



TARSUS
ÜNİVERSİTESİ

T.C.

TARSUS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TEK VE ÇİFT TARAFLI SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAKLI
ALÜMİNYUM ALAŞIMI BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK VE
MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN KIYASLANMASI

ASIM İLHAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TARSUS – 2024

**T.C.
TARSUS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEK VE ÇİFT TARAFLI SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAKLI
ALÜMİNYUM ALAŞIMI BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK VE MİKROYAPI
ÖZELLİKLERİNİN KIYASLANMASI**

ASIM İLHAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şeref ÖCALIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TARSUS – 2024

Tarsus Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğüne;

Bu çalışma, jüri tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Şeref ÖCALIR
(Danışman)

Üye: Doç. Dr. Ahmet Ümit TEPE

Üye: Doç. Dr. İbrahim Aslan REŞİTOĞLU

Yukarıdaki Jüri kararı Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/..../2024 tarih ve/.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim elemanlarına ait olduklarını onaylarım.
.../.../2024

Doç. Dr. Ayşe ERGİN ÜNAL

Enstitü Müdürü

NOT: Bu tezde kullanılan ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu'ndaki hükümlere tabidir.

ETİK BEYANI

Tarsus Üniversitesi Lisansüstü Eğitim 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 ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim. / / 2024

İMZA
Asım İLHAN

ÖZET

TEK VE ÇİFT TARAFLI SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAKLI ALÜMİNYUM ALAŞIMI BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN KIYASLANMASI

ASIM İLHAN

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şeref ÖCALIR

Ağustos 2024, 81 sayfa

Bu çalışmada AA 5083-H111 ve AA 6082-T651 alüminyum alaşımı levhalar sürtünme karıştırma kaynak (SKK) ve çift taraflı sürtünme karıştırma kaynak (ÇT-SKK) yöntemiyle farklı devir ve ilerleme hızında birleştirilmiştir. Farklı parametrelerde birleştirilen levhalara çekme deneyi, eğme deneyi, mikrosertlik ölçümleri, metalografik incelemeler yapılarak bulgular karşılaştırılmıştır. Çalışılan parametrelerin bir kısmında birleştirmelerin yüzeyinde takım kaynaklı deformasyonlar belirgin olarak görülmüştür ve bunun birleştirmelerin mukavemetini azalttığı sonucuna varılmıştır. SKK'li birleştirmelerde çekme mukavemeti 208,17-239,55 MPa arasındaki değerlerde olduğu tespit edilmiştir. ÇT-SKK'li birleştirmelerde ise çekme mukavemeti 194,11-204,91 MPa arasındaki değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Eğme deneyi sonuçları SKK'li bağlantılarda kaynak yüzeyi ve kaynak kökünde hasar oluştuğunu fakat ÇT-SKK bağlantılarında hasar oluşmadığını göstermiştir. Işık mikroskobu incelemelerinde, kaynaklı birleştirmelerde kaynak merkezinde soğan halkası şeklinde kayma bantları belirgin bir şekilde görülmüştür. Kaynaklı birleştirmelerde sertlik değerleri AA 5083 tarafında düşük değerlerde seyretmişken AA 6082 tarafına doğru yükselme eğilimi göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı (ÇT-SKK), Al alaşımı.

ABSTRACT

COMPARISON OF MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF SINGLE AND DOUBLE SIDED FRICTION STIR WELDED ALUMINUM ALLOY JOINTS

ASIM İLHAN

Master Thesis, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assit. Prof. Şeref ÖCALIR

August 2024, 81 pages

In this study, AA 5083-H111 and AA 6082-T651 aluminum alloy sheets were joined by friction stir welding (FSW) and double-sided friction stir welding (DS-FSW) methods at different rotation speed and traverse speed. Tensile tests, bending tests, microhardness measurements, and metallographic examinations were performed on the sheets joined at different parameters and the findings were compared. In some of the studied parameters, tool-induced deformations were clearly observed on the surfaces of the joints and it was concluded that this reduced the strength of the joints. The tensile strength of the FSW joints ranged between 208,17-239,55 MPa. The tensile strength of the DS-FSW joints ranged between 194,11-204,91 MPa. The bending test results showed that damage occurred on the weld surface and weld root in FSW joints, but no damage occurred in the DS-FSW joints. Light microscope examinations showed, onion ring shaped shear bands were clearly seen in the weld center of welded joints. In welded joints, hardness values were low on the AA 5083 side, while they tended to increase towards the AA 6082 side.

Keywords: Friction stir welding (FSW), double-sided friction stir welding (DS-FSW), Al alloy.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimde bana akademik bakış açısı ve araştırma becerileri kazandıran tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Şeref ÖCALIR'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Özen İş Makina, Erciyas Çelik Boru, Berdan Cıvata firmalarına ve ayrıca kaynak işlemlerinde ve deneysel çalışmalarda bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren Arş. Gör. Kazım ERCAN'a, Serdar ARSLAN'a, Mehmet KUŞ'a, Feyzi CAN'a, Ömer Faruk YASAK'a ve Sabahattin ALKAÇ'a teşekkürü borç bilirim.

Son olarak bu günlere gelmemde beni destekleyen aileme ve dostlarıma teşekkür ederim. Bu çalışma Tarsus Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: OSB.23.004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
KISALTMALAR.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
EKLER LİSTESİ.....	xii
GİRİŞ.....	1

BÖLÜM I

AMAÇ ve KAPSAM

1.1. Amaç ve Kapsam.....	3
--------------------------	---

BÖLÜM II

LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Literatür Taraması.....	4
2.1.1. Çift-Tarafli Sürtünme Karıştırma Kaynak Takımı ve Düzenegi.....	5
2.1.2. Çift-Tarafli Sürtünme Karıştırma Kaynak İşleminin Uygulamaları.....	6

BÖLÜM III

MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal.....	14
3.1.1. AA 5083 Al Alaşımı Malzeme.....	14
3.1.2. AA 6082 Al Alaşımı Malzeme.....	15
3.1.3. SKK ve ÇT-SKK Takımı.....	16
3.1.4. Kaynak İşlemi Kalıbı.....	17
3.1.5. SKK ve ÇT-SKK Makinesi.....	18
3.1.6. Zımpara ve Parlatma Makinesi.....	19
3.1.7. Çekme Deneyi Makinesi.....	19
3.1.8. Eğme Deneyi Makinesi.....	20
3.1.9. Mikro-sertlik Ölçüm Makinesi.....	20
3.1.10. Işık (Optik) Mikroskobu.....	21
3.2. Metot.....	21
3.2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynak İşlemi.....	21

3.2.2. Çekme Deneyi Yöntemi ve Deney Numuneleri.....	23
3.2.3. Eğme Deneyi Yöntemi ve Deney Numuneleri.....	23
3.2.4. Işık Mikroskobu ve Mikro-Sertlik Numune Hazırlık Yöntemi.....	24

BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. SKK ve ÇT-SKK'li Birleştirmelerinin Yüzey ve Kök Yapısı.....	25
4.2. SKK ve ÇT-SKK'li Birleştirmelerin Çekme Deneyi Bulguları.....	27
4.3. SKK ve ÇT-SKK'li Birleştirmelerin Eğme Deneyi Bulguları.....	34
4.4. Mikro-sertlik Ölçümü Bulguları.....	38
4.5. Işık Mikroskobu Bulguları.....	40
4.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Bulguları.....	44
SONUÇ ve ÖNERİLER.....	49
KAYNAKÇA.....	52
EKLER.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	81



KISALTMALAR

AL	: Alüminyum
ANN	: Yapay Sinir Ağı
CNC	: Bilgisayar Sayısal Kontrol
ÇT-SKK	: Çift Taraflı Sürtünme Karıştırma Kaynağı
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
dak.	: Dakika
dev.	: Devir
DS-FSW	: Çift Taraflı Srtünme Karıştırma Kaynağı
Fe	: Demir
FSW	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
g	: Gram
GPa	: Giga Paskal
HV	: Vickers Sertliği
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
İB	: İlerleme Bölgesi
KM	: Kaynak Merkezi
kN	: Kilo Newton
M5	: Metrik 5
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
Mn	: Manganez
MPa	: Mega Paskal
µm	: Mikron
ÖB	: Örtüşme Bölgesi
RSM	: Yanıt Yüzey Yöntemi
s	: Saniye
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
SKİ	: Sürtünme Karıştırma İle İşleme

SKNK	: Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı
SKK	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
Ti	: Titanyum
TMEB	: Termomekanik Olarak Etkilenen Bölge
TWI	: Kaynak Enstitüsü
UTS	: Çekme Mukavemeti
WOA	: Balina Optimizasyon Algoritmaları
YB	: Yığılma Bölgesi
Zn	: Çinko
%	: Yüzde

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. AA 5083 Al Alaşımının Kimyasal Bileşimi.....	14
Tablo 3.2. AA 5083-H111 Al Alaşımının Mukavemet Değerleri.....	15
Tablo 3.3. AA 6082 Al Alaşımının Kimyasal Bileşimi.....	15
Tablo 3.4. AA 6082-T651 Al Alaşımının Mukavemet Değerleri.....	16
Tablo 3.5. Kaynak İşlemi Parametreleri ve Parametre Kodları.....	22
Tablo 4.1. Çekme Deneyi Mukavemet ve % Uzama Değerleri.....	29
Tablo 4.2. SKK'li ve ÇT-SKK'li Birleştirmelerin Kaynak Performansı.....	30
Tablo 4.3. SKK'li Birleştirmelerin Eğme Deneyi Bulguları.....	36
Tablo 4.4. ÇT-SKK'li Birleştirmelerin Eğme Deneyi Bulguları.....	38



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Çift-Tarafli Sürtünme Karıştırma Kaynak (ÇT-SKK) İşlemi.....	4
Şekil 2.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı: a) SKK Yöntemi; b) ÇT-SKK Yöntem.....	5
Şekil 2.3. Kaynaklı Bağlantıya Ait Işık Mikroskobu Görüntüsü.....	6
Şekil 2.4. Numune Kesitlerinin Nanoindentasyon Sertliği: a) Pimli SKK; b) Pimsiz SKK; c) Pimli İB-İB ÇSKK; d) Pimli İB-YB-ÇT-SKK.....	7
Şekil 2.5. AA2050-T84 Birleştirmelerin Hacimsel Kusurları.....	8
Şekil 2.6. a) ÇT-SKK Yönteminin Uygulanması; b) ÇT-SKK Işık mikroskobu Görüntüsü; c) İlk (Üst) Kaynak Hattı; d) ITAB; e) TMEB; f) KM; g) ÖB.....	9
Şekil 2.7. ÇT-SKK Yöntemi ve Birleştirmelerin Makro Yapısı.....	10
Şekil 2.8. Tek Taraftan SKK Yöntemi ve ÇSKK Yöntemine Ait Makro ve Mikroyapı Görüntüleri: a) Tek Taraftan SKK Makroyapısı, b) ÇT-SKK makroyapısı, c) Tek Taraftan SKK Mikroyapısı, d) ÇT-SKK Mikroyapı görüntüleri.....	11
Şekil 2.9. SKK Sistemi: a) Takım Döndürme ve Sıkıştırma Sistemi, b) Boyutların Ayrıntıları.....	12
Şekil 2.10. SKNK Bağlantılarının Kesit Morfolojisi: a) A Planı, 0,7 MPa; b) A Planı, 0,4 MPa; c) B Planı, 0,7 MPa; d) B Planı, 0,4 MPa; e) C Planı, 0,7 MPa.....	13
Şekil 3.1. Levha Kalınlığına Bağlı SKK Takımı Omuz Çapı Dağılımı.....	16
Şekil 3.2. Levha Kalınlığına Bağlı SKK Takımı Pim Çapı Dağılımı.....	17
Şekil 3.3. SKK ve ÇT-SKK Takımları.....	17
Şekil 3.4. SKK Kalıbı.....	18
Şekil 3.5. Freze Tezgâhı.....	18
Şekil 3.6. Zımparalama-Parlatma Makinesi.....	19
Şekil 3.7. Çekme Deneyi Makinesi.....	19
Şekil 3.8. Eğme Deneyi Makinesi.....	20
Şekil 3.9. HV Mikrosertlik Ölçüm Makinesi.....	20
Şekil 3.10. Işık (Optik) Mikroskobu.....	21
Şekil 3.11. Kaynak İşlem Adımları.....	22
Şekil 3.12. Çekme Deneyi Numuneleri.....	23
Şekil 3.13. Eğme Deneyi Numuneleri.....	24
Şekil 3.14. Işık Mikroskobu İncelemeleri ve Mikro-Sertlik Ölçüm Numuneleri.....	24
Şekil 4.1. SKK'li Numunelerin Kaynak Yüzey Görüntüleri.....	25

Şekil 4.2. SKK’li Numunelerin Kaynak Kökü Görüntüleri.....	26
Şekil 4.3. ÇT-SKK’li Numunelerin Kaynak Yüzey Görüntüleri.....	26
Şekil 4.4. SKK’li Numunelerin Çekme Deneyi Sonrası Numune Görüntüleri.....	27
Şekil 4.5. ÇT-SKK’li Numunelerin Çekme Deneyi Sonrası Numune Görüntüleri....	28
Şekil 4.6. SKK’li Numunelerin Çekme Deneyi Grafiği.....	31
Şekil 4.7. ÇT-SKK’li Numunelerin Çekme Deneyi Grafiği.....	32
Şekil 4.8. SKK’li Birleştirmelerin Parametrelere Bağlı Mukavemet ve % Uzama Değişimi.....	33
Şekil 4.9. ÇT-SKK’li Birleştirmelerin Parametrelere Bağlı Mukavemet ve %Uzama Değişimi.....	34
Şekil 4.10. SKK’li Birleştirmelerin Kep (Yüzey) ve Kök Eğme Deneyi Sonrası Görüntüleri.....	35
Şekil 4.11. ÇT- SKK’li Birleştirmelerin Eğme Deneyi Sonrası Görüntüleri.....	37
Şekil 4.12. SKK’li Birleştirmelerin Mikrosertlik Ölçüm Grafiği.....	39
Şekil 4.13. ÇT-SKK’li Birleştirmelerin Mikrosertlik Ölçüm Grafiği.....	40
Şekil 4.14. T1 (T-1040-45) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) YB-KM Ara Yüzü; c) KY; d) KM; e) KK; f) KM-İB Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB.....	41
Şekil 4.15. T2 (T-1040-75) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) YB-KM Ara Yüzü; c) KY; d) KM; e) KK; f) KM-İB Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB.....	41
Şekil 4.16. T4 (T-2080-45) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) YB-KM Ara Yüzü; c) KY; d) KM; e) KK; f) KM-İB Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB.....	41
Şekil 4.17. T5 (T-2080-75) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) YB-KM Ara Yüzü; c) KY; d) KM; e) KK; f) KM-İB Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB.....	42
Şekil 4.18. T6 (T-2080-113) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) YB-KM Ara Yüzü; c) KY; d) KM; e) KK; f) KM-İB Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB.....	42
Şekil 4.19. Ç1 (Ç-1040-45) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) AA 5083 KM Ara Yüzü; c) 1. Paso KY; d) ÖB; e) 2. Paso KY; f) KM-AA 6082 Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB.....	43
Şekil 4.20. Ç2 (Ç-1040-75) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA	

5083 TMEB; b) AA 5083 KM Ara Yüzü; c) 1. Paso KY; d) ÖB; e) 2. Paso KY; f) KM-AA 6082 Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB.....	43
Şekil 4.21. Ç4 (Ç-2080-45) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) AA 5083 KM Ara Yüzü; c) 1. Paso KY; d) ÖB; e) 2. Paso KY; f) KM-AA 6082 Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB.....	43
Şekil 4.22. Ç5 (Ç-2080-75) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) AA 5083 KM Ara Yüzü; c) 1. Paso KY; d) ÖB; e) 2. Paso KY; f) KM-AA 6082 Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB.....	44
Şekil 4.23. Ç6 (Ç-2080-113) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) AA 5083 KM Ara Yüzü; c) 1. Paso KY; d) ÖB; e) 2. Paso KY; f) KM-AA 6082 Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB.....	44
Şekil 4.24. T5 (T-2080-75) parametrelili numunenin SEM görüntüleri.....	45
Şekil 4.25. T2 (T-1040-75) parametrelili numunenin SEM görüntüleri.....	46
Şekil 4.26. Ç1 (Ç-1040-45) parametrelili numunenin SEM görüntüleri.....	47
Şekil 4.27. Ç4 (Ç-2080-45) parametrelili numunenin SEM görüntüleri.....	47



EKLER LİSTESİ

	Sayfa
Ek 1. Çekme Deneyi Grafikleri.....	59
Ek 2. SKK'li ve ÇT-SKK'li Birleştirmelerin Mikrosertlik Ölçümleri.....	79



GİRİŞ

Üretim, tüketicilerin beklentilerini karşılamak üzere hammaddelerin ya da yarı mamullerin nihai ürünlere dönüştürülmesi süreci olarak tanımlanabilir. Günümüz rekabetçi üretim süreci kaynakların ve enerjinin çevreye minimum etkiyle optimum kullanımını zorunlu kılarak, gelecek nesiller için kaynaklara zarar vermeden ihtiyaçları karşılayabilen “sürdürülebilirlik” olgusuna önem vermelidir. Bu bağlamda sürdürülebilir imalat, enerji açısından verimli, çevre dostu, çalışanlar, tüketiciler ve topluluklar için güvenli, ekonomik açıdan istikrarlı ve kaynakları koruyan, süreçlere dayanan ürünlerin üretimini içerir (Majeed vd.,2021:6558-6563).

Kaynaklı işlemi, makine ve inşaat başta olmak üzere insan yapıtlarının imalatında önemli bir süreçtir. Sürdürülebilir bir kaynaklı imalatta, maksimum işlem verimliliği, maksimum enerji verimliliği, optimum hammadde kullanımı, minimum çevresel etki göz önünde bulundurulmalıdır (Bağ vd.,2020:225-236).

Geleneksel ergitme kaynak yöntemlerinde karşılaşılan zorluklara alternatif ve etkili olabilecek sürtünme kaynağı, basınç kaynağı, sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ve difüzyon kaynağı vb. gibi katı hal kaynak işlemleri keşfedilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), enerji verimliliği ve çevre dostu olması nedeniyle yeşil bir imalat yöntemidir. Bu katı hal birleştirme işlemi, bir omuz ve/veya bir pimden oluşan döner bir takım ile sağlanır. Omuz sürtünme yoluyla ısı üretir ve omuzun alt yüzeyinin altında nispeten ince bir tabakada plastik deformasyon meydana gelerek pimin karıştırma marifetiyle birleşim sağlanır (Nandau vd.,2008:980-1023). SKK, geleneksel ergitme kaynak işlemleriyle birleştirilemez olarak değerlendirilen malzemeleri birleştirmek için uygun bir yöntemdir. Ayrıca SKK, ergitme kaynak yöntemleri ile kaynaklanamayan ya da yetersiz performansta birleştirilebilen 2xxx ve 7xxx seri alüminyum alaşımlarını birleştirmek için başarılı bir şekilde kullanılır. Ayrıca SKK yöntemiyle, benzer veya farklı eşit/eşit olmayan kalınlıktaki malzemeleri erime noktasının altında birleştirmek için umut verici çalışmalar bulunmakta ve uygulanmaktadır. Uygulamalara ve avantajlara dayalı olarak SKK, son yıllarda havacılık, raylı araçlar, denizcilik, otomotiv vb. gibi çeşitli alanlarda uygulanması ile yaygın ilgi görmüştür (Öcalır,2019; TWI,2024).

Literatürde ve endüstriyel uygulamalarda genellikle bir yüzeyden uygulanarak SKK işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu uygulamalar yüksek başarıda birleştirme sağlasa da bazı uygulamalarda tek taraftan uygulanan SKK işlemleri yetersiz nüfuziyet, kaynak kök bölgesinde boşluk ve çentik oluşumu gözlemlenebilmektedir (Kah

vd.,2015:1-10). Bu çalışmada çift-terafli sürünme karıştırma kaynak (ÇT-SKK) yönteminin literatür ve endüstrideki uygulamaları araştırılmış ve bu yöntem üzerinde yeterli çalışma yapılmadığı tespit edilmiştir. Yapılan tez çalışması ile AA 5083-H111 ve AA 6082-T651 Al alaşımı levhalar SKK ve ÇT-SKK yöntemi ile farklı parametrelerde birleştirilerek iki yöntemin kaynaklı birleştirmelerin mekanik ve mikroyapı özellikleri açısından üstünlükleri ve sınırlılıkları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

BÖLÜM I

AMAÇ ve KAPSAM

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), geleneksel ark kaynağı işlemlerine göre bir dizi avantaj sunmaktadır. Katı hal kaynak işlemi olarak SKK, sıcak çatlama, gözeneklilik veya katılaşma çatlakları olmayan, büyük ölçüde hatasız bir birleştirme yöntemidir. Tez çalışmasında uygulanacak olan çift taraflı sürtünme karıştırma kaynak (ÇT-SKK) yönteminin, literatür taramalarında da belirtildiği üzere, kaynak bağlantılarının mukavemet özellikleri ve mikroyapısal değişikliklerinin tek taraflı sürtünme karıştırma kaynak yöntemine göre üstünlüğü ve sınırlılıkları hakkında karşılaştırmalı olarak incelenerek literatüre ve endüstriye katkı sağlamak hedeflenmiştir.

Yapılan çalışmadaki amacımız sürtünme karıştırma kaynak (SKK) sonrası kaynak kök bölgesinin yetersiz nüfuziyet ve çentik etkisi gibi muhtemel mukavemet özellikleri olumsuz yönde etkileyen faktörleri gidermektir. Bunun için farklı parametrelerde birleştirilen kaynaklı levhalar ters yüz edilerek bir paso daha aynı parametrelerde kaynak işlemi uygulanacak standartlara uygun deneysel çalışmalar yapılarak bulgular değerlendirilecektir. Çalışma sonucunda, ÇT-SKK işleminin SKK işlemine göre üstünlükleri ve sınırlılıklarının araştırılacaktır.

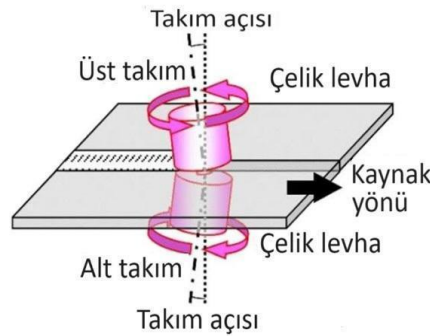
BÖLÜM II

LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Literatür Taraması

Sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak yapılması zor ve hatta kaynak yapılamaz olarak adlandırılan malzemelerin birleştirilmesini amaçlayan bir teknolojidir. Süreç, iki metal parçanın ergitilmeden moleküler düzeyde birleştirilmesini içerir. Kaynak takımı birleştirme hattı boyunca yerinde döner ve ilerler. Malzemeyi yumuşatmak için yeterli sürtünme ısısına ulaşarak parçaları karıştırarak birbirine birleşimini sağlar (Matsushita vd.,2023:561-571; Nath vd.,2021:691-703).

Çift- taraflı sürtünme karıştırma kaynak (ÇT-SKK) işlemi ise çift döner takım kullanarak metal levhaları birleştirme yöntemidir. Ayrıca önce birleştirilecek levhanın bir yüzü ardından levha ters yüz edilerek diğer yüzü kaynak yapılarak iki adımda yöntem uygulanabilmektedir. Takımlar, istenen malzeme akışına ve bağlantı kalitesine bağlı olarak aynı veya ters yönde döner. Çift- taraflı SKK, tek taraflı SKK kıyasla kaynak hızını artırabilir, takım aşınmasını azaltabilir ve bağlantı özelliklerini iyileştirebilmektedir (Matsushita vd.,2023:561-571; Nath vd.,2021:691-703). Çift- taraflı sürtünme karıştırma kaynak işleminin uygulanması Şekil 2.1.'de verilmiştir (STAM-Science and Technology in Advanced Manufacturing,2024).



Şekil 2.1. Çift-Taraflı Sürtünme Karıştırma Kaynak (ÇT-SKK) İşlemi

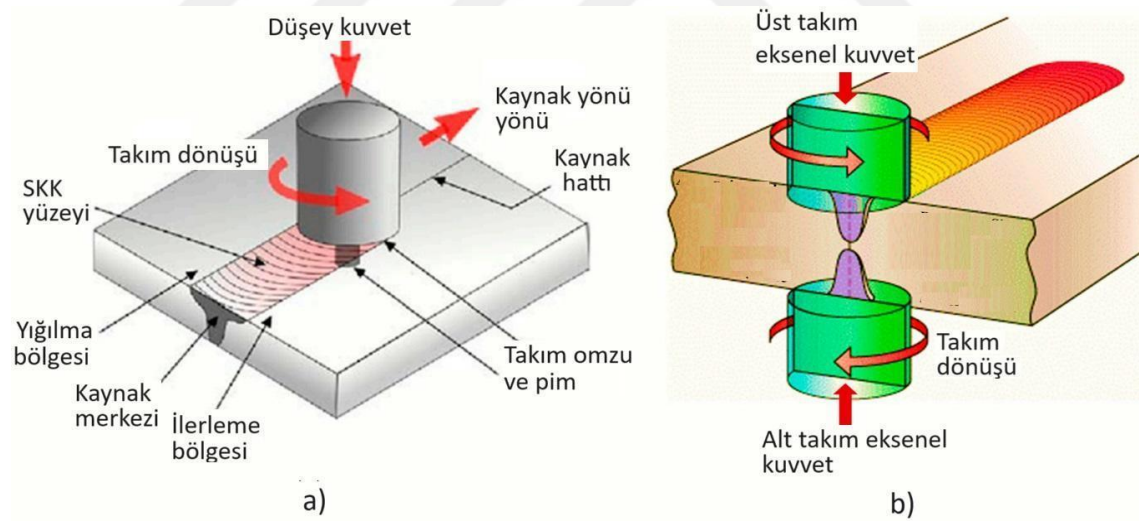
Kaynak: STAM, 2024

Çift- taraflı sürtünme karıştırma kaynağı, tek taraflı SKK'ye kıyasla kaynak işlem hızını artırabilir ve hataları azaltabilir. Çift- taraflı SKK yöntemi, otomotiv uygulamaları için farklı metalleri veya gelişmiş yüksek mukavemetli çelikleri kaynaklamak için de kullanılabilir (Matsushita vd.,2023:561-571; Rahmatian vd.,2019:2739-275; Singh vd.,2021:6-11; Kaygusuz vd.,2023:286-295).

SKK yönteminin otomotiv, uçak, denizcilik, demiryolu ve havacılık endüstrilerinde birçok uygulaması vardır. Yüksek kaynak kalitesi ve geometri doğruluğu nedeniyle havacılık ve uzay endüstrisinde uçak gövdeleri, ince alaşımlı kaplamalar, yakıt tankları, hafif yapılarda, otomotiv endüstrisi, demiryolu için vagonlar ve arabaların imalatında kısmen kullanılmaktadır (Patnaik vd.,2022:2681). SKK'den türetilen sürtünme karıştırma ile işleme (SKİ), plastik deformasyon ve düşük sıcaklık yoluyla özel mikro yapılarda, gelişmiş mekanik özelliklere sahip döküm parçalarda, kompozitler ve yüzey kaplamaları üretmek veya yüzey yapısını değiştirmek için kullanılan bir katı hal işleme tekniğidir (Ma vd.,2022:361-366).

2.1.1. Çift-Tarafli Sürtünme Karıştırma Kaynak Takımı ve Düzenegi

Tek taraftan uygulanan ve SKK olarak bilinen kaynak işleme alternatif olarak aynı anda iki tarafta bir adımda çalışabilen bir ÇT-SKK mekanizması tasarlamak yöntemin uygulanmasında önemli bir konudur. Tek taraftan uygulanan ve çift taraftan uygulanması önerilen SKK yöntemleri Şekil 2.2.'de şematik olarak verilmiştir (Muhayat vd.,2023:75).



Şekil 2.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı: a) SKK Yöntemi; b) ÇT-SKK Yöntem

Kaynak: Muhayat vd.,2023:75

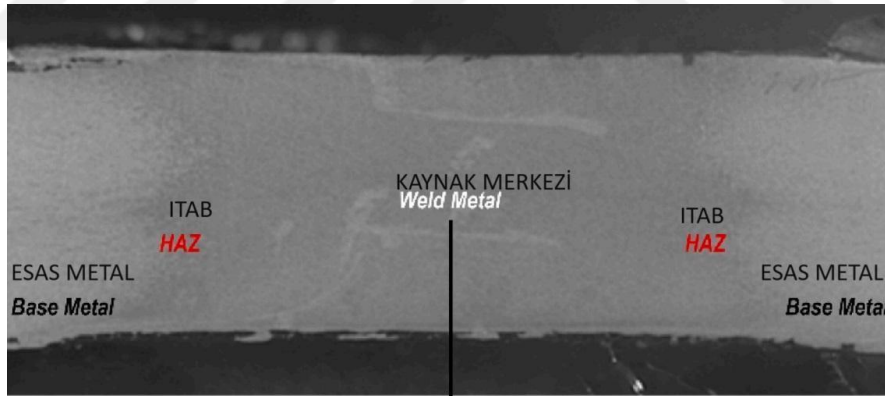
İki aşamalı bir kaynak işlemine sahip ÇT-SKK yönteminde, tek yüzeyden kaynak yapılan plaka ters yüz edilir ve plakanın diğer tarafından ikinci kez kaynak işlemi uygulanır. Bu işlem uzun üretim süresi ve enerji gerektirir. Bu nedenle tek aşamalı çift-tarafli bir SKK yöntemi geliştirmek gerekmektedir. Bu yöntemde, kaynak-takım çifti

plakanın iki tarafında aynı anda hareket eder ve böylece birleştirme işlemi tek seferde gerçekleştirilebilir (Muhayat vd.,2023:75).

