

## Elektrik direnç punta kaynağı ile kaynak edilmiş TWIP çeliklerinde kaynak parametrelerinin Taguchi yöntemi ile optimizasyonu

### The optimisation of welding parameters for electrical resistance spot-welded TWIP steels using a Taguchi method

Mümin TUTAR<sup>1</sup>, Hakan AYDIN<sup>2\*</sup>, Ali BAYRAM<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.  
mmnttr@gmail.com, hakanay@uludag.edu.tr, bayram@uludag.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 17.12.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 09.04.2018

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.88965

Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışmanın amacı, TWIP çelik saclarının elektrik direnç punta kaynağı ile birleştirmelerinde Taguchi metodu kullanarak kaynak parametrelerinin optimize edilmesidir. Kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot baskı kuvveti gibi kaynak parametrelerinin değerleri, rastgele yaklaşımlı L9 Taguchi ortogonal dizine göre belirlenmiştir. Optimum kaynak parametreleri, kaynaklı numunelerin en yüksek kopma yüküne göre tahmin edilmiş ve her bir parametrenin kopma yükü üzerindeki etkisi sinyal/gürültü (S/N) oranı ve varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir. Optimum kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot kuvveti sırasıyla 12 kA, 300 ms and 3000 N olarak bulunmuştur. ANOVA sonuçları, kopma yükü üzerindeki en yüksek istatistiksel etkiye %78.73 ile kaynak akımının sahip olduğunu gösterirken, kaynak akımını da sırasıyla kaynak zamanı ve elektrot baskı kuvvetinin takip ettiğini göstermiştir. Elektrik direnç punta kaynağı ile kaynak edilmiş birleştirmelerin kopma yükleri kaynak akımı ve elektrot baskı kuvvetiyle artmıştır. Ancak, yüksek kaynak zamanlarında nispeten daha düşük kopma yükleri gözlenmiştir. Ayrıca, seçilen kaynaklı numunelerin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak karakterize edilmiştir. Bu incelemede, daha yüksek kaynak mukavemetine sahip birleştirmelerin nispeten daha sünek kırılma karakteristiği sergilediği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** TWIP çeliği, Elektrik direnç punta kaynağı, Kaynak parametreleri, Kaynak mukavemeti, Optimizasyon

#### Abstract

The aim of this work is to optimize the welding parameters of electrical resistance spot welded TWIP steel sheets using a Taguchi method. The welding parameters, such as weld current, welding time and electrode force, were determined according to the Taguchi orthogonal array L9 using a randomized approach. The optimum welding parameters for the peak tensile shear load of the joints were predicted, and the individual importance of each parameter on the tensile shear load of the resistance spot weld was evaluated by examining the signal-to-noise (S/N) ratio and analysis of variance (ANOVA). The optimum weld current, welding time and electrode force were found to be 12 kA, 300 ms and 3000 N, respectively. The ANOVA results indicated that the weld current has the highest statistical effect with 78.73% on the tensile shear load, followed by the welding time and electrode force. The tensile shear load of the resistance spot welding joints increased with increasing weld current and electrode force. But, higher welding time led to relatively lower tensile shear load. In addition, the fracture surface characterization of the selected joints was conducted using scanning electron microscopy (SEM) technique. In this examination, it has been found that the joints having higher weld strength exhibited a relatively more ductile fracture characteristic.

**Keywords:** TWIP steel, Electrical resistance spot welding, Welding parameters, Weld strength, Optimisation.

## 1 Giriş

Yakıt ekonomisine önemli bir oranda etkisi bulunan araç hafifletme, yakıt tüketimini azaltmada en öne çıkan araştırma çalışmaları arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, otomotiv sektöründe, daha yüksek mukavemetli, beklenen performansı daha ince et kalınlığı ile sağlayabilen veya mevcut kalınlıkla daha yüksek bir performans sergileyen, kolay şekillendirilebilir ve daha ucuz sac kullanmak mevcut rekabet koşullarında neredeyse bir zorunluluk haline gelmiştir. Otomobillerde kullanılan metalik malzemelerin önemli bir kısmını çelik saclar oluşturmaktadır. Bu sebeple, çelik saclarla ilgili yapılabilecek en küçük bir iyileştirmenin etkisi bile büyük olmaktadır. Buna istinaden, yüksek mukavemetli çeliklerin otomotiv sektöründeki kullanımı giderek artmaktadır. Ancak, genel bir kural olarak sac dayanımının artması ile sacın şekillendirilebilirlik kabiliyeti önemli ölçüde azalmaktadır. Otomotiv sanayinde kullanılan saclar için geçerli olan bu kural, ultra geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler grubunda yer alan yeni nesil inovatif nitelikte değerlendirilen TWIP (Twinning Induced Plasticity) yüksek Mangan alaşımlı ostenitik çelik saclarla ortadan kaldırılmaktadır [1]-[3].

TWIP sacları yüksek dayanımı ile yük taşıma, çarpma enerjisi sönmüleme, maliyet ve ağırlık azaltma alanlarında ön plana çıkarken; aynı zamanda yüksek şekillenebilirlik kabiliyeti ile hemen her seviye karmaşık geometride parçaları yirtılma problemi yaşanmadan kalıplarda şekillendirmek mümkün olmaktadır. TWIP sacları genel olarak %17-24 Mangan, %0.5-0.7 Karbon, %1.8-3.5 Alüminyum ve %1.8-4 oranında Silisyum içerirler [2],[4]-[7]. Böylece nispeten yumuşak (şekillendirilebilir) ostenit fazı TWIP saclarında oda sıcaklığında da stabil olabilmektedir. Diğer taraftan, TWIP saclarında şekillendirmenin etkisiyle mevcut ostenit fazında değişim meydana gelir; ancak bu değişim faz dönüşümünden ziyade sadece atomik dizilişte kendi gösterir (ikizlenme). TWIP saclarında dayanımı sağlayan mekanizma işte bu ikizlenme (Twinning) mekanizmasıdır [8]-[10]. Şekillendirme oranı arttıkça ikizlenme sınırı miktarı da artar; dolayısıyla dayanım da artar. Buna ek olarak artan ikizlenme oranı tanelerin nispeten incelmeye de sebep olur ki, bu da sacın şekillendirilmesi esnasında kopmasını, yirtılmasını engeller; dolayısıyla şekillendirilebilirlik kaybedilmemiş olur.

