



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Çift aşamalı nokta direnç kaynağı uygulamasının yüksek dayanım düşük alaşımlı S700 çeliğinin mekanik dayanımına etkisinin incelenmesi

Effect of double-pulse resistance spot welding on the mechanical properties of high strength low alloy S700 steel

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet Okan GÖRTAN¹

ORCID¹: 0000-0002-6095-1161

To cite to this article: Görtan M.O., “Çift aşamalı nokta direnç kaynağı uygulamasının yüksek dayanım düşük alaşımlı S700 çeliğinin mekanik dayanımına etkisinin incelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, *(*) : *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Görtan M.O., “Çift aşamalı nokta direnç kaynağı uygulamasının yüksek dayanım düşük alaşımlı S700 çeliğinin mekanik dayanımına etkisinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1524711

Çift Aşamalı Nokta Direnç Kaynağı Uygulamasının Yüksek Dayanım Düşük Alaşım S700 Çeliğinin Mekanik Dayanımına Etkisinin İncelenmesi

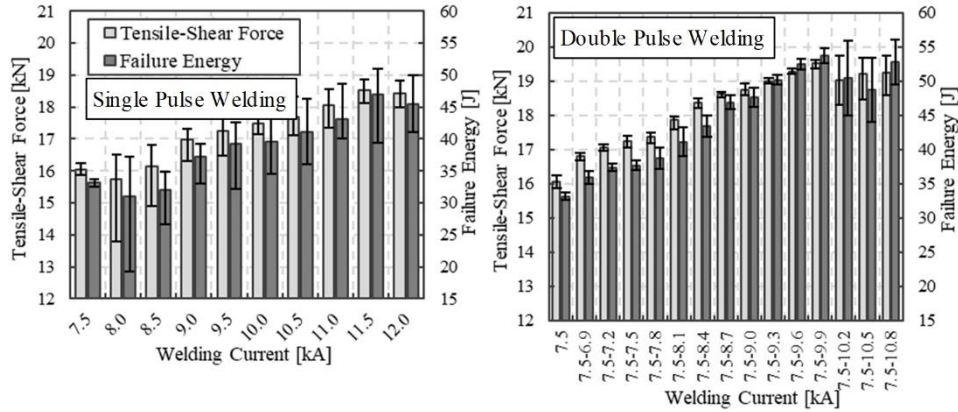
Effect of Double-Pulse Resistance Spot Welding on the Mechanical Properties of High Strength Low Alloy S700 Steel

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Çift aşamalı nokta direnç kaynağı / Double pulse resistance spot welding
- ❖ Kaynak sıçramasının kontrol altına alınması / Control of the welding expulsion
- ❖ Mekanik dayanımdaki saçınıklığın çift aşamalı nokta direnç kaynağı ile iyileştirilmesi / Improvement of deviation in mechanical strength using double pulse resistance spot welding

Grafik Özet (Graphical Abstract)

S700 çeliğinde tek ve çift aşamalı nokta direnç kaynağının mekanik dayanıma etkileri incelenmiştir. / Effect of single and double pulse welding on the mechanical strength is investigated using S700 steel.



Şekil. Deneysel çekme-makaslama sonuçları /Figure. Experimental tensile-shear results

Amaç (Aim)

Çift aşamalı nokta direnç kaynağı uygulaması ile bağlantıların mekanik dayanımının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. / It is aimed to improve the mechanical strength of resistance spot welded joints using double pulse welding.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Farklı akımlar kullanılarak tek aşamalı ve çift aşamalı nokta direnç kaynağı bağlantıları oluşturulmuş ve bunlar çekme-makaslama testleri ile incelenmiştir. / Single pulse and double pulse resistance spot welded joints are generated using different welding currents and those joints are characterized using tensile-shear tests.

Özgünlük (Originality)

Çift aşamalı kaynak stratejisinin etkileri geniş bir kaynak akımı aralığında incelenmiştir. / Effect of double pulse welding is investigated in a wide range of welding currents.

Bulgular (Findings)

Çift aşamalı nokta direnç kaynağı ile sıçrama olmadan yüksek dayanımlı bağlantılar oluşturulabilmiştir. / It was possible to generate high strength joints without expulsion using double pulse resistance spot welding.

Sonuç (Conclusion)

Çift aşamalı nokta direnç kaynağı ile S700 çeliği kullanılarak oluşturulan bağlantıların çekme-makaslama dayanımı ve kopma enerjisi sırasıyla %4,5 ve %14,6 artırılmıştır. / Tensile-shear strength and failure energy of resistance spot welded joints of S700 steel could be improved by 4.5% and 14.6%, respectively.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Çift Aşamalı Nokta Direnç Kaynağı Uygulamasının Yüksek Dayanım Düşük Alaşımli S700 Çeliğinin Mekanik Dayanımına Etkisinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet Okan GÖRTAN^{1*}

¹Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 30.07.2024 ; Kabul/Accepted : 04.09.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 10.09.2024)

ÖZ

Bu çalışmada, 1,2 mm kalınlığında S700 olarak adlandırılan sıcak haddelenmiş yüksek dayanımlı düşük alaşımli yapısal çeliğe uygulanan tek aşamalı ve çift aşamalı nokta direnç kaynağı stratejilerinin bağlantıların mekanik dayanımını ve kopma şekline etkisi incelenmiştir. Farklı kaynak akımları kullanılarak hazırlanan numunelerin çekme-makaslama dayanımları, kopma enerjileri ve kopma şekilleri ile birlikte bağlantıların geometrik özellikleri araştırılmıştır. Çift aşamalı nokta direnç kaynağı kullanılması halinde birleştirme prosesi sırasında kaynak sıçramasının daha geç gerçekleştiği ve buna bağlı olarak daha büyük çekirdek çaplarına çıkılabildiği belirlenmiştir. Sonuç olarak çift aşamalı kaynak uygulamasında çekme-makaslama dayanımı ile kopma enerjisi tek aşamalı kaynağa kıyasla sırasıyla % 4,5 ve % 14,6 oranında iyileştirilebilmiştir. Buna ek olarak çift aşamalı kaynak uygulamasında mekanik dayanımlar daha kararlı hale gelmiş ve ölçümlerdeki standart sapmalar belirgin oranda azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nokta direnç kaynağı, S700MC çeliği, mekanik dayanım.

Effect of Double-Pulse Resistance Spot Welding on the Mechanical Properties of High Strength Low Alloy S700 Steel

ABSTRACT

In this study, the impact of single-pulse and double-pulse resistance spot welding strategies on hot-rolled high-strength low alloy structural steel, specifically S700 with a thickness of 1.2 mm, has been examined regarding their influence on the mechanical strength and fracture characteristics of joints. Samples prepared using different welding currents were investigated for their tensile-shear strengths, fracture energies, fracture modes, and geometric properties of the joints. It has been determined that when double-pulse resistance spot welding is used, expulsion occurs later during the joining process, allowing for larger nugget diameters to be achieved as a result. As a result, in double-pulse welding applications, the tensile-shear strength and fracture energy have been improved by 4.5% and 14.6%, respectively, compared to single-pulse welding. Additionally, in double-pulse welding applications, mechanical strengths have become more stable, and the standard deviations in measurements have decreased significantly.