2.1.2. Çift-Tarafli Sürtünme Karıştırma Kaynak İşleminin Uygulamaları

SKK yöntemi, benzer veya farklı metalik malzemeler ve metal ve metal dışı malzemeler için uygulanmaktadır. Çift-tarafli sürtünme karıştırma kaynak (ÇT-SKK) yöntemi başta Al alaşımları olmak üzere magnezyum ve polimer malzemelere de uygulanmaktadır. Özellikle tek tarafli kaynak işleminde yüksek sıcaklık gerektirmesi sebebiyle çeliklere de uygulanabilmektedir (Singh, vd.,2018:339-416).

Priyasudanang ve diğeri yaptıkları çalışmada, 6 mm kalınlıkta Al 6061 alaşımı plakalara çift-tarafli sürtünme karıştırma kaynak işlemi uygulamışlardır. Kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerini ve korozyon davranışlarını belirlemeyi amaçlamışlardır. Üst ve alt takımların dönme hızı ve eksenini değiştirilerek kaynak işlemini uygulamışlardır. Mikroyapısal gözlemlerin sonuçlarında kaynak işleminin neden olduğu ısının, karıştırma alanında ince taneler şeklinde yeniden kristalleşmeye neden olduğunu ve faz değişimi olmadığını gözlemlemişlerdir. Kaynaklı birleştirmeye ait ışık mikroskobu görüntüsü Şekil 2.3.'te verilmiştir (Priyasudana vd.,2023).

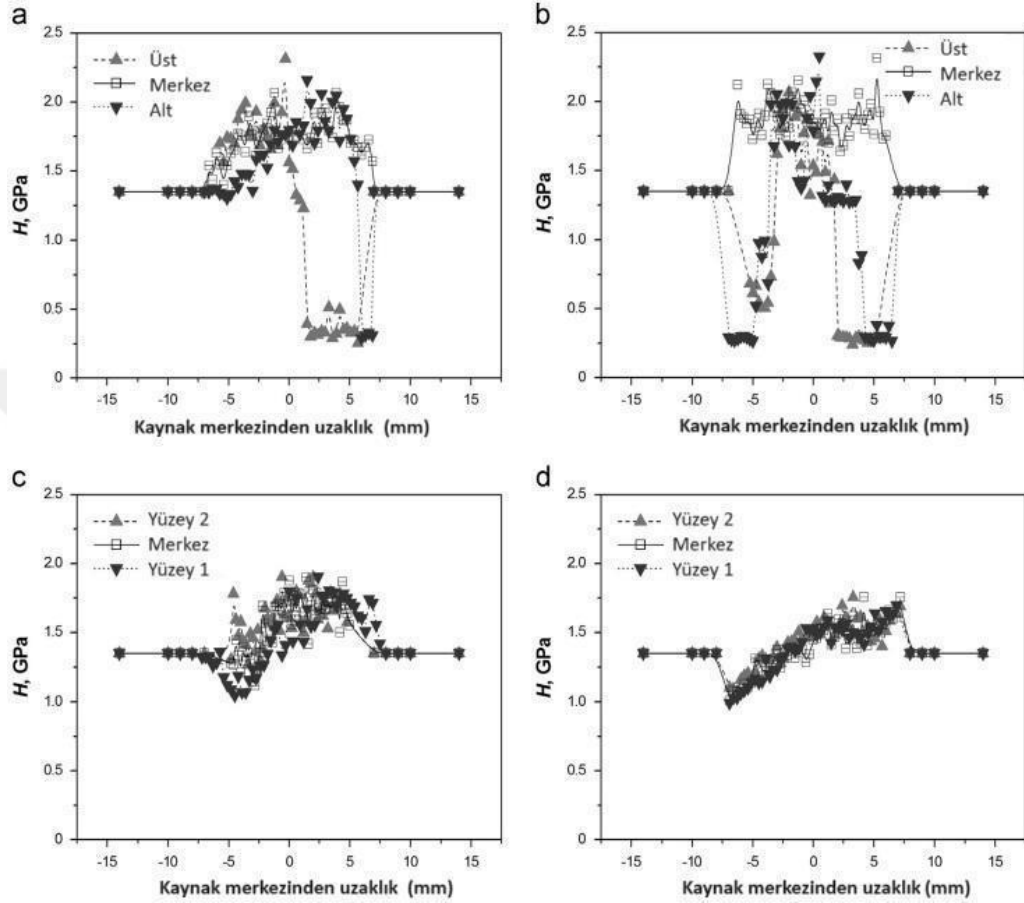


Şekil 2.3. Kaynaklı Birleştirmeye Ait Işık Mikroskobu Görüntüsü

Kaynak: Priyasudana vd.,2023

Cabibbo ve diğeri çalışmalarında, çift-tarafli sürtünme karıştırma kaynağı işlemini AA 6082 malzeme üzerinde geleneksel pimli ve pimsiz takımla ile birleştirmişlerdir. Çalışmalarında mikroyapı değişimlerini, mikrosertlik ve elastik modülünü incelemişlerdir. Termomekanik etkilenen bölge (TMEB) ve ısıdan etkilenen bölgeyi (ITAB), kaynak merkezini (KM), ilerleme bölgesi (İB) ve yığılma bölgelerini (YB) farklı kaynak kesit derinliklerinde mekanik olarak karakterize etmek için nanoindentasyon yöntemi kullanılmıştır. Karıştırılan bölgede daha iyi mikroyapı

homojenliği ve ana metale yakın sertlik ve elastik modül değerleri, geleneksel SKK yöntemine kıyasla ÇT-SKK daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. İnceledikleri numune kesitlerinin nanoindentasyon sertliği Şekil 2.4.'te verilmiştir (Cabibbo vd.,2014:209-217).



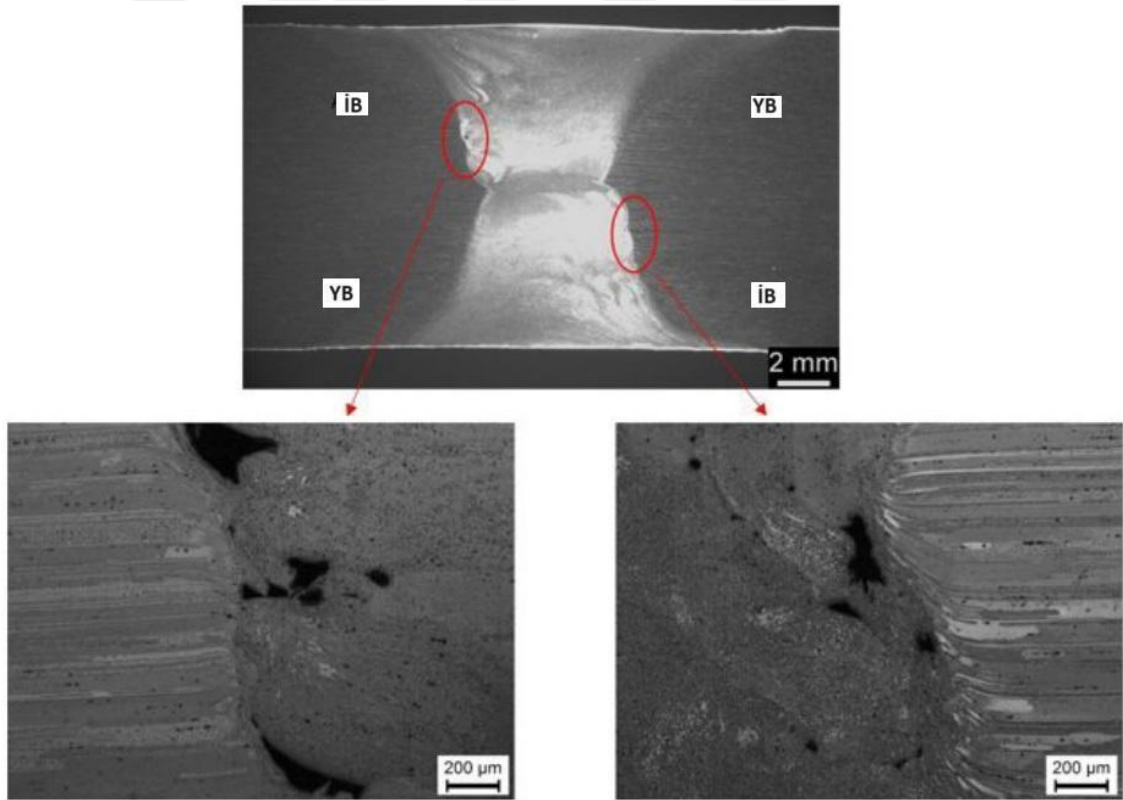
Şekil 2.4. Numune Kesitlerinin Nanoindentasyon Sertliği: a) Pimli SKK; b) Pimsiz SKK; c) Pimli İB-İB ÇSKK; d) Pimli İB-YB-ÇT-SKK

Kaynak: Cabibbo vd.,2014:209-217

Nosrati ve diğerleri AA 2024-T6'nın çift-tarafli sürtünme karıştırma kaynağı (ÇT-SKK) işleminde parametrelerin etkisini araştırmışlardır. Yanıt yüzey yöntemi (RSM), yapay sinir ağı (ANN) ve ayrıca optimizasyon algoritmaları kullanılarak ÇT-SKK prosesinin optimum parametre değerleri tayin etmek istemişlerdir. İlk olarak, 31 adet ÇT-SKK deneyi gerçekleştirilmiş ve dönme hızı, kaynak hızı, eğim açısı ve takım pimi uzunluğu gibi parametrelerin birleştirmelerin nihai gerilme mukavemeti (UTS) ve yüzde uzama üzerindeki etkisi araştırmışlardır. İkinci olarak, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve balina optimizasyon algoritmaları (WOA) tarafından optimize edilen ANN kullanılarak, yukarıdaki parametreler ve yanıtlar arasındaki bağlantıyı bulmuşlardır. Son

olarak en uygun çözümleri bulmak amacıyla, balina optimizasyon algoritması ile birlikte en uygun sinir ağı optimizasyonunu kullanmışlardır (Nostani vd.,2022:1-11). Öngördükleri parametreler altında ÇT-SKK işlemi gerçekleştirilerek, çekme gerilmesi (UTS) ve yüzde uzama için yanıt değerleri sırasıyla yaklaşık 438 MPa ve %3,56 olarak elde bulmuşlardır. Sertlik profiline bağlı olarak sertlikteki düşüş nedeniyle ITAB bölgesinde kırılma meydana gelmiştir.

Santini ve diğerleri çalışmalarında, AA 2050-T84 12,7 mm kalınlığındaki plakaların 5 mm/s veya daha yüksek ilerleme hızlarında ÇT-SKK yöntemi ile kaynak edilebilirliğini incelemişlerdir. Hacimsel kusur içermeyen sağlam birleştirmeler 12 mm/s hıza kadar olan ilerlemelerde elde edilmiş, akma dayanımı ve çekme dayanımı sırasıyla ana malzeme değerlerinin %65'i ve %77'si olarak elde etmişlerdir. En düşük enerji girdisi ile birleştirilen AA 2050-T84 birleştirmelerin hacimsel kusurları Şekil 2.5.'te verilmektedir. (Santini vd.,2021)

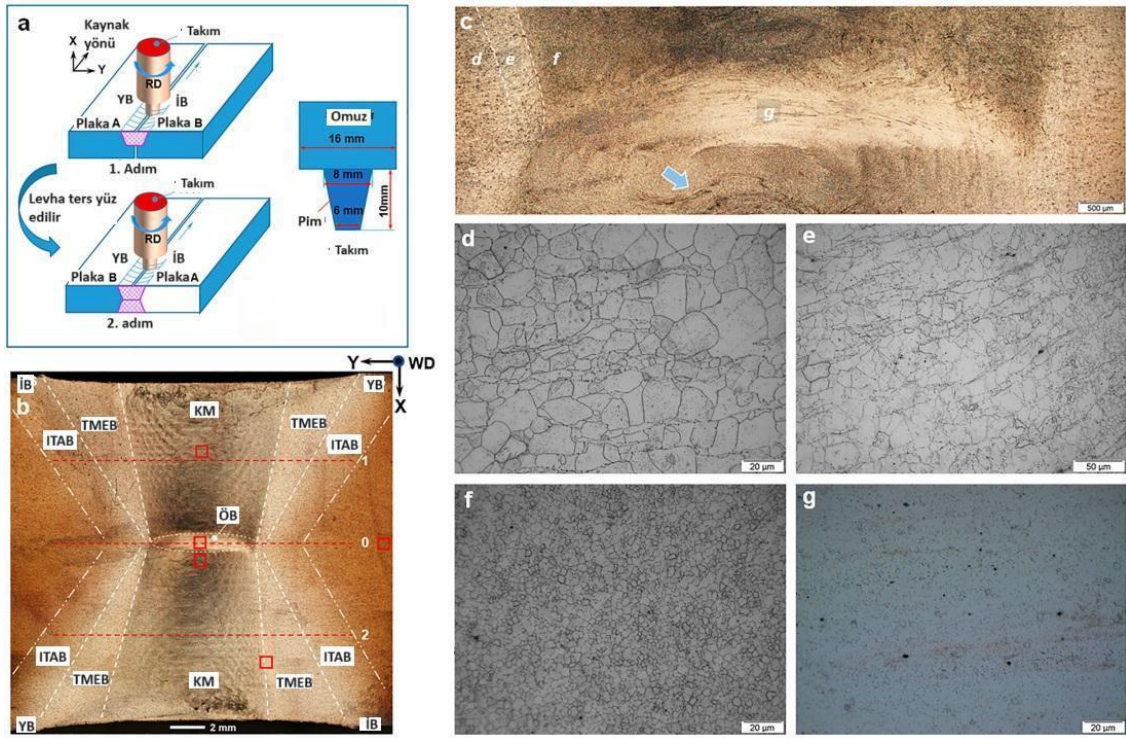


Şekil 2.5. AA 2050-T84 Birleştirmelerin Hacimsel Kusurları

Kaynak: Santini vd.,2021

Weng ve diğerleri iki aşamalı çift-tarafli sürtünme karıştırma kaynağı (ÇT-SKK) yöntemini 20 mm kalınlığındaki Mg-Y-Nd magnezyum alaşımli plakaları birleştirmek için kullanmışlardır. SSK ilk olarak alın bağlantısının bir tarafından gerçekleştirilmiş ve

ardından plakalar diğer tarafı çevrilmiş ve kaynatılmıştır. ÇT-SKK bağlantısında kusur gözlemlenmemiş ve kaynak merkezinin ince eş eksenli taneler şeklinde formlandığını gözlemlemişlerdir. İki kaynak izi arasında ultra ince taneli ($\sim 2.19 \mu\text{m}$) ve dağıtıcı partiküller içeren bir örtüşme bölgesi tespit etmişler ve bu da bağlantının bütünlüğü için olumlu etki gösterdiğini belirtmişlerdir. Birleştirmelerin nihai çekme mukavemeti 277,6 Mpa, akma mukavemeti 204,1 MPa ve uzama oranı % 7,27 olarak tespit etmişlerdir. ÇT-SKK'li birleştirmelerde yüksek bir birleştirme verimliliği (birleştirme ve ana malzeme arasındaki oranı) yaklaşık %82,6 olarak elde edilmişlerdir. İki aşamalı ÇT-SKK yönteminin nin şeması, takım boyutları ve kaynak bölgesine ait mikroyapılar Şekil 2.6.'da verilmiştir (Weng vd.,2020:359-368).



Şekil 2.6. a) ÇT-SKK Yönteminin Uygulanması; b) ÇT-SKK Işık mikroskobu Görüntüsü; c) İlk (Üst) Kaynak Hattı; d) ITAB; e) TMEB; f) KM; g) ÖB

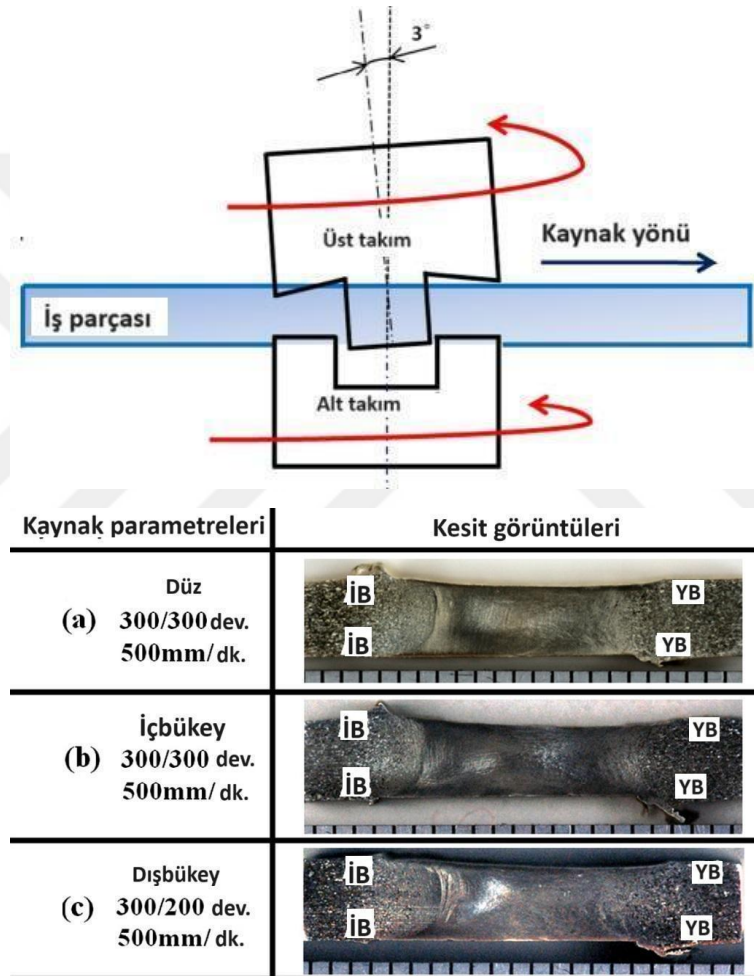
Kaynak: Weng vd.,2020:359-368

Şekil 2.6. b'de (1) ile gösterilen bölge ilk kaynak hattın merkezi, (2) ile gösterilen bölge ikinci kaynak hattının merkezidir. İB; ilerleme bölgesi, YB; yığılma bölgesidir.

Ayrıca Şekil 2.6. b'de, 0-örtüşme bölgesinin (ÖB) merkezidir (Weng vd.,2020:359-368).

Chen ve diğerleri dışbükey ve içbükey takımların birlikte kullanıldığı ÇT-SKK ile magnezyum alaşımının birleştirilmesini incelemişlerdir. İçbükey ÇT-SKK ile yapılan

kaynaklar uygun koşullar altında sağlam birleştirmeler elde edilmiş ve birleştirmeler, SKK'den farklı karıştırma bölgesi karakteristiği sergilemiştir. Karıştırma bölgesinin ortalama tane boyutu, içbükey takımın artan dönüş hızı ile azalmıştır. Bu sonuç, SKK sırasında ısı üretiminin sadece sürtünmeden değil aynı zamanda plastik deformasyondan da kaynaklandığını göstermiştir. Dışbükey takım tarafından geliştirilen karmaşık karışık metal akışı, karıştırma bölgesindeki dokuyu rastgele hale getirmiş ve bu da tercih edilen gerilme davranışını sağlamıştır. ÇT-SKK yöntemi ve birleştirmelerin enine kesitine ait makro yapısı Şekil 2.7.'de verilmiştir (Chen vd.,2015:181-189).

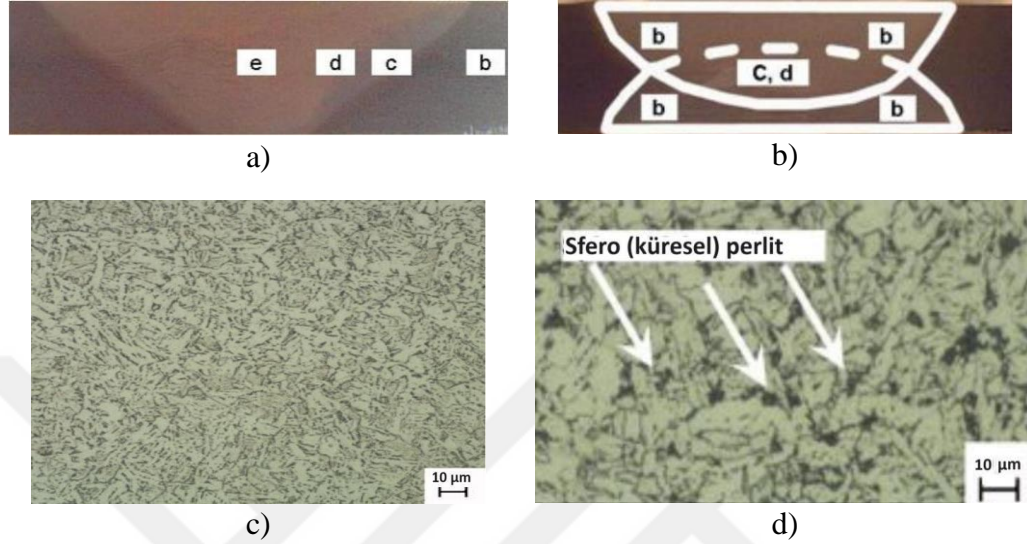


Şekil 2.7. ÇT-SKK Yöntemi ve Birleştirmelerin Makro Yapısı

Kaynak: Chen vd.,2015:181-189

McPherson ve diğerleri 8mm kalınlığındaki DH36 çelik levhayı tek taraflı ve çift-taraflı SKK kullanılarak birleştirilmişlerdir. Kaynak işlemi sonrası birleştirmelerin sertlik, akma dayanımı, tokluk ve mikroyapı özelliklerinin değerlendirmesini yapmışlardır. Ayrıca bir karşılaştırma olarak, mevcut gemi mm kalınlığında DH36 plaka üzerinde toz altı ark kaynak işlemini çalışmaya dahil edilmiştir. Çift-taraflı işlemin ikinci

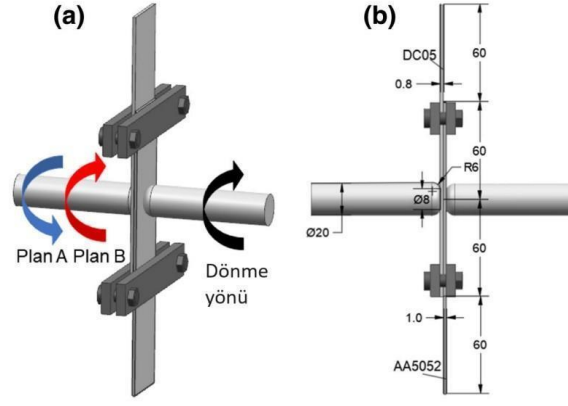
tarafını tamamlamak için iş parçasını 180° döndürme gerekliliği de dahil olmak üzere genel işlem fizibilitesi yapmışlardır. Tek taraftan SKK yöntemi ve ÇT-SKK yöntemine ait makro ve mikroyapı görüntüleri Şekil 2.8.'de verilmiştir (Mcpherson vd.,2013:284-290).



Şekil 2.8. SKK ve ÇT-SKK Yöntemine Ait Makro ve Mikroyapı Görüntüleri: a) SKK Makroyapısı, b) ÇT-SKK Makroyapısı, c) SKK Mikroyapısı, d) ÇT-SKK Mikroyapı görüntüleri

Kaynak: McPherson vd.,2013:284-290

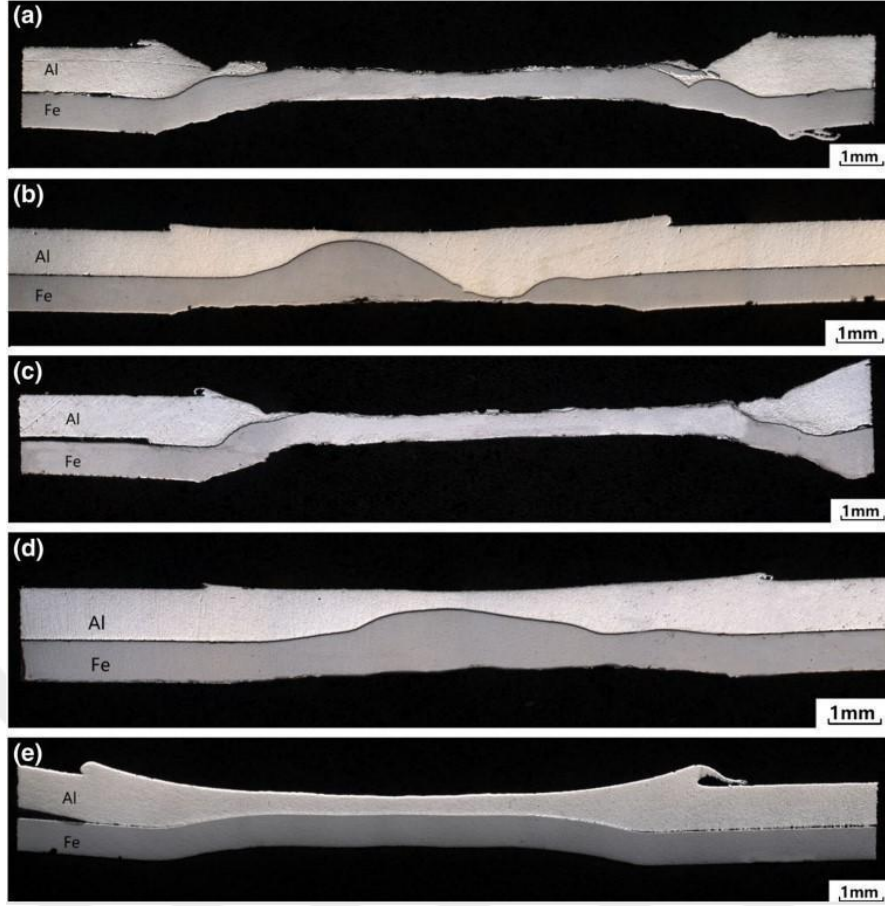
Lyu ve diğerleri farklı alüminyum/çelik alaşımlı levhaların çift-taraflı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (ÇT-SKNK) geliştirmiş ve farklı takım dönüş yönlerinin ve dalma kuvvetlerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkileri araştırmış ve tek taraflı SKNK ile karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, dalma kuvvetinin artmasıyla kırılma yükünün arttığını ve çift-taraflı SKNK yönteminde dalma kuvvetinden bağımsız olarak tek taraflı SKNK'de daha yüksek kırılma yükünü sürdürebildiğini gözlemlemişlerdir. Dalma kuvveti 1,16 kN'den az ise iki dönme yönü kaynaklı parçada benzer kırılma yüküne, dalma kuvveti 1,16 kN'den büyükse, ters dönme yönü kaynak noktasında daha yüksek kırılma yükü sağladığını tespit etmişlerdir. Şekil 2.9.'da çalışmalarında kullandıkları sürtünme karıştırma kaynak sistemi verilmiştir (Lyu vd.,2018:2875-2884).



Şekil 2.9. SKK Sistemi: a) Takım Döndürme ve Sıkıştırma Sistemi, b) Boyutların Ayrıntıları

Kaynak: Lyu vd.,2018:2875-2884

Çalışmada çift- taraflı sürtünme karıştırma kaynak yönteminin farklı malzemeler üzerinde denenerek tek taraftan uygulanan yöntemle göre üstünlükleri ve sınırlılıkları irdelenmiştir. Yöntem başta alüminyum malzemeler olmak üzere farklı endüstriyel malzemelere de başarı ile uygulanabildiği görülmüştür. Yöntem özellikle tek taraftan uygulandığında tatmin edici düzeyde birleşmenin sağlanamadığı kalın plakalar uygulandığı görülmüştür. Ayrıca yöntemin hem eş zamanlı çalışan bir sistem tasarlanarak, hem de ardışık olarak önce bir yüzeyin ardında diğer yüzeyin kaynak işlemine tabi tutularak gerçekleştirilebileceği görülmüştür. Yöntem sadece SKK işlemi için değil çift- taraflı SKNK (sürtünme karıştırma nokta kaynak) işleminde de uygulanabildiği görülmüştür. Bu literatür çalışması neticesinde bu alanda daha fazla akademik çalışmaya ihtiyaç duyulduğu kanısına varılmıştır. Farklı kaynak koşullarına göre SKNK bağlantılarının kesit morfolojisi Şekil 2.10.'da görülmektedir.



Şekil 2.10. SKNK Bağlantılarının Kesit Morfolojisi: a) A Planı, 0,7 MPa; b) A Planı, 0,4 MPa; c) B Planı, 0,7 MPa; d) B Planı, 0,4 MPa; e) C Planı, 0,7 MPa

Kaynak: Lyu vd.,2018:2875-2884

Dalma basıncı 0,7 MPa olarak ayarlandığında Şekil 1.10.a'da ve 1.10.c'de gösterildiği gibi çift-taraflı SKNK; Şekil 1.10.e'de gösterildiği gibi tek taraflı SKNK yönteminden daha yüksek düzeyde girintiye yol açtığı gözlemlenmiştir. Çift-taraflı SKNK'de alüminyum levha tamamen deforme olmuş ve kaynak bölgesinin çevresine akmıştır; dolayısıyla kaynak bölgesinde alüminyum bulunmamıştır. Tek taraflı SKNK işleminde ise aynı dalma basıncı altında bu durum gözlemlenmemiştir. Dalma basıncı 0,4 MPa olarak seçildiğinde, A planındaki (Şekil 1.10.b) alüminyum ve çelik levhalar Şekil 10'de gösterildiği gibi B planına göre birbirlerine daha fazla nüfuz ettiği gözlemlenmiştir. Çift-taraflı SKNK arayüzler, Araştırmacılar Şekil 1.10.e'de gösterildiği gibi tek taraflı SKNK düz çizgi yerine Şekil 1.10.b ve Şekil 1.10.d'de gösterildiği gibi dalga şeklindedir ve bu da daha yüksek kırılma yüküne neden olabileceği kanısına varmışlardır (Lyu vd.,2018:2875-2884).

