



T.C.
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

MEHMET FATİH DEMİRDÖĞEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KIRŞEHİR

2023



T.C.
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

MEHMET FATİH DEMİRDÖĞEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Doç. Dr. Süleyman KILIÇ

II. DANIŞMAN

Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK

KIRŞEHİR

2023

KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesini okuduğumu ve anladığımı ve Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığımı bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığımı eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tez olarak sunduğum bu çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda bu konuda hakkımda yapılacak tüm yasal işlemleri ve aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim. 31/05/2023

Mehmet Fatih DEMİRDÖĞEN

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa No
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	II
TEŞEKKÜR	III
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
TABLolar DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	IX
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç	1
1.2. Önem.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı	3
2.1.1. Avantajlar	3
2.1.2. Dezavantajlar	4
2.2. Literatür Araştırması.....	4
3. MATERYAL VE METOT	40
3.1. Materyal	40
3.1.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Malzeme	40
3.1.2. Sürtünme Karıştırma Kaynak Takımı Malzemesi	41
3.2. Metot.....	41
3.2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılması	41
3.2.2. Sürtünme Karıştırma Kaynak Takımı İmalatı	43
3.2.3. Çekme Testi.....	45
3.2.4. Üç Nokta Eğme Testi	46
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	48
4.1. Çekme Testi Sonuçları.....	51
4.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonucu.....	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ders sürecinde kendisini tanıdığım günden bu yana gösterdiği sakin ve sabırlı yaklaşımı hem bir hoca hem bir ağabey gibi bana destek çıkan, bilgi birikimi ve emeğini esirgemeyen, mühendislik açısından bana yol gösteren, değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Süleyman KILIÇ 'a,

Tezimin her aşamasında, tezin şekillenmesinde ve nihai hale gelmesinde katkıları olan ikinci danışman hocam Sayın Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK'e,

Çalışmamıza desteğinden dolayı Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.' ye,

Deneysel çalışmalarda destek olan Oralsan A.Ş.'den Hüseyin Bey'e, Çözen Metal' den İsa Bey'e, Uygurlar Makina ailesine,

Eğitim hayatımın tüm zamanlarında maddi ve manevi destek olan kıymetli babam Hanifi DEMİRDÖĞEN ve annem Sebihat DEMİRDÖĞEN'e, hayatımın her anında bana destek olan kardeşlerime,

Yolumuzun kesiştiği günden itibaren hep yanımda olan sevgili eşim Öğr. Gör. Esra BAYRAMOĞLU DEMİRDÖĞEN'e,

Dünyaya gelişiyle hayatımıza renk katan kıymetli oğlum Mustafa Mahir'e teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs, 2023

MEHMET FATİH DEMİRDÖĞEN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

MEHMET FATİH DEMİRDÖĞEN

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Doç. Dr. Süleyman KILIÇ
Yıl: 2023, Sayfa: 77
Jüri: Dr. Öğr. Üyesi Sercan BASİT
Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM
İkinci Danışman Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK

Alüminyum alaşımları, üretim teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte hafif ve yüksek mukavemetli olmaları sebebiyle imalat endüstrilerinde oldukça popüler hale gelmiştir. Alüminyum malzemelerin artan kullanım alanları nedeniyle farklı imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri de sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) işlemidir. Geleneksel kaynak yöntemi füzyon kaynağıdır, ancak füzyon kaynağı sonucu kaynak dikişlerinde düşük mukavemet değerleri görülmektedir. Füzyon kaynağı sırasında ergime sıcaklığına ulaşan alüminyum, ısı ile işleme kazandırılan mukavemetini kaybeder ve bu nedenle kaynak dikişi dayanımı azalır. Katı hal birleştirme kaynağı yöntemi olan SKK, mukavemeti korumak amacıyla geliştirilmiştir ve sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaynak işlemi, karıştırıcı takımın malzemeye temas etmesi sonucu ortaya çıkan ısının malzemeyi yumuşatması ve dönen pim sayesinde iki iş parçası malzemesinin birbirine karıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Malzemenin ergime sıcaklığına çıkmaması sayesinde, kaynak dikiş mukavemet değerleri ana malzemelerin mukavemet değerlerini büyük ölçüde koruyabilir. Ancak, bu yöntemde kaynak mukavemetinin birçok parametreye göre değişmesi en büyük sorundur.

Bu çalışmada, 2.5 mm kalınlığındaki 5754-H111 ve 2024-T3 alüminyum alaşımlarının farklı kaynak parametreleri ile sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmesi incelenmiştir. Kaynak edilen parçalar lazer tezgahında kesilerek çekme ve eğme numuneleri hazırlanmıştır. Farklı kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Aynı tür ve farklı türdeki iki alaşım başarılı bir şekilde kaynatılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda kaynak parametrelerinin oldukça önemli olduğu ve detaylı olarak belirlenmesi gerektiği tespit edilmiştir. Fakat elde edilen mekanik değerler ana malzemelerin mekanik değerlerinin oldukça altındadır. Verimlilik istenilen seviyenin altında kalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma kaynağı, Sürtünme kaynağı, Alüminyum kaynağı, Alüminyum alaşımları, Mekanik özellikler

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FRICTION STIR WELDING ON MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS

MEHMET FATİH DEMİRDÖĞEN

KIRŞEHİR AHİ EVRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT

Supervisor: Assoc. Dr. Süleyman KILIÇ
Year: 2023, **Pages:** 77
Juries: Asst. Prof. Sercan BASİT
Asst. Prof. Oğuz ERDEM
Co-Supervisor Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK

Aluminum alloys have become very popular in the manufacturing industries due to their light weight and high strength with the development of production technologies. Different manufacturing methods have been developed due to the increasing usage areas of aluminum materials. One of these methods is Friction Stir Welding (FSW) process. The traditional welding method for aluminum is fusion welding. Low strength values are observed in weld seams as a result of the fusion welding of aluminum alloys. Aluminum that reaches the melting temperature during fusion welding loses its strength gained through heat treatment, and therefore, the weld seam strength decreases. The FSW is a solid-state joining welding method, has been developed to maintain strength and has become widely used in the industry. The welding process is achieved by softening the material due to the heat generated by the contact of the mixer tool with the material and mixing the two workpiece materials with the help of a rotating pin. Due to the fact that the material does not reach its melting temperature, the weld seam strength can largely preserve the strength values of the main materials. However, the biggest problem in this method is that the weld strength can vary depending on many parameters.

In this study, the joining of 2.5 mm thick 5754-H111 and 2024-T3 aluminum alloys with different welding parameters using friction stir welding method was investigated. Tensile and bending samples were prepared by cutting the welded parts on the laser bench. The effects of different welding parameters on mechanical properties were investigated. Two alloys of the same type and different type have been successfully welded. As a result of the examinations, it has been determined that the welding parameters are very important and should be determined in detail. However, the mechanical values obtained are well below the mechanical values of the main materials. Efficiency remained below the desired level.

Keywords: Friction stir welding, Friction welding, Aluminum welding, Aluminum alloys, Mechanical properties

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa No
Tablo 3.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri.....	40
Tablo 3.2. DIN 1.2344 Sıcak iş takım çeliği kimyasal bileşimi	41
Tablo 3.3. Kaynak malzemeleri ve işlem parametreleri	43
Tablo 4.1. Literatürdeki bulgular ve deneysel bulgular	61



Şekil 2.1. a) Takım dönüş hızıyla tane büyüklüğü ilişkisi, b) Takım dönme hızı ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki.....	6
Şekil 2.2. Kaynak prosesi.....	8
Şekil 2.3. Farklı pim geometrileri.....	8
Şekil 2.4. Deneylerde kullanılan uç geometrileri.....	9
Şekil 2.5. Takım dönme hızı ve ilerleme hızına bağlı sıcaklık grafiği.....	10
Şekil 2.6. a) Kaynak prosesi b) Pimsiz takım c) Pimli takım.....	11
Şekil 2.7. a) Termal kontrollü kaynak prosesi b) Termokupl ve kaynak bölgesi.....	13
Şekil 2.8. Farklı dalma derinliklerinde ölçülen mukavemet değerleri.....	14
Şekil 2.9. a) Kaynak numunesi b) Karıştırma takımı.....	15
Şekil 2.10. SKK'da kullanılan takımlar.....	16
Şekil 2.11. Masuralı takım görüntüsü.....	17
Şekil 2.12. a) Bobin takımı ile sürtünme kaynağı prosesi, b) Bobin takım prosesi.....	18
Şekil 2.13. Farklı kaynak hızlarında gerilme mukavemeti ve uzama değerleri.....	19
Şekil 2.14. a) Karıştırma kaynak prosesi b) Kaynak eklemi görüntüsü.....	19
Şekil 2.15. Karıştırıcı uç profilleri.....	21
Şekil 2.16. Vibrasyonlu sürtünmeli karıştırma kaynağı prosesi.....	22
Şekil 2.17. Su altı sürtünme karıştırma kaynağı şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.18. Konvansiyonel ve su soğutmalı kaynak için gerilme ve uzama eğrisi.....	24
Şekil 2.19. Su altı kaynak sistemi.....	26
Şekil 2.20. Farklı ilerleme ve dönme hızlarında tane büyüklükleri.....	27
Şekil 2.21. Kaynak işleminde kullanılan farklı takım geometrileri.....	30
Şekil 2.22. Fırlatma aracı tankının yapısı ve ana kaynakları için şematik gösterim.....	31
Şekil 2.23. AA2219 alaşımında karıştırma kaynağı için optimize edilen takım dönme ve ilerleme hızı işlem parametre grafiği.....	32
Şekil 2.24. Sürtünme karıştırma kaynak işleminin uygulanışı.....	33
Şekil 2.25. Farklı ilerleme hızlarının sertlik değerine etkisi.....	34
Şekil 2.26. Farklı takım profilleri.....	35
Şekil 2.27. 3 noktalı eğme testinde farklı yüzeylerden kuvvet uygulanması.....	37
Şekil 2.28. Eğme deney numunelerinin eğme testi sonrası hali.....	37
Şekil 2.29. a) Üst yüzeyden eğilen numuneler b) Alt yüzeyden eğilen numuneler.....	38
Şekil 3.1. a) Kaynak tablası üretimi, b) Kaynak tablası ve numunelerin bağlanması.....	42
Şekil 3.2. Düzlemselliğin kontrol edilmesi.....	43
Şekil 3.3. Tornalama operasyonlarında kullanılan elmas.....	44
Şekil 3.4. Sertleştirme işlemi sonrası takımların görüntüsü.....	44
Şekil 3.5. Çekme deney numunesi ölçüleri.....	45
Şekil 3.6. Çekme deney düzeneği.....	46
Şekil 3.7. Eğme deney numunesi ölçüleri.....	46
Şekil 3.8. a) Eğme test cihazı b) Test kontrol bilgisayarı.....	47
Şekil 3.9. Eğme test düzeneği.....	47
Şekil 4.1. Takımın sertlik değerleri a) Sertleştirme öncesi, b) Sertleştirme sonrası.....	48
Şekil 4.2. Kaynak işleminin yapılması.....	49
Şekil 4.3. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımın işlem sonrası görüntüsü ...	49
Şekil 4.4. Kaynak hızının yüzey kalitesine etkisi.....	50
Şekil 4.5. Ana malzemelerden alınan numunelerin çekme dayanım grafiği.....	51

Şekil 4.6. Kaynaklanmış AA5754 alaşımında farklı deformasyon hızlarında gerilme gerinim grafiği.....	51
Şekil 4.7. Konumlandırmanın kaynak dikiş mukavemetine etkisi.....	52
Şekil 4.8. İlerleme hızının kaynak mukavemetine etkisi	53
Şekil 4.9. AA2024-5754 kaynak numunesinin çekme dayanım grafiği.....	54
Şekil 4.10. AA5754-5754 kaynak numunesinin çekme dayanım grafiği.....	54
Şekil 4.11 AA2024-2024 kaynak numunesinin çekme dayanım grafiği.....	55
Şekil 4.12. Farklı kaynak parametrelerinde kopma mukavemetinin değişimi.....	56
Şekil 4.13. AA5754 numunelerin çekme testi sonucu kopma bölgesi.....	56
Şekil 4.14. Çekme testi sonrası kopan bir numunenin kopma bölgesi.....	57
Şekil 4.15. Üç nokta eğme testi sonuçları	58
Şekil 4.16. AA2024-5754 kaynak numunesi eğme testi görüntüsü	59
Şekil 4.17. AA2024-T3 alaşımında kaynak hatası	59
Şekil 4.18. Eğilme testinde kırılan numune	60



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
<i>dk</i>	: dakika
<i>g</i>	: gram
<i>kg</i>	: kilogram
<i>l</i>	: litre
<i>m</i>	: metre
<i>mm</i>	: milimetre
<i>sn</i>	: saniye

Kısaltmalar	Açıklama
A	: Amper
AA	: Alüminyum Alaşımı
Al	: Alüminyum
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir Çelik Enstitüsü)
Cu	: Bakır
Cr	: Krom
CNC	: Computer Numeric Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
dev/dk	: devir/dakika
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standardizasyon Enstitüsü)
FSW	: Friction Stir Welding (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)
Fe	: Demir
HRC	: Hardness Rockwell C Scale (Rockwell Sertliği)
HV	: Vickers Hardness (Vickers Sertliği)
kN	: Kilonewton
MPa	: Megapaskal
mm/dk	: milimetre/dakika
Mn	: Manganez
Mg	: Magnezyum
SKK	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
Si	: Silisyum
TIG	: Tungsten Inert Gas (Tungsten İner Gaz)
Ti	: Titanyum
V	: Voltaj
YSA	: Yapay Sinir Ağları
Zn	: Çinko
Zi	: Zirkonyum

1. GİRİŞ

1.1. Amaç

İki farklı malzemenin bir araya getirilip birleştirilerek yeterli mukavemete sahip olabilmesi için çözülen ve çözilemeyen bağlantı yöntemleri kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarında uygulanan füzyon kaynağı koruyucu gaz altında alternatif akımla yapılmaktadır. Bu yöntem kaynak bölgesinde malzemenin mekanik özelliklerinde kayıplara sebebiyet vermektedir. Bu yüzden kullanımı kısıtlı olup alternatif birleştirme yöntemleri araştırılmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) bu alternatiflerden birisi olup füzyon kaynağında karşılaşılan mukavemet kayıplarını azaltarak birleştirme işlemi sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında aynı ve farklı alüminyum alaşımların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Kaynak sonrası elde edilen mekanik özellikler ve kaynak parametrelerinin etkilerinin belirlenmesi literatüre önemli katkı sağlayacaktır.

1.2. Önem

Tasarımdan imalata uzanan mühendislik işlemlerinde kullanılan malzemelere ait bilgiler çok büyük öneme sahiptir. Kullanıldığı yer ve şekil itibariyle malzemeler üzerinde mukavemet hesaplamaları yapılır. Kullanım alanlarına bağlı olarak malzemeye, birleşim bölgesine veya sistemin bütününe gelen zorlamalar bilgisayar yazılımları ile simüle edilerek oluşabilecek deformasyonlar öngörülebilmektedir. Fakat bu yazılımların tasarımcı veya analizciye deformasyon miktarlarına ait verileri verebilmesi için malzemenin mekanik özelliklerine dair bilgilerin yazılımın veri tabanında olması gerekmektedir. Malzemelerin özelliklerine (üretim yöntemi, ısı işlem vs.) göre yapılan testlerden elde edilen sonuçlar gereklidir. Fakat kaynaklı birleşimlere ait mekanik özelliklere kolaylıkla ulaşılamamaktadır veya veriler mevcut değildir. Çalışmamızda farklı alüminyum alaşımlarının farklı işlem parametreleriyle birleştirilmesi sonucu elde edeceğimiz veriler, gelecekte yapılacak olan çalışmalara temel oluşturacak ve ışık tutacaktır. Ayrıca bu çalışma kapsamında SKK yönteminin CNC tezgahında yapılabilirliği incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünme karıştırma kaynağı, metallerin kaynatılmasında ihtiyaç duyulan ısı girdisinin sağlanmasında yüksek elektrik tüketimini ortadan kaldıran ve koruyucu gaz olarak kullanılacak olan tehlikeli gazların doğaya salınmaması, bu tehlikeli gazlar kullanılmadan işlemin gerçekleşmesi itibariyle önemli bir kaynak yöntemidir (Singh ve ark., 2022). Son yıllarda üzerinde hassasiyetle durulan çevreye duyarlı teknolojiler ve sürdürülebilirlik açısından da önemli bir yere sahiptir. Geleneksel kaynak yöntemleriyle kaynatılma imkânı olmayan veyahut kaynak işlemi yapılabilsede dahi dayanım veya mukavemet olarak yeterli düzeye ulaşılamayan hafif metallerinde birleştirilmesini sağlamaktadır. Oluşturduğu yüksek dayanım ve uygulama kolaylığı nedeniyle son yıllarda oldukça fazla kullanılan bir yöntemdir. Sarf malzeme kullanımının olmaması ve uygulama kolaylığı nedeniyle çelik malzemelerde de tercih edilmektedir. Bu yöntem, yüzeyde yapılan işlem sayesinde sertleştirme ve dayanım artırma amacıyla da kullanılmaktadır (Demirdöğen ve ark., 2022a).

Sürtünme kaynağında birden fazla yöntem kullanılmaktadır. Bunlar doğrusal, lineer ve sürtünme karıştırma kaynağıdır. Sürtünme karıştırma kaynakları da kendi içinde farklılıklara sahiptir. Kısaca sürtünme karıştırma kaynağını tarif edecek olursak iki malzemenin karıştırıcı bir takım vasıtasıyla birleştirilmesi diyebiliriz. Takımın malzemelere sürtünmesi sonucu ortaya çıkan ısı ve karıştırma ile birleştirilmesidir (Öcalır, 2019).

Bu yöntem çok karmaşık bir yöntem olup birçok parametreye bağlıdır. Her malzeme için uygun kaynak parametrelerin belirlenmesi gerekir. Kaynak parametrelerinden; takım geometrisi, kaynak hızı, takım dönme hızı malzeme akış şekli kaynak dikiş mukavemetine etki etmektedir (Ma ve ark., 2018).

2.1.1. Avantajlar

- Sürtünme karıştırma kaynağı diğer geleneksel kaynak yöntemlerine göre kolay uygulanabilirlik, düşük maliyet, çevre dostu, ana malzemede düşük deformasyon ve yüksek verimlilik gibi avantajlara sahiptir (Demirdöğen ve ark., 2022a).
- Alüminyum ve magnezyum alaşımlarını ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta kaynak etmesi, dayanımın yüksek kalmasını sağlamakla birlikte katılaşma

sırasındaki birçok sorunu ortadan kaldırmaktadır. Bu yüzden havacılık ve uzay, gemi ve demiryolu endüstrilerinde tercih edilmektedir (Wei ve ark., 2022).

- Farklı malzemelerin füzyon kaynağı ile birleştirilmesinde görülen intermetalik etki, sürtünme karıştırma kaynağında ısıl denge sağlandığında en aza indirilebilmektedir (Yugandhar ve ark., 2022).

2.1.2. Dezavantajlar

- Kaynak bölgesinde gerekli ısının oluşması; kullanılan takım geometrisine, takım dönme hızına ve takım ilerlemesine bağlıdır. Bu parametrelerden herhangi biri uygun olmadığında kaynak dikişinde kaynama hatalarının oluşmasının sonucunda dayanımda düşüş görülebilir (Yugandhar ve ark., 2022).
- Takımının kaynak esnasında kaynak çizgisinden herhangi bir sebeple sapması kaynak edilen malzemelere ve sapma konumuna bağlı olarak, kaynak dikişinde istenen dayanımın elde edilememesine yol açabilir (Hadji ve ark., 2022).
- Takımın malzemeye dalma derinliği oldukça büyük önem arz etmektedir. Bu derinliğin optimum düzeyde olmayışı, prosten kaynaklı olarak derinliğin az veya fazla olması kaynak dikişinin dayanımına olumsuz etki edebilir (Kumar, 2022).

2.2. Literatür Araştırması

Alüminyum alaşımları, çeşitli yapısal parçalarda ve çeşitli bileşenlerde beyaz eşya, havacılık, otomotiv, denizcilik ve demiryolu taşımacılığı dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Tercih edilme sebebi yüksek mukavemetin ağırlığa oranının büyük olmasıdır. Bunun yanında korozyon dirençlerinin de yüksek olması ayrıca önemli bir özelliktir. Fakat, bu alaşımların kaynak edilmesinde füzyon kaynağı mukavemet üzerinde negatif etkiye sahiptir. Bu noktada alaşımların mukavemetini koruyan sürtünme karıştırma kaynağı oldukça fazla ilgi görmektedir.

Sürtünme karıştırma kaynağı, ince sac ve plakalar için en yaygın kullanılan katı hal birleştirme tekniklerinden birisidir. Bu birleştirme tekniği enerji tasarrufu sağlayan, çevre dostu ve çok yönlü bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Yüksek mukavemet gösteren alüminyum ve titanyum alaşımlarının kullanıldığı havacılık sektöründe, sürtünme karıştırma kaynağıyla füzyon kaynağına göre oldukça mukavemetli dikişler oluşturulabilmektedir.

Uygulamalarda farklı alüminyum alaşımı kombinasyonlarının kullanılması da aynı bileşende maliyet ve performansın bileşik faydasını artırmaktadır. Bunun yanında farklı malzemelerinde birbirine kaynatılması mümkündür. Metalik malzemelerin özellikle hafif ve yüksek mukavemete sahip alüminyum ve magnezyum alaşımlarının birleştirilmesine imkân sağlar. Bu sebeple bu yöntem son 20 yılda en önemli malzeme birleştirme yöntemleri arasında yer almaktadır. Sürtünme karıştırma prosesi ile kaynak haricinde metalik malzemeleri modifiye ve imal etmek de mümkündür.

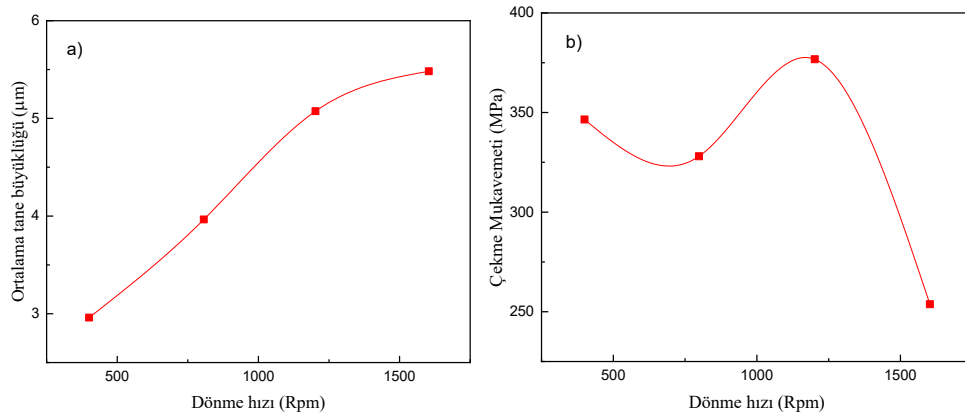
Sürtünme karıştırma kaynağı düşük ısı girişi ve farklı metallerde intermetalik bileşim oluşumunu en aza indirebilme kabiliyeti ile diğer kaynak yöntemlerinden avantajlıdır. Oluşan maksimum sıcaklık değeri ergime sıcaklığının 0.8-0.95 katı aralığında değişmektedir (Ma ve ark., 2018). Takım malzemesi ve takım şekli tasarımı intermetalik tabakanın kalınlaşmasını önlemek ve karıştırma yoluyla metaller arasında metalurjik bir bağ oluşturabilmek için oldukça önemlidir. Çelik ve alüminyumlar arasında gerçekleşen kaynak prosesinde malzeme karışımını ve eklemın mekanik performansını arttırmak için lazer ve ark gibi farklı ısı kaynakları kullanılarak hibrit kaynak yöntemleri geliştirilmiştir (Wan ve Huang, 2018).

Sürtünme karıştırma takımı, kaynak prosesinde kullanılacak olan takım niteliklerini yerine getirmelidir. Kaynak bölgesinde oluşan yüksek sıcaklık karşısında tokluğunu koruyarak dayanıklı olmalıdır. Takımın dalması ve ilerlemesi esnasında maruz kalacağı aksel ve yanal yüklere karşı mukavemetli olmalıdır. Sıcaklık etkisi altında, maruz kalacağı zorlamalara karşı mekanik özelliklerini muhafaza ederek plastik deformasyona uğramaması gerekmektedir. Ayrıca işlem sırasında sürtünme dolayısıyla ortaya çıkan ısıyı hızlıca ortama iletebilmelidir (Demirdöğen ve ark., 2022b).

Sürtünme karıştırma kaynak takımları incelendiğinde genel olarak omuz ve pimden oluşmaktadır. Malzeme kalınlığına bağlı olarak farklı geometrilerde üretilmektedir. Özel ihtiyaca bağlı olarak bobin takım gibi takımlar imal edilmektedir. Takım geometrisi kaynatılacak olan malzemenin cinsine ve kalınlığına bağlı olarak tasarlanmalıdır. Bu tasarımda sürtünmeyle ortaya çıkması gereken ısı önemlidir. Kalın malzemelerin kaynak edilebilmesi için çift omuzlu takımlar imal edilerek, omuz sürtünmesiyle daha fazla ısı ortaya çıkarmak suretiyle başarılı bir sürtünme karıştırma kaynak prosesi hedeflenir (Fuse ve Badheka, 2019).

Bevilacqua ve ark. (2017) 2 mm kalınlığındaki AA5754 alüminyum alaşımında farklı dönme ve kaynak hızlarının etkilerini incelemişlerdir. 12 mm omuz çapına sahip olan takım çeliğinden imal edilen takımın taban çapı 3.5 ve uç çapı 1.8 mm olacak şekilde konikliğe sahiptir. Kaynak işleminde 1200, 1500, 2000 ve 2500 dev/dk dönme hızları ve 30, 60 ve 100 mm/dk ilerleme hızlarının etkisini incelemişlerdir. 1200 dev/dk dönme ve 100 mm/dk kaynak hızlarının en verimli parametre çifti olduğu tespit edilmiştir.

Mahany ve ark. (2017) farklı alüminyum alaşımlarında takım dönüş hızı ve eksenel yükün SKK performansına etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında, 4 ve 5 mm kalınlığında 2024-T4 ve 7075-T6 alüminyum alaşımlarını kullanmışlardır. H13 çeliğinden imal edilen konik dişli pim ve iç bükey omuza sahip takım kullanılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı için özel olarak imal edilen bir makine kullanmışlardır. Bu makine takımı 3 derece açıyla eğerek tek pasoda 50 mm/dk hızla kaynak işlemi gerçekleştirmektedir. Dönme hızları 400 ve 1600 dev/dk arasında seçilirken eksenel kuvvet ise 1000 ve 1450 kg arasında uygulanmıştır. Takım kaynak malzemesine 3 mm/dk hızla daldırıldıktan sonra 15 sn beklenerek yeterli ısı oluşumu elde edilmiştir. Takım dönme hızı ve eksenel yük artışı kaynak bölgesinde ısının artmasına sebep olmuştur. 1200 dev/dk dönme hızı ve yaklaşık 1300 kg eksenel yük altında Şekil 2.1.'de görüldüğü üzere 378.7 MPa maksimum çekme mukavemeti elde edilmiştir. Değerlerin artırılarak devam edilmesi sonucunda kaynak bölgesinde bozulmaların olduğu görülmüş ve mukavemet değerleri düşmüştür.



