

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM VE MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA TAKIM GEOMETRİSİ VE İŞLEM
PARAMETRELERİNİN KAYNAK KALİTESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seray GERİKALMAZ

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Mühendisliği Programı

Ekim 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM VE MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA TAKIM GEOMETRİSİ VE İŞLEM
PARAMETRELERİNİN KAYNAK KALİTESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Seray GERİKALMAZ
(526161021)**

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr.Öğr.Üyesi Canan Gamze GÜLERYÜZ PARASIZ

Ekim 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 526161021 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Seray GERİKALMAZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ALÜMİNYUM VE MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA TAKIM GEOMETRİSİ VE İŞLEM PARAMETRELERİNİN KAYNAK KALİTESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr.Öğr.Üyesi Canan Gamze GÜLERYÜZ PARASIZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof.Dr.Murat VURAL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr.Öğr.Üyesi Umut KARAGÜZEL
Işık Üniversitesi

Teslim Tarihi : **4 Kasım 2019**

Savunma Tarihi : **31 Ekim 2019**





Aileme,



ÖNSÖZ

Tez çalışmamda, planlanma aşamasından sonuç aşamasına kadar geçen süre içerisinde desteğini eksik etmeyen ve değerli bilgileriyle yol gösteren tez danışmanım Dr.Öğr.Üyesi Canan Gamze GÜLERYÜZ PARASIZ'a, yardımlarını eksik etmeyen Tekniker OSMAN ÇELEBİ Bey'e ve Tekniker Selçuk KILIÇ Bey'e,Teknik Öğretmen AHMET MİTHAT EKİNCİ Bey'e,Gediz Üniversitesi Öğretim Üyesi Mehmet Turan Bey'e,Birleşik Metal A.Ş'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca her daim desteğinin olduğunu bildiğim sevgili annem Nezihe GERİKALMAZ ve manevi varlığının hep benimle olduğunu hissettiğim babam merhum Vural GERİKALMAZ'a; moral destekleri her zaman yanımda olan ağabeyim Serhan GERİKALMAZ'a,bana her zaman ablalık yapan yengem Sanem GERİKALMAZ'a, varlığı ile bana mutluluk veren yeğenim Kerem GERİKALMAZ'a ve bu süreçte bana destek veren tüm aile bireylerine teşekkür ederim.

Aralık 2019

Seray Gerikalmaaz
(İmalat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	2
2. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI (SKK)	17
2.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Tarihiçesi	17
2.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Endüstride Kullanım Alanları	17
2.2.1. Demiryolu ulaşımı uygulamaları	17
2.2.2. Karayolu ulaşımı uygulamaları	18
2.2.3. Havayolu ulaşımı uygulamaları	19
2.3 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Avantajları ve Dezavantajları.....	20
2.3.1. Avantajları.....	20
2.3.2. Dezavantajları	20
2.4 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulama Yöntemi	20
2.5 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Birleştirme Şekilleri	22
2.6 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takım Uçları	23
2.7 Sürtünme karıştırma Kaynağı Uygulamaları Yapılan Malzemeler	24
2.7.1 Alüminyum	25
2.7.2 Magnezyum.....	26
2.8 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Standartları	26
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
3.1 Malzeme ve Yöntem	29
3.2 Çekme Makaslama Testleri	34
3.3 Kaynak Bölgesinin Metalografik İncelenmesi	36
3.4 Sertlik Testleri	37
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	41
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	47



KISALTMALAR

SKK	: Sürtünme Karıştımaya Kaynağı
TWI	: İngiliz Kaynak Enstitüsü
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu
EN	: Avrupa Standardı





ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Dövme alüminyum alaşımlarının dayanım aralıkları [30].	25
Çizelge 3.1: AA6082 kimyasal bileşimi.	29
Çizelge 3.2: AZ31 kimyasal bileşimi.	29
Çizelge 3.3: Al-Al Sürtünme karıştırma kaynağı deney planı.	32
Çizelge 3.4: Al-Mg Sürtünme karıştırma kaynağı deney planı.	33





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Raylı taşıt gövdesi ana parçaları [1]	2
Şekil 1.2: Alt gövde üretimi [1]	2
Şekil 1.3: Alüminyum Profil Birleştirme Şekli [2]	3
Şekil 1.4: Raylı taşıt üzerinde kaynak uygulamaları [2]	3
Şekil 1.5: Vickers Mikrosertlik [7]	6
Şekil 1.6: 10 mm kalınlığındaki Al 7075-T651 levhasının optik mikroskopla görünümü a.Ana malzeme b.Kaynak metali bölgesi,c. Termomekanik etkilenen bölge d.ısı ile etkilenen bölge [9]	7
Şekil 1.7: 10 mm kalınlığındaki Al 7075-T651 levhasının elektron mikroskopu resimleri a.Ana malzeme b.Kaynak metali bölgesi,c. Termomekanik etkilenen bölge etkilenen bölge d.ısı ile etkilenen bölge d.ısı ile etkilenen bölge [9]	7
Şekil 1.8: 16 mm kalınlığındaki Al 7075-T651 levhasının optik mikroskopla görünümü a.Ana malzeme b.Kaynak metali bölgesi,c. Termomekanik etkilenen bölge d.ısı ile etkilenen bölge [9]	8
Şekil 1.9: Kırılma yüzeyi SEM görüntüleri AA7075 a.Dönme hızı 50mm/dk b. dönme hızı 200mm/dk c.AA5083 Dönme hızı 50 mm/dk d. AA 5083 dönme hızı 200mm/dk [10]	8
Şekil 1.10: Kırılma yüzeyi SEM görüntüleri AA7075/AA5083 a.Dönme hızı 50mm/dk b. işaretli bölgenin büyütülmüş hali dönme hızı 50mm/dk c.Dönme hızı 200 mm/dk d. İşaretli bölgenin büyütülmüş hali dönme hızı 200mm/dk [10]	9
Şekil 1.11: Çinko ara tabakalı sürtünme karıştırma bindirme kaynağı şematik gösterimi [18]	11
Şekil 1.12: 1000 dev/dk dönme hızında yapılan kaynak bölgesi kesitleri (a)Ara tabakasız (d) Çinko ara tabakalı [18]	12
Şekil 1.13: Ara tabakasız 1000 dev-dk dönme hızında yapılan kaynak bölgesi SEM sonuçları [18]	13
Şekil 1.14: Çinko ara tabakalı 1000 dev/dk dönme hızında yapılan kaynak bölgesi SEM sonuçları [18]	14
Şekil 2.1: Alüminyum profillerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş Shinkansen treni [1]	18
Şekil 2.2: Ford GT ara kanal sürtünme karıştırma kaynağı [21]	18
Şekil 2.3: Sürtünme karıştırma kaynağı kullanılmış Eclipse 500 jetinin ilk test uçuşu [21]	19
Şekil 2.4: Helikopter inme alanı ve açıkta zemin levhalarının sürtünme karıştırma kaynağı [21]	19
Şekil 2.5: Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi [23]	21
Şekil 2.6: Sürtünme karıştırma kaynağı bölgesinin içyapı gösterimi [23]	22
Şekil 2.7: Sürtünme karıştırma kaynağı birleştirme şekilleri örnekleri [1]	22
Şekil 2.8: Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan temel takım ucu profilleri [26]	23

Şekil 2.9: a)Whorl™ ve b) MX Triflute™ pin tasarımları [27]	23
Şekil 2.10: Takım uçları için vida profilleri [28].....	24
Şekil 3.1: Birinci takım ucu üç boyutlu tasarımı ve gerçek hali.....	30
Şekil 3.2: Deney çalışması.....	30
Şekil 3.3: Konik takım ucu	31
Şekil 3.4: Üç Boyutlu Deney düzeneği.....	31
Şekil 3.5: Ara tabakasız ve ara tabakalı bindirme kaynağı durumu	32
Şekil 3.6: Deney Düzeneği	32
Şekil 3.7: AA6082-AA6082 bindirme kaynağı	33
Şekil 3.8: AA6082-AZ31 bindirme kaynağı.....	34
Şekil 3.9: Çekme makaslama numunesi boyutları[1]	34
Şekil 3.10: AA6082-AA6082 Çekme makaslama deney sonuçları.....	35
Şekil 3.11: a.AA6082-AA6082 980 rpm 12 mm/dk bindirme kaynağı kırılma yüzeyleri b.AA6082-AZ31 980 rpm 16 mm/dk bindirme kaynağı kırılma yüzeyleri	36
Şekil 3.12: Sürtünme karışıma kaynağında kaynak bölgelerinin iç yapısının tipik görüntüsü [36]	36
Şekil 3.13: AA6082-AA6082 bindirme kaynağı iç yapıları a.980 rpm 12 mm/dk b.980 rpm 20 mm/dk c.1180 rpm 12mm/dk d.1180 rpm 20 mm/dk.....	37
Şekil 3.14: AA6082-AZ31 980 rpm 16 mm/dk parametrelerindeki bindirme kaynağı iç yapısı	37
Şekil 3.15: a.AA6082-AA6082 kaynağı sertlik ölçüm yerleri b. AA6082-AZ31 kaynağı sertlik ölçüm yerleri.....	38
Şekil 3.16: Shimadzu Mikrosertlik Ölçüm Cihazı.....	38
Şekil 3.17: AA6082-AA6082 MikroVickers sertlik değerleri.....	39
Şekil 3.18: AA6082-AZ31 MikroVickers sertlik değerleri	40

ALÜMİNYUM VE MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA TAKIM GEOMETRİSİ VE İŞLEM PARAMETRELERİNİN KAYNAK KALİTESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Ulaşım türlerinden biri olan demiryolu ulaşımı zamanla dünyada daha çok tercih edilen bir çeşit olması amacıyla büyük çalışmalar sağlamıştır. Türkiye’de şehir içi ve şehirlerarası demiryolu hatlarının genişlemesi için birçok adımlar atılmış ve çalışmalar yapılmıştır. Metro, hafif raylı sistemler ve yüksek hızlı trenler gibi demiryolu çeşitlerinin hizmet ağının genişlemesi ve daha çok kitleye ulaştırılmak istenmesi demiryolunun sağladığı avantajları göstermiş ve bu avantajların daha da arttırılması konusunda araştırma ve geliştirmenin önemini fazlaştırmıştır.

Günümüzde hala önemli bir yere sahip olan ağırlık iyileştirme akımı demiryolu ulaşımında da kendisini öne çıkarmıştır. Demiryolu araçlarında kullanılan çelik gibi malzemelerin yerini alüminyum, magnezyum gibi daha hafif malzemelerin yerini almaya çalışması bu alanda kullanılan yeni yöntemlerin de bulunma ve bunların geliştirilmesi yönünde geniş bir alan açılmasını sağlamıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı da demiryolu araçlarında bu amaçla kullanılan bir yöntem olmuştur. Sürtünme karıştırma kaynağı sürtünme ile ortaya çıkan enerji yardımıyla plastik deformasyonun sağlandığı katı hal kaynağıdır. Hafif malzemelerin dayanımı yüksek şekilde birleştirilmesini sağlayan bu kaynak üzerinde yapılan çalışmalarda özellikle kaynak ucu tasarımlarının ve kaynak parametrelerinin değiştirilmesi üzerinde farklı sonuçlar elde edilmesi bu konuda araştırmalara açık alan yaratmıştır. Bu alana ek olarak henüz yeni çalışmalara konu olan sürtünme karıştırma kaynağında ara tabaka kullanımı literatürde yerini az bulmuş ve araştırılmasının önü açık olan konulardan biri olmuştur.

Bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynağında ara tabaka kullanımının etkileri, kullanılan uç tasarımının alüminyum ve magnezyum malzemeleri çeşitleri için farklı parametre değerlerinde kaynak uygulamalarının gözlemlenip mekanik özelliklerinin deneylerle incelenmesi yapılacak ve kaynak malzemelerine etkileri araştırılacaktır.

Bu kapsamda ilk olarak literatür araştırması yapılmış demiryolu endüstrisinde kullanılan malzemeler ve sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları araştırılmıştır. Bu araştırmanın ışığında takım ucu tasarımı yapılmıştır ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması için kullanılan AA6082 ve AZ31 malzemeler ile bağlama düzeneği için gerekli parçalar temin edilmiştir.

Çalışmanın deneysel aşamasında sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları gözlemlenmek istenilen parametreler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Kaynak bölgesi metalografik olarak incelenerek mekanik özelliklerinin incelenmesi için numuneler çıkarılmış ve çekme makaslama testi, sertlik testi vb. testler uygulanarak kaynak bölgesinin farklı durumlar için gösterdiği mekanik özellikler incelenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.



INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF TOOL GEOMETRY AND PROCESS PARAMETERS ON THE QUALITY OF WELD IN FRICTION STIR WELDING OF ALUMINUM AND MAGNESIUM ALLOYS

SUMMARY

Railway transportation which is one of the transportation modes has made many efforts for the purpose of the becoming more preferred transportation type as time goes in worldwide. In Turkey, many steps are taken and many researches are done to expand urban and intercity railway lines. Demands like increasing service network of railway types such as metro, light rail systems and high speed railways and making more people to reach these types show the advantages of the railway and increase the importance of researches and development on improving of these advantages.

Weight optimization trend which is still important nowadays stands out for railway transportation, too. Studies on changing of the materials like steel to more light materials like aluminum and magnesium in rolling stocks have made a large area for the founding new methods and developing these. In this respect, friction stir welding has become one of the methods used for rolling stocks. Friction stir welding is a solid-state welding where energy from friction of a tool on workparts and plastic deformation from the stirring action of the tool pin causing plastic deformation of the parts used for joining. In the studies of this welding method which makes high strength joints on light materials, it is seen that different results are observed with the changing of tool design and welding parameters. This observation makes an open place on the studies of this subject. In addition to that, the use of interlayer in friction stir welding which is one of the new research area has a little space in literature and it is one of the subject that more studies can be done.

In this thesis, studies on the interlayer usage in friction stir welding, effects of tool design and welding parameters on the friction stir welding of aluminum and magnesium alloys types have been observed and mechanical testing has been conducted to see mechanical properties of weld.

First of all, researches on literature has done about the materials used for railway industry and applications of friction stir welding. After making use of this knowledge, various tool geometry has been designed and manufactured. AA6082 and AZ31B materials and necessary parts for fixture have been bought.

In the experimental part of the research, friction stir welding has been applied according to parameters that are intended to observe. To examine the mechanical and metallographic properties of the weld, specimens have been obtained and tests such as tensile shear, hardness together with metallographic observations have been performed. After that, results have been compared.



1. GİRİŞ

Dünya'daki başlıca ulaşım türleri arasında yer alan demiryolu ulaşımı gün geçtikçe ağını genişleten ve daha yaygın kullanılan bir tür olma yolunda önemli gelişmeler katetmiştir. Özellikle ülkemizde şehir içi ve şehirlerarası ulaşımında demiryolu ulaşımı için yapılan çalışmalar bunun bir göstergesi olmuştur. Metro, hafif raylı sistemler ve yüksek hızlı trenler gibi demiryolu ulaşım çeşitlerinin kullanımının artması bu alanda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarıyla demiryolu ulaşımının avantajlarının fazlalaştırmasındaki önemi de yanında getirmiştir. Bu çalışmalardan biri de hafifleştirme çalışmalarıdır. Günümüzde hala önemli bir yere sahip olan ağırlık iyileştirme akımı demiryolu ulaşımında da kendisini öne çıkarmıştır. Demiryolu araçlarında kullanılan çelik gibi malzemelerin yerini alüminyum, magnezyum, kompozit gibi daha hafif malzemelerin yerini almaya çalışması bu alanda kullanılan yeni yöntemlerin de bulunma ve bunların geliştirilmesi yönünde geniş bir alan açılmasını sağlamıştır. Özellikle hafifleştirmenin yakıt tasarrufu ve yüksek hızlı tren gibi farklı raylı taşıt uygulamalarında hızların artmasıyla zaman tasarrufu gibi avantajları bu alanda yapılan çalışmaların da önemini arttırmıştır ve tren, vagon gibi yük ve yolcu taşımacılığının temel unsurlarının tasarım ve üretimi üzerinde çalışmaları da genişletmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı da demiryolu araçlarında bu amaçla kullanılan bir yöntem olmuştur.

