

## Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilen yüksek mukavemetli çeliklerin mekanik özelliklerinin incelenmesi

### Investigation of mechanical properties of high strength steel welded by resistance spot welding

Sedat ARAS<sup>1</sup> , Rukiye ERTAN<sup>2\*</sup> , Hande GÜLER ÖZGÜL<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>BŞH Ev Aletleri San. ve Tic. AŞ, Tekirdağ, Türkiye.  
arassdt@gmail.com

<sup>2,3</sup>Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.  
rukiye@uludag.edu.tr, handeguler@uludag.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 13.12.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 29.03.2017

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.88972  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışmada farklı kalınlıklardaki DP 800, Usibor 1500 ve Ductibor 500P olmak üzere üç farklı yüksek mukavemetli çelik sac malzeme elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynak işlemi elektrik akımı, basıncı ve süresi gibi sabit parametreler altında farklı malzeme kombinasyonlarında yapılmıştır. Aynı ve farklı malzeme çiftleri için bindirme şeklinde elektrik direnç nokta kaynağı uygulanarak standartlara uygun çekme numuneleri hazırlanmıştır. Bağlantıların mekanik özellikleri sertlik ve çekme-makaslama testleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Ductibor 500P malzemenin kaynak sonrasında en yüksek mukavemet ve sertlik değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca farklı tür çelikler birbirleriyle kaynak edildiğinde ulaşılan maksimum çekme-makaslama kuvveti ve uzama miktarı aynı tür malzemelere göre daha yüksek değerlerde elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** DP 800, Usibor 1500, Ductibor 500P, Elektrik direnç nokta kaynağı, Vickers sertlik testi, Çekme-makaslama testi

#### Abstract

In this study, DP 800, Usibor 1500 and Ductibor 500P three different high strength steel sheet materials with different thicknesses were joined with electrical resistance spot welding. Welding process is carried out in different material combinations under constant parameters such as electric current, pressure and duration. Tensile specimens for the same and different material pairs welded by resistance spot welding in the form of overlay were prepared according to the standards. Mechanical properties of the welded specimens were evaluated by hardness and tensile-shear tests. The results show that Ductibor 500P material has the highest strength and hardness values. Furthermore, when different types of steels are welded together, the maximum tensile-shear force and elongation achieved are higher than those of the same type of materials.

**Keywords:** DP 800, Usibor 1500, Ductibor 500P, Resistance spot welding, Vickers hardness, Tensile-shear test

## 1 Giriş

Günümüzde artan çevre bilinci ile birlikte hava kirliliğinde etkin bir role sahip taşıt kaynaklı kirleticilerin azaltılması konusunda birçok çalışma yapılmaktadır. Azalan petrol rezervleri ile birlikte yakıt fiyatlarının artması da otomotiv sektöründe hafif taşıtlara ilgiyi ve rekabeti arttırmıştır.

Taşıtların hafifletilmesinde genellikle daha düşük özgül ağırlıklara sahip malzemelerin veya daha ince kalınlıkta yüksek mukavemetli yüksek özgül ağırlıklara sahip malzemelerin kullanılması gibi çözümlere başvurulmuştur. Kompozitler, alüminyum, magnezyum, titanyum alaşımları ve yüksek mukavemetli çelikler bu amaçla kullanılan malzemelerdendir [1]-[4]. Özellikle son zamanlarda yapılan hafifletme çalışmaları yüksek akma mukavemetli yeni nesil çeliklerin kullanımının artırılması yönünde devam etmektedir [5]. Bu çelikler sergiledikleri yüksek mukavemetleri nedeniyle taşıtlarda performansta ödün vermeden birçok parçanın daha ince kalınlıklarda üretilmesine olanak sağlamaktadır. Araç gereksinimlerini karşılamak amacı ile yeni nesil yüksek mukavemetli çelikler (AHSS), çift fazlı çelikler (DP), TRIP çelikleri (Transformed Induced Plasticity), kompleks fazlı çelikler (CP), borlu çelikler ve martenzitik (MS) çelikler taşıt üzerinde kullanılmakta ve Ar-Ge çalışmaları yapılmaktadır.

