

Robot Nokta Kaynaklarında Smartblock™ ile Elektrot Bileme Sıklığı, Kaynak Akımı ve Süresinin Taguchi Metodolojisi Kullanılarak Araştırılması

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 05.08.2023

Kabul/Accepted: 19.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

Investigation on Dressing Frequency, Welding Current and Time Using Taguchi Methodology in Robotic Spot Welding with Smartblock™

Hilal KIR^{1*}, Şükrü KARABULUT¹, Mustafa YAZAR², Şükrü TALAŞ³

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

²AR&GE Merkezi, Şahinkul Makina ve Yedek Parça Sanayii ve Ticaret A.Ş. Bursa, Türkiye

³Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Robot direnç nokta kaynaklarında elektrot aşınması ve efektif kullanımı iyi takip edilmesi gereken bir durumdur. Erkenden değiştirilen bir elektrot veya kullanım süresini aşan bir elektrodun getireceği fayda-zarar etkisi maliyetlere olumsuz olarak yansımaktadır. Elektrotların direnç nokta kaynağı boyutlarının şartnameye uygun oluşturması beklenirken aşınma ile beraber kaynak çekirdek boyut ölçümleri beklenen değerlerden farklı çıkmaktadır ve bu sorunun çözümü için elektrot bileme işlemi uygulanmaktadır. Bu çalışmada, prosesin otomatik hale getirilmesi Smartblock™ vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir ve "Smartblock™" kontrol algoritması kullanılarak bileme sıklığı, kaynak akımı ve süresinin robot nokta kaynaklarındaki en son çekirdek çap özelliklerine etkisi çalışılmıştır. En uygun elektrot bileme frekansı olarak 70 nokta kaynağı bulunurken, 100 ms kaynak süresi ve 8 kA kaynak akımı en iyi nokta kaynağı için diğer optimum parametreler olarak ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nokta Kaynağı, Elektrot Bileme, Taguchi Metodolojisi, Smartblock™

Abstract

Electrode wear and its effective use in robotic resistance spot welding are a condition that should be followed closely. The benefit-harm effect of an electrode that is replaced early or an electrode that exceeds its lifespan is reflected negatively on costs. While it is expected that the electrodes will give the resistance spot welding form in accordance with the specification; the weld nugget diameter measurements are different from the expected values due to wear and the electrode dressing process is applied to solve this problem. In this study, the automation of this process was carried out by means of the Smartblock™ and the effects of dressing frequency, welding current and time on the final nugget diameter properties of robot spot welds were studied using the "Smartblock™" control algorithm. As 70 spot welds were found as the most suitable electrode dressing frequency, 100 ms welding time and 8 kA welding current were the other optimum parameters for better spot welding.

Keywords: Spot Welding, Electrode Dressing, Taguchi Methodology, Smartblock™.

1. Giriş

Otomotiv sanayisinde en yaygın kullanılan kaynak yöntemlerinden biri direnç nokta kaynağıdır (Ogawa vd. 2022, Soomro vd. 2022, Arslan ve Karabaş 2019). Direnç nokta kaynak yönteminde, kaynak metalleri iki elektrot arasına üst üste yerleştirilerek metaller üzerinden akım geçirilmesi şeklinde uygulanır. Bu akım ile üretilen ısı sac malzemeleri eriterek erimiş bir kütle, yani kaynak çekirdeğini oluşturmaktadır. Kaynak döngüsü sırasında oluşan eriyik hacmin soğuması beklenerek direnç nokta kaynağı tamamlanmaktadır (DiGiovanni vd. 2020). Sac-saca nokta kaynağı olan direnç nokta kaynağı hızlı bir yöntemdir ve bakımı kolaydır; bu sebeple, seri üretimde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca araçlarda çarpışma anındaki kaynaklı yapıların bütünlüğünü

korumada ve darbe sönümlenmede önem taşımaktadır (Sabırlı ve Fığlalı 2020, Ma vd. 2021). Direnç nokta kaynağının yaygın kullanılma sebeplerinden biri de düşük üretim maliyeti ve yüksek verimlilik sağlamalarıdır (Chen vd. 2020). Ark kaynaklarıyla karşılaştırıldığında bu yöntemde zararlı gaz üretilmediği için yeşil kaynak yöntemi olarak da bilinmektedir (Bozkurt ve Keleş 2017, Deepati vd. 2021). Geleneksel kaynak yöntemlerine göre uygulanması için herhangi dolgu metaline ve kalifiye elemana ihtiyaç duyulmaması sebebiyle otomasyona uygundur (Deepati vd. 2021).

Bu kaynak metodunda bir süre sonra kaynak elektrotları aşınarak baskı yüzey çapları değişmeye başlamaktadır (Pashazadeh vd. 2016). Kaynak işlemi sırasında elektrotlarda meydana gelen aşınma, keplerin sürekli

yüksek sıcaklık, kaynak baskı kuvveti ve ani ısı değişimlerine bağlı olarak meydana gelmektedir (Açış ve Talaş 2023). Kaynak keplerinde meydana gelen bu değişimler kaynak kalitesini düşürmektedir. Kaynak kalitesinin sağlanması için aşınan kep ucuna bileme işlemi yapılmaktadır. Bileme işlemi geç yapılırsa kaynak kalitesini olumsuz etkilediği gibi erken yapılırsa da üretim hattının gereksiz durdurulmasına ve elektrodun gereken zamanından önce değiştirilmesine neden olmaktadır. Bu da üretim maliyetlerini arttırmaktadır (Pashazadeh vd. 2016). Direnç nokta kaynağı sırasında karşılaşılan diğer hatalardan bazıları; fazla kaynak ucu uzunluğu, kaynak uçları arasındaki merkezleme farklılığıdır. Kaynak uçları arasındaki merkez farklılığı elektrodun yanlış hizalanmasından, uyumun zayıf olmasından kaynaklanabilmektedir. Bu durum asimetrik kaynak dikişine sebep olmaktadır (Xing vd. 2018).

