

**T.C.  
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE  
BİRLEŞTİRİLEN 7075 Al VE AZ91 Mg ALAŞIMLARININ  
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**ÖMER EKİNCİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**TEZ DANIŞMANI  
Doç. Dr. Zülküf BALALAN**

**BİNGÖL-2021**



T.C.  
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN 7075 Al  
VE AZ91 Mg ALAŞIMLARININ MİKROYAPI VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Doç. Dr. Zülküf BALALAN danışmanlığında, Ömer EKİNCİ tarafından hazırlanan bu çalışma 06/09/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Konstriksiyon Bilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan :	İmza :
Üye :	İmza :
Üye :	İmza :
Üye :	İmza :
Üye :	İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun ...../...../..... tarih ve ...../.....  
nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Zafer ŞİAR**  
**Enstitü Müdürü**

Bu çalışma Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BÜBAP) kapsamında desteklenmiştir.  
Proje No: BAP-MMF.2019.00.001

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca bilgi birikimini ve tecrübelerini benimle cömertçe paylaşan, beni her zaman destekleyen ve yönlendiren Danışmanım Sayın Doç. Dr. Zülküf BALALAN'na ve değerli görüş ve düşüncelerini esirgemeyen Tez İzleme Komitesi Üyeleri Sayın Doç. Dr. Mehmet YAZA'a ve Dr. Öğr. Üyesi Üsame DEMİR'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Yaptığım bu çalışmayı BAP-MMF.2019.00.001 nolu proje ile destekleyen Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BÜBAP) Birimi Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım süresince beni sabırla destekleyen eşime ve aileme sonsuz teşekkür ederim.

**Ömer EKİNCİ**

**Bingöl 2021**

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xvi
ÖZET.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	8
2.1. Alüminyum ve Alaşımaları.....	30
2.1.1. Alüminyum Alaşımalarının Sınıflandırılması.....	32
2.1.1.1. Dövme Alüminyum Alaşımaları.....	33
2.1.1.2. Dökme Alüminyum Alaşımaları.....	33
2.1.2. Alüminyum ve Alaşımalarında Temperleme.....	34
2.1.3. 7xxx Serisi Alüminyum Alaşımaları.....	35
2.1.4. 7075 Alüminyum Alaşımı.....	35
2.2. Magnezyum Alaşımaları.....	37
2.2.1. Magnezyum Alaşımalarını Tanımlama ve Sınıflandırma.....	38
2.2.2. Magnezyumu Alaşımalarının Başlıca Alaşım Elementleri ve Etkileri	40
2.3. Al ve Mg Alaşımalarının Bir Arada Kullanıldığı Yapılar.....	43
2.4. Sürtünme Kaynak Yöntemleri.....	46
2.4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK).....	48
2.4.1.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yönteminin Avantajları.....	49
2.4.2. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK).....	49
2.4.2.1. SKNK İşlem Parametrelerinin Etkileri.....	53
2.4.2.1.1 Takım Dönme Hızı.....	53

2.4.2.1.2. Takım Dalma Hızı.....	54
2.4.2.1.3. Takım Bekleme Süresi.....	54
2.4.2.1.4. Takım Dalma Derinliği.....	55
2.4.2.1.5. Plakaların Pozisyonu.....	56
2.4.2.1.6. Kaynak Takımı Geometrisi.....	56
2.4.2.2. SKNK Avantajları.....	60
2.4.2.3. SKNK Dezavantajları.....	61
2.4.2.4. SKNK Kaynak Bölgesi Özellikleri.....	61
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	63
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	63
3.2. Deneylerde Kullanılan Kaynak Takımları.....	64
3.3. Deneylerde Kullanılan Parametreler.....	65
3.4. SKNK Deneyleri.....	66
3.5. Metalografik İncelemeler.....	71
3.6. Mekanik Testler.....	72
3.6.1. Mikrosertlik Testi.....	72
3.6.2. Çekme Kesme Testi.....	72
3.6.3. Çekme-Basma Yorulma Testi.....	73
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	74
4.1. 7075-T651 Al ve AZ91 Mg Alaşımı Plakaların SKNK.....	74
4.1.1. Makro ve Mikroyapı İncelemeleri.....	76
4.1.2. Mikrosertlik.....	149
4.1.3. Çekme Kesme Testi.....	153
4.1.4. Çekme Kesme Testi Sırasında Kaynakların Kırılma Şekilleri.....	172
4.1.5. Çekme-Basma Yorulma Testi.....	186
4.1.6. Çekme-Basma Yorulma Testi Sırasında Kaynakların Kırılma Şekilleri.....	189
4.2. 7075-T651 Al Alaşımı Plakaların SKNK.....	197
4.2.1. Kaynak Görünümü.....	197
4.2.2. Kaynak Arayüzey Kancası ve Kaynak Bölgesi.....	200
4.2.3. Mikroyapı.....	206

4.2.4. Mikrosertlik.....	211
4.2.5. Çekme Kesme Testi.....	213
4.2.6. Çekme Kesme Testi Sırasında Kaynakların Kırılma Şekilleri.....	216
4.3. AZ91 Mg alaşımı plakaların SKNK.....	219
4.3.1. Arayüz Kancası ve Kaynak Birleşme Genişliği.....	219
4.3.2. Mikroyapı.....	222
4.3.3. Mikrosertlik.....	225
4.3.4. Çekme Kesme Testi.....	227
4.3.5. Çekme Kesme Testi Sırasında Kaynakların Kırılma Şekilleri.....	229
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	232
KAYNAKLAR.....	235
ÖZGEÇMİŞ.....	257

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al	: Alüminyum
Mg	: Magnezyum
°C	: Santigrat
dev/dak	: Devir/dakika (dakikadaki devir sayısı)
mm/dak	: Milimetre/dakika (takım dalma ve çıkma hızı ve çekme testi hızı)
sn	: Saniye
kN	: Kilonewton
mm	: Milimetre
µm	: Mikrometre
MPa	: Mega Pascal
N	: Newton
g/cm <sup>3</sup>	: Gram/santimetreküp
HV	: Vickers sertlik birimi
HRC	: Rockell C sertlik birimi
HB	: Brinell sertlik birimi
DKB	: Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge
AM	: Ana malzeme
ITAB	: Isı Tesiri altındaki bölge
TMEB	: Termomekanik etkilenen bölge
KB	: Karıştırma bölgesi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope)
XRD	: X-Işını difraktometresi (faz analizi)
EDS	: Enerji dağılımı x- ışını spektroskopisi (element analizi)
SKNK	: Sürtünme karıştırma nokta kaynağı
SKK	: Sürtünme karıştırma kaynağı
EDNK	: Elektrik direnç nokta kaynağı

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Magnezyum alaşımlarının kodlanması.....	38
Şekil 2.2.	Magnezyum alaşımlarını kullanarak elde edilen ağırlık kazancı.....	44
Şekil 2.3.	Al-Mg faz diyagramı.....	45
Şekil 2.4.	Sürtünme kaynak yöntemleri; a) sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), b) sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK), c) lineer sürtünme kaynağı (LSK) ve d) rotasyon sürtünme kaynağı (RSK).....	46
Şekil 2.5.	SKK şematik gösterimi.....	48
Şekil 2.6.	SKNK ile mazda otomobili gövde paneli imalatı.....	50
Şekil 2.7.	SKNK kullanılarak imal edilmiş mazda RX-8'in yan kapı paneli ve SKNK kaynaklarının görünüşü.....	50
Şekil 2.8.	Mazda tarafından SKNK ile üretilmiş alüminyum motor kaputu ve arka kapı ve kaynakların görünümü.....	50
Şekil 2.9.	SKNK şematik olarak gösterimi.....	52
Şekil 2.10.	5083 Al alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan takımlar: a) vidalı silindirik pimli takım (vida gösterilmemiş) ve b) üçgen pimli takım.....	57
Şekil 2.11.	6063 Al alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan takımlar: a) konik pimli takım, b) kare pimli takım ve c) beşgen pimli takım.....	57
Şekil 2.12.	AZ31 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan takımlar: a) vidalı silindirik pimli ve 10 derece konkav omuzlu takım ve b) üçgen pimli ve 10 derece konkav omuzlu takım.....	58
Şekil 2.13.	6061 Al alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan takımlar: a) silindirik pimli takım, b) kare pimli takım ve c) üçgen pimli takım.....	58



Şekil 2.14.	AZ91/AZ31 Mg alaşımlarının SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan takımlar: a) vidalı silindirik pimli takım, b) vidalı üçgen pimli takım ve c) vidasız üçgen pimli takım.....	59
Şekil 2.15.	Yaygın kullanılan diğer takım pim profilleri: a) vidalı üçgen pimli takım, b) vidalı konik pimli takım ve c) vidalı ve üç oluklu konik pimli takım.....	59
Şekil 2.16.	Kaynak takımı pim ve omuz bölgesi gösterimi.....	60
Şekil 2.17.	Takım omuz tasarımları.....	60
Şekil 2.18.	Tipik bir SKNK enine kesit görünümü ve kaynak bölgeleri.....	62
Şekil 3.1.	SKNK kaynaklarının yapılmasında kullanılan takımlar ve ölçüleri: a) konik pimli takım, b) üçgen pimli takım ve c) vidalı silindirik pimli takım.....	65
Şekil 3.2.	Üst üste bindirilip SKNK ile birleştirilen plakalar ve ölçülerinin şematik gösterimi.....	67
Şekil 3.3.	Üst üste bindirilmiş iki plakanın birleştirilmesi.....	67
Şekil 3.4.	7075-T651 alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üstündeyken, konik pimli takım ile yapılan kaynaklar.....	68
Şekil 3.5.	AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üstündeyken, konik pimli takım ile yapılan kaynaklar.....	68
Şekil 3.6.	7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üstündeyken, üçgen pimli takım ile yapılan kaynaklar.....	69
Şekil 3.7.	AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üstündeyken, üçgen pimli takımla yapılan kaynaklar.....	69
Şekil 3.8.	7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üstündeyken, vidalı silindirik pimli takım ile yapılan kaynaklar.....	70
Şekil 3.9.	AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üstündeyken vidalı silindirik pimli takım ile yapılan kaynaklar.....	70
Şekil 3.10.	7075-T651 Al alaşımı plakaların konik pimli takım ile yapılan kaynaklar.....	71
Şekil 3.11.	7075-T651 Al alaşımı plakaların üçgen pimli takım ile yapılan kaynaklar.....	71
Şekil 3.12.	SKNK kaynaklı plakaların çekme testi öncesi her iki uçuna bir parça yapıştırma.....	73

Şekil 3.13.	Çekme kesme testi.....	73
Şekil 3.14.	Çekme-basma yorulma testi.....	73
Şekil 4.1.	Konik pimli takım ile yapılan kaynakların enine kesit alanları: a) 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üstünde b) AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üstünde yapılan kaynaklar.....	76
Şekil 4.2.	Üçgen pimli takım ile yapılan kaynakların enine kesit alanları: a) 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üstünde b) AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üstünde yapılan kaynaklar.....	76
Şekil 4.3.	Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan kaynakların enine kesit alanları: a) 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üstünde b) AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üstünde yapılan kaynaklar.....	77
Şekil 4.4.	Konik pimli takım ile yapılan S1 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	79
Şekil 4.5.	Konik pimli takım ile yapılan S2 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	81
Şekil 4.6.	Konik pimli takım ile yapılan S3 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	83
Şekil 4.7.	Konik pimli takım ile yapılan S4 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	85
Şekil 4.8.	Konik pimli takım ile yapılan S4 kaynağının enine kesit alanından elde edilen XRD sonucu.....	85
Şekil 4.9.	Konik pimli takım ile yapılan S5 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	87
Şekil 4.10.	Konik pimli takım ile yapılan S6 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	88
Şekil 4.11.	Konik pimli takım ile yapılan S7 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	91
Şekil 4.12.	Konik pimli takım ile yapılan S8 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	93

Şekil 4.13.	Konik pimli takım ile yapılan S9 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	95
Şekil 4.14.	Konik pimli takım ile yapılan S10 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	97
Şekil 4.15.	Konik pimli takım ile yapılan S11 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	99
Şekil 4.16.	Konik pimli takım ile yapılan S12 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	101
Şekil 4.17.	Üçgen pimli takım ile yapılan S13 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	103
Şekil 4.18.	Üçgen pimli takım ile yapılan S14 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	105
Şekil 4.19.	Üçgen pimli takım ile yapılan S15 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	107
Şekil 4.20.	Üçgen pimli takım ile yapılan S16 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	109
Şekil 4.21.	Üçgen pimli takım ile yapılan 17 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	111
Şekil 4.22.	Üçgen pimli takım ile yapılan S18 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	113
Şekil 4.23.	Üçgen pimli takım ile yapılan S19 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	116
Şekil 4.24.	Üçgen pimli takım ile yapılan S20 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	118
Şekil 4.25.	Üçgen pimli takım ile yapılan S21 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	121
Şekil 4.26.	Üçgen pimli takım ile yapılan S22 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	123
Şekil 4.27.	Üçgen pimli takım ile yapılan S23 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	125
Şekil 4.28.	Üçgen pimli takım ile yapılan S24 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	128

Şekil 4.29.	Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S25 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	130
Şekil 4.30.	Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S26 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	132
Şekil 4.31.	Vidalı silindirik pimli takım yapılan S27 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	133
Şekil 4.32.	Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S28 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	135
Şekil 4.33.	Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S29 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	136
Şekil 4.34.	Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S30 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	138
Şekil 4.35.	Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S31 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	139
Şekil 4.36.	Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S32 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	141
Şekil 4.37.	Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S33 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	143
Şekil 4.38.	Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S34 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	145
Şekil 4.39.	Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S35 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	147
Şekil 4.40.	Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S36 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı.....	149
Şekil 4.41.	7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarının kaynak bölgesi sertliği.....	151
Şekil 4.42.	AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarının kaynak bölgesi sertliği.....	152
Şekil 4.43.	SKNK işlemi sırasında üçgen ve vidalı silindirik pimli takımların pimine ve omuzuna yapışan malzeme.....	153
Şekil 4.44.	7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı....	155

Şekil 4.45.	AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı....	159
Şekil 4.46.	7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı....	161
Şekil 4.47.	AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı...	166
Şekil 4.48.	7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı.....	167
Şekil 4.49.	AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı.....	172
Şekil 4.50.	Konik pimli takımı ile yapılan S4 ve S10 kaynaklarının çekme kesme testinden sonra alt ve üst plakadaki kaynak kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) S4 ve b) S10.....	174
Şekil 4.51.	Üçgen pimli takımı ile yapılan S14 ve S20 kaynaklarının çekme kesme testinden sonra alt ve üst plakadaki kaynak kırık yüzeyleri: a) S14ve b) S20.....	176
Şekil 4.52.	Vidalı silindirik pimli takımı ile yapılan S30 ve S36 kaynaklarının çekme kesme testinden sonra alt ve üst plakadaki kaynak kırık yüzeyleri: a) S30 ve b) S36.....	178
Şekil 4.53.	7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme testinden sonra makro kaynak kırık yüzeyleri.....	181
Şekil 4.54.	AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımları kullanarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme testinden sonra makro kaynak kırık yüzeyleri.....	186
Şekil 4.55.	AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma ömrü.....	187

Şekil 4.56.	Üçgen pimli takım ile yapılan S20 kaynaklarının çekme-basma yorulma testinden sonra kaynak kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.....	191
Şekil 4.57.	Konik pimli takım ile yapılan bazı SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testinden sonra makro kaynak kırık yüzeyleri: a) S3 kaynağının kırık yüzeyi ve b) S7 ve S12 kaynaklarının kaynak kırık yüzeyleri.....	193
Şekil 4.58.	7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arasında üçgen pimli takım ile yapılan bazı SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testinden sonra makro kaynak kırık yüzeyleri: a) S17 ve S18 b) S20 ve S24.....	195
Şekil 4.59.	7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arasında vidalı silindirik pimli takım ile yapılan bazı SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testinden sonra makro kaynak kırık yüzeyleri: a) S26 ve b) S36.....	197
Şekil 4.60.	7075-T651 Al alaşımı plakaların SKNK kaynaklarının üst yüzeylerinin yakından görünüşleri.....	199
Şekil 4.61.	Konik ve üçgen pimli takımlar ile yapılan S37, S38, S39, S40, S41 ve S42 kaynaklarının enine kesit alanları.....	200
Şekil 4.62.	Konik pimli takım ile yapılan S37, S38 ve S39 kaynaklarının enine kesit alanları ve I, II ve III dikdörtgen alanların büyütülmüş görünümü.	203
Şekil 4.63.	Üçgen pimli takım ile yapılan S40, S41 ve S42 kaynaklarının enine kesit alanları: a) S40, b) S41 ve c) S42. d) Şekil a)'da işaretlenen I dikdörtgen alanının büyütülmüş görünümü, f) Şekil b)'de işaretlenen II dikdörtgen alanının büyütülmüş görünümü ve h) Şekil c)'de işaretlenen III dikdörtgen alanının büyütülmüş görünümü. e) Şekil d)'deki kancanın büyütülmüş görünümü, g) Şekil f)'deki kancanın büyütülmüş görünümü ve i) Şekil h)'deki kancanın büyütülmüş görünümü.....	206
Şekil 4.64.	Konik pimli takım ile yapılan S37, S38 ve S39 kaynaklarının SEM görüntüleri. a) S37 kaynağının temsili enine kesit alanı, b) I dikdörtgen alanının, c) II dikdörtgen alanının büyütülmüş görünümü, d) S37 kaynak bölgesi mikroyapısı, e) S38 kaynak bölgesi mikroyapısı ve f) S39 kaynak bölgesi mikroyapısı, g) na malzeme (AM), ısı tesiri	

	altındaki bölge (ITAB), termomekanik etkilenen bölge (TMEB).....	208
Şekil 4.65.	Üçgen pimli takım ile yapılan S40, S41 ve S42 kaynakların SEM görüntüleri. a) S40 kaynağının temsili kesiti b) I dikdörtgen alanının, c) II dikdörtgen alanının büyütülmüş görünümü, d) S40 kaynak bölgesi mikroyapısı, e) S41 kaynak bölgesi mikroyapısı, f) S42 kaynak bölgesi mikroyapısı ve g) BM: ana metal, HAZ: ısıdan etkilenen bölge, TMAZ: termo-mekanik olarak etkilenen bölge.....	209
Şekil 4.66.	Konik ve üçgen pimli takımlar ile yapılan kaynakların enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonuçları. a) konik pimli takım ile kaynaklar b) üçgen pimli takım ile yapılan kaynaklar.....	210
Şekil 4.67.	S41 kaynağının SEM görüntüsü ve EDS analiz sonucu.....	211
Şekil 4.68.	Konik ve üçgen pimli takımlar ile yapılan kaynakların Vickers mikrosertlikleri.....	212
Şekil 4.69.	a) Konik pimli takım ile b) üçgen pimli takım ile yapılan kaynakların çekme kesme dayanımı.....	216
Şekil 4.70.	a) S38 kaynağının çekme testi yapılmadan önceki resmi ve çekme kesme testinden sonra b) S41 çekme testi yapılmadan önceki resmi ve çekme kesme testinden sonra alt plakanın üstündeki ve üst plakanın altındaki kaynak kırık yüzeyleri ve c) A ve B ile işaretlenmiş alt plakaların üstündeki kaynak kırık yüzeylerinin yakından görünümü.....	217
Şekil 4.71.	a) S38 kaynağının çekme kesme testi sonrası alt plakanın üst ve üst plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzey görünümü b) alt plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyinde A bölgesinin SEM görüntüsü...	218
Şekil 4.72.	a) S41 kaynağının çekme kesme testi sonrası alt plakanın üst ve üst plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzey görünümü ve b) alt plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyinde A bölgesinin SEM görüntüsü.....	219
Şekil 4.73.	Konik ve üçgen pimli takımlar ile yapılan kaynakların kesit alanları (a) S43, (b) S44 ve (c) S45, (d) S46, (e) S47 ve (f) S48. Şekil a, b, c, d, e, f 'de I, II, III, IV, V and VI dikdörtgen bölgeler büyütülerek gösterilmiştir.....	221

Şekil 4.74.	) AZ91 Mg alaşımı b) kaynak bölgesi/TMAZ/HAZ sınırlarının c) karıştırma bölgesi ve d) S48 kaynağının ITAB mikroyapısını gösteren optik mikroskop görüntüleri.....	222
Şekil 4.75.	a) Karıştırma bölgesi/TMAZ/HAZ sınırlarının, (b) TMAZ ve HAZ ve (c) HAZ'ın S44 mikroyapılarını gösteren optik mikroskop görüntüleri..	223
Şekil 4.76.	a) S48 kaynağın enine kesitinden alınan SEM görüntüsü. (b), (c) ve (d), sırasıyla (a)'da gösterildiği gibi A, B ve C bölgelerinden elde edilen EDS element yoğunluğu analizi sonuçlarını gösterir. Bölge A, B ve C (a)'da belirtildiği gibi sırasıyla karıştırma bölgesinde, TMAZ ve ITAB'da dır.....	225
Şekil 4.77.	a) Konik pim takım ve b) üçgen pim takım ile kaynakların sertlik profilleri.....	227
Şekil 4.78.	a) Konik ve b) üçgen pimli takım ile yapılan kaynakların çekme kesme yükü ve uzama eğrisi.....	229
Şekil 4.79.	Çekme kesme teslerinden sonra kaynakların alt ve üst plakalarının üst kısmındaki kırılma yüzey görünüşleri ve kesitleri: a) S43, S44 ve S45 ve (b) S46, S47 ve S48 kaynakları.....	231



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Saf alüminyumun genel özellikleri.....	31
Tablo 2.2.	Sınıflandırılmış dövme alüminyum ve alaşımları.....	33
Tablo 2.3.	Dökme alüminyum alaşımları ve gösterimi.....	34
Tablo 2.4.	7075 Al alaşımlarının kimyasal bileşimleri.....	36
Tablo 2.5.	7075 Al alaşımının temper işlemine göre mekanik özellikleri.....	36
Tablo 2.6.	Saf magnezyumun mekanik ve fiziksel özellikleri.....	37
Tablo 2.7.	Magnezyum alaşımlarının ASTM sistemine göre, alaşım ve temperleme gösterimlerinin standart dört kısmı.....	39
Tablo 2.8.	Magnezyum elementine eklenen alaşım elementlerinin ASTM sistemine göre tanımlanması.....	39
Tablo 2.9.	Magnezyum alaşımlarına uygulanan temperleme gösterimleri.....	39
Tablo 2.10.	ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94'e göre magnezyum alaşımları standartları ve bileşimleri.....	43
Tablo 3.1.	7075-T651 Al alaşımının kimyasal bileşenleri.....	63
Tablo 3.2.	7075-T651 Al alaşımının mekanik özellikleri.....	64
Tablo 3.3.	AZ91 Mg alaşımının kimyasal bileşenleri.....	64
Tablo 3.4.	AZ91 Mg alaşımının mekanik özellikleri.....	64
Tablo 3.5.	SKNK işleminde kullanılan takımların kimyasal bileşenleri.....	64
Tablo 3.6.	7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımlarının SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan parametreler.....	65
Tablo 3.7.	7075-T651 Al alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan parametreler.....	66
Tablo 3.8.	AZ91 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan parametreler.....	66

# SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN 7075 Al VE AZ91 Mg ALAŞIMLARININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

## ÖZET

Günümüzde, özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde taşıtların yakıt verimliliğini ve performansını artırmak için çelik yerine daha olan hafif alüminyum ve magnezyum alaşımlarını kullanmaya başlamışlardır. Alüminyum ve magnezyum alaşımları bir arada kullanılmasıyla taşıtların ağırlığı daha da azaltılabilir ve performansı artırılabilir. Bu alaşımlar geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile kaynak edildiğinde kaynaktaki kaynağın mukavemetini ciddi azaltan kusurlar meydana geldiği için bu yöntemler bu alaşımları kaynak etmede uygun değildir. Katı hal kaynak yöntemleri malzemeleri ergitmeden kaynak ettiği ve ergitme ile ilgili kusurların çoğunu bertaraf edilebildiğinden bu alaşımların kaynağında uygun görülmektedir. Bu çalışmada, 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımlarının katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) ile birleştirilmesinde plaka pozisyonunun (üst üste bindirilip SKNK ile birleştirilen 7075-T651 Al alaşımı plaka ve AZ91 Mg alaşımı plakanın üstte veya altta olma durumu), takım pim profilinin (konik, üçgen ve vidalı silindirik), takım dönme hızının (1000, 1400 ve 1800 dev/dak) ve takım bekleme süresinin (3 ve 6 sn) yapılan kaynakların mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, 7075-T651 Al alaşımı plakaların birbirine ve AZ91 Mg alaşımı plakaların birbirine SKNK ile birleştirilmesinde takım pim profilinin (konik ve üçgen) ve takım dönme hızının (800, 1200 ve 1600 dev/dak) kaynakların mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme mukavemeti ve çekme-basma yorulma ömrü 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan kaynaklardan daha yüksek çıkmıştır. En yüksek 2610 N çekme kesme yüküne ve en uzun yorulma ömrüne sahip kaynak, AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde üretilmiştir. Genel olarak, 1400 dev/dak takım dönme hızında 1000 ve 1800 dev/dak takım dönme hızlarına göre daha yüksek mukavemetli kaynaklar üretilmiştir. Ve takım bekleme süresi 3 sn'den 6 sn'ye çıkarıldığında kaynakların mukavemeti artmıştır. 7075-T651 Al alaşımı plakaların birleştirilmesinde üçgen pimli takım ile 1200 dev/dak dönme hızında en yüksek 7,776 kN çekme kesme yüküne sahip kaynak yapılmıştır. AZ91 Mg alaşımı plakaların birleştirilmesinde üçgen pimli takım ile 1600 dev/dak dönme hızında en yüksek 2035 N çekme kesme yüküne sahip kaynak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum alaşımı, magnezyum alaşımı, sürtünme karıştırma nokta kaynağı.

# **AN INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 7075 AL AND AZ61 MG ALLOYS JOINED BY FRICTION STIR SPOT WELDING**

## **ABSTRACT**

Today, especially in the aviation and automotive sectors, they have started to use lighter aluminum and magnesium alloys instead of steel to increase the fuel efficiency and performance of vehicles. By using aluminum and magnesium alloys together, the weight of vehicles can be further reduced and their performance increased. When these alloys are welded by conventional fusion welding methods, since defects occur in the weld severely reduce the strength of the weld and therefore these methods are not suitable for welding these alloys. Solid state welding methods are considered suitable for welding these alloys as they weld the materials without melting them and most of the melting-related defects can be eliminated. In this study, in the joining of 7075-T651 Al and AZ91 Mg alloys with friction stir spot welding (FSSW), which is a solid state welding method, effect of the plate position (being on the top or bottom of 7075-T651 Al alloy plate and AZ91 Mg alloy plate joined with FSSW by overlapping), tool pin profile (conical, triangular and screwed cylindrical), tool rotation speed (1000, 1400 and 1800 rpm) and tool dwell time (3 and 6 sec) on the microstructure and mechanical properties of the made FSSW welds were investigated. In addition, in the joining of 7075-T651 Al alloy plates and AZ91 Mg alloy plates to each other with FSSW, effect of tool pin profile (conical and triangular) and tool rotation speed (800, 1200 and 1600 rpm) on the microstructure and mechanical properties of the produced FSSW welds were investigated. Tensile shear strength and tension-compression fatigue life of the FSSW welds made with conical, triangular and screwed cylindrical pin tools when AZ91 Mg alloy plate was on 7075-T651 Al alloy plate were higher than that of the FSSW welds made when 7075-T651 Al alloy plate was on AZ91 Mg alloy plate. While AZ91 Mg alloy plate was on 7075-T651 Al alloy plate, the weld having highest tensile load of 2610 N and longest fatigue life was produced by triangular pin tool at rotation speed of 1400 rpm and dwell time of 6 sec. In general, stronger welds were produced at 1400 rpm tool rotation speed than at 1000 and 1800 rpm tool rotation speeds. And strength of the welds increased when tool dwell time was increased from 3s to 6s. In the joining of 7075-T651 Al alloy plates, the weld having highest tensile shear load of 7,776 kN made with triangular pin tool at rotation speed of 1200 rpm. In the joining of AZ91 Mg alloy plates, the weld having highest tensile shear load of 2035 N was obtained with triangular pin tool at rotation speed of 1600 rpm.

**Keywords:** Aluminium alloy, magnesium alloy, friction stir spot welding.

## 1. GİRİŞ

Küresel kaynak ve çevre sorunları son yıllarda giderek daha şiddetli olma eğiliminde olduğundan, taşıtların yakıt tüketimini ve sera gazı salınımının zararlı etkisini azaltmak için otomobillerin, uçakların ve yüksek hızlı yolcu araçlarının gövde ağırlığını azaltmaya büyük önem verilmiştir (Wise vd. 2009; Pollock 2010; Kim vd. 2010; Zhang vd. 2011; Shindell vd. 2011; Kim vd. 2011; Howey 2012; Alonso vd. 2012). Otomotiv ve havacılık sektörlerindeki üreticiler, taşıtın gövde ağırlığını azaltmak için gelişmiş hafif malzemeler kullanmak zorundadır (Begum vd. 2009; Fan vd. 2009; Kang vd. 2010; Kim vd. 2010; Kim vd. 2011; Jordon vd. 2011; Wang vd. 2011; Wu vd. 2012; Yu vd. 2012). Alüminyum (Al), yeryüzünde en çok bulunan üçüncü elementtir (Franz vd. 2015). Al, sonsuza kadar verimli bir şekilde geri dönüştürülebilen çevre dostu bir malzemedir (Zamzami vd. 2017). Al, tasarım ve imalatta çeşitli uygulamalar için çeliğe alternatif olmada en yaygın malzemelerden biri haline geldi (Heinen vd. 2014). Son yıllarda, dünya genelinde Al'nin tüketimi ve değeri artmıştır (Siewert vd. 2018). Al alaşımları hafif olmasının yanı sıra, mükemmel darbe direncine, ideal korozyon direncine sahip olması ve geri dönüştürülebilir olmasından dolayı, otomobillerde, uçaklarda, yüksek hızlı trenlerde ve deniz taşıtlarında geniş ölçekte kullanılmaktadır (Li vd. 2018). Taşıtların farklı kısımlarında Al alaşımları kullanılarak, taşıtların yakıt tüketimi azaltılabilir (Milani vd. 2016). Yüksek mukavemetli ve çökelmeyle sertleşen 7000 serisi Al alaşımları, örneğin 7075 Al alaşımı en güçlü Al alaşımlarından birisi ve yüksek özgül dayanımı nedeniyle özellikle de uçak birincil yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. 7075 Al alaşımı çağdaş dünyada çok önemli bir rol oynamaktadır. 7075 Al alaşımının ana elementleri alüminyum (Al), çinko (Zn), magnezyum (Mg) ve bakır (Cu)'dır. Ayrıca, 7075 Al alaşımı, yüksek özgül dayanımı yanı sıra doğal yaşlanma özelliklerine sahip olduğu için, havacılık, otomobil ve denizcilik gibi endüstrilerde ilgi görmektedir (Abhay ve Sreekumar 2008). Daha fazla uygulamada, 7075 Al alaşımından daha fazla faydalanabilmek için, 7075 Al alaşımının sağlam ve güvenilir bir şekilde kaynaklanabilmesi önemlidir. Ancak, geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile 7075 Al

alaşımını kaynak etmek zor ve hatta mümkün değildir. Çünkü kaynak mukavemetini ciddi şekilde zayıflatan bazı problemler görülmektedir. Bu problemler şöyle sıralanabilir; kaynakta katılaşıma çatlama, ısıdan etkilenen bölgenin kısmen erimiş bölgesinde sıcak yırtılmaya bağlı aşırı mikro çatlaklar, 7075 Al alaşımı ağırlıkça yaklaşık %1,75 bakır içerdiği için, ergitme kaynağı sırasında, kaynak çatlamaına karşı son derece hassastır. Ayrıca, 7075 Al alaşımının ergitme kaynağında, kaynakta gözeneklilik, yetersiz ergime ve zararlı dumanlar gibi problemler de görülmektedir. Bu nedenle, 7075 Al alaşımının kaynağında, geleneksel ergitme kaynak yöntemlerinin kullanılması uygun değildir (Madhusudhan vd. 1997; Haghshenas vd. 2018). Magnezyum (Mg) en hafif yapı metalidir. Magnezyumun bu özelliği, otomobil, havacılık ve savunma sektörlerindeki üreticileri daha yoğun olan malzemelerin yerine, Mg alaşımlarını tercih etmeye teşvik etmektedir. Mg ve Mg alaşımlarının avantajları: daha düşük yoğunluk, yüksek özgül dayanım, iyi dökülebilirlik, iyi işlenebilirlik, iyi korozyon direnci ve geri dönüştürülebilirliktir (Mordike ve Ebert 2001). Magnezyumun yoğunluğu  $1,74 \text{ g/cm}^3$ , alüminyumun yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$  ve çeliğin yoğunluğu  $7,869 \text{ g/cm}^3$ . Magnezyum alüminyumdan %35 ve çelikten ise neredeyse dört kat daha hafiftir. Günümüzde Mg ve alaşımlarının hafif yapı malzemeleri olarak hem havacılık hem de otomotiv uygulamalarında kullanılmasının önemi artmıştır (Steve 2009; Kulekci 2007). AZ91 Mg alaşımının ana elementleri magnezyum (Mg), alüminyum (Al) ve çinko (Zn)'dir. AZ91 Mg alaşımı, yüksek mukavemet, iyi dökülebilirlik ve mükemmel korozyon direncinin iyi bir kombinasyonuna sahip olduğu için en yaygın kullanılan Mg alaşımlarından biridir (Mordike ve Ebert 2001; Dahle vd. 2001; Kleiner vd. 2003; Braszczyń ve Malik 2005). Karmaşık yapıların üretiminde, metallerin uygulamalarını artırmak için kaynaklanabilirlik kilit noktadır (Asadi vd. 2020). Ancak, birçok magnezyum alaşımının, özellikle AZ91 Mg alaşımının, geleneksel ergitme kaynak teknikleri ile kaynak edilmesinde zayıf kaynak bağlantıları üretilmektedir. Aksine, katı hal kaynak teknikleri, erimiş faz olmadan düşük ısı girdisi sunarak kaynak verimliliğini artırır ve potansiyel olarak Mg ve alaşımlarının farklı endüstrilerdeki uygulamalarını genişletebilir (Givi ve Asadi 2014; Amini vd. 2014; Asadi vd. 2016). Mg alaşımları, plazma ark kaynağı, gaz tungsten ark kaynağı veya lazer ışın kaynağı gibi ergitme kaynak yöntemleriyle kaynak edildiğinde, kaynakta sıcak çatlama, gözeneklilik, oksidasyon ve yüksek artık gerilme gibi kaynak bağlantısını kötü etkileyen kusurlar meydana geldiği için Mg alaşımlarının uygulanmasını engellemektedir (Sheng vd. 2016). Dünya genelinde, daha ekonomik ve

daha iyi performanslı araçlar üretmek için çelik yerine daha hafif olan Al ve Mg alaşımlarının uygulanması artmaktadır (Cole ve Sherman 1995). Al ve Mg alaşımlarını bir hibrit yapıda birleştirerek kullanmak, bu alaşımların daha fazla uygulamada kullanılmasını mümkün kılacak ve bu da arzu edilen ağırlık tasarrufu sağlayacaktır (Liu vd. 2007). Al ve Mg alaşımlarının hafif yapı malzemeleri olarak önemi sürekli artmaktadır. Al ve Mg alaşımlarının aynı anda uygulanması, daha fazla tasarım esnekliği ve azaltılmış ağırlıkla geliştirilmiş mekanik yanıt sağlar. Bu farklı alaşımları birbirine birleştirmek için güvenilir bir birleştirme tekniği gereklidir. Ancak, Al ve Mg alaşımlarının birbirine kaynaklanması hala birçok zorlukla karşı karşıyadır. Al ve Mg alaşımlarının, geleneksel kaynak yöntemleriyle birleştirilmesinde, büyük ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), katılma çatlama, gözeneklilik, alaşım elementlerinin buharlaşma kaybı ve yüksek artık gerilimler gibi kaynağın mekanik özellikleri olumsuz etkileyen birçok sorun görülmektedir (Thomas vd. 2005; Lee vd. 2008). Al/Mg hibrit yapılarının büyük miktarda potansiyel uygulamaları nedeniyle, bu farklı malzemelerin birleştirilmesi önemli bir konudur. Al alaşımlarının, Mg alaşımlarına, gaz tungsten ark kaynağı, elektron ışın kaynağı ve lazer ışın kaynağı gibi ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmeye çalışılmıştır. Fakat sıvılaştırma kaynaklı, katılma sırasında kaynak içinde hapsolmuş hidrojenin bir sonucu olarak çatlama ve gözeneklilik gibi kusurlar sık sık görülmüştür (Zhang vd. 2012). Ayrıca, ergitme kaynak yöntemlerini kullanarak, Al ve Mg alaşımlarını birbirine birleştirmek için birçok girişimde bulunulmuştur. Ancak, kaynakta, kaynak mekanik özelliklerini azaltan çok miktarda kırılma metallerarası bileşiklerin ve mikro çatlakların oluşması, bu yöntemlerin bu farklı alaşımları birbirine kaynaklamada uygun olmadığı görülmüştür (Ben vd. 2002; Liu vd. 2007). Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), 1991'de Birleşik Krallık'taki Cambridge Kaynak Enstitüsü tarafından geliştirilen ve patenti alınan bir katı hal metal birleştirme tekniğidir (Genevois vd. 2004). Geleneksel ergitme kaynağı ile karşılaştırıldığında, SKK çevre dostu, enerji tasarruflu ve çok yönlü bir katı hal birleştirme teknolojisidir (Thomas vd. 1991). SKK sırasında ortaya çıkan maksimum sıcaklık kaynak edilen metallerin ergitme sıcaklığı altında olduğu için, geleneksel ergitme kaynağında görülen çatlaklar ve gözeneklilik gibi kusurlar, SKK'da görülmez (Ma vd. 2018; Zhang vd. 2019; Yang vd. 2020; Saray vd. 2020). SKK katı hal kaynak işlemi olduğu için, SKK'da faz dönüşümü gerçekleşmez bu yüzden SKK, ergitme kaynağı ile ilgili tüm problemlerin üstesinden gelebilmektedir. SKK'da dar ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), düşük çarpılma, düşük artık gerilme ve

yüksek mukavemetli kaynak gibi birçok avantaja daha sahiptir (Mlleswaran vd. 2017). SKK, başlangıçta Al alaşımlarını birleştirmek etmek için geliştirildi ve şimdi Al alaşımlarının kaynağında yaygın olarak kullanılmaktadır (Thomas vd. 2005; Chen vd. 2006). Daha sonra, SKK, magnezyum (Suhuddin vd. 2009; Cao ve Jahazi 2011), bakır (Avula vd. 2011), titanyum (Rai vd. 2011) ve çelik alaşımlarının (Saeid vd. 2010), kaynağında da kullanılmaya başlandı. Ayrıca, günümüzde, SKK, farklı metallerin alüminyum/magnezyum (Chang vd. 2011; Pourahmad ve Abbasi 2013), alüminyum/bakır (Abdollah-Zadeh vd. 2008; Saeid vd. 2010), alüminyum/çelik (Rai vd. 2011), alüminyum/titanyum (Chen ve Nakata 2009; Saeid vd. 2010; Rai vd. 2011) ve magnezyum/çelik (Chen ve Nakata 2009) kaynağında da kullanılmaktadır. SKK, Al alaşımlarının ve özelliklede ergitme kaynak yöntemleriyle kaynaklanamaz olarak görülen yüksek mukavemetli 2000 ve 7000 serisi Al alaşımlarının kaynağında çok uygundur (Madhusudhan vd. 1997; Genevois vd. 2005). SKK ile üretilen kaynakların, ergitme kaynağıyla üretilen kaynaklardan daha iyi mekanik performans sergilediği bildirilmiştir (Ma vd. 2013; Ma vd. 2018; Yang vd. 2020; Saray vd. 2020). Son yıllarda, Al ve Mg alaşımlarının birbirine SKK ile birleştirilmesi üzerine çok sayıda araştırma yapılmış ve sağlam kaynakların başarılı bir şekilde üretilebildiğini bildirmişlerdir. Hirano vd. (2003), Sato vd. (2004) ve Park vd. (2002), 1050 Al alaşımını AZ31 Mg alaşımına SKK ile kaynaklanabilirliğini araştırmış ve bu iki farklı alaşım arasında yüksek kaliteli kaynağın mümkün olduğunu bildirmişlerdir. Mclean vd. (2003), AZ31B Mg alaşımıyla 5083 Al alaşımını SKK ile birleştirmiş ve sağlam kaynakların üretilebileceğini belirtmişlerdir. SKK, son yıllarda, metal birleştirme alanındaki en önemli gelişme olarak düşünülmektedir (Lee vd. 2008). 2003 yılında, Japonya'nın Mazda Motor Şirketi, sürtünme karıştırma kaynağından (SKK'dan), katı hal nokta kaynağı olan sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) geliştirdi ve SKNK'yı kullanarak, Mazda RX-8 aracının motor kaputunu ve arka kapılarını imal etmiştir (Mazda 2003). Geleneksel ergitme kaynak yöntemiyle karşılaştırıldığında, SKNK ve SKK aynı avantajlara sahiptir. Örneğin, kullanımı kolay olması, kaynakta çatlama veya gözeneklilik sorunları olmaması, üstün kaynak mekanik özelliklerine sahip olması, farklı malzemeleri kaynak etmeye uygun olması, kaynakta düşük artık gerilme olması, düşük enerji girişi olması, toplam yapısal ağırlıkta azalma olması, az atık veya az kirlilik olması (Babu vd. 2013). SKNK işlemi sırasında, SKK'da olduğu gibi oluşan sıcaklık kaynak edilen malzemelerin ergime sıcaklığı altında olduğu için, ergitme kaynağında görülen kusurlar çoğunlukla SKNK'de

görülmez. SKNK'nın diğer avantajları, soğutma maddesine, ilave malzemelere veya kaynak sonrası işleme gerek yoktur. Ayrıca, SKNK, diğer tip nokta kaynağı teknikleriyle karşılaştırıldığında daha enerji tasarruflu ve temizdir (Rao vd. 2013). SKNK'de belli bir hızda dönen kaynak takımı kaynak edilecek üst üste bindirilmiş parçalara belli bir hızla belli bir deriliğe daldırılır ve kaynak takımı istenilen derinliğe daldırıldıktan sonra malzemelerin sürtünme ısısı ile yumuşaması ve plastik deformasyona uğratılmasıyla birbirine karışması için orada belli bir süre bekletilir (birkaç saniye mertebesinde). Daha sonra kaynak takımı parçalardan geri çekilerek parçaların tek noktadan birleşmesi sağlanır. SKK'da ise belli bir hızda dönen kaynak takımı, kaynak edilecek üst üste bindirilmiş veya alın altına getirilmiş parçalara belli bir hızla belli bir deriliğe daldırılır. Kaynak takımı istenilen derinliğe daldırıldıktan sonra malzemelerin sürtünme ısısı ile yumuşaması ve plastik deformasyona uğratılmasıyla birbirine karışması için orada belli bir süre bekletildikten sonra kaynak takımı istenilen yere ötelenerek (hareket ettirilerek) parçaların malzemeleri birbirine karışması ile oluşan kaynak dikişiyle birleşmesi sağlanır. Kaynak takımı istenilen yere ötelendikten sonra durdurulur ve daha sonra parçalardan geri çekilerek parçaların kaynak dikişiyle birleşmesi tamamlanır. SKNK'nın çalışma prensibi SKK'ye benzer: Döner kaynak takımının dalması, bekleme süresi sırasında malzemelerin karıştırılması ve kaynak takımı reaksiyonu. SKNK ve SKK arasındaki tek fark, SKNK'de kaynak takımının ötelenme hareketi yoktur (Lathabai vd. 2006; Arici vd. 2008). Tipik bir SKNK mekanizması, birleştirilmek için üst üste bindirilmiş iki metal plakaya daldırılan bir pime sahip döner bir kaynak takımından oluşur. Kaynak takımı plakalarla etkileşime girdiğinde kaynak takımının dönme hızı ve aşağı yönlü kuvveti bölgesel sürtünme yaratır. Sürtünmeyle oluşan ısı ve plakaların plastik deformasyonu, kaynak takımı çevresinde plakaların malzemeleri karıştırır ve üst ve alt tabakalar arasında katı hal bir bağ oluşturur (Wang vd. 2009). Elektrik direnç nokta kaynağı (EDNK) ve perçinleme, günümüzde tek noktadan birleştirme için kullanılan başlıca yöntemlerdir. Ancak, SKNK ile karşılaştırıldığında, EDNK ve perçinleme doğal dezavantajlara sahiptir. Örneğin, EDNK'da yüksek enerji tüketimi ve zayıf kaynaklar görülürken, perçinleme için yüksek maliyet, düşük üretim verimliliği ve kötü çalışma ortamı vardır. Dahası, SKNK'nın maliyeti, EDNK'dan %25 daha düşüktür ve SKNK daha basittir ve değişen malzeme koşullarına ve yüzey koşullarına duyarlı değildir (Smith vd. 2004; Uematsu ve Tokaji 2009; Zhang vd. 2011). SKNK, su, basınçlı hava veya karmaşık elektrik dönüştürme ekipmanına gerek duymaz (Aebegast 2006). Günümüzde, havacılık



endüstrisinde parçaların birleştirilerek montajlanmasında, çok sayıda perçin ve civata kullanılmaktadır. Bu bağlantı elemanlarının yerine kaynak kullanılması önemli ölçüde ağırlık tasarrufu ve üretim maliyetinde bir azalma sağlayacaktır (Nicholas ve Thomas 1998; Threadgill 1999). EDNK günümüzde çelik araba gövdeleri imalatında kullanılan en önemli birleştirme yöntemidir. Çünkü EDNK hızlı, çok yönlü ve kolayca otomatikleştirilebilir (Connolly 2007). EDNK, Otomotiv endüstrisinde en yaygın kullanılan geleneksel tek noktadan birleştirme yöntemi ve çelikleri kaynak etmede iyidir, fakat Al ve Mg alaşımlarını kaynak etmede uygun değildir (Cole ve Sherman 1995; Thornton vd. 1996; Gean vd. 1999). Al ve Mg alaşımları EDNK ile kaynak edildiğinde, kaynak gözenekliliği, elektrot aşınması, yüksek enerji tüketimi, düşük üretim verimliliği, ve kaynak başarısızlık modlarında tutarsızlık gibi sorunlar vardır (Gean vd. 1999; Sun vd. 2007; Liu vd. 2010; Xiao vd. 2011; Liu vd. 2013). SKNK, EDNK ile kıyaslandığında daha düşük enerji tüketimi, daha küçük çarpılma, daha az kaynak kusurları ve daha iyi kaynak bağlantı kalitesi avantajlarına sahiptir (Zhang vd. 2011). Katı hal birleştirme teknolojisi olan SKNK, Al ve Mg alaşımları gibi hafif malzemeleri kaynaklamak için daha uygundur (Chen ve Nakata 2008; Babu vd. 2012; Li vd. 2014; Caovd. 2014). Yapılan literatür araştırmasına göre, SKNK nispeten yeni bir kaynak yöntemi olmasına rağmen, diğer noktasal birleştirme tekniklerine göre daha avantajlı ve onların yerini alabilecek potansiyele sahiptir. Özellikle, hafif Al ve Mg gibi alaşımların kaynağında, SKNK ekstra ağırlık eklemekten daha az maliyetiyle daha mukavemetli ve kaliteli birleştirme sağlayabilmektedir. SKNK’de kaynak parametreleri (kaynak takımı dönme hızı, dalma hızı, dalma derinliği, bekleme süresi ve kaynak takımı profili) üretilen kaynağın kalitesini etkilemektedir. SKNK sırasında kaynak takımı dönme hızı, sürtünme ısı üretiminde çok önemli rol oynarken, kaynak takımı dalma hızı, dalma derinliği, bekleme süresi ve profili kaynak arayüzünde malzeme akışında çok önemli rol oynamaktadır (Tozaki vd. 2007; Fujimoto vd. 2008). SKNK’de kaynak takımı dönme hızı, dalma derinliği gibi ana parametreler kaynak sırasında ısı üretimini, kaynak bağlantı oluşumunu ve bağlantı mekanik özelliklerini belirlemektedir (Gerlich vd. 2005; Badarinarayan vd. 2009). SKNK’de Kaynak parametrelerine ek olarak, kaynak takımı profili malzeme akışında ve karışımında çok önemli bir rol oynamaktadır. İçbükey (konkav) omuza sahip kaynak takımıyla yapılan kaynakların, dışbükey (konveks) ve düz omuza sahip kaynak takımlarıyla yapılan kaynaklardan daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir (Lin vd. 2008; Badarinarayan vd. 2009; Yang vd. 2011). Ayrıca, SKNK’de

daha mukavemetli kaynak bağlantıları elde etmek için, üçgen pime ve daha uzun pime sahip kaynak takımları kullanılması tavsiye edilmiştir. Farklı kalınlıklarda ve farklı Al alaşımlarının SKNK ile birleştirilmesinde, en yüksek kaynak mukavemetini elde etmek için, kaynak parametrelerinin optimum kombinasyonları elde edilmiştir (Freeney vd. 2006; Zhang vd. 2011; Yuan vd. 2011). SKNK üzerine yapılan araştırmaların çoğu, aynı cins Al veya Mg alaşımlarının birleştirilmesiyle nispeten sınırlı kalmıştır. Al veya Mg alaşımlarının optimum fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinden faydalanmak için, Al ve Mg'nin bir arada kullanımına ilgi artmaktadır. Bu farklı alaşımları birleştirmedeki zorluk, kaynak bölgesinde oluşan ve kaynağın mukavemetini düşüren sert ve gevrek metallere bileşiklerdir. Bu metallere bileşikler genelde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ 'dir. Bu metallere bileşikler ana malzemeden çok daha sert ve kırılgandır ve kaynakta çatlakların oluşmasına neden olduğu ve ayrıca kaynak dış kuvvetlere maruz kaldığında çatlakların kolayca büyümesine neden olduğu için kaynak mukavemeti için kötüdür (McLean vd. 2003; Chen ve Nakata 2008; Lee vd. 2009; Yamamoto vd. 2009; Sato vd. 2010; Choi vd. 2011; Chowdhury vd. 2012).

SKNK ile sağlam ve kaliteli kaynak bağlantıları elde etmek için uygun kaynak parametreleri ve kaynak takımı geometrisi seçilmesi gereklidir. Bu çalışmada, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde potansiyeli yüksek olan 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesi yapıldı. Öncelikle, 7075-T651 Al alaşımı plakayı, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerine koyup (7075-T651 Al alaşımı plaka üstte/AZ91 Mg alaşımı plaka altta olacak şekilde) ve daha sonra AZ91 Mg alaşımı plakayı, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerine koyup (AZ91 Mg alaşımı plaka üstte/7075-T651 Al alaşımı plaka altta olacak şekilde) iki farklı alaşımı iki farklı pozisyonda üst üste bindirip birbirine SKNK ile birleştirilmesinde, kaynak takımı dönme hızının (1000, 1400 ve 1800 dev/dak), bekleme süresinin (3 ve 6 sn), takım pim profilinin (konik, üçgen ve vidalı silindirik) kaynak mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisi ve plaka pozisyonunun kaynak kabiliyetine etkisi araştırıldı. Ayrıca, aynı cins 7075-T651 Al alaşımı plakaların ikisini ve aynı cins AZ91 Mg alaşımı plakaların ikisini üst üste koyup birbirine SKNK ile birleştirilmesinde, kaynak takımı dönme hızının (800, 1200 ve 1600 dev/dak), ve takım pim profilinin (konik ve üçgen pimli takımlar) kaynak mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisi araştırıldı.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Dünya genelinde otomotiv endüstrileri, daha ekonomik ve daha iyi performans gösteren araçlar üretmek için çelik yerine daha hafif Al ve Mg alaşımlarının uygulanmasını artırmaya gitmiştir (Cole ve Sherman 1995). Al alaşımları, hafifliği, yüksek mukavemeti ve iyi korozyon direnci nedeniyle birçok mühendislik uygulamasında görülür (Komisarov vd. 1996; Chen vd. 1999; Guillaumin ve Mankowski 1999; Dymek vd. 2003). 7XXX serisi Al alaşımları yüksek mukavemetli yaşlandırılabilir alaşımlardır. Bu Al alaşımlar özellikle havacılık endüstrilerinde yapısal malzeme olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Ahmad vd. 2001; Dymek ve Dollar 2003). 7075 Al alaşımı, yüksek mukavemeti ve hafifliği nedeniyle havacılık ve uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Wu vd. 2016). Al alaşımları yüksek özgül dayanıma, iyi şekillendirilebilirliğe sahip olması ve ağırlık tasarrufu sağlamasından, taşıtların imalatında kullanılmaktadır. Mg alaşımları yapısal metallerin en hafifi ve taşıtların imalatında yapısal malzeme olarak kullanılır. Ergitme kaynak yöntemlerini kullanılarak Al ve Mg alaşımlarını birbirine kaynaklamak için birçok girişimde bulunulmuştur. Ancak, kaynakta oluşan intermetalik bileşiklerin seviyesi kaynak mekanik özelliklerini kötü etkilemesi nedeniyle bu yöntemlerin bu alaşımları birbirine kaynaklamada uygun olmadığı görülmüştür (Ben-Artzy vd. 2002; Liu vd. 2007).

Otomotiv ve havacılık endüstrisinde taşıtların imalatında Al ve Mg alaşımlarının hafif yapı malzemesi olarak kullanılmasının önemi her geçen gün artmaktadır. Al ve Mg alaşımlarının bir arada bulunan uygulamalar, daha fazla tasarım esnekliği ve daha fazla hafiflik sağlayabilir. Ancak, Al ve Mg alaşımlarının kaynaklanmasında hala birçok zorluk vardır. Geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle bu alaşımları birleştirmede, kaynakta gözeneklilik, katılaşma çatlama, alaşım elementlerinin buharlaşması, ısıdan etkilenen bölge büyük olması ve yüksek artık gerilmeler gibi kaynak bağlantısını olumsuz etkileyen kusurlar ortaya çıkmaktadır. Bu iki farklı alaşımı birleştirmek için güvenilir gelişmiş yeni bir birleştirme teknolojisine ihtiyaç vardır (Thomas vd. 2005; Lee vd. 2008).

EDNK ve perçinleme otomotiv ve diğer endüstrilerde sac metal montajların imalatında kullanılan en yaygın tek noktadan birleştirme tekniğidir (Kim vd. 2009; Han vd. 2010).

Al ve Mg alaşımları EDNK ile kaynak edildiğinde, kaynak gözenekliliği, elektrot aşınması, yüksek enerji tüketimi, düşük üretim verimliliği ve tutarsız kaynak bozuklukları gibi problemler görülmektedir (Gean vd.1999; Sun vd. 2007; Liu vd. 2010; Xiao vd. 2011; Liu vd. 2013). EDNK otomotiv endüstrisinde kullanılan geleneksel birleştirme yöntemidir. Bu birleştirme yöntemi çeliklerin birleştirilmesinde etkilidir, fakat Al ve Mg alaşımları için uygun değildir (Cole ve Sherman 1995; Thornton vd. 1996; Gean vd. 1999). EDNK ve perçinleme, günümüzde tek noktadan birleştirme için kullanılan en önemli birleştirme yöntemleridir. Ancak, bu yöntemler SKNK ile karşılaştırıldığında, yüksek enerji tüketimi, zayıf kaynaklar ve manevra problemleri gibi doğal dezavantajlar EDNK’de görülürken, yüksek maliyet, düşük üretim verimliliği ve kötü çalışma ortamı gibi doğal dezavantajlar perçinlemede görülür. Ayrıca, SNK’nın maliyeti EDNK’ye göre %25 daha düşük ve SKNK işlemi daha basit ve değişen malzeme koşullarına ve yüzey koşullarına EDNK kadar duyarlı değildir (Smith vd. 2004; Uematsu ve Tokaji 2009; Zhang vd. 2011). Ek olarak, SKNK, su, basınçlı hava veya karmaşık elektrik dönüştürme ekipmanına ihtiyaç duymaz. Mazda Motor Corporation, 2003 RX-8 aracının arka kapılarının üretiminde SKNK’yi başarılı bir şekilde uygulamış ve arka kapı yan darbelere karşı mükemmel yapısal kararlılık ve beş yıldızlı devrilme koruması sağlamış (Aebegast 2006).

SKNK ile yapılan kaynak bağlantılarının, geleneksel EDNK ve kendinden delmeli perçin ile yapılan bağlantılarla karşılaştırıldığında üstün özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir (Briskham vd. 2006). SKNK geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında, kullanım kolaylığı, kaynakta çatlama veya gözeneklilik sorunları olmaması, üstün kaynak mekanik özellikleri, düşük artık gerilme, düşük enerji girişi, az atık veya kirlilik gibi avantajlar sağlamaktadır (Babu vd. 2013). Geleneksel kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında, SKNK’nın en önemli avantajı malzemeleri ergitmeden kaynak etmesidir (Tran vd. 2009). SKNK işleminde, takım dönme hızı, takım dalma hızı, takım dalma derinliği, takım bekleme süresi ve takım geometrisi işlem parametreleri kaynağın mikroyapısını ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Takım dönme hızı sürtünme ısısı üretiminde başrol oynarken, takım bekleme süresi, takım dalma hızı, takım

dalma derinliği ve takım geometrisi malzeme akışında başrol oynamaktadır (Tozaki vd. 2007; Fujimoto vd. 2008).

SKNK sırasında, takım bekleme süresi 2-5 sn aralığında kısmen kısa bir süre olduğu için, takım dönme hızı ve takım dalma hareketi çoğunlukla ısı oluşumunu, kaynak oluşumunu ve kaynak mekanik özelliklerini belirler (Yin vd. 2010).

SKNK, SKK'den türetilmiştir. SKNK'de dönen takım kaynak edilecek üst üstte bindirilmiş parçalara daldırılır, dönen takım istenilen derinliğe daldırıldıktan sonra parçaların malzemeleri karışması için orada birkaç saniye bekletilir ve daha sonra parçalardan geri çekilmesiyle parçalar tek noktadan birleşir. SKK'da ise dönen takım kaynak edilecek üst üstte bindirilmiş veya alın altına getirilmiş parçalara daldırılır, dönen takım istenilen derinliğe daldırıldıktan sonra parçaların malzemeleri karışması için orada birkaç saniye bekletilir ve daha sonra lineer olarak hareket ettirilmesiyle parçaların malzemeleri birbirine karışır ve karışmanın oluşturduğu kaynak dikiş parçaları birleştirir. Dönen takıma istenilen lineer ilerleme yaptırıldıktan sonra ilerlemesi durdurulur ve parçalardan geri çekilmesiyle parçaların kaynak dikişleriyle birleştirilmesi tamamlanır. SKNK üst üstte bindirilmiş parçaları tek noktadan birleştirirken, SKK üst üstte bindirilmiş veya alın altına getirilmiş parçaları kaynak dikişleriyle birleştirir. SKNK ile SKK arasındaki tek fark SKNK'de takımın lineer hareketi olmamasıdır (Smith vd. 2004).

SKNK, SKK ile aynı avantajlara sahiptir; örneğin kullanımı kolay, kaynakta çatlama veya gözeneklilik problemleri yoktur, kaynak yüksek mekanik özelliklere sahip, kaynakta düşük artık gerilme, düşük enerji girişi, az atık veya kirlilik (Babu vd. 2013). SKNK, otomotiv endüstrisinde çok yaygın kullanılan EDNK'nin yerini etkin bir şekilde alabilir ve farklı malzemeleri birbirine kaynak etmede bazı avantajları ortaya koymuştur (Mehta ve Badheka 2016). Benzer olmayan malzemelerin kaynaklanmasındaki en büyük sorunlardan biri karıştırma bölgesinde (kaynak bölgesinde) intermetalik bileşiklerin oluşmasıdır (Lee vd. 2009; Yamamoto vd. 2009; Kou 2009; Firouzdor vd. 2010; Cao ve Jahazi 2010; Choi ve Kou 2011). Sürtünme ısısı üretiminde baskın olan takım dönüş hızının, intermetalik bileşiklerin oluşumunu büyük ölçüde etkilediği görülmüştür (Sato vd. 2010; Choi vd. 2011). SKNK'de kaynak genişliği, üst ve alt plakalardan plastik olarak deforme olmuş malzeme, takım pimi yardımıyla akıp karıştığında, malzemelerin

tam bir yapışmasının meydana geldiği kaynak bölgesidir. Plastik deformasyon miktarını, çoğunlukla üretilen sürtünme ısı miktarı belirler. SKNK sırasında, sürtünme ısısının büyük bir kısmı, takım omzu üst plaka ile temas ettiğinde üretilir ve takım dönüş hızı da üretilen sürtünme ısı miktarı etkilenir. SKNK sırasında takım omzu ağırlıklı olarak üretilen sürtünme ısısını belirlerken, takım pimi malzeme akışını ve karışımını etkiler (Badarinarayan vd. 2009; Badarinarayan vd. 2009; Sun vd. 2009; Yin vd. 2010).

SKNK, üst üste bindirilmiş metal plakaların nokta kaynağı ile birleştirmede kullanılan bir katı hal birleştirme işlemidir (Chowdhury vd. 2010; Yin vd. 2010). SKNK'de nokta kaynakları bir pim ve bir omzu sahip kaynak takımı kullanılarak yapılmaktadır (Babu vd. 2013). SKNK işlemi, kaynak takımının üst üste bindirilmiş metal plakalara dalması, karıştırması ve geri çekilmesi olmak üzere üç farklı aşamadan meydana gelmektedir. SKNK işlemi, kaynak takımının belli bir hızla döndürülmesiyle başlar ve ardından dönen kaynak takımı üst üste bindirilmiş metal plakalara belli bir hızla daldırılır bu arada alt plakanın altında bulunan destek kaynak takımının aşağı doğru kuvvetini destekler. Kaynak takımı pimi üst plakayı geçip alt plakaya istenilen miktarda daldırıldıktan sonra (kaynak takımı omuzu üst plakaya istenilen miktarda daldırıldıktan sonra) orada birkaç saniye kaynak takımı aşağı doğru kuvveti, dönme hızı ve omuzu bekletilerek sürdürülür. Kaynak takımı ve plakaların malzemeleri arasında oluşan sürtünme ısı ile plakaların malzemeleri yumuşar kaynak takımı tarafından plastik deformasyona uğratarak ve karıştırılması ile üst ve alt plaka yüzeyleri arasında katı hal birleşme gerçekleşir (Wang ve Chen 2009).

SKNK işleminde, kaynak takımı dönme hızı, bekleme süresi, dalma derinliği ve dalma hızı gibi önemli kaynak parametreleri, ısı üretimi ve kaynağın mekanik dayanımı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Sağlam bir nokta kaynağı elde etmek için bu parametreler doğru bir şekilde kontrol edilmelidir. SKNK işleminde, kaynak parametrelerinin yanı sıra, kaynak takımının pim profili ve omuz tasarımı da malzeme akışında ve karışımında çok önemli bir rol oynar (Lin vd. 2013).

Takım dönüş hızındaki artışla birlikte kaynakların karıştırma bölgesinin büyüklüğü azalmıştır (Rao vd. 2015). Takım dönüş hızını artırmak, daha yüksek sürtünme ısı sağlar (Chang vd. 2004; Gerlich vd. 2005; Gerlich vd. 2007).

Badarinarayan vd. (2009), 5083 Al alaşımı plakaları birbirine SKNK ile birleştirmede silindirik pimli bir takım ve üçgen pimli bir takım kullanmıştır. Üçgen pimli takım kullanılarak yapılan kaynakların mukavemeti silindirik pimli takım kullanılarak yapılan kaynaklarda çok daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Shen vd. (2015) 2 mm kalınlığında AZ31B Mg alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip, 2 mm kalınlığındaki 6061-T6 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip, AZ31B Mg alaşımı plakayı 6061-T6 Al alaşımı plakanı üstüne ve 6061-T6 Al alaşımı plakayı AZ31B Mg alaşımı plakanın üstüne bindirip SKNK ile birleştirmede kaynak mekanik özelliklerini araştırmıştır. AZ31B Mg alaşımı plakaların ve 6061-T6 Al alaşımı plakaların nokta kaynaklarının çekme makaslama kuvveti, AZ31B Mg alaşımı plaka ile 6061-T6 Al alaşımı plaka arasındaki nokta kaynaklarınınkinden daha yüksek çıkmıştır. AZ31B Mg ile 6061-T6 Al alaşımları SKNK ile birleştirmede, AZ31B Mg alaşımı plaka 6061-T6 Al alaşımı plakanın üstünde olduğunda daha yüksek çekme makaslama kuvveti elde edilmiştir. AZ31B Mg alaşımı plakayı 6061-T6 Al alaşımı plakanın üstüne koyup yapılan kaynak 1,7 kN çekme makaslama kuvvetine sahip olurken, 6061-T6 Al alaşımı plakayı AZ31B Mg alaşımı plakanın üstüne koyup yapılan kaynak 1,4 kN çekme makaslama kuvvetine sahip olmuştur. AZ31B Mg ve 6061-T6 Al alaşımı arasındaki kaynaktaki  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşikten meydana gelen bir tabaka tespit edilmiştir. 6061-T6 Al alaşımı AZ31B Mg alaşımının üstündeyken yapılan nokta kaynağında  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşikten oluşan tabaka kalınlığı daha fazladır ve kaynak mukavemetini zayıflatmıştır.

Kaynak takımı dönme hızı, bekleme süresi ve dalma derinliği, sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) işleminde, kaynak mekanik özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerdir (Gerlich vd. 2007). SKNK bağlantılarının çekme makaslama yükünün, kaynak takımı dönme hızının belirli bir değere kadar artmasıyla arttığını ve daha sonra kaynak takımı dönme hızının daha da artmasıyla azaldığını belirtmiştir Lathabai vd. (2006). Benzer şekilde, Yuan vd. (2011), 6016 alüminyum alaşımı plakaları SKNK ile birleştirmede, kaynak takımı dönme hızının 1000'den 2500 dev/dak'ya çıkardığında, kaynağın çekme makaslama kuvvetinin önce arttığını ve daha sonra azaldığını bindirmiştir. Ayrıca, Tozaki vd. (2007) ve Merzoug vd. (2010) SKNK kaynaklarının çekme makaslama yükünün, kaynak takımı dönme hızının artırılmasıyla azaldığını tespit

etmiştir. Genel olarak, daha yüksek kaynak takımı dönme hızı daha düşük mekanik özelliklere sahip SKNK kaynaklarının üretilmesine yol açmaktadır. Bu, ısıl işlem görmeyen alüminyum alaşımlarının kaynak bölgesinde tane büyümesine veya ısıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarının kaynak bölgesinde çökelti irileşmesine neden olan artan kaynak takımı dönüş hızı ile daha yüksek ısı girdisi ile ilişkilendirilebilir.

Su vd. (2006) göre 750 dev/dak kaynak takımı dönme hızı altındaki dönme hızları kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarında, karıştırma bölgeleri (kaynak bölgeleri) iyi bağlanmış bölgeler sergileyemiyor. Kaynak takımı omuzu altında kaynak edilen malzemelerin yetersiz plastik deformasyonundan dolayı, kaynak takımı pimi etrafında yetersiz karıştırma hareketine neden olan düşük ısı girdisi ile ilişkilendirilebilir. Düşük kaynak takım dönüş hızı ve bekleme süresi düşük ısı girdisi sağladığı için kaynak edilecek malzemeler kaynak takımı tarafından yeterince plastik deformasyona uğratılmıyor ve karıştırılmıyor bu da zayıf kaynakların üretilmesine neden olmaktadır. SKNK işleminde bekleme süresi de kaynak mukavemeti üzerinde etkili bir parametredir.

Tozaki vd. (2007) ve Tran vd. (2009), bekleme süresinin kaynak özelliklerine etkisini araştırmıştır. Tran vd. (2009), kaynak mukavemetinin bekleme süresinin artmasıyla arttığına dikkat çekmiştir. Pathak vd. (2013) 5754 Al alaşımı plakaların SKNK kaynaklarının çekme makaslama yükü, kaynak takımı bekleme süresinin 4 saniyeden 12 saniyeye çıkartılmasıyla arttığını belirtmiştir. Daha yüksek bekleme süresi, daha yüksek sürtünme ısı girdisi sağladığı, bu da karıştırma sırasında kaynak birleşme bölgesinin büyümesini sağlamaktadır.

SKNK işleminde, kaynak takımı dalma derinliği kaynak dayanımı üzerinde etkili bir başka parametredir. Merzoug vd. (2010) 6060-T5 Al alaşımlarını SKNK ile birleştirmede, kaynak takımı dalma derinliğinin kaynak mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Kaynak takımı dalma derinliğinin artırılmasıyla, kaynakların mekanik özellikleri arttığı görülmüştür. Ancak, derin bir dalma derinliği üst plakanın aşırı incelmeye yol açtığı için kaynak mukavemetinin azalmasına neden olabileceğini bildirmişlerdir. Rao vd. (2015), kaynak takımı dönme hızının (1000, 1500, 2000 ve 2500 dev/dak) ve omuz dalma derinliğinin (0 mm'den 0,9 mm'ye) farklı AM60B Mg ve 6022-T4 Al alaşımlarının SKNK ile birleştirilmesinde kaynak mukavemetine etkisini



araştırmışlardır. Daha düşük takım dönme hızında (1000 dev/dak) ve daha yüksek dalma derinliğinde (0,9 mm) daha yüksek mukavemetli kaynak elde edilebileceği belirmiştir.

Benzer şekilde, Fereiduni vd. (2015) ve Merzoug vd. (2010) de maksimum çekme makaslama kuvvetine sahip SKNK kaynaklarının daha düşük kaynak takımı dönüş hızında elde edilebileceğini bildirmiştir.

Mazzaferro vd. (2015), TRIP çeliğinin sürtünme karıştırma nokta kaynağında, kaynak takım dönüş hızının (1600 ve 2400 dev/dak) ve bekleme süresinin (2 ve 3 sn) kaynak mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Daha düşük kaynak takımı dönüş hızında (1600 dev/dak) ve daha yüksek bekleme süresinde (3 sn) yapılan SKNK en yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Al ve Mg alaşımları arasında yapılan kaynaklarda yapısal sıvılaşma olmakta ve kaynak arayüzünde metallerarası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşmaktadır (McLean vde. 2003; Chen ve Nakata 2008; Yamamoto vd. 2009; Choi vd. 2011; Chowdhury vd. 2012). Bu metallerarası bileşikler ana malzemelere göre gevrek ve çok daha serttir ve çatlakın kolayca büyümesine neden olurlar. AA5083 Al alaşımının AZ31 Mg alaşımına SKNK ile birleştirilmesinde, kaynak bölgesinde metallerarası bileşiklerden oluşan kalın bir tabaka görülmüştür. Metallerarası bileşiklerin kalınlığı kaynak çekme makaslama kuvveti üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu görülmüş. Fakat bu metallerarası bileşiklerin dağılımı kaynak mukavemetini etkilediği tespit edilmiştir (Sato vd. 2010). Buna karşılık, A6K21 Al ve AZ31 Mg alaşımlarının SKNK ile birleştirilmesinde, kaynak bölgesinde metallerarası bileşiklerden oluşan tabakanın artan kalınlığı ile kaynağın çekme makaslama mukavemeti azalmıştır. Kaynağın çekme makaslama mukavemetindeki bu azalış metallerarası bileşiklerde oluşan çatlaklara bağlanmıştır. Sürtünme ısı, kaynak takımı dönüş hızı ve bekleme süresindeki artışla arttığı bu da metallerarası bileşiklerde oluşan tabakanın kalınlığında artışa neden olmuştur (Choi vd. 2011). Tutar vd. (2014), 3 mm kalınlığında AA3003-H12 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip SKNK ile birleştirmede Taguchi metodunu kullanarak en iyi kaynak parametrelerini (takım dönme hızını, takım dalma derinliğini ve takım bekleme süresini) tespit etmeye çalışmıştır. SKNK kaynakları, tükenmeyen H13 sıcak iş takım çeliğinden yapılmış, 12 mm çapında ve 10 derece konkav bir omuza ve sağ vida M5x0,8 mm çapında ve 3 mm uzunluğunda

vidalı silindirik bir pime sahip bir takım kullanarak yapılmıştır. Sonuç olarak, en uygun takım dalma derinliğinin 4,8 mm, takım bekleme süresinin 2 sn ve takım dönme hızının 1500 dev/dak olduğu tespit edilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre kaynağın çekme makaslama yüküne en fazla etki eden takım dalma derinliğinin olduğu (%69,26), sonra bekleme süresinin ve sonrada takım dönme hızının olduğu tespit edilmiştir. Kaynak çekme makaslama yükünün takım dalma derinliğinin artırılmasıyla arttığı görülmüştür. Ayrıca, kaynak çekme makaslama yükünün, kaynak birleşme bölgesinin artmasıyla doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Kaynak birleşme bölgesinde (karıştırma bölgesinde) daha ince taneli yapı kaynağın sertliğini ve kopma dayanımını artırmıştır. Kaynaklar çekme testinde kaynak birleşme bölgesinden (karıştırma bölgesinden) birleşmenin en az olduğu yerden kırıldığı tespit edilmiştir.

Bozkurt ve Bilici (2013), 1,6 mm kalınlığında AA2024-T3 Al alaşımı plaka ile 1,5 mm kalınlığında 5754-H22 Al alaşımı plakayı SKNK ile birleştirmede plaka pozisyonun (AA2024-T3 Al alaşımı plakanın altta ve üstte olma durumu) kaynak mekanik özelliklerine etkisini tespit etmeye ve Taguchi metodunu kullanarak kaynak parametrelerini (takım dönme hızını, takım dalma derinliğini, takım bekleme süresini (karıştırma süresini) ve takım eğim açısını) optimize etmeye çalışmışlardır. İki farklı AA2024-T3 ve 5754-H22 Al alaşımının SKNK ile birleştirmede AA2024-T3 Al alaşımı plaka ile 5754-H22 Al alaşımı plaka 25x25 mm ölçülerinde bir alana üst üste bindirilip bindirme alanının tam ortasına nokta kaynağı yapılmıştır. SKNK kaynakları, alüminyum titanyum nitrür kaplı sıcak iş takım çeliğinden çapılmış (AISI H13), 56 HRC sertliğe, 10 mm omuz çapına, 4 mm pim çapına ve 2,35 mm pim uzunluğuna sahip bir takım kullanarak yapılmıştır. Sonuç olarak plakaların pozisyonu (üstte veya altta olması) kaynak mukavemeti üzerinde önemli bir rolü olduğu, AA2024-T3 Al alaşımı plaka üstte 5754-H22 Al alaşımı plaka altta olduğunda yapılan kaynağın daha sağlam olduğu görülmüştür. AA2024-T3 Al alaşımı plaka, 5754-H22 Al alaşımı plakanın üstüne bindirilip, 1500 dev/dak takım dönme hızı, 2,65 mm takım dalma derinliği, 10 sn takım bekleme süresi ve 2 derece takım eğim açısı kaynak parametreleri kullanılarak yapılan SKNK en yüksek çekme makaslama kuvvetine sahip olmuştur. Kaynak çekme makaslama kuvvetini en fazla etkileyen kaynak parametresinin takım dönme hızı olduğu belirtilmiştir.

Choi vd. (2011), 1 mm kalınlığında 6K21 Al alaşımı plakayı, 1 mm kalınlığında AZ31 Mg alaşımı plakanın üstüne bindirip SKNK ile birleştirmede, takım dönme hızının ve takım bekleme süresinin kaynak bölgesinde Al ve Mg alaşımının reaksiyonu sonucu oluşan metallerearası bileşiklere etkisini ve üretilen SKNK kaynaklarının çekme makaslama kuvveti ile metallerearası bileşikler arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. SKNK ile birleştirilen 6K21 Al ve AZ31 Mg alaşımı plakalar aynı boyutlarda; 1 mm kalınlığında, 30 mm genişliğinde ve 100 mm boyundadır. 6K21 Al alaşımı plaka, AZ31 Mg alaşımı plakanın üzerine 30x30 mm ölçülerinde bir alana bindirilmiş ve bindirme alanın ortasına SKNK yapılmıştır. SKNK kaynakları SKD11 takım çeliğinden yapılmış, 13.5 mm çapında omuza ve 9.5 mm çapında ve 0.5 mm boyunda pime sahip bir takım kullanarak 1050 ve 1600 dev/dak takım dönme hızında takımı üst üste bindirilmiş plakalara daldırıp 5, 10, 20 ve 30 sn bekleterek yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, 6K21 Al alaşımının AZ31 Mg alaşımına SKNK ile birleştirilmesinde, kaynak bölgesinde  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerearası bileşikler tespit edilmiştir. 6K21 Al ve AZ31 Mg alaşımı arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden oluşan tabakanın kalınlığı takım dönme hızının ve bekleme süresinin artırılmasıyla arttığı görülmüştür. Metallerearası bileşiklerden meydana gelen tabakanın kaynakların çekme mukavemetini ciddi şekilde etkilediğı ve kalın tabakanın kaynak mukavemetini ciddi şekilde azalttığı tespit edilmiştir. 6K21 Al alaşımının AZ31 Mg alaşımına SKNK ile birleştirilmesinde, 1050 dev/dak takım dönme hızında ve 5 sn takım bekleme süresinde yapılan kaynağın en yüksek çekme makaslama kuvvetine 1.6 kN sahip olmuştur. Ancak, takım dönme hızının ve bekleme süresinin daha fazla artırılması kaynak arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden oluşan tabaka kalınlığını artırmış ve bu tabakada çatlaklar meydana geldiğı için kaynak çekme makaslama kuvveti düşmüştür.

Chowdhury vd. (2013), iki farklı alaşımı Terokal 5089 yapışkan ara tabaka kullanarak ve kullanmadan AZ31B-H24 Mg ve AA5754-O Al alaşımları üç farklı kombinasyonda üst üste bindirerek SKNK ile birleştirmiştir. SKNK kaynakları H13 takım çeliğinden yapılmış helezonik kıvrımları olan 13 mm çapında omuza ve sol vida 5 mm çapında ve 2,8 mm boyunda silindirik vidalı pime sahip bir takım ve 2000 dev/dak takım dönme hızı, 3 mm/s takım dalma hızı, 0,2 mm takım omuz dalma derinliğı, 2 sn takım bekleme süresi ve 15 mm/s takım çıkma hızı parametreleri kullanarak yapılmıştır. AZ31B-H24 Mg ve AA5754-O Al alaşımlarının bütün kaynak kombinasyonlarında kaynak bölgesinde (kariştırma bölgesinde)  $Al_3Mg_2$  and  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerearası bileşiklerden oluşan bir

arayüzey tabakası tespit edilmiştir ve bu arayüzey tabaka sertliğinin artmasına neden olmuştur. Ara tabakalı AZ31B-H24 plaka üstte/AA5754-O plaka altta ve ara tabakalı AA5754-O plaka üstte/AZ31B-H24 plaka altta yapılan kaynakların çekme makaslama dayanımı, çekme kopma enerjisi ve yorulma ömrü ara tabakasız AA5754-O plaka üstte /AZ31B-H24 plaka altta yapılan kaynaktan çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ara tabakalı AA5754-O plaka üstte/AZ31B-H24 plaka altta yapılan SKNK, yüksek çevrim yüklerinde yorulma çatlak ilerlemesi kaynak dolgusunun çevresi boyunca gerçekleştiği için kaynak dolgusu yerinden çıkarak kopmasıyla sonuçlanmıştır. Düşük çevrim yüklerinde ise kaynak işlemi sonunda oluşan delikte gerilme yığılması çatlak oluşmasını başlattığı ve daha sonra çatlağın uygulanan yüke dik doğrultuda ilerlediğinden dolayı yorulma kopması altta bulunan AZ31B-H24 plakadan olmuştur. Çekme testleri sırasında ise ara tabakalı AA5754-O plaka üstte/AZ31B-H24 plaka altta ve ara tabakalı AZ31B-H24 plaka üstte/AA5754-O plaka altta yapılan kaynaklarda kaynak dolgusunun yerinden çıkarak kopmasıyla sonuçlanmıştır. Ara tabakasız AA5754-O plaka üstte/AZ31B-H24 plaka altta yapılan kaynağın çekme testi sırasında kaynak dolgusunun ayrılmasıyla kopma gerçekleşmiştir. Ara tabakalı AZ31B-H24 plaka üstte/AA5754-O plaka altta yapılan kaynağın yorulma ömrü, çekme makaslama yükü ve çekme kopma enerjisi ara tabakalı AA5754-O plaka üstte/AZ31B-H24 plaka altta ve ara tabakasız AA5754-O plaka üstte/AZ31B-H24 plaka altta yapılan kaynaklardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Chowdhury vd. (2012).

Rao vd. (2015), 3,1 mm kalınlığında AM60B Mg alaşımı plakayı, 1,5 mm kalınlığında AA6022-T4 Al alaşımı plakaya SKNK ile birleştirmede kaynak parametrelerinin kaynak mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. SKNK kaynakları, H13 standart takım çeliğinden yapılmış, 12 mm çapında konkav omuza ve yüzeyinde dişli oluklar olan 5,4 mm çapında ve 3,5 mm boyunda bir pime sahip üçgen pimli bir takım kullanarak yapılmıştır. AM60B Mg alaşımı plaka 30x30 mm ölçülerinde AA6022-T4 Al alaşımı plakanın üzerine bindirip bindirme alanının ortasına SKNK kaynakları yapılmıştır. Birinci etapta en uygun takım dönme hızını tespit etmek için kaynaklar sabit 12 mm/dak takım dalma hızında ve sabit 1 sn takım bekleme süresinde, takım 1000, 1500, 2000 ve 2500 dev/dak dönme hızı için takım omuzunu 0,2, 0,4 ve 0,6 mm daldırarak yapılmıştır. Birinci etapta en uygun takım dönme hızınının 1000 dev/dak olduğu tespit edilmiştir. İkinci etapta ise en uygun takım omuz dalma derinliğini tespit etmek için kaynaklar sabit 1000

dev/dak takım dönme hızında, 12 mm/dak takım dalma hızında ve 1 sn takım bekleme süresinde, takım omuzu 0, 0,3, 0,6 ve 0,9 mm daldırma derinliğinde yapılmıştır. İkinci etapta en uygun omuz dalma derinliğinin 0,9 mm olduğu tespit edilmiştir. 12 mm/dak takım dalma hızında, 1 sn takım bekleme süresinde, 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 0,9 mm takım omuz dalma derinliğinde en yüksek çekme makaslama kuvvetine 2,5 kN sahip kaynak üretilmiştir. Elde edilen test sonuçlarına göre her bir kaynağın karıştırma bölgesinde (kaynak birleşme bölgesinde)  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşiklerin oluştuğu tespit edilmiştir. Takım dönme hızı artırıldığında kaynak karıştırma bölgesinin (kaynak birleşme bölgesinin) genişliği azaldığı ve buna bağlı olarak kaynak çekme makaslama kuvvetinin de azaldığı görülmüştür. 1000 dev/dak takım dönme hızında, takım omuz dalma derinliği artırıldığında, kaynak karıştırma bölgesinin (kaynak birleşme bölgesinin) genişliği arttığı ve metallerarası bileşiklerin kenetlenmesi görülmüştür. Yüksek çekme makaslama kuvvetine sahip kaynakların geniş kaynak karıştırma bölgesine (kaynak birleşme bölgesine) sahip olduğu ve oluşan kanca geometrisinin uç kısmında süreksiz metallerarası bileşiklerin oluştuğu görülmüştür. 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 0,9 mm takım omuz dalma derinliğinde üretilen kaynağın en yüksek çekme makaslama kuvvetine 2,5 kN sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmaya göre, farklı AM60B Mg ve AA6022-T4 Al alaşımlarının sürtünme karıştırma nokta kaynağında, kaynak karıştırma bölgesi genişliği (kaynak birleşme bölgesi), arayüzeyde oluşan kanca şeklindeki yapı ve metallerarası bileşikler kaynak mekanik özellikleri etkilemekte ve kaynak parametrelerine bağlıdır.

