

**Araştırma / Research****SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ  
BAĞLANTILARDA PİM ÇAKIŞMASININ MEKANİK ÖZELLİKLER  
ÜZERİNE ETKİSİ****Şefika KASMAN<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-4722-9203)\***  
**Sertan OZAN<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0003-1932-8308)**<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 35397 İzmir, Türkiye<sup>2</sup>Yozgat Bozok Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 66100 Yozgat, Türkiye

Geliş / Received: 18.12.2017

Kabul / Accepted: 02.05.2018

**ÖZ**

Bu çalışmada, AA-7075 T651 alüminyum alaşımlı plakaların sabit bir pim ofset mesafesi ve iki farklı ofset yönü ile üst üste bindirilmiş iki kaynak dikişi için mekanik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. Herhangi bir ofset olmaksızın plakaların temas yüzeyinde gerçekleştirilen tek kaynak dikişinin mekanik özellikleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca kaynaklı bağlantılar için mikroyapısal incelemeler yapılarak kaynaklı bağlantılardaki kusurlar ve pim karıştırma bölgesine ait tane yapısındaki değişimler araştırılmıştır. Deneysel verilerin değerlendirilmesi sonucunda en yüksek çekme mukavemeti olan 423 MPa, 400 dev/dak takım dönme hızında ve herhangi bir çakışmanın olmadığı tek kaynak dikişine sahip kaynaklı bağlantıdan elde edilmiştir. Bu koşul için ölçülen birim uzama %10 iken, en yüksek birim uzama değeri %12,5, 400 dev/dak ve pim ofset yönü olarak pimin dönüş yönünün seçildiği kaynaklı bağlantıdan elde edilmiştir. En yüksek mukavemet ve birim uzama (%) değeri üç farklı pim ofset yönü için de takım dönme hızının 400 dev/dak olduğu durumda elde edilmiştir. Takım dönme hızındaki artış ile çekme dayanımında ve birim uzama (%) değerinde azalma meydana geldiği ortaya çıkmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sürtünme karıştırma kaynağı, pim çakışması, mekanik özellikler, mikroyapı**EFFECT OF PIN OVERLAP ON MECHANICAL PROPERTIES OF FRICTION STIR  
WELDED JOINTS****ABSTRACT**

In this study, the changes in mechanical properties of AA-7075 T651 aluminum alloy plates for a fixed pin offset distance and two overlapping weld seams with two different offset directions were investigated. Comparisons were made with the mechanical properties of the single weld seam formed on the contact surface of the plates without any offset. In addition, microstructural observations of welded joints were carried out to investigate the defects in welded joints and the changes of grain structure in the nugget zone. As a result of evaluation of the experimental data, the highest tensile strength, 423 MPa, was obtained from the welded joint with single weld seam which was manufactured with a tool rotational speed of 400 rpm and without any pin overlap. The elongation at rupture for this condition was measured to be 10%, while the highest elongation at rupture, 12.5%, was obtained from the joint welded with a tool rotational speed of 400 rpm and where AS was selected as the pin offset direction. The highest strength and elongation at rupture (%) for all three different pin offset directions were obtained with the tool rotational speed of 400 rpm. It was revealed that with the increase in tool rotational speed, both tensile strength and elongation at rupture (%) decreased.

**Keywords:** Friction stir welding, pin overlap, mechanical properties, microstructure

---

\*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90-232-301-9217; e-mail / e-posta: sefika.kasman@deu.edu.tr

## 1. GİRİŞ

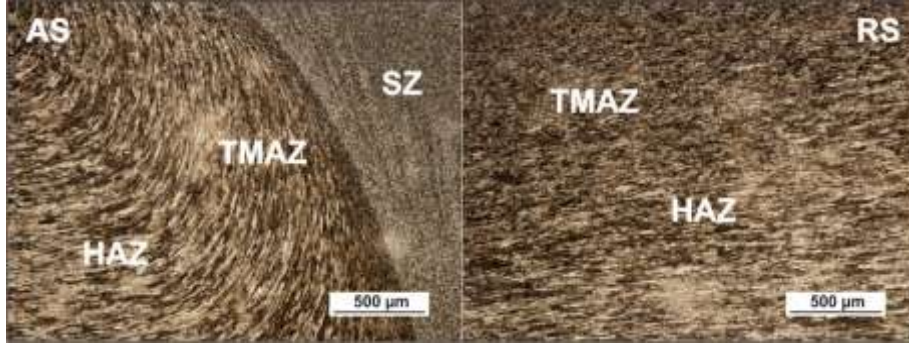
Kaynaklı uygulamalar, özellikle otomotiv, havacılık, gemi yapım ve yakıt tankları alanında birincil öneme sahip olup seçilen kaynaklı imalat yönteminin ilgili uygulamalar üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu endüstriler için kaynak bölgesinin mekanik özellikleri işlem performansı açısından çok önemli olmakla birlikte diğer önemli bir konu da kaynak bölgesinin iç yapısının kaynak performansına etkisidir. Çok iyi bilinmektedir ki kaynak performansını, kaynak dikişinin mukavemeti, şekil alma kabiliyeti ve kaynak bölgesinin kusur içermemesi belirlemektedir. Tüm bunların bir arada sağlanması güç olmakla birlikte bu endüstriler için mutlaka sağlanması gereken kriterler olması açısından önem arz etmektedir. Geleneksel kaynak uygulamalarından olan ergitme kaynak yöntemleri ile bu kriterlerin bazı alaşımlar için sağlanması oldukça zor olmakla birlikte bazı alaşımlar için çok iyi sonuçlar elde edilebilmektedir.

