



Investigation of the effects of welding parameters on mechanical properties and microstructure of triple joined FEP05/DP600/FEP05 steel sheets joined by electrical resistance spot welding

Levent Selova¹, Oğuz Tunçel², Oktay Çavuşoğlu^{3,4*}, Çiğdem Dindar^{3,4}, Hakan Aydın³

¹TOGG, Turkey's Automobile Joint Venture Group Inc., 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Siirt University, Siirt, Türkiye

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bursa Uludağ University, 16059, Bursa, Türkiye

⁴TOFAŞ, Turkish Automobile Factory, R&D Center, Bursa, Türkiye

Highlights:

- Mechanical performance of welded triple joint
- Multi-layer welding
- Effects of resistance spot welding parameters

Keywords:

- Electrical resistance spot welding
- Triple welding
- Effect of welding parameters
- Mechanical properties

Article Info:

Research Article

Received: 13.12.2022

Accepted: 19.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1217239

Correspondence:

Author: Oktay Çavuşoğlu

e-mail:

oktay.cavusoglu@hotmail.com

phone: +90 224 295 5264

Graphical/Tabular Abstract

Nowadays, resistance spot welding of two or triple joints and of similar or dissimilar sheet metals is widely used in the automotive industry. In the a-, b-, and c-pillars of car bodies, dual-phase (DP) 600 steels and FEP05 steels are commonly welded together. This study investigated the impact of resistance spot welding process parameters such as welding current, welding time, and electrode force on the tensile shear load, elongation, nugget diameter, and indentation depth of triple welded sheet joints (FEP05 + DP600 + FEP05). To determine the mechanical properties of the welded joint, tensile tests and micro-hardness measurements were performed. Microstructural characterization was also used to analyze the weld quality. Additionally, it was demonstrated that welding time, welding current, and electrode force are important factors in triple welded joints. As a result, it has been seen that FEP05 + DP600 + FEP05 sheets can be successfully combined with triple electrical resistance spot welding by choosing the welding parameters appropriately. A shows the relationship of the welding current with the indentation depth and the nugget diameter.

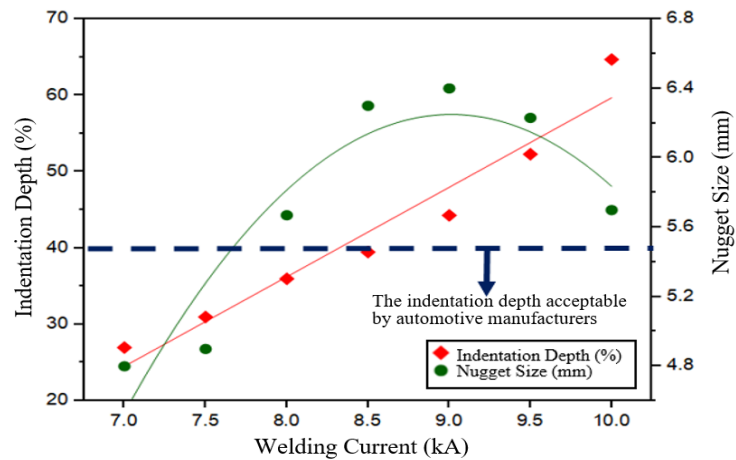


Figure A. Variation of indentation depth and nugget diameter of welded samples with welding current

Purpose: The effects of welding time, electrode force and welding current on the mechanical properties, nugget diameter and indentation depth of triple spot joints were investigated.

Theory and Methods: The FEP05 and DP600 sheets are triple joined by electric resistance spot welding. In the triple welding process, the DP600 steel sheet is placed in the center and the FEP05 steel sheet is placed on the edges. To determine the mechanical properties, tensile test, hardness test were applied and micro-macro structure images were analyzed.

Results: The shear load in load has increased according to the welding current. The welding time had no apparent effect on the tensile shear load, and a negligible decrease was noted as welding time increased. The effect of the increase in electrode force on the tensile shear load was negative.

Conclusion: Resistance spot welding parameters have significant effects on mechanical properties. Successful triple welding processes can be realized by optimizing the welding parameters.



Elektrik direnç punta kaynağı ile üçlü birleştirilen FEP05/DP600/FEP05 çelik saclarda kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere ve mikroyapı üzerindeki etkilerin araştırılması

Levent Selova¹, Oğuz Tunçel², Oktay Çavuşoğlu^{3,4*}, Çiğdem Dindar^{3,4}, Hakan Aydın³

¹TOGG, Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye

²Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye

³Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye

⁴TOFAŞ, Türk Otomobil Fabrikası, Ar-Ge Merkezi, Bursa, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Kaynakla üçlü birleştirilmiş birleşimlerin mekanik performansı
- Çok katmanlı kaynak işlemi
- Elektrik direnç punta kaynak parametrelerinin etkileri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 13.12.2022

Kabul: 19.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1217239

Anahtar Kelimeler:

Elektrik direnç nokta kaynağı,
üçlü kaynak,
kaynak parametrelerinin
etkileri, mekanik özellikler

Ö Z

Günümüz otomotiv endüstrisinde, farklı malzemelerin elektrik direnç punta kaynağı ile ikili ve üçlü birleştirmeleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Araba gövdelerinin a-, b- ve c sütunlarında çift fazlı (DP) 600 çelikleri ve FEP05 çelikleri sıklıkla birbirine kaynaklanır. Bu çalışmada kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot kuvveti gibi elektrik direnç punta kaynağı proses parametrelerinin yük taşıma kapasitesi, uzama, çekirdek çapı ve üçlü kaynaklı sac bağlantılarının (FEP05 + DP600 + FEP05) çökme miktarı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testleri ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Kaynak kalitesini analiz etmek için mikroyapısal karakterizasyon kullanılmıştır. Ayrıca üçlü kaynaklı birleştirmelerde kaynak zamanının, kaynak akımının ve elektrot kuvvetinin önemli faktörler olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak, kaynak parametreleri uygun seçilerek FEP05 + DP600 + FEP05 levhalarının elektrik direnç punta kaynağı ile üçlü olarak başarılı şekilde birleştirilebileceği görülmüştür.

Investigation of the effects of welding parameters on mechanical properties and microstructure of triple joined FEP05/DP600/FEP05 steel sheets joined by electrical resistance spot welding

H I G H L I G H T S

- Mechanical performance of welded triple joint
- Multi-layer welding process
- Effects of resistance spot welding parameters

Article Info

Research Article

Received: 13.12.2022

Accepted: 19.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1217239

Keywords:

Electrical resistance spot
welding, triple welding,
effects of welding parameters,
mechanical properties

ABSTRACT

Nowadays, resistance spot welding of two or triple joints and of similar or dissimilar sheet metals is widely used in the automotive industry. In the a-, b-, and c-pillars of car bodies, dual-phase (DP) 600 steels and FEP05 steels are commonly welded together. This study investigated the impact of resistance spot welding process parameters such as welding current, welding time, and electrode force on the tensile shear load, elongation, nugget diameter, and indentation depth of triple welded sheet joints (FEP05 + DP600 + FEP05). To determine the mechanical properties of the welded joint, tensile tests and microhardness measurements were performed. Microstructural characterization was also used to analyze the weld quality. Additionally, it was demonstrated that welding time, welding current, and electrode force are important factors in triple welded joints. As a result, it has been seen that FEP05 + DP600 + FEP05 sheets can be successfully combined with triple electrical resistance spot welding by choosing the welding parameters appropriately.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : leventselova@hotmail.com, oguz.tuncel@siirt.edu.tr,
*oktay.cavusoglu@hotmail.com, cigdemdindar@gmail.com, hakanay@uludag.edu.tr / Tel: +90 224 295 5264