Rodriguez vd. (2014), 1,4 mm kalınlığında ZEK100 Mg alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip SKNK ile birleştirmede kaynak parametrelerinin (takım dönme hızının ve takım omuz dalma derinliğinin) kaynak mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. SSKNK kaynakları, 12 mm çapında konkav omuza ve 1,8 mm boyunda silindirik pime sahip bir takım kullanarak yapılmıştır. SKNK kaynakları 1500 ve 2250 dev/dak takım dönme hızında, takım omuzunu 0, 0,2 ve 0,6 mm daldırarak yapılmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre bütün kaynakların kaynak bölgesinin (karıştırma bölgesinin) mikroyapısı, ZEK100 Mg alaşımı ana malzemenin mikroyapısından daha ince taneli bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. 1500 dev/dak takım dönme hızında ve 0,2 mm takım omuz dalma derinliğinde yapılan SKNK'nın en yüksek çekme makaslama kuvvetine 3,2 kN sahip olmuştur. 1500 dev/dak takım dönme hızında, takım omuz dalma

derinliği 0,2 mm'den 0,6 mm'ye artırıldığında kaynak çekme makaslama kuvvetinin ciddi şekilde düştüğü görülmüştür. Kaynak çekme makaslama kuvvetinin düşmesi kaynak bölgesindeki tanelerin büyümesine ve yumuşamasına bağlamıştır. En düşük çekme makaslama kuvvetine sahip SKNK 2250 dev/dak takım dönme hızında ve 0.6 mm omuz dalma derinliğinde yapılmıştır. Sonuç olarak, SKNK çekme makaslama kuvveti öncelikle kaynak birleşme genişliğine ve kaynaktan sonraki üst plaka kalınlığına bağlanmıştır. Mikroyapı kaynak çekme makaslama kuvveti üzerinde fazla bir etkiye sahip değildir.

Sekhar vd. (2018), 2 mm kalınlığında AA5052- H38 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip birbirine SKNK ile birleştirmede takım dönme hızının kaynak özelliklerine etkisini araştırmıştır. Aynı boyutlarda 2 mm kalınlığında, 75 mm boyunda ve 25 mm genişliğinde Al alaşımı iki plaka 25x25 mm ölçülerinde üst üste bir alana bindirip bindirme alanının ortasına SKNK yapılmıştır. SKNK kaynakları 10 mm/dak sabit takım dalma hızında, 3,4 mm sabit takım dalma derinliğinde ve 3 sn sabit takım bekleme süresinde ve 500, 700, 900, 1100 ve 1300 dev/dak takım dönme hızında, yüksek karbonlu çelikten yapılmış vidalı silindirik pime sahip bir takım kullanarak yapılmıştır. Kaynaklar çekme makaslama testlerinde iki farklı şekilde kopmuş, kısmi kavisli arayüzeyden kopma ve kaynak dolgusunun yerinden çıkmasıyla kopma. Kaynak dolgusunun yerinden çıkmasıyla kopan kaynaklar daha yüksek çekme makaslama kuvvetine sahip olduğu olmuştur. Takım dönme hızının 500 dev/dak'dan 900 dev/dak'ya artırılmasıyla kaynak çekme makaslama kuvveti artmıştır. Ancak, takım dönme hızının daha fazla artırılmasıyla kaynak çekme makaslama kuvveti düşmüştür. 900 dev/dak takım dönme hızında yapılan kaynak en yüksek çekme makaslama kuvvetine 4,215 kN ve 500 dev/dak takım dönme hızında yapılan kaynak ise en düşük çekme makaslama kuvvetine 3,265 kN sahip olmuştur.

Shen vd. (2013), 2 mm kalınlığında 6061-T4 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip SKNK ile birleştirmede, takım dönme hızının ve takım bekleme süresinin yapılan SKNK kaynakların mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkilerini araştırmıştır. SKNK ile birleştirilen 6061-T4 Al alaşımı plakalar aynı boyutlarda 2 mm kalınlığında, 150 mm boyunda ve 40 mm genişliğindedir. İki 6061-T4 Al alaşımı plaka, 40x40 mm ölçülerinde üst üste bindirerek bindirme alanının ortasına sürtünme karıştırma

nokta kaynağı yapılmıştır. Kaynakların yapımında yüksek hız çeliğinden (JIS, SKD61) yapılmış 10 mm çapında ve 8 derece konkav omuza ve 0,5 mm vida adımı vidalı konik dip çapı 5mm, uç çapı 3 mm ve 3,1 mm boyunda pime sahip bir takım kullanarak yapılmıştır. Takım ve kaynak edilmek için üst üste bindirilen iki plaka arasındaki açı 3 derece. Kaynaklar sabit 20 mm/dak takım dalma hızı ve sabit 0,1 mm takım omuz üst plaka dalma derinliği altında, 1200, 1500, 1800 ve 2100 dev/dak takım dönme hızı kullanarak 2, 3 ve 4 sn takım bekleme süresinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kaynak mikroyapısı ve mekanik özellikleri takım dönme hızına ve takım bekleme süresine bağlı olarak farklılık göstermiş ve ayrıca takım dönme hızı ve takım bekleme süresi kaynak arayüzeyinde oluşan kanca geometrisini ve malzeme akışını önemli derecede etkilemiş bu da kaynak karıştırma bölgesinin büyüklüğünü etkilemiştir. Kaynakların sertlik profili W şeklinde olmuş ve en düşük sertlik değerleri termomekanik etkilenen bölge ve ısı tesiri altındaki bölge arasında görülmüştür. Takım dönme hızı ve takım bekleme süresi artırıldığında kaynak çekme makaslama yükü arttığı ve takım dönme hızının kaynak mukavemeti üzerinde çok önemli bir role sahip olduğu görülmüştür. Kaynak birleşme genişliğiyle kaynak mukavemeti arasında doğrudan bir ilişki olduğu tespit edilmiş buna göre daha büyük kaynak birleşme genişliğine sahip kaynak daha dayanıklı olmuştur. Kaynaklar çekme makaslama testlerinde kesme kırılması şeklinde kopmuştur.

Tuncel vd. (2016), 3 mm kalınlığında AA6082-T6 Al alaşımı plakaları SKNK ile birleştirmede takım dönme hızının, takım dalma hızının, takım dalma derinliğinin ve takım bekleme süresinin SKNK'nın çekme makaslama yüküne etkisini araştırmıştır. AA6082-T6 Al alaşımı plakalar aynı boyutlarda 3 mm kalınlığında, 100 mm boyunda ve 40 mm genişliğinde ve iki plaka 40x40 mm ölçülerde üst üste bindirerek bindirme alanının ortasına SKNK yapılmıştır. SKNK kaynakları tükenmeyen H13 sıcak iş takım çeliğinden yapılmış bir takım kullanarak yapılmıştır. Takım 15 mm çapında 10 derece konkav omuza ve 0,8 mm vida adımı olan sağ vidalı silindirik 6 mm çapında, 3,5 mm boyunda iki tarafına karşılıklı oluk açılmış bir pime sahiptir. SKNK Kaynakları 1000, 1500, 2000 ve 2500 dev/dak takım dönme hızı, 32, 38, 43 ve 50 mm/dak takım dalma hızı, 4, 4,5, 5 ve 5,5 mm takım dalma derinliği ve 0, 2, 4, 7 ve 9 takım bekleme süresi kaynak parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Takım kaynak işleminde saat yönünde döndürülmüştür. Sonuç olarak, 1000 dev/dak takım dönme hızı, 50 mm/dak takım dalma

hızı, 5 mm takım dalma derinliği ve 7 sn takım bekleme süresi parametreleri kullanılarak yapılan kaynak en yüksek çekme makaslama yüküne 7,89 kN'na sahip olmuştur. Kaynakların çekme makaslama yükü, takım dönme ve dalma hızının artırılmasıyla neredeyse lineer olarak düşmüştür. Diğer taraftan kaynakların çekme makaslama yükü, takım dalma derinliğinin ve bekleme süresinin artırılmasıyla neredeyse lineer olarak artmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre en etkili kaynak parametresinin takım bekleme süresi olduğu ve takım bekleme süresi 2 sn'den 7 sn'ye çıkarıldığında kaynak çekme makaslama yükünün yaklaşık %44 artışı görülmüştür.

Shen vd. (2013), 2 mm kalınlığında 7075-T6 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip yeniden doldurmalı SKNK ile birleştirmede kaynak mikroyapısını ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Yeniden doldurmalı SKNK yapılan 7075-T6 Al alaşımı plakalar 2 mm kalınlığında, 150 mm boyunda ve 40 mm genişliğinde ve bu iki 7075-T6 Al alaşımı plaka 40x40 mm ölçülerinde bir alana üst üste bindirerek bindirme alanının ortasına yeniden doldurmalı SKNK yapılmıştır. Kaynakların yapımında kullanılan takım üç parçadan meydana gelmektedir bunlar sıkıştırma halkası, 15,9 mm çapında omuz ve 5 mm çapında pim. Kaynaklar 1500, 1750 ve 2000 dev/dak takım dönme hızında, takım 3, 4 ve 5 sn bekleme süresi ile yapılmıştır. Sonuç olarak, kaynak sırasında oluşan anahtar deliği başarılı bir şekilde yeniden doldurulmuştur. Yapılan kaynakların mikroyapı, tane büyüklükleri genişlik ve kalınlık yönünde farklılık göstermiştir. Takım dalma ve karıştırma hareketi sonucu meydana gelen malzeme akışıyla ilişkili olarak kanca şekli, boşluklar, alt ve üst plaka arasında birleşme bağları ve yeniden doldurmayla tam dolmamış bölge gibi kusurlar görülmüştür. Kaynakların sertlik profili W şeklinde olmuş ve düşük sertlik oluşumuna en çok çökme durumu neden olmuştur. 1500 dev/dak takım dönme hızı ve 4 sn takım bekleme süresi parametreleri kullanarak yapılan kaynak en yüksek çekme makaslama yüküne 7,031 kN sahip olmuştur. Takım dönme hızı 1500 dev/dak'nın üstüne çıkıldığında kaynağın çekme makaslama yükü ciddi şekilde düşmüştür.

Zhang vd. (2020), 1,6 mm kalınlığında AA2024-T3 Al alaşımı plakayı, 2 mm kalınlığında AA7075-T6 Al alaşımı plakanın üstüne bindirip havada ve suda SKNK ile birleştirmede kaynak özelliklerini (kaynak birleşme genişliğini, ortalama tane büyüklüğünü, kaynaktaki arayüzeyinde oluşan kanca şeklini), kaynak mikroyapısını, kaynak mekanik özelliklerini ve kaynakların çekme makaslama testinden sonra kırık



yüzeyini araştırmıştır. SKNK kaynakları yüksek hız çeliğinden (HSS) yapılmış, 10 mm çapında omuza ve 4 mm çapında ve 2,4 mm boyunda silindirik bir pime sahip bir takım kullanarak yapılmıştır. Kaynaklar sabit 2 mm/dak takım dalma hızında ve sabit 5 sn takım bekleme süresinde, 630, 1000, 1400 dev/dak takım dönme hızında takım omuzu 0,1-0,5 mm daldırılarak yapılmıştır.

Zhang vd. (2011), 1 mm kalınlığında 5052-H112 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip SKNK ile birleştirmede takım dönme hızının (1541 ve 2256 dev/dak) ve bekleme süresinin (5, 10 ve 15 sn) yapılan kaynakların mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. SKNK kaynakların sertlik grafiği W şeklinde olmuş ve en düşük sertlik kaynakların ısı tesiri altında kalan bölgesinde görülmüştür. Takım dönme hızı artırıldığında, kaynak çekme mukavemeti düştüğü görülürken, takım bekleme süresinin artırılmasıyla kaynak mukavemetinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. En yüksek çekme mukavemeti 2,847 kN takım dönme hızı 1541 dev/dak ve takım bekleme süresi 5 sn parametreleri kullanılarak yapılan kaynakta elde edilmiştir. SKNK'de yüksek takım dönme hızı kaynak bölgesindeki tanelerin büyümesine, kaynak genişliğinin ve mukavemetinin azalmasına neden olduğunu iddia etmiştir.

Tozaki vd. (2007), 1 mm kalınlığında 2017- T6 Al alaşımı plakayı, 1 mm kalınlığında 5052 Al alaşımı plakanın üzerine bindirerek SKNK ile birleştirilmesinde takım dönme hızının ve takım bekleme süresinin kaynak çekme makaslama yüküne etkisini araştırmıştır. Kaynaklar üç farklı 1000, 1500 ve 2000 dev/dak takım dönme hızı ve altı takım bekleme süresi 0,2, 1, 3, 5, 9 ve 13 sn kullanılarak yapılmıştır. Kaynaklar 20 mm/dak sabit takım dalma hızında ve sabit 0,1 mm omuz üst plaka dalma derinliğinde yapılmıştır. Kaynaklar 7 mm çapında konkav omuza ve 1,7 mm boyunda ve M3 sol vida pime sahip yüksek hız çeliğinden yapılmış bir takım ile yapılmıştır. Tozaki vd. (2007) göre daha yüksek dayanıma sahip SKNK kaynakları elde etmek için kaynak arayüzünde yeterli malzeme karışımı çok önemli bu da daha düşük takım dönme hızı seviyelerinin ve daha yüksek takım bekleme sürelerinin birlikte kullanılmasıyla mümkündür. Daha düşük takım bekleme süreleri kullanarak yapılan kaynakta yetersiz plastik deformasyondan dolayı kaynak dayanımı düşük olmuştur. 5 saniyeden daha düşük takım bekleme sürelerinde yapılan kaynaklar çekme makaslama testinde kaynak dolgusu kesilerek kırılırken daha uzun bekleme sürelerinde yapılan kaynaklar ise çekme makaslama

testinde kaynak dolgusu üst plakadan çekme kırılması ve kaynak dolgusunun kesme kırılması birlikte görülmüştür.

Fujimoto vd. (2008), 1 mm kalınlığında 6061 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip SKNK ile birleştirmede kaynak mikro yapısını araştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, güçlendirici çökeltilerin kaynağın mikroyapısında ve sertlik dağılımında çok önemli bir rol oynamıştır. Kaynak bölgesinin sertliği ısı tesiri altında kalan bölgenin sertliğinden daha yüksek çıkmıştır. Kaynak bölgesinin sertliği yüksek olması güçlendirici çökeltilerin tamamen çözünmesine bağlanırken, ısı tesiri altında kalan bölgenin daha düşük sertliğe sahip olması ise güçlendirici çökeltilerin tam olarak çözünmemesine bağlanmıştır.

Tier vd. (2013), 1,5 mm kalınlığında AA5042-O Al alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip yeniden doldurmalı SKNK ile birleştirmede kaynak parametrelerinin (takım dalma derinliğinin, takım dönme hızının, takım dalma hızının ve takım bekleme süresinin) kaynak mikroyapısına ve kesme mukavemetine etkisini araştırmıştır. Kaynakların mekanik özellikleriyle kaynak parametreleri arasındaki ilişkiyi tespit etmek için statistica software package yazılım paketi kullanılmıştır. Buna göre en önemli değişkenlerin takım dalma derinliği ve takım dönme hızının olduğu görülürken, hacimsel kusurların kaynakların mekanik performansı üzerinde çok az bir etkisi olduğu görülmüştür. Takım dönme hızı 1900 dev/dak'dan 900 dev/dak'ya düşürüldüğünde kaynak birleşme uzunluğunun arttığı görülmüştür. Yüksek 1900 dev/dak takım dönme hızında üretilen kaynak bağlantılarında, kaynak sırasında malzeme daha çok yukarı doğru akmış ve kaynak birleşme uzunluğu azalmıştır, bunun sonucunda kaynak kesme mukavemeti azalmıştır. Ravindra vd. (2020) 2 mm kalınlığında 6061 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip hava ve su ortamında SKNK ile birleştirmede kaynak mikroyapısını ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. SKNK kaynakları hava ve su ortamında 16,4 mm çapında omuza ve alt çapı 3,7 mm ve uç çapı 2,4 mm konik bir pime sahip H13 çeliğinden yapılmış bir takım kullanarak üç farklı 700, 900 ve 1100 dev/dak takım dönme hızında yapılmıştır. Her iki ortamda da (hava ve su) takım dönme hızı 700 dev/dak'dan 1100 dev/dak'ya yükseltilecek yapılan kaynağın yük taşıma kapasitesi artmış ve ayrıca kaynağın sertliği de biraz artmıştır. Su ortamında yapılan kaynak hava ortamında yapılan kaynakla karşılaştırıldığında, su ortamında yapılan kaynakların yük

taşıma kapasitesinin daha fazla olduğu ve ayrıca kaynakların sertliğinin de biraz daha yüksek olduğu görüşmüştür. Su ortamında yapılan kaynakların daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olması, kaynak mikroyapısının daha ince taneli olmasına bağlanmıştır. Su ortamında kaynak sırasında suyun ısıyı çekmesinden dolayı yapılan kaynağın termomekanik etkilenen bölgesi daha dar olmuştur hava ortamında yapılan kaynağınkiyle karşılaştırıldığı zaman. Su ortamında 1100 dev/dak takım dönme hızında yapılan kaynak en yüksek 1208,36N yük taşıma kapasitesine sahip olurken hava ortamında 1100 dev/dak takım dönme hızında yapılan kaynak en yüksek 1128,32N yük taşıma kapasitesine sahip olmuştur.

Li vd. (2019), 2 mm kalınlığında 1060 Al alaşımı plakayı, 2 mm kalınlığında T2 bakır plaka üstüne bindirip SKNK ile birleştirmede takım bekleme süresinin kaynak mikro yapısına ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Kaynak bağlantıları 14 mm çapında konkav omuza ve silindirik 2,85 mm boyunda 4,6 mm çapında sağ vidalı pime sahip bir takım kullanarak sabit 2250 dev/dak takım dönme hızında ve sabit 0,1 mm takım omuz dalma derinliğinde 1, 5 ve 9 sn takım bekleme süresinde yapılmıştır. Yapılan bütün kaynak bağlantılarında alta bulunan bakır malzemesinin bir kısmı kanca şekline benzer şekilde yukarıya doğru alüminyum malzemesinin içine dalmış ve bu arayüzeyde metallerearası bileşikler oluşmuştur. Takım bekleme süresi artırılarak yapılan kaynakta kaynak sırasında ısı girdisinin artmasından dolayı metallerearası bileşikler büyümüştür. Kısa takım bekleme süresinde yapılan kaynakta kaynak arayüzeyinde kesintili olarak dağılmış  $CuAl_2$  fazından meydana gelen ve kısmen  $CuAl$  fazıyla karışmış bir tabaka meydana gelmiştir. Ancak daha yüksek takım bekleme süresinde yapılan kaynakta kaynak arayüzeyinde  $CuAl_2-CuAl-Al_4Cu_9$  fazlarından oluşan sürekli yapraksı bir tabaka meydana gelmiştir. Farklı bölgelerin sertliği oldukça farklı olmuştur. Kaynak karıştırma bölgesi ince taneli yapıya sahip olması ve metallerearası bileşik parçacıklarının dağınık olarak dağılmış olmasından dolayı kaynak karıştırma bölgesindeki sertlik değerleri çok daha yüksek olmuştur. Çekme mukavemeti daha iyi çıkan kaynak bağlantılarında kaynak sırasında altta bulunan bakır malzemesi üstte bulunan alüminyum malzemesine kanca şekline benzeyen bir şekilde daha fazla dalmış ve dalmayla oluşan bu kanca şekli arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden oluşan sürekli bir tabaka meydana gelmiştir. Çekme testi sırasında bütün kaynaklar  $CuAl_2-CuAl$  veya  $CuAl_2-Al$

arayüzeyinden kırılmaya başlamış ve daha sonra kırılma kanca arayüzeyi boyunca ilerleyerek kopma gerçekleşmiştir.

SKNK işleminde en önemli kaynak parametreleri takım dönme hızı, takım bekleme süresi, takım dalma derinliği ve takım dalma hızıdır. Bu kaynak parametreleri kaynak sırasında açığa ısının ve yapılan kaynak bağlantısının mukavemeti üzerinde doğrudan etkisi vardır. Bu yüzden SKNK'de sağlam nokta kaynakları üretebilmek için bu kaynak parametrelerinin doğru bir şekilde seçilmesi gereklidir. SKNK'de kaynak parametrelerinin dışında kaynak sırasında takım pim ve omuz profili malzeme akışında ve karışımında çok önemli bir rol oynamaktadır. Konkav omuza sahip takımlarla yapılan SKNK kaynaklarının mukavemeti konveks omuza sahip takım ile yapılan SKNK kaynaklarının mukavemetinden daha yüksek çıkmıştır. Genel olarak, üçgen pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarının kaynak birleşme genişliğinin ve çekme mukavemetinin silindirik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarınınkinden daha yüksek çıktığı görülmüştür (Badarinarayan vd. 2009; Badarinarayan vd. 2009).

Yin vd. (2010), AZ91 Mg alaşımının, AZ31 Mg alaşımına SKNK ile birleştirilmesinde, yüzeyine vida dişi açılmış üçgen pimli takım kullanarak yapılan kaynakların kaynak birleşme genişliği ve mukavemetinin yüzeyi düz ve silindirik pimli takım ile yapılan kaynaklarınınkinden daha büyük olmuştur. Badarinarayan vd. (2009) 1,64 mm ve 1,24 mm kalınlığında 5083 Al alaşımı plakaları üst üste bindirip SKNK ile birleştirmede takım geometrisinin kaynak mukavemetine etkisini araştırmıştır. SKNK kaynakları, aynı kaynak parametreleri şartlarında, üçgen pimli bir takım ve silindirik pimli bir takım kullanarak yapılmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre, üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme mukavemeti, silindirik pimli takım ile yapılanınkinden oldukça daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni, üçgen pimin asimetric şekli ve dönüşünden dolayı malzemenin daha fazla plastik deformasyona uğraması ve yeterli akışı sonucunda kaynak arayüzeyinde süresiz kanca şeklindeki yapının oluşmasına ve üçgen pimli takım ile yapılan kaynakların kaynak karıştırma bölgesinin daha ince taneli bir mikro yapıya sahip olmasına bağlanmıştır. Ayrıca, takım pim geometrisinin, birleştirilen parçaların arayüzeyinde kaynak karıştırma bölgesinin çevresinde oluşan kanca şeklindeki kısmen birleşmiş hattın şekli üzerinde çok önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Silindirik pimli takım ile yapılan kaynaklarda, kanca şeklindeki hattın sürekli olduğu ve

kaynak karıştırma bölgesine girmeden aşağıya kaynak tabanına doğru hareket ettiği görülmüştür. Üçgen pimli takım ile yapılan kaynaklarda ise, üçgen pimin asimetrik dönüşünden dolayı kanca şeklindeki kısmen birleşmiş hattın ileri geri hareket etmesi sonucu parçalandığı ve yukarı doğru hareket edip kaynak karıştırma bölgesinin çevresinde sonlandığı görülmüştür.

Rao vd. (2013), 2 mm kalınlığında AZ31 Mg alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip birbirine SKNK ile birleştirmede, kaynağın yorulma ömrünü araştırmıştır. SKNK kaynakları üçgen pimli bir takım ve silindirik pimli bir takım kullanarak yapılmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre üçgen pimli takımı kullanarak, 750 dev/dak takım dönme hızında ve 2,5 sn takım bekleme süresinde yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağının yorulma ömrü silindirik pimli takım ile yapılanınkinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Garg vd. (2017), 0,9 mm kalınlığında AA6061 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip SKNK ile birleştirmede üç farklı kaynak takımının (silindirik pimli bir takım, dörtgen pimli bir takım ve üçgen pimli bir takım), üç farklı takım dönme hızının (1000, 1500 ve 2000 dev/dak) ve üç farklı takım bekleme süresinin (2, 4 ve 6 sn) eşzamanlı olarak üretilen SKNK'nın çekme makaslama kuvvetine etkisini araştırmış ve en iyi parametreleri elde etmeye çalışmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en önemli parametrenin takım dönme hızı olduğu, bunu takım pim şekli ve daha sonra takım bekleme süresi izlemiştir. Kaynağın çekme makaslama kuvveti takım dönme hızının artırılmasıyla azalırken, takım bekleme süresinin artırılmasıyla önce artmış daha sonra azalmıştır. En yüksek çekme makaslama kuvvetine sahip SKNK, dörtgen şekilli pime sahip takım ile yapılırken, bunu üçgen şekilli pime sahip takım ve daha sonra silindir şekilli pime sahip takım takip etmiştir. Kaynak işleminden sonra özellikle de dörtgen ve üçgen şekilli pime sahip takımların pimlerinde önemli miktarda aşınma sonucu profilde hasar görülmüş ve ayrıca kaynak edilen malzemelerden bir miktar malzemenin takım pim yüzeyine yapıştığı gözlemlenmiştir. Mikroskobik sonuçlara göre, dörtgen ve üçgen şekilli pime sahip takımlarla yapılan kaynaklar, silindir şekilli pime sahip takım ile yapılan kaynaklarla karşılaştırıldığında, dörtgen ve üçgen şekilli pime sahip takımlarla yapılan kaynaklarda, dörtgen ve üçgen pimin daha yüksek süpürme oranı nedeniyle, daha fazla karıştırma ve malzeme akışı gerçekleştiği görülmüştür. Dörtgen ve üçgen pimli takımlarla

karşılaştırıldığında, kaynak sırasında silindirik pimli takım ile daha yüksek sıcaklık üretilmiştir ve bundan dolayı silindirik pimli takım ile çok daha az gerilme üretilmiştir. Takım dönme hızı 1000 dev/dak'dan 2000 dev/dak'ya artırıldığında kaynak çekme makaslama kuvveti düşmüştür. En yüksek çekme makaslama kuvvetine sahip kaynak, 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 4 sn takım bekleme süresinde dörtgen şekilli pime sahip takım ile yapılmıştır.

Lee vd. (2017), 1 mm kalınlığında AA6061-T6 Al alaşımı plakalardan ikisini üst üste bindirip SKNK ile birleştirmede takım dönme hızının (800, 1000 ve 1500 dev/dak) takım bekleme süresinin (1, 2, 3, 4,5, 5 ve 6 sn) ve dalma eksenine göre takım pim açısının (3 ve 5 derece) üretilen kaynak mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. SKNK kaynakları SKD11 çelik (standart KS D3753) malzemesinden yapılmış 8 mm çapında omuza ve dip çapı 2,94 mm, uç çapı 2 mm ve boyu 1,75 mm olan vidalı konik pime sahip bir takım kullanarak yapılmıştır. Bütün SKNK kaynakları sabit 1,75 mm dalma derinliğinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek çekme makaslama kuvvetine 2,75 kN sahip kaynaklar 1000 ve 1500 dev/dak takım dönme hızında ve 5 sn takım bekleme süresinde elde edilmiştir. Sabit 1000 dev/dak takım dönme hızında ve sabit 5 derece takım pim eğim açısında, takım bekleme süresi 1 sn'den 5 sn'ye artırıldığında kaynak çekme makaslama kuvvetinde ciddi bir artış olmuştur. SKNK sırasında daha yüksek bekleme süreleri kullanılması malzemelerin daha iyi karışmasını sağlamış bu da kaynak mukavemetini artırmıştır. Kaynak bölgesinin sertliği güçlendirici çökeltilerin büyüklüğüne ve şekline bağlıdır. Sonuç olarak, en iyi SKNK, takım dönme hızının 1000-1200 dev/dak aralığında, takım bekleme süresinin 4,5-5,5 sn aralığında ve takım pim eğim açısının 5 derece olduğu şartlarda elde edilebileceği belirtilmiştir.

Siddharth vd. (2017), 1,5 mm kalınlığında Al5052 Al alaşımı plakayı, 1,6 mm kalınlığında C27200 bakır alaşımı plakanın üstüne bindirip SKNK ile birleştirmede takım dönme hızının, takım dalma derinliğinin ve takım bekleme süresinin üretilen kaynağın çekme mukavemetine ve sertliğine etkisini araştırmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre, takım dönme hızı 1000 dev/dak altında ve düşük takım bekleme süresinde yapılan kaynaklarda yetersiz ısı üretiminden dolayı malzeme karışımı yetersiz olduğu için zayıf kaynaklar üretilmiştir. Takım dönme hızı 1600 dev/dak üstünde ve yüksek bekleme süresi parametreleri kullanılarak yapılan kaynaklarda aşırı ısı üretilmesinde dolayı kaynak

mukavemeti düşmüştür. Uğurlu ve Çakan (2019), 3 mm kalınlığında AA7075-T6 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste koyup SKNK ile birleştirmede takım dönme hızının üretilen kaynağın mikro yapısına ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. SKNK kaynakları, silindirik pimli bir takım kullanılarak, 1040, 1320 ve 1500 dev/dak dönme hızında parçalara sabit 3,2 mm derinliğe daldırılarak yapılmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre 1500 dev/dak takım dönme hızında yapılan kaynağın en yüksek çekme makaslama kuvvetine (6,2 kN) sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 1500 dev/dak takım dönme hızında üretilen kaynağın çok az miktarda gözenekliliğe sahip olduğu görülmüştür.

Suresh vd. (2020), 2 mm kalınlığında AA7075-T6 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste koyup ve üstteki plakanın üst kısmına 2 mm çapında açılmış deliğin içine 30 nm boyutunda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparçacıklar koyduktan sonra iki plakanın birbirine SKNK ile birleştirmiştir. SKNK kaynakları vidalı silindirik M5 bir pime sahip bir takım kullanılarak 900, 1100, 1300, 1500 ve 1700 dev/dak takım dönme hızında yapmış ve takım dönme hızının kaynak mikro yapısına ve mekanik özelliklerine etkisi araştırmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre, takım dönme hızı 900 dev/dak'dan 1300 dev/dak'ya çıkarıldığında kaynak çekme makaslama kuvveti ciddi şekilde artmış ve takım dönme hızı 1300 dev/dak'dan 1700 dev/dak'ya çıkarıldığında ise kaynak çekme makaslama kuvveti azalmaya başlamıştır. 1300 dev/dak takım dönme hızında üretilen SKNK'de, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparçacıkların homojen bir şekilde dağılmasından dolayı bu devirde üretilen kaynak en yüksek çekme makaslama kuvvetine (4679 N) sahip olmuştur.

Kumar vd. (2021), 3 mm kalınlığında AA6063 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste koyup SKNK ile birleştirmede, Taguchi metodunu kullanarak, takım dönme hızının (1000, 1200 ve 1400 dev/dak), takım pim profilinin (silindirik, kare ve beşgen pimli takım) ve eksenel kuvvetin (5, 6 ve 7 kN) kaynak çekme mukavemetine etkisini araştırmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre, en yüksek çekme mukavemetine sahip kaynak, kare pimli takım, 1400 dev/dak dönme hızı ve 5 kN eksenel kuvvet kullanılarak yapılmıştır. Taguchi sonucuna göre, kaynak mukavemetine, takım pim profili %91,03, eksenel kuvvet %3,87 ve takım dönme hızı %0,66 katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Bodur vd. (2016), 1,6 mm kalınlığında 2024-T3 Al alaşımı plakayı, 1,5 mm kalınlığında 5754-H22 Al alaşımı plakaya SKNK ve EDNK ile birleştirmiş ve bu iki farklı yöntem ile üretilen kaynakları birbiriyle çekme mukavemeti anlamında karşılaştırmıştır. EDNK ile, 20,90 kA akım, 0,08 sabit kaynak süresi ve 1710 N sabit elektrot kuvveti için, maksimum çekme kuvveti 3,5 kN olan kaynak elde edilirken, SKNK ile 1500 dev/dak takım dönme hızı, 2,7 mm takım dalma derinliği ve 10 saniye takım bekleme süresi için maksimum çekme mukavemeti 4,31 kN olan kaynak üretilmiştir. SKNK ile üretilen kaynağın, EDNK ile üretilen kaynaktan daha ince taneli bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Sonuç olarak SKNK ile daha sağlam kaynak üretilmiştir.

Ibrahim vd. (2007), 2 mm kalınlığında AA2024-T3 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip yeniden doldurmalı SKNK ile birleştirmede silindirik pimli bir takım ve üçgen pimli bir takım kullanmıştır. Üçgen pimli takım kullanılarak yapılan kaynakların çekme makasla mukavemeti silindirik pimli takım kullanılarak yapılanınkinden daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Daha önce yapılan birçok SKNK çalışması göstermiştir ki SKNK kaynaklarının mukavemeti kaynak bölgesinin büyüklüğüne bağlı ve kaynak bölgesinin büyüklüğü de kaynak parametrelerine ve kaynak takımı profiline bağlıdır. SKNK'de daha yüksek kaynak mukavemeti, kaynak takımı dönme hızının düşürülmesiyle (Henrichs vd. 2004; Tozaki vd. 2006) ve profilli bir kaynak takımının kullanılmasıyla (Addison ve Robelou 2004; Ikegami vd. 2006) elde edilen daha büyük kaynak karıştırma bölgesine bağlanmıştır.

İki plakanın üst üste bindirilip SKNK ile birleştirilmesinde, iki plakanın birleşme arayüzeyinde kanca şeklinde bir geometrik kusurun meydana gelmesi, SKNK kaynaklarının karakteristik bir özelliğidir. Kanca şeklindeki geometrik kusur, kaynak takım piminin altta bulunan plakaya dalması sonucu plaka arayüzünün yukarıya doğru bükülmesinden dolayı oluşur. Metalik malzemelerin yüzeyinde genelde ince bir oksit film vardır. Üst üste bindirilmiş iki plakanın temas eden yüzeylerinde bulunan oksit filmi, kaynak takımının plakalara dalması ve karıştırması sonucunda parçacıklara ayrılır ve parçacıkların kaynak bölgesine dağılması, üst üste bindirilen plakaların kısmen veya tamamen metalürjik yapışmasına neden olur. Kancanın varlığı SKNK kaynaklarının bütünlüğünü azaltır çünkü kaynak dış yüke maruz kaldığında çatlağın başlaması, yayılması ve kopma kancadan olabilir (Sato vd. 2005).



## 2.1. Alüminyum ve Alaşımları

Al ve alaşımları; endüstrilerdeki hızlı gelişmelerle birlikte önemi sürekli artmaktadır ve günümüzde demir esaslı metallere sonra en çok kullanılan metaldir. Al ve alaşımları günlük hayatta en basit ürünlerde ve ileri teknolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Al alaşımlarının birçok farklı alanda tercih edilmesinin nedeni: hafif, özgül dayanımı yüksek, sünek, kolay işlenebilir, soğuk ve sıcak şekillendirilebilir, geri dönüştürülebilir olmasının yanı sıra korozyon direnci, ısı ve elektrik iletkenliği ve ısı ve ışık yansımaları yüksek olmasındandır. Ayrıca, Al alaşımlarının mekanik özelliklerinin yükseltilebilir olması bu alaşımları endüstrilerde vazgeçilmez yapmaktadır (Bilgin 2019). Al üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olduğu için çok yönlü bir mühendislik ve yapı malzemesidir. Alüminyumun yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , çeliğin yoğunluğu  $7,83 \text{ g/cm}^3$  ve bakırın yoğunluğu ise  $8,93 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Bu üç farklı metal yoğunlukları bakımından karşılaştırıldığında, alüminyum, çelik ve bakırdan yaklaşık üç kat daha hafiftir. Alüminyum, çelikle kıyaslandığında mukavemeti daha düşük olmasına rağmen kesit alanı artırılarak aynı mukavemet değerlerine ulaşabilmektedir. Konstrüksiyonlarda alaşımsız çelik yerine Al alaşımlarının kullanılması ağırlığı %50'den fazla azaltmaktadır (ASM Handbook 1990; Tülbentçi 1990; Anık 1991; Cirik 2007; Sarsılmaz 2008; Bekir 2014). Al alaşımları taşımacılık sektöründe en önemli metallere biridir. Son yıllarda, özellikle de enerji tasarruflu yani hafifletmeyle, daha az yakıt yakan ve daha ekonomik taşıtların üretilmesine yönelik girişimlerle birlikte kara, hava ve deniz taşıtlarının üretiminde Al alaşımları daha çok kullanılmaya başlanmıştır. Al alaşımlarının dayanım ve darbe özellikleri artırılmasıyla savunma sanayisinde en önemli metallere bir haline gelmiştir (Kafalı 2011).

Alüminyumun kullanıldığı endüstrilerin önemi göz önünde bulundurulduğunda, alüminyum ülkeler için stratejik bir metal olarak düşünülmesine sebep olmuştur (Tülbentçi 1990; Oğuz 1990; Anık 1991). Al alaşımlarının ambalaj sektöründe kullanımı da ulaşım sektöründe olduğu gibi hızlı bir şekilde artmıştır (Doğan 2006). Al ve alaşımlarının kullanımı ulaştırma, inşaat, kimya, gıda, tarım, elektrik ve elektronik sektörlerinde hemen hemen tüm imalat sanayilerinde giderek artmaktadır (Oğuz 1990). Yüksek saflıktaki alüminyum, alaşımları ile kıyaslandığında, mekanik özellikleri daha düşük, çok daha yumuşak ve plastik özelliktedir. Al hafif olmakla beraber

alaşımlandırılmayla mekanik özellikleri birçok yapı çeliğinin mekanik özelliklerinden daha yüksek olmaktadır (Tımaç 2006; Töre 2012). Saf alüminyumun bazı özellikleri (fiziksel, kimyasal ve mekanik) Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Saf alüminyumun genel özellikleri (ASM Handbook 1990)

Sembol	Al
Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26,98154
Kristal yapısı	YMK
Ergime noktası	660,4°C
Kaynama noktası	2494°C
Yoğunluğu (20°C’de)	2,6989 g/cm <sup>3</sup>
Termal genleşme katsayısı (20°C – 200°C aralığında)	24,5 µ/m·K
Özgül ısısı (25°C’de)	900 J/kg·K
Ergime gizli ısısı	397 kJ/kg
Buharlaşma gizli ısısı	10,78 MJ/kg
Yanma ısısı	31,05 MJ/kg
Isıl iletkenliği (20°C’de)	247 W/m·K
Çekme mukavemeti (Tavlanmış)	40 – 50 MPa*
Akma mukavemeti (Tavlanmış)	15 – 20 MPa*
Uzama	50 – 70%*
Elastikiyet modülü	62 GPa
Kayma modülü (25°C’de )	25 GPa
Sertlik (O ısıl işlem için)	15 HV
Elektrik iletkenliği (2°C’de)	%65 - 66 IACS
Katılaşma esnasında kendini çekme	6,5%
Elektrik direnci	26,2 nΩ·m
Yansıtıcılık (tungsten flamadan gelen beyaz ışık için)	90%

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

Alüminyum içine farklı alaşım elementleri eklenerek mukavemeti yükseltilir. Demir esaslı metallere farklı olarak az miktarlarda alaşım elementi içerirler. Alüminyum alaşımlarında kullanılan başlıca alaşım elementleri; magnezyum, çinko, bakır, silisyum, mangan ve lityumdur. Diğer alaşım elementleri; krom, nikel, titanyum, skandiyum ve titanyumdur. Alaşım elementlerinin alüminyum üzerindeki başlıca etkileri (Mathers 2002; Mazzolani 1995).

**Magnezyum (Mg):** Ergime sıcaklığını düşürür (yaklaşık 451°C) pekleşme özelliğini ve tuzlu suda korozyon direncini yükseltir. Katı çözelti sertleşmesi yapar.

**Çinko (Zn):** Mukavemetini yükseltir ve dökülebilirliği azaltır. Çökelme sertleşmesine imkân sağlar. Çinko miktarının artması soğuma çekmesi ve sıcak çatlamaya sebep olabilir.

**Bakır (Cu):** Mukavemetini yükseltir ve çökelme sertleşmesine imkân sağlar. Ancak, korozyon direncini, kaynak edilebilirliğini ve sünekliğini azaltır. Genel olarak yüksek sıcaklık özelliğinden işlenebilirliği yükseltir.

**Mangan (Mn):** Demir ile beraber eklendiğinde alaşımın dökülebilirliğini yükseltir. Metallerarası bileşiklerin özelliğini değiştirir; alaşımların sünekliğini, tokluğunu yükseltir ve çekmeyi düşürür.

**Silisyum (Si):** Akışkanlığı yükseltir; sıcak çatlamayı engeller, %13' den fazla silisyuma sahip alaşımlar çok zor işlenir.

**Nikel (Ni):** Yüksek çalışma sıcaklıklarında dayanımını yükseltir.

**Titanyum (Ti):** Ortalama tane büyüklüğünü düşürür.

**Zirkonyum (Zr):** Isıl işlemlerde dengeleme elementi olarak görev görür.

**Krom (Cr):** Gerilmeli korozyon direncini yükseltir.

**Lityum (Li):** Çökelme sertleşmesine imkân verir, elastikiyet modülünü ve mukavemeti ciddi şekilde yükseltir ve yoğunluğu azaltır.

**Skandiyum (Sc):** Yaşlandırma sertleşmesi ile dayanımı ciddi şekilde yükseltir. Kaynakta tane inceltmede özellikle etkili bir elementtir.

**Kurşun (Pb) ve Bizmut (Bi):** Talaşlı imalatı kolaylaştırır.

**Demir (Fe):** Artık elementtir. Alaşıma eklenmez, ancak saf alüminyumun mukavemetini yükseltir.

### 2.1.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Al alaşımları üretim yöntemlerine göre dövme ve dökme (döküm) olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Kütük (ignot) halinde dökülen alaşımların çeşitli plastik şekillendirme metotlarıyla (haddeleme, ekstrüzyon vb.) son şeklini almasıyla üretilen alaşımlar dövme Al alaşımlarını temsil eder. Bileşimleri ve özellikleri belirlenip sıvı olarak direk kalıba dökülerek üretilen alaşımlar ise dökme (döküm) Al alaşımlarını temsil eder. Dövme ve dökme Al alaşımları element bileşimlerine göre alt gruplara ayrılmaktadır (Öksüz 1996; Yılmaz 2002). Hem dökme hem de dövme alüminyum alaşımları ısıl işlem yapılabilme özelliğine göre 2 gruba ayrılmaktadır. Isıl işlem yapılabilen alaşımlar sertliklerini

yaşlandırma işlemiyle elde ederken ısıtma işlemi yapılamayan alaşımların mukavemetleri dağılım (dispersiyon), katı eriyik sertleşmesi ve pekleşme sertleştirilmesiyle yükseltilebilmektedir (Binal 2006).

### 2.1.1.1. Dövme Alüminyum Alaşımları

Dövme Al alaşımları dört haneli standart bir sistem ile gösterilmektedir örneğin 1xxx, 2xxx vb. Dört rakamlı sayısal simge ile gösterilen alüminyum alaşımının ilk rakamı (Xxxx), içerdiği ana alaşım elementini belirtmektedir. Saf alüminyum (%99,00) 1XXX serisi ile gösterilir. Son iki rakam (xxXX), alüminyumun saflığını veya alaşımını temsil eder. Baştan ikinci sayı (xXxx), özel olarak denetlenen ilave elementlerin sayısını ifade eder. 2XXX'den 8XXX'e kadar olan Al alaşımlarında ilk rakam alaşım cinsini, ikinci rakam değişimleri (modifikasyon) temsil eder (Oğuz 1990). Dövme Al alaşımları içerisinde bulunan alaşım elementinin oranına göre sınıflandırılırken, ısıtma işlemi yapılabilirlik (yaşlandırma) başka bir değerlendirme özelliğidir. Sınıflara ayrılmış dövme Al alaşımları Tablo 2.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Sınıflandırılmış dövme alüminyum ve alaşımları (Öksüz 1996)

Alüminyum serisi	Ana alaşım elementleri	Isıtma işlemi ile yaşlandırılabilirliği
1000	Saf alüminyum ( $\geq 99,3-99,7$ )	Yaşlandırılmaz
2000	Alüminyum-Bakır	Yaşlandırılabilir
3000	Alüminyum-Mangan	Yaşlandırılmaz
4000	Alüminyum-Silisyum	Yaşlandırılmaz
5000	Alüminyum-Magnezyum	Yaşlandırılmaz
6000	Alüminyum-Magnezyum-Silisyum	Yaşlandırılabilir
7000	Alüminyum-Çinko- Magnezyum	Yaşlandırılabilir
8000	Lityum v.s.	Yaşlandırılabilir
9000	Boş	

### 2.1.1.2. Dökme Alüminyum Alaşımları

Dökme Al alaşımları kum, kokil ve basınçlı döküm metotlarıyla üretilmektedir ve bu alaşımlar yüksek fiziksel, işlenebilirlik ve kaynak edilebilirlik özelliklerine sahiptir. Dökme Al alaşımları yüksek korozyon direncine ve iyi bir mukavemete sahiptirler. Dökme Al alaşımlarının bir kısmına ısıtma işlemi yapılamamaktadır. Bu alaşımlara %5-12 arasında silisyum eklenmesiyle mukavemet, besleme kabiliyeti ve akıcılık artışı için silisyum önemli katkı elementidir (Öksüz 1996). Döküm metoduyla yapılan çok sayıda Al alaşımı

bulunmaktadır. Dökme Al alaşımları üç haneli rakam ve bir ondalık rakamdan meydana gelen bir sistem ile gösterilir ve sınıflandırılırlar. Sınıflandırma işleminde ilk hane (XXXX), alaşıma katılan esas alaşım elementini veya elementlerini belirtir. İkinci ve üçüncü haneler (xXXx), serideki özel alaşımları gösterir. Ondalık kısım alaşımın üretim yöntemini döküm (.0) veya ingot döküm (1 yada 2) olmasını belirtir. Dökme Al alaşımlarının standartlara göre gösterilmesi Tablo 2.3’de sunulmuştur.

Tablo 2.3. Dökme alüminyum alaşımları ve gösterimi (ASM Handbook 1990)

Gösterimi	Alaşım
1000	Al (en az % 99 Al)
2000	Al-Cu
3000	Al-Si (Cu ve/veya Mg’lu)
4000	Al-Si
5000	Al-Mg
6000	Kullanılmayan seri
7000	Al-Zn
8000	Al-Sn

### 2.1.2. Alüminyum ve Alaşımlarında Temperleme

Dövme alüminyum alaşımlarının mukavemetini yükseltmek için ikincil fazın küçük tanecikler şeklinde matris fazına çökmesiyle yaşlandırma (çökme sertleşmesi) işlemi yapılabilmektedir. Çökme sertleşmesi, faz diyagramlarında solvüs eğrisine sahip olan alaşım sistemlerine yapılır. Çökme sertleşmesi, çözündürme işlemi ve su verme işlemiyle yaşlandırma olarak iki adımda yapılır (Kırtay 1997). Al ve alaşımları için üretilen temper gösterim düzeneği malzemelere yapılan ısı veya mekanik işlemlere dayanan bir ifade biçimidir. Temper gösterim alfanumerik şekilde yapılmaktadır. Harfler esas temper işlemi temsil ederken, rakamlar ise esas temperin alt işlemlerini temsil etmektedir (ASM Handbook 1990). Bu çalışmada SKNK birleştirmelerinde kullanılan 7075-T651 Al alaşımına yapılan T651 temper işlemi aşağıda açıklanmıştır.

**T651 temperleme işlemi:** Çözündürme, gerilim gidermek için kontrollü germe ve 120°C’de 24 saat suni yaşlandırma işlemlerini tanımlar.

### 2.1.3. 7xxx Serisi Alüminyum Alaşımları

Yüksek mukavemetli, ısıl işlem yapılabilen ve dövülebilen 7xxx serisi Al alaşımları, alüminyuma %4-8 Zn ve %1-3 Mg ilave edilerek meydana kombinasyonlarla üretilir. Çinko ve magnezyum başlıca alaşım elementlerinin birlikte uygulanması, ısıl işleme sertleşebilme özelliği sağlamaktadır. Çinkonun alaşıma eklenmesi, malzemenin dökülebilirliğini azaltmaktadır. Çinkolu alaşımlarda soğuma çekmesi ve sıcak çatlama meydana gelir. Alaşımlarda çinko oranı %8'den fazla olduğunda gerilmeli korozyon çatlamasına neden olur. Ancak, diğer alaşım elementleriyle bir arada olması durumunda mukavemeti çok yükselmektedir. 7xxx serisi Al alaşımlarının üretilmesinde zorluklar vardır. Ergitme ısıl işleminden hemen sonra şekillendirme işlemi yapılması gerekir ve daha sonra çökelme ısıl işlemi yapılır (Oysu 1996).

7xxx serisi Al alaşımlarına az bir miktarlarda krom ve bakır gibi diğer elementlerin de eklenmesi mukavemeti yükseltir. 7xxx serisi Al alaşımları genelde havacılık endüstrisinde kullanılmaktadır (ASM Handbook 1990).

En yüksek mukavemete sahip Al alaşımları 7xxx serisi Al alaşımları içerisinde bulunmaktadır. 7075 Al alaşımı çok yüksek bir mukavemete sahiptir ve uçak gövdelerinin yapımında kullanılmaktadır. 7xxx seri Al alaşımlarının başlıca kullanım yerleri uçak, roket ve savunma sanayi parçaları ve kamyon kasaları, tavan vinçleri ve vidalı makine parçaları (Öksüz 1996; Çoşkuner 2001).

### 2.1.4. 7075 Alüminyum Alaşımı

7075 Al alaşımının ana alaşım elementleri çinko (Zn), magnezyum (Mg) ve bakır (Cu)'dır. 7075 Al alaşımlarının kimyasal bileşimleri Tablo 2.4'te verilmiştir. 7075 Al alaşımları yüksek mukavemete sahip olmasının yanı sıra yüksek mukavemet/ağırlık oranına da sahip olduğu için uçak yapı malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Töre 2012).

Tablo 2.4. 7075 Al alaşımlarının kimyasal bileşimleri (Cayless 1992)

Gösterimi	Kimyasal Kompozisyon, % ağırlık										Al, En az		
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer Elementler (Tanımlı)	Diğer Elementler (Tanımsız)			
AA UNS ISO R209											Her biri	Top.	
7075 A97075 AlZn5,5MgCu	0,4	0,5	1,2 -	0,3	2,1 - 2,9	0,18 -	5,1 -	0,2	(y)	0,05	0,15		Kalan

(y) Üretici tüketici ve sağlayıcının mutabık olması durumunda ekstrüzyon ve dövme ürünleri için max % 0,25 (Zr + Ti) kullanılabilir.

7075 Al alaşımları hava taşıtlarında kanatta (gerilme etkin) ve kuyrukta (gerilme-basma etkin) kullanılmaktadır. Birçok ticari ve askeri uçaklarda kanat panellerindeki ve alt yatay dengeleyici panellerdeki gövde kirişleri ve gövde omurga kirişleri 7075 Al alaşımlarından ekstrüzyon ile üretilip kullanılmaktadır. Biyel kolları, piston ve motor gövdeleri de hafifliği nedeniyle 7075 Al alaşımlarından yapılmaktadır. 7075 Al alaşımları yüksek ısı ilettiği için 7075 Al alaşımlarından imal edilen pistonlar daha yüksek sıkıştırma yapılabilme imkânı vermektedir. Bunların dışında 7075 Al alaşımları mermi yapımında, silah parçalarında, uçakların iniş takım çalıştırma silindirlerinde ve yapısal parçalarında, yüksek basınç altında çalışan yerlerde kullanılmaktadır (Kaya 2005; Cirik 2007; Sarsılmaz 2008). 7075 Al alaşımlarının sahip olabileceği en yüksek sertlik değeri alaşıma T6 ve T651 ısıtma işlemi uygulanmasıyla elde edilir (Bekir 2014). Alaşımın mukavemetini artırmak için T6 ve T651 ısıtma işlemleri yapılır. T6, çözelti ısıtma işlemi ve suni olarak yaşlandırma işleminden meydana gelir. T65 ise çözelti ısıtma işlemi, kontrollü bir miktarı germe ile gerilim gidermeye tabi tutuma ve suni olarak yaşlandırma işleminden meydana gelir (Töre 12). 7075 Al alaşımının farklı temperleme işlemleri için mukavemet değeri Tablo 2.5’te sunulmuştur (Cayless 1992).

Tablo 2.5. 7075 Al alaşımının temper işlemine göre mekanik özellikleri (Cayless, 1992)

Temper	Çekme Dayanımı MPa	Akma Sınırı MPa	Uzama*%	Brinell Sertliği, HB	Kesme Mukavemeti MPa
O	228	103	17	60	152
T6, T651	572	503	11	150	331
T73	503	434	-	-	-

\*50 mm ya da d çap olmak üzere 4d’de.

Bu çalışmada farklı AZ91 Mg alaşımı plaklarla 7075-T651 Al alaşımı plakaların ve ayrıca aynı 7075-T651 Al alaşımı plakaların SKNK ile kaynak edilebilirliğinin araştırılmasında kullanılan 7075-T651 Al alaşımı plakalar Ankara Bronz şirketinden temin edildi.

## 2.2. Magnezyum Alaşımları

Demir ve alüminyumdan sonra konstrüksiyonda en fazla tercih edilen metal magnezyumdur. Magnezyum  $1,7 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahiptir. Magnezyum alüminyumdan %38 (1,53 kat) ve çelikten ise %78 (5,5 kat) daha hafif olduğu için birçok endüstride kullanılmaktadır. Magnezyum hafiflik anlamında rakibi olan alüminyumla karşılaştırıldığında daha yüksek mukavemet/ağırlık (özgül dayanım) orana sahip olabilmektedir. Konstrüksiyonlarda hafiflik istenildiğinde özgül dayanım ve özgül rijitlik önemli hale gelmektedir. Magnezyum otomotiv endüstrisinde kullanılan önemli malzemelerle karşılaştırıldığında örneğin plastik ile karşılaştırıldığında daha katı bir davranış göstermekte ve geri dönüşümü de yüksektir. Alüminyum ve çelikle karşılaştırıldığında hafifliğiyle ve yeterli mukavemetiyle dikkat çekmektedir. Bu yüzden magnezyum hafifliğin önemli olduğu yerlerde özellikle de hava ve otomotiv araçlarında elektronik cihazların üretiminde ve spor aletlerinde daha fazla kullanılmaktadır (Atalay 2006; Aybaraz ve Buldum 2013; Mert 2013). Saf magnezyumun mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 2.6'da sunulmuştur.

Tablo 2.6. Saf magnezyumun mekanik ve fiziksel özellikleri (Committe 1999)

Özellik	Değer	Özellik	Değer
Ergime noktası	$650 \pm 2^\circ\text{C}$	Isıl genleşme katsayısı (Doğrusal) $20^\circ\text{C}$ 'de ( $\mu\text{m/m}\cdot\text{K}$ )	
Kaynama noktası	$1107 \pm 10^\circ\text{C}$	Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	
Ergime gizli ısı	370 kJ/kg	$20^\circ\text{C}$ 'de	1,738
Buharlaşma gizli ısı	5,25 MJ/kg	$600^\circ\text{C}$ 'de	1,622
Yanma ısı	25,1 MJ/kg	$650^\circ\text{C}$ 'de (katı)	1,65
Elektriksel direnci $20^\circ\text{C}$ 'de	$4,45 \mu\Omega \text{ cm}$	$650^\circ\text{C}$ 'de (sıvı)	1,58
Isıl iletkenliği $25^\circ\text{C}$ 'de	155 W/kg·K	Özgül Isısı ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )	
Akma dayanımı	70-110 MPa	$20^\circ\text{C}$ 'de	1030
Kopma dayanımı	140-190 MPa	$600^\circ\text{C}$ 'de	1178
Brinell Sertliği	35-47 HB	Katılaşma sırasında hacimsel değişim	%4,2
Uzama	2-15%	Soğuma sırasında hacimsel değişim ( $650-20^\circ\text{C}$ )	%5

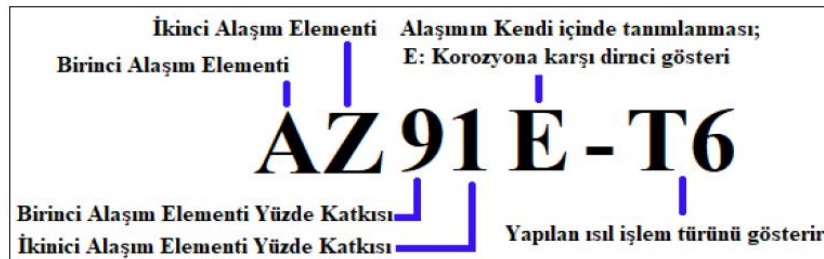
Magnezyum alaşımları düşük yoğunluklara sahip olduğu için ve en hafif yapı metalleri oldukları için kara ve hava araçlarının imalatında hafiflik istenildiğinde öne çıkmaktadırlar. Otomotiv endüstrisi magnezyum alaşımlarını kullanarak daha hafif ve böylece daha az yakıt tüketen ve daha az sera gazı salınımı yapan araçlar imal etmeye amaçlamaktadır. Günümüzde otomotiv endüstrisindeki imalatçılar elektrik, hidrojen ve güneş enerjisi gibi farklı enerji



kaynaklarıyla çalışan araçlar imal etmeyi amaçlamakta ve bu araçların daha verimli çalışabilmesi için hafiflik bugüne göre çok daha önemli bir faktör haline gelmiştir. Otomotiv imalatçıları 3 litre yakıt ile 100 km'lik bir mesafeyi gitmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçlarına ulaşabilmeleri için aracın ağırlığını yaklaşık %30 oranında azaltmaları gerekiyor (Friedrich ve Schumann 2001). Magnezyum alaşımları otomotiv ve havacılık endüstrilerinde etkin olduğu kadar elektronik ve spor endüstrilerinde de etkindir (Kumar ve Wu 2017). Magnezyum alaşımları genel olarak dökme ve dövme magnezyum alaşımları olmak üzere iki gruba ayrılır. Dökme magnezyum alaşımları kendi içerisinde basınçlı, kum ve kokil kalıba dökme magnezyum alaşımları şeklinde ayrılırlar. Dövme magnezyum alaşımlar levha, sac, ekstrüzyon ve dövme olarak alt sınıflara ayrılmaktadır. Bir kısım magnezyum alaşımlarına ısıt işlem yapılırken, diğerlerine yapılmaz (Luo ve Pekguleryuz 1999).

### 2.2.1. Magnezyum Alaşımlarını Tanımlama ve Sınıflandırma

Magnezyum alaşımlarının tanımı ASTM sistemi içinde standart hale getirilmiştir (Tablo 2.7). Her bir magnezyum alaşımı dört kısımdan oluşan bölümlerle tanımlanmaktadır. İki harften oluşan ilk kısım ana alaşım elementlerini göstermektedir (örn: AZ, ZK, AM, v.b.). Tablo 2.8'de harflerin hangi alaşım elementini temsil ettiği gösterilmiştir. Sayılardan meydana gelen ikinci kısım ise sırasıyla birinci ve ikinci ana alaşım elementinin ağırlıkça yüzde değerini gösterir. Üçüncü kısım alaşımı kendi içerisinde tanımlar. Bu bölüm genelde malzemenin saflık oranını göstermektedir. Dördüncü kısımda ise alaşıma yapılmış ısıt işlemi gösterir (Tablo 2.9) (Mert 2013). Şekil 2.1' de magnezyum alaşımlarının standart kodlanması ile ilgili örnek verilmiştir.



Şekil 2.1. Magnezyum alaşımlarının kodlanması

Tablo 2.7. Magnezyum alaşımlarının ASTM sistemine göre, alaşım ve temperleme gösterimlerinin standart dört kısmı (Committe 1999)

Birinci kısım	İkinci kısım	Üçüncü kısım	Dördüncü kısım
İki temel alaşım elementini belirtir	İki ana alaşım elementinin miktarını belirtir	Temel alaşım elementi miktarları aynı olan alaşımlar arasındaki farkı belirtir	Temperleme koşullarını belirtir
Azalan yüzde miktarlarına göre düzenlenmiş iki ana alaşım elementini ifade eden, iki harften meydana gelir	İki ana alaşım elementinin yuvarlatılmış yüzdelerini gösteren iki rakamdan meydana gelir ve birinci kısımdaki gösterim sırasına göre düzenlenir	ASTM standardına göre belirlenmiş bir alfabetik harften oluşur (I ve O hariç) A: Birinci Bileşim B: İkinci Bileşim C: Üçüncü Bileşim D: Yüksek Safılıkta (HP) E: Yüksek Korozyon Direnci	Bir harfi izleyen bir numaradan meydana gelir. (üçüncü kısımdan tire işaretiyle ayrılmıştır)

Tablo 2.8. Magnezyum elementine eklenen alaşım elementlerinin ASTM sistemine göre tanımlanması (ASM Handbook 1998)

Harf	Alaşım elementi	Harf	Alaşım elementi
A	Alüminyum (Al)	M	Mangan (Mn)
C	Bakır (Cu)	N	Nikel (Ni)
E	Nadir Topraklar (RE)	Q	Gümüş (Ag)
F	Demir (Fe)	S	Silisyum (Si)
H	Toryum (Th)	T	Kalay (Sn)
K	Zirkonyum (Zr)	W	İtiryum (Y)
L	Lityum (Li)	Z	Çinko (Zn)

Tablo 2.9. Magnezyum alaşımlarına uygulanan temperleme gösterimleri (ASM Handbook 1998)

Genel Bölümler		Isıl İşlem (T) Alt bölümleri	
F	Üretildiği gibi	T1	Soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış
O	Tavlanmış ve yeniden kristallenmiş (sadece dövme ürünler için)	T2	Tavlanmış (sadece döküm ürünler için)
H	Gerinme sertleştirilmesi yapılmış	T3	Çözelti ısı işlemi uygulanmış ve soğuk işlenmiş
T	F, O veya H den başka kararlı menevişler için ısı işlem görmüş	T4	Çözelti ısı işlemi uygulanmış
W	Çözelti ısı işlemi uygulanmış (kararsız menevişleme)	T5	Soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmış
Gerinme Sertleştirilmesi (H) Alt bölümleri		T6	Çözelti ısı işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış
H1	Sadece gerinme sertleştirilmesi uygulanmış	T7	Çözelti ısı işlemi görmüş ve kararlaştırılmış
H2	Gerinme sertleştirilmesi uygulanmış ve kısmi tavlanmış	T8	Çözelti ısı işlemi görmüş, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış
H3	Gerinme sertleştirilmesi uygulanmış ve kararlaştırılmış	T9	Çözelti ısı işlemi görmüş, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş

### 2.2.2. Magnezyumu Alaşımlarının Başlıca Alaşım Elementleri ve Etkileri

Saf magnezyum düşük mekanik özelliklere sahiptir. Saf magnezyumun mekanik özellikleri artırmak için alaşımlandırılır. Magnezyum sıkı paket hegzagonal yapıya sahip ve tane çapı (atom yarıçapı: 150 pm) olup çok sayıda element ile katı çözünebilirliğini yapabilmektedir. Al, Ca, Be, Fe, Cu, Mn, Si, Ni, Sn, Ag, Zr ve Zn ana alaşım elementleridir. Bunların dışında K, Li, Na alkali ve Ce, Y, Nd, La gibi toprak elementler de alaşım elementi olarak faydalanılmaktadır. Saf magnezyum bu elementlerle alaşımlandırıldığı zaman mekanik özellikleri ve mukavemet/ağırlık oranı yükselmektedir (Koç 2008). Ticari magnezyum alaşımlarında kullanılan elementlerin etkileri kısa bir şekilde aşağıda verilmiştir.

**Alüminyum (Al-A):** Alüminyum, magnezyum alaşımlarında kullanılan en önemli elementlerinden birisidir. Alüminyumun eklenmesi alaşımın setliğini ve çekme mukavemetini artırırken darbe dayanımını ve sünekliğini düşürmektedir. İçerilen alüminyum miktarı, çözünürlük limitinden daha fazla ise, sert ve kırılğan bir Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalik bileşik çökeltisi meydana gelmekte ve bu oluşan sert ve kırılğan Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalik bileşik çökeltisi mekanik özelliklerin oluşumu üzerinde önemli bir rol oynamaktadır (Luo 2004).

**Çinko (Zn-Z):** Çinko da magnezyum alaşımlarında kullanılan en önemli elementlerinden birisidir. Genelde alüminyum ile birlikte alaşımlara eklenir örneğin AZ31. Çinkonun tane sınırlarındaki ötektik miktarı artmasıyla alaşımın katılaşıma sıcaklığı düşmektedir. Bakırın korozyon özellikleri üzerindeki kötü etkisini ortadan kaldırmak için çinko eklenmektedir. Çinko çökelti sertleşmesiyle ortam sıcaklıklarında mukavemeti, sertliği ve ayrıca ergiyiğin akıcılığını yükseltmektedir. Bunun dışında, çinko tane sınırlarına çökmesiyle sıcak yırtılma meydana getirdiği için %2 ile sınırlı kalmaktadır (Kuşdemir 2008; Çiçek 2011).

**Mangan (Mn-M):** Mangan genelde alüminyum gibi diğer elementler ile beraber alaşıma eklenir. Mangan elementi genelde alaşımın korozyon dayanımını yükseltmek amacıyla %0,1-0,5 arasında alaşıma eklenir. Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımlarının akma direncini yükseltir ve tuzlu su korozyon dayanımını artırır. Alaşımın içerdiği en fazla mangan ağırlıkça %1,5-2 dir (Bakke ve Westengen 2003).

**Kalsiyum (Ca-X):** Kalsiyum levhaların haddelenme kabiliyetini iyileştirir ve ağırlıkça %0,3'ten fazla ilave edilmesi alaşımın kaynak kabiliyetini kötü etkiler. Magnezyum

alaşımına %1 oranında eklenmesi sürünme dayanımını artırır ancak sıcak yırtılmaların meydana gelme olasılığını da artırır (Zhang 2000).

**Lityum (Li-L):** Magnezyum alaşımlarının yoğunluğunu azaltan tek alaşım elementi lityumdur. Lityum eklenmesi magnezyum alaşımının mukavemetini düşürür fakat sünekliğini yükseltir (Ünal 2008).

**Silisyum (Si-S):** Silisyum ilavesi, alaşımın yüksek sıcaklıklarda direncini artırır. Eğer alaşım Fe de içeriyorsa silisyum magnezyum alaşımlarının korozyon dayanımını düşürür (Zhang 2000).

**Kalay (Sn-T):** Kalay ilavesi, alaşımın sünekliğini artırmakta ve ayrıca sıcak işlem esnasında alaşımın çatlamasını önlemeye çalışarak işlenebilirliğini artırır (Aizawa ve Song 2006).

**Toryum (Th-H):** Toryum ilavesi, 300°C sıcaklıklara kadar sürünme dayanımını artırır. Dökülebilirliği artırır, mikroporozite olma ihtimalini düşürür ve çinkoyle beraber kullanıldığı zaman kaynaklanabilirliği artırır (Kumar ve Wu 2017).

**Zirkonyum (Zr-K):** Zirkonyum tane inceltici element ve oda sıcaklığında mekanik özellikleri artırır. Toprak elementleri ile beraber kullanıldığı zaman dökülebilme kabiliyetini artırır. Sadece çözünmüş halde bulunan zirkonyum tane inceltmede etkilidir (Easton vd. 2008).

**Kurşun (Pb-P):** Alaşıma eklenen kurşun, iyi bir çözünürlüğe sahip olduğu için yüksek sıcaklıklarda (460°C civarında) %45'e kadar çözünmekte ve faz şeklinde ortaya çıkmamakla birlikte Mg17Al12 metallerarası fazı da inceltir (Ünal 2008).

**Titanyum (Ti):** Alaşıma katılan titanyum, magnezyum içerisinde çok az çözünür ve az da olsa tane inceltmeyi sağlar. Magnezyum alaşımları hızlı katılaşmayla üretilir ise titanyumun çözünürlüğü yükseltilebilir (Zhao vd. 2007).

**Demir (Fe-F):** Alaşıma katılan demir, korozyon dayanımını düşürdüğünden çok zararlıdır ve iyi bir korozyon dayanımı olması için demir miktarı ağırlıkça en fazla %0,005 olarak tespit edilmiştir (Powell vd. 2002).

**Bakır (Cu-C):** Alaşıma ilave edilen bakır, dökülebilirlik kabiliyetini artırır. Magnezyum alaşımları içerisinde bakır miktarı %0,05'in üstüne çıktığında korozyon direncini azaltmaktadır. Ayrıca, alaşıma bakır katıldığında yüksek sıcaklıklarda alaşım daha dayanıklı olmaktadır (Kumar ve Wu 2017).

**Berilyum (Be):** Berilyum, magnezyum alaşımlarında çok az çözünmektedir. Ergimiş metalin yüzeyinde oksidasyonu azaltma amacıyla çok az miktarlarda berilyum eklenir (Kumar ve Wu 2017).

**Stronsiyum (Sr-J):** Mikro gözeneklerin dağılmasında stronsiyum bir rol oynar ve magnezyum alaşımlarında gözenek oluşumunu engelleme yönünde çalışır. Magnezyum alaşımlarına ağırlıkça %2 stronsiyum eklenmesiyle magnezyum alaşımlarının korozyon dayanımı ve mekanik özellikleri yükselmektedir (Fan vd. 2007).

**Nikel (Ni-N):** Nikel çok zararlı bir katkı elementidir. Çok az miktarlarda nikel alaşıma eklense bile alaşımın korozyon dayanımı çok düşer. Alaşımın korozyon dayanımı iyi olması için nikel miktarı ağırlıkça %0,005'ten fazla eklenmemelidir (Kumar ve Wu 2017).

**Nadir Toprak Elementleri (RE-E):** Nadir toprak elementleri magnezyum alaşımlarına ilave edildiğinde magnezyum alaşımlarının yüksek sıcaklık direncini ve sürünme dayanımını artırır. Ayrıca, magnezyum alaşımlarının dökülebilirlik kabiliyetini artırır ve magnezyum alaşımlarında mikro gözeneğin meydana gelmesini azaltır. Nadir toprak elementleri ile üretilen alaşımlar artan sıcaklıklarla kararlı çökelti oluşturur ve bu çökeltielerin tane sınırlarında ve matriste yayılmasıyla sürünme dayanımı artar (Koç 2008). Magnezyum alaşımları içerisinde alaşım elementlerinin oranı ve ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94'e göre standartları Tablo 2.10'da verilmiştir.

Bu çalışmada farklı AZ91 Mg alaşımı plaklarla 7075-T651 Al alaşımı plakaların ve ayrıca aynı AZ91 Mg alaşımı plakaların SKNK ile kaynak edilebilirliğinin araştırılmasında kullanılan AZ91 Mg alaşımı plakalar Vig Metal şirketinden temin edildi.

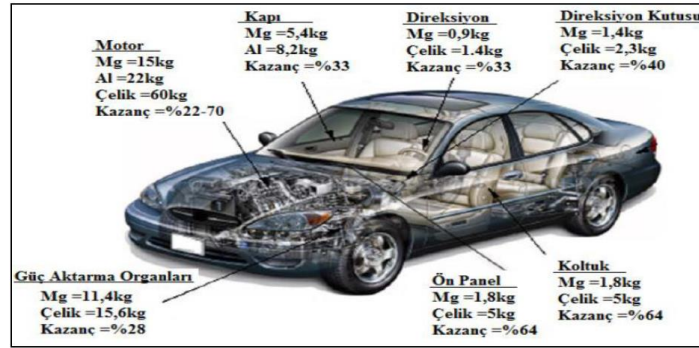
Tablo 2.10. ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94'e göre magnezyum alaşımları standartları ve bileşimleri (ASM Handbook 2009; ASM Handbook 2004)

Alaşım Elementi	Magnezyum Alaşımları								
	AM50	AM60	AS21	AS41	AZ31	AZ80	AZ91	ZE10	ZK60
Al	4,5-5,3	5,6-6,4	1,9-2,5	3,7-4,8	2,5-3,5	7,8-9,2	8,5-9,5	0,05 En fazla	0,05 En fazla
Zn	0,20 En fazla	0,20 En fazla	0,15-0,25	0,10 En fazla	0,7-1,3	0,2-0,8	0,45-0,9	1,0-1,5	4,8-6,2
Mn	0,28-0,5	0,26-0,5	0,20 En az	0,35-0,6	0,20 En az	0,15-0,5	0,17-0,4	0,1 En fazla	0,1 En fazla
Si (En fazla)	0,05 En fazla	0,05 En fazla	0,7-1,2	0,6-1,4	0,05 En fazla	0,10 En fazla	0,05 En fazla	0,05 En fazla	0,05 max.
Fe (En fazla)	0,004	0,004	0,004	0,035	0,005	0,05	0,004	0,03	0,03
Cu (En fazla)	0,008	0,008	0,008	0,015	0,005	0,05	0,025	0,025	0,05
Ni (En fazla)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005	0,005	0,001	0,005	0,005
Be	-	-	-	-	-	0,002	-	0,002	0,002
Ce	-	-	-	-	-	-	-	0,12-0,25	-
Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3-0,9
Diğer	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Mg	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan

### 2.3. Al ve Mg Alaşımlarının Bir Arada Kullanıldığı Yapılar

Al ve Mg alaşımları başta havacılık, otomotiv ve uzay endüstrilerinde olmak üzere elektrik, makine ve kimya endüstrilerinde de kullanımı sürekli artmaktadır ve bu alaşımların birleştirilmesi kaçınılmazdır (Feng 2005; Cao 2006). Günümüzde, otomobillerde ve zırhlı tanklarda (Larsson 2003). havacılık motorları ve elemanlarında (Wang vd. 2008) ve bisiklet yapımında (Kwon 2008) Al ve Mg bir arada kullanılmaktadır. Al ve Mg alaşımlarının güvenilir bir şekilde birleştirilip kullanılması endüstrilerdeki uygulamalarını daha da artıracaktır (Larsson 2003; Shang vd.2012). Ulaşım sektöründeki gelişmelerle birlikte üreticilerin amacı ve karşısına çıkan en önemli zorluk güvenlikten taviz vermeden ağırlığı azaltarak performansı daha yüksek taşıtlar üretmek olmuştur (Yan vd. 2005; Chowdhury vd. 2013)]. Ulaşım sektöründeki üreticilerin diğer bir amacı da 3 litre yakıt ile 100 km gidebilen araçlar üretebilmektir. Bu hedefe ulaşmak için araştırmalar araçların hafifletilmesi ve motor teknolojilerinin geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Hafifliği elde etmek için yapı malzemeleri en önde

gelen Al ve Mg alaşımları elik yerine iyi bir alternatif olduğunu göstermektedir. Gelecekte gövde yapılarının imalatında Al, Mg ve Ti alaşımlarının yaygın bir şekilde kullanılmasıyla hafiflik, yüksek yakıt verimliliği, evre dostu ve geri dönüştürme hedeflerine ulaşılabilir hale gelecektir (Tübitak 2003). Al ve Mg alaşımları hem hafif hem de dayanıklı olma özelliğine sahip olduğu için bu iki farklı alaşımın bir arada kullanılacağı uygulamalar önemli hale gelecektir ve bu da bu alaşımların kullanımını artıracaktır (Mohammadi vd. 2015; Yan vd. 2005). Mg alaşımlarını kullanarak üretilen bazı otomobil parçalarının eskiye kıyasla sağladığı ağırlık tasarrufu Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Magnezyum alaşımlarını kullanarak elde edilen ağırlık kazancı (Kulekci 2008)

Sweeder, bir aracın ağırlığı %10 azaltılmasıyla aşağındaki sonuçların meydana geleceğini iddia etmiştir (Sweeder 2000):

Yakıtta tasarruf: 0,8 lt/100 km

Performans: 0-100 km/h hızlanmada 0,5 s düşüş

Emisyon: %7 daha az gaz salınımı

Güvenlik: %10 daha az kinetik enerji

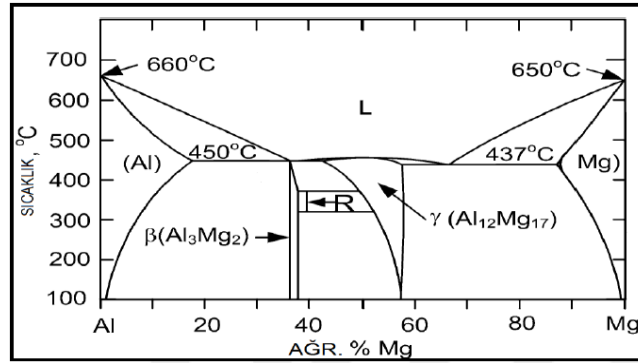
Yük taşıma kapasitesi: 140 kg’lık iyileşme

Frenleme mesafesi: 100-0 km/h yavaşlamada 3 m azalma

Araç içi donanımların artırılması: DVD alar, araç içi eğlence sistemleri gibi.

Al ve Mg alaşımlarının bir arada kullanılarak üretilen yapıların sağlayacağı hafiflik: Üretim ve tasarımıda esnekliğe, mekanik gelişmeye, maliyette azalmaya ve petrol kaynaklarının korunmasına katkı sağlanacaktır (Sato vd. 2004; Venkateswaran ve Reynolds 2012; Chowdhury vd. 2013; Fu vd. 2015; Mohammadi vd. 2015). Bu

avantajların dışında elektrikle çalışan, manevra kabiliyeti yüksek ve daha çok yük taşıyabilen taşıtların imalatı daha çok mümkün olacaktır (Bilgin vd. 2017). TIG (Liu vd. 2007), MIG (Shang vd. 2012) ve lazer kaynağı (Liu vd. 2007; Borrisutthekul vd. 2005) gibi ergitme kaynak yöntemleriyle Al ve Mg alaşımları birleştirildiğinde kaynak bölgesinde oluşan çok miktarda sert, gevrek ve kırılğan intermetalik bileşikler kaynağın mekanik özelliklerini kötüleştirmektedir. Bu yüzden, ergitme kaynak yöntemleriyle bu alaşımları birbirine birleştirmede zor ve özel işlemler gerektirdiği için ergitme kaynak yöntemleri bu alaşımları birbirine birleştirmede pratik olmadığı görülmektedir (Ben-Artzy vd. 2002; Sato vd. 2004; Yan vd. 2005; Zhao vd. 2015). Ergitme kaynak yöntemleriyle bu alaşımların birbirine birleştirilmesinde kaynak bölgesinde oluşan intermetalik bileşikler bu alaşımların bir arada kullanılmasını engellemektedir. Al ve Mg alaşımları birbirine sağlam bir şekilde kaynak edilebilmesiyle gövde yapılarının üretiminde bu alaşımlar bir arada kullanılabilir. Al ve Mg alaşımlarının birbirine kaynağında kaynak bölgesinde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  intermetalik bileşikler oluşmaktadır.  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  intermetalik bileşikler Şekil 2.3'te Al-Mg faz diyagramında görülebilmektedir (Committee 1998; Wang vd. 2008).



Şekil 2.3. Al-Mg faz diyagramı (Committee 1998)

Kaynak ile birleştirilmesi zor veya mümkün olmayan malzemeler günümüzde perçin kullanılarak birleştirilmektedir. Ancak, perçin ile birleştirmede ağırlığın artması, imalatta zorluklar, maliyetin artması, perçin deliğinde gerilme konsantrasyonu ve korozyon oluşması gibi dezavantajlar görülmektedir (Kafalı ve Ay 2014). Al ve Mg alaşımlarının perçinleme ve ergitme kaynak yöntemleri ile birbirine birleştirilmesindeki dezavantajlardan dolayı Al ve Mg alaşımlarının bir arada kullanılarak üretilen yapılar kısıtlı kalmıştır. Bu iki farklı alaşımların birbirine birleştirilmesinde katı hal kaynak yöntemi olan SKNK uygun bir yöntemdir. Al ve Mg alaşımlarının birleştirilmesinde SKNK'nın

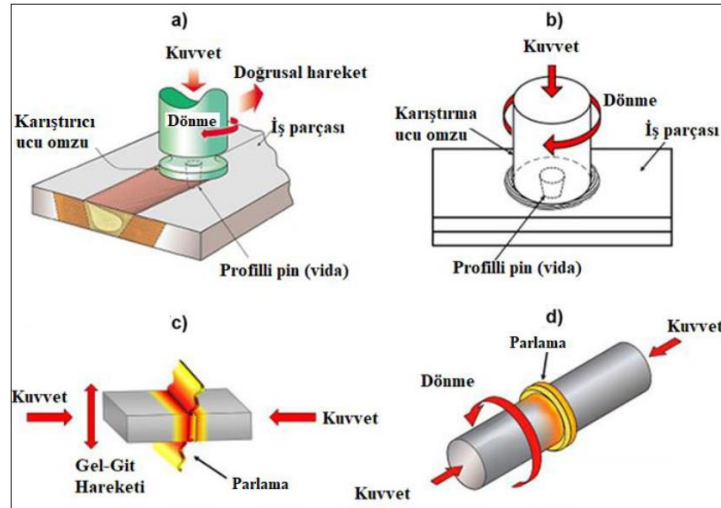


ergitme kaynak yöntemlerine göre avantajları; ısı girdisi daha az olduğu için kaynak bölgesinde intermetalik bileşiklerin ve kusurların oluşması en aza indirgenmesiyle üretilen kaynağın mukavemeti artmaktadır. Perçinleme ile birleştirmede ortaya çıkan ağırlık artışı SKNK ile ortadan kaldırılır. Al ve Mg alaşımlarının SKNK ile birleştirilmesi bu alaşımların kullanımını ve uygulama alanlarını artırabilir (Bilgin vd. 2017).

## 2.4. Sürtünme Kaynak Yöntemleri

Sürtünme ile kaynak, parçaların mekanik sürtünmeyle ortaya çıkan sürtünme ısısı sayesinde katı halde birleştirilmesi yöntemidir. Mekanik hareket ile parçaların sürtünen malzemeleri ısınarak yumuşar. Yumuşayan malzemelere mekanik hareket ve basınç uygulanmasıyla parçalar arasında birleşme gerçekleşir. Sürtünme şekline ve malzeme karışımının meydana gelme şekline göre dört çeşit sürtünme ile kaynak yöntemi vardır (TWI Ltd).

1. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK),
2. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK),
3. Lineer sürtünme kaynağı (LSK)
4. Rotasyon sürtünme kaynağı (RSK).



Şekil 2.4. Sürtünme kaynak yöntemleri; a) sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), b) sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK), c) lineer sürtünme kaynağı (LSK) ve d) rotasyon sürtünme kaynağı (RSK) (TWI Ltd)

SKK ve SKNK'de, tükenmeyen bir karıştırıcı takım kullanılarak mekanik karışım ve sürtünme ısı üretilir. SKK'da kaynak işlemi karıştırıcı takımın döndürülmesiyle başlar ve dönen karıştırıcı takım alın altına getirilip sabitlenmiş iki parçanın temas eden yüzeylerinin bulunduğu hatta daldırılır ve hat boyunca hareket ettirilerek parçalar birleştirilir. Karıştırıcı takımın parçalara dalıp hareket etmesi sırasında ısınıp yumuşayan malzemeler karıştırıcı takım tarafından karıştırılmasıyla katı hal birleşme gerçekleşir (Şekil 2.4a). SKNK, SKK'dan türetilmiş bir katı hal nokta kaynağıdır. SKNK, SKK'da olduğu gibi tükenmeyen bir karıştırıcı takım kullanır. SKNK kaynak işleminde karıştırıcı takım belli bir hızda döndürülür ve kaynak edilmek üzere üst üste konulan parçaların bindirme alanına belli bir derinliğe kadar daldırılır ve orada birkaç saniye bekletildikten sonra karıştırıcı takım parçalardan geri çıkarılmasıyla parçalar tek noktadan birleşmiş olur. SKNK'de SKK'dan farklı olarak karıştırıcı takım parçalara daldıktan sonra yanlara hareket etmez. LSK'da kaynak işlemi bir basınç kuvveti altında bir parçanın yüzü diğer parçanın yüzüne aşağı yukarı doğrusal olarak salındırılmasıyla gerçekleşir. Parçaların salınımla temas eden yüzeyleri arasında sürtünmeyle oluşan ısı malzemelerin yumuşamasına ve basınçla birlikte mekanik olarak karışmasıyla birleşme olur (Şekil 2.4c). RSK işleminde kaynak edilen parçalar genelde yuvarlak ve birbirine göre döndürülerek gerçekleşmesi dışında LSK'ye benzer (Şekil 2.4d).

Sürtünme ile yapılan kaynağın avantajları

- Sürtünme ile yapılan kaynak katı halde gerçekleştiği için ergitme kaynağında görülen katılama çatlama ve gözeneklilik gibi birçok kusur sürtünme ile yapılan kaynakta görülmez.
- Ergitme kaynağı ile kıyaslandığında, sürtünme ile kaynakta düşük sıcaklıklar olduğu için farklı malzemelerin kaynağında metallerarası bileşiklerin oluşması azaltılabilmektedir. Sürtünme kaynak yöntemleriyle çok çeşitli benzer ve benzer olmayan malzemeler kaynak edilebilmektedir.
- Sürtünme ile kaynak yapılamayan 7000 ve 2000 serisi Al alaşımlarının kaynağı yapılabilir.
- Sürtünme ile kaynakta koruyucu gaz, dolgu metaline ve elektrik akımına gerek duyulmaz
- Sürtünme ile kaynak kolayca otomasyona uygun hale getirilebilir
- Sürtünme kaynak yöntemleriyle daha iyi mekanik özelliklere sahip kaynaklar üretilebilir.