Bilindiği gibi malzemelerin, mekanik özelliklerinin yanında üretim yöntemlerine de uygun olması, söz konusu malzemelerin pratik anlamda kullanılabilirliği açısından son derece önemli bir unsurdur. Sacların en çok maruz kaldığı üretim yöntemlerinin başında "kaynak" gelir. Günümüzde kullanılan tüm kaynak yöntemlerinde, uygulanan kaynak yöntemlerine bağlı olarak kaynak bölgesi ve çevresinde istenmeyen mukavemet düşüşleri meydana gelmektedir. Kaynak kalitesinin istenen seviyede olabilmesi ancak uygun kaynak parametrelerinin seçimiyle mümkün olmaktadır.

Otomotiv sektörü dikkate alındığında yassı çeliklerin kullanımının söz konusu olduğu yerlerde en çok kullanılan kaynak yöntemi elektrik direnç punta kaynağıdır. TWIP çeliklerinin kaynak kabiliyeti, yüksek oranda Mn, Si, Al gibi alaşım elementleri içermeleri nedeniyle alaşım çelik saclarına göre oldukça düşüktür [11]. Ancak, otomotiv sanayine yönelik yeni nesil çelik grubunda yer alan TWIP saclarının elektrik direnç punta kaynağı ile ilgili çalışmalar oldukça azdır. Bu çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir: Saha ve diğ. [12], Fe-18Mn-0.6C-1.5Al çeliğinin elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilebilirliğini araştırmışlar ve mikro yapı analizleri yapmışlardır. Alaşım elementlerinin fazla olmasından dolayı, diğer ileri yüksek mukavemet çelik (AHSS) türlerine göre sıçratma (expulsion) olayının daha önce gerçekleştiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca bu çalışmalarında, kısmen ergiyen bölgedeki çatlamların, porozitenin ve çekme boşluklarının en çok rastlanan kaynak hataları olduğunu belirtmişlerdir. Saha ve diğ. [13], bir diğer çalışmalarında elektrik direnç punta kaynağı ile kaynak edilmiş TWIP çeliklerinin ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) meydana gelen sıvılaştırma çatlak oluşumunu incelemişler ve çatlak boyunun ve genişliğinin ısı girdisi ile arttığını tespit etmişlerdir. Mújica ve diğ. [14], TWIP çeliklerinin kaynağı isimli çalışmada, kaynak bölgesindeki Mn buharlaşması, seyrelmesi ve segregasyonu konularına odaklanmışlardır. TWIP çeliklerindeki ostenitik katılaşmada mikrosegregasyonun meydana geldiği ve Karbon'un Mangan'a olan afinitesinin Demir'den fazla olmasından dolayı Karbon-Mangan'ca zengin bölgelerin oluştuğu, bunların da yine, bazı bölgelerde martenzitik dönüşümü tetiklediğini rapor etmişlerdir. Yu ve diğ. [15], 1 GPa seviyesinde çekme mukavemetine sahip TWIP ve DP çeliklerinin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesini, çekme-kayma testi, mikro sertlik ölçümü ve mikroyapı analizleri ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Zengin alaşım elementleri sonucu meydana gelen ergiyik sıçramasından dolayı uygun kaynak parametreleri aralığının TWIP çelikleri için daha dar olduğunu belirttikleri çalışmada, DP çeliğinin kaynak bölgesindeki martenzitik dönüşüm sonucu yüksek sertlik değerlerinin elde edildiğini, buna karşın TWIP çeliğinin farklı kaynak bölgelerinde sertlik değerlerinin yaklaşık aynı kaldığını belirtmişlerdir. Eşit kaynak bölgesi genişliği elde edildiği durumda DP çeliğinin yaklaşık 1.6 kat daha fazla yük taşıyabildiğini ortaya koymuşlardır. Kaynak akımını, gerilimini ve kaynak esnasındaki dinamik direnci ölçerek yaptıkları ısı girdisi hesabıyla, TWIP çeliğinin çok daha düşük ısı girdilerinde ergiyik sıçratması meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Holovenko ve diğ. [16], Fe-18Mn-0.6C içeren TWIP ve geleneksel DP çeliklerinin ayrı ayrı kaynaklarını karşılaştırmıştır. Hem elektrik direnç nokta kaynağının, hem de lazer kaynağının kullanıldığı çalışmada; metalografik inceleme, çekme ve yorulma testleri yapılmıştır. DP çeliğinin elektrik direnç punta kaynağında, kaynak bölgesi sertlik değerlerinin temel malzeme sertliğinden yaklaşık 150 HV

daha yüksek olduğunu ve makro hata içermeyen birleştirmenin elde edilebildiğini bildirilmişlerdir. TWIP çeliğinin elektrik direnç kaynağında ise mikro ve makro seviyede çekme boşluklarının ve porozitenin bulunduğu ve sertlik dağılımında (<40 HV) neredeyse değişiklik olmadığı rapor edilmiştir. Her iki çeliğinde yaklaşık 1 GPa çekme mukavemetinin bulunmasına karşın, akma mukavemetleri farkından dolayı yorulma testlerinde DP çeliği daha yüksek yorulma mukavemeti sergilemiştir. Spena ve diğ. [17], %22.4 Mn ve %0.51C içeren TWIP çeliğini geleneksel DP çeliği ve Mn-B sıcak şekillendirme çeliği ile MAG yöntemi ve 307L ek metali kullanarak alın altına birleştirmişlerdir. Yapılan mikro sertlik taramalarında ise en yüksek sertlik farkının DP ve Mn-B çeliklerinin ısı etkisi altında kalan bölgesinde bulunduğunu, Mn-B çeliğinin temel malzeme sertliğinin ve bahsedilen sertlik farkının daha yüksek değerler gösterdiğini bildirmişlerdir. TWIP çeliği tarafında ise sertlik değişiminin çok daha küçük değerlerde olduğunu tespit etmişlerdir. TWIP/DP birleştirmelerinde kırılmalar kaynak bölgesi ve DP çeliğinin ITAB'ında gerçekleşirken, TWIP tarafında ise hiç kırılma meydana gelmemiştir. Razmpoosh ve diğ. [18], 1 mm kalınlığındaki Fe-31Mn-3Al-3Si çelik sacları elektrik direnç punta kaynağı ile birleştirmişlerdir. Sonrasında, oluşan kaynak mikro yapılarını incelemişler, kaynak bölgesinde mikro sertlik ölçümleri yapmışlar ve kaynak parametrelerine göre çekme-kayma testleri sonucu kopma kuvvetlerini karşılaştırmışlardır. Ergimiş metal sıçraması olayının optimum kaynak parametrelerini daha düşük değerlere ötediğini vurgulamışlardır. Kaynak sonrası içyapı, dendritik ergime bölgesi ve iri taneli ITAB olarak ikiye ayrılmış, mikro sertlik ölçümlerinde en yüksek sertlikler sırasıyla, ergime bölgesi, temel malzeme ve ITAB'da elde edilmiştir.

