; Scialpi ve diğerleri AA6082-T6 plakada yaptıkları çalışmalarda özellikle ince plakalarda yuvarlatılmış ve boşluklu bileşenlere sahip takım omuzlarının daha kaliteli kaynaklar elde edildiğini tespit etmişlerdir [64].

Pim uzunluğunun belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmaların yanında matematiksel çalışmalar da bulunmaktadır. Khan ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında pim uzunluğu ile plaka kalınlığı arasında bir bağıntı kurmaya çalışmışlar ve Eş. 3.1’de görülen denklemi elde etmişlerdir [68].

$$l = \frac{T - \left(\frac{R}{2} + r\right) \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} \quad (3.1)$$

l = Pim uzunluğu (mm),

α = Takım eğim açısı (Derece),

T = Toplam plaka kalınlığı (mm),

R = Takım omuz yarıçapı (mm),

r = Pim yarıçapı (mm)

Denklemin doğrulanması için 2,5 mm kalınlığındaki AA7475-AA2219 plakaları $2,5^\circ$ takım açısı, 900 dev/dak dönme devri, 200 mm/dak ilerleme hızı, 12 mm omuz çapı ve 4 mm pim çapı değerlerini kullanarak hesapladıkları pim uzunluğuna sahip (2,184 mm) takımla ve farklı pim uzunluğuna sahip takımlarla (2,1 mm ve 2,3 mm) birleştirmişlerdir. Deney sonuçlarını kıyasladıkları zaman elde ettikleri denklemin oldukça iyi sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir [68].

Deney sonuçları elde edilen eşitliği doğrular nitelikte olsa da ilerleme hızı ve dönme devirleri ile pim uzunluğu arasında bir bağıntı kurulmadığı için ek araştırmaya ihtiyaç duymaktadır.

3.3.6. Takım malzemesi

Sürtünme karıştırma kaynağında takım malzemesi seçimi kaliteli kaynaklar elde edebilmek için üzerinde durulması gereken en önemli konulardan biridir. Bilindiği üzere sürtünme karıştırma kaynağında kaynak işlemi, malzeme erime noktasının yaklaşık %70-90'ı kadar bir sıcaklıkta yapılır, bu nedenle takım malzemesinin bu sıcaklıkta yeterli mukavemete sahip olması önemlidir, aksi takdirde takım bükülebilir ya da kırılabilir [64].

Takım malzemesi seçimi, çalışma sıcaklığı, aşınma direnci ve kırılma tokluğu gibi takım malzemesi çalışma özellikleriyle beraber, çalışılacak malzeme türüne ve sağlanması gereken takım ömrüne de bağlıdır [69]. Sürtünme karıştırma kaynağında beklenen genel özelliklerden bazıları şunlardır;

- Aşınma dayanımı yüksek olmalıdır.
- Kaynaklanan malzemeyle zararlı reaksiyonlara girmemelidir.
- Üzerine gelebilecek kuvvetlere karşı yeterli dayanıma sahip olmalıdır.
- Ergime noktası kaynaklanacak malzemeden daha yüksek olmalıdır.
- Yüksek sıcaklıklarda yeterli boyutsal kararlılığı sağlayabilmesi için düşük termal genleşme katsayısına sahip olmalıdır.
- Tekrarlanan termal döngülere dayanabilmek için iyi termal yorulma dayanımına sahip olmalıdır.
- Soğuk malzemeye ilk dalma anında kırılmaması için yüksek tokluğa sahip olmalıdır.
- Talaşlı imalatının sağlanabilmesi için işlenebilirliğinin kolay olması gerekir.
- Maliyeti düşük olmalıdır.

Sürtünme karıştırma kaynağı ile alüminyum, bakır ve magnezyum alaşımlar gibi yumuşak malzemelerin kaynaklanması amacıyla kolay ulaşılabilir olmalarının yanı sıra yüksek termal yorulma dayanımına da sahip oldukları için genellikle takım çelikleri tercih edilmektedir. Karbür parçacık takviyeli kompozit takımlar ise yüksek karbonlu çelikler, paslanmaz çelikler ve bazı titanyum alaşımların kaynaklanmasında tercih edilmektedir. Ergime noktaları yüksek ve çok daha sert malzemelerin kaynaklanması için ise genellikle polikristalin kübik bor nitrür veya seramik alaşımlı takımlar tercih edilmektedir. Ancak seramik alaşımlar gibi kırılgan malzemeler kullanılırken özellikle soğuk haldeki malzemeye ilk daldırma aşamasında çok dikkatli olunması gerekmektedir [69].

3.3.7. Penetrasyon derinliği

Özellikle sürtünme karıştırma nokta kaynağında karşılaşılan parametrelerden biri olan penetrasyon derinliği, malzemeleri plastikleştirmek için gerekli ısının sağlanmasına yardımcı olur [67]. Sürtünme karıştırma kaynağında ısı oluşumu açısından ve malzeme sirkülasyonu açısından bakılacak olursa penetrasyon derinliğinin çok önemli olduğu görülür. Resim 3.9’da bakır plakaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde penetrasyon derinliğinin etkisi görölmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi penetrasyon derinli 0 mm iken tam birleştirme bile yapılamazken, penetrasyon derinliğinin 0,3 mm olduğu durumda daha kaliteli bir görünüme sahip kaynak elde edilmiştir [70].



Resim 3.9. Bakır plakada farklı penetrasyon derinliklerinde kaynak yüzeyi görünümü.
(İşlem parametreleri; dönme devri: 700 dev/dak, ilerleme hızı: 40 mm/dak, takım açısı: 1°) [70]

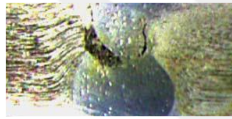
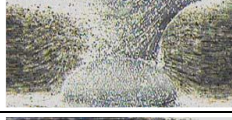
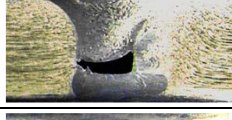
Sürtünme karıştırma kaynağında penetrasyon derinliğinin doğru ayarlanmaması çoğu zaman çeşitli kaynak kusurlarına neden olabilmektedir. Yapılan çalışmalar penetrasyon derinliğinin artmasına bağlı olarak malzemeye aktarılan ısı miktarının arttığını göstermektedir [71].

Çalışılan malzeme türüne ve diğer parametrelere bağlı olarak ideal penetrasyon derinliği aşıldığı zaman hem kaynak bölgesinin kalınlığı azaldığı için hem de artan ısı girdisi miktarına bağlı olarak tane büyümesi olduğu için kaynak dayanımı hızlı bir şekilde azalmaya başlamaktadır. Bununla birlikte penetrasyon derinliği ile takım eğim açısı ve eksenel kuvvet arasındaki ilişki de göz önünde bulundurulması gereken en önemli durumlardan biridir. Çünkü uygun takım eğim açılarında penetrasyon derinliği artışı daha kaliteli kaynaklar elde edilmesini sağlayabilmektedir.

3.3.8. Eksenel kuvvet

Sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin kaynak kalitesine etkilerinin incelendiği pek çok çalışma eksenel kuvvetin kaynak kalitesinde diğer parametrelere göre daha düşük etkiye sahip olduğunu gösterse de kaynak bölgesindeki malzemenin preslenerek arka tarafa hareketinde önemli bir işleve sahiptir [72]. Bununla birlikte sürtünme karıştırma kaynağının yapıldığı malzeme türü için ideal eksenel kuvvetin kullanılması daha iyi tane oluşumu sağlayarak kaynak dayanımının artmasını sağlar [73].

Çizelge 3.6. AZ61A magnezyum alaşımında farklı eksenel kuvvetlerde içyapı analizi [73]

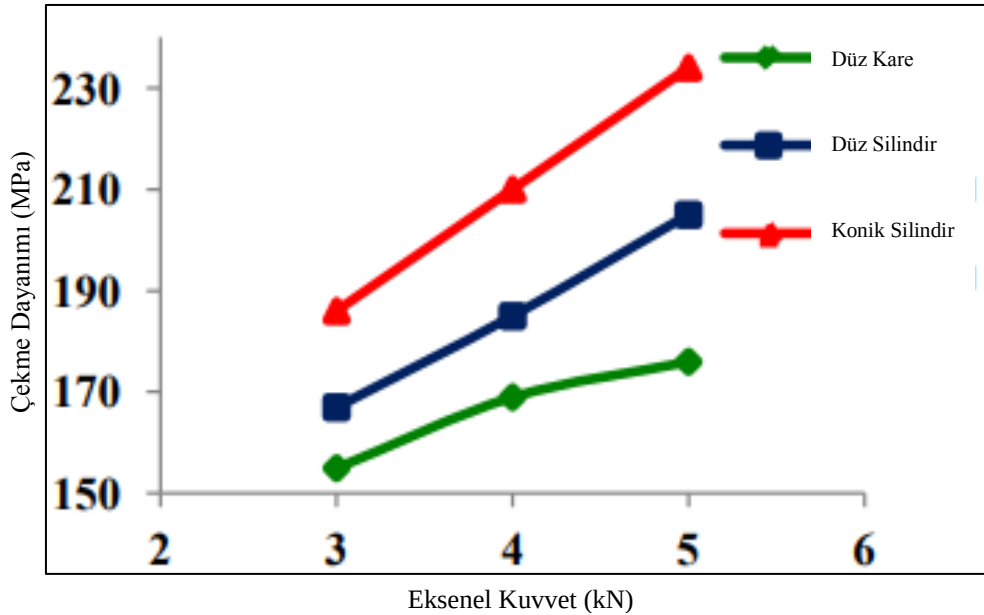
Eksenel Kuvvet (kN)	Makroyapı		Kaynak Bölgesi Ölçüleri (mm)		Karıştırma Bölgesinin Şekli	Hata Adı ve Yeri	Kaynak Konsolidasyon Kalitesi	Ortalama Tane Büyüklüğü (μm)
	Geri taraf	İleri Taraf	Genişlik	Yükseklik				
3			4,3 4,9 6,1	5,9	Ters yamuk	İlerleme tarafında kaynağın ortasında pim deliği	Zayıf	14,37
4			4,6 6,2 6,8	5,9	Ters yamuk	İlerleme tarafında kaynağın ortasında pim deliği	Zayıf	13,09
5			6,4 5,6 6,3	5,9	Küresel	Hata yok	İyi	12,43
6			7,6 5,7 5,8	5,8	Ters yamuk	İlerleme tarafında kaynağın alt kısmında tünel hatası	Zayıf	16,8
7			8,4 6,3 6,1	5,8	Ters yamuk	İlerleme tarafında kaynağın alt kısmında tünel hatası	Zayıf	18,2

* Deneydeki diğer parametreler; Dönme devri:1200 dev/dak, İlerleme hızı:90 mm/dak, Takım omuz çapı:18 mm, Pim çapı:6 mm, Pim uzunluğu:5,9 mm, D/d oranı:3, Takım açısı:0°, Penetrasyon derinliği:0,1 mm, Takım pim profili: Konik dişli, Takım malzemesi: HCS.

Eksenel kuvvetin etkilerinin incelendiği bir çalışmada, eksenel kuvvetin artması Çizelge 3.6'da da görüldüğü gibi kaynak genişliğinin sürekli olarak artmasına sebep olurken, belirli değerlerden sonra kaynak kalınlığının azalmasına ve kaynak bölgesinde tane büyümesine sebep olarak malzeme dayanımının düşmesini tetiklediği tespit edilmiştir. Bu çalışmada 5 kN eksenel yüke kadar artan eksenel yük değerlerinde ortalama tane büyüklükleri azalırken, 5 kN'dan sonra tane irileşmesi başlamaktadır. Özellikle 7 kN'dan sonra tane büyümesi miktarı çok daha hızlı artmıştır. Öyle ki 8 kN eksenel yük uygulandığında ortalama tane büyüklüğü 42 μm değerine ulaşmıştır [73].

Sürtünme karıştırma kaynağındaki pek çok işlem parametresinde olduğu gibi eksenel kuvvette de her malzemede tek bir ideal değer yoktur. Çeşitli çalışmalarda elde edilen değerlerden bazıları şunlardır: 6,2 mm kalınlıktaki AA6082- T6 alüminyum alaşımında 4 kN, 6 mm kalınlıktaki AZ61A magnezyum alaşımında 5 kN, AZ80A magnezyum alaşımında 3 kN şeklindedir [72-74].

Sürtünme karıştırma kaynağında eksenel kuvvetin etkisi üzerine yapılan çalışmalar, eksenel kuvvetin etki türünün takım geometrisinden bağımsız olduğunu ancak etki miktarının takım geometrisine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.



Şekil 3.7. AZ80A magnezyum alaşımında takım geometrisine bağlı olarak eksenel kuvvet çekme dayanımı ilişkisi [74]

Şekil 3.7'deki grafiklerde de görüldüğü gibi 5 mm kalınlıktaki plakada eksenel kuvvetin ideal değere kadar artışı malzeme mekanik özelliklerini olumlu yönde etkiler. Ancak bu etki miktarları takım geometrisine bağlı olarak değişiklik göstermektedir [74].

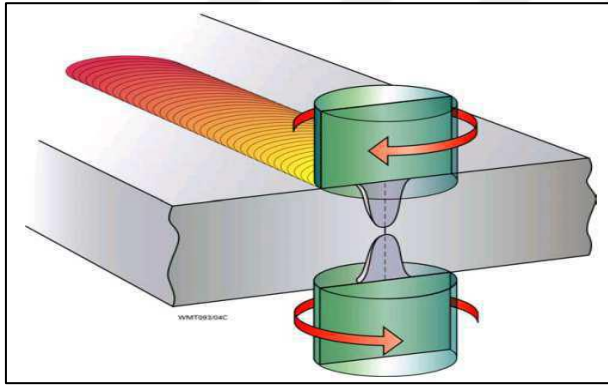
Bütün işlem parametrelerinde de görüldüğü gibi sürtünme karıştırma kaynağında sadece tek bir parametreye odaklanmadan bütün işlem parametrelerinin optimum değerlerinin kullanılması kaynak kalitesi açısından büyük öneme sahiptir.

3.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Proses Geliştirme Uygulamaları

Sürtünme karıştırma kaynağı üzerine yapılan pek çok çalışmada da görüldüğü gibi, malzeme türüne, özelliklerine, kalınlığına bağlı olarak yöntemde ilave uygulamalar yapılarak kaynak kalitesi arttırılabilmektedir. Bu bölümde sürtünme karıştırma kaynağında şu zamana kadar yapılan çeşitli proses geliştirme uygulamaları açıklanmaktadır.

3.4.1. Eş zamanlı, çift taraflı takım uygulaması

Bu yöntemde aynı devirde fakat zıt yönlü dönmekte olan takım, malzemelere karşılıklı olarak uygulanmaktadır. Takım dönüş yönlerinin zıt yönlü olarak seçilmesinin en temel nedeni takımlar arasında zıt yönlü tork oluşturarak malzeme rijitliğini arttırmaktır. Genellikle aynı geometriye sahip takımların kullanıldığı bu uygulamada takım ilerleme hızları da aynıdır [21]. Uygulamada Şekil 3.8’de görüldüğü gibi takımların birbirine temas etmeden ancak oldukça yakın bir mesafede konumlandırılmaları gerekmektedir [21].

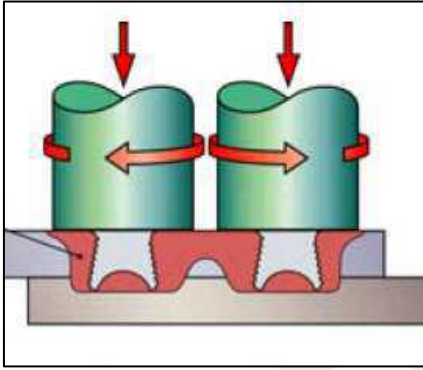


Şekil 3.8. Eş zamanlı, çift taraflı, zıt yönlü takım uygulaması şematik görünümü

Bu yöntem sayesinde sürtünme karıştırma kaynağının en büyük problemlerden biri olan reaktif torkun azaltılması, asimetrik yanal kuvvetlerin azaltılması ve malzeme kalınlığı boyunca daha simetrik ısı girişleri başarıyla sağlanmaktadır [21]. Bunlarla birlikte çok daha kalın malzemelerin başarıyla kaynaklanması da mümkün hale gelmektedir. Yöntemin uygulamada karşılaştığı en büyük problem ise malzeme alt tarafındaki takımın her uygulamada serbest bir şekilde hareket edememesidir. Pek çok uygulamada bu takım konstrüksiyon içinde kalmaktadır ve hareketi için yeterli boşluklar bulunmamaktadır. Bu olumsuzluk, yöntemin yaygınlaşmasını engelleyen en büyük problemlerden biridir.

3.4.2. Paralel çiftli takım uygulaması

Paralel çiftli takım uygulamasında eş zamanlı olarak hareket eden aynı iki takım kullanılmaktadır. Çiftli ısıtma işlemi sayesinde normalden daha düşük devirlerde ve daha yüksek ilerleme hızlarında kaynak işlemi gerçekleştirilebilmektedir ancak bu yöntem plaka incilmesi gibi çeşitli kusurlara da sebep olabilmektedir [21]. Yöntemin şematik görünümü Şekil 3.9’da görüldüğü gibidir [21].



Şekil 3.9. Paralel çiftli takım uygulamasının şematik görünümü

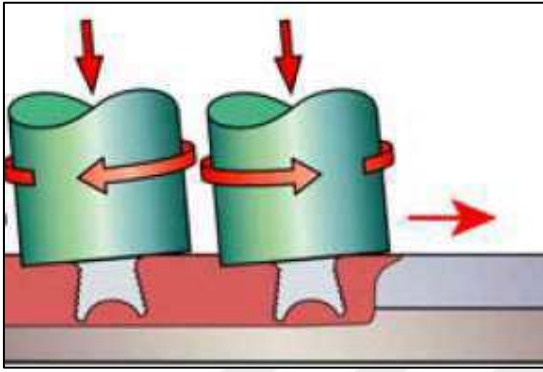
Yöntemin kendi içinde farklı varyasyonları olarak Resim 3.10’da görüldüğü yan yana hareket eden uygulaması olduğu gibi takımlar arasında biri önde diğeri daha geride olacak şekilde mesafe olan çeşitli uygulamaları da bulunmaktadır. Bu uygulamaların günümüzde karşılaştığı en büyük eksiklik ise üzerlerinde yeterince çalışma bulunmamasıdır. Sürtünme karıştırma kaynağının geleneksel halinde bile pek çok işlem parametresi varken bu tarz uygulamalarda takımlar arası mesafe, her bir takımın dönme devirleri gibi pek çok ekstra parametrenin incelenmesi gerekliliği araştırmaları zorlaştırmaktadır.



Resim 3.10. Yan yana paralel çiftli takım [75]

3.4.3. Tandem çiftli takım uygulaması

Bu yöntemde paralel çiftli takım uygulamasından farklı olarak aynı kaynak çizgisi üzerinde peş peşe hareket eden iki takım kullanılmaktadır. Takımların tersine dönüşleri sayesinde reaktif tork büyük ölçüde azaltılmaktadır. Daha da önemlisi bu yöntemle birinci takımın arkasında parçalanmadan kalan oksit tabakası ikinci takım tarafından tamamen parçalanmakta, bu sayede de kaynak kalitesinin artırılması sağlanmaktadır. Yöntemin şematik görünümü Şekil 3.10'da görüldüğü gibidir [21].



Şekil 3.10. Tandem çiftli takım uygulamasının şematik görünümü

Bu yöntemde arkadan gelen takım zaten plastik malzeme içerisinde ilerlediği için birinci takım ile aynı kalitede olmasına gerek yoktur. Aynı sebepten dolayı ikinci takımın dönme devri birinci takımdan daha düşük olarak seçilebilmektedir [21].

Her iki takımı da aynı devirde dönen tandem çiftli takım uygulaması ile aynı parametrelerde tek takım ile çift geçişli uygulamaların kıyaslanmasını içeren çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalar özellikle düşük ilerleme hızlarında tandem uygulaması ile kaynaklanan malzemelerin çift geçişli uygulama ile kaynaklanan malzemelerden daha yüksek çekme dayanımı gösterdiğini ancak dönme devri arttıkça tandem uygulamasında malzeme çekme dayanımları azalırken, çift geçişli uygulamalarda arttığı sonucuna ulaşılmıştır [76].

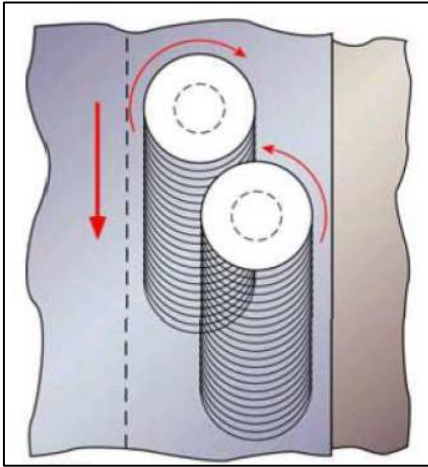
Bu uygulamadaki en büyük olumsuzluklardan biri ise takımlar arasındaki mesafeye bağlı olarak parçalar üzerinde Resim 3.11'de görüldüğü gibi birbirinden uzak iki takım çıkış deliği bulunmasıdır. Bu pratikte atıl parça miktarını arttıracak için göz önünde bulundurulması gereken bir durumdur.



Resim 3.11. Tandem çiftli takım uygulaması ile kaynaklanmış 2,5mm plaka [76]

3.4.4. Kademeli çiftli takım uygulaması

Kademeli çiftli takım uygulamasında normal uygulamalara göre çok daha geniş kaynak kalınlığı elde edilebilmektedir. Genellikle zıt dönüş yönlü iki takımın kullanıldığı bu uygulamada takım ilerleme çizgileri kısmen temas halindedir. Özellikle bindirme kaynaklarında daha geniş kaynak hattı, tek geçişli geleneksel sürtünme karıştırma kaynağından daha yüksek mukavemet sağlayacağı için sıklıkla tercih edilmektedir. Yöntemin şematik görünümü Şekil 3.11’de görüldüğü gibidir [21].

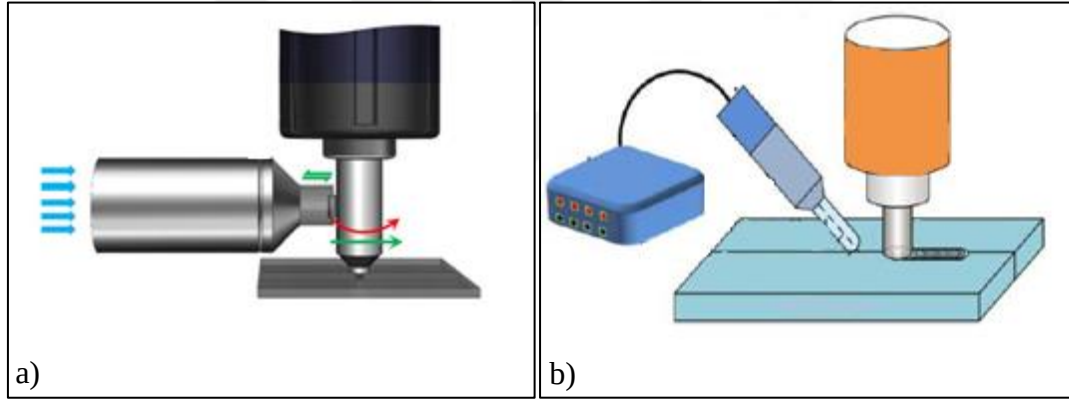


Şekil 3.11. Kademeli çiftli takım uygulamasının şematik görünümü

Bu yöntemde paralel çiftli takım uygulamasında olduğu gibi takımlar arası mesafe, her bir takımın dönme devirleri gibi pek çok ekstra parametrenin incelenmesini gerektirdiğinden, ayrıca özel takım tutucularına ihtiyaç duyulduğundan araştırmaları zorlaştırmaktadır.

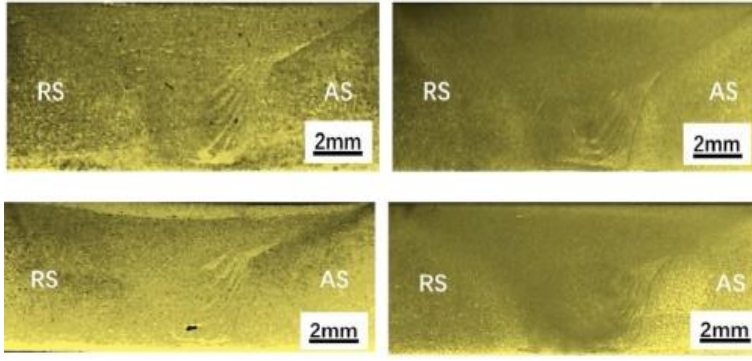
3.4.5. Ultrasonik titreşimli sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları

Bu yöntemde akustik enerjiyi kullanarak ultrasonik titreşimleri sürtünme karıştırma kaynak takımına dikey yönde aktararak kaynak verimini artırmak amaçlanmaktadır. Yöntemin farklı varyasyonları olarak, ultrasonik titreşimin malzemeye alttan veya üstten uygulandığı çeşitleri de mevcuttur. Ancak bu uygulamalarda özellikle ultrasonik titreşimin malzeme üzerinde, kaynak bölgesinden belirli bir mesafede uygulandığı çalışmalarda ultrasonik titreşimlerin ve takım etrafındaki termomekanik etkinin eş zamansız etkileşimi ile sonuçlandığı tespit edilmiştir. Bunun önüne geçebilmek için ultrasonik titreşimlerin takıma uygulanması gerektiği çeşitli çalışmalarda belirtilmiştir [57]. Ultrasonik titreşimli sürtünme karıştırma kaynağı çeşitlerinden bazılarının şematik görünümü Şekil 3.12’de görüldüğü gibidir [57,58].



Şekil 3.12. Ultrasonik titreşimli SKK uygulaması çeşitleri. (a) takıma ultrasonik titreşim uygulaması [57], (b) malzeme üst yüzeyine ultrasonik titreşim uygulaması [58]

AA6061-T6 malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde takıma uygulanan ultrasonik titreşimlerin etkileri üzerine yapılan çalışmalar, ultrasonik titreşimlerin takıma uygulanan torku ve eksenel kuvveti azalttığını, kaynak hızını arttırdığını ve kaynak bölgesindeki tünel oluşumu, boşluk gibi içyapı kusurlarını Resim 3.12’de görüldüğü gibi büyük ölçüde ortadan kaldırdığını göstermektedir [57]. Bununla birlikte AA2024-T4 malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak bölgesinin 20 mm ilerisine 40° açı ile uygulanan ultrasonik titreşimlerin, aynı işlem parametrelerinde ultrasonik titreşim uygulanmadan, geleneksel yöntemle yapılan birleştirmelere göre malzeme dayanımını, uzama miktarını ve malzeme sertliğini arttırdığını göstermiştir [58].

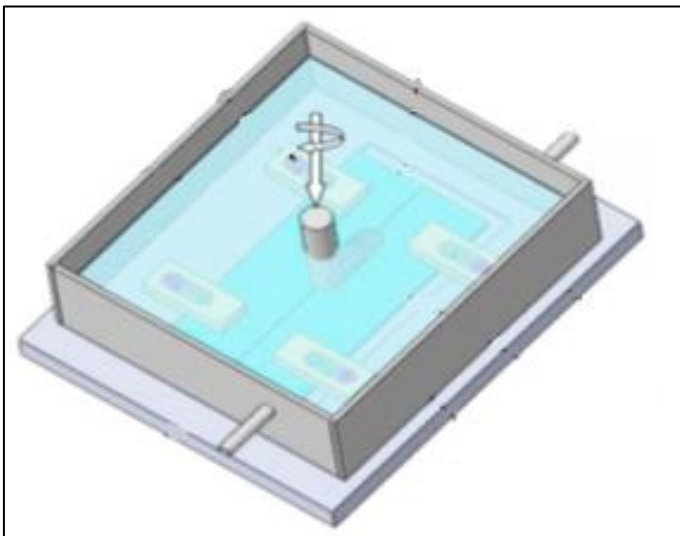


Resim 3.12. AA6061-T6’da iki farklı hızda kaynak bölgesi ve içyapı kusurları.
(Solda) geleneksel SKK, (Sağda) takımına dikey olarak ultrasonik etki uygulanmış SKK [57]

3.4.6. Soğutucu akışkan içerisinde sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları

Soğutucu akışkan içerisinde sürtünme karıştırma kaynağı, diğer kaynak yöntemlerine göre pek çok üstünlüğe sahip olsa da özellikle ısıl işleme tabi tutulabilir alüminyum alaşımların mekanik özelliklerinde azalmaya neden olan geleneksel sürtünme karıştırma kaynağının eksikliklerini gidermek için geliştirilmiş bir varyasyondur. Bu işlem, özellikle kaynak sırasında ısınmaya duyarlı alaşımlar için oldukça uygundur [61].

Soğutucu akışkan olarak pek çok akışkan tercih edilebilse de pratik uygulamalarda maliyet açısından uygunluğundan dolayı genellikle su tercih edilmektedir. Yöntemin şematik görünümü Şekil 3.13’te görüldüğü gibidir.



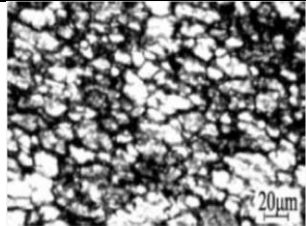
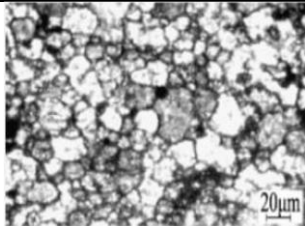
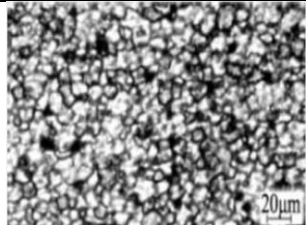
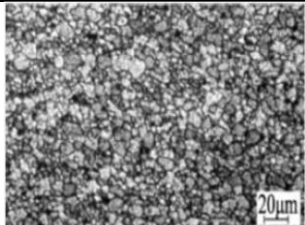
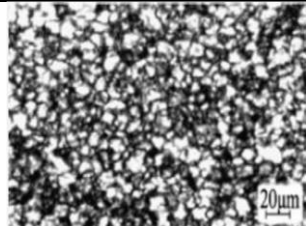
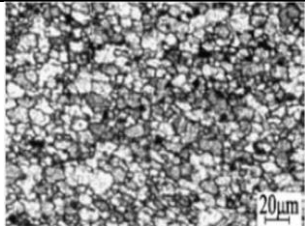
Şekil 3.13. Su altı sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması [61]

Yöntemin geleneksel sürtünme karıştırma kaynağına pek çok üstünlüğü bulunmaktadır. Bu üstünlüklerden bazıları şu şekildedir [61];

- Pik sıcaklığı gelişimi geleneksel SKK'ya göre daha düşüktür, bu da çökelmeyi engeller.
- Bu yöntemde geleneksel SKK'ya göre daha üstün mekanik özelliklere sahip malzemeler elde edilebilir.
- Bu yöntem oksidasyonu engeller ve geleneksel SKK'ya göre daha iyi yüzeyler elde edilmesini sağlar.
- Bu yöntem, geleneksel SKK'da görülen içyapı kusurlarının azaltılmasına yardımcı olur.
- Isı girdisine bağlı olarak oluşan artık gerilmeleri azalttığı için malzemedeki çarpılmaları önlemeye yardımcı olur.

Düşük ısı girişi olan durumlarda soğutucu akışkan kullanımı tane yapısında büyümelere sebep olarak mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilese de orta ve yüksek ısı girişi olan durumlarda daha küçük tane oluşumuna ve dolayısıyla da daha üstün mekanik özellikler elde edilmesine yardımcı olmaktadır [77]. Çizelge 3.7'de AA6061-T6'da değişik ısı girişi koşullarında, su altı SKK uygulamasının tane çapına etkisi görülmektedir [78].

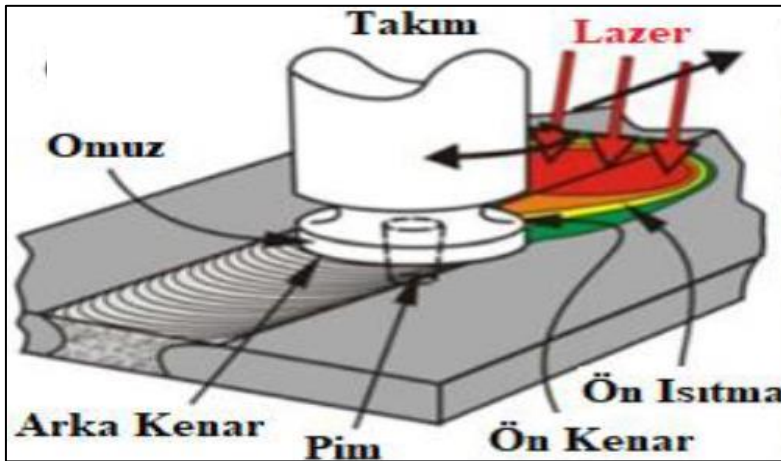
Çizelge 3.7. AA6061-T6'da su altı SKK uygulamasının tane çapına etkisi

Koşullar	Geleneksel SKK	Su altı SKK
Düşük ısı girişi; 600 dev/dak 80 mm/dak	 Ortalama tane çapı= 41 µm	 Ortalama tane çapı= 51 µm
Ortalama ısı girişi; 1000 dev/dak 50 mm/dak	 Ortalama tane çapı= 24 µm	 Ortalama tane çapı= 17 µm
Yüksek ısı girişi; 1400 dev/dak 20 mm/dak	 Ortalama tane çapı= 38 µm	 Ortalama tane çapı= 28 µm

Yukarda bahsedilen avantajlarla birlikte her yöntemde olduğu gibi soğutucu akışkan içerisinde sürtünme karıştırma kaynağında da pek çok olumsuzluklar söz konusudur. Bu olumsuzlukların en başında endüstride uygulanabilirlik sorunu gelmektedir. Bilindiği gibi sürtünme karıştırma kaynağı, endüstride kullanıldığı pek çok alanda oldukça büyük parçaların birleştirilmesinde tercih edilmektedir. Bu parçaları tamamen soğutucu akışkan içerisine daldırmak mümkün olmamaktadır. Bununla birlikte su debisi, soğutucu akışkan türü, soğutucu akışkan sıcaklığı gibi pek çok parametrenin de daha detaylı araştırılması gerekmektedir.

3.4.7. Lazer destekli sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları

Geleneksel sürtünme karıştırma kaynağı alüminyum alaşımlar gibi ergime noktaları düşük malzemeleri birbirleriyle kaynaklamada oldukça yüksek performansa sahipken, çelik gibi yüksek ergime noktasına sahip malzemeleri birleştirmede yetersiz kalmaktadır. Bununla birlikte çelik ve alüminyum gibi ergime noktaları çok farklı iki malzemenin yüksek kalitede birleştirilmesi geleneksel sürtünme karıştırma kaynağı ile mümkün değildir [79]. Bu sorunları aşmak için geliştirilen yöntemlerden biri, Şekil 3.14'te görülen lazer destekli sürtünme karıştırma kaynağı işlemidir.



Şekil 3.14. Lazer destekli sürtünme karıştırma kaynağı işlemi [80]

Lazer ışın kaynakları, alev kaynaklarından daha pahalı olmasına rağmen ilave ısıtmayı sağlamak amacıyla alev yerine lazerin kullanılmasının en temel sebebi, lazer kaynağında güç kontrolünün ve odaklama işleminin daha kolay yapılabilmesidir.

Lazer destekli sürtünme karıştırma işlemi sadece ergime noktaları farklı malzemeleri birleştirmek amacıyla geliştirilmemiştir. Bilindiği gibi sürtünme karıştırma kaynağında, kaynak takımına çok büyük kuvvetler etki etmektedir. Kaynak yapılan malzemenin ergime noktası ve mekanik özellikleri arttıkça takıma gelen kuvvetlerde artmaktadır. Bu kuvvetlerin etkisi altında kalan takımın hasar almaması için normalden daha kaliteli malzemeden imal edilip, fazladan pek çok işlemden geçmesi gerekir [81]. Bununla birlikte sadece takımın kaliteli olması işlem için yeterli olmayacağı ve işlem yapılan tezgâhtan da daha üstün beklentiler olacağı için doğrudan işlem maliyeti artmaktadır [82].

Lazer destekli sürtünme karıştırma kaynağında malzemenin kaynak bölgesi ön ısıtmaya maruz kaldığı için malzemede bir yumuşama gerçekleşmekte ve takımın malzemeye aktarması gereken enerji miktarı azalmaktadır. Bu sayede takımdan ve tezgâhtan beklenen kuvvet miktarı azaldığı için tezgâh gereksinimleri de düşmekte dolayısıyla da işlem maliyeti azalmaktadır [83].