1. Giriş (Introduction)

Elektrik direnç punta kaynağı (RSW) otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Elektrik direnç punta kaynağı, yüksek kalitesi ve düşük maliyeti nedeniyle tercih edilmektedir [1]. Bir araç gövdesinde tipik olarak yaklaşık 4000 tane elektrik direnç punta kaynak bağlantısı bulunur. [2, 3]. Genel olarak, elektrik direnç punta kaynağı benzer türdeki malzemeleri birleştirmek için kullanılır. Ancak bu çalışma farklı kalınlıklarda benzer olmayan tipteki çeliklerin elektrik direnç punta kaynağı kullanılarak birleştirilmesi ile, otomotiv endüstrisinde bu çeliklerin kaynak işlemine katkı sağlayacaktır. Ayrıca farklı malzemelerin verimli bir şekilde birleştirilmesine de yardımcı olacaktır. Özellikle çift fazlı (DP) çelikler, üstün şekillendirilebilirlik, süneklik ve yüksek mukavemet karakteristiklerinden dolayı özellikle tercih edilmektedir. Çift fazlı çelikler ferrit matris içine dağılmış martenzit fazından oluşmaktadır [4–7]. Benzer ve farklı sacların birleştirilmesi günümüzde otomotiv endüstrisinde sıkça karşılaşılan bir durumdur. Dolayısıyla otomotiv endüstrisinde kullanılan yüksek dayanımlı çeliklerin birleştirilmesi önemli bir araştırma konusudur [8–11]. Araştırmacılar kaynak kalitesine giderek daha fazla odaklanmaktadır [12–15]. Kaynak akımı, kaynak zamanı, levhalara uygulanan elektrot baskı kuvveti, malzeme kalınlığı ve elektrot çapı gibi çeşitli faktörler elektrik direnç punta kaynağı kalitesini etkilemektedir [16–19]. Literatürde elektrik direnç punta kaynağında kaynak parametrelerinin etkisine ilişkin çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Wei vd. [20] benzer kalınlıklardaki galvanizli DP780 çelik saclarla, farklı kaynak parametreleri altında farklı katman konfigürasyonlarındaki (ikili, üçlü ve dörtlü) direnç punta kaynaklı sacların kaynak çekirdek boyutunu ve yük taşıma kapasitesini incelemişlerdir. Uygun bağlantı konfigürasyonlarına sahip çok katmanlı punta kaynaklarının, iki katmanlı punta kaynaklarına göre daha iyi kaynak kalitesine sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Wei vd. [21] yaptıkları bir başka çalışmada, üç katmanlı gelişmiş yüksek dayanımlı benzer ve farklı çeliklerin direnç punta kaynaklarının kaynaklanabilirliğini ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapmış oldukları bu çalışmada kaynak akımının, farklı elektrik direnç punta kaynağı konfigürasyonlarında birleştirilmiş 1,36 mm kalınlığında soğuk haddelenmiş galvanizli DP1000 çeliği, 1,56 mm kalınlığında soğuk haddelenmiş kaplamasız TRIP980 çeliği ve 1,8 mm kalınlığında soğuk haddelenmiş soyulmuş TWIP980 çelik sacların mekanik davranışı üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Çalışmalarında, malzeme kombinasyonlarının kaynak kalitesini etkilediği sonucuna ulaşmışlardır. Li vd. [22] bu araştırma çalışmasına benzer bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında 1,2 mm kalınlığında DP600 yüksek dayanımlı çelik ve 1,5 mm kalınlığında AA5052 alüminyum alaşım sac elektrik direnç punta kaynağı ile birleştirilmiştir. Mikroskop görüntüleri alınarak kaynak zamanına bağlı olarak yük taşıma kapasitesi incelenmiştir. Üçlü sac bağlantılarının yük taşıma kapasitesi kaynak zamanının 14 çevriminde maksimum değere ulaştı ve kaynaklı bağlantı DP600/AA5052 bağlantısının neredeyse iki katı kadar yüksek değerde olduğunu tespit etmişlerdir. Literatürde klasik ikili birleştirme ile birleştirilmiş elektrik direnç punta kaynak ile birleştirme sıkça karşılaşılmaya

rağmen üçlü kaynaklı birleştirme ile ilgili yeterli çalışma bulunmamaktadır. Ancak otomobil sektöründeki yapısal tasarım kısıtlamaları nedeniyle a-, b-, c kolonu gibi parçalarda ve traverslerde üçlü kaynaklı birleşimler ile karşılaşılmaktadır [23, 24]. Bununla beraber, otomotiv endüstrisinde üçlü kaynaklı birleştirme uygulamalarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır [25–27].

Elektrik direnç punta kaynağı, metal levhaları bakır elektrotlar kullanarak çok kısa süreler boyunca aşırı yüksek akımlar geçirerek kaynaklamak için kullanılan bir tekniktir. Diğer kaynak teknikleriyle karşılaştırıldığında elektrik direnç punta kaynağı ekonomiktir, otomatikleştirilmesi kolaydır, hızlıdır ve dolgu malzemesi gerektirmez. Bu mükemmel özellikleri nedeniyle elektrik direnç punta kaynağı otomobiller, kamyon kabinleri, demiryolu vagonları ve konutlar için sac metallerin birleştirilmesinde kullanılır. Punta kaynağı, yüzey durumundan ve levha ile elektrot hizalamasından etkilenir. Uygun kalitede kaynak için, bir punta kaynak işlemi parametrik değişkenlerde toleransa izin veren optimum işlem koşullarına sahip olmalıdır [28, 29].

Günümüzde, hafif araç yapılarına olan taleple birlikte, ön uzunlamasına raylar, a-, b- ve c sütunları (a-sütunları ön camı destekler, b-sütunları yolcu bölmesinin ortasındadır (ön kapıların hemen arkasında) ve c-sütunları yolcu bölmesinin arkasındadır.) ve iç kanat bölmesi gibi bazı karmaşık yapılarda üç saclı elektrik direnç punta kaynağı giderek daha fazla uygulanmaktadır. İki saclı RSW ile karşılaştırıldığında, üç sacın birleştirilmesi, eklenen ekstra arayüz ve farklı malzeme ve sac kalınlığı kombinasyonları nedeniyle daha karmaşıktır. Bu nedenle, üç saclı punta kaynak bağlantısının kaynak çekirdeği gelişimi ve mekanik davranışa etkisini anlamak önemlidir [30].

Bu çalışmada DP600 ve galvanizli düşük karbonlu FEP05 çelik saclar farklı kaynak parametrelerinde elektrik direnç punta kaynağı ile üçlü birleştirilmiştir. Kaynak zamanının, elektrot kuvvetinin ve kaynak akımının üçlü punta birleştirmelerin mekanik özellikleri, çekirdek çapı ve çökme miktarı değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi uygulanmıştır. Ayrıca ultrasonik yöntemle çekirdek çapı ve çökme miktarı ölçülmüş ve optik mikroskoplarda makro görüntüler alınmıştır. Bu makale otomotiv parçalarının üçlü elektrik direnç kaynağı birleştirilmesi suretiyle yapılan bir parametrik çalışma ile literatüre katkıda bulunmaktadır. Özellikle üçlü birleştirmelerde çökme miktarı açısından kabul edilebilir standartlara göre uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Bu çalışmada 0,7 mm kalınlığında FEP05 ve 2,0 mm kalınlığında DP600 ticari çelik saclar elektrik direnç punta kaynağı ile üçlü olarak birleştirilmiştir. FEP05 ve DP600 çelik sacların kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. FEP05 ve DP600 sacları elektrik direnç punta kaynağı ile

Tablo 1. FEP05 ve DP600'ün kimyasal bileşimi (%) (FEP05 and DP600's chemical composition (wt.%))

	C	Mn	P	S	Si	Al
FEP05	0,008	0,3	0,025	0,02	0,03	0,02
DP600	0,23	3,3	0,09	0,015	2,0	0,01

Tablo 2. FEP05 ve DP600'ün mekanik özellikleri (FEP05 and DP600's mechanical properties)

	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
FEP05	140-180	270-330	36
DP600	340-400	590	20

birleştirilmiştir. Üçlü kaynak işleminde DP600 çelik sacı üçlü kaynak işleminin merkezinde, FEP05 çelik sacı ise kenarlara yerleştirilmiştir. Kaynak konfigürasyonunun şematik bir elektrik direnç punta kaynağı diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir [31, 32].

Elektrik direnç punta kaynağı sırasında, iş parçalarından geçen kaynak akımı ısı üretir. Kaynak akımı ve kaynak süresi, Eş. 1'de gösterildiği gibi elektrik direnç kaynağındaki temel faktörlerdir [33].

$$Q(J) = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1)$$

Burada Q ısı girdisi, joule; I akım, amper; R direnç, ohm; ve t akımın süresi, çevrim veya saniyedir.

