

U Geometrilili Elektrot ve Çift Kademeli Braket Tasarımı ile Projeksiyon Kaynak Kalitesinin İyileştirilmesi

¹Hilal Kır, ^{*2} Mustafa Yazar, ³Şükrü Talaş

¹ Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Bursa Uludag University, Turkey

^{*2} R&D Department, Machine and Spare Parts Manufacturing Co. Ltd., Turkey

³ Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Afyon Kocatepe University, Turkey

Özet

Projeksiyon kaynak yöntemi otomotiv endüstrisinde en yaygın kullanılan üretim metotlarından biridir. Yapılan çalışmada otomotiv yan sanayisi tarafından üretilen sac metal parçaların projeksiyon kaynak prosesi incelenmiştir. Çalışma kapsamında yetersiz kaynak mukavemeti sorunu ele alınmıştır. 0.5 mm kalınlığındaki detay braket parçası üzerine uygulanan kaynak mukavemetinin yeterli olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle parça geometrisi yeniden tasarlanarak sac kalınlığı 1 mm'ye ve kaynak kabartma sayısı 4'e çıkartılmıştır. Kaynak kalitesinin artırılması amacıyla ise geleneksel bakır elektrot yerine U geometrilili yeni bir elektrot tasarlanmıştır. Yeniden tasarlanan parça geometrisi ve elektrot geometrilerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkisini görmek, kaynak akımı ve baskı kuvveti gibi kaynak parametrelerinin proses özelinde çalışma parametrelerini analiz etmek için Taguchi L9 deney tasarımı kullanılmıştır. Kaynak zamanı sabit tutulan çalışmada analiz sonuçları keski-çekiç testleri, optik mikroskop ve SEM analizleri ile değerlendirilmiş, en uygun kaynak parameter değerleri belirlenmiştir. Yapılan iyileştirmeler ile kaynak süresi azalırken, proses verimliliği artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Projeksiyon kaynağı, kaynak mukavemeti, Taguchi deney tasarımı, SEM analizleri

Improving Projection Welding Quality with U Geometry Electrode and Double-Stage Bracket Design

Abstract

Projection welding method is one of the most widely used production methods in the automotive industry. In the study, the projection welding process of sheet metal parts produced by the automotive sub-industry was examined. The problem of insufficient welding strength was addressed within the scope of the study. It was concluded that the welding strength applied to the 0.5 mm thick detail bracket part was not sufficient. Therefore, the part geometry was redesigned, the sheet thickness was increased to 1 mm and the number of welding reliefs was increased to 4. In order to increase the welding quality, a new electrode with U geometry was designed instead of the traditional copper electrode. Taguchi L9 experimental design was used to see the effect of the redesigned part geometry and electrode geometries on the welding strength and to analyze the process-specific working parameters of welding parameters such as welding current and pressure force. In the study where the welding time was kept constant, the analysis results were evaluated with chisel-hammer tests, optical microscope and SEM analyses, and the most suitable welding parameter values were determined. With the improvements made, the welding time decreased and the process efficiency increased.

Keywords: Projection welding, welding strength, Taguchi experimental design, SEM analyses

*Sorumlu yazar: Adres: AR-GE Merkezi Şahinkul Makina ve Yedek Parça San. Tic. A.Ş., Bursa TÜRKİYE. E-mail: yazatmustafa08@gmail.com, GSM: +902242611530

1. Giriş

Otomotiv endüstrisinde araç sac parçalarının birleştirilmesinde direnç kaynak yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır [1, 2, 3]. Direnç nokta kaynağı ve projeksiyon kaynağı gibi direnç kaynak prosesleri seri üretime uygunlukları, düşük maliyetleri, uygulama kolaylığı ve yüksek güvenilirlikleri ile dikkat çekmektedir [4]. Direnç kaynak yöntemi iki sac malzeme arasında akım geçtiği sırada üzerine uygulanan basınç altında sac malzemeler arasında ısının açığa çıkmasıdır. Bu ısının açığa çıkması sonucunda temas yüzeyi eriyerek iki sac malzemenin birleştirilmesi sağlanmaktadır [5]. Bir direnç kaynağı yöntemi olan projeksiyon kaynak yöntemi ise nokta kaynağından farklı olarak iki sacdan birinin önceden deforme edilerek kabartılmış bir çıkıntı yüzeyine sahip olması ve akabinde bu çıkıntının birleştirme amacıyla ergimesinden oluşur. Kabartma veya projeksiyon yüzeyinin tek tarafta olması ve kaynak prosesi sonrasında da ön yüzeyde herhangi bir estetik farklılığa sahip olmaması nedeniyle otomotiv sanayinde üreticiye avantaj sunmaktadır. Projeksiyon kaynak prosesi aynı zamanda kabartma geometrisine sahip olması nedeniyle kaynak akımını dar bir alana yoğunlaştırmaktadır. Akım yoğunluğunun yanı sıra, temas direnci de artmakta ve bu da uygulanan akım ve kaynak süresini düşürmektedir [6, 7]. Bu proses yaygın olarak saplama, somun ve civata gibi bağlantı elemanlarının sac parçalara montajında da kullanılmaktadır [8]. Projeksiyon kaynak, joule enerjisi ile oluşan sıcaklık ve basıncın kaynak malzemelerinin birleştirilmesini sağlamaktadır. Kaynak parametreleri olan kaynak akımı, kaynak kuvveti ve süresi kaynak mukavemeti üzerinde sıcaklık ve basınç gibi doğrudan etkili olmaktadır [9].

