

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Experimental Investigation of the Joining of SPH440-OD Steel with MAG Welding in the Scope of Microstructure and Mechanical Properties

Mustafa Bayram Kaya^{a*}, Muhammed Elitas^b

Submitted: 4.07.2024 Revised: 30.07.2024 Accepted: 03.09.2024 doi:10.30855/0705AR06

ABSTRACT

Keywords: SPH440-OD steel, MAG welding, Microstructure, Mechanical properties, Experimental investigation

^{a,*} Bilecik Seyh Edebali University, Graduate Education Institute, Dept. of Mechanical Engineering, 11100, Bilecik, Türkiye
Orcid: 0009-0003-9093-4121
e mail: mustafabayram9898@hotmail.com

^b Bilecik Seyh Edebali University, Engineering Faculty, Dept. of Mechanical Engineering, 11100 - Bilecik, Türkiye
Orcid: 0000-0001-5358-1783

*Corresponding author: mustafabayram9898@hotmail.com

In this study, the microstructure and mechanical properties of SPH440-OD steel joined by MAG welding method were experimentally examined through tensile, metallography and microhardness tests. In the welding process, welding voltage and wire speed were accepted as variable welding parameters and welding applications were carried out in 9 different variations. After the welding process, test samples were cut from the welded plates obtained from variable welding parameters and tensile and microhardness tests were applied to experimentally examine the mechanical properties of the samples. With the metallography experiment on the samples, Base Metal (BM), Weld Metal (WM), Heat Affected Zone (HAZ) microstructure images were obtained under an optical microscope. As a result of experimental investigations, it has been observed that different welding parameters set also affect the mechanical properties of the structures (percent elongation/tensile strength) and the quality of the weld seam. When the samples were examined in tensile tests, it was seen that the rupture generally occurred in BM. Unlike BM, denser and larger in grain forms were observed in HAZ. Columnar grain structure formations were observed in the WM microstructure. It was observed that the hardness of the samples increased from BM to HAZ and from HAZ to WM.

SPH440-OD Çeliğinin MAG Kaynağı ile Birleştirilmesinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Kapsamında Deneysel Olarak İncelenmesi

ÖZ

Bu çalışmada, MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen SPH440-OD çeliğinin çekme, metalografi ve mikrosertlik deneyleri ile mikroyapı ve mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Kaynak işleminde kaynak gerilimi, tel hızı değişken kaynak parametreleri olarak kabul edilmiş ve 9 farklı varyasyonda kaynak uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemlerinden sonra değişken kaynak parametrelerinden elde edilen kaynaklı plakalardan tel erozyon tekniği ile deney numuneleri kesilerek, numunelerin mekanik özelliklerini deneysel olarak inceleyebilmek için çekme ve mikrosertlik deneyleri uygulanmıştır. Numuneler üzerinde metalografi deneyi ile optik mikroskopta Esas Metal (EM), Kaynak Metali (KM), Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Deneysel incelemeler sonucunda, ayarlanmış farklı kaynak parametrelerinin yapıların mekanik özelliklerini (yüzde uzama/çekme dayanımı) ve kaynak dikişinin kalitesini de etkilediği görülmüştür. Numuneler incelendiğinde kopmanın genel olarak EM’de gerçekleştiği görülmüştür. Ek olarak, EM’den farklı olarak ITAB’da tane formlarında sıklaşma ve büyüme olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca KM mikroyapısında ise kolonsal tane yapı oluşumlarının olduğu görülmüştür. Numunelerde EM’den, ITAB’a, ITAB’dan KM’ye doğru sertliğin arttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: SPH440-OD çeliği, MAG kaynağı, Mikroyapı, Mekanik özellikler, Deneysel inceleme

1. Giriş (Introduction)

SPH440-OD çeliği sıcak haddeleme yöntemiyle üretilen otomotiv sektöründe şerit ve levha uygulamalarında sınıflandırılmış, presleme ve dayanım özellikleri bakımından otomobil şasi ve tekerleklerinde vb. kullanım alanlarına sahip, endüstri standartına göre farklı kaynaklar incelendiğinde Japanese Industrial Standart (JIS) G3113 standardına uyan, Toyota üretim kodlandırmasına göre ise TSG3100G olarak tanımlanan yapısal çelik sınıfında yer alan rulo tipi sac çeliğidir [1-4].

Havanın etki ettiği olumsuz durumlardan kaynağı korumak amacıyla koruyucu gaz türlerinin kullanıldığı gaz altı ark kaynağı yöntemi olan MIG/MAG kaynağının uygulanma yöntemi ya da çalışma mantığı, kaynak torcu aracılığıyla devamlı beslenen tel elektrodun kaynak arki oluşumuyla ergimesi şeklinde açıklanabilir. Kaynak için gereken ısı, tel elektrodla kaynaklanacak malzeme arasında oluşan kaynak arkıyla bu esnada tel elektrottan geçen akımında direnç göstermesi sonucu bu etmenlerin birbirleriyle ilişkisi sayesinde elde edilir. MIG/MAG kaynakları arasındaki fark incelenirse eğer aralarındaki isimlendirme farkları ortaya çıkmaktadır. İsimlendirmelerinde aktif ve asal koruyucu gaz türlerinin kullanılmasından dolayı farklılık vardır. MAG kaynağının Metal Aktif Gaz olarak açılımı yapılmaktadır ve bu kaynakta belli miktarlarda karbondioksit (CO₂) koruyucu gazı kullanılarak kaynak işlemleri yapılmaktadır. MIG kaynağının ise Metal Inert Gaz olarak açılımı yapılmaktadır ve Argon (Ar) ve Helyum (He) soygazlarının belli miktarlarda tek başına veya karışım halinde kullanılması ile kaynak işlemleri gerçekleştirilmektedir. MIG/MAG kaynaklarında kaynak donanımları benzer olsa bile (CO₂) gazı içeren koruyucu gaz tüplerinin dışında ısıtıcı bulunmaktadır [5,6].

Geniş bir alanda kullanıma sahip olan MIG/MAG kaynağı, metal sektörü, otomotiv, konteyner ve çelik imalatı vb. uygulanmaktadır. Sektörel bazda bu kadar yaygın kullanım göstermesi farklı boyutlarda farklı malzemelerin kaynaklanmasına olanak sağlamasından dolayıdır [7]. Demir ve demir dışı malzemelerin kaynağında, alaşım malzemelerin kaynaklanmasında uygulanabilmektedir. Yarı otomatik (elle yapılan) kaynak işlemlerinde uygulamanın kolay olmasının kaynakçı için zorluk çıkarmaması MIG/MAG kaynağının yaygın kullanım elde etmesini sağlamıştır. Kaynakçı topraklama aparatını kaynaklanacak iş parçasına bağladıktan sonra kaynak torcundan iletilen tel elektrodu birleştirme yapılacak alana dokundurması kaynağın başlaması için yeterlidir [5].

