

## Sürtünme karıştırma nokta kaynak tekniği ile birleştirilen farklı alüminyum levhaların taguchi analizi

### Taguchi analysis of dissimilar aluminum sheets joined by friction stir spot welding

Mustafa Kemal BİLİCİ<sup>1\*</sup>, Barkın BAKIR<sup>2</sup>, Yahya BOZKURT<sup>3</sup>, İrfan ÇALIŞ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kuyumculuk ve Mücevherat Tasarımı Bölümü, Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.  
mkbilici@marmara.edu.tr, icalis@marmarmara.edu.tr

<sup>2</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.  
bbakir@marmara.edu.tr

<sup>3</sup>Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.  
ybozkurt@marmara.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 03.02.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 14.07.2015

doi: 10.5505/pajes.2015.06641

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Son yıllarda, yeni ve kompleks yapılarıdaki malzemelerin kaynağı, endüstri için sorun teşkil etmektedir. Bu malzemelerin birleştirilmesinde katı hal kaynak yöntemleri etkili olmuştur. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarından üretilen levhaların özellikle otomotiv, demiryolu ve savunma sanayii gibi alanlarda katı hal kaynak yöntemlerinin uygulanması gerekliliğini ortaya koymuştur. Katı hal kaynak yöntemlerinden birisi de sürtünme karıştırma nokta kaynağıdır (SKNK). SKNK'de maksimum kaynak kuvvetini elde etmek için kaynak parametreleri çok önemlidir. SKNK parametreleri olarak (takım dönme hızı, takım dalma derinliği, takım bekleme süresi ve takım eğim açısı) seçilmiştir. Bu çalışmada, AA2024-T3 ile AA5754-H22 alüminyum alaşımı sac levhaların SKNK tekniği ile birleştirilmesi taguchi analizi ile incelenmiştir. Kaynak parametrelerinin kopma kuvvetine etkisi, çekme-makaslama deneyi ile belirlenmiştir. "En büyük-en iyi" kalite kontrol karakteristiği ile optimum kaynak parametreleri Varyans Analizi (ANOVA) metodu kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar hem grafiksel hem de sayısal verilerle değerlendirilmiştir. Kaynak kopma mukavemetine etki eden en önemli parametreler takım dönme hızı (%44.74) ve takım bekleme süresi (%31.60) olarak tespit edilmiştir. Taguchi analizi sonucunda yapılan karşılaştırma deneylerinde kaynak kopma mukavemeti başlangıç parametresine göre %42 oranında artış göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, Mekanik özellikler, Taguchi metodu, Optimizasyon

#### Abstract

In recent years, the welding of materials of new and complex structure constitutes a problem for the industry. The solid state welding method for joining of these materials were effective. Sheets produced from aluminum and aluminum alloys, especially in areas such as automotive, railway and defense industry have revealed the requirement of the application of solid state welding methods. The friction stir spot welding is one of the solid state welding method. Welding parameters is very important FSSW in order to obtain the maximum welding strength in FSSW. SKNK as parameters (tool rotational speed, depth, dive team, team and team inclination angle of standby time) is selected. In this study has investigated the joining of AA2024-T3 and AA5754-H22 aluminum alloy sheets with FSSW technique by Taguchi analysis. "The highest -the better" quality control characteristic using the Analysis of Variance (ANOVA) method were obtained the optimum welding parameters. The results have been analyzed both the graphical methods and numerical data. The most important parameters affecting the weld tensile strength were detected as tool rotation speed (44.74%) and the team of waiting time (31.60%). Weld tensile strength by Taguchi analysis result conducted for comparing experiments the increased by 42% compared to the initial parameters.

**Keywords:** Friction stir spot welding, Mechanical properties, Taguchi method, Optimization

## 1 Giriş

Günümüzde otomotiv endüstrisinde en çok araştırma ve geliştirme çalışmaları yakıt verimini arttırmak ve otomobil iskelet ağırlığını azaltmak üzerinedir. Yakıt verimini arttırmak için en etkin çalışma otomobil ağırlığının azaltılması üzerinedir [1]. Bunun için hafif metal olarak çelik saclar yerine aynı mukavemet değerine sahip alüminyum ve alüminyum alaşımlı levhalar kullanılmaya başlanmıştır [1]. Alüminyum alaşımlarının ergitmeli kaynak tekniklerinden biri olan elektrik direnç nokta kaynağı (EDNK) ile birleştirilmesi esnasında, alüminyumun yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olması sebebiyle, yüksek kaynak akımına gereksinim duyar. Yani, çelik ile aynı kalınlıkta alüminyum birleştirilmek istenildiğinde gerekli olan kaynak akımı, çelik için gerekli olandan daha yüksektir. Al-Fe gibi benzer olmayan iki metalin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi mümkün olmamaktadır. Ayrıca; Al, Sn, Zn, Zn-Pb alaşımlı kaplanmış çeliklerin EDNK ile birleştirilmesinde özel kaynak ekipmanlarına ihtiyaç

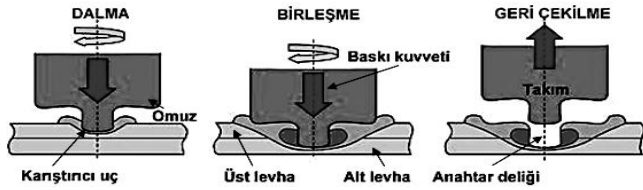
duyulmaktadır [1]-[3]. Dolayısıyla, alüminyum alaşımlarının EDNK yöntemi ile birleştirilmesinde kaynak kalitesini etkileyen başlıca dört etken yüzey temizliği ve malzeme uniformluğu; elektrotların profil ve temizliği; kaynak kuvveti ve kaynak akım şiddetidir. Bu şartların sağlanmaması halinde istenilen kaynak kalitesi elde edilememektedir [3].

