

YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİK SAÇLARIN KAYNAKLANABİLİRLİĞİ VE DİRENÇ SPOT KAYNAĞI PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ METODUYLA OPTİMİZASYONU

*Aynur GÜRSOY ÖZCAN**
*Volkan PEŞTELİ**
*Orçun YÖNTEM**

Alınma:09.01.2018; düzeltme:23.07.2018; kabul:30.07.2018

Öz: Son dönemlere dayanımı daha yüksek ve hafif olan yüksek mukavemetli çelik malzemelerin otomotiv sektöründeki kullanımı yükselen bir trendle artış göstermektedir. Bu nedenle düşük mukavemetli malzemelerde yaşanan kaynak problemlerinden yola çıkarak yüksek mukavemetli malzemelerde aynı sorunları yaşamamak adına araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmada 980MPa ve 1180MPa yüksek mukavemetli ve çift fazlı olan iki çeşit çelik sac kullanılmış ve robot teknolojisi kullanılarak direnç spot kaynağı uygulamaları yapılmıştır. Malzemelerin öncelikle mikro analizleri yapılarak malzeme karakterizasyonları, mekanik ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Kaynak kalitesini arttırmak için az deneme ile daha iyi sonuçlar almayı hedefleyen Taguchi metodu kullanılarak kaynak parametrelerinin optimizasyonu amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek mukavemetli çelikler, Direnç spot kaynağı, Kaynak çekirdek çapı, Taguchi

Optimization of Resistance Spot Welded On High Strength Steels With Taguchi Method

Abstract: In recent times, the use of higher strength and higher strength steel materials in the automotive sector has increased with a rising trend. Therefore, researches have been carried out in order not to repeat the same problems in high-strength materials, starting from the welding problems experienced in low-strength materials. In this study, two types of high strength and dual phase steel sheets of 980 MPa and 1180 MPa were used and resistance spot welding applications were carried out using robot technology. First of all, material characterization, mechanical and chemical properties of materials were analysed by micro analysis. Optimization of welding parameters is aimed by using Taguchi method which aims to obtain better results with fewer experiments in order to increase the welding quality.

Keywords: High strength steels, Resistance spot welding, Nugget size, Taguchi

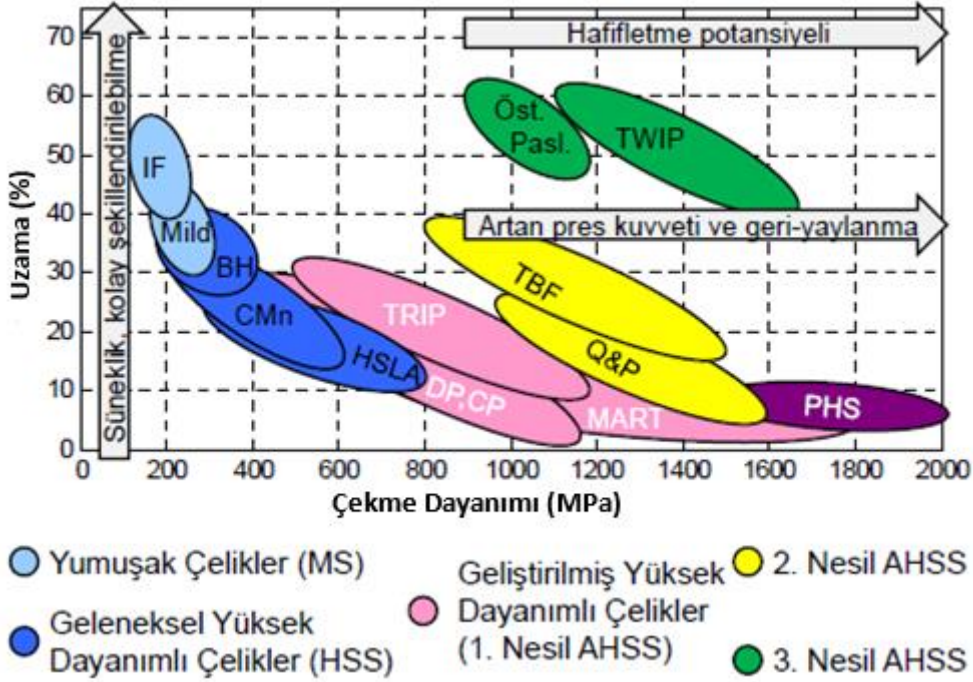
1. GİRİŞ

Günümüzün zorlayıcı ekonomik koşulları ve artan rekabet ortamında otomotiv sanayi sürekli gelişme sağlayabilmek ve bunları düşük maliyetle yapabilmek adına Ar-Ge çalışmalarına önem vermektedir. Otomotiv sektöründeki yeni malzeme ihtiyaçları, çelik sektörünü teknolojik gelişmeler için tetiklemekte ve bu sayede yeni nesil çelikler sürekli geliştirilmektedir.

Artık dünya çapında, gelecekteki araçlarda zorunlu uygulamaları karşılayabilmesi için yakıt tasarrufuyla birlikte emisyon oranının düşürülmesi ve yolcu güvenliğinin artması adına

* Toyotetsu Türkiye, TOSB 5.Cadde No:4, Şekerpınar, Çayırova, 41420, KOCAELİ
İletişim Yazarı: Aynur GÜRSOY ÖZCAN (gursoya@toyotetsu.com.tr)

daha hafif araçların üretilmek istenmesi gibi nedenlerde yüksek dayanımlı çelikler (Advanced High Strength Steels / AHSS) konusu araştırılmakta ve en yoğun çalışılan konular arasında yer almaktadır. Çeliklerdeki geliştirmelerde önem verilen sadece yüksek mukavemetli olmaları değil aynı zamanda kolay şekil verilebilir ve kaynaklanabilir olmasıdır. “Çelik sektöründeki son güncel gelişmelerle birlikte, kopma dayanımı (UTS) 1000-1200 MPa, soğuk sac şekillendirmeye hatta derin çekme (deep drawing) işlemine olanak verecek kadar sünek çelikler üretilmektedir” Çeşitli kalitelerde yumuşak, geleneksel ve geliştirilmiş dayanımlı çelik sacların çekme dayanımı - %uzama eğrisi Şekil 1’de gösterilmektedir (Billur ve Çetin, 2016; Matlock, 2012).



Şekil 1:
Çeşitli çelik sınıflarının dayanım-toplam uzama eğrisi
(Billur ve Çetin, 2016)

Ürün veya sürecin istenilen karakteristik özelliklerini yakalayabilmek adına yapılan deneysel çalışmalar geliştirilmektedir. Az maliyetle yapılması hedeflenen çalışmalar için parametre optimizasyonu problemlerinde ortogonal diziler yardımıyla daha az sayıda deneyle optimum değerleri yakalamaya olanak sağlayan Taguchi metodu sıklıkla kullanılmaktadır. Kontrol edilen veya edilemeyen faktörlerin yanıt değişkeni (çıktı) üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılır (Aytekin, 2011). Topluma hızlı ve kaliteli şekilde yanıt verebilmek için teoride kalmış olan teknikler pratikte de uygulamaya geçmiştir. Ürün parametrelerinin ve parametre sayısının artması ile birlikte istatistiksel deneyler ürün maliyetini yükseltmektedir. Parametre ve seviye sayısına göre seçilen Taguchi ortogonal dizinleri ile çok az deneme ile iyi neticeler sağlanabilmektedir. Ortogonal diziler sayesinde parametre seviyeleri, teker teker değiştirilmek yerine eş zamanlı olarak değiştirilebilmektedir (Eşme ve diğ., 2006).

Taguchi yöntemi faktör seviyelerinin tespit edilmesinde; gözlem yöntemi, sıralama yöntemi, sütun farkları yöntemi, varyans analizi ve fark etkilerinin grafiksel gösterimi yöntemlerinden birisi uygulanmaktadır (Bıyık ve diğ., 2016).

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bilici ve diğ. (2016) sürtünme karıştırma spot kaynak tekniği ile birleştirilen AA2024-T3 ile AA5754-H22 alüminyum alaşımlı sac levhaları Taguchi analizi ile incelenmiştir. Çekme makaslama deneyi ile kaynak parametrelerinin kopma mukavemetine etkisini incelemişlerdir. Taguchi deneyleri ile birlikte yapılan çalışmalar sonucunda kopma mukavemeti %42 oranında artmıştır.