Lazer destekli sürtünme karıştırma kaynağında, geleneksel sürtünme karıştırma kaynağında olmayan lazer gücü, lazer-karıştırma merkezi arası uzaklık gibi çeşitli işlem parametreleri bulunmaktadır. 6 mm kalınlıktaki AA5757-H111 plaka üzerine yapılan bir çalışmada 1,2 mm lazer ışın çapına, 1070 nm dalga boyuna, 4 kW maksimum lazer gücüne sahip iterbiyum fiber lazer, karıştırma bölgesinin 40 mm ilerisine odaklanmıştır. Çalışma sonucunda, diğer işlem parametreleri sabit tutularak lazer gücü arttırıldıkça, Çizelge 3.8’de görüldüğü gibi malzemenin çekme dayanımı değişmeden sünekliğinin arttığı, akma dayanımının ise azaldığı belirlenmiştir [82].

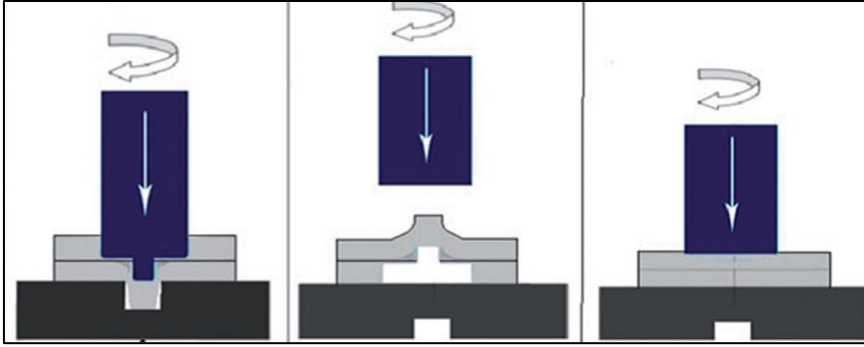
Çizelge 3.8. AA5757-H111 malzemede lazer gücünün mekanik özelliklere etkisi [82]

Tanım	İlerleme Hızı (mm/dak)	Takım Dönme Devri (dev/dak)	Lazer Gücü (W)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
1	20	500	-	113,9	201,3	8,9
1L	20	500	500	101,0	207,3	9,4
2L	20	500	1000	98,9	204,1	9,4
3L	20	500	2000	77,2	206,9	14,8

3.4.8. Takım çıkış deliği sorununun çözümü için geliştirilen uygulamalar

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak işleminin sonlandırılmasından sonra oluşan çıkış deliğinin çözümü için yapılan pek çok literatür çalışması ve patent çalışması mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları şunlardır;

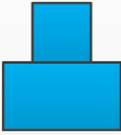
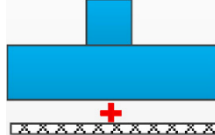
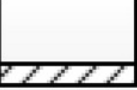
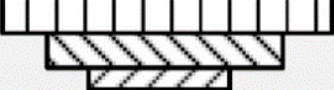
Sürtünme karıştırma kaynağında oluşan çıkış deliğinin tamiri için uygulanan en popüler yöntemlerden biri Şekil 3.20’de görülen ve 4 aşamadan oluşan yöntemdir. Bu yöntemde ilk aşamada üstünde takım geometrisine uygun bir boşluk bulunan tablada, takım dönme halindeyken aşağı yöne ilerler ve plakalar tabladaki boşluğun şeklini alır. İkinci aşamada takım geri çekilir. Üçüncü aşamada düz yüzeye sahip yeni takım dönme halindeyken, ters çevrilmiş plaka yüzeyine doğru iner. Son aşamada, takım istenilen mesafeden geri çekilir ve böylece çıkış deliği kapatılmış olur [84]. Yöntem deneysel çalışmalar için uygun olsa da endüstriyel kullanım açısından uygun değildir.



Şekil 3.15. Üç aşamalı çıkış deliği tamir işlemi [84]

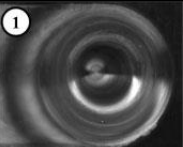
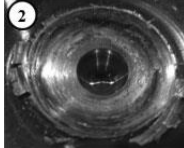
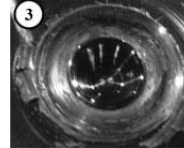
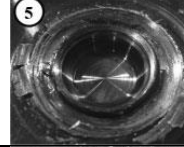
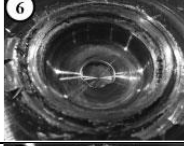
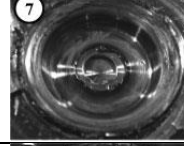
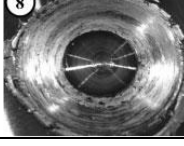
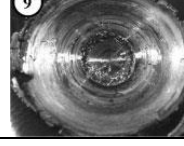
Anlatılan bu yöntemin haricinde daha farklı bir yöntemlerde vardır. Aktif-pasif dolgulu sürtünme karıştırma tamiri adı verilen bir yöntemde, ilk olarak çıkış deliğine bir miktar plakalarla aynı içeriğe sahip malzeme eklenir. Ekleme işleminden sonra düz yüzeye sahip bir takım ile ilk sürtünme karıştırma kaynak işlemi gerçekleştirilir. Bu sayede boşluk bir miktar genişlemiş ancak kısmen doldurulmuş olur. İkinci aşamada aynı işlemler daha geniş bir yüzeye sahip takım ile tekrar gerçekleştirilir. Son aşamada ise malzeme ekleme işlemi yapılmadan sadece ikinci takımdan daha geniş yüzeyli takım kullanılır. Sonuçta ise daha geniş ancak doldurulmuş bir çıkış deliği elde edilir [85]. Bu yöntemdeki işlem aşamalarının şematik görünümü Çizelge 3.9’da görüldüğü gibidir [85].

Çizelge 3.9. Aktif-pasif dolgulu sürtünme karıştırma tamiri işlem basamakları [85]

İsim	Çıkış deliği	İlk aktif doldurma	İkinci aktif doldurma	Pasif doldurma
Dönme Takımı				
Kesit Görünüşü				

Zhou ve diğerlerinin yapmış oldukları çalışmada ise bir önceki yöntemde olduğu gibi kademeli takım kullanılmış ancak malzeme ekleme işlemi yapılmamıştır. 9 farklı takımın kullanıldığı bu çalışmada deney malzemesi olarak 10 mm kalınlıktaki 316L paslanmaz çelik plakalar, takım malzemesi olarak polikristalin kübik bor nitrür (PCBN), işlem parametreleri olarak ise Çizelge 3.10’da görülen parametreler kullanılmış ve çıkış deliği nispeten kapatılmış ancak yeri hala belirgin halde kalmıştır [86].

Çizelge 3.10. Proses parametreleri ve çıkış deliği görünüşü [86]

Deney numarası	Takım kodu	İşlem parametreleri (ω -F-t)	İşlem sonrası çıkış deliği görünüşü
1	FSP	300 dev/dak – 30 kN – 0 sn	
2 3	SRFSW-1 SRFSW-2	1200 dev/dak – 30 kN – 5 sn 1200 dev/dak – 30 kN – 5 sn	 
4 5	SRFSW-3 SRFSW-4	1200 dev/dak – 30 kN – 5 sn 1200 dev/dak – 30 kN – 5 sn	 
6 7	SRFSW-5 SRFSW-6	1500 dev/dak – 30 kN – 5 sn 1500 dev/dak – 30 kN – 5 sn	 
8 9	SRFSW-7 SRFSW-8	1500 dev/dak – 30 kN – 5 sn 1500 dev/dak – 30 kN – 5 sn	 

3.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları

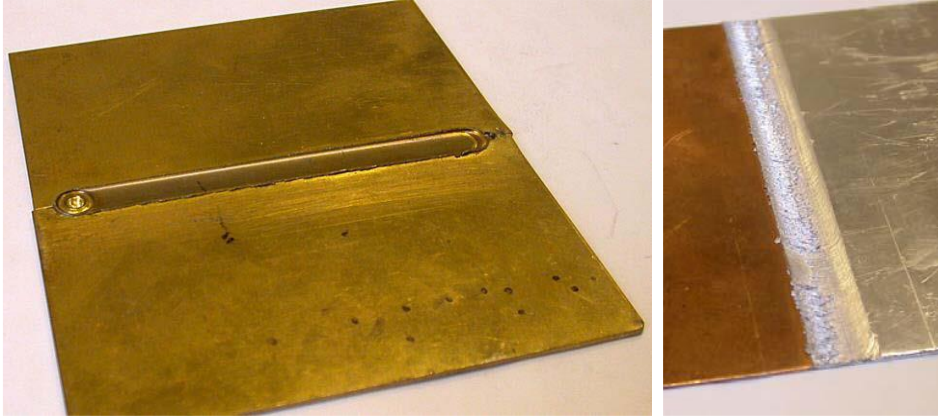
3.5.1. Sürtünme karıştırma kaynağının avantajları

Sürtünme karıştırma kaynağı geleneksel kaynaklara ve diğer modern kaynak teknolojilerine kıyasla pek çok üstünlüğe sahiptir. Bu üstünlüklerden bazıları şunlardır:

Uygulanabilir malzeme çeşitliliği geniştir.

Katı hal birleştirme yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı hemen hemen bütün temel alüminyum alaşım tiplerine uygulanabilmektedir ve özellikle bu alaşımların geleneksel füzyon kaynaklarında sıklıkla görülen sıcak çatlama, gözeneklilik ve malzeme kaybı gibi pek çok sorunun önüne geçer [36].

Bakır ve alaşımları, alüminyum ve alaşımları gibi magnezyum, çinko ve kurşun da içerebilen hemen hemen bütün hafif yapı malzemelerinin kendi aralarında ya da Resim 3.13'te görüldüğü gibi birbirleriyle birleştirilmeleri sürtünme karıştırma kaynağı ile mümkündür [87].



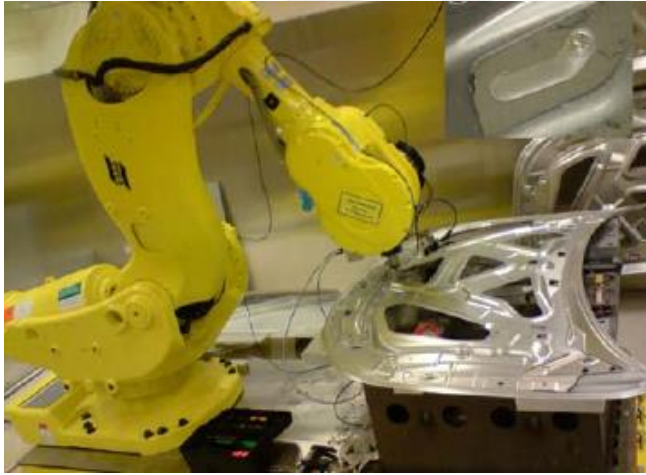
Resim 3.13. (Solda) SKK ile bakır-bakır birleşimi, (Sağda) SKK ile bakır-alüminyum birleşimi [87]

Başta yumuşak çelikler, paslanmaz çelikler ve titanyum alaşımlar olmak üzere yüksek dayanıma sahip pek çok malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi bugün başarıyla gerçekleştirilmektedir. Özellikle freze bıçağı takım uçlarında kaplama olarak kullanılan polikristal kübik bor nitrürden (PCBN) yapılmış sürtünme karıştırma kaynak takımlarından oldukça umut verici sonuçlar elde edilmektedir [87].

SKK başlangıçta kurşun, çinko, magnezyum ve bir dizi alüminyum alaşım gibi nispeten yumuşak iş parçası malzemeleri ile sınırlı olsa da son zamanlarda bakır, titanyum, düşük karbonlu ferritik çelik, alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler ve nikel alaşımları da kaynak yapılmıştır. Prensip olarak, sıcak işlenebilen herhangi bir malzeme bu yöntemle kaynaklanabilmektedir. Bununla birlikte, SKK'da genellikle kaynak yapılan malzemeden daha çok, takım malzemesi sınırlayıcı faktördür [88].

Yüksek otomasyona uygundur.

Sürtünme karıştırma kaynağı büyük ölçüde tekrar edilebilir bir işlemdir ve diğer pek çok füzyon kaynağında olduğu gibi insan becerilerine dayanmaz. Çok nadiren doğrudan müdahale gerektirir [36, 89]. Üstelik Resim 3.14'te görüldüğü gibi deneysel ve endüstriyel kullanım için tasarlanmış pek çok otomasyon çalışması mevcuttur [90].



Resim 3.14. Deneysel çalışmalarda kullanılan ESAB Rosio FSW robotu [90]

Ek ihtiyaç gereksinimleri düşüktür.

Alüminyum alaşımların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde geleneksel kaynak yöntemlerinde olduğu gibi koruyucu gaz ya da dolgu teli gerekmez [79, 96]. Kaynak sonrası yüzey kalitesi diğer pek çok kaynak yöntemine kıyasla oldukça iyidir. İlerleme hızı, takım dönme devri gibi işlem parametrelerine bağlı olarak değişmekle beraber sürtünme karıştırma kaynağında 4,09 μm yüzey pürüzlülük değerlerine ulaşılabilir [91].

Sürtünme karıştırma kaynağı bir katı hal birleştirme yöntemi olduğundan dolayı diğer bazı kaynak yönteminde olduğu gibi çarpımları önlemek için parçaların tamamen ısıtılmasına ihtiyaç duymaz. Ancak seramik alaşımlı ya da titanyum alaşımlı malzemeler gibi ergime noktaları veya dayanımları yüksek malzemelerde çeşitli uygulamalarda karıştırıcı takımda oluşabilecek hasarları engellemek ya da işlem hızını arttırmak için sadece kaynak bölgesinde ek ısıtıcıya ihtiyaç duyulmaktadır [65, 79].

Kaynak kusurlarının oluşumunu azaltır.

Kaynak işlemi esnasında füzyon olmaması, katılaşma ve soğutma ile ilişkili termal gerilmelerin çoğunu ortadan kaldırarak kaynak çarpımlarında azalmalar sağlar [36]. SKK'da penetrasyon eksikliği, öpüşen yüzeyler, çapak vb. kusurlar oluşabilse de bu kusurların oluşumunun en temel sebebi yöntemin kendisi değil doğru ayarlanamamış işlem parametreleri ya da uygun olmayan takım seçimi gibi kullanıcı kaynaklı sebeplerdir.

Çevre dostu bir teknolojidir.

İşyeri dostudur. İşlemden ark olmadığı için, ultraviyole veya elektromanyetik radyasyon tehlikesi, duman, rahatsız edici ışık vb. olumsuz durumlara sebep olmaz [36]. Sürtünme karıştırma kaynağı geleneksel ark kaynaklarına göre ciddi enerji tasarrufu sağlar. Alüminyum malzemede sürtünme karıştırma kaynağı ile gaz metal ark kaynağının enerji tüketimi ve çevresel etkileri açısından kıyaslandığı bir çalışmada SKK'nın %42 oranında daha az enerji tükettiği, %31 oranında daha az sera gazı ürettiği tespit edilmiştir [92]. Çalışmanın diğer sonuçları Çizelge 3.11'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 3.11. Alüminyum malzemede yaşam döngüsü etki değerlendirme sonuçları [92]

Etki kategorisi	Kategori göstergesi	Sonuçlar	
		FSW	GMAW
Asitleştirme	mol H ⁺ -Ek.	2,7	3,9
Ekotoksosite	kg 2,4-D-Eq.	2,1	2,8
Ötrofikasyon	kg N	8×10^{-4}	11×10^{-4}
Küresel ısınma	kg CO ₂ -Eq.	6,8	9,8
Ozon tabakası incilmesi	kg CFC-11-Eq.	$1,7 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-7}$
Fotokimyasal ozon oluşumu	kg NO _x -Eq.	$1,7 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-2}$

Üstün mekanik özellikler elde edilmesini sağlar.

Sürtünme karıştırma kaynağının, özellikle yüksek karbonlu çeliklerde geleneksel kaynak yöntemlerinde imkânsız olan soğuma hızını ve tepe sıcaklığını düzgün bir şekilde kontrol etmeyi sağladığı kanıtlanmıştır [93]. Bununla birlikte sürtünme karıştırma kaynağı ile ince taneli, yüksek yorulma dayanımına ve tokluğa sahip malzemeler elde edilmektedir [94].

Yüksek proses kabiliyetlerine sahiptir.

Sürtünme karıştırma kaynağı ile geleneksel kaynak yöntemlerinde elde edilenden çok daha uzun kaynak çizgileri elde edilebilir. Kalın malzemelerin kaynak ağzı açmadan, tek pasoda kaynaklanabilmelerine olanak sağlar. Resim 3.15'te Crawford Swift PowerStir ve TWI firmaları tarafından geliştirilen, tek pasoda 150 mm kalınlığa kadar kaynak yapabilme kapasitesine sahip SKK makinası görülmektedir [95].



Resim 3.15. Crawford Swift Power Stir firmasına ait tek pasoda 150 mm kalınlıkta kaynak yapabilen FSW makinası

İşlem kalitesiz kenar hazırlığına son derece toleranslıdır. Plaka kalınlığının %20'sine kadar olan boşluklar tolere edilebilir, ancak dolgu maddesi eklenmediği için kaçınılmaz olarak yerel kesit kalınlığında bir azalmaya yol açar [96].

Özellikle alüminyum alaşımların kaynaklanmasında füzyon kaynaklarında karşılaşılan en büyük problemlerden biri olan, yansıtıcı alüminyum oksit film tabakasından dolayı oluşan enerji kayıpları sürtünme karıştırma kaynağında yoktur [97].

3.5.2. Sürtünme karıştırma kaynağının dezavantajları

Sürtünme karıştırma kaynağı sahip olduğu pek çok avantajın yanında bazı dezavantajlara da sahiptir. Bu dezavantajların tam olarak anlaşılacak ortadan kaldırılması, sürtünme karıştırma kaynağı hakkında yapılan güncel çalışmaların temel ilgi alanlarından birisidir. Sürtünme karıştırma kaynağında bulunan eksikliklerden bazıları şunlardır:

Sürtünme karıştırma kaynağında takım aşınmasına vardır.

Sürtünme karıştırma kaynağı bir katı hal birleştirme işlemi olduğu için karıştırıcı takımın malzemeye ilk daldırılması esnasında malzeme soğuk olduğundan dolayı takımda büyük miktarlarda aşınma olur [77, 82].

Ayrıca, malzemede yumuşama sağlama amacıyla ön ısıtma işlemi yapılmış olsa bile kaynak işlemi esnasında kaynak parametrelerine ve kaynak uzunluğuna bağlı olarak belirli oranlarda takım aşınması olur. AA7075-T6 malzemede takım aşınmasının kaynak bölgesinin dayanımına etkilerinin incelendiği bir çalışmada Resim 3.16'da görüldüğü gibi kaynak uzunluğu arttıkça takımın farklı oranlarda aşındığı ve 200 m kaynak uzunluğundan sonra kaynak bölgesinin dayanımının büyük ölçüde azaldığı tespit edilmiştir [98].



Resim 3.16. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak uzunluğunun takım aşınmasına etkisi. (Kaynak uzunlukları ve aşınma oranları soldan sağa doğru; 0 m, 100 m & %2, 200 m & %4, 300 m & %10, 400 m & %12) [98]

Sürtünme karıştırma kaynağının manuel hareket kabiliyeti kısıtlıdır.

Sürtünme karıştırma kaynağı esasında otomasyonu çok uygun bir yöntem olup, yöntemin gereklilikleri itibarıyla büyük tezgâhlar gerektirir. Otomasyon açısından avantaj olan bu durum, manuel hareket kabiliyeti açısından olumsuzluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

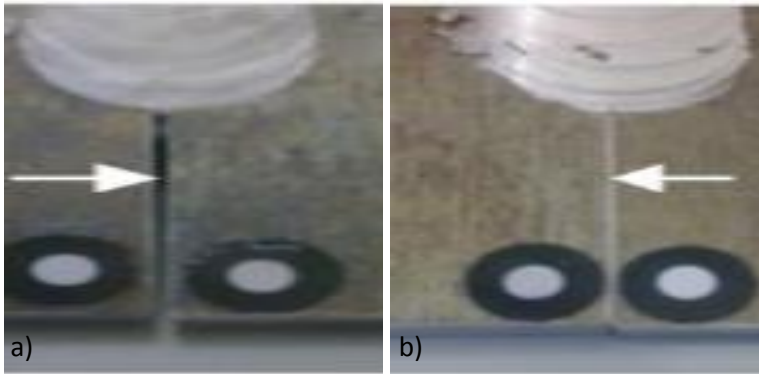
Ancak SKK yöntemi, günümüzde büyük tezgâhlar yerine, sadece robot kolları kullanılarak gerçekleştirilebilir duruma gelmiştir (Resim 3.17).



Resim 3.17. KUKA ve TWI tarafından geliştirilmiş robot FSW kol [99]

Kaynak işlemi sırasında kullanılacak fikstür tasarımı çok önemlidir.

Sürtünme karıştırma kaynağında destek plakaları ve fikstürler oldukça önemli elemanlardır. Kaynak sırasında oluşan çeşitli kuvvetlerin etkisinde kalan plakaların yayılmaması veya havaya kalkmaması gerekir. Yapılan çalışmalar aralıklı fikstür yerine kaynak boyunca uzanan sürekli fikstürlerin daha tutarlı kaynak kalitesi sağladıklarını ortaya koymaktadır. Çeşitli çalışmalarda zayıf yanal fikstür kullanımının, kaynak işlemi esnasında Resim 3.18’de görüldüğü gibi plakalar arasında açıklık oluşumuna sebep olduğunu ve bu açıklığa bağlı olarak kaynak dayanımının düştüğü belirlenmiştir [100].



Resim 3.18. SKK’da sıkma durumuna bağlı olarak plakalar arasında oluşan boşluk [100].
(a) yanal basınç olmadan, (b) yanal basınç varken

Fikstürlerin plakaları sabitlemek dışında çeşitli görevleri de vardır. Çelik ve titanyum gibi ergime noktaları alüminyum alaşımlardan çok daha yüksek olan alaşımların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi esnasında ortaya çıkan termal enerjinin takımda birikerek, takıma malzeme sıvanması ya da takımın yumuşamasına sebep olmasını engellemek için gerekli olduğu bilinmektedir. Bu yüzden sürtünme karıştırma kaynak işlemi esnasında iyi bir fikstür tasarımı kullanarak, ısıyı iş parçasından uzaklaştırıp kaynak kalitesini ve performansını arttırmak büyük önem taşır [101].

Kaynak sonrası parçalarda takım çıkış deliği oluşur.

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak işleminin sonlandırılması esnasında takım çıkış deliği adı verilen boşluk oluşmaktadır. Kaynak işlemini tamamlayan takım, çıkarma işleminden önce durgun bir vaziyette olduğu için soğuyan bir miktar malzeme takıma yapışır. Takımın geri çekilmesi esnasında yapışan bu malzeme delikten dışarı doğru taşınır (Resim 3.19). Ancak malzeme türlerine göre bu hasar oluşumunun da farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda AA5083 ve AA6082 serilerinin nispeten daha az yapışma gösterirken, AA2024 serisinin çok fazla yapışma gösterdiği belirlenmiştir.



Resim 3.19. AA2024-T3'te çıkış deliği hasarı [83]

Yöntem, kaynak kalitesine etki eden çok fazla işlem parametresi içerir.

Sürtünme karıştırma kaynağı daha önceden de bahsedildiği gibi çok fazla işlem parametresi içermektedir. Bu işlem parametrelerinin her bir malzeme türü için ayrı ayrı optimizasyonu oldukça geniş bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür araştırması “Proses Parametresi Optimizasyon Uygulamaları” ve “Proses Geliştirme Uygulamaları” adlı iki alt başlıkta sunulmuştur.

4.1. Proses Parametresi Optimizasyon Uygulamaları

Dubourg ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında 2,3 mm kalınlıktaki AA2024-T3 yüzey üzerine 1,5 mm kalınlıktaki AA7075-T6 dayanma profillerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanması işleminde proses parametrelerinin optimizasyonu üzerinde yaptıkları çalışmalarında ilerleme hızının (50 mm/dak – 1000 mm/dak) ve dönme devrinin (500 dev/dak – 2000 dev/dak) kaynak kalitesi üzerine etkileriyle beraber 3 farklı kaynak prosesinin malzeme çekme ve yorulma dayanımına etkilerini araştırmışlardır. 4 farklı numunenin üretildiği çalışmada numuneler; “tek geçiş sürekli”, “çift geçiş sürekli”, “çift geçiş kesikli” ve “perçinli” şeklinde birleştirilmişlerdir. Takım olarak H13 takım çeliğinden imal edilmiş takımın kullanıldığı çalışmada 4 farklı birleştirme işlemindeki 3 birleştirme işlemi için 700 mm/dak ilerleme hızı ve 700 dev/dak dönme devri değerleri kullanılmıştır. Çalışmada ana malzeme olan AA2024-T3’ün çekme dayanımı olan 475 MPa değerine çok yakın olan 466 MPa değerine ulaşılmıştır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda en yüksek çekme dayanımına ve yorulma dayanımına çift geçiş sürekli kaynakta ulaşmışlardır [102].

Kumar ve diğerleri 5 mm kalınlığındaki AA2024 Alüminyum alaşımlı malzemenin, 20 mm omuz çapına, 4,8 mm pim uzunluğuna, 6 mm en büyük pim çapına, 3 mm en küçük pim çapına, 4 D/d oranına sahip, D2 takım çeliğinden imal edilmiş konik silindirik takım kullanılarak ve sabit 3 kN yüklemeye çeşitli ilerleme hızları ve dönme devirlerinde sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde optimum ilerleme hızı ve dönme devrini bulmaya çalışmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda en yüksek akma dayanımı değeri olan 280 MPa değerine (AA2024 akma dayanımı; 276 MPa) ve en yüksek çekme dayanımı değeri olan 300 MPa değerine (AA2024 çekme dayanımı; 400 MPa), 1000 dev/dak dönme devri ve 30 mm/dak ilerleme hızında ulaşmışlardır [103].

Nadammal ve diğerleri 6 mm kalınlığındaki AA2024-T3 levhanın sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde optimum işlem parametrelerinin belirlenebilmesi için yaptıkları çalışmalarında aşağıdan-yukarıya yaklaşımını kullanmışlardır. İş takımı olarak 20 mm omuz çapına, 6 mm pim taban çapına, 4 mm pim uç çapına, 5,4 mm pim uzunluğuna sahip, sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş karıştırıcı ucun kullanıldığı çalışmada takım açısı olarak 2^0 kullanılarak; batma derinliği, ilerleme hızı ve dönme devri değerleri optimize edilmeye çalışılmıştır. Batma derinliğinin optimizasyonunda dönme devri 500 dev/dak'da ilerleme hızı ise 25 mm/dak değerinde sabit tutulmuş, batma derinliği değeri 200 mm uzunluğundaki kaynak dikişi boyunca 5,0 mm'den 5,8 mm'ye kademeli olarak arttırılmıştır. Bu bölüm sonucunda en yüksek akma ve çekme dayanımı değerlerine 5,63 mm batma derinliğinde ulaşılmıştır. İkinci değişken olan optimum dönme devrinin bulunmasında 5,63 mm batma derinliği değeri ve 25 mm/dak ilerleme hızı değerleri sabit tutularak dönme devri değeri iki eşit kademeli olarak 200 dev/dak'dan 1600 dev/dak değerine çıkarılmıştır. Bu deney sonucunda da optimum dönme devri 350 dev/dak olarak bulunmuştur. Son deneyde ise bir önceki optimum veriler kullanılarak en iyi ilerleme hızı 95 mm/dak olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda; 6 mm kalınlığındaki AA2024-T3 malzeme için optimum işlem parametreleri olan; 5,63 mm batma derinliği, 350 dev/dak dönme devri, 95 mm/dak ilerleme hızı değerlerinde 500 MPa çekme dayanımı (AA2024-T3 için çekme dayanımı 475 MPa) elde edilmiştir [104].

Kumar ve diğerleri yapmış oldukları çalışmalarında 6 mm kalınlıktaki AA6061 levha ile 6 mm kalınlıktaki AA2024 alüminyum alaşım malzemelerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde ilerleme hızı, dönme devri ve yükleme kuvvetinin malzemenin çekme dayanımı üzerindeki etkisini Taguchi ve ANN metotlarıyla modellemeye ve optimize etmeye çalışmışlardır. Kaynatma işlemi için 16 mm omuz çapına, 5 mm pim çapına sahip ısıtıl işlem görmüş yüksek hız çeliğinden imal edilmiş takım kullanmışlardır. 3 farklı proses parametreleri kombinasyonun çalışıldığı çalışmada ortalama çekme dayanımı değerine en yakın değere ANN metodunda (Taguchi;187,14 MPa, ANN;188,89 MPa, Deneysel sonuç;189,1 MPa) ulaşılmıştır [105].

Liu ve diğerleri yapmış oldukları bir diğer çalışmalarında 4 mm kalınlığındaki AA6061-T6 malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde ilerleme hızının malzeme içyapısına ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Dönme devrinin 600 dev/dak'da sabit tutulduğu çalışmada ilerleme hızı 50 mm/dak'dan 200 mm/dak'ya

çıktıkça kaynak merkezindeki tane boyutlarının büyüdüğü ancak ısı ile etkilenmiş bölgelerdeki tane boyutlarının neredeyse değişmediği sonucuna ulaşmışlardır. İlerleme hızı arttıkça kaynak bölgesindeki β^l fazı miktarının azaldığı ancak malzeme uzanımının ve çekme dayanımının arttığı sonucu da çalışmadaki bir diğer bulgudur [106].

Fathi ve diğerleri yapmış oldukları çalışmalarında su soğutmalı ortamda sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen AA6061-T6 malzemenin kaynak sonrası mekanik özelliklerini ve artık gerilme dağılımını incelemişlerdir. Geleneksel ve su soğutmalı şeklinde iki farklı yöntemle birlikte, 3 farklı dönme devri ve 3 farklı ilerleme hızıyla üretilmiş toplam 18 adet numunenin üretildiği çalışmada su soğutmalı prosesle kaynatılmış numunelerin akma dayanımları diğer numunelerin akma dayanımlarına oranla yaklaşık %16 civarında, sertlikleri yaklaşık %12,5 oranında artmıştır. Ancak soğutma işlemiyle beraber malzeme uzama miktarlarının %10,46 ile %6,98 oranında azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca su ile soğutma sonucu iç gerilmelerin arttığı da çalışmanın bir diğer bulgusudur [78].

Abrahams ve diğerleri 6 mm kalınlığındaki AA5005-H34 plaka ile 6,5 mm kalınlığındaki AA7075-T651 plakaların sürtünme karıştırma kaynağı ile ayrı ayrı birleştirilmesinde proses parametrelerinin mekanik özellikler üstündeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında H13 takım çeliğinden imal edilmiş 56 HRC sertlikte üç farklı profildeki karıştırıcı uç kullanarak AA5005-H34 plaka için 127 mm/dak sabit ilerleme hızında 3 farklı dönme devrinde (490 dev/dak, 970 dev/dak, 1200 dev/dak), AA7075-T651 plaka için 4 farklı ilerleme hızında (32 mm/dak, 64 mm/dak, 127 mm/dak, 241 mm/dak) ve 4 farklı dönme devrinde (490 dev/dak, 970 dev/dak, 1200 dev/dak, 1500 dev/dak) yapılan kaynatma işlemini dikkate almışlardır. Çalışmaları sonucunda malzemenin çekme dayanımını ilerleme hızının, dönme devrinden daha çok etkilediği, ilerleme hızı arttıkça malzemenin çekme dayanımının arttığı ve karıştırıcı uç profilinin kaynak bölgesindeki mikro yapıyı doğrudan etkilediği sonucuna ulaşmışlardır [107].

Bayazid ve diğerleri ise yaptıkları çalışmada 5 mm kalınlığındaki AA7075-T6 plakanın 63 mm/dak ilerleme hızı ve 1600 dev/dak dönme devrinde sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde karıştırıcı ucun içyapı kusurlarına etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada; silindirik, kare ve üçgen profile sahip 3 farklı karıştırıcı uç incelenmiştir. Çalışma her karıştırıcı uçta tünel oluşumunun gözlemlendiği ancak silindirik profilin ucun;

tünelle beraber zikzak çizgisi gibi kusurlara da sebep olduğunu, üçgen profilli ucun kullanımında; çatlak ve bağlantı çizgisinin oluştuğu ancak kare profilli karıştırıcı uç ile birleştirilen numunelerde harici bir kusurun tespit edilmediği sonucuna ulaşılmıştır [108].

Carlone ve Palazzo yaptıkları çalışmalarında 4 mm kalınlığındaki AA2024-T3 malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanmasında proses parametrelerinin kaynak bölgesinin tane yapısına ve mekanik özelliklerine etkisi üzerine yapmış oldukları çalışmalarında sabit 2° eğim açısı ve 0,2 mm penetrasyon derinliğinde, 5 farklı dönme devri için (800 dev/dak, 1000 dev/dak, 1200 dev/dak, 1400 dev/dak, 1600 dev/dak) 3 farklı ilerleme hızını (35 mm/dak, 70 mm/dak, 140 mm/dak) toplam 15 adet numune incelemişlerdir. Çalışma için 20 mm omuz çapına, 3,8 mm pim uzunluğuna, 6,2 mm büyük pim çapına, 30° koni açısına sahip AISI1040 su verilmiş çelikten imal edilmiş 56HRC sertlikte takım kullanmışlardır. Ayrıca çalışma süresince kaynak bölgesinin sıcaklığı infrared termal kamera ile ölçülmüştür. Çalışma sonuçlarına göre en küçük tane yapısı en düşük dönme devri ve en yüksek ilerleme hızına sahip (800 dev/dak, 140 mm/dak) numunede, en büyük tane yapısı ise en yüksek dönme devrine ve en düşük ilerleme hızına sahip (1600 dev/dak, 35 mm/dak) numunede elde edilmiştir [109].

Xu ve diğerleri 20 mm kalınlığındaki AA2219-T62 malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynak yapılması sırasında hızlı soğumanın malzeme dayanımına etkisini inceledikleri çalışmalarında öncelikle malzeme yüzeyindeki oksit tabakasını kaldırmışlar daha sonrada etanol ile malzeme yüzeyini temizlemişlerdir. 34 mm omuz çapına, 13,5 mm kök, 9,3 mm uç pim çapına sahip takımın kullanıldığı çalışmada dönme devri olarak 300 dev/dak, ilerleme hızı olarak 80 mm/dak, takım açısı olarak ise 2,8° değerleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında bazı numuneler sadece havada soğutulurken diğer numuneler kaynak bölgesi yüzeyine ya da altına uygulanan su ile soğutulmuştur. Çalışma içerisinde yapılan deneyler sonunda havada soğuma işlemi gerçekleştirilen numunelerde ana malzemeye göre çok düşük çekme dayanımları elde edilirken alt yüzeyinden su ile soğutulmuş numunelerde ana malzemeye çok yakın dayanımlar elde edilmiştir ancak su ile soğutma işlemlerinde malzemenin sünekliğinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır [110].

Arun Babu ve diğerleri sürtünme karıştırma kaynağı ile AA7075/WC ($\sigma_{max} = 240$ MPa) metal matrisli kompozit malzemelerinin üretilmesinde işlem parametrelerinin optimizasyonu üzerinde yapmış oldukları çalışmalarında her biri dört farklı değere sahip

takım, dönme devri, ilerleme hızı ve eğim açısını incelemişlerdir. Taguchi metodunun kullanıldığı çalışmada işlem parametrelerinin kaynak mukavemetine etkileri incelendiğinde en çoktan aza doğru; takım dönme devri, takım profili, ilerleme hızı, eğim açısı ve takım omuz çapı şeklindedir. En iyi mukavemet değerinin elde edildiği takım olan kare profilli takımında optimize edilmiş maksimum çekme dayanımı 272,4 MPa elde edilmiştir [111].

Sivaraj ve diğerleri 12 mm kalınlığındaki AA7075-T651 plakanın sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde yorulma çatlak büyümesini incelemişlerdir. Kaynaklanma işlemi görmemiş ana metalle (AA7075-T651) sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş malzemenin kıyaslandığı çalışmada, takım olarak; sol helisli konik dişli pim profiline sahip, 36 mm omuz çaplı, 12 mm pim üst çaplı, 11,6 mm pim uzunluklu takım kullanılmıştır. İşlem parametreleri olarak ise 250 dev/dak dönme devri, 25 mm/dak ilerleme hızı tercih edilmiştir. Çalışma sonunda sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin akma dayanımları $\sigma_y = 335$ MPa, maksimum çekme dayanımları $\sigma_{max} = 394$ MPa olarak ölçülmüş (AA7075-T651 için referans değerleri; $\sigma_y = 510$ MPa, $\sigma_{max} = 563$ MPa) ve ΔK_{cr} değerinin 10×10^{-3} MPa. m^{1/2} oranında azaldığı sonucu elde edilmiştir [112].