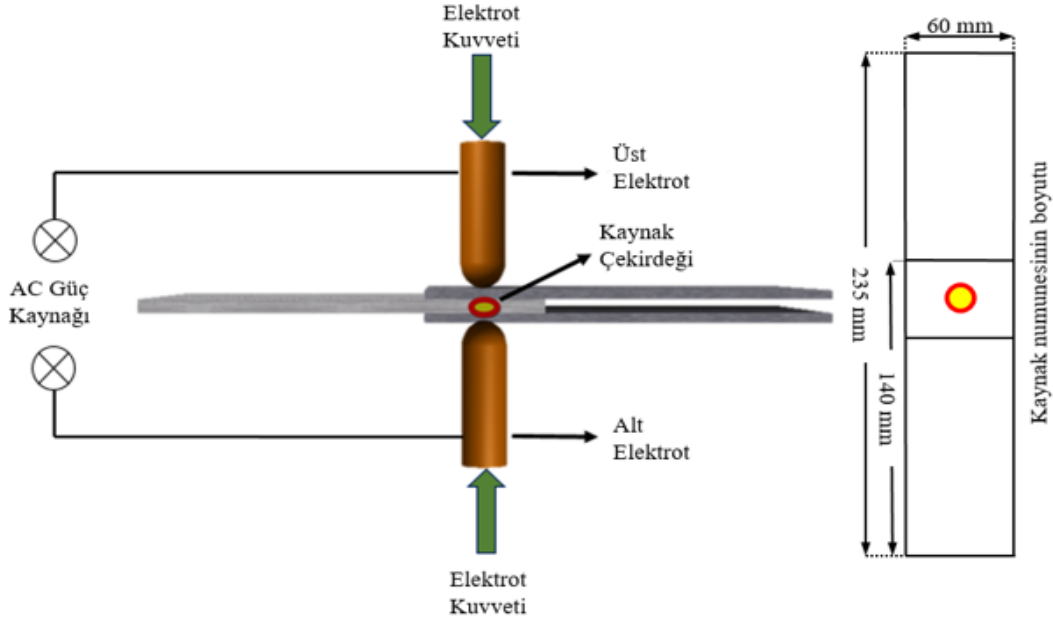
Şekil 2'de çekme testi numunesi şematik olarak gösterilmektedir. Test sırasında eğilme davranışı nedeniyle oluşabilecek herhangi bir negatifliği önlemek için, çekme testi numunelerinin kenetlenme kenarlarına ilave olarak 2 mm kalınlığında ekstra bir sac parçası bağlanmıştır [34].

Kaynak kalitesini belirlemek için çekme testleri, mikrosertlik testleri ve mikroyapı analizleri yapılmıştır. Kaynaklı numunelerin çekme testi ISO 14273 standartına göre, oda sıcaklığında 10 mm/dk sabit çapraz kafa hızında 250 kN kapasiteli bilgisayar kontrollü UTEST-7014 üniversal çekme test makinesinde gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri üç tekrar olacak şekilde uygulanmış ve sonuçların ortalamaları alınmıştır. Ayrıca, kaynak giriş parametreleri ile çekirdek çapının ve çökme miktarının nasıl değiştiğini belirlemek için bir TESSONICS RSWA ultrasonik punta kaynak kontrol makinesi kullanılmıştır.

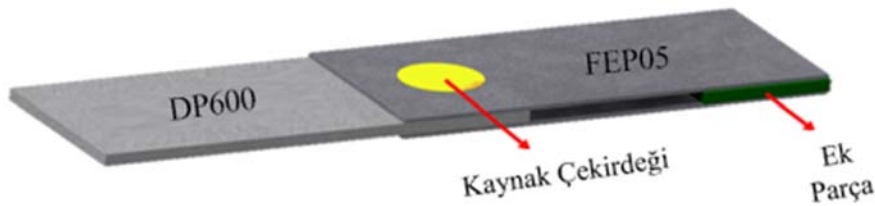
Birkaç bölgeden (temel malzeme, ergime bölgesi ve ısı tesiri altındaki bölge) sertlik ölçülerek, ısının sertlik üzerindeki etkisi de incelenmiştir. 0,25 µm'ye kadar elmas solüsyon ile metalografik aşındırma ve temizleme işlemleri yapılmıştır. %3 Nital dağlama ile polisaj kaynak bölgesi belirginleştirilmiştir. Metalografik numuneler, 200 g yük ve 10 s bekleme süresi ile bir DUROLINE-M mikrosertlik test cihazı kullanılarak Vickers mikrosertlik testleri uygulanmıştır. Numunelerin mikro ve makro yapılarının görüntüleri bir Nikon Eclipse MA100 mikroskobu kullanılarak alınmıştır. Deneyler sırasında kullanılan temel kaynak parametreleri Tablo 3'de listelenmiştir. 19 adet farklı kaynak parametresi ile birleştirilmiş numunelerin mekanik özelliklerinde ve mikroyapılarında meydana gelen değişimler incelenmiştir [35].

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Çalışmada, kullanılan FEP05 + DP600 + FEP05 sac malzemeler elektrik direnç punta kaynağı ile başarılı şekilde üçlü olarak birleştirilmiştir. Elektrik direnç punta kaynak ile üçlü birleştirilmiş bağlantıların, kaynak parametrelerinin (kaynak akımı, elektrot kuvveti ve kaynak zamanı) kaynak kalitesi üzerine etkisini belirlemek için, bağlantılara tek eksenli çekme testi uygulanmış, kopma yükleri ve uzama değerleri belirlenmiştir. Ayrıca çökme miktarı ve çekirdek çapını belirlemek için ultrasonik ölçüm gerçekleştirilmiştir. Şekil 3a'da kaynak akımına bağlı olarak yük taşıma kapasitesi ve uzama arasındaki ilişki gösterilmiştir. Kaynak akımı arttırıldığında uzama azalırken yük taşıma kapasitesi artmıştır. Şekil 3b 'de elektrot kuvvetine bağlı olarak yük taşıma kapasitesi ve uzama arasındaki ilişki gösterilmiştir. Elektrot kuvveti ile yük taşıma kapasitesi ve



Şekil 1. Üçlü kaynaklı numunelerin şematik elektrik direnç punta kaynağı diyagramı (Schematic RSW diagram of triple welded samples)



Şekil 2. Ek parçalı çekme testi numuneleri (The tensile shear test samples with additional pieces)

uzama arasında genel olarak ters orantı görülmüştür. Elektrot kuvveti arttıkça yük taşıma kapasitesi ve uzama azalmıştır. 2,3 kN elektrot kuvvetinde maksimum yük taşıma kapasitesi ve uzama sırasıyla, 8,63 kN ve 4,93 mm tespit edilmiştir. Elektrot kuvvetine bağlı olarak yük taşıma kapasiteleri ve uzama değerlerinde benzer değişim eğilimleri görülmüştür. Şekil 3c'de kaynak zamanına bağlı olarak yük taşıma kapasitesi ve uzama arasındaki ilişki gösterilmiştir. Kaynak zamanının yük taşıma kapasitesi üzerinde belirgin etki göstermemesine rağmen, kaynak zamanı arttıkça yük taşıma kapasitesinde hafif bir düşüş görülmüştür. Kaynak zamanı ile uzama arasında parabolik bir değişim görülmüştür. Kaynak zamanına bağlı olarak uzama miktarı 27 çevrime kadar düşüş göstermiş, 27 çevrimden sonrasında uzama miktarı artmıştır. En düşük uzama değeri 27 çevrimde 4,17 mm olarak ölçülmüştür. Çeliklerin elektrik direnç punta kaynağında kaynak akımı ve kaynak zamanı parametrelerinin artması ısı girdisini arttırdığından genel itibarıyla çekirdek çapında artışa neden olabilmektedir. Çekirdek çapındaki artış da kaynaklı bağlantının yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Fakat ısı girdisinin çökme miktarını arttırmak gibi de bir tarafı vardır. Bu artış da kesit incelmeleri ve çentik etkisi oluşturarak yük taşıma kapasitesine olumsuz etki de yapabilmektedir [36]. Çekme testi uygulanan kaynaklı numunelerin, FEPO5 'in ısı tesiri altındaki bölgesinde çekirdek çekme (nugget pullout) tipi kırılma meydana gelmiştir. Bu kırılma, FEPO5 üzerinde yırtılma şeklinde devam etmiştir.