BÖLÜM III

MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Tez çalışmasında 4 mm kalınlığında AA 5083 - H111 ve AA 6082 - T651 iki farklı alüminyum alaşımı levhalar kullanılmıştır.

3.1.1. AA 5083 Al Alaşımı Malzeme

AA 5083 alüminyum alaşımı mükemmel sünekliği ve çok iyi şekillendirme kabiliyeti olan bir alaşımdır. Korozyon direnci yüksek ve kaynak yapılmaya çok uygundur. Havacılık ve gemi sanayinde tercih edilen bir alaşımdır (Referans Metal,2024).

Alüminyum 5083 alaşımı kaynaklı imalat sonrası iyi mukavemet özelliği sergiler ancak 65 °C'den yüksek sıcaklıklarda kullanım için önerilmez (Azo Materials,2024).

Tablo 3.1.'de AA 5083 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 3.1. AA 5083 Al Alaşımının Kimyasal Bileşimi

KİMYASAL KOMPOZİSYON	% İÇERİK
Silisyum (Si)	0.00 - 0.40
Krom (Cr)	0.05 - 0.25
Manganez (Mn)	0.40 - 1.00
Magnezyum (Mg)	4.00 - 4,90
Bakır (Cu)	0.00 - 0,10
Titanyum (Ti)	0.00 - 0.15
Demir (Fe)	0,00 - 0,40
Çinko (Zn)	0.00 - 0.25
Alüminyum (Al)	Kalan

Kaynak: Referans Metal, 2024

Alüminyum 5083-H111, temperleme ürünün sertleştirilebilme durumunu gösterir; bu, işlenerek sertleştirme yoluyla mukavemeti artırılan ürünler için uygun olduğu anlamına gelir. Üründe mukavemeti azaltmak için ilave ısıl işleme tabi tutulması da mümkündür. (Haomei Marine Aluminum,2024; Lion Metal,2024). H111 basit iş sertleştirme işleme durumu ifade eder. Gerekli mukavemetin ilave ısıl işlem yapılmadan ancak iş sertleştirmesinden sonra elde edilebileceği durum için uygundur. Tablo 3.2.'de AA 5083-H111 alüminyum alaşımının mukavemet özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.2. AA 5083-H111 Al Alaşımının Mukavemet Değerleri

MUKAVEMET ÖZELLİKLERİ	DEğER
Akma Dayanımı	170 MPa
Çekme Dayanımı	310 MPa
Uzama	% 17
Elastisite	71 GPa

Kaynak: Referans Metal, 2024

3.1.2. AA 6082 Al Alaşımı Malzeme

AA 6082 alüminyum alaşımı, mükemmel korozyon direncine sahip, orta mukavemetli bir alaşımdır. 6XXX serisi alaşımların en yüksek mukavemetine sahiptir.

Alaşım 6082, yapısal alaşım olarak bilinir ve plaka formunda, şekillendirme ve imalatta en yaygın olarak kullanılan alaşımdır. Büyük miktarda manganezin eklenmesi tane yapısını kontrol eder ve bu da daha güçlü bir alaşım elde edilmesini sağlar. 6082 alaşımından ince duvarlı, karmaşık ekstrüzyon şekilleri üretmek zordur. AA 6082 başlıca; makas, köprü ve vinç imalatında, taşıma araçlarında ve gıda fiçısı imalatı gibi alanlarda kullanılmaktadır (Azo Materials,2024; Yieh Corporation Limited,2024). Tablo 3.3.'de AA 6082 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 3.3. AA 6082 Al Alaşımının Kimyasal Bileşimi

ELEMENT	% İÇERİK
Silisyum (Si)	0,70 - 1,30
Krom (Cr)	0,00 - 0,25
Manganez (Mn)	0,40 - 1,00
Magnezyum (Mg)	0,60 - 1,20
Bakır (Cu)	0,00 - 0,10
Titanyum (Ti)	0,00 - 0,10
Demir (Fe)	0,00 - 0,50
Çinko (Zn)	0,00 - 0,20
Alüminyum (Al)	Kalan

Kaynak: Referans Metal,2024

6082 T651 temper durumunda Al alaşımı, çeşitli mekanik işlemler, tornalama, frezeleme ve benzeri işlemlerde başarılı bir şekilde kullanılabilir. Korozyon direnci genel olarak iyidir, özellikle atmosferik koşullara karşı dayanıklıdır (Sarıoğlu alüminyum,2024).

Tez çalışmasında kullanılan hadde mamul AA 6082-T651 alüminyum alaşımının

genel mekanik özellikleri Tablo 3.4.'de verilmiştir.

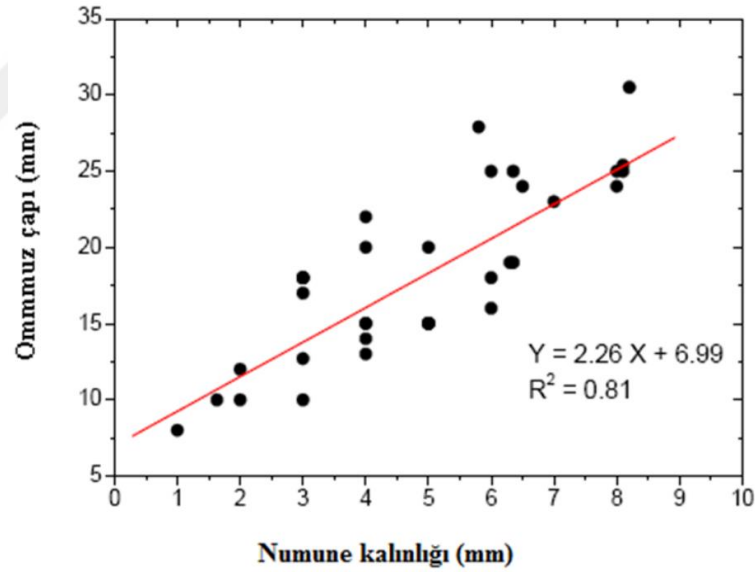
Tablo 3.4. AA 6082-T651 Al Alaşımının Mukavemet Değerleri

MUKAVEMET ÖZELLİKLERİ	DEĞER
Akma Dayanımı	270 MPa
Çekme Dayanımı	330 MPa
Uzama	%16
Elastisite	71 GPa

Kaynak: Referans Metal,2024

3.1.3. SKK ve ÇT-SKK Takım

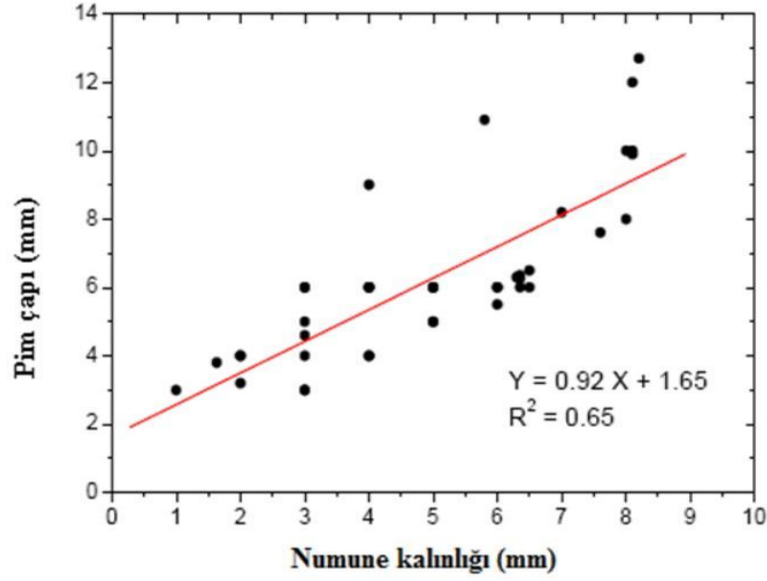
SKK işleminde takım basıncı ve takım devri ısı oluşumuna birinci dereceden etki eder ve omuz yarıçapı basma kuvvetinin bir fonksiyonudur. Bu bağlamda kaynak birleştirme performansı büyük ölçüde takım boyutuna bağlıdır. Literatürde 30 farklı kaynaklı birleştirme için kullanılan takım omuz çapı ve levha kalınlıklarının yer aldığı grafik aşağıda Şekil 3.1.'de verilmiştir (Öcalır,2019).



Şekil 3.1. Levha Kalınlığına Bağlı SKK Takımı Omuz Çapı Dağılımı

Kaynak: Öcalır,2019

Literatürde SKK yönteminde kullanılan birçok pim profili mevcuttur. Farklı levha kalınlıkları ve birleştirme tipleri için değişik boy ve çapta pimler kullanılmıştır. Şekil 3.2.'de literatürde yer alan levha kalınlığına bağlı olarak pim çapı değişimi verilmiştir.



Şekil 3.2. Levha Kalınlığına Bağlı SKK Takımı Pim Çapı Dağılımı

Kaynak: Öcalır,2019

Tez çalışmasında kaynak takımı olarak, H13 sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır. 4 mm kalınlıktaki Al alaşımı levhaları kaynatmak için iki adet 16 mm omuz çapında M5 vida profilinde 3.8 mm ve 1.5 mm pim boyu olarak SKK ve ÇT-SKK takımları imal edilmiştir. Takım boyu bağlanacak freze tezgahına bağlı olarak 100 mm olarak imal edilmiştir. Bu tez çalışmasında SKK işleminde kullanılan kaynak takımı Şekil 3.3.'te verilmiştir.



Şekil 3.3. SKK ve ÇT-SKK Takımları

3.1.4. Kaynak İşlemi Kalıbı

SKK işleminde plakaların sabit olarak konumlandırılması için yarı otomatik freze tezgâhı tablasına bağlanabilir özellikte bir kalıp kullanılmıştır. Levhaların kalıp üzerine sabitlenmesi metrik 10 cıvatarlarla sağlanmıştır. Şekil 3.4.'te imalatı yapılan kalıp gösterilmiştir.



Şekil 3.4. SKK Kalıbı

3.1.5. SKK ve ÇT-SKK Makinesi

SKK işlemi Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren Özen İş Makina firması bünyesinde bulunan yarı otomatik freze tezgâhında yapılmıştır. Şekil 3.5.'te SKK işleminde kullanılan tezgâh görülmektedir.



Şekil 3.5. Freze Tezgâhı

3.1.6. Zımpara ve Parlatma Makinesi

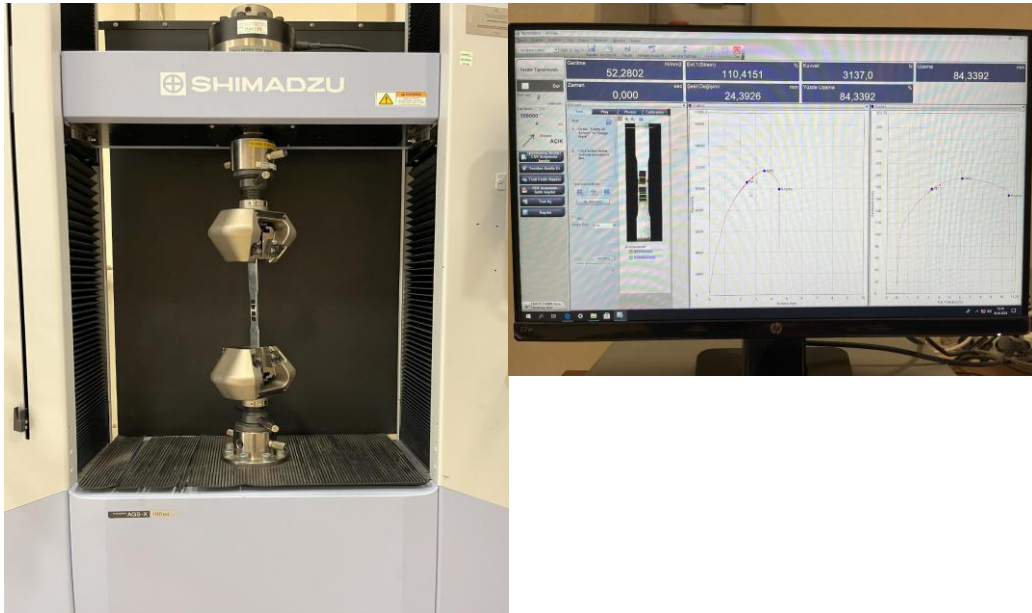
Optik mikroskop ve mikrosertlik deney numunelerinin hazırlanmasında Mersin Tarsus OSB’de bulunan Berdan Cıvata Enerji İmalat Savunma San. ve Lab. Hiz. Tic. A.Ş. firması bünyesinde bulunan Metkon marka zımparalama ve parlatma makinesi kullanılmıştır. Şekil 3.6.’da zımparalama-parlatma makinesi verilmiştir.



Şekil 3.6. Zımparalama-Parlatma Makinesi

3.1.7. Çekme Deneyi Makinesi

Çekme deneyleri Yozgat Bozok Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan Shimadzu marka makine ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7.’de çekme deneyinde kullanılan makine görülmektedir.



Şekil 3.7. Çekme Deneyi Makinesi

3.1.8. Eğme Deneyi Makinesi

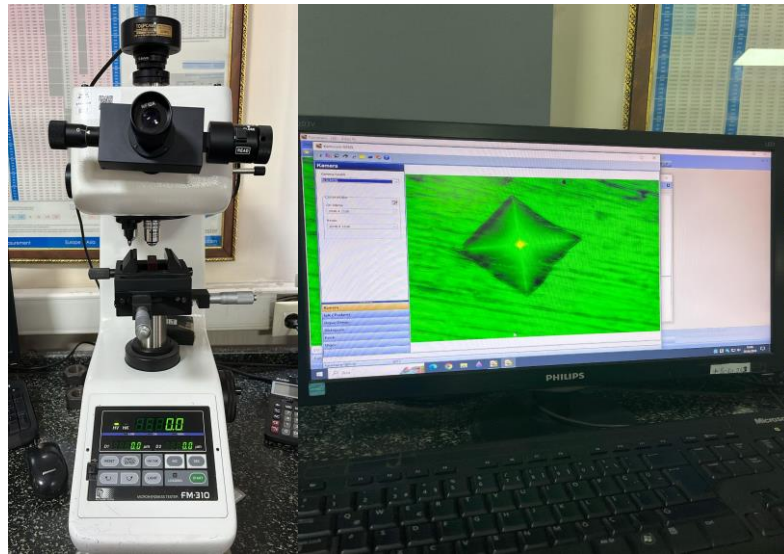
Eğme deneyleri Mersin Tarsus OSB’de faaliyet gösteren Erciyas Çelik Boru firmasındaki Hualong marka çekme-eğme deneyi makinesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8.’de eğme deneyinde kullanılan çekme-bükme deney makinesi verilmiştir.



Şekil 3.8. Eğme Deneyi Makinesi

3.1.9. Mikro-sertlik Ölçüm Makinesi

Mikrosertlik ölçümleri Mersin Tarsus OSB’de bulunan Berdan Cıvata Enerji İmalat Savunma San. ve Lab. Hiz. Tic. A.Ş. malzeme test laboratuvarındaki Future-Tech FM-310 marka Vickers (HV) mikrosertlik ölçüm test makinesinde gerçekleştirildi. Şekil 3.9.’da mikrosertlik ölçüm makinesi verilmiştir.



Şekil 3.9. HV Mikrosertlik Ölçüm Makinesi

3.1.10. Işık (Optik) Mikroskobu

Kaynak bölgesine ait optik mikroskop incelemeleri Tarsus Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan Tronic marka polarize optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.10.'da tez çalışmasında kullanılan optik mikroskop verilmiştir.



Şekil 3.10. Işık (Optik) Mikroskobu

3.2. Metot

3.2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynak İşlemi

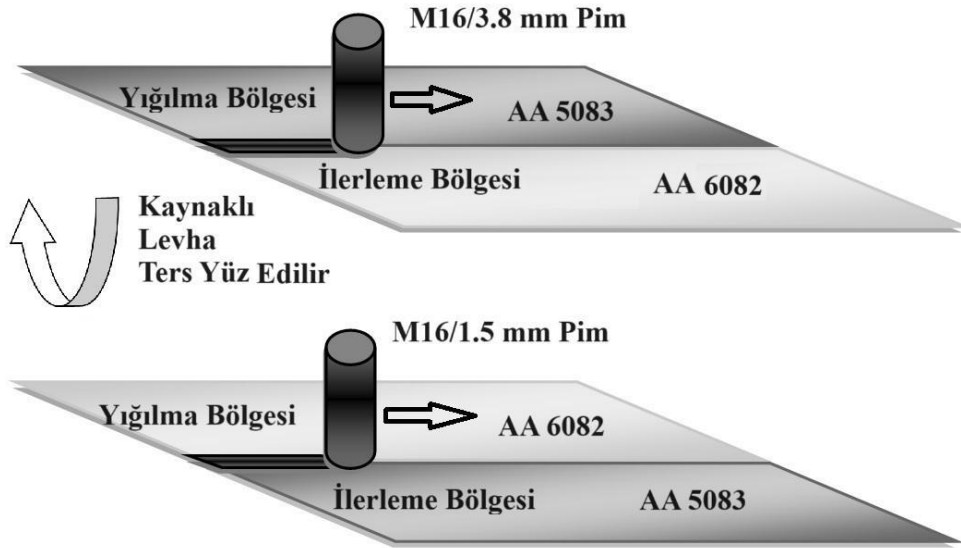
Çalışmada 16 mm omuz çapı ve 3.8 mm pim boyuna sahip kaynak takımı, iki farklı takım devri (1040 dev/dak; 2080 dev/dak) ve üç farklı takım ilerleme hızı (45 mm/dak; 75 mm/dak; 113 mm/dak) kullanılarak 6 parametrede kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.

Belirlenen takım devri ve ilerleme hızları sayıları literatürde çalışılan parametrelerin dışında, ancak çalışılmış olan aralıktadır (Öcalır,2019). İlk olarak tek taraftan pim boyu 3.8 mm olan takımla kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından 1.5 mm pim boyuna sahip takımla aynı parametrelerde levhalar ters yüz edilerek kaynak işlemi tekrarlanmıştır. Kaynak işlemi sol helis açılmış pimli takım saat yönünün tersine dönecek şekilde gerçekleştirilmiştir. SKK işleminde kaynak takımına 2° eğim verilmiştir. Bu kaynak işleminde levha yüzeyinden talaş kaldırılmasını engellemek amacıyla yapılmıştır.

Yeterli sürtünme sıcaklığına ulaşmak için dönen takım levha yüzeyinde 60 saniye

bekletilmiş ve ardında ilerleme hareketi verilmiştir.

Tek taraflı SKK işleminde takım saat yönünün tersine dönerken AA 6082 alaşımı ilerleme bölgesinde ve AA 5083 Al alaşımı levha yığılma bölgesinde konumlandırılmıştır. Çift taraflı SKK işleminde ise ters yüz edilen kaynaklı birleştirmede levha çifti konumu değişmiştir. Tek taraftan ve çift taraftan uygulanan kaynak işlemi Şekil 3.11.'de görülmektedir.



Şekil 3.11. Kaynak İşlem Adımları

Tablo 3.5.'te 6 parametrede yapılan tek taraflı ve çift taraflı sürtünme karıştırma kaynak işlemleri ve parametre kodları verilmiştir.

Tablo 3.5. Kaynak İşlemi Parametreleri ve Parametre Kodları

PARAMETRE NO	OMUZ ÇAPI	TAKIM DEVRİ	İLERLEME	PARAMETRE KODU
T1	16 mm	1040 dev./dak.	45 mm/dak.	T-1040-45
T2			75 mm/dak.	T-1040-75
T3			113 mm/dak.	T-1040-113
T4		2080 dev./dak.	45 mm/dak.	T-2080-45
T5			75 mm/dak.	T-2080-75
T6			113 mm/dak.	T-2080-113
Ç1	16 mm	1040 dev./dak.	45 mm/dak.	Ç-1040-45
Ç2			75 mm/dak.	Ç-1040-75
Ç3			113 mm/dak.	Ç-1040-113
Ç4		2080 dev./dak.	45 mm/dak.	Ç-2080-45
Ç5			75 mm/dak.	Ç-2080-75
Ç6			113 mm/dak.	Ç-2080-113

ÇT-SKK yöntemi literatürde Al alaşımı levhaların farklı kaynak parametrelerinde birleştirilmesi amacıyla kullanılmıştır (Bergmann vd.,2022:1747-1756; Hejazi ve Mirsalehi,2016:676-683; Kumar vd.,2012:3951-3961; Nosrati vd.,2022:1-11; Raturi ve Bhattacharya,2023; Thakur vd.,2023:16-30; Weng vd.,2020:359-368; Yang vd.,2020:105-116). Ancak AA 5083 ve AA 6082 Ala alaşımlarının çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesine yönelik bir çalışma yapılmamıştır.

3.2.2. Çekme Deneyi Yöntemi ve Deney Numuneleri

Çekme deneyi temel malzeme mukavemet ve mekanik (akma, çekme ve % uzama) özelliklerini tespit etmek amacıyla yapılmıştır. Çekme deneyi için TS EN ISO 6892-1 standardında numuneler hazırlanmıştır. Kaynaklı levhalar CNC freze tezgâhında işlenmiştir. Farklı parametrelerdeki birleştirmelerde ikişer adet çekme deney numunesi imal edilmiştir. Çekme deneyi 2 mm/dak. hızla oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Çekme deneyi numunelerine ait fotoğraflar Şekil 3.12.'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Çekme Deneyi Numuneleri

3.2.3. Eğme Deneyi Yöntemi ve Deney Numuneleri

Kaynaklı birleştirmelerin sünekliliğini tespit etmek amacı ile kaynak yüzeyi ve kaynak kökü eğme deneyine tabi tutulmuştur. Deney numuneleri önce şerit testere dilimlenmiş ve nihai boyutuna CNC freze tezgâhı kullanılarak getirilmiştir. Eğme deneyi TS 5173 standardında hazırlanan numunelere 20 mm/dak.hızla uygulanmıştır. Eğme deneyi numunelerine ait fotoğraflar Şekil 3.13.'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Eğme Deneyi Numuneleri

3.2.4. Işık Mikroskobu ve Mikro-Sertlik Numune Hazırlık Yöntemi

Kaynaklı birleştirmelerin metalografik incelemeleri ve mikro-sertlik değişimi tespiti için her bir kaynaklı birleştirme takım omuz genişliğinin her iki tarafında 5 mm mesafeden kesim yapılarak deney numuneleri çıkarılmıştır. Numuneler şeffaf bakalite alınarak 320-600-1000 ve 2000 SiC su zımparası ile zımparalanmıştır. Yüzeyler son işlem olarak 3µ boyutunda alümina solüsyon ile parlatılmıştır. Parlatma sonrası yüzeyler Keller's asit karışımında 60 s süreyle dağlanmışır (PACE TECHNOLOGIES,2024).

Dağlama sonrası numuneler saf su ile temizlenmiştir. Işık mikroskobu incelemeleri ve mikro-sertlik ölçümlerinde kullanılan numuneler Şekil 3.14.'te görülmektedir.



Şekil 3.14. Işık Mikroskobu İncelemeleri ve Mikro-Sertlik Ölçüm Numuneleri

Mikro-sertlik ölçümleri için Vickers ölçüm (HV) makinesi kullanılmıştır. Ölçümler 200 g yük altında kaynak merkezinden her iki yöne (ilerleme bölgesi ve yığılma bölgesi) doğru 1'er mm aralıklarla gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM IV

BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. SKK ve ÇT-SKK'li Birleştirmelerinin Yüzey ve Kök Yapısı

SKK işleminde takım devri ısı oluşumunu sağlayan birincil faktördür (Ugander,2018:205-213). Ayrıca takım ilerleme hızı ve takım geometrisi kaynak içyapıları özellikleri üzerinde etkili olan faktörlerdendir. SKK işleminde takım omzu ısı oluşumunu sağlarken pim ise plastize olan malzemeyi karıştırır. Takım omuz çap büyüklüğü artışı ile sürtünme ve mekanik iş oluşumu ve bunlara bağlı olarak kaynak bölgesinde sıcaklık artışına sebep olur (Rai vd.,2011:515-523; Casalino vd.,2014:1541-1548; Mehta vd.,2011:2716-2722; Ramanjaneyulu vd.,2014:769-780; Unfried-Silgado vd.,2017:202-208). Bu değiştirilebilen faktörlerle farklı kaynak parametreleri ve neticede farklı kaynak yapıları elde edilir (Elangovan vd.,2008:251-260; Rao vd.,2016:13053-13058).

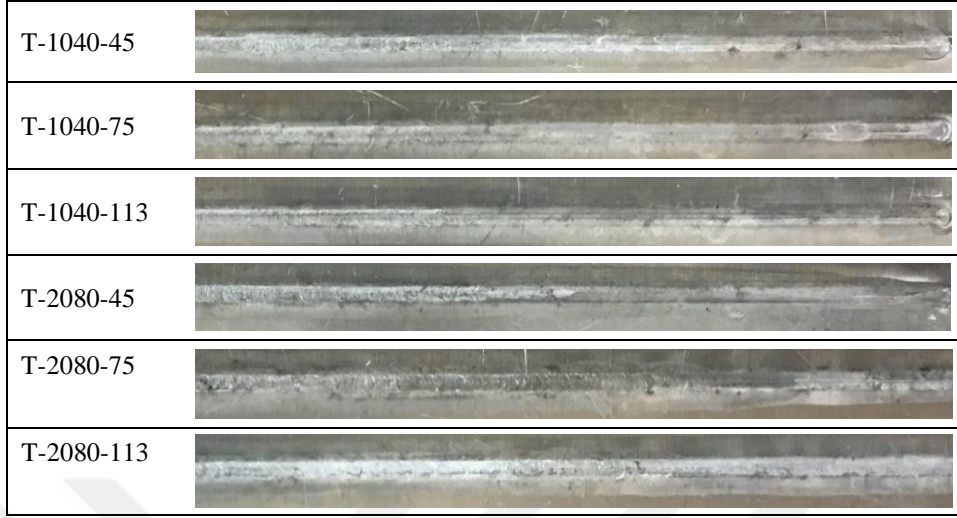
Tez çalışmasında, tek taraflı ve çift taraflı sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirmelerde, farklı parametreler kullanılmış ve farklı kaynak yüzey yapıları elde edilmiştir. Kaynak işlemlerinin ardından öncelikle gözle muayene yapılarak kaynak yüzeyi ve kaynak kökü hataları tespit edilmeye çalışılmıştır. İncelemeler neticesinde tek taraftan yapılan kaynaklı birleştirmelerde omuz temas genişliği, pim dalma derinliği ve pim kök nüfuziyetinin kabul edilir sınırlar içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Tek taraflı SKK'li birleştirmelere ait kaynaklı yüzey yapıları Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. SKK'li Numunelerin Kaynak Yüzey Görüntüleri

T3 (T-1040-113) numaralı parametrede yapılan kaynak işleminde takım levhadan çıkarken yırtılma şeklinde hasar bırakmıştır. Benzer olgu Gungor ve arkadaşlarının

çalışmalarında da gözlemlemişlerdir (Gungor vd.,2014:84-90). Tek taraflı sürtünme karıştırma kaynaklı numunelerin kaynak kökü görüntüleri Şekil 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.2. SKK'li Numunelerin Kaynak Kökü Görüntüleri

Çift-taraflı sürtünme karıştırma kaynaklı (ÇT-SKK) numunelerin kaynak yüzey yapıları Şekil 4.3.'de verilmiştir.



