



AISI 304 PASLANMAZ ÇELİĞİN ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI PARAMETRELERİNİN TAGUCHI YÖNTEMİYLE ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYONU

Elif COŞGUN ŞAHİN^{1*}, Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN¹, Mümin TUTAR² Umut Onur ŞAHİN³

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

² Bursa Uludağ Üniversitesi, Yenişehir İbrahim Orhan Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri
Bölümü, Bursa, Türkiye

³ Mactera Joining Technologies, Kudem Makine A.Ş. NOSAB, Bursa, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*AISI 304 Çeliği,
Elektrik Direnç Nokta
Kaynağı,
Kaynak Parametreleri,
Mekanik Özellikler,
Taguchi Yöntemi.*

Öz

Bu çalışmada, elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş AISI 304 paslanmaz çelik sacların mekanik özelliklerinin akım şiddeti, kaynak zamanı ve elektrot kuvvetine göre değişimi incelenmiştir. Kaynak parametrelerinin seçilebilmesi için elektrik direnç nokta kaynağı ile ön denemeler gerçekleştirilmiştir. Optimum sonuç için, parametre aralıkları belirlenirken çekirdek oluşumundan başlayarak parametreler değiştiğinde malzeme yüzeyinde oluşan çökme miktarı ve önemli düzeyde sıçratma dikkate alınmıştır. Taguchi yöntemi kullanılarak belirlenen maksimum ve minimum aralıklarda değerler değiştirilerek deney seti oluşturulmuştur. Bu amaçla, oluşturulan deney seti ile en yüksek kaynak dayanımını belirlemek için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Kaynağın dayanımında en etkili olan parametrelerin sırasıyla akım şiddeti, elektrot kuvveti ve kaynak zamanı olduğu belirlenmiştir.

OPTIMIZATION OF RESISTANCE SPOT WELDING PARAMETERS OF AISI 304 STAINLESS STEEL BY MULTI OBJECTIVE TAGUCHI METHOD

Keywords

*AISI 304 Steel,
Resistance Spot Welding,
Welding Parameters,
Mechanical Properties,
Taguchi Method.*

Abstract

In this study, the mechanical properties of AISI 304 stainless steel sheets joined by resistance spot welding, current intensity, welding time and electrode force parameters were investigated. In order to select the welding parameters, preliminary experiments were carried out with resistance spot welding. For the optimum result, expulsion and indentation on the material surface as the parameters change, starting from the core formation, were taken into account when determining the parameter ranges. The experimental set was formed by changing the values in the maximum and minimum intervals determined by using the Taguchi method. For this purpose, tensile tests were carried out to determine the highest weld strength with the created test set. It has been observed that the most effective parameters on the strength of the weld are current intensity, electrode force and welding time, respectively.

Alıntı / Cite

Coşgun Şahin, E., Gülçimen Çakan, B., Tutar, M., Şahin, U.O., (2023). AISI 304 Paslanmaz Çeliğin Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Çok Amaçlı Optimizasyonu, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(1), 324-335.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. Coşgun Şahin, 0000-0002-9295-9467
B. Gülçimen Çakan, 0000-0003-1739-1143
M. Tutar, 0000-0002-7286-3433
U. O. Şahin, 0000-0002-4722-6344

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 08.06.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date 09.09.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date 29.09.2022
Yayın Tarihi / Published Date 27.03.2023

* İlgili yazar / Corresponding author: elifcosgunn@gmail.com, +90-531-915-6610

OPTIMIZATION OF RESISTANCE SPOT WELDING PARAMETERS OF AISI 304 STAINLESS STEEL BY MULTI OBJECTIVE TAGUCHI METHOD

Elif COŞGUN ŞAHİN^{1†}, Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN¹, Mümin TUTAR², Umut Onur ŞAHİN⁴,

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

² Bursa Uludağ Üniversitesi, Yenişehir İbrahim Orhan Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Bursa, Türkiye

³ Mactera Birleştirme Teknolojileri, Kudem Makine A.Ş. NOSAB Erguvan Cad. No:4/E Nilüfer, Bursa, Türkiye

Highlights

- The RSW parameters of AISI 304 stainless steel were optimized using Taguchi method.
- Tensile test and elongation values were used for determining the mechanical properties.
- The effect rank of the parameters was current intensity, electrode force and welding time.
- The tensile load increased almost linearly with increasing heat input index.

Purpose and Scope

Resistance spot welding is a joining method frequently used in many sectors, especially in automotive. It is preferred due to reasons such as lack of additional material, short application time, high-strength bonding and affordable cost. AISI 304 stainless steel is also used in automotive construction elements due to its corrosion resistance, high formability and ductility. Increasing the use of stainless steel in automotive provides low fuel consumption with low sheet thickness and helps energy efficiency. In this study, optimum parameters were determined considering the tensile strength and elongation values obtained from tensile tests of spot-welded sheets. As a result, it was ensured that the most suitable parameter providing the welding strength for AISI 304 stainless steel was preferred.

Design/methodology/approach

1,2 mm thick AISI 304 stainless steel test specimens were cut using the laser cutting method and were joined using resistance spot welding by considering the welding current intensity, welding time and electrode force as process parameters. Taguchi L9 orthogonal array consisting of 9 different types of samples was created for the optimization of welding parameters. In the Taguchi method, the S/N ratios were calculated with the "Larger the better" criterion. In addition, ANOVA table was created to determine the effect of individual parameters. The welding heat input values were also considered.

Findings

The order of importance of welding parameters was determined as welding current, electrode force and welding time. The current density is the parameter that affects the heat input the most, and as it increases, the heat input index increases. It has been determined that increasing weld core size also causes an increase in tensile strength. However, if the maximum welding current intensity value is exceeded, expulsion and excessive indentation occur due to melting in the welding core.

Research limitations/implications

The tensile strength of the bonded specimens increases as the current intensity increases. The highest tensile values were obtained as 16,11 kN at 13 kA. However, for the 1,2 mm AISI 304 stainless steel sheet joining process with resistance spot welding, the selection of higher current intensity value is not recommended due to expulsion and indentation error.

Originality

In this study, optimum parameters were determined by using the Taguchi method based on the tensile force and elongation values and considering the effect of heat input index values. Considering the increasing use of stainless steels in the automotive industry, it is thought that it would be beneficial to use the optimization method presented in this study and the obtained welding parameters.

