



Determination of the optimum welding parameters for ultimate tensile strength and hardness in friction stir welding of Cu/Al plates using Taguchi method

Gökhan Başar^{1*}, Selçuk Mıstıkoğlu²

¹Department of Industrial Engineering, Osmaniye Korkut Ata University, Osmaniye, 80000, Turkey

²Department of Mechanical Engineering, Iskenderun Technical University, Hatay, 31200, Turkey

Highlights:

- Joining of copper and aluminum sheets with friction stir welding
- Determination of optimal friction stir welding parameters for highest ultimate tensile strength and hardness values
- Development of regression equation for ultimate tensile strength and hardness

Keywords:

- Cu
- Al
- Taguchi method
- Variance analysis
- Regression model

Article Info:

Research Article
Received: 15.07.2017
Accepted: 26.03.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.570891

Acknowledgement:

The authors thank the Mustafa Kemal University Scientific Research Project Directorate for supporting this study (Project No: YL-13261).

Correspondence:

Author: Gökhan Başar
e-mail:
gokhanbasar@osmaniye.edu.tr
phone: +90 328 827 1000-3432

Graphical/Tabular Abstract

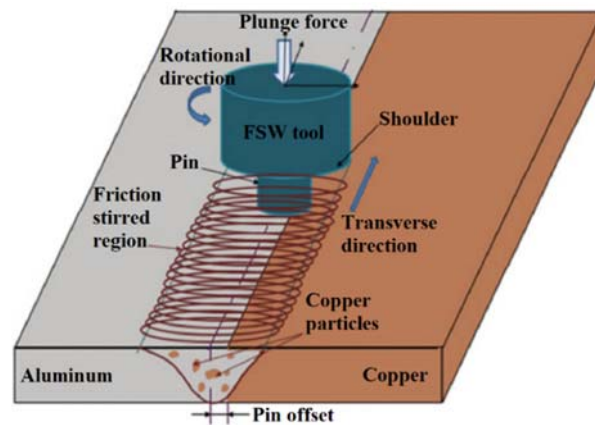


Figure A. Process principle of dissimilar Friction Stir Welding (FSW)

Purpose: The aim of the study was predicted the mechanical properties (ultimate tensile strength (UTS) and hardness) of friction stir welded pure copper and 1050 aluminum alloy joints.

Theory and Methods:

The Taguchi method was used to optimize FSW parameters for improving mechanical behavior of Cu/Al joints. Experiments were conducted via Taguchi L9 orthogonal array. The assessment of the experimental results was based upon the signal to noise ratio. Tool rotational speed, tool transverse speed and tool position were considered as control factors for UTS and hardness. Analysis of variance (ANOVA) and main effect plot were utilized to detect the substantial parameters and set the optimal level for each parameter. A confirmation test was carried out to verify the optimized results.

Results:

Considering the ANOVA results, the percent contributions of the tool rotational speed, tool transverse speed and tool position factors on UTS were found to be 14.13 %, 7.32 % and 76.88 % respectively. This showed that the most effective factor on UTS was tool position. Moreover, the most significant factor on hardness was found as tool position 80.76 %, while the tool transverse speed was second ranking factor 10.01 % and tool rotational speed was the least 7.39%. A linear regression was derived to estimate each output characteristic. The experimental and estimated values were in a good agreement with R^2 of 0.82 and 0.86 for UTS and hardness, respectively. For UTS and hardness, the mean absolute percentage error (MAPE) between actual and Taguchi predicted values were computed as 3.37 % and 1.74 %, respectively.

Conclusion:

According to the optimization results, the best condition for the mechanical characteristics was obtained with a tool rotational speed 525 rpm, tool transverse speed of 50 mm/min and tool position of 1.5 mm. It was determined that in UTS and hardness, the most effective parameter is tool position. The results acquired were validated by performing confirmation tests, the results of which verify the adequacy and effectiveness of this approach.



Cu/Al levhaların sürtünme karıştırma kaynağında Taguchi metodu ile çekme mukavemeti ve sertlik için optimum kaynak parametrelerinin tahmini

Gökhan Başar^{1*}, Selçuk Mıstıkoğlu²

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 80000, Osmaniye, Türkiye

²İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 31200, Hatay, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Bakır ve alüminyum levhaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi
- En yüksek çekme mukavemeti ve sertlik değerleri için optimum sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin belirlenmesi
- Çekme mukavemeti ve sertlik için regresyon denklem geliştirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 15.07.2017

Kabul: 26.03.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.570891

Anahtar Kelimeler:

Cu,
Al,
Taguchi metodu,
varyans analizi,
regresyon modeli

ÖZET

Bu çalışmada, Cu/Al levhaların sürtünme karıştırma kaynak işleminde, kaynak parametrelerinin performans karakteristiğine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, Taguchi L9 ortogonal dizisine göre tasarlanmıştır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde sinyal/gürültü (S/N) oranı esas alınmıştır. Taguchi metodu kullanılarak optimum çekme mukavemeti ve vickers sertlik değerlerini veren kontrol faktörleri belirlenmiştir. Kontrol faktörü olarak üç farklı takım dönme devri (525, 1025 ve 1525 dev/dak), üç farklı takım ilerleme hızı (50, 75 ve 100 mm/dak) ve üç farklı takım konumu (0, 0,75 ve 1,5 mm) seçilmiştir. S/N oranları kullanılarak tespit edilen değişkenlerin optimum değerleri, çekme mukavemeti ve sertlik için aynı seviyelerde bulunmuştur. Varyans analizi sonuçlarına göre, çekme mukavemeti ve sertlik değerlerini etkileyen en önemli değişken takım konumu olarak belirlenmiştir. Ayrıca, çekme mukavemeti ve sertlik değerleri için MINITAB 17 programından yararlanılarak birinci dereceden regresyon modeli oluşturulmuştur.

Determination of the optimum welding parameters for ultimate tensile strength and hardness in friction stir welding of Cu/Al plates using Taguchi method

H I G H L I G H T S

- Joining of copper and aluminium sheets with friction stir welding
- Determination of optimal friction stir welding parameters for highest tensile strength and hardness values
- Development of regression equation for tensile strength and hardness

Article Info

Research Article

Received: 15.07.2017

Accepted: 26.03.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.570891

Keywords:

Cu,
Al,
Taguchi method,
variance analysis,
regression model

ABSTRACT

In this study, the effect of welding parameters on the performance characteristic in the friction stir welding of Cu/Al plates were experimentally investigated. Experiments were designed according to Taguchi L9 orthogonal array. The evaluation of the experimental results was based on the signal/noise (S/N) ratio. Control factors that given optimum ultimate tensile strength and vickers hardness values determined by using Taguchi method. Three different tool rotational speeds (525, 1025 and 1525 rev/min), tool transverse speeds (50, 75 and 100 mm/min) and tool positions (0, 0.75 and 1.5 mm) as control factors have been selected. Optimal values of variables which were obtained using the S/N ratios were found at the same levels for ultimate tensile strength and hardness. According to the variance analysis results, the most significant variable affecting to ultimate tensile strength and hardness values was determined as tool position. Furthermore, for ultimate tensile strength and hardness values, first degree regression model was created by utilizing MINITAB 17 program.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: gokhanbasar@osmaniye.edu.tr, selcuk.mistikoglu@iste.edu.tr / Tel: +90 328 827 1000 / 3432 1596

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çelik, alüminyum alaşımları, bakır ve pirinç gibi metal esaslı malzemeler mühendislik yapılarında kullanılmakta olup hem kendi aralarında hem de farklı türden malzemeler ile birleştirilmesi sanayi için oldukça öneme sahiptir. Bu birleştirmelerin elde edilmesi amacıyla yapılan çalışmalar sonucu katı hal kaynak yöntemleri bulunmuştur [1]. Katı hal kaynak yöntemlerinden olan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK), 1970' li yıllarda İngiltere'de Kaynak Enstitüsü'nde (TWI) geliştirilmiş ve 1990' lı yıllarda patenti alınmış bir kaynak yöntemidir [2]. Birleştirilmek için sabitlenmiş levha, boru vb. malzemelerin kaynak bölgesine sabit devirde, silindirik bir omuza sahip takım daldırılır. Takım kaynak yapılacak parçalar boyunca sabit ilerleme hızı ile hareket ettirilir. SKK için gerekli ısı, kaynak bileşenlerinin (takım ve malzeme) sürtünmesi sonucu meydana gelir. Sürtünme sonucu meydana gelen bu ısı malzemeyi yumuşatır. Kaynak takımının omuzu, karıştırıcı pim tarafından karıştırılarak geriye doğru atılan malzemelere baskı uygulayarak parçaların kaynak edilmesinde rol alır [3-5]. Bu yöntem kaynak konstrüksiyonu zor olan malzemelerin birleştirilmesinde; minimum yüzey hazırlığı, kısa kaynak süresi, otomasyon kolaylığı, düşük maliyeti ve yüksek enerji verimliliği, ilave bir kaynak metali ya da kaynak ağzına ihtiyaç duyulmaması, koruyucu gaz içermediği için çevreci olması [4] ve ayrıca farklı malzemelerin kaynağında başarılı olması [6] gibi kendine has pozitif özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Bakır (Cu) ve alüminyum (Al), iyi elektrik ve ısı iletkenliklerine ilaveten yüksek korozyon dirençleri ve mekanik özelliklerinden dolayı elektrik, otomotiv, inşaat, raylı taşımacılık vb. sektörlerde mühendislik malzemesi olarak kullanılmaktadır [7, 8].