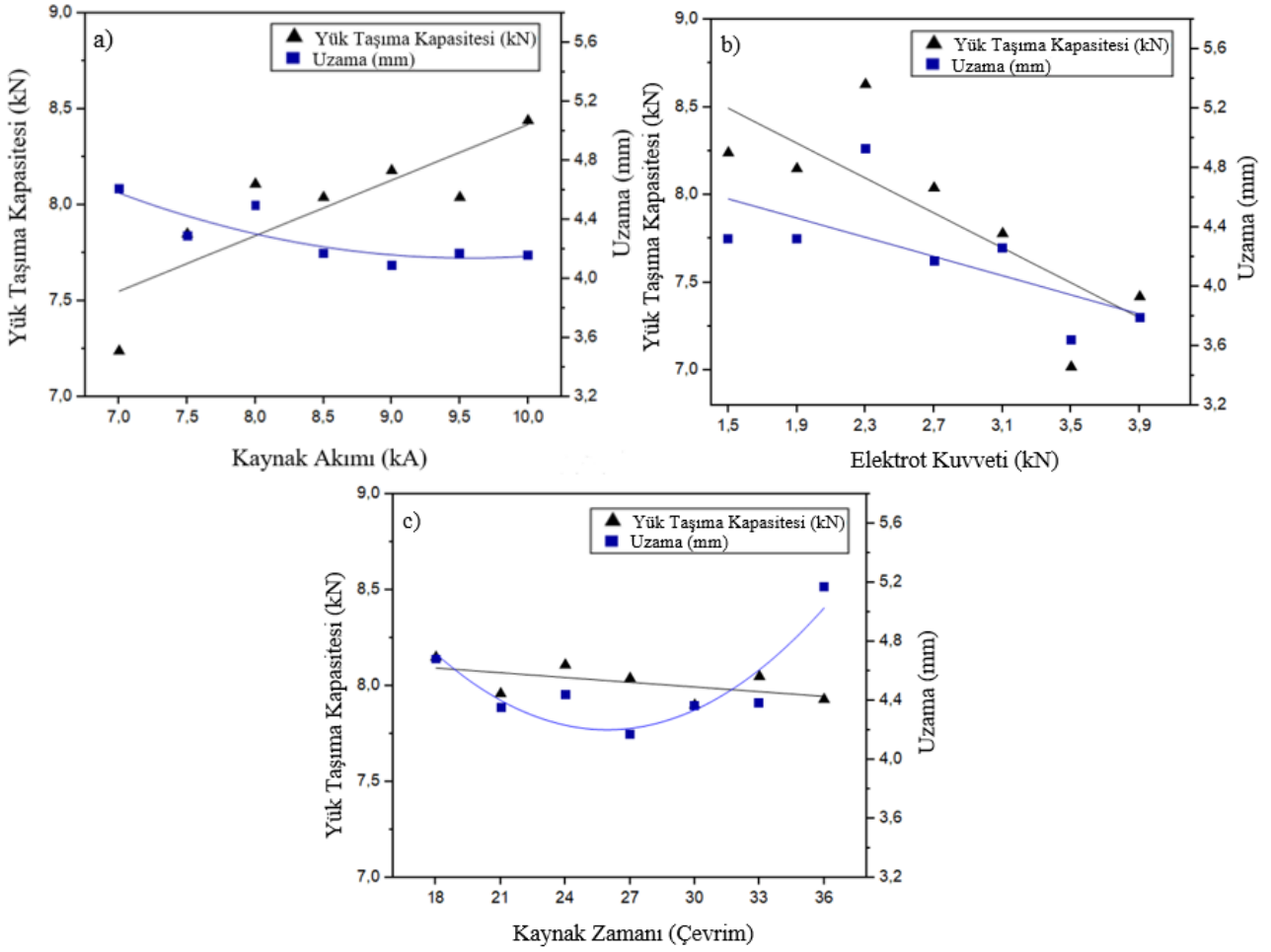
Tablo 3. Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri (Welding parameters used in the experiments)

Numune No	Kaynak Parametreleri		
	Kaynak Akımı (kA)	Elektrot Kuvveti (kN)	Kaynak Zamanı (Çevrim)
1	7	2,7	27
2	7,5	2,7	27
3	8	2,7	27
4	8,5	2,7	27
5	9	2,7	27
6	9,5	2,7	27
7	10	2,7	27
8	8,5	1,5	27
9	8,5	1,9	27
10	8,5	2,3	27
11	8,5	3,1	27
12	8,5	3,5	27
13	8,5	3,9	27
14	8,5	2,7	18
15	8,5	2,7	21
16	8,5	2,7	24
17	8,5	2,7	30
18	8,5	2,7	33
19	8,5	2,7	36

Kaynaklı numunelerde meydana gelen çökme miktarı ve meydana gelen çekirdek çapının kaynak parametrelerine bağlı değişimi karşılaştırılmıştır. Şekil 4a'da kaynak akımına bağlı olarak çökme miktarı ve çekirdek çapı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Kaynak akımının artması ile çökme miktarı doğrusala yakın bir artış

göstermiştir. Çekirdek çapı ilk kısımda 9 kA'a kadar artmış sonra azalmaya başlamıştır. Deneysel sonuçlar, üçlü elektrik direnç punta kaynaklı çelik levha bağlantılarının yük taşıma performansının kaynak akımından büyük ölçüde etkilendiğini gösterdi. Şekil 4b 'de elektrot kuvvetine bağlı olarak çökme miktarı ve çekirdek çapı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Çökme miktarı elektrot kuvveti değişiminden çok fazla etkilenmemesine rağmen, elektrot kuvveti artmasıyla çökme miktarında hafif bir düşüş görülmüştür. Çekirdek çapı elektrot kuvvetine bağlı olarak parabolik bir değişim göstermiş 2,7 kN elektrot kuvvetine kadar çekirdek çapı artmış sonrasında azalmıştır. Maksimum çekirdek çapı 2,7 kN 'da 6,3 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 4c 'de kaynak zamanına bağlı olarak çökme miktarı ve çekirdek çapı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Kaynak zamanına bağlı olarak çökme miktarı lineer bir artış göstermiştir. Kaynak zamanı 36 çevrimde, %47 çökme tespit edilmiştir. Çekirdek çapı kaynak zamanına bağlı olarak parabolik bir değişim göstermiş 27 çevrime kadar çekirdek çapı artmış sonrasında azalmıştır. Deneysel sonuçlara göre kaynak akımı, elektrot kuvveti ve kaynak zamanı parametreleri çekirdek çapı üzerinde benzer etkiler göstermiştir. Çökme miktarları üzerinde kaynak akımı ve kaynak zamanının belirgin ve benzer etkilere sahip olmasına rağmen diğer parametrelere kıyasla elektrot kuvveti çok daha hafif bir etkiye sahiptir. Kaynak akımının ve kaynak zamanının artmasına bağlı olarak çökme miktarları artmıştır. Bu durum, birleştirilen malzemelere ısı girdisinin artmasına atfedilebilir. Çökme miktarı estetik kaygılar açısından son kullanıcıda olumsuz bir irtiba bırakacağından otomotiv üreticileri açısından önemlidir. Özellikle gözle görünür parçalarda, araçların dış gövdelerinde minimum düzeyde olması istenmektedir. Araç üzerinde gözle görünmeyen bölgelerde ise dayanım açısından önemli bir parametredir. Genel olarak bir standart olmamasına karşın otomotiv üreticileri tarafında yaklaşık %40 üstü çökme miktarı tercih edilmemektedir. Elektrik direnç punta kaynak temel parametrelerinin, çökme miktarı üzerinde etkili olduğu ve kabul sınırları içerisinde kalması için dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmalıdır. Otomotiv üreticileri tarafından yaklaşık olarak kabul edilebilir çökme miktarı grafikler üzerinde hayali olarak oluşturulmuş mavi çizgi ile belirtilmiştir. Bu çizginin üzerinde kalan çökme miktarlarının elde edildiği elektriksel direnç punta kaynak parametreleri otomotiv üreticileri tarafından tercih edilmemektedir [37].

Otomotiv sektöründe, kaynaklı birleşimlerde çökme miktarının hem estetik hemde mekanik dayanım açısından kabul sınırları içerisinde kalması beklenir. %40 üzeri çökme miktarı genellikle tercih edilmemektedir. Çökme miktarları ultrasonic cihazlar yardımıyla ölçülebilmektedir. Şekil 5 'te elektrik direnç punta kaynak parametrelerine bağlı olarak kabul sınırları içerisinde kalan ve kabul sınırları içerisinde kalmayan kaynak parametreleri gösterilmiştir. Eksenlerin merkezine 8,5 kA kaynak akımı, 2,7 kN elektrot kuvveti ve 27 çevrim kaynak zamanı yerleştirilmiştir. Aşağıdaki şekilde üç eksenle farklı kaynak parametrelerini temsil etmektedir, iki parametre sabit tutularak bir parametrenin değişimine bağlı olarak kabul edilebilirlik açısından incelenmiştir. Kırmızı ile gösterim 9-9,5-10 kA kaynak akımı sabit 2,7 kN elektrot kuvveti, sabit 27 çevrim kaynak zamanı; 1,5-1,9 kN elektrot kuvveti sabit 8,5 kA kaynak akımı sabit 27 çevrim kaynak zamanı ile 34-37 çevrim kaynak zamanı sabit 8,5 kA kaynak akımı sabit 27 çevrim kaynak zamanı parametrelerinde çökme miktarı açısından %40 'ın üzerinde kaldığından tercih edilmemektedir. Yeşil ile gösterilen elektrik direnç punta kaynak parametreleri ise çökme miktarı açısından kabul edilebilir sınırları içerisinde kalan kaynak koşullarını göstermektedir. Elektrik direnç punta kaynak parametreleri seçimi çökme miktarı açısından önem teşkil ettiğini vurgulamak gerekmektedir. Uygun parametreler seçilerek başarılı üçlü kaynak birleşimleri elde edilebileceği görülmüştür.