Reza-E-Rabby ve Reynolds yaptıkları çalışmalarında takım pim diş profilinin 32 mm kalınlığındaki AA7050-T7451 ile 25 mm kalınlığındaki AA6061-T651 plakalarının sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynak edilebilirliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 25,4 mm omuz çapına, 12,5 mm pim uzunluğuna, 15,9 mm pim çapına sahip silindirik profilli takımın kullanıldığı çalışmada 4 farklı diş hatvesi (1,02 mm, 1,41 mm, 2,12 mm ve 3,18 mm) incelenmiştir. AA7050 için; 120-51, 150-51, 180-51, 160-102, 200-102 ve 240-102 şeklinde 6 farklı parametre kombinasyonunun (dev/dak – mm/dak), AA6061 için ise; 160-102, 200-102, 240-102, 240-203, 320-203 ve 400-203 şeklinde 6 farklı parametre kombinasyonunun kullanıldığı çalışmada her kombinasyon için 4 farklı diş hatvesinin etkisi araştırılmıştır. Çalışmada -x eksenindeki düzlem içi reaksiyon kuvvetleri, piston basınç dönüştürücüsünden üretilen sinyalden, Y eksenindeki reaksiyon kuvvetleri iş mili taşıyıcısındaki yük hücresinden elde edilmiştir. Çalışma sonucunda orta diş hatvelerine 1,41 mm ve 2,12 mm sahip takımların daha iyi performans gösterdiğiyle beraber, AA7050 malzemede AA6061 ‘den daha çok hata tespit edilmiştir. Bununla

birlikte pimdeki düzlem içi reaksiyon kuvvetlerinin, AA7050 kaynaklarında AA 6061'den önemli ölçüde daha büyük olduğu belirlenmiştir [113].

Srinivasa Rao ve diğerleri yapmış oldukları çalışmalarında sürtünme karıştırma kaynağı ile ayrı ayrı birleştirilen 10 mm ve 16 mm kalınlığındaki AA7075-T651 plakaların mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 10 mm kalınlığındaki plaka için; M2 takım çeliğinden imal edilmiş, konik dişli pime sahip (sol el metrik dişli, 1,5 mm hatve), 7 mm omuz ucu pim çapına, 4 mm uç ucu pim çapına, 9,5 mm pim uzunluğuna, 22 mm omuz çapına sahip düz omuzlu takım, 700 dev/dak dönme devri, 120 mm/dak ilerleme hızı ve $1,5^{\circ}$ açıda kullanılmıştır. 16 mm kalınlığındaki plaka için ise; M2 takım çeliğinden imal edilmiş, konik dişli pime sahip (sol el metrik dişli, 1,5 mm hatve), 10 mm omuz ucu pim çapına, 8 mm uç ucu pim çapına, 15 mm pim uzunluğuna, 30 mm omuz çapına sahip düz omuzlu takım, 500 dev/dak dönme devri, 25 mm/dak ilerleme hızı ve $1,5^{\circ}$ açıda kullanılmıştır. Sertlik testleri, vickers sertlik test cihazı kullanılarak 0,1 kg'lık bir yük ve 10 sn kalma süresi kullanılarak yapılan deneyde 16 mm kalınlığındaki levhalarda yapılan kaynaklarda kaynak işleminden dolayı sertlikteki azalmanın 10 mm kalınlığındaki levhalardan daha fazla olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda 10 mm kalınlığındaki plakada dayanım değerleri $\sigma_y = 320$ MPa, $\sigma_{max} = 424$ MPa şeklinde elde edilmişken bu değerler 16 mm kalınlığındaki plakada $\sigma_y = 192$ MPa, $\sigma_{max} = 330$ MPa olarak elde edilmiştir [114].

Bocchi ve diğerleri çalışmalarında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş alüminyum alaşımlarda proses parametrelerin malzemelerin mekanik özelliklerine ve korozyon dayanımına etkisini incelemişlerdir. Her birinin kalınlığı 4 mm olan; AA2024-T3 ve AA7075-T6 malzemelerinin kullanıldığı çalışmada AA2024-AA2024, AA7075-AA7075 ve AA2024-AA7075 olmak üzere 3 farklı kombinasyon incelenmiştir. Kaynak takımı olarak ise 16 mm omuz çapına, 6 mm en büyük 4 mm en küçük pim çapına, 3,8 mm pim uzunluğuna sahip takım kullanılmıştır. Değişken işlem parametreleri olarak 3 farklı dönme devri (1000, 1500, 2000 dev/dak) ve ilerleme hızı olarak ise 10 mm/dak, 35 mm/dak, 60 mm/dak şeklinde 3 farklı değer dikkate alınmıştır. Çalışma sonunda neredeyse bütün numunelerde korozyon dayanımının dönme devri ve ilerleme hızı orta değere yaklaştıkça arttığı, orta değerlerden uzaklaştıkça azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Bununla

beraber malzemelerin çekme dayanımlarında aynı davranışı sergilediği gözlenmiştir [115].

Sun ve arkadaşları sürtünme karıştırma kaynağı ile çok düşük sıcaklıklarda birleştirilmiş AA6061-T6 alüminyum alaşımlı plakanın tane yapısını ve mekanik özelliklerini incelemiştir. 1 mm kalınlığındaki plakanın 30, 40 ve 50 dev/dak dönme devirlerinde birleştirildiği çalışmada biri pimli (omuz çapı: 12 mm, pim çapı: 4 mm, pim uzunluğu: 1 mm) diğeri ise düz omuzlu ve pimsiz (omuz çapı: 12 mm) olmak üzere her ikisinde WC-Co içerikli iki takım kullanılmıştır. Plakaya uygulanan düşey kuvvetler 4000-8000 kg aralığında, ilk bekleme süresi ise 30 sn tutularak işlem sırasındaki maksimum sıcaklık 200 °C değerinde sınırlanmıştır. Sıcaklık ölçümü için K-tipi termokuplların kullanıldığı çalışmada tane yapısını incelemek için ise elektron mikroskobu kullanılmıştır. Çalışma sonunda 500 nm'den daha küçük boyutlu tane yapısı elde edilmiştir ve HAZ bölgesinde sertlik azalması tespit edilememiştir. Bütün bunlarla beraber çalışma; AA6061-T6 malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile birleştirilmesinde yaklaşık 5400 N maksimum kesme yüküne ulaşabileceğini ortaya koydu [116].

Wang ve diğerleri sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş 2,88 mm kalınlıktaki AA2024-T4 plakanın sıcak deformasyon davranışlarını incelemiştir. Deformasyon davranışını belirlemek için tek eksenli gerilme ve serbest şişkinlik testlerinin kullanıldığı çalışmada, 3,4 mm kök çapına, 2,8 mm uzunluğunda dişli bir pime ve 12 mm çapında içbükey bir omuza sahip takım kullanılarak, levhalar yuvarlanma yönünde 2° eğme açısıyla kaynaklanmıştır. 7 farklı dönme devri-ilerleme hızı kombinasyonu denendikten sonra numunelerde elde edilen maksimum çekme dayanımının ana metalin %70'i kadar olduğu ve serbest şişkinlik testinde ise SKK sacının şişkin yüksekliğinin, baz metalin sadece %50'si kadar olduğu tespit edilmiştir [117].

Yang ve diğerleri çalışmalarında 10 mm kalınlığındaki AA6061-T6 plakanın sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi sırasında H13 takım çeliğinden imal edilmiş farklı profillere sahip 7 tane karıştırıcı uç ile alüminyum alaşımlı plaka arasındaki termo – mekanik etkileşimi incelemiştir. Kaynak işleminde kritik noktaların sıcaklığını ve takım mili torkunu ölçmek için özelleştirilmiş bir deney düzeneği kullanılan çalışmada kaynak bölgesinin mikro yapısı ve çekme mukavemeti değerleri dikkate alınmıştır. İşlem parametreleri olarak ise 900 dev/dak dönme devri, 60 mm/dak ilerleme hızı, 2,5⁰ takım

açısı, 0,15 mm penetrasyon derinliği ve 2 geçişli tarama sabit olarak seçilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda ısı üretiminde en etkili faktörler; omuz ve pim geometrileri ile düşey kuvvet olarak belirlenmiştir ancak dönme devri ve ilerleme hızının ısı oluşumuna etkisi çalışmada dikkate alınmamıştır. Bununla birlikte omuz ve pimdeki oluklu yapının daha ince tane oluşumuna sebep olurken, düz yüzeylerin karışık tane yapısına sebep olduğu belirlenmiştir [118].

RaviKumar ve diğerleri çalışmalarında her biri 6,35 mm kalınlıktaki AA6061 ve AA7075 alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmesinde işlem parametrelerini çoklu cevap optimizasyon yöntemi kullanılarak optimize etmeye çalışmışlardır. Taguchi L9 ortogonal diziyi kullanarak yaptıkları deney tasarımında birleştirilen malzemelerin maksimum çekme dayanım değerlerini ve sertlik değerlerini kullanarak takım ilerleme hızını, takım dönme devrini ve takım geometrisini optimize etmişlerdir. Deneysel çalışmalarda takım dönme devir aralığını 800–1000 dev/dak, takım ilerleme hız aralığını 90-110 mm/dak olarak belirlemişlerdir. Deneyler süresince numunelerden maksimum 195,04 MPa maksimum çekme dayanımının elde edildiği çalışmada optimize edilmiş işlem parametreleri 900 dev/dak takım dönme devri, 95 mm/dak takım ilerleme hızı olarak bulunmuşken takım profili kullanılan optimizasyon yöntemine göre değişiklik göstermiştir [119].

Gowthaman ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında her ikiside ısı işlem görebilen malzeme olan 6 mm kalınlığa sahip AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmesinde işlem parametrelerinin tane yapısına ve malzeme dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Takım dönme devri olarak 1000 dev/dak ve 1400 dev/dak değerleri kullanılırken, takım ilerleme hızı olarak 20 mm/dak ve 40 mm/dak değerleri ve sabit 4 kN eksenel yük uygulamışlardır. Takım olarak ise 6 mm pim çapına, 20 mm omuz çapına sahip H13 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş takım kullanılmıştır. Çalışma sonunda takım dönme devri arttıkça artan ısı girdisine bağlı olarak tane yapısında büyüme olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte en iyi çekme dayanımı 214,3 MPa olarak 1000 dev/dak takım dönme devri ve 20 mm/dak takım ilerleme hız değerlerinin kullanıldığı numunede elde edilmiştir [120].

Mohamed ve diğerleri çalışmalarında Taguchi L9 ortogonal diziyi kullanarak farklı işlem parametreleri kullanılarak birleştirilmiş AA5083 ve AA6061 alüminyum alaşımlarının

çekme dayanımlarını, uzama miktarlarını ve sertlik değerlerini kullanarak işlem parametrelerini optimize etmeye çalışmışlardır. Takım malzemesi olarak paslanmaz çeliğin tercih edildiği çalışma sonunda malzeme özelliklerini en çok etkileyen işlem parametresinin takım dönme devri olduğu sonucuna ulamışlardır [121].

4.2. Proses Geliştirme Uygulamaları

Prabhuraj ve diğerleri yapmış oldukları çalışmalarında Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Sodyum Klorit çözeltisi içerisinde birleştirilen 10 mm kalınlığa sahip AA7075-T651 Alüminyum alaşımlı malzemenin elektrokimyasal tepkisini incelemişlerdir. Sürtünme karıştırma kaynağı için 30 mm omuz çaplı, 10 mm pim çaplı, 9,5 mm pim uzunluklu ve konik dişli pim profiline sahip yüksek hız çeliğinden imal edilmiş takım kullanmışlardır. Kaynak parametreleri ise takım dönme devri 750 dev/dak, düşey yükleme kuvveti 12 kN ve takım ilerleme hızı 30 mm/dak şeklindedir. Yaptıkları bu çalışmada malzemenin elektrokimyasal davranışını incelemek için %3,5 oranında NaCl çözeltisi kullanmışlardır. Karıştırma bölgesinin korozyon davranışını değerlendirmek için ise Potansiyodinamik test yapılmış, test örnekleri karıştırma bölgesinin orta kısmına çıkarılmıştır. Çalışma sonunda karıştırma bölgesinin ana metalden daha fazla korozyon potansiyeline sahip olduğu gözlenmiştir [27].

Chen ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında elektrik destekli sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş AA2219-T87 malzemenin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları malzeme 6 mm kalınlığa sahipken, takım dönme devri 800 dev/dak, takım ilerleme hızı 160 mm/dak, takım açısı $1,5^0$ ve ön ısıtma süresi 3 sn olarak belirlenmiştir. Sıcaklık değişimlerinin kaydedilmesi için 8 K-tipi termokuplların kullanıldığı çalışmada, sıcaklık verilerini toplamak için ise Datapaq TP2016A sıcaklık iz sürücüsü kullanılmıştır. Çalışma esnasında ulaşılan en ilginç verilerden biri muhakkak ki sisteme verilen akım 0 A'den 600 A'e çıkarıldığı zaman kaynak bölgesinin sıcaklığı da $285,5\ C^0$ 'den $417,8\ C^0$ 'ye çıkarken 100 A değerinde sıcaklığın $285,5\ C^0$ 'nin altına düşmesidir. Çalışma sonucunda artan akımla beraber kaynak bölgesindeki malzemenin akıcılığının arttığı, buna bağlı olarak da yanıl akış ekstrüzyon kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir. İç akıştaki bu değişimlerin tane yapısını değiştirmesi neticesinde malzeme çekme dayanımının %17,11 oranında artarken malzeme yüzey sertliğinin ise yaklaşık %18,13 oranında arttığı da çalışmanın diğer sonuçlarını oluşturmaktadır [122].

Jamshidi ve diğerleri ise ters çift dönme işleminin AA7075-T6'dan AISI304'e sürtünme karıştırma kaynağı özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Alüminyum alaşımın çeliğe kaynatıldığı çalışmada ergime noktaları çok farklı olduğu için geleneksel kaynak yöntemleriyle kaynatılması mümkün olmayan bu iki metalin ters çift dönme işlemleri sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak birleştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan AA7075-T6 levhanın kalınlığı 2 mm iken, AISI304 östenit paslanmaz çelik levhanın kalınlığı 1 mm'dir. Her iki levhanın anma ölçüleri ise 200 mm × 100 mm'dir. Literatürden elde edilen bilgiler neticesinde sürtünme karıştırma kaynak yöntemi AA7075-T6 levha yüzeyine uygulanmıştır. Geleneksel ve çift döner iki adet karıştırıcı ucun kullanıldığı bu çalışmada geleneksel ucun dönme devri 1000 dev/dak, ilerleme hızı 120 mm/dak ve takım açısı $2,5^{\circ}$ iken, çift döner karıştırıcı ucun pim dönme devri 1000 dev/dak, omuz dönme devri 600 dev/dak, ilerleme hızı 120 mm/dak ve takım açısı $2,5^{\circ}$ 'dir. Her iki takımında omuz çapı 14 mm, pim çapı 5 mm, pim uzunluğu 2,1 mm ve koniklik açısı 2° 'dir. Deney esnasındaki sıcaklık profillerini ölçmek için ise K-tipi termokupllar kullanılmıştır. Çalışma sonunda ters çift dönme işleminin geleneksel yöntemden daha fazla malzemenin yer değiştirmesine sebep olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte ters çift dönme işleminde üretilen ısının azaltılması, ara yüzdeki intermetalik bileşiklerin miktarını azaltmış, ancak kaynağın iyi mekanik davranışını sağlamak için yeterli olmamıştır [123].

Liu ve diğerleri çalışmalarında alt yüzeylerinden ultrasonik titreşimlerle titreştirilen, 5mm kalınlığındaki AA2219-T6 malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmesi sonucu oluşan kaynak bölgesinin mikro yapısını incelemişlerdir. Konkav omuz çapının 14mm olduğu çalışmada 6,0 mm – 3,4 mm çaplarında, toplam 4,85 mm uzunluğunda çift yönlü karıştırıcı uç ve 18 mm çapa, 2 mm kenar yuvarlatmasına sahip destek sütunu, titreşim için ise 20 kHz frekans ve 40 µm amplitüd ile çalışan sonotrod kullanılmıştır. Sonotrod eksenini ile destek kolunun eksenini arasındaki mesafe ise 16 mm, sonotrod ve iş parçası arasındaki sıkma kuvveti ise 250 N'dur. Çalışma sonunda ultrasonik titreşimlerin uygulanmasıyla, pimin etrafındaki malzemeler önemli ölçüde yumuşatılmış ve yeterli bir plastik deformasyona maruz kalmıştır, bu da alternatif ince tanelerden ve kaba tanelerden oluşan lamelli yapıların oluşmasına sebep olmuştur [124].

Mahto ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında AA6061-T6 Alüminyum alaşım ile AISI304 çeliğinin sürtünme karıştırma kaynağı ile su altında kaynaklanabilirliğini araştırmışlardır.

Çalışmalarında kullandıkları her biri 1 mm kalınlığındaki plakaları üç farklı dönme devrinde ve üç farklı derinlikte, H13 yüksek hız takım çeliği ve C2 tungsten karpit (WC) den yapılmış takım ile kaynattıktan sonra kaynak bölgesinin içyapısını incelemişlerdir. Hem su altında hem de havada yaptıkları bu çalışmada takım dönme devri ve derinliği arttıkça kaynak bölgesinde oluşan kuvvetlerin arttığı ve buna bağlı olarak da kaynak bölgesinin sıcaklığının arttığını tespit etmişlerdir. Su altında yapılan çalışmalarda daha hızlı soğuma meydana geldiği için daha ince taneli yapılar oluşmuştur. Bununla birlikte devir ve derinlik artışı kaynak bölgesinin sıcaklığını düzenli olarak artırmasına rağmen en iyi malzeme dayanımları havada yapılan çalışmalarda 1400 dev/dak ve 2 mm derinlikte meydana gelirken, suda yapılan çalışmalarda 1800 dev/dak ve 2 mm derinlikteki numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca havada maksimum çekme yüklemesi 1,8 kN civarındayken, suda bu değer 2,0 kN değerinin üzerine çıkmıştır [125].

Singh ve diğerleri ise soğutma ortamı ve kaynak hızının Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile birleştirilmiş Al-Mg-Cu alaşımlı malzemenin (AA5052-H32) yorulma dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Soğutma ortamı olarak; hava, 28 °C'de su ve sıvı nitrojenin kullanıldığı çalışmada dönme devri 560 dev/dak da sabit tutulurken, ilerleme hızları; 100 mm/dak, 200 mm/dak, 300 mm/dak ve 400 mm/dak olarak seçilmiştir. Takım açısının 2°, pim çapının 7 mm ve omuz çapının 18 mm olduğu çalışmada toplam 12 adet deney numunesi elde edilmiştir. Bir önceki çalışmada olduğu gibi bu çalışmada da en yüksek çekme dayanımları suda çalışılan numunelerde elde edilmiştir. Çalışmanın en önemli sonuçlarından biri ise yorgunluk çatlak büyüme hızının su soğutması durumunda düşük olduğu, sıvı azot soğutması durumunda ise kaynak bölgesindeki oksit varlığının yorgunluk çatlak büyüme hızında önemli bir artışa neden olduğunu göstermesidir [126].

Devanathan ve diğerleri alüminyum alaşımların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kullanılan takımın kaplamalı ya da kaplamasız olmasının kaynak kalitesine etkilerini araştırmışlardır. Kaplamalı olarak kullandıkları takımı 4 mikron kalınlığında TiAlN ile kaplamışlardır. Toplam 7 deney içeren çalışmalarının sonunda takım dönme hızının kaynak kalitesini etkileyen en önemli faktör olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Yapılan deneylerde elde edilen en önemli sonuçlardan biriside kaplamalı takımda takım aşınması daha az olmasına rağmen takıma sıvanan alüminyum miktarı fazla olmuştur. Bunun aksine kaplamasız takımda daha az sıvanmayla beraber daha yüksek takım aşınması görülmüştür [127].

Kawashima ve diğerkleri yapmış oldukları çalışmada sürtünme karıştırma kaynağı ile 900 dev/dak dönme devri, 100 mm/dak ilerleme hızı ve 5 kN yükleme kuvveti altında birleştirilmiş 3 mm kalınlıktaki AA7075-T73 malzemenin yorulma dayanımını hiçbir kaplayıcı malzeme kullanmadan havada yaptıkları Femtosecond Laser Peening yöntemi ile artırılması üzerine yaptıkları çalışmada bu malzemenin yorulma dayanımını temel malzemeye göre yaklaşık 3,7 kat arttırmayı başarmışlardır. Çalışmada 800 nm dalga boyuna, tam genişlikte 130 fs darbe genişliğine sahip yarı genişlikte bir femtosaniye lazer darbesi, odak uzaklığı 70 mm olan bir plano-dışbükey mercek kullanılarak numunenin yüzeyine odaklanmıştır. Nanosaniye lazerlerde vuruş yoğunluğu arttıkça malzeme yüzey pürüzlülüğü artmasıyla beraber vuruş enerjisinin artmasına bağlı olarak malzeme yüzey sertliğinin de arttığı tespit edilmiştir [128].

Wahid ve diğerkleri sualtı sürtünme karıştırma kaynak türlerini yeniden inceledikleri çalışmalarında bu yöntemin sürtünme karıştırma kaynağına olan üstünlüklerini gözden geçirmişlerdir. Buna göre su altında yapılan sürtünme karıştırma kaynağında klasik yöntemle göre malzeme dayanımı artarken, sünekliliği azalmaktadır. Bununla birlikte su altı sürtünme karıştırma kaynağında oluşan iç gerilme miktarı daha az olduğu için malzemedeki çarpılma miktarları da azalmaktadır. İçyapıda artan mükemmelliğe bağlı olarak daha az kaynak kusuru görülmesi de su altında yapılan sürtünme karıştırma kaynağının avantajlarından birisi olarak çalışmada sunulmaktadır [129].

Rao ve diğerkleri çalışmalarında sürtünme karıştırma kaynağıyla alın altına birleştirilmiş her biri 5 mm kalınlıktaki AA6061-T6 – AA7075-T6 malzeme çiftinin mekanik özelliklerini incelemişler ve seçilecek işlem parametresi derecesine göre malzeme dayanımını yanıt yüzeyi yöntemini kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. 4 farklı geometriye sahip karıştırıcı takımın kullanıldığı çalışmada deney planı Taguchi L16 deney tasarımına göre yapılmıştır. Bağımsız değişkenler olarak her biri 4 seviyeye sahip olan takım geometrisi, takım dönme devri ve takım ilerleme hızı seçilmişken, takım omuz çapı (20 mm), ilk bekleme süresi (20 sn), takım eğim açısı (0°) ve pim çapı (6 mm) ise sabit tutulmuştur. Deneysel çalışmalarda en fazla 306 MPa değerine ulaşılabilen çalışma sonunda malzeme çekme dayanım, uzama miktarı ve sertlik değerleri kullanılarak işlem parametreleri optimize edilmiştir [11].

Garg ve diğerleri çalışmalarında 12,7 mm kalınlığındaki AA6061-T6 – AA7075-T651 alüminyum alaşımlarını alın altına çift yönlü olarak birleştirmişlerdir. İlk birleştirme işlemi gerçekleştirildikten sonra plaka çiftleri ters çevrilmiş ve aynı parametrelerde ancak takım dönme yönü tersine çevrilerek ikinci birleştirme işlemi daha öncekinde altta olan yüzeyde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada H13 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş 6,85 mm pim çapına, 20 mm omuz çapına ve 3° omuz açısına sahip takım kullanılmıştır. Proses parametrelerinden ise takım dönme devri 900 dev/dak değerinde, takım ilerleme hızı ise 98 mm/dak değerinde sabit tutulmuştur. Çalışma sonunda, geliştirilen yöntemin malzeme çekme dayanımıyla birlikte özellikle malzeme sünekliğini ciddi ölçülerde arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır [12].

Muhamad ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında Al-Ni tozu eklenerek sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmiş AA7075-T6 alüminyum alaşımı ile 304 L paslanmaz çelik malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Deney parametresi olarak sabit 25 mm/dak ilerleme hızıyla beraber 200 dev/dak – 800 dev/dak arasında lineer olarak artan 7 farklı takım dönme devrinin tercih edildiği çalışmada malzeme kalınlıkları 2 mm, takım eğim açısı 3°, pim uzunluğu 1,8 mm, pim batma derinliği 1,9 mm olarak belirlenmiştir. Eşit oranlarda toz eklenen bu çalışmada tozların ortalama çapları ise Al için 45 µm, Ni için ise 10 µm'dir. Çalışmada toz eklenmemiş birleştirmelerde en büyük çekme dayanım değeri olarak 220 MPa değeri elde edilebilmişken, Al-Ni tozu eklenerek yapılan birleştirmelerde en büyük çekme dayanımı değeri 360 MPa'a kadar çıkarılabilmektedir. Çalışma sonunda hem toz eklenmiş numunelerde hemde eklenmemiş numunelerde takım dönme devri arttıkça daha pürüzsüz yüzeyler elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca Al-Ni karışımli tozun çekme dayanımındaki etki oranının düşük dönme devirlerinde daha yüksek olduğu da tespit edilmiştir [16].

Jafari ve diğerleri yapmış oldukları çalışmalarında 11-13 nm boyutlarındaki SiO₂ parçacıkları kullanılıp güçlendirilerek sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş her biri 5 mm kalınlığındaki AA7075-T6 levha ile AA6061-T6 levhanın mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında AISI H13 sıcak iş çeliğinden imal edilmiş 56 HRC sertliğe, 30 mm omuz çapına, 25 mm omuz yüksekliğine, 4,7 mm pim uzunluğuna, 12° pim açısına, 2,5° takım açısına ve konik silindirik dış yapısına sahip takım kullanmışlardır. Malzemenin akma dayanımı artırmak amacıyla kaynak yapılmadan önce kaynak çizgisi

üzerine oluk açılarak SiO_2 parçacıkları ile doldurulmuştur. 4 farklı dönme devri (450 dev/dak, 560 dev/dak, 710 dev/dak, 900 dev/dak), 4 farklı ilerleme hızında (25 mm/dak, 31,5 mm/dak, 50 mm/dak, 80 mm/dak) ve parçacık takviyeli-parçacık takviyesiz olmak üzere iki farklı seçenekte üretilen numuneler incelendiğinde en yüksek akma dayanımı (103 MPa) 560 dev/dak dönme devri, 31,5 mm/dak ilerleme hızının kullanıldığı parçacık takviyesiz numunelerde, en yüksek çekme dayanımı ise (196 MPa) aynı değerlerde fakat parçacık takviyeli numunelerde elde edilmiştir. Bununla beraber dönme devri ve ilerleme hızı arttıkça kaynak bölgesindeki artık gerilmelerin arttığı, SiO_2 tozu takviyeli bütün numunelerde ise artık gerilme miktarının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır [31].

Talebizadehsardari ve diğerleri çalışmalarında Al-Mg alaşımlarının su altında sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmesinin modellenmesi ve doğrulanması üzerine çalışmışlardır. Çalışmada su altı sürtünme karıştırma kaynağının malzeme dayanımı üzerindeki etkilerini daha iyi anlayabilmek için klasik sürtünme karıştırma kaynağıyla aynı işlem parametrelerinde birleştirilmiş numuneleri kıyaslamışlardır. Çalışma sonunda su altında birleştirilen numunelerde daha küçük tane oluşumlarına bağlı olarak daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Bununla birlikte su altında gerçekleştirilen işlemlerde takımın arka tarafındaki iş parçasına uygulanan sıkıştırma basıncının geleneksel yöntemle göre daha fazla olduğu ve buna bağlı olarak da kaynak çizgisi boyunca daha sert bir yapının oluştuğu gözlemlenmiştir [45].

5. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan AA6061-T6 ve AA7075-T6 alüminyum alaşımların kimyasal ve mekanik özellikleri, karıştırıcı takıma ait özellikler, kullanılan tezgâhlar, test cihazları ve diğer ekipmanlar anlatılmıştır. Bunun yanında deney planı oluşturulmasında kullanılan yöntemle ait detaylar verilmiştir.

5.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler olan AA6061-T6 ve AA7075-T6 alüminyum alaşımları 1000 mm × 2000 mm × 2 mm boyutlarında Referans Metal A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Malzemelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 5.1’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. AA6061-T6, AA7075-T6 plakaların kimyasal bileşimleri

Malzeme	Alaşımların Elementleri (%)								
	Si	Cr	Mn	Mg	Cu	Ti	Fe	Zn	Al
AA6061-T6	0,40 - 0,80	0,04 - 0,35	0,00 - 0,15	0,80 - 1,20	0,15 - 0,40	0,00 - 0,15	0,00 - 0,70	0,00 - 0,25	Kalan
AA7075-T6	0,00 - 0,40	0,18 - 0,28	0,00 - 0,30	2,10 - 2,90	1,20 - 2,00	0,00 - 0,20	0,00 - 0,50	5,10 - 6,10	Kalan

Çizelge 5.2. AA6061-T6, AA7075-T6 plakaların mekanik özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Kesme Dayanımı	Uzama	Elastisite Modülü	Erime Sıcaklığı
AA6061-T6	270 MPa	310 MPa	207 MPa	%15	69 GPa	582 °C
AA7075-T6	480 MPa	560 MPa	330 MPa	%8	71,7 GPa	466 °C

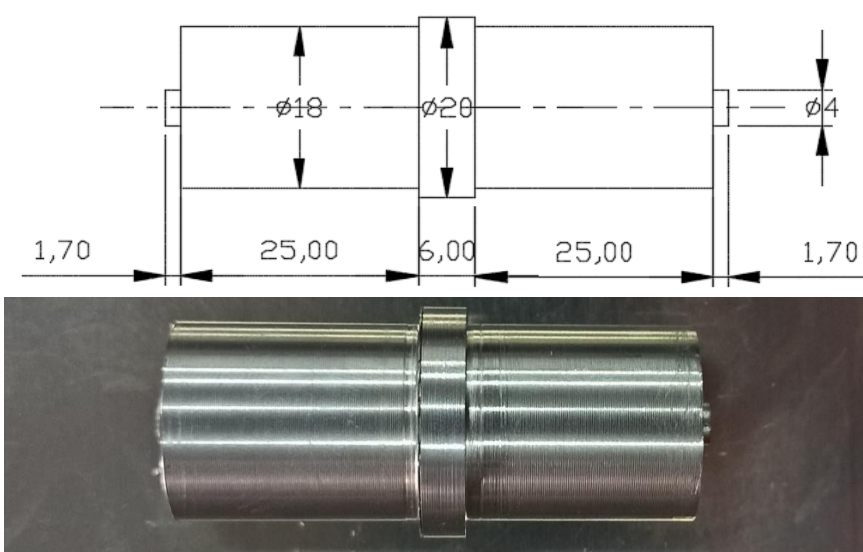
1000 mm × 2000 mm × 2 mm boyutlarındaki plakalar Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bünyesinde bulunan Durmazlar marka giyotin makinası kullanılarak 100 mm × 125 mm × 2 mm boyutlarında kesilerek deneyler için hazırlanmıştır. Kesilen plakalardan bazıları Resim 5.1’de görülmektedir. Plakalar kesildikten sonra deneye geçilmeden önce birleşme kenarlarındaki pürüzlülükler eğe ile giderildikten sonra zımparalanmıştır. Takımla temas edecek plaka yüzeyleri ise saf alkolle temizlenmiştir.



Resim 5.1. 100 mm × 125 mm × 2 mm boyutlarında kesilmiş AA6061-T6 plakalar

5.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Karıştırıcı Takım

Kaynak işleminin gerçekleştirilmesinde kullanılacak karıştırıcı takım malzemesi olarak AISI H13 HSS (DIN 1.2344) sıcak iş takım çeliği seçilmiştir. 21 mm çaplı çubuktan 60 mm uzunluğunda 4 parça kesilerek universal tornada Resim 5.2’de görülen teknik resme uygun olarak $\pm 0,05$ mm toleransla işlenmiştir.

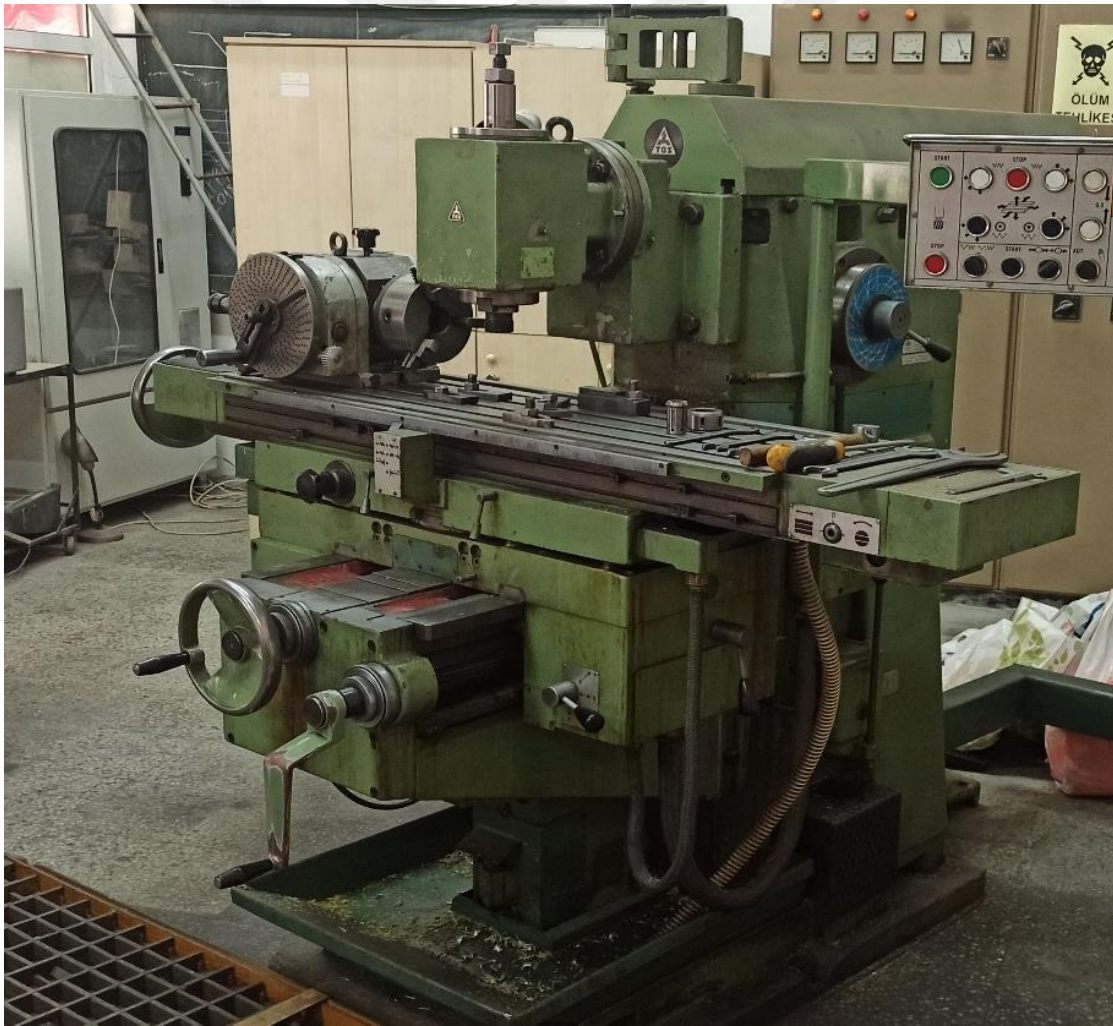


Resim 5.2. AISI H13 HSS malzemeden imal edilen karıştırıcı takım

Karıştırıcı takım aşınması her ne kadar değişime ihtiyaç duymadan 45 plakayı birleştirecek kadar az olsa da deneylerin güvenilirliğini artırabilmek için her 20 plakada bir karıştırıcı takım değiştirilerek yeni karıştırıcı takım kullanılmaya başlanmıştır.

5.3. Kullanılan Cihaz ve Deney Düzeneği

Sürtünme karıştırma kaynak işlemleri Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bünyesinde bulunan Takım Tezgâhları laboratuvarındaki 31,5–1400 dev/dak dönme devir aralığına, 14–900 mm/dak ilerleme hız aralığına ve 0-90° açı aralığına sahip olan TOS marka dik başlı universal freze tezgâhında yapılmıştır. Tezgâh Resim 5.3'te görüldüğü gibi zemine rijit bir şekilde sabitlenmiştir. Yapılan deneylerde birleştirilen numunelere soğuma hızını artıracak ya da azaltacak ekstra bir işlem uygulanmayarak havada soğumaya bırakılmıştır.