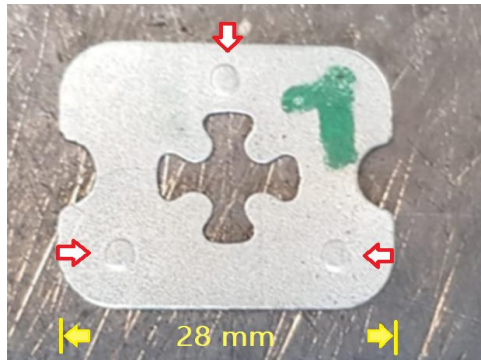
Kaynak prosesleri elektrotların sac metale kaynak akımı ve kaynak baskı kuvvetini iletmesi ile gerçekleşmektedir. Bu nedenle kaynak kalitesini etkileyen en önemli faktörlerden biri kaynak elektrodudur. Kaynak elektrodları ısı kaybı olmadan kaynak akımını saca iletebilmeli, kaynak baskı kuvvetini saca uygulayarak kaynak külçesini oluşturmalıdır [10]. Bu çalışmada projeksiyon kaynak prosesinin gerekli mukavemet değerlerine sahip olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu amaçla kaynak sacı ve kaynak elektrodu ayrı ayrı değerlendirilerek kaynak kalitesinin artırılması üzerine çalışılmıştır. Direnç kaynağı prosesinde kaynak elektrodu üzerine literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Mazur ve ark. (2016) direnç nokta kaynak kalitesini değerlendirmek için standart elektrod başlığı ile yapılan kaynak analizleri ile, modifiye edilmiş elektrod başlıklarının kaynak kalitesi üzerindeki etkisini karşılaştırmışlardır. Kaynak parametrelerini kaynak külçe boyutuna ve konumuna göre değerlendirmiştir. Çalışmalarında modifiye ettikleri elektrod ile modifiye edilmemiş elektrodun yüzey kalitelerinin eş değer olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Geliştirilen elektrod geometrisiyle maliyet önemli ölçüde azaltmıştır [11]. DiGiovanni ve ark. (2020) çinko kaplamalı çeliklerde meydana gelebilen sıvı metal gevrekleşme (LME) potansiyeli üzerinde farklı elektrod geometrilerinin etkilerini incelemiştir. 3 farklı elektrot geometrisi araştırılmıştır. Bunlar; B-burun (B-Nose), kesik koni (truncated cone) ve yarıçap uçlu (Radius tip) elektrottur. Çalışmada ısı girdisi sabittir. Deneysel sonuçlara göre yarıçap elektrod geometrisinin kaynak kalitesi üzerinde daha iyi sonuçlar sağladığı, tutarlı temasın çatlamasının azalması üzerinde etkili olduğu görülmüştür [12]. Parkı ve ark. (2024) A6451-T4'ün direnç nokta kaynağı analizinde kaynak elektrodunun farklı alaşım ve yarıçap eğrilik değerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkilerini ele almışlardır. Çalışmada bu iki parametre değerinin de kaynak kalitesini ve elektrot aşınma değerini etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Elektrod bileşen farklılığı kaynak sıcaklığı üzerinde 62° sıcaklık farkına sebep olurken, kaynak elektrot geometrisi 14° sıcaklık farkına neden olmaktadır.

Kaynak elektrot eğrilik çapının artması daha düşük temas direnci ve daha iyi ısı dağılımı göstermektedir. Bu durum üretilen ısı miktarını düşürerek tutarsızlığa sebep olmaktadır. Çalışmada elektrot ömrü ve kaynak kalitesi sebebiyle elektrot seçiminin yüksek öneme sahip olduğu vurgulanmıştır [13]. Tuchteld ve ark. (2019) da direnç nokta kaynağı için elektrot ömrünün arttırılması amacıyla elektrot geometrilerinin, elektrot ömrü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada numune boyutları sabittir. Bombeli elektrot geometrisine sahip tip A elektrotlar ile kesik konik geometrisindeki Tip B elektrotlar çalışılmıştır. 16 mm çapındaki tip A elektrodu 25 mm ile 300 mm arasındaki bombeli yüzleri, 12 mm uç yüzeyine sahip tip B için de 65 ve 36 koni açıları değerlendirilmiştir. Elektrot çapı azaldıkça gerekli akım değerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır [14]. Yapılan literatür çalışmasına göre kaynak mukavemetinin, elektrot geometrisi ile değiştiği sonucuna varılmaktadır.

Bu çalışmada da yetersiz kaynak mukavemeti sebebiyle koparma testlerinde başarısız olan üzerinde üç kabartma geometrisi bulunan sac braketin kaynak mukavemetinin arttırılması amacıyla; numune geometrisi değiştirilmiş ve sonrasında da kaynak elektrot geometrisi tartışılmıştır. Optimum kaynak parametrelerinin elde edilmesi için kaynak numunesinin sac kalınlığı ve üzerindeki işleme kabartma sayısı arttırılmıştır. Standart kaynak elektrodu ile üretilen kaynak prosesi için U geometrili bakır elektrot tasarlanmıştır. Kaynak parametre değerleri ise Taguchi L9 deneysel tasarım yöntemi ile çalışılarak 3 farklı kaynak akımı ve 3 farklı kaynak kuvvetinin proses üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen kaynaklı numunelerin çekiç-keski testi yapılmış, çekirdek çapları optik mikroskop altında ölçülmüş ve kaynak bölgesinin özellikleri SEM analizleri ile incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada üzerinde üç adet projeksiyon kabartması olan 0.5 mm kalınlığındaki 24x28 mm boyutlarındaki düşük karbon soğuk şekillendirme çeliği (B53 3110) olan detay braket sac parça, 3 mm kalınlığındaki DD13 çeliğinden üretilmiş araç montaj parçası üzerine projeksiyon kaynağı ile birleştirilmektedir. Şekil 1’de 3 kaynak kabartmalı detay braket parça gösterilmiştir. Çalışmada 0.5 mm kalınlığındaki detay braket sacı ilk önce 3 kabartmalı olarak test edilmiş daha sonra ise dizayn değişikliği yapılarak kabartı sayısı 4’e çıkarılarak tekrar 3 mm kalınlığındaki otomobil montaj parçası ile projeksiyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynak prosesi AC/DC trafolu kaynak makinelerinde tamamlanmaktadır.



