

**Atıf İçin:** Barlas Z, Ormanlı E, Öz Saraç U, Orhan A, Çalığülü U, 2021. HSS S960QL Çeliğinin MAG Kaynağında Kaynak Akımı ve Gaz Kompozisyonundaki CO<sub>2</sub> Oranının Birleştirme Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(2): 1430-1443.

**To Cite:** Barlas Z, Ormanlı E, Öz Saraç U, Orhan A, Çalığülü U, 2021. Investigation on Effects of Weld Current and CO<sub>2</sub> Content in Gas Composition in GMAW on Joint Properties of HSS S960QL Steel. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(2): 1430-1443.

### **HSS S960QL Çeliğinin MAG Kaynağında Kaynak Akımı ve Gaz Kompozisyonundaki CO<sub>2</sub> Oranının Birleştirme Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi**

Zafer BARLAS<sup>1\*</sup>, Esen ORMANLI<sup>2</sup>, Uğur ÖZSARAÇ<sup>1</sup>, Ayhan ORHAN<sup>3</sup>, Uğur ÇALIGÜLÜ<sup>3</sup>

**ÖZET:** Bu çalışmada, 8 mm kalınlığındaki HSS S960QL çelik plakalar %5 CO<sub>2</sub> ve %20 CO<sub>2</sub> içerikli iki farklı karışım gaz koruması altında 185, 215 ve 245 amper olmak üzere üç farklı kaynak akımında MAG kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Uygulanan bu kaynak değişkenlerinin birleştirme denemelerinin kaynak bölgesi mekanik ve mikroyapı özelliklerine olan etkilerini tespit etmek amacıyla makro ve mikroyapı incelemelerinin yanı sıra çekme ve çentik darbe testleri ile mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma ve gözlem sonuçları göstermiştir ki kaynak akımı ve CO<sub>2</sub> oranının artmasıyla, daha geniş ve derin nüfuziyete sahip bir kaynak metali meydana gelirken, kaynak bölgesinde başlangıç mikroyapısındaki temperlenmiş martenzitin beynite oranı azalmış, ayrıca buna tane irileşmesi de eşlik etmiştir. Dolayısıyla, sertlik ölçümlerinde artan akımla birlikte nispeten daha yavaş soğuma hızına bağlı olarak ısı tesiri altındaki bölgede ve kaynak metalinde sertlik düşüşleri belirlenmiştir. Ayrıca kaynak akımı ve CO<sub>2</sub> miktarındaki artış, akma ve çekme dayanımlarının yanı sıra çentik darbe tokluğunu da düşürücü bir rol oynamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** MAG kaynak yöntemi, S960QL çeliği, kaynak akımı, koruyucu gaz kompozisyonu

### **Investigation on Effects of Weld Current and CO<sub>2</sub> Content in Gas Composition in GMAW on Joint Properties of HSS S960QL Steel**

**ABSTRACT:** In this study, HSS S960QL steel plates in thickness of 8 mm using three different welding currents which 185, 215 and 245 ampere were joined under two different shielding gas including of 5% CO<sub>2</sub> and 20% CO<sub>2</sub>. Tensile and notch impact tests, hardness measurement with macro and microstructure inspections were carried out in order to determine the effects of the used weld parameters on weld zone properties. All experimental studies show that a widener and more penetrated weld metal occurred by using a higher weld current and CO<sub>2</sub> in the shielding gas, and ratio of tempered martensite to bainite was decreased and grain growth observed in the weld zones. In the hardness measurements detected that the weld metal and heat affected zones softened due to relatively slow cooling rate according to the base metal. Using higher weld current and level of CO<sub>2</sub> in the gas mixture played a role in the decreasing of yield and tensile strengths, and the notch impact toughness.

**Keywords:** GMAW, HSS S960QL, welding current, shielding gas composition

<sup>1</sup> Zafer BARLAS ([Orcid ID: 0000-0001-9063-6501](https://orcid.org/0000-0001-9063-6501)), Uğur ÖZSARAÇ ([Orcid ID: 0000-0002-4806-1609](https://orcid.org/0000-0002-4806-1609)), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup> Esen ORMANLI ([Orcid ID: 0000-0002-2225-2546](https://orcid.org/0000-0002-2225-2546)), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Sakarya, Türkiye

<sup>3</sup> Ayhan ORHAN ([Orcid ID: 0000-0002-7648-2566](https://orcid.org/0000-0002-7648-2566)), Uğur ÇALIGÜLÜ ([Orcid ID: 0000-0003-4862-7219](https://orcid.org/0000-0003-4862-7219)), Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Zafer BARLAS, e-mail: barlas@subu.edu.tr

Bu çalışma Esen ORMANLI'nın Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

## GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel uygulamalarda malzeme seçimi yaparken muhtemeldir ki öncelikli kriterler kullanılacak malzemenin sağlamlığı, hafifliği ve maliyetinin düşüklüğü olduğu söylenebilir (Alabi vd., 2018). Böylesi beklentiler, mühendis ve tasarımcıları özellikle yapısal uygulamalarda akma dayanımı  $\geq 690$  MPa olan çeliklerin kullanımına yönlendirmektedir ki bu derece yüksek dayanımlara sahip çeliklerin çekme, eğme gibi yüklemeler karşısındaki davranışlarının anlaşılması, özellikle kaynaklı uygulamalar açısından büyük önem kazanmaktadır (Slazak ve Sniezek, 2016). İşte bu noktada, otuz yıllık bir süreç içerisinde ince taneli yapı çelikleri, mikro alaşımlama gibi kavramlar teknolojinin gelişmesi ile birlikte yüksek basınç ve sıcaklığa direnç amacıyla çelik literatüründe sağlam bir yer kazanmıştır (Aydın, 2017). Su verme sonrası tavlama neticesinde oluşan ince taneli temperlenmiş martenzit ve beynit yapısının yanı sıra Cr, Mo ilavesiyle artan sertleşebilirliği ve V, Ti, Nb ile mikro düzeyde alaşımlamayla engellenen tane irileşmesi sayesinde yüksek akma ve çekme dayanımlarına ulaşabilmektedir (Gaspar, 2019). Aynı zamanda iyi sayılabilecek tokluğa sahip bu çelikler, azaltılmış kesite sahip daha az malzeme kullanımının önünü açtıkları için de araç üretimi ve taşımacılık sektörlerinde üreticilerin karbondioksit salınımlarıyla ilgili katı kurallar ve müşteri taleplerinin karşılanması hususunda gittikçe artan bir öneme sahip olmaya başlamıştır (Slazak ve Sniezek, 2015). Bununla birlikte aşınma, korozyon, darbe dayanımı geliştirilmiş ince cidarlı, dolayısıyla da hafif, yüksek mukavemetli çelikler (High Strength Steels, HSS) ağır hizmet tipinde yer alan yağ, gaz boru hatları ve depolama tanklarında, arazi, maden ve demiryolu araçlarında, inşaat ve tarım makineleri, kule, köprü ve deniz yapıları gibi birçok yapısal birçok uygulama için de tercih edilmektedir (Blacha ve ark., 2017). Yüksek bir akma dayanımı/çekme dayanımı oranına sahip esasında ultra yüksek dayanıma sahip S960QL çeliği de esnemeye karşı direnç göstermesi sebebiyle genel olarak vinç, kule ve kaldırma ekipmanları yapımında tercih edilmektedir (Cadoni ve Forni, 2019). Bu çeliklerin ilgili sektörlerde artan oranlarda kullanılmak istenmesiyle birlikte, üretimde sıklıkla kullanılan kaynakla birleştirme işlemlerinde, o malzemenin mekanik özelliklerinden taviz vermeyecek ölçüde güvenilirlik algısı da ön plana çıkmaktadır. Özellikle kaynaklı birleştirmelerin ısı tesiri altındaki bölgesinde (ITAB) tespit edilen bozulmuş ince tane yapısının sonucu olarak hem sert hem de yumuşamış kısımların varlığı başlangıç mekanik özellikleri de değiştirerek soğuk çatlama olasılıklarını temel problem olarak karşımıza çıkmaktadır (Gaspar, 2019). Mekanik özellikleriyle ön plana çıkan bu çeliklerin yapısal uygulamalarda kullanılmak istenmesi, kaynak ile birleştirme operasyonları sonrası standartlara uygunluğu büyük önem arz etmekte olup, uygulanan ergitme kaynak yöntemleri için başta kaynak akımı ve gaz kompozisyonun başlangıç mikroyapı ve mekanik özelliklerde sürekliliğin sağlanmasında önemli rolleri olduğu da bir gerçektir. Öyle ki Goss ve Marecki (2012) S960QL çeliğinin TIG kaynağı sonrası yorulma ömrünü incelemiş, kaynaklı birleştirmenin yorulma ömrünün esas metale göre yaklaşık %90 oranında düştüğünü tespit etmişlerdir. Benzer şekilde Slazak ve Sniezek (2016) I ve V kaynak ağzı açılmış S960QL çeliğini MAG ile birleştirdikten sonra, kaynağın yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar I alın kaynaklı birleştirmenin diğerine göre %20-50 daha fazla yorulma ömrüne sahip olduğunu görmüşlerdir. Samardzic ve ark. (2017) 20 mm kalınlığındaki ince taneli S960QL çeliğinin farklı kaynak akımı, gerilimi ve kaynak hızları değişkenleri altında MAG ile birleştirilmesinde ITAB'ın çentik darbe tokluğunu ve sertliğini ısı girdisini değerlendirerek incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre ön-ısıtma, pasolar arası sıcaklık ve ısı girdisi gibi faktörler için verilen değerlere sıkıca uyulmasının beklentilere uygun kaynak kalitesinin sağlanması açısından önemli olduğu, aksi halde yetersiz ısı girdisinin birleştirmenin mukavemet ve sertliğini azalttığı, kalıntı gerilme ve hidrojenin varlığının çatlama ve gevrek kırılma eğilimini arttırdığı vurgulanmıştır. Türker (2017) S960QL çeliği için tozaltı kaynak