Şekil 2.1. a) Takım dönüş hızıyla tane büyüklüğü ilişkisi, b) Takım dönme hızı ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki (Mahany ve ark., 2017)

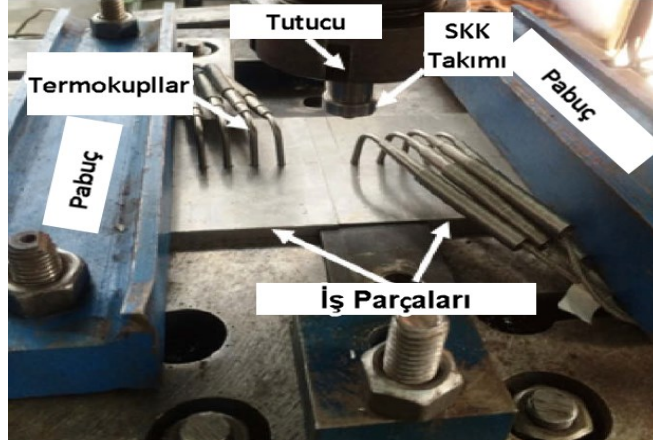
Sürtünme karıştırma kaynağının parçaların yorulma ömürlerine etkisi de önemli bir araştırma konusudur (Resan ve ark., 2018). Isıl etkisinden dolayı özellikle sıcaklığın

yorulmaya etkisinin belirlenmesi önemlidir. 3 mm kalınlığında 2024 alüminyum alaşımında, farklı sıcaklık ve farklı dönme hızlarında kaynak işlemi yapılmıştır. En iyi sonucun 1800 dev/dk elde edildiği görülmüştür.

Vignesh ve ark. (2016) 3 mm kalınlığında 6061-T6 alüminyum alaşımında sürtünme karıştırma kaynağı işlemi sırasında oluşan ısı ve ısı geçişlerini sonlu elemanlar metodu ile incelemiştir. Kaynak bölgesinde pik sıcaklık artışı takım dönüş hızı ve omuz çapı ile doğru orantılı iken, takım ilerleme hızı ile ters orantılı olduğu görülmüştür. Pim çapının, pik sıcaklık üzerinde etkisiz olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda malzemede oluşan sıcaklık dağılımı asimetrik olmakla beraber oluşan maksimum sıcaklık malzemenin ergime sıcaklığının %85-90 arasında olduğu gösterilmiştir.

Sonlu elemanlar analizi kaynak sürecinin durum değişkenlerini tahmin etmek için önemli bir yöntem olmakla birlikte, takım ve iş parçası arasında doğrusal olmayan temaslar, yer değiştirme ve sıcaklığın bağımlılığı sebebiyle süreç çok karmaşık olup iyi modellenmesi gerekir. Jain ve ark. (2017) Deform-3D yazılımı kullanılarak 2024 alüminyum alaşımının alın kaynağında termal geçişleri, gerilmeleri ve termomekanik durumları incelemiştir. Takım dönüş hızının artmasının deformasyon miktarının artışına yol açtığı, takım ilerleme hızının azalması ile deformasyonu azalttığı tespit edilmiştir.

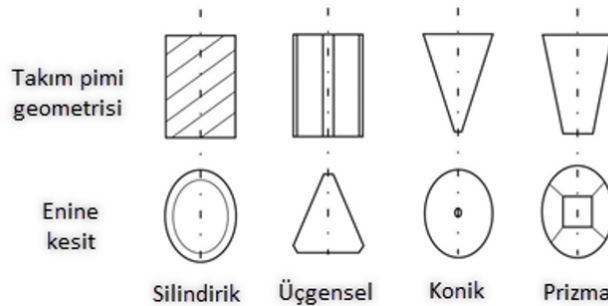
Sürtünme karıştırma kaynağındaki temel prensip; iş parçası ile takım arasındaki sürtünme sonucu ortaya çıkan ısı ile kaynak yapılmasıdır. Bu yüzden, işlem esnasında gerçekleşen ısı akışını incelemek kaynak prosesinin verimliliğini ölçmek adına önem arz etmektedir. Isı dağılımı aynı zamanda kaynak işlemi yapan takım ömrü üzerinde de etkiye sahiptir. Verma ve ark. (2017) 6.35 mm kalınlığındaki 6082 alüminyum alaşımında kaynak bölgesindeki ısı dağılımını incelemiştir. Elde edilen sıcaklığı ölçmek amacıyla Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi merkezden belirlenen uzaklıklara 8 adet termokupllar yerleştirilmiştir. Takımlara eğim açısı (1-3°) vermenin etkisi ve parça içerisinde bekleme (10, 20, 30 sn) sürelerinin etkisi araştırmışlardır. Sıcaklıkların her zaman takım saat yönünde dönerek ilerlediği çalışmada, takım ilerleme yönünün solunda olduğu görülmüştür. En yüksek sıcaklık 2 derece eğim açısı ve 30 sn bekleme süresinde ölçülmüştür.



Şekil 2.2. Kaynak prosesi (Verma ve Misra, 2017)

Marco ve ark. (2016) sürtünme karıştırma kaynaklı AA5182 ve AA6061 alaşımlarında şekillendirilebilirliğini incelemiştir. Haddeme yönüne farklı yönlerde (0° , 45° ve 90°) kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynak prosesi sonucu hem karıştırma bölgesinde hem de AA6061 malzeme tarafında ısıdan etkilenen bölgede önemli sertlik kayıpları gözlenmiştir. Şekillendirilebilme testleri sonucu kırılma gerçekleşmiş ve bu kırılmanın düşük süneklik nedeniyle kaynak bölgesi ve AA6061 malzemesi tarafına eğilimli olarak gerçekleştiği görülmüştür. Bu durumun kaynak bölgesindeki karıştırma işleminin tam homojen bir biçimde gerçekleşmediği, karıştırma bölgesinde farklı iç yapıların oluşması sonucu farklı mekanik özellikler gösterdiğinden kaynaklandığı ifade edilmiştir.

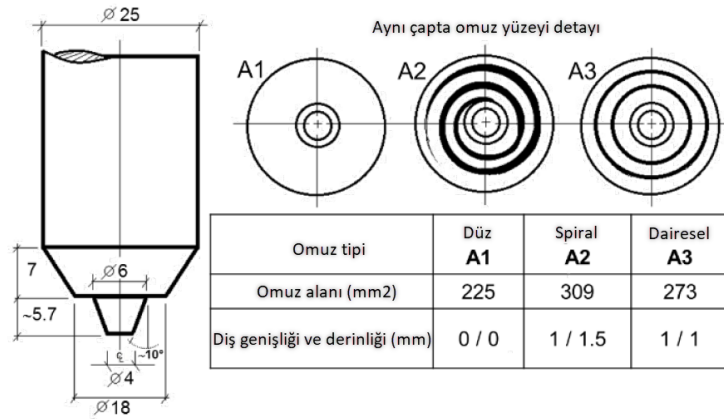
Kumar ve ark. (2020) sürtünme karıştırma kaynağının kaynak dikişlerin de görülen mukavemetin diğer kaynak yöntemlerine göre oldukça yüksek olduğunu vurgulamıştır. Enerji tüketimi açısından verimli olduğu için çevre dostu olduğunu dile getirmişlerdir. Kaynak parametrelerinden birisi olan pim geometrisinin, karıştırma verimliliğini doğrudan etkilediği söylenmiştir. Şekil 2.3.'de farklı pim geometrilerindeki takımlar gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Farklı pim geometrileri (Kumar Rajak ve ark., 2020)

Sürtünme karıştırma kaynağının, ince sac malzemelerin kaynağında özgün bir teknik olduğunu vurgulayan Bozkurt ve ark. (2019) sürtünme karıştırma kaynağı ile elektrik direnci nokta kaynağını karşılaştırmışlardır. Deneylerde AA2024-T3 plakalar kullanmışlardır. Takım 1.2344 sıcak iş çeliğinden 18 mm omuz çapı, 6 mm pim çapı ve 3,8 mm pim yüksekliği olacak şekilde imal edilmiştir. Deneyler sonucunda sürtünme karıştırma kaynağı ile daha iyi mekanik özellikler elde etmişlerdir.

Unfried ve ark. (2017) 1100 serisi alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında freze tezgâhı kullanarak takım omuz geometrisinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Kullanılan takımlar Şekil 2.4.'de gösterilmiştir. 6 mm kalınlığındaki plakaları haddeme yönüne dik şekilde kaynak etmişlerdir. Takımın omuz geometrisi kaynak bölgesinde oluşan sıcaklık dağılımları ve tane boyutlarında etkilidir.



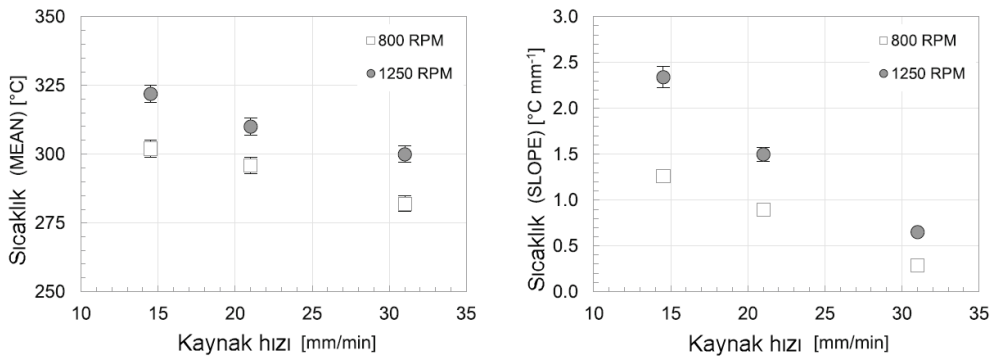
Şekil 2.4. Deneylerde kullanılan uç geometrileri (Unfried-Silgado ve ark., 2017)

Panzer ve ark. (2018) 2 mm kalınlığında AA6016 ve AA6111 alaşımlarından T4 ve T6 olarak temperlenmiş malzemelerinde sürtünme karıştırma kaynağının etkisini incelemişlerdir. ESAB Legio 3 ST sürtünme karıştırma kaynağı makinesinde yapılan kaynak operasyonunda omuz çapı 15 mm, prob çapı 5 mm ve prob uzunluğu 1,7 mm olan takım kullanılmıştır. Takım dönme hızının kaynak prosesinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, aynı zamanda kaynak işlemi sırasında etki eden kuvvetlerin kaynak edilen parçanın mekanik özellikleri ile değişim gösterdiği tespit edilmiştir.

6082-T6 alüminyum alaşımı üzerinde çalışma yapan Hamilton ve ark. (2018) SKK işleminin termal simülasyonunu incelemişlerdir. Çalışmada, tork ve sürtünme katsayısından oluşan sıcaklığa bağlı akma gerilimine dayanarak model oluşturulmuştur. 9 mm kalınlığında plakalar 28 mm üst omuz, 22 mm alt omuz, 12 mm pim çapı ve 9 mm pim yüksekliğine

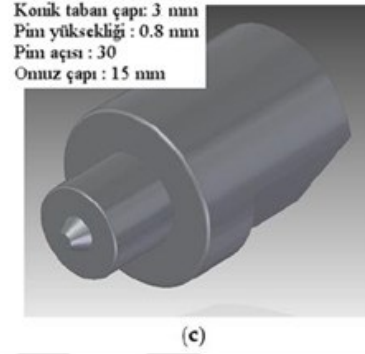
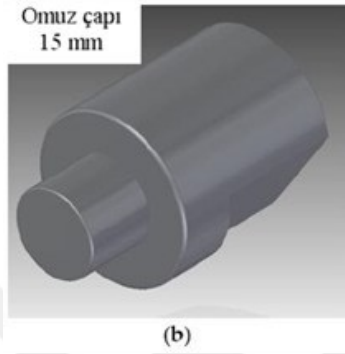
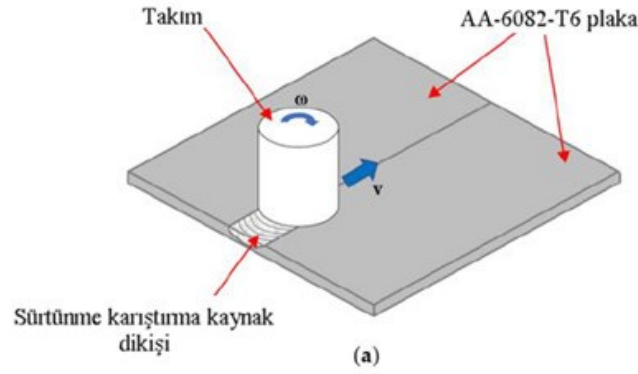
sahip HS6-5-2 yüksek hız çeliğinden bobin tarzı bir takım ile kaynak işlemi gerçekleştirmişlerdir. Isı üretimi için iki farklı model oluşturulmasına rağmen toplam ısı üretiminin iki modelde de aynı görüldüğü anlaşılmıştır.

Lambiase ve ark. (2018) 3 mm kalınlığında 6082-T6 alüminyum alaşımında sürtünme karıştırma kaynağı işleminde kaynak parametrelerinin, kaynak ısısı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sürtünme karıştırma kaynağında sıcaklığın hiçbir zaman ergime noktasına ulaşmaması ve kaynak prosesi itibariyle füzyon kaynaklarının aksine kaynak hatalarının olmamasını bu yöntemin avantajları arasında saymışlardır. Kaynak işleminde temizlik amacıyla su ve etanol kullanılmıştır. Yapılan araştırmalarda Şekil 2.5.'te görüldüğü üzere, takım dönüş hızının artması sıcaklığı artırırken, takım ilerleme hızının artması kaynak bölgesindeki sıcaklık artışını azalttığı görülmüştür. Bunun yanında kaynak hızındaki artış, takıma gelen kuvvetleri artırırken, takım dönme hızı artışına bağlı olarak sıcaklık artışı ve malzemenin yumuşaması sebebiyle takıma gelen yükler azalış göstermiştir.



Şekil 2.5. Takım dönme hızı ve ilerleme hızına bağlı sıcaklık grafiği (Lambiase ve ark., 2018)

Forcellese ve ark. (2020) 1 mm kalınlığında 6082-T6 alüminyum alaşımının da pimsiz bir takım (Şekil 2.6.) kullanarak sürtünme karıştırma kaynağını incelemişlerdir. İşlem sırasında takım dönme hızı ve ilerleme hızını sabit tutmuşlardır. Kaynak hattı boyunca en baştan sona %11 daha yüksek bir kubbe şeklinde hata oluştuğunu görmüşlerdir.



Şekil 2.6. a) Kaynak prosesi b) Pimsiz takım c) Pimli takım (Forcellese ve Simoncini, 2020)

Safeen ve ark. (2019) sürtünme karıştırma kaynağında takım dönme hızı ve takım ilerleme hızlarının kaynak bölgesinde oluşan ısı miktarı ile doğrudan ilişkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Seçilen yanlış kaynak parametrelerinin, kaynak bölgesinde hata oluşumlarına sebep olacağını vurgulamışlardır. Parametrelerin yeterli düzeyde ısıyı üretecek şekilde malzeme ergime sıcaklığına ulaşmadan prosesin ilerletilmesi gerektiği konusunda öneride bulunmuşlardır.

Mükemmel termal iletkenlik ve korozyon direnci gibi nedenlerden dolayı magnezyum alaşımları nükleer santral uygulamalarında tercih edilmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağının magnezyum alaşımlarının verimli bir şekilde kaynak edilebilmesi ve hafif metallerde de uygulanabilmesinden dolayı birçok güncel araştırma konusu bulunmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağının magnezyum alaşımları ve hafif metallerin kaynaklanmasında önemli yere sahip olduklarını belirten Singh ve ark. (2018) magnezyum alaşımlarında bu kaynak yönteminin kullanılmasının endüstride bir çok farklı uygulamaya imkan sağladığını ifade etmişlerdir. Takım geometrisinin proses gelişiminde oldukça büyük bir role sahip olduğunu ve kullanılan takımın profili, omuz çapı ve malzemesinin, kaynağın birleşme kalitesini etkilediği ifade edilmiştir. Kaynak bölgesinde oluşan sıcaklık ve

karıştırma verimi, tane boyutu ve homojen yapı oluşumunu doğrudan etkilemesi sebebi ile kaynağın mekanik özellikleri etkilediği söylenmiştir.

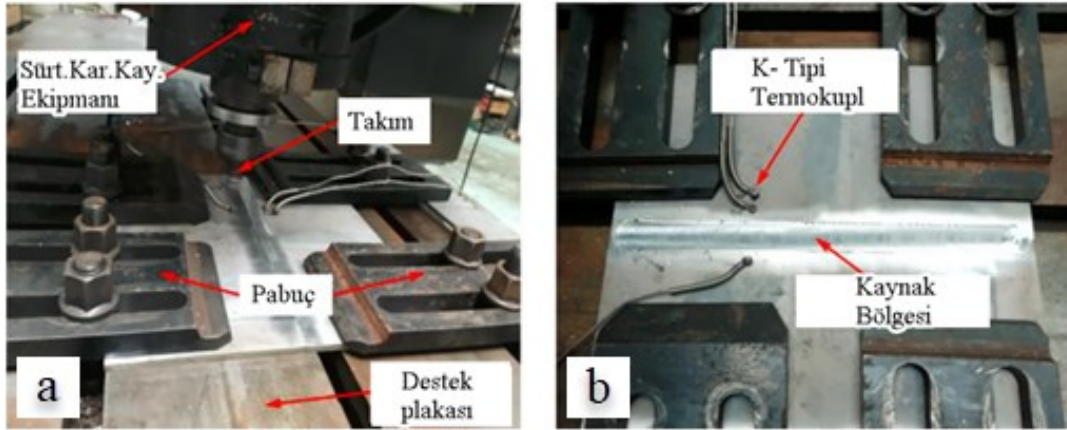
Sürtünme karıştırma bölgesinde yetersiz ısı girişi sonucu kaynak bölgesinde hatalar oluşmaktadır. Mekanik olarak oluşan sürtünme ısını tahmin etmek için Rasti (2018) tarafından bir matematik model geliştirilmiştir. Modelde, ısı girişi ile tünel boşluğu hatasını ilişkilendirmektedir. 5 mm kalınlığında 1060 alüminyum malzeme incelenmiştir. İşlemler 500 ve 1000 dev/dk dönme hızı ve 250, 500 ve 650 mm/dk ilerleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Kaynak esnasında oluşan maksimum sıcaklığı ölçmek için termal kamera kullanılmıştır. Kaynak işleminden sonra kaynak bölgesi enine kesit olarak incelenmiş ve tünel boşluğunu ortadan kaldırmak için en az 800 J/mm ısı girişinin gerekli olduğu tespit edilmiştir.

Sürtünme karıştırma kaynağında birçok etken parametre olduğundan dolayı optimum parametrelerin belirlenmesi önemli bir faktördür. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen AA5454 ve AA7075 arasındaki farklı eklemler ve parametreleri optimize etmek ve hangisinin önemli olduğunu belirlemek için Taguchi L16 optimizasyon yöntemi incelenmiştir (Abd Elnabi ve ark., 2019). Çalışmada, iki seviyede yedi parametre seçilmiştir. Seçilen parametreler; takım dönme hızı, travers hızı, pim profili, omuz çapı (D) ve pim çapı (d) arasındaki oran, takım eğim açısı, dalma derinliği ve baz metalin konumudur. Deneylerde 3.5 mm kalınlığında plakalar kullanılmıştır. Proses koşullarında maksimum çekme mukavemeti; 0.1 mm dalma derinliği, 1225 dev/dk dönme hızı, konik pim profili, 21 mm/dk ilerleme hızı, 2° eğim açısı, 3 (dev/dk) oranı ile AA5454 tarafında görülmüştür. En yüksek süneklik ise yine AA5454 tarafında 0.1 dalma derinliği, 1225 dev/dk, silindirik pim profili, 21 mm/dk ilerleme hızı, 1.5° eğim açısı, 3 (D/d) oranında tespit edilmiştir.

Marcello ve ark. (2020) çift taraflı sürtünme karıştırma kaynağını AA6082 malzemede başarılı bir şekilde uygulamışlardır. Aynı zamanda dönen pimde bir miktar sapmanın etkilerini araştırmışlardır. Deneyler CNC işleme merkezinde HRC 52 sertliğe sahip omuz çapı 15, pim çapı 3.9 omuz yüksekliğine göre 30° konik pimli takımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı dalma derinlikleri uygulamak için 2.0 ve 2.3 mm pim yüksekliğinde iki farklı takım kullanmışlardır. Kaynak parametreleri 1200 dev/dk dönme hızı ve 100 mm/dk ilerleme hızı olarak uygulanmıştır. Her iki yaklaşımda da hem yaşlanma

ile sertleşen hem de yaşlanma ile sertleşemeyen alüminyum alaşımların mekanik özelliklerinde açık bir iyileşme olduğu görülmüştür.

Nie ve ark. (2020) 10 mm kalınlığında 2219-T8 alüminyum alaşımı iki levhayı sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynatmışlar ve bir termal model geliştirmişlerdir. Isıyı ölçmek için Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi K tipi termokupllar yerleştirilmiştir. Eksenel kuvvetin ve takım dönme hızının artışının sıcaklığın arttırdığı, takım ilerleme hızının artışının ise sıcaklığı azalttığını göstermişlerdir. Kaynak işlemi esnasında oluşacak olan ısı ve artık gerilmeler, geliştirilen model ile başarıyla tahmin edilmiştir. Eksenel kuvvet ve kaynak hızının artık gerilmelerde büyük role sahip olduğu görülmüştür ve bu iki parametredeki artışın daha büyük artık gerilmelere yol açtığı deneylerle doğrulanmıştır. Dönme hızının etkisinin belirgin olmadığı görülmüştür.



Şekil 2.7. a) Termal kontrollü kaynak prosesi b) Termokupl ve kaynak bölgesi (Nie ve ark., 2020)

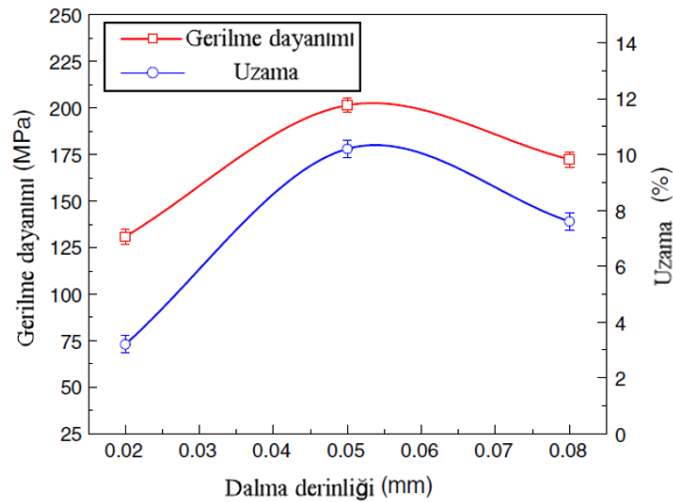
Doktaş (2019) 1050 alüminyum alaşımında sürtünme karıştırma kaynağı parametrelerinin mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Parametre olarak; takım pim profili, takım dönme ve ilerleme hızını seçmiştir. Takım dönme hızları olarak 1000, 1450, 1800 ve 2000 dev/dk kullanılmıştır. Takım dönme hızının artırılıp ilerleme hızı azaltıldığında daha kaliteli bir kaynak olduğu gözlenmiştir. Takım dönme hızı azaltılıp ilerleme artırıldığında ise kaynak yüzeyinde yetersiz ısı girişi sonucu çatlaklar meydana geldiği görülmüştür.

Huang ve ark. (2016) sürtünme karıştırma kaynağı esnasında malzeme akış davranışını "Marker Insert" tekniği ile görselleştirmiştir. 300 x 100 x 5 mm ölçülerde 6082-T6 alüminyum alaşımlı plakalar kullanılmıştır. Kaynak esnasında iki plaka arasına belirli

konumlara Cu-T3 levhalar yerleştirilmiştir. Kullanılan takım geometrisi içbükey omuzlu yüksek hız çeliğidir. Omuz tahrikli akışın malzemeyi geri çekilen taraftan ilerleyen tarafa sürdüğü ve pim tahrikli akışın esas olarak ekstrüde edilen malzemeyi geri çekilen tarafa sürdüğü gösterilmiştir.

Patel ve ark. (2019) farklı alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı uygulanmasında; parçanın konumlandırılması, takım dönüş hızı, kaynak hızı ve takım geometrisi gibi yardımcı parametreleri incelemiştir. Takım dönme hızının plastik deformasyon üzerinde büyük bir etkisi olduğunu ve artık gerilmeler üzerinde etkili olduğunu dile getirmişlerdir. Bu yüzden kaynak kalitesi ve mukavemet için bu değerlerin optimum olarak belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Yüksek dönüş hızı ve yavaş ilerleme tane büyüklüğünde artışa sebep olurken, düşük dönme hızı ve hızlı ilerleme kusurlara sebep olduğunu ifade etmişlerdir.

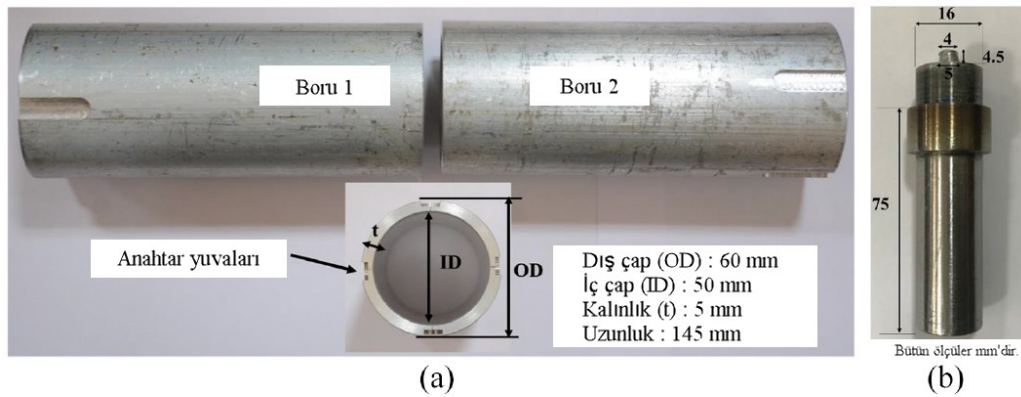
Huang ve ark. (2019) ultra ince 0.5 mm kalınlığında 6061-T4 alüminyum alaşımının birleştirilmesini başarı ile gerçekleştirmişlerdir. Kaynak için iki farklı takım kullanılmıştır. Şekil 2.8.'deki deney sonucunda optimum dalma derinliği 0.05 mm olarak görülürken, artan kaynak hızı ile çekme özelliğinin artış gösterdiği ancak 500 mm/dk'dan daha yüksek kaynak hızında ise azaldığı görülmüştür.



Şekil 2.8. Farklı dalma derinliklerinde ölçülen mukavemet değerleri (Huang ve ark., 2019)

Borularda sürtünme karıştırma kaynağının etkisi Iqbal ve ark. (2019) tarafından incelenmiştir. Kaynak için rijit bir visko plastik model geliştirerek sıcaklık dağılımını, kuvvet değişimini ve malzeme akış davranışlarını çalışmışlardır. Kaynak işlemine başlamadan önce simülasyon aracılığı ile optimum dalma derinliği değerini tahmin etmişler

ve deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Model ile belirlenen dalma derinliği boru kaynağında yeterli omuz temasını sağladığı görülmüştür. Sıcaklık ve gerilme dağılımının, kaynak çizgisi boyunca asimetrik olduğu ayrıca işlem yönünün solunda, sağına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. İşlem sırasında üretilen maksimum sıcaklığının, ergime sıcaklığının yaklaşık %90'ına denk geldiği ifade edilmiştir. Başka bir çalışmada (Iqbal ve ark., 2020) Şekil 2.9.'da gösterilen AA6065 alüminyum alaşımından 145 mm uzunluk, 60 mm dış çap ölçüsü ve 5 mm et kalınlığına sahip boruların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesini incelemişlerdir. Proses parametrelerinin kaynak işlemi sırasında fiziksel özelliklere etkisi incelenmiş ve böylece optimum kaynak parametrelerini elde etmişlerdir. Eksenel kuvvet, tork, sıcaklık ve güçteki değişim gibi fiziksel tepkiler analiz edilmiştir. İmal edilen kaynak bölgelerinde maksimum %90 mukavemet verimine ulaşılmıştır. Sıcaklığın artması ile kaynak bölgesinde tane büyüklüğünün artmasına bu da sertliğin artmasına sebep olduğunu göstermişlerdir. Kaynak işleminde H13 sıcak iş çeliğinden imal edilen takım kullanmışlardır. Maksimum kaynak mukavemeti 0.3 mm dalma derinliği, 1500 dev/dk dönme hızı ve 95 mm/dk kaynak hızı ile %90 kaynak mukavemet verimi ile elde etmişlerdir.

