



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

DC01 Çeliğinin Sertliğine NDK Parametrelerinin Etkisinin Çoklu Regresyon Analiziyle İncelenmesi

Muhammed ELİTAŞ

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 11100 Bilecik, Türkiye

Muhammed ELİTAŞ, [ORCID No: 0000-0001-5358-1783](https://orcid.org/0000-0001-5358-1783)

Sorumlu yazar e-posta: muhammed.elitas@bilecik.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 05.09.2022
Kabul: 24.01.2023
Online Ağustos 2023

DOI: [10.53433/yyufbed.1171388](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1171388)

Anahtar Kelimeler

Çoklu regresyon analizi,
DC01 çeliği,
Elektrot kuvveti,
Kaynak akımı,
Mikrosertlik

Öz: Bu çalışmada DC01 çeliğine 8-10-12 kA kaynak akımı ve 1.96-2.94 kN elektrot kuvveti kaynak parametrelerinde farklı nokta direnç kaynak işlemleri uygulanmıştır. Ana metal, ısının tesiri altındaki bölge ve kaynak metali boyunca mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde kullanılan formüller ile teorik sertlik değeri hesaplanmış ve elde edilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çoklu regresyon analizi ile kaynak parametrelerinin sertlik değeri üzerindeki önem düzeyleri belirlenmiş ve model kurulmuştur. Sonuç olarak kaynak akımı ve elektrot kuvveti arttıkça mikrosertlik değeri artmıştır. 12 kA-2.94 kN kaynak parametrelerinde teorik değere göre daha yüksek sertlik değeri bulunurken, diğer kaynak parametrelerinde daha düşük değerler elde edilmiştir. Çoklu regresyon analizi sonucunda kaynak akımının sertlik üzerindeki önem düzeyi elektrot kuvvetinden daha yüksek çıkmıştır.

Investigation of the Effect of RSW Parameters on the Hardness of DC01 Steel with Multiple Regression Analysis

Article Info

Received: 05.09.2022
Accepted: 24.01.2023
Online August 2023

DOI: [10.53433/yyufbed.1171388](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1171388)

Keywords

DC01 steel,
Electrode force,
Microhardness,
Multiple regression analysis,
Welding current

Abstract: This study made different resistance spot welding combinations on DC01 steel with welding parameters of 8-10-12 kA welding current and 1.96-2.94 kN electrode force. Microhardness measurements were carried out along base metal, heat affected zone and weld metal. The theoretical hardness value was calculated using the literature's formulas and compared with the obtained experimental results. With multiple regression analysis, the importance levels of the welding parameters on the hardness value were determined, and the model was established. Consequently, the microhardness value increased as the electrode force and welding current increased. While a higher hardness value was found in 12 kA-2.94 kN welding parameters compared to the theoretical value, lower values were obtained in other welding parameters. As a result of multiple regression analysis, the importance level of welding current on hardness was higher than electrode force.

1. Giriş

DC01, hemen hemen tüm pres işlemleri için tasarlanmış bir çelik kalitesidir ve özellikle otomotiv endüstrisinde, çoğunlukla araba gövde panellerinin şekillendirilmesinde kullanılır. Malzeme iyi kaynaklanabilirliğe sahiptir, bu nedenle bağlantı işlemi sırasında ek işlem gerektirmez (Ambroziak ve ark., 2011). Araç gövdesi bileşenlerini birleştirme teknolojisi, büyük ölçüde Nokta Direnç Kaynağı (NDK) dâhil olmak üzere birleşimin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Günümüzde araç gövdesi büyük oranda NDK yöntemi ile birleştirilmektedir (Gould ve ark., 2006; Daneshpour ve ark., 2009; Bina ve ark., 2014).

NDK işleminde oluşan yüksek ısı ve sonrasında hızlı soğuma neticesinde mikroyapıda değişim meydana gelmektedir. Bu bağlamda, Kaynak Metali (KM) sertliğinde Esas Metale (EM) göre artış görülmektedir. KM sertliğinin EM'e göre yaklaşık 2 kat fazla olduğu literatürde bildirilmiştir (Ma ve ark., 2008). Sertlik (S), malzemenin akma dayanımı, elastikiyet modülü, çekme dayanımı vb. diğer özellikleri hakkında da bilgi vermesi açısından çok önemlidir. Bu öneminden dolayı sertlik çalışmada değerlendirme ölçütü olarak ele alınmıştır.