uygulaması yapmış, mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümleri, çekme ve çentik darbe testleri gerçekleştirmiştir. Yazar, en yüksek sertliklerin nispeten daha yüksek soğuma hızı ve yeniden kristalleşme kaynaklı olarak ITAB'da olduğunu; kalınlık boyunca alınan üç farklı çekme numunesinden en iyi çekme test sonuçlarının orta ve alt kısımdakilerden alındığını belirtmiştir. Üst numunenin ise daha geniş bir kaynak metaline sahip olmasının burada dezavantaj oluşturduğu ifade edilmiştir. Ayrıca ergime sınırında en düşük çentik darbe enerjisi elde edilirken, esas metalden (EM) sonra en yüksek enerji değeri kaynak metali (KM) merkezini içeren numunede görülmüştür. Gorka ve Kotarska (2019) da S960QL çeliğinin MAG kaynağı sonrasında sertliğin esas metale göre kaynak metalinde azaldığını, ITAB'da ise arttığını; çekme testleri sonrasında birleştirmelerin esas metalle benzer çekme mukavemetleri elde edilebildiğini tespit etmişlerdir. Gaspar (2019) ise S960QL çeliğinin ark kaynağında 800-500 °C arasındaki kritik soğuma hızını ( $t_{8/5}$ ) dikkate alarak ITAB'ın mikroyapısı, sertlik ve tokluk özellikleri üzerine araştırma yapmıştır. Sonuçlar  $t_{8/5}$  geçiş süresinin 2,5-30 s olması durumunda ITAB'ın sertliğinde bir artışı, tokluğunda ise azalmayı gösterirken;  $t_{8/5} = 100$  s şartındaysa ITAB'ın kaba taneli kısmında yumuşamayı ve oldukça düşük bir çentik darbe tokluğunu işaret etmiştir. Yukarıda verilen çalışmalarından da anlaşılabilirliği üzere, ince taneli ultra yüksek mukavemetli S960QL çeliğinin MAG kaynağı ile birleştirilebilirliği üzerine oldukça sınırlı sayıda deneysel çalışmanın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, bilindiği üzere MAG ile birleştirmede CO<sub>2</sub> ve Ar karışımı aktif gazlar pürüzsüz ve temiz bir dikiş sağlamada, kaynak metalinin esas metale kademeli olarak geçişi ve mekanizasyona uygun olması sebepleriyle yaygın olarak kullanılırken (Gres ve ark., 2018), genel olarak CO<sub>2</sub> oranı olarak %8-25 seçilmektedir (Meneses ve ark., 2016). Yine de en uygun CO<sub>2</sub> ile ilgili farklı değerlerin ortaya konulduğu da görülmektedir. Genel sonuç ise gazdaki yüksek CO<sub>2</sub> miktarı ark kararlılığını düşürmekte, bunun sonucunda ısı girdisi de azalmakta dolayısıyla ark kararlılığı sağlamak için aynı akım değerinde daha yüksek gerilim kullanılması gereksinimi ortaya çıktığıdır (Yılmaz ve Barlas, 2005). Ayrıca metal transferinin stabilitesi ile duman ve sıçranta oluşumunda da artış gözlenmektedir. Düşük oranlarda ise kaynağın iç kısımları dış kısımlarından daha sıcak olmaktadır (Meneses ve ark., 2016). Sonuç olarak bu çalışmada, S960QL çeliğinin farklı kaynak akımı, gerilimi ve gaz kompozisyonu altında yapılan birleştirmelerinde makroyapı ve mikroyapı özellikleriyle, mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmış, literatürde geçen çalışma sonuçlarına katkı yapılabilmesi hedeflenmiştir.

## MATERYAL VE METOT

Bu çalışma kapsamında, genellikle vinç yapımında tercih edilen ultra yüksek dayanımlı bir çelik türü olan S960QL (EN 10025-6) malzeme seçilmiş olup, levhalar lazer kesim sonrası CNC ile işlemeyle 300×150×8 mm<sup>3</sup> boyutlarına getirilmiştir. Bu malzemenin spektral analiz ile elde edilen kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 1 ve 2'de verilmiştir. S960QL levhaların, MAG kaynak yöntemiyle alın formunda birleştirilmesi için her bir iş-parçasına Şekil 1a'da gösterilen 45°, yani 90° V-kaynak ağızları açılmış; iş-parçalarının rijitliğinin sağlanabilmesi için Şekil 1b'deki gibi puntalama ve montaj işlemleri yapıldıktan sonra da Şekil 1c'de gösterilen düzende kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. MAG yöntemiyle birleştirme denemeleri 185, 215 ve 245 Amper (A) olmak üzere üç farklı kaynak akımında, %93 Ar + %2 O<sub>2</sub> + %5 CO<sub>2</sub> ve %78 Ar + %2 O<sub>2</sub> + %20 CO<sub>2</sub> olmak üzere iki farklı gaz kompozisyonu koruması altındayken yapılmıştır. Denemelerde kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 3 ve 4'de verilen ilave dolgu teli kullanılmıştır. Diğer kaynak parametreleri ise sabit tutulmuştur. Kaynak işlemi sonrası iş-parçaları havada soğumaya bırakılmıştır. Böylece, S960QL çeliğinin MAG ile kaynak işlemlerinde farklı akım ve gerilim değerlerinde, CO<sub>2</sub> gazı miktarının kaynak bölgesine olan etkilerinin anlaşılabilmesi hedeflenmiştir. Çizelge 5, birleştirmelerde kullanılan MAG

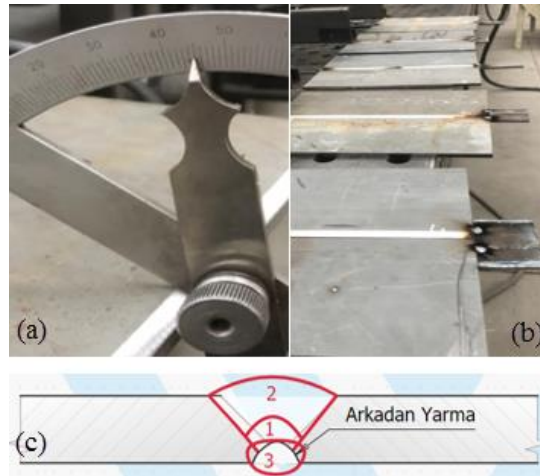
kaynak parametrelerini ve bu parametreler altında yapılan kaynak denemelerine verilen kodları göstermektedir ki bundan sonra anlatımda birleştirmeler ilgili kodlarıyla tanımlanacaktır. Kodlamada verilen ilk sayı A biriminden kaynak akımı değerini, sonraki sayı ise gaz kompozisyonundaki % CO<sub>2</sub> oranını ifade etmektedir. Tüm bunlarla beraber, gerçekleştirilen kaynak denemeleri için “(Akım × Gerilim × 60 × 0,8) / (Kaynak hızı (mm/dak) × 1000)” formülünden (Gourd, 1995) faydalanarak ısı girdileri (kJ/mm) hesaplanmıştır. Birleştirmelerde, iş-parçası kalınlığı, tel besleme hızı ve seçilen kaynak akım değerine göre diğer parametreleri otomatik olarak ayarlayabilen, su soğutmalı bir tel sürme ünitesine sahip KILMAK İNO 500 marka bir inverter gazaltı kaynak makinesi kullanılmıştır.