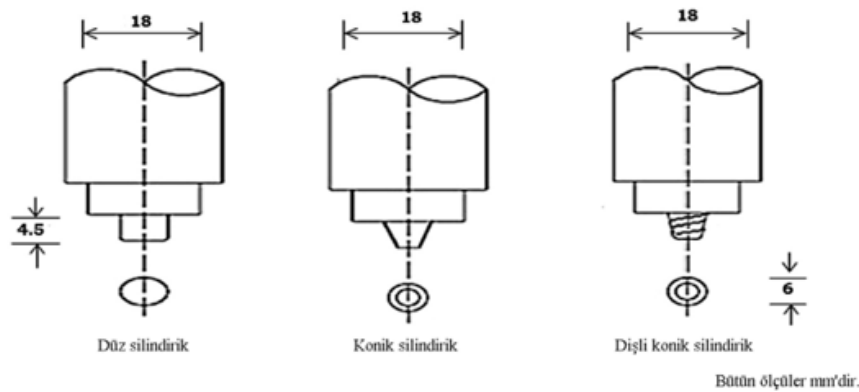


Şekil 2.9. a) Kaynak numunesi b) Karıştırma takımı (Iqbal ve ark., 2020)

Keskin (2019) yaptığı çalışmada AA6005-T6 ve AA6082-T6 alaşımlarını SKK yöntemiyle birleştirerek kaynak davranışlarını incelemiştir. Malzemeler deney için 200 x 90 x 3.9 mm boyutlarında ekstrüde edilerek üretilmiştir. Deneyde aynı alaşım ve farklı alaşım olarak 3 kombinasyon oluşturularak Mazak VTC-800/30SR CNC tezgâhta kaynak işlemi uygulanmıştır. Odak noktası olarak dönme ve kaynak hızı alınmıştır. Çalışmada silindirik dişli pim ve konik dişli pim olmak üzere iki farklı takımın incelemesini de yapmışlardır. Takımlar, 55 HRC sertlik için ısıl işleme tabi tutulmuştur. Takım malzemesi olarak termal şoka ve aşınmaya dirençli, yüksek tokluğa sahip ayrıca yüksek ısıl iletkenliği ile ısıyı

üzerinden hızlı bir şekilde atabilen AISI-H13 çeliği kullanılmıştır. Kaynak işlemi sırasında yetersiz ısı oluşumunun kaynak hatalarına sebep olduğu dolayısıyla uygun parametre seçiminin önemli olduğu ifade edilmiştir. Bazı numunelerde dönme hızı sabit iken kaynak hızı arttığında sertliğin arttığı görülmüştür. Kaynak bölgesindeki en büyük sertlik değeri 6082-6005 alaşımların 1800 dev/dk dönme hızı, 110 mm/dk ilerleme hızında gerçekleşen kaynakta 84,6 HV olarak gözlenmiştir. Numunede görülen maksimum gerilme değeri ise 197 MPa olarak ölçülmüştür. AA6005 çiftinin kaynağı için, en yüksek gerilme mukavemeti 189 MPa, %70.1 kaynak verimliliği ile 1500 dev/dk ve 110 mm/dk'da, minimum mukavemet 1500 dev/dk ve 150 mm/dk'da tespit edilmiştir. AA6082 çifti kaynağı için, en yüksek gerilme mukavemeti, 1500 dev/dk ve 110 mm/dk işlem parametreleriyle görülmüştür ve %73.1 kaynak verimi ile 212 MPa'lık maksimum gerilme mukavemeti elde edilmiştir.

Ugander ve ark. (2018) AZ31 magnezyum alaşımında sürtünme karıştırma kaynağı parametrelerinden takım pim profilleri, dönme hızı ve kaynak hızının mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Kaynatılacak levhalar 240 x 60 x 5 mm ölçülerde hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan pim profilleri Şekil 2.10.'da gösterilmiştir. 900, 1120 ve 1400 dev/dk dönme hızlarında deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler ANOVA analizleri ile desteklenmiştir. Takım dönme hızının gerilme mukavemeti ve sertlik üzerinde en yüksek istatistiksel etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Regresyon analizleri ile tahmin edilen mekanik özelliklerin deneysel çalışmalarla uyumlu olduğu belirtilmiştir.

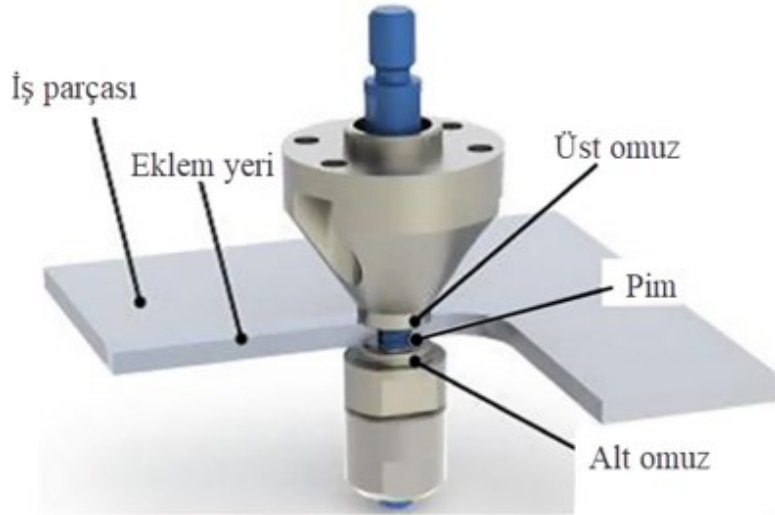


Şekil 2.10. SKK'da kullanılan takımlar (Ugander, 2018)

Pan ve ark. (2017) 3 mm kalınlığında Mg-5Al-1Sn magnezyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleşiminde takım dönme hızının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ekstrüde edilmiş plakalara, sabit parametreler ile çeşitli takım dönme hızlarında işlem gerçekleştirilmiştir. 10 mm çapında içbükey omuzlu, 4 mm çap 2,8 mm uzunluk ve 2.5° takım eğim açısına sahip H13 çeliğinden yapılmış bir takım

kullanılmıştır. 150 mm/dk kaynak hızında 600-800-1100 dev/dk dönüş hızlarında, maksimum mukavemet 800 dev/dk'da %91 verimlilik ile görülürken, 600 dev/dk hızında delik tipi kusurlar görülmüştür. Dönüş hızı arttıkça kaynak mukavemeti artmış, daha sonra azalma göstermiştir.

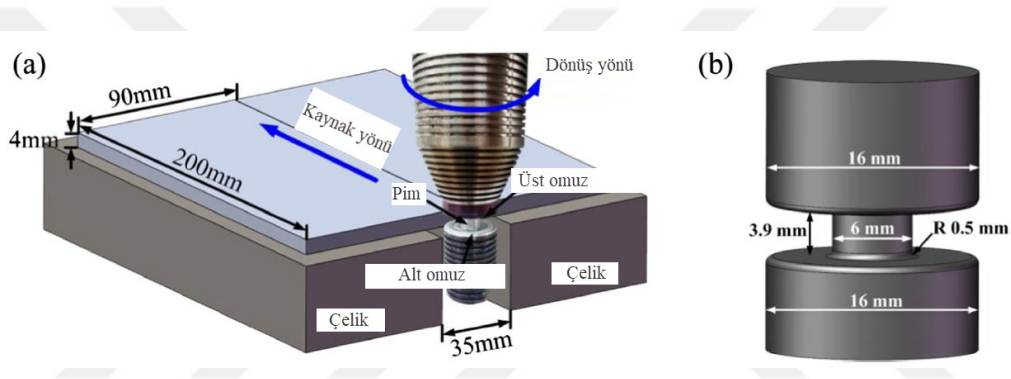
Bobin takım sürtünmeli karıştırma kaynağı geleneksel sürtünmeli karıştırma kaynağının bir çeşididir. Şekil 2.11.'de gösterildiği üzere geleneksel yöntemde pim üst kısmında yer alan tek omza ek olarak altta da bir omuz olmak üzere iki omuzdan oluşan bir takım oluşturulur. Böylelikle kaynak nüfuziyeti artmış olmaktadır. Alt omuz sayesinde sert bir destek plakasına ihtiyaç duymadan kök kusursuz, tam kaynak penetrasyonu ve dengeli ısı girişi gibi geleneksel yöntemde göre bazı özel avantajlara sahiptir. İnce sacların kaynağında takım kırılması ve kaynak hataları gibi sorunlarla karşılaşılması olasıdır (Wang ve ark., 2020). İki omuzlu yapısı sayesinde geleneksel yöntemin sınırlandırmalarını ortadan kaldırmaktadır.



Şekil 2.11. Masuralı takım görüntüsü (Wang ve ark., 2020)

Wen ve ark. (2019) bobin takım sürtünmeli karıştırma kaynağı işlemi sırasında band deseni oluşum mekanizmasını araştırmak için “*Euler-Lagrangian (CEL)*” modeli geliştirmişlerdir. Malzeme akış gerilmesindeki, gerilme hızı ve sıcaklık etkilerini birleştiren “*Johnson-Cook*” kurucu modelini kullanmışlardır. Deneysel çalışmada 4 mm kalınlığındaki 2219-T87 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Silindirik bir gövde üzerine bağlanmış iki omuzdan oluşan (alt ve üst) bir takım seçilmiştir. 400 dev/dk ve 120 mm/dk kaynak hızı ile 0° açıyla Şekil 2.12.'de gösterildiği gibi kaynak uygulamışlardır. Yapılan deneylerde kaynak işlemi bobin takımıyla başarılı bir şekilde uygulanmış ve sayısal analiz sonuçları deneysel

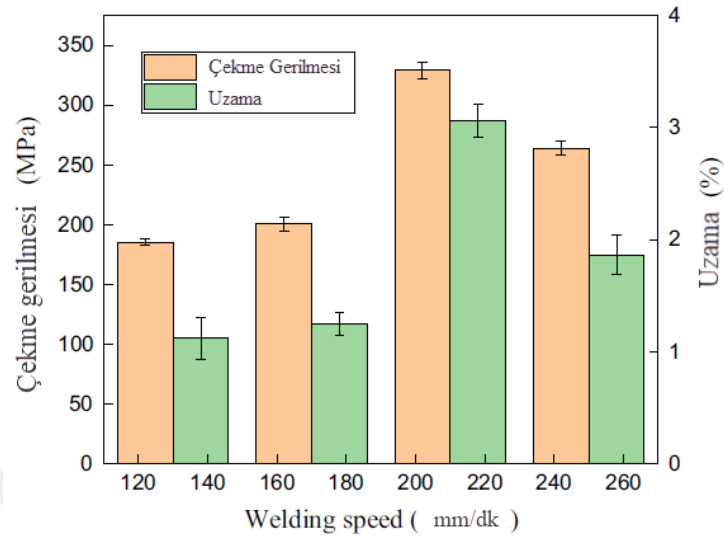
araştırmalarla benzer olduğu görülmüştür. Tek yönlü sürtünme karıştırma kaynağı ve bobin takım karıştırma kaynağı içeren işlemin 7085-T7452 alüminyum alaşımına kalın levha bağlantılarının tane yönelimi, tane büyüklüğü, yeniden kristalleşme davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır (Xu ve ark., 2018). Yeniden kristalleşme ve alt yapı tanelerinin yüzdesi, her iki eklem için temel malzemeye göre kıyasla önemli ölçüde arttığı ifade edilmiştir. Yeniden kristalleşme derecesi esas olarak ısı girişine kıyasla plastik deformasyonun gerilme hızı ile kontrol edilebileceği söylenmiştir. Fuse ve arkadaşları (2019) bobin takım ile sürtünmeli karıştırma kaynağı ile detaylı bilgi vermeyi amaçlamıştır. Kaynak hızının, kaynak kalitesinde diğer parametrelerden daha yüksek bir etkiye sahip olduğu dile getirilmiştir. Bobin takım sürtünmeli karıştırma kaynağında, çok düşük kaynak hızı ve yüksek dönme hızından kaçınılarak flaş oluşumundan kaçınmanın mümkün olduğu bildirilmiştir.



Şekil 2.12. a) Bobin takımı ile sürtünme kaynağı prosesi, b) Bobin takım prosesi (Wen ve ark., 2019)

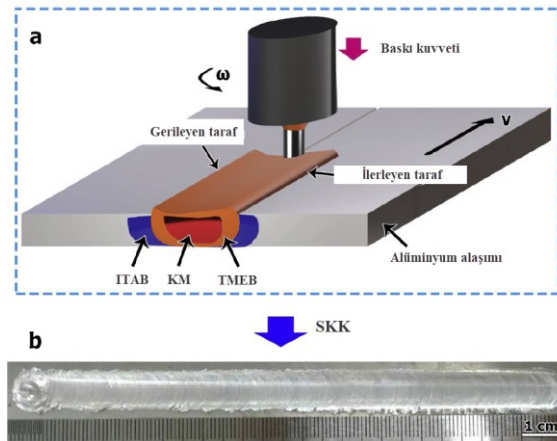
Bobin (Masuralı) takım kullanılarak, 4 mm kalınlığında 2219-T87 alüminyum alaşımında yapılan sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızlarının etkisi incelenen bir çalışmada (Wen ve ark., 2020) kaynak bölgesindeki bağlantıların mikroyapısı, mekanik özellikleri araştırılmıştır. Ekstrüzyon yönüne paralel olarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Üst ve alt omuz çapı 15 mm, omuz çapı 6 mm ve omuzlar arası 3.8 mm boşluk bulunan takım kullanılmıştır. Kaynak hızı 130-250 mm/dk ve 350 dev/dk dönme hızıyla kaynaklar gerçekleştirilmiş ve Şekil 2.13.'de gösterilen değerler elde edilmiştir. Kaynak hızı artışıyla birlikte kaynak bölgesi genişliği artmış ve bu bölgedeki tane boyutu azalmıştır. Sertliğin, kaynak kalınlığı boyunca simetrik iken, kaynak bölgesi genişliği

boyunca asimetrik olduğu saptanmıştır. Kaynak bağlantısında, temel malzemeye göre maksimum %70 mekanik özellikler elde edilmiştir.



Şekil 2.13. Farklı kaynak hızlarında gerilme mukavemeti ve uzama değerleri (Wen ve ark., 2020)

Li ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada 3 mm kalınlığındaki 7004-T6 alüminyum alaşımında sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin etkilerini incelemişlerdir. Şekil 2.14.'te kaynak bölgeleri detaylı olarak gösterilmiştir. Kullanılan takım omuz çapı 10 mm, pim uzunluğu 2.85 mm, karıştırma ucu çapı 3 mm ve mil ile takım arasında 2°'lik bir açı seçilmiştir. Omuz basıncı 1.5-2.5 kN, kaynak hızı 40-200 mm/dk, takım dönme hızı ise 600-1200 dev/dk olarak kullanılmıştır. Yapılan test sonuçlarına göre en yüksek mukavemet 1000 dev/dk dönme hızı ve 120 mm/dk kaynak hızında %4.24 uzama oranı ile elde edilmiştir.



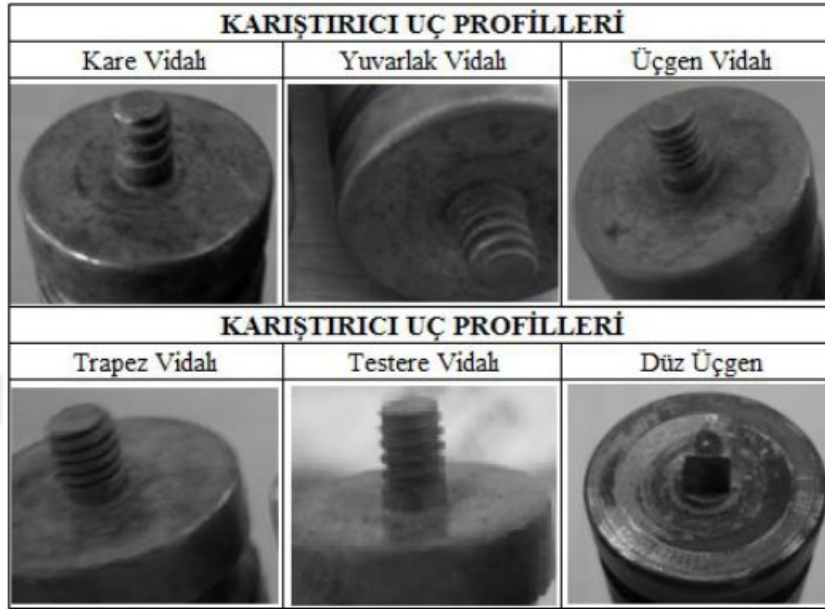
Şekil 2.14. a) Karıştırma kaynak prosesi b) Kaynak eklemi görüntüsü (Li ve ark., 2020)

AA2099-T83 ve AA2060-T8E30 alüminyum alaşımlarının sürtünmeli karıştırma kaynağı sırasında farklı geometrilerde takım kullanılması ile kaynak bölgesinde malzeme akışı, malzemenin kaynak işlemi esnasında gösterdiği davranışlar incelenmiştir (Aldanondo ve ark., 2020). Kaynak işlemi 2.5 mm kalınlığa sahip AA2060-T8E30 alaşımı üzerine 2 mm kalınlıktaki AA2099-T83 alaşımının noktasal olarak karıştırıcı pim aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi sırasında 10 mm omuz çapı, 4 mm pim çapı ve 2.5 mm pim uzunluğu olan bir takım kullanılmıştır. Kaynakta kullanılan takım omzunun malzeme yüzeyine dayandırılmış olması malzemenin yukarı doğru akışını engellemiştir. Kullanılan iki farklı takım da kaynak hızı artışı ve dönme hızında azalma olması durumunda tork değerlerinde artış gösteren net bir eğilim göstermiştir. Kullanılan takım geometrisi, kaynak bölgesine giren ısı miktarını doğrudan etkilediği için kaynak kusurlarının oluşumunun takım geometrisi ile bağlantılı olabileceği görüşünü ifade etmişlerdir.

3 mm kalınlığa sahip 6061 alüminyum alaşımı 2.8° eğim açısı ile haddeleme yönünde sürtünme karıştırma kaynağına tabi tutulmuştur (Zeng ve ark., 2019). Kaynak işleminde 12 mm omuz çapına, 4 mm prob çapı ve 2.5 mm prob uzunluğuna sahip ısı işlem görmüş takım çeliğinden imal edilen konik dişli bir takım kullanılmıştır. Kaynak esnasında tane oluşumuna etkisini incelemek için 400 ve 1000 dev/dk takım dönüş hızlarında 100 mm/dk kaynak hızları ile su ve hava soğutmalı ortamlarda gerçekleştirilmiştir. Yüksek ve düşük dönüş hızlarının tane yapısına etkisi olduğu gösterilmiştir. Kaynak sonrası soğutma sırasında tane büyüklüğünü kontrol eden en önemli faktör soğutma hızından ziyade yüksek sıcaklıklarda kalma süresi olduğunu vurgulamışlardır. İnce taneli yapı elde etmek için yüksek sıcaklıklarda kalma süresi kilit faktör olarak tespit edilmiştir.

Türkyılmaz (2019) yaptığı çalışmada 10 mm kalınlığındaki AA6066 alaşımında sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan karıştırıcı uç geometrisinin kaynak mukavemetine etkisini ve işlem sırasında oluşan kuvvetleri incelemiştir. Universal freze tezgahında işlemi yapmak üzere kaynak için bir tabla tasarımı yapılmış olup bu tablayla, tezgâh esas tablası arasına dinamometre yerleştirilerek gelen kuvvetler ölçülmüştür. Kaynak işlemini gerçekleştirmek için 4340 ıslah çeliğinden 25 mm omuz çapı, 5 mm pim çapı ve 6 mm pim uzunluğunda takım hazırlanmış, 5 adet vidalı olmak üzere 7 farklı pim imal edilmiştir. Takımların 55 HRC sertlik değerinde hazırlanmıştır. Kullanılan takımlar Şekil 2.15.'te gösterilmiştir. Yapılan çalışmada 900 dev/dk dönme hızı ve 31.5 mm/dk ilerleme hızı ile başarılı bir şekilde kaynak yapıldığı söylenmiştir. Kaynak hızı arttıkça takıma gelen kuvvetin arttığı ve bunu azaltmak için dönme hızı arttırılması gerektiği ifade edilmiştir.

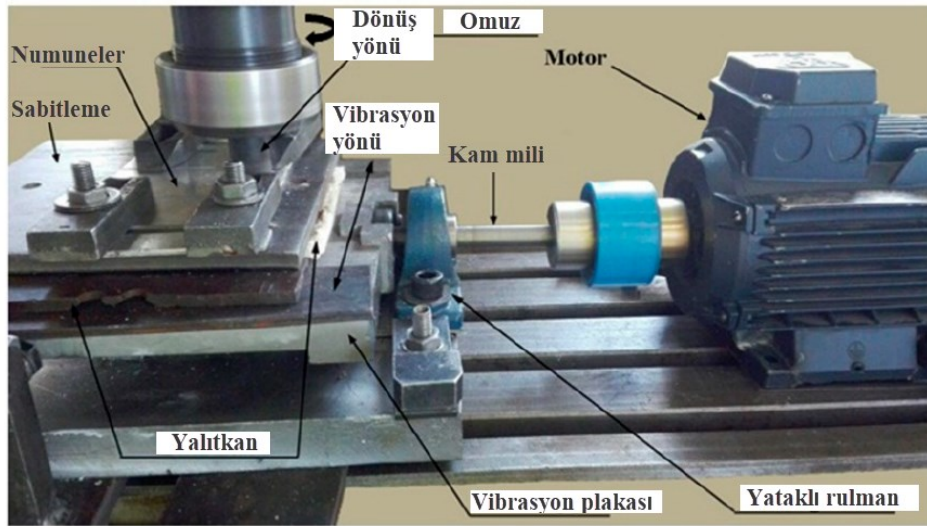
Karıştırıcı uçlarda 1 mm adım kullanılması önerilmiştir. Kaynaklarda en verimli kaynak üçgen vidalı ve testere vidalı uçlarda elde edilmiştir. Üçgen diş ile elde edilen mukavemet değeri en yüksek olmuştur. Sürtünme yüzeyindeki artışın mukavemeti arttırdığı gözlenmiştir. Yeterli sürtünme sağlanamayan diğer uçlarda kaynak birleşimleri istenildiği şekilde gerçekleşmemiştir.



Şekil 2.15. Karıştırıcı uç profilleri (Türkyılmaz, 2019)

Fouladi ve ark. (2017) Şekil 2.16.'da görüldüğü üzere sürtünme karıştırma kaynağı sırasında prosese titreşim katarak mekanik özellikleri incelemiştir. Bu işlemin mukavemete ve süneklığe pozitif etkileri olduğunu dile getirmiştir. AA5052 alaşım 150 x 50 x 3 mm boyutlarda hazırlanarak, omuz çapı 18 mm, pim ucu 6 mm ve yüksekliği 2.8 mm olan 105° konik, 65 HRC sertliğe sahip bir takım ile kaynatılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, titreşimin kaynak bölgesinde tane büyüklüğünü ve korozyon direncini azalttığı görülmüştür. Hu ve ark. (2019) sürtünme karıştırma kaynak bölgesinde ultrasonik titreşimlerin eklemin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Karşılaştırma yapabilmek adına aynı kaynak parametrelerinde ultrasonik titreşim etkisi altında olmayan kaynaklar yapılmıştır. Deneyde 5 mm kalınlığında 2219-T6 alüminyum alaşımı, 800 dev/dk takım dönme hızı ile 200, 300, 400 mm/dk kaynak hızlarında incelenmiştir. Kaynak ekleminin üst tabakası ultrasonik titreşimlerden çok etkilendiği ifade edilmiştir. Test sonuçlarına göre ultrasonik titreşim altında gerçekleşen kaynak numuneleri, geleneksel kaynağa göre daha yüksek mukavemet göstermiştir. Yapılan başka bir çalışmada (Rahmi ve Abbasi, 2017) geleneksel sürtünmeli kaynak yöntemine dahil edilen titreşim

altında yapılan kaynak ile geleneksel yöntem arasındaki farklar incelenmiştir. Titreşimli ve titreşimsiz şartlar altında yapılan kaynaklardan alınan numuneler mekanik özellikleri açısından incelemeye tabi tutulmuştur. Deneylerde 120 x 50 x 3 mm ölçülerinde AA5052 malzeme kullanılmıştır. Karıştırıcı takım pimi tungsten karbürden yapılmış olup omuz malzemesi M2 çelik olarak seçilmiştir. Omuz yapısının mekanik özelliklere etkisini incelemek üzere omuz çapı 22 ve 32 mm olan iki farklı omuz boyutu kullanılmıştır. Diğer ölçüler sabit tutularak pim yüksekliği 2.8 mm olarak kullanılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde geleneksel kaynak prosesine dahil edilen titreşimle birlikte tane boyutunun azaldığı, mukavemetin ve sünekliliğin arttığı tespit edilmiştir. Mikro sertliğin ise %23 arttığı görülmüştür. Titreşim frekansı arttıkça mekanik özelliklerde pozitif yönde değişim gözlemlenmiştir. Bu yüzden maliyeti düşük uygulaması kolay olarak bu yöntemin geleneksel sürtünme karıştırma kaynağına alternatif olarak seçilebilmesi söz konusu olmaktadır.



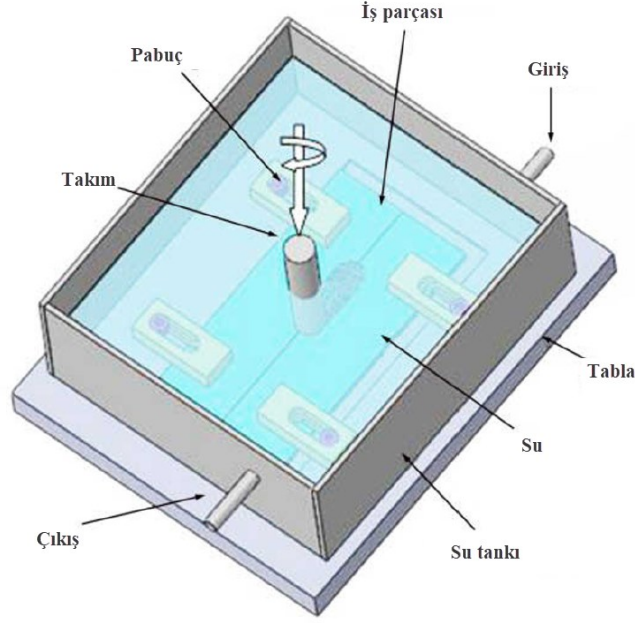
Şekil 2.16. Vibrasyonlu sürtünmeli karıştırma kaynağı prosesi (Fouladi ve ark., 2017)

Tezcan (2018) toz metalürjisi ile üretilmiş AA6063 levhanın sürtünme karıştırma kaynağı performansını incelemiştir. Hazır olarak alınmış 600 x 100 x 8 mm ölçülerindeki levhalar kullanılmıştır. Kaynak için 24 mm omuz çapı, 8 mm uç çapı ve takım omzuna doğru 2.5° genişleyen 7.5 mm uç uzunluğuna sahip 52 HRC sertlikte bir takım kullanılmıştır. Sinterlenmiş alüminyum malzemelerde kaynak verimliliği % 90' kadar çıktığı görülmüştür. Kaynak parametreleri malzemeye göre denenmesi ve sağlıklı bir eklem oluşturmak için en uygun değerler kullanılması gerektiği vurgulanmıştır.