Elektrik direnç punta kaynağında kaynak kalitesi tamamıyla kaynak parametreleri ile belirlenir. Bu anlamda, kaynak parametrelerinin optimizasyonu son derece önem kazanmaktadır. Bir deney tasarım metodu olan Taguchi yöntemi klasik deney tasarımlarına sağladığı üstünlüklerden dolayı (deney sayısı, maliyet, zaman gibi) son zamanlarda gerek akademik çalışmalarda gerekse özel firmalardaki mühendislik uygulamalarında, özellikle parametre optimizasyonu için sıkça kullanılan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [19]. Taguchi yöntemi ile elektrik direnç punta kaynak parametrelerinin optimizasyonuna yönelik çeşitli çalışmalar mevcuttur [20]-[24]. Ancak, TWIP çeliklerinin elektrik direnç punta kaynak parametrelerinin optimizasyonuna yönelik çalışmalar yok denecek kadar azdır [25]. Mevcut bu çalışmada, TWIP çeliklerinin mekanik özellikleri açısından büyük önem arz eden plastik deformasyonun kaynak işlemlerindeki etkileri de göz önüne alınmıştır. Ayrıca, bu çalışmada "çok amaçlı optimizasyon" yöntemi kullanılmış olup amaç fonksiyonu olarak çekme mukavemetini arttırmak ve görsel bir kısıt olan çökme değerini azaltmak bir arada kullanılmıştır.

TWIP çelikleri üzerinde yapılacak her çalışmanın, bu sacların otomotiv sanayindeki adaptasyon sürecine önemli bir katkı sağlayacağı açıktır. Bu çalışma kapsamında, TWIP saclarında elektrik punta kaynak parametreleri Taguchi deney tasarımı metoduyla optimize edilmiştir. Çalışmada, incelenecek elektrik direnç punta kaynak parametreleri olarak kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot baskı kuvveti belirlenmiştir. Çalışmada, kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çekme-kayma testleri uygulanmıştır. Ayrıca, test numunelerinin çekme testleri sonucundaki kırılma

yüzeyleri de Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak karakterize edilmiştir.

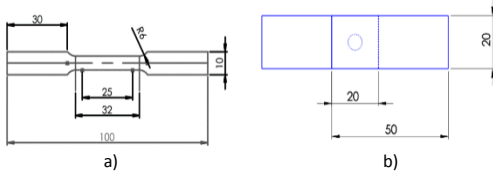
## 2 Materyal ve metot

Bu çalışmada 1.3 mm kalınlığındaki ticari olarak temin edilen TWIP çelik sacları kullanılmıştır. Kullanılan bu çelik sacın kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Çalışmada kullanılan TWIP çeliğinin kimyasal kompozisyonu (%Ağ.)

C	Mn	Si	Al	Cr	Ti
0.28	15.6	1.06	1.89	0.564	0.1

Temin edilen bu TWIP sacından 20x50mm boyutlarında kaynaklı üretimler için gerekli numuneleri ve TWIP sacının mekanik özelliklerini belirlemek için ASTM E8 standardına [26] uygun sub-size çekme numuneleri elde etmek üzere levhanın kesim işlemleri lazerle yapılmıştır. Bu bağlamda, sac levhadan numune alınması esnasında iç yapının ısıdan etkilenmesine müsaade edilmemiştir. Temel malzeme çekme numunelerinin inceltirilmiş kısımları ise CNC frezede işlenerek son ölçüsüne getirilmiştir. Kaynak numunelerinin ve çekme numunesinin ölçüleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: (a): ASTM E8 standardına uygun sub-size çekme numunesi. (b): Kaynak yapılacak numunelerin ölçüsü ve bindirme kaynak pozisyonu.

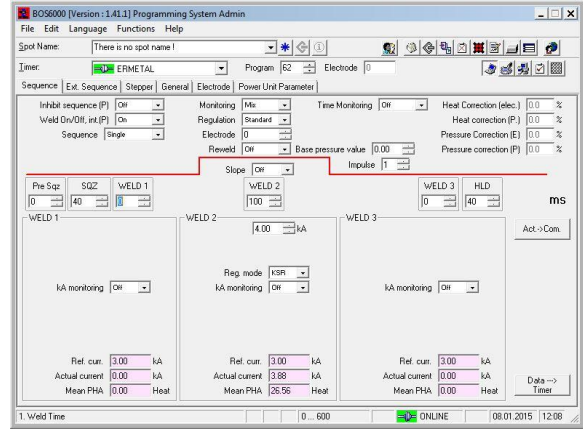
Tüm kaynak işlemleri Erkalıp-Bursa firmasında bulunan ABB marka kaynak robotuna bağlı MFDC (Medium-Frequency Inverter Technique) elektrik direnç punta kaynak makinesiyle yapılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2: Tüm kaynakların gerçekleştirilmesinde kullanılan ABB marka robot kola bağlı MFDC (Medium-Frequency Inverter Current) elektrik direnç punta kaynak makinesi.