Keywords: Resistance spot welding, S700MC steel, mechanical strength.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv sektörüne son 20 yıldır damgasını varan en önemli akımlardan bir tanesi ağırlık azaltma olarak öne çıkmaktadır. Bu amaçla en sık kullanılan strateji de kullanılan malzemelerin daha yüksek dayanımlılarıyla değiştirilmesidir. Bu şekilde daha düşük kesitler ile aynı yükleri taşıyarak yolcu güvenliğini tehlikeye atmadan araç ağırlığını düşürmek mümkün olmaktadır [1]. Uygulamadaki esnekliği, yüksek verimliliği ve otomasyona uygunluğu nedeniyle nokta direnç kaynağı özellikle otomotiv sektöründe yüksek dayanımlı sacların birleştirilmesi konusunda tercih edilen yöntem olmuştur [2]. Bu nedenle nokta direnç kaynağı bağlantılarının mekanik dayanımının iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : okangortan@hacettepe.edu.tr

Nokta direnç kaynağı sırasında aktif olarak soğutulan basınçlı elektrotlar tarafından birlikte tutulan genellikle sac malzemeler üzerinden elektrik akımı geçirilir. Elektrik akışı sonucu oluşan ısı enerjisi saclar arasındaki görelî küçük bir bölgede sıcaklığın çok hızlı bir şekilde yükselmesini ve böylece kısa sürede ergiyen metallerin birleşmesini sağlar [3]. Yüksek mekanik dayanımları ve ekonomikliği nedeniyle çelik saclar otomotiv sektöründe hale tercih edilen malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Bu malzemelerin yüksek öz direnç değerleri nedeniyle nokta direnç kaynağı özellikle yolcu taşıtı imalatında tercih edilen birleştirme yöntemi olarak öne çıkmaktadır [4-6].

Nokta direnç kaynağı bağlantılarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinin en yaygın geleneksel yöntemi kaynak akımı ve süresinin en uygun hale getirilmesidir. Güncel çalışmaların büyük bir kısmında yüksek dayanımlı çelik saclar kullanılmıştır [7-14]. Anijdan ve arkadaşları [8] çift fazlı ve paslanmaz

çeliklerin nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesi sırasında kaynak akımı ve süresinin mekanik dayanıma etkisini incelemişlerdir. 1 mm kalınlığında sac malzeme kullanılarak yapılan çalışmalarda 8; 10 ve 12 kA kaynak akımı değerleri 14, 15 ve 16 çevrim sayısında uygulanmıştır. Bunun sonucunda 8 kA gibi düşük bir akımla 16 çevrimlik görelî yüksek bir kaynak süresinde en yüksek mekanik dayanımın elde edildiği belirlenmiştir. Buna karşın Jaber ve arkadaşları [9] tarafından aynı çift fazlı çelik sacın 1,5 mm kalınlığındaki hali ile kullanılarak yapılan çalışmada 15 çevrimlik kaynak süresinin dayanım açısından daha uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yine aynı çalışmada 11 kA değerindeki kaynak akımı kullanılması halinde bağlantılarda en yüksek çekme-makaslama dayanımına ulaşılmıştır. Aynı malzemenin 1,3 mm kalınlığındaki galvanizli halinin Kishore ve arkadaşları [10] tarafından incelendiği çalışmada ise kaynak akımı 6 ile 10 kA arasında 1 kA adımlarla değiştirilmiş ve herbir akım değerinde 7, 11 ve 15 çevrimlik kaynak süreleri denenmiştir. İncelemelerde en yüksek mekanik dayanım 9 kA kaynak akımı kullanılarak 11 çevrim sonunda elde edilmiştir. Daha yüksek akım değerleri veya daha uzun kaynak sürelerinin kullanılması halinde kaynak bölgesinden eriyik metalin sıçraması gözlenmiş ve buna bağlı olarak da bağlantıların mekanik dayanımları düşmüştür. Burada sıçrama nokta direnç kaynağı sırasında eriyik metalin elektrotlar arasındaki bölgeden kuvvetli bir şekilde dışarı fışırması olarak tanımlanmaktadır. Yaghoobi ve arkadaşları [11] tarafından 1 mm kalınlığında çift fazlı sac ve arayef atomsuz saclar kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada 30 çevrimlik sabit kaynak süresi kullanılmıştır. 6; 8 ve 10 kA olarak 3 farklı kademede uygulanan kaynak akımının mekanik dayanıma etkisi incelenmiştir. Seçilen en yüksek akım olan 10 kA seviyesinde en yüksek mekanik dayanımın elde edildiği belirlenmiştir. Belirtilen çalışmaların hepsinde seçilen kaynak akımları arasındaki farkların büyük olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak diğer önemli bir durum ise kaynak akımı ve süresi arttıkça kaynak çekirdeği büyürken sıçrama riskinin de artmasıdır. Kaynakta sıçrama görülmesi halinde bağlantı bölgesinde malzeme kaybı olmakta ve buna bağlı olarak mekanik dayanımda belirgin bir düşüş gözlenmektedir [12-14].

Nokta direnç kaynağında sıçrama oluşturmadan çekirdek çapını artırmak ve mekanik dayanımı iyileştirmek için kullanılan yeni bir yöntem çift aşamalı kaynak uygulamasıdır. Çift aşamalı nokta direnç kaynağı uygulamasında sac malzemeler elektrotlar arasına yerleştirilip sıkıldıktan sonra kaynak bölgesinde sıçrama oluşturmayacak görelî düşük bir akım uygulanarak çekirdek oluşumu sağlanır. Sonrasında akım kesilip genellikle 100 ms veya 5 çevrimin altında bir bekleme ile çekirdeğin katılaşması sağlanır ve böylece ilk aşama tamamlanır. Sonrasında ilk aşamadaki kaynak akımının altında veya üstünde bir akım uygulanarak kaynak bölgesinde sıçrama oluşmadan çekirdeğin daha da büyümesi amaçlanır [15-21]. Liu ve arkadaşları [16] 1,8

mm kalınlığındaki su verilmiş ve temperlenmiş çelik sac ile yaptıkları çalışmada tek aşamalı kaynakta sıçramanın başladığı kaynak akımını 7,0 kA olarak belirlemişlerdir. Sonrasında 40 milisaniye, yani 2 çevrimlik bir soğuma süresi beklenildikten sonra ikinci aşamada 4,5; 6,0; 6,5; 7,0 ve 7,5 kA değerinde farklı kaynak akımları uygulanmıştır. İki aşamalı nokta direnç kaynağı numunelerinde en yüksek mekanik dayanım 6,0 kA akım durumunda gözlenirken en büyük çekirdek çapı 7,5 kA uygulamasında gözlenmiştir. Chabok ve arkadaşlarının [17, 18] 1,5 mm kalınlığında çift fazlı çelik saclar ile yaptıkları çalışmada aynı akımları kullandıkları tek aşamalı ve çift aşamalı nokta direnç kaynağı incelenmiştir. Tek bir akım değerinin uygulandığı durumda çift aşamalı kaynak uygulamasında mekanik dayanımların %27,1 oranında artırılabilirdiği raporlanmıştır. Pouranvari ve arkadaşları [19] tarafından 1,5 mm kalınlığında martenzitik çelik saclar kullanılarak yapılan çalışmada ikinci kaynak aşamasında ilkinden daha düşük bir akım kullanılarak bağlantının temperlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada 0,2 ile 1,8 saniyeler arasında farklı temper süreleri kullanılmıştır. Hiçbir çift aşamalı kaynak uygulamasında çekirdek çapında büyüme gözlenmemesine rağmen mekanik dayanımlarda artış belirlenmiştir. Bu durum ikinci kaynak aşamasının ısı tesiri altındaki bölgeyi temperlemesi ve bu bölgede sünekliliği artırması ile açıklanmıştır. Çift aşamalı kaynak üzerine yapılan çalışmalarda genellikle az sayıda değişken incelenerek genel hatlarıyla ikinci kaynak aşamasının etkileri incelenmiştir. İkinci aşamada uygulanan farklı kaynak akımlarının mekanik dayanım ve mikroyapıya etkilerinin detaylı bir incelemesi gerçekleştirilmemiştir.