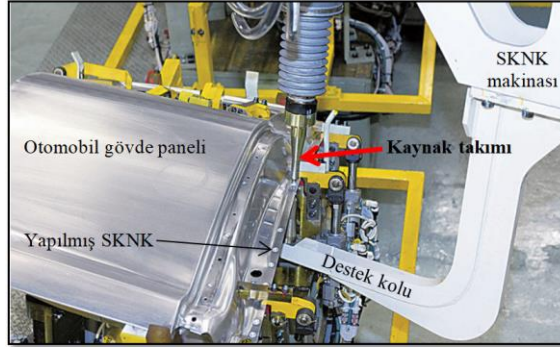


#### **2.4.1.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yönteminin Avantajları**

SKK yöntemi geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında ilk göze çarpan avantajları verimliliği yüksek, ucuz, otomasyona uygun olması ve bakım gerektirmemesidir. Bunların yanı sıra SKK hassas kaynak ağız hazırlanmasına, dolgu teline ve kaynak bölgesinin koruyucu gazlara gerek olmadan her pozisyonda kaynak edebilme kabiliyeti vardır (Özsoy ve Kaluç 2002). SKK'nın metalurjik bakımından üstün yanları; çatlama karşı hassasiyeti yüksek olan alaşımları kolaylıkla kaynak edebilir. Döküm veya ekstrüzyon ile üretilen farklı yapıdaki malzemeler farklı şartlarda SKK ile kaynak edilebilir. SKK katı hal kaynak yöntemi olmasından dolayı, SKK sırasında malzemeler ergitilmeden birleştirildiği için ITAB küçüktür ve malzemelerin metalurjik özellikleri etkilenmez. Ayrıca, SKK'da gözenek ve manyetik üfleme görülmez. Kaynak işleminden sonra oksit tabakasının giderilmesine ihtiyaç yoktur. Ayrıca, kaynak işleminden sonra kaynağa gerilim giderme tavlama uygulanarak yüksek mukavemetli kaynaklar üretilebilir (Özsoy ve Kaluç 2002; Meran ve Bilgin 2013).

#### **2.4.2. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK)**

2003 yılında, Japonya'nın Mazda Motor Corp. ve Kawasaki Heavy Industries, alüminyum gövdelerin imalatında kullanılmak üzere SKK'yı temel alarak, katı hal nokta kaynağı olan SKNK'yi geliştirdi ve SKNK'yi kullanarak, Mazda RX-8 spor otomobilinin alüminyum motor kaputunu ve arka kapılarını imal etmiştir. O zamandan beri SKNK, Toyota Motor Corp., General Motors Co., Ford Motor Co., Fiat Chrysler Automobiles ve PSA Peugeot Citroen tarafından kullanılmaktadır. SKNK ayrıca uçak, kamyon, tren, arazi ekipmanı, alet ve hatta tüketici elektroniği üreticilerinin de ilgisini çekmektedir (Tabasi vd. 2016; Assembly Magazine). SKNK, sac metallerin nokta bindirme kaynağı için bir katı hal kaynak yöntemidir (Chowdhury vd. 2010; Yin vd. 2010).



Şekil 2.6. SKNK ile Mazda otomobili gövde paneli imalatı (Badarinarayan vd. 2007)

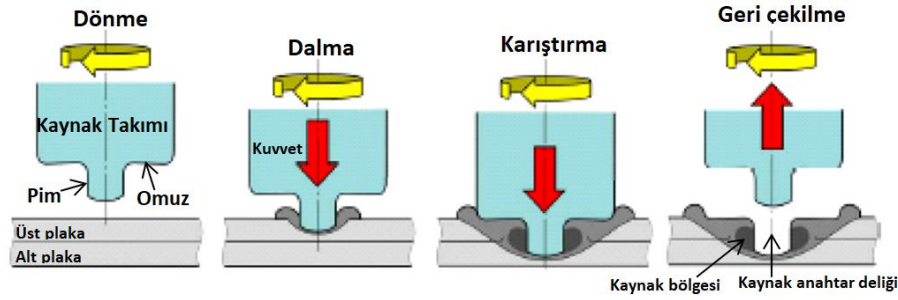


Şekil 2.7. SKNK kullanılarak imal edilmiş Mazda RX-8'in yan kapı paneli ve SKNK kaynaklarının görünüşü (Kaluç ve Taban 2007)



Şekil 2.8. Mazda tarafından SKNK ile üretilmiş alüminyum motor kaputu ve arka kapı ve kaynakların görünümü (Kaluç ve Taban 2007)

SKNK işleminin şematik olarak gösterimi Şekil 2.9'da sunulmuştur. SKNK işleminde kaynaklar bir pim ve omuzdan meydana gelen tükenmeyen bir takım kullanılarak yapılır. Tipik olarak, pim uzunluğu, kaynak edilecek üst üste bindirilen plakaların alt plakasına yeterince nüfuz edecek şekilde seçilir (Babu vd. 2013). SKNK işlemi, üç farklı aşamayla, yani daldırma, karıştırma ve geri çekme ile açıklanabilir. SKNK işlemi takımın belli bir hızda döndürülmesiyle başlar ve daha sonra dönen takım kaynak edilmek üzere üst üste bindirilmiş plakalara yavaşça belli bir hızda ve belli bir derinliğe kadar daldırılır (takım omuzu üst plakaya temas edene kadar ve hatta bir miktar üst plakaya dalana kadar daldırılır). Dönen takım istenilen derinliğe plakalara daldırıldıktan sonra orada alt ve üst plakaların malzemeleri iyice karışması için hareket etmeden dönmeyi sürdürerek birkaç saniye bekletilir (bekleme süresi). Takım bekleme süresinden sonra plakalardan geri çekilmesiyle plakaların birleştirilmesi işlemi tamamlanır. Takım plakalardan geri çekildikten sonra kaynak bölgesinde plakalarda bir delik kalır bu deliğe İngilizcede keyhole Türkçede anahtar deliği (takım piminin parçalarda oluşturduğu delik) denilmektedir (Feng vd. 2004; Gerlich vd. 2005; Gerlich vd. 2005; Lathabai vd. 2006; Baek vd. 2010). Şekil 2.9'da takımın plaklardan geri çekilmesiyle oluşan anahtar deliği görünmektedir. SKNK sırasında plakların birleştirilmesi şu şekilde gerçekleşir; Üst üste bindirilmiş plakalara takım daldırıldığında takımın aşağı yönlü basma kuvveti ve dönme hızı ile takımın plaklara basması ve sürtünmesi sonucu sürtünme ısısı üretilir ve plakların malzemeleri yumuşar, plastik deformasyona uğrayıp akması ve karıştırılmasıyla birleşme oluşur. Özellikle üst plaka ve alt plaka arayüzündeki malzemeler takım pimi tarafından ısıtılıp yumuşaması, plastik deformasyona uğratılıp akması ve karıştırılmasıyla takım pimi çevresinde üst ve alt plaka arayüzeyi arasında katı birleşme gerçekleşir (Wang ve Chen 2009). SKNK işlemi kısaca anlatmak gerekirse; dönen takım, kaynak edilecek üst üste bindirilmiş ve sıkı bir şekilde sabitlenmiş parçalara daldırılır, malzemeleri karıştırılması için bir süre bekletilir ve daha sonra parçalardan geri çekilerek işlem tamamlanır.



Şekil 2.9. SKNK şematik olarak gösterimi (Cao vd. 2015)

SKNK, SKK'dan türetildiği için SKNK'nın çalışma prensibi SKK'ninkine benzer: Takımın dalması, bekleme süresi boyunca malzeme karışımı ve takım reaksiyonu (Kim vd. 2010). SKNK ile SKK arasındaki tek fark SKNK'de takım daldıktan sonra yanlara doğru öteleme hareketi yapmaz (Lathabai ve Mert 2006; Arici vd. 2010). SKK'nın aksine SKNK, kısa döngü süresi nedeniyle kısa süreli bir işlem olarak düşünülebilir (Badarinarayan vd. 2009). SKNK'de takım parçalara dalar, bir süre bekledikten sonra parçalardan geri çekilmesiyle parçalar arasında oluşturduğu nokta kaynağı ile parçalar birleşir. SKK'da ise takım parçalara dalar, bir süre bekler ve daha sonra lineer hareket ederek parçalar arasında kaynak dikişi üretir ve istenilen lineer mesafe kat edildikten sonra takımın lineer hareketi durdurulur ve parçalardan geri çekilerek parçalar arasında oluşan kaynak dikişi ile parçalar birleşir. SKNK, SKK ile aynı avantajlara sahiptir. Örneğin; kullanımı kolay, kaynakta çatlama veya gözeneklilik sorunu yok, üstün kaynak mekanik özellikleri, farklı malzemelerin kaynağına uygunluk, genel yapısal ağırlıkta azalma, düşük artık gerilim, düşük enerji girişi ve daha az atık veya kirlilik geleneksel kaynak yöntemleriyle kıyaslandığında (Babu vd. 2013). Otomotiv endüstrisinde kullanılan geleneksel birleştirme yöntemi EDNK'dır. EDNK çeliklerin kaynağında iyidir, ancak Al veya Mg alaşımlarının kaynağı için uygun değildir (Cole ve Sherman 1995; Thornton vd. 1996; Gean vd. 1999). Çünkü Al ve Mg alaşımlarının EDNK ile kaynağında, kaynak gözenekliliği, elektrot aşınması, yüksek enerji tüketimi, düşük üretim verimliliği ve zayıf kaynak bağlantıları gibi bazı problemler görülmektedir (Gean vd. 1999; Sun vd.2007; Liu vd. 2010; Xiao vd. 2011; Liu vd. 2013). Bodur vd. (2016) 1.6 mm kalınlığında 2024-T3 Al alaşımı plakayı, 1,5 mm kalınlığında 5754-H22 Al alaşımı plakaya SKNK ve EDNK ile birleştirmiş. Bu iki farklı yöntemle üretilen kaynaklar birbiriyle çekme mukavemeti anlamında karşılaştırılmıştır. EDNK ile 20,90 kA akım, 0,08 sabit kaynak süresi ve 1710 N sabit elektrot kuvveti için, maksimum çekme kuvveti

3,5 kN olan kaynak elde edilirken, SKNK ile 1500 dev/dak takım dönme hızı, 2,7 mm takım dalma derinliği ve 10 saniye takım bekleme süresi için maksimum çekme mukavemeti 4,31 kN olan kaynak üretilmiştir. SKNK ile üretilen kaynağın, EDNK ile üretilen kaynaktan daha ince taneli bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Sonuç olarak SKNK ile daha sağlam kaynak üretilmiştir (Bodur vd. 2016).

#### **2.4.2.1. SKNK İşlem Parametrelerinin Etkileri**

SKNK işleminde takım dönme hızı, takım dalma hızı, takım dalma derinliği, takım bekleme süresi, plakaların konumu (altta veya üstte olma durumu) ve kaynak takımı geometrisi ısı üretimini, kaynağın oluşumunu, kaynağın mekanik özellikleri ve kaynağın kalitesini belirleyen en önemli parametrelerdir (Gerlich vd. 2005; Tozaki vd. 2007; Badarinarayan vd. 2009).

##### **2.4.2.1.1 Takım Dönme Hızı**

Takım dönme hızı, SKNK kaynaklarının mekanik özelliklerini etkiler (Gerlich vd. 2007). Takım dönme hızı özellikle de ısı üretiminde çok önemli bir rol oynamaktadır (Tozaki vd. 2007). Takım dönme hızı ısı üretiminde ve malzemenin plastik deformasyona uğramasında önemli bir rol oynar. Bu da kaynağın mikroyapısını ve mukavemetini etkiler (Yang vd. 2010). SKNK kaynaklarının çekme kesme yükünün, takım dönme hızının belirli bir değere kadar artmasıyla arttığını ve daha sonra takım dönme hızının daha da artmasıyla azaldığını belirtilmiştir Lathabai vd. (2006). Al alaşımı levhaların SKNK kaynaklarının çekme kesme yükünün, takım dönme hızının 1000'den 2500 dev/dak'ya yükseltilmesiyle önce arttığı ve daha sonra azaldığı görülmüştür Yuan vd. (2011). Tozaki vd. (2007) ve Merzoug vd. (2010) ayrıca SKNK kaynaklarının çekme kesme yükünün, artan takım dönüş hızı ile azaldığını bulmuşlardır. Genel olarak, daha yüksek dönme hızı, daha düşük mekanik özelliklere sahip SKNK kaynaklarına yol açar. Bu, ısıl işlem görmeyen Al alaşımlarının kaynak bölgesinde tane büyümesine veya ısıl işlem uygulanabilen Al alaşımlarının kaynak bölgesinde çökelti kabalaşmasına neden olan artan takım dönüş hızı ile daha yüksek ısı girdisi ile ilişkilendirilebilir.

Su vd. (2006), 750 dev/dak'ın altındaki takım dönme hızlarını kullanılarak üretilen SKNK kaynaklarının karıştırma bölgelerinde iyi birleşmiş bölgeler oluşmadığı



belirtmiştir. Bu durum, düşük takım dönme hızı düşük ısı girdisi sağlaması nedeniyle takım omzu altındaki malzemenin yetersiz plastik deformasyonuna ve takım pimi etrafında malzemelerin uydun olmayan karıştırma hareketine bağlanmıştır. Tuncel vd. (2016), 6082-T6 Al alaşımı plakalarının SKNK ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin (takım dönme hızı, takım dalma hızı, takım dalma derinliği ve takım bekleme süresi) kaynağın çekme kesme kuvvetine etkisini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre takım dönme hızı artırıldığında kaynağın çekme kesme mukavemeti azalmıştır. Takım dönme hızı 1000 dev/dak'dan 2500 dev/dak'ya artırıldığında kaynağın çekme kesme yükü yaklaşık %19 azaldığı tespit edilmiştir. Zhang vd. (2011), SKNK işleminde yüksek takım dönüş hızı kullanımının tane büyümesine ve kaynak genişliğinin azalmasına neden olduğunu ve bu da kaynak mukavemetini düşürdüğünü bildirmiştir.

#### **2.4.2.1.2. Takım Dalma Hızı**

Takım dalma hızı da SKNK kaynaklarının mekanik özelliklerini etkiler (Malafia vd. 2010). Takım dalma hızı malzemenin akışında çok önemli bir rol oynamaktadır (Tozaki vd. 2007). Tuncel vd. (2016), 6082-T6 Al alaşımı plakalarının SKNK ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin (takım dönme hızı, takım dalma hızı, takım dalma derinliği ve takım bekleme süresi) kaynağın çekme kesme kuvvetine etkisini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre takım dalma hızı artırıldığında kaynağın çekme kesme yükünün azaldığı tespit edilmiştir. Takım dalma hızı 30 mm/dak'dan 50 mm/dak'ya artırıldığında kaynağın çekme kesme kuvveti yaklaşık %30 azaldığı görülmüştür.

#### **2.4.2.1.3. Takım Bekleme Süresi**

Takım bekleme süresi ayrıca SKNK işleminde kaynak mukavemeti üzerinde etkili bir parametredir. Takım bekleme süresi kaynağın mekanik özelliklerini son derede etkiler (Malafia vd. 2010). Takım bekleme süresi ısı üretiminde ve malzemenin plastik deformasyona uğramasında önemli bir rol oynar. Bu da kaynağın mikroyapısını ve mukavemetini etkiler (Yang vd. 2010). Takım bekleme süresi malzemenin akışında çok önemli bir rol oynamaktadır (Tozaki vd.2007). Tran vd. (2009), takım bekleme süresinin kaynak özelliklerine etkisini araştırmıştır. Tran vd. (2009), kaynak mukavemetinin

bekleme süresinin artmasıyla arttığına dikkat çekmiştir. Pathak vd. (2013) ayrıca takım bekleme süresinin 4 saniyeden 12 saniyeye çıkartılmasıyla SKNK kaynağının çekme kesme yükünün artırıldığını tespit etmiştir. Daha yüksek bekleme süresi, daha yüksek sürtünme ısı girdisi üretir, bu da karıştırma sırasında kaynak genişliğinin etkili bir artışına yol açar. Arul vd. (2008) göre, SKNK kaynak çekme kesme yükünün, bekleme süresinin artmasıyla önce arttığını, ardından azaldığını belirtmişlerdir. Tozaki vd. (2007) yüksek mukavemete sahip SKNK kaynakları elde etmek için daha düşük takım dönme hızı seviyeleri ile daha yüksek takım bekleme sürelerinin kombinasyonu ile kaynak arayüzünde yeterli malzeme karışımı sağlamanın hayati önem taşıdığını bildirmiştir. Daha kısa takım bekleme sürelerinin kullanılması, malzemelerin yetersiz plastik deformasyonu ile sonuçlanmakta bu da mukavemeti düşük kaynaklarının üretilmesine neden olmaktadır. Daha düşük takım bekleme sürelerinde üretilen SKNK kaynakları daha düşük yüklerde kopmuştur. Tuncel vd. (2016) 6082-T6 Al alaşımı plakalarının SKNK ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin (takım dönme hızı, takım dalma hızı, takım dalma derinliği ve takım bekleme süresi) kaynağın çekme kesme kuvvetine etkisini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre takım bekleme süresi artırıldığında kaynağın çekme kesme mukavemeti artmıştır. Takım bekleme süresi 2 saniyeden 7 saniyeye artırıldığında kaynağın çekme kesme yükü yaklaşık %44 artığı tespit edilmiştir.

#### **2.4.2.1.4. Takım Dalma Derinliği**

Takım dalma derinliği de SKNK işleminde kaynağın mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir (Gerlich vd. 2007). Takım dalma derinliğinin SKNK kaynaklarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi Merzoug vd. (2010) tarafından araştırılmıştır. SKNK kaynaklarının mekanik özelliklerinin, artan takım dalma derinliği ile arttığını bildirmişlerdir. Ancak, derin bir dalma derinliği, üst plakanın aşırı incelmeye nedeniyle kaynak mukavemetinin azalmasına neden olabileceği bildirilmiştir. Yuan vd. (2011) yüksek dalma derinliğinin kaynak arayüzeyinde oluşan kanca uçunun daha fazla yukarı doğru hareket etmesine neden olduğu, bunun da üst plakanın etkin kalınlığını azaltabileceğini belirtmiştir. Rao vd. (2015) AM60B Mg alaşımı plakaları 6022-T4 Al alaşımı plakalarına SKNK ile birleştirmiştir. Takım dalma derinliğinin artırılmasıyla, üretilen SKNK kaynaklarının mukavemeti artığı görülmüştür.

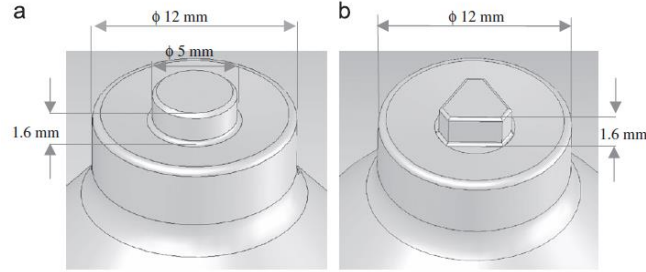
#### 2.4.2.1.5. Plakaların Pozisyonu

Benzer olmayan metallerin SKNK ile birleştirilmesinde hangi plakanın üstte veya hangi plakanın altta olacağı yapılan kaynağın mekanik özelliklerini etkilemektedir. Örneğin; Shen vd. (2015) 6061-T6 Al alaşımı plaka ile AZ31 Mg alaşımı plakayı SKNK ile birleştirmiştir. AZ31 Mg alaşımı plaka, 6061-T6 Al alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarının mukavemeti 6061-T6 Al alaşımı plaka, AZ31 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarınınkinden dikkate değer şekilde daha fazla olduğu görülmüştür. Chowdhury vd. (2013) AZ31B-H24 Mg alaşımı plaka ile 5754-O Al alaşımı plakayı SKNK ile birleştirmiştir. AZ31B-H24 Mg alaşımı plaka, 5754-O Al alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarının çekme mukavemeti ve yorulma dayanımı, 5754-O Al alaşımı plaka AZ31B-H24 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarınınkinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

#### 2.4.2.1.6. Kaynak Takımı Geometrisi

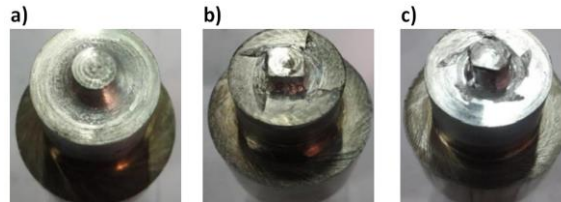
Kaynak takımı geometrisi yani takımın pim ve omuz profili, SKNK işleminde kaynağın mekanik özelliklerini etkileyen çok önemli bir faktördür. Kaynak takımı geometrisi SKNK sırasında, malzemenin plastik deformasyonunda, akışında ve karıştırılmasında çok önemli bir rol oynar. Örneğin; konkav (içbükey) omuzlu takımlarla yapılan SKNK kaynaklarının mukavemeti düz ve konveks (dışbükey) omuzlu takımlarla yapılan SKNK kaynaklarınınkinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Lin vd. 2008; Badarinarayan vd. 2009; Yang vd. 2011). Literatürde SKNK işleminde kullanılan kaynak takımlarının malzemesi genelde H13 takım çeliğidir. Al alaşımlarının SKNK yöntemiyle birleştirilmesinde yüksek mukavemetli kaynaklar elde etmek için üçgen pimli, uzun pimli ve konkav omuzlu takımların kullanılması avantajlı olduğu önerilmiştir (Freeney vd. 2006; Zhang vd. 2011; Yuan vd. 2011). Badarinarayan vd. (2009) 5083 Al alaşımı plakaları SKNK yöntemiyle iki farklı takım (vidalı silindirik pimli takım ve üçgen pimli takım) kullanarak birleştirmiştir. Takımlar Şekil 2.10'da verilmiştir. Üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme mukavemeti vidalı silindirik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarınınkinden oldukça daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun

nedeni üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının kaynak bölgesinin mikroyapısı daha ince taneli bir yapıya sahip olmasına bağlanmıştır.



Şekil 2.10. 5083 Al alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan takımlar: a) vidalı silindirik pimli takım (vida gösterilmemiş) ve b) üçgen pimli takım (Badarinarayan vd. 2009)

Genel olarak, üçgen pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynakları, silindirik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarına kıyasla daha büyük kaynak genişliği ve daha iyi çekme kesme mukavemeti sergilemiştir (Badarinarayan vd. 2009; Badarinarayan vd. 2009). Kumar vd. (2021) 6063 Al alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesini çalışmıştır. SKNK kaynakları üç farklı takım konik, kare ve beşgen şekilli pime sahip takımlar ile yapılmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre en sağlam SKNK kaynakları kare şekilli pime sahip takım kullanılarak üretilmiştir.

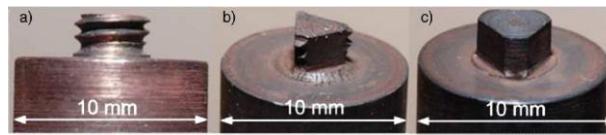


Şekil 2.11. 6063 Al alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan takımlar: a) konik pimli takım, b) kare pimli takım ve c) beşgen pimli takım (kumar vd. 2021)

Rao vd. (2013) AZ31 Mg alaşımı plakalarının SKNK'de pim geometrisi farklı olan iki takım, vidalı silindirik pimli ve 10 derece konkav omuzlu takım ve üçgen pimli ve 10 derece konkav omuzlu takım kullanarak SKNK kaynaklarını yapmıştır. Takımların görünümü Şekil 2.12'de verilmiştir. Üçgen pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarının yorulma dayanımı daha yüksek olduğu bulunmuştur.

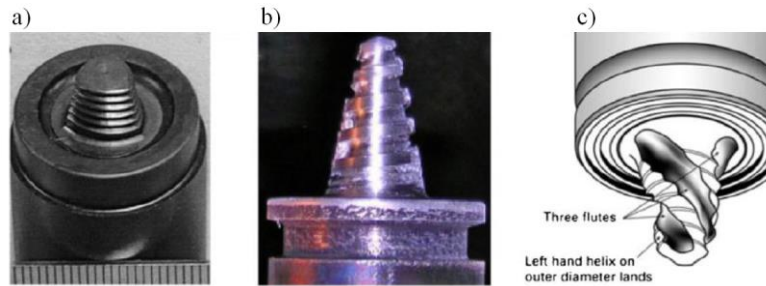


kullanılarak SKNK kaynakları üretilmiştir. Kullanılan kaynak takımları Şekil 2.14'te verilmiştir. Elde edilen test sonuçlarına göre vidalı üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme mukavemeti diğer takımları kullanarak yapılan SKNK kaynaklarınınkinde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Vidasız üçgen pimli takım ile üretilen kaynakların da vidalı silindirik pimli takım ile üretilen kaynaklardan daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür. Vidalı üçgen pimli takım ile üretilen kaynakların kaynak genişliği diğer takımlarla üretilen kaynaklarınınkinden daha büyük olduğu için daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.14. AZ91/AZ31 Mg alaşımlarının SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan takımlar: a) vidalı silindirik pimli takım, b) vidalı üçgen pimli takım ve c) vidasız üçgen pimli takım (Yin vd. 2010)

Şekil 2.15 yaygın olarak tercih edilen diğer karıştırıcı takım pim profillerini göstermektedir. SKNK'de kullanılan karıştırıcı kaynak takımı pim ve omuzdan meydana gelmektedir. Takım pimi kaynak edilecek üst üste bindirilmiş parçalara dönerek dalar ve ısınıp yumuşayan malzemeleri karıştırmasıyla birleştirmeyi sağlar. Takım omuzu ise üst parçaya sürtünerek sürtünme ısısı üretir bu da kaynak bölgesinde daha iyi bir birleşmenin oluşmasına katkı sağlar. Ayrıca, takım piminin alt ve üst parçaların malzemelerini karıştırması sırasında takım omuzu üst parçaya sürtünerek malzemelerin akarak dışarıya çıkmasını engeller ve ayrıca üst parçadan parçalara baskı uygulayarak parçaların sabit durmasını ve basınçla kaynak karıştırma bölgesinin genişlemesini sağlar bunlarda daha kaliteli bir birleşmenin oluşmasına katkı sağlar. Görüldüğü gibi SKNK'de takım pim ve omuz geometrisi çok önemlidir.



Şekil 2.15. Yaygın kullanılan diğer takım pim profilleri: a) vidalı üçgen pimli takım, b) vidalı konik pimli takım ve c) vidalı ve üç oluklu konik pimli takım (Rai vd. 2011)

Karıştırıcı kaynak takımının pim ve omuz gösterimi Şekil 2.16’da verilmiştir.

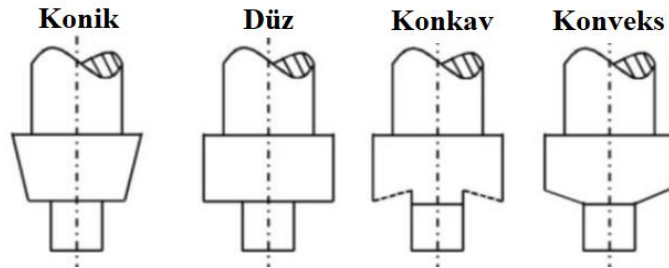


Şekil 2.16. Kaynak takımı pim ve omuz bölgesi gösterimi (Meilinger ve Török 2013)

Şekil 2.17 karıştırıcı takım omuz tasarımlarını göstermektedir. Konkav omuzlu takımlarla yapılan SKNK kaynaklarının statik mukavemeti düz ve konveks omuzlu takımlarla yapılan kaynaklarınkinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Lin vd. 2008; Badarinarayan vd. 2009; Yang vd.2011). Karıştırıcı kaynak takımı kaynak edilecek parçalara daldırıldığında sürtünmeyle ortaya çıkan yüksek sıcaklıklara, aşınmaya ve deformasyona maruz kalmakta bu da yapılan kaynağın kalitesini etkilemektedir. Bu yüzden kaliteli SKNK kaynakları üretmek için karıştırıcı kaynak takımının yüksek sıcaklıklara, aşınmaya ve deformasyona karşı dirençli olması gerekir. Karıştırıcı kaynak takımının malzemesi aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır.

- Yüksek aşınma direncine,
- Yüksek sıcaklık dayanımına,
- Temper direncine, ve
- İyi bir tokluğa (Atak 2019)

Literatürde SKNK işleminde kullanılan kaynak takımlarının malzemesi genelde H13 sıcak iş takım çeliğidir.



Şekil 2.17. Takım omuz tasarımları (Zhang vd. 2012)

#### 2.4.2.2. SKNK Avantajları

SKNK katı hal kaynak yöntemi olduğu için ve kaynak edilecek parçaları ergime sıcaklıkları altında kaynak etmesinden dolayı ergitme kaynak yöntemlerinde görülen

katılma çatlakları, gözenekler, alaşım elementinin buharlaşması, yüksek kalıntı gerilmeler, büyük ısı tesiri altındaki bölge gibi kusurlar genelde SKNK’de görülmez. SKNK’nın diğer avantajları soğutma maddesi, dolgu malzemesi veya kaynak sonrası işlem gerektirmez. Ek olarak, SKNK, diğer nokta kaynak tekniklerine kıyasla daha enerji verimli ve temizdir (Rao vd. 2013). Geleneksel kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında, SKNK işleminin en önemli avantajı metalleri ergitmeden kaynak etmesidir (Tran vd. 2009). SKNK, geleneksel ergitme kaynağına kıyasla düşük ısı girdisi ve mükemmel kaynak mekanik özellikler gibi avantajları nedeniyle, alüminyum ve çelik sacların birleştirilmesinde perçinlenmenin ve EDNK’nın yerini alabilecek potansiyele sahiptir (Mitlin vd. 2006; Briskham vd. 2006; Uematsu ve Tokaji 2009). EDNK ve perçinleme, SKNK ile karşılaştırıldığında enerji tüketimi ve maliyeti daha fazladır. Ayrıca fiziksel, termal ve kimyasal özellikler gibi malzemelerle ilişkili problemler, EDNK ile karşılaştırıldığında SKNK için daha az endişe kaynağıdır (Tozaki vd. 2007; Fujimoto vd. 2008).

#### **2.4.2.3. SKNK Dezavantajları**

SKNK’nın en büyük dezavantajı, kaynak takımı parçalara dalıp geri çekilmesiyle parçalarda oluşan deliktir veya anahtar deliğidir. Bu delik yani anahtar deliği bir kusurdur çünkü gerilme konsantrasyonuna neden olmaktadır. Ayrıca boyama işleminde anahtar deliğinin dibine ulaşmak zor olduğu için anahtar deliğine yağmur suyu girmesiyle anahtar deliğinde korozyon meydana gelebilir. Anahtar deliği korozyonun başlamasına neden olabilir. 2002 yılında yeniden doldurulmalı SKNK (refill FSSW) yöntemi GKSS-GmbH tarafından geliştirilmesiyle anahtar deliği ortadan kaldırılmıştır (Iwashita 2003; Uematsu vd. 2008).

#### **2.4.2.4. SKNK Kaynak Bölgesi Özellikleri**

SKNK’nın enine kesit alanında beş farklı özellik vardır. Bunlar Ana Malzeme (AM), Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB), Termomekanik Etkilenen Bölge (TMEB), Karıştırma Bölgesi (KB) ve Kanca Şekil.’de gösterildiği gibi.

**Ana Malzeme (AM):** Deforme olmamış kaynaklı bölgeden uzak olan malzemedir. AM mikroyapı veya mekanik özellikler açısından ısıdan etkilenmez.

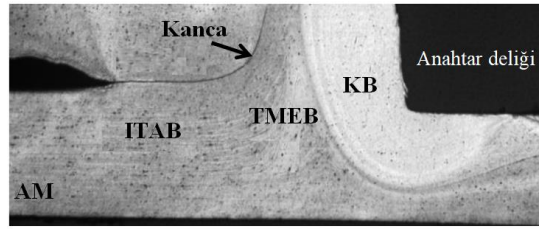


**Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB):** Kaynak merkezine daha yakın olan ve kaynak sırasında mikroyapıyı ve/veya mekanik özelliği değiştiren bir ısıl çevrime maruz kalan bir bölgedir. Bu bölgede plastik deformasyon yoktur.

**Termomekanik Etkilenen Bölge (TMEB):** Kaynak takımı tarafından plastik olarak deforme edilmiş bir bölgedir. Bazı malzemelerde, bu bölgede yeniden kristalleşme olmaksızın önemli plastik gerinim elde etmek mümkündür. Yeniden kristalleşmiş bölge ile TMEB arasında belirgin bir sınır vardır.

**Karıştırma Bölgesi (KB):** Kaynak takımı piminin hemen yakınındaki tamamen yeniden kristalleşmiş bölgedir. Karıştırma bölgesindeki taneler aşağı yukarı eş eksenlidir ve genellikle ana malzemedeki tanelerden daha küçüktür.

Kanca, bindirme konfigürasyonunda SKNK kaynaklarının karakteristik bir özelliğidir ve, bindirme konfigürasyonunda SKNK ile kaynaklanan plakanın arayüzünde oluşan bir geometrik kusurdur (Badarinarayan vd. 2009).



Şekil 2.18. Tipik bir SKNK enine kesit görünümü ve kaynak bölgeleri (Badarinarayan 2009)

SKNK sırasında, üst üste bindirilmiş iki plakaya takım piminin üste plakaya dalıp üst plakayı geçtikten sonra alt plakaya dalmasıyla plakaların arayüzeyinin yukarı doğru bükülmesiyle kanca oluşur (Badarinarayan vd. 2009). Sato vd. (2005), SKNK sırasında üst üste bindirilmiş plakaların arayüzeyindeki oksit tabakasının öncelikle kanca oluşumuna neden olduğu ve kancanın genellikle kaynağın mekanik özelliklerine zararlı olduğunu öne sürmüştür. Badarinarayan vd. (2009), kanca oluşumunda takım pim geometrisinin önemli bir rol oynadığını tespit etmiştir. Kanca, SKNK kaynakların bütünlüğünü azaltan geometrik bir kusuru ifade eder, çünkü kaynak dış yüke maruz kaldığında çatlak kanca boyunca yayılabilir (Sato vd. 2005).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan çalışmada, 2 mm kalınlığında haddelenmiş 7075-T651 Al alaşımı plaka ile 2 mm kalınlığında dökme AZ91 Mg alaşımı plaka iki farklı pozisyonda 7075-T651 Al alaşımı plakayı, AZ91 Mg alaşımı plakanın üstüne bindirip ve AZ91 Mg alaşımı plakayı, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üstüne bindirip birbirine SKNK ile birleştirmede üç farklı takım pim profilinin (konik, üçgen ve silindirik vidalı), üç farklı takım dönme hızının (1000, 1400 ve 1800 dev/dk) ve iki farklı takım bekleme süresinin (3 ve 6 sn) yapılan SKNK kaynaklarının mikroyapısına, sertliğine, çekme kesme mukavemetine ve çekme-basma yorulma ömrüne etkisi belirlenmiştir. Ayrıca, 2 mm kalınlığındaki haddelenmiş 7075-T651 Al alaşımı plakalar birbirine SKNK'de iki farklı takım pim profilinin (konik ve üçgen) ve üç farklı takım dönme hızının (800, 1200 ve 1600) üretilen SKNK kaynaklarının mikro yapısına, sertliğine ve çekme kesme mukavemetine etkisi tespit edilmiştir. Ayrıca, 2 mm kalınlığında dökme AZ91 Mg alaşımı plakalar da birbirine SKNK ile birleştirilmesinde iki farklı takım pim profilinin (konik ve üçgen) ve üç farklı takım dönme hızının (800, 1200 ve 1600) üretilen kaynakların mikroyapısı, sertlik ve çekme kesme mukavemetine etkisi araştırılmıştır.

#### 3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

SKNK deneylerinde Ankara Bronz şirketinden temin edilen 2 mm kalınlığında haddelenmiş 7075-T651 Al alaşımı plaka kullanıldı. 7075-T651 Al alaşımının kimyasal bileşenleri ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de verilmiştir. SKNK deneylerinde kullanılan diğer bir malzeme 2 mm kalınlığında dökme AZ91 Mg alaşımı plaka Vig Metal şirketinden temin edilmiş ve alaşımın kimyasal bileşimleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.1. 7075-T651 Al alaşımının kimyasal bileşenleri

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ti+Zr	Diğerleri	Al
Ağırlık (%)	0,4	0,5	1,2-2	0,3	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,2	0,25	0,15	Kalan

Tablo 3.2. 7075-T651 Al alaşımının mekanik zellikleri

Temperleme işlemi	Akma mukavemeti [MPa]	ekme mukavemeti [MPa]	Uzama [%]	Vickers sertliği [HV0.2]
T651	460	530	11	174

Tablo 3.3. AZ91 Mg alaşımının kimyasal bileşenleri

Element	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ni
Ağırlık (%)	90,3	8,67	0,749	0,228	0,0216	0,0071	0,0012	<0,001

Tablo 3.4. AZ91 Mg alaşımının mekanik özellikleri

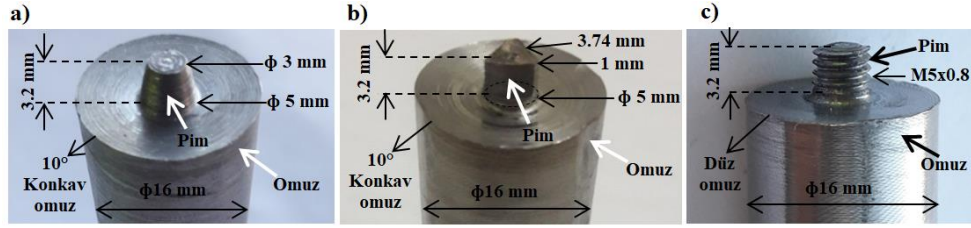
Akma mukavemeti [MPa]	ekme mukavemeti [MPa]	Uzama [%]	Vickers sertliği [HV0.2]
92	161.5	2.5	77

### 3.2. Deneylerde Kullanılan Kaynak Takımları

SKNK kaynakları pim profili konik, gen ve vidalı silindirik olan  farklı kaynak takım kullanılarak yapıldı. Kaynak takımlarının lleri Şekil 3.1’de verilmiştir. Bütün kaynak takımlarının pim boyu aynı ve 3,2 mm’dir, omuz çapı aynı ve 16 mm’dir. Konik ve gen pimli takımlar 10 derece konkav omuza sahip, vidalı silindirik pimli takım ise düz bir omuza sahiptir. Bu kaynak takımları, Birleşik Metal şirketinden temin edilen malzemesi 1.2344 sıcak iş takım çeliği, sertliği 55 HRC, apı 20 mm ve boyu 500 mm olan bir milin kesilip işlenmesiyle elde edilmiştir. Kaynak takımlarının kimyasal bileşenleri Tablo 3.5’te verilmiştir. Kaynak takımları, 20 mm çapında ve 500 mm boyundaki milden işlenip üretildikten sonra, SKNK’de kullanılmadan önce sertliklerini artırmak için GSL-1500X model ısıl işlem fırınında, argon atmosferinde, 950°C’de 1 saat bekletildikten sonra eşme suyu altında soğutulmuştur.

Tablo 3.5. SKNK işleminde kullanılan takımların kimyasal bileşenleri

Malzeme	Element	C	Cr	Mo	V	Diğerleri	Fe
1.2344	Ağırlık (%)	0,40	5,10	1,30	0,95	Si 1,10	Kalan



Şekil 3.1. SKNK kaynaklarının yapılmasında kullanılan takımlar ve ölçüleri: a) konik pimli takım, b) üçgen pimli takım ve c) vidalı silindirik pimli takım

### 3.3. DeneYlerde Kullanılan Parametreler

SKNK kaynaklarının yapımında kullanılan parametreler Tablo 3.6, 3.7 ve 3.8’de verilmiştir. Bu parametreler yapılan literatür araştırması ve deneyler sonucunda seçilmiştir. 7075-T651 Al alaşımı plakayı, AZ91 Mg alaşımı plakasının üzerine bindirip ve AZ91 Mg alaşımı plakayı, 7075-T651 Al alaşımı plakasının üzerine bindirip konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımlar ile 1000, 1400 ve 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK kaynakları sırasıyla Şekil 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, ve 3.9’da verilmiştir. 7075-T651 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip SKNK ile birleştirilmesinde konik ve üçgen pimli takımlar ile 800, 1200 ve 1600 dev/dak takım dönme hızında ve 5 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK kaynakları Şekil 3.10 ve 3.11’de gösterilmiştir.

Tablo 3.6. 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımlarının SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan parametreler

7075-T651 Al alaşımı plaka üstte/AZ91 Mg alaşımı plaka altta olacak şekilde iki farklı alaşımın SKNK kaynakları						
DeneY numarası	Takım	Takım dönme hızı (dev/dak)	Takım dalma hızı (mm/dak)	Takım dalma derinliği (mm)	Takım bekleme süresi (saniye)	Takım geri çekilme hızı (mm/dak)
S1	Konik pimli	1000	10,3	3,8	3	10,3
S2					6	
S3		1400	10,3	3,8	3	
S4					6	
S5		1800	10,3	3,8	3	
S6					6	
S7	Üçgen pimli	1000	10,3	3,8	3	10,3
S8					6	
S9		1400	10,3	3,8	3	
S10					6	
S11		1800	10,3	3,8	3	
S12					6	
S13	Vidalı silindirik pimli	1000	10,3	3,8	3	10,3
S14					6	
S15		1400	10,3	3,8	3	
S16					6	
S17		1800	10,3	3,8	3	
S18					6	

AZ91 Mg alaşımı plaka üstte/7075-T651 Al alaşımı plaka altta olacak şekilde iki farklı alaşımın SKNK kaynakları						
Deney numarası	Takım	Takım dönme hızı (dev/dak)	Takım dalma hızı (mm/dak)	Takım dalma derinliği (mm)	Takım bekleme süresi (saniye)	Takım geri çekilme hızı (mm/dak)
S19	Konik pimli	1000	10,3	3,8	3	10,3
S20					6	
S21					3	
S22		6	1400	10,3	3,8	10,3
S23		3				
S24		6				
S25	Üçgen pimli	1000	10,3	3,8	3	10,3
S26					6	
S27					3	
S28		6	1400	10,3	3,8	10,3
S29		3				
S30		6				
S31	Vidalı silindirik pimli	1000	10,3	3,8	3	10,3
S32					6	
S33					3	
S34		6	1400	10,3	3,8	10,3
S35		3				
S36		6				

Tablo 3.7. 7075-T651 Al alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan parametreler

7075-T651 Al alaşımı plakaların SKNK kaynakları						
Deney numarası	Takım	Takım dönme hızı (dev/dak)	Takım dalma hızı (mm/dak)	Takım dalma derinliği (mm)	Takım bekleme süresi (saniye)	Takım geri çekilme hızı (mm/dak)
S37	Konik pimli	8000	7,3	3,8	5	7,3
S38		1200	7,3	3,8	5	7,3
S39		1600	7,3	3,8	5	7,3
S40	Üçgen pimli	1000	7,3	3,8	5	7,3
S41		1200	7,3	3,8	5	7,3
S42		1600	7,3	3,8	5	7,3

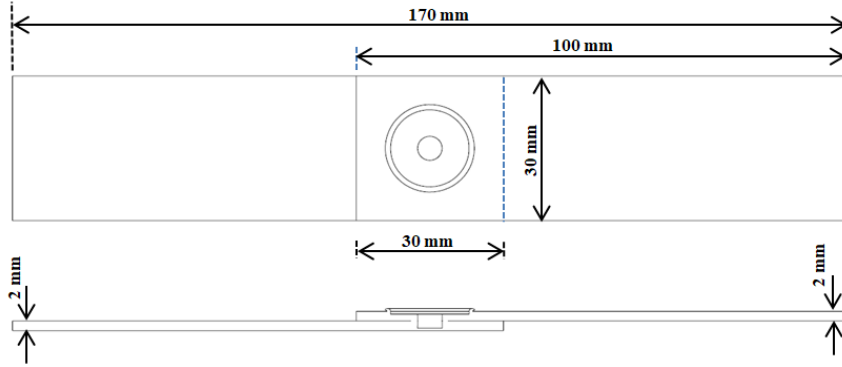
Tablo 3.8. AZ91 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesinde kullanılan parametreler

AZ91 Mg alaşımı plakaların SKNK kaynakları						
Deney numarası	Takım	Takım dönme hızı (dev/dak)	Takım dalma hızı (mm/dak)	Takım dalma derinliği (mm)	Takım bekleme süresi (saniye)	Takım geri çekilme hızı (mm/dak)
S43	Konik pimli	8000	7,3	3,3	3	7,3
S44		1200	7,3	3,3	3	7,3
S45		1600	7,3	3,3	3	7,3
S46	Üçgen pimli	1000	7,3	3,3	3	7,3
S47		1200	7,3	3,3	3	7,3
S48		1600	7,3	3,3	3	7,3

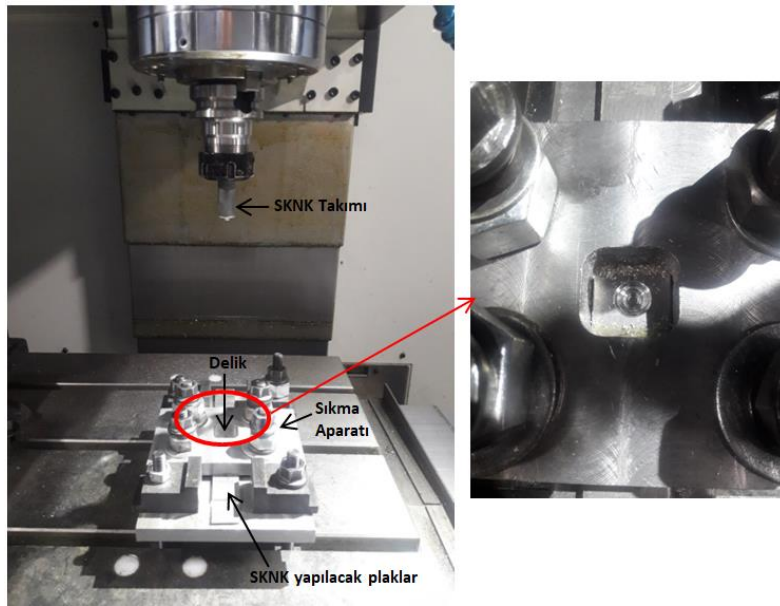
### 3.4. SKNK DeneYleri

Ankara Bronz şirketinden temin edilen 500x500x2 mm boyutlarında haddelenmiş ENAW7075-T651 Al alaşımı plakalar ve Vig Metal şirketinden temin edilen 500x500x2 mm boyutlarında dökme AZ91 Mg alaşımı plakalar SKNK için giyotin metal kesme makinası ile 100x30x2 mm boyutlarında küçük plakalar halinde kesildi. Kesilen 100x30x2 mm boyutlarındaki iki küçük plaka yüzeyleri bir bez ile temizlendikten sonra Şekil 3.2’de görüldüğü gibi 30x30 mm’lik bir alana üst üste bindirildi ve tasarlanmış bir

sıkma aparatı ile Şekil 3.3'te görüldüğü gibi DAHLIH MCV 720/860 model dikey CNC freze 199 tezgahında sıkı bir şekilde sabitlendikten sonra SKNK yapılarak birleştirildi.



Şekil 3.2. Üst üste bindirilip SKNK ile birleştirilen plakalar ve ölçülerinin şematik gösterimi



Şekil 3.3. Üst üste bindirilmiş iki plakanın birleştirilmesi



Şekil 3.4. 7075-T651 alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üstündeyken, konik pimli takım ile yapılan kaynaklar



Şekil 3.5. AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üstündeyken, konik pimli takım ile yapılan kaynaklar





Şekil 3.6. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üstüneyken, üçgen pimli takım ile yapılan kaynaklar



Şekil 3.7. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üstüneyken, üçgen pimli takımla yapılan kaynaklar

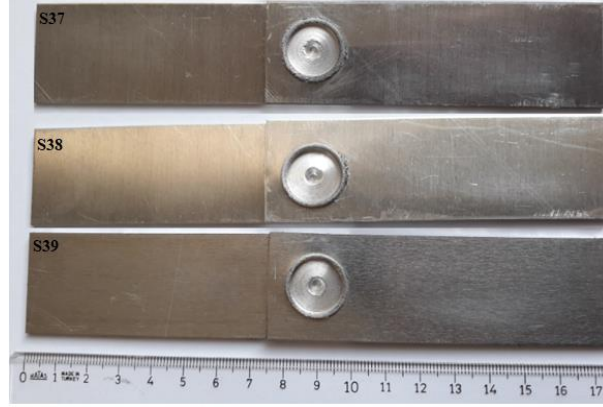




Şekil 3.8. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üstüneyken, vidalı silindirik pimli takım ile yapılan kaynaklar



Şekil 3.9. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üstüneyken vidalı silindirik pimli takım ile yapılan kaynaklar



Şekil 3.10. 7075-T651 Al alaşımı plakaların konik pimli takım ile yapılan kaynaklar



Şekil 3.11. 7075-T651 Al alaşımı plakaların üçgen pimli takım ile yapılan kaynaklar

### 3.5. Metalografik İncelemeler

SKNK kaynakları yapıldıktan sonra kaynakların kaynak bölgesinde oluşan mikroyapıyı ve potansiyel kusurları incelemek için kaynaklı numuneler tam ortadan enine bir el testeresi yardımıyla dikkatli bir şekilde kesildi. Mikroyapı incelemesi için enine kesilen numunelerin kesit alanı sulu zımparalama makinasında sırasıyla 120, 400, 600, 800, 1000 ve 1200'lük zımpara kâğıtları ile zımparadan geçirildikten sonra çuha ve 1 mikronluk pasta ile parlatıldı. Parlatılan numunelerin mikroyapılarını ortaya çıkarmak ve analiz etmek için 7075-T651 Al alaşımı keller çözeltisi (2,5 ml nitrik asit, 1,5 ml hidroklorik asit, 1 ml hidroflorik asit ve 100 ml saf su) ile ve AZ91 Mg alaşımı asetik pikral çözeltisi (10 ml asetik asit (99%), 4,2 gram pikrik asit, 10 ml su ve 70 ml etanol (%95) ile dağlandı. Dağlanan kaynaklı numunelerin mikroyapı fotoğrafları SEM ve EDS analizi bir JEOL JSM6510 marka taramalı elektron mikroskobu kullanılarak elde edildi. Ayrıca,

SKNK kaynaklarının çekme kesme ve çekme-basma yorulma testlerinden sonra kırık yüzeyleri incelemek için de JEOL JSM6510 marka taramalı elektron mikroskobu kullanıldı. Bunun dışında, 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımları arasında yapılan SKNK kaynaklarında oluşan metallerarsı bileşikleri tespit etmek için tam ortadan enine kesilen kaynakların dağlanmış kesit alanından X-ray diffraction patterns (XRD) analizi Rigaku Ultima IV marka bir cihaz kullanılarak yapılmıştır.

### 3.6. Mekanik Testler

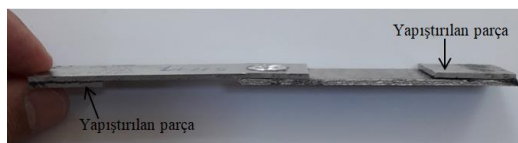
7075-T651 Al alaşımı plakalar ile AZ91 Mg alaşım plakalar arasında yapılan bindirmeli SKNK kaynaklarının mekanik özelliklerini incelemek için Vickers mikrosertlik, çekme kesme ve çekme-basma yorulma testleri yapılmıştır. Ayrıca, 7075-T651 Al alaşımı plakaların birbirine ve AZ91 Mg alaşım plakaların birbirine yapılan bindirmeli SKNK kaynaklarının mekanik özelliklerini incelemek için Vickers mikrosertlik ve çekme kesme testleri yapılmıştır. Çekme kesme ve çekme-basma yorulma testlerinden sonra kaynakların kırılma mekanizmasını tespit etmek için kaynakların kırık yüzeyleri incelenmiştir.

#### 3.6.1. Mikrosertlik Testi

Yapılan SKNK kaynaklarının Vickers mikrosertliği THV-1D model Vickers sertlik test cihazında 0,2 kg yük ve 10 sn bekleme süresi uygulanarak ölçülmüştür.

#### 3.6.2. Çekme Kesme Testi

Üst üste bindirilip SKNK ile birleştirilen plakalara çekme kesme testi ve çekme-basma yorulma testi uygulamadan önce çekme sırasında eğilme momentinin olası olumsuz etkilerinden kaçınmak için SKNK kaynaklı plakaların her iki ucuna 2 mm kalınlığında bir parça ile Şekil 3.12’de görüldüğü gibi yapıştırılmıştır.



Şekil 3.12. SKNK kaynaklı plakaların çekme testi öncesi her iki ucuna bir parça yapıştırma

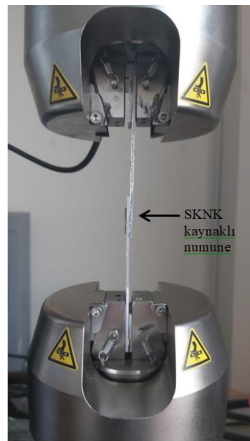
Yapılan SKNK kaynaklarının çekme testi SHIMADZU marka 250 kN üniversal çekme test makinesinde 1 mm/dak çekme hızında yapılmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Çekme kesme testi

### 3.6.3. Çekme-Basma Yorulma Testi

Yapılan SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testi Instron 8874 marka çekme-basma yorulma test makinasında,  $f=10$  hz frekans, 1 milyon sonsuz ömür ve  $R= -1$  yük oranı şartlarında yapılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Çekme-basma yorulma testi

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

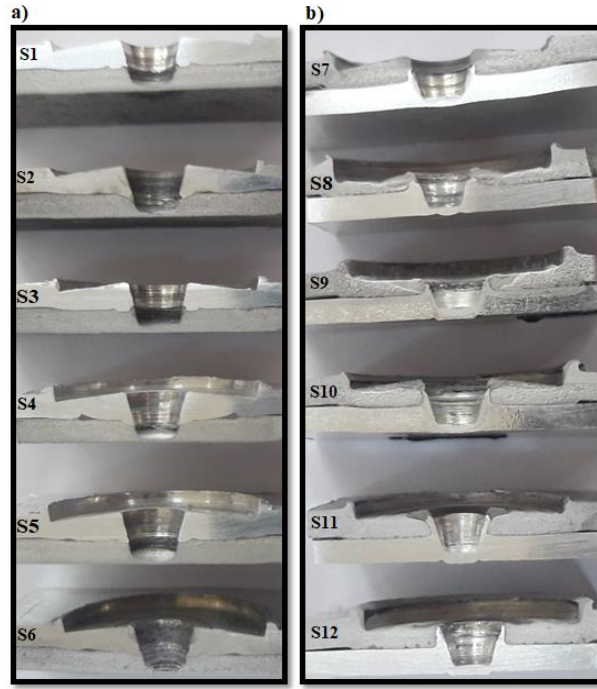
### 4.1. 7075-T651 Al ve AZ91 Mg Alaşımı Plakaların SKNK

Takım dönme hızı ve bekleme süresi SKNK'nın mekanik özelliklerini etkileyen en önemli kaynak parametrelerindedir (Gerlich vd. 2007). Takım dönme hızı, sürtünme ısısının üretilmesinde çok önemli bir rol oynarken, bekleme süresi kaynak arayüzündeki malzeme akışında önemli rol oynamaktadır (Tozaki vd. 2007; Fujimoto vd. 2008). Kaynak parametrelerine ek olarak, kaynak takımı geometrisi malzeme akışında ve karıştırılmasında çok önemli bir rol oynar. Örneğin; konkav omuzlu takım ile üretilen SKNK kaynakları, konveks ve düz omuzlu takımlar ile üretilen SKNK kaynaklarına göre daha yüksek statik dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, genel olarak üçgen şekilli pime sahip takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı silindirik şekilli pime sahip takım ile yapılan SKNK kaynaklarınınkinden daha iyi olduğu görülmüştür (Lin vd. 2008; Badarinarayan vd. 2009; Badarinarayan vd. 2009; Yang vd. 2011). Al ve Mg alaşımlarının optimum fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinden faydalanmak için, Al ve Mg alaşımlarının birleştirilerek kullanılmasına artan bir ilgi vardır. Bu farklı alaşımları birleştirmedeki zorluk, kaynak bölgesinde sert, gevrek ve kırılğan metallerarası bileşiklerin oluşumunda yatmaktadır. Bu farklı alaşımların katı hal kaynağında metallerarası bileşiklerin kaynak bölgesinde oluştuğu ve kaynağın mekanik özelliklerini etkilediği rapor edilmiştir (McLean vd. 2003; Chen vd. 2008; Yamamoto vd. 2009; Lee vd. 2009; Sato vd. 2010; Choi vd. 2011; Chowdhury vd. 2012). Al ve Mg ikili faz diyagramında, alüminyumca zengin faz ve  $Al_3Mg_2$  metallerarası bileşik arasında ve magnezyumca zengin faz ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşik arasında olmak üzere iki ötektik bulunmaktadır. İlk ötektik aşağı yukarı  $450^{\circ}C$  ve ikincisi ise aşağı yukarı  $437^{\circ}C$ 'dedir. Bu iki ötektik sıcaklığı da saf Mg ( $650^{\circ}C$ ) ve saf Al ( $660^{\circ}C$ )'nin ergime sıcaklığının altındır. Isı girdisinin artmasıyla Mg tarafında  $Al_{12}Mg_{17}$  ve Al tarafında ise  $Al_3Mg_2$  metallerarası bileşikler oluşmuştur. Isı girdisinin artmasıyla  $437^{\circ}C$  ötektik sıcaklığında  $Mg+Al_{12}Mg_{17} \rightarrow L$  ve  $450^{\circ}C$  ötektik sıcaklığında ise  $Al+Al_3Mg_2 \rightarrow L$

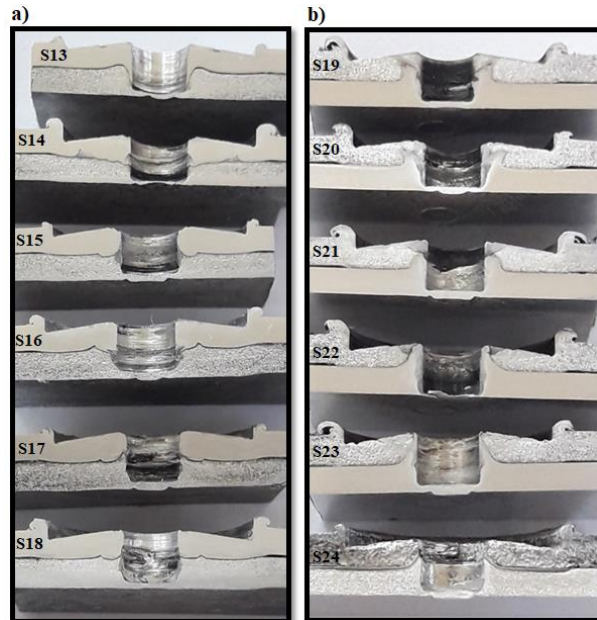
meydana gelmektedir. Bu sıvı meydana gelişine yapısal sıvılaşıma denmektedir (Pepe ve Savage 1970; Konu 2002; Sato vd. 2004; Yang vd. 2008). Al ve Mg alaşımlarının SKNK ve SKK sırasında kaynaklarda yapısal sıvılaşıma meydana geldiği ve kaynak arayüzeyinde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  metallerarası bileşiklerin oluştuğu görülmüştür (McLean vd. 2003; Chen ve Nakata 2008; Yamamoto vd. 2009; Choi vd. 2011; Chowdhury vd. 2012). Bu metallerarası bileşikler, ana malzemeye kıyasla gevrek ve çok daha serttir ve kolay çatlak büyümesi için görev görür. 5083 Al ve AZ31 Mg alaşımları SKNK ile birleştirilmiş ve kaynakta metallerarası bileşiklerden oluşan kalın bir katmanının varlığı rapor edilmiştir. Metallerarası bileşiklerin kalınlığının kaynağın bindirme-kesme mukavemeti üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir, ancak bu Metallerarası bileşiklerin dağılımı kaynak mukavemetini etkilemiştir (Sato vd. 2010). Bunun aksine, 6K21 Al ve AZ31 Mg alaşımlarının SKNK ile birleştirilmesinde, metallerarası bileşiklerin tabakasının artan kalınlığı ile birlikte kaynakların bindirme kesme mukavemeti azalmıştır. Sürtünme ısısı, takım dönüş hızı ve bekleme süresindeki artışla arttığı için, metallerarası bileşiklerde çatlama nedeniyle mukavemette bu azalma gözlenmiştir (Choi vd. 2011). Benzer şekilde, AZ31B Mg ve 5083 Al alaşımlarının SKK'da kaynakta oluşan metallerarası bileşiklerin kaynağın mekanik özelliklerini zayıflattığı görülmüştür (Yamamoto vd. 2009).

7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı plakalar iki farklı pozisyonda 7075-T651 Al alaşımı plakayı, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerine koyup ve AZ91 Mg alaşımı plakayı, 7075-T651 Al plakanın üzerine koyup SKNK ile birleştirilmiştir. 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı plakaların birbirine SKNK ile birleştirilmesinde plaka pozisyonunun, takım pim profilinin (konik, üçgen ve vidalı silindirik pim), takım dönme hızının (1000, 1400 ve 1800 dev/dak) ve takım bekleme süresinin (3 ve 6 sn) yapılan SKNK kaynaklarının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini tespit etmek amaçlanmıştır. Üretilen SKNK kaynaklarının enine kesit alanı ve mikroyapısı aşağıda verilmiştir.

#### 4.1.1. Makro ve Mikroyapı İnclemeleri

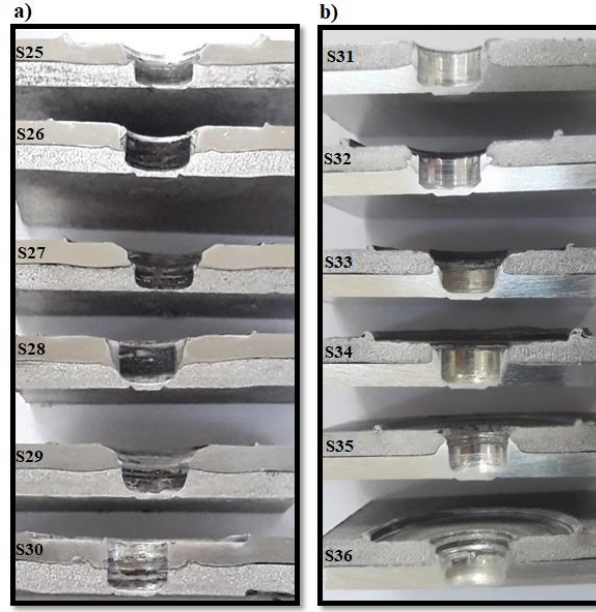


Şekil 4.1. Konik pimli takım ile yapılan kaynakların enine kesit alanları: a) 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üstünde b) AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üstünde yapılan kaynaklar



Şekil 4.2. Üçgen pimli takım ile yapılan kaynakların enine kesit alanları: a) 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üstünde b) AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üstünde yapılan kaynaklar





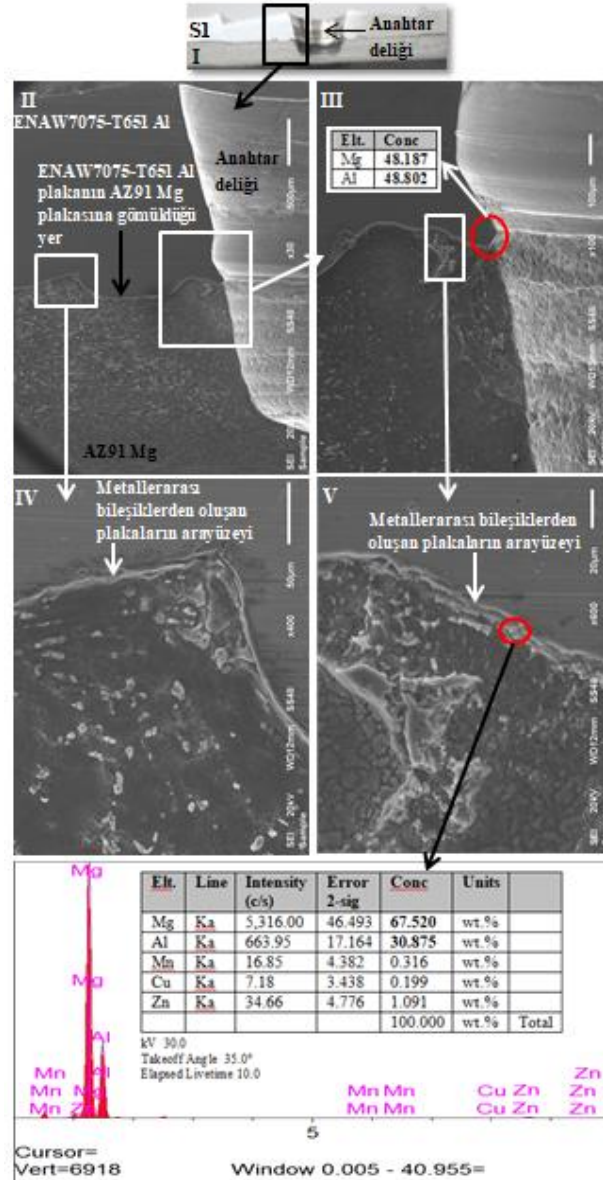
Şekil 4.3. Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan kaynakların enine kesit alanları: a) 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üstünde b) AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üstünde yapılan kaynaklar

Şekil 4.1-2-3 de verilen makro resimlere göre, 7075-T651 Al alaşımı AZ91 Mg alaşımının üstündeyken anahtar deliği çevresinde birleşme sağlanmamış, fakat tersi durumda Al alaşımı Mg alaşımının içerisine difüze olmuştur. Şekil 4.4 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindyeiken konik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Ayrıca plakaların birleştiği yerde elementlerin ağırlıkça yüzdesini tespit etmek için yapılan EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Dikdörtgen içine alınan bölgeler büyütülerek okla gösterildi ve daire içine alınan bölgeler ise EDS analizi yapılan yerleri göstermektedir. Üst üste bindirilen 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı plakalara daldırılan dönen takım piminin ve üst plakaya bir miktar daldırılan dönen takım omuzunun plakalardan geri çekilmesinden sonra takım piminin plakalarda oluşturduğu delik (anahtar deliği) ve takım omuzunun üst plakada oluşturduğu dalma profili Şekil 4.4I'deki kaynak enine kesit alanında görülmektedir. Takım omuzu dönerek üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında üst plakanın malzemesi sürtünme ısısı ile ısınarak yumuşamış ve takım omuzunun aşağı yönlü basma kuvveti ile de yumuşayan malzeme yanlara doğru akarak yığılmıştır. Şekil 4.4II'ye bakıldığında, takımın üst üste bindirilen 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı plakalara dalmasıyla üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakasının alttaki AZ91 Mg alaşımı plakaya takım omuzu



altındaki plakaların arayüzeyinde bir miktar gömüldüğü görülmektedir. Şekil 4.4III'e bakıldığında, dönen takım pimi üst plakaya dalıp daha sonra alt plakaya daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesinin bir kısmı takım pimi çevresinde yukarıya doğru hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışmıştır fakat plakalar arasında tam bir kaynak bölgesi oluşmadığı görülmektedir. Şekil 4.4IV ve V'ye bakıldığında sırasıyla takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde ve takım pimi çevresindeki (anahtar deliği çevresindeki) plakaların arayüzeyinde beyaz bir bölge olduğu görülmekte ve ayrıca takım pimi çevresindeki (anahtar deliği çevresindeki) plakaların arayüzeyindeki beyaz bölgenin daha yoğun ve büyük olduğu görülmektedir. Şekil 4.4V'deki takım pimi çevresindeki (anahtar deliği çevresindeki) plakaların arayüzeyindeki beyaz bölgenin bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %67,520 Mg elementi ve %30,875 Al elementi olduğu tespit edilmiştir ve bu sonuca göre Mg oranı daha fazla olduğu için burada  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşik oluşmuş olabilir. Şekil 4.4III'deki takım piminin hemen çevresindeki (anahtar deliğinin hemen çevresindeki) plakaların arayüzeyindeki bölgenin bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %48,187 Mg ve %48,802 Al olduğu tespit edilmiştir ve burada da  $Al_3Mg_2$  metallerarası bileşik oluşmuş olabilir. Chowdhury vd. (2012) 5754 Al alaşımını, AZ31 Mg alaşımına SKNK ile birleştirmede plakaların arayüzeyinde  $Al_3Mg_2$  and  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşiklerden oluşan tabaka tespit edilmiştir. Sato vd. (2010) AZ31 Mg alaşımını, 5083 Al alaşımına SKNK ile birleştirmede plakaların arayüzeyinde  $Al_3Mg_2$  and  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşikleri tespit etmiştir. Al ve Mg alaşımlarının SKNK sırasında yapısal sıvılaşmadan dolayı  $Al_3Mg_2$  and  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşiklerin olduğu bildirilmiştir (Sato vd. 2004; Chen 2008). Gerlich vd. (2005) 6111 Al alaşımını, AZ91 Mg alaşımına SKNK ile birleştirmede takımın çevresindeki en yüksek sıcaklığın hızlı bir şekilde  $\alpha$ -Mg ve 437°C'lik  $Al_{12}Mg_{17}$  ötektik sıcaklığına ulaştığını bildirmiştir. Al-Mg faz diyagramına göre bu sıcaklıkta ötektik mikroyapı oluşmaktadır. Al-Mg faz diyagramında iki tane ötektik bulunmaktadır. Birinci ötektik Al zengin faz ile  $Al_3Mg_2$  metallerarası bileşiği arasında 450°C civarındayken ikinci ötektik ise Mg zengin faz ile  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşiği arasında 437°C civarındadır (Pepe ve Savage 1970; Kou 2002; Sato vd. 2004; Yang vd. 2008; Yang vd. 2008). EDS sonuçlarına ve literatüre dayanarak dönen takım piminin üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalmasıyla ortaya çıkan sürtünme ısı ve

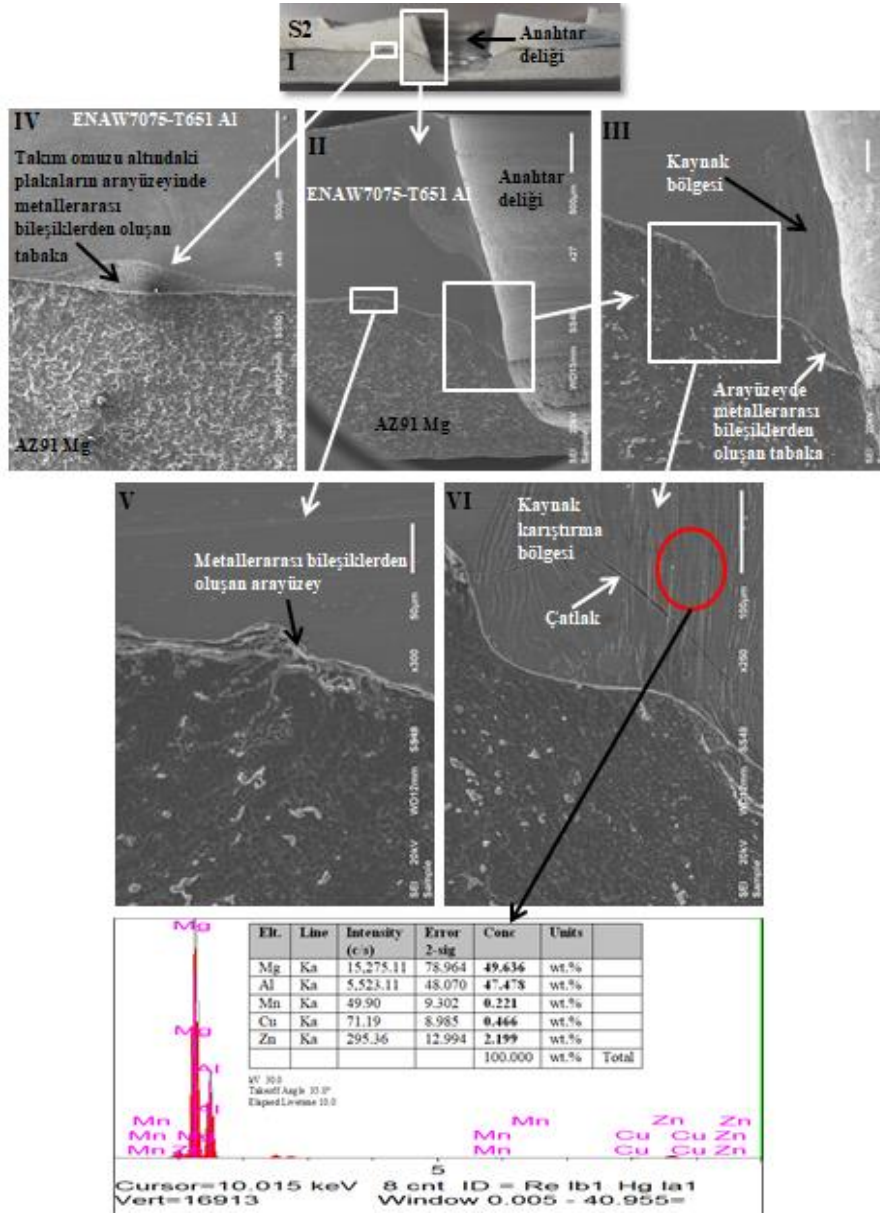
takım piminin plakalara uyguladığı basma basıncı ile ve ayrıca dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısısı ile takım omuzu altındaki ve takım pimi etrafındaki plakaların arayüzeyinde oluşan beyaz bölgelerin  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  metallererası bileşiklerden oluşan tabakalar olduğu söylenebilir. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeki konik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK’de, plakalar sadece takım omuzu altındaki ve takım pimi çevresindeki plakaların arayüzeyinde oluşan metallererası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) ile birleşmiştir.



Şekil 4.4. Konik pimli takım ile yapılan S1 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.5 de gösterilen S2 numunesi konik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan kaynağın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.5III'e bakıldığında, dönen takım pimi üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalıp daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayıp aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesinin bir kısmı takım pimi çevresinde yukarıya doğru hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi çevresinde karışarak bir kaynak bölgesi oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.5VI'ya bakıldığında kaynak bölgesinde çatlakların olduğu ve kaynak bölgesinin bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %49,636 Mg elementi ve %47,478 Al elementi olduğu görülmektedir. EDS analiz sonucuna göre kaynak bölgesi 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımlarının karışımından meydana gelmiş ve Mg oranı daha fazla olduğu için burada  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerearası bileşik oluşmuş olabilir. Şekil 4.5V'ye bakıldığında takım pimi çevresindeki plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan beyaz bir bölge oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan geniş beyaz bir tabaka oluştuğu Şekil 4.5IV'te görülmektedir. Şekil 4.4'te 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'den farklı olarak Şekil 4.5IV'te görüldüğü gibi takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan bölge çok daha büyük ve ayrıca Şekil 4.5III'de görüldüğü gibi takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) kısmen bir kaynak bölgesi oluşmuştur. Dönen takım piminin üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalmasıyla ortaya çıkan sürtünme ısısı ve takım piminin plakalara uyguladığı basma basıncı ile ve ayrıca dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısısı ile takım omuzu altındaki ve takım pimi etrafındaki plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakalar (beyaz bölgeler) meydana gelmiştir. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'de, plakalar takım omuzu altındaki ve takım pimi çevresindeki plakaların arayüzeyinde oluşan

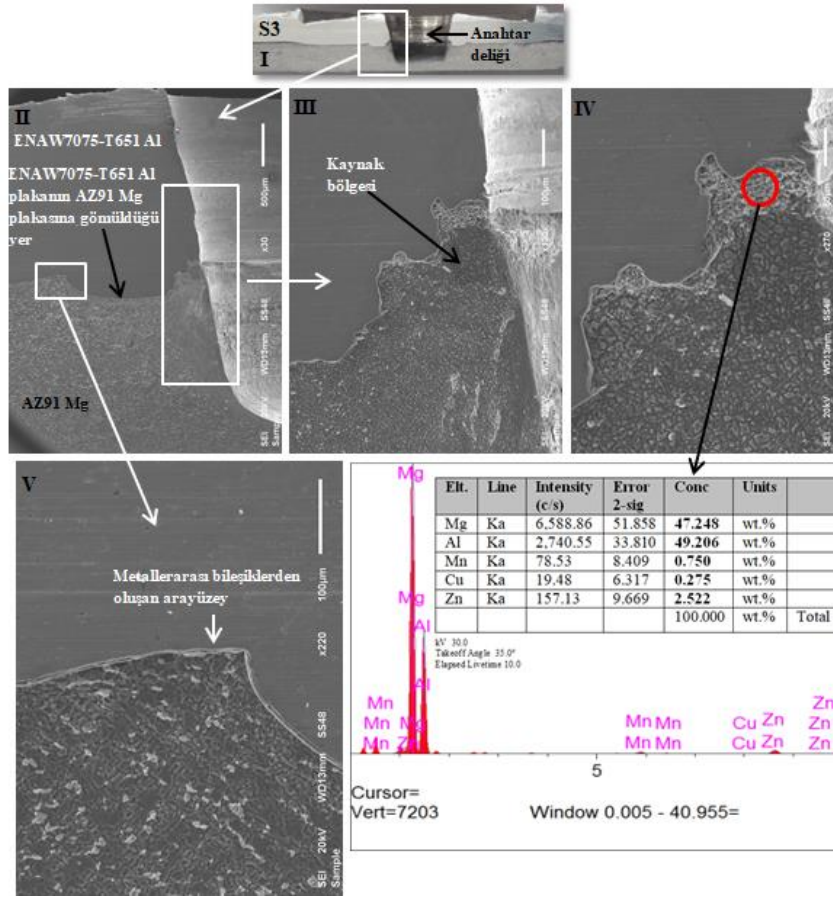
metallerarası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) ve takım pimi çevresinde oluşan kısmen bir kaynak bölgesi ile birleşmiştir.



Şekil 4.5. Konik pimli takım ile yapılan S2 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.6 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.6II'ye bakıldığında, takımın üst üste bindirilen plakalara dalmasıyla üste bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakasının alttaki AZ91 Mg alaşımı plakaya takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde bir miktar gömüldüğü görülmektedir. Şekil 4.6III'e bakıldığında,

dönen takım pimi önce 7075-T651 Al alaşımı üst plakaya dalıp daha sonra AZ91 Mg alaşımı alt plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayıp aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesi yukarıya ve yanlara doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışarak kısmen bir kaynak bölgesi oluşturduğu görülmektedir. Şekil 4.6IV ve V'ye bakıldığında sırasıyla anahtar deliği çevresindeki plakaların arayüzeyinde ve takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde beyaz bölgeler oluştuğu görülmekte ve ayrıca takım pimi çevresindeki plakaların arayüzeyindeki beyaz bölgelerin daha yoğun ve büyük olduğu görülmektedir. Şekil 6IV'deki takım pimi çevresindeki plakaların arayüzeyindeki beyaz bölgenin bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %47,248 Mg elementi ve %49,206 Al elementi olduğu tespit edilmiştir ve bu sonuca göre Al oranı fazla olduğu için burada  $Al_3Mg_2$  metallererası bileşik oluşmuş olabilir. Dönen takım piminin üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalmasıyla ortaya çıkan sürtünme ısısı ve takım piminin aşağıya doğru basma kuvveti ile ve ayrıca dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısısı ile takım omuzu altındaki ve takım pimi etrafındaki plakaların arayüzeyinde metallererası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakalar (beyaz bölgeler) meydana gelmiştir. Şekil 4.5'te 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK ile karşılaştırıldığında yüksek 1400 dev/dak takım dönme hızı daha fazla sürtünme ısısı ürettiğinden dolayı herhalde takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesinde daha 7075-T651 Al alaşımı ve AZ91 Mg alaşımı Şekil 4.6III'de görüldüğü gibi daha iyi karışmış ve çatlak yoktur. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım kullanılarak 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'de, plakalar arasındaki birleşme takım omuzu altındaki ve takım pimi çevresindeki plakaların arayüzeyinde oluşan metallererası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) ve takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) oluşan bir kaynak bölgesi ile gerçekleşmiştir.



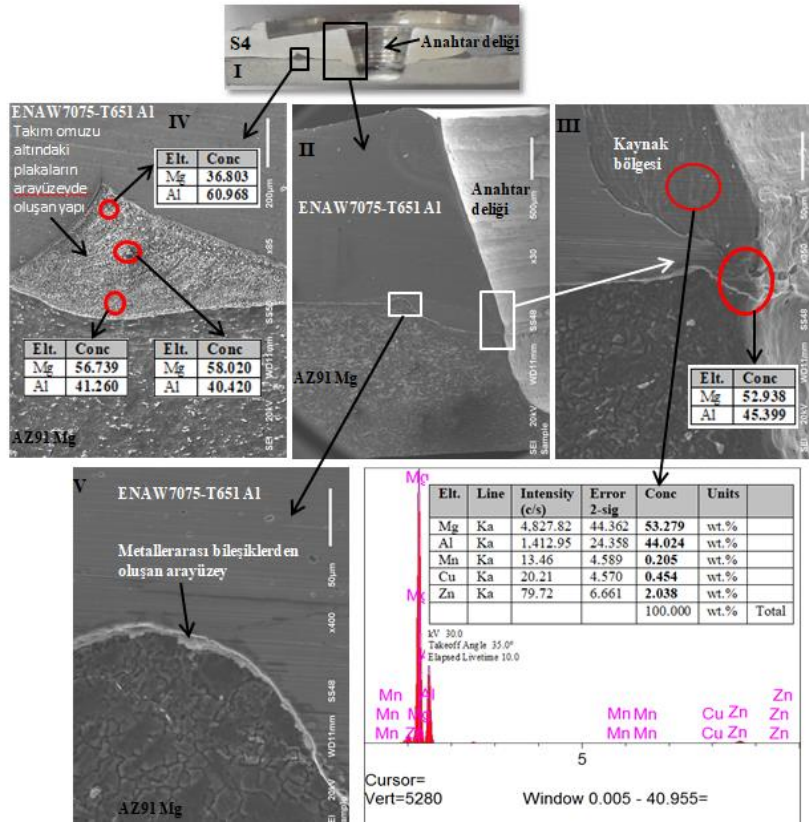
Şekil 4.6. Konik pimli takım ile yapılan S3 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.7 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.7IV ve V'ye bakıldığında sırasıyla takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde ve takım pimi çevresindeki plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan beyaz bölgeler olduğu görülmekte ve ayrıca takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyindeki beyaz bölgenin daha yoğun ve büyük olduğu görülmektedir. Dönen takım piminin üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalmasıyla ortaya çıkan sürtünme ısı ve takım piminin plakalara uyguladığı basma basıncı ile ve ayrıca dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile takım omuzu altındaki ve takım pimi etrafındaki plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakalar (beyaz bölgeler) meydana gelmiştir. Şekil 4.7III'e

bakıldığında, dönen takım pimi 7075-T651 Al alaşımı üst plakaya dalıp daha sonra AZ91 Mg alaşımı alt plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayıp aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesi yukarıya ve yanlara doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışarak bir kaynak bölgesi oluşturduğu görülmektedir. Şekil 4.7III'de kaynak bölgesinin bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %53,279 Mg elementi ve %44,024 Al elementi olduğu görülmektedir. EDS analiz sonucuna göre kaynak bölgesi 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımlarının karışımından meydana gelmiş ve Mg oranı daha fazla olduğu için burada  $Al_{12}Mg_{17}$  metallererası bileşik oluşmuş olabilir. Ayrıca, Şekil 4.7III'de takım piminin hemen çevresindeki (anahtar deliğinin hemen çevresindeki) kaynak bölgesinden elde edilen EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %52,938 Mg elementi ve %45,399 Al elementi olduğu görülmektedir. Şekil 4.7IV'de takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallererası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan geniş ve büyük bir beyaz bölge oluşmuştur. Bu bölgeden alınan EDS analiz sonuçlarına göre AZ91 Mg alaşımına yakın yerlerde Mg, Al'ye göre daha fazla ve 7075-T651 Al alaşımına yaklaştıkça Al oranı Mg oranından fazla olmuştur. Mg oranının Al'ye göre fazla olduğu yerlerde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve Al oranının Mg'ye göre fazla olduğu yerlerde ise  $Al_3Mg_2$  metallererası bileşikler oluşmuştur denilebilir.