Sürtünme karıştırma kaynağında takım profili önemli bir yere sahiptir. Optimum tasarım için yeterli nicel veri ve takımın etrafındaki termomekanik davranışın kapsamlı şekilde anlaşılması gerekmektedir. Su ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada üç boyutlu bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli kullanılarak süreci incelemişlerdir. Pim etrafındaki düz alanındaki artış, ısı üretim hızının, sıcaklık dağılımının, maksimum malzeme akış hızının ve plastik deformasyon bölge hacminin sürekli artmasına yol açtığı görülmüştür.

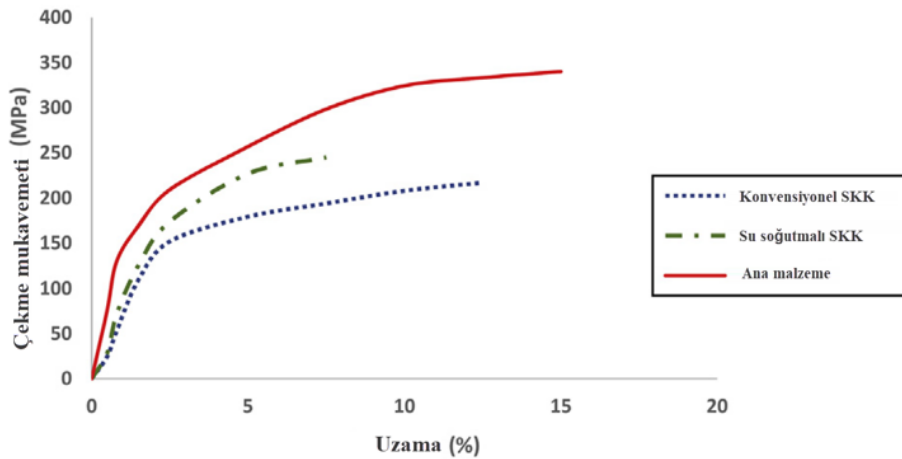
Rodop (2019) 5 mm kalınlığında 1050 alüminyum alaşımında 110 mm/dk kaynak hızı ve 1000, 1400, 1800 dev/dk takım dönme hızlarında sürtünmeli karıştırma kaynağının etkisini incelemiştir. Yapılan deneylerde kaynak birleştirme bölgesinde boşluk, çatlak oluşumu ve kaynaklanmayan alana rastlanmamıştır.

Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında oluşan sıcaklıklar, ısı işlem görmüş alüminyum alaşımlarında malzemenin mekanik özelliklerine negatif etki edebilmektedir. Su altı sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak hattı boyunca ısı iletimi ve dağılımını kontrol eden ve kaynak kalitesini geliştiren bir kaynak yöntemidir. Proses Şekil 2.17.'de gösterilmiştir. Su altı karıştırma kaynağı düşük maksimum sıcaklık ve kısa bekleme süresi nedeniyle bu sorunların üstesinden gelmek için bir yöntem olarak önerilmektedir. Kaynak prosesinde sıcaklığın düşürerek çökelti sertleşmesini kısıtlayıp mekanik özelliklerde artış sağlanması için soğutucu olarak su kullanılmaktadır. Wahid ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada sürtünme karıştırma kaynağının su altı prosesini incelemişlerdir. Prosesin gerekliliği olarak hatasız bir kaynak için uygun geometride takım seçilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Su altı karıştırma kaynağında iç bükey omuzlu takım ile düz takıma göre daha sağlıklı birleştirme tespit edilmiştir. Su altı sürtünme karıştırma kaynak yönteminde, geleneksel yöntemle göre daha yüksek dönme hızı ve kaynak hızı gereklidir. Soğutma hızının daha yüksek olması sebebiyle daha iyi mekanik özellikler elde edilmiştir.



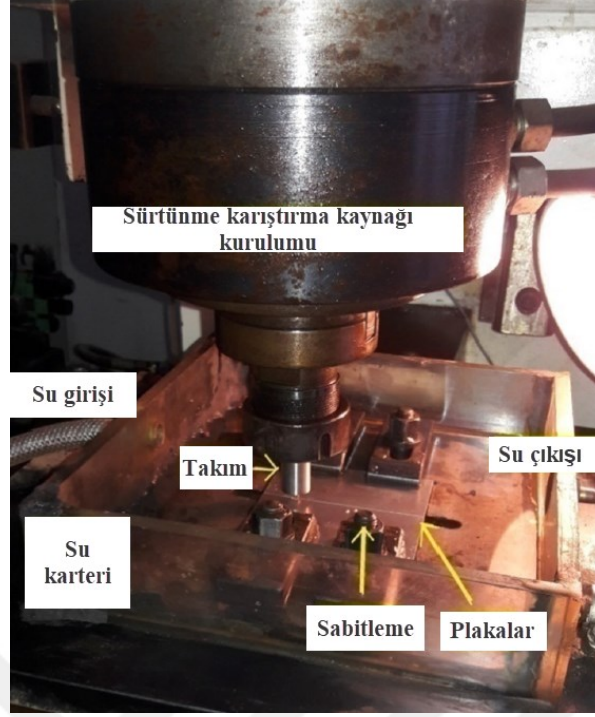
Şekil 2.17. Su altı sürtünme karıştırma kaynağı şematik gösterimi (Wahid ve Sıddiquee, 2018)

AA6061-T6'nın sürtünme karıştırma kaynağı mekanik özelliklerini arttırmak amacıyla su altında işlem gerçekleştirilmiştir (Fathi ve ark., 2019). Takım dönme hızı (600, 1000, 1400 dev/dk) ve kaynak hızı (20, 50, 80 mm/dk) çeşitli kombinasyonlara göre uygulanmıştır. Su soğutmalı sistem sayesinde gerilme mukavemetinde %16, sertlikte ise %12.5 iyileştirilebileceği görülmüştür (Şekil 2.18.).



Şekil 2.18. Konvansiyonel ve su soğutmalı kaynak için gerilme ve uzama eğrisi (Fathi ve ark., 2019)

Yapılan başka bir çalışmada (Wahid ve ark., 2019) su altı sürtünme karıştırma kaynağı proses parametrelerini optimize ederek maksimum mukavemet elde edilmeye çalışılmıştır. Deneyde 3 mm kalınlığında 6082-T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Karıştırma takımı 6 mm pim çapı ve 2.7 mm pim yüksekliğe sahip H13 çelikten imal edilmiştir. Çalışma sonucunda takım omuz çapının, takımın dönme hızının ve kaynak hızının eklemin gerilme mukavemetini önemli ölçüde etkilendiği vurgulanmıştır. 900 dev/dk dönme hızı, 80 mm/dk kaynak hızı ve 17 mm omuz çapıyla yapılan su altı karıştırma kaynağında, esas metalin %79'u ve hava ortamında yapılan sürtünme karıştırma kaynağından %10.7 daha yüksek mukavemet elde etmişlerdir. Soğutma ve ısıtma koşulları altında gerçekleştirilen sürtünme karıştırma kaynağındaki mekanik özellikleri incelemek üzere çalışma yapılmıştır (Mehta ve Badheka, 2017a). Su ile geliştirilen soğutma sistemi ile soğutulan kaynakta, kaynak bölgesinin mukavemetinin arttığı görülmüştür. Isıtma destekli yapılan karıştırma kaynağında ise korozyon miktarında artış gözlenmiştir. AA5052-H32 alaşımının su altı ve geleneksel kaynak yöntemi ile kaynaklanan birleştirme kalitesi incelenmiştir (Shanavas ve Murugan, 2018). Deneyler 100 x 50 x 6 mm numuneler üzerinde, 10° konik açığa ve 5.7 mm pim uzunluğunda kare profile sahip konik takım pim ile tek seferde kaynak edilmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Kaynak işleminin gerçekleştiği sistem Şekil 2.19.'da gösterilmiştir. Su altı kaynaklı birleştirilmelerin kaynak kalitesi 500 dev/dk dışında geleneksel yöntemle göre daha iyidir. 700 dev/dk ve 65 mm/dk kaynak parametreleriyle maksimum 208.9 MPa gerilme mukavemeti elde edilmiştir. Su altı ve geleneksel yapılan kaynak bağlantıları üzerinde yapılan farklı kaynak hızı ve dönme hızlarında geniş çaplı testler sonucu, su altında yapılan kaynak mukavemeti geleneksel yöntemle göre %2 daha fazla olduğu görülmüştür.



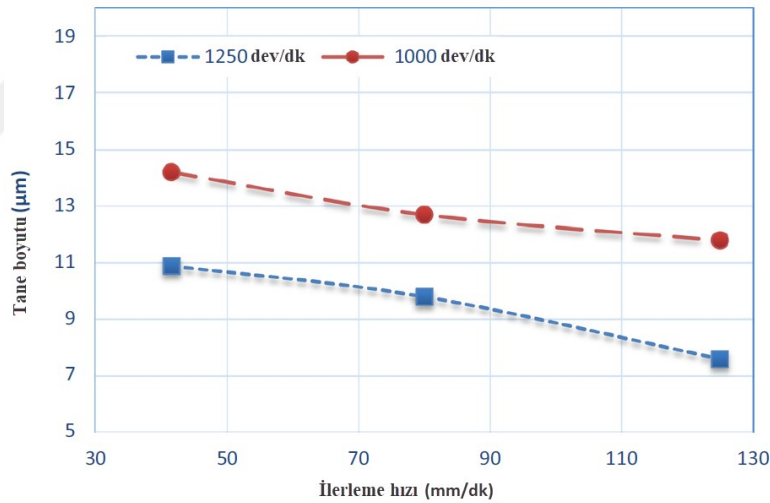
Şekil 2.19. Su altı kaynak sistemi (Shanavas ve Murugan, 2018)

Gangwar ve ark. (2018) titanyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı yöntemini araştırmışlardır. Sürtünme karıştırma kaynağında, farklı bölgelerde farklı ısılar oluşmakla beraber malzeme akışları da çeşitlilik göstermektedir. Oluşan sıcaklık farkı sebebiyle iç yapıda meydana gelen değişiklikler mekanik özelliklere etki etmektedir. Yapılan kaynakların genelinde asıl malzemenin, kaynaklı malzemedan daha yüksek mukavemet özellikleri gösterdiği tespit edilmiştir.

Tan ve ark. (2017) AA3003 alaşımının farklı başlangıç iç yapılarıyla farklı kaynak koşullarında sürtünme karıştırma kaynağı etkilerini incelemişlerdir. Kaynak işleminde 150 x 100 x 3 mm ölçülerinde 538 °C derecede 3 saat boyunca tavlanylup yeniden kristalleştirilmiş numuneler kullanılmıştır. Daha sonra numuneler 0 °C ve 20 °C su içerisinde ve hava soğutmalı ortamda birleştirip kaynatılmıştır. Kaynak işleminde H13 çeliğinden takım kullanılmıştır. Kaynak parametreleri olarak 200 mm/dk kaynak hızı ve 800 dev/dk kullanılmıştır. Kaynak yönü haddeme yönüne dik seçilmiş, takım dönme eksenine ile levha normal arasında 2° eğim uygulanmıştır. Kaynak bölgelerinin gerilme mukavemeti, akma mukavemeti ve uzaması, kaynak ortam sıcaklığının azalmasıyla arttığı görülmüştür. Tavllanmış sıcak bantlarda, kaynak derzlerinin gerilme ve akma mukavemeti, kaynak ortam sıcaklığının azalmasıyla artarken, uzama ise azalmıştır. Aynı kaynak ortam koşulunda, sıcak

bantlardaki kaynak bağlantılarının gerilme mukavemeti ve akma mukavemeti, tavllanmış sıcak bantlardakine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Jamalian ve ark. (2016) 6 mm kalınlığında AA5083 alüminyum alaşımının sürtünmeli karıştırma kaynağında dönme ve travers hızının mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Karıştırıcı pim olarak H13 çeliğinden imal edilmiş, 16 mm omuz çapı, 6 mm pim çapı ve 5.7 pim yüksekliğine sahip karıştırıcı takım kullanılmıştır. Çok düşük dönme hızında yetersiz ısı üretimi ve yetersiz metal taşınması, çok yüksek dönme hızlarında ise kaynak bölgesinde tünel ve solucan deliği kusurları tespit edilmiştir. Dönme ve travers hızındaki artışa bağlı olarak daha dinamik yeniden kristalleşme ve artan karıştırma etkisiyle Şekil 2.20.'de görüldüğü gibi tane büyüklüğünün azaldığı gözlenmiştir. Dönme hızındaki artışa uyumlu ilerleme hızı seçimi, nihai gerilme kuvveti ve sertlik üzerinde artışa neden olmuştur. 1250 dev/dk ve 80 mm/dk kaynak parametrelerinde uzamada %51, mikro sertlikte %8 artış elde edilmiştir. Nihai gerilme mukavemetinde baz metalin %85'ine ulaşılmıştır.



Şekil 2.20. Farklı ilerleme ve dönme hızlarında tane büyüklükleri (Jamalian ve ark., 2016)

Kaya (2016) SiC partikül takviyeli ve takviyesiz toz metal 7039 alüminyum alaşımlarında sürtünme karıştırma kaynağını çalışmıştır. Yapılan çalışmada %10 SiC partikül takviyeli 3.8 mm kalınlıkta levha ve partikül takviyesiz 4.8 mm kalınlıkta alaşımlar incelenmiştir. Freze tezgâhı kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı gerçekleştirilip mikro yapı ve mekanik özellikler incelenmiştir. Her iki malzemede de kaynak bölgesinde daha ince tane yapısı gözlenmiştir. Termomekanik etki nedeni ile termomekanik bölgede taneler karıştırıcı dönme yönünde yönlendirilmiştir. En yüksek çekme dayanımı 352 MPa ile takviyesiz

numunelerde görülürken, takviyeli numunelerde 225 MPa çekme mukavemeti tespit edilmiştir. Uzama oranlarına bakıldığında takviyesiz numunelerde %8.8 iken, takviyeli numunelerde %2.81 olduğu görülmüştür. Yapılan çekme, eğme ve sertlik deneyleri sonucunda uzama oranı ve eğilme açılarına bakıldığında 7039 alüminyum alaşımının SiC ile takviye edilmesi durumunda plastik deformasyon kabiliyetinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Şansseven (2019) kaynak parametrelerinin kaynak dikiş kalitesi etkilerini incelemiştir. 6 mm kalınlığa sahip 5754-H111 serisi alüminyum sacdan hazırlanan numuneler, DIN 2344 sıcak iş takım çeliğinden yapılan özel geometrilili takımla alın alına kaynatılmıştır. Kaynak parametreleri olarak 500, 1000, 1400 dev/dk dönme hızı ve 112, 210, 270 mm/dk ilerleme hızları uygulanmıştır. 1000 dev/dk ve 112 mm/dk kaynak parametrelerinde ana malzemeye en yakın mekanik özellikler elde edilmiştir. Yüksek ısı girdisi ve yetersiz karışma olan numunelerde hatalar gözlenmiştir.

Sönmez (2016) yüksek mukavemet özelliğine sahip 7075 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı öncesi ve sonrası uygulanan yaşlandırma işleminin kaynak kalitesine etkisi incelenmiştir. 7075 alaşımlı alüminyumlar sürtünme karıştırma kaynağı ile başarılı bir şekilde kaynatılmıştır. Yaşlandırılmamış parçaların birleştirilmesinde ana malzemenin çekme dayanımının %75'ine ulaşılırken, yaşlandırılmış parçalarda ise %63 olarak görülmüştür. Yaşlandırılmış malzemeye kaynak sonrası tekrar yaşlandırma işlemi uygulanması sonucu dayanım %20 artmıştır.

El-Sayed ve ark. (2018) sonlu elemanlar analizi kullanarak sürtünmeli karıştırma kaynağı işleminden kaynaklanan sıcaklık ve artık termal gerilmeleri tahmin etmeye çalışmışlardır. AA5083-O alaşım üzerinde yapılan deneylerde silindirik dişli pim profili kullanılarak kaynak gerçekleştirilmiş olup farklı dönme ve kaynak hızları kullanılmıştır. Analiz sonucu öngörülen sıcaklık değerleri, kızılötesi termal görüntü kamerası kullanılarak deneysel olarak teyit edilmiştir. Kaynak hızındaki artış maksimum sıcaklık değerini azaltırken, dönme hızının artması bu değeri yükseltmiştir. Dişli takım kullanılarak 400 dev/dk ve 500 mm/dk kaynak parametrelerinde en yüksek 230 MPa mukavemet değeri elde edilirken, konik takım kullanılarak 630 dev/dk ve 100 mm/dk'da minimum gerilme mukavemet değeri olan 85 MPa elde edilmiştir. Ölçülen tepe sıcaklık değerleri 400 dev/dk'da %1.22 ve 630 dev/dk'da %3.31 hata ile uyum göstermektedir. Aynı takım dönme

ve kaynak hızında yapılan kaynak işlemlerinde, dişli takım kullanıldığında elde edilen sıcaklık değeri konik takımın oluşturduğu sıcaklık değerinden yüksektir.

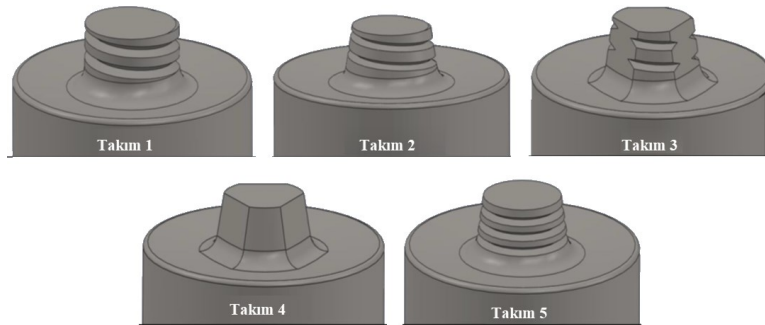
Emirlioğlu (2017) farklı alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan parametrelerin malzemelerin kaynak kabiliyetine etkisini incelemiştir. Çalışmada kullanılmak üzere AA6082-T6 ve AA7075-T651 alüminyum alaşımları 200 x 100 x 5 mm boyutlarda levha olarak hazırlanmıştır. Karıştırıcı takım olarak, sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş üç farklı takım kullanılmıştır. Takım dönme hızı ile ilerleme hızı oranı eşit olan kaynaklarda en iyi malzeme akışı helisel pim grubunda görülmüştür. Deney sonrası yapılan muayenelerde bütün numunelerin kaynak merkezinde ince taneli yapı, termomekanik etki altında olan bölgede uzamış ve yassılaştırmış tane yapısı ve ısıdan etkilenen bölgede iri taneli yapılar gözlenmiştir. Pim geometrilerine göre kaynak merkezlerinde çeşitli şekiller görülmüştür. Çekme testi sonuçları göz önüne alındığında helisel pim geometrisine sahip takımla yapılan kaynak numunelerinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sertlik değerleri genel olarak kaynak merkezinde en üst değerde ölçülürken, merkezden uzaklaştıkça azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Ahmed ve ark. (2017) 5 mm kalınlıkta AA7075-T6 ve 6 mm kalınlıkta AA5083-H111 malzemeleri 300 dev/dk takım dönme hızı ve 50, 100, 150, 200 mm/dk farklı travers hızlarında 3° takım eğim açısında sürtünme karıştırma kaynağı etkilerini incelemiştir. Takım omuzu 5 mm malzeme yüzeyine değinceye dek takım daldırılmıştır. Baz malzemenin ve kaynakların mikroyapısı ve kristalografik dokuları elektron geri saçılma kırınımı tekniği (EBSD) tekniği ile incelenmiştir. Çekme testi sonucu kırılan malzemelerin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu yöntemiyle (SEM) belirlenmiştir. Dalma derinliği uygun seçildiğinden dolayı hatasız bir kaynak mümkün olmuştur. Farklı malzemelerde gerilme mukavemeti 245-267 MPa arasında değişirken, kaynak verimi AA5083 malzeme baz metaline göre %77-87 arasında değiştiği gösterilmiştir. İki farklı malzeme ile yapılan deneyde kaynak bölgesi sertliği iki malzemenin sertlik değerinin yaklaşık olarak ortasına denk gelmektedir.

Mehta ve Badheka (2017b) yaptıkları çalışmada 6061-T651 alüminyum alaşımı ile elektrolitik ve 6.3 mm kalınlıklarda sert bakır plakalar sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynatılmıştır. 1500 dev/dk, 50 mm/dk parametrelerinin yanında farklı takım açısı ve merkezden takım kaçırarak suretiyle farklı kaynak prosesleri gerçekleştirilmiştir. Farklı takımlar ile yapılan kaynaklarda poligonal kenar sayısı arttıkça farklı Cu-Al ekleminin gerilme mukavemetinin arttığı tespit edilmiştir. 8 mm pim çapında silindirik takım pim

profili ile yapılan birleştirmelerde maksimum 89 MPa çekme mukavemeti gözlenmiştir. Kare pim profili ile yapılan kaynak bölgesinde maksimum 283 HV sertlik ölçülmüştür.

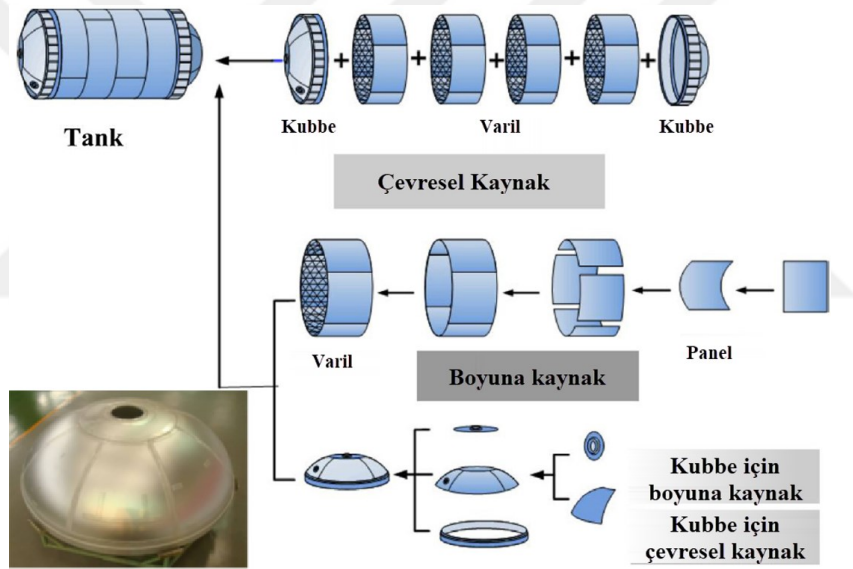
Avcı (2019) kompozit yapılarda zırh malzemesi olarak kullanılan Al7039 alaşımlı matris fazı incelemiştir. Alüminyum alaşımı içeriğine SiC, Al₂O₃ ve B₄C partikülleri takviye edilmiştir. Farklı oranda farklı takviyeler yapılarak üretilen 5 mm kalınlığında kompozit malzemeler üzerinde sürtünme karıştırma kaynağının etkileri incelenmiştir. Kaynak prosesi hazırlığında yerleştirilen termokupullarla yapılan sıcaklık ölçümleri partikül takviyeli alüminyumlarda, numunelerin termal iletkenlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. Buna sebep olarak kompozit yapımında kullanılan farklı özelliklerdeki seramik partiküllerin sebep olduğu düşünülmüştür. Kaynak işlemi sırasında termomekanik bölgede partiküllerin yönlendiği belirlenmiş olup bu durumun yığılma kenarında çok yoğun olduğu tespit edilmiştir.

Booth (2016) AA7075-T6 ve AA6022-T4 alaşıma sahip levhaların farklı takım geometrisi, kaynak hızı ve parametreleri altında gerçekleşen kaynak işlemi sonrası kaynak özelliklerini incelemiştir. Kaynak işlemlerinde Şekil 2.21.'de yer alan 5 farklı takım kullanılmıştır. İki malzeme türünde ve bütün kaynak parametrelerinde en kaliteli kaynağı gerçekleştiren 3 numaralı takım olmuştur. Deneylerde 2 mm kalınlığında AA7075-T6 aynı malzemeden numuneler ile 2 mm kalınlığında AA7075-T6 ve 0.3 mm kalınlığında AA6022-T4 malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı özellikleri incelenmiştir. 125, 180, 250, 355, 500 mm/dk kaynak hızları kullanılmış olup literatür çalışmaları göz önüne alınarak takım dönme hızı 1120 dev/dk ve takım açısı 2.5° olarak sabit tutulmuştur. İyi bir mekanik özellik, yeterli düzeyde karışan bölge oluşturması ve kusursuz kaynak işlemi sebebiyle 250 mm/dk'lık ilerleme hızı en iyi travers hızı olarak tespit edilmiştir.

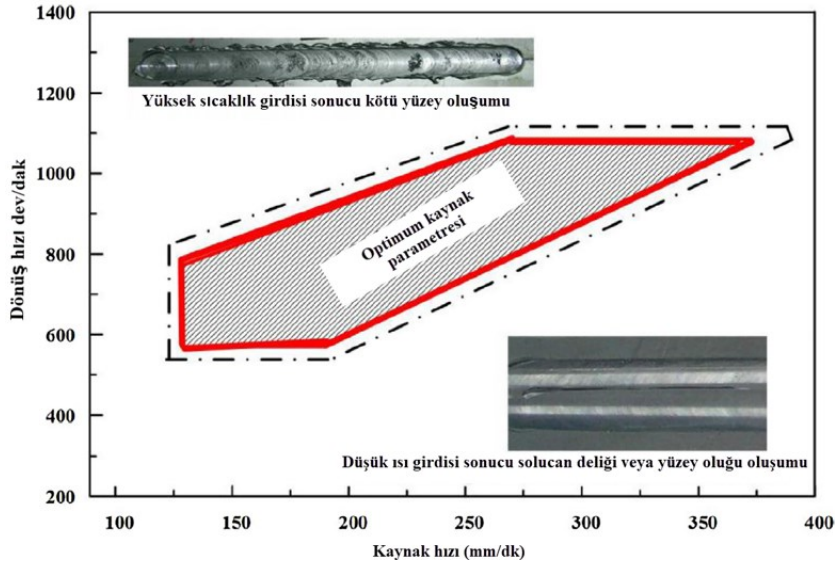


Şekil 2.21. Kaynak işleminde kullanılan farklı takım geometri tasarımları (Booth, 2016)

Sürtünme karıştırma kaynağı düşük bozulma, daha az kusur ve eklemden yüksek mekanik özellikleri gibi olağanüstü avantajları nedeniyle, büyük hacimli yakıt tankları gibi yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlı yapıların imalatı için havacılık sektöründe kullanılmaktadır. Wang ve ark. (2018) havacılık sektöründe kullanılan bu yöntemi farklı yönlerden ele almışlardır. Yeni nesil ağır fırlatma aracı, tank malzemesi olarak alüminyum lityum alaşımından 10 m çapında tasarlanmıştır. Fırlatma aracı şematik olarak Şekil 2.22.'de gösterilmiştir. Geleneksel tank üretiminin yerine sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) kullanılması, yeni model fırlatma araçlarının tasarımı ve imalatında güçlü bir destek oluşturmuştur. Robotik SKK yöntemiyle yüksek doğruluk ve kaliteli bir kaynak birleşimi yöntemin tercih edilme olasılığını arttırmıştır. Prosesteki optimum kaynak parametreleri Şekil 2.23.'de görülmektedir. Kaynakla birleşim noktalarındaki hatalar tahribatsız muayene yöntemleri ile tespit edilebilmektedir.



