

## Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş 6061 Alüminyum Alaşımlı Sacların Mekanik Özellikler Yönünden İncelenmesi

Çetin Batuk<sup>1,\*</sup> , Hüseyin Demirtaş<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 21.11.2023

**Kabul:** 19.12.2023

**Anahtar Kelimeler:**

Sürtünme Karıştırma

Kaynak

SKK

AA6061-T6

### ÖZET

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), farklı formlarda tasarlanmış uç ve omuza sahip olan takımın alın, bindirme veya farklı pozisyonlarda yerleştirilen parçaların boyunca dönerek ilerlediği bir kaynak yöntemidir. Aynı zamanda kaynak bölgesinde iyi mekanik özellikler sunan katı hal birleştirme tekniğidir. Önemli avantajlarından dolayı SKK birleştirme yöntemi son yıllarda gelişmekte olup geliştirme, araştırma ve kullanılması sürekli artış göstermektedir. Diğer kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde sıcak çatlama, porozite ve çarpılma gibi problemler yaşanan çeşitli alüminyum alaşım malzemelerde bu birleştirme yönteminin artarak kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada savunma ve havacılık sanayinde sıklıkla kullanılan AA6061-T6 sacların (0.5mm-6mm) SKK ile alın birleştirmeleri çekme dayanımı yönünden incelenmiştir. Bu amaçla 17 farklı çalışma verisi çekme mukavemetleri yönünden incelenmiş ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Çalışmalar neticesinde birleştirme mukavemetlerinin kullanılan sac mukavemetlerine oranla %30-90 aralığında dağılmakla birlikte medyan değerlerinin %60-70 aralığında toplandığı tespit edilmiştir. Çalışmalarda en sık kullanılan 6 mm saclarda ise ortalama mukavemetlerin %75 civarında olduğu belirlenmiştir. Birleştirmelerde tasarımın ve takım geometrisinin en önemli parametreler olarak öne çıktığı görülmüştür.

## Investigation of Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy Sheets Welded by Friction Stir Welding

### ARTICLE INFO

**Received:** 21.11.2023

**Accepted:** 19.12.2023

**Keywords:**

Friction Stir

Welding

FSW

AA6061-T6

### ABSTRACT

Friction stir welding (FSW) is a welding method in which a tool with a tip and shoulder designed in different forms rotates along the parts placed butt, lap or in different positions. It is also a solid-state joining technique that offers good mechanical properties in the weld area. Due to its significant advantages, the FSW combining method has been developing in recent years, and its development, research and use are constantly increasing. It has been observed that this joining method is increasingly used in various aluminium alloy materials that have problems such as hot cracking, porosity and distortion when joining with other welding methods. In this study, butt joints of AA6061-T6 sheets (0.5mm-6mm), which are frequently used in the defence and aerospace industry, were examined in terms of tensile strength. For this purpose, 17 different data sources were examined in terms of tensile strength and evaluated statistically. As a result of the studies, it was determined that the joint strengths were distributed in the range of 30-90% compared to the sheet strengths used, but the median values were collected in the range of 60-70%. It was determined that the average strength of 6 mm sheets, which were most frequently used in the studies, was around 75%. It has been observed that design and tool geometry are the most important parameters in joints.

\*Sorumlu yazar, e-posta: cetin.batuk@tubitak.gov.tr

To cite this article: Ç. Batuk, H. Demirtaş, Mekanik Özellikler Yönünden Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş 6061 Alüminyum Alaşım Sacların İncelenmesi, Manufacturing Technologies and Applications, 4(3), 167-178, 2023.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1393930>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İmalat teknolojisinde iki veya daha fazla parçanın birleştirilmesi için en yaygın kullanılan yöntem kaynaklı birleştirmelerdir. Bu kaynak yöntemlerinden biri de sürtünme karıştırma kaynağı (SKK)'dır. SKK, 1991 yılında Birleşik Krallık Kaynak Enstitüsü'nde (TWI) katı hal birleştirme tekniği olarak geliştirilmiştir. Başlangıçta özellikle sıcak çatlama, porozite ve çarpılma olmaksızın, ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi zor olan alüminyum alaşımları için geliştirilmiştir [1]. Günümüzde, birçok araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılan ve pek çok sektörde kullanım alanına sahip olan bir kaynak yöntemi haline gelmiştir. Ayrıca yirmi yıllık gelişim ile alüminyum alaşımlarını içeren savunma ve havacılık uygulamalarında uygulanabilir ve önemli bir üretim yöntemi haline gelmiştir [2–6]. SKK'nın temel yapısı oldukça basittir. Farklı formlarda tasarlanmış uç ve omuzla sahip olan takımın alın, bindirme veya farklı tiplerde yerleştirilen parçaların boyunca dönerek ilerlediği bir kaynak yöntemidir. Birleştirilecek parçalar kaynak yapılacak tezgâhta uygun bir fikstür ile sıkıca sabitlenir. Omuz ve pimden oluşan takım kendi eksenine etrafında döner ve tanımlanmış bir kuvvetle iki iş parçası arasındaki bağlantı noktasına götürülür. Pim ve omuzun formu ve dönme hareketi sayesinde sürtünmeden kaynaklı ısı oluşur. Dönen takım kaynak boyunca belirli bir ilerleme kuvveti ile ilerletilir. Plastik deformasyona uğrayan malzemelerin karıştırılması ile sürtünme karıştırma kaynağı gerçekleşir. Kaynak işlemi sırasında malzeme yüksek sıcaklıkta yoğun plastik deformasyona uğrar ve bunun sonucunda ince yapıyı yeniden kristalize taneler oluşur [7–10]. Bu ince mikro yapı sayesinde kaynak bölgesinde iyi mekanik özellikler elde edilir.

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak işlemi malzemelerin ergime sıcaklığının altında yapıldığından distorsiyon düşük ve mekanik özellikler yüksek olmaktadır [11–14]. Diğer kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında çok daha az enerji tüketilir. Düşük enerji tüketimi, koruyucu gaz ve ilave tel kullanılmaması hem çevre dostluğu hem de ekonomiklik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Kaynaklanacak parçaların sıkı sabitlenme gerekliliği, kaynak deliğinin kalması, kalın levhaların kaynağı için çok güçlü tezgâhlara ihtiyaç duyulması, her malzemenin kaynağının mümkün olmaması, kaynak hızının bazı ergitme kaynaklarından düşük olması, kalın parçaların ters çevrilip arka tarafından da kaynak edilmesine ihtiyaç duyulması ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olması gibi dezavantajlarının da olduğu görülmektedir [15–26]. Alın birleştirme, kenar birleştirme, T alın birleştirme, bindirme birleştirme, çoklu üst üste koyarak birleştirme, T üste koyarak birleştirme, dolgu birleştirme ve boru birleştirme olmak üzere birçok birleştirme tiplerinin uygulanabilmesi de yöntemin avantajlı yanı olarak karşımıza çıkmaktadır [15, 27, 28]. Yukarıda bahsedilen avantajlara bakıldığında SKK' daki gelişim ve yaygın kullanım gelecek yıllar için artarak devam edeceği rahatlıkla söylenebilir.