Ancak, birleştirilecek olan bu malzeme çiftinin kendilerine özgü sahip oldukları kimyasal, mekanik ve ısı özelliklerindeki farklılıklar, geleneksel ergitme kaynak yöntemlerinde kullanılmasında bazı problemlere neden olmaktadır [7, 9]. Bakır ve alüminyum geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile birleşmesi sırasında iş parçalarının çarpılması, kaynak bölgesinde oksitlenme, sıcak çatlama riski, gaz boşlukları oluşumu gibi kaynak hataları oluşabilmektedir. Bu kaynak hatalarının SKK yöntemi ile minimum seviyeye getirilmesi hedeflenmektedir [9, 10]. Ayrıca, kaynak bölgesinde sert ve kırılğan bir yapıya sahip olan intermetalik tabakaların varlığı, aşılması gereken bir başka problem olarak görülmektedir. Bu sebeple, geleneksel kaynak yöntemi ile yüksek kalitede Cu/Al kaynaklı bağlantı elde etmek oldukça güçtür [11]. Elektrik elektronik endüstrisinde ve özellikle yüksek doğru akım hatlarında, bu iki metalin sağlam bir şekilde birleştirilmesinde farklı kaynak yöntemlerinin uygulanabilirliği hakkında yoğun çalışmalar yapılmaktadır [12]. Bakırın alüminyum ile birleştirilmesinde sürtünme kaynağı [13], patlama kaynağı [14], lazer kaynağı [15], ultrason kaynağı [16], difüzyon kaynağı [17] gibi kaynak yöntemlerinin incelenmekte olmasına rağmen, hala diğer kaynak yöntemlerinin kullanılması ile ilgili araştırmalar sürdürülmektedir. Son

zamanlarda, kullanımı oldukça yaygınlaşan ve katı hal birleştirme yöntemlerinden biri olan sürtünme karıştırma kaynağı, bu amaca yönelik alternatif bir birleştirme tekniği olarak düşünülmektedir.

Literatürde SKK ile yapılan çalışmalar kısaca şöyle özetlenebilir; Murr vd. [18] başlangıç niteliğinde yaptıkları çalışmada, Al-6061 ile Cu levhaları alın altına SKK yöntemi ile birleştirmişlerdir. Kaynak bölgesinde, süreksiz kaynak dikişi ve karışım bölgesinde meydana gelen boşluk ve çukurların oluşmasından dolayı SKK yöntemi ile sağlam-hatasız kaynak elde etmenin güçlüğüne ifade etmişlerdir. Abdollah-Zadeh vd. [19] yaptıkları çalışmada, 1060 alüminyum alaşımı ve saf ticari bakır SKK yöntemi kullanılarak birleşen kaynaklı numunelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine çalışmışlardır. Yüksek takım dönme devri ve düşük takım ilerleme hızlarında kaynak bölgesinde hatalar meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Liu vd. [11] bakır (T2) ve 5A06 alüminyum alaşımı alın altına SKK ile birleşmesinde en yüksek çekme mukavemet değeri (296 MPa); 950 dev/dak takım dönme devri ve 150 mm/dak takım ilerleme hızında elde etmişlerdir. Saeid vd. [20] 1060 alüminyum alaşımı ve ticari saf bakır levhaları bindirme SKK ile birleştirmişlerdir. Takım ilerleme hızının arayüzey morfolojisi, mikroyapı ve birleşme mukavemetine olan etkisini araştırmışlardır. Takım ilerleme hızlarında 118 ve 190 mm/dak yetersiz ısı girdisinden dolayı kaynak bölgesi içinde çukurların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. En yüksek kayma gerilmesi, 95 mm/dak takım ilerleme hızında elde edilmiş olup bu takım ilerleme hızın kaynak bölgesinde çukurlar oluşmadığı ve az miktarda mikroçatlakların meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. En yüksek kayma gerilmesi, kaynak bölgesinde çukurların oluşmadığı ve az miktarda mikroçatlakların bulunduğu 95 mm/dak takım ilerleme hızında elde etmişlerdir. Bisadi vd. [21] AA 5083 alüminyum alaşımı ile saf bakır plakaları SKK ile birleştirmişlerdir. Kaynaklı numunelerde, takım dönme devrinin ve ilerleme hızının mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisini araştırmışlardır. En iyi çekme mukavemeti, takım dönme devrinin 825 dev/dak ve takım ilerleme hızının ise 32 mm/dak olduğunda elde etmişlerdir. Zhang vd. [22] 3 mm kalınlığında ticari saf bakır (%99,9) ve 1060 alüminyum alaşımli plakalar SKK ile birleştirmişlerdir. Saf bakır kaynak öncesi yaklaşık 650°C sıcaklıkta 1 saat bekleme süresinde tavllanmış ve sonrasında havada soğutulmuştur. Sağlam bir kaynak için optimum kaynak parametresi; takım dönme devrinin 1050 dev/dak ve ilerleme hızının 30 mm/dak olduğunu tespit etmişlerdir. Muthu ve Jayabalan yaptıkları çalışmada, Cu/Al levhaların SKK yöntemi ile farklı takım ilerleme hızlarında birleştirmişlerdir. Tavlama işlemine tabi tutulmuş Cu plakalar takım ilerleme yönünde yerleştirilmiş ve karıştırıcı uç ise Al kenarına 2 mm takım konumlandırması ile kaynak işlemini gerçekleştirmişlerdir. Hatasız kaynak karışım bölgesini oluşturmak için gerekli optimum ısı girdisi aralığı, takım ilerleme hızının 70 mm/dak ve 80 mm/dak olduğu durumlarda elde etmişlerdir [23]. Sahu vd. [24] AA 1050 alüminyum alaşımı ve saf bakır levhaları SKK yöntemi ile

birleştirmişlerdir. Kaynak parametreleri olarak; takım ilerleme hızı, takım konumu ve omuz dalma mesafesini seçmişlerdir. Kaynak kalitesi üzerine en fazla omuz dalma mesafesinin etki ettiğini belirtmişlerdir. Çelik ve Çakır çalışmasında, SKK ile birleştirilen Al-Cu levhalarda kaynak parametrelerinin, mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisini araştırmışlardır. Maksimum kaynak performansı, 1330 dev/dak takım dönme devri, 20 mm/dak takım ilerleme hızı ve Al tarafında 1 mm takım konumlandırması durumunda elde etmişlerdir [25].

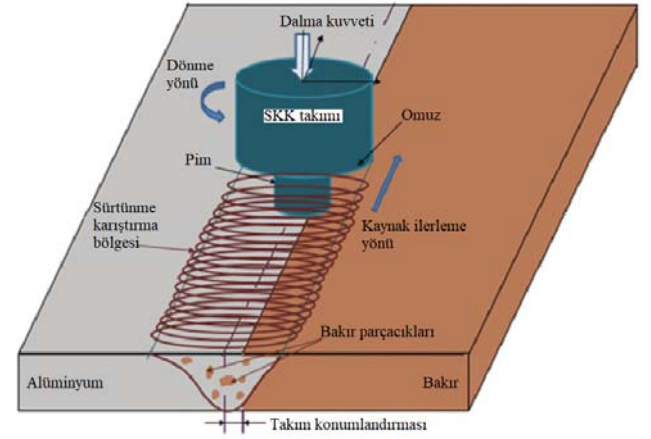
Literatürde, SKK yöntemi ile birleştirilmiş aynı ve farklı türden malzemelerin kaynak performansına, kaynak parametrelerinin etkisini araştıran birçok çalışma mevcuttur. Ancak, istatistiksel yöntemlerin kullanıldığı çalışma sayısının kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, deney sayısını azaltarak, zaman ve maliyet tasarrufu sağlamak amacıyla Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılmıştır. Cu/Al levhaların SKK ile birleştirilmesinde, kaynak parametrelerinin, kaynak performansı üzerine etkileri araştırılmıştır. Kontrol faktörleri olarak; takım dönme devri, takım ilerleme hızı ve takım konumu, çıktı faktörleri olarak da çekme mukavemeti ve sertlik seçilmiştir. Çalışmanın sonucunda, maksimum çekme mukavemeti ve maksimum sertlik değerlerini veren optimal kontrol faktörleri belirlenmiştir. Ayrıca, çekme mukavemeti ve sertlik değerleri için matematiksel denklemler elde edilmiştir.

2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Malzeme ve Deneysel Düzeneği (Material and Experimental Setup)

Çalışmada, 4 mm kalınlıkta AA 1050 alüminyum alaşımı ve %99,98 saflıkta elektrolitik bakır levhalar kullanılmıştır. Kaynak öncesi alüminyum ve bakır levhaların boyutları 120x195 mm olarak hazırlanmıştır. Tablo 1’de alüminyum malzemenin, Tablo 2’de bakır malzemenin kimyasal içeriği ve Tablo 3’te ise mekanik özellikleri verilmiştir. SKK deneyleri, 20 kW gücünde TRIDENT marka, TR-51E model CNC freze tezgahında yapılmıştır. Cu/Al levhaların SKK işleminin şematik olarak gösterimi Şekil 1’de görülmektedir.

