



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# AA7075-T6 ve AZ31B Alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı üzerinde ön ısıtma ve kuru buz soğutmasının etkisi

## *Effect of preheating and dry ice cooling on dissimilar friction stir welding of AA7075-T6 and AZ31B*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Musa BİLGİN<sup>1</sup>, Şener KARABULUT<sup>2</sup>, Ahmet ÖZDEMİR<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-8482-8291

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-6384-8162

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0001-9919-8149

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Bilgin M., Karabulut Ş. ve Özdemir A., “AA7075-T6 ve AZ31B Alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı üzerinde ön ısıtma ve kuru buz soğutmasının etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 22(3): 655-663, (2019).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.426649

# AA7075-T6 ve AZ31B Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Üzerinde Ön Isıtma ve Kuru Buz Soğutmasının Etkisi

*Araştırma Makalesi /Research Article*

Musa BİLGİN<sup>1</sup>, Şener KARABULUT<sup>1\*</sup>, Ahmet ÖZDEMİR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hacettepe ASO 1.OSB Meslek Yüksekokulu, 06935 Sincan, Ankara Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği, 06500 Yenimahalle, Ankara Türkiye

(Geliş/Received: 09.04.2018; Kabul/Accepted: 12.05.2018)

## ÖZ

Bu çalışmada, AA7075-T6 alüminyum ve AZ31B magnezyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynak (SKK) yöntemi ile kaynak edilebilme özelliği araştırılmıştır. Farklı kimyasal ve mekanik özelliklere sahip alüminyum ve magnezyum alaşımlarını sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirebilmek için sabit devir, sabit tabla ilerleme hızı, farklı takım kaydırma değerlerinde, numunelere ön ısıtma ve kuru buz ile soğutma işlemleri uygulanarak dört farklı kaynak işlemi yapılmıştır. Birleştirilmiş numunelerin kaynak kalitesi, tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Alüminyum alaşımına uygulanan ön ısıtmanın ve kaynak işlemi sırasında uygulanan kuru buz ile soğutmanın mekanik ve mikro yapısal özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Test sonuçları, önceden ısıtılmış ve kaynak işlemi sırasında kuru buz ile soğutulmuş kaynaklı numunelerinin çekme dayanımının daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş numunelerin kaynak yüzeyinde gözenek oluşumu görülürken, kuru buz ile soğutma yapılarak birleştirilen numunenin kaynak hattında boşluk oluşumu gözlenmiştir. Normal kaynaklı numunelere kıyasla, ön ısıtma ve kuru buz soğutma işlemine tabi tutularak birleştirilmiş numunelerin karıştırma bölgesinde homojen bir karışım elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AA7075, AZ31B, sürtünme karıştırma kaynağı, ön ısıtma, kuru buz soğutma, mekanik özellikler, mikro yapı.

## Effect of Preheating and Dry Ice Cooling on Dissimilar Friction Stir Welding of AA7075-T6 and AZ31B

### ABSTRACT

In this study, dissimilar friction stir welding behavior of AA7075-T6 aluminum and AZ31B magnesium alloys were investigated. Aluminum and magnesium alloys were joined by friction stir welding under four welding conditions and in two environments, namely pre-heated aluminum and dry ice for cooling, with tool rotation of 1120 rpm, table speed of 20 mm/min and two different tool offset values. The welding quality of the joined specimens were evaluated by employing destructive and non-destructive testing methods. The influence of the pre-heating applied to the aluminum alloy and employing ice cooling during the welding process on the mechanical and microstructural properties were examined. The test results showed that the higher tensile strength values were obtained from welded specimens of the pre-heated and cooled by dry ice during the welding process. Porosities were seen on the welded surface of the pre-heated specimen while the cavities were observed on the joint line of the cooled specimen using dry ice during the process. A homogenous material mixing was achieved in the stir zone of the welded specimens subjected to pre-heating and dry ice cooling process compared with the normal welded specimens.

**Keywords:** AA7075, AZ31B, friction stir welding, pre-heating, dry ice cooling, mechanical properties, microstructure

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum (Al) ve magnezyum (Mg) alaşımları düşük yoğunluğu, kolay şekillendirebilme yeteneği, yüksek ısı iletkenliği, geri dönüşüm potansiyeli ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle mühendislik malzemeleri arasında önemli bir kullanım alanına sahiptir. Hibrit bir yapıda alüminyum ve magnezyumun sağlam bir şekilde birleştirilmesi, istenen ağırlık tasarrufu için olası bir çözüm sunacaktır ve endüstriyel uygulamalarda

kullanımlarını artıracaktır [1,2]. Bununla birlikte, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip benzer olmayan en hafif iki yapısal malzemenin kaynaklı birleştirilmesi çeşitli zorluklar doğurmaktadır. Bu amaçla, lazer ışın kaynağı, elektron ışın kaynağı ve ark kaynağı gibi geleneksel kaynak teknikleri kullanılarak alüminyum ve magnezyum alaşımlarının ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilebilmesi üzerine çok sayıda araştırma çalışması yapılmıştır. Araştırmacılar, kaynak yapılmış iş parçalarının kaynak bölgesinde kaynak mukavemetini azaltan intermetalik oluşumların meydana geldiğini bildirmişlerdir [3-6]. Al alaşımlarının ve Mg

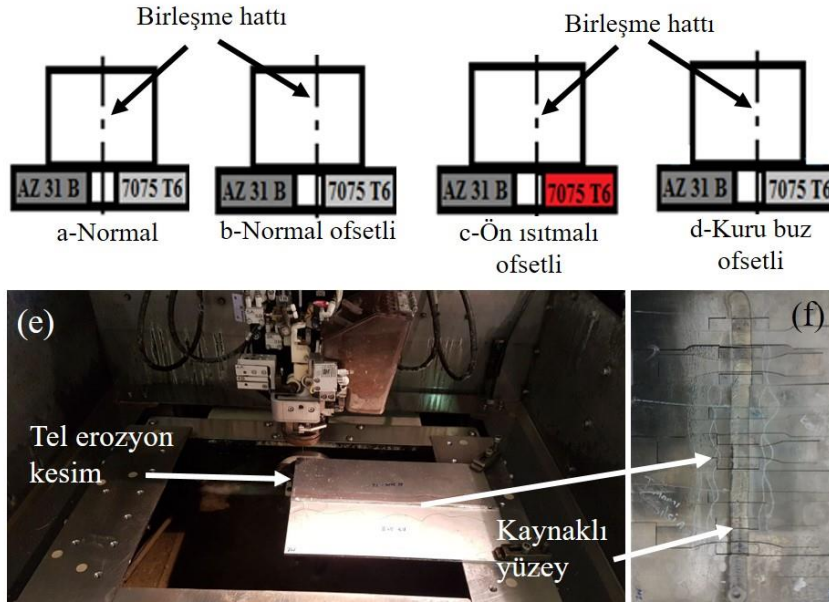
\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta: senerkarabulut@hacettepe.edu.tr