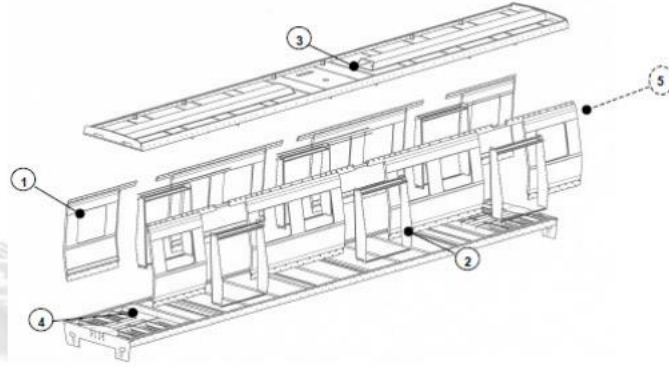
Bu çalışmanın amacı raylı taşıtlarda da kullanılan sürtünme karıştırma kaynağı üzerinde hafif malzemeler ve farklı takım ucu tasarımları için araştırma yapmak ve yapılan koşullarda çıkarılan sonuçları incelemektir. Çalışma sırasında özellikle takım ucu tasarımlarının ve kaynak parametrelerinin kaynak üzerine etkilerinin incelenmesi ön plana çıkmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında literatür araştırması yapılmış ve sürtünme karıştırma kaynağının demiryolu taşıtları için patentleri incelenmiş, sürtünme karıştırma kaynağının alüminyum ve magnezyum malzemeleri ile ilgili çalışmaları taranmıştır. Daha sonra farklı takım uçları üretilmiş ve malzeme ve makina gereksinimleri karşılanmıştır. Kaynak için gerekli adımlar tamamlandıktan sonra sürtünme karıştırma

kaynağı uygulamaları alüminyum ve magnezyum malzemeleri için farklı kaynak parametreleri ve takım uçları ile gerçekleştirilmiştir. Son olarak yapılan kaynak üzerinden deney numuneleri çıkartılmış ve deneylerle kaynak kalitesi incelenmiştir ve değerlendirilmiştir.

1.1 Literatür Araştırması

Demiryolu araçlarının üretilmesinde sürtünme karıştırma kaynağını inceleyen Demirkesen [1] 2010'da yaptığı çalışmada raylı araçların gövde üretimleri için iki yöntem belirtmiş ve bunlar için gerekli ana parçaları yan duvar (1), kapılar (2), tavan (3), alt gövde (4) ve son duvar (5) olarak göstermiştir. Gövde parçaları Şekil 1.1'de mevcuttur.



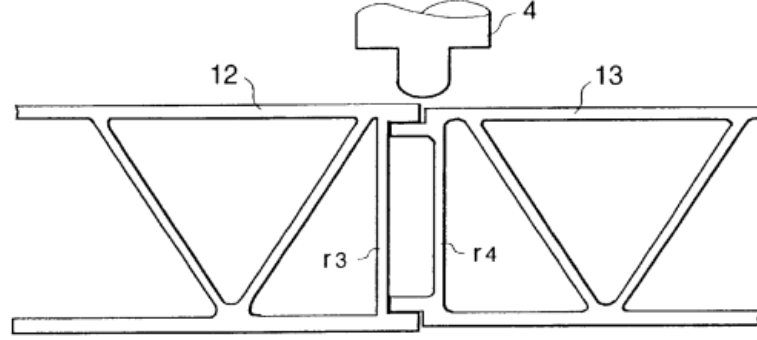
Şekil 1.1: Raylı taşıt gövdesi ana parçaları [1].

Demiryolu araçlarında sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları ekstrüzyon profillerin birbirine kaynak yöntemiyle birleştirilmesi şeklinde olduğunu belirtmiştir. Ayrıca alüminyum alt gövdenin sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması da Şekil 1.2'de gösterilmiştir.

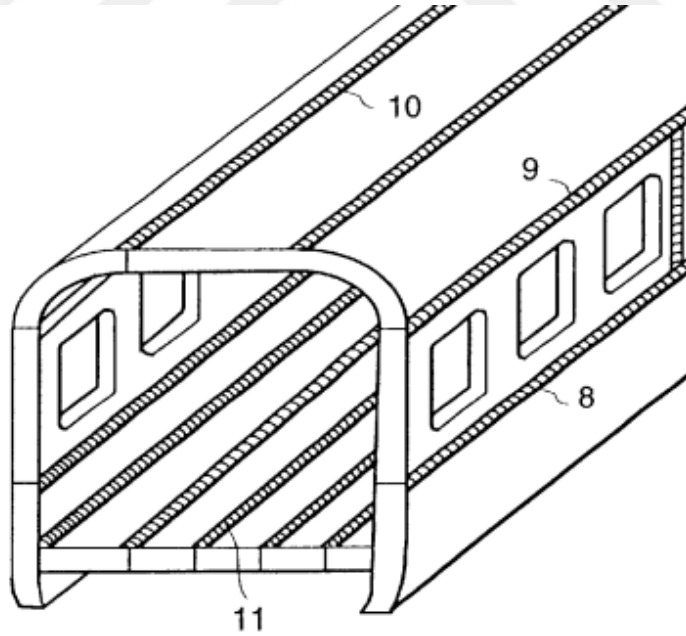


Şekil 1.2: Alt gövde üretimi [1].

Raylı taşıtlar için sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarında profillerin birleştirme şekilleriyle ilgili alınmış patentlerde mevcuttur. Bu patentlerin birinde alüminyum profillerin birleştirme şekliyle ilgili yeni bir yapı oluşturulmuş ve bu yapının daha düşük çarpılmaya uğramış sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Profillerin birleştirme şekli ve demiryolu aracı için kaynak yöntemiyle birleştirilmesi Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te gösterilmiştir. [2]



Şekil 1.3: Alüminyum Profil Birleştirme Şekli [2].



Şekil 1.4: Raylı taşıt üzerinde kaynak uygulamaları [2].

Sürtünme karıştırma kaynağı konusunda yapılan çalışmalarda ise kaynak yapılma şekli malzeme açısından iki türde incelenmiştir. Aynı malzemelerin birbirlerine kaynak

yöntemiyle birleştirildiği çalışmalar olduğu gibi farklı malzemelerin birbirlerine bu yöntemle birleştirilmeyle ilgili çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalara konu olan malzemeler genelde çelik, alüminyum, magnezyum, bakır, alüminyum matrisli kompozit gibi malzemeler olmuştur.

Genel olarak sürtünme karıştırma kaynağı çalışmaları yöntem açısından ikiye ayrılmaktadır:

1. Kaynak parametrelerinin deneysel olarak değiştirilerek kaynağa ve özelliklerine olan etkilerinin incelenmesini içeren çalışmalar
2. Kaynağın sonlu elemanlar yöntemleri ile modellenmesini içeren çalışmalar

Kaynak parametrelerinin etkilerinin incelendiği çalışmalarda incelenen yönlerden bazıları aşağıda belirtilmiştir:

- Çekme dayanımı
- İçyapı
- Sertlik.
- Yorulma dayanımı
- Korozyon

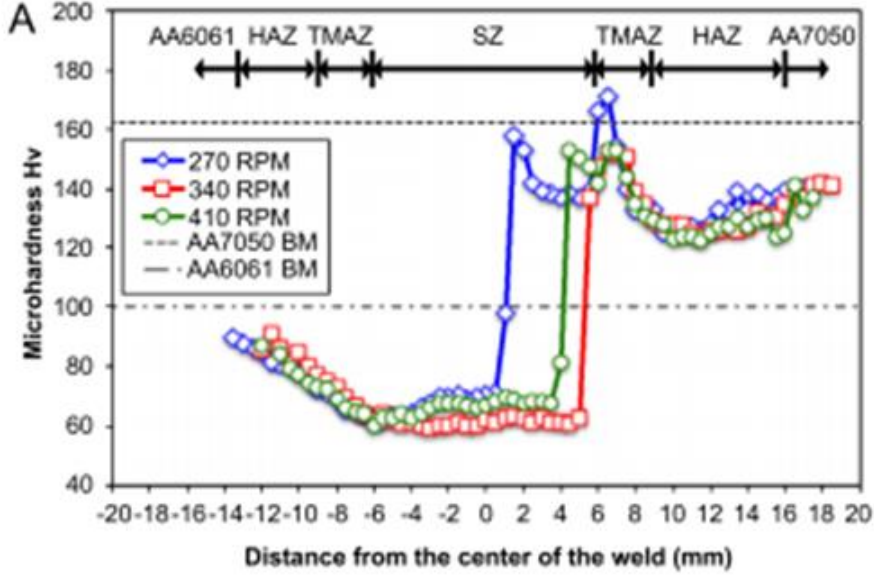
Sürtünme karıştırma kaynağı parametrelerinin etkilerinin incelendiği çalışmaların bazılarında kaynak ucu şeklinin etkileri çalışmanın ana konusu olmuştur ve bu çalışmalarda üçgen, kare, altıgen, konik vb. gibi kaynak takım ucu şekilleriyle yapılan kaynağın yapılan deneyler sonrası elde edilen verilerinin birbirleriyle olan kıyaslaması yapılmıştır. Yapılan bu tarz çalışmalarda hem sadece takım ucu tasarımının hem de farklı proses parametrelerinin değiştirilerek sürtünme karıştırma kaynağını inceleyen çalışmalar mevcuttur. Thimmaraju ve diğ. (2016) Al 6082 malzemesi için yaptıkları çalışmada üçgen, kare ve altıgen takım uçları için mekanik özellikleri ve içyapıyı incelemişlerdir. Dönme hızını ve ilerleme hızını sabit olarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda her uç için yapılan kaynak üzerinden çıkartılan numunelerin çekme eğrileri çıkartılmış üçgen, kare ve altıgen uçlar için çekme dayanımları sırasıyla yaklaşık 72 MPa, 75 MPa ve 116 MPa olarak ölçülmüş ve köşe sayısının artmasıyla çekme dayanımı üzerinde de artış gördüklerini gözlemlemişlerdir [3]. Yapılan başka bir çalışmada ise Raturi ve diğ. (2018) Al 6061 ile Al 7075 malzemeleri üzerine dönme hızının, ilerleme hızının, takım ucu şeklinin ve ön ısıtmanın kaynak dayanımına ve hasar üzerine etkilerini incelemişlerdir. Takım ucu şekilleri üç düz yüzlü silindirik

dişli, konik ikizkenar yamuk, yivli silindirik, oluklu yivli silindirik olarak seçilmiş, kaynak parametreleri olan dönme hızı ve ilerleme hızı için de 4 farklı seviye belirlemişlerdir. Her faktör ve seviye için yapılan deneyler sonucunda çekme dayanımları orta seviyelerde dönme ve ilerleme hızı yapılan yivli silindirik takım ucu üç düz yüzlü silindirik dişli takım ucunda diğerlerine göre daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir [4].

Sürtünme karıştırma kaynağı üzerinde yapılan çalışmaların bazılarında ise proses parametrelerinin kaynağa etkileri incelenmiştir. Kaynak kalitesini etkileyen ana unsurlar olan kaynak ilerleme hızı ve dönme hızı kaynağın birleşimi ve kaynakta oluşan hataları etkilemeleri açısından önemli olmuştur. Özellikle parametrelerin değiştirilerek yapıldığı araştırmalarda içyapının üzerinde etkilerin incelenmesi önem kazanmıştır. Farklı malzemelerin kaynak yöntemiyle birleştirilmesini inceleyen Prasad ve diğ. (2017) AZ91 magnezyum ile Al 6063 alüminyum sacının üç farklı dönme hızı ve iki farklı ilerleme hızı için deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Bu iki metalin birleşimi için tasarlanan takım ucu boyut ve tasarımına göre optimum değerlerin 1100 dev/dk dönme hızı 25 mm/dk ilerleme hızı olduğunu görmüşlerdir [5]. Diğer bir çalışmada ise Shirazi ve diğ. (2015) AA5456–H321 ile AA5456-O saclarını dörder farklı dönme ve ilerleme hızları için bindirme kaynağı şeklinde birleştirmiş makroyapı ve hataları incelemişlerdir. Sonuçlarda yüksek kaynak hızlarında temaslı bağlanma (kissing bond) hatasının oluştuğu, ilerleme hızı arttıkça kanca çatlağı yüksekliğinin azaldığı, dönme hızı arttıkça kanca çatlağı hata bölgesinin arttığı hatta yüksek dönme hızlarında boşlukların oluştuğunu gözlemlemişlerdir [6].

Mekanik özelliklerin incelendiği çalışmalarda kaynağı yapılan malzemelerden çıkarılan numunelerin çekme testi deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucu çekme eğrileri çıkartılmış ve çekme dayanımı, akma dayanımı vb. veriler elde edilmiştir. Bazı çalışmalarda yorulma deneyleri de çekme deneyleri ile birlikte yürütülmüştür. Ayrıca bu çalışmaların çoğunda kaynak bölgesi boyunca sertlik ölçümleri yapılmıştır.

Örnek çalışmaların birinde Rodriguez ve diğ. (2015) Al 6061 ve Al 7050 malzemeleri için içyapı ve mekanik özelliklerinin araştırmış, çekme testlerini ve Vickers mikrosertlik ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Kaynak yöntemiyle birleştirilen malzemelerin mekanik özelliklerindeki farklılıktan dolayı kaynak dikişindeki sertlik dağılımında da değişiklikler görülmüştür. En yüksek sertlik değerini ilerleyen tarafa yakın kaynak metali bölgesinde gözlemlemişlerdir (Şekil 1.5) [7].

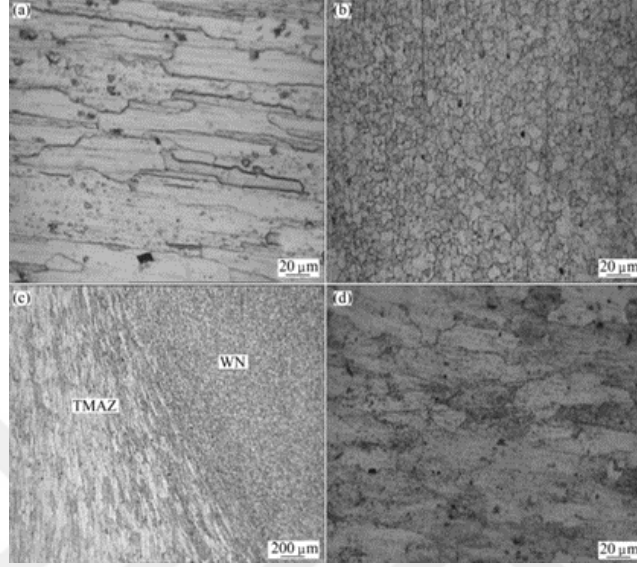


Şekil 1.5: Vickers Mikrosertlik [7].

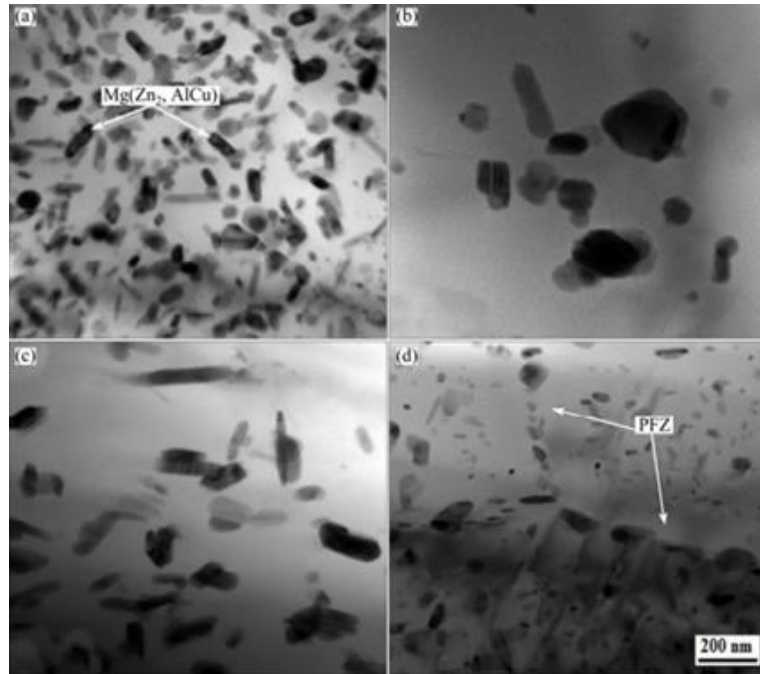
Diğer bir çalışmada ise Besel ve diğ. (2015) Al 5024-H116 malzemesinin yorulma davranışını incelemişlerdir. Yorulma yüklemesi altındaki çatlak başlama ve ilerleme içyapıdaki bölgesel davranışlarını üç farklı ilerleme hızı için gözlemlemişler. Yapılan çalışma sonucunda ise yorulma çatlaklarının çoğunlukla kaynak metali bölgesi ve termomekanik etkilenen bölgede başladığını ve kaynak dikişi boyunca ölçülen sertlik dağılımına bağlı olmadığını görmüşlerdir. Takım ilerleme hızlarının etkilerinin araştırılması için daha fazla yorulma deneyleri yapılması gerektiğini vurgulamışlardır [8].

