

**ELEKTRİK DİRENÇ VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA  
NOKTA KAYNAKLI ALÜMİNYUM ALAŞIMI  
BAĞLANTILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**ONUR ER**

**Mersin Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Eğitimi  
Ana Bilim Dalı**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

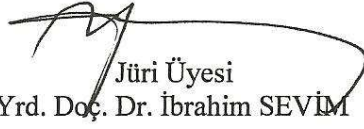
**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Mustafa Kemal KÜLEKÇİ**

**MERSİN  
Mart - 2010**

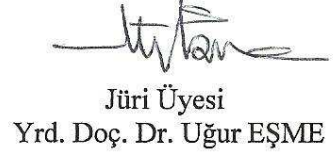
Bu tezin gerek bilimsel içerik, gerekse elde edilen sonuçlar açısından tüm gerekleri sağladığı kanaatine ulaşan ve aşağıda imzaları bulunan biz jüri üyeleri, sunulan tezi oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul ediyoruz.



Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Mustafa Kemal KÜLEKÇİ



Jüri Üyesi  
Yrd. Doç. Dr. İbrahim SEVİM



Jüri Üyesi  
Yrd. Doç. Dr. Uğur EŞME

Bu tezin Fen Bilimleri Enstitüsü yazım kurallarına uygun olarak yazıldığı Enstitü Yönetim Kurulu'nun 31.03.2012 tarih ve 2010.08.133 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Mahir TURHAN  
Enstitü Müdürü



**Not:** Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

## ÖZ

Bu çalışmada, elektrik direnç nokta kaynağı (EDNK) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) yöntemleri ile birleştirilen EN AW – 5005 (AlMg1) alüminyum alaşımı bağlantıların kaynak performansı açısından mukayesesi yapılarak SKNK bağlantıları için optimum kaynak parametrelerinin tayin edilmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte SKNK yöntemi ile elde edilen bağlantıların kaynak performansına etki eden kaynak parametrelerinin etkileşimleri araştırılmıştır. Ayrıca her iki nokta kaynağı yöntemi ile elde edilen bağlantıların mikro yapı özellikleri incelenmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilere göre SKNK yöntemi, kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri açısından EDNK yöntemine nazaran daha kaliteli nokta kaynağı bağlantıları sağlamıştır. Bununla birlikte, SKNK uygulamasında kullanılan kaynak parametrelerinden takım dalma mesafesinin nokta kaynağı bağlantısı üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Takım dalma mesafesinin artırılması ile birlikte doğru orantılı olarak kaynaklı bağlantının kesme makaslama mukavemetinin de arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışmada SKNK uygulaması için optimum kaynak parametre seviyelerinin; 2.6 mm takım dalma mesafesi, 1500 dev/dak takım devri ve 10 sn kaynak süresi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK), elektrik direnç nokta kaynağı (EDNK), alüminyum ve alüminyum alaşımları, mekanik özellikler, deneysel tasarım

## ABSTRACT

In this study 5005 aluminium alloy plates joined by using resistance spot welding (RSW) and friction stir spot welding (FSSW). Mechanical properties of the joints of RSW and FSSW had been compared to identify the optimum parameters of FSSW. The interactions of welding parameters affecting welding performance of FSSW joints were investigated. The microstructure properties of RSW and FSSW joints were determined and assessed.

The results of experimental study showed that FSSW has enabled more quality spot welding joints than RSW. FSSW tool penetration range parameter was observed to cause most significant effect on spot welding joints. The shear strength of FSSW joints increased as the tool penetration depth increase. The optimum welding parameters levels for FSSW were determined as of 2.6 mm tool penetration depth, 1500 rpm tool rotation and 10 sec welding time.

**Key Words:** Friction stir spot welding (FSSW), resistance spot welding (RSW), aluminium and its alloys, mechanical properties, experimental design

## TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim süresince her zaman yanımda olarak beni yönlendiren ve çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyerek bu tezin tamamlanmasında bana rehberlik eden tez danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa Kemal KÜLEKÇİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı öğretim üyelerine akademik ve sosyal desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmada kullandığım malzemelerin teminini sağlayan Sayın İnşaat Mühendisi Murat ER'e, kaynak çalışmalarını yapmama olanak sağlayan Tarsus E.M.L. müdürlüğü ve başta Sayın Teknik Öğretmen Musa CAN olmak üzere Makine Teknolojisi Bölümü öğretmenlerine, mekanik deneylerin yapılmasına olanak sağlayan Sayın Prof. Dr. Abdulkadir EKŞİ'ye teşekkür ederim

Tezimin gerçekleştirilmesinde bana göstermiş oldukları fedakârlıklar ve sağlamış oldukları desteklerden ötürü değerli babam, annem ve ablama teşekkürlerimi bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZ</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b>	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b>	<b>iv</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b>	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI</b>	<b>3</b>
<b>2.1. EDNK YÖNTEMİ</b>	<b>3</b>
2.1.1. EDNK Bağlantısının İçyapı Özellikleri	4
2.1.2. EDNK Uygulamalarında Kullanılan Elektrotlar	5
2.1.3. EDNK Yönteminin Uygulandığı Malzemeler ve Özellikleri	6
2.1.4. EDNK Yönteminin Uygulandığı Endüstriyel Alanlar	6
2.1.5. EDNK Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	7
<b>2.2. SKNK YÖNTEMİ</b>	<b>7</b>
2.2.1. SKNK Bağlantısının İçyapı Özellikleri	9
2.2.2. SKNK Yönteminde Kullanılan Takımlar	10
2.2.3. SKNK Yönteminin Uygulandığı Malzemeler ve Özellikleri	11
2.2.4. SKNK Yönteminin Uygulandığı Endüstriyel Alanlar	12
2.2.5. SKNK Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	13
<b>2.3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI</b>	<b>14</b>
2.3.1. Alüminyum alaşımları	14
2.3.2. Alüminyum alaşımlarının kaynağı	15
<b>2.4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR</b>	<b>16</b>
2.4.1. EDNK yöntemi ile ilgili çalışmalar	16
2.4.2. SKNK yöntemi ile ilgili çalışmalar	18
<b>2.5. DENEYSEL TASARIM</b>	<b>25</b>

<b>3. MATERYAL ve METOT</b>	28
3.1. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEME ve ÖZELLİKLERİ	28
3.1.1. Çalışmada Kullanılan Numunelerin Hazırlanması	29
3.2. EDNK YÖNTEMİNİN UYGULANMASI	29
3.2.1. EDNK Makinesi	29
3.2.2. EDNK Parametre ve Seviyeleri	30
3.2.3. EDNK Yöntemi İle Birleştirilen Kaynaklı Bağlantılar	31
3.3. SKNK YÖNTEMİNİN UYGULANMASI	32
3.3.1. SKNK Makinesi	32
3.3.2. SKNK Parametre ve Seviyeleri	33
3.3.3. SKNK Takımı	34
3.3.4. Tam Faktöriyel (Tam Eşlendirmeli) Deney Tasarımı	35
3.3.5. SKNK Yöntemi İle Birleştirilen Kaynaklı Bağlantılar	41
3.4. MEKANİK DENEYLER	44
3.4.1. Çekme Testi Deneyi	44
3.4.2. Mikro Sertlik Testi Deneyi	45
3.4.3. Mikro yapı İncelemesi	47
<b>4. BULGULAR ve TARTIŞMA</b>	49
4.1. KAYNAK PERFORMANSI	50
4.1.1. SKNK Parametrelerinin Kaynak Performansına Etkileri	54
4.2. MİKROYAPI ÖZELLİKLERİ	60
<b>5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER</b>	70
<b>KAYNAKLAR</b>	73
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	79

## ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE	SAYFA
Çizelge 2.1. Alüminyum alaşımları ve önemli endüstriyel uygulamaları.....	15
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi.....	28
Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan malzemenin mekanik özellikleri.....	28
Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan parametreler ve seviyeleri.....	37
Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan L8 deneyi parametre seviye kombinezonları.....	38
Çizelge 3.5. İstatistiksel olarak tasarlanmış L8 deney matrisi.....	38
Çizelge 3.6. L8 hesap tablosu.....	40
Çizelge 4.1. Esas metale ait çekme kuvveti değeri.....	50
Çizelge 4.2. EDNK yöntemi ile birleştirilen numunelere ait maksimum kesme makaslama kuvveti değerleri.....	51
Çizelge 4.3. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunelere ait maksimum kesme makaslama kuvveti değerleri.....	52
Çizelge 4.4. Elde edilen veriler ile doldurulmuş L8 hesap tablosu.....	55
Çizelge 4.5. AC (takım dalma mesafesi-kaynak zamanı) etkileşim tablosu.....	57
Çizelge 4.6. BC (takım devri-kaynak zamanı) etkileşim tablosu.....	59



## ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	SAYFA
Şekil 2.1. EDNK yönteminin şematik gösterimi.....	3
Şekil 2.2. EDNK tipik sıcaklık dağılımı şematik gösterimi.....	4
Şekil 2.3. EDNK uygulamalarında kullanılan elektrot başlık tipleri.....	5
Şekil 2.4. SKNK yönteminin şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.5. SKNK yönteminde kullanılan donanımlar ve pozisyonları.....	8
Şekil 2.6. SKNK bağlantısının enine kesiti.....	9
Şekil 2.7. SKNK bağlantısının mikro yapısı.....	10
Şekil 2.8. SKNK yönteminde kullanılan takım omuz yapıları.....	10
Şekil 2.9. SKNK yöntemimde kullanılan çeşitli takım konfigürasyonları.....	11
Şekil 3.1. Numunelerin kaynak pozisyonu ve boyutlarına ait şematik gösterim.....	29
Şekil 3.2. EDNK işlemi için kullanılan kaynak makinesi.....	30
Şekil 3.3. EDNK uygulamasına ait şematik gösterim.....	31
Şekil 3.4. EDNK yöntemi ile birleştirilen numuneler.....	31
Şekil 3.5. EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin üstten görünüşü.....	32
Şekil 3.6. SKNK işlemi için kullanılan dik işleme tezgahı.....	33
Şekil 3.7. SKNK işleminde kullanılan takımların boyutları.....	34
Şekil 3.8. SKNK işleminde kullanılan takımlar.....	35
Şekil 3.9. SKNK uygulamasına ait şematik gösterim.....	41
Şekil 3.10. SKNK işleminin aşamaları.....	42
Şekil 3.11. SKNK yöntemi ile birleştirilen numuneler.....	43
Şekil 3.12. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin üstten görünüşü.....	43
Şekil 3.13. Kaynaklı bağlantıların çekme deneyi pozisyonu.....	44

Şekil 3.14. Çekme deneyi için kullanılan çekme testi cihazı.....	45
Şekil 3.15. EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin sertlik ölçüm pozisyonu.....	46
Şekil 3.16. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin sertlik ölçüm pozisyonu.....	46
Şekil 3.17. Sertlik ölçümleri için kullanılan mikro sertlik testi cihazı.....	47
Şekil 3.18. Mikro yapı görüntülerin incelenmesinde kullanılan metal mikroskopu.....	48
Şekil 4.1. Esas metale ait kuvvet-uzama diyagramı.....	50
Şekil 4.2. EDNK yöntemi ile birleştirilen 1. numuneye ait kuvvet-uzama diyagramı.....	51
Şekil 4.3. SKNK yöntemi ile birleştirilen 6.1. deney numaralı numuneye ait kuvvet-uzama diyagramı.....	53
Şekil 4.4. Numunelere ait maksimum kesme makaslama kuvveti değişimleri.....	54
Şekil 4.5. Normal olasılık grafiği.....	56
Şekil 4.6. AC (takım dalma mesafesi-kaynak zamanı) etkileşim grafiği.....	58
Şekil 4.7. BC (takım devri-kaynak zamanı) etkileşim grafiği.....	59
Şekil 4.8. EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin üst parçasına ait sertlik ölçüm değerleri.....	61
Şekil 4.9. EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin alt parçasına ait sertlik ölçüm değerleri.....	62
Şekil 4.10. EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin üst ve alt parçalarından geçen hat boyunca ölçülen sertlik değerleri.....	63
Şekil 4.11. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin üst parçasına ait sertlik ölçüm değerleri.....	64
Şekil 4.12. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin alt parçasına ait sertlik ölçüm değerleri.....	65
Şekil 4.13. EDNK bağlantısına ait kaynak bölgesinin şematik görünümü.....	66

Şekil 4.14. EDNK bağlantısına ait kaynak bölgelerinin x100 büyütme ile alınan görüntüsü.....	67
Şekil 4.15. SKNK bağlantısına ait kaynak bölgesinin şematik görünümü.....	68
Şekil 4.16. SKNK bağlantısına ait kaynak bölgelerinin x100 büyütme ile alınan görüntüsü.....	69

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Cu	: Bakır
dak	: Dakika
dev	: Devir
EDNK	: Elektrik direnç nokta kaynağı
gr	: Gram
HRC	: Rockwell sertliği
HV	: Vickers sertliği
ITAB	: Isının tesiri altındaki bölge
kA	: Kiloamper
kgF	: Kilogramkuvvet
KHI	: Kawasaki heavy industries
kN	: Kilo Newton
kVA	: Kilovolt amper
Li	: Lityum
Mg	: Magnezyum
ml	: Mililitre
mm	: Milimetre
Mn	: Manganez
N	: Newton
nm	: Nanometre
Si	: Silisyum
SKK	: Sürtünme karıştırma kaynağı
SKNK	: Sürtünme karıştırma nokta kaynağı
TEB	: Termomekanik olarak etkilenen bölge
TWI	: The welding institute
V	: Volt
Zn	: Zirkonyum

## 1. GİRİŞ

Kaynak, ısı ve basınç vasıtası ile iki parçanın birbirine birleştirilmesidir. Pratikte kaynak bağlama, imalat ve tamirat işlemlerinde kullanılan bir birleştirme yöntemidir. Bağlama yöntemi olarak kaynak, perçin bağlantısının bir karıştıdır ve perçinli bağlantılara nazaran malzeme ve işçilik bakımından daha üstündür. Bu nedenle günümüzde kaynak makine konstrüksiyonunu hemen hemen bütün dallarında perçinin yerini almıştır. İmalat yöntemi olarak dökümün bir çeşidi olmakla birlikte bu iki yöntem arasında seçim parçanın büyüklüğüne, karışıklığına ve parça sayısına bağlı olarak yapılmaktadır [1].

Kaynak bağlantılarının sınıflandırılması kullanılan malzeme türü ve teknolojiye göre yapılmaktadır. Teknolojiye göre kaynak ergime ve katı hal kaynağı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Ergime kaynağında, ısı ile birlikte elektrot adı verilen bir ek malzeme kullanılırken bu yöntem oldukça büyük yüklere maruz kalan bağlantılarda kullanılmaktadır. Katı hal kaynağında ise ek bir malzemeye ihtiyaç duyulmamaktadır. Isı ile birlikte malzemeler birbirine bastırılmakta, ısının yoğun olduğu temas yerlerinde malzeme nokta halinde yumuşamakta ve bağlantı difüzyon yolu ile gerçekleşmektedir [1, 2].

Bununla birlikte nokta kaynağı otomotiv, elektronik ve uçak endüstrisinde sıklıkla kullanılan bir birleştirme tekniği olmuştur. Bu yaygın kullanım alanından başka, kısa işlem süresi ve otomasyona uygunluğu ile birlikte etkili birleştirme elde etmeye olanak sağlamıştır. Endüstride tek bir üründe yüzlerce hatta binlerce nokta kaynaklı birleştirme unsuru vardır. Bundan dolayı nokta kaynaklı birleştirmelerin tasarımı ve imalatı nihai ürün güvenliğinin yanında kalitesini de etkilemektedir [3–9].

Son yıllarda özellikle otomotiv endüstrisinde yakıt tasarrufu sağlamak ve araç gövdesinin ağırlığını azaltarak gaz salınım seviyesini en aza indirmek için çeliğin yerine hafif bir metal olan alüminyum ve alaşımlarının kullanımı hızla artmıştır. Çeliğe nazaran alüminyumun elektriksel ve termal iletkenliği kaynak işlemlerinde

daha yüksek enerji sarfiyatına yol açmaktadır. Bu durum daha yüksek kapasiteli elektriksel sistemleri ve buna bağı altyapıyı zorunlu kılmaktadır. Bundan dolayı, 19. yy. sonlarına doğru kullanılmaya başlanan elektrik direnç nokta kaynağı (EDNK) çelik malzemelerin birleştirilmesinde otomotiv endüstrisinde geniş ölçüde kullanılırken alüminyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde verimli sonuçlar verememektedir. Buna ek olarak sıklıkla oluşan elektrot üzerine eriyik malzeme sıvanması ve elektrot ömrünün kısa ömürlü olması geleneksel EDNK yönteminde karşılaşılan diğ er önemli teknolojik kısıtlamaları oluşturmaktadır [7–23].

Bu kısıtlamalar alüminyum ve benzeri hafif alaşımların nokta kaynağında EDNK yöntemine alternatif bir nokta kaynağı uygulamasının sağlanmasını zorunlu kılmıştır. Mazda ve Kawasaki Heavy Industries (KHI) tarafından geliştirilen alternatif sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) yöntemi ilk olarak 2003 yılında Mazda RX–8 seri üretim otomobilinde kullanılmıştır. SKNK yöntemi, 1991 yılında The Welding Institute (TWI) tarafından geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yönteminin bir türevidir olarak kendisine uygulama alanı bulmuştur. SKNK ile elde edilen bağlantılarda düşük ısı distorsiyonu, mükemmel mekanik özellikler ve daha az atık-kirlilik oranı sağlanmıştır. Bunun yanı sıra EDNK yöntemine nazaran %90'ın üzerinde enerji tasarrufu ve %40'ın üzerinde donanım tasarrufu elde edilmiştir [9, 10, 13–30].

Bu çalışmada EDNK ile SKNK yöntemlerinin mukayesesi yapılarak SKNK yöntemi ile birleştirilen 5005 serisi alüminyum alaşımı bağlantıların mekanik özelliklerine etki eden kaynak parametrelerinin tayin edilmesi amaçlanmıştır.

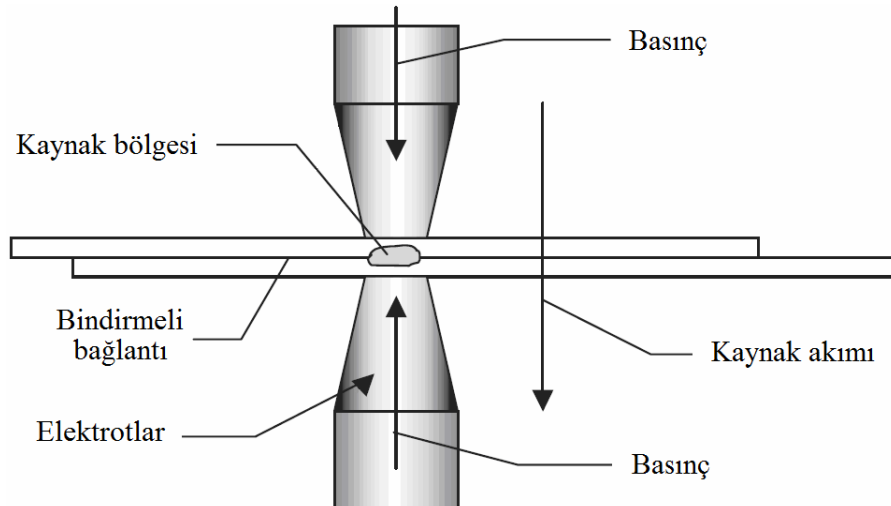
## 2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Kaynak araştırmaları bölümünde EDNK yöntemi, SKNK yöntemi, her iki yöntem ile ilgili önceki çalışmalar, alüminyum alaşımları ve deneysel tasarım konuları ile ilgili literatürden taranıp derlenen çalışmalara yer verilmiştir.

### 2.1. EDNK YÖNTEMİ

Direnç kaynağı, iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda basıncın tatbikiyle yapılan bir kaynak usulüdür. Malzemeden geçen elektrik akımının meydana getirdiği ısının dışında, herhangi bir ısı tatbik edilmemektedir. Isı, kaynak edilecek kısımlarda meydana gelir ve basınç kaynak makinesindeki elektrotlar veya çeneler vasıtası ile uygulanmaktadır [2, 12, 31].

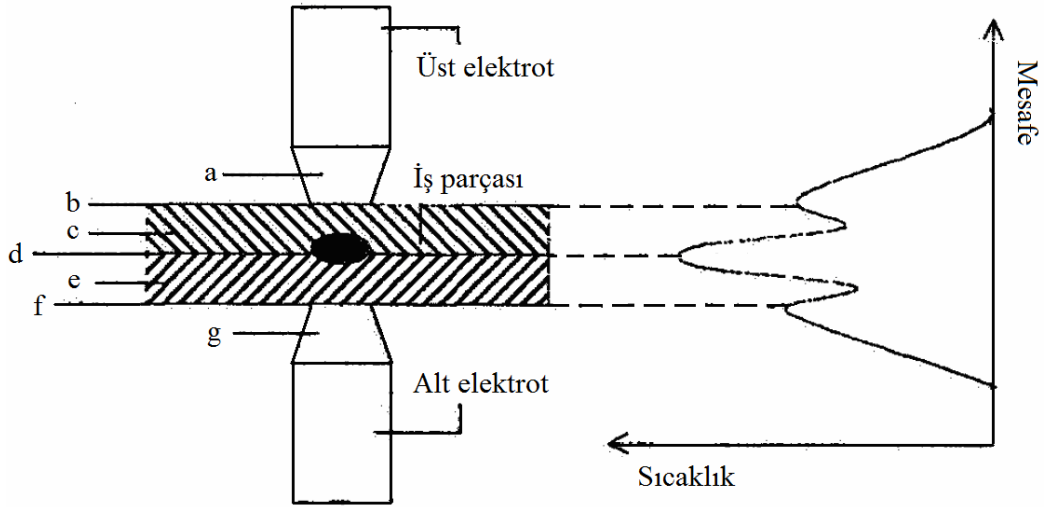
Nokta kaynağı, elektrotlar tarafından bir arada tutulan iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdikleri dirençten elde edilen ısı ile parçaların bölgesel olarak eritilip basınç altında birleştirilmeleridir [2, 31]. EDNK yöntemi Şekil 2.1.'de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.1. EDNK yönteminin şematik gösterimi [32]

### 2.1.1. EDNK Bağlantısının İçyapı Özellikleri

Kaynak edilecek parçalar elektrik akımına karşı bir seri direnç oluşturmaktadır. Bu dirençlerin toplamı elektrik akım şiddetini belirlemektedir. Kaynak olan parçalarda ve elektrotlarda ısı oluşumunu sağlayan, yedi ayrı direnç söz konusudur. Bu yedi direnç; (a) üst elektrot direnci, (b) üst elektrot ile üst parça arasındaki temas direnci, (c) üst parça direnci, (d) üst parça ile alt parça arasındaki temas direnci, (e) alt parça direnci, (f) alt elektrot ile alt parça arasındaki temas direnci, (g) alt elektrot direnci olmaktadır. Bu noktaların her birinde, o noktanın direnci ile orantılı olarak ısı oluşur. En fazla ısının kaynak olan noktada, yani kaynak edilecek metallerin temas yüzeyinde (d) oluşması istenmektedir. Kaynak esnasında görülen sıcaklık dağılımı ve içyapı özellikleri kaynak edilecek iş parçalarının malzemesine, boyutuna, metal ile elektrotların rölatif ısı iletkenliklerine, elektrotun şekline, boyutuna ve elektron soğutma şekline bağlı olmaktadır [7, 8, 33]. EDNK tipik sıcaklık dağılımı Şekil 2.2.'de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.2. EDNK tipik sıcaklık dağılımı şematik gösterimi [33]

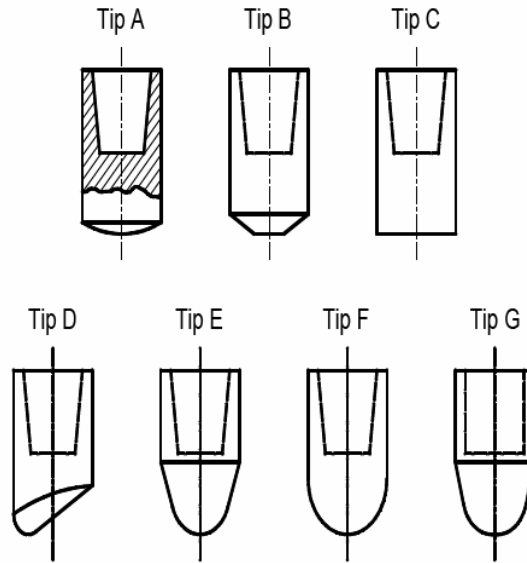
Kaynak yapılan malzemede, zamana bağlı sıcaklık değerleri belirlenerek soğuma hızı ve buna bağlı olarak da kaynak sonrası malzeme içyapısındaki değişimler hakkında bir fikir edinmek mümkün olmaktadır. Böylece, kaynak yapılan malzemenin mekanik özelliklerinin işleme şartlarına uygun olup olmadığı belirlenebilmektedir. Kaynak işleminde, malzeme içyapısında oluşabilecek



değişimler işlem gören malzemenin cinsine, kalınlığına, iş parçası ile kaynak bölgesi arasındaki sıcaklık farkına, yani soğuma hızına bağlı olmaktadır. Bu nedenle bazı kaynak uygulamalarında, iş parçası ile kaynak sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkını azaltarak soğuma hızını düşürmek amacı ile ön tavlama uygulanabilmektedir. Yine bazı özel uygulamalarda kaynak sonrası ısıtma işlemi uygulanması gerekliliği de doğabilmektedir [33].