Birleştirme işlemlerinde, Cu levha ilerleme kenarına, Al-1050 levha ise yığıma kenarına gelecek şekilde bağlama kalıbına sabitlenmiştir. Kaynak takımının karıştırıcı uç kısmı, levhaların birleşme yüzeylerine dik olacak şekilde konumlandırılmıştır. Birleştirme işlemi için omuz çapı 20 mm, pim kısmı M5x3,80 mm olan HSS (1.3343) malzemeden imal edilmiş bir kaynak takımı kullanılmıştır. Birleştirme işleminde saat yönünde dönen kaynak takımı, birleştirme için gerekli olan ön ısıyı elde etmek amacıyla birleşme bölgesine daldırılmış ve takıma ilerleme hareketi verilmeden önce 60 s beklenmiştir.



Şekil 1. Cu/Al levhaların sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi [26]
(Schematic representation of the friction stir welding of Cu/Al sheets)

Her bir deney grubu için üç adet çekme numunesi hazırlanmış ve çekme testine tabi tutulmuştur. Ayrıca, her bir numunenin kaynak bölgesinin kesitinde sertlik değerleri ölçülmüştür. Çekme test numuneleri kaynak yönüne dik olarak EN 10002-1 standardına uygun hazırlanmıştır. Deneylerin tamamında, çekme hızı 2 mm/dak olarak belirlenmiştir. Birleştirmenin kaynak bölgesindeki Vickers mikrosertlik (HV) ölçümleri için hazırlanan numune yüzeyinin üst ve alt bölgelerinden, kaynak kesitine doğru 1'er mm içeriden ve kaynak yönüne dik doğrultularda sıra-

Tablo 1. Al-1050 malzemenin kimyasal içeriği (% ağırlık) (The chemical composition of the Al-1050 material (wt%))

Al	Fe	Ti	Cr	Mg	Cu	Mn	Si
99,49	0,251	0,0262	0,0247	0,00481	0,0255	0,0365	0,124

Tablo 2. Saf Cu malzemenin kimyasal içeriği (% ağırlık) (The chemical composition of pure Cu material (wt%))

Cu	S	P	Si	Ni	Al	Zn	Fe
99,98	0,00139	0,00285	0,00135	0,00212	0,00209	0,00295	0,00408

Tablo 3. Alüminyum ve bakırın mekanik özellikleri (The mechanical properties of aluminium and copper)

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kopma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
Bakır	278,50	190,26	13,89	92
Alüminyum	122,50	70,15	11,81	38

Tablo 4. Kontrol faktörleri ve seviyeleri (Control factors and levels)

Kontrol Faktörleri	Sembol	Birim	Seviyeler			Serbestlik Derecesi
			Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	
Takım Dönme Devri	TDD	(dev/dak)	525	1025	1525	2
Takım İlerleme Hızı	TİH	(mm/dak)	50	75	100	2
Takım Konumu	TK	(mm)	0	0,75	1,5	2

sertlik şeklinde gerçekleştirilmiş ve kaynak bölgesinin ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır. Sertlik ölçümleri, MICROBUL Low Vickers & Brinell Hardness Tester Load tipi sertlik cihazında 0,5 kg yük ve 30 s bekleme süresi uygulanarak yapılmıştır. Çekme testi 10 kN kapasiteye sahip AGS-J SHIMADZU marka cihazla gerçekleştirilmiştir.

2.2. Metot (Method)

SKK parametrelerinin etkilerini ve en yüksek çekme mukavemeti ve sertlik değerlerini verecek optimum kontrol faktörleri tespit etmek amacıyla Taguchi Metodu kullanılmıştır. Taguchi Metodu, Genichi Taguchi tarafından ürün kalitesini geliştirmek amacı ile kullanılan istatistiksel bir metottur [27]. Bu istatistiksel metot birçok sanayi uygulamalarında başarılı bir şekilde uygulanmakta ve deney sayısını büyük oranda düşürmektedir [28]. Literatürde kullanılan SKK parametreleri; takım konumu, takım dönme devri, takım ilerleme hızı, eğim açısı, karıştırıcı uç boyutları ve şeklidir [26].

Bu nedenle, kaynak parametreleri olarak; takım dönme devri, takım ilerleme hızı ve takım konumu seçilmiştir. Kaynak ve makine parametreleri de göz önünde bulundurularak, Tablo 4’de kontrol faktörlerinin uygun seviyeleri seçilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde, kontrol faktörlerinin hepsi 3 seviyeye sahiptir ve kontrol faktörlerinin toplam serbestlik derecesi 6’dır. Deneyler sırasında, karıştırıcı ucun boyutu, şekli ve takım dalma mesafesi sabittir.

Optimum kaynak parametrelerini ve bu kaynak parametrelerinin etkilerini tespit etmek amacı ile kontrol faktör grubunun toplam serbestlik derecesi de dikkate alınarak en uygun ortogonal dizi seçilir [29]. Taguchi metodunda ortogonal diziler en az sayıda deneylerin yapılmasıyla deneysel çalışmaların verimli olmasını sağlamaktadır [28]. Kontrol faktör ve seviyeleri L_9 ($3 \times 3 \times 3$) ortogonal diziyeye göre belirlenmiştir. Deneysel çalışmada Tablo 5’te verilen kontrol faktörlerinin her bir kombinasyonu için SKK işlemi yapılmış ve her bir kombinasyon için üç çekme testi yapılmış, aynı zamanda kaynak bölgesinin kesitinde sertlik değerleri ölçülmüş ve ortalamaları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Minitab 17 paket programında Taguchi Metodu kullanılarak çözümlenmiş ve analiz edilmiştir.

Taguchi deney tasarım metodunda kalite karakteristiklerinin ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılan ölçüt S/G oranıdır. Sinyal (S), sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değerdir. Gürültü (G) ise ölçülen değerler içerisindeki

istenmeyen faktörlerin payını gösterir. S/G oranlarının hesaplanmasında; karakteristik tipine bağlı en küçük en iyi, nominal en iyi, en büyük en iyi metotları kullanılır [30]. Bu çalışmadaki S/G değerlerinin belirlenmesinde, kaynak verimliliği bakımından çekme mukavemeti ve sertlik değerlerinin en büyük olması istenildiği için Eş. 1’de verilen “En büyük en iyi” prensibine karşılık gelen formül kullanılmıştır.

Tablo 5. L_9 ortogonal dizi (L_9 orthogonal array)

A	B	C
1	1	1
1	2	2
1	3	3
2	1	2
2	2	3
2	3	1
3	1	3
3	2	1
3	3	2

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

Eş. 1’de, n gözlem deney sayısını, y_i ise elde edilen i. veriyi göstermektedir. Kontrol faktörlerinin seviyelere etkisi S/N oranları kullanılarak analiz edilmiştir. Bu etkiler deneysel ölçüm sonuçlarının ya da S/N oranları değerlerinin ortalamalarının toplamına göre hesaplanmıştır.

SKK işleminde kalite karakteristikleri (çekme mukavemeti ve sertlik değerleri) üzerindeki etkili faktörleri ve bu faktörlerin katkı payını hesaplamak için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Bu analiz ile her bir kontrol faktörünün kalite karakteristiklerine olan katkı payı belirlenmiştir. ANOVA tablosundan anlamlı etkileri belirlenen kontrol faktörlerinin optimal seviyeleri ile tahmini optimal kalite karakteristikleri (Tahmini optimal çekme mukavemeti, $\bar{C}M_{tah}$ ve tahmini optimal vickers sertliği, VSD_{tah}) tespit edilmiştir. Doğrulama deneyleri kalite karakteristiğini tespit etmek için güven aralığı (CI) hesaplanmaktadır. Eş. 2 kullanılarak, tahmini kalite karakteristikleri çekme mukavemeti ve sertlik için CI değerleri hesaplanmıştır [27].

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;1,V_2} V_e \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (2)$$

Eş. 2’de, $F_{\alpha;1,V_2}$ anlamlı seviye α ’nın F-oranı, α : anlamlı seviye, V_2 : birleştirilmiş hata varyansının serbestlik derecesi,

V_e : birleştirilmiş hata varyansı, r : deneylerin tekrar sayısı, n_{eff} : geçerli ölçüm sonuçlarının varyansıdır. Aşağıda verilen Eş. 3 ile n_{eff} geçerli ölçüm sonuçlarının varyansı elde edilir.

$$n_{eff} = \frac{T_{den}}{1+dof} \quad (3)$$

Eş. 3'te, T_{den} : toplam deney sayısı, dof : tahmin için kullanılan faktörlerin toplam serbestlik derecesini ifade etmektedir [27].

Taguchi metodu kullanarak elde edilen tahmini değerler ile karşılaştırmak ve Taguchi Metodunun tahmin yeteneğini tespit etmek amacıyla birinci derece tahmini denklem oluşturulmuştur. Birinci derece tahmini denklem Eş. 4'deki gibi formülüze edilebilir.

$$Y_1 = y - \varepsilon = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (4)$$

Eş. 4'de, Y_1 birinci dereceden denklemin yanıtı, y logaritmik ölçekte ölçülen yanıtlar, x_1, x_2, x_3 kontrol faktörleri takım dönme devri, takım ilerleme hızı ve takım konumunun logaritmik dönüşümleri; ε deneysel hata; b_0, b_1, b_2, b_3 ise parametre katsayıları olup en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilmiştir [28].