İçyapının incelendiği çalışmalarda ana malzeme, ısı ile etkilenen bölge, kaynak metali bölgesi ve termomekanik etkilenen bölgeler elektron mikroskobu vb. araçlarla gözlemlenmiş ve tane yapıları incelenmiştir. Kaynak parametrelerinin etkileri her bölgede görülen tane yapıları açısından yorumlanmıştır. Rao ve diğ. (2015) AA7075-T651 malzemesinden yapılan levhalar kullanılarak içyapı ve mekanik özellikleri araştırdığı çalışmada farklı iki kalınlıktaki levhaların ayrı kaynak yöntemiyle birleştirilmesinden sonra kaynak bölgelerini optik mikroskop ve elektron mikroskopuyla gözlemlemişlerdir. Karıştırma bölgesinde hem sürtünmeden kaynaklı hem de plastik deformasyondan kaynaklı ısının ince yeniden kristalleşmiş eş eksenli tanelerin oluşmasını sağlanmasını görmüşlerdir ve 10 mm plakada 16 mm plakaya göre daha ince taneler gözlemlemişlerdir. Termomekanik etkilenen bölgede yeniden kristalleşme görmemişlerdir. Isı ile etkilenen bölgede ise tanecik yapısı ana malzeme

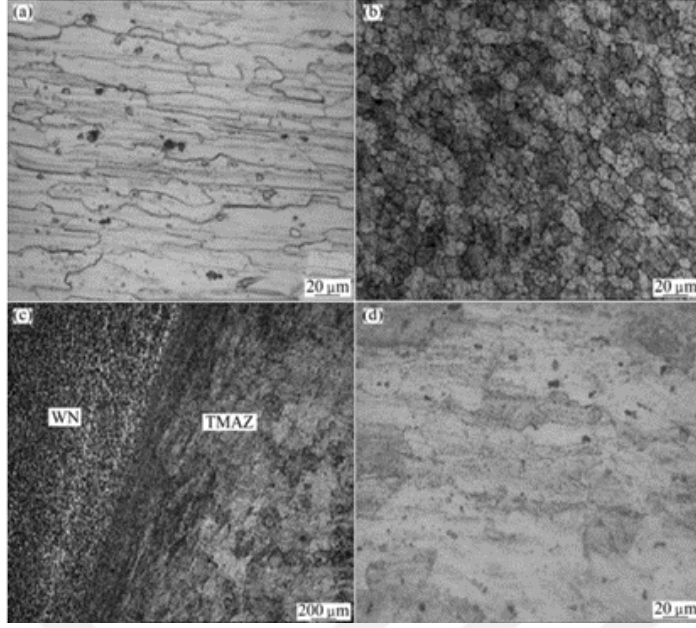
ile aynı görülmüş fakat çökelti yapısında değişiklik fark etmişlerdir. Tanecikler içerisindeki çökeltinin homojen şekilde dağılmadığı ve tane sınırlarına yakın bölgede dayanıksızlığa neden olan çökelti olmayan bölgelerin olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 1.6, Şekil 1.7 ve Şekil 1.8) [9].



Şekil 1.6: 10 mm kalınlığındaki Al 7075-T651 levhasının optik mikroskopla görünümü a.Ana malzeme b.Kaynak metali bölgesi,c. Termomekanik etkilenen bölge d.ısı ile etkilenen bölge [9].

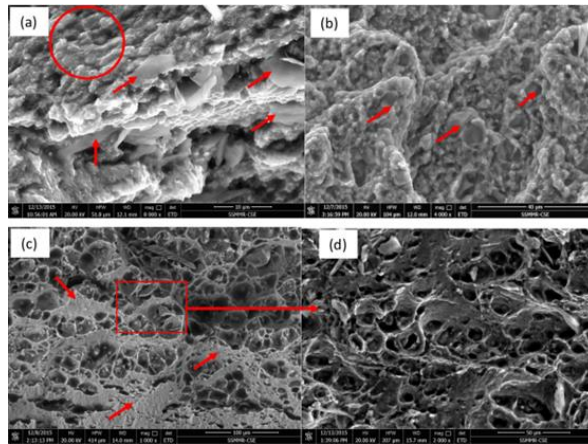


Şekil 1.7: 10 mm kalınlığındaki Al 7075-T651 levhasının elektron mikroskopu resimleri a.Ana malzeme b.Kaynak metali bölgesi,c. Termomekanik etkilenen bölge d.ısı ile etkilenen bölge d.ısı ile etkilenen bölge [9].

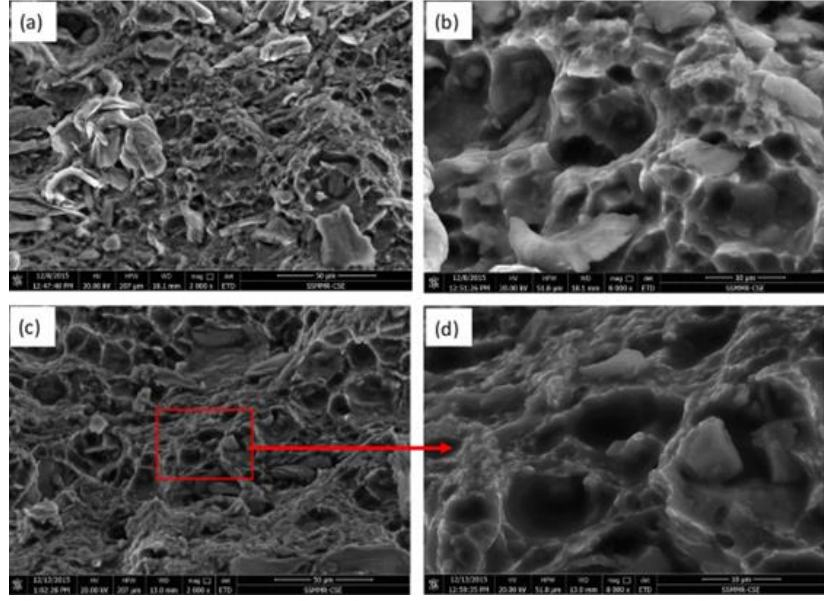


Şekil 1.8: 16 mm kalınlığındaki Al 7075-T651 levhasının optik mikroskopla görünümü a.Ana malzeme b.Kaynak metali bölgesi,c. Termomekanik etkilenen bölge d.ısı ile etkilenen bölge [9].

Farklı malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağını içeren ve iç yapısının incelendiği diğer bir çalışma Ahmed ve diğ. (2017) tarafından yapılmıştır. Çalışmada AA7075 ve AA5083 için sabit dönme hızı fakat farklı ilerleme hızlarında kendileri ve birbirleriyle kaynak yöntemiyle birleştirilmesi ve iç yapıları incelemişlerdir. Ayrıca kırılma yüzeylerini de gözlemlenmişlerdir. Yapılan çalışmada aynı malzemelerin kaynağı için kaynak hızının artması ortalama tanecik boyutunda büyük bir düşüşe neden olduğunu görmüşlerdir. Kırılma yüzeyleri içinse hem sünek hem kırılğan hasar modları birlikte bulunduğunu gözlemlenmişlerdir (Şekil 1.9 ve Şekil 1.10) [10].



Şekil 1.9: Kırılma yüzeyi SEM görüntüleri AA7075 a.Dönme hızı 50mm/dk b. dönme hızı 200mm/dk c.AA5083 Dönme hızı 50 mm/dk d. AA 5083 dönme hızı 200mm/dk [10].



Şekil 1.10: Kırılma yüzeyi SEM görüntüleri AA7075/AA5083 a.Dönme hızı 50mm/dk b. işaretli bölgenin büyütülmüş hali dönme hızı 50mm/dk c.Dönme hızı 200 mm/dk d. İşaretli bölgenin büyütülmüş hali dönme hızı 200mm/dk [10].

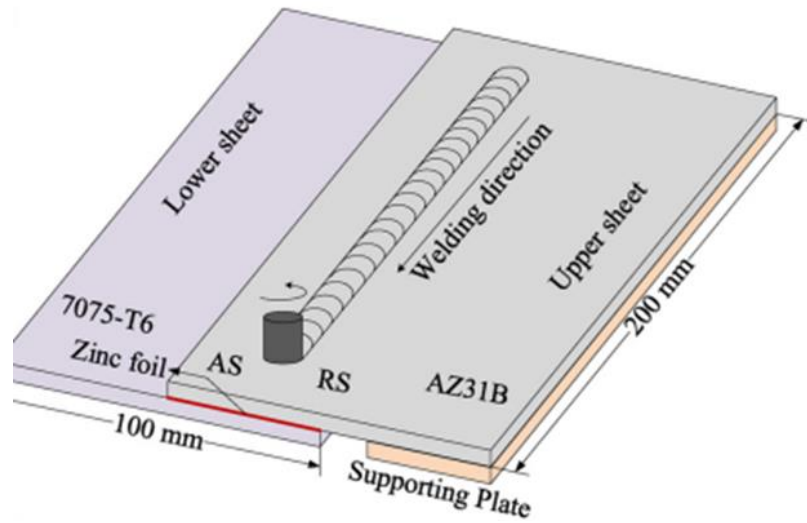
Korozyonun araştırıldığı çalışmalarda daldırma testleri yapılmıştır. Bu testlerde enerji dağılımlı görüntüleme, taramalı elektron mikroskopuyla inceleme gibi yöntemlerle kaynak bölgeleri için korozyon yapısı gözlemlenmiştir. Bu çalışmalardan biri Gharavi ve diğ. (2016) tarafından yapılmış AA 6061-T6 malzemesiyle yapılan bindirme kaynağı için korozyon değerlendirmesini araştırmışlardır. Bu çalışmada 24 ve 48 saat süreler için daldırma testleri gerçekleştirilmiş ve 24 saatte gözlemlenen sonuçlarda ısı ile etkilenen bölgede kaynak metali bölgesine göre daha yüksek korozyon hızı görmüşlerdir.48 saatlik daldırmadan sonra ise kaynak metali bölgesinin yüzeyinde görülen korozyon oluştuğu ve ısı ile etkilenen bölgede korozyonun bütün yüzeyinin kapladığını görmüşlerdir. Daldırma testi için kullanılan süreye göre korozyon davranışının kaynak bölgeleri için değiştiğini ve kaynak bölgelerinin ana malzemeye göre korozyon dayanımının düşük olduğunu gözlemlenmişlerdir [11]. Diğer bir çalışmada Sinhar ve diğ. (2018) tarafından AA2014 malzemesi kullanılarak yapılan sürtünme karıştırma kaynağı ve tungsten gaz ark kaynağının korozyon davranışları açısından karşılaştırılmasıdır. Bu çalışmada daldırma testi, potansiyodinamik polarizasyon deneyi ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi yöntemi ile kaynak türlerinin korozyon dayanımlarını gözlemlenmişler sürtünme karıştırma kaynağının tungsten gaz ark kaynağına göre korozyon dayanımının yüksek olduğunu görmüşlerdir [12].

Sürtünme karıştırma kaynağının sonlu elemanlar yöntemi ile araştırıldığı çalışmalarda malzeme modellemeleri yapılmıştır. Analizde tahmini sıcaklık dağılımları ve artık gerilme incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmaların bazılarında kaynak deneysel olarak gerçekleştirilip termo eleman veya kızılötesi sıcaklık görüntü kamerası kullanılarak deneysel ve analiz verileri karşılaştırılmıştır. El-Sayed ve diğ. (2018) sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sürtünme karıştırma kaynağı için sıcaklık dağılımlarını ve artık gerilmeleri tahmin etmeye çalışmışlardır. AA 5083-O malzemesini iki farklı takım ucu tasarımları: silindirik dişli ve konik ile dönme hızları ve ilerleme hızlarını değiştirerek analiz yapmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda ilerleme hızındaki artışın en yüksek sıcaklığı düşürdüğü, dönme hızındaki artışın ise en yüksek sıcaklık değerini arttırdığını görmüşlerdir. Analiz sonuçlarının yanında deneysel çalışma da yapmışlardır. Konik takım ucu ile belirledikleri parametreler ile yapılan bütün deneylerde kaynak hatası gözlemlenmişlerdir. Çalışmada maksimum çekme dayanımı dişli takım ucuyla 400 dev/dk dönme hızı ve 50mm/dk ilerleme hızında 230 MPa elde etmişlerdir [13]. Diğer bir çalışma Kandasamy ve diğ. (2018) tarafından yapılan sıcaklık değişimini hem analiz olarak hem deneysel olarak yapıp karşılaştırdıkları çalışmadır. Çalışmada konu olan malzeme AA7075 malzemesidir. Sürtünme kaynağının takım ucu olarak üç şekil seçmişlerdir: Koni, kesik konu ve silindir. Elde edilen analiz sonuçları ve deneysel verileri göre düzgün takım geometrisi için maksimum sıcaklık değerleri yakındır fakat kompleks takım ucu geometrilerinde analiz ve deneysel sonuçlarda farklılık görülmüştür [14].

Sürtünme karıştırma kaynağı çalışmaları içerisinde bağlama düzeneği tasarımına yönelik çalışmalarda bulunmaktadır. Literatürde daha az yer bulmuş bu konu araştırılmaya açık olması bakımından önemli bir yere sahiptir. Bu alanda yapılan çalışmalardan biri Smith (2011) tarafından AA6061-T 6511 malzemesini kullanarak sürtünme karıştırma kaynağında dönme hızı, tutucu aralıkları ve tutma momentini inceleyen çalışmadır. Bu çalışmada tutucu sayısının artırılıp aralıklarının azaltılarak farklı dönme hızları ve tutma momentlerinde çarpılmaya olan etkilerini görmüştür. Çalışma sonucunda Smith tutucu aralıklarının azaltılmasının çarpılmayı azalttığı ve tutma momentinin artırılmasının çarpılmayı azaltacağını görmüştür [15]. Diğer bir çalışma Jadhav ve Dalu (2017)'nin yaptığı bağlama düzeneği tasarımı ve geliştirilmesini konu almıştır. Bu çalışmada AA 6061-T6 malzemesi için freze tezgahı

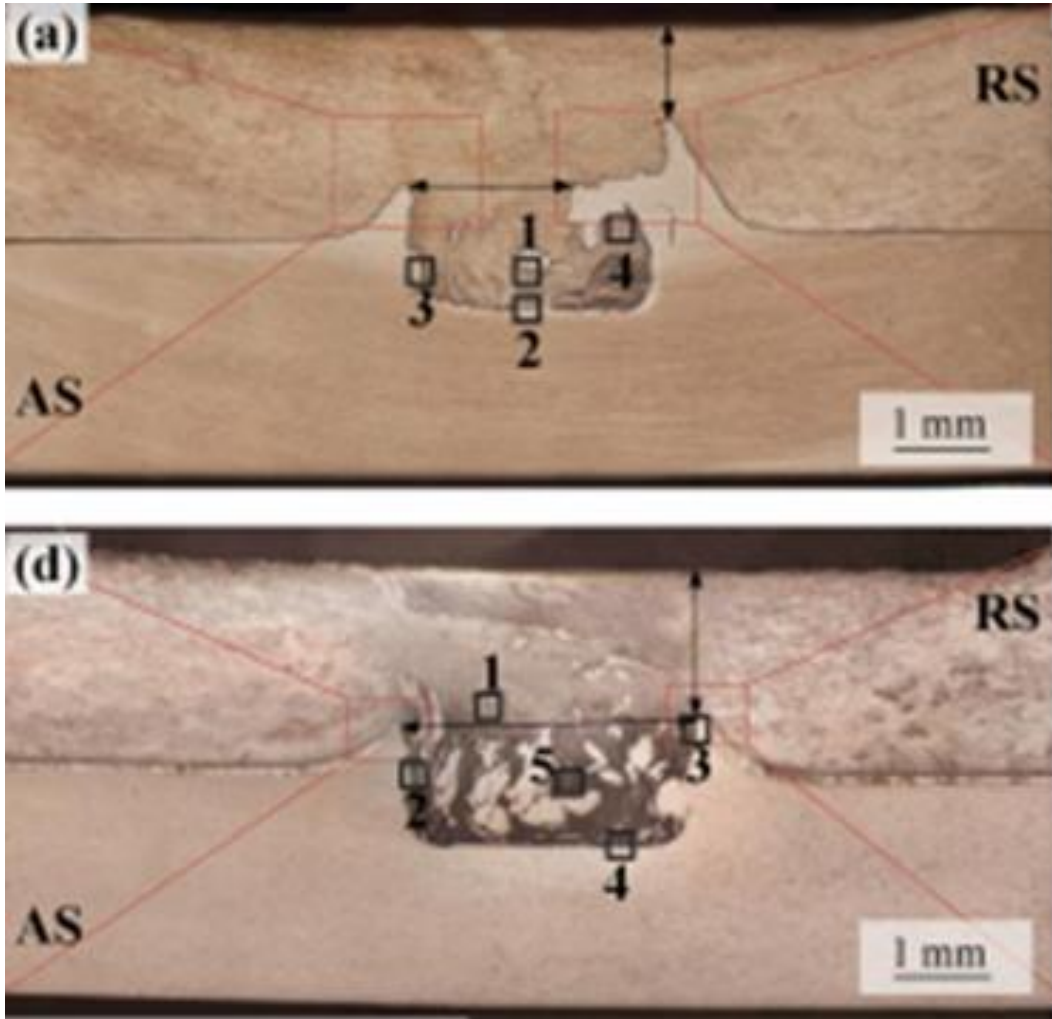
ile ekonomik şekilde başarılı sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması yapmak için bağlama düzeneği tasarımı yapmışlardır [16].

