



## Alüminyum Magnezyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Kaynak Edilebilirliğinin Değerlendirilmesi

Musa BİLGİN<sup>1,\*</sup>, Şener KARABULUT<sup>2</sup>, Ahmet ÖZDEMİR<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hacettepe Üniversitesi, Başkent O.S.B. Teknik Bilimler M.Y.O. , 06909, Sincan, Ankara

<sup>2</sup> Hacettepe Üniversitesi, Ankara Sanayi Odası 1. O.S.B M.Y.O. , 06935, Sincan, Ankara

<sup>3</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fak. , İmalat Mühendisliği, 06500, Teknikokullar, Ankara

### Öz

Hava, kara ve deniz taşımacılığında kullanılan araçlarda sera gazı emisyonlarını azaltmanın ve enerji korunumu artırmanın en iyi yollarından biri alüminyum ve magnezyum gibi daha hafif ve dayanıklı malzemeler kullanmaktır. Fakat her iki metalin klasik ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmelerinin zor olması ve özel işlem gerektirmeleri Al ve Mg alaşımlarının ortak yapılar da kullanılmalarını sınırlandırmıştır. Bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynak (SKK) yöntemi kullanılarak Al/Mg alaşımlarının birleştirilmesiyle ilgili yapılan çalışmalar değerlendirilerek, SKK yönteminin de kullanılan değişkenlerin (ilerleme hızı, devir sayısı, eğim açısı, eksenel dalma kuvveti, takım tasarımı, takım kaydırma mesafesi ve malzemelerin pozisyonları); kaynak kalitesi, mikro yapı ve mekanik özellikler üzerine etkileri incelenmiştir. Al/Mg malzeme çiftinin SKK yöntemi ile birleştirilmesinde kaynak kalitesini etkileyen en önemli unsur birleşme bölgesinde oluşan gevrek yapıdaki  $Al_3Mg_2$  ( $\beta$ ) ve  $Al_{12}Mg_{17}$  ( $\gamma$ ) intermetalik bileşiklerdir. Al/Mg alaşımların SKK yöntemi ile birleştirilmesinde kaynak bölgesinin çekme dayanımı, ana metal Al alaşımların çekme dayanımının % 60 üstünde oluşabilmektedir.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 14/10/2016

Düzeltilme: 23/01/2017

Kabul: 02/12/2017

### Anahtar Kelimeler

Alüminyum alaşımı  
Magnezyum alaşımı  
Sürtünme karıştırma  
kaynağı

### Keywords

Aluminum Alloy  
Magnesium Alloy  
Friction Stir Welding

### The Assessment of Aluminum Magnesium Alloys' Weldability with Friction Stir Welding

#### Abstract

One of the best ways to decrease emissions of greenhouse gas and increase protection of energy from vehicles used for air, land and sea transport is to use lighter and more durable materials such as aluminum and magnesium. However, it is difficult to combine each of two metals with conventional fusion welding methods and specific process requirements have restricted the usage of Al and Mg alloys in common structures. In this review study, the experimental studies about the joining of Al / Mg alloys by using friction stir welding (FSW) method were evaluated and the effect of welding parameters used in friction stir welding process such as feed rate, spindle speed, rake angle, axial pressure force, tool design, tool offset distance and positions of materials on the weld quality, microstructure and mechanical properties were analyzed. The most important factor affecting on welding quality is  $Al_3Mg_2$  ( $\beta$ ) and  $Al_{12}Mg_{17}$  ( $\gamma$ ) intermetallic on the brittle structure which occurs on joining area in the FSW of Al/Mg material pair. The tensile strength of the joining zone can be more than 60% of the Al alloy compared to the base metal in the welding of Al / Mg alloys with FSW method of by using correct joining parameters.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz endüstrisinde teknik ve ekonomik faktörler nedeniyle farklı metallerin kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Ancak mekanik, fiziksel ve metalurjik özelliklerinin farklılığından dolayı farklı metallerin kaynağını yapmak oldukça zordur [2].

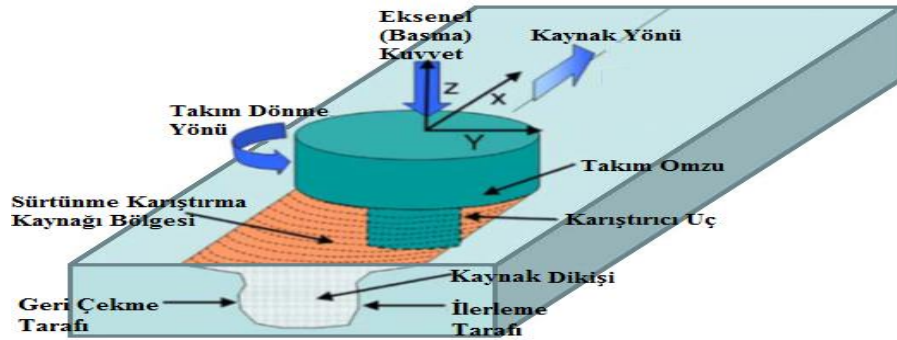
Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) TWI (The Welding Institute) tarafından 1991 yılında İngiltere'de geliştirilmiş bir katı hal kaynak yöntemidir [3]. SKK yöntemi son yıllarda metallerin birleştirmesindeki en

\*İletişim yazarı, e-mail: musabilgin@hacettepe.edu.tr

önemli gelişmelerden birisi olmuştur [4]. SKK yöntemi ilk olarak Al alaşımlarının birleştirilmesi amacıyla geliştirilmesine rağmen, son zamanlarda yüksek performanslı takım malzemelerinin kullanılmasıyla Titanyum, Nikel ve Çelik gibi yüksek ergime derecesine sahip metallere de kaynağı yapılabilmektedir [5]. Günümüzde SKK yöntemi ile Al alaşımı/Çelik [6-8], Mg alaşımı/Çelik [9], Al alaşımı/Bakır [10], Ti/Çelik [11] ve Al/Mg [12-14] gibi farklı metaller birleştirilebilmektedir.

SKK yöntemi genellikle silindirik kesitli malzemelere uygulanan ve katı faz kaynağı olan sürtünme kaynağı yönteminden geliştirilmiştir [15]. SKK yöntemiyle alın, bindirme ve T kaynağı gibi tüm pozisyonlarda birleştirme olanağı sağlamaktadır [4,16]. SKK yöntemi uygulanması esnasında düşük enerji tüketimi, gaz salınımının olmaması, ışın oluşmaması, elektrot, dolgu maddesi, toz ve korucu gaz gibi maddelere ihtiyaç duyulmamasından dolayı çevreci bir kaynak teknolojisidir. Ayrıca kısa kaynak süresi, kaynak ağzı hazırlığı gerekmemesi, kaynak parametrelerinin kontrol edilebilirliği ve otomasyona yatkınlığı gibi kendine özgü avantajlarından dolayı geleneksel yöntemlerle kıyaslandığı zaman maliyet çok düşük kalmaktadır. SKK yönteminin klasik ergitme kaynaklar yöntemlerine göre birçok üstünlüğünün bulunması uygulama alanlarını genişlemesine ve kullanımının hızla artmasını sağlamaktadır [4,17-23].

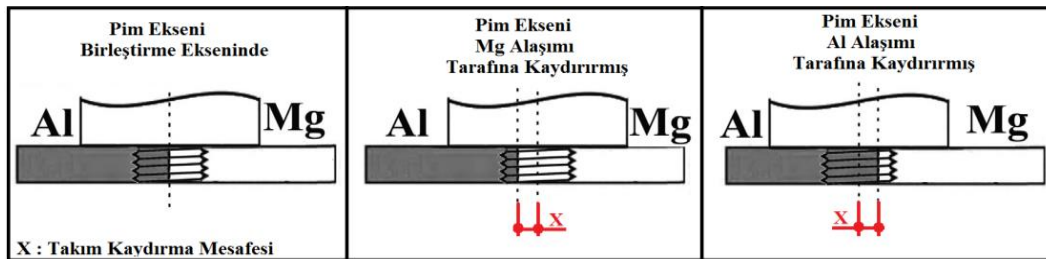
SKK yönteminin temel kavramı oldukça basittir. Pim ve omuz ile özel olarak tasarlanmış dönen takım birbirine yaslanan sac ya da plakaların içine dalar ve kaynak hattı boyunca ilerler (Şekil 1). İş parçası ile dönme ve ilerleme hareketine sahip karıştırıcı uç arasında meydana gelen sürtünme, karıştırıcı ucun etki ettiği bölgede ısı girdisi oluşturur. Isınan malzeme yumuşar, plastik olarak şekil değiştirir ve takımın basma kuvvetinden dolayı, yüksek nitelikli katı hal durumunda çarpılma olmaksızın birleştirme işlemi gerçekleşir [4, 24, 25].



Şekil 1. SKK yönteminin şematik çizimi (Schematic drawing of friction stir welding)[4]

SKK yöntemine takımın iki temel görevi vardır. Birincisi; omuz kısmının metallere sürtünerek sürtünme ısısı oluşturması, ikincisi ise; pim kısmının yüksek devirde dönerek oluşturduğu yoğun deformasyonla malzemenin taşınmasını sağlayarak birleştirme işlemini gerçekleştirmesi [4].

Aynı tür malzemelerin SKK yöntemi ile birleştirilmesinde önemli parametreler takım dizaynı, devir sayısı, ilerleme hızı, takım eğim açısı ve eksenel dalma kuvveti [4, 26] iken farklı türden malzemelerin birleştirilmesinde bunlara ek olarak farklı malzemelerin pozisyonları ve takım kaydırma mesafesi de eklenir [2]. Şekil 2' de karıştırıcı takım ekseninin birleştirme ekseninde ve belli bir takım kaydırma mesafesi kullanılarak ilerleme ya da geri çekme tarafına konumlandırılması gösterilmiştir.



Şekil 2. Takım kaydırma mesafesi (Tool offset distance) [27]

Magnezyum ve alüminyum alaşımları havacılık, uzay, otomotiv, makine, elektrik ve kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle Al/Mg alaşımlarının birleştirilmesi kaçınılmazdır [28, 29]. Günümüzde, zırhlı tanklar ve araçlarda [30], havacılık motorları ve bileşenlerinde [31] ve bisiklet

üretiminde [32] Mg/Al yapılar kullanılmaktadır. Mg/Al alaşımlarının güvenilir bir şekilde birleştirilmesi endüstride kullanımlarını daha da artıracaktır [33, 34].

Gelişen havacılık ve kara taşımacılığı endüstrisinin amacı; güvenlikten ödün vermeden araçların ağırlığını azaltarak performanslarını arttırmaktır [35, 36]. Al ve Mg alaşımları hafiflik ve dayanımı bir arada bulundurduklarından dolayı önemleri sürekli artmakta ve her iki alaşımının kullanıldığı karma yapılar büyük önem arz etmektedir [36, 37].

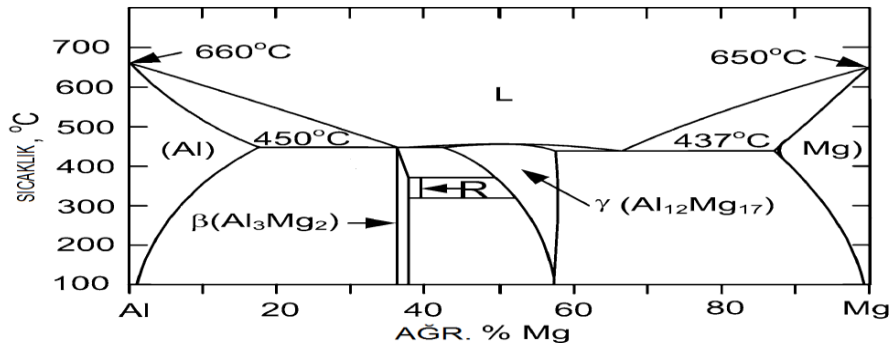
Sweeder, bir araçtaki %10'luk ağırlık azalmasıyla aşağıdaki sonuçların oluşacağını ileri sürmüştür [38]:

- Yakıt tasarrufu – 0,8 lt/100km iyileşme
- Performans iyileştirmesi – 0-100 km/h hızlanmada 0,5 s düşüş
- Emisyonların azaltılması - % 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
- Mevcut donanımların artırılması – DVD çalar, araç içi eğlence sistemleri gibi.