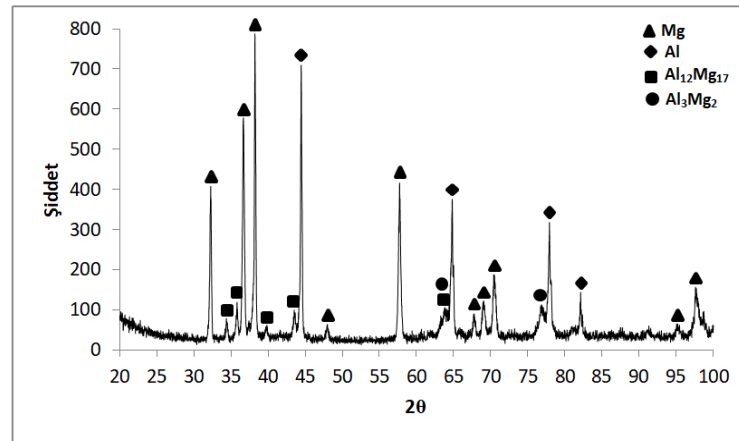
7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynakları arasında 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallererası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan bölge en büyüktür. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'de, plakalar arasındaki birleşme takım omuzu altındaki ve takım pimi çevresindeki plakaların arayüzeyinde oluşan metallererası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) ve takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) oluşan bir kaynak bölgesi ile gerçekleşmiştir.





Şekil 4.7. Konik pimli takım ile yapılan S4 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

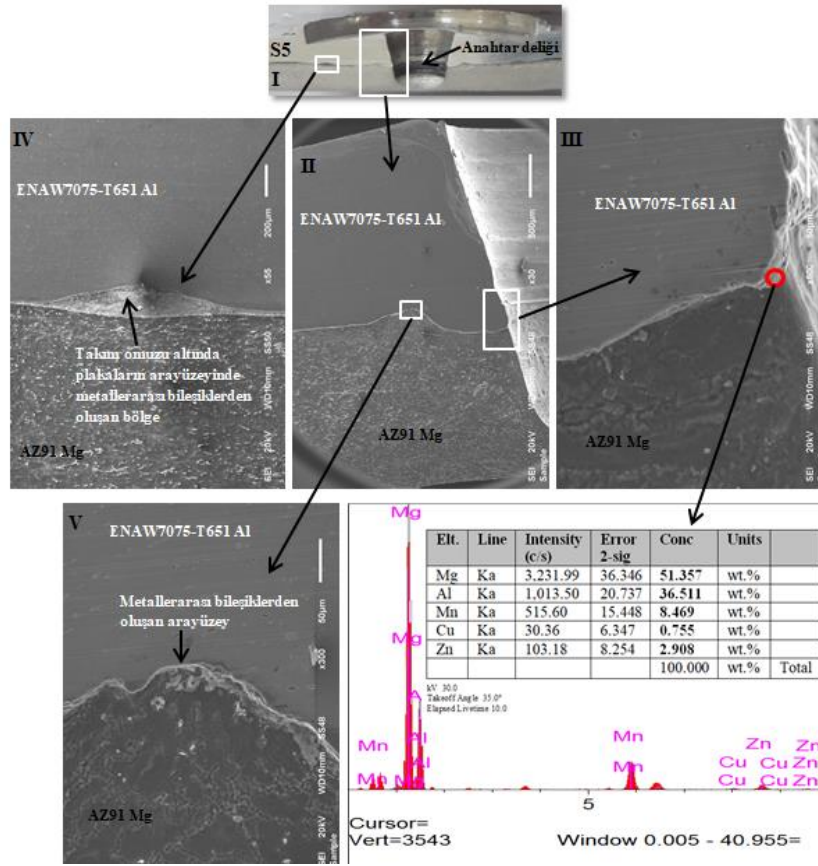
Şekil 4.8 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanından elde edilen XRD sonucunu göstermektedir. Şekil 4.8'den görüleceği üzere  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  metallerarası bileşikler kaynaktaki oluşmuştur.



Şekil 4.8. Konik pimli takım ile yapılan S4 kaynağının enine kesit alanından elde edilen XRD sonucu



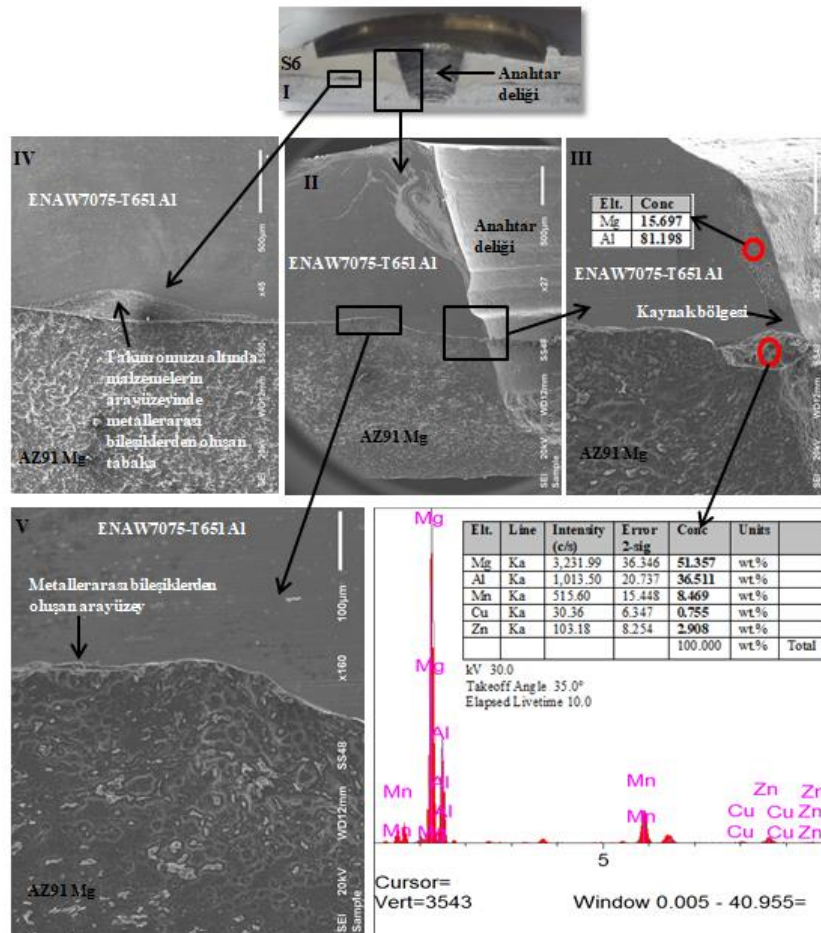
Şekil 4.9 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.9IV ve V'ye bakıldığında sırasıyla takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde ve takım pimi çevresindeki plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan beyaz bölgeler oluştuğu görülmekte ve ayrıca takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyindeki beyaz bölgenin daha büyük olduğu görülmektedir. Dönen takım piminin üst üste bindirilen 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalmasıyla ortaya çıkan sürtünme ısı ve takım piminin plakalara uyguladığı basma basıncı ile ve ayrıca dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile takım omuzu altındaki ve takım pimi etrafındaki plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakalar (beyaz bölgeler) meydana gelmiştir. Şekil 4.9II'e bakıldığında, dönen takım pimi 7075-T651 Al alaşımı üst plakaya dalıp daha sonra AZ91 Mg alaşımı alt plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayıp aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesi görülmektedir. Şekil 4.9III'e bakıldığında, dönen takım pimi üst plakaya dalıp daha sonra alt plakaya daldığında üst ve alt plaka malzemelerinin takım pimi etrafında karışarak bir kaynak bölgesi oluşmadığı görülmektedir. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'de, plakalar arasındaki birleşme sadece takım omuzu altındaki ve anahtar deliği çevresindeki plakaların arayüzeyinde oluşan metallerarası bileşikler ile gerçekleşmiştir.



Şekil 4.9. Konik pimli takım ile yapılan S5 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.10 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.10IV ve V'ye bakıldığında sırasıyla takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde ve takım pimi çevresindeki plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan beyaz bölgeler oluştuğu ve ayrıca takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyindeki beyaz bölgenin daha büyük olduğu görülmektedir. Dönen takım piminin üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalmasıyla ortaya çıkan sürtünme ısı ve takım piminin plakalara uyguladığı basma basıncı ile ve ayrıca dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile takım omuzu altındaki ve takım pimi etrafındaki plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakalar (beyaz bölgeler) meydana gelmiştir. Şekil 4.10III'e bakıldığında, dönen takım pimi 7075-T651 Al alaşımı üst plakaya dalıp daha sonra AZ91 Mg alaşımı alt

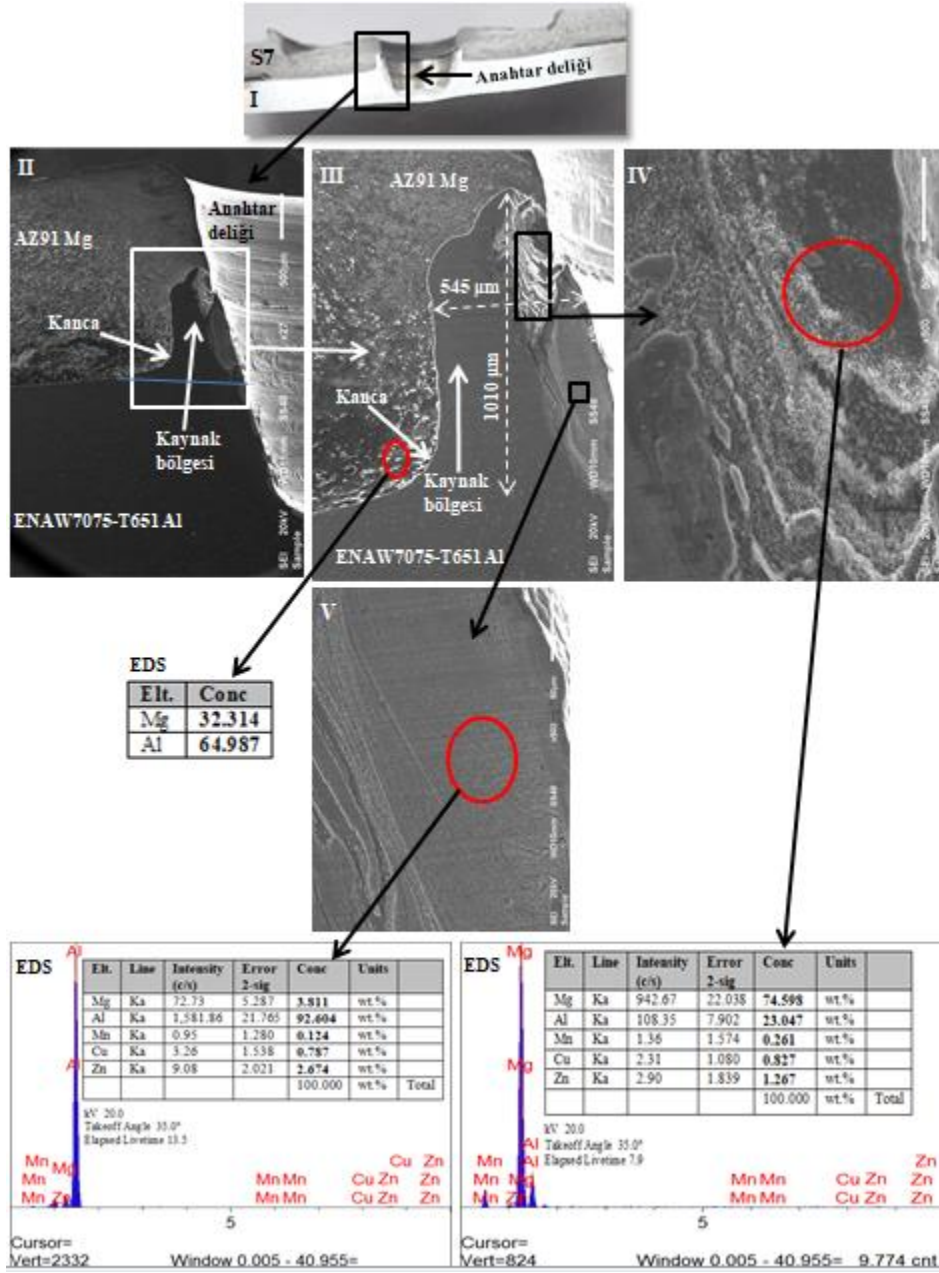
plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayıp aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesi yukarıya ve yanlara doğru akan bir kısım alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışarak kısmen bir kaynak bölgesi oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.10III'de kaynak bölgesinin bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %51,357 Mg elementi ve %36,511 Al elementi olduğu görülmektedir. EDS analiz sonucuna göre kaynak bölgesi 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımlarının karışımından meydana gelmiş ve Mg oranı daha fazla olduğu için burada  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerearası bileşik oluşmuş olabilir. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'de, plakalar arasındaki birleşme takım omuzu altındaki ve takım pimi çevresindeki plakaların arayüzeyinde oluşan metallerearası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) ve takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) oluşan kısmen bir kaynak bölgesi ile gerçekleşmiştir.



Şekil 4.10. Konik pimli takım ile yapılan S6 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.11 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.11II'ye bakıldığında, 1000 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısı ve takım piminin plakalara uyguladığı basma basıncı ile eş zamanlı olarak dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve yumuşayan plakaların malzemeleri dönen takım pimi tarafından plastik deformasyona uğratıp takım pimi etrafında karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi akarak yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesi yukarıya ve yanlara doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi çevresinde karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan plaka malzemesi akarak yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. SKNK'de takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya daldığında plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek çıkması sonucu oluşan geometrik şekil kanca şekline benzediği için bu geometrik yapıya kanca adı verilmiştir. Şekil 4.11II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Plakaların arayüzeyinde oluşan kancalar önceden var olan çatlaklar gibi işlev görür ve çatlak kancadan başlayıp en yakın serbest yüzeye ilerleyip ulaştığında kaynakların kırılması meydana gelir (Badarinarayan vd. 2009; Badarinarayan vd. 2009; Yin vd. 2010; Jordon vd. 2010; Rao vd. 2013). Sato vd. (2005) göre plakaların arayüzeyinde oluşan kanca, SKNK kaynaklarının kaynak bütünlüğünü azaltan geometrik

bir kusurudur, çünkü SKNK kaynakları dış yüke maruz kaldığında çatlak kancada başlayabilir ve kanca boyunca ilerleyebilir. Takım üst üste bindirilen plakalara daldığında alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine dalmasıyla oluşan SKNK'nın kaynak boyu, AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesine dalan 7075-T651 Al alaşımı malzemesinin tepe noktası ile plakaların arayüzeyi arasındaki mesafe olarak belirlenirken SKNK'nın kaynak genişliği ise AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesine dalan 7075-T651 Al alaşımı malzemesinin tepe noktasının anahtar deliği çevresine olan uzaklık olarak belirlenmiştir. Şekil 4.11III'de 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 1010 µm ve kaynak genişliği 545 µm olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akarak dalmıştır. Şekil 4.11IV'de takım piminin hemen çevresindeki (anahtar deliğinin hemen çevresindeki) kaynak bölgesinin bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %74,598 Mg elementi ve %23,047 Al elementi olduğu görülmekte burada  $Al_{12}Mg_{17}$  metallererarası bileşik oluşmuş olabilir. Şekil 4.11III'de kaynak bölgesinin çevresindeki AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi arayüzeyinde kancanın olduğu hat boyunca oluşan tabakanın bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %32,314 Mg elementi ve %64,987 Al elementi olduğu görülmekte burada da  $Al_3Mg_2$  metallererarası bileşik oluşmuş olabilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallererarası bileşikler tespit edilmiştir. Sonuç olarak takım piminin hemen çevresindeki (anahtar deliğinin hemen çevresindeki) kaynak bölgesinde ve kaynak bölgesinin çevresindeki kanca hattı boyunca ki arayüzeyde  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallererarası bileşikler oluşmuş olabilir.



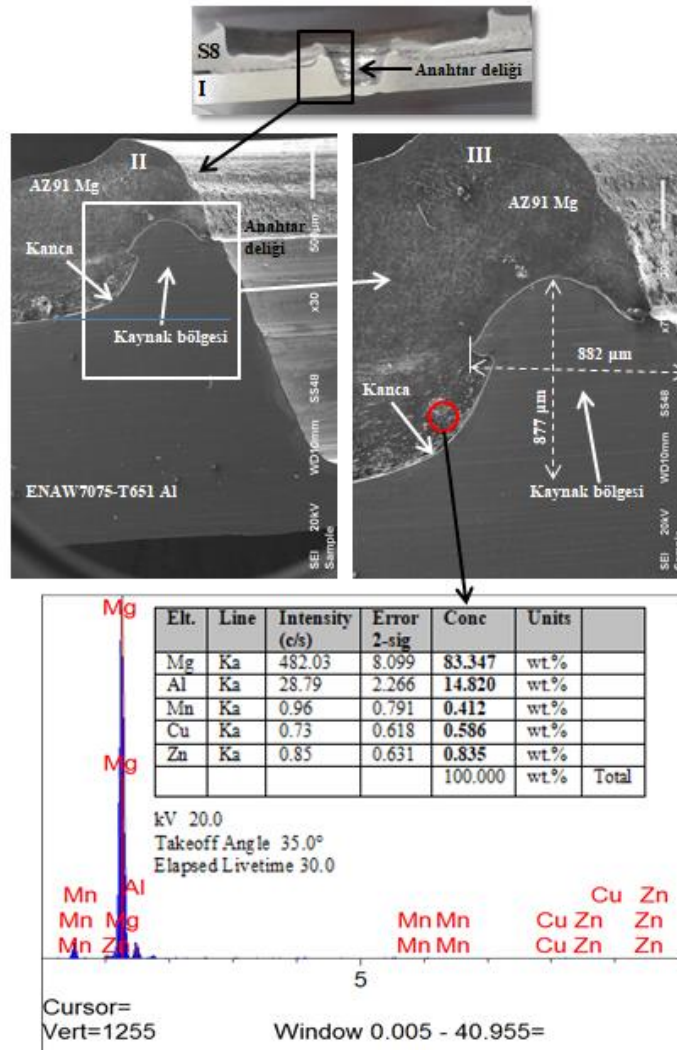
Şekil 4.11. Konik pimli takım ile yapılan S7 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.12 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.12II'ye bakıldığında, 1000 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısı ve takım piminin plakalara uyguladığı basma basıncı ile eş

zamanlı olarak dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve yumuşayan plakların malzemeleri dönen takım pimi tarafından plastik deformasyona uğratıp takım pimi etrafında karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi akarak yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üst AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra alt 7075-T651 Al alaşımı plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesi yukarıya ve yanlara doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi çevresinde karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan plaka malzemesi akarak yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. Şekil 4.12II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Şekil 4.12III'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 877 µm ve kaynak genişliği 882 µm olduğu görülmektedir. Kaynak boyu 877 µm ve kaynak genişliği 882 µm birbirine çok yakın. Kaynak genişliği, kaynak boyundan biraz daha büyük olduğundan alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yukarıya kıyasla daha çok yanlara doğru akarak dalmıştır. Ayrıca, Şekil 4.12III'de görüleceği üzere takım üst üste bindirilen plakalara daldığında alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine akarak dalmasıyla oluşan kaynağın ucu yukarıya ve yanlara doğru AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine dalmıştır. Şekil 4.11III'de 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK ile karşılaştırıldığında, 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu biraz daha küçükken, kaynak genişliği ise oldukça daha büyük ve ayrıca kaynak ucu daha çok yanlara doğru üst plakaya dalmıştır. Şekil 4.12III'de kaynak bölgesinin çevresindeki



AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi arayüzeyinde kancanın olduğu hat boyunca oluşan tabakanın bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %83,347 Mg elementi ve %14,820 Al elementi olduğu görülmekte burada  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerrarası bileşik oluşmuş olabilir. Kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerrarası bileşikler tespit edilmiştir. Sonuç olarak kaynak bölgesinin çevresindeki kanca hattı boyunca ki arayüzeyde  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerrarası bileşikler oluşmuş olabilir.



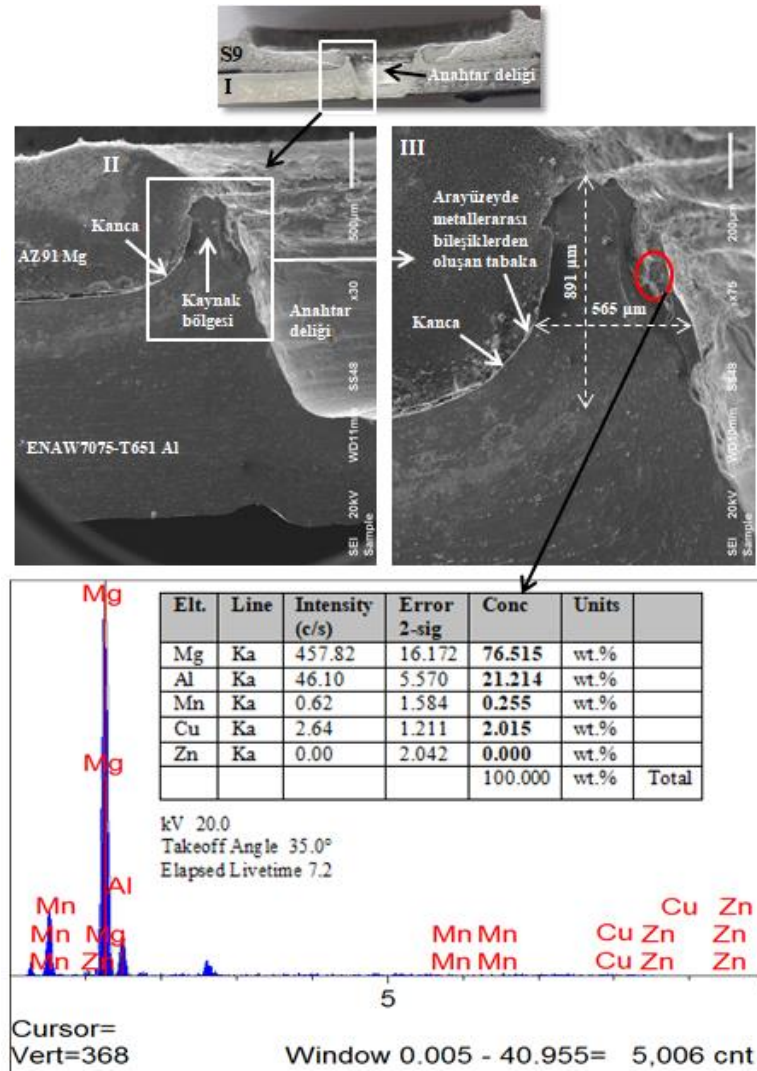
Şekil 4.12. Konik pimli takım ile yapılan S8 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.13 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeki konik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.13II'ye bakıldığında, 1400 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen



plakalara önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısı ve takım piminin plakalara uyguladığı basma basıncı ile eş zamanlı olarak dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve yumuşayan plakların malzemeleri dönen takım pimi tarafından plastik deformasyona uğratıp takım pimi etrafında karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi akarak yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üst AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra alt 7075-T651 Al alaşımı plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesi yukarıya ve yanlara doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi çevresinde karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi akarak yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. Şekil 4.13II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Şekil 4.13III'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım kullanılarak 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 891 µm ve kaynak genişliği 565 µm olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akarak dalmıştır. Şekil 4.13III'de takım piminin hemen çevresindeki (anahtar deliğinin hemen çevresindeki) kaynak bölgesinin bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %76,515 Mg elementi ve %21,214 Al elementi olduğu görülmekte burada Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> metallerearası bileşik oluşmuş olabilir. Şekil 4.13III'de kaynak bölgesinin çevresindeki AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi

arayüzeyinde kancanın olduğu hat boyunca  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  metallerearası bileşiklerden oluşan tabakalar oluşmuştur.

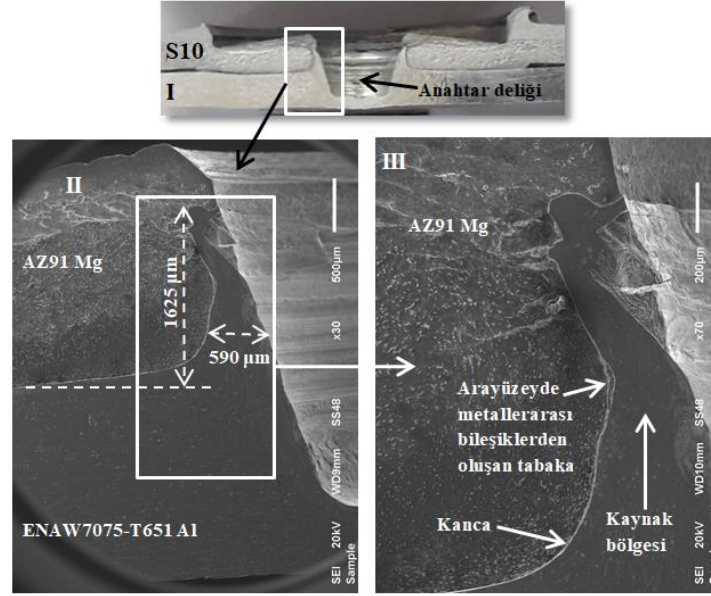


Şekil 4.13. Konik pimli takım ile yapılan S9 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.14 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.14II'ye bakıldığında, 1400 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısısı ve takım piminin plakalara uyguladığı basma basıncı ile eş zamanlı olarak dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısısı ile plakaların malzemeleri

yumuşamış ve yumuşayan plakların malzemeleri dönen takım pimi tarafından plastik deformasyona uğratıp takım pimi etrafında karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi akarak yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üst AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra alt 7075-T651 Al alaşımı plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesi yukarıya ve yanlara doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi çevresinde karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi akarak yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. Şekil 4.14II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Şekil 4.14II'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım kullanılarak 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 1625 µm ve kaynak genişliği 590 µm olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akarak dalmıştır. Şekil 4.13III'de 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK ile karşılaştırıldığında, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu ve kaynak genişliği daha fazla ayrıca kaynak ucu da daha çok yana doğru üst plakaya dalmıştır. Ayrıca, Şekil 4.14III'de görüleceği üzere AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'de takım üst üste bindirilen plakalara daldığında alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine akarak dalmasıyla oluşan kaynağın ucu yukarıya ve yanlara doğru AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine dalmıştır. Kaynak enine kesit alanından elde edilen XRD sonucunda  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  metallerarası bileşikler tespit edilmiştir.

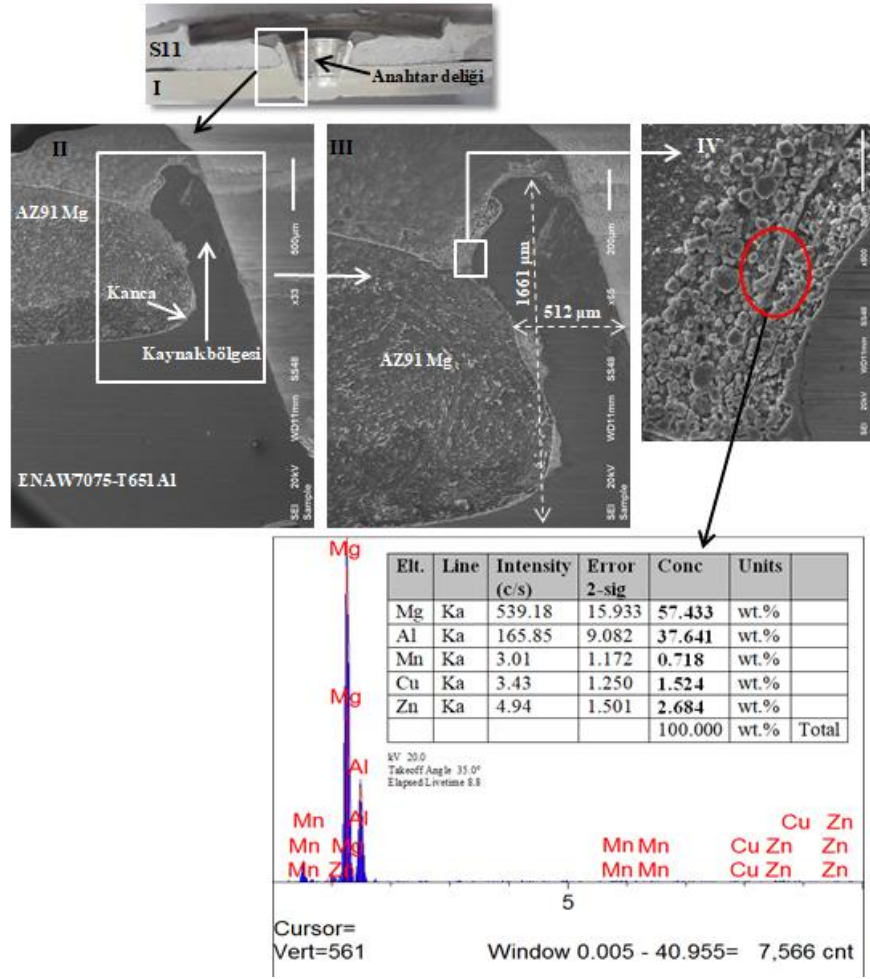
Şekil 4.14III'de kaynak bölgesinin çevresindeki AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi arayüzeyinde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  metallerrarası bileşiklerden oluşan tabakalar oluşmuştur.



Şekil 4.14. Konik pimli takım ile yapılan S10 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.15 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.15II'ye bakıldığında, 1800 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısısı ve takım piminin plakalara uyguladığı basma basıncı ile eş zamanlı olarak dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve yumuşayan plakaların malzemeleri dönen takım pimi tarafından plastik deformasyona uğratıp takım pimi etrafında karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi akarak yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üst AZ91 Mg

alaşımı plakaya daha sonra alt 7075-T651 Al alaşımı plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesi yukarıya ve yanlara doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi çevresinde karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi akarak yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. Şekil 4.15II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Şekil 4.15III'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım kullanılarak 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 1661  $\mu\text{m}$  ve genişliği 512  $\mu\text{m}$  olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akmıştır. Şekil 4.15IV'de kaynak bölgesinin uç çevresindeki AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesinin uç arayüzeyinde oluşan tabaka gözenekli ve bu tabakadan alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %57,433 Mg elementi ve %37,641 Al elementi olduğu görülmekte burada  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  metallerearası bileşik oluşmuş olabilir. Kaynak enine kesit alanından elde edilen XRD sonucunda  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  ve  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  metallerearası bileşikler tespit edilmiştir. Şekil 4.15III'de kaynak bölgesinin özellikle de kaynak ucunun çevresindeki kaynak bölgesi ve AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde yoğun bir şekilde  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  ve  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  metallerearası bileşiklerden oluşan tabakalar meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.15. Konik pimli takım ile yapılan S11 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

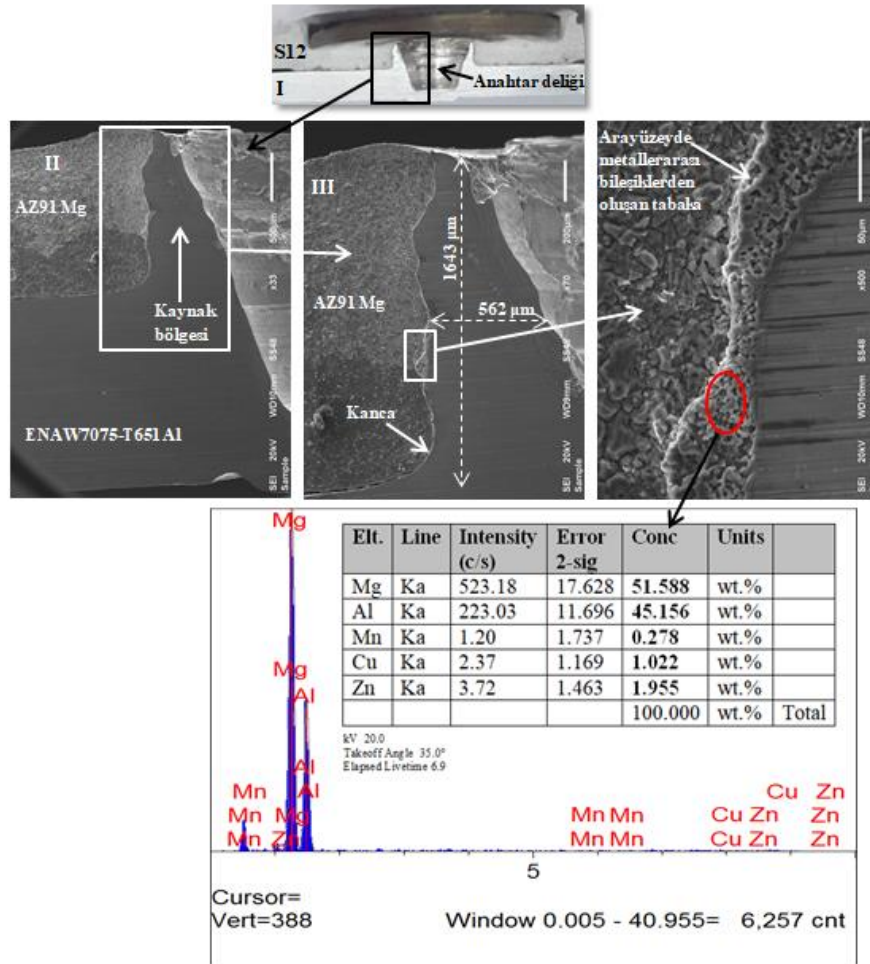
Şekil 4.16 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.16II'ye bakıldığında, 1800 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısı ve takım piminin plakalara uyguladığı basma basıncı ile eş zamanlı olarak dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve yumuşayan plakaların malzemeleri dönen takım pimi tarafından plastik deformasyona uğratarak takım pimi etrafında karıştırılması ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan 7075-T651

Al alaşımı plaka malzemesi akarak yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce st AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra alt 7075-T651 Al alaşımı plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu st plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen st plaka malzemesi yukarıya ve yanlara doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi çevresinde karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi akarak yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. Şekil 4.16III'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Şekil 4.16III'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım kullanılarak 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 1643 m ve kaynak genişliği 562 m olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akmıştır.

Şekil 4.15III'de 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK ile karışlaştırıldığında, 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak genişliği daha fazla ve kaynak boyu ise birbirine yakındır. Şekil 4.15IV'de kaynak bölgesinin çevresindeki kaynak bölgesi ve AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde oluşan tabaka gözenekli ve bu tabakandan alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %51,588 Mg elementi ve %45,156 Al elementi olduğu görülmekte burada  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerrarası bileşik oluşmuş olabilir. Kaynak enine kesit alanından elde edilen XRD sonucunda  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  metallerrarası bileşikler tespit edilmiştir. Şekil 4.16IV'de kaynak bölgesinin çevresindeki kaynak bölgesi ve AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde yoğun bir şekilde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  metallerrarası bileşiklerden oluşan tabakalar meydana geldiği görülmektedir. Genel olarak, AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarında takım dönme hızı 1000 dev/dak'dan 1800 dev/dak'ya artırıldığında



kaynağın boyu artmıştır. Takım bekleme süresi 3 sn den 6 sn ye artırıldığında ise kaynağın genişliği artmıştır. Yapılan bütün SKNK kaynaklarının kaynak bölgesi çevresindeki arayüzeyde metallerarası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşmuştur. Takım piminin üst üste bindirilen plakların arayüzeyine dalmasıyla ortaya çıkan sürtünme ısı ve dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeylerde metallerarası bileşiklerin ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşmasına neden olmuştur. 1800 dev/dak takım dönme hızında yapılan SKNK kaynaklarında daha fazla ısı girdisi olduğu için kaynağın çevresindeki arayüzeylerde metallerarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakalar daha büyük ve daha yoğun olmuştur.

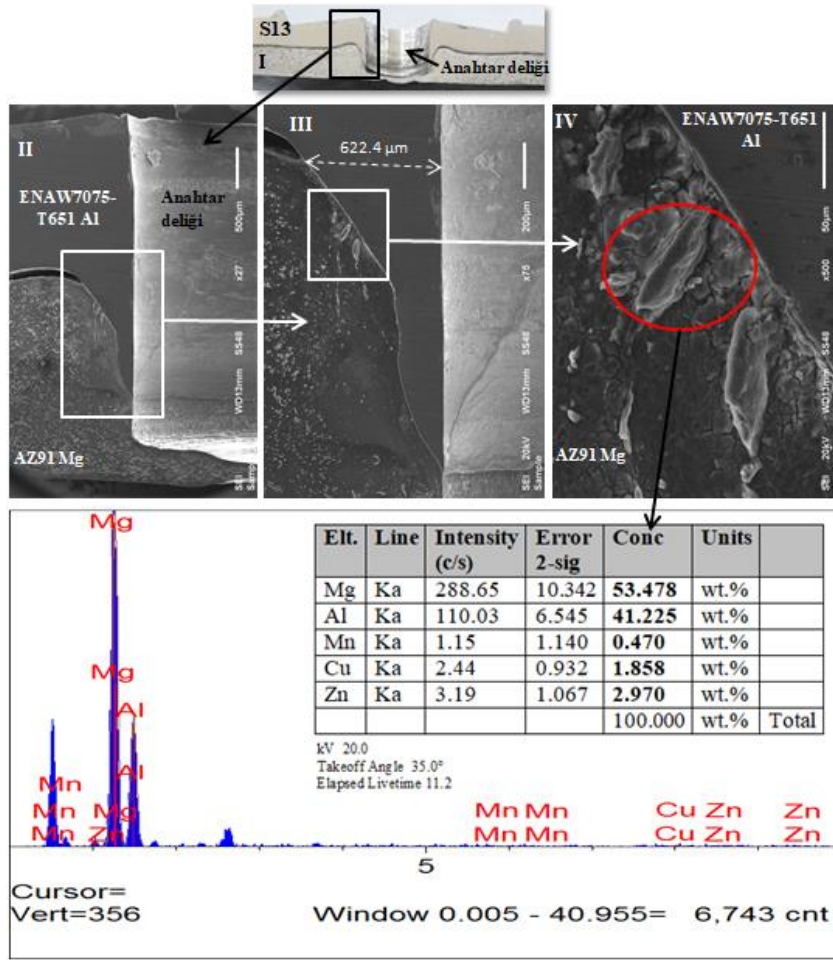


Şekil 4.16. Konik pimli takım ile yapılan S12 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.17 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan



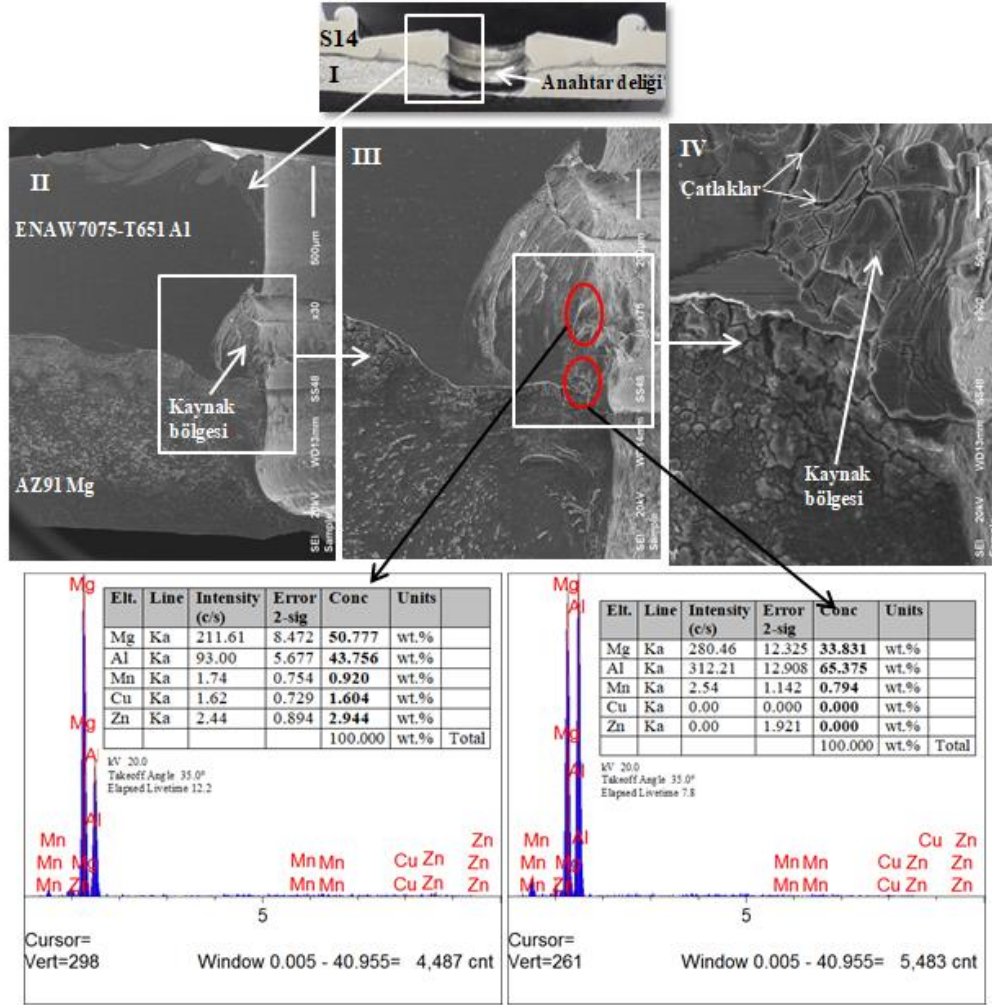
SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.17II'ye bakıldığında, 1000 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesini yumuşatıp altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi tarafından takım pimi etrafında karıştırılıp kaynaması için yeterli sürtünme ısı üretilmediği için üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi takım pimi altında biraz yumuşayarak aşağıya altta bulunan daha yumuşak plakaya doğru itilmiştir. Bu arada takım pimi altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakaya daldığında yumuşayan plaka malzemesi yukarı üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakasının içerisine karışarak dalamamış ve takım piminin etrafına yapışıp kalmıştır. Takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı kısmen karışmıştır fakat kaynak oluşumuna pek bir katkısı olmamıştır. Üst üste bindirilen 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı plakalara dönen takım pimi dalmasıyla ortaya çıkan sürtünme ısı ve dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile birlikte takım pimi etrafındaki plakaların arayüzeyinde meydana gelen beyaz bir yapı ile plakalar birleşmiştir. Şekil 4.17IV'te plakaların arayüzeyinde mikro çatlaklardan meydana gelen yapının bir bölgesinden alınan EDS analiz sonucun göre ağırlıkça %53,478 Mg elementi ve %41,225 Al elementi olduğu görülmekte burada da  $Al_{12}Mg_{17}$  metallererası bileşik oluşmuş olabilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallererası bileşikler tespit edilmiştir. Plakaların arayüzeyinde mikro çatlaklardan meydana gelen beyaz yapı  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallererası bileşiklerden meydana bir yapıdır diyebiliriz. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'de plakalar birbirine sadece takım pimi etrafındaki plakaların arayüzeyinde oluşan ve mikro çatlardan meydana gelen metallererası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan yapı ile birleşmiştir.



Şekil 4.17. Üçgen pimli takım ile yapılan S13 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.18 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeki üçgen pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 19II'de 1000 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesini yumuşatıp altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesiyle takım pimi etrafında takım pimi tarafından karıştırılıp kaynaması için kısmen yeterli sürtünme ısı üretildiği için takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin bir kısmı yukarı doğru hareket eden alt AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak kısmen bir kaynak bölgesi olduğu görülmektedir. Oluşan bu kısmen kaynak bölgesinde yoğun bir şekilde mikro çatlakların olduğu Şekil 19IV'de

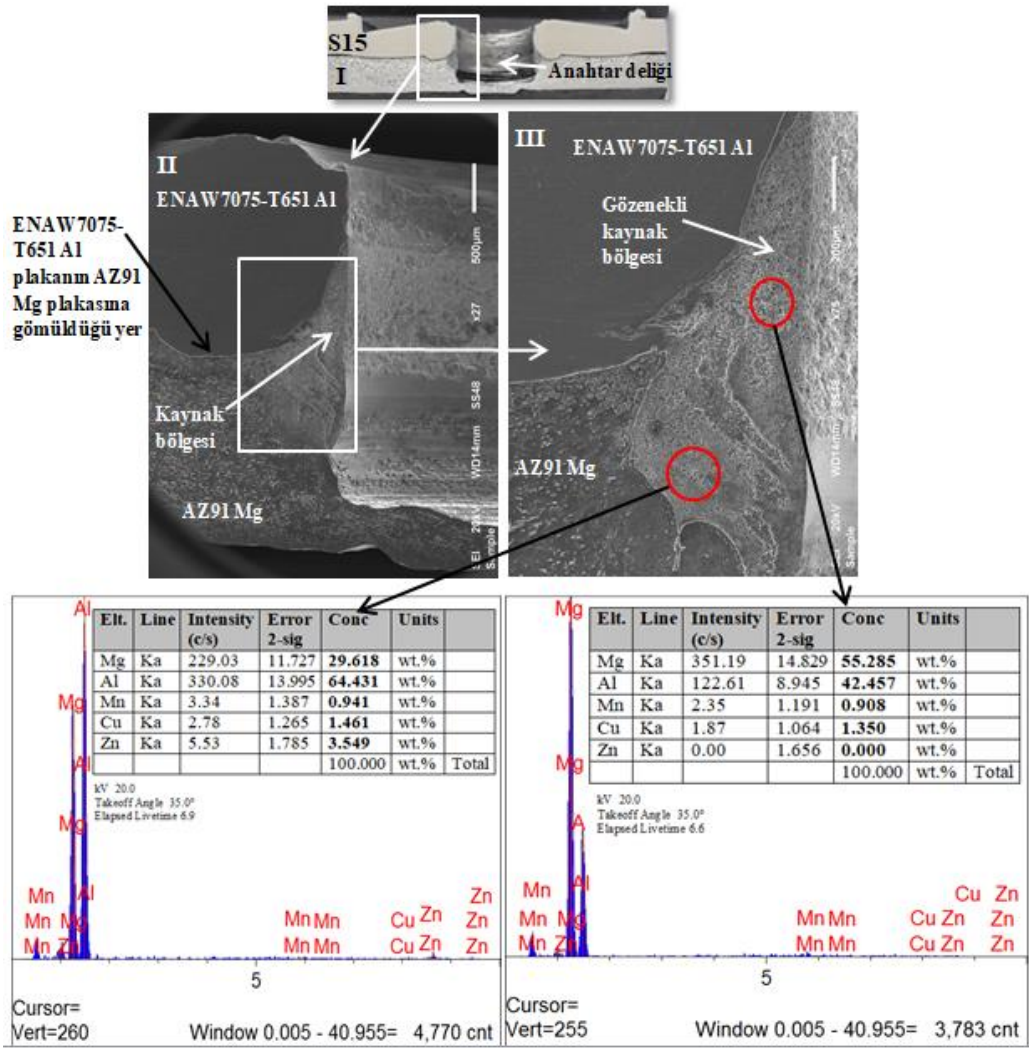
görülmektedir. Kaynak bölgesinin bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %50,777 Mg elementi ve %43,756 Al elementi ve kaynak bölgesinin başka bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %33,831 Mg elementi ve %65,375 Al elementi olduğu görülmektedir. Mg elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve Al elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_3Mg_2$  metallerearası bileşikler oluşmuştur denilebilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerearası bileşikler tespit edilmiştir. Bunun dışında, takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan geniş bir tabaka olduğu Şekil 4.18I'de görülmektedir. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'de plakalar birbirine takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) mikro çatlaklardan ve metallerearası bileşiklerden oluşan kısmen kaynak bölgesiyle ve takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan tabakalar ile birleşmiştir



Şekil 4.18. Üçgen pimli takım ile yapılan S14 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.19 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeki üçgen pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.19II'de 1400 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesini yumuşatıp altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesiyle takım pimi etrafında takım pimi tarafından karıştırılıp kaynaması için yeterli sürtünme ısısı üretildiği için takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi, yukarı doğru hareket eden alt AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak bir kaynak bölgesi oluştuğu görülmektedir. Oluşan bu kaynak bölgesinde

gözeneklerin olduğu Şekil 4.19III'de görülmektedir. Kaynak bölgesinin bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %55,285 Mg elementi ve %42,457 Al elementi ve kaynak bölgesinin başka bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %29,618 Mg elementi ve %64,431 Al elementi olduğu görülmektedir. Mg elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve Al elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_3Mg_2$  metallerearası bileşikler oluşmuştur denilebilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerearası bileşikler tespit edilmiştir. Bunun dışında, takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan bir tabakalar oluşmuştur. Şekil 4.19II'ye bakıldığında, takımın üst üste bindirilen 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı plakalara dalmasıyla üste bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakasının alttaki AZ91 Mg alaşımı plakaya takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde bir miktar gömüldüğü görülmektedir. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'de plakalar birbirine takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) gözleklerden ve metallerearası bileşiklerden oluşan kaynak bölgesiyle ve takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan tabakalar ile birleşmiştir.

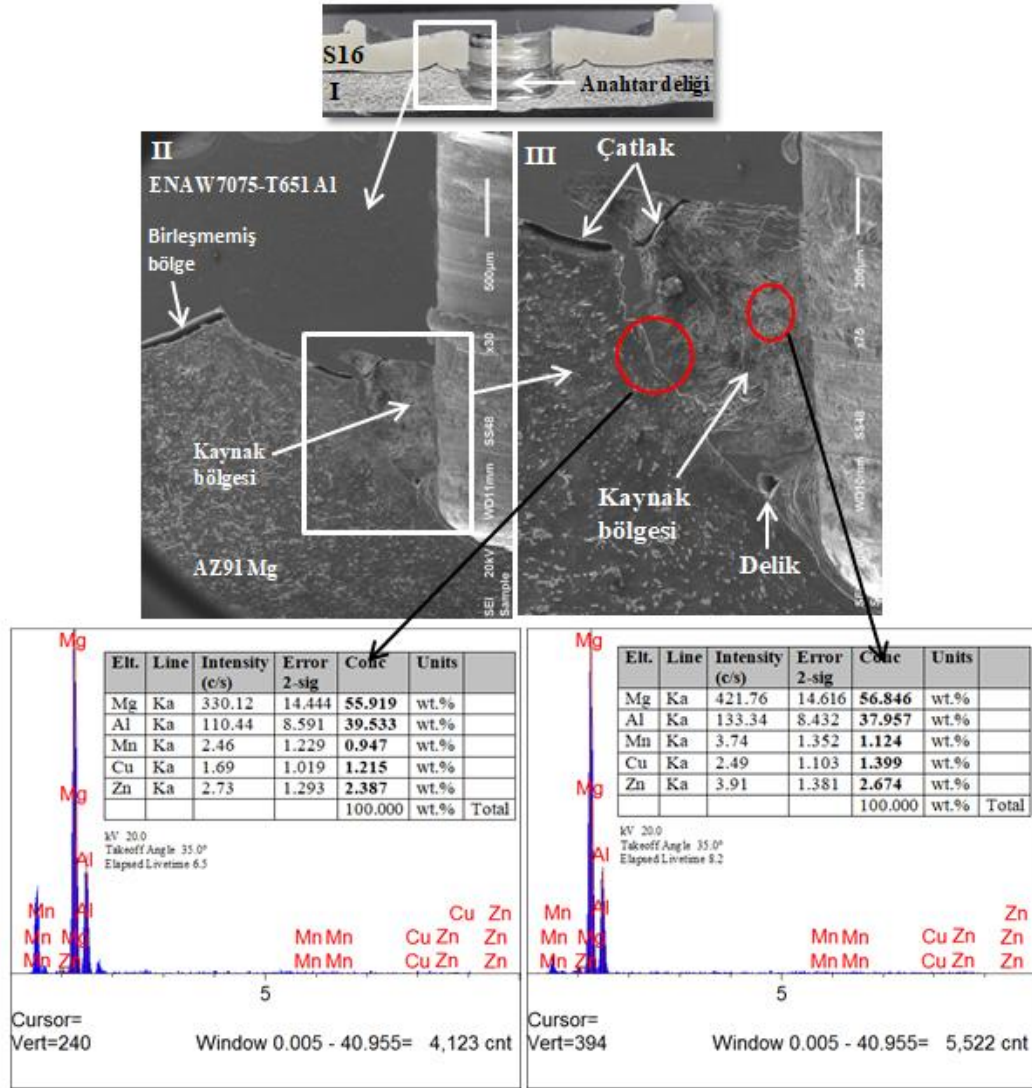


Şekil 4.19. Üçgen pimli takım ile yapılan S15 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.20 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakasının üzerindeki üçgen pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.20II'de 1400 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesini yumuşatıp altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesiyle takım pimi etrafında takım pimi tarafından karıştırılıp kaynaması için yüksek miktarda sürtünme ısı üretildiği için takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi, yukarı doğru hareket eden alt AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği

çevresinde) karışarak kısmen bir kaynak bölgesi oluştuğu görülmektedir. Oluşan bu kısmen kaynak bölgesinde büyük ve mikro çatlaklar ve birleşmemiş delik gibi kusurların olduğu Şekil 4.19III'de görülmektedir. Kaynak bölgesinin bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %56,846 Mg elementi ve %37,957 Al elementi ve kaynak bölgesinin başka bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %55,919 Mg elementi ve %39,533 Al elementi olduğu görülmektedir. Mg elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşik oluşmuştur denilebilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşikler tespit edilmiştir. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'de plakalar birbirine takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) çatlaklardan, birleşmemiş delikten ve metallerarası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan kaynak bölgesiyle ile birleşmiştir.



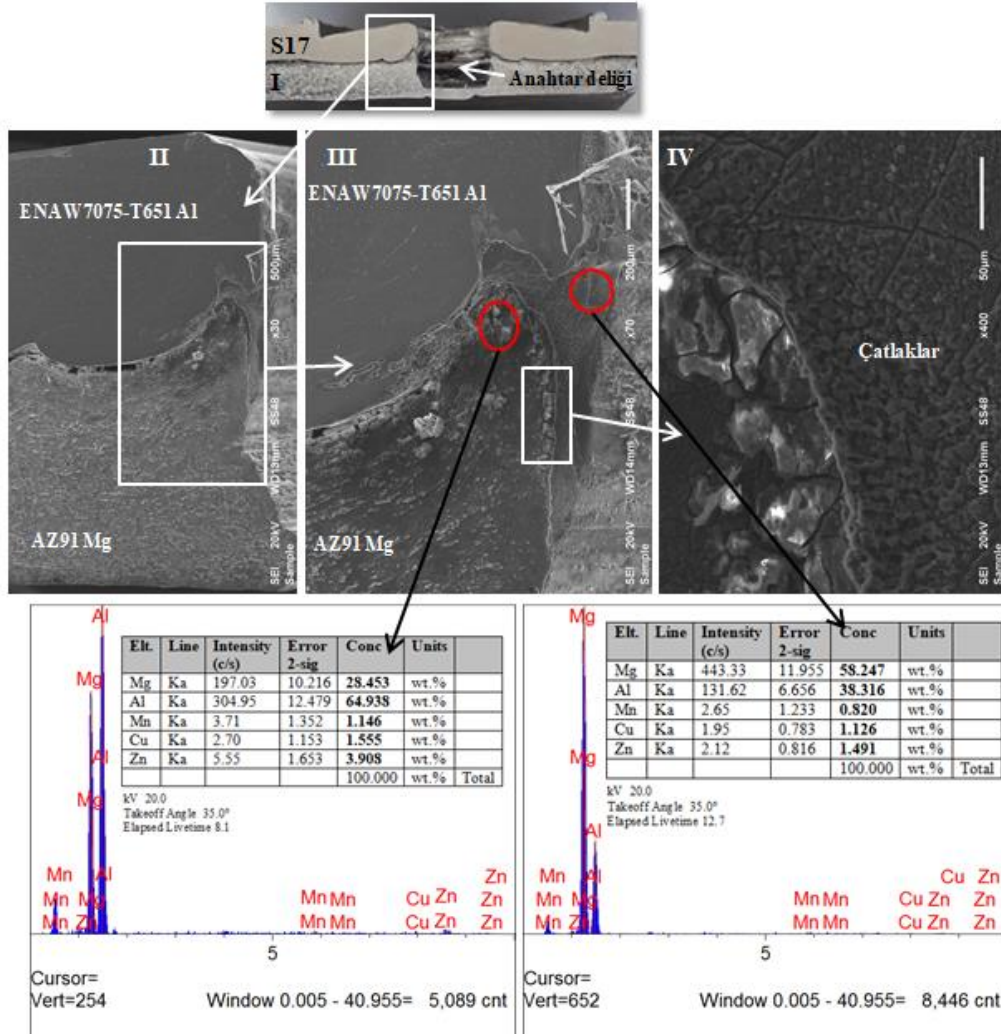


Şekil 4.20. Üçgen pimli takım ile yapılan S16 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.21 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeki üçgen pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.21II'de 1800 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesini yumuşatıp altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesiyle takım pimi etrafında takım pimi tarafından karıştırılıp kaynaması için yüksek miktarda sürtünme ısı üretildiği için takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi, yukarı doğru hareket eden alt AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği



çevresinde) karışarak kısmen bir kaynak bölgesi oluştuğu görülmektedir. Oluşan bu kısmen kaynak bölgesinde büyük ve mikro çatlakların olduğu Şekil 4.21III ve IV’de görülmektedir. Kaynak bölgesinin bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %58,247 Mg elementi ve %38,316 Al elementi ve kaynak bölgesinin başka bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %28,453 Mg elementi ve %64,938 Al elementi olduğu görülmektedir. Mg elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve Al elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_3Mg_2$  metallererası bileşikler oluşmuştur denilebilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallererası bileşikler tespit edilmiştir. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK’de plakalar birbirine takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) çatlaklardan ve metallererası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan kısmen kaynak bölgesiyle birleşmiştir.

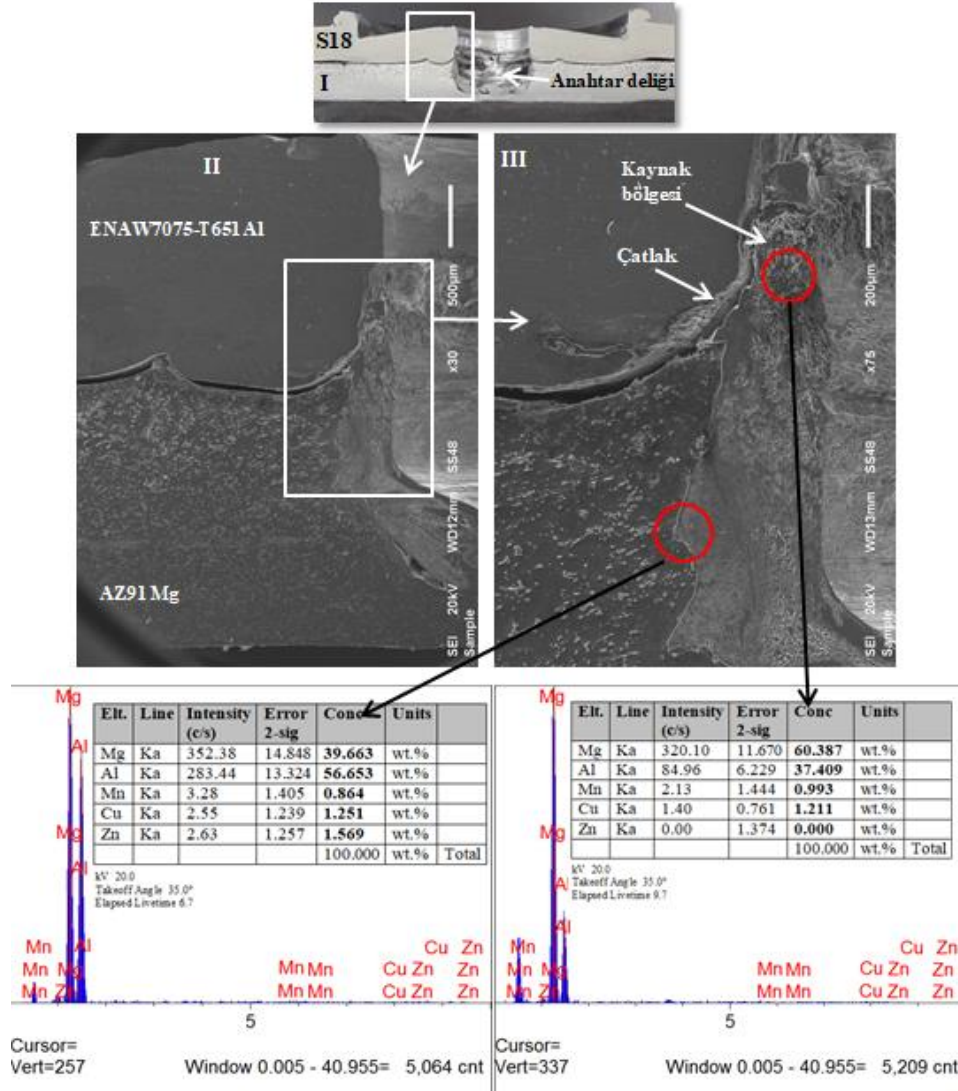


Şekil 4.21. Üçgen pimli takım ile yapılan 17 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.22 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeki üçgen pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.22II'de 1800 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesini yumuşatıp altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesiyle takım pimi etrafında takım pimi tarafından karıştırılıp kaynaması için yüksek miktarda sürtünme ısısı üretildiği için takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi, yukarı doğru hareket eden alt AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak kısmen bir kaynak bölgesi oluştuğu görülmektedir. Oluşan bu

kısmen kaynak bölgesinde büyük ve mikro çatlakların olduğu Şekil 4.21III ve IV'de görülmektedir. Kaynak bölgesinin bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %58,247 Mg elementi ve %38,316 Al elementi ve kaynak bölgesinin başka bir yerinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %28,453 Mg elementi ve %64,938 Al elementi olduğu görülmektedir. Mg elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve Al elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_3Mg_2$  metallererarası bileşikler oluşmuştur denilebilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallererarası bileşikler tespit edilmiştir. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'de plakalar birbirine takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) çatlaklardan ve metallererarası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan kısmen kaynak bölgesiyle birleşmiştir. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarında dönme hızı 1000 dev/dak dan 1800 dev/dak ya ve bekleme süresi 3 sn den 6 sn ye ye artırıldığında sürtünme ısı arttığı için üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi ve altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi yumuşayarak takım pimi etrafında karışık bir kaynak bölgesi oluşmuştur. Fakat 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'den sonra takım bekleme süresi ve takım dönme hızı artırılarak yapılan SKNK kaynaklarının kaynak bölgesinde artan ısı girdisiyle metallererarası bileşiklerin yoğunluğu arttığı için mikro çatlaklar oluşmuştur. Ayrıca, dönme hızı 1000 dev/dak dan 1800 dev/dak ya ve bekleme süresi 3 sn den 6 sn ye ye artırıldığında sürtünme ısı girdisi arttığı için altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakaya takım pimi daldığında daha fazla yumuşayan alt plaka malzemesi daha fazla yukarıya doğru hareket etmiş ve üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin bir miktarı ile takım pimi etrafında karışarak kaynak bölgesini oluştururken, bununla birlikte takım pimi çevresine yapışık kalan çoğunluğunu altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi ve bir miktar üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin karışımdan oluşan malzeme miktarı artmıştır. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak yapılan bütün SKNK kaynakları sırasında çoğunluğunu altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin oluşturduğu ve bir miktar üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin karışımdan oluşan malzeme takım pimi çevresine yapışık kalmıştır. Dönme hızı 1000 dev/dak dan 1800 dev/dak ya ve bekleme

süresi 3 sn den 6 sn ye ye artırıldığında takım pimi çevresine yapışan malzeme miktarında artmıştır.

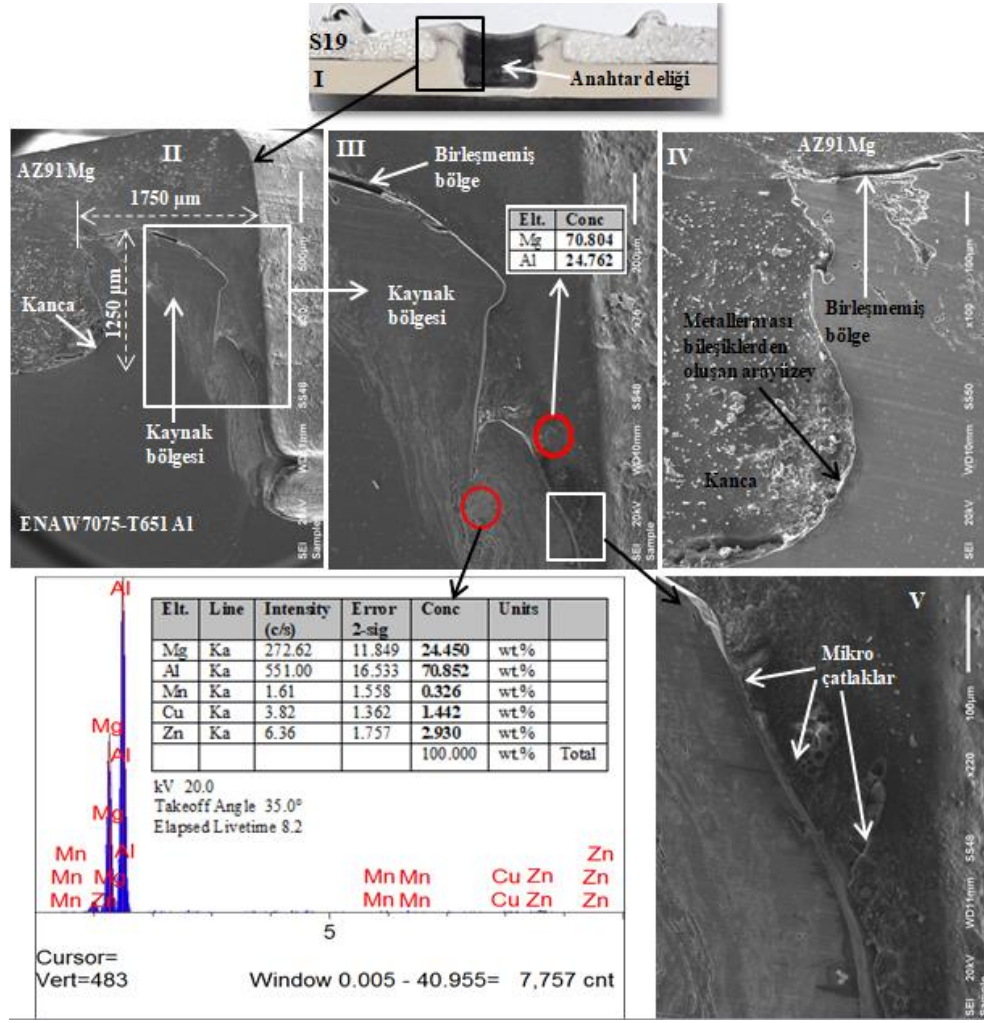


Şekil 4.22. Üçgen pimli takım ile yapılan S18 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.23 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakasının üzerindeki üçgen pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.23II'ye bakıldığında, 1000 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip alt plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısı ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile plakaların malzemeleri

yumuşamış ve takımın dönerek aşağı doğru plakalara dalma hareketi kuvvetiyle de yumuşayan plakaların malzemeleri dönen takım pimi tarafından takım pimi etrafında plastik deformasyona uğratıp karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesinin bir kısmı yukarıya doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. Şekil 4.23II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Şekil 4.23II'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 1250 µm ve genişliği ise 1750 µm olduğu görülmektedir. Kaynak genişliği, kaynak boyundan daha büyük olduğundan takım pimi alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında plaka malzemesi üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yukarıya kıyasla daha çok yanlara doğru akarak dalmıştır. Ayrıca, Şekil 4.23II'de görüleceği üzere AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'de takım üst üste bindirilen plakalara daldığında alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine akarak dalmasıyla oluşan kaynağın ucu yukarıya ve yanlara doğru AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine dalmıştır. Şekil 4.23III'de anahtar deliğinin çevresine yakın kaynak bölgesinden alınan EDS sonucuna göre ağırlıkça 24.450 Mg elementi ve %70,852 Al elementi olduğu görülmektedir. Anahtar deliğinin hemen çevresindeki AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi arayüzeyinden (anahtar deliğinin hemen çevresinde bulunan kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeyden) alınan EDS analiz sonucuna göre

ağırlıkça %70,804 Mg elementi ve %24,762 Al elementi olduğu görülmektedir. Mg elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve Al elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_3Mg_2$  metallerearası bileşikler oluşmuş olabilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerearası bileşikler tespit edilmiştir. Şekil 4.23IV'de kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeylerde (AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeylerinde) oluşan beyaz bölgeler metallerearası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakalardır. Şekil 4.23IV'de görüldüğü üzere kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeyde kancanın olduğu hat boyunca daha yoğun metallerearası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakalar oluşmuştur. Bunların dışında Şekil 4.23IV'de kaynak bölgesinin üst tarafındaki arayüzeyde (AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde) birleşmemiş bir çatlak hattı bölgesi meydana gelmiştir. Kaynak bölgesinin üst tarafındaki arayüzeyde oluşan bu çatlak malzemelerin sürtünme ısısı ile yumuşayarak birbirine geçmesi sırasında 1000 dev/dak dönme hızı ve 3 sn bekleme süresinin uygun sürtünme ısısını üretmediğinden dolayı olmuş olabilir. Ayrıca, Şekil 4.23V'de anahtar deliğinin hemen çevresindeki AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde (anahtar deliğinin hemen çevresinde bulunan kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeyde) oluşan metallerearası bileşiklerde mikro çatlaklar bulunmaktadır.



Şekil 4.23. Üçgen pimli takım ile yapılan S19 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

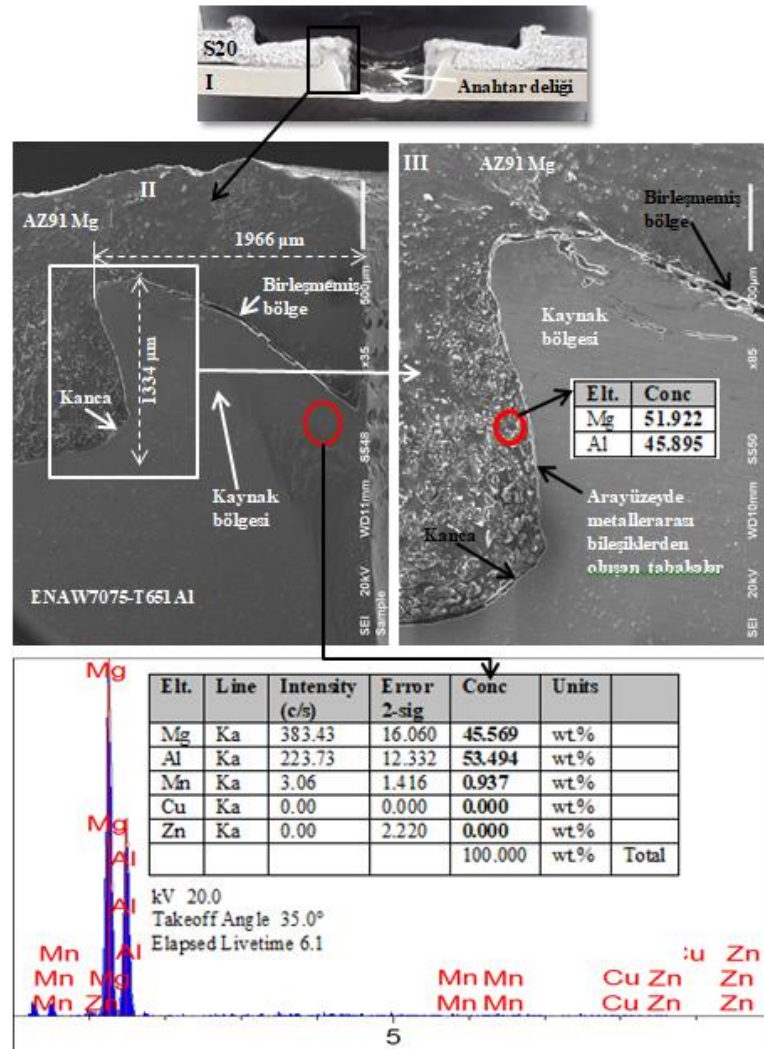
Şekil 4.24 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeki üçgen pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.24II'ye bakıldığında, 1000 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip alt plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısı ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve takımın dönerek aşağı doğru plakalara dalma hareketi kuvvetiyle de yumuşayan plakaların malzemeleri dönen takım pimi tarafından takım pimi etrafında plastik deformasyona uğratıp karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan malzeme akararak yukarı



ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Kısaca, dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesinin bir kısmı yukarıya doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. Şekil 4.23II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Şekil 4.24II'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 1334 µm ve genişliği ise 1966 µm olduğu görülmektedir. Kaynak genişliği, kaynak boyundan daha büyük olduğundan takım pimi alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında plaka malzemesi üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yukarıya kıyasla daha çok yanlara doğru akarak dalmıştır. Şekil 4.23'teki AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK ile karşılaştırıldığında, daha büyük kaynak genişliğine ve boyuna sahiptir. Ayrıca, AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'de kaynak bölgesini oluşturan alt 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin üst AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesine yanlara doğru daha keskin dalmıştır. Şekil 4.24II'de anahtar deliğinin çevresine yakın kaynak bölgesinden alınan EDS sonucuna göre ağırlıkça %45,569 Mg elementi ve %53,494 Al elementi olduğu görülmektedir. Şekil 4.24III'de kaynak bölgesinin çevresindeki kancanın olduğu arayüzeyden (AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi arayüzeyinde kancanın olduğu hattan) alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %51,922 Mg elementi ve %45,895 Al elementi olduğu görülmektedir. Mg elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve Al elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_3Mg_2$  metallere arası bileşikler oluşmuş olabilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz



sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerearası bileşikler tespit edilmiştir. Şekil 4.24III'de kaynak bölgesinin çevresindeki kancanın olduğu arayüzeyde (AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi arayüzeyinde kancanın olduğu hatta) metallerearası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan tabakalar meydana gelmiştir. Şekil 4.24III'de kaynak işlemi sırasında kaynak bölgesinin üst tarafındaki arayüzeyde (AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi arayüzeyinde) birleşmemiş bir çatlak hattı bölgesi meydana gelmiştir. Kaynak bölgesinin üst tarafındaki arayüzeyde oluşan bu çatlak, malzemelerin sürtünme ısı ile yumuşayarak birbirine geçmesi sırasında 1000 dev/dak takım dönme hızı ve 6 sn takım bekleme süresinin ideal sürtünme ısını üretmediğinden dolayı olmuş olabilir.

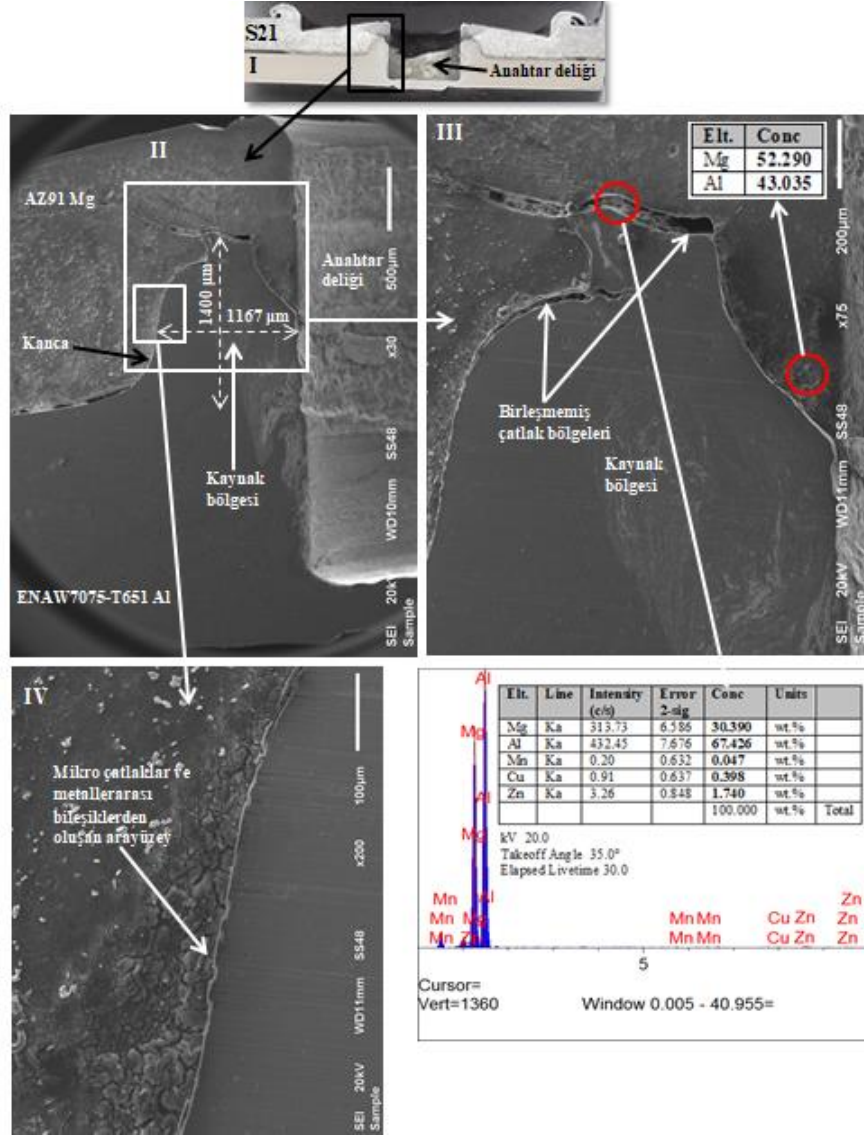


Şekil 4.24. Üçgen pimli takım ile yapılan S20 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.25 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan

SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.25II'ye bakıldığında, 1400 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip alt plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısı ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve takımın dönerek aşağı doğru plakalara dalma hareketi kuvvetiyle de yumuşayan plakaların malzemeleri dönen takım pimi tarafından takım pimi etrafında plastik deformasyona uğratıp karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesinin bir kısmı yukarıya doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. Şekil 4.25II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Kaynak takımı üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara daldığında alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi takım pimi etrafında yukarıya ve yanlara doğru akarak hareket ederken takım pimi altında aşağıya itilen üst AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi ile karışıp ve üst AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yukarıya ve yanlara doğru akarak dalmasıyla oluşan SKNK'nın kaynak boyu, AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesine dalan 7075-T651 Al alaşımı malzemesinin tepe noktası ile plakaların arayüzeyi arasındaki mesafe olarak belirlenirken SKNK'nın kaynak genişliği ise AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesine dalan 7075-T651 Al alaşımı malzemesinin anahtar deliği çevresine en uzak noktasının anahtar deliği çevresine olan uzaklık olarak belirlenmiştir. Şekil 4.25II'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım

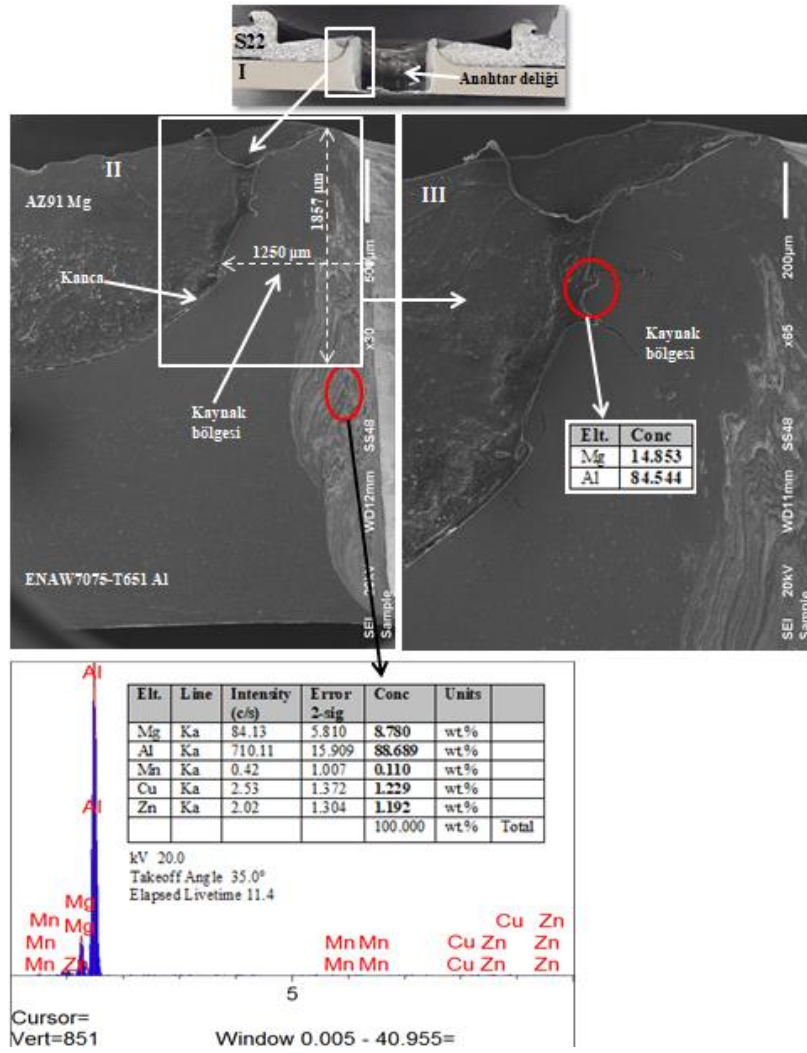
kullanılarak 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 1400 µm ve genişliği ise 1167 µm olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan takım pimi alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında plaka malzemesi üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akarak dalmıştır. Anahtar deliğinin hemen çevresindeki AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi arayüzeyinden (anahtar deliğinin hemen çevresinde bulunan kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeyden) ve kaynak bölgesinin üst kısmındaki çatlak bölgesinden alınan EDS analiz sonucuna göre sırasıyla ağırlıkça %52,290 Mg elementi ve %43,035 Al elementi ve %30,390 Mg elementi ve %67,426 Al elementi olduğu görülmektedir. Mg elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve Al elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_3Mg_2$  metallererarası bileşikler oluşmuş olabilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallererarası bileşikler tespit edilmiştir. Şekil 4.25III'de kaynak işlemi sırasında kaynak bölgesinin üst tarafındaki arayüzeylerde (AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi arayüzeylerinde) birleşmemiş çatlaklar oluşmuştur. Kaynak bölgesinin üst tarafındaki arayüzeylerde oluşan bu çatlaklar malzemelerin sürtünme ısı ile yumuşayarak birbirine geçmesi sırasında 1400 dev/dak dönme hızı ve 3 sn bekleme süresinin uygun sürtünme ısını üretmediğinden dolayı olmuş olabilir. Şekil 4.25IV'de kaynak bölgesinin çevresindeki kancanın olduğu arayüzeyde (AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi arayüzeyinde kancanın olduğu hatta) mikro çatlaklardan meydana gelen metallererarası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan tabakalar meydana gelmiştir.



Şekil 4.25. Üçgen pimli takım ile yapılan S21 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.26 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.26II'ye bakıldığında, 1400 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip alt plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısı ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve takımın dönerek aşağı doğru plakalara dalma hareketi kuvvetiyle de yumuşayan plakaların malzemeleri dönen takım pimi tarafından takım pimi etrafında

plastik deformasyona uğratıp karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesinin bir kısmı yukarıya doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. Şekil 4.26II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Şekil 4.26II'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 1857 µm ve genişliği ise 1250 µm olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan takım pimi alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında plaka malzemesi üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akarak dalmıştır. Şekil 4.25II'de 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK ile karşılaştırıldığında, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak genişliği ve kaynak yüksekliği daha büyük olmuştur. Şekil 4.26II'de anahtar deliğinin hemen çevresindeki kaynak bölgesinden alınan EDS sonucuna göre ağırlıkça %8,780 Mg elementi ve %88,689 Al elementi olduğu görülmektedir. Anahtar deliğinin hemen çevresindeki kaynak bölgesinden elde edilen EDS sonucuna göre Al elementi Mg elementinden oldukça fazla bunun nedeni 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK işlemi sırasında, AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi ile 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi takım pimi etrafında takım pimi tarafından karıştırılırken AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin çoğunluğu takım pimi çevresine yapışması ve takımın plakalardan geri çekilmesiyle takım pimi ile birlikte ortamdan sökülüp alınmasından kaynaklanmıştır.



