

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI BİRLEŞTİRMELERİNDE FARKLI  
KARIŞTIRICI UÇ FORMLARININ BİRLEŞTİRME KALİTESİNE  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**Kadir KAPTAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2008  
ANKARA**

Kadir KAPTAN tarafından hazırlanan SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI  
BİRLEŞTİRMELERİNDE FARKLI KARIŞTIRICI UÇ FORMLARININ  
BİRLEŞTİRME KALİTESİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin  
Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd.Doç.Dr. Hüdayim BAŞAK  
Tez Danışmanı, Makine Eğitim Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitim Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Kürşat Dünder  
Makine Eğitim Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi  
Yrd.Doç.Dr. Hüdayim BAŞAK  
Makine Eğitim Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi  
Prof.Dr. Faruk Mendi  
Makine Eğitim Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi  
Prof.Dr. H.Mehmet Şahin  
Makine Eğitim Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi  
Yrd.Doç.Dr. Ahmet GÜRAL  
Malzeme Eğitim Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi



Tarih: 31/11/2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans  
derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Kadir KAPTAN

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI BİRLEŞTİRMELERİNDE FARKLI  
KARIŞTIRICI UÇ FORMLARININ BİRLEŞTİRME KALİTESİNE  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Kadir KAPTAN**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Aralık 2008**

**ÖZET**

Kaynak, endüstride yaygın olarak kullanılan metallerin ergitilerek kalıcı olarak birleştirilmesini sağlayan bir metottur. İlkel kaynak metotları üretim ve birleştirme uygulamaları için kolay ve ekonomik olmasına rağmen malzeme yapısında deformasyona ve faz değişikliklerine yol açtığı için ileri teknolojide etkin bir rol alamamıştır. Bununla birlikte ilkel kaynağın bu dezavantajlarından kaçınmak için yapılan araştırmalar ve deneyler, 1991 de patentleşen sürtünme karıştırma kaynağının, malzeme özelliklerini değiştirmeden ve malzemeyi ergitmeden katı ya da yarı-katı fazlarda metallerin birleştirilebileceğini göstermiştir. Aynı zamanda sürtünme karıştırma kaynağının ilkel kaynak metotlarından daha dayanıklı ve güvenlidir. İyi bir kaynak kalitesi elde etmenin temeli pim tipine ve özelliklerine bağlıdır. Bu çalışma ile sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan pimlerin tasarımı ve tasarlanan pimlerin imalatı gerçekleştirilmiştir. 20 farklı tipte karıştırıcı pim tasarlanmıştır. Pim tasarımlarında temel olarak 5 farklı vida (metrik, trapez, testere, kare ve yuvarlak) tipinden yola çıkarak, kanalsız, 3 kanallı ve 4 kanallı olarak 15 adet pim elde edilmiştir. Vidasız olarak ta üçgen, konik, kare, 3 kanallı silindir ve 4 kanallı silindir olarak 5 adet farklı tip karıştırıcı pim tasarlanmıştır ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Yapılacak deneyler için

düzlemsel parçalar (alüminyum) ve uçlar freze tezgâhına bir bağlama aparatı ile bağlanmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen parçalardan çekme deneyi numuneleri çıkartılarak çekme deneyleri gerçekleştirilmiş, mikroyapı ve mikrosertlik incelemeleri yapılarak en iyi performansı sağlayan kaynak ve uç tasarımı tespit edilmiştir.

**Bilim Kodu** : 708.3.029  
**Anahtar Kelimeler** : Sürtünme karıştırma kaynağı, pim tasarımı  
**Sayfa Adedi** : 99  
**Tez Yöneticisi** : Yrd. Doç. Dr. Hüdayim BAŞAK

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS ON BONDING QUALITY FOR  
DIFFERENT TYPE OF MIXER PIN IN FRICTION STIR WELDING  
PROCESS**

**(M. Sc. Thesis )**

**Kadir KAPTAN**

**GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
December 2008**

**ABSTRACT**

Welding is a process which is commonly used in Industry for joining metals by melting and causing permanent coalescence. Although primitive welting methods are easy and economic for fabrications and assembly applications it could not take an effective role in advanced technology due to causing deformation in material structure and phase changes. Moreover , avoiding these disadvantages of primitive welding have been leading many researches and experiments which shows friction stir welding patented in 1991,provides metals can be joined together as solid or semi-solid phase conditions without melting and any loss of mechanical properties. Also coalescence by friction stir welding is more long lasting and safety than primitive welding. The main point of having good quality of coalescence depends on used pin types and their properties. By this study, the pins used for friction stir welding are designed and manufactured. There are 20 different types of stir pin. Designs of screwed pins are structured on basically 5 different screw types (metric, trapeze, saw, square, and round) and 15 screwed pins are manufactured with 3 grooves and 4 grooves. The other 5 pins which are unscrewed are triangle, conical, square, with 3 grooves and with 4 grooves cylindrical stir pins. Aluminum planar parts and pins are

fixed on fraise frame for the experiment. Pull of force, microstructure and microhardness test samples are prepared from the parts which are welded by friction stir welding and the pin is determined which has the best welding performance.

Science Code : 708.3.029  
Key Words : Friction stir welding, design of pin  
Page Number : 99  
Adviser : Assist. Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Yrd. Doç. Dr. Hüdayim BAŞAK' a, kullanılan aparatların üretiminde ve deneylerin yapılmasında gösterdiği değerli katkılarından dolayı GÜRMAK Makine ve Kalıp firmasına, numunelerin mikroyapı ve mikrosertlik testlerinin yapılmasındaki katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Malzeme Anabilim Dalına ve testlerin yapımında ve değerlendirmesindeki katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜRAL'a, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim Canan KAPTAN' a teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                              | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET .....                                                                   | iv           |
| ABSTRACT .....                                                               | vi           |
| TEŞEKKÜR .....                                                               | viii         |
| İÇİNDEKİLER .....                                                            | ix           |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                                    | xii          |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                                      | xiii         |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                                                     | xv           |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                                 | xvii         |
| 1. GİRİŞ .....                                                               | 1            |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....                                                | 7            |
| 3. SÜRTÜNME VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK<br>YÖNTEMLERİ .....                | 13           |
| 3.1. Sürtünme Kaynağı Yöntemi .....                                          | 13           |
| 3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemi.....                                | 16           |
| 3.3. Sürtünme Karıştırma Kaynak İşlemi İçin Temel Hazırlık .....             | 17           |
| 3.4. Kaynağın Uygulama Yöntemi.....                                          | 18           |
| 3.5. Kaynak Dikiş Formu Ve Metalurjik Yapı .....                             | 18           |
| 3.6. Karıştırıcı Uç Ve Özellikleri .....                                     | 20           |
| 3.7. Malzeme Özellikleri Ve Kaynak Parametreleri .....                       | 21           |
| 3.8. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılabilen Malzemeler.....                 | 22           |
| 3.9. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Etkin Olan Kaynak<br>Parametreleri ..... | 24           |

## Sayfa

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.10. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Üstünlükleri Ve Sınırlamaları ....                  | 26 |
| 3.10.1. Sürtünme karıştırma kaynağının avantaj ve dezavantajları.....                    | 26 |
| 3.10.2. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarında görülen bazı sınırlamalar .....      | 27 |
| 3.10.3. Sürtünme karıştırma kaynağının daha kaliteli kaynak dikişleri .....              | 28 |
| 4. MATERYAL VE METOT .....                                                               | 30 |
| 4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılacak Malzeme Çeşidi . ....                   | 30 |
| 4.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Uç Tasarımı, Özellikleri Ve İmalatı ..... | 32 |
| 4.2.1. Ç 4340 kalite ıslah çeliğin özellikleri.....                                      | 34 |
| 4.2.2. Karıştırıcı ucun imalatı .....                                                    | 36 |
| 4.3. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminde Kullanılacak Bağlama Kalıbı.....              | 39 |
| 4.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Tezgâh Tipi .....                         | 41 |
| 4.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağı İşleminin Yapılması.....                                | 42 |
| 4.5.1. SKK için tezgahın hazırlanması.....                                               | 42 |
| 4.5.2. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemine başlama.....                                 | 46 |
| 4.6. Çekme Test Çalışmaları.....                                                         | 55 |
| 4.7. Mikroyapı Çalışmaları.....                                                          | 56 |
| 5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....                                                    | 58 |
| 5.1. Çekme Deney Sonuçları ve Tartışma.....                                              | 58 |
| 5.2. Mikroyapı Karakterizasyonu.....                                                     | 62 |
| 5.3. Karıştırıcı Uç ve Enerji Dağılımlı Spektrometre (EDS) analizi.....                  | 68 |

|                                           | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------|--------------|
| 5.4. Tartışma.....                        | 69           |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....                 | 72           |
| KAYNAKLAR .....                           | 74           |
| EKLER.....                                | 78           |
| EK-1 Karıştırıcı uç detay resimleri ..... | 79           |
| ÖZGEÇMİŞ.....                             | 99           |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                         | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 4.1. Al 7075 kalite alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi .....                        | 31    |
| Çizelge 4.2. Al 7075 kalite alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.....                       | 31    |
| Çizelge 4.3. Ç 4340 Islah çeliğinin genel özellikleri.....                                      | 34    |
| Çizelge 4.4. Ç 4340 Islah çeliğinin kimyasal özellikleri .....                                  | 34    |
| Çizelge 4.5. Ç 4340 Islah çeliğinin sıcak şekillendirme ve ısıt işlemleri<br>sıcaklıkları ..... | 34    |
| Çizelge 4.6. Ç 4340 Islah çeliğinin mekanik özellikleri .....                                   | 35    |
| Çizelge 4.7. Ç 4340 Islah çeliğinin fiziksel özellikleri.....                                   | 36    |
| Çizelge 4.8. Ünlversal freze tezgahının özellikleri.....                                        | 41    |
| Çizelge 5.9. Karıştırıcı uç tipi çekme değerleri .....                                          | 60    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                       | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1. Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde özel olarak tasarlanmış pim .....                                                          | 3     |
| Şekil 1.2. Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı .....                                                                                  | 4     |
| Şekil 3.3. Sürtünme kaynağının yapım aşaması .....                                                                                          | 15    |
| Şekil 3.4. Sürtünme karıştırma kaynağının yapım aşaması .....                                                                               | 16    |
| Şekil 3.5. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin çalışma prensibi .....                                                                     | 19    |
| Şekil 3.6. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü .....                                        | 20    |
| Şekil 3.7. Temel olarak tasarlanan karıştırıcı uç formu .....                                                                               | 21    |
| Şekil 3.8. Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde ucun eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi ..... | 22    |
| Şekil 4.9. Tasarımı yapılan vida dişli karıştırıcı uçlar .....                                                                              | 32    |
| Şekil 4.10. Al alaşımlı malzemeye karıştırıcı ucun yanaşması .....                                                                          | 45    |
| Şekil 4.11. Karıştırıcı ucun, alüminyum malzemeye kaynak öncesi hizalanması .....                                                           | 46    |
| Şekil 4.12. SKK ile birleştirilmiş numunelerin TSE 138'e göre çekme testi numune geometrisi ve ölçüleri .....                               | 55    |
| Şekil 5.13. SKK ile yapılan kaynak numunelerinin çekme değerleri .....                                                                      | 61    |
| Şekil 5.14. 2 ve 4 nolu numunelerin mikrosertlik değerlerinin karşılaştırması .....                                                         | 64    |
| Şekil 5.15. 7 ve 8 nolu numunelerin mikrosertlik değerlerinin karşılaştırması .....                                                         | 64    |
| Şekil 5.16. 12 ve 13 nolu numunelerin mikrosertlik değerlerinin karşılaştırması .....                                                       | 65    |
| Şekil 5.17. Yuvarlak dişli karıştırıcı uç detay resmi .....                                                                                 | 79    |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                        | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 4.1. Al7075 malzemenin kaynak işlemine hazır hali .....                | 31    |
| Resim 4.2. İmal edilen karıştırıcı ucun genel görünümü .....                 | 37    |
| Resim 4.3. Kare vida karıştırıcı ucun genel görünümü .....                   | 37    |
| Resim 4.4. Yuvarlak vida karıştırıcı ucun genel görünümü .....               | 37    |
| Resim 4.5. Üçgen (metrik) vida karıştırıcı ucun genel görünümü .....         | 37    |
| Resim 4.6. Trapez vida karıştırıcı ucun genel görünümü .....                 | 38    |
| Resim 4.7. Testere vida karıştırıcı ucun genel görünümü .....                | 38    |
| Resim 4.8. Kare, konik ve üçgen karıştırıcı ucun genel görünümü .....        | 38    |
| Resim 4.9. Silindir üç ve dört kanallı karıştırıcı ucun genel görünümü ..... | 38    |
| Resim 4.10. Bağlama kalıbı genel görünüşü .....                              | 39    |
| Resim 4.11. Sürtünme kaynağı işleminin başlangıç aşaması .....               | 43    |
| Resim 4.12. Karıştırıcı ucun pens yardımıyla tezgaha bağlanması .....        | 44    |
| Resim 4.13. Kaynak işleminin başlangıcı .....                                | 47    |
| Resim 4.14. Kaynak işlemi parçanın orta konumunda .....                      | 48    |
| Resim 4.15. Kaynak işlemi bitmiş durumda .....                               | 48    |
| Resim 4.16. Kanalsız karıştırıcı uçlar ile yapılan numuneler .....           | 49    |
| Resim 4.17. Kırılan karıştırıcı uçların numune üzerindeki görüntüsü .....    | 51    |
| Resim 4.18. Dört kanallı karıştırıcı uç ile yapılan numuneler .....          | 51    |
| Resim 4.19. Kırılan karıştırıcı ucun freze tezgahında gösterimi .....        | 52    |
| Resim 4.20. Kırılan karıştırıcı uca bir örnek .....                          | 52    |
| Resim 4.21. Üç kanallı karıştırıcı uç ile yapılan numuneler .....            | 53    |

| <b>Resim</b>                                                                   | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 4.22. Vida açılmamış karıştırıcı uçlar ile birleştirilen numuneler ..... | 54           |
| Resim 4.23. Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan kaynak numuneleri...       | 54           |
| Resim 4.24. Mikroyapı incelemesi için hazırlanan şematik numune kesiti...      | 57           |
| Resim 5.25. Çekme testi için hazırlanan standart kaynak numunesi .....         | 58           |
| Resim 5.26. Çekme testi yapılan numunelerin kopma noktaları .....              | 59           |
| Resim 5.27. Numunelerin kaynak bölgesi mikroyapı resimleri.....                | 63           |
| Resim 5.28. 4 nolu karıştırıcı ucun SEM fotoğrafı.....                         | 66           |
| Resim 5.29. 2 nolu karıştırıcı ucun SEM fotoğrafı.....                         | 66           |
| Resim 5.30. 8 nolu karıştırıcı ucun SEM fotoğrafı.....                         | 67           |
| Resim 5.31. 13 nolu karıştırıcı ucun SEM fotoğrafı.....                        | 67           |
| Resim 5.32. EDS analizi yapılan karıştırıcı uç .....                           | 68           |
| Resim 5.33. EDS analiz sonuçları .....                                         | 69           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| <b>Simgeler</b>                    | <b>Açıklama</b>                                        |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Al</b>                          | Alüminyum                                              |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | Alüminyum oksit                                        |
| <b>dev/dak</b>                     | Devir/dakika                                           |
| <b>HRc</b>                         | Rockwell C- Sertliği                                   |
| <b>KW</b>                          | Kilo-watt                                              |
| <b>Li</b>                          | Lityum                                                 |
| <b>mm</b>                          | Milimetre                                              |
| <b>m/s</b>                         | Metre/saniye                                           |
| <b>MPa</b>                         | Mega - Paskal                                          |
| <b>N/mm<sup>2</sup></b>            | Newton/milimetre kare                                  |
| <b>μ</b>                           | Sürtünme katsayısı                                     |
| <b>Kısaltmalar</b>                 | <b>Açıklama</b>                                        |
| <b>AISI</b>                        | Amerikan Standart Birimi                               |
| <b>DIN</b>                         | Alman Endüstri Normu                                   |
| <b>EDS</b>                         | Enerji Dağılımlı Spektrometre                          |
| <b>FSW</b>                         | Sürtünme Karıştırma Kaynağı<br>(Friction Stir Welding) |
| <b>ISO</b>                         | Uluslararası Standart Organizasyonu                    |
| <b>SEM</b>                         | Taramalı Elektron Mikroskobu                           |
| <b>SKK</b>                         | Sürtünme karıştırma kaynağı                            |
| <b>TEB</b>                         | Termodinamik olarak yeniden kristalleşen<br>Bölge      |
| <b>TSE</b>                         | Türk Standartları Enstitüsü                            |

## 1. GİRİŞ

Yeni geliştirilen malzemeler genellikle modern birleştirme tekniklerine ihtiyaç duyarlar. Son yirmi yılda alaşımların gelişmesiyle bu malzemelerin kaynağı ile ilgili büyük ilerlemeler olmuştur. 1990'ların başında geliştirilen bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), geleneksel ergitmeli kaynak yöntemleriyle kaynağı güç olan özellikle yaşlanma sertleştirilmesine tabi tutulmuş alüminyum alaşımlarının kaynağında başarıyla kullanılmıştır [1]. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), ilk olarak 1991 yılında İngiltere (Cambridge)'de tanıtılmış [2], özellikle 1990'lı yıllarda büyük gelişim göstermiş ve sürekli gelişim sürecinde olan bir kaynak yöntemidir [3, 4]. Alüminyum ve alaşımlarının geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde doğan problemler, araştırmacıları yeni birleştirme yöntemleri geliştirmeye yönlendirmiştir. Alüminyum alaşımlarının (özellikle yaşlandırma sertleşmesi yapılmış olan) ergitme kaynak yöntemleri ile kaynağında, yüksek ısı girdisi bu malzemelerin ısıl genleşmelerinin yüksek olması ve katılaşma sıcaklık aralıklarının geniş olması sonucu kaynak dikişinde çatlak oluşumuna neden olabilmektedir [5, 6]. Ayrıca ark kaynağındaki yüksek ısı girdisi, alüminyum alaşımlarında ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB) tane sınırlarında düşük ergime dereceli fazların oluşumuna ve dolayısıyla bu bölgede katılaşma esnasında tane sınırlarında çatlamlara yol açtığı da bilinmektedir [6]. Yaşlandırma sertleşmesine tabi tutulmuş alüminyum alaşımlarının ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde karşılaşılan bir başka problem, kaynak dikişinde sertleştirici çökeltilerin çözünmesi ile ITAB' da aşırı yaşlanma sonucu sertlik ve mukavemetin düşmesidir [8, 9, 11]. Bu durum kaynak bölgesinde mekanik uyumsuzluğa sebep olmaktadır. Belirtilen bu sebeplerden dolayı, bu malzemelerin birleştirilmesinde katı hal kaynak yöntemleri (difüzyon, sürtünme ve sürtünme karıştırma kaynağı) büyük avantajlar sağlamaktadır.

Bir katı hal birleştirme işlemi olan sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak konstrüksiyonu güç olan malzemelerin birleştirme işlemleri için kısa kaynak

süresi, minimum yüzey hazırlama ve otomasyon kolaylığı gibi kendine özgü avantajlarından dolayı uygun bir alternatif kaynak yöntemidir [10]. Bu yöntemde koruyucu gaz, ilave kaynak metali ve kaynak edilecek parçalarda kaynak ağzı açılmaya gerek duyulmamaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan kaynaklı birleştirmelerden elde edilen kaynak kalitesi, malzeme cinsine göre farklılık göstermemektedir [11].

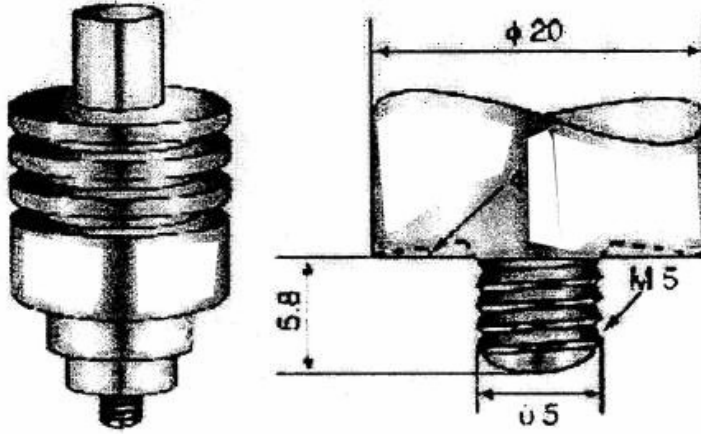
Diğer kaynak yöntemlerinde oluşan düzensizlikler, çatlaklar, form bozuklukları ve boşluklar bu yöntem ile fark edilir derecede azalmaktadır.

Günümüzde, ileri teknolojilerin uygulandığı gelişmiş makine elamanlarının kaynaklı birleştirilmelerinde faz dönüşümleri ve plastik deformasyon istenmeyen bir durumdur. Bu olumsuzlukları gidermek, ancak malzemelerin mekanik ve metalurjik özelliklerini etkilemeyecek kadar düşük sıcaklıklarda yapılan birleştirme işlemleri ile mümkündür [12]. Yöntemin uygulanması sırasında duman ve ışık oluşmaması, koruyucu gaz, toz ve ilave tele gereksinim duyulmaması, kaynak ağzı hazırlığı gerekmemesi, tüm pozisyonlarda kaynak yapılabilmesi olanağının bulunması ve otomasyona da yatkınlığı gibi daha birçok üstünlüğün bulunması, yöntemin uygulama alanlarını daha da genişletmektedir [11].

Yöntemin birçok malzeme için uygun olmasına karşın, en önemli uygulama alanı alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirilmesidir. Alüminyum alaşımları, bu yöntemde oldukça iyi mekanik özelliklerde birleştirilebilmektedir [13]. SKK yöntemi tüm pozisyonlarda rahatlıkla uygulanabilmektedir [14, 15]. Alüminyum malzemeler için yapılan çalışmalarda, plaka kalınlığının 1 – 75 mm arasında uygun birleştirme yapılabilirdiği görüşüne varılmıştır [16].

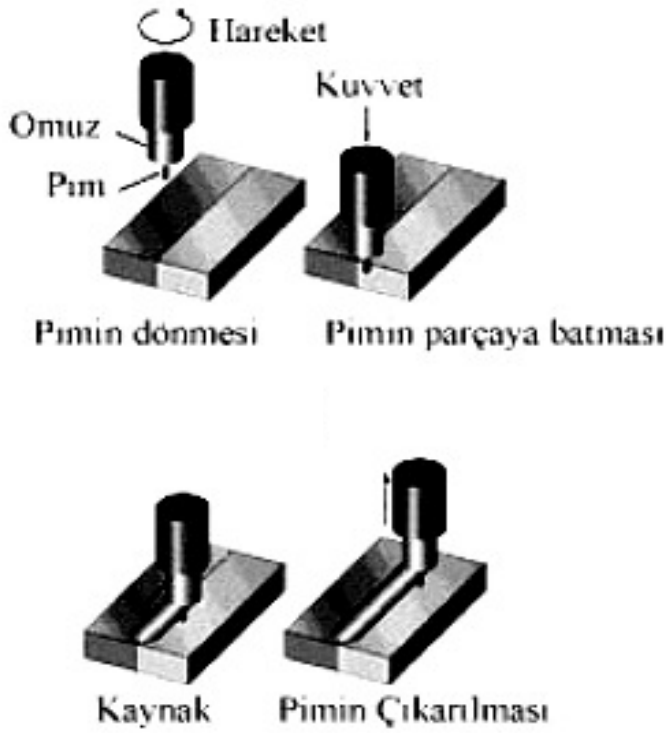
Sürtünen eleman ile kaynak yöntemi, sürtünme kaynağından türetilmiştir. Kaynak edilen parçalar ergimezler bu yüzden yöntem katı faz kaynağı olarak adlandırılır [27]. Bu kaynak yöntemi alın altına sabitlenmiş iki levhaya yüksek

devirde dönen omuzlu bir pimin (prob) daldırılarak kaynak yapılmak istenen uzunluk boyunca belirli bir hızda ilerletilmesinden ibarettir. Şekil 1.1’de yöntem için daha önce kullanılan ve özel olarak tasarlanmış pim örneği görülmektedir [17, 18].



Şekil 1.1. Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde özel olarak tasarlanmış pim [27]

Yöntem uçak, uzay, gemi, otomotiv sektöründe, yakıt deposu, gıda depolama elemanları ve radyoaktif atık madde taşıyıcılarının üretiminde kullanılan 2000, 5000, 6000, 7000 ve 8000 serisi Al-alışımlarının yanı sıra Cu-alışımlarının, Ti-alışımlarının ve bazı tür çeliklerin birleştirilmesinde uygulama alanı bulmaktadır [19]. Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Birleştirilecek parçalar, alın altına aralarında boşluk kalmayacak şekilde sabitlenir.



Şekil 1.2. Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanişı [7]

Yöntemin uygulaması iki farklı şekilde olabilir. Parçaların hareketi söz konusu olabileceği gibi, takımın dönme ve ilerleme hareketi de mümkün olmaktadır. Geniş silindirik omuzlu, delme yapabilecek şekilde bir pim (karıştırıcı uç), freze tezgâhı ekipmanları ve arka tutucular kullanılarak yüksek devirde döndürülerek; kaynak yapılacak parçalara daldırılır ve kaynak yapılacak uzunluk boyunca ilerletilir. Pim, malzemelere temas ettiğinde sürtünme kaynağındaki duruma benzer bir durum oluşarak temas noktasında ısı, sürtünmenin de etkisiyle hızla artar ve malzemelerin plastik değişimine neden olur. Bu değişim malzemelerin akışını sağlar [20].

Bu çalışma 6 bölümden oluşmuştur.

1. bölüm giriş bölümüdür. Bu bölümde çalışma konusu hakkında temel bilgiler, tarihsel gelişimi hakkında ve tezin genel konusu hakkında bilgiler verilmiştir.

2. bölümde, daha önceden sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili yapılmış olan çalışmaların literatür araştırması yapılmıştır.

3. bölümde, sürtünme ve sürtünme karıştırma kaynak yöntemlerinin tanımı, diğer yöntemlere göre avantaj ve dezavantajları, uygulanabilirliği vb. konular ele alınmıştır.