### 2.1.2. EDNK Uygulamalarında Kullanılan Elektrotlar

EDNK uygulamalarında parça kalınlığına ve türüne göre elektrot seçimi kaynağın kalitesini belirleyen önemli bir unsur olmaktadır. Elektrotlar genellikle nokta direnç kaynağı ve kabartılı nokta direnç kaynağı seri üretiminde kullanıldıklarından, elektrotlardan geçen akımın oluşturduğu dirençten dolayı elektrotlarda ısınma oluşmaktadır. Elektrot ısısının artması kaynak kalitesini olumsuz yönde etkileyeceğinden elektrotların soğutulması gerekmektedir. Kaynak makinelerinde soğutma sistemi sıvısı olarak genellikle su kullanılmaktadır. Bu sistem, makine içerisinde bir düzenekle sürekli olarak su dolaşımı sağlayarak elektrotların soğutulmasını sağlamaktadır [2, 34]. EDNK uygulamalarında kullanılan elektrot başlık tipleri Şekil 2.3.'de görülmektedir.



Şekil 2.3. EDNK uygulamalarında kullanılan elektrot başlık tipleri [34]

Kullanıma bağılı olarak zaman içerisinde kaynak elektrotları aşınmaktadır. Aşınma sonucunda elektrotun ucu bozularak akım ve basıncın azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum kaynak kalitesini olumsuz yönden etkilemektedir. Bu olumsuz durum elektrot uçlarının periyodik olarak bakımlarının yapılmasını gerektirmektedir. Bakım işlemi, bozulan uca yeniden eski formunun kazandırılması ve akım geçişini engelleyen unsurların ortadan kaldırılması ile mümkün olmaktadır. Bu işlem ege, zımpara vb. araçlar kullanılarak yapılabilmektedir [34].

### 2.1.3. EDNK Yönteminin Uygulandığı Malzemeler ve Özellikleri

Düşük karbonlu çelikler, metal birleştirme kombinasyonları içerisinde pek çok demir ve demir dışı alaşımları ile beraber nokta kaynağı uygulamalarında kullanılan bir malzeme olmuştur. Karbon katkı oranı arttıkça malzeme gevşeyerek kaynak yeri ayrılması ve çatlak oluşum eğilimi artmaktadır. Buna ek olarak, paslanmaz çeliklerin de nokta kaynağı uygulaması mevcut olmaktadır. 300 serisi östenitikler nokta kaynağı uygulamalarının çoğunluğunu oluşturmaktadır. Kaynaklı birleştirmelerin her zaman kırılğan bir faza sahip olmasından ötürü martentist faza sahip malzemeler nokta kaynağı uygulamalarında en az kullanım alanına sahiptirler [35].

Alüminyum benzeri yüksek iletkenliğe sahip malzemelerin nokta kaynağında oldukça yüksek güç sarfiyatına ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte alüminyum alaşımları nokta kaynağı uygulamalarında sınırlı olarak kullanılmaktadırlar. Alüminyum ve çelik gibi benzer olmayan malzemelerin nokta kaynağı farklı ergime özellikleri ve iletkenliklerinden ötürü genellikle mümkün olmamaktadır. Ayrıca alüminyum, kalay, çinko ve çinko kurşun alaşımlı kaplanmış çeliklerin nokta kaynağı için özel önlem ve kaynak ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır [35].

### 2.1.4. EDNK Yönteminin Uygulandığı Endüstriyel Alanlar

Otomotiv sektörü, uzay ve uçak teknolojileri, çelik yapılar, çelik eşya imalatı, hassas cihazların imalatı, elektroteknik, boru üretimi, makine sektörü gibi pek çok

endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Ayrıca bu alanlarda kullanılan ince kesitli metal malzemelerin kaynağında yaşanan sorunlar, farklı kaynak türlerinin gelişimini sağlamıştır. İnce kesitlik malzemeler yüksek ısı altında kaldıklarında kalıcı şekil bozukluklarına neden olur. Bu nedenle kaynaklama işleminin asgari ısıda ve en kısa sürede gerçekleştirme zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Kaynaklı bağlantıların hızlı bir şekilde en az deformasyonla gerçekleştirilmesi, ekonomik ve kaynak mukavemetinin yüksek olması istenilen yerlerde, elektrik direnç kaynağı ilk seçim olarak karşımıza çıkmaktadır [34].

#### 2.1.5. EDNK Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

EDNK yönteminin bazı avantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Dolgu maddesine gereksinim duyulmamaktadır.
- Yüksek üretim hızı elde etmek mümkündür.
- Otomasyona ve mekanize hale getirmeye elverişlidir.
- Yüksek operatör becerisi ve deneyimi gerektirmemektedir.
- Uygun yenilenebilirlik ve güvenilirlik sağlamaktadır.

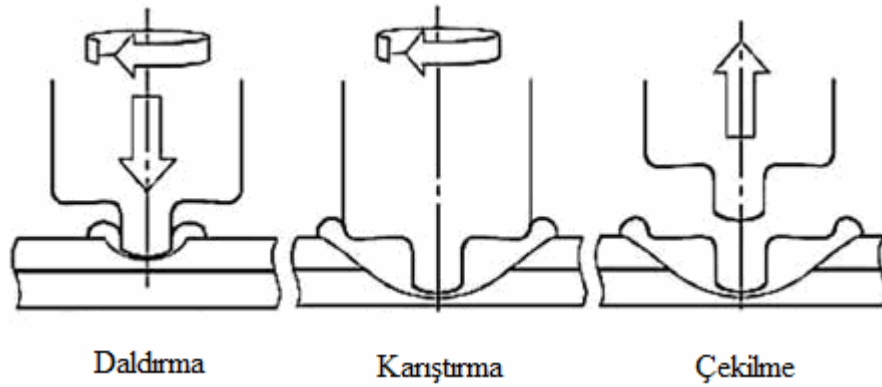
EDNK yönteminin bazı dezavantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Yüksek maliyetli donanım gerektirmektedir.
- Çoğu direnç kaynağı uygulamalarında bindirme bağlantılı uygulamaları sınırlandırmaktadır [36].

#### 2.2. SKNK YÖNTEMİ

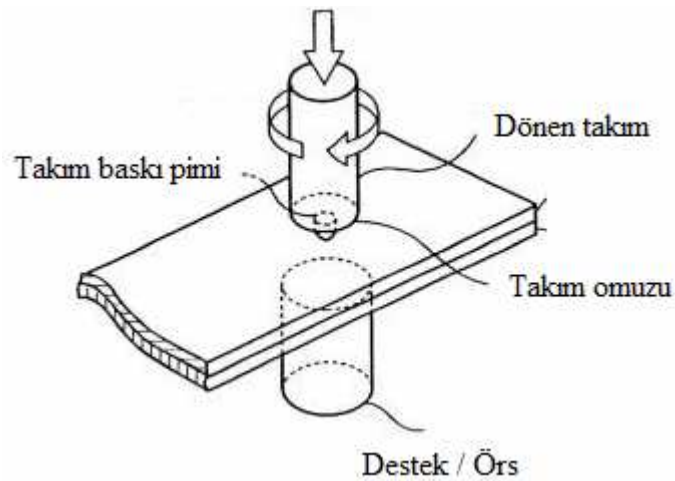
SKK yönteminin bir türevi olarak uygulama alanı bulan SKNK, alüminyum alaşımlarının kaynağında geniş çapta kullanılmakta olan yeni bir birleştirme yöntemidir. Şekil 2.4.'de şematik gösterimi verilen SKNK yönteminde, dairesel yüzeylerden biri üzerine merkezlenmiş çıkıntılı bir pim ile birlikte silindirik şekilde dönen bir takım, önceden belirlenmiş bir dalma derinliğinde üst üste bindirilmiş

levhaların yüzeyinden içine doğru belirli bir oranda daldırılmaktadır. Daha sonra ya hemen ya da bir kapanma zamanının ardından hızlı bir şekilde geri çekilmektedir. Meydana gelen sürtünme ısısı, gerek çevresel gerekse eksensel doğrultuda malzeme akışına neden olan metal ve dönen pimi yumuşatmaktadır. Takım omuzu tarafından uygulanan dövme basıncı, pim etrafında halka şeklinde bir katı hal birleştirme formunun oluşmasına yol açmaktadır [4, 10, 13–18, 20–22].



Şekil 2.4. SKNK yönteminin şematik gösterimi [10]

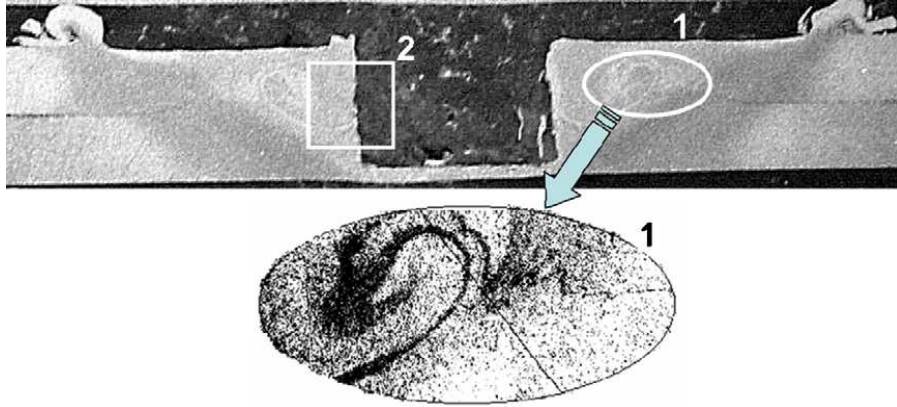
SKNK yönteminde kullanılan donanımlar ve bunların pozisyonları Şekil 2.5.'de görülmektedir.



Şekil 2.5. SKNK yönteminde kullanılan donanımlar ve bunların pozisyonları [21]

### 2.2.1. SKNK Bağlantısının İçyapı Özellikleri

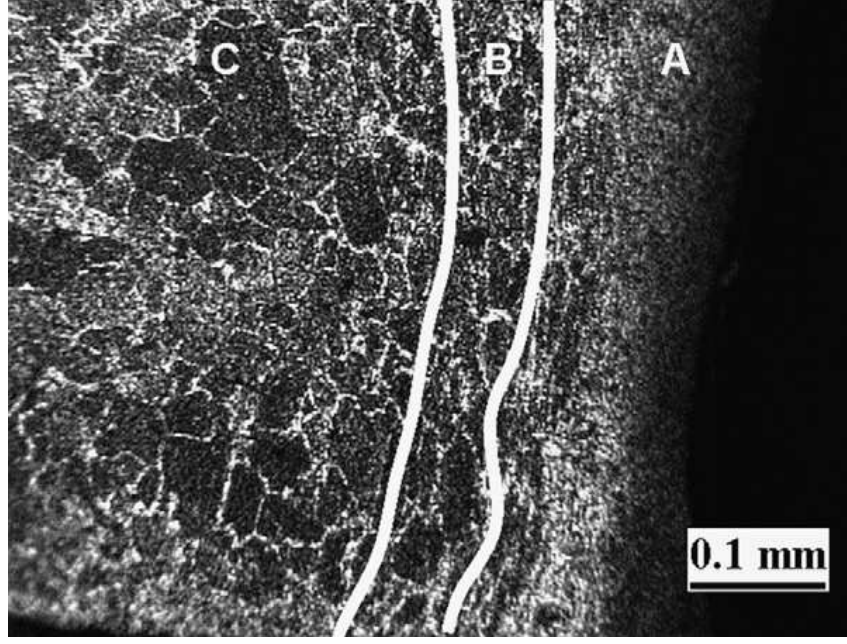
SKNK esnasında, materyal akışının incelenmesi ve bölgesel olarak kaynak bölgesinde yarattığı mikro yapı özelliklerinin belirlenmesi prosesin işleyişini kavramak için oldukça önemli olmaktadır. Alttaki numunenin ara bağ oluşturan yüzeyinde, birleştirilen iki levha arasında meydana gelen mekanik bir kilitlenmeden dolayı materyal davranışına uygun olarak yukarıya doğru bir deformasyon söz konusudur [4, 13]. SKNK bağlantılarında meydana gelen mekanik kilitlenme Şekil 2.6.'da birleştirmenin enine kesiti temel alınarak görülmektedir. Gösterimde 1 rakamı ile belirtilen bölgenin detaylı mikro yapı görüntüsünde birleştirilen numuneler arasında meydana gelen mekanik kilitlenme açıkça görülmektedir.



Şekil 2.6. SKNK bağlantısının enine kesiti [4]

Ayrıca SKNK bağlantısının enine kesitinde materyal mikro yapısı detaylı bir şekilde incelendiği zaman birkaç farklı bölgenin meydana geldiği görülmektedir [4]. SKNK bağlantısının kaynak bölgesinde oluşan bu bölgeler Şekil 2.7,'de görülmektedir. Şekil 2.7.'de, Şekil 2.6.'da 2 rakamı ile belirtilen bölgenin detaylı mikro yapı görüntüsündeki meydana gelen bölgeler görülmektedir. Bu bölgeler;

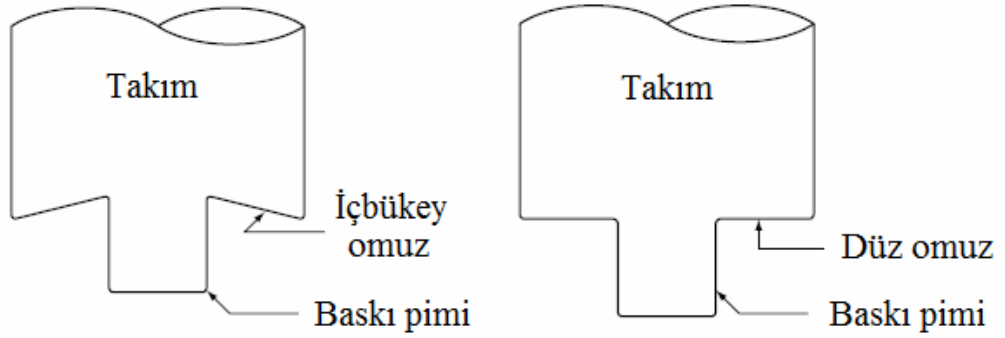
- A: Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge.
- B: Termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB).
- C: Isının tesiri altında kalan bölge (ITAB), olarak sıralanmaktadır [4].



Şekil 2.7. SKNK bağlantısının mikro yapısı [4]

### 2.2.2. SKNK Yönteminde Kullanılan Takımlar

SKNK yönteminde kullanılan takımlar, takım omuz yapısına göre genellikle içbükey ve düz olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Bu omuz yapıları SKNK için önemli işlem değişkenleridir [15]. SKNK yönteminde kullanılan takım omuz yapıları Şekil 2.8.'de görülmektedir.



Şekil 2.8. SKNK yönteminde kullanılan takım omuz yapıları [15]

İçbükey ve düz profile sahip omuz yapıları çeşitli takım konfigürasyonları ile birlikte kullanılmaktadır [37]. SKNK yönteminde kullanılan çeşitli takım konfigürasyonları Şekil 2.9.'da görülmektedir.



Şekil 2.9. SKNK yönteminde kullanılan çeşitli takım konfigürasyonları [37]

### 2.2.3. SKNK Yönteminin Uygulandığı Malzemeler ve Özellikleri

SKNK yönteminde, takım malzemesi ve tasarımı iş parçasını kalıpta dövme sıcaklığında işlemeye elverişli bir şekilde seçildiği takdirde pek çok farklı türde malzeme ve malzeme kombinasyonları birleştirme için kullanılabilir [38]. Özellikle alüminyum ve alaşımları SKNK yönteminde sıklıkla kullanılan malzemelerdir [9, 10, 13–22, 24, 38]. SKNK yöntemi ile sıklıkla birleştirilen alüminyum alaşımlarına örnek olarak;

- 2000 serisi Al (Al – Cu)
- 5000 serisi Al (Al – Mg)
- 6000 serisi Al (Al – Mg – Si)
- 7000 serisi Al (Al – Zn)
- 8000 serisi Al (Al – Li), verilebilir [21, 38].

SKNK yönteminde, yukarıda sıralanan alüminyum alaşımı seriler dışında ayrıca 1000 serisi Al (katkısız / ticari), 3000 serisi Al (Al – Mn) ve 4000 serisi Al (Al – Si) alaşımları da uygulanabilmektedir [38].

SKNK yönteminde başarılı bir şekilde uygulanan diğer malzemelere örnek olarak;

- Bakır ve alaşımları
- Kurşun
- Titanyum ve alaşımları
- Magnezyum ve alaşımları
- Çinko
- Plastikler
- Yumuşak çelikler
- Paslanmaz çelikler
- Nikel ve alaşımları, verilebilir [38].

#### 2.2.4. SKNK Yönteminin Uygulandığı Endüstriyel Alanlar

SKNK yönteminin endüstride kullanımı yöntem anlaşıldıkça hızla artmaktadır. Günümüzde yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin bu yöntemle birleştirilmesi sağlanmaktadır. Yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerde güçlü tezgâhlar, özel takım malzemeleri ve takım tutucularına ihtiyaç duyulmaktadır [39].

Günümüzde kullanımı giderek artan SKNK yönteminin uygulama alanları da gün geçtikçe artmaktadır. SKNK yönteminin ihtiyaçlara cevap verebilecek şekilde gelişmesini sağlayabilmek için de kaynak yapımında kullanılan alet, donanım ve makinelerinde buna bağlı olarak geliştirilmesi gerekmektedir [39]

SKNK yönteminin birçok endüstriyel alanda uygulaması mevcuttur. Özellikle taşıt endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır [18, 22, 26, 39]. Yöntemin farklı endüstriyel alanlardaki uygulamalarına örnek olarak;

- Elektrik endüstrisi
- Savunma endüstrisi
- Kalıp endüstrisi



- Gemi endüstrisi
- Plastik endüstrisi
- Uzay endüstrisi, verilebilir [39].

#### 2.2.5. SKNK Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

SKK yönteminin bir türevi olan SKNK geleneksel kaynak yöntemlerine nazaran daha üstün özelliklere sahiptir. SKNK yönteminin bazı avantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Ergimeyi kolaylaştıran malzemeye ve atmosfer ortamına ihtiyaç duyulmamaktadır.
- İlave metal kullanımı ve ark gereksinimine ihtiyaç duyulmamaktadır.
- Toplam enerji gereksinimi diğer kaynak yöntemlerine nazaran daha az olmaktadır.
- Birleştirmeler diğer kaynak yöntemlerine nazaran daha temiz ve güvenli olmaktadır.
- Farklı alaşımlara sahip malzemelerin birleştirilmesine olanak sağlamaktadır.
- Bir katı hal birleştirme yöntemi olduğu için alüminyum ve alaşımlarının kaynağında katılma ve sıvılaşma çatlakları görülmemektedir.
- Yöntem ile elde edilen birleştirmelerin mekanik özellikleri diğer kaynak uygulamalarına nazaran daha iyidir.
- İnsan sağlığına zararlı kaynak dumanı, radyasyon vb. durumlar oluşturmamaktadır [40].

SKNK yönteminin bazı dezavantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Çoğunlukla düşük ergimeli malzemelerin kaynağına uygun olmaktadır.
- Birleştirilecek malzemelerin sıkı bir şekilde tespitine ihtiyaç duyulmaktadır.
- Birleştirilecek malzemelerin desteklenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.
- Boyut olarak kalın malzemelerin kaynak uygulamalarında güçlü tezgâhlara gereksinim duyulmaktadır [41].

### 2.3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Alüminyumun en önemli özelliği hafif olmasıdır. Özgül ağırlığı  $2,7 \text{ gr/cm}^3$  olup demirinkinin üçte biri kadardır. Alaşımız halde çekme mukavemeti  $90 \text{ N/mm}^2$  civarında olmasına karşın alaşımlandırma ile bu mukavemet değeri  $220 \text{ N/mm}^2$  ve ısıl işleme (çökeltme sertleşmesi)  $440 \text{ N/mm}^2$  yükseltilebilmektedir. Alüminyumun diğeri bir üstün özelliği korozyona dayanıklılığıdır. Yüzeyinde oluşan oksit tabakası alüminyumu korozyona karşı korumaktadır [32,42].

Yüzey merkezli kübik kafese sahip olan alüminyum büyük ölçüde plastik şekil değiştirebilir. Haddeme sonucu % 99 oranında plastik şekil değiştirerek folyo (çok ince tabaka) haline getirilebilmektedir [42].

#### 2.3.1. Alüminyum Alaşımları

Alüminyuma katılan en önemli alaşım elemanları bakır, magnezyum, silisyum ve berilyumdur. Bu elemanlar katı eriyik oluştururlar. Endüstride alüminyum alaşımları dövme alaşımlar (hadde ürünü) ve dökme alaşımlar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Alüminyum alaşımlarında katı eriyik sertleşmesinden başka soğuk şekil verme ile de mukavemet artışı sağlanmaktadır. Özellikle bakır içeren dövme alaşımlara uygulanan çökeltme sertleşmesi veya yaşlanma sertleşmesi uygulamada önemli bir yer tutmaktadır. Bakırın yanında magnezyum ve mangan içeren alüminyum alaşımları duralümin adı ile uçak endüstrisinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır [42].

Alüminyum – magnezyum alaşımları deniz suyuna dayanıklı olmaktadır. Kolay işlenerek pekleşme ile mukavemetleri arttırılmaktadır. Denizde kullanılan teknelerin ve araçların üretimine elverişlidirler [42]. Çizelge 2.1.'de alüminyum alaşımları ve önemli endüstriyel uygulamaları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Alüminyum alaşımları ve önemli endüstriyel uygulamaları [32]

Alüminyum Alaşımı Serisi	Endüstriyel Uygulamaları
Saf alüminyum	Ambalaj, çatı kaplaması, cephe giydirme
2000 serisi (Al – Cu)	Taşıt aksamları, silindir kapağı, pistonlar
3000 serisi (Al – Mn)	Ambalaj, çatı kaplaması, cephe giydirme, kimyasal tanklar, gıda işleme ekipmanları
4000 serisi (Al – Si)	Metal dolgu maddesi, silindir kapağı, motor bloğu, valf gövdesi, mimari uygulamalar
5000 serisi (Al – Mg)	Cephe giydirme, deniz araçları gövdesi, yapı elemanları, gemi, tank, taşıt, demiryolu uygulamaları
6000 serisi (Al – Si – Mg)	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, taşıt, demiryolu uygulamaları, denizcilik uygulamaları
7000 serisi (Al – Mg – Zn)	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, büyük kesitli havayolu taşıt profili, savunma sanayi uygulamaları, zırh, ağır yük taşıtları, demiryolu uygulamaları

Alüminyum – silisyum alaşımları döküme elverişlidir. Ayrıca magnezyum katılarak mukavemetleri artırılabilir. Silisyum, bakır ve magnezyum içeren alüminyum alaşımları kokil denen metal kalıplarda dökülerek özellikle yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerini korudukları için otomotiv endüstrisinde piston üretiminde kullanılmaktadırlar [42].

### 2.3.2. Alüminyum Alaşımlarının Kaynağı

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağı, diğer metallerin kaynağı için kullanılan metotların çoğu ile kaynak edilebilmektedir. Ancak alüminyum ve alaşımlarının kaynağında en çok kullanılan metotlar koruyucu gaz ark kaynak metotları olmaktadır [32, 43].

Alüminyumun kaynağı etkileyen ana karakteristikler; hidrojen çözünebilirliği, alüminyum oksit, ısı iletkenlik, ısı genleşme, katılma çekmesi ve renk değiştirme olarak sıralanabilmektedir. Hidrojen ergimiş alüminyumda son

derece çözülebilir olmaktadır. Bu sebeple donma esnasında kaynak içinde hapsolabilmektedir. Bu durum alüminyumun kaynak bölgelerindeki oluşan gözeneklerin ana sebebini oluşturmaktadır. Bir diğer husus ilave metalin temizliğidir. İlave metalin ambarlanması ve taşınmasının önemi sıkça göz ardı edilmektedir. Alüminyum ilave metali yağlayıcılardan uzak olarak muhafaza edilmelidir [43].

Ayrıca alüminyumun oksijene karşı kuvvetli bir afinitesi olup havaya maruz kaldığında hemen oksitlenmektedir. Isıl işlemler ve nemli depolama şartları oksit kalınlığını arttırabilmektedir. Bu durumda kalınlaşan oksit tabakasının mekanik veya kimyasal araçlarla kaynak öncesi giderilmesi gerekmektedir [43].

## 2.4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

### 2.4.1. EDNK Yöntemi İle İlgili Çalışmalar

EDNK yöntemi direnç kaynağı prosesinde geniş bir kullanım alanına sahip olan bir kaynak yöntemidir. EDNK yönteminin başlıca kaynak parametreleri; kaynak akımı, elektrot kuvveti, kaynak süresi ve elektrot çapıdır [5–7, 12, 23, 40, 44, 45].