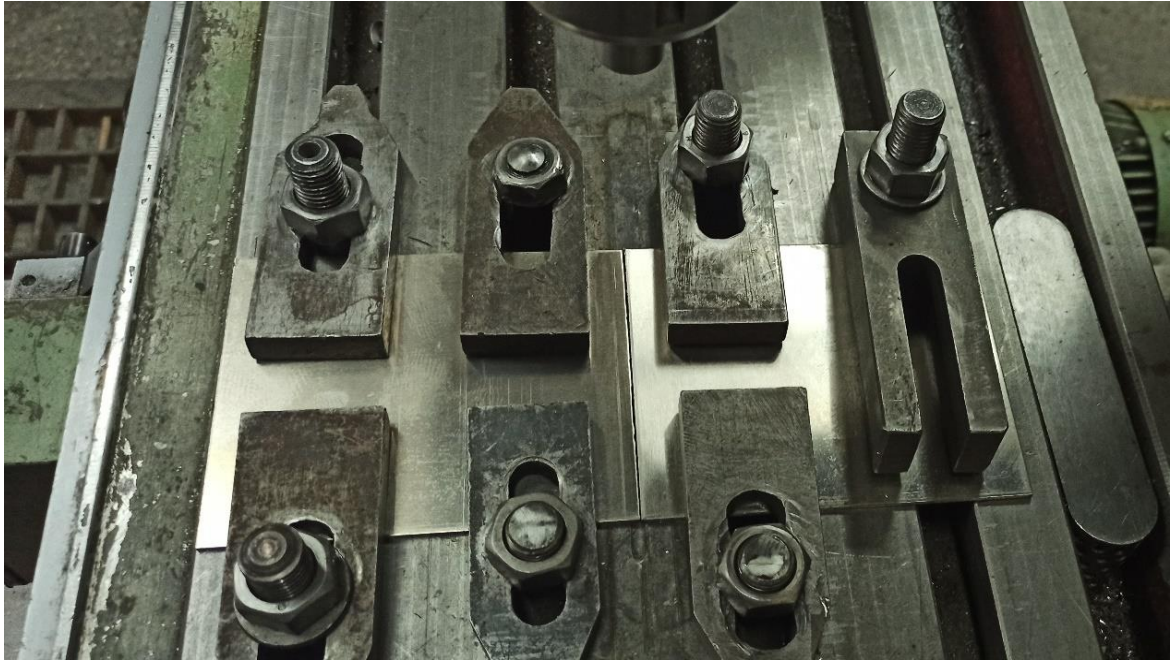


Resim 5.3. Deneylerde kullanılan dik başlı universal freze tezgâhı

Plakaların tezgâh tablasına sabitlenmesinde 6 adet düz pabuç ve 1 adet destek delikli çatal pabuç Resim 5.4’te görüldüğü gibi kullanılmıştır. Plakalar tablaya yerleştirilmeden önce olası talaş ve yağları temizlemek amacıyla tezgâh tablası üstüğü ile silinmiştir. Plakaların birbirleriyle temas edecek yüzeyleri gözle tekrar kontrol edilmiş ve kesimden kaynaklı oluşmuş çapaklar eğre ve zımpara kullanılarak temizlenmiştir.

Birleştirilme işlemine başlanılmadan hemen önce karıştırıcı takım ucunun, plakaların birleştirilme eksen çizgisi boyunca -x ve -y eksenlerine göre konumu tezgâha manuel ilerleme verilerek kontrol edilmiş ve üç ekseninde de sıfırlanmıştır. Çalışmalar esnasında tezgâh tablasındaki ısınmanın kaynak kalitesine olan etkisini ortadan kaldırabilmek amacıyla her birleştirilme işleminden sonra 5 dakika beklenilerek tezgâh tablası oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.

Bununla birlikte deneysel çalışmalar esnasında çeşitli işlem parametrelerinde takıma malzeme sıvanması olduğu görülmüş, bu durumlarda da işlem bittikten sonra takım oda sıcaklığında soğumaya bırakıldıktan sonra sıvanan malzemeler takım yüzeyinden temizlenmiştir.



Resim 5.4. Plakaların tezgâh tablasına bağlanması

5.4. Deney Tasarımı ve İşlem Parametreleri

AA6061-T6 ve AA7075-T6 alüminyum alaşımlı plakaların kendi aralarında ve birbirleriyle sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmesinde deney parametrelerinin etkilerinin incelendiği bu çalışmada, değişken olarak seçilen kontrol faktörlerinin etki seviyeleri 3 farklı kombinasyon için kıyaslanmıştır. Bu kombinasyonlar AA6061-AA6061, AA7075-AA7075 ve AA6061-AA7075 şeklindedir.

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak kalitesini etkileyen pek çok faktör bulunmasına rağmen yapılan literatür çalışmalarında bu faktörlerden kaynak kalitesini en çok etkileyenlerin takım geometrisiyle birlikte, takım dönme devri, takım ilerleme hızı ve takım eğim açısı olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada bahsedilen 4 faktörden takım geometrisi sabit tutulmuş ve diğer 3 kontrol faktörünün etkileri incelenmiştir. İncelenen her bir kontrol faktörü için 3 farklı seviye belirlenmiş ve bu seviyeler Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Performans karakteristiğini en çok etkileyen faktörler ve seviyeleri

Kod	Kontrol Faktörleri	Sembol	Birim	1.Seviye (-1)	2.Seviye (0)	3.Seviye (1)
A	Takım Dönme Devri	TDD	(dev/dak)	500	710	1000
B	Takım İlerleme Hızı	TİH	(mm/dak)	20	28	40
C	Takım Eğim Açısı	TEA	(°)	0	0,5	1

Deneylerde sabit tutulan çeşitli faktörler ve seviyeleri Çizelge 5.4'te görüldüğü gibidir. Yapılan deneme çalışmalarında dalma derinliği 0,1 mm'den fazla olduğunda çapak oluşumunun arttığı, buna bağlı olarak da kaynak bölgesinin incelendiği, daha az olduğunda ise plaka altlarında eksik birleşme olduğu gözlemlenmiştir.

İlk dalmadaki bekleme süresi ise yapılan literatür taramaları neticesinde belirlenmiştir. Dalma-çıkma hızı, tezgâhın en düşük otomatik ilerleme hızı olan 14 mm/dak olarak belirlenmiştir. Takıma bağlı değişkenler ise Çizelge 5.4'te görülen değerlerde sabit tutulmuştur.

Çizelge 5.4. Sabit faktörler ve seviye değerleri

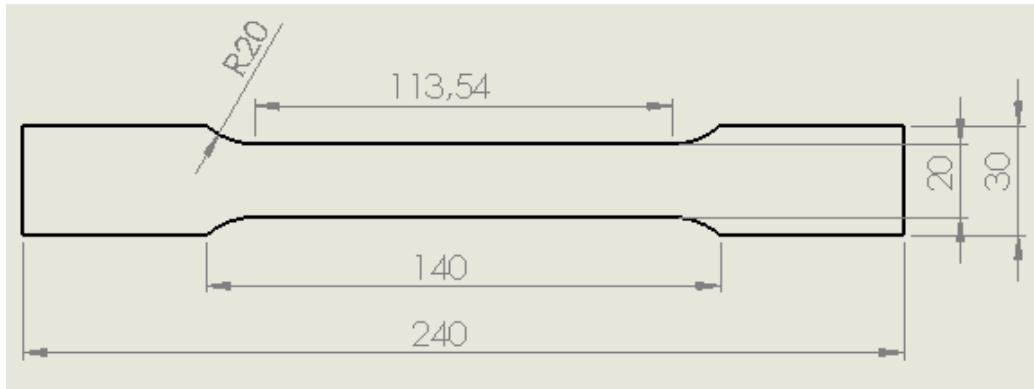
Faktör	Birim	Seviye
Dalma derinliği	mm	0,1
İlk dalmada bekleme süresi	sn	30
Dalma-Çıkma hızı	mm/dak	14
Takım geometrisi	-	Düz silindir
Takım omuz çapı	mm	18
Pim çapı	mm	4
Pim uzunluğu	mm	1,7
Takım malzemesi	-	AISI H13 HSS (1.2344)

Deney planı Yanıt Yüzeyi deney tasarım yöntemindeki Box-Behnken tasarımı seçilerek Minitab programında oluşturulmuştur. 3 faktörlü, 3 tekrarlı ve 9 merkez noktalı deney planı her bir malzeme kombinasyonu için 45 adet olmak üzere toplam 135 adet deneyi içerecek şekilde hazırlanmıştır.

5.5. Tahribatlı ve Tahribatsız Muayene Yöntemleri

5.5.1. Çekme testi

Plakalar birleştirildikten sonra çekme test numunelerinin elde edilmesi amacıyla plaka çiftleri su jeti ile kesilmiştir. Çekme test numuneleri TS EN ISO 6892-1 standartlarına uygun olarak Şekil 5.1’de görülen ölçülerde kesildikten sonra çekme deneylerine geçilmeden önce kaynak bölgelerindeki çapak oluşumları numunelere zarar verilmeden temizlenmiştir.



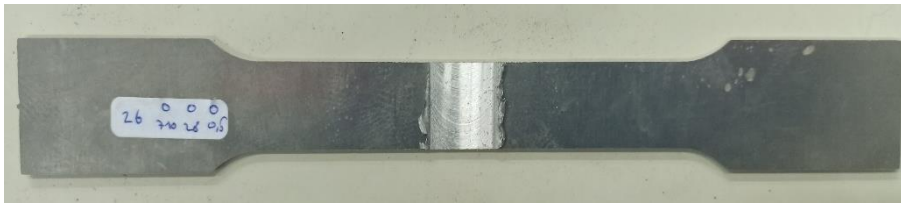
Şekil 5.1. Çekme test numuneleri ölçüleri

Çekme testleri Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne ait Mekanik-Mukavemet Laboratuvarında bulunan, Resim 5.5'te görülen Dartec marka çekme test cihazında TS EN ISO 6892-1 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.5. Dartec çekme test cihazı

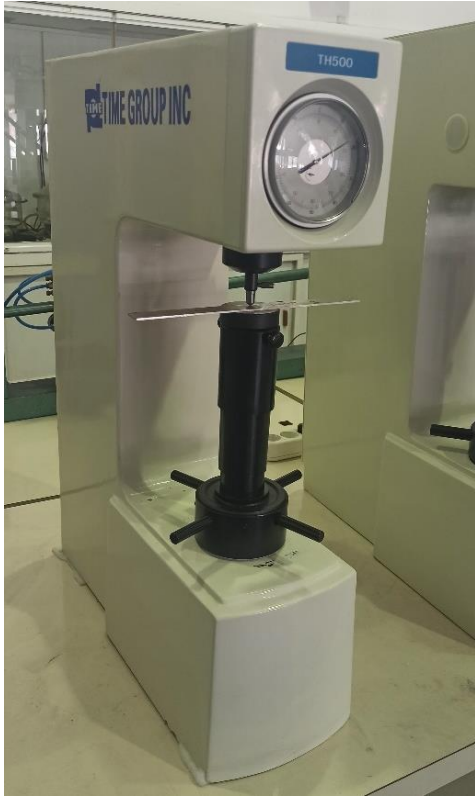
Numune sayısının fazla olmasından dolayı oluşabilecek karışmaları engellemek amacıyla çekme testine hazırlanan her numuneye Resim 5.6'da görüldüğü gibi üzerinde deney numarasının ve deney parametrelerinin yazılı olduğu kağıtlar yapıştırılmıştır. Plaka kombinasyonları arasında ayırım yapabilmek için AA7075-T6 plaka çiftlerine ait numunelere mavi renkli kalemle, AA6061-T6 plaka çiftlerine ait numunelere kırmızı renkli kalemle, AA6061-T6 – AA7075-T6 plaka çiftlerine ait numunelere ise hem kırmızı renkli kalemle hem de mavi renkli kalemle kodlama işlemi yapılmıştır.



Resim 5.6. Çekme testine hazırlanmış AA7075-T6 plaka çiftine ait 26. numune

5.5.2. Sertlik ölçümü

Kaynak bölgesinin sertlik ölçümleri Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bünyesinde bulunan Resim 5.7’de görülen TIME TH-500 Analog Manuel Sertlik Ölçüm Cihazı kullanılarak yapılmıştır. Rockwell (HRA) sertlik ölçümleri 98,1 N ön yükleme ve 588,4 N esas yükleme altında, elmas sivri uç ile 15 saniye yükleme süresi kullanılarak ölçülmüştür.



Resim 5.7. TIME TH-500 analog manuel sertlik ölçüm cihazı

Sertlik ölçüm değerleri birleştirme yüzeyi sıfır noktası kabul edilerek 5 mm aralıklarla 20 mm ilerleme tarafına ve 20 mm geri çekme tarafına olmak üzere her plaka çifti için toplam 9 yerden alınmıştır. Bu değerlerin her biri birleştirme yüzeyine olan en kısa mesafesi değiştirilmeden 3 defa ölçülüp aritmetik ortalamaları alınarak elde edilmiştir.

Ana malzemelerin çeşitli noktalarından alınan sertlik ölçüm değerleri ise malzemelerin temin edildiği firmanın verdiği değerlere uygun olarak AA6061-T6 için 32 HRA, AA7075-T6 için ise 54 HRA olarak ölçülmüştür.

5.5.3. Optik inceleme için numune hazırlığı

Birleştirilen numunelerin optik mikroskop ile incelenebilmeleri için Resim 5.8.a'da görülen ATM Brillant 250 abrasif kesme cihazı kullanılarak numunelerin kaynak yüzeylerinden 40 mm × 6 mm, kaynak kesitlerinden ise 40 mm × 2 mm ölçülerinde parçalar alınmıştır. Alınan bu parçalar Resim 5.8.b'de görülen ATM Opal 460 otomatik sıcak bakalite alma cihazı kullanılarak sıcak bakalite alınmıştır.

Numuneler sıcak bakalite alındıktan sonra Resim 5.8.c'de görülen ATM Saphir 330 çift diskli manyetik zımparalama cihazı kullanılarak, SiC zımparalar ile zımparalanmıştır. Zımparalanma işlemleri tamamlanan numuneler Resim 5.8.d'de görülen ATM Saphir 250 otomatik parlatma cihazında 6 µm, 3 µm ve 1 µm'lik keçeler kullanılarak parlatılmış ve optik inceleme için numune hazırlama süreci tamamlanmıştır.

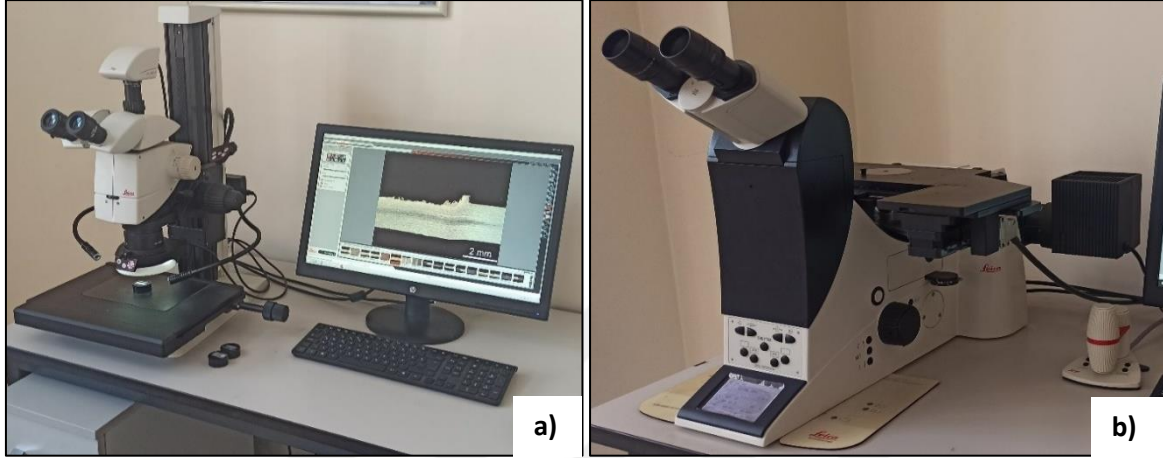


Resim 5.8. Optik inceleme numunesi hazırlama sürecinde kullanılan cihazlar

a) Abrasif kesme cihazı, b) Sıcak bakalite alma cihazı, c) Manyetik zımparalama cihazı, d) Otomatik parlatma cihazı

5.5.4. Optik mikroskop ile inceleme

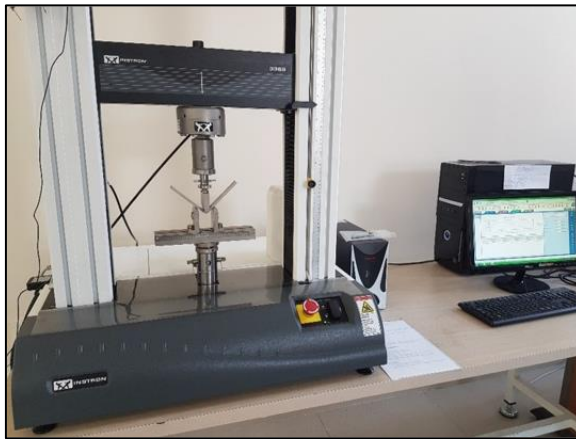
Kaynaklı numunelerin kaynak bölgelerinin makro görüntüleri Resim 5.9.a'da görülen Leica DMC 2900 metal mikroskobu kullanılarak, mikroyapı görüntüleri ve çeşitli içyapı kusurları ise Leica DM 4000M metal mikroskobu kullanılarak incelenmiştir (Resim 5.9.b).



Resim 5.9. Makro ve mikroyapı analizlerinde kullanılan optik mikroskoplar a) Leica DMC 2900, b) Leica DM 4000M

5.5.5. Eğme testi

Eğme testleri 180° kök eğme olarak, TS EN ISO 5173 standartlarında, 5 mm/dak hızda, 50 kN yükleme kapasitesine sahip olan INSTRON 3369 test cihazında gerçekleştirilmiştir (Resim 5.10). Deney numunesi ölçüleri ise 200 mm × 20 mm × 2 mm olarak belirlenmiştir.

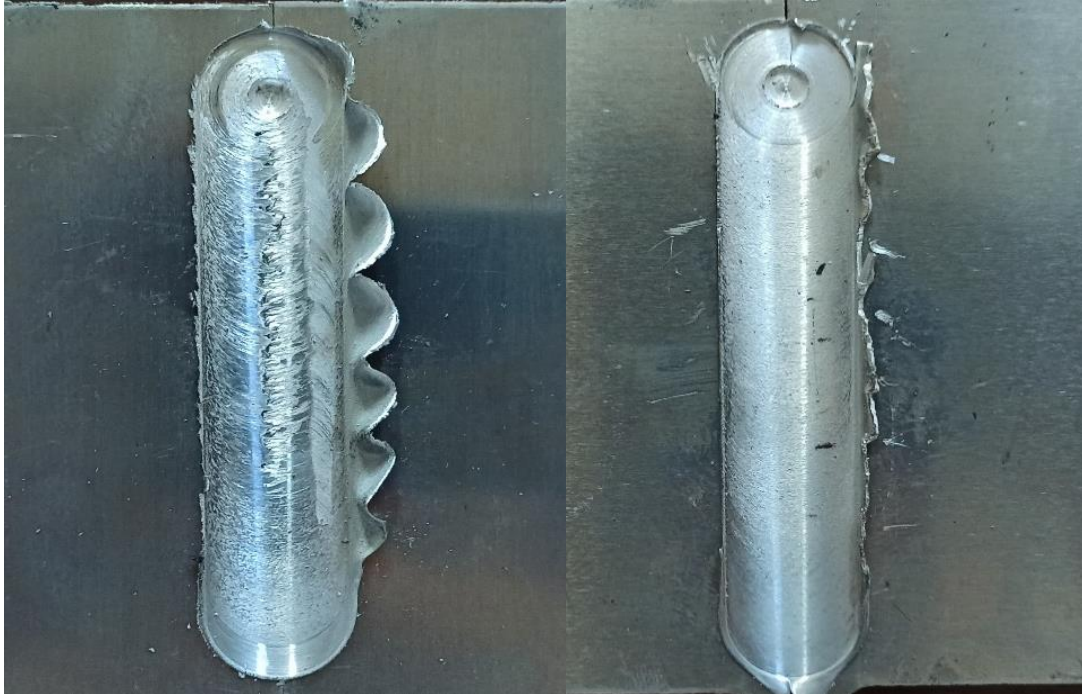


Resim 5.10. INSTRON 3369 üniversal test cihazı

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmaların başlangıcı esnasında karşılaşılan en büyük sorunlardan biri titreşim problemi olmuştur. Hazırlık amacıyla yapılan birleştirilmelerde kaynak işlemi esnasında laboratuvarında bulunan giyotin makinası gibi yüksek frekanslı makinaların oluşturduğu titreşimlerden doğrudan etkilendiği görülmüştür. Resim 6.1’de aynı işlem parametrelerinde birleştirilmiş iki farklı numune bulunmaktadır. Her iki numunede de 7075-T6 plakalar kullanılmış ve işlem parametresi olarak, 710 dev/dak dönme devri, 20 mm/dak ilerleme hızı ve 0° takım açısı değerleri denenmiştir.

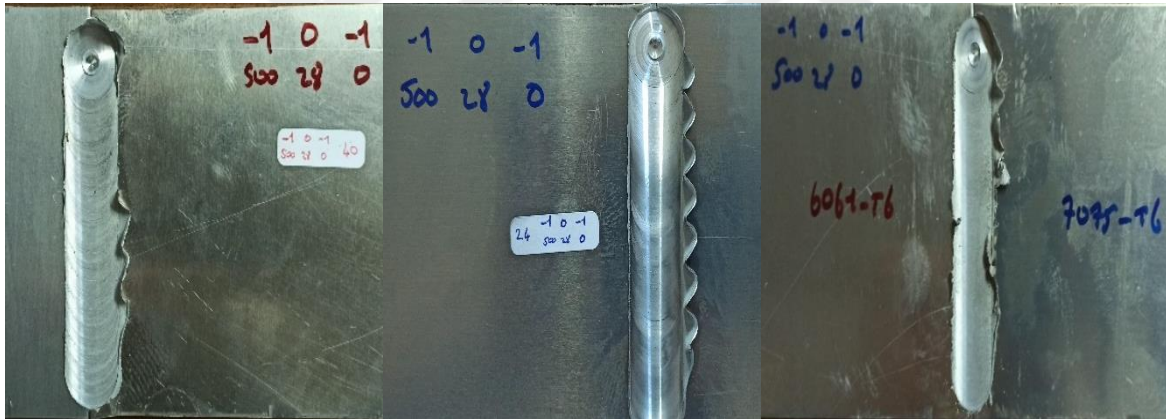
Soldaki numune birleştirilirken giyotin makinası kesmeye hazır halde çalışır durumda tutulmuş, sağdakinde ise tamamen kapatılmıştır. Yine Resim 6.1’de de görüldüğü gibi kontrolsüz titreşimler sürtünme karıştırma kaynağında ciddi problemlere sebep olmakta ve kaynak kalitesini doğrudan etkilemektedir. Kontrolsüz titreşimlerin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için deneylerde yapılan bütün birleştirmeler diğer makinalar kapalı vaziyetteyken yapılmıştır.



Resim 6.1. AA7075-T6 plakalarda kontrolsüz titreşimlerin kaynak kalitesine etkisi (solda) titreşimli, (sağda) titreşimsiz

Deneysel çalışmalarda birleştirilen numunelerin karışmaması için yapılan kodlamada birleştirilen her bir plaka çifti üzerine birleştirme esnasında kullanılan işlem parametreleri kullanılmıştır. İki aşamalı kontrol yapılabilmesi için kodlama esnasında üst satıra faktör seviyelerine ait kodlar, alt satıra ise bu kodlara ait seviyeler yazılmıştır. Bu seviyeler soldan sağa doğru; takım dönme devri, takım ilerleme hızı ve takım açısı şeklinde sıralanmıştır.

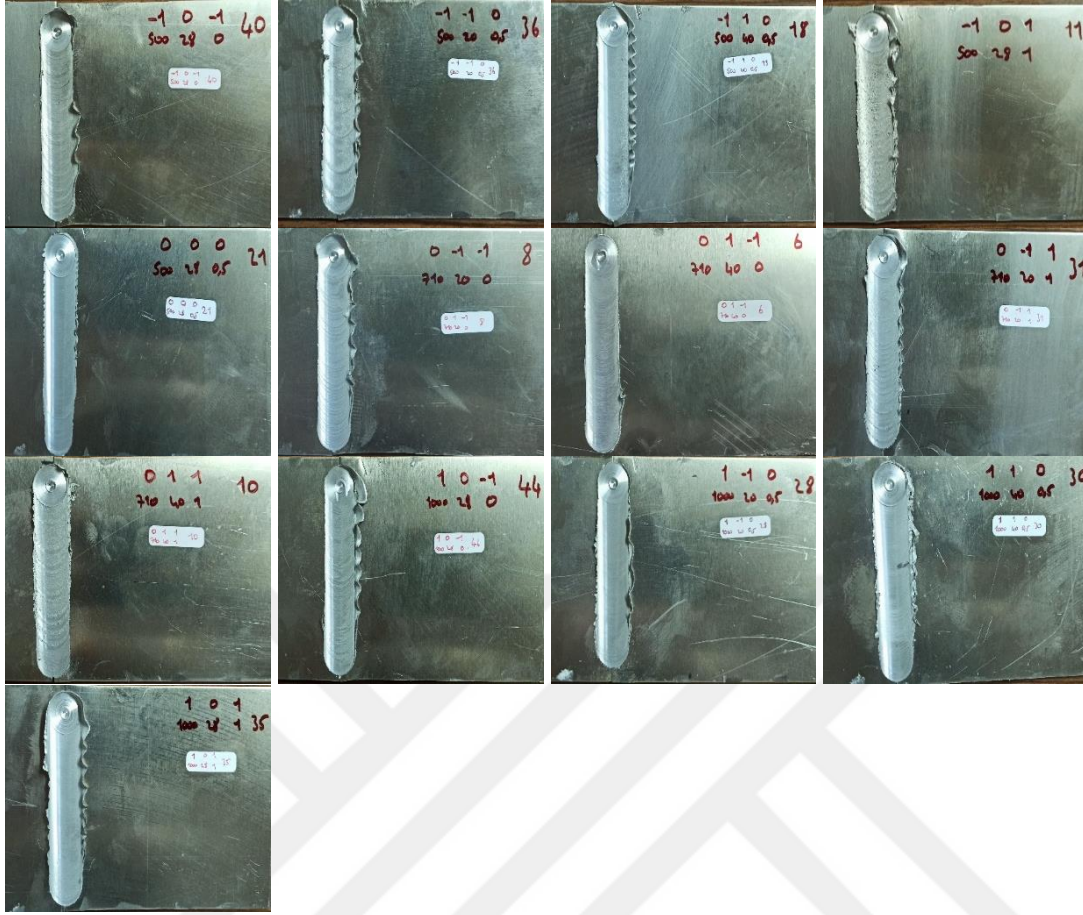
AA6061-T6 plakalar ile AA7075-T6 plakaların karışmaması için ise iki farklı renklendirme işlemi tercih edilmiştir. Bu amaçla AA6061-T6 plaka çiftlerinin seviye ve kodları yazılırken sağa yazılmış kırmızı renk tercih edilirken, AA7075-T6 plaka çiftlerinin seviye ve kodları yazılırken sola yazılmış mavi renk kullanılmıştır. AA6061-T6 – AA7075-T6 plaka çiftlerinin seviye ve kodları yazılırken ise her plakaya kendisine seçilen renkle ismi yazılmıştır. Bu kodlamalara ait örnekler Resim 6.2’de görülmektedir.



Resim 6.2. Kodlama farklılıklarını gösteren örnekler

6.1. AA6061-T6 Plakaların Birleştirilmesi

AA6061-T6 plakaların birleştirilmesine öncelikle işlem parametresinde takım açısı 0° olan deneylerle başlanmıştır. 45 çift plakanın sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirildiği bu bölümde toplam iki adet takım kullanılmıştır. Resim 6.3’te çeşitli işlem parametrelerinde birleştirilmiş AA6061-T6 plaka çiftlerinin birer adet örneği görülmektedir.

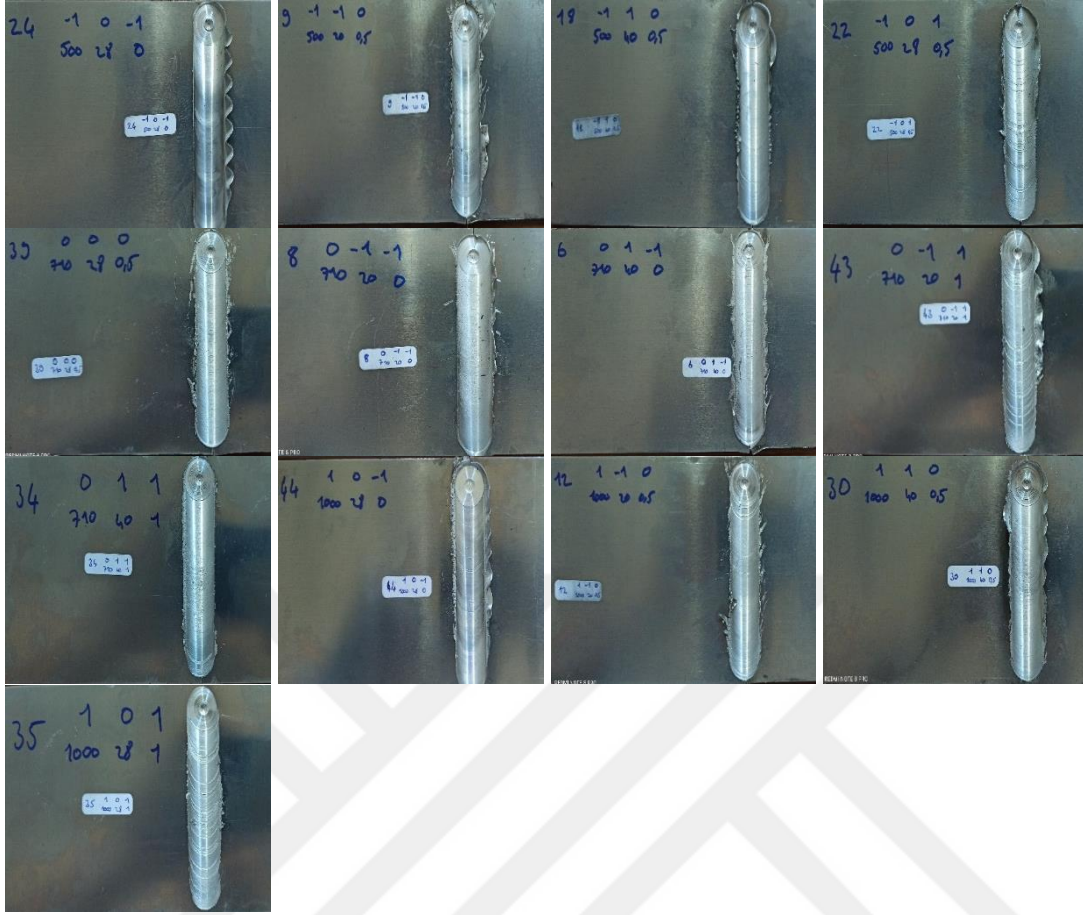


Resim 6.3. AA6061-T6 malzeme kullanılarak birleştirilmiş çeşitli plaka çiftleri

AA6061-T6 plakaların birleştirilmesi işlemi süresince takım aşınmasının kontrolü için her birleştirilme işleminden sonra pim çapı, pim uzunluğu ve omuz sıvanması olup olmadığı gözle ve kumpas yardımıyla kontrol edilmiştir. Bununla birlikte işlem parametrelerine bağlı olarak bazı numunelerde çarpılma, yetersiz ısı girişine bağlı eksik birleşme gibi kusurlarla da karşılaşmıştır.

6.2. AA7075-T6 Plakaların Birleştirilmesi

AA7075-T6 plaka çiftlerinin birleştirilmesinde AA6061-T6 plaka çiftlerinden daha kaliteli kaynak yüzeyleri elde edilmiştir. Daha düşük ergime noktası sıcaklığına sahip olmasından dolayı aynı işlem parametrelerinde AA6061-T6 plaka çiftlerine göre çapak oluşumunun arttığı gözlemlenmiştir. Resim 6.4'te çeşitli işlem parametrelerinde birleştirilmiş AA7075-T6 plaka çiftlerinin birer adet örneği görülmektedir.



Resim 6.4. AA7075-T6 malzeme kullanılarak birleştirilmiş çeşitli plaka çiftleri

AA7075-T6 plaka çiftlerde aynı işlem parametrelerinde AA6061-T6 plaka çiftlerine göre daha çok çapak oluşsa da yüzey olarak daha pürüzsüz ve parlak yapılar elde edilmiştir. Çeşitli işlem parametrelerinde takıma sıvanma olsa da karıştırıcı takım ve takım yüzeyine sıvanan malzeme soğuduktan sonra takımdan kolaylıkla temizlenmiştir.

6.3. AA6061-T6 - AA7075-T6 Plakaların Birleştirilmesi

AA6061-AA7075 plaka çiftlerinin birleştirilmesinde diğer diğer iki kombinasyondaki birleştirmelerden çok daha zor olmuştur. Farklı ergime noktası sıcaklıklarına sahip olmalarından dolayı ilk hareketten önceki bekleme anında AA7075-T6 malzeme ergimeye başladığı ilk anda AA6061-T6 malzeme hala katı halini koruduğu için freze tezgâhında ve karıştırıcı takımda hissedilebilir titreşimler oluşmuştur.

Plakalar tezgâh tablasına Resim 6.5'te görüldüğü gibi yerleştirildikten sonra her plakaya hangi malzeme olduğu yazılmış ve yerleştirme işlemi hep aynı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Resim 6.5. AA6061-AA7075 plaka çiftlerinin tezgâh tablasına yerleştirilmesi

AA6061-AA7075 plaka çiftlerinin birleştirilmesi esnasında oluşan titreşimler etkilerini kaynak yüzeyleriyle birlikte takımda da göstermişlerdir. AA6061-AA6061 ve AA7075-AA7075 plaka çiftlerinde ikişer adet takım kullanılmışken AA6061-AA7075 plaka çiftlerinin birleştirilebilmesi için toplam 3 adet takım kullanılmıştır.

Takımlardaki aşınma en çok pim uzunluğunda meydana gelmiştir. Yapılan ölçümlerde titreşimlerin hissedilir derecede çok olduğu plaka çiftlerinde takım pim ucunun 0,2 mm'ye kadar kısaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte takım aşınmasının yanında çeşitli birleştirme işlemlerinde omuz kısmında sıvanma olmazken pim çevresinde olduğu görülmüştür. Aşınan takımlardan birinin son hali Resim 6.6'da görülmektedir.



Resim 6.6. AA6061-AA7075 plaka çiftlerinin birleştirilmesi esnasında aşınan bir takım

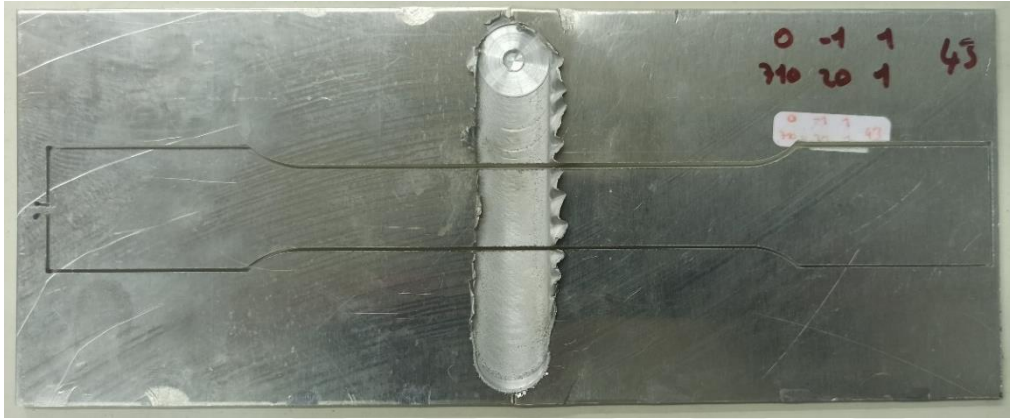
Yapılan birleştirmelerde diğer kombinasyonlardan farklı olarak çeşitli plaka çiftlerinde plaka başlangıç kenarında tek taraflı form bozulmaları meydana gelmiştir. AA6061-T6 ve AA7075-T6 plaka çiftlerinde form bozulmaları meydana geldiğinde birleştirilen her iki plakada da görülürken, AA6061-AA7075 plaka çiftlerinde, AA6061-T6 plakada form bozulması yokken, AA7075-T6 plakada form bozulmalarının oluşabildiği görülmüştür. Resim 6.7'de çeşitli işlem parametrelerinde birleştirilmiş AA7075-T6 plaka çiftlerinin birer adet örneği görülmektedir.