Şekil 2.22. Fırlatma aracı tankının yapısı ve ana kaynakları için şematik gösterim (Wang ve ark., 2018)

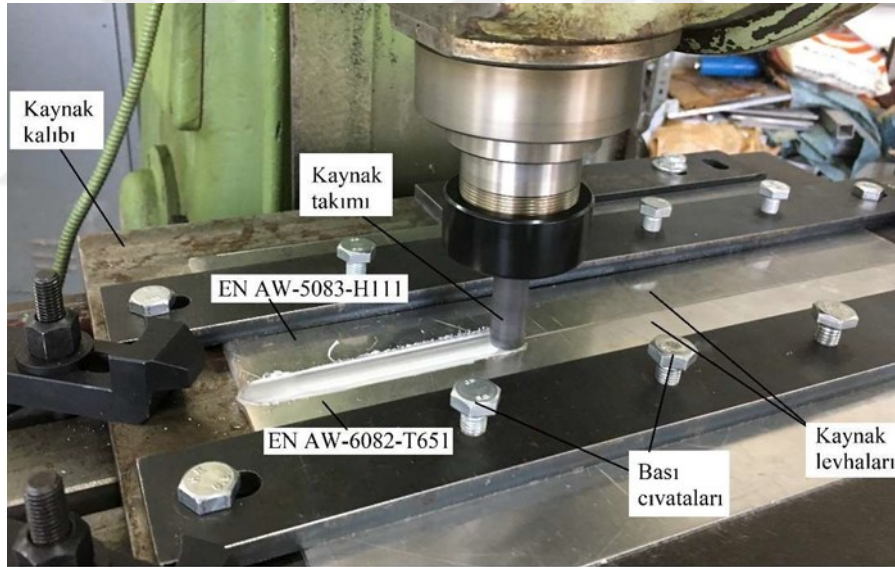


Şekil 2.23. AA2219 alaşımında karıştırma kaynağı için optimize edilen takım dönme ve ilerleme hızı işlem parametre grafiği (Wang ve ark., 2018)

Aydın (2017) sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle birleştirilmiş alüminyum alaşımlarının yorulma ömrünü incelemiştir. Özellikle 2XXX ve 7XXX serisi alaşımlar ergime noktalarına ısıtılarak yapılan birleştirmelerde kötü katılaşma mikro yapısı ve kaynak boşluğu hatası nedeniyle kaynak işlemine uygun görülmemektedir. Bu durumlarda ergime sıcaklığının altında gerçekleşen katı hal birleştirme kaynağı olan sürtünme karıştırma kaynağı kullanılması mukavemetli kaynak birleştirmelerine imkân sağlamaktadır. Deneysel çalışmalarında 5 mm kalınlığında AA7075-T651 alaşım kullanılmıştır. Sıcak iş takımından imal edilmiş beşgen profile sahip karıştırma takımı kullanılmıştır. 8 farklı takım ile farklı dönme ve ilerleme hızlarında kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. 500, 630, 800, 1000 dev/dk dönme hızları ile 50, 63, 80, 100 mm/dk ilerleme hızları kombine edilmiştir. Çekme testi sonuçlarında en kötü mukavemet 800 dev/dk ve 63 mm/dk işlem parametrelerinde elde edilirken, en iyi sonuç 800 dev/dk-80 mm/dk ve 1000 dev/dk-100 mm/dk işlem parametreleriyle elde edilmiştir. Kaynak mukavemet grafiğine bakıldığında dönme hızı ile ilerleme hızındaki paralel artış kaynak dikişinin mukavemetinin artmasını sağlamıştır. Yorulma ömürleri dikkate alındığında en iyi sonuçlar 800 dev/dk-50 mm/dk, 800 dev/dk-63 mm/dk, 800 dev/dk-80 mm/dk, 1000 dev/dk-100 mm/dk parametre çiftlerinde görülmüştür. Ultrasonik dövme işlemi yapılan numunelerde yorulma ömrünün arttığı görülmüştür.

Öcalır (2019) 4 mm kalınlığındaki 5083-H111 ve 6082-T651 alüminyum alaşımlarını sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle birleştirmiştir. Kaynak prosesi Şekil 2.24.'te gösterildiği şekilde uygulanmıştır. Farklı takım omuz çapı, dönme ve ilerleme

hızlarında kaynaklı birleştirmeler gerçekleştirilmiş ve kaynak bölgesi birçok açıdan incelenmişlerdir. Kaynak takımı olarak yüksek sıcaklıklarda aşınma dayanımı, yüksek tokluk özelliği ve ısı iletkenliğinin iyi olması nedeniyle sıcak iş takım çeliğinden üretilen malzeme kullanılmıştır. Takım omuz çapları 16, 20, 24 mm olarak tasarlanmış, pim profili M5 diş olarak imal edilmiş olup boyu levha kalınlığından 0.2 mm daha kısa tutulmuştur. 3 farklı takım omuz çapları kullanılarak 710, 1000, 1400 dev/dk takım dönme hızı ve 56, 112, 160 mm/dk takım ilerleme hızı olmak üzere 27 farklı parametrede kaynaklı birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Kaynak birleştirmelerinde yapılan gözle muayene sonucu kaynaklı levhalarda çarpılma tespit edilmemiştir. Küçük takım omuz çapı ve yüksek takım ilerleme hızlarında daha düzgün kaynak yüzeyi elde etmişlerdir. Çekme deneyleri sonucunda en yüksek mukavemet 160 mm/dk ilerleme hızında en düşük çekme mukavemeti ise 56 mm/dk'da elde edilmiştir. Maksimum çekme mukavemeti 230.43 MPa, minimum 159.55 MPa ölçülmüştür. Kaynak merkezlerinden ölçülen sertlik değerleri takım omuz çapı ve takım ilerleme hızlarının artışına paralellik gösterdiği tespit edilmiştir.



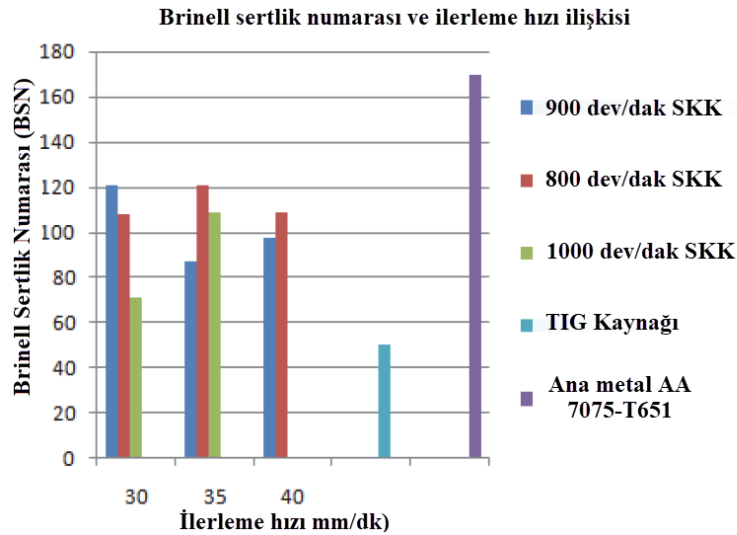
Şekil 2.24. Sürtünme karıştırma kaynak işleminin uygulanışı (Öcalır, 2019)

Kasman ve ark. (2019) 5 mm kalınlığında 7075-T651 ve 6013-T6 alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma yöntemiyle kaynak edilebilirliğini incelemişlerdir. Kaynak işlemleri üçgen, beşgen ve konik dişli takımlarla üniversal freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonucunda mukavemet ve kaynak hata durumu göz önüne alındığında en güçlü bağlantı konik helisel pim ile elde edilirken en zayıf bağlantı beşgen profilde elde edilmiştir. Bu durumu çekme ve eğme testleriyle doğrulamışlardır. En yüksek çekme dayanımı 203 MPa ofsetsiz takım ile en düşük mukavemet dayanımı ise 171 MPa

olarak ölçülmüştür. Ofsetli yapılan kaynaklar incelendiğinde yığıma kenarının aksine çekme kenarına yapılan ofsetlerde mukavemetin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Çekme testlerinde bütün kopmalar AA6013-T6 alüminyum alaşımlarında görülmüştür.

Prasad ve ark. (2021) 2519 alüminyum alaşımının gaz altı tungsten elektrod kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen dikişlerin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. 300 x 100 x 10 mm ölçülerdeki plakalara uygulanan kaynak işlemleri korozyon direnci ve mekanik özellikleri incelendiğinde, sürtünme karıştırma kaynağının mekanik özellik ve korozyon dirençlerinin daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır.

Sürtünme karıştırma kaynağı ve tungsten ark kaynağı ile birleştirilen benzer ve farklı alüminyum alaşımlarının sertlik değerlerinin araştırılması üzerine çalışma yapılmıştır (Patil ve ark., 2016). AA7075-T651 ve AA6061-T6 alaşımları 150 x 70 x 6.35 mm ölçülerde hazırlanan plakalar iki farklı kaynak yöntemiyle de birleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynakları 650, 700, 800, 900, 1000 dev/dk dönme hızları ve 30, 35, 40 mm/dk ilerleme hızları ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik testleri Brinell ile ölçülmüştür. Şekil 2.25.'te görüldüğü üzere farklı parametrelerde gerçekleştirilen bütün sürtünme karıştırma kaynağı dikişlerinde, TIG kaynak yöntemine göre daha yüksek sertlik değeri elde edilmiştir.



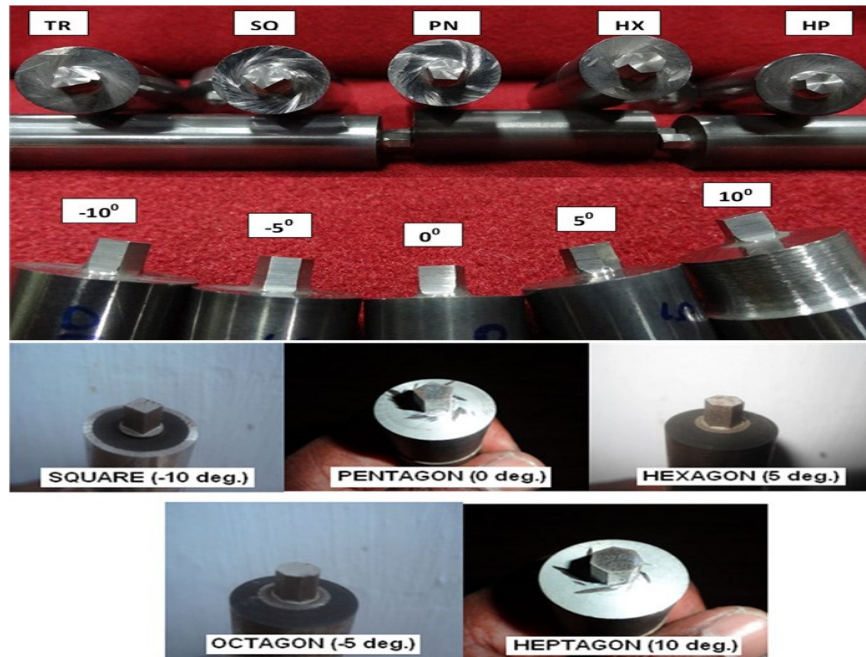
Şekil 2.25. Farklı ilerleme hızlarının sertlik değerine etkisi (Patil ve ark., 2016)

Dimopoulos ve ark. (2021) 2 mm kalınlığa sahip A17075 alaşım levhaların sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak alın derz konfigürasyonunda kaynaklamak için uygun takım geometrisini ve optimum işlem parametrelerini incelemişlerdir. Farklı pim çaplarına, 3 mm ve 4 mm, sahip düşük alaşımlı WNR 1.6582 / DIN 34CrNiMo6 çeliklerden silindirik profile

sahip iki farklı takım imal edilmiştir. Kaynak işlemi, 1000-2500 dev/dk takım dönme hızı ve 80-800 mm/dk çeşitli ilerleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı parçalarda yapılan çekme testlerinde kaynaklı birleştirmelerin ana malzemeye göre %33.75 daha az mukavemete sahip olduğu tespit edilmiştir. İki farklı takım çapında, 3 mm - 4 mm, mukavemet ve kaynak kalitesi bakımından aşırı bir fark tespit edilmemiştir. Ölçülen en yüksek dayanımlı kaynak bağlantılarında 4 mm çapa sahip takım pimi, 3 mm olana göre %5.33 daha güçlü birleştirme gerçekleştirmiştir.

Jayaprakash ve ark. (2021) 5083 ve 7068 alüminyum alaşımları için deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Deneylede kullanılan işlem parametreleri 800, 1000, 1200, 1400 dev/dk takım dönüş hızı, 30, 40, 50, 60 mm/dk ilerleme hızı, 3, 4, 5, 6 kN eksenel kuvvet olmak üzere 3, 4, 5, 6, 7, 8 mm kalınlığında plakalarda uygulamışlardır. Silindirik konik takım kullanılarak yapılan kaynaklarda maksimum nihai gerilme mukavemeti 267 MPa, üçgen takımda 286 MPa, düz silindirik takımda ise 275 MPa olarak elde etmişlerdir.

6082-T6 alüminyum alaşımı, özellikle savunma sanayi ve havacılık endüstrisi gibi hafif yapıların imalatında büyük bir role sahiptir. 6082 alaşımı zor şartlarda mukavemet/ağırlık oranı ve yüksek korozyon dayanımı ile bilinen bir alaşımdır. Gopi ve Mohan (2021) sürtünme karıştırma kaynağı işlem parametreleri ve farklı takım profillerinin kaynak bağlantılarının mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Kullanılan pim profilleri Şekil 2.26.'da görülmektedir.

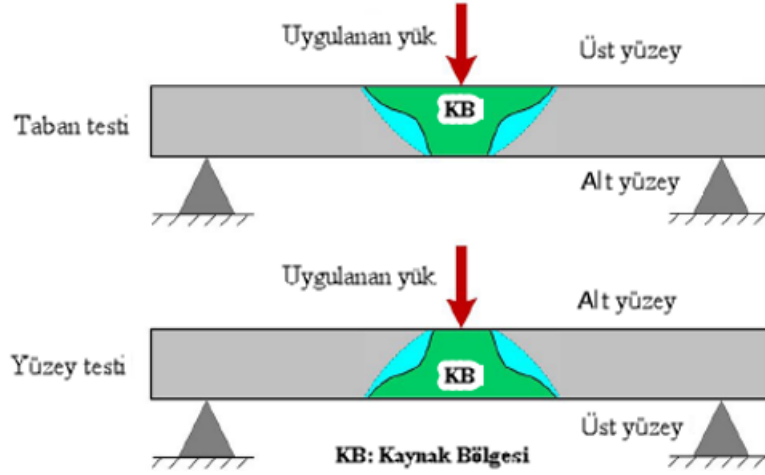


Şekil 2.26. Farklı takım profilleri (Gopi ve Mohan, 2021)

Deneylerde 4, 6, 8 mm kalınlığında plakalar kullanılmıştır. 4 mm kalınlığındaki levha için optimum kaynak parametreleri 1300 dev/dk takım dönme hızı, 3.2 mm/sn kaynak hızı, beşgen pim profili, 0.08 mm omuz penetrasyonu ve 5° dışbükey omuz konikliği olduğunu belirlemişlerdir. 6 mm kalınlığındaki levha için optimum parametrelerin 1100 dev/dk dönme hızı, 3.2 mm/sn kaynak hızı, altıgen pim profili, 0.15 mm omuz penetrasyonu ve 10° dışbükey omuz konikliği olduğu tespit edilmiştir. 8 mm kalınlığındaki levha için optimum parametreler incelendiğinde; 900 dev/dk dönme hızı, 2.4 mm/sn kaynak hızı, heptagonal pim profili, 0.20 mm omuz penetrasyonu ve 10° dış bükey omuz konikliği olduğu tespit edilmiştir.

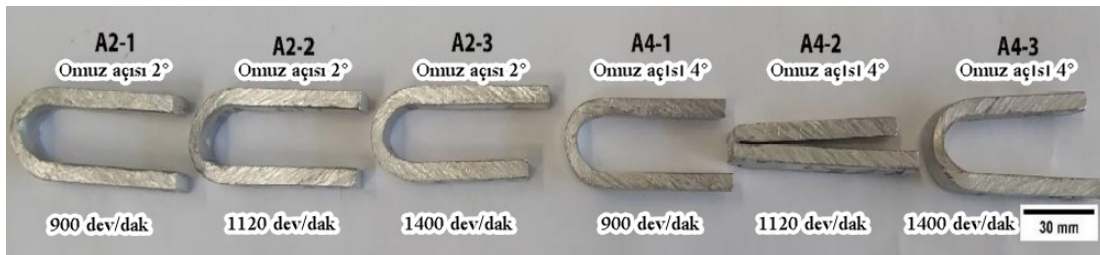
Beygi ve ark. (2023) sürtünme karıştırma kaynağının metalurjik olaylara bağlı olarak proses parametrelerini ve eklem özelliklerini doğru şekilde ilişkilendirebilme yeteneğine sahip modeller oluşturulmasını öne sürmektedir. Çalışmalarında 2024 ve 7075 alüminyum alaşımları ile yaptıkları kaynak dikişindeki nihai gerilmeyi modelleyerek tahmin edebilmek için çok katmanlı algılayıcı yapay sinir ağı kullanmışlardır. Kaynak işlemlerinde piramit, konik ve silindirik olmak üzere üç farklı pim kullanılmıştır. Dönme hızı 800 ve 1200 dev/dk ve kaynak hızı 10 ve 50 mm/dk olarak belirlenmiştir. Oluşturdukları modelle tahmin ettikleri, deneysel verilerle de karşılaştırdıklarında deneyle iyi şekilde örtüşen maksimum gerilme değeri 395 MPa olarak bulmuşlardır. Bu değeri silindirik pim kullanarak 1110 dev/dk dönme hızında elde etmişlerdir.

AZ31 ve AM60 alaşımlarını ile ilgili çalışma yapan Zhang ve ark. (2021) kaynak bağlantısının mikro yapısını ve üç noktalı eğme testinde gösterdiği mukavemeti incelemiştir. Ana metalleri ve kaynaklı numuneleri üç nokta eğme testine tabi tutmuşlardır. Kaynaklı numuneyi Şekil 2.27.'de gösterildiği gibi hem tabandan hem de yüzeyden olmak üzere eğmeye zorlamışlardır. 75 x 20 mm uzunluk ve genişlik ölçülerine sahip numunelerine 2 mm/s hız ile eğme kuvveti uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre kaynak dibinden kaynak yüzeyine doğru eğme kuvvetinin uygulanması durumunda daha yüksek akma ve eğme dayanımı elde edilmiştir. AM60 alaşımı AZ31 alaşımına göre daha fazla dayanım göstermiştir.



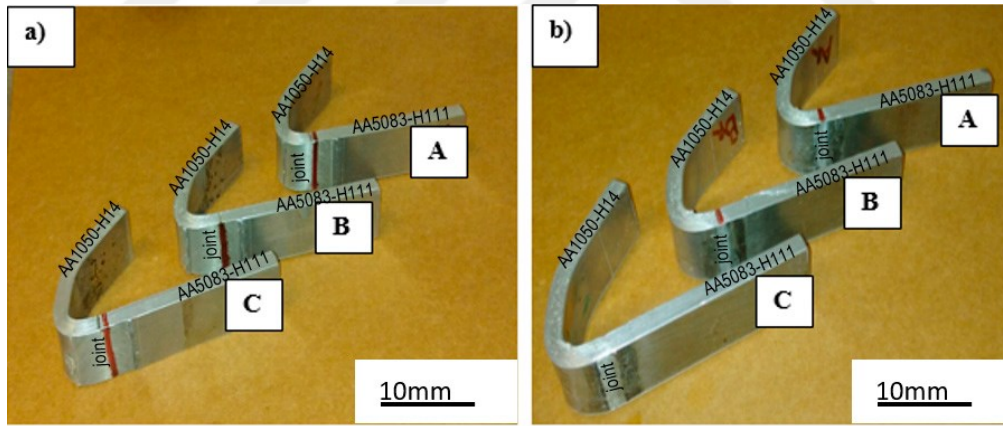
Şekil 2.27. 3 noktalı eğme testinde farklı yüzeylerden kuvvet uygulanması (Zhang ve ark., 2021)

Pecanac ve ark. (2022) AA5005-H32 alüminyum alaşımını bobin tip takım kullanarak sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirmiştir. Numuneler 140 x 60 x 4.8 mm ölçülerde hazırlanmıştır. Kaynak takımı olarak AISI H13 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş ve sertleştirme işlemi sonucu 53 HRC sertliğe sahip bir bobin takımı kullanılmıştır. Sabit 20 mm/dk kaynak hızıyla, 2° ve 4° omuz açılarında sahip bir bobin takımı ile 900, 1120, 1400 dev/dk takım dönme hızları kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaynaklanan numuneler üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Eğme testinde kaynak yüzeyinin alt ve üst yüzeyleri olarak iki farklı yüzeyden de eğme işlemi yapılmıştır. Sadece bir numune de kırılma görülmüştür. İki farklı takımda da solucan tipi kaynak hatası görülmüştür. Bu kusur diğer numunelerde kırılmaya sebebiyet vermemiştir. Fakat bir numunede bu hatanın kaynak dibine doğru ilerlemeyi başarısız bir bağlantı oluşturduğu için bükme testinde kırılmaya neden olmuştur. Eğme deneyi sonrası numunelerin son durumu Şekil 2.28.'de gösterilmiştir. Bobin takımının hem alt yüzeyde hem de üst yüzeyde benzer yapıya sahip kaynak dikişi oluşturduğu için kaynak bölgesinin alt ve üst yüzeylerinde yaklaşık aynı mukavemet değeri elde edilmiştir.



Şekil 2.28. Eğme deney numunelerinin eğme testi sonrası hali (Pecanac ve ark., 2022)

Msomi ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada farklı alaşımlar olan AA1050-H14 ve AA5083-H111 kaynak işlemleri H13 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş bir takımla 1000 dev/dk dönme hızı, 30 mm/dk kaynak hızı ve 2° eğim açısıyla gerçekleştirilmiştir. İşlemden sonra ASTM E8M-04 standardına göre elde edilen kaynak numunelerinin kaynak bağlantısının mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu testleri yaparken kaynak başlangıç, orta ve çıkış bölgesinden alınan numuneler değerlendirilmiştir. Kaynak başlangıcından alınan numune, kaynağın diğer bölgelerinden alınan numunelere göre düşük çekme özelliği göstermiştir. Üç numunedeki de sünek kırılma gözlemlenmiştir. Üç nokta eğme testleri ASTM E290-97a standardına göre yapılmıştır. Altı adet numunenin üç tanesine kaynak üst yüzeyinden, diğer üçüne ise alt yüzeyden zımba temas ettirilerek eğme kuvveti uygulanmıştır. Eğme testleri sonucu kaynak dikişlerinde kırılma görülmemiştir ve bu da malzemelerin kaynak ile iyi bir şekilde bağlandığı gösterir. Testlerde kaynak dikişinin akma mukavemetinin AA1050 alaşımından daha fazla olduğu görülmüştür. Zımba temas noktası kalemle çizildiği halde eğilme, akma mukavemeti düşük olan AA1050 malzeme tarafında gerçekleşmiştir. Eğilme testi sonrasında numunelerin son hali Şekil 2.29.'da görülmektedir (Msomi ve Mbana, 2020).



Şekil 2.29. a) Üst yüzeyden eğilen numuneler b) Alt yüzeyden eğilen numuneler (Msomi ve Mbana, 2020)

Literatür incelemesinden açıkça görüldüğü üzere birleştirilen malzemelerin cinsi ve işlem parametreleri kaynak kalitesini doğrudan etkilemektedir. Aynı tür malzemeler kaynatıldığında farklı, farklı tür malzemeler kaynatıldığında farklı sonuçlar elde edilmektedir. Kaynak parametreleri, kullanılan takımlar ve malzemelerin boyutları kaynak kalitesini ve mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Bu tez kapsamında 2.5 mm kalınlığındaki iki farklı 5754-H111 ve 2024-T3 alüminyum alaşımlarının farklı kaynak parametreleri ile sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmesi

incelenmiştir. Alaşımardan 5754 orta ve iyi derece mukavemet, iyi derecede işlenebilirlik özelliklerine sahip olup plastik şekil verme yöntemleriyle mukavemeti arttırılmaktadır. Ayrıca mükemmel kaynak kabiliyetine sahiptir. Deniz suyu ve kimyasallara karşı yüksek korozyon dayanımına sahiptir. Özellikle gemi sanayiinde birçok kullanım alanına sahiptir. Diğer alaşım 2024 ise yüksek mukavemet özelliğine sahip olup ısı ile işleme mukavemet kazanmaktadır. Çökelme sertleştirilmesi gösterir. Diğer alüminyum alaşımları kadar iyi bir korozyon direncine sahip değildir. Kaynak kabiliyeti, alaşıma bağlı olarak kötü ile orta arasındadır. Bu tez kapsamında bu iki farklı deformasyon mekanizmasına sahip alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi yapılmış ve literatüre önemli bir katkı sağlanmıştır. Her iki alaşım farklı alanlarda kullanılmaktadır.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

3.1.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Malzeme

Bu tez çalışmasında, AA2024-T3 ve AA5754-H111 alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı incelenmiştir. Malzemelerin kimyasal bileşimleri Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri.

Malzeme	Fe	Si	Cu	Cr	Mn	Mg	Zn	Zi+Ti	Diğer	Al
2024	0.5	0.5	3.8-4.9	0.1	0.3-0.9	1.2-1.8	0.25	0.15	0.15	Kalan
5754	0.4	0.4	0.1	0.3	0.5	2.6-3.6	0.2	0.15	0.15	Kalan

2024 alüminyum alaşımı ısıtılma işlemi uygun, yorulma dayanımı yüksek ve kaplama yapılarak korozyon direncinin artırılabilen bir alaşımdır. Temperleme işlemi sayesinde uzama değerinin azalmasına karşın akma ve çekme dayanımının yanında sertlik değeri de oldukça fazla artış göstermektedir. Bu yetenekleri sayesinde uçak, savunma, otomotiv sanayi ve kolay işlenebilirlik özelliği ile yüksek sertlik istenen yerlerde de kullanılmaktadır (Alüminyum,2023a). Hafiflik ve yüksek dayanım özelliği istenen karmaşık şekilli makine parçalarında malzeme olarak seçildiği takdirde kolay işlenebilirlik kabiliyeti nedeniyle imalat maliyeti düşük olacaktır. Parlak ve temiz dış yüzeyi ile estetik olarak uygun olacaktır.

5754 alüminyum alaşımı soğuk şekillendirmeye elverişli olup kaynak edilebilirliği ve yorulma dayanımı yüksektir. Temperleme yapılarak mekanik dayanımı artırılabilir. Korozyon direnci yüksektir. Özellikle deniz suyu ve atmosfere karşı dirençlidir. Bu özelliğinden dolayı gemi inşa ekipmanları, marine uygulamaları, nükleer, kimya ve gıda gibi endüstrilerde kaynaklı yapıların imalatı ve otomotiv yan sanayi ekipmanları imalatında tercih edilir (Alüminyum,2023b). Yüksek korozyon direnci nedeniyle deniz taşıtları ve korozif etkiye sahip ortamlarda çalışacak makine ve ekipmanlarda yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Özellikle deniz taşıtlarında hafifliğiyle kullanımı tercih edilmektedir. Bu yapıların imalatında sürtünme karıştırma kaynağının kullanımı verimli ve düşük maliyetli bir birleştirme sağlayacaktır.

Sürtünme karıştırma kaynağının otomasyon sistemleri ile desteklenmesi durumunda 2024 ve 5754 alüminyum alaşımlarının kullanıldığı otomotiv, havacılık ve uzay taşıtları ve deniz taşıtlarının imalatında zaman kaybını azaltarak düşük maliyetli ve yüksek verimliliğe sahip imalat proseslerinin işletilmesine imkân sağlanacaktır.