EDNK yönteminde üst üste bindirilen iş parçaları elektrotlar arasında konumlandırılarak üzerlerinden kısa zaman aralıklarıyla büyük bir elektrik akımı geçirilip kaynak işlemi için gerekli ısı elde edilmektedir [2, 8, 12, 31].

Anık ve ark. [6] yaptıkları çalışmada EDNK yönteminde kullanılan elektrotların ömürlerini deneysel olarak inceleyerek bu elektrotlar ile Al alaşım malzemeler arasındaki difüzyonu irdemiştirler. Deneplerinde Cu – Cr – Zr alaşım elektrotlar kullanarak seçtikleri bir elektrot başlığı ile Al alaşım malzemelere 10000 nokta kaynağı uygulamışlardır. Yapılan bu çalışmada üst ve alt elektrot başlıklarının boyları yaklaşık 4000 nokta kaynağına kadar hızlı, bu değerden sonra ise yavaş bir şekilde azalma göstermiştir. Bunun nedeni, elektrot uç

yüzeyindeki ısınmanın, plastik şekil değiştirmeyi daha kolay mümkün hale getirmesi olmuştur. Deneysel analizlerin ışığında 4000 – 4500 nokta kaynağından sonra elektrotların tıraşlanması gerektiği veya elektrot ucunun büyümesine göre akımı arttıran step programının çalıştırılıp akımın kontrollü olarak kademe kademe yükseltilmesi gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Lum ve ark. [11] çalışmalarında 1.5 mm kalınlığına sahip 5182 serisi alüminyum alaşımlı levhalara direnç nokta kaynak yöntemi uygulayarak elektrotlarda meydana gelen aşınmayı incelemişlerdir. Birleştirmelerin mekaniksel özelliklerine etki eden bir başka unsurun da EDNK yönteminde kullanılan elektrotlar olduğunu saptamışlardır. Araştırmalar göstermiştir ki Cu elektrot ile Al malzemesi EDNK yöntemi uygulaması esnasında bir difüzyon oluşturmaktadır. Al – Cu fazının oluşumundan dolayı Al malzemesinin elektrotlar üzerine yapışma eğilimi gözlemlenmiştir.

James ve ark. [46] yaptıkları çalışmada 50 x 350 x 2.0 mm boyutlarına sahip ve 70 nm silisyum dioksit kaplanmış 5754 serisi alüminyumun direnç nokta kaynağında mekaniksel yüklerin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, nokta kaynağı ile ilgili bir yükleme yapısında, kontak yüzeyinde kaplanmış alüminyum levhaların temas direncinin kaplanmamış alüminyum levhalara nazaran çok daha büyük olduğunun sonucuna varmışlardır. Ayrıca direnç kuvveti davranışının kontak yüzeyinde düzensiz bir davranış sergilediğinin altını çizerek davranışlardaki farklılıkların yükleme sistemindeki simetriklikten kaynaklandığını belirtmişlerdir. Kontak yüzeyinin direncini azaltmada etkili olan asimetrik elektrot çifti kullanılarak yapılan testler neticesinde direnç kuvveti davranışının kontak yüzeyinde daha düzenli bir davranış sergileme eğiliminde olduğunun sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte çalışmalarında, temas ara yüzeyindeki gözle görülebilir kaymaların mikroskobik bir skala üzerinde metal – metal temasını sağlamak için kaplanmış izole maddesinin kaldırılması gerektiğinin sonucuna vararak kayma olmadan normal basıncın uygun bir metal – metal teması sağlayamayacağını belirtmişlerdir.

Crinon ve Evans [47] çalışmalarında 2.0 mm kalınlığa sahip 5000 serisi alüminyum alaşımlı levhalara direnç nokta kaynağı yöntemi uygulayarak yüzey pürüzlülüğü, oksit film kalınlığı ve ara yüzey kaymalarının kaynak kalitesine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, kontak yüzeyi temas alanında kaplanmış alüminyumun, yükleme düzenindeki düşük seviyeli mekanik dengesizliklere karşı gösterdiği hassasiyet izlenmiştir. Yükleme yapılan numunelerde sarsıntıyı azaltmak adına özel önlemler alındığı takdirde kontak yüzeyi temas direncinin düzenli bir şekilde elde edilebileceği vurgulanmıştır. Ayrıca, oksit filmlerinin sarsıntısız yüzeyler ile birlikte azami derecede temas direncini arttırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, temas ara yüzeyindeki çok küçük bağıl kayma hareketlerinin dahi temas direncini olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

Qiu ve ark. [48] çalışmalarında 1.0 mm kalınlığa sahip 5052 serisi alüminyum alaşımı ile soğuk haddelenmiş çelik (SPCC) levhaları direnç nokta kaynak yöntemiyle birleştirerek birleştirmenin mukavemeti üzerine ara yüzey reaksiyon katmanının etkisini incelemişlerdir. Ara yüzey reaksiyon katmanının kaynak bölgesi çevresinde ince olduğunu ve kaynak bölgesinin merkezine doğru gidildikçe arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca birleştirmede oluşan çatlak yarığının kaynak bölgesi çevresinde alüminyum levhaya kadar yayıldığını ve kaynak bölgesinin merkezinde ara yüzey reaksiyon katmanına ulaştığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte ara yüzey reaksiyon katmanının 1.5 mikron kalınlığı aşması halinde direnç nokta kaynaklı birleştirmelerin gerilme mukavemetini azaltabileceğinin altını çizmişlerdir.

#### 2.4.2. SKNK Yöntemi İle İlgili Çalışmalar

SKK yöntemi temel alınarak kullanılan SKNK yöntemi yakın bir zamanda geliştirilmiştir. Bu yeni yöntem, geleneksel EDNK yöntemi ile karşılaştırıldığında düşük ısı distorsiyonu, mükemmel mekanik özellikler ve daha az kirlilik oranında dolayı otomotiv endüstrisinde alüminyum levhaların birleştirilmesinde uygulama alanı bulmuştur [4, 9, 10, 13–22, 24, 25].

SKNK yöntemi son zamanlarda otomotiv endüstrisinde alüminyum ve magnezyum alaşımlı malzemelerin birleştirilmesinde alternatif olarak kendini göstermekle birlikte yöntem belli başlı kaynak parametrelerine sahiptir. SKNK yönteminin belli başlı kaynak parametreleri; pim çapı, dalma derinliği, devir sayısı ve kaynak süresidir [3, 4, 9, 10, 13–22, 24, 25, 37].

Bir katı hal birleştirme yöntemi olan bu teknik üzerine son zamanlarda yapılan araştırmalar, kaynak parametrelerinin elde edilen kaynaklı birleştirmelerin mekaniksel özelliklerine etkisi üzerine ivme kazanmıştır [49, 50].

Uematsu ve ark. [9] yaptıkları çalışmada 30 x 100 x 2.0 mm boyutlarına sahip 6061 – T4 serisi alüminyum alaşımı levhaları üst üste bindirme tarzında 30 x 30 mm. bindirme alanı sağlayıp SKNK yöntemini uygulayarak Al – Mg – Si alaşımlı levhaların yorulma davranışlarını ve gerilme bozukluklarını incelemişlerdir. Bu inceleme için düz bir omuz ve birleştirmenin sondaj deliğini tekrarlı olarak doldurabilen, omuzun içinde saklı geri ya da ileri çekilebilir bir milden oluşan özel olarak tasarlanmış çift taraflı tesir sağlayan bir takım kullanılmıştır. Yeniden doldurmalı ve standart takımlar kullanılarak numunelere çekme ve yorulma testleri uygulanmıştır. Çekme ve yorulma mukavemetleri ölçülerek çatlak oluşma mekanizması kaynak bölgesinde elde edilen deneyler ışığında tartışılmıştır. Araştırmalar göstermiştir ki tekli yükleme durumu altında, kaynak bölgesine doğru ilerleyen makaslama geriliminin sebep olduğu çatlak, yeniden doldurmalı prosese nazaran kaynak kalitesinde daha olumsuz bir etki sağlamıştır. Ayrıca tekrarlı olarak doldurmalı sondaj mili ile yapılan birleştirmelerin yorulma mukavemeti standart sondaj mili ile yapılan birleştirmelere nazaran düşük yüklemelerde neredeyse eşdeğer bir gerilme değeri verirken bu durum yüksek yüklemelerde daha düşük bir gerilme değerine yol açmıştır.

Lathabai ve ark. [10] çalışmalarında 1.77 mm kalınlığa sahip 6060 – T5 Al – Mg – Si alaşımlı levhalar kullanarak takım geri çekilmeden evvel takımın dönme hızı, dalma oranı, dalma derinliği ve kaynak süresinin eksensel dalma kuvveti üzerine etkilerini araştırmışlardır. Takım dönme hızı olarak seçilen 1000, 2000,

3000 ve 4000 dev/dak kaynak parametreleri kullanılarak eksensel dalma kuvveti zamana bağılı olarak incelenmiştir. İncelemelerin neticesinde artan dönme hızı ile birlikte eksensel dalma kuvvetinin büyüklüğü önemli bir şekilde azalmıştır. Ayrıca 3000 dev./dak. takım dönme hızı ve 3.0 mm takım dalma derinliği sabit tutularak eksensel dalma kuvveti üzerinde takım dalma oranının etkisi araştırılmıştır. Araştırmalar göstermiştir ki daha büyük dalma oranları kabul edilebilir ve verimli kaynak kalitesi sağlamıştır. Araştırmaların ışığında AA6056 alüminyum alaşımı ve bu çalışmada kullanılan kaynak parametreleri için optimum takım dönme hızının 3000 dev./dak. olduğu kanısına varılmıştır. Ayrıca araştırma yapılan bu alan ile ilgili daha fazla çalışma yapılmasının gerekliliği vurgulanmıştır.

Badarinarayan ve ark. [13] SKNK yöntemi ile birleştirilmiş alüminyum alaşımların statik mukavemeti üzerinde takım geometrisinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında 5083 serisi alüminyum alaşımlı levhalar kullanan araştırmacılar omuz çapı 12 mm, takım mil çapı 5 mm ve takım mil uzunluğu 1.6 mm olarak seçilen bir takım kullanmışlardır. Deneylerinde sabit parametreler olarak 1500 dev/dak takım dönüş hızı, 20 mm/min takım dalma hızı, 2 sn. kaynak süresi ve 0.2 mm omuz dalma derinliği seçilmiştir. Değişken deney parametreler olarak ise 1.24 mm. ve 1.64 mm olmak üzere iki farklı levha kalınlığı ile konvansiyonel bir silindirik mil ve üçgensel tasarıma sahip bir mil olmak üzere iki farklı takım geometrisi seçilmiştir. Yapılan araştırmaların ışığında takım mil geometrisinin bağlantıyı önemli bir ölçüde etkilediği saptanmıştır. Silindirik takım mili ile yapılan kaynakta bağlantıyı sağlayan kilitlenme kademeli olarak yukarıya doğru yönelmiş ve daha sonra karışım bölgesinden sapıp kaynak bölgesinin alt kısmına aşağıya doğru inen bir eğilim göstermiştir. Üçgensel takım mili ile yapılan kaynakta ise bağlantıyı sağlayan kilitlenme karışım bölgesine yukarıya doğru yönelip çok kısa bir düzelme ile birlikte son bulmuştur. Malzeme deformasyonunun büyük ölçüde artmasına sebep olan üçgensel takım milinin asimetric dönüşünden dolayı kaynak ağzının çevresinde ince tanecikli bir yapı oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kaynak bölgesi harici yüklere maruz bırakıldığı zaman başlangıç çatlaklarının düşük seviyeli bir yüklemde dahi bağlantıyı sağlayan kilitlenme bölgesi boyunca yayıldığı saptanmıştır. Yüklemde meydana getirilen daha büyük bir artış ile birlikte üçgensel takım mili ile yapılan



kaynak, gerilim altında kaynama bölgesine kadar çatlak yayılmasından dolayı kırılırken silindirik takım mili ile yapılan kaynakta makaslama geriliminden dolayı kaynak bölgesinin alt kısmına yakın bölgelerde plastik şekil değişimi görülmüştür. Bununla birlikte kaynak bölgesinin mukavemeti incelenerek üçgensel takım mili ile yapılan kaynaklı birleştirmenin mukavemeti aynı proses şartları altında silindirik takım mili ile yapılan kaynaklı birleştirmenin mukavemetinin iki katı olduğu yapılan incelemeler ile birlikte belirlenmiştir.

Tran ve ark. [14] yaptıkları çalışmada 5754 – O ve 7075 – T6 serisi alüminyum alaşımlarına farklı birleştirme tarzında SKNK yöntemleri uygulayarak kaynaklı birleştirmelerin mukavemeti üzerinde kaynak işleme süresinin etkilerini incelemişlerdir. 25.4 x 101.6 mm boyutlarına sahip levhaları üst üste bindirme tarzında 38.1 x 25.4 mm bindirme alanı sağlayıp SKNK yöntemi uygulayarak sırasıyla; üst levha 5754 – O serisi, alt levha 7075 – T6 serisi ve bu bindirme tarzının tam tersi olan; üst levha 7075 – T6 serisi, alt levha 5754 – O serisi şeklinde birleştirmişlerdir. Levhaların kalınlıkları ise 5754 – O serisi için 2.0 mm ve 7075 – T6 serisi için 1.6 mm. seçilmiştir. Araştırmacılar işleme süresi olarak, 0.2 sn’lik bir artış oranı ile birlikte 1.6 sn den 4.0 sn ye ulaşan değerler arasındaki periyodu seçmişlerdir. Farklı proses şartları altında SKNK yöntemi uygulanan 5754/7075 ve 7075/5754 serisi alüminyum levhaları, üst üste bindirme tarzındaki yükleme durumu altında incelenmiştir. 7075/5754 serisi alüminyum levhaların oluşturduğu kaynaklı birleştirmenin maksimum kırılma yükü 5754/7075 serisi alüminyum levhaların oluşturduğu kaynaklı birleştirmenin maksimum kırılma yükünden % 40 daha büyük gözlemlendiğinin altı çizilmiştir. Önce farklı işleme sürelerinde yapılan her iki tip kaynaklı birleştirmelerin optik ve elektronik tarama mikro grafikleri elde edilmiş ve daha sonra kırılma olayı muayene edilmiştir. Birleştirmelerin mikro grafikleri, farklı işleme sürelerinde yapılan kaynaklı birleştirmelerin farklı kaynak geometrileri ve farklı kırılma tipleri olduğunu göstermiştir. Her iki birleştirme tarzının kırılma tiplerinin oldukça kompleks olduğu ifade edilip kırılma tiplerinin büyük ölçüde deformasyona uğramış levhalar arasındaki ara yüzeyin geometrisi ve mukavemetine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Lin ve ark. [15, 16] birleştirmelerin mekanik özelliklere olan etkisini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmalarında 0.94 mm kalınlığa sahip 6111 – T4 serisi alüminyum alaşımlı levhaları içbükey ve düz profilli takım omuz formuna sahip iki farklı takım omuzu ile birleştirerek birleştirmenin hata kipini ve yorulma ömrünü incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucu içbükey profile sahip takım ile uygulanan kaynaklı birleştirmenin düz profile sahip takım ile uygulanan kaynaklı birleştirmeye nazaran daha iyi yorulma dayanımı gösterdiğini vurgulamışlardır.

Wang ve Chen [18] çalışmalarında 6061 – T6 serisi alüminyum alaşımlı levhalara SKNK yöntemi uygulayarak kaynaklı birleştirmelerin yorulma ömürlerini incelemişlerdir. 25 x 100 x 1.0 mm boyutlara sahip levhalara üst üste bindirme tarzında 50 x 25 mm bindirme alanı sağlayıp SKNK yöntemi uygulanacak olan bu çalışmada kaynak parametreleri olarak; 3450 dev/dak takım dönme hızı, 1548 N takım aşağıya doğru dalma kuvveti, 40 sn toplam kaynak süresi ve 37 sn takım işleme süresi seçilmiştir. Uygulama da silindirik bir omuz ve konik biçimli bir dalma mili formunda takım kullanılarak 12 mm omuz çapı ile 5 mm dalma mili çapı esas alınmıştır. SKNK yöntemi ile birleştirilen numuneler  $5 \times 10^4$ ,  $10^5$ ,  $5 \times 10^5$  ve  $10^6$  olmak üzere dört farklı çevrim oranı esas alınarak yorulma testine tabii tutulmuşlardır. İncelemelerin ışığında  $5 \times 10^4$  çevrim oranında numunelerde hiçbir çatlak oluşmazken  $10^5$  çevrim oranında nokta kaynak bölgesinin çatlak başlangıç ucundan yayıldığı görülen bir yorulma çatlağı, nokta kaynağı bölgesinin sağ üst kısmına yakın bir yerde meydana gelmiştir. Bununla birlikte  $5 \times 10^5$  çevrim oranında iki yorulma çatlağı söz konusu olmuştur. Bu yorulma çatlaklardan bir tanesinin üstteki levhanın sınır katmanından geçerek ilerlediği görülürken nokta kaynak bölgesinin çatlak başlangıç ucundan yayıldığı görülen bir diğer yorulma çatlağının, nokta kaynağı bölgesinin sol alt kısmına yakın bir yerde meydana geldiği ifade edilmiştir. Araştırmaların akabinde  $10^6$  çevrim oranında yorulma çatlağının kaynak bölgesi ile esas metal arasındaki kaynak bağını kopardığı ve üst ile alt levha ara yüzeyinden kaynak bölgesinin uzağına doğru ilerlediği gözlemlenmiştir. Ayrıca üst üste bindirmeli tarzda SKNK yönteminin uygulandığı birleştirmelerin yorulma ömürlerinin deneysel sonuçlara dayanan modeller vasıtasıyla önceden tahmin edilebileceğinin altı çizilmiştir.

Gerlich ve ark. [19] çalışmalarında alüminyum alaşımlı levhaların SKNK yöntemi ile birleştirilmesi sırasında kaynak bölgesindeki tane sınırlarının hareketlerini incelemişlerdir. Al – 4.3 Cu – 1.4 Mg alaşımı kullanılıp elde edilen birleştirmelerin tanecik ve dislokasyon yapılarının araştırıldığı çalışmada takım dönme hızları olarak 750 dev/dak den 1500 dev/dak'ya varan değerler esas alınmıştır. Takım geometrisi olarak 10 mm takım omuz çapı, 4.0 mm takım dalma mili çapı ve 2.2 mm takım dalma mili uzunluğu seçilen çalışmada tane sınır hareketleri, ince taneli malzemenin plastik deformasyonu sırasında öncelikli izlenecek süreç olarak kabul edilmiştir. Transmisyon elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak elde edilen veriler neticesinde 500 nm'den büyük çaplara sahip tanecikler tam anlamıyla deforme olmuş mikro yapı içinde dislokasyon yoğunluğu içerirken 250 nm dan küçük çaplara sahip taneciklerin ise dislokasyondan muaf oldukları gözlemlenmiştir. Ayrıca 2024 serisi alüminyum alaşımların SKNK esnasında tane sınırı hareketlerinin, küçük çaplı taneciklerde elde edilen düşük dislokasyon yoğunluğunun hesaba katılması gerektiğini vurgulamışlardır. Tane sınırı hareketi sırasında tanecik içi zorlanmaların tanecik boyutunun artması ile birlikte orantılı bir şekilde artış gösterdiği ifade edilerek tanecik sınırları çevresindeki dislokasyonun giderilebilmesinde, dislokasyon ilerleme oranının göz ardı edilebileceğinden dolayı dislokasyon yoğunluğunun indirgenmesinin önemli bir rol oynayacağı belirtilmiştir.

Wang ve Lee [20] yaptıkları çalışmada 6061 – T6 serisi alüminyum alaşımlı levhaların SKNK yöntemi uygulanarak birleştirilmelerinde kaynak bölgesinin mikro yapısını ve kırılma mekanizmasını araştırmışlardır. 25 x 100 x 1.0 mm boyutlara sahip levhalara üst üste bindirme tarzında 50 x 25 mm bindirme alanı sağlayıp SKNK yöntemi uygulanacak olan bu çalışmada silindirik bir omuz ve konik biçimli bir dalma mili formunda takım kullanılarak 12 mm omuz çapı ile 5 mm dalma mili çapı esas alınmıştır. Kaynak parametreleri olarak 3445 dev/dak takım dönme hızı, 1740 N takım aşağıya doğru dalma kuvveti, 41 sn toplam kaynak süresi ve 38 sn takım işleme süresi esas alınmıştır. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki üst üste bindirme tarzında ortaya çıkan yüklenme durumları altında, kırılma kaynak bölgesinin orta kısmındaki dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgeye yakın bir yerde başlayıp

nihai kırılma kaynak bölgesini sınırlayan çevre hattı boyunca ilerlemiştir. Kesme kırılmasının yeri olası başlangıç yarık ucuna yakın bir yerde olup SKNK yöntemi ile elde edilen birleştirmelerdeki kırılmalar kaynak bölgesine bitişik termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölgeden (TEB) geçerek ilerlemişlerdir. Ayrıca mikro batırma sertlik ölçümleri baz alınarak yapılan sertlik ölçümlerinde sertliğin esas metal ve ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) arasındaki sınıra yaklaşarak azalır ve sonra termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölgede en düşük değerini alarak ani bir azalma gösterdiği gözlenmiştir. Termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölgeyi (TEB) geçtikten sonra, sertliğin dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgedeki sertlik değerine ulaşıncaya kadar kademe kademe bir artış gösterdiği ifade edilmiştir. Bununla birlikte ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) ile termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (TEB) arasında kalan ara yüzey bölgesinin en yumuşak bölge olduğu belirtilip üst üste bindirme tarzındaki numunelere tesir eden yükleme durumları altında SKNK yöntemi ile birleştirilen birleştirmelerin kaynak bölgesi çatlaklarının bu bölgede numunelerin kırılmasına yol açtığı vurgulanmıştır.

Mitlin ve ark. [22] çalışmalarında 6111 – T4 serisi alüminyum alaşımlı levhalar kullanarak SKNK yöntemi ile birleştirilen birleştirmelerin kaynak bölgesinin mikro yapı – mekanik özellik ilişkisini araştırmışlardır. H13 çeliğinden imal edilmiş düz omuz yapısına sahip takım kullanan araştırmacılar kaynak parametresi olarak 1.6, 1.7, 1.8 ve 1.9 mm takım mili dalma derinliği değerlerini kullanmışlardır. Takım mil penetrasyon derinliğinin makaslama geriliminden doğan çatlak üzerinde büyük bir etkisi olduğu saptanarak bu derinliğin artması ile birlikte çatlakların, kaynak bölgesinin uzağındaki ana metale doğru daha yoğun bir şekilde ilerlediği gözlemlenmiştir. Ayrıca takım omzunun altında kalan birleşmenin ara yüzeyindeki takım milinin her bir tarafında yaklaşık olarak 3.6 mm genişliğinde bir ara kesit bölgesi sağlanmıştır. Bu bölge sırasıyla herhangi bir temas olmayan alan, sadece mekanik kilitlenme sağlanan alan, metalürjik olarak bölgesel bağ ara yüzey alanı ve tamamen metalürjik olarak oluşan bağ ara yüzey alanlarından meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte alüminyumun metalürjik olarak bölgesel bağ ara yüzey alanı, tamamen metalürjik olarak oluşan bağ ara yüzey alanı ve takım mili altındaki alanda tümüyle yeniden kristalleştiği saptanmıştır. Takım omuzu

altındaki malzemenin takım mili altındaki malzemedan mühim seviyede daha büyük tanecik boyutuna sahip olduğunun altı çizilmiştir.

Tozaki ve ark. [24] çalışmalarında 40 x 150 x 2.0 mm. boyutlarına sahip 6061 – T4 serisi alüminyum alaşımı levhaları sırasıyla 3.7, 3.1 ve 2.4 mm üç farklı mil uzunluğuna sahip takım kullanarak SKNK yöntemi ile birleştirmişlerdir. Çalışmalarında kaynak parametreleri olarak 2000, 2500 ve 3000 dev/dak takım dönme hızı ile 0.2, 1 ve 3 sn kaynak süresi seçerek alüminyum alaşımli SKNK birleştirmelerin mikro yapı ve statik mukavemetleri üzerine takım geometrisinin etkilerini araştırmışlardır. Kaynak bölgesi mikro yapısının takım mil uzunluğu, takım dönme hızı ve kayma süresine bağlı olarak önemli bir şekilde farklılık gösterdiğinin altını çizmişlerdir. Çaprazlama gerilme mukavemeti takım mil uzunluğuna göre neredeyse etkilenmezken kayma mukavemeti takım mil uzunluğunun arttırılması ile doğru orantılı olarak artış göstermiştir. Bununla birlikte takım mil uzunluğuna bağlı statik mukavemet değerinin, hem üst levhanın kalınlığı hem de oluşan kaynak bölgesinin hacmi ile birlikte beraber değerlendirilmesinin gerektiğini vurgulamışlardır. Ayrıca yapılan çalışmalar sonucu takım dönme hızı ve kaynak süresinin artması ile birlikte çaprazlama gerilme mukavemeti azalırken kayma mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir.

EDNK ve SKNK yöntemleri kullanılarak yapılan bu çalışmalar genel olarak belli kaynak parametrelerinin birleştirme üzerindeki etkilerini içermektedir. Fakat her iki kaynak yönteminin mukayesesinin yapıldığı bir çalışmaya rastlanılmamaktadır. Bununla birlikte SKNK yöntemi ile ilgili çalışmalar incelendiğinde çalışmada kullanılan malzeme için seçilen tüm kaynak parametrelerinin optimum değerlerinin tayin edilmesine ve parametrelerin etkileşimlerine yönelik araştırmalar içermedikleri görülmektedir.