MIG/MAG kaynağı aşağıda belirtilen bazı avantajları sebebiyle yaygın kullanıma sahiptir. Örnekler vermek gerekirse, sürekli beslenen tel elektrod kullanımı, sınırlı uzunlukta elektrod kullanılan elektrik ark kaynağına göre avantajlı olmasını sağlamaktadır ayrıca metal aktarımı, tel besleme hızının yüksek olması ve kaynak hızının yüksek olması özellikleri de elektrik ark kaynağına göre avantajlı olduğunu göstermektedir. Bu kaynak türünde aksel yönlerin tümünde kaynak işlemi yapılabilmektedir ayrıca kaynak esnasında çapaklanma durumunun olmaması kaynak pasolarının temizlenmesindeki sürenin kısalmasını sağlamaktadır. Uygulanmasının kolay olmasından dolayı da avantajlıdır. MIG/MAG kaynağında özlü tip elektrod kullanımı ile yapılan kaynaklarda KM'nin özelliklerinin daha kaliteli olması sağlanabilmektedir [5,8].

Literatürden SPH440-OD çeliği ile ilgili yapılan kaynak çalışmaları incelendiğinde, otomotiv sektöründe kullanılan çeliklerin robot ark kaynağı [9] ve punta kaynağı [10] ile ilgili çalışmalarının olduğu görülmüştür. Okuyan ve Uzun [9], çalışmalarında otomobil koltuk kasnağında bulunan SPH440 çelik destek laması ile STKM800 boru profilini en uygun kaynak nüfuziyetinin sağlanması amacıyla kaynak hızı, kaynak akımı ve kaynak gerilimi değerlerini farklı kombinasyonlarda robot ark kaynağı tekniğini kullanarak ayarlamışlardır ve bu kaynak türünü birleştirme işleminde kullanmışlardır. Sonuç olarak, en uygun kaynak nüfuziyet değerlerinin sağlandığı kaynak akımı, kaynak hızı ve gerilim değerlerini elde etmişlerdir. Kasih ve arkadaşları [10], çalışmalarında otomotiv endüstrisinde otomobil kaportasında kullanılan SPC440 0,9 mm sac ile SPH440 2,9 mm kalınlığındaki sacları punta kaynağı ile birleştirmişlerdir. Sac malzemelerin ölçülerini 110x20 mm olarak tercih etmişlerdir. Kaynaklı numunelere çekme makaslama deneyi uygulamışlardır. Sonuç olarak, kaynak işleminde en uygun kaynak parametre değerlerini (kaynak süresi, kaynak akımı ve elektrod kuvveti) Taguchi tekniğini kullanarak optimize etmiş, yaptıkları hesaplamalara göre en uygun şartlarda kaynak işlemini uygulamışlardır.

Ek olarak yapı çelikleri kapsamında MIG/MAG kaynağı ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde, Gür [11], çalışmada 10 mm kalınlığındaki S700 MC yapı çeliğini kullanmıştır. Kaynak öncesinde ısı

girdisini hesaplayarak kaynak işlemine uygun parametreleri belirledikten sonra köşe ve alın türünde %92 Ar + %8 CO₂ koruyucu gazı altında MIG kaynağı birleştirme işlemleri gerçekleştirmiştir. Köşe ve alın kaynağı numunelerinin mikroyapı ve makro yapı incelemelerini kaynak hatalarını görme kapsamında uygulamıştır. Mekanik özelliklerin incelenmesi kapsamında ise Vickers sertlik deneyi ile birlikte kırma, charpy çentik darbe, eğme ve enine çekme deneylerini uygulamıştır. Sonuç olarak, en az sertliğin ITAB'da gerçekleştiğini, en fazla darbe sönümlenme enerji değerinin de aynı şekilde ITAB'da gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Mikroyapı incelemelerinde ise ani soğuma durumunun tane yapı formunda küçülmeye neden olduğunu böylelikle dayanımda da yükselme olduğunu belirtmiştir. Işık [12], çalışmasında St52 yapı çeliğini bazik ve rutil türde özlü tel elektrodlar kullanarak farklı akım ve kaynak gerilimi %100 CO₂ koruyucu gazı koşullarında MAG kaynağı işlemi ile birleştirme işlemi gerçekleştirmiştir. Çalışmasında özlü tel elektrod türünün kaynak dikişine etkisini mekanik özelliklerinin incelenmesi kapsamında çekme, sertlik, eğme ve çentik darbe deneyleri ile gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, çekme deneylerinde kopmaların EM'de oluştuğunu gözlemlemiştir. EM'ye etki eden yüksek ısı girdi etkisine göre bazik tel elektrodarda maksimum çekme mukavemetinin EM'ye yaklaşık geldiğini, rutil özlü tel elektrodarda ise EM'den yaklaşık olarak %2 daha yüksek geldiğini belirtmiştir. Sertlik deneyi sonucunda ise ITAB kaynak dikişi sınır bölgesinde ise sertliğin en yüksek değeri verdiğini gözlemlemiştir. Dar kaynak kenarından EM'ye doğru sertliğin düştüğünü gözlemlemiştir. Kaynak bölgesinde sertlik incelemesinde ise iki farklı özlü tel elektrodun yaklaşık olarak denk sertlik sonucu verdiğini ancak bazik tel elektrodlu kaynaklı numunelerin rutil tel elektrodlu olanlara göre yaklaşık % 10 daha fazla sertlik değeri verdiğini belirtmiştir. Eleman [13], çalışmasında iki farklı kalınlıkta S355J2+N yapı çeliklerini kullanmıştır. MIG/MAG kaynak makineleri (yeni nesil ve geleneksel) ile alın ve köşe tiplerinde %82 Ar + %18 CO₂ koruyucu gaz şartlarında ve SG 2 tel elektrodunu kullanarak kaynak işlemlerini gerçekleştirmiştir. Mekanik özellik incelemeleri kapsamında eğme, çekme, sertlik ve çentik darbe deneyleri gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, kaynak nüfuziyeti bakımından yeni nesil makinelerinin daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir. Ayrıca çekme deneyinde yeni nesil makinelerde kopmanın EM'de meydana geldiğini, geleneksel makinelerde ise KM'de oluştuğunu belirtmiştir. Sertlik deneyinde ise hem yeni nesil hem de geleneksel makineler açısından numunelerde kaynaklı birleştirme bölgelerinin sertliğinin en yüksek olduğunu belirtmiş bunu ITAB ve EM'nin sırasıyla takip ettiğini çalışmasında belirtmiştir. Okuroğulları [14], çalışmasında robotik gazaltı MAG kaynağını kullanarak S460mc ve St52 çeliklerinin kaynak uygulamalarını gerçekleştirmiştir. Bu çelikler üzerinde mekanik deneyler gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, çekme dayanımına bakılırken ilerleme hızı, tel sürme hızı ve kaynak ark boyu parametrelerinin çalışmasında optimum oranlarda belirlenmesi gerektiğini belirtmiş aksi durumların çekme dayanımını olumsuz etkileyeceğini kaynaklı yapılar için uygun şartların elde edilemeyeceğini belirtmiştir. Şık [15], çalışmasında S355J2G3 yapı çeliğini kullanmıştır. Üç farklı karışım koruyucu gaz altında ve SG 2 tel elektrodunu kullanarak MIG/MAG kaynağını uygulamıştır. Karışım gazlar MAG kaynak tekniğine göre ayarlanmış %88-%10-%2, %80-%18-%2, %93-%5-%2 (Ar, CO₂, O₂) koruyucu gazları olarak belirlemiştir. Numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla sertlik deneyleri ve eğmeli yorulma deneylerini uygulamıştır. Sonuç olarak, %88 Ar + %10 CO₂ + %2 O₂ koruyucu gazının en yüksek mekanik özellikleri veren koruyucu gaz türü olduğunu belirlemiştir.