Ülkemizde özellikle otomotiv sektörü başta olmak üzere çok sayıda endüstriyel kuruluşta, çok çeşitli amaçlarla kullanılan alüminyum ve alaşımlarının EDNK'li birleştirmelerinde çatlamlar, porozite, çarpılmalar ve kaynak elektrodunun aşınması gibi problemler mevcuttur. Bu problemler ile birlikte, özellikle son yıllarda çalışanların sağlığını gözetleyen ve onlara çok daha insancıl, konforlu çalışma ortamları sunulmasını sağlayan yönetmeliklerin yürürlüğe girmesi sonucunda endüstride katı hal kaynak yöntemlerinin (SKK ve SKNK) kullanılması yaygınlaşmıştır [4]. SKNK yöntemi ile tüketilen enerji, kaynak takımı için kullanılan motorlara gereken elektrik enerjisi kadardır. SKNK yönteminde, direnç nokta

kaynağındaki teçhizatın tükettiği enerjinin 1/20'sinden daha az enerji kullanır. Böylece işletme maliyetlerini azaltır ve güç maliyetinde yaklaşık %95 oranında azalma olur [5].

Mazda ve Kawasaki Heavy Industries tarafından geliştirilen SKNK yöntemi ilk olarak 2003 yılında Mazda RX-8 seri üretim otomobilinde kullanılmıştır. Bu sayede farklı malzemelerin sahip olduğu kimyasal, mekanik ve termal özellikleri sebebiyle meydana gelen problemlerin ortaya çıkması bu kaynak yöntemi ile engellenmiştir [6]. SKNK yöntemi ile; Al, Al-alaşımı, Mg-Al, Mg ve çelik sacların birleştirilmesinde başarılı, gün geçtikçe uygulama alanı genişlemekte, araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir [7],[8].

SKNK yöntemi, sürtünme karıştırma kaynağının nokta halinde dikiş üreten bir versiyonudur. SKNK tekniği, geleneksel ergitmeli kaynak teknikleri ile karşılaştırıldığında en önemli avantajlarından biri ana metalin ergimeden kaynak işleminin gerçekleşmesidir [9]. Kaynak işleminde kullanılan kaynak takımı, karıştırıcı uç ve omuz olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir [10]. Belirli bir hızda dönen ve dikey yönde ilerleyen kaynak takımının, üst üste yerleştirilmiş iş parçalarına belirli bir derinliğe kadar dalması ve belirlenen derinlikte belirli bir süre dönmesi ile sürtünme ısı oluşur [11],[12]. Kaynak takımının dönmesi ile oluşan ısı ile yumuşayan malzeme plastik olarak deformasyona uğrar. Belirlenen dönme süresi sonunda kaynak takımının geri çekilmesi ile üst ve alt levha arasında katı hal birleştirme işlemi gerçekleşmiş olur. Şekil 1a'da kaynak takımının birleştirilecek levhalara doğru dalma işlemi, Şekil 1b'de birleşme ve Şekil 1c'de takımın geri çekilmesi gösterilmektedir [13].



Şekil 1: SKNK yöntemi şematik gösterimi. a): Dalma, b): Birleşme, c): Geri çekilme [13].

SKNK'de takım ucunun şekli, çapı ve uzunluğu birleştirilecek malzemenin ısınmasını ve karıştırma hareketini direkt olarak etkilemektedir. Kaynak takım ucu geometrisi kaynak dikışı oluşumunu etkileyerek kaynağın kopma kuvvetini değiştirmektedir. Uygun olmayan takım uçları ile yapılan birleştirmelerde düşük kopma kuvveti ve kaynak hataları elde edilmektedir [14]. Bu yüzden SKNK işleminde takım özellikleri ve kaynak parametreleri çok önemlidir [5],[15].

Bu çalışmada, yeni ve gün geçtikçe uygulama alanı artan SKNK ile iki farklı alaşımdaki alüminyum levhaların problemsiz ve yüksek kopma mukavemeti elde etmek için gerekli kaynak parametrelerinin bulunması hedeflenmiştir. Bunun için kaynak parametreleri Taguchi yaklaşımı ile deney tasarımı oluşturulmuştur. En yüksek-en iyi deney yaklaşımı ile kaynak parametrelerinin kaynak kopma mukavemetine etkileri belirlenmiştir. Ayrıca kaynak parametreleri ayrı ayrı değerlendirilip parametrelerin hangi aralıklarda seçilmesi durumunda problemsiz kaynak elde edileceği, kaynak parametreleri ile etki oranları grafiklerle belirlenmiştir.

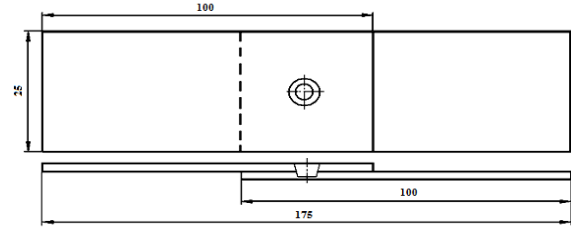
Taguchi uzun yıllar yaptığı çalışmalar sonucunda, çok az deneme ile çok iyi neticeler veren ortogonal dizileri geliştirmiştir. Ortogonal diziler, faktör seviyelerini, teker teker

değiştirmek yerine, eş zamanlı değiştirmeyi önermektedir. Bu sayede, deney tasarımında Taguchi yaklaşımı kimya, elektronik ve makine sektöründe olduğu gibi üretim sektöründe de kabul görmüştür. Mühendisliğin birçok dalında Taguchi metodu [TM] çalışma parametrelerinin tespitinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır [16]. Taguchi'nin ana amacı, ürünün hedeften olası sapmalarını etkileyecek olan, sürecin ve ürünün tasarımında etkili olan kontrol edilebilir faktörlerin ve bunların seviyelerinin tanımlanması gerektiğidir. Ayrıca Taguchi kötü etkileri kaldırmak yerine kötü etkilere sebep olan faktörlerin üzerinde çalışmayı tercih etmiştir, böylece üründe yüksek kaliteye ulaşılmış olmaktadır.

