

YÜKSEK MUKAVEMETLİ BALİSTİK ZİRH ÇELİKLERİNİN KAYNAKLANABİLİRLİĞİ

Ceren ÇELİK *^{ID}
Müesser GÖÇMEN **^{ID}
Ozan ÇOBAN ***^{ID}
Hakan BAYKAL ****^{ID}
Uğur GÜROL *****^{ID}
Mustafa KOÇAK *****^{ID}

Alınma: 26.07.2023; düzeltme: 23.10.2023; kabul: 21.11.2023

Öz: Savunma sanayisinin zırhlı araçları için geliştirilen düşük alaşımlı yüksek mukavemetli zırh çeliklerinin ark kaynak teknolojisi uygulamaları metalurjik bilgi ve deneyim isteyen zor uygulamalardır. Bu çeliklerin yüksek karbon eşdeğeri ve yüksek mukavemeti sağlayan martenzitik mikroyapıları nedeniyle kaynak proseslerinde güçlüklerle karşılaşmaktadır. Seçilecek kaynak telinin yüksek süneklik kapasitesi olan östenitik ya da yüksek mukavemetli olan ferritik yapıda olması kaynak metalinin sahip olacağı mekanik özellikleri ve kaynaklı bağlantının balistik özelliklerini belirlemektedir. Bu seçimler, doğası gereği kaynak parametrelerini ve proses adımlarını da farklılaştırmaktadır. Bu çalışmada; zırh çeliklerinin sınıflandırılması ile kaynak yönteminin, kaynak konfigürasyonun, kaynak metalinin, ısı girdisinin, ısıl işlem uygulamalarının ve gerçekleşen ısıl çevrimlerden dolayı elde edilen mikroyapısal değişimlerin mekanik ve balistik özelliklere etkileri tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zırh çelikleri, kaynaklanabilirlik, kaynak parametreleri, karakterizasyon

Weldability of High-Strength Ballistic Armor Steels

Abstract: The applications of arc welding technology for low-alloy high-strength armor steels developed for defense industry are challenging processes that require metallurgical knowledge and expertise. The high-carbon equivalent and martensitic microstructures, which provide high strength in these steels, lead to difficulties during the welding processes. The choice of welding wire with high ductility, such as austenitic, or high-strength ferritic structures, determines the mechanical properties of weld metal and the ballistic characteristics of the welded joint. These choices naturally lead to variations in welding parameters and process steps. In this study, the classification of armor steels, welding methods, welding configurations, weld metal properties, heat input, heat treatment, and the effects of microstructural changes resulting from heat cycles on mechanical and ballistic properties have been discussed.

Keywords: Armor steels, weldability, welding parameters, characterization

* Makine Mühendisliği Bölümü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul Gedik Üniversitesi, Türkiye

** Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul Gedik Üniversitesi, Türkiye

*** Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü, Gedik Meslek Yüksekokulu, İstanbul Gedik Üniversitesi, Türkiye

**** Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Gedik Kaynak A.Ş., Türkiye

***** Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Gedik Üniversitesi, Türkiye

***** Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Gedik Üniversitesi, Türkiye

1. GİRİŞ

İnsanlar, tarih boyunca saldırılara karşı kendilerini korumak için taş, sopa, kemik ve deri gibi organik maddeleri kullanırken teknolojinin gelişmesiyle birlikte çelik, bronz ve seramik gibi farklı zırh/koruma malzemeleri kullanmaya başlamışlardır. Buna paralel olarak zamanla ateşli silah kullanımı yaygınlaşmış olup, gelecek tehlikeleri engellemek adına daha nitelikli koruma sağlamak için zırh teknolojilerini geliştirmeye yönelmişlerdir. Günümüzde patlayıcı ve ateşli silahlara karşı savunma amacına yönelik sivil/askeri platformlarda zırh koruyucusu olarak seramikler, cam elyaf takviyeli çeşitli kompozitler, çelik, alüminyum ve titanyum alaşımları kullanılmaktadır (Camcı, 2020; Yanen ve Solmaz, 2016; Aksöz ve diğ., 2017). İlâveten, balistik tehditlere karşı savunma sistemlerinde hafif zırh kullanımı, enerji tasarrufu ile hareketliliğin artırılması açısından oldukça önemlidir. Bununla birlikte nispeten daha ucuza üretilen, kaynaklanabilme kabiliyeti yüksek metallerin kullanımı ön plana çıkmaktadır (Übeyli ve diğ., 2007).

Zırh çelikleri, balistik etkilere karşı güvenlik sağlaması amacıyla özel olarak geliştirilmiş çelik sınıfıdır. Balistik ve patlayıcı tehditleri azaltmak için genel olarak yüksek dayanım, yüksek sertlik ve orta derecede süneklik ile karakterize edilirler. Düşük alaşım elementi içeriği bu çeliklerin yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler (high strength low alloy steels, HSLA) sınıfında yer almalarını sağlamaktadır. Tüm bu özellikleri nedeniyle genel olarak güvenlik kabinleri, güvenli insan ve para taşımacılığı için araçlar, muharebe tankları, zırhlı araçlar gibi sivil ve askeri yapıların üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Kara ve Korkut, 2012; Popławski ve diğ., 2020; Saxena ve diğ., 2018). Bu tarz uygulamalarda kullanılmalarının bir diğer sebebi de üretim kolaylığı ve temin edilebilirlikleridir (Jena ve diğ., 2016; Pramanick ve diğ., 2017). Fakat, zırhlı araçların karmaşık yapılarından dolayı yekpare bir şekilde üretilmemesi nedeniyle bu araçların üretiminde kaynak yöntemleri kullanılması zaruri olmaktadır (Saxena ve diğ., 2018).

Genel itibarıyla bir malzemenin hatasız ve çatlama riski olmayacak bir şekilde ark kaynağı yapılabilmesi için kullanılan malzemenin temel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Çeliklerin kaynak kabiliyetine etki eden faktörler, malzemenin kimyasal bileşimi ve buna bağlı olarak karbon eşdeğeri (C_{eq}), metalurjik ve fiziksel özellikler, kullanılan kaynak yöntemi, ilave teller ve türü, kaynak geometrisi, ön ısı, ısı girdisi ve kaynak sonrası (post weld heat treatment, PWHT) ısıtma işlemleridir (Vural ve diğ., 2003). Bu çalışmada, öncelikle zırh çelikleri sınıflandırılmış olup zırh çeliklerinin kaynak proseslerine etki eden parametrelere bağlı mikroyapı ve mekanik özellik ilişkileri kurularak literatürden örnekler incelenmiştir. Mekanik testlerin yanı sıra balistik testlerin sonuçlarına da yer verilerek farklı amaçlara yönelik kullanılacak olan zırhlı araçların kaynak proseslerine yönelik bilgi derlemesi yapılmıştır.

2. ZIRH ÇELİKLERİ VE SINIFLANDIRILMASI

Dünyada zırh çelikleri genellikle MIL-A-46100 ve MIL-A-12560 standartlarına uygun olacak şekilde üretilmektedir (Cimpoeru ve diğ., 2016). Amerika Birleşik Devletleri askeri standartlarına göre MIL-A-12560 standardı homojen haddelenmiş zırh çeliklerinin (rolled homogeneous armor steel, RHA), MIL-A-46100 standardı ise yüksek sertlikteki zırh çeliklerinin standardı olarak tanımlanmaktadır. Zırh çelikleri uygulanan ısıtma işlem sıcaklıklarına göre sınıf 1 ve sınıf 2 olarak adlandırılmaktadır. Sınıf 1 çelikler suda/yağda sertleştirilip temperlenirken, sınıf 2 çelikler havada sertleştirilip temperlenmektedir. Ayrıca sınıf 1 çeliklerin karbon eşdeğeri maksimum C_{eq} 0,80 iken sınıf 2 çelikler için bir C_{eq} sınırlaması yoktur (MIL-DTL-46100E, 2019). Zırhlı araçların üretiminde genellikle sınıf 1 çelikler kullanılır. Sınıf 1 ve sınıf 2 olarak üretilen zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri benzerdir. Ancak parçalanma ve mekanik şoka dayanımın artırılması amacıyla sınıf 2 çeliklerine daha yüksek sıcaklıklarda ısıtma işlem yapılmaktadır (Şahintürk ve diğ., 2005; Karagöz ve Atapek, 2007). Her iki sınıfa ait zırh

çeliklerinin mekanik özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur (Soykan ve diğ., 2005). Kaynak parametreleri ve kaynak malzemesinin doğru kombinasyonunu seçme zırhlı araçların saha performansında çok önemlidir. Sınıf 1 zırh çelikleri bir merminin nüfuz etmesine dayanacak şekilde tasarlanırken, sınıf 2 zırh çelikleri patlamalara dayanacak şekilde tasarlanmıştır (Akça ve Karaaslan, 2008).

Tablo 1. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri (Soykan ve diğ., 2005)

Zırh Çeliği		Kalınlık (mm)	Sertlik (HB)	Min. Darbe Enerjisi (J) *	Akma Dayanım (N/mm ²) (min.)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%) (min.)
Kalite	Sınıf						
MIL-A-12560	1	3 < 20	380-430	18	950	1100-1400	9
	2	40-80	300-350	30	850	900-1200	11
MIL-A-46100	1	3-150	280-330	40	800	850-1150	12
	2	3-50	480-540	16	1200	1400-1800	8
			420-480	27	1100	1200-1600	9

*Darbe testleri -40 °C gerçekleştirilmiştir.

Zırh çeliklerinin üretim basamakları sırayla; ergitme, alaşımlama, sürekli döküm, haddeleme ve ısıtma işlem şeklinde ilerlemektedir (Soykan ve diğ., 2005). Isıtma işlem ve kimyasal bileşim, bu çeliklerde orta derecede tokluk ile yüksek mukavemet özelliğini sağlayan temel parametrelerdir. Bu değişkenler, çeliğin mekanik özelliklerini değiştiren mikroyapıyı doğrudan etkiler (Naveen Kumar ve diğ., 2022a). Amerika Birleşik Devletleri askeri standartlarına göre üretilen zırh çeliklerinin kimyasal bileşimi Tablo 2’de verilmiştir. Zırh çelikleri düşük miktarda karbon içermektedir ve bu da kaynaklanabilirliği artırması açısından oldukça önemlidir. Bu çeliklerin başlıca alaşım elementleri Cr, Mn, Mo, Ni ‘dir ve her bir alaşım elementi çeliğe farklı özellikler katmaktadır (Soykan ve diğ., 2005).