Şekil 1. 3 Kabartmalı detay braket parça ve kabartma yerleri; orijinal dizayn

Projeksiyon kaynağı yapılan detay braket parçanın kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Detay braket sac malzemesinin (B53 3110 (E)) kimyasal özellikleri (%) [15]

Element	C	Mn	Si	P	S	Al (2)
	0.10	0.50	0.10	0.035	0.035	0.020

Tablo 2. Detay braket sac malzemesinin (B53 3110 (E)) mekanik özellikleri [15]

Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	A % min	HRB max.
180-230	300 - 360	34	57

Çalışmada kullanılan bir diğer araç montaj parçası galvaniz kaplamalı DD13 sac parçasının kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 3 ve Tablo 4’te verilmiştir. DD13 sac malzeme otomotiv sanayinde soğuk şekillendirme ve çekme prosesine uygunluğu, kaynaklanabilir özelliği sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır [16].

Tablo 3. DD13+Z100 sac malzeme kimyasal özellikleri (%) (Bamesa)[17]

Element	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti
	0.001	0.100	0.009	0.010	0.008	0.050	0.055

Tablo 4. DD13+Z100 sac malzeme mekanik özellikleri (Bamesa) [17]

Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	A % (3)	r
231	324	38	1,13

2.1. Taguchi DeneySEL Tasarımı

Deney tasarımı (DoE) ürün veya süreç planlamasında, tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. DoE yöntemleri ile girdi olarak kullanılan parametrelerin belirlenmiş sonuç parametresi üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Deney tasarımı yöntemlerinde yüksek kaliteli çıktı elde etmek için tercih edilen yöntemlerden biri de Taguchi yöntemidir [18- 19]. Taguchi yöntemi tam faktöriyel deneysel tasarımlara göre daha az dağılımla yüksek kalite ve performansta sonuçlar elde etmek için daha az iş ve enerji kaybı ile daha az maliyetli deney tasarımları sunmaktadır [20]. Parametreler arasındaki etkileşimi değerlendirmek amacıyla ise Sinyal/Gürültü oranı kullanılmaktadır. Sinyal/Gürültü oranında (S/N) sinyal istenilen etkiyi, gürültü (N) ise istenmeyen etmenlerin neden olduğu sinyal bozulmalarını ifade etmektedir. Bu çalışmada belirlenen parametrelerin kaynak kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek için kaynak çap değerleri ölçülmüştür [21]. Elde edilen deneysel analiz sonuçları ise en büyük en iyidir yöntemine göre değerlendirilmektedir. Denklem 1’de Taguchi yöntemi “en büyük en iyidir” formülü verilmiştir.

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

Çalışmada kaynak numune geometrisi ve elektrodu yeniden tasarlanarak, bu yeni geometrilerin kaynak parametreleri araştırılmıştır. Kaynak prosesinde optimum parametre değerleri için 3 farklı baskı kuvveti, 3 farklı akım değeri belirlenerek kaynak zamanı 2 cycle (kaynak işleminin tamamlanması için geçen süre, genel olarak 3 cycle olarak alınır ancak bu çalışmada 2 cycle olarak alınmıştır) olarak sabit tutulmuştur. Deneysel parametre analizleri için Taguchi L9 deney tasarımı kullanılmış ve deney sonuçları kaynak çapına göre değerlendirilmiştir. Tablo 5’te Taguchi kaynak faktörleri ve seviyeleri verilmiştir.

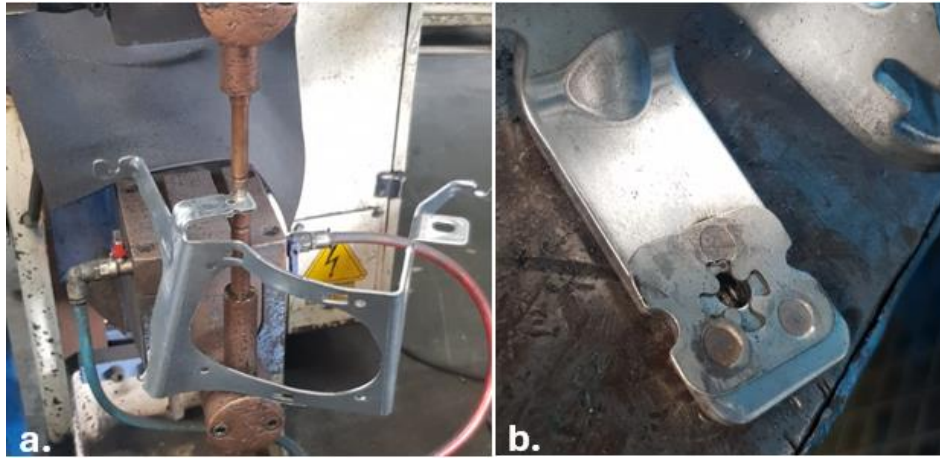
Tablo 5. Projeksiyon kaynak kontrol faktörleri ve seviyeleri

Kaynak Faktörleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kaynak akımı (kA)	26	28	30
Kaynak baskı kuvveti (daN)	450	550	650

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. 3 Çıkıntılı detay braket sac ile kaynak

Çalışmada 0.5 mm kalınlığındaki detay braket sacı 3 mm kalınlığındaki otomobil montaj parçası ile projeksiyon kaynağı ile birleştirilmektedir. Kaynak prosesi AC/DC trafolu kaynak makinelerinde tamamlanmaktadır. Şekil 2.a’da parçaların kaynak prosesi, Şekil 2.b’de tamamlanan kaynak prosesi sonrasındaki görseli verilmiştir.