Direnç punta veya nokta kaynağı otomotiv, beyaz eşya gibi büyük sanayi kollarında kullanılması sebebiyle enerji verimliliğini sağlamak ve kaliteli ürün elde etmek için süreç-parametre optimizasyonuna ihtiyaç duymaktadır. Direnç nokta kaynak yönteminde sacların kaynaklanabilirliğini arttırmak, elektrot ömrünü iyileştirmek amacıyla farklı elektrot uç geometrileri üzerinde çalışılmıştır. Dört farklı geometrideki konik yuvarlak, düz Radius 3, düz Radius 6 ve düz konik nokta kaynak elektrot uç geometrileri ile aynı parametre değerlerinde deneysel olarak çalışılan kaynak işleminin sonucunda kaynak çekirdekleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda çekirdek çapları analiz edildiğinde en yüksek çap değerinin düz Radius 3 elektroduyla ve en düşük çekirdek çapının ise düz konik elektrot ucuyla elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır (Demir vd. 2021). Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde nokta kaynak kalitesini arttırmak amacıyla elektrot uçlarının iç bükey geometriye sahip olarak da çalışılabileceği görülmüştür (Chen vd. 2020, Kim vd. 2016, Liv d. 2021, Watmon vd. 2020). Optimum kaynak parametreleri belirlenirken gri ilişki analizi, çoklu regresyon analizi ve genetik algoritma yaklaşımlarının birlikte kullanılması ile kaynak kalitesinin iyileştirildiği çalışmalar mevcuttur (Wan vd. 2016). Wan ve ark. (2016) ise yaptıkları çalışmada titanyum alaşımı için direnç nokta kaynağında çeşitli kalite özelliklerini öngörerek optimizasyon çalışmasına odaklanarak, optimum kaynak parametrelerini tahmin etmek amacıyla gri ilişki analizi, çoklu regresyon analizi ve genetik algoritma yaklaşımlarını kullanmışlardır. Bu algoritmalarından elde edilen çıktıları deneysel verilerle karşılaştırarak kaynak kalitesinin iyileştiği sonucuna ulaşmışlardır. Birden fazla yanıtı olan karmaşık çözümlü optimizasyon çalışmalarında gri sistem tabanlı analizler

de kullanılmaktadır. Otomotivde çelik sacların kaynak proseslerinde optimum kaynak parametrelerini elde etmek için deneysel tasarım yöntemi olan Taguchi Metodu yaygın olarak tercih edilmektedir. Belirlenen parametre sayısına göre deney matrisi oluşturulmuştur. Çalışma sonuçları kaynak çekirdek çapı kaynak kopma kuvveti gibi değerlere bağlı olarak ANOVA yöntemi ile değerlendirilmektedir (Ertek 2019, Mat Yasin vd. 2019). TWIP çelik sacların direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi operasyonunda kaynak parametrelerinin optimizasyonu için gerçekleştirilen deneysel tasarımda L9 ortogonal Taguchi metodu kullanılmıştır. Optimum kaynak parametreleri mukavemet ve en iyi çekirdek çapını veren değerlere göre belirlenmiş ve mukavemet üzerinde etkili parametrenin kaynak akımı olduğu, kaynak çekirdek çapı için ise kaynak zamanı olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Ertek 2019). Bir başka çalışmada ise, direnç nokta kaynağında kaynak parametrelerinin optimizasyonu L9 ortogonal Taguchi metodunu kullanarak 1,2 mm kalınlığındaki düşük karbonlu çeliğin kaynak operasyonu için kullanılmış ve değişken elektrot kuvveti, kaynak akımı ve kaynak sürelerinin optimum değerleri bulunmuştur. Varyans analizi (ANOVA) yöntemi ile yapılan değerlendirme sonucuna göre, kaynak akımı ve süresi optimum sonuçları etkileyen ana parametreler olarak ortaya çıkmıştır (Mat Yasin vd. 2020).

Bu çalışmada, direnç nokta kaynağı MFDC trafolu punta kaynak robotu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FEE 420 çelik sacların nokta kaynak parametrelerinin optimizasyon çalışması literatürdeki çalışmalardan farklı olarak Smartblock™ sistemi (Smartblock™ Tanıtım Broşürü 2020) kullanılarak bilenen elektrotlar ile yapılmıştır. Direnç nokta kaynağında enerji verimliliğinin artırılması amaçlandığı çalışmada deney tasarımı için L18 ortogonal Taguchi metodu kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot ucunun bileme zamanı değişken parametrelerdir, impuls değeri ve baskı kuvveti ise sabit değerlerdir. İmpuls ve baskı kuvveti sabit tutularak değişken parametrelerin kaynak çekirdeği üzerindeki etkileri görülmek istenmektedir. Optimum direnç nokta kaynak parametreleri, tolerans değerleri aralığındaki en büyük çekirdek çapına göre belirlenmiştir. Sonuçların analizi için sinyal/gürültü oranı (S/N) ve varyans analizi (ANOVA) yöntemleri kullanılmıştır.

2. Malzeme ve Metot

Üretim hattında verimsizliğe neden olacak hat duruşlarının veya hataların önceden tahmin edilerek

önlenmesi gerekir. Smartblock™ sistemi ile kaynak ucu, kaynak akım ve kuvveti sistematik olarak takip edilebilmektedir. Smartblock™ sistemi (Şekil 1), kaynak robotlarında harici bir ölçüm terminali oluşturarak kaynak hatalarına neden olacak uygunsuzlukları önlemektedir. Kaynak robot kolu, belirlenen periyotlarla bu harici sisteme gelmektedir. Periyodik kontrollerle kaynak operasyonundaki akım gücü, baskı kuvveti ve kaynak ucunun (keplerinin) geometrisi ölçülmektedir. Smartblock™ sistemi ile kaynak parametre değerleri belirlenen tolerans değerinden yüksek bulunursa, bu durum hata olarak iletilmektedir. Hatalı değerler e-posta ile iletilerek kaynak robotu durdurulmaktadır. Yapılan kontrollerin ardından kaynak kalitesine uygunluğu değerlendirilerek gerekirse kaynak parametreleri değiştirilmektedir.



Şekil 1. Nokta kaynak elektrodu bileme için kullanılan "Smartblock™" istasyonu.