Literatürde çelik malzemelerin kaynaklı birleşimlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması ile ilgili farklı çalışmalar bulunmaktadır. Mitschang ve ark. (2013) DC01- $AlMg_3$ hibrit metalleri ile karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzemenin indüksiyon nokta kaynak yöntemi ile birleştirilmesi üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Fu ve ark. (2022) AZ31 Mg alaşımı ve DC01 çeliğinin sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleşiminin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Mira-Aguilar ve ark. (2016) DX51D galvanizli düşük karbonlu çelik ve DC01 çeliğinin takım destekli sürtünme kaynağını gerçekleştirmiştir. Andrade ve ark. (2019) DC01, DX51D ve HC420LA çelik sacların sürtünme karıştırma nokta kaynağı boyunca sürtünme ısı üretimi üzerinde EM karakteristiklerinin ve proses parametrelerinin etkisini değerlendirmiştir. Aksöz ve ark. (2017) kaynak prosesinin elektrik ark kaynak metodu ile birleştirilen API 5L X65 çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Ada ve ark. (2016) ise API 5L X65 çeliğinin MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Derin çekme çeliklerinin NDK birleşimleri ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Daneshpour ve ark., 2009; Budiono & Martowibowo, 2017; Valera ve ark., 2017; Yuan ve ark., 2017). Literatürde DC01 derin çekme çeliğinin farklı kaynak yöntemleri ile birleşimleri üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Fakat DC01 çeliğinin NDK birleşimleri için kaynak parametrelerinin KM sertliği üzerindeki etkisinin istatistiksel analiz yöntemiyle incelenmesi ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Farklı kaynak akımı ve elektrot kuvveti parametrelerinde elde edilen NDK birleşimlerinin mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak parametrelerinin sertlik değeri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Hesaplanan teorik kaynak metali sertlik değeri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çoklu regresyon analizi ile sertlik değeri üzerinde kaynak parametrelerinin önem düzeyi belirlenmiş ve matematiksel model kurulmuştur. Oluşturulan model doğrultusunda hesaplanan sertlik değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak benzerlik oranı tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

300x300 mm boyutlarında temin edilen 2 mm kalınlığındaki DC01 çelik saclar giyotin makasta kesilerek 100x30 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. DC01 çeliğinin kimyasal bileşimi, akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. DC01 çeliğinin kimyasal bileşimi (%) ve mekanik özellikleri

| Malzeme | C | Mn | P | S | Fe |
|---------|---------------|---------------|--------------|--------------|-------|
| DC01 | ≤ 0.12 | ≤ 0.60 | ≤ 0.045 | ≤ 0.045 | Kalan |
| | $R_a(N/mm^2)$ | $R_m(N/mm^2)$ | $A_{80}(\%)$ | | |
| | 280 | 270-410 | 28 | | |

100x30x2 mm boyutlarında hazırlanan numuneler, Hyundai HS165 kaynak robotunda 8 mm uç çaplı elektrotlar kullanılarak farklı kaynak akımı ve elektrot kuvveti değerlerinde NDK işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 1a). NDK kaynak parametreleri ve elde edilen kaynaklı birleşim sırasıyla Çizelge 2 ve Şekil 1b'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. NDK işlem parametreleri

| Kaynak akımı (kA) | Elektrot kuvveti (kN) | Kaynak süresi (s) | Ön sıkma süresi (s) | Soğutma süresi (s) |
|----------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| 8 | 1.96 | 0.5 | 0.12 | 0.14 |
| 8 | 2.94 | 0.5 | 0.12 | 0.14 |
| 10 | 1.96 | 0.5 | 0.12 | 0.14 |
| 10 | 2.94 | 0.5 | 0.12 | 0.14 |
| 12 | 1.96 | 0.5 | 0.12 | 0.14 |
| 12 | 2.94 | 0.5 | 0.12 | 0.14 |



