



ALÜMİNYUM 6061-T6 ALAŞIMININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
NOKTA KAYNAĞI İLE FARKLI PARAMETRELERDE
BİRLEŞTİRİLMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Burak ŞENTÜRKEN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM 6061-T6 ALAŞIMININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI
İLE FARKLI PARAMETRELERDE BİRLEŞTİRİLMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Burak ŞENTÜRKEN
ORCID-NO: 0000-0001-5113-7734

Prof. Dr. Rukiye ERTAN
ORCID No: 0000-0002-9631-4607
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

ALÜMİNYUM 6061-T6 ALAŞIMININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI
İLE FARKLI PARAMETRELERDE BİRLEŞTİRİLMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Burak ŞENTÜRKEN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Rukiye ERTAN

Günümüzde ekonomik araçlar kullanmak insanların tercih ettiği bir durum olmuştur. Üretici firmalarda yakıt ekonomisi sağlayabilecek malzemelere ve üretim metotlarına yönelmektedir. Bu doğrultuda Alüminyum gibi hafif ama mukavim malzemeler sıkça kullanılır olmuştur. Aynı sebepler ile sürtünme karıştırma kaynağı da gün geçtikçe daha çok ürünün birleştirilmesinde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada Al6061 malzemesinin farklı parametreler kullanılarak hazırlanmış numuneleri üzerine araştırma yapılmıştır. Hazırlanan bu malzemelerin çekme ve yüzey sertliği testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Takım ilerleme hızının kaynak kalitesine olan etkisi tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma kaynağı, alüminyum, birleştirme metodları

2022, viii + 66 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

WELDING OF 6061 T6 ALUMINUM ALLOY WITH FRICTION STIR SPOT WELDING IN DIFFERENT PARAMETERS AND INVESTIGATION OF ITS MECHANICAL PROPERTIES

Burak ŞENTÜRKEN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Rukiye ERTAN

Today, using economic tools has become a situation that people prefer. Manufacturers are turning to materials and production methods that can provide fuel economy. In this direction, light but durable materials such as aluminum have been used frequently. For the same reasons, friction stir welding is used to join more and more products day by day.

In this study, research was carried out on samples of Al6061 material prepared using different parameters. Tensile and surface hardness tests of these prepared materials were carried out. Obtained results were evaluated. The effect of tool feed rate on weld quality is discussed.

Key words: Friction stir welding, aluminium, joining methods

2022, viii + 66 pages.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İnsanlık gün geçtikte daha fazla konfor ihtiyacı hissetmektedir. Bu konfor ihtiyacını ise gelişen teknoloji karşılamaktadır. At arabası ile ulaşımdan, otomobil ile ulaşım evrilen süreç bunu göstermektedir. Fakat artan nüfus ve çevre kirliliği gibi etmenler, tasarruflu ve çevreci teknolojilerin geliştirilmesini gerekli kılmıştır.

Çevreci ve tasarruflu teknolojiler geliştirme çalışmalarından otomobillerde payını almıştır. Fosil yakıtlı otomobiller yerine, elektrikli otomobiller günümüzde boy göstermeye başlamıştır.

Elektrikli otomobillerin üretim metotlarından biri olan sürtünme karıştırma kaynağı tekniği bu çalışmanın temeli olmuştur. Elektrikli otomobillerin enerjilerinin depolandığı bataryalarının içinde bulunduğu batarya kutuları, sürtünme karıştırma kaynağı metodu ile üretilmesi ekonomik ve güvenli metotlardan biridir. Çalışmamızda batarya kasalarında da kullanılan bir alüminyum çeşidinin bu metot ile üretilmesi ile meydana gelen sonuçlar incelenmiştir.

Bu çalışmada desteği geçen meslektaşım Orkun TEKELİOĞLU'na, numune hazırlama ve test imkânlarından yararlandığım ve görev aldığım Coşkunöz Holding'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans öğrenimim boyunca benden hiçbir desteğini esirgemeyen, her zaman yanımda olduğunu hissettirerek, yol gösteren tez danışmanım Prof. Dr. Rukiye ERTAN'a can-ı gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca her an dualarını ve desteklerini esirgemeyen ablam Arzu ŞENTÜRKEN'e, annem Gülsüm ŞENTÜRKEN'E ve babam Hüseyin ŞENTÜRKEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımda olduğu ilk günden itibaren hiçbir konuda benden desteğini esirgemeyen, daima yanımda olduğunu gönülden hissettiren, yüksek lisans öğrenim sürecimde biricik oğlumuz Deha'yı dünyaya getiren, sevgili eşim Pelin ŞENTÜRKEN'e kalbimin derinliklerinden teşekkürlerimi sunarım.

Burak ŞENTÜRKEN
10/08/2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Metodu	2
2.1.1. Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB).....	4
2.1.2. Termomekanik Olarak Etkilenen Bölge(TEB)	4
2.1.3. Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge(DKB).....	5
2.2. Sürtünme Karıştırma Kaynak Metodunun Üstün Yönleri	5
2.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Zayıf yönleri	7
2.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Tatbik edildiği malzemeler	7
2.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Metodunun Uygulandığı Sanayi Kolları.....	8
2.5.1. Otomotiv (Kara Araçları) ve Demiryolu Sanayileri.....	8
2.5.2. Havacılık ve Uzay Sanayi	9
2.5.3 Gemi ve Denizcilik Sanayisi	10
2.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Parametreleri	10
2.6.1. Takım Dönme Devri	11
2.6.2. Takımın İlerleme hızı	12
2.6.2. Dik Kuvvet (Eksenel Kuvvet).....	12
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	13
3.1. Malzeme	13
3.1.1. AL 6061 T6 Alüminyum Alaşım Malzeme	13
3.1.2. Sürtünme Karıştırma Kaynak Makinesi.....	15
3.1.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Sabitleme Aparatları	16
3.1.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımı	16
3.1.5. Tel Erezyon Makinesi	18
3.1.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Numune Testlerinde Kullanılan Cihazlar	19
3.1.6.1 Çekme Cihazı	19
3.1.6.2. Sertlik Ölçme Cihazı	20
3.1.6.3. Makro Yapı Ölçüm Cihazı	20
3.2. Yöntem.....	21
3.2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynak Metodunun Tatbik Edilmesi.....	21
3.2.2. Test Numunelerinin Hazırlanma Metotları ve Test metodu	23
3.2.2.1. Çekme Test Numuneleri Hazırlığı ve Test Metodu	23
3.2.2.2. Sertlik Deneyi Numuneleri ve Test metodu.....	24
3.2.3 Çekme Testi Kabul Kriterleri.....	26
4. BULGULAR	28
4.1. Çekme Testi Sonuçları	28
4.2. Sertlik Ölçümü	36
4.3. Makro Yapı Ölçümü	38
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	40
KAYNAKLAR	42

ÖZGEÇMİŞ	66
----------------	----



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
Al	Alüminyum
Si	Silisyum
Fe	Demir
Cu	Bakır
Mn	Mangan
Mg	Magnezyum
Cr	Krom
Zn	Çinko
Ti	Titanyum
G	Gram
MPa	Mega Pascal
Cm	Santimetre

Kısaltmalar	Açıklama
ITAB	Isıl tesir altındaki bölge
SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
TWI	The welding Institue
TEB	Termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge
DKB	Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	Sürtünme karıştırma kaynağı şematik gösterim..... 2
Şekil 2.2.	Farklı kalınlıklarda uygulanmış SKK örnekleri..... 3
Şekil 2.3.	Sürtünme karıştırma kaynağı mikro yapısı..... 4
Şekil 2.4.	SKK kullanılarak üretilen batarya kutusu..... 8
Şekil 2.5.	Demiryolu sektöründen örnek..... 8
Şekil 2.6.	Airbus A380 modelinin SKK uygulanmış bir flap kesiti..... 9
Şekil 2.7.	SKK ile üretilmiş güverte ve yan panelleri..... 10
Şekil 2.8.	Parametrelerin ortalama önem yüzdeleri..... 11
Şekil 2.9.	SKK'ye etki eden girdilerin neden sonuç diyagramı..... 11
Şekil 3.1.	Al 6061 T6 malzemesi iç yapı görseli..... 15
Şekil 3.2.	SKK makine bağlantı aparatları..... 16
Şekil 3.3.	Kullanılan takım profili ve kesit resmi..... 17
Şekil 3.4.	Tel erezyon makinesi..... 18
Şekil 3.5.	Zwick 150 Sac çekme cihazı..... 19
Şekil 3.6.	Sertlik ölçme cihazı..... 20
Şekil 3.7.	Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin aşamaları..... 23
Şekil 3.8.	Çekme Test Numuneleri..... 24
Şekil 3.9.	Yüzey Sertliği Numuneleri..... 25
Şekil 3.10.	Sertlik ölçüm aralıkları..... 25
Şekil 4.1.	P1 kodlu parçanın akma ve çekme dayanımı değerleri..... 29
Şekil 4.2.	P2 kodlu parçanın akma ve çekme grafiği..... 30
Şekil 4.3.	P3 kodlu parçanın akma ve çekme grafiği..... 31
Şekil 4.4.	P4 kodlu parçanın akma ve çekme grafiği..... 31
Şekil 4.5.	P5 kodlu parçanın akma ve çekme grafiği..... 32
Şekil 4.6.	P6 kodlu parçanın akma ve çekme grafiği..... 32
Şekil 4.7.	P1 kodlu parçanın çekme testi sonrası görüntüleri..... 33
Şekil 4.8.	P2 kodlu parçanın çekme testi sonrası görüntüleri..... 34
Şekil 4.9.	P3 kodlu parçanın çekme testi sonrası görüntüleri..... 34
Şekil 4.10.	P4 kodlu parçanın çekme testi sonrası görüntüleri..... 34
Şekil 4.11.	P5 kodlu parçanın çekme testi sonrası görüntüleri..... 35
Şekil 4.12.	P6 kodlu parçanın çekme testi sonrası görüntüleri..... 35
Şekil 4.13.	Yüzey Sertliği ölçülen parçalar..... 36
Şekil 4.14.	Yüzey sertliği dağılım grafiği..... 38
Şekil 4.15.	Makro yapı görüntüleri..... 39

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1.	SKK metodunun üstün yönleri..... 6
Çizelge 3.1.	Al 6061 T6 mekanik özellikleri..... 13
Çizelge 3.2.	Al 6061'in kimyasal bileşen oranları..... 14
Çizelge 3.3.	SKK makinesi özellikleri..... 15
Çizelge 3.4.	Parça kodları ve parametre tablosu..... 22
Çizelge 3.5.	fe katsayını gösterir şekil..... 27
Çizelge 4.1.	Çekme testine ait akma, çekme mukavemet değerleri ve uzama yüzdesi..... 28
Çizelge 4.2.	Sertlik ölçüm sonuçları..... 37
Çizelge 4.3.	Makro yapı ölçüm sonuçları..... 38



1. GİRİŞ

İnsan nüfusunun artması, kişi başına düşen geliri azaltmaktadır (Birinci A, 1998). Bu azalma ile tüketiciler her alanda ekonomik davranışlar gösterme eğilimi göstermektedir. Bu eğilim ile ortaya çıkan ekonomik ürünler üretmek isteği hâsıl olmaktadır. Bu sebeple araştırma ve geliştirme faaliyetleri yapılmaktadır. Bu çalışmaya konu olan ‘sürtünme karıştırma kaynağı’ yöntemi de bir ekonomik üretim metodudur.

Alüminyum otomotiv, havacılık, denizcilik, mimari ve gemi inşa sanayisinde sıklıkla kullanılan, çeşitli serileri bulunan bir malzemedir. Alüminyumun bu denli yüksek talep görmesinin birçok sebebi vardır. Korozyona dirençli olması, düşük yoğunluğu sebebi ile hafif olması, buna keza yüksek mukavemetli bir malzeme olması en önemli özelliklerindendir (Başer, T. A. 2012).

Günümüzde insanlar gelir düzeyleri azaldığı için çok daha ekonomik otomobiller tercih etmektedirler. Otomobilin ekonomikliğı ise harcadığı yakıt miktarı ile ters orantılıdır. Bir otomobili ekonomik hale getirmek için yakıt sarfiyatını düşürmek gereklidir. Yakıt sarfiyatını düşürmek için ise öncelikle aracın ağırlığı azaltılmalıdır. Mukavemetten ödün vermeden ağırlık azaltılması için alüminyum gibi malzemeler tercih edilmektedir.

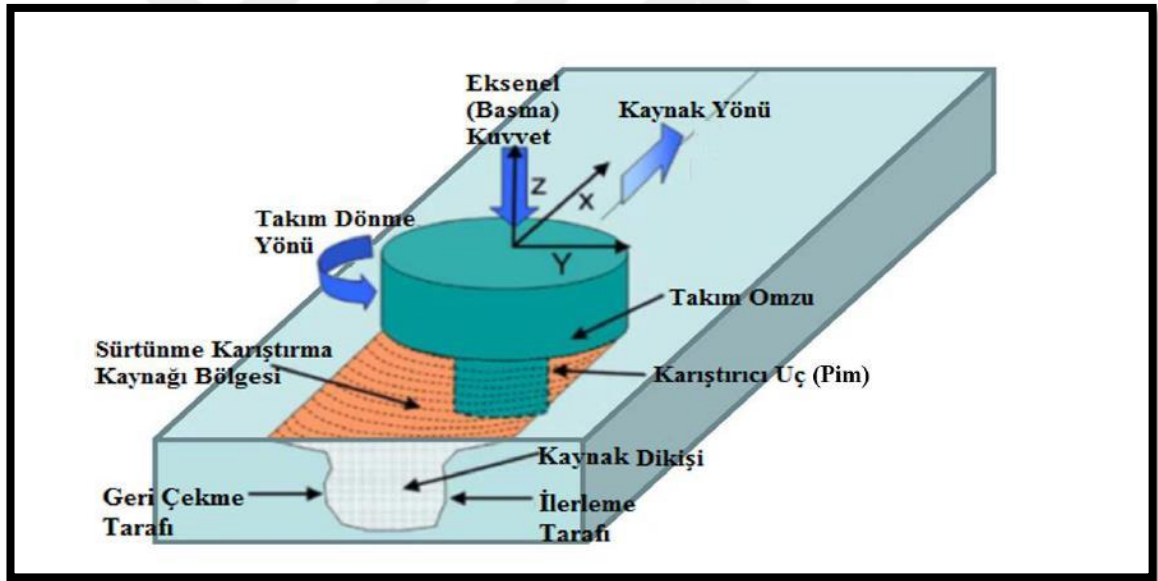
Alüminyum birçok kaynaklı birleştirme yöntemi ile birleştirilebilir. Fakat ergitme yöntemini kullanan bu kaynak metotları (metal ark kaynağı, lazer ergitme, tungsten inert gaz kaynağı) ile yapılan kaynaklar sonrası ısı tesir altındaki bölgelerinde oluşan gerilmelerden kaynaklı olarak parçanın geometrik şekli değişmektedir. Bu problemi giderebilmek için sürtünme karıştırma kaynağı metodu geliştirilmiştir. Bu metot 1991 yılında Kaynak enstitüsü (TWI) tarafından geliştirilmiştir (Khan, N. Z., 2017).

Bu çalışmada Alüminyum 6061 T6 serisi malzemenin çeşitli parametrelerde SKK metodu ile kaynağı yapılmıştır. Elde Edilen numuneler standartlara uygun olarak Çekme-kopma testine ve yüzey sertliği ölçümü kontrol metotlarına tabi tutulmuştur. Tüm bu çalışmalara ilgili bölümlerde detaylıca yer verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

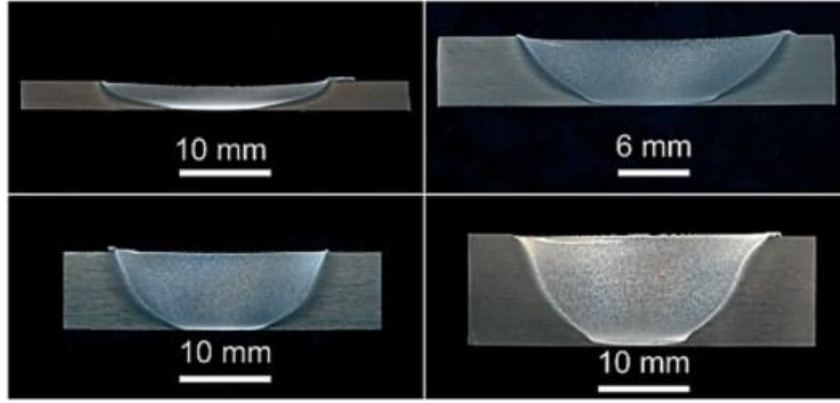
2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Metodu

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) metodu 1991 yılında İngiltere merkezli (The Welding Institute) kaynak enstitüsü tarafından icat edilmiştir. Bu metot genellikle hafif alaşımlı metallerin birleştirilmesinde kullanılan katı hal kaynak yöntemidir. SKK metodu özel tasarlanmış bir takım ile baskı altında ilerleme ve dönme hareketleriyle meydana gelmektedir. Bahsi geçen takım, omuz ve pim isimli iki silindirik bölümden oluşmaktadır. Bu takım bir hat boyunca ilerleyerek sürtünme kuvveti meydana getirir. Sürtünme kuvveti doğası gereği ısı açığa çıkarır. Bu ortaya gelen ısı iki malzemenin bir katı hal ergiyi oluşturmasını ve birbirleri ile nüfuz etmesini sağlar (Meran C. 2006, Nandan, R., ve diğerleri, 2008, Lee, W.B., ve diğerleri, 2004, Meran, C., ve diğerleri, 2008). Sürtünme karıştırma kaynağını gösteren şematik şekil Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Sürtünme karıştırma kaynağı şematik gösterim

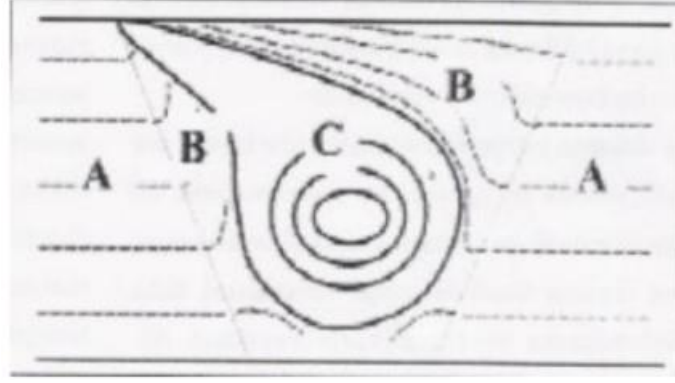
Sürtünme karıştırma kaynağı bir soğuk kaynak metodudur. Bu metot özellikle iç gerilmelerin ve çarpılmaların oluşmaması için yüksek nitelikli kaynakların oluşturulmasında farklı metal ve alaşımların birleştirilmesinde kullanılmaktadır. SKK metodu ile farklı kalınlıklarda çalışmalar yapabilmek mümkündür.



Şekil 2.2. Farklı kalınlıklarda uygulanmış SKK örnekleri (P.D. Edwards, ve diğerleri, 2009)

Sürtünme karıştırma kaynağı metodunda mekanik özellikler ve mikro yapı, kaynak parametreli ile değişkenlik göstermektedir. Bu yöntem ile malzemeler ergime noktasına gelmemektedir. Bu sebeple ark kaynağı çeşitleri olan MIG/MAG ve TIG gibi metotlarda oluşan interdentirik ve ötektik fazlar oluşmamaktadır [Cavaliere, P., ve diğerleri, 2006, Kordestani, F., ve diğerleri, 2016]. Buna ek olarak, SKK metodunda meydana gelen kaynak havuzu özellikleri takımın geometrik tasarımı ile de ilgilidir (Kulekci, M., ve diğerleri, 2008, Lombard, H., ve diğerleri, 2009, Balasubramanian, V. 2008).