Otomotiv ve havacılık endüstrisinin en önemli malzeme grupları içinde yer alan alüminyum alaşımlarından bazıları geleneksel kaynak uygulamaları için riskli malzemeler olup bu alaşımların kaynağı hem dikkat hem de tecrübe gerektirmektedir [1,2]. İngiltere’de 1991 yılında İngiltere Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından ilk patentin alındığı sürtünme karıştırma kaynak (SKK) yöntemi [3], geleneksel kaynak yöntemleri ile kaynağı zor olan alaşımlar için alternatif bir yöntem olarak öne çıkmış bir katı hal kaynak yöntemidir [4,5]. Katı hal kaynak yöntemlerinin ortak özelliği kaynak işleminin malzemelerde herhangi bir ergime olmaksızın gerçekleşmesidir. Ergime ve katılaşmayı takiben kaynak bölgesinde ortaya çıkan porozite gibi gaz boşlukları, katılaşma hızındaki düzensizliklerden kaynaklı çatlaklar [6-8] ve kristal yapı farklılıkları, oksit bileşiklerinin de içinde olduğu cürufur gibi kusurlar kaynak dikişinin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Geleneksel ergitme kaynak yöntemlerinde ortaya çıkan yüksek ısı, ısıl genleşme katsayılarının ve katılaşma sıcaklık aralıklarının yüksek olduğu alüminyum alaşımlarında arzulan mekanik özelliklere ulaşmada olumlu sonuçlar vermemektedir [5,8]. Ergitme kaynaklarında görülen bu kusurlar ve olumsuz etkileri bazı alüminyum alaşımlarında oransal olarak çok düşükken bazı alüminyum alaşımları örneğin AA-2XXX ve AA-7XXX alaşımları için oldukça yüksektir ve bu alaşımların kaynaklanabilirliği de oldukça zordur [1, 3, 9-11]. Bu alaşım grupları içinde AA-2024 ve AA-7075 yukarıda bahsi geçen otomotiv ve havacılık endüstrilerinde sıklıkla kullanılan temel alüminyum alaşımlarıdır. TWI tarafından geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağının bu grup alüminyum alaşımlarının birleştirme işlemlerinde olumlu sonuçlar verdiği yönünde literatür çalışmaları bulunmaktadır [1,3,7,9-11]. Özellikle ergitme kaynaklarında ortaya çıkan kusurlar bu yöntemde görülmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı levhaların alın altına ve bindirme birleştirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Sürtünme karıştırma kaynağı, geometrik olarak şekillendirilmiş bir pim ve omuzdan oluşan takımın, alın altına birleştirilen iki levhanın ara yüzeyinde belirli bir süre boyunca dönmesi ve bu sürenin sonunda birleşme bölgesinde ilerleme hareketinin ve dönme hareketinin ortak etkisiyle kaynak işleminin gerçekleştirilmesi esasına dayanan bir birleştirme tekniğidir [12]. Bu işlemde kaynak için gerekli ısı, pimin levhalar arasında ve omuzun levha yüzeylerinde dönme etkisi ile ortaya çıkan sürtünmeden üretilir. Kaynak için gereken ısının miktarı takım dönme hızı, takım ilerleme hızı (kaynak işlem hızı) ve takımın geometrik şekliyle etkilenmektedir [3,11]. SKK işlemlerinde en çok helisel diş açılmış pim geometrisine sahip takımlar kullanılmaktadır. SKK ile kaynaklı birleştirmelerde ısının yanında pimin karıştırma işlemini gerçekleştirirken yarattığı deformasyonun ya da plastik şekil değişiminin de [5] etkisi görülmektedir. Bu iki etki karıştırma bölgesinde dinamik yeniden kristalleşmenin ortaya çıkmasına sebep olur ki bu durum bu bölgede tane yapısının değişmesi ile birlikte, hem sertliğin değişmesine hem de mikroyapısal özelliklerin değişmesine sebep olur [4,7,11]. Bununla birlikte uygun seçilmemiş kaynak koşulları ile yapılan kaynak uygulamalarında kusurlar en çok bu bölgede kendini gösterir. SKK ile gerçekleştirilmiş bir kaynak dikişi temel olarak üç bölgeye sahiptir. Bunlar sırasıyla pim karıştırma bölgesi (SZ), termomekanik olarak etkilenmiş bölge (TMAZ) ve ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ) olarak adlandırılmaktadır [13, 14]. Bu bölgelerden TMAZ ve HAZ Şekil 1’de görüldüğü üzere kaynak dikişinin her iki tarafında da gözlenmektedir. Bunun yanında Şekil 1’de görülen AS ve RS ise kaynak dikişinin pime göre konumlanmış iki bölgesini işaret etmektedir. Buna göre AS, pimin dönüş yönündeki ve RS, pimin dönüş yönünün tersindeki bölgeyi ifade eder [15]. TMAZ ve HAZ bölgeleri her iki bölgede oluşmasına rağmen deformasyonun ve ısının farklı etkiler göstermesi sebebiyle bu bölgelerde farklı sertlik, tane boyutları ve yönelmeleri oluşabilmektedir [13]. Şekil 1’de görüldüğü üzere SZ bölgesi, pimin kapladığı alanda etkili olan yoğun plastik deformasyon ve yüksek sıcaklığın etkisiyle diğer bölgelerden farklı bir yapıya sahiptir ve buradaki farklılığın sebebi tane yapısının hem ana malzemeden hem de diğer bölgelerden farklı olmasıdır. Yüksek sıcaklık ve plastik deformasyonun ortak etkisiyle dinamik yeniden kristalleşme mekanizması SZ’de etkili olurken [13] TMAZ’de sıcaklık, deformasyon sonrası yeniden kristalleşmeyi başlatabilecek kadar yüksek olmadığı için sadece pimin hareket yönünde yönelmiş tanelerin kabalaşmasına sebep olmaktadır [15-17]. Plastik deformasyonun etkisinin olmadığı ve sıcaklığın etkisinin ise kendisine komşu olan TMAZ’ye göre çok daha az

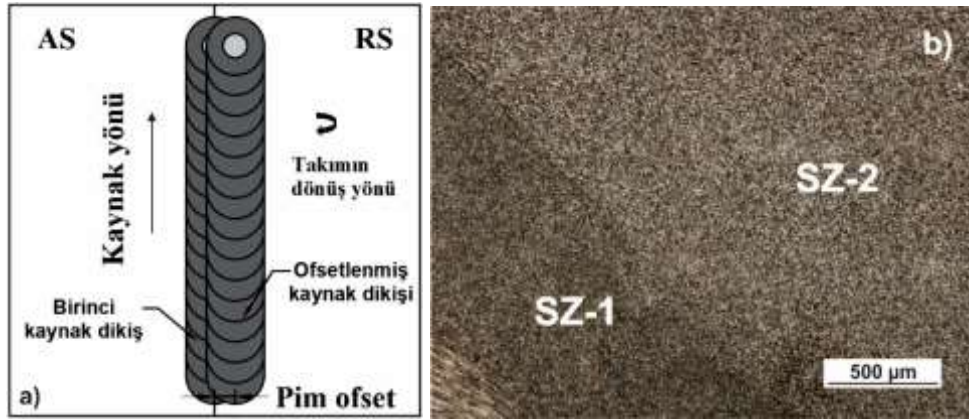
*SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARDA PİM ÇAKIŞMASININ MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ*

olduğu HAZ bölgesinde [5,10] sadece tane boyutuna bağlı olarak sertlikte azalma yönünde değişimler gözlenmektedir [5].