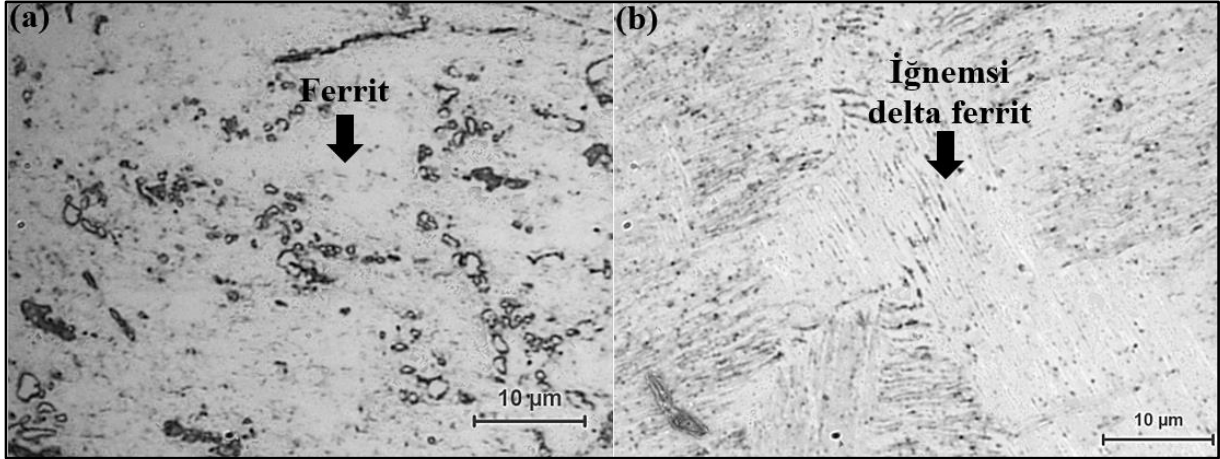
Şekil 1. NDK işlemi deney düzeneği (a) Kaynak robotu, (b) Elde edilen kaynaklı birleşim.

Mikroyapı incelemeleri için 120, 220, 360, 600, 800, 1000, 1200, 1500 ve 2000 mesh zımparalar kullanılarak zımparalama işlemi yapılmıştır. Sırasıyla 3 µm ve 1 µm elmas solüsyonlar ile 3 µm ve 1 µm çuhalarda parlatma işlemleri yapılarak %2 nital (%98 metanol+%2 nitrik asit) çözeltisinde dağlama işlemi 4 saniye süreyle gerçekleştirilmiştir. Vickers mikrosertlik deneyleri Emcotest marka DuroScan 20 model Vickers sertlik ölçüm cihazıyla EM, ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) ve KM sırasıyla eksenlere paralel olarak HV 1 değerinde yük 10 saniye uygulanarak gerçekleştirilmiştir. EM, ITAB ve KM bölgelerinde farklı noktalardan 3'er ölçüm olmak üzere toplamda 15 ölçüm gerçekleştirilmiştir. Çoklu regresyon analizi için IBM SPSS STATISTICS 22.0 programı kullanılmıştır. Sonuçlar karşılaştırılarak kaynak parametrelerinin sertlik üzerindeki önem düzeyleri belirlenmiş ve matematiksel model oluşturulmuştur.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Mikroyapı

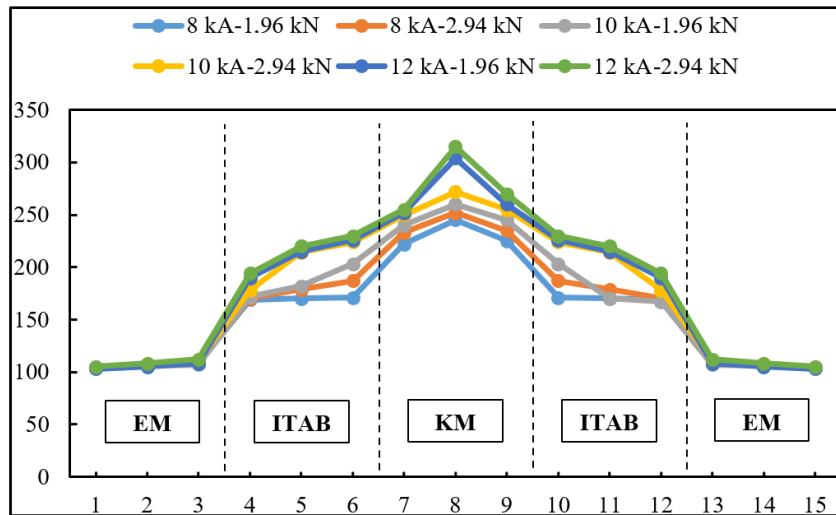
NDK işlemi uygulanan DC01 çeliğinin EM ve KM optik mikroskop (OM) görüntüleri Şekil 2.'de gösterilmiştir. EM ağırlıklı olarak ferrit fazından oluşmaktadır. KM ise NDK işleminde meydana gelen yüksek ısı girdisi ve hızlı soğuma sonucunda ağırlıklı olarak iğnemsî delta ferrit fazından oluştuğu görülmüştür (Kianersi ve ark., 2014).