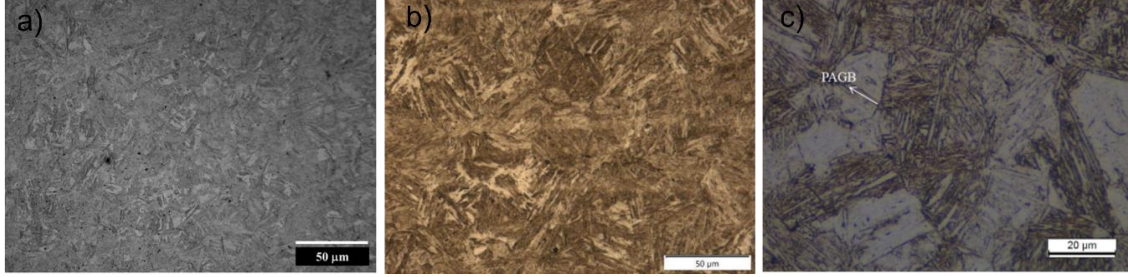
Tablo 2. Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri (Soykan ve diğ., 2005)

	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	P	S
MIL-A-12560	0,18-0,28	1,10-1,60	1,20-1,60	2,00-3,40	0,40-0,55	0,20-0,40	Max. 0,015	Max. 0,015
MILA-46100	0,22-0,32	0,70-1,00	0,40-0,70	0,80-1,30	0,50-0,65	0,35-0,50	Max. 0,010	Max. 0,010

Bu alaşım elementlerinden krom grafitleşme eğilimini en aza indirir. Nikel östenit bölgesini genişletir, A₃ ve A₁ sıcaklıklarını daha düşük sıcaklıklara indirir ve bu durum tepe sıcaklığını daha düşük sıcaklıklara denk gelen bölgede dahi martenzitik yapı oluşumunu mümkün kılar. Nikel içeriğinin artması temperleme sonrası mikroyapıda karbür konsantrasyonu ve iğnemsiz martenzit oluşumunu azaltmaktadır. Karbür fazlarının östenitik fazda çözünürlüğü yüksektir. Ni, A₁ sıcaklığını düşürerek karbür fazlarının çökmeye başlamasını geciktirir ve bu durum karbür fazı hacimsel fraksiyonunda düşüşe sebep olur. Silisyum temperlenmiş martenzit gevrekliğini geciktirici etkiye sahiptir, mangan da nikel gibi östenit fazının kararlılığını artırarak (yani A₃ ve A₁ hattını düşürerek) martenzit oluşumunu tetikler ve aynı zamanda kritik soğuma hızını artırarak (TTT diyagramında perlitik dönüşüm hattını daha yüksek kritik hız sağlayacak şekilde öteleyerek) sertleşebilirlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Kolla ve diğ., 2011; Gülgen, 2008). Ayrıca nikel ve mangan martenzit başlangıç sıcaklığını (martensite start, M_s) en fazla düşüren elementlerdir (Mateo ve diğ., 2003; Pashangeh ve diğ., 2019).

Üretim esnasında sertleştirme ve temperleme aşamalarından geçen bu çelikler martenzitik bir mikroyapıya sahiptirler (Kavuncu, 2019). Uygulanan ısıtma işlemi oluşan martenzitik yapı zırh çeliklerine yüksek mukavemet ve tokluk sağlamaktadır (Vimal Kumar ve diğ., 2022). Şekil 1’de farklı firmaların ürettiği (Armor-Ramor-Protection) 500 kalite zırh çeliğinin ana malzeme

mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Bu çeliklerin mikroyapısında temperlenmiş martenzit ve beraberinde birincil östenit tane sınırları (prior austenite grain boundary, PAGB) dahilinde bir miktar bulunan kalıntı östenit yapısı görülmektedir.



Şekil 1:

Zırh Çeliği Ana Metal Mikroyapıları a. Armox 500T (D. Janickı., 2014) b. Ramor 500 (Skowronska ve diğ.,2017) c. Protection 500 (Gürol ve diğ., 2022)

Zırh çeliklerinin patlayıcı ve delici tehditlere karşı dayanıklı olmaları önemlidir. Bu özelliği sağlamak için, yüksek mukavemet ve sertlik değerleri arzu edilir. 600 HB'den yüksek sertlik değerleri çeliğin kırılma özelliğine neden olabilir, bu da zırh çeliğinin darbe karşısında kırılma davranış sergilemesine yol açabilir. Bu çeliklerin yüksek mukavemet ve yüksek sertlik nedeniyle kaynaklanması zordur. İlave olarak, kaynak sırasında hidrojen çatlakları ve ısıdan etkilenen bölgenin yumuşaması gibi sorunlarla da karşılaşmaktadır (Gür ve diğ., 2016; V. Balaguru ve diğ., 2020). Sertlik açısından, zırh çeliklerinden yapılmış haddelenmiş ürünler üç gruba ayrılabilir: 210-470 HB sertliğe sahip RHA çelikleri, 477-534 HB sertliğe sahip olan yüksek sertlikte zırh çelikleri (High Hardness Armor Steel, HHA) ve sertliği en az 570 HB olan ultra yüksek sertlikte zırh çelikleri (Ultra High Hardness Armor steel, UHH)" (Kostin ve diğ., 2021).

Son zamanlarda, savunma sanayisi için üretilen zırhlı araçlarda ağırlık azaltma yoluyla araçların manevra, hız ve yakıt performansının artırılması Ar-Ge birimleri tarafından önceliklendirilmiş alanlar olarak görülmektedir. Araçlarda ağırlık azaltılması sağlanarak küresel ısınmayı azaltmak ve çevre düzenlemelerine uymak firmaların önemli hedeflerinden birisi haline gelmiştir. Bu sebeple, farklı çelik üreticileri, rekabetin artması nedeniyle araçlardaki toplam ürün ağırlığını azaltmak için daha hafif, fakat daha yüksek mukavemetli balistik zırh çeliklerinin geliştirilmesine odaklanmıştır (Jeong ve diğ., 2019). Dünyada savunma sanayiini temsil eden ülkelerin başında İsveç, Avustralya, ABD ve Almanya gelmektedir. MIL-46100 standardına uygun olarak alıştırılmış ve ısı işlem süreçlerine tabi tutulmuş sertlik değerleri 500 HB olan Armox-500 (İsveç), Ramor-500 (Finlandiya), Quardion-500 (Belçika), Armstal-500 (Polonya) ve MARS-270 (Fransa) gibi Dünya çapında farklı firmalarda ve farklı kalitelere zırh çelikleri üretilmektedir (Jeong ve diğ., 2019). Ülkemizde ise ilk kez Manisa'da kurulan Miilux-Oy tesislerinde zırh çelikleri farklı özelliklerde ve kalınlıklarda haddelenmiş levha şeklinde yerli olarak üretilmeye başlanmıştır.

3. ZIRH ÇELİKLERİNİN KAYNAK KABİLİYETİ

Zırh çelikleri balistik korumaya yönelik üretilmiş çelik sınıfı olup (Fras ve diğ., 2018) zırhlı araçların üretiminde kullanılmaktadır (Slyvinsky ve diğ., 2019; Cabrilo ve diğ., 2016; Kumar diğ., 2022; Janicki, 2014). Yüksek sertlik ve tokluk değerlerine sahip olduğundan mükemmel mukavemet-ağırlık oranları ile bilinmektedir (Naveen Kumar ve diğ. 2022a). Askeri araçlar karmaşık yapıları nedeniyle çok sayıda bağlantı noktasına sahiptir bu sebepten yekpare üretimi mümkün değildir. Bu tür araçların üretiminde kaynak en yaygın birleştirme işlemidir (Akça, 2008). Kaynak bağlantılı yapıda olması ile de diğer bağlantı türlerine göre araç ağırlığı azalır.

Üretilen zırhlı araçlarda, boyut ve ağırlığın azaltılması önemli bir konudur (Vimal Kumar ve diğ., 2022).

Kaynak işlemi sırasında ısıl çevrimlerin farklılığı sonucunda kaynak metalinden itibaren birbirinden farklı mekanik özelliklere sahip bölgeler oluşmaktadır. Bu bölgeler ısı tesiri altında kalan bölge adı altında toplanır (Anık ve diğ., 1991). Oluşan bu bölgelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri ana malzemeden farklıdır ve daha düşük mukavemet sergilerler. Bu nedenle kaynak metali ve ısı tesiri altında kalan bölgenin detaylı olarak incelenmesi ve buna bağlı olarak da parametre optimizasyonu yapılması gerekmektedir. Askeri operasyonlar sırasında, çakıllı yollarda sürüş sonucunda zırhlı araçlar dinamik yüklemeye maruz kalmaktadır. Optimizasyon yapılmadığı takdirde, zırhlı araçlarda dinamik yüklerin bir sonucu olarak, füzyon hattında oluşan yorulma çatlakları bu bölge boyunca çok kolay bir şekilde yayılabilir ve bu da ciddi hasarlara yol açabilir. Bu yüzden uygun kaynak sarf malzemelerinin ve parametrelerinin belirlenmesi önem arz etmektedir (Alkemade ve diğ., 1996).

Bu çeliklerin kaynak prosesi sonucunda elde edilecek kaynaklı yapının mekanik özelliklerini belirleyen parametreler genel olarak, kullanılan kaynak yöntemi, yonteme bağlı olarak kullanılan koruyucu atmosferin (toz, gaz, vb.) türü, bileşimi, debisi; kullanılıyorsa ilave kaynak metalinin türü, mekanik özellikleri, yapısı, bileşimi, çapı; kaynak parametreleri (akım, voltaj, kaynak hızı, torç açısı, vb.) ve kaynak öncesi ve sonrası ısıl işlem şeklinde özetlenebilir. Üstelik kaynaklanacak plakanın kalınlığı da ısı girdisi ve soğuma hızına etki ettiği için etkin bir parametredir. Tüm bu bileşenler özelinde optimizasyonun sağlanması gereklidir (Aytaç ve diğ., 2018).

Zırh çeliklerinin kaynaklı imalatlarda kullanımını zorlaştıran ya da riskli hale getiren özellik bu çeliğin kimyasal analizine göre hesaplanan karbon eşdeğerinin yüksek olmasıdır (Krishna Murthy ve diğ., 2014; Neuvonen ve diğ., 2021). Çünkü çelik içerisinde bulunan alaşım elementleri, kaynaklanabilirliği önemli ölçüde etkilemektedir. Karbon eşdeğeri eşitlik 1' de belirtilen Uluslararası Kaynak Enstitüsü (International Institute of Welding, IIW) kurallarına göre hesaplanmaktadır.

