



Sürtünme kaynağı ile birleştirilen AISI 1020/RAMOR 500 çelik çiftinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of the microstructural and mechanical properties of AISI 1020/RAMOR 500 steel couple joined by friction welding

Derya Abak¹, Anıl İmak², İhsan Kırık^{3*}

¹ Bingöl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, dabak902@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9862-7888>

² Bingöl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, aimak@bingol.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6091-1584>

^{3*} Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Makine Bölümü, ikirik@bingol.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8361-319X>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 5 Ocak 2022
Revizyon 18 Ocak 2022
Kabul 21 Ocak 2022
Online 30 Mart 2022

Anahtar Kelimeler:

Sürtünme Kaynağı,
AISI 1020,
Ramor 500

ÖZ

Bu çalışmada, farklı özelliklere sahip AISI 1020 ve Ramor 500 çelik çiftinin sürtünme kaynağı metodu ile birleştirme işlemi incelenmiştir. Üretim parametreleri olarak üç farklı sürtünme süresi (6 sn, 8 sn, 10 sn) kullanılarak birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen numunelerin, mikro-yapı analizleri için optik, SEM, EDS analizleri yapılmış, ayrıca Mekanik özellikler içinde sertlik ve çekme testleri uygulanmıştır. Maksimum çekme gerilmesi 537.2 MPa, en yüksek sertlik değeri ise BB bölgesinde 500-595 HV aralığında tespit edilmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde sürtünme süresinin kaynak kalitesi üzerinde önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Farklı özelliklere sahip zırh çeliği ve orta karbonlu çeliklerinin sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmesiyle daha mukavemetli birleştirmelerin yapılabildiği görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 January 2022
Received in revised form 18 January 2022
Accepted 21 January 2022
Available online 30 March 2022

Keywords:

Friction welding,
AISI 1020,
Ramor 500

ABSTRACT

In this study, the joining process of AISI 1020 and Ramor 500 steel pairs with different properties by friction welding method was investigated. The connections to be produced were joined by applying three different friction times (6 sec, 8 sec, 10 sec). Optical, SEM, EDS analyzes of the joined samples were made for microstructure analysis, and hardness and tensile tests were applied for mechanical properties. The maximum tensile stress was 537.2 MPa, and the highest hardness value was found in the BB region in the range of 500-595 HV. As a result of the examinations, it was determined that the friction time plays an important role on the quality of the friction joint. It has been observed that stronger joints can be made by combining armor steel and medium carbon steels with different properties by friction welding method.

Doi: 10.24012/dumf.1053846

* Sorumlu Yazar

Giriş

Endüstri ve savunma sanayisindeki hızlı gelişim ile birlikte kullanılan metalik malzemelerin birleştirilme işlemi de bir o kadar önem kazanmıştır. Geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirilen metalik malzemelerde çeşitli sorunlar ortaya çıkabilmektedir[1]. Yeni ve özellikli malzemelerden olan zırh çelikleri geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirildiğinde bazı metalürjik problemler ortaya çıkmaktadır. Ergitme kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilen çeliklerde oluşan olumsuzlukları azaltmak amacıyla minimum kaynak kusurları içeren ve kaynak sonrası en az iç gerilmeler oluşturan katı hal kaynak türlerinden biri olan sürtünme kaynağı tekniği kullanılabilir. Böylece ergitme kaynak yöntemlerindeki olumsuzluklar azaltılmış olmaktadır.

Katı hal kaynak teknikleri içinde yeni bir yöntem olan sürtünme kaynağı, endüstride yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu birleştirme tekniği, mekanik enerjinin birleşme arayüzünde termal enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen ısı yardımıyla plastik deformasyon ve ekstrüzyonla gerçekleştirilen bir kaynak tekniğidir[2], [3], [4], [5].