† Corresponding author: elifcosgunn@gmail.com, +90-531-915-6610

1. Giriş (Introduction)

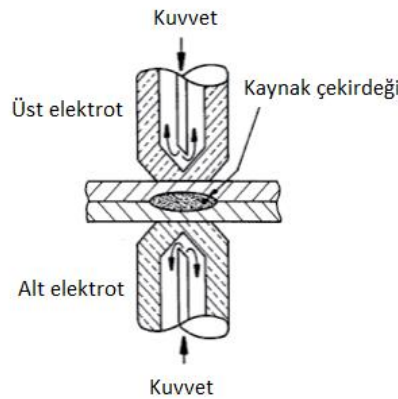
Elektrik direnç nokta kaynağı genellikle otomotiv sektöründe oldukça tercih edilen bir birleştirme yöntemidir. Genel olarak bir araçta yaklaşık 2000 ile 5000 arasında elektrik direnç nokta kaynağı bulunmaktadır. Bu kaynak metodu araç bütünlüğü ve güvenlik için oldukça önem arz etmektedir. Ayrıca elektrik direnç nokta kaynağında, ara malzeme kullanılmaması, çok kısa sürede kaynak gerçekleştirilebilmesi, uygun parametre seçimiyle beraber montaj hatlarına kolayca entegre edilebilen otomasyona uygun olması gibi avantajlarından dolayı sıklıkla tercih edilen bir imalat yöntemidir (Altun ve Özcan, 2015).

Günümüzde enerji tasarrufu ve güvenlik talepleri, araç üreticilerini araçları daha güvenli ve daha hafif hale getiren malzemeleri kullanmaya yöneltmektedir. Geçmişte alternatif olarak kullanılan hafif malzemelerin, maliyet ve kaynak kabiliyeti ile ilgili sorunları bulunmaktadır. Oysa paslanmaz çelik, üstün mekanik ve pekleşme özelliklerine, şekillendirilebilme ve kaynak kabiliyetine sahiptir. Bir otomobilde, yaklaşık 20 kilo paslanmaz çelik kullanılmaktadır (Placidi ve Fraschetti, 2005). Toplam paslanmaz çelik üretimi içinde östenitik paslanmaz çeliklerin payı %70 olup, bu çelik türünün en çok kullanılanı AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çeliklerdir. AISI 304 paslanmaz çelikler, yüksek korozyon dayanımına, mükemmel kaynak edilebilme ve sünek olduklarından kolay şekillendirilebilme kabiliyetlerine sahiptir (Kaya, 2010). AISI 304 paslanmaz çelik otomotivde, geleneksel olarak araba egzoz sistemlerinde, döşeme ve ızgaralarda ve çeşitli küçük bileşeni oluşturmak için korozyon direncinden ötürü kullanılır, ancak yeni emisyon azaltma standartları ve çevresel kaygılar üreticileri paslanmaz çelikleri yapı elemanlarında da tercih etmeye itmektedir. Bu çelikler, düşük sac kalınlıkları seçim avantajıyla güvenlikten taviz vermeden ağırlığı azaltılarak daha düşük yakıt tüketimi sağlayıp enerji verimliliğini ve sera gazını azaltmaya yardımcı olabilmektedirler. AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin gelecekte özellikle otomotiv sektöründe yapısal olarak da kullanımının artacağı varsayılarak bu çalışmanın faydalı olacağı düşünülmektedir.

Elektrik direnç nokta kaynağı, takriben 3 mm kalınlığa kadar olan aynı kimyasal bileşimdeki sac ve levhaların birbirini üzerine bindirilerek birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılır (Karcı, 2008). Kaynaklı imalat yöntemlerinde en önemli faktör kaynağın yapısal karakteristikleri olup, statik ve dinamik yüklemelerde mekanik ve yorulma dayanımının iyi olması gerekmektedir. Elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle birleştirilen iki sac malzeme için öncelik kaynağın mukavemetidir (Çavdar vd., 2017). Elektrik direnç nokta kaynağının dayanımını sağlamak için en iyi parametreleri belirlemek büyük önem taşır. Bu çalışmada, yapılan kaynak mukavemeti ve uzama öncelik gözetilerek optimum parametreler belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda AISI 304 paslanmaz çelik için kaynak dayanımını sağlayan daha uygun bulunan parametrelerin tercih edilmesi amaçlanmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Elektrik direnç nokta kaynağı, iş parçalarının devrenin bir parçasını oluşturduğu bir prosesin kaynak akımının akışına karşı iş parçalarının direncinden elde edilen ısı ve basınç ile sac malzemelerin birleşmesini sağlayan bir grup kaynak işlemi içerir. Şekil 1'de görüldüğü gibi elektrotların yerleştirildiği yerde metal sacların arasında bir kaynak çekirdeği oluşur (O'Brien ve American Welding Society, 2015).



Şekil 1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Prosesi (Resistance Spot Welding Process) (Phillips, 2016)

Bu direnç kaynağı uygulamalarıyla ilişkili ana işlem değişkenleri şunlardır; kaynak akımı, kaynak süresi, elektrot kuvveti, elektrot malzemesi ve elektrot tipi konfigürasyonudur. Bu değişkenler için parametreler uygun şekilde ayarlandıktan sonra, direnç kaynağı işlemlerini kullanmak için diğer kaynak işlemlerine göre daha az beceri gerekir. Bu parametreler uygun belirlenemez ise birçok olumsuz durum ile karşılaşılabilir. Kaynak metalinin sıçraması, genellikle aşırı kaynak akımının kullanılmasından kaynaklanan aşırı ısınmanın sonucudur. Bu, durum

yüksek akım yetersiz elektrot kuvveti veya uygun olmayan elektrotlar sonucu da ortaya çıkabilmektedir. Sıçramanın oluşmasını önlemek için uygun elektrot kuvveti ve kaynak akımı tercih edilmelidir. Başka bir durum ise elektrot kuvvetinin düşük olması, aşırı ısı üretimi, erimiş metalin dışarı atılmasına neden olur bunlarda çatlaklara veya gözenekli yapıya sebep olabilir (Sinnes ve Welding Handbook Committee, 2018).

