



## AISI 304 Paslanmaz Çeliğin Nokta Direnç Kaynağında Birleştirmenin Mekanik Özelliklerine Soğuma Hızının Etkisi

<sup>1</sup>Yusuf ÖZÇATALBAŞ, <sup>2</sup>Gürhan KUŞTUTAN, <sup>3</sup>Uğur ARABACI  
<sup>1,2,3</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Met. ve Malz. Müh. Bölümü ANKARA

### Öz

AISI 304 paslanmaz çelik saclar özellikle otomotiv, kimya ve gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemenin birleştirilmesinde ise genellikle nota direnç kaynağı kullanılır. Direnç kaynağı sonrasında kullanılan farklı soğutma ortamları, birleştirmenin mekanik özelliklerinde farklılık meydana getirmektedir. Bu çalışmada, AISI 304 paslanmaz çeliğin nokta direnç kaynağındaki akım şiddeti ve soğutma ortamının, birleştirmenin mekanik özelliklerine ve mikro yapısına etkisi araştırılmıştır. Üç farklı akım şiddeti ve soğutma ortamında yapılan birleştirme numunelerinin üzerinde çekme-makaslama ve sertlik deneyleri yapılmıştır. Birleştirmede oluşan çekirdek morfolojisi ve mikro yapı incelenmiştir. Uygun birleştirme özellikleri, 7,5 kA akımında ve hava soğutmalı ortamda sağlanmıştır. Artan akım şiddetiyle çekme-makaslama dayanımı da artmasına rağmen birleştirme aşırı deforme olmuş ve fişirme meydana gelmiştir.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 20/10/2017  
Düzeltilme: 08/12/2017  
Kabul: 15/12/2017

### Anahtar Kelimeler

Paslanmaz Çelik,  
Direnç kaynağı  
Soğuma Hızı,  
Mekanik Özellikler  
Mikro yapı.

### Keywords

Stainless Steel  
Resistant Welding,  
Cooling Rate,  
Mechanical Properties  
Microstructure Properties.

## Effect Of Cooling Rate On Mechanical Properties In Resistant Welding Joint Of AISI 304 Stainless Steel

### Abstract

AISI 304 stainless steel plates are widely used in automotive, food and chemical industries. These materials are joined by resistant spot welding. Mechanical properties of resistant spot-welded sheets are changed by using different cooling conditions after welding process. In this study, the effects of current intensity and cooling conditions during spot welding of AISI 304 stainless steel on mechanical properties and microstructure of the welded joint were investigated. Tensile-shear tests and hardness tests of joints welded at different current intensities and cooling rates were carried out. Morphology and microstructure of nucleus zone were examined. Suitable joining properties were provided by using 7.5 kA of welding current and cooling with air. Although the tensile-shear strength of the joints increased with increasing current intensity, the joint has been over-deformed and has come to a point of gushing.

## 1.GİRİŞ [INTRODUCTION]

Günümüz endüstrisinde kullanılan paslanmaz çeliklerin hangi kaynak yöntemiyle ne tür koşullarda birleştirilmelerinin uygun olacağına belirlenmesi araştırma konusu olmuştur. Nokta direnç kaynağı, yaklaşık 3 mm kalınlığa kadar olan aynı kimyasal bileşimdeki sac ve levhaların birbiri üzerine bindirilerek birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılır [1]. Kaynak edilecek iş parçalarının birleşme (kontak) yüzeyleri, kısa bir süre uygulanan düşük gerilim ve yüksek akım şiddeti ile plastik deformasyon sıcaklığına kadar ısıtılmakta, basıncın da etkisi ile noktasal kaynak çekirdeği oluşturulmakta ve böylece birleşme sağlanmaktadır [2]. Paslanmaz çelik malzemeler yüksek korozyon ve dirençleri, yüksek mekanik ve fiziksel özellikleri, sıcak ve soğuk şekillendirilebilirlikleri, kaynaklanabilir olması ile dikkat çekmektedirler. Paslanmaz çeliklerden ürün üretimi sürecinde genellikle otomasyona uygun olarak elektrik direnç kaynak yöntemi ile birleştirilmesi tercih edilen bir yöntemdir [3].

Paslanmaz çeliklerin ürün durumuna gelmesi için en genel birleştirme tekniği kaynaklı birleştirme dir. Nokta direnç kaynağı, yaklaşık 3 mm kalınlığa kadar olan aynı kimyasal bileşimdeki sac ve levhaların birbiri üzerine bindirilerek birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılır [4]. Fakat birçok kaynak yöntemi, paslanmaz çeliklerin korozyon dirençlerini düşürmekte ve tanelerarası korozyon, sigma fazı oluşumu ve kaynak sonrası sıcak çatlaklar gibi birçok problem ortaya çıkarmaktadır [4,5]. Direnç kaynağı ile birleştirme tekniklerinin uygulanması, birleştirme sürecinde oluşan bu problemleri minimize edebilmekte ve özellikle kaynak sırasındaki değişken parametrelerin [süre, basınç, akım vs.] optimizasyonu ile son yıllarda uygulanan soğutma ortamı ve kaynak soğuma hızıyla ilgili araştırmalar önem kazanmaktadır [6]. Özellikle beyaz eşya üretim sektöründe de yaygın olarak kullanılan direnç kaynağı sonrası farklı soğutma ortamlarıyla sağlanan soğutma hızlarının birleştirmenin mekanik özelliklerine etkisiyle ilgili yeterli çalışma mevcut değildir.

Bu çalışmada, imalat sanayinde geniş kullanım alanı olan elektrik direnç nokta kaynağı ile farklı akım değerlerinde birleştirilen AISI 304 paslanmaz çelik malzemedeki kaynak sonrası soğuma hızının, birleştirmenin mekanik özelliklerine ve kaynak bölgesinin mikro yapısına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Hava, su ve su+%10 bor yağlı soğutma ortamları ile soğutulan kaynaklı birleştirmelerin çekme deneyleri, sertlik ölçümleri ve kaynak bölgelerinin optik mikroskop incelemeleri gerçekleştirilerek, kaynak sonrası soğuma hızının mikro yapı üzerine etkileri araştırılmıştır.