4. bölümde, sürtünme karıştırma kaynağı yapımında kullanılacak malzeme, malzemeyi makineye sabitlemek için kullanılacak bağlama kalıbı, sürtünme karıştırma kaynağında kullanılacak karıştırıcı ucun malzeme tipi, uçların tasarım aşaması ve imalatının nasıl gerçekleştirildiği konuları anlatılmıştır. Ayrıca sürtünme karıştırma kaynağının yapım aşamasının değerlendirmesi yapılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı yardımıyla birleştirilen numuneler ile ilgili deney ve testler yapılmıştır. Karıştırıcı ucun fiziksel yapısıyla ilgili çeşitli resimler çekilmiş ve değerlendirilmiştir.

5. bölümde, bütün elde edilen veriler ışığından tartışmalar yapılmıştır.

6. bölümünde ise, sürtünme karıştırma kaynağı sonucunda elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır ve bu değerlendirmelere göre çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

Bu çalışmada, Al 7075 kalite alüminyum alaşımı, farklı geometri ve farklı adımlara sahip karıştırıcı uçlar kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle birleştirilmiştir. Deneylerde uç devri ve ilerleme miktarı olarak

sabit bir değer belirlenmiştir. Kaynak işlemleri neticesinde numunelerin çekme deneyleri, mikroyapı ve mikrosertlik incelemeleri yapılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

SKK, iki parçanın birbiri ile bir karıştırıcı uç yardımıyla birleştirme işlemidir. Alüminyum, bronz, paslanmaz çelik vb. malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan, uygulama alanı giderek artan ve devamlı gelişen bir metottur. Aynı zamanda SKK, farklı malzemelerin birleştirilmesinde ve ürün kaynağında üstün metalurjik özellik ve malzeme dayanıklılığı göstermektedir. Genellikle malzeme özelliklerinin korunması gereken yerlerde, uçak, tren ve uzay araçları gibi emniyet istenen yerlerde sürtünme karıştırma kaynak yöntemi kullanılarak diğer birleştirme elemanları ortadan kalkabilir. SKK ile ucuz bileşimli malzemeler tasarlanabilir ve önemli maliyet azalmaları olabilir. Bu teknoloji giderek yaygınlaştığından ve hızla gelişim göstermesi sebebiyle çeşitli ihtiyaçlar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Aşağıda SKK ile ilgili yapılan çalışmaların bazıları özetlenerek sunulacaktır.

Y.J.Chao ve ark. (2001) AA2024-T3 ve AA7075-T7351 alaşımlarını SKK ile kaynak yapmışlar ve bu kaynaklı parçaları bir akışkan ile basınç uygulayarak parçaların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Basma gerilmesi altında deformasyon hızını vb. noktaları incelendiğinde SKK yapılan parçaların akma gerilmesinin azaldığı, iki malzeme basınç altındayken akma gerilmesinin yüksek olduğu ve çeşitli basma gerilmelerinde gerilme sertliği benzer değerler ortaya çıkardığı görülmüştür [21].

L.Cederqvist ve A.P.Reynolds (2000) alüminyum alaşımların, bindirme birleştirmelerinin sürtünme karıştırma kaynağını etkileyen faktörlerini incelemişlerdir. Sürtünme kaynağı katı birleştirme işlemi olduğundan, bindirme kaynağında kullanılmak üzere SKK gelişiminden yararlanmak ve yeni uygulama yöntemlerinin bulunmasına olanak sağlamak için bu konu üzerine çalışmışlardır. SKK ve bindirme kaynakları üzerinde ortak noktalar ve mekanik özelliklerinin de içerdiği bir araştırma yapmışlardır. Malzeme olarak Al2024 T3 ve Al7075 T6 özellikteki havacılık ve uzay endüstrisinde genellikle kullanılan malzemeleri birleştirmişlerdir. Kaynak parametrelerine ilerleme

hızı, devir ve takım ölçüleri dâhil edilmiştir. Metalografik kesitlerin değerlendirilmesi ve kopma noktalarının incelemesini yapmışlardır. Yapılan çalışma ile tüm kaynaklarda kritik ara safha yüzlerinin mevcut olduğu tespit edilmiştir. Bu ara safha yüzlerin giderilmesi için ikinci bir kaynak işlemi yapılması gerektiği sonucuna varmışlardır. SKK ile yapılan bindirme kaynağının, mukavemet olarak diğer kaynaklara (punta ve perçin kaynağı) göre daha iyi sonuç verdiği ve SKK' nın bu tür birleştirmelerde ileride diğer kaynak türlerinin yerini alabileceği bu çalışma ile ortaya konmuştur [22].

A.Şık ve Ö.Kayabaş (2003) SKK yöntemiyle, AA 1050 alüminyum levhaları alın yüzeylerini birleştirerek, oluşan bağlantının mekanik özellikleri incelemişlerdir. Kaynak işlemi sırasında karıştırıcı ucun devir hızını ve kaynak ilerleme hızlarını değişken parametreler olarak belirlemişlerdir. Kaynak ilerleme hızı sabit iken, artan karıştırıcı uç devir hızlarında, malzemeye ısı girdisinin arttığı ve malzemede sertlik ve çekme dayanımının düştüğü sonucuna ulaşmışlar. Bu sonuca göre, artan karıştırıcı uç devir hızında; kaynak ilerleme hızı da artırılmıştır ve malzemeye giren ısı miktarını azaltmışlardır, bu sayede malzemenin mekanik özelliklerinde bir artış olduğunu tespit etmişlerdir [23].

N.Özdemir ve ark. (2007) 8 mm kalınlığındaki AA1030 alüminyum levhaları bir katı hal birleştirme yöntemi olan SKK ile alın altına üç farklı devir sayısı (900, 1120 ve 1400 dev/dak.) ve üç farklı ilerleme hızı (125, 160 ve 200 mm/dak) kullanılarak birleştirmişlerdir. Kaynaklı bağlantılar, universal freze tezgâhı donanımından faydalanarak gerçekleştirilmiştir. SKK yöntemi ile birleştirilen bu kaynaklı bağlantılarda devir sayısı, ilerleme hızı ve karıştırıcı uç profilinin mekanik davranışlar üzerine olan etkisini tespit etmek amacıyla çekme testi uygulamışlardır. Yapılan bu mekanik test sonuçlarından elde edilen verilerden, devir sayısının SSK bağlantıların çekme mukavemeti sonuçları üzerine önemli bir etkisi olduğu gözlenmezken, ilerleme hızı ve karıştırıcı uç geometrisinin önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [24].

M.Şahin ve ark. (2008) aşırı plastik deformasyonuna uğramış Al5083 alüminyum alaşımına sürtünme kaynağı uygulandıktan sonra mekanik özelliklerindeki değişimleri deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, deneysel malzeme olarak Al5083 alüminyum alaşımı ve aşırı plastik deformasyon için kare kesitli eşit kanal açısı presleme (EKAP) kalıbı kullanmışlardır. Deneylerde öncelikle Al5083 alaşımının satın alınmış şekli ile hazırlanmış numuneleri sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirmişlerdir. Kaynak için gerekli olan sürtünme süresi, yığma süresi, sürtünme basıncı ve yığma basıncı için optimum parametreleri elde etmişlerdir. Daha sonra satın alınan Al5083 alüminyum malzemeler kare kesit haline getirilerek, numunelere eşit kanal açısı presleme kalıbı yardımıyla bir kademe aşırı plastik deformasyon uygulamışlardır. Kare şeklinde elde edilen parçalar, talaşlı şekil verme ile dairesel hale getirilerek laboratuvar şartlarında önceden tasarlanan ve imal edilen klasik sürtünme kaynak tesisatında birleştirmişlerdir. Son olarak optimum şartlarda elde edilen parçaların çekme dayanımları ile satın alındığı gibi birleştirilen parçaların çekme dayanımları karşılaştırılmıştır ve sonuç olarak sürtünme süresi ve sürtünme basıncı arttıkça birleştirmelerin çekme dayanımının da arttığı görülmüştür. Ayrıca, satın alınıp birleştirilen ve bir kademe aşırı plastik deformasyona uğratılıp optimum parametrelerde birleştirilen parçalar çekme deneyine tabi tutulduğunda parçalar kaynak dışından esas malzemeden koptuğu görülmüştür. Aşırı plastik deformasyona uğramış malzemelerin kaynağıyla elde edilen birleştirmelerin kaynak mukavemeti de malzemenin deformasyon sonrası mukavemetine yakın çıkmıştır. Bu da parametrelerin doğru bulunduğunu ve kaynak mukavemetinin yeterli olduğunun sonucuna ulaşmışlardır [25].

A.Hasçalık ve ark. (2007) ticari olarak temin edilmiş AA 5251 alüminyum alaşımı, farklı geometrilere sahip karıştırıcı uçlar kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle birleştirmişlerdir. Deneylerde uç devrini 1000 dev/dak ve ilerleme miktarını 200mm/dak olarak sabit tutmuşlardır. Kaynak işlemleri neticesinde numunelerin kaynak bölgeleri mikro yapıları optik

mikroskopla incelenmiştir, çekme deneyleri ve mikro sertlik incelemeleri yapılmıştır. Sonuç olarak, en mukavemetli birleşmenin kare piramit kesitli uçta, en mukavemetsiz birleşmenin ise koni kesitli uçta gerçekleştiği ve bütün geometrilerde numunelerin çekme dayanımı esas malzemenin altında olduğunu görmüşlerdir [26].

M.Özsoy ve E.Kaluç (2002) bu makalede, sürtünen eleman ile kaynak yöntemi tanıtılmış ve uygulama esasları üzerinde durulmuştur. Endüstrinin birçok dalında uygulama alanı bulan sürtünen eleman ile kaynak yöntemi getirdiği birçok üstünlük ile diğer ergitme kaynak yöntemlerine göre daha uygun bir yöntem konumuna geldiğini görmüşlerdir. Özellikle Al ve Al alaşımları için mekanik özelliklerdeki iyileştirmeler, kaynak sonrası oluşabilecek hatalardaki azalmalar ile de gelecekte otomotiv endüstrisi, gemi inşaatı, uçak ve uzay endüstrisi ve diğer imalat sektörlerinde kullanımının her geçen gün artacağını düşünmektedirler [27].

A.Kurt ve ark. (2004) patenti 10 yıllık geçmişe sahip olmasına rağmen endüstriyel uygulamaları hızla yaygınlaşan SKK yöntemi ile ticari Al malzemeleri birbirleriyle kaynak etmişlerdir. 5×50×150 mm ebatlarında Al malzemeler freze mengenesinde alın altına getirilerek değişik kaynak ilerleme hızlarında birleştirilmişlerdir. Birleştirme işlemi 6.25, 10, 16 ve 20 mm/dak kaynak ilerleme hızlarında ve 800 dev/dak dönme hızında yapılmıştır. Kaynaklı birleştirmelerde metalografik ve mekanik testler yapılarak kaynak ilerleme hızının birleşme bölgesinin metalurjik ve mekanik özelliklerinde meydana getirdiği değişiklikler değerlendirilmiştir [28].

E.Taban ve E.Kaluç (2005) deney malzemesi olarak dünyada ve ülkemizde, gemi inşa ve savunma endüstrilerinde taşıt yapımında kullanılan EN AW-5083- H321 (EN AWAlMg4.5Mn0.7) dövme al alaşımı levhalar kullanılarak, kaynaklı bağlantıların mekanik ve mikro yapısal özelliklerini incelemek amacıyla ergitme esaslı kaynak yöntemleri olan MIG, TIG kaynak yöntemleri ve sürtünme birleştirme kaynak (FSW) yöntemiyle kaynak edilmişlerdir.

Kaynaktan sonra tüm bağlantılar, görsel incelemeye tabi tutulmuştur, bağlantıların mekanik özelliklerini saptamak amacıyla standartlara uygun olarak çıkarılan ve hazırlanan numunelere çekme ve eğme deneyleri uygulanmıştır. Kaynaklı parçaların kırılma yüzeyleri optik ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir, kaynak bölgesinden alınan metalografik numunelerde mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, kaynak bağlantılarının kaynak bölgesinin mikro yapısal özellikleri Clemex görüntü analiz sistemi ile detaylı biçimde incelenmiş ve FSW kaynaklı bağlantıların da iyi mekanik ve mikroyapısal özelliklere sahip oldukları saptanmıştır [29].

H.E.Akata ve ark. (2003) SKK'nın diğer bir kullanım alanı olan atık malzemelerdeki birleştirmesindeki etkilerini incelemişlerdir. Bilindiği gibi tezgâhlarda işlenen silindirik parçalar kullanılabilecek ölçü dışına çıktığında "atık" olarak değerlendirilip "hurdaya" ayrılırlar. Eğer bu hurda malzemeler çeşitli üretim yöntemleriyle işlenip değerlendirilirse endüstride büyük bir ekonomiklik sağlanabilir. Sunulan çalışma atıkların yeniden değerlendirilmesi ile ilgili olarak yürütülen bir araştırmanın ön sonuçlarının sunulması ile ilgilidir. Çalışmada, temin kolaylığı ve ekonomiklik nedeniyle AISI1040 malzeme kullanılmıştır. Deney malzemesinden talaşlı işleme yoluyla hazırlanan deney parçaları, daha önceden tespit edilen optimum parametrelerin altındaki parametreler kullanılarak, laboratuvar şartlarında oluşturulmuş bir tezgahta sürtünme kaynağı ile birleştirildikten sonra çıkartılan numuneler 150 metre/ton kapasiteli bir hidrolik preste belirli oranlarda yığılmıştır. Yığma parçalanma şekil ve değişimleri ile sertlik dağılımlar elde edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre 30 MPa sürtünme basıncında maksimum çekme dayanımının gerçekleştiğini, 10 MPa sürtünme basıncı değerinde ise en küçük çekme dayanımı değerinin tespit edildiği gözlenmiştir. Yığma oranlarında özellikle alt, orta ve üst yığma değerleri seçilerek form değişimleri grafik olarak sunulmuştur. Beklenildiği gibi kaynak bölgesindeki bölgesel sertleşme nedeni ile şekil değişimi bu bölgede güçleşmiş ve çap değişimi de o oranda daha az olmuştur. Sertlik dağılımları çubuk eksenine yatay

mesafede mikrosertlik cihazında incelenmiştir. Buna göre kaynak merkezlerinde sertlik değerlerinin arttığı ve ara yüzey bölgesinde en üst değeri aldığı, ITAB bölgesinin ise yaklaşık olarak 1,5-2 mm değerlerinde seyrettiği gözlemlenmiştir [30].

S.S.Yutaka ve ark. (2004) 1050 Al alaşımı ve AZ31 Mg alaşımını sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Çalışmalarında karıştırıcı uç devrini 2450 dev/dak ve ilerleme hızını 1.5 mm/sn sabit tutmuşlardır, karıştırma esnasında uç ile is parçası arasında 3°' lik bir açı kullanarak saat ibresi tersi yönünde karıştırma yapmışlardır. Sonuç olarak, kaynak bölgesinde oldukça yüksek miktarda Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> intermetalik bileşiğinin oluştuğunu ve kaynak merkez sertliğinin oldukça arttığını tespit etmişlerdir [31].

X.K. Zhu ve ark. (2004) çalışmalarında 300 dev/dak ve 500 dev/dak olmak üzere iki farklı uç devri seçerek 304 paslanmaz çeliğin SKK yöntemiyle birleştirilmeleri anında oluşan sıcaklık ve artık gerilmeleri sonlu elemanlar yöntemiyle çözmüşlerdir [32].

S.S.Yutaka ve ark. (2004) 5052 Al alaşımını SKK yöntemiyle birleştirmişlerdir. Kaynak işlemi sonrasında, kaynak bölgesinde dağlama işlemi yaparak taramalı elektron mikroskobu ile yerel olarak bölgeyi incelemişler ve izlenen yolun lineer olmadığını (zikzak şeklinde olduğunu) tespit etmişler ve kaynak dikişi üzerinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin oluştuğunu gözlemlenmiştir [33].

Bu çalışmada farklı vida tipleri ve farklı geometrik şekilli özel karıştırıcı pimler tasarlanmıştır ve bunların imalatı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu farklı karıştırıcı uçlar kullanılarak Al alaşımı SKK yöntemiyle birleştirilmiştir. Birleştirilen bu parçaların çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir, mikroyapıları incelenmiştir ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Bu deneyler ışığında en iyi performansı sağlayan birleştirme ve uç tasarımı tespit edilmiştir.

### **3. SÜRTÜNME VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMLERİ**

#### **3.1. Sürtünme Kaynağı Yöntemi**

Sürtünme kaynağı; elektriksel enerji veya diğer enerji kaynaklarından yararlanmadan parçaların yüzeylerinde tamamen mekanik dönme hareketiyle oluşturulan sürtünmenin neden olduğu ısıdan yararlanılarak uygulandığı kaynak yöntemi olarak tanımlanabilir.

Sürtünme kaynağı teknolojisi sürekli gelişim gösteren dünyamızın birçok ülkesinin endüstrisinde uygulama alanı bulmuş ticari ve ekonomik bir yöntemdir. Malzemelerin kaynak edilmesinde kullanılan enerji kaynaklarından birisi de sürtünme enerjisidir. Sürtünme ısısından yararlanılarak kaynak ve şekillendirme 1900'lü yılların başına rastlamakla birlikte endüstriyel başlangıcı 1950'li yılların ortalarına rastlamaktadır. Bevington sürtünme ısısından yararlanarak boruların kaynağını yapmıştır. 1924 yılında W.Richter İngiltere'de, H.Klopstock Sovyetler Birliğinde patent almıştır. 1941 yılında A.R. Nealonds ve H.Klopstock silindirik parçaların sürtünme kaynağı için birer patent almışlardır. Ayrıca II. Dünya savaşı sırasında Almanya ve Amerika'da plastik malzemelerin kaynağında sürtünme kaynağı kullanılmıştır [34, 35].

İngiltere'de ilk sürtünme kaynağı 1961 yılında kaynak enstitüsü tarafından yapılmıştır. 1962 yılından itibaren pek çok fabrikada sürtünme kaynağı kullanılmaya başlanmıştır. Yine 1962 yılında ABD'de Caterpillar Tractor Co. Atalet kaynağı adı altında sürtünme kaynağını değiştirerek kullanmıştır. Sürtünme kaynağı yöntemi bu tarihten itibaren daha hızlı bir gelişme göstererek hızla bütün dünyaya yayılmıştır. Günümüzde sürtünme kaynağı modern kaynak yöntemleri arasında yer almıştır. Elektron ışın kaynağından sonra pratikte en çok uygulama alanı bulmuş bir yöntemdir [34, 35].

Sürtünme kaynağının ticari amaç için seri üretim de kullanılması amacı ile bilimsel çalışmaları bir Rus makinist başlatmıştır. 1956 yılında A.J. Chdikov

iki metal çubuğu sürtünme kaynağı ile uygun şartlarda birleştirerek bir patent almıştır. Sovyetler Birliğinde daha yoğun çalışmalar Vill ve arkadaşları tarafından yürütülmüştür. Bu yöntem ABD'ye 1960'da girmiştir. Holland ve Cheng adlı araştırmacılar sürtünme kaynağının termal ve parametre analizleri üzerinde çalışmışlardır [34, 35].

Sürtünme kaynağı uygulamalarının büyük bir kısmını dairesel kesite sahip miller ve borular oluşturmaktadır. Yakın zamana kadar geçerliliğini koruyan sadece silindirik ve dönel simetriye sahip kesitlerde kullanılabileceği sınırlaması günümüzde değerini yitirmiştir. Dönel aynanın istenilen pozisyonda kendini frenlemesi sayesinde dönel simetrisi olmayan kesitlerinde kaynağı gerçekleştirilmektedir. Buradaki problem ise merkezleme sorunudur. Sürtünme kaynağının başlangıcından bitimine kadar ara yüzey basınç altındadır. Kaynak işleminde uygulanan basınç; sabit parça tarafından, hareketli parça tarafından dönen her iki parça tarafından sağlanır.

Kaynak işlemi üç aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada malzeme yüzeyleri düşük yük altında temas haline getirilir ve deformasyon işlemi sürtünme aşınması ile yönlendirilir. İkinci aşamada uygulanan yükler yavaşça artırılır. Kaynaklanacak parçaların ara yüzeyleri boyunca önemli ölçüde sürtünme ısısı oluşur. Üçüncü aşamada yığma basıncı uygulanarak birleşme tamamlanır ve oluşan çapaklar tornalanır [36].

Yine bunlara ek olarak sürtünme kaynağıyla aynı veya farklı malzeme türleri, eşit veya farklı kesitli parçaların birleştirilmesi de kolaylıkla gerçekleştirilmektedir. Sürtünme kaynağında parametrelerin belirlenmesi büyük önem kazanmaktadır. Bu kaynak türündeki en önemli parametreler; sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığma süresi, yığma basıncı ve devir sayısı olarak sayılabilir. Parçalar kaynak edilirken birleştirilecek parçaların yüzeylerinin de yağ ve oksitten arındırılması kaynak yapılırken olumlu bir işlem olacaktır. Sürtünme kaynak yöntemi genel olarak;

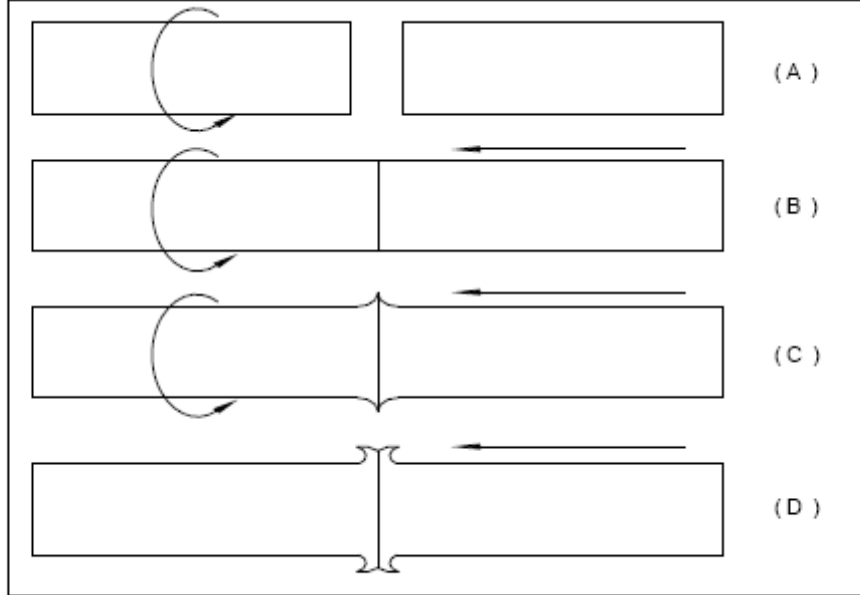
- Klasik (Sürekli Tahrikli) Sürtünme Kaynağı

Birleştirilecek parçalardan biri eksenini etrafında döndürülmekte diğeri ise eksensel yönden hareketli olarak dönen parçaya belirli bir süre bastırılmaktadır. Sürtünen yüzeylerde yeterli sıcaklığa erişilince dönme işlemi ani olarak durdurulurken basınç arttırılmakta ve yumuşak malzeme bu yüksek basınç altında soğumaya bırakılmaktadır.

- Volanlı (Atalet)

Bu yöntemde bir volandaki kinetik enerjiden yararlanılır. Volan, işlem den önce belli bir devir sayısına getirilerek tahrik motoru devreden çıkarılır. Birleştirilecek parçaların birbirine bastırılmasıyla sürtünen yüzeyler ısınır ve kaynak edilir [25].

Sürtünme kaynağının genel yöntemi Şekil 3.3'de görülebilir;



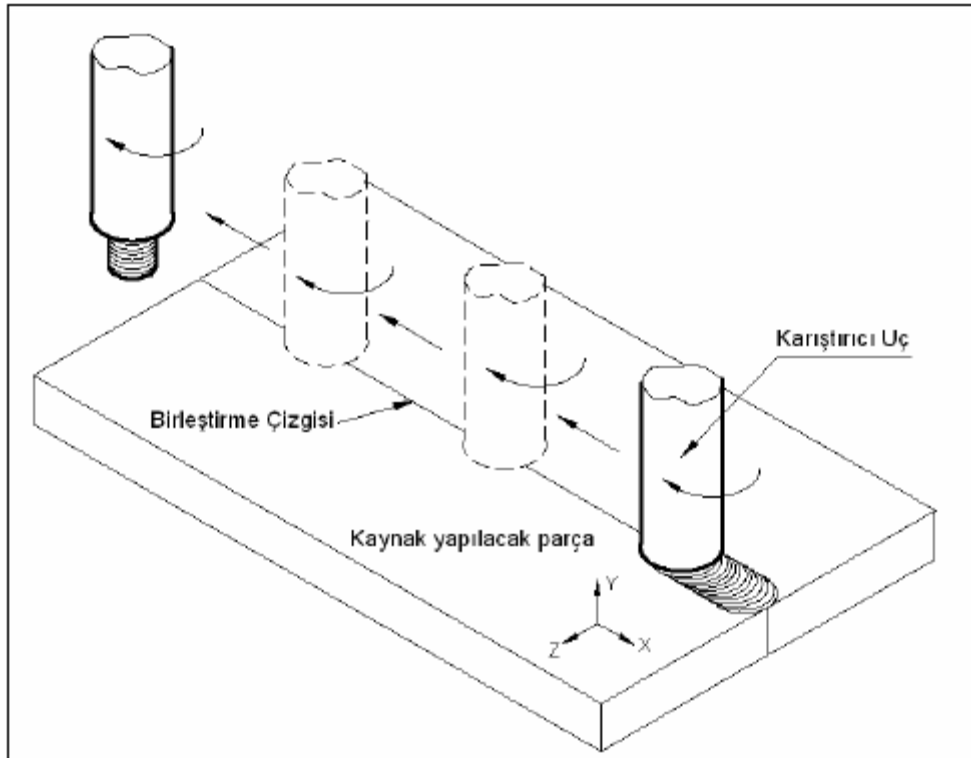
Şekil 3.3. Sürtünme kaynağının yapım aşaması [38].

- A) 1. parçaya dönme hareketi verilmiştir, B) 2. parça ilerletilerek temas sağlanmıştır, C) Sürtünme ile birleştirme başlamıştır, D) Sürtünme ile birleşme sağlanmıştır

### 3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemi

SKK yöntemi sürtünme kaynak yönteminden faydalanılarak geliştirilmiş, bir kaynak türüdür. Özellikle kaynak yapılması çoğu zaman zor olan al alaşımların birleştirilmesi, sürtünme karıştırma kaynağı performansının geliştirilmesi için kullanılabilmesine rağmen araştırmalar sanayinin ilgisi al alaşımlarını birleştirmek üzerine toplanmıştır. Bu kaynak yöntemi 1 mm' den az 35 mm' den daha kalın olan ve kaynaklanamaz olarak düşünülen alüminyum malzemelere uygulanmış ve çok iyi mekanik özellikler elde edildiğini görülmüştür [37]. Bu kaynak türü daha çok özel uçak ve askeri sanayide kullanım alanı bulan kaynak türüdür [38].

