

## TBF1180 ÇELİĞİN FİBER LAZER UYGULAMALARI

Onur YÜCE<sup>1</sup> , Mehtap HİDİROĞLU<sup>2</sup> , İsmail ERDOĞAN<sup>1</sup> , Nizamettin KAHRAMAN<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük.

<sup>2</sup>Coşkunöz Kalıp Makina Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, Bursa.

### Article Info

Research article  
Received: 03/11/2023  
Revision: 16/11/2023  
Accepted: 20/11/2023

### Keywords

Automotive Industry  
Fiber laser Welding  
TBF1180  
Mechanical Properties

### Makale Bilgisi

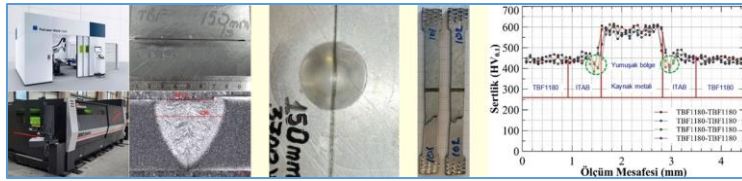
Araştırma makalesi  
Başvuru: 03/11/2023  
Düzeltilme: 16/11/2023  
Kabul: 20/11/2023

### Anahtar Kelimeler

Otomotiv Endüstrisi  
Fiber Lazer Kaynağı  
TBF1180  
Mekanik Özellikler

### Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada TBF1180 çeliğine robotik fiber lazer kaynak kullanılarak birleştirmeler sağlanmıştır. Oluşturulan numunelerin mekanik ve mikroskopik özelliklerini tespit için analizler yapılmıştır. / In this study, joints were made using robotic fiber laser welding on TBF11800 steel. Analyzes were carried out to determine the mechanical and microscopic properties of the welded samples.



Şekil/ Figure A: Yapılan çalışmalar ve bazı sonuçlar / Studies conducted and some results.

### Önemli Noktalar (Highlights)

- 4 kW robotik fiber lazer kaynağı / 4 kW robotic fiber laser welding
- Gözle muayene, mikroyapı incelemeleri, sertlik testi, çekme testi, Erichsen çökertme testi / Visual inspection, microstructure study, hardness test, tensile test, Erichsen collapse test
- Otomotiv endüstrisinde ileri mukavemet çeliği olarak kullanılan TBF1180 / TBF1180 used as advanced strength steel in the automotive industry.

**Amaç (Aim):** İleri mukavemet özelliklerine sahip TBF1180 çeliğinin otomotiv endüstrisinde alın alına birleştirilebilirliğini iyileştirmek. Bu bağlamda TBF1180 çeliğinin robotik fiber lazer birleştirmelerinde parametre çalışmaları yapılmıştır. Pilot çalışmalar ardından oluşturulan kaynak parametrelerinin seri imalat sahalarına entegrasyonu hedeflenmektedir. / To improve the butt joinability of TBF1180 steel, which has advanced strength properties in the automotive industry. For this purpose, parameter studies were carried out on joining TBF1180 steel with robotic fiber laser. It is aimed to integrate the welding parameters created after pilot studies into mass production areas.

**Özgünlük (Originality):** Piyasadan temin edilen deney malzemeleri Coşkunöz AR-GE merkezinde robotik fiber lazer kaynağı kullanılarak birleştirilmiştir. Karakterizasyon işlemleri için numune kesimleri piyasada gerçekleştirilmiştir. Uygulanan testlerden çekme testi Karabük Üniversitesi bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri, sertlik testleri, Erichsen testleri piyasada gerçekleştirilmiştir. / Experimental materials obtained from the market were assembled using robotic fiber laser welding at the Coşkunöz R&D center. Sample laser cuts for characterization were carried out commercially. Among the tests applied, the tensile test was carried out at Karabük University. Microstructure examinations, hardness tests, and Erichsen tests have been carried out in the market.

**Bulgular (Results):** Farklı kaynak parametresinin oluşturduğu numunelere uygulanan testler sonucunda yapılan analizlerde ortaya çıkan verilerin otomotiv endüstrisinde istenilen birleştirme koşullarını sağlayacağı öngörülmektedir. / It is prediction that the data obtained from the analyzes made as a result of the tests applied to the samples formed by different welding parameters will provide the desired joining conditions in the automotive industry.

**Sonuç (Conclusion):** Mikroyapı çalışmaları numunelerde martensitik ve bazen de beyritik yapı olduğunu göstermiştir. Çekme testi sonuçları incelendiğinde numunelerin birleştirme öncesinde gösterilen çekme sonuçlarına göre daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Erichsen çökme testinde yırtılma olmadığı görüldü. Sertlik grafikleri incelendiğinde kaynak metalinin sertliğinin ana malzeme ve ITAB'a göre daha yüksek olduğu görülmüştür. / Microstructural studies showed martensitic and sometimes bainitic structure in the samples. When the tensile test results were examined, it was observed that the samples reached higher values than the tensile results shown before joining. It was observed that there was no tearing in the Erichsen collapse test. When the hardness graphs were examined, it was seen that the hardness of the weld metal was higher than the main material and HAZ.



## Fiber Laser Application of TBF1180 Steel

Onur YÜCE<sup>1</sup> , Mehtap HİDİROĞLU<sup>2</sup> , İsmail ERDOĞAN<sup>1</sup> , Nizamettin KAHRAMAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük.

<sup>2</sup>Coşkunöz Kalıp Makina Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, Bursa.

### Article Info

Research article

Received: 03/11/2023

Revision: 16/11/2023

Accepted: 20/11/2023

### Keywords

Electro Discharge

Machining

Ti-6Al-4V Alloy

Keyseat

Measurement Accuracy

### Abstract

In this study, the weldability of TBF1180 materials, which are widely used in the automotive industry and have advanced strength properties, was investigated at different welding parameters. Robotic fiber laser welding method, which is widely used in the industry, was preferred in welding processes. Tensile and Erichsen cupping test were applied to determine the mechanical properties of the samples. In addition, hardness tests and microstructure examinations were carried out on the weld zones of the samples. Microstructural examinations showed that the weld metal was predominantly martensitic in structure. In hardness tests, it has been determined that the hardness of the weld metal at many joints is generally higher than other regions and that there is a soft region in the tempered zones of the heat affected zone (HAZ). As a result of the tensile tests, it was seen that the fractures occurred from the base material with lower strength. It was observed that no tearing occurred in the Erichsen cupping test.

## TBF1180 Çeliğin Fiber Lazer Uygulamaları

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 03/11/2023

Düzeltilme: 16/11/2023

Kabul: 20/11/2023

### Anahtar Kelimeler

Elektro Deşarj

İşleme

Ti-6Al-4V Alaşım

Kama Yuvası

Ölçüm Doğruluğu

### Öz

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve ileri mukavemet özelliklerine sahip TBF1180 malzemelerinin farklı kaynak parametrelerinde kaynaklanabilirliği araştırılmıştır. Kaynak işlemlerinde endüstride yaygın olarak kullanılan robotik fiber lazer kaynak yöntemi tercih edilmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme ve Erichsen çökertme testleri uygulanmıştır. Ayrıca numunelerin kaynak bölgelerinin sertlik testleri ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde kaynak metalinin ağırlıklı olarak martenzitik yapıda olduğu görülmüştür. Sertlik testlerinde birçok birleştirme noktasında kaynak metalinin sertliğinin genel olarak diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu ve ısıdan etkilenen bölgenin (ITAB) temperlenmiş bölgelerinde yumuşak bir bölgenin olduğu tespit edilmiştir. Çekme testleri sonucunda kopmaların mukavemeti daha düşük olan ana malzemeden meydana geldiği görülmüştür. Erichsen çökertme testinde yırtılma gerçekleşmediği görülmüştür.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

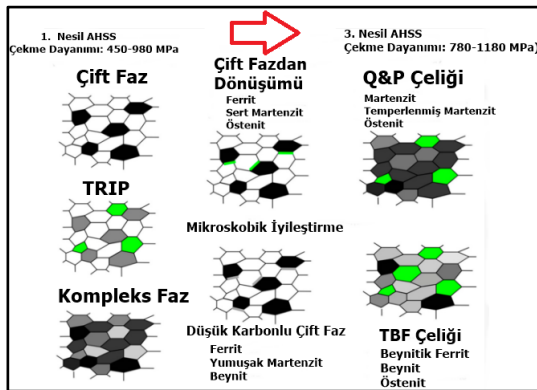
Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı (HSLA) çelikler, otomobillerin yük taşıyan kısımlarında, süspansiyon sistemlerinde, destek parçalarında, çapraz elemanlarda, boyuna kırımlar ve şasi bileşenleri gibi parçaların üretilmesinde etkin rol oynamaktadır [1]. Günümüzde otomobil gövdesi, traversler, şasi ve güvenlik parçaları gibi yapısal bileşenlerin yapımında gelişmiş yüksek mukavemetli çeliğe (AHSS) olan talep hızla artmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar genellikle mikro bileşen olarak ostenit içeren çok fazlı mikro yapıya sahip AHSS kalitelere odaklanmaktadır. Çok fazlı çeliklere olan bu ilginin nedeni, mukavemetlerinin/uzamalarının daha

yüksek olması, daha kolay şekillendirilebilmesi ve enerji soğurma özelliklerinin daha yüksek olmasıdır [2]. Bu çeliklerden bir tanesi de son zamanlarda adından çokça söz ettiren ve 3. nesil olarak adlandırılan TBF çelikleridir. Bu çelikler tam östenitleme ve soğuk haddelemeden sonra östemperlemeyi içeren iki aşamalı ısıl işlemlerle üretilir. Yüksek mukavemetli bu çelikler (AHSS) sınıfında yer alan dönüşüm etkili plastisite (TRIP) katkılı beynitik ferrit çelikleridir. TBF çeliği ilk defa Japon üretici Kobe Steel tarafından tanıtılmıştır. TBF (TRIP Aided Bainitic Ferrite) çelikleri hem yüksek mukavemet hem de yüksek süneklik kombinasyonunu bir arada bulundurmasıyla oldukça dikkat çekicidir. TBF çelikleri, kalıntı östenit içeren beynitik ve/veya temperlenmiş

martenzitik ana yapıya sahiptir. İçerdiği kararlı kalıntı östenit, bu çelik sınıfının anahtar bileşenidir. Bu çeliklerin yüksek mukavemetini ince taneli beynitik veya temperlenmiş martenzitik yapı sağlarken, yüksek uzama oranları TRIP etkisini ortaya çıkaran kalıntı östenitik inklüzyonlar sayesinde [2,3].