AA6XXX ve AA7XXX serisi alaşımlar otomotiv, havacılık ve uzay sanayiinde sıklıkla tercih edilen düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli malzemelerdir. Yaygın kullanılan AA 6061-T6 malzeme, çökeltilmeyle sertleştirilmiş Al-Mg-Si içeren alüminyum alaşımıdır ve yüksek korozyon direncine sahiptir. Yüksek mukavemet-ağırlık oranının ve iyi korozyon direncinin gerekli olduğu yapıların imalatında yaygın olarak kullanılır [29]. Fakat korozyon direnci, yoğunluk ve dayanım oranı açısından yüksek kabiliyete sahip olmasına rağmen kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür. Geleneksel yöntemlerle kaynaklı birleştirmelerinin kolay yapılamamasından veya yapılsa bile büyük termal gerilmeler oluşmasından dolayı bu alaşımların kullanımında zorluklar yaşanmaktadır. Uygulamalara bakıldığında ve literatür incelendiğinde AA6061-T6 malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile iyi birleştirmeler elde edilebildiği ve birçok sanayi uygulamasında kullanılmaya başlandığı görülmektedir. AA6061-T6 alaşımlarının kaynağında geleneksel ergitme kaynak teknolojisi kullanıldığında, aşırı ısı girdisi nedeniyle çökeltilerin yeterince çözünmesine ve tanelerin kabalaşmasına neden olmakta, bu da bağlantı mukavemetinde önemli bir kayıpla sonuçlanmaktadır [30]. Bu nedenle AA6061-T6 alaşımlarının birleştirilmesine uygun bir kaynak teknolojisine ve iyi belirlenmiş işlem parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. SKK ile başarılı birleştirmeler yapılan bu levhalarda çeşitli parametrelerin kullanıldığı görülmektedir (Tablo 1). Bu çalışmada birleştirilen levhalar alüminyum AA6061-T6 olarak sabit tutulmuş ve SKK ile

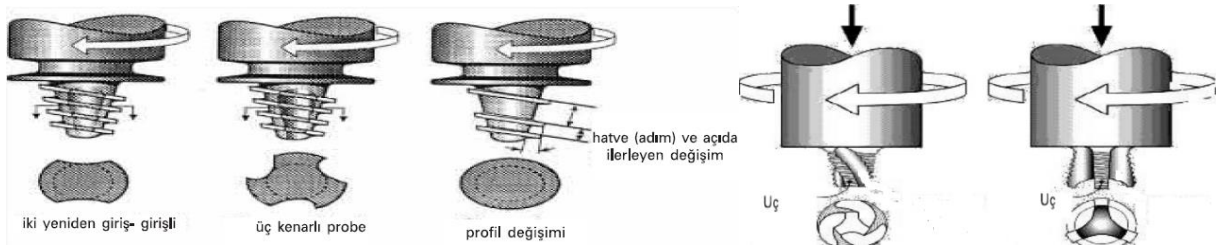
birleştirmeleri üzerine yapılan araştırmalar incelenerek kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkileri değerlendirilmiştir.

## 2. İŞLEM PARAMETRELERİ (PROCESS PARAMETERS)

Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi, termo-mekanik bir süreçtir ve bu sebeple geleneksel kaynak metodlarından farklı parametrelere bağlıdır [31–33]. Kaynak hızı, takım devri, omuz çapı ve takım yolu profili gibi işlem faktörlerinin değiştirilmesi yoluyla birçok çalışma kaynak kalitesini artırmaya yönelik yenilikçi yaklaşımı değerlendirmiştir [34]. İyi kaynak elde etmek için takım profili, dönme hızı ve takım hareketi gibi parametrelerinin optimizasyonu etkilidir [35]. Uygun olmayan parametreler ve kaynak prosesi nedeniyle katılma sırasında birçok kusur oluşabilmektedir [36–38]. SKK sürecinde etkili olan bu parametreler genel olarak takım geometrisi, kaynak parametreleri ve diğer parametreler olmak üzere üç grup altında toplanmaktadır.

### Takım geometrisi

Takımın pim ve omuz boyutları ile takımın eğim açısı takım geometrisinin ana değişkenleridir. Takım geometrisi süreç geliştirmenin en etkili yönüdür. Takım geometrisi malzeme akışında kritik bir rol oynar ve SKK'nın gerçekleştirilebileceği ilerleme hızını yönetir. Takımın lokal ısıtma ve malzeme karıştırma olmak üzere iki temel işlevi vardır. Takım, şematik olarak bir omuz ve bir pimden oluşur. Pim ve omuz ile iş parçası arasındaki sürtünme, ısınmanın ve SKK kaynak oluşumunun en büyük bileşenine neden olur. Isıtma ve karıştırma açısından pim ve omuzun boyutu ve formu önemlidir. Omuz aynı zamanda ısıtılan malzeme hacminin hapsedilmesini de sağlar. Takımın ikinci işlevi malzemeyi karıştırmak ve hareket ettirmektir. Mikro yapı ve özelliklerin tekdüzeliği ile proses yükleri takım tasarımı tarafından yönetilir. Genellikle içbükey bir omuz ve dişli silindirik pimler kullanılır. Takım geometrisinin metal akışı üzerindeki önemli etkisi göz önüne alındığında, malzeme akışı ile kaynak mikro yapısı arasındaki temel korelasyon, her takıma göre değişir. Takım tasarımı için sistematik bir çerçeve geliştirmek kritik bir ihtiyaçtır. Artan deneyim ve malzeme akışının anlaşılmasındaki bazı gelişmelerle birlikte takım geometrisi önemli ölçüde gelişmiştir. Takım üreticisi bazı firmalarda tasarladıkları özel SKK takımlarını ürün gamına eklemiştir. Şekil 1'de örnek bazı takım geometrileri görülmektedir.



Şekil 1. Çeşitli WhorlTM ve Triflute tasarımları (Various WhorlTM and Triflute designs) [39]

Malzeme akışını değiştirmek, karıştırmak ve proses yüklerini azaltmak için takımlara karmaşık özellikler eklenmiştir. Takım geometrisinin etkileri üzerine yapılan bir çalışmada, takım dönme hızı ve takım omuz çapının, mekanik özelliklerin yanı sıra korozyon direncini kontrol etmede en etkili parametreler olduğu bildirilmiştir [40].

### Kaynak parametreleri

SKK için saat yönünde veya saat yönünün tersine takım dönüş hızı ( $\omega$ , rpm) ve bağlantı hattı boyunca takım ilerleme hızı ( $v$ , mm/dak) olmak üzere iki kaynak parametresi oldukça önemlidir. Takımın dönmesi ve ilerlemesi, malzemenin dönen pim etrafında karıştırılmasına ve karıştırılan malzemeyi pimin önünden arkasına doğru hareket ettirerek kaynak işleminin oluşmasına neden olmaktadır. Daha yüksek takım dönüş hızı ve ilerleme uyumu ile artan sürtünmeli ısınma sayesinde

daha yüksek sıcaklık ve malzemenin daha yoğun karıştırılması sağlanır. Takım dönme ve ilerleme hareketlerine daha fazla odaklanması, mekanik alaşımlamada ve kaynağın diğer özelliklerinde önemli bir iyileşme sağlayabilir [41].