Kaynak elektrotu olarak da 6 mm çapında bakır alaşımı elektrotlar kullanılmıştır. Prosesteki en etkili kaynak parametreleri olarak bilinen kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot baskı kuvveti incelenecek kaynak parametreleri olarak belirlenmiştir. Tüm kaynaklarda 40 ms sıkma zamanı ve 40 ms kaynak sonu tutma zamanı sabit tutulmuştur. Kaynak parametrelerinin hassas kontrolü kaynak robotunun bağlı olduğu BOS6000 programı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Kaynaklar esnasında elektrot çapında meydana gelebilecek değişikliklerin deney sonuçlarına etkisini minimuma indirebilmek için belirlenen periyotlarda (Ort. her 20 kaynak

sonrası) kaynak elektrotları ya yenileri ile değiştirilmiş ya da hassas taşlı işleme tabi tutulmuştur. Numunelerin kaynak prosesindeki sabitlenmesini sağlayacak ve kaynak işlemini pratikleştirerek işlem hızını arttıracak numune ölçülerine uygun bir sabitleyici aparat imal edilmiş olup tüm kaynak işlemlerinde bu sabitleyici aparatın yararlanılmıştır.



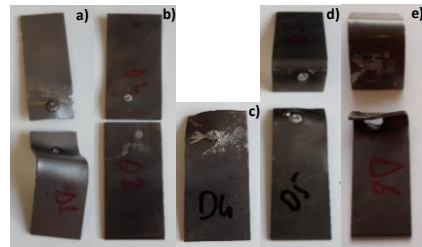
Şekil 3: Kaynak parametrelerinin kontrolünde kullanılan BOS6000 programının ekran görüntüsü.

Kaynaklı numuneler bilgisayar kontrollü UTEST-7014 marka universal çekme test cihazı kullanılarak kopma yükleri belirlenmek üzere laboratuvar şartlarında 5 mm/dk. sabit çekme hızında çekme-kayma testlerine (tensile-shear test) tabi tutulmuştur. Her bir parametre grubu için en az 3 numune çekme testlerine tabi tutularak kaynaklı numunelerin ortalama kopma yükleri tespit edilmiştir. Ayrıca, kaynaklı numunelerin çekme testleri sonucundaki kırılma yüzeyleri de taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

Çekme testi sonucunda, TWIP temel malzemesinin çekme mukavemeti 982 MPa, uzaması da %46 olarak belirlenmiştir.

## 3 Sonuçlar ve tartışma

Çalışmada öncelikle, Taguchi metodu ile optimize edilecek kaynak parametrelerinin (kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot baskı kuvveti) alt ve üst sınırlarının belirlenmesi için ön denemeler yapılmıştır. Bu ön denemelerde üretilen kaynaklı numunelerden bazıları Şekil 4'te kaynak parametreleriyle birlikte verilmiştir.



Şekil 4: Ön deneme numunelerine ait görüntüler (kaynak parametreleri sırasıyla elektrot baskı kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanı). (a): 2000N, 4kA, 100 ms-çekirdek mevcut, (b): 2000N, 3kA, 50 ms-çekirdek yok, (c): 1000N, 4kA, 100ms - çekirdek yok, (d): 1500N, 4kA, 100 ms-çekirdek yok, (e): 3000N, 10kA, 500 ms-çekirdek mevcut.

Bilindiği gibi, genel itibarıyla mekanik koparma ile çekirdek veren tipte bir kırılma (full button pull-out type fracture) sergileyen kaynak numuneleri daha yüksek kaynak mukavemetine sahip olmaktadır. Bu bağlamda, ön



çalışmalardaki kaynak parametrelerinin alt sınırlarında mekanik koparma ile (soyma testi şeklinde) en küçük çekirdek oluşumunun gözlenmesi, üst sınırlarında ise sıçramanın (expulsion) yoğunluğu veya %35'lik çökme miktarı kriter olarak alınmıştır. Ön denemelerle kaynak parametrelerinin aralıklarını belirleme çalışmalarında, alt ve üst sınırlar olarak sırasıyla, elektrot baskı kuvveti için 2000N-3000N, kaynak akımı için 4kA-12kA ve kaynak zamanı içinse 100 ms-500 ms değerleri belirlenmiştir. Bu değerlere bağlı olarak Taguchi optimizasyonuna yönelik deney numuneleri için kaynak parametreleri ve seviyeleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'deki kaynak parametreleri ve seviyeleri kullanılarak oluşturulan L9 Taguchi ortogonal dizi, çekme testlerinden elde edilen ortalama kopma kuvveti değerleri ve bu ortalama değerlerin standart sapmaları Tablo 3'te verilmiştir. Sinyal/Gürültü (S/N) oranları "en büyük en iyi" kriteri kullanılarak hesaplanmıştır [19]. Üretilen deney numunelerinin örnekleri de Şekil 5'te gösterilmiştir.

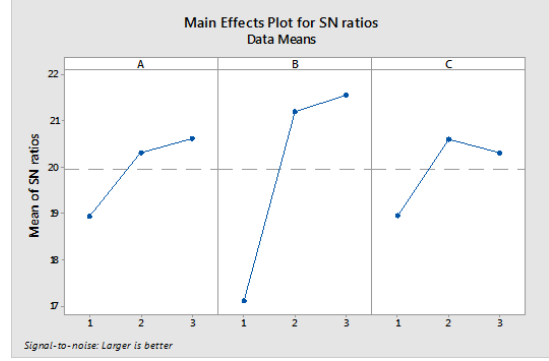


Şekil 5: L9 Taguchi ortogonal dizine göre üretilen kaynaklı numuneler.