İlk olarak Kobe Steel tarafından geliştirilen bu çelikleri 2012 yılında Renault-Nissan grubu gelecekteki araçlarında bu çeliği kullanmaya karar vermiştir. 2013 yılında piyasaya sürülen Infiniti Q50 modelinin "A" ve "B" sütunu takviyeleri ve yan tavan rayı TBF 1180 çeliğinden üretilmiştir. Üretilen bu parçalar gövde ağırlığının %4'lük kısmını oluşturmaktadır. 2015 yılında ise Nissan Murano tanıtılmış ve bu araçta da bazı parçalar TBF 1180 kullanılarak üretilmiştir. Eylül 2014 yılında ArcelorMittal firması Fortiform çelik ailesini piyasaya sunmuştur. Şu anda FortiForm 1050 piyasadan temin edilebilir durumda olmakla beraber Arcelor Mittal 980 ve 1180 MPa versiyonlarını geliştirme çalışmaları devam etmektedirler [4].

Şekil 1'de 1. nesil çift fazlı çeliklerin TBF çeliklerine dönüşümü verilmektedir. 1. nesil çeliklerde 980 MPa çekme dayanımı en yüksek olarak görülmektedir. 3. nesil AHSS çelikleri beynitik ferritin iç yapıda TRIP malzemelere etkisi ile malzemenin mukavemetini arttırmaktadır. Çekme dayanımı 1180-1200 MPa'a kadar yükseltmektedir [5].



Şekil 1. TBF çeliğinin dönüşümü (Transformation of TBF steel) [5].

Otomotiv sanayiinde kullanılan TBF1180 çelikleri genellikle 1-3 mm gibi ince et kalınlığına sahip malzemelerdir. Bu nedenle bu malzemeler genellikle bindirme biçiminde ve nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilmektedirler. Yapılan literatür araştırmalarında 22MnB5 [6-8] ve TBF malzemelerin nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirildiği bazı çalışmalar mevcuttur [9,10]. Otomotiv sanayiinde kullanılan kaynak

yöntemlerinin mutlaka otomasyon sistemine dahil olması gerektiği bilinmektedir. Bir başka ifade ile bu sektörde manuel olarak yapılacak kaynak yok denecek kadar azdır. Bu nedenle sektörde bindirme biçiminde olmayıp zorunlu alın kaynak uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Endüstride bu tür malzemelerin kaynağında en çok TIG, MIG-MAG, plazma, elektron ışın ve lazer ışın kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. TIG kaynak yönteminin otomasyona dahil edilme süreci güç olduğundan çok fazla tercih edilmezken, MIG-MAG ve plazma kaynağı otomotiv saclarından kalınlığı yüksek olan malzemelerin birleştirilmesinde tercih edilmektedir. Elektron ışın kaynağı ise genellikle vakumlu bir ortamda gerçekleştirildiği için bu tür otomasyona elverişli değildir. Dolayısıyla lazer kaynağı yüksek kaynak hızları, çok iyi bir biçimde otomatikleştirilebilir olması ve kaynak operasyonu esnasında izleme olanağı ile sürecin kontrol edilebilirliği sayesinde modern endüstride en çok tercih edilen birleştirme yöntemlerinden biri haline getirmiştir. Lazer ışını ile kaynak, yüksek kaynak ilerleme hızının yanında, çarpılma ve distorsiyonun azlığı, derin nüfuziyet ve yüksek olmayan toplam ısı girdisi özellikleri sebebiyle diğer geleneksel kaynak yöntemlerine göre daha üstün olup, başta otomotiv endüstrisi olmak üzere endüstrinin birçok alanında tercih edilmektedir [11].

1960'lı yıllarda ortaya çıkan bu teknoloji 1980'ler ve 1990'lar boyunca düşük güç seviyelerinde optik yükseltici olarak kullanılmıştır [12]. Son yıllarda ülkemizde ve dünyada geniş kullanım alanına sahip olan bu proses her yıl daha güncel teknolojilerle ortaya çıkmaktadır. Fiber lazer kaynak ve kesim tezgahı üretici firmalar satış adetlerini arttırmak için sürekli bu prosesi geliştirmektedir. CO<sub>2</sub> lazer kaynağı, ilk kullanıma başladığı dönemlerde Nd:YAG kaynağı ile mukayeseye tutulup rakip olarak lanse edilirken, fiber lazer kaynağı bugün Nd:YAG kaynağının çok ötesinde bir kullanım alanına ve verime sahiptir.

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde TBF1180 çeliklerinin kullanımını ve sürekliliğini arttırmak, çelikleri en iyi özelliklerle birleştirmek için en uygun kaynak parametrelerini belirlemek ve belirlenen bütün veriler ile birlikte TBF1180 çeliklerini fiber lazer kaynağı ile en uygun şekilde birleştirmek hedeflenmiştir. Birleştirme sonrası çeliklerde gerçekleşecek olan mekanik ve iç yapısal değişimleri kaynak metali, ITAB, ana malzeme olmak üzere gözle muayene, mikroyapı çalışmaları sertlik testleri, çekme testleri ve Erichsen çökertme testleri uygulayarak analiz etmek amaçlanmaktadır.

## 2. MALZEME VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

### 2.1. Malzeme (Material)

TBF çelikler günümüz otomotiv endüstrisinde yakın tarihte kullanım alanı artmaya başlayan bir çelik olup fiber lazer kaynağı ile birleştirilmesi sonucunda otomotiv endüstrisinde daha geniş bir kullanım alanına sahip olacağı ön görülmektedir. Çalışmaya konu olan TBF1180 malzemenin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan materyal 1,5 mm et kalınlığında TBF1180 çeliği olup birleştirme metodu olarak 4 kW gücünde robotik fiber lazer kaynağı kullanılmıştır. Uygulanan birleştirme prosesinin ardından çıkarılan numunelere gözle muayene uygulanmıştır. Mikroyapı özelliklerini ve oluşan fazları analiz etmek için mikroyapı çalışmaları yapılmış olup plastik deformasyona karşı göstereceği direnci hesaplamak için sertlik testleri, statik yükler altında gösterdiği davranışları belirlemek için çekme testleri, kaynaklı birleştirmenin şekil almaya yatkınlığını belirlemek için ise Erichsen çökertme testleri uygulanmıştır.

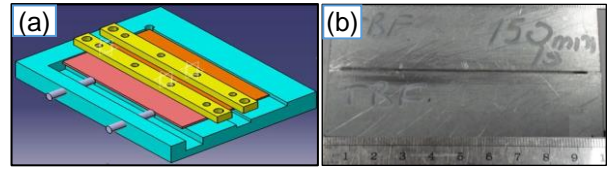
**Tablo 1.** TBF malzemenin kimyasal bileşim (ağırlıkça %) ve bazı mekanik özellikleri (Chemical composition (wt %) and some mechanical properties of TBF material).

C	Si	Mn	P	S	Al	Kalan
0,23	0,2	2,9	0,040	0,010	0,020	Fe
Çekme Dayanımı (MPa)				Uzama (%)		
1222				18		

### 2.2. Kaynaklı Birleştirmeye Hazırlık (Preparation for Welded Joining)

Muhtelif boyutlarda temin edilen malzemeler 100x60 mm boyutlarında soğuk kesme prosesi uygulanarak kesilmiştir. Kesilen malzemelerin kenarlarına zımparalama işlemi uygulanıp kesim ardından oluşan çapaklar temizlenmiştir. Kesilen numuneleri birleştirmek için numune ölçülerine uygun birleştirme fikstürü oluşturulmuştur. Birleştirilecek numune kalınlıklarının az olması ve uygulama esnasında ilave metal kullanılmayacak olması nedeni ile numunelerin hiçbirine kaynak ağzı açılmamıştır. Numuneleri sabitlemek için kullanılan fikstürün referanslama işlemi hassas ölçü aletleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde birleştirme fikstürünün robotik kaynak makinesi ile 0 ve 90 derece bağlantısı doğru olarak sağlanmıştır. Sac malzemeler fikstüre bağlanmadan önce deney malzemelerinin bağlanacağı kanalların çapakları alınmıştır. Şekil 2’de birleştirmelerin gerçekleştiği

fikstürün 3D resmi ve birleştirilen numunenin görüntüsü verilmektedir.



