

T.C.  
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİNİN A15083 ALAŞIMININ  
MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ

Murat SAYGIN

Danışman: Doç. Dr. Özlem BARAN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZİNCAN  
2019

Her Hakkı Saklıdır.

### Kabul ve Onay Sayfası

Doç. Dr. Özlem BARAN danışmanlığında, Murat SAYGIN tarafından hazırlanan bu çalışma 26.04.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği (3/3) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Tefvik KÜÇÜKÖMEROĞLU

İmza:

Üye : Doç. Dr. Özlem BARAN

İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mevra ASLAN

İmza:

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun 21 / 06 / 2019 tarih ve 22 / 8 ..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY**  
Enstitü Müdürü

### **Bilimsel Etike Uygunluk Sayfası**

“Sürtünme Karıştırma Prosesinin Al5083 Alaşımının Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi” isimli “Yüksek Lisans” tezimi tarafımdan intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın üzerinde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 09/05/2019



**Murat SAYGIN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİNİN A15083 ALAŞIMININ MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Murat SAYGIN

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Özlem BARAN

Sürtünme karıştırma prosesi (SKP), metalik malzemelerin mikroyapısını değiştirmek ve yüzey kompozitleri üretmek amacıyla kullanılan basit bir işlem olup, proses parametrelerinin kontrolünün kolay olması nedeniyle de avantajlı bir yöntemdir. SKP ile yeniden kristalleşmiş ince taneli mikro yapı elde edilebilmektedir. Bu yöntemde düşük maliyetle birlikte yüksek mekanik özelliklerin elde edilebilmesi yöntemin yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlayan en önemli etkidir. SKP günümüzde gemi, uçak, uzay, taşıt vb. birçok sanayi dalında kullanılmaya başlanmıştır. Proses alüminyum, magnezyum, bakır ve titanyum başta olmak üzere birçok malzemenin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmede tercih edilir bir hale gelmiştir. Bu çalışmada A15083 alaşımının mekanik ve tribolojik özellikleri üzerinde farklı paso sayılarında uygulanmış SKP'nin etkileri araştırılmıştır. Metalografik analizler optik mikroskop ile yapılmış ve sertlik değerleri mikro sertlik test cihazı ile belirlenmiştir. Sürtünme ve aşınma özellikleri pin-on-disk aşınma test cihazı ile belirlenmiştir. Aşınmış hacimler temassız optik profilometre ile ölçülmüş ve aşınmış yüzeyler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. Proses edilmemiş A15083 alaşımına kıyasla, SKP uygulanmış A15083 alaşımlarının sertlik değerleri artmış, sürtünme katsayıları önemli derecede azalmış ve aşınma direnci artmıştır. Ayrıca, artan paso sayısı da A15083 alaşımının aşınma direnci ve sertliğini artırmıştır.

**2019, 44 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** A15083, Aşınma, Sertlik, SKP

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **INVESTIGATION OF THE EFFECT ON MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF Al5083 ALLOY OF FRICTION STIR PROCESS**

Murat SAYGIN

Erzincan Binali Yıldırım University  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Özlem BARAN

The friction stir process (FSP) is a simple process used to change the microstructure of metallic materials and to produce surface composites, and is a method advantageous because the process parameters are easy to control. Fine grained microstructure recrystallized with FSP can be obtained. The most effective way to achieve high mechanical properties at low cost in the friction mixing process is to use it widely. The friction mixing process is nowadays in the form of ships, planes, space, vehicles and etc. it has begun to be used in many industries. It has become preferable to improve the mechanical and tribological properties of many materials such as Aluminium, Magnesium, Copper and Titanium. In this study, the effects of FSP applied at different passes number on the mechanical and tribological properties of Al 5083 alloy were investigated. Metallographic analyzes were made by optical microscope and hardness values were determined by micro hardness tester. The friction and wear properties were determined with a pin-on-disc wear tester. Worn volumes were measured with non-contact optical profilometer and the wear surfaces were characterized by scanning electron microscopy (SEM). Compared to the untreated Al5083 alloy, the hardness values of the FSP-treated Al5083 alloys increased, the friction coefficients were significantly reduced and the wear resistance increased. In addition, the increased number of passes increased the wear resistance and hardness of the Al5083 alloy.

**2019, 44 Pages**

**Keywords:** Al5083, FSP, Hardness, Wear

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanmasında her zaman yanımda olan ve yardımını esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Özlem BARAN' a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım sırasında her türlü desteği sağlayan Sayın Prof. Dr. Tefvik KÜÇÜKÖMEROĞLU, Sayın Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU ve Sayın Dr. Arş. Gör. Ayşenur KELEŞ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmaya FBA-2016-336 nolu BAP Araştırma Projesi desteğinden dolayı Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi BAP koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Murat SAYGIN

Mayıs, 2019

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>4</b>
2.1. Alüminyum (Al) ve Alaşımları .....	4
2.2. Al ve Alaşımlarının Sınıflandırılması .....	6
2.2.1. Dövme Al alaşımları .....	7
2.2.2. Döküm Al alaşımları.....	7
2.3. Sürtünme Karıştırma Teknolojisi .....	10
2.3.1. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) .....	10
2.3.2. Sürtünme karıştırma prosesi (SKP) .....	15
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>17</b>
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....</b>	<b>23</b>
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>34</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>36</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>43</b>
Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar .....	44
ÖZGEÇMİŞ .....	45

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2. 1. SKK işleminin adımları .....	13
Şekil 2. 2. SKK'nın şematik gösterimi.....	13
Şekil 3. 1. SKP cihazı.....	18
Şekil 3. 2. SKP'de işlemin uygulanma aşaması.....	19
Şekil 3. 3. Farklı pasolarda SKP uygulanmış 200 mm uzunluğunda ve 8 mm kalınlığında Al5083 numuneler.....	19
Şekil 3. 4. Optik mikroskop .....	20
Şekil 3. 5. Aşınma test cihazı .....	21
Şekil 3. 6. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	22
Şekil 4. 1. Proses edilmemiş Al5083 numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	24
Şekil 4. 2. SKP ile 1 pasoda proses edilmiş Al5083 numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	24
Şekil 4. 3. SKP ile 2 pasoda proses edilmiş Al5083 numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	25
Şekil 4. 4. SKP ile 3 pasoda proses edilmiş Al5083 numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	25
Şekil 4. 5. SKP ile 4 pasoda proses edilmiş Al5083 numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	26
Şekil 4. 6. SKP ile 5 pasoda proses edilmiş Al5083 numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	26
Şekil 4. 7. Proses edilmemiş Al5083 numune ve SKP ile farklı pasolarda proses edilmiş Al5083 numunelerin sürtünme katsayısı-zaman grafiği .....	29
Şekil 4. 8. Proses edilmemiş Al5083 numuneden SEM ile elde edilen aşınma iz görüntüsü.....	30
Şekil 4. 9. SKP ile 1 pasoda proses edilmiş Al5083 numuneden SEM ile elde edilen aşınma iz görüntüsü .....	31
Şekil 4. 10. SKP ile 2 pasoda proses edilmiş Al5083 numuneden SEM ile elde edilen aşınma iz görüntüsü .....	31
Şekil 4. 11. SKP ile 3 pasoda proses edilmiş Al5083 numuneden SEM ile elde edilen aşınma iz görüntüsü .....	32
Şekil 4. 12. SKP ile 4 pasoda proses edilmiş Al5083 numuneden SEM ile elde edilen aşınma iz görüntüsü .....	32
Şekil 4. 13. SKP ile 5 pasoda proses edilmiş Al5083 numuneden SEM ile elde edilen aşınma iz görüntüsü .....	33



## TABLULAR LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2. 1. Al'nin genel özellikleri.....	4
Tablo 2. 2. Dövme ve döküm Al alaşımlarının gösterimi ve özellikleri.....	8
Tablo 2. 3. Sürtünme karıştırma temel teknolojilerinin sınıflandırılması.....	11
Tablo 2. 4. SKK'nın temel faydaları.....	14
Tablo 3. 1. Aşınma test parametreleri.....	21
Tablo 4. 1. Proses edilmemiş Al5083 numune ve SKP ile farklı pasolarda proses edilmiş Al5083 numunelerin tane boyutları ve sertlik değerleri.....	27
Tablo 4. 2. Proses edilmemiş Al5083 numune ve SKP ile farklı pasolarda proses edilmiş Al5083 numunelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri.....	29

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

<i>Al</i>	Alüminyum
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	Alüminyum Oksit
<i>Cal</i>	Kalori
<i>CH<sub>3</sub>OH</i>	Metanol
<i>cm</i>	Santimetre
<i>Cu</i>	Bakır
<i>dev/dak</i>	Devir/dakika
<i>HClO<sub>3</sub></i>	Hidrojen Klorür (Klorik Asit)
<i>HF</i>	Hidrojen Florür (Florik Asit)
<i>HNO<sub>3</sub></i>	Hidrojen Nitrat (Nitrik Asit)
<i>HV</i>	Vickers Sertlik Değeri
<i>kg</i>	Kilogram
<i>kN</i>	Kilonewton
<i>Mg</i>	Magnezyum
<i>mm</i>	Milimetre
<i>mm/dak</i>	Milimetre/dakika
<i>Mn</i>	Mangan
<i>MPa</i>	Megapaskal
<i>Mol</i>	Molarite
<i>N</i>	Newton
<i>Nm</i>	Newtonmetre
<i>SiC</i>	Silisyumkarbür
<i>sn</i>	Saniye
<i>Zn</i>	Çinko
<i>°C</i>	Santigrat Derece
<i>µm</i>	Mikrometre
<i>%</i>	Yüzde
<i>µ</i>	Mikron

## Kısaltmalar

BHN	Brinell Sertliği
BM	Isıdan Etkilenmemiş Taban Malzeme
HAZ	Isıdan Etkilenen Bölge
ITAB	Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
MIG	Metal İnerit Gaz
TIG	Tungsten İnerit Gaz
TMAZ	Termomekanik Olarak Etkilenmiş Bölge
TWI	The Welding Institute
SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SKP	Sürtünme Karıştırma Prosesi
SZ	Karıştırılmış Bölge
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

## 1. GİRİŞ

Alüminyum (Al) ve alaşımları endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca Al alaşımları kullanım talebi de gün geçtikçe artmaktadır. Fakat Al alaşımlarının mekanik özellikleri ve aşınma performansı birçok uygulama için yeterli değildir (Shyam vd., 2016). Al alaşımlarının birçok mekanik özelliğini sürtünme karıştırma prosesi (SKP) ile iyileştirmek mümkündür.

SKP, 1991 yılında TWI (The Welding Institute) tarafından icat edilen sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) tekniğinin bir uyarlamasıdır (Thomas vd., 1991). Termomekanik bir işlem olan SKP, SKK ile aynı temel prensiplere sahip olup katı halde uygulanır. İki yöntemde aynı prensiplere sahip olmasına rağmen uygulamada farklılık gösterirler. Alüminyum, magnezyum gibi demir dışı ve demir esaslı alaşımlara uygulanabilen bu yöntem son zamanlarda polimer malzemelere de uygulanmaya başlanmıştır (Mishra vd., 2003). SKP toz metalürjisi veya dökümle üretilmiş malzemeleri homojenize etmek ve metal matriksli kompozitleri üretmek için kullanılan çok etkili bir yöntemdir (Sharma vd., 2015). Bu yöntemde iş parçasına daldırılan ve parça eksenine boyunca hareket ettirilen bir pim ve omuzlu sahip döner bir takım kullanılır. Takım üzerine uygulanan aksel kuvvet iş parçası ve takım arasında ısı oluşmasını sağlar. Döner omuz tarafından üretilen bu ısı malzemenin yumuşamasına ve takım etrafında akmasına neden olur. Böylece oluşan plastik deformasyon sonucu ultra ince taneli yapı elde edilir (Rana vd., 2016). Bu yöntemde çalışılan parçanın proses uygulanırken hareket etmesini önlemek için sıkıştırılmış olması gerekir. İş parçasını desteklemek ve bir ısı emici olarak görev yapması için bir destek kullanılması gerekir (Threadgill, 2009).

SKP'de amaç SKK'daki gibi birleştirme yapmak değildir. Yöntem malzemenin şekillenebilirliği, mukavemeti, sünekliği gibi birçok mekanik ve tribolojik özelliğini iyileştirmek için kullanılır. SKP yeniden kristalleştirme ile mikroyapıyı dinamik açıdan değiştiren ciddi bir deformasyon sürecidir (Jana vd., 2010). İnce taneli yapı elde etmek için yeniden kristalleştirme tercih edilir. Takım rotasyonunun ve hareketinin mekanik çalışması ile elde edilen gerilme enerjisi, malzemenin yeniden kristalizasyonu için kullanılır (Mishra ve Mahoney, 2007).

Al alaşımları arasında Al-Mg alaşımı olan Al5083, düşük yoğunluğa ve ağırlık oranına karşı yüksek mukavemete, mükemmel korozyon direncine ve iyi şekillendirilebilirliğe sahip olması nedeniyle havacılık ve ulaşım sektörlerinde büyük öneme sahiptir. Al5083 alaşımı ısıtılma işlem uygulanması zor bir malzemedir ve sadece iş sertleşmesi veya mikro alaşımlama ile sertleştirilebilir (Chen vd., 2016). Ayrıca, Al5083'ün diğer Al alaşımları gibi önemli problemlerinden biri de, tribolojik performanslarını sınırlayan nispeten düşük aşınma direncidir (Venkataraman ve Sundararajan, 2000). Prasada Rao vd. (2004), tane inceltmenin Al ve alaşımlarının aşınma direnci ve yük taşıma kapasitesinde iyileşme sağladığını bildirmiştir.

Al alaşımlarının sertliğini ve mukavemetini arttırmak için ultra-ince taneli mikroyapı üretmek konusunda önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu nedenle, Al5083'ün tüm iş parçasında ince taneli mikroyapıların elde edilmesi için aşırı plastik deformasyon (SPD) işlemleri geliştirilmiştir (Sakai vd., 2005).

SKP'nin Al alaşımlarının mikro yapısını inceltmesi ve böylece mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için etkili bir yol olduğu kanıtlanmıştır (Mishra ve Ma, 2005; Santella vd., 2005). Behnagh vd. (2006), SKP'nin Al5083'ün mukavemetini arttırmak için mekanik bileşen yüzeyini lokal olarak değiştirmek üzere uygulanabildiğini rapor etmiştir.

SKP uygulanan malzemelerde sertlik, mukavemet, yorulma ve korozyona karşı direncin arttığı birçok çalışma ile kanıtlanmıştır (Mishra vd., 2003). SKP'nin birçok malzemenin mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır (Mishra, 1999; Su vd., 2005; Johannes ve Mishra, 2007; Cui vd., 2009). SKP tek geçişli (paso) ve çok geçişli olarak malzemeye uygulanabilmektedir. SKP'nin uygulanması sonucu dört ayrı bölge oluşur; i) tanecik boyutunun rafine edildiği ve homojenleştirildiği termomekanik olarak işlenmiş bölge olan karıştırılmış bölge (SZ/weld-nugget), ii) mekanik olarak deformasyon sonucu tanelerin uzadığı termomekanik etkilenmiş bölge (TMAZ), iii) ısıdan etkilenen bölge (HAZ) ve iv) işleminden etkilenmemiş taban malzeme (BM) (Padhyvd., 2018). El-Rayes vd. (2012), 6082-T6 alaşımında artan paso sayısının, SZ'deki açılı tane sınırlarının tane büyüklüğünde ve fraksiyonunda artışa neden olduğunu rapor etmişlerdir. Ancak, Brown vd. (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, 7050-T7451 alaşımları için değişen paso sayısının tane büyüklüğü ve karıştırma bölgesinin sertliği üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür. Nakata vd. (2006) sürtünme ısı ve karıştırma

kullanarak katı hal mikroyapısal modifikasyon tekniği olan çok geçişli SKP ile bir Al kalıp döküm alaşımının mikroyapısal modifikasyonundan dolayı mekanik özelliklerde bir iyileşme sağladığını rapor etmiştir. Sonuç olarak geçiş sayısının Al alaşımları üzerindeki etkisi konusunda bir fikir birliği olmadığı ve dolayısıyla bu konuda daha fazla araştırma yapılması gerektiği öngörülmüştür.