Uzun ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, Taguchi tekniği kullanarak SAE 1021 karbonlu çelikler ile aşınma direnci yüksek olan Dilludur 400 ve yüksek dayanıma sahip Dillimax 500 çeliklerinin sürtünme kaynağı parametrelerini optimize etmeye çalışmışlardır. Belirli sürtünme devri ve yığıma basıncında birleştirilen çeliklerin bağlantı mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi ve mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlara göre en uygun sürtünme devri ve yığıma basıncı tespit edilmiştir.

Aytekin (2011) robotik gaz altı köşe kaynak işleminin parametreleri için Taguchi yöntemi uygulamışlardır. Deneylerinde emniyet kabini üretiminde kullanılan 3 mm Erdemir 3237 tipi sac levhalarda köşe kaynak nüfuziyet sorununun çözmek için optimum faktör ve seviye kombinasyonunu tespit etmişlerdir. Deney sonucunda gaz karışımı içerisinde O₂ kullanılmadığında kırılabilirliğin arttığı ve bu nedenle gaz karışımlarında O₂ 'nin bulunması gerekliliği gözlemlenmiştir. Doğrulama deneyi yapılarak kaynak nüfuziyetinde iyileştirme sağlanmıştır.

Eşme ve diğ. (2006) çalışmalarında gaz altı tungsten ark (TIG) kaynak parametrelerinden; kaynak hızı, kaynak akımı, gaz akış hızı ve ark sıçrama boşluğunun kaynak dayanımına etkilerini Taguchi metodunun en yüksek-en iyi kontrol karakteristiği ile optimize etmeye çalışmışlardır. Deneylerinde 4 parametre 4 seviye için L₁₈ ortogonal dizini kullanmışlardır. AISI 304 paslanmaz çelik ile yaptıkları deneylerinde sonuç olarak optimum kaynak parametrelerini tespit etmişlerdir.

Bıyık ve diğ. (2016) projeksiyon kaynağı sırasında oluşan çapakların azaltılması için Taguchi ve çok amaçlı optimizasyon yöntemleriyle optimal proses parametrelerini tespit etmeye çalışmışlardır. Fıskırma ve çapaklanma endeksi ve kaynak kopma kuvveti yanıt faktörlerini içeren kompozit çekicilik fonksiyonu yaklaşımı ile optimum değerleri belirlemişlerdir. Çalışmalarında soğuk dövme yöntemi ile 20MnB4 çeliğinden üretilmiş kaplamasız ve Zn-Ni kaplamalı M8 kaynak civatalarının galvaniz kaplı DC04 ve DP600 çelik sacılara kaynaklanmasında oluşacak çapaklanma yanıt değişkenine etkiler araştırılmıştır.

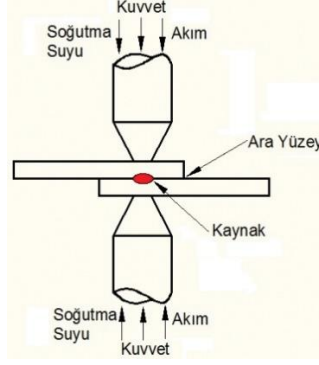
Lin ve diğ. (2007) Taguchi yöntemi ve yapay sinir ağlarını kullanarak direnç spot kaynağının optimizasyonu için çalışma yapmışlardır. Deneylerinde 0,7 mm kalınlığında yüksek mukavemetli çelik kullanmışlardır. Belirledikleri en iyi kaynak parametreleri ile elde edilen sonuçlar ortalama çekme mukavemetinin geliştirildiğini ve mühendislerin farklı uygulamalara kolayca uygulayabileceğini göstermektedir. Ayrıca yapay sinir ağları kullanılarak yapılan bu çalışma, mühendislerin hiç bir teorik gereksinime ihtiyaç duymadan parametre optimizasyonu için doğrudan yapay sinir ağı kullanımına izin vermektedir.

Aydemir ve diğ. (2017), direnç nokta kaynağı ve lazer kaynağı yöntemleri ile birleştirilmiş yüksek mukavemetli DP1000 malzeme numunelerin bağlantı yerlerinde çekme mukavemeti ve sertlik değişimlerini incelemişler, kaynaklı parçada %30'luk mukavemet kaybı olduğunu ve direnç nokta kaynaklı ve lazer kaynaklı bağlantılarının hemen hemen aynı yorulma davranışı gösterdiğini tespit etmişlerdir. Sertlik değeri kaynaklı parçada düşük iken kaynak metalinde oluşan martenzitik yapıdan dolayı daha da yüksek olarak elde edilmiştir.

3. DİRENÇ SPOT KAYNAĞININ TANIMI, ENDÜSTRİDEKİ YERİ VE ÖNEMİ

Direnç spot kaynağı, iki elektrot arasına yerleştirilen metal parçaların basınç ile sıkıştırılması sırasında, elektrik akımıyla ergime noktasına yakın sıcaklığa ulaşan parçaların ısı yardımıyla birleştirilmesi tekniğidir (<http://megep.meb.gov.tr>, 2017). Kısmi olarak ergitilen

parçalar için kaynak banyosu oluşturulur ve sonrasında elektrik akımı kesilerek metal parçalar üzerinde uygulanan basınç altında soğuma, soğuma ile birlikte de sökülemeyen birleşme sağlanır (<http://www.pukamakina.com>, 2017). Nokta kaynak manuel, robot veya özel ekipmanlar kullanılarak yapılabilir. Direnç spot kaynağının temsili Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2:

Direnç spot kaynağı (<http://www.metaldunyasi.com.tr>, 2017)

Direnç spot kaynağı, kesintisiz kaynak dikişine ihtiyaç olmayan sac parçaların birleştirilmesinde kullanılır. Bu yöntemde küçük bir alanda meydana gelen birleşme, ek malzemelere gerek duymadan bir saniyeden çok daha kısa sürede gerçekleşir (Alioğlu, 2004).

Araç gövdesi direnç spot kaynağı ile birleştirilmiş birçok çelik levhanın monte edilmesiyle oluşur (Yılmaz, 2017). Otomotiv sektöründe ağırlıklı olarak kullanılan spot kaynağı uygulamaları daha çok robotik uygulamalarla gerçekleştirilmektedir. “Bir otomobilde ortalama 3000 ila 6000 arasında spot kaynağı bulunmaktadır.” Otomotiv sektöründeki gelişmelerle birlikte kaynak prosesleri ve bununla birlikte parametreleri de geliştirilmeye başlanmıştır (Doruk ve diğ., 2016). Kaynaklanacak sacın malzemesi, kaplaması, kalınlığı, elektrot kuvveti, kaynak zamanı ve uygulanan akım spot kaynağı ile birleşmenin gerçekleştirilebilmesi için en önemli parametrelerdir (Ferudun, 2015). Spot kaynağının kalitesini ölçmekte kullanılan en önemli faktör kaynak çekirdeğinin ölçüleridir (Doruk ve diğ., 2016).



Şekil 3:

Robotik nokta kaynak uygulaması (<http://megep.meb.gov.tr>, 2017)

4. UYGULAMA: YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİK SACLARDA DİRENÇ SPOT KAYNAĞI PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ METODUYLA OPTİMİZASYONU

Taguchi metodu; ürün ve proses aşamalarında kontrol edilmesi zor olan faktörlere karşı, kontrol edilebilir faktör seviyelerinin en uygun kombinasyonlarını tespit etmeyi sağlayan, değişkenlikleri en aza indirgeyip az deneme ile daha iyi sonuç almayı amaçlayan bir deneysel tasarım metodudur (Güneş, 2015). Çok daha az deneme ile daha iyi sonuç verebilen Taguchi Yöntemi, kalitenin tasarım ve proses aşamasında sağlanmasına önceden olanak verebilmektedir

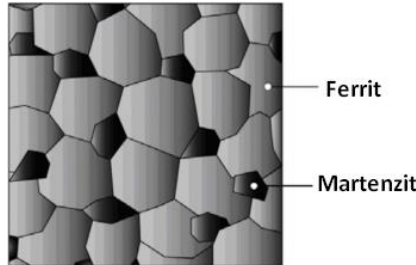
(Taguchi ve Clausing, 1990). *Taguchi kaliteyi, “Ürünün, müşteriye ulaştıktan sonra toplumda meydana getirdiği kayıptır” şeklinde tanımlamıştır* (Kara, 2012).