Zırh çelikleri, yüksek enerji emici özellikleri nedeniyle askeri ve sivil araçların korunmasında kullanılmaktadır[6],[7]. Savunma sanayisi açısından önemli olan bu malzemelerin diğer çelikler ile birlikte kullanıldıkları düşünüldüğünde, birleştirilmelerinin zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Zırh çelikleri ile diğer çeliklerin birleştirme işlemleri yaygın bir şekilde araştırma konusu olmaktadır. Bu bağlamda yapılan literatür incelemelerinde;

Merzalı, zırh çeliğinin kaynaktan sonra ısı etkisi altında bulunan bölgelerde, hemen hemen değişmemiş ve temperlenmiş bölgelerin faz özelliklerinin homojenizasyonu ve mekanik özelliklerin uygunluğu ile ilgili çalışmıştır[8]. Bekçi, Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliği plakalarının 7.62 mm mermiler karşısındaki balistik performansı farklı koşullarda deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Ramor 550'nin önde Ramor 500'ün arkada kullanıldığı yapı, alternatif sıralamalı yapıya nazaran daha yüksek balistik dayanım sergilediğini gözlemiştir[9]. Sarsılmaz vd., Armor 500 çelik ve AISI 2205'in sürtünme kaynaklı birleştirme özelliklerini incelemiş ve farklı kaynak parametrelerinde kaynağın özelliklerini karşılaştırmıştır. Mikroyapısal ve mekanik özelliklerin, seçilen koşullar aralığında değişen kaynak parametrelerinden önemli ölçüde etkilendiğini belirtmiştir[10]. Örenler, yapmış olduğu çalışmada Armox 500T zırh çeliğinin ergitme kaynak yöntemlerinde kaynakları yapılmış olan bağlantının mekanik özellikleri, sertliği, makro ve mikro-yapı özellikleri ve tokluk değerlerini incelemiştir. Test parçalarının kaynakları yapılırken aynı koruyucu gaz kompozisyonunu kullanmış beraber farklı amper değerlerine göre kaynak parametreleri farklılık göstermiştir. Bunun yanında imalatı yapılan parçalara test sonuçlarının sağlıklı olması için tahribatsız muayene yöntemlerinden görsel muayene, penetrant muayene ve radyografik muayene yöntemleriyle olası kaynak hatalarına karşı test etmiş ve herhangi bir kaynak kusuruna rastlamamıştır[11]. Taskaya, Ramor 500 zırh çeliğinin toz altı kaynağı ile birleştirmiş ve numunelerin mekanik özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir[12]. Erdoğan, metal malzemelerin ara tabaka kullanılarak sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılmasını incelemiştir. Sürtünme kaynağında Ti6Al4V ile AISI 310, AISI 304, AISI 316, AISI

316Ti, AISI 316L, AISI 430, Inconel 600 numunelerini kaynak etmiştir. Kaynaklı numunelerin mekanik ve metalürjik incelemelerini yapmıştır. Kaynaklı numunelere çekme testi, mikro sertlik, optik mikroskobu ve SEM analizleri yapmıştır. Sonuç olarak yapılan sürtünme kaynağı çalışmaları başarılı sonuç vermiştir[13]. Kırık vd., sürtünme kaynağı ile bir araya gelen AISI 1040/Duplex paslanmaz çelik ikilisinde sürtünme zamanının mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişler ve sürtünme zamanının bağlantılar üzerine önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir[14].

Farklı özelliklere sahip metalik malzemeleri ergitme kaynak metotları ile birleştirmek bazı olumsuz sonuçlar meydana getirmektedir. Özellikle zırh görevi gören Ramor çeliklerinin ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri durumunda kaynak bölgesi ve ITAB'da zırh özelliklerini kaybedebilmektedirler. Bu amaçla savunma sanayisinde farklı türleri bulunan ve birçok zırhlı araçta kullanılan Ramor 500 ile kaynak kabiliyeti iyi olan AISI 1020 çeliği üstün avantajlar sağlayan sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirilmiştir.

Materyal ve Metot

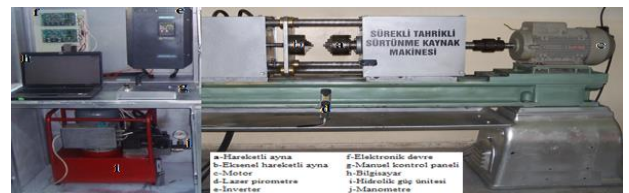
Bu çalışmada kullanılan AISI 1020 12 mm çapında çelik çubuk ve 100x300 mm plaka halinde Ramor 500 çelikleri ticari olarak temin edilmiştir. Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri

Malzeme	AISI 1020	RAMOR 500
<i>Element</i>		
C	0,207	0,35
Mn	0,441	1,50
Si	0,102	0,70
P	0,007	0,015
S	0,006	0,010
Cr	0,095	1,00
Mo	0,019	0,70
Ni	0,078	2,00
Al	0,017	-
Cu	0,1	-
B	-	0,005
Fe	Kalan	Kalan

Kaynak işleminden önce, ticari olarak levha halinde alınan Ramor 500 çeliği 12 mm çapında çubuk haline getirildikten sonra AISI 1020 çeliğiyle birlikte şerit testerede soğutma sıvısı kullanılarak Ø12x72 mm ebatlarında kesilmiştir. Kesilen numuneleri birleştirilmek için eşleştirilen alın yüzeyleri; kir, pas ve oksit tabakasından arındırmak için asetonla temizlenmiştir.