alaşımalarının klasik ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinin oldukça zor ve özel işlem gerektirmesinden dolayı katı hal kaynağı olan sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilebilmesi üzerine çok sayıda araştırma çalışmaları yapılmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi, kaynak yapılması zor olan ve daha düşük erime derecesine sahip olan farklı özelliklerdeki alüminyum alaşımlarını kaynatılabilmek için Cambridge [7] kaynak enstitüsü (TWI) tarafından geliştirilmiş olup, son 20 yılda ortaya çıkan en önemli kaynak yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir [8]. Al ve Mg alaşımlarının bu yöntemle birleştirilmesindeki en büyük problemlerden biri, kırılma ve sert yapıya sahip olan  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  intermetalik bileşiklerdir. Bu intermetalik bileşikler, kaynaklı bölgenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, kaynak dikiş bölgesinde malzemenin dinamik olarak yeniden kristalleşmesine, kaynak bölgesinde gözenek oluşumuna ve kaynaklık alanında sertlik değerlerinin oluşmasına neden olmaktadır [9-13]. Dorbane ve ark. [1] Al6061 alüminyum ve AZ31B magnezyum alaşımlarının SKK yöntemi ile birleştirerek, kaynak edilebilirlik davranışlarını incelemişler ve birleştirilen numunelerin mekanik, mikro yapı ve kırılma özelliklerini analiz etmişlerdir. Yazarlar, kaynak işlemi sırasında ilerleme tarafına alüminyum yerleştirildiğinde daha iyi kalitede kaynak değerleri elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Ayrıca temel malzemelerin %18 ila %55'i arasında çekme mukavemeti değerleri elde edilirken, numunelerin kaynak bağlantısı boyunca koptuğu görülmüştür. Kaynaklı bölge üzerinde mikro sertlik değerleri 55 HV ile 135 HV arasında değişmekte olup, magnezyum tarafında daha düşük değerler ölçülmüştür. Tabasi ve ark. [14], kaynak bölgesinde nano partiküllü SiC tozları kullanarak AA7075 ve AZ31 alaşımlarını SKK ile birleştirilmesini araştırmışlar ve SiC tozlarının kaynaklı numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. SiC tozların, kaynak mikro yapısını etkilediği, takım dönüş hızının artması ve ilerleme hızının azaltılması ile alüminyum ve magnezyum alaşımlarının kaynak kalitesinin arttığını bildirmişlerdir. Ji ve ark. [15] AA6061 ve AZ31 alaşımlarını ultrasonik titreşim kullanarak SKK yöntemi ile birleştirmişlerdir. Yazarlar, ultrasonik uygulamanın kaynak sırasında malzeme akışını iyileştirdiğini ve kaynaklı numunenin çekme dayanımının 1.5 kat daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir. Sheikh-Ahmad ve ark. [16], alüminyum 2024 ve AZ31 alaşımlarının SKK yöntemi ile birleştirilmesi sonrası meydana gelen kalıntı gerilmeyi araştırmışlar, sonuçları elemanlar sonucu elde edilen sayısal sonuçlar ile deneysel verileri kıyaslamışlardır. Yazarlar takım ofsetinin Al 2024 tarafına verilmesi ile daha düşük artık gerilme ve daha yüksek kaynak kalitesinin elde edildiğini bulmuşlardır. Ayrıca deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir korelasyon olduğu rapor edilmiştir. Garcia ve ark. [17], farklı kaynak parametrelerini kullanarak farklı AA 7075 ve AZ31B alaşımlarının SKK yöntemi ile birleştirilebilirlik davranışını incelemişlerdir. 200 dev/dak takım dönüş

hızında, 300 mm/dak kaynak hızında ve  $1^\circ$  takım açısında iyi kaynak sonuçları elde edildiği bildirilmiştir. Kaynak edilmiş numunelerde 61.35 MPa çekme dayanımı elde edilirken, 122 HV sertlik değeri ölçülmüştür. Ayrıca kaynak edilmiş numunelerde tünel ve boşluk oluşumu ile birlikte  $Al_3Mg_2$  ve  $Al_{12}Mg_{17}$  intermetalik oluşumları görülmüştür. Dumpala ve ark. [18] farklı takım dönüş hızları ve tabla ilerlemeleri kullanarak AA6063 alüminyum ve AZ91 magnezyum alaışımının SKK ile kaynak edilebilirliğini araştırmışlardır. Yazarlar en iyi kaynak sonuçlarını 1100 dev/dak takım dönüş hızında ve 25 mm/dak tabla ilerleme hızında elde ettiklerini bildirmişlerdir. Bununla birlikte bu konuda daha fazla araştırma çalışması yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Çevik [19, 20], AA7075-T6 alüminyum alaışımının SKK yöntemi ile birleştirilebilmesini araştırmış, kaynak parametrelerinin artık gerilim ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi üzerine yoğun bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucunda, karıştırıcı ucun malzeme özellikleri, devir sayısı ve tabla ilerleme hızının, kaynak bölgesinin sertlik dağılımı ve sıcaklık değişimlerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kaynak parametrelerinin kaynaklı malzemenin mekanik özelliklerini önemli derecede etkilediği belirlenmiştir. Düşük devir sayısı ve yüksek tabla ilerleme hızı ile elde edilen kaynaklı numunede yüksek çekme mukavemeti elde edilmiştir. Buffa ve ark. [21] AA7075 alaşımlarının-SKK yöntemi ile bindirme kaynak işlemine tabi tutmuşlar ve kaynak sırasında plakalar arasında SiC tozları eklemişlerdir. Tek paso kaynak işleminde matris yapı ve SiC takviye malzemesi arasında zayıf bir karışım elde edildiğini, buna karşın üç paso geçiş ile daha iyi veriler elde edildiğini gözlemlenmişlerdir. Mofid ve ark.[22] AA5083 Al ve AZ31C-O Mg alaşımlarının SKK işleminde hava ve sıvı nitrojen kullanımının intermetalik bileşiklerin oluşumu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde 400 dev/dak takım devri, 50 mm/dak tabla ilerleme hızı kullanılmıştır. Hava kullanılarak kaynatılan numunenin kaynak bölgesindeki kırılma intermetalik bileşiklerin oluşması ile kaynakta çatlama meydana geldiği, sıvı nitrojen kullanılarak yapılan kaynak işleminde ise düşük ısı girdisi nedeni ile intermetalik bileşiklerinin oluşumunun önemli ölçüde baskılandığı görülmüştür. Mofid ve ark.[23] bir başka çalışmalarında, AA5083 Al ve AZ31C-O Mg alaşımlarının SKK işleminde su ile soğutma işlemi uygulamışlar ve kaynak işlemi su içerisinde gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde 300 dev/dak sabit takım dönüş hızı, 50 mm/dak tabla ilerleme hızı kullanılmıştır. Yazarlar, su içerisinde yapılan SKK işleminde daha düşük ısı girdisine bağlı olarak intermetalik bileşiklerin oluşumunun sınırlı olduğunu bildirmişlerdir. İpekoğlu ve Çam [24] farklı özelliklere sahip AA7075 ve AA6061 alüminyum alaşımlarının SKK işleminin özellikleri üzerinde kaynak öncesi temperleme ve kaynak sonrası ısıtma işlem uygulamasının etkilerini araştırmışlardır. O ısıtma işlem uygulaması yapılmış numunelerin kaynak bölgesinde sertlikte artış meydana gelirken, T6 ısıtma işlem uygulanmış numunelerin

kaynak bölgesinde sertlikte azalma meydana geldiği görülmüştür. İpekoğlu ve ark. [25] bir başka

## 2. MALZEME VE METOD (MATERIAL AND METHOD)



**Şekil 1.** AA7075 ve AZ31B alaşımların kaynak yöntemleri ve mekanik test numunelerinin hazırlanması (Welding methods of AA7075 and AZ31B alloys and preparing the mechanical test specimens)

çalışmalarında kaynak işlemi sonrası T6 ısıtma işlemi uygulamasının birleştirme bölgesinde önemli oranda dayanım artışı sağladığını bildirmişlerdir.