Elektrik direnç nokta kaynağında kaynak bağlantılarında mekanik özellikleri belirleyen kaynak sırasındaki ısı girdisidir. Çekirdek çapı, çökme miktarı gibi önemli sınırlayıcı parametrelerin ısı girdisiyle bağlantılı değişimleri Eşitlik (1)'de gösterilmiştir:

$$Q = I^2Rt \quad (1)$$

Bu denklemde; Q üretilen ısı, I kaynak akımı, R elektrik direnci, t kaynak süresi olarak temsil edilmektedir. Formülü incelediğimizde kaynak akım ve zamanının ısı girdisini doğrudan etkilediği görülmektedir. Elektrik direncini birden fazla parametre etkilemektedir. Varsayılan parametre elektrot kuvveti ile ters orantısı olmuştur. Elektrot kuvveti arttıkça elektrik direnci düşecek ve ısı girdisi azalacaktır. Bu durumda ısı girdisi Eşitlik (2)'deki gibi tanımlanabilmektedir (Pouanvari, 2011):

$$IGİ = I^2t/F \quad (2)$$

Bu formülde; IGİ ısı girdisi indeksi, I kaynak akımı; t kaynak süresi, F elektrot kuvveti olarak temsil edilmektedir. Taguchi metodunda, deneylerden elde edilen sonuçlar sinyal/gürültü oranına (S/N) çevrilerek değerlendirilme yapılmıştır. Burada S sinyal faktörü N ise gürültü faktörünü göstermektedir. Sinyal faktörü sistemden alınan gerçek değeri, gürültü faktörü ise deney tasarımına katılmayan ama deney sonucunu etkileyen etmenleri temsil etmektedir. Gürültü kaynakları, elde edilmek istenen performans karakteristiklerinin hedef değerden sapmasına sebep olan tüm değişkenlerdir. Bu durumda S/N oranındaki gürültü faktörlerini gösteren N değeri ne kadar küçük olursa istenen hedef değere o kadar yaklaşılmaktadır. Dolayısıyla bu analizde amaç S/N oranını maksimize etmektir (Turgut ve Dikici, 2011). Taguchi metodunda, amacın “en küçük en iyi”, “en büyük en iyi” ve “nominal en iyi” olmasına göre S/N oranları hesaplanmaktadır (İç ve Yıldırım, 2012). Fakat bu analizde performans karakteristiğinin maksimize edilmesi için amaç “en büyük en iyi” olacağından S/N oranı Eşitlik (3) ile hesaplanabilir (Kumar vd., 2011):

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

Burada n deney sayısıdır ve y_i performans yanıtının i . gözlem değerini ifade eder. Daha yüksek bir S/N oranı, ana sinyal gürültüye hakim olduğundan, maksimum çekme kuvveti ve uzama değeri için iyi bir değerlendirme olduğunu gösterir. Parametre etkilerini hesaplamak için Eşitlik (4) kullanılabilir (Tutar vd., 2014):

$$S/N_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n S/N_k \quad (4)$$

Burada S/N_{ij} , i . parametrenin j . seviyesinin ortalama S/N değeridir, n , i . parametrenin j . seviyesini içeren deney sayısı ve S/N_k , k . deneyin S/N değeridir.

Farklı üretim yöntemleri için üretim parametrelerinin proses çıktıları üzerindeki etkilerini Taguchi Deney Tasarım metodu ve varyans analizi (ANOVA) kullanarak inceleyen çalışmalar literatürde mevcuttur (Kayabaşı ve Çakmak, 2019). Bu metodu elektrik direnç nokta kaynağı için gerçekleştirilen çalışmalara da rastlanmaktadır. Tutar ve arkadaşları (2017), TWIP çelik sac malzeme kullanarak elektrik direnç nokta kaynağıyla farklı kaynak parametreleri kullanarak birleştirmeler yapmışlardır. Kaynak parametreleri Taguchi yaklaşımı kullanılarak çok amaçlı olarak optimize edilmiştir. Kaynak akımı, kaynak zaman ve elektrot kuvveti giriş parametresi iken, çekme kuvveti ve çökme değerleri ise çıkış parametresi olarak ölçülmüştür. Kaynak parametrelerinin etkisi sırasıyla, kaynak akımı, elektrot kuvveti, kaynak süresi olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada iki faktörün çoklu analiz edilmesi bakımından yapılan çalışma incelenmeye değerdir. Çetin ve arkadaşları (2018), Taguchi yöntemini kullanarak düşük karbonlu çelik ve östenitik paslanmaz çelik malzemelerinin gaz metal ark kaynak metoduyla kaynak edilebilirliğini araştırmışlardır. Akım-voltaj (kaynak enerjisi) değerleri ve tel besleme hız parametreleri giriş parametresi olarak kullanılmış, kaynak bölgesinin sertliği ve çekme mukavemeti çıkış parametresi olarak ölçülmüştür. Ayrıca, kaynak bölgelerinin mikro yapısını da incelemişlerdir. AISI 304 paslanmaz çeliği ile S235JR düşük karbonlu çelik malzemenin, MIG kaynak yöntemiyle farklı kaynak parametrelerinde birleştirmiş bu çalışmadan çıkan deney sonuçları ve Taguchi metoduyla elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Yüce (2021) çalışmasında, elektrot kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresinin elektrik direnç nokta kaynağı parametrelerini optimize etmek için Taguchi metoduyla çok amaçlı bir optimizasyon gerçekleştirmiştir. Parametrelerin etkisini çekme kuvveti, çekirdek çapı ve çökme değerlerini ölçerek belirlemiştir. Taguchi metodunun yanı sıra, her parametrenin her yanıt üzerindeki etki oranlarını incelemek için ANOVA yöntemi uygulamıştır. Artan kaynak akımının bir sonucu olarak, yüksek ısı girdi seviyelerine sahip numuneler daha büyük bir çökme oranına sahiptir. Kaynak akımının çekme kuvveti üzerinde önemli bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak akımının belirli bir değere kadar artması çekme yükünü artırmıştır. Çekme kuvveti, çekirdek çapı ve çökme değerleri için en etkili parametreler sırasıyla, kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot kuvveti parametre olmuştur. Çalışmada gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon ile parametrelerin etkileri daha net olarak belirlenebilmektedir. Kumar ve Eapen (2021) AISI 304 paslanmaz çeliğini kullanarak elektrik direnç nokta kaynağıyla kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrot çapını dikkate alarak deneysel bir araştırma sunmuştur. Taguchi metodunu kullanarak analiz gerçekleştirilmiştir. Çıkış parametresi olarak çekme kuvveti ölçülmüştür. Kaynak akımı arttıkça çekme yükünün de arttığı sonucu çıkarılmıştır. Kaynak akımı arttığında üretilen artan ısının bir sonucu olarak büyük kaynak çekirdeği oluşumu tespit edilmiştir. Kaynak mukavemetini en çok etkileyen parametrenin kaynak akımı olduğu, bunu sırasıyla kaynak süresi ve elektrot çapının izlediği görülmüştür. Bu çalışmada bir çıkış parametre üzerine etkisi incelendiğinden dolayı çok amaçlı optimizasyon hakkında yeterli bilgi vermemektedir. Emre (2019) mukavemet ve kaynak çekirdek geometrisinin optimizasyonu için kaynak akımı ve zamanı parametreleri dikkate alınarak TWIP çelik saclar nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiştir. Bu amaçla çıkış parametresi olarak çekme makaslama dayanımı ve kaynak çekirdek çapının değerini ölçerek Taguchi optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Çekme makaslama dayanımı, artan kaynak çekirdek çapının kritik bir seviyeye kadar artmasıyla arttığı sonucuna varılmıştır. Çekme makaslama dayanımının değişiminde en önemli kaynak parametresi kaynak akımı ve kaynak çekirdek çapı için en önemli kaynak parametresi ise kaynak zamanı olarak bulunmuştur. Taguchi optimizasyon verileriyle deneysel çalışma verilerinin örtüştüğü görülmüştür. Bina ve arkadaşları (2014), kaynak akımının AISI 304 ve AISI 430 paslanmaz çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi ile kaynak kabiliyetine etkisini araştırmışlardır. 3 farklı kaynak akımı seviyesi kullanılarak numunelerin mekanik özellikleri ve mikro yapısı incelenmiştir. Akım arttıkça her iki tarafta da çekirdek çapında artış olduğu tespit edilmiştir. Kaynaklı numunelerin çekme mukavemeti, artan ısı girdisi nedeniyle önce kaynak akımıyla artmış, daha sonra yüksek akımda kaynakta iç kusurların oluşması nedeniyle azaldığı gözlemlenmiştir. Malzeme olarak iki farklı çeliğin kullanılmış olması ve yalnızca kaynak akımı parametresinin incelenmesi sebebiyle, 304 paslanmaz malzemeler üzerindeki parametrelerin etkisi hakkında tam bilgi vermemektedir. Bina ve arkadaşları (2015), kaynak süresinin, AISI 304 ile AISI 430 paslanmaz çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi kullanılarak kaynak kabiliyetine etkisi araştırmışlardır. 4 farklı kaynak süresi için malzemelerin, çekme mukavemeti, makro yapısı, mikro yapısı, mikro sertliğini incelemişlerdir. Kaynak süresi arttıkça her iki tarafta çekirdek çapı artmıştır. Deney tasarımındaki maksimum kaynak süresinde birleştirilen numunede kaynak çekirdek merkezinde boşluk gözlemlenmişler ve elektrik direnç nokta kaynaklarındaki bu iç kusurların, yüksek kaynak süresinden dolayı oluştuğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmada iki farklı çeliğin malzeme olarak tercih edilmesi ve tek parametre incelenmesi nedeniyle, parametrelerin 304 paslanmaz çelik kaynak kabiliyeti üzerindeki etkisini görebilmek için diğer parametrelerinde sağlandığı bir çalışma gereklidir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Malzeme (Material)