Taguchi yöntemi üç aşamaya ayrılmıştır, bunlar; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımıdır. Bir metodun ilk aşaması olan ve gerekli mühendislik ve bilimsel bilginin kullanıldığı ilk adım sistem tasarımıdır (Öktem ve Erzincanlı, 2012). Üretilecek ya da geliştirilecek ürün için en uygun işlem parametrelerinin seçildiği adım parametre tasarımıdır. Üretim esnasında kontrol edilemeyen etkiler belirlenir ve bu parametrelerin etkileri minimize edilir (Salkım, 2012). Tolerans tasarımı ise parametre tasarımı tarafından önerilen en uygun aralıklardaki toleransların analiz edilmesini sağlar (Öktem ve Erzincanlı, 2012).

4.1. Yüksek Mukavemetli Malzemeler ve Kaynaklanabilirliği

Şu anda Çift fazlı (DP) çeliklerin birkaç sınıfı; ağırlık, süneklik ve mukavemet ihtiyacını karşılayan ağırlığı azaltılmış otomotiv parçalarının üretimi için yüksek mukavemetli çelikler grubunda iddialıdır (Rocha ve diğ., 2015). Çift fazlı çelikler (Dual Phase Steels), ferritik yapı içinde ikinci faz martenzit dağılımlı yapıya sahip olmalarından dolayı kaynak edilebilir özellikleri iyi değildir. Kaynak birleştirmelerinde kullanımlarına dikkat etmek gerekmektedir. *İkinci faz genellikle yaklaşık %15-35'lik bir seviyede olan martenzittir.* Sünekliği sağlayan ferritik yapı içerisinde dağılmış olan martenzit yapı da mukavemeti kontrol altına alır (<http://www.metaldunyasi.com.tr>, 2017, Demir ve diğ., 2017). Mikro yapısında bulunan bu iki faz nedeniyle çift fazlı çelikler adını almaktadır (Sezgin, 2017). Yüksek mukavemet ve süneklik özellikleriyle şekillenebilirlik ve kaynak kabiliyeti yüksek olan çift fazlı çelikler otomobilde güvenliği sağladığından ve bunun yanı sıra birim ağırlık için daha yüksek mukavemete sahip olmaları nedeniyle otomotiv sektöründe yaygın kullanım alanına sahiptir (<http://www.metaldunyasi.com.tr>, 2017, Aydemir ve diğ., 2017).

Birim ağırlık için daha yüksek mukavemete sahip olmaları nedeniyle DP (Dual Phase) çift fazlı çeliklerin kullanımı günümüzde gitgide artmaktadır.

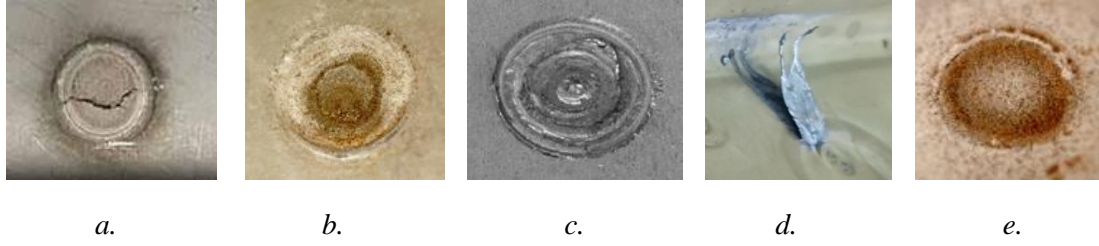


Şekil 4:

Ferrit yapı içinde martenzitin dağılımı
(<http://www.metaldunyasi.com.tr>, 2017)

Nokta direnç kaynağında istenilen çekirdek çapının elde edilmesi için belirli sürede belirli miktarda akım uygulayarak gerçekleştirilir. Kısa sürede kaynak yapıldığında çekirdek çapı küçülür, uzun sürede ise ergiyik metal miktarı artar ve metal püskürmesiyle birlikte çapak miktarı da artar, her iki durumda da mukavemet istenilen seviyede değildir (<http://www.metaldunyasi.com.tr>, 2017). Çift fazlı yüksek mukavemetli malzemelerde martenzit formundan dolayı ergime (füzyon) bölgesinde meydana gelen yüksek yapı bazı yükleme koşullarında ters etki yapabilir (Pouranvari ve Ranjbarnoodeh, 2011). Her malzemenin optimum değerini bulmak için çok sayıda deneme yapılmalıdır (<http://www.metaldunyasi.com.tr>, 2017).

Direnç spot kaynağı ile firmadaki uygulamalar incelendiğinden kaynak problemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır ve aşağıdaki Şekil 5’de gösterilmiştir.



Şekil 5:

Direnç spot kaynağında meydana gelen kaynak hataları

a. Çatlak problemi b. Kumlanma c. Spot ayrımı d. Çapak e. İstenilenden daha düşük kaynak çapı

590 MPa ve üzeri özellikle de kaplamalı metallerde bu problemlerle daha çok karşılaşmaktadır. Yüksek mukavemetli çelikler, çatlamadan kaynaklanan kaynak hatalarına karşı daha duyarlıdır. Bu metaller daha az sünek yapısı, kaynaklanan metal ve kaynak üzerinde ve soğuma sırasında “artık gerilim” oluşmasına sebep olur. Kaynak sonrasındaki hızlı soğuma sırasında bu çelikler martenzit yapı oluşumu yatkındır. Martenzit oluşumuyla birlikte tane yapısında hidrojenin yerleşebileceği alanlar oluşur ve bu da malzemede çatlamalara neden olur (<http://www.askaynak.com.tr>, 2017).

Malzemenin martenzit yapısı arttıkça mukavemet ve malzeme sertliği artacaktır. Bu nedenle de malzeme içerisinde ilerleyen akıma daha fazla kuvvet etki edecektir. Isının malzeme içerisinde eşit olarak dağılmasını sağlamak için ön ısıtma işlemine ihtiyaç vardır. Ön ısıtma ani soğumayı engelleyerek ısı altındaki kaynak bölgesinde daha sünek bir yapı oluşumunu sağlar ve martenzit yapı oluşumunu azaltır (<http://www.askaynak.com.tr>, 2017).

Kaynak bölgesinde martenzit bölge azaldığından kaynak akımına karşı çıkan kuvvet azalacak ve akımı arttırmadan kaynaklanabilirlik yeteneğinde artış sağlanabilecektir. Edinilen tecrübelerle göre yüksek mukavemetli çelikler için uygulanacak kuvvet 4000-5000 N ve üzeridir.

4.1.1. Uygulamada Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada 1,4mm kalınlığında 980MPa ve 1180MPa yüksek mukavemetli çift fazlı çelikler kullanılmış, direnç spot kaynağı spot robotu kullanılarak uygulanmıştır. Kaynak çekirdek çapı (nugget size) ultrasonik test cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Numunelerin mekanik ve kimyasal özellikleri Tablo 1 ve 2’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan metallerin mekanik özellikleri

Çelik	Akma Mukavemeti (Rp0,2) [MPa]	Çekme Mukavemeti (Rm) [MPa]	Uzama (A) [%]
590 DU	366	629	28.3
980 DUB	669	1058	14.3
1180 DUB	840	1212	9.3

Tablo 2. Çalışmada kullanılan metallerin kimyasal yapısı

Çelik	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb	B
590 DU	0,083	0,236	1,870	0,016	0,0022	0,037	0,002	0,002	0,0004
980 DUB	0,155	0,194	2,290	0,010	0,0004	0,055	0,003	0,024	0,0003
1180 DUB	0,166	0,378	2,490	0,007	0,0005	0,052	0,033	0,002	0,0024

Malzeme içindeki elementlerin miktarlarındaki değişimi görmek için 590MPa DU malzemenin de kimyasal yapısı incelenmiştir. Düşük mukavemetli malzeme ile yüksek mukavemetli malzemelerin kimyasal özelliklerini karşılaştırdığımızda en fazla değişimin karbon (C), silisyum (Si), mangan (Mn) ve alüminyum (Al) elementlerinde olduğunu görülmüştür.