Literatür taramasından, alüminyum ve magnezyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilmesi üzerine çok sayıda araştırma çalışması yapıldığı görülmüştür. Farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip bu alaşımların birleştirilebilmesi için kaynak parametrelerinin yanı sıra farklı yöntem ve teknikler de kullanılarak kaynak kalitesini ve mekanik özelliklerin iyileştirebilmesi araştırılmıştır. Bununla birlikte, araştırmacılar Al ve Mg alaşımlarının SKK yöntemi ile birleştirilmesi konusunda daha fazla araştırma çalışması yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmada, araştırmacılar tarafından daha önce kullanılan yöntemlerden farklı olarak, dört farklı yöntemle kaynak işlemine tabi tutulmuştur. Bu yöntemlerden ilk ikisinde numuneler freze tezgâhında belirlenmiş olan devir sayısı, ilerleme hızı ve takım kaydırma oranlarına bağlı olarak kaynatılmıştır. Üçüncü yöntemde alüminyum plakalar fırında belirli bir süre ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş ve devamında kaynak edilmiştir. Dördüncü olarak plakalara herhangi bir ön işleme uygulamadan kaynak sırasında kaynak edilen bölgeye kuru buz dökülerek Al ve Mg plakalar kaynak işlemine tabi tutulmuşlardır. Deneyler sonucunda kaynak parametrelerinin, ön ısıtma ve kuru buz ile soğutma işleminin kaynak kalitesi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Al ve Mg alaşımlarını birleştirme işlemleri Taksan FU V/2 dik başlı freze tezgâhı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan karıştırıcı takım 3343 yüksek hız çeliğinden imal edilmiş, daha sonra ısıtma işlemi uygulanarak sertlik değeri 62 HRC'ye çıkarılmıştır. Takım karıştırıcı pimi dış bükey üçgen profil olacak şekilde tasarlanmış, üçgenin köşelerinden teğet geçen dairenin çapı 6.2 mm, dış bükey radüsler 5.4 mm, pim uzunluğu 2.8 mm ve omuz çapı ise 18.6 mm olarak üretilmiştir. Al ve Mg plakaların birleştirilmesi için öncelikle literatürde tavsiye edilen değerler kullanılarak çok sayıda ön deney yapılmıştır. Ön deneylerden elde edilen numuneler üzerinde yapılan incelemeler, penetrasyon ve radyografi incelemeleri sonucunda deneylerde kullanılacak kaynak parametreleri belirlenmiştir. Ön deneylerden elde edilen tecrübeler doğrultusunda freze tezgâhında 1120 dev/dak sabit devir, 20 mm/dak, sabit ilerleme hızı ve 0° takım açısı değerleri kullanılarak kaynak işlemleri yapılmıştır. Al ve Mg plakaların kaynatılmasında kullanılan yöntemler Şekil 1 (a-d) ve ASTM E8/E8M-09 standardına göre çekme numuneleri tel erozyon tezgâhında kesilerek hazırlanmıştır Şekil 1 (e, f).

Malzemeler dört farklı yöntemle birleştirilmiştir. Birinci kaynak yönteminde karıştırıcı takım birleşme hattı merkezinde hareket ettirilmiştir. İkinci yöntemde karıştırıcı takım AZ31B tarafına 1 mm kaydırılarak kaynak işlemi yapılmıştır. Üçüncü yöntemde AA7075-T6 plaka, daha önceden ısıtılmış 210 °C fırın içerisinde 15 dakika ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş ve karıştırıcı takım AZ31B tarafına 1 mm kaydırılarak kaynak yapılmıştır. Dördüncü yöntemde ise, karıştırıcı takım AZ31B tarafına 1 mm kaydırılmış ve kaynak

işlemi sırasında Al ve Mg plakalar üzerine kuru buz dökülerek birleştirme işlemi yapılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi için 100 mm × 100 mm × 5 mm ebatlarında AA7075-T6 ve AZ31B magnezyum levhaları hazırlanmıştır. Kaynak edilecek numuneler doğrudan freze tezgâhının tablasına bağlanmamıştır. Ön deneylerde kaynak işlemi sırasında ortaya çıkan ısının freze tezgâhı tablasına transfer olduğunu ve bu duruma bağlı olarak numunelerin hızlı bir şekilde soğuduğu görülmüştür. Bu nedenle kaynak sırasında ortaya çıkan ısıyı malzemenin her tarafına dengeli bir biçimde dağıtması için ısı iletim katsayısı çeliğe göre daha yüksek olan alüminyum 7075 malzeme kullanılarak özel bir bağlama kalıbı üretilmiştir. Kaynak işlemine başlamadan önce, AZ31B magnezyum plaka ilerleme tarafına, AA7075-T6 alüminyum plaka ise geri çekme tarafına konumlandırılarak her iki plaka arasında boşluk kalmayacak şekilde bağlama kalıbı üzerinde sabitlenmiştir. Kaynak işlemi için özel olarak tasarlanmış olan bağlama kalıbı, dinamometrenin konumu, deneyde

sonra istenen baskı kuvveti elde edilene kadar -z yönünde hareket ettirilmiştir. Sürtünme ile oluşan ısı girdisinin istenilen seviyeye ulaşması için karıştırıcı takım bir dakika boyunca bu konumda bekletilmiştir. Kaynak bölgesinde istenen sıcaklık elde edildikten sonra, Şekil 1 (a)'da gösterilen kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sırasında temassız sıcaklık ölçüm işlemi ± (% 0.5 okuma + 2 °C) hassasiyetinde Raytek MI3 2M dijital pirometre kullanılarak yapılmıştır. MI3 kızılötesi sıcaklık sensörü hareketli aparat üzerine monte edilmiş ve bilgisayara USB dijital iletişim kablosu ile bağlanmıştır. Takım-iş parçası ara yüzünün sıcaklığı, kaynak işlemi sırasında temassız kızılötesi sıcaklık ölçümleriyle sürekli olarak izlenmiştir. Z ekseninden etki eden aksel kuvvet ve ilerleme kuvvetinin ölçümü için bağlama kalıbı ile tezgâh tablası arasına Kistler 9272 dinamometre yerleştirilmiştir. Dinamometre ile bağlama kalıbı arasında işlem esnasında oluşan sıcaklığın dinamometreye zarar vermemesi için özel olarak üretilmiş soğutucu plaka