Alüminyum ve magnezyum alaşımlarının birlikte uygulanmasıyla hafifliğin getirdiği avantaj sayesinde; küresel petrol kaynaklarının korunması, tasarım ve üretimde esneklik, mekanik gelişime ve maliyetlerin azalması sağlanacaktır [14, 33, 35, 37, 39, 40]. Yukarıda sayılan bu avantajlara ek olarak elektrik enerjisi ile çalışan, manevra kabiliyeti yüksek araçların üretiminin daha kolay ve nitelikli olacaktır.

Al/Mg alaşımlarının birlikte kullanıldığı gövde yapılarının geliştirilmesi için her iki alaşım türünün güvenli bir şekilde birleştirilmesi gerekmektedir. Fakat Al/Mg alaşımlarının TIG [41], MIG [31], lazer kaynağı [42, 43] gibi çeşitli ergitme kaynağı yöntemleri birleştirilmesinde oluşan iri taneli, gevrek ve yüksek sertlikteki Al-Mg intermetalik bileşiklerin kötü mekanik özellikleri, kaynak bölgesinde oluşan çatlaklar ve gözenekler sebebiyle kaynak dayanımı düşürmektedir. Bu metotların uygulamasının zor ve özel işlemler gerektirmesi, ergitme kaynak yöntemlerinin Al/Mg malzeme çiftinin birleştirilmesi için pratik olmadığını göstermektedir [14, 30, 36, 44, 45].

Şekil 3'de verilen ikili faz diyagramı [46] ile Al/Mg alaşımlarının kaynak sonrası oluşan intermetalik bileşiklerin  $Mg_2Al_3$  ve  $Mg_{17}Al_{12}$  şeklinde oluştuğu görülmektedir [47]. Al ve Mg alaşımlarının ortalama sertlik değerleri 25-60 HV arasında iken oluşan intermetalik bileşiklerin sertlikleri arayüz yerleşim yerine bağlı olarak 152 -221 HV arasında değişmektedir [48].

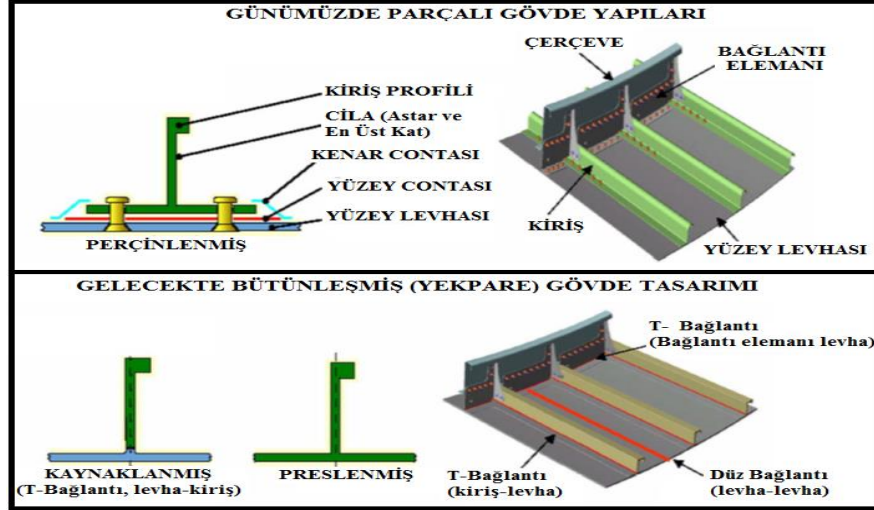


Şekil 3. Al-Mg ikili faz diyagramı (Al-Mg binary phase diagram) [46]

Günümüzde kaynakla birleştirilmesi zor olan malzemeler perçin ile birleştirilmektedir. Fakat imalat zorlukları, ağırlığı arttırması, yüksek maliyeti, perçin deliklerinde korozyon ve gerilme konsantrasyonunun oluşması perçinlemenin başlıca olumsuz etkileridir [49]. Günümüzde perçin kullanılarak oluşturulan parçalı gövde yapıları gelecekte SKK yöntemiyle birleştirilerek yada yekpare üretilerek kullanılması planlanmaktadır (Şekil 4) [50].

Al / Mg alaşımlarının ergitme kaynak yöntemleri ve perçinlemenin dezavantajlarından dolayı her iki malzemenin ortak yapılarda kullanılması kısıtlanmıştır. Katı hal kaynağı olan SKK yöntemi Al/Mg alaşımlarının birleştirilmesi için en ideal yöntemlerden biridir. SKK yöntemi ergitme kaynağı yöntemleri ile kıyaslandığında birleştirme esnasında meydana gelen düşük ısı girdisi sayesinde intermetalik bileşiklerin

oluşumu azalarak yüksek mukavemetli bir birleştirme gerçekleştirilebilmektedir. Perçinleme ile kıyaslandığında ise daha hızlı bir birleştirme gerçekleştirilmesinin yanı sıra hem perçin deliklerinin sebep olduğu korozyon ve gerilme konsantrasyonunun hem de perçinin sebep olduğu ağırlık artışı engellenmiş olacaktır. SKK yöntemi kullanarak Al / Mg alaşımların birleştirilmesiyle Al ve Mg kullanılan ortak yapıların sayıları gün geçtikçe artmaktadır



Şekil 4. Parçalı ve bütünleşmiş gövde tasarımının uçak parçalarında gösterimi (Display of the partial casing and the integrated casing design on parts of aerostructures) [50]

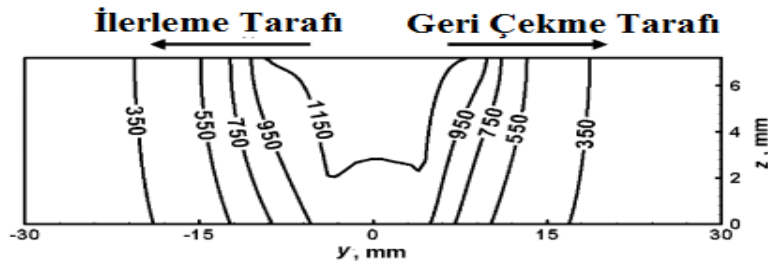
Bu çalışmada; Al/Mg alaşımlarının SKK yöntemi ile birleştirilmesine yönelik daha önce yapılan çalışmalar incelenerek; SKK yönteminin de kullanılan değişkenlerin; kaynak kalitesi, mikro yapı ve mekanik özellikler üzerine etkileri incelenmiştir. Al/Mg alaşımlarının SKK yöntemi ile birleştirilmesinde karşılaşılan en önemli sorun birleşme bölgesinde oluşan gevrek yapıdaki  $Al_3Mg_2$  ( $\beta$ ) ve  $Al_{12}Mg_{17}$  ( $\gamma$ ) intermetalik bileşiklerdir. Isı girdisinin azaltılması ile intermetalik bileşiklerin oluşumu en aza indirmek mümkündür. Fakat ısı girdisinin gereğinden fazla azaltılması yetersiz karıştırmaya neden olarak mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir.

## 2. KAYNAK PARAMETRELERİNİN ETKİLERİ (EFFECT OF WELDING PARAMETERS)

### 2.1 Malzeme Çiftlerinin Konumunun Etkisi (The Effect of Materials Pair's Position)

Birleştirilen plakaların konumlarını belirleyen esas etken karıştırıcı pimin dönme yönü ve eğer vidalı pim/uç kullanılıyorsa vida dış yönüdür (sol veya sağ helis). Sabitlenmiş plakalar pimin dönme yönüne göre ilerleme ya da geri çekilme tarafında konumlanmaktadır.

SKK yönteminde ısı girdisi temel olarak karıştırıcı takım omuzunun birleştirilecek malzemelere eşit kuvvet ile bastırılarak sürütmesi ile oluşmaktadır [4] ve en yüksek sıcaklık bu kısımda oluşmaktadır. Aynı tür malzemelerin SKK yöntemi ile birleştirilmesinde hem bilgisayar simülasyonunda hem de deneysel ölçümlerde ilerleme tarafında oluşan ısı girdisinin geri çekme tarafına göre daha fazla olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 5) [5, 51 – 53].

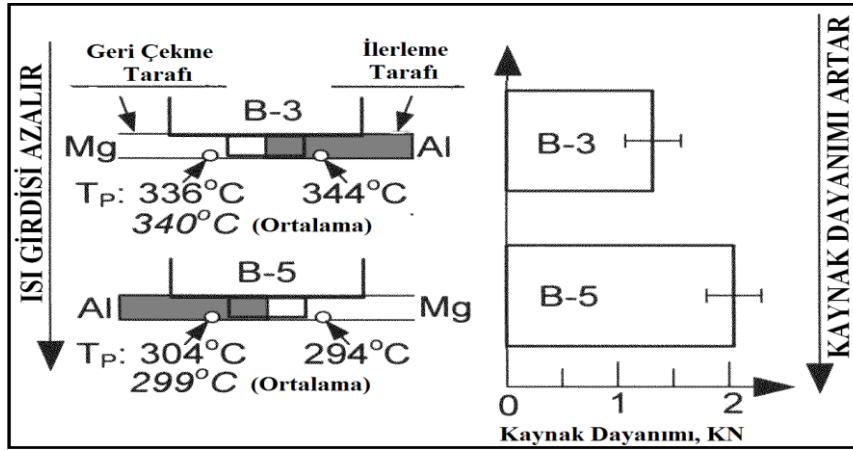


Şekil 5. Aynı tür malzemelerin SKK birleştirilmesinde sıcaklık dağılımı (Temperature distribution that similar material joined with FSW) [54].

Aynı tür malzemelerin SKK ile birleştirilmesinde geri çekme tarafına göre ilerleme tarafında ısı girdisinin fazla olması malzeme akışı ile ilgilidir. Çünkü ilerleme tarafındaki malzeme karıştırıcı takım tarafından ileri itilirken, geri çekme tarafındaki malzeme geriye doğru itilmektedir. Bu durumda ilerleme tarafındaki malzeme takıma ters yönde geri çekme tarafındaki malzeme ise takım ile aynı yönde akmasına bağlı olarak ilerleme tarafında geri çekme tarafına göre daha fazla kayma ve ısı girdisi meydana gelmektedir [55]. Malzeme akışının sebep olduğu bir diğer durum ise, karıştırma bölgesindeki malzeme pimin açtığı boşluğu doldurmak için ilerleme tarafından geri çekme tarafına doğru akış gösterdiğinden dolayı ilerleme tarafındaki malzemenin daha uzun akış mesafesi vardır. Uzun akış mesafesi ilerleme tarafındaki ısı girdisinin artmasına neden olmaktadır [56]. Isıl iletkenliği düşük malzemelerde ilerleme tarafı geri çekme tarafı arasındaki sıcaklık farkı yüksekken ısıl iletkenliği yüksek Al ve Mg gibi malzemelerde bu fark daha azdır [55].

Ayrıca aynı tür malzemelerin SKK yöntemi ile birleştirmelerinde özellikle geri çekilme tarafında porozite oluşmaktadır. Bu durum geri çekilme tarafının sertliğinin ve mekanik özelliklerinin ilerleme tarafına göre daha düşük olmasına neden olmaktadır [57 – 60].