Bu çalışmada, kaynak robot hücrelerine harici bir Smartblock™ sistemi eklenerek, kaynak parametreleri ölçülmüş ve sonuçlar Taguchi yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada 70 adet nokta kaynağı ile 120 adet nokta kaynağı sonrasında bileme operasyonu yapılmış, iki elektrodun farklı kaynak akımı (7,5-8-8,5 kA) ve farklı kaynak sürelerinde (90, 100 ve 110 ms) deneysel analizleri yapılmıştır. Deneysel tasarım için Minitab 18 programı ile S/N oranına göre analiz amaçlı Taguchi ortogonal L18 metodu kullanılmıştır (Çizelge 1). Deney sonuçları sac-saca bindirme nokta kaynağı için ölçülen çekirdek çap değerlerine göre analiz edilmiştir.

2.1. FEE 420 Sac Malzeme

Bu çalışmada, otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılan 1.5 mm kalınlığındaki FEE 420 sac malzemenin nokta kaynağı ile sac-saca puntalama işlemi için optimum parametre değerleri analiz edilmiştir. Çeliğin mekanik özellikleri Çizelge 2'de, kimyasal özellikleri ise Çizelge

3'te gösterilmiştir. FEE 420 sac malzemeye deneysel analiz için L18 Taguchi metoduyla belirlenen parametre değerlerine bağlı olarak nokta kaynak işlemi uygulanmıştır. Kaynak elektrotlarında bileme periyodunun etkisini inceleyebilmek için 70 ve 120 adet nokta kaynak operasyonundan sonra elektrotlar bilenmiştir. Deneysel çalışmada kaynak impuls değeri 2 ve kaynak baskı kuvveti 330 daN sabittir. Kaynak elektrodu optimum bileme periyodu için kaynak akımının ve kaynak sürelerinin farklı parametre değerleri çalışılmıştır. Kaynak akımı 3 farklı değer olarak 7.5, 8.0 ve 8.5 kA olarak, kaynak süresi de 3 farklı değişken olarak 90, 100 ve 110 ms için araştırılmıştır. Çizelge 4'te nokta kaynağının kaynak işlem parametreleri ve seviyeleri gösterilmiştir.

Çizelge 1. Deney parametrelerini gösteren L18 deney sayılı Taguchi çalışma tablosu (P: punta sayısı).

| Deney No | (A) Kaynak elektrodu bileme periyodu | (B) Kaynak akımı (kA) | (C) Kaynak zamanı (ms) |
|----------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 70P | 7,5 | 90 |
| 2 | 70P | 7,5 | 100 |
| 3 | 70P | 7,5 | 110 |
| 4 | 70P | 8,0 | 90 |
| 5 | 70P | 8,0 | 100 |
| 6 | 70P | 8,0 | 110 |
| 7 | 70P | 8,5 | 90 |
| 8 | 70P | 8,5 | 100 |
| 9 | 70P | 8,5 | 110 |
| 10 | 120P | 7,5 | 90 |
| 11 | 120P | 7,5 | 100 |
| 12 | 120P | 7,5 | 110 |
| 13 | 120P | 8,0 | 90 |
| 14 | 120P | 8,0 | 100 |
| 15 | 120P | 8,0 | 110 |
| 16 | 120P | 8,5 | 90 |
| 17 | 120P | 8,5 | 100 |
| 18 | 120P | 8,5 | 110 |

Çizelge 2. FEE 420 sac malzemenin mekanik özellikleri (İnt. Kyn. 1).

| | Akma (Rp) N/mm ² | Çekme (Rm) N/mm ² |
|---------|-----------------------------|------------------------------|
| FEE 420 | 420-520 | 480 (min.) |

Çizelge 3. FEE 420 sac malzemenin kimyasal özellikleri (% ağı.) (İnt. Kyn. 1).

| % Element | C | Si | Mn | P | S | Al | Nb |
|-----------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|------------|
| FEE 420 | Max 0.12 | Max 0.5 | Max 1.6 | Max 0.03 | Max 0.03 | Min. 0.01 | 0.015 - |

3. Bulgular ve Tartışma

Deneysel analiz için L18 Taguchi metoduyla belirlenen ve Çizelge 1'de verilen parametre değerleri ile FEE 420 sac malzeme kullanılarak bindirme nokta kaynak işlemi uygulanmıştır. Kaynak elektrotlarında bileme

periyodunun etkisini inceleyebilmek için 70 ve 120 adet punta kaynak operasyonundan sonra elektrotlar Smartblock™ istasyonunda bilenmiştir.

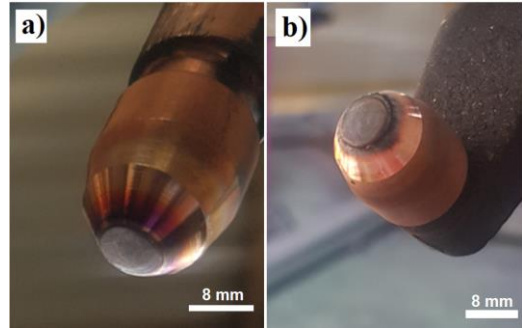
Çizelge 4. L18 Taguchi kaynak işlem parametreleri ve seviyeleri (P: Punta sayısı).

| Sembol | Kaynak Parametreleri | Seviye | Seviye | Seviye |
|--------|-------------------------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| A | Elektrot Bileme Sıklığı | 70P | 120P | - |
| B | Kaynak Akımı (kA) | 7.5 | 8 | 8.5 |
| C | Kaynak Süresi (ms) | 90 | 100 | 110 |