**Çizelge 1.** Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri (Welding parameters used in the experiments)

| Devir,<br>mm/dev | Tabla ilerleme hızı,<br>Vf (mm/dak) | Ofset miktarı,<br>mm | Birleştirme<br>yöntemi     |
|------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------------|
| 1120             | 20                                  | 0                    | Normal                     |
| 1120             | 20                                  | 1                    | Normal Ofsetli             |
| 1120             | 20                                  | 1                    | Ön ısıtmalı- Ofsetli       |
| 1120             | 20                                  | 1                    | Kuru buz soğutmalı-Ofsetli |

**Çizelge 2.** AA7075-T6 ve AZ31B deney numunelerinin kimyasal bileşimleri (Chemical compositions of AA7075-T6 ve AZ31B test specimens)

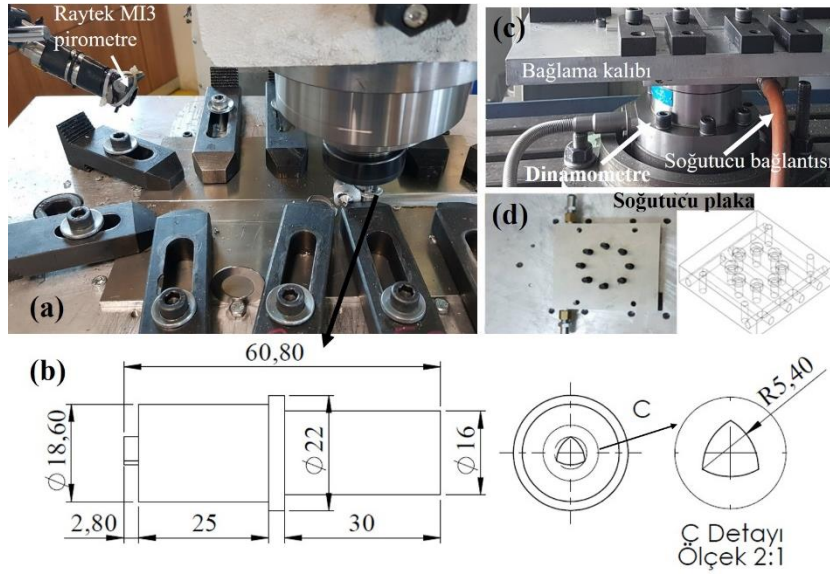
| Malzeme   | Si   | Fe    | Cu     | Mn   | Ti   | Ni     | Zn   | Cr   | Al    | Mg    |
|-----------|------|-------|--------|------|------|--------|------|------|-------|-------|
| AA7075-T6 | 0.40 | 0.50  | 1.81   | 0.30 | 0.20 | ---    | 5.80 | 0.22 | Kalan | 2.65  |
| AZ31B     | 0.17 | 0.003 | 0.0007 | 0.4  | ---  | 0.0008 | 1.0  | ---  | 3.25  | Kalan |

**Çizelge 3.** AA7075-T6 ve AZ31B deney numunelerinin mekanik ve termal özellikleri (Mechanical and thermal properties of AA7075-T6 ve AZ31B test specimens)

| Malzeme   | Çekme dayanımı,<br>MPa | Sertlik,<br>HB | Özgül ısı kapasitesi,<br>J/g-°C | Isı iletkenliği,<br>W/m-K | Erime noktası,<br>°C |
|-----------|------------------------|----------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------|
| AA7075-T6 | 572                    | 150            | 0.96                            | 130                       | 477-635              |
| AZ31B     | 240                    | 49             | 1.00                            | 96                        | 605-630              |

kullanılan karıştırıcı takımın genel görünümü ve ölçüleri Şekil 2'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 1'de, AA7075-T6 ve AZ31B alaşımlarının kimyasal içerikleri, mekanik ve termal özellikleri ise sırasıyla Çizelge 2 ve Çizelge 3'de verilmiştir. Her bir birleştirme işleminden önce, karıştırıcı takım plakaların üzerinde konumlandırıldıktan

yerleştirilmiştir. Kompresörden alınan havanın soğutucu plaka içerisindeki kanalların arasında dolaşımı sağlanarak dinamometrenin ısıdan etkilenmesi engellenmiştir. Birleştirilen numunelerin çekme testleri Instron 3369 test cihazı ile 1 mm/dak hızında yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri Metkon Duroline - M serisi cihaz ile 100 g yük altında 12 s ile yapılmıştır.



**Şekil 2.** (a) Sürtünme karıştırma deney düzeneği, (b) karıştırıcı takım, (c, d) bağlama aparatı ve soğutucu plakanın genel görünümü (Overview of the (a) friction stir welding test setup, (b) mixing tool, (c, d) fixing apparatus and cooling plate)

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

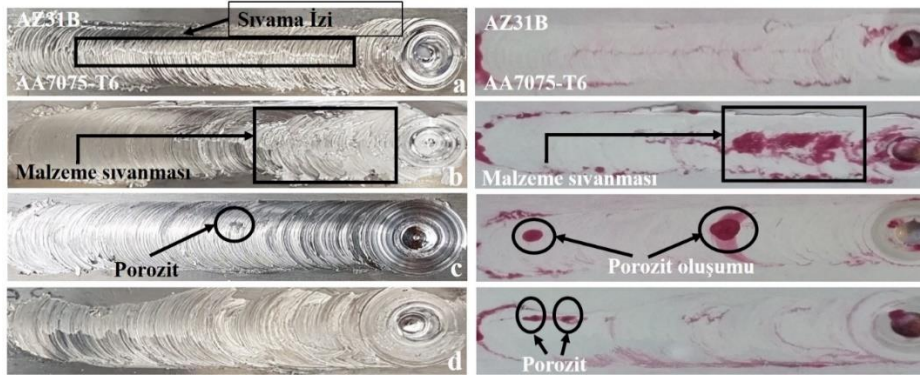
Bu çalışma, farklı mekanik, kimyasal ve termal özelliklere sahip AA7075-T6 ve AZ31B alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilebilir davranışını araştırmak amacıyla yapılmıştır. Yapılan ön deneyler ve literatürde kullanılan parametreler kullanılarak deneysel çalışmada kullanılmış olan tezgâh devir sayısı ve tabla ilerleme hızı belirlenmiştir. Ön deneyler sırasında her iki malzeme özelliklerinden dolayı kaynatılan numunelerde istenilen sonuçlar elde edilememiştir. Birleştirilen numunelerin incelenmesinde alüminyum malzemenin istenilen düzeyde ergimedığı görülmüştür. Bu nedenle alüminyum plaka kaynak işleminden önce fırında ısıtılarak kaynatılmış ve ön ısıtma işleminin kaynak kalitesi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca literatür taramasında bazı araştırmacıların numunelerde intermetalik bileşik oluşumunu engellemek için kaynak sırasında sıvı nitrojen kullandıkları [22], bazı araştırmacıların da su içerisinde SKK yaptıkları görülmüştür [23]. Buradan yola çıkarak kaynak işlemi sırasında kaynak hattı boyunca her iki malzemenin üzerine kuru buz dökülerek kaynak işlemi yapılmıştır ve kuru buz ile soğutmanın kaynak kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Dört farklı yöntem kullanılarak birleştirilmiş olan AA7075-T6 ve AZ31B alaşımlarının kaynak hattının makro resimleri ve aynı numunelere ait penetrant testi sonrası görünüşleri Şekil 3 (a-d)'de sunulmuştur. Kaynak hattı üzerinde yapılan gözle muayene sonucunda kaynak yüzeylerinde çatlak oluşumu görülmemiştir. Karıştırıcı takımın magnezyum tarafına kaydırıldığı iki numaralı deneyde Şekil 3 (b), kaynak yüzeyinde malzeme sıvanması meydana geldiği görülmüştür. Magnezyumun sürtünme katsayısının alüminyumdan düşük olmasına bağlı olarak karıştırıcı