Sürtünme karıştırma kaynağı bölgesi literatürde ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), termomekanik etkilenen bölge (TMEB) ve Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge(DKB) olmak üzere isimlendirilmektedir. SKK işlemi sonrası oluşan iç yapı Şekil 2.3.'te gösterilmiştir (Srubar, M. 2009).



Şekil 2.3. Sürtünme karıştırma kaynağı mikro yapısı (Srubar, M. 2009)

A:Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB), B:Termodinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (TEB), C:Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge(DKB)

2.1.1. Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)

Kaynak merkezinin yakınında olan bu bölgede, malzeme, mikro yapıyı ve/veya mekanik özellikleri değiştiren bir ısı çevrim geçiriyor. Bununla birlikte, bu alanda plastik deformasyon oluşmuyor. Diğer sistemlerde bundan, “sıcaklığın tesiri altındaki bölge” olarak söz ediliyordu (Güleç E., ve diğerleri, 2006).

2.1.2. Termomekanik Olarak Etkilenen Bölge(TEB)

Bu bölgede, skk takımı yüzünden malzeme plastik olarak deformasyona uğruyor ve işlem den gelen ısı, malzemede biraz etki bırakıyor. Alüminyumda, bu bölgede yeniden kristalleşme olmadan belirgin plastik özellikler elde etmek mümkündür ve TEB’in yeniden kristalleşmiş bölgesi ile deforme olmuş bölgesi arasında genellikle farklı bir sınır vardır. Önceki sınıflandırmada bu iki alt bölge farklı mikroyapısal bölgeler olarak ele alınmıştı. Bununla birlikte, diğer malzemeler üzerinde yapılan sonraki çalışma, alüminyumun diğer birçok malzemeden farklı davrandığını, yüksek sıcaklıkta yeniden kristalleşmeden çok fazla deforme olabileceğini göstermiştir. Diğer malzemelerde, farklı yeniden kristalleşen bölge(külçe) mevcut değildir ve TEB’in hepsinin, yeniden kristalleşmekte olduğu görülür. Ferritik çelikler ve a-b titanyum alaşımları(ör:Ti-6Al-4V) gibi malzemelerde ısı indüksiyon faz dönüşümünden dolayı mikroyapıyı anlamak zorlaşır ve bu ITAB ile TEB sınırının kesin olarak teşhisini güçleştirir (Güleç E., ve diğerleri, 2006).

2.1.3. Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge(DKB)

Alüminyum alaşımlarındaki, TEB'deki yeniden kristalleşen bölge geleneksel olarak külçe adıyla anılır. Bu terim, tanımlayıcı olmakla birlikte pek de bilimsel değildir. Bununla birlikte kullanımının yaygınlaşması ve bilimsel değer olarak eş anlamlı başka bir kelimenin olmaması nedeniyle bu terim benimsenmiştir. Takım omzunun doğrudan doğruya altında bulunan bölgenin(TEB'in bir parçası olduğu açıktır), tane yapısı farklı olduğu için ayrı bir kategoriye girmesi öne sürülmüştür. Buradaki mikroyapı, omzun arka yüzünün sürtmesiyle kararlıdır ve malzeme maksimum sıcaklığının altına soğutulabilir. Bu alanın TEB'in farklı bir alt bölgesi olarak ele alınması kabul edilmiştir (Güleç E., ve diğerleri, 2006).

2.2. Sürtünme Karıştırma Kaynak Metodunun Üstün Yönleri

SKK metodu düşük enerji tüketimi, zararlı emisyon oluşturmaması ve koruyucu gaz gibi sarfiyatları olmaması gibi sebeplerden dolayı çok daha çevrecidir ve karbon ayak izi düşüktür (Trimble D. 2011).

SKK metodunda malzeme ergimediği için geleneksel kaynak metotlarında ortaya çıkan oksitlenme ve boşluklu yapı gibi kusurlar meydana gelmemektedir. Alüminyum alaşımlarının SKK metodu ile birleştirilmesi, diğer kaynak metotları ile kıyaslandığında daha sert ve hafif bir yapı meydana gelmektedir. Bunlara ek olarak SKK metodunda daha yüksek yorulma dayanımına sahip bağlantılar elde edilir (Mishra, R.S., ve diğerleri, 2005). SKK metodunun genel üstün yönleri aşağıda ki çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. SKK metodunun üstün yönleri (Mishra, R.S., ve diğerleri, 2005)

Metalürjüğe üstünlükleri	Çevresel üstünlükleri	Enerji yönünden üstünlükleri
Katı hal metodudur	Koruma gazına ihtiyaç duymaz	Farklı kalınlıklarda malzemelere tatbik edilebilir ve ek operasyona ihtiyaç duymaz
Alaşım elementi kaybı olmaz	Az atık malzeme çıkar	Lazer kaynak işlemi ile kıyaslandığında enerji sarfıyatı %2.5'tir.
Kaynak bölgesinin metalürjik özellikleri iyidir	Temizlik ihtiyacı yoktur	Farklı birleştirme metodlarına göre uygulandığı araçlarda yakıt tasarrufu sağlar
Tane yapısı incedir	Geleneksel kaynak metodları gibi sarf malzeme ihtiyacı yoktur	
Çoklu bağlantı elemanlarının yerine kullanılabilir	Taşlama atığı oluşturmaz	
Kaynak bölgesi çatlaksızdır	Ön temizliğine ihtiyaç duymaz	
Çarpılma oranı düşük		
Boyutsal doğruluk oranı iyidir		

2.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Zayıf yönleri

SKK metodunda genel zayıf yönleri aşağıda listelenmiştir.

- Kalın parçalarda, kaynağın alt yüzeyi ile alt yüzeyi arasında ısı dağılımı farklı olduğu için kaynak prosesi zordur.
- Kaynak prosesi sırasında kaynak edilecek malzemelerin tespiti için yüksek kuvvetli sabitleme aparatları kullanılmalıdır.
- SKK piminin, metalin içine girmesi için yüksek baskı kuvveti gereklidir.
- Genellikle diğer kaynak metotlarına göre daha yavaştır.
- Sürtünme karıştırma kaynağı, boşluklu parçaların kaynağı için uygun değildir.
- Sürtünme karıştırma kaynağı makinesinin ilk yatırım bedeli yüksektir.
- Tek parçalı karıştırıcı uç kullanıldığında kaynağın sonunda delik kalır.
- Destek çubuğuna ihtiyaç duyulur.
- Diğer kaynak metotlarına göre geometrik parçaların birleştirilmesinde çok daha az esnektir (Dalkılıç, S. 2012, The Welding Master. 25 Aralık 2021).

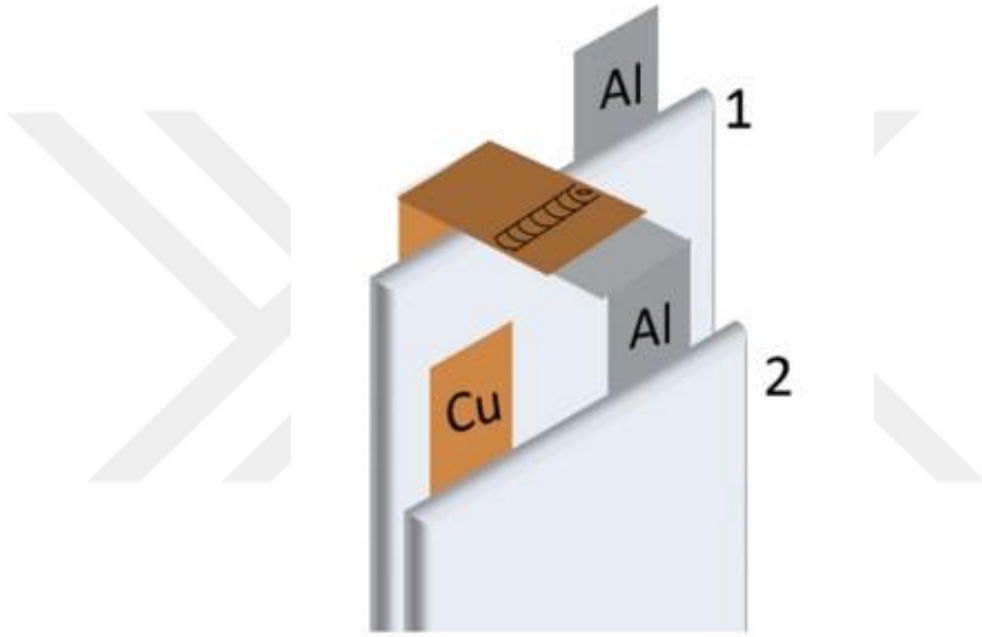
2.4. Sürtünm Karıştırma Kaynağının Tatbik edildiği malzemeler

Başlarda SKK işlemi bir dizi alüminyum alaşımı, kurşun, çinko, magnezyum ve bir nebze yumuşak malzemelerin birleştirilmesinde kullanılmıştır. Yakın zamanda, titanyum, bakır, düşük karbonlu ferritik çelik, paslanmaz çelikler, alaşımlı çelikler ve nikel alaşımlarının yanında bazı termoplastik malzemeler de SKK yöntemi ile kaynak yapılabilmektedir. Prensip olarak, sıcak işlenebilecek herhangi bir malzeme bu işlemle kaynaklanabilmektedir. Ayrıca kaynak yapılan materyalden çok takım malzemesi daha belirleyici bir faktördür (TWI. 25 Aralık 2021, Çam, G. 2011).

2.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Metodunun Uygulandığı Sanayi Kolları

2.5.1. Otomotiv (Kara Araçları) ve Demiryolu Sanayileri

Giriş bölümünde de bahsedildiği üzere araç ağırlıklarını azaltmak ve çevreci üretim yapmak günümüzde çok daha önemli bir hale gelmiştir. Özellikle otomotiv sektörü başta olmak üzere demiryolu araçlarının üretiminde de SKK metodu kullanılmaktadır. Ayrıca elektrikli otomobillerin bataryalarının kutularının üretim metodu olarak kullanılmaya başlanmıştır (Mypati O., ve diğerleri, 2019).



Şekil 2.4. SKK kullanılarak üretilen batarya kutusu (Mypati O., ve diğerleri, 2019).



Şekil 2.5. Demiryolu sektöründen örnek (TWI. 26 Aralık 2021)

1-Alstom LHB, üretim sırasında DSB Danimarka Devlet Demiryolları için eğitim veriyor. Bu trenler için FSW çatı panelleri, Sapa ile yapılan bir sözleşme kapsamında Hydro Marine Aluminium'da yapılmıştır. 2- Alstom LHB'ye (Almanya) teslim edilmek üzere Sapa için Hydro Marine Aluminium'da üretilen sürtünme karıştırma kaynaklı çatı paneli.

2.5.2. Havacılık ve Uzay Sanayi

Havacılık ve uzay sanayisinde yapısal bileşenlerin birleştirilmesinde SKK'nın kullanıldığı ilk uçak Eclipse 500'dür. Bu uçakta perçin kullanımı SKK sayesinde %65 azaltılarak 30.000 adet daha az perçin kullanılmıştır. Bu metot bir perçinin verdiği mukavemetin en az 3 katını vermektedir ve yorulma dayanımı da en az perçinle bağlantı kadardır. SKK metodu ile uçak 75 kg azaltılmıştır.

Benzer şekilde Airbus firması da A380 modelinde SKK metodunu kullanmıştır. Bu modelde yatay kirişlerin panellere bağlanmasında kullanılmıştır (Dalkılıç S. 2012).



Şekil 2.6. Airbus A380 modelinin SKK uygulanmış bir flap kesiti (Dalkılıç S. 2012)

2.5.3 Gemi ve Denizcilik Sanayisi

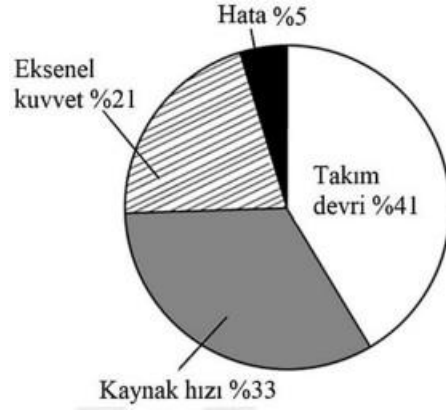
SKK metodunun ticari olarak ilk kullanıldığı sektörlerin başında Gemi ve Denizcilik sanayisi gelmektedir. Bu sektörde güverteler, yan paneller, zemin panelleri, soğutma sistemleri, helikopter pistleri, direkler ve bomlar gibi gemi bileşenleri üretilmektedir (TWI. 02 Ocak 2022). Yan bölme ve güverte panellerinin SKK metodu üretilen görselleri aşağıda ki Şekil.2.7.'de gösterilmiştir (Besharati-Givi, M.K., ve diğerleri, 2014).



Şekil 2.7. SKK ile üretilmiş güverte ve yan panelleri (Besharati-Givi, M.K., Asadi, P.2014).

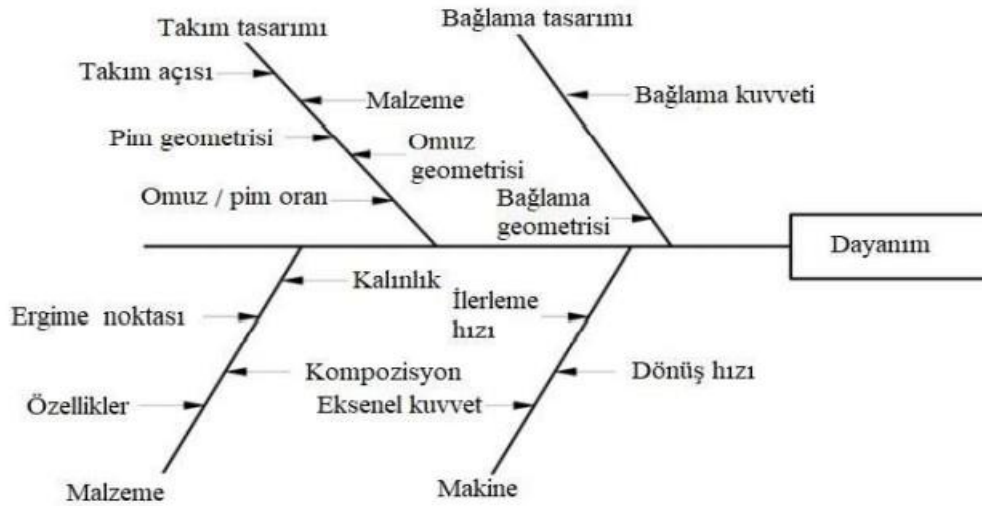
2.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Parametreleri

SKK metodunda takım ilerleme hızı, takım dönme devri, takımın baskı kuvveti (dik kuvvet), takımın açısı ve takım dalma hızı sistem parametreleridir. Bu değişkenler kaynak edilecek malzeme tipine, malzeme kalınlığına ve kaynak pozisyonuna göre belirlenmelidir. Bu parametrelerin belirlenme kriterleri ise süneklik, dayanım, korozyon direnci ve şekillendirilebilirlik gibi mekanik özelliklerdir. SKK işleminde birçok kaynak kalite gereksinimleri olmasına karşın ana hedef makul görülebilir standartlarda hatasız ve iyileştirilmiş bir kaynak dayanımı elde etmektir. Bu bilgilerin ışığında kaynak işleminde en etkin parametreler takım dönme devri ve takım ilerleme hızı ile elde edilmektedir. Bunlar SKK bağlantılarının çekme dayanımları üzerinde en belirgin etkiye sahip parametrelerdir. Şekil 2.8.'de kaynak faktörlerin bağlantı özellikleri üzerindeki ortalama yüzde etki değerleri verilmiştir (Lakshminarayanan, A.K., ve diğerleri, 2008).



Şekil 2.8. Parametrelerin ortalama önem yüzdeleri (Lakshminarayanan, A.K., ve diğerleri, 2008)

Şekil 2.8.'de gösterilen parametrelere ilaveten SKK metoduna etki edebilecek girdiler aşağıda ki Şekil 2.9.'da bulunan neden – sonuç diyagramında gösterilmiştir (Lakshminarayanan, A.K., ve diğerleri, 2008).



Şekil 2.9. SKK'ye etki eden girdilerin neden sonuç diyagramı (Lakshminarayanan, A.K., ve diğerleri, 2008)

2.6.1. Takım Dönme Devri

SKK metodunda ana parametrelerden biri takımın dönme devridir. Kaynak bölgesinde daha yüksek bozulmaya sebep olduğu için yüksek ısı istenmez. Çünkü ITAB daha geniş sınırlara sahip olacaktır. Alüminyum alaşımda daha fazla tane çökmesine de sebep olur. Bir yandan da daha büyük bir kaynak çekirdeği ve daha güçlü bir kaynak dayanımı oluşturmak için, daha fazla karıştırma gerekmektedir (Booth, M. 2016, Peel, M.J., ve diğerleri, 2006, Leitão, C., ve diğerleri, 2009, Amancio-Filho, S.T., ve diğerleri, 2008).

Dönme devri, kullanılan takımın geometrisine, kaynatılacak malzemenin türüne ve kalınlığına göre büyük ölçüde değişkenlik gösterecektir. SKK işleminde kaynak, SKK takımının geometrik şekli ve omuz tarafının uyguladığı kuvvet ile meydana gelir (Padmanaban, G., ve diğerleri, 2009, Devuri, V., ve diğerleri, 2013).

Ayrıca Isı girdisinin artması sebebiyle de kaynaklı bağlantının ısı tesir altındaki bölgesinde direnç artırıcı parçacıkların (silisyum, bakır ve magnezyum) malzeme içerisinde daha kaba (homojen olmayan) şekilde çökelme oluşturlar. (Çam, G.,2005-Gürler, M., 2000, - Anık, S., ve diğerleri, 1977).

2.6.2. Takımın İlerleme hızı

Takım ilerleme hızı, kaynak yapılacak hat boyunca takımın ilerlediği hızı ifade eder. Takımın ilerleme hızı kaynak işlemi boyunca ortaya çıkan ısı ile ters orantılıdır. Takım ilerleme hızı arttığında ısı girdisi daha az olur. Fakat ısı girdisi kaynak edilebilirliğin altında kaldığı takdirde gerekli standartlarda kaynak kalitesi meydana gelmeyebilir (Threadgill, P.L., ve diğerleri, 2009, Colegrove P.A., ve diğerleri, 2007, Q.Y. Shi, ve diğerleri, 2003). Bazı sanayi uygulamalarında 20 mm/dk ile 6 m/dk arasında değişen hızlar görülmektedir (Fadaeifard, F., ve diğerleri, 2014, Hovanski, Y., ve diğerleri, 2015).