Bunlardan DP çelikleri ferrit ve martenzit fazlarından oluşan çift fazlı çeliklerdir. Martenzit fazı sert olup gerekli mukavemeti sağlarken, ferrit fazı süneklik sağlar [6]-[8]. Isıl işlem prosedürünün kontrolü ile martenzit ve ferrit miktarı arzu edilen mukavemet doğrultusunda değiştirilebilir. Her iki özelliğin bir arada bulunması ve kontrol imkânının yüksek olması ile bu çeliklerin presle biçimlendirilebilen çeşitli otomobil parçalarının yapımında kullanılmasını imkân vermiştir. Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik saclardan, endüstriyel alanda yaygın kullanıma sahip olan bir diğer malzeme Al-Si kaplamalı 22MnB5 diğer adıyla Usibor 1500'tür. Literatürde çoğunlukla 22MnB5 alaşımı sacların yaklaşık 1-1.6 mm arasında değişen kalınlıklardaki örtülü elektrodla ark kaynağı, direnç nokta kaynağı, saplama arka kaynağı ve lazer kaynağı farklı çalışmalarda incelenmiştir [9]-[12]. Usibor 1500 malzemenin şekillendirme öncesi çekme mukavemeti yaklaşık olarak 600 MPa ve mikro yapısı ferritik-perlitik iken, sıcak şekillendirme ve kritik soğuma hızının üzerindeki hızlarda (hot stamping) soğuma işlemi ile martenzitik yapıya dönüşürler [13]. Düşük karbon oranına rağmen özellikle içerdiği mangan ve bor elementlerinin güçlü sertleştirme etkisi ile çelik bu işlem sonucunda 1500 MPa'ın üzerinde çekme, 1100 MPa'ın üzerinde de akma mukavemetine sahip hale gelir. Usibor 1500 çoğunlukla Ductibor 500P ile lazer kaynak yöntemi kullanılarak sac haldeyken birleştirilir ve sıcak şekillendirmeye tabi tutulur. Taşıt üzerinde kapı kirişleri, bel hattı takviyesi ve tünel gibi

kritik parçaların imalatında kullanılır. Ductibor 500P malzemenin şekillendirme sonrası sergilediği kararlı yapı ve yüksek deformasyon yeteneği ile enerji absorpsiyonu sağlanması önemli bir avantajdır. Ductibor 500P, yüksek mukavemetli çelikler sınıfında yer alan ferritik-martenzitik yapıya sahip sünek özellikte bir çeliktir. Şekil 1'de ArcelorMittal firması tarafından lazer kaynağı ile birleştirilmiş Usibor 1500-Ductibor 500P malzeme çiftine uygulanan bir darbe deneyi sonucu görülmektedir. Darbe karşısında Usibor bölgesinde hiçbir deformasyon belirtisi yokken çarpma enerjisi Ductibor bölgesinde deformasyon ile absorbe edilmiştir.



Şekil 1: Usibor 1500-Ductibor 500 kaynak bağlantısında darbe davranışını incelemek için yapılmış bir testin sonucu [14].

Sürekli kaynak yöntemleriyle birleştirilen yüksek mukavemetli yeni nesil çeliklerin davranışı ile ilgili çok sayıda çalışma olmasına rağmen, noktasal kaynağı konusunda çok fazla çalışmaya rastlanmamıştır. Bunlardan Spena ve diğ. (2015) [15] Q & P (quenching and partitioning) /TRIP (transformation induced plasticity) çeliklerinin, Wei ve diğ. (2014) [16] DP1000/TRIP980 çeliklerinin, Luo ve diğ. (2016) [17] bor içerikli ve sıcak şekillendirme ile üretilmiş B250P1/B1500HS çeliklerinin, Wei ve diğ. (2015) [18] DP1000/TRIP/TWIP çeliklerinin birbirilerine elektrik direnç nokta kaynağı birleştirilmesi durumundaki mekanik özelliklerini test etmişlerdir.

Yüksek mukavemeti ve kontrol edilebilir özellikleri sebebiyle otomotivde ayrı bir öneme sahip olan DP ve borlu çeliklerin noktasal olarak kaynak edilebilirliği de bir grup araştırmacı tarafından detaylı olarak araştırılmıştır. Bu araştırmacılar Choi ve diğ. (2011)[19] yaptıkları çalışmada elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş GA780DP ve Al-Si kaplamalı 22MnB5 çeliklerin kaynak kabiliyeti çekme-makaslama testleri ve mikroyapı analizleri ile araştırmışlardır. Zhang ve diğ.