**Şekil 2.** a) kaynak işlemlerinde kullanılan fikstür ve b) kaynak sonrası örnek numune görseli (a) fixture used in welding operations and b) sample image after welding)

### 2.3. Kaynak Uygulamaları (Welding Applications)

Bu çalışmada sacların birleştirmesinde tamamen robotik “Trumpf Trudisk 4001” 4 kW gücünde fiber lazer kaynak makinesi kullanılmıştır. Koruyucu gaz kullanılmadan fiber lazer uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Öncelikle literatür bilgileri ışığında dar bir aralıkta birleştirilecek olan sac metaller için en iyi birleştirme parametrelerini oluşturmak hedeflenmiştir. Bu bağlamda hurda malzemeler kullanılarak en uygun kaynak parametre havuzu oluşturulmuştur. TBF malzemelerin birleştirilmesi için yeterli sayıda çalışma bulunmadığından bu malzemelerin birleştirilmesinde parametrik çalışma yapılmıştır. Tablo 2’de oluşturulan en uygun kaynak parametreleri bulunmaktadır. Aseton ile temizlenmiş numuneler kaynak fikstürüne yerleştirilmiştir. Kaynak yapılacak alanın kinematik bilgilerinin kaynak makinesine girilmesinin ardından numuneler birleştirilmiştir.

**Tablo 2.** Uygulanan kaynak parametreleri (Applied welding parameters)

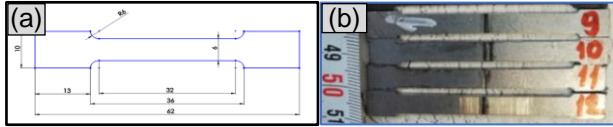
Kalınlık (mm)	Güç (W)	Kaynak Hızı (mm/sn)	Isı Girdisi (kJ/mm)
1,5	3700	100	0,37
1,5	3700	130	0,28
1,5	3700	150	0,24
1,5	3700	170	0,21

### 2.4. Karakterizasyon Çalışmaları (Characterization Studies)

Fiber lazer kaynağı ile birleştirilen numunelerin kesimi için 3 kW fiber lazer kesim makinesi kullanılmıştır. Numunelerin kesiminde lazer kaynak makinesinde kesme gazı olarak azot kullanılmıştır. Bütün numunelerin kesimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş olup herhangi bir çapak veya başka bir sorun görülmemektedir.

3 kW gücünde Amada Ensis model fiber lazer ile kesilen numunelerde makinenin WACS özelliği de kullanılarak diğer kesim parametrelerinin etkisi ile tamamıyla çapaksız bir kesim gerçekleştirilmiştir. WACS özelliği kesimden önce numunelere soğutma suyu uygulayan bir kesim yöntemidir. Şekil 3'de uygulanacak testler için kesilen numunelerin ölçüleri (a: çekme test numune ölçüleri ve b: kesilen numune görüntüleri) ve görüntüleri verilmiştir.

Birleştirme her bir kaynak hızında 2 adet olmak üzere toplamda 8 adet olarak gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen numunelere uygulanacak olan gözle muayene, mikroyapı incelemeleri, sertlik testi, çekme ve Erichsen çökertme testi için karakterizasyon işlemleri uygulanmıştır. Gözle muayene işlemleri TS EN 13018 (Tahribatsız muayene-Gözle muayene-Genel kurallar) standardına göre yapılmıştır.



**Şekil 3.** Çekme test numune ölçüleri ve görüntüleri  
(Tensile test sample dimensions and images).

Mikroyapı çalışmaları için 15x8 mm ölçülerinde fiber lazer kesim yöntemi ile numuneler çıkartılmıştır. Çıkartılan bu numunelere sıcak bakelite alma işlemi uygulanmıştır. Bakelite alınan numuneler standart zımparalama yöntemleri ile zımparalandıktan sonra %3 nitrik asit %97 etil alkol ile 10 saniye süre ile dağlanmışlardır. Bu işlemlerin ardından mikroyapı çalışmaları Nikon MA200 ters tip optik mikroskopta yapılmıştır. Optik mikroskop çalışmaları esnasında kaynak bölgesinin tamamında (kaynak metali, ITAB ve ilave olarak ana malzemenin bir kısmı) ve her bir bölgedeki farklılıkların kolaylıkla gözlemlenebilmesi için farklı büyütmelerde çalışmalar yapılmıştır. Malzemelerin sertliğinin ölçülmesi Qness QATM Q10A+ sertlik ölçüm yazılımı ile Vickers sertlik ölçme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 75 µm sabit aralıklarda, 100 g (HV<sub>0,1</sub>) yük altında kaynak metali, ITAB ve ana malzemeyi kapsayacak şekilde yapılmıştır.

Fiber lazer ışın kaynağı ile birleştirilen numunelerin statik yükler altında göstereceği davranışları analiz

etmek için kaynaklı numunelere çekme testi uygulanmıştır. Bir kaynak numunesinden iki adet çekme numunesi çıkartılmıştır. Ayrıca kaynaklı numuneleri kıyaslayabilmek için ana malzemelere de çekme testi uygulanmıştır. Bu şekilde deney numunelerimize birleştirme işleminin çekme mukavemeti konusunda nasıl bir etki ettiğini doğrudan analiz etmek mümkün olmuştur. Çekme işlemleri TS EN ISO 4136-2022 (Metalik malzemelerin kaynakları üzerinde tahribatlı deneyler- Enine çekme deneyi) standardına uygun olarak 50kN kapasiteye sahip SHIMADZU marka çekme test cihazında 2 mm/dk çekme hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Pozisyon olarak tam ortasından kaynak dikişi geçen numunelere Erichsen çökertme testinin uygulanma amacı, kaynak ile malzemelerin plastik deformasyona karşı göstereceği direnci görebilmektir. Erichsen çökertme testi TS EN ISO 20482 (Metalik malzemeler- Sac ve şeritler-Erichsen çökertme deneyi-2014) standardına göre 20 mm bilye çapı kullanılarak 10 mm/sn hız ile gerçekleştirilmiştir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

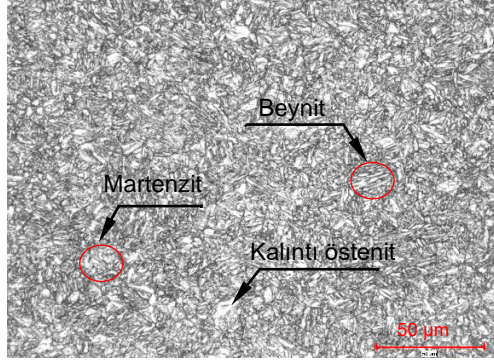
#### 3.1. Gözle Muayene (Visual Inspection)

TS EN 13018 standardına göre 8 adet numunenin hem kep hem de kök taraflarına yapılan gözle muayene incelemelerinde, hiçbir kaynaklı birleştirmede gözle görülebilir nüfuziyet eksikliği, aşırı sarkma, yenme olukları, yüzeye açık gözenek ve çatlak vb. kaynak hatasına rastlanmamıştır. Kaynaklı numunelerde olası kaynak hatalarının oluşmamasının en büyük sebebinin kaynak işlemlerinin otomatik olarak yapılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### 3.2. Makro/mikroyapı Çalışmaları

(Macro/microstructure Studies).

Kaynaklı malzemelerin kaynak bölgelerindeki makro/mikroyapı çalışmaları sonucunda elde edilecek görüntüleri değerlendirmek için öncelikle TBF1180 ana malzemeden mikroyapı görüntüleri alınmıştır (Şekil 4). Bir başka ifade ile birleştirme işlemleri sonrasında ortaya çıkan mikroyapıları kıyaslama yapmak için ana malzeme mikroyapısına ihtiyaç duyulmuştur.



**Şekil 4.** TBF1180 ana malzeme mikroyapısı  
(Microstructure of TBF1180 base material).

Ana malzemesinin yapısı incelendiğinde beynitik ve martenzitik bir mikroyapı gözlemlenmektedir. Yoğun martenzit adaları bazı noktalarda sıklıkla olup çelik bünyesinde beynitik yapı ile eşit dağılmışlardır ve lameller arası kalıntı östenit filmlerine ve yer yer beynitik ferrite rastlanılmaktadır.

Stadler ve arkadaşları [13] 1200 MPa çekme dayanımına sahip TBF çelik ana malzemenin çok fazlı bir mikroyapıdan oluştuğunu; bu yapıların beynitik matris içerisinde östenit adacıkları ile bir miktar martenzitik yapıya sahip olduğunu, Başer [10] ise TBF 1180 ana malzemenin kalıntı östenit içeren beynitik ve martenzitik mikroyapıda olduğunu belirtmiştir.