2.6.2. Dik Kuvvet (Eksenel Kuvvet)

İyi bir kaynak kalitesi sağlamak için belirli bir seviyede dik kuvvete ihtiyaç gereklidir. Çünkü sürtünme karıştırma kaynağı esnasındaki sıcaklık plastikleştirilmiş metal miktarı ile ilgilidir. Omzun iş parçasına temas ettiği noktadan itibaren, genel olarak yüzeye 0.1 mm girişim yapılır, belirli bir devirde dönen takım omzu iş parçasına dik basınç uygular ve böylelikle sürtünme ısı oluşur. Yetersiz girişim derinliğinin olması, kaynakta boşluklara sebebiyet verir. Girişim derinliğinin artırılması yüzeyde çapak oluşumuna sebebiyet verebilir (Booth, M. 2016). Dik kuvvet göreceli olarak az olduğunda, alt bölgede yetersiz nüfuziyet (daha az mekanik çalışma) meydana gelir. Bu da kalitesiz birleşim ve mukavemetsiz bağlantı meydana gelmesine neden olur (Ramulu, P.J., ve diğerleri , 2013, Ugender, S ve diğerleri, 2018, Mahany, M. S., ve diğerleri, 2017, Palanivel, R., ve diğerleri, 2012). SKK metodunda kullanılan dik kuvvetler diğer kaynak parametrelerinin de kombinasyonu ile değerlendirilerek 1 kN ile 15 kN arasında değişkenlik göstermektedir (Palanivel, R., ve diğerleri, 2012).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, Çalışmaya konu olan malzemenin mekanik ve kimyasal özellikleri ile birlikte SKK makinesi, takımı ile birlikte test cihazları ve numuneler hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

3.1. Malzeme

3.1.1. AL 6061 T6 Alüminyum Alaşım Malzeme

Bu çalışmada 4 mm kalınlığında AL 6061 T6 alüminyum alaşımdan hazırlanmış levhalar kullanılmıştır. 6XXX serisi alüminyum alaşımların başlıca malzemeleri magnezyum ve silikondur. Genellikle mimarı yapılarda kullanılır. Alüminyum alaşımlar oksidasyona dayanıklıdır. Üzerlerinde görünmez bir tabakası şeklinde oksit tabakası oluştururlar ve bu durumun malzemenin içine ilerlemesini engellerler. Bu sebeple Alüminyum alaşımlar oksidasyona dayanıklıdır. Kullanım yerine göre hafif ve mukavim bir malzemedir. Ek koruyucu operasyonlar gerektirmemektedir (Davis J.R. 2007). Çizelge 3.1. ve Çizelge 3.2.' de Al6061 Alüminyum alaşımının mekanik ve kimyasal özellikleri verilmiştir (Davis J.R. 2007).

Çizelge 3.1. Al 6061 T6 mekanik özellikleri

Malzeme	Çekme Dayanımı (ksi)	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (HRB)
Al 6061 T6	45	2,7	60

Not: 1 ksi = 6,89 MPA

Çizelge 3.2. Al 6061'in kimyasal bileşen oranları (Davis J.R. 2007)

Elementler	Ağırlıkça Miktarı (%)
Silisyum (Si)	0,40 – 0,8
Demir (Fe)	0,7
Bakır (Cu)	0,15- 0,40
Mangan (Mn)	0,15
Magnezyum (Mg)	0,8 – 1,2
Krom (Cr)	0,04 – 0,35
Çinko (Zn)	0,25
Titanyum (Ti)	0,15
Alüminyum (Al)	Kalan

Al6061 Alüminyum alaşımdan 4 mm kalınlığında levhalar temin edilmiş olup, dik işlem tezgahında 250x100 mm boyutlarına getirilmiştir. Seçilen parametre listesine göre 12 adet olarak hazırlanmıştır. Bu boyutlar SKK işlemi sonrası test numunelerinin standartlara uygun olması için belirlenmiş değerlerdir.

Kaynak bölgesinde mikro yapısal değişimler meydana gelmemesi için talaşlı üretim metodu ile numuneler hazırlanmıştır. SKK için alın kaynak metodu uygulanmıştır.

Kaynak yüzeyleri, SKK işleminden önce çapaksız ve temiz hale getirilmiş ve bu şekilde işleme alınmıştır. Aşağıda ki Şekil 3.1.'de Hazırlanan malzemenin görseli verilmiştir.



Şekil 3.1. Al 6061 T6 malzemesi iç yapı görseli

3.1.2. Sürtünme Karıştırma Kaynak Makinesi

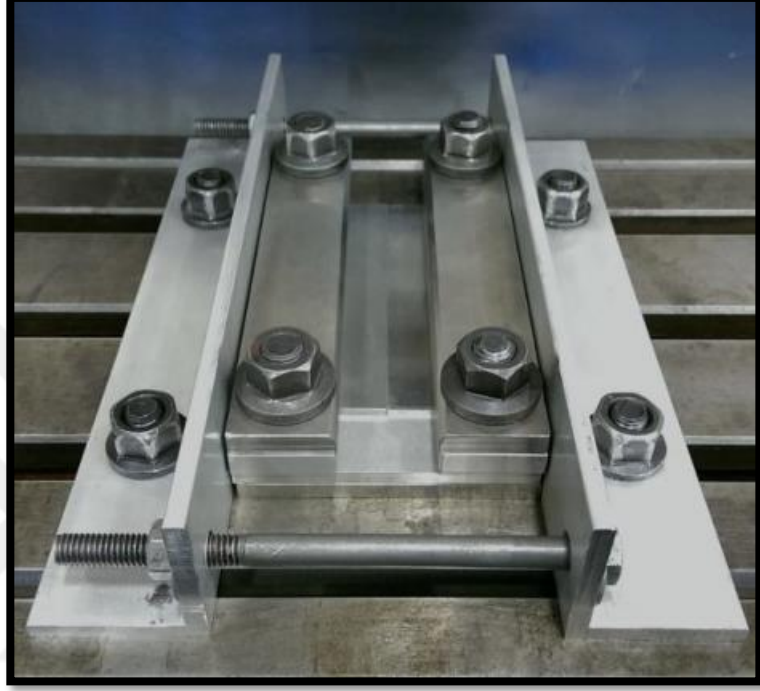
Sürtünme karıştırma kaynak işlemi için, 2020 yapımı ‘Beijing FSW technology’ firmasına ait ‘FSW-LM-BL20-2D’ model SKK makinesi kullanılmıştır. Makinenin Genel özellikleri ise aşağıda ki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.3. SKK makinesi özellikleri

Kaynak Kalınlıkları	1 ~ 20 mm (6XXX Alüminyum Alaşım)
Kaynak Metali	Alüminyum Alaşım
X eksen kursu	3300 mm
Y eksen kursu	2100 mm
Z eksen kursu	500 mm
B açısı	$\pm 5^{\circ}$
C açısı	$\pm 360^{\circ}$
Makine Gücü	30 kW
Makinenin Ağırlığı	25t

3.1.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Sabitleme Aparatları

Sürtünme karıştırma kaynağında, iş parçasının sabit olması çok önemlidir. İş parçaları x,y ve z eksenlerinde hareket etmeyecek şekilde özel mengeneler ile makine üzerinde ki bağlantı deliklerinden sabitlenmiştir. Sistemin örnek görseli Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.

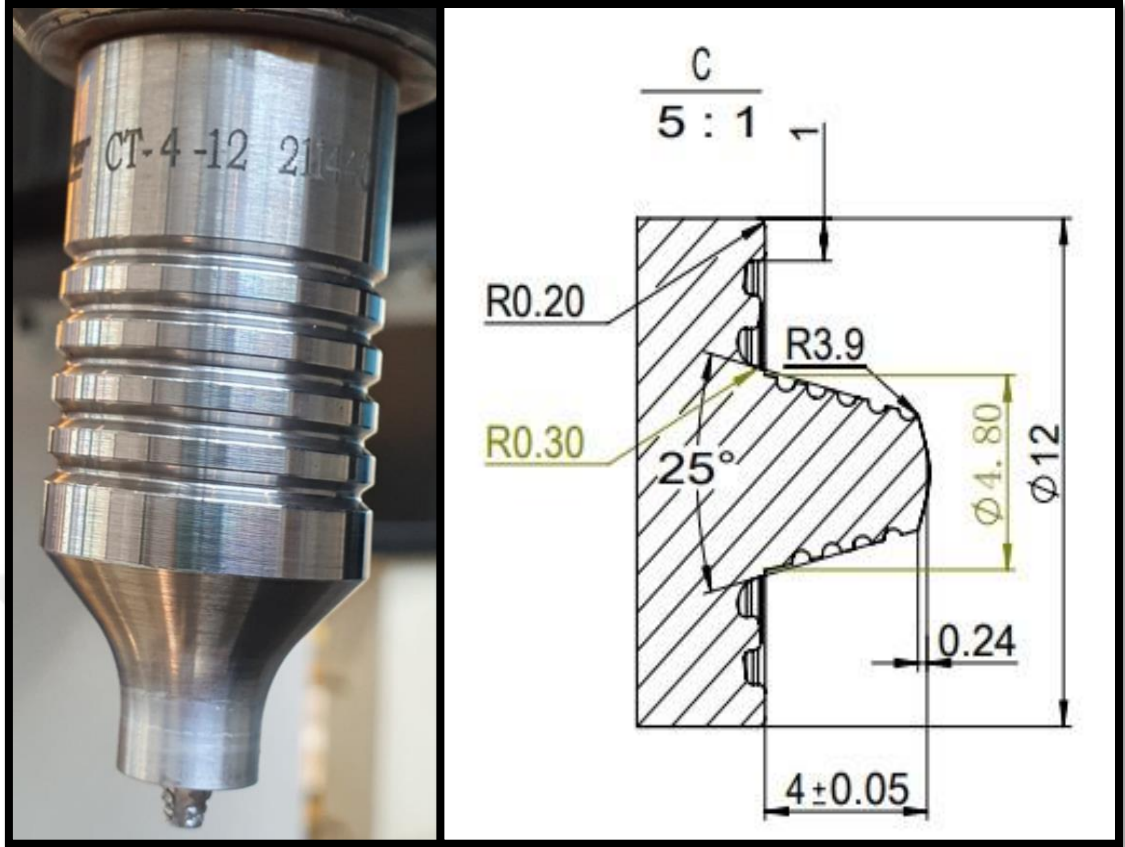


Şekil 3.2. SKK makine bağlantı aparatları

3.1.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımı

Literatür incelendiğinde takım geometrisinin, sürtünme karıştırma kaynağı prosesine doğrudan etki ettiği görülebilir. Takımın geometrik şekli çekme mukavemeti ve iç yapı özelliklerine direkt etki etmektedir. Eğer takım profili birleştirilmek istenen malzeme çiftine uygun değilse, kusurlu birleştirmeler meydana gelebilir (Boz, M. ve diğerleri, 2004, Tozaki, Y., ve diğerleri, 2007, Choi, D.H., ve diğerleri, 2010, Yadava, M.K., ve diğerleri, 2010, Bahrami, M., ve diğerleri, 2014, Singh, A., ve diğerleri, 2019).

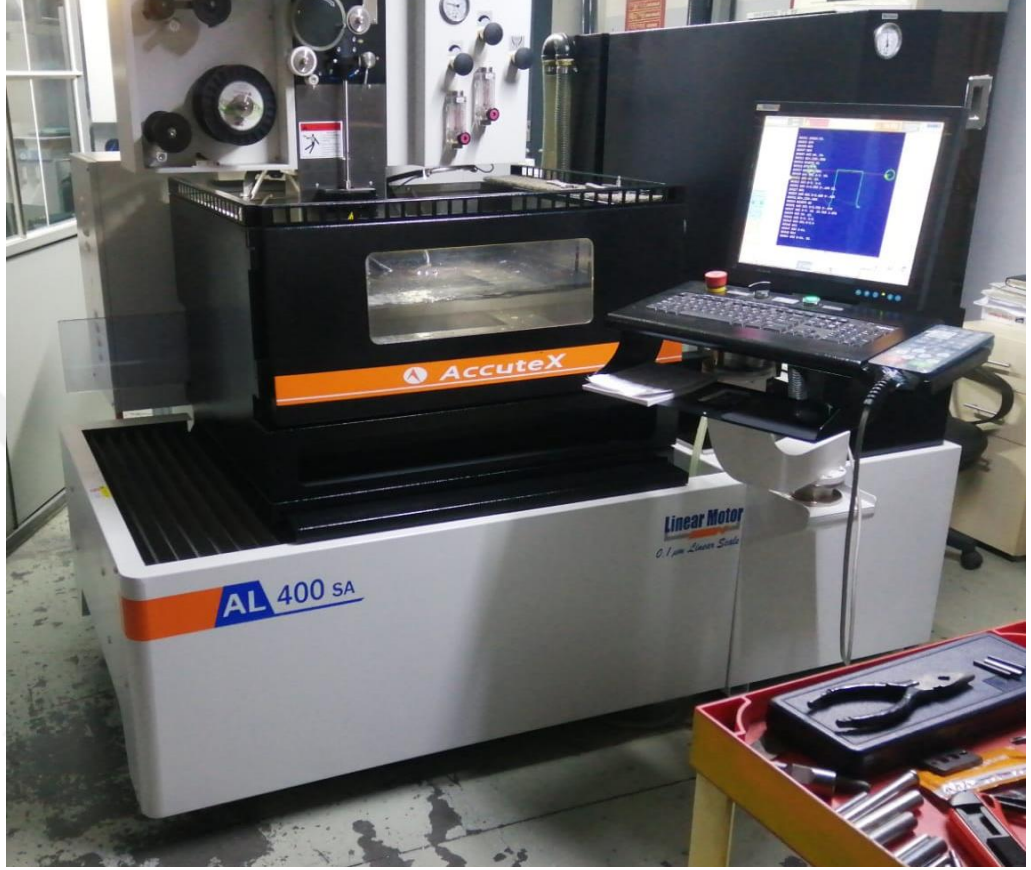
Bu çalışmada Makine üreticisi firmanın Alüminyum alaşımlar için önerilen takım kullanılmıştır. Takım profili ve görseli aşağıdaki Şekil 3.3.'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Kullanılan takım profili ve kesit resmi

3.1.5. Tel Erezyon Makinesi

Test numunelerinin hazırlanmasında Accutex marka AL400SA model makine kullanılmıştır. Makinenin görseli Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4. Tel erezyon makinesi

Makine yüksek hassasiyetli kesim yeteneği sayesinde numuneleri hem ölçüsünde, hem de deformasyon olmadan hazırlayabilmektedir.

3.1.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Numune Testlerinde Kullanılan Cihazlar

3.1.6.1 Çekme Cihazı

Çekme deneyinde kullanılan cihaz, ‘Zwick 150’ çekme cihazı ile yapılmıştır. Şekil 3.5.’te cihazın görseli vardır.



Şekil 3.5. Zwick 150 Sac çekme cihazı

3.1.6.2. Sertlik Ölçme Cihazı

Sertlik ölçme testinde kullanılan cihaz, ‘Emco’ marka cihaz ile yapılmıştır. Şekil 3.6.’te cihazın görseli verilmiştir.



Şekil 3.6. Sertlik ölçme cihazı

3.1.6.3. Makro Yapı Ölçüm Cihazı

Test numunelerinin makro yapı ölçümleri ‘Structure Expert Weld’ marka makro yapı ölçüm cihazı ile yapılmıştır.



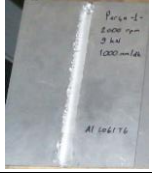
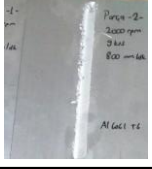
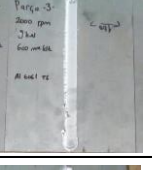
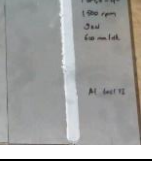
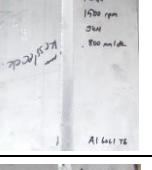
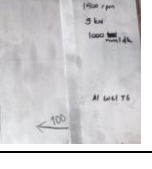
Şekil 3.7. Makro yapı ölçüm cihazı

3.2. Yöntem

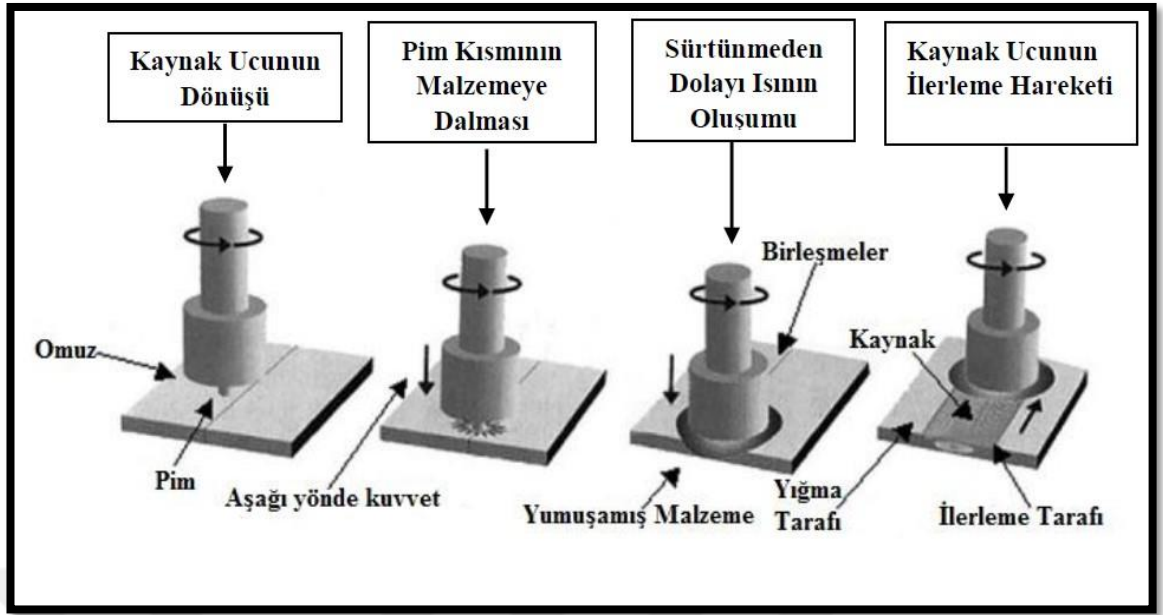
3.2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynak Metodunun Tatbik Edilmesi

Tez çalışması için, bilgilerini bölüm 3.1.2.’de verilen SKK makinesi ile numune üretimi yapılmıştır. Bu üretimde bölüm 3.1.4.’te verilen SKK takımı kullanılmıştır. Bu takım, makine üreticisi firmanın, 4 mm kalınlıklı AL 6061 malzemelerin SKK kaynağında kullanılmak için önerdiği takımdır. Tezgâhın B açısı üretici firmasının önerisi ile 3° olarak sabitlenmiştir. Yine aynı şekilde dik kuvvet 9 kN olarak ayarlanmıştır. Takım dönme (devir) hızı olarak 1500 rpm ve 2000 rpm değerleri alınmıştır. Takım ilerleme hızı olarak ise 600 mm/dk, 800 mm/dk ve 1000 mm/dk olarak numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Belirlenen devir ve ilerleme hızları ise literatür ile uyumludur (Booth, M. 2016). Parçalar devir ve ilerleme hızlarının kombinasyonu olacak şekilde üretilmiş ve toplam 6 numune üretimi sağlanmıştır. Parçalar aşağıda verilen Çizelge 3.4.’te gösterildiği şekilde kodlanmıştır. Bu kodlamada P harfi parça, Ç harfi çekme ve S harfi ise Sertlik anlamına gelmektedir.