Takım dönüş hızı ve ilerleme hızına ek olarak bir diğer önemli proses parametresi iş parçası yüzeyine göre iş milinin veya takımın eğim açısıdır. Milin arka yöne doğru uygun bir eğimi, takım omuzunun karıştırılan malzemeyi pimin önünden arkasına verimli bir şekilde hareket ettirmesini sağlar. Ancak fazla verilecek açı, yeterli ısınma ve karıştırma olmadan malzemeyi arka tarafa hareket ettireceğinden iyi bir kaynak birleşimi olmamasına sebep olacaktır. Bu yüzden takıma verilecek açı uygun seçilmelidir.

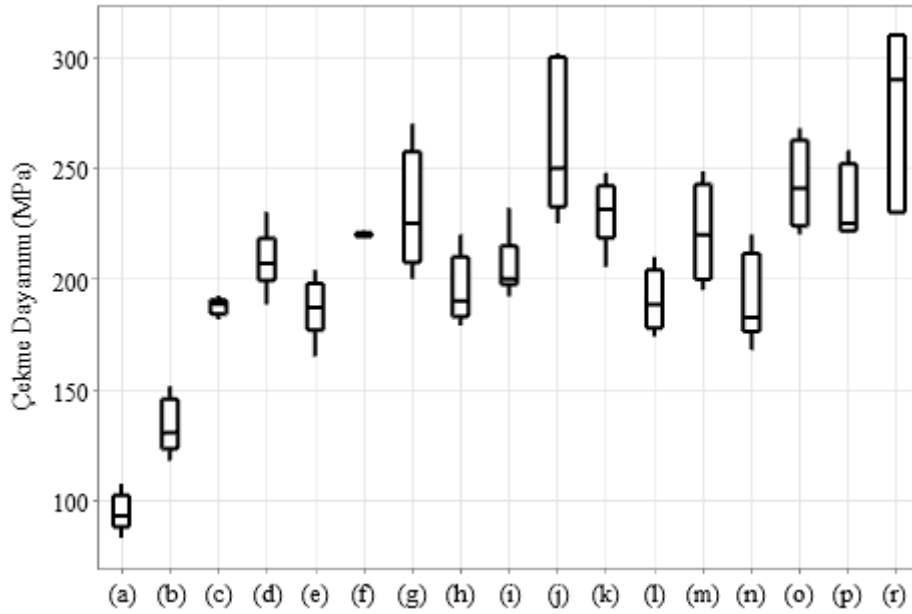
### **Diğer parametreler**

İş parçasının özellikleri, takım boyutu, iş parçası boyutu, takım malzemesi gibi parametreler SKK süreci için önem arz eden diğer parametreleri oluşturmaktadır [42]. Literatürde yukarıda belirtilen çoğu parametrenin belirlenmesi için çalışmalar bulunmaktadır [43-57]. Ancak bu çalışmada SKK için önemli olan bazı parametrelerin etkileri ele alınmıştır. Çalışma kapsamında farklı kalınlıklardaki AA6061-T6 sacların farklı parametreler kullanılarak SKK ile birleştirilmesi ile ilgili incelenen makalelerin kodları ve bazı temel parametreler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. İncelenen çalışmalar ve bazı temel SKK parametreleri (Reviewed studies and some basic FSW parameters)

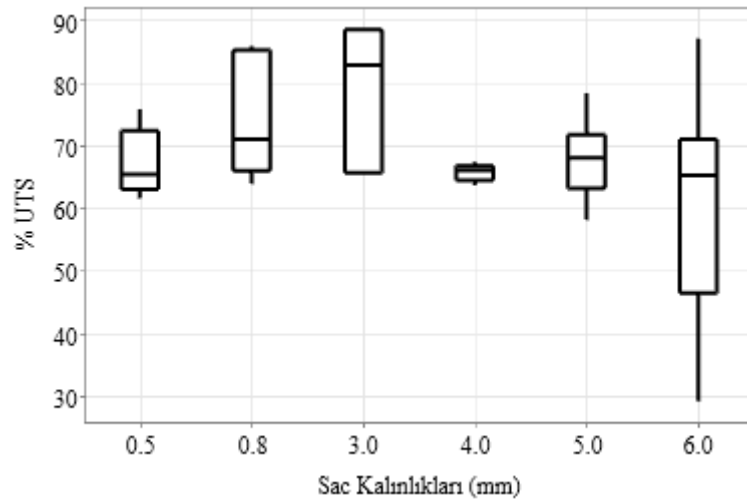
Makale kodu	Devir aralığı (rpm)	Kaynak hız aralığı (mm/dak)	Sac kalınlığı (mm)	Uç tipi
(a) [43]	800-1000	15-35	6	Silindirik
(b) [43]	800-1000	15-35	6	Kare
(c) [44]	450-710	20-63	6	Silindirik
(d) [45]	600-700	30-40	5	Yivli-Konik
(e) [46]	1200-1600	40-80	5	Silindirik
(f) [46]	1400	60	5	Silindirik
(g) [47]	1100	120	6	Yivli
(h) [48]	600-1400	300	0.5	Konik
(i) [49]	1000-1200	100-150	6	Silindirik
(j) [50]	2000-8000	300-1500	0.8	Yivli-Konik
(k) [51]	560-1800	50-650	9	Yivli
(l) [52]	900	78	2	Yivli
(m) [53]	900-1500	45-135	6	Kare
(n) [54]	1100	45-135	6	Yivli-Konik
(o) [55]	500-1400	120	6	
(p) [56]	750-1500	100-300	5	Yivli-Konik
(r) [57]	1100	125-760	3	Silindirik

Tablo 1’deki parametreler ile yapılan çalışmalarda kaynak kalitesi genel olarak çekme testleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Nihayetinde oluşabilecek kaynak kusurları veya seçilen kötü kaynak parametreleri mekanik özellikleri olumsuz etkileyecektir. Fakat bu çalışmaların genelinden çekme mukavemetinin düşüş nedenini anlamak mümkün değildir. Bu nedenle bu konuya değinilmemiştir. Çalışmalarda belirlenen çekme dayanımları (UTS) her bir çalışmanın genelini ifade edecek şekilde box-plot grafiği olarak Şekil 2’de verilmiştir. Grafikte verilen kutucukların ortasından geçen medyan çizgilerinin konumlarına baktığımızda her bir çalışmada normal dağılım oluşmadığı görülmektedir. Bilindiği gibi parametrik testler normal dağılım varsayımını gerektiren testlerdir. Diğer yandan her bir çalışmada aynı malzeme kullanılmakla birlikte üretim parametreleri değişmektedir. Bu nedenle bu çalışmalar arasında ANOVA gibi analizler uygulanmamıştır.