## 2 Yöntem

### 2.1 Deneysel çalışmada kullanılan malzeme ve kaynak yöntemi

Bu çalışmada, SKNK için kullanılan alüminyum alaşımı levhaların kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir. 1.6 mm kalınlığında AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve 1.5 mm kalınlığındaki AA5754-H22 alüminyum alaşımı levhalar 25x100 mm ölçüsünde kesilerek kaynak için hazır hale getirilmiştir (Şekil 2). Bu levhaların 25x25 mm ölçülerindeki kısımları tüm SKNK deneyleri için kaynak bölgesi olarak standartlaştırılmıştır.



Şekil 2: Çekme-makaslama numunesinin şematik boyutları.

Deneysel çalışmalarda, AA2024-T3 alüminyum alaşımı levha üstte olacak şekilde SKNK işlemi nümerik kontrollü freze tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Birleştirme noktasının çekme-makaslama numunesinin tam ortasında gerçekleşmesi için bağlama kalıbı kullanılmış ve bu kalıp sayesinde yapılan tüm kaynak işlemleri standart halde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te yapılan SKNK işlemi ve bağlama kalıbı gösterilmiştir.



Şekil 3: AA2024-T3/AA5754-H22 alüminyum alaşımı levhaların SKNK ile birleştirme işlemi.

### 2.2 Takım geometrisi ve kaynak parametreleri

SKNK işleminde kullanılan kaynak takımı 1.2344 sıcak iş çeliğinden imal edildikten sonra su verme ısıl işlemi ile 56 HRC sertlik değerine ulaşmıştır. Kullanılan kaynak takımının omuz çapı 14 mm, omuz açısı 6° ve ucun uzunluğu 2.40 mm'dir (toplam levha kalınlıklarının %76'sı). Kaynak takımının alüminyum levhalara dalma hızı 0.35 mm/s olarak tüm deneyler için sabit tutulmuştur. Optimizasyonda kullanılan kaynak parametreleri ve seviyeleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Alüminyum alaşımı levhaların kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri.

|            | Mekanik Özellikler     |         | Kimyasal Bileşim (%) |      |      |      |      |     |      |      |      |
|------------|------------------------|---------|----------------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|
|            | Çekme Mukavemeti (MPa) | Uzama % | Al                   | Si   | Fe   | Cu   | Mn   | Mg  | Zn   | Ti   | Cr   |
| AA 2024-T3 | 435                    | 17      | 93.1                 | 0.07 | 0.14 | 4.5  | 0.65 | 1.5 | 0.01 | 0.02 | -    |
| AA5754-H22 | 245                    | 14      | 95.2                 | 0.25 | 0.31 | 0.02 | 0.38 | 3.2 | 0.18 | 0.12 | 0.23 |

Tablo 2: Kaynak parametreleri ve seviyeleri.

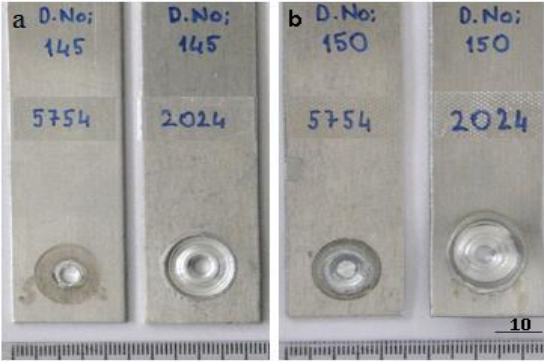
| Sembol | Kaynak Parametresi    | Birim  | Seviye 1 | Seviye 2 | Seviye 3 |
|--------|-----------------------|--------|----------|----------|----------|
| A      | Takım dönme hızı      | dev/dk | 1500     | 2100     | 3000     |
| B      | Takım bekleme süresi  | saniye | 2        | 5        | 10       |
| C      | Takım dalma derinliği | mm     | 2.45     | 2.55     | 2.65     |
| D      | Takım eğim açısı      | derece | 0        | 2        | 3        |

Birleştirilmiş levhaların çekme-makaslama deneyleri Zwick marka Z010 üniversal tip çekme cihazında JIS Z 3136 standardına göre yapılmıştır [17].

### 3 Bulgular

#### 3.1 AA2024-T3/AA5754-H22 Alüminyum alaşımı levhaların çekme-makaslama deneyi sonrası yüzey görünümleri

Şekil 4'te gösterildiği gibi SKNK uygulanmış alüminyum alaşımı levhaların çekme-makaslama deneyleri sonrasında genel olarak iki tip çesit kırılma tipinin meydana geldiği gözlenmiştir. Bunlardan birincisi, Şekil 4a'da gösterilen ve düşük kaynak kopma mukavemeti elde edilen çapraz birleşme kesilmesi (cross nugget failure), ikincisi ise, Şekil 4b'de gösterilen ve en yüksek kopma mukavemeti elde edildiği külçe çıkması (pull nugget failure) şeklinde gerçekleşen kırılma tipleridir [11],[18],[19].