(2014) [20] 1.5 mm ve 1.2 mm kalınlığındaki DP780 ve DP600 iki farklı çeliğin direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi durumundaki davranışını incelemiştir. Huin ve diğ. (2016) [21] direnç nokta kaynak parametrelerinin etkisini DP600 ve Usibor 1500 çelik numunelerinin birbirine göre çapraz ve paralel birleştirilmesi durumundaki etkisini incelemiştir. Jong ve diğ. (2011) [22] bor içerikli çelik alaşımların elektrik direnç nokta kaynağındaki kaynak karakteristiklerini mikroyapısal analiz ve mekanik testlerle incelenmiştir. Isı girdisinin çekme - makaslama mukavemetine büyük oranda etkisi olduğu ve ısı etkisi altında kalan alanın ferrit ve temperlenmiş martenzitten oluştuğu görülmüştür.

Bu çalışmada DP 800, Usibor 1500 ve Ductibor 500P yeni nesil, yüksek mukavemetli çeliklerin günümüz taşıtlarındaki artan kullanım ve önemi sebebiyle birbirileriyle elektrik direnç nokta kaynağı açısından uygunluğu değerlendirilmiştir. Bu amaçla elektrik direnç nokta kaynağı kullanılarak aynı ve farklı malzemelerin birbirileriyle kaynağı ve mekanik testleri gerçekleştirilmiştir.

## 2 Kaynak işlemleri ve malzeme testleri

Çalışmada yüksek mukavemetli 1 mm kalınlığında DP 800, 1.6 mm kalınlığında Usibor 1500 ve 1.6 mm kalınlığında Ductibor 500P olmak üzere üç farklı çelik sac birbirine direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan DP 800, Usibor 1500 ve Ductibor 500P kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir. Usibor 1500 çelik sac malzemenin yüzeyinde Al-Si kaplama bulunmaktadır ve sıcak şekillendirme (hot stamping) işlemine tabi tutulmamıştır. Malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 2'de çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve uzama oranı değerleri ile ifade edilmiştir.

Direnç nokta kaynağı işlemleri Baykal marka Projeksiyon Punta kaynak makinasında yapılmıştır. Kaynak makinasının gücü 70 KvA'dır ve maksimum kaynak akımı 15.2 kA'dır. Çalışmada kaynak işlemleri 9.5 kA kaynak akımı ve 2.5 bar elektrot basıncında yapılmıştır. Mekanik özelliklerin tespiti amacıyla çekme ve sertlik testleri yapılmıştır. Tablo 3'te kaynak işlemleri yapılan malzeme çiftlerine ait detaylar verilmiştir.

Çekme testleri UTEST marka 250 kN yük kapasiteli universal çekme cihazında 10 mm/dk. çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme numuneleri ISO 14273 [26] standardına uygun olarak Şekil 2'de verilen boyutlarda hazırlanmıştır.

Tablo 1: DP 800, Al-Si kaplamalı Usibor 1500 ve Ductibor 500P malzemelerin kimyasal kompozisyonu (%ağırlıkça) [23]-[25].

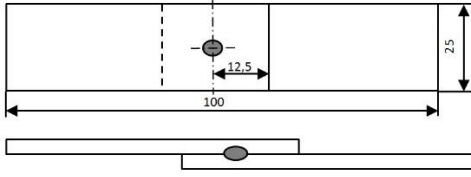
Malzeme	Kimyasal Bileşim (%)									Kaplama (%)	
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ti	Al	B	Al	Si
Usibor 1500	0.23	0.24	1.19	0.0006	0.0015	0.18	0.04	0.03	0.0023	90	10
Ductibor 500P	0.08	0.03	1.64	-	-	-	-	-	-	-	-
DP 800	0.149	0.207	1.83	0.002	0.013	-	0.002	0.029	-	-	-

Tablo 2: DP 800, Al-Si kaplamalı Usibor 1500 ve Ductibor 500P malzemelerin mekanik özellikleri [23]-[25].

Malzeme	Akma Mukavemeti [MPa]	Çekme Mukavemeti [MPa]	% Uzama
Usibor 1500	350-550	500-700	≥ 10
Ductibor 500P	450-650	500-680	≥ 20
DP 800	670	870	≥ 15.5

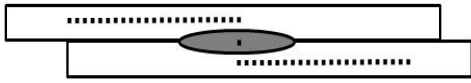
Tablo 3: Elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilecek malzeme çiftleri.

1. Malzeme	2. Malzeme
Usibor 1500	Ductibor 500P
Ductibor 500P	DP 800
DP 800	-



Şekil 2: Elektrik direnç nokta kaynağı uygulanmış çekme deneyi numunesi (ölçüler mm cinsindedir).