*Çalışmanın Amacı;* Araçlarda arpma anında asıl darbe, aracın tüm aksamalarının bağlı olduğu şasi üzerine gelmektedir. şasinin darbeyi absorbe edebilmesi için yüksek tokluğa sahip bir malzemeden imal edilmesi gerekmektedir. Ayrıca araç aksamalarıyla şasi arasındaki şasi bağlantısının gevşemesi yüzünden gevşeyen parçaların birbirine sürtünmesi ile aşınma meydana gelmektedir. Bu durum yaygın olarak görülen şasi hasarlarından biridir. Bu hasarı azaltabilmek için şasi yüzeyinin sert olması gerekir. şasi malzemesi olarak elik ve Al alaşımları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. elik ve Al'un özgül mukavemetleri (mukavemet/yoğunluk) birbirinden farklıdır. Al'un özgül mukavemetinin yüksek olması, araçlarda yakıt tüketimini azaltmak için hafifletilme çalışmalarında tercih edilme sebeplerinin başında gelmektedir. Al alaşımları arasında da bu amaçla en yaygın kullanılanı Al5083 alaşımıdır. Daha öncede belirtildiği üzere Al5083 alaşımının uygulamada kullanımını sınırlayan yetersiz mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirilebilmek için en uygun yöntem, tane yapısını inceltmek amacıyla bu alaşımı aşırı plastik deformasyona uğratmaktır. Bu nedenle, bu çalışmada Al5083 alaşımının mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için farklı paso sayılarında SKP uygulanmış ve paso sayısının Al5083 alaşımının yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Alüminyum (Al) ve Alaşımları

Al doğada en fazla bulunan elementtir. Al'nin yoğunluğu endüstride çok kullanılan çelik ve bakır gibi malzemelerin yoğunluğundan daha düşüktür. Al'nin yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$  iken çeliğin yoğunluğu  $7,83 \text{ g/cm}^3$  ve bakırın yoğunluğu  $8,96 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Al'nin mukavemetinin çelikten daha düşük olmasına rağmen, kesiti artırılarak neredeyse çelik kadar mukavemetli hale getirilebilir. Tablo 2.1'de Al'nin genel özellikleri verilmiştir.

**Tablo 2. 1.** Al'nin genel özellikleri (Tımaç, 2006)

<b>Sembol</b>	Al
<b>Atom Numarası</b>	13
<b>Atom Ağırlığı</b>	26,7 g/mol
<b>Kristal Yapısı</b>	YMK (a=4.091 Å)
<b>Yoğunluğu (25°C)</b>	2,7 g/cm <sup>3</sup>
<b>Ergime Noktası</b>	650 °C
<b>Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı</b>	150 – 300 °C
<b>Buharlaştırma Noktası</b>	2450 °C
<b>Isıl Genleşme</b>	23,6 x 10,6 (20 – 100 °C)
<b>Ergime Gizli Isısı</b>	0,224 cal/g (100 °C)
<b>Elastik Modül</b>	7,2
<b>Kayma Modülü</b>	2,7
<b>Çekme Dayanımı</b>	4-9 kg/mm <sup>2</sup>
<b>Akma Dayanımı</b>	1-3 kg/mm <sup>2</sup>
<b>% Uzama</b>	60
<b>Kopma Uzaması</b>	% 30 – 40
<b>Çentik Darbe Tokluğu</b>	10 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Sertlik</b>	17 (BHN)

Birçok konstrüksiyonda çelik yerine Al malzemelerin kullanılması ağırlık oranını düşürdüğünden birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Tasarımı doğru yapılan bir yapıda çelik yerine Al kullanmak konstrüksiyon ağırlığını %50'nin üzerinde bir oranda düşürür. Al'nin elektrik iletkenliği bakırdan düşük olmasına rağmen, aynı ağırlıktaki Al telin kesit alanı bakır telin kesit alanından daha büyük olduğu için Al tel daha fazla elektrik iletir (Yükler, 2000).

Al alaşımları düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, iyi işlenebilirlik ve korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv ve elektronik paketleme gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır (Khodabakhshi, 2018). Ancak yukarıda sıralanan avantajların yanı sıra, zayıf yüzey özellikleri ve düşük aşınma direnci nedeniyle Al ve alaşımları için mühendislik uygulamaları sınırlıdır (Meyveci, 2010).

Birçok ticari Al alaşımının mekanik özellikleri mikroyapılarına alaşımlar eklenerek ya da ısıl işlem uygulanarak geliştirilebilmektedir (Wei, 2006). Geliştirilebilen fiziksel ve mekanik özelliklere sahip Al alaşımlarının kullanım alanı da bu sayede artmaktadır.

Al ve alaşımları hava, su, yağ ve birçok kimyasal madde ile temas halinde çok iyi korozif özellikler gösterir. Atmosfer ile temas halinde yüzeyde oluşan oksit tabakası Al ve alaşımlarının korozyona karşı direncini artırır. Al ve alaşımlarının kaynağı çeliklerden çok farklıdır. Bunun nedeni Al alaşımlarının atmosfer ortamında çok kolay oksitlenebilmesi ve ergime sıcaklarının düşük olmasıdır. Bu özellikler Al ve alaşımlarına kaynak yapılmasını ve yapılan kaynağın kalitesini etkileyen en önemli faktörlerdir. Al ve alaşımları özellikle uçak sektöründe kullanılmaya başlandığında kaynakla birleştirilmesi gereksinimi ortaya çıkmıştır. Bunun içinde gazaltı kaynak yöntemleri olan TIG ve MIG kullanılmıştır. Kalın kesite sahip Al alaşımlarının kesilebilmesi içinde plazma arkı ile kesme geliştirilmiş, daha sonra plazma ark kaynağı uzay araçlarının Al parçalarının kaynağında da kullanılmaya başlanmıştır. Her ne kadar Al alaşımları bu kaynak yöntemleri ile kaynak edilmeye çalışılmış olsa da aslında Al ve alaşımlarının kaynağı gaz ergitme ve örtülü elektrotla ark kaynağı yöntemleriyle sınırlıdır. Gazaltı kaynak yöntemlerinin bulunması daha kaliteli kaynak bağlantıları yapılmasına imkân sağlamıştır (Kaluç vd., 2005). Fakat yine de ergitme esaslı olan bu yöntemler Al ve alaşımlarının kaynak bölgelerinde, ITAB'larında ve alaşımlarının içyapılarına bağlı olarak kaynak



bağlantılarında sorunlara sebep olabilmektedir. Bunun yanında bu yöntemlerle bazı Al alaşımlarının kaynağı neredeyse imkânsızdır. Bu sebeple bilim adamları yeni kaynak yöntemleri bulmak için araştırmalar yapmışlardır. Ergitme esaslı kaynak yöntemlerinde ortaya çıkan sorunlar; kaynak sırasında ve sonrasında sıcak çatlama, yüzeyde bulunan yüksek dirençli oksit tabakası, kaynak metali ve ITAB’da oluşan mukavemet kaybıdır. Bu kayıpları önlemek için yeni kaynak yöntemleri üzerinde araştırma yapan İngiltere’deki The Welding Institute 1991 yılında sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) adı verilen bir katı hal kaynağını alın altına ve köşe birleştirmelerinde başarıyla uygulayarak bilim dünyasına kazandırmıştır (Lohwasser vd., 2010).

TIG, MIG gibi gazaltı kaynak yöntemleriyle kaynak edilmesi çok zor olan Al alaşımlarının kaynağı SKK yöntemiyle basit bir şekilde yapılabilir hale gelmiştir. Ark kaynaklarına göre daha az ısı girdisi olan bu yöntem sayesinde daha az süreksizlik, gerilmeli korozyon kaynağına karşı direnç, ilave metal ihtiyacının ortadan kaldırılması ve kaynak sonrası malzemede meydana gelen mukavemet kayıpları azatılabilmektedir. (Rajiv vd., 2011).

## **2.2. Al ve Alaşımlarının Sınıflandırılması**

Endüstride kullanılan Al alaşımları; dövme ve döküm Al alaşımları olarak ikiye ayrılmaktadır. Özellikle dövme Al alaşımlarının ısıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan birçok türü mevcuttur. Bunlar arasında; 2XXX, 5XXX, 6XXX ve 7XXX en çok kullanılan dövme Al alaşımlarıdır. Bunlardan 5XXX serisi yüksek korozyon direnci ve mukavemeti, 6XXX serisi ise yine yüksek korozyon direnci ve 5XXX serilerine göre orta mukavemete sahiptir. Bu serilerden olan Al5083 ve Al6082 alaşımları yüksek korozyon direnci sebebiyle gemi yapımı endüstrisinde yoğun olarak kullanılır (Matters vd., 2002). Al’ye ilave edilen alaşım elementleri arasında Bakır (Cu), Mangan (Mn), Magnezyum (Mg) ve Çinko (Zn) en önemlileridir. Bu alaşım elementlerinin ilavesi ile saf Al’nin mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri önemli ölçüde değişmektedir (Smith, 2001).

### 2.2.1. Dövme Al Alaşımları

Dövme Al alaşımları, yüksek plastik deformasyona uğrayabildikleri için kolaylıkla şekillendirilebilmektedirler. Bu alaşımların büyük bir kısmı ısıl işleme tabi tutulabilir. Amerikan Alüminyum Birliği'ne göre bu tür Al alaşımları 4 rakam sistemiyle tanımlanmaktadır. Bu sistemdeki ilk rakam, alaşımda bulunan en fazla elementi, ikinci rakam ise orijinal alaşımdaki miktardan farklı olan element sayısını belirtmektedir. Eğer ikinci rakam 0 (sıfır) olursa alaşım serisinin orijinal olduğunu belirtir. Son iki rakam alaşımı diğer alaşım dizinlerinden ayırmak için kullanılmaktadır (Kaufman, 2000). Dövme Al alaşımlarının gösterimi ve bazı özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

### 2.2.2. Döküm Al Alaşımları

Döküm Al alaşımlarının ısıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan türleri vardır. Bu şekilde sınıflandırılabilirler gibi döküm yöntemine göre tek kullanımlık kum kalıplama (sand casting), basınçsız tek kullanımlık kalıplama ve basınçlı döküm ile üretilenler olarak sınıflandırılabilirler. Kum kalıplamada sınırsız tasarım, ölçü şekil özgürlüğü ve ürün kalitesi elde etmek mümkündür. Kalıp malzemesi olarak Silika ( $\text{SiO}_2$ ), Zirkonya ( $\text{ZrO}_2$ ), Olivin ( $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ ), Kromit ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) kumları kullanılmaktadır. En fazla Silika ve Zirkonya kullanılır. Basınçsız kalıplama ise iki ya da daha çok parça ile yapılır ve döküm sırasında bu parçalar açılıp kapanır. Bu yöntemle büyük hacimli parçalar üretilir. Bu yöntemle kum kalıplama yöntemine göre daha üniform parçaların üretimi, daha iyi ölçü hassasiyeti, mekanik ve yüzey özellikleri elde edilebilmektedir. Ayrıca bu döküm yöntemi sürekli kalıp bozulup yapılmadığından seri üretime uygundur. Kum ve basınçsız kalıplamada metalin akışı yerçekimi ile gerçekleşirken, basınçlı döküm yönteminde sıvı metal bir pompa ya da benzeri bir alet ile kalıp içerisine gönderilir. Düşük basınçlı kalıplamada basınçsız kalıplamaya benzer bir süreç meydana gelirken, yüksek basınçlı kalıplamada kalıp malzemesi olarak basınca dayanıklı metal kalıplar kullanıldığından daha pahalı bir yöntemdir (Totten vd., 2003).

Döküm Al alaşımları plastik deformasyonla şekil verilebilen dövme Al alaşımlara nazaran daha farklı kompozisyon ve mikroyapıya sahip olduklarından, yüksek akıcılık ve

dökülebilirlik, dayanım, korozyon direnci ve süneklik gibi özelliklere sahiptir (Polmear, 1981).

Alüminyum Birliği tarafından tanımlanan ‘‘Alüminyum Alaşımlarından Yapılan Dökümlerin Bileşimi’’ adlı standart Nisan 1975’te yayımlanmıştır (Taban, 2004). Bu standartizasyona göre Al döküm alaşımları dört rakam, üçüncü ve dördüncü rakam arasında bir nokta ile ifade edilmektedir. İlk üç rakam alaşımın türünü tanımlarken, dördüncü rakam ise alaşımın formunu tanımlar. Birinci rakam ana alaşım elementini, ikinci ve üçüncü rakam özel alaşım ailesini tanımlar. Son rakam ise ürünün döküm ya da ingot olduğunu gösterir. Dökümde bu rakam 0 iken, ingotta 1 ya da 2 olmaktadır. 1 rakamı daha geniş çapta kullanılır ve geniş bir bileşim alanına sahiptir. 2 rakamı ise daha dar bir alanda kullanılır ve dar bir bileşim alanına sahiptir (Kaufman, 2000). Döküm Al alaşımlarının gösterimi ve bazı özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

**Tablo 2. 2.** Dövme ve döküm Al alaşımlarının gösterimi ve özellikleri (ASM Handbook, 1979; Öksüz, 1996; Anderson, 2000; Kaufman, 2000; Deschamps vd., 2001; Şaldır, 2002; Gülyüz, 2003; Taban, 2004; Kumru, 2007; Durmuş vd., 2009)

---

#### **Dövme Al Alaşımları**

---

1XXX: Bu seri minimum %99 Al içermektedir. 1XXX serisinde ikinci rakam sıfır olursa alaşımsız grubu tanımlar. Son iki rakam ise %99 üzeri saflığın virgülden sonraki kısmı ifade etmektedir. Örneğin 1050 ifadesinde Al oranı %99,50’dir. Bu saf metaller genelde uygulama ve mekanik özellik gereksinimlerine göre benzer ek kaynak metali ya da 4XXX serisi ilave metali ile kaynak edilebilmektedirler.

2XXX: Al-Cu alaşımları olarak bilinen bu seriye ısıtılabilir işlem uygulanabilir. Bu alaşımların bazı türlerinin sıcak çatlama ve gerilmeli korozyon çatlakları hassasiyeti sebebiyle ark kaynak yöntemleriyle kaynak edilmesi imkânsızdır. Ancak diğer Al alaşımları uygun kaynak yöntemleri ile kaynak edilebilirler. Bu alaşımlar yüksek mukavemetlerini sürdürmek için 2XXX serisi ilave metalleriyle kaynak edilirler. Bazı uygulama ve çalışma isteklerine bağlı 4XXX serisi Al alaşımları ile de kaynak edilebilirler.

---

**Tablo 2. 2. Devamı:** Dövmeye ve döküm Al alaşımlarının gösterimi ve özellikleri (ASM Handbook, 1979; Öksüz, 1996; Anderson, 2000; Kaufman, 2000; Deschamps vd., 2001; Şaldır, 2002; Gülerüz, 2003; Taban, 2004; Kumru, 2007; Durmuş vd., 2009)

---

3XXX: Isıl işleme tabi tutulamayan bu seride ana alaşım elementi Mangan'dır. Bu alaşım korozyon direncinin, kaynak kabiliyetinin ve şekillenme kabiliyetinin yüksek olması sebebiyle yağ tankı, gıda kutusu gibi yerlerde kullanılır. Bu alaşımlar çalışacakları yerin durumuna göre 1XXX, 4XXX ve 5XXX ilave kaynak metalleri ile kaynak edilebilirler.

4XXX: Ana alaşım elementi Silisyum olan bu seride, Al'ye yeteri miktarda (%12'ye kadar) alaşım eklenirse gevrekleşmeden ergime derecesi azalır. Bu sebeple 4XXX serisi Al alaşımları esas metalin ergime sıcaklıklarından daha düşük sıcaklık aralıklarında sert lehim alaşımı ya da kaynak teli olarak kullanılabilirler.

5XXX: Ana alaşım elementi Magnezyum olan 5XXX serisi Al alaşımları yüksek çekme dayanımı, sertlik, aşınma direnci ve deniz ortamına karşı yüksek korozyon direncine sahiptir. Kaynak kabiliyeti yüksek olan bu alaşımların yumuşak temper formunda soğuk şekillendirilebilirlik özellikleri iyidir.

6XXX: Bu serideki alaşımların ana alaşım elementleri silisyum ve magnezyumdur. Bu alaşımların sıcak çatlama duyarlılıkları sebebiyle ilave metal kullanılmadan kaynak edilmesi oldukça zordur. Ark kaynağı süresince yeteri kadar ilave metal kullanılması esas metalin ıslanmasını sağlayacağından, sıcak çatlama duyarlılığı ortadan kaldırılmış olur. Bu alaşımlar kullanılacakları yere bağlı olarak 4XXX ve 5XXX serisi Al alaşımlarıyla kaynak edilebilirler.

7XXX: 7XXX serisi Al alaşımlarının ana alaşım elementi Çinko'dur. Çok yüksek mukavemete sahip olduklarından kaynak edildiklerinde ITAB'ları gevrek olur.

8XXX: 8XXX serisi Al alaşımlarının ana alaşım elementi lityum olup, son yıllarda özellikle uzay ve uçak sanayisindeki düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli malzeme ihtiyacı, bu alaşımları ön plana çıkarmıştır. Bu alaşımların üretim maliyeti diğer alaşımlara nazaran oldukça yüksek olduğundan, bu alaşımların üretimi hem ekonomik hem de teknolojik açıdan geliştirilmeye çalışılmaktadır.