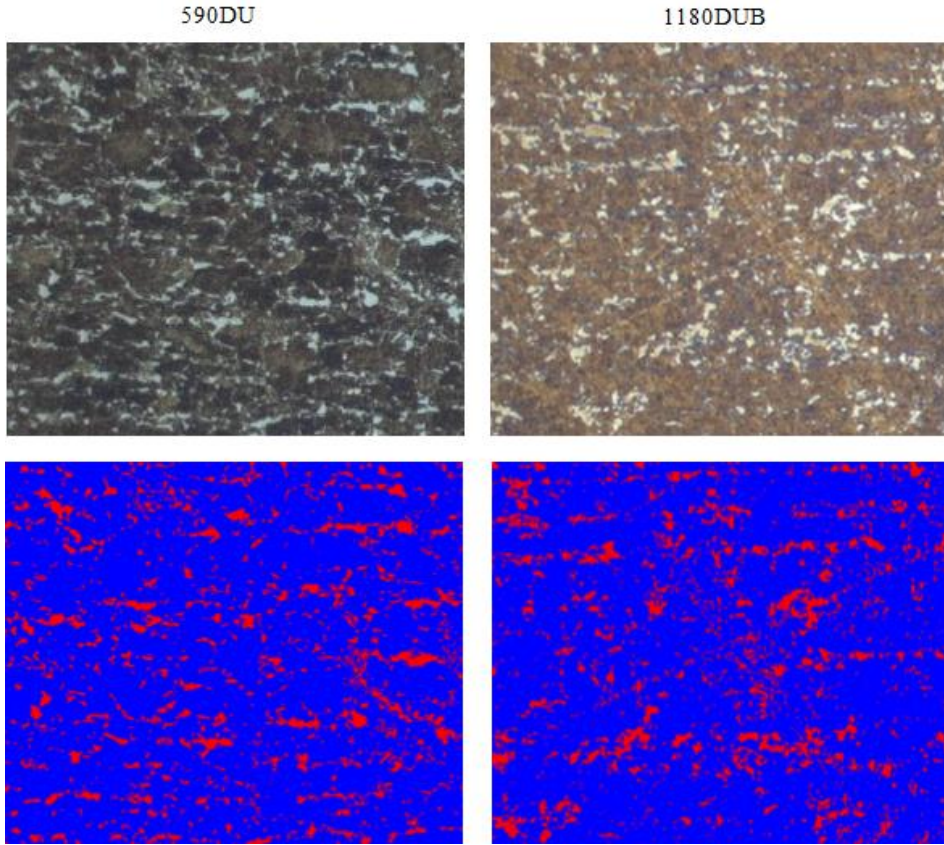
Çelik malzemelerde sertliğe etkisi olan başlıca element karbondur. Karbon sertlik ve çekme dayanımını artırır ancak bunun yanısıra malzemenin esnekliğini, kesilme, dövülme ve kaynaklanabilirliğini azaltır. Karbon miktarı arttıkça malzemenin tokluğu düşmeye ve kırılganlaşmaya başlar.

Mangan ferrit fazının dayanımını artırırken az miktarda da olsa esnekliği azaltır. Dövme ve kaynaklanabilirlik özelliklerini artırır. Ayrıca, mangan malzemenin korozyona karşı direncini de geliştirir.

Ferrit fazı içinde çözünebilen silisyum malzemenin esnekliğini ve tokluğunu az miktarda azaltsa bile çekme ve akma dayanımını artı yönde etkiler, fiziksel dayanımını artırır (<http://www.haddemetal.com>, 2017).

Alüminyum iletkenliği düşürücü etkiye sahip olduğundan kaynak kabiliyetine negatif etki yaratır.

Deneyde kullanılacak yüksek mukavemetli çelik ve karşılaştırma yapabilmek adına düşük mukavemetli 590MPa çeliği mikroskop altında incelenmiştir, faz analizlerinin görüntüleri Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6:

Çeliklerin faz analizi sonucu mikro yapı görüntüleri (mavi: martenzit yapı, kırmızı: ferrit yapı)

590DU : ferrit: %85,7 martenzit: %14,3

1180 DUB: ferrit: %81,8 martenzit: %18,2

Yüksek mukavemetli malzemelerin düşük mukavemetli malzemeye göre daha yüksek martenzit yapıya sahip olduğu görülmüştür.

Direnç spot kaynağında; geçen akıma karşı malzemenin sahip olduğu direnç sonucu ısıyla kaynak noktası oluşabildiğinden çeliğin elektrik direncinin önemli özelliklerinden biridir. Düşük ve yüksek mukavemetli malzemelerin elektrik direnci arasındaki farkları görebilmek adına ohmmetre cihazıyla bu üç malzemenin elektrik direnci ölçülmüştür. Elektrik direnci düşük olan malzemeler akımı iyi iletir. Bu durum ısının yoğunlaşmasını zorlayacak ve Kaynaklanabilirliği düşürecektir (Aydın ve Gülenç, 2003). Malzemenin direnci arttıkça akıma karşı gelen kuvvet artacak ve oluşan ısı artışıyla birlikte kaynaklanma kabiliyeti de artacaktır. Ölçüm sonuçlarının yer aldığı Tablo 3’de görüldüğü üzere yüksek mukavemetli malzemelerin elektrik direnci daha düşüktür. Bu da yüksek mukavemetli malzemeler için kaynaklanma kabiliyetini olumsuz etkileyen faktörlerden biridir.

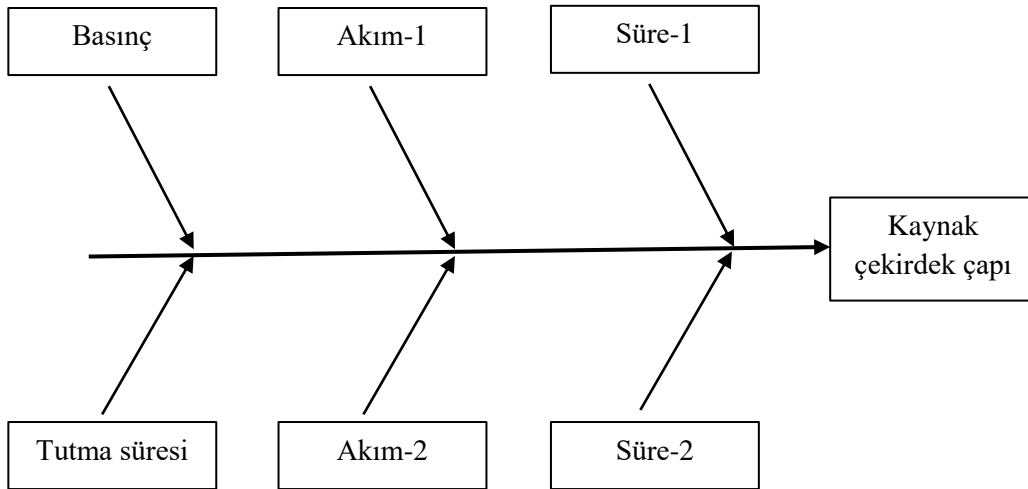
Tablo 3. Düşük ve yüksek mukavemetli malzemelerin elektrik dirençleri

Çelik	Elektrik Direnci (mΩ)
590 DU	1,2
980 DUB	1,02
1180 DUB	0,943

4.2. Faktör ve Seviyelerinin Belirlenmesi

Çok daha az deney ile çözüm üretmeyi sağlayan Taguchi metodu her bir parametrenin her bir seviyesi için çok fazla kombinasyonun olduğu durumlarda kullanılır (Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

Faktörler; prosesle ilgili kişilerin oluşturduğu grup tarafından beyin fırtınası, akış şeması, hata ağacı ve balık kılıcı gibi yöntemlerden faydalanılarak belirlenir. Balık kılıcı diyagramı çıktı olarak değerlendirilecek ve bu çıktıya etki eden tüm parametreleri ortaya koyan ve sıklıkla kullanılan bir yöntemdir (Taylan, 2009). Bu çalışmada kaynak çekirdek çapına etki eden faktörler üzerinde tartışılmış etkisi büyük olan 6 faktör Şekil 7’de gösterildiği gibi balık kılıcı yöntemi ile belirlenmiştir. Buna göre belirlenen parametreler; Basınç, Akım-1, Süre-1, Tutma süresi, Akım-2 ve Süre-2’dir. 6 kontrol faktörü için 3 ayrı seviye belirlenmiştir. Seviyeler Basınç için 4500-5500N, Akım-1 için 6-8kA, Süre-1 için 6-8cycle, Akım-2 için 8-9kA, Süre-2 için 24-32cycle, Tutma zamanı için ise 1-5cycle aralığındadır. (1 cycle: 0,2 sn)



Şekil 7:

Kaynak Çapına Etki Eden Faktörlerin Balık Kılıcı Diyagramı İle Değerlendirilmesi

Kaynak akımı: İş parçası üzerinden geçerek ısı enerjinin çıkmasına ve böylece birleşmenin sağlanmasına neden olur. Çok yüksek akım mukavemetin azalmasına, çatlaklara, kaynak çekirdek yapısının bozulmasına ve çapağa neden olurken düşük akım da istenilen kaynak çapının elde edilememesine neden olur (Zhang ve Senkara, 2006).