Araştırmacılar Al ve Mg alaşımlarını SKK yöntemi ile birleştirilmesinde ilerleme tarafına Al yerleştirerek [32, 36, 39, 44, 56, 61 - 65], Mg yerleştirerek [12, 14, 39, 66] ve her iki plakayı [27, 40, 67 – 72] yerleştirerek çalışmalar yapmışlardır. Al ve Mg alaşımlarının birleştirilmesinde malzemelerin pozisyonlarının kaynak dayanımına etkisini incelemek için ilk olarak malzeme pozisyonlarının ısı girdisi üzerine etkisi incelenmelidir [55]. Al ve Mg alaşımlarının SKK yöntemi ile birleştirilmelerinde malzeme pozisyonlarının sıcaklık ve dayanım değerlerine etkisi Şekil 6'de gösterilmiştir.



**Şekil 6.** AZ 31 Mg ve 6061 Al alaşımlarının SKK yöntemi ile alın kaynağında Malzeme pozisyonlarının ısı girdisi ve kaynak dayanımı üzerine etkisi (Effect of material position on the joint strength and the heat input in butt joint FSW of AZ31 Mg and 6061 Al) [55]

Şekil 6'da görüldüğü üzere aynı birleştirme parametrelerinde Al-Mg alaşımlarının SKK yöntemi ile birleştirilmesinde Al alaşımlarının hem ilerleme hem de geri çekme tarafına konumlandırılmaları ile Mg alaşımına göre ısı girdisi yüksek olmaktadır. Bunun sebepleri ise:

- Al alaşımları Mg alaşımlarına göre sürtünme ile daha yüksek ısı üretmektedir [73, 74].
- Al alaşımlarının yüzey merkezli kübik yapısı, Mg alaşımlarının sıkı düzen hegzagonal yapısına göre deformasyon için daha fazla aktif kayma düzlemi vardır. Bu yüzden Al Mg ile kıyaslandığında daha fazla deforme olabilir ve ısı açığa çıkar [27, 55].
- Başta AZ ve AM serisi olmak üzere pek çok Mg alaşımının için alaşım elementi olarak geniş çapta Al kullanılmaktadır. 437 derecede Magnezyumca zengin matris içinde  $Al_{12}Mg_{17}$  oluşmaktadır. Bu sıvı film karıştırma bölgesinde Mg tarafında takım ile malzeme arasına girerek takımın kaymasına sebep olur bunun sonucunda sürtünme ile oluşan ısı azalır [55].

Ayrıca Al ilerleme tarafına konumlandırılması ile geri çekme tarafına konumlandırılması arasında ortalama sıcaklıkta yaklaşık  $40^{\circ}C$  fark meydana gelmektedir. Bu fark daha önce bahsedildiği gibi ilerleme tarafında malzemenin takıma ters akış göstermesi ve pimin açtığı boşluğu doldurmak için daha uzun akış mesafesi gerekmesidir. Çünkü Al alaşımları (AA 2024 – T3 için;  $\sigma_{AK}$ : 345 MPa) ile Mg alaşımları (AZ 31 B – H24

için;  $\sigma_{AK} : 220 \text{ MPa}$ ) kıyaslandığında, Al alaşımlarının sertliği ve yüksek sıcaklıklarda mukavemeti daha fazladır. Bu durum, Al alaşımlarının daha yüksek akış direnci göstermesine yol açmakta ve dolayısıyla ilerleme tarafına Al plakanın yerleştirilmesi daha yüksek sıcaklıklar oluşmasına neden olmaktadır [56].

SKK yöntemi kaynak metalinin erimediği katı hal kaynak yöntemi olmasına rağmen farklı malzemelerin karıştırılması esnasında yapısal sıvılaştırma meydana gelebilmektedir [14]. Al/Mg ikili faz (Şekil 3) diyagramı incelendiğinde iki ötektik vardır; birincisi alüminyumca zengin faz ve  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  arasında, ikincisi ise Magnezyumca zengin faz ile  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  arasındadır. Birinci ötektik sıcaklık  $450^\circ\text{C}$ , ikinci ötektik sıcaklık ise  $437^\circ\text{C}$  dir. Her iki ötektik sıcaklıkta Al ( $660^\circ\text{C}$ ) ve Mg ( $650^\circ\text{C}$ ) alaşımlarının eğime derecesinin altındadır. Isı girdisi arttıkça Al tarafında  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  ve Mg tarafında  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  intermetalik bileşiklerinin oluştuğu görülmektedir. Isı girdisi arttıkça  $437^\circ\text{C}$  ötektik sıcaklığında  $\text{Mg} + \text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} \rightarrow \text{L}$  ve  $450^\circ\text{C}$  ötektik sıcaklığında  $\text{Al} + \text{Al}_3\text{Mg}_2 \rightarrow \text{L}$  oluşmaktadır. Bu sıvı oluşumuna yapısal sıvılaştırma denilmektedir [14, 75-79].

Artan ısı girdisi ile sıvılaştırmada artmaktadır [77]. Oluşan sıvı filmler Al/Mg ara yüzeyinde ve tane sınırları boyunca oluşabilmektedir. Sıvı filmler Al-Mg ara yüzeyinin zayıflamasına, çatlak oluşumuna, intermetalik bileşiklerin artmasına ve olumsuz malzeme akışına neden olarak kaynak dayanımını önemli bir ölçüde düşürmektedir [27, 55]. Şekil 6 da artan ısı girdisi ile kaynak dayanımı arasındaki ters orantı gösterilmiştir.

Al plakanın ilerleme tarafına yerleştirilmesi ile kaynak bölgesinde düzensizlik, yetersiz karışımı gösteren zikzak şeklinde çizgiler ve çapak oluşumu tespit etmişlerdir. İlerleme tarafına Mg plakanın yerleştirilmesi ile pürüzsüz yarım dairesel izler oluşmuş, yüzey çizgileri ve yarı (kanal, oluk) gibi kusurlar gözlenmemiştir. Karıştırma işleminde Al ve Mg birbirine nüfuz etmesi ile daha homojen karışım elde edilmiştir [39].

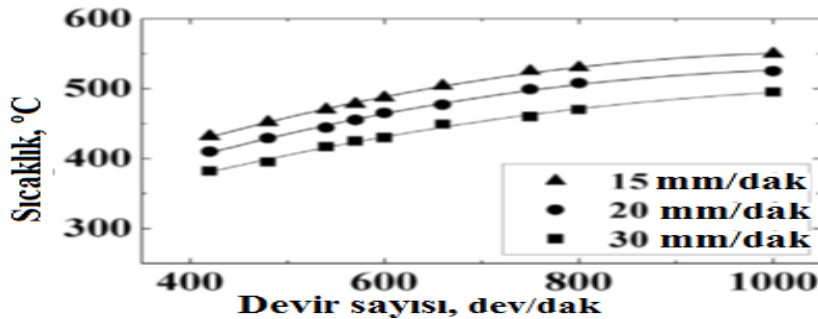
Simoncini M. ve Forcellese A.,(2012) Mg plakayı ilerleme tarafına konumlandırırdıklarında kaynak bölgesinin daha kaba bir yüzey pürüzlülüğü elde etmişlerdir. Bu durumun kaynak ucu üzerinde malzeme kaynaklanmasından (BUE) dolayı oluştuğu düşünülmektedir [71]. BUE (Built Up Edge) özellikle sünek malzemelerin düşük sıcaklıklarında ve yüksek basınç altında birleştirilmesi esnasında ana metalden kopan parçacıkların takıma kaynaklanması ile oluşmaktadır [80].

## 2.2.Devir Sayısı Ve İlerleme Hızının Etkileri (The Effect of Rotational Speed and Travel Speed)

Al ve Mg alaşımlarının birleştirilmesinde oluşan gevrek yapıdaki  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  ve  $\text{Mg}_2\text{Al}_3$  intermetalik bileşikler kaynak kalitesini direkt etkilemektedir. Bu intermetalik bileşiklerin oluşumu ısı girdisi ile doğru orantılıdır. İlerleme hızı ve devir sayısının uygun bir kombinasyonla seçilmemesi işlem esnasında ısı girişini etkilemektedir. Devir sayısı ile ısı oluşumu doğru ilişkili ( $w$ ), kaynak hızı ( $v$ ) ile ısı oluşumu arasında ters ilişki vardır, ısı girdisi ile ilerleme hızı ve devir sayısı arasındaki eşitlik aşağıda verilmiştir [62]. Şekil 7’de ilerleme hızı devir sayısına bağlı olarak ısı girdisinin değişimi gösterilmektedir.

$$\frac{w}{v} \propto \text{Isı Girdisi}$$

(1)

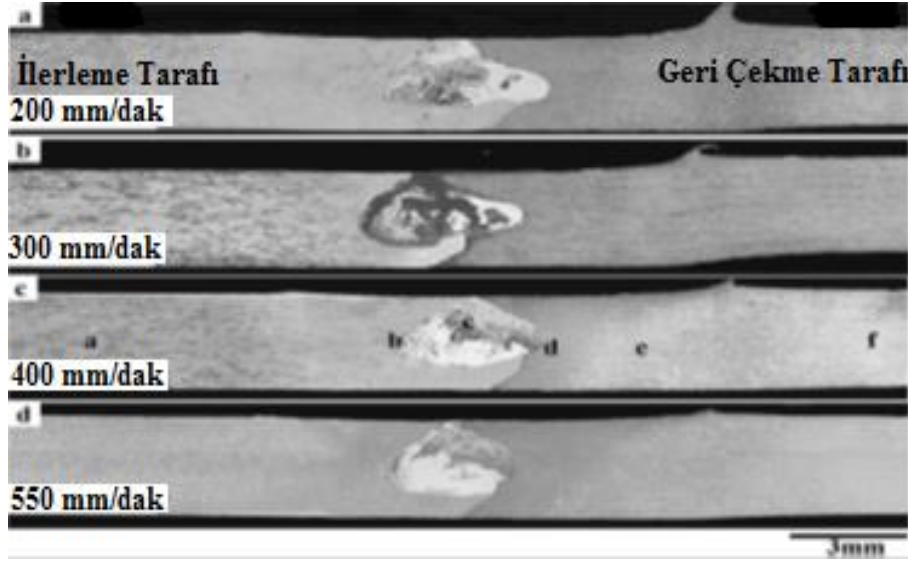


Şekil 7. AA 1100 –AZ 31 alaşımlarının birleştirilmesinde ilerleme ve devirin sıcaklık üzerine etkisi (The effect of rotational and travel speed on the temperature which alloys of AA 1100 – AZ 31 B welding) [27]

Şekil 7’de oluşan en yüksek kaynak sıcaklığı Al-Mg ötektik sıcaklıklarından fazladır. Bu nedenle düşük ilerleme ve yüksek devir sayılarında karıştırma bölgesinde sıvılaştırma beklenmektedir. Sıvı filmler Al-Mg ara yüzünü zayıflattıkları gibi SKK esnasında arayüz boyunca sıcak çatlaklara neden olabilirler [14]. Kaynak

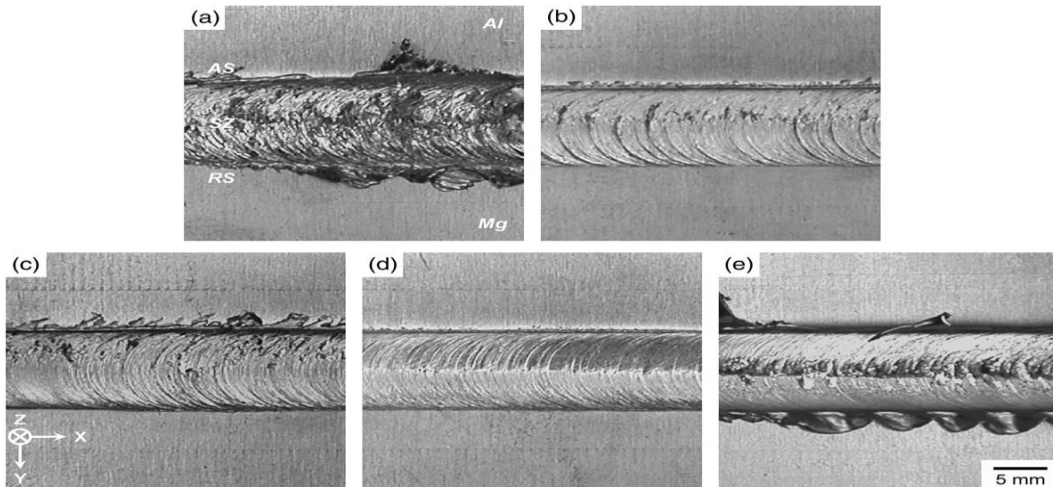
işlemden sonra sıvı filmler soğuk çatlak duyarlılığına sahip kırılğan intermetalik bileşiklere dönüşür [27]. Yüksek ısı oluşumu malzemenin plastikleşme hızını yükseltir ve plastikleşen malzeme kaynak içinde muhafaza edilemez. Bu ise dikiş kenarında yapışmaya neden olur [81]. İntermetalik bileşik oluşumunu engellemek için ısı girdisini düşürmek gerekmektedir. Isı girdisi devir sayısının düşürülmesi ya da kaynak hızının artırılması ile azaltılabilmektedir. Fakat bu iki işlemi gerçekleştirmek olumsuz sonuçlara neden olabilmektedir. Çünkü karıştırma bölgesindeki sıcaklığın düşmesi malzeme akışını engellemektedir. Bu durum kilitleme eksikliği, boşluklar ve çatlaklardan dolayı güçlü kaynak elde edilmesini engeller [27, 62].