**Şekil 1.** SKK işleminde takımın dönme yönüne göre bölgelerin konumlanması.

Bu çalışmada SKK yöntem çeşitlerinden biri olan alın altına kaynak uygulaması için gelişime açık olduğu düşünülen bir yöntem AA-7075 alüminyum alaşımı levhalara uygulanmıştır. Bu yöntemin temelini üst üste bindirilmiş iki kaynak dikişi oluşturmaktadır ve ilk kaynak dikişinin üzerinde gerçekleştirilen ikinci kaynak dikişi, pim ofset mesafesine göre takım piminin ilerleyen ya da geri çekilen tarafına göre konumlandırılır. Burada amaç, pim karıştırma bölgesinin mukavemetini arttırmak ve ilk kaynak dikişinde oluşması muhtemel kusurları ortadan kaldırmaktır. Şekil 2a’da yöntemin şematik gösterimi ve Şekil 2b’de ise SZ’de pim ofsetinin kaynak dikişinin iç yapısında meydana getirdiği değişime ait bir mikroyapı görüntüsü bulunmaktadır. Şekil 2b’de SZ-1 ile gösterilen bölge birinci kaynak dikişine ait iken SZ-2, pim ofset yönünün AS’de olduğu ikinci kaynak bölgesine aittir. Erişime açık literatürde, AA-7075 alüminyum alaşımı için eşkenar üçgen profiline sahip pim kullanılarak çift kaynak dikişi işlemine ait herhangi bir çalışma bulunamamıştır. Çalışma, bu yönüyle özgün olup seçilen kaynak parametrelerinin oluşturduğu koşullar açısından da farklılıklar içermektedir.



**Şekil 2. a)** Pim ofsetinin ve kaynak dikişi çakışmasının şematik gösterimi **b)** SKK işleminde pim çakışmasının SZ’deki tane boyutunun değişimine etkisi (SZ-1: birinci kaynak dikişi; SZ-2: pim çakışması sonrası SZ).

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

SKK deneysel çalışmalarında  $5 \times 100 \text{ mm}^2$  kesit alanına sahip 225 mm uzunluğunda, kimyasal içeriği ve mekanik özellikleri Tablo 1’de verilen AA-7075-T651 alüminyum alaşımlı levhalar kullanılmıştır.

Ş. KASMAN, S. OZAN

**Tablo 1.** AA-7075-T651 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu (ağ. %).

Alaşım / Elementler	Cu	Si	Mg	Mn	Zn	Ti	Cr	Fe	Al
Kimyasal kompozisyon	1.45	0.15	2.58	0.06	5.72	0.034	0.2	0.16	Bal.
Mekanik özellikler	Max. Çekme Mukavemeti (UTS, MPa)				Uzama ( $E_p$ , %)			Sertlik (HV <sub>0,1</sub> )	
	588				14			175	

Şekil 3a, kaynak işlemi için kullanılan takımını göstermektedir. Kaynak uygulamalarında kullanılan takım, AISI H13 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş olup omuz çapı 20 mm'dir. Pim, kenar uzunluğu 7 mm ve yüksekliği 4,85 mm olan eşkenar üçgen profiline sahip olup özel olarak tasarlanmıştır. Kaynak işleminde kullanılan takımlar ve plakalar kaynak işlemleri öncesinde fırçalanarak empüritelere temizlenmiştir. Kaynak işlemleri öncesinde plakalar, metal bir altlık üzerine yerleştirilerek hem üst yüzeylerinden hem de yan yüzeylerinden destekler kullanılarak kaynak işlemi sırasında takımın uygulayacağı kuvveti karşılamak amacıyla sabitlenmiştir. Şekil 3b'de kaynak uygulamalarında kullanılan altlık, dayamalar ve plakaların yerleşim düzeni görülmektedir. Kaynak işleminde kullanılan kaynak dikişleri belli oranda çakıştırılacak şekilde plakaların birleşme noktası temel alınmış olup çakışma olmaksızın ve iki farklı çakışma yönü seçilerek, bu çalışma kapsamında prosesin araştırma konusu olan pim ofset için üç farklı durum incelenmiştir. Çakışma miktarı 1,5 mm ve çakışma yönleri de AS ve RS olarak seçilmiştir.



**Şekil 3. a)** Pim ve takım omuz ölçüsü, **b)** Kaynak için kullanılan bileşenler (altlık, dayamalar ve plakalar)

Kaynak uygulamaları için kaynak ilerleme hızı 80 mm/dak olarak seçilmiş ve bu değer sabit tutularak üç farklı takım dönme hızı sırasıyla 400, 630 ve 800 dev/dak, pim ofset yönleri ile ilişkilendirilip mekanik özelliklerdeki değişimler araştırılmıştır. Kaynak işlemi için parametreler Tablo 2'de, deneysel düzen Tablo 3'de listelenmiştir. Bu koşullara göre kaynaklı bağlantılar gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 2.** SKK işlem parametreleri.

Parametreler (birim)	Sembol	Parametreler için seçilen değerler		
Pim ofset mesafesi ve yönü	PO	0	1,5mm-AS	1,5mm-RS
Takım dönme hızı (dev/dak.)	TDH	400	630	800
Kaynak ilerleme hızı (mm/dak.)	KİH	80	80	80

## SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARDA PİM ÇAKIŞMASININ MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ

Mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik olarak test numuneleri standartlara uygun şekilde hazırlanmıştır. Çekme testi için numuneler ASTM E8M [18] standardına göre hazırlanmış ve testler Schimadzu marka 100 kN'luk çekme test cihazında 2mm/dak'lık çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Mikro yapısal incelemeler için kaynak dikisine ait dik kesit yüzeyi, standart zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra Keller solüsyonu ile dağlanmıştır. Pim karıştırma bölgesi (SZ) için sertlik ölçümleri 100 gr yükün 10 sn süreyle uygulanması ile gerçekleştirilmiştir.