Elektrot kuvveti: Elektrotların iş parçası üzerinde yaptığı baskıdır, bu noktadan geçen akım ile yüzeyde ısı oluşur ve ergime başlar.

Kaynak zamanı: İş parçasına kuvvet uygulandığı andan itibaren akımın uygulandığı süredir. İstenilen kaynak çekirdeğinin oluşması için iş parçasına akımın uzun sürede uygulanması gerekir. Akım uzun süre uygulandığında ise ergiyik metal miktarı artar ve yüzey kalitesi bozulur.

Tutma zamanı: Parçalar serbest kalmadan ve kaynak akımı kesildikten sonra kaynak çekirdeğinin katılaşması için gerekli süredir (Zhang ve Senkara, 2006).

Kaynak denemelerinde elde edilen çekirdek çapına örnek aşağıda Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8:

Deneyde kullanılan 980MPa ve 1180MPa malzemenin kaynak sonrası oluşan kaynak çekirdeği a. Kaynaklı parçanın kesildikten sonraki mikroskop görüntüsü b. Ultrasonik test cihazı kaynak çekirdeğinin görüntüsü

4.3. Deneyin Uygulanması ve Verilerin Analizi

Üç seviyeli 6 faktörden oluşan tam faktöriyel deneyde deney sayısı $(3^6)=729$ olur. Tam faktöriyel deney zaman ve maliyet açısından çok kullanışlı değildir.

Daha az sayıda deney yapma imkanı sağlayan Taguchi metodunda kullanılacak ortogonal dizi, faktörlerin seviye sayısına bağlı olarak hesaplanan toplam serbestlik sayısına göre belirlenir. Serbestlik derecesi bir faktör için faktör seviye sayısının bir eksiğine eşittir. Deneyde kullanılacak ortogonal dizin belirlenirken, bulunan toplam serbestlik derecesine eşit veya daha fazla deneme sayısına sahip ortogonal dizi seçilir (Baynal ve Gencel, 2015). Bu çalışmada 3 seviyeli 6 faktör için Toplam serbestlik derecesi 6 faktör x (3 seviye-1)=12’ye eşittir ve veri analizlerinin güvenilirliğini arttırmak için L_{27} ortogonal dizini seçilmiştir. Ortogonal dizine göre deneyler yapılmış ve her denemeden 3 gözlem alınmıştır.

Taguchi yönteminde faktör ve seviyelerinin performansını ölçmek ve değerlendirmek için kullanılan ölçüt sinyal gürültü oranıdır (S/N). Sinyal, sistemin verdiği gerçek değeri, gürültü faktörü ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörleri temsil eder. “en küçük en iyi”, “en büyük en iyi” ve “nominal en iyi” olmak üzere üç farklı S/N amaç fonksiyonu kullanılmaktadır (Günay, 2013).

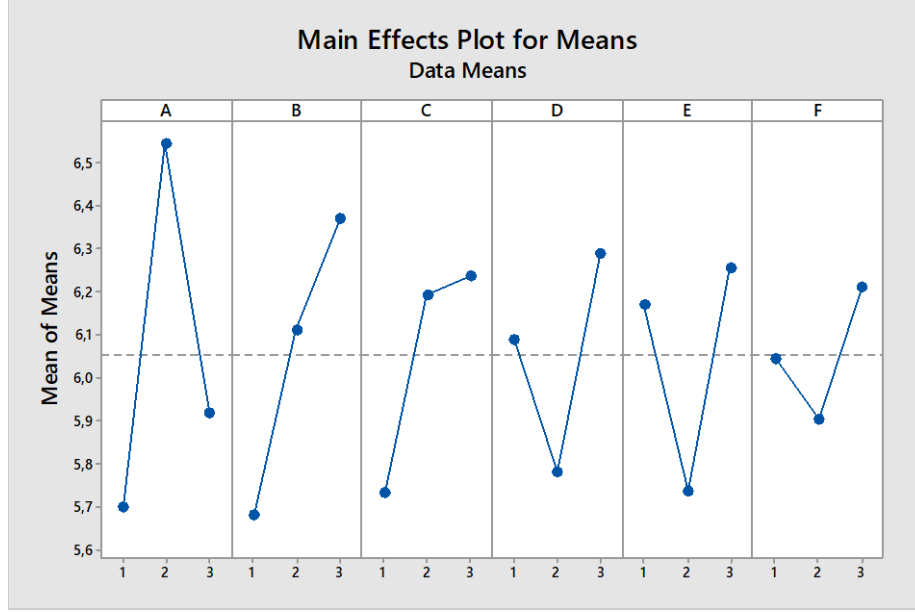
Kaynak çapının 6 mm’den daha yüksek olması istenmektedir. Bu nedenle yapılan deneyler sonucunda 6 mm’den daha yüksek olan değerler daha iyi kaynak çapı anlamındadır. En iyi sonuca ulaşabilmek için S/N amaç fonksiyonu “En Büyük En İyi” olarak belirlenmiştir.

En yüksek (büyük) en iyi olduğu durumda:

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

Eşitliklerde y_i : Performans yanıtının i . gözlem değeri, n : bir denemedeki test sayısını ifade etmektedir.

Tablo 4'de gösterildiği gibi toplanan veriler, Minitab 17 paket programının Taguchi analiz kısmında L_{27} dizinine göre tasarlanan deneyler çözümlenmiştir.



Şekil 9:

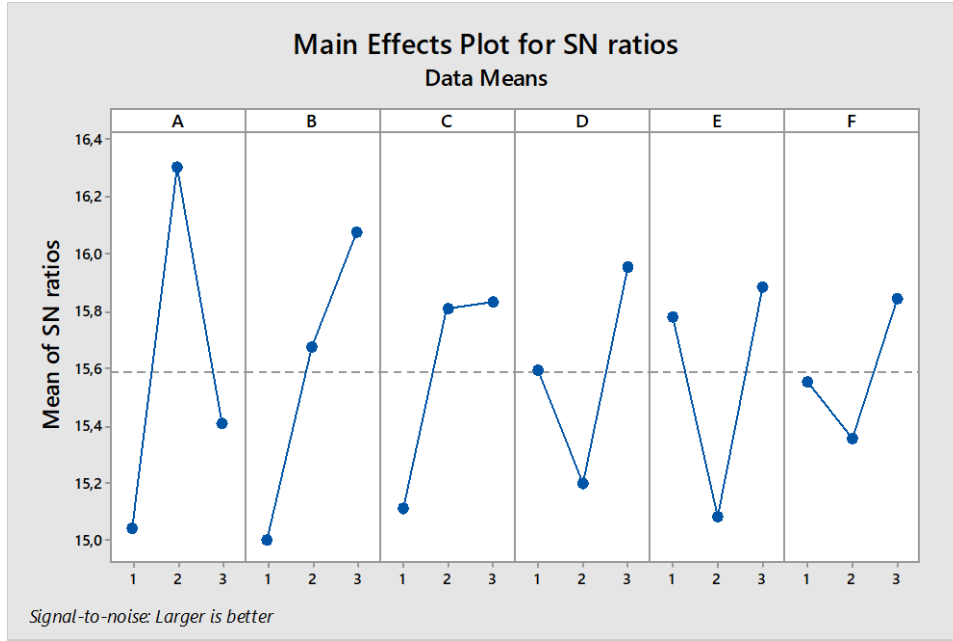
Faktörlerin kaynak çapına ait ortalama değerlere etkisinin grafiksel gösterimi (Performans karakteristiği: En Büyük - En İyi)

Yüksek mukavemetli malzemelerin düşük mukavemetli malzemeye göre daha yüksek martenzit yapıya sahip olduğu görülmüştür.