Deney numune malzemesi olarak 1,2 mm kalınlığında AISI 304 paslanmaz çeliği kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi Spectrotest TXC03 spektrometre cihazı ile elde edilip, Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde Kullanılan AISI 304 Paslanmaz Çeliğin Kimyasal Kompozisyonu (% ağırlık) (Chemical Composition of AISI 304 Stainless Steel Used in Tests (% by weight))

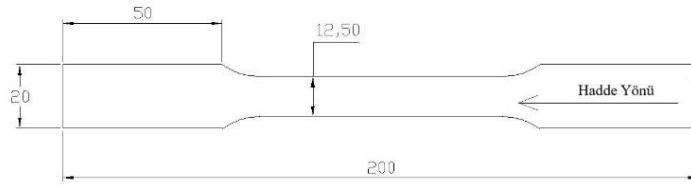
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Nb	Fe
0,014	0,280	1,830	0,006	0,009	17,490	7,370	0,520	0,370	≈ 0	71,530

Üretici tarafından sağlanan mekanik özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. AISI 304 Çeliği Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of AISI 304 Steel)

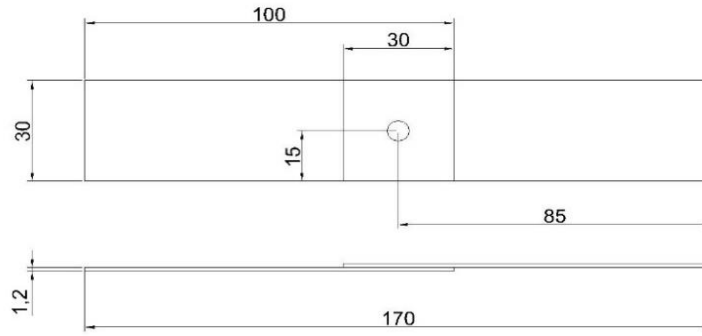
AISI 304 (EN 1.4301)	Kopma Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Sertlik Vickers (HV)
X5CrNi18-10	515 - 720	210 (en düşük)	199

Esas malzemenin mekanik özelliklerini belirleyebilmek için, ASTM E8/E8M standardına uygun olarak 5 adet çekme deneyi numunesi CNC lazer tezgahında kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Esas Malzeme İçin Çekme Numunesi CAD Görüntüsü (CAD Image of Tensile Specimen for Base Material) (ASTM E8/E8M-16a, 2016)

Kaynaklı numunelerin çekme testlerini gerçekleştirmek amacıyla, 100x30x1,2 mm boyutlarında plakalar yine CNC lazer kesim yöntemiyle kesilmiştir. Şekil 3'te görüldüğü gibi 30 mm üst üste binecek şekilde 2 plaka elektrik direnç nokta kaynağıyla birleştirilmiştir.



Şekil 3. Kaynaklı Çekme Deneyi Numunelerinin Boyutları ve Kaynak Pozisyonu (Dimensions and Welding Position of Welded Tension Test Samples)

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilen test numuneleri de hadde yönüne paralel doğrultuda hazırlanmıştır. Şekil 4'te kaynak edilmiş parça üzerinde hadde yönü gösterilmiştir.