Şekil 2. SKK kaynaklı sacların her bir çalışmada ölçülen çekme dayanımlarının dağılımı (Distribution of tensile strengths of FSW welded sheets measured in each study)

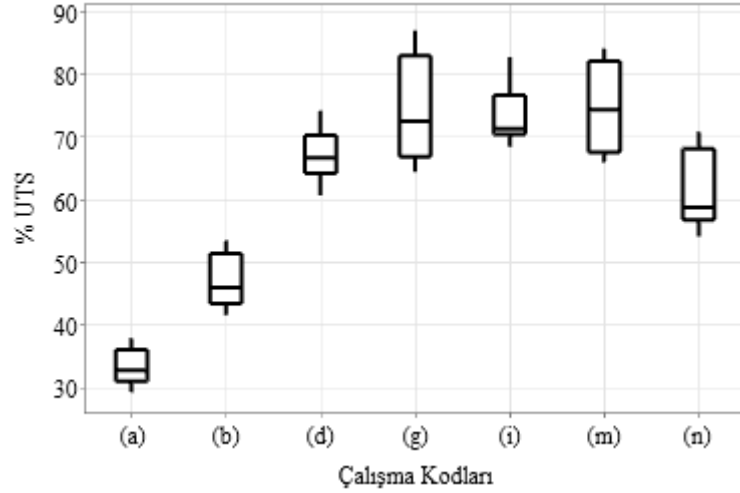
Şekil 2’deki dağılımlar incelendiğinde dayanımların büyük çoğunluğu 170-250MPa aralığında dağılmaktadır. Verilere ayrıca Grubbs testi uygulanarak aykırı değer (outlier) incelemesi yapılmış ve %5 seviyesinde aykırı değer olmadığı belirlenmiştir. Bu deneylerde aynı malzeme olmakla birlikte farklı kalınlıklardaki saclar da kullanılmıştır. Bu sacların kalınlığına bağlı olarak mukavemetlerinin de değiştiği a ve e ile j ve r çalışmalarında kullanılan sacların orijinal mukavemetlerinde görülmektedir [43, 50, 52, 57]. Bu çalışmalarda j ve r gibi ince saclarda daha yüksek çekme dayanımı ölçüldüğü görülmektedir. Bu nedenle kaynak sonrası sonuçları kıyaslamak için tüm numunelerin çekme dayanımları makalelerde kullanılan sacların işlemsiz çekme mukavemeti ile kıyaslanarak %UTS değerleri hesaplanıp Şekil 3’teki grafiklerde kullanılmıştır. İncelenen çalışmaların sac kalınlığına göre gruplandırılıp %UTS değeri değişimlerini gösteren box-plot grafiği Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. SKK kaynaklı levhaların sac kalınlıklarına bağlı % UTS değerlerinin dağılımı (Distribution of UTS % values depending on sheet thickness of FSW welded plates)

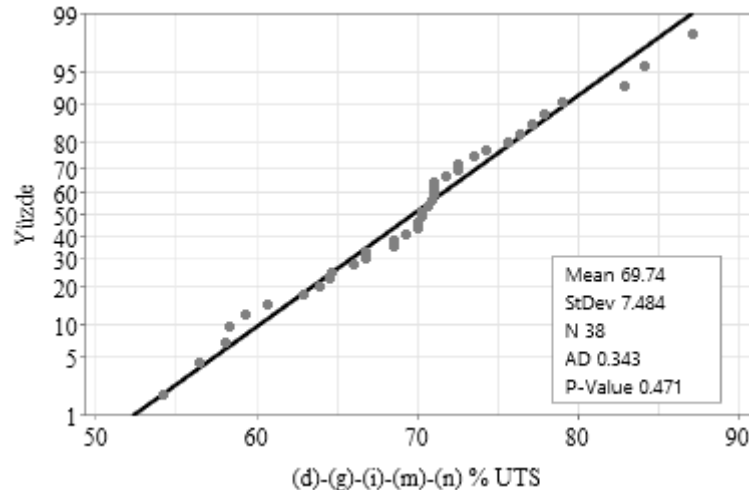
Şekil 3’te verilen farklı sac kalınlıklarına göre yapılan birleştirme mukavemetleri incelendiğinde belirgin bir ayrışma görülmemekle birlikte deneylerde kullanılan sac kalınlığı 0.5 mm’den 3mm’ye doğru artarken arttığı, sonrasında ise artan sac kalınlığı ile azaldığı görülmektedir. Grafiklerde en

yüksek üçüncü çeyrek ve medyan değeri 3mm saclar ile yapılan çalışmalarda ölçülmüştür. Bununla birlikte 6 mm sac ile yapılan deneylerde ise en yüksek değer çizgisi 3 mm ile elde edilen değerlere oldukça yakındır. Fakat diğer yandan en düşük değer ve en düşük birinci çeyrek de belirgin şekilde 6mm sac kullanılan deneylerde belirlenmiştir. SKK çalışmalarında bu saclar arasında en yaygın sac kalınlığı olarak 6mm kullanılmaktadır. Hali ile bu incelemede de en fazla veri bu sac kalınlığından elde edilmiştir. Bu çalışmalarda kullanılan parametre farklılıkları ve veri çeşitliliğine bağlı olarak geniş bir dağılım oluşmuştur. 6mm sac kullanılarak yapılan çalışmaların ayrı olarak değerlendirilmesi için her bir çalışma ayrılarak Şekil 4'teki grafikte verilmiştir.



Şekil 4. SKK kaynaklı 6 mm sac levhaların her bir çalışmadaki % UTS dağılımları (UTS % distributions of FSW welded 6 mm sheet metals in each study)

Şekil 4'te verilen grafik incelendiğinde birleştirmelerin çekme mukavemetleri (a) çalışmasının birinci çeyreğinden (88 MPa) (g) çalışmasının üçüncü çeyreğine kadar (257 MPa) geniş bir aralıkta dağılmaktadır. Bu değerler çalışmalarda kullanılan sacların çekme mukavemetinin %30'undan %85'ine kadar olan aralığa denk gelmektedir. Diğer yandan (a) ve (b) çalışmasında belirlenen çekme dayanımları diğer çalışmalardan belirgin şekilde ayrılmaktadır. Şekil 3'teki 6mm saclarda görülen büyük ayrışmanın da sebebi bu iki çalışmadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi 6mm sac mukavemetlerinde medyan değeri oldukça yukarılardadır. Bu iki çalışmanın verisi aynı makalede farklı parametreler ile yapılan üretimlerden elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra (a) ve (b) çalışmaları hariç tutularak diğer çalışmaların % UTS değerleri arasında önce Anderson-Darling (AD) normallik testi uygulanmıştır. Bu test normallikten sapmaları tespit etmek için tasarlanmış Minitab'daki üç genel normallik testinden biridir.



Şekil 5. (d)-(g)-(i)-(m)-(n) çalışmalarındaki % UTS değerlerinin normallik testi (Normality test of UTS % values in studies (d)-(g)-(i)-(m)-(n))

AD testi aslında bir hipotez testidir. Sıfır hipotezi (H<sub>0</sub>), verilerin normal dağıldığını, alternatif hipotez (H<sub>1</sub>) ise, verilerin normalden farklı olduğunu gösterir. Sıfır değerini reddedip reddetmeme konusundaki karar P değerine göre verilir. Anlam seviyesi ( $\alpha$ ) 0.05 olarak seçilirse, P değeri 0.05'ten küçükse H<sub>0</sub> hipotezi reddedilir, 0.05'in üzerindeyse verilerin istatistiksel olarak normal dağılımdan farklı olmadığını belirtilebilir. Şekil 5'teki grafiğe ve P değerine baktığımızda verilerin normal dağıldığı anlaşılmaktadır.