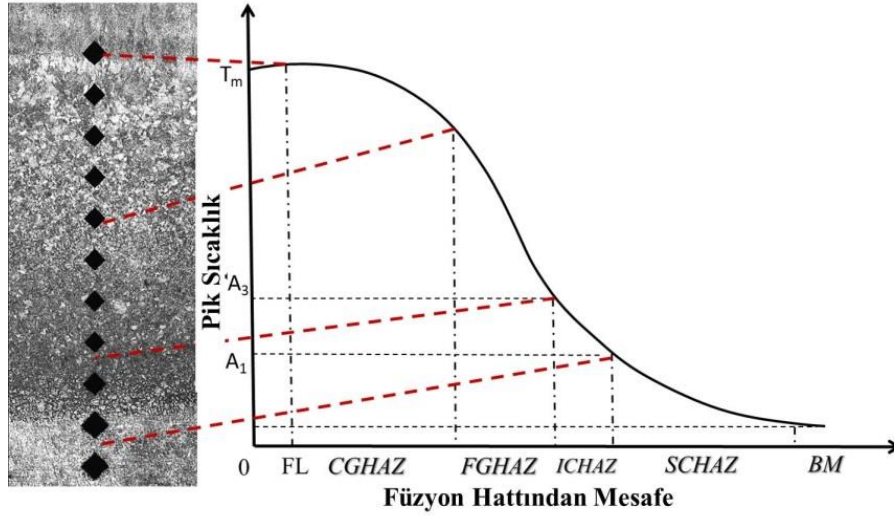
$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1)$$

Karbon eşdeğeri, kaynağın soğuma sırasında iç yapıda meydana gelen martenzit fazı ve buna bağlı olarak gevrek kırılmaya maruz kalma eğiliminin bir ölçüsü olarak tanımlanır (Alhassan ve diğ., 2021). Darbe dayanımı ve kaynaklanabilirlik açısından daha düşük seviyelerdeki karbon miktarı avantaj sunmaktadır. Karbon miktarı arttıkça kaynaklanabilirlik özelliği az olmakla birlikte kaynak bölgesinde çatlak oluşum riski artmaktadır. Çeliklerinin martenzitik iç yapısı kaynaklı bağlantı bölgelerinde soğuk çatlak hasarına neden olmaktadır (Pokhodnya ve Shvachko, 1996). Karbon eşdeğerine bağlı olarak ön ısıtma yapılması, kaynak sonrası soğuma hızını kontrol altında tutabilmek ve hidrojenin giderilmesi soğuk çatlak riskini azaltmaya olanak sağlamaktadır (Durkaya ve diğ., 2016).

3.1 Zırh Çeliklerinin Kaynaklı Bağlantılarının Karakterizasyonu

Kaynaklı bağlantılar genellikle ana malzeme (base metal, BM), kaynak metali (weld metal, WM) ve ısıdan tesiri altında kalan bölge (heat affected zone, HAZ) olarak üç farklı bölge ile karakterize edilmektedir (Zerbst ve diğ., 2014). Kaynaklı plakalarda ısı tesiri altında kalan bölgenin özellikleri, iri taneli bölge, ince taneli bölge gibi her bölgeye karşılık gelen pik sıcaklıklar ve soğuma hızları, ısı girdisi ve plaka kalınlığı ile doğrudan bağlantılıdır. Isı girdisi farklılaştıkça birim zamanda soğuma hızı ve sıcaklık da değişmektedir. Bu kapsamda mikrosertlik değerleri de mikroyapısal değişikliklere bağlı olarak değişmektedir. Çoban ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada HAZ boyunca mesafeye bağlı pik sıcaklık değişimi ve bu değişime bağlı mikrosertlik ölçümleri şematik olarak Şekil 2 'de verilmiştir. Buna göre füzyon

hattı (fusion line, FL) sıcaklıklarının altında yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgede iri taneli ısıdan etkilenmiş bölge, (coarse grained heat affected zone, CGHAZ), daha düşük ancak A3 sıcaklıklarının üzerine tekabül eden bölgede normalizasyon tavı etkisiyle ince taneli ısıdan etkilenmiş bölge (fine grained heat affected zone, FGHAZ) oluşmaktadır. Tepe (pik) sıcaklıklarının kısmi dönüşüm bölgesindeki sıcaklıklara tekabül ettiği bölgelerde, yani ara kritik ısıdan etkilenmiş bölgede (inter-critical heat affected zone, ICHAZ) ise şekilde görüldüğü gibi iz çapının artmasından anlaşılacağı üzere sertlik önemli ölçüde düşmektedir. Östenitik dönüşüm başlangıç sıcaklığı olan A₁ hattının altında ise alt kritik ısıdan etkilenmiş bölge (sub-critical heat affected zone, SCHAZ) yine sertliklerin temperleme etkisinden dolayı düşük olduğu, ana metale doğru arttığı bölgelerdir.



Şekil 2.

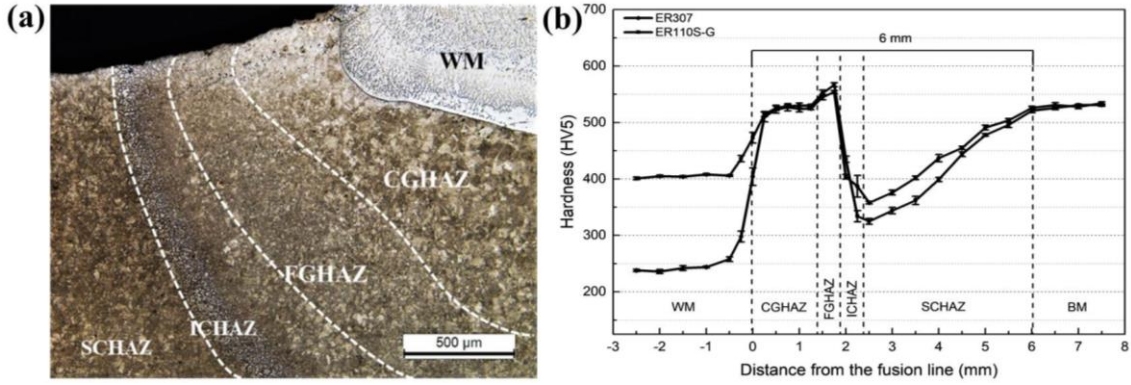
HAZ boyunca mesafeyle pik sıcaklık değişiminin mikrosertlik noktaları üzerine etkisinin şematik gösterimi (Çoban ve diğ., 2021)

Balistik zırh çeliklerinin kaynaklı imalatında genellikle östenitik, ferritik ve dubleks yapıya sahip kaynak telleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda Tablo 3'te farklı ilave metal, kaynak yöntemi ile yapılmış olan çalışmalar incelenmiş olup ana metal, kaynak metali ve HAZ bölgesinde meydana gelen sertlik değişimlerinden elde edilen veriler derlenmiştir. Ana metalden başlayıp alt kritik ısı tesiri altında kalan bölgeye kadar değişen farklı soğuma hızı ve ısı çevrimleri sonucu sertlik değerlerinin de değiştiği net bir şekilde görülmektedir. Aynı zamanda kullanılan kaynak metali ve yöntem değişikçe de bu değerlerin değiştiği gözlenmiştir.

Tablo 3. Kullanılan ilave tel ve kaynak yöntemlerine göre sertlik test sonuçları (a (Gürol ve diğ., 2022), b (Cabrilo ve diğ., 2019), c (Kostak, 2021), d (Naveen Kumar ve diğ. 2022b), e (Serrano ve diğ., 2022))

Kaynak Metali Türü	Kaynak Plakası	Kaynak Yöntemi	Sertlik Test Sonuçları (HV)						Referans	
			Ana Metal (BM)	Kaynak Metali (WM)	CG HAZ	FG HAZ	IC HAZ	SC HAZ		
Östenitik	ER307	Protection 500	GMAW	510	250	520	540	350	Min.325	a
	ER307	Protac 500	GMAW	509	190	521	378	-	-	b
	ER307	Armox 500T	GMAW	492	213	491	344	-	-	c
Ferritik	ER110S-G	Protection 500	GMAW	510	400	530	560	390	Min.325	a
	ER120S-G	Armox 500T	GMAW	485	415	477	346	-	-	c
	LHF	Armox 600T	SMAW	596	341	532	712	564	-	d
Ni-Alaşımlı	SDSS AWS E2594	Armox 600T	SMAW	598	312	741	796	781	-	d
	ER2209	Armox 500T	GMAW	489	273	490	344	-	-	c
	AWS ERNiFeCr-2	Armox 500	GMAW	425	225	228	248,4	-	-	e

Isıdan etkilenen bölgenin genişliği ve mikro yapısı; kaynak işlemi sonrası soğutma hızının ve ana malzemenin kimyasal bileşiminin bir fonksiyonudur (Cabrilo ve diğ., 2018a). Bu bölgenin metalurjik özellikleri kaynak bağlantılarının sertlik seviyesini ve balistik performansını etkiler. MIL-STAN-1185 (2008) standardına göre ısı girdisinin kontrolü, kaynak merkez hattından ölçüldüğünde, ısıdan etkilenen bölgenin genişliğinin 15,9 mm içinde kalmasına izin vererek sağlanmalıdır. Isıl çevrimlerin farklılığı sonucunda kaynak bağlantı bölgelerinde oluşan mikroyapılar Gürol ve ark. tarafından Şekil 3-a ile gösterilmiştir. Farklı ısıl çevrimler sonucunda kaynak metalinden ya da füzyon hattından itibaren sırasıyla CGHAZ, FGHAZ, ICHAZ ve SCHAZ bölgeleri oluşmuştur. Füzyon hattı sınırında yüksek sıcaklıklardan soğuma sonucunda iri taneli bölgenin (CGHAZ) oluştuğu, A_3 hattının biraz üstüne denk gelen sıcaklıklardan hızlı soğuma sonucunda ise ince taneli bölge (FGHAZ) raporlanmıştır. İlaveten A_3 ile A_1 hattı arasına denk gelen sıcaklıklarda ise kısmi dönüşümlerin gerçekleştiği ve en düşük sertlik değerlerinin olduğu inter-kritik bölge (ICHAZ) bölgenin olduğu belirtilmiştir. A_1 hattının altına denk gelen bölgelerde ise faz dönüşümü gerçekleşmezken temperleme etkisi gerçekleşmektedir ve SCHAZ (alt kritik bölge) olarak isimlendirilmektedir (Pang, 1993; Mikko, 2014). HAZ boyunca mikrosertlik dağılımı Şekil 3-b’de verilmiştir.



Şekil 3.

a. Isı tesiri altındaki bölgelerin mikroyapı görüntüsü (1.2 kJ/mm, 50X büyütme), b. kaynak metali türüne bağlı olarak HAZ boyunca mikrosertlik değişimi (Gürol ve diğ., 2022)

3.2 Kaynak Yöntemi Etkisi

Zırh çeliğinin kaynak prosesinde kullanılması gereken yöntemin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilmiş çalışmalar sonucunda en etkin yöntemin gaz altı; genel anlamda literatürde ve endüstride metal inert gaz (Metal Inert Gas, MIG) olarak isimlendirilen yöntem olduğu belirlenmiştir. Ancak gelişen teknoloji ile farklı yöntemlerin de etkileri araştırılmaya devam edilmektedir. Gaz metal ark kaynağı (Gas Metal Arc Welding, GMAW), korumalı metal ark kaynağı işlemleri (Shielded Metal Arc Welding, SMAW), özlü telle ark kaynağı (Flux-cored Arc Welding, FCAW) asker taşıyan araçların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. SMAW yöntemi, FCAW yöntemine kıyasla daha küçük birikme hızına sahiptir. Aynı zamanda kaynak havuzuna sürekli olarak tel beslenmesinin bir sonucu olarak, GMAW işlemi SMAW'a kıyasla daha üstün üretkenliğe sahiptir. HHA çeliğinin kaynağı sırasında meydana gelen HAZ yumuşaması ve HAZ'daki yumuşama derecesi, kaynak işlemine bağlı olan kaynak termal döngüsünün bir fonksiyonudur (Kuzmikova, 2013; Magudeeswaran ve diğ., 2008). Farklı kaynak yöntemlerinin HAZ bölgesindeki bu etkilerini gösteren çalışmalar bu bölümde özetlenmiştir.