Regresyon analizi için kurulan model, bağımlı (açıklanan) değişken ve bağımsız (açıklayan) değişkenleri içeren bir modeldir. Böyle bir modelde; bağımlı değişkendeki değişim, bağımsız değişkenler ile açıklanmaya çalışılır. Regresyon denklemleri sonucunda elde edilen belirtme katsayısı (R^2) bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranı yani modeldeki açıklama miktarının açıklanamayan miktara oranıdır. Regresyon sonuçlarında belirtme katsayısı (R^2) 1'e ne kadar yakın bulunursa bağımlı değişkendeki değişimin büyük bir kısmı bağımsız değişken tarafından açıklanabilmektedir [31].

3. DENEY SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ (STATISTICAL ANALYSIS OF EXPERIMENTAL RESULTS)

3.1 Taguchi metodu ve Regresyon analizi (Taguchi method and Regression Analysis)

S/N oranları Eş. 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Çekme mukavemeti ve sertlik için deneysel sonuçlar, Taguchi metodu ve birinci derece denklemden elde edilen tahmini değerler, hesaplanan S/N değerleri, Tablo 6 ve Tablo 7'de sırasıyla verilmiştir.

Çekme mukavemeti ve sertlik için Taguchi metodu kullanılarak elde edilen tahmini değerler ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında ortalama % hata oranları sırasıyla 1,74 ve 3,37 olarak bulunmuştur. Ayrıca, SKK ile yapılan birleştirmede, çekme mukavemeti ve sertlik üzerinde etkili olan temel kontrol faktörleri arasındaki korelasyon birinci dereceden regresyon analizi ile belirlenmiştir.

Kontrol faktörlerinin ana etkilerini içeren birinci derece denklemler Eş. 5 ve Eş. 6'daki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{ÇM}_{tah} &= 43,8 - 0,00790DH + 0,168IH + 26,51TK \\ R^2 &= \%82,47 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{VSD}_{tah} &= 57,80 - 0,00533DH + 0,0467IH + 12,67TK \\ R^2 &= \%86,35 \end{aligned} \quad (6)$$

Birinci derece denklemlerden Eş. 5'in belirtme katsayısı $R^2=0,825$ iken Eş. 6 da ise $R^2=0,864$ olarak bulunmuştur. Birinci derece denklemden elde edilen çekme mukavemet değerleriyle (ÇM_{tah}), deneysel çalışma sonucu elde edilen ortalama çekme mukavemet değerleri (ÇM_{ort}) karşılaştırılmış ve % hata ortalaması 9,38 olarak bulunmuştur. Birinci derece denklem kullanılarak tahmin edilen sertlik değerleri ile deneysel çalışma sonucu elde edilen sertlik değerleri arasındaki % hata ortalaması 4,50 olarak hesaplanmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda; ortalama çekme mukavemet değeri 68,17 MPa ve ortalama S/N oranı 36,34 dB iken ortalama sertlik değeri 65,33 HV ve ortalama S/N oranı 36,22 dB olarak hesaplanmıştır. Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri ve performans karakteristiği üzerinde etkili olan faktörün belirlenmesinde Taguchi metodu ile oluşturulan S/N yanıt tablosu ya da istenilen duruma göre (en küçük en iyi, nominal en iyi veya en büyük en iyi) performans karakteristikleri (çekme mukavemeti ve sertlik değerleri) kullanılarak belirlenmektedir. Tablo 8'de en büyük çekme mukavemet ortalamaları ve S/N değerleri, o kontrol faktörüne ait optimum seviyeyi vermektedir. Sertlik üzerindeki her bir kontrol faktörünün etkisini gösteren ortalama sertlik değerleri ve S/N yanıt tablosu ise Tablo 9'da gösterilmiştir. Buna göre; çekme mukavemeti üzerinde kontrol faktörlerinin etki sırası takım konumu, takım dönme devri ve takım ilerleme hızı olarak tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde; araştırmacılar başlangıçta Cu/Al malzemelerin SKK yöntemi ile birleştirilmesinde takım dönme devri, takım ilerleme hızı ve sıfır takım konumu kullanmışlardır. Bu kaynak parametreleri ile birleştirilmesi sonucunda; çatlak, boşluk vb. kaynak hatalarının meydana geldiğini görmüşlerdir [18]. Daha sonra araştırmacılar, kaynak hatalarını gidermek ve kaynak mukavemetini arttırmak amacıyla takım konumunu daha yumuşak malzemeye (alüminyuma) doğru konumlanması üzerine araştırma gerçekleştirmişlerdir [32]. Takım malzemesinin alüminyuma doğru konumlanması sonucu kaynak hatalarının giderildiği ve kaynak mukavemetinin arttığı görülmüştür [33]. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların, literatür ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür [34]. Sertlik değerleri üzerinde kontrol faktörlerinin etki sırası ise takım konumu, takım ilerleme hızı ve takım dönme devri olarak tespit edilmiştir. Çekme mukavemeti için kontrol faktörlerinin yani SKK parametrelerinin optimum değerlerini gösteren ortalama çekme mukavemeti ve S/N oranlarının ana etki grafiği sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Sertlik için ise ortalama sertlik ve S/N oranları ana etki grafiği sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir.

Tablo 6. Çekme mukavemeti için deneysel sonuçlar ve tahmini değerler
(Experimental results and predicted values for ultimate tensile strength)

Deney No	Faktörlerin Deneysel Değerleri			Deneysel Değerler		Taguchi Metodu				Birinci Derece Denklem	
	TDD [dev/dak]	TİH [mm/dak]	TK [mm]	$\bar{C}M_{ort}$ [MPa]	$\bar{C}M_{tah}$ [MPa]	% E	S/N [dB]	$\bar{C}M_{S/N_{tah}}$ [dB]	$\bar{C}M_{tah}$ [MPa]	% E	
1	525	50	0	53,43	53,86	0,81	34,56	34,39	48,04	10,09	
2	525	75	0,75	70,93	73,64	3,82	37,02	37,38	72,12	1,67	
3	525	100	1,5	105,16	102,02	2,99	40,44	40,24	96,19	8,53	
4	1025	50	0,75	63,3	60,16	4,96	36,03	35,83	63,98	1,07	
5	1025	75	1,5	72,44	72,87	0,60	37,20	37,04	88,05	21,55	
6	1025	100	0	42,42	45,13	6,38	32,55	32,91	52,47	23,70	
7	1525	50	1,5	83,03	85,74	3,26	38,38	38,74	79,91	3,75	
8	1525	75	0	45,47	42,33	6,91	33,15	32,96	44,33	2,50	
9	1525	100	0,75	77,33	77,76	0,56	37,77	37,60	68,41	11,53	
Ortalama:				68,17	68,17	3,37	36,34	36,34	68,17	9,38	
En Büyük:				105,16	102,02	6,91	40,44	40,24	96,19	23,70	
En Küçük:				42,42	42,33	0,56	32,55	32,91	44,33	1,07	

T_ÇM_{ort}: Çekme mukavemetlerinin ortalaması: 68,17 MPa
T_ÇM_{S/N}: Çekme mukavemetlerinin ortalamasına ait S/N oranı: 36,34 dB

Tablo 7. Sertlik için deneysel sonuçlar ve tahmini değerler (Experimental results and predicted values for hardness)

Deney No	Ölçüm Değerleri	Taguchi Metodu				Birinci Derece Denklem	
		VSD_{ort} [HV]	VSD_{tah} [HV]	% E	S/N [dB]	$VSD_{S/N_{tah}}$ [dB]	VSD_{tah} [HV]
1	60	59,00	1,67	35,56	35,37	57,33	4,44
2	65	66,67	2,56	36,26	36,45	68,00	4,62
3	81	80,33	0,82	38,17	38,17	78,67	2,88
4	67	66,33	1,00	36,52	36,52	64,17	4,23
5	70	69,00	1,43	36,90	36,71	74,83	6,90
6	55	56,67	3,03	34,81	35,00	57,00	3,64
7	71	72,67	2,35	37,03	37,22	71,00	0,00
8	50	49,33	1,33	33,98	33,98	53,17	6,33
9	69	68,00	1,45	36,78	36,59	63,83	7,49
Ortalama:	65,33	65,33	1,74	36,22	36,22	65,33	4,50
En Büyük:	81	80,33	3,03	38,17	38,17	78,67	7,49
En Küçük:	50	49,33	0,82	33,98	33,98	53,17	0,00