Sürtünme kaynakları Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan PLC kontrollü bir sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde yapılmıştır (Şekil 1).



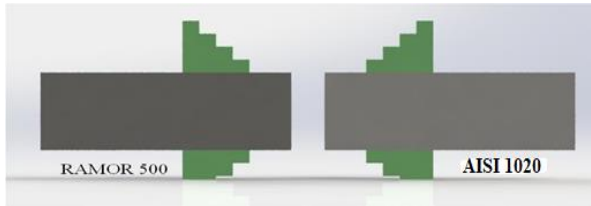
Şekil 1. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi[15]

Tablo 2. Kaynak bağlantılarının üretiminde kullanılan sürtünme kaynak parametreleri

Numune No	Devir Sayısı (rpm)	Sür. Süresi (sn)	Sür. Basıncı (MPa)	Yığma Basıncı (MPa)	Yığma Süresi (sn)	Boyca Kısalma 1020 (mm)	Flanş Boyu 1020 (mm)	Boyca Kısalma Ramor 500 (mm)	Flanş Boyu Ramor 500 (mm)
S1	2200	6	40	100	12	7,80	16,90	2,00	16,00
S2	2200	8	40	100	16	6,10	18,35	5,15	17,20
S3	2200	10	40	100	20	11,85	20,00	6,45	18,80

Literatür incelemeleri sonucunda; sürtünme kaynağı ile yapılan birleştirmelerde mikroyapı ve mekanik davranışlar üstünde büyük etkiye sahip olan sürtünme süresi parametreleri değişken olarak seçilmiş olup, bu değişkenler Tablo 2’ de verilen düzende deneysel programda incelenmiş ve veriler bulunmuştur.

Birleştirilmek üzere eşleştirilen AISI 1020/Ramor 500 çelik çifti, Şekil 2’deki düzende, tezgâha bağlanmış ve Şekil 3’teki gibi numuneler elde edilmiştir.



Şekil 2. Parçaların bağlanma şekli



Şekil 3. Kaynak sonrası elde edilen S1, S2 ve S3 no’lu numuneler

Kaynak işlemi ardından, numunelerin birleşme alanında oluşan yapısal değişimi gözlemlemek için; numuneler birleşme yüzeyine dik olacak şekilde kesilip yüzeyleri 80-1200 mesh’lik zımpara ile zımparalanmasının ardından 3 µm’ lik Elmas pasta ile parlatılmıştır. Şekil 4’ te kesilmiş numunenin şematik resmi verilmiştir.

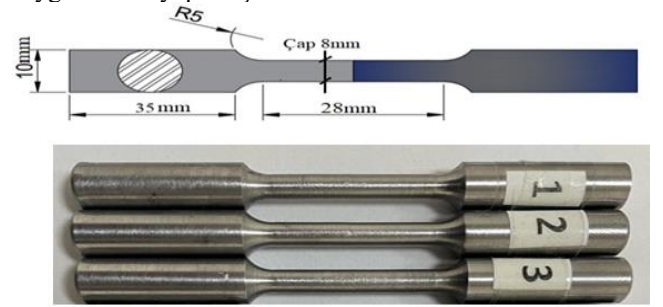


Şekil 4. Kesilmiş numunenin şematik resmi

Kaynak sonrası, numunelerin birleşme bölgesinde oluşan sertlik değişimini ölçmek için mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri, Bingöl Üniversitesi, Merkezi Laboratuvarı’ nda bulunan AOB marka mikrosertlik cihazında 20 gr yük altında 0.5 mm

aralıklarla Vickers (HV) biriminde ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler, bilgisayar ortamına yüklenerek mikrosertlik grafikleri oluşturulmuştur.