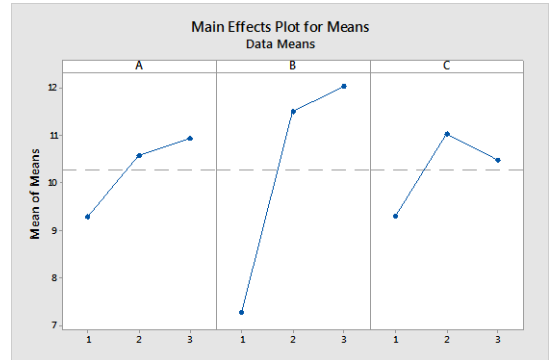
Hesaplanan S/N oranları ve ortalama değerlerin etkileri [19] Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir. S/N oranları için etki sıralamasının büyükten küçüğe sırasıyla Kaynak Akımı, Elektrot Baskı Kuvveti ve Kaynak Zamanı şeklinde olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, ortalama değerler için etki sıralaması büyükten küçüğe sırasıyla Kaynak Akımı, Kaynak Zamanı ve Elektrot Baskı Kuvveti olmuştur. Buna istinaden, S/N oranları için de ortalama değerler için de Elektrot Baskı Kuvveti ve Kaynak Zamanı için elde edilen değerlerin birbirlerine çok yakın olduğunu da vurgulamak gerekir. Bu etkiler, Şekil 6 ve Şekil 7'de grafik olarak da verilmiştir: Her bir faktörün tepki karakteristiğini nasıl etkilediği gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi her iki grafik birbiri ile mükemmel bir korelasyon sergilemiştir. S/N oranlarını en büyük yapan parametre seviyesi olarak 3-3-2 (Kaynak akımı: 12 kA; Kaynak zamanı: 300 ms; Elektrot baskı kuvveti: 3000 N) olarak belirlenmiştir. Yani, deney numuneleri ile Taguchi yönteminde elde edilen sonuçlara istinaden maksimum kopma kuvveti için optimum kaynak parametreleri deney No 9'da elde edilmiştir. Optimum kaynak parametrelerinin mevcut deney seti içerisinde çıkmasından dolayı, Taguchi yönteminin aşamalarından biri olan doğrulama deneyine gerek kalmamıştır.

Kaynak parametrelerinin katkı oranlarını belirlemek amacıyla ANOVA (analysis of variance) analizi de yapılmıştır [19] (Tablo 6). Bu analizden de, TWIP çeliği için kaynak parametrelerinin etki sırası büyükten küçüğe Kaynak Akımı, Kaynak Zamanı ve Elektrot Kuvveti olarak tespit edilmiştir. Bu etki sıralaması Taguchi analizinden elde edilen rank değerleriyle de örtüşmektedir. Ayrıca, ANOVA analizi sonucunda hata oranı %3.74 olarak belirlenmiştir (Tablo 6). Optimizasyon çalışmalarında oluşan hata miktarının %5'in

altında olması da, yapılan optimizasyonun kabul edilebilirliğini göstermektedir.



Şekil 6: Kaynaklı numunelerin kopma yükü için S/N oranlarının temel etki grafiği. (A): Elektrot baskı kuvveti, (B): Kaynak akımı, (C): Kaynak zamanı.



Şekil 7: Kaynaklı numunelerin kopma yükü için ortalamaların temel etki grafiği. (A): Elektrot baskı kuvveti, (B): Kaynak akımı (C): Kaynak zamanı.

Elde edilen sonuçlar irdelendiğinde, genel itibariyle kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot baskı kuvveti artışı ile kaynak mukavemetinde artış meydana gelmiştir. Ancak, yüksek kaynak zamanlarında ise kaynak mukavemetinde bir miktar düşüş de gözlenmiştir. Bilindiği gibi, çeliklerin elektrik direnç punta kaynağında kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ile ısı girdisi artışına bağlı olarak çekirdek çapında artış meydana gelmektedir [27]-[30]. Bu çekirdek artışı da, kaynak bölgesi yük taşıma kesit alanını arttırarak kaynaklı birleştirmelerin mukavemetini arttırmaktadır. Ancak, ısı girdisi artışı bir taraftan da punta kaynağı üzerindeki çökme miktarını arttırmaktadır [29],[30]. Bu da, bu bölgede kesit incelmeye ve çentik etkisi ile daha düşük kaynak mukavemetine sebep olabilmektedir. Nitekim bu çalışmada da bu sebeple yüksek kaynak sürelerinde yüksek ısı girdisine bağlı olarak kaynak mukavemetinde bir düşüş gözlenmiştir. Diğer taraftan, beklentilerin aksine elektrot baskı kuvveti artışı ile ısı girdisi azalmasına rağmen kaynak mukavemeti artmıştır. Bunun sebebi de, yüksek ısı girdisine sebep olan düşük elektrot baskı kuvvetlerinin erime bölgesindeki sıçratmayı (TWIP çeliklerinin yüksek alaşım elementi içermesinden dolayı) arttırarak daha küçük çekirdek çapı oluşumuna yol açması gösterilebilir [15],[18],[31]. Böylece, daha küçük çekirdek çapı da daha düşük kaynak mukavemetine sebep olmuştur. Ancak, daha yüksek elektrot baskı kuvvetlerinde ısı girdisinin daha da azalmasıyla çekirdek çapının küçülmesi mertebesinde kaynak mukavemetinin düşecektir [31].

Tablo 2: Taguchi optimizasyonuna yönelik deney numuneleri için kaynak parametreleri ve seviyeleri (SD: Serbestlik derecesi).

Kaynak Parametreleri	SD (Seviye No-1)	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Elektrot Baskı Kuvveti (N)	2	2000	2500	3000
Kaynak Akımı (kA)	2	4	8	12
Kaynak Zamanı (ms)	2	100	300	500
Toplam SD	6			

Tablo 3: Deney numuneleri için oluşturulan L9 Taguchi ortogonal dizi, bu numunelere ait çekme test sonuçları, standart sapma değerleri ve S/N oranları (SS: Standart sapma; S/N Oranı: Sinyal/Gürültü oranı).

Deney No	Elektrot Baskı Kuvveti (N)	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (ms)	Ortalama Kopma kuvveti [kN]	Kırılma Modu	SS	S/N Oranı
1	2000	4	100	5.62	Arayüzey Tip	0.25	14.99
2	2000	8	300	11.65	Çekirdek Veren Tip	0.56	21.33
3	2000	12	500	10.61	Çekirdek Veren Tip	0.95	20.52
4	2500	4	300	7.68	Arayüzey Tip	0.05	17.71
5	2500	8	500	12.30	Çekirdek Veren Tip	0.16	21.80
6	2500	12	100	11.75	Çekirdek Veren Tip	0.05	21.40
7	3000	4	500	8.53	Arayüzey Tip	0.03	18.62
8	3000	8	100	10.55	Arayüzey Tip	0.25	20.46
9	3000	12	300	13.72	Çekirdek Veren Tip	0.17	22.75

Tablo 4: Deney numunelerinin kopma kuvvetleri için S/N oranlarının tepki tablosu (response table).