Şekil 4. Kaynak Edilmiş Çekme Deneyi Numunesi (Welded Tension Test Sample)

3.2. Yöntem (Method)

Sac numuneler elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak akım şiddeti, kaynak zamanı ve elektrot kuvveti parametreleri gözetilerek birleştirilmiştir. Kaynak parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi Yöntemi ile deney tasarımının yapılması hedeflenmiştir. Yöntemi kullanabilmek için kaynak parametrelerinin alt ve üst sınırlarını belirlemek adına ön denemeler gerçekleştirilmiştir. Bunun için ısı girdisini maksimize edecek akım ve zaman değerleri belirlenmesi gerekmiştir. Isı girdisi maksimum değere çıkarıldığında kaynak kesitindeki çökme miktarı artar ve görsel olarak kabul edilemez bir kaynak ortaya çıkabilmektedir. Otomotiv sektöründeki bu çökme miktarı maksimum değeri genellikle %40 olarak alınmaktadır. Bu çalışmada da parametre değerleri belirlenirken, çökme miktarını %40'a olması dikkate alınmıştır. Ayrıca yüksek düzeyde sıçratma olmaması da önemli bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Bulunan bu değerler akım ve zaman için üst sınır parametreleri olarak alınmıştır. Kuvvet için ise alt sınır parametresi olarak belirlenmiştir. Isı girdisini azaltırsak, kaynakta oluşması gereken birleşme bölgesi bir yerden sonra elde edilememektedir. Burada kaynaklı numunede soyma testi sonucu kaynak bölgesindeki çekirdek oluşumu tespit edilmiştir. Çekirdek oluşumunun tespit edilebildiği ilk numunedeki değerler; akım ve kaynak zamanı için alt sınır parametreleri, kuvvet içinse üst sınır parametresi olarak alınmıştır. Bu şekilde bu üç parametrenin alt ve üst sınırları deneysel olarak belirlenmiştir. Ön denemeler sonucu kaynak parametrelerinin aralıklarını belirleme çalışmasında kaynak üst ve alt sınırları; kaynak akımı için 6-13 kA, kaynak zamanı için 10-20 çevrim, elektrot kuvveti için 1,5-2,5 bar arasında değerler belirlendikten sonra Taguchi L9 ortogonal dizini ile deney seti oluşturulmuştur. 9 farklı tip numuneden oluşan Taguchi L9 ortogonal dizini ile oluşturulan deney seti Tablo 3'te gösterilmiştir. Her numune tipine ait parametrelere göre üç adet paslanmaz çelik sac elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiştir.

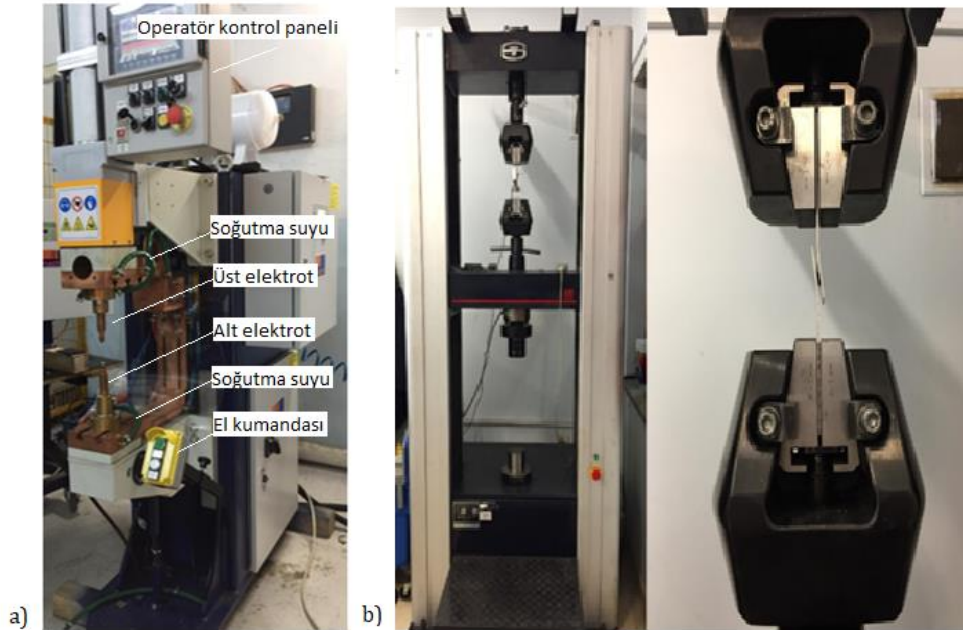
Tablo 3. Taguchi L9 Ortogonal Diziniyle Oluşturulan Deney Seti Kaynak Parametreleri (Welding Parameters of the Experiment Set Created with Taguchi L9 Orthogonal Index)

Numune Adı	Deney Numarası	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (Çevrim) 1 çevrim = 0,02 s	Elektrot Kuvveti (bar)
111	1	6	10	2,5
122	2	6	15	2,0
133	3	6	20	1,5
212	4	9,5	10	2,0
223	5	9,5	15	1,5
231	6	9,5	20	2,5
313	7	13	10	1,5
321	8	13	15	2,5
332	9	13	20	2,0

Deney numunelerinin kaynak ile birleştirilmesinde Mactera marka AC projeksiyon elektrik direnç nokta kaynak makinesi kullanılmıştır. Tüm numunelerde Ø6 mm çaplı G tipi bakır elektrik direnç nokta kaynağı kepleri kullanılmıştır. Bütün kaynaklarda sıkma zamanı ve kaynak sonu tutma zamanı 50 ms olarak uygulanmıştır. Kaynak makinesine ait özellikler Tablo 4'te verilmiştir. Şekil 5.a'da ise kaynak makinesine ait görseller yer almaktadır.

Tablo 4. Kaynak Makinesi Bilgileri (Welding Machine Information)

Anma Gücü (%50)	250 kVA
Çalışma Basıncı	6 bar
Besleme Gerilimi	380 V
Kumanda Gerilimi	24 V
Soğutma Suyu Debisi	20 lt/dak
Kuvvet Sağlama Ekipmanı	Ø160 mm pnömatik silindir

**Şekil 5.** Deneylerde Kullanılan a) Mactera Marka Kaynak Makinesi b) Çekme Test Cihazı (Equipments Used a) Mactera Brand Welding Machine b) Tensile Testing Machine)

Numunelerin çekme testleri Şekil 5.b'deki WDW 100 elektronik universal test cihazıyla yapılmıştır. Çekme testi 250 kN kapasiteli çekme test cihazında 5 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numuneler ve ASTM çekme numunelerine ait kuvvet-uzama değerleri kaydedilmiştir.