Sürtünme karıştırma kaynağının genel yöntemi Şekil 3.4'de görülebilir;



Şekil 3.4. Sürtünme karıştırma kaynağının yapım aşaması [38]

### 3.3. Sürtünme Karıştırma Kaynak İşlemi İçin Temel Hazırlık

Sürtünme karıştırma kaynağı işlemine ilk olarak tezin araştırma konusu olan karıştırıcı uçların tasarlanması ile başlanmıştır. Daha sonra tasarlanan karıştırıcı uçların üretimi yapılmıştır. Karıştırıcı uçlar imal edildikten sonra parçaların birleştirme işlemine tabi tutulmaları aşamasında bize gerekli olan bağlama kalıbının tasarımına ve imalatına geçilmiştir. Birleştirilen parçaların kaynak esnasında yana yukarıya ve ileriye doğru hareket etmelerini önlemek için bir bağlama kalıbına sıkıca bağlanması gerektiğinden buna uygun bir bağlama kalıbı tasarımı yapılmıştır ve imal edilmiştir. Bu birleştirme esnasında malzeme yukarıya doğru kalkmaya, yana doğru kaymaya ve ileriye doğru itilmeye çalışacaktır. Bu nedenle malzeme bağlama kalıbına çok iyi monte edilmelidir ve çok iyi sabitlenmelidir. Bu sabitleme işlemi için çeşitli hidrolik baskı pabuçları kullanılabilir. Ayrıca birleştirme hattında geometrik bozuklukların önüne geçilebilmesi için karıştırıcı ucun her iki yanında ve önünde baskı bilyesi kullanılabilir. Özel olarak imal edilmiş silindirik kademeli bir karıştırıcı uç dairesel hareket yapabilen bir aparata veya makineye aparat yardımıyla bağlanmıştır. Sonra dönmekte olan karıştırıcı yavaşça birleşme hattı üzerine bastırılmıştır. Karıştırıcı ucun boyu istenilen kaynak derinliği ile aynıdır. Dönen karıştırıcının ucu işlenen yüzeye temas ettiği zaman meydana gelen sürtünme, karıştırıcı ucun temas ettiği noktayı aniden ısıtmıştır ve böylece malzemenin mekanik direncini azaltmıştır. Uygulanan kuvvet altında karıştırıcı uç malzemeyi, karıştırıcı uç omuzu da izlenen yüzeye temas edinceye kadar karıştırıcı uç ve onun hareket ettiği yönde zorlamaktadır ve yerinden oynatmaktadır. Bu işlemde dönen karıştırıcı ucun meydana getirdiği sürtünme ısı, karıştırıcı uç etrafında ve karıştırıcı uç omuzu altında yumuşamış bir metal tabakası oluşturmuştur. Kaynak yapılacak parçaların veya karıştırıcının ileriye ve geriye hareket etmesi halinde, yumuşamış olan metal karıştırıcı ucun ön yüzü tarafından kaldırılmıştır ve karıştırıcı ucun mekaniksel dönüşü yönünde ve bastırma hareketi ile karıştırıcı ucu arkasından dönerek sürüklemiştir [38].

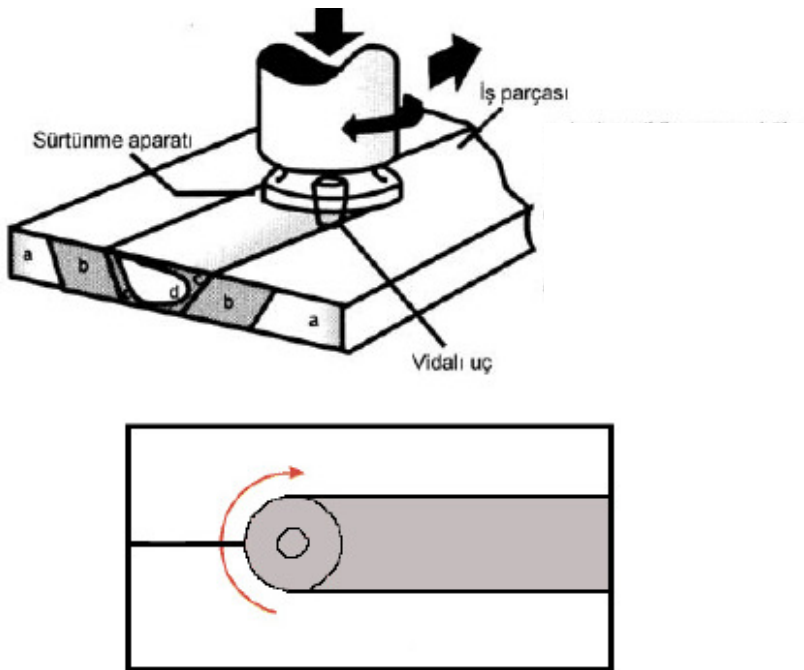
Sonuç olarak karıştırıcı uç birleşme hattı içine girdikçe oluşan sürtünme birleşme yüzeylerini ısıtarak metali yumuşak hale çevirmiştir, takiben birleşme hattını ezerek oksit filmi kırmıştır, yumuşak metali karıştırarak birbirine birleştirmiştir ve ileriye hareketi ile geride kalan birleşim soğuyarak katı hal kaynağını oluşturmuştur. Tüm bunlar alaşımın ergime noktasının altında bir sıcaklıkta meydana gelmiştir [39].

### **3.4. Kaynağın Uygulama Yöntemi**

Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Birleştirilecek parçalar, alın altına aralarında boşluk kalmayacak şekilde sabitlenmiştir. Yöntemin uygulama aşaması iki farklı şekilde olabilir. Parçaların hareketi söz konusu olabileceği gibi, takımın dönme ve ilerleme hareketi de mümkün olmaktadır [7]. Geniş silindirik omuzlu, delme yapabilecek şekilde bir pim (karıştırıcı uç), freze tezgahı ekipmanları ve arka tutucular kullanılarak yüksek devirde döndürülerek; kaynak yapılacak parçalara daldırılmıştır ve kaynak yapılacak uzunluk boyunca ilerletilmiştir. Pim, malzemelere temas ettiğinde sürtünme kaynağındaki duruma benzer bir durum oluşarak temas noktasında ısı, sürtünmenin de etkisiyle hızla artmıştır ve malzemelerin plastik değişimine neden olmuştur. Bu değişim malzemelerin akışını sağlamıştır [20]. Karıştırıcı uçtan omuza kadar olan bölgedeki kombine sürtünme ısı, gömülmüş olan karıştırıcının çevresi ile malzeme üst yüzeyi ve omuzun temas ettiği temas yüzeyinde yumuşamış bir metal oluşturmuştur; pim etrafındaki malzeme sürtünmeyle ısınıp yumuşayarak pimin ucundan arka yüzeye doğru karıştırılmıştır. Karıştırılan malzeme, hidrostatik basınç koşullarında soğuyarak katılaşmıştır ve birleşme olayı gerçekleşmiştir [27].

### 3.5. Kaynak Dikiş Formu ve Metalurjik Yapı

SKK yöntemi bir katı hal yöntemi olduğundan kaynak dikişinde ergime meydana gelmez. Yüksek ısı meydana çıkmadığından ısıdan etkilenen bölge de oldukça dardır. Şekil 3.5’de genel çalışma prensibi görülebilir. Ergitme kaynak yöntemi ile elde edilen kaynak dikişlerinden farklı bir kaynak dikişi ve metalurjik yapı elde edilir. Isıdan etkilenmeyen ana metalden kaynak dikişine doğru oluşan bölgeleri sıralarsak, kaynak bölgesinde oluşan içyapı Şekil 3.6’da şematik olarak gösterilmiştir [39]. Kaynak bölgesi üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge, termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge ve ısı tesiri altında karışım bölgesinin şekli kaynak parametrelerine, birleştirilen alaşımların mekanik özelliğine ve kullanılan karıştırıcı ucun şekline bağlı olarak değişmiştir [39].



Şekil 3.5. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin çalışma prensibi [27]

- a) Isıdan etkilenmeyen bölge, b) Isı tesiri altındaki bölge,
- c) Termo-mekanik etki altındaki bölge, d) Kaynak merkezi



Şekil 3.6. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü  
 A) kaynak tesiri altında olmayan bölge B) ısıнын tesiri altındaki bölge C) Yeniden kristalleşen bölge , D) dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge [39]

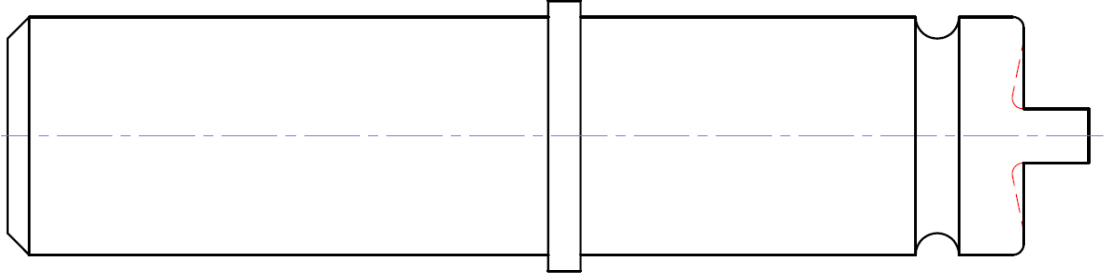
### 3.6. Karıştırıcı Uç ve Özellikleri

Karıştırıcı ucun tasarımı yapılırken dikkat edebilmesi gereken önemli noktalar vardır. SKK yönteminde kullanılan karıştırıcı ucun iki bölgesi çok önemlidir. İlk olarak karıştırıcı ucun karıştırma yaptığı bölgede kullanılan dış yapısı ve bir diğeri ise uç kısmın üstünde bulunan ve birleştirilecek parçalara temas eden geniş yüzeyin özelliğidir. Bu nedenle uç tasarımı yaparken bunlar dikkate alınmıştır. Bu döneme kadar yapılan çalışmalarda genellikle benzer tiplerde uçlar kullanılmıştır. Eğer düzgün bir kaynak işlemi ve düzgün bir yüzey elde edilmesi isteniyorsa bu noktalara dikkat edilmelidir.

Görülüyor ki SKK yönteminde birleştirme kalitesini etkileyen en önemli faktörlerden biri de, karıştırıcı ucun tasarım profili ve uç formudur. Bu faktörlere bağlı olarak birleştirme kalitesi değişmektedir. Karıştırıcı ucun tasarımı, kaynak bölgesindeki metal akış yolunu kolaylaştıracak bir tasarım şekli düşünülerek yapılmalıdır [38].

Bu tez çalışmasının en önemli amacı endüstride kullanılan dış tiplerinin ( Metrik, trapez, yuvarlak vb.) vida tipleri ile birlikte üçgen konik ve silindir geometrisindeki uçların SKK yönteminde birleşmeye etkileri incelenecektir. Karıştırıcı ucun tasarımını yapılırken bu noktalara dikkat edilerek genel bir karıştırıcı uç tasarlanmıştır (Şekil 3.7 ) ve bu uçlara metrik, trapez, yuvarlak,

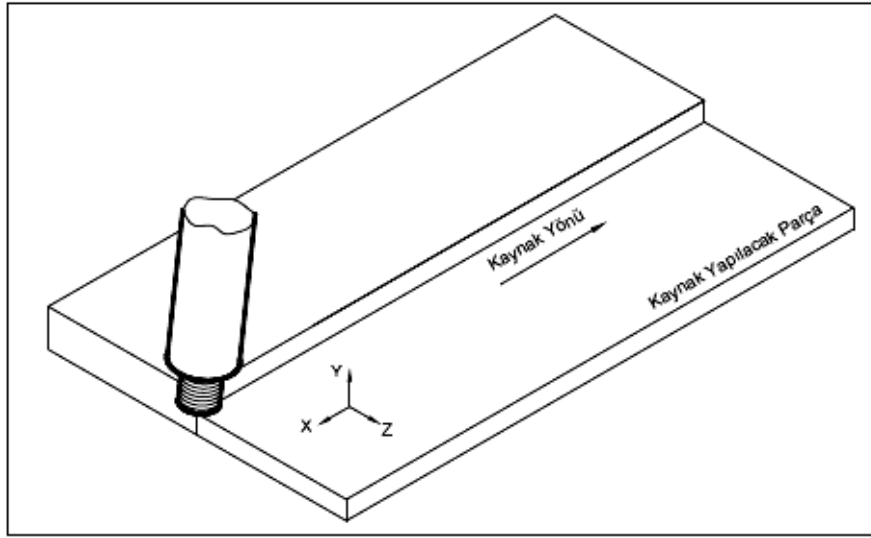
kare ve üçgen vida açılmıştır. Ayrıca kare, üçgen ve konik şekilli pim tasarımı yapılmıştır.



Şekil 3.7. Temel olarak tasarlanan karıştırıcı uç formu

### 3.7. Malzeme Özellikleri ve Kaynak Parametreleri

Yapılan çalışmalar, özellikle 2219, 2014, 6083, 6082 ve 7075 vb. Al alaşımlarında sürtünen eleman ile kaynak yönteminin başarıyla uygulandığını ortaya koymuştur [40]. Kaynak için kullanılan profillerin kalınlıkları 1.2 mm den 50 mm' ye kadar çıkabilmekte ve tek paso ile sürekli kaynak bağlantısı elde etmek mümkün olmaktadır. Farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirme işlemi pimin eğik konumda levhalara daldırılması ile yapılmalıdır (Şekil 3.8) [38].



Şekil 3.8. Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde ucu eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi [40]

### 3.8. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılabilen Malzemeler

Birçok metalik malzeme ve bileşimlerinin SKK için, uygulamalar, yöntemler ve deneyler yapılmıştır ve çeşitli veriler elde edilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağının özelliği, ergitme kaynağı ve diğer kaynak türlerinin uygulanamadığı malzeme ve malzeme bileşimlerinde de başarıyla kullanılabilmesidir. Diğer kaynak türlerinin uygulanması için çeşitli veriler olması gerekmektedir. Fakat bu veriler SKK için her zaman bir ölçüt olmayabilir. Bunun sebebi, birleşme sıcaklığının düşük, kaynak süresinin kısa ve birleştirmenin bir baskı ve kuvvet altında yapılmasıdır. Bu söylenenlere örnek olarak çeliğin alüminyum ve bakır ile toz metalurjisi ile üretilen parçaların ve seramiklerin alüminyum ile sert ve ağır metallerin diğer metallerle SKK yöntemiyle yapılan birleştirilmeleri gösterilebilir [41].

Döküm-döküm al alaşımlarında, döküm-dövme al alaşımlarında, sıvı hal kaynak yöntemleri ile kaynağı güç olan 0,8 mm kalınlığındaki çinko saçların kaynağında, düşük karbonlu yumuşak çeliklerde, orta karbonlu çeliklerde, metal matrisli kompozitlerde, plastiklerde, farklı iki malzemenin kaynaklarında, bakır alaşımlarında, kurşun, titanyum ve çinko alaşımlarında

bu yöntem başarı ile uygulanmıştır. Ayrıca zırh kaliteli alüminyum saçların sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliği üzerine mekanik testler yapılmıştır [38].

Dayanıklılığı yüksek ve üstün balistik performansı olduğu bilinen zırh kaliteli al alaşımlar halen deniz kuvvetlerinin gelişmiş amfibrik taarruz araçlarında kullanılmaktadır. Geleneksel ark kaynağı GMAK (gaz metal ark kaynağı) ve GTAK (gaz tungsten ark kaynağı) ile yapılan belirli 2519 kaynak tipleri maalesef gerekli balistik eleme testlerinden geçememişlerdir. Testten geçememek, birçok kaynak birleştirme tasarımının araç yapısında kullanılmasını engellemiştir. Balistik eleme sırasında 2519'un kusuru diğer alüminyum zırhları ile kıyaslandığında nispeten düşük genleşebilme özelliğine atfedilmiştir [41].

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilecek gereçlerin ikisinin de eş prizmatik kesitli olmalıdır. Aynı özellikte veya farklı özellikte olan malzemeler sürtünme karıştırma kaynağı ile birbirine kaynak edilebilir. Fakat aynı özellikteki malzemelerin seçilmesi, kaynağın daha kaliteli olmasını sağlar. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birbirine kaynak edilebilen malzemeler şunlardır:

- Bakırın, al ve alaşımlara,
- Düşük karbonlu çelikleri, alaşımlı çeliklere, paslanmaz çeliklere, al ve alaşımlara,
- Pirincin, al ve alaşımlara,
- Bronzun, al ve alaşımlara,
- Bakırın, çeliğe,
- Pirincin, çeliğe,
- Titanyum ve titanyum alaşımlarının, çeliğe,
- Titanyum ve titanyum alaşımlarının, al ve alaşımlarına, 23
- Paslanmaz çelik, Zirkonyum gibi metallere kaynak edilebilir [42].

Belirtilen bu metal ve alaşımların özellikleri birbirinden farklı olmasına rağmen, sürtünme karıştırma kaynağı ile kolaylıkla birleştirme yapılabilmektedir [38].

Sürtünme karıştırma kaynağının 2519 T87 zırhlı al alaşımı malzemelerin birleştirilmesinde kullanılıp kullanılmayacağı hususunu tespit etmek üzere GDYS (Genel dinamik yer sistemleri) ile Edison kaynakçılık enstitüsü tarafından ortak bir program yürütülmüştür. Sürtünme karıştırma kaynağı takım geometrisini ve kaynak parametrelerini başlangıçta bildirmek üzere bir termal model kullanımını kapsıyordu ve istenilen sonuçları almak için ihtiyaç duyulan kaynak parametrelerini daha sonra netleştirmek için istatistiksel olarak tasarlanan bir deneyi geliştirmek üzere bu modelin verileri kullanılmıştır. Bu program sonucu yapılan iş, ısının tesiri altındaki bölgeye benzer, ancak önemli derecede yüksek genleşmeye sahip sürtünme karıştırma kaynağı yapmak olmuştur. Gelişim işlem parametrelerini kullanarak uzunluğuna yapılan kaynak sacları, balistik kaynak darbe testinden istenilen hususlardan başarı ile geçmiştir [43].

### **3.9. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Etkin Olan Kaynak Parametreleri**

SKK dikkat edilmesi gereken oldukça çok sayıda parametre içermektedir. Bu yöntemle ilgili değişkenler; dönme hızı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, ilerleme süresi, yığma geciktirme süresi, yığma basıncı (dövme) ve yığma süresidir. Yapılan çalışmalarda yöntem üzerinde en etkili olan ve optimizasyonu gerektiren parametrelerin devir sayısı, sürtünme karıştırma süresi, ilerleme ve kullanılan uç olduğunu göstermiştir. Bu değerlerin dışında kaynatılacak malzeme şartlarına bağlı parametreler de söz konusudur.

Konu ile ilgili kaynak eserler incelendiğinde kaynak parametreleri ile ilgili şu genel sonuçlar çıkarılabilir [44].

Dönme hızı termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölgenin genişliğine de etkili olmuştur. Çelikler için çevresel hız 1,2-1,8 m/s arasında önerilmektedir. 1,2 m/s altındaki hızlar çok yüksek momentler dolayısıyla uniform olmayan yığılmalar meydana getirmiştir. Bununla birlikte farklı metal bağlantıları için düşük hızlar, gevrek bir intermetalik bileşiğin formlaşmasını minimize etmiştir. Yüksek hızların kullanılması durumunda ise sürtünme karıştırma süresi ve basıncı çok iyi kontrol edilmelidir [44] .

Sürtünme basıncı ve yığma basıncı, numune geometrisine ve yapıldığı malzemeye bağlıdır. Değişim dar bir aralıkta değildir. Basınç değişkeni kaynak bölgesindeki sıcaklık veya eksenel kısalma ile kontrol edilebilir. Sürtünme basıncı temas eden yüzeylerden oksitleri uzaklaştırabilecek atmosfer ile ilişkisinin kesebilecek ve ara yüzeylerde dengeli bir ısınmayı sağlayabilecek değerde olmalıdır. Yığma basıncı ise malzemelerin sıcak akma sınır değerine bağlıdır. Aşırı kaynak yığılmasına sebep olacak kadar yüksek, yetersiz kaynamaya neden olacak kadar da düşük olmamalıdır. Farklı malzemelerin kaynağında sıcak akma sınırı düşük olan malzeme esas alınarak yığma basıncı tespit edilmiştir. Genel olarak yumuşak çeliklerin sürtünme basıncı 30-65 MPa, yığma basıncı 75-140 MPa iken orta ve yüksek karbonlu çeliklerin kaynağında sürtünme basıncı 70-210 MPa, yığma basıncı ise 100-420 MPa arasındadır [44].

Sürtünme ve yığma süreleri malzemeye bağlıdır. Sürtünme süresi malzeme yüzeylerindeki pislik ve oksitleri temizleyebilecek gerekli plastisite için uniform bir kaynak bölgesi sıcaklığını sağlayabilecek düzeyde olmalıdır. Uygun bir kaynak bağlantısı için ısıtma süresi iyi tespit edilmelidir. Yetersiz ısıtma süresi kaynakta uygun plastisite değeri yakalayamadığı için birleşme yetersiz olacaktır. Aşırı ısıtma zamanı ise yığma basıncı sırasında fazla yığılmadan dolayı malzeme kaybına neden olacaktır [45].

### 3.10. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Üstünlükleri ve Sınırlamaları

Sürtünme karıştırma kaynağı süresince ısıtılan metal miktarı çok küçük olduğundan soğutma süresi de birkaç saniyeden yarım dakikaya kadar çok küçük bir zaman aralığını kapsayabilir. Bu özellik nedeni ile sürtünme karıştırma kaynağı yalnızca elektrik direnç kaynağı ile karşılaştırılabilen çok yüksek hızlarda yapılabilmektedir [38].

#### 3.10.1. Sürtünme karıştırma kaynağının avantaj ve dezavantajları

Sürtünme karıştırma kaynağının belli sınırlamaları olduğu gibi, bilinen diğer kaynak işlemlerine göre daha fazla avantajlara sahiptir [46]. Sürtünme kaynağının avantajları aşağıdaki gibidir [38]:

1. Erimeyi kolaylaştıran malzeme (Flux dolgu malzemesi) ve koruyucu atmosfere gerek yoktur.
2. Elektrik gücü ve toplam enerji gereksinimi diğer kaynak işlemlerinin sadece küçük bir oranı kadardır.
3. İşlem diğer kaynak işlemlerine nazaran daha temizdir. Çok az atık vardır. Ark gaz çıkışı oluşmaz.
4. Isıdan etkilenmiş olan alan çok dardır ve gözenek ölçüsü ana malzemenin gözenek ölçüsünden daha küçüktür.
5. Farklı özellikteki malzemelerin birbirleri ile birleşmesine uygundur. Eritme kaynağı ile birleştirilemeyen malzeme ve kompozitler sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilir (Örnek :2XXX, 7XXX Al alaşımları ve Al-Li alaşımları)
6. Al alaşımların üzerinde bulunan ince oksitlenmeler temizlenmeden kaynak işlemine geçilebilir.
7. Katı hal birleşme tekniği olduğundan, al alaşımları birleştirmede katılaşma ve sıvılaşma çatakları görülmez.

8. Uygun kaynak parametreleri ve karıştırıcı uç kullanıldığında, diğer birleştirme teknikleri ile yapılanlardan daha iyi hale gelir. Çekme, yorulma ve kopma mukavemetleri daha yüksektir.
9. 2000 ve 7000 seri al alaşımların birleştirilmesine uygundur.
10. Karıştırıcı ucun HSS kalitesinde yapılması, çok fazla parçanın kaynağın yapılmasını sağlayabilir.
11. Al alaşımlarının birleştirilmesinde plastik deformasyon sayesinde, ana metale göre kaynak metalinde daha ince taneli bir yapı ve kristalleşme meydana gelmiştir.
12. Sürtünme karıştırma kaynağında buharlaşma olmadığından, ana metalde eksilme olmaz.
13. İnsan sağlığına zararlı kaynak dumanı, radyasyon v.b. etkileri karşılaşılmaz.
14. Kaynak yapımında, eriyik metal ve ark oluşumu yoktur.
15. Malzeme çarpılması azdır. Malzeme uzun olduğu sürece oluşur.
16. Kullanılan aparata göre değişik kalınlıklardaki al alaşımları, tek bir karıştırıcı uç ile gerçekleştirilebilir.
17. Kaynak metalinde gözenek problemi yoktur.
18. İstenilen tüm kaynak pozisyonları için uygundur.
19. Enerjiden tasarruf sağlayan kaynak tipidir.
20. Eriyen ilave metal kullanmaya gerek yoktur.
21. Koruyucu maske ve gaz kullanımına gerek yoktur.
22. Kalifiye işçiliğe gerek duyulmaz.
23. Kaynak sonrasında oluşan çapakların temizlenmesinde başka herhangi bir taşlama ve fırçalamaya gerek yoktur.

### **3.10.2. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarında görülen bazı sınırlamalar**

İş parçalarından birinin kaynak yüzeyi yuvarlak (silindirik) veya silindire yakın olmalı, tutulabilir ve döndürülebilir büyüklükte olmalıdır [47]. Prizmatik

parçalar içinde, eş parçalar ve farklı geometrilere sahip parçalarda sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilebilir [38].

1. İş parçaları torka, ısınmaya ve birleştirme esnasındaki aksenal basınca dayanıklı olmalıdır.
2. İş parçalarını tutan cihazlar ağır şok ve tork yüklerine dayanacak güçte olmalıdır.
3. Geleneksel sürtünme kaynağı, açısal birleşimler için pahalı değişikliklerin yapılmasını gerektirir.

### **3.10.3. Sürtünme karıştırma kaynağının daha kaliteli kaynak dikişleri**

Sürtünme hareketi ile bütün oksit ve diğer tabakalar parçalanarak yüzeyden uzaklaştırılır ve sürtünen yüzeyler arasındaki sürekli temas kaynak sırasında oksit filmlerinin oluşmasını önlemiştir [38].

Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında kaynak süreksizliklerinin büyük bir kısmı ortadan kaldırılabilir. Bağlantı bölgesi, hızlı yerel ısıtma ve soğutma sonrası uygulanan yüksek basınç nedeni ile ince taneli bir yapıya sahiptir. Hızlı yerel ısıtma ve ayrıca bağlantıya bitişik olan göreceli olarak geniş ısıtılmamış bölgeler, yerel ısınmış bölgelerden ısıyı hızla çekmesi sonucunda çok dar bir ısının tesiri altındaki bölge oluşmuştur [38].