Güncel çalışmada S700 olarak adlandırılan sıcak haddelenmiş yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik saclar tek aşamalı ve çift aşamalı nokta direnç kaynağı kullanılarak farklı kaynak akımları ile birleştirilmiştir. Bağlantıların dayanımları çekme-makaslama testleri ile analiz edilmiştir. Bağlantılar mekanik olarak test edildikten sonra oluşan kopma tipleri optik mikroskopi vasıtasıyla incelenmiştir. Dayanım ve oluşan farklı kopma durumları mikroyapı özellikleri ile birlikte tartışılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

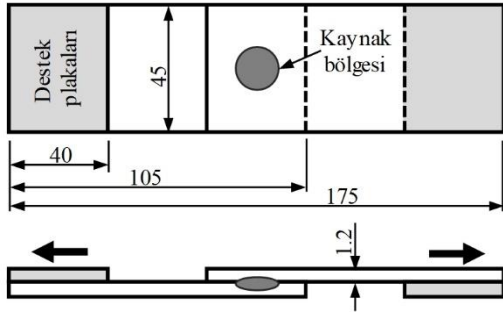
Deneyel çalışmalarda kullanılan malzeme 1,2 mm kalınlığında S700MC olarak adlandırılan sıcak haddelenmiş yüksek dayanımlı düşük alaşımlı bir yapısal çeliktir. İlgili malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 1'de verilmiştir. Bu malzeme % 0,078 değerindeki karbon içeriği nedeniyle mikro alaşımlı çelik olarak anılmaktadır. Ancak alaşımındaki % 1,94 oranındaki görelî yüksek mangan içeriği sayesinde östenitik bölgeden hızlı soğutulması halinde martenzitik dönüşümün gerçekleşmesi beklenir.

Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri ISO 6892-1:2009 standardına uygun olarak nominal genişliği 12,5 mm, nominal uzunluğu 50 mm olan numuneler ile belirlenmiştir [22]. Bu amaçla 5 adet test gerçekleştirilmiş ve bu test sonuçlarının ortalamaları Çizelge 2’de verilmiştir

Çizelge 2. Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri (Mechanical properties of the used material)

Akma Dayanımı [MPa]	Çekme Dayanımı [MPa]	Kopma Uzaması [%]
792,2	941,2	13,2

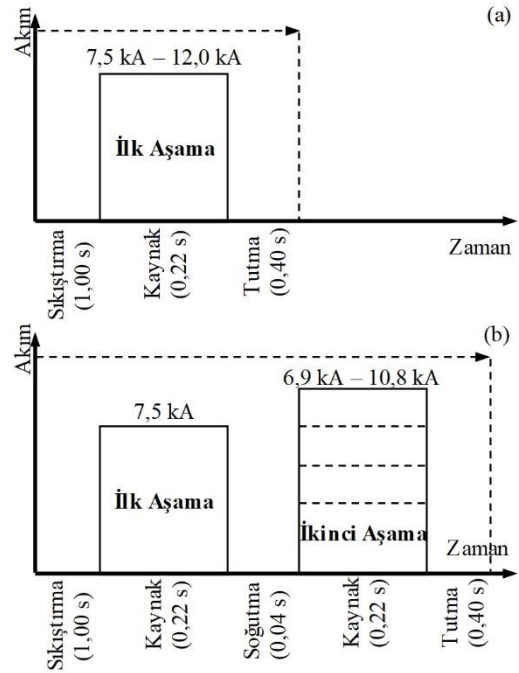
Nokta direnç kaynağında kullanılacak numuneler ISO 14273:2016 standardına uygun şekilde 105 x 45 mm boyutlarında mekanik olarak kesilmiştir [23]. Bu numuneler kaynak sırasında Şekil 1’de gösterildiği gibi standarda uygun olarak konumlandırılmış ve birleştirilmiştir. Şekildeki oklar çekme-makaslama testi sırasındaki çekme yönlerini göstermektedir



Şekil 1. Nokta direnç kaynağı numune ölçüleri - Tüm ölçüler mm cinsindedir (Resistance spot welding sample geometric properties - All measurements are in mm)

Tüm kaynak işlemleri kaynak akımı, süresi, elektrot basıncı nümerik olarak kontrol edilebilen 70 kVA kapasiteli su soğutmalı pnömatik ayaklı tip bir nokta direnç kaynak makinesinde gerçekleştirilmiştir. Bu makine elektrik şebekesi ile aynı şekilde 50 Hz frekansta çalışmaktadır. Bu nedenle bir kaynak çevrimi 20 milisaniye sürmektedir. Kaynak işleminde ISO 5821:2009 standardına uygun G0 tipi 8 mm temas çapına sahip 20 mm yükseklikte elektrotlar kullanılmıştır [24]. Bu elektrotlar ISO 5182:1991 standardına uygun olarak A 2/3 tip bakır malzemenin krom ve zirkonyum ile alaşımlandırılmasıyla üretilmiştir [25]. Çalışmada elektrotlar ile uygulanan baskı kuvveti Amerikan Kaynak Topluluğu standartlarına uygun olarak 3,4 kN olarak seçilmiştir [26]. Aynı standarda uygun şekilde her işlemde kaynak süresi 11 çevrim, yani 220 ms olarak ayarlanmıştır. Yazarın daha önceki çalışmalarına uygun olarak kaynak sonrasındaki tutma süresi 20 çevrim, yani 400 ms olarak seçilmiştir [27].

Farklı kaynak akımı değerlerinin nokta direnç kaynağı bağlantılarının mekanik dayanımına etkisini incelenmesi amacıyla tek aşamalı kaynak uygulamasında akım değeri 7,5 ile 12,0 kA arasında 0,5 kA değerinde adımlarla kademeli olarak artırılmıştır. Çift aşamalı kaynak uygulamasında ise 11 çevrim boyunca 7,5 kA akım uygulandıktan sonra 2 çevrimlik süre beklenilmiştir. Sonrasında ikinci aşama olarak 6,9 ile 10,8 kA arasında 0,3 kA değerinde adımlarla kademeli olarak artan akımlar yine 11 çevrim olarak uygulanmıştır. Her iki tipteki kaynak stratejisinde de kaynak öncesi sıkıştırma süresi 50 çevrim olarak ayarlanmıştır. Benzer olarak her kaynak durumunda birleştirme işlemi bittikten sonraki elektrot açma süresi 50 çevrim olarak belirlenmiştir. Buna bağlı olarak tek aşamalı kaynak uygulamasında tüm işlem 131 çevrim, yani 2,62 saniyede tamamlanırken çift aşamalı uygulamada bu süre 144 çevrim, yani 2,88 saniyeye çıkmaktadır. Aradaki 0,16 saniyelik fark aşamalar arasındaki soğutma ve ikinci aşamadaki kaynak nedeniyle oluşmaktadır.