Direnç spot kaynağında; geçen akıma karşı malzemenin sahip olduğu direnç sonucu ısıyla kaynak noktası oluşabildiğinden çeliğin elektrik direncinin önemli özelliklerinden biridir. Düşük ve yüksek mukavemetli malzemelerin elektrik direnci arasındaki farkları görebilmek adına ohmmetre cihazıyla bu üç malzemenin elektrik direnci ölçülmüştür. Elektrik direnci düşük olan malzemeler akımı iyi iletir. Bu durum ısının yoğunlaşmasını zorlayacak ve Kaynaklanabilirliği düşürecektir (Aydın ve Gülenç, 2003). Malzemenin direnci arttıkça akıma karşı gelen kuvvet artacak ve oluşan ısı artışıyla birlikte kaynaklanma kabiliyeti de artacaktır. Ölçüm sonuçlarının yer aldığı Tablo 3'de görüldüğü üzere yüksek mukavemetli malzemelerin elektrik direnci daha düşüktür. Bu da yüksek mukavemetli malzemeler için kaynaklanma kabiliyetini olumsuz etkileyen faktörlerden biridir.

Tablo 4. Taguchi Yöntemiyle L₂₇ dizinine göre tasarlanan deneyler, elde edilen kaynak çapları ve istatistiksel veriler

Deney No	Parametreler						Kaynak Çekirdek Çapı Endeksi (K)			İstatistiksel Veriler			
	Basınç	Akım 1	Süre 1	Akım 2	Süre 2	Tutma Zamanı	Deney Tekrar-1 (mm)	Deney Tekrar-2 (mm)	Deney Tekrar-3 (mm)	Ortalama Çap (Kort)	Standart Sapma (σ)	Sinyal/Gürültü Oranı (S/N) [db]	Mean1
1	1	1	1	1	1	1	4,1	5,5	6,2	5,3	1,1	14,43	5,27
2	1	1	1	1	2	2	4,0	5,4	3,9	4,4	0,8	12,93	4,43
3	1	1	1	1	3	3	5,4	5,7	5,1	5,4	0,3	14,65	5,40
4	1	2	2	2	1	1	5,4	6,2	5,6	5,7	0,4	15,17	5,73
5	1	2	2	2	2	2	4,8	4,7	5,7	5,1	0,6	14,09	5,07
6	1	2	2	2	3	3	6,2	5,9	6,1	6,1	0,2	15,66	6,07
7	1	3	3	3	1	1	7,1	6,0	6,9	6,7	0,6	16,48	6,67
8	1	3	3	3	2	2	5,2	7,2	5,8	6,1	1,0	15,66	6,07
9	1	3	3	3	3	3	6,1	7,0	6,6	6,6	0,5	16,35	6,57
10	2	1	2	3	1	2	7,0	5,7	6,7	6,5	0,7	16,21	6,47
11	2	1	2	3	2	3	6,3	6,9	6,8	6,7	0,3	16,48	6,67
12	2	1	2	3	3	1	6,5	7,0	6,0	6,5	0,5	16,26	6,50
13	2	2	3	1	1	2	6,2	7,1	5,8	6,4	0,7	16,08	6,37
14	2	2	3	1	2	3	6,7	7,2	5,8	6,6	0,7	16,35	6,57
15	2	2	3	1	3	1	6,9	8,5	7,2	7,5	0,9	17,54	7,53
16	2	3	1	2	1	2	6,6	7,0	6,1	6,6	0,5	16,35	6,57
17	2	3	1	2	2	3	6,5	5,1	6,9	6,2	0,9	15,80	6,17
18	2	3	1	2	3	1	5,8	5,2	7,2	6,1	1,0	15,66	6,07
19	3	1	3	2	1	3	5,5	6,2	6,2	6,0	0,4	15,51	5,97
20	3	1	3	2	2	1	4,1	4,9	5,2	4,7	0,6	13,50	4,73
21	3	1	3	2	3	2	5,4	5,7	5,9	5,7	0,3	15,07	5,67
22	3	2	1	3	1	3	6,0	6,0	6,1	6,0	0,1	15,61	6,03
23	3	2	1	3	2	1	5,9	5,4	5,7	5,7	0,3	15,07	5,67
24	3	2	1	3	3	2	5,6	6,3	6,0	6,0	0,4	15,51	5,97
25	3	3	2	1	1	3	6,8	6,3	6,3	6,5	0,3	16,21	6,47
26	3	3	2	1	2	1	6,6	6,1	6,0	6,2	0,3	15,89	6,23
27	3	3	2	1	3	2	7,1	6,1	6,4	6,5	0,5	16,30	6,53



Şekil 10:

Faktörlerin kaynak çapına ait sinyal gürültü (S/N) oranlarına etkisinin grafiksel gösterimi (Performans karakteristiği: En Büyük -En İyi)

Minitab çıktısı olan ortalama ve S/N oranları grafikleri incelendiğinde parametrelerin çalışma aralıkları kolayla tespit edilebilir. Burada parametreler Basınç, Akım-1, Süre-1, Akım-2, Süre-2 ve Tutma Zamanı sırasıyla A, B, C, D, E ve F harfleriyle gösterilmiştir. Şekil 9 ve Şekil 10'da görüldüğü gibi En Büyük – En iyi performans karakteristiği ile çalışıldığında grafiklerin yüksek çıktığı seviyeler $A_2B_3C_3D_3E_3F_3$ kombinasyonudur. Ayrıca Ek-1'de de S/N oranlarının rakamsal değerleri mevcuttur buradan da en yüksek değerli seviyeleri tespit etmek mümkündür.

4.3.1. Doğrulama Deneyinin Yapılması

Minitab ile yapılan analize göre amaç fonksiyonuna uygun en iyi sonucu veren faktör seviyeleri $A_2B_3C_3D_3E_3F_3$ olarak belirlenmişti. Bu kombinasyona göre doğrulama deneyi yapılarak bulunan sonuçlar değerlendirilmiştir. 3 tekrar ile yapılan deney sonucunda kaynak çekirdek çapı 6,2mm, 6,5mm ve 6,1mm bulunmuştur.

Deneyler sonucunda bulunan faktör-seviye kombinasyonu ile yapılan doğrulama deneyinde elde edilen kaynak çapı değeri en iyi performans karakteristiği değerine ulaştığı için istenen durum gerçekleşmiştir.

4.3.2. Varyans Analizi (ANOVA)

Seçilen parametrelerin, performans karakteristiği üzerindeki etkisini ve ne gibi değişimlere sebep olduğunu görebilmek için %95 ($\alpha=0,05$) güven düzeyinde varyans analizi ANOVA analizi, parametrelerin performans karakteristiği üzerinde istatistiksel önemini tespit etmek için de Fisher F testi yapılmıştır. Optimizasyon çalışmaları, F testi ve varyans analizi için Minitab programı kullanılmıştır. Minitab test işlemi ve yorumunu kolaylaştıran bir p anlamlılık değeri üretmektedir. Bu çalışmada;

H_0 = Faktörlerin kaynak çapı maksimizasyonu üzerinde etkisi yoktur.

H_1 = Faktörlerin kaynak çapı maksimizasyonu üzerinde etkisi vardır.

hipotezleri tanımlanmıştır.