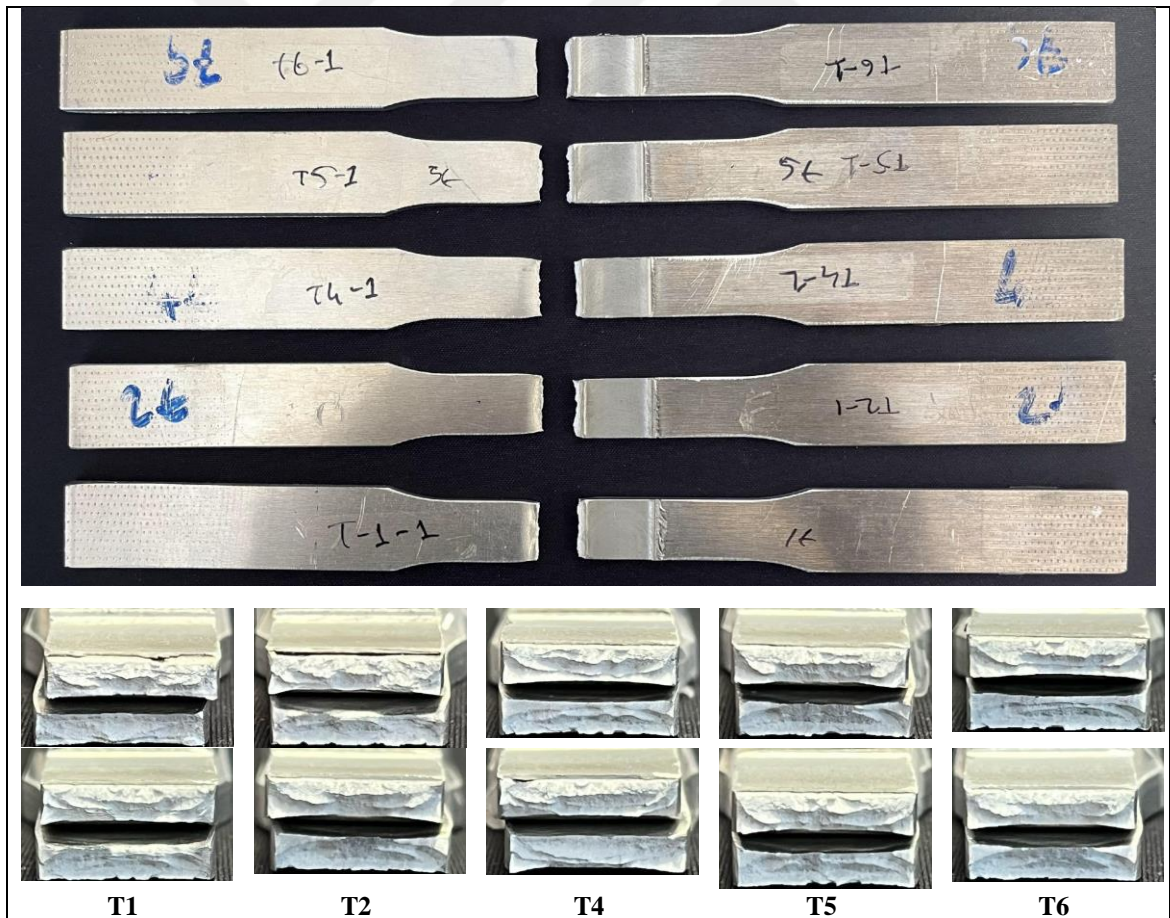
Şekil 4.3. ÇT-SKK'li Numunelerin Kaynak Yüzey Görüntüleri

ÇT-SSK birleştirmelerin yüzey yapıları incelendiğinde, devir/ilerleme faktörleri göz önüne alınarak Ç-1040-113 ve Ç-2080-45 parametrelerde yapılan kaynaklı birleştirmelerin diğer parametrelere göre yapılan birleştirmelere kıyasla yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. Ç-1040-113 numaralı parametrede ikinci pasoda yapılan kaynak işleminde pim hattı boyunca çizgisel bir kanal oluşumu gözlemlenmiştir. Ç-2080-45 numaralı parametrede ise kısmen yüzeyde çukur formunda hatalar bulunmaktadır. SKK ve ÇT-SKK'li birleştirmelerde takım devrindeki artış yüzey yapısında halkalı bir iz oluşturmuştur. Bu yapı devir sayısındaki artışın kaynak bölgesindeki sıcaklığın artmasına

ve neticede yüzey deformasyonundaki artışa sebebiyet verdiği düşünülmektedir (Ugander,2018:205-213). Ancak SKK'de çapak (flaş) görsel bir kusur olarak kabul edilse de iyi bir kaynağın işaretidir. Çapaklar, plastize olan kaynak malzemesinin kaynak takımı kenarlarından dışarıya taşması ile oluşur. Sürtünme karıştırma kaynağının amacı mükemmel düz bir kaynak dikişi elde etmektir. Bunun için SKK takımı iş parçasıyla sürekli temas halinde olmalıdır. 2 mm'lik bir flaş kabul edilebilir. Bu değer üzerinde, dikey kaynak kuvvetinin azaltılması gerekir (Stirweld,2024).

4.2. SKK ve ÇT-SKK'li Birleştirmelerin Çekme Deneyi Bulguları

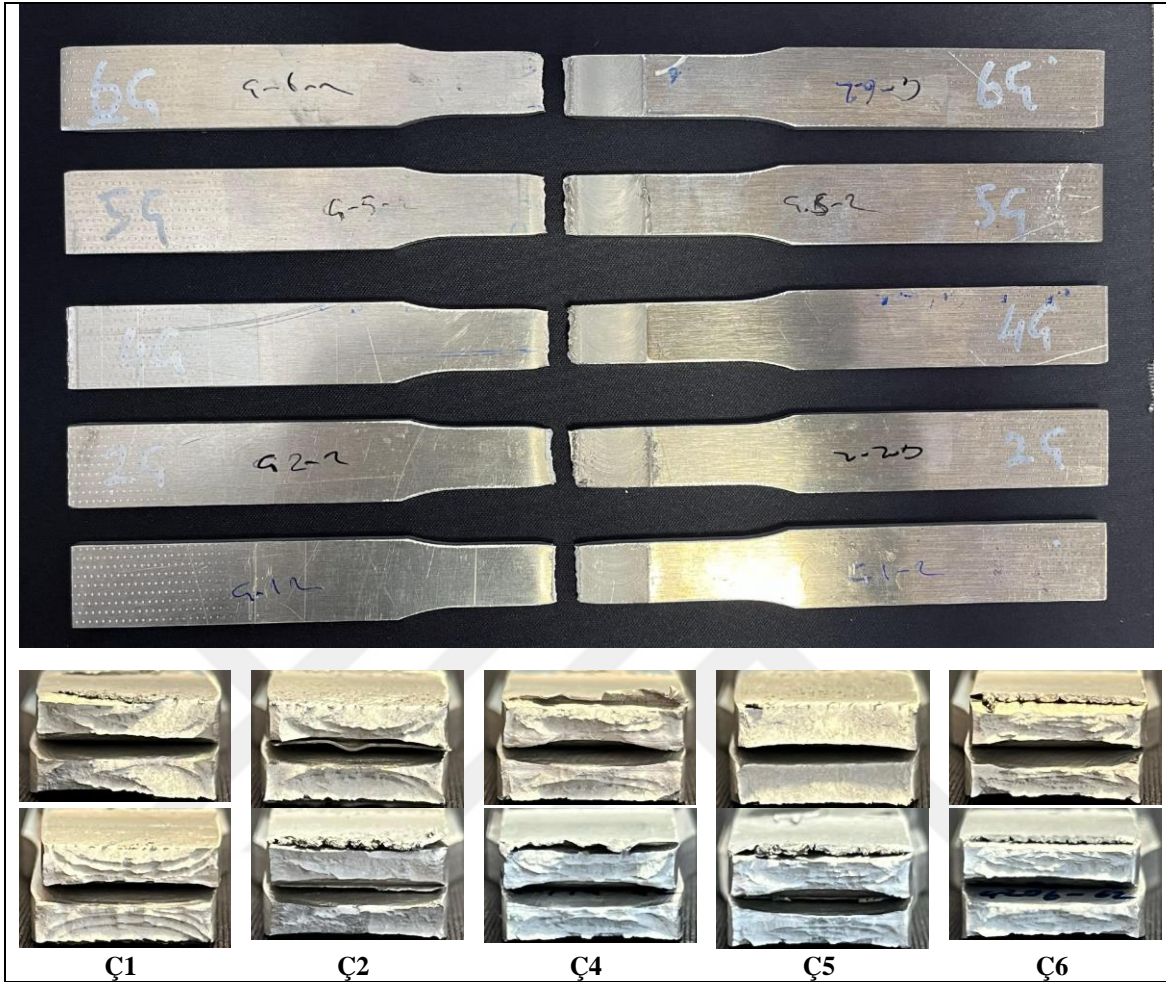
Çekme deneyi ile kaynaklı birleştirmelerin temel mukavemet özellikleri ve % uzama miktarları belirlenmiştir. Çekme deneyi 5 farklı parametrede birleştirilen SKK ve ÇT-SKK'li levhaların her birinden elde edilen ikişer adet numuneye uygulanmış ve bu deney sonuçlarından elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Tek taraflı SKK'li birleştirmelerin çekme deneyi sonrası görüntüleri Şekil 4.4.'de verilmiştir.



Şekil 4.4. SKK'li Numunelerin Çekme Deneyi Sonrası Numune Görüntüleri

Tek taraflı SKK'li birleştirmelerin hepsi AA 6082 Al alaşımının kaynak takımının omuz bitiş noktasını sınır olan ısı tesiri altında kalan bölgesinden (ITAB) kopmuştur.

Çift taraflı SKK'li birleştirmelerin çekme deneyi sonrası görüntüleri Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.5. ÇT-SKK'li Numunelerin Çekme Deneyi Sonrası Numune Görüntüleri

Çift taraflı SKK'li birleştirmelerin hepsi tek taraflı SKK'li birleştirmelerdeki gibi AA 6082 Al alaşımının kaynak takımının omuz bitiş noktasına sınır olan ısı tesiri altında kalan bölgesinden (ITAB) kopmuştur.

Gungor ve diğerleri çekme deneyi sonrası kopmanın kaynak omuz altında kalan termo mekanik etkilenen bölgede (TMEB) ve kaynak merkezinde (KM) (Gungor vd.,2014:84-90). Kasman ve diğerleri çalışmalarında çekme deneyi sonrasında kopmanın çoğunlukla ısı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) olduğunu bildirmişlerdir. Kasman ve diğerlerinin çalışmalarında ITAB'dan kopan numunelerin, çalışılan parametreler arasında en yüksek kaynak performansı gösteren birleştirmeler olduğu görülmüştür (Kasman vd.,2016:6). Hem SKK'li hem de ÇT-SKK'li birleştirmelerde çekme sonrası kopmalar literatürde yüksek performanslı kaynak işleminin göstergesi olabilecek ve ayrıca sağlam bir kaynak bölgesini işaret eden ITAB gerçekleşmesiyle elde edilen birleştirmelerin

başarılı olduğu kanaatine varılmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan AA 5083-H111 alaşımı levhanın akma mukavemeti 170 MPa, çekme mukavemeti 310 MPa ve % uzama değeri %17 olarak verilmiştir. AA 6082-T651 alaşımı levhanın akma mukavemeti 270 MPa, maksimum çekme mukavemeti 330 MPa ve % uzama değeri ise %16 olarak levhaların temin edildiği firma katalogunda verilmiştir (Referans Metal, 2024). Tablo 4.1.'de 5 farklı parametrede birleştirilen SKK'li ve ÇT-SKK'li birleştirmelerin çekme deneyi sonrası mukavemet ve % uzama bulguları verilmiştir.

Tablo 4.1. Çekme Deneyi Mukavemet ve % Uzama Değerleri

PARAMETRE NO	PARAMETRE KODU	AKMA GERİLMESİ	ÇEKME GERİLMESİ	UZAM A (%)
T1	T-1040-45	193,208	236,81	9,09
T2	T-1040-75	170,94	208,17	8,93
T4	T-2080-45	174,52	211,85	8,26
T5	T-2080-75	203,25	239,55	10,09
T6	T-2080-113	204,69	237,99	8,99
Ç1	Ç-1040-45	176,50	204,91	9,69
Ç2	Ç-1040-75	181,48	201,40	9,96
Ç4	Ç-2080-45	169,444	194,11	10,76
Ç5	Ç-2080-75	183,62	201,35	9,87
Ç6	Ç-2080-113	190,18	204,88	7,76

Tablo 4.1.'de görüldüğü üzere SKK'li ve ÇT-SKK'li birleştirmelerin genel olarak mukavemet değerleri AA 5083 - H111 esas metalinin akma dayanımının üzerinde iken, SKK'li ve ÇT-SKK'li birleştirmelerin çekme dayanımı her iki esas metalin dayanım değerlerinin altında olduğu tespit edilmiştir. SKK'li birleştirmelerin akma dayanımları 170,94 - 204,69 MPa, çekme dayanımları 208,17 - 239,55 MPa ve % uzama değerleri 8,26 - 10,09 arasında olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarına göre tek taraflı SKK'li birleştirmelerde en yüksek ortalama çekme dayanımı 239,55 MPa değeri ile T5 (T-2080-75) numaralı numuneden elde edilmiştir. En düşük çekme dayanımı ise 208,17 MPa ile T2 (T-1040-75) numaralı numuneden elde edilmiştir. Ayrıca T1 (T-1040-45) ve T6 (T-2080-113) numaralı parametrelerden elde edilen çekme dayanımı değerleri birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir.

ÇT-SKK'li birleştirmelerde ise en yüksek ortalama çekme dayanımı 204,91MPa değeri ile Ç1 (Ç-1040-45) numaralı parametreden elde edilmiştir. En düşük çekme

dayanımı ise 194,11MPa ile Ç4 (Ç-2080-45) numaralı kaynak parametresi kullanılarak birleştirilen numuneden elde edilmiştir. Ayrıca Ç1 (Ç-1040-45) ve Ç6 (Ç-2080-113) numaralı parametrelerden elde edilen çekme dayanımı değerleri birbirine çok yakın değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

Mukavemet etkinliği veya kaynak performansı, kaynakların çekme mukavemeti ile ana malzeme arasındaki orandır (Mendes vd., 2014; Kumar vd., 2022). Tablo 4.2.'de 5 farklı parametrede birleştirilen SKK'li ve ÇT-SKK'li birleştirmelerin esas metal alaşımlarının çekme mukavemetine kıyasla kaynak performansı bulguları verilmiştir.

Tablo 4.2. SKK'li ve ÇT-SKK'li Birleştirmelerin Kaynak Performansı

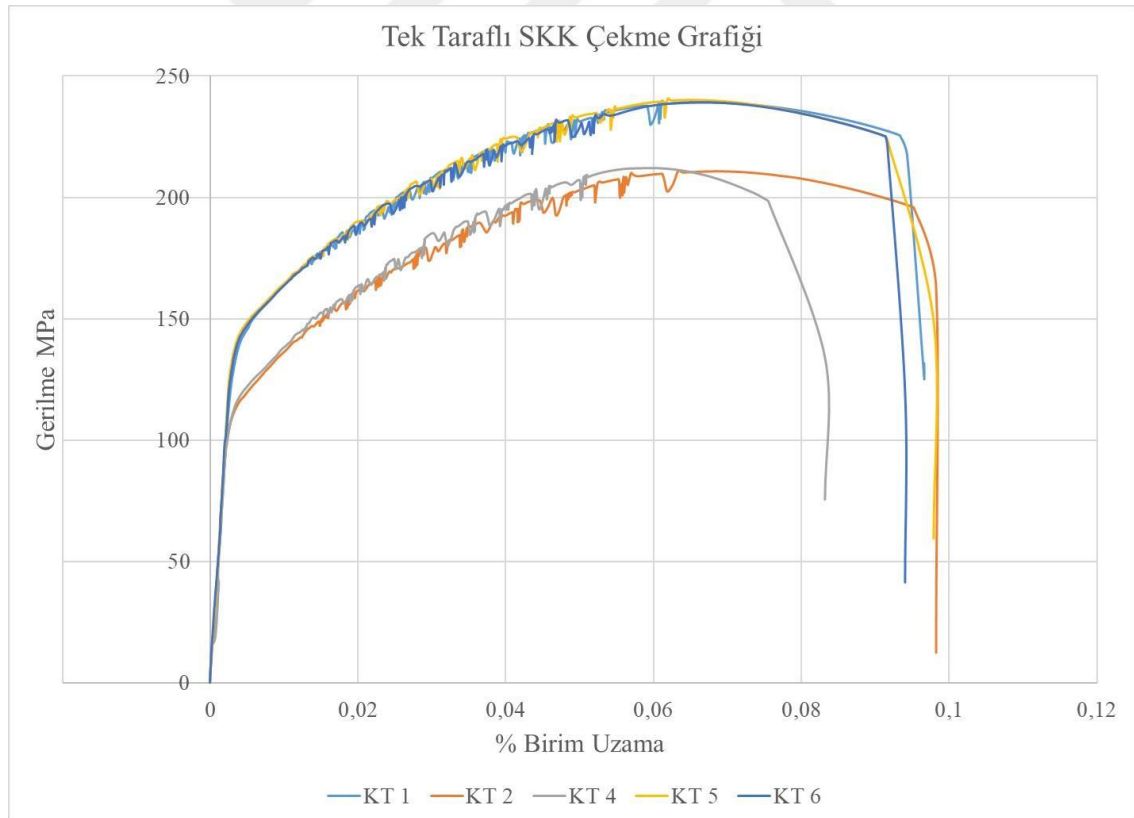
PARAMETRE NO	PARAMETRE KODU	AA 5083'E ORANLA PERFORMANS (%)	AA 6082'YE ORANLA PERFORMANS (%)
T1	T-1040-45	76,39	71,76
T2	T-1040-75	67,15	63,08
T4	T-2080-45	68,33	64,19
T5	T-2080-75	77,27	72,59
T6	T-2080-113	76,77	72,11
Ç1	Ç-1040-45	66,1	62,09
Ç2	Ç-1040-75	64,96	61,03
Ç4	Ç-2080-45	62,61	58,82
Ç5	Ç-2080-75	64,95	61,01
Ç6	Ç-2080-113	66,09	62,08

Yapmış olduğumuz kaynaklı birleştirmelerin kaynak performansı tek taraftan SKK'li birleştirmelerde AA 5083 esas alaşımın çekme mukavemetine kıyasla %67,15-%77,27 aralığında, AA 6082 esas alaşımın çekme mukavemetine kıyasla %63,08-%72,59 aralığında olduğu tespit edilmiştir. ÇT-SKK'li birleştirmelerde ise AA 5083 esas alaşımın çekme mukavemetine kıyasla %62,61-%66,10 aralığında, AA 6082 esas alaşımın çekme mukavemetine kıyasla %58,82-%62,09 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Gungor ve diğerlerinin AA 5083-H111 ve AA 6082-T651 alaşımları ile yaptıkları birleştirmelerde en düşük kaynak performansını AA 5083-H111 esas alaşımına oranla %65 olarak tespit etmişlerdir (Gungor vd.,2014:84-90). Kasman ve diğerlerinin AA 5083-H111 ve AA 6082-T651 alaşımları ile yaptıkları çalışmalarında en yüksek kaynak performansı AA 6082-T651 esas alaşımına oranla %56,06 olarak ve en yüksek %67,69 olarak bulmuşlardır. AA 5083-H111 esas alaşımına oranla kaynak performansı ise %50,57-%61,07 aralığında seyretmiştir. Yüksek performanslı birleştirmeler yüksek devir ve

yüksek ilerleme ile çalışılan parametrelerde gözlemlenmiştir (Kasman vd.,2016:6). Moni yapmış olduğu tezde AA 5083 ve AA 6082 alaşımlarını SKK ile birleştirmiş ve kaynaklı birleştirmelerin performansını AA 5083 esas metaline oranla %57-%59 ve AA 6082 esas metaline oranla %62-%65 arasında değişen değerlerde olduğunu bildirmiştir (Moni,2020). Yapmış olduğumuz tez çalışmasının çekme deneyi bulgularının SKK'li birleştirmelerin kaynak performansının literatürde yer alan AA 5083 ve AA 6082 alaşımları ile yapılan çalışmalara ait bulguların çok daha üzerinde olduğu görülmüştür.

Ayrıca ÇT-SKK'li birleştirmelere ait kaynak performansının da yapılan çalışmalara paralel ve bazı literatürdeki çalışmalardan daha yüksek performansta olduğu görülmüştür. Bu bağlamda çekme deneyi sonuçları, SKK'li birleştirmelerde takım devri ve ilerleme hızının kaynak performansında en etkili faktörler olduğunu göstermiştir (Abd Elnabi vd.,2019:1684-1693; Rajeesh vd.,2018:515-523; Elfar vd.,2016:1-6).

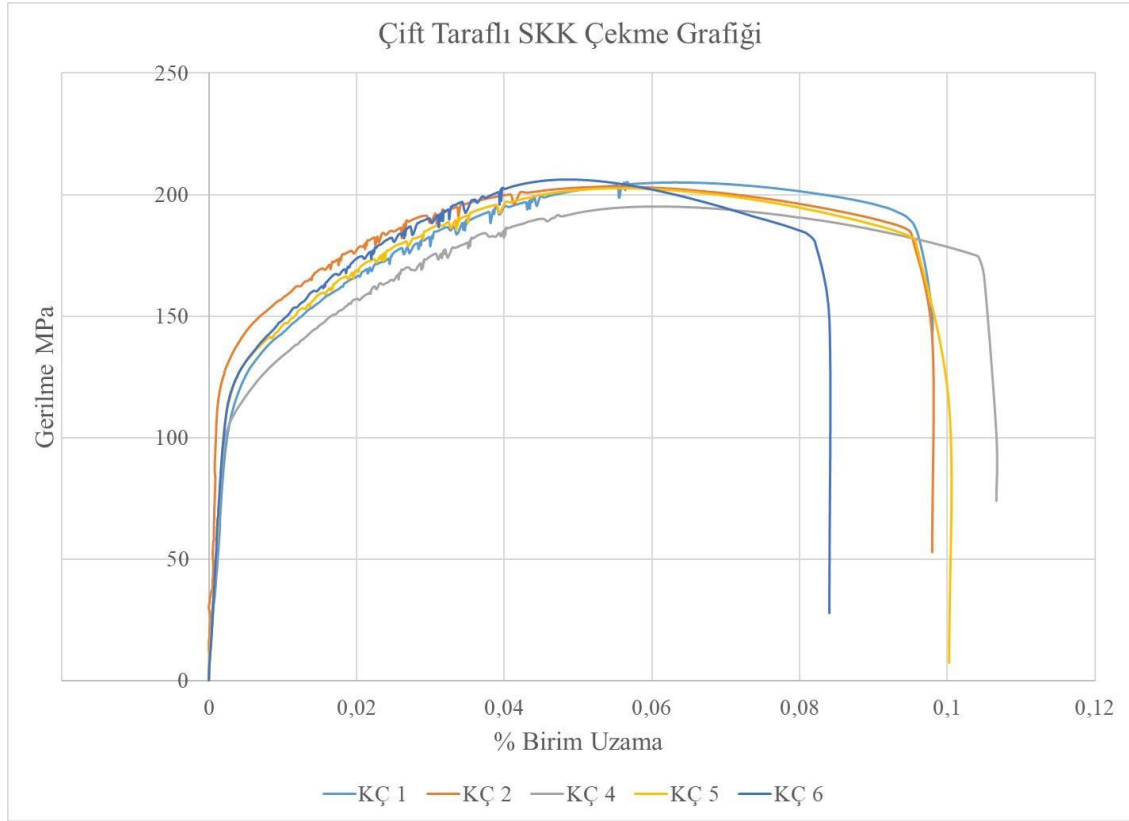
Takım ilerleme hızına bağlı olarak kaynak mukavemet değişimini gözlemlemek amacıyla grafikler oluşturulmuştur. Grafikler Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.'de verilmiştir.



Şekil 4.6. SKK'li Numunelerin Çekme Deneyi Grafiği

Şekil 4.6. incelendiğinde T1 (T-1040-45), T5 (T-2080-75) ve T6 (T-2080-113) numaralı parametrelerde birleştiren bağlantılar birbirine yakın ve yüksek çekme dayanımı

gösterirken T2 (T-1040-75) ve T4 (T-2080-45) numaralı parametreler nispeten daha düşük çekme dayanımı göstermişlerdir.

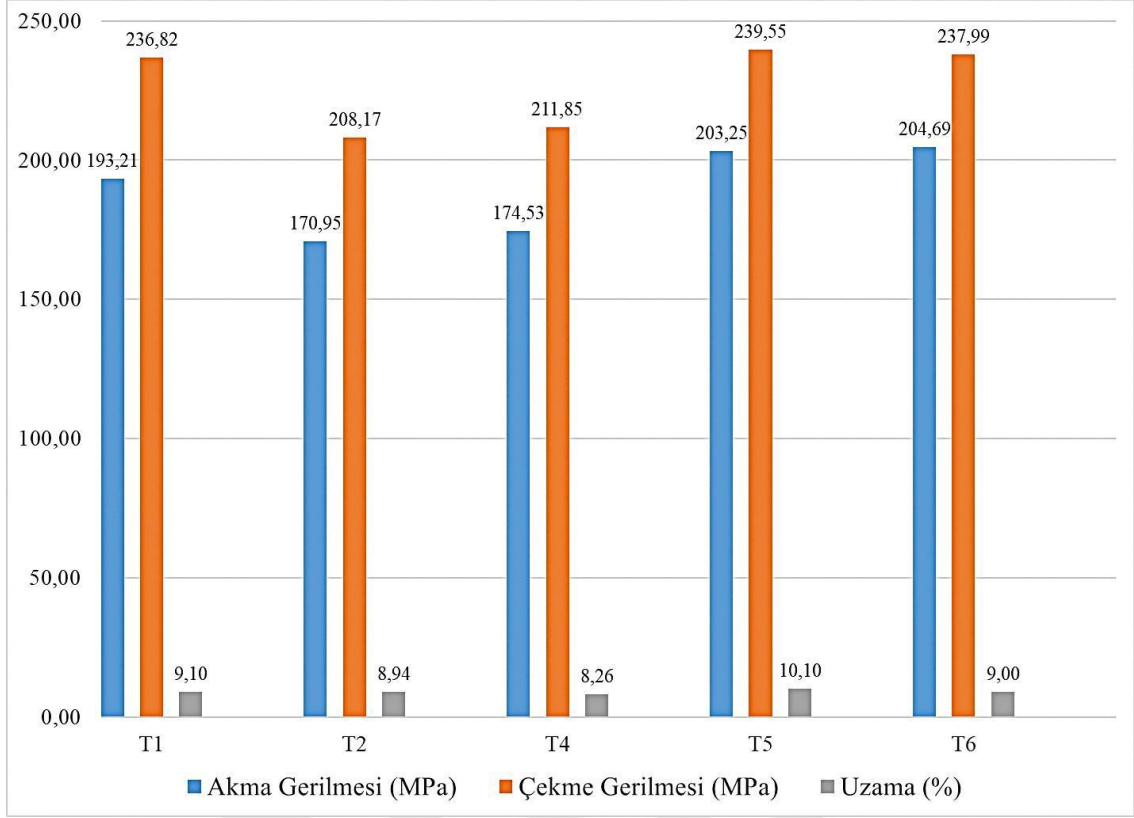


Şekil 4.7. ÇT-SKK'li Numunelerin Çekme Deneyi Grafiği

Şekil 4.7. incelendiğinde Ç1 (Ç-1040-45) ve Ç6 (Ç-2080-113) numaralı parametrelerde birleştirilen bağlantılar birbirine yakın ve yüksek çekme dayanımı gösterirken Ç2 (Ç-1040-75) ve Ç5 (Ç-2080-75) numaralı parametreler nispeten daha düşük çekme dayanımı göstermişlerdir. Ayrıca çalışılan parametreler arasında Ç4 (Ç-2080-45) numaralı parametre ile birleştirilen kaynaklı birleştirmelerin en düşük çekme dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

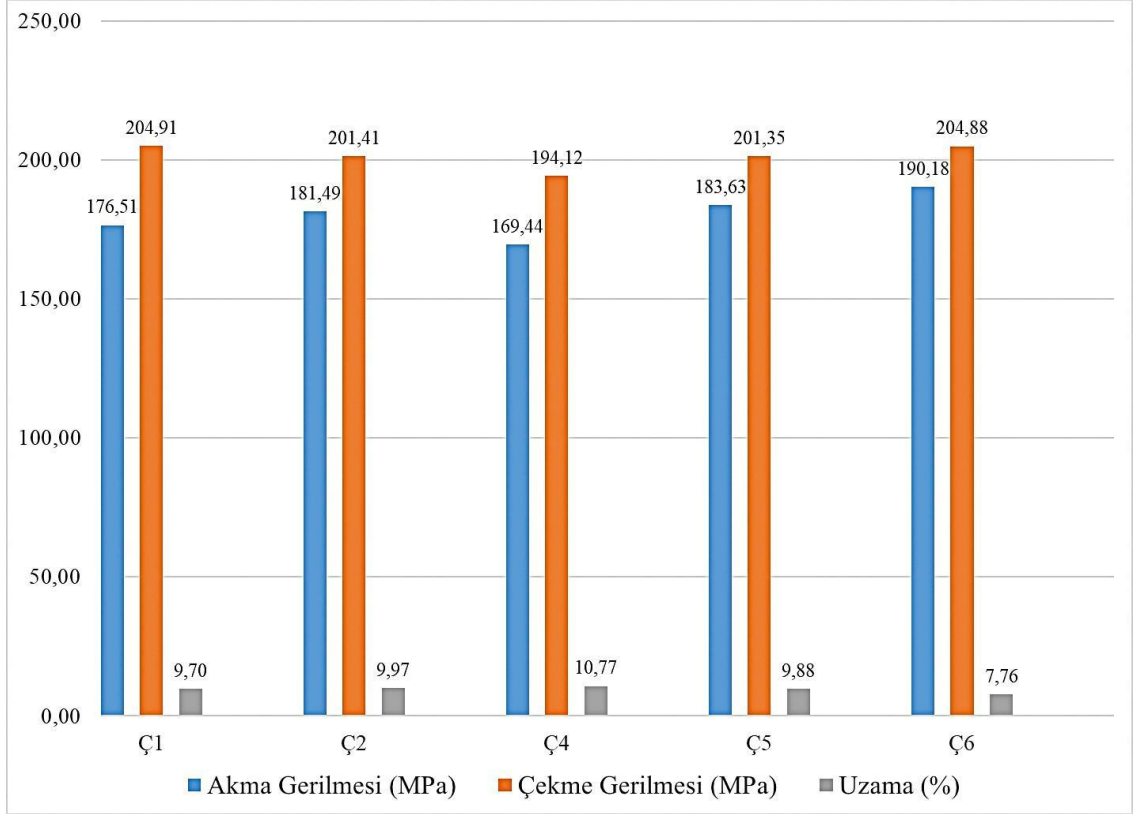
Farklı parametrelerde birleştirilen SKK'li ve ÇT-SKK'li bağlantılarda genel olarak düşük devirde ve düşük ilerlemede ve ayrıca yüksek devirde ve yüksek ilerlemede gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde iyi çekme dayanımları elde edildiği gözlemlenmiştir.

Farklı ilerleme hızlarının çekme ve akma mukavemetine etkisi Şekil 4.8. ve 4.9.'da verilen grafikte görülmektedir.