Kaynaklı numunelerin çekme testinden elde edilen sonuçlar ile Taguchi yöntemine dayalı çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir. "En büyük en iyi" kriteriyle hesaplanan S/N oranları, parametre seviyelerinin konum ve

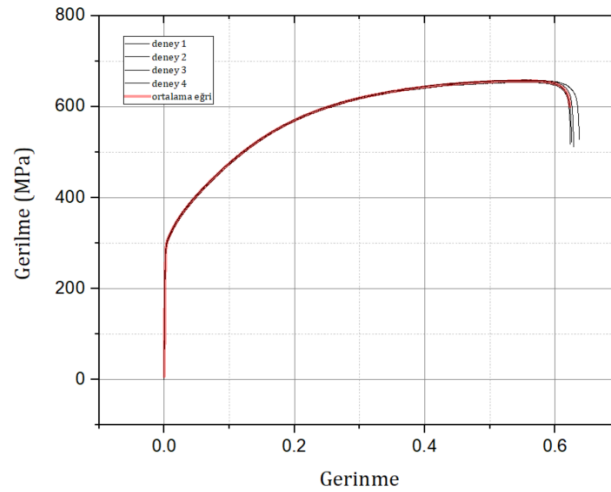
dağılıma etkilerinin birbirine karışmasını önlemek amacıyla Eşitlik (5) kullanılarak normalleştirilmiştir (Tutar vd., 2017):

$$\text{Normalleştirilmiş } S/N = \frac{S/N_p - S/N_{min}}{S/N_{mak} - S/N_{min}} \quad (5)$$

Burada S/N_p deney setinde her parametre için hesaplanan S/N oranıdır. Çekme kuvveti ve uzama miktarının normalize edilmiş S/N değerlerinin ortalaması alınarak Taguchi optimizasyonu uygulanmıştır. Ayrıca çekme kuvveti ve uzama değerleri için normalize edilmiş S/N oranlarının ortalaması, etki değerleri %50 çekme kuvveti ve %50 uzama miktarı olacak şekilde hesaplanmıştır. Daha sonra tekil parametrelerin etkisi tespit edebilmek için ANOVA tablosu oluşturulmuştur.

4. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

ASTM E8/E8M standardına göre hadde yönünde üretilen 5 numuneye ait mühendislik gerilme-gerinme eğrisi ve ortalama eğri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Hadde Yönü İçin Mühendislik Gerilme-Gerinme Eğrileri ve Ortalama Eğri (Engineering Stress-Strain Curves and Mean Curve for the Rolling Direction)

Tablo 5. Kaynaklı Numunelerin Isı Girdisi İndeksi (İGİ) Değerleri, Çekme Kuvvetleri, Uzama Miktarı, Hesaplanan S/N Oranları (Heat Input Index Values, Tensile Forces, Elongation, Calculated S/N Ratios of Welded Samples)

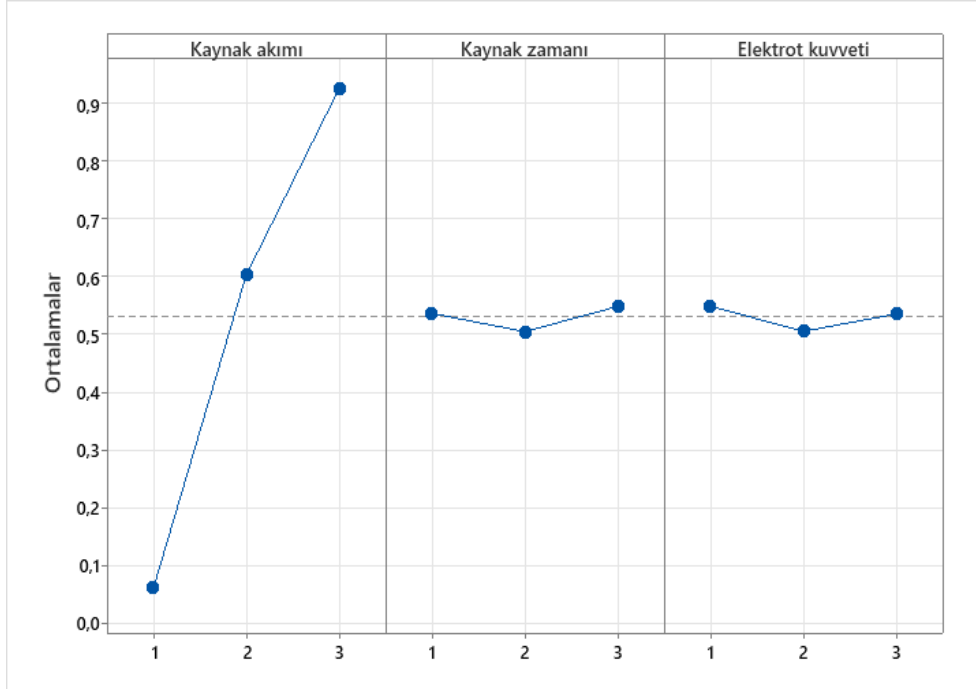
Numune Adı	İGİ	Çekme Kuvveti (kN)	Uzama Miktarı (mm)	Çekme Kuvveti ve Uzama Değerleri için normalize edilmiş S/N Oranlarının Ortalaması
111	144,00	10,09	4,95	0,165
122	270,00	9,18	4,01	0,004
133	480,00	9,13	4,14	0,012
212	451,25	12,42	7,80	0,513
223	902,50	13,30	9,99	0,664
231	722,00	13,19	9,45	0,636
313	1126,66	15,49	14,49	0,933
321	1014,00	14,82	12,79	0,848
332	1690,00	16,11	15,85	1,000

Kaynaklı numunelerin hasar olduğu andaki çekme kuvveti ve uzama değerleri normalleştirilmiş S/N oranlarının ortalaması ile birlikte Tablo 5'te verilmiştir. Ayrıca ısı girdisi değeri (2) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Kaynak parametrelerinin S/N oranlarına etkileri Tablo 6'da verilmiştir. Bu tablo her parametrenin etki seviyesini göstermektedir. Kaynak parametrelerinin önem sırası, kaynak akımı, elektrot kuvveti ve kaynak zamanı şeklindedir. Tablo 6'daki değerler kullanılarak Şekil 7'de kaynak parametrelerinin normalleştirilmiş S/N oranlarına etkisi grafik olarak gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde kaynak zamanı ve elektrot kuvveti parametre etkilerinin benzer davranışlar gösterdiği görülmektedir. Tablo 6'da kaynak parametrelerinin optimum seviyelerine bakıldığında kaynak akımı 13 kA, kaynak zamanı 20 çevrim (100 ms) ve elektrot kuvveti için 1,5 bar (184 daN) olarak değerler bulunmuştur. Taguchi hesaplamalarından elde edilen bu optimum seviyeler deney setinde

bulunmamaktadır. Fakat Tablo 6'daki değerler incelendiğinde kaynak akımı en baskın parametre olduğu ve diğer parametre sonuçları aralarında oldukça düşük bir fark oluşturduğundan dolayı 9 numaralı deneye denk olduğu görülmektedir.