---

**Tablo 2. 2. Devamı:** Dövme ve döküm Al alaşımlarının gösterimi ve özellikleri (ASM Handbook, 1979; Öksüz, 1996; Anderson, 2000; Kaufman, 2000; Deschams vd., 2001; Şaldır, 2002; Gülerüz, 2003; Taban, 2004; Kumru, 2007; Durmuş vd., 2009)

### **Döküm Al Alaşımları**

1XX.X: Saf Al'yi tanımlar. %99'dan fazla Al içerir.

2XX.X: Isıl işlem uygulanabilen bu alaşımlar %4-5 aralığında Bakır, Demir ve Silisyum empuriteleri ve bazen de az miktarda magnezyum içermektedir.

3XX.X: Ana alaşım elementi silisyum olan 3XX.X serisi Al alaşımlarına Silisyumun yanında bakır veya Magnezyumda ilave edilir. Bütün döküm yöntemleriyle üretilebilen bu alaşımlara ısıl işlem uygulanabilmektedir. Çekme mukavemetleri oldukça yüksek ve kaynak kabiliyetleri iyidir.

4XX.X: Ana alaşım elementi Silisyum olan 4XX.X serisi Al alaşımları üstün döküm özellikleri nedeniyle en önemli ticari döküm alaşımı serisidir.

5XX.X: Ana alaşım elementi Magnezyum olan 5XX.X serisi Al alaşımlarına ısıl işlem uygulanamaz. Bu alaşımlar deniz korozyonuna karşı oldukça dayanıklıdır fakat nispeten düşük döküm kabiliyetine sahiptirler.

6XX.X: Kullanılmayan seridir.

7XX.X: Ana alaşım elementi Çinko olan 6XX.X serisi Al alaşımları dökümden sonra 20-30 gün doğal yaşlandırıldıklarında maksimum dayanımlarına erişirler.

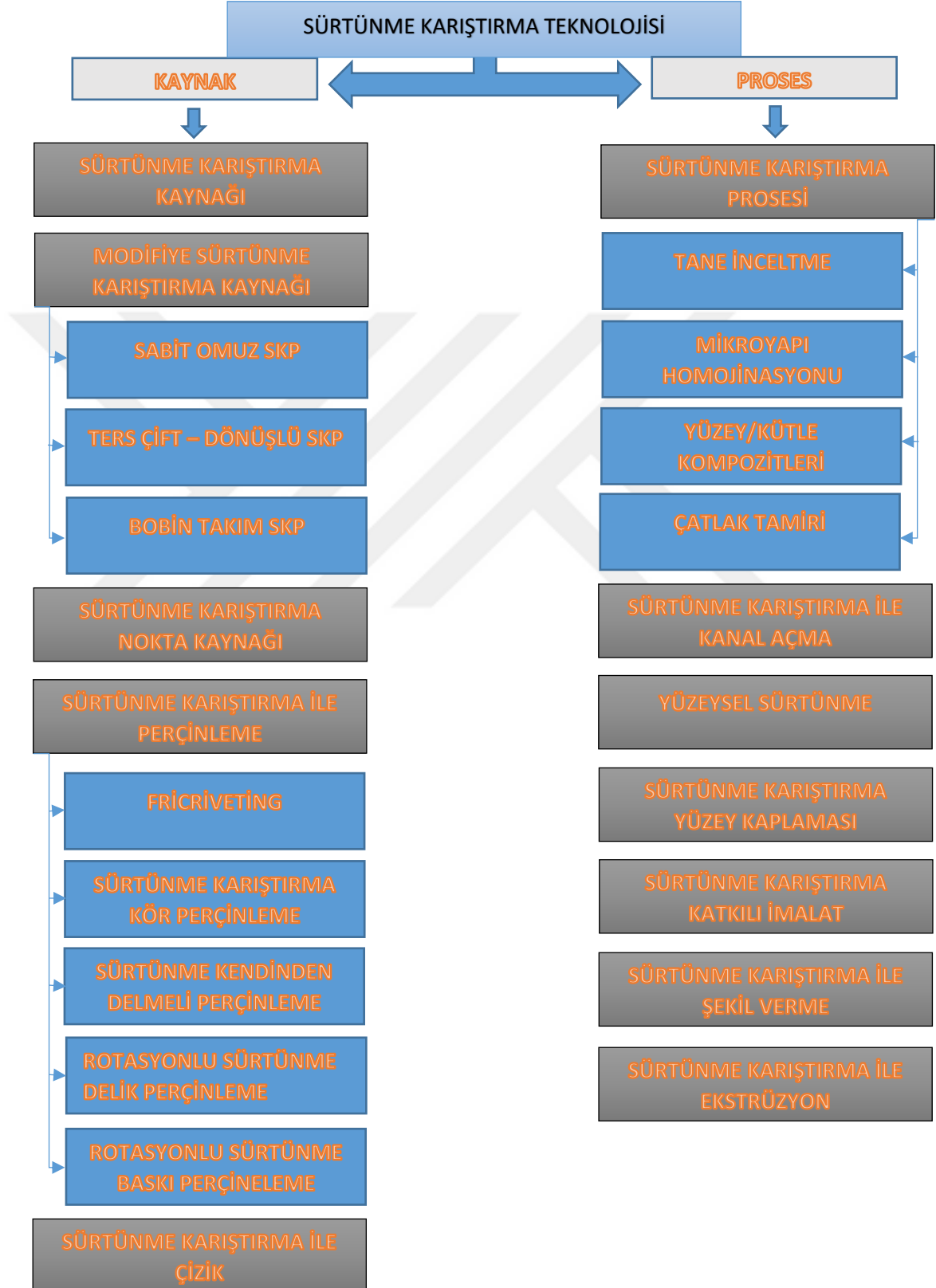
## **2.3. Sürtünme Karıştırma Teknolojisi**

### **2.3.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK)**

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), yeni bir katı hal tekniği olarak 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından icat edilmiştir (Thomas, 1995). SKK nispeten yeni bir katı hal birleştirme kaynağıdır. Bu birleştirme tekniği enerji verimli, çevre dostu ve çok yönlüdür. Bu yöntem özellikle havacılık sektöründe kullanılan yüksek mukavemetli Al alaşımlarını ve yüksek çekme mukavemeti olan diğer metalik alaşımları birleştirmek için kullanılabilir. SKK, son yıllarda metal birleştirmede en önemli teknolojik gelişme olarak kabul edilir (Mishra ve Ma, 2005).

Sürtünme karıştırma temel teknolojilerinin sınıflandırılması Tablo 2.3’de verilmiştir.

**Tablo 2.3.** Sürtünme karıştırma temel teknolojilerinin sınıflandırılması (Vilaça vd., 2012)

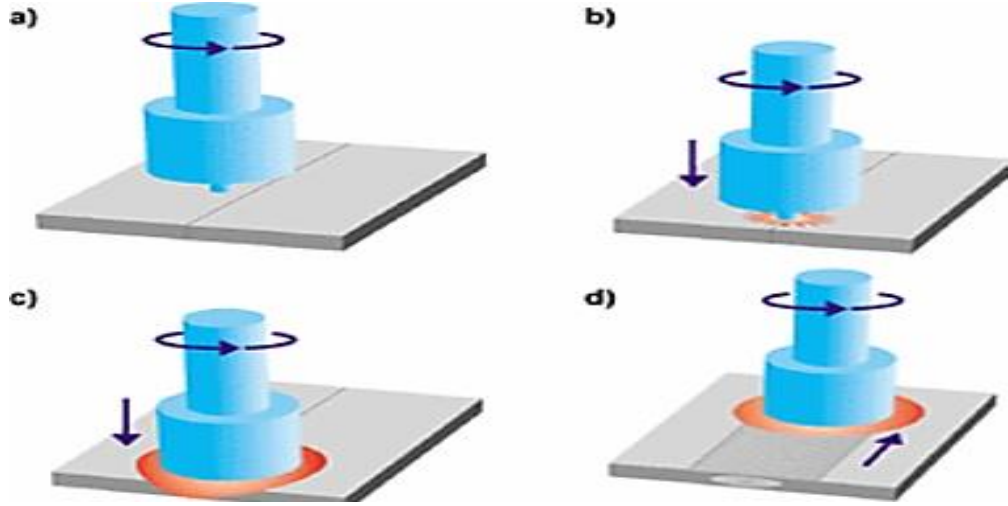


SKK'nın temel konsepti oldukça basittir. SKK, kaynak yapılacak parçadan daha sert bir malzemeden üretilmiş takımın dönen ucu ile kaynak yapılacak parçalar ile temas ettiği bölgede ısı meydana getirilmesi prensibiyle çalışır. Karıştırıcı uç, daha geniş çaplı bir metal gövdeye bağlı, daha küçük çaplı bir sonda durumundadır. Karıştırıcı uç birleşme bölgesine daldırılır ve geniş çaplı omuz birleştirilecek metal parçalara ilk teması gerçekleştirir. Karıştırıcı ucun dalma derinliği kaynak nüfuziyeti olarak da adlandırılır.

Omzun malzemeye teması kaynak bölgesine ilave bir ısı girdisi sağlar ve yumuşayan bölgeye kesik koni şeklindeki ucu daldırılır. Isıtmanın etkisi ile yumuşayan metal karıştırıcı uca doğru ilerleyerek daralan ancak üst yüzeyde omuz ile temas eden daha geniş bir hal alır. Karıştırıcı uçtan omuza kadar olan bölgedeki toplam sürtünme ısı, gömülmüş olan karıştırıcının çevresi ile malzeme üst yüzeyi ve omuzun temas ettiği yüzeyde metalin yumuşamasını sağlar. Karıştırıcı uç çevresinde malzeme akışı, karıştırıcı uç arkasında ise malzeme ile dönen uç arasında izafi bir dönüş meydana gelir. (Kurt vd., 2003).

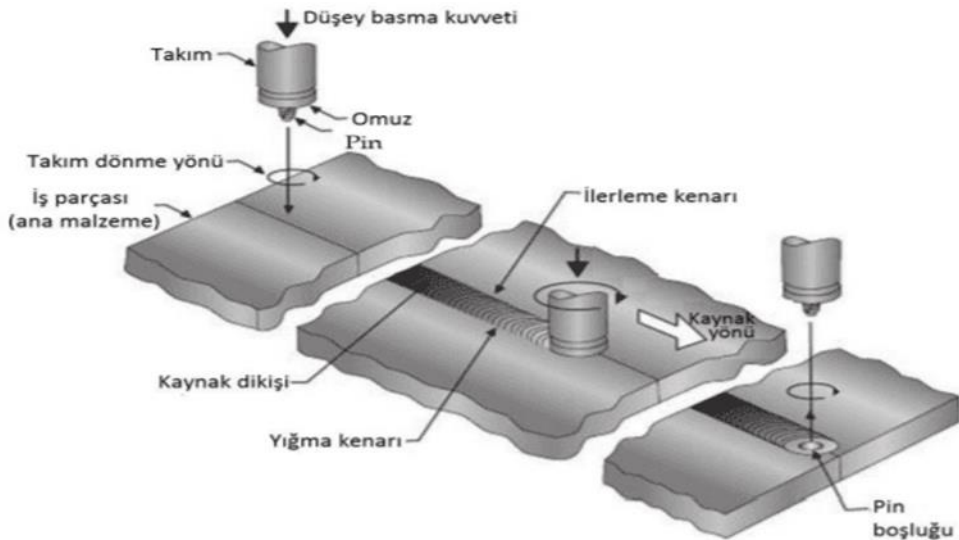
Lokal ısıtma ile pimin etrafındaki yumuşama sonucu, takım rotasyonu ile dönerek karıştırma ve ilerleme hareketinin etkisiyle pimin etrafındaki her iki malzemenin karışarak birleşmesi sağlanmış olur. Takımın çeşitli geometrik özellikleri sebebiyle, pimin etrafındaki malzeme hareketi oldukça karmaşık olabilir (London vd., 2001).

SKK, kendi kendine oluşan bir birleştirme tekniği olarak diğer birleştirme yöntemlerinden ayrılır. Birleşen malzeme doğal katı faz halinde olup, diğer ergime kaynaklarında oluşan hatalar SKK'da oluşmaz. SKK'nın adımları Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 2. 1.** SKK işleminin adımları a) Takımın döner hareketi b) Takımın birleşecek plakalar arasına dalması c) Takım omzunun plakalara teması sonucu sürtünme ve ısının oluşması d) Takımın birleşme çizgisi boyunca ilerleyerek birleşmenin oluşması (Kurt vd., 2003).

SKK işlemi sırasında malzeme, yüksek sıcaklıkta yoğun deformasyona uğrar ve bunun sonucunda kaliteli, eş eksenli taneler meydana gelir (Rhodes vd., 1997; Benavides vd., 1999). SKK’da oluşan mikroyapı sayesinde üstün mekanik özellikler elde edilir. SKK yöntemi ile elde edilen kaynak kalitesi malzeme cinsine çok bağlı değildir (Küleççi vd., 2003). Diğer kaynak yöntemlerinde oluşan çatlaklar, boşluklar, düzensizlikler, şekil bozuklukları vs. bu yöntemle çok büyük oranda en aza indirilir. Şekil 2.2’ de SKK’nın şematik gösterimi verilmiştir.



**Şekil 2. 2.** SKK’nın şematik gösterimi (Khairuddin vd., 2012)



SKK, sayısız uygulamada kullanılan Al alaşımları için gittikçe popüler bir hale gelmektedir. SKK'nın bir avantajı, TIG ve MIG gibi geleneksel kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında çok daha az ısı girdisi gerektirmesidir. Bu nedenle, bu katı hal süreci geleneksel kaynak yöntemlerine göre daha iyi mekanik özellikler elde edilmesini sağlar (Jariyaboon vd., 2007; Bousquet vd., 2011).

SKK yönteminde hiçbir koruyucu gaz veya akışkan kullanılmaz, böylece işlem çevre dostu hale gelir. Yöntemde birleştirme işlemi sırasında herhangi bir ek metal kullanılmaz ve bu nedenle, herhangi bir Al alaşımının diğer yöntemlerle kaynağında bir sorun olan bileşimin uyumluluğu için endişe duyulmasına gerek kalmaz (Murr vd., 1998; Li vd. 1999). SKK'nın faydaları Tablo 2.4'de verilmiştir.

**Tablo 2. 4.** SKK'nın temel faydaları (Ma vd., 2002)

<b>Metalurjik Faydalar</b>	<b>Çevresel Faydalar</b>	<b>Enerji Faydaları</b>
Katı faz süreci	Koruyucu gaz gerekmez	Geliştirilmiş materyal kullanımı (Örneğin; farklı kalınlıktaki malzemelerin birleştirilmesi) ağırlıkta azalmaya izin verir.
İş parçasının düşük distorsiyonu	Yüzey temizliğine gerek yoktur.	Bir lazer kaynağında kullanılan enerjinin %2.5'i kullanılır.
İyi boyutsal kararlılık ve tekralanabilirlik	Aşındırma talaşlarını ortadan kaldırma	Uçak, gemi ve otomotiv uygulamalarında azalan yakıt tüketimi
Alaşım elementi kaybı olmaması	Yağ giderme için gerekli çözücüleri ortadan kaldırma	
Ortak alanda mükemmel metalurjik özellikler	Tel ve gaz tasarrufu	
İnce mikroyapı		
Çatlak oluşmaması		

SKK günümüzde ulaştırma ve havacılık gibi sektörlerden oldukça yoğun bir ilgi görmektedir. Al5083 alaşımının SKK yöntemiyle kaynaklanabilirliği üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bazı araştırmacılar SKK'nın yorulma direnci üzerindeki etkisini incelemişlerdir (James vd., 2003; Lombard vd., 2008). Hirata vd. (2007) SKK parametrelerinin tane büyüklüğü ve şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kaynak sırasında sürtünmeli ısı akışının azalmasının tane büyüklüğünü,

sünekliği ve şekillendirilebilirliği azalttığını keşfetmişlerdir. Sato vd. (2004) işlenmemiş tabakaların şekillendirilebilirliği üzerinde bir oksit tabakasının etkisini incelemişlerdir. Bir grup kolektif oksit partikülünün, şekillendirme işlemi esnasında çatlama için bir başlangıç alanı olarak hareket edebildiğini keşfetmişlerdir. Zucchi vd. (2001), SKK ve MIG kaynağı sırasında Al5083 alaşımının çukurlaşma ve stres-korozyon çatlağı direncini artırdığını gözlemlemişlerdir.