**Çizelge 1.** Çalışmada kullanılan HSS S960QL çeliğinin kimyasal bileşimi (ağ.%)

C	Mn	Mo	Si	Cr	P	S	Ni
0,152	1,25	0,598	0,202	0,191	0,0073	<0,0030	0,0464
Nb	Ti	Al	V	Co	W	Pb	Fe
<0,0020	<0,0010	0,0619	<0,034	0,0132	<0,025	<0,015	97,4

**Çizelge 2.** HSS S960QL çeliğinin mekanik özellikleri

Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Charpy Darbe Enerjisi (J)
≥ 960	980 - 1150	10	122



**Şekil 1.** MAG ile kaynak işlemi öncesi hazırlıklar ve kaynağın uygulanma prosedürü (a) 45° kaynak ağızı açılmış iş-parçasının kaynak kumpası ile geometrisinin doğrulanması, (b) iş-parçalarının kaynak işlemine hazır hale getirilmesi için puntalanması ve sabitlenmesi, (c) kaynak işlemi sırası 1- kök paso, 2- seçilen parametrelerde kaynaklama işlemi ve 3- arkadan yarma sonrası kök paso uygulaması.

**Çizelge 3.** İlave kaynak telinin kimyasal bileşimi (ağ.%)

C	Cr	Mn	Si	Ni	Cu	Mo
0,1	0,3	1,7	0,55	2,5	0,2	0,5

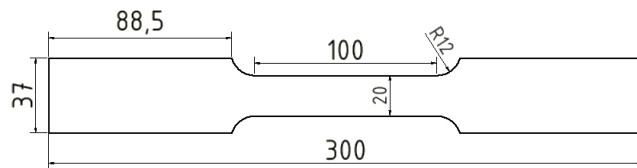
**Çizelge 4.** Kaynak dolgu telinin mekanik özellikleri

Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çentik Darbe Dayanımı (ISO-V/- 40 °C)	% Uzama (L <sub>0</sub> = 5d <sub>0</sub> )
≥ 890	940 - 1180	≥ 47 J	≥ 15

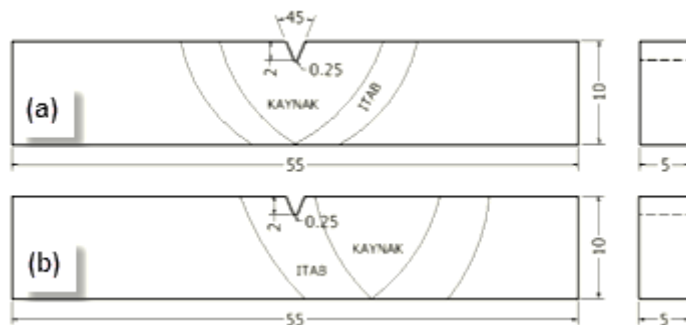
**Çizelge 5.** S960QL çeliğinin MAG ile birleştirme denemelerinde kullanılan kaynak parametreleri ve hesaplanan ısı girdisi değerleri (<sup>1</sup> kök pasonun, <sup>2</sup> arkadan yarım sonrasındaki kaynak şartlarını tanımlamaktadır.)

Kaynak Kodu	Gaz Kompozisyonu (%)	Akım (Amper, A)	Gerilim (Voltaj, V)	Tel Sürme Hızı (mm/dak)	Kaynak Hızı (mm/dak)	Isı Girdisi (kJ/mm)
185/5	93Ar + 2O <sub>2</sub> + 5CO <sub>2</sub>	185	24,6	6,7		0,97
185/20	78Ar + 2O <sub>2</sub> + 20CO <sub>2</sub>					
215/5	93Ar + 2O <sub>2</sub> + 5CO <sub>2</sub>	215	27,1	8,5	224	1,25
215/20	78Ar + 2O <sub>2</sub> + 20CO <sub>2</sub>					
245/5	93Ar + 2O <sub>2</sub> + 5CO <sub>2</sub>	245	29,5	9,8		1,55
245/20	78Ar + 2O <sub>2</sub> + 20CO <sub>2</sub>					
Kök Paso <sup>1</sup>	93Ar + 2O <sub>2</sub> + 5CO <sub>2</sub>	140	21,7	5,9	400	0,36
Altın Kök <sup>2</sup>	93Ar + 2O <sub>2</sub> + 5CO <sub>2</sub>	210	27,2	6,4	448	0,61

MAG yöntemiyle kaynak işlemleri sonrası S960QL birleştirmelerinin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi için EM ve her bir ayrı kaynak kodlu birleştirmeden TS EN ISO 4136 standardına uygun çekme numuneleri (Şekil 2), TS EN ISO 9016 standardına uygun  $55 \times 10 \times 5$  mm<sup>3</sup> ölçülerinde KM ve ITAB'dan ayrı ayrı çentik darbe numuneleri (Şekil 3) ile TS EN ISO 9015-1:2011 standardına uygun olarak da mikrosertlik ölçüm numuneleri çıkarılmıştır. Numuneler, yine lazer kesim sonrası kesim yüzeylerinin CNC ile temizlenmesi suretiyle elde edilmiştir. Çekme testleri Zwick Roel marka test cihazında yapılmış; elde edilen akma ve çekme değerlerinin esas metalle kıyaslanabilmesi için “kaynak performansı (kp) = kaynaklı numunenin değeri / S960QL esas metalin değeri  $\times$  100” formülü kullanılmıştır. Kaynaklı denemeler için mekanik özellik - yapı ilişkisinin ortaya çıkarılması amacıyla, makroyapı ve mikroyapı incelemeleri ile sertlik ölçümlerinde kullanılmak üzere  $35 \times 15$  mm<sup>2</sup> ölçülerinde hazırlanan numuneler 60-1200 mesh zımparalarla sırasıyla zımparalanmış, ardından 3  $\mu$ m boyutta elmas pasta ile parlatılmış ve sonrasında %5 nitrik asit + %95 saf alkol çözeltisiyle dağlanmış. Dağlanmış numuneler Nikon Eclipse L150 marka optik mikroskop (OM) ile TS EN ISO 17639 standardına uygun şekilde görüntülenip incelenmiştir. Ayrıca çekme ve çentik darbe testleri uygulanmış numunelerinin kırık yüzeyleri JEOL 6060 LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Sertlik ölçümleri Highwood HWDV-X3S marka cihazda, her bir farklı mikroyapı bölgesinden üçer adet olmak üzere 10 s boyunca 1 kg yük uygulanarak yapılmıştır.



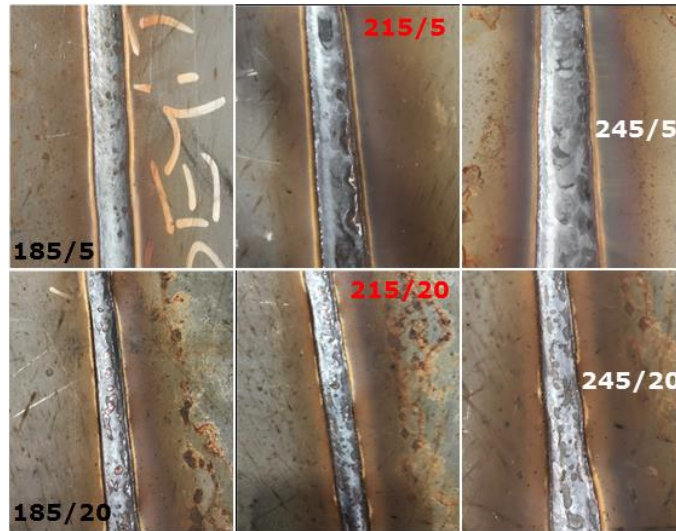
**Şekil 2.** Kaynaklı birleştirme denemeleri için kullanılan çekme testi numunesinin geometrik ölçüleri (ölçüler mm birimindedir).



**Şekil 3.** Charpy V-çentik darbe testi kullanılan (a) tamamen KM, (b) tamamen ITAB içeren numunelere ait geometrik detaylar (ölçüler mm birimindedir).