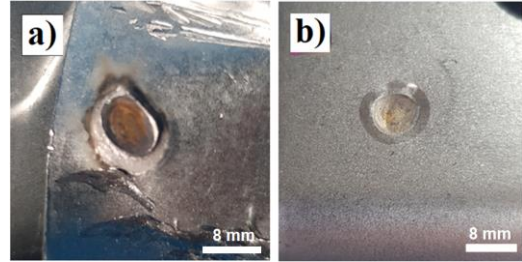
Belirlenen kaynak değerlerine göre 18 adet deney numunesi üzerinde çalışılmıştır. Şekil 2'de 70 ve 120 adet puntalama operasyonundan sonra çekilen nokta kaynak elektrotlarının makro görüntüleri verilmiştir. Nokta kaynak operasyonu sonrasında, elektrot yüzeyinde boyutsal değişimler ile şekilsel bozukluklar mevcut olup, özellikle 120 punta sonrası elektrot yüzeyinin (Şekil 2.b) deformasyonu sonucunda elektrot baskı yüzeyinde deformasyondan kaynaklı taşmalara sebep olduğu görülmektedir. Elektrot baskı yüzeyi çeperinde deformasyondan dolayı taşmalar oluşturması ardından elektrodun bu kısımlarının parçalanıp kaynak alanında yapışmalara ve hatta kaynak bölgesine bakır transferine kadar giden hasarlara sebep olmaktadır (Kekik vd. 2021). Bu tür elektrot baskı yüzey bozukluklarının genel olarak elektrik ısıtma yani Joule etkisi sonucu sac malzemede oluşan sıcaklık artışlarının bakır elektrotların plastik deformasyon kabiliyetini artırması ile beraber mantar etkisinin oluşması olarak tanımlanmaktadır (Bower vd. 1990). Bu etki, Şekil 2.a'da verilen 70 punta sonrası elde edilen elektrot baskı alanında daha az görülmektedir. Direnç nokta kaynağı boyutlarına olan etkisi ise Şekil 3'te 120 adet punta operasyonu öncesi ve sonrasındaki nokta kaynağını gösteren makro resimlerde verilmiştir. Şekil 3.a. ve Şekil 3.b.'de görüldüğü gibi, sırasıyla Smartblock™ ünitesinden geçmeden önce kaynak deformasyonu ve şekilsel bozuklukların, bileme işleminden geçtikten sonra tıraşlanmış yüzeyin daha temiz bir kaynak çekirdeği bıraktığı görülmektedir. Nokta kaynağındaki (Şekil 3.a) şekilsel bozukluk sadece elektrodun baskı yüzeyinin bozukluğundan değil aynı zamanda, elektrik akımının daha temiz olan elektrot baskı yüzeyi çeperinden geçmesi ile aşırı ısınması ve baskı kuvvetinin alansal olarak daha yüksek oranlara ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu tür nokta kaynak şekil bozuklukları nokta kaynağının mekanik özelliklerini etkileyeceğinden dolayı reddedilmektedir. Bunu ortadan kaldırmanın en kısa ve en az maliyetli yolu ise

deformasyona maruz kalan elektrodun baskı yüzey çeperi ve bunu destekleyen kenarlara bileme uygulayarak daha temiz elektrot baskı yüzeyi ile çalışmaktır. Elektrot bileme operasyonu sonucunda elektrot çeper duvar kalınlıkları incelmeyle beraber, belirli sayıda bileme işlemine müsaade edilmekte veya faydalı bir kalınlık değeri tecrübe edilerek veya bileme miktarları karşılaştırılarak bulunmaktadır.

Nokta kaynak işlemi ile birleştirilen deney numunelerine tam tahribatlı kopma yükü testi uygulanmıştır. Kopma kuvveti test cihazı kapasitesi 1.5 kW gücünde, 20 kN yük kapasitesindedir. Şekil 4'te 70 adet punta kaynak operasyonu öncesi ve sonrasındaki bileme için mekanik test yapılan test numuneleri ve 120 adet puntalama operasyonu öncesi ve sonrasındaki bileme için tahribatlı mekanik test yapılan test numuneleri verilmiştir.



Şekil 2. 70 adet (a) ve 120 adet (b) puntalama sonrası ve bileme öncesi nokta kaynak elektrotunun görünüşü.



Şekil 3. 120 adet puntalama operasyonu öncesi (a) ve sonrasındaki (b) nokta kaynağı görüntüleri.

Nokta kaynaklarının görsel hasar analizi yapıldığında, her iki elektrot bileme durumunda da kaynak çeperinden yırtılmanın genelleştirilebileceği uygun hasarlar görülürken, 120 punta kaynağı sonrasında yapılan numunelerin çekme testinde nokta kaynak çekirdek çeperinde yırtılma olmadan hasarlı kopmanın daha sık görüldüğü birkaç numune hariç (yaklaşık olarak % 20) genel olarak bu durumun değişmediği görülmektedir. Ancak, daha önce Şekil 3'te verildiği gibi görsel olarak 70 punta ve 120 punta sonrasında bileme öncesinde büyük farklılık oluşmaktadır. Nokta kaynak çekirdeğinin ısı tesiri altındaki bölgesinden (ITAB) mekanik test sonucunda yırtılması, beklenen bir hasardır.



Şekil 4. Her iki 70 ve 120 adet kaynak sonrası bilenmiş elektrotlarla kaynaklanmış ancak test edilmemiş test numuneleri; 70 adet (b) ve 120 adet (c) puntadan sonra bilenmiş elektrotla yapılan kopma testine tabi tutulmuş nokta kaynağı numuneleri gösterilmektedir.

Çizelge 5. L18 Taguchi metodu deney tasarımı, deney sonu elde edilen çekirdek çapları ve diğer istatistiksel veriler (P: Punta sayısı).