Kaynak işlemi için tedarik edilen 2.5 mm kalınlığındaki levhalar, 150 x 275 mm ölçülerde, ısı oluşumunu en aza indirerek hava yardımıyla lazerde kesilerek kaynak numuneleri elde edilmiştir. Kesilen saclar planlanan şekilde birbirleriyle eşleştirilmiştir.

3.1.2. Sürtünme Karıştırma Kaynak Takımı Malzemesi

Takım malzemesi seçimi yapılırken, proses gereklilikleri dikkate alınmalıdır. Takımın çalışma sıcaklığı, işlem esnasında maruz kalacağı sıcaklık değeri, kaynak edilecek malzemenin gösterdiği direnç, işlem sırasında takıma etki edecek kuvvetler ve takımın aşınma durumu göz önünde bulundurularak doğru malzeme seçimi yapılmalıdır (Demirdöğen ve ark., 2022b). Tüm bu etkenler göz önünde bulundurularak ve literatür dikkate alınarak takım malzemesi olarak DIN 1.2344 / AISI H13 sıcak iş takım çeliği seçilmiştir. Takım malzemesine ait kimyasal bileşim aşağıda Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. DIN 1.2344 Sıcak iş takım çeliği kimyasal bileşimi (GmbH, 2023).

Element	Karbon (C)	Krom (Cr)	Molibden (Mo)	Vanadyum (V)
Ağırlıkça (%)	0.40	5.30	1.40	1.00

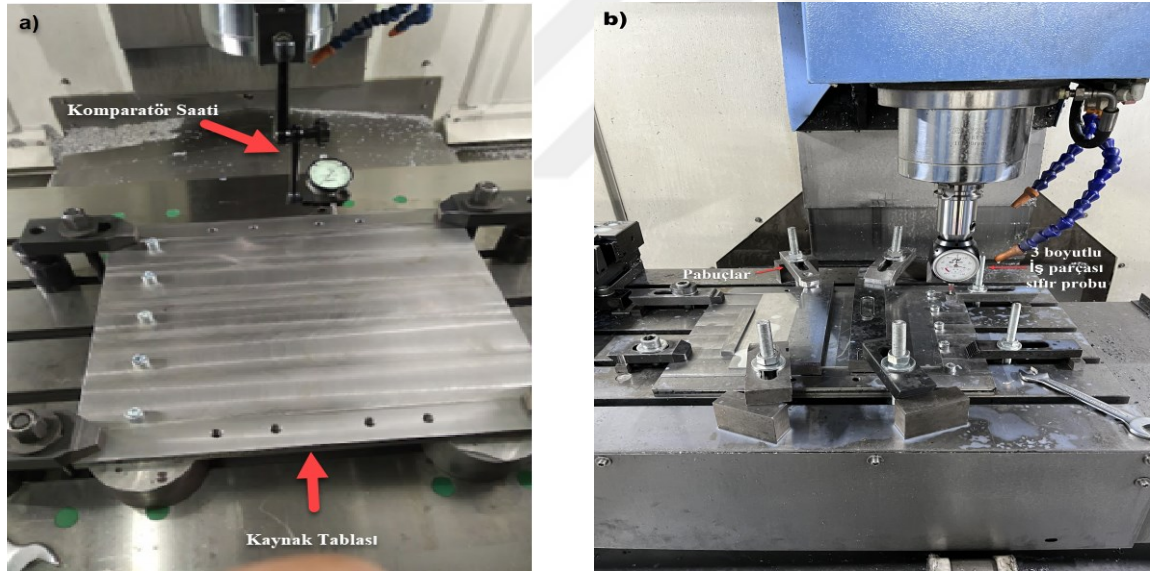
DIN 1.2344 Sıcak iş takım çeliği, yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerinin yanında aşınma direncini de kaybetmeyen bir çelik türüdür. Yüksek tokluk ve ısıl kararlılığa sahiptir. Sıcak şekillendirme işlemleri yapılan kalıplar, ekstrüzyon takımları, dövme kalıpları, alüminyum enjeksiyon kalıpları gibi ekipmanların imalatında tercih edilmektedir (GmbH, 2023). Takım malzemesi olarak sertlik alabilen ve ısıl işlem uygulanabilen ıslah çelikleri de tercih edilebilmektedir (Dimopoulos ve ark., 2021).

3.2. Metot

3.2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılması

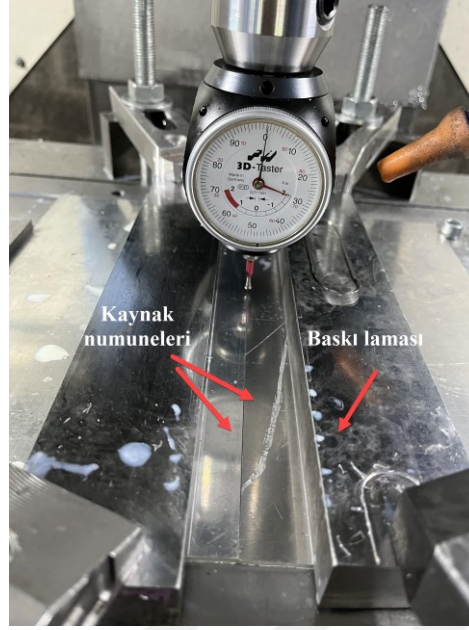
Sürtünme karıştırma kaynağını yapabilmek amacıyla 20 mm kalınlığında St52 malzemedan kesilmiş ve dik işleme merkezinde işlenmiş bir plaka kullanılmıştır. Plaka tasarlanırken kaynak işleminin en verimli şekilde yapılabilmesi, numunelerin kolaylıkla

bağlanıp çözülebilmesi göz önüne alınmıştır. Lazerde kesilen plaka CNC dik işleme merkezinde yüzey ve kenar taramaları yapılarak düzlemsellik sağlanmıştır. Tablanın ortasına 2 mm kalınlığında kanal açılarak numunelerin ekseni olarak tablaya oturması sağlanmış ve kaynak yönünde olabilecek kaymalar önlenmiştir. Tablanın talaşlı imalat sonrası son hali Şekil 3.1.a'da gösterilmektedir. Talaşlı imalat sürecinden sonra deney çalışmalarının hazırlık esnasında doğru şekilde konumlandırılması (sıfırlama işlemi) için kanal duvar ekseni ile tabla kenar duvar eksenleri komparatörle kontrol edilerek paralel oldukları teyit edilmiştir. Kaynak tablası ve numuneler tablaya bağlandıktan sonra komparatörle hem tablanın ekseni hem de numunelerin eksenleri kontrol edilmiştir. Takımın tam olarak iki malzemenin birleşim yeri olan çizgi üzerinden ilerleyerek kaynak işlemini yapması gerektiğinden her operasyon öncesinde tek tek parçaların ekseni kontrol edilerek probun iş parçasının doğru konumu sağlanmıştır. Böylece kaynak takımının levhaların birleşim çizgisinde ilerlemesi sağlanmıştır. Şekil 3.1.b'de kaynak tablasının ve kaynak edilecek levhaların bağlanmış hali gösterilmektedir.



Şekil 3.1. a) Kaynak tablası üretimi, b) Kaynak tablası ve numunelerin bağlanması

Takım kaynak çizgisi üzerinde ilerlerken malzeme içerisinde hep aynı dalma derinliğinde hareket etmesi gerekmektedir. Bu yüzden Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi 0.001 hassasiyetli üç boyutlu prob ile numunelerin düzlemselliği kontrol edilmiştir.



Şekil 3.2. Düzlemselliğin kontrol edilmesi

Kaynak işleminde konik dişli takım kullanılmıştır. Dişli takım pim ucu (koniklik küçük çap) 4 mm, pim dibi (koniklik büyük çap) 6 mm, pim yüksekliği 2.3 mm olacak şekilde konik işlenip üzerine 1 mm adımlı sağ konik diş çekilmiştir. İşlem parametreleri olarak 1200/45, 1600/60 ve 2000/75 dönme / ilerleme hız oranı seçilmiştir. Takım dönüş yönü saat yönü olarak belirlenmiştir. Kaynak malzemelerin hadde yönüne paralel yapılmıştır. Malzemelerin hangi tarafta oldukları ve işlem parametreleri Tablo 3.3.'de verilmiştir.

Tablo 3.3. Kaynak malzemeleri ve işlem parametreleri

		KONİK DİŞLİ TAKIM		
1	2	İŞLEM PARAMETRELERİ	İŞLEM PARAMETRELERİ	İŞLEM PARAMETRELERİ
	↑	Takım dönme hızı- İlerleme hızı	Takım dönme hızı- İlerleme hızı	Takım dönme hızı- İlerleme hızı
2024-2024		1200 dev/dk-45 mm/dk	1600 dev/dk-60 mm/dk	2000 dev/dk-75 mm/dk
2024-5754		1200 dev/dk-45 mm/dk	1600 dev/dk-60 mm/dk	2000 dev/dk-75 mm/dk
5754-5754		1200 dev/dk-45 mm/dk	1600 dev/dk-60 mm/dk	2000 dev/dk-75 mm/dk

3.2.2. Sürtünme Karıştırma Kaynak Takımı İmalatı

Takım imalatı için gerekli olan çelik, Alman çelik üreticisi olan Dörrenberg Edelstahl firmasından tedarik edilmiştir. Mil halinde alınan çubuklar şerit testere yardımıyla kesilmiştir. Kaba tormalama işlemlerinden sonra WNMG elmas uç kullanılarak (Şekil 3.3.) tormalanmıştır (Demirdöğen ve ark., 2022b).



Şekil 3.3. Tornalama operasyonlarında kullanılan elmas (Demirdöğen ve ark., 2022b)

Talaşlı imalatı sona eren parça ısıtma işlemi ve sertleştirme işlemlerine tabi tutulmuştur. Uygulanan ısıtma işlem süreçleri aşağıdaki gibidir:

- 850 °C tuz banyosunda 90 saniye ısıtılarak yumuşatma işlemi yapılmıştır.
- 1050 °C tuz banyosunda 90 saniye ısıtılarak östenitleştirme sıcaklığına çıkarılmıştır.
- 550 °C tuz banyosunda soğutmaya bırakılarak sertleştirme işlemi yapılmıştır.
- 480 °C tuz banyosunda 1.5 saat menevişleme işlemi uygulanmıştır.
- 460 °C tuz banyosunda 1 saat menevişleme işlemi ile ısıtma işlemi sonlandırılmıştır.

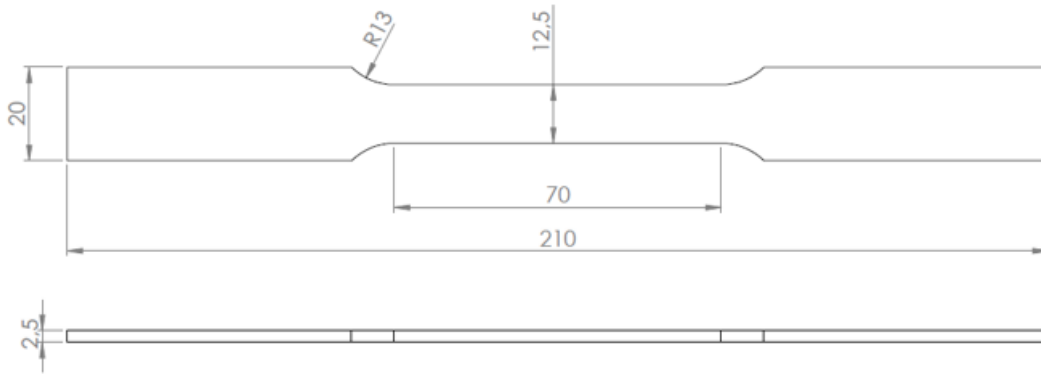
Deneylede kullanılabilmesi için 4 farklı takım imal edilmiştir. Fakat kaynak işleminde pim uç çapı 4 mm, pim dip çapı 6 mm ve pim yüksekliği 2.3 mm olan konik dişli takım kullanılmıştır. Hepsi aynı ısıtma işlem ve sertleştirme işlemlerine tabi tutulmuştur. Takımlar ısıtma işlem sonrası Şekil 3.4.'de görüldüğü gibi mat bir görüntü almıştır.



Şekil 3.4. Sertleştirme işlemi sonrası takımların görüntüsü (Demirdöğen ve ark., 2022b)

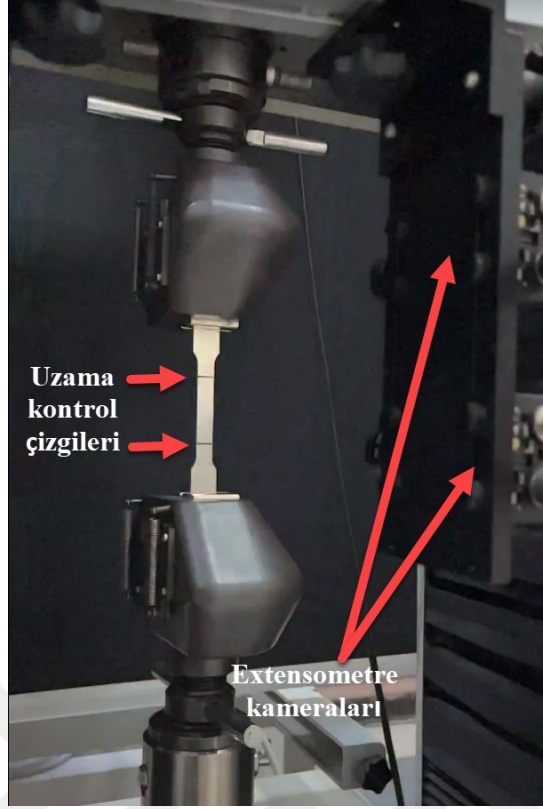
3.2.3. Çekme Testi

Kaynaklanan numuneler lazer tezgahında hava ortamında kesilerek ASTM-E8 standardına göre Şekil 3.5.'de gösterildiği ölçülerde hazırlanmıştır. Numunelerin kaynak plakasından elde edilmesinde ISO 25239-4 standardı dikkate alınmıştır. Numunelere oda sıcaklığında Shimadzu Autograph 100 kN çekme cihazında 1 mm/dk çene hızıyla çekme deneyleri uygulanmıştır. Birim deformasyon ölçümleri video tip extensometre ile yapılmıştır. Deneyler üç kez tekrarlanmıştır.



Şekil 3.5. Çekme deney numunesi ölçüleri

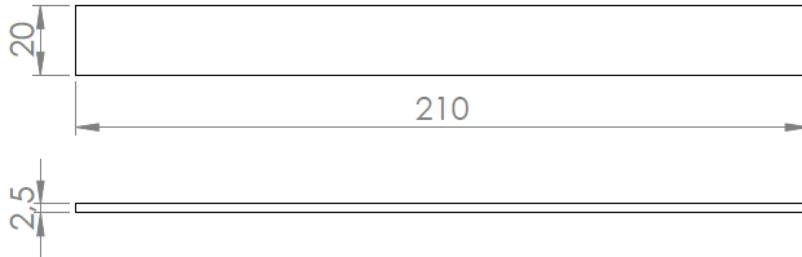
Çekme deney cihazının alt çenesi sabit üst çenesi serbest durumdadır. Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi, çekme deneyi öncesi bütün çekme numunelerinin orta bölgeleri 50 mm ölçüyle çizilerek video kamera bu çizgilere odaklanmıştır. Video tip extensometre aracılığı ile uzama miktarı saptanmıştır.



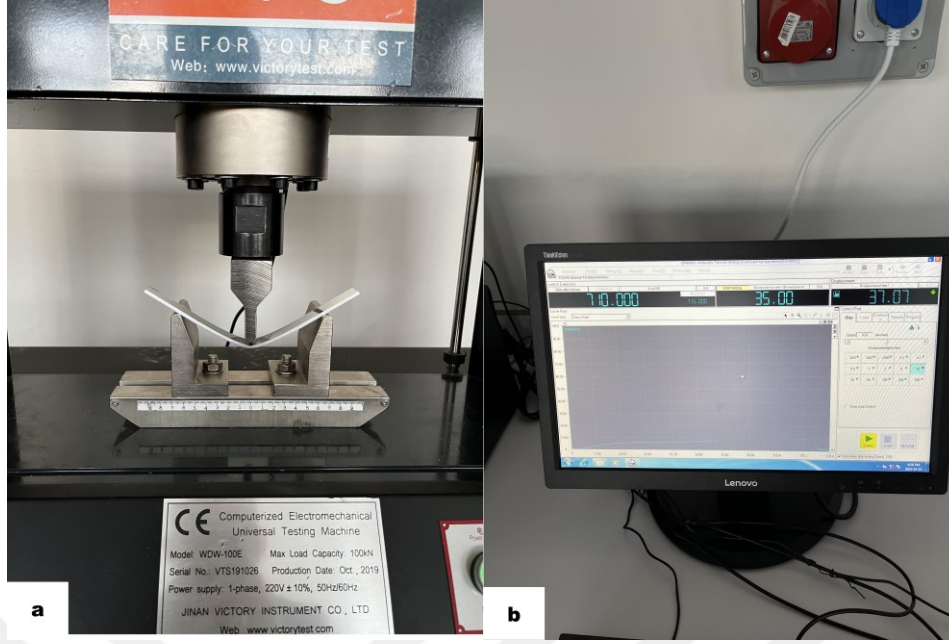
Şekil 3.6. Çekme deney düzeneği

3.2.4. Üç Nokta Eğme Testi

Kaynak edilen numunelere 5 mm yarıçapa sahip eğme zımbasıyla üç nokta eğme testi uygulanmıştır. Numuneler Şekil 3.7.'de görüldüğü gibi 210 x 20 x 2.5 mm boyutlarda hazırlanmıştır. Eğme testleri Şekil 3.8.a.'da görülen 100 kN kapasiteli Jinan Victory marka eğme test cihazıyla yapılmıştır.

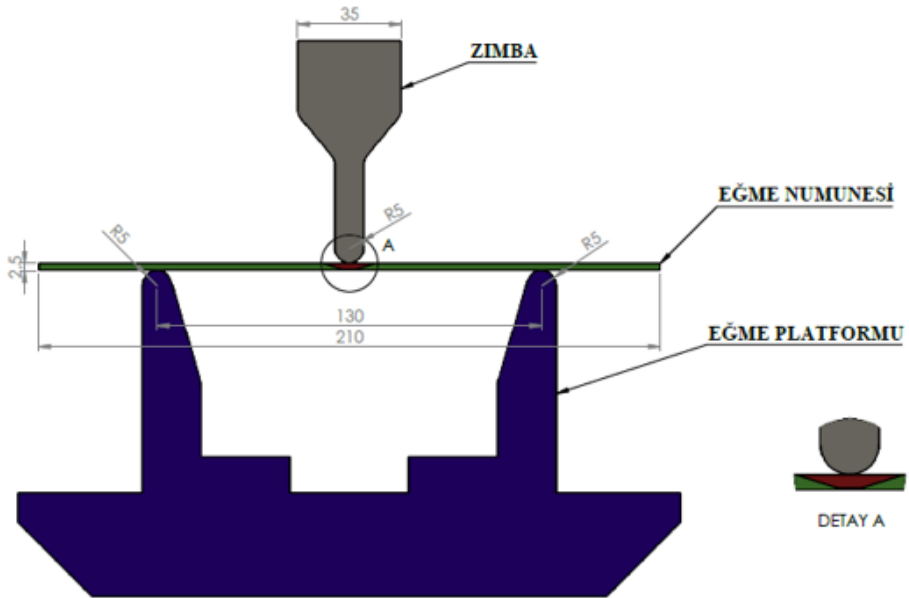


Şekil 3.7. Eğme deney numunesi ölçüleri



Şekil 3.8. a) Eğme test cihazı b) Test kontrol bilgisayarı

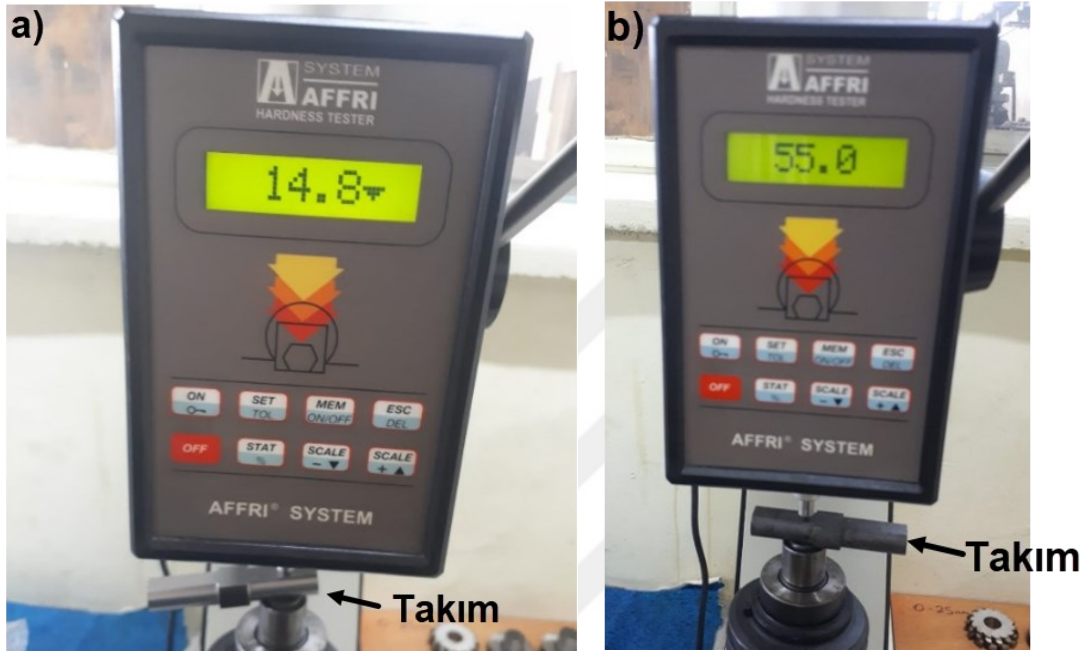
Zımbanın merkez noktası kaynak üst yüzeyinde kaynak bölgesinin merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Platform destekleri merkez mesafesi 130 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Destek noktaları 5 mm radyusa sahiptir. Zımba numuneye kaynak üst yüzeyinden temas etmek suretiyle eğme kuvveti uygulamıştır. Eğme hızı 10 mm/dk olarak seçilmiştir. Eğme test düzeneğinin detaylı gösterimi Şekil 3.9.'da yer almaktadır.



Şekil 3.9. Eğme test düzeneği

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılacak takım için önemli unsurlar takımın tasarımı, malzemesi, sertliğidir. Çalışmada kullanılan H13 çeliğinin sertleştirme işlemi öncesi sertlik testi sonucu 14.8 HRC'dir. Gerekli talaşlı imalat işlemleri yapıldıktan sonra sertleştirme işlemine tabi tutularak 55 HRC sertlik değerine ulaşılmıştır (Şekil 4.1.).

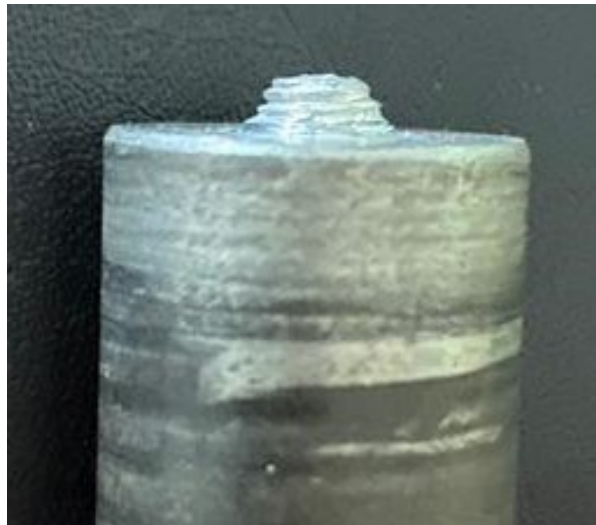


5754-H111 ve 2024-T3 alüminyum alaşımları kendi aralarında ve farklı malzeme ile eşli olmak üzere farklı devir ve ilerleme hızlarında kaynak edilmiştir. Kaynak takımı 12 saniyede 2.3 mm derinliğe dalarak ilerlemesi suretiyle 9 adet kaynaklanmış numune elde edilmiştir. Kaynak işlemine ait görüntü Şekil 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Kaynak işleminin yapılması

Kaynak işlemi sonucunda takımda herhangi bir deformasyon tespit edilmemiştir. Uygun olmayan işlem parametreleri sonucu Şekil 4.3.'de gösterilen konik dişli takımın pimi üzerinde yer alan dişli bölgeye az miktarda alüminyum malzemenin sıvandığı görülmektedir.



Şekil 4.3. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımın işlem sonrası görüntüsü

Deneysel çalışmalar sırasında ilerleme hızının yüzey kalitesine etkisini incelemek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada 2024-T3 ve 5754-H111 alüminyum alaşımları dişli konik takım kullanılarak, 2000 dev/dk dönme hızıyla 30, 50 ve 80 mm/dk ilerleme hızlarında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir. İlerleme hızı arttıkça Şekil 4.4.'de görüldüğü üzere kaynak dikişinin yüzey kalitesinin bozulduğu ve kaynak dikişinde boşluk oluşumu görülmüştür.

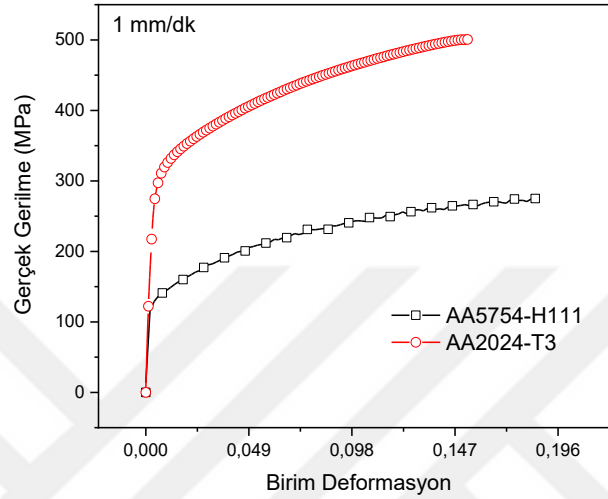


Şekil 4.4. Kaynak hızının yüzey kalitesine etkisi

Patel ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada kaynak hızı, takım dönüş hızı ve takım geometrisinin kaynak kalitesinde etkili olduğunu vurgulamışlardır. Bunun yanında Iqbal ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada kaynak ilerleme çizgisinin sol tarafında sağ tarafa göre sıcaklığın daha fazla oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca dalma derinliğinin etkisini de belirtmişlerdir. Yüzey kalitesindeki bozulmalar uygun olmayan işlem parametrelerinin kullanılmasının yanında takıma uygun parametrelerin tercih edilmemiş olmasından kaynaklanmaktadır. Kaynak dikişindeki farklı bölgelerinde farklı sıcaklığın oluşması ve malzeme akışındaki farklılık sebebiyle kaynak dikiş bölgesinin sol tarafında daha kötü bir yüzey gözlemlenmektedir. Ayrıca dalma derinliğinin doğru şekilde uygulanmamış olması yüzeyden talaş kaldırılması ve kaynak dikiş bölgesi çevresine yığılmasına sebep olmuştur. Buradaki en önemli nokta parametrelerin etkilerini çok iyi anlayarak optimize edebilmektir.