## BULGULAR VE TARTIŞMA

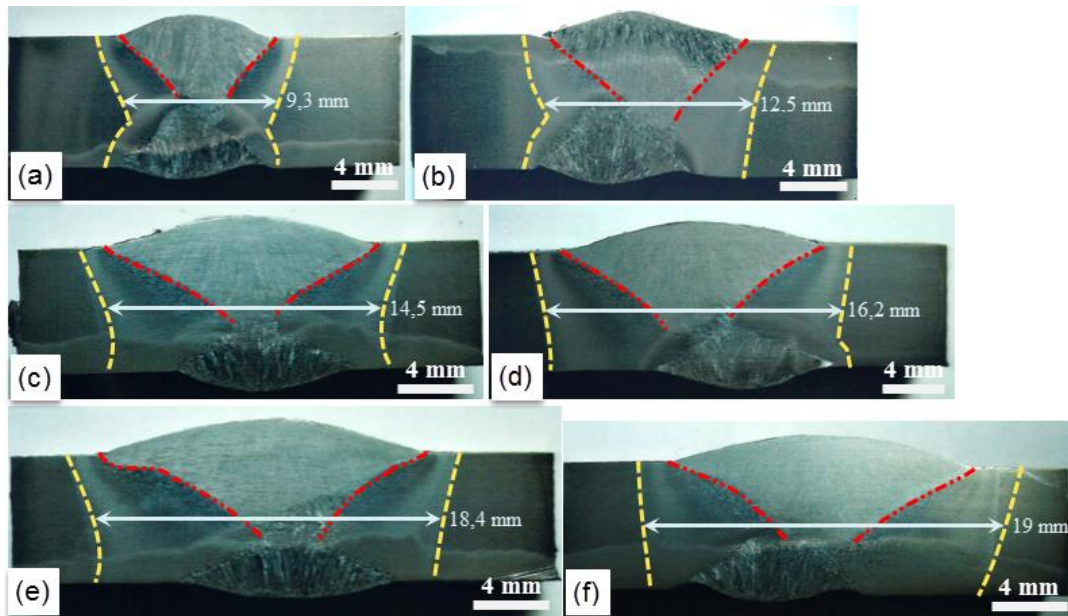
HSS S960QL çeliğinin, detayları Çizelge 5’de verilmiş olan farklı akım ve gaz kompozisyonu şartlarında MAG yöntemiyle gerçekleştirilmiş kaynak denemelerinin yüzey resimleri Şekil 4’de gösterilmektedir. Birleştirme yüzeylerinde yapılan görsel muayenelerde ilk olarak kaynak akım şiddeti ile koruyucu gaz karışımındaki CO<sub>2</sub> oranının artmasıyla beraber nispeten azalan ark kararlılığının ve daha fazla iri damla iletiminin sonucu olarak sıçrıntı miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Akım değeri ve CO<sub>2</sub> oranındaki artışın getirdiği diğer bir sonuç olarak yanma oluğu oluşumu eğiliminin arttığıdır ki bu durum, özellikle en yüksek akım ve CO<sub>2</sub> değerlerinin kullanıldığı 245/20 kodlu birleştirmede yer yer daha belirgindir. Bununla beraber, kaynak kumpası ile yapılan ölçümlerde, bu birleştirmede tespit edilen yanma oluğu derinliğinin  $\leq 0,4$  mm olduğu, bunun da TS EN ISO 5817-Sınıf C’de yer alan “ $h \leq 0,1 \times t$ , ancak en çok 0,5 mm” şartına göre kabul edilebilir aralıkta olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4. MAG kaynağı ile birleştirilmiş S960QL çeliklerinin kaynak dikişi yüzey görünümleri.

Şekil 5’de kaynak denemelerinin, kaynak yönüne dik şekilde kesimi sonrasında parlatılıp, dağlanmış makroyapı numunelerinin kök, üst ve alt kapak pasolarını da içeren KM ve ITAB makroyapıları gösterilmektedir. Öncelikle kaynak işlemleri sonrasında bütün numuneler için yeterli bir nüfuziyetten bahsetmek mümkündür ve ayrıca makro incelemelerde boşluk vb. gibi bir içyapı süreksizliğinin varlığı da tespit edilmemiştir. Yapılan gözlem ve ölçüm sonuçlarına göre ise kaynak akım şiddetinin ve koruyucu gaz kompozisyonunda CO<sub>2</sub> oranının artmasının kombinasyonu sonucu, kırmızı renkte ve noktalı kesikli çizgilerle tanımlanan ergiyip katılmış KM bölgesine ait kep kısmının genişlediği, nüfuziyet derinliğinin arttığı, sonuçta da bu KM bölgesinin hacminde bir artışın olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, iyi bilinmektedir ki herhangi bir yöntemle kaynak yapılmış bir iş-parçası için kalite algısındaki önemli ölçütlerden birisi de o birleştirmeye ait ITAB’daki mikroyapısal değişimler ve bu bölgenin genişliğidir ki uygulanan kaynak parametrelerince sadece bu bölgenin kontrol altında tutulmasıyla kaynaklı birleştirmenin özellikleri iyileştirilebilmektedir (Linnert, 1994). Bu noktadaki temel hedef, ısı girdisine bağlı olarak oluşan ITAB alanını, mikroyapısal değişime bağlı olarak mekanik özelliklerde meydana gelen ani değişim/azalma sebebiyle minimum seviyede tutmak olmaktadır (Gunaraj ve Murugan, 2002). Buradan hareketle, Şekil 5’de verilen makroyapılar üzerinde sarı renkli-kesikli çizgilerle sınırlandırılmış ITAB alanlarının görsel karşılaştırılması ve iş-parçası kalınlığının yarısından yapılan ölçüm sonuçlarından da anlaşılacağı gibi, aynı kaynak akımı

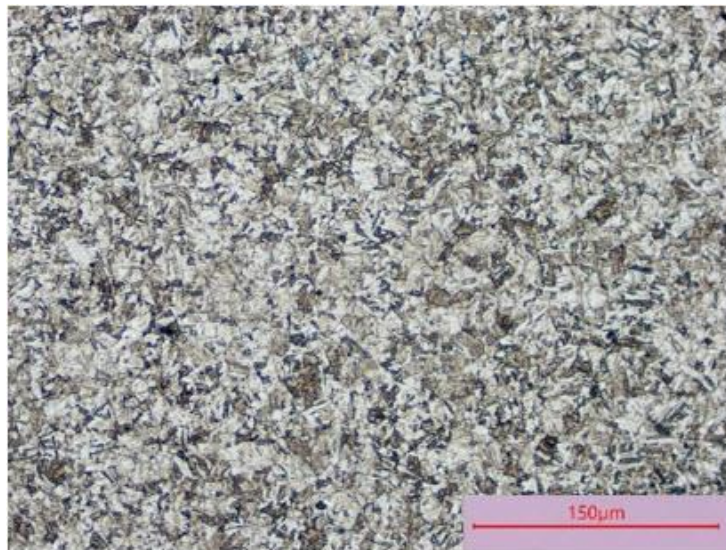
değerinde %20 CO<sub>2</sub> katkılı koruyucu gaz atmosferinde gerçekleştirilen birleştirmelerin ITAB genişliğinin, %5 CO<sub>2</sub> kullanımına göre daha geniş olduğu görülmektedir. Bu nedenle, aktif bir gaz olan CO<sub>2</sub>'nin karışım gazındaki artan oranı, S960QL çeliğinin MAG ile kaynağı esnasında arkta gerçekleşen ekzotermik reaksiyonlara bağlı olarak ark ısısını da arttırdığı açıktır. Ayrıca beklenildiği üzere, yine yüksek ısı girdisi sağlaması sebebiyle akım şiddetinin artışına paralel olarak ITAB genişlikleri için yine bir artış eğilimi söz konusudur (Gunaraj ve Murugan, 2002). Öte yandan, A değerine ve CO<sub>2</sub> oranına bağlı ölçüm sonuçları ayrı ayrı irdelendiğinde, kaynak akımının etkisinin daha belirleyici olduğu görülmektedir. Örneğin, sadece CO<sub>2</sub> oranına bağlı ITAB genişliğindeki en fazla artış 3,2 mm (12,5 – 9,3) ile 185 A'de olurken, akımın 185'den 245 A'ye çıkarılması durumundaki artışın değeri 5,2 mm olmuştur. Çünkü ısı girdisi hesaplamasında kullanılan eşitlik de dikkate alındığında, A faktörünün oldukça etkili olduğu; artan A ile açığa çıkan ısının önemli miktarının da metal kesiti boyunca iletildiği açıktır (Adak ve ark., 2015). Bu durum, Karabulut ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışma sonuçlarıyla da uyumluluk içerisindedir, zira yazarlar mikroalaşımli çeliğin tozaltı kaynağında akım şiddetinin artırılmasının ITAB'ın genişliğinin de artmasına yola açtığını belirtmişlerdir. Son olarak dikkat edilecek olursa, Şekil 5'de sunulan benzer ölçekli resimlerde akım şiddetindeki artış, kaynak bölgesinin ifade edilebilmesi için daha geniş bir fotoğrafın kullanılmasını gerektirmiş; özellikle akımın 185 A'dan 215 ve 245 A değerlerine çıkarılmasının bu yöndeki etkisinin daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5. Birleştirme denemelerinin makroyapıları (a) 185/5, (b) 185/20, (c) 215/5, (d) 215/20, (e) 245/5 ve (f) 245/20.