Bu verilere tek yönlü (one-way) ANOVA (analysis of variance) analizi yapılmış ve sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Tek yönlü varyans analizi (ANOVA), üç veya daha fazla bağımsız (ilişkisiz) grubun ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Üç veya daha fazla popülasyon ortalamasının eşit olduğunu belirten sıfır hipotezi (H<sub>0</sub>) ve en az bir ortalamanın farklı olduğunu öne süren alternatif hipotezi (H<sub>1</sub>) test edilir.

Tablo 2. (d)-(g)-(i)-(m)-(n) çalışmalarındaki %UTS değerlerinin ANOVA analizi (ANOVA analysis of %UTS values in studies (d)-(g)-(i)-(m)-(n))

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-değeri	P-değeri
Faktör	4	1002	250.46	7.72	0.002
Hata	33	1070	32.43		
Toplam	37	2072			

Tabloda DF (degree of freedom) serbestlik derecesi, SS (sum of squares) kareler toplamı ve MS (Mean Square) ortalama kareyi ifade etmektedir. F değeri, faktörün ortalama karesinin (MS) hatanın ortalama karesine bölümüdür. P değeri, tüm ortalamaların benzer olduğuna ilişkin sıfır hipotezinin geçerliliğini değerlendirmek için kullanılır. Bu çalışmada P değeri 0.002'dir. Bu küçük p değeri ( $\alpha = 0.05$ ), ortalamaların hepsinin aynı olmadığını ve ortalamaların birbirinden önemli düzeyde ( $P < 0.0001$ ) farklı olduğu kanıtlanmaktadır.

Ortalamaların farklı olduğunu belirledikten sonra gruplar arasındaki ortalama farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını hızlı bir şekilde belirlemek için gruplandırma bilgi tablosu kullanılır bu tabloda aynı harfi kullanmayan gruplar önemli ölçüde farklıdır. Tablo, seçtiğiniz karşılaştırma yöntemine bağlı olarak farklı grup çiftleri karşılaştırılır. Bu çalışmada farklılıkların hangi varyans gruplarından kaynaklandığını görmek için %95 güven aralığı ile Fisher LSD (least significant difference) çoklu karşılaştırma testi (post-hoc tests) uygulanmış ve elde edilen sonuç Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Fisher LSD metoduna göre gruplama bilgisi (Grouping information according to Fisher LSD method)

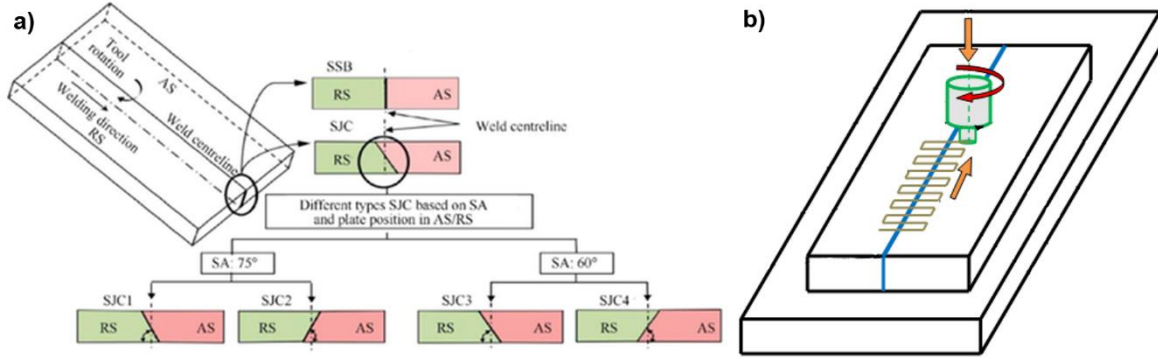
Faktör	N	Ortalama	Gruplama
(m)	4	74.79	A
(g)	5	74.52	A
(i)	12	73.45	A
(d)	9	67.40	B
(n)	8	61.29	C

Tablo 3, aynı harfte gruplanan faktörlerin ortalamaları arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermektedir. Buna göre (m), (g) ve (i) çalışmalarında bulunan ortalamaların benzerlik göstererek diğerlerinden ayrıldığı görülmektedir. Bu üç çalışma aynı zamanda uygulanan metod ve kontrol edilen parametreler yönünden de farklılık göstermektedir. SKK ile ilgili yapılan çalışmalarda genel olarak uç tipi, devir ve ilerleme hızı analiz edilmektedir. Fakat bunların dışında uç boyutu, malzemesi, mekanik özellikleri gibi uca bağlı ve birleştirme pozisyonu, uç hareketleri, açıları, ısıtma ve soğutma ortamları gibi birçok parametre de etkili olmaktadır.

Yüksek çekme mukavemeti gösteren (g) çalışmasında uç devri 1100rpm olarak sabit tutulmuş ve Şekil 6(a)'da görüldüğü gibi açılı bağlantılar yapılarak birleştirme denenmiştir. Bu sayede UTS değeri birleştirme uygulanmış orijinal malzemenin %87'sine (270 MPa) kadar çıkmıştır. Aynı parametrelerle klasik alın birleştirilmesinde ise UTS değeri sacın %72.5'si kadar olmuştur ve bu değer (g) çalışmasında elde edilen değerlerin ortalamasına (%74.5) yakındır. Sonuç olarak (g)

çalışması alın SKK birleştirmelerde Şekil 6(a)'daki gibi açılı ( $60^\circ$ - $75^\circ$ ) bir birleştirmenin daha iyi çekme mukavemeti sağladığını oraya koymuştur.

Tablo 3'te verilen A grubundaki (i) çalışmasında da SKK alın birleştirmesinde farklı bir yöntem kullanılmıştır. Bu çalışmada kaynak ucu Şekil 6(b)'de görüldüğü gibi sadece birleştirme eksenine paralel değil ona dik yönde de tekrarlı hareketler yaparak birleştirme işlemi yapılmıştır. Çalışmada, 1200 rpm devir ve 150 mm/dak ilerleme parametreleriyle Şekil 6(b)'deki modeli kullanarak 232MPa'lık çekme mukavemetine ulaşılmıştır. Bu değer deneyde kullanılan sac mukavemetinin %82.8'ine denk gelmektedir. Çalışmada bu tasarımın çekme mukavemetinde %10'luk bir artış sağladığı belirtilmiştir [49].