### 3. DENEY SONUÇLARI VE İRDELEME

#### 3.1. Kaynaklı Bağlantıların İyapı İncelemeleri

Kaynaklı bağlantıların kesit makroyapı görüntüleri incelendiğinde, Şekil 4a, 4d ve 4g bağlantılarında herhangi bir kusura rastlanmazken diğer bağlantılarda makro boyutta kusurlar ve birçok mikro boyutlu kusurların bölgesel olarak dağılım gösterdiği saptanmıştır. Genel olarak kusurların Şekil 4c ve 4ı bağlantıları için takım ilerleme yönüne ters yönde, Şekil 4e ve 4f bağlantılarındaki kusurların ise takım ilerleme yönündeki bölgede kümelenildiği görülmektedir. Özellikle Şekil 4f ve 4ı bağlantılarındaki kusurlar, pimin kapladığı bölge olan SZ'yi neredeyse tamamen kaplamıştır. Bunun yanında Şekil 4b'deki kaynaklı bağlantıda ise diğerlerinden farklı bir yapının etkin olduğu ve buradaki kusurun eliptik bir hat üzerinde yayıldığı görülmektedir.

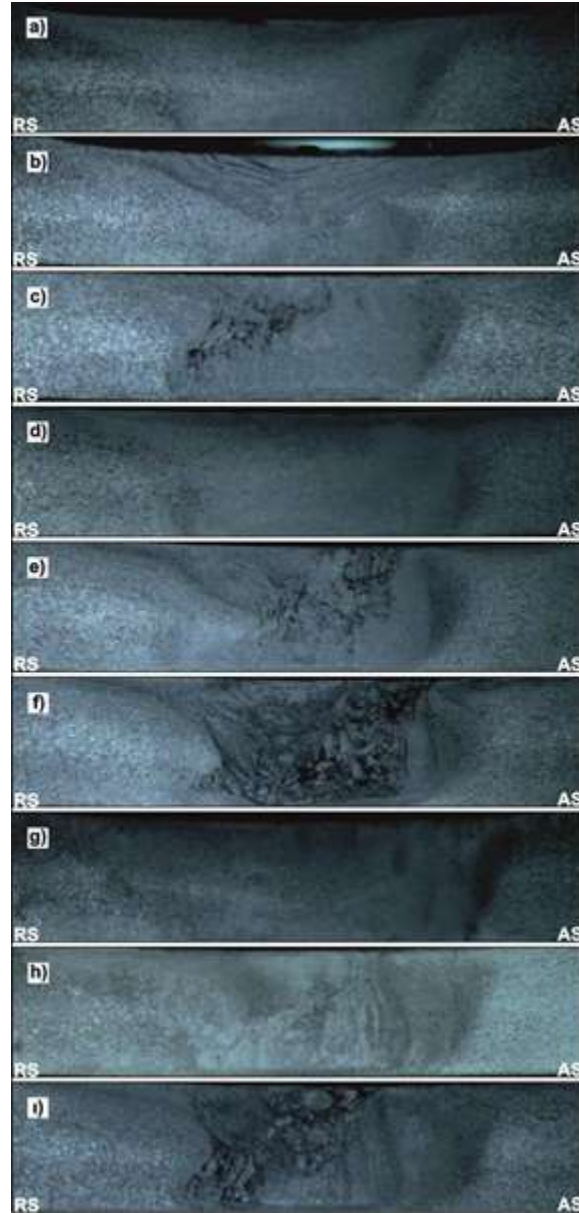
SKK yöntemi temel itibariyle dövme ve ekstrüzyon mekanizmalarının etkili olduğu ve katı fazda belli bir viskozitedeki malzemenin, pim profiline göre değişen bir karıştırma mekanizması ile kaynak bağının kurulduğu bir prostestir. Bu sebeple, SZ oluşumunda etkili mekanizmalar olan sıcaklık ve karıştırma, mikroyapısal değişimle birlikte mekanik özelliklerde de dinamik rollere sahiptir. Yüksek ısı, malzemenin viskozitesini düşürdüğü için pimin karıştırma şiddetini artırır. Bu durum, malzemenin akış yönünü kaynağın üst tarafına yani omuzun alt kısmına doğru yönlendirir ki deneysel çalışmalarda kusur içeren SZ'lerin makroyapısal incelemelerinde de görülebilmektedir. Şekil 4c, 4e, 4f, 4ı'daki makro kusurların, pimin uç kısmından omzun alt kısmına doğru yönelmesi bu durumu açıklamaktadır.

SKK yönteminde görülen ve oluşumunda yüksek ısı girdisi olan ve tünel olarak adlandırılan makro kusur malzeme taşımının süresiz olmasına ve homojen bir karışımın sağlanamamasına sebep olmaktadır [19, 20]. Bunun yanında kavite olarak adlandırılan mikro boşluklar da gözlemlenmiştir. Bu kusurun oluşmasında etkili olan proses bileşeni ise eksik ya da yüksek ısı girdisidir. Şekil 5'de kusurlu bağlantıların mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Buradaki yapılarda tünel ve kavite gibi kusurların bir çatlakla birleştiği Şekil 5f1 ve 5f2, birçok makro çatlak olduğu Şekil 5f3, kümelenmiş çok sayıda kavite ve çatlak olduğu yapı Şekil 5b1, 5c1, 5d1, 5d2 ve 5e3'de tespit edilmiştir. Takım dönme hızları arttıkça kaynak bölgesindeki ısı da artmaktadır ki bu durum SZ bölgesindeki malzemenin viskozitesini düşürmektedir. Böyle bir durumun bu çalışmada yarattığı kusurlar oldukça çeşitli olmakla birlikte, boyutsal ve oransal olarak artan takım dönme hızıyla birlikte artış göstermektedir. Özellikle, bu kusurlu yapılarda çakışan kaynaklı bağlantıların SZ bölgelerinde dinamik yeniden kristalleşme ile birlikte tane irileşmesinin de etkili olduğu görülebilmektedir.