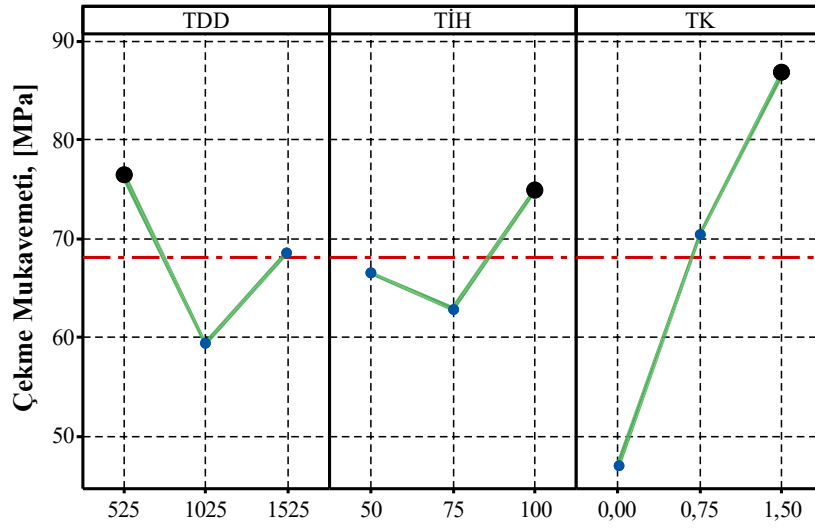
T_VSD_{ort}: Sertlik değerlerinin (VSD) ortalaması: 65,33 HV
T_VSD_{S/N}: Sertlik değerlerinin (VSD) ortalamasına ait S/N oranı: 36,22 dB

Tablo 8. Çekme mukavemeti ortalamaları ve S/N oranları için ana etki grafikleri
(Response table for averages of ultimate tensile strength and averages of S/N ratio)

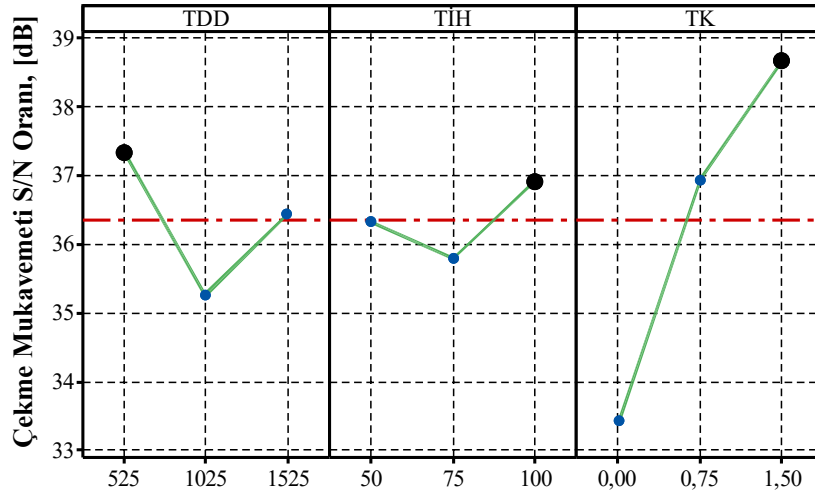
Faktörler ve Seviyeleri	Çekme Mukavemeti, [MPa]			S/N Oranı Ortalamaları, [dB]		
	TDD	TİH	TK	TDD	TİH	TK
Seviye 1	76,51	66,59	47,11	37,34	36,32	33,42
Seviye 2	59,39	62,95	70,52	35,26	35,79	36,94
Seviye 3	68,61	74,97	86,88	36,44	36,92	38,67
Fark	17,12	12,02	39,77	2,08	1,13	5,25
Sıralama	2	3	1	2	3	1

Tablo 9. Sertlik ortalamaları ve S/N oranları için ana etki grafikleri
(Response table for averages of hardness and averages of S/N ratio)

Faktörler ve Seviyeleri	Sertlik, [HV]			S/N Oranı Ortalamaları, [dB]		
	TDD	TİH	TK	TDD	TİH	TK
Seviye 1	68,67	66,00	55,00	36,66	36,37	34,78
Seviye 2	64,00	61,67	67,00	36,08	35,71	36,52
Seviye 3	63,33	68,33	74,00	35,93	36,58	37,37
Fark	5,33	6,67	19,00	0,74	0,87	2,58
Sıralama	3	2	1	3	2	1

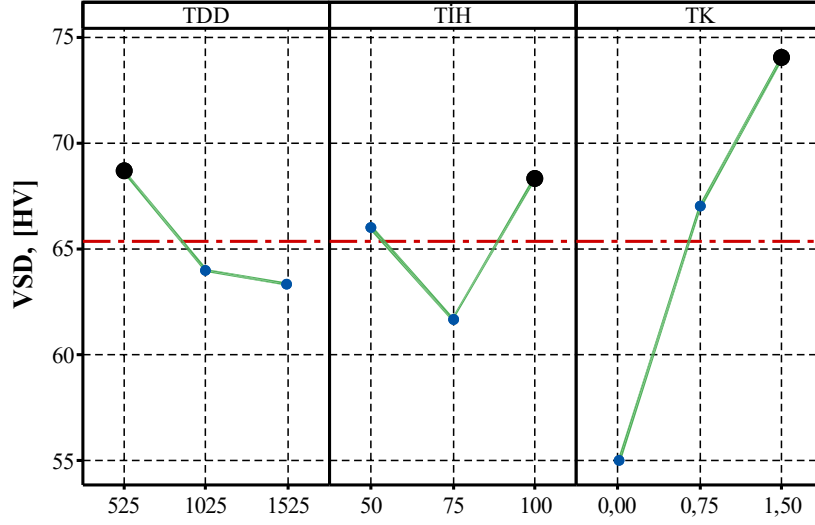


Şekil 2. Ortalama çekme mukavemet değerleri için ana etki grafiği (Main effects graphs for average ultimate tensile strength)

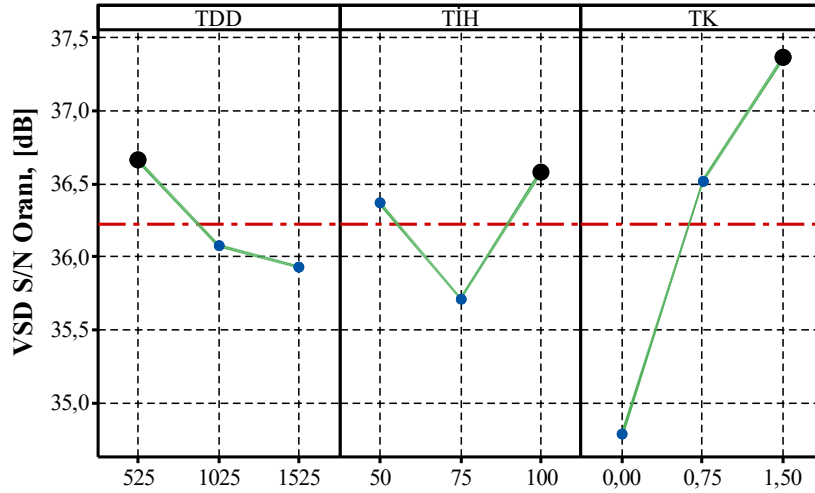


Sinyal Gürültü Oranı: Daha büyük daha iyi

Şekil 3. Çekme mukavemeti'nin S/N oranları için ana etki grafiği (Main effects graphs for S/N ratio of ultimate tensile strength)



Şekil 4. Ortalama sertlik değerleri için ana etki grafiği (Main effects graphs for average hardness)



Sinyal Gürültü Oranı: Daha büyük daha iyi

Şekil 5. Sertlik S/N oranları için ana etki grafiği (Main effects graphs for S/N ratio of hardness)

Belirlenen SKK parametreleri ile en büyük çekme mukavemeti ve sertlik değerlerini verecek kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri S/N oranlarını veya ortalama performans karakteristiklerini kullanarak $A_1B_3C_3$ tespit edilmiştir. $A_1B_3C_3$ olarak tespit edilen optimal kontrol faktörü seviyeleri için Taguchi metodundan elde edilen sonuçlar ve tahmini S/N değerleri; $\bar{C}M_{tah} = 102,02$ MPa, $\bar{C}M_{S/N_{tah}} = 40,24$ dB, $VSD_{tah} = 80,33$ HV, $\bar{C}M_{S/N_{tah}} = 38,17$ dB olarak hesaplanmıştır. Tablo 10'dan görüldüğü üzere bu çalışma için seçilen kontrol faktörlerinden; takım dönme devrinin birinci seviyesi (525 dev/dak), takım ilerleme hızının üçüncü seviyesi (100 mm/dak) ve takım konumunun üçüncü seviyesinde (1,5 mm) en büyük performans karakteristik değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada, optimum SKK parametreleri ile birleştirilmesi sonucu elde edilen en yüksek çekme mukavemet değeri

105,16 MPa olarak bulunmuştur. Diğer katı-hal kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi sonucu elde edilen çekme mukavemet değerleri; sürtünme kaynaklı Cu/Al-1050 birleştirmede 87 MPa [13], difüzyon kaynaklı saf Cu/saf Al birleştirmede 61 MPa [17] ve ultrason kaynaklı Cu/saf Al birleştirmede ise yaklaşık 90 MPa [16] olarak tespit edilmiştir. En yüksek çekme mukavemet değeri, SKK ile elde edilmiştir. Benzer şekilde, Çelik ve Çakır çalışmasında [25], SKK ile birleştirmede en yüksek çekme mukavemet değerini 99,58 MPa olarak elde etmişlerdir. Deneyler sonucunda, kaynaklı numunelerin kaynak bölgesinin ortalama sertlik değerleri 50-81 HV arasında değişmektedir. En yüksek çekme mukavemetine sahip kaynaklı numunenin ortalama sertlik değeri 81 HV olarak bulunmuştur. Çakır çalışmasında [35], en yüksek dayanıma sahip olan kaynaklı numunenin kaynak bölgesinin ortalama sertlik değerini 76

HV olarak tespit etmiştir. Karışım bölgesindeki sertlik artışları, yeniden kristalleşmiş ince taneli alüminyumca zengin yapıya, bakıca zengin yapılara ve metaller arası bileşiklerin varlığından kaynaklandığı düşünülmüştür [7, 35].