Şekil 4.8. SKK'li Birleştirmelerin Parametrelere Bağlı Mukavemet ve % Uzama Değişimi

Şekil 4.8.'de 1040 dev/dak.'da yapılan birleştirmelerde (T1 ve T2) takım ilerleme hızı arttıkça kaynak mukavemetinde azalma olduğu görülmüştür. 2080 dev/dak.'da yapılan birleştirmelerde (T4, T5 ve T6) takım ilerleme hızı sonucunda kaynak mukavemetinde önce belirgin bir artış ardından çok az bir azalış olduğu görülmüştür. % uzama değişimleri çekme mukavemetine paralellik gösterecek değişimler sergilemiştir.



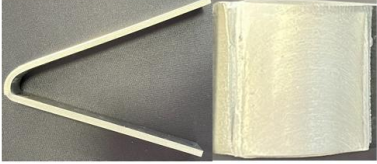
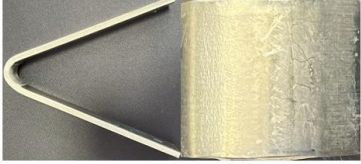
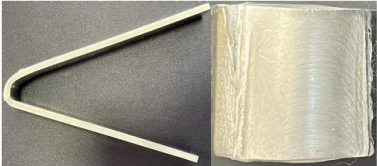
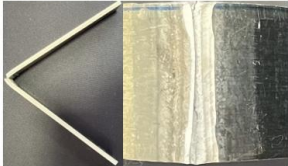
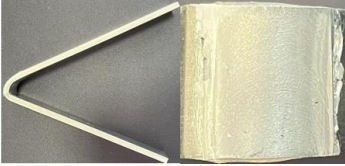
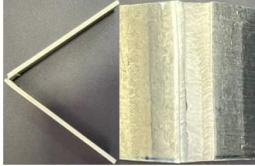
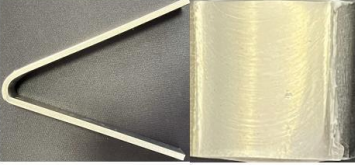
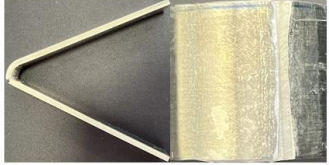
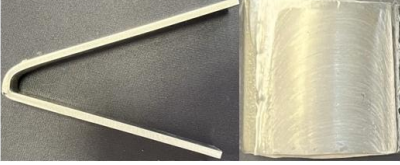

Şekil 4.9. ÇT-SKK'li Birleştirmelerin Parametrelere Bağlı Mukavemet ve %Uzama Değişimi

Şekil 4.9.'da 1040 dev/dak.'da yapılan birleştirmelerde (Ç1 ve Ç2) takım ilerleme hızı arttıkça kaynak mukavemetinde sınırlı miktarda azalma olduğu görülmüştür. 2080 dev/dak.'da yapılan birleştirmelerde (Ç4, Ç5 ve Ç6) takım ilerleme hızındaki artış kaynak mukavemetinde iyileşmeyle sonuçlanmıştır. % uzama değişimleri çekme mukavemetine bağımsız olarak Ç1 (Ç-1040-45)'den Ç2 (Ç-1040-75)'ye sınırlı bir artış gösterirken, Ç4 (Ç-2080-45)'den Ç6 (Ç-2080-113)'ya belirli oranda azalış sergilemiştir. Farklı parametrelerdeki birleştirmelerin çekme dayanımındaki değişim, malzeme akış davranışına, AA 6082'nin ITAB'ındaki soğuk iş kaybına, aşırı yaşlanmasına ve kaynak bölgesinde makroskobik kusurların oluşumuna bağlanmıştır (Palanivel vd., 2012).

4.3. SKK ve ÇT-SKK'li Birleştirmelerin Eğme Deneyi Bulguları

Eğme deneyi kaynaklı birleştirmelerin kaynak yüzeyinden ve kaynak kökünden sabit hızda eğilmeye zorlanarak kaynak sünekliğini tespit etmek amacıyla uygulanmıştır (Priyasudana vd.,2023). Ayrıca eğme deneyi ile kaynak kök bölgesindeki çatlak büyümesine karşı direnci incelemek için de yapılmaktadır (Rahmatian vd.,2019:2739-2751). Tek taraflı SKK yöntemiyle birleştirilen kaynaklı birleştirmelere ait kep (yüzey)

ve kök eğme deneyi sonrası alınan görüntüler Şekil 4.10.'da verilmiştir.

PARAMETRE KODU	EĞME METODU	
T-1040-45	 a) Kep Eğme	 b) Kök Eğme
T-1040-75	 a) Kep Eğme	 b) Kök Eğme
T-2080-45	 a) Kep Eğme	 b) Kök Eğme
T-2080-75	 a) Kep Eğme	 b) Kök Eğme
T-2080-113	 a) Kep Eğme	 b) Kök Eğme

Şekil 4.10. SKK'li Birleştirmelerin Kep (Yüzey) ve Kök Eğme Deneyi Sonrası Görüntüleri

SKK'li birleştirmelerde eğme deneyi sonrası hasar numunelerin AA 6082 alaşımı bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir. Kep eğmede hasar, takım omuz çapının sınırında, TMEB'de olduğu görülmüştür. Kök eğmede ise hasarın kaynak kökünde olduğu tespit edilmiştir. Kök kusurları kaynaklı bölgeyi zayıflatmış ve eğme deneyi sonrası parçaların karıştırma bölgesinden kırılmasına yol açmıştır (Rahmatian vd.,2019:2739-2751). Kep

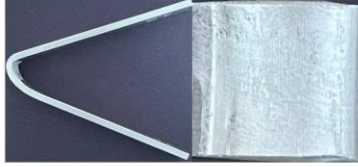
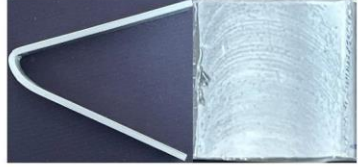
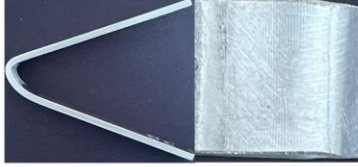
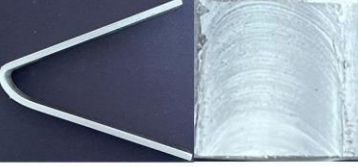
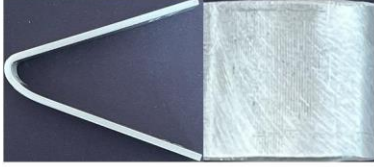
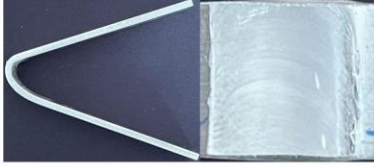
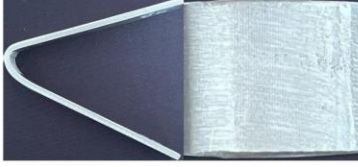
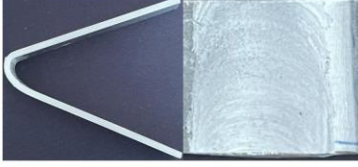

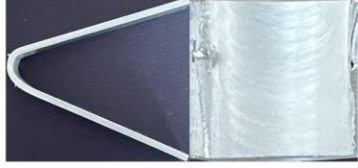
eğmede ise çatlakların takım omuzunun uç noktası olan TMEB ve ITAB ara yüzünde gerçekleşmiştir. Çekme deneylerinde de kırılmaların kaynak omuzunun hemen yakınında konumlanması mukavemet düşüşünün ITAB’da gerçekleştiğini göstermiştir (Moni,2020). Tek taraflı SKK’li birleştirmelerin eğme deneyi bulguları Tablo 4.3.’te verilmiştir.

Tablo 4.3. SKK’li Birleştirmelerin Eğme Deneyi Bulguları

KAYNAK PARAMETRESİ	EĞME METODU	DEFORMASYON AÇISI	HASAR DURUMU
T-1040-45	Kep	38	ITAB sınırında yarıma görüldü.
	Kök	41	Hasar görülmedi.
T-1040-75	Kep	34	ITAB sınırında yarıma görüldü.
	Kök	-	Hasar görüldü.
T-2080-45	Kep	46	Hasar görülmedi.
	Kök	-	Gevrek kırılma görüldü.
T-2080-75	Kep	41	Hasar görülmedi.
	Kök	48	Hasar görüldü.
T-2080-113	Kep	32	ITAB sınırında yarıma görüldü.
	Kök	49	Hasar görülmedi.

T2 (T-1040-75) ve T4 (T-2080-45) parametrelerde birleştirilen levhaların kaynak kök bölgesinin yetersiz nüfuziyet sebebi ile çentik etkisi oluşturduğu düşünülmektedir. Bunun neticesinde eğme deneyi sonrasında numuneler süneklik göstermeden kırılma şeklinde hasara uğramıştır.

ÇT- SKK yöntemiyle birleştirilen kaynaklı bağlantılara ait kep (yüzey) ve ikinci kep eğme deneyi sonrası görüntüler Şekil 4.11.’de verilmiştir.

PARAMETRE KODU	EĞME METODU	
Ç-1040-45	 a) Kep Eğme	 b) İkinci Kep Eğme
Ç-1040-75	 a) Kep Eğme	 b) İkinci Kep Eğme
Ç-2080-45	 a) Kep Eğme	 b) İkinci Kep Eğme
Ç-2080-75	 a) Kep Eğme	 b) İkinci Kep Eğme
Ç-2080-113	 a) Kep Eğme	 b) İkinci Kep Eğme

Şekil 4.11. ÇT- SKK'li Birleştirmelerin Eğme Deneyi Sonrası Görüntüleri

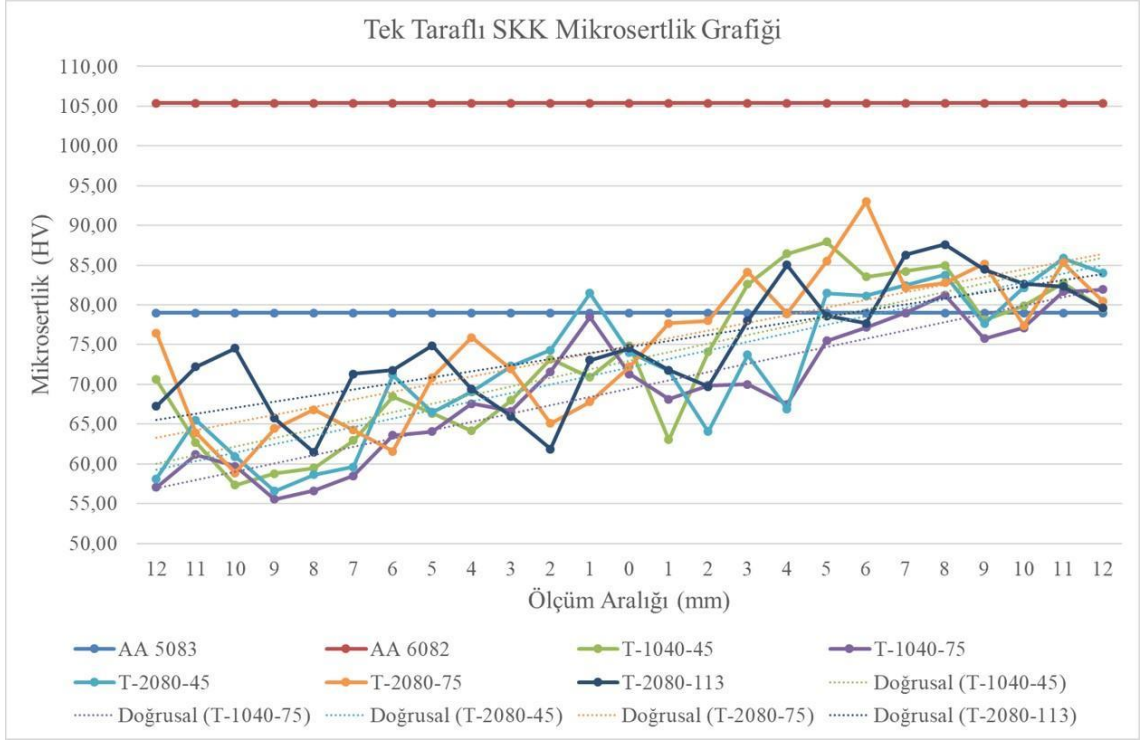
ÇT-SKK'li birleştirmeler eğme deneyi sonrası numuneler incelendiğinde hiçbir parametrede hem kep hem de kök eğmede hasar gözlemlenmemiştir. Priyasudana ve diğerlerinin AA 6061 alaşımı ile yaptıkları ÇT-SKK'li birleştirmelerde çatlak hasarı gözlemlenmişlerdir (Priyasudana vd.,2023). Bu, tez çalışmasında çalışılan parametrelerin eğilmeye karşı kaynak bütünlüğünün korunduğunu göstermiştir. SKK'li birleştirmelerin eğme deneyi bulguları Tablo 4.4.'te verilmiştir.

Tablo 4.4. ÇT-SKK'li Birleştirmelerin Eğme Deneyi Bulguları

KAYNAK PARAMETRESİ	EĞME METODU	DEFORMASYON AÇISI	HASAR DURUMU
Ç-1040-45	Kep	38	Hasar görülmedi.
	Kök	38	Hasar görülmedi.
Ç-1040-75	Kep	39	Hasar görülmedi.
	Kök	39	Hasar görülmedi.
Ç-2080-45	Kep	37	Hasar görülmedi.
	Kök	37	Hasar görülmedi.
Ç-2080-75	Kep	40,5	Hasar görülmedi.
	Kök	40,5	Hasar görülmedi.
Ç-2080-113	Kep	39,5	Hasar görülmedi.
	Kök	39,5	Hasar görülmedi.

4.4. Mikrosertlik Ölçümü Bulguları

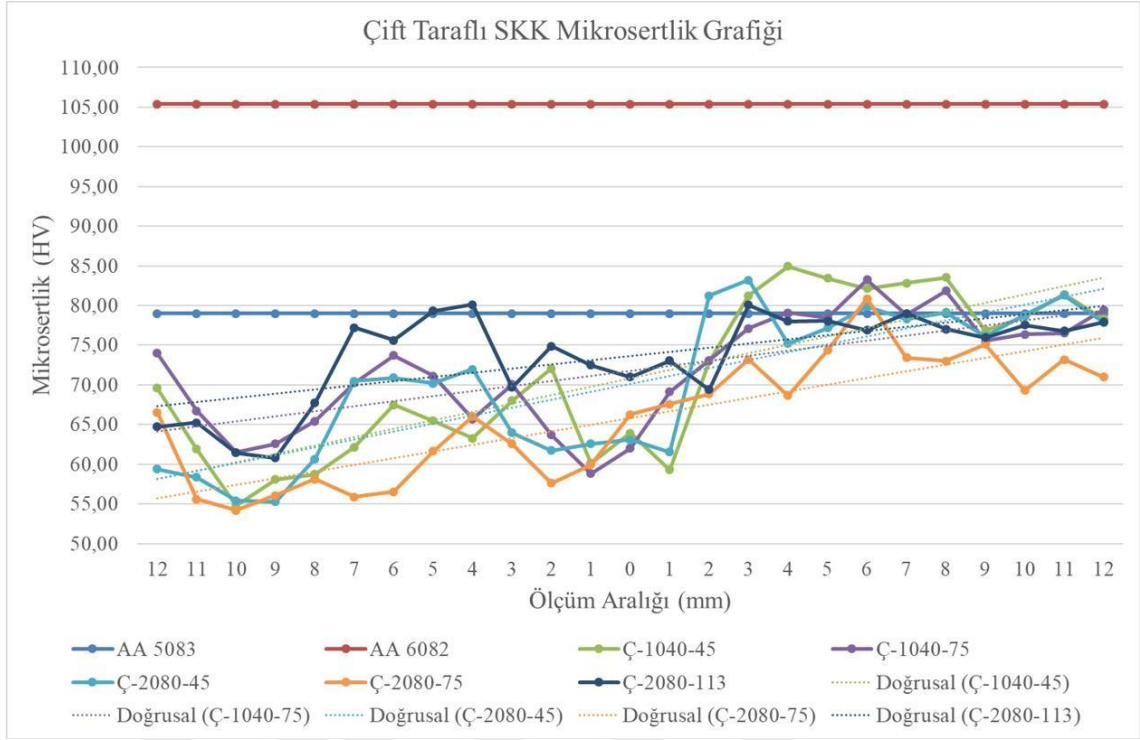
AA 5083 - H111 esas metalinin ortalama sertlik değeri 78,97 HV ve AA 6082 - T651 esas metalinin ortalama sertlik değeri 105,38 HV olarak ölçülmüştür. Hem tek taraflı hem de çift taraflı sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirmelerdeki sertlik ölçümleri AA 6082 esas metalin sertlik değerinin altında olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak kaynaklı birleştirmelerde sertlik değerleri AA 5083 tarafında düşük değerlerde seyrederken AA 6082 tarafına doğru yükselme eğilimi göstermiştir. Tek taraflı SKK ve çift taraflı SKK'li birleştirme mikrosertlik ölçümlerinden elde edilen grafik Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.'te verilmiştir.



Şekil 4.12. SKK'li Birleştirmelerin Mikrosertlik Ölçüm Grafiği

Tek taraflı SKK'li birleştirmeler arasında en düşük sertlik değerleri T2 (T-1040-75) parametrelili birleştirmede AA 5083 esas metalin ITAB'ında 55,57 HV değerinde olduğu gözlemlenmiştir. SKK'li birleştirmelerde en yüksek sertlik değeri ise T5 (T-2080-75) parametrelili birleştirmede AA 6082 esas metalin termo-mekanik etkilenen bölgede (TMEB) 92,99 HV değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Bulunan sertlik değerleri Gungor ve diğerlerinin bulgularıyla paralellik göstermiştir (Gungor vd.,2014:84-90). Genel olarak çalışılan parametrelerin çoğunluğunda takım omuz sınırında (ITAB başlangıcı) s ve takım pim sınırında sertlik değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Kaynak merkezi sertliği pim sınır bölgesine görece bir miktar artış göstermiştir. Karıştırma bölgesindeki sertlikteki artış, SKK neticesinde oluşan ince tane boyutundan ve işlem sırasında iş sertleştirme etkisinden kaynaklanmaktadır (Moni,2020; Hussein ve Al-Shammari,2018).

Kaynak merkezinde tüm parametreler için sertlik değerleri AA 5083 esas metal bölgesinde gözlemlenen değerinden daha yüksek değerlerde seyretmiştir.



Şekil 4.13. ÇT-SKK'li Birleştirmelerin Mikrosertlik Ölçüm Grafiği

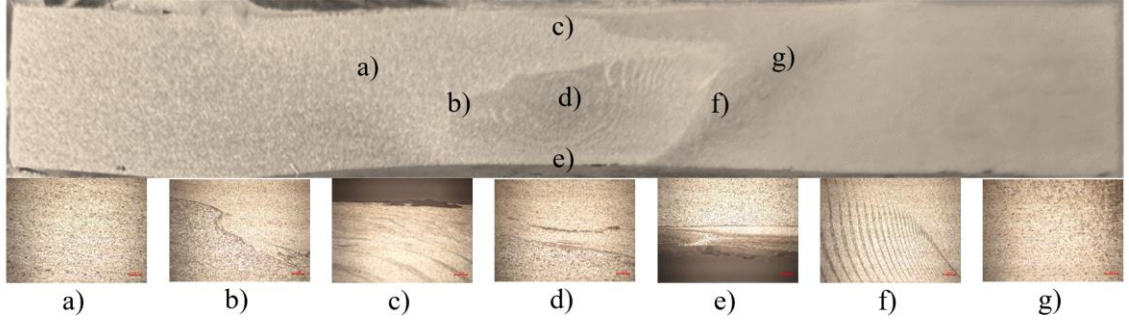
Çift taraflı SKK'li birleştirmeler arasında en düşük sertlik değerleri Ç5 (Ç-2080-75) parametrelili birleştirmede AA 5083 esas metalin ITAB'ında 54,20 HV değerinde olduğu gözlemlenmiştir. SKK'li birleştirmelerde en yüksek sertlik değeri ise Ç1 (Ç-1040-45) parametrelili birleştirmede AA 6082 esas metalin termo-mekanik etkilenen bölgede (TMEB) 84,96 HV değerinde olduğu gözlemlenmiştir. ÇT-SKK'li birleştirmelerde çalışılan parametrelerin çoğunluğunda SKK'li birleştirmelerin aksine takım omuz sınırına yakın TMEB'de sertlik değerlerinde artış, kaynak merkezinde ise sertlik değerlerinde bazı parametrelerde düşüş gözlemlenmiştir. Yang ve diğerleri AA 6082 alaşımının ÇT-SKK işleminde benzer sertlik dağılımı gösterdiğini bildirmişlerdir.

Sertlik değişimini tane boyutu ve dislokasyonlar ve çökelmelerden kaynaklı olduğuna atfetmişlerdir (Yang vd.,2020:105-116).

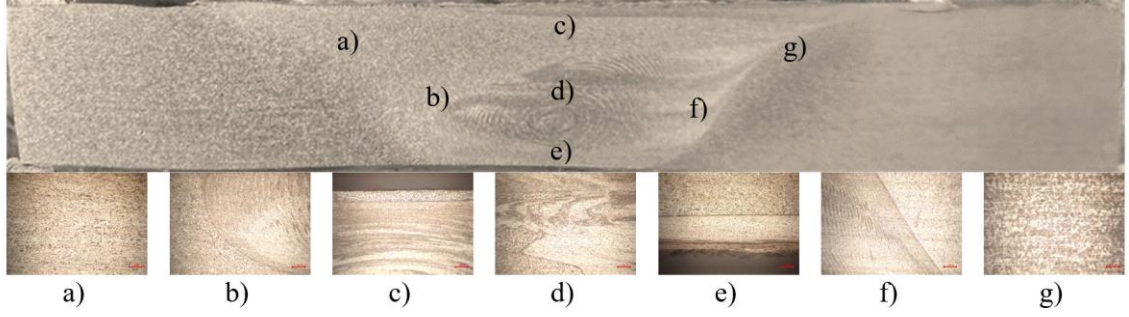
4.5. Işık Mikroskobu Bulguları

Farklı parametreler kullanılarak birleştirilen SKK'li ve ÇT-SKK'li levhaların kaynak bölgelerine ait kesitlerin optik mikroskop kullanılarak metalografik analizleri yapılmıştır. Tek taraflı SKK'li levhalardan elde edilen kaynak kesitlerine ait ışık mikroskobu görüntüleri Şekil 4.14. - 4.18.'de verilmiştir. Şekilde c; kaynak yüzeyini (KY) ve e; kaynak kökünü (KK) ifade etmektedir. Diğer kısaltmalar önceki bölümlerde

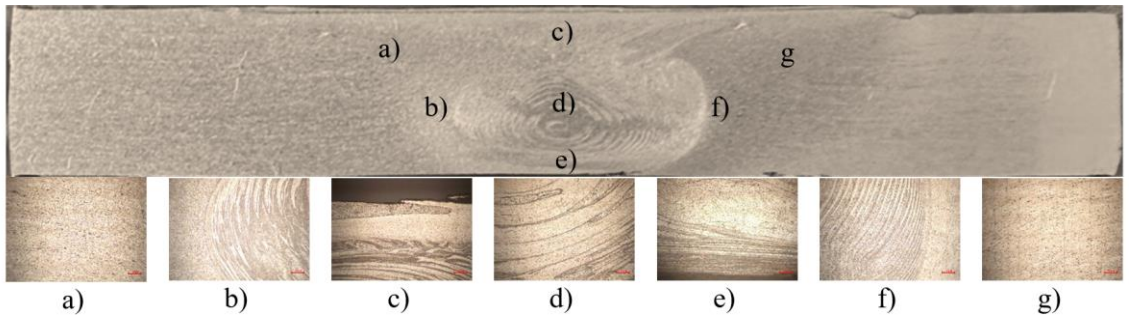
verilmiştir.



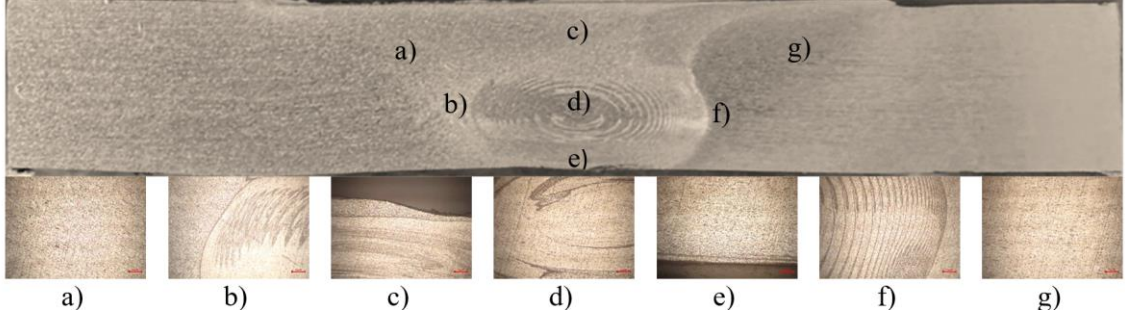
Şekil 4.14. T1 (T-1040-45) Parametrelili Numuneninin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) YB-KM Ara Yüzü; c) KY; d) KM; e) KK; f) KM-İB Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB



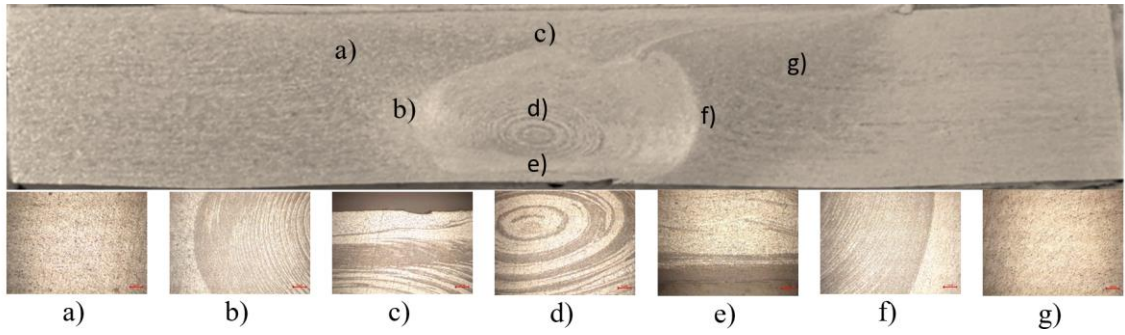
Şekil 4.15. T2 (T-1040-75) Parametrelili Numuneninin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) YB-KM Ara Yüzü; c) KY; d) KM; e) KK; f) KM-İB Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB



Şekil 4.16. T4 (T-2080-45) Parametrelili Numuneninin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) YB-KM Ara Yüzü; c) KY; d) KM; e) KK; f) KM-İB Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB



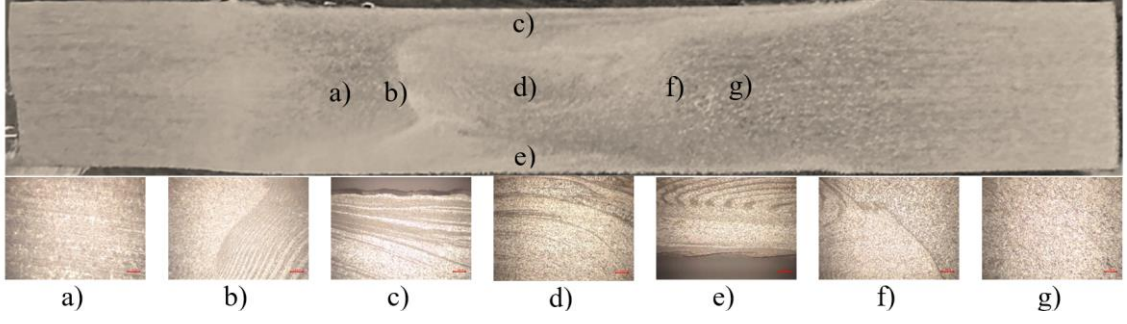
Şekil 4.17. T5 (T-2080-75) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) YB-KM Ara Yüzü; c) KY; d) KM; e) KK; f) KM-İB Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB



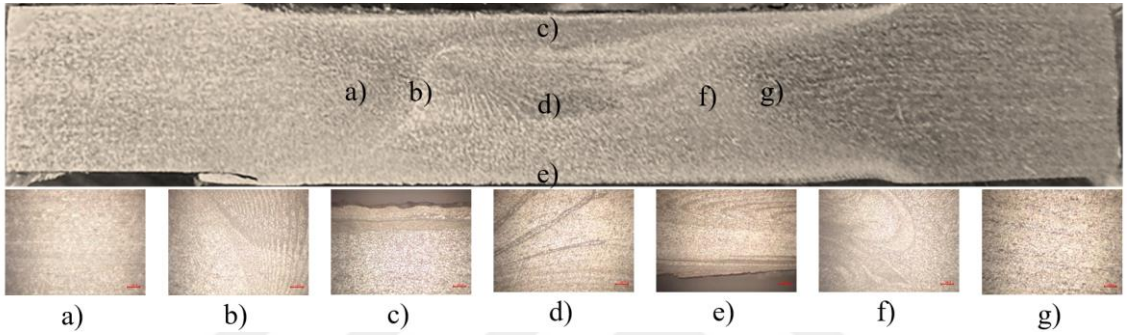
Şekil 4.18. T6 (T-2080-113) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) YB-KM Ara Yüzü; c) KY; d) KM; e) KK; f) KM-İB Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB

Kaynak takımı hareket ederken farklı mikro yapılar gözlemlenir. Gözlemlenen tüm mikro yapılar, karışmamış bölge (c), mekanik olarak karışmış bölge (d, e) ve karışık akış bölgesi (b, f) olmak üzere üç farklı bölgeye ayrılabilir. Şekillerde belirtilen (a) ve (g) ise yığılma ve ilerleme gölgelerindeki termomekanik etkilenen bölgeleri temsil etmektedir (Palanivel vd.,2012:7-16; Gungor vd.,2014:84-90; Kasman vd.,2016:6). Şekil 4.14. - 4.18.'de kaynak merkezinde (KM) soğan halkası şeklinde kayma bantları (deformasyon bantları) oluşmuştur. Kaynak bölgesindeki kayma bandı oluşumu, karıştırma bölgesinin dinamik hacmindeki artışla açıklanabilir ve eğimli üst akış bölgesinin oluşumu ilerleme tarafında belirgin olarak görülmektedir. Kayma bandının dezavantajlarından biri, elastik olmaması ve yüksek bir gerinim hızında deformasyona uğramaması olarak atfedilebilir (Mohan,2021:137; Shaik vd.,2021; Commin vd.,2009:1215-1221).