Robot ark ve punta kaynak türlerinden farklı olarak bu çalışmada kullanılan SPH440-OD çeliğinin yapısal çelik olmasından dolayı MAG kaynak uygulamasına uyumluluk sağlayacağı ve farklılık katacağı düşünüldüğünden 9 farklı tel hızı ve kaynak gerilimi parametre varyasyonlarında MAG kaynağı ile birleştirme işlemleri uygulanmıştır. Çekme ve Vickers mikrosertlik deneyleri ile birleşimin mekanik davranışının deneysel olarak incelenmesi hedeflenmiştir. EM, ITAB ve KM için ayrıca metalografi deneyi ile mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Sıcak haddelenmiş yapısal otomotiv çeliği olarak tanımlanan SPH440-OD çeliği ile yapılan bu deneysel inceleme çalışmasının, MAG gaz altı ark kaynağı uygulamalarına ve literatüre fayda sağlayacağı düşünülmektedir [16].

2. Malzeme ve Deneysel Çalışmalar (Material and Experimental Studies)

2.1. SPH440-OD çeliği ve kaynak işlemi (SPH440-OD steel and welding process)

Bu çalışmada, 3 mm kalınlıkta sıcak haddelenmiş SPH440-OD otomotiv sac çeliği kullanılmıştır. Ayrıca bu çelik SAPH440 tanımlaması ile de isimlendirilmektedir [3,4,17]. Nippon Steel Corp. [17], çelik üreticisinin çelik üretim kodu olan NSHA440B çeliği bu çalışmada kullanılan 3 mm kalınlığındaki SAPH440-SPH440-OD çeliğinin mekanik özellikleri ile aynı değerleri sunmasından dolayı Tablo 1

içerisine kimyasal bileşim verisi eklenmiştir. Ayrıca Ertürk ve Elitaş [18], çalışmasından elde edilen kimyasal bileşim verisi, SPH440-OD çeliğinin spektral analiz sonucuna göre oluşturulmuştur bu sebeple Tablo 1'e eklenmiştir. Bu çeliğe ait kimyasal bileşimler Tablo 1 içerisinde gösterilmiştir [3,4,17,18].

Tablo 1. SPH440-OD çeliğinin kimyasal bileşimleri (%) (Chemical compositions of SPH440-OD steel (%))

Çelik Sembolü JIS G3113	C Karbon	Si Silisyum	Mn Mangan	P Fosfor	S Kükürt	Cu Bakır	Ni Nikel	Al Alüminyum	Diğer	Fe Demir
SAPH440 [3]	≤ 0,21	≤ 0,30	≤ 1,50	≤ 0,025	≤ 0,025	-	-	-	≥ 0,010	Kalan
SAPH440 [4]	-	-	-	0,040 maks	0,040 maks	-	-	-	-	Kalan
SAPH440 [17]	≤ 0,15	≤ 0,80	≤ 1,90	≤ 0,025	≤ 0,010	-	-	-	-	Kalan
SPH440- OD [18]	0,15	0,01	0,70	0,013	0,007	0,026	0,022	0,02-0,05	-	Kalan

Kaynak işlemleri öncesinde uygun plaka ölçüsü elde edebilmek amacıyla Kaya [19], tarafından gerçekleştirilen çalışmada belirlenen plaka ölçüleri ile 3 mm kalınlığında elde edilen sac malzemeler EHS 10-31 M giyotin kesme makinesi aracılığıyla 300x75 mm boyutlarına getirilerek 18 adet plaka elde edilmiştir.

En uygun tel hızı ve kaynak gerilimi parametrelerini belirlemek amacıyla giyotin kesme işlemi sonrası elde edilen hurda malzemeler üzerinde kaynak işlemleri yapıldı ve Tablo 2 içerisinde verilen elde edilmiş en uygun 9 farklı kaynak parametre varyasyonunda kaynak işlemleri gerçekleştirildi.

Tablo 2. Kaynak parametre değerleri (Welding parameter values)

Sac Plaka Kodları	Tel Hızı (m/dk)	Gerilim (V)
1A	5	15
1B	5	17
1C	5	19
2A	5,5	15
2B	5,5	17
2C	5,5	19
3A	6	15
3B	6	17
3C	6	19

Kaynak uygulamalarında GekaMak PowerPlus+ Plus MIG 250 PFC kaynak makinesi kullanılmıştır. Ayrıca tel elektrod malzemesi, Magmaweld MG 2 1,2 mm çaplı gaz altı (MAG) tel elektrottur. Alaşım çeliklerin kaynak işlemlerinde kullanılan bir elektrod türüdür. Özsüz tel elektrod kullanımı olduğu için MG 2 teli aynı zamanda SG 2 teli olarak geçmektedir.

Bu tel elektrod türü alaşım veya az alaşım çelik malzemelerin kaynaklanmasında kullanılmaktadır [5].

HB 212 50 230, karışım gaz altı (MAG) koruyucu gazı olarak kullanılmıştır. Bu koruyucu gaz bileşim oranı olarak balans argon gazına ek olarak %2 O₂ ve %12 CO₂ gazı içermektedir [20]. Bu gaz türü hafif oksitleyici gaz grubunda yer alan alaşım ve az alaşım çeliklerin kaynak uygulamalarında kullanılmaktadır [21]. Tablo 3'de tel elektroda ait kimyasal bileşim verileri gösterilmiştir [5,22].

Tablo 3. SG 2/MG 2 elektroduna ait kimyasal bileşimler (%) (Chemical compositions of the SG 2/MG 2 electrode (%))

Tel Elektrod	C Karbon	Si Silisyum	Mn Mangan	≤ P Fosfor	≤ S Kükürt	Cu Bakır
SG 2 [5]	0,07-0,14	0,7-1,0	1,3-1,6	0,025	0,025	0,30
MG 2 [22]	0,07	0,90	1,45	-	-	-

Kaynak öncesinde 300x75 mm boyutlarında kesilmiş 18 adet plakaya çift V tipi 45° kaynak ağızı açılmıştır ve Tablo 2’de belirtilen kaynak parametre değerlerinde alın kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak masasına plakalar Şekil 1’deki gibi puntalanmıştır. Şekil 2’de örnek bir kaynaklı plakaya ait yatay görüntüsü gösterilmiştir. Şekil 3’de ise dikey görüntüsü paylaşılmıştır.