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen numunelerin mekanik davranışlarını incelemek için çekme testi yapılmıştır. Çekme numuneleri TSE 138 standartlarına göre Şekil 5’te gösterilen ebatlarda CNC torna tezgâhında işlenmiştir. Çekme deneyleri, 50000 N yük kapasitesine sahip SHIMADZU marka çekme cihazında, 1 mm/dak çekme hızı uygulanarak yapılmıştır.



Şekil 5. Çekme numunesi

Bulgular Ve Tartışma

Kaynaklı Bağlantıların Makroskopik Değerlendirilmesi

Farklı sürtünme süreleri kullanılarak sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantıların, ara yüzeyinden dışarı çıkan malzeme yüzeyindeki değişim resmi Şekil 6’ da verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantıların birleşme alanlarından alınan makroskopik inceleme fotoğrafları değerlendirildiğinde; sürtünme süresine göre ara yüzeyden dışarı çıkan malzeme miktarında artış gözlemlenmektedir. Kaynak sonrası numunelerden alınan boyca kısalma miktarı, dışarı çıkan malzeme miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.



Şekil 6. Sürtünme kaynaklı numunelerinde birleşme ara kesitinin resmi

Birleştirilen Numunelerin Makroskopik İncelemeleri

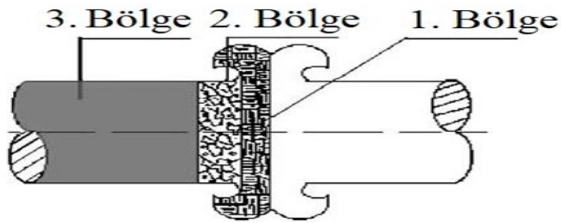
2200 dev/dak, 40 MPa sürtünme basıncı, 100 MPa yığma basıncı, üç farklı sürtünme süresi (6, 8, 10 sn) kullanılarak birleştirilen S1, S2 ve S3 no'lu kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası makro fotoğrafları Şekil 7'de verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait fotoğraflar incelendiğinde; artan sürtünme zamanına göre dışarı taşan malzeme miktarında artış görülmektedir. Kaynak sonrası yapılan boyca kısalma ölçümleri sonucunda, en çok kısalma S3 nolu numunede 11,85 mm olarak bulunmuştur. Boyca kısalma en çok AISI 1020 çelik tarafında olmuştur. AISI 1020 tarafında boyca kısalmanın daha fazla olmasının temel nedeni AISI 1020 sertliğinin zırh çeliğine göre düşük ve ısı iletim kat sayısının farklı olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7. S1, S2 ve S3 no'lu numunelerin makroskopik incelenmesi

Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, farklı bileşime sahip iki metal çifti birleştirilmiş olduğundan birleşme ara yüzeyinin hem sağında ve hem de solunda farklı yapıların ortaya çıktığı açıktır. Bu nedenle, mikroyapı değerlendirilmesi yapılırken Şekil 8'de verilen tanımlama esas alınarak 1. bölge, 2. bölge ve 3. bölge şeklinde adlandırılmıştır. Bölgesel olarak üç farklı bölgeye; 1. bölge birleşme bölgesi (BB), 2. bölge deformasyon bölgesi (DB) ve 3. bölge esas malzeme (EM) olarak tanımlanmıştır. Tanımlanan bu bölgeler artan sürtünme süresine bağlı olarak değişim gösterdiği görülmüştür.

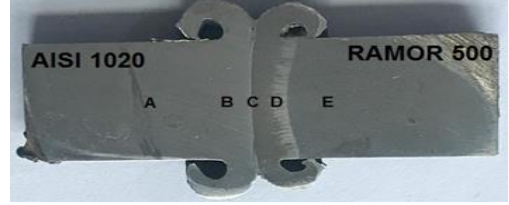


Şekil 8. Kaynaklı bağlantıların mikroyapı fotoğrafı[16]

