

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AA6013 / AA7075 ALÜMİNYUM MALZEMELERİN SÜRTÜNME KAYNAĞI  
YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ERHAN BAYSAL**

**EKİM 2019**



**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AA6013 / AA7075 ALÜMİNYUM MALZEMELERİN SÜRTÜNME KAYNAĞI**  
**YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Erhan BAYSAL**

**DANIŞMAN**

**: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR**

**ZONGULDAK**

**Ekim 2019**





**KABUL:**

Erhan BAYSAL tarafından hazırlanan "AA 6013/ AA 7075 Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Kaynağı Yöntemiyle Birleştirilmesi ve Analizi" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 18/10//2019

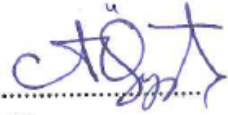
**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Prof. Dr. Hamdi Alper ÖZYİĞİT

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Menderes KAM

Düzce Üniversitesi, Cumayeri Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü



**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

.../.../20....



Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü





*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

  
Erhan BAYSAL



## ÖZET

Yüksek Lisans

### AA6013 / AA7075 ALÜMİNYUM MALZEMELERİN SÜRTÜNME KAYNAĞI YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ

Erhan BAYSAL

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR

Ekim 2019, 57 sayfa

Bu çalışmada AA6013 ile AA7075 malzemelerinin, farklı kaynak parametreleri (hız, basınç ve zaman) kullanarak sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen numunelerin titreşim analizi, mikroyapıları ve makrosertlik ölçümleri incelenmiştir. Değiştirilen kaynak parametrelerinin, yapılan incelemelere etkisi araştırılmıştır. Ayrıca kaynak kalitesinin belirlenmesinde tahribatsız muayene yöntemi olan titreşim analizinin kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bölüm 1’de giriş yapılarak sürtünme kaynağı ile ilgili yapılan çalışmaların literatür bilgisi ve sürtünme kaynağıyla birleştirilen malzeme çiftleri verilmiştir. Bölüm 2’de sürtünme kaynağı yönteminin tarihçesi, sürtünme kaynak çeşitleri, sürtünme kaynağında kullanılan parametreler, yöntemin avantaj ve dezavantajları verilmiştir. Bölüm 3’te titreşim teorisi ve FFT (Fast Fourier Transform) analizi hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bölüm 4’te yapılan AA6013 ve AA7075 çiftlerinin sürtünme kaynağı birleştirilmesinde kullanılan deneysel çalışmaların aşamaları, metalografik numunelerin hazırlanması, sertlik ölçümü ve SEM

## **ÖZET (devam ediyor)**

görüntülerine yer verilmiştir. Bölüm 5'te elde edilen sonuçlar verilmiş ve genel değerlendirmeler yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sürtünme kaynağı, Modal Analiz, AA6013, AA7075

**Bilim Kodu:** 625.03.00



## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **AA6013 / AA7075 COMBINATION AND ANALYSIS OF ALUMINUM MATERIALS WITH FRICTION WELDING METHOD**

**Erhan BAYSAL**

**Zonguldak Bülent Ecevit University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor: Assists. Prof. Dr. Oğuz KOÇAR**

**October 2019, 57 pages**

In this study, AA6013 and AA7075 materials were combined with friction welding method using different welding parameters (speed, pressure and time). Vibration analysis, microstructure analysis and macrohardness measurements of the combined samples were examined. The effect of modified welding parameters on the examinations was investigated. In addition, the usability of vibration analysis, which is a non-destructive testing method, was investigated.

In the introduction of Chapter 1, literature data of the studies on friction welding and material pairs combined with friction welding are given. In Chapter 2, the history of friction welding method, types of friction welding, parameters used in friction welding, advantages and disadvantages of the method are given. Chapter 3 provides general information about vibration theory and FFT (Fast Fourier Transform) analysis. The steps of the experimental studies used in the friction welding of AA6013 and AA7075 pairs, preparation of metallographic samples, hardness measurement and SEM images are given in Chapter 4.

## **ABSTRACT (continued)**

The results obtained in Section 5 are given and general appraisals are made.

**Keywords:** Friction Welding, Modal Analysis, AA6013, AA7075

**Science Code:** 625.03.00





## TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca yardımları ile yanımda olan, yol gösteren, yazım süreci ve deneysel çalışmalarımızda beraber çalıştığımız tez danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR'a ve yapılan deneylerde cihazların kullanılmasında ve sonuçların yorumlanmasında tecrübesiyle daima yanımda olan, desteğini esirgemeyen sayın Doç. Dr. Mehmet YETMEZ'e teşekkür ederim.

Bilgi ve deneyimleriyle çalışmamda tüm bilgilerini paylaşan, çalışmanın başlangıç ve tamamlanmasına kadar her aşamada desteğini gördüğüm sayın Prof. Dr. Hamdi Alper ÖZYİĞİT'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmam için altyapı desteği ile çalışmamın gerçekleşmesinde destek sağlayan Atılım Mühendislik ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme teşekkürler ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL:.....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
1.1 KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ .....	2
1.1.1 Alüminyum Kullanılan Malzemelerin Sürtünme Kaynağı.....	2
1.1.2 Farklı Tür Malzemelerin Sürtünme Kaynağı .....	5
BÖLÜM 2 SÜRTÜNME KAYNAĞI.....	9
2.1 YÖNTEMİN TARİFİ VE ÇEŞİTLERİ.....	9
2.1.1 Sürekli Tahrikli (Klasik) Sürtünme Kaynağı .....	12
2.1.2 Volan Tahrikli (Atalet) Sürtünme Kaynağı .....	13
2.2 YÖNTEMDE KULLANILAN PARAMETRELER .....	15
2.2.1 Hız (Devir Sayısı) .....	15
2.2.2 Basınç (Sürtünme ve Yığma) .....	15
2.2.3 Zaman (Sürtünme ve Yığma).....	16
2.3 YÖNTEMİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI.....	17
2.3.1 Avantajları .....	17
2.3.2 Dezavantajları.....	18
2.4 YÖNTEMİN UYGULAMA ALANLARI .....	18
BÖLÜM 3 DİNAMİK KARAKTERİZASYON .....	21
3.1 TİTREŞİMİN TANIMI .....	21
3.2 TİTREŞİMLE İLGİLİ TEMEL TERİMLER.....	21

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.2.1 Genlik Değerleri.....	23
3.2.2 Faz Kavramı .....	24
3.2.3 Rezonans Kavramı .....	25
3.3 TİTREŞİMİN ÖLÇÜLMESİ.....	25
3.4 FREKANS TANIM TEKNİKLERİ.....	27
3.4.1 Dalgaform Görüntüleme (Zaman Bölgesi).....	27
3.4.2 Spektrum Görüntüleme (Frekans Bölgesi).....	27
3.5 DOĞAL FREKANS HESABI VE FOURİER DÖNÜŞÜMÜ .....	28
BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	33
4.1 DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER.....	33
4.2 SÜRTÜNME KAYNAK PARAMETRELERİ.....	35
4.3 MODAL ANALİZ .....	35
4.4 METALOGRAFİK İNCELEME HAZIRLIKLARI.....	37
4.5 SERTLİK ANALİZİ .....	39
BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME .....	41
5.1 MODAL ANALİZ SONUÇLARI .....	41
5.2 METALOGRAFİK İNCELEMELER .....	43
5.3 NUMUNELERİN MAKROSERTLİK SONUÇLARI .....	48
5.4 DEĞERLENDİRMELER .....	50
5.5 ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	57

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Sürtünme kaynağında kullanılan malzemelerin hareket etme yönleri.....	10
Şekil 2.2 Dairesel sürtünme kaynağında işlem aşamaları.....	11
Şekil 2.3 Doğrusal sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmiş titanyum.....	11
Şekil 2.4 Klasik sürtünme kaynağı işlem aşamaları.....	12
Şekil 2.5 Klasik sürtünme kaynağı makinesi.....	13
Şekil 2.6 Klasik sürtünme kaynağında parametrelerin zamanla değişimi.....	13
Şekil 2.7 Volanlı sürtünme kaynağı makinesi.....	14
Şekil 2.8 Volanlı sürtünme kaynağında parametrelerin zamanla değişimi.....	14
Şekil 2.9 Havacılık sektöründe kullanılan bazı parçalar.....	19
Şekil 2.10 Otomotiv endüstrisinde kullanılan bazı parçalar.....	20
Şekil 3.1 Harmonik hareket grafiği.....	22
Şekil 3.2 Deplasman, hız ve ivme eğrileri.....	23
Şekil 3.3 Genlik değerleri.....	24
Şekil 3.4 Faz gecikmesi.....	25
Şekil 3.5 İvme Ölçerler.....	26
Şekil 3.6 Titreşim ölçerlerin frekans aralığı.....	26
Şekil 3.7 Dalgaform grafikleri.....	27
Şekil 3.8 FFT dönüşümü.....	28
Şekil 3.9 Basit kütle yay sistemi.....	28
Şekil 3.10 Frekans cevap fonksiyonu.....	31
Şekil 3.11 Frekans cevap fonksiyonu ve Fourier dönüşümü.....	31
Şekil 4.1 Kısa malzemenin (AA6013) sürtünme kaynak makinesine bağlanması.....	34
Şekil 4.2 Uzun malzemenin sürtünme kaynak makinesine bağlanması.....	34
Şekil 4.3 Kaynaklı numunelerin eşit boyda kesilmesi.....	34
Şekil 4.4 Numunelerin deney düzeneğine yerleştirilmesi.....	35
Şekil 4.5 Darbe çekici ile uyarma.....	36
Şekil 4.6 Modal analiz deney düzeneği.....	36
Şekil 4.7 Modal analiz deney düzeneği araçları.....	37
Şekil 4.8 Serbest titreşimde kullanılan araçlar.....	37
Şekil 4.9 Numune hazırlanırken kullanılan kesme cihazı.....	38
Şekil 4.10 Kesme işlemi sonrası ve dağlama işlemi öncesi numune görüntüsü.....	38
Şekil 4.11 Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	39
Şekil 4.12 Makrosertlik cihazı.....	39
Şekil 4.13 Makrosertlik değeri alınan noktalar.....	40

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.14 Numune üzerinde noktaların gösterimi.....	40
Şekil 5.1 Numuneler ait doğal frekans değişim grafiği.....	42
Şekil 5.2 Numunelere ait yer değiştirme cevap grafiği.....	42
Şekil 5.3 Numunelere ait sönüm oranı değer grafiği.....	43
Şekil 5.4 Numunelere ait 5× mikroskop görüntüleri.....	44
Şekil 5.5 Numunelere ait 50× mikroskop görüntüleri.....	45
Şekil 5.6 Numunelere ait 500× taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.....	46
Şekil 5.7 Numune – 1'e ait birleşme bölgesindeki yapılar.....	47
Şekil 5.8 Numune – 4'e ait tane yapıları.....	47
Şekil 5.9 Numune – 6'ya ait birleşme arayüzeyi.....	48
Şekil 5.10 Numune – 7'ye ait birleşme yüzeyinde oluşan boşluk.....	48
Şekil 5.11 Ortalama makrosertlik grafiği.....	49

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 Alüminyum dışında kullanılan malzemelerin sürtünme kaynakları .....	6
Çizelge 1.2 Malzeme çiftlerinin sürtünme kaynağına elverişliliği .....	7
Çizelge 2.1 Aynı çapa sahip malzemeler için ideal kaynak parametreleri.....	17
Çizelge 4.1 AA6013 ve AA7075 mekanik özellikleri.....	33
Çizelge 4.2 AA6013 ve AA7075 kimyasal özellikleri .....	33
Çizelge 4.3 Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri.....	35
Çizelge 5.1 Numunelere ait alınan cevap değerleri .....	41
Çizelge 5.2 Numunelerin ortalama sertlik değerleri.....	48





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$n$	: Devir sayısı
$D$	: Malzeme çapı
$t$	: Sürtünme süresi
$d$	: Malzeme çapı
$f$	: Doğal Frekans
$T$	: Periyot
$\omega$	: Açısal Doğal Frekans
$X$	: Yer değiştirme
$X_0$	: Genlik
$M$	: Kütle Matrisi
$\ddot{U}$	: İvme vektörü
$C$	: Sönüm Matrisi
$\dot{U}$	: Hız vektörü
$K$	: Rijitlik Matrisi
$U$	: Yer değiştirme vektörü
$F_{(t)}$	: Kuvvet vektörü
$H(\omega)$	: Frekans cevap fonksiyonu
$\omega_1$	: Kaynaklı numunenin doğal frekansı
$\omega_{10}$	: Saf numunenin doğal frekansı
$X_1$	: Kaynaklı numunenin yer değişimi
$X_{10}$	: Saf numunenin yer değişimi
$\zeta_1$	: Kaynaklı numunenin sönüm oranı
$\zeta_{10}$	: Saf numunenin sönüm oranı

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

### KISALTMALAR

<b>AA</b>	: Alüminyum
<b>ABD</b>	: Amerika Birleşik Devletleri
<b>AISI</b>	: Paslanmaz Çelik
<b>DUBİT</b>	: Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Merkezi
<b>ECAE</b>	: Equal Channel Angular Extrusion
<b>FFT</b>	: Fast Fourier Transform
<b>HB</b>	: Brinell Sertlik Deneyi
<b>Hz</b>	: Hertz
<b>ITAB</b>	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
<b>LCS</b>	: Low Carbon Steel
<b>RMS</b>	: Root Mean Square
<b>RPM</b>	: Revolution Per Minute
<b>SEM</b>	: Scanning Electron Microscope
<b>SSM</b>	: Semi – Solid Metal

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve sanayi ile birlikte üretim şekilleri değişiklik göstermektedir. Mevcut olan sistemlerde kullanılan malzemeler de bu ölçüde değişmektedir. Özellikle dayanım olarak yüksek, ağırlık olarak hafif ve ekonomik olarak uygun malzemeler daha çok tercih edilmektedir. Alüminyum malzemesi de bu tanıma uymaktadır.

Alüminyum çelikten sonra kullanım alanı olarak oldukça yaygın bir malzemedir. Uçak, otomotiv, uzay gibi büyük sektörlerde kullanıldığı gibi günlük hayatta ev eşyalarına kadar da kullanım alanı bulunmaktadır. Tek bir malzemenin belirli şartlarda istenilen performansı vermemesi yeni malzeme çeşitlerinin araştırılmasına sebep olmuştur. Bu araştırma doğrultusunda malzemeler birleştirilerek bir arada kullanılmıştır. Bu sebeple orantılı olarak yeni birleştirme şekilleri ortaya çıkmıştır.

Sürtünme kaynak yöntemi bu birleştirme yöntemlerinden birisidir. Parçaların birisi dönme hareketi yaparak sabit kalan diğer parçaya yaklaştırılır. Temas sağlandığı anda parçaların birbirleri ile sürtünmesinden dolayı ortaya çıkan ısı birleştirmeyi sağlar. Sadece birleştirme esasına dayalı olarak veya herhangi bir metot ile malzeme birleşimi yapmak mühendislik adına yeterli değildir. En doğru yöntem ve en doğru malzeme seçimi kaliteyi belirleyen faktörlerdir. Malzemeler birleştirildikten sonra kaynak bölgesinde malzeme yapısı değişmekte ve bu değişimin malzemenin bir bütün olarak özelliklerine etkisi de önem arz etmektedir.

Malzemelerin birleştirilmesinde izlenen yöntemler genel olarak ergitme ve katı hal olarak sınıflandırılmıştır. Ergitme kaynak yönteminde ister ara malzeme kullanılsın ister kullanılmamasın erime sıcaklıkları yakın olan malzemeler birleştirilebilir. Ortaya konulan bu şart farklı malzemelerin birleştirilmesi için bir eksikliklerdir. Bu eksikliğe ek olarak kaynak bölgesinde meydana gelen dayanım azalması ve çatlak oluşumu gibi faktörler nedeniyle malzemelerde en düşük yapı değişimi tercih edilmek zorundadır. Katı hal kaynak yönteminde ise malzemelerin erime sıcaklıklarının birbiri ile aynı olması veya birbirine yakın olması şartı gibi bir durum mevcut değildir. Bu da farklı özelliklere sahip malzemelerin birleştirilmesine

imkan vermektedir. Aynı zamanda ergitme kaynağında ortaya çıkan çatlama, dayanım azalması ve diğer problemler katı hal metoduyla yapılan birleştirmelerde görülmediğinden katı hal metodu daha çok tercih edilmektedir. Bu metotların arasında da en öne çıkan sürtünme kaynağı bugün sanayide yoğun bir kullanım alanına sahip olmuştur.

Bu tez çalışmasında askeri ve uçak sanayinde yüksek dayanım istenen bileşenlerde, otomotiv sanayisinde, yüksek dayanım gerektiren makine parçalarında kullanılan AA 7075 ile AA 6013 malzemelerinin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi sağlanmıştır.

## **1.1 KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ**

Sürtünme kaynağı endüstride yoğun olarak kullanımı ve çalışmaların olması birçok araştırmacı tarafından ilgi görmüştür. Bu çalışmalarda aynı veya farklı tür malzemeler sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirilmiş ve bu birleşme yerindeki kaynak kalitesi belirlenmek istenmiştir. Aynı zamanda malzemelerin ideal kaynak parametreleri, tane yapıları ve bu birleşimin malzemelerin yapısal özelliklerindeki neden olduğu değişimler araştırılmıştır. Konuyla ilgisi olan çalışmalar aşağıda verilerek malzeme türüne göre sınıflandırılmıştır.

### **1.1.1 Alüminyum Kullanılan Malzemelerin Sürtünme Kaynağı**

Asma AA7075 – AA6061 malzeme çiftini sürtünme kaynağı ile birleştirerek ideal birleştirme şartlarını belirlemek istemiş ve deney sonunda malzemelerin mikrosertlik ve mikroyapı değişikliklerini inceleyerek farklı kaynak parametrelerinin etkisini de araştırmıştır. Bu araştırmaya göre dakikada 2000 devirin birleşme için yeterli olduğunu, tane yönelmelerinin düşük devirde dahi gözlenebildiğini, mikroyapı ve mekanik sonuçlar doğrultusunda en iyi numunenin tespit edilmesini gerçekleştirmiştir (Asma 2014).

Bharathi vd. çalışmalarında sırasıyla AA2024 – AA6061, AA2024 – AA2024 ve AA6061 – AA6061 malzemelerini sürtünme kaynağı ile birleştirerek bu birleşmede mikroyapı, sertlik ve gerilme özelliklerini karakterize etmişlerdir. Sürtünme kaynaklı malzemelerden akma ve çekme dayanımı yüksekten düşüğe doğru AA2024 – AA2024, AA2024 – AA6061, AA6061 – AA6061 olacak şekilde sıralanmıştır (Bharathia vd. 2017).

Vigneshwar vd. AA2024 – AA6061 malzemelerini sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirmiş ve yapılan deney sonuçlarına göre en ideal kaynak parametrelerini belirleyerek çekme dayanımına en büyük etkinin devir sayısına bağlı olduğunu belirtmişlerdir (M.Vigneshwar 2018).

Aoki ve Koezawa ECAE yöntemiyle deforme olmuş A6063 – T5 malzemesini sürtünme kaynağı yöntemiyle çok kısa sürede birleştirmiş, aynı devir sayısında farklı basınçlar verilerek dayanımın arttığını gözlemlemişlerdir (Aoki ve Koezawa 2017).