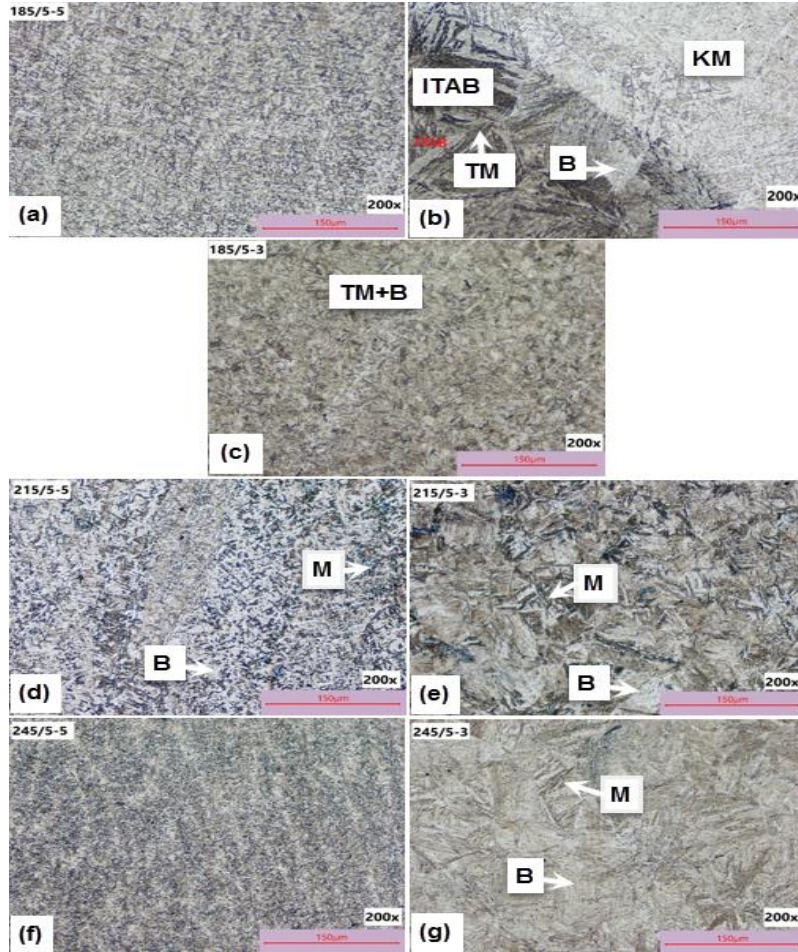
Şekil 6-8'de verilen optik mikroskop görüntülerine göre, uygulanan akım ve CO<sub>2</sub> değerlerinin kaynak bölgesinin mikroyapısal gelişimi üzerinde de etkili olduğunu göstermiştir. Üreticiden tedarik edilen S960QL EM Şekil 6'da görülebileceği gibi ince taneli temperlenmiş martenzit (TM) ve beynit (B) yapısına sahiptir. Bütün birleştirme denemelerinin kaynak bölgelerinde beynit ile beraber perlit ve ferrit dönüşümünün söz konusu olduğu düşünülmektedir ki özellikle yapılardaki beynitin martenzite olan oranının yanı sıra tane büyüklüğü farklılıklarının da belirleyici olduğu anlaşılmaktadır. Genel tespit, ısı girdisi artışını ve soğuma hızını yavaşlatıcı parametreler sonrasında tane irileşmesi ve beynitin martenzite olan oranının arttığı yönündedir. 185/5 ve 185/20 kodlu numunelerin KM'lerinin EM'ye benzer şekilde genel olarak temper martenzit + beynitten oluştuğu görülmektedir (Şekil 7a ve d). 185/5

numunesinin ergime sınırına yakın ITAB'ında, denemelerdeki en düşük ısı girdisi sebebiyle Şekil 7b'den görülebileceği gibi, martenzit ve beynit yapısının korunduğu ancak nispeten daha iri tanelerin varlığı gözlenmektedir. Bununla birlikte, hemen hemen ITAB merkezinde daha ince taneli temper martenzit + beynit yapısı hakim iken, EM'ye doğru yavaş soğuma sebebiyle beynit / martenzit oranında artışın yanı sıra, ITAB / EM geçişi civarında perlit ve ferrit dönüşüm ürünlerinin de meydana geldiği belirlenmiştir. Blacha ve ark. (2017) da S960QL çeliğinin elektron ışın kaynağında ITAB'ın ergime sınırı çevresindeki yapının genel olarak martenzitten, EM'ye yakın kısımların ise beynitten meydana geldiğini görmüşlerdir. Şekil 8, %20 CO<sub>2</sub> oranında farklı akımlardaki numunelerin kaynak mikroyapılarını göstermektedir. 185/20 numunesinde ergime sınırı civarı ITAB'da 185/5'e göre daha iri taneler ve daha fazla beynit görülmüş ve yine CO<sub>2</sub> miktarındaki artışın neden olduğu ark ısısındaki artışın genel olarak ITAB'da tane irileşmesine yol açtığı anlaşılmıştır. Uygulanan A ve CO<sub>2</sub> oranındaki artışın neden olduğu bu şekildeki yapısal değişim diğer kaynak denemelerine de yansımıştır. 215/5, 215/20, 245/5 ve 245/20 birleştirmelerinin KM'lerindeki ısı girdisinin artışı ve soğuma hızının yavaşlaması beynite kıyasla martenzit oranını düşürmüştür. Ancak bu durum tahmin edilebileceği üzere, aynı akım değerindeyken %20 CO<sub>2</sub> kullanımında daha fazla olmuştur ki en yüksek akım ve CO<sub>2</sub> kullanılan 245/20 numunesinde hem KM hem de ITAB'da genel olarak beynitik yapının söz konusu olduğu gözlemlenmiştir. Gorka ve Kotarska (2019) S960QL çeliğinin MAG kaynağı ile birleştirilebilirliği çalışmasında, nispeten daha düşük girdisi sağlayacak şekilde düşük akım, düşük CO<sub>2</sub> oranı ve daha fazla paso kullanarak kaynak bölgelerinin daha hızlı soğumasını sağlamış olmaları, başlangıç temper martenzit + beynit yapısının nispeten daha fazla korunmasına yardımcı olmuştur. Bu şekilde yazarlar, KM ve ITAB'ın temper martenzit + beynit yapıda olduğunu belirlemiştir. Bu açıdan bakıldığında, S960QL çeliğinin MAG ile birleştirilmesinde başlangıç mikroyapısının korunması sonuç hedef olarak alınır, kaynak parametrelerini ısı girdisini minimum seviyede tutacak şekilde seçmek gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Ayrıca daha kararlı ve daha düşük ark ısısı elde etmek için koruyucu gaz seçiminin önem kazandığı, bu nedenle de S960QL çeliğinin MAG kaynağı birleştirmelerinde koruyucu gazda bulunan CO<sub>2</sub> miktarının belirli bir değeri aşmaması hususunun gözden kaçırılmaması düşünülmektedir, zira literatürde bu değerin %12'yi geçmemesi de tavsiye edilmiştir (Zielinska, 2008).