Tablo 10. Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri (Optimum levels of control factors)

Kontrol Faktörleri	Birim	Optimum Seviye	Optimum Değer
TDD	(dev/dak)	1	525
TİH	(mm/dak)	3	100
TK	(mm)	3	1,5

3.2 Varyans Analizi (Analysis of Variance)

Çekme mukavemeti ve sertlik değerleri için ANOVA sonuçları, Tablo 11 ve Tablo 12’de verilmiştir. Ayrıca performans kriterlerinden çekme mukavemeti için faktörlerin yüzde olarak etkileri incelendiğinde; takım konumu faktörünün etkisinin %76,88; takım dönme devrinin etkisinin %14,13; takım ilerleme hızının etkisinin %7,32 olduğu görülmektedir. Kumar vd. [36] yaptıkları çalışmada, varyans analizi ile çekme mukavemeti üzerine en etkili SKK parametrelerin, takım dönme devri ve takım konumu olduğunu tespit etmişlerdir. Sertlik için ise takım konumu faktörünün etkisinin %80,76; takım ilerleme hızının etkisinin %10,01; takım dönme devrinin etkisinin %7,39 olduğu gözlemlenmiştir.

3.3 Doğrulama Deneyleri (Confirmation Experiments)

Doğrulama deneyleri, optimal değerleri veren koşulun öngörülen iyileşmeyi sağlayıp sağlamadığını doğrulamak için yapılan testtir. Optimal performans kriterleri veren parametre grubu, bazen mevcut deneylerden biri olabilirken, bazen ise gerçekleştirilen deney koşullarının dışında olabilmektedir. Bu çalışmada, her iki performans kriteri için optimum sonucu mevcut deney şartlarında ulaşılmıştır.

Optimal performans kriterlerinin tahmini değerleri kontrol faktörlerinin optimum kombinasyonları dikkate alınarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\zeta M_{opt} = T_{\zeta M_{ort}} + (\zeta M_{TDD_1} - T_{\zeta M_{ort}}) + (\zeta M_{TİH_3} - T_{\zeta M_{ort}}) + (\zeta M_{TK_3} - T_{\zeta M_{ort}}) \quad (7)$$

$$VSD_{opt} = T_{VSD_{ort}} + (VSD_{TDD_1} - T_{VSD_{ort}}) + (VSD_{TİH_3} - T_{VSD_{ort}}) + (VSD_{TK_3} - T_{VSD_{ort}}) \quad (8)$$

Eşitlik 7’de; deneylerden elde edilen çekme mukavemet değerlerinin ortalaması $T_{\zeta M_{ort}} = 68,17$ MPa ve etkili kontrol faktörlerinin optimum seviyelerdeki çekme mukavemet değerler $\zeta M_{TDD_1} = 76,51$ MPa, $\zeta M_{TİH_3} = 74,97$ MPa ve $\zeta M_{TK_3} = 86,88$ MPa değerleri ile $\zeta M_{opt} = 102,02$ MPa olarak hesaplanmıştır. Eşitlik 8’de ise; ölçülmüş tüm sertliklerin ortalaması $T_{VSD_{ort}} = 65,33$ HV ve etkili kontrol faktörlerinin optimum seviyelerdeki sertlik değerleri $VSD_{TDD_1} = 68,67$ HV, $VSD_{TİH_3} = 68,33$ HV ve $VSD_{TK_3} = 74$ HV değerleri ile $VSD_{opt} = 80,34$ HV olarak belirlenmiştir.

3.4 Güven Aralığının Hesaplanması

(Calculation of Confidence Interval (CI))

Deney sonuçlarına %95 güven aralığında varyans analizi uygulanarak performans kriterleri üzerindeki değişkenlerin etki seviyeleri belirlenmiştir. ANOVA tablosundan anlamlı etkileri tespit edilen kontrol faktörlerinin optimal seviyeleri ile tahmini optimal kalite karakteristiği belirlenmiştir.

Optimum değişken seviyeleri ile yapılan doğrulama deneyleri, kalite karakteristikleri belirlemek için güven aralığı Eş. 2 ve Eş. 3 yardımıyla hesaplanmıştır. Kalite karakteristiklerinden çekme mukavemet için toplam deney sayısı ve değişkenlerin serbestlik dereceleri toplamı Eş. 3’te yerine konulduğunda $n_{ef}=1,29$ olarak hesaplanmış olup, deney tekrar sayısı üç olarak uygulanmıştır. $F_{\alpha;1,V_2}$ değeri,

Tablo 11. Çekme mukavemeti için varyans analizi (Analysis of variance for ultimate tensile strength)

Kaynak	Serbestlik	Kareler	Kareler	Varyans	Faktör	% Etki
Takım Dönme Devri	2	440,52	220,26	8,44	0,106	14,13
Takım İlerleme Hızı	2	228,09	114,05	4,37	0,186	7,32
Takım Konumu	2	2397,38	1198,69	45,94	0,021	76,88
Artık Hata	2	52,18	26,09			1,67
Toplam	8	3118,17				100

$$R^2 = \%98,33; R^2(adj) = \%93,31$$

Tablo 12. Sertlik için varyans analizi (Analysis of variance for hardness)

Kaynak	Serbestlik	Kareler	Kareler	Varyans	Faktör	% Etki
Takım Dönme Devri	2	50,67	25,333	4,00	0,200	7,39
Takım İlerleme Hızı	2	68,67	34,333	5,42	0,156	10,01
Takım Konumu	2	554,00	277,000	43,74	0,022	80,76
Artık Hata	2	12,67	6,333			1,84
Toplam	8	686,00				100

$$R^2 = \%98,15; R^2(adj) = \%92,61$$

Tablo 11'deki hata serbestlik derecesi dikkate alınarak ilgili F tablosundan belirlenmiştir. Eş. 2'deki hata varyansı (V_e), Tablo 11'den tespit edilmiştir. Bulunan değerler Eş. 2'de yerine konulduğunda, çekme mukavemeti için güven aralığı (CI) değeri 23,16 MPa olarak hesaplanmıştır. %95 güven seviyesinde tahmini ortalama optimal çekme mukavemetinin güven aralığı Eş. 9'dan hesaplanmıştır.

$$|\dot{C}M_{opt} - CI_{\dot{C}M}| < \dot{C}M_{den} < |\dot{C}M_{opt} + CI_{\dot{C}M}| \quad (9)$$

Çekme mukavemeti için veriler Eş. 9'da yerine konulduğunda; $|102,02 - 23,16| < 105,16 < |102,02 + 23,16|$ eşitliğinde hesaplamalar yapıldığında doğrulama deneylerinin $102,02 \pm 23,16$ MPa ya da $78,86$ MPa – $125,18$ MPa aralığında olması beklenir. Kalite karakteristiklerin bir diğeri olan sertlik için güven aralığı Eş. 2 ve Eş. 3 yardımıyla hesaplanmıştır. Eş. 3'te yerine konulduğunda $n_{eff} = 1,29$ olarak hesaplanmış olup, deney tekrar sayısı bir olarak uygulanmıştır. $F_{\alpha,1,V_2}$ değeri, Tablo 12'deki hata serbestlik derecesi dikkate alınarak ilgili F tablosundan belirlenmiştir. Eş. 2'deki hata varyansı (V_e), Tablo 12'deki veriler ile tespit edilmiştir. Eş. 2'de sayısal değerler yerine konulduğunda; tahmini optimal değerler için güven aralığı $CI=14,44$ HV olarak belirlenmiştir. %95 güven seviyesinde tahmini ortalama optimal sertliğin güven aralığı Eş. 10'dan hesaplanmıştır.