Çizelge 3.4. Parça kodları ve parametre tablosu

NO	ADI	DEVİR HIZI (rpm)	DİK KUVVET (kN)	İLERLEME HIZI (mm/dk)	MALZEME	KALINLIK (mm)	NUMUNE ÖLÇÜLERİ (ENxBOY)(mm)	GÖRSELLER
1	PARÇA 1	2000	9	1000	AL 6061 T6	4	183x250	
2	PARÇA 2	2000	9	800	AL 6061 T6	4	183x250	
3	PARÇA 3	2000	9	600	AL 6061 T6	4	183x250	
4	PARÇA 4	1500	9	600	AL 6061 T6	4	183x250	
5	PARÇA 5	1500	9	800	AL 6061 T6	4	183x250	
6	PARÇA 6	1500	9	1000	AL 6061 T6	4	183x250	

Sürtünme karıştırma kaynak prosesi yapılırken; ilk önce takım belirlenen dönme hızında iş parçasının içerisine, belirlenen dik kuvvet meydana gelene kadar dalar. Takım belirlenen 9 kN’luk dik kuvvete geldikten sonra 1 saniye ön ısıtma için bekleme süresi geçirir. Bu süreden sonra ilgili parametrede verilen takım ilerleme hızı ile ilerler. Son noktaya gelindiğinde takım iş parçasından ayrılmadan önce 1 saniye daha bekleme yapar ve iş parçasından ayrılır. Şekil 3.7.’da



Şekil 3.7. Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin aşamaları [Lomolino, S., ve diğerleri, 2004]

Tez çalışmasına konu olan numune üretimleri aynı malzeme çiftinden üretildiği ve kalınlık farkı olmadığı için, malzemenin yığıldığı bölgeyi seçmeye gerek yoktur.

3.2.2. Test Numunelerinin Hazırlanma Metotları ve Test metodu

3.2.2.1. Çekme Test Numuneleri Hazırlığı ve Test Metodu

Tez çalışması kapsamında üretilen parçaların çekme testi numuneleri TS EN ISO 6892-1 (Metalik malzemeler - Çekme deneyi-bölüm 1: Oda sıcaklığında deney metodu) baz alınarak hazırlanmıştır. Şekil 3.8’de çekme testi için hazırlanan numuneler gösterilmiştir. Test numunesi parçaları çentik etkisi yaratmaması için bölüm 3.1.5.’te verilen tel erezyon makinesi ile hassas olarak kesilmiştir. Kesim işleminden sonra kesim yüzeyleri 2000 mesh zımpara ile zımparalanmıştır. Çekme deneyi ise oda sıcaklığı ortamında 1 mm/dk hız ile uygulanmıştır.

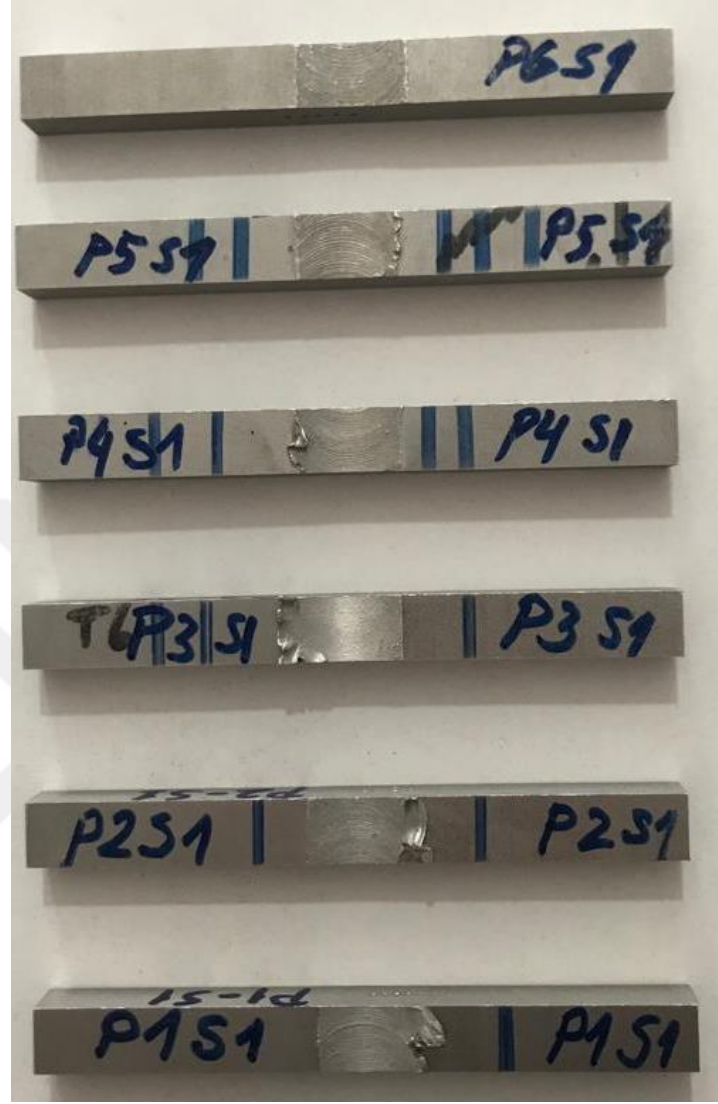


Şekil 3.8. Çekme Test Numuneleri

Çekme testi numuneleri parametre tablosunda ki P1,P2,P3,P4,P5 ve P6 isimlerine ithafen Parça 1 Çekme 1 mantığında P1Ç1,P1Ç2,P1Ç3 gibi isimlendirilmiştir. Çekme test sonuçlarının da verildiği listede bu kodlar ile eşleştirilmiştir sonuçlar.

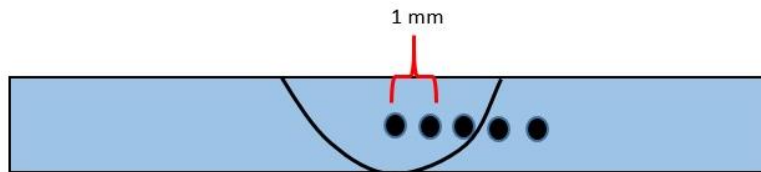
3.2.2.2. Sertlik Deneyi Numuneleri ve Test metodu

Tez çalışmasında elde edilen parçaların yüzey sertliklerinin ölçümü için gerekli olan düz ve temiz yüzey tel erezyon makinesi ile kesilerek elde edilmiştir. Kalan çapaklar ise 2000 mesh zımpara ile temizlenmiştir. Yüzey sertliği ölçümü için hazırlanan numuneler Şekil 3.9.'de verilmiştir.



Şekil 3.9. Yüzey Sertliği Numuneleri

Sertlik ölçümü, sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış ve kesilmiş parçaların yanal kesitlerinin kaynak merkezinden başlanarak 1'er mm ara ile bir yöne doğru yapılarak elde edilmiştir. Ölçüm metodunun görseli Şekil 3.10.'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Sertlik ölçüm aralıkları

3.2.3 Çekme Testi Kabul Kriterleri

Sürtünme karıştırma kaynağı prosesinin kalite kontrolü DS/EN ISO 25239-4 göre yapılmaktadır. Bu standarda göre çekme dayanımı,

$$\sigma_{min,w} = \sigma_{min,pm} f_e \quad (3.1.)$$

Formülüne göre hesaplanır. Burada

$\sigma_{min,w}$ kabul edilebilir en düşük çekme dayanımı,

$\sigma_{min,pm}$ malzemenin temel çekme dayanımı,

f_e ise ilgili malzemenin ısıtılma işlem seviyesine göre olan katsayısı anlamına gelmektedir.

Kaynaklı birleştirmenin kabul edilen minimum çekme dayanımını hesaplamak için öncelikle aşağıda verilen çizelge 3.5.'ten f_e değeri tayin edilmelidir.

Bu çalışmada T6 yapay yaşlandırılmış Alüminyum 6061 alaşımı kullanılmıştır. Çizelgede ki bölümler incelendiğinde, kullanılan malzeme ısıtılma işlem gören alaşımlar bölümünde, yapay yaşlandırma koşullarını sağlayan ve T6 kategorisinde ki malzemedir. Bu şartlar altında şartname çalışmanın kabul koşulu için kullanılacak f_e değeri 0.7'dir.

Ana malzemenin çekme dayanımı ise çizelge 3.1.'de belirtildiği üzere 45 ksi'dir. 1 ksi 6.89 MPa olduğuna göre, ana malzemenin çekme dayanımı ($\sigma_{min,pm}$) 310 Mpa'dır.

İlgili değerler denklem 3.1.'de yerine yazıldığında, $\sigma_{min,w}$ değeri,

$$\sigma_{min,w} = 310.0.7$$

$$\sigma_{min,w} = 210 \text{ Mpa}$$

olarak bulunur. Bu çalışmada üretilen numunelerin çekme dayanımı alt sınırı DS/EN ISO 25239-4 şartnamesine göre 210 MPa olarak tayin edilecektir.

Çizelge 3.5. f_e katsayını gösterir şekil (DS/EN ISO 25239-4)

Malzeme Türü	Kaynak Öncesi Ana Malzemenin Temper Durumu ^{a,b}	Kaynak Sonrası Durum	Bağlantı Verimlilik faktörü f_e
Saf Alüminyum	Tüm Isıl İşlem Şartları	Kaynaklı	1,0 ^d
Isıl İşlem Görmeyen Alaşım	Tüm Isıl İşlem Şartları	Kaynaklı	1,0 ^d
Isıl İşlem Gören Alaşımlar	T4	Doğal Yaşlandırma ^c	0,7
	T4	Yapay Yaşlandırma ^c	0,7 ^e
	T5 ve T6	Doğal Yaşlandırma ^c	0,6
	T5 ve T6	Yapay Yaşlandırma ^c	0,7 ^e
a) ISO 2107 referans alınmıştır. b) Temperi gösterilmeyen ana malzemede, $\sigma_{min,w}$ tasarım özelliğine uygundur. c) Yaşlandırma şartları tasarım standartlarına göre olmalıdır. d) Test için kullanılan asıl ana malzeme temperinden bağımsız olarak, $\sigma_{min,pm}$ 'O' koşulunun belirtilen minimum çekme mukavemetini temel alır. e) Tam bir kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanırsa daha yüksek özellikler elde edilebilir; $\sigma_{min,w}$ tasarım özelliklerine uygun olacaktır.			

4. BULGULAR

Bu bölümde tez çalışmasına konu olan sürtünme karıştırma kaynağı metodu ile üretilen parçaların çekme testi ve yüzey sertliği ölçümlerinin literatür de bulunan çalışmalar ile kıyaslanarak incelenmiştir.

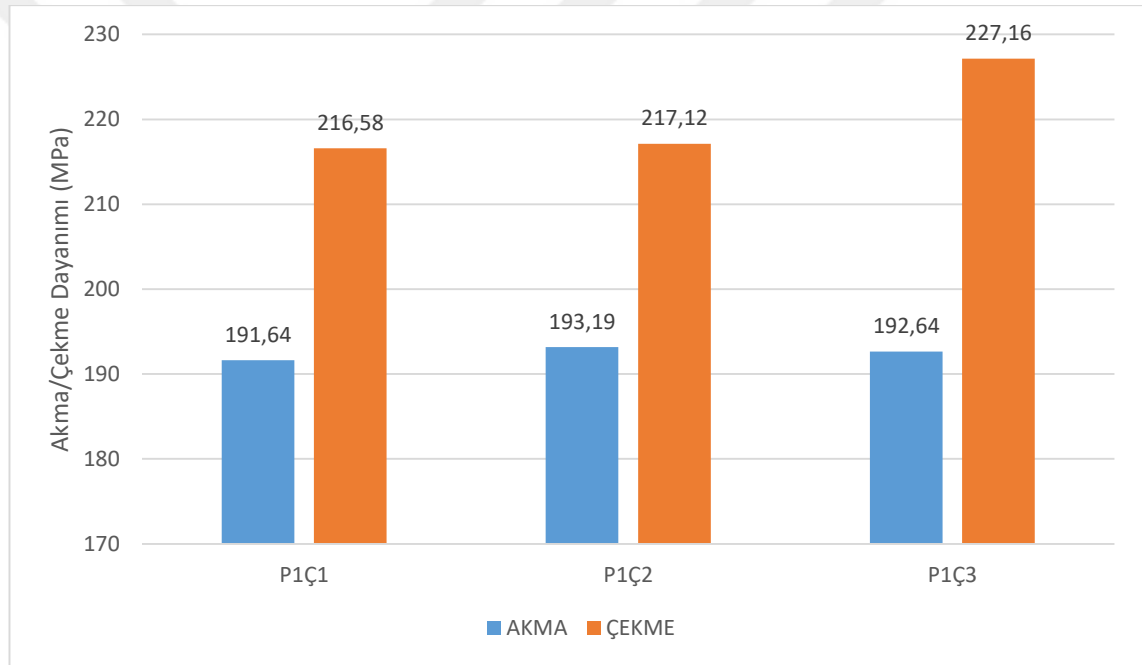
4.1. Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi 6 farklı parametreden elde edilen 18 adet çekme numunesi ile gerçekleştirilmiştir. Her parametreden 3'er numune çekilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı metodu ile üretilen bu numunelerin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri aşağıdaki Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çekme testine ait akma, çekme mukavemet değerleri ve uzama yüzdesi

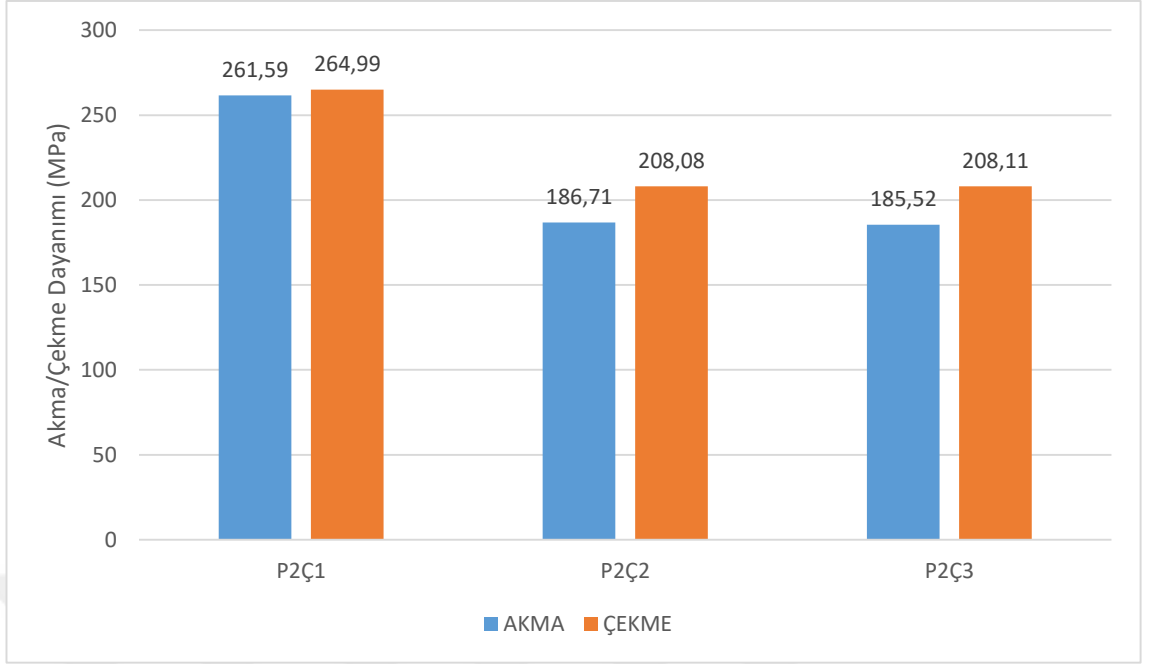
Parça Kodu	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
P1Ç1	191,64	216,58	0,55
P1Ç2	193,19	217,12	0,55
P1Ç3	192,64	227,16	0,73
P2Ç1	261,59	264,99	2,90
P2Ç2	186,71	208,08	0,55
P2Ç3	185,52	208,11	0,56
P3Ç1	181,46	201,12	0,55
P3Ç2	181,46	202,25	0,56
P3Ç3	181,78	203,03	0,55
P4Ç1	176,92	197,82	0,55
P4Ç2	179,21	201,20	0,55
P4Ç3	180,38	203,36	0,55
P5Ç1	191,11	224,90	0,78
P5Ç2	191,01	214,96	0,55
P5Ç3	191,58	215,48	0,56
P6Ç1	-	59,55	-
P6Ç2	-	54,07	-
P6Ç3	-	67,31	-

Çekme testi sonuçları incelendiğinde, sürtünme karıştırma kaynağı numunelerinin bu parametrelerde ki kaynak değerleri kullanılan ana metalin çekme değerlerinin altında kaldığı görülmektedir. P2Ç1 kodlu parçanın değerleri incelendiğinde P2Ç2 ve P2Ç3'e göre yüksek çıktığı görülmektedir. Ortalamanın dışında olduğu tespit edilmiştir. Bunun haricinde elde edilen en yüksek çekme mukavemeti 227,16 MPa'dır. Tespit edilen en düşük çekme mukavemeti ise 54,07 MPa'dır. Parçaların çekme mukavemeti değerleri ile parametreleri göz önüne alarak değerlendirildiğinde ilerleme hızı yüksek olan parçaların dayanımının daha iyi olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte takımın dönme hızının da etkisi büyüktür [Ugunder, S., 2018, Elnabi A., ve diğerleri 2019, Rajeesh, J., ve diğerleri 2018, Elfar, O.M.R ve diğerleri 2016).



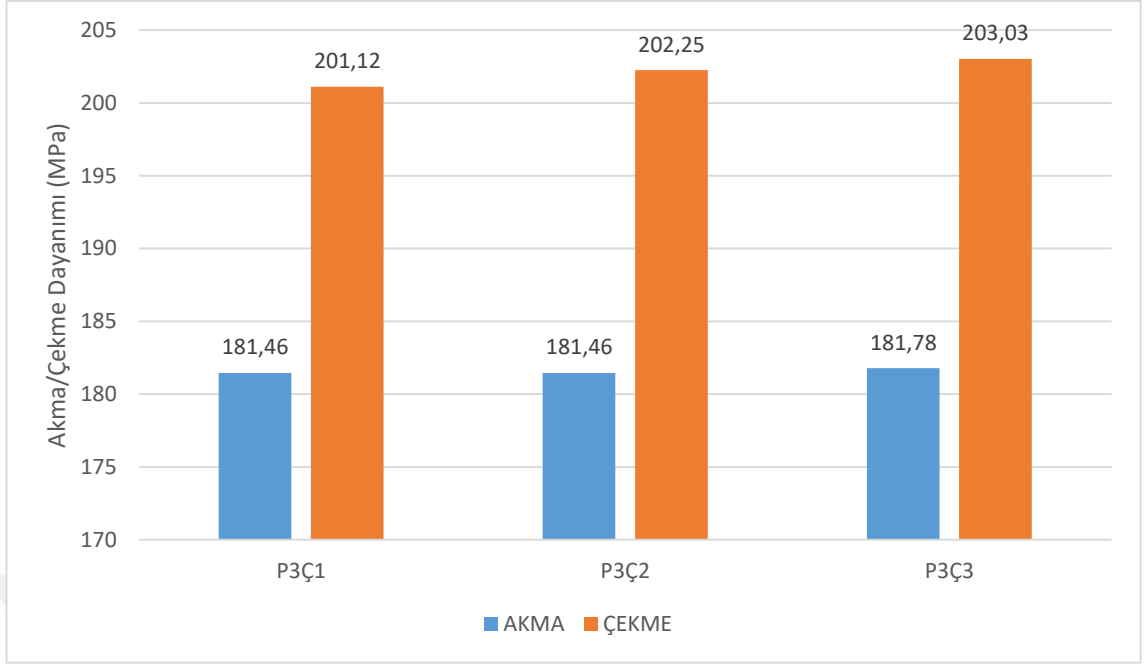
Şekil 4.1. P1 kodlu parçanın akma ve çekme dayanımı değerleri (MPa cinsinden)

P1 kodlu numunenin çekme sonuçları incelendiğinde, DS/EN ISO 25239-4 standardına göre elde edilen minimum çekme değeri olan 210 MPa'nın üzerinde olduğu ve numunenin kabul edilebilir olduğu tespit edilmiştir.