## 2.5. DENEYSEL TASARIM

Deney tasarımı kavramının bilimsel ifadesi, üretimi geliştirme ve performans sürecini başarılı bir şekilde kurmak anlamına gelmektedir. Deneyler, araştırmacılar

tarafından bir sistemi yâda belirli bir süreci tanımlamak ve anlamak için kullanılmaktadır. Deneysel tasarım bir süreç yâda sistemin girdilerinde değişiklik yapılarak çıktılarının gözlemlenmesi ve analiz edilmesini mümkün kılıp ürünündeki kaliteyi ürünün tasarım aşamasında sağlamayı amaçlamaktadır. Deneysel tasarım ilk olarak 1920'lerde İngiliz istatistikçi R. A. Fisher ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir [51–53].

İstatistiksel deney tasarımının amacı minimum zaman, kaynak ve maliyet ile maksimum anlamlı veriler elde etmektir. Bundan dolayı geleneksel yöntemlerden uzak ve araştırmalara yeni bir yaklaşım getirmektedir. Geleneksel deney tasarımı yöntemleri yüksek maliyet, uzun zaman ve kaynak gerektiren yöntemlerdir. Ayrıca geleneksel yöntemler ile yapılan deneysel çalışmalarda parametreler arasındaki etkileşimler göz ardı edilmektedir. Tüm bu dezavantaj ve kısıtlamalar istatistiksel deney tasarımı yöntemi ile giderilebilmektedir. İstatistiksel deney tasarımında çalışmanın amacı ve olanaklar dâhilinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar; tam faktöriyel deney tasarımı, kesirli faktöriyel deney tasarımı ve Taguchi metodu olarak sıralanabilirler [53].

Çalışmada SKNK yöntemi ile birleştirilen alüminyum alaşımı malzemelerin kaynak performansını incelemek, optimum SKNK parametre seviyelerini tayin etmek, SKNK parametrelerinin kaynak performansına etkilerini belirlemek ve parametreler arası etkileşimleri araştırmak için tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) deney tasarımı metodu kullanılmıştır.

En az iki veya daha fazla parametre ve bu parametrelere ait en az iki veya daha fazla seviyelerin bulunduğu deneylerde, seviyelerin birbirleri ile çarpımları sonucu oluşan kombinasyon düzeni esas alınarak yapılan deneysel çalışmalara tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) deney tasarımı adı verilmektedir. Bilimsel olarak deney tasarımı 3 temel prensibe dayandırılmaktadır. Bunlar; deney tekrarı, deney sırasının rasgele yapılması ve deneyin bloklaşması olarak tanımlanmaktadır [53]. Tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) deney tasarımında rastsal tam bloklaşmalar kullanılmaktadır. Bloklaşmanın temel amacı bilinmeyen ve kontrol edilemeyen

hataların deneyi etkilemesini önlemektir. Eğer bu temel prensipler yerine getirilmezse deneyde bilinmedik hataların ortaya çıkması muhtemel olmaktadır. Deney esnasında oluşabilecek hatalardan ve sapmalardan sakınmak için iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; deneylerin rasgele yapılması ve geriye dönük detayların incelenerek gerekli düzeltmelerin yapılması olarak sıralanabilmektedir [53, 54]. Tam faktöriyel deney tasarımı metodu ile ilgili çalışmalara tezin materyal ve metot bölümünde yer verilmiştir.

### 3. MATERYAL VE METOT

Yapılan çalışmada EDNK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilen alüminyum levhaların mekanik ve mikro yapı özellikleri incelenmiştir. Elde edilen veriler neticesinde her iki nokta kaynağı yönteminin mukayesesi yapılmıştır. Bununla birlikte SKNK yöntemi için farklı kaynak parametreleri ve bu parametrelere ait farklı seviye kombinasyonlarında birleştirme yapılarak optimum kaynak parametre seviyeleri tayin edilmiştir. Ayrıca SKNK yöntemi ile sağlanan bağlantıların mekanik özelliklerine etki eden kaynak parametrelerinin etkileri belirlenmiştir.

#### 3.1. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEME VE ÖZELLİKLERİ

Çalışmada EN AW – 5005 (AlMg1) alüminyum alaşımı levhalar kullanılmıştır. Bu levhalar Çuhadaroğlu Metal Sanayi ve Pazarlama A.Ş.' den tedarik edilmiştir.

Malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1.'de ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir. Çizelge 3.2.'de sertleştirme sütununda verilen O/H111 sembolü, kullanılan malzemenin tamamıyla tavlanmış olduğunu ve düşük seviyede gerilimle sertleştirildiğini ifade etmektedir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi

Element	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Diğer	Al
(%)	0.45	0.3	0.05	0.15	0.7 – 1.1	0.2	0.1	0.15	Kalan

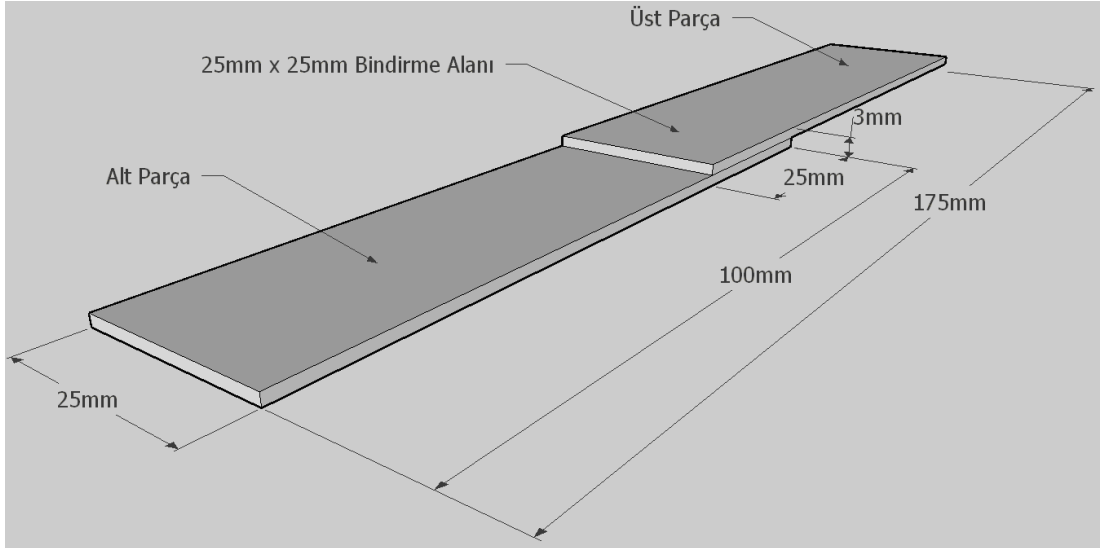
Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan malzemenin mekanik özellikleri

Sertleştirme	Akma (MPa) min - max	Çekme (MPa) min - max	Uzama (%)	Sertlik (HV)
O/H111	35 – 45	105 – 120	15	32



### 3.1.1. Çalışmada Kullanılan Numunelerin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan malzemeler 1.5 mm kalınlığına sahip standart levha şeklinde temin edilerek 100 mm × 25 mm boyutlarında kesilmiştir. Bu boyutlar daha önce yapılan benzer çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Kesilen levhalar ikişerli olarak 25 mm<sup>2</sup> bindirme alanı sağlanacak şekilde üst üste konumlandırılmıştır. Böylelikle 175 mm × 25 mm × 3 mm boyutlarına ulaşan numuneler elde edilmiştir. Kaynak işlemleri bu şekilde hazırlanan numunelere uygulanmıştır. Hazırlanan numunelerin kaynak pozisyonu ve boyutlarına ait çizim Şekil 3.1.'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Numunelerin kaynak pozisyonu ve boyutlarına ait şematik gösterim

## 3.2. EDNK YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

Hazırlanan numuneler belirlenen boyutlarda üst üste bindirme tarzında konumlandırılarak EDNK makinesinde kaynak işlemine tabii tutulmuşlardır.

### 3.2.1. EDNK Makinesi

EDNK işlemi için JXHC marka / DTN-150 model, 150 kVA gücünde, çift fazlı, 380 V, pnömatik basma tertibatlı ve su soğutmalı dijital kaynak makinesi

kullanılmıştır. EDNK işlemi için kullanılan kaynak makinesi Şekil 3.2.'de verilmiştir.

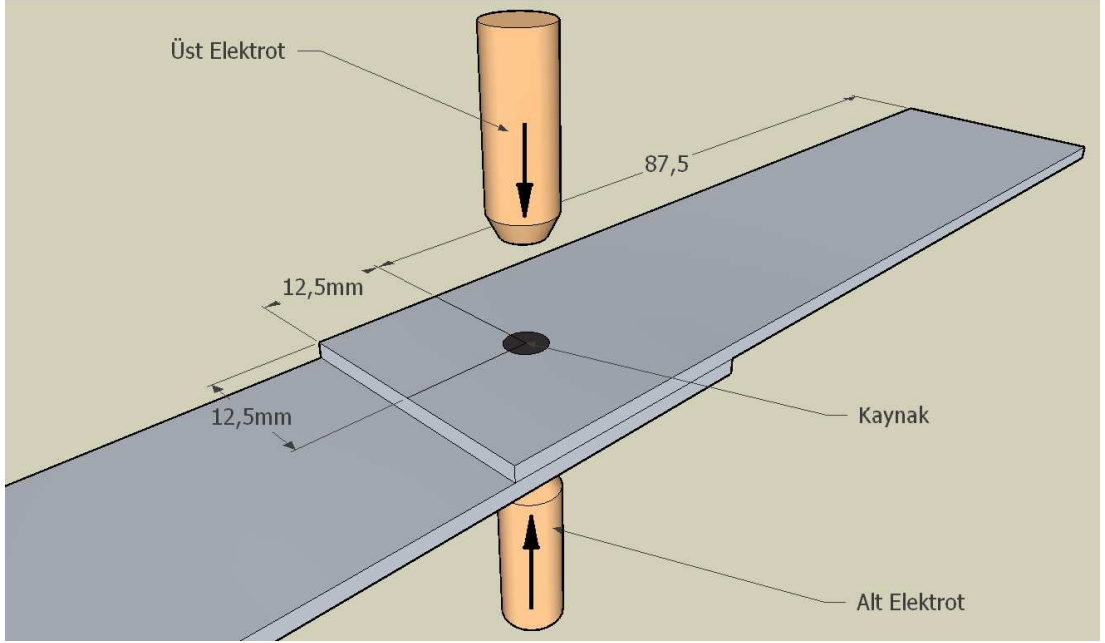


Şekil 3.2. EDNK işlemi için kullanılan kaynak makinesi

### 3.2.2. EDNK Parametre ve Seviyeleri

EDNK işlemi sabit parametre seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi için kullanılan kaynak makinesi dijital olduğu için kaynak parametre seviyeleri dijital kontrol panelinden girilmiştir. Kaynak parametre seviyeleri; temas yüzey çapı 4 mm olan saf bakır kaynak elektrotu, 2.5 kN elektrot kuvveti, 30 kA kaynak akımı, 10 çevrim sıkıştırma süresi, 7 çevrim kaynak süresi ve 10 çevrim tutma süresi olarak seçilmiştir. Bu parametre seviyeleri daha önceden yapılan benzer çalışmalar ve kullanılan kaynak makinesinin çalışma şartları dikkate alınarak belirlenmiştir.

### 3.2.3. EDNK Yöntemi ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantılar

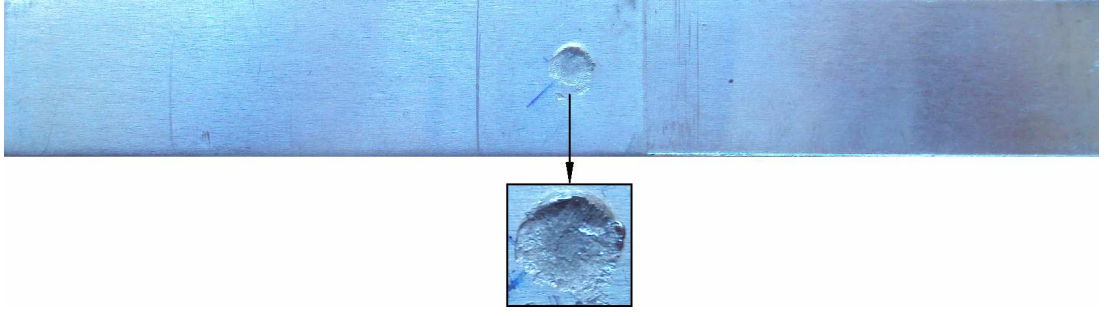


Şekil 3.3. EDNK uygulamasına ait şematik gösterim

Şekil 3.3.'de verilen EDNK uygulamasına ait şematik gösterim esas alınarak belirlenmiş kaynak parametre seviyelerinde 3 adet numune kaynak işlemine tabii tutulmuştur. Şekil 3.4.'de ve 3.5.'de sırasıyla kaynak işlemine tabii tutulmuş kaynaklı bağlantılara ait fotoğraflar verilmiştir.



Şekil 3.4. EDNK yöntemi ile birleştirilen numuneler



Şekil 3.5. EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin üstten görünüşü

EDNK işlemine tabii tutulan 3 numunenin 2 tanesi çekme deneyi için 1 tanesi ise kaynaklı bağlantının mikro sertlik ve mikro yapı araştırmaları için kullanılmıştır.

### 3.3. SKNK YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

Hazırlanan numuneler belirlenen boyutlarda üst üste bindirme tarzında konumlandırılarak SKNK makinesinde kaynak işlemine tabii tutulmuşlardır.

#### 3.3.1. SKNK Makinesi

SKNK işlemi için CNC dik işleme tezgâhı kullanılmıştır. SKNK işlemi için kullanılan CNC dik işleme tezgâhı Şekil 3.6.'da verilmiştir.



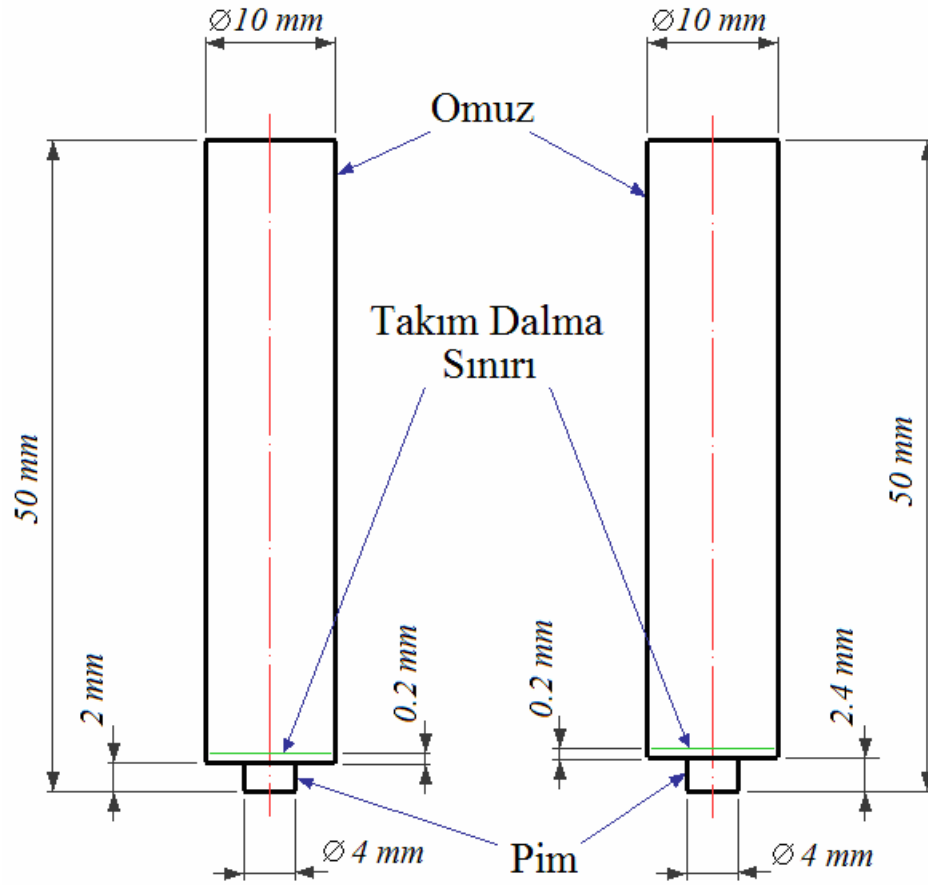
Şekil 3.6. SKNK işlemleri için kullanılan dik işleme tezgâhı

### 3.3.2. SKNK Parametre ve Seviyeleri

SKNK işlemleri sabit ve değişken parametre seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Sabit kaynak parametre seviyeleri; 4 mm takım baskı pimi çapı, düz profilli takım omuz yapısı ve 0.2 mm/sn takım dalma (ilerleme) hızı olarak belirlenmiştir. Bu sabit kaynak parametre seviyeleri tüm kaynak işlemleri süresince sabit tutulmuştur. Değişken kaynak parametre seviyeleri ise; 2.2 mm ve 2.6 mm takım dalma (ilerleme) mesafesi, 1500 dev/dak ve 2000 dev/dak takım devri, 5 sn ve 10 sn kaynak zamanı olarak belirlenmiştir. Bu sabit ve değişken parametre seviyeleri daha önceden yapılan benzer çalışmalar ve kullanılan kaynak makinesinin çalışma şartları dikkate alınarak belirlenmiştir.

### 3.3.3. SKNK Takımı

SKNK işleminde kullanılan takım için % 0.5 karbon miktarına sahip Ç 1050 takım çeliği kullanılmıştır. Takım çeliği çalışmada öngörülen boyutlarda işlenerek ısıtılma işlemine tabii tutulmuştur. Isıl işlem sonrası takımın mikro sertliği 52 HRC değerine ulaşmıştır. SKNK işlemi için farklı baskı pimi uzunluklarına sahip iki ayrı takım kullanılmıştır. Şekil 3.7.'de takım geometri ve boyutlarına ait çizim görülmektedir.



Şekil 3.7. SKNK işleminde kullanılan takımların boyutları

SKNK işleminde takım, üst üste bindirilmiş numunenin üst kısmından, yani üst parçadan Şekil 3.7.'de görüldüğü üzere takım dalma sınırına kadar daldırılmıştır. Bu dalma sınırı takım baskı piminin tamamını ve takım omzunun 0.2 mm'lik kısmı ile sınırlandırılmıştır. Bu şekilde yapılan SKNK işleminde takım baskı pimi uzunluğu ve takım omzunun numuneye dalma uzunluğu toplamı esas alınarak takım

dalma mesafeleri olan 2.2 mm ve 2.6 mm ölçüleri kaynak parametre seviyeleri olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılmak üzere imal edilip ısıtılma tabii tutulmuş kaynak takımlarının fotoğrafı Şekil 3.8.'de verilmiştir.



Şekil 3.8. SKNK işleminde kullanılan takımlar

#### 3.3.4. Tam Faktöriyel (Tam Eşlendirmeli) Deney Tasarımı

SKNK yöntemi ile birleştirilen alüminyum alaşımı malzemelerin kaynak performansını incelemek, optimum SKNK parametre seviyelerini tayin etmek, SKNK parametrelerinin kaynak performansına etkilerini belirlemek ve parametreler arası etkileşimleri araştırmak için tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) deney tasarımı metodu kullanılmıştır.

Tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) deney tasarımı metodunun yapılan çalışmada kullanılması ile ilgili bilgilerden önce bu metoda ait deney tasarımı notasyonunun tanıtılması uygun görülmüştür. Tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) deney tasarımı notasyonuna göre kalite değişkeni *Y* harfi ile temsil edilmiştir. Kaynak parametreleri alfabenin büyük harfleriyle ve parametrelere ait seviye sayıları

alfabenin küçük harfleriyle gösterilmiştir. Ayrıca parametre sayısı  $k$ , gözlem sayısı  $n$  ve tekrar sayısı  $r$  harfleriyle ifade edilmiştir. Buradaki  $n$  gözlem sayısı kaynak parametreleri seviye sayılarının ve  $r$  tekrar sayısının çarpımının sonucu olarak belirlenmiştir [54].

Yapılan çalışmada kalite değişkeni olarak maksimum kesme makaslama kuvveti seçilmiştir. Bu kuvvetin en büyük değeri en mukavemetli kaynaklı birleştirme anlamına geleceği için en büyük kesme makaslama kuvvetinin değeri çalışmada optimum değer olarak nitelendirilmiştir. Bu kalite değişkeni kaynaklı birleştirmelere uygulanan çekme deneyi sonucu elde edilmiştir. Maksimum kesme makaslama kuvvetini etkilemesi muhtemel kaynak parametreleri ve bunlara ait seviyeler, SKNK parametre ve seviyeleri başlığı altında verilen değişken parametre seviyeleri olarak belirlenmiştir. Buna göre maksimum kesme makaslama kuvvetini etkilemesi muhtemel kaynak parametre seviyeleri; 2.2 mm ve 2.6 mm takım dalma (ilerleme) mesafesi, 1500 dev/dak ve 2000 dev/dak takım devri, 5 sn ve 10 sn kaynak zamanı olarak kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada, deneyler tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) olarak tasarlanmıştır. Deneyde adları A (takım dalma mesafesi), B (takım devri) ve C (kaynak zamanı) olan üç parametre ve her bir parametreye ait 2 seviye sayısı bulunduğu için, tam faktöriyel (tam eşlendirme) sonucunda  $a \cdot b \cdot c = 2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$  kombinasyon oluşmuştur. Bu nedenle bu deneyler L8 deneyleri olarak adlandırılmıştır [54].

Çalışmada tekrar sayısı 2 olarak seçilmiştir. Böylelikle her kombinasyondan 2 adet numune denenerek toplam gözlem sayımız buna göre belirlenmiştir. Yukarıda verilen bilgileri deney tasarımı notasyonuna göre düzenlediğimizde;

Y = Maksimum kesme makaslama kuvveti (en büyük değeri en iyi)

A = Takım dalma mesafesi

B = Takım devri



C = Kaynak zamanı

a = 2 ( 2.2 mm ve 2.6 mm olmak üzere A'nın seviye sayısı)

b = 2 (1500 dev/dak ve 2000 dev/dak olma üzere B'nin seviye sayısı)

c = 2 (5 sn ve 10 sn olmak üzere C'nin seviye sayısı)

k = 3

r = 2

n = a . b . c . r = 2 . 2 . 2 . 2 = 16, verilerine ulaşılmıştır.

Tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) deney tasarımında kullanılan parametre seviyeleri Çizelge 3.3.' de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan parametreler ve seviyeleri

	<b>SKNK PARAMETRELERİ</b>		
<b>SEVİYELER</b>	<b>(A) Takım Dalma Mesafesi (mm)</b>	<b>(B) Takım Devri (dev/dak)</b>	<b>(C) Kaynak Zamanı (sn)</b>
<b>ALT</b>	2.2	1500	5
<b>ÜST</b>	2.6	2000	10

Tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) deney tasarımı notasyonuna göre iki seviyeli deneylerde, seviyenin biri alt seviye, diğeri üst seviye olarak adlandırılmıştır. Parametrelere ait alt seviye “ – “ ve üst seviye “ + “ işaretleri kullanılarak temsil edilmiştir. Parametreler arası etkileşim grafikleri incelenirken “ – “ ve “ + “ işaretleri yerine sırasıyla aynı anlamı ifade eden “ 1 “ ve “ 2 “ rakamları kullanılmıştır [54]. Bu açıklamadan sonra L8 deneyi parametre seviye kombinasyonları Çizelge 3.4.' de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan L8 deneyi parametre seviye kombinasyonları

(A) Takım Dalma Mesafesi	(B) Takım Devri	(C) Kaynak Zamanı
-	-	-
-	-	+
-	+	-
-	+	+
+	-	-
+	-	+
+	+	-
+	+	+

Tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) deneylerde kombinasyonların tümü denenmiştir. Tekrar sayısı  $r = 2$  olduğu için her bir kombinasyondan 2 adet gözlem değeri, yani maksimum kesme makaslama kuvveti alınmıştır. İstatistiksel olarak tasarlanmış L8 deney matrisi Çizelge 3.5.'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. İstatistiksel olarak tasarlanmış L8 deney matrisi

DENEY NO	(A) Takım Dalma Mesafesi (mm)	(B) Takım Devri (dev/dak)	(C) Kaynak Zamanı (sn)
1	2.2	1500	5
2	2.2	1500	10
3	2.2	2000	5
4	2.2	2000	10
5	2.6	1500	5
6	2.6	1500	10
7	2.6	2000	5
8	2.6	2000	10

Çizelge 3.5.'deki parametre kolonlarına atanan seviye değerleri Çizelge 3.4.'deki kolonlara karşılık gelen “ - “ ve “ + “ işaretlerine göre belirlenmiştir.