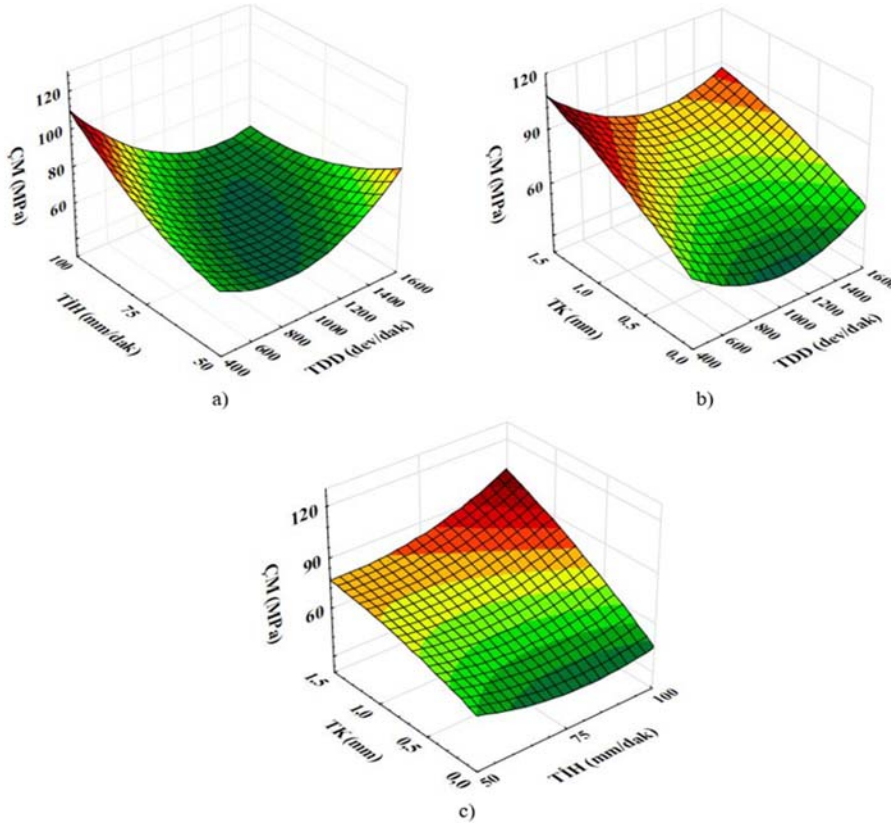
$$|VSD_{opt} - CI_{VSD}| < VSD_{den} < |VSD_{opt} + CI_{VSD}| \quad (10)$$

Sertlik için veriler Eş. 10'da yerine konulduğunda; $|80,34 - 14,44| < 81 < |80,34 + 14,44|$ eşitliğinde hesaplamalar yapıldığında doğrulama deneylerinin $80,34 \pm 14,44$ HV ya da $65,90$ HV – $94,78$ HV aralığında olması beklenir. Kontrol faktörlerinin $A_1B_3C_3$ durumunda belirlenen optimum seviyelerinin Tablo 6 ve Tablo 7'deki 3 nolu deneyin parametre seviyeleri ile aynı olup, 3 nolu deney sonucu elde edilen ortalama çekme mukavemeti ve sertlik değerleri sırasıyla $105,16$ MPa ve 81 HV'dir. Bu kalite karakteristikleri yapılan tüm deneyler içerisinde elde edilmiş en büyük değerlerdir. Kontrol faktörlerinin optimum seviyesindeki bu değerler güven aralığının üst sınır ve alt sınır değerleri arasında yer aldıklarından, Taguchi metodu ile $0,05$ anlamlılık düzeyinde optimizasyonun başarılı olduğu görülmüştür.

3.5. 3D Grafikler (3D Graphs)

Şekil 6'da deneysel olarak elde edilen performans kriterlerinin; takım dönme devri, takım ilerleme hızı ve takım konumu kontrol faktörlerine göre değişimleri gösterilmiştir.

Takım ilerleme hızı arttıkça ve takım dönme devri azaldıkça ÇM değerleri artmaktadır (Şekil 6a.) Takım konumunun artması ile ÇM değerlerinde ciddi bir artış olup takım dönme devrindeki değişiklik ile çok fazla bir değişim görülmemiştir (Şekil 6b). Takım konumu ve takım ilerleme hızının



Şekil 6. Takım dönme devri, takım ilerleme hızı ve takım konumunun çekme mukavemeti üzerine etkileri
(The effects of tool rotation speed, tool transverse speed and tool position on tensile strength)

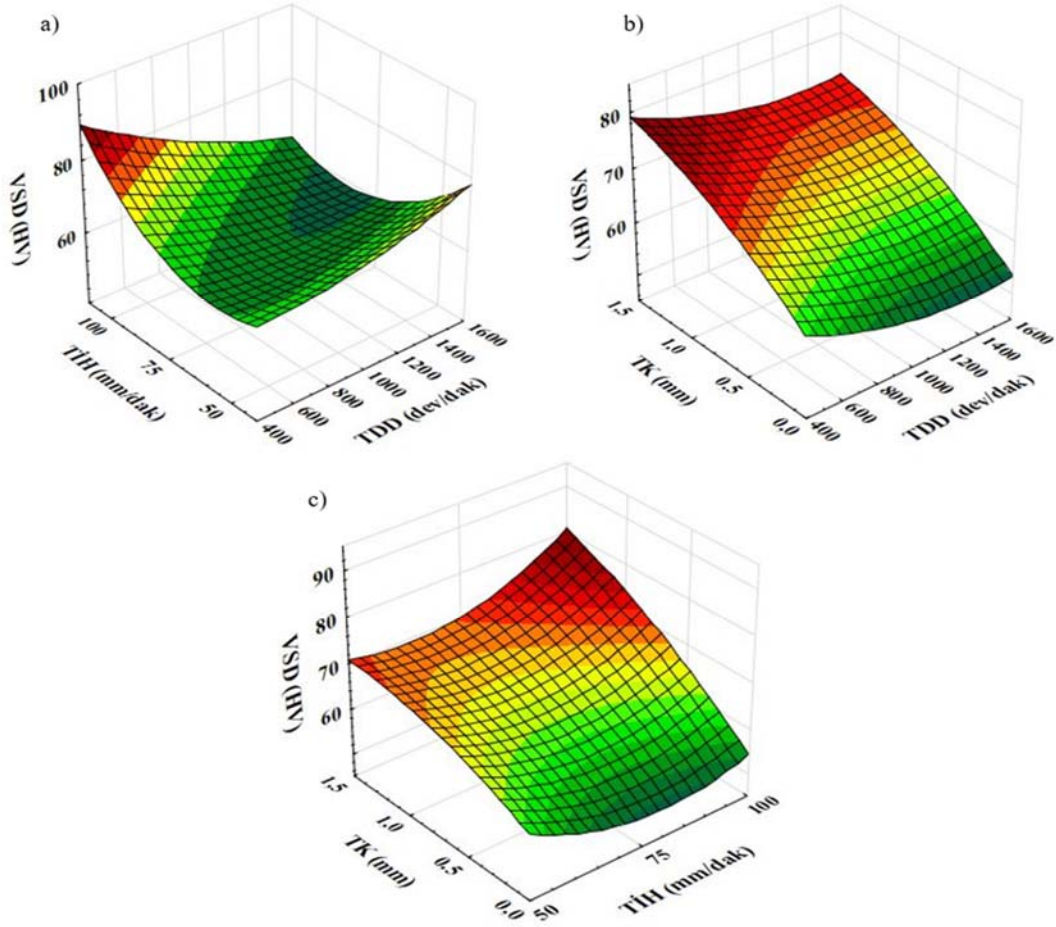
artmasıyla $\dot{C}M$ değerlerinde göze çarpan bir şekilde artış gözlemlenmiştir (Şekil 6c).

Şekil 7a incelendiğinde, takım dönme devrinin azaldığı ve takım ilerleme hızının arttığı durumda en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Yine, takım konumunun artmasıyla sertlik değerlerinde bir artış görülmekte olup takım dönme devrindeki farklılıkların ise çok fazla etkilemediği görülmüştür (Şekil 7b). Takım konumu ve takım ilerleme hızındaki artış sertlik değerlerinde göze çarpan bir şekilde arttırdığı tespit edilmiştir (Şekil 7c).

4. SİMGELER (SYMBOLS)

Al	: alüminyum
b_0, b_1, b_2, b_3	: parametre katsayıları,
Cu	: bakır
$CI_{\dot{C}M}$: çekme mukavemeti için güven aralık değeri,
CI_{VSD}	: sertlik için güven aralık değeri

$\dot{C}M_{den}$: optimum seviyelerdeki deneysel çekme mukavemet değeri, MPa
$\dot{C}M_{ort}$: ortalama çekme mukavemet değeri aritmetik ortalaması, MPa
$\dot{C}M_{S/N_{tah}}$: Taguchi metodu ile çekme mukavemet tahmini sinyal/gürültü oranı, dB
$\dot{C}M_{tah}$: Taguchi metodu ve birinci dereceden denklem ile elde edilmiş tahmini çekme mukavemet değeri, MPa
TDD	: takım dönme devri, dev/dak
dof	: tahmin için kullanılan faktörlerin toplam serbestlik derecesi,-
E	: yüzde hata,-
$F_{\alpha;1,V_2}$: anlamlı seviye α 'nın F oranı,-
TİH	: takım ilerleme hızı, mm/dak
n	: deney sayısı, adet
n_{eff}	: geçerli ölçüm sonuçlarının sayısı, adet
r	: tekrar deneylerinin sayısı, adet
R^2	: belirtme katsayısı,-
S/N	: sinyal/gürültü oranı, dB



Şekil 7. Takım dönme devri, takım ilerleme hızı ve takım konumunun vickers sertlik üzerine etkileri
(The effects of tool rotation speed, tool transverse speed and tool position on vickers hardness)

TK	: takım konumu, mm
T_{den}	: toplam deney sayısı, adet
V_e	: birleştirilmiş hata varyansı,-
V_2	: birleştirilmiş hata varyansının serbestlik derecesi,-
VSD_{ort}	: ortalama sertlik değeri aritmetik ortalaması, HV
VSD_{tah}	: Taguchi metodu ve birinci dereceden denklem ile elde edilmiş tahmini sertlik değeri, HV
$VSD_{S/N_{tah}}$: Taguchi metodu ile sertlik tahmini sinyal/gürültü oranı, dB
VSD_{den}	: optimum seviyelerdeki deneysel sertlik değeri, HV
x_0	: sabit değişken
x_1, x_2, x_3	: kontrol faktörlerinin logaritmik dönüşümleri
y_i	: elde edilen i. veri, -
y	: logaritmik ölçekte ölçülen yüzey pürüzlülüğü,-