Tablo 6. Kaynak Parametrelerinin Normalize S/N Oranlarına Etki Seviyeleri (Effect Levels of Welding Parameters on Normalized S/N Ratios)

Seviye	Kaynak akımı	Kaynak zamanı	Elektrot kuvveti
1	0,060	0,537	0,550*
2	0,604	0,505	0,506
3	0,927*	0,549*	0,536
Maks.-Min.	0,867	0,044	0,044
Sıralama	1	3	2



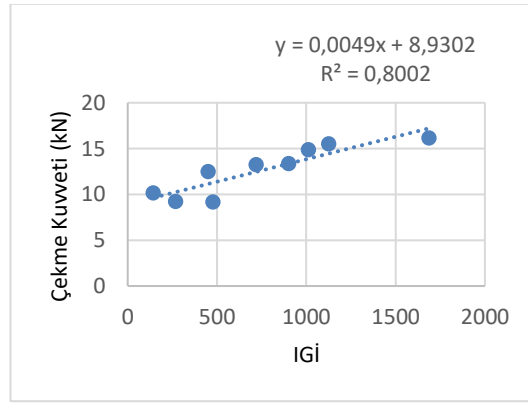
Şekil 7. Kaynak Parametrelerinin Normalize S/N Oranlarına Etkileri (Effects of Welding Parameters on Normalized S/N Ratios)

Çekme kuvveti ve uzama üzerindeki tekil kaynak parametrelerinin etkisini saptamak amacıyla ANOVA tablosu oluşturulmuştur. Tablo 7'de verilen sonuçlar incelendiğinde parametrelerin tekil analizinde etkili parametrenin %96,58 katkı payı ile kaynak akımı olduğu görülmektedir. Kumar ve Eapen (2021) çalışmasında da AISI 304 paslanmaz çeliğinde en etkili parametre olarak kaynak akımını tespit edilmiş olup, bu sonuç ile uyumluluk göstermektedir. Sonuçlara göre kaynak zamanı ve elektrot kuvveti parametreleri kaynak akımı parametresine göre etkileri çok düşük çıkmıştır. Bu durumun Taguchi sonuçlarıyla tutarlı olduğu görülmektedir.

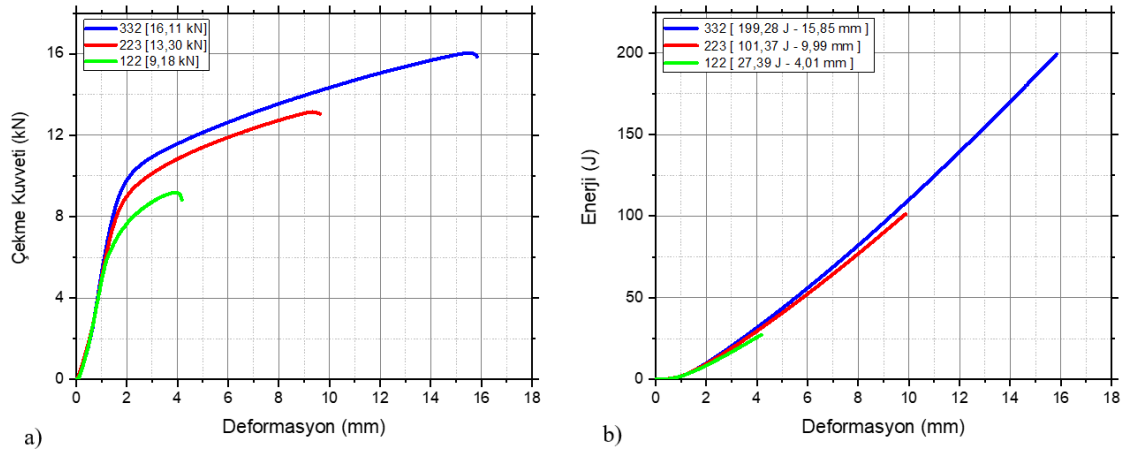
Tablo 7. Normalize edilmiş S/N oranları için oluşturulan ANOVA tablosu (ANOVA table for normalized S/N ratios)

	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% Katkı
Kaynak akımı	2	1,1512	1,1512	0,57558	33,18	96,58
Kaynak zamanı	2	0,0030	0,0030	0,00153	0,09	0,26
Elektrot kuvveti	2	0,0030	0,0030	0,00150	0,09	0,25
Kalan hata	2	0,0347	0,0347	0,01734		2,91
Toplam	8	1,1919				100,00

Birleştirmede akım şiddeti yükseldikçe ısı girdisinin artması sonucu kaynak çekirdek boyutunun büyüdüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca bu durum Sao ve Banchor (2016) tarafından yapılan çalışmada da görülmüştür. Kaynak akım şiddetine bağlı olarak artan çekme kuvveti kaynak çekirdek boyutuyla ilişkilendirilebilir. Isı girdisine bağlı olarak çekme kuvveti değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Isı girdisi arttıkça çekme kuvveti genellikle artmaktadır. Isı girdisi ve çekme kuvveti arasındaki lineer korelasyon katsayısı (R^2) 0,7'nin üzerindedir. Bu durum ısı girdisi artışıyla çekme kuvveti artışının birbiriyle bağlantılı olduğunu göstermektedir. Benzer sonuç Yüce (2021) tarafından da elde edilmiştir.



Şekil 8. Çekme Kuvvetinin Isı Girdisiyle Değişimi (Variation of Tensile Force With Heat Input)



Şekil 9. Farklı kaynak parametrelerine sahip birleştirilmiş numunelerin a) Kuvvet-Uzama Eğrileri b) Enerji-Uzama Eğrileri (Tablo 3'de 2, 5, 9 nolu numuneler) (a) Tensile Force-Elongation b) Energy- Elongation Curves of Welded Specimens with Different Welding Parameters (Samples 2, 5, 9 in Table 3))

Deney setinde sinyal gürültü oranını maksimum, minimum ve ortalama bir değer veren farklı kaynak parametrelerine sahip numunelerin Şekil 9.a'da paylaşılan çekme kuvveti-deformasyon eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen enerji sönümlenme kapasitesini gösteren grafikler Şekil 9.b'de verilmiştir. Ayrıca Şekil 9.a ve 9.b'deki eğrilere sahip numunelerin çekme deneyi sonrası görüntüsü Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Farklı kaynak parametrelerine sahip birleştirilmiş numunelerin çekme testi sonrası görüntüsü; a) 2 numaralı deney (122) b) 5 numaralı deney (223) c) 9 numaralı deney (332) (After tensile test image of the combined samples with different welding parameters; a) Experiment 2 (122) b) Experiment 5 (223) c) Experiment 9 (332))