Örnek olarak Çizelge 3.4.'deki B (takım devri) parametre sütununun 3. satırına karşılık gelen “ + “ işareti, B (takım devri) parametresinin üst seviyesi anlamını taşımaktadır. Bundan dolayı Çizelge 3.5.'deki B (takım devri) parametre sütunun 3. satırı 2000 dev/dak olarak atanmıştır. Diğer kolonlar da anlatılanlarla benzer şekilde doldurulmuştur. Bu şekilde tasarlanan L8 deney matrisinde her üç parametre seviyeleri deney sırasında değiştirilmiştir. Örnek olarak Çizelge 3.5.'deki 1. deney A (takım dalma mesafesi), B (takım devri) ve C (kaynak zamanı) parametreleri sırasıyla 2.2 mm, 1500 dev/dak ve 5 sn seviyelerinde yapılmışken, 6. deneyde bu parametre seviyeleri sırasıyla 2.6 mm, 1500 dev/dak ve 10 sn seviyelerinde yapılmıştır. Diğer deneyler de Çizelge 3.5.'de tasarlanan deney matrisine göre yapılmıştır.

Yukarıda belirtildiği gibi yapılan deneylerle elde edilen SKNK bağlantıları çekme deneyine tabii tutularak her bir deney, yani parametreler ve bunlara ait seviyeleri için *Y* kalite değişkeni (maksimum kesme makaslama kuvveti) tespit edilmiştir. Deneyler, deney sırasına göre değil rasgele belirlenen bir sıralamaya göre yapılmıştır. Tespit edilen maksimum kesme makaslama kuvvetleri hem EDNK bağlantıları ile mukayese amaçlı hem de SKNK bağlantılarının optimum kaynak parametrelerinin tayin edilmesinde kullanılmıştır. Bununla birlikte SKNK parametrelerinin kaynak performansına etkilerini belirlemek ve parametreler arası etkileşimleri araştırmak için L8 hesap tablosu adı verilen tabloya göre bu etki ve etkileşimler araştırılmıştır.

A (takım dalma mesafesi), B (takım devri) ve C ( kaynak zamanı) kaynak parametrelerinin kalite değişkeni olan maksimum kesme makaslama kuvveti, yani kaynak performansına etkileri ile parametreler arası etkileşimlerin hesaplanmasında kullanılan L8 hesap tablosu Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. L8 hesap tablosu [54]

Standart Sıra	Gözlem Değeri	A		B		C		AB		AC		BC		ABC	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1			■		■		■		■		■		■		■
2						■					■		■	■	
3				■			■		■	■			■	■	
4			■	■		■			■		■	■			■
5		■			■		■				■	■		■	
6					■	■			■	■			■		■
7				■			■		■		■		■		■
8		■		■		■		■		■		■		■	
<b>Toplam</b>															
<b>Sayı</b>	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<b>Ortalama</b>															
<b>Etki</b>															
<b>Sıra</b>															

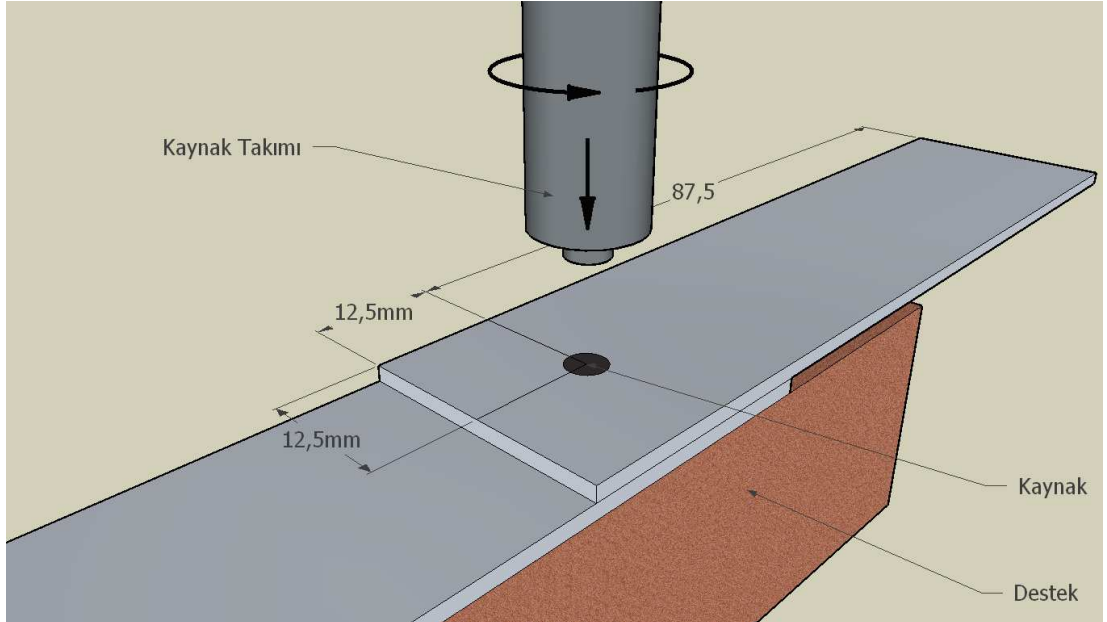
Çizelge 3.6.'da verilen L8 hesap tablosunun doldurulması için işlem basamakları verilmiştir. Bu işlem basamakları;

1. Deneyin uygulaması bitirilip veriler elde edildikten sonra, veriler L8 hesap tablosunun gözlem değerleri kolonuna sırasıyla atanır.
2. Gözlem değeri kolonundaki her değer, aynı satırdaki boş hücrelere atanır.
3. Her kolonun toplamı alınarak toplam satırına atanır.
4. Toplamları, kendi kolonlarındaki sayılara bölerek ortalamalar bulunur ve ortalama satırına atanır.
5. Her etki kolonundaki seviye 2 ortalamasından seviye 1 ortalaması çıkartılarak etki değerleri bulunur ve etki satırına atanır.
6. Etki değerleri cebirsel sıraya konur; en eksi değer “ 1 “ ve en artı değere “ 7 “ sıra numarası verilerek sıra numaraları sıra satırına atanır.

7. Sıra numaraları için dikey eksen, etki değerleri için yatay eksen kullanılarak normal olasılık grafiği oluşturulur ve noktalar grafiğe işlenir.
8. Noktaların sıfıra yakınlık bakımından en küçük yaklaşık yarısı kullanılarak bu noktalara en yakın geçecek biçimde bir doğru çizilir.
9. Noktaların doğruya göre konumlarına bakarak önemli etkiler belirlenir. Bu etkilerin değeri ya aşırı artı ya da aşırı eksidir.
10. Belirlediğimiz etkiler arasında etkileşimler varsa etkileşim grafikleri çizilerek etkileşimler yorumlanır [54].

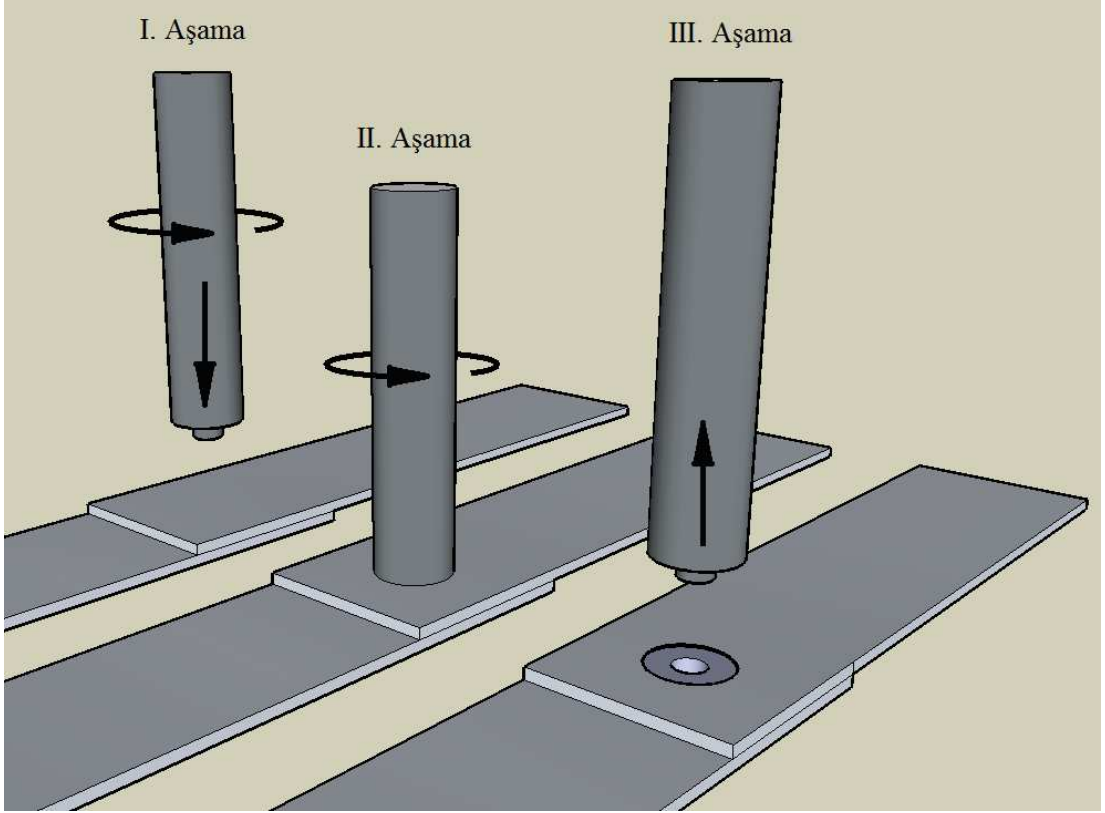
Bir parametrenin kalite değişkenine olan etkisi, diğer bir parametrenin hangi seviyede bulunduğuna bağlı ise bu durum iki parametre arasında etkileşim var anlamına gelmektedir [54]. Deneysel tasarım çalışması altında yapılan tüm araştırmalardan elde edilen verilere ve bu verilerin yorumlarına tezin bulgular ve tartışma bölümünde yer verilmiştir.

### 3.3.5. SKNK Yöntemi ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantılar



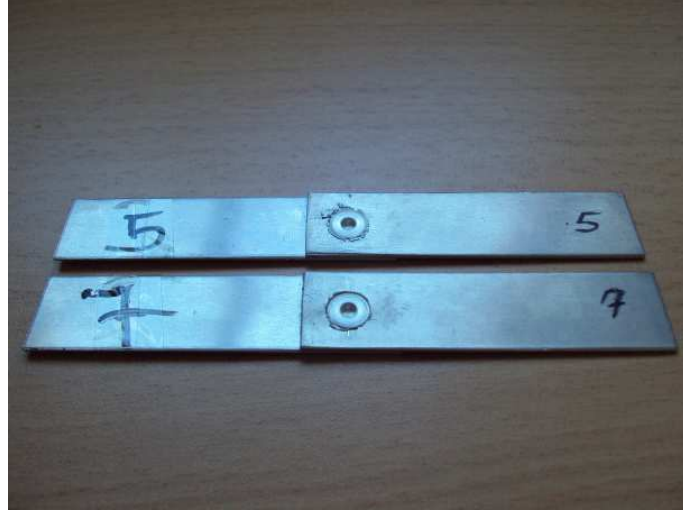
Şekil 3.9. SKNK uygulamasına ait şematik gösterim

Şekil 3.9.'da verilen SKNK uygulamasına ait şematik gösterim esas alınarak belirlenmiş kaynak parametre seviyelerinde 24 adet numune kaynak işlemine tabii tutulmuştur. Şekil 3.10.'da SKNK işleminin aşamaları şematik olarak verilmiştir.

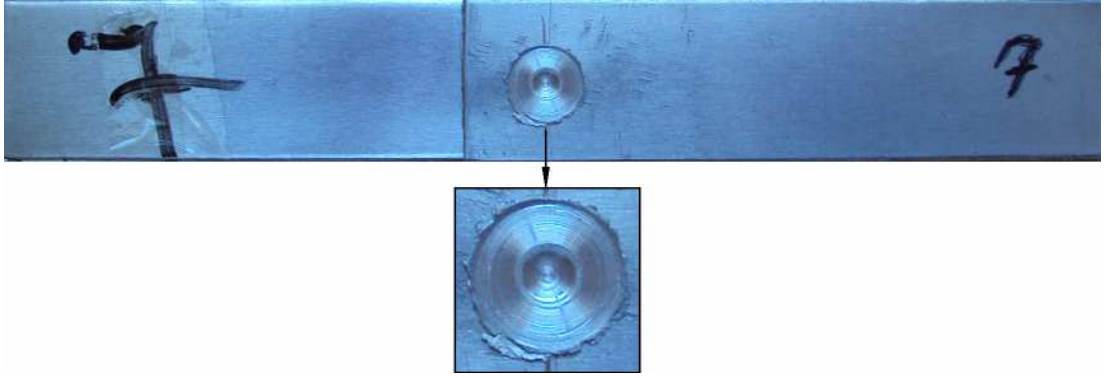


Şekil 3.10. SKNK işleminin aşamaları

Şekil 3.10.'da görüleceği gibi I. aşamada, dikey freze tezgâhına bağlanan kaynak takımı belli bir devirde dönerken aynı zamanda dikey olarak kaynağı yapılacak numuneye doğru ilerletilmiştir. II. aşamada, kaynak takımı belirlenen mesafede (belirlenen takım dalma sınırına kadar) numuneye daldırılmıştır. Bu aşamada alttaki ve üstteki alüminyum alaşımı malzemeler arasında mekanik bir kilitlenme sağlanmıştır. Değişken kaynak parametrelerinde yer alan kaynak zamanı parametre seviyelerinin değerleri II. aşamada geçen süre esas alınarak ifade edilmiştir. III. aşamada, SKNK işlemini tamamlayan kaynak takımı hızlı bir şekilde numunelerden uzaklaştırılmış ve bu şekilde kaynak işlemi tamamlanmıştır. Şekil 3.11.'de ve 3.12.'de sırasıyla kaynak işlemine tabii tutulmuş kaynaklı bağlantılara ait fotoğraflar verilmiştir.



Şekil 3.11. SKNK yöntemi ile birleştirilen numuneler



Şekil 3.12. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin üstten görünüşü

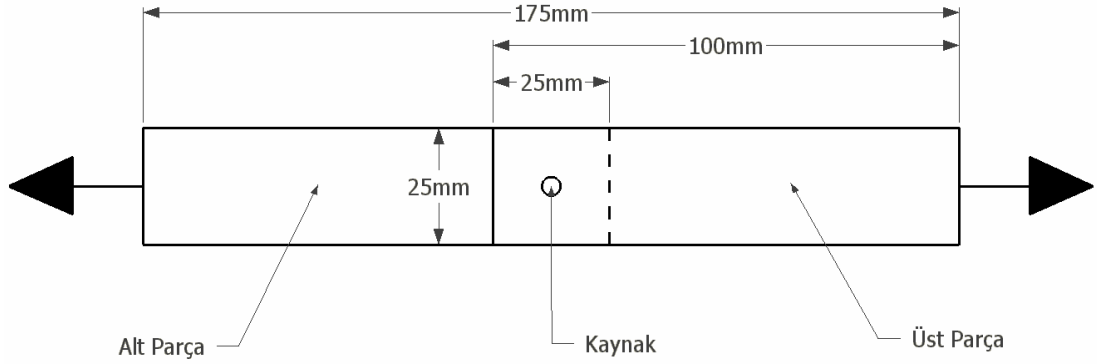
SKNK işlemi tabii tutulan 24 numune L8 deney matrisi düzenine göre birleştirilmiştir. L8 deney matrisi düzeninde yer alan 8 adet deney ve her deneyden tekrar sayısı olan 2 tane numune birleştirildiğinden dolayı toplam 16 adet numune çekme deneyi için kullanılmıştır. Bu 16 numune içinden çekme deneyi sonucu maksimum kesme makaslama kuvvetini veren numune ile aynı parametre seviyelerine sahip 1 tane numune ise kaynaklı bağlantının mikro sertlik ve mikro yapı araştırmaları için kullanılmıştır.

### 3.4. MEKANİK DENEYLER

Çalışmada EDNK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilen alüminyum alaşımı numunelerin mekanik ve mikro yapı özelliklerinin incelenmesi için numunelere çekme testi deneyi ve mikro yapı sertlik ölçüm testi uygulanmıştır. Ayrıca numunelerin mikro yapı görüntülerini elde etmek için numuneler metal mikroskobu ile incelenmiştir.

#### 3.4.1. Çekme Testi Deneyi

EDNK ve SKNK yöntemi ile birleştirilen numuneler Şekil 3.13.'de verilen şematik gösterimdeki gibi çekme deneyine tabii tutulmuşlardır.



Şekil 3.13. Kaynaklı bağlantıların çekme deneyi pozisyonu

Çekme deneyleri INSTRON marka 8801 model çekme test cihazında uygulanmıştır. Cihaz 100 kN yük kapasiteli hidrolik çekme tertibatına sahiptir. Cihazdan elde edilen veriler BLUEHILL marka malzeme test yazılımı aracılığı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Kaynak işlemine tabii tutulmuş numuneler ile birlikte 1 adet kaynak işlemi görmemiş esas malzemeye de çekme testi uygulanmıştır. Bunun nedeni kaynaklı malzemeler ile esas malzemenin mukayesesini yapmak ve elde edilen veriler neticesince numunelerin kaynak performansını değerlendirmektir. Çekme test cihazına ait fotoğraf Şekil 3.14.'de verilmiştir.

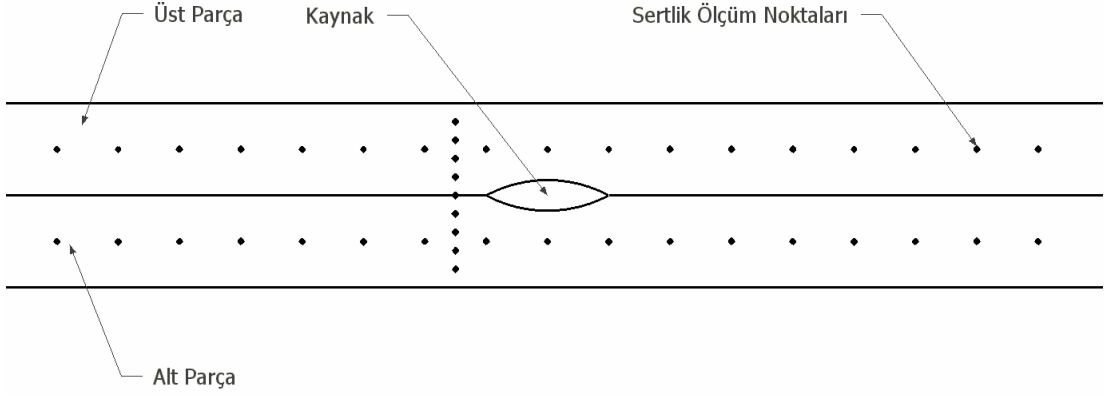




Şekil 3.14. Çekme deneyi için kullanılan çekme test cihazı

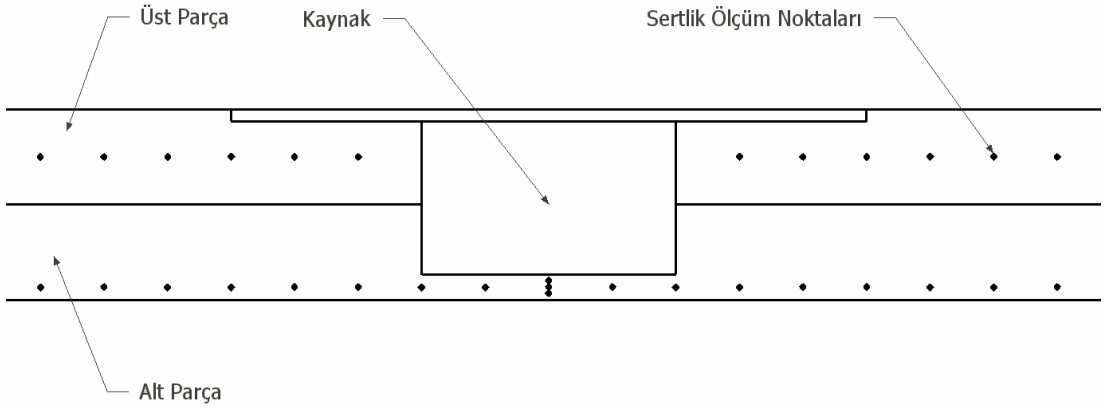
#### 3.4.2. Mikro Sertlik Testi Deneyi

EDNK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilen numuneler kaynak çekirdeği merkezinden boyuna kesilmişlerdir. Yüzeyleri sırasıyla 240, 400, 800, 1000 ve 1200 grid zımpara ile zımparalanmış ve parlatılmıştır. Mikro sertlik testi oda sıcaklığında 50 gr yük ve batıcı ucun sertlik ölçümü alınacak noktalarda 15 sn bekletilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik ölçümler 1 adet EDNK yöntemi ile birleştirilen numuneye ve 1 adet maksimum kesme makaslama kuvvetini elde ettiğimiz SKNK yöntemi ile birleştirilen numune ile aynı parametre seviyelerine sahip numuneye yapılmıştır. EDNK yöntemi ile birleştirilen numune Şekil 3.15.'de verilen şematik gösterimdeki gibi mikro sertlik testine tabii tutulmuştur.



Şekil 3.15. EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin sertlik ölçüm pozisyonu

Şekil 3.15.'de görüldüğü gibi üst ve alt parçalardan kaynak merkezinden başlayarak sağa ve sola doğru 1 mm aralıklarla sertlik ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümler üst ve alt parçada 17 adet olmak üzere toplam 34 noktadan alınmıştır. Ayrıca numunenin kesitine dik doğrultuda üst ve alt parçalardan geçen 0.3 mm aralıklarla toplam 9 adet noktada sertlik ölçümü alınarak test tamamlanmıştır. SKNK yöntemi ile birleştirilen numune ise Şekil 3.16.'da verilen şematik gösterimdeki gibi mikro sertlik testine tabii tutulmuştur.



Şekil 3.16. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin sertlik ölçüm pozisyonu

Şekil 3.16.'da görüldüğü gibi üst ve alt parçalardan kaynak merkezinden başlayarak sağa ve sola doğru 1 mm aralıklarla sertlik ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümler üst parçada 12 adet ve alt parçada 17 adet olmak üzere toplam 29 noktadan alınmıştır. Ayrıca alt parçadan numunenin kesitine dik doğrultuda 0.1 mm aralıklarla toplam 3 adet sertlik ölçümü alınarak test tamamlanmıştır.

Kaynaklı numunelerin mikro sertlik testleri MICROHARDNESS TESTER HV-1000 marka test cihazında yapılmıştır. Mikro sertlik test cihazına ait fotoğraf Şekil 3.17.'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Sertlik ölçümleri için kullanılan mikro sertlik test cihazı

### 3.4.3. Mikro yapı İncelemesi

EDNK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilen numunelerin görsel olarak incelenecek yüzeyleri parlatılmıştır. Parlatma işleminin ardından mikro yapı görüntüleri alabilmek amacı ile yüzeyler %30 HCl, %60 HF ve %10 saf su içeren 150 ml asit çözeltisinde 60 sn süre ile dağlanmıştır.

Mikro yapıları incelenen numuneler mikro sertlik ölçümlerine tabii tutulan numunelerdir. Bu numunelere ait kaynak bölgesinin mikro yapısı L2003A REFLECTED LIGHT METALLURGICAL MICROSCOPE marka metal mikroskobu ile incelenmiştir. Mikro yapı görüntüleri, çalışmada kullanılan metal mikroskobuna aparatlar vasıtası ile monte edilen MOTIC marka kamera ile alınmıştır. Çalışmada kullanılan metal mikroskobuna ait fotoğraf Şekil 3.18.'de verilmiştir.



Şekil 3.18. Mikro yapı görüntülerin incelenmesinde kullanılan metal mikroskobu

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada 1.5 mm kalınlığına sahip EN AW – 5005 (AlMg1) alüminyum alaşımı numuneler EDNK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilmiştir.

Çalışmanın EDNK bölümünde, alüminyum alaşımı numuneler sabit kaynak parametre seviyelerinde üst üste bindirme tarzında konumlandırılarak EDNK işlemine tabii tutulmuştur. 2 tanesi çekme testi deneyinde ve 1 tanesi mikro sertlik testi deneyi ile mikro yapı incelemesinde kullanılmak üzere toplam 3 adet EDNK numunesi ile çalışılmıştır. EDNK yönteminin çalışmadaki kullanım amacı, SKNK yöntemi ile mukayesesinin yapılarak elde edilen verilen tartışılmasıdır.

Çalışmanın SKNK bölümünde ise, alüminyum alaşımı malzemeler sabit kaynak parametre seviyeleri ile birlikte değişken kaynak parametre seviyelerinde üst üste bindirme tarzında konumlandırılarak SKNK işlemine tabii tutulmuşlardır. Her iki kaynak yönteminde birleştirilen numunelerin boyutları aynı tutulmuştur. Numunelerin SKNK yöntemi ile birleştirilmelerinde kullanılan kaynak parametreleri ve bu parametrelere ait seviyeler önceki çalışmalar ve kullanılan kaynak makinesinin limitleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Ayrıca bu parametre seviyelerinin belirlenmesinde bir dizi ön deney yapılarak en uygun parametre seviyelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. SKNK yönteminde kullanılan değişken kaynak parametre seviyeleri, deneysel tasarım çalışmalarında kullanılan tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) deney tasarımı metodunda yer alan L8 deney matrisine göre düzenlenmiştir. Bu deney düzenine göre 3 parametre ve her bir parametreye ait 2 seviye kendi aralarında kombinasyon oluşturarak bütün seviyelerin birbirleriyle denenmesini sağlamıştır. Bu bağlamda her grupta 8 numune olmak üzere 3 adet grup SKNK yöntemi ile birleştirilmiştir. 2 gruptan oluşan 16 numune çekme testi deneyinde kullanılmıştır. Geriye kalan 1 grup, yani 8 numune içinden, çekme testi deneyi sonucu maksimum kesme makaslama kuvveti elde edilen numunenin parametre seviyeleri ile aynı olan numune alınarak mikro sertlik testi deneyi ile mikro yapı incelemesinde kullanılmıştır.