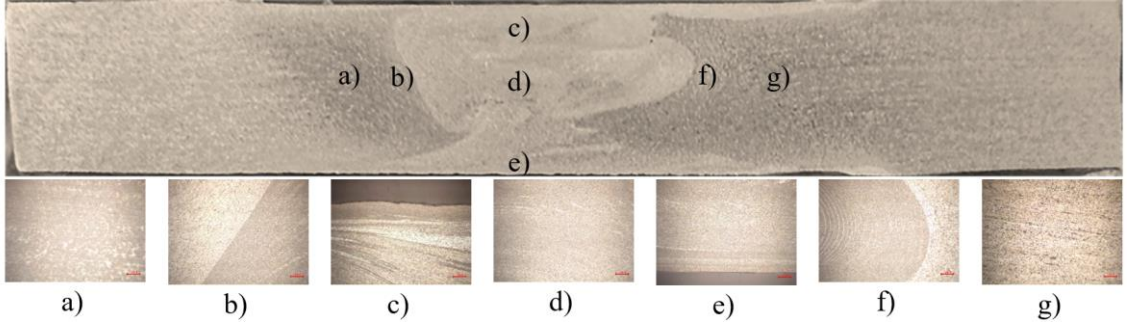
Çift taraflı SKK'li levhalardan elde edilen kaynak kesitlerine ait ışık mikroskobu görüntüleri Şekil 4.19. - 4.23.'te verilmiştir.



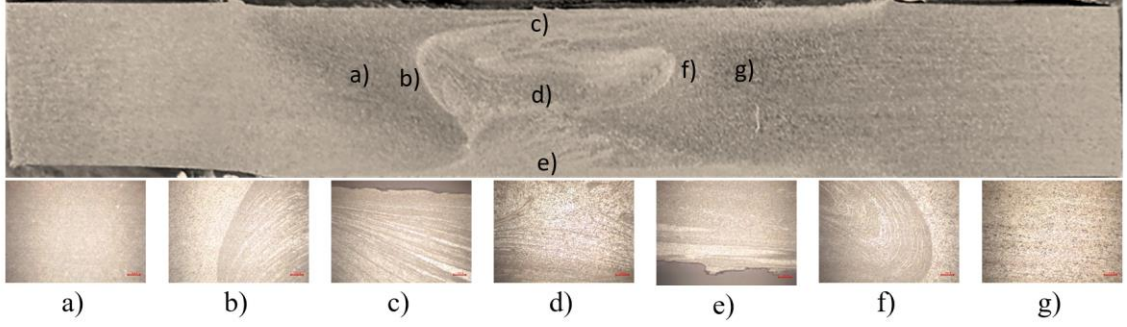
Şekil 4.19. Ç1 (Ç-1040-45) Parametrelî Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) AA 5083 KM Ara Yüzü; c) 1. Paso KY; d) ÖB; e) 2. Paso KY; f) KM-AA 6082 Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB



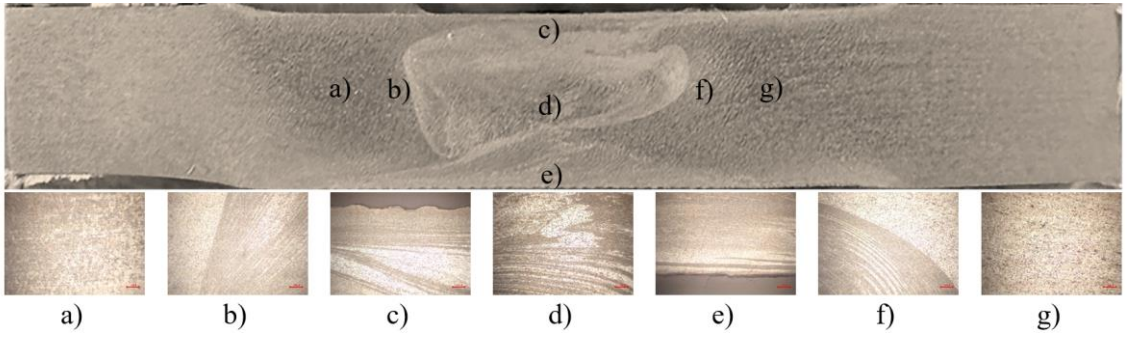
Şekil 4.20. Ç2 (Ç-1040-75) Parametrelî Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) AA 5083 KM Ara Yüzü; c) 1. Paso KY; d) ÖB; e) 2. Paso KY; f) KM-AA 6082 Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB



Şekil 4.21. Ç4 (Ç-2080-45) Parametrelî Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) AA 5083 KM Ara Yüzü; c) 1. Paso KY; d) ÖB; e) 2. Paso KY; f) KM-AA 6082 Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB



Şekil 4.22. Ç5 (Ç-2080-75) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) AA 5083 KM Ara Yüzü; c) 1. Paso KY; d) ÖB; e) 2. Paso KY; f) KM-AA 6082 Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB



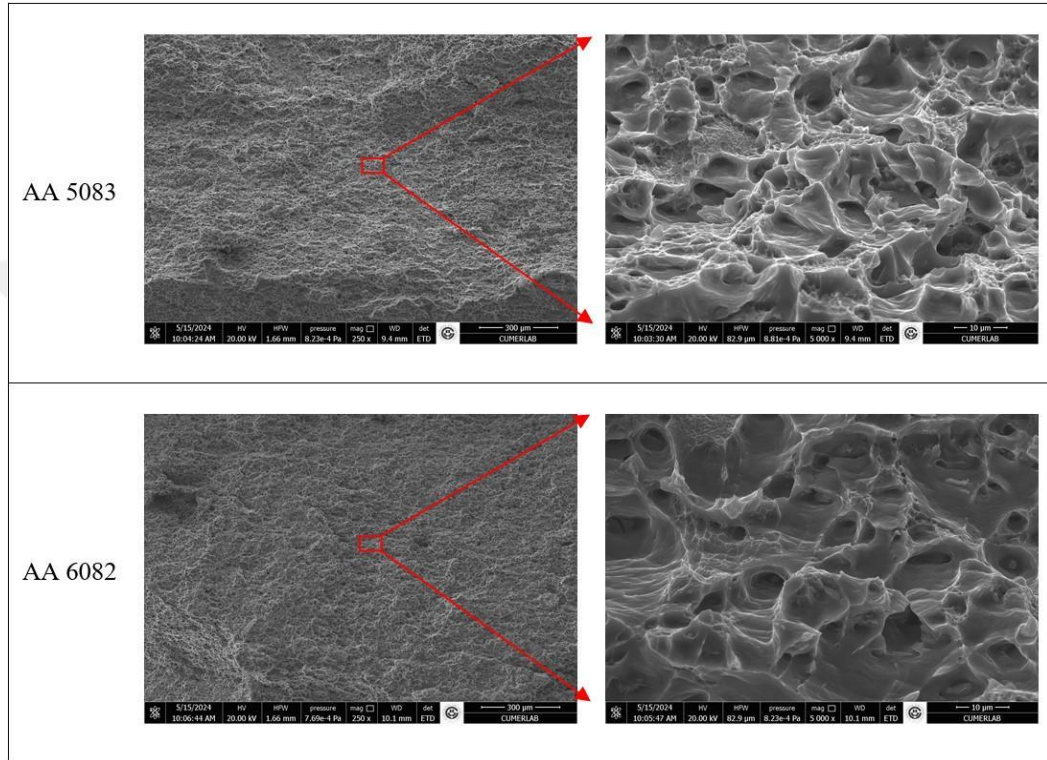
Şekil 4.23. Ç6 (Ç-2080-113) Parametrelili Numunenin Işık Mikroskobu Görüntüleri a) AA 5083 TMEB; b) AA 5083 KM Ara Yüzü; c) 1. Paso KY; d) ÖB; e) 2. Paso KY; f) KM-AA 6082 Ara Yüzü; g) AA 6082 TMEB

ÇT-SKK'li birleştirmelerde gözlemlenen mikro yapılar, karışmamış bölge (c, e), mekanik olarak karışmış bölge (d) ve karışık akış bölgesi (b, f) olmak üzere SKK'li birleştirmelerden farklı olarak bölgelere ayrılabilir. Şekillerde belirtilen (a) ve (g) ise yığılma ve ilerleme gölgelerindeki termomekanik etkilenen bölgeleri temsil etmektedir (Palanivel vd.,2012:7-16; Gungor vd.,2014:84-90; Kasman vd.,2016:6). Şekil 4.19. - 4.23. incelendiğinde, tek taraflı SKK ile yapılan birleştirmelerde gözlemlenen kaynak merkezindeki soğan halkası şeklinde kayma bantları çift taraflı SKK'li birleştirmelerde de oluşmuştur. Ters yüz edilen plakalardaki ikinci paso kaynak işlemi ile kaynak kök oluşumu ortadan kalkmış ve kaynak kökündeki çentik etkisi oluşturabilecek yapı oluşmamıştır.

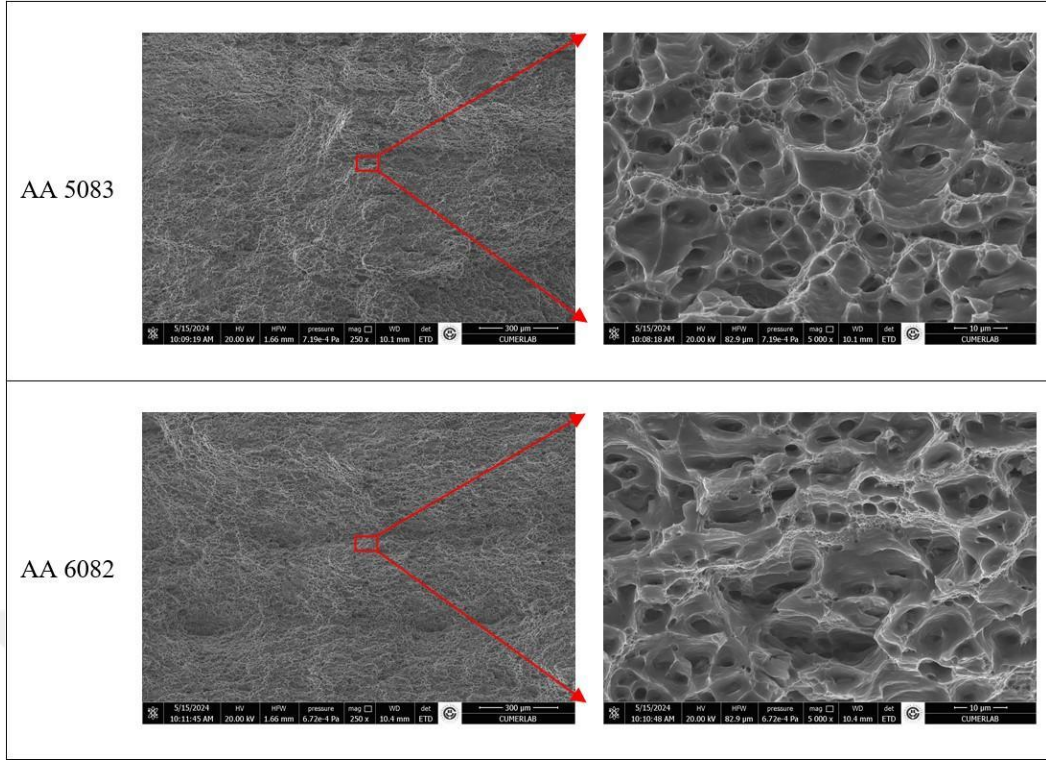
4.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Bulguları

Çekme deneyi sonrasında kırılma bölgeleri incelendiğinde kopmanın AA 6082 Al alaşımının ITAB'ında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. 5 farklı parametrede birleştirilen SKK'li ve ÇT-SKK'li birleştirmelerden çekme deneyi sonrasında en yüksek ve en düşük

mukavemet değerleri gösteren T5 (T-2080-75), T2 (T-1040-75) ve 1 (-1040-45), 4 (-2080-45) numaralı parametrelerin kopma sonrası yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiştir. şekil 4.24. ve şekil 4.25.'te T5 (T-2080-75) ve T2 (T-1040-75) numaralı numunenin AA 5083 ve AA 6082 tarafından alınan kopma yüzeylerinin $\times 250$ ve $\times 5000$ büyütmede taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri verilmiştir.



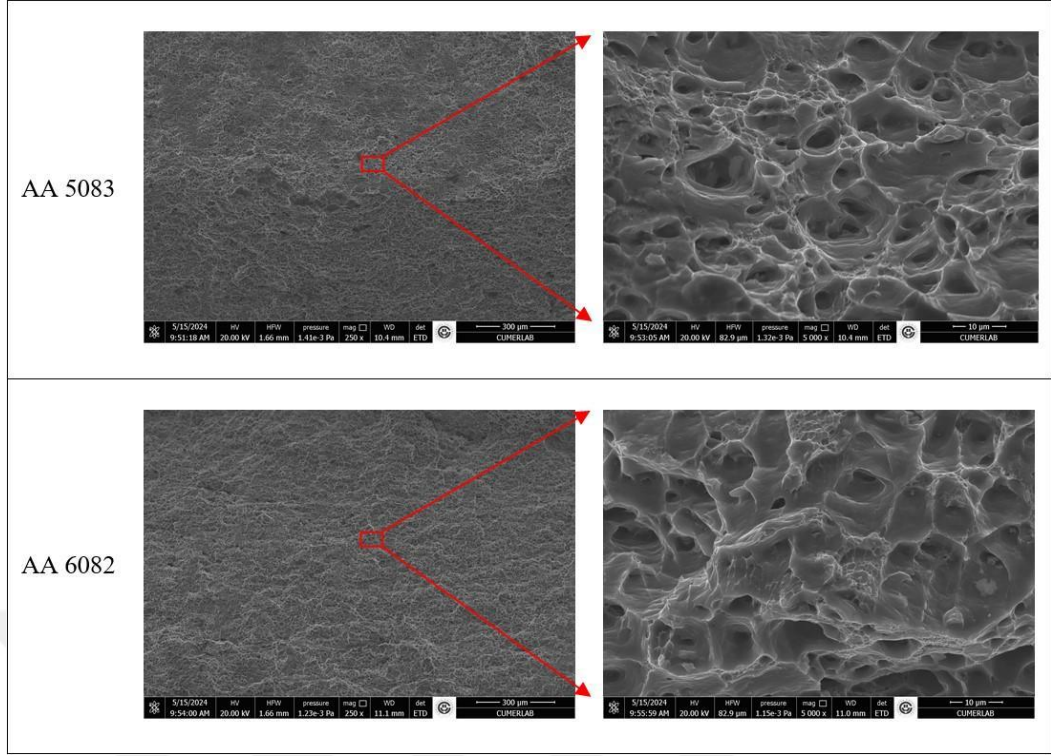
şekil 4.24. T5 (T-2080-75) parametrelili numunenin SEM görüntüleri



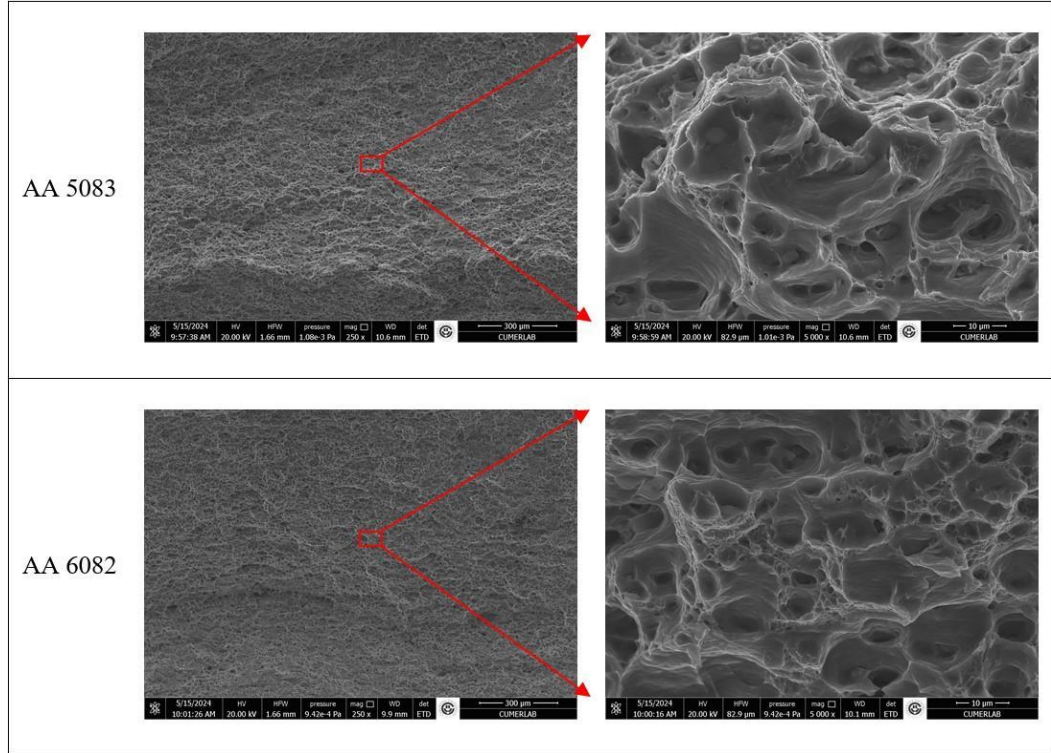
Şekil 4.25. T2 (T-1040-75) parametrelili numunenin SEM görüntüleri

T5(T-2080-75) ve T2(T-1040-75) numaralı parametrelerin SEM görüntüleri incelendiğinde T5(T-2080-75) numaralı parametreden elde edilen kırılma yüzeylerinde kaynak iç yapısının T2(T-1040-75) numaralı parametreye nazaran daha sıkı ve homojen bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu durum tane sınırlarındaki artış sebebiyle oluştuğu ve numunenin yüksek mukavemet sergilemesine sebep olduğu düşünülmektedir (Ma vd.,2008:6579; Naderi vd.,2013:1852-1861; Fouladi vd.,2017:421).

Şekil 4.26. ve Şekil 4.27.'de Ç1 (Ç-1040-45) ve Ç4 (Ç-2080-45) numaralı numunenin AA 5083 ve AA 6082 tarafından alınan kopma yüzeylerinin $\times 250$ ve $\times 5000$ büyütmede taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.26. Ç1 (Ç-1040-45) parametrelili numunenin SEM görüntüleri



Şekil 4.27. Ç4 (Ç-2080-45) parametrelili numunenin SEM görüntüleri

T5(T-2080-75) ve T2(T-1040-75) numaralı parametrelerdeki SEM görüntülerine benzer olarak Ç1 (Ç-1040-45) ve Ç4 (Ç-2080-45) numaralı parametrelerde Ç1 (Ç-1040-45) numaralı parametreden elde edilen kırılma yüzeylerinde kaynak iç yapısının Ç4 (Ç-

2080-45) numaralı parametreye nazaran daha sıkı ve homojen bir yapıya sahip olduğu gör÷lmektedir. Bu durum, tane sınırlarının artması ile bağlantının mukavemet özelliklerinde artışa sebebiyet vermiştir (Ma vd.,2008:6579; Naderi vd.,2013:1852-1861; Fouladi vd.,2017:421).



SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan tez çalışması kapsamında AA 5083-H111 ve AA 6082-T651 alüminyum alaşımı levhalar SKK ve ÇT-SKK yöntemiyle farklı devir ve ilerleme hızında birleştirilmiştir. SKK ve ÇT-SKK yöntemiyle birleştirilen levhaların mekanik ve metalografik özellikleri incelenmiş ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Literatür taraması ile çalışılan parametrelerin dışında özgün parametrelerde kaynaklı birleştirmeler yapılmıştır. Kaynaklı birleştirmelerde iki farklı devir (1040-2080 dev./dak.) ve üç farklı ilerleme (45-75-113 mm/dak.) hızları kullanılmış ancak Ç3 (Ç-1040-113) numaralı parametrelili birleştirmede 2. paso kaynak işlemi sonrası kanal hatası oluşmuştur. Bunun neticesinde çalışmaya beş farklı parametre ile devam edilmiştir.

SKK'li birleştirmelerin yüzey yapısı genel olarak hatasız olduğu ancak T3 (T-1040-113) numaralı parametrede yüzey yapısında süreksizlikler gözlemlenmiştir. Bu durum düşük devir ve yüksek ilerleme hızından kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır.

SKK'li levhaların kaynak kök görünümünden yeterli birleşme sağlandığı sonucuna varılmıştır. ÇT-SKK'li levhaların 2. paso sonrası kaynak yüzeyi incelendiğinde Ç3 (Ç-1040-113) numaralı parametrelili birleştirmede kanal şeklinde hata oluşumu görülmüştür.

Çekme deneyi sonrasında SKK'li ve ÇT-SKK'li tüm numuneler, AA 6082-T651 tarafının ısı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) takım omzunun sınırından hasara uğrayarak kopmuştur. SKK'li birleştirmelerde kaynak mukavemeti 208,17-239,55 MPa arasında olduğu tespit edilmiştir. SKK'li birleştirmelerde en yüksek kaynak performansı T5 (T-2080-75) numaralı parametrede AA 5083-H111 esas metal alaşımının %77,27 ve AA 6082-T651 esas metal alaşımının %72,59 oranında olduğu görülmüştür. Elde edilen kaynak performansı literatürde yer alan çalışmalardan daha yüksek düzeydedir. ÇT-SKK'li birleştirmelerdeki % uzama miktarı %8,26-%10,09 arasındadır. En yüksek % uzama değeri T5 (T-2080-75) numaralı parametrede görülmüştür. ÇT-SKK'li birleştirmelerde kaynak mukavemeti 194,11-204,91 MPa arasında olduğu tespit edilmiştir. SKK'li birleştirmelerde en yüksek kaynak performansı Ç1 (Ç-1040-45) numaralı parametrede AA 5083-H111 esas metal alaşımının % 66,09 ve AA 6082-T651 esas metal alaşımının % 62,09 oranında olduğu görülmüştür. Elde edilen kaynak performansı literatürde yer alan çalışmalara paralel değerlerdedir. ÇT-SKK'li birleştirmelerdeki % uzama miktarı %7,76-%10,76 arasındadır. En yüksek % uzama değeri Ç4 (Ç-2080-45) numaralı parametrede görülmüştür. Kaynaklı birleştirmelerdeki kaynak performans değişim eğilimi, hem kaynak birleştirmelerdeki kusurlara hem de

farklı Al alaşımı malzemelerin mukavemetine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Kem SKK'li birleştirmelerde hem de ÇT-SKK'li birleştirmelerde kopmalar AA 6082 esas metalinin ITAB bölgesinde meydana gelmiştir. Genel olarak mukavemet düşüşü yüksek devir ve düşük ilerleme hızlarında gerçekleşen parametrelerde gözlemlenmiştir. Bunun kaynak bölgesine yüksek ısı girişi sebebi ile olduğu sonucuna varılmıştır. SKK'li birleştirmelerin çekme mukavemetine kıyasla ÇT-SKK'li birleştirmelerin genel mukavemet değerlerindeki azalma ikinci pasoda kaynak bölgesinin ikinci defa ısıya maruz kalmasından ötürü gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

Eğme deneyi sonuçları incelendiğinde, kaynaklı birleştirmelerde takım devri ve ilerlemeye bağlı yüzey deformasyonları ve kaynak kökündeki yetersiz nüfuziyet sonucu yarılma oluşmuştur. Tek taraflı kaynaklı birleştirmelerden T1 (T-1040-45), T2 (T-1040-75) ve T6 (T-2080-113) numaralı parametrelerde kep eğme sonrası ITAB sınırında yarılma görülmüştür. Bu durum yüzeyde takım kaynaklı deformasyonun çentik etkisi oluşturduğuna atfedilmektedir. T2 (T-1040-75) numaralı parametrede kök eğmede yarılma şeklinde ve T4 (T-2080-75) parametrelerde kök eğme sonrası gevrek kırılma şeklinde hasar görülmüştür. Çift taraflı SKK'li birleştirmelerde ise eğme deneyi sonrası hem kep hem de kök eğmede hasar oluşumuna rastlanmamıştır. ÇT-SKK işlemi ile özellikle kaynak kök bölgesi oluşumunun önlenmesi eğme deneyinde olumlu sonuç elde edilmesini sağladığı düşünülmektedir.

Kaynaklı birleştirmelerde sertlik değerleri AA 5083 tarafında düşük değerlerde seyrederken AA 6082 tarafına doğru yükselme eğilimi göstermiştir. Tek taraflı SKK'li birleştirmelerde genel olarak çalışılan parametrelerin çoğunluğunda takım omuz sınırında (ITAB başlangıcı) sertlik değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Kaynak merkezinde tüm parametreler için sertlik değerleri AA 5083 esas metal bölgesinde gözlemlenen değerinden daha yüksek değerlerde seyretmiştir. ÇT-SKK'li birleştirmelerde ise çalışılan parametrelerin çoğunluğunda SKK'li birleştirmelerin aksine takım omuz sınırına yakın TMEB'de sertlik değerlerinde artış, kaynak merkezinde ise sertlik değerlerinde bazı parametrelerde düşüş gözlemlenmiştir.

Işık mikroskobu incelemelerinde tek taraflı SKK'li birleştirmelerde kaynak merkezinde soğan halkası şeklinde kayma bantları belirgin bir şekilde görülmüştür.

Kaynak yüzeyinde takımın oluşturduğu deformasyon bölgelerinden belirgin olarak görülmekte olup bunun kaynaklı birleştirmelerde mukavemet kayıplarına sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca çift taraflı SKK'li birleştirmelerde soğan halkası şeklinde deformasyon bantları daha az belirgin olup, çift taraflı kaynak işlemi sonrası yüzey

deformasyonu sonucunda kaynak mukavemetinin tek taraflı SKK'li birleştirmelere göre nispeten daha düşük çıkmasına sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

Çekme deneyi sonrası en yüksek ve en düşük mukavemete sahip parametrelili birleştirmelere ait kopma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri incelenmiştir. Tek taraflı SKK'li T5 (T-2080-75) numaralı yüksek dayanım gösteren parametrede kırılma iç yüzeyi sıkı ve sünek formda olduğu görülmüştür. En düşük mukavemet özelliği sergileyen T2 (T-1040-75) numaralı kaynak parametresinde ise boşluklu bir yapıda olduğu görülmüştür.

Bu durumun çekme dayanımındaki azalmaya sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

Çift taraflı SKK'li Ç1 (Ç-1040-45) numaralı yüksek dayanım gösteren parametrede kırılma iç yüzeyi tek taraflı SKK'li birleştirmelere benzer olarak küçük boşluklu formda olduğu görülmüştür. En düşük mukavemet özelliği sergileyen Ç4 (Ç-2080-45) numaralı kaynak parametresinde Ç1 numaralı parametreye nazaran daha boşluklu bir yapıda olduğu görülmüştür. Bu durumun çekme dayanımındaki azalmaya sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

Tez çalışmasında SKK'li ve ÇT-SKK'li birleştirmelerde kaynak takım devri ve ilerleme hızına bağlı parametrelerin mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkisi kıyaslanması yapılmıştır. Çalışmayı daha da ilerletmek adına, takım kuvvetleri ve kaynak bölgesi sıcaklığı ölçümleri de yapılarak bu değişkenlerin mekanik ve mikroyapı özellikler üzerindeki etkisinin araştırılması önerilebilir.

KAYNAKÇA

Abd Elnabi, M.M., Elshalakany, A.B., Abdel-Mottaleb, M.M., Osman, T.A., El Mokadem, A. (2019) Influence of friction stir welding parameters on metallurgical and mechanical properties of dissimilar AA5454–AA7075 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (2), 1684-1693. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.10.015>.

Azo Materials. Haziran 2024, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2804>

Bag, S., & Akinlabi, E. T. (2020). Eco friendly aspects in hybridization of friction stir welding technology for dissimilar metallic materials. *In Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials: Volume 1-5* (pp. 225-236). Elsevier.

Bergmann, L. A., Batistão, B. F., de Alcântara, N. G., Gargarella, P., & Klusemann, B. (2022). Effect of rotational speed and double-sided welding in friction stir-welded dissimilar joints of aluminum alloy and steel. *Welding in the World*, 66(9), 1747-1756.

Cabibbo, M., Forcellese, A., El Mehtedi, M., & Simoncini, M. (2014). Double side friction stir welding of AA6082 sheets: Microstructure and nanoindentation characterization. *Materials Science and Engineering: A*, 590, 209-217.

Casalino, G., Campanelli, S., Mortello, M. (2014). Influence of shoulder geometry and coating of the tool on the friction stir welding of aluminium alloy plates. *Procedia Engineering*, 69, 1541-1548. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.153>.

Chen, J., Ueji, R., & Fujii, H. (2015). Double-sided friction-stir welding of magnesium alloy with concave–convex tools for texture control. *Materials & Design*, 76, 181-189.

Commin, L., Rotinat, R., Pierron, F., Masse, J.-E., & Barrallier, L. (2009). Identification of shear bands in wrought magnesium alloy friction stir welds and laser beam welds. *Materials Science and Technology*, 25(10), 1215–1221. doi:10.1179/174328409x421997 10.1179/174328409X421997

Elangovan, K., Balasubramanian V., Valliappan, M. (2008). Effect of tool pin profile and tool rotational speed on mechanical properties of friction stir welded AA6061 aluminium alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 23 (3), 251-260, doi:10.1080/10426910701860723.