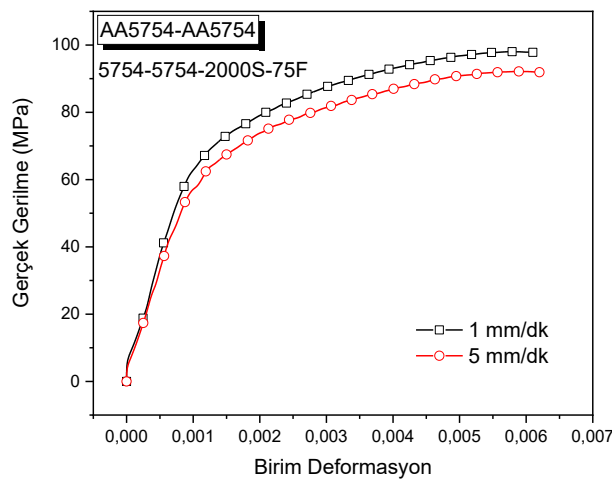
4.1. Çekme Testi Sonuçları

Hem kaynaklı numuneler hem de kaynak yapılmamış numuneler 1 mm/dk çekme hızıyla test edilmiştir. Kaynaklı ya da kaynaklız bütün numunelerde gevrek kırılma görülmüştür. Şekil 4.5.'de kaynaklanmamış AA2024-T3 alaşımı AA5754-H111 alaşımının gerilme birim deformasyon eğrisi verilmiştir.



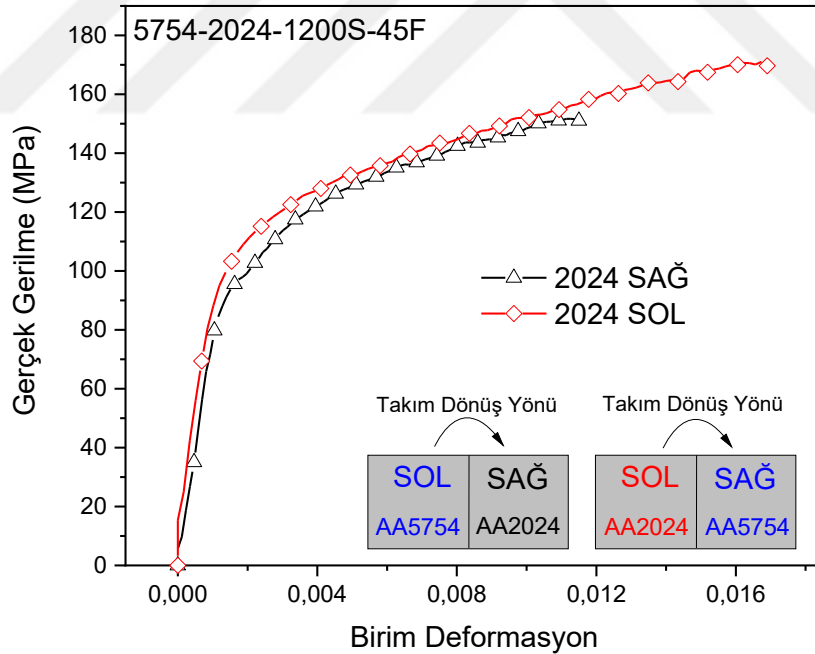
Şekil 4.5. Ana malzemelerden alınan numunelerin çekme dayanım grafiği

Sürtünme karıştırma kaynağında deformasyon hızının etkisini incelemek için 2000 devir ve 75 mm/dk ilerleme hızında AA5754-AA5754 iki plaka kaynatılmıştır. Bu plakadan alınan çekme numuneleri iki farklı hızda (1 mm/dk ve 5 mm/dk) çekilmiştir. Şekil 4.6.'da görüleceği üzere deformasyon hızının artması mukavemette bir miktar düşüğe sebep olmuştur.



Şekil 4.6. Kaynaklanmış AA5754 alaşımında farklı deformasyon hızlarında gerilme gerinim grafiği

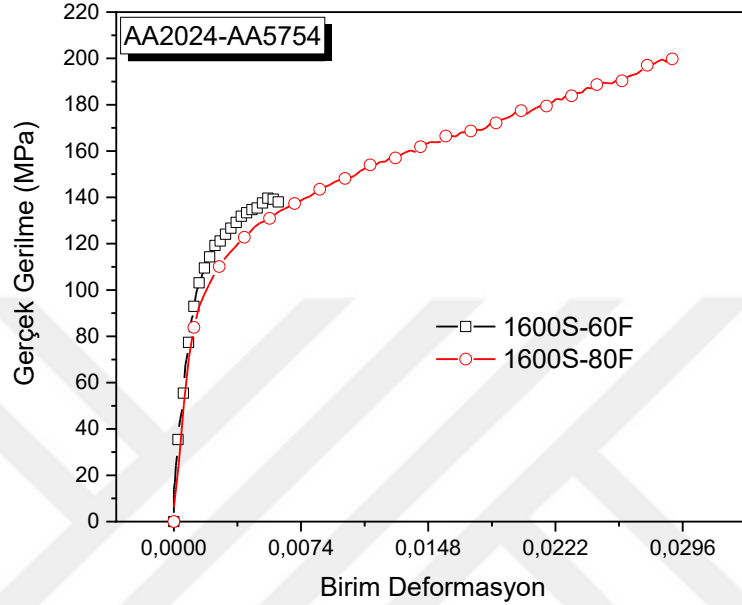
Sürtünme karıştırma kaynağında farklı malzemelerin kaynaklanmasında, malzemenin konumlandırılması incelenmiştir. Kaynak edilecek AA5754 ve AA2024 plakalar kaynak tablasına bağlanırken takım ilerleme yönünün sağ ve soluna olmak üzere iki farklı şekilde yerleştirip, aynı takım dönme ve ilerleme hızlarında, aynı şartlarda kaynak edilmiştir. İşlem prosesi takımın saat yönünde dönüşü ile tamamlanmıştır. Şekil 4.7.'de görüleceği gibi malzemenin hangi tarafa konumlandırılacağı da önemli bir parametredir. AA2024 alaşımının solda olması ile mukavemet artışı olmuştur. Bunun sebebinin ise takım ilerlerken saat yönünde dönmesi itibarıyla soldan aldığı yüksek dayanıma sahip AA2024 malzemesini sağa doğru taşıyarak daha dayanıklı bir kaynak dikişi oluşturduğu görülmektedir. Verma ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada ilerleme tarafı ile yığılma tarafı arasında sıcaklık farklılıkları olduğunu tespit etmişlerdir. Bu farkın malzemelerin konumlarının değişmesiyle birlikte mekanik özelliklerde farklılığa neden olduğu düşünülmektedir. Ma ve ark. (2018) ise kaynak bölgesindeki mekanik özelliklerin kaynak takımına bağlı olmakla beraber işlem parametrelerine de bağlı dolayısıyla malzeme akışına da bağlı olduğunu vurgulamışlardır.



Şekil 4.7. Konumlandırmanın kaynak dikiş mukavemetine etkisi

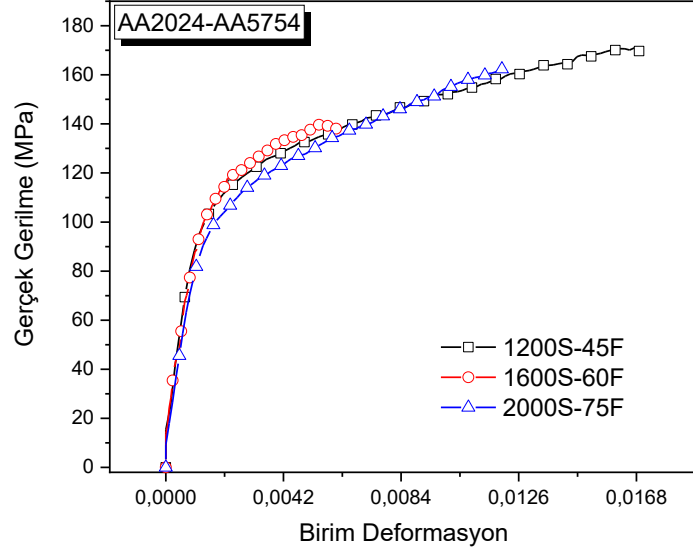
Farklı malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında ilerleme hızının etkisi incelenmiştir. AA2024-AA5754 alaşım çiftleri 1600 devir dönme hızı, 60 mm/dk ve 80 mm/dk hızlarda takım saat yönünde dönecek şekilde kaynatılmıştır. Şekil 4.8.'de görüldüğü üzere 80 mm/dk ilerleme hızında daha yüksek mukavemet ve süneklik elde edilmiştir. Li ve

ark. (2020) yaptıkları çalışmada kaynak dikiş mukavemetinin ilerleme hızıyla önce arttığı, optimum noktaya ulaştıktan sonra ise ilerleme hızındaki artış ile azaldığı görülmüştür. Bobin takımla yapılan sürtünme karıştırma kaynağında ilerleme hızının çekme gerilmesi ve uzama üzerine etkisini inceleyen Wen ve ark. (2020) ilerleme hızı artışıyla çekme dayanımı ve uzamanın artışı belirli bir değere kadar gözlemlenmiştir.



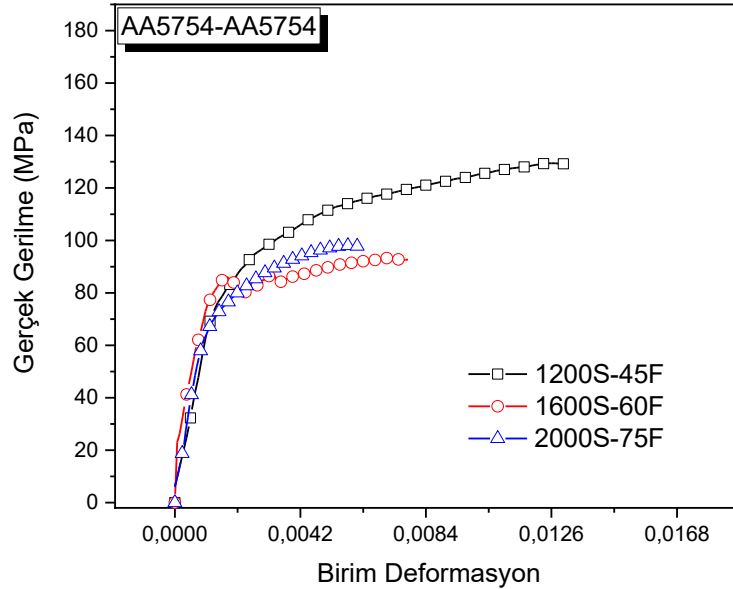
Şekil 4.8. İlerleme hızının kaynak mukavemetine etkisi

AA2024-AA5754 malzemeleri sürtünme karıştırma kaynağı ile farklı parametrelerde kaynaklanmıştır. Şekil 4.9.'da görüleceği üzere en yüksek mukavemet ve süneklik değeri 1200 dev/dk ve 45 mm/dk ilerleme hızında elde edilmiştir. Kaynak parametreleri farklılığı sebebiyle kaynak dikiş mukavemetinin farklılık gösterebileceği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Sıcaklık farklılıklarının iç yapıdaki tane boyutlarını değiştirebileceği vurgulanmıştır (Doktaş, 2019; Iqbal ve ark., 2019; Keskin, 2019; Patel ve ark., 2019). Farklı kaynak parametreleri nedeniyle kaynak dikişinde daha yüksek dayanım ve süneklik elde edilmiştir.



Şekil 4.9. AA2024-5754 kaynak numunesinin çekme dayanım grafiği

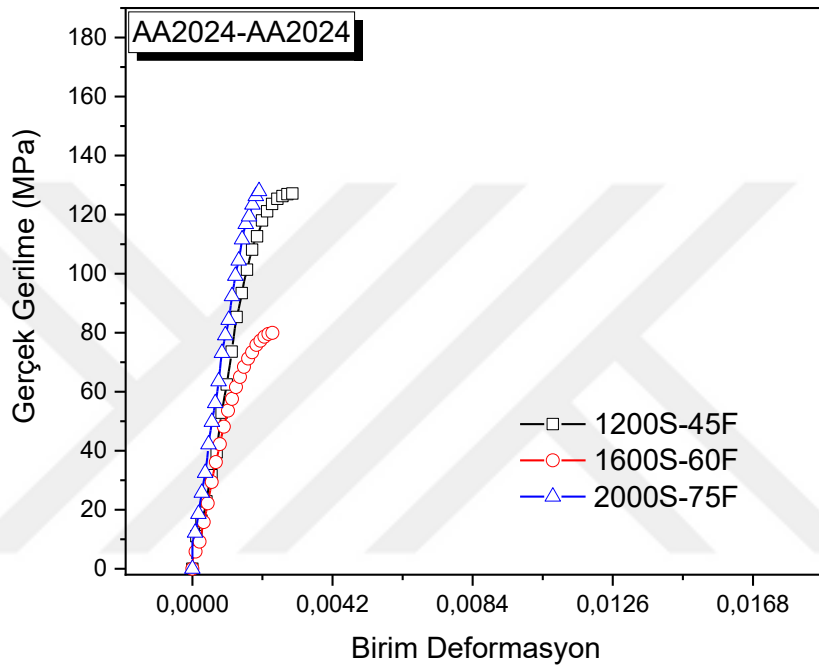
AA5754-AA5754 malzemeleri sürtünme karıştırma kaynağı ile farklı parametrelerde kaynaklandığında devir sayısı ve ilerleme hızının yine önemli olduğu görülmüştür. Şekil 4.10.'da görüleceği üzere en yüksek mukavemet ve süneklik değeri 1200 dev/dk ve 45 mm/dk ilerleme hızında elde edilmiştir. Diğer parametrelerde süneklik ve mukavemet düşmektedir. Benzer bir çalışma yapılan bu alışımda farklı takımla düşük devir sayısında (450-900 rpm) daha iyi mukavemet değerleri elde etmişlerdir (Çelik ve Tolun, 2021).



Şekil 4.10. AA5754-5754 kaynak numunesinin çekme dayanım grafiği

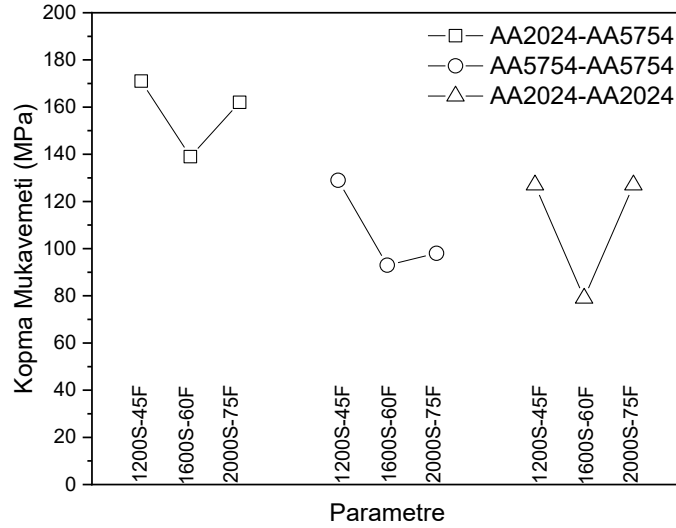
AA2024-AA2024 malzemeleri sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklandığında ise yine devir sayısı ve ilerleme hızının önemli olduğu görülmüştür. Şekil 4.11.'de görüleceği

üzere malzeme plastik şekil değişimine başladıktan hemen sonra kopma meydana gelmiştir. En yüksek mukavemet değerleri 1200 dev/dk-45 mm/dk ve 2000 dev/dak-75 mm/dk ilerleme hızı parametrelerinde elde edilmiştir. Malzemelerin ısı etkisi altında kalan kaynak bölgesinde tanecik büyümesi sonucu sertlik artışının olduğu tespit edilmiştir (Jamalian ve ark., 2016; Iqbal ve ark., 2020). Kaynak hatalarının yanında malzemelerde meydana gelen sertlik artışı, kaynaklı malzemelerin kaynaklı malzemelere göre daha az süneklik göstererek daha kısa sürede kırılmalarına neden olmuştur.



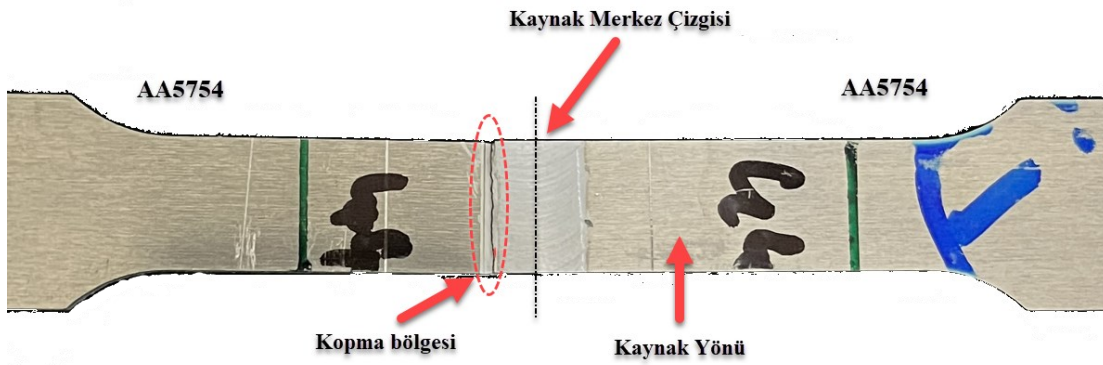
Şekil 4.11. AA2024-2024 kaynak numunesinin çekme dayanım grafiği

Yapılan incelemelerde en yüksek kopma mukavemeti değerlerinin AA2024-AA5754 plaka çiftine ait olduğu tespit edilmiştir. En yüksek kopma mukavemet değeri ise 1200 dev/dk takım dönme hızı ve 45 mm/dk ilerleme hızı ile yapılan kaynak dikişinde elde edilmiştir (Şekil 4.12.). Mahany ve ark. (2017) 2024-T4 malzemesi üzerinde sürtünme karıştırma kaynağı deneylerinde maksimum dayanımı 1200 d/dk takım dönme hızında elde etmişlerdir.



Şekil 4.12. Farklı kaynak parametrelerinde kopma mukavemetinin değişimi

AA5754 alaşımlı iki levhanın birleşiminden alınan numune çekme testine tabi tutulduğunda, kopma mekanizmasının kaynak prosesinde takım ilerleme yönünün sol tarafından geliştiği ve çatlağın soldan merkeze doğru ilerleyerek kopmaya sebep olduğu Şekil 4.13.'de gösterilmiştir. Bu kopma mekanizması, aynı malzeme ve farklı malzeme türleriyle yapılan kaynaklarda da mevcuttur.



Şekil 4.13. AA5754 numunelerin çekme testi sonucu kopma bölgesi

Çekme deneyleri sonrası incelenen farklı bir numunede ise iç yapının homojen olmadığı görülmüştür. Bunun yanında malzemenin alt ve üst bölgeleri, yani kaynak üst yüzeyi ve alt yüzeyinde, kaynak işleminin etkisi ile kesitle bütünlük göstermeyen yüzeylerde boşluklar gözlenmiştir. Bu boşluklar, malzemenin deformasyona maruz kalması ile yüzeyde çentik etkisi oluşturarak küçük çatlakların meydana gelmesi sonucu kopmaya sebep

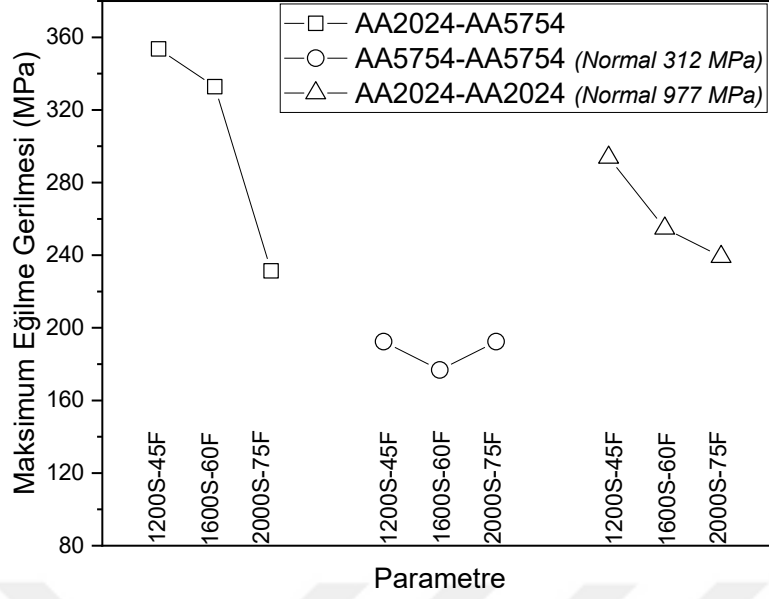
olmaktadır. Şekil 4.14.'de iç yapı görseli yer almaktadır. Kumar ve ark. (2020) takım geometrisinin karıştırma verimliliğine etkisini göstermişlerdir. Bu yüzden takım geometrisi tasarlanırken yeterli ısı oluşturma özelliğini göz ardı etmeden, malzemeyi homojen olarak karıştırabilecek bir takım tasarımı yapılmalıdır. Türkyılmaz ve ark. (2019) da en verimli takım geometrisini araştırılması üzerine çalışma yapmıştır. Çalışmada homojen karışımın yanında yeterli ısı oluşumunun etkisi vurgulanmıştır.



Şekil 4.14. Çekme testi sonrası kopan bir numunenin kopma bölgesi

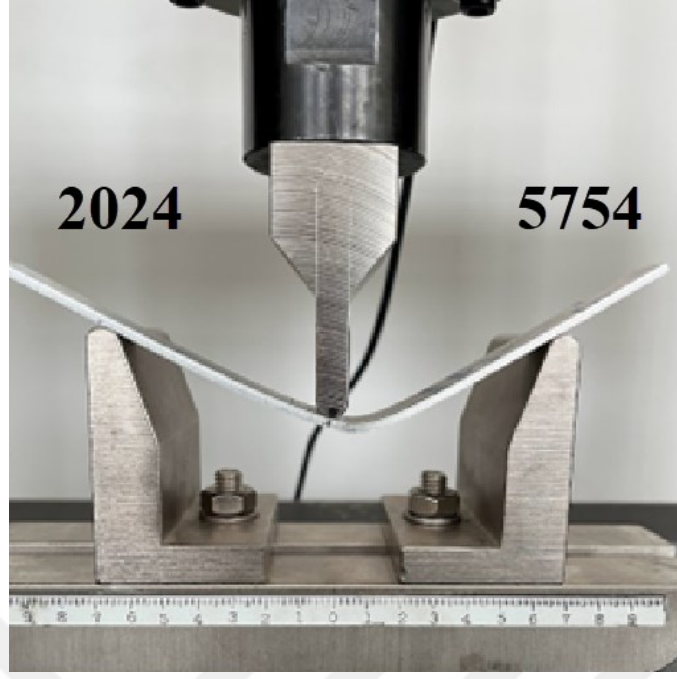
4.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonucu

Eğme testlerinin sonuçları Şekil 4.15.'de görülmektedir. Grafik incelendiğinde, eğilme mukavemetleri kaynak numunelerine yapılan çekme testleri sonuçlarını teyit eder niteliktedir. En yüksek eğilme dayanımı 1200 dev/dk ve 45 mm/dk işlem parametrelerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Üç nokta eğme testi sonuçları

AA5754-AA2024 alaşımların sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmiş numunesine 10 mm/dk hızla eğme kuvveti uygulandığında numunenin, akma mukavemeti diğer alaşıma nazaran düşük olan AA5754 alaşımı tarafından eğildiği görülmüştür (Şekil 4.16). Bu da kaynak dikişinin iki malzemenin karışımı olması dolayısıyla akma mukavemeti düşük olan 5754 alaşımından daha mukavemetli olduğunu göstermektedir. AA1050-H14 ve AA5083-H111 malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir numuneleri üç nokta eğme testine tabi tutan Msomi ve ark. (2020) eğilmenin akma mukavemeti düşük olan AA1050-H14 malzemesine doğru gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Bu tez kapsamında da benzer değerler elde edilmiştir.



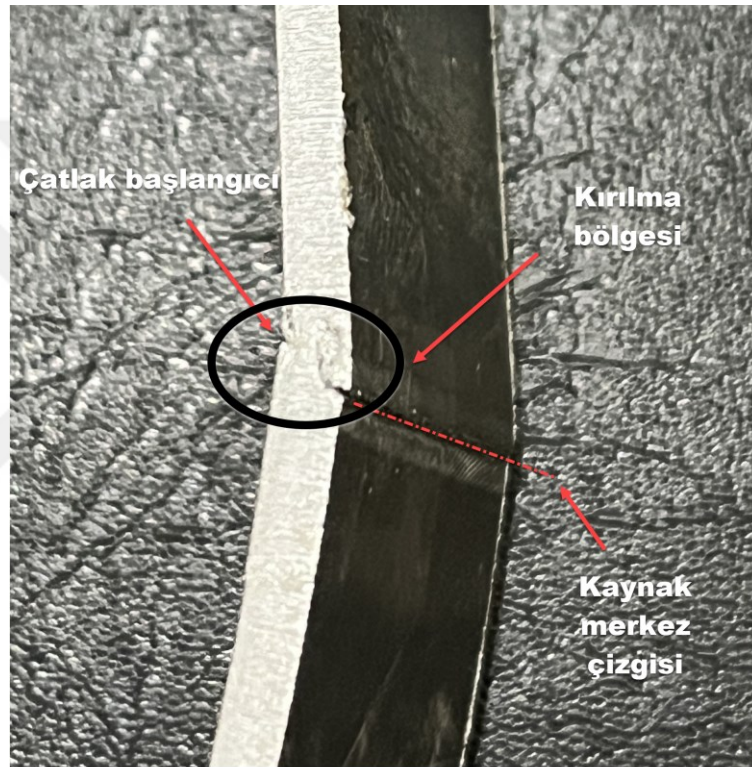
Şekil 4.16. AA2024-5754 kaynak numunesi eğme testi görüntüsü

Şekil 4.17.'de AA2024 alaşımında iç bölgede oluşan kaynak hatası görülmektedir. Kaynak yüzeyinde hiçbir problem görülmemesine rağmen, deney numunesi kesildiğinde iç kısımlarda boşluk oluşumlarından dolayı bu malzemelerin mukavemet değerleri düşük çıkmıştır. Bu nedenle çok karmaşık bir proses yapısına sahip olan sürtünme karıştırma kaynağında en uygun parametrelerin belirlenmesi gereklidir. Malzemelerin tam manasıyla doldurulamadığı durumlarda bu gibi hataların ortaya çıkması muhtemeldir. İşlem parametreleri optimize edilerek en uygun parametrelerin kullanılması gerekmektedir.



Şekil 4.17. AA2024-T3 alaşımında kaynak hatası

Eğilme testindeki kırılma durumu incelendiğinde Şekil 4.18.'de kırılma mekanizması görülmektedir. Eğme zımbasının üst yüzeye temas etmesiyle başlayan eğilme sırasında kaynak üst yüzeyinde kaynak ilerleme yönünün solunda çatlak oluşmaktadır. Bu çatlağın kaynak alt yüzeyine doğru kaynak eksenine yaklaşarak çapraz şekilde ilerlemesi numunenin iç yapısında kırılmalara ve kopmalara sebep olmaktadır. Eğilme kuvvetine bir süre dayanım gösteren numune iç yapıda meydana gelen bu kopmaların sonucunda eğilme dayanımını yitirmektedir.