Günen ve diğ. (2019) tarafından Ramor 500 zırh çeliğine 3 farklı yöntemle kaynak prosesi uygulanmıştır. MIG kaynağı, soğuk metal transfer ark kaynağı (cold metal transfer arc welding, CMT) ve hibrit plazma ark kaynağı (Hybrid Plasma Arc Welding, HPAW) yöntemleri

mikroyapı ve mekanik özellikler açısından kıyaslanmıştır (Tablo 4). Tüm yöntemlerde kaynak metali olarak yüksek tokluk değerlerine sahip östenitik 307 Si kullanılmıştır. Kaynak parametreleri her bir yöntem için optimize edilerek belirlenmiştir. Elde edilen mekanik test sonuçları Tablo 4'te özetlenmiştir. Buna göre, çekme dayanımlarının ana malzeme çekme dayanımlarına göre oranları CMT, GMAW ve HPAW için sırasıyla %45, %50 ve %65 olarak tespit edilmiştir. Kaynak metalinden çentik açılarak alınan numunelere gerçekleştirilen darbe testi sonuçlarına göre, darbe dayanımı anlamında en iyi sonuç CMT yönteminde elde edilmiştir. Kırılma yüzeyleri elektron mikroskobu ile incelenmiş ve GMAW ve HPAW yöntemlerinde gevrek kırılma karakteristik özelliği olan klivaj düzlemleri görülürken CMT yönteminde sünek kırılma göstergesi olan çukurcuklar (dimples) tespit edilmiştir. CMT yöntemiyle elde edilen kaynaklı yapı çekme testinde kaynak metalinin füzyon hattına yakın bölgesinden kırılmıştır. CMT yönteminde kaynak metali ile ana metalin iyi bir karışım sağlamadığı tespit edilmiştir. CMT'de görece daha düşük ısı girdisinin kaynak metalinden ana malzemeye doğru düşük nikel difüzyonu sonucunda kaynak metalinin östenit kararlılığının yüksek olması, diğer yöntemlerde ise nikel difüzyonunun daha yüksek ısı girdisinden dolayı fazla olması sonucunda kaynak metalinde soğuma sonucunda martenzit oluşumu raporlanmıştır ve spektral analiz ile gösterilmiştir. Bunun da kaynak metalinde GMAW ve HPAW yöntemlerinde daha yüksek sertlik eldesi ve kaynaklı yapıda daha yüksek mukavemet eldesini sağladığı raporlanmıştır. HAZ sertliğinin CMT'de yüksek olmasının sebebi ise düşük ısı girdisi nedeniyle temperlenmemiş martenzit ve daha düşük tane boyutu oluşumu olduğu gösterilmiştir.

Tablo 4. Farklı yöntemlerle elde edilmiş Ramor 500 kaynaklı yapının mekanik özellikleri (Güven ve diğ., 2019)

	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama %	Kırılma Bölgesi	Sertlik (HV10)		Çentik Darbe Dayanımı (J)	
				Kaynak Metali	HAZ	-50 °C	20 °C
Ana Malzeme	1780	6,4	-	-	-	17,3	22
GMAW	892	3,1	HAZ	478	433	10,1	19,4
CMT	718	4,4	Kaynak Metali	376	446	30,1	43,2
HPAW	1150	5,2	HAZ	454	422	15,1	20,8

Doğrugiden (2019) tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tez çalışmasında Protection 500 zırh çeliğine MIG, MAG ve TIG kaynak yöntemleri uygulanmış ve sertlik, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı özellikleri kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5'te gösterilmiştir. En yüksek eğilme dayanımı MIG kaynak yönteminde elde edilirken en yüksek darbe dayanımı TIG kaynak yönteminde elde edilmiştir. Kaynak metalinde en yüksek sertlik değeri ise MIG yönteminde elde edilmiştir ancak kullanılan kaynak metalinin sertliğinin yüksek olması burada etkindir. Aynı kaynak metali kullanılan MAG ve TIG yöntemleri kıyaslandığında kaynak metali sertliklerinin aynı olduğu, HAZ sertliklerinin yakın olduğu ancak TIG'de sertlik dağılımının daha homojen olduğu tespit edilmiştir. Yani aşırı gevrek veya aşırı düşük sertlik oluşan bölgeler TIG yönteminde çok daha azdır. Ek olarak darbe dayanımı ve kırılma tokluğunda en iyi sonuçlar TIG yönteminde elde edilmiştir. Ancak burada da MIG yönteminin kıyas dışı bırakılması gerekmektedir. Çünkü kullanılan kaynak metalinin darbe dayanımı MIG yönteminde daha düşüktür. Daha yüksek akma dayanımına sahip kaynak metali kullanılmasıyla eğilme dayanımı anlamında en iyi sonucun MIG yöntem ile elde edilmesini sağlamaktadır. Bu da MIG yönteminin üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

Tablo 5. Farklı yöntemlerle elde edilmiş Protection 500 kaynaklı yapının mekanik özellikleri (Doğrudan, 2019)

Ana Malzeme	Kaynak Metali Türü %Cr-%Ni-%Mn	Kaynak Metali Akma Dayanımı (MPa)	Kaynak Metali Darbe Dayanımı (J)	3 nokta Eğme Testi Sonuçları		Sertlik (HV _{0.5})			Çentik Darbe Dayanımı (J)	Darbe Tokluğu (kJ/m ²)
				σ_{IM} (MPa)	ϵ_{IM} (%)	Kaynak Metali	HAZ Max	HAZ Min		
Ana Malzeme				4155	2,59	530			64	799
MIG	AS-P 312/29-9-0.8	600	50	1745	3,18	395	585	440	53	668
MAG	307 Si / 19-9-7	420	80	1723	4,92	330	575	400	87	1083
TIG				1452	5,40	330	450	400	107	1343

Zırh çeliklerinin kaynak proseslerinde lazer kaynak yöntemleri de kullanılabilir. Özellikle daha dar bir kaynak dikişi ve daha yüksek penetrasyon derinliği gibi avantajlar sunan bu yöntemin zırh çeliklerinde uygulanması üzerine çalışmalar mevcuttur. Janicki (2014) tarafından Armox 500T zırh çeliğine lazer disk kaynağı ile argon korumalı şekilde farklı ısı girdileri ile başarılı kaynak prosesi gerçekleştirilmiştir. Askeri standartlara göre 15,9 mm mesafede sertlik değerlerinin ana malzemenin beklenen sertlik değerine ulaşması gerekliliğinin 0,06 kJ/mm ısı girdisi (J1 numunesi) ile 3,2 mm, 0,12 kJ/mm ısı girdisi (J2 numunesi) ile 6,4 mm'de sağlandığı gösterilmiştir. Mekanik test sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Diğer yöntemlerle kıyaslandığında kaynak metali kullanılmadığı için özellikle kaynak metali sertliklerinin oldukça yüksek olduğu, ana metal sertliklerine yakın olduğu görülmektedir. Maksimum HAZ sertlikleri incelendiğinde aşırı sertlik yükselmesi görülmemiştir. Dolayısıyla HAZ'da gevrek yapı oluşmamaktadır bu da balistik performans açısından avantaj sağlayacak bir durum olarak değerlendirilebilir. Özellikle ana malzemenin çekme dayanımının %85'i değerinde çekme dayanımı eldesi çarpıcı bir sonuçtur. Ancak darbe dayanımı ana malzemenin %70'i değerinde kalmıştır. MIG yönteminde östenitik kaynak metali kullanımında %170, ferritik kaynak metali kullanımında %120 gibi değerlerin elde edildiğinin gösterildiği çalışmalar mevcuttur.

Tablo 6. Disk Lazer Kaynağı yöntemi ile farklı ısı girdisi değerlerinde birleştirilmiş zırh çeliklerinin ve ana metalin mekanik özellikleri (Janicki, 2014)

	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Kırılma Bölgesi	Mikrosertlik (HV0.2)			Çentik Darbe Dayanımı (J)	3 Nokta Eğme Testi Eğilme Açılımları (°)	
				Kaynak Metali	HAZ (Max.)	HAZ (Min.)		Kepten Eğme	Kökten Eğme
Ana Malzeme	1645	8,1		510			26	180	
J1	1499	3,8	HAZ	520	550	340	12	46	55
J2	1348	4	HAZ	445	525	320	18	45	47

3.3 Kaynak Metali Etkisi

Zırh çeliklerinin kaynağında en çok tercih edilen yöntem ergiyen elektrot kullanılan ark kaynağının incelenmesi gereken en önemli parametresi kullanılan kaynak metali türünün etkisidir. Zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerde kaynak malzemesi, temel malzemeye göre daha düşük mekanik özelliklere sahiptir, yani dolgu malzemesi kaynaklı birleştirmenin en zayıf noktasıdır. (Cabrito ve diğ., 2018b). Ayrıca zırh çeliklerinin birleştirme kaynağında dikkat edilecek hususlardan en önemlisi soğuk çatlama riskini azaltmak için hidrojenin kaynak bölgesinden uzaklaştırılmasıdır. Çünkü hidrojen kaynak bölgesinde HAZ'a difüze olarak zamanla hidrojen gevrekliği adı verilen hasara sebep olmaktadır. Bu da zırh çeliklerinin kaynaklı birleştirmelerinde HAZ'ın mekanik özelliklerini büyük ölçüde düşürmektedir. Bu nedenle zırh çeliklerinin birleştirme kaynağında tel seçimi önemlidir. Zırh çeliklerinin

birleştirilme kaynağında genellikle ferritik ya da östenitik tel tercih edilmektedir. Östenitik paslanmaz çelik sınıfında yer alan kaynak metallerinin kullanımı birçok önemli avantajlar sunmaktadır. Bunlardan biri hidrojen gevrekliğinin önüne geçilmesidir.

Kaynak işlemi malzemede deformasyon sorunlarına yol açtığı için günümüzde halen farklı yapıdaki kaynak telleri kullanılarak en yüksek düzeyde balistik dayanımlara ulaşma çabaları sürdürülmektedir. Bu anlamda literatürde yer alan çalışmalar bu bölümde derlenmiştir. Saxena ve diğ. (2018a) Armox 500 zırh çeliğine östenitik ve ferritik kaynak metali kullanarak MIG kaynağı gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ferritik kaynak metali kullanıldığında kaynaklı yapının çekme dayanımı ana malzemenin çekme dayanımının %41'i değerinde iken bu oran östenitik kaynak metali kullanıldığında %31 olarak elde edilmiştir. Yani ferritik kaynak metali kullanımı kaynaklı yapının mukavemetinde östenitik kaynak metaline göre daha iyi sonuç vermektedir. Ancak çentik darbe testi sonuçları göstermiştir ki östenitik kaynak metali kullanılarak elde edilen kaynaklı yapının darbe dayanımı değeri ana malzemenin darbe dayanımından %20 daha yüksekken, ferritik kullanılarak elde edilen kaynaklı yapıda bu değer %12 daha düşük olarak elde edilmiştir. Östenitik kaynak metali kullanımının darbe dayanımına olumlu etki yaptığı gösterilmiştir.