Şekil 1. Kaynak öncesi puntalanmış ve kaynak ağızı açılmış plakaların görüntüsü
(Image of plates that have been centered and welding bent opened before welding)

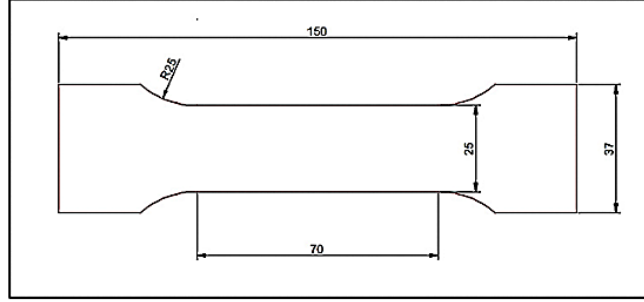


Şekil 2. Kaynak işlemi uygulanmış plakanın yatay görüntüsü (300 mm)
(Horizontal view of the welded plate (300 mm))



Şekil 3. Kaynak işlemi uygulanmış plakanın yatay görüntüsü (150 mm)
(Vertical view of the welded plate (150 mm))

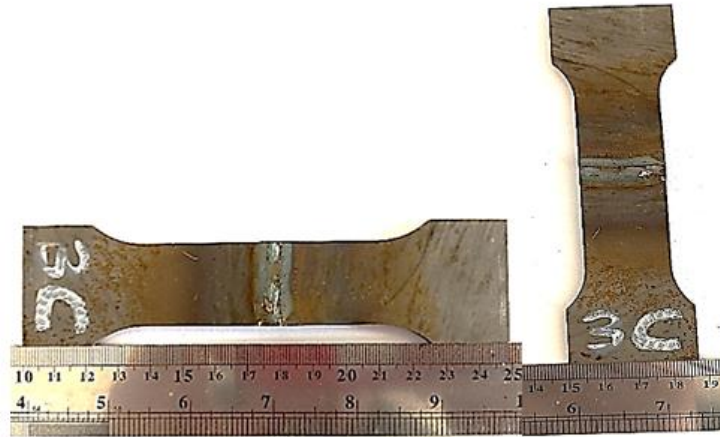
Kaynaklı 9 plaka malzemeden deneysel işlemlerde kullanmak amacıyla 27 adet çekme numunesi ve 9 adet mikroyapı ve mikrosertlik numuneleri tel erozyon kesimi ile elde edilmiştir. Tablo 2'deki sac plaka kodlandırması, tel erozyon işlemi öncesi varyasyonların karışmasını engellemek amacıyla tanımlanmıştır. Çekme numunelerine ait ölçüler ISO 4136 standardına göre ayarlanarak oluşturulmuştur [23]. Mikroyapı ve sertlik numuneleri için ölçü ise kaynak dikişini 2 cm ortalayacak şekilde EM, ITAB ve KM'yi inceleyebilmek amacıyla ayarlanmıştır. Şekil 4'de çekme numune ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 4. Çekme numunesi ölçüleri (Tensile sample dimensions)

2.2. Çekme deneyi (Tensile test)

27 adet çekme numunesi için Shimadzu AG-IC marka çekme cihazında 2 mm/dk çene çekme hızında çekme deneyleri uygulanmıştır. Şekil 5'de örnek bir kaynaklı çekme numunesine ait yatay ve dikey görüntü gösterilmiştir.



Şekil 5. Kaynaklı çekme numunesi yatay ve dikey görüntüsü (150 mm ve 37 mm)
(Horizontal and vertical view of welded tensile sample (150 mm and 37 mm))

2.3. Metalografi deneyi (Metallography test)

Tel erozyon kesimi ile elde edilmiş 9 numune içerisinde en simetrik dikiş görünümüne sahip olan 2B numunesi üzerinde EM, ITAB ve KM için mikroyapı görüntüsü alma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Numunenin büyük kesilmesinden dolayı bakalite alma işlemi uygulanmamıştır. Görüntü alma işlemleri öncesinde sırasıyla 120-220-360-600-800-1200-1500-2000 numaralı zımparalama kağıtları kullanılarak her aşamada numuneyi 90 derece çevirerek zımparalama işlemleri tamamlanmıştır. Daha sonrasında yüzeye parlatma uygulaması kapsamında ise 3 mikron ve 1 mikron elmas pasta kullanılmıştır. Metkon Forcipol 2V zımparalama-parlatma cihazında zımparalama ve parlatma işlemleri tamamlanmıştır. Sonraki adımda ise %2 nitrik asit ve %98 metanol içeren %2 nital dağlayıcı çözeltisi ile yüzeye 2 sn aralıklarla dağlama uygulaması gerçekleştirilerek, numune optik mikroskopta görüntü almaya hazır hale getirilmiştir. Daha sonrasında Nikon Eclipse LV150 optik mikroskobunda EM, ITAB ve KM bölgeleri 40 µm ölçekte incelenmiştir.

2.4. Vickers mikrosertlik deneyi (Vickers microhardness test)

Tel erozyon kesimi ile elde edilmiş 9 numunenin tamamının EM, ITAB ve KM bölgelerine Vickers sertlik deneyi uygulanmıştır. 2B numunesi dışındaki numunelere sadece zımparalama işlemi 120-220-360-600-800-1000 numaralı zımparalama kağıtları ile her aşamada numuneyi 90 derece çevirerek gerçekleştirilmiştir. EM, ITAB ve KM’de iz oluşumu elde edebilmek için diğer 8 numuneye zımparalama işlemi uygulanmıştır. Daha sonrasında numunelerin Vickers sertlik deneyleri Emcotest Durascan sertlik ölçme cihazı kullanılarak HV 0,5 yük ve 10 sn süre koşullarında uygulanmıştır. 20x odaklama ile iz görüntüleri incelenmiştir.

3. Deneysel İnceleme Sonuçları (Experimental Investigation Results)

3.1. Çekme deneyi ve kaynak dikişi incelemeleri (Tensile test and weld seam investigations)

Çekme deneyi sonucunda Trapeziumx programı ile elde edilen maksimum çekme gerilmesi ve yüzde uzama verileri Tablo 4’te gösterilmiştir. Tablo 4 içerisine ayrıca tel hızı ve kaynak gerilimi parametrelerinin çekme deneyi ve yüzde uzama sonuçlarına etkilerinin incelenmesi amacıyla Tablo 2’deki verilerde eklenmiştir. Ek olarak tablo içerisine SPH440-OD çeliğine (EM) ait çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri eklenerek sonuçlara göre tartışılmıştır.

Tablo 4. Tel hızı ve kaynak gerilimi değerlerinin etkisine göre elde edilen maksimum çekme gerilmesi ve yüzde uzama verileri (Maximum tensile stress and percent elongation data obtained according to the effect of wire speed and welding voltage values)

Sac Plaka Kodları	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Yüzde Uzama (%)	Gruplar	Tel Hızı (m/dk)	Kaynak Gerilimi (V)
1A	506,71	20,67	1.Grup	5	15
1B	507,08	18,11		5	17
1C	509,08	20,59		5	19
2A	509,92	17,85	2.Grup	5,5	15
2B	510,00	21,64		5,5	17
2C	487,83	18,99		5,5	19
3A	508,83	20,44	3.Grup	6	15
3B	511,00	21,54		6	17
3C	515,83	20,72		6	19
EM [17]	440,00≤	t=3mm 32,00≤			

Tablo 4’e bakıldığında maksimum çekme gerilmesi değeri 515,83 MPa ile 3C plakasına ait çekme numunesinde görülürken en düşük değer 487,83 MPa ile 2C plakasına ait çekme numunesinde gerçekleşmiştir. Maksimum yüzde uzama verilerinden en yüksek yüzde uzama değeri %21,64 ile 2B plakasına ait çekme numunesinde görülürken en düşük değer ise %17,85 ile 2A plakasına ait çekme numunesinde gerçekleştiği görülmektedir.