Sertlik ölçümleri Metkon marka Vickers sertlik ölçme cihazında 1 kg'lık yük altında Şekil 3'te verilen noktalardan kaynak kesiti boyunca 2 mm aralıkla yapılmıştır. Çekme ve sertlik testleri aynı şartlardaki dört adet numunenin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

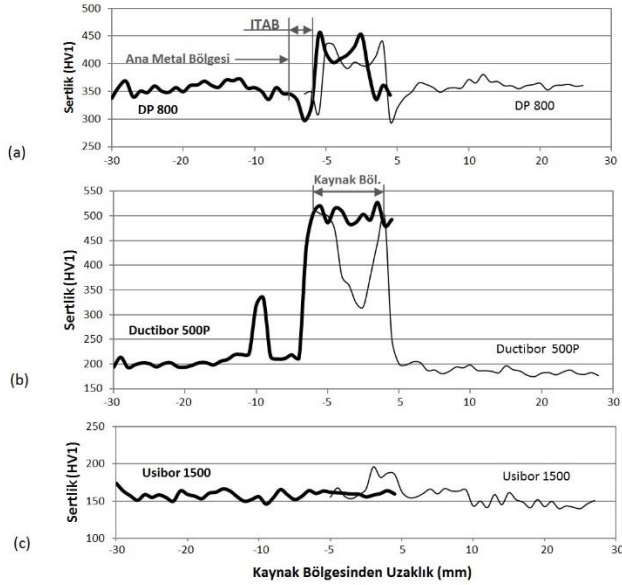


Şekil 3: Vickers sertlik ölçüm noktaları (yatay doğrultudaki noktalar arası 2 mm'dir).

### 3 Deneyel sonuçlar

#### 3.1 Sertlik testleri

Bu çalışmada kaynağı gerçekleştirilen DP 800-DP 800, Usibor 1500-Usibor 1500 ve Ductibor 500P-Ductibor 500P aynı malzeme çiftlerinin noktasal birleştirmelerinin sertlik dağılımı Şekil 4'te verilmiştir. DP 800-Usibor 1500, DP 800-Ductibor 500P, Usibor 1500-Ductibor 500P farklı malzeme çiftlerinin ise Şekil 5'te verilmiştir.

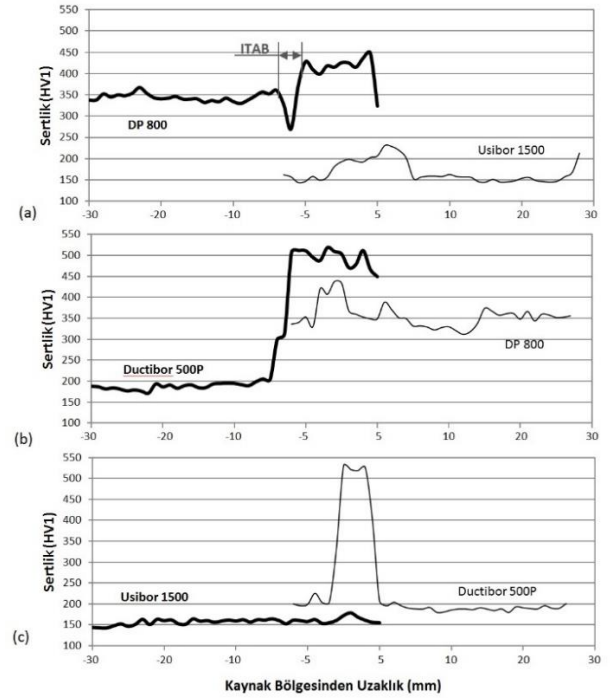


Şekil 4: Kaynak kesitindeki. (a): DP 800-DP 800, (b): Usibor 1500-Usibor 1500 ve (c): Ductibor 500P-Ductibor 500P malzeme çiftlerinin mikro sertlik dağılımı.

DP 800-DP 800, Usibor 1500-Usibor 1500 ve Ductibor 500P-Ductibor 500P malzeme çiftlerinin noktasal birleştirilmelerinde ana metal bölgesi sertlikleri açısından yüksekten düşüğe doğru DP800, Ductibor 500P ve Usibor 1500 sırasıyla 350 HV, 200 HV ve 170 HV değerlerinde elde edilmiştir. Kaynak bölgesinde ise en fazla sertlik artışı Ductibor 500P çeliğinde meydana gelmiştir (yaklaşık 500 HV). Usibor