Şekil 2.a) Projeksiyon kaynak prosesi **b)** kaynak prosesi tamamlanmış sac parçalar

Kaynak prosesi tamamlanan birleştirilmiş sac parçaların kaynak kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla keski-çekiç yöntemi kullanılarak kaynak mukavemetleri incelenmiştir. Keski – çekiç yöntemi kaynak kalitesini kaynak külçe boyutuna göre değerlendiren otomotiv endüstrisinde de yaygın kullanılan bir yöntemdir [22, 23, 24]. Keski – çekiç tahribatlı test yönteminde; birleştirilen parçalar üzerindeki kaynak noktalarının yanındaki boşluktan keski üzerine baskı uygulanmaktadır. Bu baskı kuvveti ile birleştirilen saclar birbirinden ayrılmakta ancak keski kaynağa temas etmemektedir. Test sonunda kaynak çapı değerlendirilerek kaynak kalitesi incelenmektedir [25]. Şekil 3.a’da detay braket parçasının keski-çekiç tahribatlı testi, Şekil 3b’de test sonucu gösterilmiştir.



Şekil 3.a) 0.5 mm kalınlığındaki detay parça projeksiyon kaynak mukavemeti keski – çekiç yöntemi **b)** tahribatlı muayene sonucu

Şekil 3.b’de tahribatlı muayene projeksiyon kaynak test sonucu incelendiğinde sac numuneler üzerinde yeterli kaynak külçesinin meydana gelmediği, çok düşük baskı kuvvetleri altında iki sac numunenin birbirinden ayrıldığı sonucuna ulaşılmıştır. Kaynak külçesinin elde edilmeme nedenlerinden bazıları, kaynak süresinin, akımının ya da kaynak kuvvetinin yeterli olmamasıdır [26].

Çalışmada mevcut üretim parametrelerine göre yapılan kaynak mukavemet testlerinden yetersiz kaynak kalitesinin elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Buna bağlı olarak kaynak parametreleri üzerinde çalışılmıştır. Kaynak parametrelerinin değiştirilmesi ile kaynak dayanımının artırılması ve kaynak kalitesinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada belirlenen parametrelere göre kaynak akım değeri arttırılmış parçalara keski-çekiç testleri uygulanmıştır. Şekil 4’te kaynak akım değeri arttırılan 0.5 mm kalınlığındaki detay braket parça gösterilmiştir. Şekil 5’te ise kaynak dayanımının artırılması amacıyla çalışılan parametre değerleri sonucunda elde edilen kaynak mukavemet test numuneleri verilmiştir.



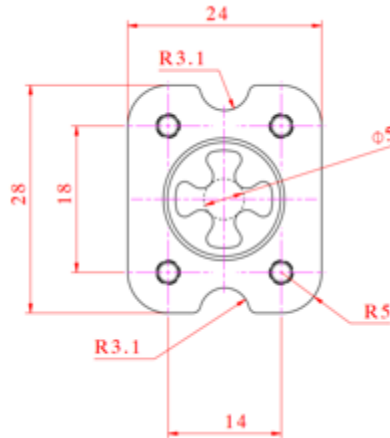
Şekil 4. Kaynak akımı arttırılmış 0.5 mm kalınlığındaki detay braket parça kaynak kalite testi



Şekil 5. 0.5 mm kalınlığındaki detay braket projeksiyon kaynak keski-çekiç testleri

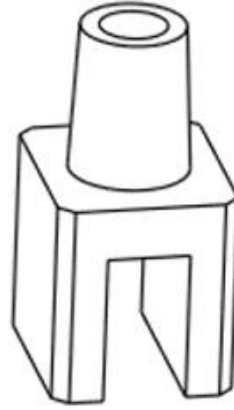
Kaynak direncinin artırılması amacıyla değiştirilen kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki mukavemet değerleri tahribatlı testlerle incelenmiştir. Projeksiyon kaynağı ile birleştirilen numunelerin test sonucunda uygun mukavemet değerleri elde edilse de kaynak çevresinde yanıklar ve bazılarında da nüfuziyet problemleri gözlemlenmiştir. Bu problemlerin engellenmesi amacıyla braket parçasının geometrisi üzerinde çalışmalar yapılmış ve yeni parça geometrisi için kaynak parametreleri tartışılmıştır.

Çalışmada elde edilen çıktılar mevcut 3 kaynak kabartma yüksekliğine sahip 0.5 mm kalınlığındaki detay braket parçasının kaynak kalitesinin değiştirilen parametre değerlerine rağmen yetersiz sonuçlar verdiğini göstermektedir. Kaynak mukavemetinin artırılması için çalışmanın sonraki aşamasında mevcut detay braket sac parçasının araç üzerinde montajlandığı bölge incelenmiştir. Bunun sonucunda sac kalınlığının artırılması ancak orta dairenin sac kalınlığının 0.5 mm'de kalması gerektiği tartışılmıştır. 3 kaynak kabartma yüksekliğine sahip sac parça üzerine simetrik kaynak prosesini sağlaması ve kaynak direncinin artırılarak daha mukavim kaynak bağlantısı için parça üzerinde kaynak kabartma sayısı 4 olarak tasarlanmıştır. Şekil 6'da yeni tasarlanan 1 mm kalınlığında detay braket parça teknik resmi verilmiştir. Diğer bir husus ise, üç çıkıntılı sistemde her bir kaynak ayrı yapılırken, 4 çıkıntılı sistemde ise tek işlemde yapılmaktadır. Bu şekilde, enerji tasarrufu ve aynı zamanda işlem süresinden kazanç sağlanmaktadır.