Bütün bu üstünlüklerinin yanında sürtünme karıştırma kaynağının bazı sınırlamaları da vardır. Sürtünme karıştırma kaynağını sınırlandırılan en büyük etken parçanın sahip olduğu geometrik biçimdir. Her ne kadar günümüzde özel yöntemler geliştirilmişse de bağlantısı yapılacak parçalardan birinin bir eksene göre simetrik olması ve çoğu kez bir eksen etrafında dönebilir olması istenir. Sürtünme karıştırma kaynağını sınırlandıran en büyük etken parçanın sahip olduğu geometrik biçimdir [38].

Her ne kadar günümüzde özel yöntemler geliştirilmişse de bağlantısı yapılacak parçalardan birinin bir eksene göre simetrik veya eş prizmatik

parçalar olması ve çoğu kez bir eksen etrafında dönebilir olması tercih edilmelidir. Sürtünme karıştırma kaynağını sınırlandıran diğer önemli bir etken ise kesit alanıdır. Kesit alanının çok büyük olması, motor gücünün ve yığma basıncı değerlerinin çok yüksek olmasına neden olur. Sürtünme karıştırma kaynağı için kesit alanları 30-8000 mm<sup>2</sup> değerleri arasında sınırlanırken, bazı araştırmacılar azami kesit alanını 10000 mm<sup>2</sup> olarak vermişlerdir. Çubuk parçalar için uygun çap değerleri de 10-250 mm olarak önerilmiştir [48].

#### 4. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışması yapılırken şu işlem basamakları takip edilmiş ve uygulanmıştır:

- Sürtünme karıştırma kaynağını gerçekleştirecek farklı tip ve adımda karıştırıcı uçlar tasarlanmış ve imatları gerçekleştirilmiştir.
- Sürtünme karıştırma kaynağı yapılacak malzemenin, kaynak sırasında sabitlenmesini sağlayacak bağlama kalıbı tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir.
- Sürtünme karıştırma kaynağı yapımı için uygun malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir.
- Bu işlemlerin yapılması için uygun makine ve aparatlar tedarik edilmiştir.
- Sürtünme karıştırma kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.

##### 4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılacak Malzeme Çeşidi

Bu çalışmada kullanılmak üzere Al7075 malzemesi seçilmiştir. Bu malzemenin genel özellikleri Çizelge 4.1 ve 4.2'de verilmiştir. SKK yöntemi için bu malzemenin seçilmesinin çeşitli sebepleri vardır. Bunlar; yüksek sertlik, çekme mukavemetinin ve birleşme kabiliyetinin çok iyi olması ve dayanım özelliğinin iyi olmasıdır. Fakat korozyona karşı oldukça duyarlı olması malzemenin olumsuz yönü olarak karşımıza çıkmaktadır.

Aynı zamanda, Al7075 malzemesi mekanik özellikleri nedeniyle endüstride birçok alanda kullanılmaktadır. Endüstride bu malzeme genellikle uzay ve uçak sanayinde kullanılmaktadır. Bu özellikler, deney malzemesi olarak Al 7075 malzemesinin seçiminde etkili olmuştur.

Çizelge 4.1. Al7075 kalite al alaşıminın kimyasal bileşimi [55]

| İŞLEM ALAŞIMLARI KİMYASAL BİLEŞİM LİMİTLERİ |      |      |           |      |           |
|---------------------------------------------|------|------|-----------|------|-----------|
| ETİNORM                                     | Fe   | Si   | Cu        | Mn   | Mg        |
| ETİAL-44<br>Al 7075                         | 0,50 | 0,40 | 1,20-2,00 | 0,30 | 2,10-2,90 |

Çizelge 4.2. Al7075 kalite al alaşıminın mekanik özellikleri [55]

| ETİNORM             | MEKANİK ÖZELLİKLER |                                     |                                      |                           |                                       |                                      |
|---------------------|--------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
|                     | Isıl İşlem         | Akma Dayanımı<br>Kg/mm <sup>2</sup> | Çekme Dayanımı<br>Kg/mm <sup>2</sup> | %Uzama<br>(50mm)<br>mm/mm | Sertlik<br>(HB)<br>Kg/mm <sup>2</sup> | Kesme Dayanımı<br>Kg/mm <sup>2</sup> |
| ETİAL-44<br>Al 7075 | O                  | 12,5                                | 21,5                                 | 10                        | 60                                    | 15,5                                 |

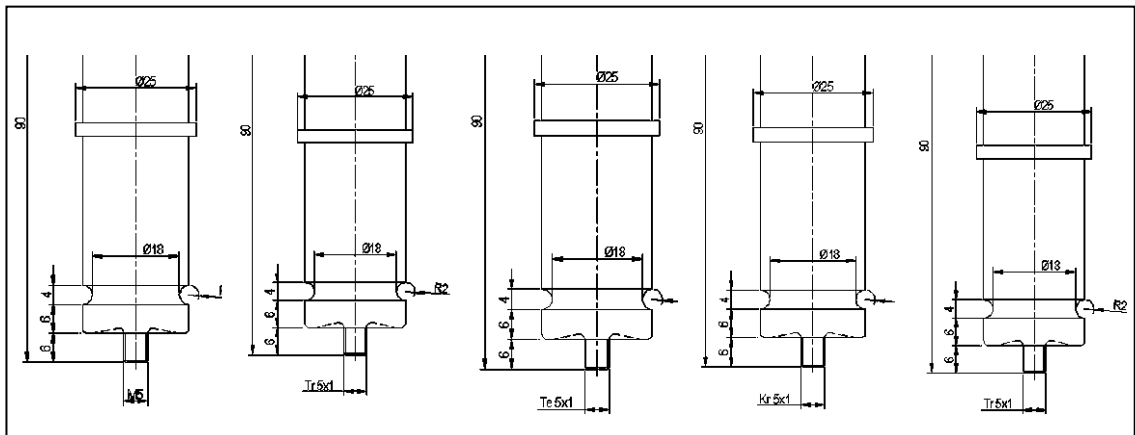


Resim 4.1. Al7075 malzemenin kaynak işlemine hazır hali

Al7075 malzemesi 5x50x100 ölçülerinde tedarikçi firmadan hazır halde 50 adet temin edilmiştir (Resim 4.1). Bu parçalar sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile ve farklı tip adımda tasarlanan karıştırıcı uçlar kullanılarak birbirleriyle birleştirilmesi ve yapılacak deneylerde kullanılması hedeflenmiştir.

#### 4.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Uç tasarımı, Özellikleri ve İmalatı

Tezin hedef amaçlarından en önemlisi sürtünme karıştırma kaynağında kullanılacak uçların tasarımı ve üretilmesidir. Karıştırıcı uçların tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. SKK yönteminde kullanılan karıştırıcı ucun iki bölgesi çok önemlidir. Bunlardan ilki karıştırıcı ucun çapıdır. Tasarıma başlarken karıştırıcı ucun çapını  $\varnothing 5$  olarak belirlenmiştir ve  $\varnothing 5$  üzerine ise metrik, yuvarlak, kare, trapez ve testere dişler belirlenen adım 1mm'ye göre 5 mm boyunda tasarlanmıştır (Şekil 4.9). Bunlara ek olarak  $\varnothing 5$ 'e teğet olarak, üçgen, kare, konik ve silindir profil tiplerinde diş çekilmeden karıştırıcı uçlar tasarlanmıştır. Bu karıştırıcı uçların yanında sadece silindir profil için 3 kanallı ve 4 kanallı olmak üzere iki farklı tip karıştırıcı uç tasarlanmıştır. Toplamda 20 farklı uç tasarlanmış oldu. Daha sonra vida dişli olarak tasarlanan karıştırıcı uçların kaynak olan malzemenin akışını kolaylaştıracağını düşünerek birisine  $120^\circ$  açı ile 3 adet, diğer birisine  $90^\circ$  açı ile 4 adet kanal açıldı. Parça çizimleri Autocad 2007 ve Solidworks 2007 çizim programları kullanılarak her biri için 2D ve 3D olarak çizimleri hazırlanmıştır ve imal edilmiştir.



Şekil 4.9. Tasarımı yapılan vida dişli karıştırıcı uçlar

Karıştırıcı uçların tasarımında bundan önceki araştırmalarda göz önüne alınarak özellikle endüstride kullanılan diş tipleri (Metrik (üçgen), trapez, yuvarlak, kare ve testere) üzerinde durulmuştur. Bununla birlikte diş açılmadığında karıştırıcı uç tiplerinin birleştirme kalitesini karşılaştırmak için üçgen, silindir, konik ve kare profiller tasarlanmıştır. Teorikte bilindiği üzere vida tipleri bağlantı ve hareket olmak üzere ikiye ayrılır. Üçgen vida tipi en sık kullanılan bağlantı civatasıdır. Üçgen profilli vidalarda profil eğimi sürtünme

$$\mu' = \tan \rho' = \frac{\mu}{\cos \frac{\beta}{2}}$$

direncini arttırdığı ( ) için üçgen dişlerde birim alanda sürtünme en üst düzeydedir. Hareket civatalarında ise birim alanda sürtünme çok azdır. Bu teorik bilgiden yola çıkarak tasarladığımız uçlarda en mukavemetli birleştirme kalitesini üçgen vida tipinde elde edeceğimiz konusunda bir öngöründe bulunabiliriz. Hareket civatalarında ( yuvarlak ve kare) ise düşük mukavemetli bir birleştirme elde edilebileceği söylenebilir. Bu kısım ile ilgili yorum, deney ve test sonuçlarına göre öneriler kısmında belirtilecektir.

Karıştırıcı uçları bir pens yardımıyla freze tezgâhına bağlamamız gerekeceğinden pens bağlama mesafesinden sonra bir kademe yapılmıştır. Bu tasarım mantığıyla karıştırıcı uç kaynak işlemi yaparken pensin içine kaçmasını engellemek amaçlanmıştır. Sürtünme karıştırma kaynak yapımına uygun şekilde karıştırıcı uçlar tasarlanmıştır. Tasarlanan karıştırıcı uçlara ait detay resimleri EK-1’de verilmiştir.

Karıştırıcı uç malzemesi olarak Ç4340 ıslah çeliği tercih edilmiştir ve bu malzemeden her uç tipinden 3’ er adet üretimi yapılmış ve 50-52 HRc sertliğinde ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur.

#### 4.2.1. Ç 4340 kalite ıslah çeliğin özellikleri

AISI 4300 serisi çeliği, Düşük alaşımlı yapı çelikleri, Dövme kalite çelikler, Orta karbonlu çelik, Alaşımlı çelik sınıfına girmektedir. Endüstride yaygın adı Nikel - Krom - Molibden Çeliği olarak tanınır. Çeliğin tüm özellikleri çizelgelerde gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Ç 4340 ıslah çeliğinin genel özellikleri

| MKE<br>NORMU | DIN<br>NORMU    | GEREÇ<br>NR. ST. | SAE<br>AISI | KULLANIM ALANLARI                                                                                                         |
|--------------|-----------------|------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ç 4340       | 340Cr Ni<br>Mo6 | 1,6582           | 4340        | Yüksek dayanım gerektiren makine parçaları şaft<br>mil cıvata dişli krank milleri eksantrik milleri<br>şanzıman parçaları |

Çizelge 4.4. Ç 4340 ıslah çeliğinin kimyasal özellikleri

| SEA<br>AISI | C             | Si        | MN        | P     | S     | Cr            | Mo            | Ni            | V   |
|-------------|---------------|-----------|-----------|-------|-------|---------------|---------------|---------------|-----|
| 4340        | 0,38-<br>0,43 | 0,15-0,40 | 0,60-0,80 | 0,035 | 0,040 | 0,70-<br>0,90 | 0,20-<br>0,30 | 1,65-<br>2,00 | --- |

Çizelge 4.5. Ç 4340 ıslah çeliğinin sıcak şekillendirme ve ısıtma işlem sıcaklıkları

|                                                    |                                                                               |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Sıcak şekillendirme sıcaklığı<br>(dövme sıcaklığı) | 1050 °C ( Başlangıç ) max.<br>850 °C ( Bitiş )                                |
| Normalizasyon tavlama sıcaklığı<br>(normalizasyon) | 850 – 880 °C (Havada Soğutma)                                                 |
| Yumuşak tavlama sıcaklığı                          | 700 °C ye ısıtılır ve bunu takiben 650 °C ye ani<br>soğutulur 8 saat beklenir |
| Yumuşak tavlama (Perlitik yapı için)               | 830 °C ye ısıtılır ve bunu takiben 705 °C ye ani<br>soğutulur.                |
| Sertleştirme ortamı ve soğuma<br>sıcaklığı         | Suda : --                                                                     |
|                                                    | Yağda : 830 – 860 °C                                                          |
| Temperleme (Menevişleme)                           | 540 – 680 °C                                                                  |
| Gerilim Giderme                                    | 120 – 200 °C                                                                  |

Çizelge 4.6. Ç 4340 Islah çeliğinin mekanik özellikleri

| Özellikleri                    | Değeri  | Koşullar |                          |                                                        |
|--------------------------------|---------|----------|--------------------------|--------------------------------------------------------|
|                                |         | T (°C)   | Temper<br>sıcaklığı      | İşlem                                                  |
|                                |         |          |                          |                                                        |
| Elastik Modülü , Gpa           | 190-210 |          |                          |                                                        |
| Darbe Mukavemeti , İzod<br>(J) | 51,1    | 25       | 810 °C de tavllanmış     |                                                        |
|                                |         |          |                          |                                                        |
| Max. Çekme<br>Mukavemeti, MPa  | 744,6   | 25       | 810 °C de tavllanmış     |                                                        |
|                                | 1279    |          | 870 °C normalize edilmiş |                                                        |
|                                | 1875    |          | 205                      | Yağda<br>Serleştirme,<br>ince taneli ,<br>temperlenmiş |
|                                | 1724    |          | 315                      |                                                        |
|                                | 1469    |          | 425                      |                                                        |
|                                | 1172    |          | 540                      |                                                        |
|                                | 965     |          | 650                      |                                                        |
|                                |         |          |                          |                                                        |
| Akma Mukavemeti, Mpa           | 472,3   | 25       | 810 °C de tavllanmış     |                                                        |
|                                | 861,8   |          | 870 °C normalize edilmiş |                                                        |
|                                | 1675    |          | 205                      | Yağda<br>Serleştirme,<br>ince taneli ,<br>temperlenmiş |
|                                | 1586    |          | 315                      |                                                        |
|                                | 1365    |          | 425                      |                                                        |
|                                | 1076    |          | 540                      |                                                        |
|                                | 855     |          | 650                      |                                                        |
|                                |         |          |                          |                                                        |
| Uzama %                        | 22      | 25       | 810 °C de tavllanmış     |                                                        |
|                                | 12,2    |          | 870 °C normalize edilmiş |                                                        |
|                                | 10      |          | 205                      | Yağda<br>Serleştirme,<br>ince taneli ,<br>temperlenmiş |
|                                | 10      |          | 315                      |                                                        |
|                                | 10      |          | 425                      |                                                        |
|                                | 13      |          | 540                      |                                                        |
|                                | 19      |          | 650                      |                                                        |
|                                |         |          |                          |                                                        |
|                                | 40      |          | 315                      |                                                        |
|                                | 44      |          | 425                      |                                                        |
|                                | 51      |          | 540                      |                                                        |
|                                | 60      |          | 650                      |                                                        |
| Kesit Daralması %              | 49,9    | 25       | 810 °C de tavllanmış     |                                                        |
|                                | 36,3    |          | 870 °C normalize edilmiş |                                                        |
|                                | 38      |          | 205                      | Yağda<br>Serleştirme,<br>ince taneli ,<br>temperlenmiş |

Çizelge 4.7. Ç 4340 Islah çeliğinin fiziksel özellikleri

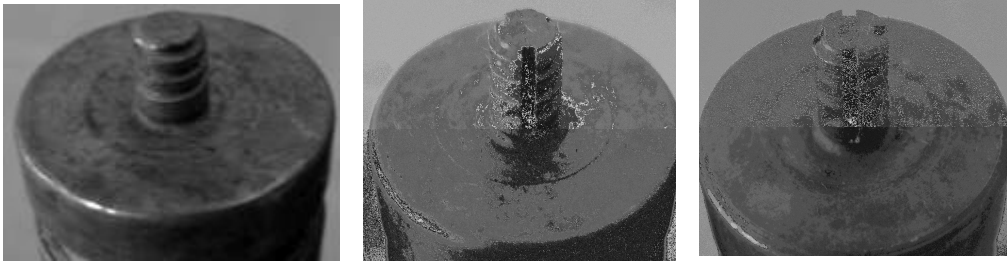
| Özellikleri                           | Değeri     | Koşullar |                          |                                               |
|---------------------------------------|------------|----------|--------------------------|-----------------------------------------------|
|                                       |            | T (°C)   | Temper Sıcaklığı         | İşlem                                         |
| Yoğunluğu (x 1000 kg/m <sup>3</sup> ) | 7.7- 8.03  |          |                          |                                               |
| Erime Noktası (°C)                    | 1413 °C    |          |                          |                                               |
| Poisson Oranı                         | 0.27- 0.30 | 25       |                          |                                               |
| Sertlik, HB                           | 217        | 25       | 810 °C de tavllanmış     |                                               |
|                                       | 363        |          | 870 °C normalize edilmiş |                                               |
|                                       | 520        |          | 205                      | Yağda Serleştirme, ince taneli , temperlenmiş |
|                                       | 486        |          | 315                      |                                               |
|                                       | 430        |          | 425                      |                                               |
|                                       | 360        |          | 540                      |                                               |
|                                       | 280        |          | 650                      |                                               |

#### 4.2.2. Karıştırıcı uç imalatı

Malzeme tedarikçi firmadan Ø26x6000mm olarak tedarik edilmiştir. Testerede her biri Ø26x92mm boyunda kesilmiştir ve toplamda 60 parça elde edilmiştir. Daha sonra bu parçalar torna tezgahında istenen ölçülere getirilmiştir. Çizimde belirtilen uç formlarına göre vida dişleri açılmıştır. Ölçüsüne getirilen bu karıştırıcı uçlar ısıtılma işleme gönderilmiştir. Isıl işlem uygulamasında malzeme Çizelge 5.6'da belirtilen özelliklerde ısıtılma işleme tabi tutulmuştur ve 50-52 HRc sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem den döndükten sonra kanal açılacak olan uçlar için dalma erozyon makinesine bağlamak üzere 3 kanallı ve dört kanallı bakır işlenmiştir ve dalma erozyon makinesi ile kanalları açılmıştır. Daha sonra yine çapak temizleme taşı ile çapakları temizlenmiştir ve karıştırıcı uçlar SKK yönteminde kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Karıştırıcı uç tipleri aşağıda gösterilmiştir.



Resim 4.2. İmal edilen karıştırıcı ucun genel görünümü



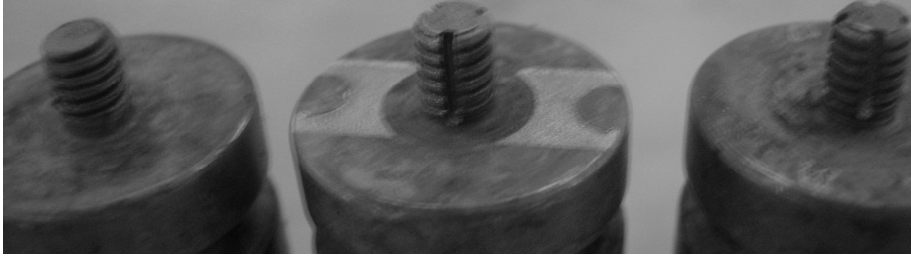
Resim 4.3. Kare vida karıştırıcı ucun genel görünümü



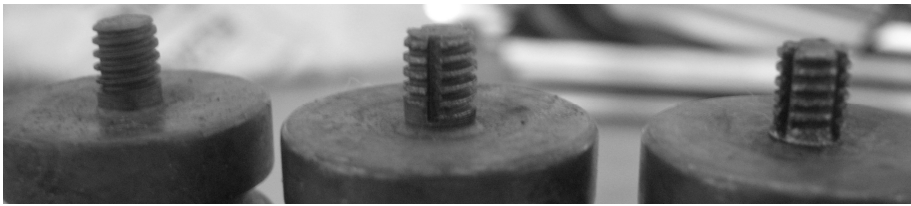
Resim 4.4. Yuvarlak vida karıştırıcı ucun genel görünümü



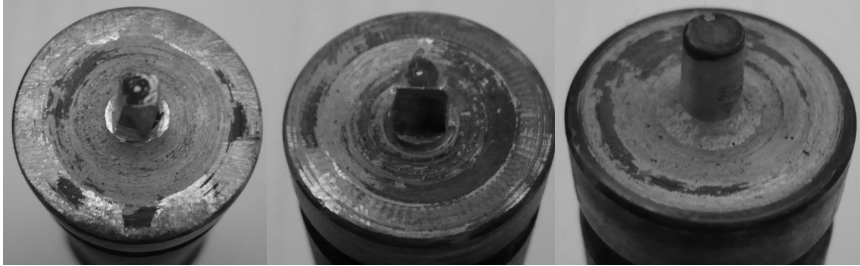
Resim 4.5. Üçgen (metrik) vida karıştırıcı ucun genel görünümü



Resim 4.6. Trapez vida karıştırıcı ucun genel görünümü



Resim 4.7. Testere vida karıştırıcı ucun genel görünümü



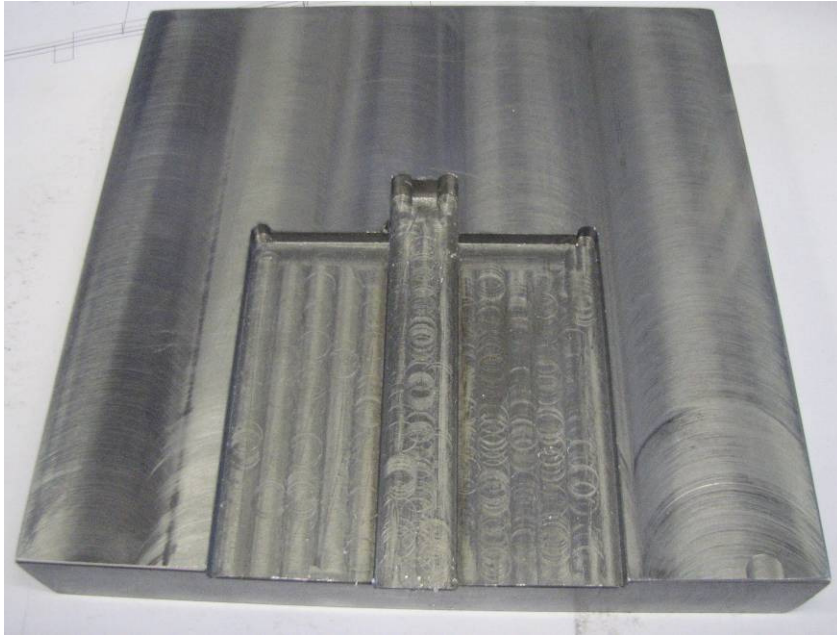
Resim 4.8. Kare, konik ve üçgen karıştırıcı ucun genel görünümü



Resim 4.9. Silindir uç ve dört kanallı karıştırıcı ucun genel görünümü

#### 4.3. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminde Kullanılacak Bağlama Kalıbı

SKK bağlama kalıbı, birleştirilecek malzeme ölçülerine göre tasarlanmış olup, kullanılacak malzemenin en hızlı ve kolay şekilde bağlanıp sökülmesi esas alınıp buna göre tasarlanmıştır. Bağlama kalıbı Ç 1050 çeliğinden bir freze yardımıyla üretilmiştir. Bağlama kalıbında malzemenin oturacağı yüzeyler tam ölçüsünde işlenmiştir. Bağlama kalıbı SKK yöntemini uygulama aşamasında parçanın hareket etmesini engelleyecek biçimde tasarlanıp üretilmiştir. Bağlama kalıbı tek bir plaka parçadan üretilmiştir. Bağlama kalıbının freze tablasına montajını bağlama pabuçları yardımıyla tabla “T” kanallarından yararlanılarak yapılmıştır. Numune malzemesini bağlama kalıbına sabitlemede freze tezgahının özel aksesuarı olan bağlama pabuçları kullanılmıştır. Numune parçanın bağlama kalıbına sabitlenmesi de benzer bir şekilde tablanın “T” kanallarından yararlanılarak yapılmıştır. İmal edilen bağlama kalıbı, Resim 4.10’da gösterilmiştir.



Resim 4.10. Bağlama kalıbı genel görünüşü

Bağlama kalıbı, operasyonu yapılacak freze tezgâhına oldukça düzgün ve sağlam bağlanmalıdır. Eğer bu bağlama yeterince iyi yapılmazsa sürtünme karıştırma kaynağı istenilen biçimde olmaz. Bağlama kalıbı karıştırıcı ucun hareketini kısıtlayacak her türlü detaya dikkat edilerek tasarlanıp işlenmiştir ve malzeme yukarı doğru kalkmasını engelleyecek şekilde bağlama pabuçları ayarlanmıştır. SKK işlemi sırasında bağlama kalıbında ve numune parçada hiç bir şekilde gevşeme, kayma, yukarı kalkma vb. durumlar olmamıştır.

#### 4.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Tezgâh Tipi

Sürtünme karıştırma kaynağı işlemini yapacağımız tezgâh TOS marka bir universal freze tezgâhıdır. Universal freze tezgâhının özellikleri Çizelge 4.9' da verilmiştir.