1500 çeliği ise kaynak işleminden sonra neredeyse sertliğinde hiçbir değişim sergilememiştir. Al-Si kaplamanın bunda önemli bir rol oynadığı düşünülmektedir. DP 800 çeliğinde çekirdek bölgesindeki sertlik artışı Ductibor 500P ile karşılaştırıldığında daha düşük bir oranda ve daha dar bir alanda gerçekleşmiştir. DP 800 çeliğinin çekirdek bölgesindeki sertlik ortalama 425 HV civarındadır. Ductibor 500P ve DP 800 çeliklerinin kaynak bölgesindeki yüksek sertliğin nedeni kimyasal bileşimlerinde bulunan sertleşebilirliği arttıran alaşım elementlerin (Mn ve Si) kaynak sırasındaki hızlı ısınma ve soğuma durumunda martensitik oluşumlara sebep olması ile değerlendirilebilir. Ergiyen bölgenin bitiminden başlayarak içeriye doğru uzanan ve ısı etkisiyle mikro ve makro yapısında önemli değişikliklerin meydana geldiği bölge olarak adlandırılan ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) Ductibor 500P ve Usibor 1500 malzemelerinin sertlik testlerinden görülememektedir. DP 800 çeliğinde ise ITAB bölgesinde sertlikte %14'lük bir düşüş meydana gelmiştir. ITAB bölgesindeki düşüş literatürde yapılan benzer çalışmalarda da DP çeliklerinde görülen bir davranıştır [27]. Ferritik martensitik yapıya sahip olan DP çeliklerinin kaynak bölgesine yakın kısımlarında martensitin temperlenmesi nedeniyle yumuşama meydana gelmiştir.

DP 800-Usibor 1500, DP 800-Ductibor 500P, Usibor 1500-Ductibor 500P malzeme çiftlerinin kaynak sonrası sertlik dağılımı Şekil 5'te verilmiştir. Kaynak bölgesinde en yüksek sertlik değeri 500 HV civarında Ductibor 500P çeliğinden, 425 HV civarında sertlik değeri ile DP 800 ikinci sırada ve Usibor 1500 çeliği de 200 HV ile en düşük sertlik değerinde elde edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4'te verilen sertlik değerlerini destekleyecek doğrultuda elde edilmiştir. ITAB bölgesi DP 800'de belirgin olarak görülebilirken, diğer malzemelerde sertliğin düştüğü belirgin bir ITAB görülmemiştir.

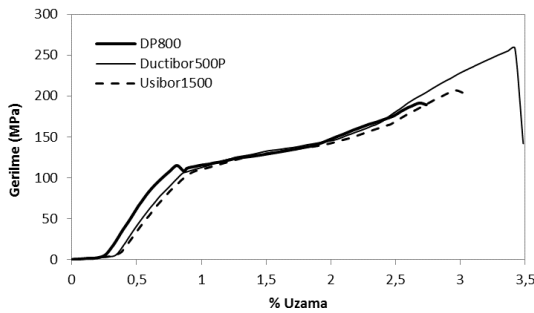


Şekil 5: Kaynak kesitindeki. (a): DP 800-Usibor 1500, (b): DP 800-Ductibor 500P ve (c): Usibor 1500-Ductibor 500P malzeme çiftlerinin mikro sertlik dağılımı.

### 3.2 Çekme-Makaslama testleri

Şekil 6'da DP 800-DP 800, Usibor 1500-Usibor 1500 ve Ductibor 500P-Ductibor 500P aynı malzeme çiftlerinin noktasal birleştirmelerinin çekme deneyi sonuçları verilmiştir. Aynı kaynak parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen kaynak işlemlerinden elde edilen numunelerde en düşük çekme gerilmesi ve uzama DP 800 çeliğinde kaydedilmiştir. En yüksek çekme gerilmesi (258 MPa) ve maksimum yükteki uzama oranı (%3.42) Ductibor 500P çeliğinden elde edilmiştir. DP 800 alaşımı numunelerin nokta kaynağında elde edilen gerilme-% uzama değişimi sertlikteki değerler ile ters orantılı olarak en düşük mukavemet sergilemiştir. DP 800 için maksimum çekme gerilmesi 188 MPa iken maksimum yükteki uzama oranı da %2.7 olarak ölçülmüştür. Çift fazlı çeliklerin ferritik-martenzitik yapısı dolayısıyla kaynak sonrası ferritik fazın martenzite dönüşmesi sebebiyle kaynaklı numunelerin sertliğinde artış (Şekiller 5 ve 6) ve şekil değiştirebilme özelliğinde düşüş gözlemlenmiştir. Usibor 1500 çeliğinin sergilediği davranış incelendiğinde Ductibor 500P'den daha düşük, DP 800'den daha yüksek bir çekme gerilmesi ve uzamaya sahip olduğu görülür. Usibor 1500 malzemenin ferritik-perlitik içyapısı nedeniyle ısı etkisi altında kalan bölgede (sertlik testleri de dikkate alındığında) perlitin kısmen martenzite dönüşmesi ferritik yapının ise kendisini muhafaza etmesi nedeniyle daha sünek ve mukavim bir yapı sergilemiştir. Ayrıca Usibor 1500 çeliğinin Al-Si kaplaması nedeniyle kaynak esnasında difüzyon ve nüfuziyetin kısıtlı olmasına ve Ductibor 500P'den daha düşük mukavemet sergilemesine yol açmıştır. Ductibor 500P'nin de ferritik-perlitik içyapısı nedeniyle uzama oranı yüksek elde edilmiştir.