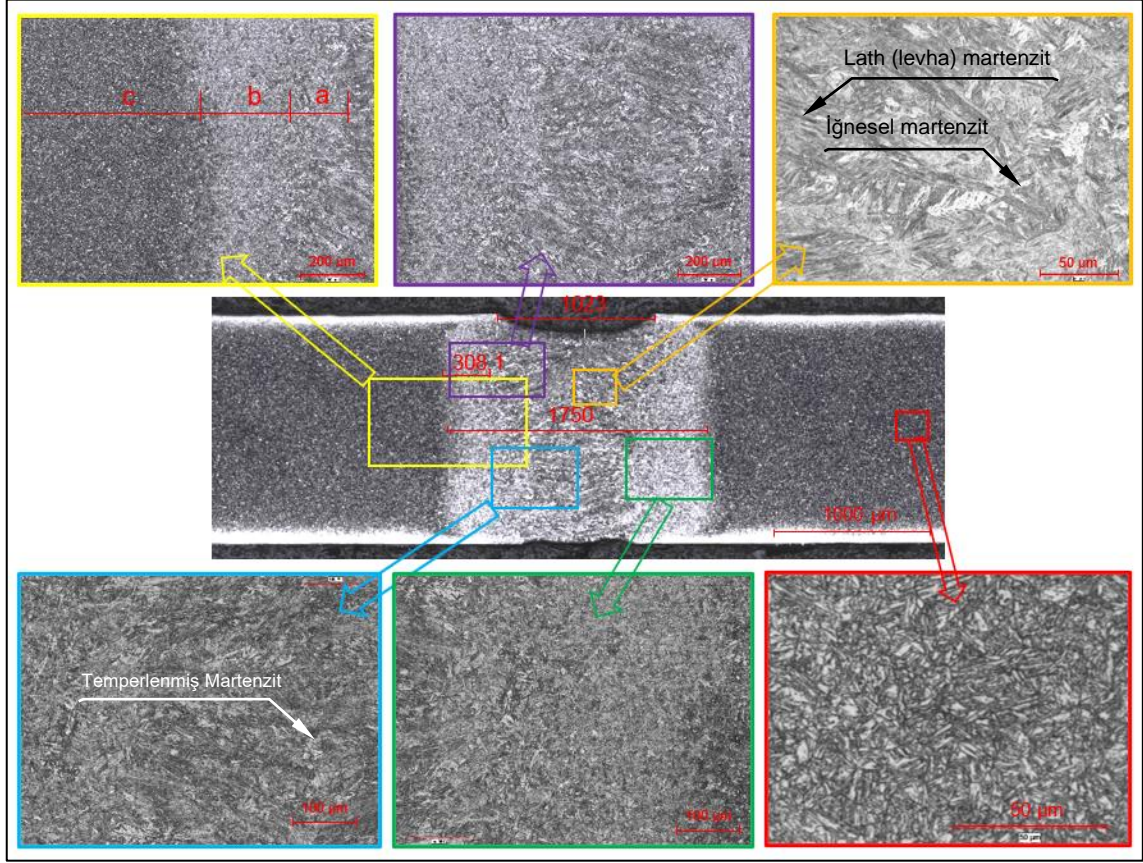
4 farklı kaynak hızı ile yapılan birleştirmelere ait mikroyapı görüntüleri Şekil 5-8 aralığında verilmiştir. Ergitmeli kaynak yöntemleri ile birleştirilen bütün çeliklerde mikroyapı incelendiğinde ana malzeme mikroyapısına göre daha karmaşık bir görüntü söz konusu olmaktadır. Bunun sebebi birleştirme esnasında malzemeye giren ısı, malzemede farklı görünüme sahip bölgeler oluşturmasıdır.

Şekil 5’de 100 mm/sn hız ile yapılan kaynak esnasında verilen ısı girdisinin en yüksek olduğu bir gerçektir. Bu nedenle bu kaynak hızında elde edilen birleştirmede kaynak metali şekli daha çok U formu alırken diğer hızlarda yapılan birleştirmelerde daha çok klasik V kaynak formuna benzemektedir. Kaynaklı numunelerin kaynak kep genişlikleri ölçüldüğünde kaynak hızına göre sırasıyla 1013 µm, 987 µm, 921 µm ve 853 µm kaynak metali genişlikleri elde edilmiştir. Benzer şekilde kaynak bölgesi (kaynak metali+ITAB) genişlikleri ölçüldüğünde ise yine sırasıyla 1750 µm, 1441 µm, 1236 µm ve 1211 µm genişlikler elde edilmiştir. Bunun sebebi kaynak esnasında parçaya verilen ısı girdisinin 0.21 kJ/mm’den 0.37 kJ/mm’ye çıkmasıyla alakalıdır. Bir başka ifade ile kaynak

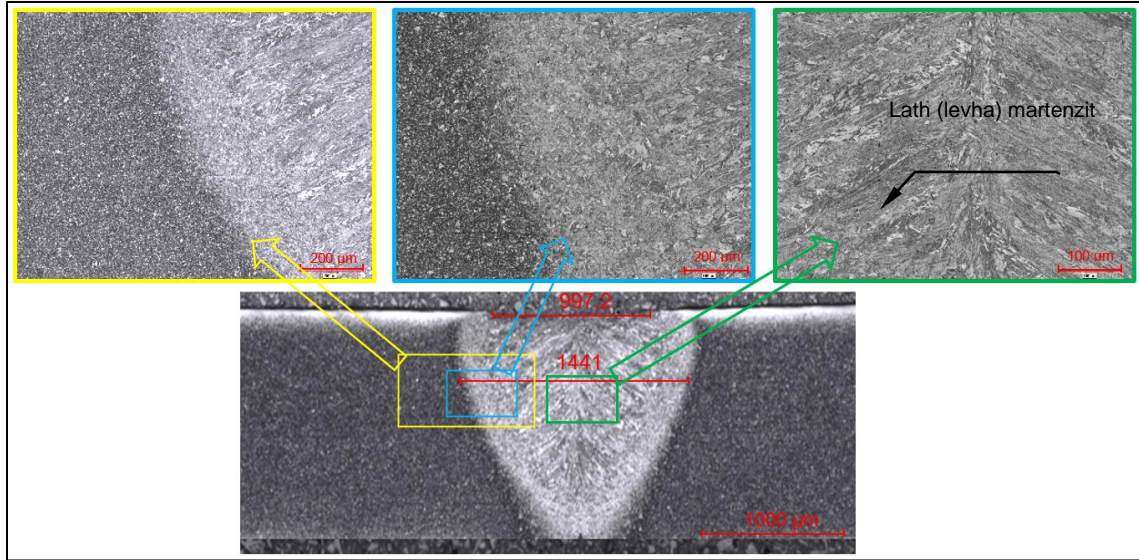
esnasında parçalara verilen ısı girdisi arttıkça hem kaynak metali genişliği hem de ITAB genişlikleri artmaktadır. Kaynaklı birleştirmelere ait mikroyapılar incelendiğinde kaynak metali yapısının kabalaşmış lamellerden oluştuğu ve yapının martenzit-beynit olduğu görülmektedir. Kaynaktan önce ağırlıklı beynitik olan TBF 1180 ana malzeme, kaynak esnasındaki ergime-katılma ile birlikte, kaynak sonrasında hızla soğumakta dolayısıyla kaynak metali mikroyapısında martenzit miktarı artarken beynit miktarı azalmaktadır.

Şekil 8’de verilen kaynaklı malzemelerin ITAB’ları incelendiğinde kaynak metaline bitişik olan (a) iri taneli bölge, bu bölgenin bitişikindeki (b) ince taneli bölge ve ana malzemeye yakın (c) kaynak ısısından dolayı temperlenen bölgedir. Kaynak esnasında birinci bölgede A3 sıcaklığının üzerine çıkılmakta ve tamamen östenit dönüşümü gerçekleşmektedir. Dolayısıyla kaynak sonrası soğuma hızına bağlı olarak içyapı genel itibarıyla beynitik ve martenzitik olmuştur. Buradaki sıcaklık oldukça yüksek (yaklaşık 1200 °C) olduğundan tane irileşmesi kaçınılmaz olmaktadır. A3 sıcaklığına bitişik olan ince taneli bölge, bir miktar yüksek sıcaklığa (yaklaşık 900 °C) maruz kalmakta dolayısıyla östenitleme gerçekleşmekte ancak burada sıcaklık önemli ölçüde tane büyümesi için yeterli olamamakta dolayısıyla ince taneli bir yapı oluşmaktadır. Sıcaklığın A1 ile A3 arasında olduğu bölgelerde ise içyapıda beynitik ve martenzitik fazların yanısıra ferrit fazı da ortaya çıkmaktadır. Yeniden kristalleşmenin etkisi ile bu bölgede de taneler oldukça ince yapıdadır. ITAB’ın ana malzemeye bitişik kısmının sıcaklığı A1 sıcaklığının altındadır dolayısıyla bu bölge sadece temperlenmiş olmaktadır.

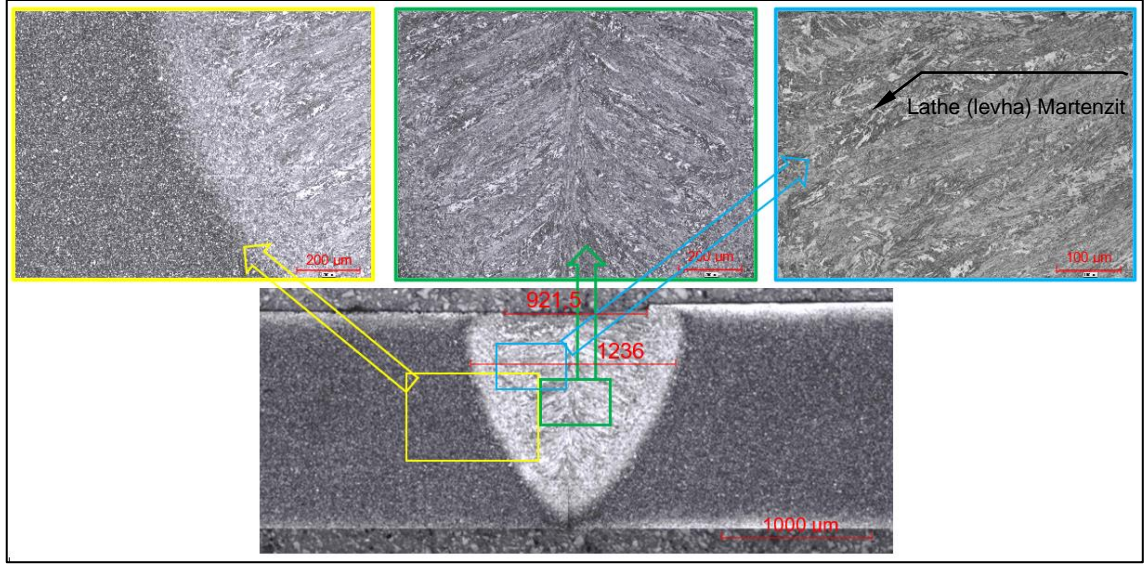
Aydın ve arkadaşları [9] DP600 ve TBF malzemeleri nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş ve ITAB’ın üç bölgeden meydana geldiğini, bu bölgelerin yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan kaba taneli bölge, sıcaklığın A3 ile A1 arasında olduğu ince taneli bölge ve sıcaklığın A1’in altında olduğu temperlenmiş bölge olduğunu rapor etmişlerdir. Stadler ve diğerleri [14] çalışmalarında TBF1200 çeliğini nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş ve kaynak sonra TBF çeliğinin kaynak bölgesi özelliklerini incelemişlerdir. ITAB’a yakın kısımda yeniden kristalleşen östenit tanelerini gözlemlemişlerdir. Salminen ve diğerleri [15] ultra yüksek dayanımlı 960 QC çeliğini fiber lazer yöntemi ile birleştirmişler ve kaynak esnasında parametre değiştirerek ısı girdisinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda gereğinden yavaş yapılan kaynağın yüksek ısı girdisine sebep olduğunu, düşük hızlarda daha geniş kaynak metali ve ITAB olduğunu rapor etmişlerdir.