Şekil 2. DC01 çeliğinin EM ve KM mikroyapı görüntüleri (a) EM, (b) KM.

3.2. Mikrosertlik

DC01 çeliğinin farklı elektrot kuvveti, kaynak akımı parametrelerinde NDK birleşimleri için EM, ITAB ve KM bölgelerinde eksenlere paralel doğrultuda ölçülen sertlik değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Mikrosertlik sonuçları.

Şekil 3 incelendiğinde tüm kaynak parametrelerinde sertlik değerlerinin EM, ITAB, KM boyunca arttığı görülmektedir. EM'den KM'e doğru NDK işleminde meydana gelen yüksek ısı girdisi sebebiyle sertlik değerlerinin artış gösterdiği literatürde bildirilmiştir (Gould ve ark., 2006; Ma ve ark., 2008; Khan ve ark., 2008; Pal & Bhowmick, 2012; Holovenko ve ark., 2013). Kaynak akımı ve elektrot kuvveti arttıkça KM sertlik değerleri artmıştır. KM sertlik değerleri 8 kA-1.96 kN, 8 kA-2.94

kN, 10 kA-1.96 kN, 10 kA-2.94 kN, 12 kA-1.96 kN, 12 kA-2.94 kN kaynak parametrelerinde sırasıyla 245 HV, 252 HV, 260 HV, 272 HV, 304 HV ve 315 HV elde edilmiştir.

Beklenen KM sertliği, esasında çelik bileşimindeki alaşım seviyelerinin bir fonksiyonudur. Karbon Eşdeğerliği (CE), alaşım elementlerinin çelik sertleşebilirliği üzerindeki etkileri ile ilgili bir indeks ölçüsü sağlar. Literatürde birçok alaşım elementlerini dikkate alan çoklu CE eşitlikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan CE formülü şu şekildedir (Eşitlik 1) (Khan ve ark., 2008):

$$CE_Y = C + A(C) \times \left\{ 5B + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} \right\} \quad (1)$$

$$A(C) = 0.75 - 0.25 \tanh\{20(C - 0.12)\}$$

CE_Y Yurioka karbon eşdeğerliği ve $A(C)$ uyum faktörüdür. Uyum faktörü, eğer karbon içeriği %0.08 değerinden düşükse 0.5'e, karbon içeriği %0.18'in üzerinde ise 1'e yükselmektedir. Uyum faktörü, CE_Y 'nin karbon içeriği 0.02 ile 0.2 arasında değişen çelik alaşımlarında uygulanabilir olmasını sağlamaktadır. Kimyasal bileşimin zenginleşmesi, daha yüksek CE değerine neden olmakta ve bu durum da KM sertliğinin artmasını sağlamaktadır. CE_Y KM sertliği ve EM kimyasal bileşimi arasında kuvvetli doğrusal ilişki göstermektedir. KM sertliği ve CE arasındaki doğrusal ilişkiyi gösteren formül ise Eşitlik 2'de verilmiştir (Khan ve ark., 2008).

$$HV_{KM} = 630 \times CE_Y + 188 \quad (2)$$

Eşitlik 2'de verilen HV_{KM} , KM bölgesinin Vickers sertliğini ve CE_Y ise Eşitlik 1'de hesaplanan CE değerini ifade etmektedir. Eşitlik 2, çeliklerin NDK KM sertliğini belirlemek için gelişmiş metot sunmaktadır. Geniş aralıkta kimyasallar için uyum faktörü içeren Yurioka CE eşitliğiyle, NDK KM sertliği ve kimyasallar arasında daha güvenilir ilişki yapılabilir (özellikle NDK şartlarında). Bu çalışmada kullanılan DC01 için Çizelge 1'de verilen kimyasal bileşim değerleri kullanılarak Eşitlik 1'e göre $A(C)$ değeri 0.75 ve CE_Y değeri ise 0.195 elde edilir. CE_Y değeri Eşitlik 2'de kullanıldığında ise 310.85 değeri elde edilmektedir. Hesaplanan teorik KM sertlik değeri ve deneyler sonucunda elde edilen KM sertlik değerleri Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Teorik ve deneyler sonucunda elde edilen KM sertlik değerleri (HV)