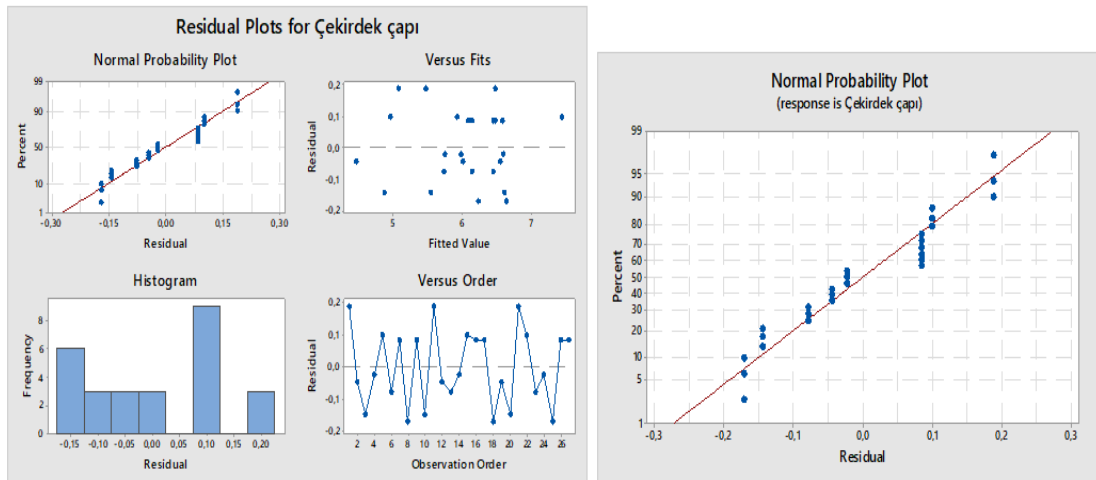
H_0 hipotezi $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyinde $p < \alpha$ olduğu durumlarda reddedilir. Şekil 11’de Anova testinin Minitab program çıktısı gösterilmektedir. Buna göre p değerleri incelendiğinde Tutma zamanı (E) parametresi haricindeki diğer tüm parametreler için $p < 0,05$ olduğu görülmektedir. Bu durumda H_0 hipotezi reddedilir, yani Basınç, Akım-1, Süre-1, Akım-2 ve Süre-2 parametrelerinin kaynak çapı maksimizasyonu üzerinde etkisi vardır. Tutma zamanı (E) p değeri ise $0,094 > 0,05$ olduğundan H_0 hipotezi bu parametre için kabul edilir, Tutma zamanının kaynak çapı maksimizasyonu üzerinde etkisi yoktur.

Ayrıca etkisi olan parametrelerin etki büyüklüklerini görebilmek için ise yine program çıktısı olan Fisher F değerleri incelenebilir. Şekil 11’de yer alan bu değerlere göre F değeri en büyük olan (29,36) Basıncın (parametre A) en büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir.

General Linear Model: Çekirdek çapı versus A; B; C; D; E; F					
A*B; A*C; A*D; A*E; A*F; B*C; B*D; C*D; C*E; C*F; D*E; D*F; E*F					
Method					
Factor coding (-1; 0; +1)					
Factor Information					
Factor	Type	Levels	Values		
A	Fixed	3	1; 2; 3		
B	Fixed	3	1; 2; 3		
C	Fixed	3	1; 2; 3		
D	Fixed	3	1; 2; 3		
E	Fixed	3	1; 2; 3		
F	Fixed	3	1; 2; 3		
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	2	3,4816	1,74078	29,36	0,001
B	2	2,2040	1,10202	18,58	0,003
C	2	1,4213	0,71066	11,98	0,008
D	2	1,1759	0,58794	9,91	0,013
E	2	1,4129	0,70646	11,91	0,008
F	2	0,4263	0,21313	3,59	0,094
B*E	4	0,4414	0,11035	1,86	0,237
B*F	4	0,5325	0,13313	2,24	0,180
Error	6	0,3558	0,05930		
Total	26	11,4517			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
0,243517	96,89%	86,54%	37,08%		

Şekil 11:

Doğrusal Model Yöntemi /Anova Minitab program çıktısı



Şekil 12:

Çekirdek çapı için artık analizi ve normallik testi

Analizde kullanılan veri setinin doğrusallık ve normallik varsayımlarını incelemek için Şekil 12’de gösterilen dağılım grafikleri çizilmiştir. Normal olasılık grafiğinin oluşturulması için her faktör ve etkileşimin etkileri belirlenir. Grafik incelendiğinde her faktör ve etkileşimlerin doğruya yakın yerlerde yoğunlaştığı görülmektedir, bu nedenle de veri seti içinde normal dağılım olduğu, herhangi bir aykırılık olmadığı söylenebilir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada direnç spot kaynağı ile birleştirilen yüksek mukavemetli saclar için kaynak parametrelerinin optimizasyonu ele alınmıştır. Optimizasyon için ise en az deneme ile az maliyet ve kısa sürede sonuç vermeyi sağlayan Taguchi metodu kullanılmıştır.

980DUB ve 1180DUB yüksek mukavemetli çeliklerin mikro yapıları incelenerek ferrit ve martenzit oranları tespit edilmiş, ayrıca düşük mukavemetli 590DU malzemeyle mikro yapı karşılaştırması da yapılmıştır. 590DU: ferrit: %85,7 martenzit: %14,3 iken 1180 DUB: ferrit: %81,8 martenzit: %18,2’dir. Yüksek mukavemetli malzemelerin martenzit oranı daha yüksektir. Martenzit yapı arttıkça malzeme mukavemeti artmaktadır, bu nedenle kaynak akımına karşı gelen kuvvet de artacağından malzemenin kaynaklanabilirliği olumsuz etkilenecektir.

Düşük ve yüksek mukavemetli malzemelerin elektrik direnci arasındaki farkları görebilmek için ohmmetre cihazı ile elektrik dirençleri de ölçülmüştür. 590DU malzemenin 1,2mΩ, 980DUB ve 1180DUB malzemelerin elektrik dirençleri ise sırasıyla 1,02 mΩ ve 0,943 mΩ bulunmuştur. Yüksek mukavemetli malzemelerin elektrik direncinin düşük mukavemetli malzemeye göre daha düşüktür.

Çalışmada kullanılan malzemelerin mikro yapı, kimyasal ve fiziksel özellikleri incelendikten sonra robot teknolojisiyle uygulanan direnç spot kaynağının optimum parametrelerini belirlemek için 6 parametre 3 seviye için Taguchi L₂₇ dizini kullanılmıştır. Parametreler Basınç (A), Akım-1 (B), Süre-1 (C), Akım-2 (D), Süre-2 (E) ve Tutma zamanıdır (F). L₂₇ dizinine göre 27 deneme yapılmıştır. Her denemeden 3 gözlem alınmıştır. Amaç fonksiyonu “En Büyük En İyi” olarak belirlenmiştir. Buna göre amaç fonksiyonuna uygun en iyi sonucu veren faktör seviyeleri A₂B₃C₃D₃E₃F₃ olarak belirlenmiştir.

Son olarak parametrelerin kaynak çapına etkilerinin olup olmadığını tespit edebilmek için %95 ($\alpha=0,05$) güven düzeyinde varyans analizi ANOVA analizi yapılmıştır. Buna göre Tutma zamanı dışındaki tüm parametrelerin kaynak çapı üzerinde etkisi olduğu tespit edilmiştir. Fisher F değeri sonucuna göre de en büyük etkiye (29,36) basıncın (A) sahip olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Aslanlar, S. (2004) The Effect of Nucleus Size On Mechanical Properties In Electrical Resistance Spot Welding Of Sheets Used In Automotive Industry, *Science Direct Materials and Design*, 27, 125–131. doi:10.1016/j.matdes.2004.09.025
2. Aydemir, B., Aydemir E. ve Kaluç, E. (2017) DP1000 Çelik Sacların Uzaktan Lazer (RLW) ve Direnç Nokta Kaynaklı (RSW) Birleştirmelerinin Çekme ve Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi, *Mühendis ve Makina*, 58(687), 17-28.
3. Aydın, M. Ve Gülenç, B. (2003) Elektro ve Sıcak Daldırma Metodlarıyla Galvaniz Kaplanmış Çelik Sacların Paslanmaz Çeliğe Direnç Kaynağı İle Kaynaklanabilirliği, *Gazi Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 16(1),179-187.
4. Baynal, K. ve Gencel, İ. (2015) Taguchi Yönteminin Gıda Sektöründe Çok Yanıtlı Problemin Eniyilemesinde Uygulanması, *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 19(1), 107-121.
5. Bıyık, A., İnce, U., Ateş, F. ve Yetilmezsoy, K. (2016) Kaynak Cıvatalarının Projeksiyon Kaynağı ile Birleştirilmesinde Çapaklanmanın Azaltılmasına Yönelik Optimal Proses