Kaynak edilen sacların farklı kalınlıklarda olması da malzemenin türü kadar mukavemet özelliklerini etkilemektedir. Ductibor 500P ve Usibor 1500 sacların DP 800'den 0.6 mm daha kalın olması bu kaynak bağlantılarının daha yüksek çekme gerilmesine ve uzama oranına sahip olmasına sebep olmuştur. Süneklik açısından birleştirmeler kıyaslandığında Ductibor 500P çiftinin en yüksek ve DP 800 çiftinin ise en düşük süneklığe sahip olduğu gözlenmiştir.



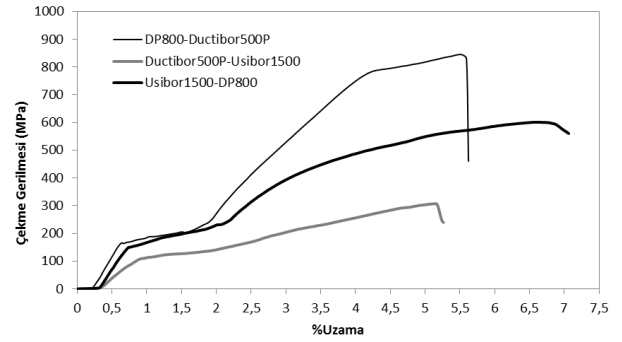
Şekil 6: Aynı türdeki malzeme çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağındaki çekme gerilmesinin uzama oranına bağlı değişimi.

DP 800, Usibor 1500 ve Ductibor 500P yüksek mukavemetli yeni nesil çeliklerin farklı kombinasyonlarda birbiriyle elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi durumunda sergiledikleri çekme davranışları Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 6 ile karşılaştırıldığında farklı çeliklerin nokta kaynağında sergiledikleri çekme gerilmesi genel olarak aynı çeliklerin kaynağından daha yüksek değerlerde elde edilmiştir. Aynı çeliklerin Ductibor 500P'nin yine Ductibor 500P ile kaynağında 258 MPa değerinde maksimum çekme gerilmesi ve %2.7'lik bir

uzama tespit edilmiştir. Farklı çeliklerin kaynağında ise Ductibor 500P'nin DP 800 ile kaynak edilmesi durumunda %224'lük bir artış ile 836 MPa maksimum çekme gerilmesi ve %103'lük bir artış ile %5.5 uzama oranı ölçülmüştür. Bu malzemeler farklı kalınlıklarda olmalarına rağmen (DP 800-1 mm, Ductibor 500P-1.6 mm) yüksek bir mukavemet sergilemişlerdir.

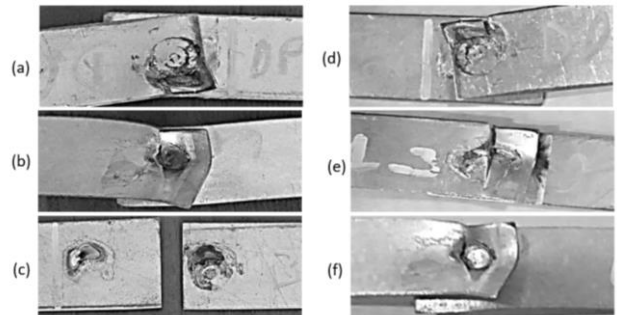
Usibor 1500 malzemenin yüzeyinde bulunan Al-Si kaplamasının etkisiyle Usibor 1500'lü kaynak bağlantıları daha düşük mukavemet değerlerine sahiptir.

Karbon oranına bağlı olarak yüksek karbon içerikli Usibor 1500 ve DP 800 çeliklerinde kaynak sonrası meydana gelen yüksek iç gerilmeler nedeniyle çekme-makaslama testinde Ductibor 500P'ye göre daha düşük gerilmelerde hasar başlamıştır.