Şekil 6. 1 mm kalınlığındaki detay braket parça teknik resmi (üst görünüş)

Mevcut yöntemde sac parçalar projeksiyon kaynak yöntemi ile birleştirilirken küresel geometrili kepler kullanılmaktadır. Ancak çalışma sırasında 0.5 mm kalınlığındaki detay braket parçasının yeterince direnç gösteremediği ve 3 kaynak kabartı noktalarının küresel kepli kaynak prosesi altında yetersiz kaynak akımı sebebiyle de kaynaklı bölgelerde açılma olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle kaynak kep geometrisi de tartışılmış ve yeniden tasarlanan detay braket parçasının üzerindeki 4 kabartı geometrisine uygun olarak U şeklinde kaynak kepi tasarlanarak üretilmiştir. Şekil 7.a'da tasarlanan bakır elektrodun perspektif görünüşü, 7.b'de ise kaynak AC/DC kaynak makinesine bağlanmış U geometrili bakır elektrot gösterilmiştir.



a.



b.

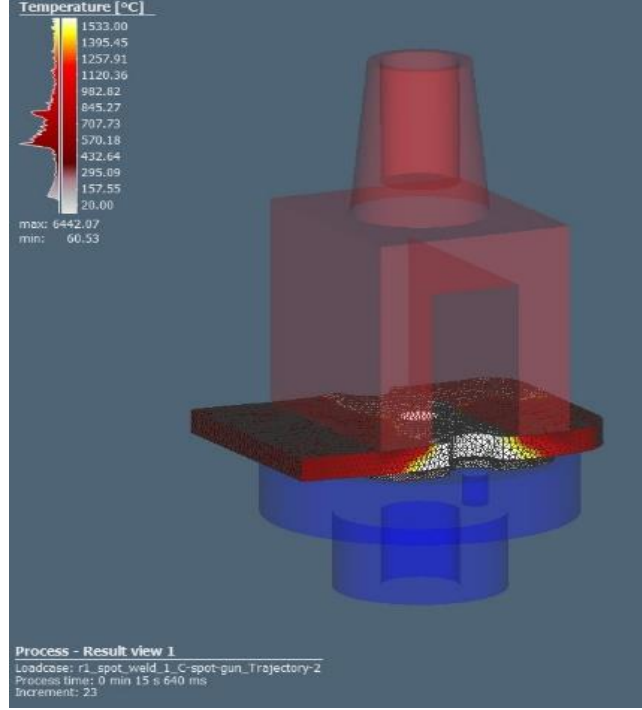
Şekil 7.a) Üst bakır elektrot teknik resim perspektif görünüş **b)** AC/DC kaynak makinesine bağlı U geometrili bakır elektrod

Kaynak elektrodu kaynak kabartmalarına aynı zamanda kaynak akımı ve kaynak kuvveti iletilmesi için düz bir temas yüzeyine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Direnç nokta ve projeksiyon kaynak proseslerinde kaynak elektrot aşınması takip edilmesi gereken, kaynak kalitesini doğrudan etkileyen bir durumdur [27, 28, 29]. Elektrot aşınmasının kalitesizlik problemine sebep olmaması için elektrotlar belirlenmiş proses adetleri sonrasında bilenerek uygun çap değerlerine geri getirilmektedir. Şekil 8'de yuvarlak alt bakır elektrot ve U geometrili üst bakır elektrot verilmiştir. Alt elektrot üzerinde iki adet sacı sabitlemeyi sağlayan iletken olmayan sabitleme pimleri bulunmaktadır.



Şekil 8. U geometrili bakır kaynak alt ve üst elektrodu

Tasarlanan bakır kaynak elektrodu sac malzeme kabartma noktaları üzerine simetrik olarak kaynak kuvveti uygulamaktadır. U geometrili kaynak elektrodu ile kaynak prosesinde çarpılma (kaynak açılma) problemlerinin önüne geçilmiştir. Şekil 9’da U geometrili elektrot ile 4 kaynak kabartmalı 1 mm kalınlığındaki detay braket parçasının 3 mm kalınlığındaki sac levha ile kaynak prosesi modellenmiştir.



Şekil 9. 3 mm detay braket parça ve U geometrili kaynak elektrodu

Projeksiyon kaynak prosesi Simufact welding programında da simüle edilmiştir. Yapılan sonlu analiz sonuçları da yeni tasarlanan kaynak prosesi ile küresel keplerle yapılan kaynak proseslerinde meydana gelen çarpılma probleminin önüne geçildiği sonucuna ulaşılmıştır.

3.2. Keski Çekiç Deney Sonuçları

Kaynak kalitesinin artırılması amacıyla yeni bir kaynak elektrodu tasarlanan projeksiyon kaynak prosesinde, kaynak parametreleri Taguchi yöntemi ile çalışılmıştır. Şekil 10’da keski-çekiç tahribatlı test yöntemi ile çalışılan numune testi gösterilmiştir.