| Teorik değer | 8 kA 1.96 kN | 8 kA 2.94 kN | 10 kA 1.96 kN | 10 kA 2.94 kN | 12 kA 1.96 kN | 12 kA 2.94 kN |
|--------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 310.85 | 245 | 252 | 260 | 272 | 304 | 315 |

Çizelge 3 incelendiğinde hesaplanan teorik sonuç, uygulama sonuçları ile karşılaştırıldığında 12 kA kaynak akımında her iki elektrot kuvveti değeri için teorik değere yakın sonuçlar elde edilmiştir. 12 kA-2.94 kN kaynak parametrelerinde teorik değere göre daha yüksek sertlik değeri bulunurken, diğer kaynak parametrelerinde daha düşük değerler elde edilmiştir.

3.3. Çoklu regresyon analizi

Çoklu regresyon iki ve daha fazla değişkenin bir bağımlı değişkeni açıklamasıdır. Bu analiz yöntemi birden fazla değişkendeki bilgiyi kullanarak modelleme yapmaktadır. Korelasyon iki değişken arasındaki ilişkidir. Genel olarak sürekli değişkenler arasındaki ilişkiler için kullanılır. Korelasyonun aldığı değerler işaretli ilişkinin yönünü belirtir. Pozitif yönlü ilişkilerde korelasyon değerinin işareti pozitif iken negatif yönlü ilişkilerde korelasyon değerinin işareti negatiftir. Korelasyon mutlak değeri 0-1 arasında bir değer alır. 1'e yakın değerler pozitif ilişki, 0'a yakın değerler ise negatif ilişkiyi göstermektedir (Yavuz ve ark., 2020; Gökçe, 2021; Gökçe & Biberici, 2022).

Bağımsız değişkenler arasında korelasyon ilişkisinin yüksek düzeyde çıkmaması beklenir. Çizelge 4 incelendiğinde analizde kaynak akımı ve elektrot kuvveti arasında 0.00'luk bir değer ile ilişki

olmadığı görülmüştür. Yani bu değer modelde beklenen varsayımı desteklemektedir. Kaynak akımı ve sertlik değeri arasında 0.952 ile yüksek düzeyde bir ilişki bulunurken, elektrot kuvveti ve sertlik arasında 0.191 ile düşük düzeyde bir korelasyon ilişkisi olduğu gözlemlenmiştir. [Feujofack Kemda ve ark. \(2020\)](#), ASTM A36 ve ASTM A653 çeliklerinin NDK işlemi üzerine yaptıkları çalışmada kaynak metali sertliğini etkileyen en önemli parametrenin kaynak akımı olduğunu bildirmişlerdir.

Çizelge 4. Korelasyonlar

| | | Sertlik | Kaynak akımı | Elektrot kuvveti |
|--------------------|------------------|---------|--------------|------------------|
| Pearson Korelasyon | Sertlik | 1.000 | .952 | .191 |
| | Kaynak akımı | .952 | 1.000 | .000 |
| | Elektrot kuvveti | .191 | .000 | 1.000 |

R değeri korelasyon katsayısını gösterir. Determinasyon katsayısı (R^2) değeri bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki toplam değişimi ne kadar açıkladığını gösterir. Düzeltilmiş R^2 değeri ise bir değişkenin tek başına etkisi ile sonradan eklenen bir değişkenin etkisi olup olmadığını gösterir. Analizde R değeri 0.971 bulunurken, düzeltilmiş R^2 değeri 0.906 çıkmıştır (Çizelge 5). Bu değerler 1'e ne kadar yakınsa ilişki düzeyi ve açıklanabilirlik o kadar yüksektir. Yani değişkenler arasında yüksek düzeyde bir ilişki bulunduğu söylenebilir. Düzeltilmiş R^2 değeri eğer R^2 değerine yakınsa yeni bir değişken eklemeye gerek olmadığı sonucuna varılır. Burada düzeltilmiş R^2 değeri 0.906 olarak bulunmuştur ve R^2 değerine (0.943) oldukça yakındır. Bu sonuca göre yeni bir değişken eklemeye gerek olmadığı görülmektedir. Durbin Watson analizi ise çoklu doğrusal regresyon varsayımlarından birini teyit etmek için kullanılan bir analizdir. Otokorelasyonun değişkenler arasında olup olmadığını gösterir. 1.5 ile 2.5 arasında olması kabul edilir. Bulunan değer 1.302'dir ve alt sınıra yakın olduğu için otokorelasyon ihmal edilebilir.