Şekil 2. Uygulanan (a) tek aşamalı ve (b) çift aşamalı kaynak parametrelerinin şematik gösterimi (Schematic representation of (a) single pulse and (b) double pulse welding parameters)

Çalışmada incelenmesi planlanan her kaynak akımı değeri için 8 adet numune imal edilmiştir. Çekme-makaslama testlerinin sonuçlarının istatistiksel olarak anlamlı olabilmesi amacıyla üretilen numunelerden 7 tanesi bu testlerde kullanılmıştır. Tüm testler ISO 14273:2016 standardına uygun olarak sabit 10 mm/dak

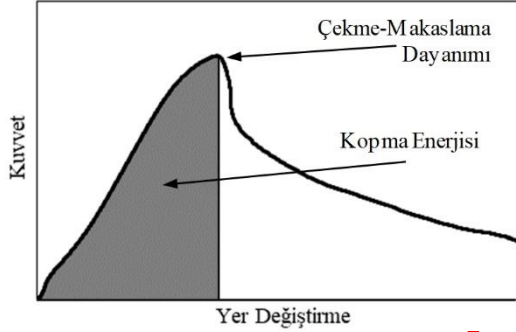
Çizelge 1. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi (% ağırlık) (Chemical composition of the used material (weight %))

C	Si	Mn	Ni	Al	Nb	V	Ti	Mo	Fe
0,078	0,083	1,94	0,15	0,031	0,087	0,02	0,092	0,168	kalan

hızıyla servo-elektrik yapıdaki 50 kN kapasiteli UTEST universal çekme cihazında gerçekleştirilmiştir [23]. Bağlantıların çekme-makaslama dayanımı ve kopma enerjisi uygulanan testlerin kuvvet-yer değiştirme eğrileri üzerinden belirlenmiştir. Bu sonuçlar örnek olarak Şekil 3'te gösterilmiştir. Kuvvet-yer değiştirme eğrisindeki en yüksek değer bağlantının çekme-makaslama dayanımı olarak değerlendirilmektedir. Kesitlerin homojen olduğu normal malzeme testlerinin aksine bu testlerde bağlantı bölgesinde düzensiz bir geometri bulunduğu için çekme-makaslama mukavemeti değerleri gerilme yerine kuvvet cinsinden verilir. Kopma enerjisi ise kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altında en yüksek yük değerine kadar alan olarak tanımlanır ve aşağıdaki formül ile hesaplanır:

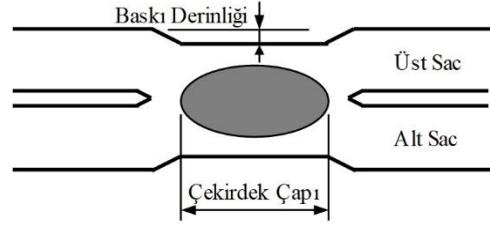
$$KE = \sum_{n=1}^{n_{max}} F(n)[x(n) - x(n-1)] \quad (1)$$

Burada F N cinsinden yük, x mm cinsinden yer değiştirme, n veri noktası sayısı ve nmax da en yüksek kuvvetin ölçüldüğü veri noktası sayısıdır.



Şekil 3. Çekme-makaslama testindeki kuvvet-yer değiştirme eğrisinin şematik gösterimi (Schematic representation of load-displacement curve in tensile-shear test)

Kaynaklanan numunelerden 1 tanesi geometri ve mikroyapı analizlerinde kullanılmıştır. Bu amaçla numuneler orta bölgelerinde abrasif olarak kesilmiş ve soğuk bakalıte alınmıştır. Sonrasında P400 ile P2500 arasında değişik seviyelerde kağıtlarla zımparalanmış ve 1µm elmas çözeltisi ile parlatılmıştır. Numuneler mikroyapının incelenmesi ve geometrik ölçümler amacıyla %4 oranında Nital çözeltisi ile 8 saniye boyunca dâğlanmışır. Optik ölçümler Optika IM-3MET mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada özel olarak çekirdek çapı ve baskı derinliği geometrileri ölçülmüştür. Bu büyüklükler şematik olarak Şekil 4'te gösterilmiştir. Mikroyapı incelemeleri ise Hitachi SU5000 taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sertlikleri ISO 6507-1:2018 standardına uygun olarak 500 g yük ve 15 s bekleme süresi ile Future Tech FM-700e cihazı ile gerçekleştirilmiştir [28]. Tüm ölçümler kaynaktaki bağlantı bölgesinin 0,2 mm altından çekirdek boyunca alınmıştır.

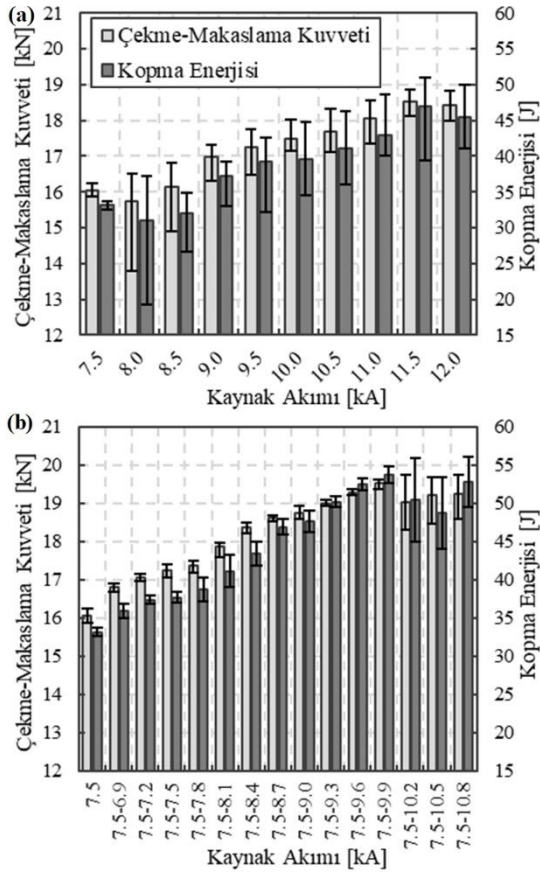


Şekil 4. Kaynak bölgesinin şematik gösterimi (Schematic representation of weld section)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Farklı akım değerleri kaynaklama stratejileri kullanılarak üretilen numunelerin çekme-makaslama testi sonuçları Şekil 5'te gösterilmiştir. Her bir durum için 7 farklı numune test edilmiş ve şekilde bu testlerin ortalamaları ile birlikte sapma değerleri olarak ölçümlerdeki en yüksek ile en düşük değerler de verilmiştir. Karşılaştırmayı kolaylaştırmak amacıyla hem tek aşamalı hem de çift aşamalı kaynak sonuçlarında y-eksenleri aynı limitler içerisinde gösterilmiştir.