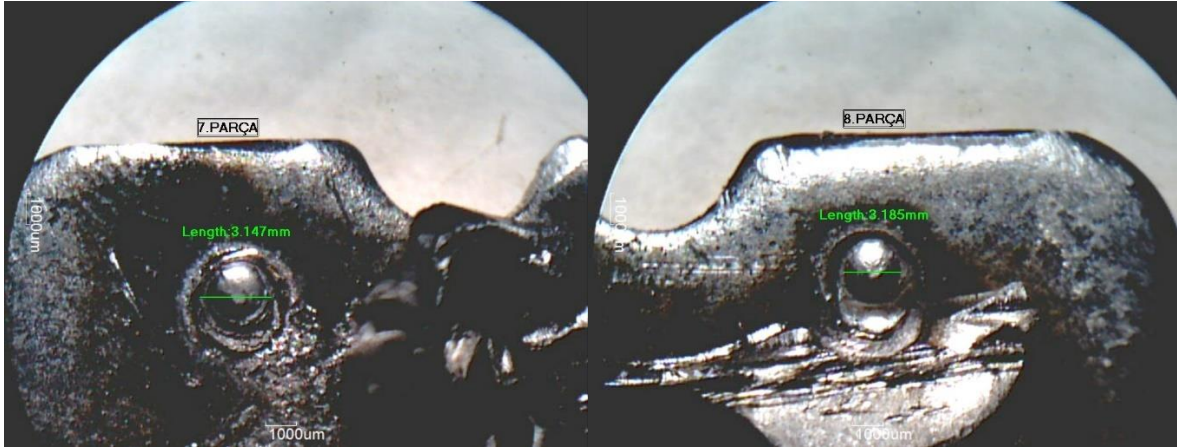


Şekil 10. Keski-çekiç tahribatlı test yöntemi ile test edilen sac numune örneği

3.3. Kaynak Numuneleri Mikroskop Analiz Bulguları

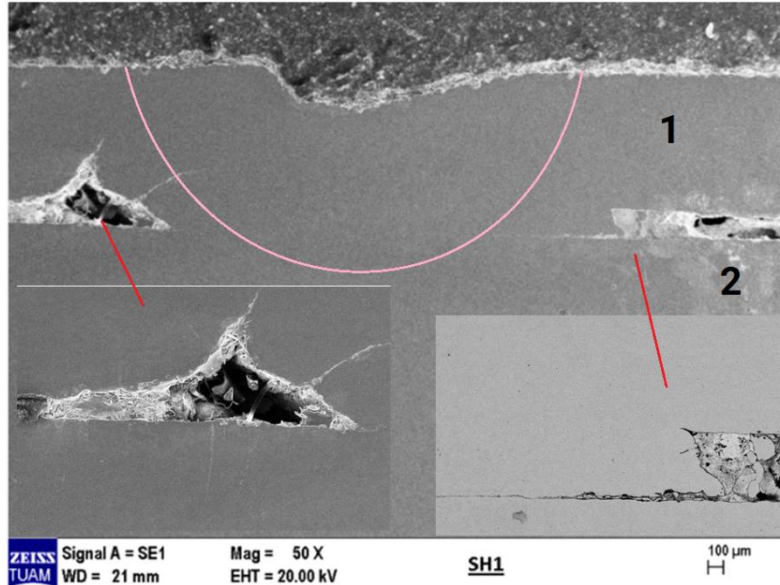
1 mm kalınlığında 4 kaynak kabartma yüksekliğine sahip projeksiyon kaynak numunelerinin kaynak çap ölçüsü kopartma testlerine göre değerlendirilmiştir. Bu çap değerleri optik mikroskop kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 11’de kopma testine tabi tutulan kaynakların kaynak çekirdek çaplarına ait optik görsellerinden örnekler verilmiştir. Numunelerin çekirdek çap değerleri makroresimlerde gösterildiği gibi, genellikle yakın olup, değişim farkları oldukça azdır ayrıca çekirdek etrafında oldukça sağlam temas noktalarının olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek deformasyon kapasitesine sahip olan matris çelik sacın kaynak çekirdeği etrafında yırtılması yanında, çekiçleme sırasında ana malzemenin katlama ile hasara uğraması bu tür çeliklerde beklenen bir durumdur. Nadiren de olsa bazı kaynak çekirdeklerinin özellikle 7 ve 8 numaralı parçaların kaynak çekirdeklerinin 1 ve 2 numaralı parçalar gibi hasara uğramadığı ve kaynak çekirdeklerinde yırtılma olduğu görülmüştür.





Şekil 11. Projeksiyon kaynağı keski-çekiç testi çap ölçüm örnekleri (makro optik)

Keski-çekiç testine gör değerlendirilen sac numunelerinin kaynak kalitesinin değerlendirilmesi için SEM mikroskobu altında kaynak nüfuziyetleri de değerlendirilmiştir. Şekil 12’de, Şekil 11’de verilen 8 numaralı numunenin kaynak bölgesinin elektron mikroskobu tarafından çekilen görüntüsünde, kaynak çekirdeğinin şekilsel olarak çok iyi oluştuğunu ve boyut olarak istene değerleri yakaladığı görülmektedir. Yapılan SEM analizler sonucunda kaynak temas noktalarında tam temas sağlanırken numunenin bakır elektrotla temas etmeyen yüzeylerinde tam temasın oluşmadığı görülmektedir. Buna karşın, kaynak dikişinin veya çekirdeğinin hemen iki yanında, çatlakların bulunduğu ve bu çatlakların daha numunenin hasara uğratılmadan önce çıkmış olması 30 kA 550daN çevriminin yetersiz olduğu görüşünü desteklemektedir. Bu tür kılcal çatlakların, yüke mruz kalan durumlarda hızlı bir şekilde yırtılma ve hasar yol açacağı düşünülmektedir.