Güven ve diğ. (2019) tarafından da benzer şekilde Ramor 500 zırh çeliğine östenitik kaynak metali kullanımı etkisi incelenmiştir. Elde ettikleri sonuca göre kaynaklı yapının çekme dayanımı ana malzemenin çekme dayanımının %50'si değerindedir. Çekme testi sonucunda kırılmanın CGHAZ bölgesinden olduğu tespit edilmiştir. Yüksek ısı girdisi aşırı tane irileşmesine ve artık östenit miktarının artmasına sebep olmuştur. Ayrıca yüksek nikel difüzyonun kaynak metalindeki östenitik yapıyı bozarak delta ferrit miktarını artırdığı raporlanmıştır. Bu da Saxena ve diğ. (2018a) tarafından elde edilen değerden yüksek çekme dayanımı değerini açıklamaktadır. Yüksek ısı girdisi CGHAZ gevrekliğini de önemli ölçüde artırmıştır. Isı girdisinin optimizasyonunun kritik olduğu açıktır.

Zırh çeliklerinin kaynaklı birleştirmelerinde östenitik kaynak metali kullanımının sağladığı en önemli avantajlardan bir tanesi yüksek hidrojen çözünürlüğünden dolayı hidrojen gevrekliği hasarının engellenmesidir (Madhusudhan ve diğ., 1995). Östenitik kaynak metallerine alternatif olarak son dönemlerde düşük hidrojenli ferritik (LHF) dolgu metali kullanımının sunduğu avantajlar gösterilmiştir. Dolgu metalinin etkisine yönelik Naveen Kumar ve diğ., (2021) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada östenitik (AWS E307-16) ve LHF (AWS E12018M) dolgu metallerine ilaveten dubleks paslanmaz çelik (AWS E2594-16) dolgu metalinin mekanik ve balistik özelliklere etkisi incelenmiştir. Mekanik özellikler için elde edilen sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek çekme dayanımı ana metalin %47'si değer ile LHF dolgu metalinde elde edilmiştir. En yüksek darbe dayanımı değerleri ana metalin %71'i değeri ile östenitik dolgu metalinde elde edilmiştir. Çentikli mukavemet oranı yine bu dolgu metalinden yüksek olarak elde edilmiştir. Bu da çentik etkisi oluşması durumunda en emniyetli tasarımın östenitik dolgu metali kullanımı ile mümkün olacağını göstermektedir. Dubleks paslanmaz çelik kullanımı genel olarak bu iki dolgu metali türünün arasında değerler sağlamıştır ancak akma dayanımını önemli ölçüde artırmıştır.

Tablo 7. Östenitik, LHF, dubleks paslanmaz çelik dolgu metali türleri mekanik özellikleri (Naveen Kumar ve diğ., 2021)

	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Çentikli Çekme Testi Sonuçları		Darbe Dayanımı (J)
				Çentikli Çekme Dayanımı (MPa)	Çentikli Mukavemet Oranı	
Ana Metal	1452	2148	10	2557	1,19	42
Östenitik	586	651	24	864	1,32	72
LHF	886	962	16	1127	1,16	48
Dubleks	767	856	20	1052	1,23	57

Bir diğer çalışmada Evcı ve ark. (2014) tarafından östenitik masif dolgu metali ile östenitik özlü tel kullanımı sonucunda zırh çeliğinin kaynaklı yapısının mekanik özelliklere etkisi

incelenmiş ve kıyaslanmıştır. AWS 5.9 ve AWS 5.28 standartlarında 2 farklı östenitik masif dolgu metali ile AWS 5.29 standardında özlü tel kullanımı ile gerçekleştirilen kaynaklı yapılardaki tokluk ve mukavemet kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre östenitik masif teller mükemmel tokluk değerleri sağlarken östenitik özlü teller toklukta önemli bir düşüşe sebep olmadan mukavemeti önemli ölçüde artırmıştır.

Kostak (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ArmoX500T zırh çeliğine ferritik, östenitik paslanmaz çelik ve dubleks paslanmaz çelik dolgu metali kullanılarak 0,4 kJ/mm ısı girdisi ile MIG kaynağı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 8’de özetlenmiştir. Östenitik ve dubleks dolgu metali kullanımında mukavemet önemli ölçüde düşerken darbe dayanımı biraz artmıştır.

Tablo 8. Dolgu metalinin mekanik özelliklere etkisi (Kostak, 2021)

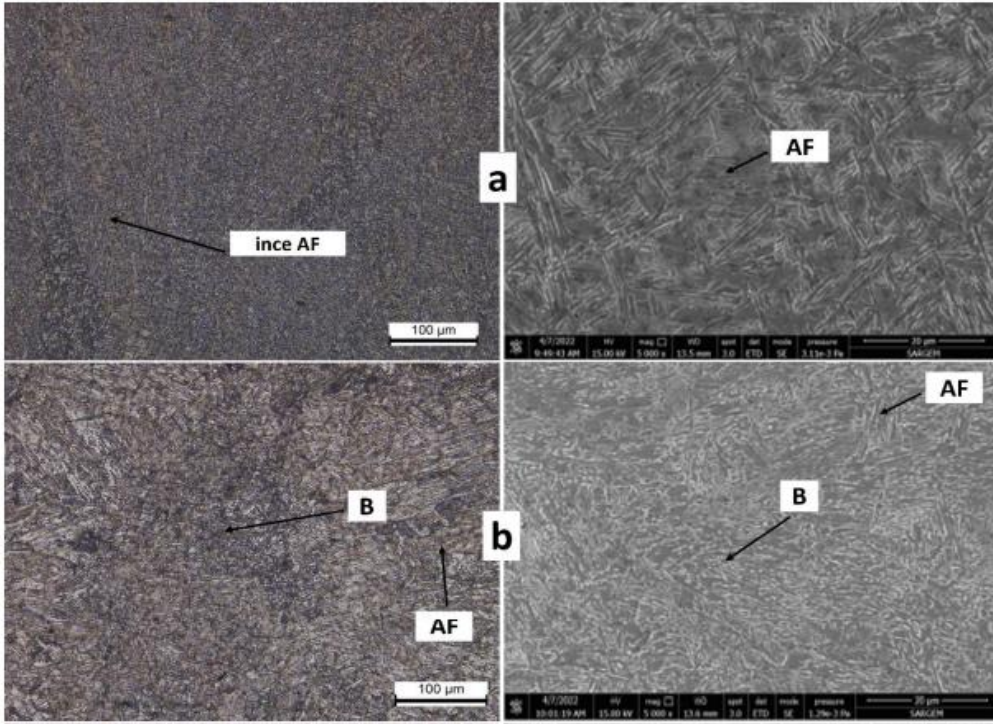
	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Çentik Darbe Dayanımı (J)
Ferritik (ER120S-G)	1200	1240	12,5	80
Östenitik (ER307)	550	700	9,5	89
Dubleks (ER2209)	650	800	11	84

Naveen Kumar ve ark. (2022a) tarafından iki farklı tipte olan 15 mm kalınlığındaki haddelenmiş homojen zırh çeliği (RHA) ve ultra yüksek sertlikteki zırh çeliği (UHA) plakaları östenitik paslanmaz çelik (Austenitic Stainless Steel, ASS), dublex paslanmaz çelik (Dublex Stainless Steel, DSS) ve düşük hidrojenli ferritik (low hydrogen ferritic, LHF) dolgu metali kullanılarak üç farklı kaynak işlemi gerçekleştirmişlerdir. Farklı dolgu metallerinin kullanıldığı kaynaklı yapılarda balistik performansı değerlendirilerek hasar modu tanımlaması yapılmıştır. Balistik testler sonucunda merminin nüfuziyet derinliği (depth of penetration, DoP), genişliği (width of penetration, WoP) ve alan yoğunluğu (DoP x hedefin yoğunluğu) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde üç farklı hasar modu tanımlanmıştır bunlar; klivaj ile oluşan ince aşınma kalıntıları (Finer Wear Debris with Cleavage, FWDC), klivaj ile oluşan kalın aşınma kalıntıları (Coarser Wear Debris with Cleavage, CWDC) ve klivaj hasarıdır (Cleavage Failure, CF). Östenitik paslanmaz çelik dolgu metali kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilen numunede 54 kg/m²’lik düşük seviyede yüzey alan yoğunluğu ile mermiye karşı en iyi balistik direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Bunun sebebi de östenitik paslanmaz çelik dolgu metalinin mikroyapısında yer alan östenit fazıdır. Bu dolgu metalinin mikroyapısı östenit matris içinde yer alan delta ferritlerden oluşmaktadır. Ferrit ve östenit faz miktarları X-ışın difraktometresi (X-ray Diffractometer, XRD) ve optik emisyon spektroskopisi (Optical Emission Spectrometer, OES) ile ölçülmüş olup %5 ferrit - %95 östenit sonucuna ulaşılmıştır. Bu da östenit fazının yüksek enerji absorpsiyon özelliğini göstermektedir. LHF dolgu metali kullanılarak kaynak yapılan numunenin mikroyapısında kalıntı ferrit fazı bulunması ve klivaj ile oluşan ince aşınma kalıntıları nedeniyle 97 kg/m² alan yoğunluğu ile bilye mermisine karşı en düşük balistik direnci gösterdiği gözlemlenmiştir. Balistik direncin tokluk ve uzama ile doğrudan, mukavemet ve mikrosertlik özellikleri ile ters orantılı bir ilişkiye sahip olduğu yapılan çalışmada gözlemlenmiştir.

Tablo 9. Üç farklı dolgu metali kullanımının mekanik özelliklere etkisi (Kumar ve diğ., 2022a)

Dolgu Metali	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%) d ₀ :50mm	Bağlantı verimliliği	Çentik Çekme Dayanımı	Çentik Mukavemet Oranı	Hasar Bölgesi	Darbe Dayanımı (J-Oda sıcaklığı)
ASS	412	656	24	55	794	1,21	WM	66
DSS	501	761	17	63	896	1,17	WM	58
LHF	586	820	13	68	942	1,14	WM	49

Kurt (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ülkemizde ilk defa yerli olarak üretilen Protection 500 kalite zırh çeliğini robotik gazaltı kaynak yöntemi kullanarak kaynak sırasında farklı ilave tel kullanımının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Kaynak teli olarak ferritik yapıya sahip olan ER110 ve SG3, paslanmaz yapıya sahip ELOX SG2209 ve östenitik paslanmaz yapısındaki ELOX 309LSi kaynak telleri kullanılmıştır. Çalışmada ısı girdisinin kontrol altında tutulabilmesi için robotik kaynak yöntemi kullanılmıştır ve ısı girdisi maksimum 1,08 kJ/mm olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak herhangi bir ön ısıtma gerçekleştirilmeden başarılı bir şekilde kaynakların gerçekleştirildiği belirtilmiştir. ER110 SG kaynak teli kullanılarak yapılan kaynaklı birleştirme incelendiğinde mikroyapıda meydana gelen asiküler ferrit (Acicular Ferrite, AF) ve kısmen beynit (B) fazının çekme mukavemetine doğrudan etkisi olduğunu ve çekme mukavemetinin ana malzemenin mukavemetine oranının %62 olduğu raporlanmıştır. Mikroyapı görüntüleri Şekil 4’ te gösterilmiştir.