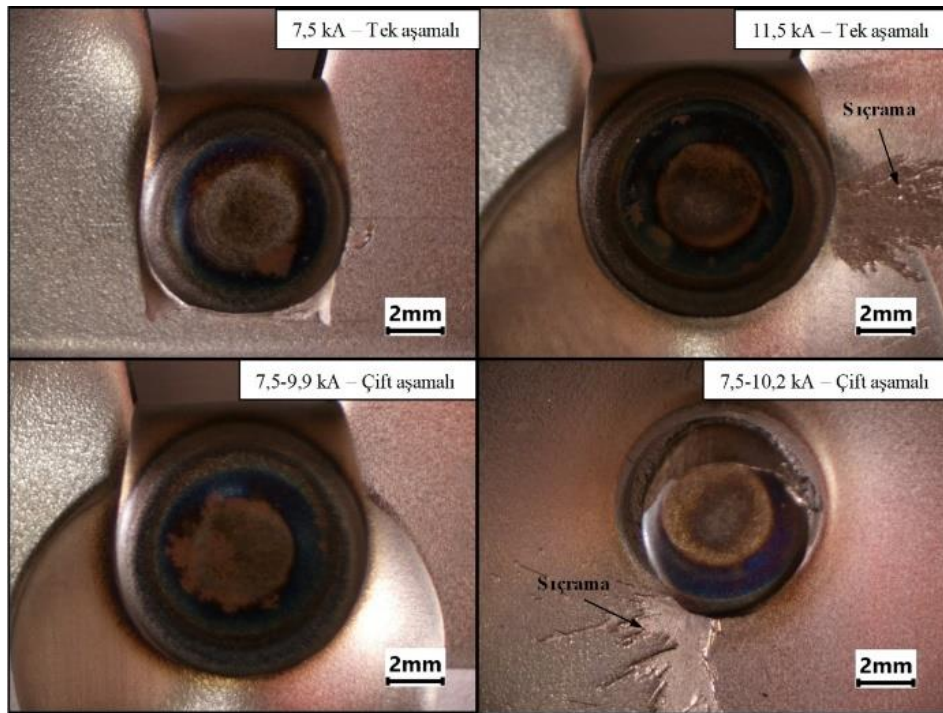
Tek aşamalı kaynak uygulaması durumunda 7,5 kA akım değerinde çekme-makaslama kuvveti ile kopma enerjisi değerleri 16,06 kN ve 33,13 J ile diğer tek aşamalı kaynak denemelerine kıyasla en düşük olarak belirlenmiştir. Ancak bu akım değerinde üretilen numunelerin testlerindeki standart sapma değerleri daha yüksek akım değerlerine kıyasla belirgin şekilde azdır. Çekme-makaslama dayanımı ve kopma enerjisindeki standart sapma sırasıyla 0,12 kN ve 0,49 J olarak hesaplanmıştır. Kaynak akımının 8,0 kA ve üzerine çıkarılması halinde 11,5 kA değerine kadar mekanik dayanımda düzenli bir artış gözlenmektedir. 11,5 kA kaynak akımının kullanıldığı durumda en yüksek dayanım 18,53 kN ve en yüksek kopma enerjisi de 46,89 J olarak ölçülmüştür. Bu şekilde ölçülen en düşük dayanım ve kopma enerjisine kıyasla sırasıyla %15,4 ve %41,5'lik artış gözlenmiştir. Ancak bu artışın yanında ölçümler arasındaki farklılıklar da belirgin bir şekilde büyümüştür. Çekme-makaslama dayanımı ve kopma enerjisindeki standart sapma değerleri sırasıyla 0,72 kN ve 3,69 J olarak hesaplanmıştır. Sonuç tek aşamalı uygulamada olarak kaynak akımı 7,5 kA değerinden 11,5 kA değerine çıkarken bağlantıların dayanımı iyileşmiş ancak aynı zamanda çekme-makaslama dayanımı ve kopma enerjisinde hesaplanan standart sapma değerleri sırasıyla %500 ve %653 artmıştır.



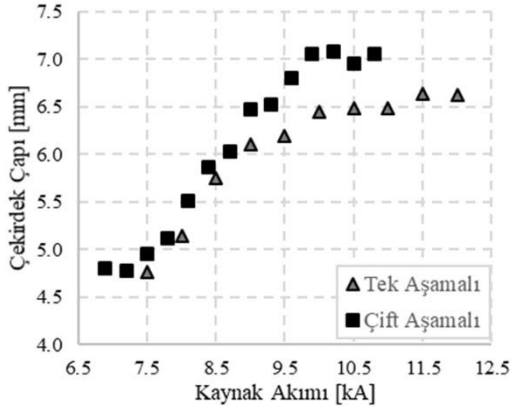
Şekil 5. Farklı akımlarla (a) tek aşamalı ve (b) çift aşamalı olarak üretilen kaynak numunelerinin çekme-makaslama testi sonuçları (Tensile-shear test results of (a) single pulse and (b) double pulse welding samples joined with different current values)

Sonuçlarda gözlenen bu durum Şekil 6'da gösterilen kaynak bölgesi kopma görselleri, Şekil 7'deki çekirdek çapı dağılımı, Şekil 8'de gösterilen baskı derinliğindeki değişimler ve Şekil 9'da örnek olarak verilen kuvvet-yer değiştirme diyagramları ile açıklanabilir. Şekil 6'da 7,5 kA akım uygulanması halinde kaynak bölgesinin düğmelenme şeklinde koptuğu ve kaynak sırasında sıçramanın gerçekleşmediği gösterilmiştir. Ancak akım artırıldığı zaman kaynak bölgesinde belirgin bir sıçrama oluşmaktadır. Sıçrama rastlantısal olarak gerçekleştiği ve kontrol edilemediği için de dayanımlar arasında farklar oluşmaktadır. Bu durum test sonuçlarındaki saçınlığı açıklamakla birlikte dayanımlardaki artış hakkında bilgi vermemektedir.

Dayanım farklarının değerlendirilebilmesi için Şekil 7'de çekirdek çapı dağılımları incelenmelidir. Bu şekilde X-ekseninde tek aşamalı kaynak için kullanılan akım değeri, çift aşamalı kaynak içinse ikinci aşamada kullanılan akım değeri gösterilmiştir. Tek aşamalı kaynak uygulamasında çekirdek çapları 7,5 kA akımdaki 4,76 mm değerinden başlayarak 11,5 kA akımdaki 6,64 mm değerine kadar artmaktadır. Bu artış yaklaşık 10,0 kA değerine kadar daha bızlı olmakla birlikte sonrasında çekirdek çapı büyümesi de yavaşlamaktadır. 11,5 kA değerinden sonra neredeyse sabit kalmaktadır. Çekirdek çapının büyümesi ile birlikte çekme-makaslama yüklenmesi altında yük taşıyan alan artmakta ve buna bağlı olarak da dayanım artmaktadır. Ancak akım değeri 11,5 kA seviyesinden 12,0 kA seviyesine çıkarıldığı zaman çekirdek çapında bir artış olmaması yüksek akımda eriyik metalin büyük bir kısmının sıçrama sonucu kaynak bölgesinden dışarı fıırdığının göstergesidir.