## 2. Malzeme ve Metot [Material and Method]

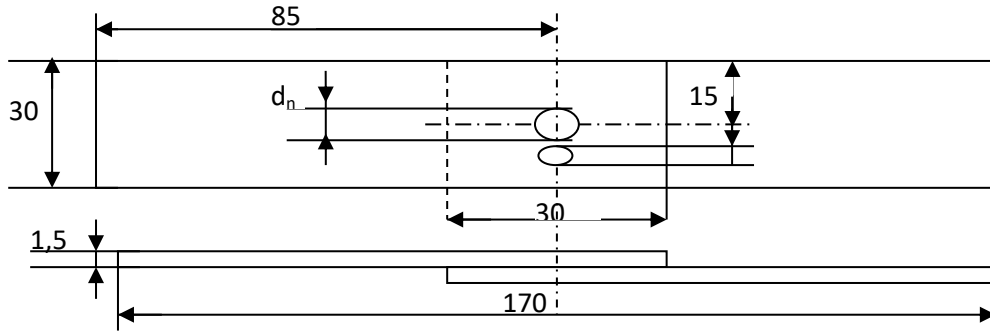
### 2.1 Malzeme [Material]

Deneylerde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1' de, numunelerinin boyutları ve kaynak noktasının pozisyonu Şekil 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Deney malzemesinin kimyasal bileşimi [% Ağırlık]

	<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Al</b>	<b>Co</b>
Malzeme	0,0733	18,08	8,28	0,491	1,79	0,314	0,0074	0,113
<b>AISI 304</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Fe</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
	0,327	0,0057	0,0018	0,0713	0,05	<70,39	<0,001	<0,001

Deneylerde kullanılan AISI 304 tipi paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu incelendiğinde Cr ve Ni ağırlıklı olduğu görülmektedir. Türk standartlarında da bu çelik X5 CrNi 18/8 şeklinde kodlanmaktadır.



Şekil 1. Deney numunelerinin boyutları ve kaynak noktasının pozisyonu

Deney numuneleri Şekil 1' de gösterilen boyutlarda, hadde yönüne paralel konumda kesildikten sonra, yüzeylerindeki yağ, pas vb. yabancı maddelerden arındırılmak amacıyla sabunlu suda yıkanmış ve temiz bir bezle silinmiştir.

## 2.2. Deney metodu [Experimental Method]

Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri Tablo 2' de verilmiştir. Verilen parametrelerden kaynak akımı ve kaynak sonrası soğutma ortamı değişken kabul edilmiş, diğer parametreler deney süresince sabit tutulmuştur.

Tablo 2. Kaynak işleminde kullanılan kaynak parametreleri.

Elektrod İnme süresi [s]	Elektrod Baskı süresi [s]	Kaynak akım süresi [s]	Kaynak akımı [kA]	Elektrot Basıncı [Bar]	Kaynak Sonrası Soğutma Tipi
1	0,6	0,133 [15 devir]	2,5 7,5 12,5	8	1- Durgun Havada (14°C) 2- Su+%10 Boryağı (18°C) 3- Suda Soğutma (18°C)

Deneylerde, tek kollu 60 kVA gücünde, BAŞAR marka elektronik akım ve zaman kontrollü, pnömatik basma donanımlı elektrik direnç nokta kaynak makinesi ve kesik konik uçlu [uç çapı 6mm olan ticari saflıkta bakır] elektrodlar kullanılmıştır.

Ayrıca çekme makaslama deneylerinde kullanılmak üzere her bir soğutma ortamında ve her bir amper değerinde kaynak yapılmış beşer adet kaynak çifti birleştirilmenin ağırlık merkezi dikkate alınarak çekme-makaslama deneyine tabi tutulmuştur. Beş numunenin ortalaması birleştirilmenin çekme-makaslama kuvveti olarak verilmiştir. Deneyler maksimum yükleme kapasitesi 30000N olan bir çekme cihazında, 20 mm/s çekme hızında gerçekleştirilmiştir.

Sertlik deneyleri ise Instron-Diatestor 7551 tipi sertlik ölçme cihazında 1 kg. yük uygulanarak Vickers metoduyla ölçülmüştür.

Mikro yapı çalışmaları için ise deney numuneleri, kaynak noktalarından [kaynak çekirdeği merkezinden] el testeresi ile kesilmiş ve bakalite gömülerek metalografik muayeneye hazır hale getirilmiştir. 10 ml HNO<sub>3</sub>, 10 ml asetik asit [CH<sub>3</sub>COOH], 15 ml hidroklorik asit [HCL], 2 damla gliserin ile hazırlanan dağlayıcı çözeltide numune yüzeyleri dağlanarak metalografik muayeneleri yapılmıştır.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA [RESULTS AND DISCUSSION]

#### 3.1. Çekme-Makaslama Dayanımı [Tensile-Shear Strength]

Yapılan deneyler sonucunda kaynak akımına ve kaynak sonrası soğutma ortamına bağlı elde edilen maksimum çekme kuvveti değerleri ile kopma mekanizmaları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Soğutma ortamı ve kaynak akımının kopma türüne etkisi.

Soğutma Ortamı	Kaynak Akımı (kA)	Maksimum Çekme Kuvveti (kN)	Kopma Türü
Hava	2,5	11,866	Ayrılma
	7,5	14,592	Düğümlenme
	12,5	15,452	Yırtılma
Su	2,5	10,964	Ayrılma
	7,5	13,487	Düğümlenme
	12,5	14,093	Yırtılma
Su+%10 Boryağ	2,5	11,271	Ayrılma
	7,5	13,746	Düğümlenme
	12,5	14,368	Yırtılma

Tablo 3 incelendiğinde 2,5 kA kaynak akımında, her üç soğutma hızında da, düşük akım girdisine bağlı yetersiz kaynak çekirdeği oluşumu ve çekirdek boyut oranı değerinin artmasıyla yük taşıyan ara kesitin azalması sonucu ayrılma tipi kopma görülmüştür. Kaynak akımının 7,5 kA’ ya artmasıyla her üç soğutma tipinde elde edilen çekme-makaslama kuvveti sonuçlarında artış tespit edilmiştir. Ayrıca düğümlenme

şeklinde kopma tipinin de birleştirme için ideal şartların oluştuğunu göstermektedir. 12,5 kA' da ise yüksek akım şiddetine bağlı oluşan fişkırmaların birleştirme bölgesinde meydana getirdiği hasar sebebiyle her üç soğutma ortamında da yırtılma şeklinde kopma görülmüştür. Yapılan bir çalışmada maksimum kaynak akımında (5 kA) birleştirilen numunelerde kaynak ağız merkezinde yüksek kaynak akımına bağlı iç kusur olarak boşluk gözlenmiştir. Kaynaklı numunelerin çekme kayma mukavemeti, artan ısı girdisine bağlı olarak kaynak akımı ile artmış ve daha sonra kaynakta iç kusurların oluşması nedeniyle azalmıştır. Maksimum mafsal mukavemeti ve kabul edilebilir mukavemet üreten yeterli kaynak akımı 3.75 kA'da kurulmuştur [7].