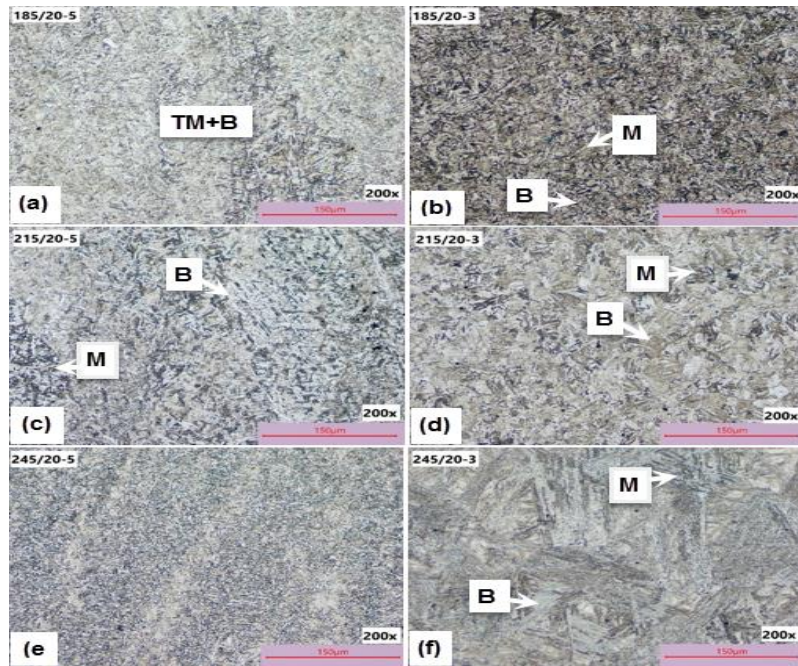


Şekil 6. Çalışmada kullanılan ultra yüksek mukavemetli S960QL çeliğinin TM + B'den oluşan mikroyapı fotoğrafı.



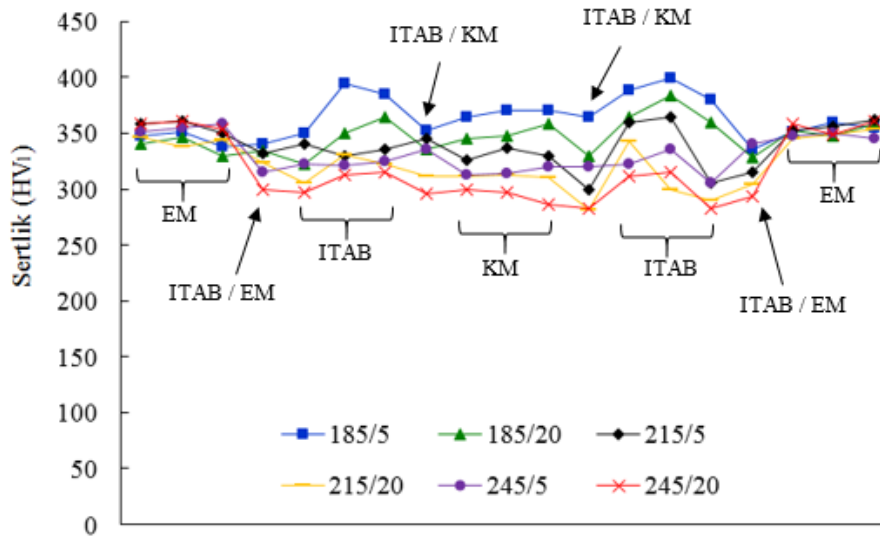


**Şekil 7.** %5 CO<sub>2</sub> değerinde, farklı A değerlerindeki birleştirme denemelerine ait kaynak bölgelerinin mikroyapı görüntüleri (a-c) 185/5 için sırasıyla KM, KM / ITAB geçişi (ergime sınırı) ve ITAB, (d ve e) 215/5 için sırasıyla KM ve ITAB, (f ve g) 245/5 için sırasıyla KM ve ITAB.



**Şekil 8.** %20 CO<sub>2</sub> değerinde, farklı A değerlerindeki birleştirme denemelerine ait kaynak bölgelerinin mikroyapı görüntüleri (a-b) 185/20 için sırasıyla KM ve ITAB, (c ve d) 215/20 için sırasıyla KM ve ITAB, (e ve f) 245/20 için sırasıyla KM ve ITAB.

Mikrosertlik ölçüm sonuçları ark ısısının artmasına, buna karşın kaynak bölgesindeki soğumanın yavaşlamasına neden olacak şekildeki akım şiddeti ve CO<sub>2</sub> oranındaki artışın, KM ve ITAB'lardaki sertlikleri düşürdüğünü ortaya koymuştur (Şekil 9). Çünkü daha önce de bahsedildiği gibi, nispeten düşük ısı girdisi ve daha hızlı soğuma şartları altında baskın yapı diğer fazlara göre daha yüksek sertliğe sahip TM iken, yüksek ısı girdisinin sonucu olarak yavaş soğuma şartları daha düşük sertliklerdeki B, tane irileşmesi gibi dönüşümlere neden olmuştur. İlaveten bu çalışmada, ısı girdisi artışına bağlı EM haricindeki KM ve ITAB kesit alanlarının genişlemesi de soğuma hızını düşürücü bir faktör olarak dikkati çekmektedir. Isı girdisi-soğuma hızı faktörlerine bağlı olarak ortaya çıkan bir başka sonuç da Mo, V gibi elementlerin alaşımında kullanılmalarının temel sebebi olan karbür ve/veya karbonitrür çökeltilerinin etkilendiğidir. Özellikle yüksek ısı girdisi bu çökeltilerin kabalaşmasına neden olmakta, dolayısıyla sertlikleri azaltıcı yönde bir rol oynamaktadır (Karabulut ve Türkmen, 2016). Ayrıca S960QL çeliğinde kaynak bölgesine yüksek enerji girdisi, sertliğin değerlerinin düşmesine neden olmaktadır (Gorka ve Kotarska, 2019). Bu nedenlerle en yüksek sertlik değerleri, A ve CO<sub>2</sub>'nin en düşük değerlerde kullanıldığı, dolayısıyla en düşük ısı girdisinin sağlandığı 185/5 kodlu numunenin her iki tarafında oluşan ITAB'ların hemen hemen merkezlerinde 395 ve 399 HV olarak ölçülmüş ve bu bölgenin ortalama sertliği 377 HV değerinde olmuştur. Çünkü bu birleştirmenin ITAB'ında ince taneli TM + B'nin varlığı söz konusuysen, KM bölgesinde EM'ye benzer bir mikroyapı oluşumu meydana gelmiştir. Samardzic ve ark. (2017) da benzer şekilde, HSS S960QL'nin MAG kaynağında ITAB sertliğinin EM'den daha yüksek olduğunu belirlemişlerse de çalışmalarında bunun nedeni hakkında herhangi bir bilgiye yer vermemişlerdir. Benzer şekilde yine bu numunenin KM sertlikleri S960QL EM'ninkinden (ort. 349 HV) bir miktar yüksek çıkarak ort. 368 HV olmuştur. 215/5 kodlu numunenin ITAB (ort. 335 HV)'ı da EM'ye göre nispeten sert iken, KM bölgesinin ort. 331 HV değeri ile çok az yumuşadığı görülmüştür. 245/5 kodlu birleştirmede ise ITAB ve KM sertlikleri EM'ye göre sırasıyla, 323 HV ve 316 HV değerlerinde çıkarak azalmıştır. 185 A ile akım değerinin düşük tutulduğu, ancak CO<sub>2</sub> oranının %5'den %20 değerine çıkarıldığı 185/20 kodlu denemede ITAB ve KM'nin EM ile benzer sertlik göstermesine rağmen, diğer birleştirmelerde daha önce anlatılan mikroyapısal farklılıklar sebebiyle hem ITAB'da hem de KM'de kaydadeğer yumuşamalar olmuştur. Örneğin, 245/5 numunesinin ITAB ve KM'i sertlikleri EM'ye kıyasla sırasıyla, %8 ve %10 oranında azalırken, bu azalma 245/20 birleştirme denemesi için ITAB'da %12, KM'de ise %16 değerlerine çıkmıştır. Göze çarpan diğer bir husus da düşük ısı girdisinin sağlandığı özellikle 185/5, 185/20 ve 215/5 kodlu birleştirmelerin ITAB/KM geçişlerinde sertlik değerlerinin iri tane yapısı sebebiyle keskin bir şekilde düştüğüdür ki bu durum, Türker (2019) tarafından MAG kaynağı sonuçları; Blacha ve ark. (2017) yaptığı elektron ışın kaynağı çalışma sonuçlarıyla da uyumludur. 215/20, 245/5 ve 245/20 kodlu denemelerde ise genel ITAB mikroyapıları bu geçişe benzer olduğu için benzer sertlik eğilimleri görülmektedir. Sonuç olarak, yüksek CO<sub>2</sub> oranının, yüksek akıma kıyasla düşük akımda iken ITAB ve KM sertliğinin azalmasında daha etkili anlaşılabilirlikle birlikte, ısı girdisini arttırıcı bu değişkenlerdeki artışın, Türker (2019) tarafından da vurgulandığı gibi, özellikle ITAB'da sertlik artışına katkı sağlayan karbür, karbonitrürlerin kabalaşmasına ve/veya çözünmesine yol açtığına da inanılmaktadır. Öte yandan, S960QL esas metalin ortalama sertliğinin 349 HV değeri ile EN 10025-6 standardındaki değerin karşılandığı; sertlik ölçümü yapılan numunelerin hiçbirinde 450 HV değerinin aşılmasına izin verilmeden EN ISO 10025-6 ve EN ISO 15614-1 standartlarına uygunluğun sağlandığının da gözden kaçırılmaması gerektiği düşünülmektedir.