### **2.3.2. Sürtünme Karıştırma Prosesi (SKP)**

Sürtünme karıştırma prosesi (SKP), SKK'nın temel prensiplerine dayanan mikroyapısal modifikasyon için genel bir araç olarak Mishra ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Mishra vd., 2000; Mishra ve Mahoney, 2001). SKP, gelişen metalürjik koşullara göre üretilen malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek amacıyla SKK'nın prensiplerini kullanan bir katı hal tekniği olarak ortaya çıkmıştır. SKP'de, bir omuz ve bir pimden oluşan döner bir alet (takım), yüksek devirde döndürülerek işlem yapılacak parçaya daldırılır ve parça boyunca ilerletilir. Bunun sonucunda yüzey sürtünmesi ve visko-plastik deformasyondan kaynaklanan mekanik karıştırma ve ısıtma sağlanır (Santella vd., 2005). SKP, yüksek açılı tane sınırları ile eş eksenli ultra ince taneler üreterek mikroyapısal inceltmenin gerçekleştiği "karıştırma bölgesi" veya "nugget bölgesi" olarak adlandırılan bir bölge oluşturur (Charit ve Mishra, 2003; Mishra vd. 2000). Takım ve iş parçası arasında oluşan sürtünmeden dolayı oluşan ısı, iş parçasını yumuşatır ve plastik bir hal almasını sağlar. SKP uygulanmış metalik malzemelerde sertlik, mukavemet, korozyon ve yorulmaya karşı direnç gibi birçok mekanik özellikte artış gözlenmektedir. SKP ile döküm hatalarını ortadan kaldırmak, metalik malzemelerde tane boyutunu inceltmek, yüzey kompozitleri üretmek ve kaynak yüzeylerini modifiye etmek mümkündür (Mishra vd., 2003).

SKP metalik malzemelerin mikroyapısını modifiye etmek ve yüzey kompozitleri üretmek için yaygın bir şekilde kullanılan bir yöntemdir. Metaller ile karşılaştırıldığında, seramik fazların takviyesi ile elde edilen metal matriksli kompozitler, daha yüksek mukavemet, yüksek aşınma direnci ve yorulma dayanımı sergilerken, bu kompozitlerin azalan süneklik ve toklukları kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Çoğu uygulamada kompozitlerin aşınma dayanımı gibi yüzey özellikleri malzemenin ömrünü

belirlemektedir. Bu nedenle yüzey kompozitleri üretimine gerek duyulmaktadır. Son yıllarda, çeşitli yüzey modifikasyon yöntemleri (yüksek enerji lazer eritme, plazma, sinterleme vb.) kullanılarak yüzey kompozitleri üretilmektedir. Bu yöntemler arasında en fazla uygulama alanı bulan yüksek enerji lazer eritme tekniğidir. Adından da anlaşıldığı gibi eritme söz konusu olduğundan bu yöntem bir sıvı faz prosesi yöntemidir. Yüzey kompozitinin üretiminde SKP'nin kullanılmasında işlemin ana metalin ergime sıcaklığı altında yapılması nedeniyle, yüksek sıcaklığın neden olduğu problemler ortadan kalkar (Mishra ve Ma, 2005).

Literatür çalışmalarına bakıldığında, SKP ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Mishra ve arkadaşları, değişik hacim oranlarında SiC kullanarak, 20-200 µm tabaka kalınlığında ve Al matris içinde SiC parçacıklarının uniform bir şekilde dağılarak mükemmel bir bağlanma gösterdiği Al-SiC yüzey kompozitlerini üretmeyi başarmışlardır. Elde edilen Al-SiC yüzey kompozitinin (yaklaşık 0.7 µm boyutlarında SiC ile güçlendirilmiş) (173 HV) ana metalin sertliğini (85 HV) önemli derecede artırdığını rapor etmişlerdir (Mahoney vd., 2003). Mishra vd. (2003), SKP yönteminde 300 dev/dk takım dönme hızında ve 1mm pim yüksekliğinde, takım ilerleme hızının Al5083-SiC yüzey kompozitlerinin üretimine etkisini incelemişlerdir. 25,4 mm/dk takım ilerleme hızında; SiC parçacıklarının uniform bir şekilde dağıldığını ve SiC parçacıkları ile oluşturulmuş yüzey kompozitinin ana metale çok iyi bağlandığı rapor etmişlerdir. İlerleme hızındaki yükselmenin (101,6 mm/dk) ise, yüzey kompoziti ile ana metal arasındaki bağlanmanın zayıflamasına yol açtığı görülmüştür.

Füller vd. (2003), Kaynak edilmiş Al alaşımlarının kaynak bölgesine uygulanan SKP'nin etkisini incelemiş ve bu prosesin kaynağın mikroyapısını ve kalıntı gerilmeleri etkilediğini gözlemlemişlerdir. Kaynak yapılmış Al numunelerde, çekme kalıntı gerilmelerinin 6 ile 25 MPa, basma kalıntı gerilmelerinin -50 ile -90 MPa aralığında olduğu görülmüştür. Kaynaklı numunelere kanyak dikişine dik olarak SKP uygulandıktan sonra, çekme kalıntı gerilmenin 28 MPa ve basma kalıntı gerilmelerinin -25 ile -70 MPa olduğu görülmüştür.

Ramesh vd. (2012) tek geçişli (paso) SKP, aralıklı çok geçişli (malzemenin, her bir SKP pasosundan sonra oda sıcaklığına geri soğumasına izin verilen ve ardından sonraki

pasonun yapıldığı) ve sürekli çoklu geçişli (pasolar arasında herhangi bir soğutma süresi olmadan, prosesin sürekli olarak gerçekleştirildiği) SKP'yi gerçekleştirmiş ve bunların işlenmiş malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuçlar, aralıklı çok geçişli SKP'ye tabi tutulan malzemenin, sürekli çoklu geçişli SKP'ye tabi tutulan malzemeye kıyasla daha iyi mekanik özellikler gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, tek geçişli, sürekli çoklu geçişli ve aralıklı çok geçişli SKP tipleri için takım hareket hızındaki bir artış ile mekanik özelliklerde bir değişiklik gözlemlendiği rapor edilmiştir.

Johannes ve Mishra (2007), Al7075 alaşımına, süper plastik ince taneli mikroyapılar üretmek için SKP işlemini uygulamıştır. Numunelere, aynı koşullar altında 1 ile 4 paso arasında SKP yapılmıştır. Tekli ve çoklu paso ile işlenen materyaller, çeşitli test sıcaklıkları ve gerilme oranlarında süper plastiklik sergilemiştir. Bununla birlikte, tek paso uygulanmış numunede en büyük uzama gözlenmiştir. Aynı zamanda, Al7075 için çoklu paso uygulanmış numunelerin süperplastik deformasyonu için tane sınır kaymasının birincil mekanizma olduğu sonucuna varılmıştır.

Soleymani vd. (2011) Al5083 alaşımının tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla alaşım üzerinde SKP'yi uygulamış ve paso sayısının (1 pasodan 4 pasoya kadar) etkisini incelemiştir. SKP'nin, alaşımın tane boyunu küçülttüğünü ve SKP geçişlerinin sayısının artırılmasının, tanelerin büyüklüğünde daha fazla azalmaya yol açtığını rapor etmişlerdir. Bunun nedeninin ısı girdisinin artması ile yeniden kristalleşme sonucu tanelerin tekrar birleşerek büyümesine bağlı olabileceğini açıklamışlardır. Ayrıca SKP'nin alaşımın sertliğini ve aşınma direncini de artırdığını, sürtünme katsayısını azalttığını ve mikroyapısal incelmeden kaynaklı olarak SKP geçişlerinin sayısının artırılmasının da sertliğin ve aşınma direncinin artmasına, sürtünme katsayısının azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, 8 mm kalınlığında ve 200 mm uzunluğunda Al5083-H111 taban malzemeler kullanılmıştır. SKP uygulanmadan önce, Al5083 taban malzemeler 600-800-1200-2000 mesh zımparalar ile zımparalanmış, ardından ultrasonik temizleme cihazı ile 20 dk temizlendikten sonra etil alkol ile yıkanmış ve kurutulmuştur.

Al5083 taban malzemelere 1'den 5 pasoya kadar SKP uygulanmış olup, tüm prosesler 1250 d/dk dönme hızı, 135 mm/dk ilerleme hızı, 7500 ±400 kN yük altında ve 3° takım açısında gerçekleştirilmiştir. Proseste karşı takım malzemesi olarak H13 takım çeliği kullanılmıştır. SKP cihazı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. SKP'de işlemin uygulanma aşaması Şekil 3.2'de verilmiştir. SKP uygulanmış 200 mm uzunluğunda ve 8 mm kalınlığında numuneler Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 1. SKP cihazı



Şekil 3. 2. SKP'de işlemin uygulanma aşaması



Şekil 3. 3. Farklı pasolarda SKP uygulanmış 200 mm uzunluğunda ve 8 mm kalınlığında Al5083 numuneler

Farklı pasolarda SKP uygulandıktan sonra, 8 mm kalınlığında ve 200 mm uzunluğunda Al5083 taban malzemelerin SKP uygulanmış bölgelerinden 30mm x 35mm x 8mm boyutunda numuneler kesilmiştir. Proses uygulanmış bölgelerden alınan Al5083 numuneler tekrar 600-800-1200-2000 mesh zımparalar ile zımparalanmıştır.

Mikroyapı çalışmaları için zımparalanan numuneler alümina ( $Al_2O_3$ ) ile parlatılmış ve %25 HF+%25 HNO<sub>3</sub>+%25 HClO<sub>3</sub>+%25 CH<sub>3</sub>OH çözeltisi ile 15 sn dağlanmıştır. Dağlanmış numuneler etil alkol ile yıkanmış ve ardından kurutulmuştur. Dağlanmış Al5083 taban malzeme ve farklı pasolarda SKP uygulanmış Al5083 numunelerin mikroyapısı optik mikroskop (Nikon ECLİPSE MA200) (Şekil 3.4) kullanılarak görüntülenmiştir. Optik mikroskoptan elde edilen sonuçlar üzerinden “Ortalama tane boyutu= 1/(kesişmelerin sayısı/çizginin gerçek uzunluğu)” formülü kullanılarak tane boyutları hesaplanmıştır.



**Şekil 3. 4.** Optik mikroskop

Al5083 numune ve SKP uygulanmış Al5083 numunelerin sertlik değeri, Vickers uç kullanılarak 15 s için 100 gr yük altında mikro sertlik test cihazı ile belirlenmiştir.

Sürtünme ve aşınma özelliklerini belirlemek için pin-on-disk (Teer coated ltd.) aşınma test cihazı (Şekil 3. 5) kullanılmıştır. Aşınma test parametreleri Tablo 3.1’de verilmiştir.



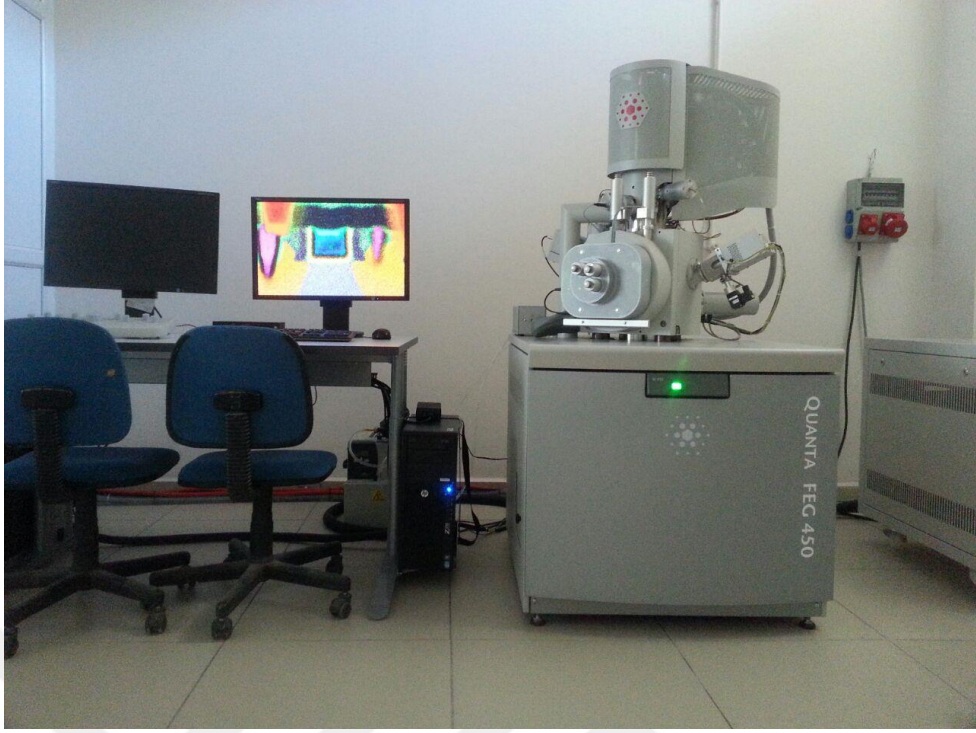
Şekil 3. 5. Aşınma test cihazı

Tablo 3. 1. Aşınma test parametreleri

Parametre	
Aşındırıcı Bilye	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Aşındırıcı Bilye Çapı (mm)	5
Hız (cm/s)	5
Uygulanan Yük (N)	2
Aşınma İz Çapı (mm)	5
Deney Süresi (dk)	20

Aşınma iz görüntüleri ise taramalı elektron mikroskobu (FEI Quanta FEG-450 SEM-EDAX) (Şekil 3.6) kullanılarak karakterize edilmiştir. Aşınma oranları 3D optik profilometre ile analiz edilerek belirlenmiştir.