Kaynak adımı (kaynak hızı / devir sayısı) malzemenin akış deseninde önemli bir etkiye sahiptir [82]. Artan kaynak hızı ile kaynak dikişinde küçülme ve yuvarlaklaşma meydana gelmektedir. Kaynak hızı farklı malzemelerin birleştirilmesini mikroyapı değişimini (Şekil 8) etkileyen önemli bir parametredir [83].



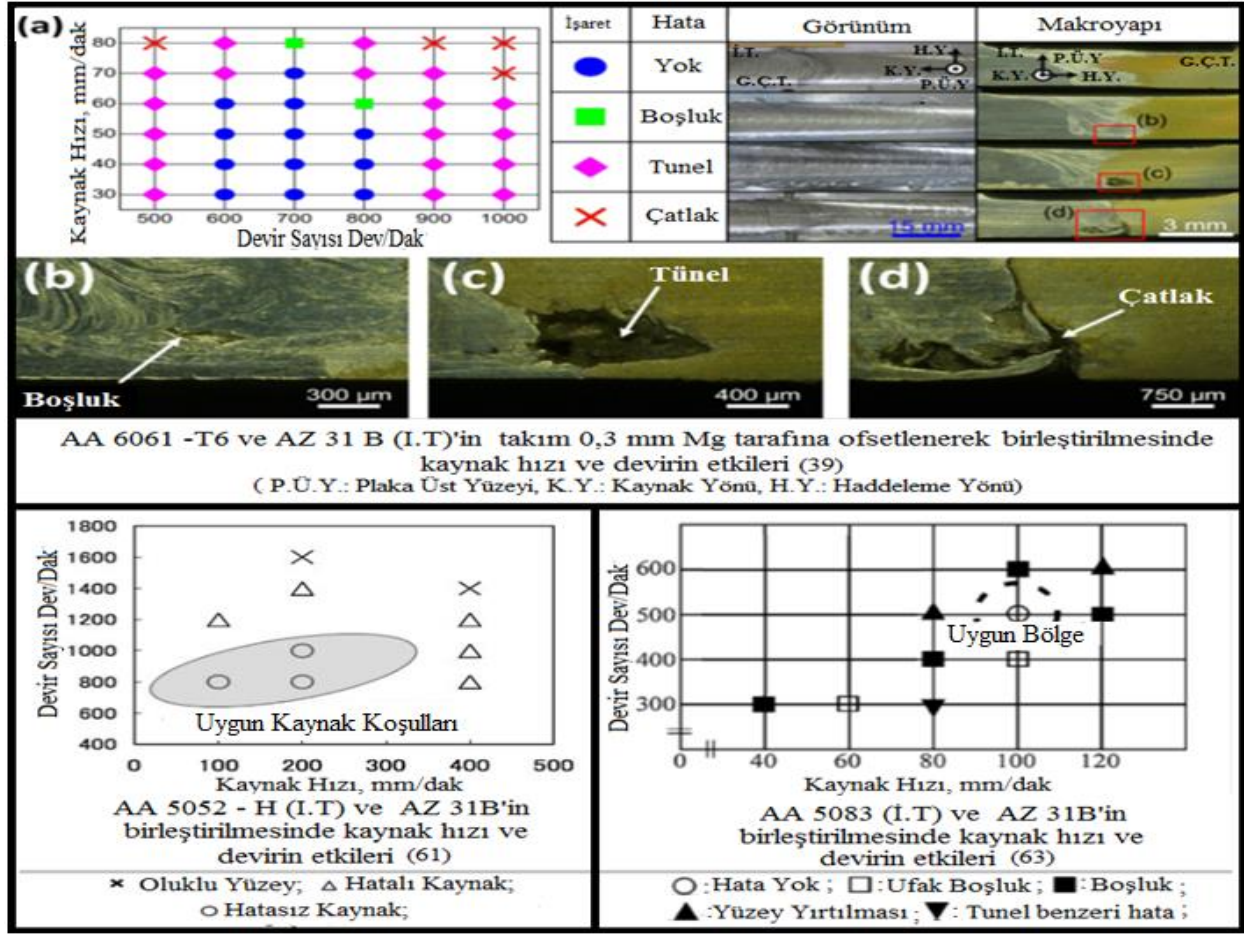
**Şekil 8.** AA 2024 – T3 (ilerleme tarafı) ve AZ 31 B (geri çekme tarafı) birleştirilmesinde farklı kaynak hızlarında karıştırma bölgesinin makro yapısı; a) 200, b) 300, c): 400, ve d) 550 mm/dak (Macrostructure of mixing area on different welding speeds to join 2024-T3 (advancing side) and AZ 31 B (retreating side) : a) 200, b) 300, c): 400, and d) 550 mm/min ) [83].

Devir sayısı ve ilerleme karıştırma bölgesinin yüzey morfolojisini etkilemektedir ve devir sayısının artması ile yüzey morfolojisinde düzelme görülmektedir. Fakat devir sayısının belli bir değerden sonra artması ile karıştırma bölgesinin merkezine yakın çatlak oluşturmaktadır (Şekil 9) [32]. Düşük ilerleme hızlarında ise çapak oluşumu ile birlikte malzeme yüzeyinde kaynak yanıklarının meydana geldiği görülmüştür [81].



**Şekil 9.** Takım devrine bağlı olarak SKK yöntemi ile birleştirilmiş plakların yüzey görünümleri a) 800, b) 1000, c) 1200, d) 1400 ve e) 1600 dev/dak. (Surface appearances of the plates FSW as depending on tool rotation speeds of a) 800, b) 1000, c) 1200, d) 1400 and e) 1600 rpm) [32]

Şekil 10'da yapılan çalışmalarda kaynak hızı ve devir sayısının değişimi ile elde edilen kaynak özellikleri ve en uygun işleme aralıkları gösterilmiştir.



Şekil 10. Al-Mg alaşımlarının SKK yöntemi ile birleştirilmesinde kaynak hızı ve devirin etkileri (The effect of welding speed and rotation speed to join Al – Mg alloy with FSW) [39, 61, 63].

Yukarıdaki ilişkiler göz önüne alındığında devir sayısı ve ilerleme hızı parametrelerini bir bütün olarak değerlendirmek daha doğrudur. Al/Mg çiftinin başarılı bir şekilde birleştirilmesi için ilerleme hızı ve devir sayısı aralığı oldukça sınırlıdır

### 2.3 Takımın Kaydırılmasının Etkisi (The Effect of Tool Offset)

Farklı malzemelerin SKK yöntemi ile birleştirilmesinde takımın kaçıklık miktarı önemli bir parametredir ve birleştirme esnasında açığa çıkan ısıyı etkilemektedir. Takımın birleştirme ekseninde kaydırılması ile açığa çıkan ısıyı etkilemesi, farklı malzemelerinin sürtünme ile farklı ısılar üretilmesinden kaynaklanmaktadır. Takımın birleştirme ekseninden kaydırılması ile işleme esnasında oluşan sıcaklık istenilen seviyede tutularak kaliteli birleştirme yapılmasına katkıda bulunmaktadır. Takımın kaydırılmasında önemli bir değişken ise plakaların konumlarıdır.

Karıştırıcı takım kaynak hattından kaydırılmadan plakalara daldırıldığında malzemelerin türüne göre birleştirme için gerekli olan ısı girdisinden daha düşük ya da yüksek sıcaklıklara ulaşılmaktadır. Mg-Al alaşımlarının birleştirilmesinde aşırı ısı girdisi yüzey yırtılması ve katılma çatlama neden olurken, düşük ısı girdisi ise malzemenin yetersiz plastik deformasyonu ile birlikte karıştırma bölgesinde kanal oluşumuna neden olmaktadır [63]. Ayrıca takım levhaların birleşme ekseninde daldırıldığında karıştırma işlemi yerine daha çok frezelemeye benzer işlem gerçekleştirmektedir [62]. Takımı birleştirme hattından kaydırmadan kaynak işlemi yapıldığında; kaynak bölgesinde düzensizlik, yetersiz karışımı gösteren zikzak oluşumu, çapak, karıştırma bölgesinde çatlaklar ve boşluklar gözlenmektedir. Takımın ilerleme tarafında



bulunan Mg plakaya kaydırılması ile kusursuz bir birleştirme gerçekleşmektedir. Al tarafına kaydırılması ile kusurların boyutlarında azalmalar olmaktadır [27, 39].

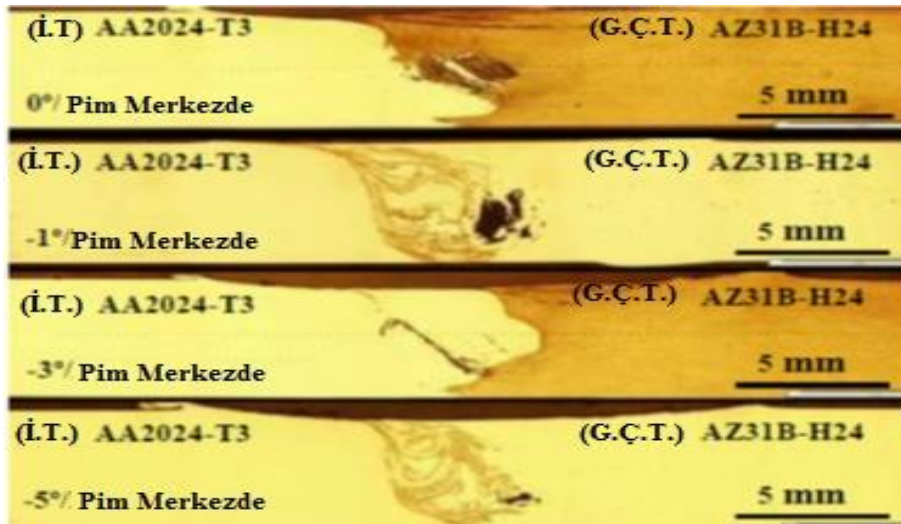
Kaçıklık miktarının artması ile belli bir kaçıklık mesafesine kadar kaynak kusurlarında azalma oluşurken optimum kaçıklık mesafesinde sonra kaçıklık değerinin artırılması ile kusurlar tekrardan oluşmaktadır. Takımın genel olarak magnezyum tarafına kaydırılması daha iyi sonuçlar vermektedir. Çünkü malzemenin Al tarafına kaydırılması sıcaklığı yükseltmekte bu durumda birleştirme işlemini olumsuz yönde etkilemektedir.