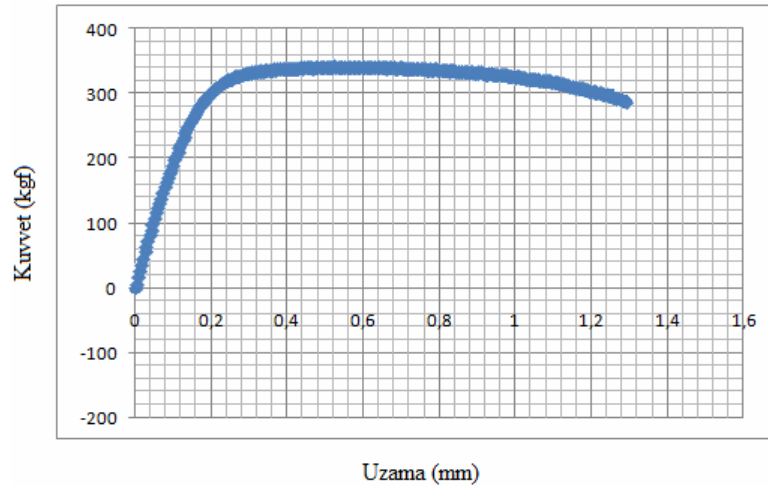
EDNK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilen numunelerin kaynak performansını belirlemek için çekme testi deneyi, mikro sertlik testi deneyi ve kaynak bölgelerinin mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Bu deney ve incelemelerin ışığında elde edilen verilere göre her iki kaynak yönteminin mekanik özellikleri açısından mukayesesi yapılmıştır. Ayrıca SKNK yöntemi ile birleştirilen numunelerin, çekme testi deneyi sonucu kesme makaslama kuvveti esas alınarak optimum kaynak parametre seviyeleri tayin edilmiş ve SKNK bağlantılarının mekanik özelliklerine etki eden parametre etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

#### 4.1. KAYNAK PERFORMANSI

EDNK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilen numunelerin kaynak performansı, çekme testi deneyi ile elde edilen maksimum kesme makaslama kuvveti baz alınarak saptanmıştır. Her iki kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin kaynak performansını değerlendirmek için çekme testi deneyine tabii tutulan esas metale ait maksimum çekme kuvveti değeri Çizelge 4.1. ve kuvvet – uzama diyagramı Şekil 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Esas metale ait çekme kuvveti değeri

Malzeme	Maksimum Çekme Kuvveti (N)
EN AW – 5005	3340



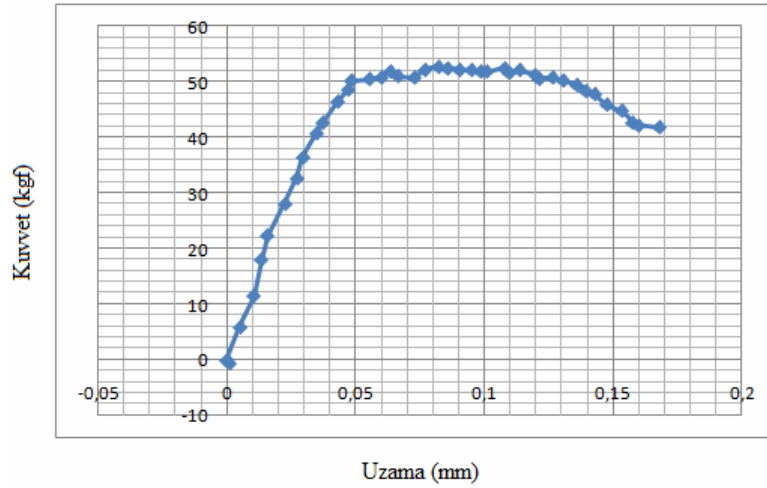
Şekil 4.1. Esas metale ait kuvvet – uzama diyagramı

EDNK yöntemi ile birleştirilen numunelere ait maksimum kesme makaslama kuvveti değerleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. EDNK yöntemi ile birleştirilen numunelere ait çekme kuvveti değerleri

Yöntem	1. Numuneye Ait Maksimum Kesme Makaslama Kuvveti (N)	2. Numuneye Ait Maksimum Kesme Makaslama Kuvveti (N)	Ortalama Kesme Makaslama Kuvveti (N)
EDNK	520	460	490

Sabit kaynak parametre seviyelerinde gerçekleşen EDNK bağlantılarının maksimum kesme makaslama kuvvetleri incelendiği zaman esas metale nazaran oldukça düşük kaynak performansı sergiledikleri gözlemlenmiştir. EDNK yöntemi ile birleştirilen 1. numuneye ait kuvvet – uzama diyagramı Şekil 4.2.'de görülmektedir.



Şekil 4.2. EDNK yöntemi ile birleştirilen 1. numuneye ait kuvvet – uzama diyagramı

SKNK yöntemi ile birleştirilen numuneler, tezin materyal ve metot bölümünde yer alan SKNK parametre ve seviyeleri esas alınarak tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) deney tasarımı çerçevesinde belirli bir deney planına göre düzenlenmiştir. Her bir deneyden iki adet numune hazırlanarak çekme testi deneyine

tabii tutulmuştur. Bu numuneler 1.1. ve 1.2. şeklinde ikili sayı sistemi ile ifade edilmiştir. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunelere ait maksimum kesme makaslama kuvveti değerleri Çizelge 4.3.'de verilmiştir.

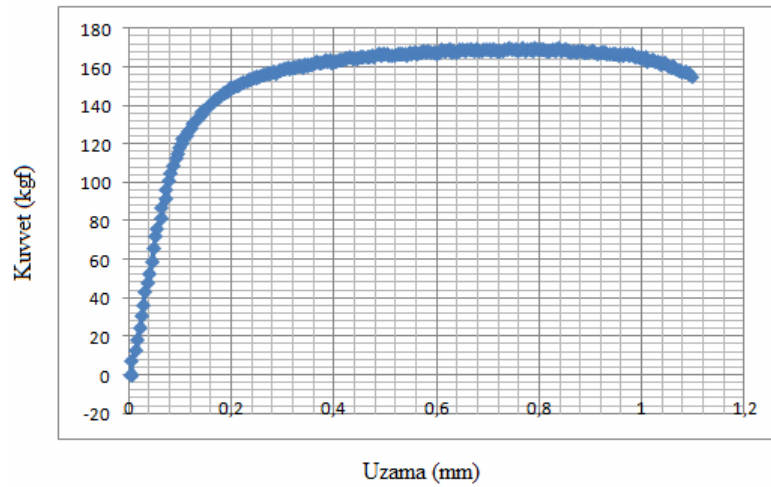
Çizelge 4.3. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunelere ait çekme kuvveti değerleri

Yöntem	Deney No	(A) Takım Dalma Mesafesi (mm)	(B) Takım Devri (dev/dak)	(C) Kaynak Süresi (sn)	Maksimum Kesme Makaslama Kuvveti (N)	Ortalama Kesme Makaslama Kuvveti (N)
SKNK	1.1.	2.2	1500	5	750	875
SKNK	1.2.				1000	
SKNK	2.1.	2.2	1500	10	630	715
SKNK	2.2.				800	
SKNK	3.1.	2.2	2000	5	850	865
SKNK	3.2.				880	
SKNK	4.1.	2.2	2000	10	880	880
SKNK	4.2.				880	
SKNK	5.1.	2.6	1500	5	780	845
SKNK	5.2.				910	
SKNK	6.1.	2.6	1500	10	1660	<b>1660</b>
SKNK	6.2.				1660	
SKNK	7.1.	2.6	2000	5	1220	1290
SKNK	7.2.				1360	
SKNK	8.1.	2.6	2000	10	1390	1265
SKNK	8.2.				1140	

Değişken kaynak parametre seviyelerinde gerçekleşen SKNK bağlantılarının maksimum kesme makaslama kuvvetleri incelendiği zaman takım dalma mesafesinin artırılması ile birlikte bağlantıların kaynak performansında büyük ölçüde artış olduğu saptanmıştır. Çizelge 4.3.'de görüldüğü gibi en büyük ortalama kesme makaslama kuvvetinin 6.1. ve 6.2. deney numaralarına sahip numunelere ait olduğu

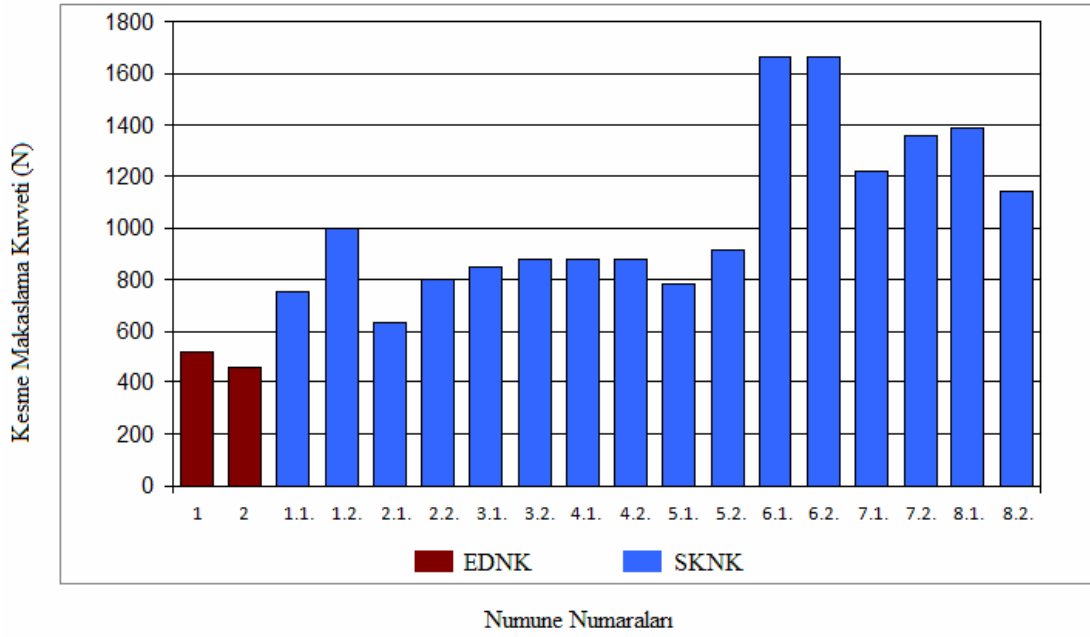


belirlenmiştir. Bundan dolayı SKNK bağlantılarına ait optimum kaynak parametre seviyelerinin 2.6 mm takım dalma derinliği, 1500 dev/dak takım devri ve 10 sn kaynak zamanı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca SKNK bağlantılarının maksimum kesme makaslama kuvvetleri incelendiği zaman esas metale nazaran daha düşük kaynak performansı sergiledikleri gözlemlenmiştir. Bununla birlikte Çizelge 4.2. ve 4.3. incelenerek, EDNK ile SKNK yöntemlerinin kaynak performansı açısından mukayeseleri yapılmıştır. Çizelgelerden de görüldüğü gibi SKNK yöntemi ile elde edilen bağlantıların ortalama kesme makaslama kuvvet değerleri EDNK yöntemi ile elde edilen bağlantıların ortalama kesme makaslama kuvvet değerinden yaklaşık olarak en az 2 ve en fazla 4 kat daha büyük olduğu saptanmıştır. Bundan dolayı SKNK bağlantılarının EDNK bağlantılarına nazaran daha yüksek bir kaynak performansı sergiledikleri sonucuna ulaşılmıştır. SKNK yöntemi ile birleştirilen ve en büyük kesme makaslama kuvvet değeri elde edilen numunelerden, 6.1. deney numarasına sahip numuneye ait kuvvet – uzama diyagramı Şekil 4.3.’de görülmektedir.



Şekil 4.3. SKNK yöntemi ile birleştirilen 6.1. deney numaralı numuneye ait kuvvet – uzama diyagramı

Kaynak performansı hakkında daha iyi bir değerlendirme yapabilmek için EDNK ve SKNK bağlantılarına ait maksimum kesme makaslama kuvveti değerlerini bir arada gösteren grafik Şekil 4.4.’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Numunelere ait maksimum kesme makaslama kuvveti değişimleri

EDNK ve SKNK yöntemi ile birleştirilen alüminyum alaşımı bağlantıların kaynak performansını tayin etmek için yapılan çekme testi deneyleri sonucunda elde edilen maksimum kesme makaslama kuvveti değerleri, benzer bir çalışma yapan Kahraman'ın [30] yüksek lisans çalışmasında yer verdiği değerlerle doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte SKNK uygulamalarında takım dalma mesafesinin artırılması ile bağlantıların kaynak performansında ciddi bir artışın sağlandığı sonucu Tozaki ve ark. [24] tarafından yapılan çalışma ile benzer sonuçlar vererek tezimizi desteklemektedir.

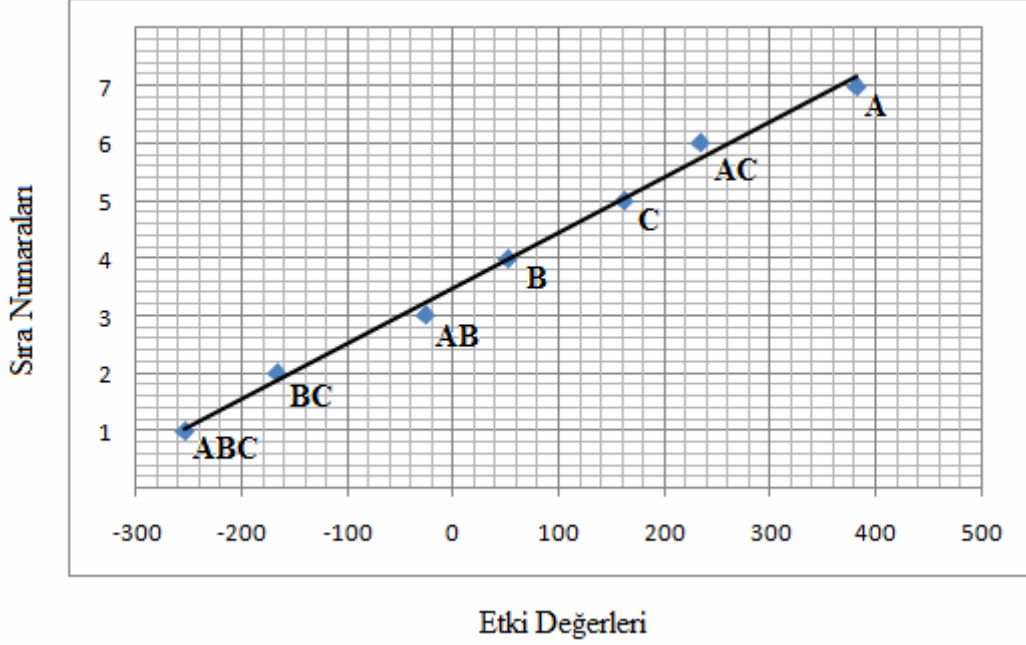
#### 4.1.1. SKNK Parametrelerinin Kaynak Performansına Etkileri

SKNK parametrelerinin kaynak performansına etkilerini belirlemek ve parametreler arası etkileşimleri araştırmak için tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) deney tasarımı metodu kullanılmıştır. Tezin materyal ve metot bölümünde yer alan tam faktöriyel (tam eşlendirmeli) deney tasarımı başlığı altında açıklanan metot kapsamında kullanılan L8 hesap tablosunun elde edilen maksimum kesme makaslama kuvveti verileri ile doldurulmuş hali Çizelge 4.4.'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Elde edilen veriler ile doldurulmuş L8 hesap tablosu

Standart Sıra	Gözlem Değeri	A		B		C		AB		AC		BC		ABC	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	875	875		875		875		875	875	875		875	875	875	
2	715	715		715		715		715	715	715		715	715	715	
3	865	865		865		865		865	865	865		865	865	865	
4	880	880		880		880		880	880	880		880	880	880	
5	845	845		845		845		845	845	845		845	845	845	
6	1660	1660		1660		1660		1660	1660	1660		1660	1660	1660	
7	1290	1290		1290		1290		1290	1290	1290		1290	1290	1290	
8	1265	1265		1265		1265		1265	1265	1265		1265	1265	1265	
<b>Toplam</b>	8395	3335	5060	4095	4300	3875	4520	4250	4145	3730	4665	4530	3865	4705	3690
<b>Sayı</b>	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<b>Ortalama</b>	1049.37	884	1265	1024	1075	969	1130	1063	1036	933	1166	1133	966	1176	923
<b>Etki</b>		381.25		51.25		161.25		-26.25		233.75		-166.25		-253.75	
<b>Sıra</b>		7		4		5		3		6		2		1	

Çizelge 4.4.'de yer alan etki ve sıra satırlarındaki değerler baz alınarak çizilen normal olasılık grafiği Şekil 4.5.'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Normal olasılık grafiği

Şekil 4.5.'de görüldüğü gibi A, B ve C sırasıyla takım dalma mesafesi, takım devri ve kaynak zamanı parametrelerini ifade edip ana etki olarak belirtilmiştir. AB, AC, BC ve ABC ise bu parametreler arasındaki etkileşimler olarak tanımlanmıştır.

Şekil 4.4. baz alınarak belirlenen önemli ana etkiler ve etkileşimlerin değeri ya aşırı artı ya da aşırı eksi olarak deney tasarımı notasyonunda belirtilmiştir. Bu çerçevede Şekil 4.4. incelendiği zaman kaynak performansına en önemli ana etkinin A (takım dalma mesafesi) olduğu saptanmıştır. Pozitif etkiye sahip olan A (takım dalma derinliği) parametresi, daha öncede belirtildiği üzere arttırılırsa kaynak performansı açısından daha büyük kesme makaslama kuvveti elde edileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca C (kaynak süresi) parametresinin de kaynak performansı üzerine pozitif etkisi olduğu görülmüştür. Ancak bu etkinin A (takım dalma mesafesi) parametresine nazaran daha az bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte B (takım devri) parametresinin kaynak performansı üzerine etkisinin diğer ana etkilere göre oldukça az olduğu gözlemlenmiştir.

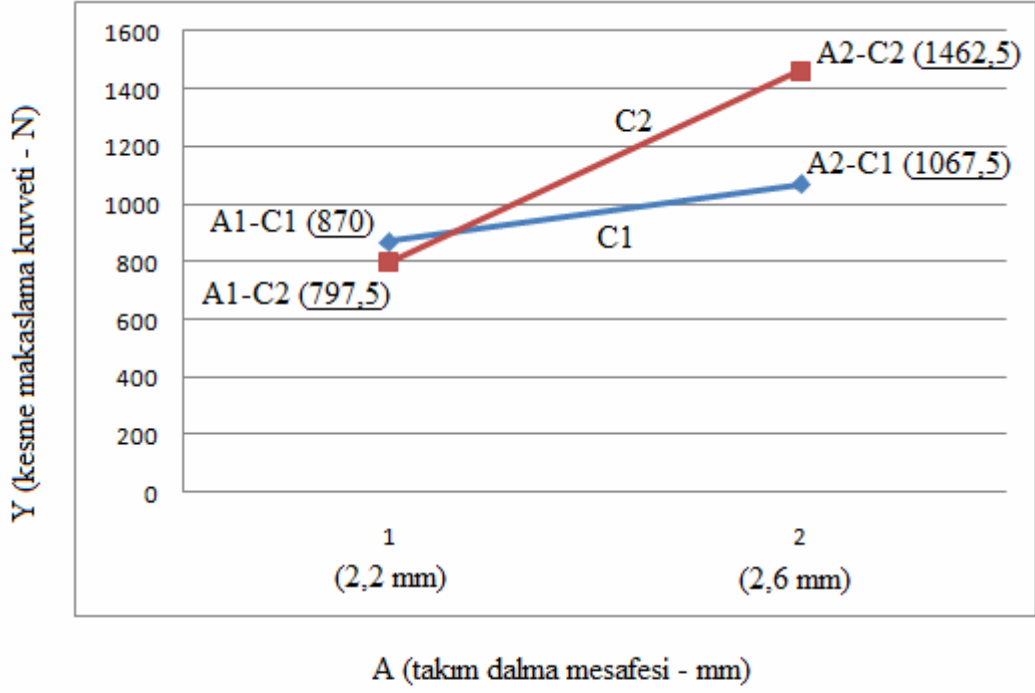
Parametreler arası etkileşimler incelendiği zaman ise en önemli etkileşimlerin sırasıyla pozitif yönden AC (takım dalma mesafesi – kaynak zamanı) ve negatif yönden BC (takım devri – kaynak zamanı) olduğu saptanmıştır. AB (takım dalma mesafesi – takım devri) etkileşiminin ise kaynak performansına etkisi göz ardı edilecek kadar küçük olduğu kanısına varılmıştır.

Yukarıda önemli oldukları belirtilen AC (takım dalma mesafesi – kaynak zamanı) ve BC (takım devri – kaynak zamanı) etkileşimlerini yorumlayarak kalite değişkenimiz olan *Y*, yani maksimum kesme makaslama kuvvetini nasıl etkilediklerini saptamak için etkileşim grafiklerinden yararlanılmıştır. Örnek olarak AC (takım dalma mesafesi – kaynak zamanı) etkileşim grafiğini çizmek için önce *Y*'nin (maksimum kesme makaslama kuvveti) sekiz adet ortalama değeri *A*'nın (takım dalma mesafesi) ve *C*'nin (kaynak zamanı) seviyelerine göre dört gruba ayrılıp her grubun ortalaması bulunarak etkileşim tablosu oluşturulmuştur. Etkileşim tablosundaki ortalama değerler, AC (takım dalma mesafesi – kaynak zamanı) etkileşim grafiğini çizmek için kullanılmıştır. *Y*'nin (maksimum kesme makaslama kuvveti) ortalama değerleri, *A*'nın (takım dalma mesafesi) seviyelerine göre grafiğe işlenmiş ve *C*'nin (kaynak zamanı) seviyelerine göre etkileşim doğruları çizilmiştir. BC (takım devri – kaynak zamanı) etkileşim grafiği de benzer şekilde çizilmiştir. AC (takım dalma mesafesi – kaynak zamanı) etkileşimi tablosu Çizelge 4.5.'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. AC (takım dalma mesafesi – kaynak zamanı) etkileşim tablosu

A	C	
	1	2
1	875;865	715;880
	<u>870</u>	<u>797.5</u>
2	845;1290	1660;1265
	<u>1067.5</u>	<u>1462.5</u>

Çizelge 4.5.'de altı çizili olan ortalama değerler baz alınarak çizilen AC (takım dalma mesafesi – kaynak zamanı) etkileşim grafiği Şekil 4.6.'da verilmiştir.



A1-C1 (A'nın 1. seviyesi olan 2,2 mm ve C'nin 1. seviyesi olan 5 sn)
A1-C2 (A'nın 1. seviyesi olan 2,2 mm ve C'nin 2. seviyesi olan 10 sn)
A2-C1 (A'nın 2. seviyesi olan 2,6 mm ve C'nin 1. seviyesi olan 5 sn)
A2-C2 (A'nın 2. seviyesi olan 2,6 mm ve C'nin 2. seviyesi olan 10 sn)

Şekil 4.6. AC (takım dalma mesafesi – kaynak zamanı) etkileşim grafiği

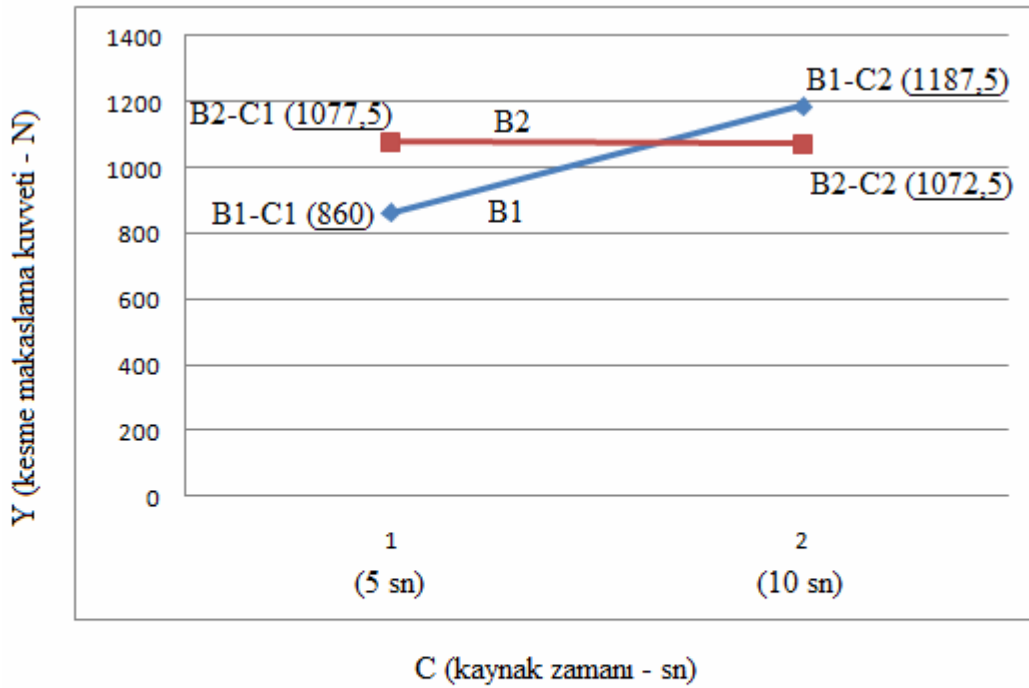
Şekil 4.6. incelendiği zaman, C'nin (kaynak zamanı) kesme makaslama kuvvetine olan etkisinin A'nın (takım dalma mesafesi) seviyesine bağlı olduğu saptanmıştır. Amaç en iyi kaynak performansı için en büyük kesme makaslama kuvveti elde etmek olduğu için grafiğe göre A2-C2 (A'nın 2. seviyesi olan 2.6 mm ve C'nin 2. seviyesi olan 10 sn) kombinasyonunun kullanılması sonucuna ulaşılmıştır.