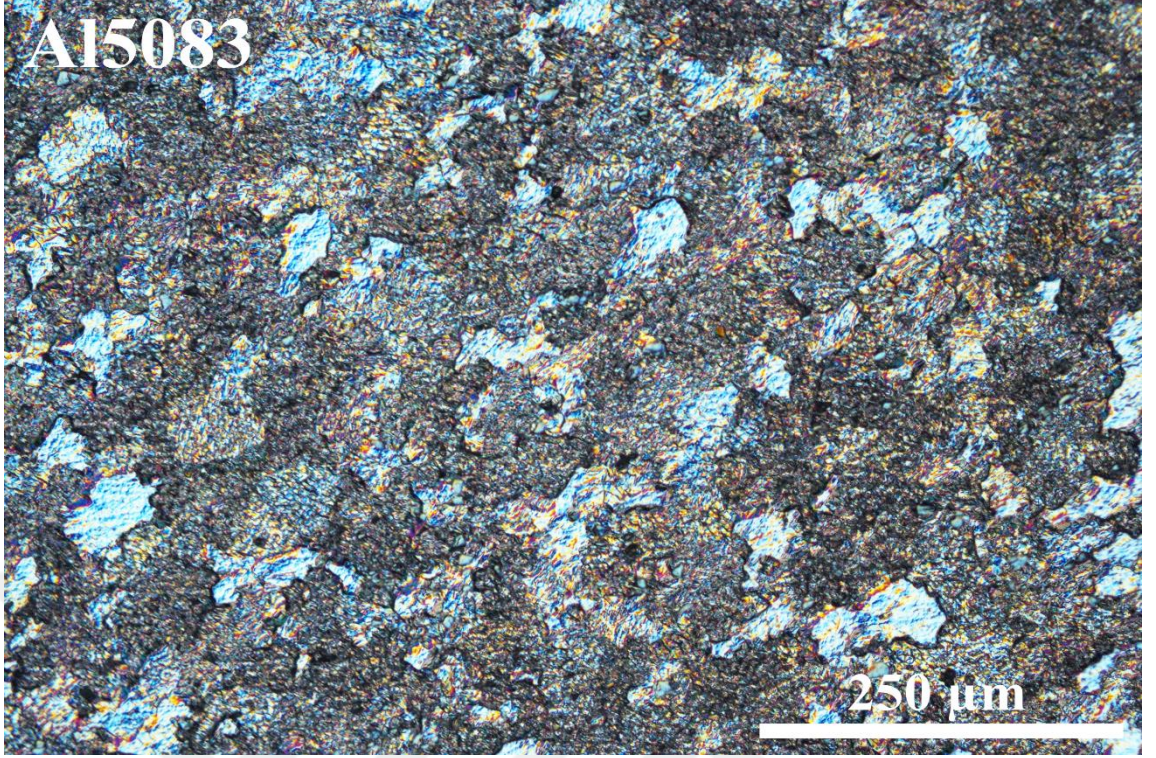


**Şekil 3. 6.** Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

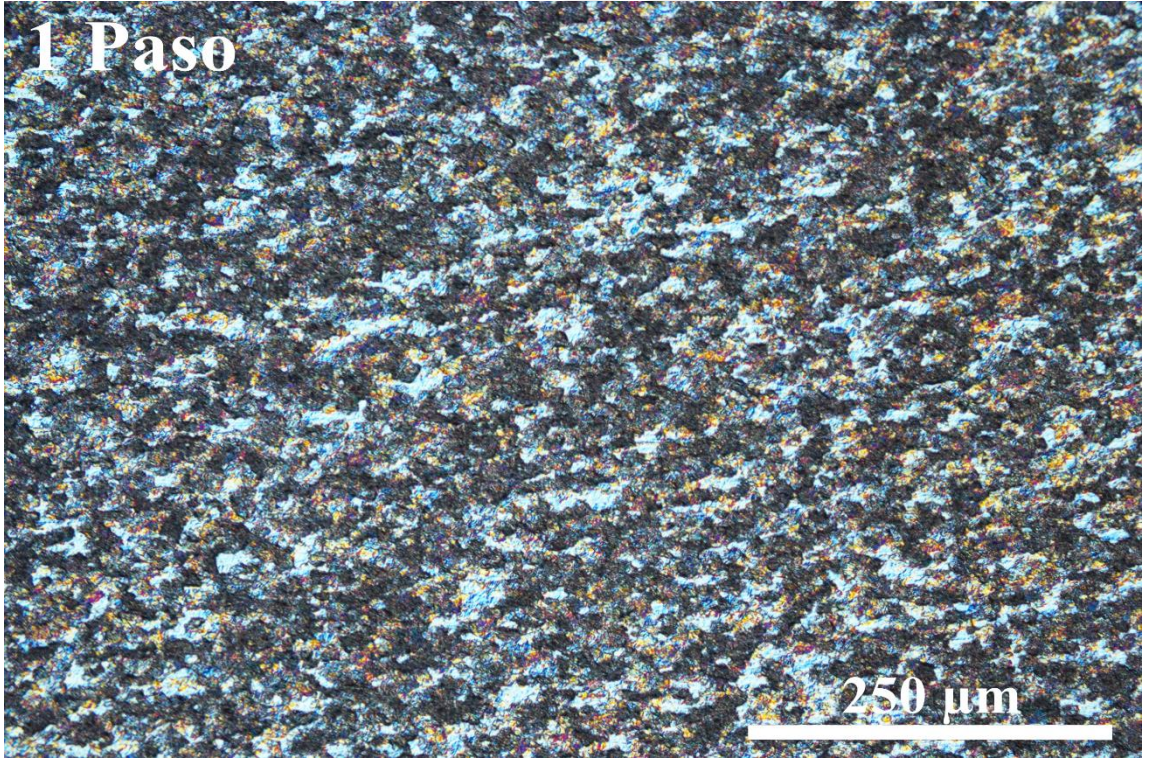
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Proses edilmemiş Al5083 numune ve SKP ile farklı pasalarda proses edilmiş Al5083 numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.1-4.6'da verilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, SKP uygulanan tüm Al5083 numunelerin (Şekil 4.2-4.6) tane boyutunun, proses edilmemiş Al5083 numunenin (Şekil 4.1) tane boyutundan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, optik mikroskop görüntülerinde tane boyutu üzerinde SKP paso sayısının etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Her bir SKP'den sonra daha fazla tane sınırı bölgesinin (daha küçük tane boyutları) oluşması mümkündür, çünkü tane sınırları ile partikül ve matris arasındaki arayüzeyler dislokasyonların kaynaklarıdır. Bir sonraki SKP paso sırasında deformasyon, bu kaynaklardan daha fazla dislokasyon oluştururken, alüminyumun yüksek istifleme hatası enerjisi (SFE) dinamik geri kazanım ve düşük açılı alt tanecik sınırlarının oluşmasına yol açar (Bauri vd., 2011). Şekil 4.2-4.6'dan gözlemlenen diğer bir sonuç ise SKP ile homojen tane yapısı elde edilmiştir ve SKP'nin uygulandığı bölgelerde herhangi bir çatlak gözlenmemiştir.

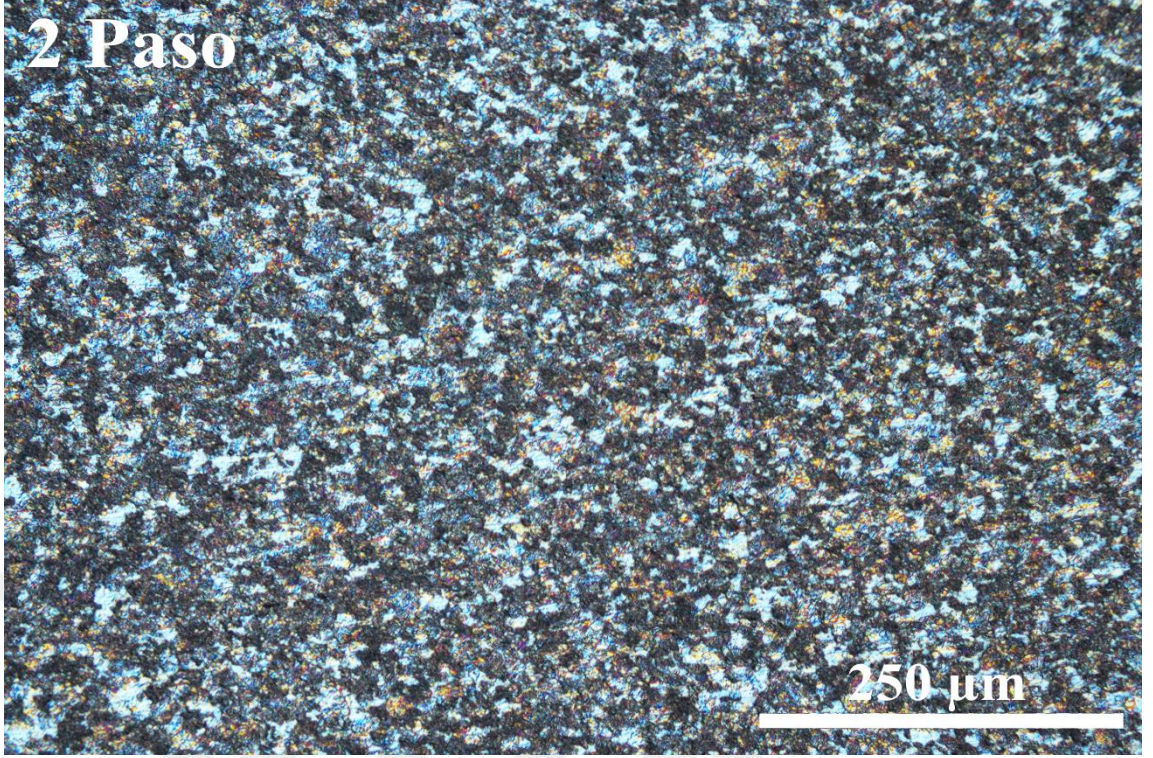
Karıştırma bölgesinin tane büyüklüğü ile ilgili olarak birbiriyle rekabet eden iki olay olduğu öne sürülmüştür: Birincisi, yeni tanelerin çekirdeklenmesine yol açan dinamik yeniden kristalleşme, tane sınırının kayması (GBS) ve daha ince tanecik boyutunun teşvik edilmesidir. İkincisi, işlem sırasında ısı girdisinin tane büyüklüğü büyümesi lehine tavlansını sağlar. Ek olarak, kompozit numunelerdeki takviye edici partiküllerin sabitleme etkisinin tane büyümesine karşı etki ettiği ve böylece daha ince tanecik boyutuna neden olduğu kanıtlanmıştır (Barmouz vd., 2011).



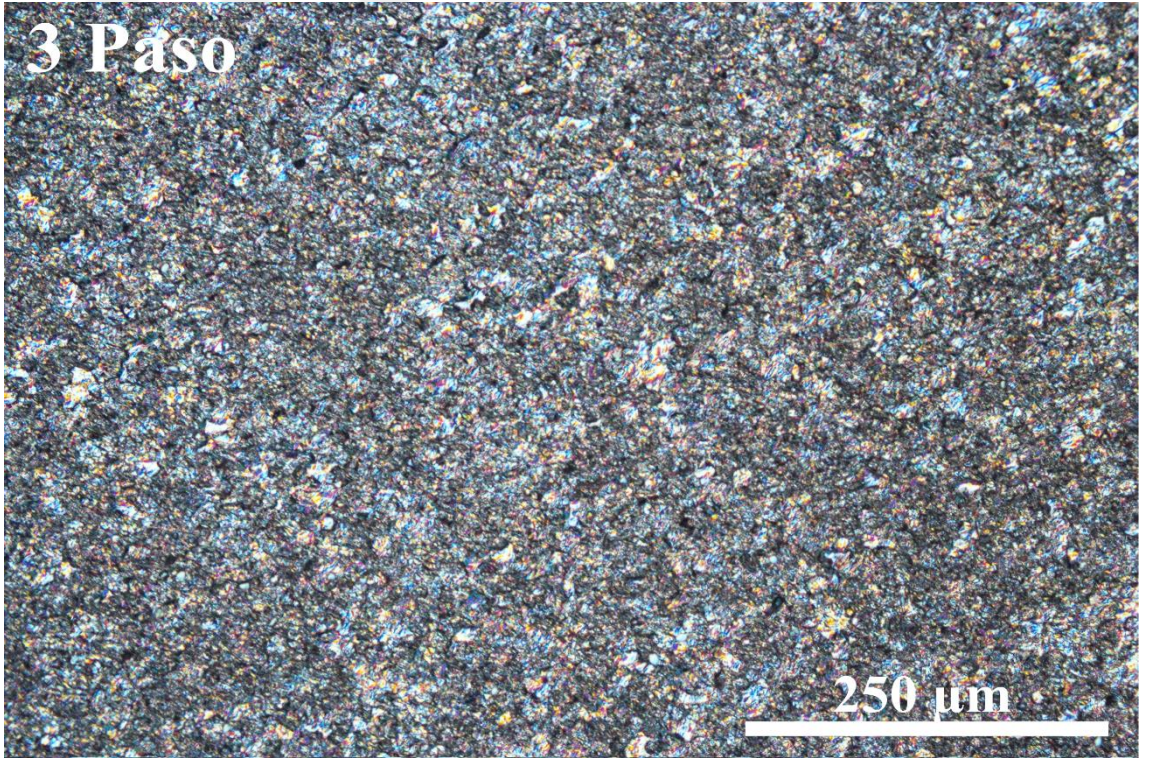
Şekil 4. 1. Proses edilmemiş Al5083 numunenin optik mikroskop görüntüsü



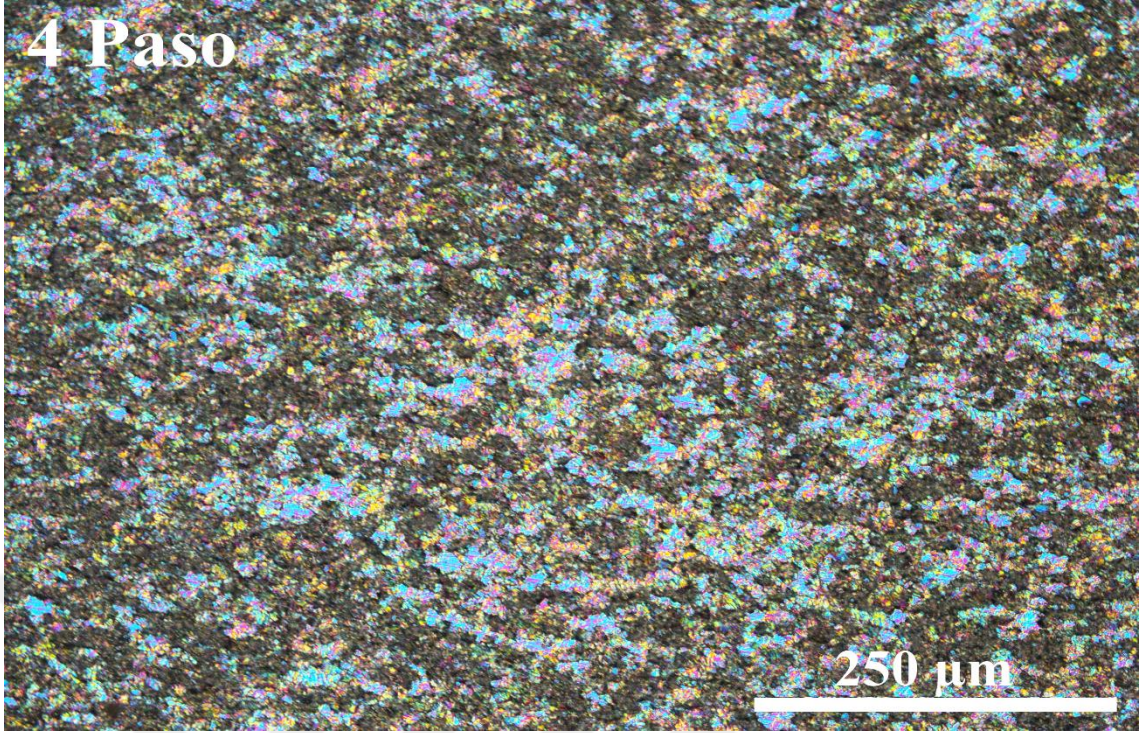
Şekil 4. 2. SKP ile 1 pasoda proses edilmiş Al5083 numunenin optik mikroskop görüntüsü



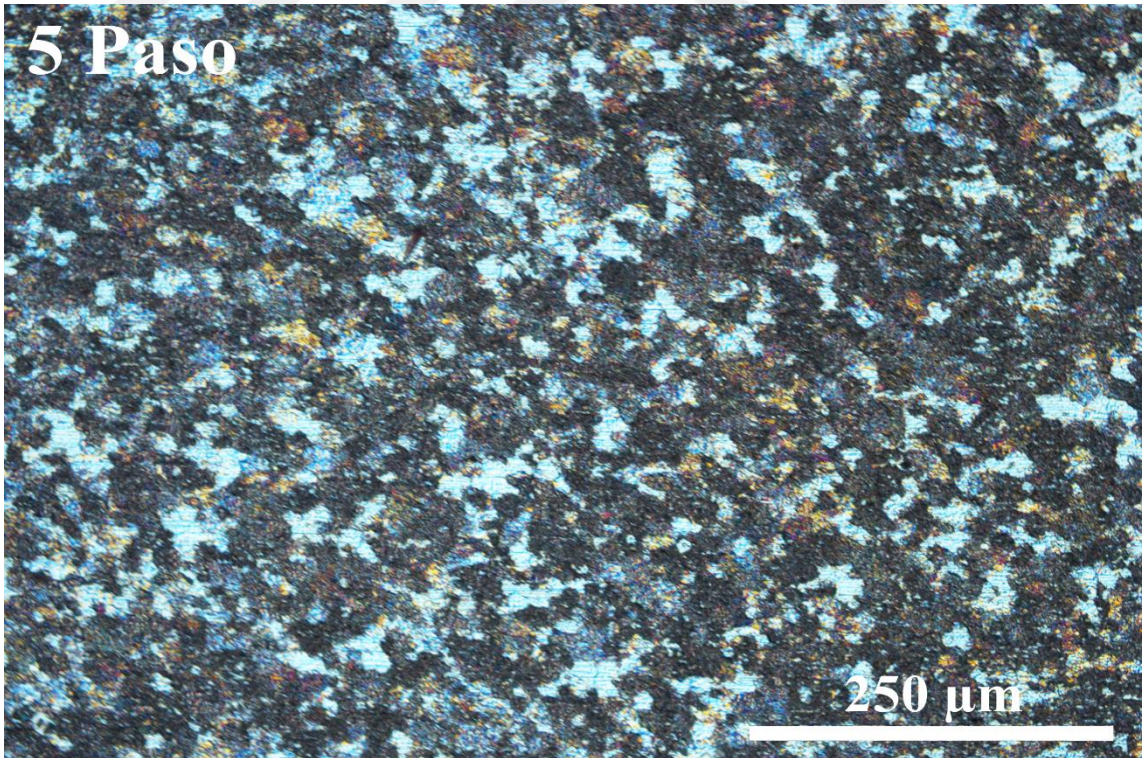
Şekil 4. 3. SKP ile 2 pasoda proses edilmiş Al5083 numunenin optik mikroskop görüntüsü



Şekil 4. 4. SKP ile 3 pasoda proses edilmiş Al5083 numunenin optik mikroskop görüntüsü



Şekil 4. 5. SKP ile 4 pasoda proses edilmiş Al5083 numunenin optik mikroskop görüntüsü



Şekil 4. 6. SKP ile 5 pasoda proses edilmiş Al5083 numunenin optik mikroskop görüntüsü

Ayrıca, SKP uygulanmamış Al5083 numunenin ve SKP ile farklı pasolarda proses edilmiş Al5083 numunelerin tane boyutları Tablo 4.1’de verilmiştir. Farklı pasolarda SKP uygulanmış Al5083 numunelerde, 3 pasoya kadar tane boyutunda önemli miktarda bir azalma gözlemlenmiştir. Soleymani vd. (2011) paso sayısı ile tane boyutunun azaldığını rapor etmiştir. Tane boyutundaki bu azalma, SKP esnasında takım piminin oluşturduğu mekanik etki (plastik deformasyon) ve sürtünmeye bağlı oluşan ısı sonucu, yüksek açılı tane sınırlarına eğilimli bir ince tanecikli eşlenik yapı üretmek için dinamik yeniden kristalizasyon (rekristalizasyon) oluşmasından kaynaklanmaktadır (Soleymani vd., 2011; Jata vd., 2000).