Şekil 6. a) Farklı açılarda eğik bağlantı tasarımı (Oblique connection design at different angles) [47], b) X-Y ekseninde hareketle birleştirme işlemi (Joining process with movement in the X-Y axis) [49]

A grubunda yer alan (m) çalışmasında ise diğer çalışmalardan farklı bir proses uygulanmış, birim devirde ilerleme miktarı (mm/rev) gibi farklı bir parametre kontrol edilerek en yüksek çekme mukavemetleri elde etmek için çalışmalar yürütülmüştür. Bu parametre, biriminden de anlaşılacağı üzere ucun devir ve ilerleme hızına bağlı olarak belirlenmektedir. Çalışmada 900-1500 rpm devir aralığında ve 0.75-2.25 mm/dak ilerleme hızı aralığında dört farklı daneme yapılmıştır. Çalışmada birim devirde ilerlemeye odaklanıldığı için tam faktöriyel bir deneme yapılmamıştır. Ayrıca aynı parametrelerin farklı devir/ilerleme kombinasyonları ile de elde edilebileceği gerçeği üzerinde durulmamıştır. Neticede birleştirilmiş sacda 248.5MPa gibi kullanılan sacın %84.1'ine denk gelen çekme mukavemeti elde edilmiştir [53]. Fakat parametrelerin belirsizliği ve diğer faktörlerin hesaba katılmaması neticesinde tekrarlanabilirliği zayıf görülmektedir.

Yukarıda belirtildiği gibi Tablo 3'teki A grup çalışmalarında birbiri ile kıyaslanamayacak özgül parametreler kullanılmıştır. Bunların dışında Şekil 4'te verilen (a), (b) ve (d) çalışmalarında kıyaslanabilir benzer değerler kullanılmış; dönme hızı ve kaynak hızı değişken parametre olarak uygulanmıştır. Aynı şekildeki diğer çalışmada (n) ise kaynak hızı ve uç şekli parametre olarak seçilmiş ve farklı olarak uçta eğim açısı (tilt angle) kullanılmıştır. Sonraki kısımda bu çalışmalar ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analizlerde çalışmalar kendi içinde değerlendirildiği için çekme mukavemeti (UTS) değerleri kullanılmıştır.

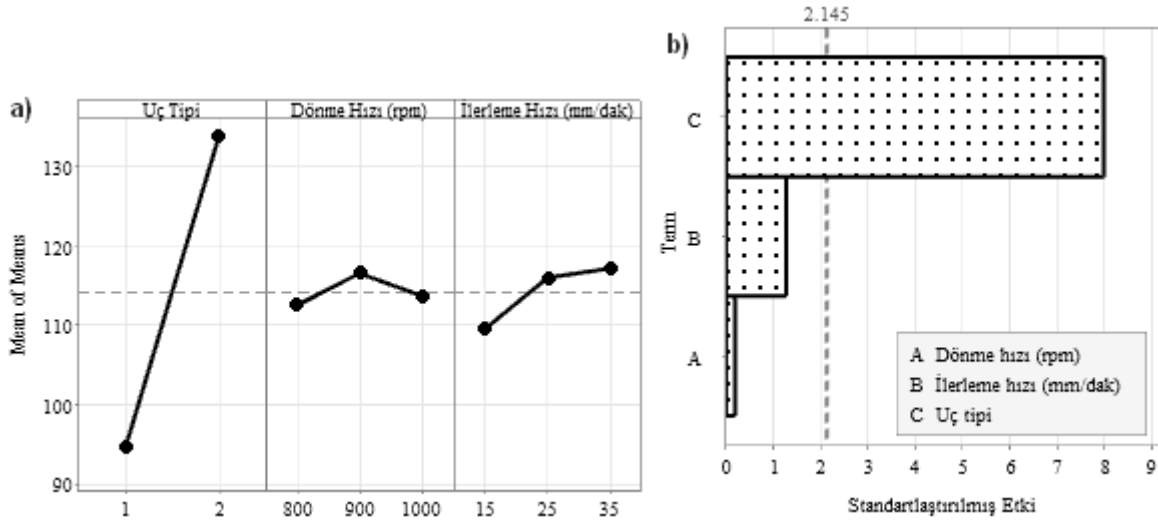
Analizde kullanılan (a) ve (b) verileri aynı üretim parametrelerinde farklı uç tipi kullanılarak elde edilmiş çekme mukavemetleridir. Bu nedenle iki veri seti birlikte değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde kare profilli takımın daha iyi sonuç verdiği 900 rpm dönme ve 25 mm/dak ilerleme hızında en iyi sonuç verdiği ve 151.6MPa çekme dayanımı ile deneyde kullanılan sacın %53.6 mukavemetine ulaşıldığı belirtilmiştir [43]. Çalışmada belirtilen sonuçlardan faydalanılarak en etkili parametrelerin tespiti için analiz edilmiştir. Bu çalışma için tam faktöriyel L18 ( $2^1, 3^2$ ) olarak tasarlanmış bir Taguchi analizi uygulanmıştır. Analiz sonucunda parametrelerin etkisi Tablo 4'te ve Şekil 7'de verilmiştir.



Tablo 4. Ortalamalara göre parametrelerin etkisi (Effect of parameters according to averages)

Level	Uç Tipi	Dönme Hızı (rpm)	İlerleme Hızı (mm/dak)
1	94.67	112.39	109.45
2	133.58	116.42	115.89
3		113.56	117.04
Delta	38.92	4.03	7.58
Rank	1	3	2

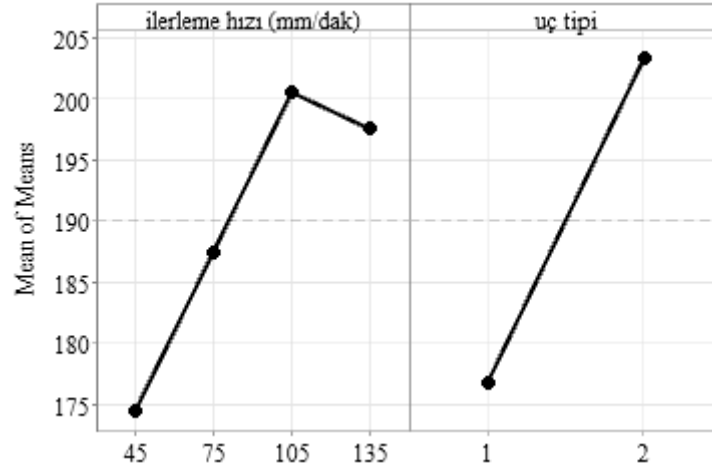
Taguchi analizinde çekme mukavemetine göre en yüksek daha iyi (larger is better) olarak belirlenmiştir. Buna göre yapılan sıralamaya göre Tablo 4'te görüldüğü gibi en yüksek etki (rank) uç tipinde ve en düşük etki de dönme hızında görülmüştür. Bu etki Şekil 7'de verilen grafiklerde de görülmektedir. Analizde kullanılan çalışmanın verilerine göre R kare (R-Sq) değeri %83.5 olarak belirlenmiştir. Bu durumda sonuçlar arasındaki ilişki çok güçlü olmamakla birlikte (%85 üstü genelde uygun) fikir vericidir. Yine Taguchi analizinde uygulanan ANOVA'ya göre uç tipi yüksek bir anlamlılık değerine ( $P < 0,0005$ ) sahiptir. Diğer iki parametrenin p değeri ise %5'in oldukça üzerindedir ve anlamlı bir fark oluşturmamışlardır. Diğer yandan değişkenlerin katkı oranlarına bakıldığında belirgin bir şekilde (%80.3) uç tipi olurken diğerlerinin katkısı düşüktür.