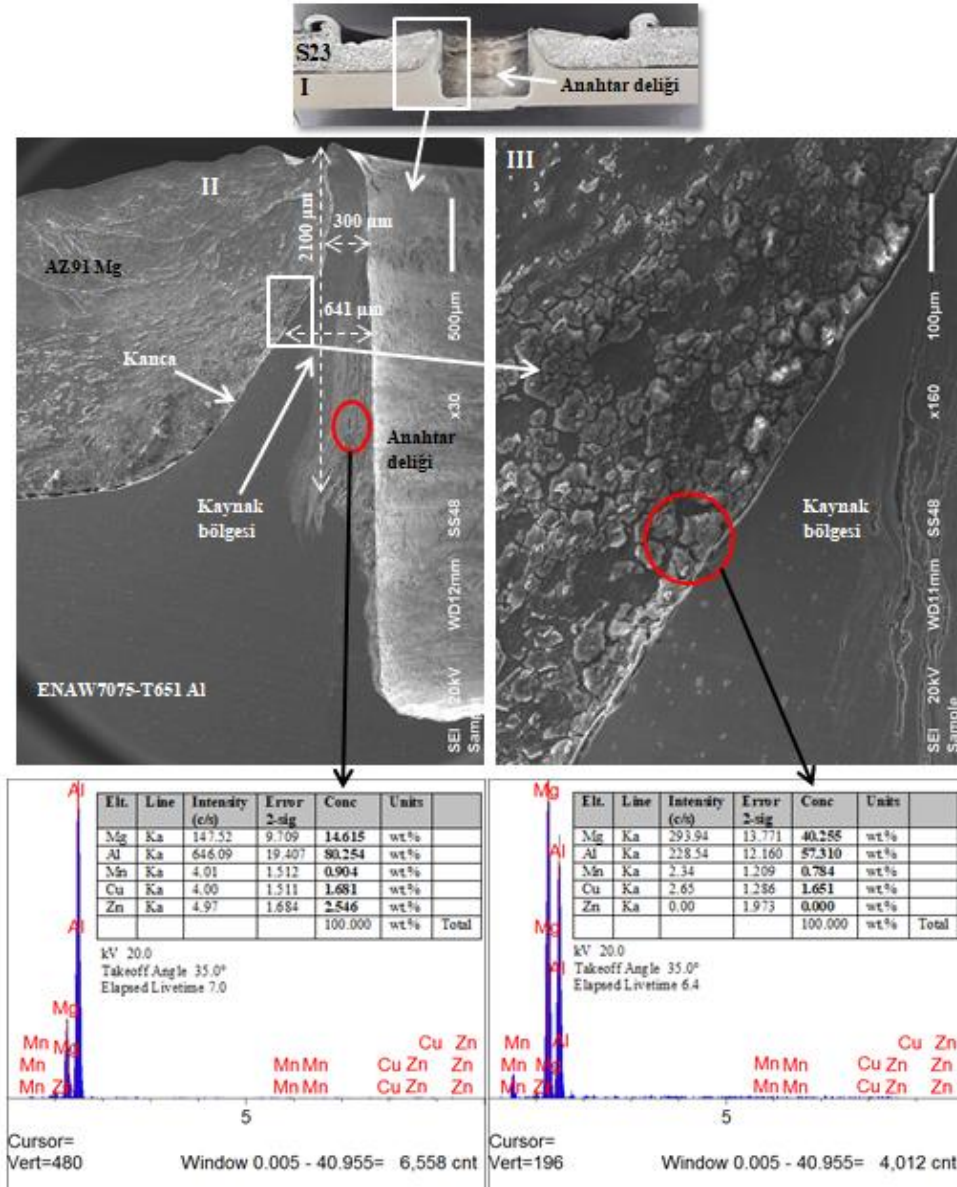
Şekil 4.26. Üçgen pimli takım ile yapılan S22 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.27 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.27II'ye bakıldığında, 1800 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip alt plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısı ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve takımın dönerek aşağı doğru plakalara dalma hareketi kuvvetiyle de yumuşayan plakaların malzemeleri dönen takım pimi tarafından takım pimi etrafında plastik deformasyona uğratıp karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan

daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesinin bir kısmı yukarıya doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. Şekil 4.27II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Şekil 4.27II'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 2100 µm, üst kaynak genişliği 300 µm ve alt kaynak genişliği 641 µm olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan takım pimi alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında plaka malzemesi yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akarak çıkmıştır. Şekil 4.27II'de anahtar deliğinin hemen çevresindeki kaynak bölgesinden alınan EDS sonucuna göre ağırlıkça %14,615 Mg elementi ve %80,254 Al elementi olduğu görülmektedir. Anahtar deliğinin hemen çevresindeki kaynak bölgesinden elde edilen EDS sonucuna göre Al elementi Mg elementinden oldukça fazladır bunun nedeni 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK işlemi sırasında, AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi ile 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi takım pimi etrafında takım pimi tarafından karıştırılırken AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin çoğunluğu takım pimi çevresine yapışması ve takımın plakalardan geri çekilmesiyle takım pimi ile birlikte ortamdaki sökölüp alınmasından dolayı olabilir. Şekil 4.27III'de kaynak bölgesinin çevresindeki kancanın olduğu arayüzeyden (AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde kancanın olduğu hattan) alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %40,255 Mg elementi ve %57,310 Al elementi olduğu görülmektedir. Mg elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve Al elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_3Mg_2$



metallerarası bileşikler oluşmuş olabilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşikler tespit edilmiştir.



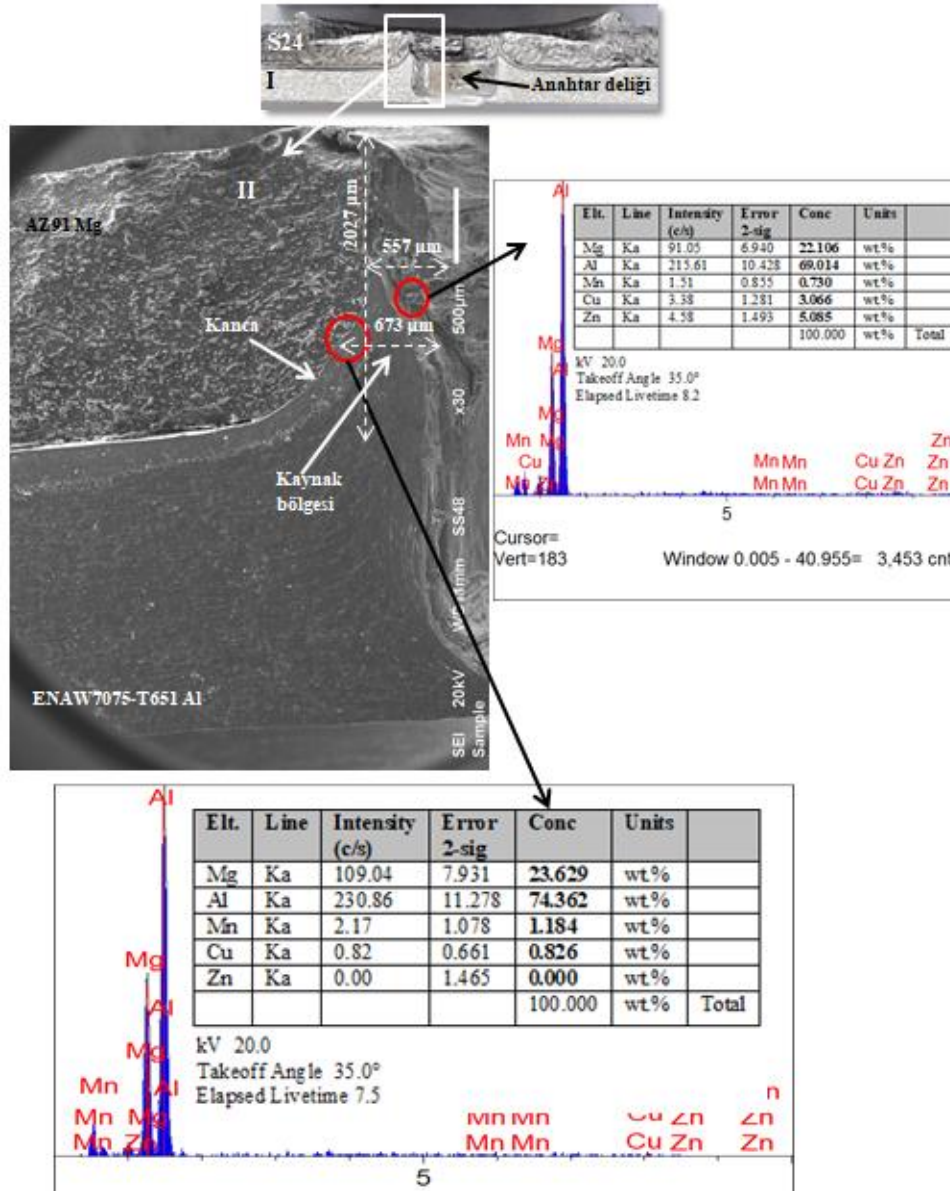
Şekil 4.27. Üçgen pimli takım ile yapılan S23 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.28 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeki üçgen pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.28II'ye bakıldığında, 1800 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra plakaların



arayüzeyini geçip alt plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısı ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve takımın dönerek aşağı doğru plakalara dalma hareketi kuvvetiyle de yumuşayan plakaların malzemeleri dönen takım pimi tarafından takım pimi etrafında plastik deformasyona uğratıp karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesinin bir kısmı yukarıya doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. Şekil 4.28II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Şekil 4.28II'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 2027 µm, üst kaynak genişliği 577 µm ve alt kaynak genişliği 673 µm olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan takım pimi alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında plaka malzemesi yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akarak çıkmıştır. Şekil 4.27II'de 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK ile karşılaştırıldığında, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak genişliği daha fazla ve kaynak yükseklikleri ise birbirine çok yakın hemen hemen aynı olmuştur. Şekil 4.28II'de anahtar deliğinin hemen çevresindeki kaynak bölgesinden alınan EDS sonucuna göre ağırlıkça %22,106 Mg elementi ve %69,014 Al elementi olduğu görülmektedir. Şekil 4.28II'de kaynak bölgesinin çevresindeki kancanın olduğu arayüzeyden (AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi arayüzeyinde kancanın olduğu hattın) alınan EDS analiz sonucuna

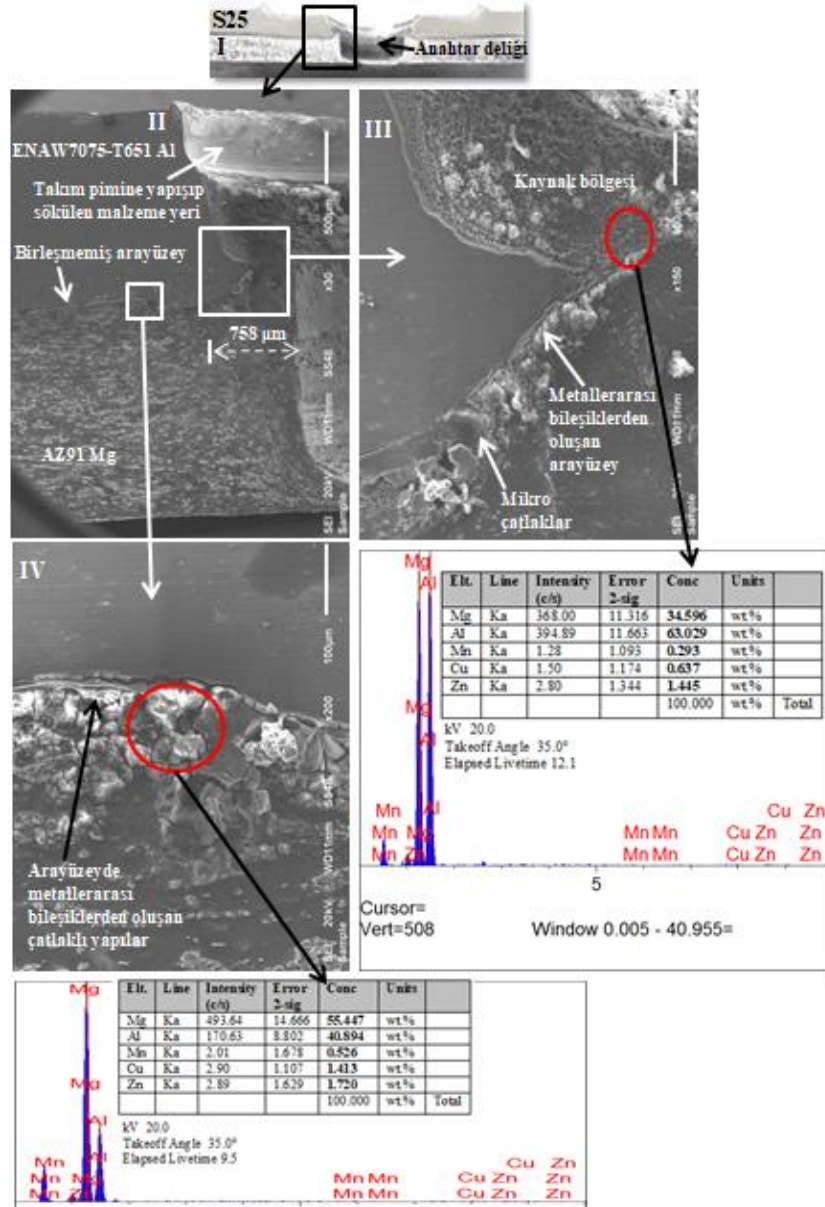
göre ağırlıkça %23,629 Mg elementi ve %74,362 Al elementi olduğu görülmektedir. Mg elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve Al elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_3Mg_2$  metallerearası bileşikler oluşmuş olabilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerearası bileşikler tespit edilmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarında, sabit takım bekleme süresinde takım dönme hızı 1000 dev/dak'dan 1800 dev/dak'ya artırıldığında altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yukarıya doğru üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine akması artmıştır. Sabit takım dönme hızında, takım bekleme süresi 3 sn'den 6 sn'ye ye artırıldığında ise altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yanlara doğru üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine akması artmıştır. Genel olarak takım dönme hızı ve takım bekleme süresi artırıldığında ısı girdisi artığından dolayı kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeylerde özellikle de kancanın olduğu kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeyde (AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi arayüzeyindeki kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzeyde) metallerearası bileşiklerden oluşan tabakların ve mikro çatlakların yoğunluğu artmıştır.



Şekil 4.28. Üçgen pimli takım ile yapılan S24 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.29 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeki vidalı silindirik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.29II'de 1000 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesini yumuşatıp altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında takım pimi tarafından karıştırılması ile kaynak

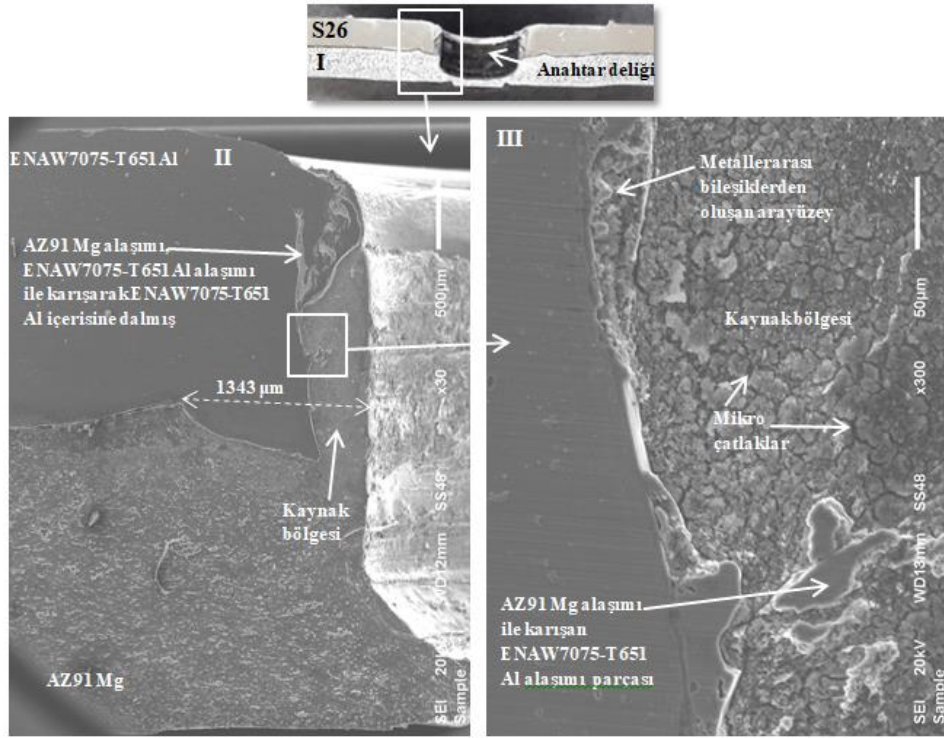
gerçekleşmiştir. Takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden alt AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak bir kaynak bölgesi oluştuğu görülmektedir. Takım üst üste bindirilen 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı plakalara 1000 dev/dak takım dönme hızında dalıp 3 sn bekleyerek plakların malzemelerini vidalı silindirik takım pimi etrafında karıştırdıktan sonra plakalardan geri çekildiğinde Şekil 32II'de görüldüğü gibi vidalı silindirik pimin çevresindeki vida kanallarına yapışıp kalan malzemeler ortamdaki ortamdan sökülüp alınmıştır. Şekil 4.29II'de kaynak bölgesi genişliği (birleşme alanı genişliği) yaklaşık 758  $\mu\text{m}$ 'dir. Kaynak bölgesinde ve özelliklede kaynak bölgesi ile 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi arayüzeyinde ve 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde mikro çatlakların oluştuğu Şekil 4.29III'de görülmektedir. Şekil 4.29III'de kaynak bölgesinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %34,596 Mg elementi ve %63,029 Al elementi olduğu görülmektedir. Şekil 4.29IV'de kaynak bölgesine yakın 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %55,447 Mg elementi ve %40,894 Al elementi olduğu görülmektedir. Mg elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  ve Al elementinin daha fazla olduğu yerlerde ise  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  metallererarası bileşikler oluşmuştur denilebilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  ve  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  metallererarası bileşikler tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinde, kaynak bölgesine dalan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde ve kaynak bölgesine yakın 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde oluşan çatlaklı beyaz bölgeler  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  ve  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  metallererarası bileşiklerden oluşmaktadır. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'de plakalar birbirine takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesiyle birleşmiştir. Kaynak bölgesinde ve özellikle de kaynak bölgesi ile 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi arayüzeyinde ve 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde mikro çatlaklar ve metallererarası bileşiklerden ( $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  ve  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ ) oluşan tabakalar tespit edilmiştir.



Şekil 4.29. Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S25 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.30 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.30II'de 1000 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesini yumuşatıp altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında takım pimi tarafından karıştırılması ile kaynak

gerçekleşmiştir. Takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden alt AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak bir kaynak bölgesi oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.30II'de görüldüğü üzere, takım pimi 1000 dev/dak dönme hızıyla önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi takım pimi etrafında üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesiyle karışarak yukarıya ve yanlara doğru akarak hareket etmiş ve bir miktar da 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmıştır. Üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesi, altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesinden daha sert olduğu için kaynak işlemi sırasında takım pimi üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesi takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itildiğinden dolayı 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesi takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesine Şekil 4.30II'de görüldüğü gibi bir miktar dalmıştır. Şekil 4.30II'de kaynak bölgesi genişliği (birleşme alanı genişliği) yaklaşık 1343  $\mu\text{m}$  ve Şekil 4.29II'de 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak bölgesi genişliğinden (758  $\mu\text{m}$ ) daha büyüktür. Kaynak bölgesinde, kaynak bölgesine dalan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde ve 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde mikro çatlakların oluştuğu Şekil 4.30III'de görülmektedir. Kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  ve  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  metallerearası bileşikler tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinde, kaynak bölgesine dalan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde ve 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde oluşan çatlaklı beyaz bölgeler  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  ve  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  metallerearası bileşiklerden oluşmaktadır. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'de plakalar birbirine takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesiyle birleşmiştir. Kaynak bölgesinde ve kaynak bölgesine yakın plakaların arayüzeyinde mikro çatlaklar ve XRD analiz sonucunda metallerearası bileşiklerden ( $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  ve  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ ) oluşan tabakalar oluşmuştur.

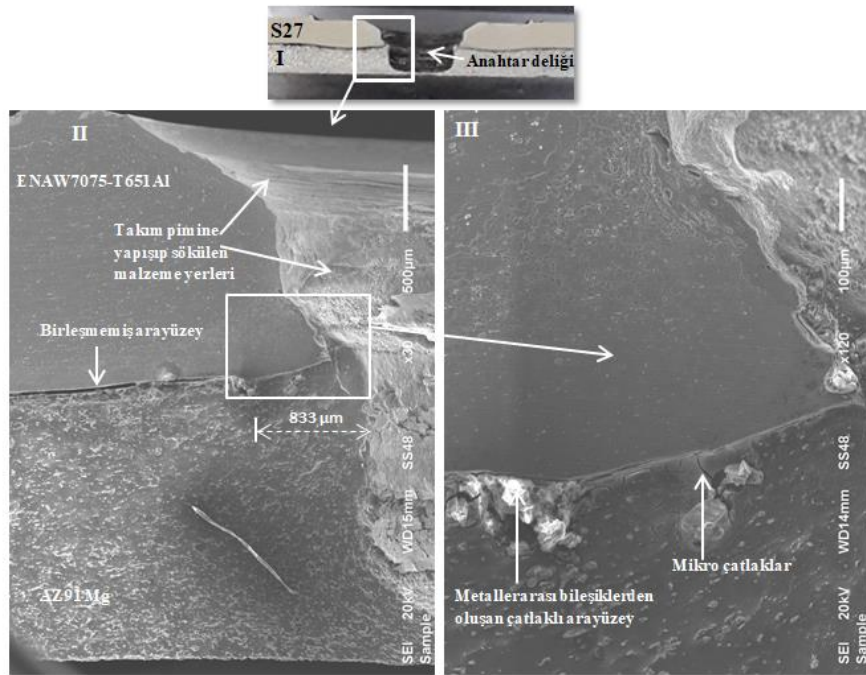


Şekil 4.30. Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S26 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.31 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.31II'de 1400 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesini yumuşatıp altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında takım pimi tarafından karıştırılması ile kaynak gerçekleşmiştir. Takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden alt AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak bir kaynak bölgesi olduğu görülmektedir. Takım üst üste bindirilen 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı plakalara 1400 dev/dak dönme hızında dalıp 3 sn bekleyerek plakaların malzemelerini vidalı silindirik takım pimi etrafında karıştırdıktan sonra plakalardan geri çekildiğinde Şekil 4.31II'de görüldüğü gibi vidalı silindirik pim çevresindeki vida kanallarına yapışıp kalan malzemeler ortamdaki malzemelerden sökülüp alınmıştır. Şekil 4.31II'de kaynak bölgesi genişliği (birleşme alanı genişliği) yaklaşık 833  $\mu\text{m}$ 'dir. Kaynak



bölgesinde özellikle de kaynak bölgesine dalan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde mikro çatlakların oluştuğu Şekil 4.29III'de görülmektedir. Şekil 4.29III'de kaynak bölgesinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %34,596 Mg elementi ve %63,029 Al elementi olduğu görülmektedir. Şekil 4.29IV'de kaynak bölgesine yakın 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %55,447 Mg elementi ve %40,894 Al elementi olduğu görülmektedir. Mg elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve Al elementinin daha fazla olduğu yerlerde ise  $Al_3Mg_2$  metallerrarası bileşikler oluşmuştur denilebilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerrarası bileşikler tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinde ve kaynak bölgesine yakın 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde oluşan çatlaklı beyaz bölgeler  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  metallerrarası bileşiklerden oluşmaktadır.



Şekil 4.31. Vidalı silindirik pimli takım yapılan S27 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

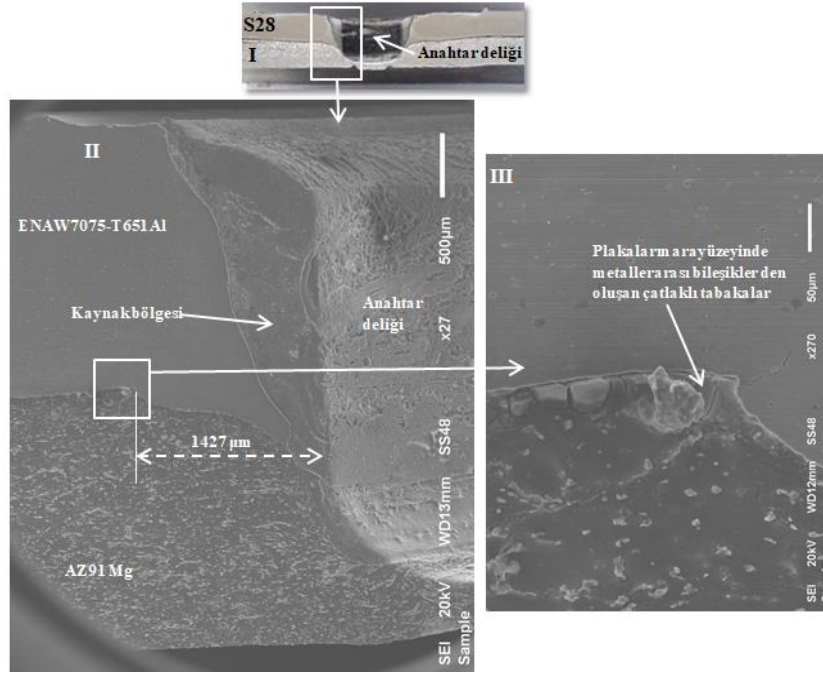
Şekil 4.32 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakasının üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.32II'de 1400 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara



önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesini yumuşatıp altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında takım pimi tarafından karıştırılması ile kaynak gerçekleşmiştir. Takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden alt AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak bir kaynak bölgesi oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.32II'de görüldüğü üzere, takım pimi 1400 dev/dak dönme hızıyla önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi takım pimi etrafında üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesiyle karışarak yukarıya ve yanlara doğru akarak hareket etmiştir. Üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesi, altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesinden daha sert olduğu için kaynak işlemi sırasında takım pimi üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesi takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itildiğinden dolayı 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesi takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesine Şekil 4.32II'de görüldüğü gibi bir miktar dalmıştır.

Şekil 4.32II'de kaynak bölgesi genişliği (birleşme alanı genişliği) yaklaşık 1427 µm ve Şekil 4.31III'de 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak bölgesi genişliğinden (833 µm) daha büyüktür. Kaynak bölgesine dalan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde ve 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde mikro çatlakların oluştuğu Şekil 4.32III'de görülmektedir. Kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşikler tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinde, Kaynak bölgesine dalan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde ve 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan beyaz çatlaklı bölgeler oluşmuştur. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'de plakalar birbirine takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesiyle ve plakaların

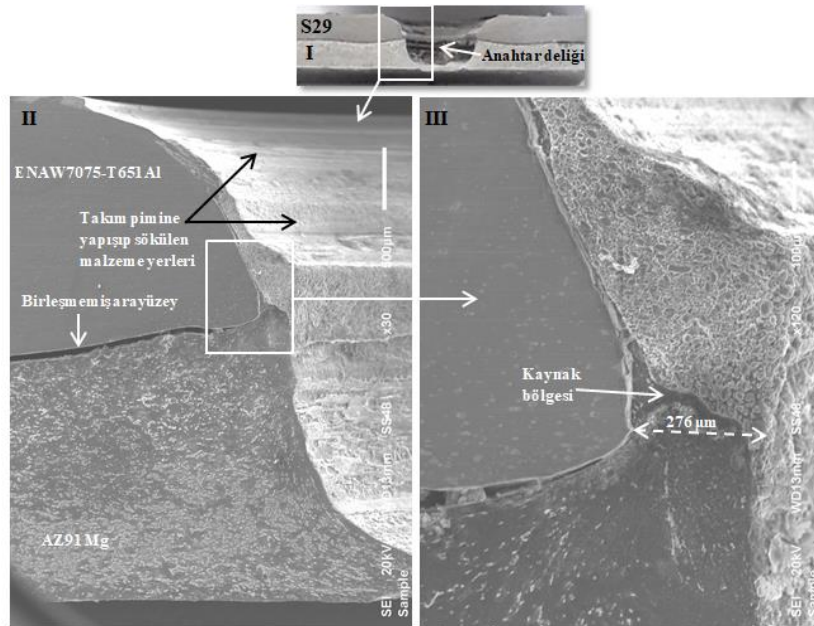
arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden oluşan tabakalar ile birleşmiştir. Kaynak bölgesi ile 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi arayüzeyinde ve 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan çatlaklı tabakalar oluşmuştur.



Şekil 4.32. Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S28 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.33 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.33II'de 1800 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesini yumuşatıp altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında takım pimi tarafından karıştırılması ile kaynak gerçekleşmiştir. Takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden alt AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak bir kaynak bölgesi oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.33II'de görüldüğü üzere, takım pimi 1800 dev/dak dönme hızıyla önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha

sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi takım pimi etrafında üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesiyle karışarak yukarıya ve yanlara doğru akarak hareket etmiştir. Takım üst üste bindirilen 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı plakalara 1800 dev/dak dönme hızında dalıp 3 sn bekleyerek plakaların malzemelerini vidalı silindirik takım pimi etrafında karıştırdıktan sonra plakalardan geri çekildiğinde Şekil 4.33II'de görüldüğü gibi vidalı silindirik pimin çevresindeki vida kanallarına yapışıp kalan malzemeler ortamdaki sökölüp alınmıştır. Şekil 4.33III'de kaynak bölgesi genişliği (birleşme alanı genişliği) yaklaşık 276  $\mu\text{m}$ 'dir. Kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  ve  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  metallerrarası bileşikler tespit edilmiştir. Şekil 4.33III'de kaynak bölgesinde  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  ve  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  metallerrarası bileşikler oluştuğu için kaynak bölgesi gevrek ve taneli bir yapıya sahiptir.

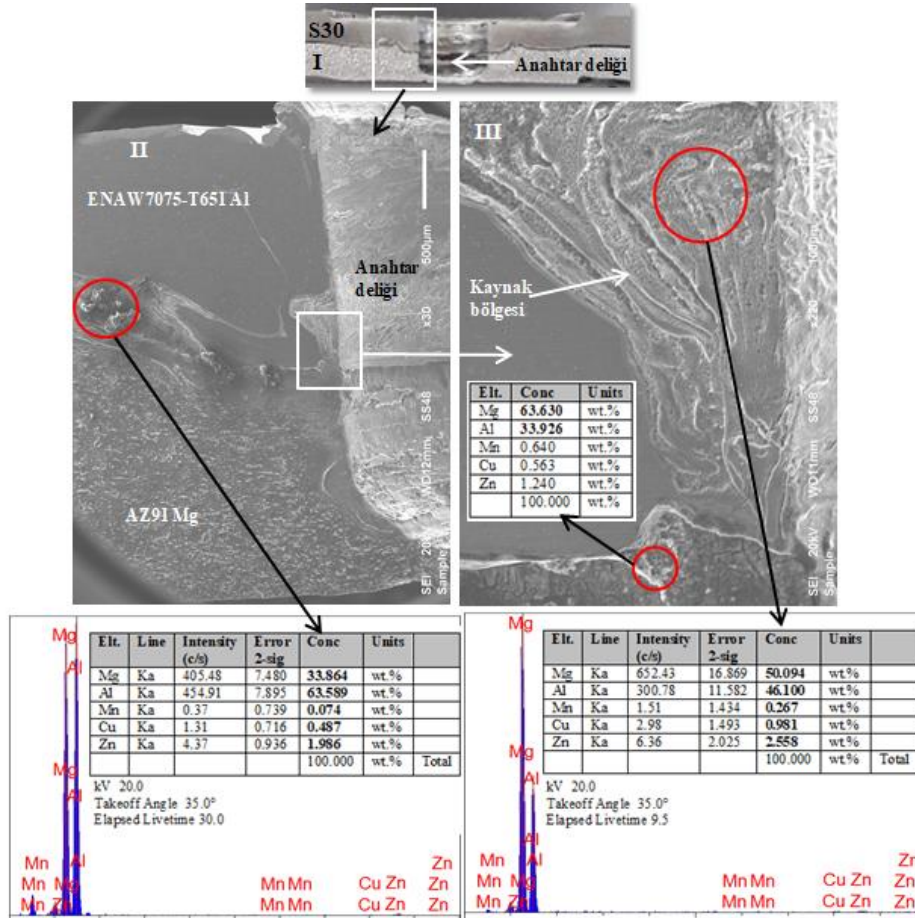


Şekil 4.33. Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S29 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.31 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Ayrıca, plakaların birleştiği yerde elementlerin ağırlıkça yüzdesini tespit etmek için yapılan EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.34II'de 1800 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al

alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesini yumuşatıp altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında takım pimi tarafından karıştırılması ile kaynak gerçekleşmiştir. Takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden alt AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak bir kaynak bölgesi oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.30II'de görüldüğü üzere, takım pimi 1800 dev/dak dönme hızıyla önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi takım pimi etrafında üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesiyle karışarak yukarıya ve yanlara doğru akarak hareket etmiş hem de üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmıştır. Kaynak bölgesinde ve kaynak bölgesi ile 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi arayüzeyinde ve 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde mikro çatlakların oluştuğu Şekil 4.34III'de görülmektedir. Şekil 4.31III'de kaynak bölgesinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %50,094 Mg elementi ve %46,1 Al elementi olduğu görülmektedir. Şekil 4.34II'de kaynak bölgesine yakın 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinden alınan EDS analiz sonucuna göre ağırlıkça %33,864 Mg elementi ve %63,589 Al elementi olduğu görülmektedir. Mg elementinin daha fazla olduğu yerlerde  $Al_{12}Mg_{17}$  ve Al elementinin daha fazla olduğu yerlerde ise  $Al_3Mg_2$  metallererarası bileşikler oluşmuştur denilebilir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallererarası bileşikler tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinde, kaynak bölgesine dalan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde ve kaynak bölgesine yakın 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzeyinde oluşan çatlaklı beyaz bölgeler  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  metallererarası bileşiklerden oluşmaktadır. Sonuç olarak 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'de plakalar birbirine takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesiyle birleşmiştir. Kaynak bölgesinde ve özellikle de kaynak bölgesi ile 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi arayüzeyinde ve 7075-T651

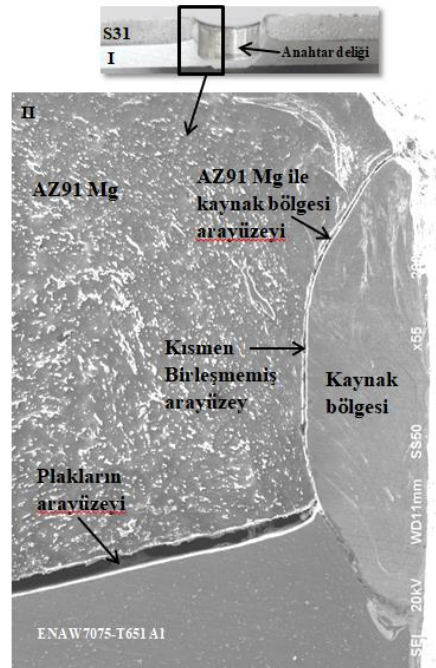
Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arayüzünde mikro çatlaklar ve metallerrarası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan tabakalar tespit edilmiştir.



Şekil 4.34. Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S30 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.35 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara daldırılan dönen takım piminin ve üst plakaya bir miktar daldırılan dönen takım omuzunun plakalardan geri çekilmesinden sonra takım piminin plakalarda oluşturduğu delik (anahtar deliği) Şekil 4.35I'deki kaynak enine kesit alanında görülmektedir. Şekil 4.35II'de görüldüğü üzere, vidalı silindirik takım pimi 1000 dev/dak dönme hızıyla önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen bir miktar üst AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden alt

7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak bir kaynak bölgesi oluştuğu görülmektedir. Ancak, kaynak bölgesi ile AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi arasındaki arayüzeyde tam bir birleşmenin gerçekleşmediği plakaların arayüzeyinden başlayıp AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinden devam edip anahtar deliği çevresine kadar giden ciddi bir çatlak kusuru oluştuğu görülmektedir. Kaynak bölgesi ile AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi arasındaki arayüzeyde oluşan bu çatlak kusurunun nedeni plakaların malzemelerini yumuşatıp karıştırmak için takım dönme hızıyla birlikte takım bekleme süresinin yeterli sürtünme ısısını üretemediğinden dolayı olmuş olabilir.



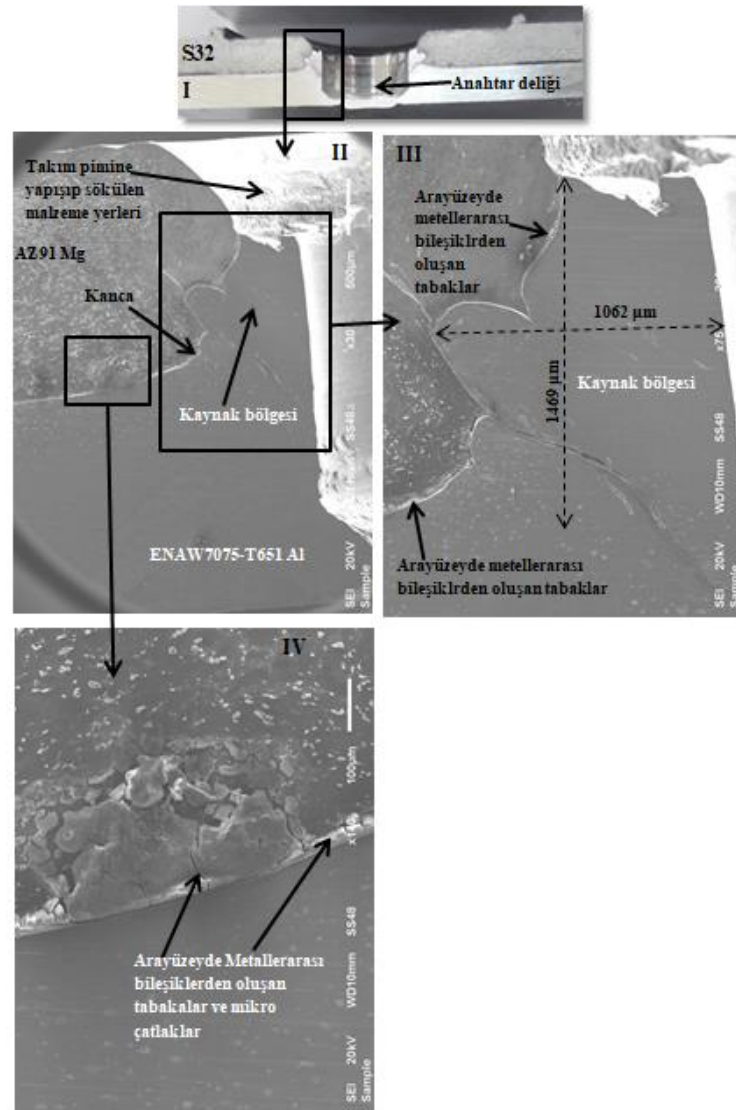
şekil 4.35. Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S31 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

şekil 4.36 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. şekil 4.36II'ye bakıldığında, 1000 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip alt plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısısı ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve takımın dönerek aşağı doğru plakalara dalma hareketi kuvvetiyle de



yumuşayan plakların malzemeleri dönen takım pimi tarafından takım pimi etrafında plastik deformasyona uğratıp karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesinin bir kısmı yukarıya doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. SKNK’de takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya daldığında plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek çıkması sonucu oluşan geometrik şekil kanca şekline benzediği için bu geometrik yapıya kanca adı verilmiştir. Şekil 4.36II’de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzey yukarıya doğru yönelmiştir. Şekil 4.36III’de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK’nın kaynak boyu 1469 µm ve kaynak genişliği ise 1062 µm olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan takım pimi alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında plaka malzemesi üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akarak dalmıştır. Ayrıca, Şekil 4.35II’de 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK’nın kaynak bölgesi boyundan ve genişliğinden daha büyüktür. Takım üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara 1000 dev/dak dönme hızında dalıp 3 sn bekleyerek plakların malzemelerini vidalı silindirik takım pimi etrafında karıştırdıktan sonra plakalardan geri çekildiğinde Şekil 4.36II’de görüldüğü üzere vidalı silindirik pimin çevresindeki vida kanallarına yapışıp kalan özellikle de üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı malzemeler ortamdaki sökölüp alınmıştır. Şekil 4.36III’de görüleceği üzere kaynak bölgesinin

çevresindeki arayüzeyde (AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzeyde ve kaynağın uç kısmındaki arayüzeyde) ve ayrıca Şekil 4.36IV’de görüleceği üzere AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalarının arayüzeyinde mikro çatlaklar ve metallerearası bileşiklerden (beyaz bölgeler) oluşan tabakalar meydana gelmiştir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerearası bileşikler tespit edilmiştir.



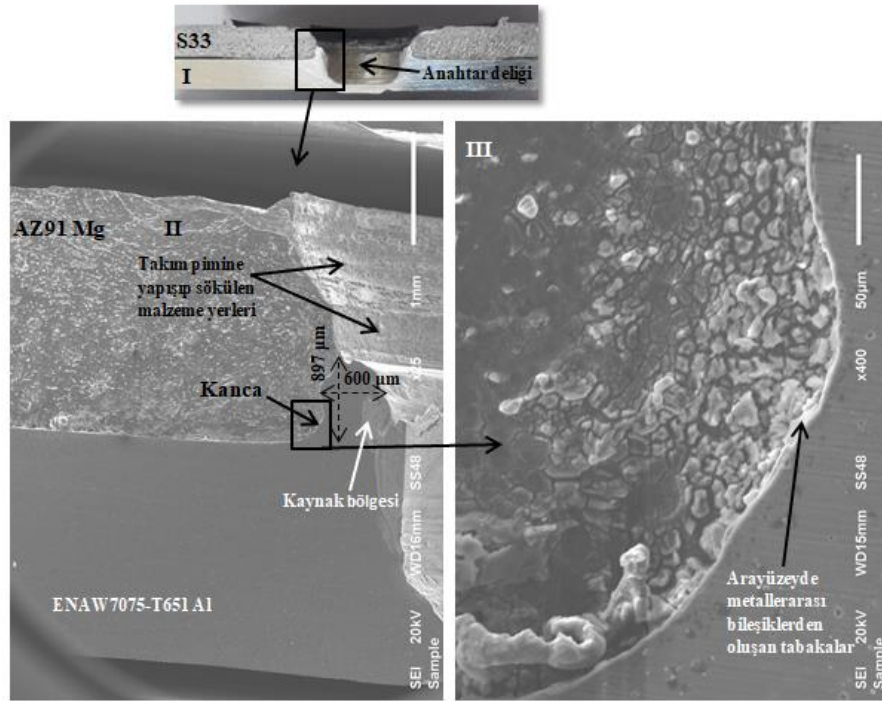
Şekil 4.36. Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S32 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.37 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil



4.37II'ye bakıldığında, 1400 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip alt plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısısı ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve takımın dönerek aşağı doğru plakalara dalma hareketi kuvvetiyle de yumuşayan plakların malzemeleri dönen takım pimi tarafından takım pimi etrafında plastik deformasyona uğratıp karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, alta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesinin bir kısmı yukarıya doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi alta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. SKNK'de takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya daldığında plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek çıkması sonucu oluşan geometrik şekil kanca şekline benzediği için bu geometrik yapıya kanca adı verilmiştir. Şekil 4.37II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzey yukarıya doğru yönelmiştir. Şekil 4.37II'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 897 µm ve kaynak genişliği ise 600 µm olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan takım pimi alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında plaka malzemesi yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akmıştır. Takım üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara 1400 dev/dak dönme hızında dalıp 3 sn bekleyerek plakların malzemelerini vidalı silindirik takım pimi etrafında karıştırdıktan

sonra plakalardan geri çekildiğinde Şekil 4.37II’de görüldüğü üzere vidalı silindirik pimlin çevresindeki vida kanallarına yapışıp kalan özellikle de üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı malzemeler ortamdaki sökölüp alınmıştır. Şekil 4.37III’de görüleceği üzere kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeyde (AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzeyde) ve AZ91 Mg alaşımı plaka ile 7075-T651 Al alaşımı plaka arasındaki arayüzeyde mikro çatlakların da olduğu metallerrarası bileşiklerden oluşan tabakalar (beyaz bölgeler) meydana gelmiştir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerrarası bileşikler tespit edilmiştir.

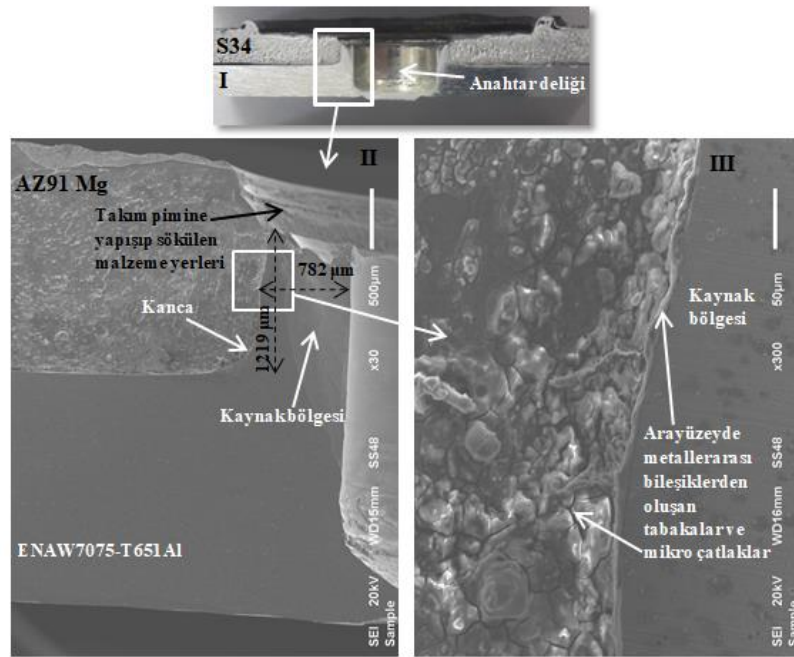


Şekil 4.37. Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S33 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.38 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.38II'ye bakıldığında, 1400 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip alt plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısısı ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısısı ile plakaların malzemeleri

yumuşamış ve takımın dönerek aşağı doğru plakalara dalma hareketi kuvvetiyle de yumuşayan plakların malzemeleri dönen takım pimi tarafından takım pimi etrafında plastik deformasyona uğratıp karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesinin bir kısmı yukarıya doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. SKNK’de takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya daldığında plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek çıkması sonucu oluşan geometrik şekil kanca şekline benzediği için bu geometrik yapıya kanca adı verilmiştir. Şekil 4.38II’de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzey yukarıya doğru yönelmiştir. Şekil 4.38II’de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK’nın kaynak boyu 1219 µm ve kaynak genişliği ise 782 µm olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan takım pimi alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında plaka malzemesi üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akarak dalmıştır. Ayrıca, Şekil 4.37II’de 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK’nın kaynak bölgesi boyundan ve genişliğinden daha büyüktür. Takım üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara 1400 dev/dak dönme hızında dalıp 6 sn bekleyerek plakların malzemelerini vidalı silindirik takım pimi etrafında karıştırdıktan sonra plakalardan geri çekildiğinde Şekil 4.38II’de görüldüğü üzere vidalı silindirik pimin çevresindeki vida kanallarına yapışıp kalan özellikle de üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı malzemeler

ortamdan sökülüp alınmıştır. Şekil 4.38III'de görüleceği üzere kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeyde (AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzeyde) ve ayrıca AZ91 Mg alaşımı plaka ile 7075-T651 Al alaşımı plaka arasındaki arayüzeyde mikro çatlakların da olduğu metallerearası bileşiklerden (beyaz bölgeler) oluşan tabakalar meydana gelmiştir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerearası bileşikler tespit edilmiştir.

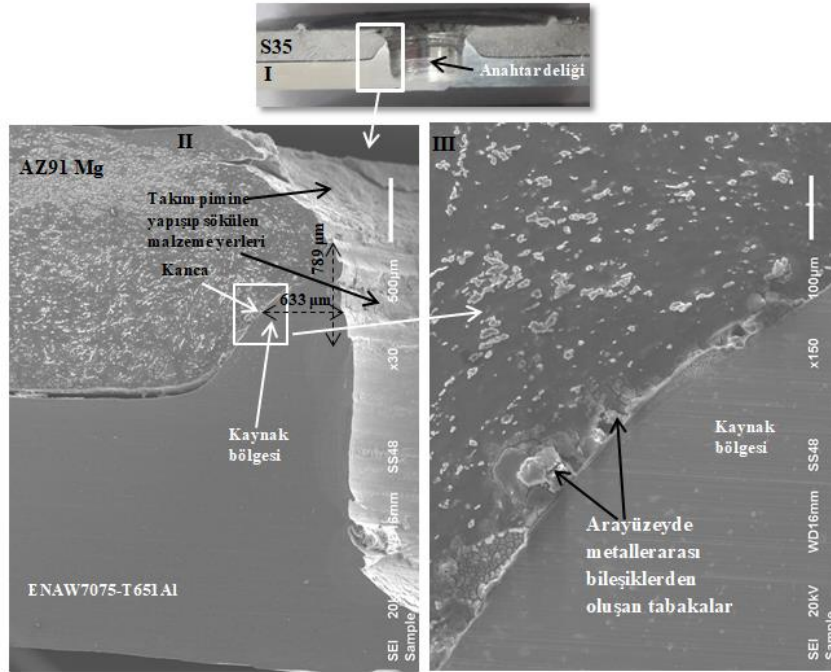


Şekil 4.38. Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S34 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.38 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakasının üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.39II'ye bakıldığında, 1800 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip alt plakaya dalıp 3 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısı ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve takımın dönerek aşağı doğru plakalara dalma hareketi kuvvetiyle de yumuşayan plakaların malzemeleri dönen takım pimi tarafından takım pimi etrafında

plastik deformasyona uğratıp karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesinin bir kısmı yukarıya doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. SKNK'de takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya daldığında plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek çıkması sonucu oluşan geometrik şekil kanca şekline benzediği için bu geometrik yapıya kanca adı verilmiştir. Şekil 4.39II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzey anahtar deliğine doğru yönelmiştir. Şekil 4.39II'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 789 µm ve kaynak genişliği ise 633 µm olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan takım pimi alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında plaka malzemesi yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akmıştır. Takım üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara 1800 dev/dak dönme hızında dalıp 3 sn bekleyerek plakaların malzemelerini vidalı silindirik takım pimi etrafında karıştırdıktan sonra plakalardan geri çekildiğinde Şekil 4.39II'de görüldüğü üzere vidalı silindirik pimin çevresindeki vida kanallarına yapışıp kalan çoğunlukla üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi ve bir miktar da altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi ortamdan sökülüp alınmıştır. Şekil 4.39III'de görüleceği üzere kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeyde (AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzeyde) ve ayrıca AZ91 Mg alaşımı plaka ile 7075-T651 Al alaşımı plaka arasındaki arayüzeyde mikro

çatlakların da olduğu metallerrarası bileşiklerden (beyaz bölgeler) oluşan tabakalar meydana gelmiştir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerrarası bileşikler tespit edilmiştir.



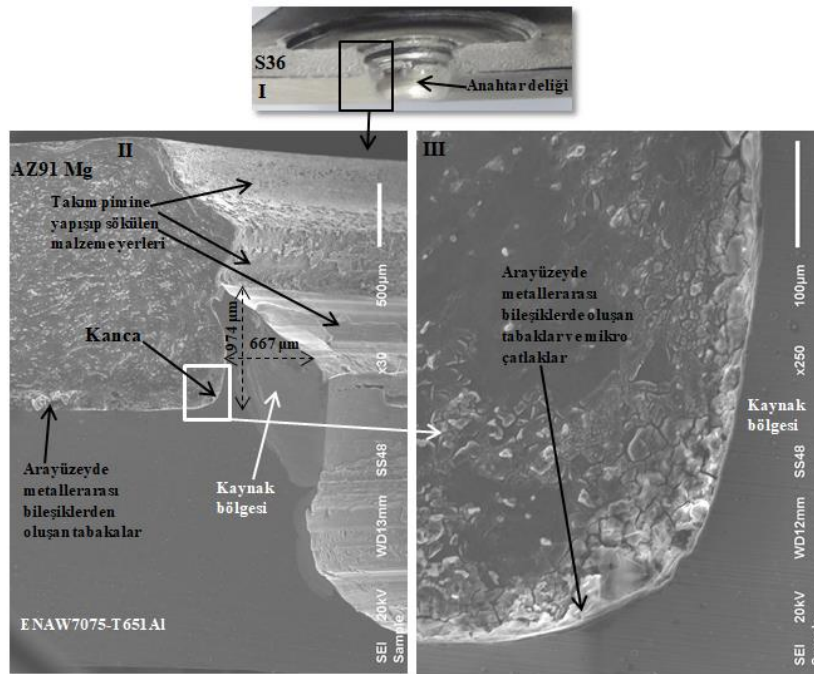
Şekil 4.39. Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S35 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

Şekil 4.40 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın enine kesit alanını ve kaynak bölgesinin mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.40II'ye bakıldığında, 1800 dev/dak dönme hızında dönen takım pimi üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara önce üst plakaya daha sonra plakaların arayüzeyini geçip alt plakaya dalıp 6 sn bekleme süresi sırasında ortaya çıkan sürtünme ısı ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile plakaların malzemeleri yumuşamış ve takımın dönerek aşağı doğru plakalara dalma hareketi kuvvetiyle de yumuşayan plakaların malzemeleri dönen takım pimi tarafından takım pimi etrafında plastik deformasyona uğratıp karıştırmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi, altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi

meydana gelmiştir. Daha kısa tarif etmek gerekirse, dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üst plakaya daha sonra alt plakaya ve eş zamanlı olarak dönen takım omuzu üst plakaya bir miktar daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesinin bir kısmı yukarıya doğru akarak hareket eden alt plaka malzemesiyle takım pimi etrafında karışmasıyla ve ayrıca dönen takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında yumuşayan malzeme akarak yukarı ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakasının malzemesi içerisine dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. Şekil 4.40II'de görüldüğü gibi takım pimi alt plakaya dalmasıyla birlikte plakaların arayüzeyi yukarıya doğru bükülerek yönelmiş ve kanca geometrisi oluşmuştur. Kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzey yukarıya doğru yönelmiştir. Şekil 4.40II'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak boyu 974 µm ve kaynak genişliği ise 667 µm olduğu görülmektedir. Kaynak boyu, kaynak genişliğinden daha büyük olduğundan takım pimi alta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında plaka malzemesi yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akmıştır. Ayrıca, Şekil 4.39II'de 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak bölgesi boyundan ve genişliğinden daha büyüktür. Takım üst üste bindirilen AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalara 1800 dev/dak dönme hızında dalıp 6 sn bekleyerek plakaların malzemelerini vidalı silindirik takım pimi etrafında karıştırdıktan sonra plakalardan geri çekildiğinde Şekil 4.40II'de görüldüğü üzere vidalı silindirik pimin çevresindeki vida kanallarına yapışıp kalan çoğunlukla üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi ve bir miktarda altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi ortamdaki sökölüp alınmıştır. Şekil 4.40III'de görüleceği üzere kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeyde (AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi ile kaynak bölgesi arayüzeyinde kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzeyde) ve ayrıca AZ91 Mg alaşımı plaka ile 7075-T651 Al alaşımı plaka arasındaki arayüzeyde mikro çatlaklar ve metallerearası bileşiklerden (beyaz bölgeler) oluşan tabakalar meydana gelmiştir. Ayrıca, kaynak bölgesinin enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonucunda  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerearası bileşikler tespit edilmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarında, Sabit takım dönme hızında, takım bekleme süresi 3 sn'den 6 sn'ye ye artırıldığında altta bulunan



7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yanlara doğru üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine akarak dalması (kaynak genişliği) artmıştır. Genel olarak, takım dönme hızı 1000 dev/dak'dan 1800 dev/dak'ya ve takım bekleme süresi 3 sn'den 6 sn'ye ye artırıldığında, ısı girdisi artığından dolayı kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeylerde (AZ91 Mg alaşımı plaka ile kaynak bölgesi arayüzeylerinde kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzeylerde)  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerearası bileşiklerden oluşan tabakların ve mikro çatlakların yoğunluğu artmıştır ve ayrıca takım pimine yapışıp kalan ve takım pimi ile ortamdan sökülüp alınan malzeme miktarı artmıştır. 1000 ve 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK kaynakları en büyük Kaynak boyuna ve genişliğine sahip olmuştur.



Şekil 4.40. Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S36 kaynağının enine kesit alanı ve mikroyapısı

#### 4.1.2. Mikrosertlik

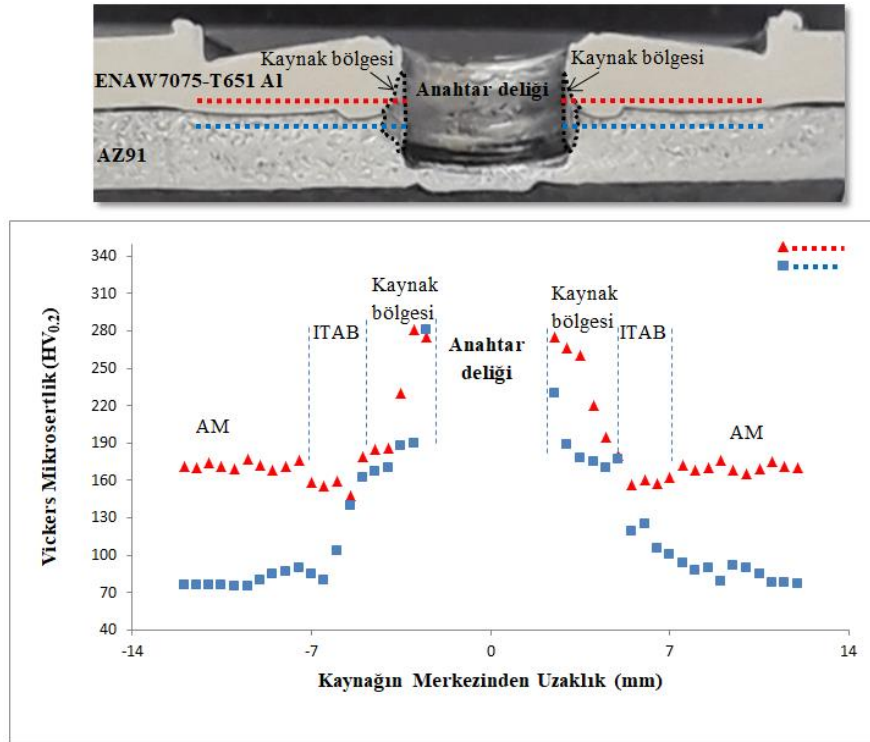
Yapılan SKNK kaynaklarının Vickers mikrosertliği THV-1D model Vickers sertlik test cihazında 0,2 kg yük ve 10 s bekleme süresi uygulanarak ölçülmüştür.

7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarının sertlik dağılımları



plakaların arayüzeyinin hemen üst tarafındaki 7075-T651 Al alaşımı plaka ana malzemesinden ve hemen alt taraftaki AZ91 Mg alaşımı plaka ana malzemesinden başlayıp daha sonra kaynak bölgesine doğru ilerleyip ve daha sonra kaynak bölgesi üzerinden anahtar deliği çevresine kadar ilerleyerek sertlik ölçümleri alınması ile elde edilmiştir. Üst taraftaki 7075-T651 Al alaşımı plakanın ortalama sertliği 173 HV olarak ölçülürken AZ91 Mg alaşımı plakanın ortalama sertliği 78 HV olarak ölçüldü. Şekil 4.41’de SKNK kaynaklarının sertliği anahtar deliği merkezine göre neredeyse simetrik olmuştur. Şekil 4.41’deki gibi SKNK kaynaklarında plakaların arayüzeyinin hemen üst tarafındaki 7075-T651 Al alaşımı plaka ana malzemesinden başlayıp anahtar deliği çevresine doğru ilerlendiğinde kaynak bölgesine varmadan kaynak bölgesinin hemen çevresinde ısı tesiri altında kalan 7075-T651 Al alaşımı malzeme sertliği 160 HV’nin altına düşmüş ve daha sonra kaynak bölgesine girip anahtar deliği çevresine ilerlendiğinde sertlik artarak maksimum değere ulaşmıştır. Plakaların arayüzeyinin hemen alt tarafındaki AZ91 Mg alaşımı plaka ana malzemesinden başlayıp kaynak bölgesine ilerlendiğinde sertlik biraz artmış daha sonra kaynak bölgesine girip anahtar deliği çevresine doğru ilerlendiğinde ise sertlik artarak maksimum değere ulaşmıştır. Plakaların arayüzeyinin hemen alt tarafındaki AZ91 Mg alaşımı plaka ana malzemesinden başlayıp kaynak bölgesine doğru ilerlendiğinde sertliğin biraz artmasının nedeni plakaların arayüzeyinde basınç ve ısı ile oluşan metallerearası bileşiklerin ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) etkisinden dolayı olabilir. SKNK kaynaklarının kaynak bölgesi sertlik değerleri 178 ve 278 HV arasında değişmekte ve 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı malzemelerinin sertliğinden daha yüksek olmuştur. SKNK kaynaklarının kaynak bölgesi sertliğinin daha yüksek olmasının nedeni büyük ihtimalle kaynak bölgesinde oluşan sert ve gevrek metallerearası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) dolayısıdır. SKNK kaynaklarında metallerearası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) XRD analizi ile tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar (Sato vd. 2004; Chen ve Nakata 2008; Chowdhury vd. 2013; Sato vd. 2010; Choi vd. 2011; Dietrich vd. 2011; Patel vd. 2011; Patel vd. 2012; Patel vd. 2012) tarafından bulunmuştur. Takım dönme hızı (1000, 1400 ve 1800 dev/dak) ve takım bekleme süresi (3 ve 6 sn) artırılarak yapılan SKNK’de sürtünme ısı girdisi fazla olduğu için kaynak bölgesinde sert ve gevrek metallerearası bileşiklerin ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) artmasına yol açmış bu da kaynak bölgesinin daha sert olmasına neden olmuştur. Yani, sabit 3 sn veya 6 sn takım dönme hızında takım dönme hızı artırılarak veya sabit takım dönme hızında takım bekleme süresi 3 sn’den 6 sn’ye artırıldığında ısı girdisi artığı için

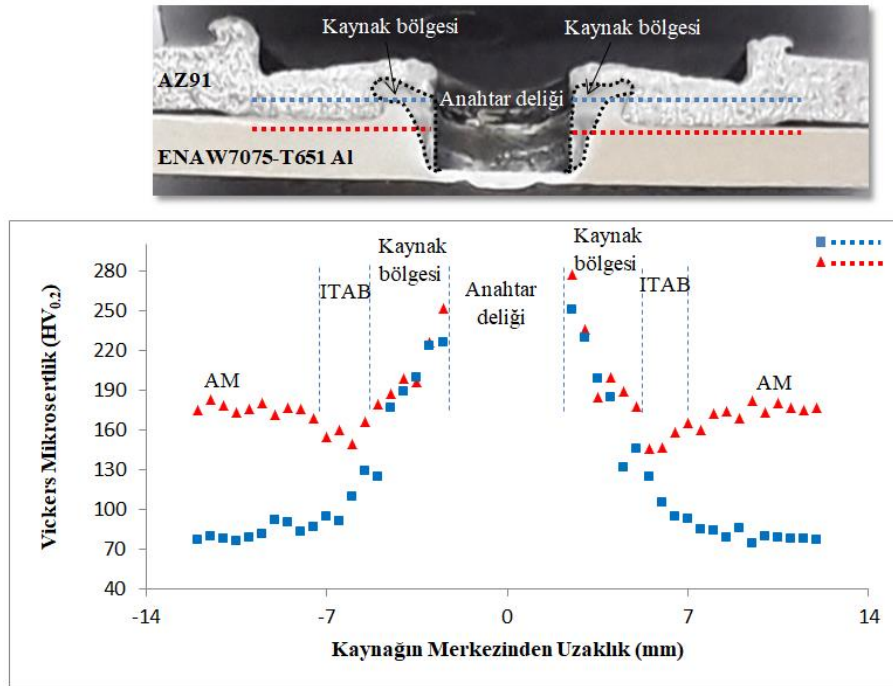
kaynak bölgesinde metallerarası bileşiklerin ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) yoğunluğunun artmasına neden olmuş bunun sonucunda kaynak bölgesinin sertliği artmıştır. 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde üretilen SKNK'nın kaynak bölgesinin sertliği en düşük olmuştur. Çünkü bu takım dönüş hızında ve bekleme süresinde en az ısı girdisi olmuş bunun sonucunda en az metallerarası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşmuştur.



Şekil 4.41. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarının kaynak bölgesi sertliği

AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımlarla yapılan SKNK kaynaklarının sertlik dağılımları plakaların arayüzeyinin hemen üst tarafındaki AZ91 Mg alaşımı plaka ana malzemesinden ve hemen alt taraftaki 7075-T651 Al alaşımı plaka ana malzemesinden başlayıp daha sonra kaynak bölgesine doğru ilerleyip ve daha sonra kaynak bölgesi üzerinden anahtar deliği çevresine kadar ilerleyerek sertlik ölçümleri alınması ile elde edilmiştir. Bütün SKNK kaynaklarının kaynak bölgesi sertliği AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalarının sertliğinden daha yüksek olmuştur. Şekil 4.42'de SKNK kaynaklarının sertliği anahtar deliği merkezine göre neredeyse simetrik olmuştur. Şekil 4.422'deki gibi SKNK kaynaklarında plakaların arayüzeyinin hemen üst tarafındaki

AZ91 Mg alaşımı plaka ana malzemesinden başlayıp kaynak bölgesine doğru ilerlendiğinde sertliğin biraz artmasının nedeni plakaların arayüzeyinde basınç ve ısı ile oluşan metallerrarası bileşiklerin ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) etkisinden dolayı olabilir. Plakaların arayüzeyinin hemen alt tarafındaki 7075-T651 Al alaşımı plaka ana malzemesinden başlayıp anahtar deliği çevresine doğru ilerlendiğinde kaynak bölgesine varmadan kaynak bölgesinin hemen çevresinde ısı tesiri altında kalan 7075-T651 Al alaşımı malzeme sertliği 160 HV'nin altına düşmüş ve daha sonra kaynak bölgesine girip anahtar deliği çevresine ilerlendiğinde sertlik artarak maksimum değere ulaşmıştır. SKNK kaynaklarının kaynak bölgesi sertliğinin daha yüksek çıkması metallerrarası bileşiklerin ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşmasına bağlanabilir. Düşük takım dönme hızında ve takım bekleme süresinde üretilen SKNK'nın kaynak bölgesi sertliği düşük çıkmış ve yüksek takım dönme hızında ve takım bekleme süresinde ısı girdisi fazla olduğu için metallerrarası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) daha fazla meydana geldiğinden dolayı üretilen SKNK kaynaklarının kaynak bölgesi sertliği yüksek olmuştur.



Şekil 4.42. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarının kaynak bölgesi sertliği

7075-T651 Al alaşımı ile AZ91 Mg alaşım arasında yapılan SKNK işlemi sırasında takım pimi tarafından karıştırılan alaşımların malzemelerinin bir kısmı ve çoğunlukla da AZ91 Mg alaşım malzemesi takımların pimine ve omuzuna yapışmıştır. Konik pimli takıma

kıyasla, üçgen pimli ve vidalı silindirik pimli takımların pimine daha çok malzeme yapışıp kalmıştır Şekil 4.43'te görüldüğü gibi çünkü üçgen pimli takımın piminde keskin kenarlar ve vidalı silindirik pimli takımın piminde de ise keskin kenarlar ve vida kanalları vardır. SKNK işlemlerinden sonra üçgen ve vidalı silindirik pimli takımların pimlerinde bir miktar aşınma da gözlemlenmiştir.



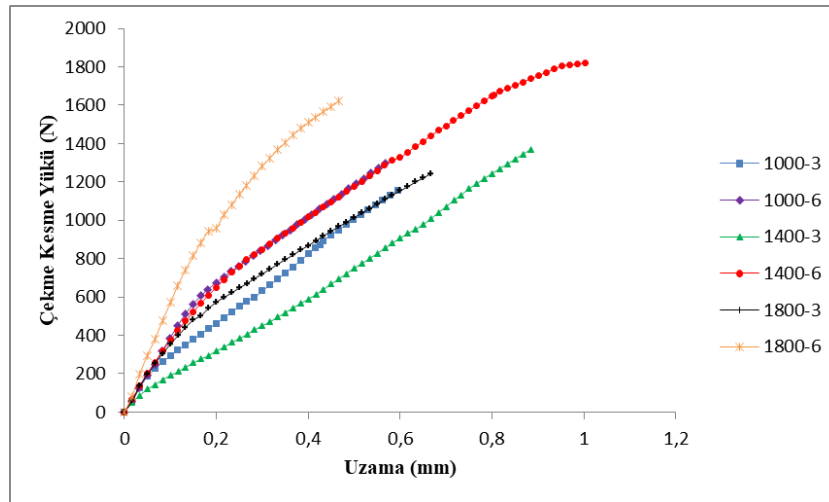
Şekil 4.43. SKNK işlemi sırasında üçgen ve vidalı silindirik pimli takımların pimine ve omuzuna yapışan malzeme

#### 4.1.3. Çekme Kesme Testi

Yapılan bütün bindirmeli SKNK kaynaklarının çekme kesme testi SHIMADZU marka 250 kN universal çekme test makinesinde 1 mm/dak çekme hızında yapıldı. Şekil 4.44 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1000, 1400 ve 1800 dev/dak dönme hızında, 10,3 mm/dak sabit dalma ve çıkma hızında, 3,8 mm sabit dalma derinliğinde ve 3 ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme testi grafiklerini göstermektedir. Şekil 4.44'ten takım dönüş hızının ve takım bekleme süresinin üretilen SKNK kaynaklarının çekme kesme yükleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir. SKNK işleminde takım dönme hızının ve takım bekleme süresinin asıl görevi sürtünme ısısı (ısı girdisi) üreterek plakaların malzemelerinin yumuşamasını sağlamaktır. Takımın dönerek plakalara dalma hareketi kuvveti de yumuşayan plakaların malzemelerini plastik deformasyona uğratar ve daha sonra takım pimi etrafında karıştırması sonucunda takım pimi etrafında kaynak oluşur. Şekil 4.44'de 7075-T651 Al alaşımı plakayı, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerine bindirip konik pimli takım ile 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme

süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1157 N, 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1327 N, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1372 N, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1820 N, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1244 N, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1623 N bulunmuştur. Şekil 4.44'te görüldüğü üzere, 1000, 1400 ve 1800 dev/dak takım dönme hızında, takım bekleme süresi 3 saniyeden 6 saniyeye çıkarıldığında SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü artmıştır. Sabit 3 ve 6 sn takım bekleme süresinde, takım dönme hızı 1000 dev/dak'dan 1400 dev/dak'ya çıkartılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü artmıştır. Ancak, sabit 3 ve 6 sn takım bekleme süresinde, takım dönme hızı daha da 1400 dev/dak'dan 1800 dev/dak'ya artırıldığında yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü bir miktar azalmıştır. Şekil 4.44'te görüldüğü üzere en yüksek 1820 N çekme kesme yüküne sahip SKNK 1400 dev/dak'da ve 6 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. En düşük 1157 N çekme kesme yüküne sahip SKNK ise 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK en düşük 1157 N çekme kesme yüküne sahip olmasının nedeni 1000 dev/dak takım dönme hızı ve 3 sn takım bekleme süresi birlikte plakaların malzemelerini yumuşatıp takım pimi etrafında karıştırılması için yeterli sürtünme ısı girdisi sağlayamadığından dolayı sadece hemen takım pimi çevresindeki plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakalar ile birleşmenin gerçekleşmesinden dolayıdır (makro ve mikroyapı bölümünde Şekil 8.4'de görülebilir). 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1327 N, 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükünden 1157 N daha büyüktür. Bunun nedeni 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde daha fazla sürtünme ısı girdisi olduğu için plakaların malzemeleri daha fazla yumuşamış ve takım pimi etrafında karışarak kısmen bir kaynak bölgesi oluşması ile ve ayrıca takım pimi çevresindeki (anahtar deliği çevresindeki) plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden oluşan tabakalar ve özellikle takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden oluşan geniş bir tabaka ile plakalar

birleştirdiğinden dolayıdır (makro ve mikroyapı bölümünde Şekil 4.5'te görülebilir). 1400 dev/dak'da ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK en yüksek 1820 N çekme kesme yüküne sahip olmasının nedeni, 1400 dev/dak takım dönme hızı ve 6 sn takım bekleme süresi birlikte plakaların malzemelerini yumuşatıp takım pimi etrafında karıştırılması için ideal sürtünme ısı girdisi sağladığından dolayı takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) plakaların malzemeleri karıştırılmasıyla bir kaynak bölgesinin oluşması ile ve ayrıca özellikle takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan geniş bir tabaka ile plakalar birleştirdiğinden dolayı olabilir (makro ve mikroyapı bölümünde Şekil 8.7'de görülebilir). 1800 dev/dak takım dönme hızında üretilen SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü biraz azalmasının nedeni fazla sürtünme ısı girdisi olduğundan dolayı plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerin yoğunluğunun artması ve daha fazla takım pimi çevresine plakaların malzemeleri yapışmasından dolayı olabilir. Rao vd. (2015) AM60B Mg alaşımı plakayı 6022-T4 Al alaşımı plakanın üzerine koyup SKNK ile birleştirilmesini, Yin vd. (2010) AM60 ve AZ31 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesini ve Yin vd. (2010) AZ91 ve AZ31 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesini çalışmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kaynak genişliği daha büyük olan SKNK daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.44. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı

Şekil 4.45 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1000, 1400 ve 1800 dev/dak dönme hızında, 10,3 mm/dak sabit dalma ve çıkma hızında, 3,8 mm sabit dalma derinliğinde ve 3 ve 6 sn bekleme süresinde yapılan

SKNK kaynaklarının çekme kesme testi grafiklerini göstermektedir. Şekil 4.45'ten takım dönüş hızının ve takım bekleme süresinin üretilen SKNK kaynaklarının çekme kesme yükleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir. SKNK işleminde takım dönme hızının ve takım bekleme süresinin asıl görevi sürtünme ısı (ısı girdisi) üreterek plakaların malzemelerinin yumuşamasını sağlamaktır. Takımın dönerek plakalara dalma hareketi kuvveti de yumuşayan plakaların malzemelerini plastik deformasyona uğratar ve daha sonra takım pimi etrafında karıştırması sonucunda takım pimi etrafında kaynak oluşur. Şekil 4.45'te AZ91 Mg alaşımı plakayı, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerine bindirip konik pimli takım ile 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1320 N, 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1485 N, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1421 N, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 2001 N, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1360 N, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1656 N bulunmuştur. Şekil 4.45'te görüldüğü üzere, 1000, 1400 ve 1800 dev/dak takım dönme hızında, takım bekleme süresi 3 saniyeden 6 saniyeye çıkarıldığında SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü artmıştır. Sabit 3 ve 6 sn takım bekleme süresinde, takım dönme hızı 1000 dev/dak'dan 1400 dev/dak'ya çıkartılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü artmıştır. Ancak, sabit 3 ve 6 sn takım bekleme süresinde, takım dönme hızı daha da 1400 dev/dak'dan 1800 dev/dak'ya artırıldığında yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü bir miktar azalmıştır. Şekil 4.45'te görüldüğü üzere en yüksek 2001 N çekme kesme yüküne sahip SKNK 1400 dev/dak'da ve 6 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. En düşük 1320 N çekme kesme yüküne sahip SKNK ise 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. Takım dönme hızı 1400 dev/dak'dan 1800 dev/dak'ya artırıldığında yapılan SKNK'nın çekme kesme yükünün azalmasının nedeni, üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine akarak dalan alt daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yukarıya doğru artması yanlara doğru azalmasından dolayıdır. Yani 1800 dev/dak takım dönme hızında altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akarak üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi

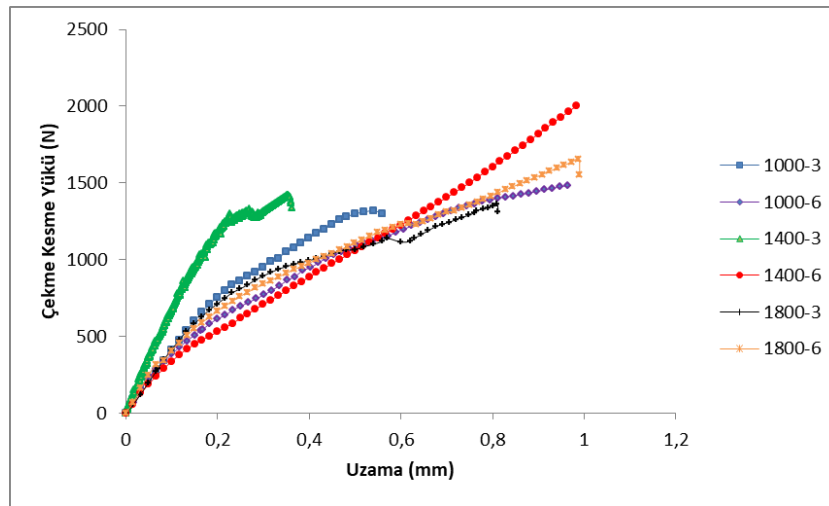
içerisine dalmasından dolayıdır. Ayrıca, 1800 dev/dak takım dönme hızında yapılan SKNK'nın kaynak bölgesi çevresindeki arayüzeylerde metallere arası bileşiklerden oluşan tabakaların büyük olması da kaynağın çekme kesme yükünü azaltmış olabilir (makro ve mikroyapı bölümünde görülebilir). 1000, 1400 ve 1800 dev/dak takım dönme hızında, takım bekleme süresi 3 sn'den 6 sn'ye çıkartıldığında yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükünün artmasının nedeni, üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi yanlara doğru akarak dalan alt daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesinin artmasından dolayıdır. 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK en düşük 1320 N çekme kesme yüküne sahip olmasının nedeni, 1000 dev/dak takım dönme hızı ve 3 sn takım bekleme süresi birlikte plakaların malzemelerini yumuşatıp takım pimi etrafında karıştırılması için yeterli sürtünme ısı girdisi sağlayamadığından dolayı takım pimi etrafında plakaların malzemeleri daha az karışmış ve ayrıca daha az altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine akarak dalmış. 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1485 N, 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükünden 1320 N daha büyüktür. Bunun nedeni 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde daha fazla sürtünme ısı girdisi olduğu için plakaların malzemeleri daha fazla yumuşamış ve bunu sonucunda altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine daha fazla akarak dalmış ve takım pimi etrafında plakaların malzemeleri daha fazla karışmıştır (makro ve mikroyapı bölümünde Şekil 4.12'de görülebilir). Öte yandan, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK en yüksek 2001 N çekme kesme yüküne sahip olmasının nedeni, 1400 dev/dak takım dönme hızı ve 6 sn takım bekleme süresi birlikte plakaların malzemelerini yumuşatıp takım pimi çevresinde karıştırılması için ideal sürtünme ısı girdisi sağladığından dolayı daha fazla altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine akarak dalmış ve takım pimi etrafında plakaların malzemeleri daha fazla karışmıştır. Özellikle de üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine yukarıya ve yanlara doğru akan



alttaki daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesinin uç kısmı daha çok yanlara akarak dalmıştır (makro ve mikroyapı bölümünde Şekil 4.14'de görülebilir).

Şekil 4.44'te 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarına kıyasla, Şekil 4.45'te AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü daha yüksek çıkmıştır. Çünkü 7075-T651 Al alaşımı plaka AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynakları sırasında takım pimi önce üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya ve daha sonra altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayıp daha sonra takım pimi çevresinde yukarıya ve yanlara doğru akan alt plaka malzemesi üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi içerisine dalamadığı için çoğunlukla takım pimi çevresine yapışıp kalmıştır. Bunun sonucunda takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı plakların malzemeleri bir kısım SKNK kaynaklarında biraz karışarak kısmen oluşan bir kaynak bölgesi ile ve ayrıca takımın plakalara dalmasıyla ortaya çıkan sürtünme ısısı ve takımın plakalara uyguladığı basma basıncıyla plakaların arayüzeyinde metallerrarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakalar ile birleşme gerçekteşmiştir. Diğer bir kısım SKNK kaynaklarında ise takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) herhangi bir kaynak bölgesi oluşmamış ve sadece plakaların arayüzeyinde metallerrarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakalar ile birleşme gerçekteştiğinden dolayı 7075-T651 Al alaşımı plaka AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı, AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarınınkinden daha düşük çıkmıştır. Diğer bir değişle, AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynakları sırasında takım pimi önce üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayan üst plaka malzemesi aşağıya alt plakaya doğru itilir ve daha sonra takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayıp daha sonra takım pimi çevresinde yukarıya ve yanlara doğru akan alt plaka malzemesi üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine dalmasıyla ve ayrıca takım pimi çevresinde plakların malzemeleri takım pimi

tarafından karıştırılmasıyla daha büyük bir kaynak bölgesi olduğu için AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeki SKNK kaynaklarının çekme dayanımı, 7075-T651 Al alaşımı plaka AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeki SKNK kaynaklarına göre oldukça daha yüksek olmuştur (makro ve mikroyapı bölümünden görülebilir). Rao vd. (2015) AM60B Mg alaşımı plakayı 6022-T4 Al alaşımı plakanın üzerine koyup SKNK ile birleştirilmesini, Yin vd. (2010) AM60 ve AZ31 Mg alaşımı plakaların ve Yin vd. (2010) AZ91 ve AZ31 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesini çalışmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kaynak genişliği daha büyük olan kaynak daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir.