Çizelge 4.8. Universal freze tezgâhının özellikleri

|                   |                                                |           |              |
|-------------------|------------------------------------------------|-----------|--------------|
| Tabla ölçüleri    | Tabla Çalışma Ölçüleri                         | mm        | 1000x500x400 |
|                   | T Kanal Sayısı ve Genişliği                    | mm        | 3 x 63       |
|                   | Tablaya Bağlanabilecek Maksimum Parça Ağırlığı | Kg        | 400          |
| Tabla hareketleri |                                                | MOTORİZE  | ELLE         |
|                   | Boyuna Hareket (X eksen)                       | mm        | 990 1000     |
|                   | Enine Hareket (Y eksen)                        | mm        | 330 340      |
|                   | Dikey Hareket (Z eksen)                        | mm        | 450 460      |
|                   | Tablaya Verilebilecek Aç                       | 45°       |              |
| İş mili           | İş Mili Koniği Standardı                       | ISO       | 40           |
|                   | İş Mili Devir Aralığı (18 Kademe)              | dev / dak | 45 - 2240    |
|                   | İş Mili eksen ile Tabla Arası Mesafe, min-max  | mm        | 65 - 425     |
| İlerleme          | Boyuna ve Enine (13 Kademe)                    | mm / dak  | 14 - 900     |
|                   | Dikey (13 Kademe)                              | mm / dak  | 4 - 250      |
| Hızlı ilerleme    | Boyuna ve Enine (X,Y Ekseninde)                | m / dak   | 2,8          |
|                   | Dikey (Z Ekseninde)                            | m / dak   | 0,8          |
|                   | İlerleme Motor Gücü                            | KW        | 1,1          |
|                   | Ana Motor Gücü                                 | KW        | 6,8          |
| Genel ölçüler     | Tezgâhın Kapladığı Alan                        | mm        | 2185 x 1815  |
|                   | Tezgâhın Ağırlığı, (Standart Teçhizat İle)     | Kg        | 2250         |

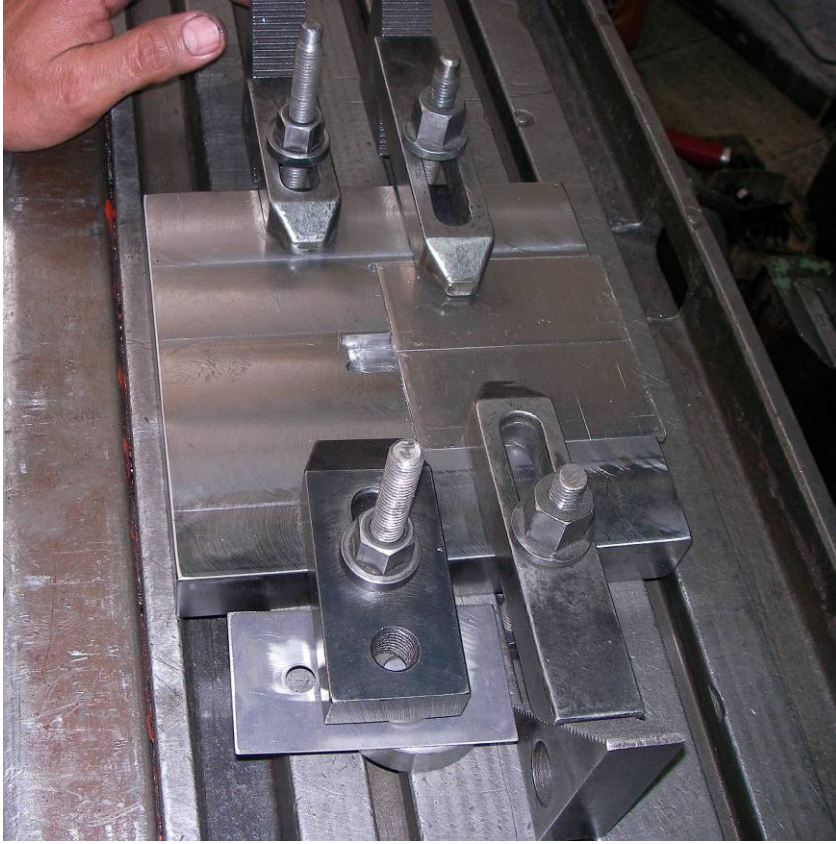
Tezgâhın standart donanımı içinde freze malafası, malafa çekirme çubuğu, soğutma sıvısı, aydınlatma, bakım ve onarım takımı, kullanma ve bakım

kitabı, mengene ve hassasiyet test protokolü bulunmaktadır. Makinede özel donanım olarak dik freze başlığı, planya başlığı, uzun malafa takımı, kısa malafa takımı, pens tutucu ve pens takımı, bağlama pabuçları ve universal divizör bulunur.

#### **4.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağı İşleminin Yapılması**

##### **4.5.1. SKK için tezgahın hazırlanması**

Sürtünme karıştırma kaynak yapılacak olan tezgâh çevresinde gerekli hazırlıklar yapıldı ve gerekli ayarlanmalar ayarlanmıştır. Tezgâh tablasının genel temizliği yapılmıştır. SKK işlemi için hazırladığımız bağlama kalıbını universal freze tezgâhının tablasının üzerine diklik gönyesi ile kontrol edilerek düzgün ve sıkı şekilde iki adet bağlama pabucu yardımıyla bağlanmıştır. Birleştirme işlemi yapılacak numune malzeme, bağlama kalıbının üzerindeki yuvaya sıkı şekilde yerleştirilmiştir ve tablanın “T” kanallarından faydalanılarak iki adet bağlama pabucu ile sabitlenmiştir. Bağlama kalıbı üzerindeki yuva 100x100 mm ölçülerinde, numune malzemelerin ölçülerine uygun biçimde işlenmiştir (Resim 4.11). Bağlama sırasında önemli nokta birleştirilecek malzemeleri kalıba bağlarken birbirlerini alında ve yatayda sıfırlamalarıdır. Numune parçalar bağlama kalıbına bağlanırken bu konuya özen gösterilmiştir ve işlem sırasında bu konuyla ilgili hiçbir şekilde sorun yaşanmamıştır.



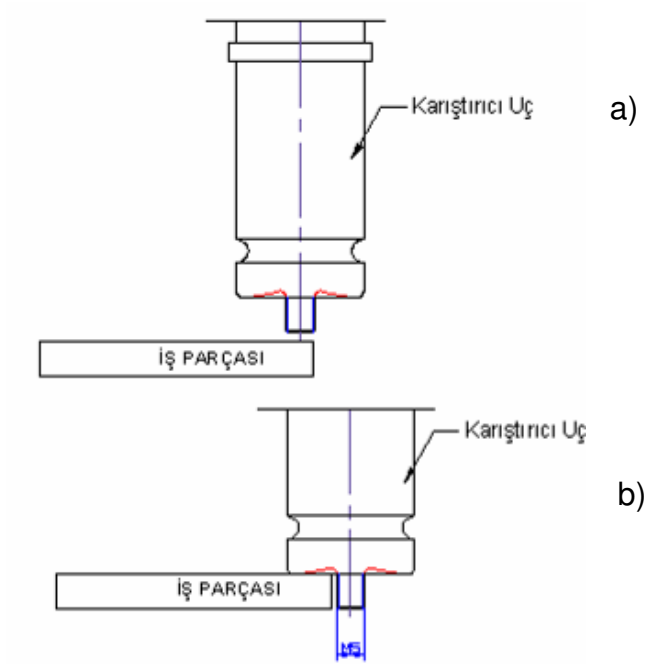
Resim 4.11. Sürtünme kaynağı işleminin başlangıç aşaması

Bağlama kalıbı dikkatli bir şekilde tezgah tablasına sabitlendikten ve numune parçada sıkı şekilde bağlama kalıbına bağlandıktan sonra tekrar numune malzemenin kontrolleri yapılmıştır. Malzeme kalıba bağlandığı sırada numune malzemelerin birbirlerine alın alına ve yatayda öpüşmesine dikkat edilmiştir. Numune malzemeyi bağladıktan sonra tezgâha Ø22'lik uçları takmak için Ø 22'lik pens temin edildi. Tezgâhın iş miline Ø22'lik karıştırıcı uç bağlanmıştır ve sıkılığı kontrol edilmiştir (Resim 4.12).

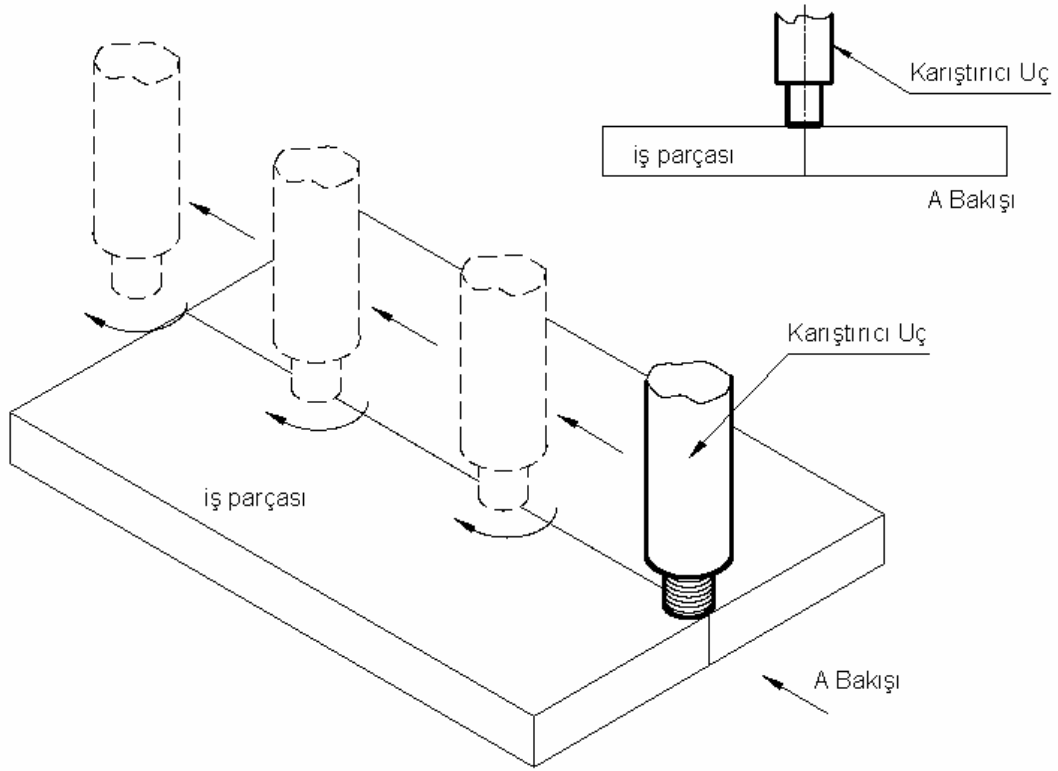


Resim 4.12. Karıştırıcı ucun pens yardımıyla tezgaha bağlanması

Tezgah sürtünme karıştırma kaynağına hazır hale getirilmiştir. Tezgâh ile ilgili ayarlama işlemine geçmeden önce, bağlanan malzemenin tekrar sabitliği kontrol edilmiştir. Kaynak işlemini gerçekleştirecek karıştırıcı uç, kaynak yapılacak malzeme üzerine doğru getirilerek yanaştırılmıştır (Şekil 4.10.a). İki numunenin birleşme çizgisi ve karıştırıcı ucun ekseninin aynı hizada olması gerektiğinden karıştırıcı uç merkezi ile malzemelerin birleşme çizgisinin hizası kontrol edilmiştir (Şekil 4.11). Elle sıfırlama ayarı yapmak için tezgâh devri 1000 dev/dak alınarak malzeme üzerine “Z” eksenini doğrultusunda yaklaştırılmıştır. Karıştırıcı uç “Z” ekseninde malzeme üzerine temas edinceye kadar uç aşağı doğru indirilmiştir (Şekil 4.10.b).



Şekil 4.10. Al alaşımlı malzemeye karıştırıcı ucun yavaşması  
 a) Karıştırıcı uç, iş parçasına yaklaştırılmıştır  
 b) Karıştırıcı uç, iş parçasın üzerinde sıfırlanmıştır



Şekil 4.11. Karıştırıcı ucun, alüminyum malzemeye kaynak öncesi hizalanması [38]

#### 4.5.2. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemine başlama

Karıştırıcı ucun hizalanması ve malzemeye teması sağlandıktan sonra sürtünme karıştırma kaynağı için tezgâh devri 710 dev/dak ve ilerleme 28 mm/dak olarak ayarlanmıştır. Tezgâh ilk olarak el kontrolü ile malzemeye yaklaştırılmıştır. Tezgâh ilerlemesi otomatik olarak çalıştırılmıştır ve kaynak işlemi başlatılmıştır.

İlerlemenin 28 mm/dak gibi düşük bir ayarda başlatılmasındaki amaç, kaynak yapacak ucun, iki alüminyum numune arasına girmeye çalışırken ani dalışını engellemek ve karıştırıcı ucun ısınmasını sağlamaktır [38]. Kaynak işlemi sırasında malzeme yüzeyinde meydana gelen erime görüldüğünde, ilerleme miktarı tezgâh durdurulmadan 40 mm/dak 'ya çıkartılmıştır. Bir kaç uygulama ile devir sayısı ve ilerleme miktarı belirlenmiştir. Devir sayısı 1000 mm/dak ve

ilerleme miktarı da 40 mm/dak olarak belirlenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağının yapım aşamasında her bir karıştırıcı uç için bu değerler sabit tutulmuştur ve bu değerlerle 20 adet farklı karıştırıcı uç için numune kaynak denemesi yapılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı imalatı sırasında çekilen bazı fotoğraflar Resim 4.13-4.14-4.15’de gösterilmiştir.



Resim 4.13. Kaynak işleminin başlangıcı



Resim 4.14. Kaynak işlemi parçanın orta konumunda



Resim 4.15. Kaynak işlemi bitmiş durumda

Sürtünme karıştırma kaynağına ilk olarak kanalsız karıştırıcı uçlar ile başlanmıştır ve tek tek kare, yuvarlak, testere, trapez ve üçgen vida açılmış karıştırıcı uçlar ile kaynak yapılmıştır.

Kare dişli uçla yapılan kaynak malzemeye teması sırasında ve bir miktar malzeme içerisine girene kadar freze tezgahında elle hissedilebilir bir sarsıntı olmuştur. Malzeme içerisine yaklaşık 20 mm ilerlediğinde bu sarsıntı kaybolmuştur. Kare dişli uçla yapılan kaynak düzgün olarak tamamlanmıştır.

Yuvarlak dişli karıştırıcı uçla yapılan kaynak sırasında hiçbir olumsuzlukla karşılaşılmamıştır. Karıştırıcı uç rahat bir şekilde malzemeye girerek kaynağı yapmıştır.

Trapez dişli karıştırıcı uçla yapılan kaynakta ise karıştırıcı uç malzemeye girerken zorlandı ve ilerlemede fazla ısı ortaya çıkmıştır. Testere ve üçgen dişli karıştırıcı uçlar ise diğer uçlara nazaran daha zorlanmıştır ve ısınma diğerlerine göre daha fazla olmuştur. Fakat uca zarar verici hiçbir etki olmamıştır.

Bu uçlarla yapılan numuneler Resim 4.16'da gösterilmiştir.



Resim 4.16. Kanalsız karıştırıcı uçlar ile yapılan numuneler

Bir sonraki kaynak deneyi dört kanal açılmış olan karıştırıcı uçlar ile yapılmıştır.

Kare dişli karıştırıcı uç ile yapılan denemede yine parçaya değdiğinde ve bir miktar içeri girene kadar bir sarsıntı oluşmuştur. Fakat yüzeyde ve kaynakta bir problem olmamıştır.

Yuvarlak dişli karıştırıcı uçla yapılan kaynak sırasında yine hiçbir olumsuzlukla karşılaşılmamıştır. Karıştırıcı uç rahat bir şekilde malzemeye girerek birleşme tamamlanmıştır.

Trapez dişli karıştırıcı uçla yapılan kaynakta ise karıştırıcı uçta hafif bir zorlama olmuştur ve ilerlemede kare ve yuvarlağa göre daha fazla ısı ortaya çıkmıştır.

Üçgen dişli karıştırıcı uç ise malzemenin içine az bir miktar girdikten sonra kırılmıştır (Resim 4.17-a). Daha sonra tezgâh devrini 710 mm/dak ve ilerlemeyi de 28 mm/dak düşürülmüştür ve üçgen dişli karıştırıcı uç ile tekrar kaynağa başladığımızda yine bir süre sonra kırılmıştır. Daha sonra devir 1200 mm/dak ve ilerlemede 28 mm/dak olarak işlem tekrarlanmıştır bu sefer istenen birleşme sağlanmıştır.

Testere dişli karıştırıcı uçla yapılan kaynakta, tekrar devir ve ilerleme sabitlediğimiz değerlere getirilmiştir ve kaynak başlatılmıştır. Fakat bu uçta parçanın ortalarında kırılmıştır (Resim 4.17-b). İlerleme 28 mm/dak düşürülerek işlem tekrarlanmıştır ve bu denemede istenen birleşme elde edilmiştir. Kırılan bu karıştırıcı uçlar ile ilgili resimler Resim 4.19-4.20'de gösterilmiştir.

Dört kanallı karıştırıcı uç ile yapılan numuneler Resim 4.18’de gösterilmiştir.



a)



b)

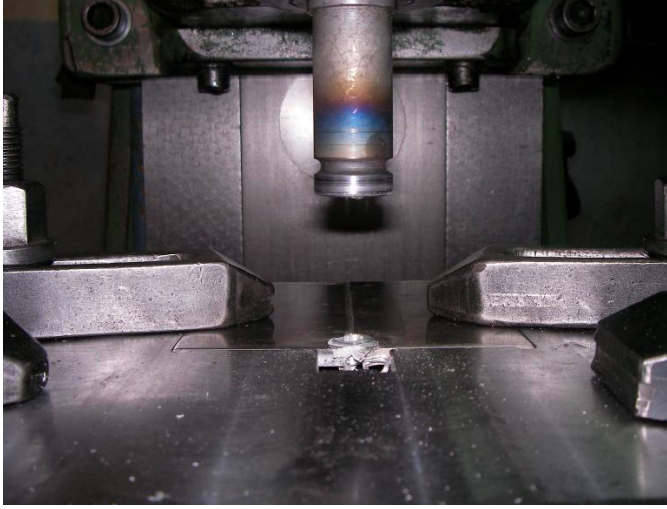
Resim 4.17. Kırılan karıştırıcı uçların numune üzerindeki görüntüsü

a) Üçgen 4 kanallı karıştırıcı ucun numunedeki durumu

b) Testere 4 kanallı karıştırıcı ucun numunedeki durumu



Resim 4.18. Dört kanallı karıştırıcı uç ile yapılan numuneler



Resim 4.19. Kırılan karıştırıcı ucun freze tezgahında gösterimi



Resim 4.20. Kırılan karıştırıcı uca bir örnek

Diğer kaynak deneyi ise üç kanal açılmış olan karıştırıcı uçlar ile yapılmıştır.

Kare dişli karıştırıcı uç ile yapılan denemede yine parçaya temas ettiğinde ve bir miktar içeri girene kadar bir sarsıntı oluşmuştur. Fakat yüzeyde ve kaynakta bir problem olmamıştır.

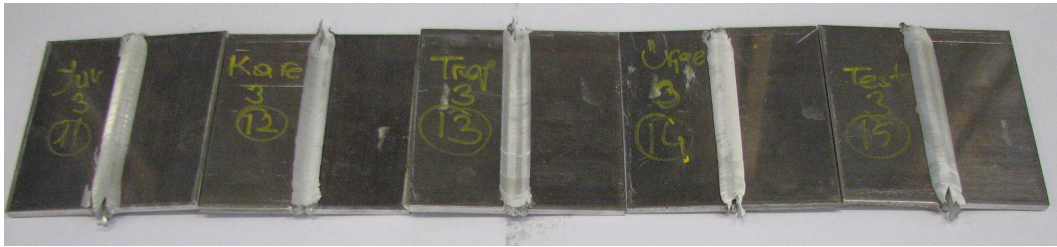
Yuvarlak dişli karıştırıcı uçla yapılan kaynak sırasında yine hiçbir olumsuzlukla karşılaşılmamıştır. Karıştırıcı uç rahat bir şekilde malzemeye girerek kaynağı yapmıştır.

Trapez dişli karıştırıcı uçla yapılan kaynakta ise karıştırıcı uçta hafif bir zorlama olmuştur fakat diğer trapez karıştırıcı uçlara göre daha iyi sonuç vermiştir ve birleşme gerçekleşmiştir.

Üçgen dişli karıştırıcı uç malzemeye girerken bir miktar titreşim yapmıştır ve bu titreşim bir süre devam ettikten sonra titreşim sona ermiştir. Titreşim bittiğinde kaynak yüzeyini düzelterek kaynağa devam etmiştir.

Testere dişli uç trapez dişle aynı tepkiyi göstermiştir. Uç kaynak sırasında hafif zorlanmıştır fakat kaynak kalite olarak iyi seviyede çıkmıştır

Üç kanallı karıştırıcı uç ile yapılan numuneler Resim 4. 21’de gösterilmiştir.



Resim 4.21. Üç kanallı karıştırıcı uç ile yapılan numuneler

En son olarak ise vida açılmayan karıştırıcı uçlar ile deney yapılmıştır. Bu uçlar ile yapılan işlemde freze tezgâhında sarsıntı ve titreme yaşanmamıştır. Fakat hepsinde ortak olarak diş açılmış karıştırıcı uçlara nazaran parçaya girişte zorlama yaşanmıştır. Bu uçlarla birleştirme işlemi standart tezgâh değerleri ile yapıldığında birleşme olmamıştır. Birleşmeyi sağlamak için daha önceki deneme tecrübelerimize göre ilerleme 28 mm/dak düşürülmüştür ve devir 1200 dev/dak. çıkarılmıştır. Bu sefer birleşme sağlanmıştır (Resim 4.22). Fakat gerçekleşen birleşme vidalı birleşmelere göre çok düşük seviyelerde olduğu, konik ve üç kanallı silindir profilli karıştırıcı uç ile yapılan birleştirmelerin birleşme yüzeyinde boşluklar görülmüştür.



Resim 4.22. Vida açılmamış karıştırıcı uçlar ile birleştirilen numuneler

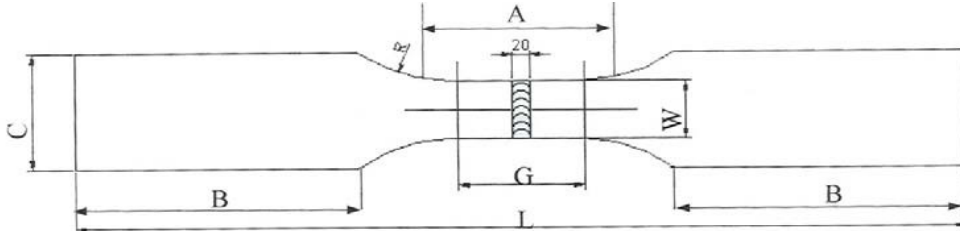
Sürtünme karıştırma kaynak işlemi tüm karıştırıcı uç tipleriyle deney yapılmıştır ve çıkan ürünler Resim 4.23 gösterilmiştir.



Resim 4.23. Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan kaynak numuneleri

#### 4.6. Çekme Test Çalışmaları

SKK yöntemiyle bileştirilen kaynak numuneleri karıştırıcı uç tipine göre Çizelge 5.9' daki gibi numaralandırılmıştır. 100x100x3 ölçülerinde birleştirilmiş numunelerden 2 Adet çekme numunesi çıkartılmıştır. Numuneler tel erozyon tezgâhında istenilen ölçülerde kesilerek deney için hazır hale getirilmiştir. Çekme deney numuneleri TSE 138'e göre Şekil 4.12 'de verilen standart çekme numune ölçülerine göre hazırlanmıştır. Bu işlemlerden sonra numune parçalar çekme deneyine hazır hale gelmiştir. Şekil 4.12 'de TSE 138'e göre standartlaştırılan çekme numunesinin geometrisi ve ölçüleri verilmiştir. Çekme deneyi için hazırlanan numuneler kalite laboratuvarında bulunan 1 ton kapasiteli ZWICK marka çekme cihazında çekme testleri yapılmıştır. Deney sırasında çekme hızı = 5 mm/dak ve Ön yük=10 N olarak belirlenmiştir. Her deney parametresi için 2 çekme numunesi test edilerek, ortalama değerler alınmıştır.



| Standart Deney Parçası         | Ölçü ( mm )  |
|--------------------------------|--------------|
| Anma Genişliği                 | 3            |
| G Ölçü uzunluğu                | $18 \pm 0,5$ |
| W Genişlik                     | $6 \pm 0,10$ |
| T Kalınlık                     | 3            |
| R Yuvarlama yarıçapı, min.     | 6            |
| L Toplam uzunluk, min.         | 70           |
| A Gövde uzunluğu, min.         | 25           |
| B Kavrama uzunluğu             | 20           |
| C Kavrama genişliği (yaklaşık) | 10           |

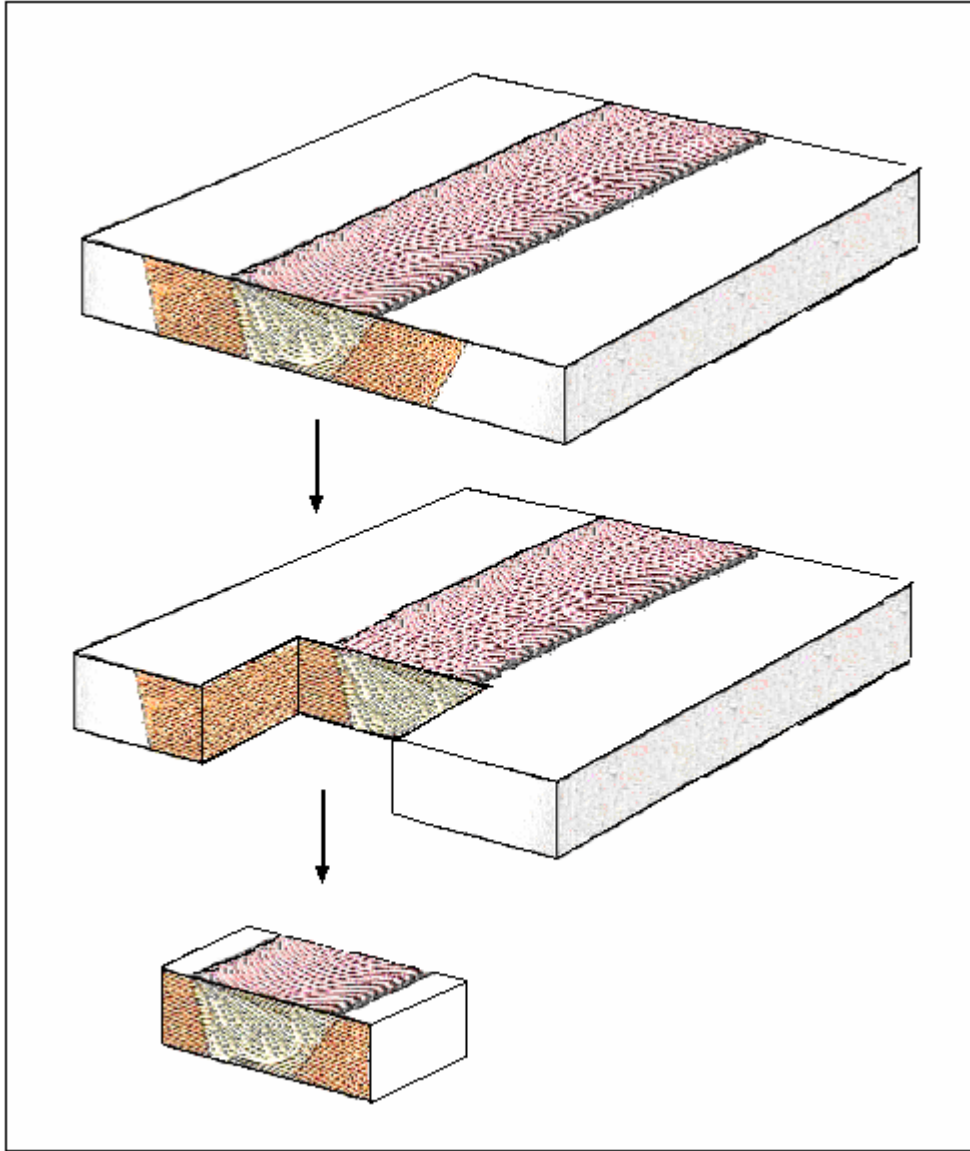
Şekil 4.12. SKK ile birleştirilmiş numunelerin TSE 138'e göre çekme testi numune geometrisi ve ölçüleri

#### 4.7. Mikroyapı Çalışmaları

Mikroyapı incelemesi yapmak üzere vidalı tip karıştırıcı uçlardan en yüksek ve en düşük çekme mukavemeti gösteren uç tipleri ile birleştirilen kaynak numuneleri seçilmiştir. Çekme sonuçlarına göre üçgen ve yuvarlak vidalı uçlar (2,4,7,8,12,13 seçilmiştir ).