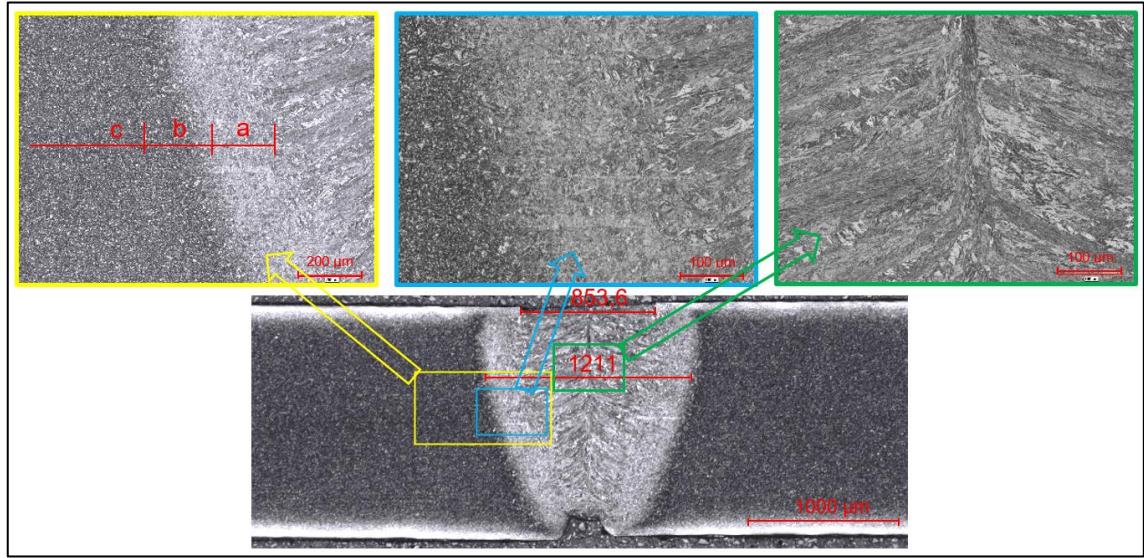
Şekil 5. 100 mm/sn hızla yapılan birleştirme (Welded sample joined with 100 mm/sec welding speed).



Şekil 6. 130 mm/sn hızla yapılan birleştirme (Welded sample joined with 130 mm/sec welding speed).



Şekil 7. 150 mm/sn hızla yapılan birleştirme (Welded sample joined with 150 mm/sec welding speed).



Şekil 8. 170 mm/sn hızla yapılan birleştirme (Welded sample joined with 170 mm/sec welding speed).

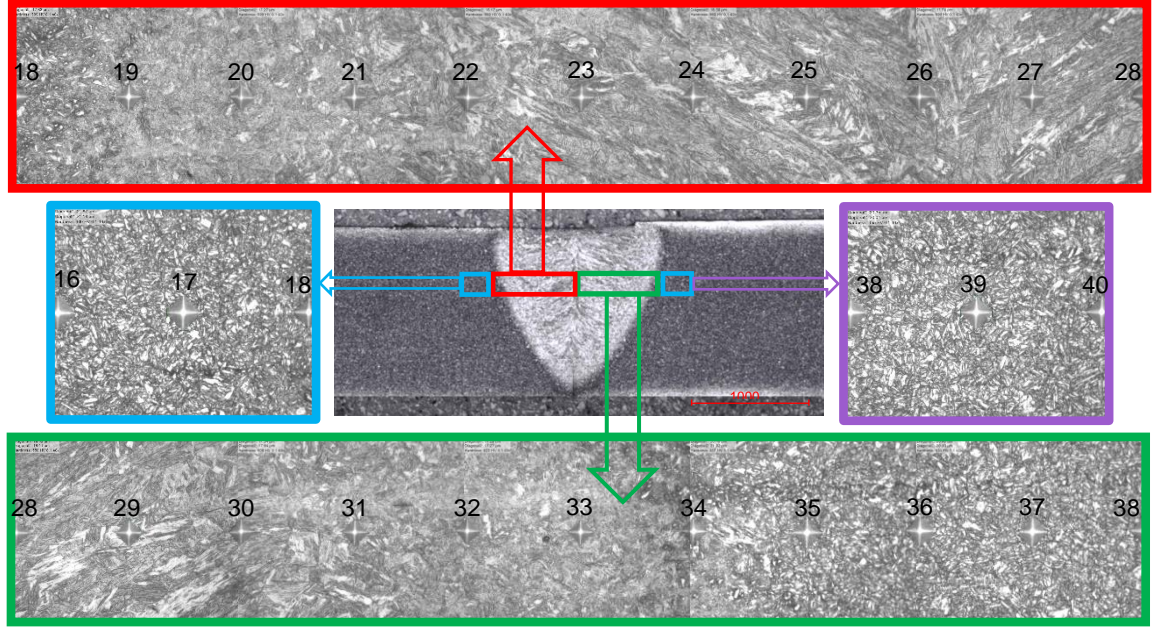
### 3.3. Sertlik Testi (Hardness test)

TBF1180 çeliklerinden oluşan deney numunelerinin plastik deformasyona karşı direncini öğrenmek amacıyla bu malzemelere ve bu malzemelerden oluşan kaynaklı birleştirmelere sertlik testi uygulanmıştır. Yapılan birleştirme sonucu oluşan her kaynaklı numunenin ana malzemesi, ITAB'ı ve kaynak metalleri incelenmiştir.

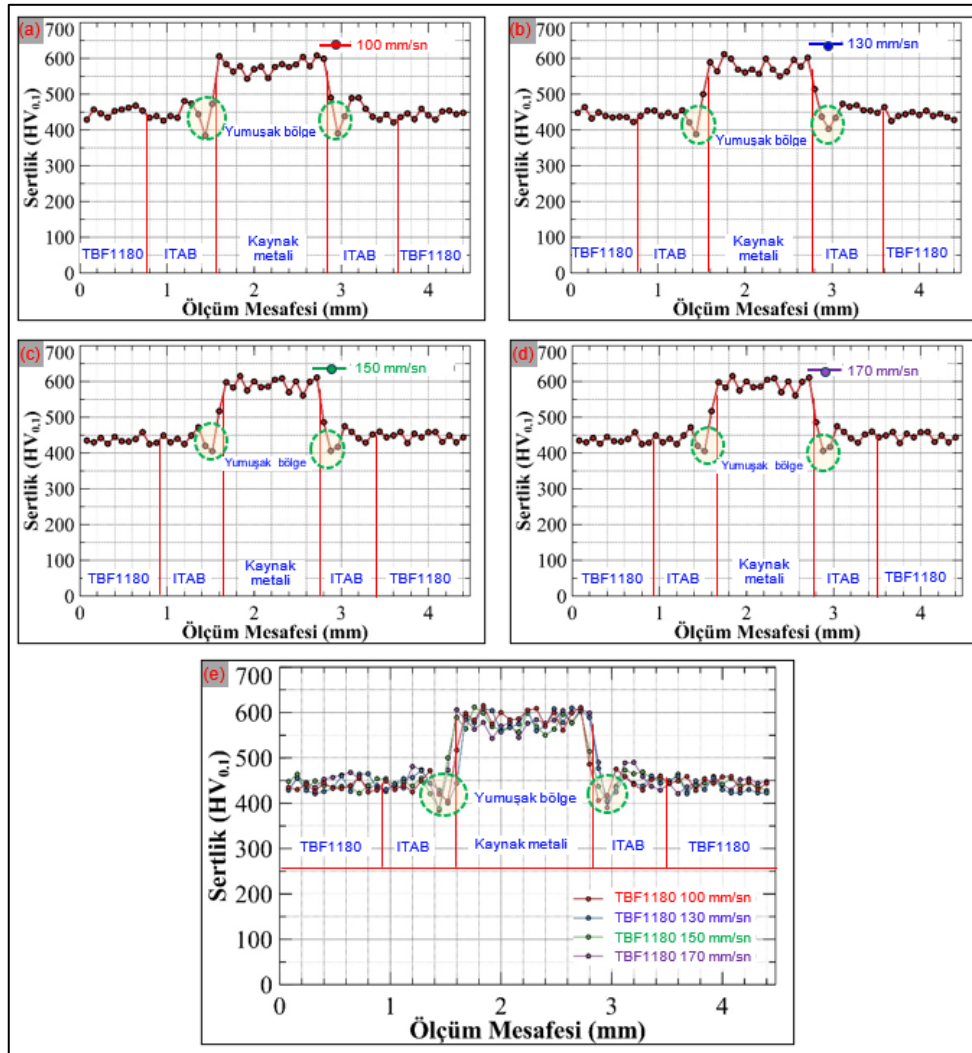
Sertlik ölçümleri tüm numunelerin kaynak bölgelerinden 75 µm aralıklarla ve her bir numuneden 55 adet olacak şekilde otomatik olarak

gerçekleştirilmiştir. Şekil 9'da her iki tarafın ana malzemesi hariç kaynak bölgesinden (ITAB ve kaynak metali) yapılan sertlik ölçüm bölgeleri ve 25 adet sertlik izleri örnek olarak verilmiştir. Şekil 10'da ise sertlik ölçüm sonucu elde edilen verilerden oluşturulmuş grafikler verilmiştir. İncelemeler sonucunda elde edilen sertlik verilerinde ana malzemede en düşük sertlik değeri 421 HV, en yüksek sertlik değeri 468 HV, ITAB'da en düşük sertlik 384 HV, en yüksek 606 HV, kaynak metalinde ise en düşük sertlik 543 HV, en yüksek sertlik 615 HV olarak ölçülmüştür.