Resim 6.7. AA6061-AA7075 plakalar kullanılarak birleştirilmiş yeni plakalar

6.4. Parametre Optimizasyon İşlemleri

Çekme test numunelerinin karışmaması için plakaların kesilmesi işleminde Resim 6.8’de de görüldüğü gibi kesilmemiş küçük bölgeler bırakılmıştır. Birleşme bölgelerinin incelenebilmesi için plakalardaki çapak temizleme işlemi numuneler plakadan çıkarıldıktan sonra gerçekleştirilmiştir.



Resim 6.8. Su jeti ile kesilmiş plaka çifti

Plakalar kesildikten sonra kaynak bölgelerindeki çapaklar taşlanarak temizlenmiş ve kaynak bölgesinde gözle görülebilen bir kusur olup olmadığı kontrol edilmiştir. Resim 6.9’da görüldüğü gibi bazı numunelerde büyük tünel oluşumları meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu numunelerin çekme dayanımı değerleri gerçek değerlerden çok uzak olacağı ve işlem parametrelerinin etkilerinin anlaşılmasını zorlaştıracığı için Çizelge 6.1’de görülen deney sonuçları bölümüne eklenmemiş ilgili plakalardan yeni numuneler alınmıştır.



Resim 6.9. Kapalı tünel oluşumuna sahip kaynak kesiti

Çizelge 6.1. Plaka çiftlerine ait çekme deneyi sonuçları

Takım Dönme Devri	Takım İlerleme Hızı	Takım Eğim Açısı	Deney No	$\sigma_{max}(6061 - T6$ $- 7075 - T6)$	$\sigma_{max}(6061$ $- T6)$	$\sigma_{max}(7075$ $- T6)$
0	0	0	1	162,8	170,21	163,14
1	1	0	2	184,86	157,46	226,95
0	0	0	3	178,23	172,1	194
1	1	0	4	135,72	163,49	187,8
0	1	-1	5	166,25	129,17	152,46
0	1	-1	6	167,1	131,07	157,44
1	0	1	7	159,87	150,42	241,61
0	-1	-1	8	179	125,3	232,15
-1	-1	0	9	164,87	167,97	218,32
0	1	1	10	186,6	185,73	235,4
-1	0	1	11	174,35	168,3	214,88
1	-1	0	12	167,63	170,72	206,94
0	0	0	13	168,3	154,51	240,17
0	0	0	14	179,7	148,82	250,35
1	-1	0	15	159,35	157,44	238,5
0	-1	-1	16	170,37	134,34	130,38
-1	0	1	17	177,87	181,59	232,29
-1	1	0	18	171,41	179	208,49
1	0	-1	19	179,52	133,83	124,33
0	0	0	20	148,82	168,82	210,12
0	0	0	21	153,13	125,39	178,49
-1	0	1	22	184	183,84	215,73
0	1	-1	23	146,74	144,18	163,67
-1	0	-1	24	175	156,41	165,9
1	0	1	25	180,21	180,39	236,29
0	0	0	26	170,72	151,57	198,66
-1	0	-1	27	171,59	133,65	280,07
1	-1	0	28	176,6	141,92	212,63
-1	1	0	29	180	133,13	249,89
1	1	0	30	176,58	168,54	203,31
0	-1	1	31	173,82	177,62	157,97
0	1	1	32	177,8	161,93	176,78
-1	-1	0	33	173,15	156,57	153,65
0	1	1	34	188,84	160,04	230,1
1	0	1	35	184,48	167,1	170,91
-1	-1	0	36	147,43	143,66	230,91
1	0	-1	37	170,55	130,02	162,45
-1	1	0	38	154,17	150,74	184,53
0	0	0	39	185,73	160,7	219,18
-1	0	-1	40	173,66	160,04	190,67
0	-1	1	41	163,65	114	210,54
0	-1	-1	42	183,66	140,21	208,04
0	-1	1	43	168,48	173,48	199,45
1	0	-1	44	166,24	148,31	157,8
0	0	0	45	158,5	126,41	210,54

Deney sonuçlarının 3 faktör ve 3 seviyeli analizinden elde edilen denklemlerde yeterli sonuçlar alınamadığı için yeni bir cevap yüzey tasarım modeli kurulmuştur. Bu modele malzemenin çekme dayanımı da 3 seviyeli olarak eklenilmiştir. Yeni modelde tekrar sayısı 3'ten 1'e indirilmiştir ancak zaten aynı olan parametreler 3 kez tekrarlanmış olduğu için bu değerlerin aritmetik ortalamaları esas alınmıştır.

Çizelge 6.2'de de görüldüğü gibi malzeme çekme dayanımının da dikkate alındığı yeni tasarımda deney sonucu olarak her biri 3 defa tekrarlanmış olan deneylerin aritmetik ortalamaları kullanılmıştır. Malzeme çekme dayanımı değerleri olarak ise AA6061-T6 – AA6061-T6 kombinasyonu için 310 MPa, AA7075-T6 – AA7075-T6 kombinasyonu için 560 MPa ve AA6061-T6 - AA7075-T6 kombinasyonu için ise her iki malzemenin çekme dayanımlarının aritmetik ortalaması olan 435 MPa değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 6.2. 4 faktörlü deney tasarım modeli ve çekme dayanımı değerleri

Takım Dönme Devri	Takım İlerleme Hızı	Takım Eğim Açısı	Malzeme Çekme Dayanımı	Numune Çekme Dayanımı			Ortalama Çekme Dayanımı
				1. Deney	2. Deney	3. Deney	
500	20	0,5	310	167,97	156,57	143,66	156,06
1000	20	0,5	310	145,657	157,44	141,92	148,33
500	40	0,5	310	179	133,13	150,74	154,29
1000	40	0,5	310	157,46	163,49	168,54	163,16
500	28	0	310	156,41	133,65	160,04	150,03
1000	28	0	310	167,83	156,02	148,31	157,38
500	28	1	310	168,3	181,59	183,84	177,91
1000	28	1	310	150,42	180,39	167,1	165,97
710	20	0	310	125,3	134,34	140,21	133,28
710	40	0	310	131,07	129,17	144,18	134,80
710	20	1	310	167,62	114	168,48	150,03
710	40	1	310	185,73	161,93	160,04	169,23
710	28	0,5	310	170,21	148,82	126,41	148,48
710	28	0,5	310	172,1	168,82	151,57	164,16
710	28	0,5	310	154,51	125,39	160,7	146,86
500	20	0,5	435	164,87	173,15	147,43	161,81
1000	20	0,5	435	167,63	159,35	176,6	167,86
500	40	0,5	435	171,41	180	154,17	168,52
1000	40	0,5	435	194,86	155,72	176,58	175,72
500	28	0	435	175	171,59	173,66	173,41
1000	28	0	435	186,52	177,55	173,24	179,10
500	28	1	435	174,35	177,87	184	178,74

Çizelge 6.2. (devam) 4 faktörlü deney tasarım modeli ve çekme dayanımı değerleri

1000	28	1	435	179,87	190,21	184,48	184,85
710	20	0	435	179	170,37	183,66	177,67
710	40	0	435	167,1	166,25	146,74	160,03
710	20	1	435	173,82	163,65	168,48	168,65
710	40	1	435	186,6	177,8	188,84	184,41
710	28	0,5	435	162,8	179,7	158,5	167
710	28	0,5	435	178,23	148,82	170,72	165,92
710	28	0,5	435	168,3	153,13	185,73	169,05
500	20	0,5	560	218,32	153,65	230,91	200,96
1000	20	0,5	560	206,94	238,5	212,63	219,35
500	40	0,5	560	208,49	249,89	184,53	214,30
1000	40	0,5	560	226,95	217,8	203,31	216,02
500	28	0	560	180,9	280,07	175,67	212,21
1000	28	0	560	232,33	226,51	227,8	228,88
500	28	1	560	214,88	232,29	215,73	220,96
1000	28	1	560	241,61	236,29	200,91	226,27
710	20	0	560	232,15	130,38	208,04	190,19
710	40	0	560	177,44	172,46	183,67	177,85
710	20	1	560	157,97	210,54	199,45	189,32
710	40	1	560	235,4	176,78	230,1	214,09
710	28	0,5	560	163,14	250,35	210,54	208,01
710	28	0,5	560	209	210,12	213,66	210,92
710	28	0,5	560	240,17	178,49	219,18	212,61

Model oluşturma işlemi sırasında “Takım Dönme Devri”, “Takım İlerleme Hızı” ve “Takım Eğim Açısı” sürekli faktör olarak belirlenmişken “Malzeme Çekme Dayanımı” değerleri kategorik faktör olarak belirlenmiştir. Yapılan analiz işleminden sonra Çizelge 6.3’te görülen verilerden de anlaşıldığı üzere modelin doğruluk oranı kabul edilebilir seviyededir.

Çizelge 6.3. Cevap yüzeyi regresyon analizinin model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7,05431	%95,41	%92,51	%86,22

Çizelge 6.4’te görülen P değerleri incelendiği zaman kurmuş olduğumuz denklemlerdeki bağımsız değişkenlerin hata oranlarının kabul edilebilir seviyede olduğu buna bağlı olarak da kurulan denklemlerin istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Çizelge 6.4. Malzeme çekme dayanımı için öngörülen faktörler

Terim	Katsayı	SE	T	P	VIF
Sabit	178,11	2,46	72,34	0,000	
Takım Dönme Devri	2,67	1,45	1,84	0,077	1,03
Takım İlerleme Hızı	2,88	1,45	1,99	0,057	1,03
Takım Eğim Açısı	7,02	1,46	4,80	0,000	1,03
Malzeme Çekme Dayanımı					
310	-24,20	1,51	-16,06	0,000	1,37
435	-6,66	1,51	-4,42	0,000	1,37
Takım Dönme Devri*Takım Dönme Devri	9,34	2,19	4,27	0,000	1,02
Takım İlerleme Hızı*Takım İlerleme Hızı	-8,57	2,23	-3,85	0,001	1,03
Takım Eğim Açısı*Takım Eğim Açısı	1,46	2,12	0,69	0,498	1,01
Takım Dönme Devri*Takım İlerleme Hızı	0,17	2,00	0,08	0,933	1,03
Takım Dönme Devri*Takım Eğim Açısı	-2,69	2,02	-1,33	0,196	1,01
Takım Dönme Devri*Malzeme Çekme Dayanımı					
310	-3,07	2,02	-1,52	0,141	1,35
435	-0,02	2,02	-0,01	0,993	1,35
Takım İlerleme Hızı*Takım Eğim Açısı	7,56	2,02	3,75	0,001	1,02
Takım İlerleme Hızı*Malzeme Çekme Dayanımı					
310	1,41	2,02	0,70	0,492	1,35
435	-0,80	2,02	-0,40	0,694	1,35
Takım Eğim Açısı*Malzeme Çekme Dayanımı					
310	4,47	2,04	2,20	0,037	1,33
435	-3,18	2,04	-1,56	0,130	1,33

Her 3 plaka kombinasyonu için ayrı ayrı elde edilen aşağıdaki eşitlikler incelendiğinde bağımsız değişkenlerin kareli değerlerinin ve ikili etkileşimlerinin katsayılarının aynı olduğu ancak lineer kısımdaki katsayıların farklı olduğu görülmektedir. Buradan da bağımsız değişkenlerin etki düzeylerinin malzemeye göre farklılık gösterdiği sonucuna ulaşılmaktadır.

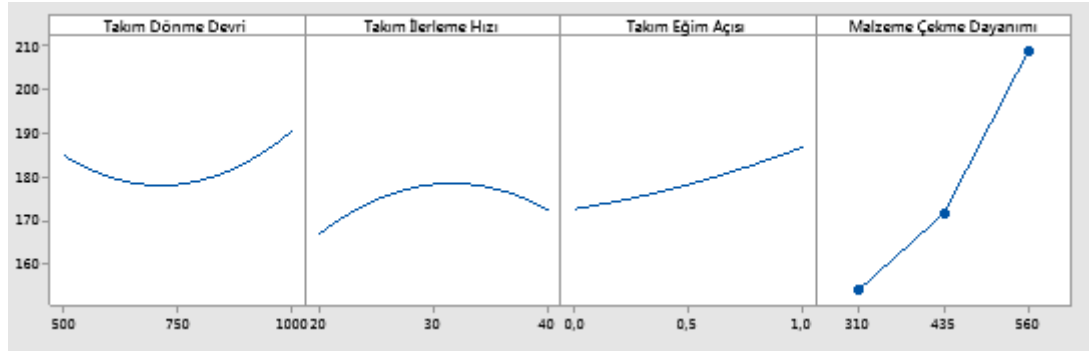
Numune
Numarası

$$\begin{aligned}
 1 \quad \sigma_{max} AA6061 - AA6061 &= 155,2 - 0,2170 x_1 + 4,77 x_2 - 12,1 x_3 + 0,000149 x_1^2 \\
 &- 0,0857 x_2^2 + 5,82 x_3^2 + 0,000068 x_1 * x_2 - 0,0215 x_1 * x_3 \\
 &+ 1,511 x_2 * x_3 \quad (Eş. 5.1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2 \quad \sigma_{max} AA6061 - AA7075 &= 177,9 - 0,2048 x_1 + 4,55 x_2 - 27,4 x_3 + 0,000149 x_1^2 \\
 &- 0,0857 x_2^2 + 5,82 x_3^2 + 0,000068 x_1 * x_2 - 0,0215 x_1 * x_3 \\
 &+ 1,511 x_2 * x_3 \quad (Eş. 5.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3 \quad \sigma_{max} AA7075 - AA7075 &= 203,6 - 0,1923 x_1 + 4,57 x_2 - 23,6 x_3 + 0,000149 x_1^2 \\
 &- 0,0857 x_2^2 + 5,82 x_3^2 + 0,000068 x_1 * x_2 - 0,0215 x_1 * x_3 \\
 &+ 1,511 x_2 * x_3 \quad (Eş. 5.3.)
 \end{aligned}$$

Yukarıda verilen her 3 eşitlikte de denklemlerin daha kolay anlaşılabilmesi için x_1 : Takım Dönme Devri, x_2 : Takım İlerleme Hızı ve x_3 : Takım Eğim Açısı değeri olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.1. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkene ana etki grafikleri

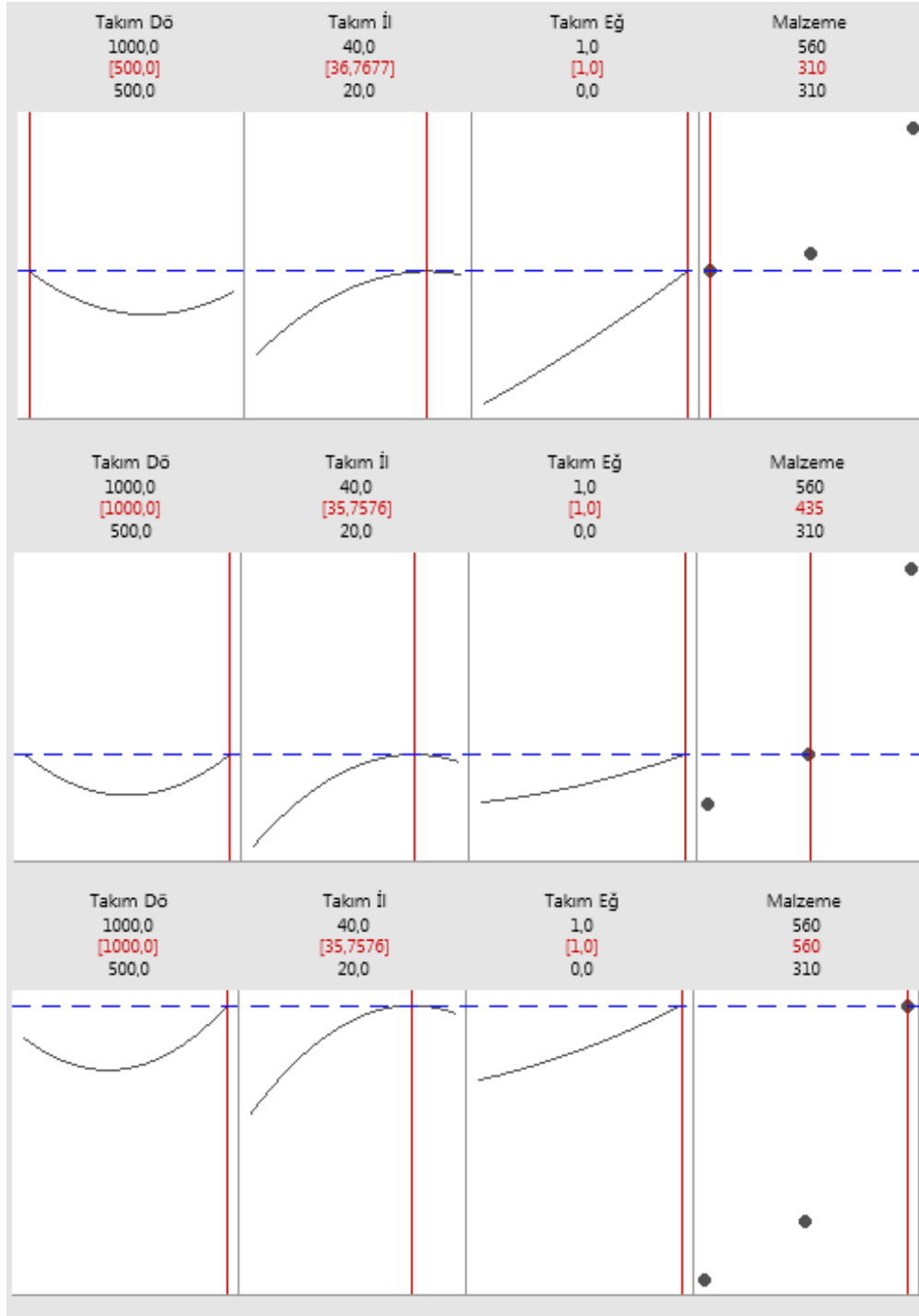
Şekil 6.1’de verilen bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken olan numune çekme dayanımına ana etki grafikleri incelendiği zaman sürtünme karıştırma kaynağında uygun değer aralıklarında olmak şartıyla takım eğim açısı değerinin artmasının malzeme çekme dayanımını sürekli olarak arttırdığı açıkça görülmektedir. Takım dönme devrinin ve takım ilerleme hızının kaynak kalitesine etkileri takım eğim açısından daha karışık olsa da her bir kombinasyona ait sonuç bölümünde detaylı olarak incelenmiştir.

İşlem parametrelerinin optimize edilerek her kombinasyonda maksimum çekme dayanımı değerlerinin elde edilebilmesi için cevap yüzey tasarımında analiz işlemleri tamamlandıktan sonra Minitab19 programında sırasıyla “Stat / DOE / Response Surface / Response Optimizer” sekmeleri kullanılarak her bir kombinasyon için optimizasyon işlemi yapılmıştır. Program çıktısından elde edilen parametre değerleri ve bu değerlere ait maksimum çekme dayanımı hedefleri Çizelge 6.5’te görüldüğü gibidir.

Çizelge 6.5. Bağımsız değişken optimizasyon işlem parametreleri

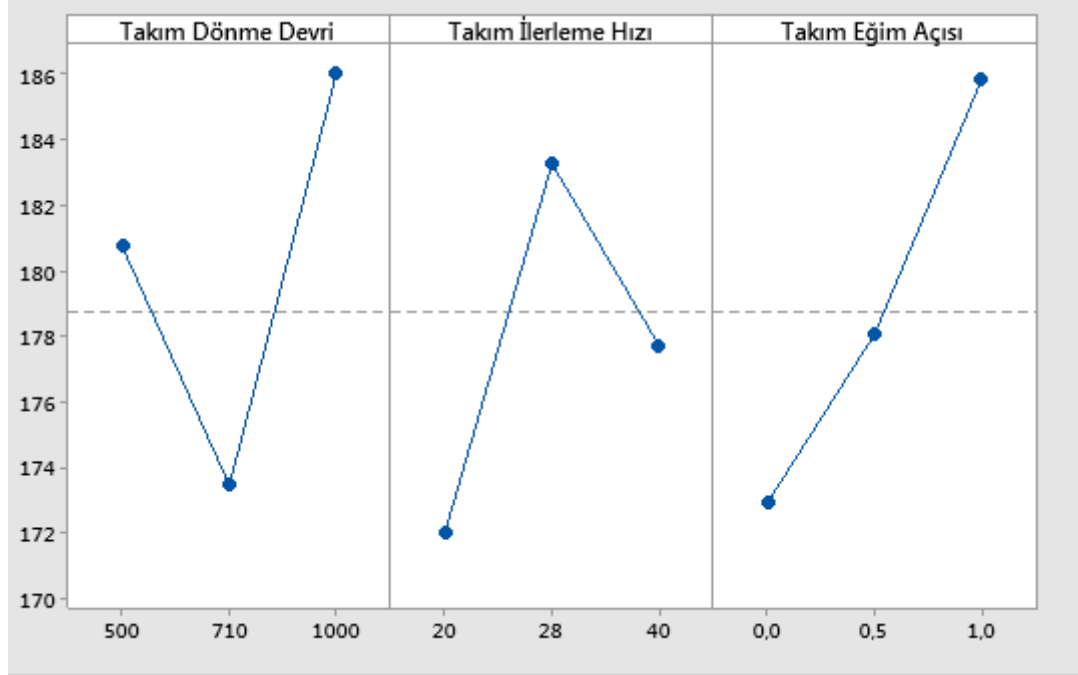
Kombinasyon	Takım Dönme Devri (dev/dak)	Takım İlerleme Hızı (mm/dak)	Takım Eğim Açısı (°)	Maksimum Çekme Dayanımı Hedefi (MPa)
AA6061-AA6061	500	36,7677	1°	183,254
AA6061-AA7075	1000	35,7576	1°	188,853
AA7075-AA7075	1000	35,7576	1°	231,490

Minitab19 programında yapılan optimizasyon işlemlerine ait grafikler Şekil 5.3'te görüldüğü gibidir. Grafiklerden de anlaşıldığı üzere takım ilerleme hızı her üç kombinasyon için de deneylerde kullanılan üst sınır olan 40 mm/dak değerine çok yakın değerler çıkmıştır.



Şekil 6.2. Çekme dayanımı optimizasyon grafikleri

Çizelge 6.5'te de görüldüğü gibi takım eğim açısı deneylerde kullanılan en büyük değer olan 1° 'ye yaklaştıkça malzemelerden elde edilen maksimum çekme dayanımı değeri artmıştır. Bu nedenle optimize edilmiş parametrelerde her 3 kombinasyon için de takım eğim açısı değeri 1° olarak bulunmuştur.



Şekil 6.3. İşlem parametrelerinin çekme dayanımına etkileri

Takım ilerle hızı değerleri ise üst parametre olan 40 mm/dak değerine çok yakın değerler çıkmıştır. Buda takım ilerleme hızının uygun aralıkta arttırıldıkça malzeme çekme dayanımının arttığı sonucunu ortaya çıkartmaktadır (Şekil 6.3).

Takım dönme devrinin etkilerine bakıldığında ise çalışılan parametrelerde parabolik bir etki gösterdiği ve malzeme çekme dayanımına etkilerinin lineer olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sebepten dolayı genel bir yargı çıkartmak zor olsa da bir sonraki bölümde daha detaylı incelenerek çeşitli özellikler üzerindeki gözlemlenen etkileri açıklanmıştır.

7. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA

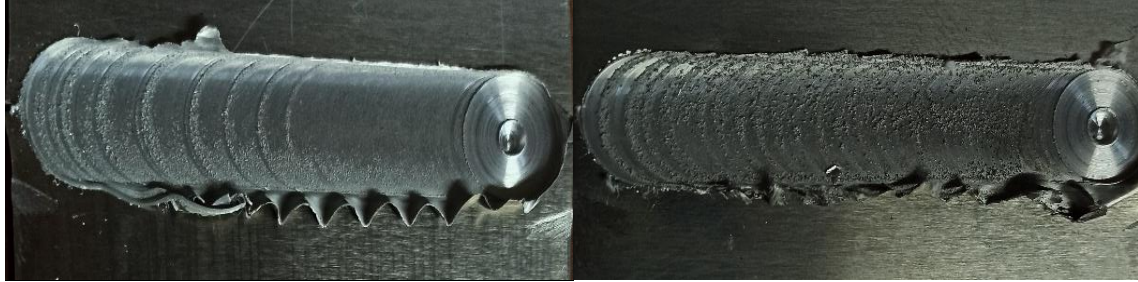
Deneysel bulgular optimizasyon öncesinde birleştirilen 135 plaka çifti için ve optimizasyon sonrasında birleştirilen 9 plaka çifti için ayrı ayrı incelenmiştir. İlk bölümdeki plakalara gözle kontrol ve çekme test işlemleri yapılmıştır. İkinci bölümdeki plakalara ise gözle kontrol, çekme testi, sertlik ölçümü, eğme testi ve optik mikroskop ile makro - micro boyutlarda içyapı incelemeleri yapılmıştır.

7.1. Optimizasyon Öncesi Deneysel Bulgular ve Tartışma

7.1.1. AA6061-T6 plaka çiftlerinin birleştirilmesine ait sonuçlar

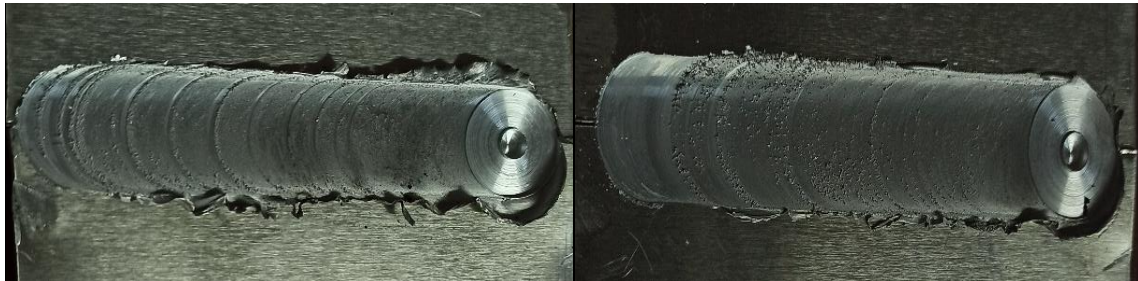
AA6061-T6 plaka çiftlerinin birleştirilmesi işlemi esnasında karşılaşılan çeşitli sonuçlar maddeler halinde şu şekildedir;

1. Takım eğim açısı arttıkça kalitesiz kaynak yüzeyleri oluşmuştur. Bununla birlikte Resim 7.1’de de görüldüğü gibi takım açısı 1° olduğunda kaynak çizgisi üzerinde düzensiz aralıklı dalga formu oluşumu gözlemlenmiştir.



a) 500 dev/dak, 20 mm/dak, 1°

b) 500 dev/dak, 28 mm/dak, 1°

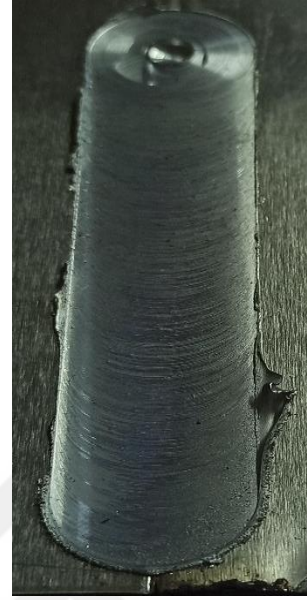
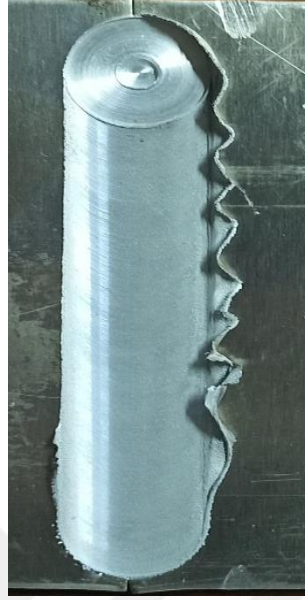
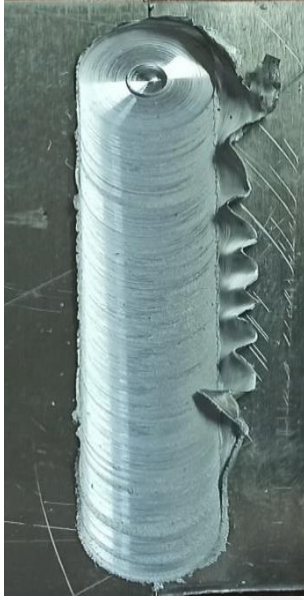


c) 710 dev/dak, 20 mm/dak, 1°

d) 710 dev/dak, 40 mm/dak, 1°

Resim 7.1. AA6061-T6 plakada 1° takım açısında dalga formu oluşumlu yüzeyler

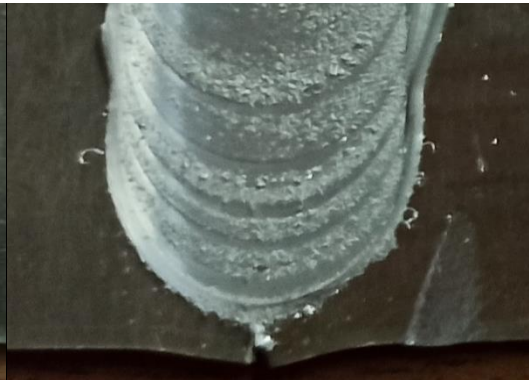
2. Resim 7.2’de de görüldüğü gibi takım dönme devri 710 dev/dak ve daha üstünde olduğunda ilerleme hızı arttıkça malzemede çapak oluşumunun azaldığı görülmüştür.



a) 710 dev/dak, 20 mm/dak, 0° b) 710 dev/dak, 28 mm/dak, 0° c) 710 dev/dak, 40 mm/dak, 0°

Resim 7.2. AA6061-T6 plakada ilerleme hızına bağlı çapak oluşumu

3. Başlangıçtaki daldırma işleminden sonraki bekleme süresinin ve daldırma noktasının plaka kenarlarına olan uzaklığının plaka formunun korunması açısından oldukça önemli olduğu görülmüştür. Çünkü Resim 7.3’te de açıkça görüldüğü gibi 1000 dev/dak takım dönme devrinde başlangıç kenar formu korunurken, 500 dev/dak takım dönme devrinde başlangıç kenarının formunun bozulabildiği gözlemlenmiştir.



a) 1000 dev/dak, 28 mm/dak, 0°
(Omuz çizgisi-Kenar uzaklığı:4 mm)

b) 500 dev/dak, 28 mm/dak, 0°
(Omuz çizgisi-Kenar uzaklığı:2 mm)

Resim 7.3. İlk daldırma noktasının plaka kenarlarına olan uzaklığına bağlı olarak oluşan form bozukluğu

4. Resim 7.4'te de görüldüğü gibi aynı takım eğim açısında, takım dönme devri arttıkça kaynak bölgesindeki malzeme akışının arttığı, artan malzeme akışına bağlı olarak ise kaynak yüzeyindeki dalga oluşumunun azaldığı ve yüzey kalitesinin arttığı gözlemlenmiştir.



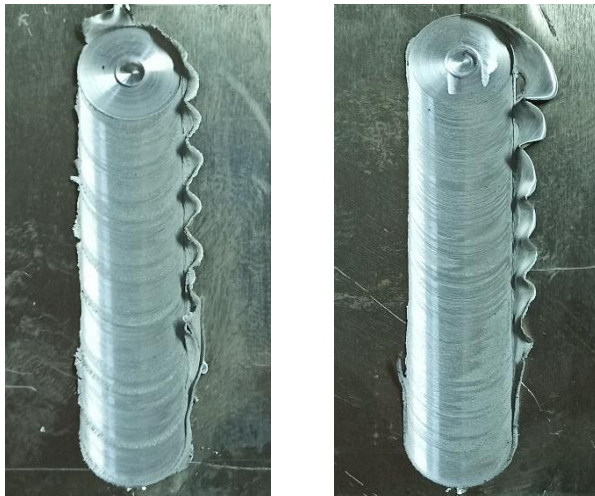
a) 500 dev/dak, 28 mm/dak, 1°

b) 710 dev/dak, 20 mm/dak, 1°

c) 1000 dev/dak, 28 mm/dak, 1°

Resim 7.4. Takım dönme devrine bağlı kaynak yüzeyi kalitesi

5. Resim 7.5.'te de görüldüğü gibi takım ilerleme hızı ve takım eğim açısı değerleri aynı olduğunda takım dönme devri arttıkça kaynak yüzeyinde oluşan çapakların büyüdüğü gözlemlenmiştir.



a) 500 dev/dak, 28 mm/dak, 0°

b) 1000 dev/dak, 28 mm/dak, 0°

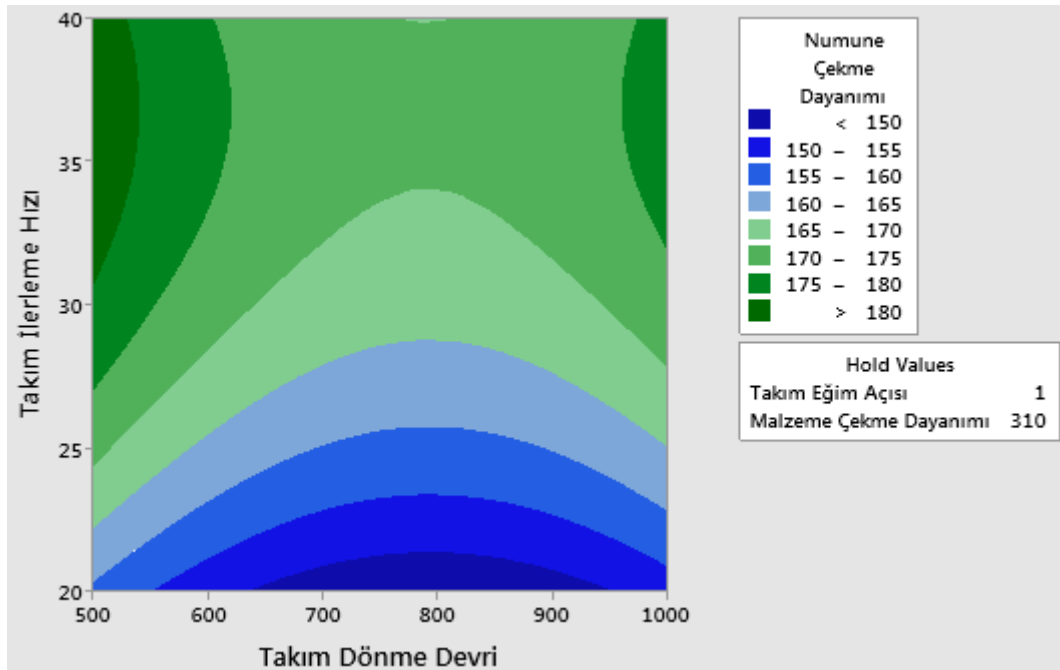
Resim 7.5. Takım dönme devrinin çapak oluşumuna etkisi

6. Uygun değerdeki takım eğim açısının kaynak bölgesindeki inceltme miktarını azalttığı tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak Çizelge 7.1’de de görüldüğü gibi takım eğim açısı arttıkça AA6061-T6 plaka çiftlerine ait numunelerden elde edilen ortalama maksimum çekme dayanımı değeri belirgin şekilde artmıştır.

Çizelge 7.1. AA6061-T6 plakada takım eğim açısının ortalama maksimum çekme dayanımına etkisi

Takım Eğim Açısı	Ortalama Maksimum Çekme Dayanımı	Ortalaması Alınan Deney Numunesi Sayısı	Malzeme
0°	143,8775 MPa	12	AA6061-T6
0,5°	155,4648 MPa	12	AA6061-T6
1°	165,7867 MPa	12	AA6061-T6

7. Şekil 7.1’de de görüldüğü gibi AA6061-T6 – AA6061-T6 plaka kombinasyonunda 1° takım eğim açısında, takım dönme devri 500 dev/dak iken takım ilerleme hızı arttıkça malzeme çekme dayanımının da arttığı tespit edilmiştir. Düşük ergime noktası sıcaklığının bir sonucu olarak takım dönme devri arttıkça ya da takım ilerleme hızı azaltıldıkça malzeme çekme dayanımında düşüşler gözlemlenmektedir.



Şekil 7.1. AA6061-AA6061 plaka kombinasyonuna ait “Takım İlerleme Hızı – Takım Dönme Devri” etkileşim grafiği

8. AA6061-T6 plaka çiftinde $0,5^\circ$ takım eğim açısında 20 mm/dak ilerleme hızında takım dönme devri 2 katına çıkarıldığında Çizelge 7.2’de de görüldüğü gibi ortalama çekme dayanımı azalırken, 40 mm/dak takım ilerleme hızında aynı işlemde ortalama çekme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Buradan da anlaşılabileceği üzere sürtünme karıştırma kaynağında uygun enerji girişinin sağlanması kritik öneme sahiptir.