Şekil 3. Kaynaklı numunelerin yük taşıma kapasitelerinin ve uzama miktarlarının kaynak akımı ile değişimi (a); elektrot kuvveti ile değişimi (b); kaynak zamanı ile değişimi (c)

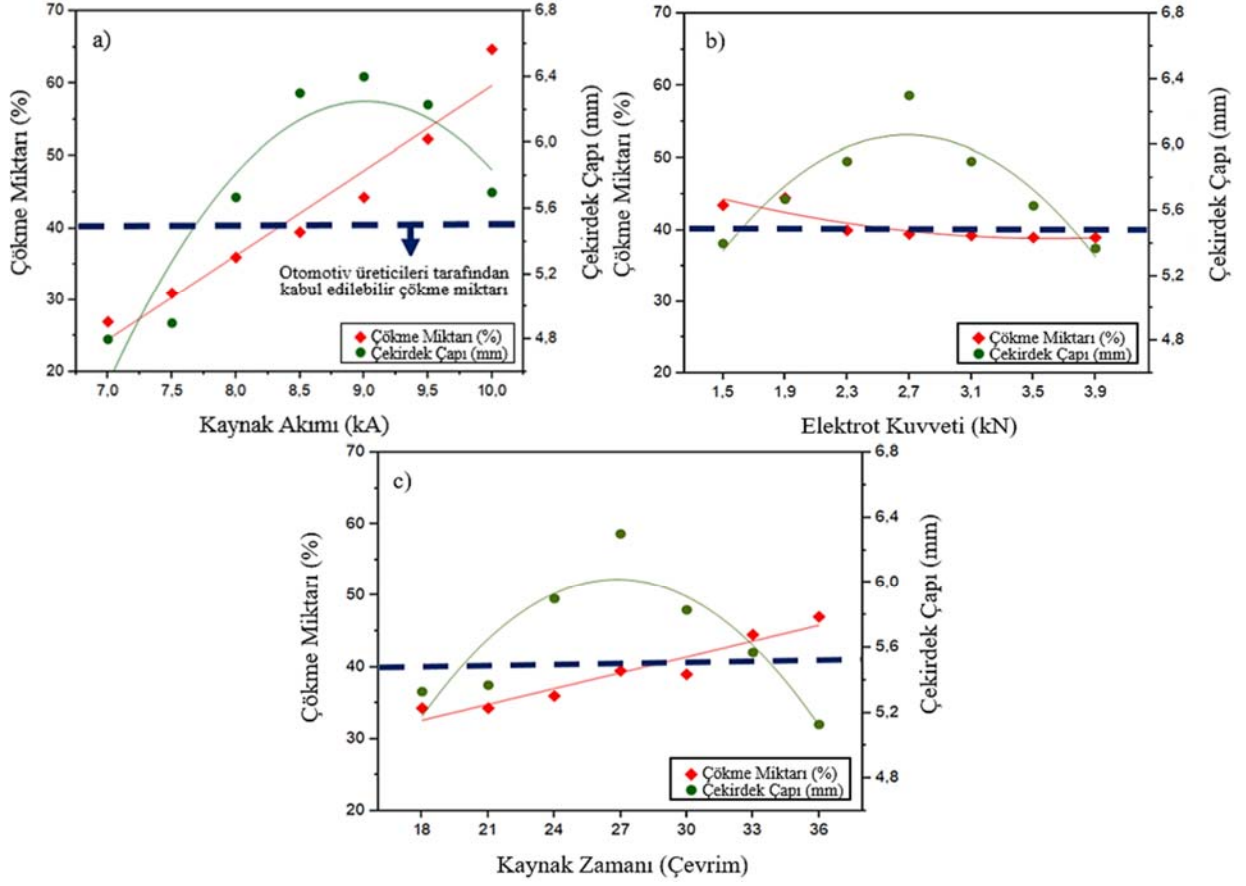
(Change of the load-bearing capacities and elongation of welded samples with welding current (a); with electrode force (b); with current time (c))

Numunenin sertliğinin ölçüldüğü kaynak bölgesinin enine kesit alanları Şekil 6'da gösterilmektedir. Ölçümler aynı bölge için 5 kez tekrarlanmış ve ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Vickers sertlik değerleri, DP600 ergime bölgesi, DP600 ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), FEP05 ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), DP600 temel malzeme ve FEP05 temel malzemeden ölçülmüştür.

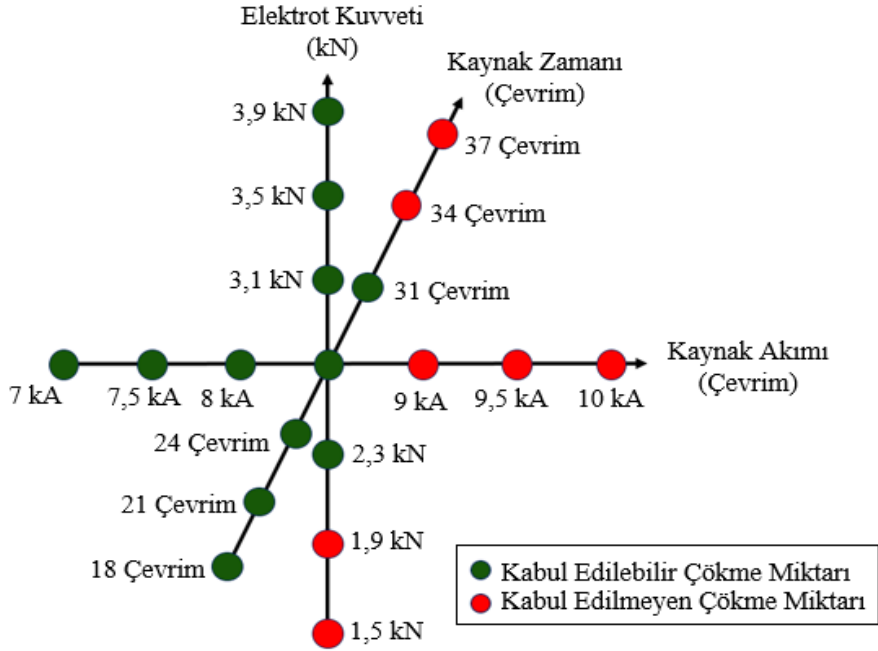
Şekil 7'de numunelerden alınan sertlik ölçümlerinin ortalaması gösterilmektedir. DP600 sacın kimyasal bileşimi nedeniyle, erime bölgesinde martenzit ve ITAB'da martenzit-beynit mikro yapılarının oluşması sonucu kaynak bölgesinin sertliği artmıştır. Erime bölgesi sertlik değerleri, martenzit oluşumu ile temel malzemelere göre önemli ölçüde artmıştır. Numune 1 incelendiğinde; DP600 ergime bölgesinde ve DP600 ITAB'da, düşük kaynak akımı ve düşük kaynak zamanında daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Bu durum, düşük ısı girişinin neden olduğu daha hızlı soğuma koşullarının bir sonucu olarak ortaya çıkmış olabilir. Numune 8 ve 13 karşılaştırıldığında, elektrot kuvvetinin DP600 erime bölgesinin sertlik değerleri üzerinde önemli bir etkisi olmamışken; yine de, DP600 ITAB'da yüksek elektrot kuvvetinde sertlik değerleri düşmüştür. FEP05 ITAB'daki tüm kaynak parametreleri için önemli bir değişiklik görülmedi. Düşük kaynak akımında (numune 1) ısı girişi düşük olduğu için, FEP05 ITAB sertliğinin en düşük değeri ölçülmüştür. Yüksek elektrot kuvveti ısı etkisi altındaki bölgeyi genişlettiği için, FEP05 ITAB 'ın en yüksek sertlik değeri, yüksek

elektrot kuvvetinde (numune 13) tespit edilmiştir. Genel olarak FEP05 ITAB malzemesinin sertlik değerleri FEP05 malzemesine göre daha düşük olmuştur. Bunun nedeni, bölgedeki faz değişiminden ziyade tane boyutunun değişimiyle ilgili olduğu düşünülmektedir. Kaynak zamanı arttığında, DP600 erime bölgesindeki ve DP600 ısıdan etkilenen bölgedeki (ITAB) sertlik değerleri azalmıştır (numune 14 ve 19).