Tablo 4’teki sonuçlar tel hızının sabit tutulup, kaynak geriliminin kademeli artırılması kapsamında incelendiğinde, 1.grup ile 3.grupta çekme gerilmesinin arttığı görülmektedir. 2.grupta 2A’dan 2B’ye çekme geriliminde artış olsa bile 2C plakasında kaynak işleminde kaynak nüfuziyetinin yeteri kadar sağlanamaması çekme gerilimini olumsuz etkilemiştir ve çekme gerilmesinde düzenli artış görülmemiştir.

Tablo 4’teki sonuçlar kaynak geriliminin sabit tutulup, tel hızının kademeli olarak artırılması kapsamında incelendiğinde, 1A plakasından 2A plakasına doğru çekme numunelerinin çekme gerilmesi değerlerinde artış görülmüş aksine 3A plakası çekme numunesinin çekme gerilmesi değerinde ise çok az bir düşüşün olduğu gözlemlenmiştir. 1B, 2B ve 3B plaka numunelerinde çekme gerilmesinde düzenli olarak artış görülürken, 1C, 2C ve 3C plakalarına ait çekme numunelerinde 2C’deki olumsuz durum burada da düzenli olarak çekme gerilmesinde artış olmasını engellemiştir.

Kılınçer ve Kahraman [24], tarafından gerçekleştirilen çalışma incelendiğinde, kaynak geriliminin sabit

tutulup, tel hızının kademeli olarak artırılması koşullarında gerçekleştirilen MIG kaynağı uygulamasında iki ayrı numunenin çekme deneyi sonuçlarında çekme mukavemeti değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Tablo 4 verileri bu koşullar çerçevesinde değerlendirildiğinde ise bu durumun genel anlamda bu çalışmada da elde edildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4'te maksimum yüzde uzama verileri %17,85 ile %21,64 aralığındadır. 3 mm kalınlığında SPH440-OD çeliğinin (EM) yüzde uzama verisi $\%32 \leq$ olarak belirtildiğinden dolayı, çekme deneyi sonucunda elde edilen maksimum yüzde uzama verilerinin bu değerden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun oluşma sebebi, EM sertliğinin ITAB-KM sertliğinden daha az olmasıdır. Kılınçer ve Kahraman [24], çalışmalarında bu durumun oluşma sebebini kaynaklı bölgede gerçekleşen sertlik artışı şeklinde belirtmişlerdir. Kaynak işlemleri esnasında kaynak akımının etkisine göre farklı ısı girdilerinin oluşması, çekme deneyi sonucunda elde edilen yüzde uzama değerlerinin farklı ve birbirine yakın seyretmesine sebep olmuştur. Kaya ve arkadaşları [25], çalışmalarında kaynaklı çekme numunelerinde yüzde uzama değerlerindeki farklılıkların belirtilen bu durumdan dolayı gerçekleştiğini düşünmüşlerdir.

Ayrıca Tablo 4'te EM'ye ait maksimum çekme gerilmesi değeri $440 \leq$ MPa olarak gösterilmiştir. Kaynaklı numunelere ait çekme deneyi sonuçlarına bakıldığında maksimum çekme gerilmesi değerlerinin EM çekme gerilmesi değerinden yüksek çıktığı görülmüştür.

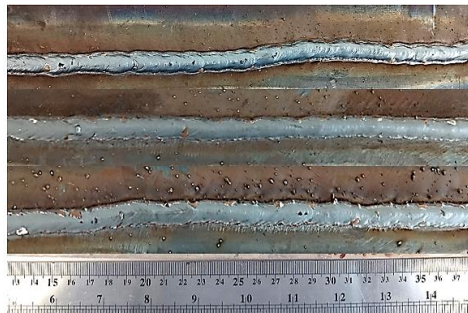
Şekil 6'da 1A, 1B ve 1C kaynaklı plakalara ait kaynak dikişleri gösterilmiştir. Şekil 7'de 2A, 2B ve 2C kaynaklı plakalara ait kaynak dikişleri gösterilmiştir. Şekil 8'de ise 3A, 3B ve 3C kaynaklı plakalara ait kaynak dikişleri gösterilmiştir.



Şekil 6. 1A, 1B ve 1C kaynaklı plakalara ait kaynak dikişleri (sırasıyla)
(Weld seams of 1A, 1B and 1C welded plates (respectively))



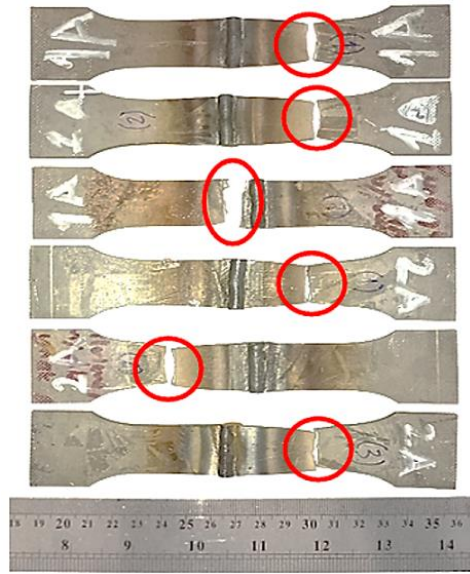
Şekil 7. 2A, 2B ve 2C kaynaklı plakalara ait kaynak dikişleri (sırasıyla)
(Weld seams of 2A, 2B and 2C welded plates (respectively))



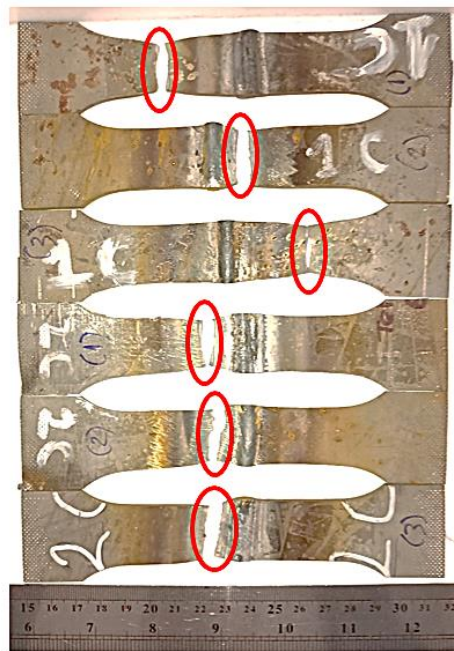
Şekil 8. 3A,3B ve 3C kaynaklı plakalara ait kaynak dikişleri (sırasıyla)
(Weld seams of 3A, 3B and 3C welded plates (respectively))

Şekil 6 ve Şekil 8 incelendiğinde kaynak dikişlerinde yukarıdan aşağıya doğru genişleme olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak geriliminin kademeli olarak artırılmasının kaynak dikişlerinin geniş ve yassı form almasına sebep olduğu anlaşılmıştır. Kaynak geriliminin düşük olduğu ilk plaka dikişlerinde dar ve dış bükey formunda dikiş görünümleri olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7'de 2A'dan 2C'ye kaynak dikişinin genişlediği görülse bile kaynak esnasında kaynak nüfuziyetinin 2C plakasında sağlanamaması kaynak dikişinin kötü görünümüne sahip olmasına sebep olmuştur. Seçilen kaynak parametre değerlerinin uyumlu olması kaynak işleminde 2C plakasından farklı olarak diğer plakalarda kaynak dikişinin sürekliliğinde sorun olmamasını sağlamıştır.