Meengam vd. SSM7075 alüminyum alaşımını sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirmiş ve en yüksek dayanım için en ideal kaynak parametrelerini araştırmıştır. Bununla birlikte kaynak bölgesinde meydana gelen sertliği ve mikroyapıyı inceleyerek tanecik boyutlarını yorumlamıştır (C. Meengam vd. 2017).

Sathish vd. AA7075 malzemesinin sürtünme kaynağı ile birleştirilme olasılığı üzerine yaptığı araştırmada kaynak numunelerinin verimliliğini artırmak için kaynak parametrelerinin en uygun kombinasyonlarını belirlemek istemiştir. Bu kombinasyonlarda devir sayılarını 500 rpm ve 2000 rpm, sürtünme basınçlarını 22 MPa ve 66 MPa, yığılma basınçlarını 88 MPa ve 132 MPa olarak seçmiştir. Bu çalışmada kaynaklanmış numunenin çekme gerilmesi en fazla ana metalin %77'si oranında değer göstermiştir. Bu gerilme değerine devir sayısını 2000 rpm, yığılma basıncını 22 MPa ve sürtünme basıncını 44 MPa olarak seçerek ulaşmıştır. Ayrıca farklı kaynak parametreleri için flaş boyutu ve biçimi için önemli farklar oluşturduğunu belirtmiştir (Sathish vd. 2010).

Sreenivasan vd. ortalama %10 hacimde 20 mm'lik SiC içeren AA7075 alüminyum bazlı metal matris kompozitler elde ederek bu malzemeleri sürtünme kaynağı ile birleştirmişlerdir. Maksimum sertlik ve çekme dayanımının tahmini ile birlikte optimum kaynak parametrelerini belirlemek için genetik algoritma kullanılarak Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile numuneleri görüntülemişlerdir. Dayanım ve sertlik tahmini kabul edilebilir bir sapma ile doğrulamışlardır. Kaynak parametreleri ise devir sayısı 1491,54 rpm, sürtünme basıncı 98,94 MPa ve yığılma basıncı 209,26 MPa olarak belirlemişlerdir (Sreenivasan vd. 2019).

Rajendran ve Mathi çapı 25,4 mm olan AA7075 alüminyum alaşımlarını sürtünme kaynağı ile birleştirdikten sonra 650°C 'de 4 saat tavlama işlemi uygulamıştır. Kaynak parametreleri

olarak devir sayısı 1125 rpm, sürtünme basıncı 20 bar ve yığma basıncı 40 bar olarak kullanmışlardır. Tavlama işlemi sonrası numuneye darbe, çekme ve sertlik testleri yapmışlardır. Test sonuçları kaynak bölgesinin değerlerinin ana metalin değerlerine göre düşük olduğunu görmüşlerdir (Rajendran ve Mathi 2012).

Kimura vd. alüminyum AA7075 – T6 alaşımı ile düşük karbonlu çelik (LCS) malzemesinin sürtünme kaynağını gerçekleştirerek kaynak parametrelerinin gerilim değerlerine olan etkisini araştırmışlardır. Kaynak parametrelerinde devir sayısını 1650 rpm, sürtünme basıncını 30 MPa ile 90 MPa arasında, yığma basıncını 30 MPa ile 360 MPa arasında ve yığma süresini 6 saniye olarak almışlardır. Sürtünme basıncının düşük alınması ve yığma süresinin 3 saniye tutulması kaynak için başarılı bir sonuç vermemiştir (Kimura vd. 2013).

Rafi vd. çalışmalarda sık olarak kullanılan sürtünme kaynaklı alüminyum AA7075 – T6 alaşımının kaynak parametrelerine bağlı olarak mikroyapı ve gerilme özelliklerini araştırmışlardır. Kaynak parametrelerinde devir sayısını 1000 rpm ve 2000 rpm, sürtünme basıncını 38 MPa ve 114 MPa, yığma basıncını 152 MPa ve 304 MPa, yanma uzunluğunu ise 1 mm ve 4 mm olarak seçerek bu parametreleri üçer tekrarlı olarak farklı kombinasyonlarla denemişlerdir. Gerilme test sonuçlarına bakıldığında ana metale göre %89 oranında gerilme dayanımı elde edilmiştir (Rafi vd. 2010).

Şahin vd. plastik deformasyona maruz bırakılmış alüminyum AA5083 alaşımı ile deformasyona uğramamış alüminyum AA5083 alaşımını kendi aralarında olacak şekilde sürtünme kaynağı ile birleştirmiştir. Deformasyona uğramayan alüminyum alaşımının sürtünme kaynağında ideal kaynak parametrelerini belirledikten sonra aynı parametreleri kullanarak deformasyona uğrayan alüminyum alaşımını sürtünme kaynağı ile birleştirdi. Plastik deformasyona uğrayan AA5083 alaşımının dayanımı daha yüksek çıkmış ve çekme testinde kopma kaynak bölgesinin dışında meydana gelmiştir (Şahin vd. 2008).

Meshram ve Reddy AA6061 – AISI4340 malzeme çiftini önce kendi arasında ve sonra ara tabakada gümüş kullanarak sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirerek çekme ve sertlik testi uygulamışlardır. Daha önce yapılan çalışmalara bakarak kaynak parametrelerinden sürtünme kuvvetini 3 kN, yığma kuvvetini 6 kN, devir sayısını 2400 rpm ve yanma uzunluğunu 2 mm olarak belirlemişlerdir. Ara katman olarak gümüş kullanılan sürtünme kaynağı ara katman kullanılmaya göre daha yüksek dayanım vermiştir (Meshram ve Reddy 2015).

Kimura vd. AA6063 - AISI304 malzeme çiftini sürtünme kaynağı ile birleştirmiş ve kaynak parametrelerinin malzemelerin mekanik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Kaynak parametreleri olarak devir sayısı 1650 rpm, sürtünme basıncı 30 MPa, 0,04 s – 5,0 s aralığında sürtünme süresi, 30 MPa ile 240 MPa aralığında yığma basıncı ve 6.0 s yığma süresi olarak belirlemişlerdir. Sürtünme süresi ilk olarak 1,5 s olduğunda kaynak yüzündeki sıcaklık 623 K ve süre arttıkça üzerine çıkmıştır. Sürtünme süresi 3,0 s üzerine çıktığında kopma AA6063 tarafında gerçekleşmiştir (Kimura vd. 2017).

Hynes vd. AA6063 – AISI1030 malzeme çiftini sürtünme kaynağı metodu ile birleştirerek kaynak bölgesini ultrasonik testle incelemiştir. Ultrasonik dalga boylarına bakarak AA6063 ve AISI1030 malzemelerinin elastisite ve kayma modülü gibi mekanik özelliklerinin kaynak bölgesinde uğradığı değişimler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre kaynak ara yüzünün mekanik özellikleri AA6063 alüminyum alaşımından yüksek AISI1030 çeliğinden ise düşük çıkmıştır. Kaynak parametreleri olarak sürtünme basıncı 2.0 bar, yığma basıncı 4.0 bar, sürtünme süresi 6 s, yığma süresi 3 s ve devir sayısı 1600 rpm alınmıştır (Hynes vd. 2014).

Farklı bir diğer çalışmada, AA2014 ile saf ( $\geq 99.9\%$ ) bakır bileşimi olan malzeme çifti kullanarak, içi alüminyum dışı bakır ve içi bakır dışı alüminyum malzemeler elde edilerek sürtünme kaynağı ile birleştirilmiştir. Çalışmada ideal kaynak parametreleri olarak sürtünme basıncı 60 MPa, yığma basıncı 120 MPa ve sürtünme süresini 2,5 s olarak belirlenmiştir (Altındal 2014).

Kimura vd. AA7075 – T6 alüminyum alaşımlarını sürtünme kaynağı ile birleştirmiş ve kaynak parametrelerinin bu birleşime etkisini incelemiştir. Kaynak parametreleri olarak sürtünme süresi ile devir sayısını sabit tutarak sürtünme basıncını değiştirmiş ve bu değişimin yüzeylerde meydana getirdiği değişimi incelemiştir (Kimura vd. 2005).

### **1.1.2 Farklı Tür Malzemelerin Sürtünme Kaynağı**

Sürtünme kaynağı yöntemi araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir. Literatüre bakıldığında alüminyum alaşımları dışında sürtünme kaynaklı diğer malzemelerin çalışmaları Çizelge 1.1’de verilmiştir. Çizelge 1.2’de ise sürtünme kaynağı ile birleşmesi uygun olan,

ideal parametrelere bağılı olarak tam birleşme ihtimali olmayan ve literatürde henüz yer almayan malzeme çiftleri verilmiştir.

**Çizelge 1.1** Alüminyum dışında kullanılan malzemelerin sürtünme kaynakları.

Malzeme Çifti	Parametreler						Yapılan İncelemeler/Testler	Yazar
	Devir Sayısı (dev/dak)	Sürtünme Süresi (s)	Sürtünme Basıncı (MPa)	Yığıma Basıncı (MPa)	Yığıma Süresi (s)			
AISI1010 BAKIR	2300 2100 1800	6,10	30,40	60,80	3,5	Metalo grafik, Mikrosertlik, Çekme Deneyi, Radyografi	(Açık 2015)	
HSS-S6-5-2 AISI1040	-	4	110	150	20	Yorulma, Darbe, Mikroyapı, Sertlik	(Şahin 2005)	
AISI304 AISI8640	1800	2,4,6, 8,10	50	100	10	Sertlik, Mikroyapı, EDS, SEM	(Batı 2016)	
AISI304 BAKIR	-	8.5	75	160	20	Çekme, Mikroyapı, EDX, SEM, Sertlik	(Çi1 2009)	
AISI2205 Armour500	1800	4,6,8	60,80	120	6	Mikroyapı, EDS, Çekme	(Sarsılmaz 2017)	
Ç1030 %6AlSiCp	3000	4,6,8, 10,12	10,20	20,30	4	SEM, EDS, Çekme, Sertlik, Mikroyapı	(Güneş 2010)	
AA6061 AISI1018	4200	1	23	50,60	5	Mikroyapı, Sertlik, SEM, STEM	(Taban 2010)	
AISI304L AISI4340	1500 2000 2500	5	40	60	10	Mikroyapı, SEM, Mikrosertlik, Çekme	(Özdenir 2005)	
AISI304 AISI304	-	9	60	110	20	Mikroyapı, Sertlik Yorulma, Darbe	(Şahin 2007)	



**Çizelge 1.2** Malzeme çiftlerinin sürtünme kaynağına elverişliliği (Crossland 1971, Gül 2006).

Malzemeler	Alüminyum	Alüminyum Alaşımları	Pirinç	Bronz	Seramik	Bakır	Bakır-Nikel	Kurşun	Magnezyum Alaşımları	Monel	Nikel	Nikel Alaşımları	Nimonic	Gümüş	Gümüş Alaşımları	Karbonlu Çelik	Alaşımlı Çelik	Maraging Çelik	Paslanmaz Çelik	Tantalyum	Titanyum	Tungsten Karbür	Zirkonyum Alaşımları	
Alüminyum	■																							
Alüminyum Alaşımları		■																						
Pirinç			●																					
Bronz				■																				
Seramik	■				■																			
Bakır	■		●			■								■					■					
Bakır-Nikel							■																	
Kurşun								■																
Magnezyum Alaşımları	■								■															
Monel										■														
Nikel	■																							
Nikel Alaşımları												■												
Nimonic													■											
Gümüş														■										
Gümüş Alaşımları															●									
Karbonlu Çelik	■		●	■		■	■																	●
Alaşımlı Çelik	■		●								■													
Maraging Çelik																								
Paslanmaz Çelik	■		●																					●
Tantalyum																								
Titanyum	■																							●
Tungsten Karbür															●									
Zirkonyum Alaşımları	■																							■

- Kaynak için uygun
- Kaynak bağlantısında tam birleşme olmayabilir
- Daha önce denenmemiş veya hiç yok



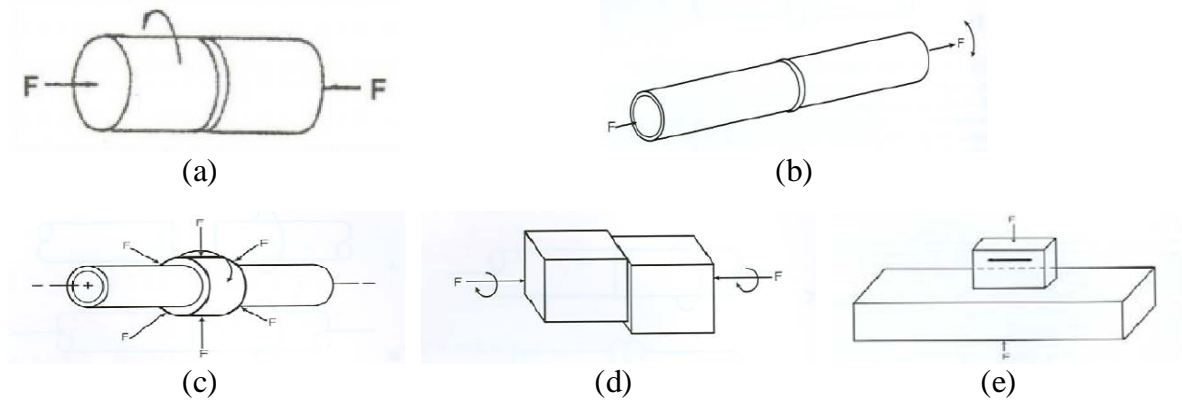
## **BÖLÜM 2**

### **SÜRTÜNME KAYNAĞI**

Tarihsel olarak sürece bakıldığında sürtünme kaynak yönteminin çıkış noktası 19. yy'ın sonlarına denk gelmektedir. Bevington 1891 tarihinde bu konu ile ilgili ilk patenti almış ve bunu sırasıyla 1924 yılında W.Richter, 1929 yılında H.Klopstock izlemiştir. Daha sonra 1956 yılında AJ. Chdikov iki metal çubuğu birleştirerek bilimsel ve ticari anlamda ilk adım atılmıştır. İlk sürtünme kaynağı 1961 yılında İngiltere'de üretilmiş ve 1962 yılında Sovyetler Birliği birçok fabrikasında kullanmıştır. Aynı yılda ABD'de Caterpillar Tractor Co. atalet kaynağı metotunu geliştirmiş ve bundan sonra atalet kaynağı Caterpillar tipi, konvansiyonel sürtünme kaynağı Rus tipi olarak anılmıştır. Günümüz endüstrisinde de sürtünme kaynağı kendisine geniş bir kullanım alanı bulmuş bir kaynak yöntemidir (Gül 2006, Sönmez 2007).

#### **2.1 YÖNTEMİN TARİFİ VE ÇEŞİTLERİ**

Sürtünme kaynağında temel olarak iki parçanın birleştirilmesi sağlanmaktadır. Birleştirme işlemi için malzemelerden en az birisinin hareket etmesi şarttır. Bu hareketler dairesel, doğrusal, açısız, radyal ya da yörüngesel şekilde olabilir. Şekil 2.1'de sürtünme kaynağında malzemelerin hareketleri gösterilmiştir.



**Şekil 2.1** Sürtünme kaynağında kullanılan malzemelerin hareket etme yönleri (Spindler 1994).

Şekil 2.1.a bu çalışmada kullandığımız ve en yaygın kullanım alanına sahip olan dairesel sürtünme kaynağıdır. Malzemeler birbirine yaklaştırılarak alından sürtünme başlar ve bu sürtünme sonucu ortaya çıkan ısı ile birlikte uygulanan basınç birleştirmeyi sağlar.

Şekil 2.1.b ise açısız sürtünme kaynağını göstermektedir. Literatüre bakıldığında hareket ile ilgili parçaların sadece birisinin belli açılar arası hareket ederek tam dönme olmadan basınç altında birleştirildiğinden bahsedilmektedir fakat konu ile alakalı uygulama alanında yeterince bilgi mevcut değildir (Spindler 1994, Ersözlü 2011, Uzkut 1999).

Şekil 2.1.c ile verilen hareket radyal sürtünme hareketidir. Genellikle boruların birleştirilmesinde kullanılır ve bu birleşme dönel bilezik aracılığıyla gerçekleşir. Uygulama alanı sınırlı olması nedeniyle literatürde pek sık rastlanılmamaktadır (Gül 2006).

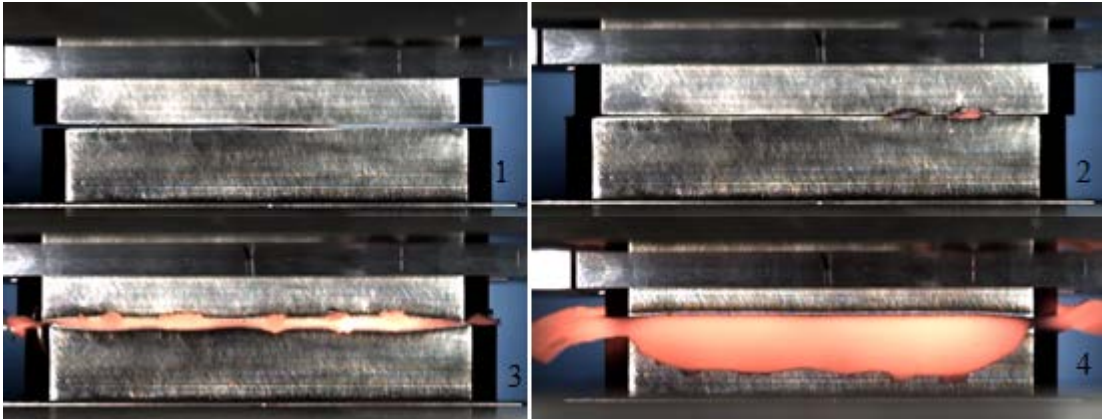
Şekil 2.1.d özellikle dairesel olmayan malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan yörüngesel sürtünme kaynağıdır. Malzemeler dönme hareketi yapmazlar. Hareket eden kısım sabit kısım üzerinde dairesel bir yörünge izleyerek birleşme işlemini tamamlar (Maalekian 2007).

Şekil 2.1.e doğrusal sürtünme hareketidir. Malzemelerden biri titreşim hareketi yaparak basınç altında sabit olan malzeme ile birleştirilir. Malzemelerin aksenal simetrik olma şartı yoktur. Uygulama olarak dairesel sürtünme kaynağı kadar olmasa da yaygın olarak kullanım alanı vardır (Maalekian 2007).



**Şekil 2.2** Dairesel sürtünme kaynağında işlem aşamaları.

Şekil 2.2’de ise klasik sürtünme kaynağı işlem aşamaları sırasıyla verilmiştir. İlk olarak aynaya bağlı olan parça dönme hareketi yapmaya başlar ve 2 numaralı kısımda görüldüğü gibi sabit parçaya yaklaşır. İlk temasın gösterildiği 3 numaralı kısımdan sonra ısınma artar, yığılma bölgesi oluşmaya başlar ve basınç etkisiyle birleşme gerçekleşir.