Şekil 4: Çekme-makaslama testi sonrası üst ve alt levhaların yüzey görünümleri. a): Minimum sonuç elde edilen görünüm, b): Maksimum sonuç elde edilen görünüm.

Düşük kopma mukavemeti elde edilen numuneler incelendiğinde yetersiz nüfuz etme ve aşırı taşmaların meydana geldiği gözlenmiştir. Bu olumsuzluklar kaynak parametrelerinden yetersiz dalma derinliği, aşırı difüzyon ısı oluşumu ve yetersiz malzeme karıştırma hareketinden meydana gelmiştir. Bu olumsuzluklar giderilmesi uygun kaynak şartları ile rahatlıkla giderilebilmektedir. Yetersiz dalma derinliği ucun kaynatılacak parçalara dalması, aşırı difüzyon ısı oluşumu ve yetersiz malzeme karıştırma hareketi uygun takım dönme hızı ile minimize edilir. Yüksek kopma mukavemeti elde edilen numuneler incelendiğinde ise nüfuz etmenin tam olduğu, dalma derinliğinin ve takım dönme hızının

yeterli şartlarda olduğu açıkça görülmektedir. Çekme deneyleri sonrasında alt levhada külçe çıkması oluşması deney şartlarının doğru seçildiğinin bir göstergesidir.

#### 3.2 SKNK'li birleştirmelerin taguchi metoduyla çekme-makaslama kuvveti analizi

Klasik deney tasarım yöntemlerinin kullanımı endüstriyel şartlar altında verimli olamamaktadır. Sistemi etkileyen faktörlerin sayısı arttıkça gerekli olan deney sayısı da hızlı bir şekilde artmakta, maliyetler yükselmekte ve uygulamalar zorlaşmaktadır. Böyle durumlarda kesirli faktöriyel tasarım olan Taguchi Metodu (TM) uygulanması daha verimli ve kolay olmaktadır. TM özellikle yüksek maliyetli çalışmalarda deney tekrarını engelleyen; kısaca asgari deney sayısı ile başarılı analiz sonuçları elde edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Genichi Taguchi, kendi adıyla anılan yaklaşımı ile deneylerin gerçekleştirilmesi ve değerlendirilmesi ile verimliliği arttıracak bir çözüm getirmiştir. Böylece deney öncesi yapılan çalışmalar sonucunda deney sayılarında önemli derecede azalma gözlenmiştir. Çalışmamızda, 4 kaynak parametresi ile optimum kaynak şartlarını tespit etmek için  $3^4=81$  adet deney yapmamız gerekirdi. Fakat, Taguchi metodunda ise Tablo 3'te gösterilen 9 adet deney (L9 Ortogonal Sıralama ile Deney Planı) ile optimum kaynak parametreleri hakkında bilgi sahibi olunabilir [20].

TM ile analiz işlemleri ile kaynak parametrelerinin etkisini açıklamak için Minitab 15 [21], istatistik program kullanılmıştır. Yapılan 9 adet deneyden elde edilen kopma mukavemeti sonuçlarının her biri taguchi metoduyla Sinyal/gürültü (S/N) oranı bulunmuştur. S/N oranı değeri küçük olan değer kötü, büyük olan değer en iyi, nominal değer iyi olarak değerlendirilir. Hedeflenen değere göre S/N farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir [18]. Çalışmamızda, S/N oranı büyük olan değer en iyi olarak analiz edilmiştir. S/N oranı Denklem (1)'deki formül kullanılarak belirlenmiştir. Denklem (2)'deki formüle ise (OSS): Ortalama standart sapma, m: deney sayısını ve Ti: deney numarasına göre çekme-makaslama kuvvetidir. En büyük-en iyi kalite karakteristiği için ortalama standart sapma (OSS), Denklem (2)'den hesaplanmaktadır [20],[22].

$$\eta = -10 \log(O.S.S.) \quad (1)$$

$$O.S.S. = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^m \frac{1}{T_i^2} \quad (2)$$

Tablo 4'ün son sütununda her kaynak deneyi için Denklem (1) ve Denklem (2)'deki formüller kullanılarak hesaplanan S/N oranı gösterilmiştir.

Tasarlanan deney planı ortogonal olduğu için her kaynak parametresinin etkisini her kaynak seviyesi için bulmak mümkündür. Örneğin, takım dönme hızının 1. 2. ve 3. seviyelerinin S/N oranını bulmak için 1-3, 4-6 ve 7-9 deneylerinin S/N oranlarının ortalamasının hesaplanması gerekir. Hesaplanan S/N değerleri, Tablo 5'te her kaynak parametre seviyesi için ortalama S/N oranı olarak verilmiştir. Bu tabloya ortalama standart sapma oranları adı verilmiştir. 9 adet deneyin ortalama standart sapması ise 7.12 dB olarak bulunmuştur. Bu değer optimum kaynak parametrelerinin seçilmesinde çok önemlidir.

Tablo 5'te çekme deneyi sonuçlarına bağlı olarak gösterilen OSS oranları her kaynak parametresinin çekme-makaslama kuvveti üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

Tablo 5 incelendiğinde ise en yüksek frekansa sahip parametrenin kaynak kopma mukavemetine etkisi anlaşılır. Takım dönme hızının 9.043 frekans değeri ile en etkin parametre olduğu buradan da açıkça anlaşılmaktadır. Bu parametrelerin etkilerini daha açık ortaya koymak ve parametrelerin birbiri ile olan ilişkisini tespit etmek için Minitab 15 istatistik programından yararlanılmıştır. Bu program vasıtasıyla kaynak parametreleri ikiserli gruplar halinde değerlendirilip kaynak kopma kuvveti üzerindeki etkileri grafiksel olarak incelenmiştir. Şekil 5'te kaynak parametrelerinin kaynak kopma mukavemetine etkileri gösterilmiştir.