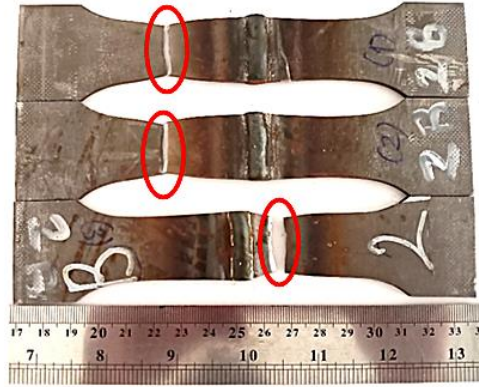
Şekil 9'da 1A ve 2A plakalarının çekme numunelerine ait kopma bölgeleri gösterilmiştir. Şekil 10'da ise 1C ve 2C plakalarının çekme numunelerine ait kopma bölgeleri gösterilmiştir. Şekil 11'de 2B plakasının çekme numunelerine ait kopma bölgeleri gösterilmiştir. Şekil 12'de ise 3A, 3B, 3C ve 1B plakalarının çekme numunelerinin kopma bölgeleri gösterilmiştir.



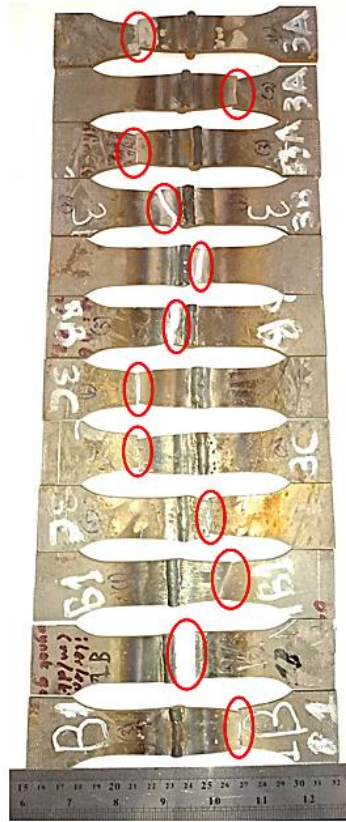
Şekil 9. 1A ve 2A plakalarının çekme numunelerine ait kopma bölgeleri
(Rupture zones of tensile samples of 1A and 2A plates)



Şekil 10. 1C ve 2C plakalarının çekme numunelerine ait kopma bölgeleri
(Rupture zones of tensile samples of 1C and 2C plates)



Şekil 11. 2B plakasının çekme numunelerine ait kopma bölgeleri
(Rupture zones of tensile samples of 2B plate)



Şekil 12. 3A, 3B, 3C ve 1B plakalarının çekme numunelerinin kopma bölgeleri
(Rupture zones of tensile samples of 3A, 3B, 3C and 1B plates)

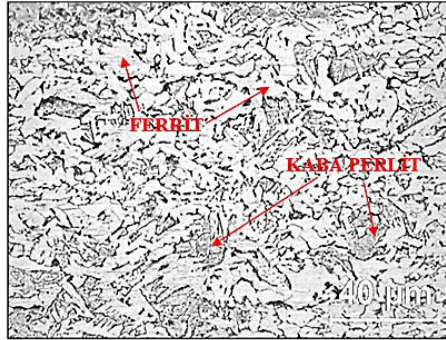
Çekme numunelerinin tümü incelendiğinde 17 çekme numunesinde EM'de kopmalar görülürken 10 çekme numunesinde ITAB'da kopmalar olduğu gözlemlenmiştir. 3B ve 2C plakalarının tümünde ITAB'da kopmalar meydana gelmiştir. Genel anlamda EM'de kopmaların oluştuğu gözlemlenebilmektedir.

ITAB'daki kopma sebepleri incelendiğinde, bu bölgede kaynak esnasında hızlı ısınma durumu oluşmaktadır ve uygulanan enerji, malzeme kalınlığı ve ön tavlama sıcaklığı gibi etmenler de hızlı soğumayı etkilemektedir. Soğuma hızı, 900 °C'nin üstündeki bölgelerde kritik soğuma hızını aştığında sert ve kırılğan yapılar oluşabilmektedir [26]. Çekme deneyi sonucunda ITAB'daki kopma sebeplerinden bir tanesi bu şekilde gerçekleşmektedir. Diğer sebep ise uygun kaynak nüfuziyetinin sağlanamamasıdır. 2C plakası numunelerindeki ITAB'da oluşan kopma durumlarına bu durumun da etki ettiği düşünülmektedir.

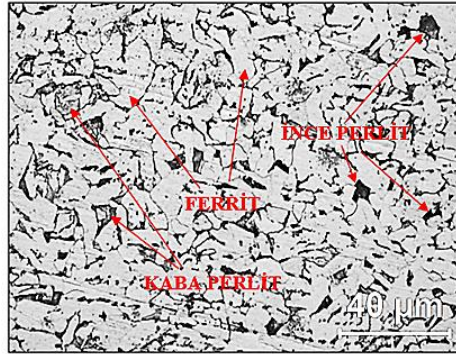
3.2. Metalografi deneyi sonuçları (Metallography test results)

2B numunesi için EM, ITAB ve KM bölgeleri için elde edilen mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 13,

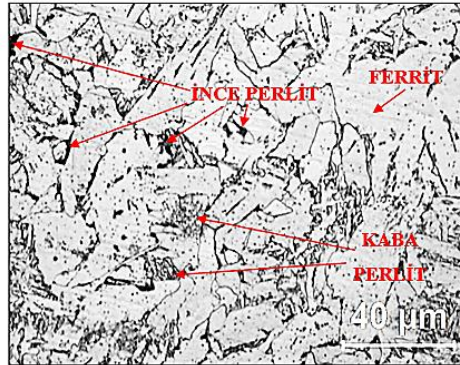
Şekil 14 ve Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 13. EM'nin mikroyapı görüntüsü
(Microstructure image of BM)



Şekil 14. ITAB'ın mikroyapı görüntüsü
(Microstructure image of HAZ)



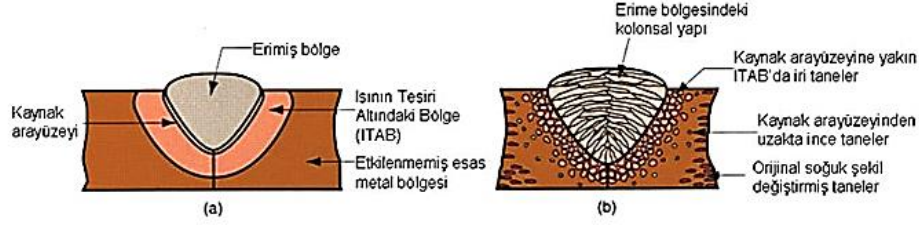
Şekil 15. KM'nin mikroyapı görüntüsü
(Microstructure image of WM)

Mikroyapı görüntülerine bakıldığında Şekil 13'te EM'de ferrit+kaba perlit faz yapı oluşumlarının olduğu görülmüştür. Şekil 14'te ise bu faz yapılarına ek olarak daha koyu görünümde ince perlit fazlarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 15'te ise Şekil 14'teki gibi benzer faz oluşumlarına rastlanmıştır. Genel anlamda EM'ye göre ITAB'da tanelerin yoğunlaştığı ve irileştiği, KM'de ise tanelerin büyüdüğü görülmektedir.