4 paso ve 5 paso işlem gören numunelerde ise tekrardan tane boyutunda artış olduğu gözlemlenmiştir. El-Rayes ve El-Danaf (2012) belirli bir geçiş hızındaki paso sayısının artırılmasının, tane boyutunda bir artışa neden olduğunu rapor etmiştir. Bunun nedeninin ise, malzemenin maruz kaldığı ek, birikmiş termal döngülerden ve her bir SKP geçişi ile meydana gelen sürekli dinamik yeniden kristalizasyonun (CDRX) eş zamanlı oluşmasından kaynaklanan tanecik kalınlaşmasından olduğu belirtilmiştir.

**Tablo 4. 1.** Proses edilmemiş Al5083 numune ve SKP ile farklı pasolarda proses edilmiş Al5083 numunelerin tane boyutları ve sertlik değerleri

	<b>Tane Boyutu (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Sertlik (<math>\text{HV}_{0,01}</math>)</b>
<b>Al5083</b>	62,5	86
<b>1 PASO</b>	16,67	97,12
<b>2 PASO</b>	12,82	118
<b>3 PASO</b>	0,15	134,25
<b>4 PASO</b>	24,39	90,62
<b>5 PASO</b>	32,9	87,23

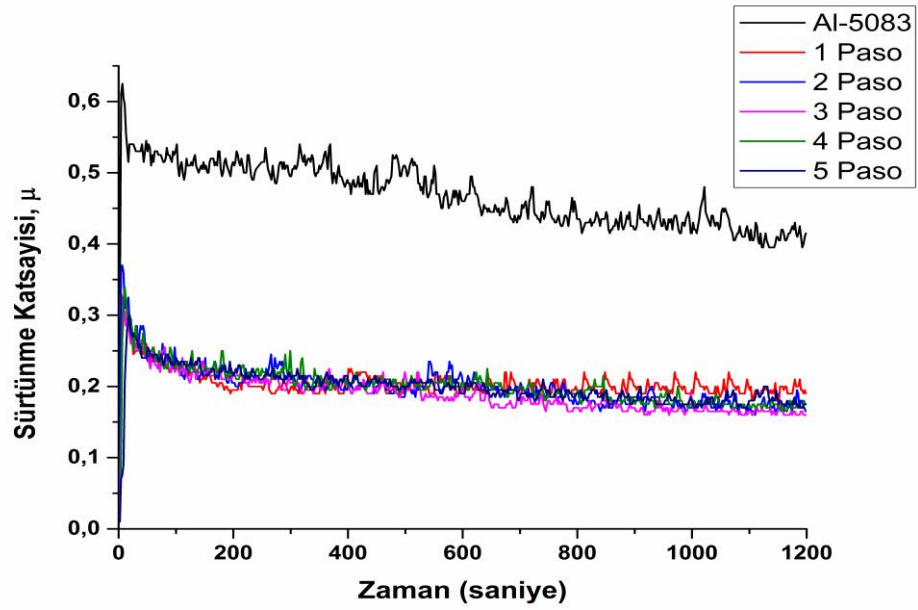
SKP uygulanmamış Al5083 numune ve SKP ile farklı pasolarda proses edilmiş Al5083 numunelerin sertlik değerleri de Tablo 4.1’de verilmiştir. SKP, Al5083 taban malzemenin sertliğini önemli ölçüde artırmıştır. Eskandari vd. (2015) artan paso sayısı ile sertliğin arttığını rapor etmiştir. Bu çalışmada da, azalan tane boyutu ile birlikte, 3 pasoya kadar proses edilmiş numunelerin sertlik değeri artmıştır. Malzemenin akma dayanımı ile tane boyutu arasındaki ilişkiyi inceleyen Hall-Petch ilişkisine göre tane büyüklüğündeki azalma, akma dayanımını artırmakta ve bu da sertlik değerini artırmaktadır. 3 pasoya

kadar azalan tane boyutunun ardından, 4. ve 5. pasoda tekrar tane boyutunun artması ile birlikte sertlik değerinde azalma gözlemlenmiştir.

SKP ile işlem görmüş numunelerin sertliğinin artmasının ana nedeni, daha ince tanecik boyutu, daha yüksek diskolasyon yoğunluğu ve daha da önemlisi, sert takviye edici partiküllerin varlığıdır. Genel olarak, bu faktörler, SKP sırasında oluşan ısı girişinin yumuşatıcı etkisini engeller ve böylece malzemenin mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanır (Mirjavadi vd., 2017).

SKP'nin uygulanması ile 5XXX alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinde iyileşme meydana geldiği daha önceki çalışmalarda da rapor edilmiştir. Al içerisinde çözünen Mg atomlarının dislokasyonlardan daha hızlı yayılmasıyla dislokasyonları yakalayarak durdurması sonucu oluşan dinamik gerinim yaşlanması malzemede tane boyutunun incelmeye ve bu sayede sertliğin artmasına neden olur. Bu olay Portevin-Le Chatelier etkisi olarak bilinir (Hall, 1970; Fonda vd., 2009; Babu vd., 2016; Imam vd., 2016).

SKP uygulanmamış Al5083 numune ve SKP ile farklı pasolarda proses edilmiş Al5083 numunelerin sürtünme katsayısı-zaman grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir. Ayrıca sürtünme katsayısı değerleri Tablo 4.2'de verilmiştir. SKP uygulanmış tüm numunelerin sürtünme katsayısının, SKP uygulanmamış Al5083 numunenin sürtünme katsayısından düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bütün numunelerde aşınma testinin ilk aşamasında (0-5 sn) sürtünme katsayısında güçlü bir artış vardır. Bunun sebebi malzemelerin karşıt malzeme ile arasındaki adeziv temasın üstesinden gelmek için gerekli olan daha yüksek kuvvete ihtiyaç duymasıdır (Uyyuru vd., 2007; Wan vd., 2007). Tüm pasolarda birbirine yakın sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Ancak sürtünme katsayısı değerlerinde 3 pasodan sonra bir miktar artış görülmüştür.



**Şekil 4. 7.** Proses edilmemiş Al5083 numune ve SKP ile farklı pasolarda proses edilmiş Al5083 numunelerin sürtünme katsayısı-zaman grafiği

**Tablo 4. 2.** Proses edilmemiş Al5083 numune ve SKP ile farklı pasolarda proses edilmiş Al5083 numunelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri

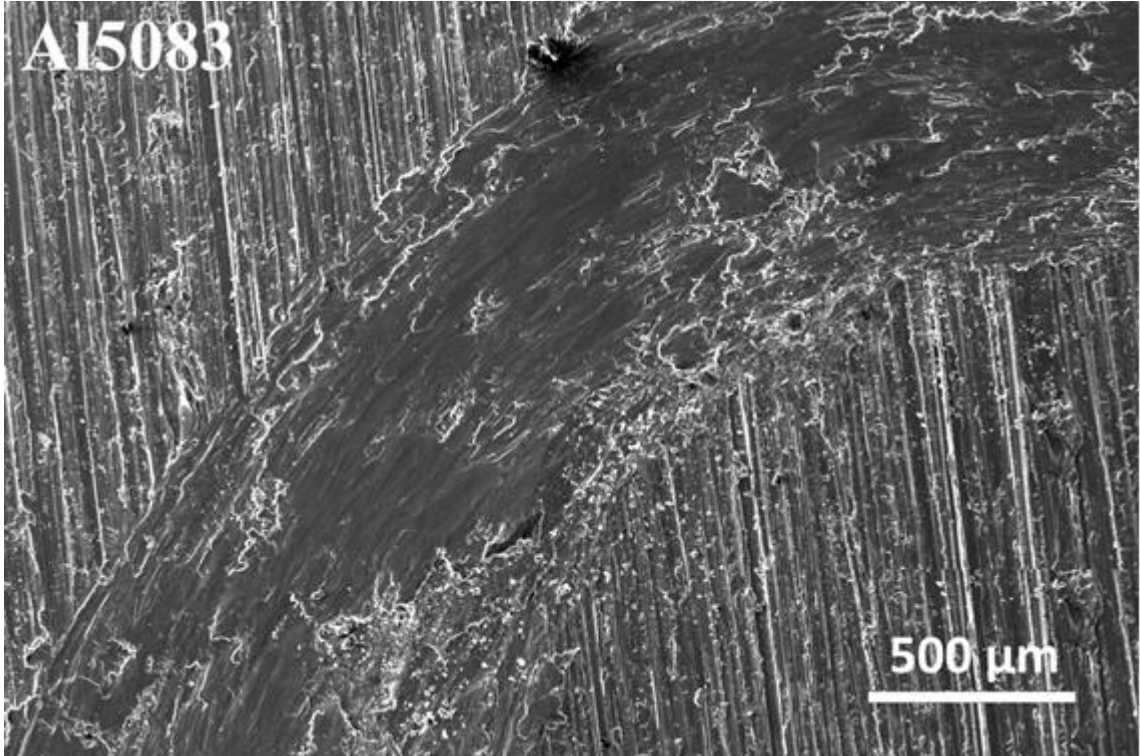
	Sürtünme Katsayısı ( $\mu$ )	Aşınma Oranı ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ )
<b>Al5083</b>	0,47	$6,8 \times 10^{-4}$
<b>1 PASO</b>	0,21	$5,8 \times 10^{-4}$
<b>2 PASO</b>	0,20	$4,9 \times 10^{-4}$
<b>3 PASO</b>	0,19	$4,3 \times 10^{-4}$
<b>4 PASO</b>	0,22	$6,0 \times 10^{-4}$
<b>5 PASO</b>	0,23	$6,2 \times 10^{-4}$

Ayrıca, SKP uygulanmamış Al5083 numune ve SKP ile farklı pasolarda proses edilmiş Al5083 numunelerin aşınma oranları Tablo 4.2’de verilmiştir. SKP ile proses edilmiş tüm numuneler Al5083 taban malzemenin aşınma oranını azaltmıştır. Sürtünme katsayısı ile doğru orantılı olarak, 3 pasoya kadar aşınma oranları azalırken, 4 ve 5 pasolarda aşınma oranlarında bir miktar artış gözlemlenmiştir. Mahmoud (2013) A390 Al alaşımı üzerinde 3 pasoya kadar SKP’yi incelemiş ve SKP uygulanmış yüzey tabakasının sertlik ve aşınma direncinin arttığını ve sürtünme katsayısının SKP uygulanmamış malzeme ile karşılaştırıldığında düştüğünü rapor etmiştir. Bu çalışmada da aşınma oranı değeri artan paso sayısı ile azalmıştır, ve bu sonuç Al alaşımlarının SKP’si ile ilgili önceki çalışmaların

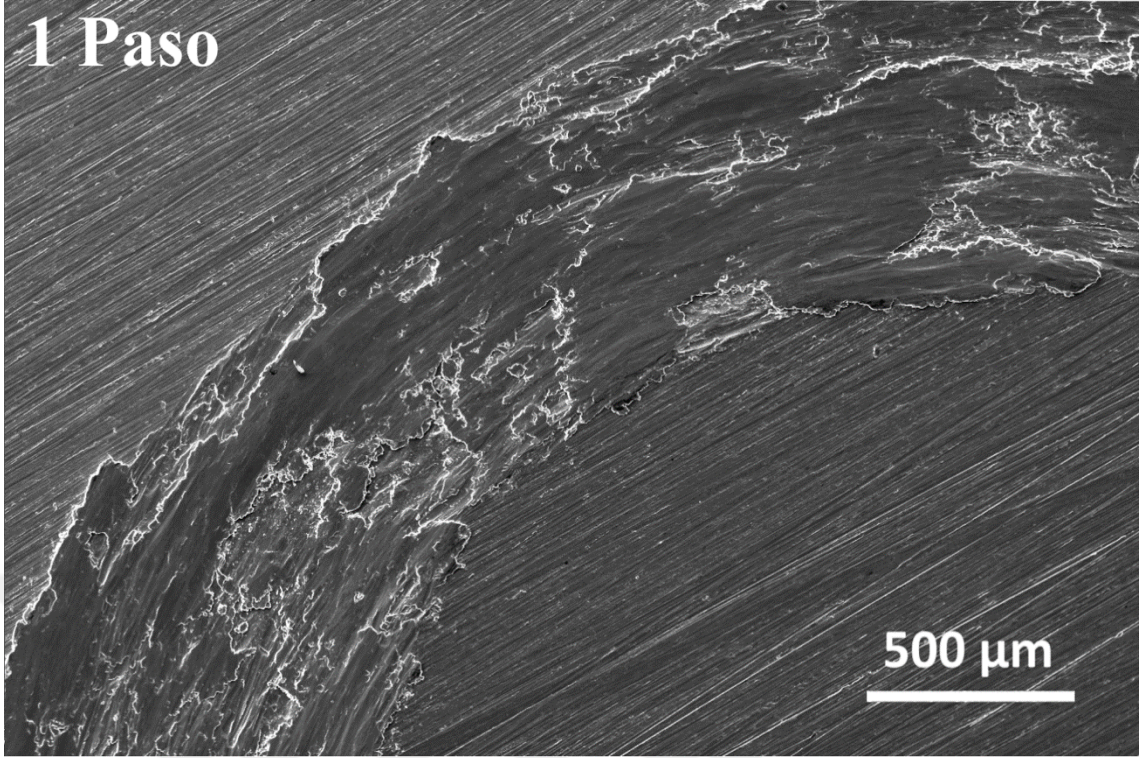


bazılarıyla iyi bir uyum içindedir (Dolatkhah vd., 2012; Asadi vd., 2011; El-Rayes vd., 2012; Shafiei-Zarghani vd., 2011)

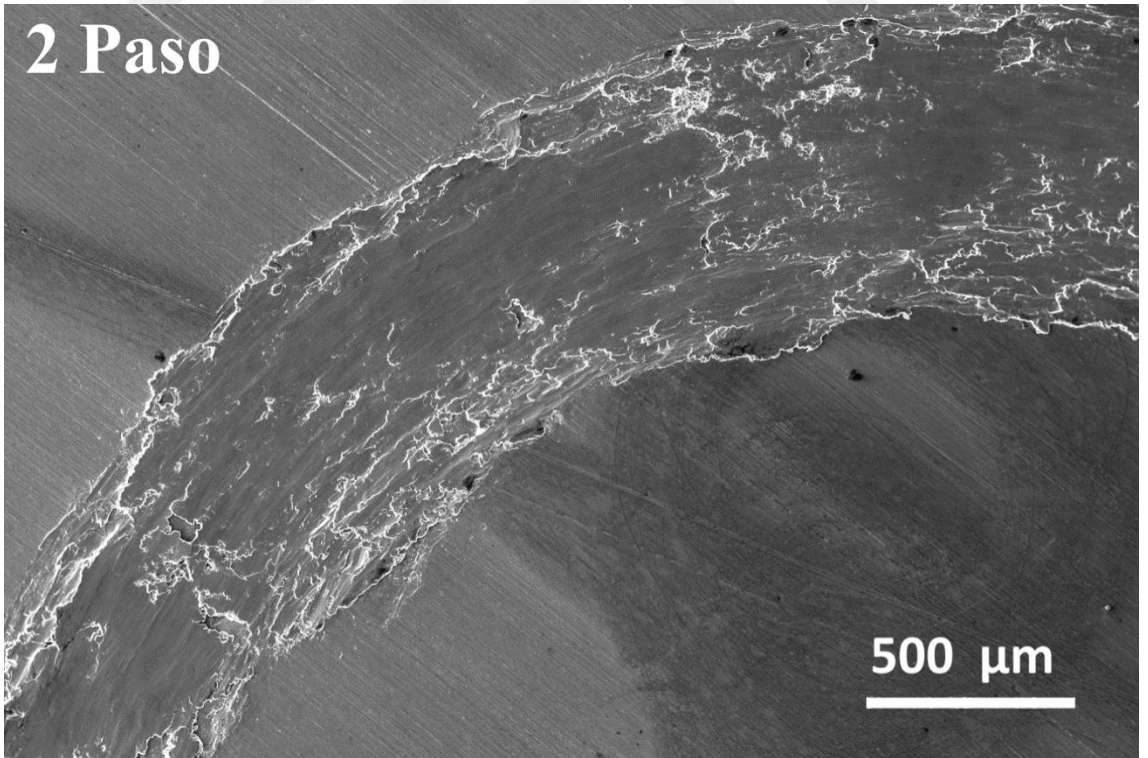
Proses edilmemiş Al5083 numune ve SKP ile farklı pasolarda proses edilmiş Al5083 numunelerin taramalı elektron mikroskopundan (SEM) elde edilen aşınma iz görüntüleri Şekil 4.8-4.13'de verilmiştir. Proses edilmemiş Al5083 numune ile kıyaslandığında, sürtünme karıştırma prosesi ile farklı pasolarda proses edilmiş Al5083 numunelerin aşınma iz genişliklerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Al5083 taban malzemede önemli ölçüde abrasif aşınma ve delaminasyon (tabakalar arası ayrışma) meydana gelmiştir. 3 pasoya kadar yapılan SKP ile abrasif aşınma miktarı ve delaminasyon azalırken, 4 ve 5 pasoda yapılan proseslerde abrasif aşınma ve delaminasyon miktarı tekrar artmıştır. Azalan sürtünme katsayısının, kayma sırasında yüzey altı malzeme tabakalarına uygulanan kesme gerilmeleri seviyesinde azalmaya yol açtığı ve böylece delaminasyonun azaldığı belirtilmiştir (Soleymani vd., 2011). Bu nedenle 3 pasoya kadar yapılan SKP sonucu azalan delaminasyon literatür sonuçlarını desteklemektedir.