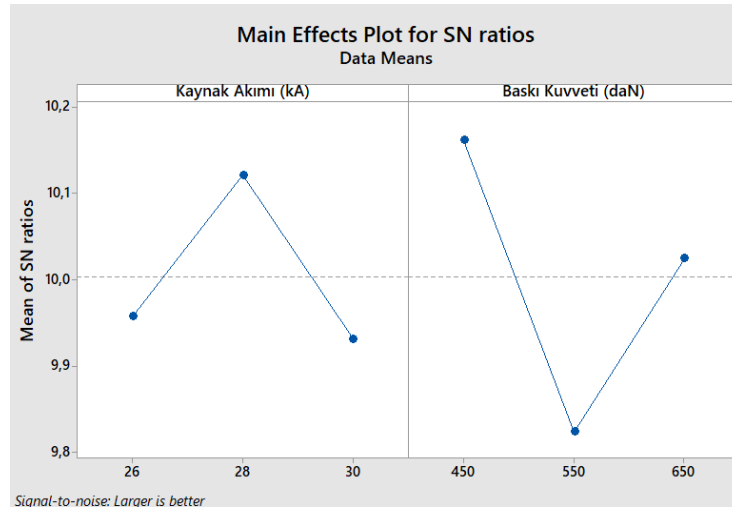
Şekil 12. 30 kA ve 550 daN parametrelerle yapılan projeksiyon kaynak çekirdeğinin SEM görüntüsü ve kaynak çekirdeği etrafındaki hasarların analizi

3.3. Taguchi L9 Deneyisel Analiz Sonuçları

Şekil 12’de örnekleri verilen projeksiyon kaynak çekirdeklerinin Tablo 6’da optik mikroskopla yapılan ölçümleri kaynak parametreleri ve deneysel analizlerden elde edilen kaynak çap değerleri verilmiştir. Optik mikroskop altında kaynak çapının ölçüldüğü kaynak numunelerinin Taguchi L9 “daha büyük daha iyidir” yöntemi ile değerlendirilmiştir. Bu sonuçlara göre, elde edilen çap değerleri Sinyal/Gürültü (S/N) oranına göre yorumlanmıştır ve Şekil 13’te grafiği optimum parametre değerlerini veren S/N grafiği gösterilmiştir. Daha önce ifade edildiği gibi, en yüksek ölçüm değerinin 3.264 mm ile 28 kA, 550 daN parametreleri ile elde edildiği anlaşılmaktadır. Düşük baskı kuvveti genellikle düşük ısı transferi yanında kaynak çekirdeğinin aşırı çökmesini engeller ve daha az temasa ancak daha yoğunlaşmış kaynak akım transferine sebep olacaktır. Bu şekilde, kaynak akımının maksimum ısı oluşumu ve ardından daha iyi ergime ve geniş kaynak çekirdeği oluşumuna sebep olmasını beklemek mümkündür. Bu koşullar altında, S/N grafiğinden elde edilen sonuçlara göre 28 kA kaynak akım değeri, 450 daN kaynak baskı kuvveti bu çalışma için optimum kaynak parametrelerini ifade etmekte iken 30 kA ve 550 daN değerleri ise en kötü parametre olarak analiz edilmiştir.

Tablo 6. L9 Taguchi deney tasarımı ve kopartma testi kaynak çap değerleri

Deney No	Kaynak Akımı (kA)	Baskı Kuvveti (daN)	Koparma Testi Kaynak Çapı (mm)
1	26	450	3.255
2	26	550	2.963
3	26	650	3.231
4	28	450	3.264
5	28	550	3.153
6	28	650	3.204
7	30	450	3.147
8	30	550	3.185
9	30	650	3.081



Şekil 12. Taguchi L9 Sinyal/Gürültü (S/N) grafiği

4. Sonuçlar

Çalışmada kaynak prosesinin mukavemetinin artırılması amacıyla otomotiv endüstrisinde araç şarj soket plakası destek sacı üzerine projeksiyon kaynak ile birleştirilen detay braket sac parçasının sac kalınlığı artırılmıştır. Kaynak direncinin artırılması, kaynak sac kaçıklığı ve merkezleme problemlerinden kaçınmak amacıyla kaynak kabartma sayısı 3 adetten 4'e çıkartılmıştır.

Kaynak kalitesinin artırılması amacıyla küresel bakır elektrotlar yerine U geometrili bakır elektrod tasarlanmıştır. Yeni tasarlanan kaynak elektrodu için patent başvurusunda bulunulmuştur.

Yeni tasarlanan elektrot ve sac geometrisinin kullanıldığı proses için kaynak parametreleri Taguchi L9 deneysel analiz yöntemi ile çalışılmıştır. Taguchi deneysel analizine göre 28 kA kaynak akımı ve 450 daN kaynak kuvveti optimum kaynak çapını vermektedir.

SEM analizi ile elde edilen test sonuçlarına göre U geometrili bakır elektrot ile yapılan kaynak testlerinde kabartmaların kaynak sacı ile yüksek nüfuziyet gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan tasarım değişikliği ile projeksiyon kaynak prosesinde parça başına operasyon süresi 40 sn'den 10 sn'ye düşürülmüştür. Yıllık bazda mali kazanç sağlanmıştır.

Acknowledgements

Scholarship in this study was supported by TÜBİTAK BİDEB (Turkish Scientific and Technological Research Council, Scientist Support Department) (Project No:119C053).

References

- [1] Capezza C, Centofanti F, Lepore A, Palumbo B. Functional clustering methods for resistance spot welding process data in the automotive industry. *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 2021;37(5): pp. 908-925.
- [2] Banga HK, Kalra P, Kumar R, Singh S, Pruncu CI. Optimization of the cycle time of robotics resistance spot welding for automotive applications. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing* 2021; 3(3).
- [3] Kashyzadeh KR, Farahi GH, Ahmadi A, Minaei M, Rahimi MO, Barforoushan S. Fatigue life analysis in the residual stress field due to resistance spot welding process considering different sheet thicknesses and dissimilar electrode geometries. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 2022; 237(1).
- [4] Dejans A, Moens D, Rymenant PV. Copper-aluminium joining by novel locked projection welding process. *Welding in the World*, 2023; Volume 67:1707-1717.
- [5] Na T-H. Simulation-Based Characterization of Tube-Cap Resistance Butt Welding of Nuclear Fuel for Light Water Reactors and Development of Melted-Volume Prediction Models. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 2023; 24: 1443-1451.
- [6] Drégelyi-Kiss Á. On the Optimization of Resistance Projection Welding Process. *Material and Mechanical Engineering Technology*;2023: 3.
- [7] Dell'Avvocato G, Palumbo D. Thermographic procedure for the assessment of Resistance Projection Welds (RPW): Investigating parameters and mechanical performances. *Journal of Advanced Joining Processes*;2024: 9.
- [8] Yurdakul A. Production and Characterization of Ceramic Bushings from Alumina-