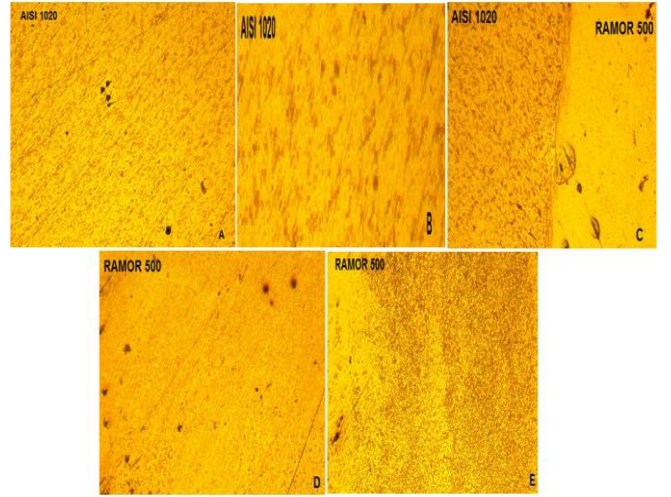
Sürtünme Kaynağıyla Birleştirilen Zırh Çeliği ve AISI 1020 Çeliğinin Optik İncelemeleri

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen numuneye ait mikroyapı fotoğrafı Şekil 9'da, optik görüntüleri ise Şekil 10'da verilmiştir. Burada harflerle gösterilen bölgeler; A ve E bölgeleri esas malzeme, B ve D bölgeleri deformasyon bölgeleri ve C bölgesi birleşme bölgesini

göstermektedir. Bu gösterilen bölgelerin optik incelemelerinde, A bölgesi dediğimiz esas malzeme kısmında bir deformasyon gözlemlenmemiş olup B ve D bölgelerinde deformasyona rastlanırken malzeme yapısında değişim gözlemlenmiş ve C kısmında malzemelerin ergitme kaynak yöntemlerine nazaran daha düzgün ve daha dar bir ısı tesiri altındaki bölgelere (ITAB) sahip birleşmelerin olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Sürtünme kaynağı ile birleştirilen Ramor 500/ AISI 1020 çeliklerinin mikroyapı fotoğrafı

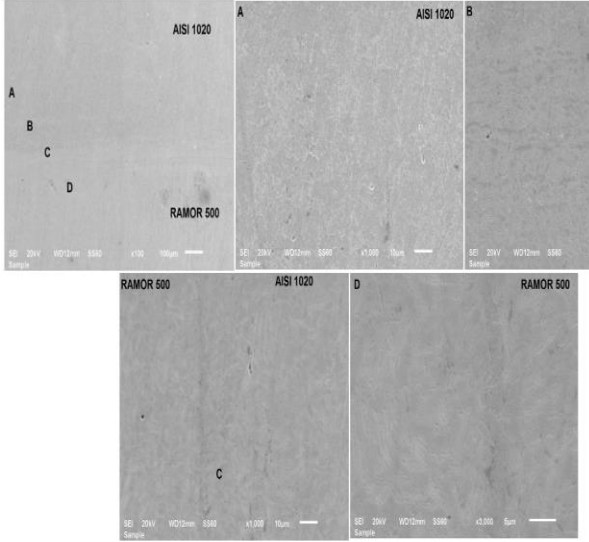


Şekil 10. a) Sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi optik görüntüsü, b) AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi optik görüntüsü, c) C bölgesi optik görüntüsü, d) RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi optik görüntüsü, e) RAMOR 500 malzemesindeki E bölgesi optik görüntüsü

Birleştirilen Numunelerin SEM Analizi

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen AISI 1020 ve Ramor 500 malzeme çiftinin SEM fotoğrafları Şekil 11'de gösterilmiştir. Kaynak sonrası birleşme bölgesi üstünde gerçekleştirilen analiz sonuçlarından, literatüre uygun üç farklı bölgenin olduğu gözlemlenmektedir. Bu kaynaklı bağlantılara ait fotoğraflar incelendiğinde; kaynaklı bağlantının birleşme ara yüzeyinde boşluk ve bağlantısız bölgelerin olmadığı görülmektedir. Kaynaklı bağlantıların ara yüzey çizgisinin AISI 1020 tarafına doğru gömüldüğü görülmektedir. Bu numuneye ait boyca kısalma miktarı toplam 9.80 mm olarak ölçüldü. Sürtünme süresinin diğer numunelere göre az olduğundan boyca kısalmanın daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, birleşme bölgesine bitişik deformasyon bölgelerinde (B, D) oluşan sıcaklık ve eksenel basıncın etkisi ile malzemenin dışarı taşma rejimi ve kayma bantları açıkça görülmektedir.

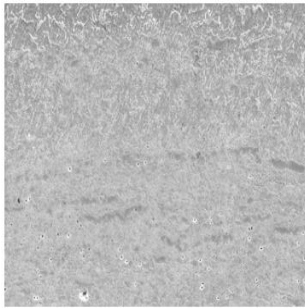
Deformasyonun etkili olduğu bölgeden uzaklaştıkça kayma bantlarının yoğunluğu azalmaktadır.