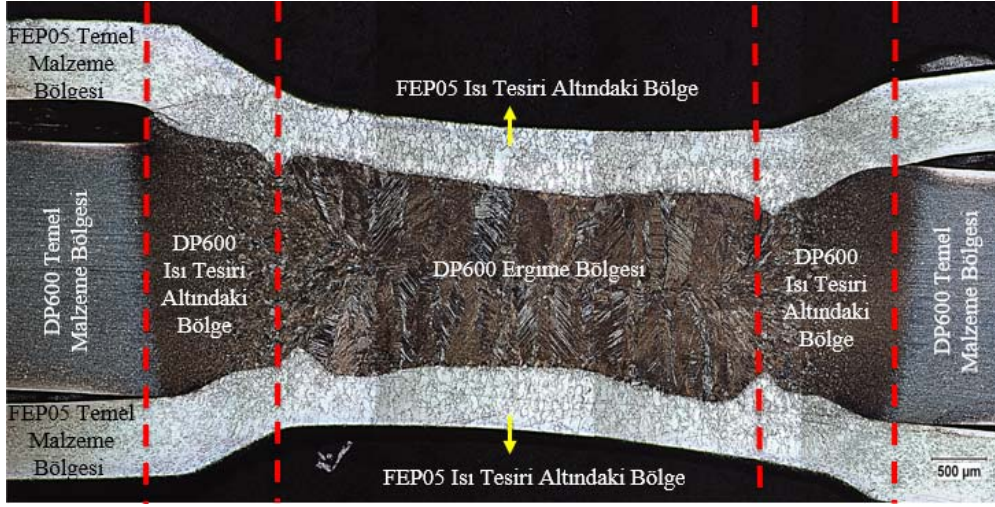
Bu çalışmada, 1-7-8-13-14-19 nolu numunelerin hem mikro yapısı hem de makro yapısı incelenmiştir (Şekil 8). Numuneler, en düşük ve en yüksek kaynak parametrelerini temsil ettikleri için seçilmiştir. Kaynak merkezi mikro yapılarında, martenzit fazlar gözlenmiştir. Kaynağın özelliğine bağlı olarak üst ve alt FEP05 çelikleri farklı olarak ergimiştir. Birinci ve yedinci numuneler karşılaştırıldığında, kaynak akımı arttıkça FEP05 çeliğinin daha fazla eridiği ve kalınlığının orantılı olarak azaldığı görülmüştür. Bu durum, sağlanan ısı miktarının artmasının bir sonucudur. 10 kA kaynak akımında, minimum FEP05 üst ve alt sac kalınlıkları sırasıyla 0,227 mm ve 0,284 mm'dir. Sekizinci ve on üçüncü numuneler arasındaki karşılaştırmada, elektrot kuvveti düşük olduğunda FEP05 çeliği daha fazla eridiği görülmüştür. On dördüncü ve on dokuzuncu karşılaştırıldığında, kaynak zamanı arttıkça FEP05 kalınlığında hafif bir azalma kaydedilmiştir. Kaynak akımı ve elektrot kuvvetinin kaynak zamanına kıyasla daha belirgin bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.



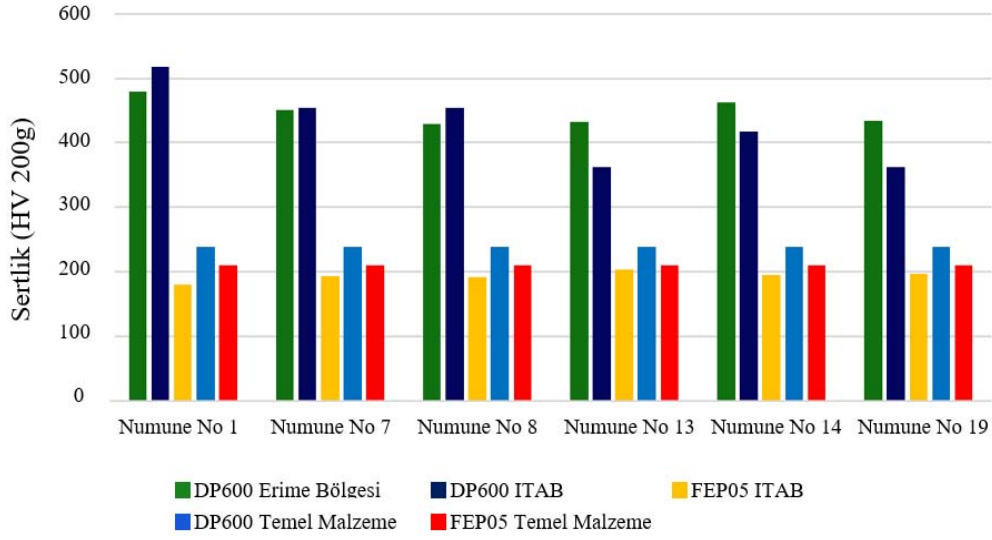
Şekil 4. Kaynaklı numunelerin çökme miktarlarının ve çekirdek çapının kaynak akımı ile değişimi (a); elektrot kuvveti ile değişimi (b); kaynak zamanı ile değişimi (c)
(Change of indentation depth and nugget size of welded samples with welding current (a); with electrode force (b); with current time (c)).



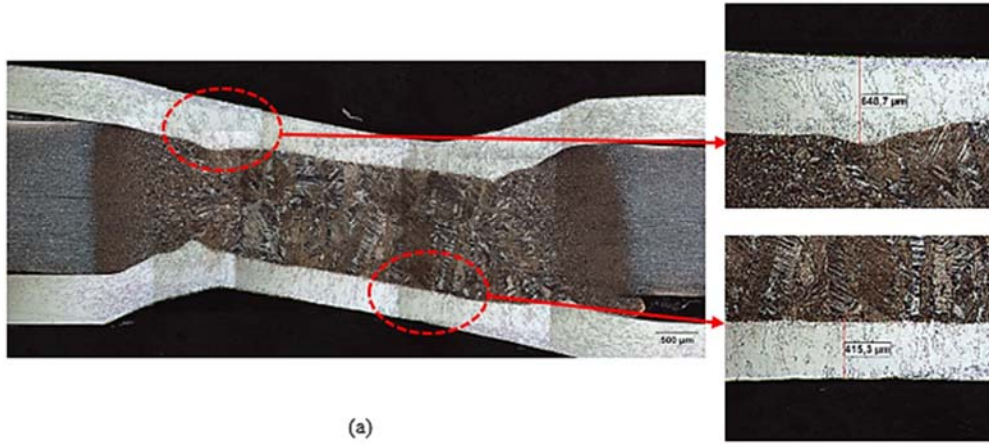
Şekil 5. Kaynak parametrelerine bağlı olarak kabul edilebilir veya kabul edilemeyen çökme miktarları
(Acceptable or unacceptable indentation depth, depending on welding parameters)



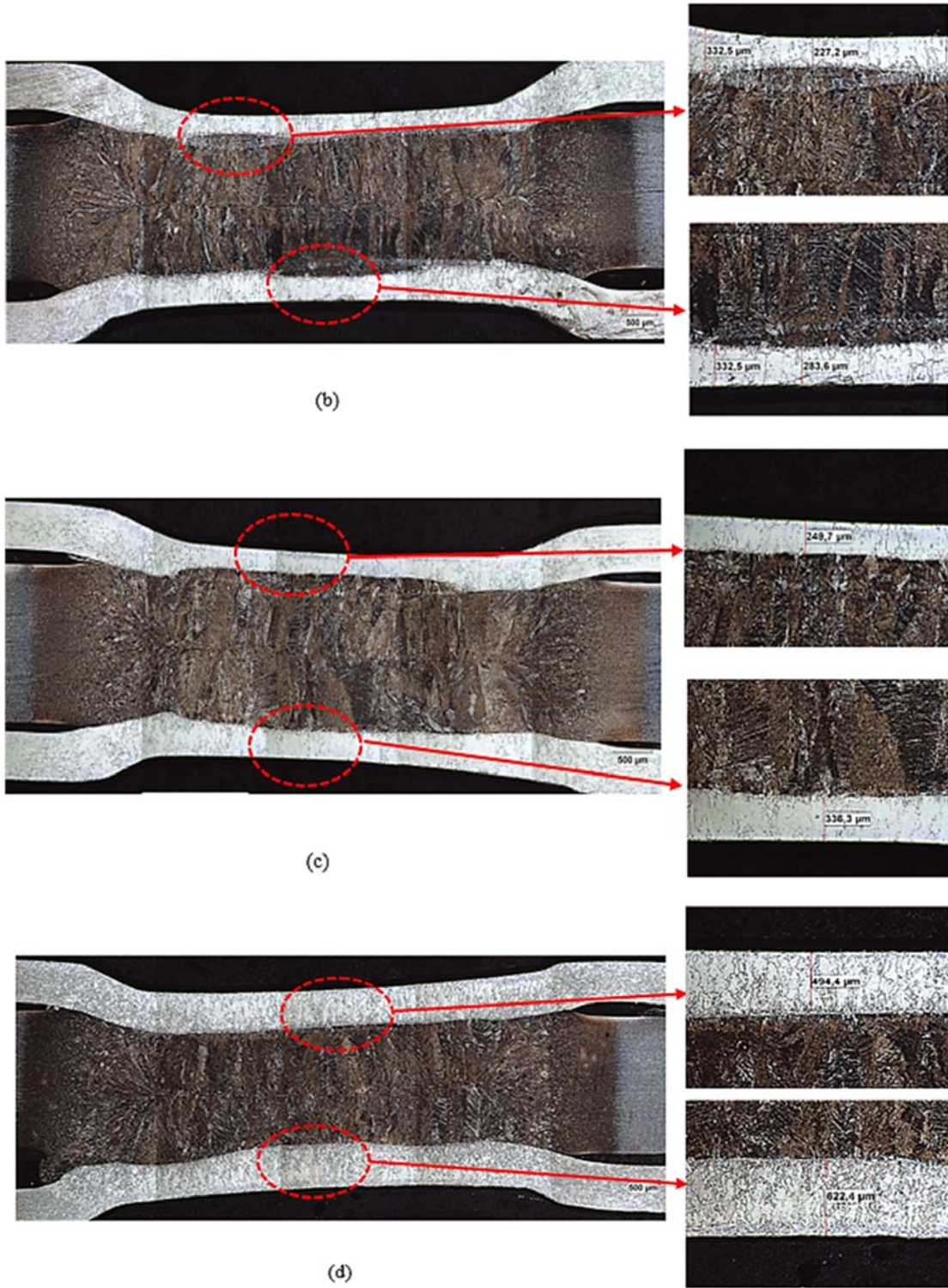
Şekil 6. Numune 14'ün enine kesit kaynak bölgesi (Cross-sectional welding zone of the sample 14)