Grafiklerdeki siyah bölgeler 3.25 kN üzerindeki çekme makaslama kuvvetini göstermektedir. Grafik üzerinde iki kaynak parametresi ihmal edildiği için sadece iki kaynak parametresinin birbiri ile müşterek etkisi incelenmiştir. Bu sayede kabaca optimum kaynak parametreleri tayin edilebilir.

Tablo 3: L9 ortogonal sıralama ile deney planı.

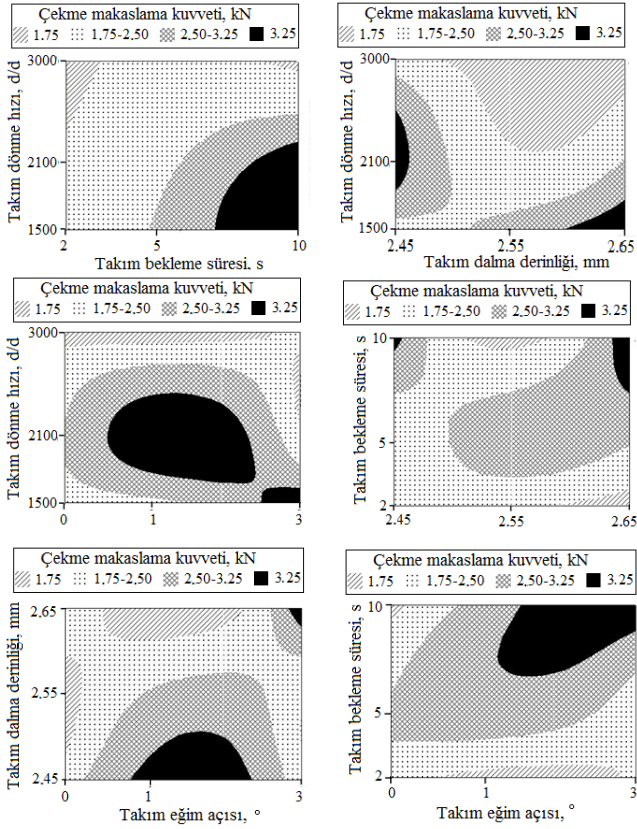
| Deney Sayısı | A                         | B                         | C                          | D                    | E    |
|--------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|------|
|              | Takım Dönme Hızı (dev/dk) | Takım Bekleme Süresi (sn) | Takım Dalma Derinliği (mm) | Takım Eğim Açısı (°) | Hata |
| 1            | 1500                      | 2                         | 2.45                       | 0                    |      |
| 2            | 1500                      | 5                         | 2.55                       | 2                    |      |
| 3            | 1500                      | 10                        | 2.65                       | 3                    |      |
| 4            | 2100                      | 2                         | 2.55                       | 3                    |      |
| 5            | 2100                      | 5                         | 2.65                       | 0                    |      |
| 6            | 2100                      | 10                        | 2.45                       | 2                    |      |
| 7            | 3000                      | 2                         | 2.65                       | 2                    |      |
| 8            | 3000                      | 5                         | 2.45                       | 3                    |      |
| 9            | 3000                      | 10                        | 2.55                       | 0                    |      |

Tablo 4: Çekme-makaslama deneyi sonuçları ve hesaplanan S/N oranları.

| Deney Sayısı | Çekme-Makaslama Kuvveti | S/N Oranı |
|--------------|-------------------------|-----------|
|              | (kN)                    | (dB)      |
| 1            | 2.11                    | 6.48      |
| 2            | 2.79                    | 8.91      |
| 3            | 3.86                    | 11.73     |
| 4            | 1.89                    | 5.52      |
| 5            | 2.56                    | 8.16      |
| 6            | 3.55                    | 11.00     |
| 7            | 1.40                    | 2.92      |
| 8            | 2.00                    | 6.02      |
| 9            | 1.47                    | 3.34      |

Tablo 5: Kaynak kopma kuvvetlerinin OSS oranları.

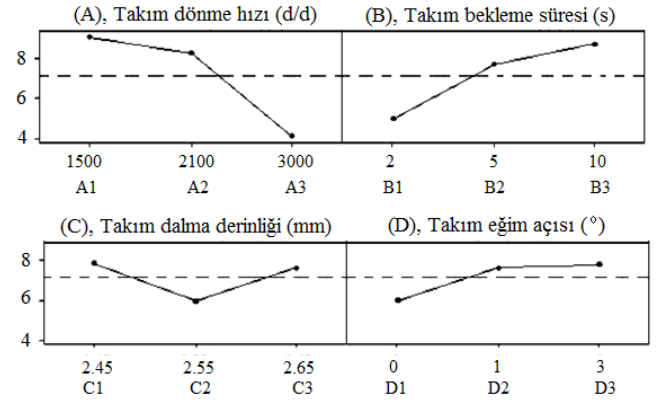
| Sembol | Kaynak Parametresi    | Ortalama S/N Oranı, dB |          |          |
|--------|-----------------------|------------------------|----------|----------|
|        |                       | Seviye 1               | Seviye 2 | Seviye 3 |
| A      | Takım dönme hızı      | 9.043                  | 8.283    | 4.097    |
| B      | Takım bekleme süresi  | 4.979                  | 7.699    | 8.694    |
| C      | Takım dalma derinliği | 7.837                  | 5.929    | 7.606    |
| D      | Takım eğim açısı      | 5.999                  | 7.613    | 7.761    |



Şekil 5: Optimum kaynak parametreleri için ANOVA analizi.