Şekil 4:

ER110 SG kaynak teli kullanılarak yapılan kaynağın a. Kaynak kep paso mikroyapısı b. kök paso mikroyapısı (Kurt, 2022)

En düşük çekme dayanımının ana malzemenin mukavemetine oranının SG3 kaynak teli kullanılarak yapılan kaynaklarda %48 olduğu vurgulanmıştır. Kaynak bölgesinden alınan çentik darbe numunelerinin test sonuçları incelendiğinde ise en yüksek tokluk değerinin ortalama 97J ile ELOX 309LSi kaynak metali kullanılarak yapılan kaynaklarda, en düşük tokluk değerinin ise ortalama 37J ile ER110 kaynak metali kullanılarak yapılan kaynaklarda elde edildiği raporlanmıştır.

3.4 Isı Girdisinin Etkisi

Zırh çeliklerinin kaynaklı yapılarının mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonunun sağlanmasında incelenmesi gereken en önemli parametre yöntem, kullanılan dolgu metali ve plaka kalınlığı özelinde uygulanan ısı girdisidir. Isı girdisinin uygun birleşmeyi sağlayacak ölçüde yüksek olması gerekirken aynı zamanda düşük HAZ genişliği ve aşırı gevrek bölgelerin oluşumunu engelleyecek ölçüde düşük olması gerekmektedir. Çok yüksek ısı girdisi kaynak

metalinde yüksek oranda delta ferrit oluşumunu artırarak tokluğu düşürürken HAZ'da özellikle CGHAZ bölgesinde iğnesel martenzit ve aşırı büyük tane yapısı oluşumuna sebep olmaktadır. Ayrıca ICHAZ bölgesinde de yüksek hacim oranında ve genişlikte M-A yapısı oluşumunu artırarak aşırı sertlik düşüşü oluşumuna sebebiyet verir. Yüksek mukavemetli düşük alaşımli çelikte "M-A yapısı" ifadesi, "Martenzit-Östenit" bileşeni anlamına gelir ve çeliğin mikro yapısında hem martenzit hem de östenit fazlarının bir arada bulunmasını ifade eder. M-A yapısının varlığı genellikle ostenitten martenzite faz geçişinin kısmen gerçekleşmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkar ve sıklıkla hızlı soğuma veya stres kaynaklı değişikliklerden kaynaklanır. Bu değişiklik, çelikte hem martenzit hem de östenit içeren alanları kapsayan kompozit bir mikro yapı ile sonuçlanır (Ramachandran ve diğ., 2020). Gürol ve diğ. (2022) bu bölgedeki sertliğin azalmasının nedenini, M-A bileşenlerinin geçişi nedeniyle matristeki oksijen içeriğinin artması ve C içeriğinin azalması olarak açıklamışlardır. Bu gibi etmenlerin belirlenmesi için ısı girdisinin optimizasyonu büyük önem arz etmektedir. Isı girdisinin kontrol edilebilmesi ile daha düşük HAZ genişliği elde edildiği yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur. Daha düşük ısı girdisi ile üretilen bağlantılarda HAZ genişliği daha küçük, daha yüksek ısı girdisi ile üretilen bağlantılarda ise daha yüksektir. HAZ'ın genişliği, balistik üzerinde doğrudan etkisi olan HAZ yumuşaması ile ilgili olduğundan, özellikle savaş aracı yapımında yapısal uygulamalar için daha küçük HAZ genişliğine sahip bir bağlantı tercih edilir. Isı girdisinin kontrolünün ve düşük tutulmasının sağlanması için robotik kaynak uygulanması büyük önem arz etmektedir.

Souza ve diğ. (2021) tarafından 8 mm kalınlığa sahip MIL-DTL-46100 standardına uygun 500 HV sertliğe sahip zırh çeliğine LHF dolgu metali kullanılarak 0,8 kJ/mm (S1 numunesi) ve 1,2 kJ/mm ısı girdisi (S2 numunesi) ile toz altı ark kaynağı (Submerged arc welding, SMAW) uygulanmıştır. Çentik darbe testi ve çekme testinin yanı sıra 7,62 mm mermi kullanılarak US Askeri Standartları (1984) ve US Askeri Kod (1997) dahilinde balistik limit hızı V50 yöntemi kullanılarak hem kaynak metali bölgesi hem de HAZ üzerinde balistik testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 10'da özetlenmiştir. Buna göre düşük ısı girdisinde çekme dayanımı ve darbe dayanımı birlikte artmıştır. Balistik test sonuçlarına göre de ısı girdisinin düşmesi balistik limit hız değeri ve buna göre hesaplanan absorbe edilen darbe enerjisi değerlerini önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle düşük ısı girdisi sonucunda HAZ'da oluşan beynitik yapının bunda çok önemli bir faktör olduğu raporlanmıştır. Çalışmada elde edilen bir diğer sonuç ise sertlik toparlanma mesafelerine yöneliktir. MIL-STAN-1185 (2008) standardına göre; herhangi bir kaynak ucundan itibaren sertlik değerlerinin ana malzemenin beklenen sertlik değerine ulaşma mesafesi maksimum 15,9 mm olmalıdır. Bunu sertlik toparlanma mesafesi olarak ifade etmek mümkündür. 0,8 kJ/mm ısı girdisinde kaynak merkezinden itibaren yaklaşık 13 mm mesafede sertlik değeri zırh çeliğinden beklenen sertlik değerine ulaşırken, bu mesafe 1,2 kJ/mm ısı girdisinde yaklaşık 25 mm olarak tespit edilmiştir.

Tablo 10. Isı girdisinin mekanik ve balistik özelliklere etkisine yönelik çalışma sonuçları (Souza ve diğ., 2021)

	Çekme Dayanımı (MPa)	Çentik Darbe Dayanımı (J)	V ₅₀ Balistik Limit Hız Değeri (m/s)		Absorbe Edilen Darbe Enerjisi (kJ)	
			Kaynak Metali	HAZ	Kaynak Metali	HAZ
Ana Malzeme	1834	29	567		1,54	
S1 (0,8 kJ/mm)	992	69	556	668	1,50	2,14
S2 (1,2 kJ/mm)	928	53	532	622	1,36	1,85

Isı girdisinin etkisine yönelik bir diğer çalışma son dönemde Savic ve Cabrilo (2021) tarafından raporlanmıştır. Protac 500 zırh çeliğine östenitik ER307 dolgu metali kullanılarak robotik MIG kaynağı gerçekleştirilen çalışmada 1,29 kJ/mm ve 1,55 kJ/mm ısı girdisi değerlerinin mekanik ve balistik özelliklere etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo

11’de özetlenmiştir. Her iki ısı girdisi için de kaynak metalinde östenitik matriste delta ferrit fazı tespit edilmiştir. Delta ferrit faz oranları sırayla kök, orta ve kep olacak şekilde; 1,29 kJ/mm için % 11,7 - % 5,4 - % 3,2 ve 1,55 kJ/mm için %10,2 - % 5,1 - % 2,9 şeklinde tespit edilmiştir. Isı girdisinin artması delta ferrit oranını hafifçe düşürmüştür. Sertlik sonuçlarından görüleceği üzere her iki ısı girdisi için de kaynak metalinin sertliği aynıdır. HAZ sertliklerinde ise ısı girdisinin artması önemli ölçüde düşüşe sebep olmuştur. Mikroyapı analizlerine göre CGHAZ bölgelerinde ısı girdisinin artışının üst beynit ve alt beynit faz oranlarının artışına ve martenzit oranının azalmasına sebep olduğu raporlanmıştır. Bu da CGHAZ’daki sertlik düşüşünü açıklamaktadır. Balistik test sonuçları HAZ bölgesinde hasar görmüş alanın ölçümü ve hasar türü ile değerlendirilmiştir. Buna göre ısı girdisinin artması hasar görmüş alanı bir miktar artırmıştır. Ayrıca 1,29 kJ/mm ısı girdisinde yapılan 3 atışta da plastik akış şeklinde bir hasar meydana gelirken 1,55 kJ/mm ısı girdisi değerinde 2 atışta delik ve 1 atışta tümsek oluşumu şeklinde bir hasar meydana gelmiştir. 1,55 kJ/mm ısı girdisinin balistik performans açısından uygun sonuç vermezken 1,29 kJ/mm’nin ise iyi performans verdiği raporlanmıştır.

Tablo 11. Isı girdisinin mikrosertlik ve balistik özelliklere etkisine yönelik çalışma sonuçları (Savic ve Cabrilo, 2021)

Isı Girdisi kJ/mm	Mikrosertlik Testi Sonuçları (HV0.5)			Balistik Test Sonuçları	
	Kaynak Metali	HAZ Maksimum	HAZ Minimum	Hasar Görmüş HAZ Alanı (mm ²)	Hasar Türü
1,29	290 ± 8	523 ± 8	390 ± 8	60,9 – 80,6	3 numunede plastik akış (plastic flow)
1,55	290 ± 7	490 ± 7	325 ± 7	70,24 – 90,26	2 numunede delik (punch hole) + 1 numunede tümsek (bulge)

Arık (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 6 mm kalınlığındaki MIL A 46100 kalite zırh çelikleri östenitik dolgu metali kullanılarak MIG kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve farklı kaynak hızlarının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, artan kaynak hızı ile ısı girdisinin azaldığı ve buna bağlı olarak da çekme mukavemetlerinin arttığı tespit edilmiştir. Kaynak hızının 7,3 mm/sn den 11,3 mm/sn ye artması ile kaynaklı yapının çekme mukavemetinin yaklaşık %14 oranında arttığı raporlanmıştır.

3.4 Kaynak Geometrisinin Etkisi

Genel olarak kalınlığı 10 mm'den fazla olan zırh sınıfı çelik levhalar daha çok askeri araç yapımında ve savunma uygulamalarında kullanılmaktadır. Yüksek kalınlıktaki sacların kaynağı için çift “V” oluklu bağlantı konfigürasyonu ve çok pasolu kaynak teknikleri önerilir (Sankar ve diğ., 2022). Fakat çok pasolu kaynak işlemleri sürekli ısınma ve soğutma nedeniyle daha geniş bir HAZ ile sonuçlanır. Bu durum da balistik performansın azalmasına sebebiyet verir.