- Toughened Yttrium-Stabilized Tetragonal Zirconia Composites for Projection Welding Applications. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2024; 46: 2579-2588.
- [9] Leitão C, Andrade DG, Galvão I, Sabari SS, Rodrigues D. Mechanical Characterization of Thin Steel Plates Welded by Resistance Projection Welding. *Proceedings M2D2022 - 9th International Conference on Mechanics and Materials in Design, Funchal/Portugal 26-30 June 2022*.
- [10] Murugan SP, Mahmud K, Ji C, Jo I, Park YD. Critical design parameters of the electrode for liquid metal embrittlement cracking in resistance spot welding. *Welding in the World* 2019; volume 63: 1613-1632.
- [11] Mazur W, Kyriakopoulos A, Bott N, West D. Use of modified electrode caps for surface quality welds in resistance spot welding. *Journal of Manufacturing Processes* 2016; 22: 60-73.
- [12] DiGiovanni C, He L, Pistek U, Goodwin F, Biro E, Zhou NY. Role of spot weld electrode geometry on liquid metal embrittlement crack development. *Journal of Manufacturing Processes* 2022; volume 49:1-9.
- [13] Park H-G, Kumar D, Park K-S, Nam KS, Kim Y, Kim Y-M, Lee T. Electrode life evaluation for varied electrode material composition and geometry in resistance spot welding of aluminum alloys. *Welding in the World* 2024; volume 68: 2701-2712.
- [14] Tuchtfield M, Heilmann S, Füssel U, Jüttner S. Comparing the effect of electrode geometry on resistance spot welding of aluminum alloys between experimental results and numerical simulation. *Welding in the World* 2019; 63: 527-540.
- [15] PSA PEUGEOT – CITROËN, Steel Flat Products Weldable Extra Mild for Cold Rolled Pressing, B53 3106
- [16] Apay S, Optimization of Welding Parameters in MAG Lap Welding of DD13 Sheet Metal with Taguchi Method and FEM Analysis. *Manufacturing Technologies and Applications* 2022; 3(3): 20-30.
- [17] BAMESA Çelik Servis Sanayi ve Ticaret A.Ş. EN 10204-3.1/DIN 50049-3.1/ISO404 Normuna Göre Kalite Sertifikası.
- [18] Shafee S, Naik BB, Sammaiah K. Resistance Spot Weld Quality Characteristics Improvement By Taguchi Method. *Materialstoday:Proceedings* 2015; 2(4-5):2595-2604.
- [19] Durakovic B. Design of experiments application, concepts, examples: State of the art. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)* 2017; 5(3): 421-439.
- [20] Trembach B, Grin A, Turchanin M, Makarenko N, Markov O, Trembach I. Application of Taguchi method and ANOVA analysis for optimization of process parameters and exothermic addition (CuO-Al) introduction in the core filler during self-shielded flux-cored arc welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2021; 114:1099-1118.
- [21] Dahake SK, Diwakar N, Kalpande SD. Optimizing Resistance Spot Welding for Enhanced Strength and Nugget Formation: A Taguchi Approach. *Journal of Ballistics* 2023; 35(3): 50-67.
- [22] Epperlein M, Schiebahn A, Reisgen U. Resistance spot welding of die-cast and wrought aluminum alloys: Improving weld spot quality through parameter optimization. *Welding in the World* 2025; volume 69:531-553.
- [23] Qamaruddin Q, Rahmanto RH, Setiadi W, Ningsih, KY. The Effect of Current on Shear Strength and Nugget Size in Resistance Spot Welding of SCGA270D-45 sheet metal.

- Proceedings of the 2nd Annual Conference of Engineering and Implementation on Vocational Education (ACEIVE 2018). 3rd November 2018. North Sumatra, Indonesia.
- [24] Bamberg P, Gintrowski G, Liang Z, Schiebahn A, Reisgen U, Precoma N, Geffers C. Development of a new approach to resistance spot weld AW-7075 aluminum alloys for structural applications: an experimental study – Part 1. *Journal of Materials Research and Technology* 2021; 15: 5569-5581.
- [25] Spot Welding Technical Information, <https://www.titespot.com/spot-welding-technical-information/> Erişim tarihi: 16.12.2024 .
- [26] Holtschke N, Jüttner S. Joining lightweight components by short-time resistance spot welding. *Welding in the World* 2017; 61: 413-421.
- [27] Kır H, Karabulut Ş, Yazar M, Talaş Ş. Investigation on Dressing Frequency, Welding Current and Time Using Taguchi Methodology in Robotic Spot Welding with SmartblockTM. Afyon Kocatepe University – *Journal of Science and Engineering* 2024; 24:207-216.
- [28] Zhou L, Li T, Zheng W, Zhang Z, Lei Z, Wu L, Zhu S, Wang W. Online monitoring of resistance spot welding electrode wear state based on dynamic resistance. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2022; 33:91-101.
- [29] Mathiszik C, Köberlin D, Heilmann S, Zschetzsche J, Füssel U. General Approach for Inline Electrode Wear Monitoring at Resistance Spot Welding. *Processes* 2021; 9(4): 685.