AA-7075-T651 alüminyum alaşımı çökeltme sertleşmesi uygulanmış Al-Mg-Zn alaşımıdır ve  $MgZn_2$ ,  $AlMgZnCu$  ve  $Al_2CuMg$  ikinci faz çökeltilelerinin varlığı nedeni ile yüksek sertliğe sahiptir [7, 10, 11]. Bu küçük boyutlu ikinci faz çökeltileleri hem tane irileşmesini önlerler hem de dislokasyonların önünde engeller teşkil ederler [7, 11]. Bu çalışmada, yüksek sıcaklıklara çıkma sonucunda görülen ikinci faz çökeltileleri tane sınırlarında yığılmış olduğu ve belli bir mesafede dağılım gösterdiği tespit edilmiştir.



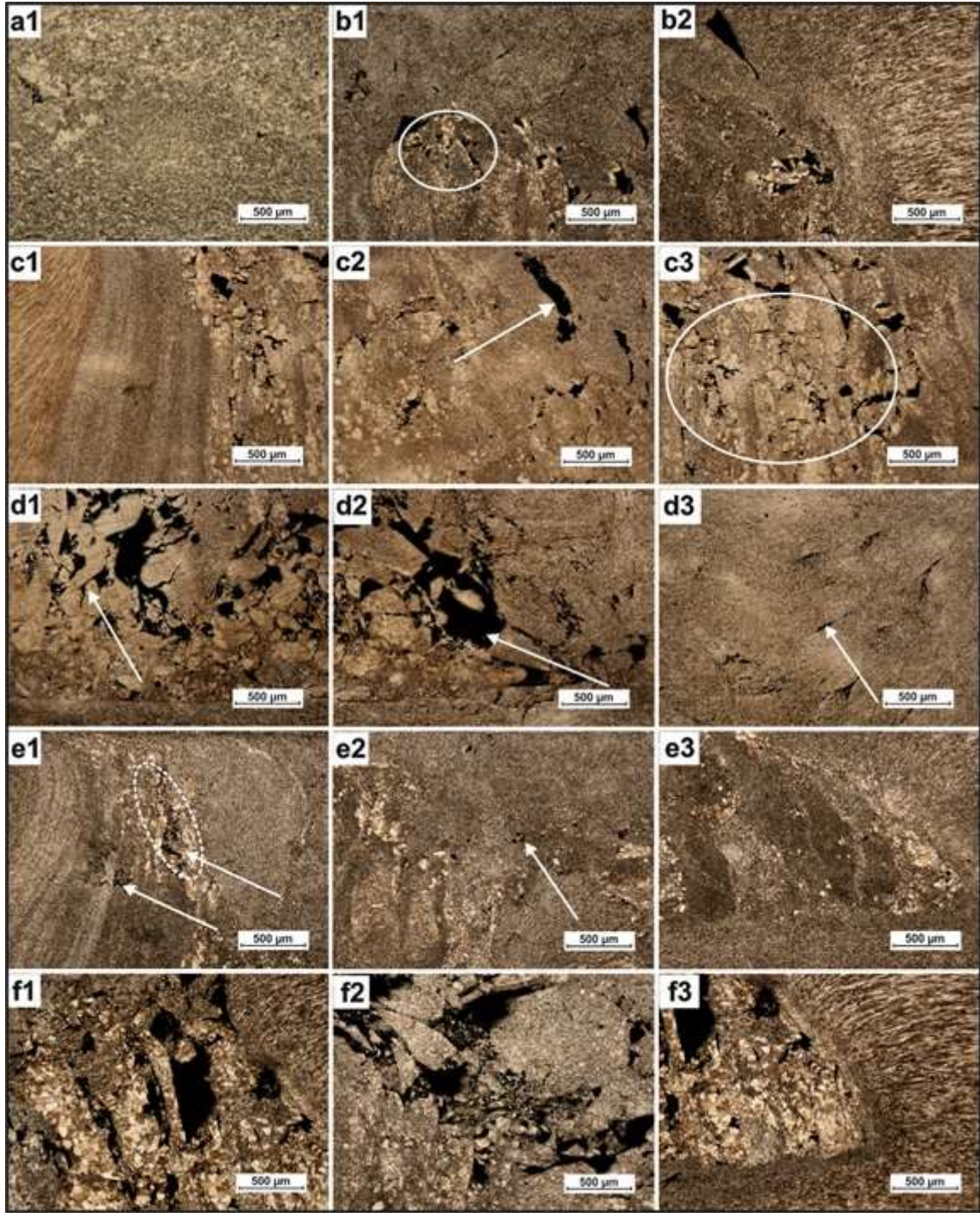
Ş. KASMAN, S. OZAN



**Şekil 4.** Kaynaklı bağlantının kesit görüntüsü (a) K1; (b) K2; (c) K3; (d) K4; (e) K5; (f) K6; (g) K7; (h) K8; (i) K9.

Şekil 6, çökeltilerin tane sınırlarındaki dağılımının daha belirgin olduğu K2, K5, K6 ve K9 kaynak bağlantılarının mikroyapı görüntülerini göstermektedir. K2 ve K5 sırasıyla 630 dev/dak'da pim ofsetinin olmadığı ve pim AS yönünde 1,5 mm kaydırılarak yapıldığı kaynaklı bağlantılardır. K6 ve K9 sırasıyla 800 dev/dak'da pim AS ve RS yönünde 1,5 mm kaydırılarak yapıldığı kaynaklı bağlantılardır. Şekil 6'daki kaynak SZ bölgesinde çökeltilerin yönelimi detaylı olarak incelendiğinde, takım piminin AS yönünde kaydırılmasıyla yapılan kaynaklı bağlantılarda çökeltilerin pim hareket yönünde yönlendiği açık bir şekilde görülebilmektedir.