Takımın Al tarafına kaydırılması ile sıcaklığın yükselmesi Al alaşımlarının Mg alaşımlarına göre sürtünme ile daha yüksek ısı üretmesidir [73, 74]. Takımın Mg tarafına kaydırılması ile düşük sıcaklık oluşumunun iki nedeni vardır. Birincisi; Mg içinde Al geniş çapta alaşım elementi olarak kullanılır.  $Al_2Mg_{17}$  437 °C 'de sıvı formda zengin Mg matris ile oluşur. Sıvı film takım ile karıştırma bölgesinin kesişme noktasına girerek kaymalara neden olur. Sonuç olarak sürtünme azalır, Mg tarafında ısı üretimi önemli ölçüde düşer. İkincisi; Al yüzey merkezli kübik yapısının, Mg sıkı düzen hegzagonal yapısına göre deformasyon için daha fazla aktif kayma düzlemi vardır [27]. SKK yöntemi sırasında plastik deformasyondan dolayı bu aktif kayma düzlemlerinin hareketleri sıcaklığı arttırmaktadır.

#### 2.4 Takım Açısının Etkisi (The Effect of Tool Tilt Angle)

Takım omuzu karıştırılan malzemeyi üstten aşağı doğru baskı altında tutabilmektedir. Bununla birlikte, plakaya paralel hareket eden omuzun karıştırılan malzemeyi önden arkaya doğru itmesi zordur. Takım açısını değiştirmek pimin önden arkaya doğru malzemeyi itmesi için takım omzuna yardımcı olmaktadır [62]. Takım açısı plastik deforme olmuş malzemeyi sıkıştırmak için de yardımcı olur. Böylece karıştırma bölgesinde dikey malzeme akışının yanı sıra yatay malzeme akışı da etkilenmiş olur [2].

Pourahmad ve Abbasi [62]; 3 derecelik takım eğim açısı ile yaptıkları birleştirmede takım daha iyi bir karıştırma gerçekleştirmiştir ve Mg içine Al 'un ekstrüze etmesi için daha fazla dalma gücüne neden olmuştur. Cao ve Jahazi [56], yaptıkları birleştirmelerde 1 ve 5 derece açılı işlemlerde boşluklu birleştirme olmasına rağmen 0 ve 3 derecelik işlemlerde iyi bir birleştirme elde etmişlerdir (Şekil 11).



**Şekil 11.** SKK yöntemi ile çeşitli açılarda yapılan birleştirmelerin karıştırma bölgeleri (Mix area of joints which are made on various tool tilt angles by FSW) [56].

#### 2.5 Eksenel Kuvvetin Etkisi (The Effect of Axial Force)

Dalma kuvveti karıştırıcı takımın pim kısmının malzemeye dalmasını sağlayarak karıştırma işleminin gerçekleştirmesinin yanı sıra takımın omuz kısmının birleştirilecek levhalara temas sürtünmesi ile ısının oluşmasını sağlamaktadır. Birleştirme esnasında oluşan kuvvetin mümkün olduğunca sabit tutulması kaliteli bir birleştirme sağlamaktadır.

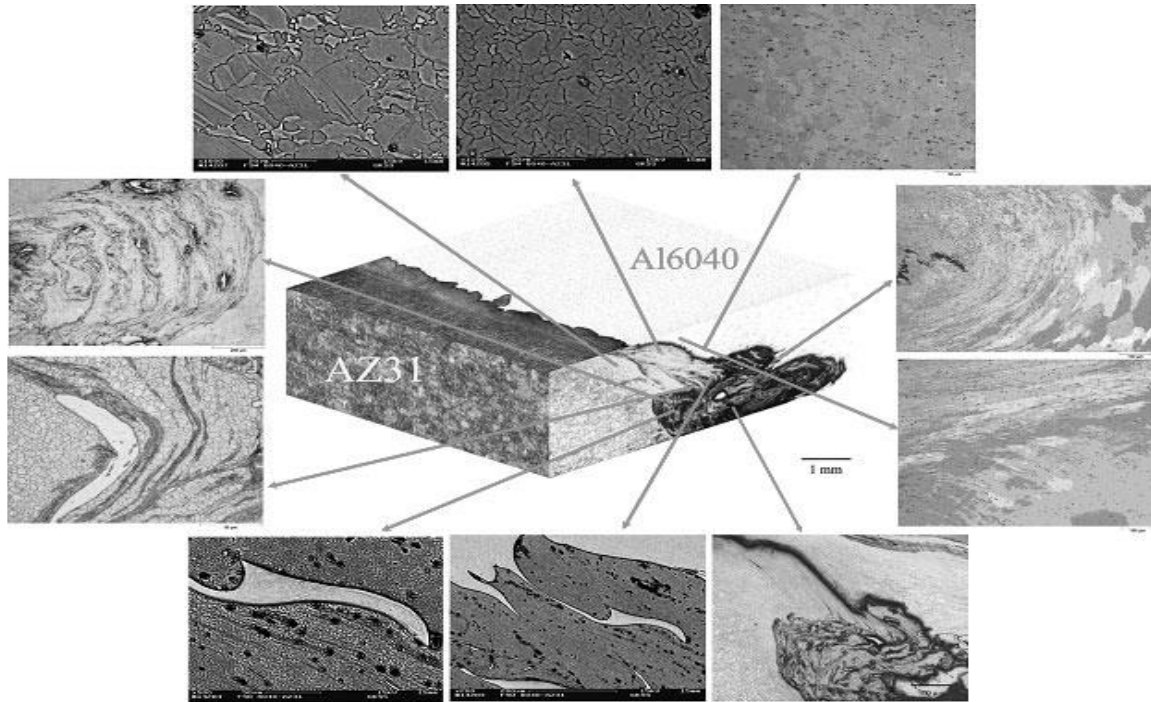
Karıştırma bölgesinde tam nüfuziyet için aksel kuvvetin yeterli olması gerekmektedir. Yetersiz aksel kuvvet deforme olmuş malzemenin dikey yönde uygun olmayan bir akış yapmasına neden olurken yüksek dalma kuvveti ise deforme olmuş malzemenin incelmesine ve bunun sonucu olarak malzemenin takımın omuz kısmından çıkarak çapak oluşmasına neden olur [2].

### 3. MİKRO YAPI İNCELEMESİ (MICROSTRUCTURE ANALYSIS)

SKK yönteminde karıştırma bölgesi için üç ayrı bölge tanımlanmaktadır:

- Kaynak sırasında omuz altında olan omuzdan etkilenen bölge,
- İlerleme tarafının üst ve orta bölgelerinde oluşan bantlı bölge.
- Alt kısımda yoğun ara katmanlı bölge [39].

Kaynak bölgesinin üst kısmı malzemelerin birlikte karıştırılarak ağır plastik deformasyonu sonucu şekil alırken takımın dönme yönü ile ilerleme tarafındaki malzemenin plastik akışı baskındır [12, 39]. Alt kısım çok daha düzgün bir arayüz ve daha az karışım göstermektedir. Kaynak bölgesinin alt ve üst kısımlarında bu farklılıklar SKK yönteminde akış alanının direkt bir sonucudur [12]. Al ve Mg alaşımlarının birleştirilmesinde karıştırma bölgesi ve geçiş bölgelerinin mikro yapısı Şekil 12’ de verilmiştir.



**Şekil 12.** Al-Mg kaynağında karıştırma ve geçiş bölgelerinin mikroyapısını gösteren 3D şematik makrografi. (3D schematic macrograph which displays the microstructure of transition and stir zone on the Mg-Al welding)[73]

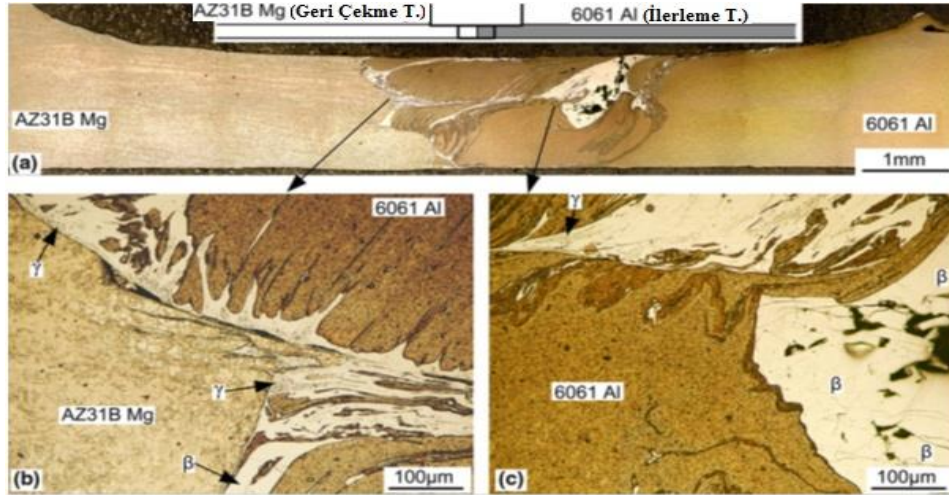
Malzemeler birbirlerine girdaplı ve vorteksli şekilde nüfus ederek karmaşık ara katmanlı akış modelleri oluşturmaktadır. Oluşan ara katmanlı mikroyapı özelliği farklı malzemelerin kaynağının tipik özelliğidir ve oluşan ara katmanlar kayma bantlarına benzemektedir. Bu ara katmanlı yapı malzemelerin farklı deforme olabilirliğinden kaynaklanmaktadır. Karıştırma bölgesinde malzemenin akışı takım dönme yönündendir [39, 67, 68, 73].

Karıştırma bölgesinde her iki tarafta da ince, homojen ve eş aksenli taneler oluşmaktadır [67]. Ana metal den karıştırma bölgesine ilerledikçe tane boyutu küçülmektedir tane boyutlarının ana metale göre boyutlarının küçülmesinin nedeni dinamik olarak yeniden kristalleşmedir (DKB) [68, 73]. Kaynaklarda bölgeler arası geçişlerde keskin sınırlar mevcuttur fakat farklı karakteristikler sergileyebilirler [67].

Metal alaşımlarının SKK yönteminde DKB birincil mekanizmadır [67]. Plastik deformasyon ve kaynak oluşumundaki katı hal akışını kolaylaştırır. DKB’ ye pim ve omuzun sürtünerek oluşturduğu ısı, pim etrafındaki adyabatik ısı, malzemenin mekanik karışımı ve karıştırıcı uçun malzemeye uyguladığı yüksek

gerilme sebep olmaktadır [4, 12, 67]. Yerel olarak yüksek sıcaklıklar ve basınçlar kimyasal reaksiyona ve difüzyonu hızlandırmaktadır, metallar arası metalik bağlara yol açmaktadırlar [67].