Çizelge 5. Model özeti

| Model | R | R^2 | Düzeltilmiş R^2 | Tahminin Standart Hatası | Durbin-Watson |
|-------|-------------------|-------|-------------------|--------------------------|---------------|
| 1 | .971 ^a | .943 | .906 | 8.80025 | 1.302 |

Anova (varyans analizi), modelin bir bütün olarak anlamlı olup olmadığını göstermektedir. Çizelge 6 incelendiğinde önem derecesi 0.013 < 0.05 olduğundan bu model istatistiksel olarak anlamlıdır. Bulunan F değeri 24.992'dir. $F_{hesap}=24.992 < F_{(3,2)}=30.817$ olarak bulunmuştur. Dolayısıyla hesaplanan F değeri F tablo değerinden küçük olduğu için kurulan modelin anlamlılığını desteklemektedir.

Çizelge 6. ANOVA

| Model | Karelerin Toplamı | Serbestlik Derecesi | Karelerin Ortalaması | F | Önem Düzeyi |
|--------------------|-------------------|---------------------|----------------------|--------|-------------------|
| 1 | 3871.000 | 2 | 1935.500 | 24.992 | .013 ^b |
| Regresyon Artıklar | 232.333 | 3 | 77.444 | | |

Çizelge 7'de katsayılar tablosu gösterilmiştir. Kaynak akımı değişkeninin önem derecesi 0.006 < 0.05 olduğundan sertlik derecesi üzerinde anlamlı ve pozitif bir etkiye sahiptir. Elektrot kuvveti 0.258 > 0.05 olduğundan sertlik derecesi üzerinde anlamlı bir etkiye sahip değildir. B katsayısındaki sabit değer, bağımsız değişkenler 0 olsa bile belirli bir sertlik değerinin ölçüldüğünü ifade etmektedir. Kaynak akımı, sertlik derecesi üzerinde 15.250 oranında etki etmektedir. Yani kaynak akımındaki 15.250 birimlik değişim sertlik üzerinde 1 birimlik artışa neden olmaktadır. Aynı şekilde elektrot kuvvetindeki 10.204 birimlik değişim sertlik üzerinde 1 birimlik artışa sebep olmaktadır. Yalnız elektrot kuvvetinin önem düzeyi anlamlı olmadığı için buradaki değişim ihmal edilebilir düzeydedir.

Standardize Beta katsayılarına bakıldığında kaynak akımının yüzde 95.2'lik bir etkiye sahip olduğu saptanırken elektrot kuvvetinin yüzde 19.1 lik düşük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. t değerleri incelendiğinde ise aynı şekilde kaynak akımı 6.932'lik bir etkileme oranına sahipken elektrot kuvvetinin 1.392'lik düşük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Tolerans ve Varyans Artış Faktörü (VIF) değerleri incelendiğinde ise; öncelikle tolerans değerinin 0.20'nin altında olmaması beklenirken yapılan analizde 1.00 çıkmıştır. Yani bu varsayımı desteklemektedir. VIF değerinin ise 10'un altında olması beklenmektedir. Çalışmamızda 1.00 bulunarak bu varsayımı da sağladığı görülmektedir. Sonuç olarak bu değerler de modelin anlamlılık düzeyini pozitif yönde etkilemektedir.