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, kaynak numuneleri ve gerçekleştirilen testler incelendiğinde genel olarak elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilen numunelerde akım şiddeti arttıkça ısı girdisi indeksi artmaktadır. Bunun kaynak çekirdek boyutunu arttırdığı buna bağlı olarak çekme kuvvetinin artışı ile kaynak dayanımını yükselttiği saptanmıştır.
- Maksimum kaynak akım şiddeti değeri aşıldığı takdirde kaynak çekirdeğinde erime dolayısıyla çökme ve sıçrama hatasının meydana gelmesi söz konusu olabilir.
- Kaynak akım şiddeti parametresi kaynak zamanı ve elektrot kuvveti parametrelerine göre kaynak dayanımını daha fazla etkilemiştir. Bağlantıların çekme kuvveti akım şiddeti arttıkça artmaktadır. En yüksek çekme kuvveti 16,11 kN olarak ve 13 kA akım değerinde elde edilmiştir. Fakat elektrik direnç nokta kaynağı ile 1,2 mm AISI 304 paslanmaz çelik sac birleştirme işlemi için daha yüksek akım şiddeti değeri seçimi çökme ve sıçratma hatası nedeniyle önerilmemektedir.
- Taguchi analizine göre kaynak parametrelerinin önem sırası: kaynak akımı > elektrot kuvveti > kaynak zamanı olarak tespit edilmiştir. Etkisi kaynak akım parametresine göre oldukça düşük olan kaynak zamanı ve elektrot kuvveti parametrelerinin etkileri birbirine oldukça yakın sonuç vermiştir.
- Yapılan bu çalışmada paslanmaz çeliklerin daha çok otomotiv sektöründe yapısal olarak kullanımının artmasına yönelik olduğu düşünüldüğünde kaynak sonrası bölgede %40 seviyelerinde belirtilen çökme miktarı görsel olarak yapısal parçalar üzerinde estetik açıdan rahatsız etmeyecek ölçüde olacağı yönündeki kararıyla parametrelerin oluşturulmuş olup bu durum göz önüne alınarak parametrelerin kullanımı önerilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından FHIZ-2021-372 nolu proje kapsamında ve Mactera Birleştirme Teknolojileri tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar (References)

- Altun, Y., & Özcan, M. (2015). Ütü Masası Üretiminde Kullanılan Elektrik Direnç Nokta Kaynak Makinesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(2), 85-90.
- ASTM International. (2016). ASTM E8/E8M-16a . *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-16A
- Bina, M. H., Jamali, M., Shamanian, M., & Sabet, H. (2014). Investigation on the resistance spot-welded austenitic/ferritic stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1371-1379. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6220-x>
- Bina, M. H., Jamali, M., Shamanian, M., & Sabet, H. (2015). Effect of welding time in the resistance spot welded dissimilar stainless steels. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68(2), 247-255. <https://doi.org/10.1007/s12666-014-0452-1>
- Çavdar, K., Yaşar, H., & Şahin, U. O. (2017). AISI 304 paslanmaz çeliğin direnç nokta kaynağı yöntemi ile izsiz kaynak parametrelerinin araştırılması. *X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*. Ankara: TMMOB.
- Çetin, M. H., Korkmaz, Ş., Elgaddafi, K. A., & Çuğ, H. (2018). Östenitik paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çeliğin kaynak edilebilirliğinin araştırılması ve kaynak parametrelerinin optimizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1068-1081.
- Emre, H. E. (2019). Taguchi Yöntemi ile Nokta Direnç Kaynaklı TWIP Çeliklerin Dayanım Optimizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 778-787.
- İç, Y. T., & Yıldırım, S. (2012). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Birlikte Taguchi Yöntemini Kullanarak Bir Ürünün Tasarımının Geliştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2), 447-458.
- Karcı, F. (2008). Soğuk Deformasyon ve Kaynak Isı Girdisinin AISI 304 Paslanmaz Çelik Direnç Kaynak Kalitesine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*. Türkiye: Karabük Üniversitesi.
- Kaya, N. (2010). AISI 304 Paslanmaz Çelik ile Genel Yapı Çeliğinin Sürtünme Kaynak Kabiliyetinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. Türkiye: Gazi Üniversitesi.
- Kayabaşı, O., & Çakmak, H. (2019). Yaklaşık Çözüm Tekniklerini Kullanarak Plastik Enjeksiyon İşlemlerinin Tasarım Metodolojisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(3), 627 - 638.
- Kumar, J. P., & Eapen, J. V. (2021). Investigation on Joining AISI 304 Stainless Steel by Resistance Spot Welding. *International Conference on Combinatorics and Optimization*. Chennai: European Alliance for Innovation. <https://doi.org/10.4108/eai.7-12-2021.2314648>
- Kumar, S., Satsangi, P. S., & Prajapati, D. R. (2011). Optimization of green sand casting process parameters of a foundry by using Taguchi's method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55, 23-34. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-3029-0>
- O'Brien, A., & American Welding Society. (2015). *Welding handbook, Materials and applications* (Ninth edition ed., Vol. 5). American Welding Society.
- Phillips, D. H. (2016). *Welding Engineering: An Introduction*. Chichester: John Wiley & Sons.

- Placidi, F., & Frascchetti, S. (2005). *Potential Application of Stainless Steel for Vehicle Crashworthiness Structures*. Retrieved Mart 20, 2022, from Phase Transformations & Complex Properties Research Group: www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2005/LINK/142.pdf
- Pouranvari, M. (2011). Effect of Resistance Spot Welding Parameters on the HAZ Softening of DP980 Ferrite-Martensite Dual Phase Steel Welds. *World Applied Sciences Journal*, 15(10), 1454-1458.
- Sao, M., & Banchor, R. (2016). Optimization of Resistance Spot Weld Parameters using Grey Relational Analysis. *International Journal for Scientific Research & Development*, 4(10), 372-378.
- Sinnes, K., & Welding Handbook Committee. (2018). *Welding Handbook, Welding and cutting science and technology* (Tenth Edition ed., Vol. 1). Miami: American Welding Society.
- Turgut, E., & Dikici, A. (2011). Eş Eksenli Bir Isı Değiştiricisinin Tasarım Parametrelerinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, (pp. 278-281). Elazığ.
- Tutar, M., Aydin, H., & Bayram, A. (2017). Multi objective Taguchi optimization approach for resistance spot welding of cold rolled TWIP steel sheets. *The 6th International Conference on Manufacturing Engineering and Process*. 885, pp. 53-57. Lisbon: IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series.
- Tutar, M., Aydin, H., Yuce, C., Yavuz, N., & Bayram, A. (2014). The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array. *Materials and Design*, 789-797.
- Yuce, C. (2021). Multi-objective optimisation for indentation rate, nugget diameter and tensile load in resistance spot welding using Taguchi-based grey relational analysis. *International Journal of Materials and Product Technology*, 63(4), 321-338.