Yapılan deneylerin sonuçları kaynak sonrası soğutma durumuna göre Şekil 3'te incelendiğinde her üç soğutma ortamında da, 7,5 kA akım değeri en iyi neticeleri vermektedir. Tüm soğutma hızlarında ideal çekirdek oluşumu sağlamayan 2,5 kA 'den, ideal çekirdek yapısı ve sonuçta ideal kopma tipi sağlayan 7,5 kA 'e geçiş ile birlikte çekme-makaslama dayanımı oldukça yüksek değerlerde artmıştır. Fakat 12,5 kA 'e çıkıldığında çekme-makaslama dayanımındaki bu artış; 2,5 kA 'den 7,5 kA 'e çıkıştaki artış kadar büyük olmayıp, yüksek amperden dolayı sac ara yüzeylerinde oluşan fişkırmaya sebebiyle akım değerindeki artışa rağmen makaslama dayanımında beklenen artış sağlanamamıştır.

Nokta direnç kaynak uygulamalarında kaynak ısı girdisine etki eden parametrelerden birisi kaynak akım şiddeti diğeri ise kaynak zamanıdır. Birleştirmeye uygulanan ısı girdisi artan kaynak zamanı ve kaynak akım şiddeti ile birlikte artış göstermektedir. Gupta ve diğeri [8], ile Vural ve diğeri [9,10] kaynak zamanının ve kaynak akım şiddetinin ısı girdisini arttırdığını rapor etmişlerdir. Artan kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanına bağlı olarak ısı girdisinin artması sebebiyle kaynak çekirdek boyutunun arttığı görülmektedir. Kaynak ısı girdisi artışının çekirdek boyutunu artırdığı daha önce yapılan çalışmalarda da belirtilmiştir [9,10]. Kaynak çekirdek boyutu nokta direnç kaynak kalitesini belirleyen parametrelerden bir tanesidir [11]. Kaynak kalitesi ve dayanımı kaynak çekirdek boyutu ve kaynak nüfuziyetini ölçerek tahmin edilmeye çalışılır. Normalde kabul ve tekrar edilebilir bir nokta direnç kaynak birleştirmesi için minimum çekirdek boyutu, birleştirilen en ince parça kalınlığının 3,5-4 katı kalınlığında olması istenir [12]. Nokta direnç kaynak nüfuziyetinin ise birleştirilen malzeme kalınlığının %20-80'ni arasında olması istenir.

Sonuç olarak kaynak zamanına ve kaynak akım şiddetine bağlı olarak artan çekme makaslama yükü taşıma kapasiteleri kaynak çekirdek boyutuyla ilgili olduğu düşünülmektedir. Araştırmacılar artan ısı girdisinin kaynak çekirdeğini genişlettiğini bununla çekme makaslama dayanımını arttırdığını rapor etmişlerdir [8,10,12]. Ancak, Vural ve diğeri'nin yapmış olduğu bir çalışmada AISI 304 paslanmaz çelik çifti ve AISI304-galvanizli çelik çifti birleştirmelerinde 10 kA akım şiddetinden sonra kaynak çekirdek boyutunun aşırı erimeye ve sıçramaya bağlı olarak azaldığına işaret etmektedirler [13]. Çalışmada kullanılan maksimum 9 kA akım şiddeti kullanıldığı için çekirdek boyutunda bir azalma tespit edilmemiştir.

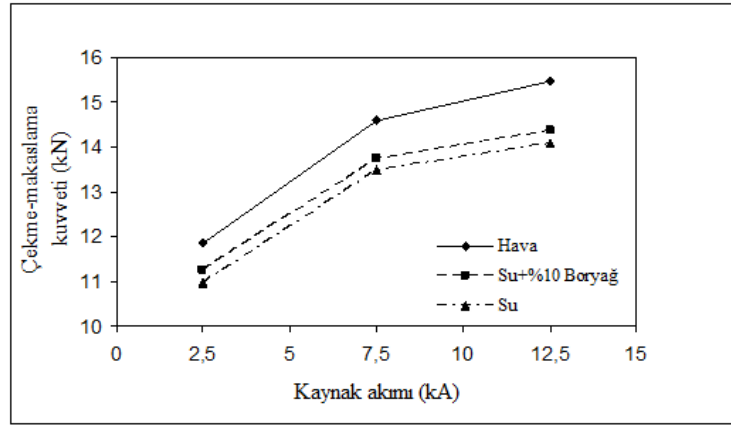
Literatürdeki yüksek akım değerleri [12,5 kA ve üstü] ile yapılmış çalışmalar [14] incelendiğinde fişkırmının başladığı 12,5 kA akım değeri ile birleştirilmiş numunelerin çekme-makaslama dayanımları, daha düşük akım değerleri ile birleştirilmiş numunelerin çekme-makaslama dayanımlarından daha düşüktür. Bir çalışmada da çekme mukavemetinin, ısı girdisi arttıkça azaldığı ve çekme testi kırık yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopisinde sünek ve kırılğan görüldüğü tespit edilmiştir [15]. Ayrıca artan akım şiddetine bağlı olarak  $h_n / d_n$  çekirdek boyut oranı azalmaktadır. Bu durumda malzemelerin birleştiği ara kesit büyürken, çekirdek bölgesinde malzeme kalınlığı azalmaktadır. Dolayısı ile kaynak çekirdeğinin çekme-makaslama dayanımı artmakta ve düğmelenme şeklinde kopmalar meydana gelmektedir. Yapılan bir diğer çalışmada da kaynak akımı, direnç nokta kaynaklı numunelerin çekme kayma mukavemetini etkileyen ana faktör olduğu ve kaynak akımı arttıkça, kaynak çekirdek boyutunun arttığı ve dolayısıyla da artan çekme-kesme kuvveti değerlerine neden olduğu tespit edilmiştir. [16]. Ancak, boyut oranı belli bir değerin altına düştüğünde, çekirdeğin aşırı derecede yassılaştırılması sonucu malzemedeki nüfuziyet yetersiz kalmakta ve çekme-makaslama dayanımı tekrar düşme eğilimi göstermekte ve ayrılma türü kopma meydana gelmektedir. Şekil 2’de kopma şekilleri temsili olarak verilmiştir [14]