takıma malzeme kaynaklanması meydana geldiği ve devamında da kaynak hattı yüzeyinde malzeme sıvanması ile birlikte yüzeyde bozulma olduğu görülmüştür [26]. Bununla birlikte penetrant testi sonrası kaynak hattı üzerinde yer yer gözenek oluşumu meydana geldiği görülmüştür. Penetrant testi incelemesi sonucu karıştırıcı takımın giriş ve çıkış kısımlarında görülen kusurlar değerlendirme dışı tutulduğunda, karıştırıcı takımın magnezyum tarafına kaydırıldığı iki numaralı yöntemde malzeme sıvanması meydana gelmiş ve bu durum penetrant testinde de yüzey hatası olarak görülmüştür. Karıştırıcı takımın Mg tarafına kaydırılması ile gerçekleştirilen birleştirmede tünel hatasının boyutunun küçüldüğü görülmektedir. Mg alaşımın ilerleme tarafına konumlandırılması ve takım ofsetinin ilerleme tarafına verilmesi, Mg alaşımının karıştırma bölgesine daha derin nüfuziyet etmesini ve daha iyi bir kenetleme gerçekleşmesini sağladığı düşünülmektedir. Makro incelemede dikkat çeken bir diğer önemli husus ise gözenek ya da tünel oluşumlarının magnezyum tarafında gerçekleşmiş olmasıdır. Al/Mg alaşımlarının birleştirilmesinde Al alaşımları ister geri çekme tarafına ister ilerleme tarafına konumlandırılınsın, Al tarafında Mg tarafına göre daha fazla ısı oluşmaktadır [29]. Yüksek ısı oluşan bölgede daha iyi plastik deformasyon oluşacağından kaynak hataları Mg tarafına konumlanmıştır. Kaynak hatalarının magnezyum alaşımı tarafında oluşmasının bir diğer sebebi ise her iki alaşımın farklı atomik yapıya sahip olmasındandır. Al alaşımları yüzey merkezli kübik yapıya sahip iken Magnezyum alaşımları sıkı düzen hegzagonal yapıya sahiptirler [30, 31]. Hegzagonal sıkı düzen atomik yapı yüzey merkezli kübik yapıya göre daha zor plastik deformasyona uğramaktadır. AA7075 numunenin fırında ön ısıtma işlemine tabi tutulduktan sonra SKK işleminin yapıldığı üç numaralı yöntemde kaynak hattı üzerinde Şekil 3 (c)'de görüleceği üzere sürekli olmayan gözenek



formasyonu oluşmuştur. SKK bir katı hal kaynak yöntemi olmasına rağmen Al/Mg alaşımlarının kaynağında, 430 °C'nin üzerinde meydana gelen  $Al_3Mg_2$  ( $\beta$ ) ve  $Al_{12}Mg_{17}$  ( $\gamma$ ) intermetalik bileşikler sıvılaşmaya başlamaktadır [27]. Üç numaralı yöntemde, alüminyum plakanın kaynak işleminden önce ısıtılması ve devamında kaynak sırasında ortaya çıkan ısı ile birlikte sıvılaşmanın hızlandığı ve ancak soğuma hızına bağlı olarak gözenek oluşumunun meydana geldiği düşünülmektedir.

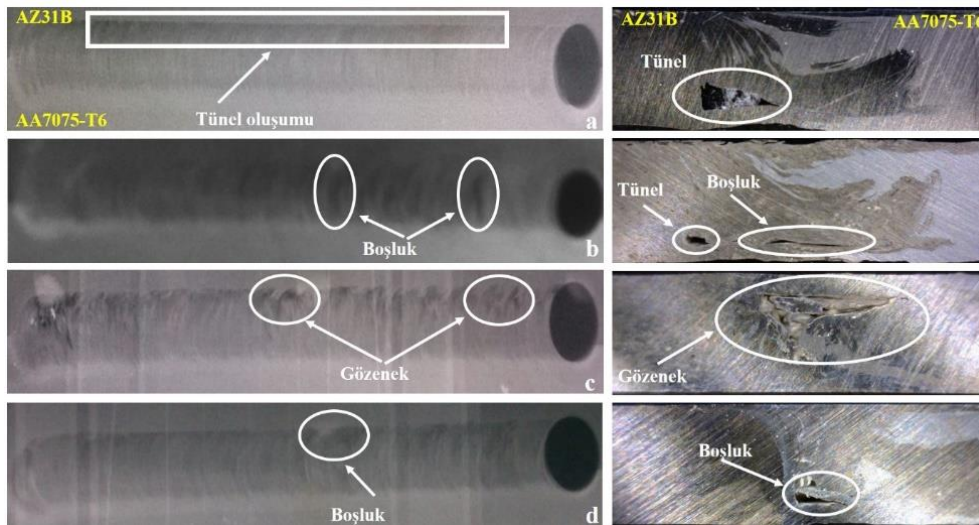
meydana geldiği görülmüştür. Ön ısıtmalı yöntemle yapılan birleştirmede oluşan gözenek yapısı incelendiğinde, katı hal kaynak yöntemi olan SKK yönteminde sıvılaşma gözükmemektedir. SKK işleminde böyle bir formasyonun oluşumu beklenmemektedir. Bununla birlikte, Al/Mg alaşımlarının birleştirilmesinde yapısal sıvılaşma oluşmaktadır [32]. Isı girdisi arttıkça bu yapısal sıvılaşma 437 °C ötektik sıcaklığında  $Mg + Al_{12}Mg_{17} \rightarrow L$  ve 450 °C ötektik sıcaklığında  $Al + Al_3Mg_2 \rightarrow L$  şeklinde oluşmaktadır [32, 33]. Kuru buz ile



**Şekil 3.** Birleştirilmiş numunelerin kaynak yüzeylerinin ve penetrant testi sonuçlarının görünümü, (a) Normal, (b) Normal ofsetli, (c) Ön ısıtmalı, (d) Kuru buz uygulaması (Macro image of the welded surface and penetration test results of