Şekil 9. 150 mm/sn hızla birleştirilen numunenin seri sertlik ölçüm izleri ve makro görünümü (Serial hardness measurement traces and macro view of the sample joined at a speed of 150 mm/sec).



Şekil 10. Sertlik sonuçları a) 100 mm/sn, b) 130 mm/sn, c) 150 mm/sn, d) 170 mm/sn ve e) birleşik grafik (Hardness results a) 100 mm/sec, b) 130 mm/sec, c) 150 mm/sec, d) 170 mm/sec and e) combined graph)

Şekil 10 incelendiğinde birleştirmelerin en sert bölümleri kaynak metalleri olduğu görülmektedir. Burada dikkat çeken en önemli değişim kaynak metalinden (ergime sınırından) ana malzemeye doğru ani sertlik düşüştür. Ayrıca ergime sınırına bitişik olan bu bölge (yeşil daire içine alınan kısım) kaynaklı bağlantıların en düşük sertliğe sahip kısmını oluşturmaktadır. Bu kısımdan ana malzemeye doğru gidildikçe sertlik bir miktar yükselmekte ve devamında ana malzemenin az üzerinde bir sertlik bölgesi görülmektedir. Bu sertliğin en düşük olduğu bölge birçok araştırmada [6,10,13] yumuşak bölge (soft zone) olarak bilinmektedir. Bu bölge ITAB'da mevcut martenzit gibi sert fazların belirli bir sıcaklık aralığında temperlenmesinden kaynaklanmaktadır.

Dört farklı kaynak hızında birleştirilmiş kaynaklı numunelerin ana malzemeler ile kaynak bölgelerinden (kaynak metal ve ITAB) ölçülen sertlik değerlerinden elde edilen grafiklerin birbirlerine son derece benzer oldukları görülmektedir. Burada kaynak esnasında kullanılan kaynak hızı hariç sabit parametrelerin sıkı bir şekilde kontrol edilmesi, kaynak esnasında doğru fikstürleme ve otomatik kaynağın yanı sıra sertlik ölçümlerinin manuel olarak değil otomatik sertlik ölçme cihazı ile yapılması, grafiklerin benzer ve hatalardan arındırılmış olmasının bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Grafiklerde incelendiğinde oluşan bu yumuşak bölgeleri analiz etmek daha kolaydır. En yüksek sertlik değerlerinin kaynak metallere (en düşük 543 HV, en yüksek 615 HV) elde edildiği görülmektedir. Ayrıca kaynak metal sertliklerinin artan kaynak hızı ile (dolayısıyla düşük ısı girdisi) attığı, ancak bu artışın dikkate değer bir artış olmadığı tespit edilmiştir. Bir başka ifade ile en düşük ısı girdisi ile en yüksek ısı girdisi arasında birleştirilen kaynaklı numunelerde sertlik farkı %1-3 arasında değişmektedir. Kaynaklı malzemelerin kaynak metallere en yüksek sertlik değerlerinin ölçülmüş olmasının sebebi kaynak sonrası kaynak metallere elde edilen mikroyapı ile ilgilidir. Mikroyapı çalışmalarında kaynak metalinin ağırlıklı olarak martenzitik olduğu bu nedenle sertliğinin yüksek olması normal bir durumdur. Ayrıca artan ısı girdisine bağlı olarak martenzit oranının azalması beynitik yapının artması sertliğin bir miktar düşmesine neden olmaktadır.

Dört farklı kaynak ilerleme hızında birleştirilmiş kaynaklı numunelerin ITAB'ları incelendiğinde, kaynak ergime sınırından ITAB'a doğru gidildikçe sertliğin neredeyse doğrusal sayılabilecek şekilde azaldığı görülebilir. ITAB'da sertlik değerleri en yüksek yaklaşık 600 HV iken en düşük yaklaşık 400

HV ölçülmüştür. Ana malzeme sertliğinin ortalama yaklaşık 435 HV olduğu düşünüldüğünde ITAB sertliğinin ana malzemeden hem yüksek hem de düşük bölgelerinin olduğu görülmüştür. ITAB'dan ölçülen değerler kıyaslandığında ITAB'da olan farklı mikroyapılara bağlı olarak en düşük sertlik ile en yüksek sertlik değerleri arasında yaklaşık %65 fark olduğu tespit edilmiştir. Kaynak metal sınırı olan ergime sınırına bitişik bölgede en yüksek ITAB sertliği elde edilirken ana malzemeye en yakın bölgede ise ana malzemeden yaklaşık %10 düşük sertlik değerleri bulunmuştur. En yüksek ITAB sertliğinin ölçüldüğü bölge iri taneli bölge, en düşük sertliğin ölçüldüğü bölge ise ana malzemeye bitişik temperlenmiş yumuşak bölge (soft zone) olarak belirlenmiştir. Bir başka ifade ile kritik üstü bölgede en yüksek sertlik elde edilirken interkritik bölgede orta sertlik, kritik altı bölgede ise en düşük sertlik değerleri elde edilmiştir.

Başer [10] TBF1180 çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı ısı girdilerinde birleştirmiş ve kaynak bölgesindeki en yüksek sertlik değerinin kaynak metalinde 532 ile 559 HV arasında ölçüldüğünü belirtmiştir. Kaynak metal bir başka açıdan değerlendirildiğinde artan kaynak hızına bağlı olarak ısı girdisi azalmış, dolayısıyla kaynak metal genişlikleri küçülmüş bulunmaktadır. Bu ölçüm sonuçlarından elde edilen kaynak metal genişlikleri makro/mikroyapı çalışmalarındaki ölçüm değerleri ile örtüşmektedir.

Stadler ve diğerleri [14] TBF1200 malzemeleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynak bölgesinde sertlik haritalandırması yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda 400 HV sertliğe sahip ana malzeme sertliğinin ergime-katılma sonucunda kaynak metalinde 500 HV'nin üzerine çıktığını, kritik üstü ITAB'da bu değer 550 HV, interkritik bölgede ise ana malzemeye benzer sertlik sonucu gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında ana malzemenin temperlenmesiyle kritik altı ITAB'da sertliğin 370 HV'ye düştüğünü rapor etmişlerdir.

Benzer şekilde Aydın ve diğerleri [9] TBF1180 malzemeyi nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş ve ITAB'dan ana malzemeye geçiş olduğu çok dar bir bölgede sertlik değerlerinin önemli ölçüde ana malzemenin altına indiğini rapor etmiştir. Bu sertlik kayıplarının ITAB ve ana malzeme sertliklerine nazaran sırasıyla kabaca %40 ve %15 civarında olduğunu ve bu önemli sertlik düşüşünün tane büyüklüğünden değil temel malzeme iç yapısındaki sert fazların (martenzit ve beynit) kaynak ısı

çevriminde önemli ölçüde temperlemesiyle ortadan kalkması neticesinde olduğunu belirtmiştir.

Altay [16], yapmış olduğu çalışmada otomotiv endüstrisinde kullanılan ileri mukavemet özelliklerine sahip DP1200 çeliğinin üzerinde lazer kaynak parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Kaynaklı numunelere uyguladıkları sertlik testleri sonucunda bütün numunelerde kaynak metalinin sertliğinin martenzitik yapısı nedeniyle ana metalden ve ITAB'dan yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Tunçel [17] lazer kaynağı ile birleştirilmiş farklı türdeki ultra yüksek mukavemetli çeliklerin

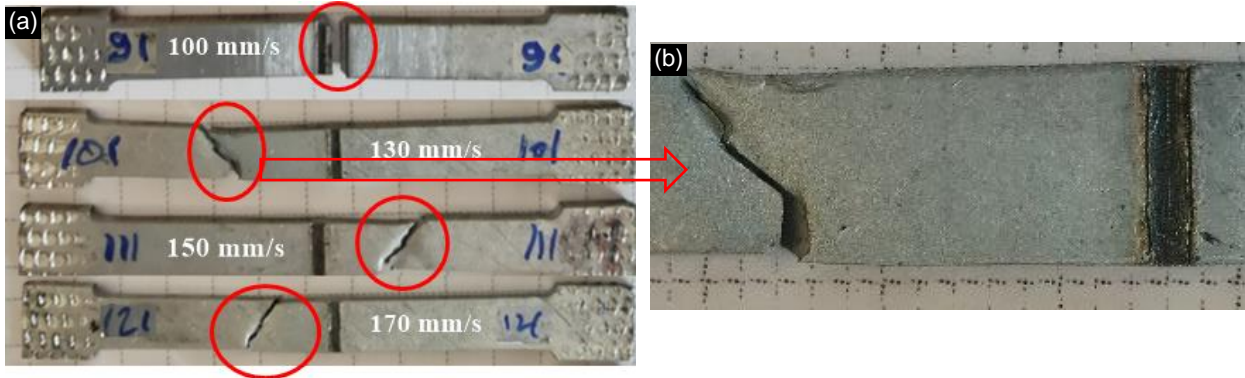
### 3.4. Çekme Testi (Tensile Test)

Çekme testi, bir deney numunesinin kopana kadar tek eksen doğrultusunda çekme kuvvetine maruz bırakılarak gerçekleştirildiği bir testtir. Bu testin amacı numunenin MPa birimi cinsinden ne kadar kuvvete dayandığını ne kadar % uzama gerçekleştireceğini öğrenmektir. Bu amaç doğrultusunda ana malzeme ve birleştirme uygulamasından sonra kaynak metalinin dahil olduğu bölümden çıkarılan çekme numunelerine bu test uygulanmıştır. Çekme testi ana malzeme ve her bir kaynak parametresinden 2 adet olmak toplamda 10 adet numuneye uygulanmıştır.