Seviye	Elektrot Baskı Kuvveti	Kaynak Akımı	Kaynak Zamanı
1	18.94	17.11	18.95
2	20.30	21.19	20.60*
3	20.61*	21.56*	20.31
Delta	1.67	4.45	1.65
Rank	2	1	3

\*Optimum Seviye.

Tablo 5: Deney numunelerinin kopma kuvvetleri için ortalamalar (means) tepki tablosu (response table).

Seviye	Elektrot Baskı Kuvveti	Kaynak Akımı	Kaynak Zamanı
1	9.293	7.276	9.306
2	10.578	11.498	11.019*
3	10.932*	12.030*	10.479
Delta	1.639	4.754	1.713
Rank	3	1	2

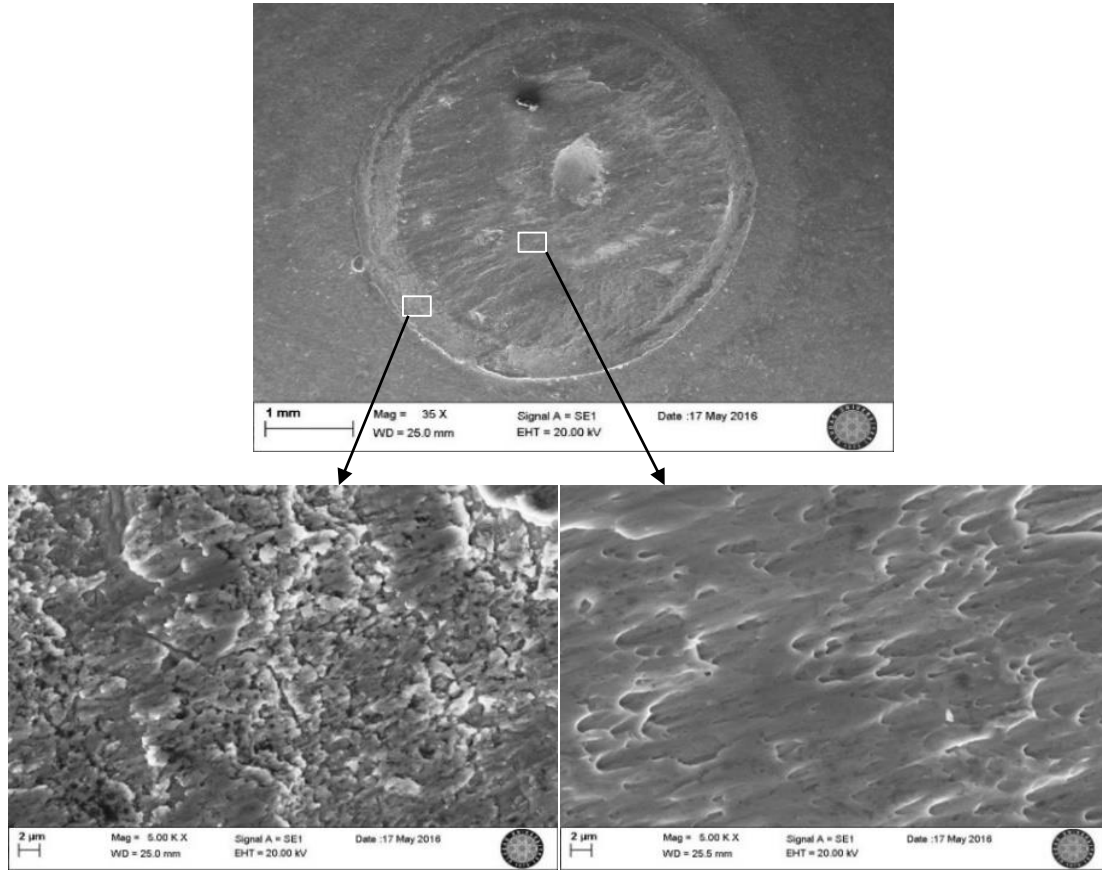
\*Optimum Seviye

Tablo 6: Deney numuneleri için ANOVA analizi.

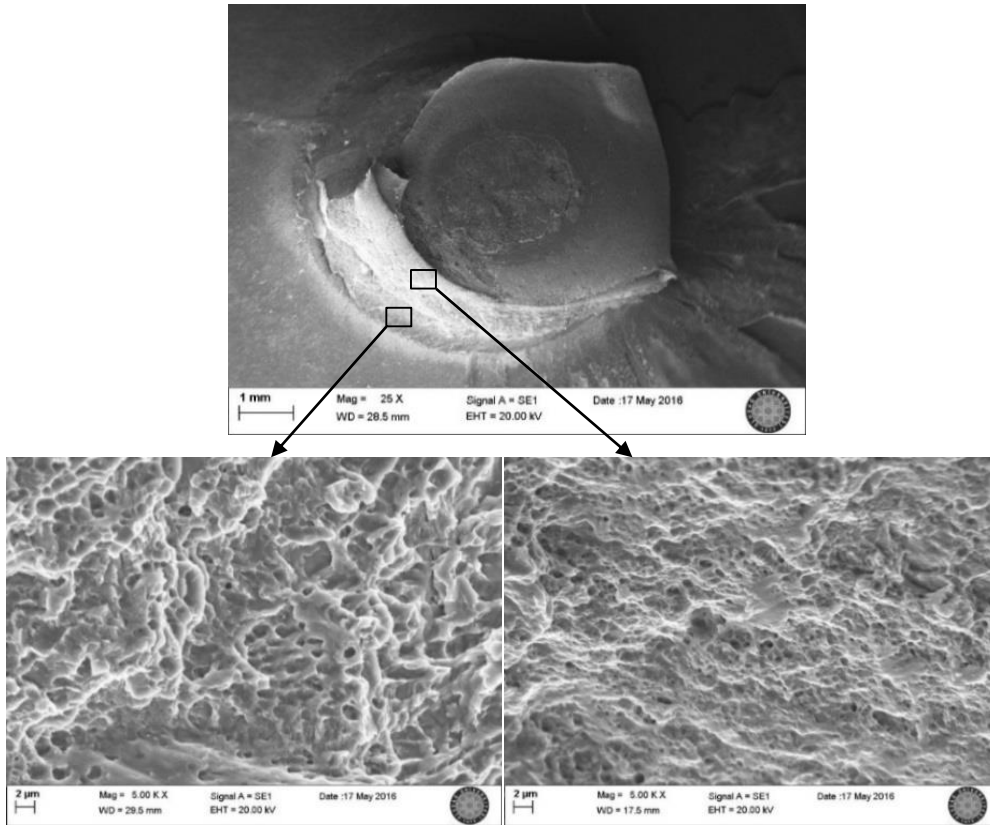
Kaynak Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Ardışık Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F	P	% Katkı
Elektrot Baskı Kuvveti	2	4.461	4.461	2.2307	2.31	0.303	8.63
Kaynak Akımı	2	40.715	40.715	20.3576	21.04	0.045	78.73
Kaynak Zamanı	2	4.604	4.604	2.3019	2.38	0.296	8.90
Artık Hata	2	1.935	1.935	0.9676			3.74
Toplam	8	51.716					100