Faz yapılarının yapıya etkileri incelendiğinde, ferrit fazının çözebildiği karbon oranının düşük olması bu fazın sertliğinin de az olmasına sebep olmaktadır. Bu faz yapısı malzemelerin sünek ve işlemeye uygun olmasını sağlar aynı zamanda bu yapı manyetik özellik göstermektedir [27]. Perlit fazı sementit ve ferrit fazlarından oluşmaktadır. Sementit fazı sert ve gevrek bir fazdır. Malzemenin yapısında sementit oranının artması malzemenin sertliğini ve dayanıklılığını artırırken buna karşın sünekliğini ve tokluğunu da azaltır. Perlit fazı iki farklı türden oluşmaktadır. İnce perlitte, ferrit ve sementit fazları nispeten ince ve tekrarlı tabaka oluşumları ile faz düzenine sahip olurken, kaba perlitte daha sert ve dayanıklı bir fazdır fakat daha az sünektir. Kaba perlitte, nispeten kalın ve tekrarlı tabaka oluşumları ile faz düzeni oluşumu görülür bu fazın ince perlit fazına göre sünekliği ve tokluğu daha yüksektir [28]. EM, ITAB ve KM mikroyapı incelemelerinde görülen bu faz yapıları, kaynaklı yapıların mekanik

özelliklerini yukarıda belirtilen özellikleri kapsamında etkilemektedir.

Şekil 16'da MAG kaynak uygulamasında rastlanan, EM, ITAB ve KM bölgelerine ait tane oluşumları şematik olarak gösterilmiştir.

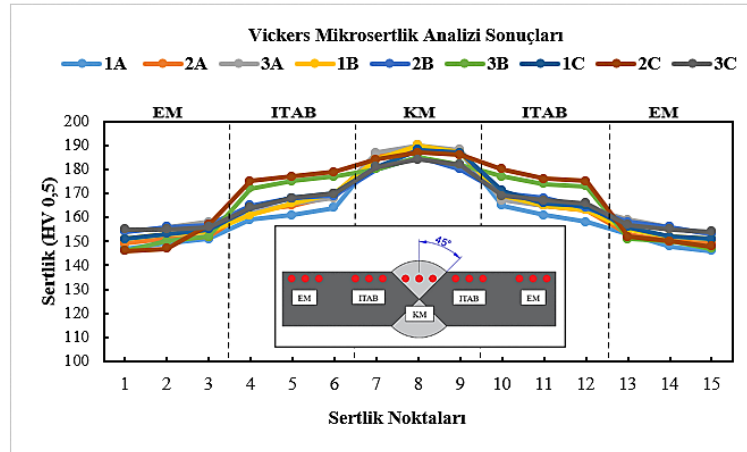


Şekil 16. EM, ITAB ve KM'ye ait şematik tane oluşumları [29]
(Schematic image of grain formations of BM, HAZ and WM)

Şekillerle belirtilen mikroyapı görüntülerine bakıldığında, EM'ye göre ITAB'da tane yapılarının büyüdüğü ve sıklaştığı, KM'de ise tanelerde kolonsal yapıda irileşme olduğu görülmüştür. Şekil 16'ya göre bu durum desteklenmiştir.

3.3. Vickers mikrosertlik deneyi sonuçları (Vickers microhardness test results)

Şekil 17'de Vickers mikrosertlik deneyi analiz sonuçları ve kaynak dikişine ait şematik görsel üzerinde sertlik noktaları bölgesel olarak şekilde gösterilmiştir. Tablo 5'te ise bölgelere göre sertlik noktalarına ait olan verilerin ortalamaları alınarak oluşturulmuş HV sertlik verileri sunulmuştur.



Şekil 17. EM, ITAB, KM bölgelerinin mikrosertlik analiz sonuçları ve kaynak dikişi sertlik noktaları
(Microhardness analysis results and weld seam hardness points of BM, HAZ, WM regions)

Tablo 5. EM, ITAB, KM bölgelerinin ortalama mikrosertlik analiz verileri (Average microhardness analysis data of BM, HAZ, WM regions)

Numuneler	EM ORT	ITAB ORT	KM ORT
1A	149,00	161,33	186,67
2A	150,67	165,67	187,00
3A	156,00	165,33	188,33
1B	152,67	165,67	187,00
2B	155,67	167,33	181,67
3B	149,33	174,67	182,33
1C	153,00	167,33	185,33
2C	150,00	177,00	185,67
3C	155,33	167,33	182,33

Şekil 17 ve Tablo 5'e göre sonuçlar incelendiğinde bölge bazlı EM'den ITAB'a, ITAB'dan KM'ye doğru sertlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Kaya [19], çalışmasında yapı çeliklerinin MAG kaynak türünde birleştirilebilirliğini incelemiş ve sertlik değerlerinin bölge bazlı EM'den ITAB'a, ITAB'dan KM'ye doğru artış gösterdiğini belirtmiştir. Bu çalışmada ise bu durumun desteklendiği görülmektedir.

Tüm plaka numunelerinde sertlik aralıkları, EM'de 146-159 HV ölçülmüştür. ITAB'da, 158-180 HV ölçülürken, KM'de ise, 180-190 HV sertlik değer aralıkları elde edilmiştir.

2C ve 3B plakalarına ait numunelerin tümünde çekme deneyi sonucunda ITAB'da kopmalar meydana geldiğinden mikrosertlik deneyi sonuç verileri arasındaki ilişki incelendiğinde, 2C ve 3B plaka numunelerinin ITAB sertliklerinin diğer numunelerin ITAB sertlik değerlerinden daha fazla çıktığı görülmüştür ve numunelerde kopmaların bu sebeple gerçekleştiği düşünülmektedir.

Ayrıca Şekil 17 incelendiğinde, tüm plaka numunelerinin sertlik değerlerinin nokta bazlı EM ve KM'de birbirine yakın değerler gösterdiği görülmektedir. ITAB'da kaynaklı birleşimler için çatlama ve kopma durumları incelendiğinde kritik bir bölge olmasından dolayı sertlik değerleri eğrisel olarak daha farklı sonuçlar göstermiştir. Kılınçer ve Kahraman [24], çalışmalarında çatlama ve kopmaların kaynaklı birleşimlerde ITAB'da gerçekleştiğini desteklemiştir.