TBF1180 birleştirmelere uygulanan çekme testlerinin ardından numunelerde olan kopma

mekanik ve mikroyapı ilişkilerini incelemiştir. Yapılan incelemeler sonucunda ITAB sertliği öncelikle artış, sonrasında ise ciddi bir düşüş eğilimindedir. Mikro sertliğin arttığı ITAB'da martenzitin incelenmesi ile kaynak bölgesinden daha yüksek değerlerde mikro sertlik değerleri elde edilmiştir. Lazer kaynak sırasında tamamen östenitlenen yapı yeniden kristalize olmuştur. Mikro sertlik değerlerinde ciddi azalmanın görüldüğü ITAB'da ise temperlenmiş martenzit yapısından kaynaklı değerlerde düşüş yaşanmakta ve ana malzeme sertlik değerlerinin de altına inmektedir. Bu bölge yumuşak bölge (soft zone) olarak adlandırılmaktadır.

noktaları Şekil 11'de verilmiştir. 100 mm/s hızla yapılan birleştirme dışında bütün numuneler ana malzemenin, 100 mm/s hızla yapılan birleştirme ise kaynak metalinden koptuğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 11'de verilen kırılma görüntüsünden kopmanın gevrek türde olduğu ve çekme test esnasında malzemede boyun vermenin sınırlı olduğu görülmektedir. Burada malzeme kalınlıklarının aynı olması, kaynak mukavemetlerinin ana malzemeler ile aynı veya çok az miktarda yüksek olduğu sonucunu meydana getirmektedir. Bir başka ifade ile benzer malzemelerin birleştirilmesinde uygun yöntem ve parametre seçildiğinde kaynak metalinden kopma beklenmemektedir.



Şekil 11. Çekme testi sonrası kopma bölgeleri (Rupture zones after tensile testing).

100 mm/s hızla birleştirme yapılan numunede; seçilen kaynak hızının bu kalınlıkta olan TBF1180 çelikleri için uygun olmadığı görülmektedir. Burada düşük kaynak hızının tetiklediği yüksek ısı girdisi kaynak metalinin çökmesine dolayısıyla kaynak kesit kalınlığının azalmasına sebep olmuş, sonuçta kopma bu numunede kaynak metalinde gerçekleşmiştir. Tablo 3'de çeliklere uygulanan 8 çekme testine ait bütün ölçümler, (% uzamalar, kaynak verimleri, kopma noktaları), Şekil 12'de ise

çekme testi sonuçları grafik olarak verilmiştir. Şekil 12'de verilen grafikler aynı grafikler olup sadece aralarındaki farkın kolay anlaşılması için ötelenmiş (a) ve bindirme (b) biçiminde verilmiştir.

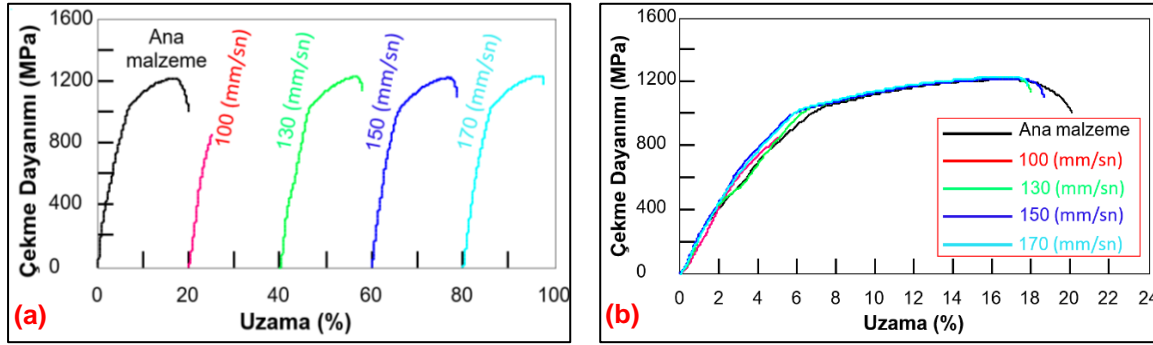
Tablo 3'de verilen çekme test sonuçları incelendiğinde gerek çekme dayanımlarının gerekse % uzama değerlerinin birbirlerine yakın değerlerde ölçülmesi bu tür kaynaklı konstrüksiyonların elde edilmesinde tekrarlanabilirlik açısından son derece

önemlidir. Burada tekrarlanabilirliğin yüksek olmasının sebebi kaynak işlemlerinde direkt insan faktörünün olmaması, ön parametrik çalışmaların yapılması ve malzemeye uygun yöntemin seçilmiş

olmasıdır. Kaynak yönteminde ilave metal kullanılmamasının da bu yüksek değerlerin ölçülmesinde önemli bir etkisinin olduğu unutulmamalıdır.

**Tablo 3.** TBF1180 ana malzeme ve birleştirme sonrası çekme testi sonuçları (TBF1180 base material and after joining tensile test results).

Kaynak Hızı (mm/s)	Ölçüm No	Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalama	Ölçüm No	Uzama (%)	Ortalama	Kopma yeri	Verim (%)
100	1. ölçüm	872,10	869,21	1. ölçüm	5,28	5,16	Kaynak metali	71
	2. ölçüm	866,32		2. ölçüm	5,05		Kaynak metali	
130	1. ölçüm	1232,39	1235,37	1. ölçüm	15,90	16,03	Ana malzeme	100
	2. ölçüm	1238,35		2. ölçüm	16,17		Ana malzeme	
150	1. ölçüm	1233,06	1230,95	1. ölçüm	16,17	16,15	Ana malzeme	100
	2. ölçüm	1228,85		2. ölçüm	16,14		Ana malzeme	
170	1. ölçüm	1236,89	1238,15	1. ölçüm	16,51	16,72	Ana malzeme	100
	2. ölçüm	1239,42		2. ölçüm	16,93		Ana malzeme	
<b>Ana malzeme (TBF1180)</b>		<b>Katalog</b>	<b>Ölçülen</b>	<b>Verim:</b> ana metalin mukavemetine göre kaynaklı bir bağlantının mukavemetini ifade eder. %100 bağlantı verimliliği, kaynağın ana metal ile aynı mukavemete sahip olduğunu gösterir.				
<b>Çekme Dayanımı (MPa)</b>		1222	1227,9					
<b>Uzama (%)</b>		18	16,6					



**Şekil 12.** Çekme test sonuçları a) ötelenmiş ve b) bindirme biçiminde (Tensile test results in a) offset and b) overlap graphic).

Yukarıda veriler Tablo ve grafikler incelendiğinde 100 mm/s kaynak hızıyla yapılan birleştirmenin kopma noktası ve çekme dayanımı birleştirme için kabul edilemez bir noktadadır. Ana malzemenin çekme dayanımı 1200 MPa civarındayken 100 mm/s kaynak hızıyla gerçekleştirilen birleştirmenin ulaştığı çekme dayanımı 860-870 MPa arasındadır. Dolayısıyla bu numunede kopma kaynak metalinde gerçekleşmiştir. Diğer birleştirmelerde kaynak hızının artması ile numunelerin çekme dayanımı ana malzeme ile aynı değerlere gelmiş olup kopmalar ana malzemelerden gerçekleşmektedir. Bu test sonuçlarından ideal kaynak parametrelerinin bu değerler olduğu sonucu çıkarılabilir. Çünkü bu üç numunenin kopma yerleri kaynak metali ve ITAB değil ana malzemedir. Kaynaklanabilirliği kötü olmayan malzemelerin ideal kaynak ekinin en az ana malzemeler kadar mukavemet vermesi gerekliliği bilinmektedir. Dolayısıyla kaynak sonrasında kaynaklı bağlantılarda kopmanın ana

malzemeden olması ideal kaynak ekinin elde edildiğini göstermektedir [18]. Özellikle yüksek mukavemetli çeliklerde ilave metalin kullanıldığı durumlarda çoğu kez kopmalar kaynak metali veya ITAB'dan gerçekleşmektedir. Özellikle 22MnB5 ve Q&P (Quench and Partioning) gibi yüksek mukavemetli malzemelerin kaynağı esnasında ITAB'da meydana gelen yumuşak bölge, çekme testinde kaynaklı bağlantımın hem bu bölgeden kopmasına hem de ciddi verim düşüşlerine neden olmaktadır. Çalışmada kullanılan TBF1180 malzemesinde de kaynaktan sonra ITAB'da yumuşak bölgenin varlığı Şekil 10'daki sertlik grafiklerinde açıkça görülmektedir. Ancak TBF malzemelerin kaynağında ITAB'da meydana gelen yumuşak bölge diğer yüksek mukavemetli çeliklere göre hem çok az hem de dar bir alanda meydana gelmektedir. Bu nedenle 22MnB5 ve Q&P gibi kaynaklı çeliklerin çekme testinde kopma ITAB'ın yumuşak bölgesinde meydana gelirken kaynaklı