**Şekil.2.** Numunelerde meydana gelen kopma türleri [14]

- a) Ayrılma kopması      b) Düğmelenme şeklinde kopma      c)Yırtılma şeklinde kopma

Kaynak sonrası soğutma hızının birleştirmenin maksimum çekme-makaslama kuvvetine etkisinde ise, havada soğutma ortamının faydalı etkilerinden bahsedilebilir. Soğuma hızındaki artışla birlikte birleştirmenin maksimum çekme-makaslama kuvvetlerinin azaldığı görülmektedir. Yüksek akım değerinde ise soğutma hızının etkisi daha belirgindir.

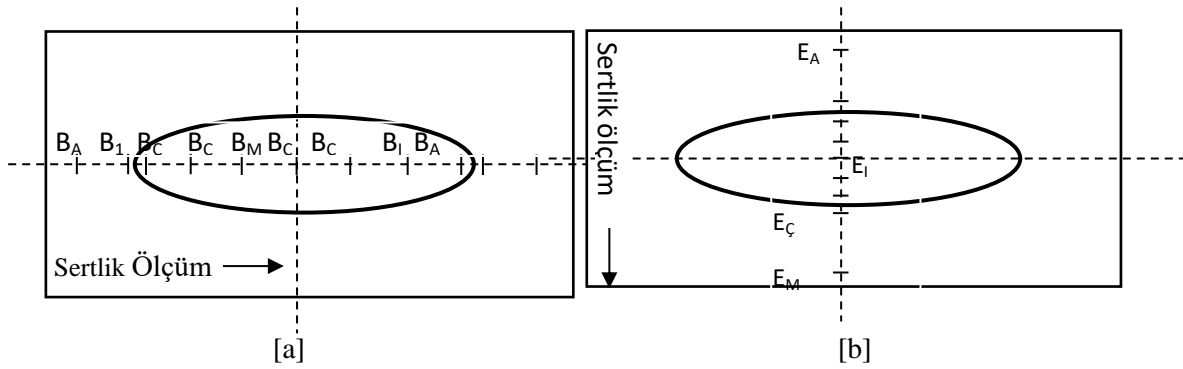


**Şekil 3.** Birleştirmenin maksimum çekme-makaslama kuvvetine akım şiddeti ve soğutma hızının etkisi

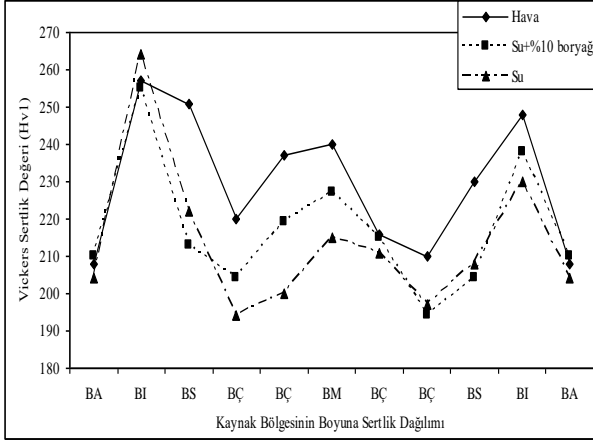
Şekil 3’de verilen kaynak akımı- çekme makaslama kuvveti ilişkisi incelendiğinde; artan akım değeri ile birlikte soğuma hızındaki artışın birleştirmenin makaslama dayanımında belirgin miktarda azalmaya sebep olduğu görülmektedir. Bu durum, birleştirmenin gerek çekirdek ve gerekse ITAB bölgesindeki sertlik değişimi ile manidar bir ilişki içinde açıklanabilir.

### 3.2. Sertlik [Hardness]

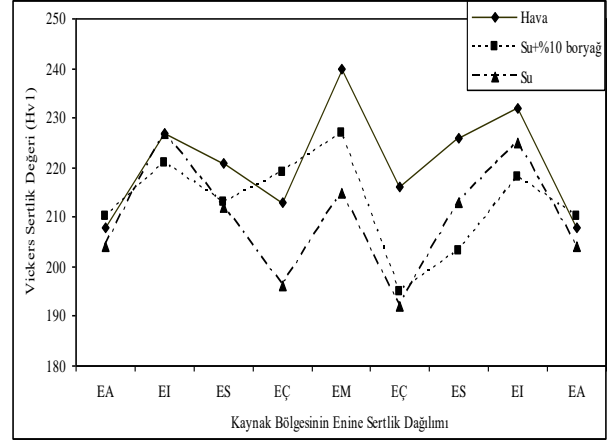
Numunelerin sertlik ölçümü yapılan bölgeleri Şekil 4’de verilmiştir. Farklı akım şiddetine bağlı oluşan farklı çekirdek ve ITAB boyutları sebebiyle sertlik ölçümleri tanımlanmış belirli ölçü aralıkları yerine, belirtilen bölgeleri tanımlayacak aralıklarda kodlanmış yerlerden yapılmıştır (Şekil 4). Bu sayede, çekirdek merkezinden (BM/EM), ITAB (BI/EI) ve ana malzemeye (BA/EA) kadar tanımlanan noktalardan ölçülen sertliklerle sertlik değişiminin karakteristiği açıklanmıştır.



**Şekil 4.** Kaynak çekirdeğinde sertlik değeri alınan noktalar. [a]: Çekirdek genişliği boyunca ölçüm noktaları. [b]: Çekirdek yüksekliği boyunca ölçüm noktaları.