Çizelge 7. Katsayılar

| Model | B | Std. Hata | Standart Katsayı Beta | t | Önem Derecesi | Tolerans | VIF |
|------------------|--------|-----------|-----------------------|-------|---------------|----------|-------|
| Sabit (Sertlik) | 97.167 | 28.629 | | 3.394 | .043 | | |
| Kaynak akımı | 15.250 | 2.200 | .952 | 6.932 | .006 | 1.000 | 1.000 |
| Elektrot kuvveti | 10.204 | 7.332 | .191 | 1.392 | .258 | 1.000 | 1.000 |

Bağımsız olarak hesaplanan değişkenlerin, bağımlı değişkeni tahmin ettiği düşünülen formülasyonda aşağıdaki hipotezler kurulmuştur:

H_0 =Model anlamsızdır.

H_s =Model anlamlıdır

Gerçekleştirilen analizler ve kıyaslanan değerler ışığında modelimizin anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır. S, elektrot kuvveti (EK) ve kaynak akımı (KA) arasında kurulan model Eşitlik 3'te gösterilmiştir.

$$S = 97.167 + (15.250 \times KA) + (10.204 \times EK) \quad (3)$$

Eşitlik 3'te oluşturulan model dikkate alınarak hesaplanan sertlik değerleri ve deneysel sonuçlar Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8. Kurulan modele göre hesaplanan sertlik değerleri ve deneysel sonuçlar (HV)

| Sertlik değerleri | 8 kA 1.96 kN | 8 kA 2.94 kN | 10 kA 1.96 kN | 10 kA 2.94 kN | 12 kA 1.96 kN | 12 kA 2.94 kN |
|-------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Teorik | 239.17 | 249.17 | 269.67 | 279.67 | 300.17 | 310.17 |
| Deneysel | 245 | 252 | 260 | 272 | 304 | 315 |

Çizelge 8 incelendiğinde kurulan modele göre hesaplanan sertlik değerleri ile deneysel sonuçlar arasında yaklaşık olarak %1-3 aralığında farklılık bulunmaktadır. Bu durum kurulan modelin deneysel sonuçlara yaklaşık %97-99 oranında benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir. 8 kA-1.96 kN, 8 kA-2.94 kN, 12 kA-1.96 kN ve 12 kA-2.94 kN kaynak parametrelerinde teorik sertlik değerlerinin deneysel sonuçlara göre daha düşük olduğu, 10 kA-1.96 kN ve 10 kA-2.94 kN kaynak parametrelerinde ise teorik sertlik değerlerinin deneysel sonuçlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

4. Sonuç

NDK DC01 çeliğinin KM sertlik değeri üzerinde farklı KA ve EK parametrelerinin etkisinin değerlendirildiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

1. DC01 çeliğinin EM mikroyapısının ağırlıklı olarak ferrit fazından, KM mikroyapısının ise iğnemsiz delta ferrit fazından oluştuğu görülmüştür.
2. Tüm kaynak parametrelerinde sertlik değerleri EM'den KM'e doğru artmıştır.
3. Kaynak akımı ve elektrot kuvveti arttıkça sertlik değerleri artmıştır.
4. 12 kA-2.94 kN kaynak parametrelerinde teorik değere göre daha yüksek sertlik değeri bulunurken, diğer kaynak parametrelerinde daha düşük değerler elde edilmiştir.
5. KM sertlik değerini etkileyen en önemli parametrenin kaynak akımı olduğu görülmüştür.
6. Kaynak akımı, elektrot kuvveti ve sertlik arasında çoklu regresyon modeli başarıyla kurulmuştur. Modelin deneysel sonuçlara yaklaşık %97-99 oranında benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Kaynakça