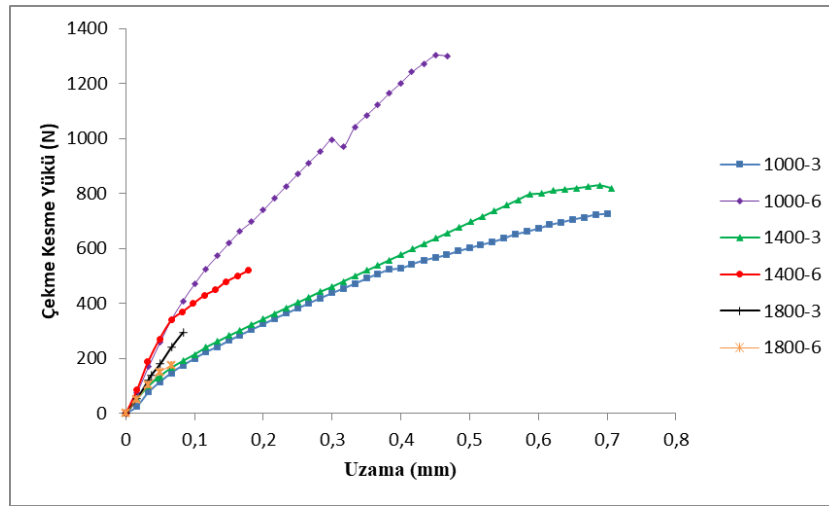


Şekil 4.45. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeki konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı

Şekil 4.46 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeki üçgen pimli takım ile 1000, 1400 ve 1800 dev/dak dönme hızında, 10,3 mm/dak sabit dalma ve çıkma hızında, 3,8 mm sabit dalma derinliğinde ve 3 ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme testi grafiklerini göstermektedir. Şekil 4.46'dan takım dönüş hızının ve takım bekleme süresinin üretilen SKNK kaynaklarının çekme kesme yükleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir. SKNK işleminde takım dönme hızının ve takım bekleme süresinin asıl görevi sürtünme ısısı (ısı girdisi) üreterek plakaların malzemelerinin yumuşamasını sağlamaktır. Takımın dönerek plakalara dalma hareketi kuvveti de yumuşayan plakaların malzemelerini plastik deformasyona uğratar ve daha sonra takım pimi etrafında karıştırması sonucunda takım pimi etrafında kaynak oluşur. Şekil 4.46'da 7075-T651 Al alaşımı plakayı, AZ91 Mg

alaşımı plakanın üzerine bindirip üçgen pimli takım ile 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 727 N, 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1302 N, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 831 N, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 520 N, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 295 N, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 176 N bulunmuştur. Şekil 4.46'da görüldüğü üzere, 1000 dev/dak takım dönme hızında, takım bekleme süresi 3 saniyeden 6 saniyeye çıkarıldığında SKNK'nın çekme kesme yükü artmıştır. Ancak, sabit 3 ve 6 sn takım bekleme süresinde, takım dönme hızı 1000 dev/dak'dan 1400 dev/dak'ya ve daha sonra 1800 dev/dak'ya çıkartılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü gitgide azalmıştır. Ayrıca, 1400 ve 1800 dev/dak takım dönme hızlarında takım bekleme süresi 3 sn'den 6 sn'ye artırılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü azalmıştır. Şekil 4.46'da görüldüğü üzere en yüksek 1302 N çekme kesme yüküne sahip SKNK 1000 dev/dak'da ve 6 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. En düşük 176 N çekme kesme yüküne sahip SKNK ise 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. 1000 dev/dak'da ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK en yüksek 1302 N çekme kesme yüküne sahip olmasının nedeni, 1000 dev/dak takım dönme hızı ve 6 sn takım bekleme süresi birlikte plakaların malzemelerini yumuşatıp takım pimi etrafında karıştırılması için yeterli sürtünme ısı girdisi sağladığından dolayı takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) plakaların malzemeleri karıştırılmasıyla bir kaynak bölgesinin oluşması ile ve ayrıca takım pimi çevresindeki plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakalar bununla birlikte özellikle takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan geniş bir tabaka ile plaklar birleştiğinden dolayı olabilir (makro ve mikroyapı bölümünde Şekil 4.18'de görülebilir). 1000 dev/dak takım dönme hızı ve 6 sn takım bekleme süresinden sonra takım dönme hızı ve takım bekleme süresi artırılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü gitgide düşmüştür. Bunun nedeni takım dönme hızının ve bekleme süresinin artışıyla birlikte sürtünme ısı girdisinin artması bunun sonucunda takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) plakaların malzemeleri takım pimi tarafından karıştırılarak

oluşan kaynak bölgesinde metallerearası bileşiklerin ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) yoğunluğunun artması kaynaklı çatlakların artması ve ayrıca takım pimi etrafında karıştırılan plakaların malzemelerinin takım pimi çevresine yapışıp kalmasının artmasından dolayı üretilen SKNK kaynaklarının çekme dayanımı düşmeye başlamıştır makro ve mikroyapı bölümünde görülebilir). Rao vd. (2015) AM60B Mg alaşımı plakayı 6022-T4 Al alaşımı plakanın üzerine koyup SKNK ile birleştirilmesini, Yin vd. (2010) AM60 ve AZ31 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesini ve Yin vd. (2010) AZ91 ve AZ31 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesini çalışmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kaynak genişliği daha büyük olan SKNK daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.46. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı

Şekil 4.47 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1000, 1400 ve 1800 dev/dak dönme hızında, 10,3 mm/dak sabit dalma ve çıkma hızında, 3,8 mm sabit dalma derinliğinde ve 3 ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme testi grafiklerini göstermektedir. Şekil 4.47'den takım dönüş hızının ve takım bekleme süresinin üretilen SKNK kaynaklarının çekme kesme yükleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir. SKNK işleminde takım dönme hızının ve takım bekleme süresinin asıl görevi sürtünme ısısı (ısı girdisi) üreterek plakaların malzemelerinin yumuşamasını sağlamaktır. Takımın dönerek plakalara dalma hareketi kuvveti de yumuşayan plakaların malzemelerini plastik deformasyona uğratar ve daha sonra takım pimi etrafında karıştırması sonucunda takım pimi etrafında kaynak

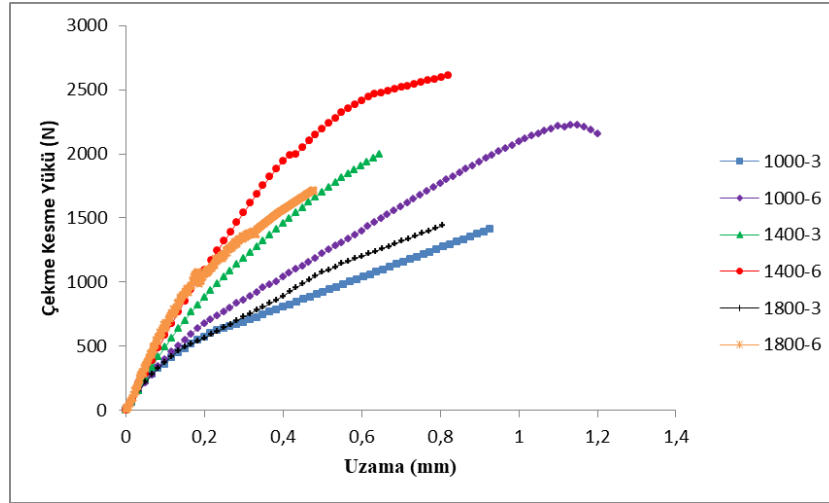
oluşur. Şekil 4.47’de AZ91 Mg alaşımı plakayı, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerine bindirip üçgen pimli takım ile 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK’nın çekme kesme yükü 1410 N, 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK’nın çekme kesme yükü 2223 N, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK’nın çekme kesme yükü 1998 N, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK’nın çekme kesme yükü 2610 N, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK’nın çekme kesme yükü 1440 N, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK’nın çekme kesme yükü 1718 N bulunmuştur. Şekil 4.47’de görüldüğü üzere, 1000, 1400 ve 1800 dev/dak takım dönme hızında, takım bekleme süresi 3 saniyeden 6 saniyeye çıkarıldığında SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü artmıştır. Sabit 3 ve 6 sn takım bekleme süresinde, takım dönme hızı 1000 dev/dak’dan 1400 dev/dak’ya çıkartılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü önemli ölçüde artmıştır. Ancak, sabit 3 ve 6 sn takım bekleme süresinde, takım dönme hızı daha da 1400 dev/dak’dan 1800 dev/dak’ya artırıldığında yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü bir miktar azalmıştır. Şekil 4.47’de görüldüğü üzere en yüksek 2610 N çekme kesme yüküne sahip SKNK 1400 dev/dak’da ve 6 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. En düşük 1410 N çekme kesme yüküne sahip SKNK ise 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. 1000, 1400 ve 1800 dev/dak takım dönme hızında, takım bekleme süresi 3 sn’den 6 sn’ye çıkartıldığında yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükünün artmasının nedeni, üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine yanlara doğru akarak dalan alt daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesinin artmasından dolayıdır. 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK en düşük 1410 N çekme kesme yüküne sahip olmasının nedeni, 1000 dev/dak takım dönme hızı ve 3 sn takım bekleme süresi birlikte plakaların malzemelerini yumuşatıp takım pimi çevresinde karıştırılması için yeterli sürtünme ısı girdisi sağlayamadığından dolayı daha az altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine akarak dalmasıyla oluşan kaynak bölgesinin çevresindeki üst arayüzeyde çatlaklar meydana gelmiş ve takım pimi etrafında plakaların malzemeleri daha az karışmıştır (makro ve mikroyapı bölümünde Şekil 4.23’te görülebilir). 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme

süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 2223 N, 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükünden 1410 N daha büyüktür. Bunun nedeni 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde daha fazla sürtünme ısı girdisi olduğu için plakaların malzemeleri daha fazla yumuşamış ve bunu sonucunda altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine daha fazla akarak dalmasıyla kaynak bölgesi oluşmuş ve takım pimi etrafında plakaların malzemeleri daha fazla karışmıştır (makro ve mikroyapı bölümünde Şekil 4.24'te görülebilir). Öte yandan, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK en yüksek 2610 N çekme kesme yüküne sahip olmasının nedeni, 1400 dev/dak takım dönme hızı ve 6 sn takım bekleme süresi birlikte plakaların malzemelerini yumuşatıp takım pimi etrafında karıştırılması için ideal sürtünme ısı girdisi sağladığından dolayı daha fazla altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine akarak dalmış ve takım pimi etrafında plakaların malzemeleri daha fazla karışmıştır (makro ve mikroyapı bölümünde Şekil 4.26'da görülebilir). 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'ye göre altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi daha fazla yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine akarak dalmış ancak üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine daha az yukarıya doğru altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi akarak dalmış ve ayrıca 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın kaynak bölgesinin çevresindeki üst arayüzeyde çatlaklar meydana geldiği için 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'den daha düşük çekme kesme yüküne sahip olmuştur. 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın, 1800 dev/dak takım dönme hızında yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükünden daha yüksek çıkmasının nedeni 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'de altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi daha fazla yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine akarak dalması ve ayrıca 1800 dev/dak takım dönme hızında yapılan SKNK kaynaklarının kaynak bölgesi

çevresindeki arayüzeyde daha yoğun metallerarası bileşiklerin oluşmasından dolayı olabilir. Takım dönme hızı 1000 dev/dak'dan 1800 dev/dak'ya artırıldığında altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine yukarıya doğru akarak dalması artmış fakat yanlara doğru akarak dalması azalmıştır. Bu yüzden 1400 dev/dak takım dönme hızının üzerindeki 1800 dev/dak takım dönme hızında yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü biraz azalmıştır. Takım dönme hızı 1400 dev/dak'dan 1800 dev/dak'ya artırıldığında yapılan SKNK'nın çekme kesme yükünün azalmasının nedeni, üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine akarak dalan alt daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yukarıya doğru artması yanlara doğru azalmasından dolayıdır. Yani 1800 dev/dak takım dönme hızında altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru akarak üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine dalmasından dolayıdır. Ayrıca, 1800 dev/dak takım dönme hızında yapılan SKNK'nın kaynak bölgesi çevresindeki arayüzeylerde metallerarası bileşiklerden oluşan tabakaların büyük olması da kaynağın çekme kesme yükünü azaltmış olabilir (makro ve mikroyapı bölümünde görülebilir). Şekil 4.46'd 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarına kıyasla, Şekil 4.47'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü oldukça daha yüksek çıkmıştır. Çünkü 7075-T651 Al alaşımı plaka AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynakları sırasında takım pimi önce üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesi ve daha sonra takım pimi altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayıp ve daha sonra takım pimi çevresinde yukarıya ve yanlara doğru akan alt plaka malzemesi üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi içerisine dalamadığı için çoğunlukla takım pimi çevresine yapışıp kalmış ve takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) bir miktar 7075-T651 Al ve AZ91 Mg alaşımı plakaların malzemeleri takım pimi tarafından karıştırılması sonucunda genelde mikro çatlaklardan ve metallerarası bileşiklerden oluşan küçük bir kaynak alanı meydana gelmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynakları sırasında ise

takım pimi önce üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayan üst plaka malzemesi aşağıya alt plakaya doğru itilir ve daha sonra takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya dalmasıyla takım pimi altında yumuşayıp daha sonra takım pimi çevresinde yukarıya ve yanlara doğru akan alt plaka malzemesi üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine dalmasıyla ve ayrıca takım pimi çevresinde plakların malzemeleri takım pimi tarafından karıştırılmasıyla bir kaynak bölgesi oluştuğu için AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı, 7075-T651 Al alaşımı plaka AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarına göre oldukça daha yüksek olmuştur (makro ve mikroyapı bölümünden görülebilir). Ayrıca, AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü, AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik ve vidalı silindirik pimli takımlar kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükünden daha yüksek olmuştur. Bunun nedeni AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynakları sırasında takım pimi önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında konik ve vidalı silindirik pimli takımlara kıyasla üçgen pimin köşe kenarları plakaların malzemelerini daha fazla plastik deformasyona uğratarak etrafında karıştırdığı için ve ayrıca özellikle üçgen pimin altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında plakanın malzemesi üçgen pimin köşe kenarlarından dolayı daha fazla plastik deformasyona uğrayıp daha fazla yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine akarak daldığı için üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü daha fazla olmuştur (makro ve mikroyapı bölümünde görülebilir). Rao vd. (2015) AM60B Mg alaşımı plakayı 6022-T4 Al alaşımı plakanın üzerine koyup SKNK ile birleştirilmesini, Yin vd. (2010) AM60 ve AZ31 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesini ve Yin vd. (2010) AZ91 ve AZ31 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesini çalışmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kaynak genişliği daha büyük olan SKNK daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir.

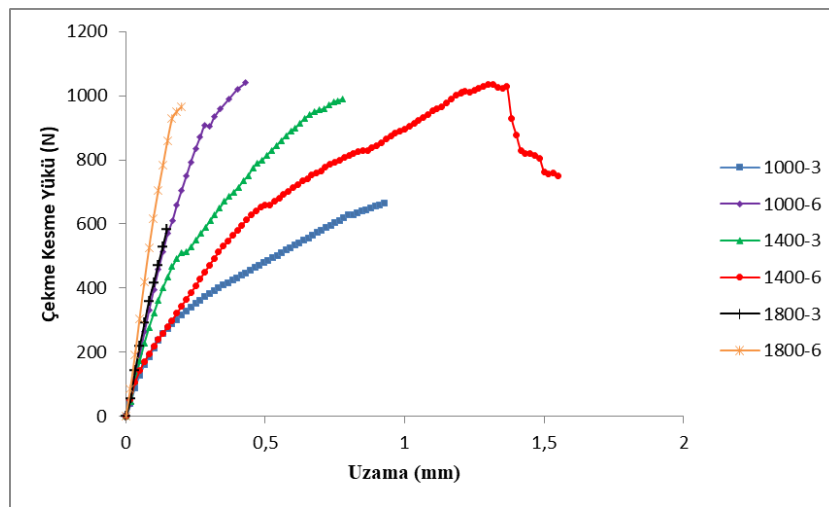




Şekil 4.47. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı

Şekil 4.48 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1000, 1400 ve 1800 dev/dak dönme hızında, 10,3 mm/dak sabit dalma ve çıkma hızında, 3,8 mm sabit dalma derinliğinde ve 3 ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme testi grafiklerini göstermektedir. Şekil 4.48'den takım dönüş hızının ve takım bekleme süresinin üretilen SKNK kaynaklarının çekme kesme yükleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir. SKNK işleminde takım dönme hızının ve takım bekleme süresinin asıl görevi sürtünme ısı (ısı girdisi) üreterek plakaların malzemelerinin yumuşamasını sağlamaktır. Takımın dönerek plakalara dalma hareketi kuvveti de yumuşayan plakaların malzemelerini plastik deformasyona uğratar ve daha sonra takım pimi etrafında karıştırması sonucunda takım pimi etrafında kaynak oluşur. Şekil 4.48'de 7075-T651 Al alaşımı plakayı, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerine bindirip vidalı silindirik pimli takım ile 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 665 N, 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1040 N, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 990 N, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1036 N, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 584 N, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 965 N bulunmuştur. Şekil 4.48'de görüldüğü üzere, 1000, 1400 ve 1800 dev/dak takım dönme hızında, takım

bekleme süresi 3 saniyeden 6 saniyeye çıkarıldığında SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü artmıştır. 3 sn takım bekleme süresinde, takım dönme hızı 1000 dev/dak'dan 1400 dev/dak'ya çıkartılarak yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü artmıştır. Ancak, sabit 3 ve 6 sn takım bekleme süresinde, takım dönme hızı daha da 1400 dev/dak'dan 1800 dev/dak'ya artırıldığında yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü bir miktar azalmıştır. Şekil 4.48'de görüldüğü üzere en yüksek 1040 N çekme kesme yüküne sahip SKNK 1000 dev/dak'da ve 6 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. En düşük 584 N çekme kesme yüküne sahip SKNK ise 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. Şekil 4.48'de görüldüğü üzere en yüksek 1040 N çekme kesme yüküne sahip SKNK 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde ve 1036 N çekme kesme yüküne sahip SKNK 1400 dev/dak'da ve 6 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. 1000 ve 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK kaynaklarının takım pimi çevresinde plakaların malzemeleri karışarak oluşan kaynak bölgesinin diğer takım dönme hızında ve bekleme süresinde yapılan SKNK kaynaklarından daha büyük olmuştur (makro ve mikroyapı bölümünde görülebilir). Rao vd. (2015) AM60B Mg alaşımı plakayı 6022-T4 Al alaşımı plakanın üzerine koyup SKNK ile birleştirilmesini, Yin vd. (2010) AM60 ve AZ31 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesini ve Yin vd. (2010) AZ91 ve AZ31 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesini çalışmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kaynak genişliği daha büyük olan SKNK daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir.



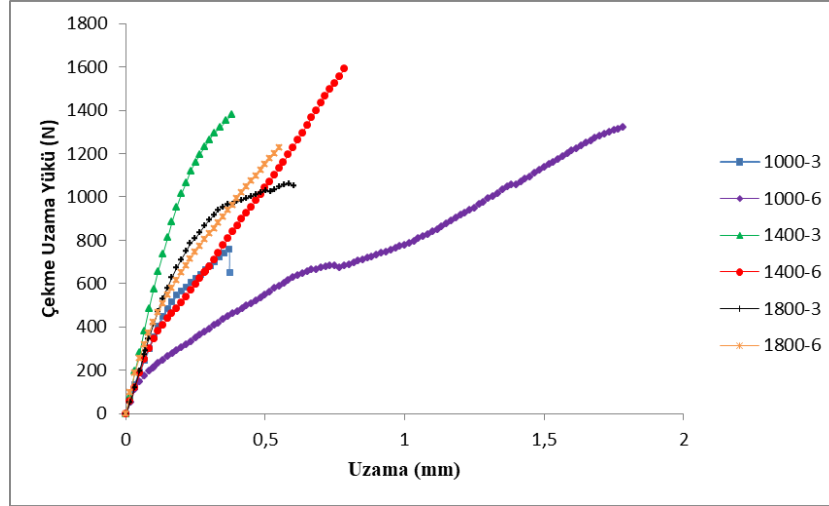
Şekil 4.48. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı

Şekil 4.49 AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1000, 1400 ve 1800 dev/dak dönme hızında, 10,3 mm/dak sabit dalma ve çıkma hızında, 3,8 mm sabit dalma derinliğinde ve 3 ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme testi grafiklerini göstermektedir. Şekil 4.49'dan takım dönüş hızının ve takım bekleme süresinin üretilen SKNK kaynaklarının çekme kesme yükleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. SKNK işleminde takım dönme hızının ve takım bekleme süresinin asıl görevi sürtünme ısısı (ısı girdisi) üreterek plakaların malzemelerinin yumuşamasını sağlamaktır. Takımın dönerek plakalara dalma hareketi kuvveti de yumuşayan plakaların malzemelerini plastik deformasyona uğratar ve daha sonra takım pimi etrafında karıştırması sonucunda takım pimi etrafında kaynak oluşur. Şekil 4.49'da AZ91 Mg alaşımı plakayı, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerine bindirip vidalı silindirik pimli takım ile 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 761 N, 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1321 N, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1380 N, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1590 N, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1050 N, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1228 N bulunmuştur. Şekil 4.49'da görüldüğü üzere, 1000, 1400 ve 1800 dev/dak takım dönme hızında, takım bekleme süresi 3 saniyeden 6 saniyeye çıkarıldığında SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü bir miktar artmıştır. Sabit 3 ve 6 sn takım bekleme süresinde, takım dönme hızı 1000 dev/dak'dan 1400 dev/dak'ya çıkartılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü biraz artmıştır. Ancak, sabit 3 ve 6 sn takım bekleme süresinde, takım dönme hızı daha da 1400 dev/dak'dan 1800 dev/dak'ya artırıldığında yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü bir miktar azalmıştır. Şekil 4.49'da görüldüğü üzere en yüksek 1590 N çekme kesme yüküne sahip SKNK 1400 dev/dak'da ve 6 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. En düşük 761 N çekme kesme yüküne sahip SKNK ise 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. Şekil 4.48'de 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarına kıyasla, Şekil 4.49'da AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik

pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü daha yüksek çıkmıştır. 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK en düşük 761 N çekme kesme yüküne sahip olmasının nedeni, 1000 dev/dak takım dönme hızı ve 3 sn takım bekleme süresi birlikte plakaların malzemelerini yumuşatıp takım pimi çevresinde karıştırılması için yeterli sürtünme ısı girdisi sağlayamadığından dolayı daha az altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine akarak dalmasıyla oluşan kaynak bölgesinin çevresindeki arayüzeyde çatlaklar meydana gelmiş ve takım pimi etrafında plakaların malzemeleri daha az karışmıştır (makro ve mikroyapı bölümünde Şekil 4.35'te görülebilir). 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükü 1321 N, 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme yükünden 761 N daha büyüktür. Bunun nedeni 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde daha fazla sürtünme ısı girdisi olduğu için plakaların malzemeleri daha fazla yumuşamış ve bunu sonucunda altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine daha fazla akarak dalmasıyla kaynak bölgesi oluşmuş ve takım pimi etrafında plakaların malzemeleri daha fazla karışmıştır (makro ve mikroyapı bölümünde Şekil 4.36'da görülebilir). Öte yandan, 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK en yüksek 1590 N çekme kesme yüküne sahip olmasının nedeni, 1400 dev/dak takım dönme hızı ve 6 sn takım bekleme süresi birlikte plakaların malzemelerini yumuşatıp takım pimi çevresinde karıştırılması için ideal sürtünme ısı girdisi sağladığından dolayı daha fazla altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yukarıya ve yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine akarak dalmasıyla kaynak bölgesi oluşmuş ve takım pimi etrafında plakaların malzemeleri daha fazla karışmıştır (makro ve mikroyapı bölümünde Şekil 4.38'de görülebilir). 1800 dev/dak takım dönme hızında sürtünme ısı girdisinin artmasından dolayı altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi daha fazla yumuşadığı için yanlara kıyasla daha çok yukarıya doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine akarak daldığı için ve ayrıca takım pimi çevresine yapışıp kalan plakaların malzemeleri arttığı için 1800 dev/dak takım dönme hızında üretilen SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü biraz düşmüştür. 1800 dev/dak

takım dönme hızında takım bekleme süresi 3 sn'den 6 sn'ye çıkarıldığında daha fazla ısı girdisi olmasından dolayı altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi yanlara doğru üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine akarak dalması artmış bu da çekme dayanımını artırmıştır. Bundan dolayı 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme dayanımı, 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme dayanımından daha yüksek olmuştur (makro ve mikroyapı bölümünde görülebilir). Şekil 4.48'de 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarına kıyasla, Şekil 4.49'da AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü daha yüksek çıkmıştır. Çünkü 7075-T651 Al alaşımı plaka AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynakları sırasında takım pimi önce üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst plaka malzemesi ve daha sonra takım piminin altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakaya dalmasıyla takım pimi altında yumuşayıp daha sonra takım pimi çevresinde yukarıya ve yanlara doğru akan alt plaka malzemesiyle takım pimi çevresinde karışmasıyla karışımın bir kısmı takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesini oluşturmuş ve karışımın bir kısmı da takım pimi çevresine yapışıp kalmıştır. 7075-T651 Al alaşımı plaka AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynakları sırasında oluşan SKNK kaynaklarının çevresindeki arayüzlerde mikro çatlakların ve metallerearası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakaların meydana gelmesi ve ayrıca plakaların malzemelerinin karışarak daha fazla takım pimi çevresine yapışıp kalmasından dolayı çekme kesme yükü AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarından daha düşük çıkmıştır. AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynakları sırasında ise takım pimi önce üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayan üst plaka malzemesi aşağıya alt plakaya doğru itilir ve daha sonra takım pimi altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayıp daha sonra takım pimi çevresinde yukarıya ve yanlara doğru akan alt

plaka malzemesi üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın malzemesi içerisine dalmasıyla ve ayrıca takım pimi çevresinde plakların malzemeleri takım pimi tarafından karıştırılmasıyla daha büyük bir kaynak bölgesi oluştuğu için AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı, 7075-T651 Al alaşımı plaka AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarına göre daha yüksek olmuştur (makro ve mikroyapı bölümünden görülebilir). AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükü, 7075-T651 Al alaşımı plaka AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükünden daha yüksek olmuştur. Shen vd. (2015) 6061-T6 Al alaşımı plaka ile AZ31B Mg alaşımı plakayı birbirine SKNK ile birleştirmede AZ31B Mg alaşımı plaka 6061-T6 Al alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme mukavemeti 6061-T6 Al alaşımı plaka AZ31B Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarınınkinden daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca, Chowdhury vd. (2013) 5754-O Al alaşımı plaka ile AZ31B-H24 Mg alaşımı plakayı birbirine SKNK ile birleştirmede AZ31B-H24 Mg alaşımı plaka 5754-O Al alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme mukavemeti çekme-basma yorulma ömrü 5754-O Al alaşımı plaka AZ31B-H24 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarınınkinden daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken en yüksek çekme kesme yüküne sahip SKNK kaynakları, üçgen pimli takım, daha sonra konik pimli takım ve bunu takip eden vidalı silindirik pimli takım kullanılarak yapılmıştır. 7075-T651 Al alaşımı plaka AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken en yüksek çekme kesme yüküne sahip SKNK kaynakları konik pimli takım kullanılarak elde edilmiştir. Rao vd. (2015) AM60B Mg alaşımı plakayı 6022-T4 Al alaşımı plakanın üzerine koyup SKNK ile birleştirilmesini, Yin vd. (2010) AM60 ve AZ31 Mg alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesini ve Yin vd. (2010) AZ91 ve AZ31 Mg alaşımı plakların SKNK ile birleştirilmesini çalışmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kaynak genişliği daha büyük olan SKNK daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir.



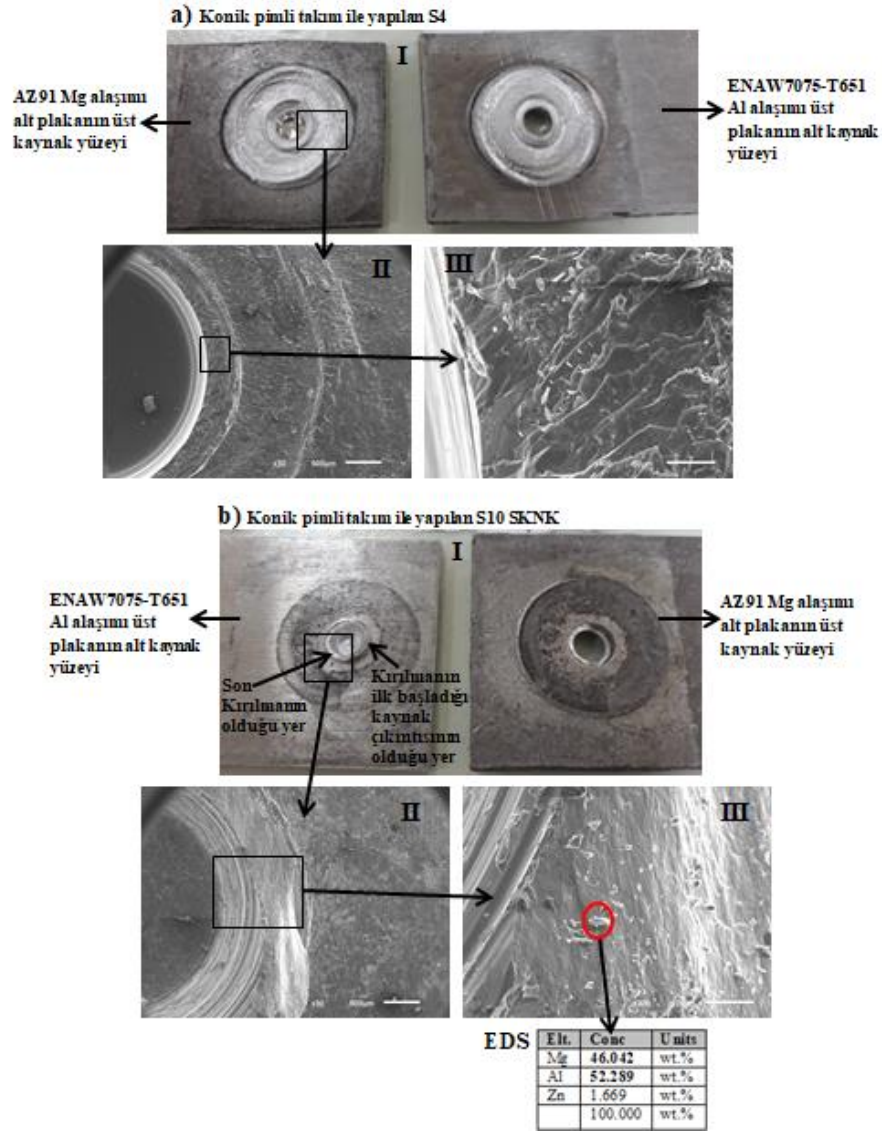
Şekil 4.49. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme dayanımı

#### 4.1.4. Çekme Kesme Testi Sırasında Kaynakların Kırılma Şekilleri

Şekil 4.50 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken ve AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme testinden sonra kaynak kırık yüzeylerinin SEM görüntülerini ve EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Dikdörtgen içine alınmış bölgeler büyütülerek okla gösterilmiş ve daire içine alınmış bölgelerde de EDS analiz sonucunu göstermektedir. Şekil 4.50aI'de görüldüğü gibi üst ve alt plakalar arasındaki birleşme yüzeyi yırtılarak plakalar birbirinden ayrılmış ve nispeten pürüzsüz bir kırılma yüzeyi ortaya çıkmıştır. Şekil 4.50aI'de görülen kaynak kırık yüzeyine göre tam bir kaynak birleşme alanı oluşmadığı görülmektedir. Dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daldığında plakalara uyguladığı dalma basma basıncı ve ortaya çıkan sürtünme ısı ile ve ayrıca takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak plakalara üstten uyguladığı dalma basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile plakaların temas eden yüzeyleri arasında ısı ve basma basıncıyla özellikle Şekil 4.50aI'de görüldüğü gibi takım piminin hemen etrafındaki plakaların temas eden yüzeyleri arasında ve kısmen takım omuzu altındaki plakaların temas eden yüzeyleri arasında metallerarası bileşiklerden oluşan tabakalar ile ve üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı

plakanın altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakaya bir miktar gömülmesi ile birleşme gerçekleştiği görülmektedir. Özellikle takım pimi çevresindeki ve kısmen takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden oluşan tabakalar sayesinde gerçekleşen birleşme çekme kesme testi sırasında yırtılarak ayrılmıştır. Şekil 4.50aII altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst kısmındaki kaynak kırık yüzeyini göstermektedir. Şekil 4.50aIII'de altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın kaynak kırık yüzeyinde yönelmiş ve gevrek bir kırılma şekli olduğu görülmektedir. Şekil 4.50bI'de Dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayarak aşağıya alt plakaya doğru itilen üst AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden alt 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak ve altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yukarı ve yanlara doğru akarak dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesi çekme kesme testi sırasında altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyine göre kırılmanın öncelikle kaynak bölgesinin bir tarafından kancanın bulunduğu yerden başladığı ve kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzeyden anahtar deliğine doğru ilerleyerek en zayıf kaynak bölgesinden (altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyindeki çıkıntıdan) kırıldıktan sonra son olarak kaynak bölgesinin diğer tarafından kaynak bölgesi boyunca kırılmanın gerçekleşmesiyle kopma gerçekleşmiş ve kaynağın bir kısmı üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakada ve bir kısmı da altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakada kaldığı görülmektedir. Şekil 4.50aI'deki 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK ile karşılaştırıldığında, Şekil 4.50bI'de AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK'de takım pimi etrafında bir kaynak birleşme bölgesinin oluştuğu ve çekme kesme testi sırasında kırılma kaynak bölgesinden olmuştur. Şekil 4.50bII altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst kısmındaki kaynak kırık yüzeyini göstermektedir. Şekil 4.50bIII'de altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın kaynak kırık yüzeyinde ağırlıkça %46,042 Mg ve %52,289 Al elementinden oluşan malzemeler bulunmaktadır bu da metallerearası bileşiklerin ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşmuş olduğuna işarettir.

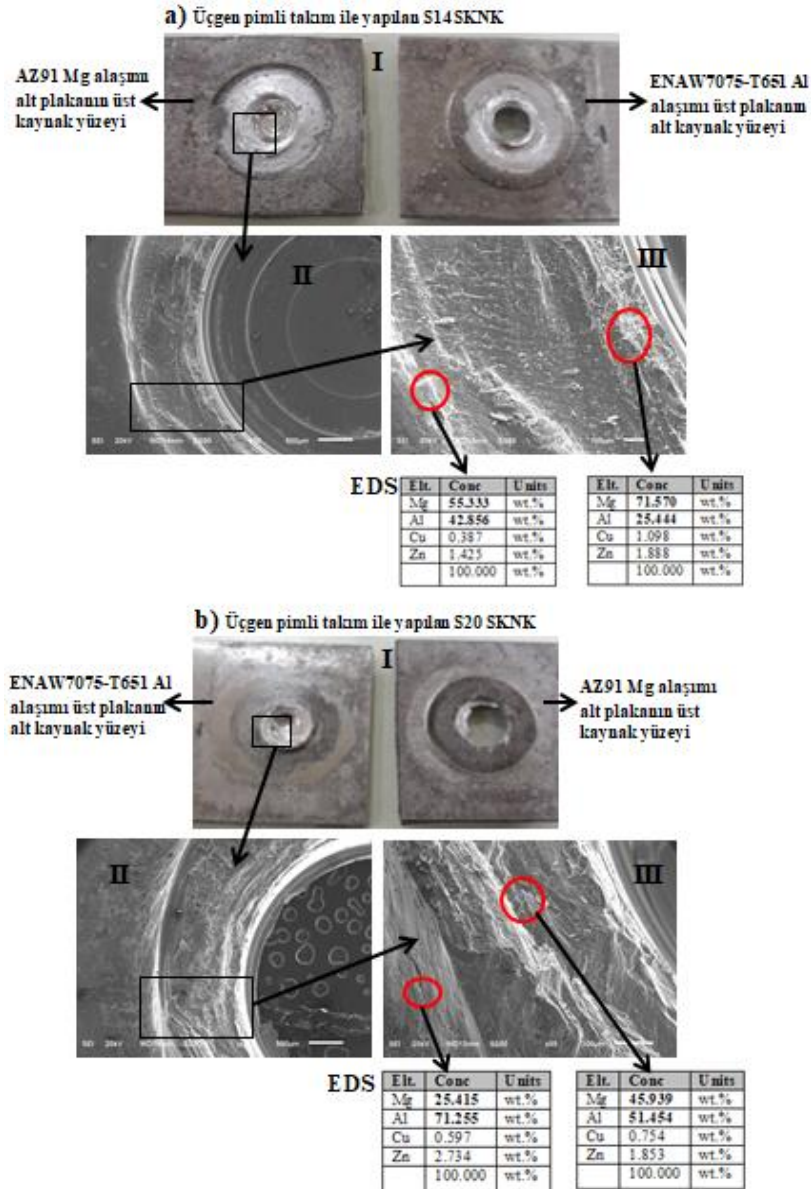




Şekil 4.50. Konik pimli takım ile yapılan S4 ve S10 kaynaklarının çekme kesme testinden sonra alt ve üst plakadaki kaynak kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) S4 ve b) S10

Şekil 4.51 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken ve AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile, 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde üretilen SKNK kaynaklarının çekme kesme testinden sonra kaynak kırık yüzeylerinin SEM görüntülerini ve EDS analiz sonucunu göstermektedir. Şekil 4.51aI'de altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyine ve üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyine göre plakalar birbirine takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kısmen bir kaynak bölgesi ve kısmen oluşan kaynak bölgesinin çevresindeki plakaların arayüzeyinde metallererarası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ )

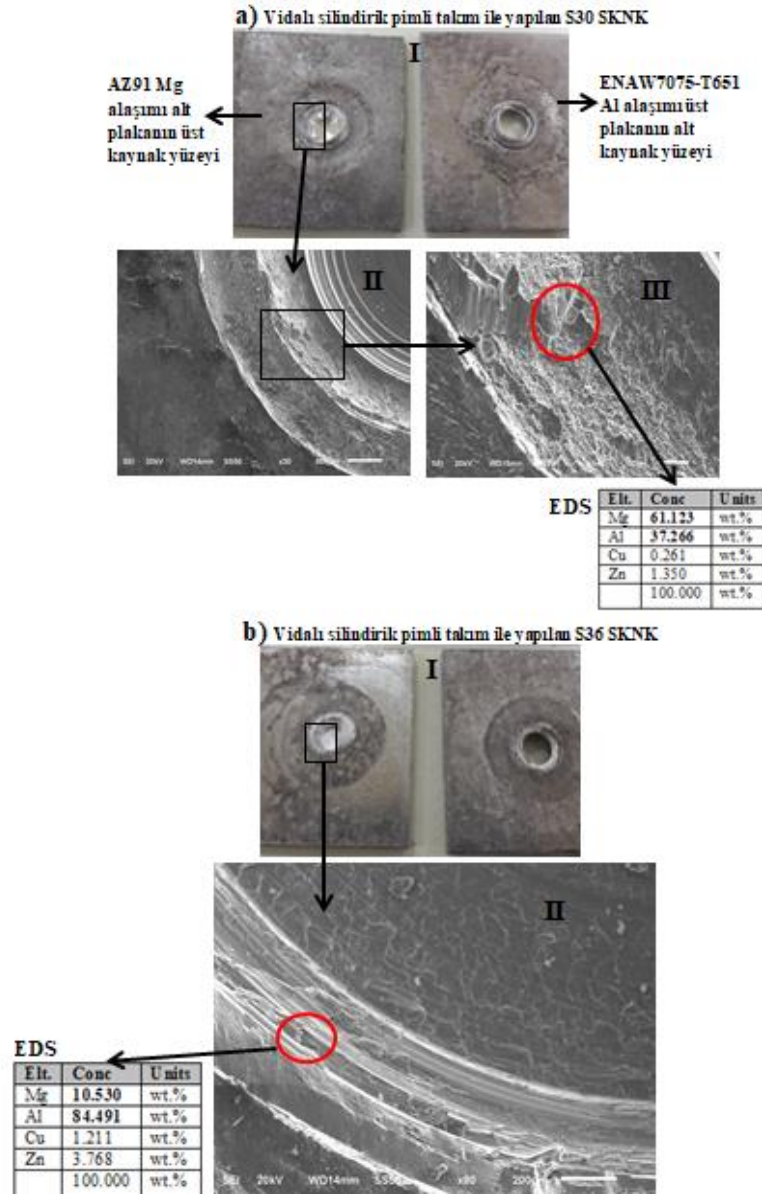
oluşan tabakalar ile birleşmiş ve çekme kesme testi sırasında önce plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden oluşan tabakaların yırtılması daha sonra kısmen oluşan kaynak bölgesinin çevresi boyunca kırılması sonucu plakalar birbirinden ayrılmıştır. Şekil 4.51aI'de altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyine ve üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın alt kısmındaki kaynak kırık yüzeyine bakıldığında nispeten pürüzsüz bir kırılma yüzeyi ortaya çıkmıştır. Şekil 4.51aII altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst kısmındaki kaynak kırık yüzeyini göstermektedir. Şekil 4.51aIII'de altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst kısmındaki kaynak kırık yüzeyinde gevrek bir kırılmanın meydana geldiği görülmekte ve bu gevrek kırılma EDS sonuçlarına göre metallerarası bileşiklerin ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) kaynakta oluşmuş olmasından dolayı olabilir. Şekil 4.51b AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile, 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde üretilen SKNK'nın çekme kesme testinden sonra kaynak kırık yüzeylerinin SEM görüntülerini ve EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.51bI'de altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyine ve üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyine bakıldığında plakalar birbirine takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan bir kaynak bölgesi ile birleşmiş ve çekme kesme testi sırasında kaynak bölgesinin çevresi boyunca kırılması ve bazı yerlerde yerinden çıkması sonucu plakalar birbirinden ayrılmıştır. Şekil 4.51bII altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst kısmındaki kaynak kırık yüzeyini göstermektedir. Şekil 4.51bIII'de kaynağın basamaklı ve gevrek bir şekilde kırıldığı görülmektedir. EDS sonuçlarına göre gevrek kırılma olmasının nedeni kaynak bölgesinde oluşan metallerarası bileşikler ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) olabilir.



Şekil 4.51. Üçgen pimli takım ile yapılan S14 ve S20 kaynaklarının çekme kesme testinden sonra alt ve üst plakadaki kaynak kırık yüzeyleri: a) S14ve b) S20

Şekil 4.52 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken ve AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile, 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde üretilen SKNK kaynaklarının çekme kesme testinden sonra kaynak kırık yüzeylerinin SEM görüntülerini ve EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.52aI 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK'nın çekme kesme testinden sonra kaynak kırık yüzeylerini göstermektedir. Şekil 4.52aI'de altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyine ve üstte bulunan 7075-T651 Al

alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyine bakıldığında plakalar birbirine takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kısmen bir kaynak bölgesi ve bu oluşan kısmen kaynak bölgesinin çevresindeki plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan tabakalar ile birleşmiş ve çekme kesme testi sırasında önce plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden oluşan tabakaların yırtılması daha sonra kısmen oluşan kaynak bölgesinin çevresi boyunca kırılması sonucu plakalar birbirinden ayrılmıştır. Şekil 4.52aII altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst kısmındaki kaynak kırık yüzeyini göstermektedir. Şekil 4.52aII'den görülebileceği gibi kaynak takımının vidalı pimi çevresinde vida kanalı ile oluşan iki birleşme kaynak alanı meydana gelmiştir. Şekil 4.52aIII'den görülebileceği gibi kaynak gevrek şekilde kırılmış bunun nedeni kaynak bölgesinde meydana gelen gevrek metallerearası ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) bileşiklerden dolayı olabilir. Şekil 4.52bI AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK'nın çekme kesme testinden sonra kaynak kırık yüzeylerini göstermektedir. Şekil 4.52b AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üretilen SKNK'nın çekme kesme testinden sonra kaynak kırık yüzeylerinin SEM görüntülerini ve EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.52bI'de altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyine ve üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyine göre plakalar birbirine takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan bir kaynak bölgesi ile birleşmiş ve çekme kesme testi sırasında kaynak bölgesinin çevresi boyunca kırılması sonucu plakalar birbirinden ayrılmıştır. Şekil 4.52bII altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst kısmındaki kaynak kırık yüzeyini göstermektedir. Şekil 4.52bII'de kaynak kırık yüzeyinin bir bölgesinden alınan EDS sonucuna göre ağırlıkça %84,491 Al ve %10,530 Mg bulunmaktadır. Bu da 7075-T651 Al alaşımı ve AZ91 Mg alaşımı takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) iyi bir şekilde karışmamış olabilir.



Şekil 4.52. Vidalı silindirik pimli takım ile yapılan S30 ve S36 kaynaklarının çekme kesme testinden sonra alt ve üst plakadaki kaynak kırık yüzeyleri: a) S30 ve b) S36

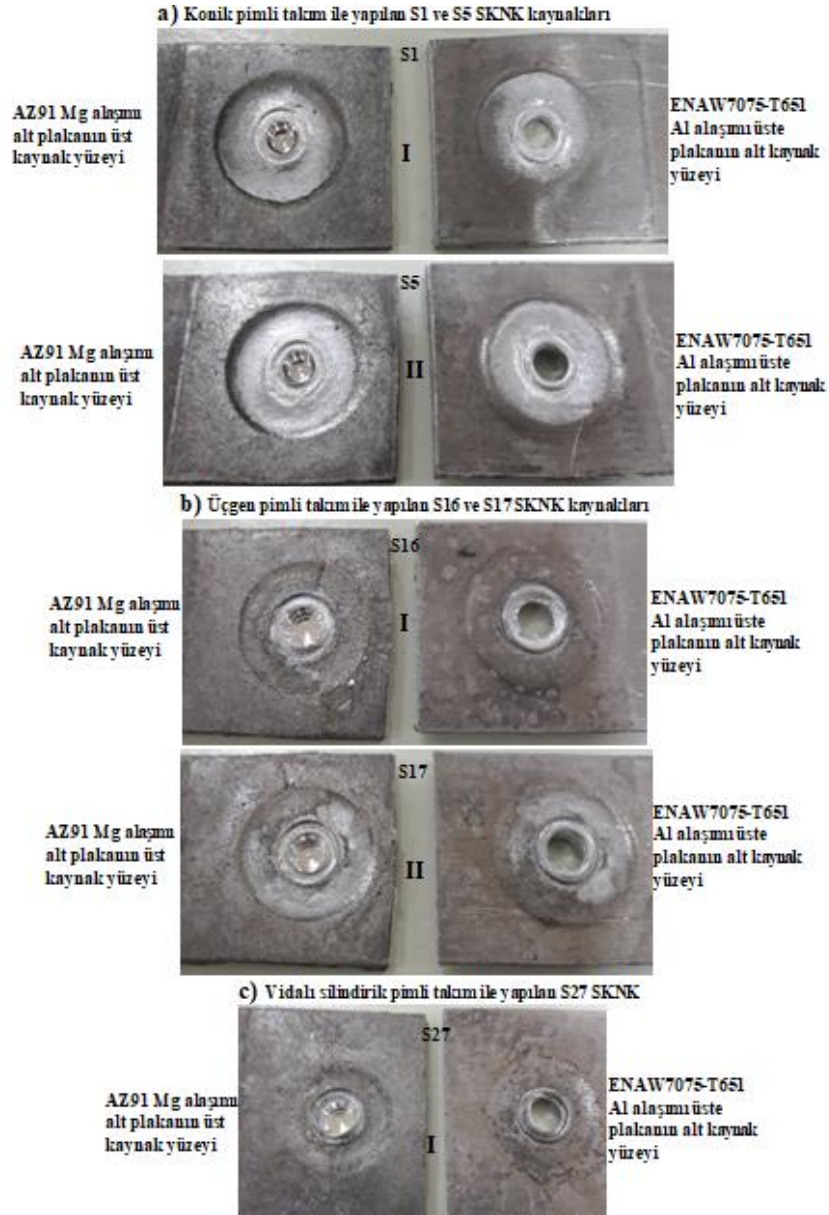
7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme testinden sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst tarafındaki ve üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyleri Şekil 4.53aI'de gösterilmiştir. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme testinden sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst tarafındaki ve üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın alt

tarafındaki kaynak kırık yüzeyleri Şekil 4.53aII'de gösterilmiştir. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının bir kısmı (çekme kesme yükü düşük olanlar) Şekil 4.53aI'deki gibi dönen takım piminin üst üste bindirilen plaklara dalmasıyla plakalara uyguladığı basma basıncı ve ortaya çıkan sürtünme ısısı ile ve ayrıca dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısısı ile üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakaya takım piminin hemen etrafındaki (anahtar deliği çevresindeki) plakaların arayüzeyinde bir miktar gömülmesiyle ve ortaya çıkan sürtünme ısısıyla da metallerearası bileşiklerden oluşan tabakaların meydana gelmesiyle gerçekleşen birleşme çekme kesme testi sırasında yırtılması sonucu plakalar birbirinden ayrılmıştır. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının diğer bir kısmı da (çekme kesme yükü daha yüksek olanlar) Şekil 4.53aII'deki gibi dönen takım piminin üst üste bindirilen plaklara dalmasıyla plakalara uyguladığı basma basıncı ve ortaya çıkan sürtünme ısısı ile ve ayrıca dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısısı ile üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya çoğunlukla takım piminin hemen etrafında ve birazda takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde bir miktar gömülmesiyle ve sürtünme ısısıyla da daha çok takım piminin hemen çevresindeki ve birazda takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden oluşan tabakaların meydana gelmesiyle gerçekleşen birleşme çekme kesme testi sırasında önce takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyindeki metallerearası bileşiklerden oluşan tabakalar ve daha sonra takım piminin hemen çevresindeki plakaların arayüzeyindeki metallerearası bileşiklerden oluşan tabakalar yırtılması sonucu plakalar birbirinden ayrılmıştır. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme testinden sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst tarafındaki ve üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyleri Şekil 4.53bI'de gösterilmiştir. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme testinden sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst tarafındaki ve üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık

yüzeyleri Şekil 4.53bII’de gösterilmiştir. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynakları Şekil 4.53bI ve II’deki gibi dönen takım pimi üst üstte bindirilen plakalara daldığında takım pimi altında aşağıya alt plakaya doğru itilen üst 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden alt AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak oluşan kaynak bölgesi ve ayrıca, dönen takım pimi üst üste bindirilen plaklara dalmasıyla plakalara uyguladığı basma basıncı ve ortaya çıkan sürtünme ısısı ile ve ayrıca dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısısı ile üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakaya takım pimi etrafında oluşan kaynak bölgesi çevresindeki plakaların arayüzeyinde bir miktar gömülmesiyle ve kaynak bölgesi çevresindeki plakaların arayüzeyinde sürtünme ısısıyla metallerarası bileşiklerden oluşan tabakalarla gerçekleşen birleşme çekme kesme testi sırasında kaynak bölgesi çevresindeki plakların arayüzeyinde metallerası bileşiklerden oluşan tabakalardan önce kırılma başlamış daha sonra kaynak bölgesine ilerleyerek ve kaynak bölgesinin çevresi boyunca kırılma sonucu kopma gerçekleşmiştir. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK’nın çekme kesme testinden sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst tarafındaki ve üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyleri Şekil 4.53cI’de gösterilmiştir. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile yapılan SKNK kaynakları Şekil 4.53cI’deki gibi dönen takım piminin üst üstte bindirilen plakaların arayüzeyine dalmasıyla plakaların malzemelerinin takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karıştırılmasıyla oluşan bir kaynak bölgesi ve ayrıca takım piminin plakalara dalmasıyla ortaya çıkan sürtünme ısısı ve dönen takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak üst plakadan plakalara uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısısı ile üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın altta bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakaya takım piminin hemen etrafında oluşan kaynak bölgesi çevresindeki plakaların arayüzeyinde bir miktar gömülmesiyle ve burada sürtünme ısısıyla plakların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden oluşan tabakalar çekme kesme testi sırasında kaynak bölgesi çevresindeki plakların arayüzeyinde metallerası bileşiklerden oluşan tabakalardan önce kırılma başlamış ve daha sonra kaynak bölgesine doğru ilerleyerek



kaynak bölgesi çevresi boyunca kırılma gerçekleşmesi sonucu plakalar birbirinden ayrılmıştır.



Şekil 4.53. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme testinden sonra makro kaynak kırık yüzeyleri

AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme testinden sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki ve üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyleri Şekil 4.54a'de gösterilmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın

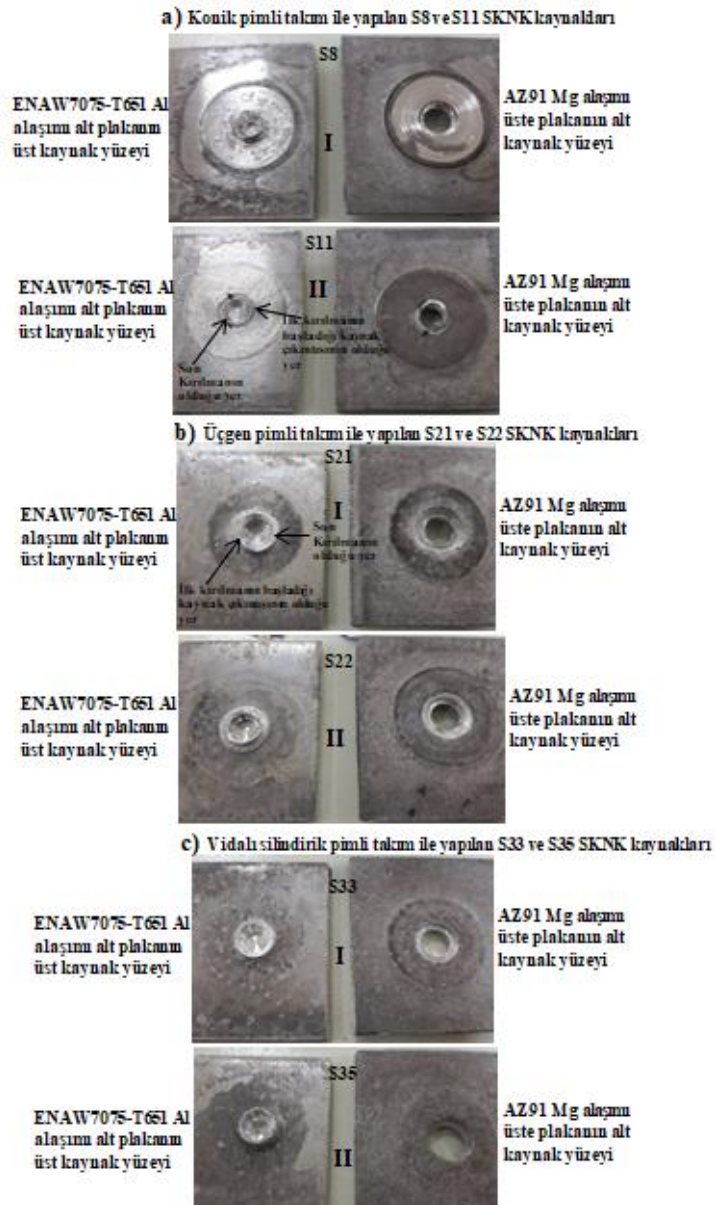


üzerindeyken konik pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme testinden sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki ve üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyleri Şekil 4.54aII'de gösterilmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının bir kısmı Şekil 4.54aI'deki gibi Dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayarak aşağıya alt plakaya doğru itilen üst AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden daha sert alt 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak ve ayrıca altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yukarı ve yanlara doğru akarak dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesi ve ayrıca plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden oluşan tabakalar ile gerçekleşen birleşme çekme kesme testi sırasında kırılma önce plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden oluşan tabakaların yırtılmasıyla başlamış daha sonra kaynak bölgesinin çevresinde bulunan kanca hattı boyunca yukarıya anahtar deliğine doğru ilerlemiş ve son olarak en zayıf kaynak bölgesi çevresi boyunca kırılmanın gerçekleşmesiyle kopma gerçekleşmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının diğer bir kısmı da Şekil 4.54aII'deki gibi dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayarak aşağıya alt plakaya doğru itilen üst AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden daha sert alt 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak ve ayrıca altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yukarı ve yanlara doğru akarak dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesi ve ayrıca kaynak bölgesi çevresinde ve bir miktarda plakaların arayüzeyinde metallerearası bileşiklerden oluşan tabakalar ile gerçekleşen birleşme çekme kesme testi sırasında önce arayüzeyde metallerearası bileşiklerden oluşan tabakaların yırtılmasıyla başlayan kırılma daha sonra yukarı yönde ilerleyip en zayıf kaynak bölgesinin bir kısmından kırıldıktan

sonra kırılma yayılarak diğer tarafta bulunan kaynak bölgesi boyunca kırılmanın gerçekleşmesiyle kaynak bölgesinin bir kısmı alt plakada bir kısmı da üst plakada kalacak şekilde kopma gerçekleşmesiyle plakalar birbirinden ayrılmıştır. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme testinden sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki ve üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyleri Şekil 4.54bI'de gösterilmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme testinden sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki ve üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyleri Şekil 4.54bII'de gösterilmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının bir kısmı Şekil 4.54bI'deki gibi dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayarak aşağıya alt plakaya doğru itilen üst AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden daha sert alt 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak ve ayrıca altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yukarı ve yanlara doğru akarak dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesi çekme kesme testi sırasında kırılmanın öncelikle kaynak bölgesinin bir tarafından kaynak bölgesinin çevresinde metallerearası bileşiklerden oluşan tabakalar ile birleşmenin gerçekleştiği kancanın bulunduğu arayüzeyden başladığı ve kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzeyden yukarıya anahtar deliğine doğru ilerleyerek en zayıf kaynak bölgesinden (Şekil 4.54bI'de alt bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyindeki çıkıntılı yerden) kırıldıktan sonra kırılma yayılarak diğer tarafta bulunan kaynak bölgesi boyunca son olarak kırılmanın gerçekleşmesiyle plakalar birbirinden ayrılmıştır. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının diğer bir kısmı da Şekil 4.54bII'deki gibi dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayarak aşağıya alt plakaya doğru itilen üst AZ91 Mg alaşımı

plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden daha sert alt 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak ve ayrıca altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yukarı ve yanlara doğru akarak dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesi çekme kesme testi sırasında kırılmanın öncelikle kaynak bölgesinin çevresinde metallerearası bileşiklerden oluşan tabakalar ile birleşmenin gerçekleştiği kancanın bulunduğu arayüzeyden başladığı ve kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzeyden yukarıya anahtar deliğine doğru ilerleyerek en zayıf kaynak bölgesi çevresi boyunca kırılmanın gerçekleşmesiyle plakalar birbirinden ayrılmıştır. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme testinden sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki ve üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyleri Şekil 4.54cI'de gösterilmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme kesme testinden sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki ve üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyleri Şekil 4.54cII'de gösterilmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile yapılan SKNK kaynakları Şekil 4.54cI ve II'deki gibi Dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daldığında takım pimi altında yumuşayarak aşağıya alt plakaya doğru itilen üst AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden daha sert alt 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak oluşan kaynak bölgesi ve ayrıca kaynak bölgesinin çevresinde metallerearası bileşiklerden oluşan tabakalar ile birleşmenin gerçekleştiği kancanın olduğu arayüzey çekme kesme testi sırasında önce kaynak bölgesinin çevresindeki kanca hattının olduğu arayüzeyde metallerearası bileşiklerden oluşan tabakaların yırtılmasıyla başlayan kırılma daha sonra yukarı ve anahtar deliği çevresine doğru ilerleyip kaynak bölgesinin çevresi boyunca kırılmanın gerçekleşmesiyle plakalar birbirinden ayrılmıştır. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarında tam bir kaynak bölgesi oluşmadığından veya

nispeten bir kaynak bölgesi olduğundan plakalar birbirine sadece hemen takım pimi etrafındaki veya hem takım pimi etrafındaki (anahtar deliği çevresindeki) hem de takım omuzu altındaki plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan tabakalar ile birleştiklerinden dolayı çekme testi sırasında genelde plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan tabakaların yırtılmasıyla nispeten pürüzsüz bir kırılma yüzeyi ortaya çıkmış ve ayrıca kırılma plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) oluşan tabakalardan gerçekleştiği için gevrek bir kırılma olmuştur. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarında ise takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) bir kaynak bölgesi oluşmuş ve çekme testi sırasında kaynak bölgesinden kırılmanın gerçekleşmesiyle kopma gerçekleşmiş ve ayrıca kaynak bölgesinde metallerarası bileşikler ( $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$ ) olduğundan dolayı gevrek bir kırılma olmuştur.

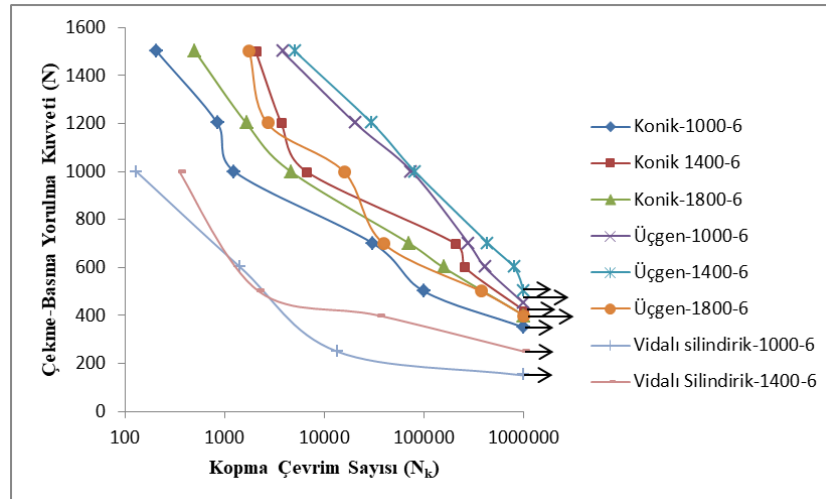


Şekil 4.54. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımları kullanarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme testinden sonra makro kaynak kırık yüzeyleri

#### 4.1.5. Çekme-Basma Yorulma Testi

SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testleri Instron 8874 marka çekme-basma yorulma testi makinasında,  $f=10$  Hz frekans, 1 milyon sonsuz ömür ve  $R=-1$  yük oranı şartlarında yapıldı. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme mukavemeti 7075-T651 Al alaşımı plaka AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken

yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme mukavemetinden daha yüksek çıktığı için AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik ve üçgen pimli takımlar ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde, 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde ve 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde ve ayrıca vidalı silindirik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde ve 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testleri yapıldı. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik ve üçgen pimli takımlar ile 1000, 1400 ve 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde ve vidalı silindirik pimli takım ile 1000 ve 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK kaynakların çekme kesme dayanımı aynı takım dönme hızlarında ve 3 sn takım bekleme süresinde yapılan diğer SKNK kaynaklarınınkinden daha yüksek olduğu için bu kaynaklar çekme-basma yorulma testi için seçildi. Çekme-basma yorulma testine tabi tutulan SKNK kaynakları 1000000 (1 milyon) çevrim sayısına maksimum çekme-basma kuvvetinde ulaşılan kadar çekme-basma kuvveti artırılarak çekme-basma yorulma testleri yapılmaya devam edilmiştir.



Şekil 4.55. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma ömrü

AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK çekme-basma yorulma testinde, 450 N çekme-basma kuvveti altında kopmadan 1000000 çevrim sayısına ulaşırken, 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan

SKNK, 500 N çekme-basma kuvveti altında kopmadan 1000000 çevrim sayısına ulaşmış ve 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK ise 400 N çekme-basma kuvveti altında kopmadan 1000000 çevrim sayısına ulaşmıştır. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK çekme-basma yorulma testinde, 350 N çekme-basma kuvveti altında kopmadan 1000000 çevrim sayısına ulaşırken, 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK 420 N çekme-basma kuvveti altında kopmadan 1000000 çevrim sayısına ulaşmış ve 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK ise 400 N çekme-basma kuvveti altında kopmadan 1000000 çevrim sayısına ulaşmıştır. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK çekme-basma yorulma testinde 150 N çekme-basma kuvveti altında kopmadan 1000000 çevrim sayısına ulaşırken, 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK 250 N çekme-basma kuvveti altında kopmadan 1000000 çevrim sayısına ulaşmıştır. Şekil 4.55'te görüldüğü üzere üçgen pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK en uzun çekme-basma yorulma ömrüne sahip olmuştur. Üçgen pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın en uzun yorulma ömrüne sahip olmasının nedeni büyük bir kaynak bölgesine ve daha az çatlak, metallerarası bileşiklerden oluşan tabakalar gibi kusurlara sahip olmasına bağlanabilir (makro ve mikroyapı bölümünde görülebilir). Üçgen pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme-basma yorulma ömrü ise 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme-basma yorulma ömründen daha uzun olduğu görülmektedir. 1000 ve 1400 dev/dak dönme hızında yapılan SKNK kaynaklarının daha yüksek yorulma ömrüne sahip olmasının nedeni kaynak genişliklerinin daha büyük olmasındandır (makro ve mikroyapı bölümünde görülebilir). Üçgen pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK ayrıca en yüksek çekme kesme yüküne sahip olmuş ve bunu 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK takip etmiştir (çekme kesme testi bölümünde görülebilir). Konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynakları arasında 1400 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme-basma yorulma ömrü en uzun olandır. Bunu 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK takip etmiştir. Vidalı silindirik

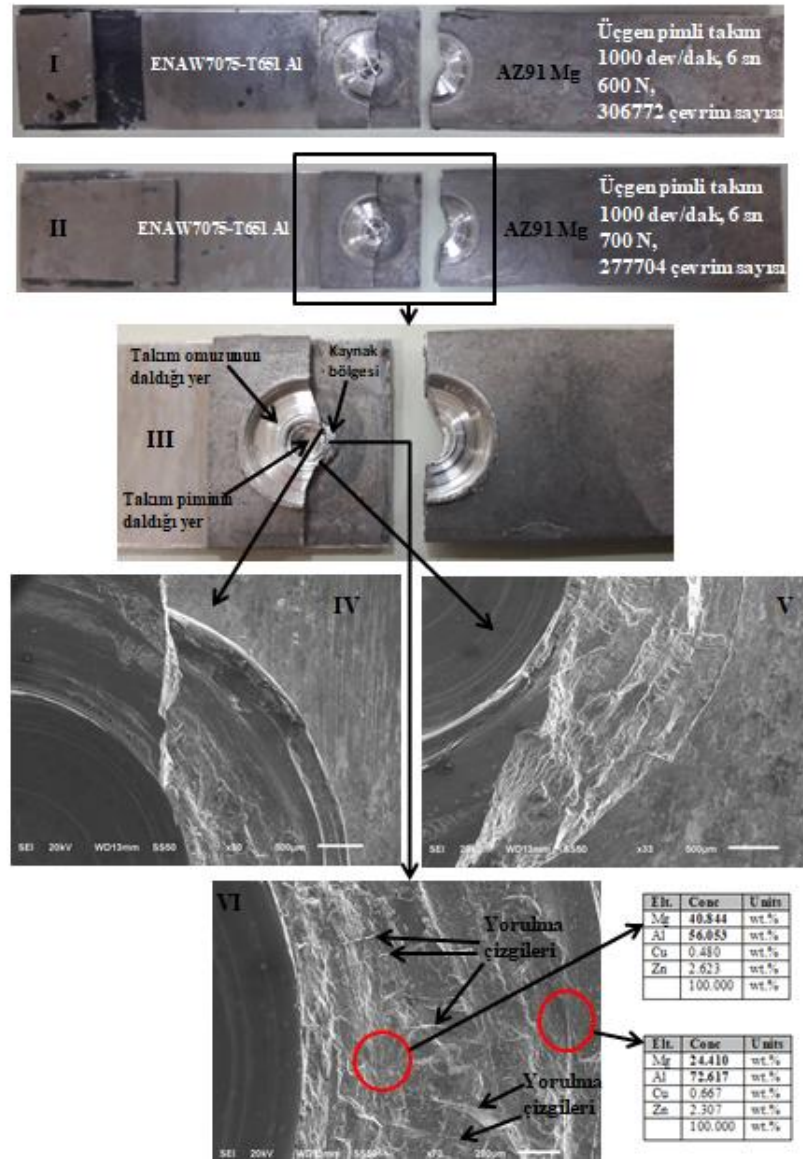
pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının yorulma ömrüne en kısadır. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme mukavemeti de üçgen ve konik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarınınkinden daha düşük çıkmıştır. Her üç takım için 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK en uzun yorulma ömrüne sahip olmuştur. 1400 dev/dak takım dönme hızı ve 6 sn takım bekleme süresi birlikte AZ91 Mg ve 7075-T651 Al alaşımı plakalarının malzemelerini sürtünme ısı ile ısıtarak yumuşatıp takım pimi çevresinde karıştırılarak kaynak oluşumu için en uygun ürettiğinden dolayı bu takım dönüş hızı ile birlikte takım bekleme süresi en sağlam SKNK yapılmasını sağlamıştır.

#### **4.1.6. Çekme-Basma Yorulma Testi Sırasında Kaynakların Kırılma Şekilleri**

Şekil 4.56I AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile, 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme-basma yorulma testinde 600 N çevrim yükü altında 306772 çevrim sayısında koptuktan sonraki kırılma şeklini göstermektedir. Şekil 4.56II de aynı şekilde AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile, 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme-basma yorulma testinde 700 N çevrim yükü altında 277704 çevrim sayısında kırıldıktan sonraki kırılma şeklini göstermektedir. Şekil 4.56I ve II'den görülebileceği gibi SKNK kaynakları çekme-basma yorulma testinde üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakadan ve takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) bulunan kaynak bölgesinin bir kısmından yükleme yönüne neredeyse dik açıda kopmuştur. Çekme-basma yorulma testi sırasında kaynak bölgesinde başlayan çatlak kaynak etrafında yaklaşık yarısına kadar çevresel olarak yayıldıktan sonra kırılma gerçekleşmiş ve daha sonra çatlak üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın takım omuzu daldığı yerden ilerleyerek sona ulaştığında kopma olmuştur. Çekme-basma yorulma testi sırasında kopma üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın takım omuzu daldığı yerden olmasının nedeni takım omuzunun üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya fazla dalmasıyla kalınlığının azalmasından dolayı olabilir. Üçgen pimli takım ile AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarının bir kısmı Şekil 4.56I ve II'deki gibi kırılmıştır. Şekil 4.56IV ve V 700 N çevrim yükünde kırılan kaynaklı numunenin kaynak



kırık yüzeyinin SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 4.56V'de kaynak bölgesinde basamaklı ve gevrek bir kırılma şekli gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.56VI'da EDS analiz sonuçlarına göre kaynak bölgesinde büyük olasılıkla metallerarası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) olduğu ve bunların gevrek kırılmaya neden olduğu söylenebilir. Şekil 4.56VI'da kaynağın kırık yüzeyinde yorulma çizgilerinin olduğu görülmektedir. Laird (1967) göre yorulma çizgileri normalde yüzey merkezli kübik malzemelerde tekrarlanan plastik köreltme-keskinleştirme işlemiyle meydana gelir. yorulma çizgileri, yorulma çatlağı ucunun önündeki plastik bölge içinde kayma yönü boyunca kayma düzlemi üzerindeki dislokasyonların kaymasından kaynaklanır. Chowdhury vd. (2012) 5754 Al alaşımı plakayı, AZ31 Mg alaşımı plakanın üzerine koyup SKNK ile birleştirilmesiyle üretilen SKNK kaynaklarının yorulma testinde kaynakların kırık yüzeyinde yorulma çizgileri görülmüştür. Yorulma çatlağı yayılımı, çoğunlukla yorulma çizgilerinin oluşumu ile karakterize edilmiştir. 5754 Al ve AZ31 Mg alaşımlarının SKNK ile birleştirilmesinde plakaların arayüzeyinde  $Al_3Mg_2$  and  $Al_{12}Mg_{17}$  metallerarası bileşiklerden oluşan tabakalar ile birleştiği ve yorulma testi sırasında bu tabakanın ayrılmasıyla plakalar birbirinden ayrılmıştır.

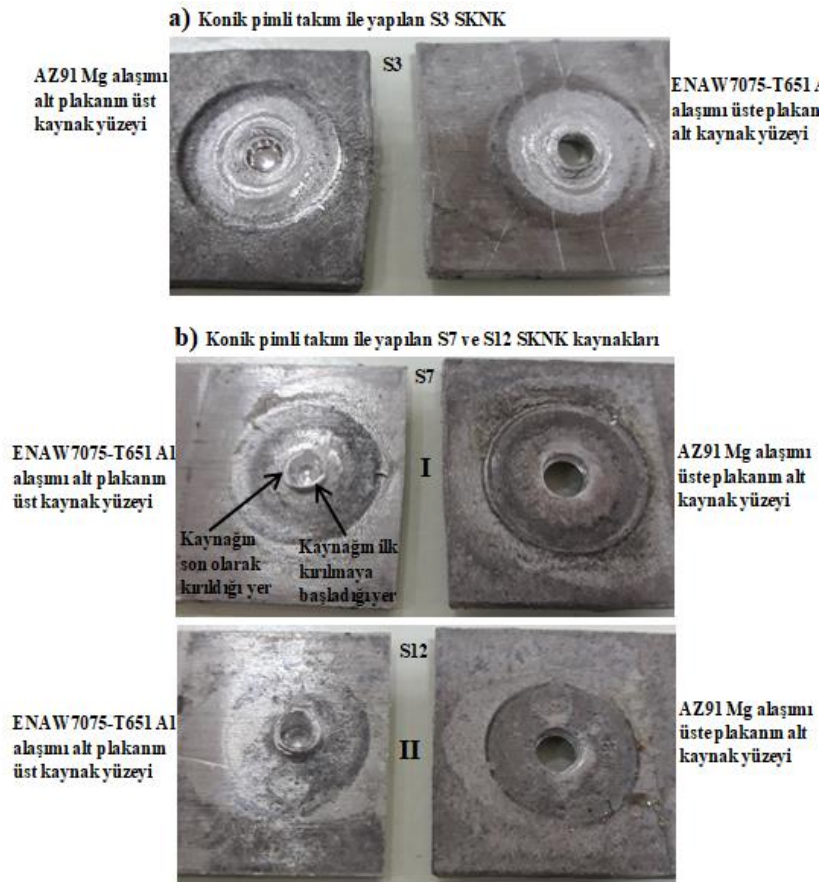


Şekil 4.56. Üçgen pimli takım ile yapılan S20 kaynaklarının çekme-basma yorulma testinden sonra kaynak kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları

Şekil 4.57 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1400 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme-basma yorulma testinden sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyini ve üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyini göstermektedir. Ayrıca, AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 3 sn bekleme süresinde ve 1800 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testinden sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyini ve

üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyini göstermektedir. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarında Dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara önce üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakaya daha sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya daldığında plakalara uyguladığı basma basıncı ve ortaya çıkan sürtünme ısı ile ve ayrıca takım omuzunun üst plakaya bir miktar dalarak plakalara üstten uyguladığı basma basıncı ve ürettiği sürtünme ısı ile plakaların temas eden yüzeyleri arasında ısı ve basma basıncıyla SKNK kaynaklarının bir kısmı sadece takım pimi etrafındaki (anahtar deliği çevresindeki) plakaların temas eden yüzeyleri arasında ve SKNK kaynaklarının bir kısmı da hem takım pimi etrafındaki (anahtar deliği çevresindeki) plakaların temas eden yüzeyleri arasında hem de takım omuzu altındaki plakaların temas eden yüzeyleri arasında metallere arası bileşiklerden oluşan tabakalar ile ve üstte bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plakanın altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakaya bir miktar gömülmesi ile birleşme gerçekleştiği için SKNK kaynakları çekme-basma yorulma testi sırasında genelde Şekil 4.57a'da görüldüğü gibi plakaların temas eden yüzeyleri arasında metallere arası bileşiklerden oluşan tabakaların yırtılmasıyla plakalar birbirinden ayrılmıştır. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarında plakaların arayüzeyinde metallere arası bileşiklerden oluşan tabakalar meydana geldiği için çekme-basma yorulma testi sırasında gevrek kırılmış ve AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarına göre daha pürüzsüz bir kaynak kırık yüzeyi oluşmuştur. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarında dönen takım pimi üst üste bindirilen plakalara daldığında takım pimi altında yumuşayarak aşağıya alt plakaya doğru itilen üst AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesi, yukarı ve yanlara doğru akarak hareket eden alt 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesiyle takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) karışarak ve altta bulunan daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka malzemesinin üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plaka malzemesinin içerisine yukarı ve yanlara doğru akarak dalmasıyla takım pimi etrafında (anahtar deliği çevresinde) kaynak bölgesi oluşmuştur. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının bir kısmı çekme-basma yorulma testi sırasında Şekil 4.57bI'deki gibi önce kaynağın bir tarafından çıkıntının olduğu kaynak bölgesinden kırılmaya başlamış ve daha sonra kırılma yayılarak

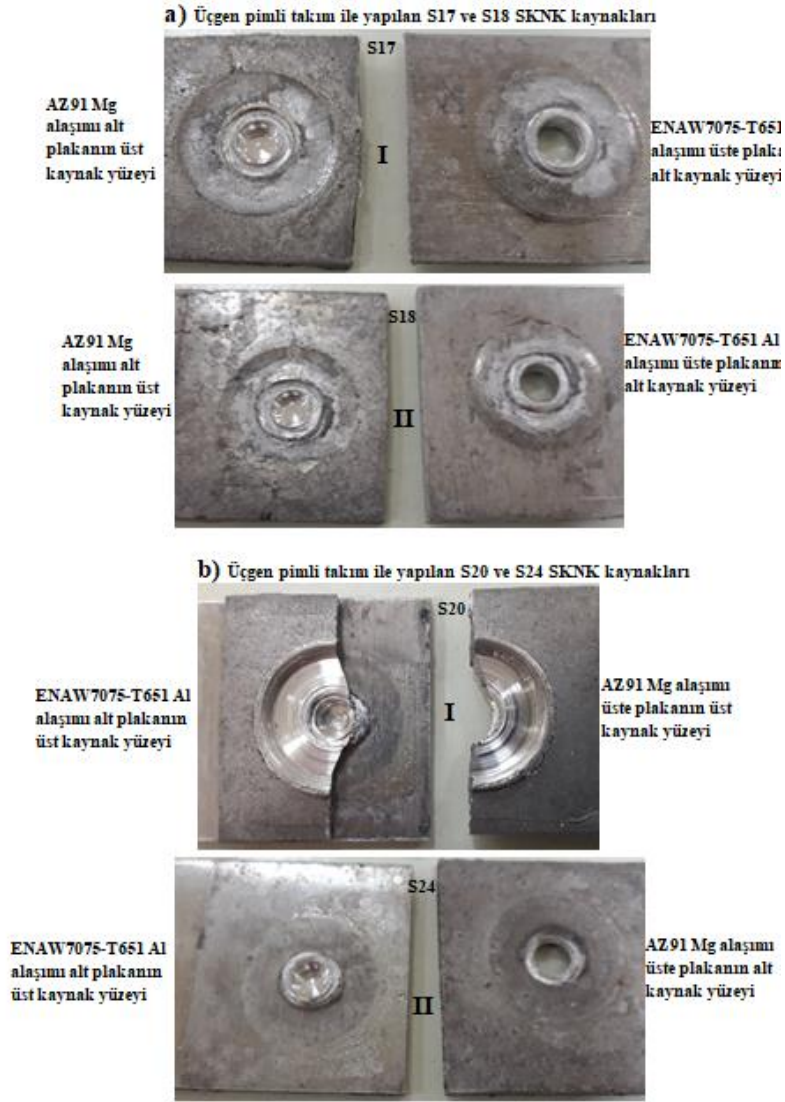
kaynağın diğer tarafından son olarak kaynak boyunca kırılmasıyla kopma gerçekleşmiştir. SKNK kaynaklarının diğer bir kısmı ise çekme-basma yorulma testi sırasında Şekil 4.57bII'deki gibi takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynağın çevresi boyunca kırılarak kopma gerçekleşmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarında kaynak bölgesinde metallerearası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) meydana geldiği için çekme-basma yorulma testi sırasında gevrek kırılmıştır ve ayrıca yorulma çizgileri de kaynakların kırık yüzeyinde görülmüştür.



Şekil 4.57. Konik pimli takım ile yapılan bazı SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testinden sonra makro kaynak kırık yüzeyleri: a) S3 kaynağının kırık yüzeyi ve b) S7 ve S12 kaynaklarının kaynak kırık yüzeyleri

Şekil 4.58 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1800 dev/dak dönme hızında ve 3 ve 6 sn bekleme sürelerinde yapılan SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testinden sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyini ve üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyini göstermektedir. Ayrıca, AZ91 Mg

alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde ve 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testinden sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyini ve üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyini göstermektedir. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testi sırasında Şekil 4.58aI ve II'de görüldüğü gibi takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesinin çevresi boyunca kırılmasıyla kopma gerçekleşmiştir. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarında metallerarası bileşiklerin ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşması nedeniyle çekme-basma yorulma testi sırasında gevrek kırılmıştır ve ayrıca 7075-T651 Al alaşımı alt plakaların üst tarafında bulunan kaynak kırık yüzeylerinde yorulma çizgileri tespit edilmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının bir kısmı çekme-basma yorulma testi sırasında Şekil 4.58bI'deki gibi kaynak bölgesinin yaklaşık yarısından ve üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakadan çekme-basma kuvvetine neredeyse dik doğrultuda kopmuştur. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının bir kısmı da çekme-basma yorulma testi sırasında Şekil 4.58bII'deki gibi takım pimi çevresinde (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesinin çevresinde metallerarası bileşiklerden oluşan tabakalar ile birleşmenin gerçekleştiği kancanın bulunduğu arayüzeyden öncelikle kırılmanın başladığı ve kancanın olduğu hat doğrultusundaki arayüzeyden yukarıya anahtar deliğine doğru ilerleyerek en zayıf kaynak bölgesi çevresi boyunca kırılmanın gerçekleşmesiyle kopma gerçekleşmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarında metallerarası bileşiklerin ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşması nedeniyle çekme-basma yorulma testi sırasında gevrek kırılmıştır ve ayrıca AZ91 Mg alaşımı alt plakaların üst tarafında bulunan kaynak kırık yüzeylerinde yorulma çizgileri tespit edilmiştir.

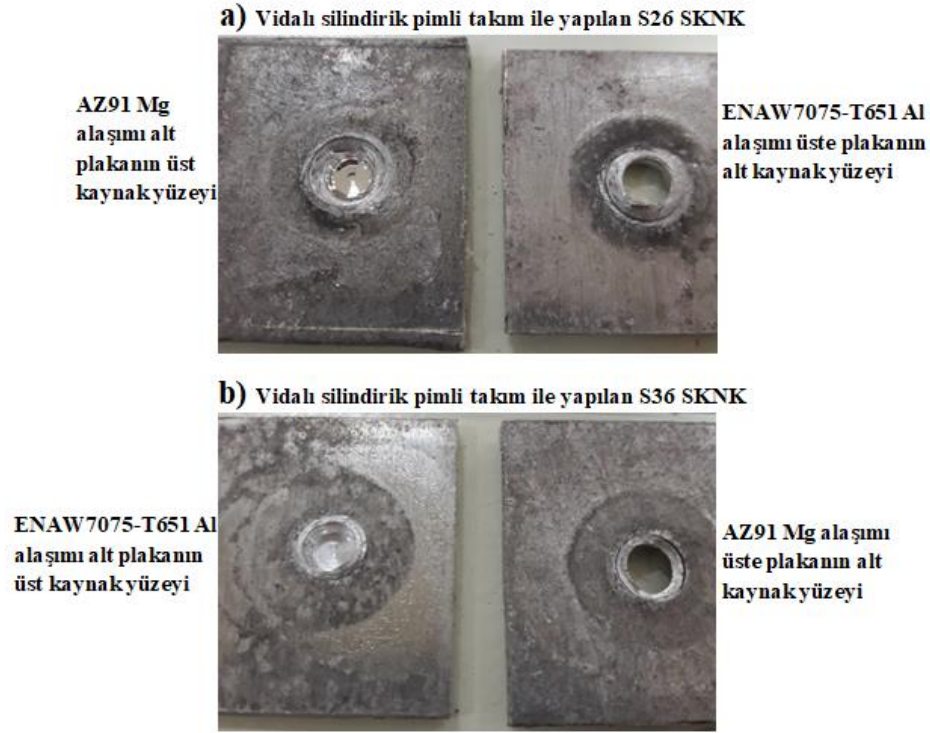


Şekil 4.58. 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arasında üçgen pimli takım ile yapılan bazı SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testinden sonra makro kaynak kırık yüzeyleri: a) S17 ve S18 b) S20 ve S24

Şekil 4.59 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1000 dev/dak dönme hızında ve 6 sn bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme-basma yorulma testinden sonra altta bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyini ve üstte bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzeyini göstermektedir. Ayrıca, AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile 1800 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde yapılan SKNK'nın çekme-basma yorulma testinden sonra altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyini ve üstte bulunan AZ91 Mg alaşımı plakanın alt

tarafındaki kaynak kırık yüzeyini göstermektedir. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testi sırasında Şekil 4.59a'da görüldüğü gibi takım pimi üst üste bindirilen plakaların temas eden yüzeylerine daldığında plakaların arayüzeyinde takım piminin hemen çevresinde (anahtar deliği çevresinde) oluşan küçük bir kaynak bölgesinin dış çevresinde plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşan tabakanın öncelikle yırtılmasıyla ve daha sonra küçük kaynak bölgesinin çevresi boyunca kırılmasıyla kopma gerçekleşmiştir. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken vidalı silindirik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testi sırasında Şekil 4.59b'deki gibi dönen takım pimi üst üste bindirilen plakaların temas eden yüzeylerine daldığında plakaların arayüzeyinde takım piminin hemen çevresinde (anahtar deliği çevresinde) oluşan kaynak bölgesinin çevresi boyunca ortadan kırılarak kaynağın bir kısmı alt plakada bir kısmı da üst plakada kalmıştır. 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testinde kaynakların kırık yüzeyleri AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarınınkine göre daha pürüzsüz olmuştur. Çünkü 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarında birleşme çoğunlukla plakaların arayüzeyinde metallerarası bileşiklerden oluşan tabakalar ile olmuştur. Ayrıca, tüm SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testinden sonra altta bulunan plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyinde yorulma çizgileri görülmüştür.