Örneğin, tüm deney sonuçları incelendiğinde kaba olarak tüm kaynak parametrelerinin çalışma aralıkları grafikten tespit edilebilir. Buna göre, kaynak takımının dönme hızının 1500-2400 dev/dk arasında, takımın dönme esnasındaki bekleme süresinin 6-10 saniye, takımın iş parçasına dalma derinliğinin 2.61-2.65 ve 2.45-2.50 arasında seçileceği ve son olarak eğim açısının 0.5-3 derece arasında olacağı grafikte açıkça görülmektedir. Burada en önemli sonuç olarak takım eğim açısının neredeyse bütün şartlarda olumlu sonuç verdiği anlaşılmaktadır. Bir diğer önemli nokta ise, takım dalma derinliğinde parametrelerin etkinliğinin kesikli olmasıdır. 2.45-2.50 ve 2.61-2.65 arasında olması gerektirir. Bu aralıklar dışına çıktığında optimum kaynak kopma mukavemeti elde etmemiz zorlaşmaktadır. Diğer iki parametrede ise belirlenen aralıklarda herhangi bir değer seçilip kaynak yapılabilir. Sadece grafik okuma ile uygun kaynak parametrelerinin tespiti rahatlıkla yapılabilmektedir [8],[12]. Tablo 5'teki sonuçlardan faydalanarak elde edilen S/N oranı etki grafikleri Şekil 6'da görülmektedir. Bu şekildeki kesikli çizgi bütün deneylerin ortalama S/N oranını (7.12 dB) göstermektedir. Ayrıca, her grafik her kaynak parametresinin

seviye etkisini ifade etmektedir [16]. Örneğin; takım dönme hızının artması ile (dev/dk) (A parametre seviyesi) ortalama S/N oranı yani kaynak kopma kuvveti azalmaktadır. Takımın dönerken bekleme süresinde ise (B parametre seviyesi) bekleme süresi arttıkça S/N oranının yani kaynak kopma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Takım dalma derinliğinin (C parametresi) kaynak kopma kuvveti üzerinde farklı etkiler gösterdiği ve belirli aralıklarda deneylerin yapılacağını, bu yüzden de kritik bir faktör olduğu Şekil 6'dan anlaşılmaktadır. Son olarak, takım eğim açısının kaynak kopma kuvveti üzerinde çok az bir etkisinin olduğu frekans değerinin fazla değişiklik göstermemesinden anlaşılmaktadır.



Şekil 6: Kaynak kopma kuvvetlerinin ortalama S/N oranı etki grafiği.

### 3.3 Varyans analizi (Analysis of variance)

İstatistiksel bir yöntem olan varyans analizi (ANOVA) iki veya daha fazla kaynak parametresi arasındaki etkileri belirlemek için kullanılmıştır. ANOVA değerlendirmesinde amaç, SKNK'li birleştirmelerin çekme-makaslama kuvvetini etkileyen kaynak parametrelerinin önem derecesini belirlemektir [11]. Tablo 6'da çekme-makaslama kuvveti için ANOVA analizi gösterilmektedir. Kaynak parametreleri ile elde edilen optimizasyon deneylerinde sonra yapılan ANOVA analizi sonrasında etkinlik (katkı) yüzdelere bakıldığında en yüksek katkı %44.74 ile takım dönme hızı (A faktörü) olurken ikinci en önemli katkı %31.60 oranı ile takımın dönerken bekleme süresi (B faktörü) ile sağlanmıştır. Bu iki faktör optimum kaynak kopma kuvveti elde etmek için yaklaşık %76'lık bir öneme sahiptir. Ayrıca, takım dalma derinliğinin %10.16 ve takım dönme hızının %9.37 oranında bir etkisi olduğu hesaplanmıştır. ANOVA analizi sonucunda hata oranı %3.36 olmuştur. Optimizasyon çalışmalarında oluşan hata miktarının %5'in altında olması, yapılan optimizasyonun kabul edilebilirliğini göstermektedir [22]. Elde edilen %3.36'lık oran yapılan optimizasyonun geçerliliğini açıkça göstermektedir.

Tablo 6: Çekme-makaslama kuvveti için ANOVA analizi.

| Sembol | Kaynak Parametreleri       | Serbestlik Derecesi (v) | Kareler Toplamı (SS) | Kareler Ortalaması | Katkı Yüzdesi (%) |
|--------|----------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| A      | Takım dönme hızı (dev/dk)  | 2                       | 2.730                | 1.365              | 44.74             |
| B      | Takım bekleme süresi (sn)  | 2                       | 1.928                | 0.964              | 31.60             |
| C      | Takım dalma derinliği (mm) | 2                       | 0.666                | 0.333              | 10.16             |
| D      | Takım eğim açısı (°)       | 2                       | 0.572                | 0.286              | 9.37              |
| Hata   |                            | 2                       | 0.205                | 0.053              | 3.36              |
| TOPLAM |                            | 8                       | 6.101                |                    | 100.0             |

Yapılan deneysel çalışma sonucunda bu malzeme grubu için yapılacak SKNK'nin kaynak parametrelerini seçerken en önemli faktör olan takım dönme hızı ve takımın dönerken beklenen süre üzerinde durulması gerekir. Ayrıca takım dalma derinliğinin de belirli aralıklarda seçilmesi gereklidir (Şekil 5). Takım dalma derinliği sadece 2.45-2.50 ve 2.61-2.65 mm aralığında olması kaynak kalitesi ve mukavemeti için çok büyük önem arz etmektedir. Takım eğim açısının SKNK için önemli faktör olmadığı da Şekil 5 ve Şekil 6'dan açıkça görülmektedir. Şekil 5'e göre belirlen aralığın çok geniş olması (0.5-3 derece), Şekil 6'da ise frekans değerinin ortalama S/N değerine çok yakın olması ve bu parametrenin kaynak kopma mukavemetine etki oranının %9'da kalması parametre etkinliğini düşürmektedir. Buna göre takım dönme hızı ve takım bekleme süresi seçildikten sonra takım dalma derinliğinin belirlenen aralıklarda seçilmesi koşulu ile uygun birleştirmeler rahatlıkla gerçekleştirilebilir.