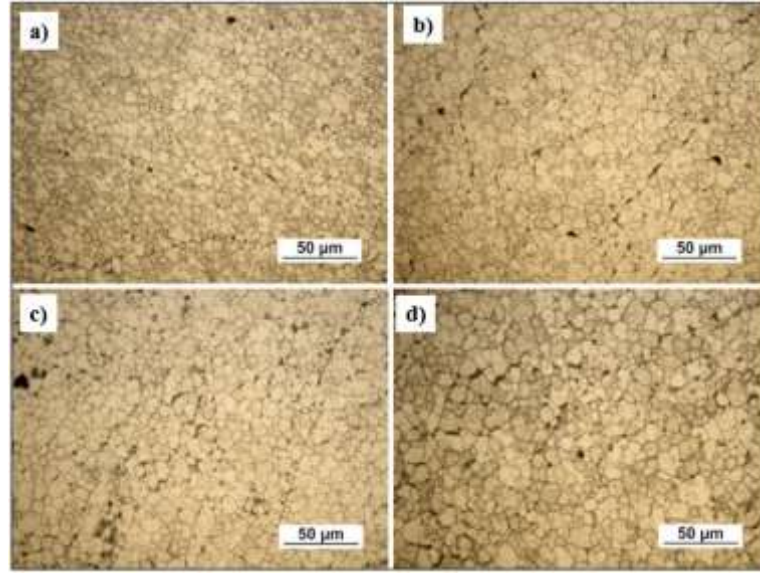
*SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARDA PİM ÇAKIŞMASININ MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ*



**Şekil 5.** Kaynaklı bağlantılardaki kusurlar (a1) K2; (b1, b2) K3; (c1, c2, c3) K5; (d1, d2, d3) K6; (e1, e2, e3) K8; (f1, f2, f3) K9.



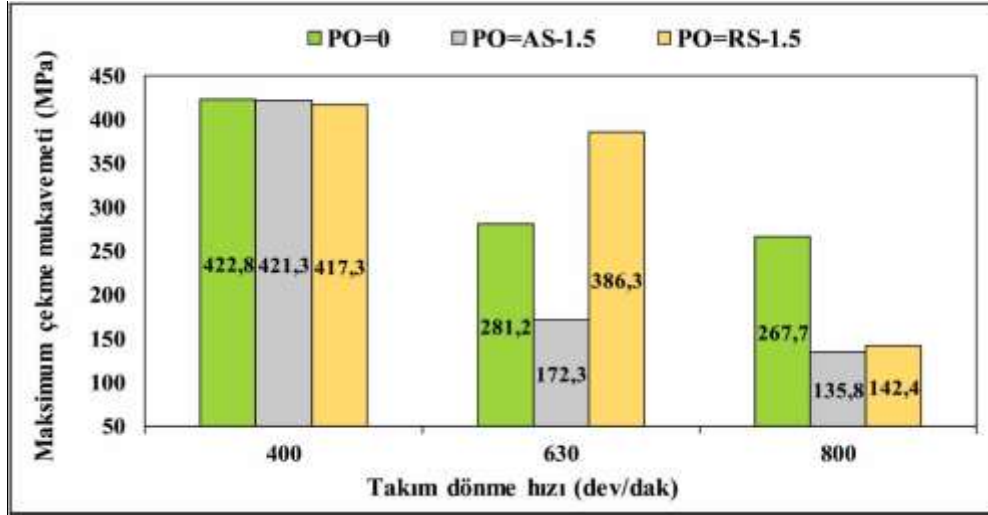
Ş. KASMAN, S. OZAN



Şekil 6. İkinci faz çökeltilerinin tane sınırlarındaki kümelenmeleri (a) K2; (b) K5; (c) K6; (d) K9.

### 3.2. Mekanik Test Sonuçları ve İrdelenmesi

DeneySEL çalışmalar kapsamında kaynak dikişinin çakıştırılması ve çakıştırılmaması durumu ile ilgili olarak kaynak işlemleri üç grup altında toplanmıştır. İlk grup çalışmalarında kaynak dikişinde herhangi bir çakışma olmaksızın kaynak işlemleri gerçekleştirilirken ikinci grup çalışmalar kapsamında ise ilk kaynak dikişi gerçekleştirildikten sonra ikinci kaynak dikişi pim dönüş yönünün ilerleyen tarafına doğru 1,5 mm kaydırılarak gerçekleştirilmiştir. Üçüncü grup kaynak işlemleri ise ilk kaynak dikişinin üzerine ikinci kaynak dikişi, pim geri çekilen tarafına doğru 1,5 mm kaydırılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7. Kaynaklı bağlantıların çekme testi sonuçları.

Kaynaklı bağlantıların çekme testinden elde edilen değerler Tablo 3 ve Şekil 7'de görülmektedir. Bu kapsamda sabit takım dönme hızında, pim ofset mesafesinin kaynak mukavemetine etkisi incelendiğinde görülmüştür ki pim ofset mesafesi olmadan 400 dev/dak'da gerçekleştirilen kaynaklı bağlantının çekme mukavemeti en yüksek değer olan yaklaşık 423 MPa'ı göstermektedir. Ancak aynı takım dönme hızında diğer kaynaklı bağlantıların çekme mukavemetleri oldukça yakın değerlere sahipken bu bağlantılar için standart sapma  $\pm 2,8$  olarak saptanmıştır. Takım dönme hızı 630 dev/dak iken en iyi kaynak mukavemeti pim ofset yönü RS'de iken elde



*SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARDA PİM ÇAKIŞMASININ MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ*

edilmiş olup değeri yaklaşık 386 MPa olarak ölçülmüştür. Kaynak mukavemeti temel alınarak bir değerlendirme yapıldığında en zayıf kaynaklı bağlantı pim ofset yönü AS'de ve takım dönme hızı 800 dev/dak iken gerçekleştirilmiş ve bu koşulda ölçülen çekme dayanımı yaklaşık 136 MPa'dır. Bunun yanında elde edilen bilgiler neticesinde pim ofset mesafesi sabit iken takım dönme hızı arttığında kaynak mukavemetinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Kaynaklı bağlantıların çekme mukavemet değerleri AA-7075 T651 alüminyum alaşımının çekme mukavemeti ile karşılaştırıldığında en yüksek verim %72 olarak ölçülmüştür.