Şekil 11. Birleştirilen numunelerin SEM görüntüsü, a) AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi SEM görüntüsü, b) AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi SEM görüntüsü, c) C bölgesi SEM görüntüsü, d) RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi SEM görüntüsü

EDS Analizi

S1 no' lu kaynaklı bağlantılara ait EDS analiz sonuçları Şekil 12'de verilmiştir. Numune EDS analizleri açısından incelendiğinde; AISI 1020 tarafında kısmen dönüşüme uğrayan bölgede krom ve nikel miktarı yükselmiştir.



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
C	Ka	11.42	2.315	1.366	wt.%
Cr	Ka	22.24	4.000	0.233	wt.%
Mn	Ka	31.40	4.065	0.648	wt.%
Fe	Ka	3,635.69	22.286	97.549	wt.%
Ni	Ka	4.98	2.859	0.204	wt.%
				100.000	wt.%

Şekil 12. S1 no' lu kaynaklı bağlantılara ait EDS analiz sonuçları

Kaynaklı Bağlantıların Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Kaynaklı bağlantıların sertlik değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Bu numuneye ait sertlik profili incelendiğinde; sertlik BB bölgesinde 500-595 HV aralığında olduğu ve ara bölgeden Ramor 500 çeliğine doğru düştüğü görülmektedir. Ölçülen minimum sertliğin AISI 1020 tarafında olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 3. Üç numuneye (S1, S2, S3) ait mikrosertlik değerleri

Numune No	EM AISI 1020	DB AISI 1020	BB (HV)	DB RAMOR 500	EM RAMOR 500
S1	200	510	595	450	350
S2	198	540	580	410	360
S3	200	560	500	400	400

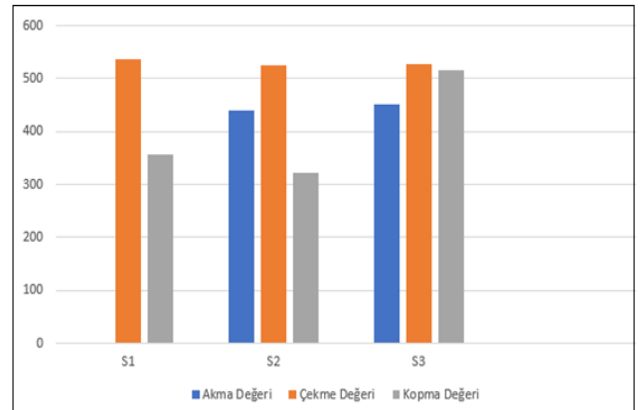
	(HV)	(HV)		(HV)	(HV)
S1	200	510	595	450	350
S2	198	540	580	410	360
S3	200	560	500	400	400

Kaynaklı Bağlantıların Çekme Testi Sonuçları

2200 dev/dak, 40 MPa sürtünme basıncı, 100 MPa yığıma basıncı, üç farklı sürtünme süresi (6, 8, 10 sn) kullanılarak birleştirilen S1, S2 ve S3 no'lu kaynaklı bağlantılara ait çekme sonrası yüzey görüntüleri Şekil 13'te verilmiştir. Yüzey fotoğrafları incelendiğinde S1 nolu numune dışındaki bütün numunelerin ara yüzeyinin AISI 1020 tarafında DB bölgesinde kırıldığı görülmektedir. Bu durumun sürtünme süresinin düşük tutulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen çekme grafikleri Şekil 14'te verilmiştir. Bu grafiklerden, artan sürtünme süresine bağlı olarak maksimum çekme değerleri sırasıyla 537.2, 525.7 ve 527.4 MPa olarak kaydedilmiştir. Maksimum çekme değerindeki bu farklılık, DB'nin genişliği ile doğrudan ilişkilidir. İki metal çifti ara yüzeyindeki bağlantısız bölge, çatlak ve boşlukların varlığı ve büyüklükleri de çekme testlerinin kırılma davranışları üzerine önemli rol oynamaktadır.