ANOVA ve ortalama S/N oranı etki grafiği analizlerinden optimum kaynak kopma kuvvetini veren kaynak parametreleri en büyük-en iyi kriterine göre incelenmiştir. Karşılaştırma deneylerinin yapılabilmesi için en iyi (optimum kaynak parametresi) ve orta değerlerin (başlangıç parametresi) karşılaştırılması gerekmektedir. Bunun için en iyi olarak Şekil 6'dan A1B3C1D3, 1500 dev/dk takım dönme hızı, 10 sn takım bekleme süresi, 2.45 mm takım dalma derinliği ve 3° takım eğim açısı olarak tespit edilmiştir. Şekil 6'daki S/N grafiğinden her parametre için orta sonuç alınarak bu sefer başlangıç kaynak parametreleri (A2B2C3D2) elde edilmiştir.

Karşılaştırma deneylerini için hem optimum kaynak parametrelerinde hem de başlangıç parametrelerinde 4 deney yapılarak ortalama kaynak kopma kuvveti ve S/N oranları elde edilmiştir. Tespit edilen deney parametrelerine ait sonuçların karşılaştırılması sayesinde yapılan optimizasyonun doğruluğu irdelenmiştir. Parametrelerin karşılaştırılması optimum kaynak parametresine göre elde edilen değerlerin başlangıç parametresine göre oranlanması ile elde edilmiştir. Kaynak kopma kuvvetinde %42 oranında ve S/N oranında 2.62 dB artış sağlandığı görülmüştür. Karşılaştırma deneylerinin S/N oranları ve kaynak kopma kuvveti değerleri Tablo 7'de gösterilmiştir. Burada hesaplanan değer ile deneysel sonuç arasında büyük farklılık ortaya çıkmıştır. Seçilen parametrenin doğru seçildiği ve öngörülenden daha fazla mukavemet değerine ulaştığı anlaşılmaktadır.

SKNK'de esas olan kaynak takımının yeterli ısı üretmesi ile yüksek nüfuz sağlaması sonucunda alt-üst parçaların birbirine birleştirilmesidir. Düşük ısı üretilmesi ile oluşan birleştirilmelerde kaynak kopma mukavemeti düşük çıkmaktadır. Bu çalışmada, takım eğim açısının S/N grafiğinde büyük değişimler oluşturmaması ve %9.87 oranında kaynak

kopma mukavemetine etki gösterdiğinden dolayı yeterli ısı ve nüfuz etmede önemli bir etki göstermediği anlaşılmaktadır. Ayrıca, dalma derinliğinin artması kaynak kopma kuvvetini olumsuz yönde etkilemektedir. Takım dalma derinliğinin artması ile aşırı ısı üretimi ve malzeme et kalınlığının azaldığı görülmektedir. Bu olumsuz durumlar ve %10.16'lık bir katkı söz konusu olduğu için kaynak kopma mukavemetinde önemli etkisi yoktur. Şekil 5 ve Şekil 6 dikkatlice incelendiğinde dalma derinliğinde kritik noktalar (2.45-2.50 ve 2.61-2.65) oluşmuştur. Takım dalma derinliği bu aralıklarda seçilmelidir. Şekil 5 yardımı ile de diğer iki önemli faktör olan takım dönme hızı ve takım bekleme süresinin hangi şartlarda kullanılacağına bakılmalıdır. Sonuç olarak, SKNK'de optimum kaynak kopma kuvveti elde etmek için uygun kaynak parametrelerinin seçilmesi çok büyük önem arz etmektedir.

#### 4 Sonuçlar

AA2024-T3 ve AA5754-H22 alüminyum alaşımı levhaların SKNK ile birleştirilmesinde elde edilen sonuçlar aşağıdadır.

- SKNK uygulanmış alüminyum alaşımı levhaların çekme-makaslama deneyleri sonrasında iki çeşit kırılma tipinin meydana geldiği gözlenmiştir. Bunlardan birincisi, düşük kaynak mukavemeti elde edilen çapraz birleşme kesilmesi (cross nugget failure), ikincisi ise en yüksek çekme-makaslama kuvveti değerlerinin elde edildiği külçe çıkması (pull nugget failure) şeklinde gerçekleşen kırılma tipleridir,
- Takım dönme hızı ve takım bekleme süresinin kaynak kopma kuvveti üzerinde etkin parametreler olduğu tespit edilmiştir. Bu iki kaynak parametresi kaynak kopma kuvveti üzerinde %76.34 oranında etkili olmaktadır. Takım dönme hızı %44.74 ile birinci seviyede ve takım bekleme süresi ise %31.60 ile ikinci seviyededir,
- Elde edilen sonuçlara göre takım dalma derinliğini seçerken çok dikkat edilmesi gereklidir. Diğer parametreler ne olursa olsun dalma derinliği olarak kesinlikle bu aralıklarda çalışılmalıdır(2.45-2.50 ve 2.61-2.65 mm),
- Taguchi metodu ile yapılan optimizasyonda kaynak kopma kuvvetinde başlangıç parametresine göre %42 oranında artış sağlanmıştır.