Sürtünme karıştırma kaynağının araştırılmasında öncelik bulan diğer bir konu ise sürtünme karıştırma kaynağında ara tabaka kullanımının etkilerinin incelenmesidir. Sürtünme karıştırma kaynağında ara tabaka ile çalışmalar henüz yeni olup araştırılmaya açık olan konulardandır. Bu çalışmalardan biri Shamsipur ve diğ. (2018) tarafından yapılan AA5754 malzemesinin sürtünme karıştırma kaynağında çinko ara malzeme kullanımının iç yapı korozyon özelliklerine olan etkilerini inceleyen çalışmadır. Bu çalışmada 4mm alüminyum saclar arasına 100 µm çinko ara tabaka eklenmiş ve kesik konik dişli şeklindeki takım ucu kullanılarak alın kaynağı yapmışlardır. Çalışmada hem ara tabakasız hem de ara tabakalı farklı dönme hızları ve ilerleme hızlarında kaynakların yapıldığı numuneleri incelemişlerdir. Araştırmanın sonucunda hatasız birleşme yapılabilmesi için kaynak parametrelerinin en iyi şekilde ayarlanması gerektiğini görmüşler ve en iyi birleşmenin olduğu numune 800 dev/dk dönme hızı ve 15 mm/dk ilerleme hızında elde etmişlerdir. Bu numunenin kaynak metali bölgesindeki kimyasal bileşiminin 7xxx alüminyum serisinin kimyasal bileşimi ile aynı olduğunu ve diğer numuneler arasında en yüksek korozyon dayanımına sahip olduğunu görmüşlerdir [17]. Ara tabaka içeren sürtünme karıştırma kaynağı araştıran diğer bir çalışma Niu ve diğ. (2019) tarafından yapılan AZ31B magnezyum alaşımı ile AA7075-T6 alüminyum alaşımının çinko ara tabakası kullanarak bindirme sürtünme karıştırma kaynağı yapılan çalışmadır (Şekil 1.11).

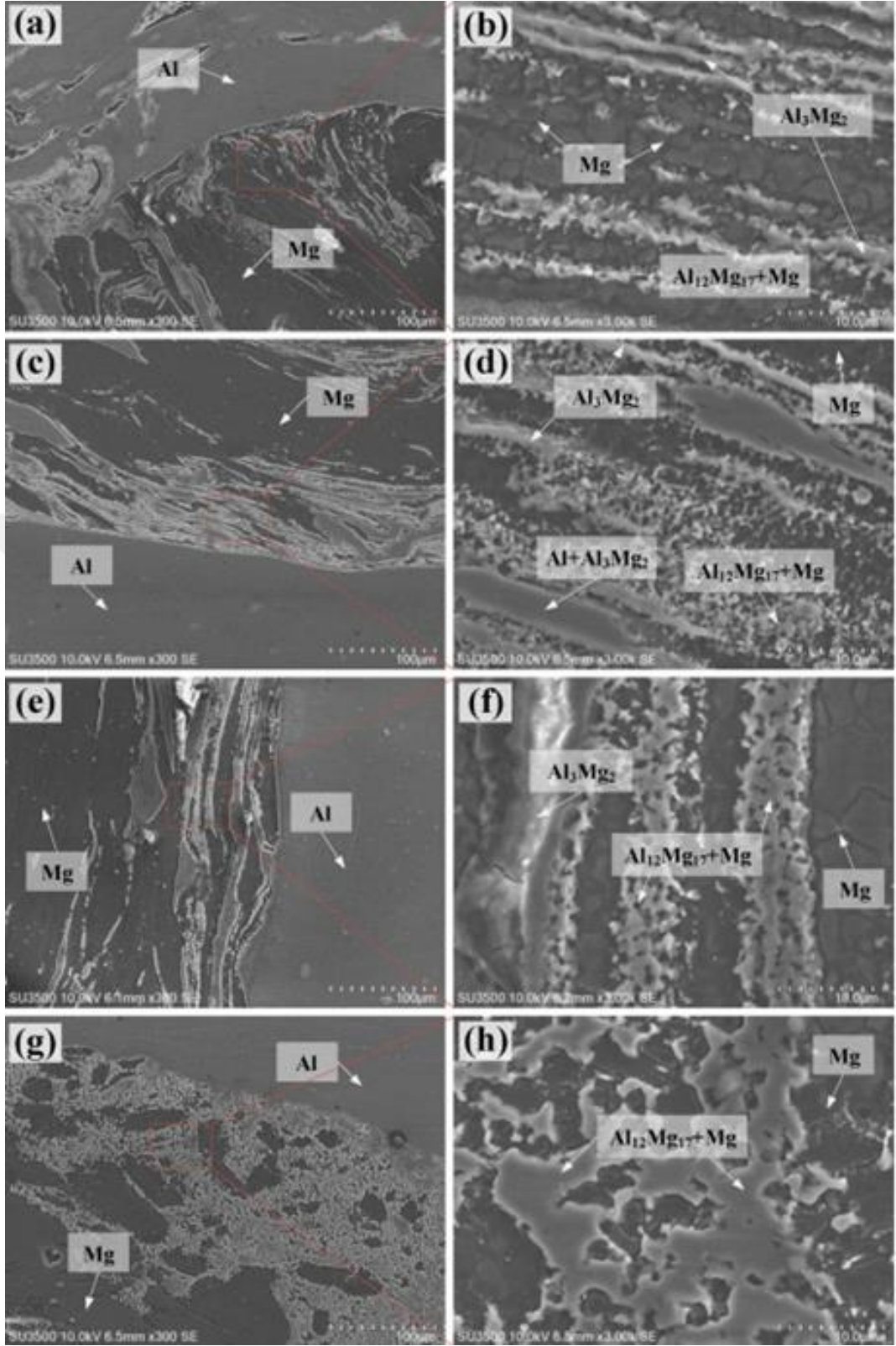


Şekil 1.11: Çinko ara tabakalı sürtünme karıştırma bindirme kaynağı şematik gösterimi [18].

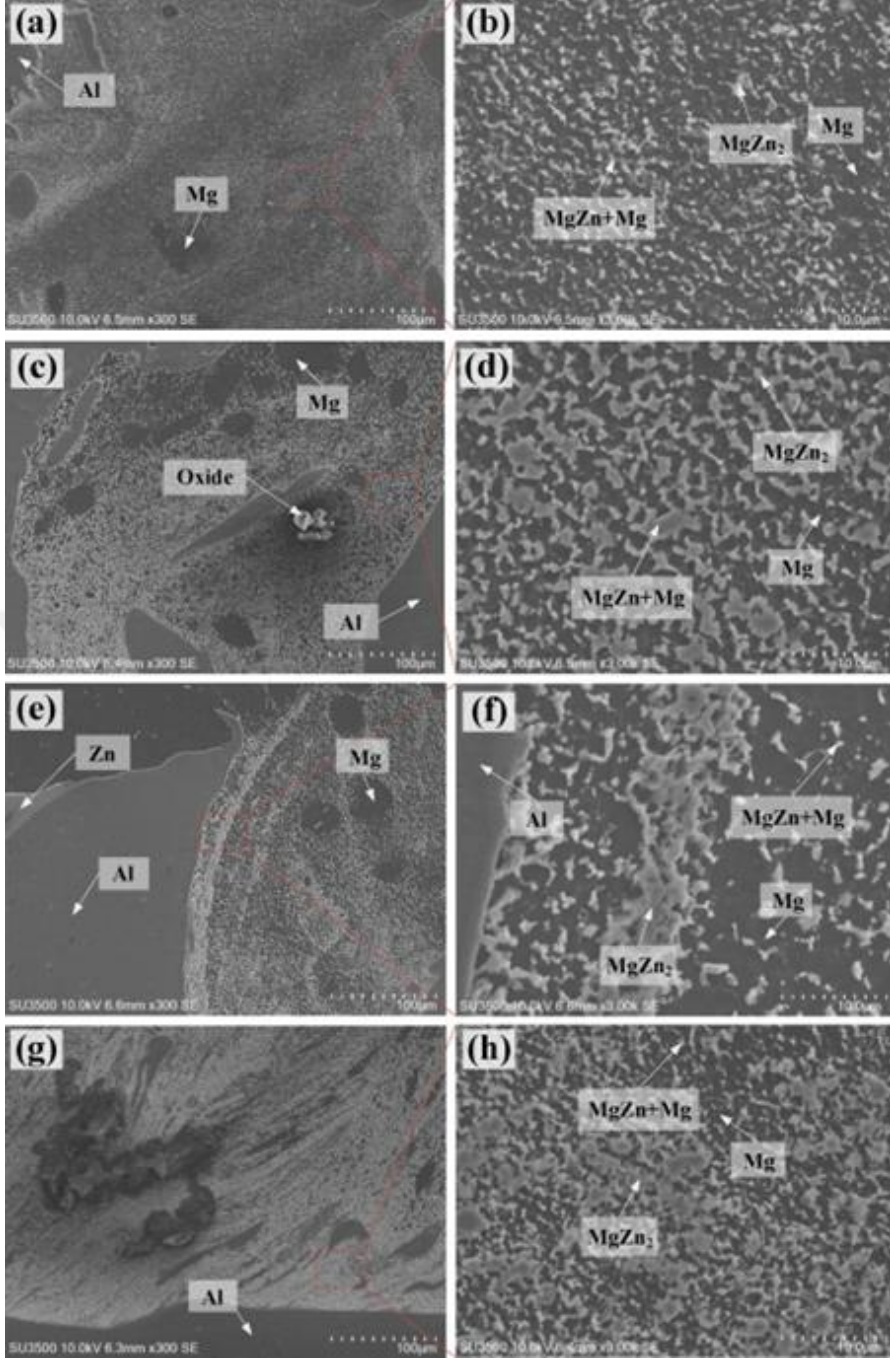
Bu çalışmada 0,1 mm çinko tabakası bindirme kaynağına eklenerek bu tabakanın iç yapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştirlerdir. Çalışmada çinko ara tabakası ile kaynak metali bölgesinde alüminyum ve magnezyum arasında mekanik özellikleri olumsuz etkileyen sert ve kırılğan Al-Mg metaller arası bileşiklerin yerine üniform dağılımlı Mg-Zn metaller arası bileşiklerin oluşumunu gözlemlemiştirlerdir. Mekanik özellikler açısından çinko eklenilmesinin kaynak bölgesinin çekmeli kayma yükünü arttırdığı ve bu özelliğin maksimum 6,6 kN değerini 1000 dev/dk dönme hızında elde etmişlerdir (Şekil 1.12, Şekil 1.13 ve Şekil 1.14) [18].



Şekil 1.12: 1000 dev/dk dönme hızında yapılan kaynak bölgesi kesitleri (a)Ara tabakasız (d) Çinko ara tabakalı [18].



Şekil 1.13: Ara tabakasız 1000 dev-dk dönme hızında yapılan kaynak bölgesi SEM sonuçları [18].



Şekil 1.14: Çinko ara tabakalı 1000 dev/dk dönme hızında yapılan kaynak bölgesi SEM sonuçları [18].

Sürtünme karıştırma kaynağında diğer bir araştırma konusu sualtı sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarıdır. Bu çalışmalardan biri Zhao ve diğ.(2016) tarafından yapılan AA6013 ile AZ31 malzemelerinin sürtünme karıştırma kaynağını hem normal yani hava hem su altı uygulamalarını karşılaştırdığı çalışmadır. Çalışma sonucunda kaynak bölgesinde karıştırmanın normal uygulamada daha güçlü olduğunu gözlemlemişlerdir.1200 dev/dk dönme hızı ve 80 mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirilen kaynaklarda sualtında yapılan sürtünme karıştırma kaynak

dayanımının havadakine göre daha iyi olduğunu görmüşlerdir ve değerleri sırasıyla 152 MPa ve 131 MPa olarak ölçmüşlerdir. Her iki durumda da kaynağın gevrek kırılmaya maruz kaldığını gözlemlemişlerdir [19]. Bu konuda yapılan diğer bir çalışma Bijanrostami ve diğ. (2017) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada AA6061 ve AA7075 alüminyum alaşımlarının sualtı sürtünme karıştırma kaynağında çekme davranışlarını incelemişlerdir. 5 mm kalınlığındakini malzemeleri konik dişli takım ucuyla kaynaklamışlardır ve çekme dayanımlarını, uzamayı ve içyapıyı incelemişlerdir. Çalışma sonucunda maksimum çekme dayanımı ve uzama sonucunu 1853 dev/dk dönme hızı 50 mm/dk ilerleme hızında almışlardır ve değerleri 237,3 MPa ve 41,2% dir. Ayrıca yüksek ısı girişinin olduğu durumlarda düşük dayanıma neden olan tane büyümesinde ve dislokasyon yoğunluğunda azalma görmüşlerdir [20].





2. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI (SKK)

2.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Tarihçesi

Günümüze kadar gelen kaynak yöntemleri eritme kaynağı ve katı hal kaynağı olarak iki ana başlık altındadır. Özellikle eritme kaynağı yöntemlerinin çok enerji gerektirmesi gibi dezavantajları yeni yöntemlerin bulunması gerekliliğini doğurmuştur. Bu olumsuzluğa getirilen çözümlerden birisi sürtünme kaynağı olmuştur. Sürtünme kaynağında parçaların birbirlerine göre hareketleriyle parçalar arası sürtünme yaratılmış ve bir basınç uygulanarak sürtünme kaynağı gerçekleştirilmiştir. Sürtünme kaynağının yapılışı sırasındaki kaynak şekli gibi sınırlamalar temeli termomekanik prensibi dayanan bu yöntemde değişiklikleri getirmiş ve sürtünme karıştırma kaynağının temellerini atmıştır. Bu temel ışığında İngiliz Kaynak Enstitüsü sürtünme karıştırma kaynağını keşfetmiş ve sürtünme karıştırma kaynağı 1991 yılında TWI tarafından patenti alınmış katı hal kaynağı yöntemi olmuştur [21]. Sürtünme karıştırma kaynağı sürtünme ile ortaya çıkan enerji yardımıyla plastik deformasyonun ve birleşmenin sağlandığı katı hal kaynağıdır. İcadından sonra birçok alanda kullanılan sürtünme karıştırma kaynağı kısa sürede alüminyumun başarılı bir şekilde kaynak yöntemiye birleştirilmesinde ön plana çıkmıştır [1].

2.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Endüstride Kullanım Alanları

Sürtünme karıştırma kaynağı uygulama yöntemi ve sağladığı avantajlar açısından endüstride bir çok alanda kullanılan bir yöntemdir. Özellikle ulaşım türlerine ait araçların imalatında ön plana çıkmıştır.

2.2.1. Demiryolu ulaşımı uygulamaları

Sürtünme karıştırma kaynağı demiryolu endüstrisi için dünyanın hem doğusunda hem batısında kullanılan bir yöntem olmuştur. Avrupa'da raylı taşıt yapan imalatçılar

tarafından alüminyum ekstrüzyonların büyük bir panel şekline getirilmesi için kullanılmaktayken Japonya'da içi boş profillerin birleştirilmesiyle bütün demiryolu aracının üretilmesinde kullanılmıştır (Şekil 2.1)[21].



Şekil 2.1: Alüminyum profillerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş Shinkansen treni [1].

2.2.2. Karayolu ulaşımı uygulamaları

Otomotiv üretiminde bazı parçaların üretimlerinde sürtünme karıştırma kaynağı kullanılmaktadır. Halla Climate Control firması sürtünme karıştırma kaynağını araç klima sistemleri içinde yer alan kompresörde kullanılan küçük pistonların birleştirilmesi için kullanmaktadır. Almanya'da bulunan Riftec firması sürtünme karıştırma kaynağının otomotiv üretim hatlarında uygulanması ve seri üretimde ürün tasarımı üzerinde gerekli değişiklikler için danışmanlık sağlar. Ford şirketi Ford GT spor arabaları için ara kanal üretiminde sürtünme karıştırma kaynağı kullanmıştır (Şekil 2.2) [21].



Şekil 2.2: Ford GT ara kanal sürtünme karıştırma kaynağı [21].

2.2.3. Havayolu ulaşımı uygulamaları

Havayolu ulaşımında sũrtũnme karıştırma kaynağı uğak ve roket paręalarının ¼retiminde kullanılmıştır. The Phantom Works of the Boeing şirketi uğak, f¼ze ve uzay arağları için sũrtũnme karıştırma kaynağının farklı birleştirme şekilleri ¼zerinde ęalıřmıřtır. Eclipse havacılık şirketi peręinleme ve yapıştırma gibi y¼ntemlerin yerine sũrtũnme karıştırma kaynağı y¼ntemini kullanmaya karar vermiştir. Bu karar sonrası sũrtũnme karıştırma kaynağı kullanılan Eclipse 500 jetini ¼retmiřtir (şekil 2.3) [21].