Şekil 13. Çekme sonrası S1, S2 ve S3 nolu numunelere ait yüzey görüntüleri



Şekil 14. S1, S2, S3 numaralı numunelerin gerilme grafikleri

Sonuçlar

Farklı özelliklere sahip Ramor 500 zırh çeliği ile AISI 1020 çeliği sürekli tahrikli sürtünme kaynağıyla başarılı bir şekilde birleştirilebildiği görülmüştür. Kaynak

bölgesinde herhangi bir çatlak, boşluk veya bağlantısız bölgenin varlığına rastlanmamıştır.

Kaynaklı bağlantıların mikro-yapısında temelde üç farklı bölgenin var olduğu görülmüş. Bunlar literatür ışığında DB, BB ve EM olarak tanımlanmıştır.

Yapılan mikrosertlik incelemelerinde Ramor 500 tarafında meydana gelen DB bölgesinde sertliğin 400-450 HV bandında olduğu ancak AISI 1020 tarafında BB bölgesine yakın olan DB bölgesinde 510-560 HV bandında olduğu görülmüştür. Ancak en yüksek sertlik BB bölgesinde 500-595 HV aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Sürtünme kaynaklı bağlantıların dayanımlarını tespit etmek için yapılan çekme testi sonuçlarından bağlantı dayanımları artan sürtünme süresine bağlı olarak azalmıştır. Ayrıca, S1 nolu numune dışındaki diğer numuneler kaynak bölgesi dışında DB bölgesinde boyun vererek sünek kırılma davranışı sergilemiştir.

Kaynakça

- [1] E. Cetkin, Y.H. Çelik, and S. Temiz, "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of AA7075/AA5182 alloys joined by TIG and MIG welding methods," *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. and Eng.*, vol. 42, pp. 1-12, 2020.
- [2] S. Celik and I. Ersozlu, "Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and 1050 steels," *Mater Des*, vol. 30, pp. 970-976, April 2009.
- [3] I. Kirik, "Effect of temperature on microstructure and mechanical behavior of diffusion bonded Armor 500 and AISI 1040 steels," *Materials Testing*, vol. 57, no. 4, pp. 296-300, April 2015.
- [4] S. Batı, M. Kılıc, and I. Kırık, "Friction welding of dissimilar AISI 304 and AISI 8640 steels," *EJT*, vol. 6, pp. 79-86, 2016.
- [5] A. Imak, I. Kırık, and E. Cetkin, "Sürtünme karıştırma saplama kaynak metodu ile birleştirilen AISI 5140 çeliği ile AISI 316 paslanmaz çeliğin mikroyapısal özelliklerinin belirlenmesi," *Bingöl Üni.Teknik Bilimler Dergisi*, vol. 1, pp.41-48, 2020.
- [6] J. Nowacki and A. Lukojc, "Structure and properties of the heat-Affected zone of duplex steels welded joints," *J Mater. Process Technol.*, vol. 164, pp. 1074-1081, May 2005.
- [7] F. Ade, "Ballistic qualification of armour steel weldments," *Weld J*, vol. 70, pp. 53-54, 1991.
- [8] C. Merzalı, "Zırh çeliklerinde kaynak sonrası ısı tesiri altında kalan bölgenin özelliklerinin ısı işlem ile iyileştirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2013.
- [9] M. Bekçi, "Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliklerinin balistik performanslarının incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2019.
- [10] F. Sarsılmaz, I. Kirik, and S. Batı, "Microstructure and mechanical properties of armor 500/AISI2205 steel joint by friction welding," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 28, pp. 131-136, August 2017.
- [11] A. Örenler, "Zırh çeliklerinin kaynak kabiliyetinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2018.
- [12] S. Taşkaya, "Ramor 500 çeliğinin tozaltı kaynağıyla birleştirilmesi ve Ansys paket programıyla değerlendirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2017.
- [13] A. Erdoğan, Metal malzemelerin ara tabaka kullanılarak sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Tunceli Üniversitesi, Tunceli, 2015.
- [14] I. Kırık and N. Özdemir, "Sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş AISI 1040/Dublex paslanmaz çelik çiftinde sürtünme süresinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi," *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 16, no. 2, pp. 69-75, 2012.
- [15] I. Kırık, "Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 1040/AISI 304L çelik çiftinin elektrokimyasal korezyon davranışının araştırılması," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2012.
- [16] N. Ozdemir and N. Orhan, "Microstructure and mechanical properties of friction welded joints of a fine-grained hypereutectoid steel with 4% Al," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 166, pp. 63-70, July 2005.