#### 5 Teşekkür

Yazarlar, "FEN-C-YLP-130313-0087" nolu proje kapsamında verdiği finansal destekten ötürü Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Koordinasyon Birimine (BAPKO) sonsuz şükranlarını sunar.

Tablo 7. Karşılaştırma deneylerinin sonuçları.

|                           | Basınç        | Optimum Kaynak Parametreleri |          | İYİLEŞTİRME  |
|---------------------------|---------------|------------------------------|----------|--------------|
|                           | Parametreleri | ile Yapılanlar               |          |              |
|                           | (Deneysel)    | Hesaplanan                   | Deneysel |              |
| Parametre seviyesi        | A2B2C3D2      | A1B3C1D3                     | A1B3C1D3 |              |
| Kopma Kuvveti (N)         | 2.76          | 3.09                         | 3.92     | <b>%42.0</b> |
| Hesaplanan S/N Oranı (dB) | 8.72          | 9.77                         | 12.39    |              |

## 6 Kaynaklar

- [1] Kim DC, Park HJ, Hwang IS, Kang MJ. "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.
- [2] Mei L, Yan D, Chen G, Xie D, Zhang M, Ge X. "Comparative Study on CO<sub>2</sub> Laser Overlap Welding and Resistance Spot Welding for Automotive Body in White". *Materials & Design*, 78, 107-117, 2015.
- [3] Er O. Elektrik Direnç ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynaklı Alüminyum Alaşımı Bağlantıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye, 2010.
- [4] Buffa G, Fanelli P, Fratini L, Vivio F. "Influence of Joint Geometry on Micro and Macro Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Joints". *Procedia Engineering*, 81, 2086-2091, 2014.
- [5] Mert Ş, Mert S. "Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Yönteminin İncelenmesi". *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2(1), 26-35, 2013.
- [6] Bilici MK, Yükler Aİ, Kurtulmuş M. "Yüksek Yoğunluklu Polietilen Levhaların Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında Kaynak Ucu Geometrisinin Kaynak Mukavemetine Etkisi". *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 23(3), 111-122, 2011.
- [7] Külekçi MK, Er O. "Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynaklı EN AW-5005 (Al Mg1) Alüminyum Alaşımı için Optimum Kaynak Parametre Seviyelerinin Belirlenmesi". *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(3), 537-545, 2012.
- [8] Kaçar R, Ertek HE, Demir H, Gündüz S. "Al-Cu-Al Malzeme Çiftinin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Kabiliyeti". *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(2), 349-357, 2011
- [9] Su P, Gerlich A, North TH, Bendzsak GJ. "Friction Stir Spot Welding of Aluminum and Magnesium Alloys". *Materials Forum*, 29, 290-294, 2005.
- [10] Külekçi MK, Şık A, 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), 877-882, 2008.
- [11] Bozkurt Y, Bilici MK. "Application of Taguchi Approach to Optimize of FSSW Parameters on Joint Properties of Dissimilar AA2024-T3 and AA5754-H22 Aluminum Alloys". *Materials and Design*, 51, 513-521, 2013.
- [12] Tozaki Y, Uematsu Y, Tozaki K. "Effect of Tool Geometry on Microstructure and Static Strength in Friction Stir Spot Welded Aluminium Alloys". *International Journal Machine Tools Manufacture*, 47, 2230-2236, 2007.
- [13] Lathabai S, Painter MJ, Cantin GMD, Tyagi VK. "Friction Spot Joining of an Extruded Al-Mg-Si alloy". *Scripta Materialia*, 55(10), 899-902, 2006.
- [14] Hirasawa S, Badarinarayan H, Okamoto K, Tomimura T, Kawanami T. "Analysis of Effect of Tool Geometry on Plastic Flow During Friction Stir Spot Welding Using Particle Method". *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 455-1463, 2010.
- [15] Mert Ş, Mert S. "Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Yönteminde Kullanılan Makine ve Ekipmanların İncelenmesi". *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2(3), 121-129, 2013.
- [16] Bilici MK, Yükler Aİ. "Polietilenin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Parametrelerinin Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu". *VII Ulusal Kaynak Teknolojisi Kongre ve Sergisi*, Ankara, Türkiye, 14-15 Kasım 2011.
- [17] Japanese Standards Association. "Specimens Dimensions and Procedure for Shear Testing Resistance Spot and Embossed Projection Welded Joints". Japanese Standards Association. Japan, JIS Z 3136, 1999.
- [18] Li W, Li J, Zhang Z, Gao D, Wang W, Dong C. "Improving Mechanical Properties of Pinless Friction Stir Spot Welded Joints by Eliminating Hook Defect". *Materials & Design*, 62, 247-254, 2014.
- [19] Bozkurt Y, Salman S, Çam G. "Effect of Welding Parameters on Lap Shear Tensile Properties of Dissimilar Friction Stir Spot Welded AA 5754-H22/2024-T3 Joints". *Science and Technology of Welding and Joining*, 18(4), 337-345, 2013.
- [20] Tutar M, Aydın H, Yüce C, Yavuz N, Bayram A. "The Optimisation of Process Parameters for Friction Stir Spot-Welded AA3003-H12 Aluminium Alloy Using a Taguchi Orthogonal Array". *Materials & Design*, 63, 789-797, 2014.
- [21] Minitab 17. *User Manual Making Data Analysis Easier*. Minitab Inc. State College, USA, 2014.
- [22] Campanelli LC, Suhuddin UFH, Santos JF, Alcântara NG. "Parameters Optimization for Friction Spot Welding of AZ31 Magnesium Alloy by Taguchi Method". *Soldagem & Inspeção*, 17(1), 26-31, 2012.