Çizelge 7.2. AA6061-T6 plakada takım dönme devri-takım ilerleme hızı ilişkisi

Takım Dönme Devri (dev/dak)	Takım İlerleme Hızı (mm/dak)	Takım Eğim Açısı (°)	Ortalaması Alınan Numune Sayısı	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)
500	20	0,5	3	156,06
1000			3	148,34
500	40		3	154,29
1000			3	163,16

7.1.2. AA7075-T6 plaka çiftlerinin birleştirilmesine ait sonuçlar

AA7075-T6 plaka çiftlerinde yapılan sürtünme karıştırma kaynak işlemi ile AA6061-T6 plaka çiftlerinde yapılan sürtünme karıştırma kaynak işlemleri arasında belirgin farklılıklar görülmüş olup bu farklılıkların en temel sebebi AA7075-T6’nın daha düşük ergime noktası sıcaklığına sahip olmasıdır. Bu farklar ve AA7075-T6 plaka çiftlerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesine ait sonuçlar maddeler halinde şu şekildedir;

1. AA6061-T6 plaka çiftlerinden farklı olarak AA7075-T6 plaka çiftlerinde 500 dev/dak gibi düşük dönme devirlerinde bile kaliteli kaynak yüzeyleri elde edilmiştir. Düşük ergime noktasına bağlı olarak aynı işlem parametrelerinde AA7075-T6 plaka çiftlerinde AA6061-T6 plaka çiftlerindeki kadar fazla çapak oluşumu gözlemlenmiştir. Resim 7.6’da 500 dev-dak takım dönme devrinde, 28 mm/dak takım ilerleme hızında ve 0° takım eğim açısında birleştirilmiş iki farklı plaka çiftinde ergime noktasına düşüklüğüne bağlı olarak artan kaynak yüzeyi kalitesiyle birlikte çapak oluşumunun da arttığı açıkça görülmektedir.



a) 6061-T6 plaka çifti

b) 7075-T6 plaka çifti

Resim 7.6. Ergime noktası farklılığına bağlı olarak aynı işlem parametrelerinde değişen çapak oluşumu (500 dev/dak, 28 mm/dak, 0°)

2. Resim 7.7’de de görüldüğü gibi düşük ergime noktası sıcaklığına bağlı olarak aynı daldırma sonrası bekleme süresinde AA7075-T6 plaka çiftlerinde başlangıç kenarındaki form bozulma miktarının arttığı gözlemlenmiştir.



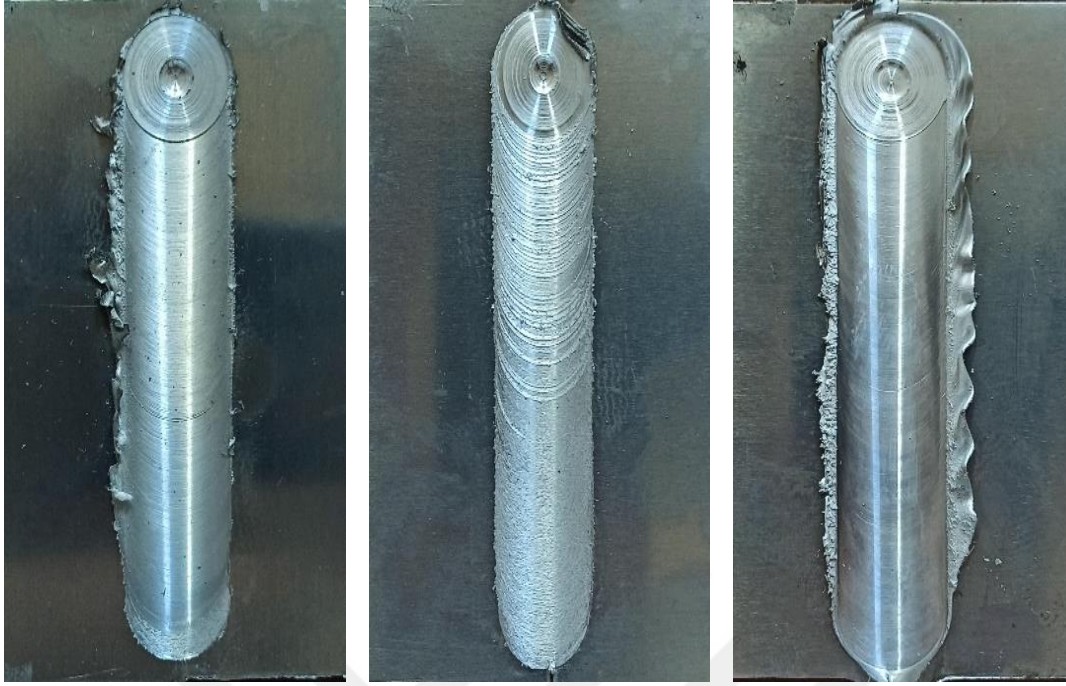
a) 710 dev/dak, 20 mm/dak, 0°

b) 710 dev/dak, 40 mm/dak, 0°

c) 1000 dev/dak, 28 mm/dak, 0°

Resim 7.7. AA7075-T6 plakada kaynak başlangıç kenarında oluşan form bozulmaları

3. 710 dev/dak takım dönme devrinde, 20 mm/dak takım ilerleme hızında ve 1° takım açısında dalga formsuz düz yüzeyler elde edilirken takım ilerleme hızı 40 mm/dak değerine çıkarıldığında dalga formu oluşumları gözlemlenmiştir. Ancak Resim 7.8’de de görüldüğü gibi aynı takım dönme devrinde ve ilerleme hızında, 0° takım açısında dalga formu oluşumunun olmadığı gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak düz yüzeyli takımlarda takım eğim açısının kaynak yüzeyindeki dalga formu oluşumlar üzerinde doğrudan etkili olduğu anlaşılmıştır.



a) 710 dev/dak, 20 mm/dak, 1° b) 710 dev/dak, 40 mm/dak, 1° c) 710 dev/dak, 40 mm/dak, 0°

Resim 7.8. Düz yüzeyli takımda takım eğim açısına bağlı dalga formu oluşumu

4. Takım eğim açısı arttıkça çıkış deliğinin olduğu kenardaki form bozulma miktarının azaldığı görülmüştür. Takım eğim açısı azaldıkça ve takım dönme devri arttıkça çıkış deliğinin olduğu kenarın formunun daha çok bozulduğu gözlemlenmiştir. Resim 7.9'daki iki çift örnekte takım eğim açısı arttıkça çıkış deliğinin olduğu kenardaki form bozukluğunun azaldığı, bununla birlikte takım dönme devri azaldıkça da aynı şekilde form bozukluğunun azaldığı görülmektedir.

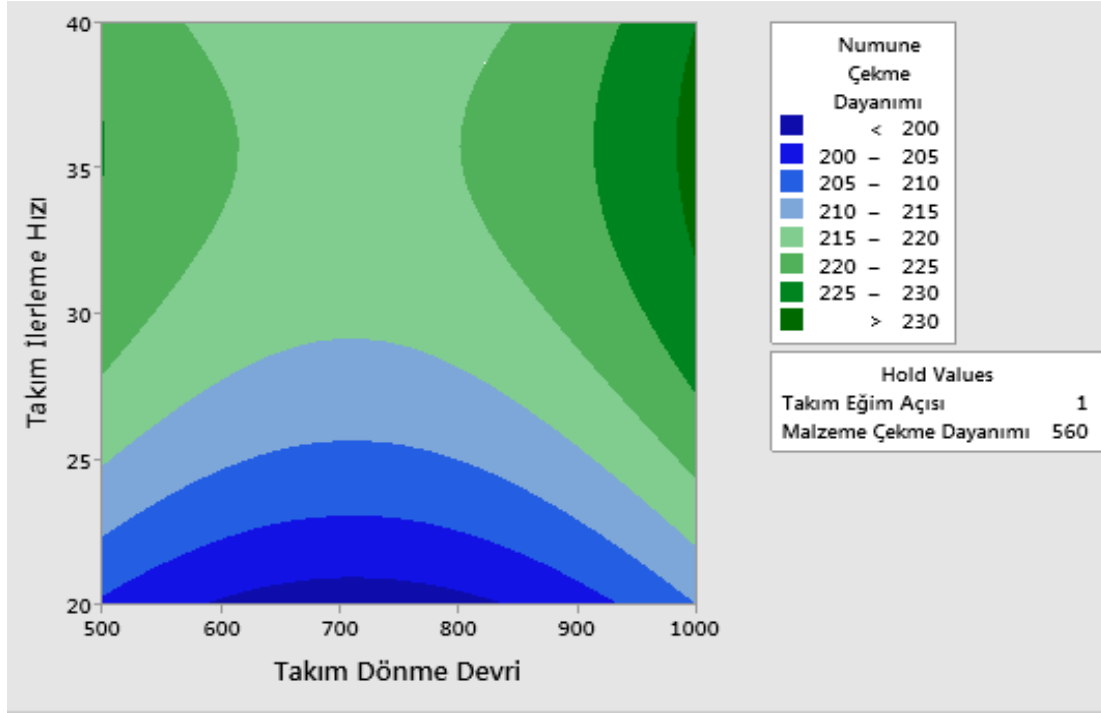


a) 710 dev/dak, 40 mm/dak, 0° b) 710 dev/dak, 40 mm/dak, 1° c) 500 dev/dak, 28 mm/dak, 0° d) 500 dev/dak, 28 mm/dak, 1°

Resim 7.9. Takım dönme devrine ve takım eğim açısına bağlı çıkış deliği kenar form bozukluğu

5. Şekil 7.2'de verilen grafikte de görüldüğü gibi AA7075-T6 – AA7075-T6 plaka kombinasyonunda 1° takım eğim açısında, takım dönme devri ve takım ilerleme hızı

arttıkça malzeme çekme dayanımının da arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte deneysel çalışmalarda kullanılan 3 farklı takım dönme devrinde de takım ilerleme hızı azaldıkça malzeme çekme dayanımının da azaldığı görülmüştür.



Şekil 7.2. AA7075-AA7075 plaka kombinasyonuna ait “Takım İlerleme Hızı – Takım Dönme Devri” etkileşim grafiği

7.1.3. AA6061-T6 - AA7075-T6 plaka çiftlerinin birleştirilmesine ait sonuçlar

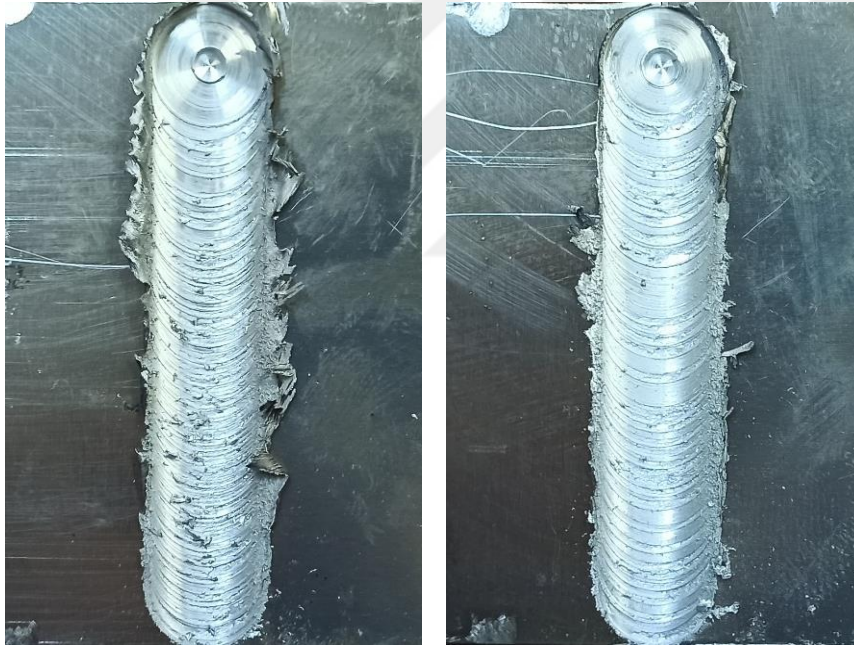
AA6061-T6 plakalar ile AA7075-T6 plakaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde en çarpıcı sonuçlar mekanik özelliklerde ortaya çıkmıştır. Çizelge 5.1’de de açıkça görüldüğü gibi AA6061-T6 – AA7075-T6 plaka çiftlerinin maksimum çekme dayanımlarının genel olarak AA6061-T6 plaka çiftlerinden daha fazla olduğu, AA7075-T6 plaka çiftlerinden ise daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

1. Çizelge 7.3’te de görüldüğü gibi AA6061-T6 – AA7075-T6 plaka çiftlerinin birleştirilmesiyle elde edilen çekme deneyi numunelerinin ortalama maksimum çekme dayanımları her üç takım eğim açısı değeri için de AA6061-T6 plaka çiftlerinden daha yüksek, AA7075-T6 plaka çiftlerinden ise daha düşük çıkmıştır.

Çizelge 7.3. Farklı takım eğim açılarında ortalama maksimum çekme dayanımları

Takım Eğim Açısı	Ortalama Maksimum Çekme Dayanımı			Ortalaması Alınan Deney Numunesi Sayısı
	AA6061-AA6061	AA6061-AA7075	AA7075-AA7075	
0°	143,87 MPa	172,55 MPa	202,28 MPa	12
0,5°	154,48 MPa	167,98 MPa	211,74 MPa	21
1°	165,78 MPa	179,16 MPa	212,66 MPa	12
Tümü	154,66 MPa	172,18 MPa	209,46 MPa	45

2. Resim 7.10'da da görüldüğü gibi çeşitli takım dönme devirlerinde ilerleme hızı arttıkça kaynak bölgesinin yüzey kalitesinin azaldığı ve kaynak yüzeyinde dalga formlarının oluştuğu gözlemlenmiştir.

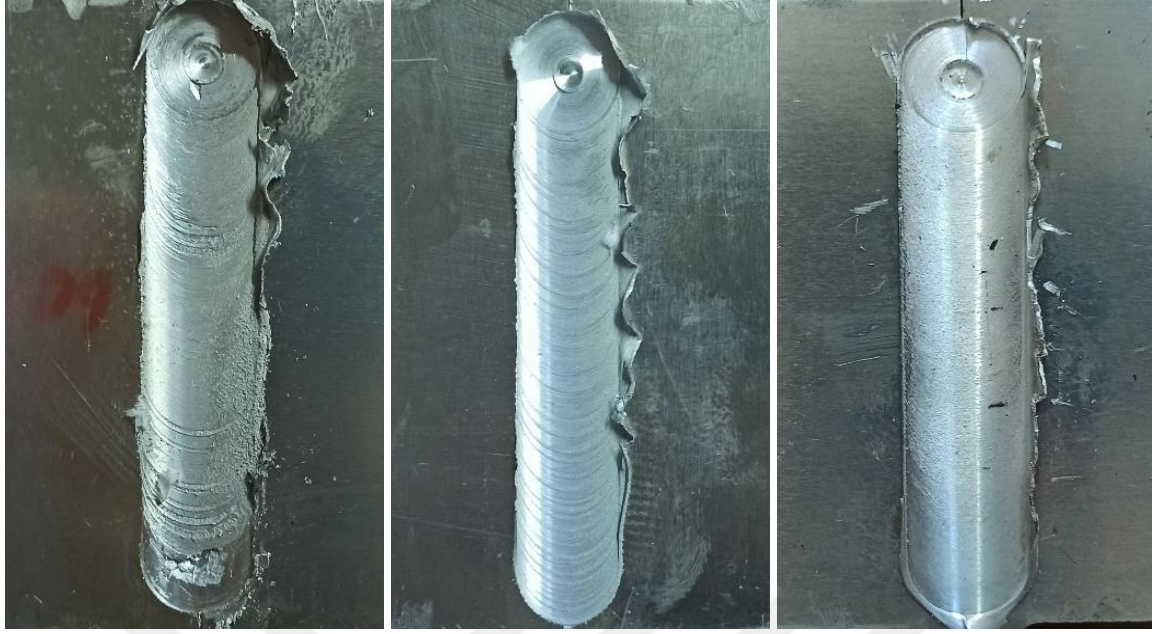


a) 1000 dev/dak, 40 mm/dak, 0,5°

b) 1000 dev/dak, 20 mm/dak, 0,5°

Resim 7.10. AA6061-AA7075 plaka çiftinde ilerleme hızının yüzey kalitesine etkisi

3. AA6061-T6 - AA7075-T6 plaka çiftlerinde AA6061-T6 ve AA7075-T6 plaka çiftlerine kıyasla çok daha düşük kaliteli birleştirmelerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Resim 7.11'de de görüldüğü gibi farklı ergime noktalarına sahip olmaları AA6061-T6 - AA7075-T6 plaka çiftlerinde birleştirme işlemini zorlaştırmıştır. Özellikle başlama anındaki bekleme süresinin kaynak kalitesine etkisi, farklı plaka çiftlerinin birleştirilmesinde daha açık görülmektedir.



a) AA6061-AA7075

b) AA6061-AA6061

c) AA7075-AA7075

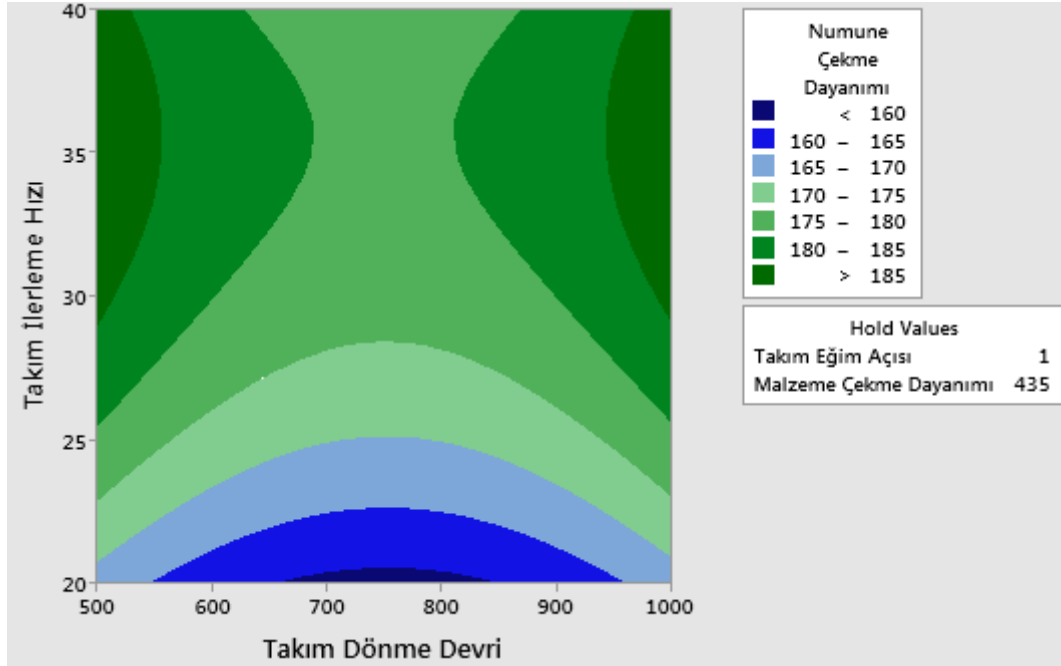
Resim 7.11. Aynı işlem parametrelerinin farklı kombinasyonlarda yüzey kalitesine etkisi (710 dev/dak, 20 mm/dak, 0°)

4. Diğer kombinasyonlardan farklı olarak Çizelge 7.4'te de görüldüğü gibi AA6061 – AA7075 plaka çiftlerinde 0,5° takım eğim açısında hem takım dönme devrinin hem de takım ilerleme hızının ayrı ayrı ya da beraber artırılmasının malzeme çekme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 7.4. AA6061 – AA7075 plakada takım dönme devri-takım ilerleme hızı ilişkisi

Takım Dönme Devri (dev/dak)	Takım İlerleme Hızı (mm/dak)	Takım Eğim Açısı (°)	Malzeme	Ortalaması Alınan Numune Sayısı	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)
500	20	0,5	AA6061-T6	3	161,81
1000				3	167,86
500	40			3	168,52
1000				3	175,72

5. Şekil 7.3'te verilen grafikte de görüldüğü gibi AA6061-T6 – AA7075-T6 plaka kombinasyonunda 1° takım eğim açısında hem düşük takım dönme devrinde hem de yüksek takım dönme devrinde takım ilerleme hızı arttıkça malzeme çekme dayanımının da arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte diğer plaka kombinasyonlarında da olduğu gibi deneysel çalışmalarda kullanılan 3 farklı takım dönme devrinde de takım ilerleme hızı azaldıkça malzeme çekme dayanımının da azaldığı görülmüştür.



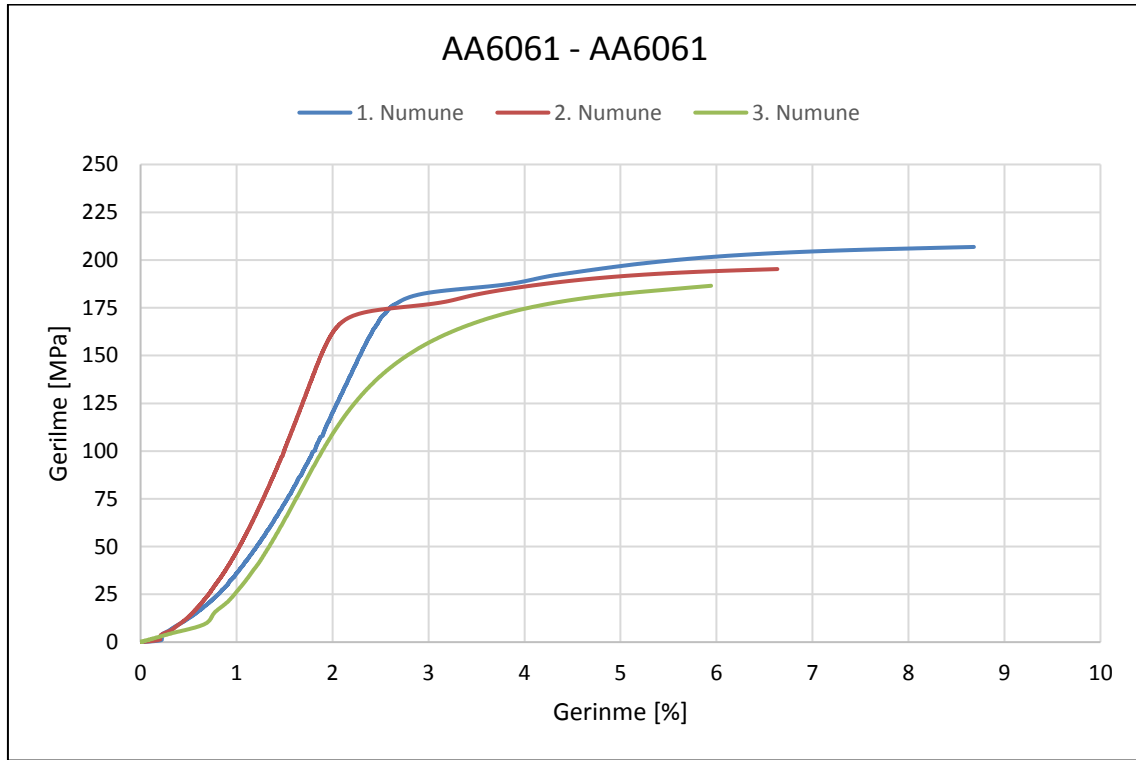
Şekil 7.3. AA6061-AA7075 plaka kombinasyonuna ait “Takım İlerleme Hızı – Takım Dönme Devri” etkileşim grafiği

7.2. Optimizasyon Sonrası Deneysel Bulgular ve Tartışma

7.2.1. İşlem parametrelerinin çekme dayanımına etkileri

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak kalitesini etkileyen pek çok parametre mevcuttur. İşlem parametrelerine bağlı olarak ısı girdisi azaldığı zaman öpüşen yüzeyler, penetrasyon eksikliği ve makro ölçekli boşluklar meydana gelmektedir. Bu gibi içyapı kusurlarına bağlı olarak ise malzeme çekme dayanımı büyük ölçüde azalmaktadır. Bunun yanında ısı girdisi çok fazla arttırıldığında ise sürtünme karıştırma kaynağı kendine has özelliklerini kaybetmekte ve malzeme ergimektedir. Ergiyen malzeme kaynak hattı boyunca kenarlara taşmakta ve kaynak hattı boyunca malzemede istenmeyen bir incelme meydana gelmektedir. İşlem parametreleriyle birlikte çeşitli dış etmenlere bağlı olarak oluşan kusurlar da malzeme çekme dayanımını azaltabilmektedir. Bunun gibi çeşitli pek çok sebebe bağlı olarak malzeme çekme dayanımı azalabildiği için işlem parametrelerinin iyilenmesi zorunlu bir hal almaktadır. Bundan önceki bölümde işlem parametrelerinin çekme dayanımına etkileri incelenmiş olsa da bu bölümde optimizasyon sonrasında hedeflenen çekme dayanımlarına ne kadar yaklaşıldığı açıklanmıştır.

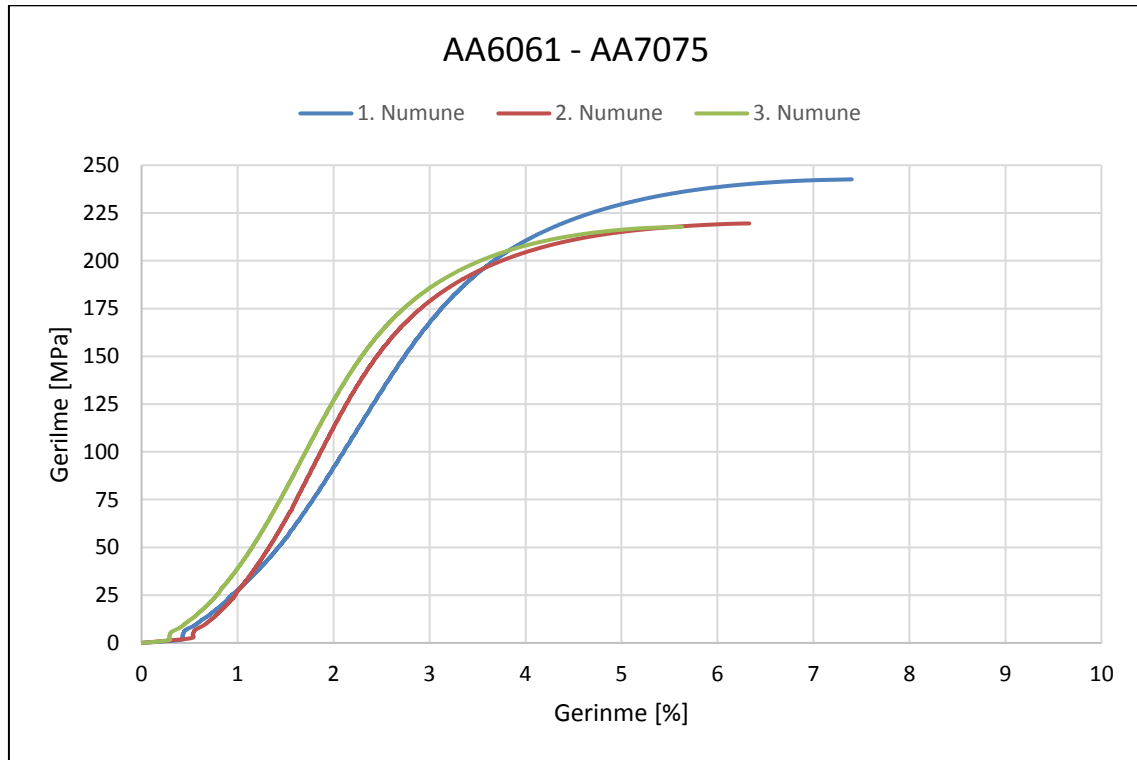
Şekil 7.4'teki grafikte 500 dev/dak takım dönme devri, 36,7677 mm/dak takım ilerleme hızı ve 1° takım eğim açısında birleştirilmiş 3 farklı AA6061 – AA6061 plaka çiftine ait çekme test sonuçları görülmektedir. Aynı işlem parametrelerinde yapılan birleştirmelerde elde edilen en yüksek çekme dayanımı 206,86 MPa iken en düşük çekme dayanımı 181,96 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek gerinme değeri ise %8,74 elde edilmişken en düşük gerinme değeri %5,96 olarak elde edilmiştir. Elde edilen değerler analiz sonuçlarıyla hedeflenen 183,254 MPa değerine oldukça yakındır.



Şekil 7.4. AA6061 – AA6061 optimizasyon sonrası çekme dayanımı

Her ne kadar elde edilen çekme dayanımı değerleri AA6061-T6 alüminyum alaşımının 310 MPa çekme değerinden düşük olsa da malzemenin düşük kaynak kabiliyeti düşünüldüğü zaman umut verici olmaktadır. Optimize edilmiş parametreler ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımlarının esas metalin çekme dayanımından daha düşük çıkmasının en temel sebebi kaynak bölgesi içyapısında oluşan boşluklar ve kaynak işlemi sırasında kaynak bölgesinde meydana gelen incelmelerdir. Hem gerilme hemde gerinme değerlerindeki azalmaların özellikle kaynak kök bölgesinde meydana gelen mikro çatlakların çekme testi sırasında büyümesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

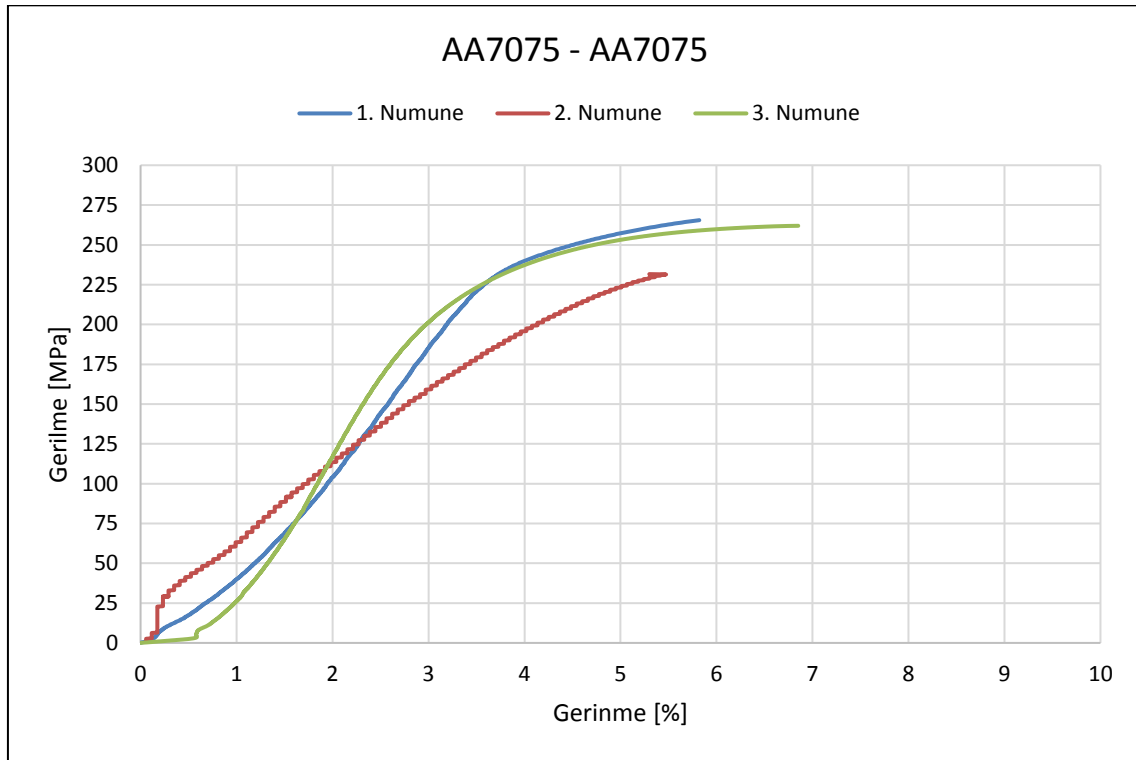
Şekil 7.5'teki grafikte ise 1000 dev/dak takım dönme devri, 35,7576 mm/dak takım ilerleme hızı ve 1° takım eğim açısında birleştirilmiş 3 farklı AA6061 – AA7075 plaka çiftine ait çekme test sonuçları görülmektedir. Aynı işlem parametrelerinde yapılan birleştirmelerde elde edilen en yüksek çekme dayanımı 239,75 MPa iken en düşük çekme dayanımı 208,09 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek gerinme değeri ise %7,51 elde edilmişken en düşük gerinme değeri %5,66 olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.5. AA6061 – AA7075 optimizasyon sonrası çekme dayanımı

AA6061 – AA7075 plaka çiftlerinin birleştirilmesinde düşük dönme devirlerinde kaynak bölgesinde malzemelerin tam olarak karışmadıkları görülmüştür. Buna bağlı olarak çekme dayanımlarında büyük düşüşler görülmüştür. Optimizasyon sonrası yapılan birleştirmelerde ise içyapı görüntülerinde de görüldüğü gibi tam birleşme meydana gelmiştir. Ancak yüksek takım dönme devrine bağlı olarak çapak oluşumunun arttığı ve kaynak bölgesinde incelme meydana geldiği görülmüştür. Yine de elde edilen değerler analiz sonuçlarıyla hedeflenen 188,853 MPa değerinden daha yüksek çıkmıştır. Buna rağmen birleştirilen numunelerin sünekliklerinin çok azaldığı görülmektedir. AA6061 – AA6061 plaka çiftlerinde de olduğu gibi AA6061 – AA7075 plaka çiftlerinde de kaynak bölgesindeki boşlukların çekme dayanımını azalttığı düşünülmektedir.

Şekil 7.6'daki grafikte 1000 dev/dak takım dönme devri, 35,7576 mm/dak takım ilerleme hızı ve 1° takım eğim açısında birleştirilmiş 3 farklı AA7075 – AA7075 plaka çiftine ait çekme test sonuçları görülmektedir. Aynı işlem parametrelerinde yapılan birleştirmelerde elde edilen en yüksek çekme dayanımı 265,00 MPa iken en düşük çekme dayanımı 227,30 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek gerinme değeri ise %6,71 elde edilmişken en düşük gerinme değeri %5,42 olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.6. AA7075 – AA7075 optimizasyon sonrası çekme dayanımı

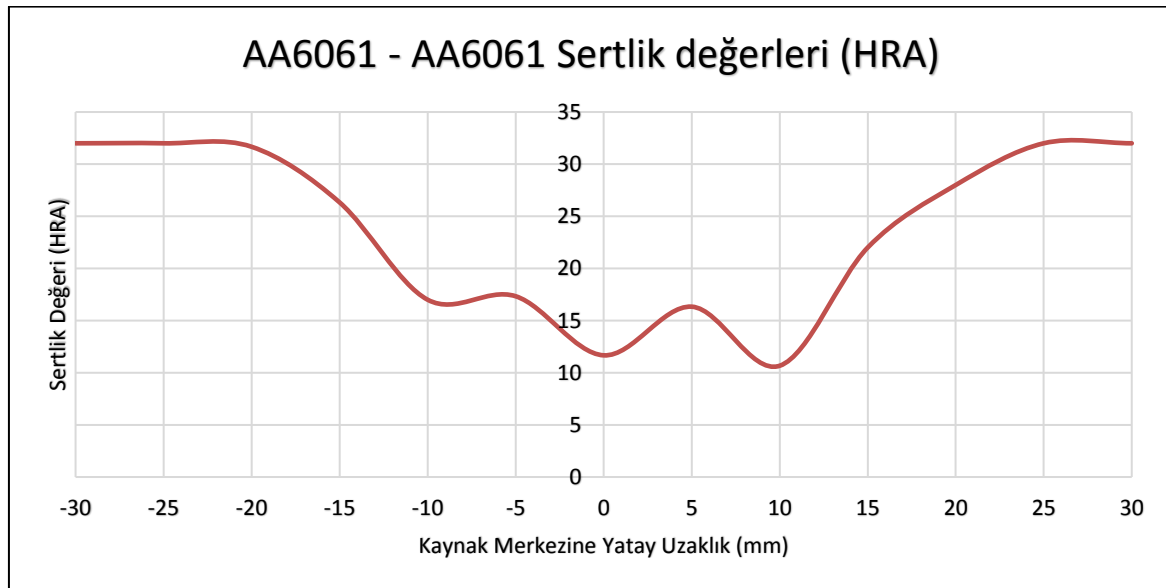
Parametre optimizasyonu sonrasında birleştirilen AA7075 – AA7075 plaka çiftlerinin çekme test grafiklerinden de görüldüğü gibi malzeme çekme dayanımındaki azalma sünekliğindeki azalmadan daha fazla olmuştur. Her ne kadar mikroyapı görüntülerinden de görüldüğü üzere AA7075 – AA7075 çiftlerinde DKB'de daha küçük boyutlu bir tane yapısı elde edilmiş olsa da mikro çatlaklar ve mikro boyutlu tüneller malzeme dayanımının büyük ölçüde azalmasına sebep olmuştur. Özellikle 2. numunenin çekme testinde çok gevrek bir davranış göstermesi sadece içyapıda meydana gelmiş olabilecek boşluklarla açıklanabilmektedir. Buna rağmen çekme test sonuçları literatürle uyumlu çıkmıştır. İç yapıda meydana gelen boşlukların ise plaka temas yüzeylerinin işlem öncesinde daha hassas taşlanarak büyük ölçüde azaltılabileceği öngörülmektedir.