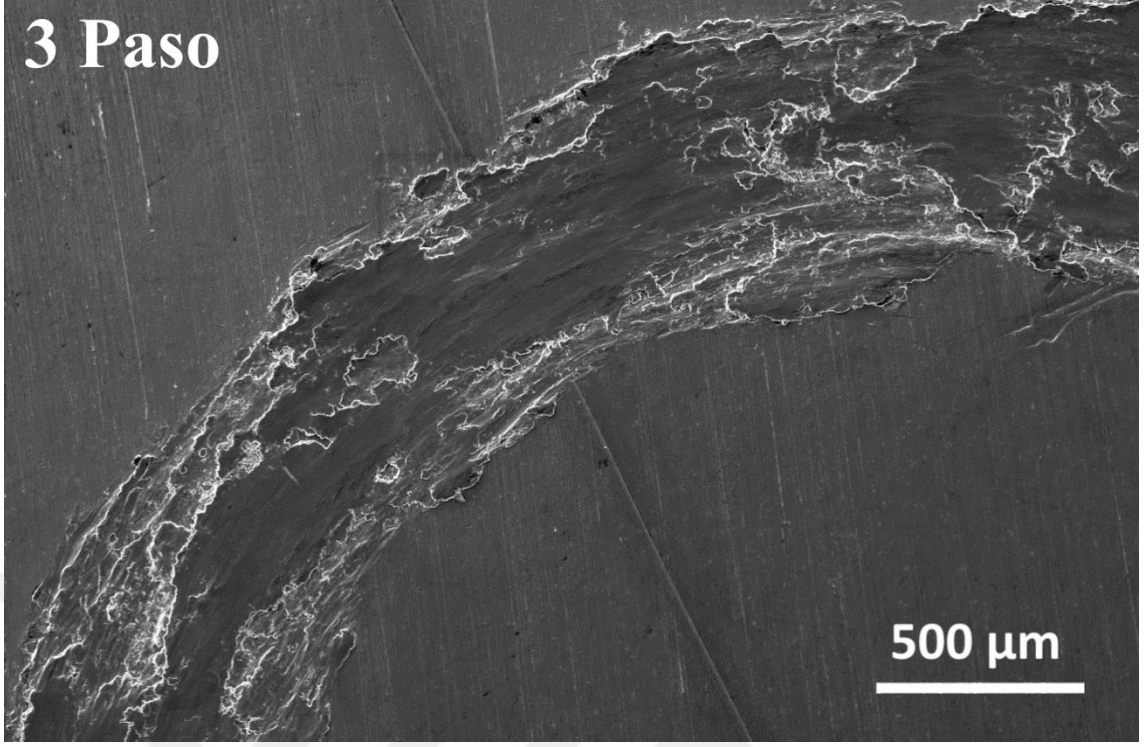
**Şekil 4. 8.** Proses edilmemiş Al5083 numuneden SEM ile elde edilen aşınma iz görüntüsü



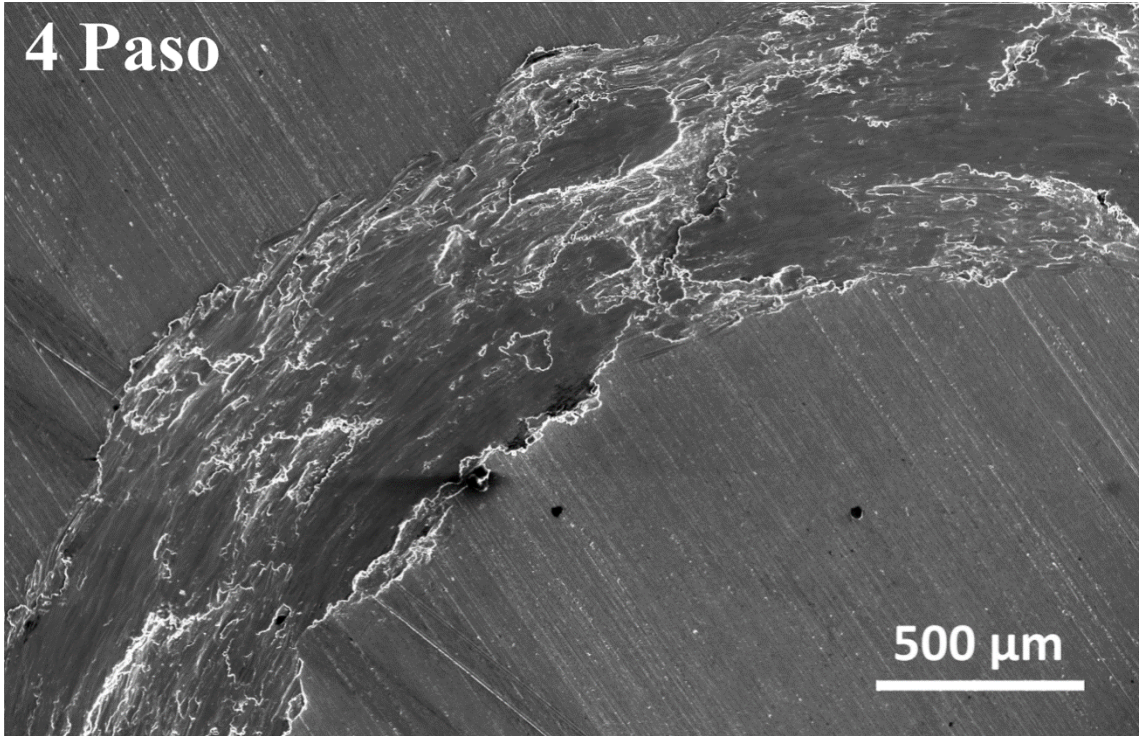
**Şekil 4. 9.** SKP ile 1 pasoda proses edilmiş Al5083 numuneden SEM ile elde edilen aşınma iz görüntüsü



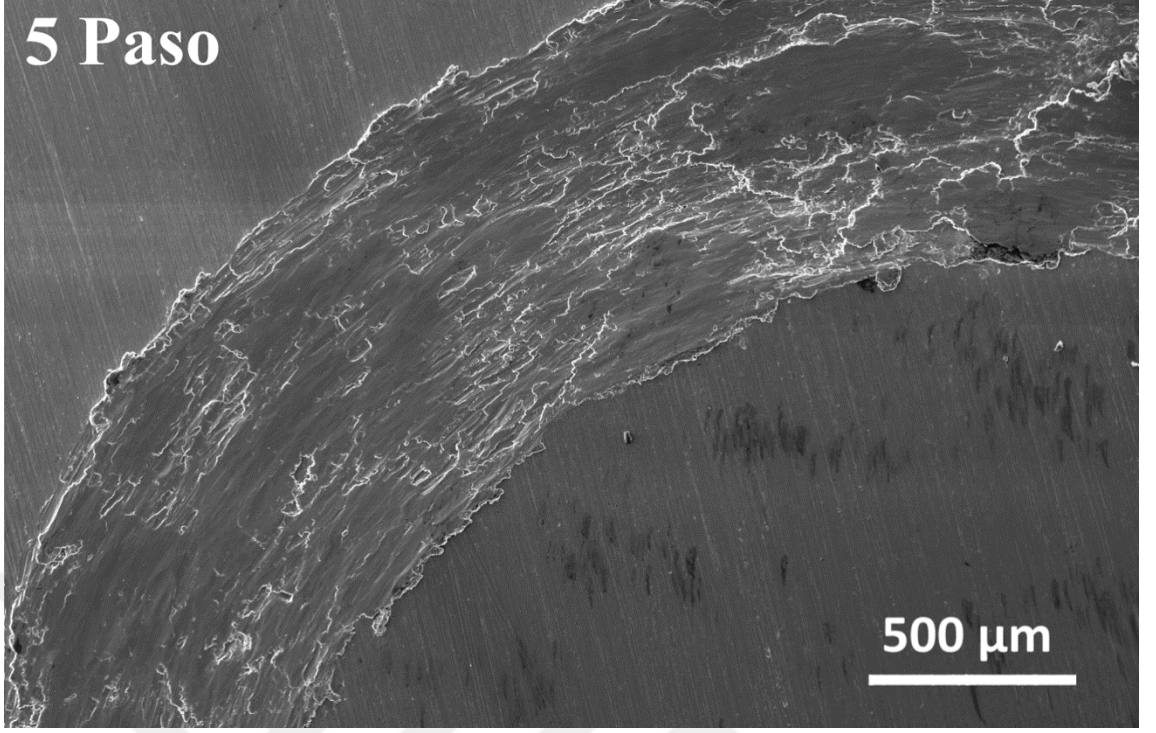
**Şekil 4. 10.** SKP ile 2 pasoda proses edilmiş Al5083 numuneden SEM ile elde edilen aşınma iz görüntüsü



Şekil 4. 11. SKP ile 3 pasoda proses edilmiş Al5083 numuneden SEM ile elde edilen aşınma iz görüntüsü



Şekil 4. 12. SKP ile 4 pasoda proses edilmiş Al5083 numuneden SEM ile elde edilen aşınma iz görüntüsü



**Şekil 4. 13.** SKP ile 5 pasoda proses edilmiş Al5083 numuneden SEM ile elde edilen aşınma iz görüntüsü

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla Al5083 alaşımına farkı pasolarda sürtünme karıştırma prosesi (SKP) uygulanmıştır. Al5083 alaşımı üzerinde farklı pasolarda (1 pasodan 5 pasoya kadar) uygulanmış SKP'nin etkileri aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- Al5083 alaşımına SKP işlemi başarılı bir şekilde uygulanmıştır.
- Artan paso sayısı (3 pasoya kadar) tane boyutunun azalmasına neden olmuştur. Daha ince tane boyutu, sürtünme karıştırma işlemine bağlı olarak SKP paso sayısının artmasıyla dinamik yeniden kristalleşmeye bağlı olarak gerçekleşir.
- 3 pasodan sonra (4 paso ve 5 pasoda) Al5083 numunelerin tane boyutunda tekrardan artış meydana gelmiştir. Bu durum malzemenin maruz kaldığı ek / birikmiş termal döngülerden ve her bir SKP geçişi ile meydana gelen sürekli dinamik yeniden kristalizasyonun (CDRX) eşzamanlı oluşmasından kaynaklanan tanecik kalınlaşmasından ortaya çıkmaktadır.
- SKP, işlem görmemiş Al5083 alaşımının sertliğini önemli ölçüde artırmıştır. 3 pasoya kadar tane boyutunun azalmasıyla sertlik önemli derecede artarken ardından 4. ve 5. pasoda tekrar tane boyutunun artması ile birlikte sertlik değerinde azalma gözlemlenmiştir. Bu durum, Hall-Petch ilişkisine göre tane büyüklüğündeki azalmanın, akma dayanımını artırması ve bunun sonucu olarak sertliğin artmasına atfedilmiştir. Ayrıca proses esnasında artan dislokasyon yoğunluğu sertlik üzerinde etkili olmuştur.
- SKP ile proses edilmiş tüm numuneler artan sertlikleri nedeniyle Al5083 taban malzemenin sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azaltmıştır. Sürtünme katsayısı ile doğru orantılı olarak, 3 pasoya kadar aşınma oranları azalırken, 4 ve 5 pasolarda aşınma oranlarında bir miktar artış gözlemlenmiştir.
- Aşınma testleri sonucu, proses edilmemiş Al5083 alaşımında önemli ölçüde abrasif aşınma ve delaminasyon (tabakalar arası ayrışma) meydana gelmiştir. 3 pasoya kadar yapılan sürtünme karıştırma prosesi ile abrasif aşınma miktarı ve delaminasyon azalırken, 4 ve 5 pasoda yapılan proseslerde abrasif aşınma ve delaminasyon miktarı tekrar artmıştır.

- SKP'nin Al5083 alaşımının mekanik ve tribolojik özellikleri üzerinde bir iyileşme sağladığı, paso sayısının da aynı Şekilde mekanik ve tribolojik özellikleri üzerinde etkili olurken artan paso sayısının belirli bir noktaya kadar özelliklerde önemli ölçüde iyileşme sağladığı, belirli bir paso sayısından sonra oluşan ısı artışı ve sürekli dinamik yeniden kristalleşmenin nispeten negatif etkiler oluşturabileceği öngörülmüştür.
- Çalışma, Al5083 alaşımının mekanik (sertlik, tokluk) ve tribolojik özelliklerinin iyileştirilebilirliği üzerinde SKP'nin etkili olduğunu göstermiş ve bu alaşımdan istenen özelliklerin elde edilmesi ile birlikte alaşımın kullanımının sınırlarının ortadan kaldırılabileceği yönünde mit verici olmuştur. Bu nedenle otomotiv uygulamalarında yöntemin uygulanabilirliği ve alaşımın kullanılabilirliği araştırmaya değerdir.
- Bu çalışmada aynı SKP parametreleri ile proses edilmiş Al5083 alaşımının mekanik ve tribolojik özellikleri üzerinde farklı paso sayısının etkileri incelenmiştir. Bu nedenle sonraki çalışmada, farklı SKP parametreleri ile proses edilen Al5083 alaşımının mekanik ve tribolojik özellikleri üzerinde artan paso sayısının etkilerinin incelenmesi ve bunun sonucunda bu özellikler üzerinde optimum proses parametrelerinin belirlenmesi önerilmektedir. Ayrıca SKP ile paso sayısının etkisi farklı malzemeler üzerinde de incelenerek maksimum elde edilebilecek mekanik ve tribolojik özellikleri incelemek bu prosesin etkisinin daha yaygın bir Şekilde kullanımına ışık tutacaktır.

## KAYNAKLAR

- Anderson, T. (2000) "The advancement of Al within the welding fabrication industry and product design applications", *Svetsaren*, 3, 3-5.
- Asadi, P., Faraji, G., Masoumi, A. and Givi, M.K.B. (2011) "Experimental investigation of magnesium-base nanocomposite produced by friction stir processing: Effects of particle types and number of friction stir processing passes", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42A, 2820-2832.
- ASM Handbook Committee, Metals Handbook (1979) "Properties and selection, non ferrous alloys and pure metals", ninth edition, volume 2, *American Society for Metals*, Metalspark, Ohio.
- Babu, N.K., Kallip, K., Leparoux, M., A. AlOgab, K., Reddy, G.M. and Talari, M.K. (2016) "A-Struct. Microstructure characterization of microstructure and mechanical properties of friction stir welded AlMg5- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites", *Journal Of Materials Science and Engineering*, 658, 109-122.
- Barmouz, M., Givi, M.K.B and Seyfi, J. (2011) "On the role of processing parameters in producing Cu/SiC metal matrix composites via friction stir processing: Investigating microstructure, microhardness, wear and tensile behavior", *Materials Characterization Journal*, 62, 108-117.
- Bauri, R., Yadav, D. and Suhas, G. (2011) "Effect of friction stir processing (FSP) on microstructure and properties of Al-TiC in situ composite", *Journal Of Materials Science and Engineering A*, 528, 4732-4739.
- Behnagh, R. A., Shen, N., Abdollahi, M, Ding H. (2006) "Ultrafine-grained surface layer formation of Aluminum Alloy 5083 by Friction Stir Processing", *Procedia CIRP* ,45, 243-246.
- Benavides, S., Li, Y., Murr, L. E., Brown, D. and McClure, J. C. (1999) "Low-temperature Friction-stir Welding of 2024 Aluminum," *Scripta Materialia*, 41 (8), 809-815.
- Bousquet, E., Poulon-Quintin, A., Puiggali, M., Devos O., Touzet M. (2011) "Relationship between microstructure, microhardness and corrosion sensitivity of an AA 2024-T3 friction stir welded joint", *Corrosion Science*, 53, 3026-3034.
- Brown, R., Tang W., and Reynolds A.P. (2009) "Multi-pass friction stir welding in alloy 7050-T7451: Effects on weld response variables and on weld properties", *Materials Science and Engineering A*, 513, 115-121.