Şekil 7: Farklı türdeki malzeme çiftlerinin elektrik direnç nokta kaynağındaki çekme gerilmesinin uzama oranına bağlı değişimi.

Direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin çekme - makaslama deneyi sonrası hasar görüntüleri Şekil 8'de verilmiştir. DP 800-DP 800 ve Ductibor 500P-Ductibor 500P çiftinde hasar kaynak çekirdeği etrafından yırtılma şeklinde meydana gelmiştir (Şekil 8(a) ve (b)). Usibor 1500-Usibor 1500 çiftinde ise ara yüzeyde kaynak nüfuziyeti Al-Si kaplama nedeniyle yeterince gerçekleşmediği için hasar kaynak parçalarının arasından gerçekleşmiştir Şekil 8(c). Farklı türdeki malzemelerin birbirileri ile olan kaynağında ise hasar kaynak çekirdeğinde meydana gelmiştir. DP 800-Usibor 1500 kaynak çiftinde yırtılma DP 800 malzemesinde (Şekil 8 (d)), DP 800-Ductibor 500P çiftinde hasar DP 800 malzemesinde (Şekil 8(e)) ve Usibor 1500-Ductibor 500P çiftinde hasar Ductibor 500P'de meydana gelmiştir (Şekil 8(f)).



Şekil 8: Direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş. (a): DP 800-DP 800, (b): Ductibor 500P-Ductibor 500P, (c): Usibor 1500-Usibor 1500, (d): DP 800-Usibor 1500, (e): DP 800-Ductibor 500P ve (f): Usibor 1500-Ductibor 500P malzeme çiftlerinin numunelerin çekme-makaslama deneyi sonrası hasar görüntüleri.



#### 4 Sonuçlar

Otomotiv sektöründe kullanım oranı gittikçe artan yüksek mukavemetli çelikler sınıfından DP 800, Usibor 1500 ve Ductibor 500P çeliklerinin bu çalışmada elektrik direnç nokta kaynağı kullanılarak birbirleriyle farklı kombinasyonlarda birleştirilmesi durumundaki mekanik davranışları araştırılmıştır. Kaynak işlemlerinde elektrik akımı, basınç ve süresi gibi parametreler sabit tutularak malzemelerin birbirleriyle olan bağlantı kabiliyetleri sertlik ve çekme-makaslama testleri kullanılarak değerlendirilmiştir ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Sertlik değerleri açısından karşılaştırıldığında en yüksek kaynak sertlikleri Ductibor 500P'de elde edilmiştir,
- DP 800 malzemede kaynak sonrası ısı etkisi altında kalan bölgede sertlik düşüşleri tespit edilirken Usibor 1500 ve Ductibor 500P malzemelerinde böyle bir duruma rastlanmamıştır,
- Farklı çeliklerin nokta kaynağında sergiledikleri çekme mukavemeti genel olarak aynı çeliklerin kaynağından daha yüksek değerlerde elde edilmiştir,
- Çekme-makaslama deneyi sonucunda en yüksek mukavemet değerleri Ductibor 500P'nin DP 800 ile kaynağa uzama değerleri de Ductibor 500P'nin Usibor 1500 ile kaynağından elde edilmiştir,
- Direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin çekme-makaslama deneyinde Usibor 1500-Usibor 1500 çifti dışında hasar hepsinde çekirdek bölgesine yakın kısımlarda meydana gelmiştir.