şekil 2.3: Sũrtũnme karıştırma kaynağı kullanılmış Eclipse 500 jetinin ilk test uğuşu [21].

2.2.4. Denizyolu ulaşımı uygulamaları

Sũrtũnme karıştırma kaynağı uygulamaları genellikle al¼minyum levhalarda kullanılmakla birlikte bu levhaların gemilerin g¼verteleri, helikopter sahası gibi alanlarda kullanıldığı g¼r¼lm¼řt¼r (şekil 2.4) [21].



şekil 2.4: Helikopter inme alanı ve açıkta zemin levhalarının sũrtũnme karıştırma kaynağı [21]

The Tamano Works of Mitsui Engineering&Shipbuilding şirketi yolcu ve yük gemileri için sürtünme karıştırma kaynağını kullanmışlardır [21].

2.3 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Avantajları ve Dezavantajları

2.3.1. Avantajları

- Hiçbir işleme gerek kalmadan kaynak yöntemiyle birleştirildiği haliyle iyi mekanik özellikler gösterir.
- Kaynak sırasında herhangi bir zehirli gaz, sıçrama vb. görülmediği için daha güvenli bir yöntemdir [22].
- Kaynak yöntemiyle birleştirilen parçalarda bağlama düzeneğinden kaynaklı çarpılma daha azdır.
- Kaynak sırasında tüketilen elektrot tarzı malzeme bulunmaz. Takım ucu aşınmaya uğrayıp amacını yerine getirmediği zamana kadar kullanılabilir.
- Hem aynı hem farklı malzemelerin kaynağı yapılabilir.
- Genellikle kaynak sonrası talaşlı imalat yöntemlerinin kullanılmasına gerek duyulmaz. Kaynak görüntüsü ve yüzeyi iyi sonuç verir.
- Her yönde kaynak uygulaması yapılabilir.
- Düşük bütçeyle basit freze makinalarında uygulanabilir.
- Çevrecidir.
- Enerji tasarrufu sağlar.

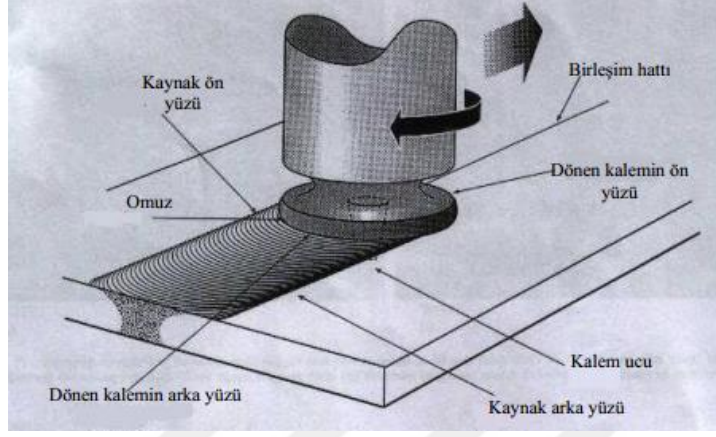
2.3.2. Dezavantajları

- Takım ucu parçadan ayrıldıktan sonra çıkış deliği görüntüsü oluşur.
- Parçaların hareket etmemesi için bağlama düzeneği dikkatli tasarlanmalıdır.
- Daha düşük ilerleme hızlarında kaynak yapılır.
- Parçaların sabit tutulması için parçaların altına konulan destek plaka gereklidir.
- Kaynak sonucunun daha iyi olması için yüzey temizleme işlemleri gerçekleştirilmelidir [1].

2.4 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulama Yöntemi

Kaynağın yöntemi sürtünme sonucu ortaya çıkan ısı yardımıyla iki malzemenin birleşmesini sağlamaktır. Sürtünme karıştırma kaynağının gerçekleştirilmesi için

gerekli parçalar takım ucu, bağlantı düzeneğidir. Temel olarak takım ucu dönerek malzemelerde sürtünmeyi gerçekleştirip iki malzeme arasındaki birleşmeyi sağlayan elemandır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi [23]

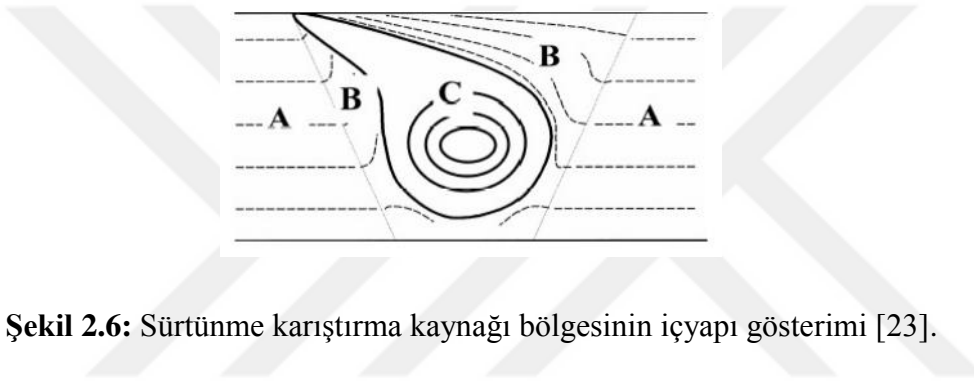
Takım uçlarının değişik tasarımları kaynak kalitesi üzerinde farklı sonuçları ortaya çıkarır. Takım uçlarının tasarımı dışında boyutları da yapılan kaynak üzerinde farklılık yaratır. Bağlantı düzeneği ise kaynak sırasında kaynak yöntemiyle birleştirilen parçaların hareketinin engellemesini sağlar. Bu düzeneğin tasarımında kullanılacak destek plaka amacını sağlayacak kalınlıkta olmalı ve bağlantı düzeneğinde kullanılan malzemelerin ısıl iletkenlikleri düşük olmalıdır. Ayrıca bağlantı düzeneğinde kullanılan tutucular kaynak yöntemiyle birleştirilecek parçalara dikey kuvvet uygulamalıdır [24]. Bağlantı düzeneğinde kullanılan tutucuların sayısı ve tasarımı kaynağın kalitesini etkileyen faktörler arasındadır.

Kaynak kalitesini etkileyen diğer bir faktör destek plaka seçimidir. Destek plaka kaynak yöntemiyle birleştirilecek iki malzemenin altına yerleştirilen plaka olup kaynak bölgesi etrafında ısı dağılımını gerçekleştirmesine neden olur. Bu yüzden destek plakanın fiziksel özelliklerinden olan ısıl dağılıma gücü kaynak kalitesini etkileyen önemli etkenlerden olmuştur. Genelde düşük yayınma katsayısı olan malzemelerin seçilmesi kaynağın kalitesini arttıran bir sonuç ortaya çıkarmıştır. Destek plaka olarak paslanmaz çelik, orta ve düşük karbonlu çelikler, saf bakır, seramik gibi malzemeler kullanılabilir [25].

Kaliteli bir kaynak oluşturmak için proses sırasında etkili olan parametreler başlıcaları dönme hızı ve ilerleme hızıdır. Bu iki parametre, takım ucu ile

malzemeler arasındaki sürtünmeyi ve dolayısıyla o bölgedeki ısı girişini belirlediğinden kaynak bölgesini etkilemektedir. Genel olarak yüksek dönme hızları o bölgede daha fazla ısı oluştururken yüksek ilerleme hızları ise kaynak bölgesinde oluşan ısıyı azaltmaktadır. Kaynağın kalitesinin yüksek olması için bu parametreler dikkatli seçilmelidir.

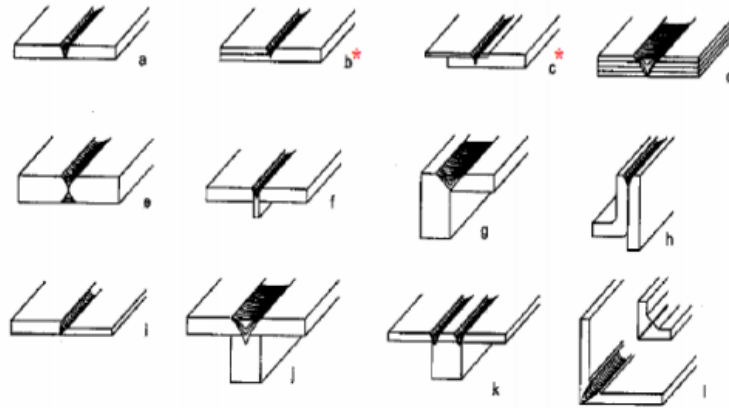
Sürtünme karıştırma kaynağı için kaynak bölgesi; kaynak metali bölgesi (C), termomekanik etkilenen bölge (B), ısı tesiri altındaki bölge (A) ve ana malzeme olarak dört alana ayrılmaktadır. Bu bölgeler içerisinde ısı ve plastic deformasyonun etkili olduğu yerler farklılık göstermektedir. Bu farklılık tanecik yapısını etkiler ve dolaylı olarak kaynağın mekanik özelliklerinde değişikliğe neden olur (Şekil 2.6) [1].



Şekil 2.6: Sürtünme karıştırma kaynağı bölgesinin içyapı gösterimi [23].

2.5 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Birleştirme Şekilleri

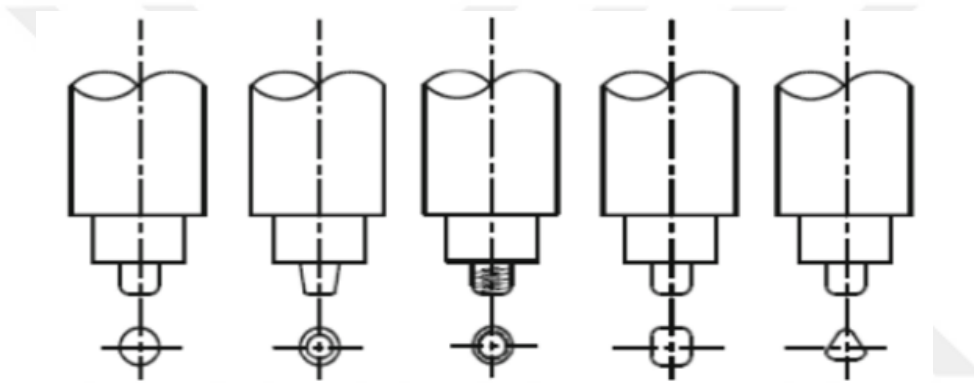
Sürtünme karıştırma kaynağında özellikle alın kaynağı ve bindirme kaynağı birleştirme şekilleri daha yaygın uygulanmakta olup literatürde çoğu çalışmalar bu birleştirme şekilleri üzerine yoğunlaşmışlardır. Bazı sürtünme kaynağı birleştirme şekilleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Sürtünme karıştırma kaynağı birleştirme şekilleri örnekleri [1].

2.6 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takım Uçları

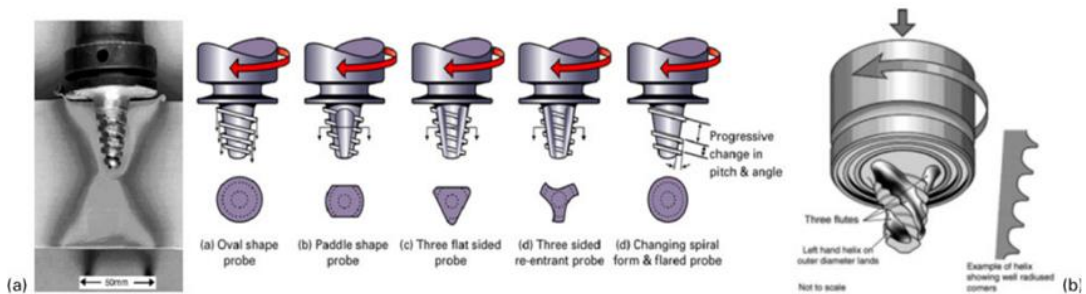
Sürtünme karıştırma kaynağında takım ucu şekilleri kaynağın kalitesini etkileyen başlıca etkenlerden biridir. Takım ucunun dönmesiyle yaratılan sürtünmenin etkisi ve o bölgede gerçekleşen malzeme hareketinin farklılıkları takım ucu tasarımının çalışmalardaki önemini arttırmaktadır. Literatürde takım ucu tasarımlarının kaynağın mekanik ve iç yapı özelliklerine etkilerinin farklı malzemeler için incelendiği pek çok araştırma mevcuttur. Bu araştırmalara baktığımızda genel olarak omuz ve pinden oluşan takım ucu için çeşitli tasarımlar ön plandadır. Şekil 2.8’de temel takım ucu pin tasarımları gösterilmiştir. Şekilde pin silindirik, konik, konik dişli, kare ve üçgen şekillerinde tasarlanmıştır [26].



Şekil 2.8: Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan temel takım ucu profilleri [26].

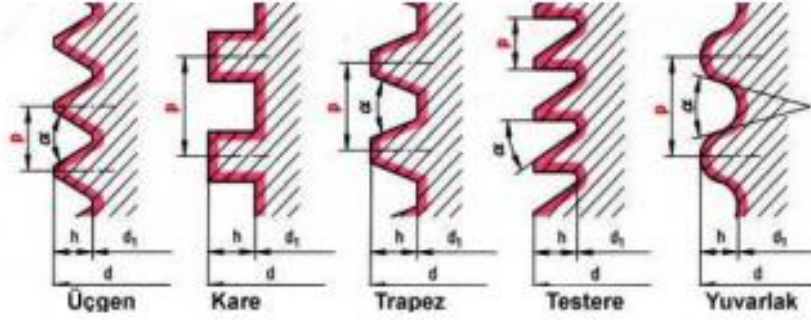
Temel tasarımların dışında İngiliz Kaynak Enstitüsü’nün geliştirdiği farklı pin tasarımları da mevcuttur. Trivex™, MX Triflute™, Whorl™ gibi Şekil 2.9’da gösterilen tasarımlar daha gelişmiş şekiller olup kaynağı daha güç malzemeler ve kalınlığı fazla olan durumlarda tercih edilen kaynak ucu tasarımları arasındadır.

Whorl™ tipi takım uçları ile kalınlığı 60 mm olan levhaların bile kaynakları yüksek hızda gerçekleştirilebilmektedir [1].



Şekil 2.9: a) Whorl™ ve b) MX Triflute™ pin tasarımları [27].

Pin tasarımlarının yanı sıra dişli pin şekline sahip takım uçları için diş profilindeki farklılıkların kaynak üzerine etkilerinin görüldüğü çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalarda üçgen diş profilinin diğer profillere göre çekme dayanımı açısından daha iyi sonuçlar vermiştir (Şekil 2.10) [28].



Şekil 2.10: Takım uçları için vida profilleri [28].

Takım ucu malzemesi için gerekli özellikler aşağıdaki gibidir:

- Maliyeti avantajlı olmalı
- Karmaşık şekillere kolay imal edilebilmeli
- Isıl genleşme katsayısı düşük olmalı
- Dayanımı yüksek olmalı
- Isıl yorulma dayanımı yüksek olmalı
- Kaynak yöntemiyle birleştirilecek malzemelerle tepkimeye girmemeli
- Aşınmaya karşı direnci yüksek olmalı

Alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı için takım ucu malzemesi olarak genelde takım çelikleri kullanılır. Takım çeliklerinin arasında H13 en çok kullanılan malzeme olmuştur [27].

2.7 Sürtünme karıştırma Kaynağı Uygulamaları Yapılan Malzemeler

Sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak birleştirilen ilk malzeme alüminyumdur. Bunun dışında sürtünme karıştırma kaynağının avantajlarından yararlanıp uygulamaları yapılan ya da üzerinde çalışmalar yapılan malzemeler arasında ise bakır, magnezyum, çelik, metal matrisli kompozit, titanyum gibi malzemeler vardır

[21].Bu çalışmada demiryolu araçlarında hafiflik sağlayan malzemelerden olan alüminyumun ve magnezyumun özellikleri üzerinde durulacaktır.

2.7.1 Alüminyum

Dünyada birçok alanda yaygın olarak kullanılan alüminyumun tercih edilmesini sağlayan pek çok özelliği mevcuttur.Bu özellikler aşağıda belirtilmiştir:

- Hafif malzeme
- Elektrik ve ısı iletkenliği yüksek
- Korozyona dayanıklı
- Aşınma dayanımı düşük
- Yumuşak
- Yüksek sıcaklıklarda iyi özellik göstermez
- Dayanım-ağırlık oranı düşünüldüğünde iyi

Alüminyum alaşımları dövme ve dökme olarak ikiye ayrılır [29].Dövme alaşım çeşitleri ve dayanım aralıkları Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1: Dövme alüminyum alaşımlarının dayanım aralıkları [30].