- Charit, I. and Mishra, R.S. (2003) “High strain rate superplasticity in a commercial 2024 Al alloy via friction stir processing”, *Materials Science and Engineering A*, 290, 359-364.
- Chen, Y., Ding, H., Li, J., Cai, Z., Zhao, J., Yang, W. (2016) “Influence of multi-pass friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of Al-5083 alloy”, *Materials Science & Engineering*, A650, 281-289.
- Cui, G.R., Ma Z.Y., and Li S.X. (2009) “The origin of non-uniform microstructure and its effects on the mechanical properties of a friction stir processed Al–Mg alloy”, *Acta Materialia*, 57(19), 5718-5729.
- Deschamps, A., Dumont, D., Brechet, Y., Siğli, C. and Dubost, B. (2001) “Process modeling of age-hardening aluminum alloys : from microstructure evolution to mechanical and fracture properties”, *ASM International, Materials Park*, OH, 298-305.
- Dolatkhah, A., Golbabaie, P., Givi, M.K.B. and Molaiekiya, F. (2012) “Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing”, *Materials & Design*, 37, 458-464.
- Durmuş, S., Akgün, S., ve Şahin, S. (2009) “Çökeltme Sertleştirilmesi uygulanmış AA 7012 Alüminyum alaşımlarında sertliğin mikro yapı ile değişiminin incelenmesi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük.
- El-Rayes, M.M. and El-Danaf E.A. (2012) “The influence of multi-pass friction stir processing on the microstructural and mechanical properties of Aluminum Alloy 6082”, *Journal of Materials Processing Technology*, 212(5), 1157-1168.
- Eskandari, H., Taheri, R. (2015) “A novel technique for development of Aluminium Alloy Matrix/TiB<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid surface nanocomposite by Friction Stir Processing”, *Procedia Materials Science*, 11, 503-508.
- Fonda, R.W., Pao, P.S., Jones, H.N., Feng, C.R., Connolly, B.J. and Davenport, A.J. (2009) “A-Struct. Microstructure, mechanical properties, and corrosion of friction stir welded Al 5456”, *Materials Science & Engineering*, 519, 1–8.
- Fuller C., Mahoney M. and Bingel W. (2003) “Friction Stir Processing of Aluminum fusion welds”, *Rockwell Scientific Company*, ABD.
- Güleryüz, K. (2011) “Deformasyon yaşlanmasının AA7075 alaşımının mekanik özelliklerine ve aşınma davranışına etkisi”, *Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 5-12.
- Hall, E. (1970) “Yield point phenomena in metals and alloys”, *Plenum Press*, New York, 57-58.



- Hirata, T., Tanaka, T., Chung, S.W., Takigawa, Y. and Higashi, K. (2007) "Superplastic forging with dynamic recrystallization of Mg-Al-Zn alloys cast by thixo-molding", *Scripta Materialia*, 56 (6), 477-480.
- Imam, M., Sun, Y., Fujii, H., Ma, N., Tsutsumi, S. and Murakawa, H. (2016) "Microstructural characteristics and mechanical properties of Friction Stir Welded Thick 5083 Aluminum Alloy", *Metallurgical and Materials Transaction A*, 1-22.
- James, D. G. H. M. and Bradley, G. R. (2003) "Friction-stir welding of aluminium alloy 5083", *International Journal of Fatigue*, 25, 12.
- Jana, S., Mishra, R.S., Baumann, J. and Grant, G. (2010) "Effect of friction stir processing on fatigue behavior of an investment cast Al-7Si-0.6 Mg alloy", *Acta Materialia*, 58, 989-1003.
- Jariyaboon, M., Davenport, A.J., Ambat, R., Connolly, B.J., Williams, S.W. and Price, D.A. (2007) "The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024-T351", *Corrosion Science*, 49, 877-909.
- Jata, K. V. and Semiatin, S. L. (2000) "Continuous Dynamic Re-crystallization during Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys", *Scripta Materialia*, 43(8), 743-749.
- Johannes, L.B and Mishra, R.S. (2007) "Enhanced superplasticity through friction stir processing in continuous cast AA5083 Aluminum", *Materials Science and Engineering A*, 464 (1-2), 351-357.
- Johannes, L.B., Mishra, R.S. (2007) "Multiple passes of friction stir processing for the creation of superplastic 7075 Aluminum", *Materials Science and Engineering A*, 464, 255-260.
- Kaluç, E. ve Taban E. (2005) "Alüminyum ve Alüminyum alaşımlarının MIG kaynağı", *Metal Dünyası*, 144, 130-141.
- Kaufman, J. G. (2000) "Introduction to Aluminum alloys and tempers", ASM International, *Materials Park*, Ohio
- Khairuddin, J. T., Abdullah, J., Hussain, Z. and Almanar, I. P. (2012) "Principles and Thermo Mechanical Model of Friction Stir Welding", *Welding Processes Chapter 9*, ISBN 978-953-51-0854-2.
- Khodabakhshi, F., Nosko, M. and Gerlich, A.P. (2018) "Effects of graphene nanoplatelets (GNPs) on the microstructural characteristics and textural development of an Al-Mg alloy during frictionstir processing", *Surface & Coatings Technology*, 335, 288-305.
- Kumru, N. (2007) "Etial-141, 145 ve 160 tipi döküm alüminyum ile plaka tipi alüminyum malzemeler için yorulma makinası tasarımı ve eğilmeli yorulma

- davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 13-26.
- Kurt, A., Özdemir, M. ve Boz, M. (2003) “Alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi”, *Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, 89-99.
- Külekçi, M.K. ve Şık A. (2003) “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Alüminyum alaşımı levhaların birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri”, *Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 70-75.
- Li, Y., Murr, L.E and McClure, J.C. (1999) “Flow visualization and residual microstructures with the friction stir welding of 2024 aluminium to 6061 aluminium”, *Materials Science & Engineering A*, 271, 213-323.
- Lohwasser, D. and Chen, Z. (2010) “Standards for friction stir welding In: Friction Stir Welding: From Basics to Applications”, *Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK*, 10-12.
- Lombard, H., Hattingh, D.G., Steuwer, A. and James, M.N. (2008) “Optimising FSW process parameters to minimise defects and maximise fatigue life in 5083-H321 aluminium alloy”, *Engineering Fracture Mechanics*, 75(3-4), 341.
- London, B., Mahoney, M., Bingel, B., Calabrese, M. and Waldron, D. (2001) “Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding”, *Kobe, Japan*, 27–28.
- Magdy, M., El-Rayesa, M.M., Ehab, A. and El-Danaf, E. (2012) “The influence of multi-pass friction stir processing on the microstructural and mechanical properties of Aluminum Alloy 6082”, *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 1157-1168.
- Mahmoud, T.S. (2013) “Surface modification of A390 hypereutectic Al–Si cast alloys using friction stir processing”, *Surface Coating Technology*, 228, 209-20.
- Mahoney, M.W. ve Lynch, S.P. (2003) “Friction Stir Processing”, *Rockwell Scientific Company, ABD*.
- Matters, G. (2002) “The Welding of aluminium and its alloys”, *Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK*.
- Ma, Z.Y., Mishra, R.S. and Mahoney, M.W. (2002) “Superplastic deformation behaviour of friction stir processed 7075 Al alloy”, *Acta Materilia*, 50, 4419-4430.
- Meyveci, A., Karacan, İ., Çaligülü, U. ve Durmuş, H. (2010) “Pin-on-disc characterization of 2xxx and 6xxx aluminium alloys aged by precipitation age hardening”, *Journal of Alloys and Compounds*, 491, 278-283.

- Mirjavadi, S.S., Alipour, M., Hamouda, A.M.S., Matin, A., Kord, S., Afshari, B.M. and Koppad P.G. (2017) "Effect of multi-pass friction stir processing on the microstructure, mechanical and wear properties of AA5083/ZrO<sub>2</sub> nanocomposites", *Journal of Alloys and Compounds*, 726, 1262-1273.
- Mishra, R.S., Mahoney, M.W., McFaden, S.X., Mara, N.A. and Mukherjee, A.K. (1999) "High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 Al alloy", *Scripta Materialia*, 42(2), 163-168.
- Mishra, R.S., Mahoney, M.W., McFadden, S.X., Mara, N.A. and Mukherjee, A.K. (2000) "High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 Al alloy", *Scripta Materialia*, 163, 42-48.
- Mishra, R.S. and Mahoney, M.W. (2001) "Friction stir processing: a new grain refinement technique to achieve high strain rate superplasticity in commercial alloys", *Material Science and Engineering*, 507, 357-359.
- Mishra, R.S., Ma, Z.Y. and Charit, I. (2003) "Friction Stir Processing: A novel technique for fabrication of surface composite", *Material Science and Engineering*, A341, 307-310.
- Mishra, R.S. and Ma, Z.Y. (2005) "Friction Stir Welding and Processing", *Materials Science and Engineering*, R50, 1-78.
- Mishra, R.S. and Mahoney, M. (2007) "Friction Stir Welding and Processing", *ASM International*, Ohio, USA, 368.
- Murr, L.E., Li, Y., Flores, R.D., Trillo, E.A. and McClure, J.C. (1998) "Intercalation vortices and related microstructural features in the Friction Stir Welding of dissimilar metals", *Materials Research Innovations*, 2(3), 150-163.
- Nakata, K., Kima, Y.G., Fujii, H., Tsumura, T., Komazaki, T. (2006) "Improvement of mechanical properties of aluminum die casting alloy by multi-pass friction stir processing", *Materials Science and Engineering A*, 437, 274-280.
- Öksüz, C. (1996) "Yüksek Mukavemetli (2024,6061,7075) Alüminyum alaşımlarının jominy yöntemi ile su verme duyarlılığı", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi.
- Padhy, G.K., Wu, C.S. and Gao, S. (2018) "Friction stir based welding and processing technologies, processes parameters, microstructures and applications", *A Journal of Materials Science & Technology*, 34, 1-38.
- Polmear, I. J. (1981) "Light Metals", *E. Arnold Publishers*, London.
- Prasada Rao, A. K., Das K., Murty, B. S. and Chakraborty, M. (2004) "Effect of grain refinement on wear properties of Al and Al-7Si Alloy", *Wear*, 257( 1-2), pp. 148-153.
- Yükler, İ. (2000) "Alüminyum alaşımlar ve ısıl işlemleri", *Dergipark*, 150-200

- Rajiv, S.M., Murray, W. M., Yutaka, S., Yuri, H. and Ravi, V. (2011) "Friction stir welding and processing", *TMS&WILEY*, USA.
- Ramesh, K. N., Pradeep, S., Pancholi, V. (2012) "Multipass Friction-Stir Processing and its effect on mechanical properties of Aluminum Alloy 5086", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43 (11), 4311-4319.
- Rana, H.G., Badheka, V.J and Kumar, A. (2016) "Fabrication of Al7075/B4C surface composite by novel friction stir processing and investigation on wear properties", *Procedia Technology*, 23, 519-528.
- Rhodes, C.G., Mahoney, M.W. and Bingel, W.H. (1997) "Effects of friction stir Welding on microstructure of 7075 aluminium", *Scripta Materialia*, 37, 355-361.
- Rohrer, G.S. (1948) "Introduction to grains, phases, and interfaces-An interpretation of microstructure", *Transactions AIME*, vol. 175, pp. 15-51, by Smith C.S., *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41, 1063-1100.
- Sakai, G., Horita, Z., Langdon, T.G. (2005) "Grain refinement and superplasticity in an aluminium alloy processed by high-pressure torsion", *Materials Science and Engineering A*, 393(1-2), 344-351.
- Santella, M.L., Engstrom, T., Storjohann, D. and Pan, T.Y. (2005) "Effects of FSP on mechanical properties of the cast aluminum alloys A319, A356", *Scripta Materialia*, 53, 201-206.
- Sato, Y. S., Yamashita, F., Sugiura, Y., Park, S. H. C. and Kokawa, H. (2004) "FIB-assisted TEM study of an oxide array in the root of a friction stir welded aluminium alloy", *Scripta Materialia*, 50 (3), 365-369.
- Shafiei-Zarghani, A., Kashani-Bozorg, S.F. and Zarei- Hanzaki, A. (2011) "Wear assessment of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-composite surface layer produced using friction stir processing", *Wear*, 270, 403-412.
- Sharma, V., Prakash U and Kumar, B.V.M. (2015) "Surface composites by friction stir processing: a review", *Journal Materials Processing Technology*, 224, 117-134.
- Shyam Kumar, C.N., Bauri, R., and Yadav, D. (2016) "Wear properties of 5083 Al-W surface composite fabricated by friction stir processing", *Tribology International*, 101, 284-290.
- Smith, W.E. (2001) "Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri", Demir dışı alaşımlar, Çeviri M. Erdoğan, *Nobel Dağıtım*, Cilt 2.
- Soleymani, S., Abdollahzadeh, A. and Alidokht, S. A. (2011) "Improvement in tribological properties of surface layer of an Al Alloy by Friction Stir Processing", *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 1, 95-100.

- Su, J.-Q., Nelson, T.W. and Sterling, C.J. (2005) "Friction stir processing of large-area bulk UFG aluminum alloys", *Scripta Materialia*, 52(2), 135-140.
- Şaldır, R. (2002) "Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynak kabiliyeti" Yüksek Lisans Tezi, *Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Taban, E. (2004) "5XXX serisi alüminyum alaşımlarının TIG, MIG ve sürtünen eleman ile birleştirme kaynaklı bağlantılarının mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi*, 154963.
- Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R. and Withers, P. J. (2009) "Friction stir welding of Aluminium alloys", *International Materials Reviews*, 4(2), 49-93.
- Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Templesmith, P. and Dawes, C.J. (1991) "International patent application PCT/GB92/02203 and GB patent application 9125978.8", *UK Patent Office*, London,
- Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Temple-Smith P. and Dawes, C.J. (1995) "Method of operating on a workpiece", *in United States Patent The Welding Institute*, Cambridge, GB 5,460,317.
- Tımaç, G. (2006) "Uçak endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının TIG kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi", *İstanbul*, Türkiye.
- Totten, G. E. and Mackenzie, S. (2003) "Handbook of aluminum Vol 1: Physical metallurgy and processes", *Marcel Dekker Inc.*, USA.
- Venkataraman, B. and Sundararajan, G. (2000) "Correlation between the characteristics of the mechanically mixed layer and wear behaviour of aluminium, Al-7075 alloy and Al-MMCs", *Wear*, 245 (1-2), 22-38.
- Vuyyuru, R.K., Surappa, M.K. and Brusethaug, S. (2007) "Tribological behavior of Al-Si-SiCp composites/automobile brake pad system under dry sliding conditions", *Tribology International*, 40, 365-373.
- Vilaça, P., Vidal, C., Gandra, J and Ahmed, Z. (2012) "Aluminum alloys and new trends in fabrication and applications", *Intech Open Access Publisher*, 159-197.
- Wan, D.T., Hu, C.F., Bao, Y.W. and Zhou, Y.C. (2007) "Effect of SiC particles on the friction and wear behavior of Ti<sub>3</sub>Si(Al)C<sub>2</sub>-based composites", *Wear*, 262, 826-832.
- Wei, W., Jianmin, H., Weijing, L. and Jinhua, W. (2006) "Study of rare earth element effect on microstructures and mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Si cast alloy", *Rare Metals*, 25, 129-132.
- Zucchi, F., Trabanelli, G and Grassi, V. (2001) "Pitting and stress corrosion cracking resistance of friction stir welded AA 5083", *Materials and Corrosion*, 52, 853-859.



## **Ek-1.** Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

Baran Ö., Saygın M., Kara L., Kucukomeroglu T., "Al-5083 alaşımının mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin Sürtünme Karıştırma Prosesi ile iyileştirilmesi", *1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials*, KARABÜK, TÜRKİYE, 22-24 Mart 2018, 189-189.



## ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Erzincan'da doğdu. İlköğretim, ortaöğretim ve lise öğrenimini Erzincan'da tamamladı. 2009 yılında Elazığ Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünü kazandı. 2012 yılında bu bölümden mezun oldu. Lisans mezuniyetinden 2 yıl sonra 2014 yılında Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine, 2015 yılında da Erzincan Üniversitesi Makine Mühendisliği lisans öğrenimine başladı.