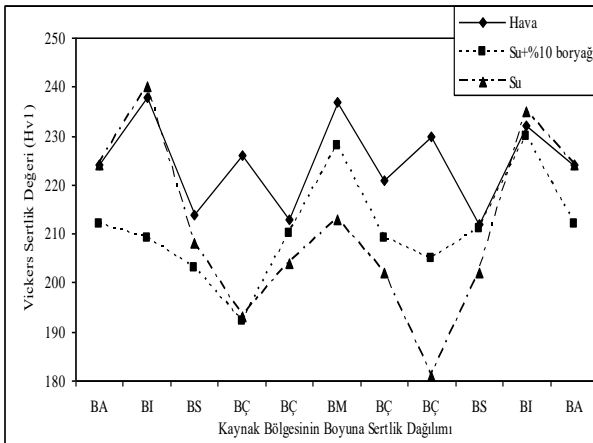


**Şekil 5.** 2,5 kA akım şiddeti için çekirdeğin boyuna sertlik dağılımı.

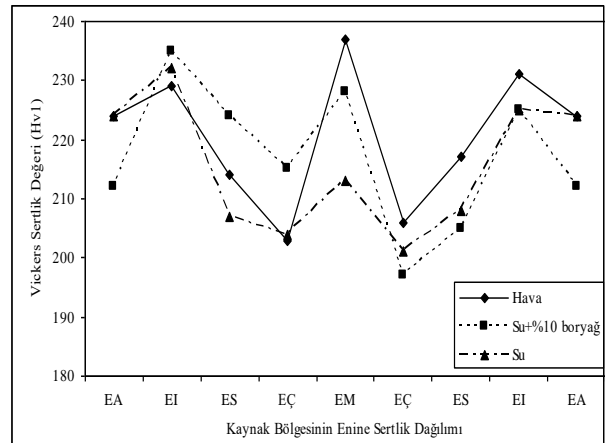


**Şekil 6.** 2,5 kA akım şiddeti için çekirdeğin yüksekliğine sertlik dağılımı.

Şekil 5' de ki boyuna ve Şekil 6'da ki enine sertlik ölçüm bölgeleri ve bu noktadaki sertlik değerleri incelendiğinde genel olarak 2,5 kA' de ve havada soğutmada yüksek sertlik değerlerine [ $\sim 270$  Hv1] ulaşıldığı görülmüştür. Enine ve boyuna sertlik ölçümlerinde; kaynak merkezi [ $B_M$  ve  $E_M$ ] ve yüzeye yakın yerlerde, kaynak çekirdeğinden ana metale geçişte [ $B_S$  ve  $E_S$ ] ve ITAB' da [ $B_I$  ve  $E_I$ ] en yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Soğuma metale doğru olduğundan, hızlı soğuma neticesinde çekirdek sınırında ve ITAB' ta yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Yine yapılan çalışmalarda Sertlik değerlerine genel olarak bakıldığında en düşük sertlik değeri esas metalde, en yüksek sertlik değeri ise kaynak çekirdeğinde bulunmuştur [2]. Yapılan diğer çalışmalarda da, kaynaklı birleştirmelerin ITAB ve kaynak çekirdek sertlikleri kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanına bağlı olarak artan ısı girdisiyle arttığı belirtilmiştir [1,2].



**Şekil 7.** 7,5 kA akım şiddeti için çekirdeğin boyuna sertlik dağılımı

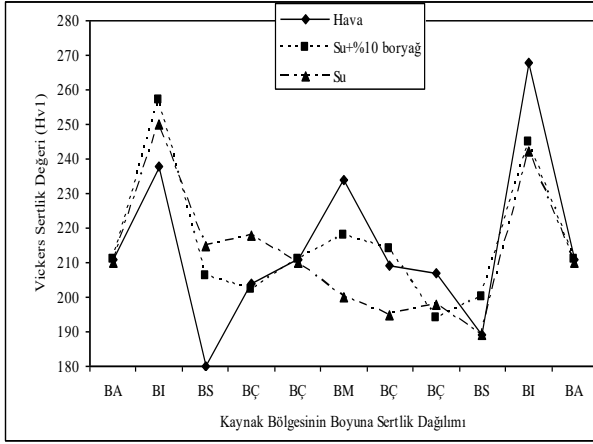


**Şekil 8.** 7,5 kA akım şiddeti için çekirdeğin yüksekliğine sertlik dağılımı

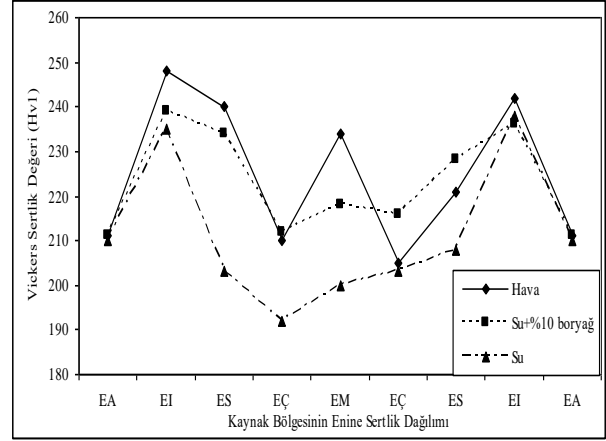
Şekil 7 ve 8 incelendiğinde yine havada soğutmada en yüksek sertlik değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Bunu sırasıyla su+%10 boryağda soğutma ve suda soğutma izlemektedir. Yine yüzeye yakın yerlerde kısmen hızlı soğuma ve buna bağlı olarak oluşan ince tane yapısından dolayı yüksek sertlik değerleri elde



edilmiştir.



**Şekil 9.** 12,5 kA akım şiddeti için çekirdeğin boyuna sertlik dağılımı



**Şekil 10.** 12,5 kA akım şiddeti için çekirdeğin yüksekliğine sertlik dağılımı

12,5 kA' de sırasıyla havada, su+%10 boryağda ve suda soğutma ortamlarında yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır [Şekil 9-10]. Bu akım değerinde, enine sertlik ölçümlerinde ana metal ile kaynak metali geçiş ara yüzeylerinde yüksek sertlik değerleri görülmüş fakat boyuna sertlik ölçümlerinde kaynak çekirdeğinden ana metale geçiş ara yüzeylerinde diğer kaynak akım değerlerine [2,5 ve 7,5 kA] göre düşük sertlik değerleri görülmüştür.