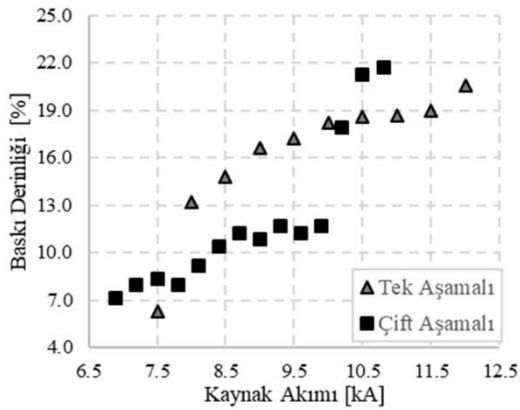


Şekil 6. Kaynak bölgesinin kopma görselleri (Fracture pictures of the weld section)



Şekil 7. Kaynak akımı ve aşama durumuna bağlı olarak oluşan çekirdek çapları (Nugget diameter distribution depending on the welding current and pulse number)

Tek aşamalı nokta direnç kaynağındaki sıçramanın etkileri baskı derinliği ölçüm sonuçlarında da gözlenmektedir. Şekil 8’de de gösterildiği gibi kaynak akımı 7,5 kA seçildiği zaman baskı derinliği %6,25 olarak ölçülmüştür. Ancak akım 8,0 kA seviyesine çıktığı zaman bu derinlik %111,3’lük artışla %13,21 değerine çıkmaktadır. Buradaki ani artış kaynak işleminde sıçramanın başladığını işaret etmektedir. Akım değeri artırıldıkça baskı derinliği de düzenli bir şekilde artış göstermektedir. Bununla birlikte akımın 12,0 kA değerine çıkartıldığı durumda baskıda ani bir artış görülmektedir. Bu durum bu akım seviyesinde sıçramada belirgin bir artış olduğunu işaret etmektedir. Sonuç olarak akımın 12,0 kA seçildiği durumda çekirdek büyümesi de gözlenmemekte ve bağlantı dayanımı da artmamaktadır.

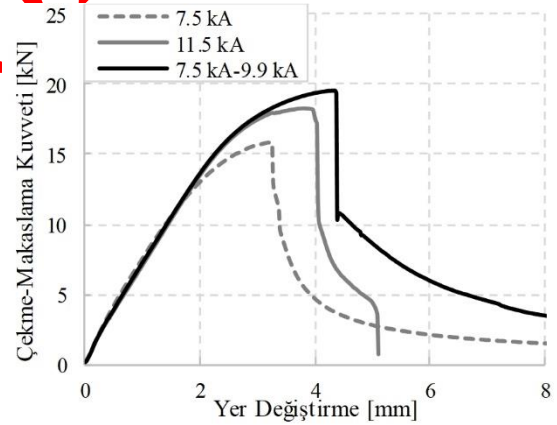


Şekil 8. Kaynak akımı ve aşama durumuna bağlı olarak oluşan baskı derinlikleri (Indentation distribution depending on the welding current and pulse number)

Çift aşamalı kaynak uygulaması kullanılması halinde bağlantıların çekme-makaslama dayanımı ve kopma enerjileri 9,9 kA akım seviyesine kadar artış göstermiştir. Bu şekilde ölçülen en yüksek dayanım ve enerji değerleri sırasıyla 19,52 kN ve 53,72 J olmuştur. Bu haliyle çift aşamalı kaynak uygulamasında dayanım ve kopma enerjisi değerleri tek aşamalıya kıyasla sırasıyla % 4,5 ve % 14,6 artırılabilmiştir. Bunun yanında çift aşamalı

kaynak işleminin en büyük avantajı olarak testlerdeki kararlılık ve buna bağlı standart sapmalarındaki düşüştür. Tek aşamalı kaynakta dayanım ve kopma enerjisindeki 0,72 kN ve 3,69 J değerindeki standart sapma değerlerine kıyasla çift aşamalı uygulamada aynı değerler 0,09 kN ve 1,11 J seviyesine gerilemiştir.

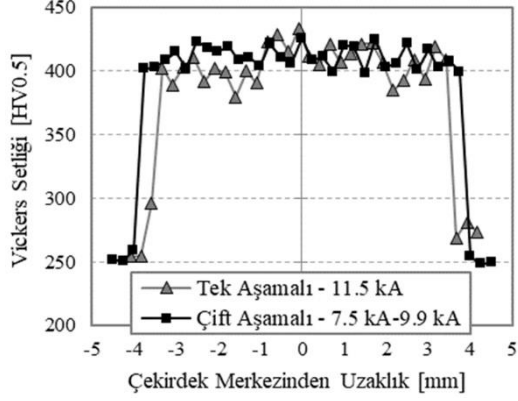
Öte yandan ikinci aşama kaynak akımı 10,2 kA değerine çıkarıldığı zaman hem çekme-makaslama dayanımı düşmüştür hem de sonuçlardaki sapmada belirgin bir artış olmuştur. Bu durum Şekil 6’da da gösterildiği gibi kaynak bölgesinde oluşmaya başlayan sıçrama ile açıklanabilir. İkinci kaynak akımının 9,9 kA değerinde seçilmesi halinde düğmelenme şeklinde oluşan kopmada herhangi bir fişırma belirtisi görülmemektedir. Ancak ikinci akımın 10,2 kA değerine çıkartılması halinde sıçrama belirgin şekilde oluşmaktadır. Buna bağlı olarak kopma şekli de tam düğmelenmeden kısmi düğmelenme ve kısmi arayer kopmasına dönüşmüştür. Şekil 7’de de gösterildiği gibi 7,2 kA ile 9,9 kA kaynak akımları arasında 4,78 mm seviyesinden 7,06 mm seviyesine düzenli olarak çıkan çekirdek büyümesi, 10,2 kA kaynak akımında başlayan fişırma oluşumu ile birlikte ani bir şekilde durmuştur. Buna ek olarak Şekil 8’de de görülebileceği gibi ikinci aşama kaynak akımının 10,2 kA veya üzerinde olması halinde baskı derinliklerinde ani ve belirgin bir artış oluşmaktadır. 9,9 kA halinde % 11,67 olan baskı derinliği ikinci akım 10,2 kA değerine çıkarıldığı zaman % 17,92 seviyesine çıkmıştır.