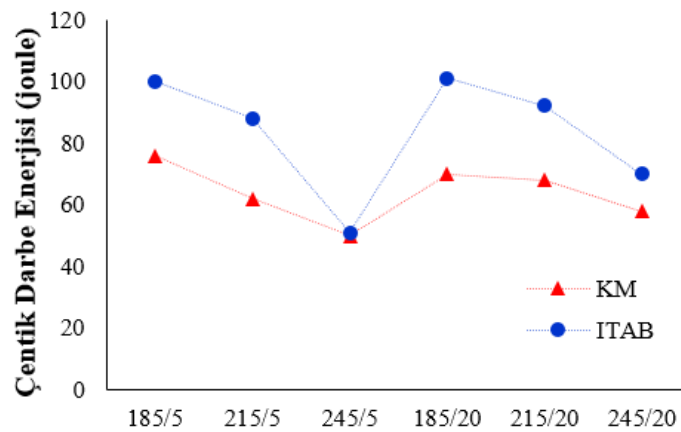
Şekil 9. Uygulanan MAG parametrelerine bağlı farklı kaynak denemelerinin kaynak bölgelerindeki sertlik grafiği.

Çizelge 6'da birleştirme denemelerinin çekme test sonuçları ile akma ve çekme performansları verilmiştir. Bu çizelgeden çıkarılabilecek en açık olan sonuç, artan kaynak akımı değeri ve CO<sub>2</sub> miktarının sonucu olarak kaynak bölgesine ısı girdisindeki artışın ve bunun da temelde ortaya çıkardığı kararsız bir ark oluşum eğiliminin, birleştirmelerin çekme testi performanslarının düşmesine neden olduğudur. Türker (2019) de yüksek ısı girdisinin tane irileşmesi, çökeltilerin çözünmesi gibi faktörler sebebiyle mekanik özellikleri azaltıcı etkisi olduğunu rapor etmiştir. Bu nedenle, S960QL EM'ye kıyasla en yüksek akma ve çekme performansları 185 A ile en düşük akım değerinin kullanıldığı uygulamalarda elde edilmiştir ve hatta %5 ile en düşük CO<sub>2</sub> oranında iken esas metalle benzer mukavemet değerlerine ulaşılmıştır. Düşük ısı girdisi sayesinde elde edilen ince taneli temper martenzit ve beynit yapısının birleştirmelerin akma dayanımlarına da katkı sağladığı açıktır (Alabi ve ark., 2018). Ayrıca bu numunede kopma, mikroyapı incelemelerinde tespit edilen ve alaşım çökeltilerinin çözünmesi kaynaklı olarak iri tanelerin, dolayısıyla düşük sertliğin meydana geldiği düşünülen ITAB / KM geçişinde olmuştur. %5 CO<sub>2</sub> oranında akımın 215 ve 245 A'ya artırılması durumunda dayanım ve yüzde uzama değerlerinde hemen hemen benzer bir azalma meydana gelmiştir. Çekme deneyleri sonrası elde edilen değerlerden göze çarpan başka bir husus da CO<sub>2</sub> oranının %5'den %20'ye çıkarılması durumundaki etkinin, özellikle yüksek akımda daha belirgin olduğudur. Şöyle ki 185/20 kodlu numunenin çekme testi özellikleri yaklaşık olarak %5 CO<sub>2</sub> içerikli birleştirmelerle benzer iken, 215/20 ve 245/20 birleştirmeleri diğerlerine göre daha düşük performanslar sergilemiştir. Bu durumun, görsel muayenede belirlenen yanma oluşu oluşumu eğilimi ve mikroyapı incelemelerinde ortaya konulan mikroyapı gözlemleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, yüksek ısı girdisi ve düşük soğuma hızına bağlı olarak kaynak bölgelerinde görülen TM'den daha düşük sertliklere sahip B miktarlarındaki değişim, perlit, ferrit gibi yapıların ortaya çıkışı ve tane büyümesi gibi faktörlerin dayanım özelliklerini düşüreceği de açıktır. Diğer bir husus ise daha önce makroyapı gözlemlerinde de belirtildiği gibi, artan akım ve CO<sub>2</sub> miktarıyla diğer bölgelere nazaran sertliği daha düşük olan KM ve ITAB kesit alanlarının da artış gösterdiğidir ki bu durumda azalan çekme testi genel sonuçlarının makroyapı ve mikrosertlik incelemeleriyle de uyumlu olduğunu söylemek mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, yüksek CO<sub>2</sub> kullanımıyla kaynak sırasında artan oksijenin, KM içerisindeki elektrottan ve esas metalden gelen özellikle manganın varlığını olumsuz etkilendiği, bu şekilde sünekliği düşürdüğüne, kopmaların bu bölgede meydana gelmesine yol açtığına inanılmaktadır.

**Çizelge 6.** S960QL çeliğinin MAG kaynağıyla farklı A ve CO<sub>2</sub> içerikleri kullanılarak birleştirilmesi sonrası elde edilen çekme testi sonuçları

Numune Kodu	Akma Dayanımı (MPa)	Akma Performansı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Performansı (%)	Uzama (%)	Kopma Yeri
S960QL EM	952	-	1060	-	11,4	-
<b>185/5</b>	<b>969</b>	<b>101,7</b>	<b>1043</b>	<b>98,3</b>	<b>4,87</b>	<b>ITAB</b>
215/5	920	96,6	1018	96	4,08	ITAB
245/5	923	96,9	1022	96,4	3,96	ITAB
185/20	945	99,2	1031	97,2	4,24	ITAB
215/20	874	91,8	968	91,3	2,52	KM
245/20	865	90,8	980	92,4	2,57	KM

Birleştirmelerin, oda sıcaklığında (~20 °C) yapılan çentik darbe test sonuçlarına gelince, bütün birleştirmelerin darbe enerjilerinin S960QL EM'den (122 J) düşük olduğu görülmektedir (Şekil 10). Dolayısıyla bu çalışmada uygulanan bütün kaynak parametrelerinin kaynak bölgesi mikroyapısında meydana gelen farklılaşma, özellikle de iri tanelerin varlığı sebebiyle tokluğu düşürdüğünü söylemek mümkündür (Gaspar, 2019). Bununla birlikte, bütün birleştirme denemelerine ait sadece ITAB içeren numunelerin darbe enerjileri, sadece KM içerenlerden yüksek çıkmıştır. Kaynak akım değerindeki artışın, her iki CO<sub>2</sub> değerinde de toklukları düşürdüğü anlaşılmaktadır. Benzer bir çıkarımı, CO<sub>2</sub> oranındaki artış için de yapmak mümkün olsa da kırılma için gerekli darbe enerjisi için belirleyici faktörün, bu çalışmada daha ziyade uygulanan akım değeri olduğu söylenebilir. Çünkü en yüksek darbe enerjileri 185 A değerindeki kaynak denemelerinde elde edilebilmiş, bu akımda CO<sub>2</sub> içeriğinin %5 veya %20 olması belirgin bir farklılığa neden olmamıştır (sırasıyla 100 ve 101 J). Darbe testi sonuçlarının sertlik-mikroyapı ilişkisinde belirlenen özelliklerle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır, zira genel olarak darbe numunelerinin ITAB sertliklerinin KM'den yüksek olduğu bilinmektedir. Türker (2019), S960QL EM'ye göre KM'de darbe enerjinin düştüğünü ancak, en düşük çentik darbe enerjisinin ergime sınırında tespit edildiğini bildirirken; Samardzic ve ark. (2017) ise ergime sınırından ITAB'a doğru 0,5 mm mesafelerde uzaklaşıldıkça kırılma enerjinin artış gösterdiğini vurgulamışlardır ki çalışmadan darbe enerjilerinin hemen hemen en yüksek sertliklerin ölçüldüğü yerler olduğu anlaşılmaktadır. KM'de nispeten yüksek ısı girdisi kaynaklı değişen martenzit / beynit oranının yanı sıra mangan varlığının olumsuz yönde etkilenmesi ve iri tane yapısının da darbe tokluğunu düşürdüğüne inanılmaktadır.