Mikroyapı incelemesi sonucunda ince perlit fazının KM ve ITAB bölgelerinde gözükmesi sertliğin bu bölgelerde artış göstereceği sonucunu ortaya çıkarmıştır. 2B mikroyapı numunesine ait elde edilen sertlik değerlerinin KM ve ITAB'da yüksek olması bu durumu desteklemiştir.

Aynı zamanda ITAB ve KM'nin, EM'ye göre daha yüksek sertliğe sahip olması, kaynak uygulamasında ısı girdisinin etkisine göre kaynak işlemi sonrasında farklı soğuma hızlarından ortaya çıkmıştır. Kaya [19], çalışmasında bu durumu yaptığı mikrosertlik testi sonuçlarında desteklemiştir.

Çekme deneyi sonucu numuneler için elde edilen maksimum yüzde uzama verilerinin, bu çalışmada kullanılan 3 mm kalınlığındaki SPH440-OD çeliğinin yüzde uzama verisinden daha düşük geldiği bu durumun sebebinin ise, EM sertliğinin ITAB-KM sertliğinden daha az olması şeklinde daha öncesinde açıklanmıştı. Genel olarak, sertlik deneyi sonuçlarına göre EM sertliğinin, ITAB ve KM sertliklerinden daha az geldiği veriler ışığında gözlemlenilmektedir. Vickers mikrosertlik deney sonuçları belirtilen argümanın desteklenmesini sağlamıştır.

4. Sonuçlar (Results)

Bu deneysel inceleme çalışmasında, 3 mm kalınlığında SPH440-OD sıcak haddelenmiş yapısal otomotiv çeliğine, 9 farklı tel hızı-kaynak gerilimi parametre değerlerinde gazaltı ark kaynağı yöntemi olan MAG kaynağı birleştirme işlemi uygulanmıştır. Kaynak işlemi uygulanmış plakalardan deney numuneleri elde edilmiş ve bu numunelere çekme deneyi, metalografi deneyi ve Vickers mikrosertlik deneyleri uygulanmıştır. Birleşimlerin kaynak dikişleri, mikroyapı ve mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir.

- Çekme deneyleri sonuçlarına göre, en yüksek çekme gerilmesi 3C plakasına ait çekme numunesinde gerçekleşirken, en düşük çekme gerilmesi ise 2C plakasına ait çekme numunesinde olduğu görülmüştür.
- Çekme deneyleri sonuçlarına göre, en yüksek yüzde uzama 2B plakasına ait çekme numunesinde gerçekleşirken, en düşük yüzde uzama ise 2A plakasına ait çekme numunesinde olduğu görülmüştür.
- Tel hızı ve kaynak geriliminin çekme deneyi sonuçları ile ilişkisi incelendiğinde, genel anlamda ayarlanan gruplar arasında çekme gerilmesinde artışın olduğu görülürken, 2C plakasına ait gruplamalarda kaynak nüfuziyetindeki sorundan dolayı çekme gerilmesinde düşme gözlemlenmiştir.
- ITAB-KM sertliğinin EM sertliğinden yüksek olması, çekme deneyleri ile elde edilen yüzde uzama verilerinin kullanılan çelik malzemenin yüzde uzama verisinden düşük gelmesine sebep olmuştur. Vickers mikrosertlik deney sonuçlarına göre de bu durum sayısal anlamda desteklenmiştir.
- Tel hızının sabit tutulması ve kaynak geriliminin kademeli artırılması genel anlamda kaynaklı plakaların kaynak dikişlerinin geniş dikiş formu almasına neden olmuştur.
- Çekme deneylerinde numunelerde kopma bölgelerine bakıldığında genel olarak EM'de kopmaların oluştuğu görülmüştür.
- Çekme deneyi sonucunda ITAB'da kopma durumlarının hızlı ısınma ve soğumaya bağlı oluşan sert ve kırılğan yapılardan ve kaynak nüfuziyetsizliği durumlarından dolayı gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.
- Metalografi deneyi sonucuna göre bölge bazlı elde edilen faz yapılarının, EM, ITAB ve KM sertliğini etkilediği sonucuna varılmıştır. Vickers sertlik deneyi ile bu sonuç desteklenmiştir.

- [18] Ç. Ertürk and M. Elitaş, "MAG gazaltı kaynağı ile birleştirilen otomotiv çeliklerinin (SPH270-C/SPH440-OD) çekme özelliklerinin ve kaynak dikişinin incelenmesi," *2nd International Conference on Scientific and Innovative Studies*, 2024. pp. 398-402.
- [19] Y. Kaya, "S235JR ile S355JR yapı çeliklerinin özlü tel elektrotla MAG kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması," *Politeknik Dergisi*, vol. 21, no. 3, pp. 597-602, 2018. doi:10.2339/politeknik.375183
- [20] "HB212 Karışım Gazı," [Online]. Available: <https://www.elkagaz.com.tr/hb212-karisim-gazi-nedir>. [Accessed: May 03, 2024].
- [21] K. Tülbentçi, *MIG-MAG eriyen elektrod ile gazaltı kaynağı: MIG-MAG kaynak donanımı*, İstanbul, Gedik Eğitim Vakfı, 1990, pp. 1-27.
- [22] "MG 2," [Online]. Available: <https://www.magmaweld.com.tr/mg-2-uo>. [Accessed: May 03, 2024].
- [23] "ISO 4136'ya Göre Saclar ve Yassı Mamuller İçin Hazırlanan Kaynaklı Çekme Numunesi Şekli ve Ölçüleri," [Online]. Available: <https://www.mazlumboru.com.tr/upload/2017/03/kaynakli-cekme-test-numunesi-iso-4136.pdf>. [Accessed: May 04, 2024].
- [24] S. Kılınçer and N. Kahraman, "AISI 409 ve Ç1010 çeliğın östenitik elektrod kullanarak MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin araştırılması," *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, vol. 24, no. 1, pp. 23-31, 2009.
- [25] Y. Kaya, G. Çayırhan, M. Bökü and N. Kahraman, "Paslanmaz Çelik ile düşük karbonlu çelik malzemelerin MIG kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin incelenmesi," *Engineering Sciences (NWSAENS)*, *1A0453*, vol. 15, no. 2, pp. 89-99, 2020. doi:10.12739/NWSA.2020.15.2.1A0453
- [26] İ. Ertürk, T. Durukan and B. Şentürk, "Çeliklerin kaynağında ısıdan etkilenen bölgenin mikro yapı ve özelliklerinin tahmini," *X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, 2017. pp. 1-14.
- [27] "Ferrit, Östenit ve Sementit," [Online]. Available: <https://www.maktoloji.com/2018/12/ferrit-ostenit-ve-sementit.html>. [Accessed: May 19, 2024].
- [28] "Faz Dönüşümleri," [Online]. Available: <https://web.hitit.edu.tr/dosyalar/duyurular/yusufkanca@hititedutr211220180X7J9S0V.pdf>. [Accessed: May 19, 2024].
- [29] "Ergitme ve Katı Hal Kaynak Bölgesi Arasındaki Farklar," [Online]. Available: <https://xn--natralist-s9a.com/ergitme-ve-kati-hal-kaynak-bolgesi-arasindaki-farklar/> [Accessed: May 20, 2024].

This is an open access article under the CC-BY license