Birleştirilen numunelerin iç kısımlarında meydana gelen hasar mekanizmasını görüntülemek için numunelerin kaynak hattı üzerinde radyografik inceleme yapılmıştır. Daha sonra numuneler tel erozyon tezgâhında kesilerek kesit görünüşü üzerinden de ayrıca kaynak kalitesi değerlendirilmiştir. Şekil 4'de verilen makro resimler incelendiğinde hem radyografik hem de kesit görünüşte normal kaynak parametrelerinin kullanıldığı birinci ve ikinci yöntemde kaynak hattı boyunca düşük ısı girdisine bağlı olarak tünel ve boşluk şeklinde kaynak kusurlarının meydana geldiği görülmüştür [19, 28]. Ön ısıtmalı ve kuru buz ile soğutmalı yöntemde ise tünel oluşumu ortadan kalkmış ancak gözenek ve boşluk şeklinde kaynak kusurlarının

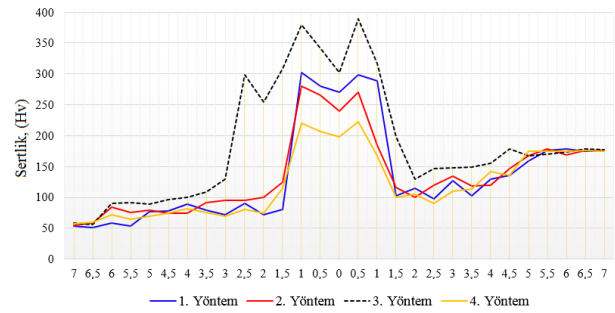
soğutularak yapılan birleştirmede ısı girdisinin azalması ile tünel oluşumu beklenirken kaynak hattında boşluk oluşumu meydana gelmiştir. Düşük ısı girdisinin yanı sıra tünel oluşumunun bir diğer sebebi ise; birleştirilen malzemelerin ısı iletim hızları arasında termodinamik dengenin oluşturulmaması da tünel yapısının oluşmasına neden olabilmektedir [34]. Bu durum dışarıdan yapılan soğutma işleminin malzemedeki ısı transferini değiştirmesi dolayısıyla termodinamik dengenin sağlanması ile tünel oluşumunu ortadan kaldırdığı düşünülmektedir. Isıtmalı ve soğutmalı yöntemler ile yapılan birleştirmelerin karıştırma bölgeleri incelendiğinde ilk iki birleştirmeye göre daha homojen bir karışma işlemi gerçekleştiği görülmektedir.



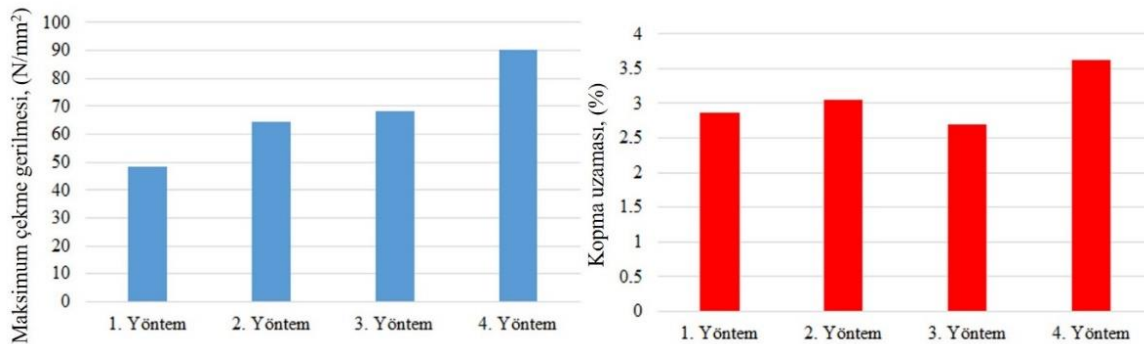
**Şekil 4.** Numunelerin birleştirme hattının radyografik ve kesit görünüşleri (Radiographic and cross section view of the joint line of specimens

SKK yöntemi ile birleştirilen plakaların çekme gerilmeleri ve kopma uzamaları Şekil 5’de verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere, numunelerin çekme dayanımları kaynak bölgesinde meydana gelen kaynak kusurlarına bağlı olarak değişim göstermiştir. Birinci yöntem ile yapılan birleştirmede çekme dayanımı kaynak hattı boyunca oluşan tünel kusuruna bağlı olarak 48.33 N/mm<sup>2</sup> olarak gerçekleşirken, ikinci yöntem ile yapılan birleştirmede takımın magnezyum tarafına 1 mm kaydırılması ile tünel oluşumundaki azalmaya bağlı olarak çekme dayanımı 64.55 N/mm<sup>2</sup>’ye yükselmiştir. Ön ısıtma ve kuru buz ile soğutmanın uygulandığı birleştirmelerde tünel oluşumunun ortadan kalkması kaynak dayanımlarında artışlar meydana getirmiştir. Ön ısıtma ve kuru ve buz ile soğutmanın uygulandığı numunelerde çekme dayanımları sırasıyla 68.11 N/mm<sup>2</sup> ve 90.00 N/mm<sup>2</sup>’dir. Genel olarak numunelerin tamamının çekme dayanımları temel malzemelerin

benzer bir sertlik dağılımı sergilemiş, en yüksek sertlik değerleri ön ısıtma işlemi uygulanarak kaynatılan numunede ölçülmüştür.



Şekil 6. Al/Mg plakaların kaynak hattı üzerinde mikro sertlik dağılımı (Micro hardness distribution on joint line of Al/Mg sheets).



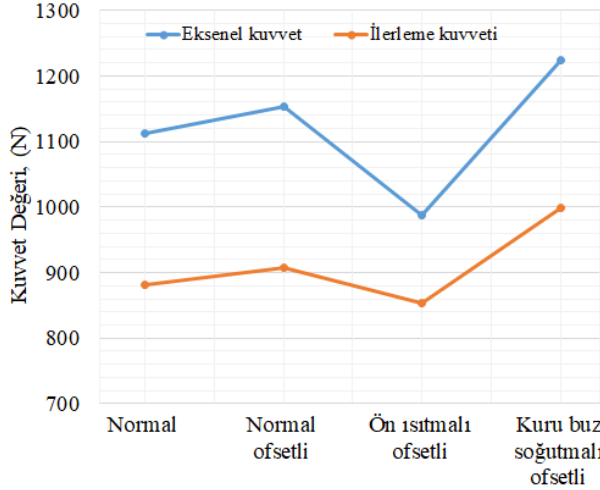
Şekil 5. Birleştirilmiş numunelerin (a) maksimum çekme gerilmesi ve (b) kopma uzaması (Ultimate tensile strength (a) and elongation (b) of the welded specimens)

dayanımlarından düşük çıkmıştır. Birleştirme sırasında meydana gelen tünel, boşluk ve gözenek gibi kaynak kusurları çentik etkisi meydana getirmekte ve kaynak hattında dayanımın düşmesine neden olmaktadır. En yüksek oluşan çekme dayanımı ana malzeme AZ31B’nin çekme dayanımının % 37,5 i olarak gerçekleşmiştir. Ön ısıtma ile kaynatılan numune hariç diğer numunelerde kopma uzaması ve çekme dayanımları arasında bir korelasyon olduğu görülmüştür. Ön ısıtma işlemine tabi tutulan numune de kopma uzamasının azalmasının nedeni, ısıtma işlemi ile birlikte artan ısı girdisine paralel olarak karıştırma bölgesinde Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> ve Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> intermetalik bileşiklerde artış olduğu ön görülmektedir. Kırılgan yapıdaki bu intermetalik bileşikler çekme dayanımı ve kopma uzamasını olumsuz etkilemektedir. Kuru buz ile soğutarak yapılan birleştirmede kopma uzamasının yüksek olması intermetalik bileşik oluşumun en az seviyede olduğunu göstermektedir.