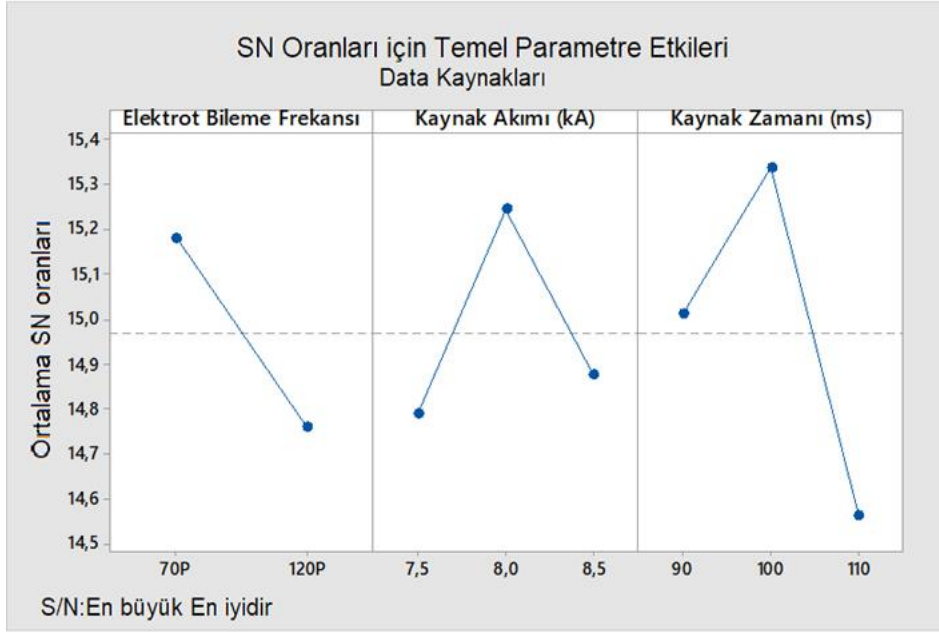
| Deney No | (A) Kaynak elektrodu bileme periyodu | (B) Kaynak akımı (kA) | (C) Kaynak zamanı (ms) | Kaynak çekirdek çapı (mm) | S/N Oranı (dB) | Tahmin edilen çekirdek çapı (mm) |
|----------|--|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 1 | 70P | 7,5 | 90 | 5,30 | 14,48 | 5,66 |
| 2 | 70P | 7,5 | 100 | 5,56 | 14,90 | 5,87 |
| 3 | 70P | 7,5 | 110 | 6,30 | 15,98 | 5,39 |
| 4 | 70P | 8,0 | 90 | 5,57 | 14,91 | 5,95 |
| 5 | 70P | 8,0 | 100 | 6,24 | 15,90 | 6,16 |
| 6 | 70P | 8,0 | 110 | 5,32 | 14,51 | 5,68 |
| 7 | 70P | 8,5 | 90 | 6,42 | 16,15 | 5,72 |
| 8 | 70P | 8,5 | 100 | 5,72 | 15,14 | 5,93 |
| 9 | 70P | 8,5 | 110 | 5,37 | 14,59 | 5,45 |
| 10 | 120P | 7,5 | 90 | 5,39 | 14,63 | 5,39 |
| 11 | 120P | 7,5 | 100 | 5,66 | 15,05 | 5,60 |
| 12 | 120P | 7,5 | 110 | 4,82 | 13,66 | 5,12 |
| 13 | 120P | 8,0 | 90 | 5,83 | 15,31 | 5,68 |
| 14 | 120P | 8,0 | 100 | 6,16 | 15,79 | 5,89 |
| 15 | 120P | 8,0 | 110 | 5,63 | 15,01 | 5,41 |
| 16 | 120P | 8,5 | 90 | 5,34 | 14,55 | 5,45 |
| 17 | 120P | 8,5 | 100 | 5,76 | 15,20 | 5,66 |
| 18 | 120P | 8,5 | 110 | 4,78 | 13,58 | 5,18 |

Genel olarak nokta kaynaklarının çekirdek kısmında yüksek sertlik değerleri görülürken, çekirdeğin hemen kenarındaki ITAB'ın sertliği düşük olmaktadır. Özellikle, tane irileşmesi gözlemlenen nokta kaynak çekirdeğinin ITAB başlangıç çizgisi en zayıf bölge olarak yırtılmaya en müsait bölgedir (Ertan vd. 2019, Demir vd. 2021). Kaynak akımı ile kaynak ısı girdisi arasındaki ilişkiye bağlı olarak, artan ısı girdisinin ITAB genişliğini artırması ve tane irileşmesine maruz kalan bölgenin de genişleyip oldukça düşük sertlikle sonuçlanması (Saha vd. 2012, Tutar vd. 2017) kaynak hasarının yırtılma ile daha çok kaynak çekirdeğinin hemen etrafından dairesel olarak ayrılmasına sebep olmaktadır.

FEE 420 sacının birleştirilmesi için kullanılan sac-saca bindirme nokta kaynağı yönteminde Taguchi L18 deneysel yaklaşımı ile optimizasyon çalışması yapılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları iki farklı bileme sonrasındaki elektrodun nokta kaynak operasyonu sonrası bindirme kaynağı yapılan parçada oluşturduğu çekirdek çapına göre değerlendirilmiştir. Çizelge 5'te L18

ortogonal Taguchi yöntemine göre tasarlanan deney verileri ve elde edilen çekirdek çapları verilmiştir. Çalışmada Sinyal/Gürültü (S/N) oranları en büyük çekirdek çapı en iyi sonuçları veren "en büyük en iyidir" amaç fonksiyonu ile yorumlanmıştır.

Çizelge 5'te verilen değerler Minitab 18 programı ile S/N oranına göre analiz edilmiştir. L18 dizinine göre tasarlanan deneylerin S/N oranının grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'ten görüldüğü gibi, 120 punta, 8,5 kA ve 110 ms parametreleri için S/N değeri oldukça düşüktür ve kaynak akımı ve kaynak zamanı için en düşük ve en yüksek parametrelerin güvenilirliğinin ve uygulama sırasında çok farklı değerler verdiğini göstermektedir. Şekil 5 ve 6'da verildiği gibi elektrot bileme sayısının az olması yanında ölçüm yapılan numune sayıları da önemlidir. Bu çalışmada, 70 ve 120 punta kaynak operasyonu sonrası bileme arasındaki S/N farklarının yüksek olması, elektrot bilemede seçilen 70 ve 120 sayısının uygun olduğunu göstermektedir.