Bir diğer önemli etkileşim olarak kabul edilen BC (takım devri – kaynak zamanı) etkileşimine ait etkileşim tablosu Çizelge 4.6.'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. BC (takım devri – kaynak zamamı) etkileşim tablosu

B	C	
	1	2
1	875;845 <u>860</u>	715;1660 <u>1187.5</u>
2	865;1290 <u>1077.5</u>	880;1265 <u>1072.5</u>

Çizelge 4.6.'da altı çizili olan ortalama değerler baz alınarak çizilen BC (takım devri – kaynak zamamı) etkileşim grafiği Şekil 4.7.'de verilmiştir.



B1-C1 (B'nin 1. seviyesi olan 1500 dev/dak ve C'nin 1. seviyesi olan 5 sn)  
 B1-C2 (B'nin 1. seviyesi olan 1500 dev/dak ve C'nin 2. seviyesi olan 10 sn)  
 B2-C1 (B'nin 2. seviyesi olan 2000 dev/dak ve C'nin 1. seviyesi olan 5 sn)  
 B2-C2 (B'nin 2. seviyesi olan 2000 dev/dak ve C'nin 2. seviyesi olan 10 sn)

Şekil 4.7. BC (takım devri – kaynak zamamı) etkileşim grafiği

Şekil 4.7. incelendiği zaman B'nin (takım devri) kesme makaslama kuvvetine olan etkisinin C'nin (kaynak zamanı) seviyesine bağlı olduğu gözlemlenmiştir. B

(takım devri) 2. seviyesindeyken (2000 dev/dak), C'nin (kaynak zamanı) her iki seviyesinde (5 sn ve 10 sn) elde edilen kesme makaslama kuvvetlerinin hemen hemen aynı değerde olduğu saptanmıştır. Ancak B (takım devri) 1. seviyesindeyken (1500 dev/dak), C'nin (kaynak zamanı) seviyesinde artış kesme makaslama kuvveti değerinde de önemli bir artış sağlamıştır. BC (takım devri – kaynak zamanı) etkileşim grafiğine göre, amaç en iyi kaynak performansı için en büyük kesme makaslama kuvveti elde etmek olduğundan B1-C2 (B'nin 1. seviyesi olan 1500 dev/dak ve C'nin 2. seviyesi olan 10 sn) kombinasyonunun kullanılması sonucuna ulaşılmıştır.

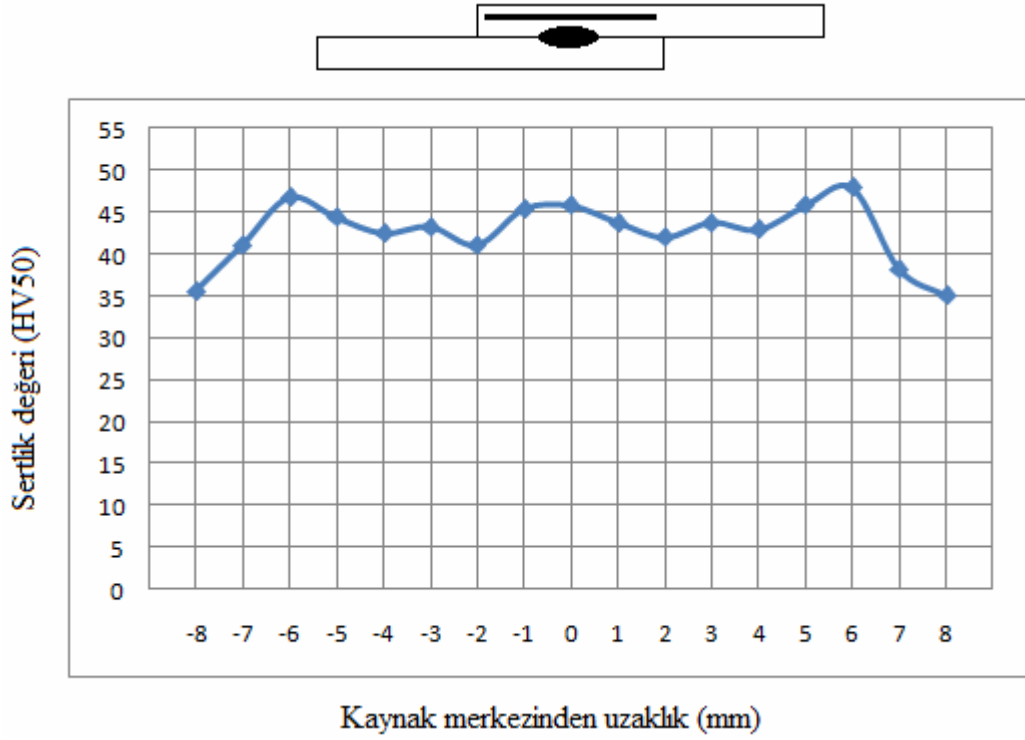
#### 4.2. MİKRO YAPI ÖZELLİKLERİ

EDNK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilen numunelerin mikro yapı özellikleri, mikro sertlik ölçüm değerleri ve metal mikroskobu ile x100 büyütme sonucu elde edilen görüntüler baz alınarak saptanmıştır. EDNK yöntemi için sabit kaynak parametre seviyelerinde elde edilen numune ve SKNK yöntemi için ise maksimum kesme makaslama kuvveti veren 6.1. deney numarasına sahip numune ile aynı kaynak parametre seviyelerinde olan numune mikro yapı özelliklerin incelenmesi için kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan esas metalin mikro sertlik değeri 32 HV olarak ölçülmüştür.

EDNK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilen numuneler üst üste bindirme tarzında kaynak pozisyonu ile birleştirildikleri için her numunenin üst ve alt parçalarından olmak üzere iki ayrı doğrusal bir hat boyunca sertlik ölçüm değerleri alınmıştır. Buna ek olarak EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin üst ve alt parçalarından geçen enine bir hat boyunca da sertlik ölçüm değerleri alınarak elde edilen değerler grafiksel olarak sunulmuştur.

EDNK yöntemi birleştirilen numunenin üst parçasına ait sertlik ölçüm değerleri Şekil 4.8.'de görülmektedir.

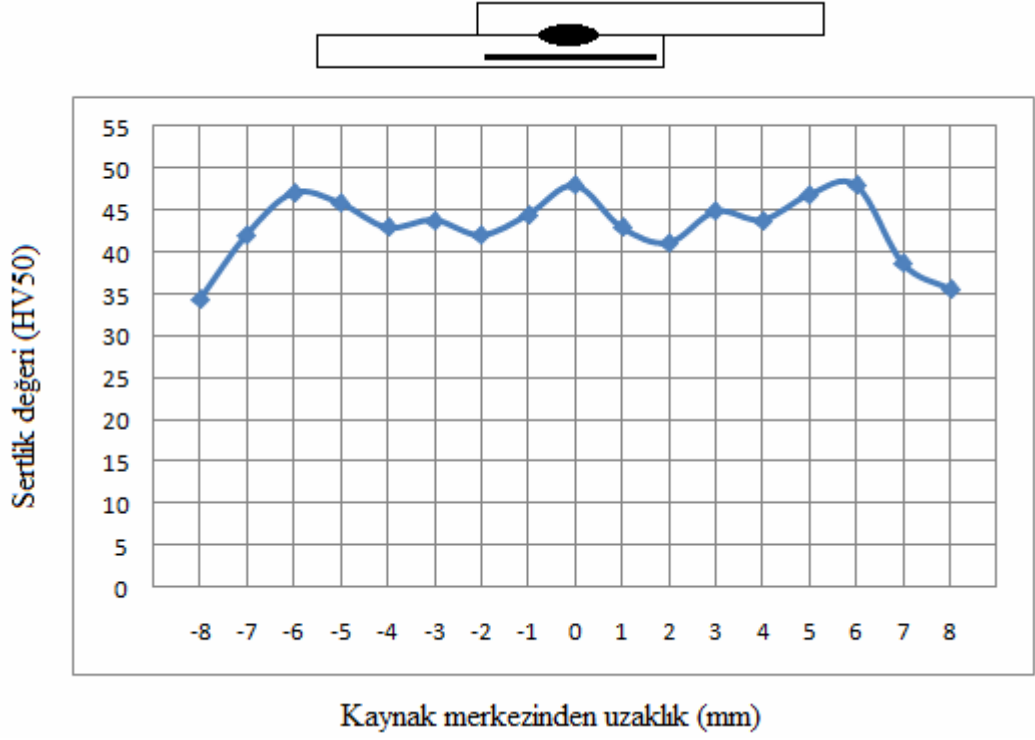




Şekil 4.8. EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin üst parçasına ait sertlik ölçüm değerleri

Şekil 4.8.'de görüldüğü gibi, kaynak merkezinden sağa ve sola doğru gidildikçe sertlik değerinde önce bir miktar düşüş, ardından kaynak merkezindeki sertlik değerinin üstünde artış ve daha sonra tekrardan esas metale doğru yaklaştıkça ciddi bir düşüş gözlemlenmiştir. 32 HV olan esas metalin sertlik değeri kaynak merkezinde 45.8 HV olarak ölçülmüştür. Üst parçaya ait ortalama sertlik değeri ise 42.67 HV olarak belirlenmiştir.

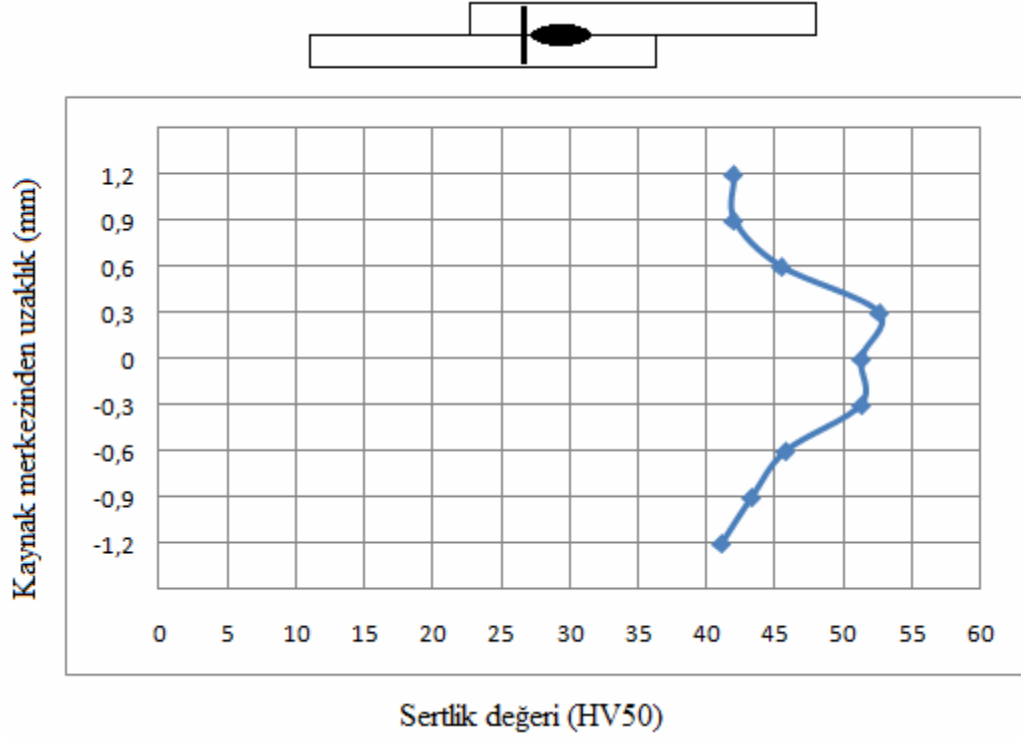
EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin alt parçasına ait sertlik ölçüm değerleri Şekil 4.9.'da görülmektedir.



Şekil 4.9. EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin alt parçasına ait sertlik ölçüm değerleri

Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi, EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin alt parçasına ait sertlik ölçüm değerlerinin grafiksel olarak dağılımı, Şekil 4.7.'de verilen üst parçaya ait sertlik dağılımına benzer bir şekilde meydana gelmiştir. Üst parçada 45.8 HV olarak ölçülen kaynak merkezinin sertlik değeri alt parçada 47.9 HV olarak ölçülmüştür. Alt parçaya ait ortalama sertlik değeri ise 43.03 HV olarak belirlenmiştir.

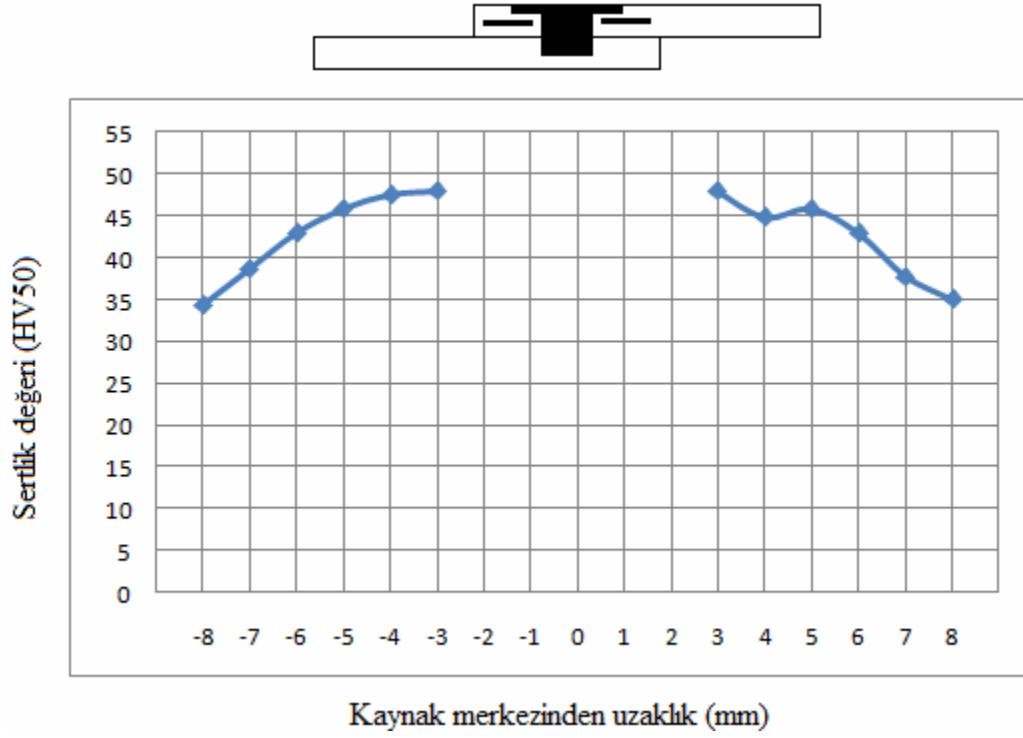
EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin üst ve alt parçalarında geçen enine doğrusal bir hat boyunca ölçülen sertlik değerleri Şekil 4.10.'da görülmektedir.



Şekil 4.10. EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin üst ve alt parçalarından geçen hat boyunca ölçülen sertlik değerleri

Şekil 4.10.'da görüldüğü gibi, hem üst hem de alt parçada enine doğrusal bir hat boyunca ölçülen sertlik değerleri, kaynak merkezinden sağa ve sola doğru simetrik bir dağılım göstermiştir. Bu şekilde ölçülen sertlik değerlerinin ortalaması 46.08 HV olarak belirlenmiştir.

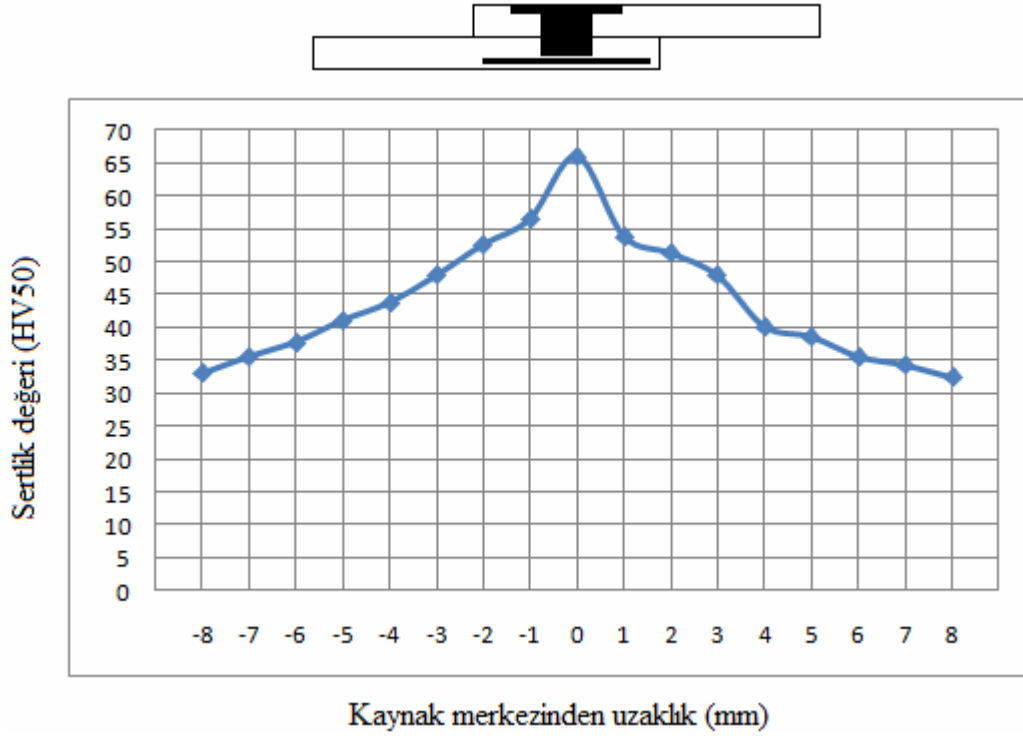
SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin üst parçasına ait sertlik ölçüm değerleri Şekil 4.11.'de görülmektedir.



Şekil 4.11. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin üst parçasına ait sertlik ölçüm değerleri

Şekil 4.11.'de görüldüğü gibi, kaynak merkezinden sağa ve sola doğru gidildikçe sertlik değerinde önemli miktarda düşüşler olduğu saptanmıştır. SKNK yönteminin meydana getirdiği kaynak metali formundan dolayı belirli bölgelerden sertlik ölçüm değeri alınamamıştır. Sertlik ölçümü almaya müsait olan bölgelerden alınan sertlik ölçüm değerlerinin ortalaması ise 42.6 HV olarak belirlenmiştir.

SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin alt parçasına ait sertlik ölçüm değerleri Şekil 4.12.'de görülmektedir.



Şekil 4.12. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin alt parçasına ait sertlik ölçüm değerleri

Şekil 4.12.'de görüldüğü gibi, SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin alt parçasında sertlik ölçüm değeri esas metalden kaynak merkezine doğru ciddi bir şekilde artış göstermiştir. 32 HV olan esas metalin sertlik değeri kaynak merkezinde 66 HV olarak ölçülmüştür. Alt parçaya ait ortalama sertlik değeri ise 44.02 HV olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin alt parçasından, takım piminin dalma sınırından itibaren enine doğrusal bir hat boyunca 0.1 mm. aralıklarla 3 adet noktadan sertlik değeri alınmıştır. Bu noktalardan alınan sertlik değerleri takım dalma sınırından başlayarak aşağıya doğru sırasıyla; 67.7 HV, 66 HV ve 64.2 HV olarak ölçülmüştür.

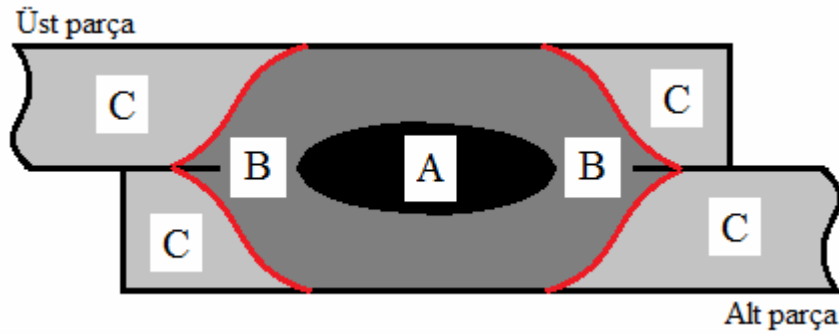
EDNK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilen numunelerin sertlik ölçüm değerleri incelendiği zaman, esas metalden kaynak metaline doğru ölçülen sertlik değerlerinin ortalamasının birbirine yakın değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak kaynak metaline yaklaştıkça, kaynak merkezi ve yakın bölgesi incelendiği zaman, EDNK bağlantısının sertlik değeri yaklaşık olarak 47 HV olarak ölçülürken SKNK bağlantısının değeri yaklaşık olarak 67 HV olarak ölçülmüştür. Bu durum,

SKNK bağlantılarının EDNK bağlantılarına nazaran daha iyi kaynak performansı sergiledikleri savını desteklemiştir.

SKNK bağlantısında incelenen sertlik ölçüm değerlerinin kaynak metaline yaklaştıkça önemli bir şekilde artış göstermesinin, Badarinarayan ve ark. [13] tarafından yapılan çalışmadaki sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar, Kahraman'ın [30] yaptığı çalışmada yer verdiği sertlik değerleri ile örtüşerek tezimizi desteklemektedir.

Yapılan çalışmada EDNK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilen numunelerin mikro yapı özellikleri ve kaynak hatalarını belirlemek için metal mikroskobu kullanılmıştır. Metal mikroskobu ile kaynaklı bağlantıların kaynak merkezinden boyuna kesilip elde edilen kesit bölgelerinden görüntüler alınarak incelenmiştir.

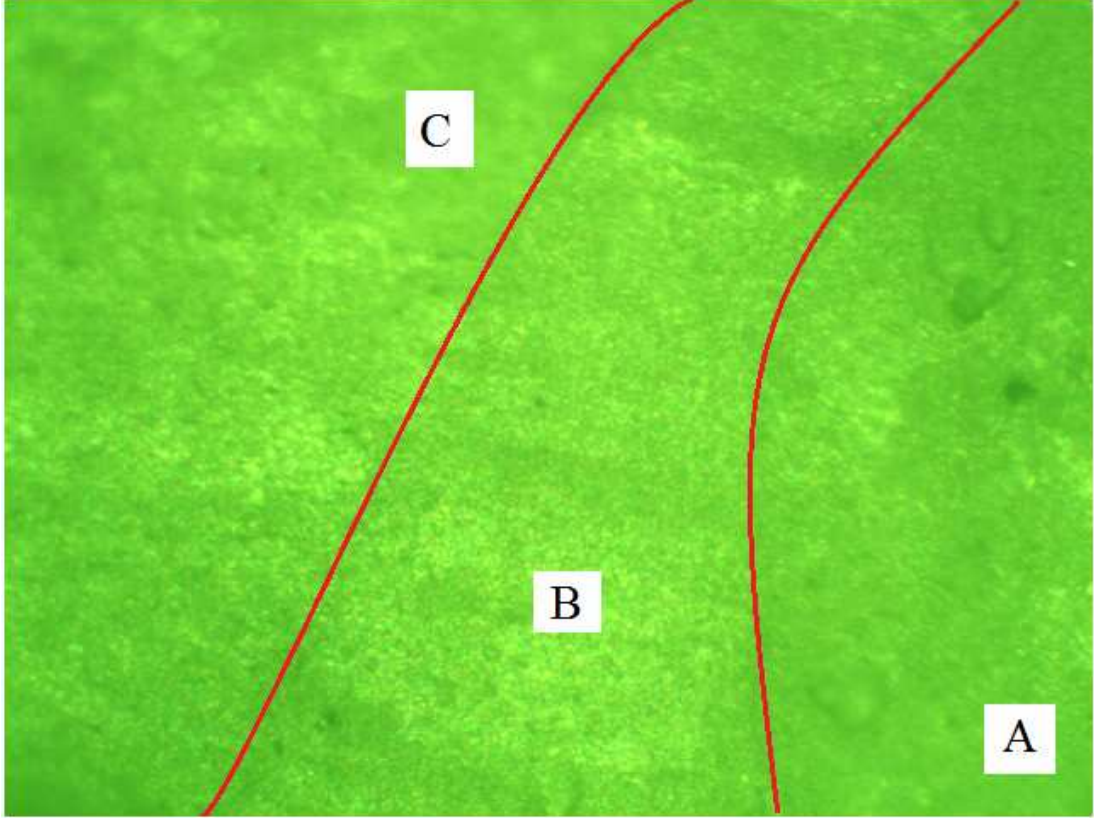
EDNK bağlantısına ait kaynak bölgesinin hem göz ile muayene edilmiş hem de metal mikroskobu ile mikro yapısı incelenmiş şematik görünümü Şekil 4.13.'de verilmiştir.