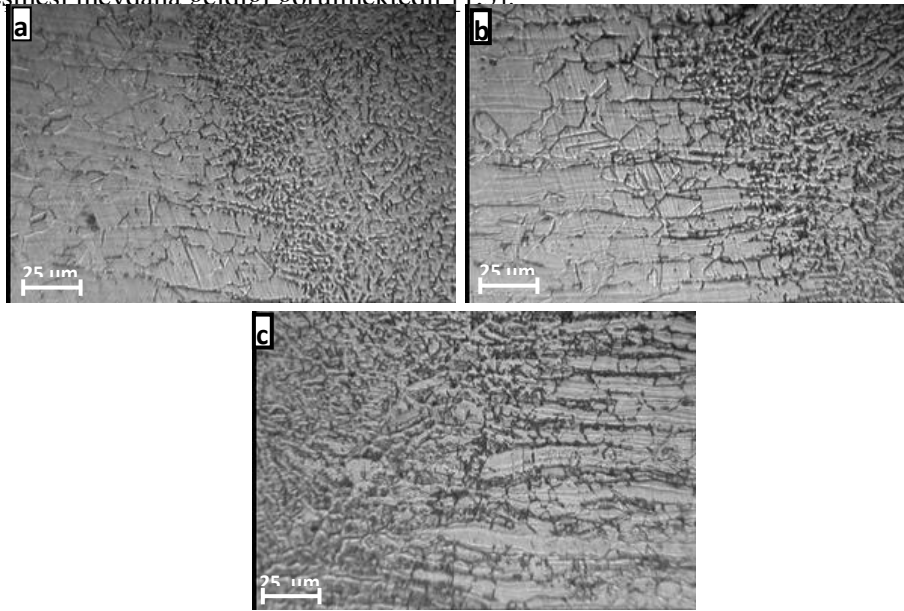
Soğutma ortamı ve kaynak akımı ile beraber kaynak basıncının [özellikle yüksek akım değerlerinde] oluşturduğu deformasyonun da sertliğe etkisi görülmüştür. Enine sertlik ölçüm grafiklerinden de görüleceği üzere özellikle çekirdek sınırında [ $E_s$ ] kaynak basıncının deformasyon etkisiyle sertlikte artışlar gözlenmiştir. Özellikle 12,5 kA akım değerinde, çekirdek sınırında, bu etki yüksek sıcaklık ile beraber şiddeti artan kaynak basıncının etkisiyle oldukça belirgindir. Bu akımda, çekirdek sınırındaki sertlik değeri ~ 245 Hv1' e yükselmiştir. 7,5 ve 2,5 kA akım değerinde ise bu etki daha azdır. Bu akım değerlerinde çekirdek sınırının sertlik değeri en çok ~ 225 Hv1' e kadar yükselmiştir.

Soğuma hızının çekirdek ve ITAB sertliğinin etkisine genel olarak bakıldığında, havada soğuma ortamının gerek çekirdek merkezinde ve gerekse ITAB' da ki sertliği arttırdığı, ancak soğuma hızındaki artışla bu sertlik dağılımının genellikle minimum olduğu görülmektedir. Durgut ve Kaçar çalışmalarında kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetine bağlı olarak değişen ısı girdisi neticesinde kaynaklı birleştirimin soğuma hızı da değiştiğinden dolayı kaynak çekirdeğinde ferrit-östenit dengesi bozularak ferrit lehinde oluşumun meydana geldiğini, kaynak çekirdeğindeki sertlik artışının da bununla ilgili olduğunu söylemişlerdir. [2] Hızlı soğuma ile meydana gelen katılaşmada, dendritik katılaşmanın gecikmesi ve eş eksenli ince taneli kalın duvar katılaşması ile matris içinde daha fazla intermetalik fazın çözünmesi muhtemeldir. Bu sebeple son katılaştıran bölge olan çekirdek merkezinde gerek intermetalik fazın ve gerekse safiyet dışı elementlerin segregasyonu azalacaktır. Bu durumun ise artan soğuma hızı ile

birlikte çekirdek merkezi ve içindeki sertliği azalttığı düşünülmektedir. Yine yapılan çalışmalarda da artan kaynak zamanı ve kaynak akım şiddetine bağlı olarak artan ısı girdisi sonucunda kaynak çekirdeğinin ısıl çevrimden etkilendiğine işaret etmektedir [2,3]. Hemen aynı etki hem boyuna ve hem de enine sertlik dağılımında mevcuttur. Sonuç olarak kaynak sonrası soğuma hızındaki artışın, birleştirmenin sertliğini düşürdüğü söylenebilir.

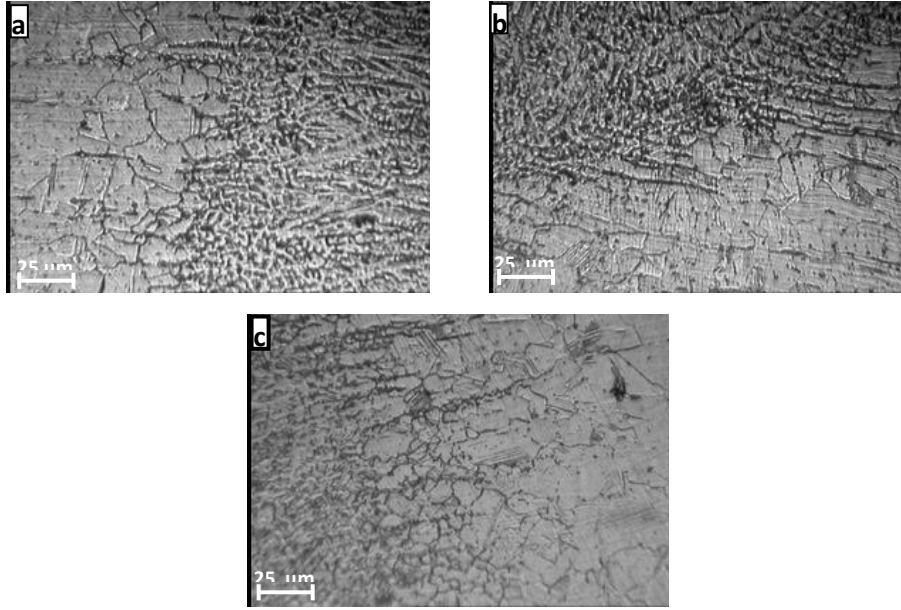
### 3.3. Mikroyapı Değişimleri [Changes of Microstructure]

Mikroyapıda görülen beyaz renkler ostenit fazını, siyah renkler ise  $\delta$ -ferrit fazını ifade etmektedir. Tüm mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde  $\delta$ -ferrit fazının yüksek oranda olduğu bölgeler [siyah renkte], ferritsiz bölgelere oranla daha ince tane yapısına sahiptir. Bu  $\delta$ -ferrit miktarı ısı girdisine, soğuma hızına ve bazı özel durumlarda ana metalle karışım oranına bağlıdır [10]. Her üç soğutma ortamında yapılan birleştirmelerin ITAB bölgelerinde ince tane bölgesinin artan akım şiddeti ile daraldığı ve yüksek akım şiddetinde aşırı  $\gamma$  tane irileşmesinin olduğu görülmektedir. Benzer çalışmalarda da birleştirmelerin mikroyapısı incelendiğinde artan ısı girdisiyle birleştirmelerin ITAB bölgesi ve kaynak çekirdeği tane boyutunun arttığı tespit edilmiştir. Yapı kaynak ısıl çevrimin etkisiyle ferrit solvüs sıcaklığının üzerine çıkılan bölgelerde tamamen ferrit fazına dönüştüğü ve ferritik paslanmaz çeliklerde olduğu gibi tane irileşmesi meydana geldiği görülmektedir [1, 3].