7.2.2. İşlem parametrelerinin sertliğe etkileri

AA6061 – AA6061 plaka çiftlerinin sertlik ölçüm değerlerini içeren Çizelge 7.5 incelendiğinde kaynak merkezinden uzaklaştıkça malzeme sertliği arttığı görülmüştür. Kaynak bölgesi bazında incelendiğinde ilerleme tarafı olan sol tarafın sertliğinin, geri çekme tarafı olan sağ taraftan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 7.7). Ana metalle kıyaslandığında ise sürtünme karıştırma kaynak işleminin malzemede büyük ölçekli yumuşamaya sebep olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 7.5. İşlem parametrelerinin AA6061 – AA6061 çiftinin sertliğine etkileri

AA6061 – AA6061													
Kaynak merkezine olan yatay uzaklık (mm)	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
1. Ölçüm sertlik değeri (HRA)	32	32	32	29	14	15	11	15	12	18	24	32	32
2. Ölçüm sertlik değeri (HRA)	32	32	31	27	17	21	12	18	10	24	28	32	32
3. Ölçüm sertlik değeri (HRA)	32	32	32	23	20	16	12	16	10	24	32	32	32
Ortalama sertlik değeri (HRA)	32	32	31,6	26,3	17	17,3	11,6	16,3	10,6	22	28	32	32

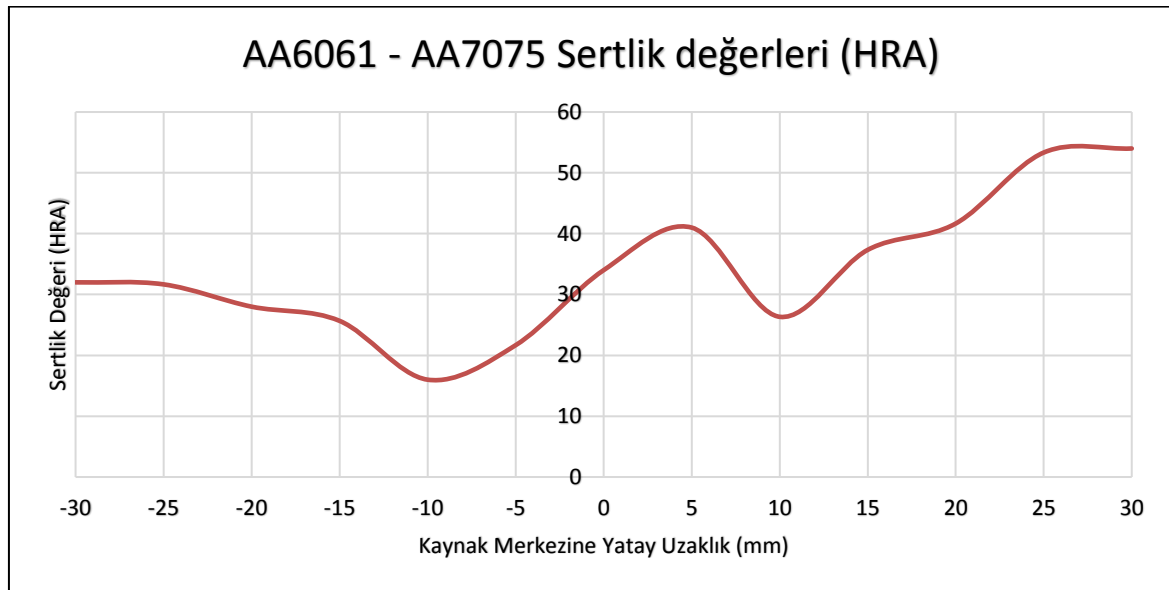


Şekil 7.7. AA6061 – AA6061 çiftinde kaynak merkezine uzaklıkla sertliğin değişimi

AA6061 – AA7075 plaka kombinasyonunda AA6061 plakalar ilerleme yönüne yerleştirilirken AA7075 plakalar geri çekme yönüne yerleştirilmiştir. AA7075 plakada diğer kombinasyonlarda olduğu gibi merkezden 5 mm mesafeye kadar sertlik artarken bu mesafeden takım omuz çizgisine kadar yumuşama meydana gelmiştir. Bunun yanında diğer kombinasyonların aksine bu kombinasyonda ilerleme tarafındaki malzemede takım omuz çizgisine yaklaşıldıkça sertlik sürekli olarak azalmaya devam etmiştir (Şekil 7.8). En düşük sertlik değerleri ise ilerleme tarafında bulunan AA6061 malzemenin takım omuz çizgisinde ölçülmüştür (Çizelge 7.6).

Çizelge 7.6. İşlem parametrelerinin AA6061 – AA7075 çiftinin sertliğine etkileri

AA6061 – AA7075													
Kaynak merkezine olan yatay uzaklık (mm)	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
1. Ölçüm sertlik değeri (HRA)	32	32	27	25	17	23	29	41	26	35	41	52	54
2. Ölçüm sertlik değeri (HRA)	32	31	27	27	16	20	36	42	27	39	42	54	54
3. Ölçüm sertlik değeri (HRA)	32	32	30	25	15	22	37	40	26	38	42	54	54
Ortalama sertlik değeri (HRA)	32	31,6	28	25,6	16	21,6	34	41	26,3	37,3	41,6	53,3	54

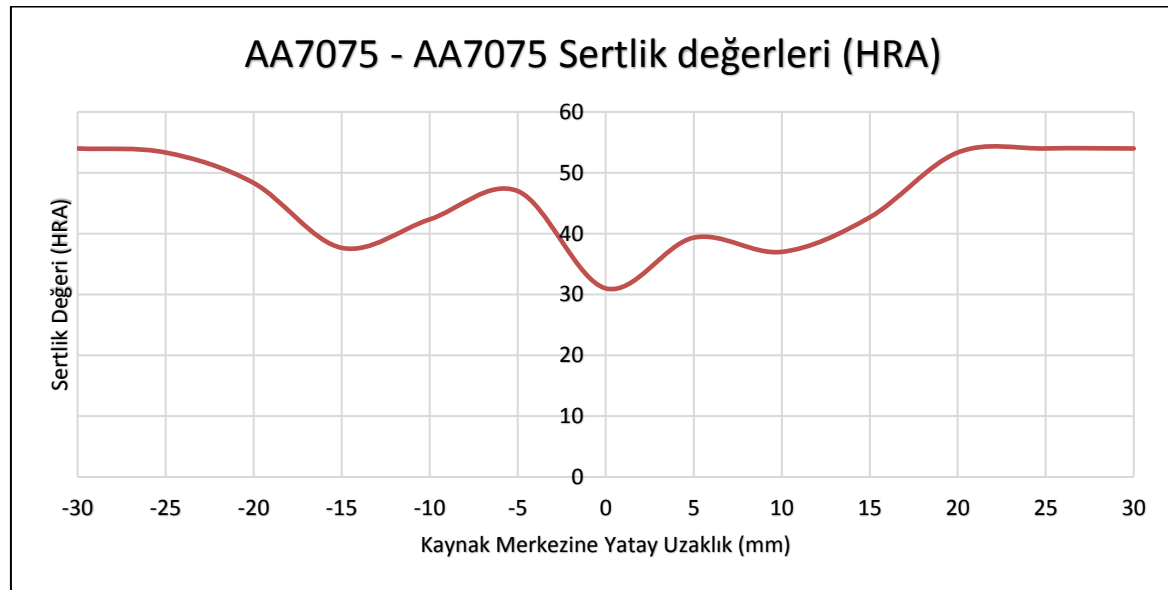


Şekil 7.8. AA6061 – AA7075 çiftinde kaynak merkezine uzaklıkla sertliğin değişimi

AA6061 – AA6061 plaka çiftlerinde olduğu gibi AA7075 – AA7075 plaka çiftlerinde de ilerleme tarafının geri çekme tarafından daha sert olduğu görülmüştür. Ana metal sertliğinin 54 HRA olmasına rağmen bu değer in kaynaklı birleştirme sonucunda belirli noktalarda 29 HRA'ya kadar düştüğü gözlemlenmiştir (Çizelge 7.7). Kaynak bölgesi sertliği ana malzemeye göre düşmüş olsa da AA7075 – AA7075 plaka çiftinin AA6061 – AA6061 plaka çiftine kıyasla daha düşük oranda yumuşadığı tespit edilmiştir. Bunlarla beraber yine aynı şekilde en yumuşak bölgenin kaynak merkezi olduğu da gözlemlenmiştir (Şekil 7.9).

Çizelge 7.7. İşlem parametrelerinin AA7075 – AA7075 çiftinin sertliğine etkileri

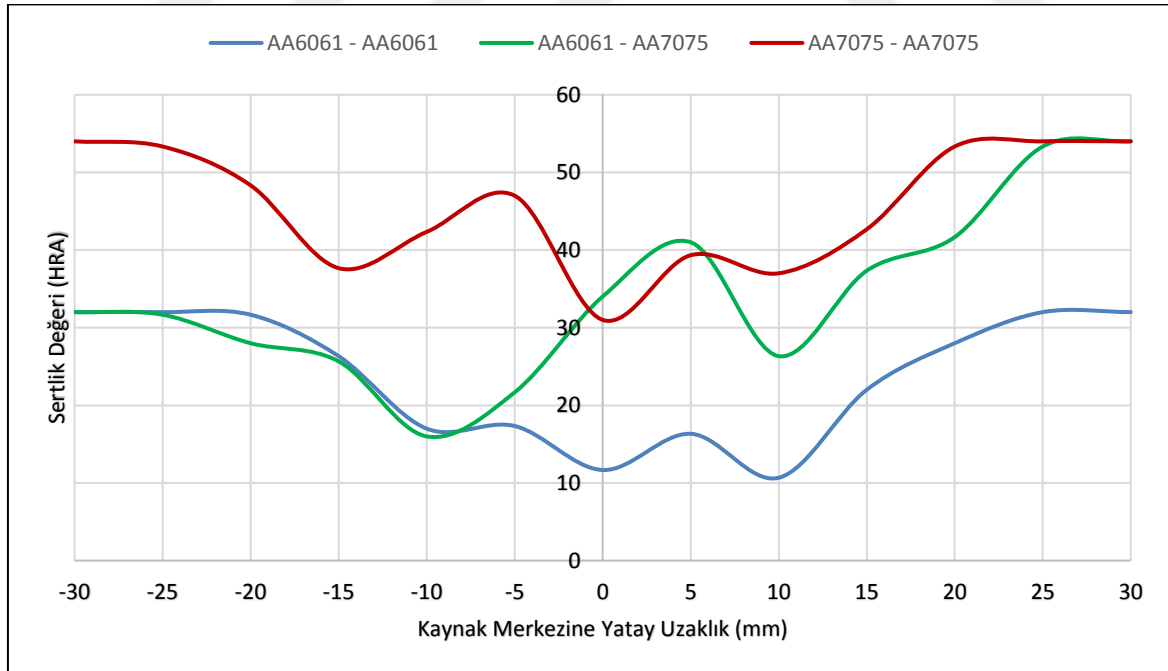
AA7075 – AA7075													
Kaynak merkezine olan yatay uzaklık (mm)	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
1. Ölçüm sertlik değeri (HRA)	54	53	52	41	41	47	30	40	36	43	52	54	54
2. Ölçüm sertlik değeri (HRA)	54	53	48	35	42	48	34	37	37	43	54	54	54
3. Ölçüm sertlik değeri (HRA)	54	54	45	37	44	46	29	41	38	42	54	54	54
Ortalama sertlik değeri (HRA)	54	53,3	48,3	37,6	42,3	47	31	39,3	37	42,6	53,3	54	54



Şekil 7.9. AA7075 – AA7075 çiftinde kaynak merkezine uzaklıkla sertliğin değişimi

Sertlik test sonuçları genel olarak yorumlandığında benzer alaşımların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde ilerleme tarafının geri çekme tarafından daha sert olduğu gözlemlenmiştir. Mikroyapı görüntüleri de dikkate alındığında kaynak bölgesinin geri çekme tarafında sıklıkla oluşan porozitenin buna sebep olabileceği düşünülmektedir. Kaynak merkez sertlikleri kıyaslandığında ise AA7075'in AA6061'den daha sert olmasından dolayı AA6061 – AA7075 kombinasyonunun kaynak merkezi sertliğinin AA6061 – AA6061 kombinasyonundan daha yüksek olduğu görülmektedir.

Hem AA6061 – AA6061 plaka çiftlerinde hem de AA7075 – AA7075 plaka çiftlerinde kaynak merkezi olan pim ilerleme çizgisinden 5 mm'ye kadar uzaklaşıldıkça sertliğin kaynak merkezi sertliğine göre arttığı, sonrasında ise takım omuz çizgisine kadar olan mesafe boyunca tekrar azaldığı görülmüştür (Şekil 7.7, Şekil 7.9). Takım omuz çizgisinde meydana gelen yumuşama miktarları incelendiğinde ise AA6061 – AA6061 kombinasyonları ile AA6061 – AA7075 kombinasyonlarında yaklaşık %50 oranında bir yumuşama meydana gelmişken, AA7075 – AA7075 kombinasyonlarında bu oranın daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.10).

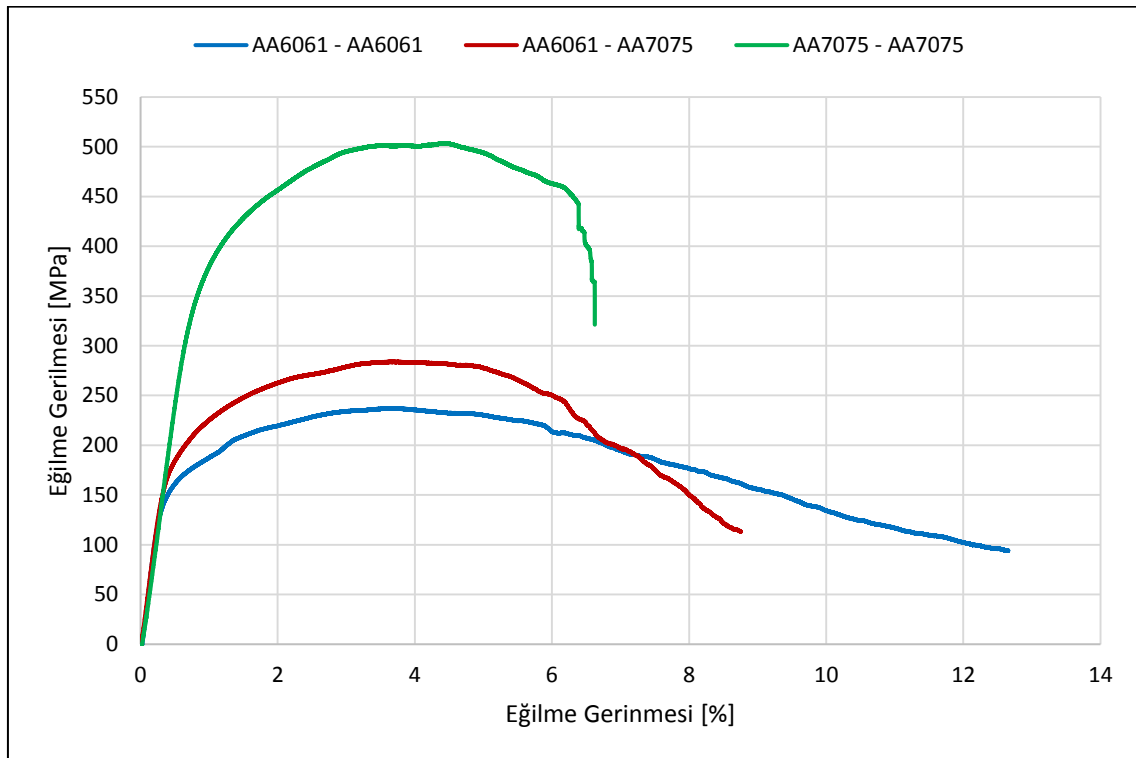


Şekil 7.10. Farklı kombinasyonlar için kaynak merkezine uzaklıkla sertlik değişimi

7.2.3. İşlem parametrelerinin eğme dayanımına etkileri

Yapılan literatür taramalarından ve incelenen içyapı görüntülerinden de anlaşıldığı gibi sürtünme karıştırma kaynağında mikro çatlaklar en çok kaynak kök bölgesinde meydana gelmektedir. Bunun yanında penetrasyon eksikliğine ya da yetersiz ısı girişine bağlı olarak da öpüşen yüzeyler gibi kusurlar da kaynak kök bölgesinde daha sık görülmektedir. Bu sebeplerden dolayı eğme testleri numunelerin kök bölgelerini daha çok zorlayabilmek için kök eğme tipinde yapılmıştır. Destekler arası açıklık ise 60 mm olarak belirlenmiştir.

Eğme testine geçilmeden önce numune kesitlerinde tünel oluşumları kontrol edilmiştir. Tünel oluşumuna sahip numunelerde eğme testi gerçekleştirilmemiştir. Her bir numune için 3 adet test gerçekleştirilmiş, grafik ve tablolarda ise ortalama dayanımın alındığı numunelere ait sonuçlar kullanılmıştır. Eğme test sonuçlarını ana metallerle kıyaslayabilmek için öncelikle AA6061-T6 alüminyum alaşımından ve AA7075-T6 alüminyum alaşımından alınan numunelere eğme testi yapılmıştır. Eğme test sonuçlarına göre AA6061-T6 alüminyum alaşımının eğme dayanımı 641,12 MPa, AA7075-T6 alüminyum alaşımının eğme dayanımı ise 1235,98 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.11. Üç nokta eğme test sonuçları

Plakaların eğme dayanımı değerleri esas metallerin karakteristik özelliklerine benzer doğrultuda çıkmıştır. Bilindiği gibi AA7075-T6 alüminyum alaşımı AA6061-T6 alüminyum alaşımına kıyasla daha yüksek eğilme dayanımına ve daha düşük eğilme gerinmesi değerine sahiptir. Üç noktalı eğme test sonuçlarına bakıldığında da benzer ilişki görülmektedir. Şekil 7.11’de de görüldüğü gibi AA7075 – AA7075 plaka çiftine ait numunede daha gevrek bir kırılma olmuştur. Bunun sebebi AA7075-T6 alüminyum alaşımının AA6061-T6 alüminyum alaşımına kıyasla daha gevrek yapıya sahip olmasıdır.

Parametre optimizasyonu sonrasında birleştirilen plaka çiftlerinden alınan numunelere yapılan eğme testlerinde AA6061 – AA6061 plaka çiftinden alınan numunede çatlak meydana gelmişken AA6061 – AA7075 plaka çiftinden alınan numunede ve AA7075 – AA7075 plaka çiftinden alınan numunede kırılma meydana gelmiştir (Çizelge 7.8).

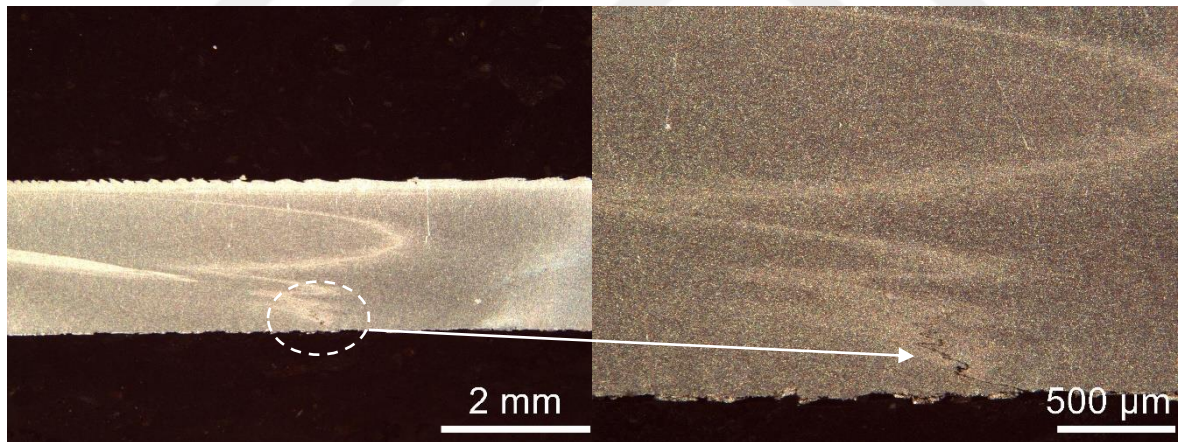
Çizelge 7.8. Numunelere ait eğme dayanımları

Numune	Eğme Açısı	Eğme Dayanımı	Numune Son Hali	Sonuç
AA6061 – AA6061	180°	235,459 MPa		Çatladı
AA6061 – AA7075	180°	283,400 MPa		Kırıldı
A7075 – AA7075	180°	500,812 MPa		Kırıldı

7.2.4. İşlem parametrelerinin makro ve mikroyapı üzerindeki etkileri

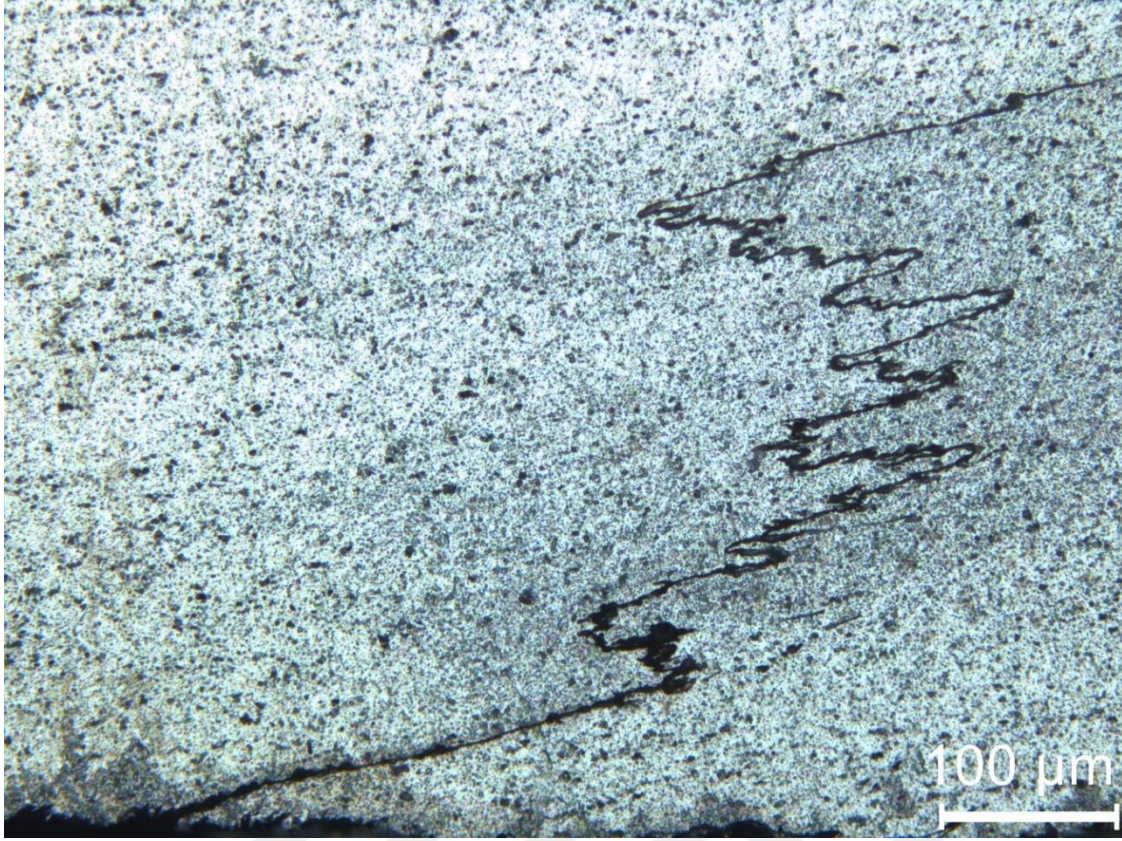
Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinin ilerleme tarafındaki içyapı ve geri çekme tarafındaki içyapı birbirinden farklılık göstermektedir. Bunun en temel sebebi ilerleme esnasında her iki tarafta farklı miktarlarda ısı açığa çıkması ve her iki tarafında farklı büyüklüklerde kuvvetlere maruz kalmasıdır. Bu gibi farklılıklarla beraber işlem esnasında plastik akış gerçekleşiyor olması içyapıda girdaplı bir görünümün oluşmasına sebep olmaktadır.

Resim 7.12’de görülen AA6061 – AA6061 plaka çiftlerine ait makro görüntülerde de kaynak merkezindeki girdaplı yapı açıkça görülmektedir. Bununla beraber daha önceden de belirtildiği gibi geri çekme tarafında Termomekanik olarak etkilenen bölge (TMEB) daha geniş bir alanı kapsarken, ilerleme tarafında çok daha kısıtlı bir alanı kapsamaktadır. Kaynak bölgesi kökünde görülen çatlak ise tezgâh tablası ile malzeme arasındaki ısı farkından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.



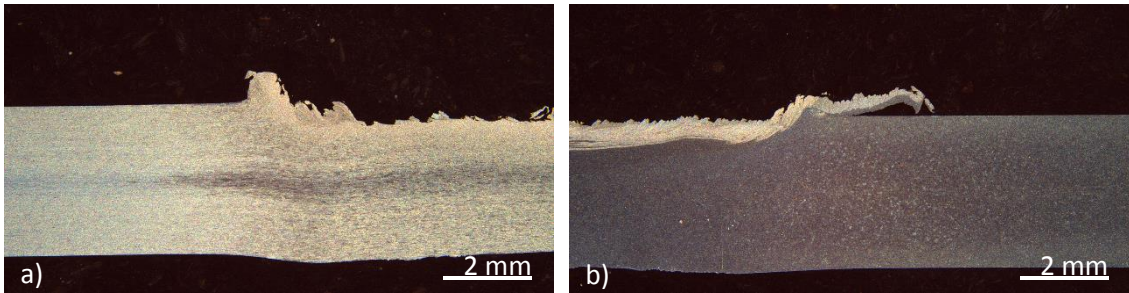
Resim 7.12. AA6061 – AA6061 çiftinde kaynak kökünde meydana gelen çatlak

AA6061 – AA6061 plaka çiftine ait başka bir numunenin kaynak kökünde ise yetersiz ısı girdisine bağlı olarak oluşan öpüşen yüzeyler görülmektedir (Resim 7.13). Aynı numunenin kaynak başlangıç noktasına daha uzak bir noktadaki kaynak kesitinden alınan başka görüntülerde bu kusurun tekrar görülmemesi nedeniyle kaynak başlangıç anındaki ilk bekleme süresinin yetersiz olmasının başlangıç noktasına yakın yerlerde bu gibi içyapı kusurlarına neden olabileceği sonucuna ulaşılmaktadır.



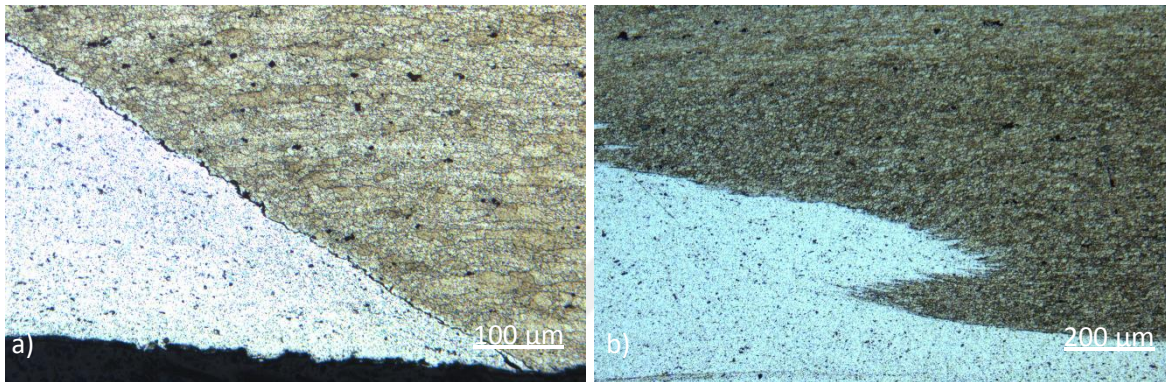
Resim 7.13. AA6061 – AA6061 çiftinde kaynak kökünde öpüşen yüzeyler

AA6061 – AA7075 çiftine ait görüntüde AA7075 tarafındaki ilave yüzey oluşumunun AA6061 tarafından daha fazla olduğu görülmektedir. SKK'da ilerleme tarafında geri çekme tarafından daha fazla ısı açığa çıkmaktadır [1]. AA6061'in ergime noktası sıcaklığı AA7075'ten daha yüksek olduğu için birleştirme işlemleri esnasında ilerleme tarafına AA6061 plakalar gelecek şekilde konumlandırma yapılmıştır. Buna rağmen Resim 7.14'te de görüldüğü gibi AA7075 tarafındaki ilave yüzey oluşumu daha fazla olmuştur. Bununla birlikte AA6061 – AA6061 çiftinde olduğu gibi burada da geri çekme tarafındaki termomekanik olarak etkilenen bölge daha geniş bir alanı kapsamaktadır (Resim 7.14.b).



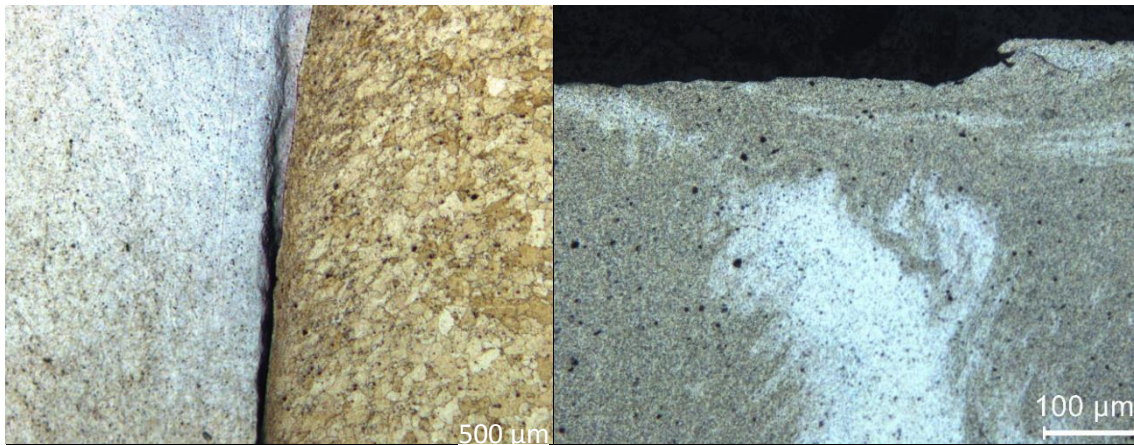
Resim 7.14. AA6061 – AA7075 çiftinde oluşan ilave yüzeyler a) AA7075, b) AA6061

AA6061 – AA7075 plaka çiftlerinde de AA6061 – AA6061 plaka çiftlerinde olduğu gibi kaynak başlangıç noktasına yakın kesitlerden alınan görüntülerde füzyon eksikliğine bağlı olarak oluşan öpüşen yüzeyler görülmektedir (Resim 7.15.a). Kaynak başlangıç noktasından daha uzak bir kesitten alınan görüntülerde ise ısı girdisinin yeterli olduğu, buna bağlı olarak da öpüşen yüzeylerin oluşmadığı ve tam birleşmenin sağlandığı görülmüştür (Resim 7.15.b).



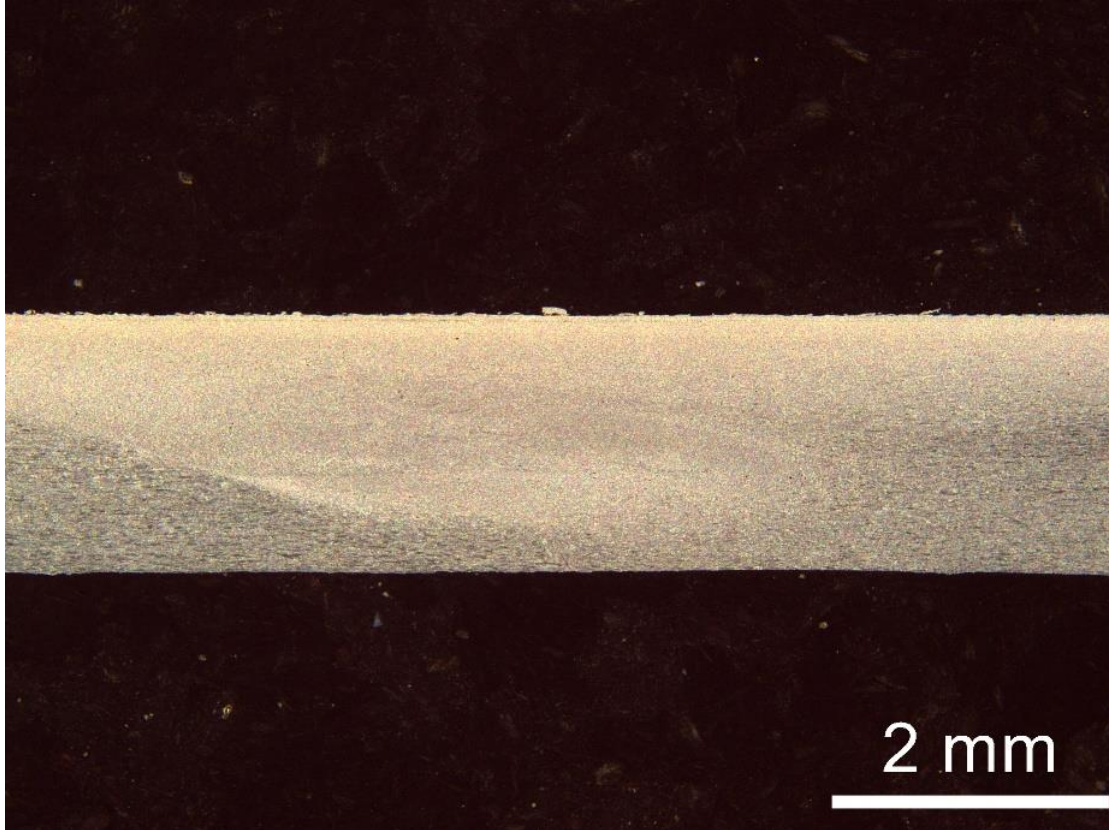
Resim 7.15. AA6061 – AA7075 çiftinde füzyon eksikliğine bağlı oluşan öpüşen yüzeyler
a) Başlangıç kenarına uzaklık = 20 mm, b) Başlangıç kenarına uzaklık 40 mm

AA6061 – AA7075 plaka yüzeyinden alınan görüntülerde ise yüzeyde meydana gelmiş kesikli boşluklar içeren oluk oluşumlarına rastlanmıştır (Resim 7.16.a). Bunun yanında özellikle AA7075 tarafında kaynak bölgesindeki incelme miktarının daha fazla olduğu görülmüştür (Resim 7.16.b). Kesit kalınlığındaki azalma dalma derinliğinin fazla olduğunu düşündürse de daha düşük dalma derinliklerinde çeşitli parametrelerde yetersiz ısı oluşumuna bağlı kusurlar oluştuğu için bütün çalışma boyunca sabit tutulmuştur.