Çekme testi sonrası kaynaklı numunelerin kırılma yüzeyi incelemeleri Şekil 8 ve 9'da verilmiştir. Çok düşük mukavemete sahip ara yüzey kırılması (interfacial fracture) sergileyen numunenin (Deney no 1) kırılma yüzeyi incelendiğinde, merkez dışında muhtemelen ITAB ve erime bölgesi arasında gevrek parçalı bir kırılma gözlenmiştir (Şekil 8). Bu bölge civarında (ITAB ve erime bölgesi arayüzeyi civarında), iki sac arasında güçlü bir bağlantının meydana gelmediği söylenebilir. Diğer taraftan merkez bölgesinde hem gevrek hem de sünek kırılmanın (sığ çukurcuklar) işaretlerini de içeren gevrek-sünek tarzda karışık bir kırılmanın varlığı söz konusudur (Şekil 8). Bu bölge de erime bölgesine denk düşmektedir. Bu bölgede oldukça güçlü bir bağlantı söz konusu olmuş olsa da merkez dışındaki bölgede (gevrek parçalı kırılma) çekme yükü altında oluşan çok sayıda ilerleyen tarzdaki çatlağın merkez bölgesinde hızla ilerlemesiyle kırılma düşük yükte gerçekleşmiştir. Şekil 8'deki

makro görüntüde, çatlak ilerleme izleri de görülebilmektedir. Yüksek mukavemete sahip çekirdek veren tipte kırılma (full button pull-out type fracture) sergileyen numunenin (Deney No 2) kırılma yüzeyi incelendiğinde ise, merkez dışındaki bölgede gevrek kırılmanın baskın olduğu gevrek-sünek tarzda karışık bir kırılma gözlenmiştir (Şekil 9). Bu bölge, ITAB ve erime bölgesi arasına denk düşmektedir ve bu bölgede güçlü bir bağlantının meydana geldiği net olarak söylenebilir. Bu bölgedeki güçlü bağlantı, çekme yönündeki ilerleyen uzun çatlak oluşumlarına fırsat vermeyip mukavemetin daha yüksek çıkmasında önemli rol oynamıştır. Diğer taraftan, merkez bölge civarındaki kırılma gevrek kırılma işaretleri içerse de esas itibarıyla birçok irili ufaklı (sığ ve derin) çukurcuk içeren sünek bir kırılmayı ön plana çıkarmaktadır.



Şekil 8: Deney No 1'deki kaynaklı numuneye ait çekme testi sonrasındaki SEM kırılma yüzeyi görüntüleri.



Şekil 9: Deney No 2'deki kaynaklı numuneye ait çekme testi sonrasındaki SEM kırılma yüzeyi görüntüleri.

## 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, elektrik direnç punta kaynağı ile kaynak edilmiş TWIP çeliklerinde kaynak mukavemetini maksimize edecek kaynak parametreleri Taguchi ortogonal dizi kullanılarak optimize edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Kaynak parametrelerinin optimum kombinasyonu, 12 kA kaynak akımı, 300 ms kaynak zamanı ve 3000 N elektrot baskı kuvveti olarak belirlenmiştir,
- Kaynak parametrelerinin genel etki sıralaması, kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot baskı kuvveti şeklindedir. Kaynak akımı %78.73 oranı ile en etkin parametredir. Diğer taraftan, kaynak zamanı ve elektrot baskı kuvvetinin etki oranları birbirlerine oldukça yakındır,
- Kaynak mukavemeti kaynak akımı ve elektrot baskı kuvveti ile artmıştır. Ancak, yüksek kaynak zamanlarında daha düşük kaynak mukavemeti elde edilmiştir,
- Daha yüksek kaynak mukavemetine sahip birleştirmelerde ısı tesiri altındaki bölge ve erime bölgesi arasında daha güçlü bir bağlantı görülürken, bu birleştirmeler genel itibarıyla nispeten daha sünek kırılma karakteristiği sergilemişlerdir.

## 5 Teşekkür

Bu çalışma, MAG 213M597 proje numarası ile TÜBİTAK "Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme" Programı kapsamında finansal olarak desteklenmiştir. Yazarlar olarak, bu desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz. Ayrıca, yazarlar olarak, kaynakların yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Bursa Ermetal A.Ş.'ye de teşekkürlerimizi sunmaktayız.