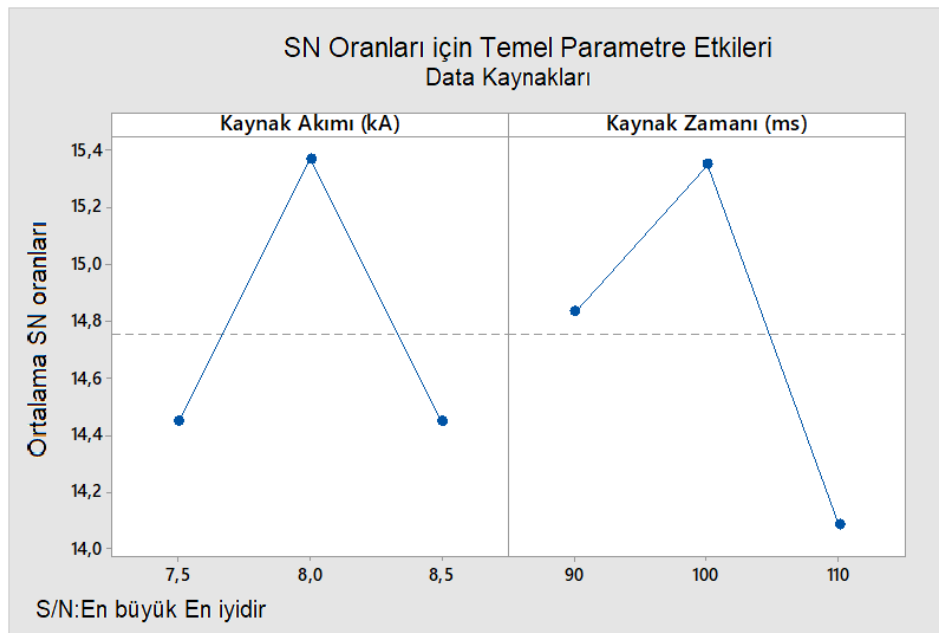


Şekil 5. L18 Taguchi deney tasarımı S/N grafiği (bütün parametreler için).

Çizelge 6. 70 punta ve 120 punta atım sonrası bileme işlemi için varyans analizi (PRESS: Tahmin edilen ve gerçek R^2 değerleri arasındaki sapmanın bir ölçüsüdür- the prediction error sum of squares).

| Kaynak | Serbestlik | Sırasal Kareler Toplamı (Seq SS) | Katkı Oranı | Uyarlanmış Kareler | | |
|--------------------------|---------------|----------------------------------|-------------|---------------------|----------|----------|
| | Derecesi (DF) | | | Ortalaması (Adj MS) | F-Değeri | p-Değeri |
| Elektrot Bileme Frekansı | 1 | 0,3280 | 9,13% | 0,3280 | 1,72 | 0,215 |
| Kaynak Akımı (kA) | 2 | 0,2743 | 7,64% | 0,1372 | 0,72 | 0,508 |
| Kaynak Zamanı(ms) | 2 | 0,6952 | 19,36% | 0,3476 | 1,82 | 0,204 |
| Hata | 12 | 2,2941 | 63,87% | 0,1912 | -- | -- |
| Toplam | 17 | 3,5917 | 100% | | | |

| Varyans Analizi (S) | R^2 | R^2 ortalama | PRESS | R^2 ilk |
|---------------------|--------|----------------|---------|-----------|
| 0,437238 | 36,13% | 9,51% | 5,16177 | 0,00% |



Şekil 6. 120 punta sonrası bileme ile elde edilen kaynakların kaynak akımı ve kaynak zamanı parametrelerine ait S/N sonuçları.

Çizelge 7. 120 punta atım sonrası bileme işlemi için varyans analizi (PRESS: Tahmin edilen ve gerçek R² değerleri arasındaki sapmanın bir ölçüsüdür- the prediction error sum of squares).

| Kaynak | Serbestlik Derecesi (DF) | Sırasal Kareler Toplamı (Seq SS) | Katkı Oranı | Uyarlanmış Kareler Ortalaması (Adj MS) | F-Değeri | p-Değeri |
|-------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------|--|----------|----------|
| Kaynak Akımı (kA) | 2 | 0,6767 | 40,49% | 0,3383 | 19,68 | 0,009 |
| Kaynak Zamanı(ms) | 2 | 0,9258 | 55,39% | 0,4629 | 26,92 | 0,005 |
| Hata | 4 | 0,0688 | 4,12% | 0,0172 | -- | -- |
| Toplam | 8 | 1,6712 | 100% | | | |

| Varyans Analizi (S) | R ² | R ² ortalama | PRESS | R ² ilk |
|---------------------|----------------|-------------------------|---------|--------------------|
| 0,13113 | 95,88% | 91,77% | 0,34819 | 79,17% |

Şekil 5 ve 6'da verildiği gibi elektrot bileme sayısının az olması yanında ölçüm yapılan numune sayıları da önemlidir. Bu çalışmada, 70 ve 120 punta kaynak operasyonu sonrası bileme arasındaki S/N farklarının yüksek olması, elektrot bilemede seçilen 70 ve 120 sayısının uygun olduğunu göstermektedir. Kaynak zamanının 10 ms daha fazla olması S/N oranının düşmesine sebep olmuştur. Artan kaynak süresinin kaynak ısı girdisinin artmasına yol açması ve sonuç olarak, kaynak çekirdek çapının artmasına sebep olacağı beklenirken (Piott vd. 2020, Moshayedi ve Sattari Far 2012), bu çalışmada ise artan kaynak süresinin kaynak çekirdek boyutunu ciddi oranda etkilemediği gibi bir sonuç ortaya çıkmıştır. Süre artışının çok küçük olması yanında dış etkenlere bağımlı bir sonuç olabileceği düşünülmektedir.

Çalışmadan elde edilen verilere göre, 70 adet punta operasyonundan sonra bileme işlemi uygulanan elektrodun, 8 kA kaynak akımı değerinin ve 100 ms kaynak süresinin optimum nokta kaynak parametreleri olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 5'te verildiği gibi, tahmin edilen değerler ile deneysel verilerin arasında fark olduğu görülmektedir. Bu farklılıkların sebebi deneylerin tekrarlanmaması ve ölçümler sırasındaki çevresel koşulların arasındaki farklar olarak değerlendirilmeye mümkündür. Özellikle çekirdek çaplarının ölçümü sırasında dijital teknolojinin veya resim analizi için programın kullanılmaması ölçüm farklılıklarının temel sebebi olarak düşünülebilir. Bu nedenle, gözle yapılan ölçümlerde, hassasiyetin düşük olması ve aynı zamanda, tam olarak tespit için çok yüksek sayıda ölçüm alınması ihtiyacı nedeniyle bu fark oluşabilmektedir. Ayrıca, bileme sayısındaki farkın diğer parametrelerdeki deneysel aralıklara göre farklı olması da S/N sonuçlarını etkileyebilmektedir. Sac-saca punta kaynağında kaynak parametreleri nokta kaynağı üzerinde farklı etki değerlerine sahiptirler. Bu etki değerleri