Şekil 9. Çekme-makaslama kuvveti-yer değiştirme eğrisi örnekleri (Examples of tensile-shear strength-displacement curves)

Şekil 6’da gösterilen kopma tipi farklarının aynı zamanda mekanik testlerdeki kuvvet-yer değiştirme dağılımına da etkisi bulunmaktadır. Tek aşamalı kaynak uygulamasında fişırma olmadan gerçekleştirilebilen tek akım değeri olan 7,5 kA durumunda Şekil 9’da da gösterildiği gibi en yüksek dayanıma ulaşıldıktan sonra düğmelenme şeklinde kopma gerçekleşmektedir. Ancak oluşan düğme sonrasında ana sacdan ayrıldığı için bağlantı yük taşımaya devam etmektedir. Benzer şekilde bir davranış çift aşamalı kaynak durumunda da gözlenmektedir. İkinci aşamada 9,9 kA akımı kullanılması halinde oluşturulan bağlantıda yine düğmelenme oluşmuştur. Sonrasında düğme ana sacdan

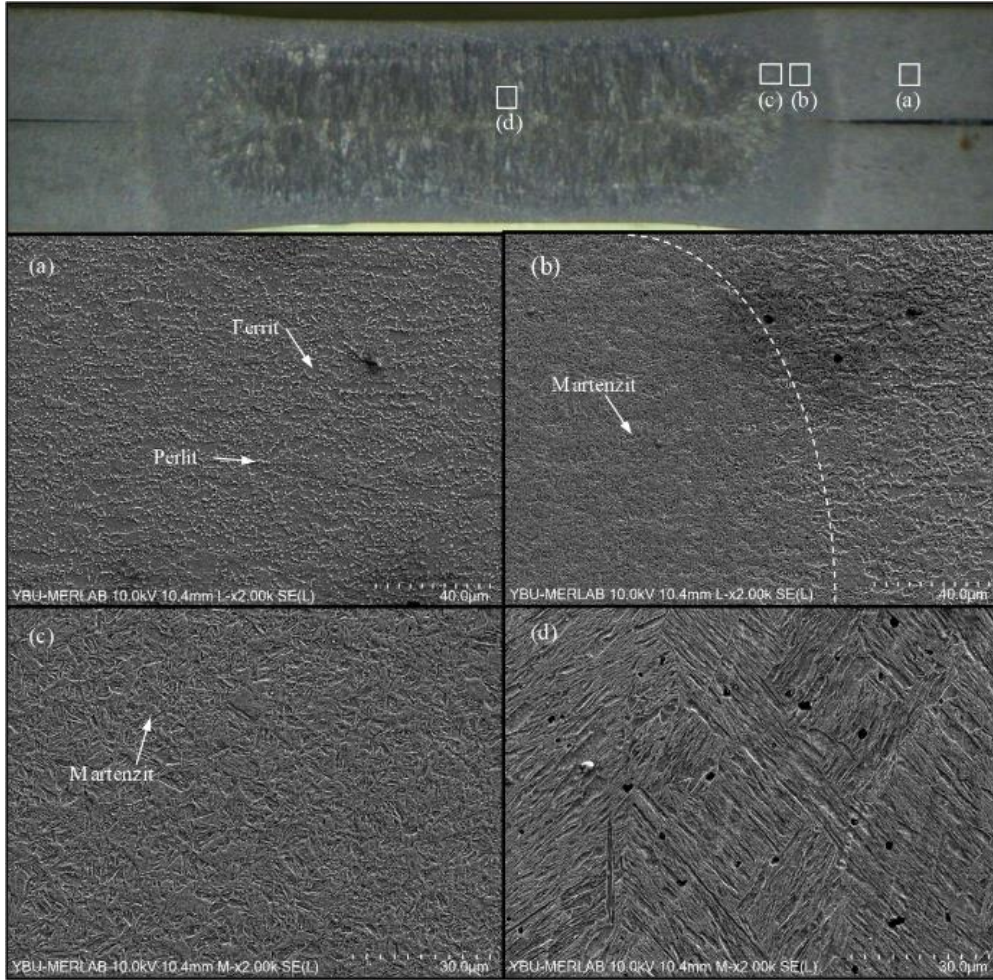
tam olarak ayrılmadığı için bağlantı en yüksek kuvvetin altında da olsa yük taşımaya devam etmiştir. Buna karşın tek aşamalı kaynakta en yüksek dayanımın görüldüğü 11,5 kA akım değerinde ise yine düğmelenme görülmekte ancak sonrasında oluşan düğme şekli ana saçtan kısa sürede ayrılmaktadır.



Şekil 10. Tek aşamalı ve çift aşamalı kaynak numunelerindeki örnek sertlik dağılımı (Hardness distribution example in single pulse and double pulse welding samples)

Tek ve çift aşamalı kaynakta en yüksek dayanımın elde edildiği akım değerlerindeki numunelerde kaynak boyunca sertlik dayanımı incelenmiştir. Ölçüm sonuçları Şekil 10'da gösterilmektedir. Sertlik ölçümleri sırasında 500 g yük kullanıldığı için 0,25 mm aralıklarla inceleme yapılabilmektedir. Sertlik değerlerinde ilk göze çarpan her iki kaynak şeklinde de çekirdek bölgesinde sertliklerde belirgin bir artış olmasıdır. Buna ek olarak ısı tesiri altındaki bölgede ana malzemenin daha altında bir sertlik ölçülmemiştir. Bu durum ısı tesiri altındaki bölgede herhangi bir yumuşamanın oluşmadığını işaret etmektedir. Tek ve çift aşamalı kaynak sertlik dağılımları arasındaki tek fark çift aşamalı kaynak durumunda çekirdek bölgesi daha büyük olduğu için sert çekirdek bölgesinin daha geniş bir alan kaplamasıdır.

Kaynak bölgesinin sertlik davranışı Şekil 11'de gösterilen mikroyapı analizleri ile açıklanabilir. Çalışmada kullanılan S700 çeliği Şekil 11 (a)'da gösterildiği gibi ferritik-perlitik mikroyapıya sahiptir. Bu ferritik-perlitik mikroyapı Şekil 11 (b)'de kesikli çizginin sağ tarafında görüldüğü gibi ısı tesiri altında bölgenin (ITAB) içerisinde de devam etmektedir. Bununla birlikte kaynak sonrasındaki hızlı soğuma nedeniyle ITAB bölge içerisinde kritik alan bölgeden (Şekil 11 (b) kesikli



Şekil 11. Çift aşamalı kaynak numunesinin mikroyapısı (Microstructure of double pulse welded specimen)

çizginin sağ tarafı) direkt olarak taneciklerin küçüldüğü süper-kritik bölgeye (Şekil 11 (b) kesikli çizginin sol tarafı) geçilmektedir. Buna bağlı olarak Şekil 10'da gösterilen sertlik dağılımında çekirdek bölgesinden ITAB içerisine geçişte sertliklerde herhangi bir düşüş gözlenmemektedir. Çekirdek içerisinde ortalara ilerledikçe mikroyapı baskın olarak martenzitik özellikler göstermektedir. ITAB ile çekirdek sınırında Şekil 11 (c)'de gösterildiği gibi küçük taneli martenzitik mikroyapı gözlenmiştir. Çekirdeğin içerisinde ise nokta direnç kaynağının karakteristik özelliği olan aşırı yönlendirilmiş martenzitik mikroyapı görülmektedir. Sonuç olarak da Şekil 10'da gösterilen sertlik dağılımlarında çekirdek içerisinde ortalama 400 HV değerlerinde yüksek sertlikler ölçülmüştür.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Güncel çalışmada 1,2 mm kalınlığında S700MC olarak adlandırılan sıcak haddelenmiş yüksek dayanımlı yapısal çeliğe uygulanan tek aşamalı ve çift aşamalı nokta direnç kaynağı stratejilerinin bağlantıların mekanik dayanımı ve kopma şekline etkisi incelenmiştir.