Mikroyapı incelemeleri için seçilmiş bu numuneler; soğuk reçineler (akrilik polyester) içine gömülmüştür. Ardından 200-1200# SiC aşındırıcılı zımparalarla zımparalanmıştır. Zımparalanan numuneler, 3µ' luk elmas pasta ile otomatik parlaticıda parlatılmıştır. Parlatma işlemi sonunda numuneler, makro dağlayıcı ile dağlandı. Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numunenin şematik resmi Resim 4.24' de gösterilmiştir.

Mikroyapıların görüntülenmesinde Prior marka optik metal mikroskobu kullanılmış ve görüntüler dijital olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Numunelerde kaynaklanmış bölgeden ana metale doğru mikro-sertlik dağılım profilini elde etmek için mikroyapıları hazırlanan numuneler Shimadzu marka mikro-sertlik cihazında 100 g yük uygulanarak Vickers (HV0.1) mikrosertlikleri belirlenmiştir. Ölçümler belirli aralıklarda en az 3'er defa yapılarak aritmetik ortalaması ve standart sapmaları belirlendikten sonra grafikler elde edilmiştir. Ayrıca karıştırıcı uçlarda uç geometrisine göre numunenin sıvanma durumunun belirlenmesi için taramalı elektron mikroskobundan (SEM) yararlanılmıştır. Bunun için Jeol 6060 LV SEM cihazı kullanılmıştır. Sıvanan malzemenin kaynak yapılan malzemesi olduğunu kanıtlamak amacıyla da IXRF sistemiyle EDS analizi yapılmıştır.



Resim 4.24. Mikroyapı incelemesi için hazırlanan şematik numune kesiti

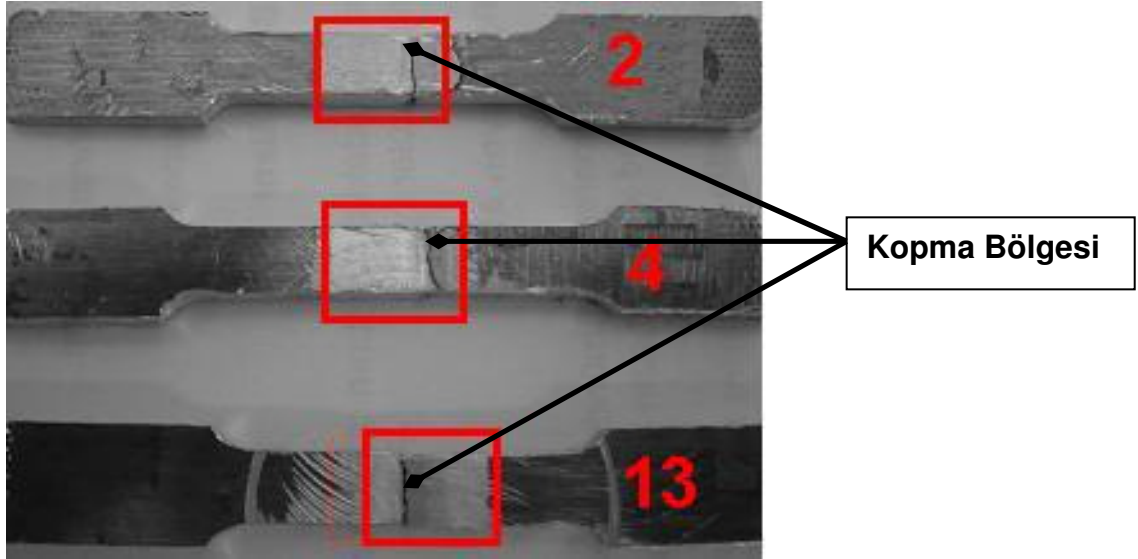
## 5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

### 5.1. Çekme Deney Sonuçları ve Tartışma

TSE 138'e göre hazırlanmış çekme deney numunelerinin bir örneği Resim 5.25' deki gibi hazırlanmıştır. Bu işlemlerden sonra numune parçalar çekme deneyine hazır hale gelmiştir. Çekme testi yapılan numunelerin çekme gerilme değerleri  $N/mm^2$  birimi ile elde edilmiştir. Tüm numunelerin çekme değerleri Çizelge 5.9 ve Şekil 5.13 de verilmiştir. Görüldüğü üzere tüm numunelerin çekme gerilme değerleri umulan değerlerden daha düşük çıkmıştır. Ancak SKK için kullanılan karıştırıcı uçların geometrisine bağlı olarak çekme gerilmelerinde önemli değişimler görülmüştür. Numuneler, çoğunlukla kaynak bölgesinde ana metale yakın bölgeden kopmuştur (Resim 5.26).



Resim 5.25. Çekme testi için hazırlanan standart bir numune örneği

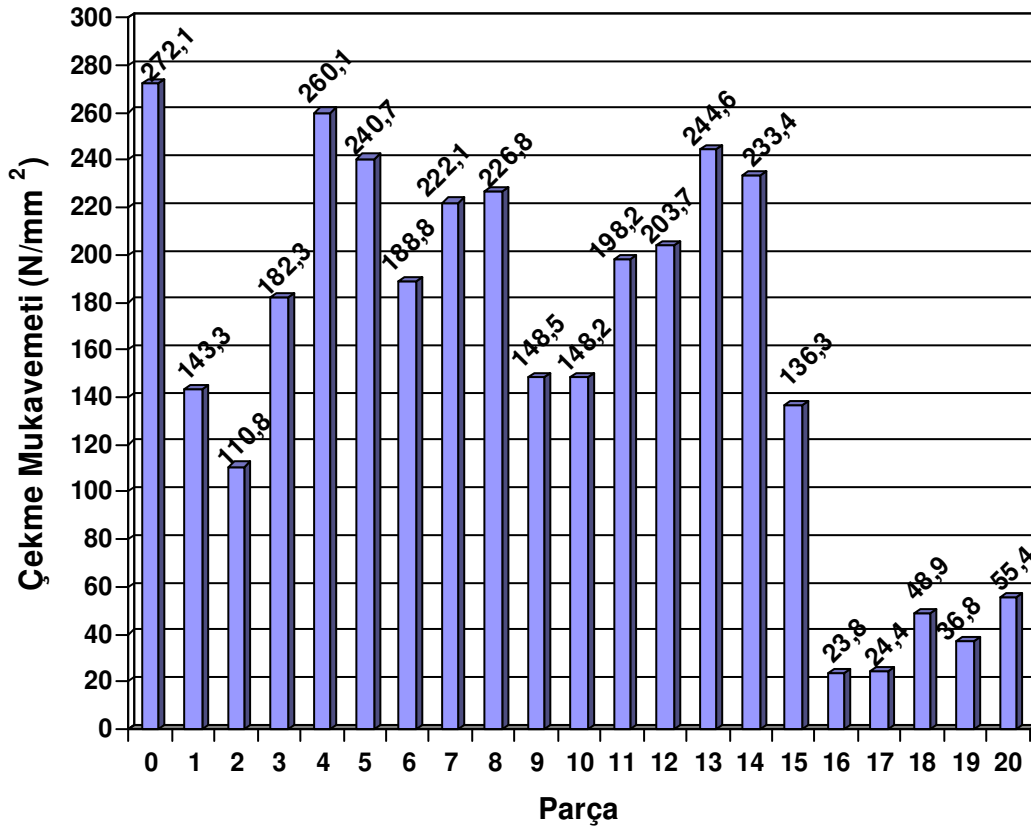


Resim 5.26. Çekme testi yapılmış numunelerin kopma noktaları

Bu durum, SKK işleminin etkili şekilde yapılamamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle tüm numunelerin çekme değerlerinin düşük çıkmasına neden olmuştur. Vidalı uçlarla yapılan SKK işlemi sonucu kaynaklı bağlantıların vidasız uçlara göre daha fazla çekme dayanımına sahiptirler.

Çizelge 5.9. Karıştırıcı uç tipi ve çekme değerleri

| NO | PARÇA İSMİ                                            | ÇEKME DEĞERİ(N/mm <sup>2</sup> ) |
|----|-------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 0  | Esas parça                                            | 272,1 N/mm <sup>2</sup>          |
| 1  | Kare vidalı karıştırıcı uç                            | 143,3 N/mm <sup>2</sup>          |
| 2  | Yuvarlak vidalı karıştırıcı uç                        | 110,8 N/mm <sup>2</sup>          |
| 3  | Trapez vidalı karıştırıcı uç                          | 182,3 N/mm <sup>2</sup>          |
| 4  | Üçgen (metrik) vidalı karıştırıcı uç                  | 260,1 N/mm <sup>2</sup>          |
| 5  | Testere vidalı karıştırıcı uç                         | 240,7 N/mm <sup>2</sup>          |
| 6  | Üç kanallı kare vidalı karıştırıcı uç                 | 188,8 N/mm <sup>2</sup>          |
| 7  | Üç kanallı yuvarlak vidalı karıştırıcı uç             | 222,1 N/mm <sup>2</sup>          |
| 8  | Üç kanallı üçgen (metrik) vidalı karıştırıcı uç       | 226,8 N/mm <sup>2</sup>          |
| 9  | Üç kanallı trapez vidalı karıştırıcı uç               | 148,5 N/mm <sup>2</sup>          |
| 10 | Üç kanallı testere vidalı karıştırıcı uç              | 148,2 N/mm <sup>2</sup>          |
| 11 | Dört kanallı kare vidalı karıştırıcı uç               | 198,2 N/mm <sup>2</sup>          |
| 12 | Dört kanallı yuvarlak vidalı karıştırıcı uç           | 203,7 N/mm <sup>2</sup>          |
| 13 | Dört kanallı üçgen (metrik) vidalı karıştırıcı uç     | 244,6 N/mm <sup>2</sup>          |
| 14 | Dört kanallı trapez vidalı karıştırıcı uç             | 233,4 N/mm <sup>2</sup>          |
| 15 | Dört kanallı testere vidalı karıştırıcı uç            | 136,3 N/mm <sup>2</sup>          |
| 16 | Vidasız konik profilli karıştırıcı uç                 | 23,8 N/mm <sup>2</sup>           |
| 17 | Vidasız üç kanallı silindir profilli karıştırıcı uç   | 24,4 N/mm <sup>2</sup>           |
| 18 | Vidasız dört kanallı silindir profilli karıştırıcı uç | 48,9 N/mm <sup>2</sup>           |
| 19 | Vidasız üçgen profilli karıştırıcı uç                 | 36,8 N/mm <sup>2</sup>           |
| 20 | Vidasız kare profilli karıştırıcı uç                  | 55,4 N/mm <sup>2</sup>           |



Şekil 5.13. SKK ile yapılan kaynak numunelerinin çekme değerleri

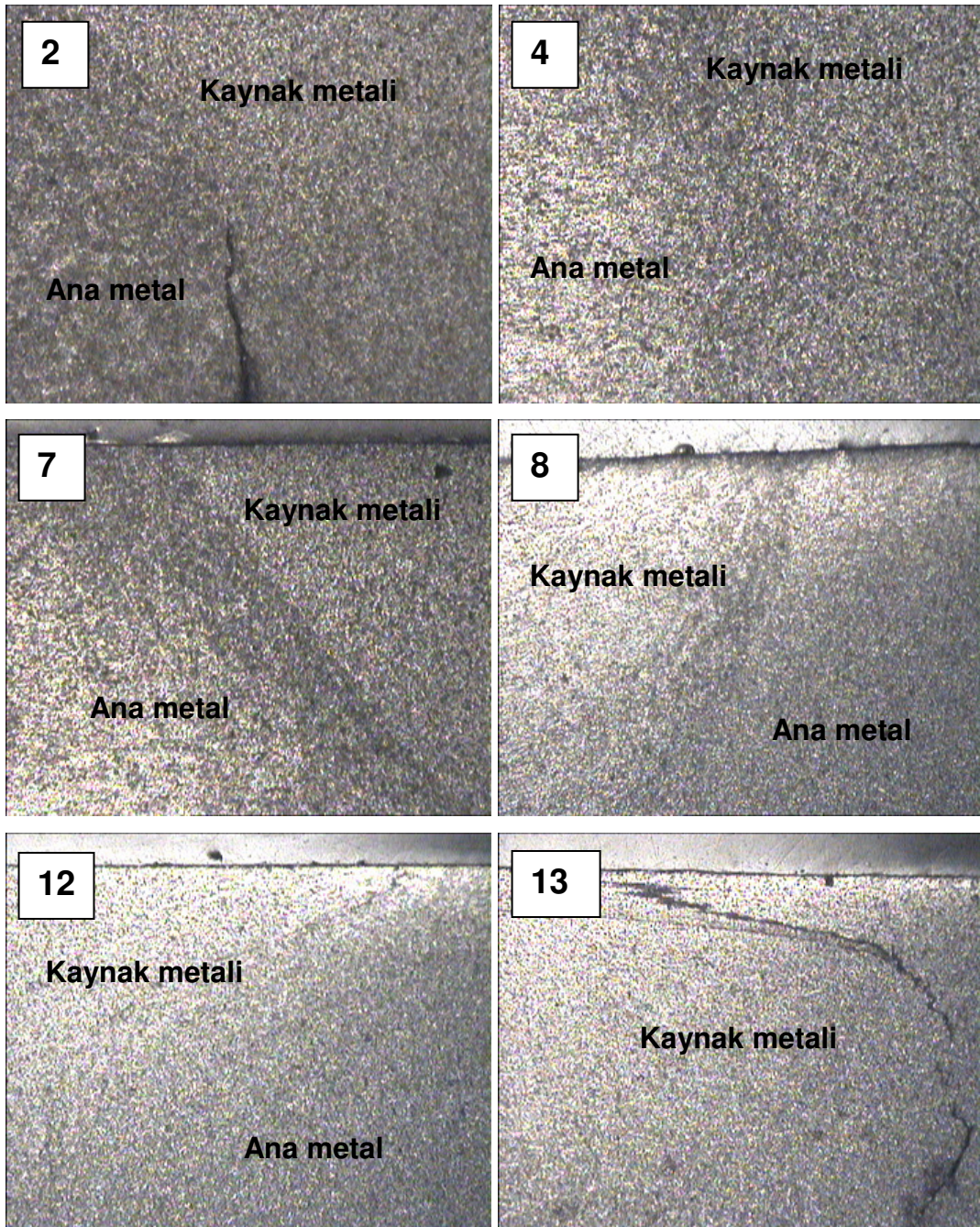
Vidalı karıştırıcı uçlar ile yapılan numuneler esas parça çekme mukavemetine yakın değerlerde çıkmıştır. Üçgen (metrik) vidalı karıştırıcı uç ile yapılan numune parça ile en yüksek çekme mukavemeti elde edilmiştir ( $260.1 \text{ N/mm}^2$ ). Vidasız konik profilli karıştırıcı uç ile yapılan numune parça ile en düşük çekme mukavemeti elde edilmiştir ( $23.8 \text{ N/mm}^2$ ). Vidasız karıştırıcı uç ile yapılan numune parçalar içinde en yüksek çekme mukavemeti kare profilli karıştırıcı uç ile elde edilmiştir. Vida açılmayan karıştırıcı uçlar ile elde edilen numunelerin çekme mukavemetleri istenilen seviyenin çok altında çıkmıştır. Bu nedenle diğer analizlerde vidasız uçlar kullanılmamıştır. Vidalı karıştırıcı uçlar ile yapılan numune parçalarda en düşük çekme mukavemeti yuvarlak vidalı karıştırıcı uç ile elde edilmiştir ( $110.8 \text{ N/mm}^2$ ). Vidalı karıştırıcı uçlar ile yapılan numune parçalarda en yüksek çekme mukavemetini Üçgen (metrik) vida ile elde edilmiştir. Vidalı

kariştırıcı uçlar hem kanallı hem de kanalsız olarak yapılan numune parçalarda ortalama olarak en düşük çekme mukavemeti kare vida ile elde edilmiştir. Vidalı kariştırıcı uçlara kanal açıldığında genel olarak daha iyi çekme mukavemeti elde edilmiştir. Sadece üçgen vidada kanal açılmamış vidalı kariştırıcı uç istisna olmuştur.

SKK işleminin etkili olabilmesi için kariştırıcının yüzey alanının fazla olması gerektiği düşünülmektedir. Bu nedenle kariştırıcı uç geometrisine bağlı olarak yüzey alanı parametresi doğrudan SKK işlemini etkilemektedir. Çünkü yüzey alanı artarken sürtünme işlemi daha etkili olacağından ortaya çıkan ısı miktarı da fazla olacaktır. Böylece iki parçanın birleştirilmesinde daha düzgün bir karişım sağlanacaktır. Ancak bu çalışmada bazı numunelerde muhtemelen kariştırma geometrisine bağlı olarak kaynak kökünde homojen bir karişım gerçekleşmemiştir. Bunun için ayrıca mikroyapı karektarizasyonu çalışması yapılmıştır.

## **5.2. Mikroyapı Karektarizasyonu**

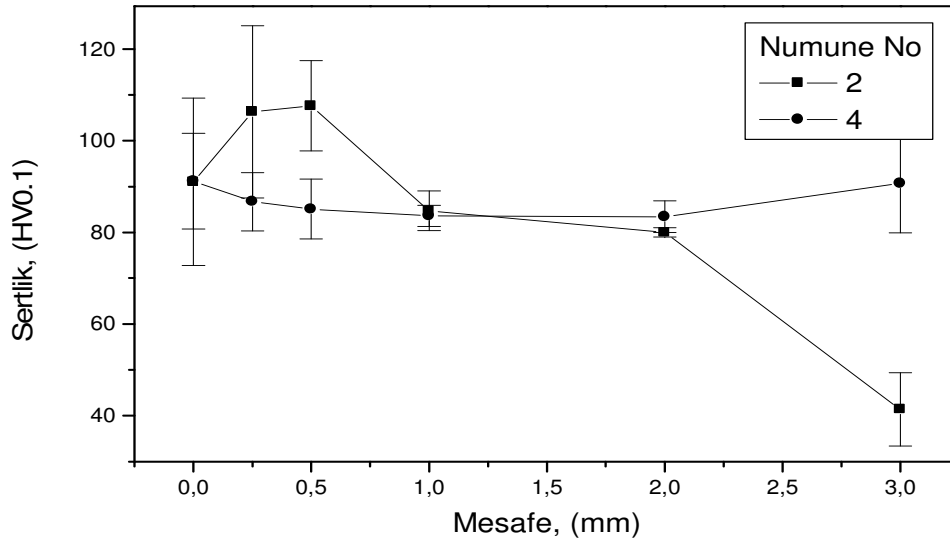
SKK işlemi yapılmış numunelerden bazı numunelerin ara kesit mikroyapıları Resim 5.27 'de gösterilmiştir. 2 nolu numunede kaynak kökünde mikro çatlakların varlığı tespit edilmiştir. Bu çatlaklar muhtemelen karişımın etkin olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bu numunelerin çekme gerilmesi düşük çıkmıştır. 4,7,8 nolu numunelerin SKK işleminin daha başarılı olduğu görölmektedir. Kaynak ve ana metal arasında herhangi bir ayırışma, çatlama gibi problemleri görölmemektedir. Ancak 12 ve 13 nolu numunelerde görölen ince çatlak oluşumu muhtemelen termal genişlemeden olduğu düşünülmektedir.



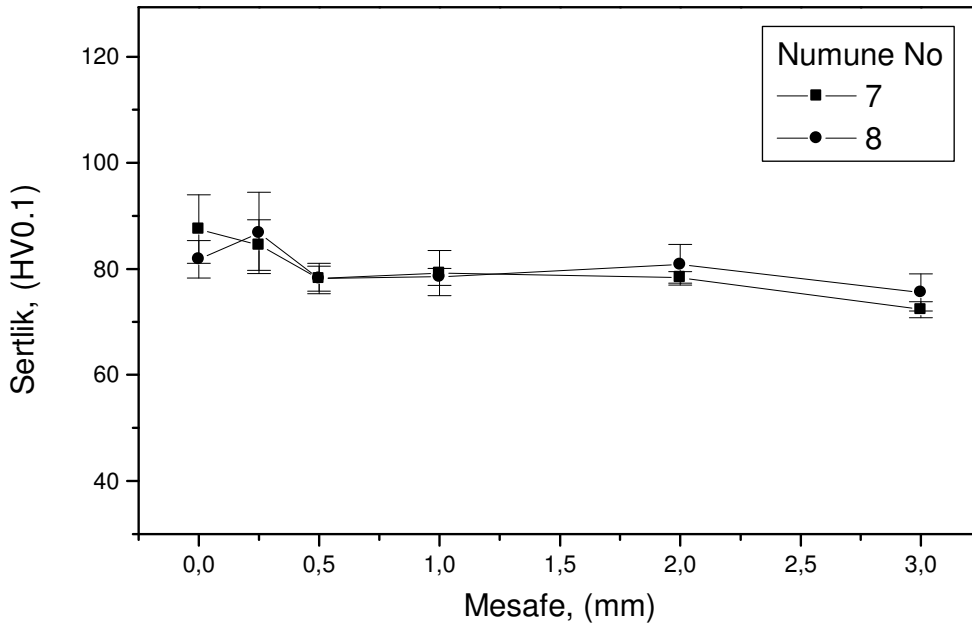
Resim 5.27. Numunelerin kaynak bölgesi mikroyapı resimleri

Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler mikrosertlik ölçümlerinde kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçme cihazı ile numunelerin kaynak bölgesindeki sertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinde 5 sn süreyle, HV (Vickers) cinsinden 100gr (0,1 HV) baskı uygulanmıştır. Kaynak merkezinden başlanarak 0,25 mm, 0,5 mm, 1mm, 2 mm, 3 mm mesafelerde ve 3 farklı

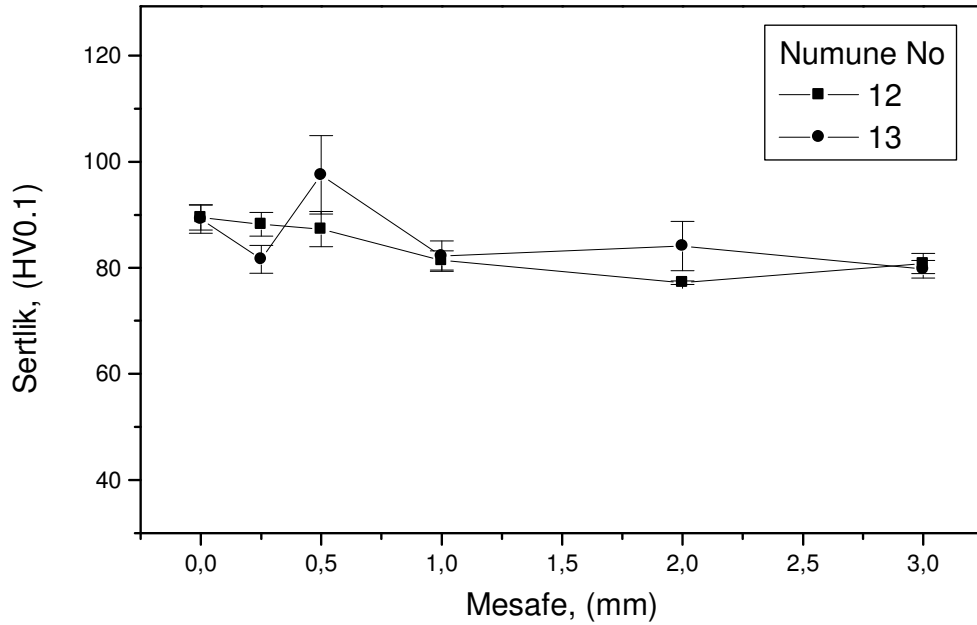
bölgede sertlik ölçümü yapılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri bir tablo haline getirilerek bu değerlerin aritmetik ortalaması ve sapması bulunmuştur. Bulunan değerler için karşılaştırmalı grafikler hazırlanmıştır.