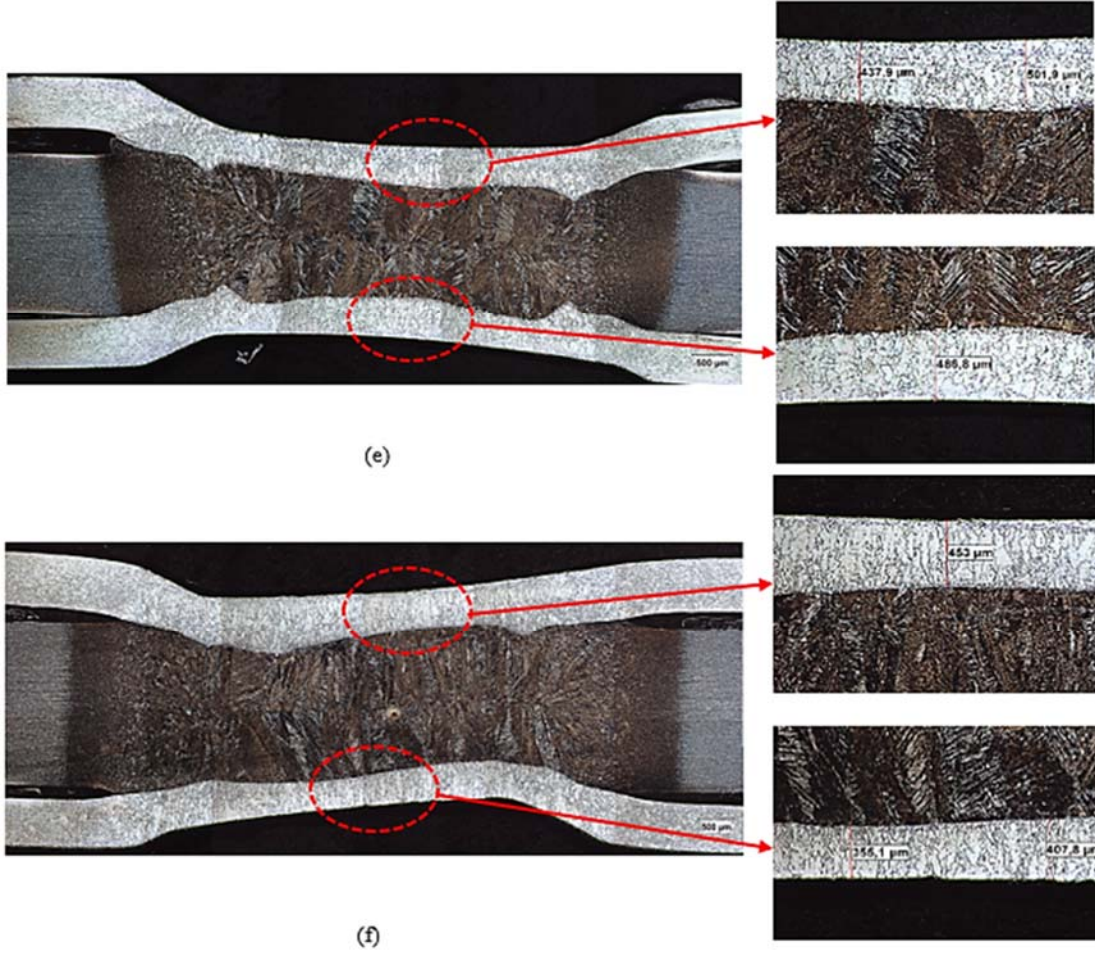
Şekil 7. Ölçülen sertlik değerlerinin ortalaması (HV 200g) (Average of measured hardness measurement values (HV 200g))



Şekil 8. Numune 1 (a); numune 7 (b); numune 8 (c); numune 13 (d); numune 14 (e); numune 19 (f)'nin makro yapısının ve mikro yapısının karşılaştırmalı görüntüsü (Comparative view of macrostructure and microstructure of sample 1 (a); sample 7 (b); sample 8 (c); sample 13 (d); sample 14 (e); sample 19(f))



Şekil 8. Numune 1 (a); numune 7 (b); numune 8 (c); numune 13 (d); numune 14 (e); numune 19 (f)'nin makro yapısının ve mikro yapısının karşılaştırmalı görüntüsü
(Comparative view of macrostructure and microstructure of sample 1 (a); sample 7 (b); sample 8 (c); sample 13 (d); sample 14 (e); sample 19(f))



Şekil 8. Numune 1 (a); numune 7 (b); numune 8 (c); numune 13 (d); numune 14 (e); numune 19 (f)'nin makro yapısının ve mikro yapısının karşılaştırmalı görüntüsü
(Comparative view of macrostructure and microstructure of sample 1 (a); sample 7 (b); sample 8 (c); sample 13 (d); sample 14 (e); sample 19(f))

4. Simgeler (Symbols)

DP	: Çift Faz
TWIP	: İkizlenme kaynaklı plastisite
TRIP	: Dönüşüm kaynaklı plastisite
AA	: Alüminyum alaşım
ITAB	: Isı tesiri altındaki bölge
RSW	: Direnç punta kaynak
RSWA	: Direnç punta kaynak analiz cihazı

5. Sonuçlar (Conclusions)

FEP05 + DP600 + FEP05 levhalarının üçlü kaynağına ilişkin deneysel testlerin sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Kaynak akımına bağlı olarak yük taşıma kapasitesinde belirgin bir artış görülürken, kaynak süresinin yük taşıma kapasitesi üzerinde belirgin bir etkisi olmamıştır. Kaynak süresi değişimi çekirdek çapı ve çökme üzerine sınırlı etkili olduğundan yük taşıma kapasitesi üzerinde ihmal edilebilir bir azalmaya neden olmuştur. Kaynak akımının yük taşıma kapasitesini artırması kaynak akımı ile artan çekirdek çapındaki yüksek oranlı yükselişten kaynaklanmıştır. Elektrot kuvveti yük taşıma kapasitesini negatif yönde etkilemiştir. Çökme yüzdesinde önemli bir değişiklik olmazken çekirdek çapının düşmesi artan elektrot kuvveti ile yük taşıma kapasitesini düşürmüştür.

- Kaynak akımı ve elektrot kuvvetindeki artış uzama miktarını azaltırken, kaynak zamanı 27 çevrime kadar uzama miktarını azaltmış sonra arttırmıştır. Özellikle kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ile çökme miktarındaki artışlar yüzde uzamaya azaltıcı yönde etki etmiştir.
- Kaynak parametrelerinin çökme miktarı üzerinde belirgin etkileri olduğu tespit edilmiştir. Kaynak parametreleri uygun seçilerek FEP05 + DP600 + FEP05 levhalarının elektrik direnç punta kaynağı ile üçlü olarak başarılı şekilde birleştirilebileceği görülmüştür. Kaynak akımı ve kaynak zamanı ile çökme miktarı artarken elektrot kuvvetindeki artışla çökme miktarı düşüş eğilimine girmiştir.
- İleride bu konuda yapılacak çalışmalar için yüksek kaynak akımı ve yüksek kaynak zamanı parametrelerinin çökme miktarını kabul sınırlarının dışına çıkarmasından dolayı kaçınılması gereken bir husus olduğu tarafımızca önerilmektedir.