#### 5 Kaynaklar

- [1] Uthaisangsuk V, Prah U, Bleck W. "Modelling of damage and failure in multiphase high strength DP and TRIP steels". *Engineering Fracture Mechanics*, 78(3), 469-486, 2011.
- [2] Güler H, Ertan R, Özcan R. "Investigation of the hot ductility of a high-strength boron steel". *Materials Science and Engineering: A*, 608(1), 90-94, 2014.
- [3] Bihanta R, Bui QH, Guillot M, D'Amours G, Rahem A, Fafard M. "Application of a new procedure for the optimization of variable thickness drawing of aluminium tubes". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5(2), 142-150, 2012.
- [4] Sugimoto Y, Oda N, Higuchi T, Mineshita K. "Development of aluminium metal matrix composites disc brake rotor : (Mazda Motor Corporation)". *Society of Automotive Engineers of Japan Review*, 17(4), 440-443, 1996.
- [5] Wang W, Li M, He C, Wei X, Wang D, Du H. "Experimental study on high strain rate behavior of high strength 600-1000 MPa dual phase steels and 1200 MPa fully martensitic steels". *Materials & Design*, 47, 510-521, 2013.
- [6] Davies RG. "Influence of martensite composition and content on the properties of dualphase steels". *Metallurgical Transactions*, 9(5), 671-679, 1978.
- [7] Arıdağ K. Dual Fazlı Çeliklerde Mikroyapının Mekanik Özelliklere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye, 2001.
- [8] Çimenoğlu H, Kayalı ES. "Ticari çift fazlı çelik üretimi". *4. Ulusal Metalurji Kongresi*, Ankara, Türkiye, Ekim 1986.
- [9] Koganti R, Elliott A. "Gas metal arc welding (GMAW) process optimization of 1.0 mm Usibor® 1500 P steel to 1.5 mm uncoated dual phase 780 (DP780) steel joint for automotive body structural applications". *SAE Technical Paper*, 4, 485-500, 2009.
- [10] Kim C, Kang MJ, Park YD. "Laser welding of Al-Si coated hot stamping steel". *Procedia Engineering*, 10, 2226-2231, 2011.
- [11] Hovanski Y, Santella ML, Grant GJ. "Friction stir spot welding of hot-stamped boron steel". *Scripta Materialia*, 9, 873-876, 2007.
- [12] Hsu C, Mumaw J. "Weldability of advanced high-strength steel drawn arc stud welding". *Welding journal*, 90, 45-53, 2011.
- [13] Naderi M. Hot Stamping of Ultra High Strength Steels. Doctoral Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 2007.
- [14] ArcelorMittal Automotive Worldwide. "Multi-thickness laser welded blanks: Tailored Blanks". <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/LWB/EN> (11.09.2017).
- [15] Spena PR, Maddis M, Lombardi F. "Mechanical strength and fracture of resistance spot welded advanced high strength steels". *Procedia Engineering*, 109, 450-456, 2015.
- [16] Wei ST, Lv D, Liu RD, Lin L, Xu RJ, Guo JY, Wang KQ. "Similar and dissimilar resistance spot welding of advanced high strength steels: welding and heat treatment procedures, structure and mechanical properties". *Science and Technology of Welding and Joining*, 19(5), 427-435, 2014.
- [17] Luo X, Ren J, Li D, Qin Y, Xu P. "Macro characteristics of dissimilar high strength steel resistance spot welding joint". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1-4), 1105-1113, 2016.
- [18] Wei ST, Liu RD, Lv D, Lin L, Xu RJ, Guo JY, Wang KQ, Lu XF. "Weldability and mechanical properties of similar and dissimilar resistance spot welds of three-layer advanced high strength steels". *Science and Technology of Welding and Joining*, 20(1), 20-26, 2015.
- [19] Choi HS, Park GH, Lim WS, Kim BM. "Evaluation of weldability for resistance spot welded single-lap joint between GA780DP and hot-stamped 22MnB5 steel sheets". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(6), 1543-1550, 2011.
- [20] Zhang H, Wei A, Qiu X, Chen J. "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded dissimilar thickness DP780/DP600 dual-phase steel joints". *Materials & Design*, 54, 443-449, 2014.
- [21] Huin T, Dancette S, Fabrègue D, Dupuy T. "Investigation of the failure of advanced high strength steels heterogeneous spot welds". *Metals*, 6, 111-130, 2016.
- [22] Jong YS, Lee YK, Kim DC, Kang MJ, Hwang IS, Lee WB. "Microstructural evolution and mechanical properties of resistance spot welded ultra high strength steel containing boron". *Materials Transactions*, 52(6), 1330-1333, 2011.
- [23] Güler H. "Investigation of usibor 1500 formability in a hot forming operation". *Materials Science*, 19(2), 144-146, 2013.

- [24] Múnera D, Pic A, Abou-Khalil D, Shmit F, Pinart F. "Innovative press hardened steel based laser welded blanks solutions for weight savings and crash safety improvements". Society of Automotive Engineers International Journal of Materials and Manufacturing, 1(1), 472-479, 2009.
- [25] Farías D. Bake Hardening Response of DP800 and the Influence on the 'In Service Performance. Master Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Department of Mechanical Engineering Division of Computational and Experimental Mechanics, Nederlands, 2006.
- [26] International Organization for Standardization. "Resistance welding, Destructive testing of welds, Specimen dimensions and procedure for tensile shear testing resistance spot and embossed projection welds", Dublin, International Institute of Welding, 2016.
- [27] Girvin B, Peterson W, Gould J. "Development of Appropriate Spot Welding Practice for Advanced High-Strength Steels". American Iron and Steel Institute, Pittsburgh, USA, Technical Report, 2004.