Alüminyum Serileri	Alüminyum Alaşım İçerikleri	Dayanım Arttırma Yöntemleri	Çekme Dayanımı Aralıkları (MPa)
1xxx	Al	Soğuk şekillendirme	70-175
2xxx	Al-Cu-Mg(1-2,5% Cu)	Isıl işlem	170-310
2xxx	Al-Cu-Mg(3-6% Cu)	Isıl işlem	380-520
3xxx	Al-Mn-Mg	Soğuk şekillendirme	140-280
4xxx	Al-Si	Soğuk şekillendirme (Bazı ısıl işlemler)	105-350
5xxx	Al-Mg(1-2,5% Mg)	Soğuk şekillendirme	140-280
5xxx	Al-Mg(3-6% Mg)	Soğuk şekillendirme	280-380
6xxx	Al-Mg-Si	Isıl işlem	150-380
7xxx	Al-Zn-Mg	Isıl işlem	380-520
7xxx	Al-Zn-Mg-Cu	Isıl işlem	520-620
8xxx	Al-Li-Cu-Mg	Isıl işlem	280-560

Alüminyum alaşımlarında dayanım arttırma şekli olarak et etkili yöntem yaşlandırma mekanizmasıdır.Alüminyum ve alüminyum alaşımlarında temper durumları aşağıdaki gibi gösterilir [29]:

- F: İmal edildiği gibi
- O: Tavlanmış
- H: Soğuk şekil verilmiş
- W: Çözme tavi uygulanmış
- T: Yaşlandırma uygulanmış

Alüminyum temper çeşitlerinden T6 çözme tavı ve yapay yaşlandırmayı belirtir ve demiryolu uygulamalarında genellikle T6 şeklindeki alüminyum alaşımları kullanılır [1]. Ayrıca demiryolu endüstrisinde genellikle 5052, 5083, 5086, 5454 ve 6061 alüminyum alaşımları sac parçalar için, ekstrüzyon parçaları içinse 5059,5383 ve 6082 alüminyum alaşımları kullanılır [31].

2.7.2 Magnezyum

Magnezyum genel özellikleri açısından yoğunluğu $1,74 \text{ g/cm}^3$ olan hafif bir malzemedir. Birim ağırlık başına düşen dayanım oranı yüksektir. Sönümlenme özelliği iyidir. İşlenebilirliği yüksektir. Akıcıdır, kolay dökülebilir. Fakat korozyon dayanımı düşüktür ve yüksek sıcaklık değerlerinde akma ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri kötüleşir [32].

Magnezyum alaşım çeşitleri içerdiği alaşım malzemesine göre farklı şekilde adlandırılır. Magnezyum alüminyum, çinko, silisyum, bakır, manganez vb. çeşitli malzemelerle alaşımlandırılabilir [32]. AZ31B, AZ61, AM60B magnezyum alaşımlarından bazılarıdır. Özellikle AZ31B ve AZ61 magnezyum alaşımı sürtünme karıştırma kaynağı çalışmalarının çoğunda araştırma malzemesi olmuştur.

2.8 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Standartları

Sürtünme karıştırma kaynağının 1991'de bulunmasından sonra uygulama kalite kontrol açısından EN 287-Kaynakçı Kalifikasyon Testleri ve EN 288-Kaynak Yöntem Testleri gibi diğer kaynak yöntemlerinin standartlarına göre uygulamalar yapılmıştır [1]. Fakat gitgide kullanımının demiryolu, denizyolu ve havayolu uygulamalarında yaygınlaşmasından sonra kaynağın uygulama açısından belli bir standarta gereksinim duyulduğu görülmüştür [21].

Yapılan çalışmalar sonucunda 2011 yılında ISO25239 Sürtünme karıştırma kaynağı- Alüminyum standardı çıkartılmıştır. Bu standart 5 bölümden oluşmaktadır:

- Bölüm 1-Kelimeler Listesi
- Bölüm 2- Kaynak Bağlantılarının Tasarımı
- Bölüm 3-Kaynak Operatörlerinin Kalifikasyonu
- Bölüm 4- Kaynak Prosedürlerinin Belirlenmesi ve Kalifikasyonu
- Bölüm 5-Kalite ve Muayane Gereklilikleri

Standartın birinci bölümünde sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili terimler ve anlamları açıklanmıştır.İkinci bölümde alüminyum malzemesinin sürtünme karıştırma kaynağı bağlantı Şekilleri ile ilgili gerekliliklerden bahsedilmiŖtir.üçüncü bölüm alüminyum sürtünme karıştırma kaynağı yapacak kiŖilerin yetkinlikleri için gerekli Ŗartları gösterir. Dördüncü bölüm sürtünme karıştırma kaynağı baŖarılı bir Ŗekilde yapılması için gerekli kuralları anlatır.BeŖinci bölüm sürtünme karıştırma kaynağı yapanların kaynağı değerlendirmesi için gerekli kalite gereklerinden bahseder[33].





3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmanın bu bölümünde takım ucu,kaynak parametreleri ve ara tabaka kullanımlarının kaynak kalitesine yarattığı etkileri incelenecektir.

3.1 Malzeme ve Yöntem

Sürtünme karıştırma kaynağı deneysel çalışmaları için AA6082-T6 ve AZ31 malzemeleri seçilmiştir. Bağlantı türü olarak bindirme kaynağı yapılmasına karar verilmiştir. Çizelge 3.1 ve 3.2’de seçilen malzemelerin kimyasal bileşimleri gösterilmektedir. Kaynak plaka boyutları 100x310x5 mm ‘dir.Ara tabaka malzemesi olarak çinko kullanılmıştır. Çinko kalınlığı 0.4 mm olarak belirlenmiş ve kullanılmak üzere kaynak bindirme genişliği olan 40x300 mm boyutlarında kesilmiştir. Kaynak altlığı ve destek plakası olarak 3 mm ve 5 mm kalınlığında paslanmaz çelik kullanılmıştır.

Çizelge 3.1: AA6082 kimyasal bileşimi.

EN	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)	Al (%)
AA6082	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	0,2	0,2	0,1	Diğer

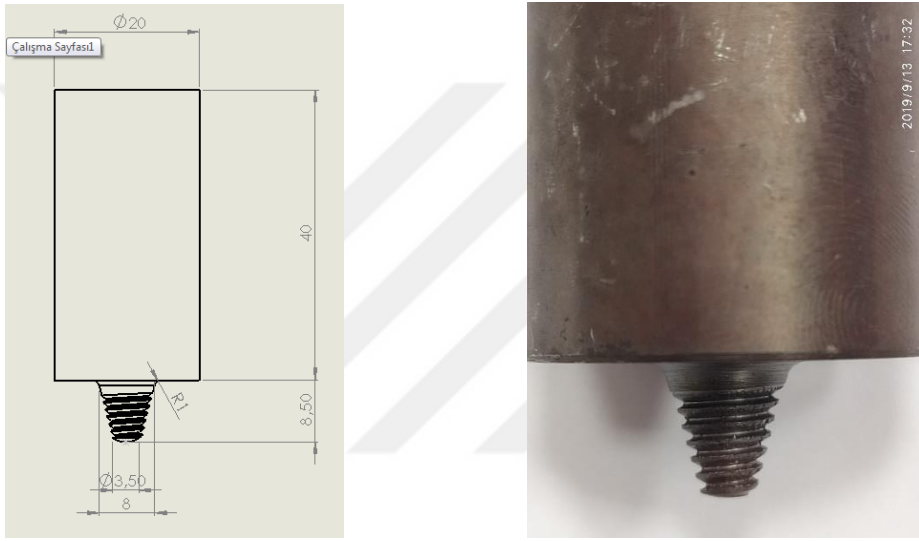
Çizelge 3.2: AZ31 kimyasal bileşimi.

EN	Mg (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Zn (%)	Al (%)	Diğer(%)
AZ31	95,4	0,0297	<0,0012	<0,00040	0,391	1,04	3,11	0,7

Deneysel çalışmaların yapılabilmesi için öncelikle sürtünme karıştırma kaynağı yapılacak makinanın kararlaştırılması, incelenmesi ve gerekli eksiklikler varsa bunların belirlenmesi lazımdır.Bu çalışmada okul staj atölyesinde bulunan KF NO:2 Dik ve yatay Kalıpçı Freze tezgahı sürtünme karıştırma kaynağına uygun hale getirilmeye çalışılarak başarılı şekilde kaynak uygulamalarının gerçekleştirilmesi istenmiştir.

Öncelikle makinanın motor gücü kontrol edilmiş ve istediğimiz koşullar için çalışabilirliği üzerinde durulmuştur.Daha sonra makinanın takım ucu montajı yapılan kısmına uygun boyutlarda takım ucu tasarımı oluşturulmuştur.Takım ucu olarak konik

dişli pin şekline sahip tasarım yapılmıştır. Takım ucu malzemesi H13 olarak seçilmiş ve sertliği 48 HRC olacak şekilde ısıl işlem yaptırılmıştır. Takım ucu boyutları belirlenirken kaynak şeklinin bindirme tipi olması pin uzunluğunu etkilemiş ve tasarımda önemli etkenlerden olmuştur. Konik dişli takım ucunun üç boyutlu çizimi ve kendisi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Bu takım ucunun omuz çapı ve yüksekliği 20 mm ve 40 mm’dir. Pin çapı ise 8 mm’den 3.6 mm’ye incek şekilde tasarlanmış ve uzunluğu 8.5 mm olarak yapılmıştır. Şekil 3.2’de gösterilen deneysel çalışmalar sonucu takım ucu pin yüksekliğinin yetersiz olmasından dolayı kaynak bölgesinde boşluk görülmüştür ve yükseklik 9.7 mm olarak değiştirilmiştir.



Şekil 3.1: Birinci takım ucu üç boyutlu tasarımı ve gerçek hali.



Şekil 3.2: Deney çalışması.

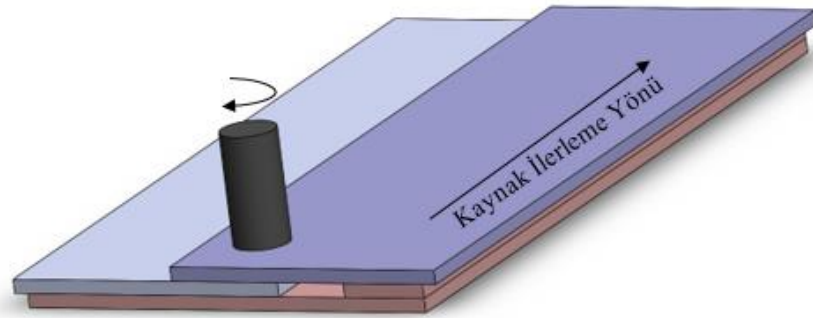
Deney çalışmasından sonra makina zorlanması önlemek amacıyla sac kalınlıkları 3 mm olarak değiştirilmiştir. Yeni seçilen kalınlıklara uygun şekilde takım ucu boyutlarında değişiklik yapılmıştır. Yeni deney düzeneğine uygun olacak şekilde pin uzunluğu 5.7 mm, pin çapı ise 8 mm’den 6 mm’ye düşecek şekilde takım ucu

değiştirilmiştir (Şekil 3.3). Al-Mg birleştirmeleri için aynı pin ölçüleri kullanılarak omuz da ise 6° içbükey takım ucu oluşturulmuştur.

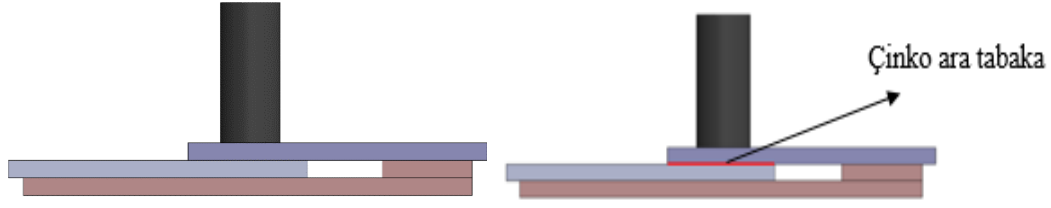


Şekil 3.3: Konik takım ucu.

Deney düzeneğinin 3 boyutlu hali Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Bindirme genişliği 40 mm’dir. Şekil 3.6 deney düzeneği göstermektedir. Parçalar freze tezgahına 4 adet pabuçla sabitlenmiştir. Ara tabaka kullanımı durumlarında kesilen çinko kaynak bindirme bölgesine yerleştirilmiştir (Şekil 3.4). Parçalar düzeneğe yerleştirilmeden önce aseton ile temizlenerek kaynak uygulamasına hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.4: Üç Boyutlu Deney düzeneği.



Şekil 3.5: Ara tabakasız ve ara tabakalı bindirme kaynağı durumu.



Şekil 3.6: Deney Düzenegi.

Sürtünme karıştırma kaynağı AA6082-AA6082 ve AA6082-AZ31 malzemeleri arasında olacak şekilde planlanmıştır. Alüminyum-alüminyum birleştirmeleri için iki dönme hızı ve iki ilerleme hızı araştırılmıştır. Alüminyum ve magnezyum birleştirmeleri için iki dönme hızı ve ara tabaka kullanım durumu parametreleri seçilerek gerçekleştirilmiştir. Bu plan ile 8 durum elde edilmiş ve Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3: Al-Al Sürtünme karıştırma kaynağı deney planı.

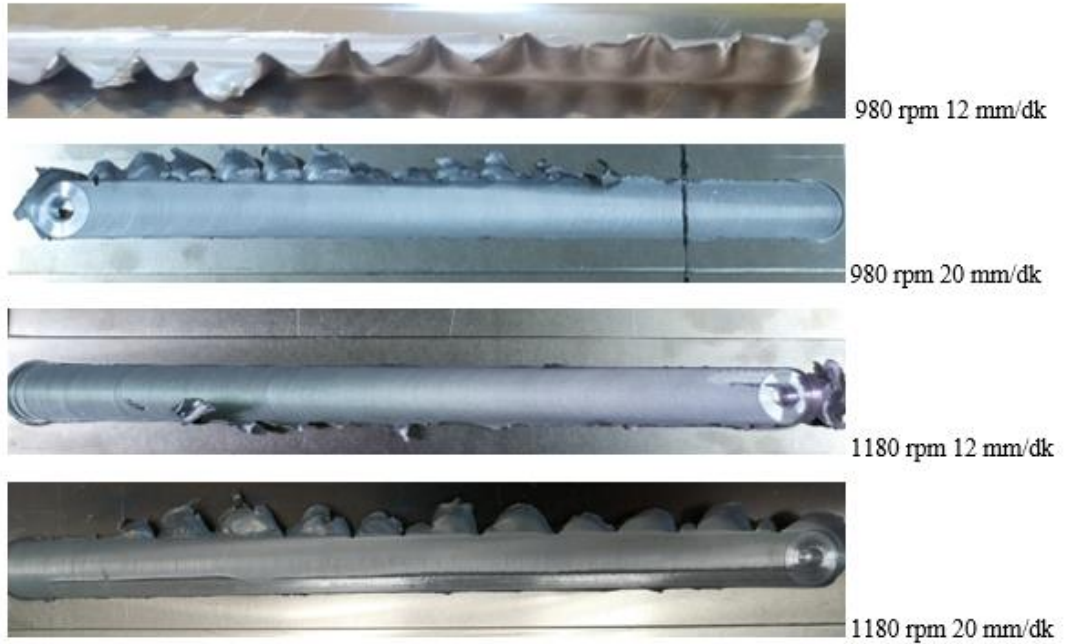
Kaynak Malzemeleri	980 rpm	1180 rpm	12 mm/dk	20 mm/dk
AA6082-AA6082	✓		✓	
AA6082-AA6082	✓			✓
AA6082-AA6082		✓	✓	
AA6082-AA6082		✓		✓

Çizelge 3.4: Al-Mg Sürtünme karıştırma kaynağı deney planı.