Şekil 7. a) Üretim parametrelerinin ortalamalar üzerine etkisi ve b) standartlaştırılmış etkinin preto grafiği (a) Effect of production parameters on averages and b) preto plot of standardized effect)

Analizde büyük daha iyidir (larger is better) seçildiğinde Şekil 7a'da görüldüğü gibi uç tipinde 2. seçenek, yani kare uç, belirgin bir şekilde çekme mukavemetini olumlu etkilemiştir. Bu durum, bu çalışmanın (a) ve (b) şeklinde gösterildiği Şekil 3'teki grafikte de görülmektedir ve (b) çekme mukavemeti verilerine ait box-plot belirgin şekilde (a) dan ayrılmıştır. Dönme hızında 900 rpm ve ilerleme hızında 35 mm/dak en iyi parametreler olarak görülmektedir.

Bu çalışmalarda görüldüğü gibi uç tipi en etkili parametre olurken, dönme hızı en etkisiz parametre olmuştur. Aynı kalınlık ve türdeki sacın kullanıldığı (n) çalışmasında ise devir 1000 rpm de sabit tutulmuş uç tipi ve ilerleme hızı değişken olarak kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde şu sonuçlar çıkmıştır. Analizde kullanılan çalışmanın verilerine göre R kare (R-Sq) değeri %86.5 olarak belirlenmiştir. ANOVA'ya göre uç tipi anlamlı bir değere ( $P=0,04$ ) sahipken ilerleme hızının P değeri 0.25 ile anlamlılık değerinin üzerinde çıkmıştır. Bu çalışma L8 kolonunda Taguchi metoduyla analiz edilmiş ve üretim parametrelerinin ortalamalar üzerine etkisi Şekil 8'de verildiği gibi bulunmuştur.



Şekil 8. Üretim parametrelerinin ortalamalar üzerine etkisi (Effect of production parameters on averages)

Çalışma analizinde yüksek olan iyidir olarak değerlendirildiğinden ilerleme hızı en iyi 105 mm/dak, karıştırıcı uç ise yivli konik (taper thread) olanda görülmektedir (Şekil 8). Ayrıca ilerleme hızının ortalamalara etkisi incelendiğinde 135 mm/dak hızda lineerliğin bozulduğu görülmektedir. Bu veri dışında ilerleme hızı da ortalamalar ile anlamlı bir ilişki çıkması muhtemeldir. Fakat sonuç olarak (a), (b) ve (n) çalışmaları birlikte değerlendirildiğinde en etkili parametrenin uç tasarımı olduğu açıktır. İlerleme hızının bazı uç tipi ve dönme hızlarına bağlı olarak etkisi değişmektedir.

### 3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

AA6061-T6 saclara uygulanan sürtünme karıştırma kaynağı sonrası birleştirilen parçaların çekme mukavemetleri yönünden inceleme yapılmıştır. Aynı türde sacın kullanıldığı 17 farklı çalışma incelenmiş (Şekil 2) ve şu sonuçlar çıkarılmıştır. Kaynaklanmamış ince sacın genel olarak çekme mukavemeti kalın saca (6mm) göre daha yüksektir ve kaynaklanma sonrası da mukavemeti daha yüksek çıkmaktadır. Fakat çekme mukavemetleri orijinal sacın mukavemeti ile kıyaslandığında sac kalınlığı belirgin bir faktör olmaktan çıkmıştır (Şekil 3). Çalışmalarda en yaygın kullanılan 6mm kalınlığındaki saclar ayrı olarak incelendiğinde UTS değerleri benzer olan üç farklı çalışmada yüksek mekanik özellikler belirlenmiştir (Tablo 2). Fakat bu üç çalışmada da farklı kaynak teknikleri kullanılarak yüksek değerler elde edildiği belirlenmiştir. Diğer çalışmalar ayrı olarak incelendiğinde uç tipinin en etkili olduğu bununla birlikte uç dönme hızının en az etkili parametre olduğu belirlenmiştir. Uç ilerleme hızı ise diğer parametrelere bağlı olarak önem kazandığı görülmüştür.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. W.M. Thomas, E.D. Nicholas, Friction welding, US Patent 228, 1995.
2. I. Stol, Selecting manufacturing processes for automotive aluminum space frames, *Weld J.*, 73: 57–65, 1994.
3. R. Irving, Interest in welded aluminum automobiles Gathers Momentum worldwide, *Weld J.*, 77: 31–35, 1998.
4. M.R. Johnsen, Friction stir welding takes off at Boeing, *Weld J.*, 78: 35–39, 1999.
5. P.F. Mendez, T.W. Eager, Welding processes for aeronautics, *Adv Mater Process*, 159: 34-43, 2001.
6. D. Burford, C. Widener, B. Tweedy, Advances in friction stir welding for aerospace applications, *Airframer*, 14: 3–7, 2007.
7. S. Benavides, Y. Li, L.E. Murr, D. Brown, J.C. McClure, Low temperature friction stir welding of 2024 aluminum, *Scr Mater*, 41: 809–815, 1999.
8. K.V. Jata, S.L. Semiatin, Continuous dynamic recrystallization during friction stir weldind of high strength aluminum alloys, *Scr Mater*, 43: 743–749, 2000.
9. G. Liu, L.E. Murr, C.S. Niou, J.C. McClure, F.R. Vega, Microstructural aspects of the friction stir welding of 6061-T6 aluminum, *Scr Mater*, 37: 355–361, 1997.