5.1. Yunan Harfleri (Greek Symbols)

ε	: deneysel hata
α	: anlamlı seviye

5.2. Kısaltmalar (Abbreviations)

ANOVA	: varyans analizi
HRc	: rockwell C sertliği
VSD	: vickers sertlik değeri
SKK	: sürtünme karıştırma kaynağı
TWI	: kaynak enstitüsü

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu deneysel çalışma; SKK ile birleştirilen Cu/Al levhaların performans kriterleri üzerine; takım dönme devri, takım ilerleme hızı ve takım konumu faktörlerinin etkilerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Deneyler Taguchi L_9 ortogonal dizinine göre tasarlanarak 27 deney yerine 9 deney ile optimal performans kriterleri daha kısa süre içerisinde belirlenmiş, böylece zaman ve maliyetten kazanımlar elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

Taguchi metodu kullanılarak elde edilen optimal kaynak parametreleri; 525 dev/dak takım dönme devri, 100 mm/dak takım ilerleme hızı ve 1,5 mm takım konumu olarak tespit edilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre; çekme mukavemeti üzerine en etkili parametreler sırasıyla takım konumu (%76,88), takım dönme devri (%14,13) ve takım ilerleme hızı (%7,32) iken sertlik üzerine en etkili parametreler sırasıyla takım konumu (%80,76), takım ilerleme hızı (%10,01) ve takım dönme devri (%7,39) olduğu görülmüştür.

Takımın sıfır konumundan uzaklaşması ile çekme mukavemeti ve sertliğin arttığı görülmüştür. Taguchi Metodundan elde edilen tahmini değerler ile deneysel

sonuçlar arasındaki, ortalama hata değerleri; çekme mukavemeti için %3,37, sertlik için ise %1,74 olarak belirlenmiştir.

Regresyon analizi sonucu elde edilen tahmini değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki, ortalama hata değerleri; çekme mukavemeti için %9,38, sertlik için %4,50 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, Taguchi Metodu ile regresyon analizi karşılaştırıldığında Taguchi metodunun tahmin yeteneği daha yüksek bulunmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Mustafa Kemal Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimi (BAP) tarafından YL-13261'nolu proje desteği ile gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, projenin gerçekleşmesinde maddi destek sağlayan Mustafa Kemal Üniversitesi BAP'a ve testlerin yapıldığı HATBORU AŞ.'ne (HATAY) sonsuz teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Öcalır Ş., Külekci M.K., SKK ile yapılan AA1050 Al alaşımı birleştirmelerde optimum parametrelerin belirlenmesi, 4. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi, Gaziantep-Türkiye, 877-886, 11-13 Mayıs, 2016.
2. Çam G., Al-Alaşımları için geliştirilen yeni kaynak yöntemleri, Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi, İstanbul-Türkiye, 267-277, 19-20 Ekim, 2001.
3. Karagöz İ., Öksüz M., Microstructures occurring in the joined thermoplastics sheets with friction stir welding, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33(2), 503-515, 2018.
4. Çam G., Mistikoglu S., Recent developments in friction stir welding of Al-alloys, J. Mater. Eng. Perform., 23 (6), 1936-1953, 2014.
5. Bozkurt Y., Uzun H., Salman S., Effect of tool wear on mechanical properties of friction stir welded AA2124/SiCp/25 composite plates, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26 (1), 139-149, 2011.
6. Kulekci M.K., Esme U., Ocalir S., Ustun D., Kazancoglu Y., Tensile shear strength and elongation of FSW parts predicted by Taguchi-based fuzzy logic, Materials Testing, 58 (4), 351-356, 2016.
7. Barlas Z., Uzun H., Investigation of microstructural and mechanical properties of friction stir welded Cu/Al-1050 butt joint, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25 (4), 857-865, 2010.
8. Ouyang J., Yarrapareddy E., Kovacevic R., Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper, J. Mater. Process. Technol., 172(1), 110-122, 2006.
9. Al-Roubaiby A.O., Nabat S.M., Batako A.D.L., Experimental and theoretical analysis of friction stir welding of Al-Cu joints, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 71 (9-12), 1631-1642, 2014.

10. Mishra R.S., Ma Z.Y., Friction stir welding and processing, *Mater. Sci. Eng., R*, 50 (1-2), 1-78, 2005.
11. Liu P., Shi Q., Wang W., Wang X., Zhang Z., Microstructure and XRD analysis of FSW joints for copper T2/aluminium 5A06 dissimilar materials, *Mater. Lett.*, 62 (25), 4106-4108, 2008.
12. Veerkamp W.E., Copper-to-aluminum transitions in high DC bus system, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 33 (4), 1027-1034, 1997.
13. Lee W.B., Bang K.S., Jung S.B., Effects of intermetallic compound on the electrical and mechanical properties of friction welded Cu/Al bimetallic joints during annealing, *J. Alloys Compd.*, 390 (1-2), 212-219, 2005.
14. Amani H., Soltanieh M., Intermetallic phase formation in explosively welded Al/Cu bimetals, *Metall. Mater. Trans. B*, 47 (4), 2524-2534, 2016.
15. Tadamalle A.P., Reddy Y.P., Ramjee E., Influence of laser welding process parameters on weld pool geometry and duty cycle, *Adv. Prod. Eng. Manage.*, 8 (1), 52-60, 2013.
16. Tsujino J., Ueoka T., Ultrasonic butt welding of aluminum, anticorrosive aluminum and copper plate specimens, *Proceeding IEEE 1988 Ultrasonics Symposium*, New York, A.B.D., 493-496, 1988.
17. Ay İ., Çelik S., Çelik İ., Comparison of properties of friction and diffusion welded joints made between the pure aluminium and copper bars, *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1 (2), 88-102, 1999.
18. Murr L.E., Li Y., Flores R.D., Trillo E.A., McClure J.C., Intercalation vortices and related microstructural features in the friction-stir welding of dissimilar metals, *Material Research Innovations*, 2 (3), 150-163, 1998.
19. Abdollah-Zadeh A., Saeid T., Sazgari B., Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints, *J. Alloys Compd.*, 460 (1-2), 535-538, 2008.
20. Saeid T., Abdollah-zadeh A., Sazgari B., Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by friction stir welding, *J. Alloys Compd.*, 490 (1-2), 652-655, 2010.
21. Bisadi H., Tavakoli A., Sangsarakı M.T., Sangsarakı K.T., The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints, *Mater. Des.*, 43, 80-88, 2013.
22. Zhang Q.Z., Gong W. B., Liu W., Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al-Cu joints by friction stir welding, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 25 (6), 1779-1786, 2015.
23. Muthu M.F.X., Jayabalan V., Tool travel speed effects on the microstructure of friction stir welded aluminum-copper joints, *J. Mater. Process. Technol.*, 217, 105-113, 2015.
24. Sahu P.K., Kumari K., Pal S., Pal S.K., Hybrid fuzzy-grey-Taguchi based multi weld quality optimization of Al/Cu dissimilar friction stir welded joints, *Advances in Manufacturing*, 4 (3), 237-247, 2016.
25. Celik S., Cakir R., Effect of friction stir welding parameters on the mechanical and microstructure properties of the Al-Cu butt joint, *Metals*, 6 (6), 133, 1-15, 2016.
26. Mehta K.P., Badheka V.J., A review on dissimilar friction stir welding of copper to aluminum: process, properties, and variants, *Mater. Manuf. Processes*, 31(3), 233-254, 2016.
27. Montgomery D.C., *Design and analysis of experiment*, Wiley, A.B.D. 2008.
28. Kuş A., Motorcu A.R., Ekici E., Wire electrical discharge machining of a hybrid composite: Evaluation of kerf width and surface roughness, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21 (1), 243-257, 2016.
29. Yurdakul M., Güneş S., İç Y.T., Improvement of the surface quality in the honing process using Taguchi method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (2), 347-360, 2016.
30. Kahraman F., Optimization of cutting parameters for surface roughness in turning of studs manufactured from AISI 5140 steel using the Taguchi method, *Materials Testing*, 59(1), 77-80, 2017.
31. Yaka H., Uğur L., Akkuş H., AISI 1040 çeliğinin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün çoklu regresyon ile incelenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 770-775, 2016.
32. Xue P., Ni D.R., Wang D., Xiao B.L., Ma Z.Y., Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints, *Mater. Sci. Eng., A*, 528, 4683-4689, 2011.
33. Xue P., Xiao B.L., Ni D.R., Ma Z.Y., Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al-Cu joint by intermetallic compounds, *Mater. Sci. Eng., A*, 575, 5723-5727, 2010.
34. Galvao I., Loureiro A., Verdera D., Gesto D., Rodrigues D.M., Influence of tool offsetting on the structure and morphology of dissimilar aluminum to copper friction stir welds, *Metall. Mater. Trans. A*, 43 (13), 5096-5105, 2012.
35. Çakır R., AA1050/Cu malzeme çiftinin birleştirilmesinde sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
36. Kumar N., Dhuria G. K., Singh R., Evaluation of tensile strength in friction stir welded aluminum alloy 6101-T6 and commercially pure copper joints, *Mater. Today: Proc.*, 5 (9), 19230-19236, 2018.