Birleştirilen numunelerin kaynaklı hattı merkez noktasının sağ ve sol tarafından mikro sertlik ölçümleri yapılmış ve ölçümlerden elde edilen sonuçlar grafik olarak Şekil 6’da verilmiştir. Sertlik değerleri magnezyum tarafında daha düşük ölçülürken, en yüksek mikro sertlik değerleri kaynak hattının 0,5 mm sağında ve 1 mm solunda elde edilmiştir. Numunelerin tamamı

Numunelerin sertlik değerlerinin, kopma uzamaları ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Kuru buz soğutma ile kaynatılan ve kopma uzaması en yüksek olan numunede en düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. SKK karıştırma kaynağında oluşan ara katmanlı yapılar düzensiz sertlik dağılımının ana nedenini oluşturmaktadır [35]. Özellikle ara katmanlı yapılarda mikro sertlik değerlerinin yüksek olmasının sebebi Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> ve Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> gevrek intermetalik bileşiklerden kaynaklandığı düşünülmektedir [31, 36, 37]. Şekil 7’de SKK işlemi sırasında ölçülen ortalama ilerleme ve aksenal kuvvet değerleri verilmiştir. Şekil 7’de sunulmuş olan grafikten görüleceği üzere en düşük kuvvet değerleri ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş numune de görülürken, en yüksek kuvvet değerleri kuru buz ile soğutmanın yapıldığı birleştirme işlemine gözlemlenmiştir. Ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş numunenin plastik şekil değiştirmesi daha kolay olmasından dolayı kuvvet değerleri daha düşük gerçekleştiği, soğutulan numunenin plastik şekil değiştirmesinin daha zor hale gelmesi ise kuvvet değerlerinin daha yüksek çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir. Magnezyum tarafına karıştırıcı takımın 1 mm kaydırılması ise kuvvet değerinde çok az bir miktarda artma meydana getirmiştir.





Şekil 7. SKK işlemi sırasında oluşan ilerleme ve eksenel kuvvet değerleri (Feed force and axial force during the FSW process)

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

Bu çalışmada, farklı özelliklere sahip AA7075-T6 ve AZ31B alaşımları, sabit devir ve tabla ilerleme hızı kullanılarak sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Birleştirme işlemlerinde ön ısıtma ve kuru buz ile soğutma tekniklerinin kullanıldığı dört farklı yöntem kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- Gözle muayene ve penetrant testi sonucu başarılı bir birleştirme yapıldığı ve kaynak hattı üzerinde sıcak çatlak oluşumu görülmemiştir. Ancak karıştırıcı takım ucunda oluşan malzeme yapışmasının kaynak yüzeyini bozduğu görülmüştür. Karıştırıcı takımın magnezyum tarafına kaydırıldığı durumda malzeme yapışması artmıştır.
- Karıştırıcı takımın merkezden hareket ettiği ve magnezyum tarafında kaydırıldığı deneylerde, numunelerin kaynak köklerinde tünel oluşumu gözlemlenmiştir. Tünel oluşumunun ağırlıklı olarak magnezyum tarafında yoğunlaştığı görülmüştür.
- Ön ısıtma ve kuru buz uygulanan deneylerde, numunelerde tünel oluşumu yok olmuş ancak numunelerin kaynak bölgesinde yer yer gözenek ve boşluklar oluştuğu görülmüştür.
- Birleştirme sırasında meydana gelen tünel, gözenek ve boşluk oluşumları numunelerin çekme dayanımlarının düşmesine neden olmuştur. En düşük çekme dayanımı  $48.33 \text{ N/mm}^2$  ile karıştırıcı takımın merkez noktasından hareket ettiği birinci yöntemde, en yüksek çekme dayanımı ise kuru buz ile soğutmanın yapıldığı deneyde  $90.00 \text{ N/mm}^2$  olarak ölçülmüştür.
- Birleştirilen numunelerin kaynak hattının merkez noktasının  $0.5 \text{ mm}$  sağında ve solunda en yüksek mikro sertlik değerleri elde edilmiştir. Ön ısıtma işleminden sonra kaynatılan numunede en yüksek sertlik ve en düşük kopma uzaması elde edilirken, kuru buz ile

soğutmanın yapıldığı numunede en düşük sertlik ve en yüksek kopma uzaması elde edilmiştir.

Deneylerden elde edilen veriler değerlendirildiğinde birleştirilen numunelerde temel malzemelerin mukavemet değerlerine ulaşamadığı görülmüştür. Alüminyum ve magnezyum gibi farklı özelliklere sahip malzemelerin sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkileri üzerine daha fazla araştırma çalışması yapılması gerekmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından “BAP 59/2016-01” kodlu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Gazi Üniversitesine teşekkür ederiz. Araştırmacılar; test numunelerinin hazırlanmasında Poyraz CNC firmasına ve Şakir Şeker’e, mikro sertlik ölçümlerinde ANKAS Metal firmasına ve Kazım Filik’e, tahribatsız muayene testlerinin yapılmasında Emek Boru ve Tamer Küsen’ e vermiş oldukları desteklerden dolayı teşekkür ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dorbane A., Mansoor B., Ayoub G., Shunmugasamy V.C. and Imad A., “Mechanical, microstructural and fracture properties of dissimilar welds produced by friction stir welding of AZ31B and Al6061”, *Mater. Sci. Eng. A.*, 651:720–733, (2016)
- [2] Liu L., Ren D. and Liu F., “A review of dissimilar welding techniques for magnesium alloys to aluminum alloys”, *Materials (Basel)*, 7: 3735–3757, (2014)
- [3] Liu P. and Li Y., Geng H., Wang J., “Microstructure characteristics in TIG welded joint of Mg/Al dissimilar materials”, *Mater. Lett.*, 61: 1288–1291, (2007)
- [4] Ben-Artzy A., Munitz A., Kohn G., Bronfin B. and Shtechman A., “Joining of light hybrid constructions made of magnesium and aluminum alloys”, *TMS Annual Meeting*, 295–302, (2002)
- [5] Chi C.T., Chao C.G., Liu T.F. and Lee C.H., “Aluminum element effect for electron beam welding of similar and dissimilar magnesium–aluminum–zinc alloys”, *Scr. Mater.*, 56: 733–736, (2007)
- [6] Bannour S., Abderrazak K., Mattei S., Masse J.E., Autric M., Mhiri H., “The influence of position in overlap joints of Mg and Al alloys on microstructure and hardness of laser welds”, *J. Laser Appl.*, 25: 032001- 032008, (2013)
- [7] Thomas W., Nicholas E., Needham J., Murch M., Temple-Smith P. and C. Dawes, Friction stir butt welding, *International Patent No.* PCT/GB92/02203, *GB Patent No.* 9125978.8, 1991, *U.S. Patent No.* 5,460,317, (1995)
- [8] Cam G., “Friction stir welded structural materials: beyond Al-alloys”, *International Materials Reviews*, 56(1): 1-48, (2011)
- [9] Mohammadi J., Behnamian Y., Mostafaei A., Izadi H., Saeid T., Kokabi A.H. and Gerlich A.P., “Friction stir welding joint of dissimilar materials between AZ31B magnesium and 6061 aluminum alloys: Microstructure studies and mechanical characterizations”, *Materials Characterization*, 101: 189–207, (2015)
- [10] Zhao Y., Lu Z., Yan K. and Huang L., “Microstructural characterizations and mechanical properties in