Şekil 4.13. EDNK bağlantısına ait kaynak bölgesinin şematik görünümü A-) Kaynak metal, B-) Isının tesiri altındaki bölge (ITAB), C-) Esas metal

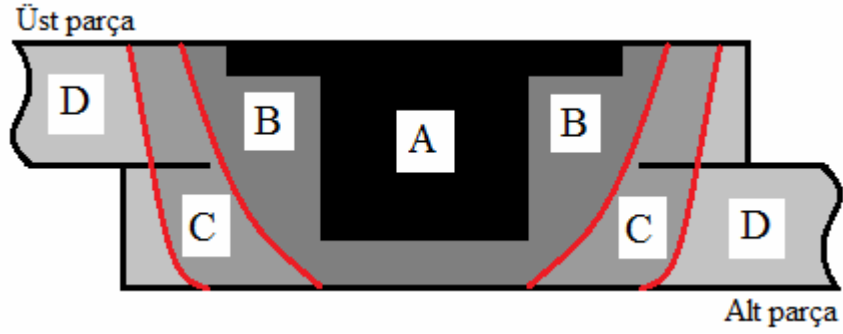
Şekil 4.13.'de gösterilen şematik gösterimde A harfi ile gösterilen bölge kaynak metal bölgesidir. B harfi ile gösterilen bölge ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) olup kaynak işlemi esnasında meydana gelen ısı bu bölgenin metalürjik özelliklerini etkilemiştir. C harfi ile gösterilen bölge ise esas metal bölgesidir. Bu bölge kaynak işlemi esnasında meydana gelen ısıdan etkilenmemiştir.

EDNK bağlantısına ait Şekil 4.13.'de verilen kaynak bölgesinin metal mikroskobu ile x100 büyütme alınarak elde edilen görüntüsü Şekil 4.14.'de verilmiştir. Görüntüleri alınan numune sabit EDNK parametre seviyelerinde kaynak işlemi görmüş numunedir.



Şekil 4.14. EDNK bağlantısına ait kaynak bölgelerinin x100 büyütme ile alınan görüntüsü A-) Kaynak metali, B-) Isının tesiri altındaki bölge (ITAB), C-) Esas metal

SKNK bağlantısına ait kaynak bölgesinin hem göz ile muayene edilmiş hem de metal mikroskobu ile incelenmiş şematik görünümü Şekil 4.15.'de verilmiştir.

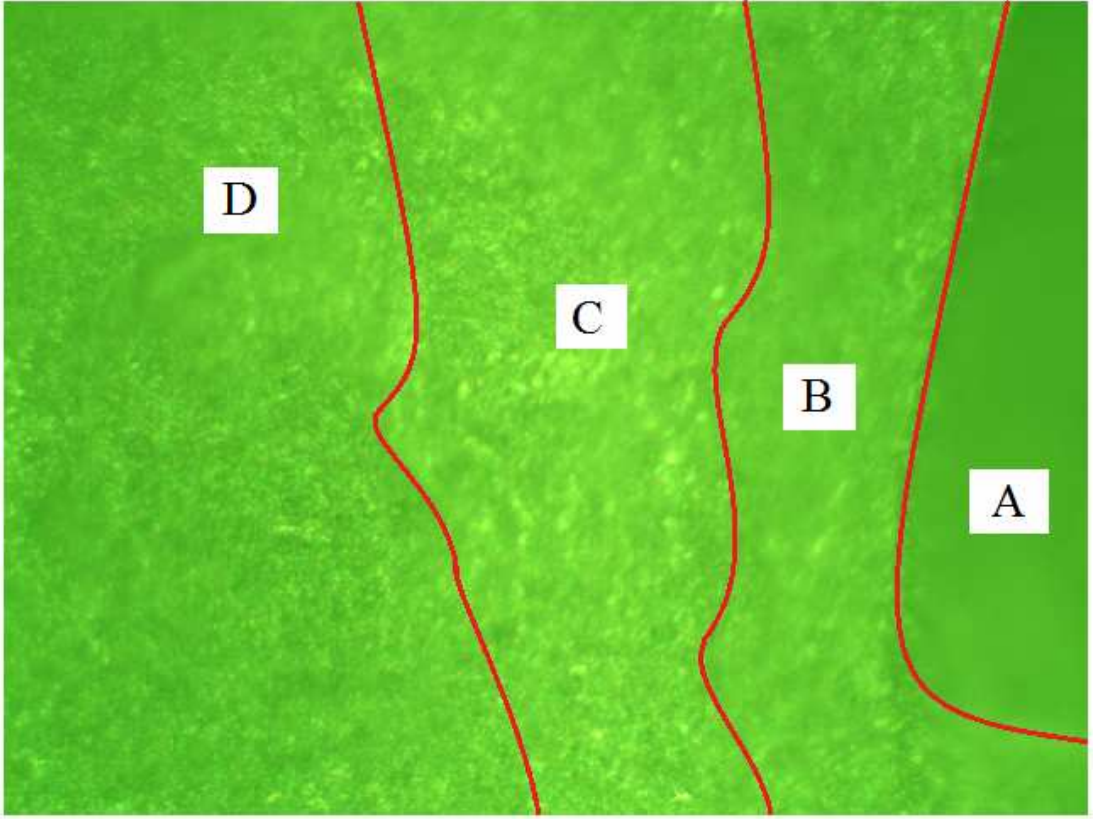


Şekil 4.15. SKNK bağlantısına ait kaynak bölgesinin şematik görünümü A-) Kaynak metali, B-) Termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB), C-) Isının tesiri altında kalan bölge (ITAB), D-) Esas metal

Şekil 4.15.'de gösterilen şematik gösterimde A harfi ile gösterilen bölge kaynak metali bölgesidir. Bu bölge, kaynak işlemi esnasında kullanılan takım pimi formunda, malzeme üzerinde bir boşluk meydana getirilerek oluşmuştur. B harfi ile gösterilen bölge termomekanik olarak etkilenmiş bölge (TEB) olup kaynak işlemi esnasında meydana gelen ısı ve basınç bu bölgenin plastik deformasyona uğramasına yol açmıştır. C harfi ile gösterilen bölge ısının tesiri altındaki bölgedir (ITAB). Bu bölge plastik deformasyona uğramamakla birlikte ısı ve kaynak işlemi esnasında ortaya çıkan ısı bu bölgenin metalürjik özelliklerini etkilemiştir. D harfi ile gösterilen bölge ise kaynak işlemi esnasında ortaya çıkan ısıdan etkilenmemiş olan esas metal bölgesidir.

SKNK bağlantısına ait Şekil 4.15.'de verilen kaynak bölgesinin metal mikroskobu ile x100 büyütme alınarak elde edilen görüntüsü Şekil 4.16.'da verilmiştir. Görüntüleri alınan numune, çekme testi deneyi sonucu en iyi kesme makaslama kuvveti elde edilen numunedir. Bu numuneye ait SKNK parametre seviyeleri; 2.6 mm takım dalma mesafesi, 1500 dev/dak takım devri ve 10 sn kaynak zamanı olarak çalışılan 6.1. deney numarasına sahip SKNK numunesidir.





Şekil 4.16. SKNK bağlantısına ait kaynak bölgelerinin x100 büyütme ile alınan görüntüsü A-) Kaynak metali, B-) Termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB), C-) Isının tesiri altında kalan bölge (ITAB), D-) Esas metal

EDNK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilen numunelerin mikro yapı incelemeleri sonucu elde edilen verilerin, Kahraman'ın [30] yaptığı çalışmada yer verdiği veriler ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, SKNK bağlantısına ait mikro yapı araştırmaları sonucu elde edilen veriler, daha önce yapılmış çalışmalardaki veriler ile desteklenmektedir [4, 9, 20].

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, EDNK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilen 5000 serisi alüminyum alaşımı bağlantıların kaynak performansı açısından mukayesesi yapılarak SKNK bağlantıları için optimum kaynak parametrelerinin tayin edilmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte SKNK uygulamasında, kaynaklı bağlantıların performansına büyük ölçüde etki eden kaynak parametrelerinin etkileşimleri araştırılmıştır. Ayrıca her iki yöntem ile elde edilen bağlantıların mikro yapı özellikleri incelenmiştir.

EDNK yönteminde sabit kaynak parametre seviyelerinde çalışılırken SKNK yönteminde üç farklı parametre ve her parametreye ait iki farklı seviye değerinde çalışılmıştır. Yapılan çalışmada bu parametreler ve seviyeleri; 2.2 mm ve 2.6 mm seviyelerinde takım dalma mesafesi, 1500 dev/dak ve 2000 dev/dak seviyelerinde takım devri ile 5 sn ve 10 sn seviyelerinde kaynak süresi olarak belirlenmiştir.

Kaynaklı bağlantıların kaynak performansını değerlendirmek için numunelere çekme testi deneyi uygulanmış ve deney sonucu elde edilen kesme makaslama kuvveti baz alınarak bağlantıların kalitesi hakkında yorum yapılmıştır. Deney sonucunda EDNK uygulanmış numunelerde ortalama 490 N kesme makaslama kuvveti elde edilmiştir. SKNK uygulanmış numunelerde ise ortalama 1049.37 N kesme makaslama kuvveti elde edilirken en büyük kesme makaslama kuvveti 6.1. ve 6.2. deney numaralarına sahip numunelerde 1660 N olarak ölçülmüştür. Bu deney numaralarına sahip numunelerin kaynağında kullanılan parametre seviyeleri optimum kaynak parametre seviyeleri olarak belirlenmiştir. Bu parametre seviyeleri; 2.6 mm takım dalma mesafesi, 1500 dev/dak takım devri ve 10 sn kaynak süresi olarak saptanmıştır.

Yukarıda belirtilen sonuçlardan da anlaşılacağı gibi SKNK yöntemi, EDNK yöntemine nazaran daha iyi kesme makaslama kuvveti değerleri vermiştir. Bu durum, SKNK uygulamasının EDNK uygulamasına göre daha kaliteli birleştirmeler elde etmeye olanak sağladığını ifade etmektedir.

SKNK uygulamasında kullanılan parametrelerin kaynak bağlantısı üzerine etkileri incelendiği zaman en önemli etkinin takım dalma mesafesi olduğu sonucuna varılmıştır. Takım dalma mesafesinin artırılması ile birlikte doğru orantılı olarak kaynak performansının da arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kaynak süresi parametresinin de kaynak performansı üzerine pozitif etkisi olduğu görülmüştür. Ancak bu etkinin takım dalma mesafesi parametresine nazaran daha az bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte takım devri parametresinin kaynak performansı üzerine etkisinin diğer ana etkilere göre oldukça az olduğu gözlemlenmiştir.

Parametreler arası etkileşimler incelendiği zaman en önemli etkileşimlerin takım dalma mesafesi – kaynak zamanı ve takım devri – kaynak zamanı etkileşimleri olduğu görülmüştür. Kaynak zamanının kesme makaslama kuvvetine olan etkisinin takım dalma mesafesinin seviyesine bağlı olduğu saptanmıştır. Amaç en iyi kaynak performansı için en büyük kesme makaslama kuvveti elde etmek olduğundan dolayı takım dalma mesafesi – kaynak zamanı etkileşim grafiğinden elde edilen verilere göre takım dalma mesafesinin 2. seviyesi olan 2.6 mm ve kaynak zamanının 2. seviyesi olan 10 sn kombinezonunun kullanılması sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, takım devrinin kesme makaslama kuvvetine olan etkisinin kaynak zamanının seviyesine bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Takım devri 2. seviyesindeyken (2000 dev/dak), kaynak zamanının her iki seviyesinde (5 sn ve 10 sn) elde edilen kesme makaslama kuvvetlerinin hemen hemen aynı değerde olduğu saptanmıştır. Ancak takım devri 1. seviyesindeyken (1500 dev/dak), kaynak zamanının seviyesindeki artış kesme makaslama kuvveti değerinde de önemli bir artış sağlamıştır. Takım devri – kaynak zamanı etkileşim grafiğinden elde edilen verilere göre takım devrinin 1. seviyesi olan 1500 dev/dak ve kaynak zamanının 2. seviyesi olan 10 sn kombinezonunun kullanılması sonucuna ulaşılmıştır.

Her iki yöntem ile birleştirilen numunelerin sertlik ölçüm değerleri incelendiği zaman, SKNK yöntemi ile elde edilen numunenin, esas metalden kaynak merkezine doğru gidildikçe sertlik değerinde büyük bir artış olduğu saptanmıştır. EDNK yöntemi ile elde edilen numunenin ise sertlik değerlerinde grafiksel olarak

dalgalanma olduğu gözlemlenmiştir. EDNK yöntemi ile birleştirilen numunenin sertlik değerlerinde gözlemlenen dalgalanma, özellikle ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB) düşük olarak ölçülen sertlik değerlerinden kaynaklanmaktadır. Bu durumun, ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB) meydana gelen sıcaklık artışından kaynaklandığı düşünülmektedir. SKNK bağlantısının kaynak merkezi ve yakın bölgesinde sertlik değeri yaklaşık olarak 67 HV, EDNK bağlantısının ise 47 HV olarak ölçülmüştür. Bu durum, SKNK bağlantısının EDNK bağlantısına göre daha iyi kaynak performansı verdiğini destekler niteliktedir.

Bağlantıların mikro yapıları hem göz hem de metal mikroskobu ile görsel olarak incelenmiştir. SKNK uygulamasında herhangi bir kaynak hatasına rastlanmazken EDNK uygulamasında numunenin kaynak metali bölgesinde yoğun olmamakla birlikte az miktarda gözeneğe rastlanmıştır.

Alüminyum alaşımı malzemelere EDNK ve SKNK yöntemleri uygulanarak yapılan bu çalışmada elde edilen verilerin sonuçları göstermiştir ki; yeni bir yöntem olan SKNK uygulaması, geleneksel bir yöntem olan EDNK uygulamasına nazaran mekanik özellikler açısından büyük ölçüde daha kaliteli kaynaklı bağlantılar sağlamıştır. Bununla birlikte, bu yeni birleştirme tekniğinin endüstriyel alanlarda uygulaması henüz yaygın değildir. Bundan dolayı, SKNK uygulamalarının seri üretim sistemlerinde yer alması ve endüstriyel alanlarda EDNK uygulamasının alternatifi olarak kullanılması için akademik çalışmalar ile birlikte üniversite – sanayi işbirliği kapsamında desteklenmesini önermekteyim.

## KAYNAKLAR

- [1] Akkurt, M. “Makina Elemanları”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 720 s., (2000)
- [2] Anık, S. “Kaynak Tekniği El Kitabı”, Gedik Eğitim Vakfı, İstanbul, 244 s., (1991)
- [3] Chae, S. W., Kwon, K. Y. ve Lee, T. S. “An optimal design system for spot welding locations”, *Finite Elements in Analysis and Design*, **38(3)**: 277-294, (2002)
- [4] Buffa, G., Fratini, L. ve Piacentini, M. “On the influence of tool path in friction stir spot welding of aluminum alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, **208(1-3)**: 309-317, (2008)
- [5] Rogeon, P., Carre, P., Costa, J., Sibilila, G. ve Saindrenan, G. “Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies”, *Journal of Materials Processing Technology*, **195(1-3)**: 117-124, (2008)
- [6] Anık, S., Ogur, A., Vural, M. ve Turan, H. “Direnç nokta kaynak elektrodu ömrünün deneysel analizi”, *Mühendis ve Makina*, **(513)**: (2002)
- [7] Aslanlar, S. “The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry”, *Materials and Design*, **27(2)**: 125-131, (2006)
- [8] Aslanlar, S., Ogur, A., Ozsarac, U. ve Ilhan, E. “Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding”, *Materials and Design*, **29(7)**: 1427-1431, (2008)
- [9] Uematsu, Y., Tokaji, K., Tozaki, Y., Kurita, T. ve Murata, S. “Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behavior of friction stir spot welded joints in Al-Mg-Si alloy”, *International Journal of Fatigue*, **30(10-11)**: 1956-1966, (2008)
- [10] Lathabai, S., Painter, M. J., Cantin, G. M. D. ve Tyagi, V. K. “Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy”, *Scripta Materialia*, **55(10)**: 899-902, (2006)

- [11] Lum, I., Fukomoto, S., Biro, E., Boomer, D. R. ve Zhou, Y. “Electrode pitting in resistance spot welding of aluminum alloy 5182”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **35A**: 217-226, (2004)
- [12] Kim, D. C., Park, H. J., Hwang, I. S. ve Kang, M. J. “Resistance spot welding of aluminum alloy sheet 5J32 using SCR type and inverter type power supplies”, *Archives of Materials Science and Engineering*, **38(1)**: 55-60, (2009)
- [13] Badarinarayan, H., Yang, Q. ve Zhu, S. “Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **49(2)**: 142-148, (2009)
- [14] Tran, V. X., Pan, J. ve Pan, T. “Effects of processing time on strength and failure modes of dissimilar spot friction welds between aluminum 5754-O and 7075-T6 sheets”, *Journal of Materials Processing Technology*, **209(8)**: 3724-3739, (2009)
- [15] Lin, P. C., Pan, J. ve Pan, T. “Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 1: Welds made by a concave tool”, *International Journal of Fatigue*, **30(1)**: 74-89, (2008)
- [16] Lin, P. C., Pan, J. ve Pan, T. “Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 2: Welds made by a flat tool”, *International Journal of Fatigue*, **30(1)**: 90-105, (2008)
- [17] Tran, V. X., Pan, J. ve Pan, T. “Fatigue behavior of aluminum 5754-O and 6111-T4 spot friction welds in lap-shear specimens”, *International Journal of Fatigue*, **30(12)**: 2175-2190, (2008)
- [18] Wang, D. A. ve Chen, C. H. “Fatigue lives of friction stir spot welds in aluminum 6061-T6 sheets”, *Journal of Materials Processing Technology*, **209(1)**: 367-375, (2009)
- [19] Gerlich, A. P. ve Shibayanagi, T. “Grain boundary sliding during friction stir spot welding of an aluminum alloy”, *Scripta Materialia*, **60(4)**: 236-239, (2009)

- [20] Wang, D. A. ve Lee, S. C. “Microstructure and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets”, *Journal of Materials Processing Technology*, **186(1-3)**: 291-297, (2007)
- [21] Arul, S. G., Pan, T., Lin, P. C., Pan, J., Feng, Z. ve Santella, M. L. “Microstructures and failure mechanisms of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 5754 sheets”, *Society of Automotive Engineers*, **1256**: (2005)
- [22] Mitlin, D., Radmilovic, V., Pan, T., Chen, J., Feng, Z. ve Santella, M. L. “Structure-properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum”, *Materials Science and Engineering*, **A441(1-2)**: 79-96, (2006)
- [23] Cho, Y., Li, W. ve Hu, S. J. “Design of experimental analysis and weld lobe estimation for aluminum resistance spot welding”, *Welding Journal*, **85(3)**: 45-51, (2006)
- [24] Tozaki, Y., Uematsu, Y. ve Tokaji, K. “Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **47(15)**: 2230-2236, (2007)
- [25] Gerlich, A., Su, P. ve North, T. H. “Tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloys”, *Journal of Materials Science*, **40**: 6473-6481, (2005)
- [26] Feng, Z. ve Eberhardt, J. J. “Friction stir welding and processing of advanced materials”, *High Strength Weight Reduction Materials 2005 Progress Report*, 122-134, (2005)
- [27] Külekci, M. K. ve Şık, A. “Effects of tool rotation and transverse speed on fatigue properties of friction stir welded AA 1050-H18 aluminium alloy”, *Archives of Metallurgy and Materials*, **51(2)**: 213-216, (2006)
- [28] Külekci, M. K., Şık, A. ve Kaluç, E. “Effects of tool rotation and pin diameter on fatigue properties of friction stir welded lap joints”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **36(9-10)**: 877-882, (2006)

- [29] Öcalır, Ş. “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Yapılan Alüminyum Alaşımı Birleştirmelerde Optimum Parametrelerin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Mersin, 62s (2009)
- [30] Kahraman, B. “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan 5754 Alüminyum Alaşımı Sacların Direnç Nokta Kaynağı(RSW) ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı(FSSW) Yöntemleri ile Birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, 98s (2009)
- [31] Han, J. H., Ping, S. ve Shengsun, H. “Fractal characterization and simulation of surface profiles of copper electrodes and aluminum sheets”, Materials Science and Engineering, **A403(1-2)**: 174-181, (2005)
- [32] Mathers, G. “The Welding of Aluminium and Its Alloys”, Woodhead Publishing Limited, İngiltere, 236 s., (2002)
- [33] Çimen, M. Ş., Akkuş, A. “Nokta direnç kaynağında sıcaklık dağılımının incelenmesi”, Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi, 85-96, (1999)
- [34] MEB. Elektrik Direnç Kaynağı, s:2-8, Ankara, (2005)
- [35] Design Considerations for Spot Welding,  
[http://www.makeitmetal.com/resources/CH13\\_SpWeld.htm](http://www.makeitmetal.com/resources/CH13_SpWeld.htm), (15.12.2008)
- [36] Welding Processes,  
[http://mechse.illinois.edu/media/uploads/course\\_websites/me\\_350\\_-\\_lect\\_20\\_-\\_ch\\_31.20081118.492265a107e111.19674596.pdf](http://mechse.illinois.edu/media/uploads/course_websites/me_350_-_lect_20_-_ch_31.20081118.492265a107e111.19674596.pdf), (15.12.2008)
- [37] Evaluation of Friction Stir Weld Process and Properties for Aircraft Application,  
[http://depts.washington.edu/amtas/events/jams\\_08/16.Widener.pdf](http://depts.washington.edu/amtas/events/jams_08/16.Widener.pdf), (15.12.2008)
- [38] Friction Stir Welding – Materials and Thicknesses,  
<http://www.twi.co.uk/content/fswmat.html>, (15.12.2008)
- [39] Meran, C. ve Çolak, M. “Tool holder design for friction stir welding”, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, **23(3)**: 671-679, (2008)



- [40] Özkan, S. “Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilen Parçalarda Haddeme (Burnishing) İle Yüzeylerin İşlenmesi, Haddemenin Yüzey Pürüzlülüğü ve Sertleşmeye Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 138s., (2006)
- [41] Serindağ, H. T. “Pirinç Levhaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Alın Kaynağı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antakya, 56s., (2006)
- [42] Onaran, K. “Malzeme Bilimi”, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 383 s., (2000)
- [43] Senyen, C. “Alüminyum alaşımlarının kaynağında dikkat edilecek husular”, Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi, 253-265, (2001)
- [44] Darwish, S. M. ve Al-Dekhial, S. D. “Statistical models for spot welding of commercial aluminium sheets”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **39(10)**: 1589-1610, (1999)
- [45] Kahraman, N. “The influence of welding parameters on the joint strength of resistance spot-welded titanium sheets”, Materials and Design, **28(2)**: 420-427, (2007)
- [46] James, P. S., Chandler, H. W., Evans, J. T., Wen, J. ve Newton, C. J. “The effect of mechanical loading on the contact resistance of coated aluminum”, Materials Science and Engineering, **A230(1-2)**: 194-201, (1997)
- [47] Crinon, E. ve Evans, J. T. “The effect of surface roughness, oxide film thickness and interfacial sliding on the electrical contact resistance of aluminum”, Materials Science and Engineering, **A242(1-2)**: 121-128, (1998)
- [48] Qui, R., Iwamoto, C. ve Satonaka, S. “The influence of reaction layer on the strength of aluminum/steel joint welded by resistance spot welding”, Materials Characterization, **60(2)**: 156-159, (2009)
- [49] Ericsson, M. ve Sandström, R. “Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG”, International Journal of Fatigue, **25(12)**: 1379-1387, (2003)

- [50] Mandal, S., Rice, J. ve Elmustafa, A. A. “Experimental and numerical investigation of the plunge stage in friction stir welding”, *Journal of Materials Processing Technology*, **203(1-3)**: 411-419, (2008)
- [51] Canıyılmaz, E. ve Kutay, F. “Taguchi metodunda varyans analizine alternatif bir yaklaşım”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **18(3)**: 51-63, (2003)
- [52] Hamzaçebi, Ç. ve Kutay, F. “Taguchi metodu: Bir uygulama”, *Teknoloji*, **6(3-4)**: 7-17, (2003)
- [53] Gökçe, B. ve Taşgetiren, S. “Kalite için deney tasarımı”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **6(1)**: 71-83, (2009)
- [54] Şirvancı, M. “Kalite İçin Deney Tasarımı: Taguchi Yaklaşımı”, *Literatür Yayınları*, İstanbul, 112 s., (1997)

## ÖZGEÇMİŞ

Onur ER 1983 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2006 yılında Mersin Üniversitesi Tarsus Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü'nden mezun oldu. Mezun olduğu sene aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen Makine Eğitimi Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.