Elfar, O.M.R., Rashad, R.M., Megahed, H. (2016). Process parameters optimization for friction stir welding of pure aluminium to brass (CuZn30) using Taguchi Technique. *MATEC Web of Conferences*, 43, 1-6. doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20164303005>

Friction Stir Welding, FSW, Wayne Thomas and Solid State Welding TWI [Çevrim-içi: <https://www.twi-global.com/what-we-do/research-and-technology/technologies/welding-joining-and-cutting/friction-welding/friction-stir-welding>] Erişim Tarihi: 19 Aralık 2023.

Fouladi, S., Ghasemi, A H., Abbasi, M., Abedini, M., Khorasani, A.M., Gibson, I. (2017). The effect of vibration during friction stir welding on corrosion behavior, mechanical properties, and machining characteristics of stir zone. *Metals*, 7(10), 421, 1-14. <https://doi.org/10.3390/met7100421>

FRICITION STIR WELDING (2023). Friction Stir Welding, FSW, Wayne Thomas and Solid State Welding TWI [Çevrim-içi: <https://www.twi-global.com/what-we-do/research-and-technology/technologies/welding-joining-and-cutting/friction-welding/friction-stir-welding>] Erişim Tarihi: 19 Aralık 2023.

Gungor, B., Kaluc, E., Taban, E., & Sik, A. (2014). Mechanical, fatigue and microstructural properties of friction stir welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys. *Materials & Design* (1980-2015), 56, 84-90.

Haomei Marine Aluminum. Haziran 2024, <https://www.marinealu.com/a/marine-grade-aluminum-sheet-5083-h111-vs-5083-h321.html#:~:text=Aluminum%205083%20H321%20refers%20to,to%20obtain%20stable%20mechanical%20properties>

Hejazi, I., & Mirsalehi, S. E. (2016). Effect of pin penetration depth on double-sided friction stir welded joints of AA6061-T913 alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(3), 676-683.

Hussein, W. & Al-Shammari, M.A. 2018. Fatigue and Fracture Behaviours of FSW and FSP Joints of AA5083-H111 Aluminium Alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 454(1).

Kah, P., Rajan, R., Martikainen, J., & Suoranta, R. (2015). Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys. *International Journal of*

Mechanical and Materials Engineering, 10, 1-10.

Kasman, S., Kahraman, F., Emiralioğlu, A., & Kahraman, H. (2016). A case study for the welding of dissimilar EN AW 6082 and EN AW 5083 aluminum alloys by friction stir welding. *Metals*, 7(1), 6.

Kaygusuz, E., Karaomerlioglu, F., & Akıncı, S. (2023). A review of friction stir welding parameters, process and application fields. *Turkish Journal of Engineering*, 7(4), 286-295.

Kumar, A. R., Varghese, S., & Sivapragash, M. (2012). A comparative study of the mechanical properties of single and double sided friction stir welded aluminium joints. *Procedia engineering*, 38, 3951-3961.

Kumar, J., Majumder, S., Mondal, A. K., & Verma, R. K. (2022). Influence of rotation speed, transverse speed, and pin length during underwater friction stir welding (UW-FSW) on aluminum AA6063: A novel criterion for parametric control. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 5(3), 295-305.

Lion Metal. Haziran 2024, <https://www.shlionmetal.com/aluminum-alloy/what-is-the-difference-between-5083h111-and-5083h112-in-aluminum-alloy/>

Lyu, X., Li, M., Li, X., & Chen, J. (2018). Double-sided friction stir spot welding of steel and aluminum alloy sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 2875-2884.

Ma, X., Xu, S., Wang, F., Zhao, Y., Meng, X., Xie, Y., ... & Huang, Y. (2022). Effect of temperature and material flow gradients on mechanical performances of friction stir welded AA6082-T6 joints. *Materials*, 15(19), 6579.

Matsushita, M., Yamagishi, D., Igi, S., & Ikeda, R. (2023). Development of double-sided friction stir welding of advanced high strength steel sheets. *Welding in the World*, 67(3), 561-571.

Majeed, T., Wahid, M. A., Alam, M. N., Mehta, Y., & Siddiquee, A. N. (2021). Friction stir welding: A sustainable manufacturing process. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6558-6563.

Ma, Z., Pilchak, A., Juhas, M., Williams, J. (2008). Microstructural refinement and property enhancement of cast light alloys via friction stir processing. *Scr. Mater.*, 58,

361–366. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.09.062>

McPherson, N. A., Galloway, A. M., Cater, S. R., & Osman, M. M. (2013, March). A comparison between single sided and double sided friction stir welded 8mm thick DH36 steel plate. *In 9th international conference on trends in welding research* (pp. 284-290).

Mehta, M., Arora, A., De, A., Debroy, T. (2011). Tool geometry for friction stir welding optimum shoulder diameter. *Metallurgical And Materials Transactions A*, 42 (9), 2716-2722. doi: 10.1007/s11661-011-0672-5. 115

Mendes, N., Loureiro, A., Martins, C., Neto, P., & Pires, J. N. (2014). Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds. *Materials & Design*, 58, 457-464.

Mohan, D. G., & Wu, C. (2021). A review on friction stir welding of steels. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 34(1), 137.

Moni, V. (2020). Mechanical properties of friction stir welded 5083-h321 and 6082-t651 dissimilar aluminium alloys (Doctoral dissertation, Cape Peninsula University of Technology).

Muhayat, N., Putri, E. D. W. S., Hendrato, Depari, Y. P. D. S., Puspitasari, P., Jamasri, ... & Triyono. (2023). Apparatus Design of One-Step Double-Side Friction Stir Welding for Aluminum Plates. *Designs*, 7(3), 75.

Naderi, M., Abbasi, M., Saeed-Akbari, A. (2013). Enhanced mechanical properties of a hotstamped advanced high-strength steel via tempering treatment. *Metall. Mater. Trans. A*, 44, 1852–1861. doi: 10.1007/s11661-012-1546-1

Nandau, R., DebRoy, T., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2008). Recent advances in friction-stir welding-Process, weldment structure and properties. *Prog. Mater. Sci*, 53(6), 980-1023.

Nath, R. K., Jha, V., Maji, P., & Barma, J. D. (2021). A novel double-side welding approach for friction stir welding of polypropylene plate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 691-703.

Nosrati, H. G., Yazdani, N. M., & Khoran, M. (2022). Double-sided friction stir welding of AA 2024-T6 joints: Mathematical modeling and optimization. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 36, 1-11.

Öcalir, Ş. (2019). Farklı iki malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin bağlantının mekanik özelliklerine ve korozyon direncine etkilerinin incelenmesi.

Patnaik, S., Chattopadhyaya, S., & Shankar, S. (2022, November). Friction stir welding and its applications: An overview. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2681, No. 1). *AIP Publishing*.

PACE TECHNOLOGIES. Haziran 2024, <https://www.metallographic.com/Metallographic-Etchants/Metallography-Aluminum-etchants.htm>

Palanivel, R., Mathews, P. K., Murugan, N., & Dinaharan, I. (2012). Effect of tool rotational speed and pin profile on microstructure and tensile strength of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminum alloys. *Materials & Design*, 40, 7-16.

Priyasudana, D., Crisdion, S. A., Puspitasari, P., & Pramono, D. D. (2023). Double side friction stir welding effect on mechanical properties and corrosion rate of aluminum alloy AA6061. *Heliyon*, 9(2).

Rahmatian, B., Mirsalehi, S. E., & Dehghani, K. (2019). Metallurgical and mechanical characterization of double-sided friction stir welded thick AA5083 aluminum alloy joints. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 72, 2739-2751.

Ramanjaneyulu, K., Madhusudhan Reddy, G., Venugopal Rao, A. (2014). Role of tool shoulder diameter in friction stir welding: an analysis of the temperature and plastic deformation of AA 2014 aluminium alloy. *Trans Indian Inst Met*, 67(5), 769–780, doi: 10.1007/s12666-014-0401-z.

Rajeesh, J., Balamurugan, R., Balachandar, K. (2018). Process parameter optimization for friction stir welding of aluminium 2014-T651 alloy using taguchi technique. *Journal of Engineering Science and Technology*, 13 (2), 515-523.

Rai, R., De, A., Bhadeshia, H.K.D.H., DebRoy, T. (2011). Review: friction stir welding tools. *Science and Technology of Welding and Joining*, 16 (4), 325-342. <https://doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000023>.

Raturi, M., & Bhattacharya, A. (2023). Attributes of intergranular corrosion in AA6061-

AA7075 double sided friction stir weld. *Materials Chemistry and Physics*, 298, 127429.

Rao, P S., Bawazir, A.F.O., Awang, M., Rani, A.M.A.,Jebaraj, S. (2016). Effect of tool geometrical parameters on friction stir welding joint properties of aluminium alloy AA6061. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11 (22), 13053-13058.

Referans Metal. Haziran 2024, <https://www.referansmetal.com/alasimli-aluminyum/product/198/uzay-havacilik-savunma/cubuk-lama/ams-qq-a-2004-almg4-5mn0-7-5083-h111>.

Stirweld (2024), Common defects in Friction Stir Welding[Çevrim-içi: <https://stirweld.com/en/common-defects-in-friction-stir-welding/>] Erişim Tarihi: 23 Temmuz 2024.

Santini, F. F., Plaine, A. H., Afonso, C. R. M., Bergmann, L., de Alcântara, N. G., dos Santos, J. F., & Miyazaki, M. H. (2021). Microstructure features and mechanical properties of double-sided friction stir welded joints of AA2050-T84 thick plates. *Materials Research*, 23, e20200309.

Sarıoğlu alüminyum. Haziran 2024, Sarıoğlu Alüminyum Fabrikası | Alüminyum 6082 Üretim ve Satışı (sarioglualuminyum.com.tr).

Singh, K., Singh, G., & Singh, H. (2018). Review on friction stir welding of magnesium alloys. *Journal of magnesium and alloys*, 6(4), 399-416.

Singh, R. P., Dubey, S., Singh, A., & Kumar, S. (2021). A review paper on friction stir welding process. *Materials Today: Proceedings*, 38, 6-11.

Shaik, B., Harinath Gowd, G., & Durga Prasad, B. (2021). Investigations on Friction Stir Welding to Improve Aluminum Alloys. *IntechOpen*. doi: 10.5772/intechopen.96250

STAM-Science and Technology in Advanced Manufacturing (2023). Investigation of the Stir Friction Welding Process. [Çevrim-içi: <https://www.tcd.ie/mecheng/research/stam/research/projects/current/friction-stir.php>] Erişim Tarihi: 19 Aralık 2023.

Thakur, A., Sharma, V., & Bhadauria, S. S. (2023). Investigation of metallurgical characterization and mechanical properties of double-sided friction stir welding of aluminum 6061 T6 alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 237(1-2), 16-30.

TWI. Haziran 2024, <https://www.twi-global.com/what-we-do/research-and-technology/technologies/welding-joining-and-cutting/friction-welding/friction-stir-welding/benefits-and-advantages>

Ugenter, S., (2018). Influence of tool pin profile and rotational speed on the formation of friction stir welding zone in AZ31 magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 6 (2), 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.05.001>.

Unfried-Silgado, J., Torres-Ardila, A., Carrasco-García, J.C., Rodríguez-Fernández, J. (2017). Effects of shoulder geometry of tool on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of AA1100 aluminum alloy. *DYNA*, 84 (200), 202-208. <https://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n200.55787>.

Weng, F., Liu, Y., Chew, Y., Lee, B. Y., Ng, F. L., & Bi, G. (2020). Double-side friction stir welding of thick magnesium alloy: *Microstructure and mechanical properties*. *Science and Technology of Welding and Joining*, 25(5), 359-368.

Yang, C., Zhang, J. F., Ma, G. N., Wu, L. H., Zhang, X. M., He, G. Z., ... & Ma, Z. Y. (2020). Microstructure and mechanical properties of double-side friction stir welded 6082Al ultra-thick plates. *Journal of materials Science & technology*, 41, 105-116.

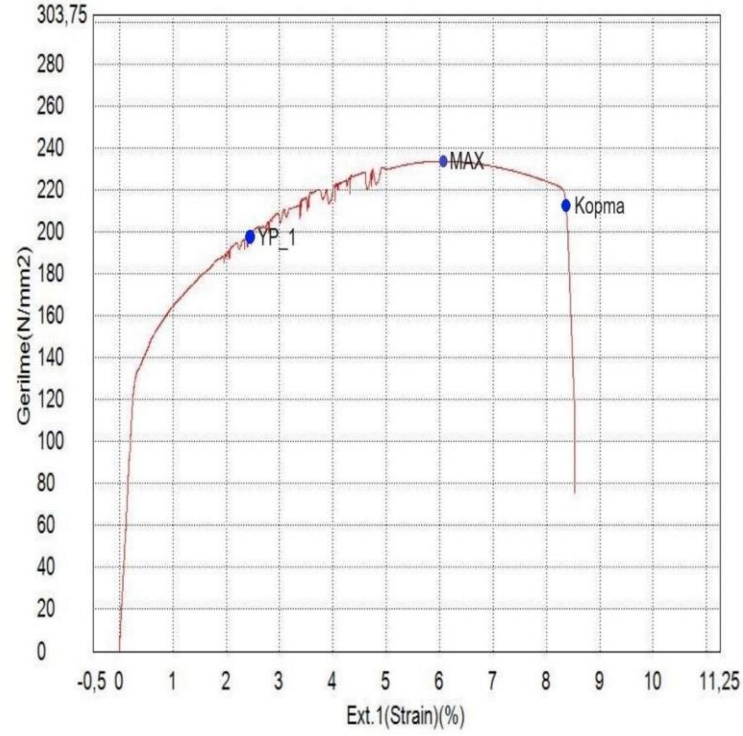
Yieh Corporation Limited. Haziran 2024, <https://aluminum.yieh.com/Upfiles/EDUp/files/6000%20Series/TDS/AA6082/TDS-YIEH-6082-Plate.pdf>

EKLER

Ek 1. Çekme Deneyi Grafikleri

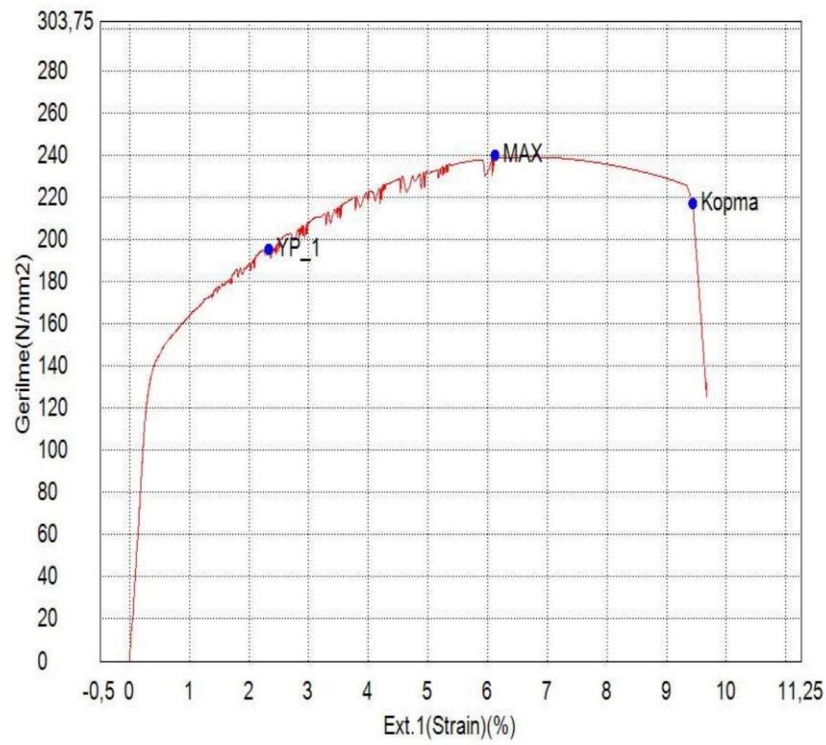
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	T-1040-45_1	Metot Dosya Adı	seref.xmas
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	1mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	233,670	215,256	191,236
Ortalama	233,670	215,256	191,236
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



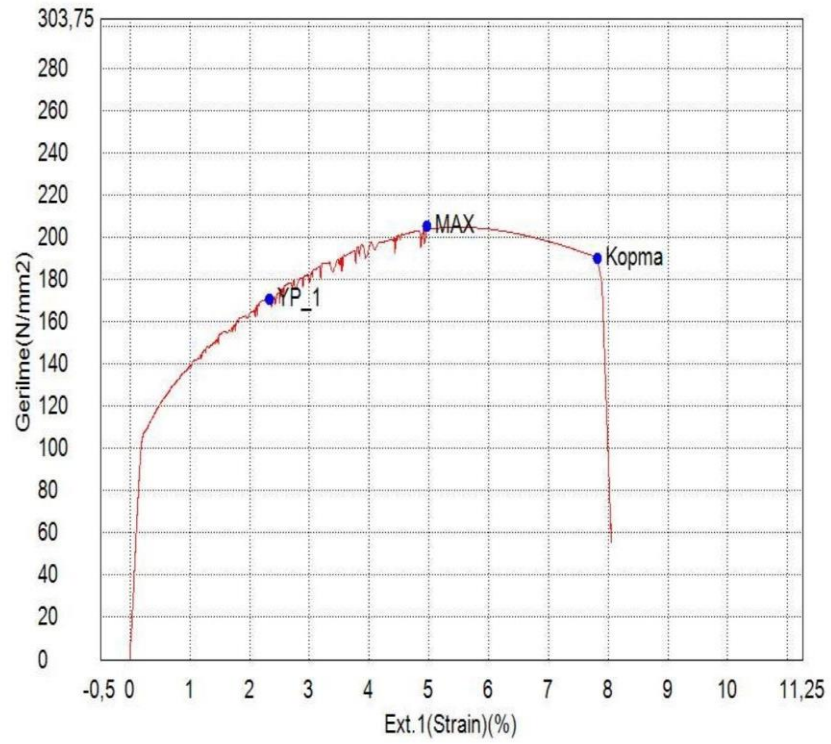
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	T-1040-45_2	Metot Dosya Adı	seref2.xmas
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	239,960	217,256	195,181
Ortalama	239,960	217,256	195,181
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



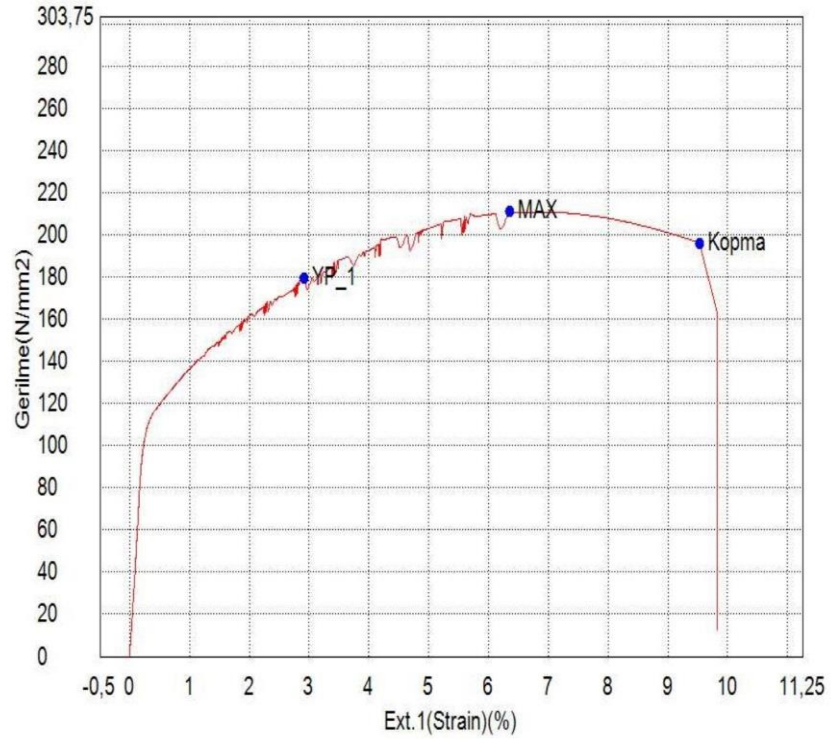
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	T-1040-75_1	Metot Dosya Adı	seref2.xmas
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	205,081	189,825	170,945
Ortalama	205,081	189,825	170,945
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



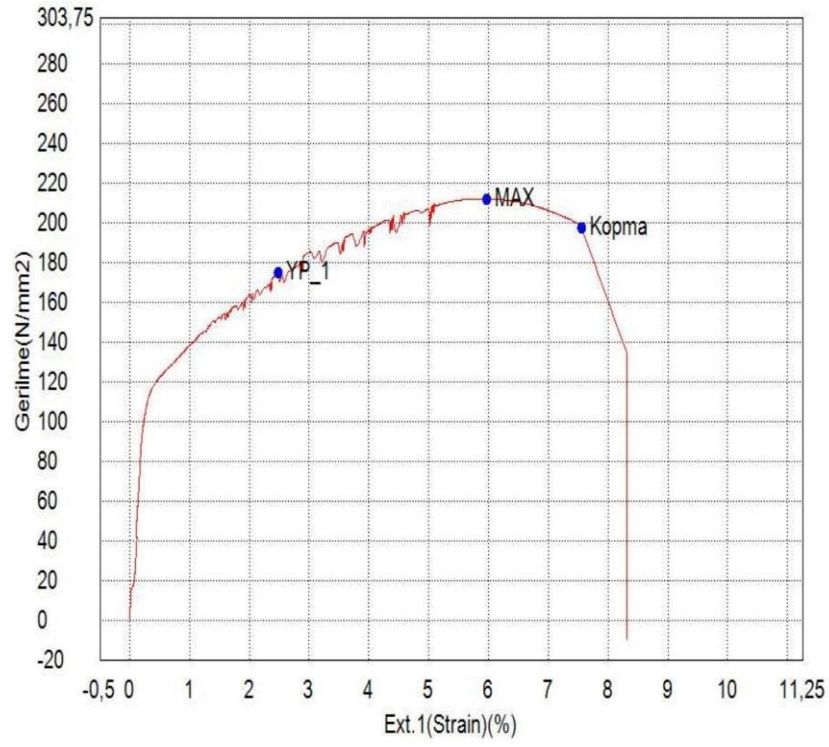
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	T-1040-75_2	Metot Dosya Adı	seref2.xmas
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	211,262	195,939	179,409
Ortalama	211,262	195,939	179,409
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



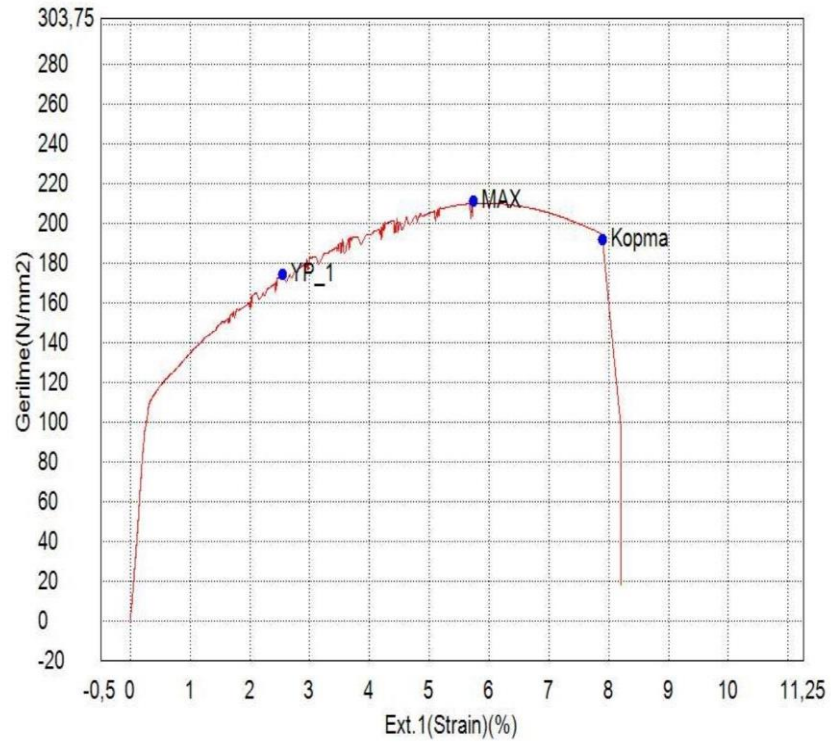
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	T-2080-45_1	Metot Dosya Adı	seref2.xmas
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	212,235	197,701	174,768
Ortalama	212,235	197,701	174,768
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



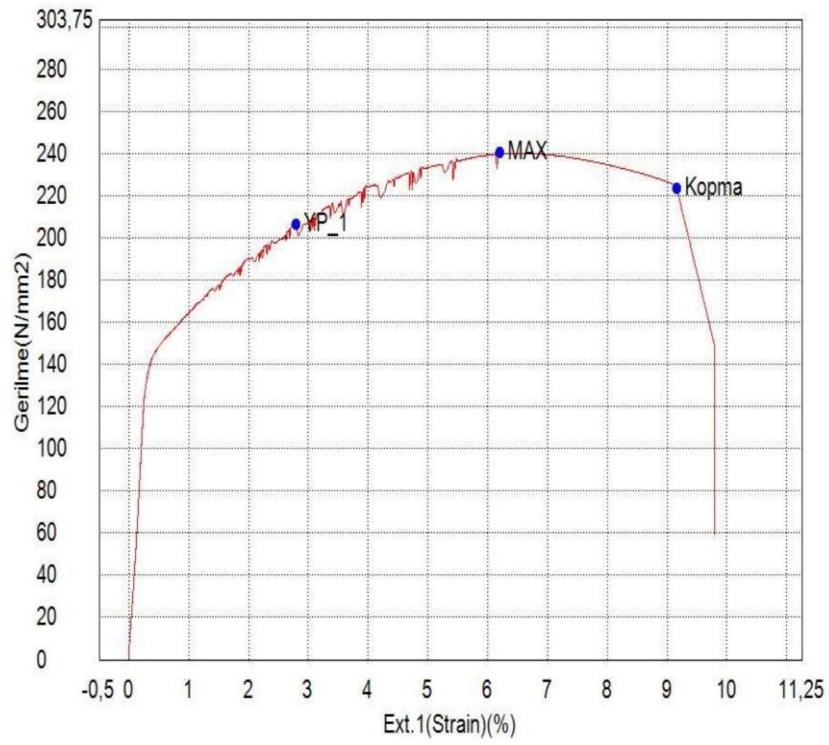
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	T-2080-45_2	Metot Dosya Adı	seref2.xmas
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	211,468	191,976	174,285
Ortalama	211,468	191,976	174,285
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



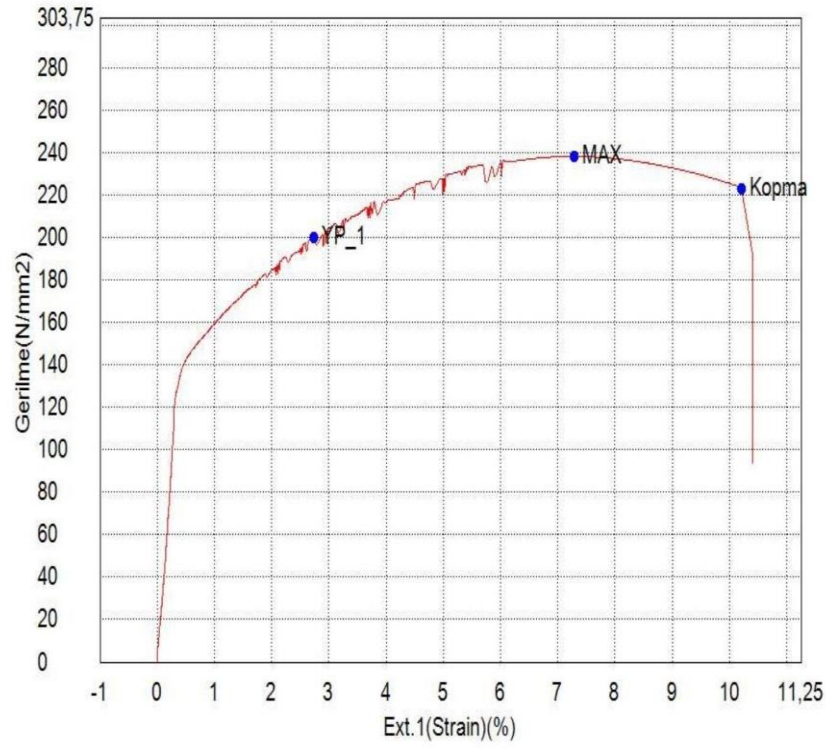
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	T-2080-75_1	Metot Dosya Adı	
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	240,838	223,726	206,559
Ortalama	240,838	223,726	206,559
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