- Ada, H., Aksöz, S., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B., & Candan, İ. (2016). API 5L X65 çeliklerinin mag kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde, kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(ÖS1), 1–9. doi:10.21605/cukurovaummfd.311031
- Aksöz, S., Ada, H., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B., & Candan, İ. (2017). API 5L X65 çeliklerinin elektrik ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde, kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. *El-Cezeri*, 4(1), 72-81. doi: 10.31202/ecjse.289639
- Ambroziak, A., Tobota, A., Tokarz, K., & Kustron, P. (2011). Testing of thin-walled steel joints fabricated by spot welding and plug welding. *Welding International*, 25(4), 277–282. doi:10.1080/09507116.2010.540833
- Andrade, D. G., Leitão, C., & Rodrigues, D. M. (2019). Influence of base material characteristics and process parameters on frictional heat generation during Friction Stir Spot Welding of steels. *Journal of Manufacturing Processes*, 43, 98–104. doi:10.1016/j.jmapro.2019.05.015
- Bina, M. H., Jamali, M., Shamanian, M., & Sabet, H. (2014). Investigation on the resistance spot-welded austenitic/ferritic stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(9–12), 1371–1379. doi:10.1007/s00170-014-6220-x
- Budiono, Y. K., & Martowibowo, S. Y. (2017). Optimization of resistance spot welding process using response surface methodology and simulated annealing. *Manufacturing Technology*, 17(4), 434–440. doi:10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/4/434
- Daneshpour, S., Riekehr, S., Kocak, M., & Gerritsen, C. H. J. (2009). Mechanical and fatigue behaviour of laser and resistance spot welds in advanced high strength steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, 14(1), 20–25. doi:10.1179/136217108X336298
- Feujofack Kemda, B. V., Barka, N., Jahazi, M., & Osmani, D. (2020). Optimization of resistance spot welding process applied to A36 mild steel and hot dipped galvanized steel based on hardness and nugget geometry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(5), 2477–2491. doi:10.1007/s00170-019-04707-w
- Fu, X., Chen, K., Liu, C., Wang, M., & Hua, X. (2022). Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir lap welding between AZ31 Mg alloy and DC01 steel. *Materials Characterization*, 187, 111870. doi:10.1016/j.matchar.2022.111870
- Gökçe, H. (2021). Modelling and optimization for thrust force, temperature and burr height in drilling of custom 450. *Experimental Techniques*, 46, 707–721. doi:10.1007/s40799-021-00510-z
- Gökçe, H., & Biberici, M. A. (2022). Investigation of thrust force, drill bit temperature and burr height in the drilling of aluminum alloy used in ammunition wing drive systems. *Experimental Techniques*, 46(4), 691–705. doi:10.1007/s40799-021-00501-0
- Gould, J. E., Khurana, S. P., & Li, T. (2006). Predictions of microstructures when welding automotive advanced high-strength steels. *Welding Journal*, 85(5), 111-116.
- Holovenko, O., Ienco, M. G., Pastore, E., Pinasco, M. R., Matteis, P., Scavino, G., & Firrao, D. (2013). Microstructural and mechanical characterization of welded joints on innovative high-strength steels. *La Metallurgia Italiana*, 3, 3-12.
- Khan, M. I., Kuntz, M. L., Biro, E., & Zhou, Y. (2008). Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded advanced high strength steels. *Materials Transactions*, 49(7), 1629-1637. doi:10.2320/matertrans.MRA2008031

- Kianersi, D., Mostafaei, A., & Amadeh, A. A. (2014). Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations. *Materials & Design*, 61, 251–263. doi:10.1016/j.matdes.2014.04.075
- Ma, C., Chen, D. L., Bhole, S. D., Boudreau, G., Lee, A., & Biro, E. (2008). Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 485(1–2), 334–346. doi:10.1016/j.msea.2007.08.010
- Mira-Aguiar, T., Verdera, D., Leitão, C., & Rodrigues, D. M. (2016). Tool assisted friction welding: A FSW related technique for the linear lap welding of very thin steel plates. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 73–80. doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.07.006
- Mitschang, P., Velthuis, R., & Didi, M. (2013). Induction spot welding of metal/CFRPC hybrid joints. *Advanced Engineering Materials*, 15(9), 804–813. doi:10.1002/adem.201200273
- Pal, T. K., & Bhowmick, K. (2012). Resistance spot welding characteristics and high cycle fatigue behavior of DP 780 steel sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(2), 280–285. doi:10.1007/s11665-011-9850-2
- Valera, J., Miguel, V., Martínez, A., Naranjo, J., & Cañas, M. (2017). Optimization of electrical parameters in Resistance Spot Welding of dissimilar joints of micro-alloyed steels TRIP sheets. *Procedia Manufacturing*, 13, 291–298. doi:10.1016/j.promfg.2017.09.074
- Yavuz, M., Gökçe, H., Çiftçi, İ., Gökçe, H., Yavaş, Ç., & Şeker, U. (2020). Investigation of the effects of drill geometry on drilling performance and hole quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9), 4623–4633. doi:10.1007/s00170-019-04843-3
- Yuan, X., Li, C., Chen, J., Li, X., Liang, X., & Pan, X. (2017). Resistance spot welding of dissimilar DP600 and DC54D steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 239, 31–41. doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.08.012