Şekil 4.59. 7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plaka arasında vidalı silindirik pimli takım ile yapılan bazı SKNK kaynaklarının çekme-basma yorulma testinden sonra makro kaynak kırık yüzeyleri: a) S26 ve b) S36

## 4.2. 7075-T651 Al Alaşımı Plakaların SKNK

### 4.2.1. Kaynak Görünümü

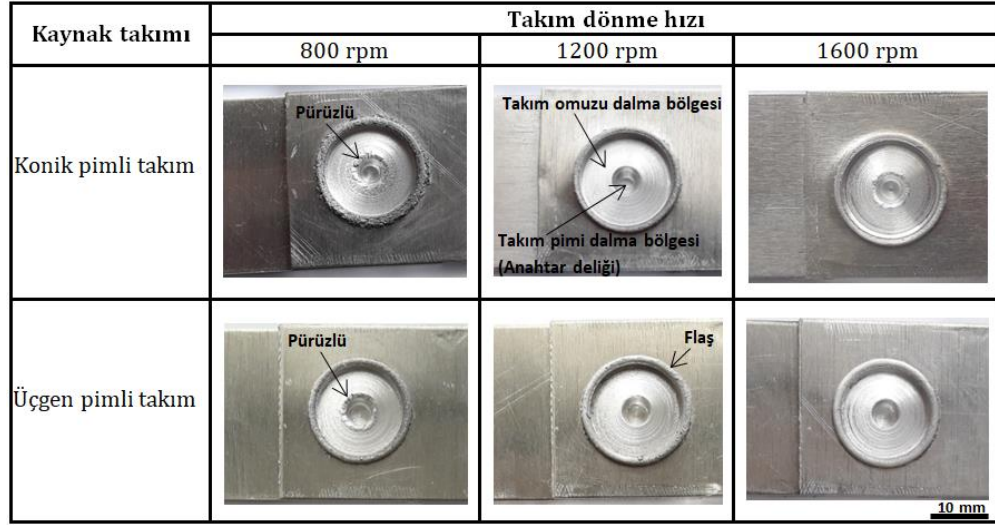
Şekil 4.60 konik ve üçgen pimli takımlar ile 800, 1200 ve 1600 dev/dak dönme hızında ve sabit 7,3 mm/dak dalış hızında, 3,8 mm dalma derinliğinde, 5 sn bekleme süresinde ve 7,3 mm/dak geri çekilme hızında üretilen SKNK kaynaklarının üst görünümünü göstermektedir. Her iki kaynak takımı 10 derece konkav omuza sahiptir. Şekil 4.60'ta, SKNK sırasında tüm kaynaklarda takım omuzu üstteki plakaya dalması sonucu üst yüzeyindeki malzeme dışarı doğru akıp çıktığı ve takım omuz girintisinin dış çevresi boyunca dışa doğru akarak yığıldı açıktır. Kaynakların üst yüzeyinden, takım pimi ve omuzu dalma bölgeleri ve ezilerek dışarı çıkan yığılmış malzeme flanşları oluştuğu görülmektedir. Kaynakların üst yüzeylerinde çatlak, gözeneklilik veya çapak gibi kusurlar tespit edilmedi.



Her iki kaynak takımı için de dönme hızı 800'den 1600 dev/dak'ya çıkıldığında, artan dönme hızı ile sürtünme ısısı girdisinin artmasına buna bağlı olarak malzemenin daha fazla yumuşaması nedeniyle kaynağın üst yüzeyinde biraz daha fazla malzemenin dışarı ve yanlara doğru akarak yığıldığı görülmüştür. Diğer bir değişle, her iki kaynak takımı için de takım dönme hızı 800'den 1600 dev/dak'ya artırıldığında, sürtünme ısısı arttığı için malzeme daha fazla yumuşamış bunun sonucunda kaynağın üst yüzeyinde dışarı ve yanlara doğru yığılan malzeme (flanş) büyüklüğü biraz arttığı görülmüştür.

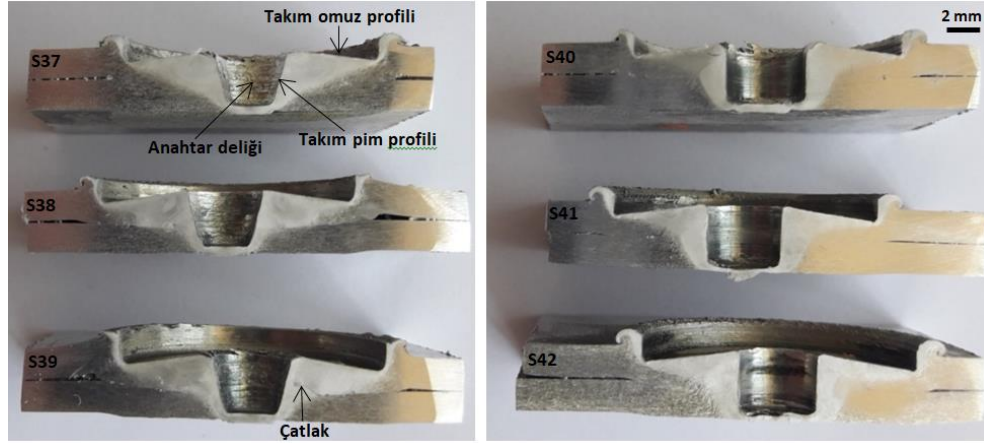
Ayrıca, 1200 ve 1600 dev/dak takım dönüş hızlarında yapılan kaynakların üst yüzeyleri, 800 dev/dak takım dönüş hızında yapılan kaynakların üst yüzeylerine göre daha parlak ve pürüzsüz olduğu görülmüştür. Bunun nedeni yüksek 1200 ve 1600 dev/dak takım dönüş hızı daha yüksek sürtünme ısısı ürettiğinden malzeme daha fazla yumuşamış ve dolayısıyla takım pimi ve omuzu malzemeyi karıştırma sırasında malzeme üzerinde daha kolay kayması nedeniyle takım piminin ve omuzunun temas ettiği malzeme yüzeyleri daha pürüzsüz olmuştur. 800 dev/dak takım dönüş hızlarında üretilen kaynakların Şekil 4.60'ta siyah okla gösterilen anahtar deliklerinin etrafındaki üst yüzeyler, 1200 ve 1600 dev/dak takım dönüş hızlarında üretilen kaynaklarınkinden daha pürüzlü olduğu görülmektedir.

SKNK işleminde takım dönüş hızı, kaynağın mikroyapısını ve mukavemetini önemli ölçüde etkileyen malzeme ısınması ve plastik deformasyona uğramasına katkıda bulunur (Yang vd. 2010). Ek olarak, kaynak takımı geometrisi malzeme akışında ve karışımında dolayısıyla kaynağın mekanik özellikleri üzerinde çok önemli bir rol oynar. Örneğin, konkav omuzlu takım ile yapılan SKNK kaynakları, düz ve konveks omuzlu takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarına göre, daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür (Lin vd. 2008; Badarinarayan vd. 2009; Yang vd. 2011). Genel olarak, üçgen pimli takımlar ile yapılan kaynaklar, silindirik pimli takımlar ile yapılan kaynaklara kıyasla daha büyük kaynak birleşme genişliği ve daha iyi çekme-kesme mukavemeti sergilemiştir (Badarinarayan vd. 2009).



Şekil 4.60. 7075-T651 Al alaşımı plakaların SKNK kaynaklarının üst yüzeylerinin yakından görünüşleri

Şekil 2.61 yapılan SKNK kaynaklarının dağlanmış enine kesit alanlarını göstermektedir. Şekil 4.61a-c konik pimli takım ile sırasıyla 800, 1200 ve 1600 dev/dak dönme hızında yapılan SKNK kaynaklarının dağlanmış enine kesit alanlarını göstermekte ve Şekil 4.61d-f ise üçgen pimli takım ile sırasıyla 800, 1200 ve 1600 dev/dak dönme hızında yapılan SKNK kaynaklarının dağlanmış enine kesit alanlarını göstermektedir. Şekil 4.61'de kaynakların enine kesit alanında görünen girinti profilleri konik ve üçgen pimli ve konkav omuzlu takımların kaynak edilmek üzere üst üste bindirilmiş plakalara dalması sonucunda pim ve omuzun meydana getirdiği şekli göstermektedir. Çoğu kaynakların enine kesit alanında gözle görülür bir kusur görülmedi, ancak konik pimli takım ile 1600 dev/dak dönme hızında yapılan kaynağın kesitinde gözle görülür bir çatlak tespit edildi Şekil 4.61c'de görüldüğü gibi. 800 dev/dak takım dönme hızında yapılan SKNK kaynaklarının anahtar deliklerinin üst yüzeylerinde kaynak çapakları olduğu Şekil 4.61'den de açıkça görülmektedir. Şekil 4.61'de kaynakların enine kesit alanında görülen beyaz bölgeler kaynakların karıştırma bölgesini göstermektedir. Şekil 4.61'deki SKNK kaynaklarının enine kesit alanından görülebileceği gibi, karıştırma bölgelerinin profilleri (beyaz bölgeler) ve anahtar deliklerinin yüzey pürüzlülüğü, kaynak takımının pim geometrisine ve dönme hızına bağlı olarak farklılık göstermektedir.



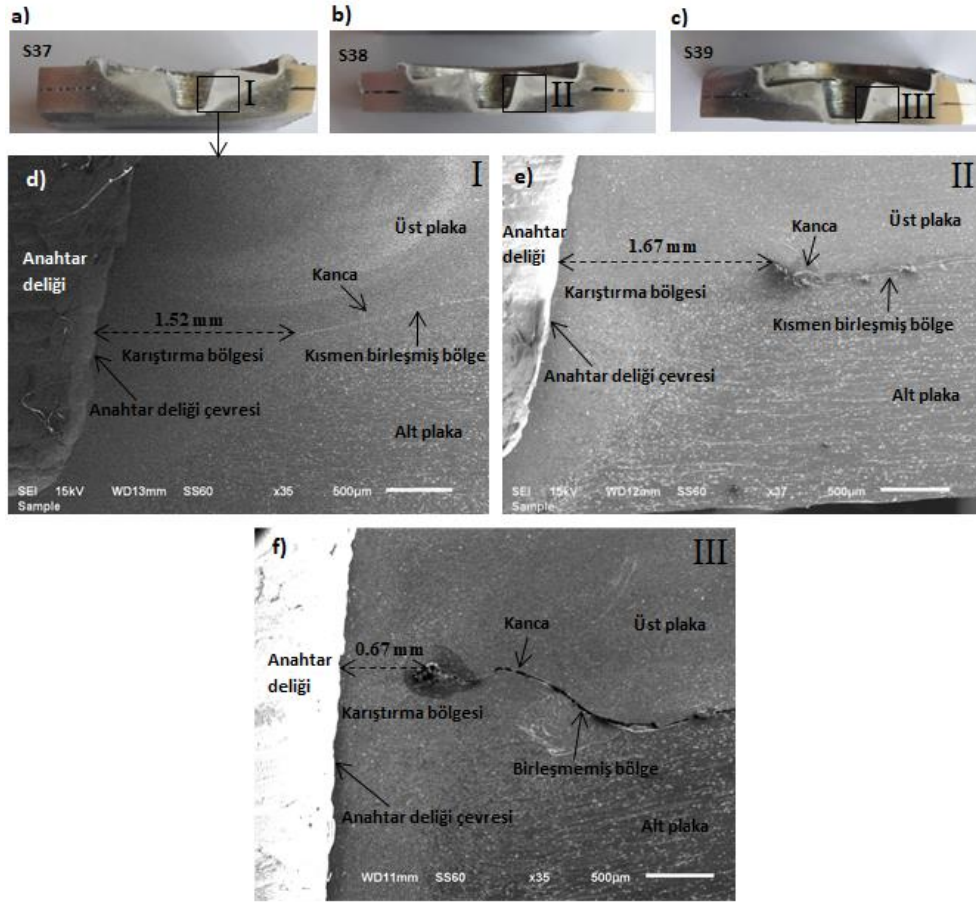
Şekil 4.61. Konik ve üçgen pimli takımlar ile yapılan S37, S38, S39, S40, S41 ve S42 kaynaklarının enine kesit alanları

#### 4.2.2. Kaynak Arayüzey Kancası ve Kaynak Bölgesi

SKNK sırasında, birleştirilmek üzere üst üste bindirilmiş iki plakanın birbirine temas eden yüzeyleri arasında (plakaların arayüzeyinde) sıkışmış oksit filmleri bulunmaktadır. Kaynak takım pimi üst plakaya dalıp ve daha sonra üst plakayı geçerek alt plakaya daldığında kaynak takım pimi altında ve çevresinde bulunan malzeme ısınmadan dolayı yumuşar ve plastik deformasyona uğrayarak aktığı için, genellikle oksit filmlerinin bulunduğu plakların arayüzeyi de yukarı üst plakaya doğru bükülerek yer değiştirmesi sonucu kancaya benzer bir şekil oluşur (Rao vd. 2013). Bu oluşan kanca (hook), SKNK kaynaklarının bütünlüğünü zayıflatan geometrik bir kusurdur. Çünkü kaynaklar dış yüklerle maruz kaldığında, çatlak önce kancada başlayabilir ve kanca boyunca ilerlemesiyle kaynakların beklenenden daha erken kopmasına neden olabilir (Yutaka vd. 2005). SKNK kaynaklarında oluşan kancalar önceden var olan çatlaklar gibi hareket ettiğinden, SKNK kaynakları dış yüklerle maruz kaldığında ortaya çıkan çatlak kanca ucu boyunca ilerlemiş ve en yakın serbest yüzeye ulaşmasıyla kaynaklar kopmuştur (Badarinarayan vd. 2009; Yin vd. 2010; Jordon vd. 2010; Rao vd. 2013). SKNK kaynaklarının mukavemeti kanca geometrisine bağlıdır (Badarinarayan vd.2009). Şekil 4.62a-c, konik pimli takım ile 800, 1200 ve 1600 dev/dak dönme hızında üretilen SKNK kaynaklarının enine kesit alanı makro resimlerini göstermekte ve her bir resimde sırasıyla I, II ve III roma rakamı ile gösterilmiş dikdörtgen alan SKNK kaynaklarının kaynak karıştırma bölgesini göstermektedir. I, II ve III roma rakamıyla gösterilen dikdörtgen

kaynak alanları Şekil 4.62d, e ve f’de büyütülerek verilmiştir. Yin vd. (2010) AZ91 Mg alaşımını AZ31 Mg alaşımına SKNK ile birleştirilmesini çalışmış ve kaynak ara yüzeyinde oluşan kancanın ucundan anahtar deliği çevresine kadar olan mesafenin kaynak mekanik özelliklerini üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Bu mesafesi daha büyük olan SKNK kaynakların daha yüksek çekme kesme mukavemetine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Rao vd. (2015) AM60B Mg alaşımını 6022-T4 Al alaşımına SKNK ile birleştirilmesini çalışmıştır ve yapılan SKNK kaynakların çekme mukavemeti kanca geometrisinden, karıştırma bölgesinin büyüklüğünden ve kaynak genişliğinden oldukça etkilendiğini belirtmişlerdir. Üretilen SKNK kaynaklarının kaynak genişliğini SKNK kaynaklarının arayüzeyinde oluşan kancanın ucundan anahtar deliği çevresine kadar olan mesafeyi ölçerek bulmuşlar. Kancanın ucundan anahtar deliği çevresine kadar olan mesafe kaynak genişliği (malzemelerin birleştiği bölge) olarak tanımlanmış burada SKNK sırasında takım pimi sayesinde alt ve üst plakanın plastik deformasyona uğraması, akması ve malzemelerin karışmasıyla malzemeler tamamen birleşmiştir. Kaynak genişliği artmasıyla kaynağın mukavemeti arttığı görülmüştür. Bu çalışmada konik pimli takım ile 800, 1200 ve 1600 dev/dak dönme hızında üretilen SKNK kaynaklarının kaynak genişliği (karıştırma bölgeleri) kaynakların arayüzeyinde oluşan kancanın ucundan anahtar deliği çevresine kadar olan mesafeyi ölçerek bulunmuştur. Şekil 4.62d-f üretilen SKNK kaynaklarının kaynak genişliğini ve kaynak karıştırma bölgesini göstermektedir. Şekil 4.62d-f’de her iki ucunda ok bulunan kesikli çizgi kaynakların kaynak genişliğini göstermektedir. Şekil 4.62d, e ve f’de, SKNK kaynakların kanca şekli, kaynak genişliği (karıştırma bölgesi), takım dönme hızına bağlı olarak değiştiği açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.62’de görüldüğü gibi 1200 dev/dak takım dönme hızında yapılan SKNK, 800 ve 1600 dev/dak takım dönme hızında yapılan SKNK kaynakları ile karşılaştırıldığında 1.67 mm’lik kaynak genişliğiyle en büyük kaynak genişliğine sahiptir. Öte yandan, 800 dev/dak takım dönme hızında yapılan nokta kaynağı, 1.52 mm kaynak genişliğine sahip ve 1600 dev/dak takım dönme hızında yapılan nokta kaynağının kaynak genişliğinden daha büyüktür. SKNK sırasında, anahtar deliğinden uzağa takım dönme ekseninden dışarıya doğru yönelen kancalara sahip kaynakların, anahtar deliğine çok yakın yerde sonlanan kancalara sahip kaynaklar ile kıyaslandığında daha yüksek mukavemetlere sahip olduğu bulunmuştur (Badarinarayan vd. 2009; Yin vd. 2010). Şekil 4.62e’den görülebileceği gibi, 1200 dev/dak takım dönme hızında üretilen nokta kaynağının kancası anahtar deliği ekseninden dışarı doğru, anahtar

deliği çevresinden uzağa yönelirken, Şekil 4.62d ve f'de 800 ve 1600 dev/dak takım dönme hızında yapılan nokta kaynaklarının kancası, anahtar deliği çevresine doğru yöneldiği görülmektedir. SKNK sırasında, takım dönme hızı arttığında, sürtünme ısı ve gerinim oranı artar. Bu da takım omzu altındaki ve takım pimi etrafındaki malzemenin viskozitesini düşürür. Malzeme viskozitesi düştüğü için takım omzu ve pimi malzeme üzerinde kaymaya başlamış, bu da takımın karıştırma fonksiyonunu ve karıştırma bölgesinde üst ve alt plaka malzemelerinin birbirine verimli bir şekilde karışmasını engeller. Bunun sonucunda kaynak genişliği (karıştırma bölgesi) küçük olan kaynak üretilir (Gerlich vd. 2005; Chang vd. 2004; Gerlich vd. 2007; Yuan vd. 2012) Bu durum 1600 dev/dak takım dönme hızında yapılan nokta kaynağında olmuş olabilir. Çünkü Şekil 4.62f'de görüldüğü üzere 1600 dev/dak takım dönme hızında yapılan nokta kaynağı en düşük 0.67 mm'lik kaynak genişliğine sahiptir. 1600 dev/dak takım dönme hızında yapılan nokta kaynağının kaynak genişliği 800 ve 1200 dev/dak takım dönme hızında üretilen nokta kaynaklarınınkinden daha az olmasının başka bir nedeni: 1600 dev/dak takım dönme hızı diğerlerine göre daha yüksek olduğu için ürettiği sürtünme ısı da fazla olduğundan malzemeler gereğinden fazla ısınarak yumuşamış ve fazla akıcı olmasında dolayı takım pimi tarafından plastik deformasyona uğratılmasıyla yan taraflara akmasında ziyade daha çok yukarı yönde akmasından olabilir. Diğer bir değişle, takım pimi üst üste bindirilmiş plakalara dalmasıyla takım pimi altındaki ve çevresindeki özellikle de plakaların arayüzündeki malzemeler yüksek ısıdan dolayı akıcılığı gerektiğinden fazla olduğu için takım pimi tarafından plastik deformasyona uğratılmasıyla takım pimi çevresinden özellikle plakaların arayüzünde yanlara kıyasla daha çok yukarı yönde aktığından kaynak birleşme genişliği diğerlerine göre daha az olmasına neden olmuş olabilir. 800 dev/dak takım dönme hızında yapılan SKNK'nın arayüzünde oluşan kanca aşağıya ve anahtar deliğine doğru yöneldiği için kaynak genişliği 1200 dev/dak takım dönme hızında yapılan nokta kaynağınınkinden daha az olmuştur. Bunun nedeni, 800 dev/dak takım dönme hızı malzemelerin yumuşaması, plastik deformasyona uğraması ve akmasında yeterli sürtünme ısı üretilmediğinden dolayı olmuştur. 800 dev/dak takım dönme hızı yeterli ısıyı üretilmediğinden özellikle de plakaların arayüzündeki malzemelerin yumuşamasında, plastik deformasyona uğramasında, karışmasında, yanlara ve yukarı yönde daha fazla akmasında yetersiz kalmış olabilir.



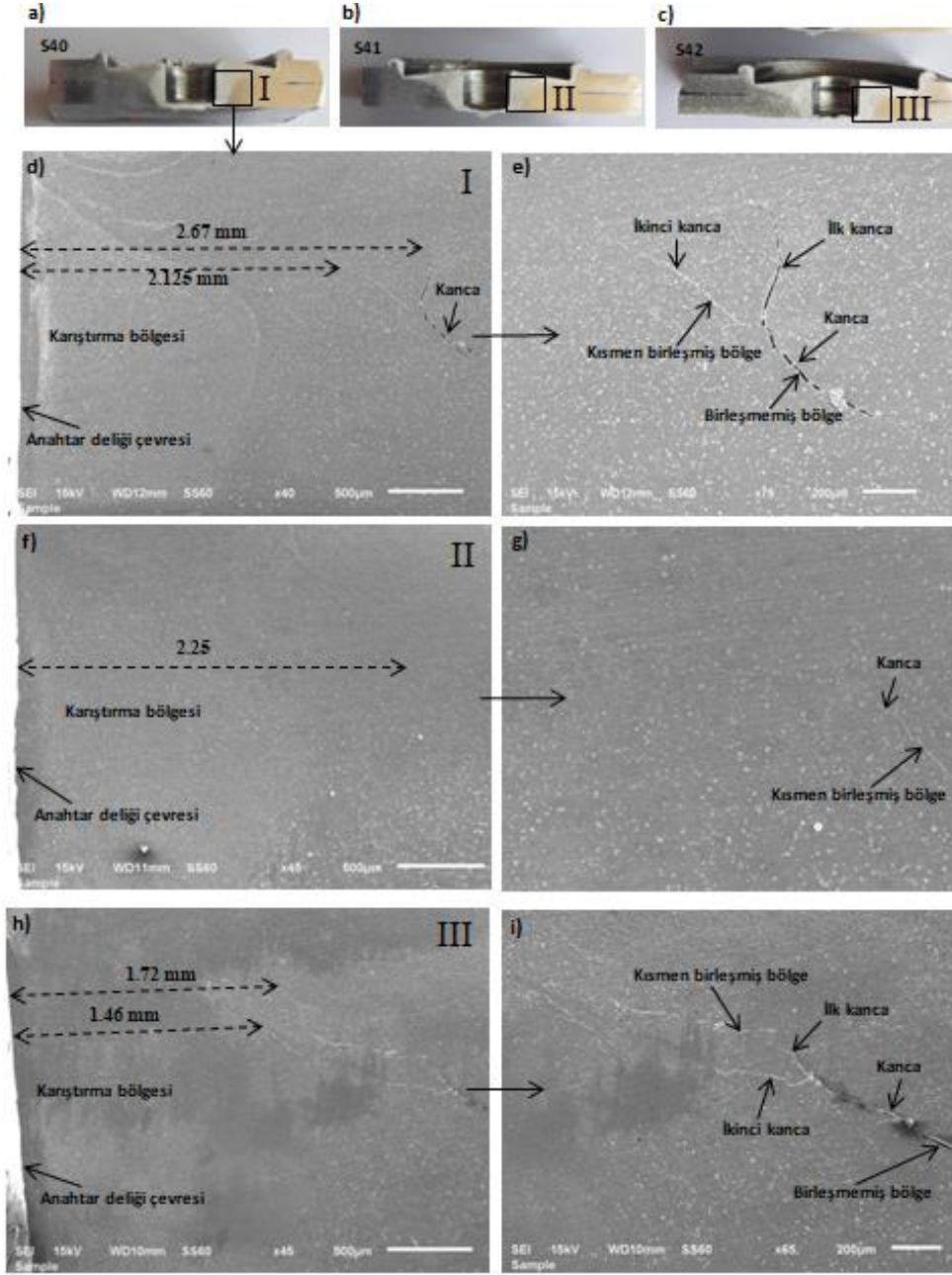
Şekil 4.62. Konik pimli takım ile yapılan S37, S38 ve S39 kaynaklarının enine kesit alanları ve I, II ve III dikdörtgen alanların büyütülmüş görünümü

Şekil 4.63a-c, üçgen pimli takım ile 800, 1200 ve 1600 dev/dak takım dönme hızında üretilen SKNK kaynaklarının enine kesit alanı makro resimlerini göstermekte ve her bir resimde sırasıyla I, II ve III roma rakamı ile gösterilmiş dikdörtgen alan SKNK kaynaklarının kaynak karıştırma bölgesini göstermektedir. I, II ve III dikdörtgen kaynak bölgeleri Şekil 4.63d, f ve h'de büyütülerek verilmiştir. Şekil 4.63e, g ve i, sırasıyla Şekil 4.63d, f ve h'deki kancaların büyütülmüş görünümünü temsil etmektedir. Üretilen SKNK kaynaklarının kaynak genişliği (karıştırma bölgeleri), kaynaklarda oluşan kancanın anahtar deliği çevresine en yakın ucunun anahtar deliği çevresine olan uzaklığı ölçülerek belirlendi. Şekil 4.63d, f ve h'de, her iki tarafında ok bulunan kesikli çizgiler nokta kaynaklarının kaynak genişliklerini göstermektedir. Şekil 4.63d, f ve h'de, kaynakların kanca şekillerinin ve kaynak genişliklerinin (karıştırma bölgelerinin), takım dönme hızına bağlı olarak değişiklik gösterdiği açıktır. 1200 dev/dak takım dönüş hızında yapılan nokta kaynağı Şekil 4.63f'de görüldüğü gibi 2,25 mm'lik en yüksek kaynak

genişliğine sahip olmuştur ve bunu takip eden 800 dev/dak takım dönüş hızında yapılan nokta kaynağı Şekil 4.63d'de görüldüğü gibi 2,125 mm'lik bir kaynak genişliğine sahiptir. 1600 dev/dak takım dönüş hızında yapılan nokta kaynağı Şekil 4.63h'de görüldüğü gibi 1.46 mm'lik en küçük kaynak genişliğine sahiptir. Takım dönme hızı 800'den 1200 dev/dak'ya artırıldığında, kaynağın kaynak genişliği (karıştırma bölgesi) büyüdü, ancak takım dönme hızı 1200'den 1600 dev/dak'ya daha fazla artırılması kaynak genişliğinin azalmasına neden olmuştur. SKNK sırasında, takım pimi üst üste bindirilmiş plakaların alt plakasına dalmasıyla plakaların ara yüzü yukarı doğru bükülmesi nedeniyle kaynak arayüzeyinde kanca oluşur (Badarinarayan vd. 2009). Zhikang vd. (2013) göre SKNK kaynaklarında oluşan arayüzey kancası, malzemelerin yetersiz karışmasından dolayı meydana gelmektedir. Malzemelerin yetersiz karışımı da malzemelerin yeterli akıcılığa ulaşamaması ve plakaları birleştirme sıkma basıncının yetersiz olması nedeniyle olmaktadır. Şekil 4.63e ve 8.63i'de 800 ve 1600 dev/dak takım dönüş hızlarında yapılan nokta kaynaklarında kaynak mukavemeti için iyi olmayan, dallanmış arayüzey kancaları ve birleşmemiş bölgeler (çatlak) olduğu açıktır. Şekil 4.63e'de 800 dev/dak takım dönüş hızında yapılan nokta kaynağında dallanmış kanca ve birleşmemiş bölgen daha belirgindir. Büyük bir arayüzey kancası kaynakta çatlakları başlatabilir ve statik ve yorulma dayanımını azaltabilir (Rao vd. 2013). Yapılan çalışmada, Şekil 4.63e'de 800 dev/dak takım dönme hızında yapılan nokta kaynağının arayüzeyinde belirgin dallanmış kanca oluşmasının nedeni, SKNK işlemi sırasında malzemeleri yumuşatmada takım dönme hızı (sürtünme ısısı) düşük olmasından, takım omuzunun plakalara uyguladığı basma basıncı yetersiz olmasından, plakaların sabitlenmesinde ve sıkılmasında uygulanan basınç yetersiz olmasından Kaynaklanmaktadır. Ayrıca takımın üçgen pim profilinin de kanca dallanması oluşumunda etkili olmuştur. Çünkü Şekil 4.62'de görüldüğü gibi konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının arayüzeyinde dallanmış kanca oluşumu yoktur. Badarinarayan vd. (2009) takım pimi profilinin kanca oluşmasında önemli bir etkiye sahip olduğunu bildirmiştir. Şekil 4.63i'de 1600 dev/dak takım dönme hızında yapılan nokta kaynağında dallanmış kanca oluşumu, yüksek takım dönme hızının (yüksek sürtünme ısısının) veya plakaların sabitlenmesinde ve sıkılmasında uygulanan basıncın yetersiz olmasından dolayı olabilir. Diğer yandan, Şekil 4.63g'de 1200 dev/dak takım dönme hızında yapılan nokta kaynağında ise kanca dallanması ve birleşmemiş bölge (çatlak) yoktur. Bu da, 1200 dev/dak takım dönüş hızının, malzemeleri karıştırmada ideal olduğu ve 800 ve 1200 dev/dak takım dönme hızlarından daha iyi kaynaklar

üretebildiğini göstermektedir. Şekil 4.63'te üçgen pimli takım ile üretilen SKNK kaynaklarının kaynak genişliği (karıştırma bölgesi), Şekil 4.62'de konik pimli takım ile üretilen SKNK kaynaklarınınkinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni üçgen pimli takımın simetrik olmayan profili ve üçgen köşe kenarlarının malzemeleri daha iyi plastik deformasyona uğratabilmesinden dolayı olabilir. Yuan vd. (2012) AZ31 Mg alaşımı plakaların SKNK ile kaynak edilmesini çalışmış ve takım dönme hızının artırılmasıyla kaynak genişliğinin azaldığını tespit etmişlerdir. Genel olarak, Şekil 4.63'te üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının her birinin kaynak genişliği (karıştırma bölgesi), Şekil 4.62'deki konik pim takım ile yapılan tüm SKNK kaynaklarınınkinden daha büyüktür. Diğer bir deyişle, üçgen pimli takım ile yapılan ve en az kaynak genişliğine (karıştırma bölgesine) sahip nokta kaynağının kaynak genişliği bile, konik pimli takım ile yapılan ve en büyük kaynak genişliğine (karıştırma bölgesine) sahip nokta kaynağının kaynak genişliğinden daha geniştir. Sonuç olarak, 7075-T651 Al alaşımı plakaların SKNK ile birleştirilmesinde takım pim profili ve dönme hızı malzeme akışında yani oluşan kaynak genişliğinin (kaynak karıştırma bölgesinin) büyüklüğü üzerinde çok önemli bir rol oynamaktadır.





Şekil 4.63. Üçgen pimli takım ile yapılan S40, S41 ve S42 kaynaklarının enine kesit alanları: a) S40, b) S41 ve c) S42. d) Şekil a)'da işaretlenen I dikdörtgen alanının büyütülmüş görünümü, f) Şekil b)'de işaretlenen II dikdörtgen alanının büyütülmüş görünümü ve h) Şekil c)'de işaretlenen III dikdörtgen alanının büyütülmüş görünümü. e) Şekil d)'deki kancanın büyütülmüş görünümü, g) Şekil f)'deki kancanın büyütülmüş görünümü ve i) Şekil h)'deki kancanın büyütülmüş görünümü

### 4.2.3. Mikroyapı

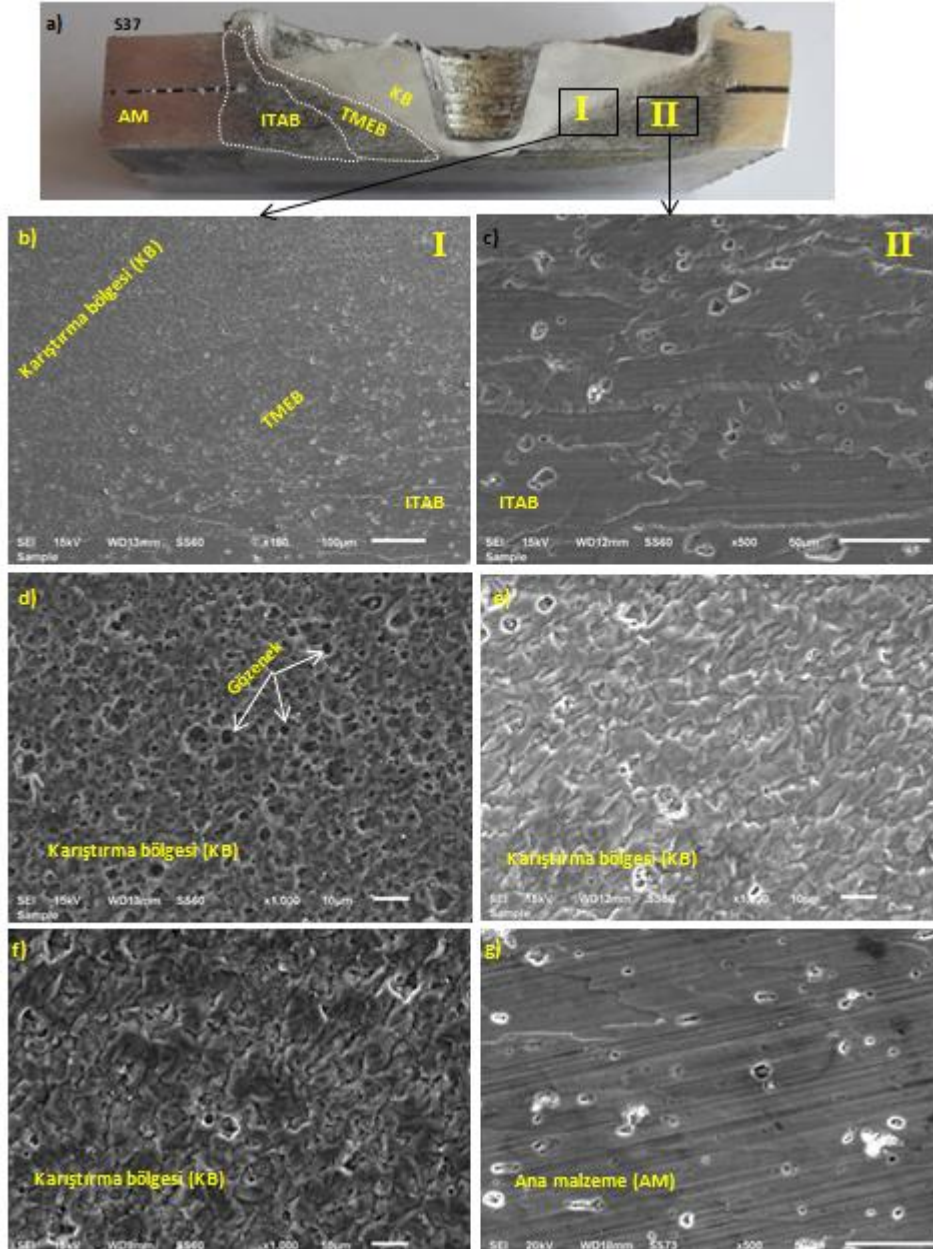
Sırasıyla Şekil 4.64a ve 8.65a'da gösterilen konik pimli takım ve üçgen pimli takım kullanılarak 800 dev/dak takım dönme hızında yapılan SKNK kaynaklarının temsili enine

kesit alanları verilmiştir. Şekil 4.64a ve 8.65a'daki kaynakların enine kesitlerindeki girintilerden oluşan profil kaynak takımlarının pim ve omuz şekliyle eşleşmektedir. Kaynak takımının dönerek ve aşağı doğru basma kuvvet ile üst üste bindirilmiş plakalara dalmasıyla üst plaka malzemesinin çoğu ve alt plaka malzemesinin bir kısmı ısınarak yumuşamış, plastik deformasyona uğramış ve ezilerek yanlara ve dışarı doğru akmıştır. Şekil 4.64a ve Şekil 4.65a'da verilen kaynakların enine kesitlerine dayanarak, 7075-T651 ana metal (AM) dışında üç farklı mikro yapısal bölge vardır. Bunlar karıştırma bölgesi (KB), termomekanik etkilenen bölge (TMEB) ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB)'dir. Kaynakların karıştırma bölgeleri dinamik yeniden kristalleşmeye uğradığı için ana metal (AM), termomekanik etkilenen bölge (TMEB) ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ile karşılaştırıldığında daha ince tanelerden meydana geldiği açıktır. Yeniden kristalleşme tane boyutu, plastik deformasyon miktarı ve ısı girdisi ile ilgilidir (Rodrigues vd. 2009).

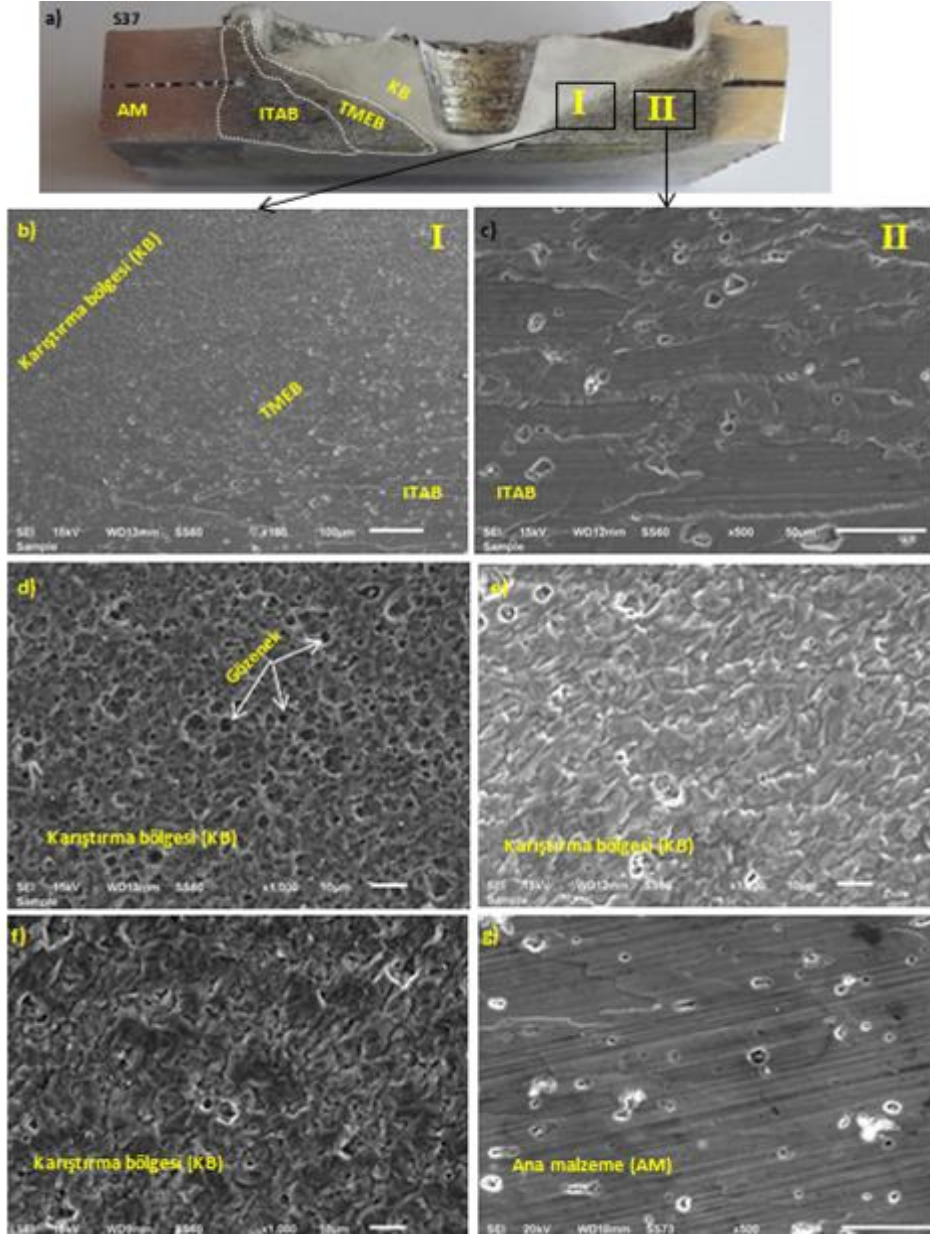
Özellikle Şekil 4.64b ve 8.65b'de KB, TMEB ve ITAB'ın tane boyutu açısından birbirinden farklı olduğu ve karıştırma bölgesinde daha küçük tanelerin bulunduğu açıkça görülmektedir. Kaynakların TMEB'leri kısmen plastik deformasyona maruz kalmıştır ve bu nedenle ITAB ve AM'ye göre daha küçük tanelerden oluşması ile karakterize edilir. ITAB, sürtünme ısısına maruz kaldığından, ITAB, AM ile karşılaştırıldığında daha iri tanelerden oluşmuştur. Şekil 4.64g'de gösterilen BM düzensiz tanelerden oluşmuştur. Şekil 4.64d'de gösterildiği gibi konik pimli takım kullanılarak 800 dev/dak takım dönüş hızında yapılan nokta kaynağın karıştırma bölgesinde çok miktarda boşluk kusuru tespit edildi. Ayrıca, Şekil 4.65d'de gösterildiği gibi üçgen pimli takım kullanılarak 800 dev/dak dönme hızında yapılan nokta kaynağın karıştırma bölgesinde az miktarda boşluklar tespit edildi. Bu durum, yetersiz takım dönüş hızı ve takım pim geometrisine bağlanabilir.

Her iki kaynak takımı kullanılarak 1200 dev/dak dönme hızında yapılan nokta kaynaklarının karıştırma bölgeleri, Şekil 4.64e ve 8.65e'de gösterildiği gibi neredeyse boşluksuzdur. Takım dönüş hızı 800'den 1600 dev/dak'ya artırılarak her iki takım ile yapılan nokta kaynaklarının karıştırma bölgelerindeki tane yapısı da büyümüştür. Bu tane irileşmesi durumu, takım dönüş hızında bir artışla birlikte daha fazla ısı girdisi ve daha fazla yeniden kristalleşmeye bağlanabilir. Bununla birlikte, Şekil 4.64d ve Şekil 4.65d'de

gösterildiği gibi her iki takım ile 800 dev/dak dönüş hızında yapılan nokta kaynaklarının karıştırma bölgesinde diğer takım dönüş hızlarınınkine göre daha ince taneli bir yapı oluşmuştur bunun nedeni daha az ısı girdisi olabilir. Tane boyutu ile takım dönüş hızı arasındaki bu ilişki dikkat çekilmiştir (Xunhong ve Kuaishe 2006; Lin ve Pan 2008; Afrin vd. 2008; Mallick ve Agarwal 2009; Jordon vd. 2010; Chowdhury vd. 2012).



Şekil 4.64. Konik pimli takım ile yapılan S37, S38 ve S39 kaynaklarının SEM görüntüleri. a) S37 kaynağının temsili enine kesit alanı, b) I dikdörtgen alanının, c) II dikdörtgen alanının büyütülmüş görünümü, d) S37 kaynak bölgesi mikroyapısı, e) S38 kaynak bölgesi mikroyapısı ve f) S39 kaynak bölgesi mikroyapısı, g) na malzeme (AM), ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), termomekanik etkilenen bölge (TMEB)

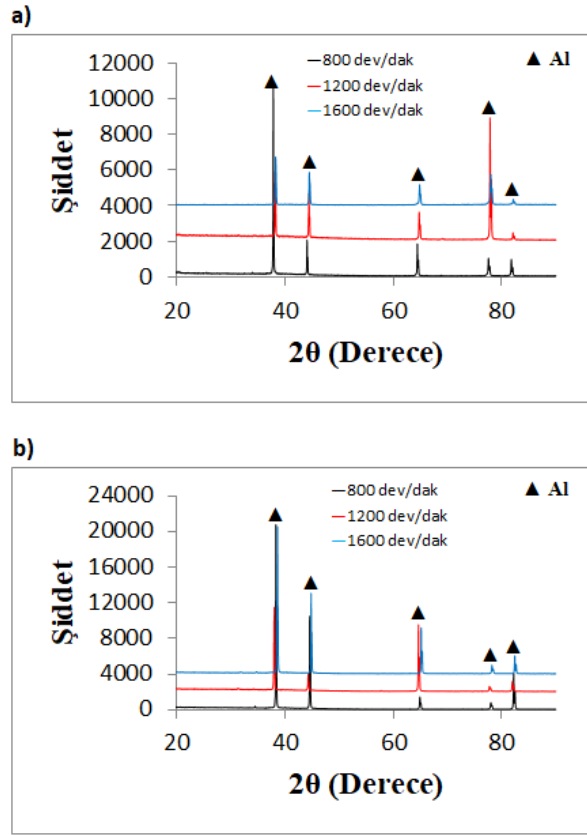


Şekil 4.65. Üçgen pimli takım ile yapılan S40, S41 ve S42 kaynakların SEM görüntüleri. a) S40 kaynağının temsili kesiti b) I dikdörtgen alanının, c) II dikdörtgen alanının büyütülmüş görünümü, d) S40 kaynak bölgesi mikroyapısı, e) S41 kaynak bölgesi mikroyapısı, f) S42 kaynak bölgesi mikroyapısı ve g) BM: ana metal, HAZ: ısıdan etkilenen bölge, TMAZ: termo-mekanik olarak etkilenen bölge

Şekil 4.66 üretilen SKNK kaynaklarının enine kesitlerinden elde edilen X-ışını difraksiyonu (XRD) analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.66a ve 8. 66b, sırasıyla konik pimli takım ve üçgen pimli takım kullanılarak yapılan kaynakların XRD analiz sonuçlarını temsil etmektedir. Siyah üçgen ile gösterilen pikler, alüminyumun katı çözeltilisini temsil etmektedir. Şekil 4.66'dan açıkça görülmektedir ki, kaynaklarda çoğunlukla alüminyum katı çözelti oluşmuştur ve dikkate değer miktarda başka bir faz



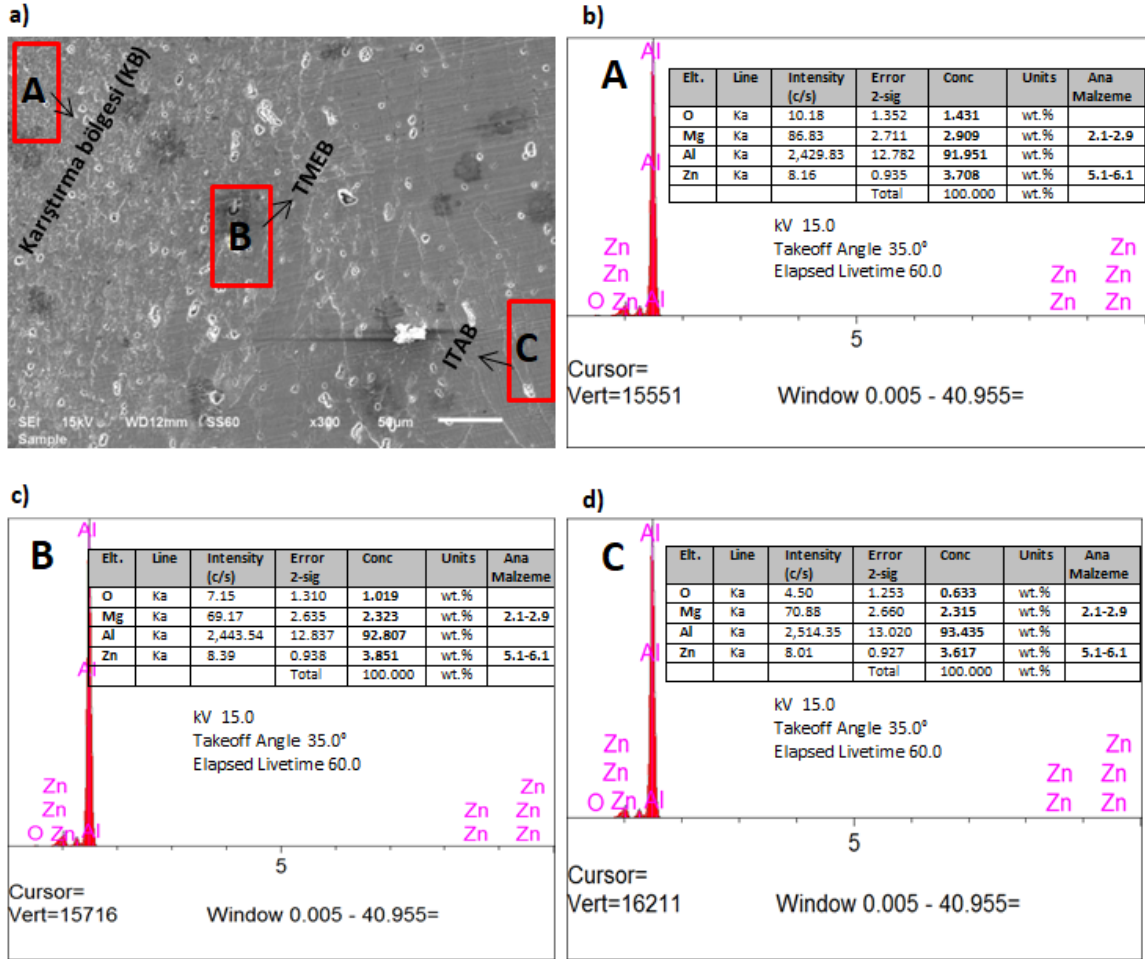
tespit edilmemiştir. Benzer sonuçlar 7075-T651 Al alaşımının SKK ile birleştirilmesinde da elde edilmiştir (Journal of Materials Physics and Chemistry, 2013).



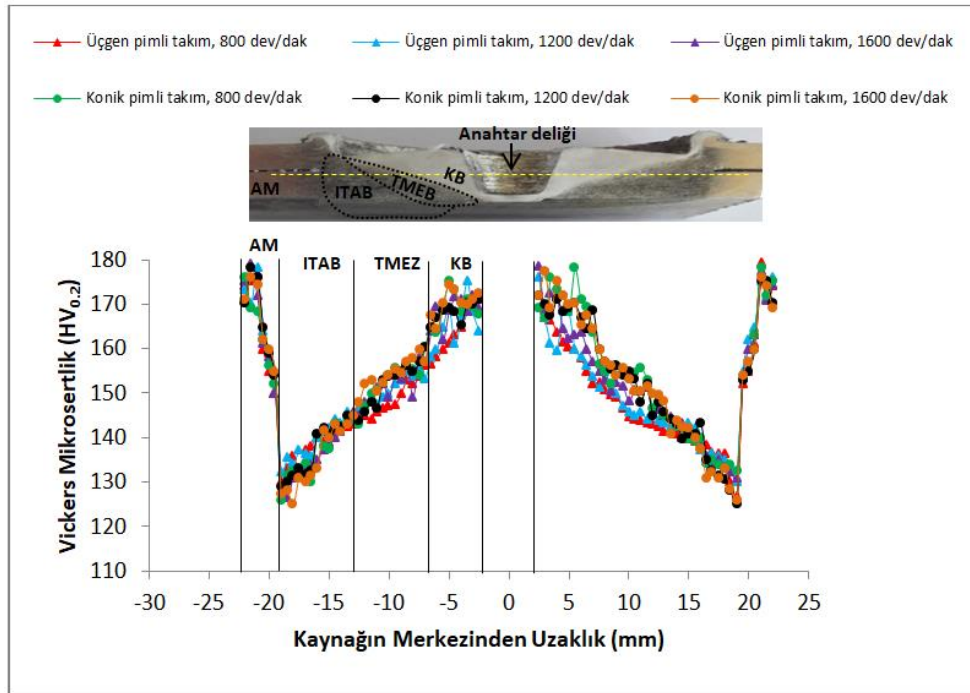
Şekil 4.66. Konik ve üçgen pimli takımlar ile yapılan kaynakların enine kesit alanından elde edilen XRD analiz sonuçları. a) konik pimli takım ile kaynaklar b) üçgen pimli takım ile yapılan kaynaklar

Şekil 4.67 1200 dev/dak takım dönüş hızında üçgen pimli takım kullanılarak yapılan nokta kaynağının karıştırma bölgesi (KB), termomekanik etkilenen bölgesi (TMEB) ve ısıdan etkilenen bölgesinden (ITAB)'dan elde edilen (EDS) analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.67a'daki SEM görüntüsünden, tane boyutu açısından üç bölge arasında mikroyapısal farklılıklar olduğu açıktır. KB, TMEB ve ITAB ile karşılaştırıldığında daha ince tane bir mikroyapıya sahiptir. Bunun nedeni, KB'nin dinamik yeniden kristalleşmesinden olabilir. Şekil 4.67b, c ve d'deki EDS analiz sonuçlarına göre, KB, TMEB ve ITAB'daki çinko (Zn) konsantrasyonu, 7075-T651 ana metalindekinden biraz daha düşük ve KB'deki Mg elementi konsantrasyonu TMEB ve ITAB'dakinden biraz daha yüksektir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında, yüksek sürtünme ısı, plastik deformasyon ve yeniden kristalleşme olayları meydana gelir. Bu nedenle, karıştırma hareketinin ve termal döngülerin bir sonucu olarak, 7075-T651 Al alaşımının  $MgZn_2$  gibi fazlar yapı içerisinde çözülmüşü ve ardından soğuma ile

yeniden çökelmiştir. Sadece Al, Mg ve Zn elementlerinin konsantrasyonuna bakılmış ve bunların 7075-T651 Al alaşımının ana elementler olduğu tespit edilmiştir.



SKNK kaynaklarının karıştırma bölgesinden (KB), ısıdan etkilenen bölgesinden (ITAB) ve termomekanik etkilenen bölgesinden (TMEB) daha yüksektir. Tüm kaynaklar için sertlik, AM'den ITAB'ye hareket ettiğimizde ciddi şekilde düşmüştür ve hatta en düşük sertlik değerleri ITAB'da görülmüştür. ITAB'den KB'ye doğru ilerlediğimizde sertlik yavaş yavaş artmıştır ve anahtar deliği sınırında maksimum değere ulaşmıştır. En düşük sertlik 130 ile 140 HV arasında kaynakların ısıdan etkilenen bölgelerinde tespit edilirken, en yüksek sertlik 160 ile 170 HV arasında kaynakların karıştırma bölgelerinde bulunmuştur. Kaynakların ısıdan etkilenen bölgeleri en düşük sertlik değerlerine sahip olmuştur. Bunun nedeni, sürtünme ısıyla, ısıdan etkilenen bölgelerdeki tanelerin irileşmesi ve kaynak ısı döngü sırasında çökeltilerin büyümesine bağlanabilir (Yin vd. 2010). TMEB, yüksek sürtünme ısısına ve biraz da deformasyona uğradığı için deforme olmuş bir bölge olarak tanımlanır. KB, son derece yüksek sıcaklıklara ve plastik deformasyona maruz kaldığı için dinamik yeniden kristalleşme bölgesi olarak tanımlanır. Ek olarak, kaynak ısı döngüleri sırasında, çökeltilerin seyrelmesi meydana gelir. TMEB ve KB'nin sertliği, gerinim sertleşmesinin kapsamlı etkilerine, kuvvetlendirici fazların çözünmesine ve tane boyutlarındaki değişikliklere bağlanabilir. Gerinim sertleşmesinin etkileri ve kuvvetlendirici fazlarının çözülmesi sertlik değerini belirleyen ana faktörlerdir (Shen vd. 2013).



Şekil 4.68. Konik ve üçgen pimli takımlar ile yapılan kaynakların Vickers mikrosertlikleri

#### 4.2.5. Çekme Kesme Testi

Şekil 3.13 yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme testi deneyinin yapılışını göstermektedir. Konik ve üçgen pimli takımlar ile 800, 1200 ve 1600 dev/dak dönme hızında, 7,3 mm/dak sabit dalma ve çıkma hızında, 3,8 mm sabit dalma derinliğinde ve 5 sn sabit bekleme süresinde yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükleri Şekil 4.69'da verilmiştir. SKNK kaynaklarının çekme kesme yükleri, 1 mm/dakika sabit bir çekme hızında elde edildi. Şekil 4.69a, konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yüklerini gösterirken, Şekil 4.69b, üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yüklerini göstermektedir. Şekil 4.69'dan açıkça görülebileceği gibi, takım dönüş hızı ve takım pimi geometrisi, üretilen SKNK kaynaklarının çekme kesme mukavemetleri üzerinde çok önemli bir etkisi vardır. Ek olarak, Şekil 4.69'da üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynakları, konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarından önemli ölçüde daha yüksek çekme kesme yüküne sahip olduğu açıktır. Genel olarak, konik pimli takıma göre, üçgen pimli takım ile daha güçlü nokta kaynakları yapılmıştır.

Kullanılan her iki kaynak takım için de, kaynağın çekme kesme mukavemeti, takım dönüş hızı 800'den 1200 dev/dak'ya çıkarıldığında önemli ölçüde artmıştır. Ancak, konik pimli takım için, takım dönüş hızı 1200'den 1600 dev/dak'ya yükseltildiğinde, kaynak çekme kesme mukavemeti önemli ölçüde düşmüştür ve hatta 800 dev/dak'da yapılan kaynağın çekme kesme mukavemeti altına bir değere düşmüştür Şekil 4.69a'da görüldüğü gibi. Öte yandan, üçgen pimli takım için, takım dönüş hızı 1200'den 1600 dev/dak'ya çıkarıldığında, kaynağın çekme kesme mukavemetinde hafif bir azalma olmuştur Şekil 4.69b'de görüldüğü gibi. Kaynak çekme kesme yükü, her iki kaynak takımı için de, 1200 dev/dak takım dönüş hızında en yüksek değere ulaşmıştır. 1200 dev/dak takım dönüş hızında en yüksek 7,776 kN çekme kesme yükü üçgen pimli takım ile yapılan kaynakta elde edilirken, konik pimli takım ile yapılan kaynakta en yüksek 4,908 kN çekme kesme yükü elde edilmiştir. Ayrıca, çekme kesme testleri sırasında, üçgen pimli takım ile üretilen nokta kaynakları, genel olarak konik pimli takım ile üretilen nokta kaynaklarından daha uzun süre dayanmıştır. Şekil 4.69'da her iki takım için de, verilen çekme kesme testi deney sonuçlarına göre, 800 ve 1600 dev/dak gibi daha düşük ve daha yüksek takım dönüş hızlarında yapılan nokta kaynakları, 1200 dev/dak'da



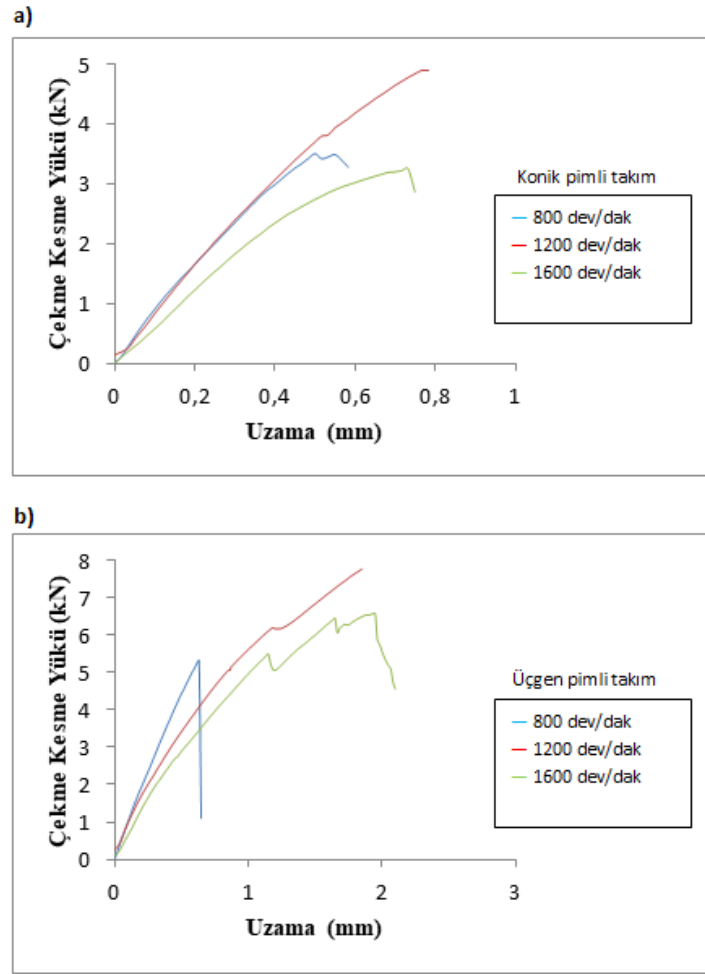
yapılan nokta kaynaklarından daha düşük çekme kesme mukavemeti sergilemiştir. Bunlara ek olarak, üçgen pimli takım ile yapılan her bir nokta kaynağı, konik pimli takım ile yapılan tüm nokta kaynaklarından daha yüksek çekme kesme mukavemeti göstermiştir. Ayrıca, üçgen pimli takım ile yapılan kaynaklar genel olarak konik pimli takım ile yapılan kaynaklardan daha fazla uzamıştır. Badarinarayan vd. (2009) 5083 Al alaşımı plakaları üst üste bindirip üçgen pimli bir takım ve silindirik pimli bir takım kullanarak birbirine SKNK ile birleştirmesini çalışmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre üçgen pimli takım ile üretilen SKNK kaynaklarının, silindirik pimli takım ile üretilen SKNK kaynaklarından çok daha fazla mukavemetli olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak, çekme kesme yükleri sonuçlarına göre, takım dönüş hızı ve takım pimi geometrisi, SKNK’de kaynak çekme kesme mukavemetinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. SKNK işleminde, kaynak bağlantısını meydana getiren ve kaynak bağlantısının mekanik özelliklerini belirleyen en önemli kaynak parametreleri takım dönüş hızı, takım dalma derinliği ve bekleme süresidir (Gerlich vd. 2005; Badarinarayan vd. 2009). SKNK işleminde, kaynak takımı geometrisi de özellikle malzeme karışımında ve akışında çok önemli bir faktördür. Örneğin konkav omuzlu takım ile yapılan SKNK kaynakları, düz ve konveks omuzlu takım ile yapılan SKNK kaynaklarından daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir (Lin vd. 2008; Badarinarayan vd. 2009; Yang vd. 2011). Bu çalışmada kullanılan iki kaynak takımı da 10 derece konkav omuza sahiptir. SKNK işleminde, takım dönüş hızının artırılması, kaynak bağlantısındaki sürtünme ısısını ve gerinim hızını artırır, bu da takım piminin çevresindeki ve takım omzunun altındaki malzemenin viskozitesinde bir azalmaya yol açar (Chang vd. 2004; Gerlich vd. 2005; Gerlich vd. 2007; Yuan vd. 2012). Yüksek takım dönüş hızlarında malzeme viskozitesinin düşmesi sonucu takım pimi ile malzeme arasında kayma meydana gelir, bu kayma olayı takım piminin alt ve üst plakların malzemelerini etkili bir şekilde karıştırmasını engeller ve bunun sonucunda karıştırma bölgesi küçük ve dar olan düşük mekanik özelliklere kaynaklar üretilir. Üstün mekanik özelliklere sahip SKNK kaynakları daha büyük karıştırma bölgelerine sahiptir (Tozaki vd. 2006). Yapılan bu çalışmada, 7,776 kN’lik en yüksek çekme kesme yükünü sahip sürtünme karıştırma nokta kaynağı da en büyük kaynak genişliğine (kaynak karıştırma bölgesine) sahiptir. Üçgen pimli takım ile yapılan kaynakların çekme kesme yükleri, konik pimli takımın kaynaklarına göre daha yüksek olduğu bulunmuştur, çünkü üçgen pimli takımın kaynaklarının kaynak

genişlikleri (kaynak karıştırma bölgeleri) daha büyüktür Şekil 4.62 ve 63'de görüldüğü gibi.

Rao vd. (2015), farklı AM60B Mg ve 6022-T4 Al alaşımlarını SKNK ile birleştirmede takım dönme hızının kaynak mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. 1500 ve 2000 dev/dak yüksek takım dönüş hızlarında yapılan kaynakların, 1000 dev/dak takım dönüş hızında yapılan kaynaklara kıyasla daha küçük karıştırma bölgesine ve daha dar kaynak genişliğine sahip olduğu ve sonuç olarak çok daha düşük yüklerde koptuğu görülmüştür. 1000 dev/dak takım dönüş hızında yapılan SKNK kaynakları daha büyük bir karıştırma bölgesine ve kaynak genişliğine sahip olduğu için daha güçlü olmuştur. 1000 dev/dak takım dönüş hızı uygun sürtünme ısıyı sağladığı için, takım pimi etrafındaki malzemenin viskozitesi plastik deformasyona uğraması için uygun hale gelmesiyle pimin yüzeyine yapışmış ve daha sonra takım ile aynı hızda dönmesiyle plakaların arayüzeyi parçalanarak alt ve üst plakların malzemeleri iyi bir şekilde karışmasıyla kaynak genişliği daha büyük ve doğal olarak daha güçlü nokta kaynakları üretilmiştir (Schmidt vd. 2004).

Yin vd. (2010), benzer olmayan AZ91 ve AZ31 Mg alaşımlarının SKNK kaynaklarının çekme kesme dayanımının, kaynak genişliğindeki artışla arttığını bildirmiştir. Rao vd. (2015), takım ekseninden dışa doğru yönelen ve anahtar deliğinden daha uzakta sona eren kancalara sahip SKNK kaynaklarının daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu bulmuşlardır.

Yapılan bu çalışmada, takım ekseninden dışa doğru yönelen ve anahtar deliğinden daha uzakta sona eren kancalara SKNK kaynakları, Şekil 4.62 ve 63'te görüldüğü gibi daha yüksek çekme kesme mukavemetine sahiptir.

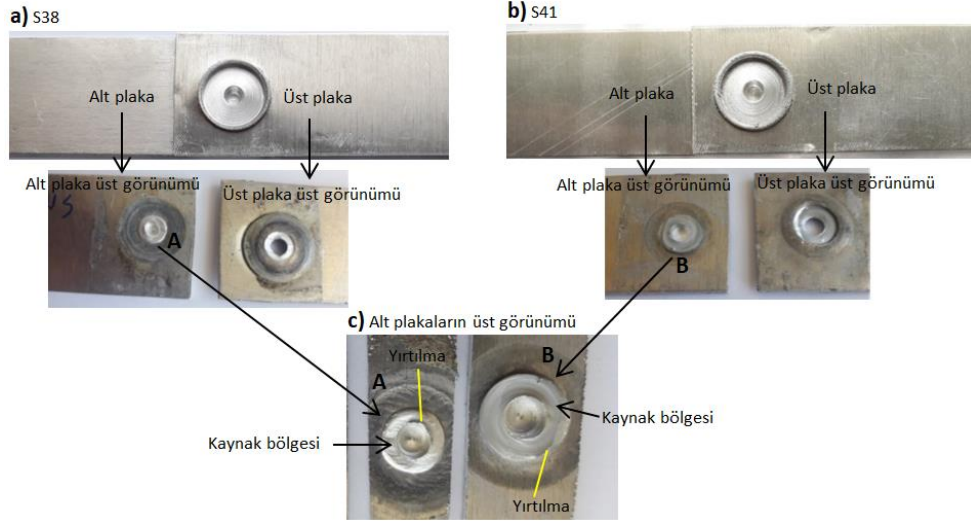


Şekil 4.69. a) Konik pimli takım ile b) üçgen pimli takım ile yapılan kaynakların çekme kesme dayanımı

#### 4.2.6. Çekme Kesme Testi Sırasında Kaynakların Kırılma Şekilleri

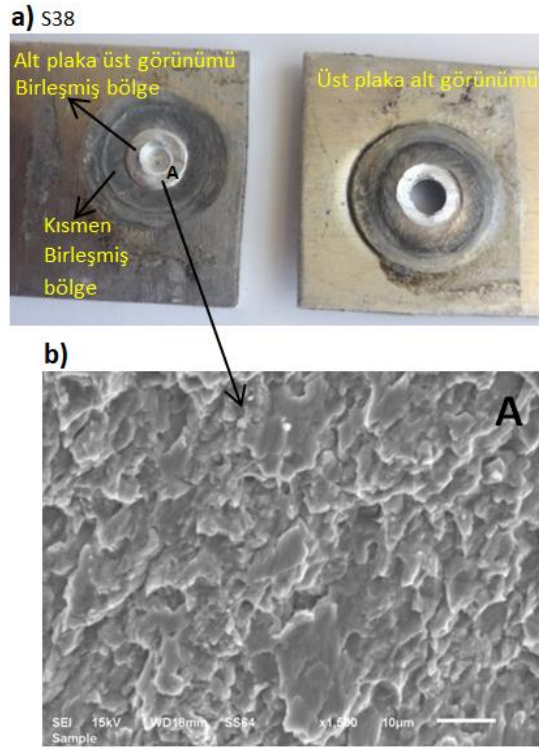
Şekil 4.70, 1200 dev/dak takım dönme hızında konik pimli takım ve üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklı numuneler sırasıyla Şekil 4.70a ve Şekil 4.70b'de ve çekme kesme testlerinden sonra bu SKNK kaynaklı numunelerin üst plakların alt ve alt plakların da üst kaynak kırık yüzeylerini göstermektedir. Sadece bu iki nokta kaynağın kırık yüzeyleri gösterilmek üzere seçildi. Çünkü en yüksek çekme kesme yükleri bu iki nokta kaynağında elde edilmiştir. Şekil 4.70c, alt plakların üst kaynak kırık yüzeylerinin yakından görünüşlerini göstermektedir. A, konik pimli takım ile yapılan nokta kaynağının alt plakasının üst kaynak kırık yüzeyi iken, B, üçgen pimli takım ile yapılan nokta kaynağının alt plakasının üst kaynak kırık yüzeyidir. Şekil 4.70c'den açıkça görülmektedir ki, üçgen pimli takım ile yapılan nokta kaynağın kaynak bölgesi genişliği

(kaynak karıştırma bölgesi büyüklüğü), konik pimli takım ile yapılan kaynağınınkinden daha büyüktür.



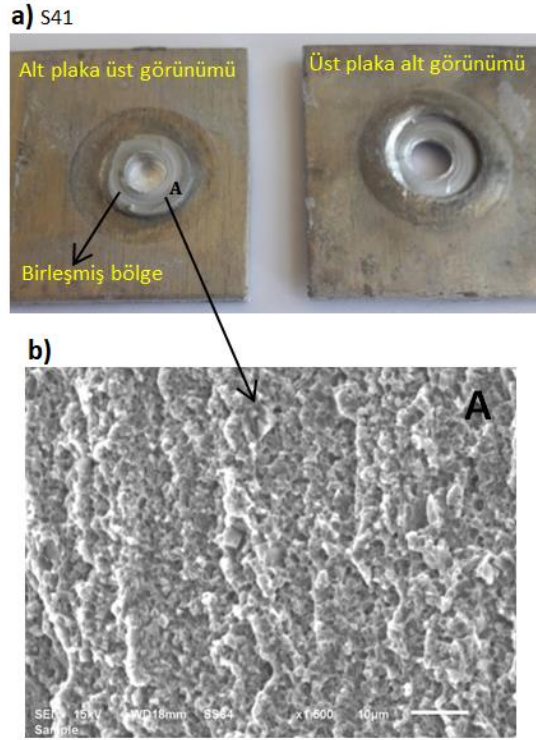
Şekil 4.70. a) S38 kaynağının çekme testi yapılmadan önceki resmi ve çekme kesme testinden sonra b) S41 çekme testi yapılmadan önceki resmi ve çekme kesme testinden sonra alt plakanın üstündeki ve üst plakanın altındaki kaynak kırık yüzeyleri ve c) A ve B ile işaretlenmiş alt plakaların üstündeki kaynak kırık yüzeylerinin yakından görünümü

Şekil 4.71, 1200 dev/dak takım dönüş hızında konik pimli takım kullanılarak yapılan nokta kaynağının çekme kesme testinden sonraki kırık yüzeylerini göstermektedir. Şekil 4.71a, alt plakanın üst ve üst plakanın alt kaynak kırık yüzeylerini göstermektedir. Şekil 4.71a'da, alt plakanın üst kaynak kırık yüzeyinde kısmen birleşmiş bir bölge ve tam birleşmiş bir bölge (kaynak bölgesi) vardır. Bu, kaynağa çekme kesme yükü uygulandığında, kopmanın kısmen birleşme bölgesinde önce başladığı ve daha sonra devam ederek tam birleşme bölgesinde kaynağın çevresi boyunca kırılarak gerçekleştiğini göstermektedir. Şekil 4.71b, Şekil 4.71a'daki alt plakanın üst kısmında bulunan kaynak bölgesi kırık yüzeyinde işaretlenmiş olan A bölgesinin büyütülmüş görüntüsünü göstermektedir. Yani Şekil 4.71b, Şekil 4.71a'daki alt plakanın üstündeki kaynak kırık yüzeyinin büyütülmüş görüntüsünü göstermektedir. Şekil 4.71b'de kaynak kırık yüzeyinden görülebileceği gibi sünek taneici bir kırılma gerçekleşmiş ve kaynak kırık yüzeyinde çekme yönünde çeşitli boyutlarda çok sayıda uzamış gamzeli çukurcuklar (dimples) vardır. Sünek kopma ve uzamış gamzeli çukurcuklar (dimples), kaynak karıştırma bölgesinde (kaynak bölgesinde) kaliteli bir metalurjik bağlamanın gerçekleşmiş olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.71. a) S38 kaynağının çekme kesme testi sonrası alt plakanın üst ve üst plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzey görünümü b) alt plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyinde A bölgesinin SEM görüntüsü

Şekil 4.72 1200 dev/dak takım dönüş hızında üçgen pimli takım kullanılarak yapılan nokta kaynağının çekme kesme testinden sonraki kırık yüzeylerini göstermektedir. Şekil 4.72a, alt plakanın üst ve üst plakanın alt kaynak kırık yüzeylerini göstermektedir. Şekil 4.72a'da alt plakanın üstündeki ve üst plakanın altındaki kaynak kırık yüzeylerinden görülebileceği gibi kaynak dolgusunun çekme kesme testi sırasında yerinden çıkarak koptuğu açıktır. Şekil 4.72b, Şekil 4.71a'daki alt plakanın üst kısmında bulunan kaynak bölgesi kırık yüzeyinde işaretlenmiş olan A bölgesinin büyütülmüş görüntüsünü göstermektedir. Yani Şekil 4.72b, Şekil 4.71a'daki alt plakanın üstündeki kaynak kırık yüzeyinin büyütülmüş görüntüsünü göstermektedir. Şekil 4.72b'de kaynak kırık yüzeyinden görülebileceği gibi sünek taneçi bir kırılma gerçekleşmiş ve kaynak kırık yüzeyinde çekme yönünde çeşitli boyutlarda çok sayıda uzamış gamzeli çukurcuklar (dimples) var ve ayrıca uzamış gamzeli çukurcukların (dimples) yoğunluğu Şekil 4.71b'de konik pimli takım ile üretilen nokta kaynağınıninkinden daha fazladır. Sünek kopma ve çok sayıda uzamış gamzeli çukurcuklar (dimples), bu kaynağın karıştırma bölgesinde (kaynak bölgesinde) yüksek kaliteli bir metalurjik birleşmenin gerçekleştiğini işaret etmektedir.



Şekil 4.72. a) S41 kaynağının çekme kesme testi sonrası alt plakanın üst ve üst plakanın alt tarafındaki kaynak kırık yüzey görünümü ve b) alt plakanın üst tarafındaki kaynak kırık yüzeyinde A bölgesinin SEM görüntüsü

### 4.3. AZ91 Mg alaşımı plakaların SKNK

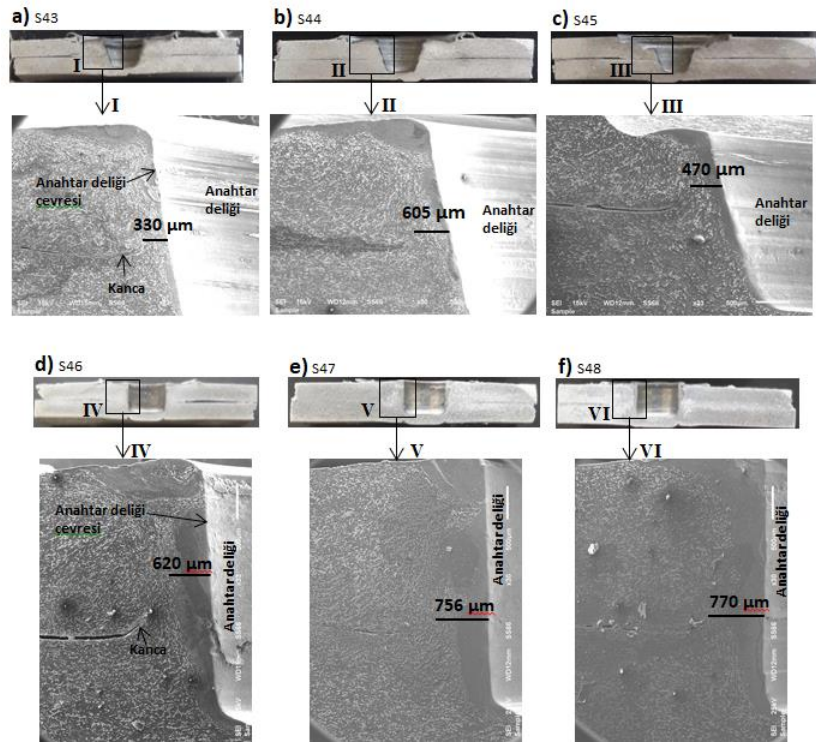
#### 4.3.1. Arayüz Kancası ve Kaynak Birleşme Genişliği

SKNK işlemi sırasında, kaynak edilecek üst üste bindirilmiş plakaların arayüzeyinde sıkışmış oksit filmleri bulunmaktadır. Kaynak takımı pimi üst plakaya dalıp ve ardından üst plakayı geçerek alt plakaya daldığında malzemeler plastik deformasyona uğrayarak aktığı için oksit filmlerinin bulunduğu plakaların arayüzeyi genellikle yukarı üst plakaya doğru kancaya benzer bir şekilde bükülür (Yin vd. 2010). Kanca, kaynak bütünlüğünü bozan geometrik bir kusurdur, çünkü kaynak dış yüklerle maruz kaldığında çatlaklar kancadan başlayabilir ve kanca hattı boyunca ilerleyerek kırılabilir (Sato vd.2005). SKNK işleminde kaynak takımı birleştirilmek üzere üst üste bindirilmiş plakalara dalıp çıktıktan sonra takım piminin plaklarda kaynak bölgesinde oluşturduğu deliğe anahtar deliği denilmektedir. SKNK'de, anahtar deliğinden dışa doğru yönelmiş ve anahtar deliğinden uzakta bir yerde sonlanmış kancalar sahip kaynak bağlantıları, anahtar

deliğine doğru yönelmiş ve anahtar deliğine yakın bir yerde sonlanmış kancalara sahip kaynak bağlantılarına göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olmuştur (Badarinarayan vd. 2009; Yin vd. 2010). Yin vd. (2010) göre, kanca ucu ve anahtar deliği çevresi arasındaki mesafe benzer olmayan AZ91/AZ31 Mg alaşımlarının SKNK kaynaklarının mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu iki farklı Mg alaşımı üç farklı takım tasarımı (vidalı silindirik pimli takım, üç vida üçgen pimli takım ve vidasız üçgen pimli takım) kullanılarak SKNK ile birbirine birleştirmiştir. Her üç takım ile üretilen SKNK kaynakları içerisinde kanca ucu ile anahtar deliği çevresi arasındaki mesafesi en düşük olanların mukavemeti de en düşük olmuştur. Ayrıca, kanca ucundan anahtar deliği çevresine mesafesi en yüksek olan SKNK kaynaklarının mukavemeti de yüksek olmuştur. Şekil 4.73, bu çalışmada, konik pimli takım ve üçgen pimli takım ile 800, 1200 ve 1600 dev/dak takım dönüş hızında, sabit 7,3 mm/dak takım dalma ve çıkma hızında, sabit 3.2 mm dalma derinliğinde ve sabit 5 sn takım bekleme süresinde AZ91 Mg alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip birbirine SKNK ile birleştirilmesinde üretilen SKNK kaynaklarının enine kesit alanlarını ve kaynak genişliklerini göstermektedir. Şekil 4.73a, b ve c, konik pimli takımı kullanarak 800, 1200 ve 1600 dev/dak takım dönüş hızında yapılan SKNK kaynaklarını göstermektedir. Şekil 4.73d, e ve f, üçgen pimli takımı kullanarak 800, 1200 ve 1600 dev/dak takım dönüş hızında yapılan SKNK kaynaklarını göstermektedir. Yapılan SKNK kaynaklarının kaynak genişlikleri, kaynakların arayüzeyinde oluşan kancanın ucu ile anahtar deliği çevresi arasındaki mesafeyi ölçülerek elde edildi. SKNK kaynaklarının arayüzeyinde oluşan kancaları incelemek ve kaynakların kaynak genişliklerini ölçmek için, kaynakların enine kesit alanı resimlerinden kaynak bölgesini içine alan roma rakamı ile I, II, III, IV, V ve VI numaralandırılan dikdörtgen bölgeler büyütülmüş. I, II, III, IV, V ve VI resimlerindeki siyah düz çizgi, sırasıyla Şekil 4.73a-f'deki SKNK kaynaklarının ölçülen kaynak genişliklerini göstermektedir. Şekil 4.73'te görüldüğü gibi yapılan SKNK kaynaklarının arayüzeyinde oluşan kanca ve kaynak genişliği, takım dönüş hızına ve takım pimi geometrisine bağlı olarak değişmiştir. Konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarında oluşan kancaların ucu yukarı ve anahtar deliği çevresine doğru yönelirken, üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının kancalarının uçları ise daha çok yukarı doğru yönelmiştir. SKNK kaynaklarının kaynak genişliği, kaynak arayüzeyinde oluşan kancanın ucundan anahtar deliği çevresine kadar olan mesafeyi ölçerek bulundu.



Sonuç olarak, üçgen pimli takım kullanılarak üretilen SKNK kaynaklarının, Şekil 4.73'te görüldüğü gibi, konik pimli takım kullanılarak üretilen SKNK kaynaklarından daha geniş bir kaynak genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynakları arasında 605  $\mu\text{m}$ 'lik en geniş kaynak genişliği, 1200 dev/dak takım dönüş hızında yapılan kaynakta bulunmuştur. Öte yandan, üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynakları arasında 770  $\mu\text{m}$ 'lik en geniş kaynak genişliği, 1600 dev/dak takım dönüş hızında yapılan kaynakta bulunmuştur. Üçgen pimli takımı kullanarak, 1600 dev/dak takım dönme hızında yapılan SKNK kaynağı, üretilen tüm SKNK kaynakları arasında en büyük kaynak genişliğine sahiptir. Üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarında, takım dönüş hızı 800'den 1600 dev/dak'ya çıkarıldığında kaynak bağı genişliği artmıştır. Bununla birlikte, konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarında, kaynak bağı genişliği takım dönüş hızı 800'den 1200 dev / dak'ya yükseltildiğinde ilk önce önemli ölçüde arttı, ancak takım dönüş hızı 1600 dev/dak'ya yükseltilmesi, kaynak bağı genişliğinde az bir düşüşe neden olmuştur. Bu, SKNK kaynağı genişliğinin çoğunlukla, sürtünme ısı yoğunluğunu ve malzeme deformasyonunu ve akışını belirleyen takım dönüş hızına ve takım pimi geometrisine bağlı olduğunu göstermektedir.