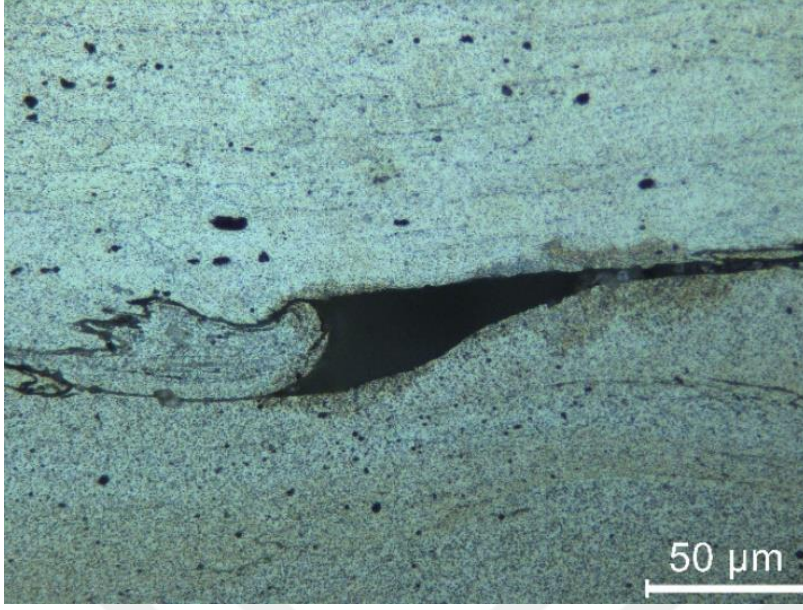
Resim 7.16. AA6061 – AA7075 plakada oluk oluşumu ve kesit incelmesi a) Kaynak yüzeyi, b) Kaynak kesiti

Diğerlerinin aksiyeye AA7075 – AA7075 çiftinde kaynak kalınlığındaki azalmanın daha düşük olmuştur. Buna bağılı olarak çapak oluşumu ve oluşan çapakların boyutları daha az olmuştur. Bununla birlikte yeniden kristalleşmenin daha başarılı bir şekilde gerçekleşmesinden dolayı ana metalden kaynak merkezine yaklaştıkça tanelerin küçüldüğü görülmüştür (Resim 7.17).



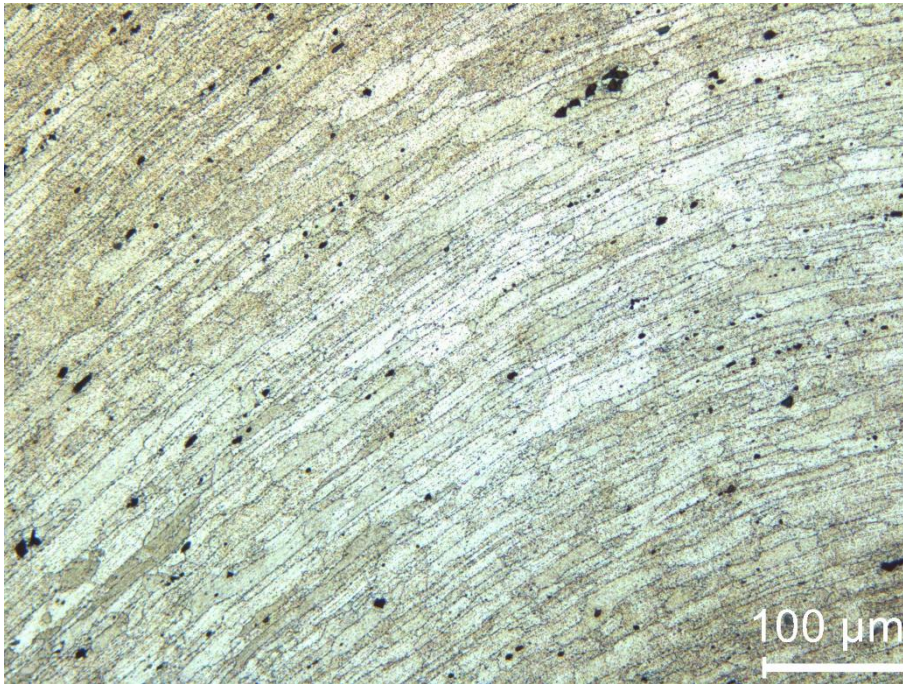
Resim 7.17. AA7075 – AA7075 çiftine ait kesit görünümü

AA7075 – AA7075 plaka çiftlerinin kaynak kök bölgesinde öpüşen yüzeyler, penetrasyon eksikliği gibi yetersiz ısı girişine bağılı olarak oluşan içyapı kusurlarına rastlanmamıştır. Her ne kadar AA7075 – AA7075 çiftlerinde diğerlerine kıyasla daha kaliteli birleşmeler elde edilmiş olsa da mikro boyutlarda tünel oluşumları da görülmüştür (Resim 7.18).



Resim 7.18. AA7075 – AA7075 çiftinde mikro tünel oluşumu

Resim 7.19’da AA7075 – AA7075 çiftinde meydana gelen tane yönlenmesi açıkça görülmektedir. Bunun yanında içyapıda mikro boyutlu pek çok boşluk oluştuğu da gözlemlenmiştir. Mikro boyutlu bu boşluklarla dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgede daha az karşılaşılmış olması bu boşlukların oluşma sebebinin yetersiz karışma olabileceğini düşündürmektedir.



Resim 7.19. AA7075 – AA7075 çiftinde tane yönlenmesi

Her ne kadar her 3 kombinasyonda da benzer hatalarla karşılaşılsa da bu hataların optimizasyon öncesinde yapılan birleştirmelerle kıyaslandığında büyük ölçüde azaldığı görülmektedir. Optimize edilmiş işlem parametreleriyle birleştirilen plakalarda çapak oluşumunun daha düşük olduğu, ilerleme hattındaki dalgalı yapının neredeyse tamamen ortadan kalktığı gözlemlenmiştir.

Optimizasyon sonrası yapılan kaynak işlemlerinde görülen mikro çatlaklar, mikro tüneller, mikro boşluklar ve penetrasyon eksikliğine bağlı pek çok kusurun ön ısıtma gibi önleyici tedbirler kullanılarak kolaylıkla ortadan kaldırılabileceği düşünülmektedir. Her ne kadar alüminyum malzemelerde yeniden kristalleşme zor olsa da özellikle AA7075 – AA7075 plaka çiftlerinin kaynak merkezlerinde başarılı bir şekilde gerçekleştiği ve tane yapısının küçüldüğü gözlemlenmiştir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında AA6061-T6 alüminyum alaşımı ve AA7075-T6 alüminyum alaşımı kendi aralarında ve birbirleriyle olmak üzere 3 farklı kombinasyonda sürtünme karıştırma kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmiş ve en uygun kaynak parametreleri bulunarak işlem parametrelerinin kaynak kalitesine etkileri araştırılmıştır. İşlem parametrelerini en iyileyeabilmek için 135 çift plaka sürtünme karıştırma kaynak yöntemi kullanılarak çeşitli işlem parametrelerinde birleştirilmiştir. Birleştirilen plakalardan elde edilen çekme test numuneleri kullanılarak her bir plakanın çekme dayanımı belirlenmiştir. Elde edilen çekme dayanımı değerleri kullanılarak her bir kombinasyon için işlem parametreleri en iyilenmiştir. En iyileme işlemi sonucunda elde edilen işlem parametre değerleri kullanılarak 9 adet yeni birleştirme işlemi yapılmıştır. Elde edilen her bir numune tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleriyle incelenmiş ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde özetlenmiştir;

1. Takım eğim açısı arttıkça kaynak hattında dalga formlu yapılar oluştuğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte bu yapıların malzeme çekme dayanımına doğrudan olumlu ya da olumsuz etkisi tespit edilememiştir.
2. Başlangıçtaki daldırma işleminden sonraki bekleme süresinin ve daldırma noktasının plaka kenarlarına olan uzaklığının plaka formunun korunması açısından oldukça önemli olduğu görülmüştür. Çünkü başlangıç kenar uzaklığına bağlı olarak 1000 dev/dak takım dönme devirlerinde başlangıç kenar formu korunurken, 500 dev/dak takım dönme devirlerinde başlangıç kenarının formunun bozulabildiği gözlemlenmiştir.
3. Takım eğim açısı sabit tutulurken, takım dönme devri arttırıldıkça yüzey kalitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte aynı değerlerde takım ilerleme hızı azaltıldıkça çapak oluşumunun artmaya başladığı ve yüzey kalitesinin olumsuz olarak etkilendiği görülmüştür.
4. Takım eğim açısının artmasının çapak oluşumunu ve kaynak kalınlığındaki incelmeyi azalttığı görülmüştür. Bununla birlikte takım eğim açısının çok fazla arttırılması takımın ilerleme tarafındaki teması azaltacağı için pime gelen toplam kuvvetin artacağı ve takımda hasar oluşabileceği düşünülmektedir.
5. Düşük ergime noktasına bağlı olarak AA7075 – AA7075 plaka çiftlerinde AA6061 – AA6061 plaka çiftlerindeki daha fazla çapak oluşumu gözlemlenmiştir.

6. AA6061 – AA7075 plaka çiftlerinin birleştirilmesiyle elde edilen çekme deneyi numunelerinin ortalama maksimum çekme dayanımları her üç takım eğim açısı değeri için de AA6061 – AA6061 plaka çiftlerinden daha yüksek, AA7075 – AA7075 plaka çiftlerinden ise daha düşük çıkmıştır.
7. Hem AA6061 – AA6061 plaka çiftlerinde hem de AA7075 – AA7075 plaka çiftlerinde kaynak merkezi olan pim ilerleme çizgisinden 5 mm'ye kadar uzaklaşıldıkça sertliğin kaynak merkezi sertliğine göre arttığı, sonrasında ise takım omuz çizgisine kadar olan mesafe boyunca tekrar azaldığı görülmüştür. Takım omuz çizgisinde meydana gelen yumuşama miktarları incelendiğinde ise AA6061 – AA6061 kombinasyonları ile AA6061 – AA7075 kombinasyonlarında yaklaşık %50 oranında bir yumuşama meydana gelmişken, AA7075 – AA7075 kombinasyonlarında bu oranın daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
8. Kaynak başlangıç noktasına yakın yerlerden alınan içyapı görüntülerinde yetersiz ısı girişine bağlı olarak oluşan çeşitli içyapı kusurlarıyla karşılaşılrsa da daha uzak noktalardan alınan görüntülerde bu kusurların büyük kısmının ortadan kalktığı görülmüştür.
9. Alüminyum malzemelerde yeniden kristalleşme zor olmasına rağmen özellikle AA7075 – AA7075 plaka çiftlerinde başarılı bir şekilde gerçekleştiği ve tane yapısının küçüldüğü gözlemlenmiştir.
10. Takım malzemesi deneysel çalışmalarda kullanılan alüminyum alaşımlardan çok daha sert olsa da takım aşınması her parametrede olmuştur. Bu sebepten dolayı takım geometrisi ne olursa olsun takım sertliğinin mümkün olduğunca arttırılmasının gerekliliği anlaşılmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen deneyimler sonunda sürtünme karıştırma kaynağı üzerine yapılacak çalışmalara ait öneriler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Malzeme ve takımda gerçekleştirilecek ön ısıtma işlemleri kaynak kalitesinin artmasına büyük ölçüde yardımcı olabilir.
- Takım dalma derinliğinin kaynak bölgesindeki boşluk oluşumlarına etkisinin incelendiği çalışmalara ağırlık verilebilir.
- Sürtünme karıştırma kaynak işleminde işlem parametrelerinin kaynak kalınlığındaki azalmaya etkileri incelenebilir.
- Sürtünme karıştırma kaynak işlemi sırasında meydana gelen takım aşınmasının kaynak kalitesine etkileri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Bilgin, M., Karabulut, Ş., ve Özdemir, A. (2017). Alüminyum magnezyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynak edilebilirliğinin değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(2), 191-209.
2. İnternet: Alüminyum : Genel Özellikleri. URL: <http://canaluminyum.com.tr/TR/Aluminium/>, Son Erişim Tarihi: 25.02.2020.
3. Vander Voort, G. F., Lampman, S. R., Sanders, B. R., Anton, G. J., Polakowski, C., Kinson, J., and Scott Jr, W. W. (2004). ASM handbook. *Metallography and microstructures*, 9, 00002-44073.
4. İnternet: Hall-Heroult Cell Schematic. URL: <https://www.makinaegitimi.com/aluminyum-uretimi/>, Son Erişim Tarihi: 07.02.2021.
5. Tanya, A. B. (2012). Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 635, 51-58.
6. İnternet: Understanding The Alloys of Aluminum. URL: <http://www.alcotec.com/us/en/education/knowledge/techknowledge/understanding-the-alloys-of-aluminum.cfm>, Son Erişim Tarihi: 25.09.2020.
7. İnternet: Karşılaştırmalı Mekanik Özellikler Tablosu. URL: <http://referansmetal.com/upload/files/aluminyum-mekanik-ozellikler.pdf>, Son Erişim Tarihi: 17.08.2020
8. İnternet: Alloy 6061. URL: <https://www.hydro.com/Document/Index?name=Alloy%206061&id=5963>, Son Erişim Tarihi: 07.02.2021.
9. İnternet: Technical Data Sheets. URL: <http://www.aerospacemetals.com/aluminum-distributor.html>, Son Erişim Tarihi: 21.11.2020.
10. İnternet: Nanotechnology Enables Engineers to Weld Previously Un-Weldable Aluminum Alloy. URL: <https://samueli.ucla.edu/nanotechnology-enables-engineers-to-weld-previously-un-weldable-aluminum-alloy/#>, Son Erişim Tarihi: 12.12.2020
11. Rao, T. B. (2020). Stochastic tensile failure analysis on dissimilar AA6061-T6 with AA7075-T6 friction stir welded joints and predictive modeling. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 20(4), 1333-1350.
12. Garg, A., Raturi, M., Garg, A., and Bhattacharya, A. (2020). Microstructure evolution and mechanical properties of double-sided friction stir welding between AA6061-T6 and AA7075-T651. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 431-438.

13. İnternet: Dökümcünün El Kitabı, Alüminyum Döküm Alaşımları. URL: <https://muhendishane143950393.files.wordpress.com/2018/09/ffe79-el-kitabi-04.pdf>, Son Erişim Tarihi: 11.12.2020.
14. İnternet: Aluminum and Aluminum Alloys: URL: https://www.asminternational.org/documents/10192/22833166/06610G_Sample_BuyNow.pdf/682770e4-3845-4e47-bc71-baf71b17a014, Son Erişim Tarihi: 28.12.2020.
15. Dagdelen, E., and Ulus, A. (2016). *Aluminum sheet production: Heat treatment of aluminium and temper designations of aluminium alloys*. 18th International Metallurgy and Materials Congress, Istanbul.
16. Muhamad, M., Jamaludin, M., Yusof, F., Mahmoodian, R., Morisada, Y., Suga, T., and Fujii, H. (2020). Effects of Al-Ni powder addition on dissimilar friction stir welding between AA7075-T6 and 304L. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 51(9), 1274-1284.
17. İnternet: Alüminyum Alaşımları İçin Temper Göstergeleri. URL: <http://web.gtu.edu.tr/aluminyum/2018/04/26/237/>, Son Erişim Tarihi: 26.02.2020.
18. Türker, M., ve Tosun, M. (2017). *Havacılık Endüstrisinde Kullanılan Modern Kaynak Teknolojileri*. X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi, Ankara.
19. İnternet: Demir Dışı Metallerin Kaynağı. URL: https://www.magmaweld.com.tr/Content/UserFiles/OerlikonKutuphanesi/Demir_disi_metallerin_kaynagina_giris.pdf, Son Erişim Tarihi: 14.01.2021.
20. Mendez, P., and Eagar, T. (2002, August). *New trends in welding in the aeronautic industry*. 2nd Conference on New Manufacturing Trends for Aeronautical Industries, Cambridge, USA.
21. Bozkurt, Y., Türker, A., Soytemiz, G., and Salman, S. (2019). The investigation and comparison of friction stir spot welding and electrical resistance spot welding of AA2024 aluminium alloy joints. *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 3(1), 52-58.
22. Atabay, S. E., and Dericioğlu, A. F. (2016). *Optimization of the diffusion bonding parameters for 6063 aluminum alloy*. 18th International Metallurgy and Materials Congress, Ankara, Turkey.
23. Kashaev, N., Ventzke, V., and Çam, G. (2018). Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 36, 571-600.
24. İnternet: EAA Aluminium Automotive Manual – Joining. URL: https://www.european-aluminium.eu/media/1514/1-introduction_2015.pdf, Son Erişim Tarihi: 24.02.2020.
25. İnternet: Sürtünme Karıştırma Kaynağı. URL: <http://www.teknikbelgeler.com/dokuman/belge/surtunmekaristirmakaynagi.pdf>, Son Erişim Tarihi: 23.09.2020.

26. Karagöz, İ., ve Öksüz, M. (2016). Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kullanılan yöntemler. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31, 19-28.
27. Prabhuraj, P., Rajakumar, S., and Balasubramanian, V. (2020). Electro chemical response of stir zone in friction stir welded AA7075-T651 joint in sodium chloride solution. *Materials Today: Proceedings*, 22(3), 546-550.
28. Bayazid, S. M., Heddad, M., and Cayiroglu, I. (2018). A review on friction stir welding, parameters, microstructure, mechanical properties, post weld heat treatment and defects. *Material Science & Engineering International Journal*, 2, 116-126.
29. İnternet: Boeing Still Tinkering with Giant Welder for SLS Stages. URL: <https://spacenews.com/boeing-still-tinkering-with-giant-welder-for-sls-stages/>, Son Erişim Tarihi: 16.02.2020.
30. İnternet: Friction Stir Welding. URL: <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2003/FSW/aaa.html>, Son Erişim Tarihi: 26.02.2020.
31. Jafari, H., Mansouri, H., and Honarpisheh, M. (2019). Investigation of residual stress distribution of dissimilar Al-7075-T6 and Al-6061-T6 in the friction stir welding process strengthened with SiO₂ nanoparticles. *Journal of Manufacturing Processes*, 43, 145-153.
32. Podržaj, P., Jerman, B., and Klobčar, D. (2015). Welding defects at friction stir welding. *Metallurgija*, 54(2), 387-389.
33. Şık, A. (2010). Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen magnezyum levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(2), 134-140.
34. Kumar, K., and Kailas, S. V. (2008). The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. *Materials Science and Engineering: A*, 485(1-2), 367-374.
35. Lacki, P., Wiğckowski, W., and Wiecek, P. (2015). Assessment of joints using friction stir welding and refill friction stir spot welding methods. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60(3), 2297-2306.
36. Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R., and Withers, P. J. (2009). Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*, 54(2), 49-93.
37. Boldsai Khan, E., Corwin, E., Logar, A., McGough, J., Arbogast, W., and Center, A. (2009). *Detecting wormholes in friction stir welds from welding feedback data*. 42nd Midwest Instruction and Computing Symposium, Rapid City, SD, USA.
38. Liu, Z., Cui, H., Ji, S., Xu, M., and Meng, X. (2016). Improving joint features and mechanical properties of pinless friction stir welding of Al-Cu 2A12-T4 aluminum alloy. *Journal of Materials Science and Technology*, 32(12), 1372-1377.

39. Oosterkamp, A., Oosterkamp, L. D., and Nordeide, A. (2004). Kissing bond phenomena in solid-state welds of aluminum alloys. *Welding Journal-New York*, 83(8), 225-S.
40. Ruzek, R., and Kadlec, M. (2014). Friction stir welded structures: Kissing bond defects. *Journal of Terraspace Science and Engineering*, 6, 77-83.
41. Hernández-García, D., Saldaña-Garcés, R., García-Vázquez, F., Gutiérrez-Castañeda, E., Deaquino-Lara, R., and Verdera, D. (2017). Friction stir welding of dissimilar AA7075-T6 to AZ31B-H24 alloys. *MRS Advances*, 2(64), 4055-4063.
42. Shashi Kumar, S., Murugan, N., and Ramachandran, K. K. (2019). Identifying the optimal FSW process parameters for maximizing the tensile strength of friction stir welded AISI 316L butt joints. *Measurement*, 137, 257-271.
43. Cao, X., and Jahazi, M. (2009). Effect of welding speed on the quality of friction stir welded butt joints of a magnesium alloy. *Materials & Design*, 30(6), 2033-2042.
44. Dewangan, S. K., Tripathi, M. K., and Manoj, M. K. (2020). Effect of welding speeds on microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welding of AA7075 and AA5083 alloy. *Materials Today: Proceedings*, 27(3), 2713-2717.
45. Talebizadeh Sardari, P., Musharavati, F., Khan, A., Sebaey, T. A., Eyvaziana, A., and Derazkola, H. A. (2020). Underwater friction stir welding of Al-Mg alloy: Thermo-mechanical modeling and validation. *Materials Today Communications*, 101965.
46. Kumar, K. S. A., Murigendrappa, S. M., Kumar, H., and Shekhar, H. (2018). Effect of tool rotation speed on microstructure and tensile properties of FSW joints of 2024-T351 and 7075-T651 reinforced with SiC nano particle: The role of FSW single pass. *AIP Conference Proceedings*, 1943.
47. Ko, Y., Lee, K., and Baik, K. (2017). Effect of tool rotational speed on mechanical properties and microstructure of friction stir welding joints within Ti-6Al-4V alloy sheets. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(8).
48. Li, Y., Sun, D., and Gong, W. (2019). Effect of tool rotational speed on the microstructure and mechanical properties of bobbin tool friction stir welded 6082-T6 aluminum alloy. *Metals*, 9, 894.
49. Prabha, K. A., Putha, P. K., and Prasad, B. S. (2018). Effect of tool rotational speed on mechanical properties of aluminium alloy 5083 weldments in friction stir welding. *Materials Today: Proceedings*, 5(9, Part 3), 18535-18543.
50. D, S., S, M., M, V., and G, M. R. (2020). Tool rotational speed variant response on the evolution of microstructure and its significance on mechanical properties of friction stir welded 9Cr-1Mo steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 278.

51. Rajendran, C., Srinivasan, K., Balasubramanian, V., Balaji, H., and Selvaraj, P. (2019). Effect of tool tilt angle on strength and microstructural characteristics of friction stir welded lap joints of AA2014-T6 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(9), 1824-1835.
52. Kumar, S. S., Murugan, N., and Ramachandran, K. K. (2020). Effect of tool tilt angle on weld joint properties of friction stir welded AISI 316L stainless steel sheets. *Measurement*, 150, 107083.
53. Zhang, S., Shi, Q., Liu, Q., Xie, R., Zhang, G., and Chen, G. (2018). Effects of tool tilt angle on the in-process heat transfer and mass transfer during friction stir welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 32-42.
54. İnternet: A (much) Closer Look at How We Build SLS. URL: <https://blogs.nasa.gov/Rocketology/tag/friction-stir-welding/>, Son Erişim Tarihi: 26.02.2020.
55. Arici, A., and Selale, S. (2007). Effects of tool tilt angle on tensile strength and fracture locations of friction stir welding of polyethylene. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(6), 536-539.
56. Barbini, A., Carstensen, J., and Dos Santos, J. F. (2018). Influence of a non-rotating shoulder on heat generation, microstructure and mechanical properties of dissimilar AA2024/AA7050 FSW joints. *J. Mater. Sci. Technol.*, 34(1), 119-127.
57. Ding, W., and Wu, C. (2019). Effect of ultrasonic vibration exerted at the tool on friction stir welding process and joint quality. *Journal of Manufacturing Processes*, 42, 192-201.
58. Liu, X. C., Wu, C. S., and Padhy, G. K. (2015). Improved weld macrosection, microstructure and mechanical properties of 2024Al-T4 butt joints in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 345-352.
59. Shi, L., Wu, C. S., and Fu, L. (2020). Effects of tool shoulder size on the thermal process and material flow behaviors in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 53, 69-83.
60. Elangovan, K., and Balasubramanian, V. (2008). Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *Materials & Design*, 29(2), 362-373.
61. Devuri, V., Mandal, N., Mahapatra, M., and Harsh, A. (2013). Tool design effects for FSW of AA7039. *Welding journal*, 92, 41-47.
62. Uygur, I. (2012). Influence of shoulder diameter on mechanical response and microstructure of FSW welded 1050 Al-alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*, 57.
63. Azmal Hussain, M., Zaman Khan, N., Noor Siddiquee, A., and Akhtar Khan, Z. (2018). Effect of different tool pin profiles on the joint quality of friction stir welded AA 6063. *Materials Today: Proceedings*, 5(2, Part 1), 4175-4182.

64. Padmanaban, G., and Balasubramanian, V. (2009). Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy – an experimental approach. *Materials and Design*, 30(7), 2647-2656.
65. Sharma, N., Siddiquee, A. N., Khan, Z. A., and Mohammed, M. T. (2018). Material stirring during FSW of Al–Cu: Effect of pin profile. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(7), 786-794.
66. Patel, N., Bhatt, K. D., and Mehta, V. (2016). Influence of tool pin profile and welding parameter on tensile strength of magnesium alloy AZ91 during FSW. *Procedia Technology*, 23, 558-565.
67. Lorrain, O., Favier, V., Zahrouni, H., and Lawrjaniec, D. (2010). Understanding the material flow path of friction stir welding process using unthreaded tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(4), 603-609.
68. Khan, N. Z., Siddiquee, A. N., and Khan, Z. A. (2018). Proposing a new relation for selecting tool pin length in friction stir welding process. *Measurement*, 129, 112-118.
69. Chiteka, K. (2013). Friction stir welding/processing tool materials and selection. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2, 8-18.
70. Teimurnezhad, J., Pashazadeh, H., and Masumi, A. (2016). Effect of shoulder plunge depth on the weld morphology, macrograph and microstructure of copper fsw joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 254-259.
71. Padhy, G. K., Wu, C. S., and Gao, S. (2018). Friction stir based welding and processing technologies - processes, parameters, microstructures and applications: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(1), 1-38.
72. Sreenivas, P., Kumar, R., and Sreejith, P. S. (2017). Effect of applied axial force on fsw of AA 6082 - T6 aluminium alloys. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8, 88-99.
73. Razal Rose, A., Manisekar, K., and Balasubramanian, V. (2011). Effect of axial force on microstructure and tensile properties of friction stir welded AZ61A magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(5), 974-984.
74. Sevvel, P., and Jaiganesh, V. (2017). Effects of axial force on the mechanical properties of AZ80A Mg alloy during friction stir welding. *Materials Today: Proceedings*, 4(2, Part A), 1312-1320.
75. İnternet: Shelley, T. Train Carriages Benefit from Multi-Head Friction Stir Welding. URL: <https://www.eurekamagazine.co.uk/design-engineering-features/technology/train-carriages-benefit-from-multi-head-friction-stir-welding/47900/>, Son Erişim Tarihi: 26.02.2020.
76. Kumari, K., Pal, S. K., and Singh, S. B. (2015). Friction stir welding by using counter-rotating twin tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 132-141.

77. Prado, R. A., Murr, L. E., Soto, K. F., and McClure, J. C. (2003). Self-optimization in tool wear for friction-stir welding of Al 6061+20% Al₂O₃ MMC. *Materials Science and Engineering: A*, 349(1), 156-165.
78. Fathi, J., Ebrahimzadeh, P., Farasati, R., and Teimouri, R. (2019). Friction stir welding of aluminum 6061-T6 in presence of watercooling: Analyzing mechanical properties and residual stress distribution. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(2), 107-115.
79. Merklein, M., and Giera, A. (2008). Laser assisted friction stir welding of drawable steel-aluminium tailored hybrids. *International Journal of Material Forming*, 1, 1299-1302.
80. Daftardar, S., *Laser assisted friction stir welding: finite volume method and metaheuristic optimization*. (Master dissertation, Louisiana State University, 2009).
81. Kohn, G., Greenberg, Y., Makover, I., and Munitz, A. (2002). Laser-assisted friction stir welding. *Welding Journal (Miami, Fla)*, 81, 46-48.
82. Campanelli, S., Casalino, G., Casavola, K., and Moramarco, V. (2013). Analysis and comparison of friction stir welding and laser assisted friction stir welding of aluminum alloy. *Materials*, 6(12), 5923-5941.
83. Dickerson, T., Shercliff, H., and Schmidt, H. (2003, May). *A weld marker technique for flow visualization in FSW a weld marker technique for flow visualization in friction stir welding*. 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Park City, Utah, USA.
84. Enami, M., Farahani, M., and Farhang, M. (2019). Novel study on keyhole less friction stir spot welding of Al 2024 reinforced with alumina nanopowder. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(9), 3093-3106.
85. Ji, S., Meng, X., Zeng, Y., Ma, L., and Gao, S. (2016). New technique for eliminating keyhole by active-passive filling friction stir repairing. *Materials & Design*, 97, 175-182.
86. Zhou, L., Liu, D., Nakata, K., Tsumura, T., Fujii, H., Ikeuchi, K., and Morimoto, M. (2012). New technique of self-refilling friction stir welding to repair keyhole. *Science and Technology of Welding and Joining*, 17(8), 649-655.
87. İnternet: Friction Stir Welding - the ESAB Way. URL: <http://eng.esab.co.kr/Web-App/Upload/2012/04/05/Friction%20Stir%20Welding.pdf>, Son Erişim Tarihi: 26.02.2020.
88. İnternet: What Materials Can I Join With Friction Stir Welding?. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-materials-can-i-join-with-friction-stir-welding>, Son Erişim Tarihi: 01.02.2020.
89. İnternet: Carter, B. Introduction to Friction Stir Welding (FSW). URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/42710093.pdf>, Son Erişim Tarihi: 05.02.2021.

90. De Backer, J., Christiansson, A. K., Oqueka, J., and Bolmsjö, G. (2012). Investigation of path compensation methods for robotic friction stir welding. *Industrial Robot: An International Journal*, 39, 601-608.
91. Sicilian.T, M., and Senthil, S. K. (2014, March). *Analysis of surface quality of friction stir welding joints using image processing techniques*. International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology, Kerela, India.
92. Shrivastava, A., Krones, M., and Pfefferkorn, F. (2015). Comparison of energy consumption and environmental impact of friction stir welding and gas metal arc welding for aluminum. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 9, 159-168.
93. Cui, L., Fujii, H., Tsuji, N., and Nogi, K. (2007). Friction stir welding of a high carbon steel. *Scripta Materialia*, 56(7), 637-640.
94. Kundu, J., Ghangas, G., Rattan, N., and Kumar, M. (2017). Friction Stir Welding: Merits over other joining processes. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 7, 1175-1177.
95. İnternet: Heavy-Duty Moving-Gantry FSW Machine. URL: <https://www.twi-global.com/pdfs/Equipment-factsheets/1486-Heavy-duty-FSW-gantry-LR.pdf>, Son Erişim Tarihi: 18.01.2020.
96. Chevret, S., Jemal, N., Langlois, L., Attar, A., Hatsch, J., Abba, G., and Bigot, R. (2014). Fsw process tolerance according to the position and orientation of the tool: Requirement for the means of production design. *Materials Science Forum*, 783-786, 1820-1825.
97. Tang, W., Guo, X., McClure, J., Murr, L., and Nunes, A. (1998). Heat input and temperature distribution in friction stir welding. *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*, 7, 163-172.
98. Burek, R., Wydrzyński, D., Sęp, J., and Wieckowski, W. (2017). The effect of tool wear on the quality of lap joints between 7075 T6 aluminum alloy sheet metal created with the FSW method. *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 20, 100-106.
99. İnternet: Kuka Robotic Friction Stir Welding. URL:<https://www.twi-global.com/who-we-are/who-we-work-with/members-showcase/products/robotic-friction-stir-welding>, Son Erişim Tarihi: 26.02.2020.
100. Hasan, M., Ishak, M., and Rejab, R. (2015). A simplified design of clamping system and fixtures for friction stir welding of aluminium alloys. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 9, 1628-1639.
101. Fratini, L., Micari, F., Buffa, G., and Ruisi, V. F. (2010). A new fixture for FSW processes of titanium alloys. *CIRP Annals*, 59(1), 271-274.
102. Kawashima, T., Sano, T., Hirose, A., Tsutsumi, S., Masaki, K., Arakawa, K., and Hori, H. (2018). Femtosecond laser peening of friction stir welded 7075-T73 aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 262, 111-122.

103. Anil Kumar, H. M., Venakata Ramana, V., and Shanmuganathan, S. P. (2018). Experimental investigation of mechanical properties and morphological studies on friction stir welded aluminum 2024 alloy. *Materials Today: Proceedings*, 5(1, Part 1), 700-708.
104. Nadammal, N., Kailas, S. V., and Suwas, S. (2015). A bottom-up approach for optimization of friction stir processing parameters; a study on aluminium 2024-T3 alloy. *Materials & Design*, 65, 127-138.
105. Kumar, A., Khurana, M. K., and Singh, G. (2018). Modeling and optimization of friction stir welding process parameters for dissimilar aluminium alloys. *Materials Today: Proceedings*, 5(11, Part 3), 25440-25449.
106. Liu, H. J., Hou, J. C., and Guo, H. (2013). Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy. *Materials & Design*, 50, 872-878.
107. Abrahams, R., Mikhail, J., and Fasihi, P. (2019). Effect of friction stir process parameters on the mechanical properties of 5005-H34 and 7075-T651 aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 751, 363-373.
108. Bayazid, S. M., Farhangi, H., and Ghahramani, A. (2015). Effect of pin profile on defects of friction stir welded 7075 aluminum alloy. *Procedia Materials Science*, 11, 12-16.
109. Carlone, P., and Palazzo, G. S. (2013). Influence of process parameters on microstructure and mechanical properties in AA2024-T3 friction stir welding. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2(4), 213-222.
110. Xu, W. F., Liu, J. H., Chen, D. L., Luan, G. H., and Yao, J. S. (2012). Improvements of strength and ductility in aluminum alloy joints via rapid cooling during friction stir welding. *Materials Science and Engineering: A*, 548, 89-98.
111. Arun Babu, N., Balu Naik, B., Ravi, B., and Rajkumar, G. (2018). Process parameter optimization for producing AA7075/WC composites by friction stir welding. *Materials Today: Proceedings*, 5(9, Part 3), 18992-18999.
112. Sivaraj, P., Kanagarajan, D., and Balasubramanian, V. (2014). Fatigue crack growth behaviour of friction stir welded AA7075-T651 aluminium alloy joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(8), 2459-2467.
113. Reza-E-Rabby, M., and Reynolds, A. P. (2014). Effect of tool pin thread forms on friction stir weldability of different aluminum alloys. *Procedia engineering*, 90, 637-642.
114. Rao, T. S., Reddy, G. M., and Rao, S. R. K. (2015). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA7075-T651 aluminum alloy thick plates. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(6), 1770-1778.

115. Bocchi, S., Cabrini, M., D'Urso, G., Giardini, C., Lorenzi, S., and Pastore, T. (2018). The influence of process parameters on mechanical properties and corrosion behavior of friction stir welded aluminum joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 35, 1-15.
116. Sun, Y., and Fujii, H. (2015). Improved resistance to hydrogen embrittlement of friction stir welded high carbon steel plates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(25), 8219-8229.
117. Wang, Z. B., He, Z. B., Fan, X. B., Zhou, L., Lin, Y. L., and Yuan, S. J. (2017). High temperature deformation behavior of friction stir welded 2024-T4 aluminum alloy sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 247, 184-191.
118. Yang, M., Bao, R., Liu, X., and Song, C. (2019). Thermo-mechanical interaction between aluminum alloy and tools with different profiles during friction stir welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(3), 495-506.
119. Ravi Kumar, S., Kaja Bantha Navas, R., and Sujeeth, P. S. (2019). Multiple response optimization studies for dissimilar friction stir welding parameters of 6061 to 7075 aluminium alloys. *Materials Today: Proceedings*, 16, 405-412.
120. Gowthaman, P., and Saravanan, B. (2020). Determination of weldability study on mechanical properties of dissimilar Al-alloys using friction stir welding process. *Materials Today: Proceedings*, 44(3), 206-212.
121. Mohamed, M. F., Yaknesh, S., Kumar, C. A., Rajadurai, J. G., Janarthanan, S., and Vignes, A. (2020). Optimization of friction stir welding parameters for enhancing welded joints strength using taguchi based grey relational analysis. *Materials Today: Proceedings*.
122. Chen, S., Zhang, H., Jiang, X., Yuan, T., Han, Y., and Li, X. (2019). Mechanical properties of electric assisted friction stir welded 2219 aluminum alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 44, 197-206.
123. Jamshidi Aval, H., and Loureiro, A. (2019). Effect of reverse dual rotation process on properties of friction stir welding of AA7075 to AISI304. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(5), 964-975.
124. Liu, H., Hu, Y., Du, S., and Zhao, H. (2019). Microstructure characterization and mechanism of acoustoplastic effect in friction stir welding assisted by ultrasonic vibrations on the bottom surface of workpieces. *Journal of Manufacturing Processes*, 42, 159-166.
125. Mahto, R. P., Gupta, C., Kinjawadekar, M., Meena, A., and Pal, S. K. (2019). Weldability of AA6061-T6 and AISI 304 by underwater friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 38, 370-386.
126. Singh, R. K. R., Prasad, R., Pandey, S., and Sharma, S. K. (2019). Effect of cooling environment and welding speed on fatigue properties of friction stir welded Al-Mg-Cr alloy. *International Journal of Fatigue*, 127, 551-563.

127. Devanathan, C., Babu, A. S., and Shankar, E. (2019). Friction stir welding of aluminum alloys using coated and non coated tool. *Materials Today: Proceedings*, 16, 889-896.
128. Dubourg, L., Merati, A., and Jahazi, M. (2010). Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin. *Materials & Design*, 31(7), 3324-3330.
129. Wahid, M. A., Khan, Z. A., and Siddiquee, A. N. (2018). Review on underwater friction stir welding: A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(2), 193-219.







GAZİ GELECEKTİR..