- underwater friction stir welding of aluminum and magnesium dissimilar alloys”, *Materials and Design*, 65: 675–681, (2015)
- [11] Venkateswaran P. and Reynolds A.P., “Factors affecting the properties of friction stir welds between aluminum and magnesium alloys”, *Material. Sci. and Eng.*, A545: 26– 37, (2012)
- [12] Jagadeesha C.B., “Dissimilar friction stir welding between aluminum alloy and magnesium alloy at a low rotational speed”, *Material. Sci.and Eng.*, A616: 55–62, (2015)
- [13] Masoudian A., Tahaei A., Shakiba A., Sharifianjazi F., and Mohandesi J.A., “Microstructure and mechanical properties of friction stir weld of dissimilar AZ31-O magnesium alloy to 6061-T6 aluminum alloy”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 24: 1317–1322, (2014)
- [14] Tabasi M., Farahani M., Besharati Givi M. K., Farzami M., and Moharami A., “Dissimilar friction stir welding of 7075 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy using SiC nanoparticles”, *Int J Adv Manuf Technol.* , 86(1-4): 705 – 715, (2015)
- [15] Ji S., Meng X., Liu Z., Huang R. and Li Z., “Dissimilar friction stir welding of 6061 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy assisted with ultrasonic”, *Mater Lett.*, 201: 173–176, (2017)
- [16] Hou Z., Sheikh-Ahmad J., Jarrar F. and Ozturk F., “Residual stresses in dissimilar friction stir welding of AA2024 and AZ31: experimental and numerical study”, *J Manuf Sci Eng.*, 140: 1–10, (2018)
- [17] Hernández-García D., Saldaña-Garcés R., García-Vázquez F., Gutiérrez-Castañeda E.J., Deaquino-Lara R. and Verdera D., “Friction stir welding of dissimilar AA7075-T6 to AZ31B-H24 alloys”, *MRS Advances*, 2(64): 1-9, (2017)
- [18] Ratna Sunil B., Pradeep Kumar Reddy G., Mounika A.S.N, Navya Sree P., Rama Pinneswari P., Ambica I., Ajay Babu R. and Amarnadh P., “Joining of AZ31 and AZ91 Mg alloys by friction stir welding”, *J Magnes Alloy*, 3 (4): 330–334, (2015)
- [19] Çevik B., “Sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin kalıntı gerilmelere ve birleştirmenin mekanik özelliklerine etkisi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2014)
- [20] Çevik B., Özçatalbaş Y. and Gülenç B., “Friction stir welding of 7075-T651 aluminium alloy”, *Practical Metallography*, 53(1): 6-23, (2016)
- [21] Buffa G., Campanella D. and Fratini L., “Enhancement of mechanical properties of FSWed AA7075 lap joints through in-situ fabrication of MMC”, *J. Manuf. Process.*, 28: 422–427, (2016)
- [22] Mofid M.A., Abdollah-Zadeh A. and Gür C.H., “Investigating the formation of intermetallic compounds during friction stir welding of magnesium alloy to aluminum alloy in air and under liquid nitrogen”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 71: 1493–1499, (2014)
- [23] Mofid M.A., Abdollah-zadeh A., Malek Ghaini F., “The effect of water cooling during dissimilar friction stir welding of Al alloy to Mg alloy”, *Mater. Des.*, 36: 161–167, (2012)
- [24] İpekoğlu G. and Çam G., “Effects of initial temper condition and postweld heat treatment on the properties of dissimilar friction-stir-welded joints between AA7075 and AA6061 aluminum alloys”, *Metallurgical and Materials Trans. A*, 45(7): 3074-3087, (2014)
- [25] İpekoğlu G., Erim S. and Çam G. “Effects of temper condition and post weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of friction stir butt-welded AA7075 Al alloy plates”, *The Int. Journal of Adv. Man. Tech.*, 70(1-4): 201-213, (2014)
- [26] Simoncini M. and Forcellese A., “Effect of the welding parameters and tool configuration on micro- and macro-mechanical properties of similar and dissimilar FSWed joints in AA5754 and AZ31 thin sheets”, *Materials and Design*, 41:50–60, (2012)
- [27] Yang Y. K., Dong H., Cao H., Chang Y. A., and Kou S. “Liquation of Mg alloys in friction-stir spot welding”, *Welding Journal*, 87: 167-177, (2008)
- [28] Yamamoto N., Liao J., Watanabe S. and Nakata K., “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 (2): 2833-2838, (2009)
- [29] Firouzdor V. and Kou S., “Al-to-Mg friction stir welding: effect of material position, travel speed and rotation speed”, *Metal. and Mat. Trans. A*, 41A: 2914-2935, (2010)
- [30] Azizieh M., Alavijeh A. S., Abbasi M., Balak Z. and Kim H.S., “Mechanical properties and microstructural evaluation of AA1100 to AZ31 dissimilar friction stir welds”, *Materials Chemistry and Physics*, 170: 251-260, (2016)
- [31] Firouzdor V. and Kou S., “Al-to-Mg friction stir welding: effect of positions of Al and Mg with respect to the welding tool”, *The Welding Journal*, 88: 213-224, (2009)
- [32] Yutaka S. S., Park S. H. C., Masato M. and Hiroyuki K., “Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys”, *Scripta Mater*, 50(9): 1233–1236, (2004)
- [33] Yang Y. K., Dong H. and Kou S., “Liquation tendency and liquid-film formation in friction stir spot welding”, *Welding Journal*, 87 (8): 202-211, (2008)
- [34] Sarsılmaz F., “Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2008).
- [35] Yan Y., Zhang D., Qiu C. and Zhang W., “Dissimilar friction stir welding between 5052 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20: 619–623, (2010)
- [36] Cao X. and Jahazi M., “Friction stir welding of dissimilar AA 2024-T3 to AZ31B-H24 alloys”, *Materials Science Forum*, 638-642: 3661-3666, (2010)
- [37] Morishige T., Kawaguchi A., Tsujikawa M., Hino M., Hirata T. and Higashi K., “Dissimilar welding of Al and Mg alloys by FSW”, *Materials Transactions*, 49(5): 1129-1131, (2008)