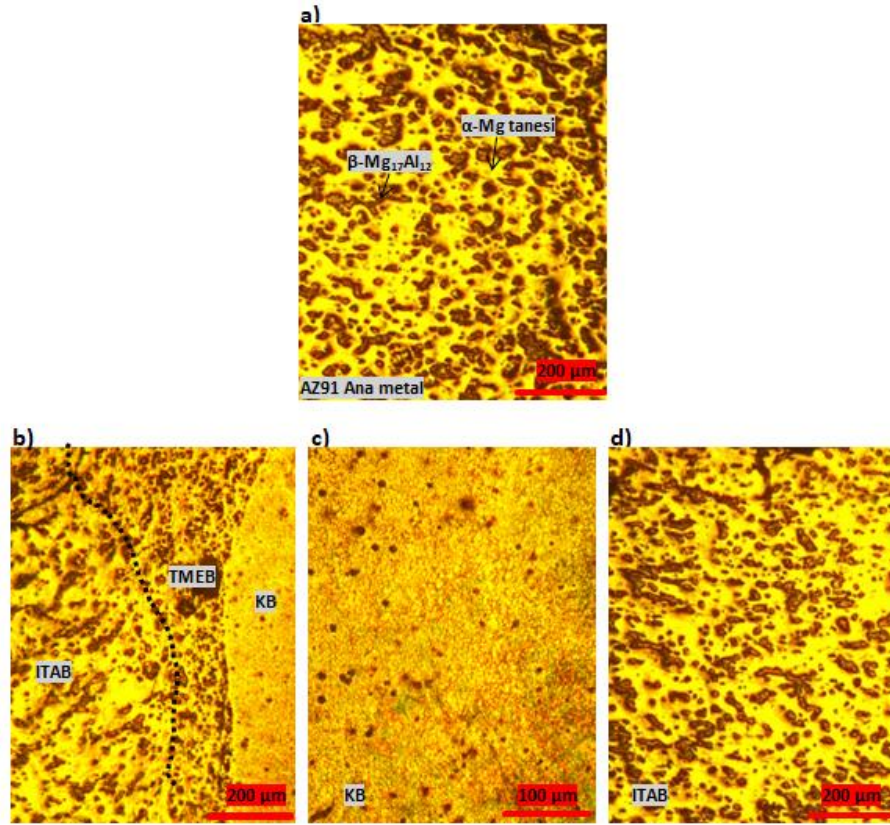


Şekil 4.73. Konik ve üçgen pimli takımlar ile yapılan kaynakların kesit alanları (a) S43, (b) S44 ve (c) S45, (d) S46, (e) S47 ve (f) S48. Şekil a, b, c, d, e, f 'de I, II, III, IV, V and VI dikdörtgen bölgeler büyütülerek gösterilmiştir



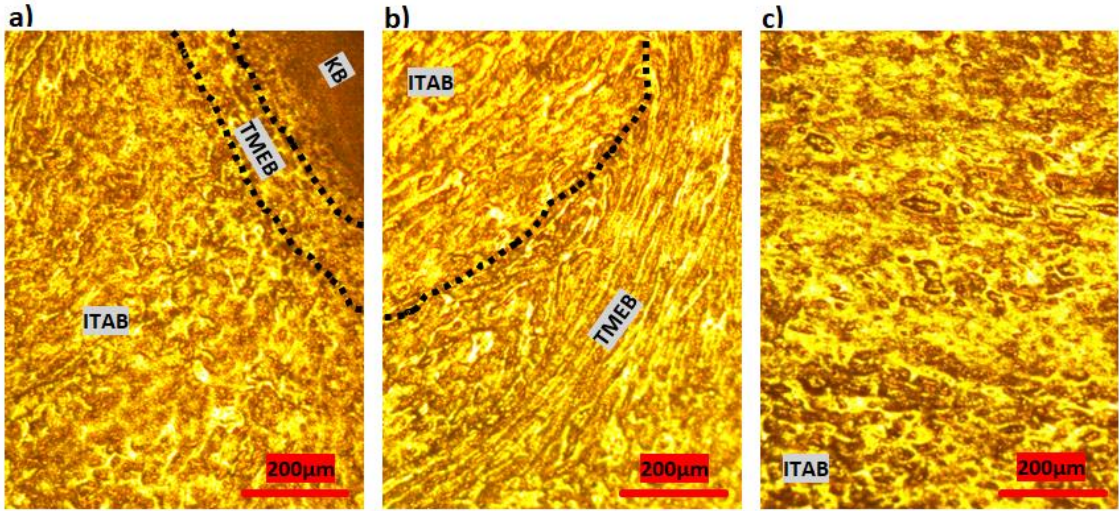
### 4.3.2. Mikroyapı

Şekil 4.74, AZ91 Mg alaşımı ana metalinin mikroyapısını ve üçgen pimli takım ile 1600 dev/dak takım dönüş hızında üretilen SKNK kaynağının ısıdan etkilenen bölge (ITAB), termomekanik etkilenen bölge (TMEB) ve karıştırma bölgesinin (KB) mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.74a'da görüldüğü gibi AZ91 Mg alaşımı, birincil olarak  $\alpha$ -Mg fazı tanelerinden (sarı) ve  $\alpha$ -Mg fazı tanelerinin sınırlarında yer alan alüminyum bakımından zengin  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> fazından (koyu) oluşan bir mikroyapıya sahiptir. Üretilen SKNK kaynaklarında AZ91 ana metali (AM) mikroyapısının yanı sıra karıştırma bölgesi (KB), termomekanik etkilenen bölge (TMEB) ve ısıdan etkilenen bölge (ITAB) olmak üzere üç farklı mikroyapı bölgesi tespit edildi. Şekil 4.74b'de sahip oldukları tanelerin büyüklükleri bakımından birbirinden farklı üç mikroyapı bölgesi olduğu açıktır. Şekil 4.74c'deki karıştırma bölgesinin (KB), ana metal dahil diğer bölgelerle karşılaştırıldığında en küçük tanelere sahip olduğu açıktır. Bu, şiddetli plastik deformasyona maruz kalması nedeniyle karıştırma bölgesinin dinamik yeniden kristalleşmesine atfedilebilir. TMEB'deki tanelerin boyutu KB'ninkinden daha büyüktür, ancak ITAB ve AM'ninkinden daha küçüktür. Öte yandan, Şekil 4.74d'deki ITAB en büyük tanelere sahiptir.



Şekil 4.74. a) AZ91 Mg alaşımı b) kaynak bölgesi/TMAZ/HAZ sınırlarının c) karıştırma bölgesi ve d) S48 kaynağının ITAB mikroyapısını gösteren optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.75 1200 dev/dak takım dönüş hızında ve konik pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynağının karıştırma bölgesi (KB), TMEB ve ITAB mikroyapılarını göstermektedir. Şekil 4.75a'da, karıştırma bölgesinin (KB), TMEB ve ITAB'dan daha ince taneli bir mikroyapıya sahip olduğu görülebilir. TMEB, Şekil 4.75b'de görüldüğü gibi malzemelerin akışı boyunca oldukça deforme olmuş ve uzun tanelere sahiptir. Ek olarak, TMEB, ITAB ve AM'den daha ince taneli bir yapıya sahiptir, bunun nedeni takım piminin karıştırması sırasında TMEB'nin yüksek ısıya maruz kalmasının yanında deformasyona uğramasına bağlanabilir. Üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının mikroyapıları, konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarınınkiyle karşılaştırılmasında, Şekil 4.74 ve 75'te görüldüğü gibi üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının mikroyapıları, konik pimli takım ile üretilen SKNK kaynaklarınınkinden daha incedir.

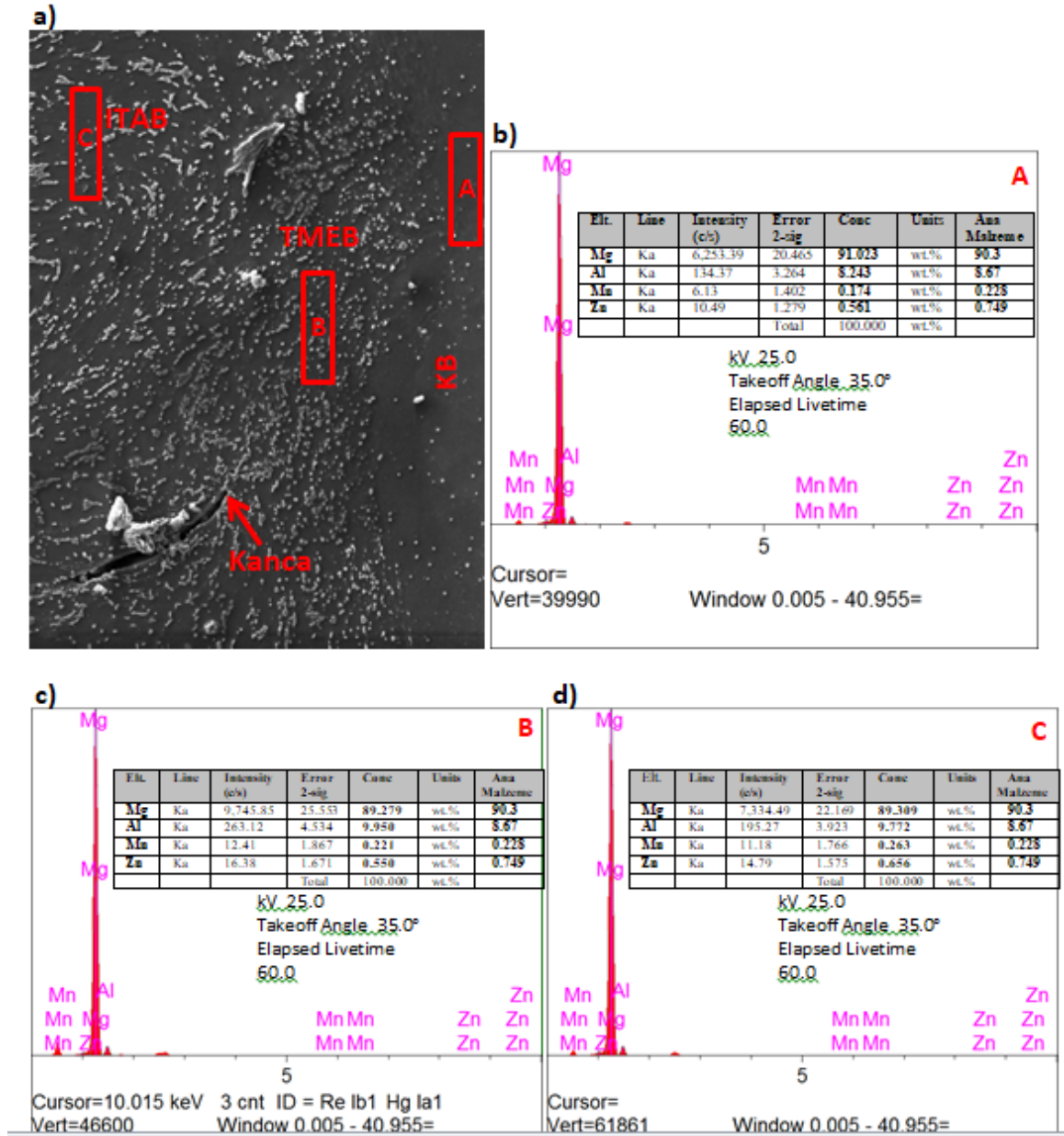


Şekil 4.75. a) Karıştırma bölgesi/TMAZ/HAZ sınırlarının, (b) TMAZ ve HAZ ve (c) HAZ'ın S44 mikroyapılarını gösteren optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.76 üçgen pimli takım ve 1600 dev/dak'lık takım dönüş hızı kullanılarak üretilen SKNK kaynağının karıştırma bölgesi (KB), TMEB ve ITAB'sinden elde edilen enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDS) element yoğunluk analizi sonuçlarını göstermektedir. (EDS) element yoğunluğu analizi KB'nin A bölgesinde, TMEB'nin B bölgesinde ve ITAB'nin C bölgesinde gerçekleştirildi. Sırasıyla Şekil 4.76b, c ve d'deki tablolarda ana metaldeki ve kaynağın A, B ve C bölgesindeki elementlerin yüzdeleri sunulmuştur. AZ91 Mg alaşımı ana metaldeki elementlerin yüzde olarak konsantrasyonu, A, B ve C bölgelerindeki elementlerin konsantrasyonu ile karşılaştırıldığında, Mg, Al, Zn ve Mn gibi ana elementlerin miktarlarında farklılıklar vardı. Karıştırma bölgesinin (KB) A bölgesindeki Mg elementinin konsantrasyonu, ana metal, TMEB bölgesi B ve ITAB bölgesi C bölgesindekinden biraz daha yüksekti, ancak karıştırma bölgesinin A bölgesindeki Al elementinin konsantrasyonu, ana metaldekenden, TMEB B bölgesinden ve ITAB C bölgesinden biraz daha düşüktür.

Öte yandan, TMEB'nin B bölgesindeki Mg elementi ve ITAB'ın C bölgesindeki Mg elementi konsantrasyonu, ana metaldeki Mg elementi konsantrasyonuna göre daha düşüktür. Ancak, TMEB'in B bölgesinde ve ITAB'nin C bölgesinde Al elementinin konsantrasyonu AZ91 ana metalinkinden biraz daha yüksekti. AZ91 Mg alaşımı ana metaldeki ve kaynakların ITAB, TMEB ve KB'sindeki Al ve Mg elementlerinin

miktarlarındaki değişiklikler, kaynak sırasında  $Mg_{17}Al_{12}$  fazlarının çözünmesine bağlanabilir.



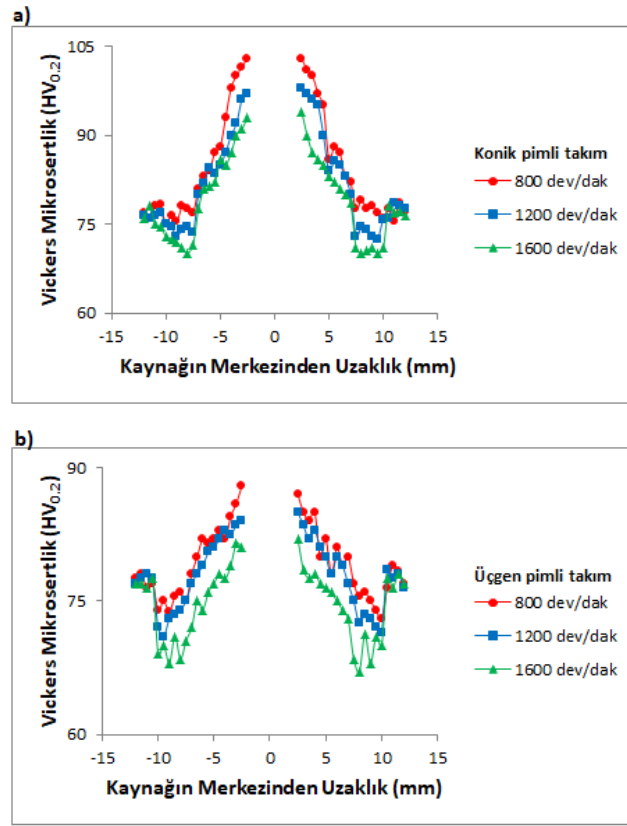
Şekil 4.76. a) S48 kaynağın enine kesitinden alınan SEM görüntüsü. (b), (c) ve (d), sırasıyla (a)'da gösterildiği gibi A, B ve C bölgelerinden elde edilen EDS element yoğunluğu analizi sonuçlarını gösterir. Bölge A, B ve C (a)'da belirtildiği gibi sırasıyla karıştırma bölgesinde, TMAZ ve ITAB'da dır

#### 4.3.3. Mikrosertlik

Şekil 4.77, konik ve üçgen pimli takımlar ile 800, 1200 ve 1600 dev/dak dönüş hızında yapılan SKNK kaynaklarının Vickers mikrosertlik profillerini göstermektedir. Şekil

4.77a, konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının Vickers mikrosertlik profillerini gösterirken, Şekil 4.77b, üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynakların Vickers mikrosertlik dağılımını göstermektedir. Kaynakların anahtar deliğinin her iki tarafındaki Vickers mikrosertlik, 200 g yük ve 10 saniyelik bekleme süresi şartlarında elde edilmiştir. Kaynakların anahtar deliği merkezine göre sertlik dağılımı neredeyse simetrik olduğu ve kaynakların sertlik profillerinin W şeklinde görüldüğü görülmüştür. AZ91 Mg alaşımı ana metal (AM) sertliğinin ortalama 77 HV olarak bulunmuştur. Ana metalden (AM) ısıdan etkilenen bölgeye (ITAB) doğru hareket edildiğinde hem konik hem de üçgen pimli takım ile üretilen tüm SKNK kaynaklarında, sertlik ITAB'de en düşük değerlere düşmüştür. Ancak daha sonra ısıdan etkilenen bölgeden (ITAB), karıştırma bölgesine (KB) hareket, edildiğinde sertlik kademeli olarak artmıştır ve tüm kaynaklar için anahtar deliği çevresinde maksimum değerlere ulaşmıştır. Genel olarak, üçgen pimli takım ile üretilen SKNK kaynaklarının sertliği, Şekil 4.77'de gösterildiği gibi konik pimli takım ile üretilen SKNK kaynaklarından biraz daha yüksektir, bunun nedeni, üçgen pimin konik pimden daha fazla malzemeleri plastik deformasyona uğratmasına ve daha iyi karıştırmasına bağlanabilir. Ayrıca, AM, TMEB ve ITAB sertlik değerlerine kıyasla, ölçülen en yüksek sertlik değerleri kaynakların karıştırma bölgelerinde bulunmuştur, çünkü kaynakların karıştırma bölgeleri, Şekil 4.74'te görüldüğü gibi diğer bölgelere kıyasla daha küçük tanelere sahiptir. En düşük sertlik değerleri kaynakların ısıdan etkilenen bölgelerinde bulunmuştur. Bunun nedeni, Şekil 4.74 ve 75'te görüldüğü gibi kaynakların ısıdan etkilenen bölgelerinde oluşan büyük tanelerdir. Ayrıca, takım dönüş hızı arttığında kaynakların sertliği biraz azaldı görülmektedir. SKNK sırasında takım dönüş hızındaki artışla birlikte sürtünme ısısı da artar. Sürtünme ısısının etkisi ile ITAB'daki taneler BM'dekinden daha kaba hale gelir. Tanelerin irileşmesi ve kaynak ısı döngüsü ile büyüyen çökeltiiler nedeniyle ITAB'da düşük sertlik meydana gelir (Badarinarayan vd. 2009). Her iki takım için de 800 dev/dak takım dönüş hızında yapılan SKNK kaynaklarının sertliği, 1200 ve 1600 dev/dak takım dönüş hızında yapılan SKNK kaynaklarınınkine göre biraz daha yüksekti. Bunun nedeni, 1200 ve 1600 dev / dak'da daha yüksek sürtünme ısı üretiminin daha büyük tanelere neden olması olabilir.



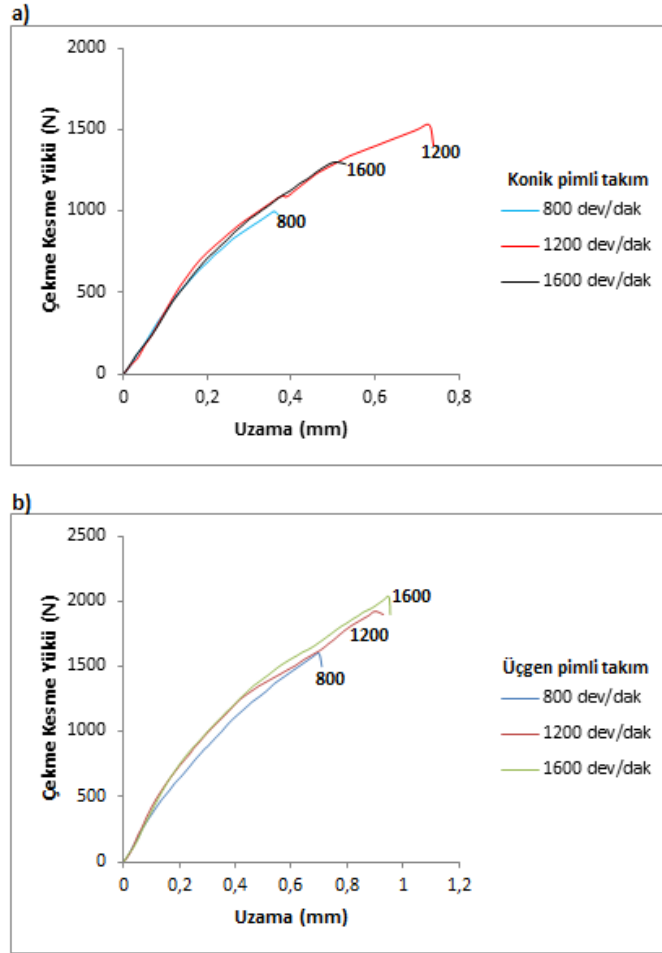


Şekil 4.77. a) Konik pim takım ve b) üçgen pim takım ile kaynakların sertlik profilleri

#### 4.3.4. Çekme Kesme Testi

Şekil 4.78, konik pimli takım ve üçgen pimli takım ile üretilen SKNK kaynaklarının çekme kesme yüküne karşı uzama eğrilerini göstermektedir. Şekil 4.78a ve 78b, sırasıyla konik pimli takım ve üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme yükünü göstermektedir. Konik pimli takımı kullanarak en yüksek 1530 N çekme kesme yüküne sahip nokta kaynağı 1200 dev/dak takım dönüş hızında üretilirken, üçgen pimli takımı kullanarak en yüksek 2035 N çekme kesme yüküne sahip nokta kaynağı 1600 dev/dak takım dönüş hızında üretilmiştir. En düşük çekme kesme yüklerine sahip nokta kaynakları, her iki takım için de 800 dev/dak takım dönüş hızında yapılmıştır. 800 dev/dak takım dönüş hızı, malzemelerin etkili bir şekilde karıştırılması için yeterli ısıyı üretmediğine bağlanabilir. Takım dönüş hızı 800'den 1200 dev/dak'ya yükseltildiğinde, kaynağın çekme kesme yükü her iki takım için de önemli ölçüde artmıştır. Ancak takım dönüş hızını 1600 dev/dak'ya daha da yükselttiğinde, kaynağın çekme kesme yükü konik pimli takım için azaldığı ve üçgen pimli takım için de biraz arttığı görülmüştür. 1200 ve

1600 dev/dak takım dönüş hızlarında ve üçgen pimli takım kullanılarak yapılan nokta kaynaklarının çekme kesme yükleri birbirine çok olmuştur. 1600 dev/dak'da yapılan kaynağın çekme kesme yükü, 1200 dev/dak'da yapılan kaynağınkinden sadece biraz daha fazladır. Şekil 4.78'den, aynı takım dönüş hızlarında yapılan nokta kaynaklarının çekme kesme yükü karşılaştırıldığında, üçgen pimli takım ile yapılanlarıninki daha yüksek olduğu görülmektedir. Genel olarak, üçgen pimli takım ile üretilen SKNK kaynakları, konik pimli takım ile üretilen SKNK kaynaklarından daha yüksek çekme kesme yükü sergilemiştir. Bunun nedeni, üçgen pimli takımın malzemeleri daha iyi karıştırması olabilir. Şekil 4.73'te görüldüğü gibi üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynakları daha geniş bir kaynak genişliğe sahiptir. Üçgen pimli takım kullanılarak 1600 dev/dak takım dönüş hızında yapılan nokta kaynağı en yüksek 2035 N çekme kesme yüküne sahip olmuştur. Şekil 4.73'te görüldüğü gibi üçgen pimli takım kullanılarak 1600 dev/dak takım dönüş hızında yapılan nokta kaynağı ayrıca en büyük kaynak genişliğine sahiptir. Yin vd. (2010), AZ91 Mg alaşımını AZ31 Mg alaşımına SKNK ile birleştirilmesinde kaynak genişliğinin kaynak mukavemetini önemli derece etkilediğini ve daha büyük kaynak genişliğine sahip kaynağın daha mukavemetli olduğu tespit etmiştir. Kullanılan vidalı silindirik pimli takıma kıyasla, kullanılan üzerinde üç vida dışı bulunan üçgen pimli takımın kaynağın kaynak genişliğini önemli derece arttırdığı görülmüştür. Genel olarak, üzerinde üç vida dışı bulunan üçgen pimli takım ile yapılan kaynaklar, vidalı silindirik pimli takım ile üretilen kaynaklar ile kıyaslandığında daha geniş kaynak genişliğine ve daha yüksek çekme kesme mukavemetine sahip olmuştur. Genel olarak, üçgen pimli takım ile yapılan SKNK kaynaklarının mukavemeti, silindirik pimli takım ile yapılanlarınkinden daha iyi olduğu tespit edilmiştir (Badarinarayan vd. 2009). Ayrıca, Yin vd. (2010), AM60 Mg alaşımlarının SKNK ile kaynak edilmesini ve AZ31 Mg alaşımlarının SKNK ile kaynak edilmesini araştırmıştır. Her iki Mg alaşımın SKNK'de da kaynak genişliği artmasıyla, kaynağın çekme kesme mukavemetinin arttığı görülmüştür.



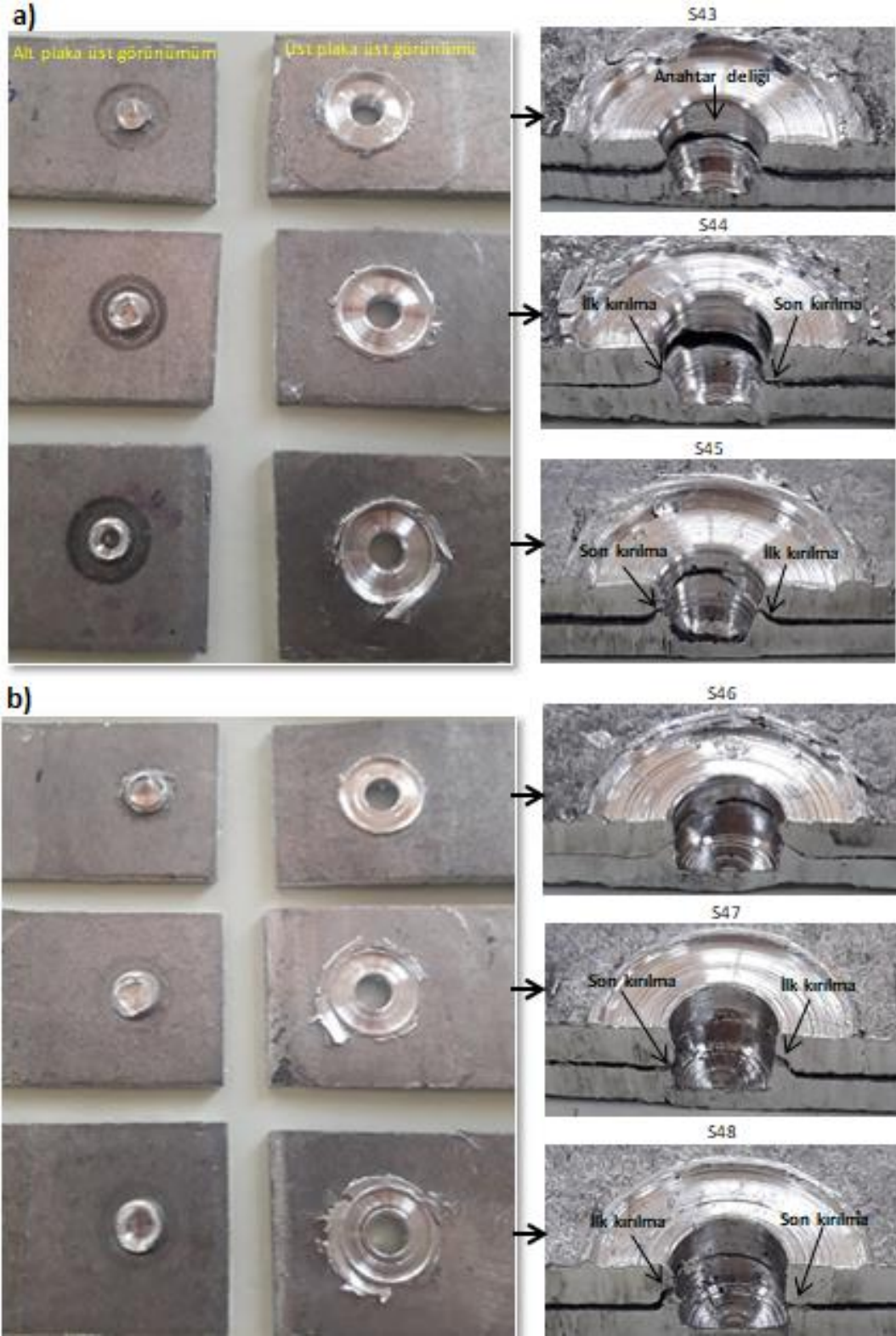
Şekil 4.78. a) Konik ve b) üçgen pimli takım ile yapılan kaynakların çekme kesme yükü ve uzama eğrisi

#### 4.3.5. Çekme Kesme Testi Sırasında Kaynakların Kırılma Şekilleri

Şekil 4.79 çekme kesme testinden sonra kaynakların alt ve üst plakalarının üst kısmındaki kaynak kırık yüzeylerini ve kaynakların enine kesitlerini göstermektedir. Şekil 4.79a ve b, sırasıyla konik pimli takım ve üçgen pimli takım ile 800, 1200 ve 1600 dev/dak takım dönüş hızında üretilen SKNK kaynaklarını göstermektedir. Konik ve üçgen pimli takım ile 800 dev/dak takım dönüş hızında yapılan SKNK kaynaklarında çekme kesme testi sırasında, çatlaklar kaynakların arayüzünde kaynak işlemi sırasında oluşan kancada başlamış ve kanca hattı boyunca ilerleyip kanca ucuna ulaştıktan sonra anahtar deliğine doğru en zayıf birleşme bölgesinden direk ilerleyerek anahtar deliği yüzeyine ulaştığında kırılma anahtar deliği çevresi boyunca gerçekleşmiştir. Şekil 4.79a ve 79b'de, 800 dev/dak'da yapılan kaynakların çekme kesme testine tabi tutulduktan sonraki enine



kesitlerinde görüldüğü gibi. Öte yandan 1200 ve 1600 dev/dak takım dönüş hızlarında konik ve üçgen pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme testi sırasında, çatlaklar kaynakların bir tarafında arayüzey kanca hattında önce başlamış ve kanca hattı boyunca ilerleyip kanca ucuna ulaştıktan sonra en zayıf kaynak birleşme bölgesinden direk anahtar deliğine doğru ilerleyip anahtar deliği yüzeyine ulaşarak ilk (İlk kırılma) kırılma gerçekleşirken, kaynakların diğer tarafında çatlaklar arayüzey kanca hattında başlamış ve daha sonra kalın kaynak birleşme bölgesi boyunca ilerleyerek anahtar deliği yüzeyine ulaşmasıyla son kırılma (son kırılma) gerçekleşmiştir. Benzer kırılma şekli farklı AM60B dökme Mg alaşımı ile 6022-T4 dövme Al alaşımının SKNK kaynaklarının çekme kesme testi sırasında gözlemlenmiştir (Rao vd. 2015). Genel olarak, Şekil 4.79'da kaynakların çekme testinden sonra kırık yüzey bölgelerine bakıldığında 1200 ve 1600 dev/dak takım dönüş hızlarında yapılan SKNK kaynaklarının, 800 dev/dak takım dönüş hızında yapılan kaynaklardan daha kalın bir kaynak birleşme bölgesine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, üçgen pimli takım ile 1600 dev/dak takım dönüş hızında yapılan nokta kaynağının, üretilen diğer nokta kaynaklarına göre en büyük kaynak birleşme bölgesine sahip olmuştur.



Şekil 4.79. Çekme kesme teslerinden sonra kaynakların alt ve üst plakalarının üst kısmındaki kırılma yüzey görüntüleri ve kesitleri: a) S43, S44 ve S45 ve (b) S46, S47 ve S48 kaynakları

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7075-T651 Al alaşımı plaka ile AZ91 Mg alaşımı plakanın katı hal kaynak yöntemi olan SKNK ile birleştirilmesinde plaka pozisyonunun (üst üste bindirilip SKNK ile birleştirilen 7075-T651 Al alaşımı plaka ve AZ91 Mg alaşımı plakanın üstte veya altta olma durumu), takım pim geometrisinin (konik, üçgen ve vidalı silindirik), takım dönme hızının (1000, 1400 ve 1800 dev/dak) ve takım bekleme süresinin (3 ve 6 sn) yapılan SKNK kaynaklarının mikroyapısına ve mekanik özelliklerine (mikrosertlik, çekme kesme mukavemeti ve çekme-basma yorulma ömrü) etkisi araştırıldı. Ayrıca, 7075-T651 Al alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip ve AZ91 Mg alaşımı plakaların ikisini üst üste bindirip SKNK ile birleştirilmesinde takım pim geometrisinin (konik ve üçgen) ve takım dönme hızının (800, 1200 ve 1600 dev/dak) yapılan SKNK kaynaklarının mikroyapısına ve mekanik özelliklerine (mikrosertlik ve çekme kesme mukavemeti) etkisi araştırıldı. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken her üç takım (konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takım) ile de yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme mukavemeti ve çekme-basma yorulma ömrü 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarınınkinden daha iyi çıkmıştır. Çünkü daha sert 7075-T651 Al alaşımı plaka altta iken takım plakalara daldığında 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesi takım pimi çevresinde yukarıya ve yanlara doğru akarak üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın içerisine dalmasıyla daha sağlam SKNK kaynaklarının oluşmasını sağlamıştır. AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken aynı kaynak parametre şartlarında üçgen pimli takım kullanılarak yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme mukavemeti ve çekme-basma yorulma ömrü konik ve vidalı silindirik pimli takım ile üretilen SKNK kaynaklarınınkinden daha yüksek çıkmıştır. Çünkü üçgen pimin köşe kenarları plakaların malzemelerini daha fazla plastik deformasyona uğratarak karıştırması ve daha fazla altta bulunan 7075-T651 Al alaşımı plakanın malzemesinin yukarıya ve yanlara doğru akarak üstte bulunan daha yumuşak AZ91 Mg alaşımı plakanın içerisine dalmasıyla daha büyük kaynak birleşme bölgelerinin oluşmasını sağlamıştır. 7075-T651 Al alaşımı

plaka ile AZ91 Mg alaşımı plakanın konik, üçgen ve vidalı silindirik pimli takımlar ile yapılan SKNK kaynaklarının kaynak bölgesinde ve plakaların arayüzeyinde sert ve gevrek metallerrarası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) meydana gelmiştir. Özellikle de 7075-T651 Al alaşımı plaka, AZ91 Mg alaşımı plakanın üzerindeyken yapılan SKNK kaynaklarında, kaynak bölgesinde ve plakaların arayüzeyinde metallerrarası bileşikler ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) oluşmuştur. 1800 dev/dak yüksek takım dönme hızında sürtünme ısı girdisi falza olduğu için kaynak bölgesinde ve plakaların arayüzeyinde metallerrarası bileşiklerin ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$ ) yoğunluğu artmıştır ve bu da kaynağın mukavemetini bir miktar düşürmüştür. Genel olarak 1400 dev/dak takım dönme hızında yapılan SKNK kaynaklarının çekme kesme mukavemeti ve çekme-basma yorulma ömrü 1000 ve 1800 dev/dak takım dönme hızında yapılanındakinden daha iyi çıkmıştır. Çünkü plakaların malzemeleri ısınarak yumuşatılıp ve takım pimi tarafından karıştırılmasıyla oluşan kaynak bölgesi için en uygun sürtünme ısı girdisini sağlamıştır. Genel olarak takım bekleme süresi 3 sn'den 6 sn'ye artırıldığında plakaların malzemeleri daha fazla karışması sağlanmış bunun sonucunda da daha mukavemetli SKNK kaynakları üretilmiştir. En yüksek 2610 N çekme yüküne ve en uzun yorulma ömrüne sahip SKNK, AZ91 Mg alaşımı plaka, 7075-T651 Al alaşımı plakanın üzerindeyken üçgen pimli takım kullanılarak 1400 dev/dak takım dönme hızında ve 6 sn takım bekleme süresinde üretilmiştir. 7075-T651 Al alaşımı plakaların birbirine SKNK ile birleştirilmesinde konik pimli takım ve üçgen pimli takım ile 1200 dev/dak dönme hızında yapılan SKNK kaynakları en yüksek çekme kesme yüküne sahip olmuştur. Konik pimli takım ile kıyaslandığında üçgen pimli takım ile üretilen SKNK kaynaklarının kaynak bölgesi genişliği daha büyük olduğundan dolayı çekme kesme mukavemeti daha yüksek olmuştur. Çekme testleri sırasında konik pimli takım ile yapılan SKNK kaynakları kaynak çevresi boyunca kırılırken, üçgen pimli takımı ile yapılan SKNK kaynakları ise kaynak dolgunun yerinden çıkarak koptuğu görülmüştür. 7075-T651 Al alaşımı plakaların SKNK kaynaklarının sertlikleri arasında çok az farklılıklar olduğu için kaynak sertliğinin kaynak çekme mukavemeti üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı söylenebilir. 7075-T651 Al alaşımı plakaların birbirine SKNK ile birleştirilmesinde üçgen pimli takım ile 1200 dev/dak dönme hızında en yüksek 7,776 kN çekme yüküne sahip SKNK elde edilmiştir. AZ91 Mg alaşımı plakaların birbirine SKNK ile birleştirilmesinde konik pimli takıma göre üçgen pimli takım ile üretilen SKNK kaynaklarının kaynak bölgesi genişliği daha büyük olduğundan dolayı çekme kesme

mukavemeti daha yüksek olmuştur. AZ91 Mg alaşımı plakaların birbirine SKNK ile birleştirilmesinde üçgen pimli takım ile 1600 dev/dak dönme hızında en yüksek 2035 N çekme yüküne sahip SKNK elde edilmiştir. Benzer olmayan Al ve Mg alaşımlarının sürtünme karıştırma nokta kaynağında daha sağlam kaynaklar magnezyum alaşımı Al alaşımının üstünde olacak şekilde, 1000 ile 1400 dev/dak arasında bir takım dönme hızı, bu çalışmada kullanılan takım dalma hızından (10,3 ve 7,3 mm/dak) daha düşük bir dalma hızı, 3 ile 6 saniye arasında bir takım bekleme süresi ve konkav omuza ve üçgen, dörtgen veya beşgen şekilli pime sahip bir kaynak takımı seçilerek yapılabilir. Ayrıca, benzer Al alaşımlarının birbirine ve benzer magnezyum alaşımlarının birbirine SKNK ile birleştirilmesinde daha sağlam birleştirmeler elde etmek için 1000 ile 1400 dev/dak arasında bir takım dönme hızı, bu çalışmada kullanılan takım dalma hızından (10,3 ve 7,3 mm/dak) daha düşük bir dalma hızı, 3 ile 6 saniye arasında bir takım bekleme süresi ve konkav omuza ve üçgen veya dörtgen şekilli pime sahip bir kaynak takımı seçilebilir. SKNK işleminden sonra kaynak bölgesinde delik kaldığı için stres konsantrasyonuna ve korozyon oluşmasına neden olmakta bu yüzden deliğin ortadan kaldırılması için yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağından farklı yeni tip SKNK yöntemleri geliştirilebilir.

## **KAYNAKLAR**

Alonso E, Lee TM, Bjelkengren C, Roth R, Kirchain RE (2012) Evaluating the Potential for Secondary Mass Savings in Vehicle Lightweighting. *Environmental Science & Technology* 46(5): 2893-2901

Avula D, Singh RKR, Dwivedi DK, Mehta NK (2011) Effect of friction stir welding on microstructural and mechanical properties of copper alloy. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 74: 214-223

Asadi P, Alimohammadi S, Kohantorabi O, Fazli A, Akbari M (2020) Effects of material type, preheating and weld pass number on residual stress of welded steel pipes by multipass TIG welding (C-Mn, SUS304, SUS316). *Thermal Science and Engineering Progress* 16: 100462

Pollock TM, (2010) Weight loss with magnesium alloys. *Science* 328(5981): 986-987

Wise M, Calvin K, Thomson A, Clarke L, Bond-Lamberty B, Sands R, Smith SJ, Janetos A, Edmonds J, (2009) Development of artificial neural network models for predicting weld output parameters in advanced fusion welding of a magnesium alloy. *Science* 324(5931): 1183-1186

Kim HJ, Keoleian GA, Skerlos SJ (2011) Economic assessment of greenhouse gas emissions reduction by vehicle lightweighting using aluminum and high-strength steel. *Journal of Industrial Ecology* 15(1): 64-80

Kim HJ, McMillan C, Keoleian GA, Skerlos SJ (2010) Greenhouse gas emissions payback for lightweighted vehicles using aluminum and high-strength steel. *Journal of Industrial Ecology* 14(6): 929-946

Shindell D, Faluvegi G, Walsh M, Anenberg SC, Dingenen RV, Muller NZ, Austin J, Koch D, Milly G (2011) Climate, health, agricultural and economic impacts of tighter vehicle-emission standards. *Nature Climate Change* 1: 59-66

Howey DA (2012) A challenging future for cars. *Nature Climate Change* 2: 28-29

Yu Q, Zhang JX, Jiang YY, Li QZ (2012) An experimental study on cyclic deformation and fatigue of extruded ZK60magnesium alloy. *International Journal of Fatigue* 36: 47-58

Begum S, Chen DL, Xu S, Luo AA (2009) Effect of strain ratio and strain rate on low cycle fatigue behavior of AZ31 wrought magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A* 517(1–2):334-343

Fan CL, Chen DL, Luo AA (2009) Dependence of the distribution of deformation twins on strain amplitudes in an extruded magnesium alloy after cyclic deformation. *Materials Science and Engineering A* 519(1–2): 38-45

Wu HY, Yang JC, Liao JH, Zhu FJ (2012) Dynamic behavior of extruded AZ61 Mg alloy during hot compression. *Materials Science and Engineering A* 535: 68-75

Kang H, Accorsi I, Patel B, Pakalnins E (2010) Fatigue performance of resistance spot welds in three sheet stack-ups. *Procedia Engineering* 2: 129-138

Kang H, Accorsi I, Patel B, Pakalnins E (2010) Fatigue performance of resistance spot welds in three sheet stack-ups. *Procedia Engineering* 2: 129-138

Wang HY, Liu LM, Jia ZY (2011) The influence of adhesive on the Al alloy in laser weld bonding Mg-Al process. *Journal of Materials Science* 46: 5534-5540

Franz D, Szilvasi T, Irran E, Inoue S (2015) A monotopic aluminum telluride with an Al=Te double bond stabilized by N-heterocyclic carbenes. *Nature Communications* volume 6 Article Number: 10037

Zamzami IA, Susmel L (2017) On the accuracy of nominal, structural, and local stress based approaches in designing aluminium welded joints against fatigue. *International Journal of Fatigue* 101(2): 137-158

Heinen P, Wu H, Olowinsky A, Gillner A (2014) Helium-tight laser beam welding of aluminum with brilliant laser beam radiation. *Physics Procedia* 56: 554–565

Siewert E, Hussary N, Schnick M, Dreher M, Schuster H, Wagner R, Eichler S (2018) New GTAW variant for high-throughput aluminum welding. *Welding in the World*. 62: 385-391

Li J, Xue J, Zhang Z, Hu Y (2018) Effects of thermal frequency on microstructures. *Applied Sciences* 8(4): 540

Milani AM, Paidar M, Khodabandeh A, Nategh S (2016) Influence of filler wire and wire feed speed on metallurgical and mechanical properties of MIG welding–brazing of automotive galvanized steel/5754 aluminum alloy in a lap joint configuration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 82(9-12): 1495-1506

Abhay Jha K, Sreekumar K (2008) Metallurgical studies on cracked Al-5.5 Zn-2.5Mg-1.5Cu aluminum alloy injector disc of turbine rotor. *Journal of Failure Analysis and Prevention* 8(4): 327-332

Madhusudhan RG, Gokhale AA, Prasad RK (1997) Weld microstructure refinement in a 1441 grade aluminium-lithium alloy. *Journal of Materials Science* 32: 4117-26

Haghshenas M, Gerlich AP (2018) Joining of automotive sheet materials by frictionbased welding methods: a review. *Engineering Science and Technology An International Journal* 21(1): 130-148

Mordike BL, Ebert T (2001) Magnesium properties–application–potential. *Materials Science and Engineering: A* 302: 37-45

Kleiner S, Orgis S, Beffort O, Uggoqitzer PJ (2003) Semi-solid metal processing of aluminum alloy A356 and magnesium alloy AZ91: comparison based on metallurgical consideration. *Advanced Engineering Materials* 5(9): 633-658

Dahle AK, Lee YC, Schaffer PL, St. John DH (2001) Development of the as-cast microstructure in magnesium-aluminium alloys. *Journal of Light Metals* 1: 61-72

Givi MKB, Asadi P (2014) *Advances in friction-stir welding and processing*. 1st ed. Wood-head Publishing, Elsevier

Asadi P, Givi MKB, Akbari M (2016) Simulation of dynamic recrystallization process during friction stir welding of AZ91 magnesium alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83(1-4)

Amini A, Asadi P, Zolghadr P (2014) *Friction stir welding applications in industry*

Fu-sheng P, An-lian X, De-an D, Jun-hua Y, Xian-quan J, Ai-tao T, Yang R (2016) Effects of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of magnesium alloy Mg–5Al–3Sn [J]. *Materials and Design* 110: 266-274

Liu P, Li Y, Geng H, Wang J (2007) Microstructure characteristics in TIG welded joint of Mg/Al dissimilar materials. *Materials Letters* 61: 1288-1291

Zhang J, Luo G, Wang Y, Shen Q, Zhang L (2012) An investigation on diffusion bonding of aluminum and magnesium using a Ni interlayer. *Materials Letters* 83: 189-191



Genevois C, Deschamps A, Denquin A, Doisneau-coottignies B. (2005) Quantitative investigation of precipitation and mechanical behaviour for AA2024 friction stir welds. *Acta Materialia* 53: 2447-58

Thomas WM, Nicholas ED, Needham JC, Murch MG, Temple SP, Dawes CJ (1991) Friction stir butt welding. International patent application No. PCT/GB92/ 02203; December

Zhang C, Cui L, Wang D, Liu Y, Liu C, Li H ((2019) The heterogeneous microstructure of heat affect zone and its effect on creep resistance for friction stir joints on 9Cr–1.5 W heat resistant steel. *Scripta Materialia* 158: 6-10

Ma Z, Feng A, Chen D, Shen J (2018) Recent advances in friction stir welding/processing of aluminum alloys: microstructural evolution and mechanical properties, *Crit. Rev. Solid State* 43: 269-333

Yang CB, Wang B, Yu L, Wu P, Xue X, Zhang (2020) High-cycle fatigue and fracture behavior of double-side friction stir welded 6082Al ultra-thick plates. *Engineering Fracture Mechanics* 226: 106887

Azhari-Saray H, Sarkari-Khorrami M, Nademi-Babahadi A, Kashani-Bozorg SF (2020) Dissimilar resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy/St-12 carbon steel using a high entropy alloy interlayer. *Intermetallics* 124: 106876

Mllieswaran K, Padmanabhan R, Balasubramanian V (2018) Friction stir welding parameters optimization for tailored welded blank sheets of AA1100 with AA6061. *Advances in Materials and Processing Technologies* 4(1): 142-157

Chen YC, Liu HJ, Feng JC (2006) Friction stir welding characteristics of different heat-treated-state 2219 aluminum alloy plates. *Materials Science and Engineering A* 420: 21-25

Cao X, Jahazi M (2011) Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy. *Materials and Design* 32: 1–11

Suhuddin UFHR, Mironov S, Sato YS, Kokawa H, Lee CW (2009) Grain structure evolution during friction-stir welding of AZ31 magnesium alloy. *Acta Materialia* 57: 5406-5418

Rai R, De A, Bhadeshia HKDH, DebRoy T (2011) Review: friction stir welding tools. *Science and Technology of Welding and Joining* 16: 325-342

Saeid T, Abdollah-zadeh A, Shibayanagi T, Ikeuchi K, Assadi H (2010) On the formation of grain structure during friction stir welding of duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering A* 527: 6484-6488

Chen YC, Nakata K (2009) Effect of tool geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded magnesium alloy and steel. *Materials and Design* 30: 3913-3919

Chen YC, Nakata K (2009) Microstructural characterization and mechanical properties in friction stir welding of aluminum and titanium dissimilar alloys. *Materials and Design* 30: 469-474

Pourahmad P, Abbasi M (2013) Materials flow and phase transformation in friction stir welding of Al 6013/Mg. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 23: 1253-1261

Chang WS, Rajesh SR, Chun CK, Kim HJ (2011) Microstructure and mechanical properties of hybrid laser-friction stirwelding between AA6061-T6 Al alloy and AZ31Mg alloy. *Journal of Materials Science & Technology* 27: 199-204

Abdollah-Zadeh A, Saeid T, Sazgari B (2008) Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints. *Journal of Alloys and Compounds* 460: 535-538

Ma YE, Xia Z, Jiang R, Li W (2013) Effect of welding parameters on mechanical and fatigue properties of friction stir welded 2198 T8 aluminum–lithium alloy joints. *Engineering Fracture Mechanics* 114: 1-11

Sato YS, Park SHC, Michiuchi M, Kokawa H (2004) Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys. *Scripta Mater* 50: 1233-6

Park SHC, Michiuchi M, Sato YS, Kokawa H (2002) *Proceedings of the International Welding/Joining Conference Korea*. Gyeongju: KWS 534-538

Wang DA, Lee SC (2007) Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets. *Journal of Materials Processing Technology* 186(1-3): 291-297

Threadgill PL (1999) *Bulletin, TWI* 678

Nicholas ED, Thomas WM (1998) *International Journal of Materials and Product Technology* 13: 45

Connolly C (2007) Friction spot joining in aluminium car bodies. *Industrial Robot* 34-17

Zhang ZH, Yang XQ, Zhang JL (2011) Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Materials and Design* 32: 4461-4470

Li WY, Li JF, Zhang ZH (2014) Improving mechanical properties of pinless friction stir spot welded joints by eliminating hook defect. *Materials and Design* 62: 247-254

Babu S, Janaki Ram GD, Venkitakrishnan PV (2012) Microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded aluminum alloy AA2014. *Journal of Materials Science & Technology* 5: 414-426

Chen YC, Nakata K (2008) Friction stir lap joining aluminum and magnesium Alloys. *Scripta Mater.* 58: 433-436

Cao R, Huang Q, Chen JH, Wang PC (2014) Cold metal transfer spot plug welding of AA6061-T6 to galvanized steel for automotive applications. *Journal of Alloys and Compounds* 585: 622-632

Yuan W, Mishra RS, Webb S, Chen Y, Carlson B, Herling D, Grant G. (2011) Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds. *Journal of Materials Processing Technology* 211: 972-977

Freeney T, Sharma S, Mishra R (2006) Effect of welding parameters on properties of 5052 Al friction stir spot welds', SAE Technical Paper, SAE International, Washington, DC, USA

Suryanarayanan R, Sridhar VG (2020) Experimental investigation on the influence of process parameters in Friction stir spot welded dissimilar aluminum alloys. *Materials Today: Proceedings* 27: 529-533

McLean A, Powell GLF, Brown IH, Linton VM (2003) Friction stir welding of magnesium alloy AZ31B to aluminium alloy 5083. *Science and Technology of Welding and Joining* 8: 462-4

Wang DA, Chen CH, Mater J (2009) Fatigue Lives of Friction Stir Spot Welds in Aluminum 6061-T6 Sheets. *Journal of Materials Processing Technology* 209(1): 367-375

Lin YC, Liu JJ, Chen JN (2013) Material flow tracking for various tool geometries during the friction stir spot welding process. *Journal of Materials Engineering and Performance* 22: 3674-83

Su P, Gerlich A, North TH, Bendzsak GJ (2006) Energy utilization and generation during friction stir spot welding. *Science and Technology of Welding and Joining*: 11(2): 163-9

Tozaki Y, Uematsu Y, Tokaji K (2007) Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminum alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47: 2230-2236

Fereiduni E, Movahedi M, Kokabi AH (2015) Aluminum/steel joints made by an alternative friction stir spot welding process. *Journal of Materials Processing Technology* 224:1-10

Mazzaferro CCP, Rosendo TS, Tier MAD, Mazzaferro JAE, Santos JFD, Strohaecker TR (2015) Microstructural and mechanical observations of galvanized TRIP steel after friction stir spot welding. *Materials and Manufacturing Processes* 30: 1090-103

Tutar M, Aydin H, Yuce C, Yavuz N, Bayram A (2014) The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array. *Materials and Design* 63: 789-797

Bozkurt Y, Bilici MK (2013) Application of Taguchi approach to optimize of FSSW parameters on joint properties of dissimilar AA2024-T3 and AA5754-H22 aluminum alloys. *Materials and Design* 51: 513-521

Chowdhury SH, Chen DL, Bhole SD, Cao X, Wanjara P (2013) Lap shear strength and fatigue behavior of friction stir spot welded dissimilar magnesium-to-aluminum joints with adhesive. *Materials Science & Engineering A* 562: 53-60

Chowdhury SH, Chen DL, Bhole SD, Cao X, Wanjara P (2012) Lap shear strength and fatigue life of friction stir spot welded AZ31 magnesium and 5754 aluminum alloys. *Materials Science & Engineering A* 556: 500-509

Rao HM, Yuan W, Badarinarayan H (2015) Effect of process parameters on mechanical properties of friction stir spot welded magnesium to aluminum alloys. *Materials and Design* 66: 235-245

Rodriguez RI, Jordon JB, Rao HM, Badarinarayan H, Wei Yuan, Haitham ElKadiri, Allison PG (2014) Microstructure, texture, and mechanical properties of friction stir spot welded rare-earth containing ZEK100 magnesium alloy sheets. *Materials Science & Engineering: A* 618: 637-644

Sekhar SR, Chittaranjandas V, Govardhan D, Karthikeyan R (2018) Effect Of Tool Rotational Speed On Friction Stir Spot Welded AA5052 – H38 Aluminum Alloy. *Materials Today: Proceedings* 5: 5536-5543

Zhang G, Xiao C, Ojo OO (2021) Dissimilar friction stir spot welding of AA2024-T3/AA7075-T6 aluminum alloys under different welding parameters and media. *Defence Technology* 17(2): 531-544

Shen Z, Yang X, Zhang Z, Cui L, Li T (2013) Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints. *Materials and Design* 44:476-486

Yin YH, Ikuta A, North TH (2010) Microstructural features and mechanical properties of AM60 and AZ31 friction stir spot welds. *Materials and Design* 31: 4764-4776

Tier MD, Rosendoa TS, dos Santosb JF, Huberb N, Mazzaferroc JA, Mazzaferroc CP, Strohaeckerd TR (2013) The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds. *Journal of Materials Processing Technology* 213: 997-1005

Ravindra S, ShekhawataVijay N, NadakuduraaKishore B, Nagumothub (2020) Microstructures and mechanical properties of friction stir spot welded Al 6061 alloy lap joint welded in air and water. *Materials Today: Proceedings* Received 19 November 2019, Revised 23 May, Accepted 4 June 2020, Available online 9 July 2020

Yin YH, Sun N, North TH, Hu SS (2010) Microstructures and mechanical properties in dissimilar AZ91/AZ31 spot welds. *Materials Characterization* 61: 1018-28

Garg A, Bhattacharya A (2017) On lap shear strength of friction stir spot welded AA6061 alloy. *Journal of Manufacturing Processes* 26: 203-215

Lee SH, Lee DM, Lee KS (2017) Process optimisation and microstructural evolution of friction stir spot-welded Al6061 joints. *Materials Science and Technology* 33(6): 719-730

Siddharth S, Senthilkumar T, Chandrasekar M (2017) Development of processing windows for friction stir spot welding of aluminium Al5052 /copper C27200 dissimilar materials. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 27(6): 1273-1284

Uğurlu M, Çakan A (2019) The Effect of Tool Rotation Speed on Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded (FSSW) AA7075-T6 Aluminium Alloy Sheets. *European Mechanical Science*, September 3(3): 97-101

Suresh S, Venkatesan V, Elango Natarajan, Rajesh S (2020) Influence of tool rotational speed on the properties of friction stir spotwelded AA7075-T6/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite joint. *Materials Today: Proceedings* 27: 62-67

Kumar PR, Nandhakumar S, Seenivasan S, Chandraprakash R (2021) Parametric optimizationof friction stir spot welded aluminium AA6063 alloy joints. *Materials Today: Proceedings* 37: 2897-2902

Davis JR (1993) *Aluminum and aluminum alloys* Materials Park, OH, ASM international

Roberts CS (1960) *Magnesium and its alloys*. Hoboken, NJ, Wiley

Nandan R, DebRoy T, Bhadeshia H (2008) Recent advances in friction-stir welding – process, weldment structure and properties. *Prog. Mater. Sci.* 53: 980-1023

Chowdhury S, Chen D, Bhole S, Cao X, Wanjara P (2012) Lap shear strength and fatigue life of friction stir spot welded AZ31 magnesium and 5754 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A* 556: 500-509

Thomas W, Nicholas ED, Staines D, Tubby PJ, Gittos MF (2005) FSW process variants and mechanical properties. *Welding in the World* 49: 4-11

Lee CY, Lee WB, Kim JW, Choi DH, Yeon YM, Jung SB (2008) Lap joint properties of FSWed dissimilar formed 5052 Al and 6061 Al alloys with different thickness. *Journal of Materials Science* 43: 3296-3304

Lin PC, Lin SH, Pan J, Pan T, Nicholson JM (2004) Microstructures and failure mechanisms of spot friction welds in lap shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets GARMAN M A. [C]// 2004 SAE World Congress. Detroit City

Kim DC, Park HJ, Hwang IS, Kang MJ (2009) Resistance spot welding of aluminium alloy sheet 5J32 using SCR type and inverter type power supplies. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 38(1): 55-60

Li H, Martin T, Shergold MA (2010) Comparison of the mechanical behaviour of self-piercing riveted and resistance spot welded aluminium sheets for the automotive industry. *Materials and Design* 31(3): 1457-67

Uematsu Y, Tokaji K (2009) Comparison of fatigue behaviour between resistance spot and friction stir spot welded aluminium alloy sheets. *Science and Technology of Welding and Joining* 14: 62-71

Zhang ZH, Yang XQ, Zhang JL, Zhou G, Xu XD, Zou BL (2011) Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Materials and Design* 32(8–9): 4461-70

Aebegast WJ (2006) Friction stir welding after a decade of development. *Welding Journal* 85: 28-35

Liu L, Wang H, Song G, Ye J (2007) Microstructure characteristics and mechanical properties of laser weld bonding of magnesium alloy to aluminum alloy. *Journal of Materials Science* 42: 565-72

Tozaki Y, Uematsu Y, Tokaji K (2007) Effect of processing parameters on static strength of dissimilar friction stir spot welds between different aluminium alloys. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 30(2): 143-148

Fujimoto M, Koga S, Abe N, Sato YS, Kokawa H (2008) Microstructural analysis of stir zone of Al alloy produced by friction stir spot welding. *Science and Technology of Welding and Joining* 13(7): 663-670

Yin YH, Ikuta A, North TH (2010) Microstructural features and mechanical properties of AM60 and AZ31 friction stir spot welds. *Materials and Design* 31(10): 4764-4776

Ibrahim HK, Khuder AWH, Muhammed MAS 2017 *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 6(4)

Henrichs JF, Smith CB, Orsini BF, DeGeorge RJ, Smale BJ, Ruehl PC (2004) Friction stir welding for the 21st century automotive industry. in: *Proceedings of the 5th International Symposium of Friction Stir Welding*, September. Metz, France, s. 14-16

Tozaki Y, Uematsu Y, Tokaji K (2006) Effect of welding condition on tensile strength of dissimilar FS spot welds between different Al alloys. in: *Proceedings of the 6th International Symposium of friction Stir Welding*, October. Saint-Sauveur, Nr Montreal, Canada p. 10-13

Ikegami I, Tsumura T, Ye F, Nakata K (2006) Effect of tool geometry on joint strength of Mg alloy by spot friction welding, *Preprints of the National Meeting of Japan Welding Society* No. 78, Spring, Paper #215

Addison AC, Robelou AJ (2004) Friction stir spot welding: principal parameters and their effects. in: *Proceedings of the 5th International Symposium of Friction Stir Welding*, September. Metz, France, p. 14-16

Wu Q, Li DP, Zhang YD (2016) Detecting milling deformation in 7075 aluminum alloy aeronautical monolithic components using the quasi-symmetric machining method. *Metals (Basel)* 6: 80

Komisarov V, Talianker M, Cina B (1996) The effect of retrogression and reaging on the resistance to stress corrosion of an 8090 type aluminium alloy *Materials Science and Engineering: A* 221: 113-121

Chen L, Myung N, Sumodjo PTA, Nobe K (1999) *Electrochim. Acta* 44: 2751-2764

Guillaumin V, Mankowski G (1999) Localised corrosion of 2024 T351 aluminum alloy in chloride media. *Corrosion Science* 41: 421-438

Dymek S, Dollar M (2003) TEM investigation of age-hardenable Al 2519 alloy subjected to stress corrosion cracking tests. *Materials Chemistry and Physics* 81: 286-288

Ahmad Z, Ul-Hamid A, Abdul-Aleem BJ (2001) The corrosion behavior of scandium alloyed Al 5052 in neutral sodium chloride solution. *Corrosion Science* 43: 1227-1243

Steve R (2009) Introduction to the magnesium casting industry. American Foundry Society, Schaumburg, IL

Magnesium and its alloys applications in automotive industry, Mustafa Kemal Kulekci  
Received: Springer-Verlag London Limited 2007

Smith CB, Hinrichs JF, Ruehl PC (2004) Friction stir and friction stir spot welding-lean, mean, and green. Sheet metal welding conference XI, Paper 2–5, Sterling heights, MI; May 11-14

Mehta KP, Badheka VJ (2016) A review on dissimilar friction stir welding of copper to aluminum: process, properties, and variants. *Materials and Manufacturing Processes* 31: 233-54

Lee C, Choi D, Yeon Y, Jung S (2009) Dissimilar friction stir spot welding of low carbon steel and Al–Mg alloy by formation of IMCs. *Science and Technology of Welding and Joining* 14: 216-20

Yamamoto N, Liao J, Watanabe S, Nakata K (2009) Effect of intermetallic compound layer on tensile strength of dissimilar friction-stir weld of a high strength Mg alloy and Al alloy. *Materials Transactions* 50: 2833-8

Firouzdor V, Kou S (2010) Formation of liquid and intermetallics in Al-to-Mg friction stir welding. *Metallurgical and Materials Transactions A* 41: 3238-51

Kou S (2009) Al-to-Mg friction stir welding: effect of positions of al and mg with respect to the. *Weld J* 88: 213–24

Cao XJ, Jahazi M (2010) Friction stir welding of dissimilar AA 2024-T3 to AZ31B-H24 alloys. *Materials Science Forum* 638–642: 3661-6

Sato YS, Shiota A, Kokawa H, Okamoto K, Yang Q, Kim C (2010) Effect of interfacial microstructure on lap shear strength of friction stir spot weld of aluminium alloy to magnesium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining* 15: 319-24

Choi DH, Ahn BW, Lee CY, Yeon YM, Song K, Jung SB (2011) Formation of intermetallic compounds in Al and Mg alloy interface during friction stir spot welding. *Intermetallics* 19: 125-30

Chang CI, Lee CJ, Huang JC (2004) Relationship between grain size and Zener-Holloman parameter during friction stir processing in AZ31 Mg alloys. *Scripta Materialia* 51: 509-514



Gerlich A, Yamamoto M, North T (2007) Strain rates and grain growth in Al 5754 and Al 6061 friction stir spot welds. *Metallurgical and Materials Transactions A* 38: 1291-302

Gerlich A, Su P, North TH (2005) Peak temperatures and microstructures in aluminium and magnesium alloy friction stir spot welds. *Science and Technology of Welding and Joining* 10: 647-52

Yin YH, Sun N, North TH, Hu SS (2010) Hook formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds. *Journal of Materials Processing Technology* 210: 2062-70

Sun N, Yin YH, Gerlich AP, North TH (2009) Tool design and stir zone grain size in AZ31 friction stir spot welds. *Science and Technology of Welding and Joining* 14: 747-52

Thomas WM, Nicholas ED, Needham JC, Murch MG, Temple-Smith P, Dawes CJ (1995) Friction butt welding. International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8, Dec. 1991; U.S. Patent Application No. 5460317, Oct. 1995

Özsoy M, Kaluç E (2002) Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının esasları. *Mühendis ve Makina Dergisi* 513

Meran C, Bilgin MB (2013) Fusion and friction stir welding of X6Cr17 stainless steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 61(2): 403-410

Threadgill PL, Leonard AJ, Shercliff HR, Withers PJ (2009) Friction stir welding of aluminium. *International Materials Reviews* 54(2): 49–93

Mishra RS, Ma ZY (2005) Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 50(1-2): 1-78

Bilgin MB, Meran C (2015) Optimization of strength of friction stir welded joints for AISI 430 ferritic stainless steels by genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 77(9-12): 2221-2233

Uzun A, Turker M (2016) Friction stir welding of foamable AlSi7 reinforced by B4C. *International Journal of Materials Research* 107(6): 558-565

Bozkurt Y, Kentlİ A, Uzun H, Salman S (2012) Experimental investigation and prediction of mechanical properties of friction stir welded aluminium metal matrix composite plates. *Materials Science* 18(4): 2-6

Chen Y C, Nakata K (2008) Effect of the surface state of steel on the microstructure and mechanical properties of dissimilar metal lap joints of aluminum and steel by friction stir welding. *Metallurgical and Materials Transactions A C*. 39A p. 1985-1992

Springer H, Kostka A, dos Santos JF, Raabe D (2011) Influence of intermetallic phases and Kirkendall-porosity on the mechanical properties of joints between steel and aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A* 528(13–14): 4630–4642

Watanabe T, Takayama H, Yanagisawa A (2006) Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding. *Journal of Materials Processing Technology* 178(1–3): 342–349

Chen YC, Nakata K (2010) Effect of surface states of steel on microstructure and mechanical properties of lap joints of magnesium alloy and steel by friction stir welding. *Science and Technology of Welding and Joining* 15(4): 293–298

Galvão I, Verdera D, Gesto D, Loureiro A, Rodrigues DM (2013) Influence of aluminium alloy type on dissimilar friction stir lap welding of aluminium to copper. *Journal of Materials Processing Technology* 213(11): 1920–1928

Kostka A, Coelho RS, dos Santos J, Pyzalla AR (2009) Microstructure of friction stir welding of aluminium alloy to magnesium alloy. *Scripta Materialia* 60(11): 953–956

Mazda Develops World's First Aluminum Joining Technology Using Friction Heat, Mazda News Release, February 27, 2003, (erişim tarihi: 05.08.2021), <<http://www.mazda.com/publicity/release/2003/200302/0227e.html>>

Friction Stir Spot Welding. *Assembly Magazine* (erişim tarihi: 06.10.2021)

Chowdhury SM, Chen DL, Bhole SD, Cao X (2010) Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and Weld pitch. *Materials Science and Engineering A* 527: 6064–6075

Yin YH, Sunb N, North TH, Hu SS (2010) Hook formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds. *Journal of Materials Processing Technology* 210: 2062–2070

Feng Z, Diamond S, Santella ML, Pan TY, Li NFY (2004) Progress report: friction stir welding and processing of advanced materials. Oak Ridge, TN, USA: Oak Ridge National Laboratory

Gerlich A, Su P, North TH, Bendzsak GJ (2005) Friction stir spot welding of aluminum and magnesium alloys. *Materials Science Forum* 29: 290–294

Wang DA, Chen CH (2009) Fatigue lives of friction stir spot welds in aluminum 6061-T6 sheets. *Journal of Materials Processing Technology* 209: 367–75

Kim D, Badarinarayan H, Ryu I, Kim JH, Kim C, Okamoto K (2010) Numerical simulation of friction stir spot welding process for aluminum alloys. *Metals and Materials International* 16: 323–32

Arici A, Mert S (2008) Friction stir spot welding of polypropylene. *The Journal of Reinforced Plastics and Composites* 27: 2001-4

Babu S, Sankar V, Ram GJ, Venkitakrishnan P, Reddy GM, Rao KP (2013) Microstructures and mechanical properties of friction stir spot welded aluminum alloy AA2014. *Journal of Materials Engineering and Performance* 22: 71-84

Cole GS, Sherman AM (1995) Lightweight materials for automotive applications. *Materials Characterization* p.3-9

Thornton P, Krause AR, Davies RG (1996) The aluminum spot weld. *Welding Journal* 75: 101-8

Gean A, Westgate SA, Kuczka JC, Ehrstrom JC (1999) Static and fatigue behavior of spot-welded 51 82-0 aluminum alloy sheet. *Welding Journal – New York* 78: 80-6

Liu L, Xiao L, Feng JC, Tian YH, Zhou SQ, Zhou Y (2010) *Metallurgical and Materials Transactions A* 41(10): 2642-2650

Liu L, Xiao L, Chen DL, Feng JC, Kim S, Zhou Y (2013) Microstructure and fatigue properties of Mg-to-steel dissimilar resistance spot welds. *Materials and Design* 45: 336-342

Sun DQ, Lang B, Sun DX, Li JB (2007) Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded magnesium alloy joint. *Materials Science and Engineering A* 460-461: 494-498

Xiao L, Liu L, Chen DL, Esmaili S, Zhou Y (2011) Resistance spot weld fatigue behavior and dislocation substructures in two different heats of AZ31 magnesium alloy *Materials Science and Engineering A* 529: 81-87

Bodur D, Oğuzcan C, Ertürk S, Bozkurt Y (2016) Direnç ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilen alüminyum plakaların karşılaştırılması 4 th international conference on welding technologies and exhibition. Gaziantep University Gaziantep TURKEY 11-13 May 2016

Gerlich A, Su P, North TH (2005) Tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloys. *Journal of Materials Science* 40: 6473-81

Lathabai S, Painter M, Cantin G, Tyagi V (2006) Friction spot joining of an extruded Al–Mg–Si alloy. *Scripta Materialia* 55: 899-902

Zhang Z, Yang X, Zhang J, Zhou G, Xu X, Zou B (2011) Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Materials and Design* 32(8-9): 4461–4470

- Malafia AMS, Milan MT, Oliveira MF, Spinelli D (2010) Fatigue behavior of friction stir spot welding and riveted joints in an Al alloy. *Procedia Engineering* 2: 1815-1821
- Yang Q, Mironov S, Sato YS, Okamoto K (2010) Material flow during friction stir spot welding. *Materials Science and Engineering A* 527: 4389-98
- Tran VX, Pan J, Pan T (2009) Effects of processing time on strengths and failure modes of dissimilar spot friction welds between aluminum 5754-O and 7075-T6 sheets. *Journal of Materials Processing Technology* 209: 3724-39
- Pathak N, Bandyopadhyay K, Sarangi M, Panda SK (2013) Microstructure and mechanical performance of friction stir spot-welded aluminum-5754 sheets. *Journal of Materials Engineering and Performance* 22(1): 131-44
- Arul SG, Miller SF, Kruger GH, Pan T-Y, Mallick PK, Shih AJ (2008) Experimental study of joint performance in spot friction welding of 6111-T4 aluminum alloy. *Science and Technology of Welding and Joining* 13: 629-37
- Gerlich A, Su P, Yamamoto M, North TH (2007) Effect of welding parameters on the strain rate and microstructure of friction stir spot welded 2024 aluminum alloy. *Journal of Materials Science* 42: 5589-601
- Merzoug M, Mazari M, Berrahal L, Imad A (2010) Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys. *Materials and Design* 31: 3023-8
- Yuan W, Mishra RS, Webb S, Chen YL, Carlson B, Herling DR, et al. (2011) Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds. *Journal of Materials Processing Technology* 211(6): 972-7
- Shen J, Li Y, Zhang T, Peng D, Wang D, Xu N (2015) Preheating friction stir spot welding of Mg/Al alloys in various lap configurations, *Science and Technology of Welding and Joining* 20(1): 1-10
- Chowdhury SH, Chen DL, Bhole SD, Cao X, Wanjara P (2013) Lap shear strength and fatigue behavior of friction stir spot welded dissimilar magnesium-to-aluminum joints with adhesive *Materials Science & Engineering A* 562: 53-60
- Lin P, Pan J, Pan T (2008) Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 2: Welds made by a flat tool. *International Journal of Fatigue* 30: 90-105
- Yang Q, Li X, Chen K, Shi YJ (2011) Effect of tool geometry and process condition on static strength of a magnesium friction stir lap linear weld. *Materials Science and Engineering A* 528: 2463-78
- Badarinarayan H, Yang Q, Zhu S (2009) Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49: 142-148

Rao HM, Jordon JB, Barkey ME, Guo YB, Su X, Badarinarayan H (2013) Influence of structural integrity on fatigue behavior of friction stir spot welded AZ31 Mg alloy. *Materials Science & Engineering A* 564: 369-380

Mitlin D, Radmilovic V, Pan T, Chen J, Feng Z, Santella ML (2006) Structure-properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum. *Materials Science and Engineering A* 441: 79-96

Briskham P, Blundell N, Han L, Hewitt R, Young K (2006) Comparison of self-pierce riveting, resistance spot welding and spot friction joining for aluminium automotive sheet. In: SAE Special Publication SP-2034, SAE Technical Warrendale, USA p.-01-0774

Uematsu Y, Tokaji K, Tozaki Y, Kurita T, Murata S (2008) Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behavior of friction stir spot welded joints in Al-Mg-Si alloy. *International Journal of Fracture* 30: 1956-66

Iwashita T (2003) Method and apparatus for joining. U.S. patent no. 6601751 B2

Badarinarayan, H, Yang Q, Zhu S (2009) Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49(2): 142-148

Badarinarayan H (2009 ) Fundamentals of friction stir spot welding. PhD thesis, Missouri University of Science And Technology, United State

Badarinarayan H, Shi Y, Li X, Okamoto K (2009) Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49: 814-23

Sato YS, Takauchi H, Park SHC, Kokawa H (2005) Characteristics of the kissing-bond in friction stir welded Al alloy 1050. *Materials Science and Engineering: A* 405: 333-8

Hirano S, Okamoto K, Doi M, Okamura H, Inagaki M, Aono Y (2003) Microstructure of dissimilar joint interface of magnesium alloy and aluminum alloy by friction stir welding. *Quarterly Journal of The Japan Welding Society* 21(4): 539-45

ASM Handbook Committee (1990) ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International. Ohio.

Anık S (1991) Kaynak tekniği el kitabı. Yöntemler ve donanımlar. Gedik Eğitim Vakfı Kaynak. İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı Kaynak

Tülbentçi K (1990) Alüminyum ve alarınlarının kaynağı İstanbul: Böhler Yayınları

Cirik E (2007) Anodik oksidasyon işleminin 7075-T6 alüminyum alaşımının yorulma davranışına olan etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 3-18

Bekir Ç (2014) Sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin kalıntı gerilmelere ve birleştirmenin mekanik özelliklerine etkisi. Doktora Tezi Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü 1-45: 113-178

Sarsılmaz F (2008) Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması. Doktora Tezi Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 1-108

Kafalı H (2011) Sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmiş Al1 6013-T6 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Anabilim Dalı 1-85

Oğuz B (1990) Demir dışı metallerin kaynağı. OERLIKON Yayını

Doğan S (2006) AA 5754-H22 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri. Yüksek Lisans Tezi Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 1-73

Tımaç G (2006) Uçak endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının tıg kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 9-34

Töre C (2012) Mekanik tasarımda alüminyum ve özellikleri. Ankara: TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları

Öksüz C (1996) Yüksek mukavemetli (2024, 6061, 7075) alüminyum alaşımlarının jominy yöntemi ile suverme duyarlılığı. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 1-33

Mathers G (2002) The welding of aluminium and its alloys. Woodhead Publishing Limited. Blvd, NW Boca Raton: Cambridge: Woodhead Publishing Ltd

Mazzolani FM (1995) Aluminium alloy structures. Cambridge: Great Britain University Pres

Yılmaz B (2002) Alüminyum alaşımlarında faz yapılarının mekanik özelliklere etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta 1-35

Binal A (2006) AA2024-T3 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü, Eskişehir 1-81

Pakdil M (2005) Determination of the mechanical properties and fatigue crack propagation of the laser welded new generation aluminum alloys. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir 1-136

Kırtay S (1997) Etial-24 ve etial-44 alüminyum alaşımlarına yarı-katı halde şekil verilmesi, mikroyapı ile mekanik özelliklerin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 1-42

Oysu M (1996) 7075 alüminyum alaşımlarına uygulanan mığ kaynağının mekanik özelliklere etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli 1-42

Çoşkuner AO (2001) 5000 serisi alüminyum magnezyum alaşımlarının döküm ve termomekaniksel prosesleri. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul p. 1-51

Cayless RBC (1992) Alloy and temper designation systems for aluminum and aluminum alloys. In ASM handbook (volume 2): Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose material (C. 2). USA: ASM International

Kaya I (2005) Al 7075 alaşımlarının şekillenme ve ısı işleme özelliklerinin iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 1-35

Buldum BB (2013) AZ91 Magnezyum alaşımlarının işlenebilirliğinin incelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 1-19

Mert F (2013) Basınçlı dökümde AM50 magnezyum alaşımına ce ilavesinin mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 1-53

Atalay O (2006) Magnezyum ve alaşımlarının konstrüksiyon malzemesi olarak otomotivde kullanım. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 1-37

Aybaraz E (2010) Hafif metal alaşımlarıyla otomotiv gövde parçalarının şekillendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa 1-84

Committe AIH (1999) ASM specialty handbook, magnesium and magnesium alloys. (A. I. H. Committee, Ed.). USA

Friedrich H, Schumann S (2001) Research for a “new age of magnesium” in the automotive industry. Journal of Materials Processing Technology 117(3): 276-281

Kumar S, Wu C (2017) Review: Mg and its alloy - scope, future perspectives and recent advancements in welding and processing. *Journal of Harbin Institute of Technology* 24(6): 1-37

Luo A, Pekguleryuz MO (1999) Cast magnesium alloys for elevated temperature applications. *Journal of Materials Science* 29(20): 5259-5271

ASM Handbook Committee. (1998) ASM handbook volume 15, casting. United States of America: ASM International

Koç E (2008) Alaşım elementlerinin magnezyum döküm özelliklerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük 10-36

Luo AA (2004) Recent magnesium alloy development for elevated temperature applications. *International Materials Reviews* 49(1): 13-30

Kuşdemir H (2008) AZ91 magnezyum alaşımının korozyon davranışları üzerine ilave alaşım elementlerinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük 24-49

Çiçek B (2011) Mg<sub>2</sub>Si Partikül takviyeli mg alaşımlarının aşınma ve korozyon özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük 33-74

Bakke P, Westengen H (2003) Die casting fo high performance-focus on alloy development. *Advanced Engineering Materials* 5(12): 879-885

Aizawa T, Song R (2006) Mechanically induced reaction for solid-state synthesis of Mg<sub>2</sub>Si and Mg<sub>2</sub>Sn. *Intermetallics* 14(4): 382-391

Zhang Z (2000) Development of magnesium-based alloys for elevated temperature applications. Thesis (Ph.D.), Université Laval, Québec

Ünal M (2008) Magnezyum alaşımlarının döküm özelliklerinin incelenmesi. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 41-121

Easton M, Beer A, Barnett M, Davies C, Dunlop G, Durandet Y, Beggs P (2008) Magnesium alloy applications in automotive structures. *Jom* 60(11): 57-62

Zhao P, Wang Q, Zhai C, Zhu Y (2007) Effects of strontium and titanium on the microstructure, tensile properties and creep behavior of AM50 alloys. *Materials Science and Engineering A* 444(1-2): 318-326



Powell BR, Rezhets V, Balogh MP, Waldo RA (2002) Microstructure and creep behavior in AE42 magnesium die-casting alloy. *Jom* 54(8): 34-38

Yu F, Guo HW, C. Q. Z. (2007) Effect of strontium on mechanical properties and corrosion resistance of AZ91. *Materials Science Forum* 546-549, 567-570

ASM Handbook Committee (2009) ASTM B93/B93M-09, Standard Specification for Magnesium Alloys in Ingot Form for Sand Castings, Permanent Mold Castings and Die Castings, steel. ASM International USA

ASM Handbook Committee (2004) ASTM B94-04, Standard Specification for Magnesium-Alloy Die Castings. ASM International USA

Feng JC, Wang YR, Zhang ZD (2005) Status and expectation of research on welding of magnesium alloy. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* 15(2):165-178

Cao X, Jahazi M, Immarigeon JP, Wallace W (2006) A review of laser welding techniques for magnesium alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 171(2): 188-204

Shang J, Wang KH, Zhou Q, Zhang DK, Huang J, Ge JQ (2012) Effect of joining temperature on microstructure and properties of diffusion bonded Mg/Al joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 22(8): 1961-1966

Wang J, Feng JC, Wang YX (2008) Microstructure of Al-Mg dissimilar weld made by cold metal transfer MIG welding. *Materials Science and Technology* 24(7): 827-831

Larsson JK (2003) Overview of joining technologies in the automotive industry. *Welding Res Abroad* 49(6): 29-45

Tübitak (2003) Rapor, makina ve malzeme paneli teknoloji öngörüsü. Ankara

Sweeder T (2000) Demand for Lightweight Technology. Magnesium Expo, Michigan-USA

Bilgin M, Karabulut Ş, Özdemir A (2017) Alüminyum Magnezyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Kaynak Edilebilirliğinin Değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* 5(2):191-209

Liu LM, Wang HY, Zhang ZD (2007) The analysis of laser weld bonding of Al alloy to Mg alloy. *Scripta Materialia* 56(6):473-476

Borrisutthekul R, Miyashita Y, Mutoh Y (2005) Dissimilar material laser welding between magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy A5052-O. *Science and Technology of Advanced Materials* 6: 199-204

Ben-Artzy A, Munitz A, Kohn G, Bronfin B, Shtechman A, (2002) Joining of light hybrid constructions made of magnesium and aluminum alloys. TMS Annual Meeting 295-302

Committee AH (1998) ASM Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagrams. (H. Baker, Ed.) (C. 3). ASM Internationa

Wang J, Li Y, Liu P, Geng H (2008). Microstructure and XRD analysis in the interface zone of Mg/Al diffusion bonding. Journal of Materials Processing Technology 205(1–3):146–150

Kafalı H, Ay N (2014) Havacılıkta kullanılan 6013 - T6 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 18(1):38-47

Liao J, Yamamoto N, Liu H, Nakata K (2010). Microstructure at friction stir lap joint interface of pure titanium and steel. Materials Letters 64(21): 2317-2320

Kaluç E, Taban E (2007). Otomotiv endüstrisinde direnç nokta kaynağına alternatif bir yöntem: sürtünen elemanla nokta kaynağı (FSSW). Kaynak Teknolojisi VI. Ulusal Kongresi ve Sergisi, Ankara 449

Zhang YN, Cao X, Larose S, Wanjara P (2012) Review of tools for friction stir welding and processing. Researchgate

Joining Innovation with Expertise (TWI Ltd)

Atak A (2019) Sürtünme karıştırma nokta kaynağında kullanılan pimin omuz profili tasarımı ve birleştirilen magnezyum levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Bilgin M, (2019) Alüminyum/magnezyum (al/mg) malzeme çiftinin sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynak edilebilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Tabasi M, Farahani M, Givi MKB, Farzami M and Moharami A (2016) Dissimilar friction stir welding of 7075 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy using SiC nanoparticles. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 86(1-4): 705-715

Kulekci MK (2008) Magnesium and its alloys applications in automotive industry. The International Journal of Advanced Manufacturing 39: 851-865

Baek SW, Choi DH, Lee CY, Ahn BW, Yeon YM, Song K (2010) Microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded galvanized steel. *Materials Transactions* 51:1044-50

Tuncel O, Aydin H, Tutar M, Bayram A (2016) Mechanical performance of friction stir spot welded AA6082-T6 sheets. *International Journal of Mechanical And Production Engineering* 4(1)

Jordon JB, Gibson JB, Horstemeyer MF, Kaidi HEI, Bair JC, Luo AA (2011) Effect of twinning, slip, and inclusions on the fatigue anisotropy of extrusion-textured AZ61 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A* 528(22-23): 6860-6871

## ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Mersin'de tamamladı. 2010 yılında, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2014 yılında, İngiltere'de, The University of Manchester Üniversitesinde, Advanced Manufacturing Technology & Systems Management Dalında yüksek lisansını tamamladı. 2015 yılı Nisan ayında Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı ve hala Bingöl Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaya devam etmektedir.