Kurt (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 1 mm çapa sahip 307Si östenitik dolgu metali kullanılarak 517 HV sertliğe sahip zırh çeliğine farklı kaynak ağız açılarına sahip “V” ve “X” dikiş geometrisinde kaynak prosesleri uygulanmıştır. Kaynak ağız açıları 30-36-42-48-54 ve 60° olacak şekilde hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kaynak ağız açısının artmasıyla 48°'ye kadar çekme dayanımı artarken (“V” için 670 MPa’dan 773 MPa’a, “X” için 551 MPa’dan 726 MPa’ya) 54 ve 60°'de çekme dayanımları düşmüştür. Genel anlamda “X” kaynak dikiş geometrisinin “V” ye göre daha düşük dayanım değerleri eldesine sebep olduğu tespit edilmiştir. “V” kaynak dikişinin “X” kaynak dikişine göre aynı zamanda daha yüksek darbe dayanımı sağladığı Özdemir (2020) tarafından ortaya koyulmuştur. Özdemir (2020) tarafından yapılan bu çalışmada dolgu metalinin yanı sıra kaynak geometrisinin etkisi de incelenmiştir. Östenitik MI 307 Si ile ferritik FCH 330 dolgu metali kullanarak V ve X kaynak dikiş oluşturarak Armox 500 zırh çeliğine MIG kaynağı uygulanmıştır. Oda sıcaklığında

gerçekleştirilen çentik darbe testi sonuçları “V” geometrisinde östenitik dolgu metali kullanıldığında 94 J değeri elde edilirken ferritikte bu değer 41 J’e düştüğü gösterilmiştir. “X” geometrisinde ise bu değerler her iki dolgu metali için de 29 J olarak bulunmuştur.

Benzer bir çalışma İpek ve Elaldi (2012) tarafından gerçekleştirilmiştir. 490 HB sertliğe sahip 12 mm kalınlıktaki zırh çeliğine östenitik dolgu metali kullanılarak GMAW (MIG) kaynağı uygulanmıştır. “V” ve “X” kaynak dikişi ve 48-54-60° kaynak ağız açısı tasarımıyla gerçekleştirilen kaynak prosesleri sonrasında çekme ve basma testleri gerçekleştirilerek ve aynı zamanda nümerik analiz de gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bulgulara göre çekme gerilmelerine karşı “V” konfigürasyonunun “X” konfigürasyonuna göre daha iyi sonuç verdiği, basma gerilmeleri için ise tam tersi durumun söz konusu olduğu raporlanmıştır. Hem çekme hem de basma dayanımı anlamında en iyi sonuç elde edilen kaynak ağız açısının “V” konfigürasyonu için 54° ve “X” konfigürasyonu için 48° olduğu tespit edilmiştir.

Kim ve Yi (2017) tarafından yapılan bir diğer çalışma da ise MIL-STD-12560 sınıfı zırh çeliğine dar aralıklı kaynak ağızı (Narrow Gap Welding, NGW) açılarak gaz metal ark kaynak yöntemi (GMAW) uygulanmış ve bu kaynak geometrisinin etkisi X kaynak geometrisinin etkisi ile kıyaslamak amaçlanmıştır. Sonuç olarak, “NGW” parçası, “X” parçasından daha iyi bir akma dayanımı, çekme dayanımı ve uzama yüzdesi sergilemiştir. Bunun nedeni, NGW’de toplam kaynak ısı girdi enerjisinin, özellikle gelişmiş çekme mukavemeti ve uzama yüzdesine neden olan geleneksel kaynak bağlantısı olan X olduğuna göre daha düşük olmasıdır. Sünek özellikler sağlayan HAZ’ın dar ve düşük sertlik değerleri, NGW’de çekme mukavemetini ve uzamayı iyileştirmeye yardımcı olduğu görülmüştür. Aynı zamanda balistik test yapılmış olup dar aralıklı kaynak geometrisi uygulamasının kaynak standardının gerektirdiği balistik performansı sağladığı tespit edilmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada balistik tehditlere karşı zırhlı araçların üretiminde kullanılan yüksek mukavemetli zırh çeliklerinin belirleyici özellikleri ve bu çeliklerin kaynaklı birleştirmeleri için yaygın olarak kullanılan ark kaynak teknolojisi alanında dünyada yapılan çalışmalardan örnekler, bilgiler derlenmiş ve önemli konularda açıklamalar yapılmıştır. Seçilen kaynak tellerinin östenitik, ferritik veya dubleks yapıda olması en başta kaynaklı bölgenin yapısal yük altında ve balistik performans gerektiren durumdaki davranışını belirlediği açıklanmıştır. Genellikle bu tür çeliklerin kaynaklanabilirlik aşamasında sorunsuz kaynak yapılmasını sağlayan düşük mukavemetli (undermatching) fakat yüksek deformasyon, süneklilik ve kırılma tokluğu kapasitesine sahip östenitik paslanmaz kaynak telleri kullanılmaktadır. Ancak bu durum, kaynaklı birleşme bölgesini yük taşıma kapasitesi açısından zayıf bırakmaktadır. Genel tasarım yaklaşımı kaynak dolgu malzemesini kaynak yapılacak ana malzemeden daha yüksek akma mukavemeti olmasını tercih etmektedir (overmatching). Bu durum kaynak bölgesini maruz kalınan yapısal yüklere karşı koruyacaktır, ancak zırh çeliklerinin kaynak edilebilirlik açısından bu her zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle kaynaklı yapının özelliklerinin geliştirilmesi için; uygun kaynak yöntemi ve kaynak tasarımı belirlenmeli, kaynak telinin, ısı girdisinin ve kaynak parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmeli ve kaynak öncesi/sonrası ısıl işlem uygulamaları araştırılmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı “TÜBİTAK 1505 Programı” kapsamında “5210029” numaralı proje ile destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu’na (TUBİTAK) teşekkür ederiz.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Ceren Çelik, Müesser Göçmen, Ozan Çoban, Uğur Gürol verilerin toplanması, yorumlanması ve makale taslağının oluşturulması; Hakan Baykal ve Mustafa Koçak fikrinsel içeriğin eleştirisel incelenmesi ve makalenin düzenlenmesi konularında katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. Akça, C. ve Karaaslan, A. (2008) Weldability of class 2 armor steel using gas tungsten arc welding, *Archives of Materials Science and Engineering*, 34(2), 110-112.
2. Ada, H., Barlay Ergü, Ö., Özer, A., ve Aksöz, S. (2017) Weldability of Armor Steel Produced According to MIL-A-12560 Specification (Class 1) by Shielded Metal ArcWelding Method , *8th InternationalAdvanced Technologies Symposium(IATS) 2017*, Elazığ, Turkey, 35-40.
3. Alhassan, M., Bashiru, Y. (2021) Carbon Equivalent Fundamentals in Evaluating the Weldability of Microalloy and Low Alloy Steels. *World Journal of Engineering and Technology*, 09(04), 782-792. doi:10.4236/wjet.2021.94054
4. Alkemade, S. J. (1996) The weld cracking susceptibility of high hardness armour steel, 1-27. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory. Corpus ID: 136481022
5. Anık, S., Tülbentçi, K., & Kaluç, E. (1991) Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağı, *Gedik Eğitim Vakfı*.
6. Arık M., (2018). MARS 240 (MIL A46100) Zırh çeliğinin korumalı metal ark kaynağı ile birleştirilerek kaynak performansının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
7. Aytaç, A., Yavuz, H.İ., Aztekin, K., Özdemir, T., Işık, M.S., Çanakçı, B., Kaya, M.T. (2018) MIL-A 46100 zırh çeliğinin kaynaklama işleminde etkili parametrelerin belirlenmesi, *International Science and Technology Conference*, Paris.
8. Balaguru, V., Balasubramanian, V. & Shivkumar, P. (2020) Tensile properties of shielded metal arc welded ultrahigh hard armour steel joints, *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 1(2). doi:10.30574/wjaets.2020.1.2.0029
9. Cabrilo, A., Geric, K. (2016) Weldability of high hardness armor steel, *Advanced Materials Research*, 1138, 79–84. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1138.79
10. Cabrilo, A., Geric, K., Jovanovic, M., & Vukic, L. (2018a) Weldability and Impact Energy Properties of High-Hardness Armor Steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 1281-1295. doi:10.1007/s11665-018-3211-3
11. Cabrilo, A., Geric, K., Klisuric, O., Cvetinovic, M. (2018b) Toughness behaviour in armour steel welds, *Tehnički vjesnik*, 25(6), 1699-1707. doi:10.17559/TV-20170722201539
12. Cabrilo, A., Sedmak, A., Burzic, Z., Perkovic, S. (2019) Fracture mechanics and fatigue crack propagation in armor steel welds, *Engineering Failure Analysis*, 106, 104155. doi:10.1016/j.engfailanal.2019.104155

13. Camcı, E. (2020) Metal Esaslı Sandviç Kompozitlerin Balistik Performansının İncelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8 (2), 1454-1469. doi:10.29130/dubited.619423
14. Cimpoeru, S. J. (2016) The mechanical metallurgy of armour steels, *Land Division Defence Science and Technology Group*, Australia.
15. Çoban, O., Gürol, U., Erdöl, S., Koçak, M (2021) Effect of plate thickness on the microstructure and hardness of robotic fillet welded armour steels, *6 th International Conference on Welding Technologies and Exhibition (ICWET'21)*, Hatay, 288-299.
16. Doğrugiden M.Y.,(2019). Farklı kaynak metotları ile birleştirilen zırh çeliklerinin kırılma tokluk değerlerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak.
17. Durkaya, G., Kaplan, H., Çetin, B., Gürleyik, M., Pişkin, A. R., Ersoy, K., Halim, M. E. Ç. O. (2016) Zırh çeliklerinin kaynağında hidrojen içeriğinin raman spektroskopisi yöntemi ile analiz edilmesi, *Mühendis ve Makina*, 57(674), 50-56.
18. Evcı, C., Işık, H., Değirmenci, E. (2014) Influence of Welding Wire Selection on the Strength and Toughness of Welded Armor Steel Joints, *Materials Testing*, 56(10), 812-817, doi:10.3139/120.110634
19. Garcia-Mateo, C., Caballero, F.G., Bhadeshia, H.K.D.H. (2003) Development of Hard Bainite, *ISIJ Int.*, 43, 1238–1243. doi:10.2355/isijinternational.43.1238
20. Gülgen İ.S. (2008) İş Makineleri Tırnakları Üretiminde Kullanılan Az Alaşımli Çeliklerin Isıl İşlemi Sakarya Üniversitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
21. Günen, A., Bayar, S., & Karakaş, M. S. (2020) Effect of different arc welding processes on the metallurgical and mechanical properties of Ramor 500 armor steel, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 142, 1-23. doi:10.1115/1.4045569
22. Gür, A. K., Çaligülü, U., Yiğittürk, N. (2016) The investigation of welding capability of aısi 304/ramor 500 steels welded with method welding PTA, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 1(1), 248-258. doi:10.12739/NWSA.2016.2A11PB
23. Gürol, U., Karahan, T., Erdöl, S., Çoban, O., Baykal, H., Koçak, M. (2022) Characterization of Armour Steel Welds Using Austenitic and Ferritic Filler Metals, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 75(3). doi:10.1007/s12666-021-02464-7
24. İpek, N. E., Elaldi, F. (2012) Analysis of welding groove angle and geometry on strength of armor steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(12), 1437-1441. doi:10.1080/10426914.2012.709343
25. Janicki, D. (2014) Disk laser welding of armor steel/ spawanie laserem dyskowym stali pancernej, *Archives of Metallurgy and Materials*, 59(4), 1641-1646. doi:10.2478/amm-2014-0279
26. Jena, P. K., Ponguru Senthil, P., Siva Kumar, K. (2016) Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel, *Journal of Applied Research and Technology*, 14(1). doi:10.1016/j.jart.2016.02.002
27. Jeong, Y., Kim, C., Lee, S., Jung, Y., Park, C., Lee, B., Cho, Y. T. (2019) Welding technical trend of high hardness armour steel for combat vehicle, *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 22(3), 299-310. doi:10.9766/KIMST.2019.22.3.299