- Parametrelerinin Taguchi ve Çok Amaçlı Optimizasyon Yöntemleriyle Tespit Edilmesi, *Mühendis ve Makina*, 57(677), 36-52.
6. Bilici, M.K., Bakır, B. Bozkurt, Y. ve Çalış, İ. (2015) Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Tekniği İle Birleştirilen Farklı Alüminyum Levhaların Taguchi Analizi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(1), 17-23. doi: 10.5505/pajes.2015.06641
 7. Billur, E., Çetin, B. ve Gürleyik, M. (2016) New Generation Advanced High Strength Steels: Developments, Trends and Constraints, *International Journal of Scientific and Technological Research*, 2(1), 50-62.
 8. Demir, B., İncekar, E., Dinçel, Ö. ve Elitaş, M. (2017) İleri Dayanımlı Çeliklerde Nokta Direnç Kaynağı Etkilerinin İncelenmesi, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 4(1), 92-100.
 9. Doruk, E., Pakdil, M., Çam, G., Durgun, İ. ve Kumru, U.C. (2016) Otomotiv Sektöründe Direnç Nokta Kaynağı Uygulamaları, *Mühendis ve Makina*, 57(673), 48-53.
 10. Eşme, U., Bayramoğlu, M., Geren, N. ve Serin, H. (2006) Tig Kaynağında Kaynak Dayanımının Taguchi Metoduyla Optimizasyonu, *TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi*, 335-343.
 11. Ferudun, N. (2015) Akım ve Basıncın Direnç Kaynak Kalitesine Etkisi, *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası*, 175, 32-34.
 12. Gökçe B. ve Taşgetiren, S. (2009) Kalite İçin Deney Tasarımı, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 71-83.
 13. Günay, G. (2013) AISI 316L Çeliğinin İşlenmesinde Takım Radyüsü Ve Kesme Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(3), 437-444.
 14. Güneş, S. (2015). Honlama Prosesinde Yüzey Kalitesini Etkileyen Parametrelerin Taguchi Metodu İle Optimizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
 15. H.-L. Lin, T. Chou, C.-P. Chou (2007) Optimization of Resistance Spot Welding Process using Taguchi Method and A Neural Network, *Developments, Applications and Tutorials in Experimental Mechanics Techniques*, 31(5), 30-36. doi: 10.1111/j.1747-1567.2007.00186.x
 16. Kaynak Hatalarının Önlenmesi İçin 6 Yöntem. Erişim Adresi: <http://www.askaynak.com.tr/yayinlar/bultenler/kaynak-hatalarinin-onlenmesi-icin-6-yontem> (Erişim Tarihi: 08.08.2017)
 17. Robotik Gazaltı Köşe Kaynak İşleminin Taguchi Yöntemi İle Eniyilenmesi. Erişim Adresi: <http://dergipark.gov.tr/download/article-file/203449> (Erişim Tarihi: 09.05.2017)
 18. Alaşım Elementlerinin Çeliğin Yapısına Etkisi. Erişim Adresi: <http://www.haddemetal.com/tr/Download/Alasim%20Elementlerinin%20Celigin%20Yapisi%20Etkisi.pdf> (Erişim Tarihi: 18.10.2017)
 19. Metal Teknolojisi, Elektrik Direnç Kaynağı. Erişim Adresi: http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Elektrik%20Diren%C3%A7%20Kayna%C4%9F%C4%B1.pdf (Erişim Tarihi: 31.08.2017)
 20. Çift Fazlı Çelikler ve Nokta Direnç Kaynağı Uygulamaları. Erişim Adresi: <http://www.metaldunyasi.com.tr/tr/arsiv/2015/23/cift-fazli-celikler-ve-nokta-direnç-kaynagi-uygulamaları.html> (Erişim Tarihi: 13.07.2017)

21. Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Otomotiv Çelik Kaliteleri. Erişim Adresi: <http://www.metaldunyasi.com.tr/tr/arsiv/2016/153/gelistirilmis-yuksekmukavemetli-otomotiv-celik-kaliteleri.html> (Erişim Tarihi: 13.07.2017)
22. Elektrik Direnç Kaynağı. Erişim Adresi: <http://www.pukamakina.com/teknik-bilgi/1/elektrik-direnc-kaynagi.html> (Erişim Tarihi: 23.08.2017)
23. Robot Kaynak Teknolojisi. Erişim Adresi: <http://www.slideshare.net/aliogluonder/robot-kaynak-teknolojisi> (Erişim Tarihi: 23.08.2017)
24. Kara, V. (2012) Taguchi Metodu Yardımıyla, GS 24Mn5 N Malzemenin Frezleme Operasyonunda, İşleme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Optimizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Mersin Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
25. Matlock, D.K., Speer, J.G., Moor, E.D. ve Gibbs, P.J. (2012) Recent Developments In Advanced High Strength Sheet Steels For Automotive Applications: An Overview, *Jestech*, 15(1), 1-12.
26. Öktem, H. ve Erzincanlı, F. (2012) Bir Dvd-Rom Ön Kapağının Plastik Enjeksiyonla Basılması Sonucunda Oluşan Çekmeye Etki Eden En Uygun İşlem Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Belirlenmesi, *TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi*, Balıkesir, 431-441.
27. Öztürk Yılmaz, İ., Bilici, A.Y. ve Aydın, H. (2017) An Investigation into the Effect of Welding Parameters on Mechanical Properties of Dissimilar Resistance Spot Welded DP1000–QP1180 Steel Joints, *3rd Iron and Steel Symposium(UDCS'17)*, Karabük, 397-401.
28. Pouranvari, M. ve Ranjbarnoodeh, E. (2011), Resistance Spot Welding Characteristic of Ferrite-Martensite DP600 Dual Phase Advanced High Strength Steel-Part II: Failure Mode, *World Applied Sciences Journal*, 15(11), 1527-1531.
29. Rocha, I.C.L., Machado, I.G.M., ve Mazzaferro, C.C.P. (2015) Mechanical and metallurgical properties of DP 1000 steel square butt welded joints with GMAW, *International Journal of Engineering & Technology*, 26-34. doi: 10.14419/ijet.v4i1.3928
30. Salkım, İ. (2012) Taguchi Optimizasyon Yönteminin Anten Tasarım Problemlerine Uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
31. Sezgin, C.T. (2017) Otomotiv Endüstrisinde Yeni Nesil Çelik Kullanımının Önemi, *Akademia Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1(3), 205-210.
32. Taguchi, G. ve Clausing, D. (1990) Robust Quality, *Harvard Business Review*, 65-76.
33. Taylan D. (2009) Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
34. Uzun, A., Eski Ö. ve Çelik, E. (2017) Taguchi Tekniği Kullanılarak SAE 1021/ Dillidur 400 / Dillimax 500 Çeliklerinin Sürtünme Kaynağı için İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 5(2), 53-62.
35. Zhang, H. ve Senkara, J. (2006) *Resistance Welding Fundamentals and Applications*, CRC Baskı, Amerika.
36. Zhao, L.C. ve Shao, F.M. (1997) Optimization of connecting two communication networks subject to reliability constraint, *Microelectronics and Reliability*, 37(4), 629-633. doi:11.3267/2553/8911.324.260

EK-1. Taguchi Minitab program çıktısı

Taguchi Design						
Taguchi Orthogonal Array Design						
L27 (3 ⁶)						
Factors:	6					
Runs:	27					
Columns of L27 (3 ¹³) Array						
1	2	3	4	5	6	
Taguchi Analysis: Çekirdek çapı versus A; B; C; D; E; F						
Response Table for Signal to Noise Ratios						
Nominal is best (10×Log10(Ybar ² /s ²))						
Level	A	B	C	D	E	F
1	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*
Delta	*	*	*	*	*	*
Rank	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Response Table for Means						
Level	A	B	C	D	E	F
1	5,696	5,678	5,730	6,089	6,170	6,044
2	6,544	6,111	6,193	5,781	5,733	5,904
3	5,919	6,370	6,237	6,289	6,256	6,211
Delta	0,848	0,693	0,507	0,507	0,522	0,307
Rank	1	2	4	5	3	6
Taguchi Analysis: Çekirdek çapı versus A; B; C; D; E; F						
Response Table for Signal to Noise Ratios						
Larger is better						
Level	A	B	C	D	E	F
1	15,05	15,01	15,11	15,60	15,78	15,56
2	16,30	15,68	15,81	15,20	15,09	15,36
3	15,41	16,08	15,84	15,96	15,89	15,85
Delta	1,26	1,07	0,72	0,76	0,80	0,49
Rank	1	2	5	4	3	6