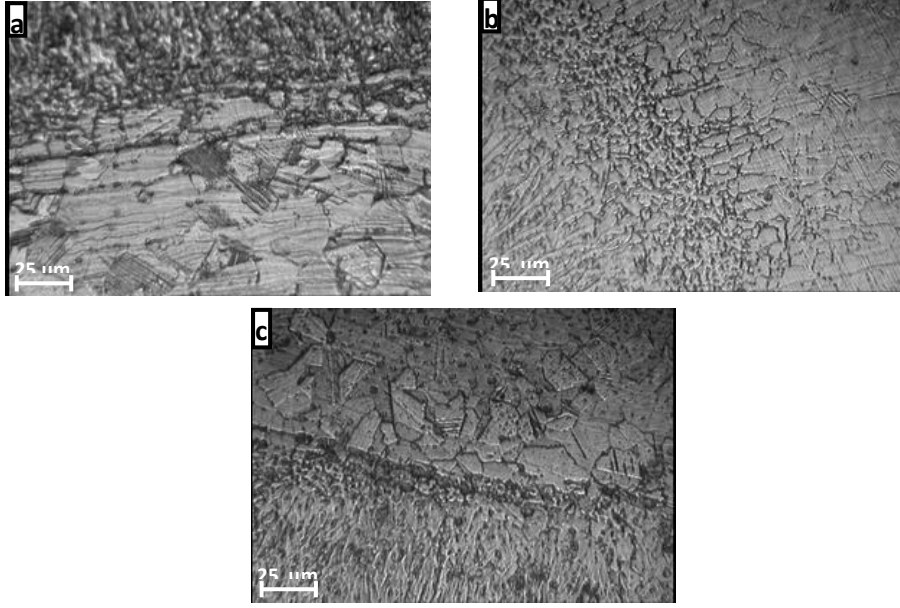
**Şekil 11.** 2,5 kA kaynak akımında soğuma hızının mikroyapıya etkisi. [a]: Havada, [b]: Suda, [c]: Su+ %10 Bor yağında.

2,5 kA' de her üç soğutma ortamının kullanıldığı birleştirmelerin ITAB bölgesinde ince tane oluşumu ve ana malzemeye doğru tane irileşmesi açıkça görülmektedir [Şekil 11]. Kaynak sonrası soğuma hızının diğer bir etkisi ise hem ITAB' da ve hem de çekirdek içindeki katılaşmada görülmektedir. Havada soğutulmuş birleştirmenin ITAB bölgesi düzgün ve homojen görünümlüdür.



**Şekil 12.** 7,5 kA kaynak akımında soğuma hızının mikroyapıya etkisi. [a]: Havada, [b]: Suda, [c]: Su+ %10 Bor yağında.

Ancak soğuma hızındaki artışla şiddetinin arttığı gözlenen ve kaynak çekirdeğine yönelmiş fiberli bir yapıya benzetilebilen, çekirdeğe yaklaştıkça belirginleşen fiberli görünüm mevcuttur [Şekil 12-a,b,c]. Düşük soğuma hızında [havada] ince taneli bölgeye komşu çekirdeğin katılma bölgesinde dar bir aralıkta hızlı katılma etkisi görülmüş ve sonra çekirdek merkezine doğru dendritik katılma başlamıştır [Şekil 12-a]. Ancak soğuma hızındaki artışla birlikte hızlı katılma etkisi ile oluşan eş eksenli ve ince tane aralığı da giderek artmıştır [Şekil 12-b]. Ayrıca östenit matriste skeltal tip ferrit fazının göze çarpmaktadır. Yapılan bir çalışmada da üç delta ferrit morfolojisi, direnç nokta kaynaklı bölgelerde oluşan, iskelet, asiküler ve lathy tip delta ferrit morfolojilerinin oluştuğunu ve bu dengeli olmayan fazların, nokta direnç kaynağı işlemindeki hızlı soğumaya bağlı olarak oluştuğu söylenmiştir [17]. Bu durum, soğuma hızındaki artışla birlikte çekirdeğin katılmasında dendritik katılmanın gecikmesine bağlanabilir. Bu sayede ITAB'a komşu hızlı katılmış eş eksenli tane duvarının kalınlaştığı söylenebilir. Bu durumun, yavaş soğumada oluşan katılma ile dendritler arasında meydana gelebilecek intermetalik segregasyonunu azaltabileceği düşünülmektedir. Zira katılma hızındaki düşüşün intermetalik [ve diğer safsızlıkların] segregasyonunu arttıracakı belirtilmektedir [2,10].



**Şekil 13.** 12,5 kA kaynak akımında soğuma hızının mikroyapıya etkisi. [a]:Havada, [b]: Suda, [c]:Su+%10 Bor yağında.

Şekil 13 incelendiğinde ise artan akım şiddeti ile birlikte, 12,5 kA’ deki her üç soğutma ortamı ile oluşan ITAB bölgeleri kıyaslandığında, 2,5 kA’ e göre daha iri tane oluşumu gözlenmiş ve düşük soğuma hızlarında [hava ve su+%10 boryağı] tane büyümesinin (irileşmesinin) daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca sıcaklık ve deformasyona bağlı olarak, ostenit tane içinde ikizlemeler de görülmüştür [Şekil 13-a,b,c].