ANOVA yöntemiyle analiz edilmektedir (Çizelge 6). Çizelge 6'dan görüldüğü gibi, F değerinin kaynak akımı parametresinde sıfıra yakın çıkması, kaynak akım etkisinin bağımsız aşırı değişken olduğunu ifade etmektedir. Diğer parametrelerinde katkı sağladığı hata oranının yüksek olması bu grup deneyler için güvenilirliklerin zayıf olduğu ancak kaynak akımının etkisiyle sonuçların tamamıyla reddedilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Ancak varyansın yüksek olduğu durumlarda ve F değerindeki değişikliklerin fazla olduğu durumlarda p değeri dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, sonuçların güvenilirlik (p) değerinin elektrot bileme, kaynak akımı ve kaynak zamanı için düşük sayılabilecek bir değerde çıkması (p>0.05) ısı girdisine bağlı olarak çekirdek çapının beklentilerin aksine daralmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sadece 70P numunelerinde 7.5 kA serisinde artan ve 8.5 kA serisinde ise azalan davranış gözlemlenirken, diğerlerinde ise parametrik olarak değişken çekirdek çap ölçümleri görülmüştür. Ancak, sonuçlar birbirine oldukça yakın olması nedeniyle, bu değişimin önemli olmadığı veya etkisinin az olacağı düşünülmektedir. Şekil 6 ve Çizelge 7'de görüldüğü gibi, ikinci tip ölçüm sonucu 120P serisindeki bütün kaynak akım serilerinde görüldüğü ve değişiklik olmadığı için ölçüm sonuçlarındaki p güvenilirlik değerleri oldukça yüksek çıkmıştır (p<0.05). Uyarlanmış kareler değerlerinin ve F değerlerinin yüksek olması ve 120P sonrası tıraşlamanın sistemsel olarak, p güvenilirlik değerlerinin de çok düşük çıkması nedeniyle uygulanması gerektiğini göstermektedir.

ANOVA yöntemine göre, elde edilen deney verileri %5 anlamlılık ve %95 güven düzeyi ile hesaplanmıştır (Mohsin I. vd. 2020). Yapılan deneysel çalışma biraz yüksek hata oranına sahip olmakla beraber, çalışma 120 ve 70 punta sonrasında bileme operasyonu uygulanmış kaynak elektrotlarının kullanılmasıyla kaynak çekirdek çapına olan etkisi dikkate alındığında, deneysel verilerin

120 punta sonrasındaki değerlerin %95,88 güven düzeyine ulaştığı ($R^2 > \%95$) sonucuna ulaşılmıştır. Bu koşullar altında, 120 punta sonrasında yapılan deneyler, daha güvenilir ve aynı zamanda parametrik değerlerin daha uygulanabilir olduğunu ortaya koyulmaktadır.

4. Genel Sonuçlar

Bu çalışmadan elde edilen verilere göre aşağıdaki sonuçlar öne çıkmaktadır:

1. 70 adet punta operasyonundan sonra bileme işlemi uygulanan nokta kaynak elektrodunun, optimum parametreleri şunlardır; 8 kA kaynak akımı ve 100 ms kaynak süresidir. Optimum değerler sonucunda kaynak çekirdek çapı 6,24 mm'dir.
2. 120 puntadan sonra yapılan bileme işleminden elde edilen değerlere göre ise 8.0 kA ve 100 ms değerlerinde 6,16 mm çapında kaynak çekirdeği oluşmaktadır. Bu değerler 120 adet punta işleminden sonra elde edilen çekirdek çapı ile 70 adet punta işleminden sonra elde edilen kaynak çekirdek çapı arasında %1,282 değerinde bir fark olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre; 120 adet puntadan sonra yapılan bileme işlemi ile 70 adet puntadan sonra yapılan bileme işlemlerinin optimum parametre değerlerine yakın sonuçlar verdiğine ulaşılmaktadır.
3. Deneysel çalışmalarda, 70 punta sonrasında yapılan bilemenin istatistiki olarak daha az güvenilir sonuçlar verdiği buna karşın 120 punta sonrasında yapılan bileme işlemiyle beraber, deneysel güvenilirliklerin daha iyi olduğu görülmektedir.
4. Tahmin edilen çekirdek çapı ile ölçülen değerler arasındaki farkın bu yüksek hataya sebep olduğu da en önemli çıktı olarak düşünülebilir. Bu durumda, ölçüm sayısının artması bu hata oranını daha da azaltacaktır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Hilal KIR: Araştırma, Deney tasarımı, Analiz, Yazma – orijinal taslak
Şükrü KARABULUT: Araştırma, Deney tasarımı, Yazma – orijinal taslak,
Mustafa YAZAR: Fikir Sahibi, Metodoloji/Çalışma, deneysel tasarım,
Proje Yöneticisi,
Şükrü TALAŞ: Fikir Sahibi, Deney tasarımı, Analiz ve yorumlama,
Yazma/inceleme ve düzenleme, Danışmanlık

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Bu proje Şahinkul Makine Ar-Ge merkezi tarafından Ar-Ge 2022-27 2200850000 nolu Robot Nokta Kaynaklarında Smartblock ile Proses Optimizasyonu projesi ile desteklenmiştir.

Çalışmada görev alan bursiyer öğrenciler Hilal Kır ve Şükrü Karabulut TÜBİTAK BİDEB tarafından desteklenmektedir (Proje No: 119C053).