Şekil 5.14. 2 ve 4 nolu numunelerin mikrosertlik değerlerinin karşılaştırması



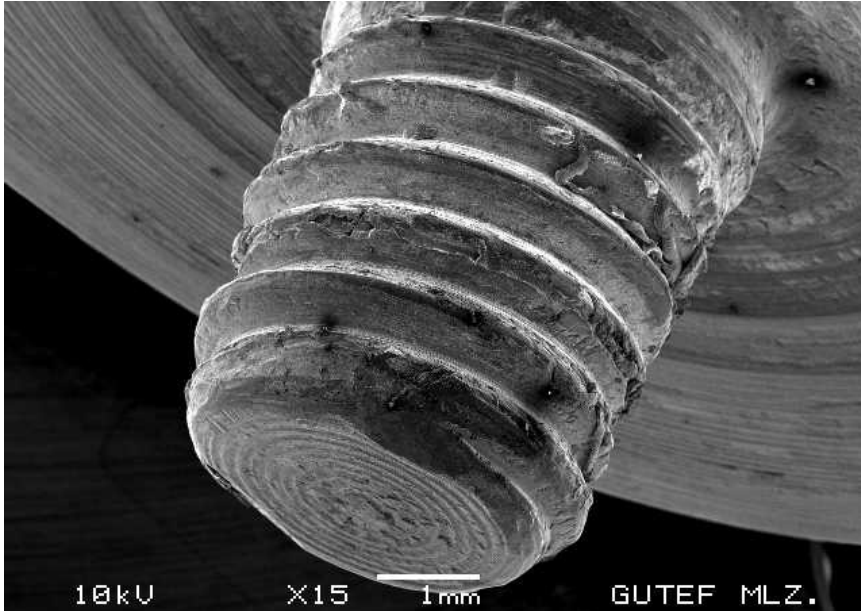
Şekil 5.15. 7 ve 8 nolu numunelerin mikrosertlik değerlerinin karşılaştırması



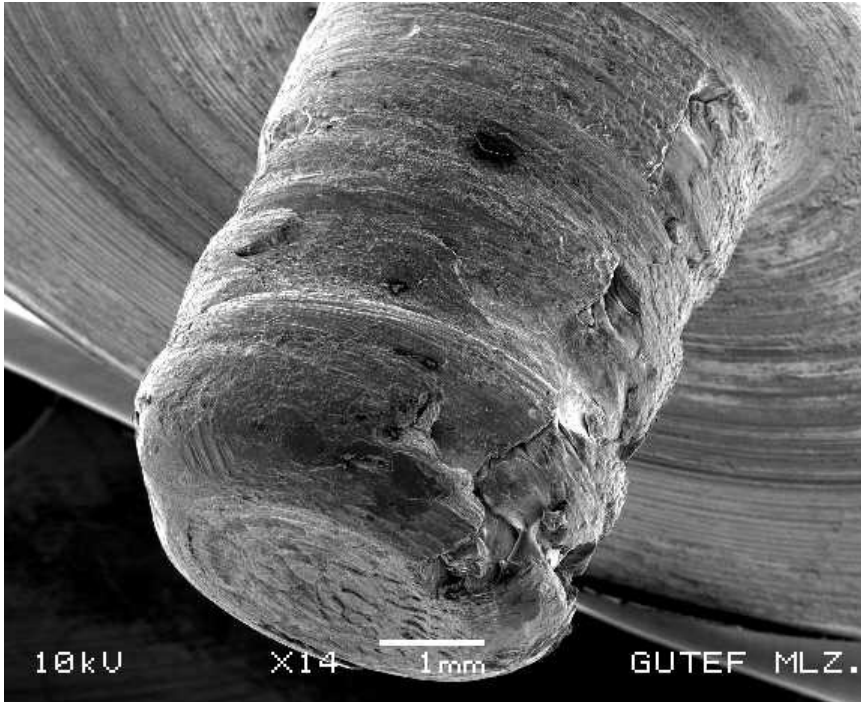
Şekil 5.16. 12 ve 13 nolu numunelerin mikrosertlik değerlerinin karşılaştırması

Karıştırıcı uçların kaynak işleminden sonra fiziksel yapılarındaki değişikliği görebilmek amacıyla bazı karıştırıcı uçların (üçgen ve yuvarlak vidalı) SEM resimleri çekilmiştir. SEM ile çekilen karıştırıcı uç resimleri aşağıda gösterilmiştir.

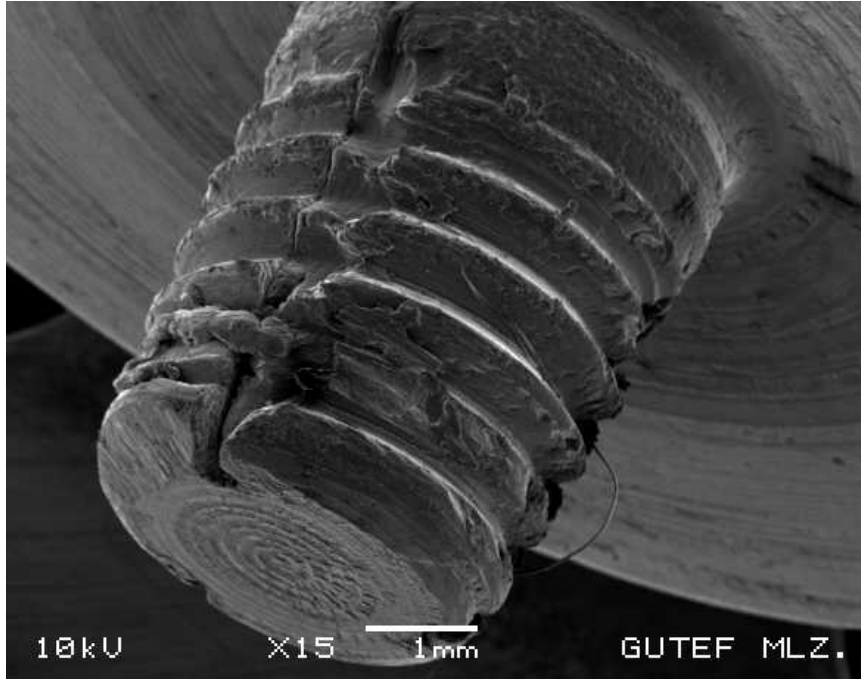
SEM resimleri incelendiğinden ilk bakışta görüldüğü gibi yuvarlak vida tipli karıştırıcı uç üzerine, üçgen vida tipli karıştırıcı uca göre daha fazla birleştirme malzemesi sıvanmıştır. Çekme deneyinde vidalı tiplerde en az mukavemeti gösteren yuvarlak vidalı karıştırıcı uç, en mukavemetli birleştirme ise üçgen vidalı karıştırıcı uç ile elde edildiği görülmüştür. Bu görüntüden yola çıkarak yuvarlak vida tipli karıştırıcı uç ile yapılan birleştirmenin yeterli mukavemeti göstermemesinin sebeplerinde biri olarak ergiyen malzemenin bir miktarının karıştırıcı uç üzerine sıvanmasından kaynaklandığını söyleyebiliriz.



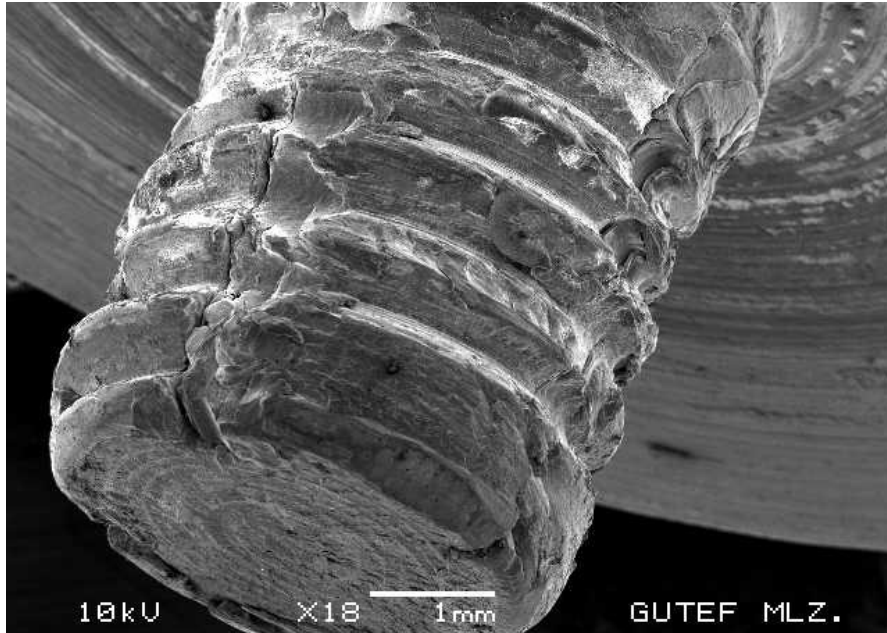
Resim 5.28. 4 nolu karıştırıcı ucun SEM fotoğrafı



Resim 5.29. 2 nolu karıştırıcı ucun SEM fotoğrafı



Resim 5.30. 8 nolu karıştırıcı ucun SEM fotoğrafı

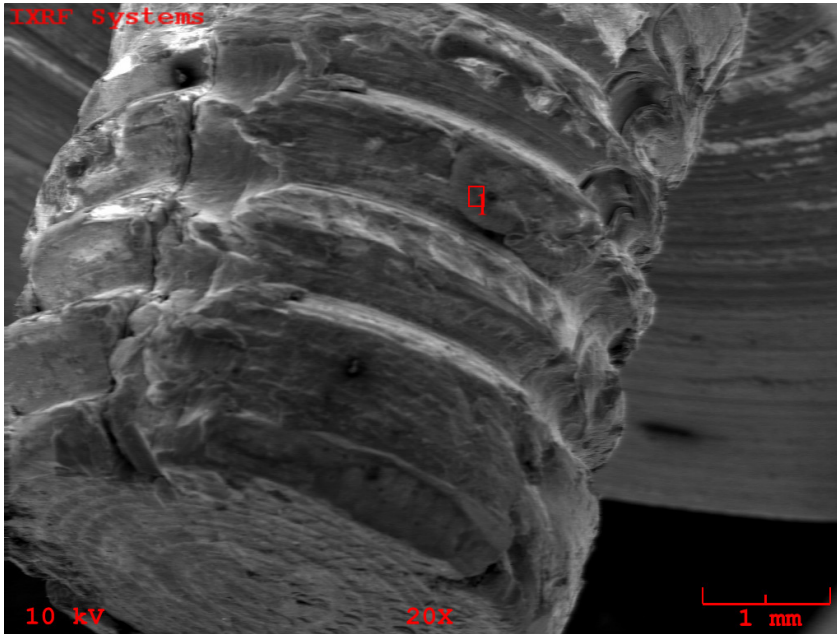


Resim 5.31. 13 nolu karıştırıcı ucun SEM fotoğrafı

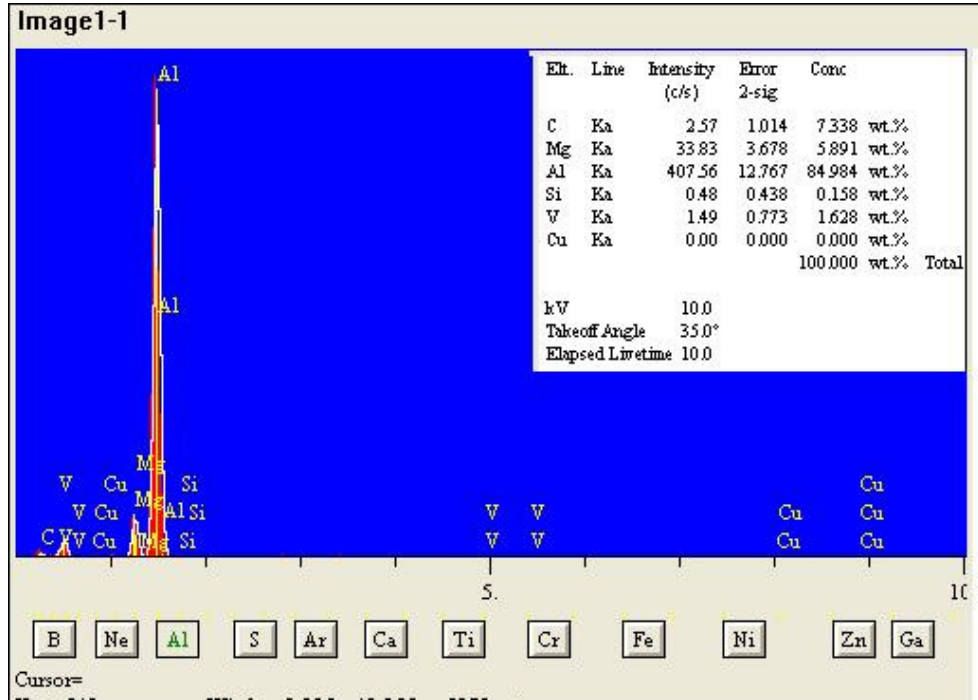
### 5.3. Karıştırıcı Uç Enerji Dağılımlı Spektrometre (EDS) Analizi

Karıştırıcı uç ömrü konusunda kısmen bir tahminde bulunabilmek amacıyla karıştırıcı ucun EDS analizi yapılmıştır. Karıştırıcı ucun üzerinde bulunan işaretli bölgede EDS analizi yapılarak üzerindeki malzemeler tespit edilmiştir.

Analiz sonrası görüldüğü gibi karıştırıcı uç malzemesinden aşınarak kopan bir parça bulunmamıştır. Bu sonuca göre karıştırıcı ucun uzun ömürlü olabileceği varsayımında bulunabiliriz. Ayrıca karıştırıcı uç vida boşluklarında ve kanallar üzerinde biriken Al alaşımı her birleştirmede ısıdan dolayı tekrar ergiyeceği için karıştırıcı ucun performansında bir azalma görülmeyeceği varsayımında bulunabiliriz.



Resim 5.32. EDS analizi yapılan karıştırıcı uç



Resim 5.33. EDS analiz sonuçları

#### 5.4. Tartışma

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan içyapı, üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB), termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB) ve ısı tesiri altındaki bölge olarak adlandırılmaktadır [26].

2 nolu numunede (yuvarlak vidalı karıştırıcı uç) kaynak bölgesinde sertliğin arttığı ve kaynak bölgesinden ana metale giderken sertlikte bir azalma görülmüştür. Ancak 4 nolu numunede (üçgen vidalı karıştırıcı uç) ise kaynak bölgesi ile ana metal arasında sertlik dağılımında çok fazla bir değişim görülmemiştir. Kaynaklı birleştirmelerden istenen yüksek mekanik özellik için mikroyapı ve sertliğin homojen dağılımı önemlidir. Diğer taraftan akma ve çekme dayanımı sertlikle orantılıdır. Buna rağmen 4 nolu numunenin kaynak bölgesindeki sertlik 2 nolu numuneden daha düşük çıkmasına rağmen mikroyapı ve sertlik dağılımının daha homojen olması bu numunenin çekme

dayanımını arttırdığı düşünülmektedir. 2 nolu numunede kaynak kökünde görülen mikro çatlaklar etkin bir karışımın olmadığına ve bunun sonucu olarakta çekme mukavemetinin düşük çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

7 ve 8 nolu numunelerin sertliği kaynak bölgesinde ana metale göre nispeten biraz fazla çıkmasına rağmen genel olarak homojen bir sertlik dağılımı olduğu söylenebilir. Aynı zamanda bu her iki numunenin sertlikleri tüm bölgelerde birbirine yakındır. Bunun sonucu olarak her iki ucunda bu özelliklere benzer sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.

12 ve 13 nolu numunelerde sertlik dağılımları 13 nolu (üçgen vidalı karıştırıcı uç) numunede oldukça heterojen olup hatta kaynağın ortasında sertlik daha yüksek çıkması gerekirken ana metale yakın kısmında sertlik daha fazla çıkmıştır. Bunun muhtemel nedeni bu geometriye sahip uçta sürtünme karıştırması daha etkili olduğundan ana metale yakın erimemiş bölgede sıcaklığın çok fazla artmış olması ve bununla birlikte daha hızlı soğuma etkisiyle tane yapısı incelmış olabilir. 12 nolu (yuvarlak vidalı karıştırıcı uç) numunede ise sertlik dağılımı çok daha homojendir. 13 nolu numunede çekme dayanımının yüksek olmasına neden Resim 5.30 ve 5.31 görüldüğü gibi sertliğin ince taneli bölgede artmış olmasıdır. Çünkü çekme testinde hemen hemen bütün numuneler birleşme bölgesine yakın bölgede gerçekleşmiştir. Bu nedenle bahsedilen bu bölgeler çekme yüklerini daha fazla taşımak zorundadırlar

Genellikle bu incelenen ve tartışılan numunelerde kaynak bölgesi yada birleşmeye yakın kısımlarda sertliğin artışı çekme dayanımlarını arttırdığı görülmüştür. Mikroyapının ve mikrosertliğin düzgün dağılım gösterdiği numunelerde esas malzemeye yakın çekme sonuçları elde edildiği görülmüştür.

Birleştirme sonucu oluşan bölgelerin boyutu ve şekli, karıştırıcı ucun geometrisine bağlı olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak karıştırıcı ucun geometrisi mekanik davranışlar üzerinde onemli bir etkiye sahip olduğu yorumu yapılabilir.

Yüksek sürtünmeye sahip ularada malzemeye giren ısı miktarının fazla olmasından dolayı malzemelerin soğuması daha yavaş olmakta ve bu da sertliği düşürmekte bir etken olmaktadır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynağı üzerine yapılan çalışmalara artı olarak yirmi farklı uç için; özellikle malzeme akısını kolaylaştırmak için vida türleri kullanılarak yeni uçlar tasarlanmış, bu uçların imalatı gerçekleştirilmiş ve sürtünme karıştırma kaynağı tekniği kullanılarak birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı tekniği ile birleştirilen numunelerden çekme deneyi için standartlara uygun parçalar alınarak en iyi performansı sağlayan karıştırıcı uç tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmaların sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Sürtünme karıştırma kaynağı ile Al 7075 al alaşımlar başarıyla birleştirilmiştir.
- SKK ile yapılan birleştirmelerin kaynak dikiş görüntüsü diğer kaynak yöntemlerine göre daha düzgün olduğu görülmüştür.
- Sürtünme karıştırma kaynağı işleminde, tezgâh devir sayısı Al7075 malzeme için 1000 dev./dak ilerleme içinde 40mm/dak. ile istenen birleşme elde edilmiştir.
- Karıştırıcı ucun ilerleme hızı arttıkça, özellikle kanal açılan uçlarda kırılmalar olabilir. Eğer kırılma ihtimalini düşürmek istenirse ilerlemenin düşük, devre (700-1000-1200 dev./dak) ayarlanması tavsiye edilir. Fakat her bir uç için uygun devir ve ilerleme denemeler ile belirlenmelidir.
- Sürtünme karıştırma kaynağında vida açılan karıştırıcı uçlarda, karıştırıcı uçları zayıflattığı için kanal açılacak uçlarda daha kalın bir çap tavsiye edilebilir.
- Karıştırıcı uçlarda adım olarak 1 mm. iyi sonuçlar verdiği için adım olarak kullanılması önerilir.
- Karıştırıcı uçlarda en iyi performans ve en mukavemetli birleştirme üçgen dişten elde edilmiştir. Karıştırıcı uç tasarımlarında bu tipin tercih edilmesi tavsiye edilir.

- Teorik olarak doğrulanan ve tezin uç tasarım kısmında belirtildiği gibi en mukavemetli birleştirme üçgen vidada elde edilmiştir.
- Üçgen diş ile elde edilen mukavemet değeri tablodan görüldüğü gibi esas parçaya en yakın değeri bize vermiştir.
- Vida çekilmeden yapılan karıştırıcı uçlar ile yapılan kaynaklarda hem birleşme yüzeyi hem de çekme kuvveti istenilen düzeyde olmamıştır.
- Vida çekilmiş karıştırıcı uçlar ile yapılan birleştirmelerde en kötü sonuç yuvarlak dişli karıştırıcı uç ile birleştirilen numuneden elde edilmiştir.
- Teorik olarak öngöründe bulunduğumuz gibi hareket ileten vidalarda en düşük mukavemetli birleştirme elde edildiği görülmüştür.
- SKK yöntemi ile esas malzemeye yakın çekme mukavemeti elde edilebilir.
- Karıştırıcı uç tasarımlarında vidalı ve kaynak dikişinin akışını kolaylaştıran tipler tercih edilmelidir.
- Karıştırıcı uç tasarımlarında sürtünme yüzeyi fazla olan uçlar tercih edilirse birleşme daha homojen ve sağlıklı olabilir.
- Karıştırıcı uç kaynak yapılacak malzemeden uzun olmamalıdır.
- Kaynak yapılacak parçalar, uygun bağlama kalıbı ile bağlamalıdır ve kesinlikle hareket etmesi engellenmelidir.
- Kaynak bölgesinde yada birleşmeye yakın kısımlarda sertliğin artışı çekme dayanımlarını arttırdığı söylenebilir.
- Çekme testinde kopma bölgesi genelde kaynaklı bölge ile ana metalin birleşim noktasında olduğu görülmüştür.
- Karıştırıcı ucun vida sürtünme yüzeyinin büyüklüğü, kaynaklı birleşmenin çekme mukavemetini arttırdığı söylenebilir.

## KAYNAKLAR

1. Çam, G., "Sürtünme karıştırma kaynağı ve uygulamaları", **9. Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı**, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 450-458 (2002).
2. Mahoney, M.W., Rhodes, C.G., "Properties of friction welded 7075 T 651 aluminum", **Metallurgical Materials Transistation**, 29(A): 1955-1964 (1998).
3. David, P., Field, T.W., "Heterogeneity of crystallographic texture in friction stir welds of aluminum", **Metallurgical Materials Transistation**, A: 2869-2877 (2001).
4. Seidel, T.U., Reynolds, A.P., " Visualization of the material flow in AA 2195 friction stir welds using a marker insert technique", **Metallurgical Materials Transistation**, 32(A): 2879-2884 (2001).
5. Çam, G., "Al-alışımları için geliştirilmiş yeni bir kaynak teknolojisi", **Mühendis Ve Makine**, 46 (541): 30-39 (2005).
6. Anık, S., "Alüminyum ve alışımlarının kaynağı", **İTÜ Makine Fakültesi**, İstanbul, 10-19 (1960).
7. Işık, A., "Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen alüminyum levhaların eğme ve yorulma özelliklerinin incelenmesi", **SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 9(2): 12-13 (2005).
8. Çam, G., "Sürtünme karıştırma kaynağındaki gelişmeler", **1. Bölüm, Makine Tek.**, 80: 44-49 (2004).
9. Çam, G., "Sürtünme karıştırma kaynağındaki gelişmeler", **2.Bölüm,Makine Tek.**, 81:100-104 (2004).
10. Çam, G., "Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler", **TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre Ve Sergisi**, Kocaeli, 47-62 (2003).
11. Külekçi, M.K., Şık, A., "Sürtünme karıştırma kaynağı ile alüminyum alışımlı levhaların birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri", **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, Isparta, 70-75 (2003).
12. Thomas, W.N., Nicholas, E.D., "Friction stir welding fort the transportation industries", **Metarials And Design**, 18(4): 269-273 (1997).

13. Boz, M., Kurt, A., "The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process", **Materials And Design**, 25: 343-347 (2004).
14. Kolligan, K., "Material flow behavior during friction stir welding of aluminum", **Weld Res. Supply**, 229-237 (1999).
15. Jata, K.W., Semiatin, S.L., "Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys", **Scripta Materials**, 43: 743-749 (2000).
16. Thomas, W.M., Nicholas, E.D., "Friction stir welding for the transportation industries", **Materials And Design**, 18: 269-273 (1997).
17. Kaluç, E., Bozduman, B., "Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi", **Makine Magazin**, 27: 54-61 (1998).
18. Çam, G., "Al- alaşımları için geliştirilen yeni kaynak yöntemleri", **Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongre Bildiriler Kitabı**, Yıldız Teknik Üniversitesi Oditoryumu, İstanbul, 268-277 (2001).
19. Kaluç, E., Mert, Ş., "Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler", **TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre Ve Sergisi**, Kocaeli, 103-114 (2003).
20. Dong, P., "Proc. of the 1st int. symp. on friction stir welding", **Thousand Oaks**, Ca, Usa, 5-6 (1999).
21. Chao, Y.J., Wang Y., Miller K.W., "Effect of friction stir welding on dynamic properties of AA2024-T3 and AA7075-T7351", **Welding Research Supplement**, 196-200 (2001).
22. Cederqvist, L., Reynodls, A.P., "Factors effecting the properties of friction stir welded aluminum lap joints", **Journal Of Materials Processing Technology**, 1-2 (2000).
23. Şık, A., Kayabaş, Ö., "Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyumun kaynağında kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi", **Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi**, 11(12): 30-43 (2003).
24. Özdemir, N., Büyükarıslan, S., Sarsılmaz, F., "Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA1030 alaşımında karıştırıcı uç, devir sayısı ve ilerleme hızının mekanik davranışlar üzerine etkisi", **Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi**, Elazığ, 19 (3): 407-415 (2007).

- 25.Şahin, M., Akata, H.E., Özel, K., “Soğuk şekil verilmiş alüminyum malzemelerinin sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilmesi üzerine deneysel bir çalışma”, **Mühendis ve Makine Dergisi**, 48 (573): 24-31 (2008).
- 26.Hasçalık, A., Çaydas, U., Ünal, E., Karaca, F., “AA 5251 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliğine uç geometrisinin etkisi” **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 4: 1-7 (2007).
- 27.Özsoy, M., Kaluç, E., “Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının esasları”, **Mühendis ve Makine Dergisi**, 513:2-3 (2002).
- 28.Kurt, A., Boz, M., Özdemir, M., “Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi”, **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi**, 19(2): (2004).
- 29.Taban, E., Kaluç, E., “En Aw-5083- H321 alüminyum alaşımının mig, tig ve sürtünen eleman ile birleştirme (fsw), kaynaklı bağlantılarının mekanik ve mikroyapısal özellikleri” , **Mühendis ve Makine Dergisi**, 46: 541(2005).
- 30.Erolakata, H., Şahin, M., İpekçi M.T., “Atık parçaların değerlendirilmesinde sürtünme kaynak yönteminin kullanılması üzerine bir çalışma” , **Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi**, Kocaeli, 117-126 (2003).
- 31.Yutaka, S.S., Seung, H.C.P., Masato, M., Hiroyuki, K., “Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys”, **Scripta Materialia**, 50: 1233-236 (2004).
- 32.Zhu, X.K., Chao, Y.J., “ Numerical simulation of transient temperature and residual stres in friction stir welding of 304 stainless steel” , **Journal Of Materials Processing Technology**, 146: 263-272 (2004).
- 33.Yutaka, S.S., Fumie, Y., Yusuke, S., Seung, H.C.P., Hiroyuki, K., “Fib – assisted tem study of an oxide array in the root of a friction stir welded aluminum alloy”, **Scripta Materialia**, 50: 365-369 (2004).
- 34.Ertuğ, A., "Sürtünme kaynağı", **Mühendis ve Makine Dergisi**, 21(241): 45-54 (1977).
- 35.Erdmann, H.C., "Metallografie und estigkeitscerhalten von reibschweißverbindungen an unterschiedlichen werkstoffen" **Materials**, DVS, Dusseldorf, 1-17 (1968).
- 36.Kurt, A., “Sürtünme karıştırma kaynağı”, **Ulusal Kongre ve Sergisi**, 65-75 (2003).