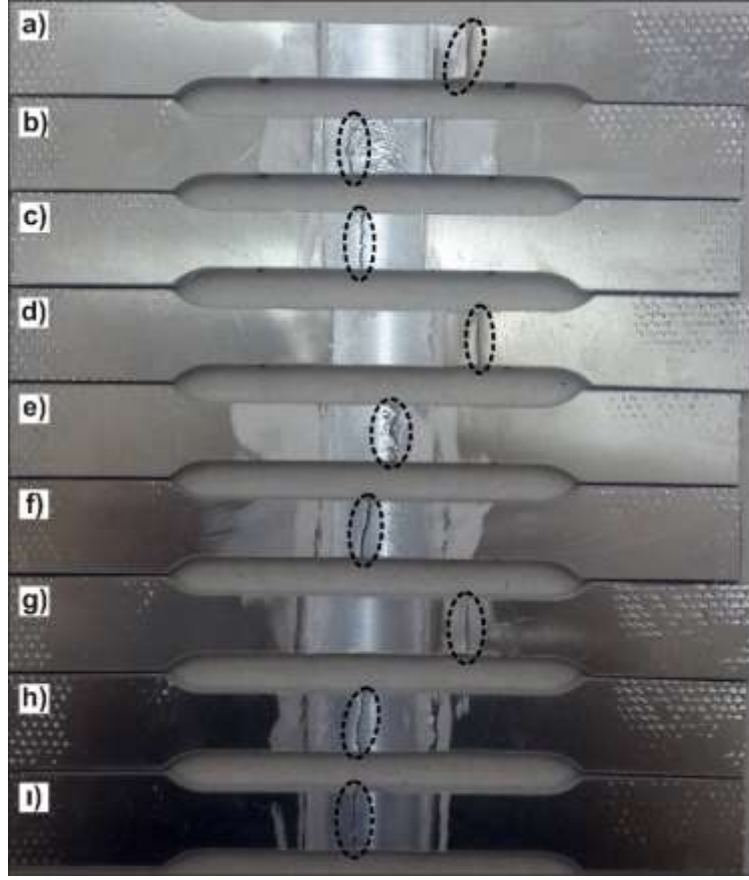
**Tablo 3.** SKK işlem parametreleri ve çekme test sonuçları.

Deney No	İşlem parametreleri		Çekme testi sonuçları		Sertlik (SZ)
	TDH	PO	UTS	$E_p$	HV
K1	400	0	422,8 ± 13,4	10,3 ± 2,7	148,6± 1,1
K2	630	0	281,2 ± 28,5	5,4 ± 0,6	151,2 ± 2,2
K3	800	0	267, 7 ± 27,2	5,6 ± 0,7	157,8 ± 2,6
K4	400	AS-1,5	421,3 ± 2,1	12,1 ± 0,3	146 ± 0,7
K5	630	AS-1,5	172,3 ± 19	3,4 ± 0,4	145,2 ± 10,4
K6	800	AS-1,5	135,8 ± 26,9	2,6 ± 0,6	142,6 ± 6,6
K7	400	RS-1,5	417,3 ± 1,32	12,5 ± 0,8	145,6 ± 3,3
K8	630	RS-1,5	386,3 ± 17,7	9,65 ± 0,7	146,2 ± 8,4
K9	800	RS-1,5	142,4 ± 28,6	3 ± 0,9	141,6 ± 2,4

Şekil 8'de, çekme testi uygulanmış kaynaklı bağlantıların kopma bölgeleri eliptik bir şekil içine alınarak gösterilmiştir. Aynı takım dönme hızında fakat farklı pim ofset mesafelerinde gerçekleştirilen K1, K4 ve K7 kaynaklı bağlantılarında kopma ana metalde ve AS tarafında gerçekleşirken diğer kaynaklı bağlantılarda kopma SZ'de meydana gelmiştir. Mikroyapısal incelemeler neticesinde kusurların RS tarafından başlayıp AS tarafına doğru yoğunlaştığı ve SZ'de pimin uç tarafında kümelenildiği tespit edilmiştir. Bu durum kopmaların SZ'de gerçekleşme sebebinin açıklanmaktadır. Tablo 3 incelendiğinde birim uzama (%) değerlerinin, çekme dayanımı için elde edilen sonuçlarla neredeyse benzer bir eğilim gösterdiği görülmektedir. En yüksek birim uzama değeri olan %12,5 takım dönme hızı 400 dev/dak ve pim ofset yönü RS'de iken elde edilmiştir. Ancak aynı takım dönme hızında pim ofset yönü AS'de iken ölçülen değer olan %12,1'dir ve pim ofset yönü RS'de iken çok yakın bir sonuç verdiği görülmüştür. Takım dönme hızının artması ile birim uzama (%) değerinin azaldığı tespit edilmiştir ki bu durumun artan takım dönme hızının kaynaklı bağlantıda yarattığı kusurlarla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Şekil 8 incelendiğinde tüm kaynak koşulları için kaynak bağlantılarının boyun vermeksizin kopma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir.

Kaynaklı bağlantıların hem çekme dayanımının hem de birim uzama (%) değerlerinin artan sıcaklıkla azalmasının nedenlerinin başında ısı girdi miktarının mikroyapıda yarattığı kusurlar gelmektedir. Buna bağlı olarak çekme testi sırasında kusurların birleşerek daha büyük boyutta kusurlar oluşturması neticesinde nihai kopma meydana gelmektedir. Bu makro kusurlar, kaynaklı bağlantılarda neredeyse hiç boyun vermeden kopmanın gerçekleşmesine neden olmuştur.