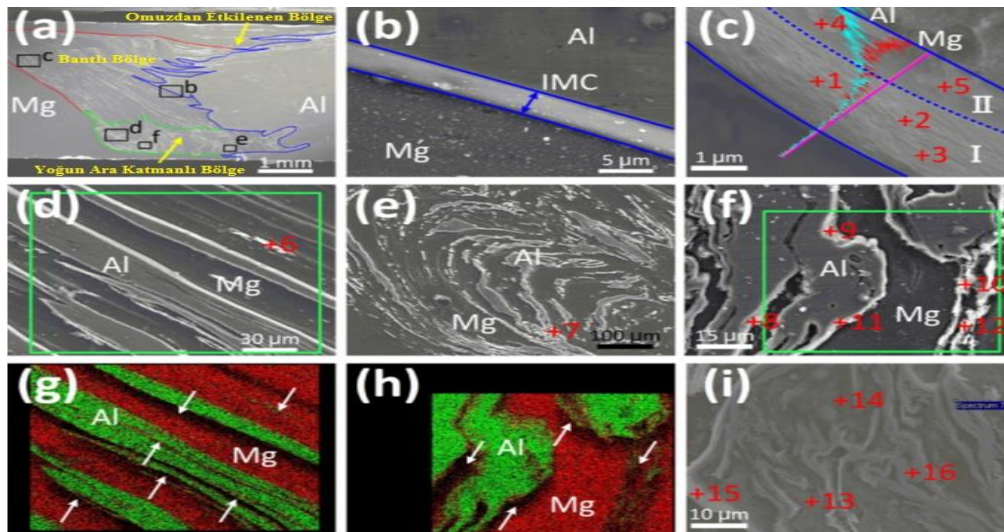
Al ve Mg alaşımlarının birleştirilmesinde  $Al_3Mg_2$  ( $\beta$ ) ve  $Al_{12}Mg_{17}$  ( $\gamma$ ) intermetalik bileşiklerinin oluşturduğu ara yüzey tabakası yaygın olarak görülmektedir (Şekil 13) [14, 27, 36, 39, 69].



**Şekil 13.** Al – Mg alaşımlarının SKK yöntemi ile birleştirilmesinde intermetalik bileşiklerin dağılımı (The distribution of intermetallic compounds to join alloys of Al-Mg by FSW)[72]

SKK işleminde sıcaklığın artması ile sıvılaşıma artmaktadır bu durum daha çok miktarda intermetalik bileşik oluşturmaktadır [72, 84]. İntermetalik fazlar her iki tarafta da değişime uğramamış alaşımların arasına girmektedir [12]. Mg ilerleme tarafına yerleştirilmesi sıcaklığı önemli ölçüde düşürmektedir. Bu durum intermetalik bileşiklerinin oluşumunu azaltmaktadır. Düşük ilerleme ve hızlı devir sayılarında ilerleme tarafına alüminyum yerine magnezyum yerleştirilmesi intermetalik bileşiklerin oluşumunu önemli ölçüde düşürmektedir [55, 72].

Şekil 14 de Al Mg kaynağında SEM incelemesi EDX analizi verilmiştir. Şekilde karmaşık ara katmanlı yapı ve intermetalik fazlı katmanlar açık olarak gözükmemektedir. İntermetalik katman kalınlığı yaklaşık 3 mikrondur ve I. Katman  $Al_{12}Mg_{17}$  II. katman  $Al_3Mg_2$  dir. Şekil 14.i de 3. bölgedeki tipik bir ötektik yapı gösterilmiştir. Açık fazlar  $Al_3Mg_2$ , koyu fazlar katı hal çözeltilisini  $Al_3Mg_2$  karışımını göstermektedir Şekil 14.d bantlı bölge, Şekil 14.e-f yoğun ara katmanlı bölge gösterilmiştir [39].

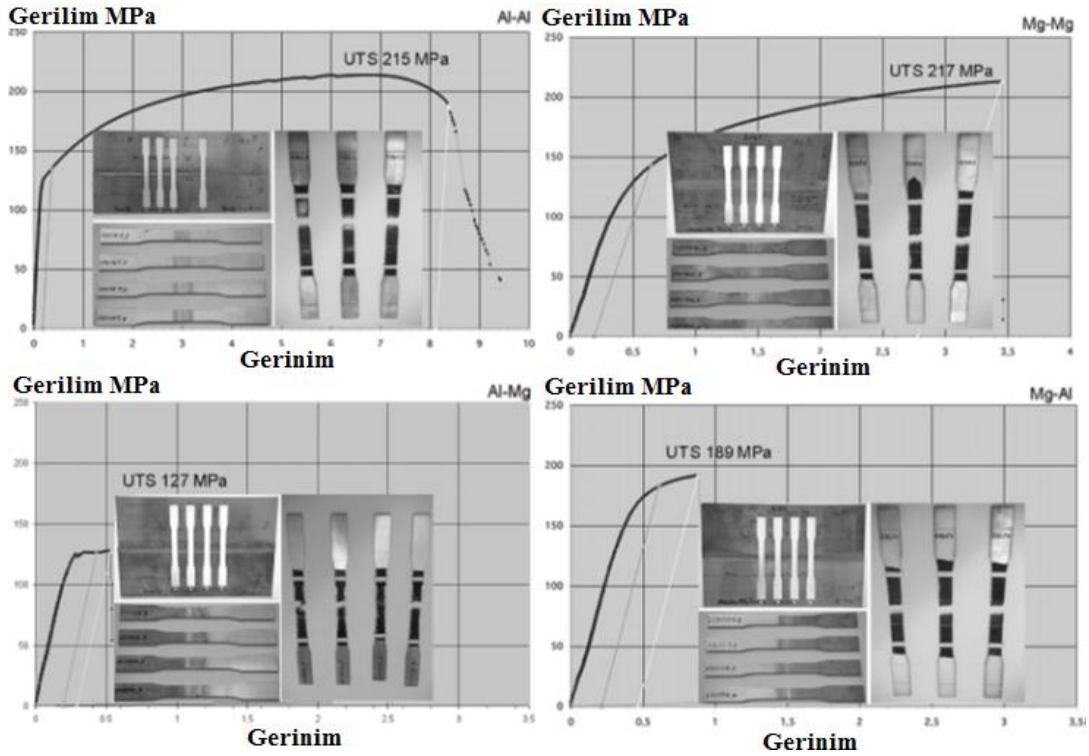


**Şekil 14.** Al-Mg alaşımlarının 700 dev/dak ve 60 mm/dak işleme koşullarında Mg alaşımının ilerleme tarafına yerleştirilerek ve takımı 0,3 mm ilerleme tarafına kaydırarak SKK yöntemi ile birleştirilmesinde SEM mikro yapısı ve EDX analizi: a) genel kesit ve bölge tanımlaması, b, d-f ve i) a'da işaretlenmiş bölgelerin büyütülmüş görüntüleri, c) arayüzün EDX analiz çizgisi, g) d' de işaretlenmiş bölgenin EDX

haritası, h)  $f'$  de işaretlenmiş bölgenin EDX haritası (SEM microstructure and EDX analysis of Al-Mg alloys to join by FSW as placing Mg onto the advancing side on 700 rpm and 60 mm/min process conditions and, tool offsetting to AS 0.3 mm: a) the description of cross-section and area, b, d-f and i) the blown-up images of the marked area on a, c) EDX analysis interface, g) EDX map of the marked area on d, h) EDX map of the marked area f)) [39].

#### 4. MEKANİK ÖZELLİKLER (MECHANICAL PROPERTIES)

Al- Mg 'un SKK işleminde intermetalik katmanların varlığı kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini ciddi oranda etkilemektedir [14, 36, 69, 72]. Yüksek ısı girdisi olumsuz malzeme akışına ve daha fazla sıvılaşmaya neden olduğundan dolayı düşük çekme dayanıma neden olabilir [62, 85, 86]. Isı girdisinin artışına paralel olarak intermetalik bileşiklerin katman kalınlığı da artmaktadır. İntermetalik bileşiklerin kalınlığının artmasından dolayı mekanik kilitlemenin zayıflaması ve intermetalik bileşiklerin sebep olduğu çatlaklardan dolayı çekme mukavemeti önemli ölçüde azalmaktadır [36, 40, 63]. SKK yönteminde kaynak sıcaklığı malzemelerin sünekliliğini direkt etkilediği için farklı malzemelerin kaynağında anahtar bir parametredir [79]. Şekil 15'de SKK yöntemi ile farklı malzemelerin birleştirilmesinden elde edilen çekme eğrileri verilmiştir.



Şekil 15. SKK yöntemi ile birleştirilmiş çeşitli numunelerin çekme testi sonuçları (Tensile test's results of various specimens joined by FSW) [73]

Düşük ısı girdisi ile intermetalik fazların oluşumun engellemesi ile yüksek uzama ve kaynak verimliliği elde edilebilir [61]. Ancak ısı girdisinin düşürülmesi malzemelerin iyi karıştırılmaması, kaynak bölgesinde boşlukların oluşması gibi nedenlerden dolayı her zaman olumlu sonuçlar vermemektedir. Ayrıca ısı girdisinin düşürülmesi için devir sayısının düşürülmesi intermetalik bileşiklerin kötü bir şekilde dağılımına neden olarak mukavemeti de düşürmektedir [55, 87]. Kaynak hızının artması iki parçanın düşük karıştırma ile birleştirilmesine neden olduğundan numunelerinin gerilme mukavemeti azalmaktadır [81].

Birleştirme bölgesinin mekanik özelliklerini etkileyen bir diğer unsur ise karıştırma hareketi ve plastik deformasyonun bir sonucu olarak kaynak bölgesinde artık gerilme kalmaktadır [4]. Bu kalıntı gerilme kaynağın mekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir [62].

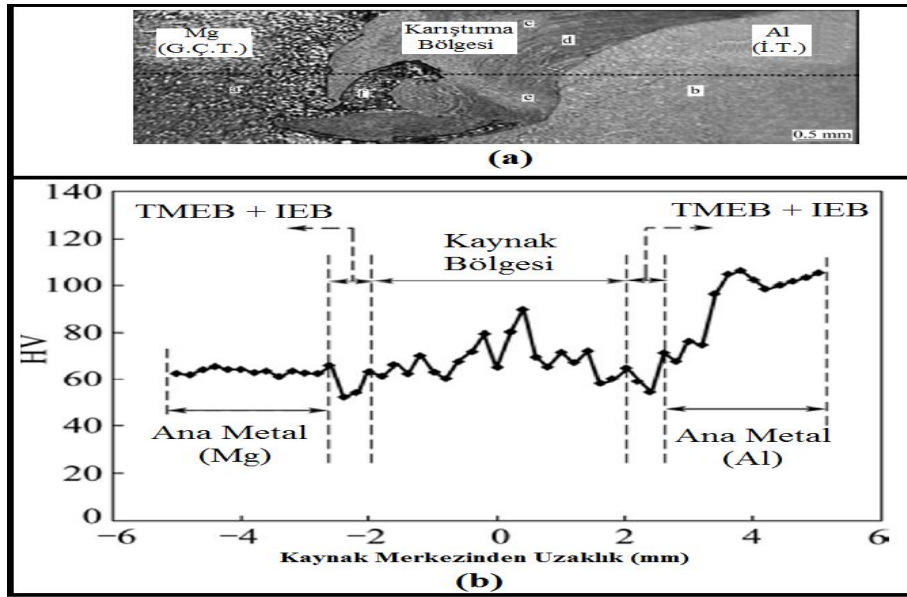
Arayüz özelliklerinden; arayüz uzunluğunun artması, ara katmanlı yapının artması ve çekme yüzeyindeki mikro boşlukların azalması ile çekme mukavemeti artar. Arayüzün uzunluğu ve karmaşıklığı arttıkça yüksek mekanik kitleme (malzemelerin kendilerini kenetleme etkilerinin artmasında, kırılma yüzeyinin

uzamasında ve mikro boşluğun azalma potansiyelinden dolayı) nedeniyle çekme mukavemeti yükselir. [40].

Birleştirme değişkenlerinin doğru seçilmesi ile çekme mukavemeti artırılabilir. Al-Mg kaynağının çekme mukavemeti, Mg-Mg kaynağının çekme mukavemetinin %80 ile %100'ü olabilmektedir ve çekme mukavemeti ana metal olan Al ile kıyaslandığında çekme dayanımı Al alaşımının % 60 üstünde oluşabilmektedir [32, 36, 68].