Tek aşamalı olarak uygulanan kaynak halinde en yüksek çekme-makaslama dayanımı ve kopma enerjisi sırasıyla 18,53 kN ve 46,89 J olarak ölçülmüştür. Aynı ölçümlerdeki standart sapma değerleri sırasıyla 0,72 kN ve 3,69 J olarak hesaplanmıştır.

Çift aşamalı kaynak uygulanması halinde en yüksek çekme-makaslama dayanımı ve kopma enerjisi sırasıyla 19,52 kN ve 53,72 J olarak ölçülmüştür. Bu halyle çift aşamalı kaynak uygulamasında dayanım ve kopma enerjisi değerleri tek aşamalıya kıyasla sırasıyla % 4,5 ve % 14,6 artmıştır. Çift aşamalı kaynağın tek aşamalıya kıyasla en büyük avantajı olarak çift aşama durumunda çekme-makaslama dayanımı ve kopma enerjisindeki standart sapma değerlerinin sırasıyla 0,09 kN ve 1,11 J hesaplanmış olmasıdır. Bu durum çift aşamalı nokta direnç kaynağı uygulanması halinde daha kararlı bağlantıların oluşturulabileceğini göstermektedir.

Tek aşamalı nokta direnç kaynağı uygulamasında en yüksek dayanımın görüldüğü durumda birleşme bölgesinde fişkırmaya gerçekleşmektedir. Buna bağlı olarak tek aşamalı kaynak durumunda en büyük çekirdek çapı 6,64 mm olarak ölçülmüştür. Buna karşı çift aşamalı kaynak uygulamasında çekirdek çapı 7,06 mm değerine herhangi bir fişkırmadan çıkabilmektedir. Çift aşamalı nokta direnç kaynağındaki çekme-makaslama dayanımı ve kopma enerjisindeki artış ile bu değerlerdeki standart sapmanın düşüklüğü çekirdek çapında fişkırmadan artış sağlanabilmesi ile açıklanmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 9210025 Numaralı proje ile ve SMART EUREKA CLUSTER tarafından Advanced Manufacturing Program kümesi altında S0406

proje numarası ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Jeswiet J., Geiger M., Engel U., Kleiner M., Schikorra M., Dufloy J., Neugebauer R., Barian P. and Bruschi S., "Metal forming progress since 2000", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 11: 2-17, (2008).
- [2] Yıldırım M.S., Kaya Y., Çakıroğlu R., Gülenç B., Kahraman N., Durgutlu N., "Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen titanyum levhaların çekme-makaslama dayanımlarının taguchi metoduyla optimizasyonu", *Politeknik Dergisi*, 22(3): 567-573, (2019).
- [3] Kijinski M. And Philips D.H. "Resistance Spot Welding – Fundamentals and Applications for the Automotive Industry" *Springer*, Switzerland, (2023).
- [4] Mutlusu Ö. ve Ertan R., "Nokta direnç kaynak yöntemi ile alüminyum ve titanyum alaşımı sacların IF çelik saclarla kaynak kabiliyetinin araştırılması", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1003-1013, (2020).
- [5] Kaya Y. ve Kahraman N. "Titanyum Sacların Nokta Direnç Kaynağı İle Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Çekirdek Oluşumuna Etkisi". *Politeknik Dergisi*, 14(4): 263-70, (2011).
- [6] Pouranvari M. and Marashi S.P.H., Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties, *Science and Technology of Welding and Joining*, 18-5:361-403, (2013).
- [7] Aslanlar S., Ogur A., Ozsarac U. and Ilhan E., "Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding", *Materials & Design* 29(7):1427-1431, (2008).
- [8] Mousavi Anijdan S.H., Sabzi M., Ghobeiti-Hasab M. and 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 & Engineering A*, 726:120-125, (2018).
- [9] Jaber H. L., Pouranvari M., Salim R.K., Hashim F.A. and Marashi S.P.H., "Peak load and energy absorption of DP600 advanced steel resistance spot welds", *Ironmaking & Steelmaking*, 44-9:699-706, (2017).
- [10] Kishore K., Kumar P. and Mukhopadhyay G., "Resistance spot weldability of galvanized and bare DP600 steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 271:237-248, (2019).
- [11] Yaghoobi F., Jamaati R. and Aval H.J., "Resistance spot welding of high-strength DP steel and nano/ ultrafine-

- grained IF steel sheets”, *Materials Chemistry and Physics*, 281:125909, (2022).
- [12] Rao S.S., Chhibber R., Arora K.S. and Shome M., “Resistance spot welding of galvanized high strength interstitial free steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 246:252-261, (2017).
- [13] Spina P.R., De Maddis M. and Lombardi F., “Mechanical strength and fracture resistance spot welded advanced high strength steels”, *Procedia Engineering*, 109:450-456, (2015).
- [14] Sivaraj P., Seeman M., Kanagarajan D. and Seetharaman R., “Influence of welding parameter on mechanical properties and microstructural features of resistance spot welded dual phase steel sheets joint”, *Materials Today: Proceedings*, 22-3:558-562, (2020).
- [15] Zhang H. and Senkara J., “Resistance Welding – Fundamentals and Applications”, *CRC Press*, Boca Raton, (2011).
- [16] Liu, X.D., Xu Y.B., Misra R.D.K., Peng F., Wang, Y. and Du Y.B., “Mechanical properties in double pulse resistance spot welding of Q&P 980 steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 263:186-197, (2019).
- [17] Chabok A., van der Aa E., Basu I., De Hosson J.T.M. and Pei Y., “Effect of pulse scheme on the microstructural evolution, residual stress state and mechanical performance of resistance spot welded DP1000-GI steel”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 23-8:649-658, (2018).
- [18] Chabok A., van der Aa E., De Hosson J.T.M. and Pei Y.T., “Mechanical behavior and failure mechanism of resistance spot welded DP1000 dual phase steel”, *Materials & Design*, 124:171-182, (2017).
- [19] Pouranvari M., Aghajani H. and Ghasemi A., “Enhanced mechanical properties of martensitic stainless steels resistance spot welds enabled by in situ rapid tempering”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 25-2:119-126, (2020).
- [20] Kim, J.W., Murugan, S.P., Yoo, J.H., Ashiri, R. and Park, Y. D., “Enhancing nugget size and weldable current range of ultra-high-strength steel using multi-pulse resistance spot welding”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 25-3:235-242, (2019).
- [21] Soomro I.A., Pedapati S.R. and Awang M., “Optimization of postweld tempering pulse parameters for maximum load bearing and failure energy absorption in dual phase (DP590) steel resistance spot welds”, *Materials Science & Engineering A*, 803:140713, (2021).
- [22] ISO 6892-1, “Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature”, (2009).
- [23] ISO 14273, “Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds”, (2016).
- [24] ISO 5821, “Resistance welding – Spot welding electrode caps”, (2009).
- [25] ISO 5182, “Welding – Materials for resistance welding electrodes and ancillary equipment” (1991).
- [26] AWS C1.1M/C1.1, “Recommended Practices for Resistance Welding”, (2019).
- [27] Görtan M.O., Yüksel B. and Çağırankaya F., “Control of the Martensitic Transformation During Resistance Spot Welding of High Strength S700MC Steel”, *Shape Memory and Superelasticity*, 9:485-491, (2023).
- [28] ISO 6507-1, “Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method”, (2018).