Şekil 4.18. Eğilme testinde kırılan numune

Tablo 4.1. Literatürdeki bulgular ve deneysel bulgular

Alaşım çifti	Kaynak Çekme Dayanımı (MPa)	Ana Malzeme Çekme Dayanımı (MPa)	Fark (MPa)	Verimlilik (%)	Takım Geometrisi	Referans
2024-T4	335.0	427	92.00	78.45	Silindirik	(Resan ve ark., 2018)
6061-T6	220.3	290	69.70	75.96	Triflat	(Huang ve ark., 2019)
5052-H32	208.9	214	5.10	97.61	Kare konik	(Shanavas ve Murugan, 2018)
5052	205.0	214	9.00	95.79	Konik	(Fouladi ve ark., 2017)
5754-H111	223.8	240	16.20	93.25	Konik	(Bevilacqua ve ark., 2017)
5086-H34	264.5	280	15.50	94.46	Kare	(Jamalian ve ark., 2016)
2024-T4/7075-T6	378.7	427/503 (Ort:465)	86.30	81.44	Dişli konik	(Mahany ve ark., 2017)
5754-H114/Yumuşak çelik	222.3	240,93/440 (Ort:340.465)	118.16	65.29	Silindirik	(Karakizis ve ark., 2019)
2024-T3/5754-H111	172.0	400/240 (Ort:320)	148.00	53.75	Konik	Bu tez çalışması
5754-H111	130.0	240	110.00	54.16	Konik	Bu tez çalışması
2024-T3	128.0	400	272.00	32.00	Konik	Bu tez çalışması
2024	204.2	306.5	102.30	66.62	TIG Kaynağı	(Mehdi ve Mishra, 2019)
5754	183.0	237.1	54.1	77.18	TIG Kaynağı	(Akçakale, 2021)

Literatürde yapılan sürtünme karıştırma kaynağı verilerinin yanında tungsten elektrod kullanılarak gaz altı kaynağı ile yapılan kaynak dikişlerinin verimi de tabloda verilmiştir. Her iki malzemede de ısıl işlem olmaması kaynak sonucu verimi olumlu etkilemiştir. Isıl işlem olmaması ergime sıcaklığıyla beraber dayanım düşüş oranını azaltmıştır. 5754 alüminyum alaşımının kaynak kabiliyetinin yüksek olması sebebi ile diğer alaşıma göre daha yüksek verimlilik elde edilmiştir.

Sürtünme karıştırma deneyleri incelendiğinde kaynak numunelerinin çekme dayanımlarında en düşük %65 oranında verimlilik tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda ise maksimum %54 verime ulaşıldı. Numunelerde elde edilen bu düşük kaynak verimliliğinin nedeni olarak, malzemelere uygun olmayan işlem parametreleri olduğu düşünülmektedir. Bu alanda daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Parametrelerin sayısı artırılarak en uygun aralığın tespit edilmesi gereklidir. Bunun dışında mikroyapıdaki değişimlerinde incelenerek değerlendirme yapılmalıdır. Bilindiği üzere sıcaklıkla beraber iki farklı özellikteki alaşım farklı özellikler gösterecektir. Bu durum verimliliği etkileyecektir. Deney işlemlerinin CNC dik işleme merkezinde yapılması sebebiyle dalma esnasında oluşan baskı kuvveti ve ilerleme sırasında oluşan aksel kuvvetler ölçülemedi. Deneylerin sürtünme karıştırma kaynağı için özel imal edilmiş makinelerde yapılması daha uygundur. Bu sayede işlem sırasında kontrol edilmesi gereken parametrelere hâkim olunarak,

ölçülebilir değerlerle daha verimli kaynak yapmak mümkün olacaktır. Deney sırasında oluşan ısınma sebebiyle kaynak alt tablasının ısı altında tokluğunu koruması ve ısı çarpılmaları önlemek amacıyla sıcak iş takım çeliklerinden imal edilmesi oluşabilecek boyutsal kararsızlığı önleyecektir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

AA2024-T3 ve AA5754-H111 alaşımları, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan iki alaşımdır. Bu iki alaşımın farklı özellikleri nedeniyle, çeşitli uygulamalarda bir arada kullanılabilirler. Bu durumda, farklı alaşımların birleştirilmesi için uygun bir yöntem kullanılması gerekir.

Bu tez çalışmasında, SKK yöntemi kullanılarak aynı ve farklı alaşımlarının birleştirilmesi incelenmiştir. Çalışmada, devir sayısı ve ilerleme hızı gibi kaynak parametrelerinin malzeme özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Malzemeler, birbiriyle eş olarak ve farklı olarak birleştirme yapılmıştır. SKK yöntemi, farklı devir sayıları ve ilerleme hızları kullanılarak uygulanmıştır. Kaynak sonrası çekme ve 3 nokta eğme gibi mekanik testler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Mekanik testler sonucunda, SKK yönteminde kullanılan devir sayısı ve ilerleme hızı parametreleri, numunelerin mekanik özelliklerini etkilemiştir. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin mukavemet değerleri seçilen parametrelerde düşük çıkmıştır. Burada tabii ki SKK yönteminin etkilendiği birçok parametrenin olması önemli bir etkidir. Bu parametrelerin değerlendirilmesi ise oldukça zaman alıcı ve maliyet oluşturmaktadır. Başta takım tasarımı olmak üzere, dalma derinliği, devir sayısı, ilerleme miktarı, takım dalma açısı gibi parametrelerden çok sayıda numune yapıp detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca bu işlemlerin iyi bir modelleme sürecinden sonra daha etkili birleştirmeler yapacağı da kuşkusuzdur. Özellikle her malzeme için örnek bir takım tasarımı ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi elzemdir. Farklı malzemelerde numune konumlandırılması ve takım dönme yönü yine önemli parametrelerden olmuştur.

SKK uygulanmasından sonra numune yüzeylerinde herhangi bir problem görünmezken, lazer tezgahında çekme deneyi numunelerinde iç kısımlarda boşluklar olduğu tespit edilmiştir. Bu boşluklar özellikle AA2024 alaşımında düşük süneklik değerlerinin oluşmasına sebep olmuştur.

Çalışmanın sonuçlarında, SKK yönteminin 2024-T3 ve 5754-H111 alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde bir yöntem olarak kullanılabileceği görülmekle birlikte, kaynak parametrelerinin malzeme özellikleri üzerindeki etkisi dikkate alınarak uygun parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Değerlerin ana malzeme değerlerine yakın hale getirilmesi için işlem parametreleri çok detaylı çalışılmalıdır. Bu tez kapsamında

yöntemin uygulanabilirliği ve ön çalışmalar tamamlanmıştır. Mevcut bir CNC altyapısıyla birleştirme işlemi yapılmıştır. Birleştirilen bölgelerin malzeme iç yapısında değerlendirmeye alınmalı ve bu doğrultuda parametreler seçilmelidir.



KAYNAKLAR

- Abd Elnabi, M. M., Abdel-Mottaleb, M., Osman, T., & El Mokadem, A. (2019). Influence of friction stir welding parameters on metallurgical and mechanical properties of dissimilar AA5454–AA7075 aluminum alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 1684-1693.
- Ahmed, M., Ataya, S., Seleman, M. E.-S., Ammar, H., & Ahmed, E. (2017). Friction stir welding of similar and dissimilar AA7075 and AA5083. *Journal of Materials Processing Technology*, 242, 77-91.
- Akçakale, N. (2021). Mechanical and Microstructural Properties of AL 5754 Alloy Joined by GMAW and GTAW. *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, 6(1), 23-36.
- Aldanondo, E., Vivas, J., Álvarez, P., & Hurtado, I. (2020). Effect of tool geometry and welding parameters on friction stir welded lap joint formation with AA2099-T83 and AA2060-T8E30 aluminium alloys. *Metals*, 10(7), 872.
- Alüminyum, S. (2023a). *AA2024 Kimyasal Bileşimi*. Seykoç Alüminyum. <https://seykoc.com.tr/icerik/2024?dil=tr>, Erişim Tarihi: 10.04.2023
- Alüminyum, S. (2023b). *AA5754 Kimyasal Bileşimi*. Seykoç Alüminyum. <https://seykoc.com.tr/icerik/5754?dil=tr>, Erişim Tarihi: 15.04.2023
- Avcı, U. (2019). *Yeni bir yaklaşımla partikül takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş hibrit özellikli tabakalı kompozit üretimi ve sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinin incelenmesi* [Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=T1mWGp9MngYYkCSgiJvtVhEUEMXh6Xsdzbxwxs-NIdmekcZQfN1kTr5voalj5DB>
- Aydın, A. (2017). *Sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) ile kaynak edilmiş alüminyum alaşımlarının yorulma ömrünün artırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi]. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=fS4sqEZr79C_n60Rk6MjFV97IzG8E67zcx2zC5iGThLIBXTpx26QzJMobncGILF

- Bevilacqua, M., Ciarapica, F. E., D’Orazio, A., Forcellese, A., & Simoncini, M. (2017). Sustainability analysis of friction stir welding of AA5754 sheets. *Procedia CIRP*, 62, 529-534.
- Beygi, R., Zarezadeh Mehrizi, M., Akhavan-Safar, A., Mohammadi, S., & da Silva, L. F. (2023). A Parametric Study on the Effect of FSW Parameters and the Tool Geometry on the Tensile Strength of AA2024–AA7075 Joints: Microstructure and Fracture. *Lubricants*, 11(2), 59.
- Booth, M. (2016). *Effects of Processing Parameters on Friction Stir Welded Lap Joints of AA7075-T6 and AA6022-T4* [Master Thesis, University of Waterloo]. <http://hdl.handle.net/10012/11021>
- Bozkurt, Y., Türker, A., Soytemiz, G., & Salman, S. (2019). The Investigation and Comparison of Friction Stir Spot Welding and Electrical Resistance Spot Welding of AA2024 Aluminium Alloy Joints. *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 3(1), 52-58.
- Cabibbo, M., Forcellese, A., Santecchia, E., Paoletti, C., Spigarelli, S., & Simoncini, M. (2020). New approaches to friction stir welding of aluminum light-alloys. *Metals*, 10(2), 233.
- Çelik, S., & Tolun, F. (2021). Effect of double-sided friction stir welding on the mechanical and microstructural characteristics of AA5754 aluminium alloy. *Materials Testing*, 63(9), 829-835. <https://doi.org/doi:10.1515/mt-2021-0009>
- Demirdöğen, M. F., Kılıç, S., & Öztürk, F. (2022a). Sürtünme Karıştırma Kaynağı. In B. Bayram (Ed.), *The 14th International Scientific Research Congress Full Text Book* (pp. 138-145). Asos Yayınevi.
- Demirdöğen, M. F., Kılıç, S., & Öztürk, F. (2022b). H13 Sürtünme Karıştırma Kaynak Takımı Üretiminin Araştırılması. In B. Bayram (Ed.), *The 14th International Scientific Research Congress Full Text Book* (pp. 199-206). Asos Yayınevi.

- Dimopoulos, A., Vairis, A., Vidakis, N., & Petousis, M. (2021). On the Friction Stir Welding of Al 7075 Thin Sheets. *Metals*, 11(1), 57. <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/1/57>
- Doktaş, O. (2019). *Sürtünme Karıştırma Kaynağının Farklı Kalınlıktaki Alüminyum Parçalara Uygulanması* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi]. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=npGs9H39x7G6401x51yqpAA2MkvyNQ_DMIC0P11RDSgCN0Dv1e4DHsXkKaPDA36V
- El-Sayed, M., Shash, A., & Abd-Rabou, M. (2018). Finite element modeling of aluminum alloy AA5083-O friction stir welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 252, 13-24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.008>
- Emirlioğlu, A. (2017). *Farklı alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağında kaynak parametrelerinin kaynak edilebilirliğine etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=vbVkXe1KChYWNElr1MuLZlw9pG8a-xyAmyj0Oeghjer1HgCVz7hUHauKT5b449>
- Fathi, J., Ebrahimzadeh, P., Farasati, R., & Teimouri, R. (2019). Friction stir welding of aluminum 6061-T6 in presence of watercooling: Analyzing mechanical properties and residual stress distribution. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(2), 107-115.
- Forcellese, A., & Simoncini, M. (2020). High-speed deformation of pinless fswed thin sheets in aa6082 alloy. *Metals*, 10(1), 15.
- Fouladi, S., Ghasemi, A. H., Abbasi, M., Abedini, M., Khorasani, A. M., & Gibson, I. (2017). The effect of vibration during friction stir welding on corrosion behavior, mechanical properties, and machining characteristics of stir zone. *Metals*, 7(10), 421.
- Fuse, K., & Badheka, V. (2019). Bobbin tool friction stir welding: a review. *Science and Technology of Welding and Joining*, 24(4), 277-304.

- Gangwar, K., & Ramulu, M. (2018). Friction stir welding of titanium alloys: A review. *Materials & Design*, 141, 230-255.
- GmbH, D. E. (2023). Retrieved 09.04.2023 from <https://www.doerrenberg.de/en/special-steels-en/>
- Gopi, S., & Mohan, D. G. (2021). Evaluating the Welding Pulses of Various Tool Profiles in Single-Pass Friction Stir Welding of 6082-T6 Aluminium Alloy. *Journal of Welding and Joining*, 1, 01-11. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.3.7>
- Hadji, I., Badji, R., Gaceb, M., & Cheniti, B. (2022). Dissimilar FSW of AA2024 and AA7075: effect of materials positioning and tool deviation value on microstructure, global and local mechanical behavior. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(7), 2391-2403.
- Hamilton, C., Dymek, S., Węglowska, A., & Pietras, A. (2018). Numerical simulations for Bobbin tool friction stir welding of aluminum 6082-T6. *Archives of Metallurgy and Materials*, 63, 1115-1123. <https://doi.org/10.24425/123784>
- Hu, Y., Liu, H., & Fujii, H. (2019). Improving the mechanical properties of 2219-T6 aluminum alloy joints by ultrasonic vibrations during friction stir welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 271, 75-84.
- Huang, Y., Meng, X., Lv, Z., Huang, T., Zhang, Y., Cao, J., . . . Feng, J. (2019). Microstructures and mechanical properties of micro friction stir welding (μ FSW) of 6061-T4 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 1084-1091.
- Huang, Y., Wang, Y., Wan, L., Liu, H., Shen, J., dos Santos, J. F., . . . Feng, J. (2016). Material-flow behavior during friction-stir welding of 6082-T6 aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1), 1115-1123.
- Iqbal, M. P., Jain, R., & Pal, S. K. (2019). Numerical and experimental study on friction stir welding of aluminum alloy pipe. *Journal of Materials Processing Technology*, 274, 116-258.

- Iqbal, M. P., Vishwakarma, R. K., Pal, S. K., & Mandal, P. (2020). Influence of plunge depth during friction stir welding of aluminum pipes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. <https://doi.org/10.1177/0954405420949754>
- Jain, R., Pal, S. K., & Singh, S. B. (2017). Finite element simulation of temperature and strain distribution during friction stir welding of AA2024 aluminum alloy. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 98(1), 37-43.
- Jamalian, H. M., Farahani, M., Givi, M. B., & Vafaei, M. A. (2016). Study on the effects of friction stir welding process parameters on the microstructure and mechanical properties of 5086-H34 aluminum welded joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1-4), 611-621.
- Jayaprakash, S., Siva Chandran, S., Sathish, T., Gugulothu, B., Ramesh, R., Sudhakar, M., & Subbiah, R. (2021). Effect of Tool Profile Influence in Dissimilar Friction Stir Welding of Aluminium Alloys (AA5083 and AA7068). *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021.
- Karakizis, P. N., Pantelis, D. I., Dragatogiannis, D. A., Bougiouri, V. D., & Charitidis, C. A. (2019). Study of friction stir butt welding between thin plates of AA5754 and mild steel for automotive applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9), 3065-3076. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03388-9>
- Kasman, Ş., & Sertan, O. (2019). AA7075/AA6013 Alaşım çiftinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde pim çakışmasının mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 436-446.
- Kaya, F. (2016). *Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen partikül takviyeli ve takviyesiz tozmetal 7039 Al alaşımının mikro yapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi]. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=OykDDeWBWTL9-Wm52sZBrBu2IYc5WHZeSMKVG8ObDXoVZn_VUFXT4NkU8WJ6TFPK

- Keskin, E. Y. (2019). *Investigation of weld quality for friction stir welding of extruded 6000 series aluminum alloys* [Yüksek Lisans Tezi, Türk-Alman Üniversitesi]. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=wf-FPgY-5qjHEzEoOgvMs4qZQ8NnwLE_jH9iNJzjLTOXHJkiWR_kbMCMvdfTqImp
- Kumar, K. A. (2022). Effect of tool plunge depth (TPD) on the microstructure and mechanical properties of FSW dissimilar joints reinforced with SiC nano particles. *Materials Today: Proceedings*, 52, 355-360.
- Kumar Rajak, D., Pagar, D. D., Menezes, P. L., & Eyvazian, A. (2020). Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34(24), 2613-2637.
- Lambiase, F., Paoletti, A., & Di Ilio, A. (2018). Forces and temperature variation during friction stir welding of aluminum alloy AA6082-T6. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(1), 337-346.
- Li, J., Su, M., Qi, W., Wang, C., Zhao, P., Ni, F., & Liu, K. (2020). Mechanical property and characterization of 7A04-T6 aluminum alloys bonded by friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 52, 263-269.
- Ma, Z., Feng, A., Chen, D., & Shen, J. (2018). Recent advances in friction stir welding/processing of aluminum alloys: microstructural evolution and mechanical properties. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 43(4), 269-333.
- Mahany, M., Abbas, R. R., Ahmed, M., & Abdelkader, H. (2017). Influence of tool rotational speed and axial load in friction stir welding (FSW) of high strength aluminium alloys. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 6(02), 114-120.
- Mehdi, H., & Mishra, R. (2019). Study of the influence of friction stir processing on tungsten inert gas welding of different aluminum alloy. *SN Applied Sciences*, 1, 1-11.

- Mehta, K. P., & Badheka, V. J. (2017a). Hybrid approaches of assisted heating and cooling for friction stir welding of copper to aluminum joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 239, 336-345.
- Mehta, K. P., & Badheka, V. J. (2017b). Influence of tool pin design on properties of dissimilar copper to aluminum friction stir welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(1), 36-54.
- Msomi, V., & Mbanja, N. (2020). Mechanical properties of friction stir welded AA1050-H14 and AA5083-H111 joint: sampling aspect. *Metals*, 10(2), 214.
- Nie, L., Wu, Y., & Gong, H. (2020). Prediction of temperature and residual stress distributions in friction stir welding of aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(7), 3301-3310.
- Öcalır, Ş. (2019). *Farklı iki malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin bağlantının mekanik özelliklerine ve korozyon direncine etkilerinin incelenmesi* [Doktora Tezi, Tarsus Üniversitesi]. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=aEzj_IdWAsjiSAfK3qw_rBv6yoTerVdEDBT_fu7Xmz6Pr76TiXvzaRG0l8bmbIzG8
- Pan, F., Xu, A., Ye, J., Tang, A., Jiang, X., Ran, Y., & Du, W. (2017). Effects of rotation rate on microstructure and mechanical properties of friction stir-welded Mg-5Al-1Sn magnesium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(1), 389-397.
- Panzer, F., Werz, M., & Weihe, S. (2018). Experimental investigation of the friction stir welding dynamics of 6000 series aluminum alloys. *Production Engineering*, 12(5), 667-677.
- Parente, M., Safdarian, R., Santos, A. D., Loureiro, A., Vilaca, P., & Jorge, R. N. (2016). A study on the formability of aluminum tailor welded blanks produced by friction stir welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(9-12), 2129-2141.

- Patel, V., Li, W., Wang, G., Wang, F., Vairis, A., & Niu, P. (2019). Friction stir welding of dissimilar aluminum alloy combinations: State-of-the-art. *Metals*, 9(3), 270.
- Patil, C., Patil, H., & Patil, H. (2016). Experimental investigation of hardness of FSW and TIG joints of aluminium alloys of AA7075 and AA6061. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 10(37), 325-332.
- Pecanac, M., Zlatanovic, D. L., Kulundzic, N., Dramicanin, M., Lanc, Z., Hadzistević, M., . . . Balos, S. (2022). Influence of Tool and Welding Parameters on the Risk of Wormhole Defect in Aluminum Magnesium Alloy Welded by Bobbin Tool FSW. *Metals*, 12(6), 969.
- Prasad, G. S., Sharmila, T., SrinivasaRao, K., & Reddy, G. M. (2021). Effect of welding process on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of AA2519 Al-alloy. International Conference on Advances in Materials and Manufacturing (ICAMM2021), Chennai, India.
- Rahmi, M., & Abbasi, M. (2017). Friction stir vibration welding process: modified version of friction stir welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1-4), 141-151.
- Rasti, J. (2018). Study of the welding parameters effect on the tunnel void area during friction stir welding of 1060 aluminum alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 2221-2230.
- Resan, K. K., Alasadi, A. A., Al-Waily, M., & Jweeg, M. J. (2018). Influence of Temperature on Fatigue Life for Friction Stir Welding of Aluminum Alloy Materials. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, 18(02).
- Rodop, A. (2019). *Sürtünme karıştırma kaynağının alüminyum parçaların birleştirilmesinde uygulanması* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi]. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=jNRDC1RLfVd4_T7x7ZXmmX6U39nPcscgUXfsKyQyz4XKcaM3kjlSbRZNJTE8bytU

- Safeen, M. W., & Russo Spena, P. (2019). Main issues in quality of friction stir welding joints of aluminum alloy and steel sheets. *Metals*, 9(5), 610.
- Shanavas, S., & Murugan, N. (2018). Weldability of marine grade AA 5052 aluminum alloy by underwater friction stir welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(9-12), 4535-4546.
- Singh, K., Singh, G., & Singh, H. (2018). Review on friction stir welding of magnesium alloys. *Journal of magnesium and alloys*, 6(4), 399-416.
- Singh, L., Al Haque, M. S., Singh, A., & Pun, A. K. (2022). Study and optimize tensile strength of FSW joints using AA5083 filler by Taguchi & Anova. *Materials Today: Proceedings*, 48, 1718-1722.
- Sönmez, F. (2016). *Yaşlandırılabilir alüminyum alaşımların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi ve kaynak sonrası mekanik özelliklerinin incelenmesi* [Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi].
https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=OykDDeWBWTL9-Wm52sZBrGOUh2geCmwltxOmfjwrf_8tFfJPe1y3K80leqGfzEtA
- Su, H., Xue, L., & Wu, C. (2020). Optimizing the tool pin with three flats in friction stir welding of aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 721-733.
- Şansseven, H. G. (2019). *Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağında kaynak parametrelerinin dikiş kalitesine etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi].
https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=aEzj_IdWAsjiSAfK3qwrBmzjgnve6HwyRITlawIVq0U8RaESvfe6MF392aK4YpVg
- Tan, Y., Wang, X., Ma, M., Zhang, J., Liu, W., Fu, R., & Xiang, S. (2017). A study on microstructure and mechanical properties of AA 3003 aluminum alloy joints by underwater friction stir welding. *Materials Characterization*, 127, 41-52.
- Tezcan, G. (2018). *Alüminyum tozlarından sinterleme tekniği ile üretilen levhalara, sürtünme karıştırma kaynağının uygulanabilirliği ve mekanik özellikler ile mikro yapı özelliklerinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi].

https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=vbVkJXelKChYWNElr1MuLZgqc_uvEdC2yrfjWaaO5giPD4A3a0YXmPt-WxfRBTlpz

Türkyılmaz, E. H. (2019). *Sürtünme karıştırma kaynağı birleştirmelerinde farklı karıştırma uç formlarının bileştirme esnasında oluşturduğu kuvvetlerin deneysel incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi].
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=npGs9H39x7G6401x51yqpFKDMGxwXg9zb9pAUqNqqYT8-enq98MwO3B0DkOmzSz0>

Ugender, S. (2018). Influence of tool pin profile and rotational speed on the formation of friction stir welding zone in AZ31 magnesium alloy. *Journal of magnesium and alloys*, 6(2), 205-213.

Unfried-Silgado, J., Torres-Ardila, A., Carrasco-García, J. C., & Rodríguez-Fernández, J. (2017). Effects of shoulder geometry of tool on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of AA1100 aluminum alloy. *Dyna*, 84(200), 202-208.

Verma, S., & Misra, J. (2017). Study on temperature distribution during Friction Stir Welding of 6082 aluminum alloy. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1350-1356.

Vignesh, R. V., Padmanaban, R., Arivarasu, M., Thirumalini, S., Gokulachandran, J., & Ram, M. S. S. S. (2016). Numerical modelling of thermal phenomenon in friction stir welding of aluminum plates. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*,

Wahid, M. A., Khan, Z. A., Siddiquee, A. N., Shandley, R., & Sharma, N. (2019). Analysis of process parameters effects on underwater friction stir welding of aluminum alloy 6082-T6. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(6), 1700-1710.

Wahid, M. A., & Siddiquee, A. N. (2018). Review on underwater friction stir welding: A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(2), 193-219.

- Wan, L., & Huang, Y. (2018). Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys and steels: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(5), 1781-1811.
- Wang, G.-Q., Zhao, Y.-H., & Tang, Y.-Y. (2020). Research progress of bobbin tool friction stir welding of aluminum alloys: A review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 33(1), 13-29.
- Wang, G., Zhao, Y., & Hao, Y. (2018). Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(1), 73-91.
- Wei, C.-G., Lu, S., Chen, L.-Y., & Xu, M.-Y. (2022). Comparison Study on Welding Temperature and Joint Characteristics of AZ31 Magnesium Alloy by Ultrasonic and Heat Pipe Assisted FSW. *Metals*, 12(2), 267.
- Wen, Q., Li, W., Gao, Y., Yang, J., & Wang, F. (2019). Numerical simulation and experimental investigation of band patterns in bobbin tool friction stir welding of aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(9), 2679-2687.
- Wen, Q., Li, W., Patel, V., Gao, Y., & Vairis, A. (2020). Investigation on the effects of welding speed on bobbin tool friction stir welding of 2219 aluminum alloy. *Metals and Materials International*, 26, 1830-1840.
- Xu, W., Luo, Y., & Fu, M. (2018). Microstructure evolution in the conventional single side and bobbin tool friction stir welding of thick rolled 7085-T7452 aluminum alloy. *Materials Characterization*, 138, 48-55.
- Yugandhar, K., Balaji, P., Chandu, P., Prasanna, R. V., Magesh, M., & Loganathan, T. (2022). A study on FSW parameters of joining dissimilar metals-Al and Fe. *International Journal of Trendy Research in Engineering and Technology*, 6(1), 14-21. <https://doi.org/https://doi.org/10.54473/IJTRET.2022.6104>
- Zeng, X., Xue, P., Wu, L., Ni, D., Xiao, B., Wang, K., & Ma, Z. (2019). Microstructural evolution of aluminum alloy during friction stir welding under different tool

rotation rates and cooling conditions. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(6), 972-981.

Zhang, J., Liu, H., Chen, X., Zou, Q., Huang, G., Jiang, B., Tang A., Pan, F. (2021). Deformation Characterization, Twinning Behavior and Mechanical Properties of Dissimilar Friction-Stir-Welded AM60/AZ31 Alloys Joint During the Three-Point Bending. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 1-18.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER	
Adı Soyadı:	Mehmet Fatih DEMİRDÖĞEN
Uyruğu:	T.C.
Orcid Numarası:	0000-0002-0545-3733

EĞİTİM BİLGİLERİ	
Lisans	
Üniversite:	Balıkesir Üniversitesi
Fakülte:	Mühendislik Mimarlık Fakültesi
Bölümü:	Makine Mühendisliği
Mezuniyet Yılı:	2015
Yüksek Lisans	
Üniversite:	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Enstitü:	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı:	Makine Mühendisliği
Mezuniyet Yılı:	2023

Tezden Üretilen Makaleler ve Bildiriler
<p>Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler</p> <ul style="list-style-type: none">Kılıç, S., & Demirdöğen, M. F. Sıcaklık ve Deformasyon Hızının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. <i>International Journal of Engineering Research and Development</i>, 14(2), 406-419.
<p>Uluslararası Konferans ve Sempozyumlarda Sunulan Bildiriler</p> <ul style="list-style-type: none">Demirdöğen, A. M. F., Kılıç, S., & Öztürk, F. (2022, August). Sürtünme Karıştırma Kaynağı. <i>In The 14th International Scientific Research Congress</i> (p. 138).Demirdöğen, A. M. F., Kılıç, S., & Öztürk, F. (2022, August). H13 Sürtünme Karıştırma Kaynak Takımı Üretimini Araştırılması. <i>In The 14th International Scientific Research Congress</i> (p. 199).
<p>Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınlanan makaleler</p> <ul style="list-style-type: none">Demirdöğen, M. F., Kılıç, S., & Öztürk, F. Yüzey Pürüzlülüğünün Tahmininde Farklı Yöntemlerin İncelenmesi. <i>Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi</i>, 37(2), 531-542.