Genel olarak Al alaşımlarının Mg alaşımları ile kıyaslandığında sertliği yüksektir. SKK yönteminde Al ana metalden ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) ve Termo-mekanik etkilenmiş bölgeye (TMEB) doğru ilerledikçe sertlik değeri düşmektedir. Benzer eğilim Mg alaşımları için görülmektedir. Fakat Mg alaşımlarındaki sertlik değerinin düşmesi Al alaşımlarına göre daha az gerçekleşmektedir. Mg alaşımlarında sertliğin daha az düşmesinin nedeni yeniden kristalleşmedir. Karıştırma bölgesindeki sertlik faz oluşumuna ve yerel olarak yeniden kristalleşmenin boyutuna bağlıdır. Hem Al hem de Mg içeren karıştırma bölgesinde sertlik değerleri Al 'den düşük Mg'den yüksektir [56]. AA 6061 – T6 ve AZ 31 – O alaşımlarının birleştirilmesinde Şekil 16. a.'da kesikli çizgi ile gösterilen eksenden gerçekleştirilen mikro sertlik ölçüm değerleri Şekil 13.b. de verilmiştir.

Ayrıca kaynak bölgesinde düzensiz sertlik dağılımı meydana gelmesinin ana nedeni ara katmanlı yapıdır [69, 88]. Kaynak bölgesinde oluşan ara katmanlı yapı; karmaşık (girdap şeklinde) ve lamelli mikro yapıya sahiptir ve mikrosertlik değerinde ani değişimlere sebep olarak en düşük ve en yüksek sertlik değerleri arasında büyük farkların oluşmasına neden olmaktadır. Mikro sertlik değerlerinde meydana gelen ani değişimler DKB'miş ara katmanlı yapılar yada deforme olmuş kayma bantlarıdır [67]. Özellikle ara katmanlı yapılarda mikro sertlik değerlerinin yüksek olması  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_3Mg_2$  gevrek intermetalik bileşiklerden kaynaklanmaktadır [56, 69, 73]. Yüksek sertlik değerleri ile ısı girdisi arasında doğrusal bir ilişki vardır [61].



Şekil 16. SKK yöntemi ile Al-Mg alaşımlarının birleştirilmesinde mikro sertlik dağılımı (Microhardness distribution to be joined of Al- Mg alloys via by FSW)[68]

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Al/Mg malzeme çiftinin katı hal kaynak yöntemi ile birleştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar incelenerek konu esaslı bir literatür değerlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan literatür araştırmasında aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

- Al – Mg yapılı ürünlerin kullanılmasıyla hafifliğin getirdiği birçok avantajdan faydalanılabilmektedir.
- Geleneksel kaynak yöntemleri ile birleştirmeleri oldukça zor olan Al ve Mg alaşımları, katı hal kaynağı olan SKK yöntemi ile başarılı bir şekilde birleştirilebilmektedir.

- Aynı tür malzemelerin SKK yöntemi ile birleştirilmesinde, takım tasarımı, devir sayısı, ilerleme hızı, eğim açısı ve eksenel dalma kuvveti kaynak kalitesini etkileyen en önemli parametrelerdir. Farklı türden malzemelerin birleştirilmesinde ise bu değişkenlere ek olarak birleştirme ekseninden takımı kaydırma mesafesi ve malzemelerin konumlandırılması kaynak kalitesi üzerinde önemli olan parametrelerdir.
- Hatasız bir birleştirme elde edebilmek için takım ilerleme hızı ve devir sayısının doğru belirlenmesi gerekmektedir. Fakat Al-Mg çiftinin hatasız bir şekilde birleştirilmesi için ilerleme hızı ve devir sayısı aralığı oldukça dardır.
- Kaynak kalitesinin etkileyen en önemli etken 450 °C oluşan  $Al_3Mg_2$  ( $\beta$ ) ve 437 °C oluşan  $Al_{12}Mg_{17}$  ( $\gamma$ ) gevrek yapıdaki intermetalik bileşikler ve bunların oluşturdukları intermetalik fazlı katmandır.
- İntermetalik oluşumu ısı girdisi ile doğru orantılıdır.
- İntermetalikler birleştirme bölgesinin sertliği ve çekme dayanımını direkt etkilemektedir.
- Isı girdisi kaynak hızı ile ters, devir ile doğru orantılıdır.
- İntermetalik oluşumundan kaçınmak için ısı girdisinin azaltılması, yetersiz karıştırma ve karıştırma bölgesinde boşluklara neden olarak mekanik özellikleri düşürmektedir.
- Mg alaşımının ilerleme tarafına yerleştirilmesi ve karıştırıcı ucun Mg tarafına kaydırılması genel olarak sıcaklık oluşumunu azaltmakta ve daha kaliteli bir kaynak elde edilmesini sağlamaktadır.
- Farklı malzemelerin özelliklerini aynı yapıda kullanmak için malzemelerin güvenli bir şekilde birleştirilmesi gerekmektedir. Bu işlem için en ideal yöntemlerden birisi ise SKK'dır. Bu sebepten dolayı SKK yönteminin özellikle havacılık ve otomotiv alanlarında kullanımı dünyada artarak devam eden bir öneme sahiptir ve metal birleştirme alanında araştırmacıların odak noktası haline gelmiştir ve farklı malzeme çiftlerinin kusursuz bir şekilde SKK yöntemi ile birleştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından “**BAP 59/2016-01**” kodlu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Gazi Üniversitesine teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Mehta, K. P. and Badheka, V. J., “Effects of tilt angle on the properties of dissimilar friction stir welding copper to aluminum”, **Materials and Manufacturing Processes**, Cilt 31, No 3, 255–263, 2016.
- [2] Mehta, K. P. and Badheka, V. J., “A review on dissimilar friction stir welding of copper to aluminum: process, properties and variants”, **Materials and Manufacturing Processes**, Cilt 31, No 3, 233–254, 2016.
- [3] Thomas, W., Nicholas, E., Needham, J., Murch M., Temple-Smith P. and Dawes C., “Friction stir butt welding”, **International Patent No.** PCT/GB92/02203, **GB Patent No.** 9125978.8, 1991, **U.S. Patent No.** 5,460,317, 1995.
- [4] Mishra, R.S. and Ma, Z.Y. “Friction stir welding and processing”, **Material Science and Engineering R**, Cilt 50, No 1-2, 1–78, 2005.
- [5] Nandan, R., Debroy, T., Bhadeshia, B., “Recent advances in friction stir welding- process, weldment structure and properties”, **Prog. Mater. Sci.**, Cilt 53, No 6, 980–1023, 2008.
- [6] Chen, Y.C. and Nakata, K., “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”, **Metall. Mater. Trans. A**, Cilt 39, No 8, 1985–1992, 2008.
- [7] Springer, H., Kostka, A., dos Santos, J. F. and Raabe, D., “Influence of intermetallic phases and Kirkendall-porosity on the mechanical properties of joints between steel and aluminium alloys”, **Mater Sci Eng A**, Cilt 528, No 13 – 14, 4630–4642, 2011.

- [8] Watanabe, T., Takayama, H. and Yanagisawa, A. “Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding”, **J Mater Process Technol**, Cilt 178, No 1 – 3, 342–349, 2006.
- [9] Chen, Y.C. and Nakata, K., “Effect of surface states of steel on microstructure and mechanical properties of lap joints of magnesium alloy and steel by friction stir welding”, **Sci. Technol. Weld. Joining**, Cilt 15, No 4, 293–298, 2010.
- [10] Galvao, I., Verdera, D., Gesto, D., Loureiro, A. and Rodrigues, D.M., “Influence of aluminium alloy type on dissimilar friction stir lap welding of aluminium to copper”, **J. Mater. Process. Technol**, Cilt 213, No 11, 1920–1928, 2013.
- [11] Liao, J. S., Yamamoto, N., Liu, H. and Nakata, K., “Microstructure at friction stir lap joint interface of pure titanium and steel” **Mater. Lett.**, Cilt 64, No 21, 2317–2320, 2010.
- [12] Kostka, A., Coelho, R. S., Dos Santos, J. and Pyzalla, A. R., “Microstructure of friction stir welding of aluminium alloy to magnesium alloy”, **Scr Mater**, Cilt 60, No 11, 953–956, 2009.
- [13] Venkateswaran, P., Xu, Z. H., Li, X. and Reynolds, A. P., “Determination of mechanical properties of Al–Mg alloys dissimilar friction stir welded interface by indentation methods”, **J Mater Sci**, Cilt 44, No 15, 4140–4147, 2009.
- [14] 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**, Cilt 50, No 9, 1233–1236, 2004.
- [15] Kurt, A., Boz, M. and Özdemir, M. “Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi”, **Gazi Üniv., Müh. Mim. Fak. Derg.**, Cilt 19, No 2, 191-197, 2004.
- [16] Zhang, Y. N., Cao, X., Larose, S. and Wanjara, P., “Review of tools for friction stir welding and processing”, **Can. Metall. Q.**, Cilt 51, No 3:250–261, 2012.
- [17] Salih, O. S., Ou, H., Sun, W. and McCartney, D.G., “A review of friction stir welding of aluminium matrix composites”, **Materials and Design**, Cilt 86, 61–71, 2015.
- [18] Külekçi, M. K. and Şik, A. “Sürtünme karıştırma kaynağı ile alüminyum alaşımı levhaların birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri”, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, Cilt 7, No 3, 70–75, 2003.
- [19] Külekçi, M. and Şik, A. “Effects of tool rotation and traverse speed on fatigue properties of friction stir welded AA1050-H18 aluminum alloy”, **Archives of Metallurgy and Materials**, Cilt 51, No 2, 213–216, 2006.
- [20] Cam, G. “Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler”, TMMOB M.M.O. “**Kaynak Teknolojisi İV. Ulusal Kongre ve Sergisi**”. 47-62, 2003.
- [21] Kurt, A., Boz, M. “The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process”, **Materials & Design**, Cilt 25, No 4, 343-347, 2004.
- [22] Kurt, A., Boz, M., Özdemir, N. “Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi”, **G.Ü. Müh. Mim. Fak. Derg.**, Cilt 19, No 2, 191-197, 2004
- [23] Kaluç, E. ve Bozdoğan, B. “Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi”, **Makine Magazin**, Cilt 27, 1998.
- [24] Xu, S., “Microstructure analysis and solid mechanics modeling of friction stir welding”, **PhD Thesis**, Department of Mechanical Engineering College of Engineering & Information Technology, University of South Carolina, 2003.