Kaynakça

- Açış, İ. F., Talaş, Ş., 2023. Performance of resistance spot weld caps coated with Ni and Fe aluminate alloys by electro spark deposition on hot dip galvanized steel, *Revista de Metalurgia*, **59**(1), 237.
<https://doi.org/10.3989/revmetalm.237>
- Arslan, S. ve Karabaş, M., 2019. Effect of Different Magnet Geometry On Magnetically Assisted Resistance Spot Welding, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **19**(1), 129-139.
Doi: <https://doi.org/10.35414/akufemubid.436609>.
- Bower, R. J., Sorensen, C. D., and Eager T. W., 1990. Electrode Geometry in Resistance Spot Welding. *Welding Journal*, February, 45-51.
- Bozkurt, Y., Keleş, D., 2017. Effect on Worker Health of Emerging Gas and Fume in Fusion Welding Methods, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, **4**, 144-150.
<https://doi.org/10.7240/marufbd.372945> .
- Chen, T., Ling, Z., Wang, M., Kong, L., 2020. Effect of a slightly concave electrode on resistance spot welding of Q&P1180 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, **285**, 116797.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116797>
- Deepati, A.K., Alhazmi, W., Benjeer, I., 2021. Mechanical characterization of AA5083 aluminum alloy welded using resistance spot welding for the lightweight automobile body fabrication, *Materialstoday Proceedings*, **45**(6), 5139-5148.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.646> .
- Demir, B., Elitaş, M. & Karakuş, H., 2021. Investigation of the Effect of the Electrode Tip Type on the Mechanical Properties of Advanced High Strength Steel Combined with Resistance Spot Welding, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **7**(3) 277-285.
<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.10> .
- DiGiovanni, C., He, L., Pistek, U., Goodwin, F., Biro, E., Zhou N.Y., 2020. Role of spot weld electrode geometry on liquid metal embrittlement crack

- development, *Journal of Manufacturing Processes*, **49**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.015>.
- Ertan, R., Aras, S., Özgül, H.G., 2019. The Effect of the Welding Current on the Mechanical Properties of the New Generation Steels Welded with Resistance Spot Welding, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **19**, 025902 (461-469).
- Ertek Emre, H., 2019. Strength Optimization of Resistance Spot Welded TWIP Steel by Taguchi Method. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **7**(1), 778-787.
- Kekik, M., Özen, F., İlhan, E., Aslanlar, S., Microstructural Evaluation and Influence of Welding Parameters on Electrode Plunge Depth in Resistance Spot Welded Dissimilar DP800HF/1200M Steel Joints, 2021. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, **9**(2), 284-291. <https://doi.org/10.21541/apjes.859623>.
- Kim, D., Yu, J., Rhee, S., 2016. Effect of a conically shaped hollow electrode on advanced high strength steel in three-sheet resistance spot welding, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **17**, 331-336. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0041-9>.
- Li, M., Wang, Y., Yang, S., Tao, W., Zhang, G., 2021. Improving mechanical properties and electrode life for joining aluminum alloys with innovatively designated Newton ring electrode, *Journal of Manufacturing Processes*, **64**, 948-959. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.001>.
- Ma, Y., Takikawa, A., Nakanishi, J., Doira, K., Shimizu, T., Lu, Y., Ma, N., 2021. Measurement of local material properties and failure analysis of resistance spot welds of advanced high-strength steel sheets, *Materials & Design*, 201, 10955. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109505>.
- Mat Yasin, N.A., Alisibramulisi, A., Salleh, Z., Ghazali, F., 2020. Optimization of Resistance Spot Welding (RSW) Parameters by using Taguchi Method, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, **9**(3), 2795-2800.
- Mohsin, I., He, K., Li, Z., Zhang, F., Du, R., 2020, Optimization of the Polishing Efficiency and Torque by Using Taguchi Method and ANOVA in Robotic Polishing, *Applied Sciences*, **10**(3), 824. <https://doi.org/10.3390/app10030824>.
- Moshayedi, H., Sattari-Far, I., 2012, Numerical and experimental study of nugget size growth in resistance spot welding of austenitic stainless steels, *Journal of Materials Processing Technology*, **212**(2), 347-354. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.09.004>.
- Ogawa, Y., Ohara, I., Arakawa, J., Akebono, H., Sugetu, A., 2022. Effects of welding defects on the fatigue properties of spot welded automobile steel sheets and the establishment of a fatigue life evaluation Method, *Welding in the World*, **66**, 745-752. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01238-5>.
- Pashazadeh, H., Gheisari, Y., Hamed, M., 2016, Statistical modeling and optimization of resistance spot welding process parameters using neural networks and multi-objective genetic algorithm. *Journal of Intelligence Manufacturing*, **27**, 549-559. <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0891-x>.
- Piott, M., Werber, A., Schleuss, L., Doynov, N., Ossenbrink, R., Michailov, V.G., 2020. A study of the heat transfer mechanism in resistance spot welding of aluminum alloys AA5182 and AA6014. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **111**, 263-271. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05650-x>.
- Sabırlı, A. ve Fiğlalı, A., 2020. Optimization of Electric Resistance Welding Parameters by Taguchi Method to Achieve Optimum Nugget Size. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **3**(2), 223-229.
- Saha, D.C., Han, S., Chin, K.G., Choi, I., Park, Y. Do, 2012. Weldability evaluation and microstructure analysis of resistance-spot-welded high-Mn steel in automotive application, *Steel Research International*, **83**, 352-35. <https://doi.org/10.1002/srin.201100324>.
- Smartblock Tanıtım Broşürü, 2020. TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., AR-GE Merkezi, Bursa.
- Tutar, M., Aydın, H., Bayram, A., 2017, Effect of Weld Current on the Microstructure and Mechanical Properties of a Resistance Spot-Welded TWIP Steel Sheet, *Materials*, **7**, 519. <https://doi.org/10.3390/met7120519>.
- Wan, X., Wang, Y., Zhao, D., 2016. Multiple Quality Characteristics Prediction and Parameter Optimization in Small-Scale Resistance Spot Welding, *Arabian Journal for Science and Engineering*, **41**, 2011-2021. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2061-2>.

Watmon, T. B., Wandera, C., Apora, J., 2020. Characteristics of resistance spot welding using annular recess electrodes, *Journal of Advanced Joining Processes*, **2**, 100035. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2020.100035>.

Xing, B., Yan, S., Zhou, H., Chen, H., Qin, Q. H., 2018. Qualitative and quantitative analysis of misaligned electrode degradation when welding galvanized steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **97**, 629–640. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1958-1>.

İnternet Kaynakları

1- http://erdemir.ro/Sites/1/upload/files/Yassi_Urun_Katalogu_2020_subat-1205.pdf, (10.02.2023).