**Şekil 2.3** Doğrusal sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmiş titanyum.

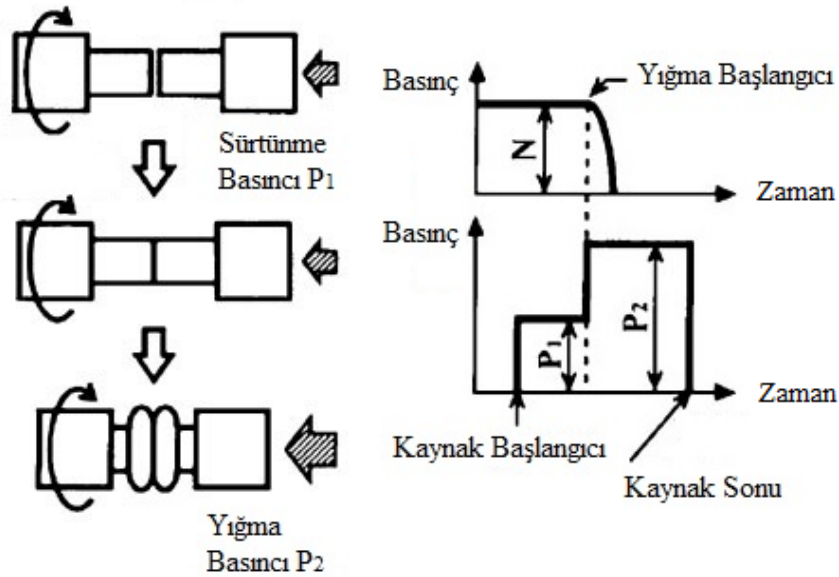
Şekil 2.3’te ise dairesel sürtünme yönteminden farklı olarak malzemelerin dönme hareketi yerine lineer hareket etmesidir. Kaynak aşamaları yine dairesel sürtünme kaynağı ile aynıdır.

Alt kısımdaki parça sabittir. Üstteki parça lineer titreşim hareketi yapar ve sabit parçaya aksenal kuvvet uygulanır. Isınma gerçekleştikten sonra basınç uygulanarak birleşme tamamlanır.

Sürtünme kaynağı hareket şekillerine göre ayrıldığı gibi genel olarak enerji kaynağına göre de sınıflandırılmıştır.

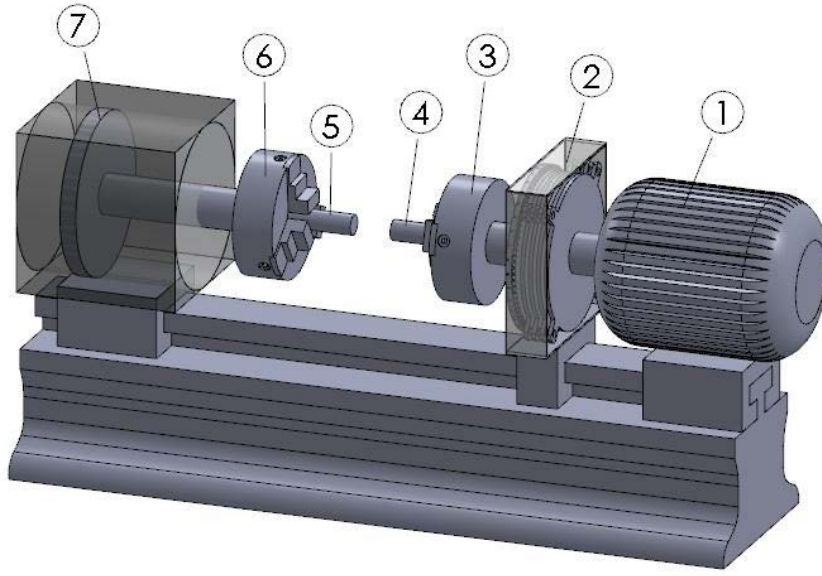
### 2.1.1 Sürekli Tahrikli (Klasik) Sürtünme Kaynağı

Eksenel olarak hizalanan iki malzemenin biri dönme hareketi yaparken diğeri doğrusal hareket ederek temas sağlanır. Tercih edilen devir sayısına göre sürtünme işlemi başladıktan sonra ısınma gerçekleşir ve istenilen sıcaklığa ulaşana kadar dönme işlemi devam eder. Dönme işlemi bir anda durdurulur ve doğrusal hareket eden malzeme dönen parçaya bir süre bastırılır. Şekil 2.4'te işlem aşamaları gösterilerek zamana bağlı basınç değişimi grafik şeklinde verilmiştir.

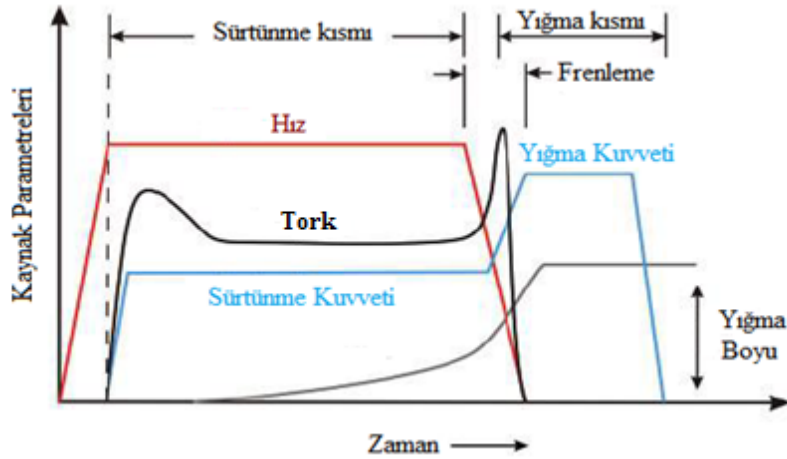


Şekil 2.4 Klasik sürtünme kaynağı işlem aşamaları (Basheer 2010).

Klasik sürtünme kaynağı makinesi şematik olarak Şekil 2.5'te ve kaynak esnasında zamana bağlı olarak parametrelerin değişimi Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



**Şekil 2.5** Klasik sürtünme kaynağı makinesi 1.Tahrik Motoru 2.Fren 3.Döner Ayna 4.İş Parçası 5.Sabit Parça 6.Sabit Ayna 7.Yığma Silindiri (Mercan 2013).



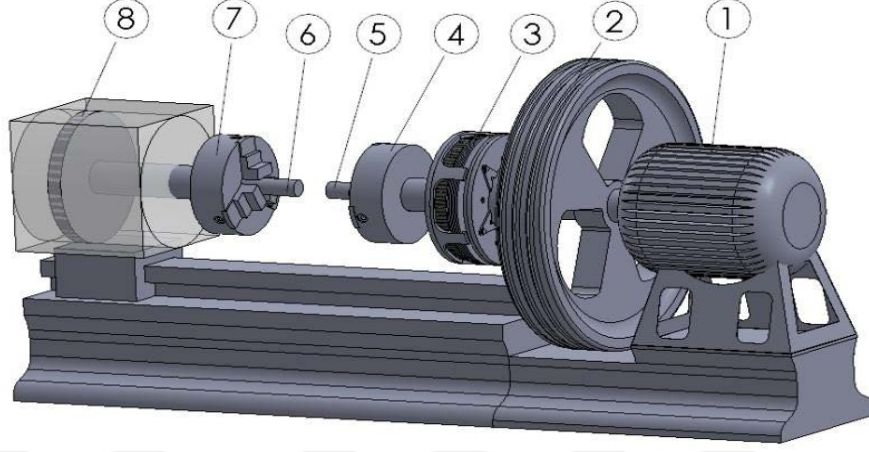
**Şekil 2.6** Klasik sürtünme kaynağında parametrelerin zamanla değişimi (Maalekian 2007).

### 2.1.2 Volan Tahrikli (Atalet) Sürtünme Kaynağı

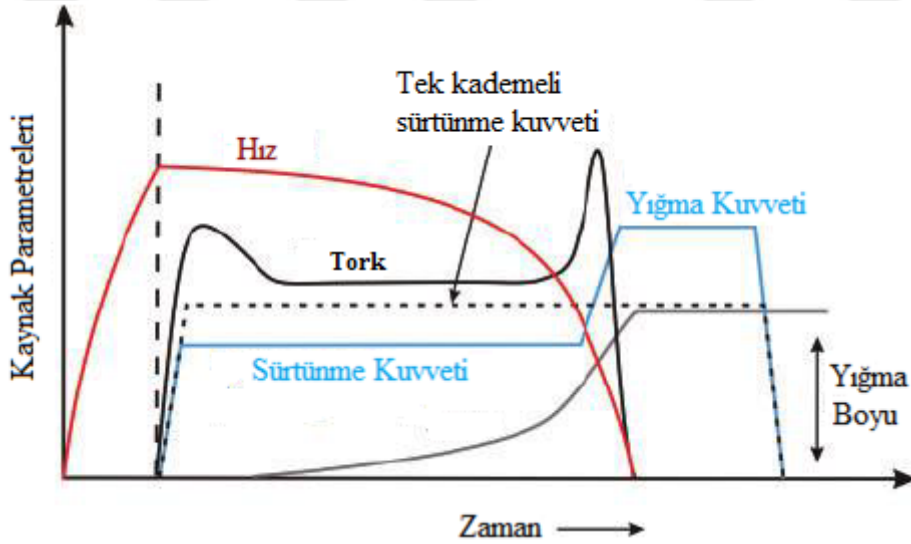
Klasik sürtünme kaynağı ile neredeyse aynı sisteme sahiptir. Fark olarak elektrik motoru ile dönen ayna arasında ek olarak bir volanın bulunmasıdır. Burada volan elektrik motorundan verilen enerjiyi alır ve motor devreden çıkar. Malzemeler temas ettikten sonra volanın



hareketi durmadan basınç artırılır ve volan durduktan sonra da bir süre devam eder. Volanlı sürtünme kaynağı makinesinin şematik gösterimi Şekil 2.7’de ve parametrelerin değişimi ise Şekil 2.8’de verilmiştir.



**Şekil 2.7** Volanlı sürtünme kaynağı makinesi 1.Tahrik Motoru 2.Volan 3.Döner Ayna 4.İş Parçası 5.Sabit Parça 6.Sabit Ayna 7.Yığma Silindiri (Mercan 2013).



**Şekil 2.8** Volanlı sürtünme kaynağında parametrelerin zamanla değişimi (Maalekian 2007).

Klasik sürtünme kaynağında temel kaynak parametrelerini devir sayısı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yağma basıncı ve yağma süresi oluştururken volanlı sürtünme kaynağında



temel parametreler devir sayısı, volan kütlesi, yığma basıncı ve yığma süresidir. Buradan anlaşılacağı üzere volanlı sürtünme kaynağı iki kademeli basınç için uygun değildir. Bu dezavantaja rağmen sürtünme süresinin ve enerji miktarının düşük olması, ilave fren tertibatına gerek olmayışı sistemin avantajlarındandır.

## **2.2 YÖNTEMDE KULLANILAN PARAMETRELER**

Sürtünme kaynağı için kullanılan yöntem kadar kontrol edilmesi gereken parametre sayısı da önemlidir. Literatüre bakıldığında kullanılan devir sayısı, sürtünme zamanı, sürtünme basıncı, frenleme, yığma süresi, yığma basıncı, yığma sonu bekleme zamanı bu parametrelerden olduğu gibi malzeme kısmı için de çap, geometri, kimyasal yapı, ön işlem durumu söz konusudur. Kaynak kalitesinin en ideal düzeyde olması için ise yapılan araştırmalar üç temel parametrenin önemli olduğunu göstermiştir. Bu parametreler;

1. Hız (Devir Sayısı)
2. Basınç (Sürtünme ve Yığma)
3. Zaman (Sürtünme ve Yığma)

### **2.2.1 Hız (Devir Sayısı)**

Devir sayısı malzemelerin birleşmesi ve sürtünmesi sırasında ısı oluşumunun sağlanması için büyük öneme sahiptir. Düşük olarak belirlenen devir sayılarında yeterli ısınma meydana gelmediğinden dolayı kaynak bölgesinde dengeli olmayan bir yığma meydana gelmektedir. Isınmanın fazla olması ve malzeme iç yapısında değişimler meydana getirmesi de istenen bir durum değildir. Bu nedenle sürtünme basıncının ve süresinin değerlerine dikkat edilmelidir. Literatürde çelikler için 1,2 – 1,8 m/s ve kaynak kalitesi için düşük devir sayıları tavsiye edilmiştir (Yılmaz 1993).

### **2.2.2 Basınç (Sürtünme ve Yığma)**

Sürtünme basıncı malzemelerin temas anında ara yüzeyde oluşan oksitleri elimine edebilecek, malzemelerin temas yüzeylerinin atmosfer ile bağlatısını kesecek ve malzeme ara yüzlerinde düzenli ısınmayı temin edecek şekilde seçilmelidir. Yığma basıncı ise malzemelerin akma sınırı ile orantılıdır. Yığma basıncı yüksek olarak belirlendiğinde aşırı sıcak şekillenme

meydana gelirken, düşük olarak alındığında kaynak yetersizliği ortaya çıkmaktadır (Mastek 2019).

### 2.2.3 Zaman (Sürtünme ve Yığıma)

Zaman malzemeye göre değişkenlik gösteren bir parametredir. Zaman seçimi yapılırken göz önünde bulundurulması gereken husus malzemenin yüzeyinden en kısa sürede kalıntıların ayrılması ve en kısa sürede kaynak ısısının oluşmasıdır. Gereğinden az ya da fazla seçilen süre kaynak özelliğini ve malzeme tüketimini etkilemektedir (Özcan 2013).

Parametreler malzeme çiftlerine göre değişkenlik göstermesine rağmen Ellis (1976) kendi çalışmalarına dayanarak bazı ampirik formüller vermiştir (Mercan 2013).

Devir sayısı için :

$$n = (1,2 - 6,0)10^4 / D \quad (2.1)$$

Bu denklemde “n” dönme hızını (dev/dk), “D” ise malzeme çapını (mm) ifade etmektedir. Özellikle düşük ve orta karbonlu çelikler için önerilmiştir.

Sürtünme basınç kuvveti ile ilgili olarak düşük alaşımlı ve alaşımsız çelikler için başlangıç güç değeri 4,8 kW/cm<sup>2</sup> olarak belirtilmiştir. Sürtünme basıncı yumuşak çelikler için 30 – 65 MPa, orta ve yüksek karbonlu çelikler için 70 – 210 MPa arasında değerler tavsiye edilmektedir (Mercan 2013, Ersözlü 2011).

Yığıma basınç değerleri ile ilgili olarak yumuşak çeliklerde 75 – 140 MPa arası, orta ve yüksek karbonlu çeliklerde ise bu aralık 100 – 420 MPa değerlerindedir.

Sürtünme süresini ise (Ellis 1976) malzeme çapına bağlı olarak formülize etmiştir (Mercan 2013).

$$t = 82,55.d \quad (2.2)$$

Bu formülde “t” sürtünme süresini (s), “d” ise malzeme çapını (mm) ifade etmektedir.

Yığıma süresi birleştirilen malzeme çapına göre değişmekle birlikte genel olarak sürtünme süresinin iki katı olarak tercih edilmelidir (Mercan 2013).

İdeal kaynak parametreleri aynı çapa sahip malzemelere göre Çizelge 2.1’de verilmiştir (Mercan 2013).

**Çizelge 2.1** Aynı çapa sahip malzemeler için ideal kaynak parametreleri (Mercan 2013).

Malzeme (Çap 20 mm)	Sürtünme Kuvveti (N/mm <sup>2</sup> )	Yığıma Kuvveti (N/mm <sup>2</sup> )	Sürtünme Süresi (s)	Yığıma Süresi (s)	Hız (m/s)
Alaşımız ve Düşük Alaşımızlı Çelikler	20 – 80	80 – 200	1 – 10	2 – 10	0,5 – 5
Yüksek Alaşımızlı Çelikler	40 – 100	120 – 400	3 – 12	2 – 10	0,5 – 5
Yüksek Sıcaklığa Dayanımlı Alaşımızlar	60 – 180	180 – 600	5 – 15	2 – 15	0,5 – 5
Hafif Metaller	10 – 80	20 – 250	1 – 8	2 – 5	0,5 – 4
Ağır Metaller	10 – 80	20 – 250	1 – 8	2 – 5	0,5 – 4

## 2.3 YÖNTEMİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

### 2.3.1 Avantajları

- Bu yöntemde kullanılan sarfedilen enerji miktarı diğer yöntemlere göre oldukça azdır.
- Ek olarak herhangi bir metal malzeme kullanım gerekliliği yoktur.
- Birleşme süresinin kısa olması zaman ve maliyet açısından önemli bir kazanımdır.
- Malzemelerde birleşme sırasında meydana gelen ısı tesiri altında kalan bölgenin (ITAB) dar olması içyapılarda olan değişimin de çok az veya yok olduğunu gösterir.
- Parametre kontrolü kolaydır, işlem otomatik gerçekleşir ve parçaların sökölüp bağlanması yöntemin pratikliğini ortaya koymaktadır.
- Yöntem temizdir. İşlem sırasında kıvılcım, gaz ve duman gibi etkiler görülmez.
- İşlem öncesi özel bir durum olmadığı sürece ön hazırlık yapma gereksinimi yoktur.
- Birleşme sırasında sürtünme meydana geldiğinden dolayı oksit, kir, pas gibi yabancı maddeler malzeme yüzeylerinden ayrılır.

- Kaynak bölgesinin dayanım değeri birleştirilen parçaların dayanım değerine eşit ya da uygun parametreler seçilmesi durumunda yüksek olabilmektedir.
- Kaynak işlemi sırasında oluşan ısı malzemelerin ergime derecelerinin altında olduğu için farklı metallerin birleşimi gerçekleşmektedir.
- Kaynak dikişi, işlem sırasında gerçekleşen yığılma ile havanın zararlı etkilerinden korunur (Gül 2006).

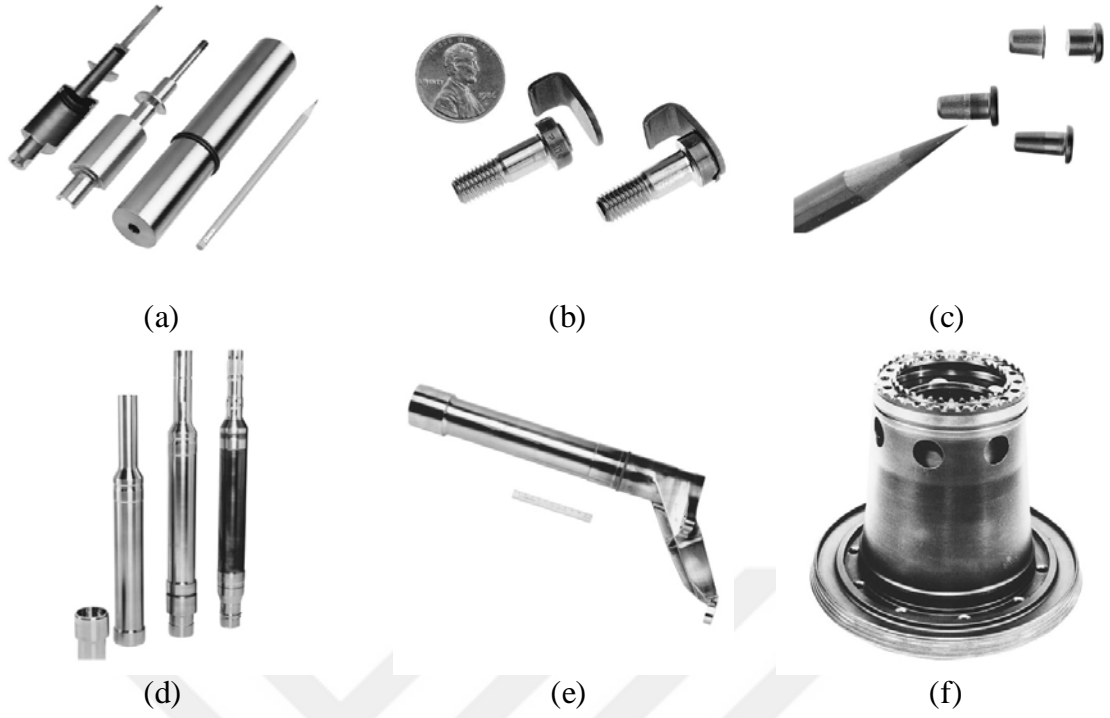
### 2.3.2 Dezavantajları

- Parça geometrileri işlemi sınırlandırmaktadır. Genellikle silindirik malzemeler kullanılır.
- Büyük parçalarda ısı dağılımının homojen olmaması birleşme işlemi zorlaştırır. Ayrıca yüksek güç ve basınç değerleri gerektirir.
- Kurulum maliyeti yüksektir.
- Birleştirilen malzemelerde kısalma meydana gelmektedir.
- Birleştirilen malzemelerin farklı açısal pozisyon almasını sağlamak için yüksek maliyetli değişikliklerin olması gerekmektedir (Mercan 2013).
- Kaynak için kullanılan malzemelerin ısı ve basınca karşı dayanıklı olması gerekir.

## 2.4 YÖNTEMİN UYGULAMA ALANLARI

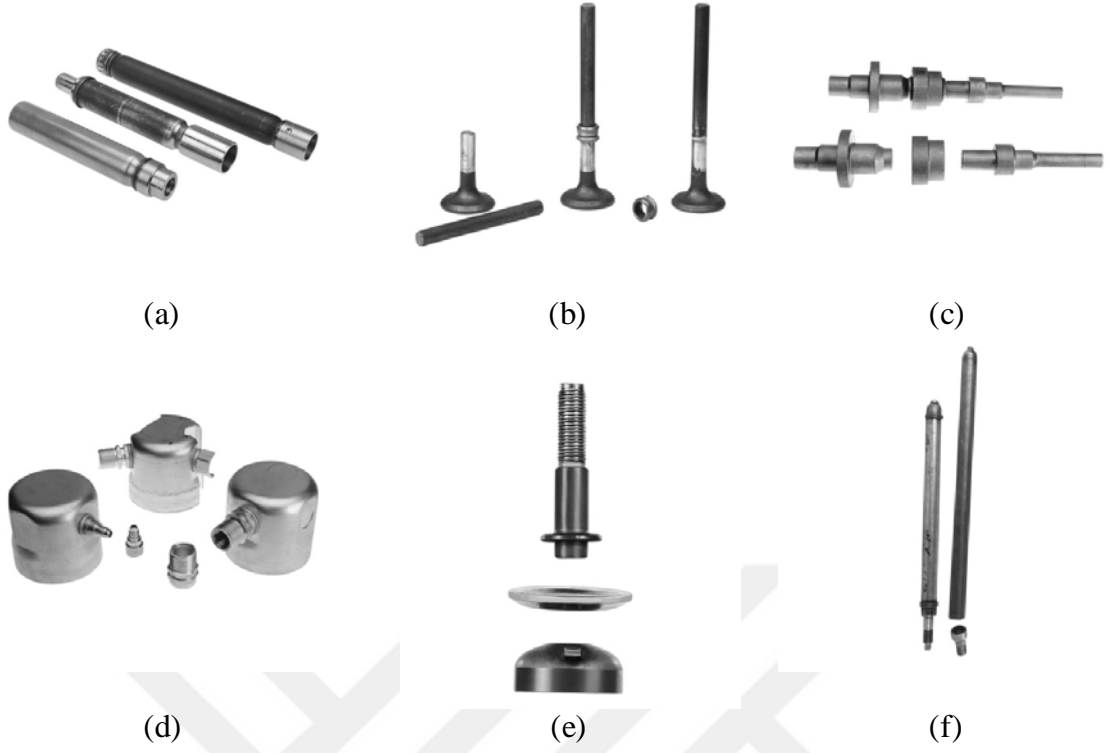
Farklı malzeme kombinasyonlarının birleştirilmesine imkan veren sürtünme kaynak yöntemi endüstriyel anlamda kendisine geniş kullanım alanı bulmuştur. Havacılık, uzay, savunma, otomotiv, elektrik, elektroteknik ve takım endüstrilerinde bu yöntem uygulanmaktadır (Ersözlü 2011).

Özellikle diğer kaynak yöntemleriyle birleştirilemeyen malzeme kombinasyonlarının sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve yöntemin ekonomik olması endüstride tercih edilme nedeni olmuştur. Günümüzdeki sürtünme kaynak kapasitesi ile 0,6 – 200 mm çapa kadar makine parçaları birleştirilebilir, bu değer çelik borular için 900 mm çapa kadar çıkabilir ve kalınlık değeri ise 7 mm'dir (Arıcı 2013). Şekil 2.9'da havacılık sektöründe kullanılan ve sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş bazı parçalar gösterilmiştir.



**Şekil 2.9** Havacılık sektöründe kullanılan bazı parçalar a) Paslanmaz çelik kullanılarak birleştirilen uçak pompası için kullanılan hafif piston, b) Nikel bazlı uçak kancası civataları, c) Titanyum uçak perçinleri, d) Nikel bazlı askeri jet motoru fan mili, e) Çelik – yüksek karbon alaşımı iniş takımı bileşeni f) Nikel bazlı jet motoru bileşeni (MTI 2019).

Şekil 2.10’da ise otomotiv endüstrisinde kullanılan aynı yöntemle birleştirilmiş bazı parçalar gösterilmiştir.



**Şekil 2.10** Otomotiv sektöründe kullanılan bazı parçalar a) Çelik – düşük karbonlu, çelik – yüksek karbonlu yan hava yastığı şişiricileri, b) Nikel bazlı, çelik – yüksek karbon alaşımı motor egzoz valfleri, c) Çelik – düşük karbonlu, çelik – yüksek karbonlu şanzıman giriş mili, d) Alüminyum alaşımlı klima akümülatörü, e) Çelik – düşük karbonlu amortisör taban kabı, f) Çelik – düşük karbonlu ön süspansiyon destekleri (MTI 2019).

Takım endüstrisinde ise genel olarak talaşlı imalatta kullanılan matkap uçları, raybalar, freze çakıları, çelik kalemler ve takım çeliklerinin karbonlu çeliklerle birleştirilmesinde uygulanır. Elektrik ve elektroteknik endüstrisinde ise lehim uçları, alıcı kameralar, gaz analiz cihazları, geçiş parçaları için uygulanır. Ayrıca sürtünme kaynağının plastik deformasyona maruz kalmış, arızalanmış parçalar içinde tarım, petrol, deniz endüstrilerinde de onarım amaçlı uygulama alanları bulunmaktadır (Mercan 2013, Arıcı 2013, Özcan 2013, Dinç 2006).

## BÖLÜM 3

### DİNAMİK KARAKTERİZASYON

#### 3.1 TİTREŞİMİN TANIMI

Titreşim, belli bir zaman aralığında kendini tekrar eden hareket olarak ifade edilebilir. Bazı sistemlerde titreşim genel olarak istenmeyen bir durumdur ve özellikle mühendislik alanında gürültü, aşınma, dayanım azalması, yüksek gerilmeler gibi ciddi sorunlara neden olmaktadır. Bazı sistemlerde ise titreşim hareketinin olması gerekmektedir. Örnek olarak konveyörler, müzik enstrümanları, darbeli matkaplar bu sınıfa girmektedir.

Titreşim hareketinin nedeni bir dış kuvvete karşı verilen cevap hareketi olmasıdır. Bu dış kuvvet darbe, deprem olabileceği gibi dönen sistemlerdeki dengesizlik veya motorlarda gidip gelen kütleler de olabilir.

Mühendislik tasarımları için titreşimin ölçülmesi, kontrol edilmesi ve analizinin doğru olarak yapılabilmesi önem arz etmektedir. Sistemin titreşime maruz bırakıldığında verdiği yanıtlar gerekli önlemlerin alınmasına yardımcı olmaktadır. Aksi takdirde titreşen sistemlerde çalışan parçalarda erken yorulma, çatlama, kırılma gibi durumlar ortaya çıkar ve daha büyük zararlar meydana gelir. Bu artış sistemin veya parçanın istenilen şekilde çalışmasını engeller.

#### 3.2 TİTREŞİMLE İLGİLİ TEMEL TERİMLER

Titreşim hareketinde tekrarlama işleminin gerçekleştiği zaman aralığına periyot ( $T$ ) denir. Birim zamandaki tekrarlanma sayısı ise frekans ( $f$ ) anlamına gelir. Frekans ile eğer bir saniyedeki tekrarlama ifade ediliyorsa birimi Hertz (Hz), bir dakika içindeki tekrarlama ifade ediliyorsa birimi RPM (revolution per minute) olarak alınır ( $Hz = RPM / 60$ ).

$$f = 1/T \quad (3.1)$$

Deplasman, harekette yer değiştirme miktarı olarak tanımlanır. Birimi mm yada mikron olarak alınabilir.

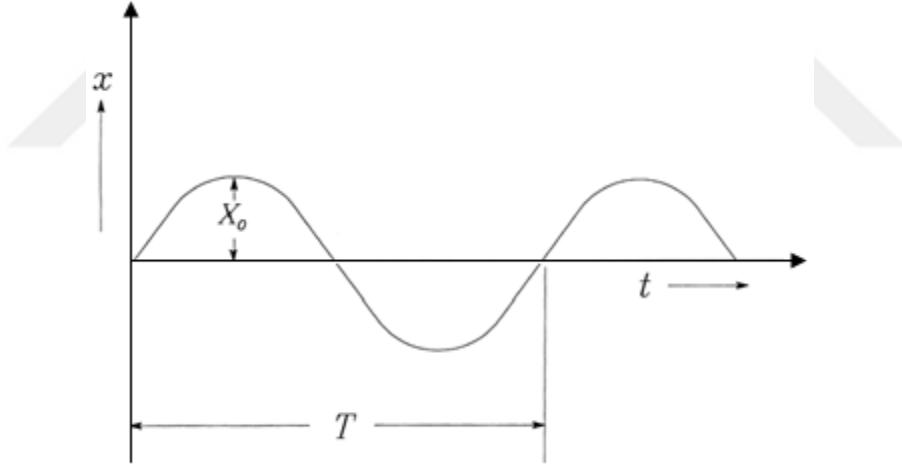
Hız, yer değiştirmenin zaman bağlı değişimini ifade etmektedir. Genel olarak birimi m/s, mm/s, mikron/s, inç/s, mil/s olabilmektedir.

İvme, hızın zamana göre değişimi anlamına gelir. Birimleri ise  $m/s^2$ ,  $mm/s^2$ ,  $mikron/s^2$ ,  $inç/s^2$  olabilmektedir.

Açısal frekans, dönme hareketi yapan cismin birim zamanda aldığı yolun radyan cinsinden ifadesidir ve birimi rad/s'dir.

$$\omega = 2\pi f \quad (3.2)$$

Titreşim hareketinin en basit şekline harmonik hareket denmiştir. şekil 3.1'de basit harmonik hareketin grafiği verilmiştir.



şekil 3.1 Harmonik Hareket Grafiği

Grafikte gösterilen X ifadesi yer değiştirme genliğini veya deplasmanı göstermektedir.  $X_0$  ise hareketin maksimum genlik değeridir. Verilen hareketin zamana bağlı denklemi řu şekildedir:

$$X = X_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

Deplasman denkleminin zamana göre birinci türevi titreşim hareketinin hızını vermektedir.

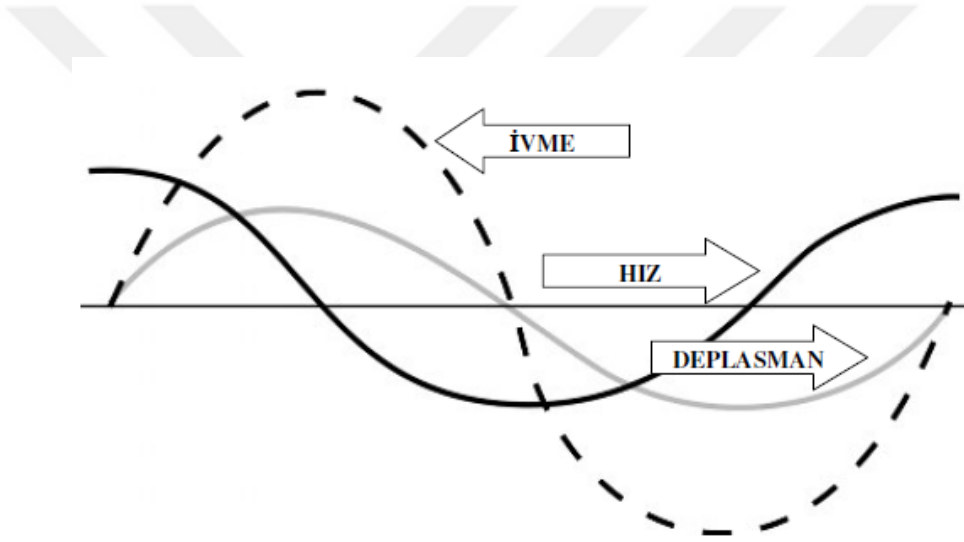


$$\frac{dX}{dt} = V = X_o \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (3.4)$$

Aynı şekilde hız denkleminin zamana göre birinci türevi de titreşim hareketinin ivmesini vermektedir.

$$\frac{dV}{dt} = a = -X_o \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \quad (3.5)$$

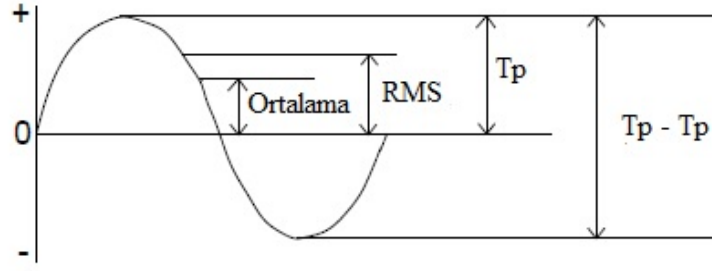
Denklemlere bakıldığında deplasman ve ivme sinüs eğrisi çizerken hız kosinüs eğrisi çizmektedir. Şekil 3.2'de bu eğriler gösterilmiştir (Baykara 2009).



Şekil 3.2 Deplasman, hız ve ivme eğrileri (Baykara 2009).

### 3.2.1 Genlik Değerleri

Genlik, titreşimin şiddeti olarak tanımlanmaktadır. Eğri grafiğinde tepe ile sıfır noktası arasındaki uzaklıktır. Şekil 3.3'te gösterilen genlik değerleri tepeden tepeye, sıfırdan tepeye, ortalama ve RMS olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3.3 Genlik Değerleri (Erol 2015).

Tepeden tepeye deplasman mesafesi ( $T_p - T_p$ ) parçanın titreşim sırasında maksimum ve minimum sınır koşulları arasındaki aldığı mesafedir. Sıfırdan tepeye ( $T_p$ ) olan mesafe yani sıfır noktasından tepe noktasına olan uzaklık maksimum titreşim değerini ifade eder.

Ortalama, bir sinyalin  $t_1 - t_2$  zaman aralığında aldığı değerlerin ortalamasıdır (Erol 2015).

RMS (Root Mean Square) bir sinyalin  $t_1 - t_2$  zaman aralığında aldığı değerlerin karelerinin ortalamasının kareköküdür (Erol 2015).

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (3.6)$$

Genlik değerlerinin birbirlerine dönüşümü mümkündür (Baykara 2009).

$$Ortalama = 0.637 x Tepe = 0.9 x RMS \quad (3.7)$$

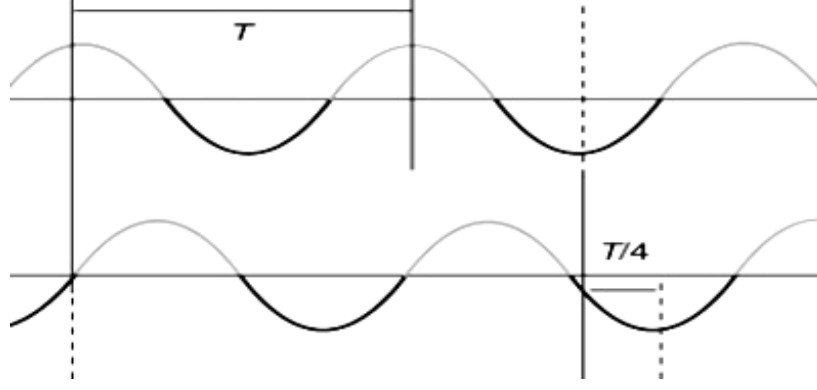
$$Tepe = 1.414 x RMS = 1.57 x Ortalama \quad (3.8)$$

$$RMS = 0.707 x Tepe = 1.11 x Ortalama \quad (3.9)$$

$$Tepeden Tepeye = 2 x Tepe \quad (3.10)$$

### 3.2.2 Faz Kavramı

Şekil 3.4'te gösterildiği gibi aynı genlik ve frekansa sahip iki titreşim dalgasının arasındaki gecikme zamanıdır. Eksen kaçıklığı, gevşeklik gibi makine arızalarında önem arz etmektedir (Baykara 2009).



Şekil 3.4 Faz Gecikmesi (Baykara 2009).

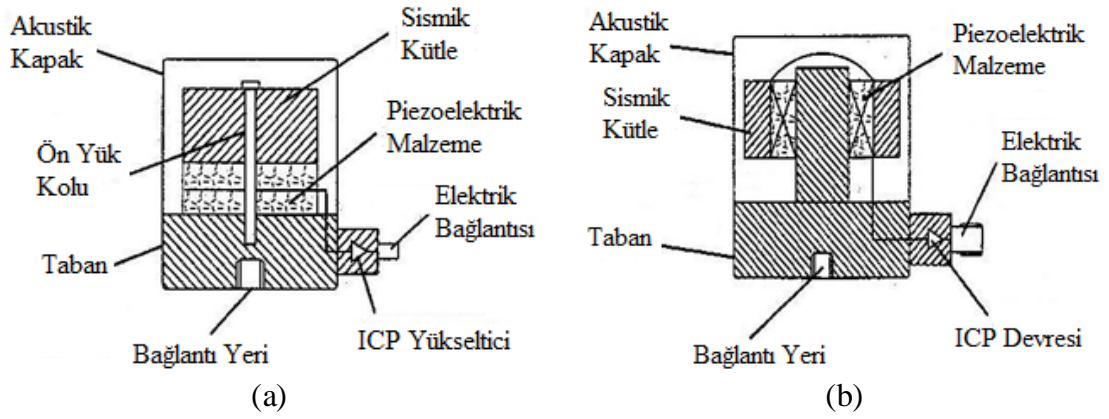
### 3.2.3 Rezonans Kavramı

Titreşim hareketi yapan her sistem doğal frekans değerine sahiptir. Titreşimin kaynağı herhangi bir dış kuvvet uygulamadan olabileceği gibi belli bir kuvvet altında da sistem titreşime maruz kalabilir. Uygulanan kuvvetin frekansı sistemin kendi doğal frekansı ile aynı değerde olursa rezonans durumu ortaya çıkmaktadır. Bu durum sistem genliğinin sınırsız artışı anlamına gelmektedir. Doğal frekansı bilinmeyen sistemlerde rezonans olayı büyük zararlara yol açabilmektedir.

### 3.3 TİTREŞİMİN ÖLÇÜLMESİ

Titreşimlerin ölçülmesinde genellikle hız, ivme ve deplasman ölçerler kullanılmaktadır. Bu titreşim ölçerlerin temel görevi titreşim verilerini toplamak ve bu verileri elektrik akımı yada voltaja dönüştürmektir.

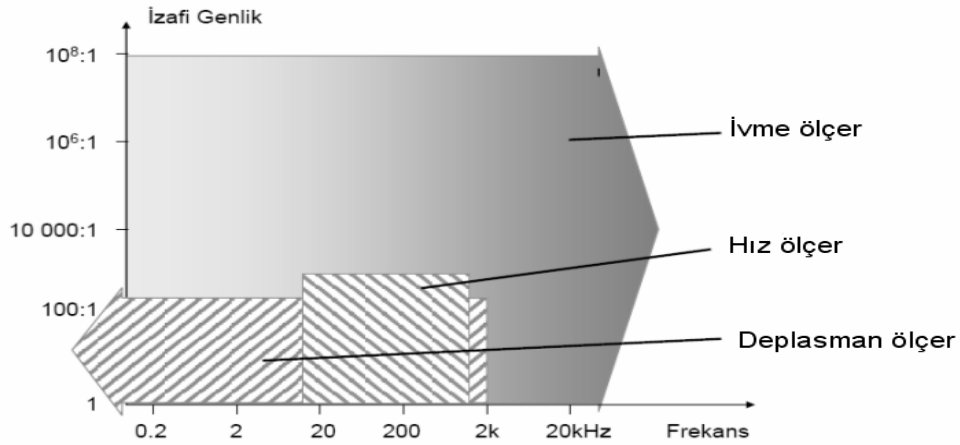
İvme ölçerler kullanım olarak diğer titreşim ölçerlere göre daha yaygındır. Ufak ve hafif olması, daha geniş frekans aralığının olması tercih edilmesinde önemli özelliklerdir. Şekil 3.5'te verilen kesme ve baskı tipi en çok kullanılan iki ivme çeşididir (Karadayı 2011).



Şekil 3.5 İvme Ölçerler a) Baskı Tipi, b) Kesme Tipi (Karadayı 2011).

İvme ölçerlerin çalışma performanslarına etkisi olan faktörler voltaj hassasiyeti, frekans ve ağırlığıdır. İvme ölçerler yapılarındaki piezoelektrik elemanlar sayesinde titreşim hareketini algılayarak yerleştirildikleri yüzeyin titreşim ivmesi ile orantısal olarak şarj üretir. İvme ölçerlerin rezonans frekans aralığı yüksek olduğu kadar frekans ölçüm aralığı da genişlemektedir (Karahana 2005).

Şekil 3.6'da hız, ivme ve deplasman ölçerlerin çalışma aralığı verilmiştir (Karahana 2005).

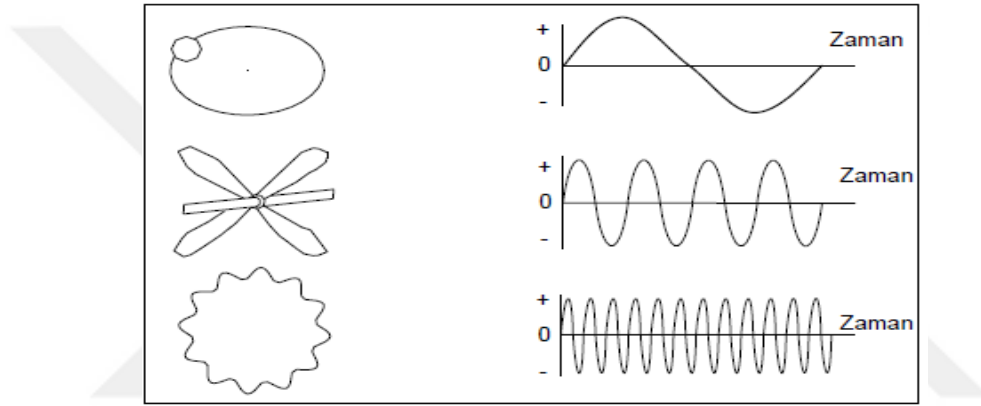


Şekil 3.6 Titreşim ölçerlerin frekans aralığı (Karahana 2005).

### 3.4 FREKANS TANIM TEKNİKLERİ

#### 3.4.1 Dalgaform Görüntüleme (Zaman Bölgesi)

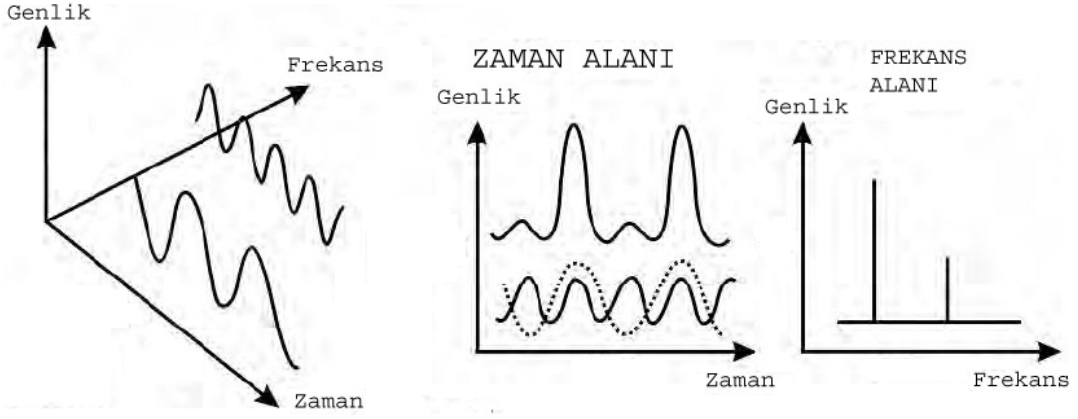
Bu görüntüleme tekniğinde titreşim sinyalleri tam zamanlı olacak şekilde gerçek değerleri ile görüntülenir. Çalışmaya bağlı şartlarda değişimlerin analizinde zaman domeninin kullanımı faydalı olmasına rağmen bu verileri kullanmak kolay değildir. Titreşime sebep olan bütün etkenler toplam olarak hesaplandığı için sistemden alınan anlık deplasman değerinde herhangi bir titreşim kaynağının etkisini bulmak zor olmaktadır. Şekil 3.7’de farklı yapıların dalgaform grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Dalgaform Grafikleri (Erol 2015).

#### 3.4.2 Spektrum Görüntüleme (Frekans Bölgesi)

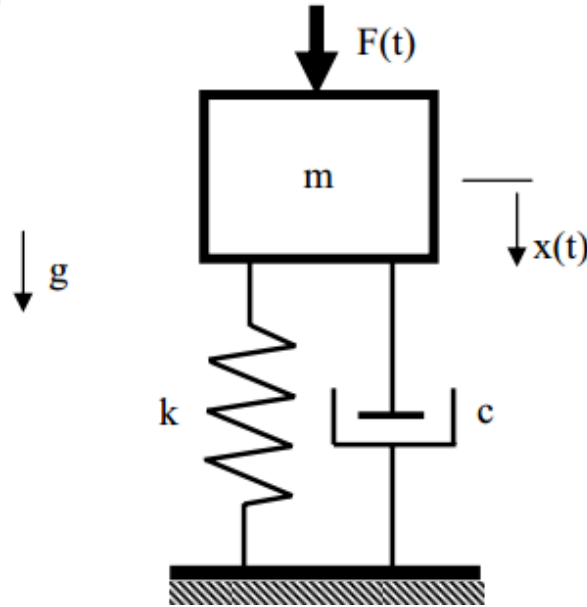
Titreşim yapan bir sistemde ivmeölçerlerin ölçtüğü sinyaller karmaşık bir yapıdadır. Joseph Forier tarafından geliştirilen FFT tekniğinin temelinde sistemden alınan bu karmaşık sinyallerin basitleştirilmesi vardır. Bu basitleştirme işleminde zaman düzlemindeki eğrilerin frekans düzlemindeki eğrilere dönüştürülmesi sağlanmıştır. Şekil 3.8’de FFT dönüşümü gösterilmiştir (Baykara 2009).



Şekil 3.8 FFT Dönüşümü (Baykara 2009).

### 3.5 DOĞAL FREKANS HESABI VE FOURIER DÖNÜŞÜMÜ

Bir sistemin modal analizi yapılırken doğal frekans değerleri hesaplanmaktadır. Şekil 3.9'da verilen basit bir kütle – yay sisteminden yola çıkarak sönümsüz ve serbest titreşimler için doğal frekans değerleri hesaplanmıştır (Şenveli 2018).



Şekil 3.9 Basit kütle – yay sistemi (Şenveli 2018).

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU(t) = F(t) \quad (3.11)$$

M : Kütle Matrisi

C : Sönüm Matrisi

K : Rijitlik Matrisi

U : Genelleştirilmiş yer değiştirme vektörü

$\dot{U}$  : Yer değiştirme vektörünün birinci türevi (Hız vektörü)

$\ddot{U}$  : Yer değiştirme vektörünün ikinci türevi (İvme vektörü)

$F_{(t)}$  : Genelleştirilmiş kuvvet vektörü

Sistem sönümsüz kabul edildiğinden  $C=0$  ve titreşim hareketi serbest kabul edildiğinden  $F_{(t)}=0$  değerindedir. O halde denklem:

$$M\ddot{U} + KU(t) = 0 \quad (3.12)$$

(3.12) numaralı homojen denklemin çözümü:

$$U = \varphi \cos(\omega t - \theta) \quad (3.13)$$

$$\ddot{U} = -\varphi\omega^2 \cos(\omega t - \theta) \quad (3.14)$$

Denklem (3.13) ve (3.14), denklem (3.12)'de yerine konulursa:

$$-M\varphi\omega^2 \cos(\omega t - \theta) + K\varphi \cos(\omega t - \theta) = 0 \quad (3.15)$$

$\cos(\omega t - \theta) \neq 0$  durumu için çözüme gidilirse:

$$[-\omega^2 M + K]\varphi = 0 \quad (3.16)$$

eşitliği sağlanır. Bu denklem n adet homojen denklemi ifade eder. Denklem sisteminin determinantının sıfıra eşit olması durumunda bir çözüm vardır.

$$\Delta = |-\omega^2 M + K| = 0 \quad (3.17)$$

(3.17) denklemi karakteristik denklemdir.  $\omega^2 = \lambda$  eşitliği ile determinant polinom şeklindedir.

$$\Delta = 0 = a_0 + a_1 \omega^2 + a_2 \omega^4 + a_3 \omega^6 + \dots + a_n \omega^{2n} \quad (3.18a)$$

$$\Delta = 0 = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \lambda^i) \quad (3.18b)$$

$\omega$ 'lar sisteme ait doğal frekanslardır.  $\omega = \pm\sqrt{\lambda}$  iken  $\{\lambda_k\}_{k=1,2,\dots,n}$  veya  $\{\pm\omega_k\}_{k=1,2,\dots,n}$  olacak şekilde n adet kök vardır. Herbir doğal frekans değeri denklem (3.16)'yı sağlamaktadır.

Frekans cevap fonksiyonu, herhangi bir sisteme uygulanan kuvvetin sistemde meydana getirdiği değişimdir. Bu değişim deplasman, hız ya da ivme olabilir.

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (3.19)$$

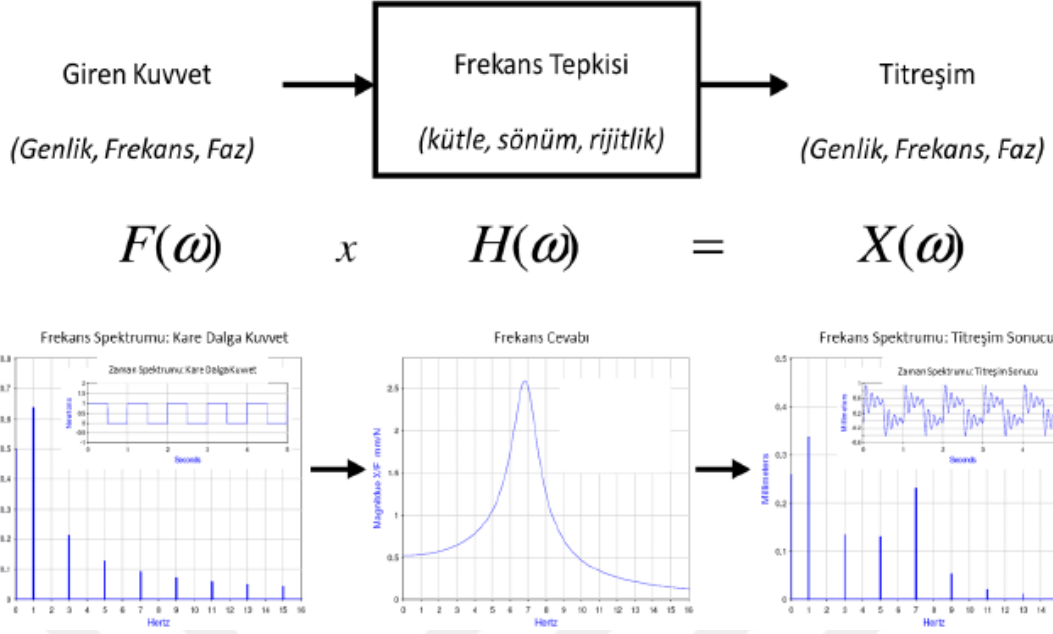
$$\omega = 2\pi f \quad (3.20)$$

Denklem (3.19) Fourier dönüşümleri yapılarak yazılırsa:

$$H(f) = \frac{X(f)}{F(f)} \quad (3.21)$$

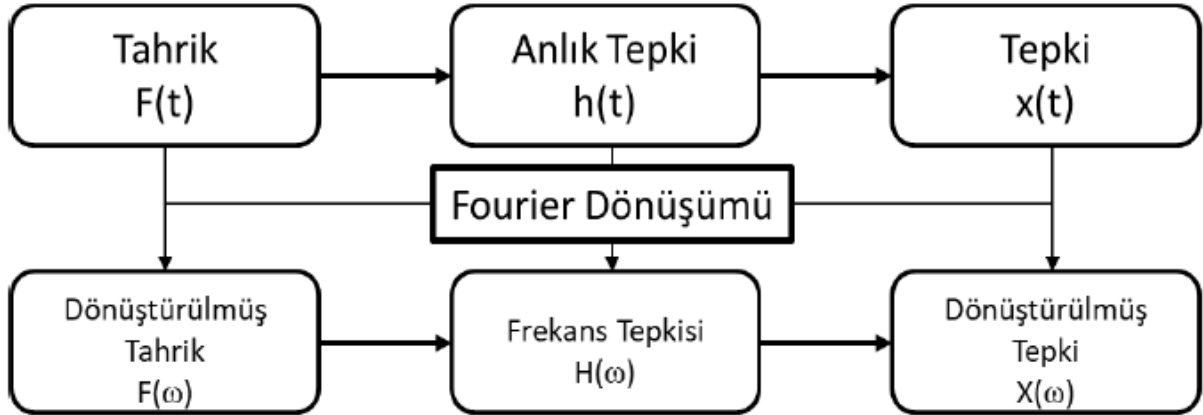
Şekil 3.10'da frekans tepkisi ifadeleri ve cevap fonksiyonu gösterilmiştir.





**Şekil 3.10** Frekans cevap fonksiyonu (Şenveli 2018).

Şekil 3.11’de frekans cevap fonksiyonu ile Fourier dönüşümü birlikte gösterilmiştir (Şenveli 2018).



**Şekil 3.11** Frekans cevap fonksiyonu ve Fourier dönüşümü (Şenveli 2018).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (3.22)$$

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (3.23)$$

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (3.24)$$

Birim darbe etkisi için bu fonksiyonları açarsak:

$$\begin{aligned} \delta(t-a) &= 0 & t &\neq a \\ \delta(0) &= \infty & t &= a \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-a) dt = 1 \quad (3.26)$$

Denklem (3.26)'da  $\delta(t-a)$  ifadesi herhangi bir zaman fonksiyonu ile çarpılırsa  $t=a$  anı dışında sonuç sıfır olacaktır.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t-a) dt = f(a) \quad 0 < a < \infty \quad (3.27a)$$

$$\hat{F} = F dt = mdv \quad (3.27b)$$

$m$  kütesine etki eden kuvvet  $\hat{F}$ , doğal frekansın  $\omega_n$  olduğu sönümsüz bir sistemin tepkisi:

$$X = \frac{\hat{F}}{m\omega_n} \sin \omega_n t = \hat{F}h(t) \quad (3.28a)$$

$$h(t) = \frac{1}{m\omega_n} \sin \omega_n t \quad (3.28b)$$

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-\omega i t} dt \quad (3.28c)$$

Frekans cevap fonksiyonu titreşim analizlerinde yaygın bir kullanım alanına sahiptir.

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada AA6013 ile AA7075 alüminyum malzemelerinin sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirilmesi incelenmiştir. Birleştirilen numunelerin doğal frekans değerleri elde edilerek kaynak kalitesi üzerindeki değişimleri belirlenmiştir. Daha sonra numunelerin kaynak bölgesinden kesit alınarak SEM analizi ile mikroyapıları elde edilmiş ve sertlik değişimleri incelenmiştir. Literatürde olan çalışmalar ışığında sonuçlar değerlendirilmiştir.

#### 4.1 DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER

Alüminyumlar, AA6013 3000x33 mm'lik ve AA7075 3000x35 mm'lik dairesel çubuk şeklinde ticari olarak temin edilmiştir. Kullanılan malzemelerin Çizelge 4.1'de mekanik özellikleri ve Çizelge 4.2'de kimyasal özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 4.1** AA6013 ve AA7075 mekanik özellikleri.

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)
AA6013-T6	390	360	6	110 – 120
AA7075-T6	581	522	7.8	150

**Çizelge 4.2** AA6013 ve AA7075 kimyasal özellikleri.

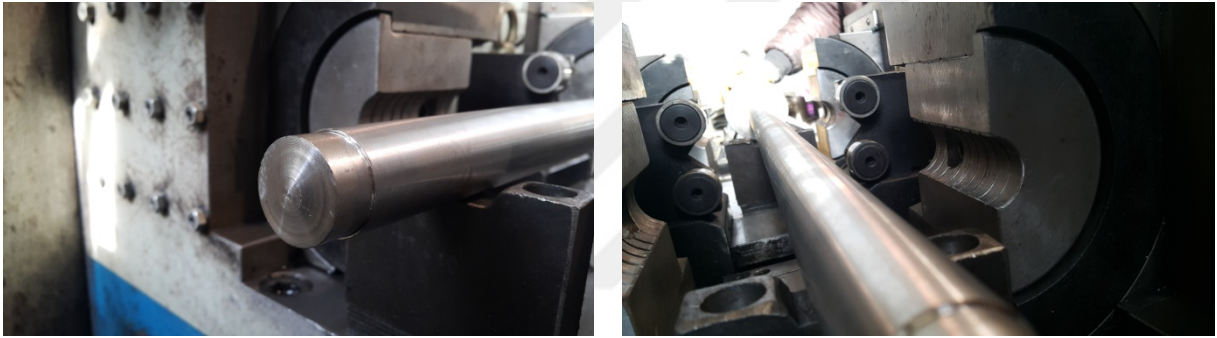
Malzeme	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ti %	Cr %	Al %	Diğer
AA6013-T6	0,89	0,47	0,85	0,50	1,02	0,15	0,01	0,02	96,08	0,01
AA7075-T6	0,08	0,12	1,27	0,04	2,34	5,64	0,05	0,20	Kalan	-

Temin edilen alüminyumlar aynı çapa getirilmek ve yüzeylerinin temizlenmesi için torna tezgahına bağlanarak çapları 32 mm olacak şekilde işlenmiştir. Tezgâh kapasitesine göre Şekil 4.1'de görüldüğü gibi AA6013 eşit uzunluklara (60 mm) bölünerek aynaya bağlanmıştır. Malzeme sarfiyatını önlemek açısından Şekil 4.2'de ise AA7075 malzemesi

kaynak makinesine uzun olarak bağlanmıştır. Sürtünme kaynak işlemleri bittikten sonra Şekil 4.3'teki gibi eşit uzunlukta (120 mm) kaynaklı numuneler elde edilmiştir.



**Şekil 4.1** Kısa malzemenin (AA6013) sürtünme kaynak makinesine bağlanması.



**Şekil 4.2** Uzun malzemenin sürtünme kaynak makinesine bağlanması.



**Şekil 4.3** Kaynaklı numunelerin eşit boyda kesilmesi.

#### 4.1 SÜRTÜNME KAYNAK PARAMETRELERİ

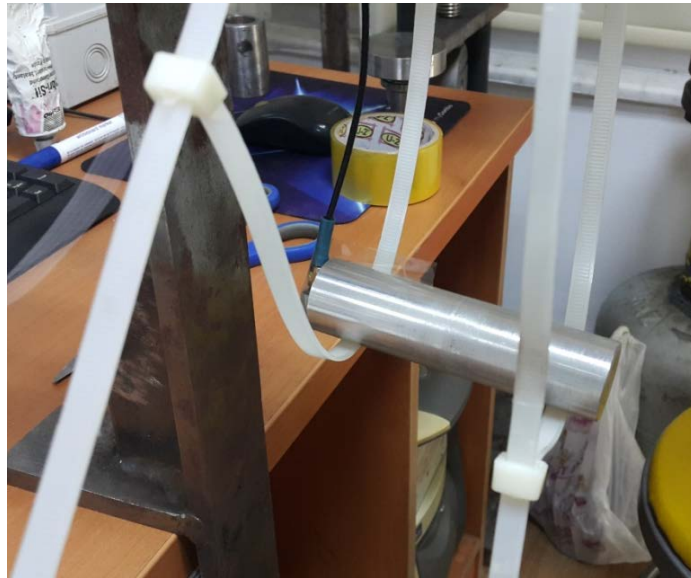
Alüminyum malzemelerin sürtünme kaynak parametreleri literatür çalışmaları incelenerek, yapılan ön deneylere, firma tecrübesi ve tezgâh kapasitesine göre en uygun şekilde belirlenmiştir. Çizelge 4.3'te her bir numune için sürtünme kaynak parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.3 Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri.

Numune No	Devir Sayısı (dev/dk)	Yığıma Basıncı (MPa)	Yığıma Süresi (s)	Sürtünme Süresi (s)	Sürtünme Basıncı (MPa)
1	1000	1	5	10	1
2	1000	3	5	10	1
3	1000	5	5	10	1
4	1000	7	5	10	1
5	2000	1	5	10	1
6	2000	3	5	10	1
7	2000	5	5	10	1
8	2000	7	5	10	1

#### 4.2 MODAL ANALİZ

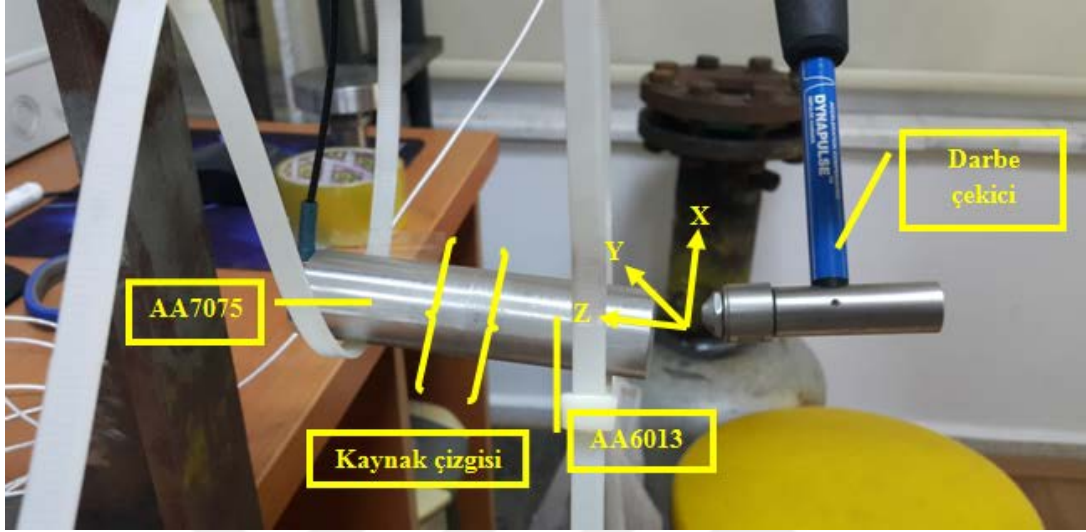
Birleştirilen numunelerin modal analiz yöntemiyle doğal frekans değerleri ve mod şekilleri elde edilmiştir. Şekil 4.4'te gösterildiği gibi numunenin X eksenine doğrultusunda ivmeölçer bağlanarak iki ucu serbest mesnetli olacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 4.4 Numunelerin deney düzeneğine yerleştirilmesi.

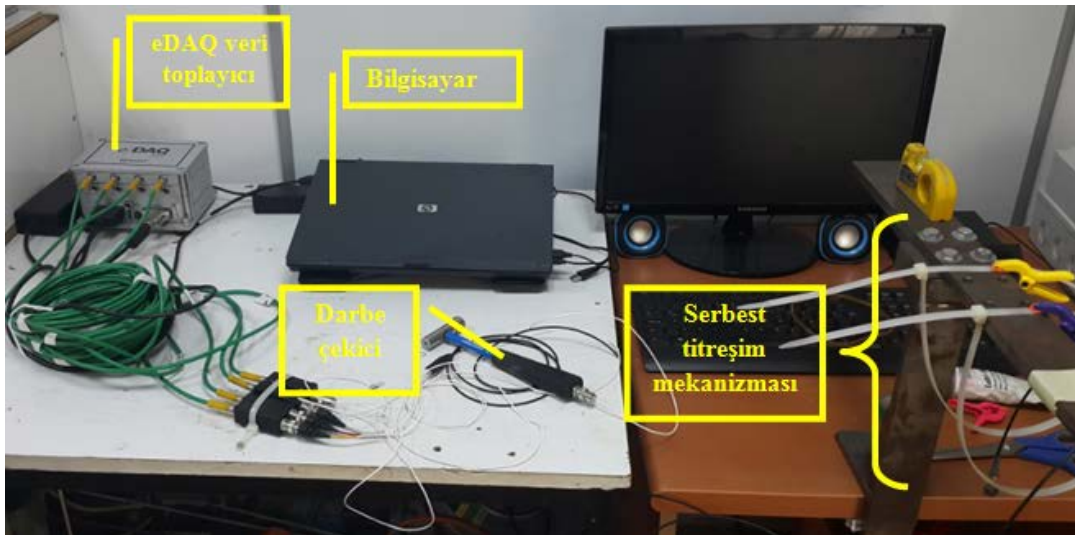


İncelenecek numune dışarıdan bir kuvvet ile uyarılmış ve ivmeölçerlerden alınan ivme değerleri doğrultusunda oluşacak frekans cevap fonksiyonları yardımıyla sistemin doğal frekans değerleri belirlenmiştir. Genelde modal analizde en çok kullanılan ve uygulanabilirliği kolay olan yöntem “Gezici Çekiç Darbe Testi” dir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Darbe çekici ile uyarma.

Zaman alanında elde edilen değerler FFT aracılığıyla (Fourier Dönüşümü) frekans alanına dönüştürülür. Bu dönüşüm için FFT analizörü kullanılır. Elde edilen frekans verileri bir modal analiz yazılımı ile incelenir. Şekil 4.6’da modal analiz deney düzeneği, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Modal analiz deney düzeneği.

Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar:

- Bilgisayar (nCode ve Infield)
- eDAQ veri toplayıcı
- Dytran 3093B ivmeölçer
- Dynapulse darbe çekici



(a)



(b)

Şekil 4.7 Modal analiz deney düzeneği araçları a) Bilgisayar, b) Veri toplayıcı.



(a)

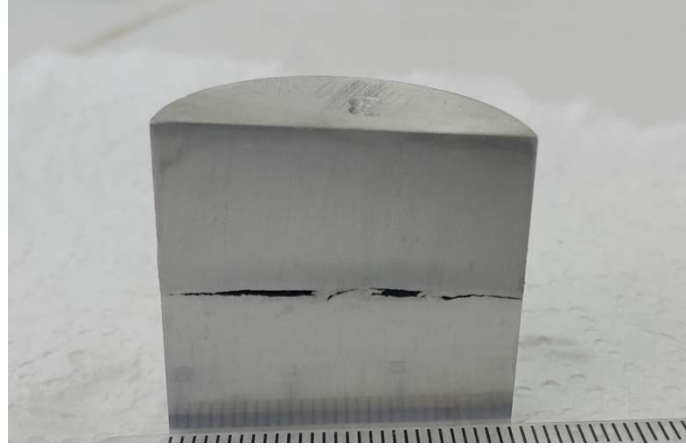


(b)

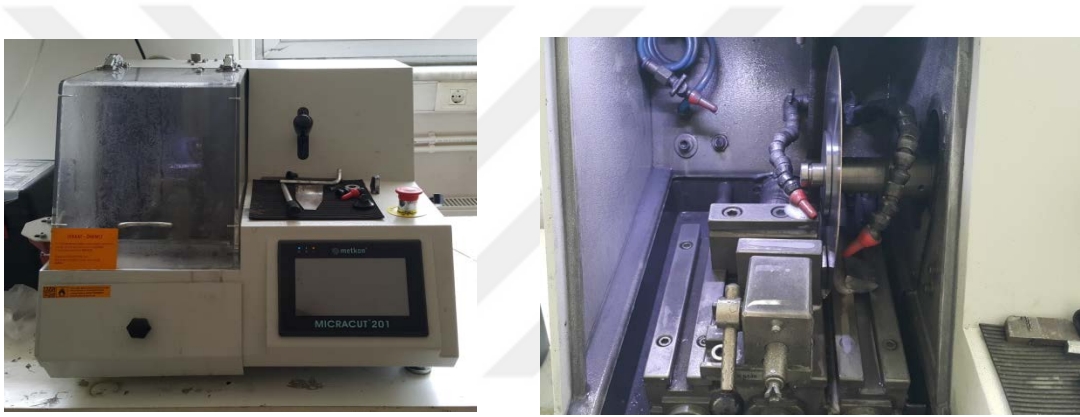
Şekil 4.8 Serbest titreşimde kullanılan araçlar a) Darbe çekici b) İvmeölçer.

### 4.3 METALOGRAFİK İNCELEME HAZIRLIKLARI

Kaynak sonrasında birleşme bölgelerinde meydana gelen yapısal değişikliklerin incelenmesi için numunelerden, kaynak bölgesine dik olacak şekilde 30 mm boyunda ara kesitler alınmıştır (Şekil 4.9). Bu kesitler Şekil 4.10'da gösterilen, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'nde Metalurji Mühendisliği Laboratuvarında bulunan METKON marka MICRACUT201 model hassas kesme cihazı kullanılarak yapılmıştır.



**Şekil 4.9** Kesme işlemi sonrası ve dağlama işlemi öncesi numune görüntüsü.



**Şekil 4.10** Numune hazırlanırken kullanılan kesme cihazı.

Bu işlemten sonra yüzeyin SEM analizi için temizlenmesi ve parlatılmasına geçilmiştir. İlk önce sırasıyla, 120 – 240 – 400 – 800 – 1200 – 2000 mesh'lik zımparalar ile yüzey zımparalama işlemleri yapılmıştır. Sonrasında, numuneler 3 µm'lik elmas pasta ile dağlama işlemine hazır hale getirilmiştir. Dağlama işlemi için 190 ml saf su, 5 ml nitrik asit, 3 ml hidroklorik asit, 2 ml hidroflorik asit karışımı hazırlanarak numune yüzeyi 10 sn süre karışımda bekletilmiştir.

Belirlenen kaynak parametrelerinin mikroyapı üzerindeki etkilerini incelemek için optik mikroskopta 5× ve 50× görüntüleri alınmış daha sonra DUBIT merkezinde Şekil 4.11'de gösterilen QUANTA marka FEG 250 model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak detaylı yüzey görüntüleri alınmıştır.





**Şekil 4.11** Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

#### **4.4 SERTLİK ANALİZİ**

Kaynaklı numunelerin sertlik değışimlerinin belirlenmesi için Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'nde Metalurji Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Şekil 4.12'de gösterilen BULUT MAKİNA marka DIGIROCK – RB model makrosertlik cihazı kullanılmıştır.



**Şekil 4.12** Makrosertlik cihazı.

Birleştirilen numunelerin kaynak bölgesi Şekil 4.13'te Şematik olarak ve Şekil 4.14'te gösterildiği gibi numaralandırılarak makrosertlik değerleri elde edilmiştir. Numune üzerinde birleşme bölgesinden 2 mm aralıklarla 3 noktadan (4-5-6) ve kalan bölgelerden 4 mm aralıklarla (1-2-3 ve 7-8-9) 62,5 kgf yük uygulanarak sertlik değerleri kaydedilmiştir.

AA7075	1	2	3	4	5	6	7	8	9	AA6013
--------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--------

Şekil 4.13 Makrosertlik değerleri alınan noktalar.



Şekil 4.14 Numune üzerinde noktaların gösterimi.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 5.1 MODAL ANALİZ SONUÇLARI

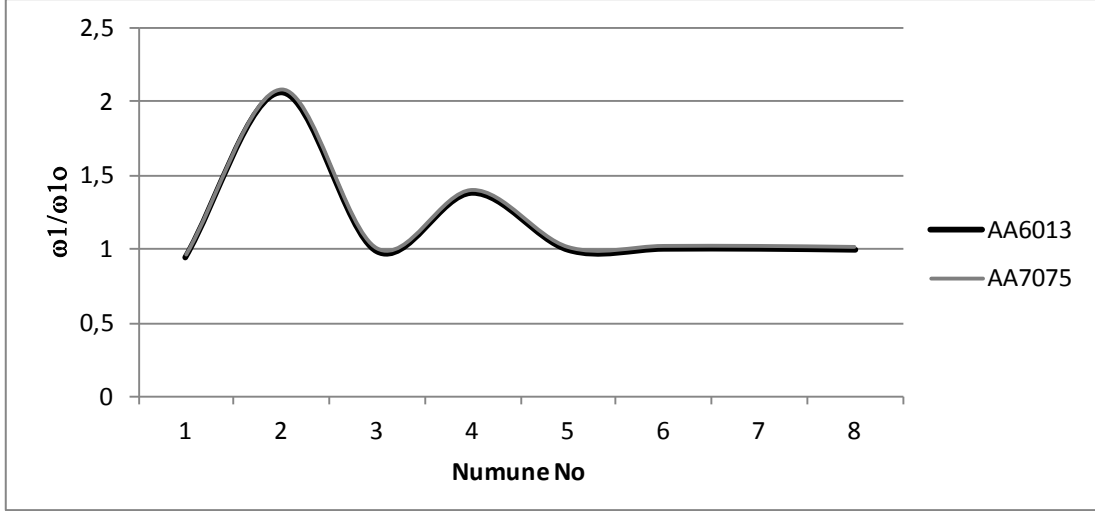
Numunelerin darbe testine verdikleri doğal frekans ( $\omega$ ), yer değiştirme ( $\mathbf{x}$ ) ve sönüm oranı ( $\zeta$ ) cevapları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

**Çizelge 5.1** Numunelere ait alınan cevap değerleri.

Numune No	MAJOR: AA6013			MAJOR: AA7075		
	$\omega_1/\omega_{10}$	$\mathbf{x}_1/\mathbf{x}_{10}$	$\zeta_1/\zeta_{10}$	$\omega_1/\omega_{10}$	$\mathbf{x}_1/\mathbf{x}_{10}$	$\zeta_1/\zeta_{10}$
1	0,948394	1,757212	0,884211	0,959959	1,269097	0,865979
2	2,056024	0,799808	0,365263	2,081098	0,577639	0,357732
3	0,98996	1,595192	0,750526	1,002033	1,152083	0,735052
4	1,382129	3,477788	0,881053	1,398984	2,511736	0,862887
5	0,999398	0,383365	0,926316	1,011585	0,276875	0,907216
6	1,006627	0,663462	0,989474	1,018902	0,479167	0,969072
7	1,006627	1,305865	0,996842	1,018902	0,943125	0,976289
8	1	2,069712	0,849474	1,012195	1,494792	0,831959

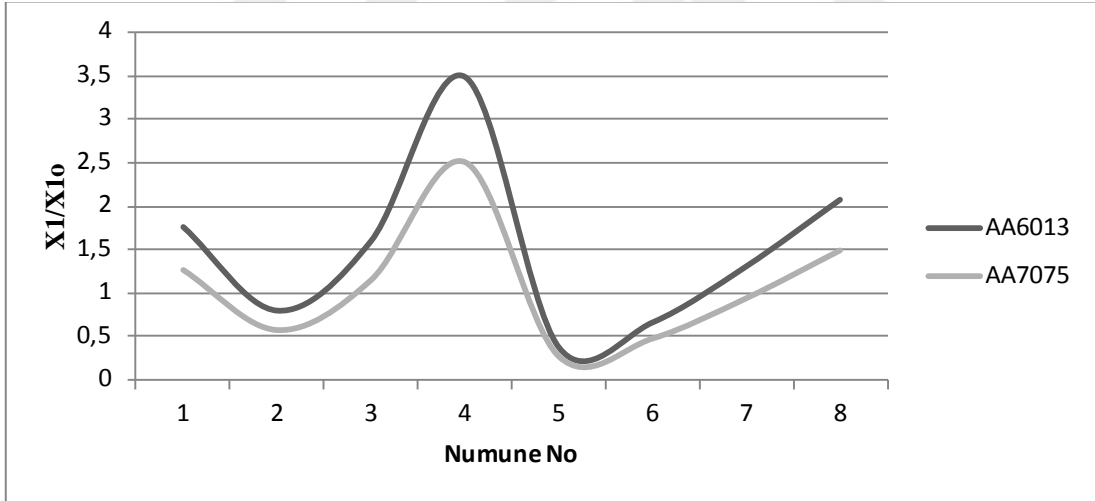
Major AA6013, darbe çekici ile AA6013 tarafından ve major AA7075, AA7075 tarafından kuvvet uygulandığını ifade etmektedir. Çizelgede belirtilen oranlarda “1” indisi kaynaklı numuneyi ve “10” indisi kullanılan alüminyumun kaynaksız olarak kendisini temsil etmektedir.

Şekil 5.1’de numunelere ait doğal frekans grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre düşük olan devir sayısında yığma basıncının değiştirilmesi doğal frekans değerlerini etkilemektedir. Yüksek olan devir sayısında ise yığma basıncının değişmesi doğal frekans değerlerini çok etkilememiştir.



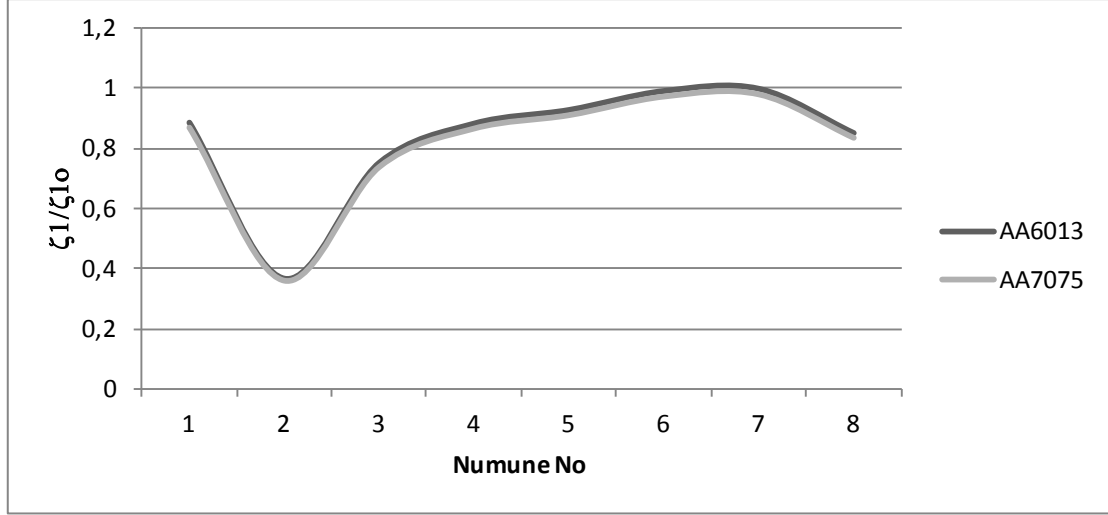
**Şekil 5.1** Numunelere ait doğal frekans değişim grafiği.

Şekil 5.2’de ise numunelere ait yer değiştirme grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre yüksek devirde yığma basıncının değişmesi yer değiştirme fonksiyonunda doğrusal bir sonuç göstermiştir.



**Şekil 5.2** Numunelere ait yer değiştirme cevap grafiği.

Şekil 5.3’te ise sönümlenme oranı grafiği verilmiştir. Yüksek devir sayısında yığma basıncının değişimi sönümlenme oranı değerlerini etkilemektedir. Düşük devir sayısında ise Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’ye benzer eğri çizmektedir.

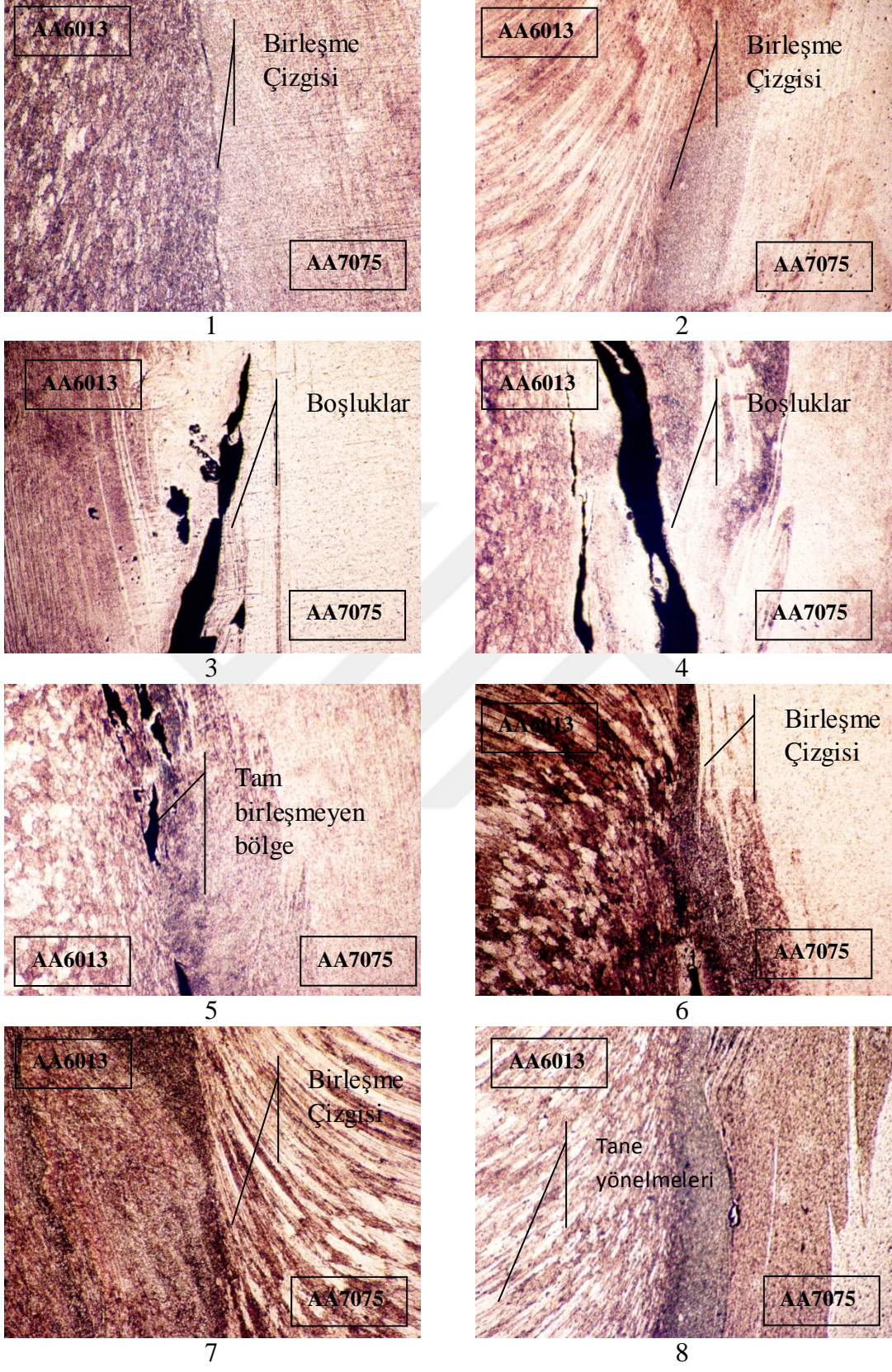


**Şekil 5.3** Numunelere ait sönüm oranı değer grafiği.

## 5.2 METALOGRAFİK İNCELEMELER

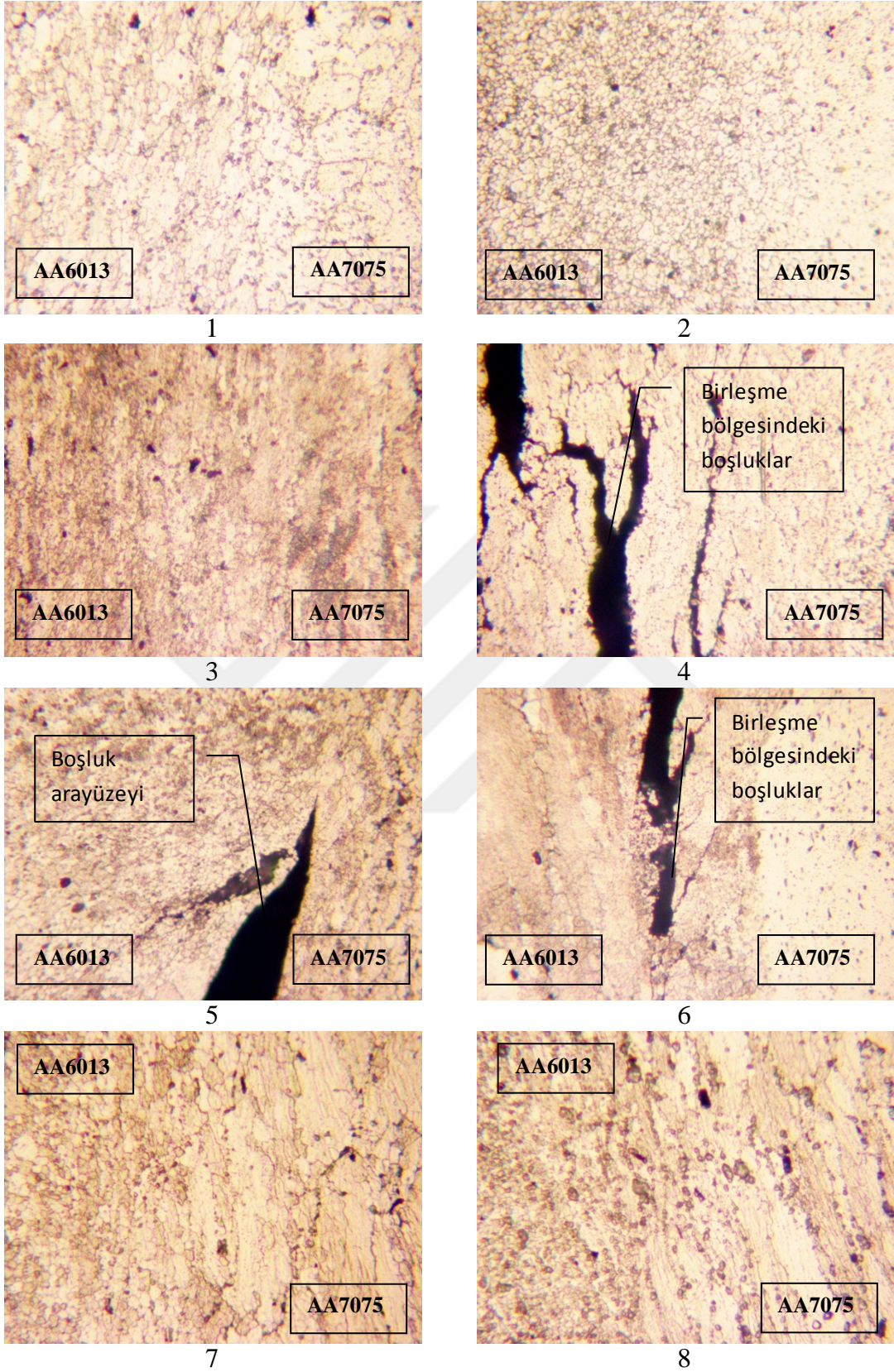
Numunelere ait 5× optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.4'te, 50x optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.5'te ve 500× taramalı taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 5.6'da verilmiştir. Düşük devir sayısında yığma basıncının artırılmasıyla AA6013 tarafında tane yönelmelerinin arttığı gözlemlenmiştir. Yine düşük devirde 3 ve 4 numaralı numunelerde birleşme arayüzünde boşluklar meydana gelmiştir. Yüksek devirde yığma basıncının artırılması AA7075 tarafında da tane yönelmelerini açıkça göstermektedir. Yüksek devirde yığma basıncının artmasıyla, düşük devirli numunelere göre boşluklu yapılar azalma göstermiştir.



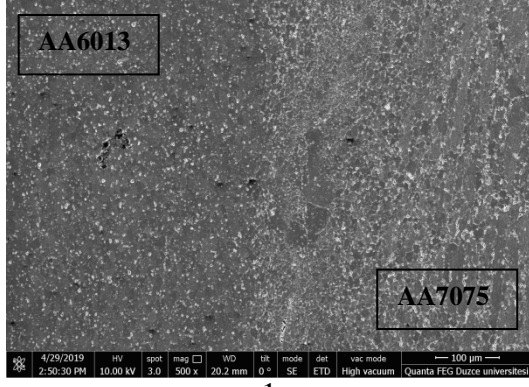


Şekil 5.4 Numunelere ait 5× mikroskop görüntüleri.

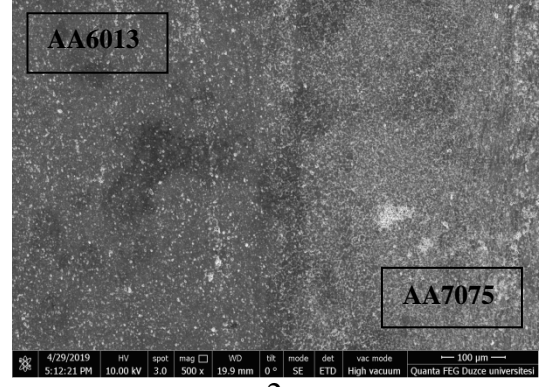




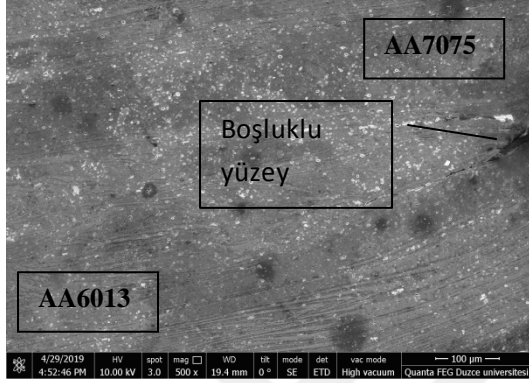
Şekil 5.5 Numunelere ait 50× mikroskop görüntüleri.



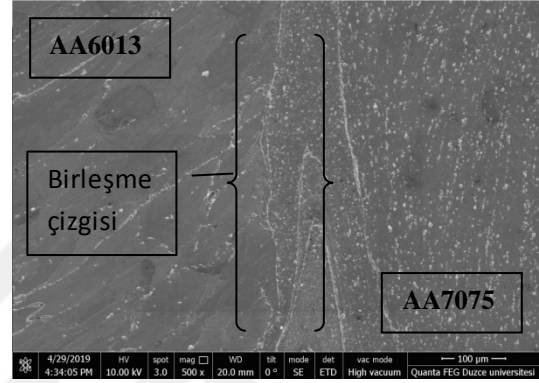
1



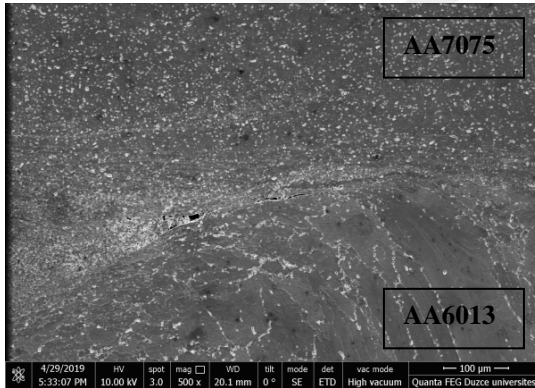
2



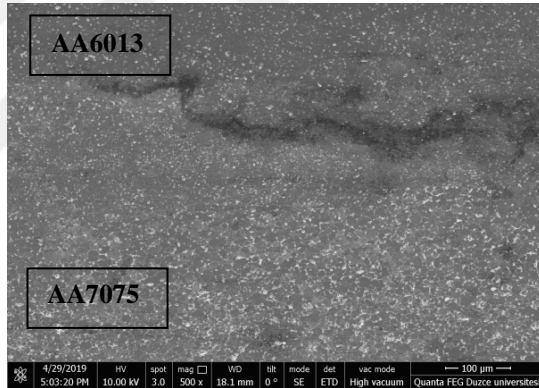
3



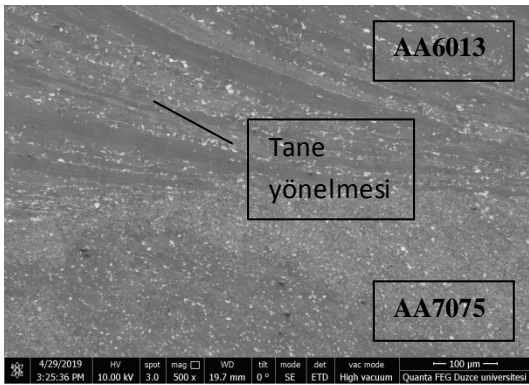
4



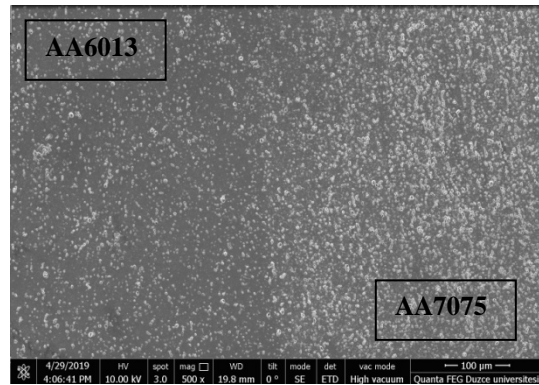
5



6



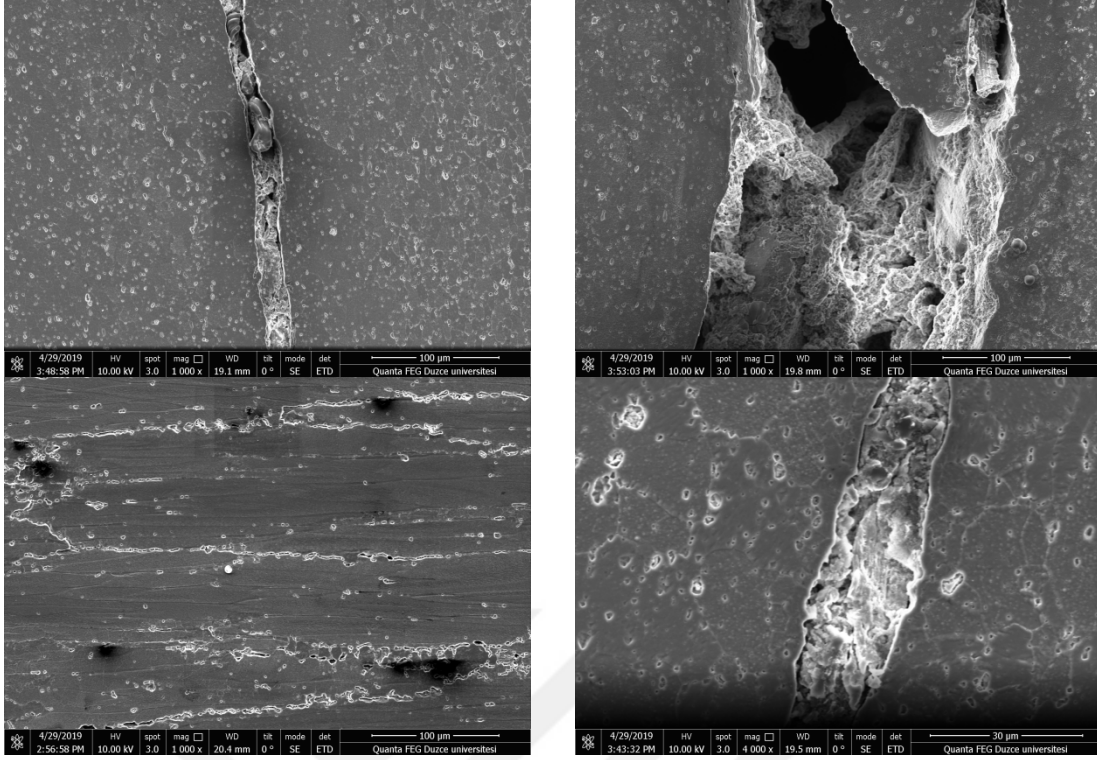
7



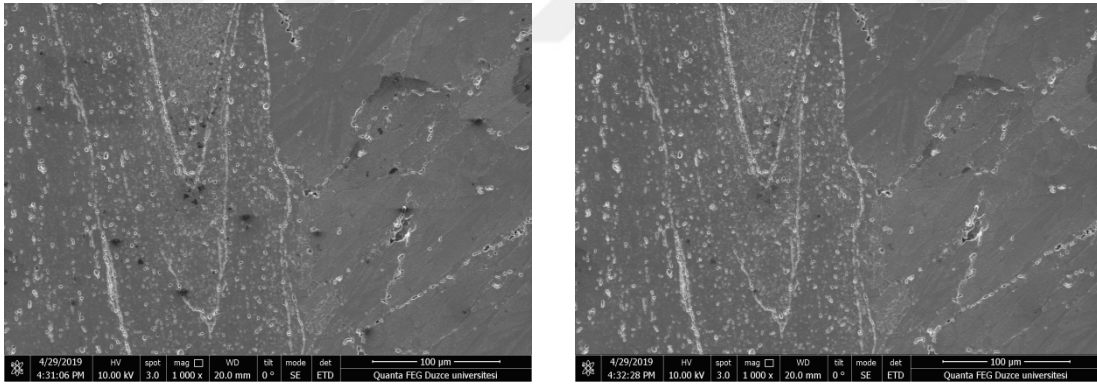
8

Şekil 5.6 Numunelere ait 500× taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.

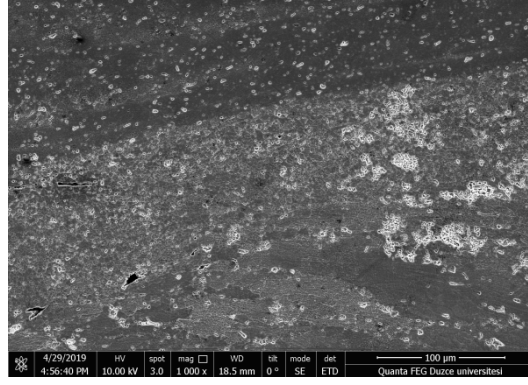




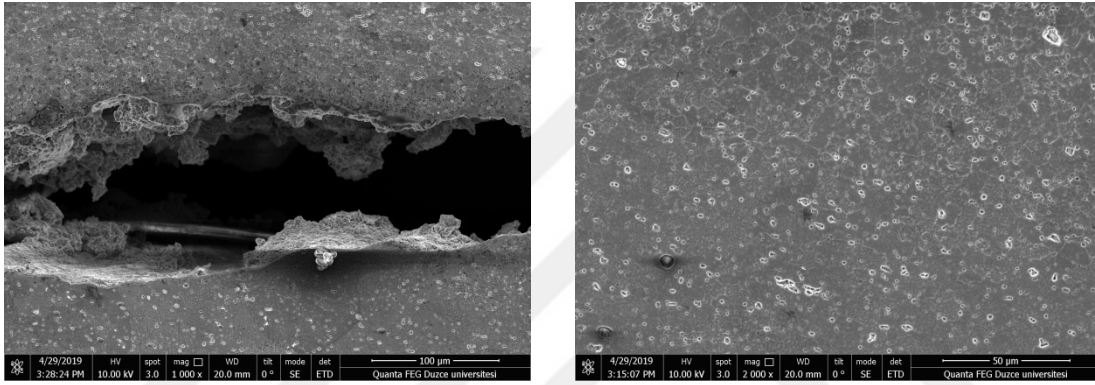
Şekil 5.7 Numune – 1'e ait birleşme bölgesindeki yapılar.



Şekil 5.8 Numune – 4'e ait tane yapıları.



Şekil 5.9 Numune – 6'ya ait birleşme arayüzeyi.



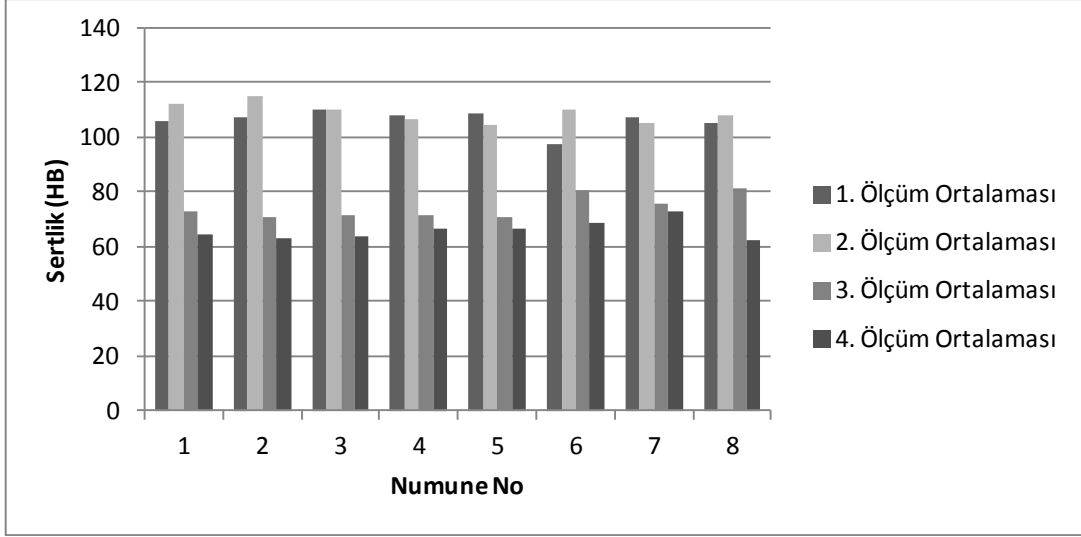
Şekil 5.10 Numune – 7'ye ait birleşme yüzeyinde oluşan boşluk.

### 5.3 NUMUNELERİN MAKROSERTLİK SONUÇLARI

Numunelere ait numaralandırılmış kısımlardan alınan sertlik değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Sertlik değerleri ortalama alınarak 4 nokta ile belirtilmiştir (Şekil 5.11).

Çizelge 5.2 Numunelerin ortalama sertlik değerleri (HB).

Numune No	1	2	3	4
1	106,1	112,4	72,8	64,8
2	107,6	115,1	70,8	63,35
3	110,1	110	71,4	63,85
4	107,7	106,7	71,25	66,55
5	108,4	104,3	71	66,7
6	97,65	109,8	80,8	68,4
7	107	105,2	75,65	72,9
8	105,3	107,8	81,4	62,5



**Şekil 5.11** Ortalama makrosertlik grafiği.

En iyi makrosertlik sonucu 1, 2, 3 ve 6 numaralı numunelerde görülmüştür. Aynı yığma basıncı değerlerinde devir sayısının artırılması, kaynak bölgesine ait sertlik değerlerinin düşmesine neden olmuştur. AA6013 tarafından kaynak bölgesine doğru geçişlerde, sertlik değerlerinde açık olarak bir artış görülmektedir. Uygun olarak seçilen devir sayısı - yığma basıncı sertlik değerlerinde önem göstermektedir.

## 5.4 DEĞERLENDİRMELER

Sürtünme kaynak yöntemi ile AA 6013 ve AA 7075 malzemeleri farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilmiştir. Numunelerin modal analizi, mikroyapı ve makrosertlik incelemeleri yapılarak kaynak parametrelerinin bu analiz ve incelemelere olan etkileri araştırılmıştır. Buna göre:

- Belirlenen kaynak parametrelerinin devir sayısının 1000 dev/dak üzeri, yığma basıncının 3 MPa olması birleşmeler için uygun olduğu belirlenmiştir.
- Düşük devirde yığma basıncının değişimi, doğal frekans değerlerinde etkili olan bir parametre olduğu gözlemlenmiştir.
- Yüksek devirde yığma basıncının değişimi, doğal frekans değerlerinde fazla etkili olmadığını belirlenmiştir.
- Yer değiştirme ve sönümlenme oranı değerlerinde yüksek devir sayısı etkili olmuştur.
- Modal analizin sonuçlarına göre devir sayısı yüksek tercih edilmelidir.
- Düşük devirde 3 ve 4 numaralı numunelerin, diğer numunelere oranla kaynak bölgesinde daha fazla boşluk gösterdiği belirlenmiştir.
- Tane yönelmelerinde, artan yığma basıncının etkisi olduğu gözlemlenmiştir fakat düşük devirde AA7075 malzemesinde görülmemiştir. Bunun sebebi AA7075'in AA6013'e göre daha sert ve dayanımının yüksek olmasıdır.
- Yüksek devirdeki birleştirmelerde birleştirme bölgesinde ki ısı yükseldiği için daha iyi birleştirmeler elde edilmiştir. Buda malzemelerin birleştirilmesi için yüksek devir sayısının önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Literatürdeki çalışmalar da bunu destekler niteliktedir.
- En iyi makrosertlik değerleri 1, 2, 3 ve 6 numaralı numunelerde elde edilmiştir.
- Kaynak bölgesinde yüksek sertlik değerlerinin istenildiği durumlarda düşük devir sayısı tercih edilmelidir.
- Sürtünme kaynağı ile birleştirilen numunelerin doğal frekans ile kaynak kalitesinin belirlenmesi literatürde sık karşılaşılmayan bir yöntemdir. Bu çalışmayla malzemelerin doğal frekansları kullanılarak belirlenen parametreler için kaynak kalitesi araştırılmış olup, yöntemin kullanılabilirliği belirlenmiştir.

## 5.5 ÖNERİLER

- Yığılma basıncı sabit tutularak sürtünme basıncının doğal modal analize göre etkisi araştırılabilir.
- Kullanılan parametreler farklı tezgâh kapasitelerine göre değiştirilebilir.
- Malzemelerin birbirine sürtünmesi esnasında, seçilen kaynak parametrelerine göre ortaya çıkan ısı ölçülerek kaynak kalitesine etkisi araştırılabilir.
- Malzemelerin kaynak sırasında boyca kısalma miktarı belirlenerek, parametrelere göre değişimi araştırılabilir.





## KAYNAKLAR

- Açık M** (2015) AISI 1010 - Bakır Malzeme Çiftinin Sürtünme Kaynak Yöntemi İle Birleştirilebilirliği. *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 113 s.
- Altındal A** (2014) Sürtünme Kaynağında Birleştirilen Bimetalik Parçaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne, 44 s.
- Arıcı G** (2013) Nikel Alüminatların Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilebilirliklerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 116 s.
- Asma Y** (2014) AA7075 - AA6061 Malzeme Çiftinin Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 83 s.
- Basheer, Uday & Mohd Noor, Ahmad Fauzi & Zuhailawati, Hussain & Ismail, Ahmad** (2010) Advances in friction welding process: A review. *Science and Technology of Welding and Joining*, 534-558.
- Bati S, Kilic M, Kırık İ** (2016) Friction Welding of Dissimilar AISI 304 and AISI 8640. *European Journal of Technich*.
- Baykara V İ** (2009) Titreşim Analizi ile Şanzımanlarda Arıza Teşhisi ve Kestirimci Bakım. *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 102 s.
- Meengam C, Chainarong S, Muangjumburee P** (2017) Friction Welding of Semi-Solid Metal 7075 Aluminum Alloy. *Materials Today: Proceedings*, 1303-1311.
- Çil E** (2009) Sürtünme Kaynağıyla Birleştirilmiş Paslanmaz Çelik ve Bakır Parçaların Kaynak Bölgesi Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne, 76 s.
- Crossland B** (1971) Friction Welding. *Contemporary Physicst*, 12: 559-574.
- Denli H B** (2007) Kestirimci Bakım ve Uygulamalarının İyileştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin, 109 s.

- Dinç D** (2006) AISI 1040 ve AISI 304 Çeliklerinin Sürtünme Kaynak Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, 133 s.
- Taban E, Gould J E, Lippold J C** (2010) Dissimilar Friction Welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization. *Materials & Design(1980-2015)*,2305-2311.
- Erol S S** (2015) Dinamik Sistemlerin Kestirimci Bakımına Etki Eden Faktörlerin Durum Bazlı İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 159 s.
- Ersözü İ** (2011) AISI 316 ve Ck 45 Çeliğinin Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmesi, Kaynak İşleminin Simülasyonu ve Isı Analizi. *Doktora Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, 170 s.
- Gül A** (2006) Farklı Metalsel Malzemelerin Sürtünme Kaynağında, Kaynak Parametrelerinin Dikiş Özelliklerine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 71 s.
- Güneş D** (2010) Al Matrisli SiCp Takviyeli Kompozit ile Ç1030 Çeliğinin Sürtünme Kaynak Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, 146 s.
- Rafi H K, Janaki Ram G D, Phanikumar G, Rao G P** (2010) Microstructure and tensile properties of Friction Welded Aluminum Alloy AA7075-T6. *Materials & Design (1980-2015)*, 2375-2380.
- Sreenivasan K S, Kumar S S, Katiravan J** (2019) Genetic Algorithm Based Optimization of Friction Welding Process Parameters on AA7075-SiC Composite. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 1136-1148.
- Karadayı H M** (2011)Titreşim Analizi ile Pompalarda Arıza Tespiti ve Kestirimci Bakım Uygulamaları. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, 95 s.
- Karahan M M** (2005) Titreşim Analizi ile Makinalarda Arıza Teşhisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 96 s.
- Kaya Ö** (2008) Titreşim ve Dinamik Davranışlar Dikkate Alınarak Vagon Dinamik Parametrelerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 133 s.
- Aoki K, Koezawa T** (2017) Characteristics of friction welding within a short time for aluminum alloy deformed by ECAE process. *Procedia Engineering*,597-602.
- Kimura M, Suzuki K, Kusaka M, Kaizu K** (2017) Effect of friction welding condition on joining phenomena and mechanical properties of friction joining between 6063 aluminium alloy and AISI 304 stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 178-187.



- Kimura M, Kusaka M, Seo K, Fuji A** (2005) Joining phenomena during friction stage of A7075-T6 aluminium alloy friction weld. *Science and Technology of Welding and Joining*, 378-383.
- Kimura M, Yukawa T, Kusaka M, Kaizu K, Fuji A** (2013) Possibility of Direct Friction Welding between type 7075 aluminum and low carbon steel. *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding*, 6-8 Kasım 2013, Osaka, Japonya, 267-273.
- Vigneshwar M, Selvamani S T, Hariprasath P, Palanikumar K** (2018) Analysis of Mechanical, Metallurgical and Fatigue Behavior of Friction Welded AA6061-AA2024 Dissimilar Aluminum Alloys in Optimed Condition. *Materials Today: Proceedings*, 7853-7863.
- Maalekian M** (2007) Friction welding - critical assessment of literature. *Science and Technology of Welding and Joining*, 738-759.
- Mercan S** (2013) Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmiş AISI 2205 / AISI 1020 Malzeme Çiftinin Mikroyapı ve Yorulma Davranışının Araştırılması. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 211 s.
- Şahin M, Akata H E, Özel K** (2008) An experimental study on joining of severe plastic deformed aluminium materials with friction welding method. *Material & Design*, 265-274.
- Jesudoss Hynes N R, Nagaraj P, Jennifa Sujana J A** (2014) Ultrasonic evaluation of friction stud welded AA 6063/AISI 1030 steel joints. *Material & Design(1980-2015)*, 118-123.
- Özcan A** (2013) Titanyum Alüminatların Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilebilirliklerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 95 s.
- Özdemir N** (2005) Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function rotational speed. *Material Letters*, 2504-2509.
- Rajendran M, Mathi K** (2012) Experimental Investigation on Mechanical Behavior of friction welded Al 7075, *IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management(ICAESM-2012)*, 30-31 Mart 2012, Tamil Nadu, Hindistan, 79-83.
- Sundara Bharathi S R, Rajeshkumar R, Rose A R, Balasubramanian V** (2018) Mechanical Properties and Microstructural Characteristics of Friction Welded Dissimilar Joints of Aluminium Alloys *Materials Today: Proceedings*, 6755-6763.
- Sahin M** (2007) Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding. *Material & Design*, 2244-2250.

- Sahin M** (2005) Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 202-210.
- Sarsılmaz F, Kırık İ, Batu S** (2017) Microstructure and mechanical properties of armor 500/AISI2205 steel joint by friction welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 131-136.
- Sathish R, Ananthapadmanaban D, Nixon G S, Harish V** (2010) Friction weldability of 7075 aluminium alloy. *Recent Advances in Space Technology Services and Climate Change 2010 (RSTS & CC-2010)*, 208-212.
- Şenveli E** (2018) Taşıt Titreşim Kaynağı Tespit Yöntemleri ve Uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 73 s.
- Sönmez F** (2007) Sürtünme Kaynağıyla Birleştirilmiş Yüksek Hız Çeliği (HSS) ve AISI 1040 Çeliklerinde Mukavemet ve Metalurjik Özelliklerin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne, 73 s.
- Spindler D E** (1994) What Industry Needs to Know about Friction Welding. *Welding Journal*, 37 - 43.
- Meshram S D, Reddy G M** (2015) Friction welding of AA6061 to AISI4340 using silver interlayer. *Defence Technology Volume 11 Issue 3*, 292-298.
- Uzkut M** (1999) Yüksek Alaşımlı İki Farklı Çeliğin Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmesinde Optimum Kaynak Parametrelerinin Tespiti ve Birleşme Bölgesinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 109 s.
- Yılmaz M** (1993) Farklı Takım Çeliklerinin Sürtünme Kaynağında Kaynak Bölgesinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 190 s.
- URL-1** <<http://mastek.cbu.edu.tr/index.php/surtunme-kaynagi>>, Ziyaret tarihi: 08.05.2019.
- URL-2** <<http://www.mtiwelding.com>>, Ziyaret tarihi: 09.05.2019.

## ÖZGEÇMİŞ

Erhan BAYSAL 1990 yılında İstanbul'da doğmuştur. İlköğrenimi Yıldırım Beyazıt İlkokulu'nda Ortaöğrenimini Pendik Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır. 2008 yılında başladığı Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü 2013 yılında tamamlamıştır. 2013 yılından itibaren özel sektörde makine mühendisi olarak çalıştıktan sonra 2016 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Alaplı Meslek Yüksekokulu'nda öğretim görevlisi olarak göreve başlamış ve devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ:**

Adres: Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Alaplı Meslek Yüksekokulu

Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü

Alaplı / ZONGULDAK

Tel: (+90) 372 378 20 05 – 06 (Dahili 148)

E-posta: erhanbaysal@beun.edu.tr