## 6 Kaynaklar

- [1] Bouaziz O, Allain S, Scott CP, Cugy P, Barbier D. "High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships". *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 15, 141-168, 2011.
- [2] Chen L, Zhao Y, Qin, X. "Some aspects of high manganese twinning-induced plasticity (TWIP) steel, a review". *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 26, 1-15, 2013.
- [3] Cornette D, Cugy P, Hildenbrand A, Bouzekri, M, Lovato G. "Ultra High Strength FeMn TWIP Steels for Automotive Safety Parts". *SAE Technical Paper 2005-01-1327*, 2005, <https://doi.org/10.4271/2005-01-1327>.
- [4] Curtze S, Kuokkala VT. "Dependence of tensile deformation behavior of TWIP steels on stacking fault energy, temperature and strain rate". *Acta Materialia*, 58(15), 5129-5141, 2010.
- [5] Peng X, Zhu D, Hu Z, Wang M, Liu L, Liu H. "Effect of carbon content on stacking fault energy of Fe-20Mn-3Cu TWIP Steel". *Journal of Iron and Steel Research, International*, 21(1), 116-120, 2014.
- [6] Xiong Z, Ren X, Shu J, Wang Z, Bao W, Li, S. "Effect of Temperature on Microstructure and Deformation Mechanism of Fe-30Mn-3Si-4Al TWIP Steel at Strain Rate of 700 s<sup>-1</sup>". *Journal of Iron and Steel Research, International*, 22(2), 179-184, 2015.

- [7] Neu RW. "Performance and characterization of TWIP steels for automotive applications". *Materials Performance and Characterization*, 2(1), 244-284, 2013.
- [8] Saha DC, Cho Y, Park Y. "Metallographic and fracture characteristics of resistance spot welded TWIP steels". *Science and Technology of Welding and Joining*, 18(8), 711-720, 2013.
- [9] Ma L, Wei Y, Hou L, Yan B. "Microstructure and mechanical properties of TWIP steel joints". *Journal of Iron and Steel Research, International*, 21(8), 749-756, 2014.
- [10] Jin JE, Lee YK. "Strain hardening behavior of a Fe-18Mn-0.6C-1.5Al TWIP steel". *Materials Science and Engineering: A*, 527(1-2), 157-161, 2009.
- [11] Billur E, Cetin B, Gurleyik M. "New generation advanced high strength steels: developments, trends and constraints". *International Journal of Scientific and Technological Research*, 2(1), 50-62, 2016.
- [12] Saha DC, Han S, Chin KG, Choi I, Do Park Y. "Weldability evaluation and microstructure analysis of resistance-spot-welded high-Mn steel in automotive application". *Steel Research International*, 83(4), 352-357, 2012.
- [13] Saha DC, Chang I, Park Y-D. "Heat-affected zone liquation crack on resistance spot welded TWIP steels". *Materials Characterization*, 93, 40-51, 2014.
- [14] Mújica Roncery L, Weber S, Theisen W. "Welding of twinning-induced plasticity steels". *Scripta Materialia*, 66(12), 997-1001, 2012.
- [15] Yu J, Shim J, Rhee S. "Characteristics of resistance spot welding for 1 GPa grade twin induced plasticity steel". *Materials Transactions*, 53(11), 2011-2018, 2012.
- [16] Holovenko O, Lenco MG, Pastore E, Pinasco MR, Matteis P, Scavino G, Firrao D. "Microstructural and mechanical characterization of welded joints on innovative high-strength steels". *Metallurgia Italiana*, 105(3), 3-12, 2013.
- [17] Spena PR, Matteis P, Sanchez A, Scavino G. "Strength and fracture of TWIP steel dissimilar weld joints". *Convegno Nazionale IGF XXII*, Roma, Italia, 1-3 July 2013, 109-117
- [18] Razmpoosh M, Shamanian M, Esmailzadeh M. "The microstructural evolution and mechanical properties of resistance spot welded Fe - 31Mn - 3Al - 3Si TWIP steel". *Materials and Design*, 67, 571-576, 2015.
- [19] Tutar M, Aydın H, Yüce C, Yavuz N, Bayram A. "The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array". *Materials & Design*, 63, 789-797, 2014.
- [20] Singh NK, Vijayakumar Y. "Application of Taguchi method for optimization of resistance spot welding of austenitic stainless steel AISI 301L". *Innovative Systems Design and Engineering*, 3(10), 49-61, 2012.
- [21] Thakur AG, Rao TE, Mukhedkar MS, Nandedkar VM. "Application of Taguchi method for resistance spot welding of galvanized steel". *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(11), 22-26, 2010.
- [22] Raut M, Achwal V. "Optimization of spot welding process parameters for maximum tensile strength". *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 3(4), 507-517, 2014.
- [23] Pandey AK, Khan MI, Moed KM. "Optimization of resistance spot welding parameters using Taguchi Method". *International Journal of Engineering Science and Technology*, 5(2), 234-241, 2013.



- [24] Thakur AG, Nandedkar VM. "Optimization of the resistance spot welding process of galvanized steel sheet using the Taguchi method". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(2), 1171-1176, 2014.
- [25] Tutar M, Aydın H, Bayram A. "Multi objective Taguchi optimization approach for resistance spot welding of cold rolled TWIP steel sheets". *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 885, 1-5, 2017.
- [26] ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials. *Annual Book of ASTM Standards* 4, 1-27, 2010.
- [27] Ertek Emre H, Kaçar R. "Resistance spot weldability of galvanize coated and uncoated TRIP steels". *Metals*, 6, 299, 2016. doi:10.3390/met6120299.
- [28] Baskoro AS, Trianda MR, Istiyanto J, Supriyadi S, Sumarsono DA, Kiswanto G. "Effects of welding time and welding current to weld nugget and shear load on electrical resistance spot welding of cold rolled sheet for body construction". *IEEE International Conference on Electrical Engineering and Computer Science*, Bali, Indonesia, 24-25 November 2014.
- [29] Tutar M, Aydın H, Bayram A. "Effect of Weld Current on the Microstructure and Mechanical Properties of a Resistance Spot-Welded TWIP Steel Sheet". *Metals*, 7, 519, 2017.
- [30] Aydın H, Tutar M, Bayram A. "The Influence of Welding Time on Mechanical Properties of Resistance Spot Welded TWIP Steel Sheets". *XIII International Scientific Congress Machines, Technologies, Materials*, Varna, Bulgaria, 14-17 September 2016.
- [31] Aydın H, Tutar M, Bayram A. "Otomotiv sanayinde kullanılan twıp çeliğinin elektrik direnç punta kaynağında elektrod baskı kuvvetinin mekanik özelliklere etkisi". *8. Otomotiv Teknolojileri Kongresi OTEKON16*, Bursa, Türkiye, 23-24 Mayıs 2016.