Kaynaklar (References)

1. Ma Y., Shan H., Niu S., Li Y., Lin Z., MA N., A comparative study of friction self-piercing riveting and self-piercing riveting of aluminum alloy AA5182-O, Engineering, 7, 1741–1750, 2021.
2. Donders S., Brughmans M., Hermans L., Tzannetakis N., The Effect of Spot Weld Failure on Dynamic Vehicle Performance, Sound and Vibration, 39, 16–25, 2005.
3. Mousavi Anijdan S. H., Sabzi M., Ghobeiti-Hasab M., Roshan-Ghiyas A., Optimization of spot welding process parameters in dissimilar joint of dual phase steel DP600 and AISI 304 stainless steel to achieve the

- highest level of shear-tensile strength, *Materials Science and Engineering: A*, 726, 120–125, 2018.
4. Bouaziz O., Zurob H., Huang M., Driving force and logic of development of advanced high strength steels for automotive applications, *Steel research international*, 84, 937–947, 2013.
 5. Çavuşoğlu O., Toros S., Gürün H., Microstructure based modelling of stress-strain relationship on dual phase steels, *Ironmaking & Steelmaking*, 46, 313–319, 2019.
 6. Tuncel O., Aydın H., A comparison of tensile properties of single-sided and double-sided laser welded DP600 steel sheets, *Materials Science*, 26, 173–178, 2020.
 7. Sen N., Civek T., Detailed deformation behaviour analysis of DP steels at warm forming temperatures via warm tensile tests, *Ironmaking & Steelmaking*, 49, 604-614, 2022.
 8. Tuncel O., Aydın H., Cavusoglu O., Selova L., Effect of Electrode Force on Mechanical Properties of Triple Joined Dissimilar Steel Sheets by Resistance Spot Welding, 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt-Türkiye, 924-928, 19-21 Eylül 2019.
 9. Selova L., Aydın H., Tuncel O., Cavusoglu O., Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Three-Sheet Stack Joints of Dissimilar Steels in Different Welding Time, 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt-Türkiye, 591-596, 19-21 Eylül 2019.
 10. Aydın H., Tuncel O., Selova L., Effect of Welding Current on Mechanical Properties of Dissimilar Steels Joined Triple by Electrical Resistance Spot Welding, 4th International Iron & Steel Symposium, Karabük-Türkiye, 396-400, 04-06 Nisan 2019.
 11. Aydın H., Tutar M., Davut K., Bayram A., Effect of welding current on microstructure and mechanical properties of 15% deformed TWIP steel joined with electrical resistance spot welding, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 803–817, 2020.
 12. Sun H.T., Lai X.M., Zhang Y.S., Shen J., Effect of variable electrode force on weld quality in resistance spot welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 12, 718–724, 2008.
 13. Tamizi M., Pouranvari M., Movahedi M., Welding metallurgy of martensitic advanced high strength steels during resistance spot welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 22, 327–335, 2017.
 14. Husain I.M., Saad M.L., Barrak O.S., Hussain S.K., Hamzah M.M., Shear force analysis of Resistance Spot Welding of Similar and Dissimilar Material: copper and carbon steel, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1105, 012055, 2021.
 15. Sivaraj P., Seeman M., Kanagarajan D., Seetharaman R., Influence of welding parameter on mechanical properties and microstructural features of resistance spot welded dual phase steel sheets joint, *Materials Today: Proceedings*, 22, 558–562, 2020.
 16. Eshraghi M., Tschopp M.A., Asle Zaem M., Felicelliab S.D., Effect of resistance spot welding parameters on weld pool properties in a DP600 dual-phase steel: A parametric study using thermomechanically-coupled finite element analysis, *Materials & Design*, 56, 387–397, 2014.
 17. Karthikeyan R., Balasubramanian V., Optimization of Electrical Resistance Spot Welding and Comparison with Friction Stir Spot Welding of AA2024-T3 Aluminum Alloy Joints, *Materials Today: Proceedings*, 4, 1762–1777, 2017.
 18. Pouranvari M., Sobhani S., Goodarzi F., Resistance spot welding of MS1200 martensitic advanced high strength steel: Microstructure-properties relationship, *Journal of Manufacturing Processes*, 31, 867–874, 2018.
 19. Cen Y., Chen F., Chen L., Mechanism of resistance spot welding of dissimilar steel, *Materials Research Express*, 6, 095801, 2019.
 20. Wei S.T., Liu R.D., Lv D., Lin L., Lu X.F., Ding S.W., Effect of joint configuration on resistance spot weldability of galvanised DP780 steel sheets, *Science and Technology of Welding and Joining*, 21, 178–185, 2016.
 21. Wei S.T., Liu R.D., Lv D., Lin L., Xu R.J., Guo J.Y., Wang K.Q., Lu X.F., Weldability and mechanical properties of similar and dissimilar resistance spot welds of three-layer advanced high strength steels, *Science and Technology of Welding and Joining*, 20, 20–26, 2015.
 22. Li T., Yuan X., Hu Z., Wu K., Wang H., Zhang B., Dissimilar Resistance Spot Welding of DP 600/A5052/DP 600 Triple Sheets, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19, 1673–1679, 2018.
 23. Huda N., Nam D-G., Park Y-D., Study on the Mechanism of Nugget Growth Behavior in Three Sheets Stack Resistance Spot Welding, *Journal of Welding and Joining*, 37, 564–571, 2019.
 24. Çavuşoğlu O., Bakırcı A., Dinkçi H., Yılmazoğlu A.G., Triple joining of different sheets with self-pierce riveting method, *Science and Technology of Welding and Joining*, 27, 579–585, 2022.
 25. Tavasolizadeh A., Marashi S.P.H., Pouranvari M., Mechanical performance of three thickness resistance spot welded low carbon steel, *Materials Science and Technology*, 27, 219–224, 2011.
 26. Pouranvari M., Marashi S.P.H., Weld nugget formation and mechanical properties of three-sheet resistance spot welded low carbon steel, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 51, 105–109, 2012.
 27. Wan X., Wang Y., Zhang P., Modelling the effect of welding current on resistance spot welding of DP600 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 2723–2729, 2014.
 28. Aslanlar S., Ogur A., Ozsarac U., Ilhan E., Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding, *Materials & Design*, 29, 1427–1431, 2008.
 29. Bhat S. D., Vijeesh V., Acharya P., Rao M., Investigation of thin sheet stainless steel resistance spot welds: Effect of weld current on nugget failure and microstructure, *Materialstoday: Proceedings*, 35 (11), 361–365, 2021.
 30. Li Y., Yu Z., Luo Z., Failure Mode Transition of Triple-Thin-Sheet Aluminum Alloy Resistance Spot Welds under Tensile- Shear Loads, *Welding Journal*, 95, 479–490, 2016.
 31. Jaber H.L., Pouranvari M., Salim R.K., Hashim F.A., Marashi S.P.K., Peak load and energy absorption of DP600 advanced steel resistance spot welds, *Ironmaking & Steelmaking*, 44, 699–706, 2017.
 32. Li C., Yuan X., Wu K., Wang H., Hu Z., Pan X., Nugget formation and its mechanism of resistance spot welded joints in DP600 dual-phase and DC54D ultralow carbon steel, *Metals and Materials International*, 23, 543–553, 2017.
 33. Kannaiyan M., Raghuvaran J. G. T., Govindan k., Annamalai E. P., Process parameters and properties of electric resistance spot welded AISI304- AISI1020 dissimilar weldments, *Journal of Ceramic Processing Research*, 21, 26-34, 2020.
 34. Aydın H., Tuncel O., Umur Y., Tutar M., Bayram A., Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of aluminum alloy AA6082-T6 friction stir spot welds, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 24, 215–227, 2017.
 35. Selova L., Üçlü sac elektrik direnç nokta kaynak birleşimlerinde kaynak parametrelerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2019.
 36. Tutar M., Aydın H., Bayram A., Elektrik direnç punta kaynağı ile kaynak edilmiş TWIP çeliklerinde kaynak parametrelerinin Taguchi yöntemi ile optimizasyonu, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24, 650–657, 2018.
 37. Aydın H., Yılmaz I.Ö., Bilici A.Y., Investigation of microstructure and mechanical properties of dissimilar electrical resistance spot welded TBF/DP600 steel sheets, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (2), 609–624, 2022.