- [25] Uzun, H., Yılmaz, R. ve Fındık, F., “Alüminyum Alaşımları için Süper Birleştirme Yöntemi: Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniği ve Uygulamaları”, **Metal Dünyası**, Cilt 118: 75-82, 2003.
- [26] Rai, R., De, A., Bhadeshia, H. K. D. H. and DebRoy, T., “Review: Friction stir welding tools”, **Science and Technology of Welding and Joining**, Cilt 16, No 4, 325–342, 2011.
- [27] 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**, Cilt 170, 251-260, 2016.
- [28] Feng, J. C., Wang, Y. R. and Zhang, Z. D., “Status and expectation of research on welding of magnesium alloy”, **The Chinese Journal of Nonferrous Metals**, Cilt 15, No 2, 165–178, 2005.
- [29] Cao, X., Jahazi, M., Immarigeon, J. P. and Wallace, W., “A review of laser welding techniques for magnesium alloys”, **Journal of Mater Process Technol**, Cilt 171, No 2, 188–204, 2006.
- [30] Hui, L., Ming, Q. and Da, L., “The effect of intermetallic compounds on laser weldability of dissimilar metal joint between magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy 6061”, **Laser Journal**, Cilt 28, No 5, 61–63, 2007.
- [31] Wang, J., Feng, J. C. and Wang, Y. X., “Microstructure of Al–Mg dissimilar weld made by cold metal transfer MIG welding”, **Mater Sci Technol**, Cilt 24, No 7, 827–831, 2008.
- [32] Kwon, Y. J., Shigematsu, I. and Saito, N., “Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminum alloys”, **Mater Lett**, Cilt 62, No 23, 3827–3829, 2008.
- [33] Zeng, R., Ke, W., Xu, Y., Han, E. and Zhu, Z., “Recent development and application of magnesium alloys”, **Acta Metallurgica Sinica**, Cilt 37, No 7, 673–685, 2001.
- [34] Larsson, J. K., “Overview of joining technologies in the automotive industry”, **Welding Res Abroad**, Cilt 49, No 6, 29–45, 2003.
- [35] Chowdhury, S. H., Chen, D.L., Bhole, S. D., Cao, X. and Wanjara, P., “Lap shear strength and fatigue behavior of friction stir spot welded dissimilar magnesium-to-aluminum joints with adhesive”, **Materials Science & Engineering A**, Cilt 562, 53–60, 2013.
- [36] Yan, J., Xu, Z., Li, Z., Li, L. and Yang, S., “Microstructure characteristics and performance of dissimilar welds between magnesium alloy and aluminum formed by friction stirring” **Scripta Materialia**, Cilt 53, No 5, 585–589, 2005.
- [37] 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**, Cilt 101, 189–207, 2015.
- [38] Sweeder, T., “Demand for Lightweight Technology”, **Magnesium Expo**, Michigan-USA, 2000.
- [39] Fu, B., Qin, G., Li, F., Meng, X., Zhang, J. and Wu, C., “Friction stir welding process of dissimilar metals of 6061-T6aluminum alloy to AZ31B magnesium alloy”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 218, 38–47, 2015.
- [40] Venkateswaran, P. and Reynolds, AP., “Factors affecting the properties of friction stir welds between aluminum and magnesium alloys”, **Mater Sci. Eng. A**, Cilt 545, 26–37, 2012.
- [41] Liu, P., Li, Y. J., Geng, H. R. and Wang, J., “Microstructure characteristics in TIG welded joint of Mg/Al dissimilar materials”, **Mater Lett**, Cilt 61, No 6, 1288–91, 2007.



- [42] Borrisutthekul, R., Miyashita, Y. and Mutoh, Y., “Dissimilar material laser welding between magnesium alloy AZ31B and aluminium alloy A5052-O”, **Sci. Technol. Adv. Mater.**, Cilt 6, No 2, 199–204, 2005.
- [43] Liu, L. M., Wang, H. Y. and Zhang, Z. D., “The analysis of laser weld bonding of Al alloy to Mg alloy”, **Scripta Mater**, Cilt 56, No 6, 473–478, 2007.
- [44] 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**, Cilt 65, 675–681, 2015.
- [45] Ben-Artzy, A., Munitz, A., Kohn, G., Brining, B. and Shtechman, A. “Joining of light hybrid constructions made of magnesium and aluminum alloys”, **Magnesium Technology**, 295-302, 2002.
- [46] American Society for Metals. *Binary Alloy Phase Diagrams* 1: 106, **ASM International**, Materials Park, Ohio, 1986.
- [47] Wang, J., Li Y. J., Liu, P. and Geng, H. R., “Microstructure and XRD analysis in the interface zone of Mg-Al diffusion bonding”, **J. Mater. Process. Technol**, Cilt 205, No 1 -3, 146–150, 2008.
- [48] Hajjari, E., Divandari, M., Razavi, S. H., Emami, S.M., Homma, T. and Kamado, S. “Dissimilar joining of Al Mg light metals by compound casting process”, **J. Mater. Sci.**, Cilt 46, No 20, 6491–6499, 2011.
- [49] Kafalı, H. and Ay, N., “Havacılıkta kullanılan 6013-T6 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmesi”, **S.D.Ü. Fen Bil. Ens. Dergisi**, Cilt 18, No 1, 38-47, 2014.
- [50] Kafalı, H. and Ay, N., “Sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmiş havacılık ve uzay yapılarında kullanılan Al 6013-T6 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, **Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi**, Cilt 7, No 2, 85-101, 2014.
- [51] Nandan, R., Roy, G. G., and DebRoy, T. “Numerical simulation of three-dimensional heat transfer and plastic flow during friction stir welding”, **Metallurgical and Materials Transactions A**, Cilt 37, No 4, 1247–1259, 2006.
- [52] Cho, J. H., Boyce, D. E., and Dawson, P. R. “Modeling strain hardening and texture evolution in friction stir welding of stainless steel”, **Materials Science and Engineering A**, Cilt 398, No 1 -2, 146–163, 2005.
- [53] Cho, J. H., Boyce, D. E., and Dawson, P. R. “Modelling strain hardening during friction stir welding of stainless steel”, **Model. Sim. in Mat. Sci. and Eng.**, Cilt 15: 469–486, 2007.
- [54] Nandan, R, Lienert, TJ, DebRoy, T. “Toward reliable calculations of heat and plastic flow during friction stir welding of Ti– 6Al–4V alloy”, **Int J Mater Res**, Cilt 99, No 4, 434–44, 2008.
- [55] 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**, Cilt 88, 213-224, 2009
- [56] Cao, X. and Jahazi, M., “Friction stir welding of dissimilar AA 2024-T3 to AZ31B-H24 alloys”, **Materials Science Forum**, Cilt 638-642, 3661-3666, 2010.
- [57] Çevik, B., Özçatalbaş, Y., Gülenç, B. “SKK ile birleştirilen 7075-T651 Al Alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine devir sayısının etkisi”, **3. Int. Conference on Welding Technologies and Exhibition (ICWET’14)**, 658-668, May 2014, Manisa.
- [58] Çevik, B., Özçatalbaş, Y., Gülenç, B. “Friction stir welding of 7075-T651 aluminium Alloy” **Practical Metallography**, Cilt 53, No 1, 6-23, 2016.

- [59] Çevik, B., Özçatalbaş, Y., Gülenç, B. “Effect of tool material on microstructure and mechanical properties of friction stir welding”, **Materials Testing**, Cilt 58, No 1, 36-42, 2016.
- [60] Çevik, B., Özçatalbaş, Y., Gülenç, B. “Effect of welding speed on the mechanical properties and weld defects of 7075 Al alloy joined by FSW”, **Kovove Mater.**, Cilt 54, No 4, 241–247, 2016.
- [61] 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.
- [62] Pourahmad, P. and Abbasi, M., “Materials flow and phase transformation in friction stir welding of Al 6013/Mg”, **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, Cilt 23, No 5, 1253–1261, 2013.
- [63] 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**, Cilt 50, No 12, 2833-2838, 2009.
- [64] Jagadeesha, C.B., “Dissimilar friction stir welding between aluminum alloy and magnesium alloy at a low rotational speed”, **Materials Science & Engineering A**, Cilt 616, 55–62, 2014.
- [65] Liua, C., Chena, D. L., Bholea, S., Caob, X. and Jahazib, M.,” Polishing-assisted galvanic corrosion in the dissimilar friction stir welded joint of AZ31 Magnesium alloy to 2024 Aluminum alloy”, **C. Materials Characterization**, Cilt 60, No 5, 370 – 376, 2009.
- [66] Malarvizhi, S. and Balasubramanian, V., “Influences of tool shoulder diameter to plate thickness ratio (D/T) on stir zone formation and tensile properties of friction stir welded dissimilar joints of AA6061 aluminum–AZ31B magnesium alloys”, **Materials and Design**, Cilt 40, 453–460, 2012.
- [67] Somasekharan, A. C. and Murr, L. E., “Characterization of complex, solid-state flow and mixing in the friction-stir welding (FSW) of aluminum alloy 6061-T6 to magnesium alloy AZ91D using color metallography”, **J Mater Sci**, Cilt 41, No 16, 5365–5370, 2006.
- [68] 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**, Cilt 24, No 5, 1317–1322, 2014.
- [69] Somasekharan, A.C. and Murr, L.E. “Microstructures in friction-stir welded dissimilar magnesium alloys and magnesium alloys to 6061-T6 aluminum alloy”, **Materials Characterization**, Cilt 52, No 1, 49– 64, 2004.
- [70] Somasekharan, A.C. and Murr, L.E., “Fundamental studies of the friction-stir welding of magnesium alloys to 6061-T6 aluminum”, **Magnesium Technology**, 31-36, 2004.
- [71] 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**, Cilt 41, 50–60, 2012.
- [72] Firouzdor, V. and Kou, S., “Al-to-Mg friction stir welding: effect of material position, travel speed and rotation speed”, **Metallurgical and Materials Transactions A**, Cilt 41, No 11, 2914-2935, 2010.
- [73] Zettler, R., Augusto, A., da Silva, M., Rodrigues, S., Blanco A. and dos Santos J. F., “Dissimilar Al to Mg alloy friction stir welds”, **Advanced Engineering Materials**, Cilt 8, No 5, 415-421, 2006.
- [74] Morishige, T., Hirata, T., and Tanaka, T.: Preprints of The National Meeting of J.W.S, 85, 220–221, 2009.
- [75] Pepe, J. J., and Savage, W. F. “Effects of constitutional liquation in 18-Ni maraging steel weldment”, **Welding Journal**, Cilt 46, No 9, 411-422, 1967.

- [76] Pepe, J. J., and Savage, W. F. “Weld heat-affected zone of the 18Ni maraging steels”, **Welding Journal**, Cilt 49, No 12, 545-553, 1970.
- [77] Kou, S. “Welding Metallurgy”, **2nd edition, John Wiley and Sons**, 303–339, (2003), New York, N.Y.
- [78] Yang, Y. K., Dong, H., Cao, H., Chang, Y. A., and Kou, S. “Liquation of Mg alloys in friction-stir spot welding”, **Welding Journal**, Cilt 87, 167-177, 2008.
- [79] Yang, Y. K., Dong, H. and Kou, S., “Liquation tendency and liquid-film formation in friction stir spot welding”, **Welding Journal**, Cilt 87, No 8, 202-211, 2008.
- [80] Çakır, C., “Modern talaşlı imalatın esasları”, **Nobel Yay Dağ.**,69-75, 2006, Ankara
- [81] Bergmann, J. P., Schuerer, R. and Ritter, K., “Friction stir welding of tailored blanks of aluminum and magnesium alloys”, **Key Engineering Materials** , Cilt 549, 492-499, 2013.
- [82] Seidel, T. U. and Reynolds, A. P., “Visualization of the material flow in AA2195 friction-stir welds using a marker insert technique” **Metallurgical and materials transactions A**, Cilt 32, No 11, 2879-2884, 2001.
- [83] Khodir, S. A. and Shibayanagi, T., “Dissimilar friction stir welded joints between 2024-T3 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy”, **Materials Transactions**, Cilt 48, No 9, 2501 – 2505, 2007.
- [84] Firouzdor, V. and Kou, S., “Formation of liquid and intermetallics in Al-to-Mg friction stir welding”, **Metallurgical and Materials Transactions A**, Cilt 41, No 12, 3238-3251, 2010.
- [85] Klag, O., Wagner, G. and Otmar D. E., “Mechanical properties of friction stir welded Mg/Mg- and Mg/Al-joints”, **Advanced Engineering Materials**, Cilt 12, No 12, 1212-1219, 2010.
- [86] Cao, G. and Kou, S., “Liquation cracking in full penetration Al-Si welds” **Welding Journal**, Cilt 84, No 4, 63-71, 2005.
- [87] Park, S.H.C., Sato, Y.S., Kokawa, H., “Microstructural evolution and its effect on Hall-Petch relationship in friction stir welding of thixomolded Mg alloy AZ91”, **Mater Sci.**, Cilt 38i No 21, 4379-4383, 2003.
- [88] 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**, Cilt 20, No 2, 619–623, 2010.