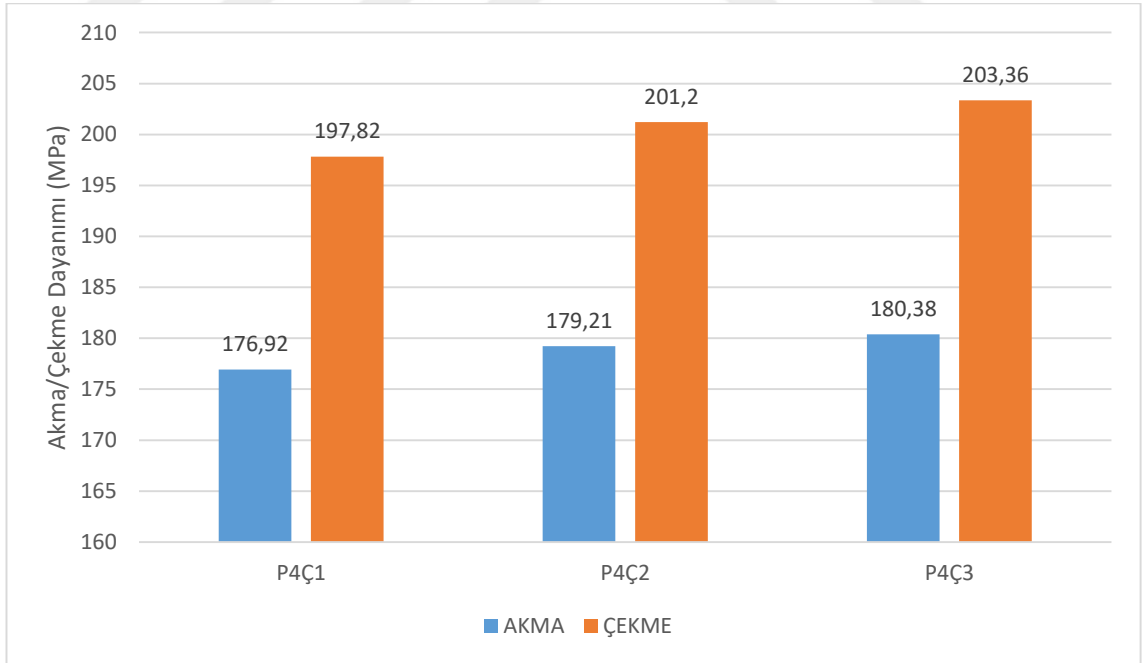
Şekil 4.2. P2 kodlu parçanın akma ve çekme grafiği (MPa cinsinden)

P2 kodlu numunenin akma çekme değerleri birbirine çok yakın çıktığı gözlemlenmiştir. Değerlerin DS/EN ISO 25239-4 standardına göre hesaplanan 210 MPa olan minimum çekme dayanımına çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.



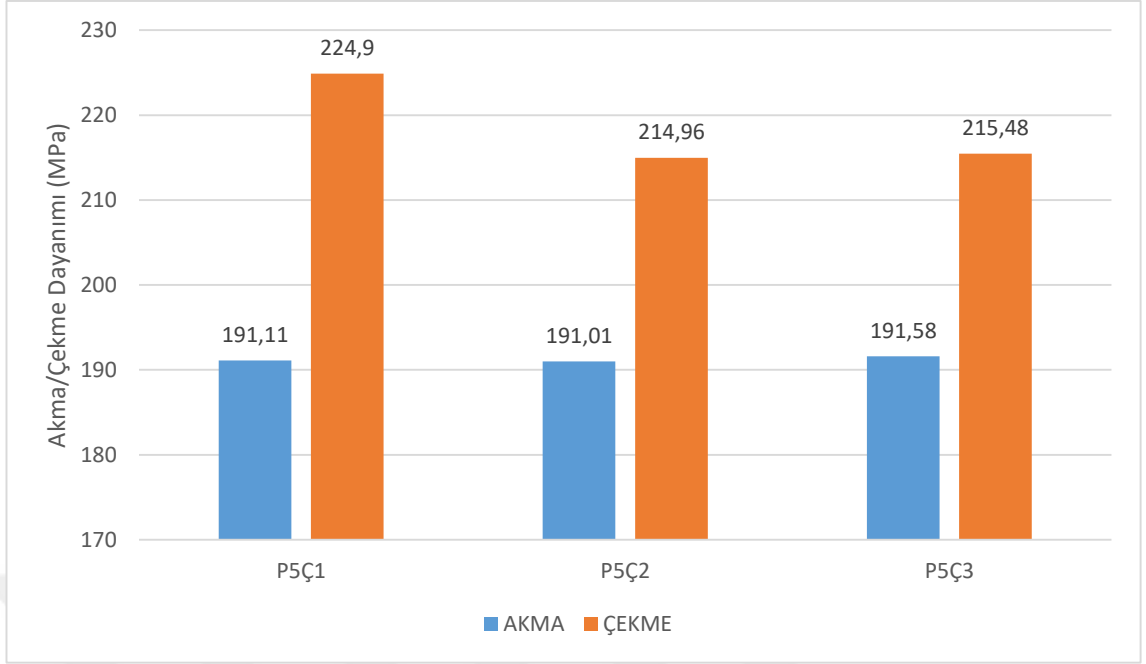
Şekil 4.3. P3 kodlu parçanın akma ve çekme grafiği (MPa cinsinden)

P3 kodlu numunenin grafiği incelendiğinde DS/EN ISO 25239-4 şartnamesine göre olan 210 MPa'lık minimum çekme dayanımı değerinin altında kalmıştır.



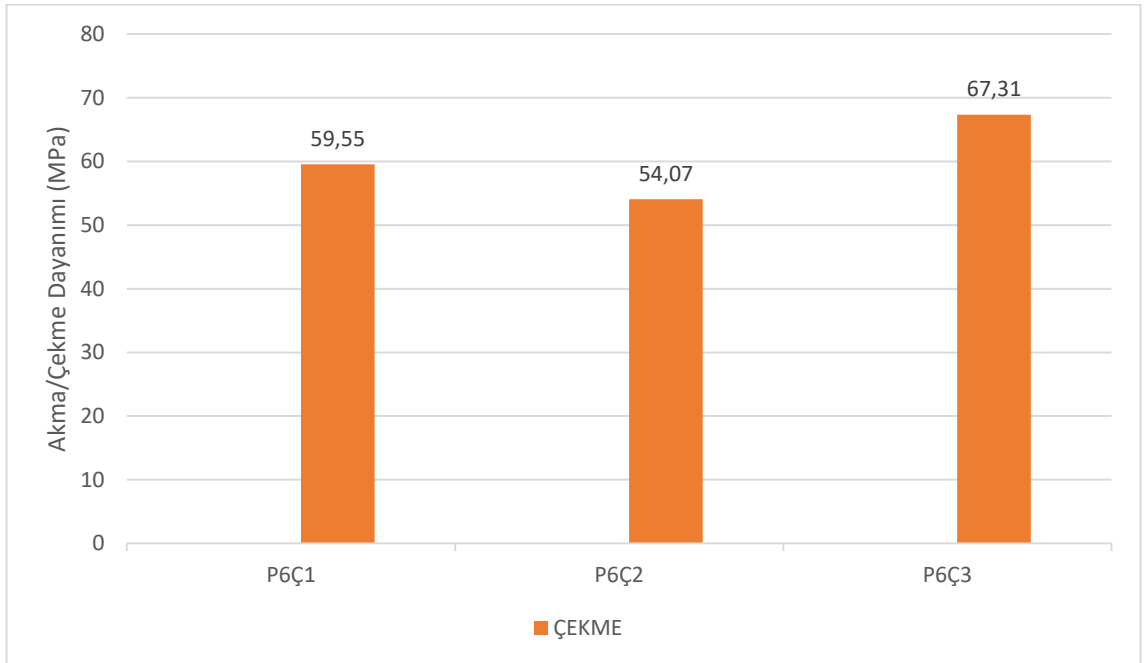
Şekil 4.4. P4 kodlu parçanın akma ve çekme grafiği (MPa cinsinden)

P4 kodlu numunenin grafiği incelendiğinde DS/EN ISO 25239-4 şartnamesine göre olan 210 MPa'lık minimum çekme dayanımı değerinin altında kalmıştır.



Şekil 4.5. P5 kodlu parçanın akma ve çekme grafiği (MPa cinsinden)

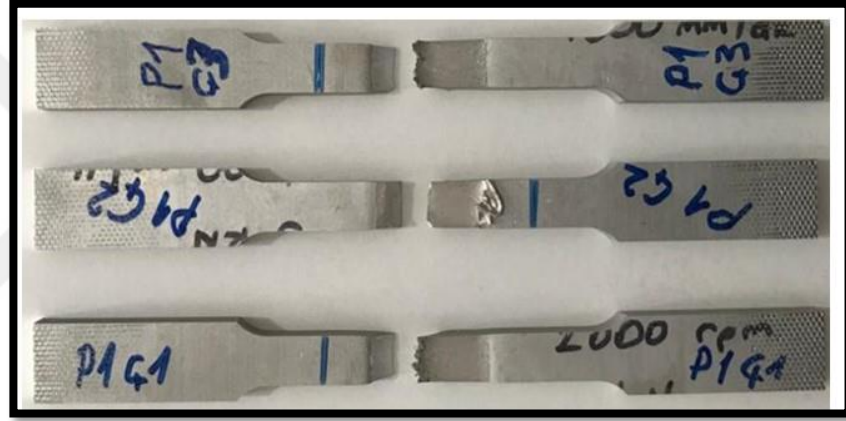
P5 kodlu numunenin çekme değerleri incelendiğinde DS/EN ISO 25239-4 şartnamesine göre 210 MPa'lık minimum çekme dayanımı değerini sağladığı görülmektedir. Numune uygun olarak kabul edilebilir.



Şekil 4.6. P6 kodlu parçanın akma ve çekme grafiği (MPa cinsinden)

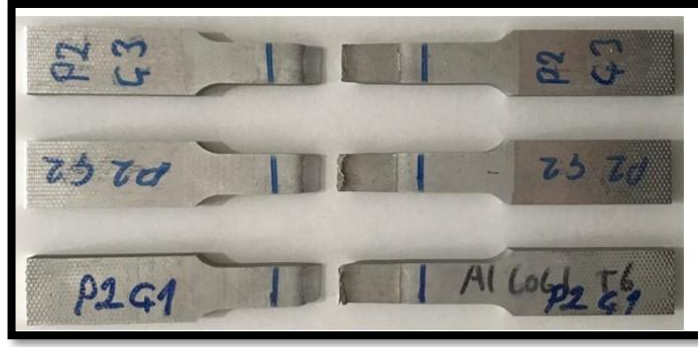
Genel olarak takım ilerleme hızının 800 ve 1000 mm/dk olan parçaların akma ve çekme değerleri daha yüksek gelmektedir. Fakat 600 mm/dk olan P3 ve P4 parçalarında bir nebze daha düşüktür. Takım dönme hızının etkisi daha az olarak gözlenmektedir. Fakat yüksek takım dönme hızı ve yüksek ilerleme hızının bir olduğu P6 parçasında ise diğer parçalara göre çok düşük çekme dayanımı gözlemlenmiştir.

Parçaların kopma bölgeleri incelendiğinde tamamının TEB'ten koptuğu görülmektedir. Bunun nedeninin gerilme sertleşmesi olduğu düşünülmektedir. P6 kodlu parçada ise yüksek devir ve ilerleme hızları ile bu sertleşme en üst seviyeye çıkarak, kusur oluşturduğu düşünülmektedir. Aşağıda ki şekillerde 6 parçanın da çekme numuneleri ve kopma görüntüleri verilmiştir.



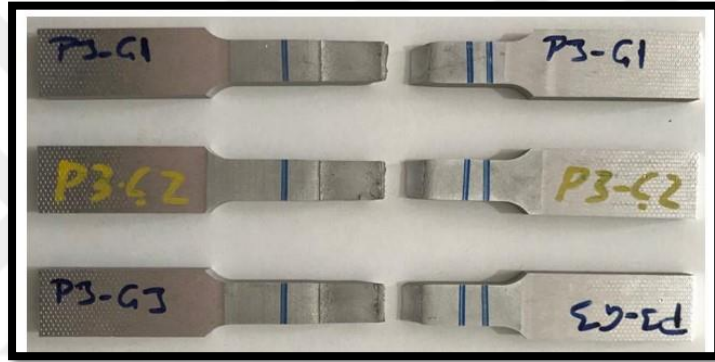
Şekil 4.7. P1 kodlu parçanın çekme testi sonrası görüntüleri

P1 kodlu numunenin çekme testi sonrası kopan numuneleri incelendiğinde ısı tesiri altında ki bölgeden koptuğu gözlemlenmiştir.



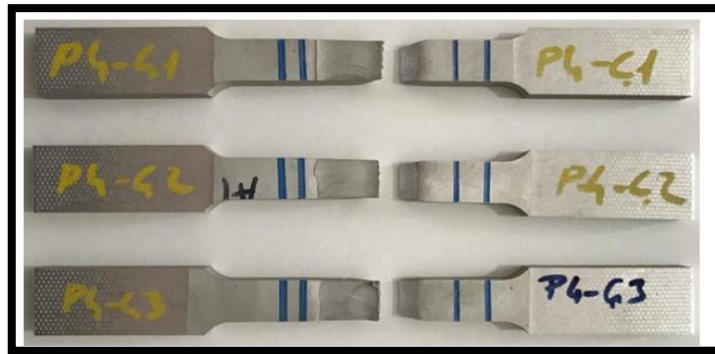
Şekil 4.8. P2 kodlu parçanın çekme testi sonrası görüntüleri.

P2 kodlu numunenin çekme testi sonrası kopan numuneleri incelendiğinde ısı tesiri altında ki bölgeden koptuğu gözlemlenmiştir.



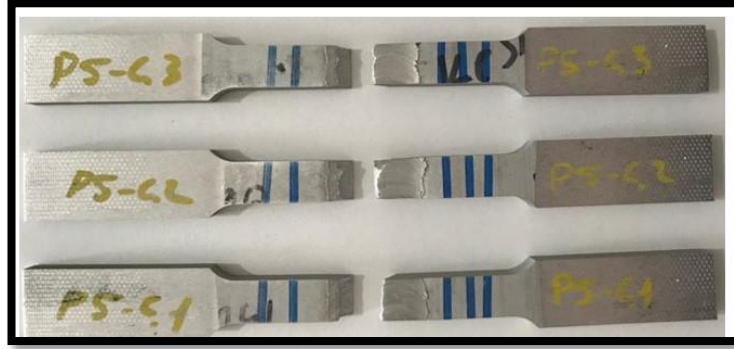
Şekil 4.9. P3 kodlu parçanın çekme testi sonrası görüntüleri

P3 kodlu numunenin çekme testi sonrası kopan numuneleri incelendiğinde ısı tesiri altında ki bölgeden koptuğu gözlemlenmiştir.



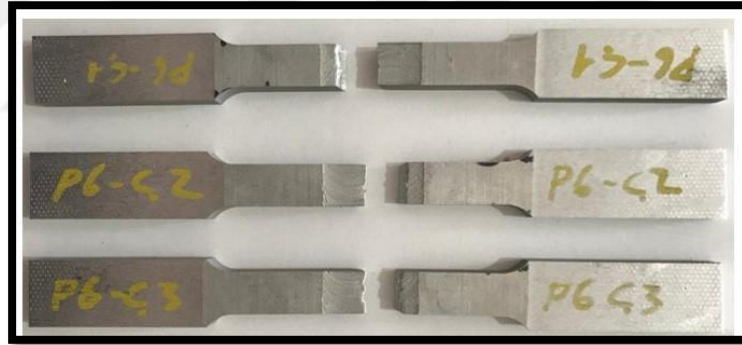
Şekil 4.10. P4 kodlu parçanın çekme testi sonrası görüntüleri

P4 kodlu numunenin çekme testi sonrası kopan numuneleri incelendiğinde ısı tesiri altında ki bölgeden koptuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.11. P5 kodlu parçanın çekme testi sonrası görüntüleri

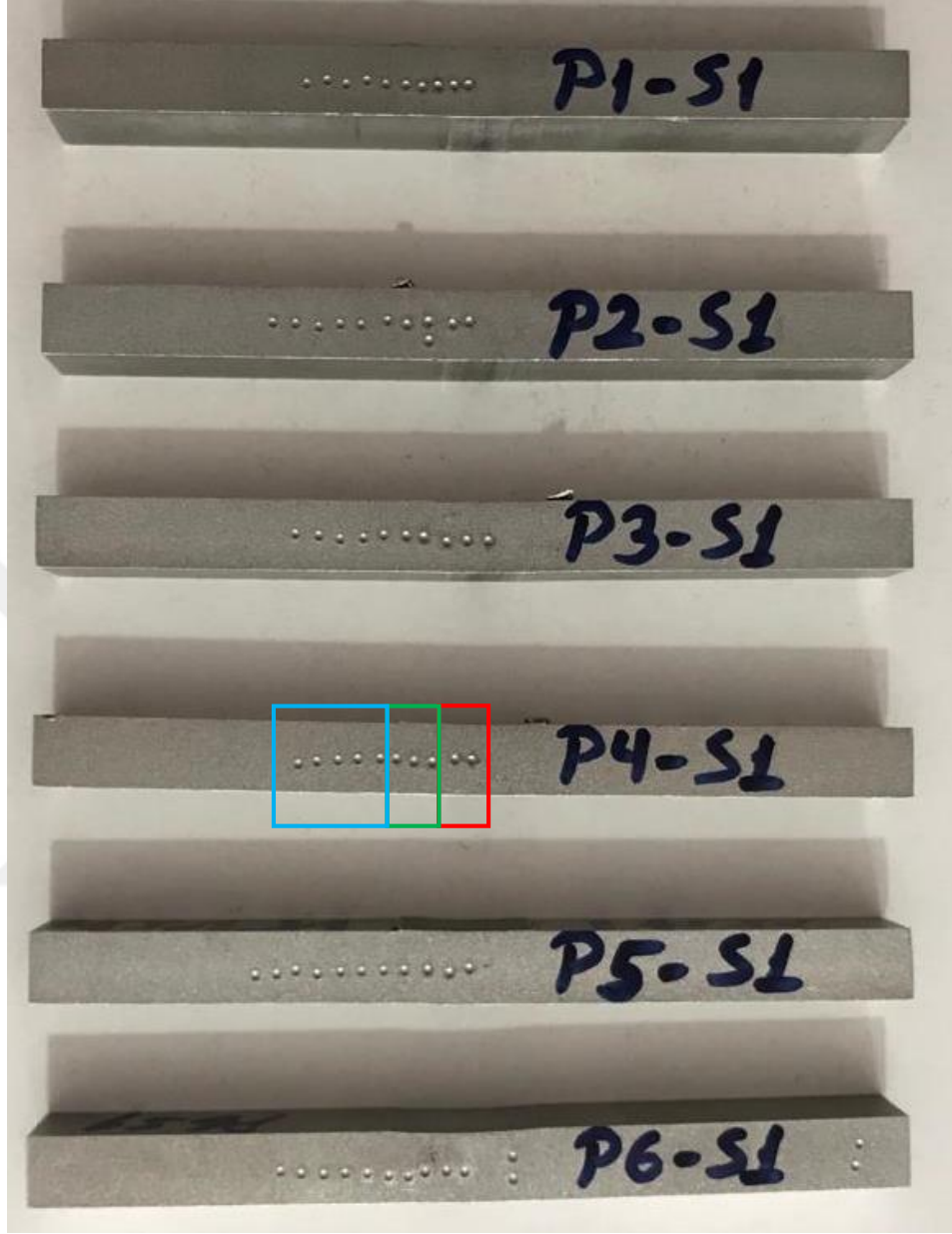
P5 kodlu numunenin çekme testi sonrası kopan numuneleri incelendiğinde ısı tesiri altında ki bölgeden koptuğu gözlemlenmiştir



Şekil 4.12. P6 kodlu parçanın çekme testi sonrası görüntüleri.