28. Kara, S., Korkut, M. H. (2012) Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan zırh plakalarında kaynak sonrası ısıtma işleminin birleşim mukavemetine etkisinin araştırılması, *Savunma Bilimleri Dergisi The Journal of Defense Sciences*, 11(2), 159-171. doi:10.17134/sbd.44699.
29. Karagöz, Ş., Atapek, H. (2007) Bor Katkılı Zırh Çeliklerinin Kırılma Davranışı, *Uluslar Arası Kırılma Konferansı*, 186-196.
30. Kavuncu, N.E. (2019) Zırh çeliklerinde robot ve manuel kaynak uygulamalarının malzeme üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması, *Kaynak Kongresi 11.Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, 171-177.
31. Kim, J. S., Yi, H. J. (2017) Characteristics of GMAW narrow gap welding on the armor steel of combat vehicles, *Applied Sciences*, 7(7), 658. doi:10.3390/app7070658
32. Kolla, H. H., Mishra, B., Jena, P. K., Kumar, K. S., Bhat, T. B., Srinivas, M., & Reddy, A. V. (2011) Development of an ultrahigh strength low alloy steel for armour applications. *Materials Science and Technology*, 27(2). doi:10.1179/026708309X12560332736476
33. Kostak E. (2021) MIL DTL 46100 sınıfı zırh çeliklerinin farklı dolgu malzemeleri kullanılarak yapılan kaynak işleminde ön ısıtma gerekliliğinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
34. Kostin, V. A., Poznyakov, V. D., Berdnikova, O. M., Zhukov, V. V., Alekseyenko, T. O., & Alekseyenko, I. I. (2021) Influence of structural transformations on the mechanical properties of welded joints of armor steels, *Materials Science*, 56(4), 472-480. doi:10.1007/s11003-021-00453-1
35. Krishna Murthy, N., Janaki Ram, G. D., Murty, B. S., Reddy, G. M., Rao, T. J. P. (2014) Carbide-Free Bainitic Weld Metal: A New Concept in Welding of Armor Steels, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 45(6), 2327-2337. doi:10.1007/s11663-014-0120-1
36. Kurt S., (2015). Farklı kaynak ağzı açısı ve geometrilerinde gerçekleştirilen kaynakların mil-a 46100 zırh çeliği mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
37. Kurt, R. M. (2022). Zırh çeliklerinin robotik MIG/MAG kaynağı ile birleştirilmesinde ilave metallerin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Gedik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
38. Kuzmnikova L. (2013) An investigation of the weldability of high hardness armor steel, *Doktora Tezi*, Wollongong Üniversitesi, <https://ro.uow.edu.au/theses/3853>
39. Madhusudhan Reddy, G., Mohandas, T., Tagore, G. R. N. (1995) Weldability studies of high-strength low-alloy steel using austenitic filler,. *Journal of Materials Processing Technology*, 49(1-2), 213-228. doi:10.1016/0924-0136(94)01317-T
40. Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., & Madhusudhan Reddy, G. (2008) Effect of welding processes and consumables on high cycle fatigue life of high strength, quenched and tempered steel joints, *Materials & Design*, 29(9), 1821-1827. doi:10.1016/j.matdes.2008.03.006
41. MIL-DTL-46100E, MIL-DTL-46100E, (2019) Detail specification: armor plate, steel, wrought, high-hardness.

42. Mikko, P. (2014) Weldability of high-strength steels using conventional welding methods, Thesis submitted as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Technology, Espoo,
43. Naveen Kumar, S., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Hafeezur Rahman, A., Balaguru, V. (2021) Influence of microstructural characteristics on ballistic performance and its mode of failure in shielded metal arc welded ultra-high hard armor steel joints, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(4), 909-921. doi:10.1007/s12666-021-02197-7
44. Naveen Kumar, S., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Rahman, A. H., & Balaguru, V. (2022a) Effect of failure modes on ballistic performance of Gas Metal Arc welded dissimilar armour steel joints, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 37, 570-583. doi:10.1016/j.cirpj.2022.03.004
45. Naveen Kumar, S., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Rahman, A. H., & Balaguru, V. (2022b) Effect of welding consumables on shielded metal arc welded ultra high hard armour steel joints, *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 31(1), 8-21. doi:10.1515/jmbm-2022-0002
46. Neuvonen, R., Skriko, T., & Björk, T. (2021) Discretization and material parameter characterization for a HAZ in direct-quenched armor steel, *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 89. doi:10.1016/j.euromechsol.2021.104305
47. Özdemir, T. (2020) Mechanical & microstructural analysis of armor steel welded joints, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Gelistirme Dergisi*. doi:10.29137/umagd.488104
48. Pang, W. (1993) The structure and properties of the heat affected zone of structural plate steels welded by high productivity processes, A thesis submitted in the fulfillment of the requirements for the award of the degree of Doctor, University of Wollongong.
49. Pashangeh, S., Zarchi, H., Banadkouki, S. S. & Somani, M. (2019) Detection and Estimation of Retained Austenite in a High Strength Si-Bearing Bainite-Martensite-Retained Austenite Micro-Composite Steel after Quenching and Bainitic Holding (Q&B), *Metals*, 9, 492. doi:10.3390/met9050492.
50. Pokhodnya, I. K., Shvachko, V. I. (1996) Cold cracks in welded joints of structural steels, *Materials Science*, 32(1), 45-55. doi: 10.1007/BF02538924
51. Popławski, A., Kędzierski, P., Morka, A. (2020) Identification of ArmoX 500T steel failure properties in the modeling of perforation problems, *Materials and Design*, 190. doi:10.1016/j.matdes.2020.108536
52. Pramanick, A. K., Das, H., Nandy, S., & Pal, T. K. (2017) Characterization of Microstructure and Nonmetallic Inclusions of Double V Grooved Armour Steel Weld Metal Through Developed Coated Electrode, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(6). doi:10.1007/s12666-016-0961-1
53. Ramachandran, D.C., Kim, S.D., Moon, J., Lee, C.H., Chung, J.H., Biro, E., Park, Y.D. (2020) Classification of martensite-austenite constituents according to its internal morphology in high-strength low alloy steel, *Materials Letters*, 278, 128422, doi:10.1016/j.matlet.2020.128422.
54. Sankar, N., Malarvizhi, S., Balasubramanian, V., Rahman, A. H., & Balaguru, V. (2022) Effect of Rotating Arc (Spin Arc) on Mechanical Properties and Microstructural Characteristics of Gas Metal Arc Welded Armour Steel Joints, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 75(12), 3047-3059. doi:10.1007/s12666-022-02679-2

55. Savic, B., Cabrilo, A. (2021) Effect of heat Input on the ballistic performance of armor steel weldments. *Materials*, 14(13), 3617. doi:10.3390/ma14133617
56. Saxena, A., Kumaraswamy, A., Madhusudhan Reddy, G., Madhu, V. (2018a) Influence of welding consumables on tensile and impact properties of multi-pass SMAW ArmoX 500T steel joints vis-a-vis base metal, *Defence Technology*, 14(3). doi:10.1016/j.dt.2018.01.005
57. Serrano, R., Ambriz, R. R., Ayoub, G., Jaramillo, D. (2022) Mechanical Behavior of Armor Steel Gas Metal Arc Welding Joints Performed by Nickel-Chromium and Low-Alloy Steel Filler Metals, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(5), 3930-3942. doi:10.1007/s11665-021-06517-2
58. Skowrońska, B., Szulc, J., Bober, M., Baranowski, M., Chmielewski, T. (2022) Selected properties of RAMOR 500 steel welded joints by hybrid PTA-MAG, *Journal of Advanced Joining Processes*, 5, 100111. doi:10.1016/j.jajp.2022.100111
59. Slyvinsky, O., Chvertko, Y., & Bisyk, S. (2019) Effect of welding heat input on heat-affected zone softening in quenched and tempered armor steels. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 23(3). doi:10.1615/HighTempMatProc.2019031690
60. Souza, E. R. S., Weber, R. P., Monteiro, S. N., Oliveira, S. de S. (2021) Microstructure effect of heat input on ballistic performance of welded high strength armor steel, *Materials*, 14(19). doi:10.3390/ma14195789
61. Soykan, H. Ş., Aslanoğlu, Z., Karakaş, Y. (2005) Zırh çeliklerinin metalurjisi, *Makina Mühendisleri Odası*, 427, 838-869.
62. Şahintürk, C., Tozlu, İ., Utku, Ş., & Pamuk, U. (2005) Erdemir levha haddehanesi ve zırh çeliği üretim çalışmaları, *Makina Mühendisleri Odası*.
63. Übeyli, M., Yildirim, R. O., Ögel, B. (2007) On the comparison of the ballistic performance of steel and laminated composite armors, *Materials and Design*, 28(4). doi:10.1016/j.matdes.2005.12.005
64. Vimal Kumar, N., Uthayakumar, M., Thirumalai Kumaran, S., & Velayudham, A. (2022) The effect of weld-groove surface modification on the joint performance of military grade armour steel: A sustainability approach, *Materials Chemistry and Physics*, 281, 125902. doi:10.1016/j.matchemphys.2022.125902
65. Vural, M., Piroğlu, F., Çağlayan, Ö. B., Uzgider, E. (2003) Yapı çeliklerinin kaynaklanabilirliği. *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 426 - 2003/4.
66. Yanen, C., Solmaz, M. Y. (2016) Tabakalı Hibrit Kompozitlerin Bireysel Zırh Malzemesi Olarak Üretimi ve Balistik Performanslarının İncelenmesi, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(2). doi:10.31202/ecjse.264200
67. Zerbst, U., Ainsworth, R. A., Beier, H. T., Pisarski, H., Zhang, Z. L., Nikbin, K., & Klingbeil, D. (2014) Review on fracture and crack propagation in weldments—A fracture mechanics perspective, *Engineering fracture mechanics*, 132, 200-276. doi:10.1016/j.engfracmech.2014.05.012