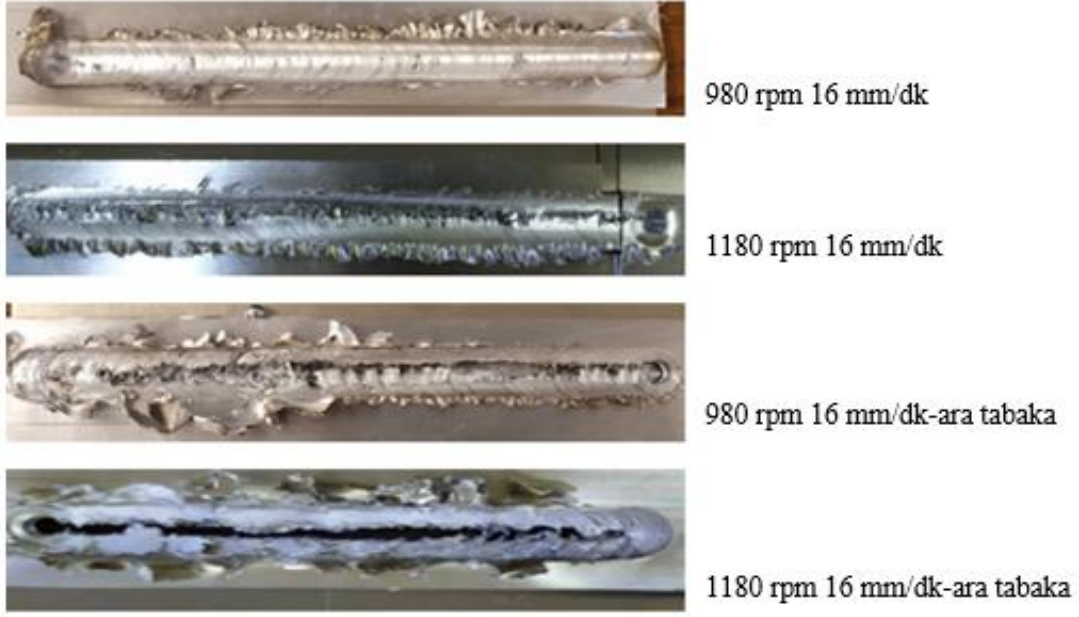
Kaynak Malzemeleri	980 rpm	1180 rpm	16 mm/dk	Zn ara tabaka
AA6082-AZ31	✓		✓	
AA6082-AZ31	✓		✓	✓
AA6082-AZ31		✓	✓	
AA6082-AZ31		✓	✓	✓

Yapılan sürtünme karıştırma kaynağı durumları Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Eski tasarlanan pin ucu ile yapılan deneylere göre kaynak kök kısmında boşuk boyutlarının küçüldüğü gözlemlenmiştir. Bunun nedeni pin ucu konikliğinin azaltılması ile kaynak kök kısmında daha büyük malzeme hacmi hareketi sağlandığı ve daha homojen birleştirme sağlanması olabilir[34]. Kaynaklarda genelde taşan metal kaynak hatası görülmüştür [35]. Bu hata takım ucunun batma derinliğinin ve basma kuvvetinin iyi ayarlanamadığı ve fazla gelmesinden dolayı oluşmuştur. 1180 rpm 20 mm/dk.’da yapılan kaynakta yüzeyde oluk hatası oluştuğu görülmüştür[35].

Deney planına göre bütün durumlar için kaynak yapılmaya çalışılmıştır fakat Al-Mg bindirme kaynağında seçilen parametreler ara tabaka durumunu incelenmesi için yeterli olmamıştır. Bu durumlar için kaynak sırasında birleşme gözlemlenememiştir.



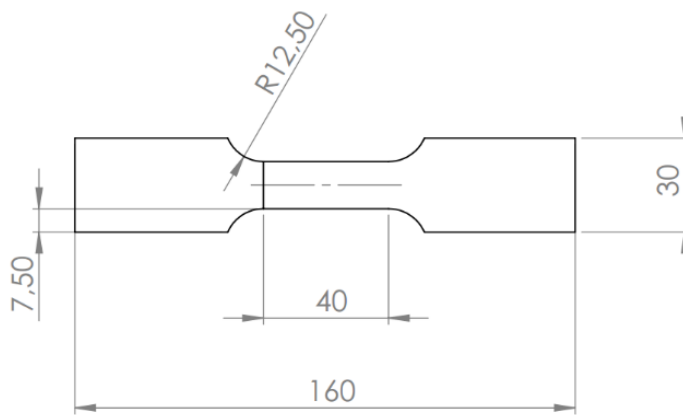
Şekil 3.7: AA6082-AA6082 bindirme kaynağı.



Şekil 3.8:AA6082-AZ31 bindirme kaynağı.

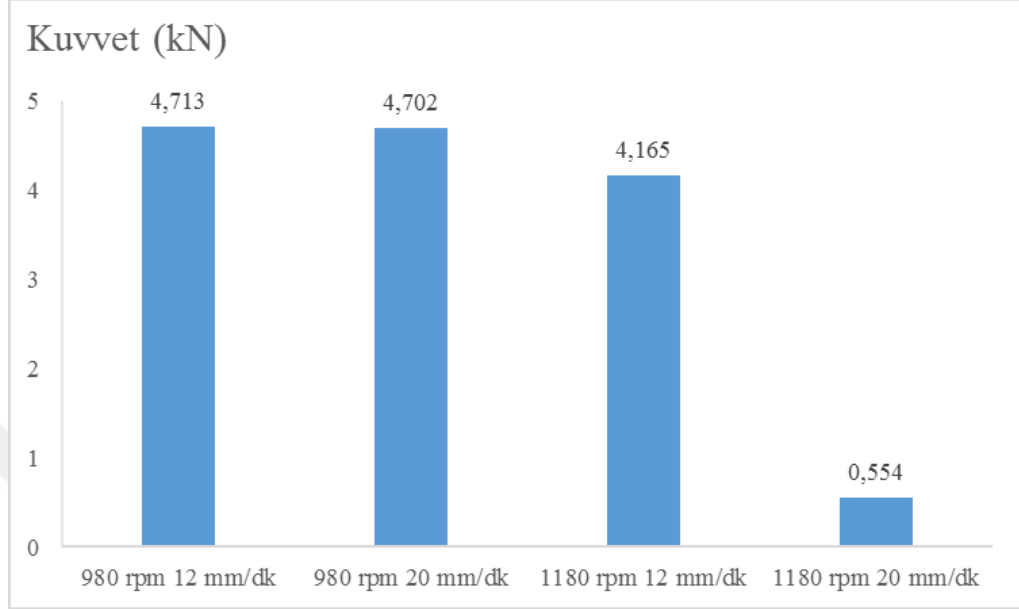
3.2 Çekme Makaslama Testleri

Yapılan kaynağın mekanik özelliklerini incelemek amacıyla kaynak yapılan plakalardan çıkarılan numuneler çekme makaslama testine tabi tutulmuştur.Çekme makaslama testi numune boyutları Şekil 3.9'daki gibidir. Numunelerin çıkarılması su jeti ile kestirilme yapılmıştır.Her başarılı kaynak durumundan 3'er adet çekme makaslama numunesi çıkartılmıştır.



Şekil 3.9:Çekme makaslama numunesi boyutları[1].

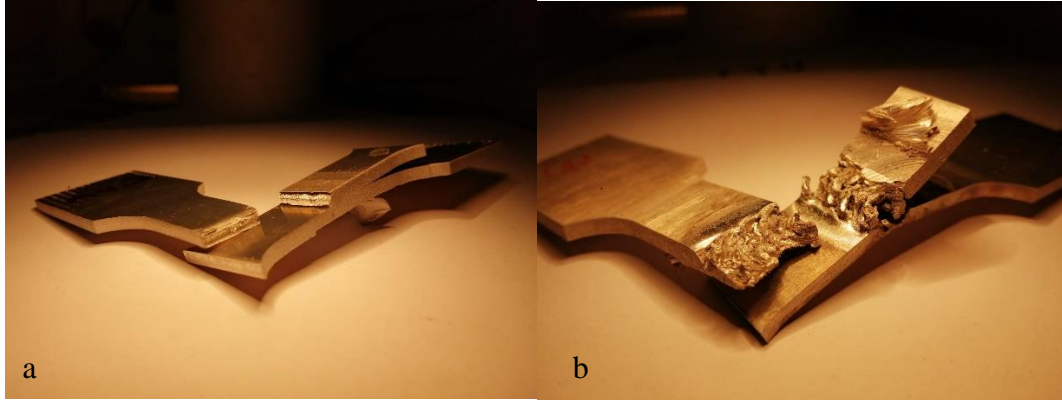
Deneysel Shimadzu 50 kN'luk üniversal çekme makinasında 2 mm/s çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme makaslama numunelerinin AA6082-AA6082 bindirme birleştirmesi için deney sonuçları Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10: AA6082-AA6082 Çekme makaslama deney sonuçları.

Aynı metal birleştirme durumlarından olan 980 rpm 12 mm/dk. parametreleri ile yapılan deneyde diğerlerine göre en iyi sonucu vermiştir. Bu durum için kırılma yüzeyleri Şekil 3.11.a'da gösterilmiştir. Test sırasında kırılma kaynak arka yüzeye yakın yerdeki boşluktan başlayıp arka yüzle birleşme şeklinde olmuştur. En kötü sonuç ise 1180 rpm 20 mm/dk parametrelerinde yapılan bindirme kaynağından alınmıştır. Bunun nedeni hem kaynağın üst bölgesinde oluk hatasının olması hem de kaynak kök kısmında boşluk görülmesinden kaynaklanmış olabilir.

AA 6082-AZ31 bindirme birleştirmesi için yapılan deney planındaki 4 durumdan sadece 980 rpm 16 mm/dk'da kaynaklı bağlantı elde edilebildiğinden sadece bu durum için çekme makaslama testi yapılmıştır. Test sonucunda maksimum kuvvet 1,023 kN olarak görülmüştür. Bu durum için kırılma yüzeyleri Şekil 3.11.b'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11: a.AA6082-AA6082 980 rpm 12 mm/dk bindirme kaynağı kırılma yüzeyleri b.AA6082-AZ31 980 rpm 16 mm/dk bindirme kaynağı kırılma yüzeyleri.

3.3 Kaynak Bölgesinin Metalografik İncelenmesi

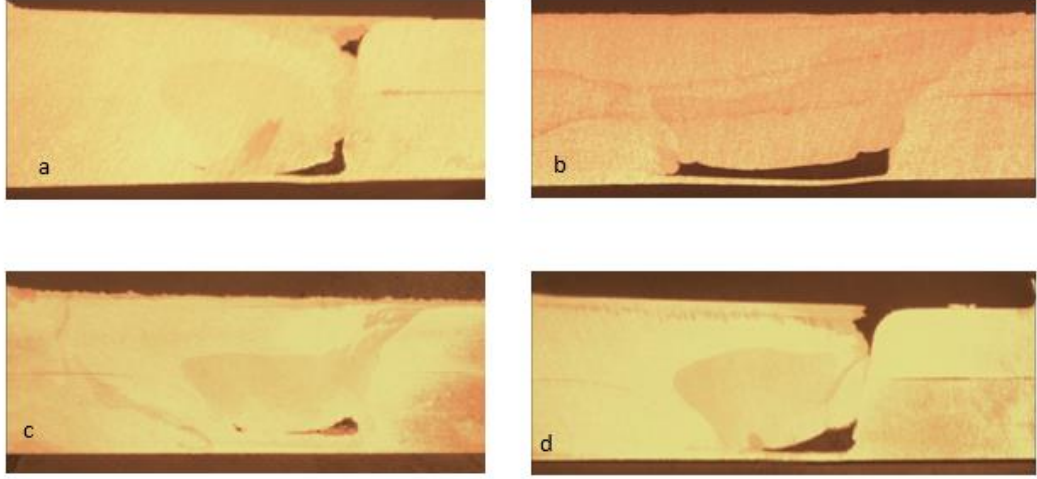
Yapılan kaynak sonrası ana malzeme ve kaynak bölgesi iç yapılarını incelemek amacıyla metalografik testler uygulanmıştır. İç yapıyı daha iyi gözlemleyebilmek için Al-Al birleştirmelerinin dağlanmasında Kellers ayırıcı kullanılmıştır. Al-Mg birleştirmeleri için magnezyum tarafı Nital 2 ayırıcı ile dağlanmıştır.

Genel olarak Şekil 3.12’de belirtilen tipik kaynak bölgesi görüntüsü yapılan kaynakların deney numunelerinde de gözlemlenmiştir.



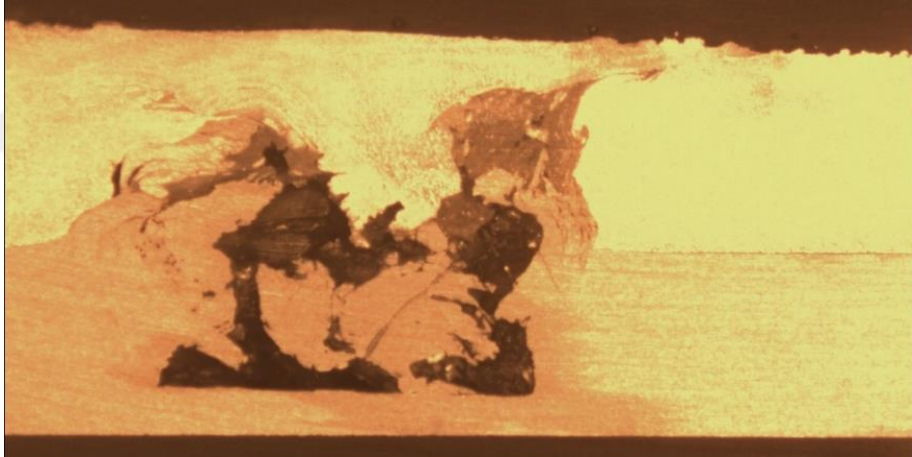
Şekil 3.12 Sürtünme karıştıma kaynağında kaynak bölgelerinin iç yapısının tipik görüntüsü [36].

Aynı malzeme için yapılan sürtünme karıştırma bindirme kaynağının iç yapısı Şekil 3.13’de gösterilmiştir. 980 rpm 20 mm/dk parametrelerinde yapılan kaynakta parçalara uygulanan basma kuvvetinin düşük kalmasından dolayı oluşabilecek kaynak hatası görülmüştür[35]. Bütün durumlarda yapılan kaynakta referans 22’ye göre ısı girdisinin düşük kalmış olduğu düşünülmüştür[22].



Şekil 3.13: AA6082-AA6082 bindirme kaynağı iç yapıları a.980 rpm 12 mm/dk b.980 rpm 20 mm/dk c.1180 rpm 12mm/dk d.1180 rpm 20 mm/dk.

Al-Mg arasında yapılan kaynağın iç yapısı Şekil 3.14’de gösterilmiştir. Bu durumda malzemeler arasında homojen karışım sağlanamamıştır.

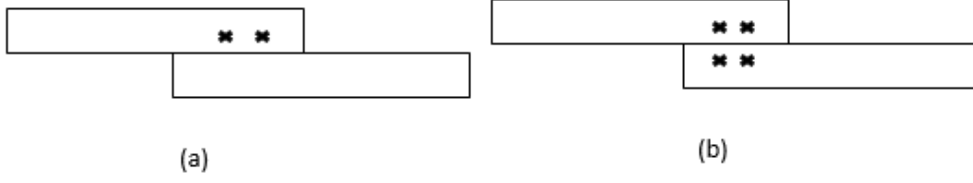


Şekil 3.14: AA6082-AZ31 980 rpm 16 mm/dk parametrelerindeki bindirme kaynağı iç yapısı.

3.4 Sertlik Testleri

Sertlik testi ana metallerle kaynak bölgesi arasında sertlik dağılımını belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde Shimadzu mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.16). Sertlik ölçümleri Vickers yöntemi kullanılarak 0,3 kg yük ile yapılmıştır. Ölçümler aynı malzeme kaynak durumları için iki sac metalin birleşme çizgisinden yaklaşık 1 mm yukarıda mümkün olduğu kadar kenara paralel yapılmaya çalışılmıştır. Farklı malzemelerin kaynak durumu için ise hem Al hem Mg tarafında

ölçüm yapılmıştır ve iki sac metalin birleşme çizgisinden sırasıyla yaklaşık 1 mm altta ve 1 mm üstte olan noktalar ölçüm noktaları olarak kabul edilmiştir (Şekil3.15).

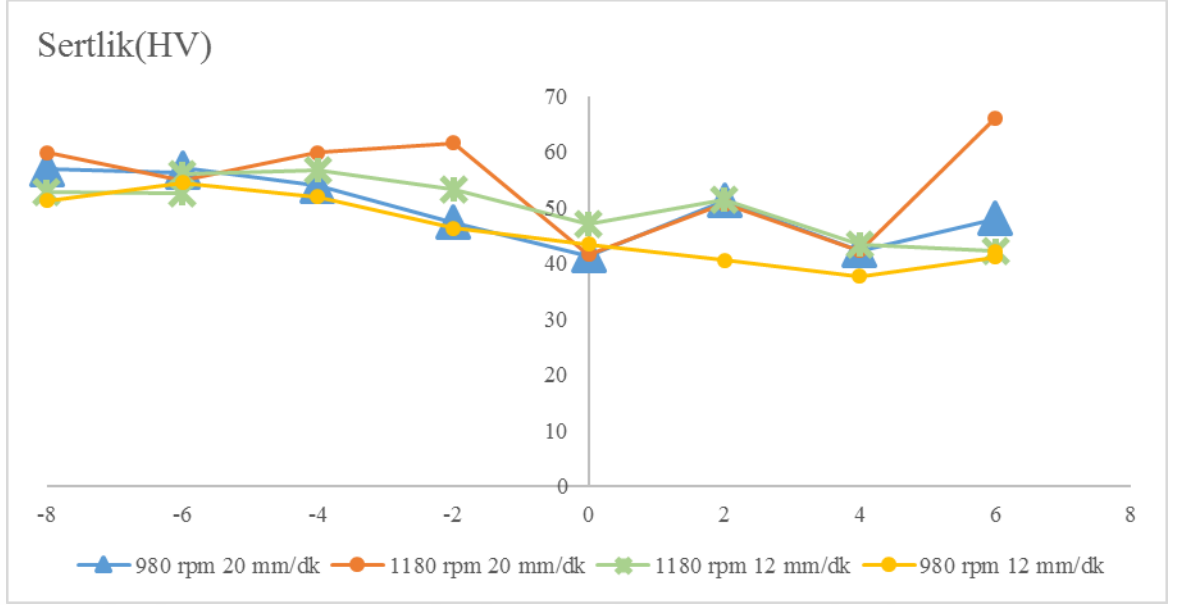


Şekil 3.15: a.AA6082-AA6082 kaynağı sertlik ölçüm yerleri b. AA6082-AZ31 kaynağı sertlik ölçüm yerleri.