**Şekil 10.** Birleştirmelerin KM ve ITAB'larına uygulanan çentik darbe testi sonuç grafiği.

## SONUÇ

Bu çalışma kapsamında HSS S960QL çeliğinin MAG ile birleştirilmesinde akım değeri ve CO<sub>2</sub> oranının etkileri değerlendirilmeye çalışılmıştır. Kullanılan kaynak akımı ve CO<sub>2</sub> oranı karakteristik mikroyapı bölgelerinin kesit geometrilerini yani makroyapıyı, her bir mikroyapı bölgesini genel olarak karakterize eden faz türü ve miktarını, tüm bunların sonucu olarak da birleştirmelerin sertlik değerlerini, akma ve çekme dayanımlarını, süneklik ve çentik darbe tokluğu gibi özellikleri belirlemektedir. Kaynak akımı ve koruyucu gazdaki CO<sub>2</sub> oranının artırılması, yukarıda belirtilen özellikleri direkt olarak etkileyen kaynak bölgesine ısı girdisini artırırken, soğuma hızını azaltmıştır. Bunun sonucu olarak da TM'nin B'ye olan oranı değişmiş, sertlikleri bu faza göre daha az olan ferrit, perlit gibi diğer fazların ve tane irileşmesinin meydana gelmesine, mukavemet değerlerinin ve çentik darbe enerjilerinin düşmesine neden olmuştur. Dolayısıyla bu çalışma göstermiştir ki S960QL çeliğinin MAG ile birleştirilmesinde nispeten daha az ısı girdisi sağlayacak kaynak parametrelerinin seçilmesi büyük önem arz etmektedir.

Genel olarak çalışma sonucunda:

- 1- A ve CO<sub>2</sub> oranının artması sıçrıntı ve yanma oluşu oluşturma eğilimini arttırmıştır.
- 2- En düşük A ve CO<sub>2</sub> gaz oranının kullanıldığı, yani en düşük ısı girdisinin sağlandığı 185/5 kodlu birleştirme denemesinin kaynak bölgesinde nispeten daha dar bir ITAB meydana gelmiştir ki diğer birleştirmelere ait ITAB'lara göre ince taneli TM + B yapısının korunduğu gözlenmiştir.
- 3- 185/5 birleştirmesindeki bu yapı, sertlik ölçümlerinde S960QL EM de dahil olmak üzere en yüksek sertliklerin bu bölgede, ort. 377 HV değerinde çıkmasına neden olmuştur. Ancak A ve CO<sub>2</sub>'nin artırılması durumunda, muhtemelen çökeltilerin çözünmesi ve nispeten daha iri tane yapıları sebebiyle KM ve ITAB'daki sertlikler azalmıştır.
- 4- Çekme testinde en yüksek performansı nispeten daha az yapısal değişimin görüldüğü, daha yüksek sertliklere sahip 185/5 kodlu birleştirme göstermiştir. Bu birleştirme EM ile benzer akma performansı (%101,7) ve çekme performansı (%98,3) sergilemiştir.
- 5- Tüm birleştirme denemelerinde tespit edilen iri tanelerin varlığı, oda sıcaklığındaki çentik darbe testinde hem ITAB hem de KM numunelerinin darbe enerjilerinin düşmesine neden olmuştur. En düşük akımın kullanıldığı 185/5 ve 185/20 kodlu birleştirmelerinin sadece ITAB içeren numuneleri ~100 J ile en yüksek enerjileri yakalamıştır. Yine uygulanan parametrelerdeki artışlar darbe enerjilerinin düşmesine neden olmuş, en düşük değerler ~50 J ile 245/5 birleştirme denemesinde görülmüştür.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

## KAYNAKLAR

- Adak DK, Mukherjee M and Pal TK, 2015. Development of a Direct Correlation of Bead Geometry, Grain Size and HAZ Width with the GMAW Process Parameters on Bead-on-plate Welds of Mild Steel. Transactions of the Indian Institute of Metals, 68, 839-849.
- Alabi AA, Moore PL, Wrobel LC, Campbell JC, He W, 2018. Tensile behaviour of S690QL and S960QL under high strain rate. Journal of Constructional Steel Research, 150: 570-580.
- Aydın M, 2017. Çelik Malzemeler Aybitak Yayınları, S. 540. İstanbul.
- Błacha S, Wegłowski M, Dymek S, Kopyscianski M, 2017. Microstructural and Mechanical Characterization of Electron Beam Welded Joints of High Strength S960QL and Weldox 1300 Steel Grades. Archives of Metallurgy and Materials, 62(2): 627-634.

- Cadoni E, Forni D, 2019. Mechanical behaviour of a very-high strength steel (S960QL) under extreme conditions of high strain rates and elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, 109, 102869.
- Gaspar M, 2019. Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Areas in S960QL High Strength Steel. *Metals*, 9(11): 1226-1239.
- Górka J, Kotarska A, 2019. MAG welding of 960QL quenched and tempered steel. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 591, 012017
- Gourd LM, 1995. Kaynak Teknolojisinin Esasları (Eryürek, B., Bodur, O., Dikicioğlu, A. Çev.) Birsen Yayınevi. S. 43. İstanbul.
- Greš M, Viňáš J, Mulidrán P, Sleziak T, Brezina J, 2018. Analysis of Shielding Welding Gas Composition Effects on the Final Microhardness of the Fillet Joints Made With Use of MAG Technology. *The International Journal of Engineering and Science*, 7(7-I): 63-70.
- Gunaraj V and Murugan N, 2002. Prediction of Heat-Affected Zone Characteristics in Submerged Arc Welding of Structural Steel Pipes. *Welding Journal* 81(3): 45/S-53/S.
- Karabulut H, Türkmen M, Erden MA and Gündüz S, 2016. Effect of Different Current Values on Microstructure and Mechanical Properties of Microalloyed Steels Joined by the Submerged Arc Welding Method. *Metals*, 6(11): 281-287.
- Karabulut H, Türkmen M, 2016. Temperleme İşleminin Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen Mikroalaşımli Çeliklerin Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 7(3): 587-594.
- Linnert GE, 1994. *Welding Metallurgy Carbon and Alloy Steels*. AWS. S. 801. Miami, Florida.
- Meneses VA, Leal VS, Scotti A, 2016. Influence of Metal Transfer Stability and Shielding Gas Composition on CO and CO<sub>2</sub> Emissions during Short-circuiting MIG/MAG Welding. *Soldagem & Inspeção*, 21(3): 253-268.
- Samardžić I, Dunder M, Katinić M, Krnić N, 2017. Weldability Investigation on Real Welded Plates of Fine-Grained High-Strength Steel S960QL. *Metalurgija*, 56(1-2): 207-210.
- Slezak T, Sniezek L, 2015. A Comparative LCF Study of S960QL High Strength Steel and S355J2 Mild Steel. *Procedia Engineering*, 114: 78-85.
- Slezak T, Sniezek L, 2016. Fatigue Life of Welded Joints of High-Strength Structural Steel S960QL. *Solid State Phenomena*, 250: 169-174.
- TS EN ISO 4136: Metalik Malzemelerin Kaynakları Üzerinde Tahribatlı Deneyler-Enine Çekme Deneyi, 12.06.2013.
- TS EN ISO 9016: Metalik Malzemelerde Kaynaklar Üzerinde Tahribatlı Deneyler - Vurma Deneyleri - Deney Numunesi Yeri, Çentik Yönü ve Muayene, 12.06.2013.
- TS EN ISO 9015-1:2011: Metalik Malzemelerdeki Kaynaklar Üzerinde Tahribatlı Deneyler-Sertlik Deneyi-Bölüm 1: Ark Kaynaklı Birleştirmelerde Sertlik Deneyi, 22.11.2011.
- TS EN ISO 17639: Metalik malzemelerdeki kaynaklarda tahribatlı muayene - Kaynakların makroskopik ve mikroskopik muayenesi, 13.02.2014.
- TS EN ISO 5817: Kaynak - Çelik, nikel, titanyum ve bunların alaşımlarında ergitme kaynaklı (demet kaynağı hariç) birleştirmeler - Kusurlar için kalite seviyeleri, 29.04.2014.
- Türker M, 2017. The Effect of Welding Parameters on Microstructural and Mechanical Properties of HSLA S960QL Type Steel with Submerged Arc Welding. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(3): 673-682.
- Yılmaz R, Barlas Z, 2005. Paslanmaz Çeliklerin Gazaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde Koruyucu Gaz Kompozisyonunun Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3): 391-400.
- Zielinska S, Pellerin S, Valensi F, Dzierzega K, Musio K, de Izarra C, and F Briand, 2008. Gas influence on the arc shape in MIG-MAG welding. *The European Physical Journal - Applied Physics*, 43(1): 111-122.