Kaynaklı bağlantıların SZ bölgesinde yapılan sertlik ölçüm sonuçları Tablo 3'de listelenmiştir. Çakışma olmaksızın yapılan kaynak bağlantılarının SZ sertlik değeri, artan takım dönme hızı arttıkça artarken, çakışmanın AS yönünde olduğu kaynaklı bağlantılarda sertlik artan takım dönme hızıyla azalmıştır. Buna karşılık çakışmanın RS yönünde olduğu kaynaklı bağlantılarda sertlik artan takım dönme hızıyla önce artmış sonra azalmıştır. Sertlikte aynı parametrenin farklı çakışma oranında farklı eğilim göstermesinde kusurların dinamik rollere sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 8. Kaynaklı bağlantıların çekme testi sonrası kopma bölgeleri (a) K1; (b) K2; (c) K3; (d) K4; (e) K5; (f) K6; (g) K7; (h) K8; (i) K9.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada AA 7075–T651 alüminyum alaşımlı levhalar 400, 630 ve 800 dev/dak takım dönme hızları ve 80 mm/dak kaynak ilerleme hızı ile sürtünme karıştırma kaynak yöntemi kullanılarak kaynak edilmiştir. Sabit bir pim ofset mesafesi ve iki farklı ofset yönü ile üst üste bindirilmiş iki kaynak dikişi için mekanik özelliklerdeki ve mikroyapıdaki değişimler araştırılmıştır. Başlıca sonuçlar aşağıdaki gibidir:

a) En iyi kaynaklı bağlantı 400 dev/dak’da elde edilmiştir. Diğer takım dönme hızları kaynak dikişlerinde makro kusurların oluşmasına sebep olmuştur.

b) İki farklı pim ofset yönü ve 1,5 mm’lik sabit ofset mesafesi için kaynak dikişleri karşılaştırılmıştır. Mekanik özellikler dikkate alındığında RS yönünde gerçekleştirilen kaynaklarda daha başarılı kaynak dikişleri elde edilmiştir.

c) Kaynaklı bağlantılardaki kusurlar makro boyutlu olup RS bölgesinden başlayıp AS bölgesine doğru yönelmiştir. SZ bölgesinde kusurların kapladığı alanlar karşılaştırıldığında en yoğun kusur içeren kaynaklı bağlantılar 800 dev/dak’da meydana gelmiştir.

d) Kaynaklı bağlantıların çekme mukavemet değerleri kaynak edilmemiş olan malzeme ile karşılaştırıldığında en yüksek verim %72 olarak ölçülmüştür.

e) Sertlikte aynı parametrenin farklı çakışma oranında farklı eğilim göstermesinde kusurların dinamik rollere sahip olduğu tespit edilmiştir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından “2017.KB.FEN.002” numaralı proje desteği ile finanse edilmiştir. Yazarlar, projedeki çalışmaların gerçekleşmesinde sağladığı

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARDA PİM ÇAKIŞMASININ MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ**

finansal desteklerden dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerini sunar.

**KAYNAKLAR**

- [1] Sharma, C., Dwivedi, D. K., Kumar, P., "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of AA7039 aluminum alloy", *Materials & Design*, 36, 379-390, 2012.
- [2] Venkateswarlu, G., Davidson, M., Tagore, G., "Influence of process parameters on the cup drawing of aluminium 7075 sheet", *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2, 41-49, 2010.
- [3] Mao, Y., Ke, L., Liu, F., Huang, C., Chen, Y., Liu, Q., "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of 2060 aluminum lithium alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 1419-1431, 2015.
- [4] Hasan, M. M., Ishak, M., Rejab, M. R. M., "Effect of backing material and clamping system on the tensile strength of dissimilar AA7075-AA2024 friction stir welds", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 3991-4007, 2017.
- [5] Xu, W. F., Li, Z. X., Sun, X. H., "Effect of Welding Speed on Mechanical Properties and the Strain-Hardening Behavior of Friction Stir Welded 7075 Aluminum Alloy Joints", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26, 1938-1946, 2017.
- [6] Zhou, L., Li, G. H., Liu, C. L., Wang, J., Huang, Y. X., Feng, J. C., Meng, F. X., "Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded Al-Mg-Si alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89, 3509-3516, 2017.
- [7] Golezani, A. S., Barenji, R. V., Heidarzadeh, A., Pouraliakbar, H., "Elucidating of tool rotational speed in friction stir welding of 7020-T6 aluminum alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 1155-1164, 2015.
- [8] Mohammadzadeh Jamalian, H., Farahani, M., Besharati Givi, M. K., Aghaei Vafaei, M., "Study on the effects of friction stir welding process parameters on the microstructure and mechanical properties of 5086-H34 aluminum welded joints", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 611-621, 2016.
- [9] Daniolos, N. M., Pantelis, D. I., "Microstructural and mechanical properties of dissimilar friction stir welds between AA6082-T6 and AA7075-T651", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 88, 2497-2505, 2017.
- [10] Dehghani, K., Ghorbani, R., Soltanipoor, A. R., "Microstructural evolution and mechanical properties during the friction stir welding of 7075-O aluminum alloy", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 77, 1671-1679, 2015.
- [11] Mao, Y. Q., Ke, L. M., Chen, Y. H., Liu, F. C., Xing, L., "Improving local and global mechanical properties of friction stir welded thick AA7075-T6 joints by optimizing pin-tip profile", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 88, 1863-1875, 2017.
- [12] Palanivel, R., Koshy Mathews, P., Murugan, N., Dinaharan, I., "Effect of tool rotational speed and pin profile on microstructure and tensile strength of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminum alloys", *Materials & Design*, 40, 7-16, 2012.
- [13] Mishra, R. S., Ma, Z. Y., "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50, 1-78, 2005.
- [14] Sundaram, N. S., Murugan, N., "Dependence of ultimate tensile strength of friction stir welded AA2024-T6 aluminium alloy on friction stir welding process parameters", *Mechanics*, 78, 17-24, 2009.
- [15] Peel, M., Steuwer, A., Preuss, M., Withers, P. J., "Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds", *Acta Materialia* 51, 4791-4801, 2003.
- [16] Gemme, F., Verreman, Y., Dubourg, L., Wanjara, P., "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of AA7075-T6 friction stir welded joints", *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 34, 877-886, 2011.
- [17] Franchim, A. S., Fernandez, F. F., Travessa, D. N., "Microstructural aspects and mechanical properties of friction stir welded AA2024-T3 aluminium alloy sheet", *Materials & Design*, 32, 4684-4688, 2011.
- [18] ASTM. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.

Ş. KASMAN, S. OZAN

- [19] Gupta, R. K., Das, H., Pal, T. K., “Influence of Processing Parameters on Induced Energy, Mechanical and Corrosion Properties of FSW Butt Joint of 7475 AA”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21, 1645-1654, 2012.
- [20] Karthikeyan, L., Senthil Kumar, V. S., “Relationship between process parameters and mechanical properties of friction stir processed AA6063-T6 aluminum alloy”, *Materials & Design*, 32, 3085-3091, 2011.