P6 kodlu numunenin çekme testi sonrası kopan numuneleri incelendiğinde ısı tesiri altında ki bölgeden koptuğu gözlemlenmiştir.

4.2. Sertlik Ölçümü



Şekil 4.13. Yüzey Sertliği ölçülen parçalar

Yüzey sertliği ölçümü Rockwell HRB cinsinden yapılmıştır. Ölçüm bölüm 3.2.2.2.'de tarif edildiği şekilde yapılmıştır. Şekil 4.13'te ölçümü yapılan parçaların görseli verilmiştir.

P4 kodlu numune üzerinde gösterilen kırmızı renkli kare içerisinde ki 1 ve 2 numaralı ölçüm kaynak havuzu, yeşil kare içerisinde ki 3,4 ve 5 numaralı ölçümler ısı tesir altında

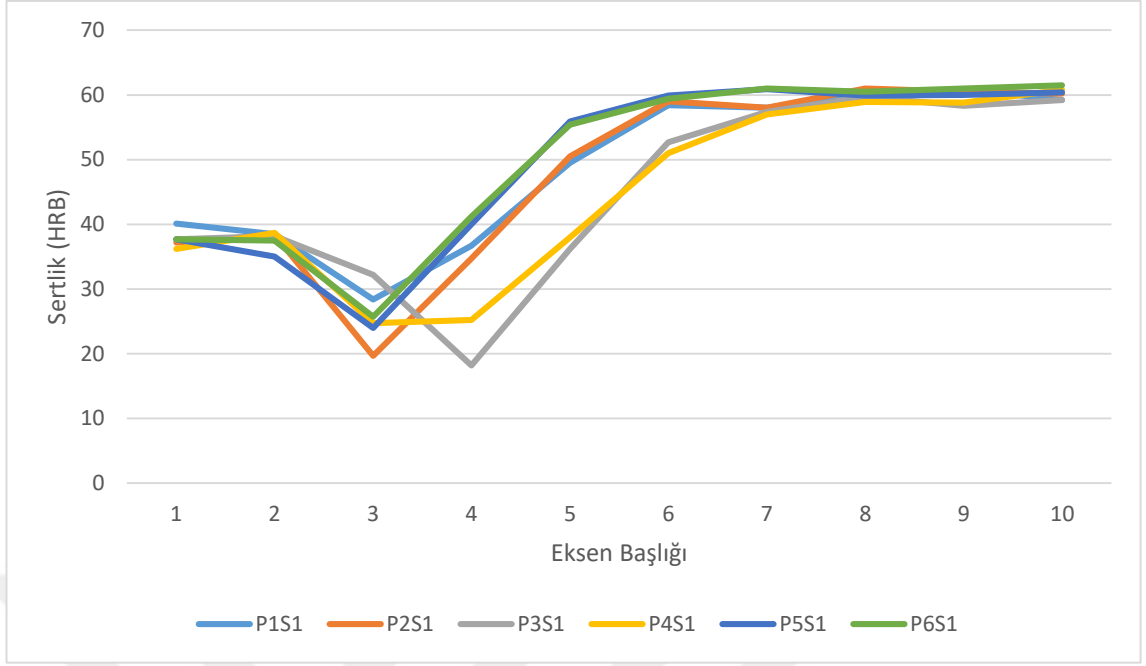
ki bölge ve son olarak mavi kare içerisinde ki 6,7,8,9 ve 10 numaralı ölçümler ana metal üzerinde denk gelmektedir.

Aşağıda ki Çizelge 4.2.'de sürtünme karıştırma kaynağı numunelerin ölçülen yüzey sertlikleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Sertlik ölçüm sonuçları

Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P1S1	40,10	38,50	28,40	36,70	49,50	58,40	58,00	60,20	60,90	59,20
P2S1	37,20	38,40	19,70	34,70	50,50	59,00	58,00	61,00	60,50	60,20
P3S1	37,70	38,20	32,20	18,20	36,20	52,70	57,40	59,70	58,30	59,20
P4S1	36,20	38,70	24,70	25,20	38,00	51,00	57,00	58,90	58,80	60,80
P5S1	37,70	35,00	24,00	40,00	55,90	59,90	60,90	59,90	60,00	60,40
P6S1	37,70	37,50	25,70	41,20	55,40	59,40	61,00	60,50	61,00	61,50

Yüzey sertliklerinin dağılımı aşağıda ki Şekil 4.14'te ki grafikte verilmiştir. 1 numaralı ölçüm tam kaynak merkezine denk gelmektedir. 5 numaralı ölçümden itibaren TEB'in dışına çıkılarak ana malzemenin yüzey sertliklerine denk gelmektedir. Grafik incelendiğinde ana malzemeye göre DKB bölgesinde ki yüzey sertliği nispeten düşüktür. Fakat TEB bölgesinde ise sertlik nispeten daha düşüktür. DKB bölgesinde en yüksek yüzey sertliği 40.10 HRB gelmekle birlikte en düşük ise 35 HRB ölçülmüştür. TEB bölgesinde ise en yüksek sertlik 28.40 HRB gelirken, en düşük 19.70 HRB olarak tespit edilmiştir. Ana malzemenin ortalama yüzey sertliği ise 60.00 HRB civarında belirlenmiştir.



Şekil 4.14. Yüzey sertliği dağılım grafiği (HRB cinsinden)

Grafik incelendiğinde Yüzey sertliği kaynak havuzunun merkezinde 40 HRB değerinde olduğu görülmektedir. Isıl tesir altında ki bölgelerde ise yüzey sertliği değerinin 20 HRB'lere kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Ana metale doğru yapılan ölçümlerde ise yüzey sertliğinin yükseldiği ve tek bir değere (60 HRB) geldiği tespit edilmiştir.

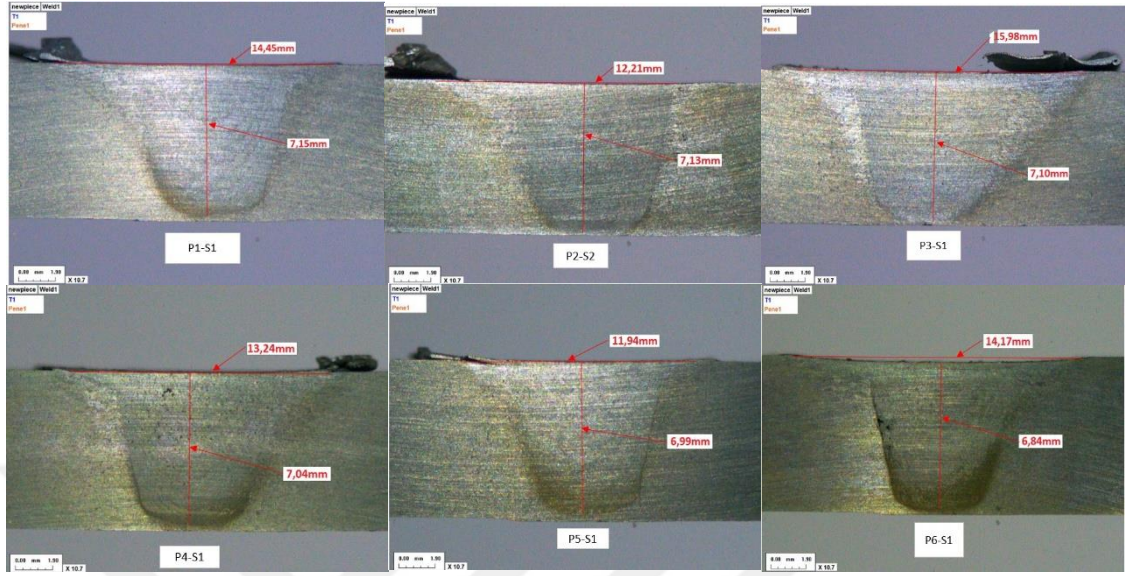
4.3. Makro Yapı Ölçümü

Aşağıda ki çizelge 4.3.'te numunelerin kaynak dikiş genişliği ve nüfuziyeti verilmiştir.

Çizelge 4.3. Makro yapı ölçüm sonuçları

	P1-S1	P2-S1	P3-S1	P4-S1	P5-S1	P6-S1
Genişlik (mm)	14,45	12,21	15,98	13,24	11,94	14,17
Nüfuziyet (mm)	7,15	7,13	7,10	7,04	6,99	6,84

Şekil 4.15'te makro yapı ölçümü yapılan numunelerin görselleri verilmiştir.



Şekil 4.15. Makro yapı görüntüleri

Makro yapı değerleri ve görselleri incelendiğinde nüfuziyetin parametreye bağlı olmadığı, takımın geometrisi ve batma derinliği ile doğrudan ilişkili olduğu kanısına varılmıştır.

Kaynak havuzunun genişliği ise parametre ile ilişkilendirilebilir. Parametre değişkenliğine göre havuzun genişlik değerleri değişmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında sürtünme karıştırma kaynağı metodu kullanılarak 6 adet parça üretilmiştir. Seçilen parametreler 1500 rpm ve 2000 rpm takım devir hızları karşılaştırılması temeline dayanmaktadır. Bu devirlerin 600 mm/dk, 800 mm/dk ve 1000 mm/dk takım ilerleme hızlarında ki kombinasyonları parametre olarak uygulanmıştır. Üretilen parçalardan hazırlanan test numuneleri çekme ve yüzey sertliği testlerine tabi tutulmuş olup, test sonuçları elde edilmiştir. Yapılan araştırmaya haiz olan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Parçalar sürtünme karıştırma kaynağı için üretilmiş bir makinede üretilmiştir. Makinenin iş parçasını sabitleme tablası çeşitli geometrilerde ki iki boyutlu parçaları sabitlemek için özel tasarlanmıştır. Bu sistem ile sabitlenen parçalar, verilen parametrelerde üretildiğinde parçalarda ki ısınma herhangi bir geometrik bozukluğa sebep olmadı. Parçaların kaynak bölgeleri gözlemlendiğinde birbirine benzer görselleri olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan çekme testi sonuçlarında elde edilen en yüksek çekme mukavemeti 227,16 MPa'dır. Tespit edilen en düşük çekme mukavemeti ise 54,07 MPa'dır.

Ayrıca çekme numuneleri görselleri incelendiğinde tüm numunelerde kopma ısıl tesir altındaki bölgelerden gerçekleşmiştir.

Üretilen parçaların, kaynak edilen yüzeye olan dik kesitine uygulanan yüzey sertliği ölçüm sonuçlarında en yüksek yüzey sertliği 40,10 HRB ile DKB bölgesinde tespit edilmiş olup, en düşük yüzey sertliği ise 19,70 HRB ile TEB bölgesinde ölçülmüştür.

1,2 ve 5 numaralı numunelerin DS/EN ISO 25239-4 şartnamesine göre belirlenen minimum çekme sınırı olan 210 MPa'nın üzerinde çekme değerleri elde ettiği ve kabul gördüğü belirlenmiştir. Bu numunelerin 1 ve 2 numaralı numuneler 2000 dev/dak dönme hızına sahipken, 5 numaralı numune 1500 dev/dak hızına sahiptir. 2 ve 5 numaralı numuneler ise 800 rpm devir hızına sahiptir. Kabul görmeyen numuneler ise 600 rpm devir hızına sahiptir.

6 numaralı numunenin de uygun çıkması beklenirken, 5 numaralı numuneden farklı olarak 2000 rpm dönme hızı sebebiyle ısı girdisi artmıştır. Isı girdisinin artması sebebiyle

de takımın dönme devri bölümünde belirtildiği üzere kaynaklı bağlantının ısı tesir altındaki bölgesinde direnç arttırıcı parçacıkların malzeme içerisinde daha kaba çökelme oluşturlar. Bu durumda bağlantının mukavemetinin düşmesine sebep olur. 6 numaralı parçanın erken kopması da bu duruma bağlanmıştır.

Devir hızı yükseldikçe istenilen kriterde kaynak mukavemeti elde edilebilir yorumunu yapabiliriz. Fakat ilerleme hızı düştüğü bir parametre kombinasyonu olursa (6 numaralı numune gibi) ısı girdisi artacağı için istenilen kaynaklı bağlantı elde edilemeyecektir. Optimum ilerleme ve dönme hızları seçilmelidir.

Makro görüntüleri ve değerleri incelendiğinde 1,2 ve 5 numaralı numunelerin Isıl tesir altındaki bölgeleri daha dar olduğu gözlemlenmiştir. Çekme sonuçları kabul gören bu numunelerden yola çıkarak, daha dar ısı tesir altındaki bölgeye sahip kaynak numuneleri daha başarılı sonuçlar vermektedir diyebiliriz.

Yapılan Çekme ve yüzey sertliği ölçümlerini bir arada değerlendirirsek, sürtünme karıştırma kaynağı prosesinde belirlenen parametreler ile yapılan bu çalışmada TEB bölgesinde gerilme sertleşmesi meydana geldiği düşünülmektedir. Ana metal ile TEB bölgesi arasında kalan bu bölge kaynaklı parçanın mukavemetinin düşmesine sebep olmuştur.

Yapılan bu tez çalışmasına ek olarak, daha iyi bir birleşme kalitesi için farklı parametreler denenebilir, farklı takım geometrileri kullanılabilir, farklı dik kuvvetler denenebilir ve farklı açılar değerlendirilebilir. Tüm bunlara ek olarak parça boyutları büyüdükçe parçalı kaynak metotları uygulanabilir.

KAYNAKLAR

Abd Elnabi, M.M., Elshalakany, A.B., Abdel-Mottaleb, M.M., Osman, T.A., El Mokadem, A. 2019. Influence of friction stir welding parameters on metallurgical and mechanical properties of dissimilar AA5454-AA7075 aluminum alloy. Journal of Materials Research and Technology, 8 (2), 1684-1693. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.10.015>.

Amancio-Filho, S.T., Sheikhi, S., Dos Santos J.F., Bolfarini, C. 2008. Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4. Journal of Materials Processing Technology, 206 (1-3), 132-142. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.12.008.

Anık, S., Anık, E.S., 1997, “Malzeme bilgisi ve muayenesi”, Üçer Matbaacılık, İstanbul, 144–147.

Bahrami, M., Givi, M.K.B., Dehghani, K. ve Parvin, N. 2014. On the role of pin geometry in microstructure and mechanical properties of AA7075/SiC nanocomposite fabricated by friction stir welding technique, Materials & Design, 53, 519-527

Balasubramanian, V. 2008. Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters. Materials Science and Engineering A, 480, 397-403. doi: 10.1016/j.msea.2007.07.048.

Başer, T. A. 2012. Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı, Mühendis ve Makina, cilt 53, sayı 635, s. 51-58

Besharati-Givi, M.K., Asadi, P.2014. Advances in Friction-Stir Welding and Processing, Woodhead Publishing.

Birinci A, 1998.Nüfus artışının ekonomiye yaptığı etkiler açısından değerlendirilmesi ve Türkiye’deki Yansımaları, Atatürk Üniv. Ziraat Fak.Derg. 29 (1), 153-162.

Booth, M. 2016. Effects of processing parameters on friction stir welded lap joints of AA7075- T6 and AA6022-T4. Yayımlanmış yüksek lisans tezi, University of Waterloo, Waterloo, Ontario.

Boz, M. ve Kurt, A. , 2004. The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process, Materials & Design, 25- 4, 343–347.

Cavaliere, P., Campanile G., Panella, F., Squillace. 2006. A.effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by friction stir welding. Journal of Materials Processing Technology, 180, 263–270. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.06.015.

Choi, D.H., Ahn, B.W., Lee, C.Y., Yeon, Y.M., Song, K. ve Jung, S.B. , 2010. Effect of pin shapes on joint characteristics of friction stir spot welded AA5J32 sheet, Materials Transactions, 51,5, 1028–1032

Colegrove P.A., Shercliff, H.R., Zettler, R. 2007. Model for predicting heat generation and temperature in friction stir welding from the material properties. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12 (4), 284-297. doi:10.1179/174329307X197539.

Cook, G.E., Crawford, R., Clark, D.E., Strauss, A.M. 2004. Robotic Friction Stir Welding, *Industrial Robot: An International Journal*, 31 (1), 55-63. doi: 10.1108/01439910410512000

Çam, G. 2005, “Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK): Al-Alaşımları İçin Geliştirilmiş Yeni Bir Kaynak Teknolojisi”, *Mühendis ve Makina Cilt:46 Sayı:541*.

Çam, G. 2011. Friction stir welded structural materials: beyond Al-alloys. *International Materials Reviews*, 56 (1), 1-48. doi:10.1179/095066010X12777205875750

Dalkılıç, S. 2012. Sürtünme karıştırma kaynağı ve havacılık ve uzay endüstrisindeki uygulama alanları. *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 5 (4), 25-33.

Davis J.R. 2007. *ASM handbook Aluminum and Aluminum Alloys*

Ugenter, S., 2018. Influence of tool pin profile and rotational speed on the formation of friction stir welding zone in AZ31 magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 6 (2), 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.05.001>.

Devuri, V., Ranjan Mandal, N., Mohan. Mahapatra, M., HARSH, S.P. 2013. Tool design effects for FSW of AA7039. *Welding Journal*, 92(2):41s-47.

Elfar, O.M.R., Rashad, R.M., Megahed, H. 2016. Process parameters optimization for friction stir welding of pure aluminium to brass (CuZn30) using Taguchi Technique. *MATEC Web of Conferences*, 43, 1-6. doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20164303005>

Fadaeifard, F., Gharavi, F., Matori, K.A., Daud, A.R., Ariffin, M.K.A.M., Awang, M. 2014. Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded AA6061-T6 in Various Welding Speeds," *Journal of Applied Sciences*, 14 (3), 221-228. doi:10.3923/jas.2014.221.228.

Güleç E., Uysal M.İ. 2006. Sürtünme karıştırma kaynağı araştırma projesi, 3

Gürler, M. 2000, “Alüminyum alaşımlarının sürtünme kaynak özellikleri”, *Doktora tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 11–40.

Hovanski, Y., Upadhyay, P., Carsley, Luzanski, T., Carlson, B., Eisenmenger, M., Soulami, A., Marshall, D., Landino, B., Hartfield-Wunsch. 2015. High-speed friction-stir welding to enable aluminum tailor-welded blanks. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, 67 (5), 1045-1053. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1384-x>.

Khan, N. Z. ; Khan, Z. A. 2017. Friction stir welding. Dissimilar aluminum alloys. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.

Kordestani, F., Faramarz, A.G. Arab, N. 2016. An investigation of FSW process parameters effects on mechanical properties of PP composites. *Mechanics & Industry*, 17 (611), 1-8, doi: 10.1051/meca/2016012.