37. Koruzar, D.L., "Joint desing for the friction welding process", **Welding Journal**, 31-35 (1979).
38. Özkan, S., "Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen parçalarda haddeme (burnishing) ile yüzeylerin işlenmesi, haddemenin yüzey pürüzlülüğü ve sertleşmeye etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 12-14, 18-23, 25-27 (2006).
39. Dawes, C.J., Thomas, W.M., "Friction stir process welds aluminium alloys". **Welding Journal**, 28 (1): 41-45 (1996).
40. Jonhson, R., Kallee, S., "Friction stir welding, materials world", 7(12): 751-753 (1999).
41. Elliott, S., Vvallah, E.R., "Joining aluminium to steel part 1 –diffosion bonding", **Metal Construction**, 167-171 (1981).
42. Ertuğ, A., "Sürtünme kaynağı", **Mühendis Ve Makine Dergisi**, 21(24): 46-50 (1997).
43. Karaman, M., "Sürtünme kaynağı ve uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 4-16 (2001).
44. Gürleyik, M.Y., "Sürtünme karıştırma kaynağı", **Mühendis Ve Makine Dergisi**, 16: 241 (1997).
45. Kurt, A., Özdemir, M., Boz, M., "Alüminyum malzemelerinin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi", **IV.Ulusal Kaynak Teknolojisi Kongresi**, Kocaeli, 89-99 (2003).
46. Kreye, H., Reiners, G., "Mikrostruktur und mechanische eigenschaften von aluminium-kupfer reibschweipverbindungen", **Metallkunde**, 708-713 (1989).
47. James, F., "CNC machining and friction welding in one and the same machine", **Schweifbtechnik, Information Sheet by KUKA**, 69 (1985).
48. Contreray, F., Trillo, E.A., Murr, L.E., "Friction-stir welding of a berilyum aluminium powder metallurgy alloy", **Journal of Materials Science**, 370: 89-99 (2002).

## EKLER





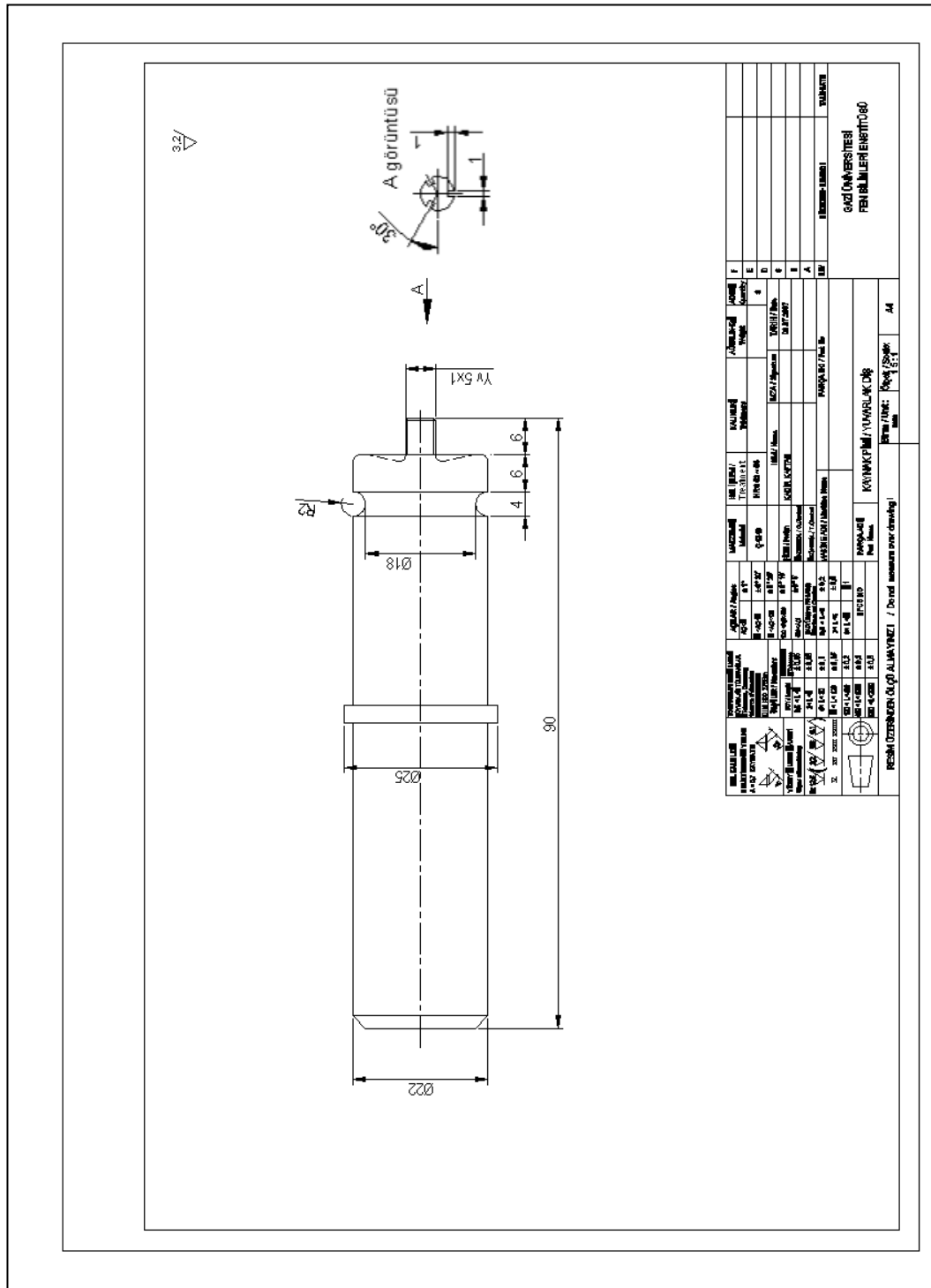






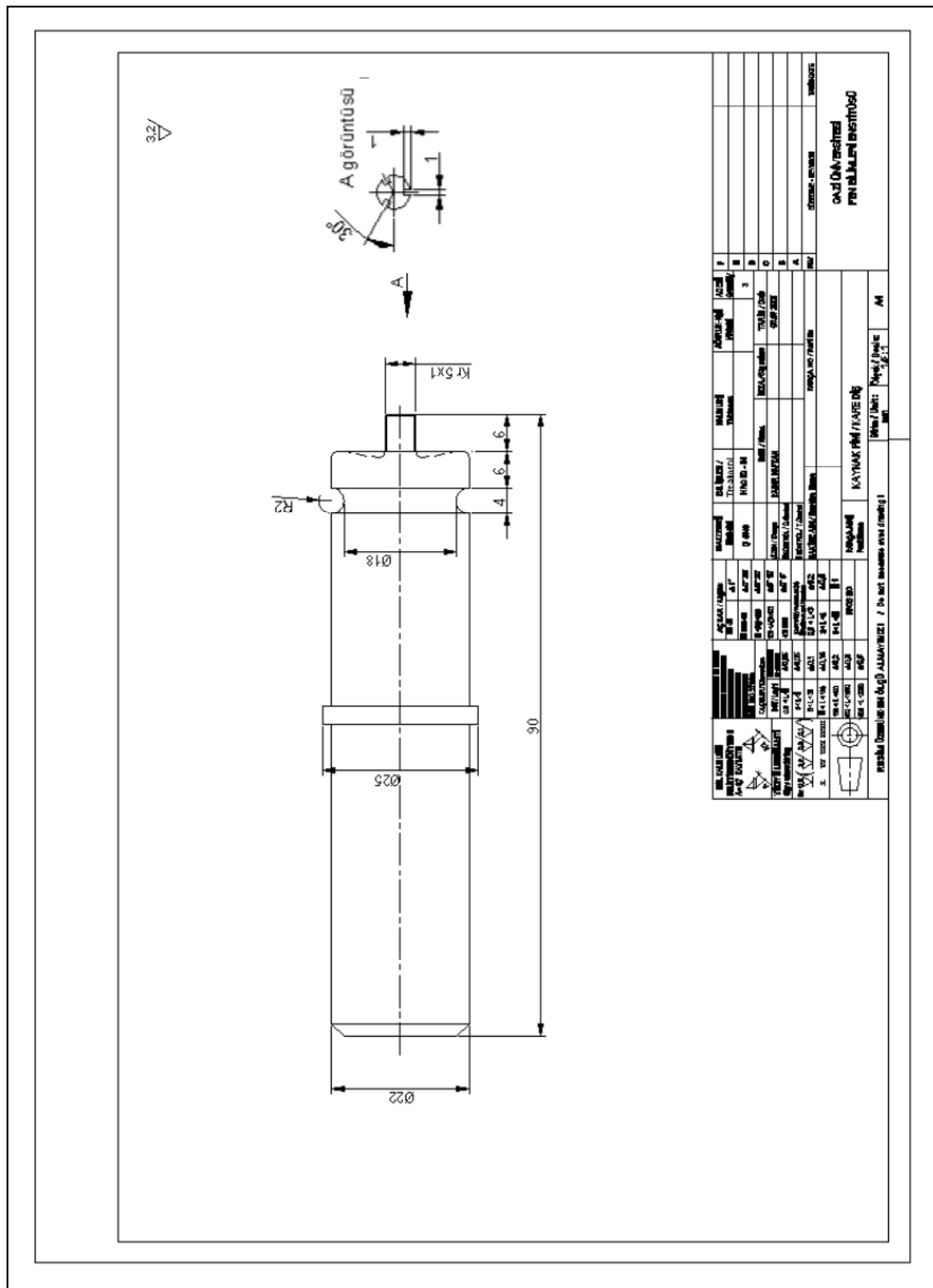


### EK-1 (Devam) Karıştırıcı uç detay resimleri

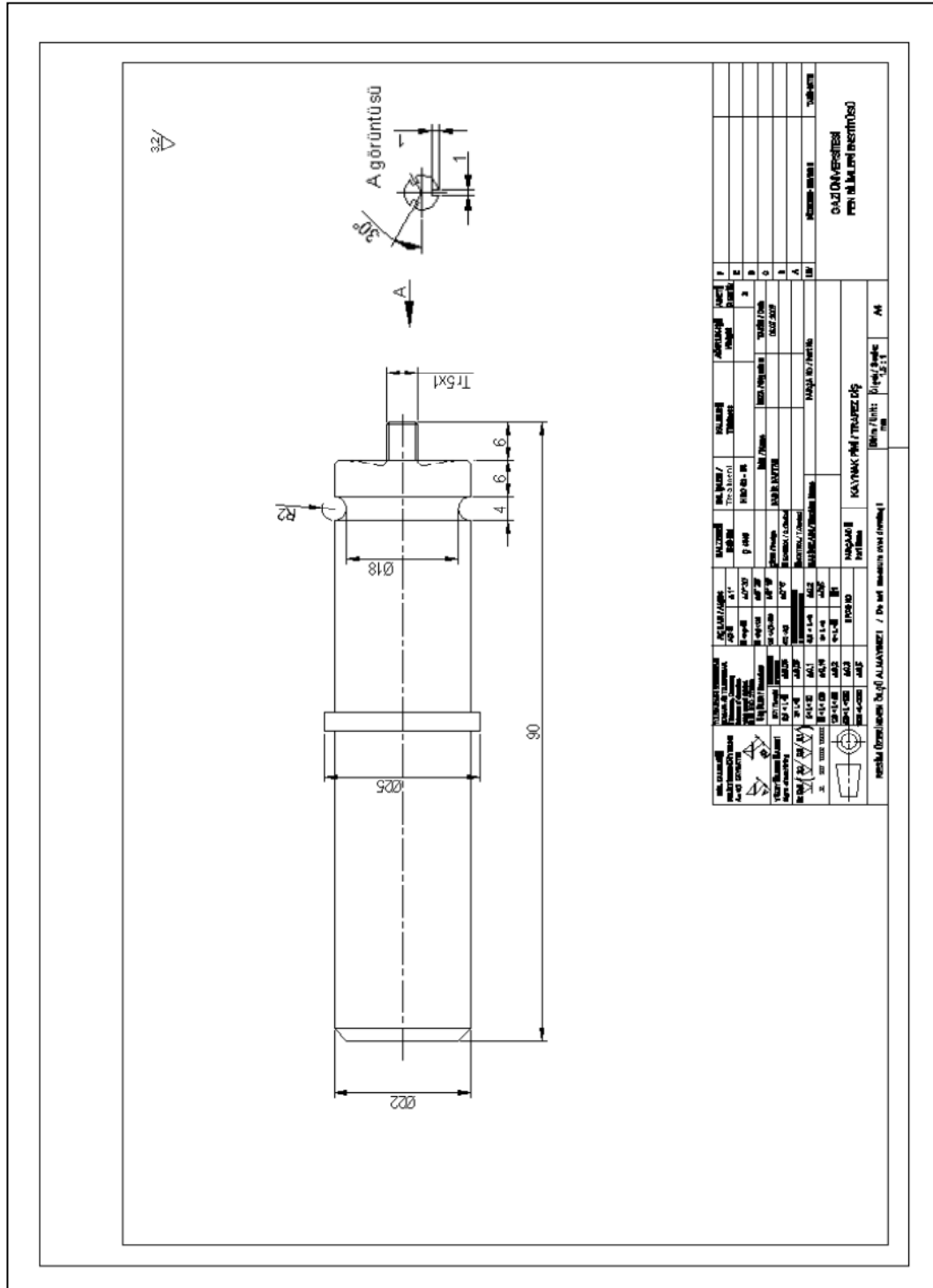


Şekil 1.7. Üç kanallı yuvarlak dişli karıştırıcı uç detay resmi

### EK-1 (Devam) Karıştırıcı uç detay resimleri



## EK-1 (Devam) Karıştırıcı uç detay resimleri



Şekil 1.9. Üç kanallı trapez dişli karıştırıcı uç detay resmi

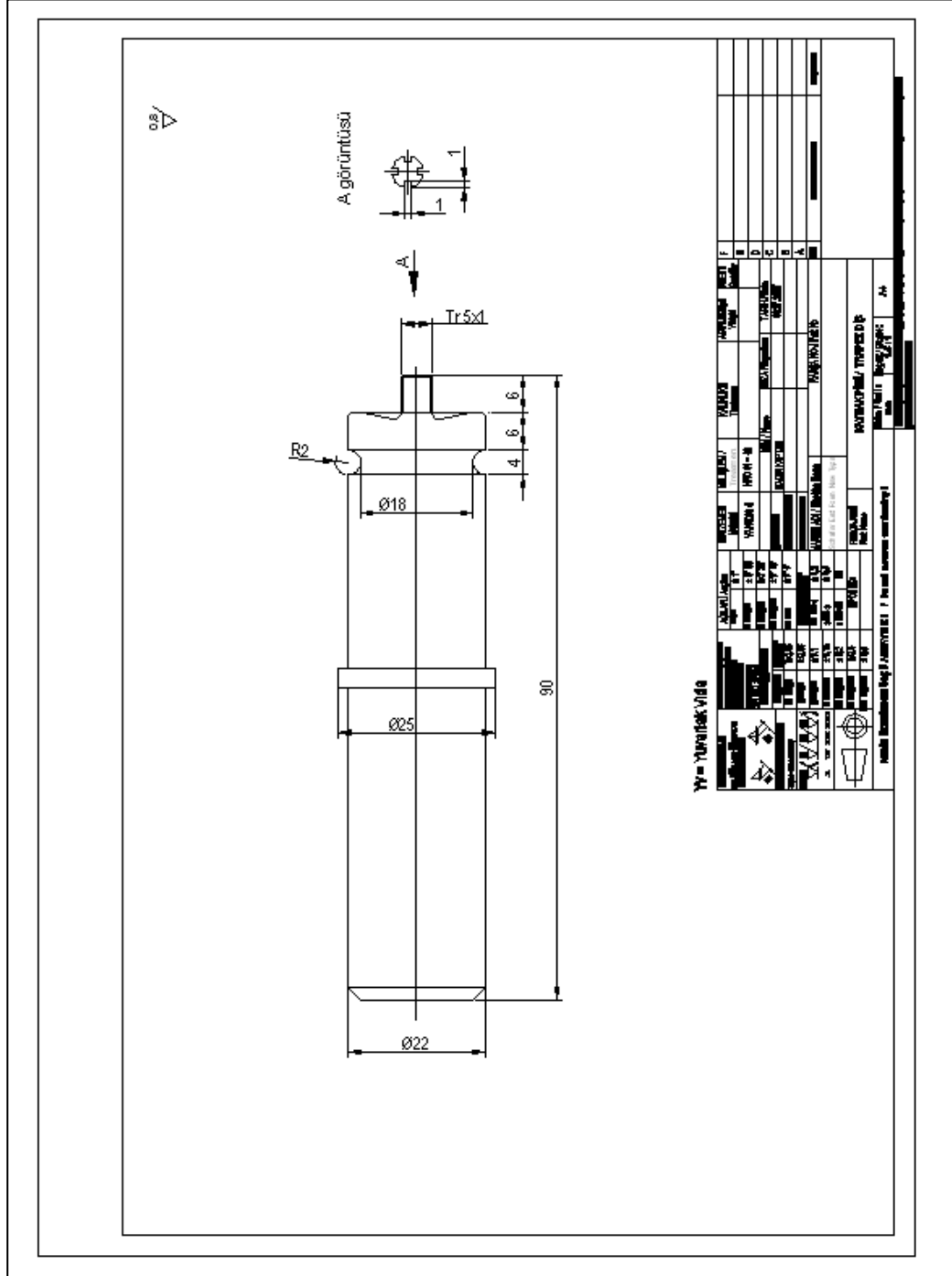






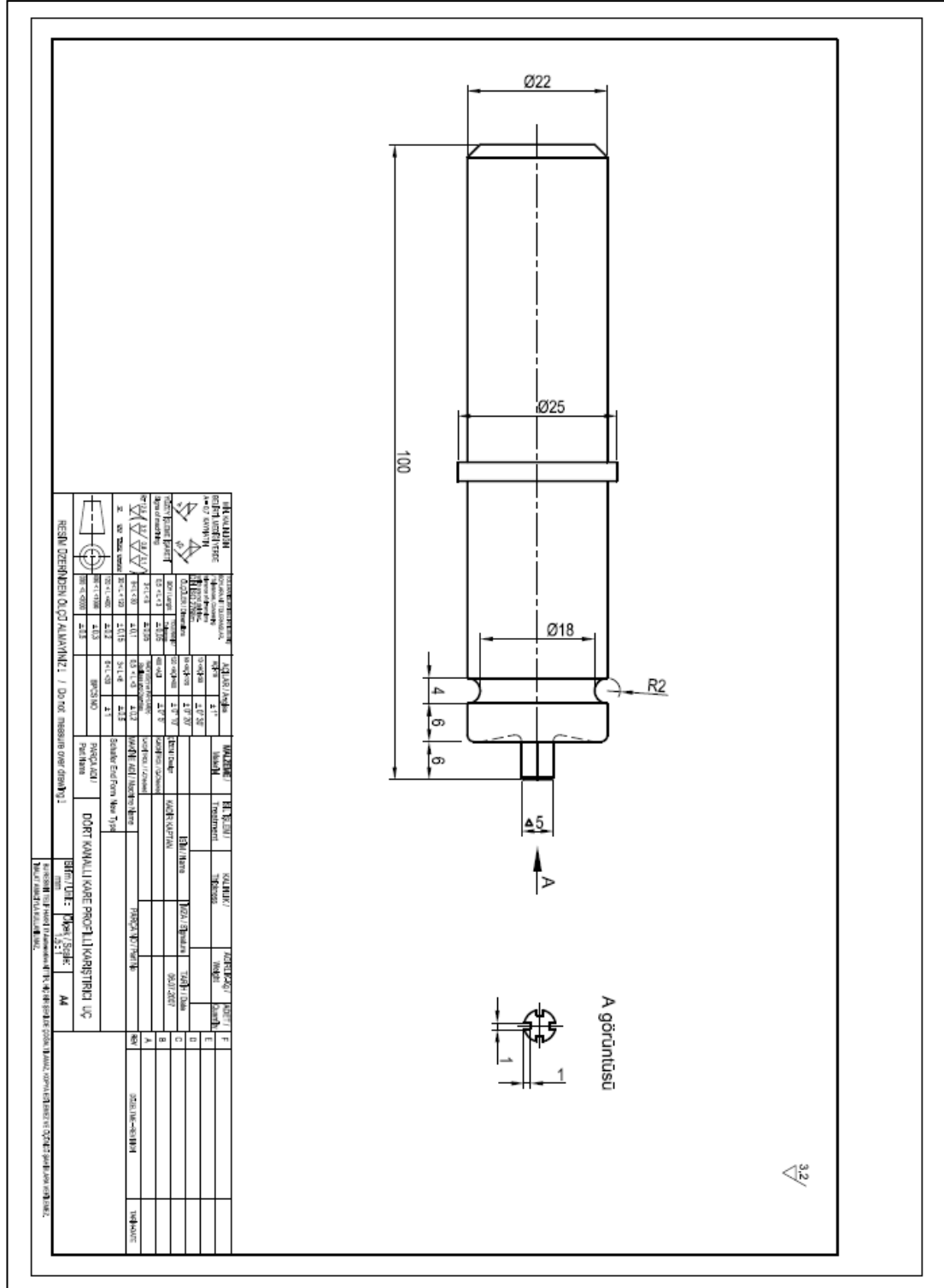


## EK-1 (Devam) Karıştırıcı uç detay resimleri





## EK-1 (Devam) Karıştırıcı uç detay resimleri



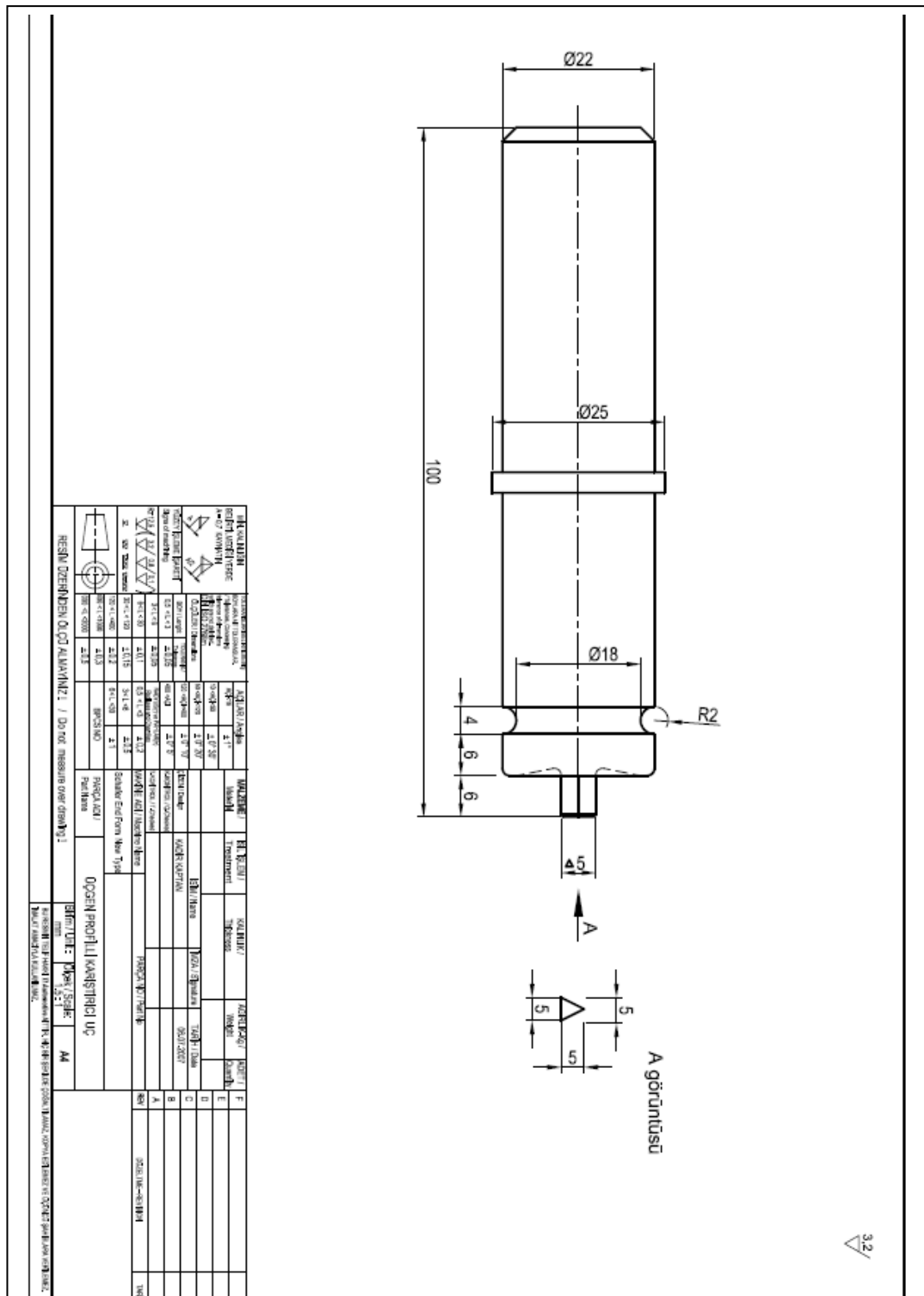
Şekil 1.16. Dört kanallı silindirik profilli karıştırıcı uç detay resmi







### EK-1 (Devam) Karıştırıcı uç detay resimleri



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAPTAN, Kadir  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 05.08.1980 Bursa  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 536 430 45 02  
Faks : 0 224 411 01 11  
e-mail : [kadirkaptan1@gmail.com](mailto:kadirkaptan1@gmail.com)

### Eğitim

| Derece | Eğitim Birimi                    | Mezuniyet tarihi |
|--------|----------------------------------|------------------|
| Lisans | Gazi Üniversitesi /Makine Eğitim | 2004             |
| Lise   | Mimar Sinan Teknik E.M.Lisesi    | 1997             |

### İş Deneyimi

| Yıl       | Yer                   | Görev             |
|-----------|-----------------------|-------------------|
| 2007-     | TI Automotive         | Ürün Mühendisi    |
| 2006-2007 | Durmazlar makine A.Ş. | Tasarım sorumlusu |
| 2004-2005 | Şahinler makine A.Ş.  | Proje sorumlusu   |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

-

### Hobiler

Bilgisayar, Doğa gezintisi, Halk oyunları, Kitap okumak, İnternet