10. C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton, Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum, *Scr Mater*, 36: 67–75, 1997.
11. M. ÖZDEMİR, Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile alüminyum malzemelerin kaynaklanabilirliği, Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi, 2003.
12. G. Staniek, W. Hillger, C.D. Donne, Ultrasonic testing on friction stir welded aluminium alloys, *Welding and Cutting*, 313–318, 2002.
13. P. Threadgill, Friction stir welds in aluminium alloys- preliminary microstructural assessment, *TWI*, 2: 513, 1997.
14. C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton, Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminium, *Scr Mater*, 36: 690–751, 1997.
15. R.S. Mishra, Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering R. Reports*, 50: 1–78, 2005.
16. E. Taban, E. Kaluç, Sürtünen eleman ile kaynak (FSW) yöntemi, Makine Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 2007.
17. B. Christner, J. McCoury, S.C. Higgins, Development and testing of friction stir welding (FSW) as a joining method for primary aircraft structure, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, 14–16, 2003.
18. B. Christner, M. Hansen, M. Skinner, G.V. Sylva, Friction stir welding system development for hinge aerospace structures, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, 2003.
19. G.E. Shepherd, The evaluation of friction stir welded joints on Airbus aircraft wing structure, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, 2003.
20. D. Lohwasser, Friction stir welding of aerospace alloys, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, 2003.
21. H.J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi, Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, *J. Mater Process Technol*, 142: 692–696, 2003.
22. W.M. Thomas, K.I. Johnson, C.S. Wiesner, Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies, *Adv Eng Mater*, 5: 485–490, 2003.
23. H.N.B. Schmidt, T.L. Dickerson, J.H. Hattel, Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3, *Acta Mater*, 54: 1199–1209, 2006.
24. J.A. Schneider, A.C. Nunes, Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 35: 777–783, 2004.
25. P. Heurtier, C. Desrayaud, F. Montheillet, A thermomechanical analysis of the friction stir welding process, *Materials Science Forum*, 396: 1537–1542, 2002.
26. P. Heurtier, M.J. Jones, C. Desrayaud, J.H. Driver, F. Montheillet, D. Allehauxet, Mechanical and thermal modelling of friction stir welding, *J. Mater Process Technol*, 171: 348–357, 2006.
27. A. Sık, M.K. Külekçi, Sürtünme karıştırma kaynağı ile alüminyum almasını levhalarının birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri, *Kaynak Teknolojisi IV Ulusal Kongresi*, 77–87, 2003.
28. G. Çam, Sürtünme karıştırma kaynağındaki gelişmeler, *Kaynak Teknolojisi IV Ulusal Kongresi*, 47–64, 2003.
29. H.J. Liu, J.C. Hou, H. Guo, Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy, *Mater Des*, 50: 872–878, 2013.
30. D. Peng, J. Shen, Q. Tang, C. Wu, Y. Zhou, Effects of aging treatment and heat input on the microstructures and mechanical properties of TIG-welded 6061-T6 alloy joints, *Int J Miner Metall Mater*, 20: 259–265, 2013.
31. W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Smith, C.J. Dawes, Improvements relating to friction stir welding, 1992.
32. W.M. Thomas, I.M. Norris, I.J. Smith, D.G. Staines, Reversal stir welding-feasibility study, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, 2003.
33. R.A. Prado, L.E. Murr, D.J. Shindo, K.F. Soto, Tool wear in the friction-stir welding of aluminium alloy 6016+20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: a preliminary study, *Scr Mater*, 45: 78–80, 2001.
34. S. Vijayan, R. Raju, S.R.K. Rao, Multi objective optimization of friction stir welding process parameters on aluminum alloy AA 5083 using Taguchi-based grey relation analysis, *Mater Manuf Process*, 25: 1206–1212, 2010.
35. N.Z. Khan, Z.A. Khan, A.N. Siddiquee, Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength of friction stir welded 6063 aluminium alloy, *Mater Today*, 2: 1450–1457, 2015.

36. S. Babu, K. Elangovan, V. Balasubramanian, M. Balasubramanian, Optimizing friction stir welding parameters to maximize tensile strength of AA2219 aluminum alloy joints, *Metals Mater Int*, 15: 321–330, 2009.
37. J. Mohammadi, Y. Behnamian, A. Mostafaei, H. Izadi, T. Saeid, A.H. Gerlich, Materials characterization friction stir welding joint of dissimilar materials between AZ31B magnesium and 6061 aluminum alloys: microstructure studies and mechanical characterizations, *Mater Charact*, 101: 189–207, 2015.
38. R.P. Mahto, R. Bhoje, S.K. Pal, H.S. Joshi, S. Das, A study on mechanical properties in friction stir lap welding of AA 6061–T6 and AISI 304, *Mater Sci Eng*, 652: 136–144, 2016.
39. W.M. Thomas, E.D. Nicholas, S.D. Smith, Friction stir welding- tool developments, TMS Annual Meeting and Exhibition, Aluminium Joining – Emphasizing Laser and Friction stir welding, New Orleans, 2001.
40. S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian, Predicting tensile strength, hardness and corrosion rate of friction stir welded {AA}6061-T6 aluminium alloy joints, *Mater Des*, 32: 2878–2890, 2011.
41. K. Elangovan, V. Balasubramanian, Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy, *Mater Sci Eng A*, 459: 7–18, 2007.
42. S. Verma, M. Gupta, J.P. Misra, Friction stir welding of aerospace materials, a State of Art Review, 135–150, 2016.
43. M. Vangalapati, K. Balaji, A. Gopichand, ANN modeling and analysis of friction welded AA6061 aluminum alloy, *Mater Today Proc*, 18: 3357–3364, 2019.
44. L.N. Semakane, E. Ekınlabı, F. Nemavhola, Material characterization and optimisation of friction stir welds of 6061-T6 aluminium alloy, Masters, University of Johannesburg, 2018.
45. M. Gomathisankar, M. Gangatharan, P. Pitchipoo, A novel optimization of friction stir welding process parameters on aluminum alloy 6061-T6, *Mater Today Proc*, 5: 14397–14404, 2018.
46. S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian, Establishing empirical relationships to predict grain size and tensile strength of friction stir welded AA 6061-T6 aluminium alloy joints, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20: 1863–1872, 2010.
47. D. Sethi, U. Acharya, S. Shekhar, B. S. Roy, Applicability of unique scarf joint configuration in friction stir welding of AA6061-T6: Analysis of torque, force, microstructure and mechanical properties, *Defence Technology*, 18: 567–582, 2022.
48. H. Zhang, S. Chen, Y. Zhang, X. Chen, Effect of high rotational-speed friction-stir welding on microstructure and properties of welded joints of 6061-T6 Al Alloy ultrathin plate, *Materials*, 14: 6012, 2021.
49. L. Prabhu, S.S. Kumar, S. Krishnamoorthi, A. Anderson, Effect of novel tool path pattern on mechanical properties of friction stir welded AA6061 alloy, *Appl Nanosci*, 13: 2129–2138, 2023.
50. F.J. Liu, Z.Y. Sun, Y.F. Tuo, Y. Ji, Effect of shoulder geometry and clamping on microstructure evolution and mechanical properties of ultra-thin friction stir-welded Al6061-T6 plates, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106: 1465–1476, 2020.
51. H. Hsieh, J.L. Chen, Influence of welding parameters on mechanical properties of friction stir welded 6061-T6 launch box, *Mater Trans*, 49: 2179–2184, 2008.
52. A. Astarita, A. Squillace, L. Nele, Mechanical characteristics of welded joints of aluminum alloy 6061 T6 formed by arc and friction stir welding, *Metal Science and Heat Treatment*, 57: 564–569, 2016.
53. A. Banik, T. Debnath, J.D. Barma, S.C. Saha, Effect of square pin tool on friction stir welded AA 6061-T6 from the perspective of revolution pitch, *Soldagem & Inspeção*, 27: 2706, 2022.
54. A. Banik, J. Deb Barma, S.C. Saha, Effect of threaded pin tool for friction stir welding of AA6061-T6 at varying traverse speeds: Torque and force analysis, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 44: 749–764, 2020.
55. D. Sethi, U. Acharya, S. Kumar, S. Shekhar, Effect of tool rotational speed on friction stir welded AA6061-T6 scarf joint configuration, *Adv Compos Hybrid Mater*, 5: 2353–2368, 2022.
56. D. Li, X. Yang, L. Cui, F. He, Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of AA6061-T6 butt welded joints by stationary shoulder friction stir welding, *Materials and Design*, 64: 251–260, 2014.
57. S. Malopheyev, I. Vysotskiy, V. Kulitskiy, S. Mironov, Optimization of processing-microstructure-properties relationship in friction-stir welded 6061-T6 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*, 662: 136–143, 2016.