Kulekci, M., K., Şik A., Kaluç E. 2008. Effects of tool rotation and pin diameter on fatigue properties of friction stir welded lap joints. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36, 877-882. doi: 10.1007/s00170-006-0901-z.

Lakshminarayanan, A.K., Balasubramanian, V. 2008. Process parameters optimization for friction stir weld of RDE-40 aluminium alloy using Taguchi technique. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18, 548-554. doi: 10.1016/S1003-6326(08)60096-5.

Lee, W.B., Jung, S.B. 2004. The joint properties of copper by friction stir welding. *Materials Letters*, 58(6), 1041-1046. doi: 10.1016/j.matlet.2003.08.014.

Leitão, C., Emilio, B., Chaparro, B.M., Rodrigues, D.M. 2009. Formability of similar and dissimilar friction stir welded AA 5182-H111 and AA 6016-T4 tailored blanks. *Materials & Design*, 30 (8), 3235-3242. doi:10.1016/j.matdes.2008.12.005.

Lombard, H., Hattingh, D.G., Steuwer, A., James, M.N. 2009. Effect of process parameters on the residual stresses in AA5083-H321 friction stir welds. *Materials Science and Engineering A*, 501, 119-124. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.078>.

Lomolino, S., Tovob, R., Dos Santos, J., 2004. On the fatigue behaviour and design curves of friction stir butt-welded Al Alloys. *International Journal of Fatigue* 27 (2005) 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.06.013>

Mahany, M. S., Abbas, R.R., Ahmed, M.M.Z., Abdelkader, H. 2017. Influence of tool rotational speed and axial load in friction stir welding (FSW) of high strength aluminum alloys. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 6 (2), 2319-1163.

Meran C. 2006. The joint properties of brass plates by friction stir welding. *Materials and Design*, 27, 719-726. doi: 10.1016/j.matdes.2005.05.006.

Meran, C., Kovan, V. 2008. Microstructures and mechanical properties of friction stir welded dissimilar copper/brass joints. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 39 (8), 521-530. doi: 10.1002/mawe.200800278.

Mishra, R.S., Ma, Z.Y. 2005. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 50 (1-2), 1–78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>.

Mypati O., Mishra D., Sahu S., Pal S., Srirangam P., 2019. A Study on Electrical and Electrochemical Characteristics of Friction Stir Welded Lithium-Ion Battery Tabs for

Electric Vehicles, The Minerals, Metals & Materials Society,
<https://doi.org/10.1007/s11664-019-07711-8>

Nandan, R., Deb Roy, T., Bhadeshia, H.K.D.H. 2008. Recent advances in friction-stir welding Process, weldment structure and properties. Progress in Materials Science, 53, 980-1023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.05.001>.

P.D. Edwards, M. Ramulu, Sci. 2009. Technol. Weld. Join. 476–483,

Padmanaban, G., Balasubramanian, V. 2009. Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy-An experimental approach. Materials and Design, 30 (7), 2647-2656. doi:10.1016/j.matdes.2008.10.021.

Palanivel, R., Koshy Mathews, P., Balakrishnan, M., Dinaharan, I., Murugan, N. 2012. Effect of tool pin profile and axial force on tensile behavior in friction stir welding of dissimilar aluminum alloys. Advanced Materials Research, 415, 1140-1146. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.415-417.1140>.

Peel, M.J., Steuwer, A., Withers, P.J., Dickerson, T., Shercliff, H. 2006. Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082. Part I: Process parameter effects on thermal history and weld properties. Metallurgical and Materials Transactions A, 37 (7), 2183-2193. <https://doi.org/10.1007/BF02586138>.

Q.Y. Shi, Dickerson, T.L., Shercliff, H. R. 2003. Thermo-mechanical FE modelling of friction stir welding of AL-2024 including tool loads. International Symposium on Friction Stir Welding, Park City Utah.

Rajeesh, J., Balamurugan, R., Balachandar, K. 2018. Process parameter optimization for friction stir welding of aluminium 2014-T651 alloy using taguchi technique. Journal of Engineering Science and Technology, 13 (2), 515-523.

Ramulu, P.J., Narayanan, R.G., Kailas, S.V., Reddy, J. 2013. Internal defect and process parameter analysis during friction stir welding of Al6061 sheets. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 65(9-12), 1515-1528. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4276-z>

Singh, A., Kumar, V. ve Grover, N.K. 2019. Influence of tool pin profiles on friction stir welding with a gap for AA6082-T6 aluminium alloy, Materials Research Express, 6, 8

Srubar, M. 2009. Application of friction stir welding in aircraft structures. Yayımlanmış yüksek lisans tezi, Brno University of Technology, Brno.

The Welding Master. 25 Aralık 2021. Friction stir welding-working principle, advantages, disadvantages with application. <https://www.theweldingmaster.com/friction-stir-welding/>

Threadgill, P.L., Leonard, A.J., Shercliff, H R Withers, P.J. 2009. Friction stir welding of aluminium alloys. International Materials Reviews,54 (2), 49-93. doi:10.1179/174328009X411136.

Tozaki, Y., Uematsu Y. ve Tokaji, K. , 2007. Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47,15, 2230-2236

Trimble D. 2011. Optimisation of process parameters and tooling during friction stir welding of AA2024-T3. Yayınlanmış doktora tezi, University of Dublin, Dublin.

TWI. 02 Ocak 2022. Industrial Applications, Industrial Applications - TWI (twi-global.com)

TWI. 25 Aralık 2021. What materials can I join with friction stir welding. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-materials-can-i-join-with-friction-stir-welding>

TWI. 26 Aralık 2021. Railway Rolling Stock Manufacturers Implement Friction Stir Welding <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/railway-rolling-stock-manufacturers-implement-friction-stir-welding-october-2002>

Ugenter, S., Jayakrishna S., Francis, E.D. 2018. Influence of welding speed, axial force and rotational speed on the formation of friction stir welding zone in AZ31 magnesium alloy. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 9(8), 845-857.

Yadava, M.K., Mishra, R.S., Chen, Y.L., Carlson, B. Ve Grant, G.J. 2010. Study of friction stir welding of thin aluminium sheets in lap joint configuration, Journal Science and Technology of Welding and Joining, 15, 1, 70–75

EKLER

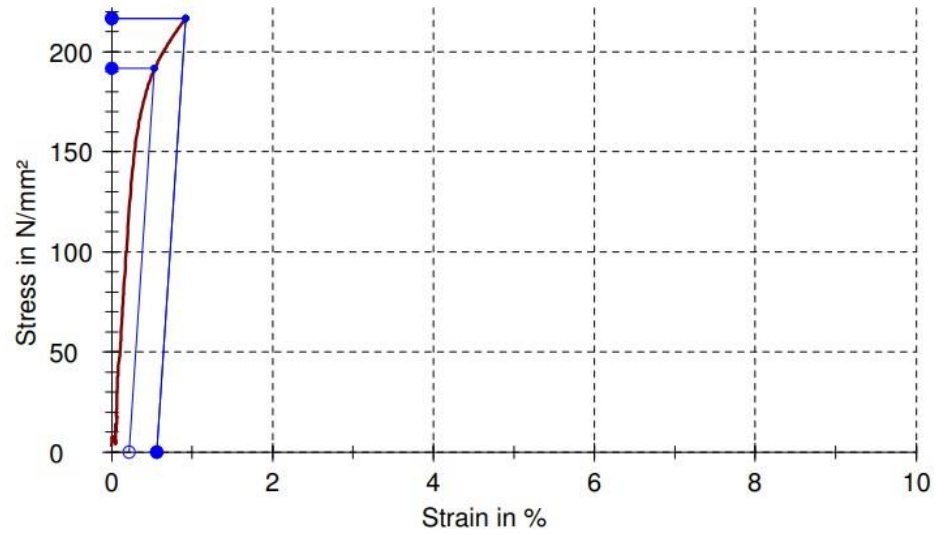
EK 1 Çekme Deneyi Grafikleri

P1Ç1											
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ											

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,1	12,45	50,00	90	191,64	216,58	0,55	0,55	-	

Grafikler:

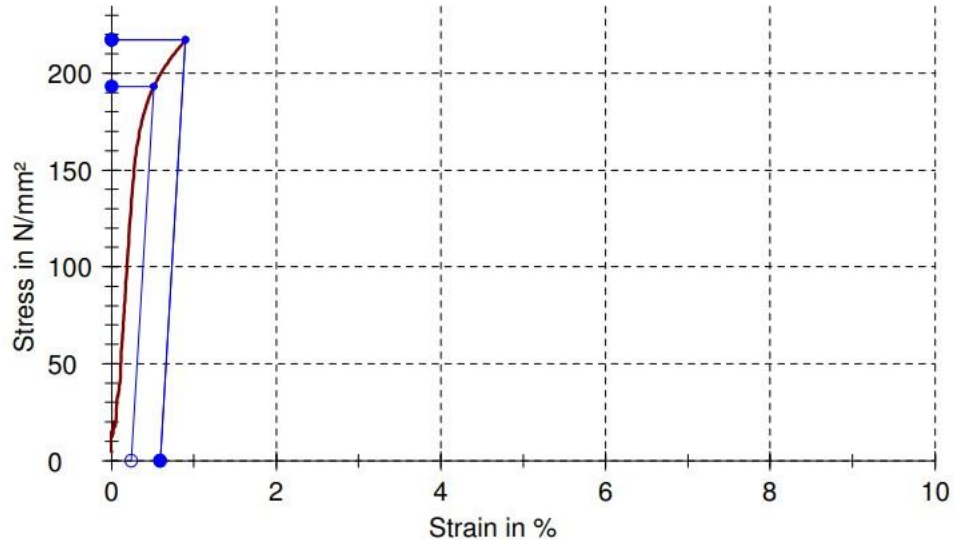


P1Ç2
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,1	12,46	50,00	90	193,19	217,12	0,55	0,55	-	

Grafikler:

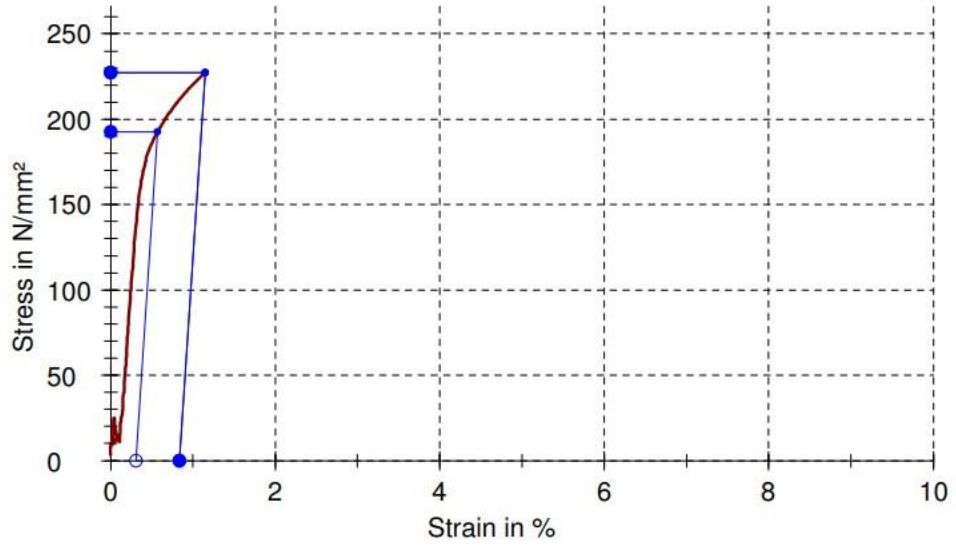


P1Ç3
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,12	12,45	50,00	90	192,64	227,16	0,73	0,73	-	

Grafikler:

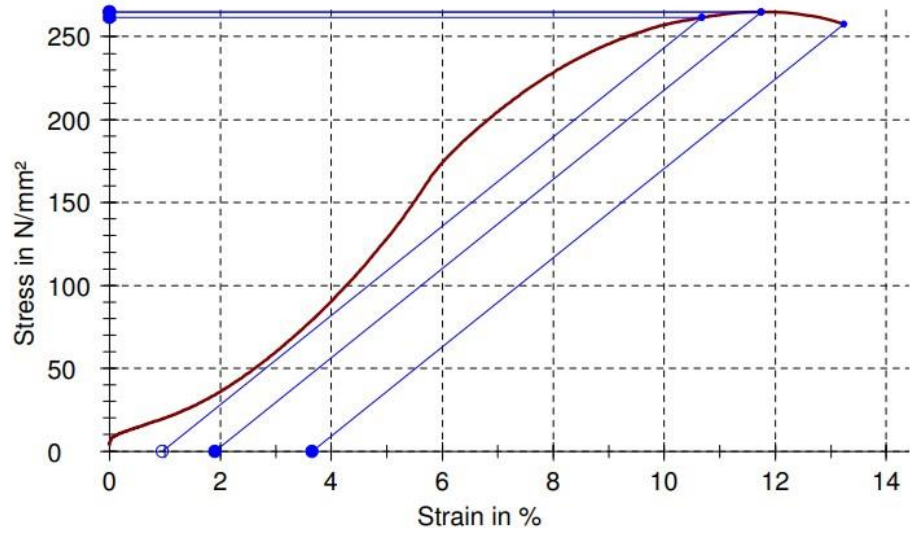


P2Ç1
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,12	12,46	50,00	90	261,59	264,99	1,14	2,90	-	

Grafikler:

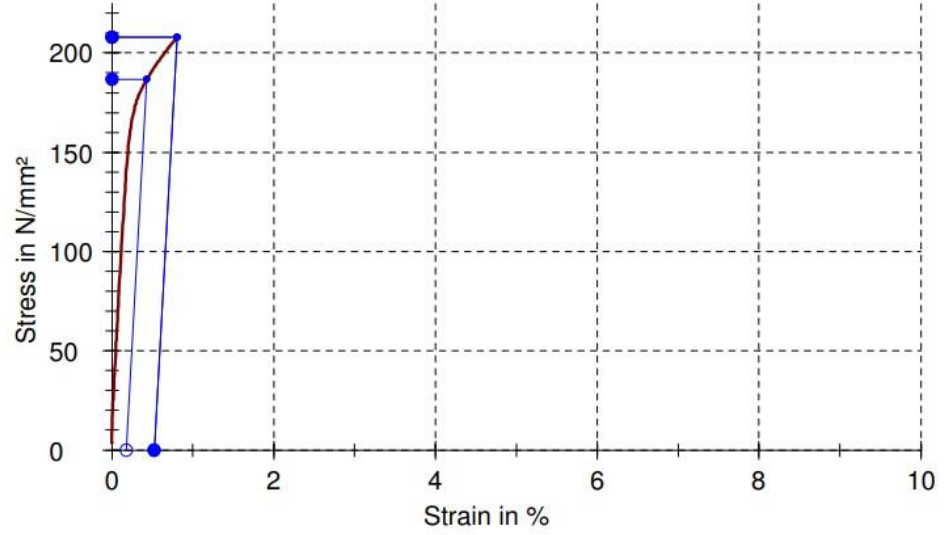


P2Ç2
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,11	12,43	50,00	90	186,71	208,08	0,55	0,55	-	

Grafikler:

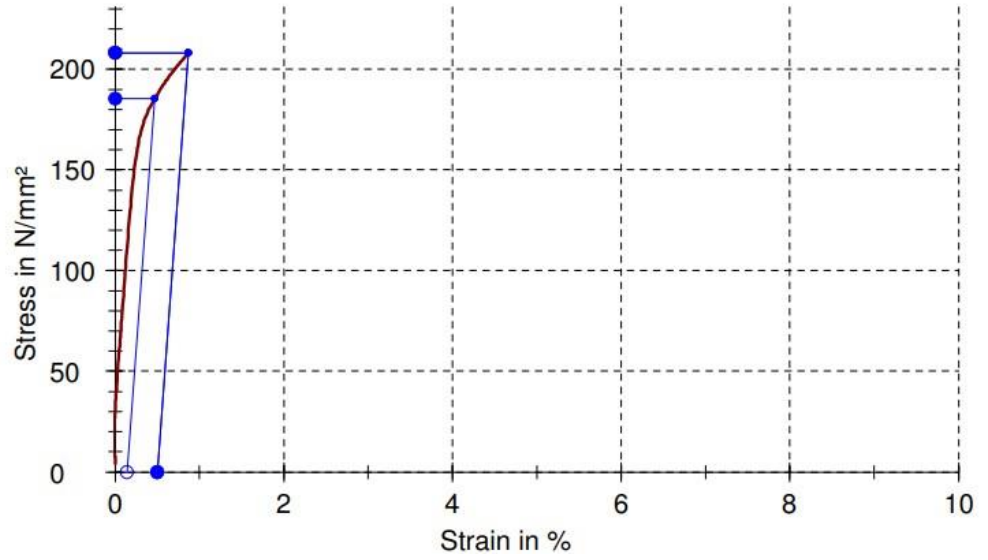


P2Ç3
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,13	12,45	50,00	90	185,52	208,11	0,56	0,56	-	

Grafikler:

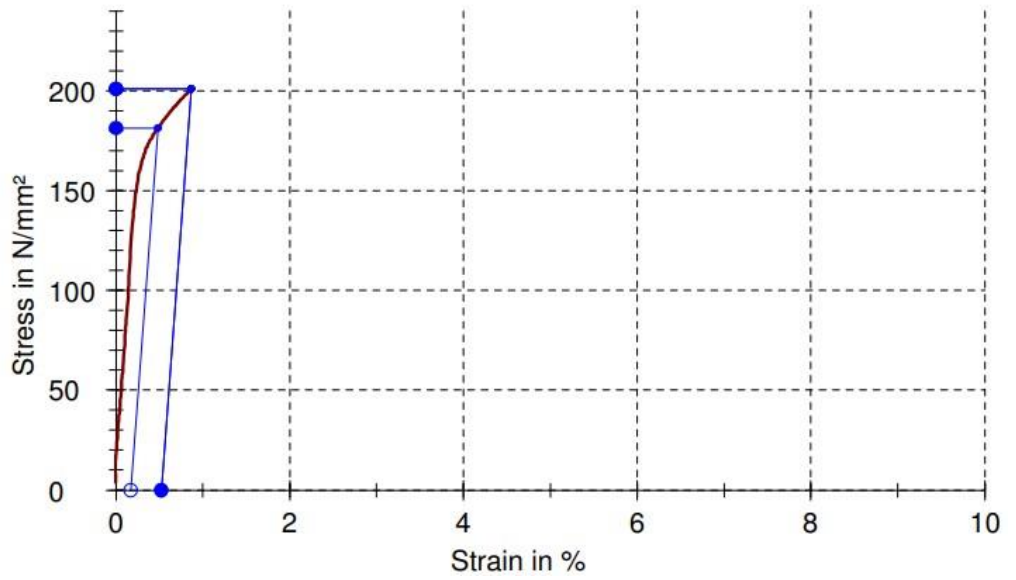


P3Ç1
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,13	12,45	50,00	90	181,46	201,12	0,55	0,55	-	

Grafikler:



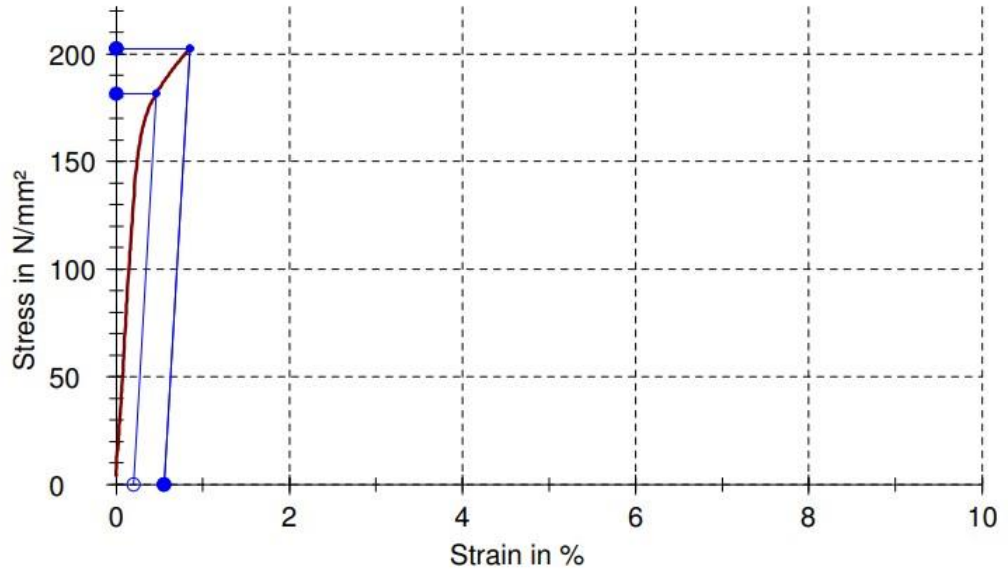
P3Ç2

NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,11	12,43	50,00	90	181,46	202,25	0,56	0,56	-	

Grafikler:



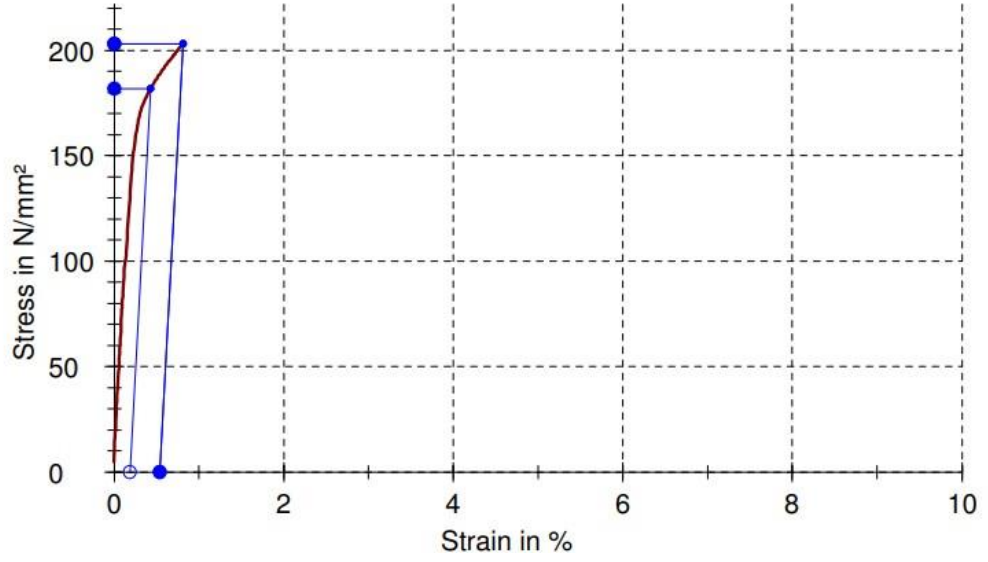
P3Ç3

NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,12	12,44	50,00	90	181,78	203,03	0,55	0,55	-	

Grafikler:

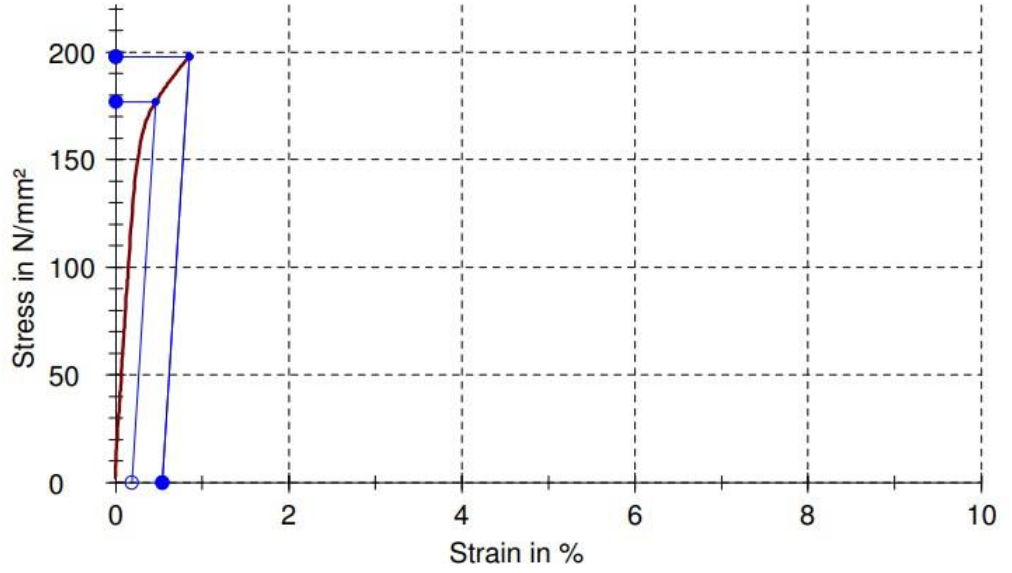


P4Ç1
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,12	12,44	50,00	90	176,92	197,82	0,55	0,55	-	

Grafikler:

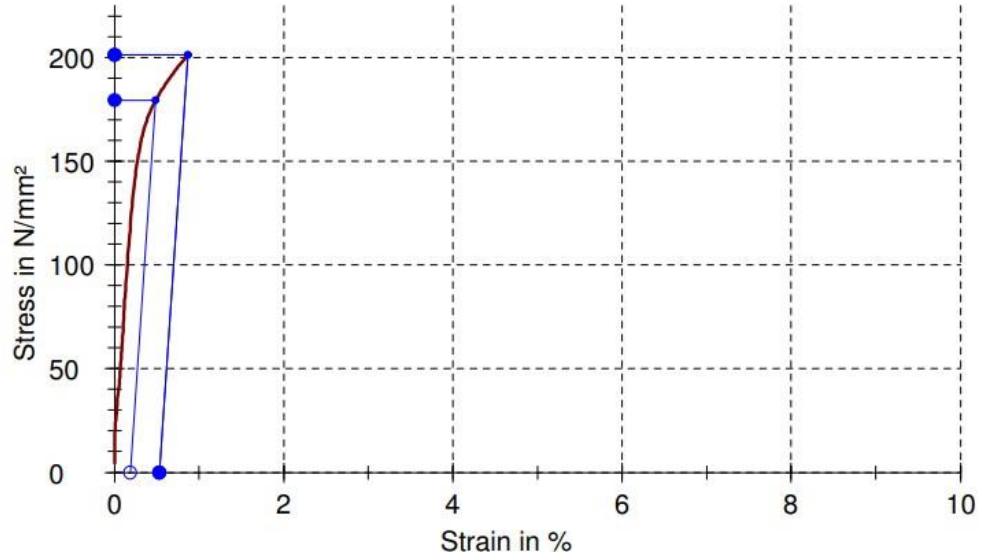


P4Ç2
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,13	12,44	50,00	90	179,21	201,20	0,55	0,55	-	

Grafikler:

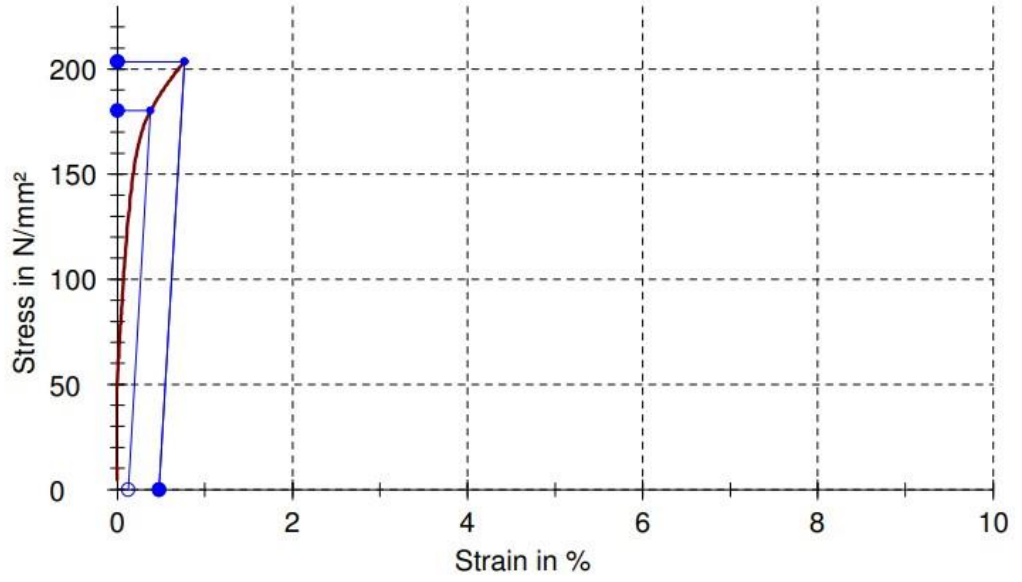


P4Ç3
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,13	12,44	50,00	90	180,38	203,36	0,55	0,55	-	

Grafikler:

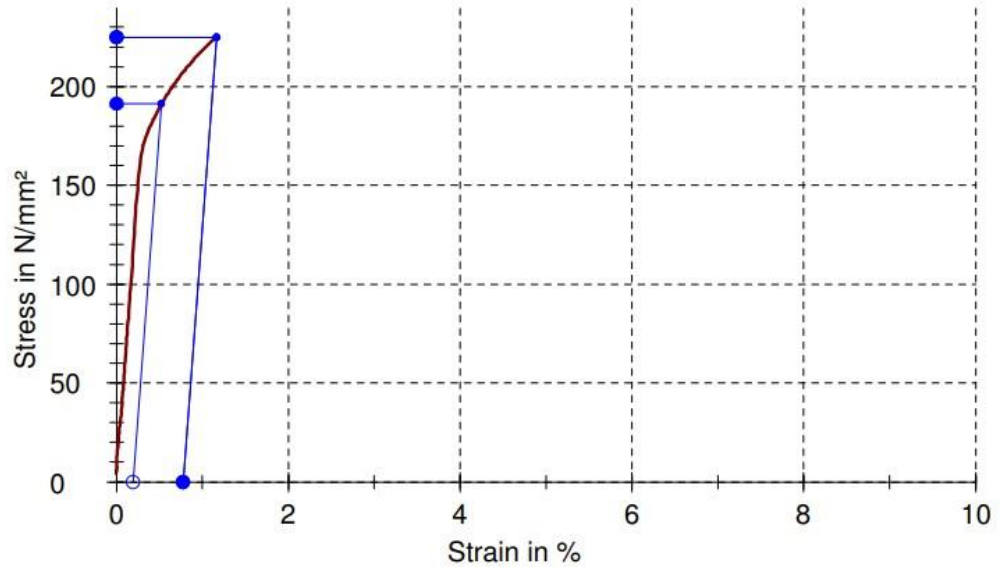


P5Ç1
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,15	12,47	50,00	90	191,11	224,90	0,78	0,78	-	

Grafikler:



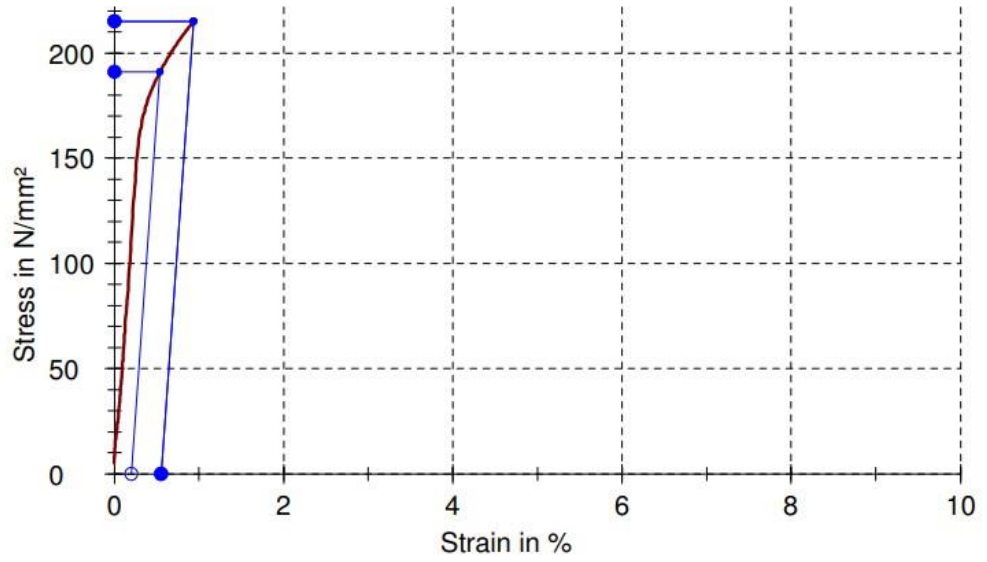
P5Ç2

NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,16	12,48	50,00	90	191,01	214,96	0,55	0,55	-	

Grafikler:

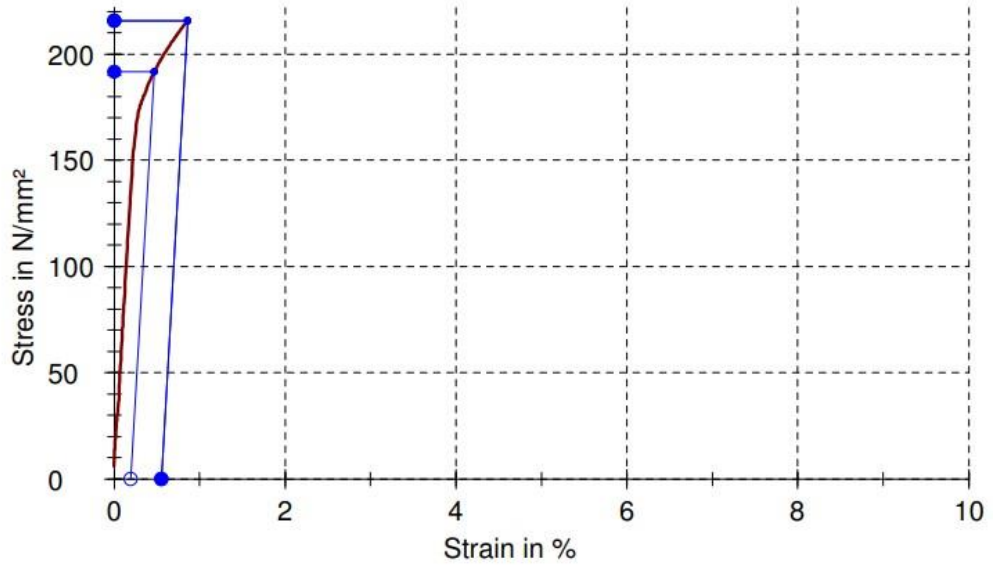


P5Ç3
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,1	12,45	50,00	90	191,58	215,48	0,56	0,56	-	

Grafikler:

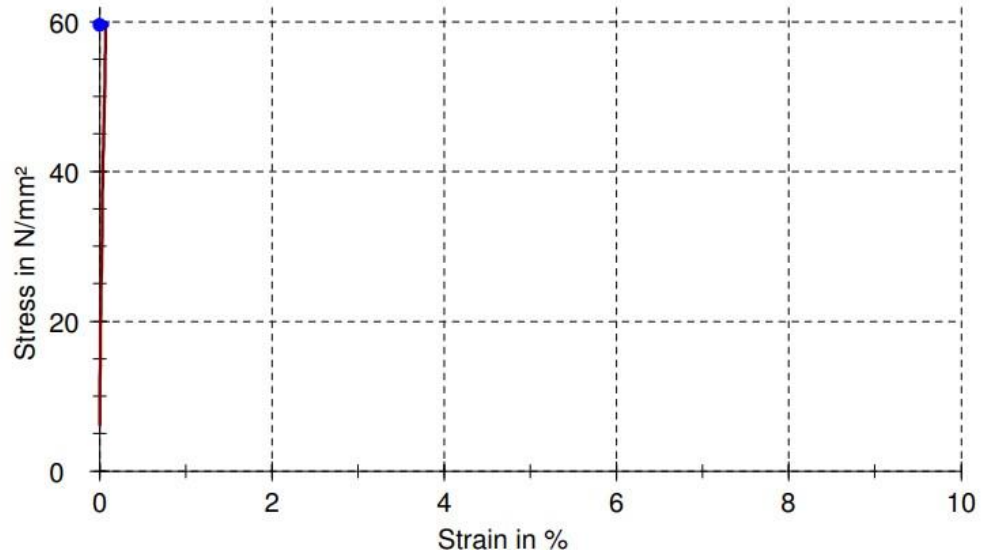


P6Ç1
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,11	12,47	50,00	90	-	59,55	-	-	-	-

Grafikler:

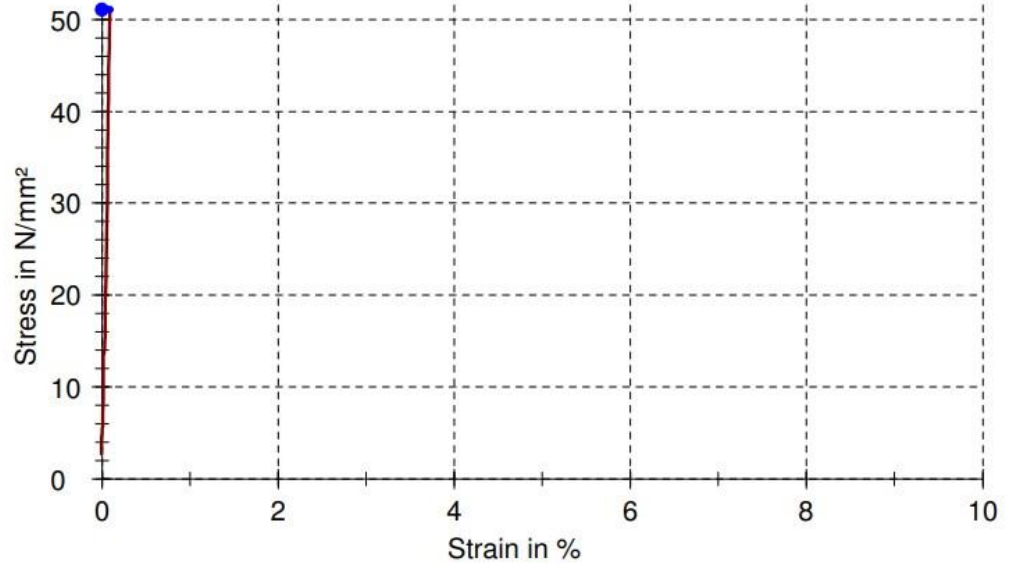


P6Ç2
NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,09	12,45	50,00	90	-	51,07	-	-	-	-

Grafikler:



P6Ç3

NUMUNESİ ÇEKME TESTİ DEĞERLERİ VE GRAFİĞİ

Test sonuçları:

Nr	a0 mm	b0 mm	L0 mm	Yön	Akma Rp 0,2 N/mm ²	Çekme Muk. N/mm ²	Ag %	Uzama %	n	nm
1	8,09	12,46	50,00	90	-	67,31	-	-	-	-

Grafikler:

