

**T.C  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN PARTİKÜL  
TAKVİYELİ VE TAKVİYESİZ TOZ METAL 7039 Al ALAŞIMININ  
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**FERHAN KAYA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MAYIS 2016**

**Tezin Başığı:** Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Partikül Takviyeli ve Takviyesiz Toz Metal 7039 Al Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

**Tezi Hazırlayan:** Ferhan KAYA

**Sınav Tarihi:** 09.05.2016

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Sınav Jüri Üyeleri**

**Tez Danışmanı :**

**Doç. Dr. Mehmet ERDEM**  
İnönü Üniversitesi



**Doç. Dr. Ali Kaya GÜR**  
Fırat Üniversitesi



**Yrd. Doç. Dr. Eray ARSLAN**  
İnönü Üniversitesi



**Prof. Dr. Alaattin ESEN**  
Enstitü Müdürü

## **ONUR SÖZÜ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Partikül Takviyeli ve Takviyesiz Toz Metal 7039 Al Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden olduğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ferhan KAYA

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN PARTİKÜL TAKVİYELİ VE TAKVİYESİZ TOZ METAL 7039 Al ALAŞIMININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Ferhan Kaya

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

54 + x sayfa

2016

Danışman: Doç. Dr. Mehmet ERDEM

Bu çalışmada, %10 SiC takviyeli ve takviyesiz 7039 Al alaşımı levhalar toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiştir. Karışımı oluşturan tozların bir karıştırıcıda (Turbola) homojen karışımları sağlandıktan sonra 300 MPa presleme basıncında soğuk olarak preslenmiştir. Presleme sonunda çapı ve yüksekliği aynı olan (100x100 mm) blok numuneler üretilmiştir. Bu blok numuneler 500 °C sıcaklıkta ¼ oranında ekstrüze edilerek ve 24 mm kalınlıkta 86 mm genişlikte plakalar elde edilmiştir. Akabinde de 500 °C’de kademeli haddeleme işlemiyle plakaların kalınlığı 4-5 mm’ye indirilmiştir. Haddeleme sonrasında levhaya T6 ısıl işlemi uygulanarak yaşlandırma yapılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı için karıştırıcı uç olarak 3 mm çapında ters kılavuz uç, dönme hızı 900 ve 1400 dev/dak ve ilerleme hızı ise 50 mm/dak kullanılmıştır. Kaynaklı numunelerin mikroyapısını tespit için optik mikroskop ve SEM incelemeleri, mekanik özelliklerini tespit için de mikro sertlik, çekme ve eğme deneyleri yapılmıştır. Kaynak kesiti incelemelerinde birleşim hatasının olmadığı ve dört farklı mikroyapının (ana metal, ısıdan etkilenen bölge, termo mekanik etkilenen bölge ve kaynak metali) oluştuğu tespit edilmiştir. Bu bölgelerin sertlik değeri 110-160 HV arasında olduğu ve numunelerin çekme dayanımı ortalaması takviyesiz numunelerde 352,15 MPa ve takviyeli numunelerde 225,35 MPa tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** 7039 toz metal Al alaşımı, Sürtünme karıştırma kaynağı, Metal matrisli kompozitler, Mikroyapı-mekanik özellikler.

## ABSTRACT

Master Thesis

### INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF FRICTION STIR WELDED PARTICLE REINFORCED AND UNREINFORCED METAL POWDER 7039 Al ALLOY

Ferhan Kaya

Inonu University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

54 + x Page

2016

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet ERDEM

In this study 10wt. % SiC reinforced and unreinforced 7039 Al alloy plates were produced by powder metallurgy method. Powders which are forming the mixture were cold pressed at pressing pressure of 300 MPa, after the homogenous mixture obtained in a mixer (Turbula mixer). After pressing process, block samples in same diameter and height (100x100 mm) were produced. These block samples were extruded in the ratio of ¼ at temperature of 500 °C and plates with 24 mm thickness and 86 mm wideness were obtained. Subsequently plates thickness reduced to 4-5 mm by progressive rolling process at temperature of 500 °C. After the rolling, aging was conducted by applying T6 heat treatment to the plate. Reverse guide tip in a diameter of 3 mm was used as mixer tip in friction stir welding process at rotation speed of 900 and 1400 rev / min and feed rate of 50 mm/min. Optical microscope and SEM examination were carried out to determine the microstructure; micro hardness, tensile and bending tests were performed to determine the mechanical properties of welded samples. It was found that there is no joining defect and it consists of four different microstructure (base metal, heat affected zone, thermomechanical affected zones, weld metal) by welding section investigations. It was found that hardness values of these regions were between 110-160 HV and mean ultimate tensile strength values were for unreinforced samples 352,15 MPa and reinforced samples 225,35 MPa .

**Keywords:** 7039 powder metal Al alloy, Friction stir welding, Metal matrix composites, Microstructure-mechanical properties

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri ve desteklerini esirgmeden beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet ERDEM' e;

Deneyleerde kullanılan malzemelerin üretilmesinde yardımlarını esirgemeyen Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Öğretim üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ' ye;

İmalat sürecinde bana yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Mehmet ALTUĞ ve Ümit ATEŞ' e;

Tezin deneysel aşamalarında bana yardımcı olan Uşak Üniversitesi Araştırma Görevlisi Önder YEŞİL' e;

Mikroyapı incelemelerinde bana yardımcı olan İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği öğrencisi Sayın Mustafa KARABULUT' a;

Ayrıca tüm çalışmalarım süresince benden her türlü desteğini esirgemeyen değerli Eşim' e

teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ONUR SÖZÜ .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
SİMGELER DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER .....	3
2.1. Metal Matrisli Kompozitler.....	3
2.1.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
2.2. Partikül Takviyeli Al Metal Matrisli Kompozitler.....	6
2.2.1. Matris Alaşımları .....	7
2.2.2. Takviye Elemanları .....	8
2.3. Al Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	9
2.3.1. Sıvı Hal Üretim Yöntemleri .....	10
2.3.2. Katı Hal Üretim Yöntemleri.....	11
2.4. Al MMK'lerin Kullanım Alanları .....	12
2.4.1. Otomotiv Sanayi Uygulamaları .....	12
2.4.2. Havacılık ve Uzay Sanayi Uygulamaları .....	14
2.5. Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti .....	15
2.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağı .....	16
2.7. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılışı.....	17
2.8. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Oluşan Bölgeler.....	18
2.8.1. Ana Metal (Isıdan Etkilenmeyen Bölge).....	18
2.8.2. Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB).....	19
2.8.3. Thermo-Mekanik Olarak Etkilenmiş Bölge (TMEB).....	19
2.8.4. Karıştırma Bölgesi (KB) .....	19
2.9. SKK Uygulamasına Etki Eden Faktörler .....	19
2.9.1. Takım İlerleme Hızı ve Takım Devir Sayısı .....	20
2.9.2. SKK Uygulamasında Kullanılan Uçlar (Pimler) ve Omuzlar.....	20
2.10. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yönteminin Uygulama Alanları.....	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	24
3.1. Materyal .....	24
3.2. Yöntem.....	24

3.2.1.	Dik Başlı Üniuersal Freze Tezgâhı .....	24
3.2.2.	Karıştııcı Uç .....	25
3.3.	Kaynaklanmış Malzemedden Deney Numunelerinin Hazırlanması .....	26
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	29
4.1.	Mikroyapı Sonuçları .....	29
4.2.	Çekme Deneyi Sonuçları.....	35
4.3.	Eğme Deneyi Sonuçları .....	40
4.4.	Sertlik Deneyi Sonuçları .....	43
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER .....	47
6.	KAYNAKLAR .....	49

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Takviye elemanlarına göre MMK'lerin şematik gösterimi .....	5
Şekil 2.2.	Çeşitli MMK kompozitler .....	6
Şekil 2.3.	MMK pazarında yer alan farklı takviye elemanı tercih eden firma sayısı .....	9
Şekil 2.4.	Audi A3 için Al levhadan üretilmiş ön bölüm.....	13
Şekil 2.5.	a) Gri dökme demir fren diski, b) Al/SiC/20p Al MMK fren diski .....	13
Şekil 2.6.	Gaz Tungsten Ark Kaynağı kullanarak 7039 Al alaşımının kaynağında oluşan çatlaklar .....	16
Şekil 2.7.	SKK şematik gösterimi .....	18
Şekil 2.8.	Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan alüminyum alaşımında oluşan bölgeler .....	18
Şekil 2.9.	Farklı ilerleme hızlarındaki gerilme ve uzamalar .....	20
Şekil 2.10.	Bir uç-omuz bağlantısı ve temel ölçüleri .....	21
Şekil 2.11.	Omuz çaplarının levha kalınlıklarına göre değişimi .....	22
Şekil 2.12.	Farklı uç profilleri.....	22
Şekil 3.1.	Dikey başlı universal freze tezgahı .....	25
Şekil 3.2.	Karıştırıcı uç .....	26
Şekil 3.3.	Karıştırıcı uç ölçüleri .....	26
Şekil 3.4.	a) Çekme numunesi b) Eğme numunesi .....	27
Şekil 3.5.	Çekme (a) ve eğme (b) numunelerinin teknik ölçüleri .....	27
Şekil 3.6.	a) Leica DM4000 M mikroskop b) Shimadzu sertlik ölçme cihazı .....	28
Şekil 3.7.	Mikroyapı incelemeleri için ara parçaları alınmış çekme numuneleri.....	28
Şekil 4.1.	Ana metal kısımların mikroyapı fotoğrafları a) 7039 Al b) 7039/SiC/10p... 29	29
Şekil 4.2.	7039 Al kaynaklı malzemenin optik mikroskop görüntüleri .....	30
Şekil 4.3.	7039/SiC/10p kaynaklı malzemenin optik mikroskop görüntüleri .....	31
Şekil 4.4.	Kaynaklı 7039 Al alaşımının kaynak kesit görüntüsü .....	32
Şekil 4.5.	%10 SiC takviyeli 7039 Al alaşımının kaynak kesit görüntüsü.....	33
Şekil 4.6.	7039/SiC/10p numunesinin ana metal (a) ve karıştırma bölgesi (b).....	33
Şekil 4.7.	7039/SiC/10p numunesine ait a) Genel SEM görüntüsü b) Alüminyum c) Karbon d) Magnezyum e) Çinko f) Silisyum g) Titanyum .....	364
Şekil 4.8.	7039 Al numunelerinin çekme deneyi grafikleri .....	36
Şekil 4.9.	7039/SiC/10p numunelerine ait çekme deneyi grafikleri .....	37
Şekil 4.10.	7039 Al çekme numunelerinin testten sonraki görünüşleri.....	38
Şekil 4.11.	7039/SiC/10p çekme numunelerinin testten sonraki görünüşleri.....	39
Şekil 4.12.	7039 Al eğme testi sonrası görünüm .....	42
Şekil 4.13.	7039/SiC/10p Eğme testi sonrası görünüm.....	42
Şekil 4.14.	7039 Al numunesinin sertlik değerleri.....	43
Şekil 4.15.	7039/SiC/10p numunesinin vickers sertlik değerleri.....	44
Şekil 4.16.	7039 Al ve 7039/SiC/10p diğer noktalardan alınan ölçüm değerleri.....	44

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Metal matrisli kompozitlerin otomotivde uygulama örnekleri .....	13
Çizelge 2.2.	Demiryolu, elektrik/elektronik, spor, kağıt ve diğer endüstrilerde Al MMK'lerin uygulamaları .....	15
Çizelge 3.1.	7039 Al kimyasal bileşimi .....	24
Çizelge 4.1.	7039 Al ve 7039/SiC/10p çekme deneyi sonuçları.....	35
Çizelge 4.2.	7039 Al ve 7039/SiC/10p eğme deneyi sonuçları.....	41

## SİMGELER DİZİNİ

%ε	Kopmadaki toplam şekil değıştirme
7039/SiC/10p	%10 SiC partikül takviyeli 7039 alüminyum kompozit malzemesi
7039 Al	7039 Alüminyum alaşımı
Al	Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	Alüminyum karbür
AlN	Alüminyum nitrür
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Bor
B <sub>4</sub> C	Bor karbür
BeO	Berilyum oksit
C	Karbon
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Krom karbür
Cu	Bakır
E	Elastisite modülü
F <sub>kop</sub>	Malzemenin kopma noktasındaki yük değeri
F <sub>max</sub>	Malzemenin akma noktasını geçtikten sonra dayanabileceği en büyük yük
H <sub>2</sub> O	Saf su
HB	Brinell sertliği
HCL	Hidroklorik asit
HF	Hidroflorik asit
HNO <sub>3</sub>	Nitrik asit
HV	Vickers sertliği
ITAB	Isı tesiri altındaki bölge
KB	Karıştırma bölgesi
L <sub>0</sub>	Şekil değıştirmeye maruz kalan numunenin ilk uzunluğu
Li	Lityum
L <sub>kop</sub>	Kopma noktasındaki sehim miktarı
L <sub>max</sub>	Maksimum yükte sehim miktarı
MMK	Metal matrisli kompozit
Mg	Magnezyum
Mg <sub>2</sub> Si	Magnezyum Silisit
MIG	Metal inert gaz
Nb	Niyobyum
R <sub>e</sub>	Akma sınırı
R <sub>m</sub>	Çekme dayanımı
R <sub>me</sub>	Eğilme Dayanımı
R <sub>mort</sub>	Ortalama çekme dayanımı
SEM	Scanning electron microscope
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
Si <sub>2</sub> N <sub>4</sub>	Silisyum nitrür
SiO <sub>2</sub>	Silisyum oksit
SKK	Sürtünme karıştırma kaynağı
Ti	Titanyum
TiB <sub>2</sub>	Titanyum diborür
TiC	Titanyum karbür
TIG	Tungsten inert gas
TMEB	Termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge
TWI	The Welding Institute
Zn	Çinko
ZrO <sub>2</sub>	Zirkonyum dioksit

## 1. GİRİŞ

Metal Matrisli Kompozit (MMK) malzemeler, mühendislik uygulamalarında düşük yoğunluğa ve yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olmasından dolayı son yıllarda otomotiv, savunma, havacılık ve uzay teknolojilerinde önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir. MMK malzemeler, kompozit malzemelerin bir grubunu oluşturan, diğer tüm kompozit malzemeler gibi kimyasal ve fiziksel olarak farklı olan en az iki faz içeren geleneksel malzemelere göre daha yüksek aşınma direncine, mukavemet/ağırlık oranına sahip, başta alüminyum olmak üzere titanyum ya da magnezyum gibi hafif metal alaşımlarının, yüksek dayanıma sahip seramik partiküller ya da fiberler ile takviye edilmesiyle elde edilen modern mühendislik malzemeleridir. Partikül takviyeli MMK'ler, üretimlerinin daha kolay ve maliyetlerinin daha düşük olması nedeni ile sürekli fiberlerle takviye edilen MMK'lerden daha çok ticari öneme sahiptirler [1].

Otomotiv ve havacılık endüstrisinde yaygın kullanılan, düşük yoğunluğa, ideal (uygun) mekanik özelliklere ve korozyon dayanımına sahip olan alüminyum alaşımları MMK'lerde en çok tercih edilen matris alaşımıdır. Al matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak en çok partikül halinde SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılmaktadır [2].

Al MMK'lerin geleneksel ergitme kaynağı yöntemleri ile birleştirilmesinde kaynak metalinde malzemenin homojenliğinin bozulması, kaynak bölgesinde soğuma sırasında takviye elemanları nedeniyle alışılmışın dışında bir katılaşma olması gibi bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Ergitme kaynağında karşılaşılan bir diğer sorun ise yüksek sıcaklık nedeniyle takviye elemanı ve matris malzemesi arasında istenmeyen reaksiyonların meydana gelmesidir. Takviye elemanı olarak SiC kullanıldığında geleneksel ergitme kaynağı yöntemlerinde yüksek işlem sıcaklığı değerlerinde istenmeyen reaksiyonlar sonucunda Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>'ler oluşmaktadır. Oldukça kırılgan ve atmosferik koşullarda dağılma özelliğine sahip olan bu reaksiyon ürünü sebebi ile kaynak dayanımı düşmektedir.

Al ve alaşımlarının kaynağında 1991 yılında İngiltere'deki The Welding Institute (TWI) tarafından geliştirilen bir katı hal birleştirme tekniği olan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) ile önemli gelişmeler yaşanmıştır. SKK'da

özel olarak tasarlanmış bir omuz ve uçtan oluşan takım, birleştirilecek plakaların birleşme kenarlarına daldırılır ve birleşme hattı boyunca ilerletilir. Takımın iki temel işlevi vardır: İş parçasını ısıtmak ve birleştirmeyi oluşturmak için malzemeyi hareket ettirmek. Isıtma işlemi takım ile iş parçası arasındaki sürtünme ve iş parçasının deformasyonu ile oluşur. Bölgesel ısıtma takım ucu etrafındaki malzemeyi yumuşatır ve takımın dönüşü ile takım ucunun önündeki malzeme ucun arkasına doğru hareket eder. Bu işlemin sonunda katı halde bir birleşme oluşur [3].

Bu çalışmada, %10 SiC partikül takviyeli alüminyum metal matrisli kompozit levhalar sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş ve mikro yapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca takviyesiz toz metal 7039 Al alaşımı levhalarda SKK ile birleştirilerek tespit edilen özelliklerin kıyaslanması amaçlanmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Metal Matrisli Kompozitler

İstenen amaç için tek başlarına uygun olmayan farklı iki veya daha fazla malzemeyi, istenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirilerek elde edilen malzemeye Kompozit Malzeme denir. Kompozit Malzemelerin monolitik malzemelere göre avantajı sadece yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahip bir malzeme alternatifi oluşturmak değil, aynı zamanda bazı parametrelerini (kullanılan takviyenin boyutu, hacim oranı, en-boy oranı gibi) değiştirerek, mekanik ve fiziksel özellikleri istenilen mühendislik uygulamasına göre ayarlanabilir olmasıdır [4]. Örneğin karbon nano-tüpler, çok yüksek çekme dayanımı, elektriksel ve ısı iletkenlik gibi üstün malzeme özelliklerine sahiptirler. Plastikler ise kolay işlenebilme avantajına sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle, Dönmez' in yaptığı çalışmada da görüldüğü gibi polikarbonat polimerine karbon nano-tüp takviye ederek polikarbonat polimerlerinin iletkenliğini ve elastisite modülünü artırmıştır [5].

Son yıllarda metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler yoğun bir şekilde araştırılmakta, dayanım/ağırlık oranı yüksek, çok sayıda yeni malzeme ortaya çıkmaktadır. Uzay ve havacılık alanlarında, otomotiv ve diğer yapısal uygulama alanlarında MMK'lere ilgi giderek artmaktadır. Bu artışın tek nedeni bu malzemelerin yapısal ağırlığındaki azalma değil, aynı zamanda özgül değerlerinin de artmış olmasıdır. Örneğin; SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde, normal alaşıma göre özgül değerlerde %50 artış sağlanırken, ağırlıkta %10 kadar azalma görülmüştür [6].

MMK'lerde, metalik malzemelerin özellikleri (şekil değiştirebilme kabiliyeti, tokluk, vb.) ve seramik malzemelerin özellikleri (yüksek dayanım, yüksek özgül değerler, ısı kararlılık, vb.) bir arada bulunur. Böylece daha yüksek kayma direncine, basma direncine sahip ve daha yüksek işletme sıcaklıklarında çalışabilen malzemeler elde edilebilmiştir. MMK'ler ilgi çekici fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptirler. Bu özellikler arasında; yüksek özgül değerleri, yüksek dayanım, ısı kararlılık, yüksek sürünme dayanımı, iyi oksidasyon direnci örnek olarak verilebilir [7,8].

Matrisler bağlayıcı eleman olmakla beraber, takviye elemanlarına gelen yükü transfer eder ve dağıtırlar. Böylece takviyeler, matris ve takviye arasındaki birleşmeye bağlı olarak, yükün büyük bir kısmını taşırlar. MMK'lerde genellikle alüminyum, magnezyum, titanyum, nikel ve nikel-kobalt gibi metaller ve alaşımlar matris olarak kullanılmaktadır. Fakat yoğunluğunun düşük oluşu, ucuz olması, kolay bulunuşu, çeşitli alaşım formlarında bulunabilmesi ve oldukça iyi mekanik özellik kombinasyonlarına sahip olmasından dolayı matris olarak en çok alüminyum kullanılır [9].

MMK malzemelerin dayanımı, elastik modülü, darbe dayanımı, sertlik, aşınma direnci, ısı dayanımı gibi mekanik ve fiziksel özelliklerinin istenilen düzeyde olması, metal matrislerin özellikleri ile ilgili olduğu kadar takviye elemanının yapısına, dağılımına, boyutlarına ve karışım oranlarına da bağlıdır [10].

### **2.1.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması**

MMK malzemelerde kullanılacak takviye elemanının da belirli özelliklere sahip olması gerekir. Yoğunluk, bu önemli özelliklerden birisidir. Yüksek dayanım/yoğunluk oranı öne çıktığından genellikle matris alaşımı olarak alüminyum ve magnezyum gibi hafif alaşımlar tercih edilir. Bazı özel uygulamalarda titanyum, bakır, gümüş, nikel, niyobyum ve süper alaşımların da matris malzemesi olarak kullanıldığı bilinmektedir [11,12].

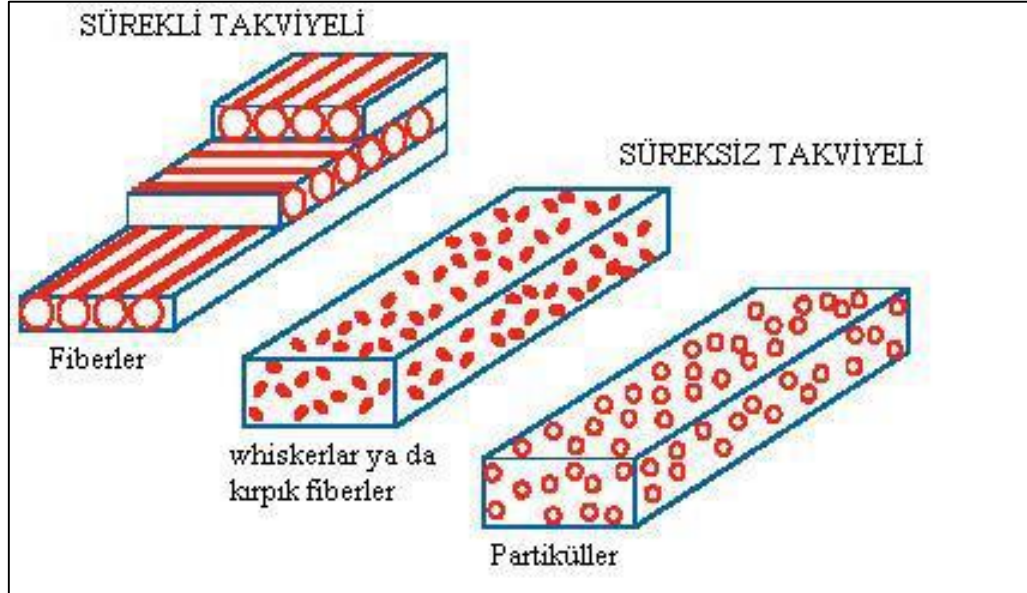
MMK malzemelerin üretiminde kullanılan takviye malzemeleri kimyasal yapılarına göre;

- a) Oksitler ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- b) Karbürler ( $\text{SiC}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ )
- c) Nitrürler ( $\text{Si}_2\text{N}_4$ ,  $\text{AlN}$ )
- d) Elementler (paslanmaz çelik, Si, C, vb.) gibi dört ana gruba ayrılır [13].

MMK'lerin kullanılan takviye malzemesinin geometrisine göre ise farklı çeşitleri vardır. Bunlar:

- i. Partikül takviyeli MMK'ler
- ii. Süreksiz fiber (kırpık fiber, kısa fiber) takviyeli MMK'ler
- iii. Sürekli fiber takviyeli MMK'ler

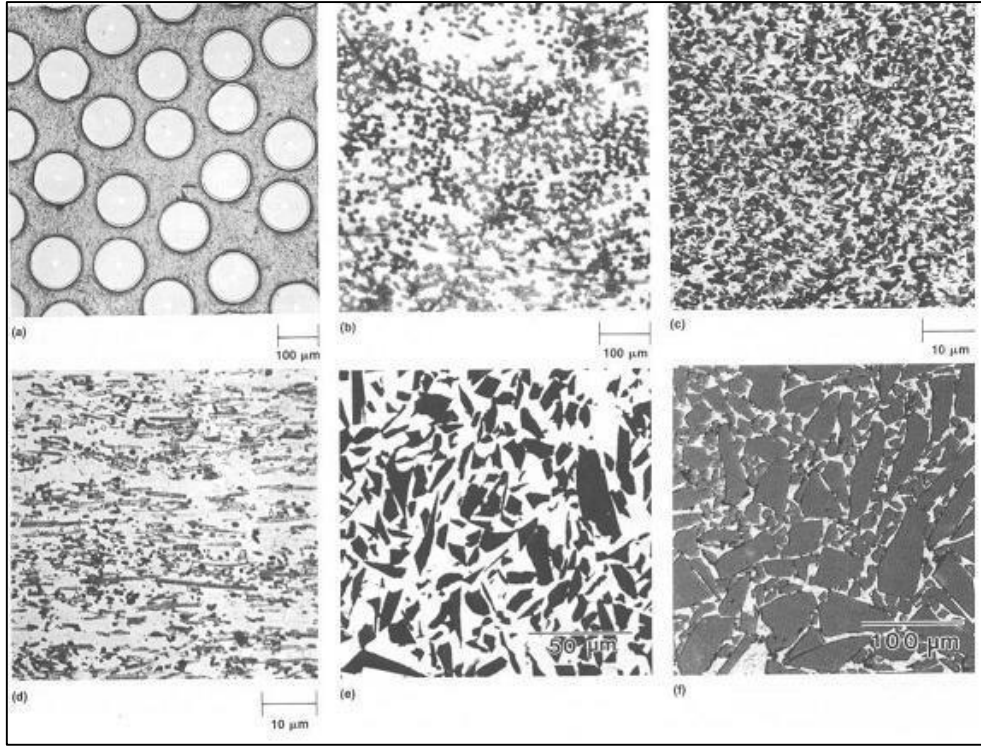
Şekil 2.1’de MMK’lerde kullanılan takviye elemanları şematik olarak görülmektedir [14]. Şekil 2.2’de ise sürekli ve süreksiz takviyeli MMK’lere ait şematik mikroyapı görüntüleri yer almaktadır [16].



**Şekil 2.1.** Takviye elemanlarına göre MMK’lerin şematik gösterimi [14]

MMK’ler üzerindeki ilk çalışmalar sürekli fiberlerle takviye edilen alüminyum ve titanyum matris esaslı kompozit malzemeler üzerine olmuştur. Çeşitli sürekli fiber takviyeli metal matris kompozitler, bazı havacılık ve askeri uçak uygulamalarında kullanılmıştır. Ancak, ümit verici sonuçlara rağmen, işleme zorlukları, yüksek üretim maliyeti, yüksek iş yükü, süneklik ve tokluklarındaki kısıtlamalardan dolayı bu malzemelerin kullanımları genellikle sınırlı kalmıştır [13].

Kısa fiberler yada whisker (kıl gibi ince metal tel) takviyeli MMK’lerin mükemmel özelliklere sahip oldukları belirtilmesine rağmen, 1990’ların başlarında bu alanda yapılan çalışmalar giderek azalmıştır. Günümüzde ticari kullanım alanlarının oldukça az olmasının en büyük sebebi işleme zorluklarıdır. Genel olarak kısa fiberler ve whisker takviyeli MMK’lerin şekillendirilebilme kabiliyetleri partikül takviyeli MMK’lerden belirgin bir şekilde daha düşüktür. Diğer taraftan, partikül takviyeli MMK malzemelerden daha iyi sürünme direnci, daha düşük uzama ve aşınma direncine sahiptirler [15].



**Şekil 2.2.** Çeşitli MMK kompozitler a) Sürekli bor fiber takviyeli Al matrisli kompozit ( $B_4C$  kaplı  $142 \mu m$  çapında bor fiberler, matris 6061 Al alaşımı) b) Kırıpk grafit fiberli Al matrisli kompozit (fiber çapı  $10 \mu m$ , takviye oranı %40, matris 2024 Al alaşımı) c) %40 SiC partikül takviyeli 6061Al matrisli kompozit d) %20 SiC süreksiz fiber takviyeli Al matrisli kompozit e) %60  $Al_2O_3$  takviyeli Al matrisli kompozit f) %81 SiC takviyeli Al matrisli kompozit [16]

## 2.2. Partikül Takviyeli Al Metal Matrisli Kompozitler

Alüminyum, yeryüzünde en yaygın olarak bulunan elementlerden biridir ve yerkabuğunun %8'ini oluşturmaktadır [17]. Alüminyumun keşfi ve üretim teknolojisinin geliştirilmesi, diğer pek çok metale göre oldukça yeni olmasına rağmen günümüzde diğer tüm demir dışı metallerden daha fazla miktarda üretilmektedir.

Düşük yoğunluğu, üstün mekanik özellikleri ve korozyon dayanımı özellikleri nedeni ile matris metali olarak alüminyum alaşımları titanyum ve magnezyuma oranla daha çok kullanılmaktadır [1,16]. Ayrıca alüminyum, diğer düşük yoğunluklu metallerden (Ti ve Mg) daha ucuzdur. Alüminyum alaşımları, havacılık ve otomotiv endüstrisi gibi birçok endüstride oldukça iyi tanınan alaşımlardır. Birçok bakımdan mükemmel özelliklere sahip olan alüminyum alaşımları farklı uygulamalara cevap verecek şekilde modifiye edilebilmektedir [18].

Alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları, çökelme ile sertleşebilme kabiliyetleri, iyi korozyon direnci, yüksek ısı ve elektriksel iletkenlikleri ile yüksek ıslanma kabiliyetlerinden dolayı oldukça cazip malzemelerdir. Özellikle 2000, 5000, 6000 ve 7000 serisi alüminyum alaşımları MMK üretiminde kullanılan en yaygın malzemelerdir [8]. Alüminyum matrisli kompozitler 1920'lerden bu yana geniş bir alanda kullanılmış ve günümüzde spor malzemeleri, uzay araçları uygulamaları, zırh ve otomotiv endüstrisi gibi alanlarda kullanım alanı bulmuştur. Alüminyum matrisli kompozitler genellikle SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C, SiO<sub>2</sub>, B, BN, B<sub>4</sub>C ve AlN ile takviye edilirler [13].

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerde kullanılan takviye malzemesinin morfolojisi, kompozit malzemenin özelliklerine etki eden önemli bir parametredir. Takviye morfolojisi açısından en önemli olanlar sürekli fiberler, kısa fiber ya da whiskerler ve partiküllerdir. Genel olarak sürekli fiberler, fiber yönlenmesi doğrultusunda en iyi özellikleri göstermektedir. Ancak en yüksek maliyetli grubu oluşturmaktadırlar. Kısa fiber veya whiskerler, düzlemsel olarak ya da takviye yönlenmesi doğrultusunda mekanik özelliklerinde önemli artışlar sağlarken, sürekli fiberlere göre daha düşük maliyet sunarlar. Partikül takviyeler ise diğerlerine göre daha az özellik artışı sunsa da izotropik özellikleri ve düşük maliyetleri ile avantaj sağlamaktadırlar [21].

### **2.2.1. Matris alaşımları**

Demir içerikli malzemeler dışında Al ve alaşımları, gerek saf gerekse alaşım olarak en sık ve yaygın olarak kullanılan malzeme grubunu teşkil etmektedir. Alüminyum alaşımlar düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve iyi korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı uzay araçlarında ve önemli uygulamalarda tercih edilir. Al-Cu-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu alaşımları çökelti sertleşmesi ile sertleştirilebilir alüminyum alaşımları olarak da adlandırılır. Al-Li alaşımları çökelti ile sertleştirilebilir alüminyum alaşımlarının en önemlilerindedir. Lityum alüminyuma birincil alaşım elementi olarak karıştırıldığı zaman, özellikle elastisite modülünü artırır ve alüminyumun yoğunluğunu düşürür. Bunlara ilaveten, şekillendirme ve ince levha haline getirilmesi diğer bir özelliğidir. Ancak saf alüminyumun oksijene olan yüksek affinitesinden dolayı döküm kabiliyetinin kötü oluşu, daha düşük mekanik özellikler göstermesi ve kaynakla birleştirmenin güçlüğü gibi problemler

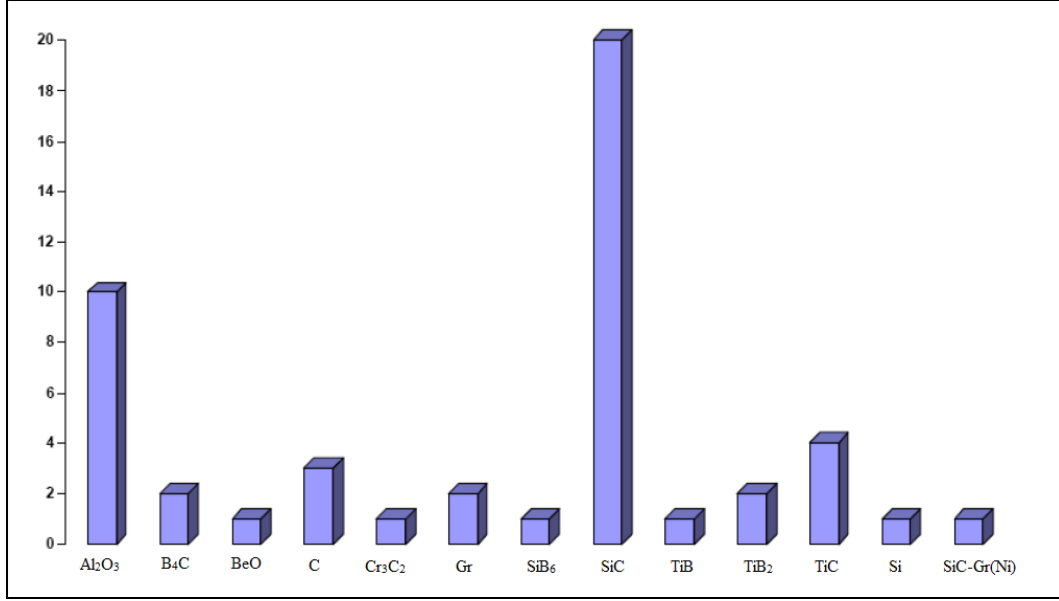
oluşturmaktadır. Ancak, ilave metal katkısı yapılarak bu özelliklerde gelişme sağlanabilir. Diğer taraftan alüminyum belirli bir yorulma sınırı göstermediği için oldukça düşük gerilmelerde kırılabilmektedir. Düşük ergime noktasından dolayı yüksek sıcaklık özelliği de iyi değildir. Ancak saf alüminyum, düşük mekanik dayanımlarına karşılık iyi korozyon dayanımından dolayı kullanılır [10,20].

### **2.2.2. Takviye elemanları**

Takviye elemanı seçimini etkileyen başlıca faktörler, kompozit malzemedeki beklenen özellikler, üretim yöntemi ve maliyettir. Kompozit malzemedeki beklenen nihai özellikler dikkate alınarak uygun yoğunluğa, yüksek dayanım değerine ya da uygun ısıl genleşme ve iletkenlik özelliğine sahip bir takviye elemanı seçilmelidir. Üretim yönteminde sıcaklık ve matris alışımları ile takviye elemanının etkileşim süresi göz önüne alınarak, istenmeyen reaksiyonların yaşanmayacağı bir takviye elemanı seçmek gerekir. MMK malzemelerde partikül şeklinde takviye elemanı kullanımının başlıca sebebi maliyet olduğundan, seçilecek partiküller ekonomik açıdan uygun olmalı ve istenilen boyut ve miktarda temin edilebilmelidir [22].

Düşük maliyeti ve her boyutta kolaylıkla bulunabilmesi bakımından SiC en çok kullanılan takviye elemanıdır. SiC, elmasa benzer bir yapıya sahiptir. Yoğunluğu düşük, rijitlik ve dayanımı yüksek ve ısıl kararlılığı çok iyidir [23]. Al/SiC MMK malzemeleri yüksek elastisite modülü, yüksek dayanım ve düşük ısıl etkenlik özelliklerine sahiptirler. Bu özellikler, Al/SiC MMK malzemelerin düşük üretim maliyetinden dolayı çeşitli araç gereç ve optik malzemelerin üretimini çok cazibeli hale getirmiştir. Çok hassas olan ve birkaç yönden değişik doğrultulardan uygulanan kuvvetlere maruz kalan, yöne bağlı kararlılığı, mikro deformasyon dayanımı gibi özelliklerin iyi olmasını isteyen parçaların üretiminde Al/SiC MMK malzemelerin kullanımı büyük avantajlar sağlamaktadır. Çünkü bu özelliklerin sağlanmadığı bazı durumlarda, bazı iç gerilmeler (bu iç gerilmeler oluşan ısı sonucunda ortaya çıkarlar) önüne geçilemeyen şoklara ve titreşimlere sebep olmaktadır. Bu yüzden düşük gerilme şartlarında Al/SiC MMK kompozit malzemelerin deformasyon davranışını anlamak çok önemlidir [24].

Şekil 2.3'de MMK üretimi alanında ticari olarak faaliyet gösteren firmaların büyük bir kısmının SiC ile çalıştığı görülmektedir.



**Şekil 2.3.** MMK pazarında yer alan farklı takviye elemanı tercih eden firma sayısı [25]

İkinci olarak en çok kullanılan takviye elemanı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'dür. Diğer seramik takviye elemanlarında olduğu gibi oluşturdukları kompozitlerde iyi sürtünme ve aşınma davranışı sergilerler. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozitlerin sertlik değerlerinin; takviye elemanı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikül ağırlık oranının artmasıyla arttığı, fakat boyut artması sonucu az da olsa sertlikte azalma olduğu görülmüştür [26].

Al matrisli MMK üretiminde, Al alaşımlarının partiküllerle takviye edilmesinde SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dışında B<sub>4</sub>C, TiC, TiB<sub>2</sub> ve ZrO<sub>2</sub> gibi seramik partiküller de kullanılmaktadır [59].

MMK'lerde takviyenin boyutu, hacimsel oranı ve matris-takviye ara yüzeyi de önem taşımaktadır. Kullanımda avantaj sağlayacak mekanik özellikler ancak partiküller, yapıda homojen olarak dağılırsa gerçekleşebilir. Kompozitlerin; partikül hacim oranının ve boyutunun artmasıyla yoğunluklarının, partikül hacim oranının artması ve boyutunun azalmasıyla porozite oranının arttığı görülmüştür. Ayrıca partiküllerin tane büyüklüğü arttıkça matris içerisinde daha homojen dağılımı görülmüştür [26].

### 2.3. Al Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

MMK malzemelerinin üretim yönteminin seçiminde ürün kalitesi ve maliyet temel etkindir. Mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve maliyeti düşük bir

üretim için etkin üretim yöntemleri geliştirmek bu çalışmaların önemli bir kısmını oluşturmaktadır [27].

MMK malzemelerin üretim yöntemleri genel olarak üç grupta sınıflandırılabilir.

- a) Sıvı hal üretim yöntemleri
- b) Katı hal üretim yöntemleri
- c) Reaksiyon (in situ) üretim yöntemleri [20].

Kullanılan en yaygın üretim teknikleri sıvı ve katı hal üretim teknikleridir. MMK malzemelerin üretiminde tercih edilen yöntemler MMK malzeme kullanan sektörlere göre de değişiklik gösterir. Mortensen'in [25] değerlendirmesine göre, havacılık ve uzay sanayi MMK üretiminde %57 toz metalurjisi, %43 sıvı-hal yöntemlerini tercih ederken, otomotiv sektörü %67 sıvı hal yöntemlerini, %33 toz metalurjisi yöntemini tercih etmektedir. Elektronik sanayi de otomotiv sektörüne benzer olarak daha çok sıvı hal yöntemlerini tercih etmektedir.

### **2.3.1. Sıvı hal üretim yöntemleri**

Sıvı faz üretim yöntemleri geleneksel döküm yöntemlerinin kompozit malzemeler üzerine uygulanması ile geliştirilen yöntemlerdir. Değişik tekniklerin uygulandığı bu yöntemde matris, seramik takviye ile temas sağlandığında, kısmen veya tamamen eriyik durumdadır. Bu durumda, matris ile takviye malzemesi arasında iyi bir temas sağlandığından ara yüzey bağları kuvvetli olur. Ancak sıcaklık, basınç, temas süresi gibi değişkenlerin kontrol edilememesi halinde, ara yüzey reaksiyonları oluşabileceğinden dolayı kırılgan bir yapı ile karşılaşılabilir. Buna rağmen yöntemin; basit ve ucuz olması, kompleks ve şekilli parçaların mekanik işlemeye tabi tutulmadan elde edilmesi, çeşitli metal matris ve fiberler için uygun olması, sık ihtiyaç duyulan kompleks parçaların üretim kolaylığı gibi avantajlara sahip olması ticari uygulamalarda tercih edilmesine neden olmaktadır [28].

Al MMK'lerin üretiminde en çok kullanılan sıvı hal üretim yöntemlerini başlıca üç grup altında toplamak mümkündür:

- a) Karıştırmalı döküm ve sıvı metal infiltrasyonu
- b) Sıkıştırılmı döküm ya da basınçlı infiltrasyon
- c) Sıvı metal püskürtme

### 2.3.2. Katı hal üretim yöntemleri

Katı faz üretim yöntemleri içinde en yaygın olanı toz metalürjisi yöntemidir. Toz metalürjisi boyutları, şekilleri farklı olan metal tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı malzemelere dönüştürür. Toz metalürjisi yöntemi, matris alaşımı ve takviye elemanı tozlarının bir karıştırıcı yardımı ile karıştırılmasını, karıştırılan tozların preslenmesini ve sinterlenmesini içermektedir.

Toz metalürjisi yöntemi yüksek ergime derecesine sahip matrisler de dahil olmakla birlikte, geniş bir çeşitlilikte matris takviye kompozisyonlarıyla üretimi olanaklı kılmaktadır. Temel işlem aşamaları şöyledir:

i. Matris ve takviye tozlarının karıştırılması, harmanlanması ya da mekanik alaşımlama: Bu aşamada dikkat edilmesi gereken en önemli konu üniform takviye dağılımının sağlanmasıdır.

ii. Gaz giderme: Bu aşama, adsorbe edilmiş gazları, suyu ve/veya hidroksitleri uzaklaştırmak için uygulanmaktadır.

iii. Birleşme: Bu aşama, soğuk ve/veya sıcak presleme, soğuk ve/veya sıcak izostatik presleme, ekstrüzyon, dövme, enjeksiyon kalıplama, sıcak haddeleme gibi işlemleri içerir. Soğuk presleme gibi düşük sıcaklıklarda yapılan presleme işlemlerinin ardından sinterleme kademesi uygulanmaktadır.

İşlem sıcaklığına bağlı olarak ara yüzeydeki istenmeyen etkileşimlerin minimize edilmesi, yüksek hacim oranında parça üretiminin mümkün olması gibi avantajlarının yanında, sadece partikül takviyeli kompozitler için elverişli bir yöntem olması, uzun işlem süreleri, şekil ve boyut kısıtlamaları ve tüm kademelerle bir bütün olarak düşünüldüğünde nispeten yüksek üretim maliyetlerine sahip olması yöntemin dezavantajlarıdır [29].

Difüzyonlu birleştirme ve vakumda presleme yöntemi başka bir katı hal üretim yöntemidir. Bu yöntemde, levha veya yaprak şeklindeki matris malzemeleri ile levha veya uzun fiber şeklindeki takviye elemanları üst üste konularak, ergime sıcaklıklarının altında bir sıcaklıkta preslenerek difüzyon yoluyla birleşmeleri sağlanmaktadır. Matris ve takviye elemanlarının birleşecek yüzeylerinin düzgün, temiz ve oksitsiz olması difüzyonla birleşmenin başarısında önemlidir. Matris malzemesi olarak Al ve Titanyum (Ti) alaşımları, takviye elemanı olarak da  $Al_2O_3$  ve SiC gibi fiberler kullanılmaktadır. Bu yöntemin

olumsuz yanları ise; malzeme üretim sürecinin uzun olması, yüksek sıcaklık ve basınçlar gerektirmesi nedeniyle üretim maliyetinin yüksek olmasıdır [30].

#### **2.4. Al MMK'lerin Kullanım Alanları**

Alüminyum matrisli kompozit malzemeler, önceki bölümlerde aktarılan üstün özelliklerinden dolayı endüstrinin farklı alanlarında uygulanmaktadır. Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin en çok kullanıldığı sektörler olarak otomotiv sektörü ile havacılık ve uzay sektörü öne çıkmaktadır.

##### **2.4.1. Otomotiv sanayi uygulamaları**

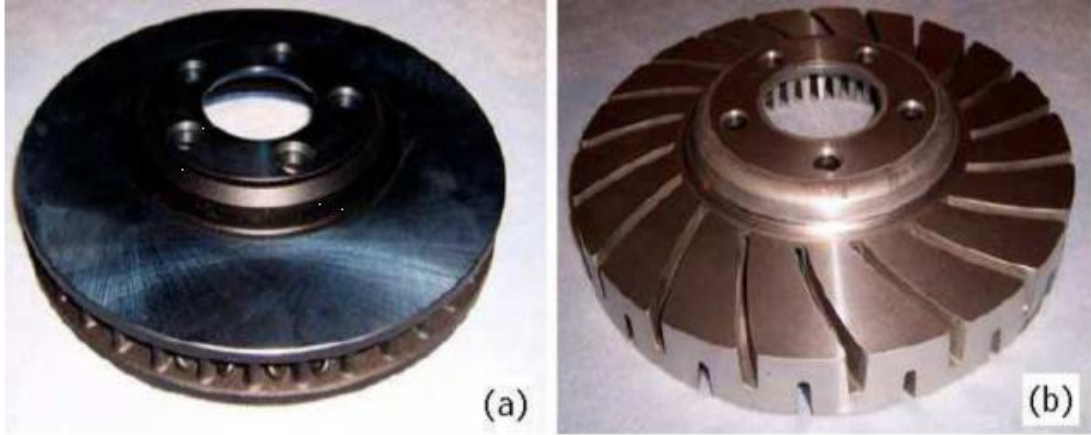
Günümüzde otomotiv sektöründe çeşitli alüminyum parçalar kullanılmaktadır. Bunların başında döküm yöntemiyle üretilen silindir kafaları, dişli kutuları, jantlar, levha ve ekstrüzyon yöntemiyle imal edilen radyatörler, tamponlar, koltuk rayları, yan çarpma çubukları vb. gelmektedir. Alüminyum emniyet, konfor ve güvenilirlikten ödün vermeden ağırlık azalımı için anahtar bir malzemedir. Alüminyumun sunduğu yüksek teknoloji çözümleri sayesinde güvenlik unsurlarından taviz verilmeksizin bir araçta 2'kg lık konvansiyonel malzemenin 1 kg alüminyumun yerini alması önemli ölçüde araç ağırlığının azalmasına, toplam kullanım süresi boyunca çok ciddi yakıt tasarrufunun elde edilmesine olanak tanıyacaktır. Düşük özgül ağırlığı ve yüksek mukavemeti sayesinde alüminyumun yaygın olarak kullanımı orta sınıf bir otomobilde yaklaşık 300 kg ağırlık azaltımı sağlayabilir [31].

Özellikle levha ürünü malzemelerin kullanılarak kompleks geometrilere sahip bileşenlerin pres operasyonları ile imalatında, alüminyumun düşük akma mukavemeti sayesinde parça imalatı daha az enerji harcanarak yapılabilmektedir. Audi A3 örneğinde olduğu gibi aracın motor bloğunu barındıran ön tarafı bu tip bir imalat metodunun ürünüdür (bkz. Şekil 2.4 ) [31].



**Şekil 2.4.** Audi A3 için Al levhadan üretilmiş ön bölüm

Herling'in yürüttüğü bir projede dört kapılı bir sedan otomobilde kullanılan gri dökme demirden imal edilen 8,44 kg ağırlındaki fren diski Al/SiC/20p Al MMK'den üretilerek ağırlık 3,32 kg'a düşürülmüştür (Şekil 2.5) [32].



**Şekil 2.5.** a) Gri dökme demir fren diski, b) Al/SiC/20p Al MMK fren diski [32]

Otomotivde kullanılan bazı alüminyum MMK parçaların uygulama alanları ve özellikleri Çizelge 2.1'de özetlenmiştir [33].

**Çizelge 2.1.** Metal matrisli kompozitlerin otomotivde uygulama örnekleri

<b>Takviye Malzemesi</b>	<b>Matris</b>	<b>Uygulama Alanı</b>	<b>Özellikleri</b>
SiC	Al	Fren disk rotoru	Aşınma direnci, ağırlığın azalması
SiC	Al	Amortisör silindiri	Aşınma direnci, ağırlıkta azalma, ısı yayılımı
SiC	Mg	Dişli çark, makara ve zırh	Ağırlık azalması, yüksek mukavemet ve rijitlik
SiC	Al	Piston, fren diski, çap mastarı, silindir gömleği, pervane mili	Ağırlık azalması, yüksek dayanım, aşınma direnci, yüksek özgül rijitlik
SiC	Al	Piston başı	Yüksek sıcaklıkta çekme direnci ve yorulma direnci
B <sub>4</sub> C	Al	Tahrik mili borusu	Ağırlığın azalması, yüksek aşınma direnci, ısı kararlılık
B <sub>4</sub> C	Al	Fren diski	Ağırlığın azalması, yüksek aşınma direnci, ısı kararlılık
B <sub>4</sub> C	Al	Fren balatası	Ağırlığın azalması, yüksek aşınma direnci, ısı kararlılık
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al	Piston segmanı	Yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklıkta çalışma
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al	Motor bloğu	Düşük ağırlık, geliştirilmiş mukavemet, yüksek aşınma direnci
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + C	Al	Silindir gömleği	Aşınma Direnci, plastik akma direnci, ağırlığın azalması
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> veya C	Al	Valfler	Yüksek sıcaklık, yorulma sürünme ve aşınma direnci

#### **2.4.2. Havacılık ve Uzay Sanayi Uygulamaları**

Otomotiv sektörünün aksine havacılık ve uzay uygulamalarında performans, maliyetin önüne geçmektedir. Isıl genleşme, yüksek mukavemet, süneklik, korozyon dayanımı gibi özellikler düşük yoğunluk ile birlikte talep edilmektedir. Ticari jet uçaklarında fan kılavuz kanatları, helikopterlerde pervane milleri, uzay teleskopu antenlerindeki frekans yönlendiricileri, alüminyum matrisli kompozit malzemelerin havacılık-uzay endüstrisindeki uygulamalarına örnek olarak gösterilebilir [29].

Uçaklar ve diğer hava aracı bileşenlerinde alüminyum, silisyum karbür (SiC) partikülle takviye edilerek bazı özellikleri iyileştirilmiştir. Örneğin motorda yüksek ısıya maruz kalan bölgelerdeki parçalarda takviye elemanının miktarının ayarlanması ile birleştirilmiş elemanların termal genleşme katsayısı belirlenebilmiştir [34].

Günümüzde kullanılan bazı alüminyum MMK parçaların uygulama alanları ve özellikleri Çizelge 2.2’de özetlenmiştir [33].

**Çizelge 2.2.** Demiryolu, elektrik/elektronik, spor, kağıt ve diğer endüstrilerde Al MMK’lerin uygulamaları

Endüstri	Takviye Malzemesi	Matris	Uygulama Alanı	Özellikleri
Demiryolu	SiC	Al	Fren disk rotoru	Aşınma direnci, ağırlığın azalması
Elektrik/ Elektronik	SiC	Al	Multiçip modül	Yüksek ısı iletimi, ağırlık azalması
Elektrik/ Elektronik	C	Al	Termal genleşme ara desteği	Termal genleşme
Elektrik/ Elektronik	Bor	Al	Soğutma Plakaları	Yüksek ısı iletimi, ağırlık azalması
Spor	SiC	Al	Golf malzemeleri	Aşınma direnci, hafiflik
Spor	SiC veya Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al	Bisiklet kadranı	Rijitlik, hafiflik, yorulma direnci
Kesici takımlar	Bor	Cu- Ti- Sn		
Süper iletkenler	Nb ipliği	Ni, Cu, Ag		

## 2.5. Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti

Alüminyum alaşımlarının kaynağı pek çok malzemeye göre zor ve sorunludur. Bu alaşımların kaynatılması sırasında karşılaşılan en yaygın problem sıcak çatlamadır. Cieslak vd. [7] yapmış oldukları alüminyum alaşımlarının lazer kaynağı ile birleştirilebilirliği konulu çalışmada; kaynak esnasında meydana gelen yüksek enerji akışından dolayı, yüksek buhar basıncına sahip elementler buharlaşarak, kaynak havuzunun kimyasal kompozisyonunu etkileyebileceğini belirtmişlerdir. Yine aynı çalışmada diğer füzyon (ergitme) kaynakları ile yapılan

alüminyum alaşımlarının kaynağı sırasında alüminyumda; Mg ve Zn'nun buharlaştığını belirtmektedirler. Alaşımdaki elementlerin buharlaşması nedeniyle çatlak oluşumunun artabileceği belirtilmiştir [7,35].

Yapılan başka bir çalışmada gaz tungsten ark kaynağı (TIG) kullanarak 7039 alüminyum alaşımının kaynağı yapıp çeşitli kaynak parametreleri altında sıcak çatlama eğilimi ve çatlaklara bağlı kırılma davranışı incelenmiştir. Dolgu malzemesi kullanımının sıcak çatlama davranışını azalttığı görülmüştür (Şekil 2.6) [19].



**Şekil 2.6.** Gaz Tungsten Ark Kaynağı kullanarak 7039 alüminyum alaşımının kaynağında oluşan çatlaklar [19]

## 2.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) 1970'li yıllarda İngiltere'de The Welding Institute (TWI) adlı kurumda geliştirilmiş ve 1990'lı yıllarda patenti alınmış bir katı hal kaynak yöntemidir. SKK'nın diğer geleneksel kaynak yöntemlerine göre;

- a. Kaynak edilen malzemelerin ısıdan etkilenmesi dolayısıyla mekanik özelliklerdeki kaybın minimum olması,
- b. Katı hal kaynağı olduğu için çatlak ve porozite oluşumu gibi sıvı hal kaynaklarında karşılaşılan problemler söz konusu olmaması,
- c. Yatırım maliyeti lazer ve elektron kaynağı cihazlarından düşük olması,
- d. Yapılan kaynakta ilave tel kullanılmaması,

- e. Temiz ve çevreci bir kaynak yöntemi olması,
- f. Otomasyona uygun olması,
- g. Farklı yumuşak malzemelerin kaynağında rahatlıkla kullanılabilir olması gibi üstünlükleri vardır [36].

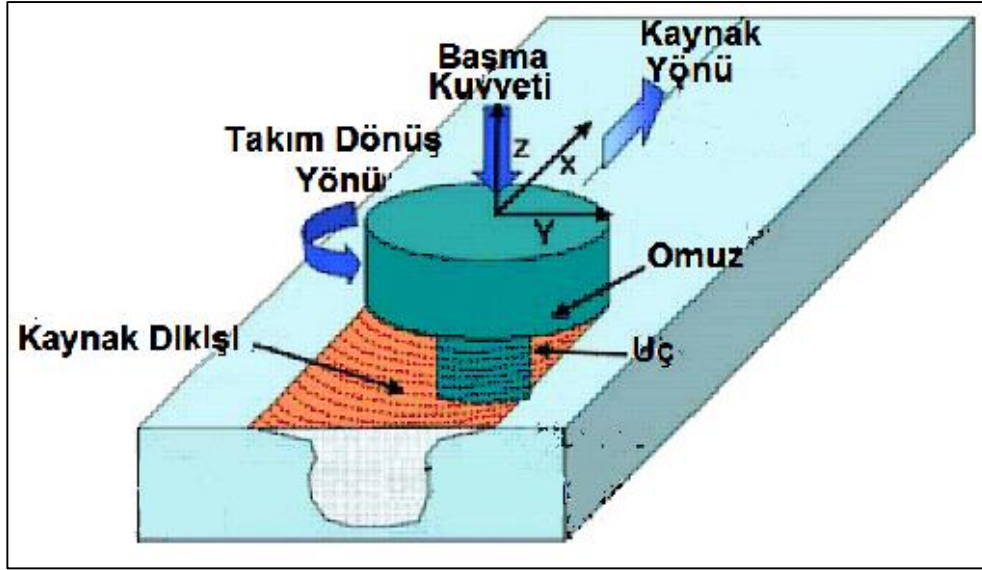
Günümüze kadar yapılmış olan birçok çalışmada da Al ve alaşımların birleştirilmesinde farklı ve üstün bir kaynak yöntemi olduğunu göstermiştir.

Sürtünme karıştırma kaynağı gemi, uçak, uzay aracı, tren ve kara taşıtlarının imalatı gibi çok geniş bir potansiyel uygulama alanı yelpazesine sahiptir.

## **2.7. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılışı**

SKK yönteminde, alüminyum alaşımı plakalar alın altına, bindirme ve köşe birleştirme türlerinde; özellikle yatay oluk pozisyonunda kaynak edilebilmekte ve ergitme esaslı yöntemlere göre önemli üstünlükler göstermektedir. SKK, alüminyum alaşımları ve diğer bazı metallerin düz ve bindirmeli kaynağı için yeni ve başarılı bir kaynak tekniğidir [29].

Birleştirilecek parçalar, arkalarına bir plaka konularak, Şekil 2.7’de görüldüğü gibi alın altına aralarında boşluk olmayacak şekilde sabitlenir. Geniş silindirik omuzlu, delme yapabilecek tipte bir takım (baticı uç), freze tezgahı ekipmanları ve arka tutucular kullanılarak yüksek devirde döndürülür. Kaynak yapılacak levhalara daldırılır ve kaynak yapılacak uzunluk boyunca ilerletilir. Takım etrafındaki malzeme sürtünmeyle ısınıp yumuşayarak takım ucundan arka yüzeye doğru karıştırılır. Karıştırılan malzeme katılaştır ve hidrostatik basınç koşullarında soğur [37].

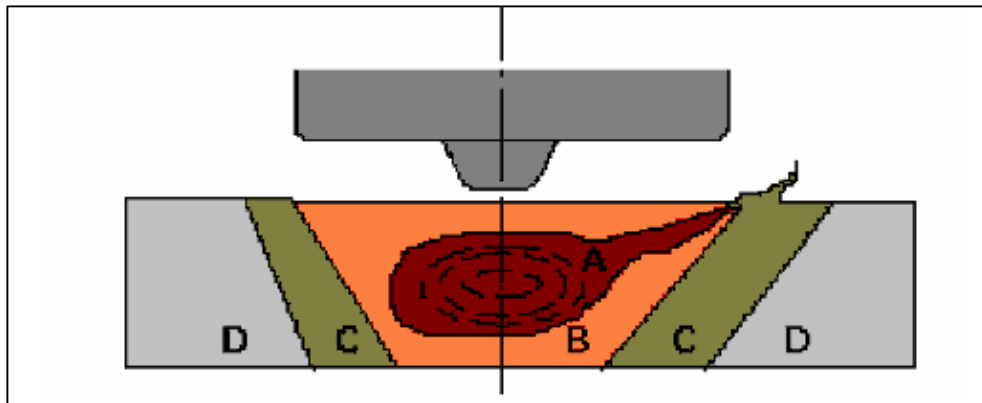


Şekil 2.7. SKK şematik gösterimi [53]

SKK takımı uç ve uç omzu olmak üzere iki parçadan oluşur. SKK takımının, malzemeyi mekanik özelliklerini kaybettirmeden yumuşatması gerekir. Bu sebeple takım, yüksek sıcaklıklarda yüksek mekanik uygunluğa sahip, yıpranmaya dayanıklı malzemeden imal edilmelidir [38].

## 2.8. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Oluşan Bölgeler

Şekil 2.8'de SKK yönteminde kaynak bölgesinde oluşan dört farklı bölge görülmektedir.



Şekil 2.8. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan alüminyum alaşımında oluşan bölgeler [39]

### 2.8.1. Ana metal (ısıdan etkilenmeyen bölge)

Şekil 2.8'de D bölgesidir. Esas malzeme olup bu bölgede plastik şekil değiştirme olmaz. Malzemenin mikroyapı ve özelliklerinin değişmediği ana metal bölgesidir.

### **2.8.2. Isı tesiri altındaki bölge (ITAB)**

Kaynak metaline daha yakın, ısıdan etkilenmeyen ana metale komşu olan bölgedir. Şekil 2.8’de C bölgesidir. Bu bölgedeki malzeme karıştırma esnasında meydana gelen ısıdan etkilenir ve malzemenin yapı ve özelliklerinde kısmi değişimler ortaya çıkar. Bu bölgede plastik deformasyon meydana gelmez. Çökeltme sertleşmesi ısı işlemi uygulanan bazı alüminyum alaşımlarında bu bölgenin sıcaklığı 250°C’yi geçmediği takdirde taneler, esas malzemenin özelliklerini göstermektedir. Fakat 250°C aşıldığı zaman bu bölgede tane irileşmesi ve tane sınırlarında çökeltmeler meydana gelmektedir [39].

### **2.8.3. Termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge (TMEB)**

Karışım bölgesi ile ısıdan etkilenen bölge arasında, yüksek deformasyon ve sıcaklığa maruz kalan bölgeyi temsil etmektedir. Şekil 2.8’de B ile gösterilen bölgedir. Ana metalin tanelerinin kaynak merkezinden bu bölgeye ekstrüze edilmesiyle, yoğun bir dövme olayı meydana gelmektedir. Karıştırma esnasında oluşan ısı, bu bölgenin mikroyapı ve mekanik özelliklerini değiştirir. Bunun sonucunda deformasyona uğrayan taneler, uzamış ve yassılaştırmış taneler haline gelmektedir [39].

### **2.8.4. Karıştırma bölgesi (KB)**

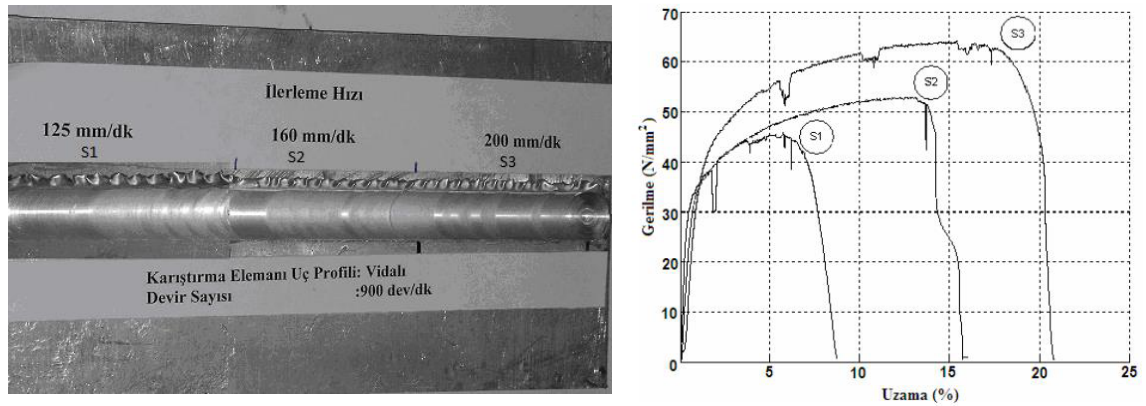
Kaynağın ortasında yer alan (Şekil 2.8’de A ile gösterilmiştir) ek yerinin diğer bölgelerinden daha yüksek mekanik karakteristiklere sahip oldukça iyi ve değişmez bir mikroyapı gösteren bölgedir. Karışım bölgesinin dinamik toparlanma sonucu oluştuğu kabul edilir. Kaynak bölgesinde biriken yüksek orandaki plastik genişleme sonucu ortaya çıkan mikroyapı karışım bölgesinde çok ince taneli bir yapıya neden olur [40].

## **2.9. SKK Uygulamasına Etki Eden Faktörler**

Takımın ilerleme hızı, takımın devir sayısı, takımın uç dizaynı, takım baskı kuvveti, takımın yüzeye dalma açısı, pim batma derinliği, yüzey hazırlama, malzeme kalınlık farklılığı, kalıp ve sabitleme aparatları başlıca sürtünme karıştırma kaynağında kaynak kalitesine etki eden parametrelerdir.

### 2.9.1. Takım ilerleme hızı ve takım devir sayısı

Özdemir vd. 8mm kalınlığında 1030 Al alaşımı levhaları farklı ilerleme hızları ve farklı devirlerde SKK ile birleştirmişlerdir [41]. Kaynaklı bağlantılara uyguladıkları çekme testi sonuçlarından elde edilen gerilme ve uzama eğrilerinden, ilerleme hızının kaynaklı bağlantıların mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir. İlerleme hızı artırılarak birleştirilen kaynaklı numunelere ait gerilme ve uzama eğrileri incelendiğinde, artan ilerleme hızına bağlı olarak malzemenin çekme dayanımının arttığı görülmüştür. Düşük ilerleme hızlarında birleştirilen kaynaklı numunelerde yüksek ısı girdisi kaynak havuzundaki malzemenin viskozitesini artırarak ekstrüzyonun şiddetini artırmış ve bunun sonucunda tane büyümesi meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak bu numunelerde gevrek kırılma davranışı görülmüştür (Şekil 2.9 ).

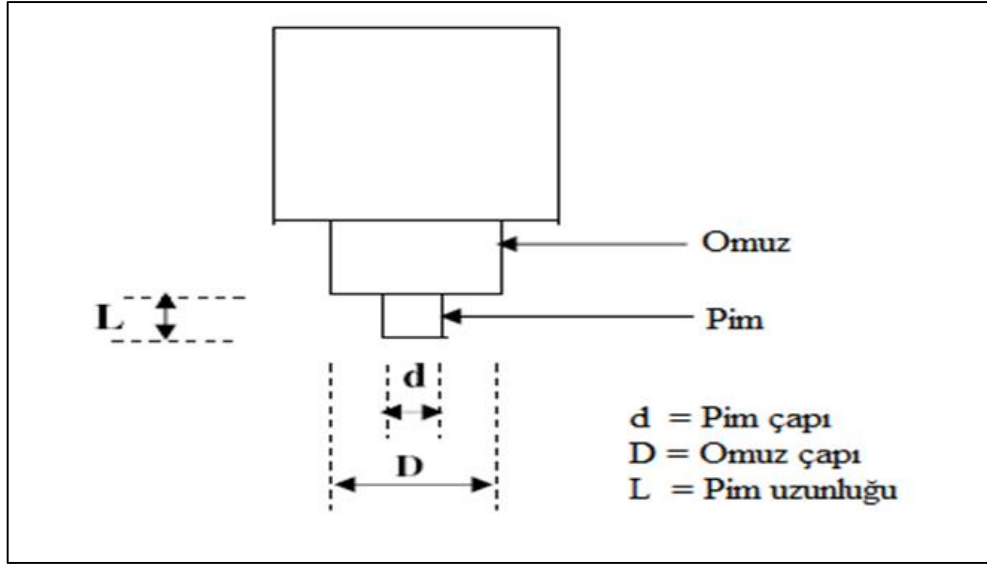


Şekil 2.9. Farklı ilerleme hızlarındaki gerilme ve uzamalar [41]

### 2.9.2. SKK uygulamasında kullanılan uçlar (pimler) ve omuzlar

Takım geometrisi, bu kaynak yönteminin gelişimi üzerindeki en önemli etkendir. Plastik şekil değiştiren malzemenin akışı üzerinde kritik bir rol oynar ve kaynak dikişinin profilini, mikroyapısını ve mekanik özelliklerini etkiler [38,41,42].

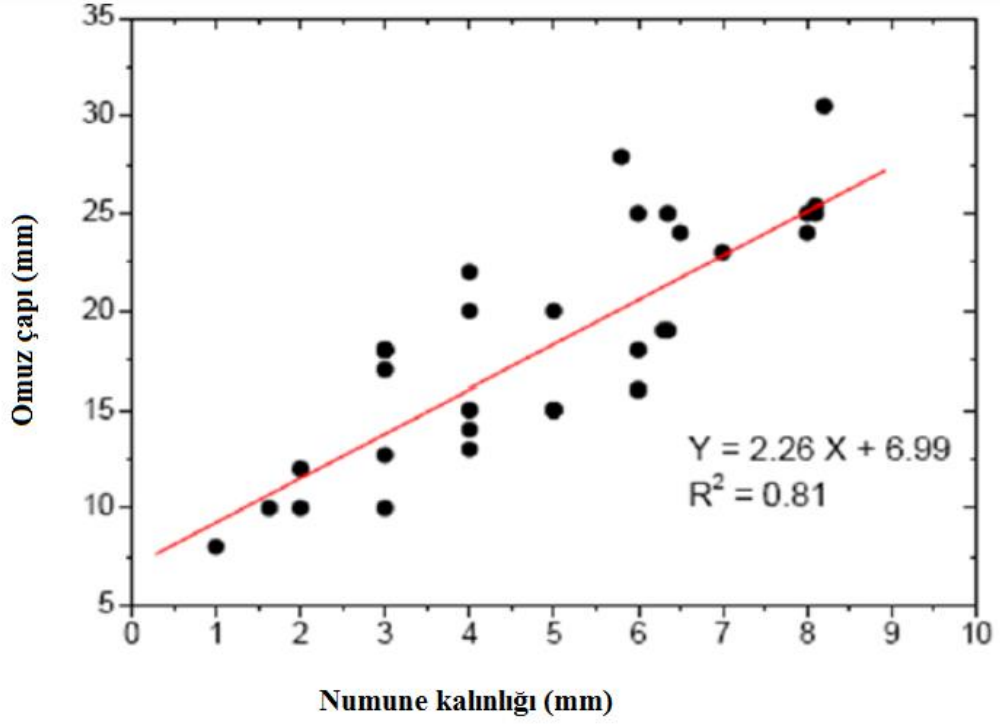
Şekil 2.10'da SKK takımının uç-omuz bağlantısı ve temel ölçüleri yer almaktadır.



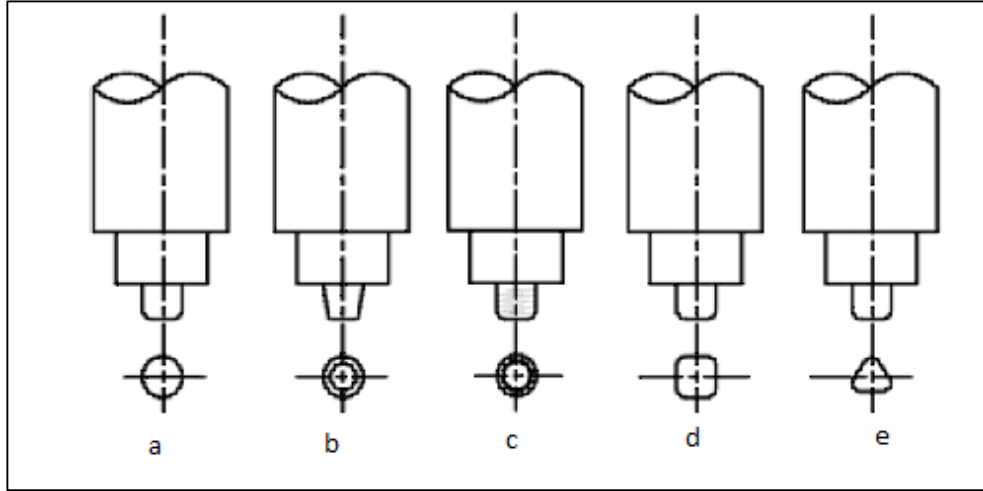
**Şekil 2.10.** Bir uç-omuz bağlantısı ve temel ölçüleri [43]

Sürtünme karıştırma kaynağında ısı girdisini etkileyen en önemli parametre karıştırıcı ucun devir sayısı ve omuz çapıdır. Omuz çapı arttıkça sürtünme yüzeyi ve buna bağlı olarak meydana gelen ısı miktarı artacaktır. Sıcaklık değerlerinin farklılıklar göstermesi malzemenin mekanik özelliklerinin değişmesinde önemli rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalarda geniş çaptaki omuzlu malzemenin yüzey sıcaklığını artırdığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi geniş omuzdaki sürtünme yüzey alanının diğerlerine göre daha fazla olmasıyla birim zamanda malzemeye giren ısı akışının da bu oranda artmasıdır [44]. Şekil 2.11’de omuz çapları ile levha kalınlıkları arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Sarsılmaz vd. yapmış oldukları çalışmada [42] Al1050 ve Al6061 alüminyum alaşım çiftlerini alın pozisyonunda SKK yöntemiyle birleştirilmiştir. Yapılan birleştirmelerde farklı takım uç geometrilerine sahip (vida, üçgen, konik) özel yapım karıştırıcı uçlar kullanılmış ve yapılan mekanik test sonuçlarından elde edilen verilerden, vida profilindeki karıştırıcı uç geometrisinin bağlantılar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.12’de daha farklı uç profilleri gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Omuz çaplarının levha kalınlıklarına göre değişimi [45]



Şekil 2.12. Farklı uç profilleri a) silindirik uç b) konik uç c) vida profilli d) kare profilli e) üçgen profilli [46]

## 2.10. Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin uygulama alanları

SKK yöntemi gerek yaşlandırma sertleştirme yapılan gerekse yaşlandırma sertleştirme yapılamayan (lxxx ve 5xxx serileri gibi ısıl işleme duyarlı olmayan) Al-alaşımalarında başarı ile uygulanabilmektedir. Bu yöntem ile elde edilen birleştirmelerin yüzey kalitesi geleneksel ergitme ile elde edilen birleştirmelerden çok daha yüksektir. Buna ilaveten, bu yöntem ile kaynak edilen 5454 alüminyum alaşımının korozyon performansının da oldukça iyi olduğu tespit

edilmiştir. Hatta, geleneksel kaynak yöntemleri ile kaynağı çok güç olan 7075 alüminyum alaşımı bile bu yöntem ile başarılı bir şekilde birleştirilmiş ve elde edilen birleştirmeler oldukça iyi mekanik özellikler göstermiştir [47].

Yüksek hız feribotlarında kullanılan standart boydaki alüminyum ekstrüzyon panelleri sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmektedir. Ergitme kaynaklarına kıyasla ısı girdisinin düşük olması, panellerdeki distorsiyon ve kalıntı gerilmelerini minimum düzeyde olmasını sağlamaktadır [48].

SKK yolcu uçakları gibi hafif alüminyum iskeletli yapılarda büyük potansiyel arz etmektedir. Eclipse Aviation Corporation üreteceği özel jetlerde perçinleme ve yapıştırma yerine; maliyet ve montaj zamanından tasarruf amacıyla sürtünme karıştırma kaynağını kullanmaya karar verdiğini açıklamıştır. Günümüzde, Al-Li 2195 alaşımından üretilen uzay mekiklerinin yakıt tanklarının son kubbe kısımlarının kaynağında bu yöntem başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [47].

Sürtünme karıştırma kaynağının otomotiv sektöründe ilk uygulamalarından biri Hydro Marine Aluminium (Norveç) firması tarafından prototip otomobil jantlarının iki parçasının birleştirilmesidir [49].

Modern yolcu treni vagonlarının imalatında, alüminyum ekstrüzyonlardan üretilen petek paneller daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu panellerde, uzun Al-ekstrüzyonlar aralarına sıklık artırıcı destekler yerleştirilerek birleştirilmektedir. Bu sayede, hem çarpışmalarda emniyet hem de bükme kuvvetlerine dayanım artırılmaktadır. Klasik ergitme kaynağı, özellikle yüksek mukavemetli Al-alaşımalarında ITAB bölgesinde aşırı mukavemet kaybına sebep olduğu için, son yıllarda Almanya ve İngiltere'de meydana gelen hızlı tren kazalarında daha dayanıklı kaynaklara ihtiyaç duyulduğu gerçeği ortaya çıkmıştır.

Sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak bölgesinde daha düşük seviyelerde mukavemet kaybına neden olduğu için son yıllarda Avrupa ve Japonya 'da hızlı tren vagonlarının üretiminde bu kaynak teknolojisi ile imal edilen Al-alaşımı petek paneller kullanılmaya başlanmıştır [50].

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Bu çalışmada, toz metal yöntemi ile üretilmiş 7039 Al alaşımı levhalar kullanılmıştır. Bu levhaların kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu alaşımı oluşturan tozlar takviyesiz ve partikül takviyeli (%10 SiC) olarak 1 saat ayrı ayrı bir karıştırıcıda (Turbola) homojen karışımları sağlandıktan sonra 300 MPa presleme basıncında soğuk olarak preslenmiştir. Presleme sonunda çapı ve yüksekliği aynı olan (100x100 mm) blok numuneler üretilmiştir. Bu blok numuneler 500 °C sıcaklıkta ¼ oranında ekstrüze edilerek ve 24 mm kalınlıkta 86 mm genişlikte plaka elde edilmiştir. Akabinde de 500°C’de kademeli haddemeleme işlemiyle levha kalınlıkları, takviyesiz 7039 Al alaşımı levha 4.8 mm ve SiC takviyeli levha ise 3.8 mm’ye haddelenmiştir. Haddemeleme sonrasında SiC takviyeli ve takviyesiz levhalara T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. Takviyesiz levhalar 480°C de, takviyeli levhalar ise 550°C’de 2 saat fırında bekletilmiştir. Sonrasında su ile soğutularak 120°C’de 24 saat yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Yaşlandırma ısıl işlemi sonrasında levhaların yüzeyleri freze tezgahında düzeltilerek 60x50 mm boyutlarında kaynağa hazır hale getirilmiştir.

**Çizelge 3.1.** 7039 Al kimyasal bileşimi [35]

Zn	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	Cr	Ti	Diğer	Başka metallerin bileşimi	Al
3,5-4,5	2,3-3,3	0,10-0,40	0,10	0,40	0,30	0,15-0,25	0,10	0,05	0,15	Kalan

#### 3.2.Yöntem

##### 3.2.1.Dik başlı üniversal freze tezgâhı

SKK deneyleri İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü takım tezgâhları laboratuvarında bulunan (WMW-HECKERT D.ALMAN YA Teknik lisansı altında Taksan Takım Tezgâhları Sanayi ve Ticaret A.S. tarafından 1982 yılında üretilmiş FU 315 V/2) dikey başlı freze tezgahında yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı freze tezgahı Şekil 3.1’de verilmiştir. Deneylerde iki farklı dönme hızı 1400 dev/dak (SiC takviyelide), 900 dev/dak (takviyesizde) ve ilerleme hızı ise her iki levha için 50 mm/dak olacak şekilde uygulanmıştır. Partikül takviyeli

metal matrisli kompozit levhalara 900 dev/dak dönme hızında ön birleştirme işlemi yapılmıştır. Ancak dönme hızının levhaları birleştirmek için yeterli olmadığı görülmüştür. Bu nedenle devir sayısında artışa gidilmiştir. Aynı devir sayısının (900 dev/dak) takviyesiz toz metal levhalar için yeterli olduğu görülmüştür. Bu işlemde amaç daha fazla ısı girdisi ile kaynaklı birleştirme yapmaktır. Karıştırıcı uç levhalara daldıktan yaklaşık 2 dakika sonra karıştırıcı uca ilerleme verilmiştir.



**Şekil 3.1.** Dikey başlı universal freze tezgahı

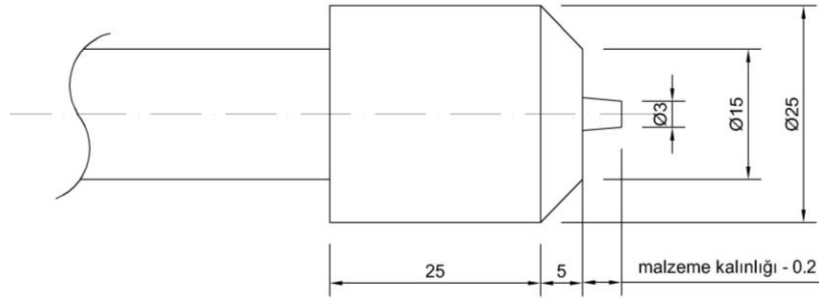
### **3.2.2. Karıştırıcı Uç**

Karıştırıcı uç olarak vida profilli 3 mm çapında format marka ters kılavuz seçilmiş ve talaşlı imalat ile takım tutucu yapılmıştır. Karıştırıcı uç ve tutucunun resmi Şekil 3.2’de verilmiştir.



**Şekil 3.2.** Karıştırıcı uç

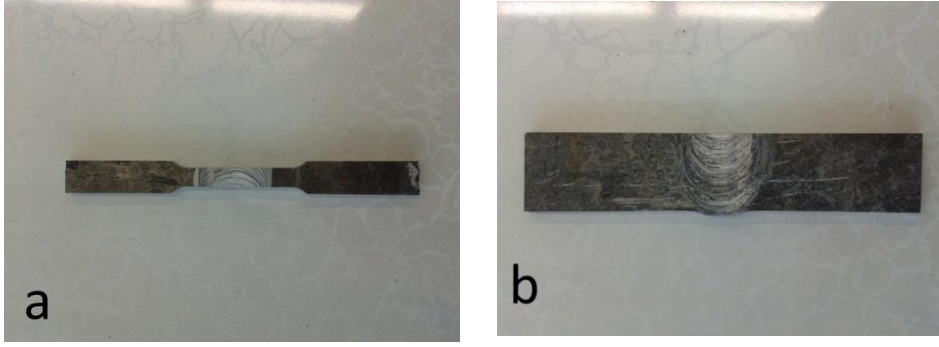
Malzeme kalınlıkları birbirinden farklı olduğu için uç batma derinliği ayarlanabilir bir şekilde imal edilmiştir. Şekil 3.3’de karıştırıcı uca ait teknik çizim verilmiştir.



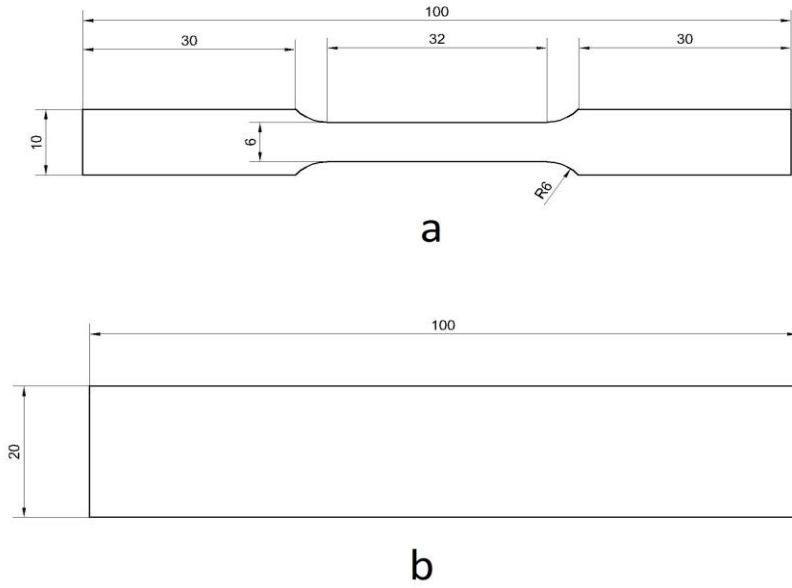
**Şekil 3.3.** Karıştırıcı uç ölçüleri

### **3.3. Kaynaklı Levhalardan Eğme ve Çekme Deney Numunelerinin Hazırlanması**

Çekme ve eğme deney numuneleri ASTM E 8 M-04 standardının belirttiği ölçülerde malzeme yapısını değiştirmeden tel erozyon tezgahında kesilmiştir [52]. Kesme işlemi yüksek hassasiyetli ONA AF 25 marka WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) tezgahında 0,25 mm çapında pirinç tel kullanılarak yapılmıştır. Kaynaklı levhalardan 3’er adet çekme numunesi, 2’şer adet eğme numunesi hazırlanmıştır. Şekil 3.4’te çekme ve eğme numunelerine ait resimler, Şekil 3.5’de ise teknik resim ölçüleri verilmiştir.



Şekil 3.4. a) Çekme numunesi b) Eğme numunesi

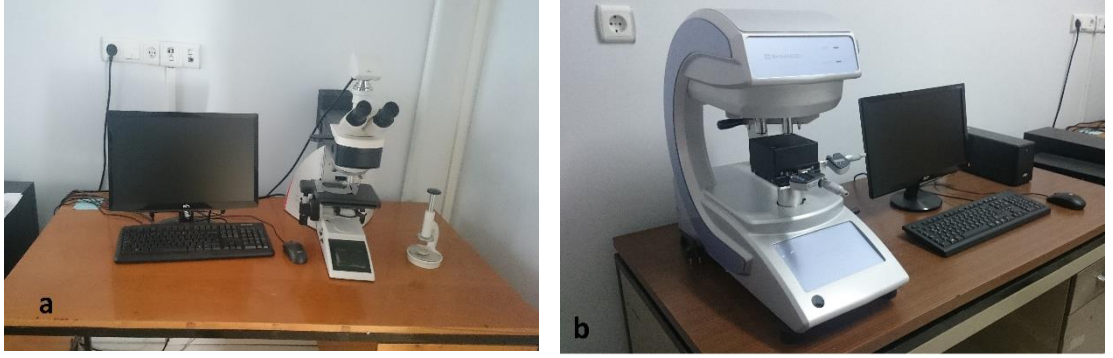


Şekil 3.5. a) Çekme b) Eğme numunelerinin teknik ölçüleri

Çekme ve eğme deneyleri 5 ton kapasiteli Utest marka çekme-basma cihazında 1 mm/dak çekme ve basma hızlarında yapılmıştır.

Mikroyapı ve mikro sertlik incelemelerinde kullanılan numuneler için iki çekme numunesinin arasında kalan Şekil 3.7’de görülen kısım kullanılmıştır. Bu numuneler 180 numaralı zımparadan başlanıp 1200 numaralı zımparaya kadar kademeli olarak zımparalanıp sırasıyla 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  elmas pasta ile parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatma işlemi bittikten sonra Keller çözeltisinde (1 ml HF, 1,5 ml HCl, 2,5ml HNO<sub>3</sub>, 95 ml H<sub>2</sub>O) 15 sn daldırılarak dağlama işlemi yapılmıştır. Kaynak yönüne dik kesitlerden alınan mikroyapı fotoğrafları Leica DM4000-M marka mikroskop ile kaynak bölgesi ve çevresindeki değişimler incelenmiş ve mikro sertlik ölçümleri Shimadzu marka HMV-G21 serisi mikro

sertlik ölçme cihazında 100 gr yük kullanılarak yapılmıştır. Bu ölçüm cihazları Şekil 3.6 a ve b de verilmiştir.



**Şekil 3.6.** a) Leica DM4000-M Mikroskop b) Shimadzu sertlik ölçme cihazı



**Şekil 3.7.** Mikroyapı incelemeleri için ara parçaları alınmış çekme numuneleri

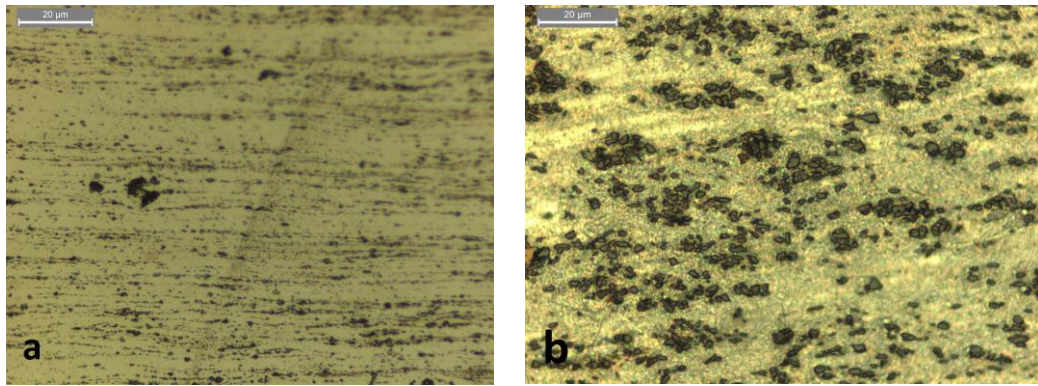
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

7039 Al ve 7039/SiC/10p malzemelerine SKK sonrası elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Tane yapısını görmek amacıyla mikroyapı fotoğrafları alınmıştır. Ayrıca mekanik özellikleri ve kaynak performansları hakkında bilgi edinmek amacıyla çekme, eğme ve sertlik deneyleri yapılmıştır.

##### 4.1. Mikroyapı Sonuçları

Şekil 4.1’de takviyesiz 7039 Al ve 7039/SiC/10p levhalarının ana metal kısımlarının mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Takviyesiz 7039 Al numunesinde tanelerin hadde yönünde uzadıkları görülmüştür. Bu tanelerin yaklaşık 500-1000  $\mu\text{m}$  uzunluğunda 1~5  $\mu\text{m}$  genişliğinde oldukları tespit edilmiştir. 7039/SiC/10p numunesinde ise SiC partikülleri açık bir şekilde görülmekte olup bu partüküllerin hemen hemen homojen dağıldıkları görülmüştür.

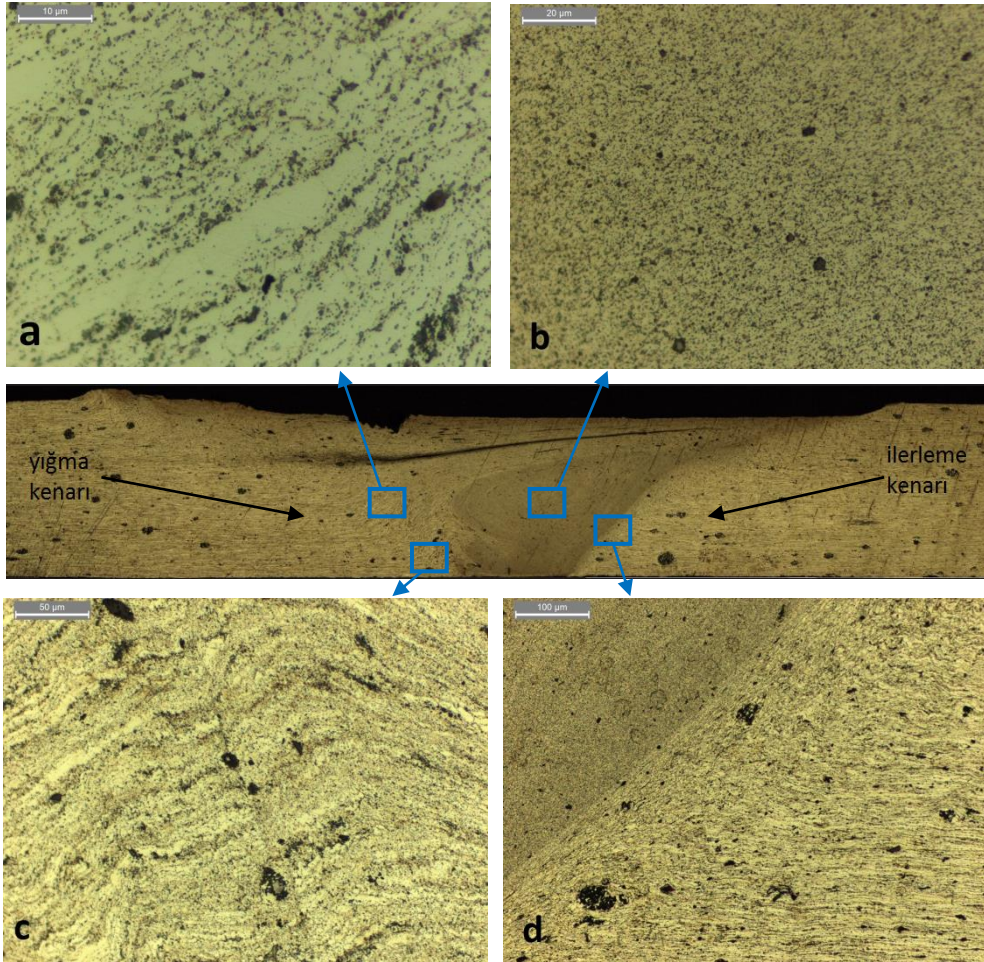
Partikül takviyeli numune mikro yapısı ile takviyesiz numune mikro yapısı kıyaslandığında; partikül takviyeli numunenin tane yapılarının hadde yönünde uzadıkları ancak takviyesiz numune tane yapısı gibi ince uzun yönelim göstermedikleri tespit edilmiştir. Takviye edilen SiC partiküllerinin tanelerin hadde yönünde yönelimini sınırladığı belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Ana metal kısımların mikroyapı fotoğrafları a) 7039 Al b)7039/SiC/10p

Şekil 4.2’de takviyesiz 7039 Al levhaların SKK sonrası genel ve detay mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Birleştirilen levhanın kesit görüntüsü incelendiğinde herhangi bir birleşim hatası görülmemiştir. Karıştırıcı ucun dalma

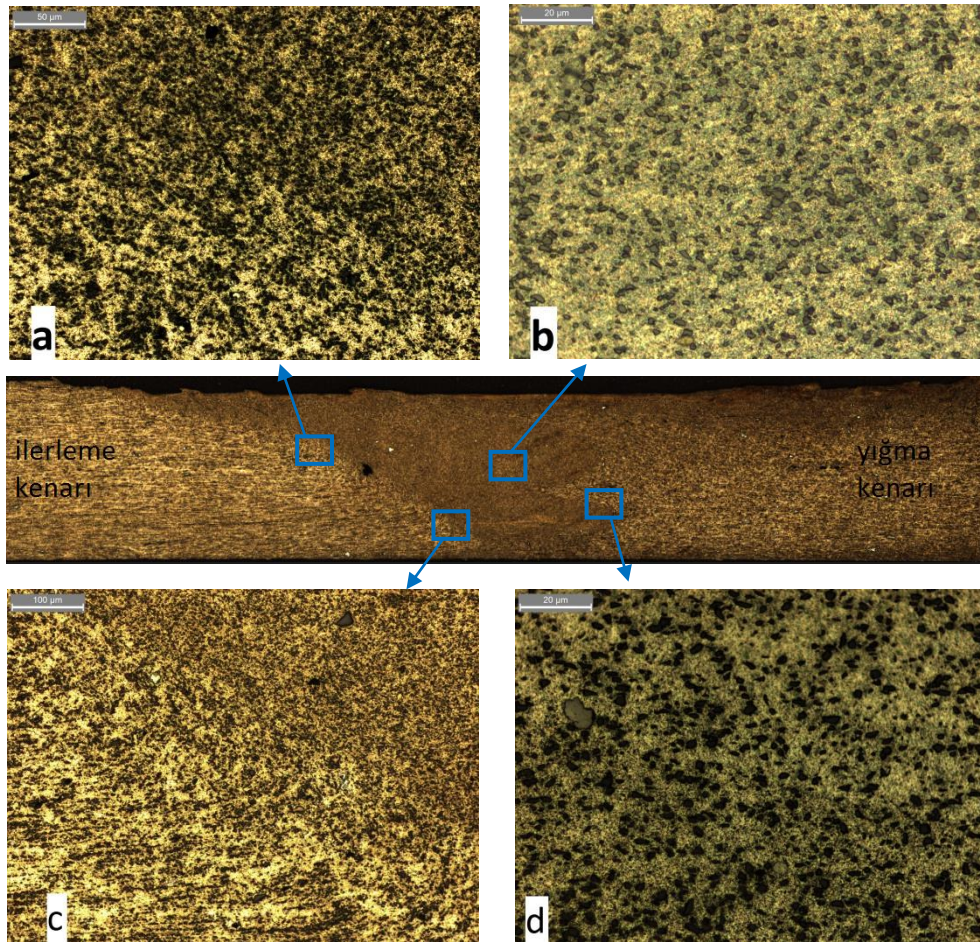
derinliği kaynak boyunca ideal seviyede ayarlanmış ve karıştırma bölgesinin alt kısmında porozite tespit edilmemiştir. Kaynak kesit görüntüsünde yığma ve ilerleme kenarları açık bir şekilde görülmüştür. Yığma kenarında (Şekil 4.2 a ve c) karıştırıcı ucun yığma basıncı etkisiyle tanelerin dalgalı yönlenim gösterdikleri belirlenmiştir. Dalgalı yönlenim gösteren tanelerin yığma kenarı bölgesinde termo mekanik etkiyle bu yönlenimi gösterdikleri düşünülmektedir. Yığma kenarında TMEB açık bir şekilde görülmüştür. Şekil 4.2.d'de ilerleme kenarının detay resmi verilmiştir. Bu resimde karıştırıcı ucun dönme yönünde tanelerin yönlendiği tespit edilmiştir. İlerleme kenarında da TMEB tespit edilmiştir. Şekil 4.2.b'de dinamik kristalleşme nedeniyle ince taneli bir yapı oluşmuştur. Bu yapının ortalama tane boyutu yaklaşık 2-3  $\mu$  civarında olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 4.2.** 7039 Al kaynaklı malzemenin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.3'te 7039/SiC/10p levhaların SKK sonrası genel ve detay mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Birleştirilen levhanın kesit görüntüsü incelendiğinde herhangi bir birleşim hatası görülmemiştir. Kaynak kesit

görüntüsünde yığıma ve ilerleme kenarları net bir şekilde görülmüştür. Şekil 4.3.a ve Şekil 4.3.c'de ilerleme kenarının detay resimleri verilmiştir. ITAB ve TMEB açık bir şekilde tespit edilmiştir. Gerek yığıma gerek ilerleme kenarındaki tane yönelimine partikül takviyesinin etkisi olmuştur. Partikül takviyesiz numune ilerleme kenarına kıyasla partikül takviyeli numunenin ilerleme kenarına ait TMEB'de taneler takviye partikülleri sayesinde termomekanik etkiyle daha az yönlendikleri görülmüştür. Şekil 4.3.b de karıştırma bölgesindeki takviye partiküllerin mikroyapıda homojen dağılımı gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca karıştırıcı ucun karıştırma etkisiyle takviye edilmiş partikülleri kırarak küçülttüğü görülmüştür. Şekil 4.3.d'de yığıma kenarında takviye partiküllerin karıştırma bölgesine kıyasla homojen olmadığı görülmüştür. Burada yığıma etkisiyle partiküllerin belli bölgelerde daha yoğun olduğu görülmüştür.

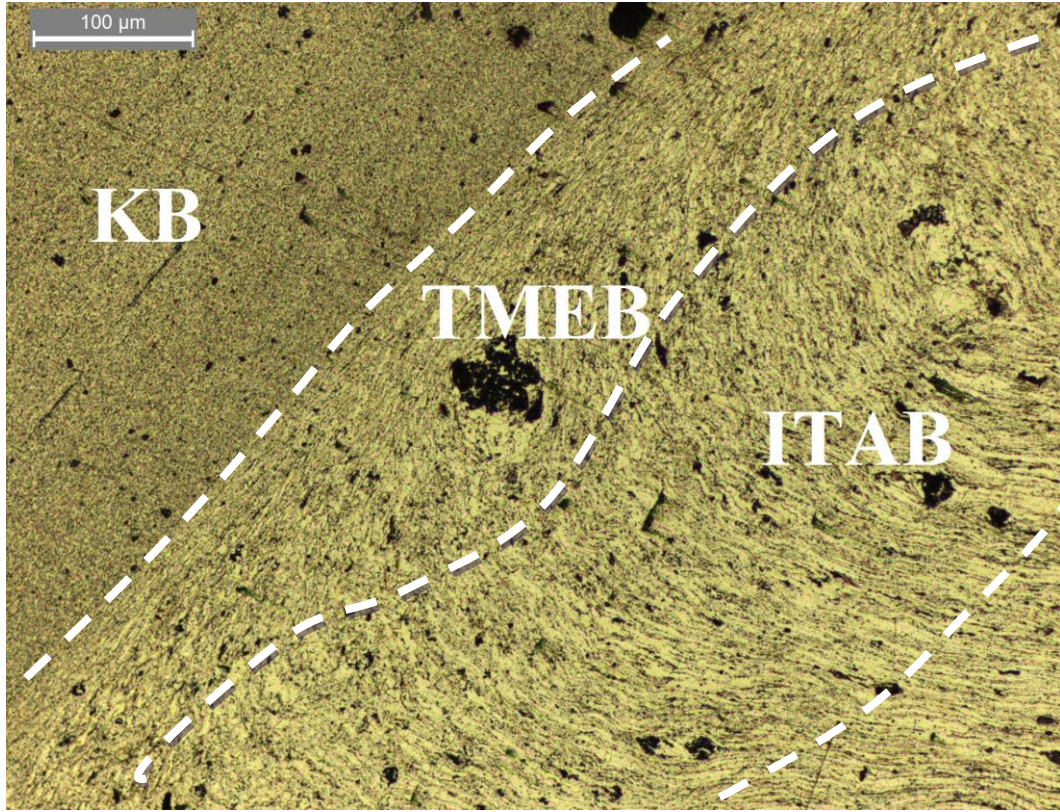


**Şekil 4.3.** 7039/SiC/10p kaynaklı malzemenin optik mikroskop görüntüleri

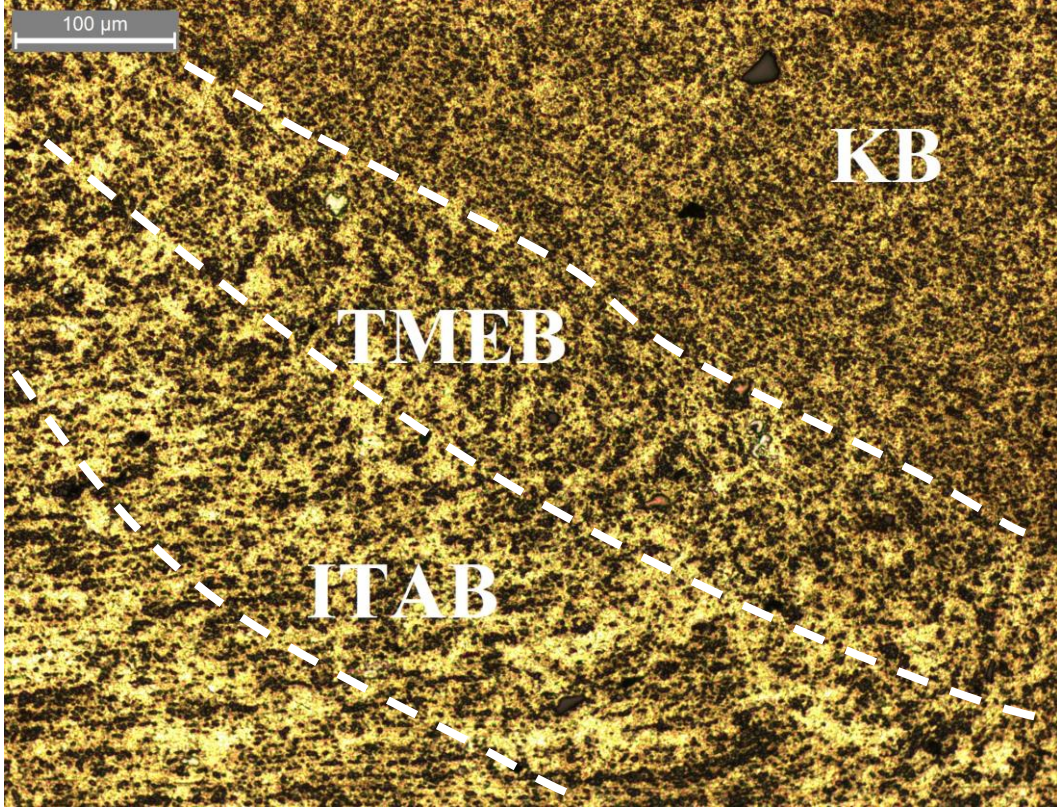
Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de SKK sonucunda oluşan bölgeler verilmiştir. Gerek partikül takviyeli gerek partikül takviyesiz numunelerin kaynak kesit

alanlarında dört farklı bölgeden oluştuğu net bir şekilde görülmüştür. Bunlar karıştırma bölgesi (KB), termo mekanik etkilenen bölge (TMEB), ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve ana metaldir.

Aslında ITAB bölgesinde hem termo mekanik etkilenmiş taneler hem de ısı tesiri altında kalmış taneler birlikte bulunmaktadır. Karıştırıcı ucun etkisiyle bu bölgede hadde yönünde uzamış bazı taneler yukarıya doğru yönlendikleri, bazı tanelerin ise ısı etkisiyle irileştiği görülmüştür. TMEB'deki tanelerin ITAB'daki tanelerin tersi yönde aşağıya doğru yönlendikleri tespit edilmiştir. Bu yönlentinin karıştırıcı ucun dönmesi yönünde olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.5'de partikül takviyeli numunede ITAB'daki taneler yukarı doğru yönlenme olmayıp genelde taneler partiküllerin müsaade ettiği ölçüde irileşmiş ve karıştırıcı ucun dönmesi yönünde yönlendirilmiştir.

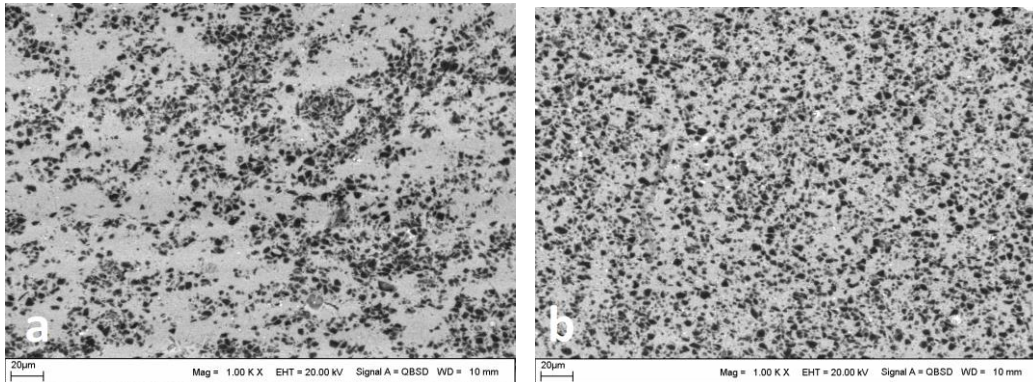


Şekil 4.4. Kaynaklı 7039 Al alaşımının kaynak kesit görüntüsü



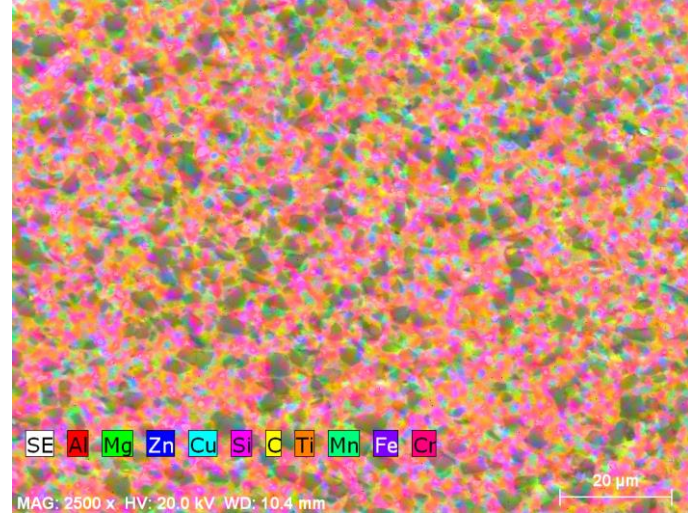
**Şekil 4.5.** %10 SiC takviyeli 7039 Al alaışımının kaynak kesit görüntüsü

Şekil 4.6’da partikül takviye edilmiş numunenin karıştırma bölgesinin ve ana metalin SEM görüntüleri verilmiştir. Burada partiküllerin karışım bölgesindeki dağılımının ana metale kıyasla hem daha homojen hem de daha ince boyutta dağılım gösterdikleri tespit edilmiştir. Karışım bölgesinde takviye partiküllerin daha ince olmasının nedeni karıştırıcı ucun bu bölgede partikülleri kırarak inceltmesidir.

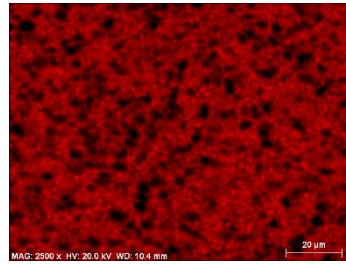


**Şekil 4.6.** 7039/SiC/10p numunesinin ana metal (a) ve karıştırma bölgesi (b)

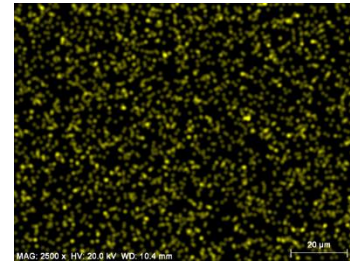
Şekil 4.7’de partikül takviye edilmiş numunenin SEM görüntüsü üzerinde yapılan X-ışın haritalama örneği görülmektedir. Malzeme içi her bir elemente ait dağılımı renk değişkenliği ile gösterilmiştir. Elementlerin malzeme içinde homojen dağıldığı görülmüştür.



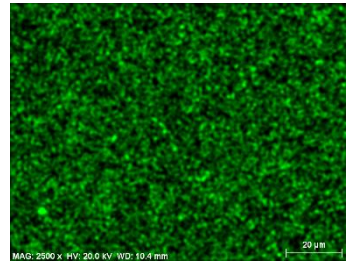
(a)



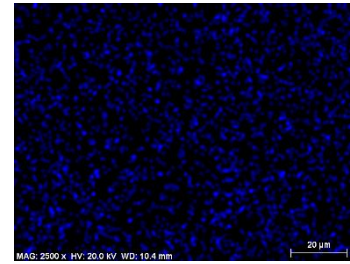
(b)



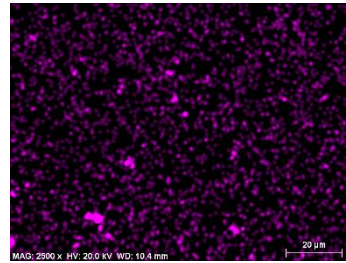
(c)



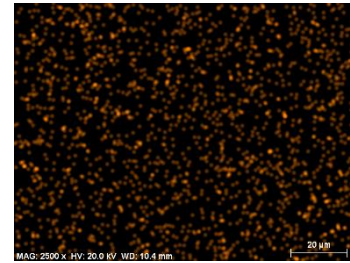
(d)



(e)



(f)



(g)

**Şekil.4.7.** 7039/SiC/10p numunesine ait a) Genel SEM görüntüsü b) Alüminyum c) Karbon d) Magnezyum e) Çinko f) Silisyum g) Titanyum

## 4.2. Çekme Deneyi Sonuçları

SKK ile birleştirilen 7039 Al ve 7039/SiC/10p levhalar mekanik özelliklerini ve kaynak performansını belirlemek amacıyla çekme deneyine tabi tutulmuştur. Çekme deneyi sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** 7039 Al ve 7039/SiC/10p çekme deneyi sonuçları

Numune	E (MPa)	R <sub>e</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	% ε	F <sub>maks</sub> (N)	F <sub>kop</sub> (N)	
7039 Al	1	17481.50	120.38524	341.03261	8.53	8523.087	2701.898
	2	6828.4881	138.351256	363.28382	9.07	8934.747	3413.976
	3	23324.99	140.184337	273.60109	4.81	6508.012	2890.453
7039/SiC/10p	1	13009.30	110.99106	250.39015	3.924	5121.230	3082.829
	2	14262.22	110.73582	210.05824	2.35	4133.274	2201.677
	3	19595.06	101.28279	215.59388	2.18	4397.360	3633.436

Deney sonunda elde edilen verilerin tarifleri aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır.

E : Elastisite modülü

R<sub>e</sub> : Akma sınırı

R<sub>m</sub> : Çekme dayanımı

% ε : Kopmadaki toplam şekil değiştirme

$$\% \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

ΔL : Kopma uzaması

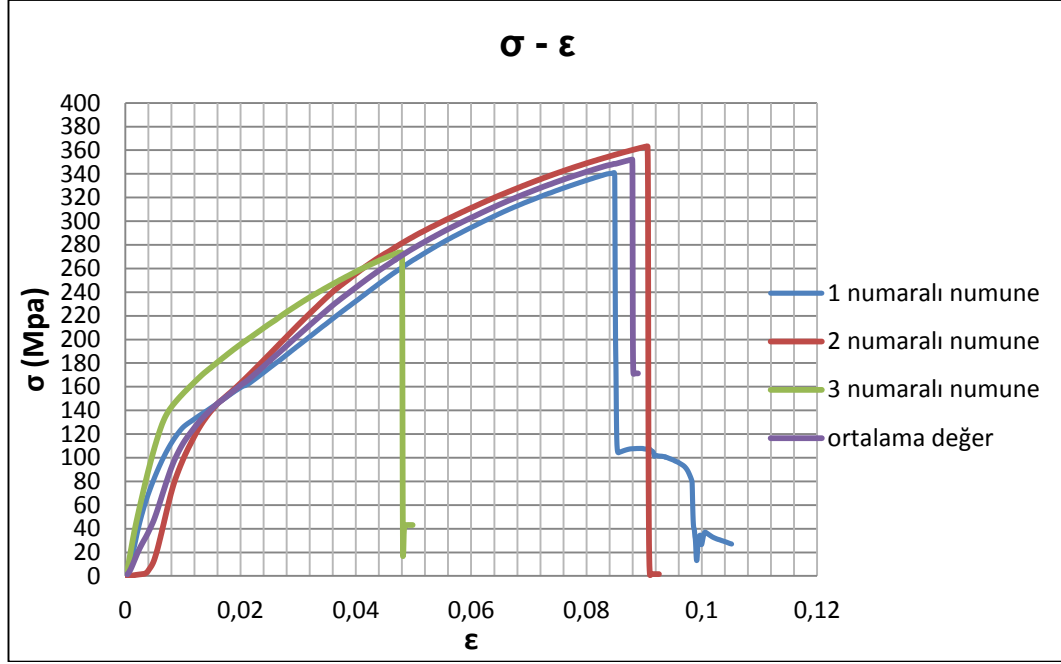
L<sub>0</sub> : Şekil değiştirmeye maruz kalan numunenin ilk uzunluğu

F<sub>maks</sub> : Malzemenin akma noktasını geçtikten sonra dayanabileceği en büyük yük

F<sub>kop</sub> : Malzemenin kopma noktasındaki yük değeri

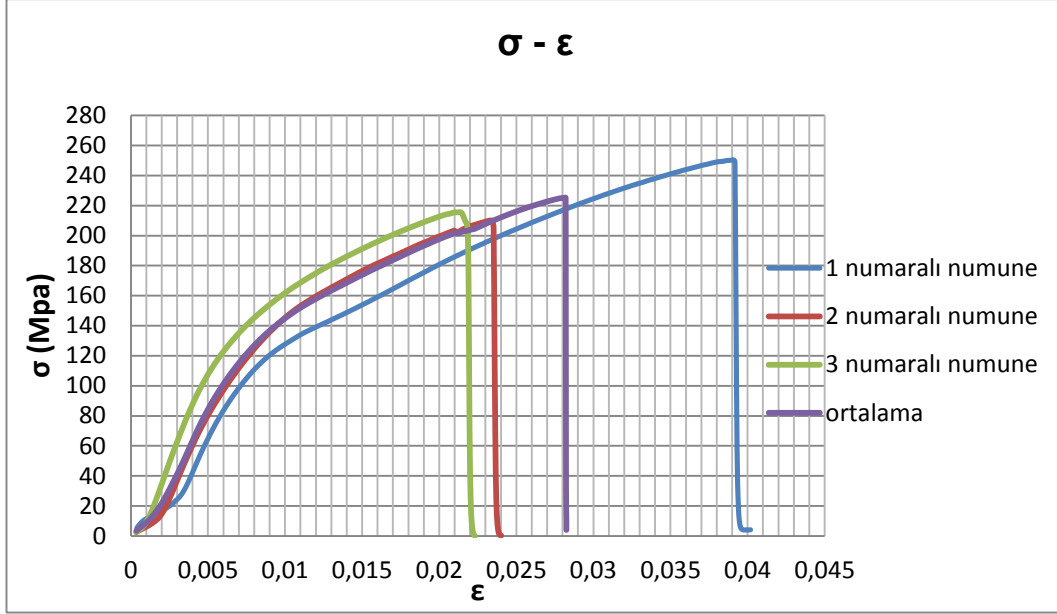
7039 Al çekme deneylerinde 3 numaralı numunede çekme cihazının deney numunesinin bağlandığı çene kısmında deney esnasında kırılma olmuştur. Numune kırılan kısımdan tekrar bağlanıp deney tamamlanmıştır. Kırılan kısım Şekil 4.10’da daire içerisinde gösterilmiştir. 3 numaralı numunenin değerleri ortalama değer hesaplanırken göz ardı edilmiştir.

Şekil 4.8’de 7039 Al numunelerinin çekme grafikleri verilmiştir. Değerlere bakıldığı zaman çekme dayanımı en yüksek değeri 2 numaralı numuneden alınmıştır. En yüksek şekil değişim oranı da yine 2 numaralı numuneden alınmıştır. Bu sıralamayı 1 ve 3 numaralı numune takip etmiştir. Ortalama çekme  $R_{m_{ort}} = 352,15$  MPa, ortalama uzama ise %8,8 çıkmıştır.



**Şekil 4.8.** 7039 Al numunelerinin çekme deneyi grafikleri

Şekil 4.9’da 7039/SiC/10p numunelerine ait çekme grafikleri verilmiştir. Değerlere bakıldığında en yüksek çekme değeri 1 numaralı numuneden alınmıştır. 1 numaralı numuneyi sırasıyla 3 ve 2 numaralı numune takip etmiştir. Ortalama çekme  $R_{m_{ort}} = 225,35$  MPa, ortalama uzama %2,81 olarak belirlenmiştir.



**Şekil 4.9.** 7039/SiC/10p numunelerine ait çekme deneyi grafikleri

Partikül takviyeli numunelerin çekme deneyi sonuçları ile takviyesiz numunelerin çekme deneyi sonuçları karşılaştırıldığında takviyesiz numunelerin maksimum çekme mukavemeti ve % uzaması yüksek çıkmıştır. Al matrisi içine takviye edilen sert SiC partikülleri buldukları noktalarda Al matrisin şekil değiştirmesine (uzamasına) fırsat vermedikleri için bu değerlerin düşük çıktığı değerlendirilmektedir. Ayrıca takviye partiküllerinin dislokasyonlarla kesişmeyecek kadar iri oldukları düşünülmektedir. Bu nedenle dislokasyon hareketine yeterince engel olamadıkları düşünülmektedir.

Şekil 4.10'da 7039 Al çekme numunelerinin testten sonraki görünüşleri verilmiştir. Numunelere bakıldığında kopmalar, kaynaklı birleşmenin ana metale yakın kısımlarında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu bölgeden kırılma yaşlandırma ile sertleştirilmiş numuneler için beklenen bir durumdur. Çünkü karıştırıcı ucun sürtünme ısısı ITAB'da çökeltilerin irileşmesine neden olduğu ve aşırı yaşlanmaya bağlı mukavemet azalması meydana geldiği düşünülmektedir.



**Şekil 4.10.** 7039 Al çekme numunelerinin testten sonraki görünüşleri

Şekil 4.11’de 7039/SiC/10p çekme numunelerinin testten sonraki görünüşleri verilmiştir. 1 numaralı numune karıştırıcı uç omuzunun temas ettiği noktadan (bu nokta ana metale yakın bölge) kopmuş, 2 numaralı numune ana metalden kopmuş ve 3 numaralı numune ise karıştırma bölgesine yakın yerden kopmuştur. Bu partikül takviyeli çekme numunelerinde kopma bölgelerinin farklılığı takviye edilen partiküllerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sert partiküller çekme esnasındaki şekil değişimine olumsuz yönde etki ettiği düşünülmektedir. Kopmaların karıştırma bölgesinden olmamasının nedeni de; karıştırıcı ucun mekanik dönme etkisi karıştırma bölgesindeki partikülleri kırarak inceltmiş ve bu bölgede partiküllerin daha homojen dağılmasını sağlamıştır.



**Şekil 4.11.** 7039/SiC/10p çekme numunelerinin testten sonraki görünüşleri

Bu konuyla ilgili yapılan çalışmada Venkateswarlu vd. 6 mm kalınlığındaki 7039 Al malzemesine yaptıkları çekme testi sonunda çekme dayanımını 347 MPa bulmuşlardır [51].

Erdem 12,7 mm kalınlığındaki 7039 Al plakaları MIG kaynağıyla birleştirmiş ve kaynaklı numunelerin ortalama çekme dayanımı 300,37 MPa olarak bulmuştur [35]. Sharma vd. yaptıkları çalışmada [54] 5mm kalınlığında 7039 Al-T6 malzemesini vida profilli karıştırıcı uç ile 635 dev/dak da 120 mm/dak ilerleme hızında SKK yaparak 352,7 MPa çekme gerilmesine ulaşmışlardır. Venkateswarlu vd. 6 mm kalınlığındaki 7039 Al malzemesinin kaynağını farklı takım ölçülerinde yapmışlardır [51]. Yaptıkları çalışmada en iyi sonuçları 7mm karıştırıcı uç çapında almışlardır. En iyi çekme dayanımları 240-290 MPa aralığında çıkmıştır. Venkateswarlu vd. yaptıkları başka bir çalışmada [56] 5mm kalınlığında TiC takviyeli Al-Si matrisli kompozit malzemede SKK yöntemiyle 700 dev/dak ve 20 mm/dak ilerleme hızıyla yaptığı birleştirmede 171,74 MPa çekme dayanımı bulmuşlardır. Ceschini vd. 7 mm kalınlığında T6 ısıtılmış işlemi uygulanmış (465 °C de 1 saat çözeltiye alınmış sonrasında su ile soğutulup 1 saat 95°C ve 16 saat 145°C yaşlandırılmış) %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikül takviyeli

AA7005 matrisli malzemeyi SKK yöntemiyle birleştirmişlerdir. Ortalama çekme gerilimini 299 MPa bulmuşlardır [57]. Özben yaptığı çalışmada basınçlı döküm yöntemiyle üretilen %5, %10, %15 oranlarında SiC takviye edilmiş Al-Mg-Si matrisinde çekme mukavemetleri sırasıyla 260 MPa, 281 MPa, 233 MPa değerlerini elde etmiştir [55].

Bu çalışmada elde edilen takviyesiz kaynaklı levhaların çekme deneyi sonuçları literatürdeki çalışmalarda elde edilen sonuçlara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. SiC takviyeli kaynaklı levhaların çekme deneyi sonuçları takviyesiz levhaların çekme deneyi sonuçlarına göre düşük çıkmıştır. Ancak literatürdeki takviyeli levhaların çekme deney sonuçları ile kıyasladığımızda yüksek değerde ya da yakın değerde oldukları tespit edilmiştir.

Literatürdeki sonuçlarla bu çalışmada elde edilen sonuçları karşılaştırdığımızda her iki malzeme grubu için hem toz metal levhaların üretimi hem de SKK'nın başarıyla gerçekleştiği görülmüştür.

### **4.3. Eğme Deneyi Sonuçları**

Eğme deneyi takviyeli ve takviyesiz levhalarda SKK yönteminin birleşim başarısını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla ASTM E8 M-04 standart şartlarına göre hazırlanmış numunelere üç noktadan eğme deneyi uygulanmıştır. SKK ile birleştirilmiş 7039 Al ve 7039/SiC/10p numunelerine ait eğme deneyi sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

7039 Al'a ait numunelerin eğme mukavemeti,  $R_{me}$ ,  $F_{maks}$  ve  $F_{kop}$  değerleri beklenildiği gibi 7039/SiC/10p'ye kıyasla genelde yüksek çıkmıştır. 7039 Al'a ait bu değerler sırasıyla 691,83 MPa, 2225,94 N, 381,13 N dur.

Partikül takviyeli kompozit malzemenin eğme dayanımının düşük çıkma nedeninin takviye edilen sert partiküller matriste buldukları noktada matrisin şekil değişimine izin vermemelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sonucu eğme açıları desteklemektedir. Eğme açıları kaynak edilmiş takviyeli numunelerde daha yüksektir. Yani plastik şekil değişimi azdır. Takviyesiz numunelerin eğme açıları daha düşük çıkmıştır. Bu durum, kaynak edilmiş, takviyesiz numunelerin eğme deneyi esnasında plastik şekil değiştirerek daha fazla katlanabileceklerini göstermiştir.

**Çizelge 4.2.** 7039 Al ve 7039/SiC/10p eğme deneyi sonuçları

Numune	L (mm)	$\Delta L_{max}$ (mm)	$\Delta L_{kop}$ (mm)	Kopma Açısı(°)	$R_{me}$ (MPa)	Ort $R_{me}$	$F_{maks}$ (N)	Ort $F_{maks}$	$F_{kop}$ (N)	Ort $F_{kop}$	
7039/SiC/10p	1	80	5.84	7.62	159	315.519	323.87	565.74	685.07	111.19	108.79
	2	80	4.16	5.25	161	332.226		804.40		106.39	
7039 Al	1	80	13.05	13.69	134	696.941	691.83	2270.41	2225.94	347.20	381.13
	2	80	14.39	14.75	133	686.721		2181.47		415.06	

Deney sonunda elde edilen verilerin tarifleri aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır.

L : Şekil değiştirmeye maruz kalan numune uzunluğu

$L_{max}$  : Maksimum yükte sehim miktarı

$L_{kop}$  : Kopma noktasındaki sehim miktarı

$R_{me}$  : Eğilme Dayanımı

$$R_{me} = \frac{3 F_{max} L}{2 b a^2}$$

$F_{max}$  : Numunenin dayandığı maksimum yük

$F_{kop}$  : Numunenin kopma noktasındaki yük değeri

a : Numunenin kalınlığı

b : Numunenin eni

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de eğme numunelerinin testten sonraki görüntüleri verilmiştir. Her iki malzeme grubu için kırılma bölgeleri incelendiğinde, kırılmalar genelde ana metale yakın kısımda olmuştur. Bu sonuç SKK yönteminin başarılı bir şekilde uygulandığını göstermiştir. 1 numaralı takviyesiz kaynaklı numune karıştırma bölgesinden kırılmıştır. Ancak bu numunenin eğme deneyi sonuçları diğer numunelerin eğme deneyi sonuçlarından daha iyi olduğu görülmüştür. Bu nedenle SKK yöntemi tüm numunelere başarıyla uygulanmıştır.



**Şekil 4.12.** 7039 Al eğme testi sonrası görünüm



**Şekil 4.13.** 7039/SiC/10p Eğme testi sonrası görünüm

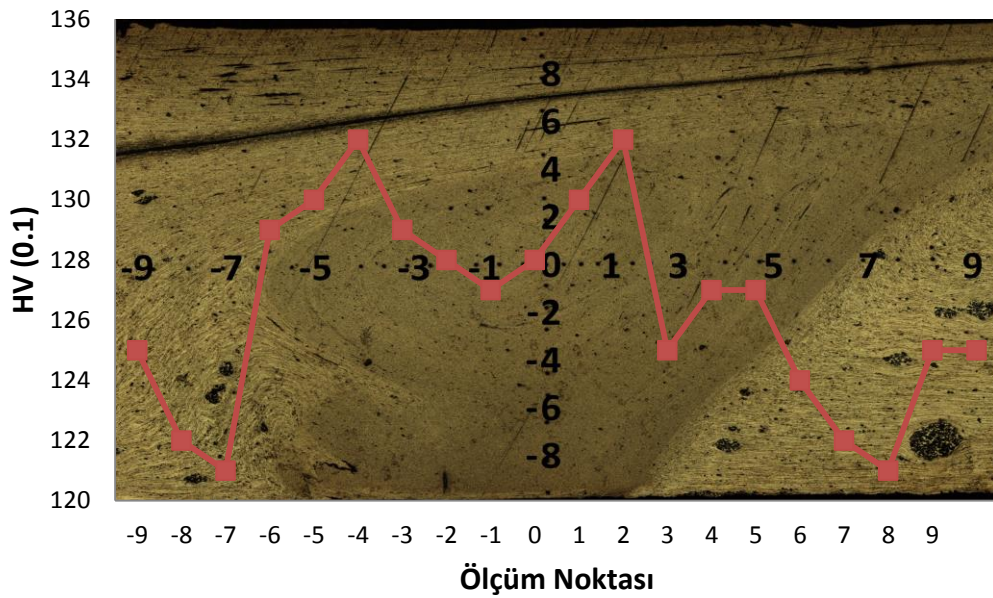
Bu konuyla ilgili Erdem 12,7 mm kalınlığındaki 7039 Al alaşımı plakaları çoklu paso MIG kaynağıyla birleştirmiş ve kaynaklı plakalara eğme deneyi uygulamıştır. Eğme mukavemetini ve eğme açısı sırasıyla 734 MPa, 127° tespit etmiştir [35].

Bu çalışmada elde edilen eğme deneyi sonuçları literatürle uyumlu oldukları görülmüştür.

#### 4.4. Sertlik deneyi sonuçları

Takviyeli ve takviyesiz numunelerin sertlik deneyinde grafik üzerinde verilen mikroyapı fotoğrafları üzerindeki noktalardan üç ölçüm alınarak ölçülen değerlerin ortalamaları göz önüne alınmıştır.

Şekil 4.14’de 7039 Al numunesinin sertlik değerleri verilmiştir. Sertlik değerlerine bakıldığında ana malzemede, geçiş bölgesinde veya karışma bölgesindeki sertlik değerlerinin çok farklı olmayıp 115-130 HV aralığında değiştiği görülmüştür.

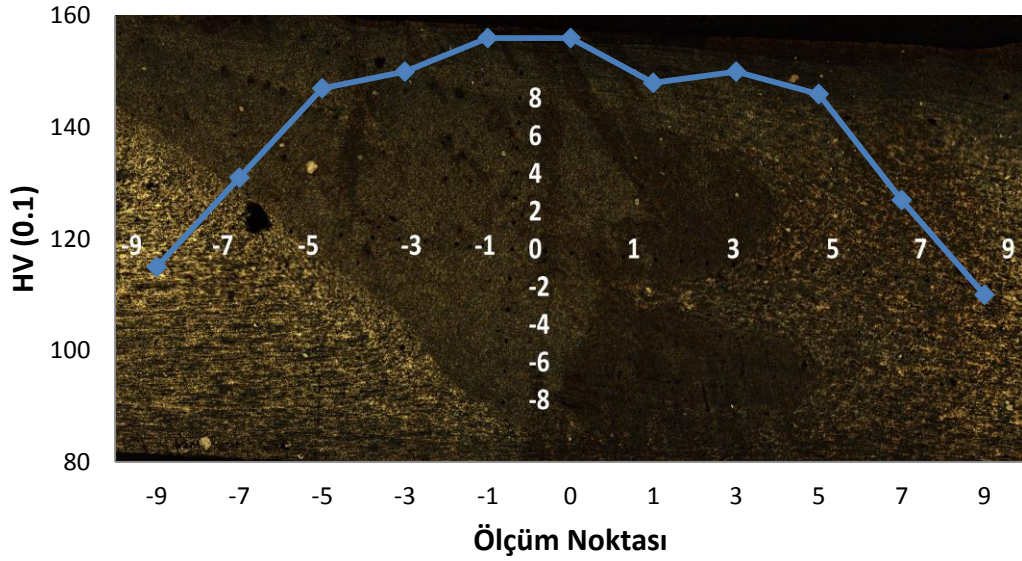


Şekil 4.14. 7039 Al numunesinin sertlik değerleri

Bu konuda Durmuş vd. [66] AA7012 alüminyum alaşımında çökeltme sertleşmesini incelemişlerdir. Malzemeleri 470°C’de 2 saat süre ile çözeltiye almış ve ardından 20°C’ de su verme işlemi yapmışlardır. Daha sonra 160°C de belirli sürelerde bekletilerek yapay yaşlandırma işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. Yaşlandırma öncesi 56 HB olan sertlik değeri yaşlandırma işlemiyle en yüksek 112 HB değerini 33 saat yaşlandırma sonucu elde etmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan takviyesiz numunelerin sertlik deneyi sonuçları literatürdeki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür.

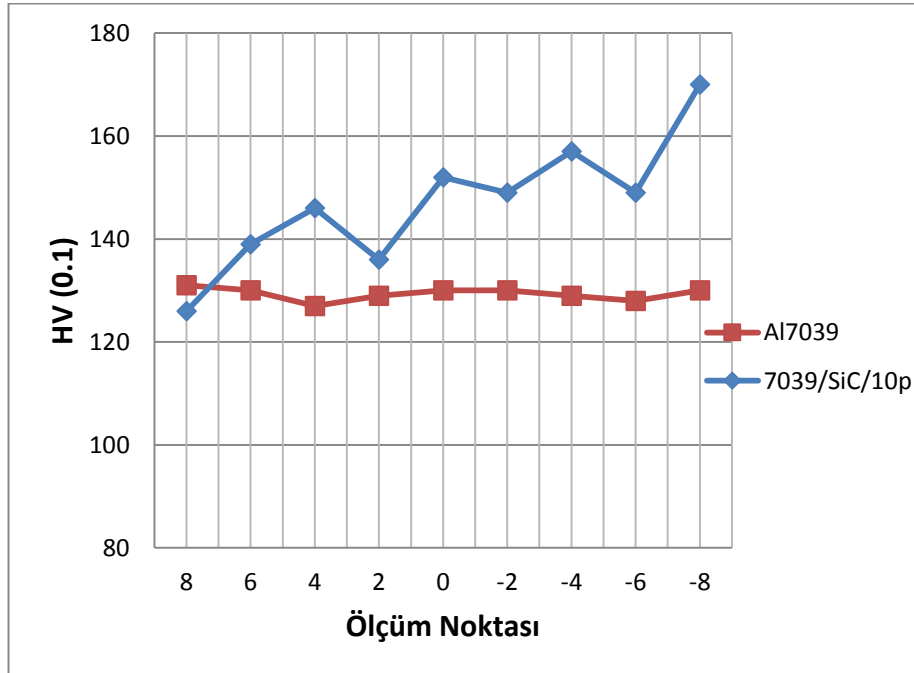
Şekil 4.15’de 7039/SiC/10p numunesinin sertlik değerleri verilmiştir. Bu numunedeki sertlik değerlerinde ana metale göre karışım bölgesinde sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Ana metalde 110 HV olan sertlik değeri karıştırma bölgesinde 156 HV’ye kadar çıkmıştır. Bu artışın sebebi karıştırma bölgesindeki SiC partiküllerinin karıştırıcı ucun mekanik karıştırma etkisiyle

kırılmaları ve bu kırılmış küçük boyutlu SiC partiküllerinin daha homojen dağılım göstermesidir.



Şekil 4.15. 7039/SiC/10p numunesinin vickers sertlik değerleri

Şekil 4.16'da 7039 Al ve 7039/SiC/10p numunelerinde karışım bölgesindeki diğer noktalardan alınan ölçüm değerleri verilmiştir. 7039 Al numunesinde çok fazla bir değişiklik olmazken 7039/SiC/10p numunesinde levhanın üst bölgesinden kaynak dibine doğru sertliğin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.16. 7039 Al ve 7039/SiC/10p diğer noktalardan alınan ölçüm değerleri

Ceschini vd. [57] %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikül takviyeli AA7005 matrisli kompozit malzemesini T6 şartlarında 465 °C de 1 saat çözeltiye almış ve 145 °C de 16 saat yaşlandırmışlardır. Bu yaşlandırma sonucu ana metalde 84 HV sertlik değerini elde etmişlerdir. Yaptıkları SKK sonucunda kaynak bölgesinde ise 100 HV sertlik değerini elde etmişlerdir. Feng vd. yaptıkları çalışmada [58] %15 SiC partikül takviyeli AA2024 kompozit malzemesine önce SKK uygulayıp sonra T4 şartlarında 502 °C de 1 saat çözeltiye alıp oda sıcaklığında 1 ay yaşlandırmışlardır. Bu ısıl işlem sonucu ana metalde sertlik değerini yaklaşık 105 HV'den 170 HV değerine yükseltmişlerdir. Karışım bölgesinde ise sertlik değerinde bir değişiklik olmamış 150-170 Hv aralığında kalmıştır.

Wang vd. %15 SiC takviyeli Al2009 kompozit malzemesine önce SKK uygulamış sonrasında T4 koşullarında 516 °C de 1 saat çözeltiye alıp oda sıcaklığında yedi gün yaşlandırmışlardır. SKK sonrasında ısıl işlem uygulanan numunelerle ısıl işlem uygulanmayan numunelerin sertlik değerlerini karşılaştırmışlardır. Isıl işlem uygulanmayan numunelerin sertlikleri ana metal kısmında 100 HV olan sertlik karışım bölgesinde 155 HV'ye çıkmaktadır. Isıl işlem uygulanan numunelerde ise sertlik değeri her bölgede aynı olup yaklaşık 170 HV'dir [60].

Nami vd. yaptıkları çalışmada [61] %15 Mg<sub>2</sub>Si takviyeli Al matrisli malzemenin SKK uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Yaptıkları SKK lı birleştirmede yaklaşık 70 HB'ye ulaşmışlardır.

Periyasamy vd. yaptıkları araştırmada [62] AA6061 matrisli %20 SiC takviyeli kompozit malzemesine SKK uygulamışlardır. SKK sonucu en yüksek sertliği, karışım bölgesinde 114 HV bulmuşlardır.

Michael Rajan vd. AA7075 matrisine %3, %6 ve %9 oranında TiB<sub>2</sub> partikül takviye etmişlerdir. 63 HV sertlikte olan malzemedan takviye sonrası sırasıyla 80 HV, 105 HV, 125 HV değerlerini almışlardır [63].

Ay yaptığı çalışmada [64] AA7075 alüminyum alaşımına farklı oranlarda (%2, %4 ve %6) Ti ve (%3, %6 ve %9) B<sub>4</sub>C ilave etmiş ve sertlik ölçümleri sonucunda, en yüksek sertliğin (%6 Ti+%9 B<sub>4</sub>C) ilavesiyle üretilen kompozitlerde olduğunu belirlemiştir. Bu değerlerin 117 – 123 HV arasında değiştiği görülmüştür.

Kevenlik çalışmasında [65] Toz metalurjisi yöntemi ile alüminyum 2014 (Al 2014) matrisli, ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 silisyum karbür (SiC)

takviyeli ve takviye içermeyen Al2014 metal matrisli kompozitler üretmiştir. Ürettiği kompozitleri fırında 2 saat süreyle 470 °C tutmuş ve su ile ani soğuması akabinde 24 saat süreyle 120 °C'de bekleterek T6 yaşlandırma işlemine tabi tutmuştur. En yüksek sertlik değerini %20 SiC takviyeli kompozit malzemesinde ölçmüştür. Yaşlandırma öncesi 67,3 HV olan bu numune yaşlandırma sonrası 99,8 HV olmuştur. Takviyeli kaynaklı levhalarda karıştırma bölgesindeki sertlik artışı literatürdeki çalışmalarda da görülmüştür.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

%10 oranında SiC partikül takviyeli ve takviyesiz toz metal 7039 Al alaşımı plakalar SSK ile birleştirilmiş mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu incelemede şu sonuçlar elde edilmiştir:

- a. Her iki malzeme grubu için dinamik yeniden kristalleşme nedeni ile karışım bölgesinde tane yapısı diğer bölgelere kıyasla daha incedir. Termo mekanik etki nedeni ile TMEB’de taneler karıştırıcı ucun dönme yönünde yönlendikleri açıkça görülmüştür. ITAB’da iri tane yapısı tespit edilmiştir. Ana metalde, tane yapısında ekstrüzyon yönünde uzamış taneler yapısının hakim olduğu tespit edilmiştir. Bu tane yönelimleri partikül takviyeli numunelerde takviyesizlere kıyasla daha az olduğu görülmüştür. Değişen mikroyapı dört farklı bölgenin (ana metal, TMEB, ITAB ve KB) var olduğunu ortaya çıkarmıştır.
- b. En yüksek çekme dayanımı ortalama 352,15 MPa ile takviyesiz numunelerden alınmıştır. Takviyeli numunelerde ise ortalama 225.35 MPa değerleri tespit edilmiştir. Takviyesiz numunelerde %8,8 olan ortalama toplam uzama oranı takviyeli numunelerde %2,81 olarak tespit edilmiştir.
- c. Eğme deneyi sonrası oluşan eğilme açılarında, takviyesiz numunelerde ölçülen 159-161° değerleri takviyeli numunelerde 133-134° ölçülmüştür. Eğme mukavemeti takviyesiz numunelerde 691,83 MPa, takviyeli numunelerde ise 323,87 Mpa bulunmuştur. Bu sonuçlar kaynaklı takviyesiz numunelerin plastik deformasyon kabiliyetinin kaynaklı takviyeli numunelere kıyasla daha iyi olduğunu ortaya koymuştur.
- d. Takviyesiz numunenin sertlik ölçümlerinde ana metal ve kaynak bölgeleri arasında fazla fark olmayıp 115-130 HV arasında değişmektedir. Takviyeli numunelerde ise ana metalde 110 HV olan sertlik değeri karışım bölgesinde 156 HV olduğu görülmüştür. Takviyeli numunenin karıştırma bölgesindeki sertlik artışı karıştırıcı ucun mekanik karıştırma etkisiyle kırılarak incelmış partiküllerin homojen dağılmasından kaynaklanmıştır.
- e. Çekme, eğme ve sertlik deneyleri sonucunda uzama oranlarına ve eğilme açalarına bakıldığında toz metal 7039 Al alaşımının SiC ile takviye edilmesi sonucunda plastik deformasyon kabiliyetinin azaldığı görülmüştür.

SiC Takviye edilmiş metal matrisli kompozit malzemelerin takviyesiz 7039 Al alaşımlarına kıyasla aşınma ve balistik özelliklerinin daha iyi olacağı düşünülmektedir. Bu özellikleri ile ilgili çalışma yapılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] M.B.D. Ellis, *Joining of aluminium based metal matrix composites*, International Materials Reviews, 41 (1996) 42-57.
- [2] A. Mortensen, J.A. Cornie, *On the infiltration of metal-matrix composites*, Metallurgical and Materials Transactions, 18 (1987) 1160-1163.
- [3] S. Dalkılıç, *Sürtünme karıştırma kaynağı ve havacılık ve uzay endüstrisindeki uygulama alanları*, Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 5:4 (2012) 25-33.
- [4] H.X. Peng, Z. Fan, J.R.G. Evans, *Novel MMC microstructures prepared by melt infiltration of reculated ceramic preforms*, Materials Science and Technology, 16 (2000) 903-907.
- [5] Sinan Dönmez. *“Investigation on mechanical and electrical properties of carbon nano-tubes reinforced polycarbonate nano-composite material”*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2012.
- [6] Afşin Alper Cerit. *“Partikül ve fiber takviyeli alüminyum matrisli kompozitin balistik performansının incelenmesi”*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2004.
- [7] M.J. Cieslak, P.W. Fuerschbach, *On the weldability, composition and hardness of pulsed and continuous ND: YAG Laser welds in aluminum alloy 6061, 5456 and 5086*, Metallurgical transaction, 19:2 (1988) 319 327 328.
- [8] K. Yıldızlı, F. Nair, M.B. Karamış, A. Cerit, *Erosive behavior of SiCp reinforced aluminum matrix composites*, 6th International Fracture Conference, Selçuk University, Konya, September 10-12 (2003), pp: 517-524.
- [9] S. Buytoz, M. Yıldırım, *Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri*, 9. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, Mayıs 8-10 (2002), pp: 349-357.
- [10] Y. ŞAHİN, *Kompozit Malzemelere Giriş*, Gazi Kitapevi, Ankara, 2000.
- [11] M. Muratoğlu, M. Demirel, *Cu/Ni<sub>3</sub>Al metal matrisli kompozitin kuru kayma aşınma davranışlarının araştırılması*, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (İATS'09), Karabük Üniversitesi, Karabük, Mayıs 13-15(2009), pp:759-764.
- [12] B. Karaduman, O. Meydanoğlu, E.S. Kayalı, H. Çimenoğlu, *Geleneksel toz metalurjisi yöntemi ile titanyum matrisli titanyum karbür takviyeli kompozit üretimi*, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (İATS'09), Karabük Üniversitesi, Karabük, Mayıs 13-15(2009), pp:1000-1002.
- [13] Recep Ekici. *“Alüminyum esash SiC partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin darbe davranışlarının incelenmesi”*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2004.
- [14] L. Froyen, B. Verlinden, *Aluminium Matrix Composites Materials*, TALAT Lecture 1402, 1994.

- [15] T. W. Clyne, *Composites: MMC, CMC, PMC*, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, (3.7), (2001) 12-26.
- [16] J.V. Foltz, *Metal Matrix Composites, ASM Handbook, Volume 2*, ASM International, USA,1990
- [17] TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, Alüminyum raporu, Metalürji sayı 137 (2004).
- [18] J.M. Torralba, C.E. Costa, F. Velasco, *P/M aluminum matrix composites: an overview*, Journal of Materials Processing Technology, 133 (2003) 203-206.
- [19] Mert Akkuş. “7039 alüminyum - çinko alaşımında, kaynaklama işleminin sıcak çatlama davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2010.
- [20] K. K. Chawla, *Composite Materials Science And Engineering*, Springer Verlag, USA, (1998), 164-211
- [21] Jr. W. Hunt, D.R. Herling, *Aluminum metal matrix composites*, Advanced Materials & Processes, 162:2 (2004) 39-42.
- [22] Sedat Deniz. “ $Al_2O_3$  takviyeli alüminyum matrisli kompozit üretimi, mekanik ve fiziksel özellikleri ile mikroyapı karakterizasyonu”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2000.
- [23] A. E. Geçginli, *İleri Teknoloji Malzemeleri*, İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi Yayını, İstanbul, (1992).
- [24] F. Zhang, P. Sun, X. Li, G. Zhang, *A comparative study on microplastic deformation behavior in a SiCp / 2024 Al composite and its unreinforced matrix alloy*, Materials Letters, 49 (2001) 69 – 74.
- [25] A. Mortensen, *Metal Matrix Composites in Industry: an Overview*, MMC Conference VIII, London, November 26–27, (2001).
- [26] M.A. Doğan, E. Kanca, M. Kök,  *$Al_2O_3$  Partikül takviyeli 6061 alüminyum metal matrisli kompozitlerin üretimi*, International Iron & Steel Symposium, Karabük, April 02-04(2012).
- [27] T. Clyne, P. Withers, *An introduction to metal matrix composites*, Cambridge University Pres, Cambridge, (1993), 1-400.
- [28] S. Ateş, İ. Uzun, V. Çelik, *Basınçlı infiltrasyon yöntemi ile üretilmiş SiC/Al2014 kompozitin ısı iletkenliği üzerine infiltrasyon sıcaklığının etkisi*, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), Fırat Üniversitesi, Elazığ, Mayıs 16-18 (2011).
- [29] F. Toptan. “Alüminyum matrisli  $B_4C$  partikül takviyeli aşınma direnci yüksek kompozit malzeme üretimi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2011.

- [30] M. Pul. “*Al matrisli MgO takviyeli kompozitlerin infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve işlenebilirliğinin değerlendirilmesi*”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2010.
- [31] T.A. Başer, *Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde Kullanımı*, Mühendis ve Makina, 53:635 (2012) 51-58.
- [32] D.R. Herling, *Low-cost cast aluminum metal matrix composites*. Automotive Lightweighting Materials, FY 2004 Progress Report, 61-68, 2004.
- [33] S. Tezcan. “*Vorteks metodu ile üretilen bor karbür partikül takviyeli alüminyum kompozitlerin Tıg kaynak kabiliyeti ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*”, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2012.
- [34] S. Güneş, V. Erturun, *Metal matriksli kompozit malzemelerin havacılıkta kullanım alanları*, HaSeM'08 Kayseri VII. Havacılık Sempozyumu, Kayseri, Mayıs 15-16 (2008), pp: 138-142.
- [35] M. Erdem. “*Alüminyum alaşımlarının (5083 ve 7039) kaynak öncesi ve sonrası mekanik ve balistik özelliklerinin araştırılması*”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2001.
- [36] G. Çam, *Al-alaşımları için geliştirilen yeni kaynak yöntemleri*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi, İstanbul, Ekim 19-20(2001), pp:267-270.
- [37] S. Güçlüer. “*Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle alın kaynağı yapılmış Al-5086 h32 levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi*”, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, 2007.
- [38] H. Kafalı, N. Ay, *Sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmiş havacılık ve uzay yapılarında kullanılan Al 6013-t6 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 7:2 (2014) 85-101.
- [39] İlyas İnce. “*Demir esaslı malzemelerin sürtünme-karıştırma kaynağında, kaynak parametrelerinin dikiş özelliklerine etkisi*”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2011.
- [40] M.N. James, D.G. Hattingh, G.R. Bradley, *Weld tool travel speed effects on fatigue life of friction stir welds in 5083 aluminium*. International Journal of Fatigue, 25 (2003) 1389-1398.
- [41] N. Özdemir, S. Büyükarıslan, F. Sarsılmaz, *Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA1030 alaşımında karıştırıcı uç, devir sayısı ve ilerleme hızının mekanik davranışlar üzerine etkisi*, Fırat Üniversitesi Fen ve Müh. Bil. Dergisi, 19:4 (2007) 575-582.
- [42] F. Sarsılmaz, N. Özdemir, *AA1050/AA6061 alüminyum alaşım çiftinin sürtünme karıştırma kaynağında karıştırıcı uç profillerinin mekanik özellikler üzerine etkisi*, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 6:2 (2008) 61-65.

- [43] K. Elangovan, V. Balasubramanian, *Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy*, Materials and Design, 29:2 (2008) 362-273.
- [44] F. Sarsılmaz, N. Özdemir, S. Özel, *Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilen AA6061/AA7075 çiftinde karıştırıcı uç omuz genişliğinin mekanik özellikler üzerine etkisi*, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi, 7:1 (2008) 51-61.
- [45] L. Dubourg, P. Dacheucx, *Design and properties of FSW tools: a literature review*, Saint-Sauveur, Nr Montreal, Canada, October 10-13(2006).
- [46] S. Babu, K. Elangovan, V. Balasubramanian, M. Balasubramanian, *Optimizing friction stir welding parameters to maximize tensile strength of AA2219 aluminum alloy joints*, The Korean Institute of Metals and Materials, 15:2 (2009) 321-330.
- [47] G. Çam, *Sürtünme karıştırma kaynağındaki gelişmeler*, TMMOB Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi, Kocaeli, Ekim 24-25 (2003), pp:47-64.
- [48] G. Çam, *Sürtünme karıştırma kaynağı (skk) : Al-alaşımaları için geliştirilmiş yeni bir kaynak teknolojisi*, Makine ve Mühendis, 541(2005) 30-39.
- [49] R. Johnson, S.W. Kallee, *Friction stir welding technology*, Materials World, 7:12 (1999) 751-753.
- [50] S.W. Kallee, J. Davenport, E.D. Nicholas, *Railway manufacturers implement friction stir welding*, Welding Journal, 81:10 (2002) 47-50.
- [51] D. Venkateswarlu, N.R. Mandal, M.M. Mahapatra, S.P. Harsh, *Tool design effects for fsw of AA7039*, Welding Journal, 92:2 (2013) 41-47.
- [52] ASTM Standard, Test Methods For Tension Testing Metallic Material, ASTM standard E/8M-04, American Society of the International Association for Testing and Materials, 2004.
- [53] H. Lombard, D.G. Hattingh, A. Steuwer, M.N. James, *Optimizing FSW process parameters to minimise defects and maximise fatigue life in 5083- H321 aluminium alloy*, Engineering Fracture Mechanics, 75 (2008) 341-354.
- [54] C. Sharma, D.K. Dwivedi, P. Kumar, *Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of AA7039 aluminum alloy*, Materials and Desing, 36 (2012) 379-390.
- [55] Tamer Özben. “Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen seramik partikül takviyeli Al-Si esaslı metal matrisli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2001.
- [56] B.S. Yigezu, D. Venkateswarlu, N.R. Mandal, M.M. Mahapatra, *On friction stir butt welding of Al + 12Si/10 wt%TiC in situ composite*, Materials and Design, 54 (2014) 1019-1027.

- [57] L. Ceschini, I. Boromei, G. Minak, A. Morri, F. Tarterini, *Effect of friction stir welding on microstructure, tensile and fatigue properties of the AA7005/10 vol.%Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub> composite*, Composites Science and Technology, 67 (2007) 605-615.
- [58] A.H. Feng, B.L. Xiao, Z.Y. Ma, *Effect of microstructural evolution on mechanical properties of friction stir welded AA2009/SiCp composite*, Composites Science and Technology, 68 (2007) 2141-2148.
- [59] Sedat Kolukısa. “*Uçucu kül içeren alüminyum matrisli kompozit üretimi, özellikleri ve mikroyapı karakterizasyonu*”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1999.
- [60] D. Wang, B.L. Xiao, Q.Z. Wang, Z.Y. Ma, *Friction stir welding of SiCp/2009Al composite plate*, Materials and Design, 47 (2013) 243-247.
- [61] H. Nami, H. Adgi, H. Sharifitabar, H. Shamabadi, *Microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al/Mg<sub>2</sub>Si metal matrix cast composite*, Materials and Design, 32 (2011) 976-983.
- [62] P. Periyasamy, B. Mohan, V. Balasubramanian, S. Rajakumar, S. Venugopal, *Multi-objective optimization of friction stir welding parameters using desirability approach to join Al/SiCp metal matrix composites*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 23 (2013) 942-955.
- [63] H.B.M. Rajan, S. Ramabalan, I. Dinaharan, S.J. Vijay, *Synthesis and characterization of in situ formed titanium diboride particulate reinforced AA7075 aluminum alloy cast composites*, Materials and Design, 44 (2013) 438-445.
- [64] H. Ay. “*Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen AA7075 alüminyum alaşımına Ti ve B4C ilavesinin aşınma davranışı üzerine etkisinin incelenmesi*”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2014.
- [65] O. F. Kevenlik. “*Toz metalurjisi yöntemi ile SiC takviyeli Al2014 esaslı kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*”, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2013.
- [66] H. Durmuş, S. Akgün, S. Şahin, *Çökeltme sertleştirilmesi uygulanmış AA7012 alüminyum alaşımlarında sertliğin mikroyapı ile değişiminin incelenmesi*, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (İATS'09), Karabük Üniversitesi, Karabük, Mayıs 13-15(2009).

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad:** Ferhan KAYA

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Elazığ 02.10.1984

**Adres:** İnönü Mah. İstasyon Cad. TCDD Loj. B/8 Yeşilyurt MALATYA

**E-Posta:** ferhankaya@tcdd.gov.tr

**Lisans:** Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği 2006

### **Mesleki Deneyim:**

2012-2016	TCDD 5.Bölge Vagon Bakım Onarım Atölye Müdürlüğü Makine Mühendisi
2010-2012	Şırnak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Araştırma Görevlisi
2008-2010	Turan İnşaat Makine Mühendisi