Şekil 3.16: Shimadzu Mikrosertlik Ölçüm Cihazı.

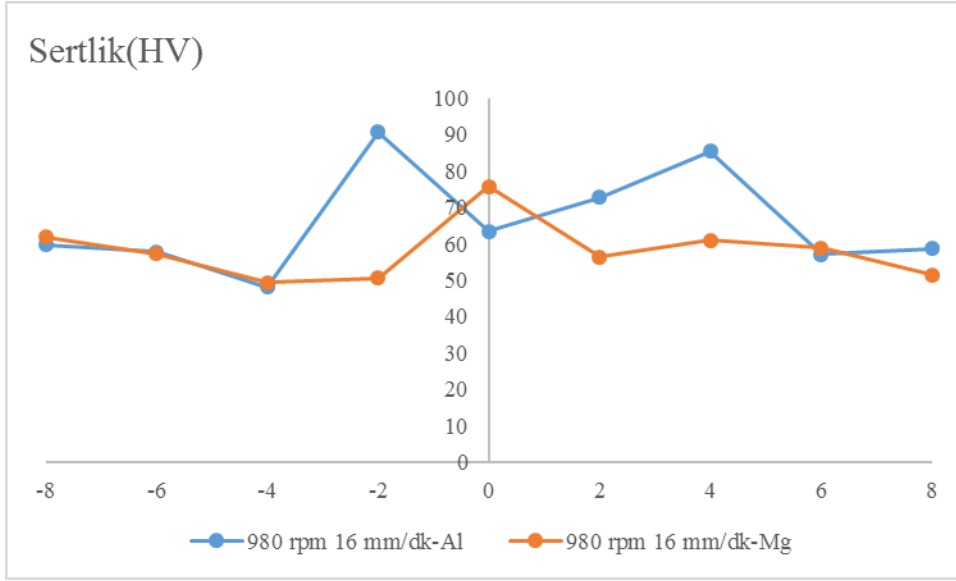
Ölçüm noktaları arasındaki mesafeler 2 mm'dir.Şekil 3.17'de AA6082-AA6082 arasında yapılan sürtünme karıştırma kaynağı için sertlik ölçüm değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.17: AA6082-AA6082 MikroVickers sertlik değerleri.

Dört durum için kaynak bölgesinde 41-50 HV arasında sertlik ölçülmüştür. Kaynak bölgesinden ana metale doğru sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Kaynak metali bölgesinde görülen sertlik azalışları literatür çalışmalarıyla örtüşme sağlamıştır[1]. Bu bölgedeki sertlik değerlerinin daha düşük olmasının nedeni kaynak metali bölgesinde ısıyla birlikte malzeme karışımına olanak verecek yumuşama sağlanmasıdır. Kaynak kök kısmınının boşluk boyutlarının artmasıyla kaynak bölgesinde sertliğin düştüğü görülmüştür[37].

AA6082-AZ31 sürtünme karıştırma kaynağı için sertlik değerleri Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Alüminyum ve magnezyum arasında yapılan kaynağın sertlik değerleri ölçüldüğünde kaynak bölgesindeki enbüyük sertlik değerleri 90 HV ve 75 HV olarak ölçülmüştür ve bu bölgede lokal sertlik artışı görülmüştür. Sertlik artışı literatürle benzerlik göstermiş olup bu durum alüminyum-magnezyum arasında oluşan metallerearası bileşikler sebebiyle oluşmuş olabilir.[22].Alüminyum-magnezyum kaynağı homojen olarak gerçekleşmediğinden dolayı yüksek sertlik değerleri kaynak bölgesi dışında olan yerlerde de görülmüştür.



Şekil 3.18: AA6082-AZ31 MikroVickers sertlik değerleri.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde raylı sistemler uygulamalarında da yerini bulan sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin hafif malzemeler olan alüminyum ve magnezyum için kaynak durumlarının araştırılması yapılmıştır ve yapılan deneylerle birlikte elde edilen veriler ve yapılacak daha sonraki çalışmalar için öneriler şunlardır:

- AA6082-AA6082 arasında 980 rpm ve 1180 rpm dönme hızları, 12 mm/dk ve 20 mm/dk ilerleme hızlarının etkileri araştırılmıştır. Kaynak kök kısmı bölgelerinde boşluklar görülmüştür. Alınan çekme makaslama deneyleri sonuçlarına göre 980 rpm 12 mm/dk kaynak parametreleri diğer durumlar arasında en iyi sonucu vermiştir.
- AA6082-AZ31 arasında 16 mm/dk ilerleme hızında 980 rpm ve 1180 rpm dönme hızları araştırılmıştır. 980 rpm dönme hızında 16 mm/dk ara tabakasız kaynak birleştirme durumunda çekme makaslama deneyinde 1, 023 kN yüke dayandığı gözlemlenmiştir. Bu parametreler için bindirme bölgesinde ara tabaka etkisi araştırılmak istenmiştir fakat seçilen kaynak parametreleri başarılı kaynak yapılmasını sağlamamıştır.
- Aynı ve farklı metaller için yapılan sürtünme karıştırma kaynağında sertlik ölçümleri yapılmıştır. AA6082-AA6082 bindirme kaynağında ana metalden kaynak bölgesine doğru ölçüm yapıldıkça birleştirmeyi sağlamak amaçlı ısının sağladığı yumuşamadan dolayı sertliğin düştüğü gözlemlenmiştir. AA6082-AZ31 kaynağında ise kaynak bölgesi sertliklerinde metaller arası bileşiklere bağlı olabileceği düşünülen artışlar görülmüştür. İki durum için de sertlik değerleri değişim hareketi literatürle benzerlik göstermiştir.
- Yapılan metallografik deneylerde kaynak kök kısmı bölgesinde boşluk, oluk gibi kaynak hataları olduğu gözlemlenmiştir.
- Sürtünme karıştırma kaynağı için hazırlanan deney düzeneği sabitleme açısından önem kazandığından tasarımı iyi yapılmalıdır..Bindirme kaynağında kaynak

sırasında ortaya çıkan sıcaklık ile birlikte bindirme bölgesinde iki sac arasında boşluk oluşturabilir.Düzenek sabitleyici elemanların sayısı ve lokasyonu optimize olarak belirlenmelidir.

- Sürtünme karıştırma kaynağı ısı girdisi ile doğrudan etkilenen yöntem olduğundan ısı oluşumu sürtünme yaratarak direk etkileyen takım ucu geometrisi doğru seçilmelidir.Bu amaçla Al-Mg bağlantıları için içbükey omuz tasarımı ya da omuzda oluşturulabilecek farklı tasarımlar düşünülebilir.Doğru geometri ve boyutları yakalayabilmek için termokupl ile sıcaklık ölçümleri ve sıcaklık dağılımını ve malzeme akışını öngörebilecek sonlu elemanlar analizi çalışmaları yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Demirkesen, G.** (2010). *Sürtünme karıştırma kaynağının raylı taşıt imalatındaki uygulamasının araştırılması.* (Yüksek lisans tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Okamura H., Funyu I., Satou A., Aota K., Ezumi M., Ishimaru Y.** (2004). *U.S Patent No. US 6,722,286 B2* Google Patents üzerinden erişildi.
- [3] **Thimmaraju P.K., Dr.Arkanti K., Dr. Reddy G.C.M., Tilak K.B.G.** (2016) Comparison Of Microstructure And Mechanical Properties Of Friction Stir Welding Of Al 6082 Aluminum Alloy With Different Tool Profiles, *International Conference On Materials Research And Applications (Icmra-2016), Materials Today: Proceedings 3* 4173–4181.
- [4] **Raturi M., Garg A, Bhattacharya A.** (2019). Joint Strength And Failure Studies Of Dissimilar AA6061-AA7075 Friction Stir Welds: Effects Of Tool Pin, Process Parameters And Preheating, *Engineering Failure Analysis*, 96, 570–588, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.12.003>.
- [5] **Prasad B.L., Neelaiah G., Krishna M.G, Ramana S.V.V., Prakash K. S., Sarika G., Reddy G.P.K., Dumpala R., Sunil B.R.** (2018). Joining Of AZ91 Mg Alloy And Al6063 Alloy Sheets By Friction Stir Welding, *Journal Of Magnesium And Alloys*, 6, 71–76, <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.12.004>.
- [6] **Shirazi H., Kheirandish Sh., Safarkhanian M.A.** (2015). Effect Of Process Parameters On The Macrostructure And Defect Formation In Friction Stir Lap Welding Of AA5456 Aluminum Alloy, *Measurement*, 76, 62–69, <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.08.001>.
- [7] **Rodriguez R.I., Jordon J.B, Allison P.G., Rushing T., Garcia L.** (2015). Microstructure And Mechanical Properties Of Dissimilar Friction Stir Welding Of 6061-To-7050 Aluminum Alloys, *Materials & Design*, 83, 60–65, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.074>.
- [8] **Besel M., Besel Y., Mercado U.A., Kakiuchi T., Uematsu Y.** (2015). Fatigue Behavior Of Friction Stir Welded Al–Mg–Sc Alloy, *International Journal Of Fatigue*, 77, 1–11, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.02.013>.
- [9] **Rao T.S, Reddy G.M, Rao S.R.K.** (2015) Microstructure And Mechanical Properties Of Friction Stir Welded AA7075–T651 Aluminum Alloy

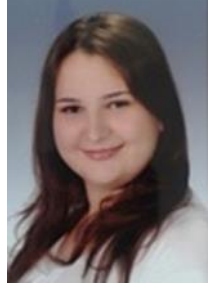
Thick Plates, *Transactions Of Nonferrous Met. Soc. China*, 25, 1770–1778, Doi: 10.1016/S1003-6326(15)63782-7.

- [10] **Ahmed M.M.Z., Ataya S., El-Sayed Seleman M.M., Ammar H.R., Ahmed E.** (2017). Friction Stir Welding Of Similar And Dissimilar AA7075 And AA5083, *Journal Of Materials Processing Technology*, 242, 77–91, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.11.024>.
- [11] **Gharavi F., Matori K.A., Yunus R., Othman N.K., Fadaeifard F.** (2016). Corrosion Evaluation Of Friction Stir Welded Lap Joints Of AA6061-T6 Aluminum Alloy, *Transactions Of Nonferrous Met. Soc. China*, 26, 684–696, Doi: 10.1016/S1003-6326(16)64159-6.
- [12] **Sinhmar S. & Dwivedi D.K.** (2018) A Study On Corrosion Behavior Of Friction Stir Welded And Tungsten Inert Gas Welded AA2014 Aluminium Alloy, *Corrosion Science*, 133, 25–35, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.01.012>.
- [13] **El-Sayed M.M, Shash A.Y, Abd-Rabou M.** (2018) Finite Element Modeling Of Aluminum Alloy AA5083-O Friction Stir Welding Process, *Journal Of Materials Processing Tech.*, 252, 13–24, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.008>.
- [14] **Kandasamy J., Sairama J., Hussain M.M.** (2018) Comparative Analysis Of Temperature Variation In Friction Stir Welding, *Icmpec_2018, Materials Today: Proceedings*, 5, 18798–18804.
- [15] **Smith, T.L.** (2011). *The effect of tool rotation speed and clamping on deformation in friction stir welded 6061-T6511 aluminum extrusions*" (Yüksek lisans tezi) Erişim adresi: <https://scholarworks.uno.edu/td/350> University Of New Orleans, New Orleans.
- [16] **Jadhav G. C. & Dr. Dalu R. S.** (2017) Design And Development Of A Fixture For Friction Stir Welding, *International Journal Of Mechanical Engineering And Technology* 8(9), Pp. 132–139.
- [17] **Shamsipur A., Anvari A., Keyvani A.** (2018) Improvement of microstructure and corrosion properties of friction stir welded AA5754 by adding Zn interlayer, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* Vol. 25- 8, p. 967 <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1646-z>.
- [18] **Niu S.J.S., Yan D., Meng X., Xiong X.** (2019) AZ31B/7075-T6 alloys friction stir lap welding with a zinc interlayer, *Journal of Materials Processing Tech.*, 263, 82–90, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.009>.
- [19] **Zhao Y., Jiang S., Yang S., Lu Z., Yan K.** (2016) Influence of cooling conditions on joint properties and microstructures of aluminum and magnesium dissimilar alloys by friction stir welding, *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 83, 673–679 doi: 10.1007/s00170-015-7624-y.

- [20] **Bijanrostami K., Barenji R.V., Hashemipour M.** (2017). Effect of Traverse and Rotational Speeds on the Tensile Behavior of the Underwater Dissimilar Friction Stir Welded Aluminum Alloys, *JMEPEG* 26, 909–920, doi: 10.1007/s11665-017-2506-0.
- [21] **Lohwasser D.& Chen Z.**(2010) *Friction stir welding From basics to applications*, Boca Raton.US, Woodhead Publishing, Erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/book/9781845694500/friction-stir-welding>.
- [22] **Givi M.K.B. & Asadi P.** (2014)*Advances in Friction Stir Welding and Processing*, United Kingdom,Woodhead Publishing Erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/book/9780857094544/advances-in-friction-stir-welding-and-processing>.
- [23] **Kurt A., Boz M., Özdemir M.** (2004). Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 19, No 2, 191-197*.
- [24] **Kamble L.V., Soman S.N., Brahmanekar P.K.** (2017). Understanding the Fixture Design for friction stir welding research experiments, *5th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016), Materials Today: Proceedings, 4, 1277–1284*.
- [25] **Kulkarni B.S., Pankade S.B., Andhale S.B., Gogte C.L.** (2018) Effect of backing plate material diffusivity on microstructure, mechanical properties of friction stir welded joints: a review, *2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering, Procedia Manufacturing, 20, 59-64*.
- [26] **Dabeer P., & Shinde G.** (2018) Perspective of Friction Stir Welding Tools, *ICMMM – 2017, Materials Today: Proceedings, 5, 13166–13176*.
- [27] **Zhang Y.N., Cao X., Larose S., Wanjara P.** (2012) Review of tools for friction stir welding and processing, *Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 51, No. 3, doi: 10.1179/1879139512Y.0000000015*.
- [28] **Başak, H., Kayır, Y., Türkyılmaz, E.H.** (2017) Sürtünme Karıştırma Kaynağında Farklı Karıştırma Uç Formlarının Oluşturduğu Kuvvetlerin Ve Birleşmeye Etkisinin Deneysel İncelenmesi, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 4(2), 249-257*.
- [29] **Aran A.** MAL201-Malzeme Bilgisi [pdf belgesi] ders notları website: 15 Nisan 2019 tarihinde <https://web.itu.edu.tr/~arana/mal201.pdf> adresinden erişildi.
- [30] **Davis J.R.** (2001). Alloying: Understanding the Basics doi: 10.1361/autb2001p351.

- [31] **Skillingberg M.** (2007) Aluminum Applications in the Rail Industry, Erişim adresi:<https://www.aluminum.org/sites/default/files/Light%20Metal%20Age%20--%20Aluminum%20Applications%20in%20the%20Rail%20Industry.pdf>.
- [32] **Akdoğan A.**(2008) Magnezyum ve alaşımları [Powerpoint slaytı] 15 Nisan 2019 tarihinde
http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Magnezyum_ve_Magnezyum_Alasimlari.pdf adresinden erişildi.
- [33] **ISO25239:2011** Sürtünme karıştırma kaynağı-Alüminyum.
- [34] **Buffa G., Campanile G., Fratini L., Prisco A.** (2009) Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties, *Materials Science and Engineering A* 519 pp.19–26
- [35] **Yükler A.İ., Bilici M.K., Fidaner O.** (2012) Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynak Hataları, 3. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi-2012*
- [36] **Kaluç E., Taban E.,** (2007) Sürtünen Eleman ile Kaynak(FSW) Yöntemi, *MMO*,460,p.111
- [37] **Aadhari, S. and Malkapuram, D.,** (2018) Friction Stir Welding of Aluminum 6082, *SAE Technical Paper 2018-28-0051*,doi:10.4271/2018-28-0051

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad :Seray Gerikalmaz
Doğum Tarihi ve Yeri : 05.05.1993-Antalya
E-posta : seraygerikalmaz@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, İmalat Mühendisliği