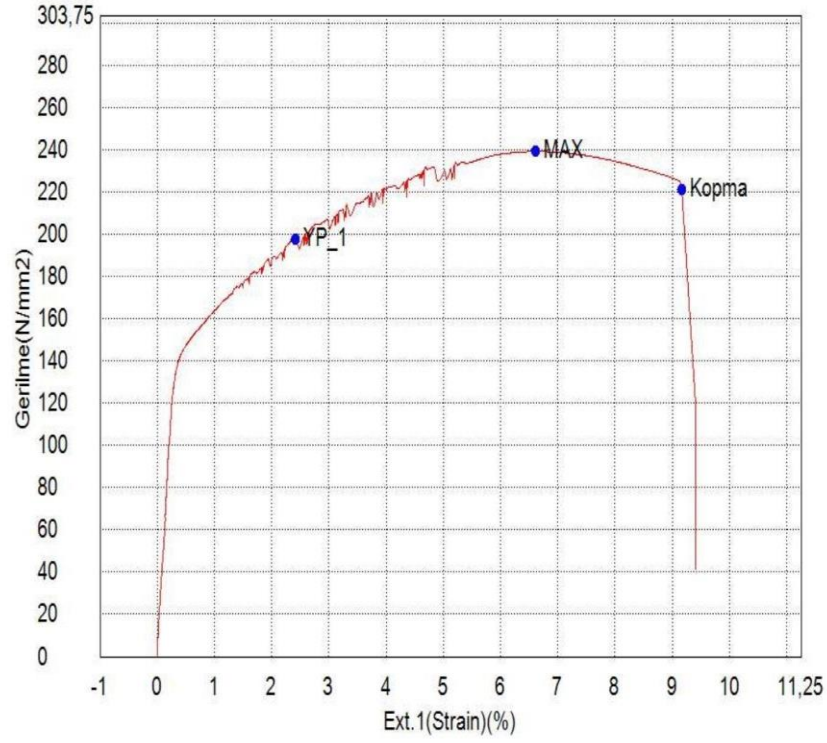
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	T-2080-75_2	Metot Dosya Adı	
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	238,263	223,090	199,947
Ortalama	238,263	223,090	199,947
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



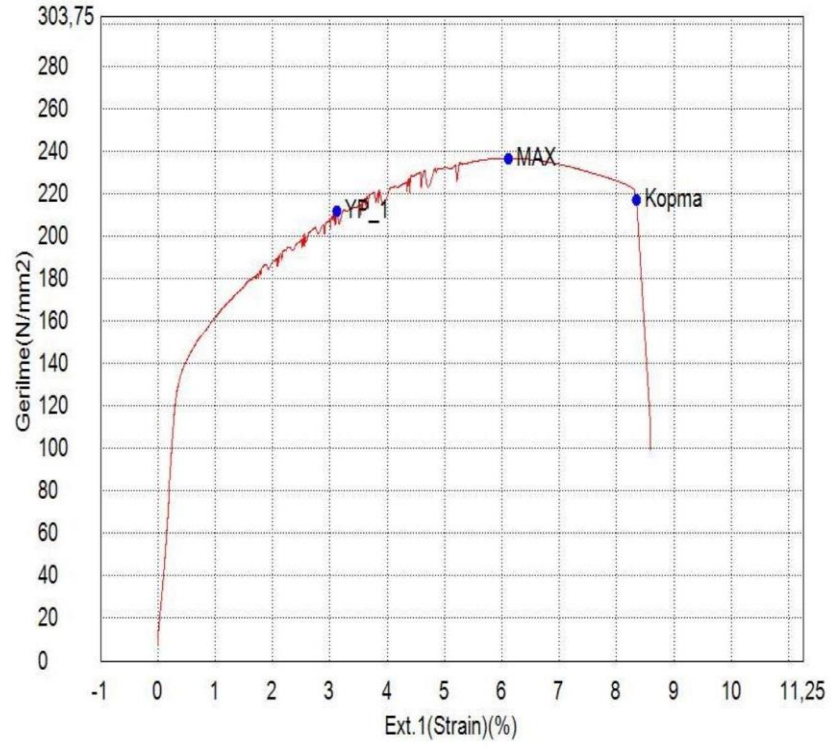
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	T-2080-113_1	Metot Dosya Adı	
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	239,221	221,212	197,518
Ortalama	239,221	221,212	197,518
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



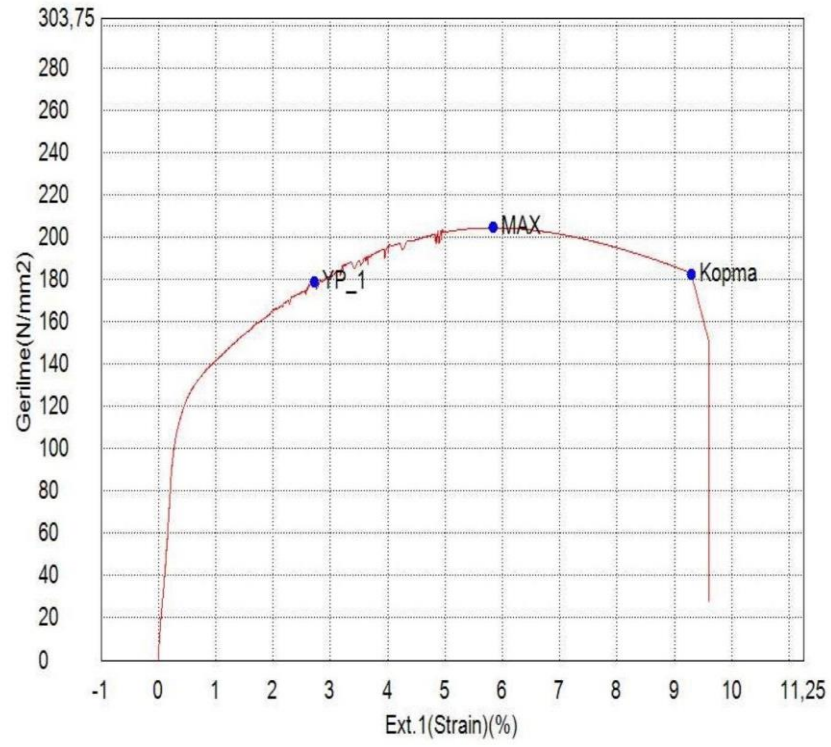
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	T-2080-113_2	Metot Dosya Adı	
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	236,767	216,881	211,869
Ortalama	236,767	216,881	211,869
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



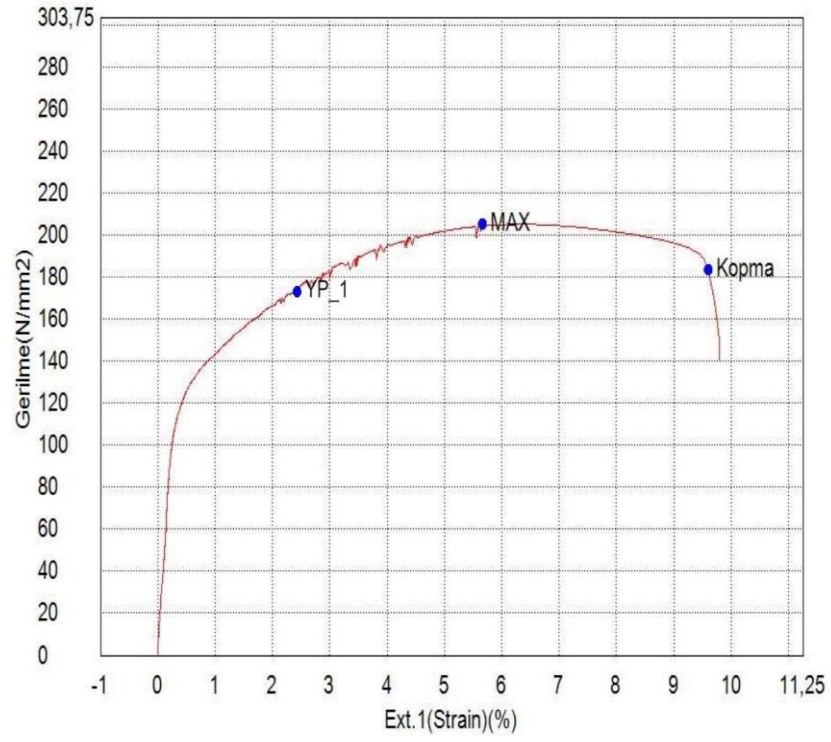
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	Ç-1040-45_1	Metot Dosya Adı	
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	204,477	182,285	178,932
Ortalama	204,477	182,285	178,932
Standart Sapma	-:-	-:-	-:-
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



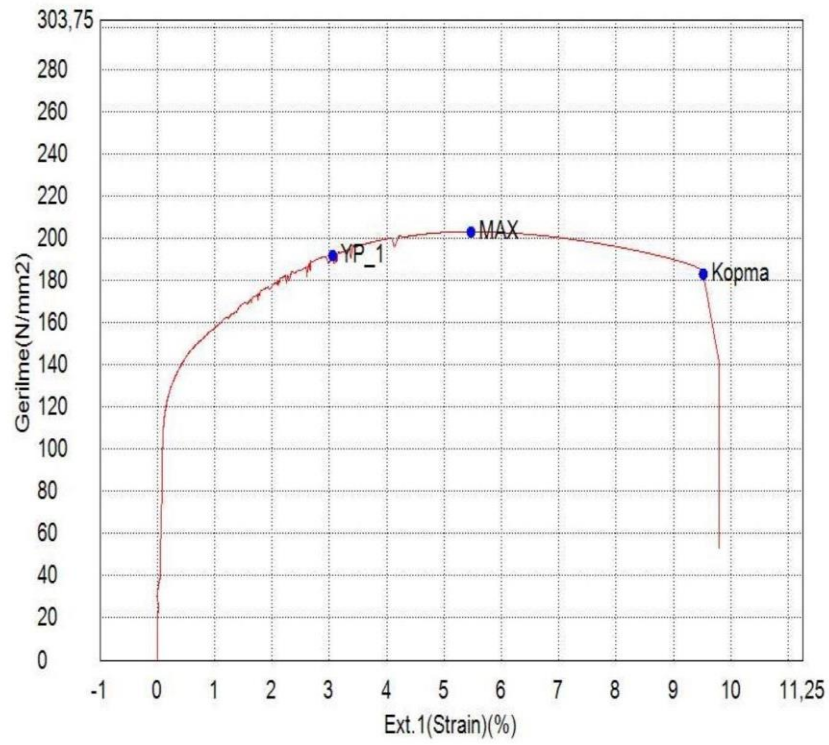
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	Ç-1040-45_2	Metot Dosya Adı	
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	205,343	183,476	174,079
Ortalama	205,343	183,476	174,079
Standart Sapma	-:-	-:-	-:-
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



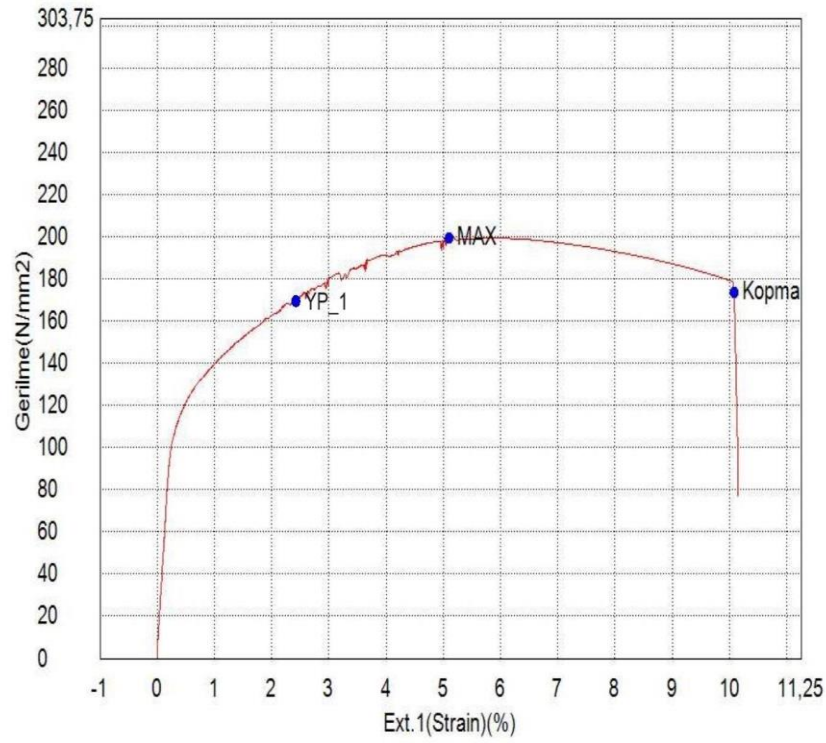
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	Ç-1040-75_1	Metot Dosya Adı	
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	203,180	183,225	192,108
Ortalama	203,180	183,225	192,108
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



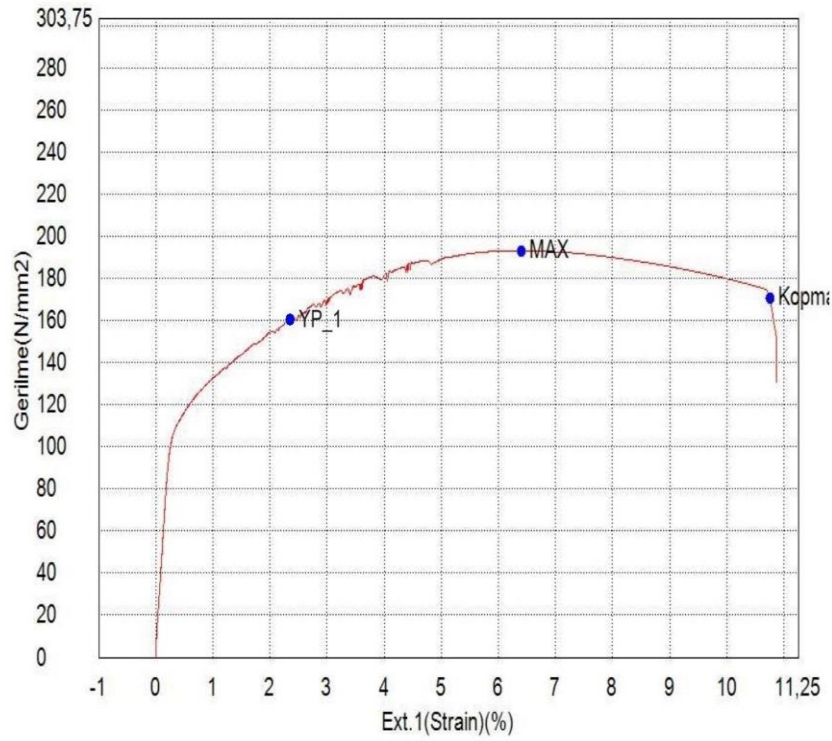
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	Ç-1040-75_2	Metot Dosya Adı	
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	199,637	173,552	170,862
Ortalama	199,637	173,552	170,862
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



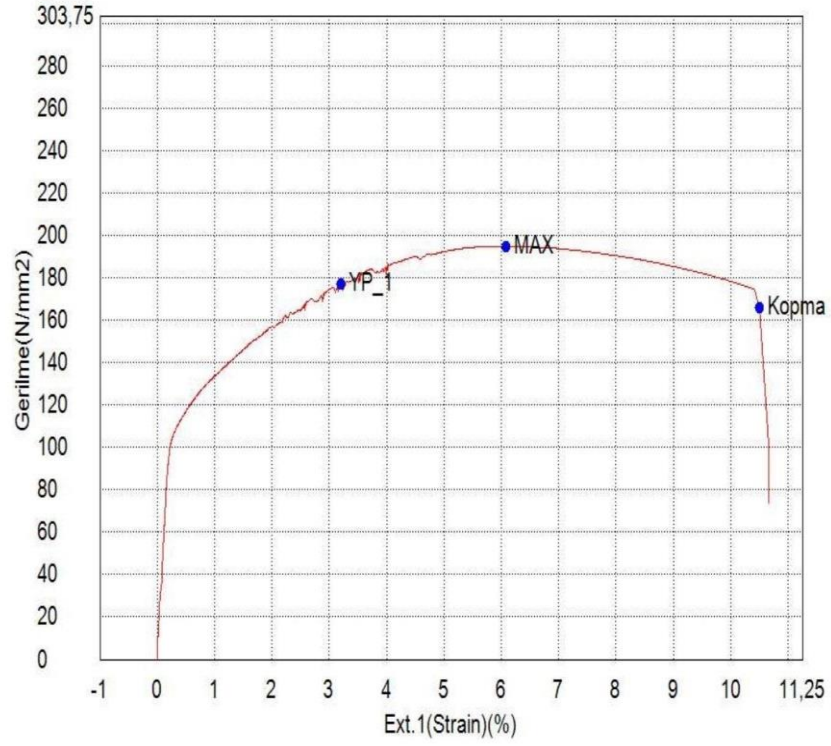
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	Ç-2080-45_1	Metot Dosya Adı	
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	193,244	170,474	161,468
Ortalama	193,244	170,474	161,468
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



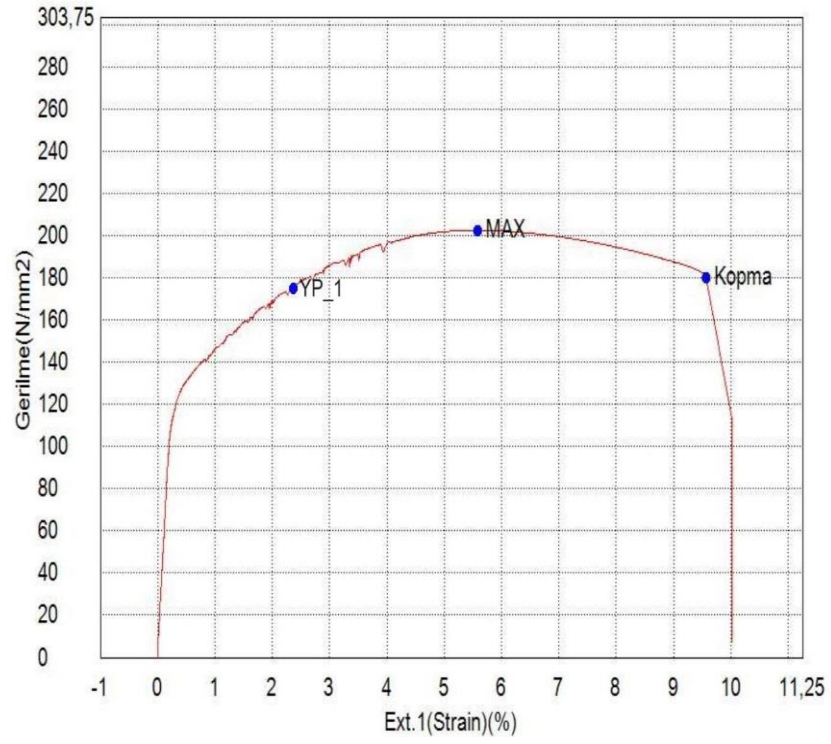
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	Ç-2080-45_2	Metot Dosya Adı	
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	194,990	166,238	177,420
Ortalama	194,990	166,238	177,420
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



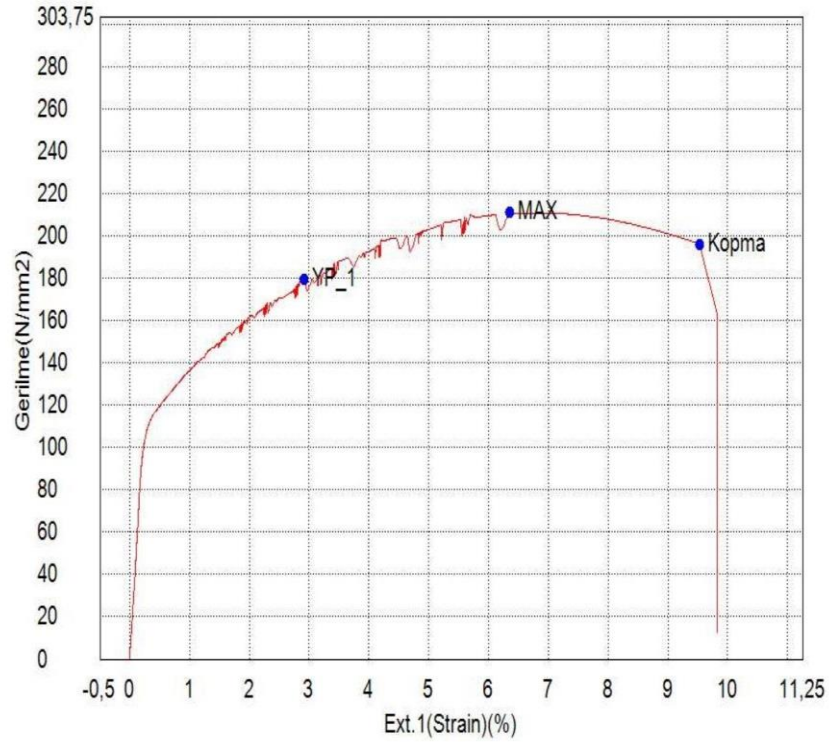
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	Ç-2080-75_1	Metot Dosya Adı	
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	202,593	179,998	176,397
Ortalama	202,593	179,998	176,397
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



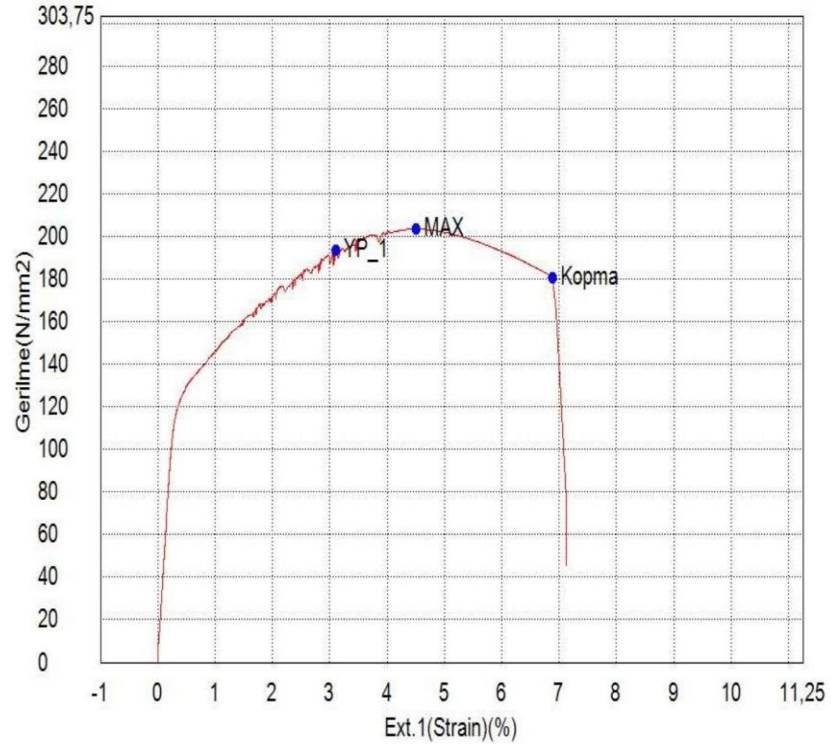
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	T-1040-75_2	Metot Dosya Adı	seref2.xmas
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	211,262	195,939	179,409
Ortalama	211,262	195,939	179,409
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



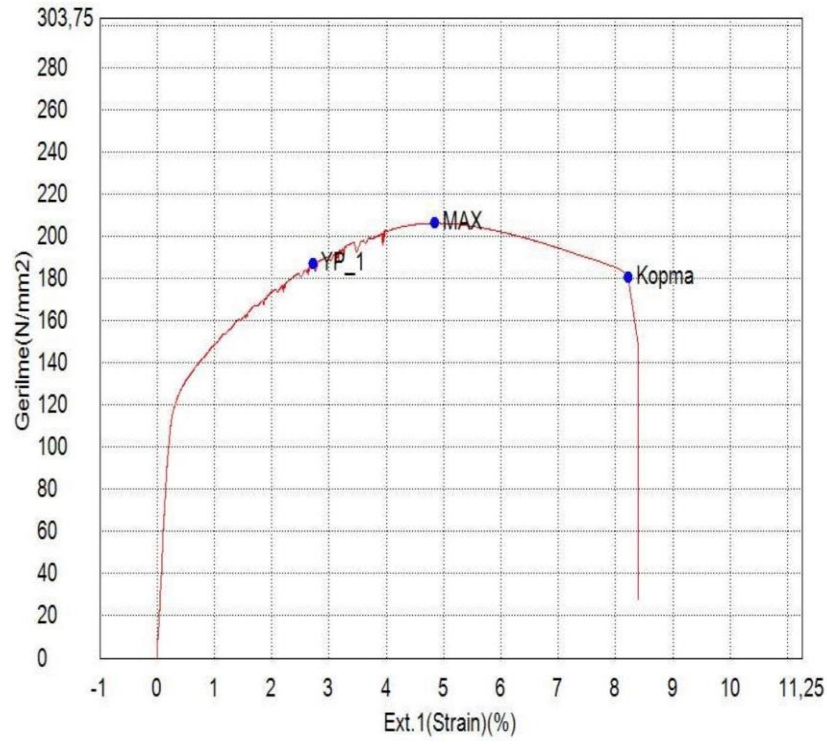
Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	Ç-2080-113_1	Metot Dosya Adı	
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	203,520	180,570	193,353
Ortalama	203,520	180,570	193,353
Standart Sapma	--	--	--
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



Anahtar Kelime		Ürün Adı	
Test Dosyası Adı	Ç-2080-113_2	Metot Dosya Adı	
Rapor Tarihi	30.04.2024	Test Tarihi	30.04.2024
Test Modu	Tek	Test Tipi	Çekme
Hız	2mm/min	Şekil	Plaka
Grup Sayısı:	1	Alt Grup Sayısı:	1

İsim	Max_Gerilme	Kopma_Gerilme	YP(%FS)_Gerilme
Parametreler	Tüm Alan Hesaplaması	Hassasiyet: 10	0,2 %
Birim	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1_1	206,244	180,415	187,008
Ortalama	206,244	180,415	187,008
Standart Sapma	-:-	-:-	-:-
Aralık	0,00000	0,00000	0,00000



Ek 2. SKK'li ve ÇT-SKK'li Birleştirmelerin Mikrosertlik Ölçümleri

Tek Taraflı Sürtünme Karıştırma Kaynağı Mikrosertlik Ölçümleri

Esas Metal	Mesafe (mm)	T-1040-45 Sertlik (HV0.2)	T-1040-75 Sertlik (HV0.2)	T-2080-45 Sertlik (HV0.2)	T-2080-75 Sertlik (HV0.2)	T-2080-113 Sertlik (HV0.2)
AA 5083	12	70,62	57,06	58,14	76,49	67,27
	11	62,73	61,14	65,51	63,93	72,19
	10	57,34	59,73	60,92	58,87	74,55
	9	58,78	55,57	56,58	64,45	65,73
	8	59,49	56,64	58,61	66,81	61,42
	7	62,96	58,49	59,63	64,23	71,33
	6	68,48	63,59	71,19	61,57	71,79
	5	66,37	64,08	66,49	70,87	74,86
	4	64,15	67,55	69,07	75,90	69,39
	3	67,98	66,65	72,30	71,94	65,98
	2	73,18	71,57	74,30	65,10	61,88
	1	70,90	78,47	81,49	67,79	73,06
Merkez	0	74,88	71,30	74,01	72,19	74,55
AA 6082	1	63,02	68,12	71,74	77,69	71,77
	2	74,07	69,89	64,04	77,99	69,70
	3	82,61	70,02	73,73	84,15	77,99
	4	86,41	67,48	66,91	78,91	85,05
	5	87,94	75,47	81,49	85,48	78,63
	6	83,52	77,16	81,16	92,99	77,67
	7	84,24	79,01	82,46	82,13	86,29
	8	84,97	81,24	83,74	82,79	87,62
	9	78,10	75,76	77,61	85,18	84,47
	10	79,86	77,12	82,16	77,38	82,65
	11	82,80	81,67	85,85	85,30	82,32
	12	79,54	81,92	84,03	80,50	79,62

Çift Taraflı Sürtünme Karıştırma Kaynağı Mikrosertlik Ölçümleri

Esas Metal	Mesafe (mm)	Ç-1040-45 Sertlik (HV0.2)	Ç-1040-75 Sertlik (HV0.2)	Ç-2080-45 Sertlik (HV0.2)	Ç-2080-75 Sertlik (HV0.2)	Ç-2080-113 Sertlik (HV0.2)
AA 5083	12	69,58	74,00	59,37	66,52	64,74
	11	61,90	66,71	58,34	55,60	65,21
	10	54,74	61,48	55,42	54,20	61,44
	9	58,06	62,55	55,28	56,05	60,79
	8	58,75	65,43	60,65	58,11	67,69
	7	62,13	70,22	70,49	55,86	77,19
	6	67,50	73,71	70,89	56,55	75,64
	5	65,45	71,11	70,19	61,64	79,32
	4	63,29	65,70	71,97	66,01	80,10
	3	67,99	70,07	63,98	62,57	69,68
	2	72,08	63,70	61,70	57,62	74,88
1	60,13	58,84	62,58	59,96	72,51	
Merkez	0	63,92	62,00	63,06	66,26	70,99
AA 6082	1	59,27	69,12	61,54	67,57	73,05
	2	72,94	73,10	81,22	68,83	69,38
	3	81,26	77,14	83,22	73,19	80,09
	4	84,96	79,10	75,18	68,64	78,03
	5	83,44	78,43	77,18	74,35	78,04
	6	82,14	83,27	79,89	80,88	76,89
	7	82,85	78,80	78,27	73,43	79,00
	8	83,55	81,85	79,11	73,00	77,02
	9	76,86	75,53	76,13	75,09	75,93
	10	78,58	76,35	78,80	69,30	77,52
	11	81,44	76,50	81,27	73,19	76,81
	12	78,27	79,47	77,87	71,01	77,92

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Asım İlhan

Doğum Tarihi :

E-mail :

Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Makine Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2015-2019
Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği	Tarsus Üniversitesi	2021-Devam

Görevler :

Görev Ünvanı	Görev Yeri	Yıl
Yedek Subay	Ankara	2020-2021
Makine Mühendisi	SASA Polyester	2021-Devam

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. Ş. ÖCALIR and A. İLHAN, “Çift-Taraflı Sürtünme Karıştırma Kaynak ÇSKK Uygulamaları,” presented at the 5. Uluslararası Akdeniz Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Mersin, 2024.