#### 4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER [CONCLUSION AND SUGGESTIONS]

Bu çalışmada şu sonuçlara varılmıştır:

- 1- Bağlantıların çekme-makaslama kuvveti değerleri artan akım şiddetleri ile birlikte artmaktadır. En yüksek çekme-makaslama kuvveti [15,4 kN] havada soğutmada ve 12,5 kA kaynak akım değerinde elde edilmiştir. Ancak fışkırma ile düşen yüzey kalitesi ve kaynak bölgesindeki yapısal bozukluklar nedeniyle bu akım değeri önerilmemektedir.
- 2- Birleştirmenin yüzey kalitesi, mikroyapısı ve mukavemeti dikkate alındığında 7,5 kA’da ve havada soğutma ortamında ideal birleştirme şartlarının sağlandığı gözlenmiştir. Uygun soğutma ortamı ise sırasıyla havada soğutma, su+%10 boryağda soğutma ve suda soğutma şeklinde sıralanmıştır. Her üç soğutma hızında da 2,5 kA akım değerinde, kaynak çekirdeği oluşumu tamamlanmadığından bağlantının çekme-makaslama kuvveti yetersiz kalmakta ve ayrılma tipinde kopma meydana gelmektedir.
- 3- Yüksek ısı girdisinin olduğu 12,5 kA değerlerinde ve kısmen de 7,5 kA akım değerinde, yavaş soğumaya da bağlı olarak kaynak çekirdeğine bitişik ITAB’ da tane irileşmesi olmuştur. Bu durum, bağlantıların tokluk ve şekil değiştirme kabiliyetlerini olumsuz yönde etkileyeceğinden,

yüksek tokluk ve şekil değiştirme kabiliyeti gereken uygulamalarda tane büyümesine izin vermeyecek önlemlerin [hızlı soğutma, kısa kaynak süresi, düşük akım şiddeti vb.] alınması tavsiye edilir.

- 4- Soğuma hızının çekirdek ve ITAB sertliğinin etkisine genel olarak bakıldığında, havada soğuma ortamının gerek çekirdek merkezinde ve gerekse ITAB’ da ki sertliği arttırdığı, ancak soğuma hızındaki artışla, yani suda soğuma ortamında ise bu sertlik dağılımının genellikle minimum olduğu görülmektedir. Hızlı soğuma ile meydana gelen katılaşmada, dendritik katılaşmanın gecikmesi ve eş eksenli ince taneli kalın duvar katılaşması ile matris içinde daha fazla intermetalik fazın çözünmesi muhtemeldir. Bu sebeple son katılaşan bölge olan çekirdek merkezinde gerek intermetalik fazın ve gerekse safiyet dışı elementlerin segregasyonu azalacaktır. Bu durumun ise artan soğuma hızı ile birlikte çekirdek merkezi ve içindeki sertliği azalttığı düşünülmektedir.

## 5. KAYNAKLAR [REFERENCES]

- [1]. Karcı, F., **Soğuk Deformasyon ve Kaynak Isı Girdisinin AISI 304 Paslanmaz Çelik Direnç Kaynak Kalitesine Etkisi**, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2008.
- [2]. Erkan Durgut Ve Ramazan Kaçar Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Nokta Direnç Kaynağına Akım Şiddeti Ve Kaynak Zamanının Etkisi Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 26, No 2, 341-348, 2011
- [3]. Lippold, J.C. and Kotecki, D.J., **Welding metallurgy and weldability of stainless steel**, Wiley-interscience publications, ISBN 0471 47379 0, 231-263, 2005.
- [4]. N. Kahraman, B. Gülenç, H.Akça., “Ark kaynak yöntemi ile birleştirilen östenitik paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çeliğin mekanik özelliklerinin incelenmesi” Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 17, No 2, 75-85, 2002.
- [5]. Gülgün H., Aydoğdu M., K Aydınol., “AISI 316L Tipi Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Tanelerarası Korozyona Duyarlılığının Elektrokimyasal Polarizasyon Yöntemiyle Belirlenmesi”. TMMOB Metalurji Müh. Odası Dergisi, Sayı 1, Sayfa 50-61, Mayıs 2005.
- [6]. Mustafa AYDIN\*, Behçet GÜLENÇ. “Elektro ve sıcak daldırma metotlarıyla galvaniz kaplanmış çelik saçların paslanmaz çeliğe direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliği”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Ankara 16 [1]: 179-187 [2003].
- [7]. M. H. Bina, M. Jamali, M. Shamanian, H. Sabet. “Investigation on the resistance spot-welded austenitic/ferritic stainless steel”. *Int J Adv Manuf Technol* (2014) 75:1371–1379
- [8]. Gupta P, Ghosh P K, Nath K. and Ray S., “Resistance spot weldability of plain Carbon and low alloy dual phase steels”, *Z Metallkd.* 81(7), 502–508, 1990.
- [9]. Vural M., Anık S. ve Anık E. S., **1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı**, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul, s. 186-209, 1993.
- [10]. Vural M. and Akkus A., “On the resistance spot weldability of galvanized interstitial free steel sheets with austenitic stainless steel sheets”, *J. Mater. Process. Technol.* 1 (6), 53-156, 2004.

- [11]. Aslanlar S., “The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry”, **Materials & Design**, 27 (2) 125-131., 2006.
- [12]. Pouranvari M, Asgari H R, Mosavizadeh S M, Marashi P H and Goodarzi M., “Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds”, **Sci Techn. Weld. Joining**, 12, 217-225, 2007.
- [13]. Vural M., Akkuş A., Eryürek B., “Effect of welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets”, **Journal of Materials Processing Technology** 176 127–132, 2006.
- [14]. Ceyhan, V., “Ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklerin karbonlu çelik ile nokta kaynağında kaynak parametrelerinin bağlantının çekme-makaslama dayanımına ve taneler arası korozyona etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 1-50 [1992].
- [15]. Apurv Choubey, Vijaykumar S. Jatti. “Influence of Heat Input on Mechanical Properties and Microstructure of Austenitic 202 grade Stainless Steel Weldments”. WSEAS Transactions On Applied And Theoretical Mechanics. E-ISSN: 2224-3429. Volume 9, 2014.
- [16]. A.B.Verma, S.U.Ghunage, B.B.Ahuja. “Resistance Welding of Austenitic Stainless Steels (AISI 304 with AISI 316)”. 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) IIT Guwahati, Assam, India. December 12th -14th, 2014,
- [17]. Danial Kianersi, Amir Mostafaei, Ahmad Ali Amadeh. “Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations”. **Materials and Design** 61 251–263. (2014)