TBF1180 malzemelerin çekme testinde kopma ana malzemeden olabilmektedir. Bu farklılığın çekme testi esnasında TBF malzeme ITAB'ında dar ve düşük bir miktarda olan bu yumuşak bölgenin hızla pekleşerek ana malzeme özelliklerine ulaşmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. 22MnB5 ve Q&P gibi malzemelerde bu bölgenin hem daha geniş hem de ana malzemeden belirgin bir değerde düşük olası kaynaklı bağlantının bu bölgeden boyun vermesi ve kopmasıyla sonuçlanmaktadır. Tuncel ve arkadaşları [19] 22MnB5 malzemeleri farklı lazer gücü ve farklı kaynak hızlarında birleştirmiş ve üç farklı lazer gücü için kaynak hızı artırdığında çekme mukavemeti ve uzama yüzdesi değerlerinin azaldığını ve çekme testi sonucunda ısı girdisi düşük olan numuneler kaynak metalinden kırılırken, ısı girdisi yüksek olan numunelerin ITAB'ın yumuşak bölgesinden kırıldığını rapor etmişlerdir. Benzer şekilde Jia ve arkadaşları da [20] ultra yüksek dayanımlı 22MnB5 ve Q235 çelik malzemeleri fiber lazer yöntemi ile 3.5 kW lazer gücü ve 5 farklı kaynak hızı (3, 4, 5 ve 6 m/dk) kullanarak birleştirmişler çalışmaları sonucunda 22MnB5 malzemelerin kendi aralarındaki birleştirmelerinde en yüksek kaynak hızlarında

(6 m/dk) yeterli nüfuziyet elde edilememiş ve kopmalar kaynak metalinden gerçekleşmiştir. Diğer bütün hızlarda kopma ITAB'ın yumuşak bölgesinden gerçekleşmiş ve kaba tanelerin ve sert, kırılğan fazın oluşması nedeniyle herhangi bir görünür boyunlanma oluşumu olmadan kırıldıklarını rapor etmişlerdir.

#### 3.4. Erichsen Çökertme Testi (Erichsen Cupping Test)

Lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı malzemelerin kaynak sonrası şekillendirme özelliklerinin bilinmesinde Erichsen çökertme testleri kullanılmaktadır. Test sonrası kaynaklı numunelerin oda sıcaklığında şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisini incelemek için çökme yükseklikleri ve kalınlık dağılımları ölçülür [21]. Bu amaç doğrultusunda 150 mm/s hız ile yapılan birleştirme dikkate alınarak Erichsen çökertme testi uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerden 150 mm/s hızla birleştirilen numuneye uygulanan test sonrası cihazın ekran görüntüsü ve testin yapıldığı bölgenin yakın mesafeden görüntüleri Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 13. Erichsen çökertme test görüntüleri ve test sonuçları (Erichsen cupping test images and test results).

150 mm/s hız ile birleştirilen numuneye uygulanan test sonucunda bir yırtılma gerçekleşmemiştir. Burada kaynaklı numunenin çökertme derinliği 5.1 mm olarak ölçülmüştür. Lakin yırtılma olmaması bu malzemenin şekillendirilebilirliğinin iyi olduğu anlamına gelmemektedir. Burada yırtılma olmayışının sebebi kaynak bölgesinin sağlam olmasının yanında makine gücünün yetersiz olduğunu göstermektedir. Numunenin makro görüntüsüne bakıldığında uygulanan 4.98 ton basınça rağmen kaynak bölgesinde (kaynak metal ve ITAB) çatlama ve yırtık gözlenmemiştir. Kaynaklı numune üzerinde oluşan çukurlaşma derinliği kaynaklı malzemenin şekillendirilebilirliğinin iyi olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Di ve arkadaşları [22] 1,5 mm kalınlıkta DP780 ve DP980 çeliklere fiber lazer kaynak işlemi

gerçekleştirmiş, dayanım, şekillendirilebilme gibi özellikleri incelemişlerdir. Erichsen çökertme deneyi sonucu farklı malzemelerin birleşmesinde şekillendirilebilirliğin daha kötü olduğu belirtilmiş, sebebi asimetrik deformasyona ve farklı yumuşama derecelerine bağlanmıştır. Çatlağın DP780'in yumuşamış bölgesinden başladığı ve kaynak bölgesine paralel olarak ilerlediği belirtilmiştir.

Jia ve arkadaşları [23] 1,36 mm kalınlığında QP980 ve 1,2 mm kalınlığında B1500HS çeliklerini fiber lazer ile alın kaynağı işlemi gerçekleştirmişler ve Erichsen çökertme deneyinde çatlak başlangıcının B1500HS'nin ITAB'ının yumuşamış bölgesinde olduğu belirtilmiştir. Huan ve arkadaşları [24] DP590, DP780 ve DP980 çelikleri lazer kaynağı ile birleştirdikleri çalışmalarına Erichsen çökertme deneyi uygulamışlar ve kaynaklı numunelerde ana malzemenin %81,1'i ile %91,7'si arası dayanım

değerleri belirlemiştir. Hamidinejad ve arkadaşları [25] IF çeliklerini CO<sub>2</sub> lazer kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynaklı numunelere Erichsen çökertme testi uygulamışlar ve çalışmaları sonucunda üç tür kırılma hatası gözlemlenmiştir. Bunlar artan gözenek sayısı ve düşük kaynak sünekliği nedeniyle meydana gelen ayrılma; ikinci olarak ana malzeme şekillendirme sınırını (istenen tip) aşacak şekilde oluşan ana malzeme yırtılması ve ITAB'dan başlayan ve erken oluşan yırtılma tipi kırılmadır. Bandyopadhyay ve arkadaşları [26] da DP980, DP600 ve yüksek dayanımlı IF çeliklerini fiber lazer kaynağı ile birleştirmişler ve Erichsen çökertme testi sırasında iki farklı başarısızlık modeli gözlemlendiğini ve DP980'de kaynağa yakın yumuşak bölgede lokalize boyun verme ve kaynağa paralel yumuşak bölge civarında yayılan kırılma ve yüksek dayanımlı IF çeliği ile DP600'lerde yırtılmanın başladığı ve kaynak boyunca ana metale dik yönde yayıldığını rapor etmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen Erichsen çökertme testi sonrasında kaynak bölgesinde dikkate değer bir kaynak hatasının (yetersiz ergime, nüfuziyet azlığı, gaz boşluğu, mikro çatlak vb) oluşmadığı sonucu çıkarılabilir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan TBF1180 çelikler 4 kW fiber lazer kaynak (Trumpf Trudisk 4001) yöntemi ile birleştirilmiş ve birleştirmeler çekme testi, Erichsen çökertme test, sertlik testi ve makro/mikroyapı incelemeleri yapılarak karakterize edilmiştir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Kaynaklı numunelere yapılan göz ile muayene sonucunda kaynak esnasında kullanılan parametrelerin yeterli ergimeyi sağladığı, kaynak kep ve kökünün malzeme kesit kalınlıkları boyunca olduğu yani gözle görülebilecek herhangi bir kaynak kusurunun (makro çatlak, gözenek, yenme olukları vb.) oluşmadığı görülmüştür.
- Makro/mikroyapı çalışmaları sonucunda tüm birleştirmelerde kaynak metalinin simetrik oluştuğu, kaynak esnasındaki fiktürleme sayesinde malzemeler arasında eksenel

kaşıklığın olmadığı ve kaynak metali, ITAB ve ana malzemelerin farklı tane morfolojilerine sahip oldukları tespit edilmiştir.

- Mikroyapı çalışmaları sonucunda ITAB'da -üst kritik, -inter kritik ve -kritik altı olmak üzere üç farklı bölge tespit edilmiştir. Burada üst kritik ITAB genel itibariyle martenzitten oluşurken, interkritik ITAB ferrit ve martenzitten, kritik altı ITAB ise temperlenmiş martenzit ve ferritten oluştuğu belirlenmiştir.
- Kaynaklı birleştirmelere ait mikroyapılar incelendiğinde kaynak metali yapısının kabalaşmış lamellerden oluştuğu ve yapının martenzit-beynit olduğu tespit edilmiştir. Kaynaktan önce ağırlıklı beynitik olan ana malzeme mikroyapısı, kaynak işlemi sonrası artan soğuma hızı ile birlikte martenzit fazı lehine artış ile beraber beynit fazının miktarının azaldığı tespit edilmiştir.
- Sertlik ölçüm çalışmaları sonucunda en yüksek sertlik değerleri kaynak metallere ölçülmüştür. Kritik altı ITAB'ın bir kısmı kaynak sıcaklığından etkilenecek şekilde temperlenmiş, dolayısıyla bu bölgedeki sertlik değeri ana malzeme sertliğinden düşük (yumuşak bölge), diğer bölge sertlik değerleri ana malzemeden daha yüksek bulunmuştur.
- Uygulanan çekme testlerine göre kaynaklı birleştirmelerin 100 mm/s hızla birleştirilen numunede yüksek ısı girdisi nedeniyle kopma kaynak metalinde meydana gelirken, diğer birleştirmelerde kopmanın ana malzemelerden gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- Kaynaklı numunelerin kaynak bölgesinin kaynak sonrası şekillenebilirliğini ölçmek için yapılan Erichsen çökertme testi sonrasında makinanın uyguladığı maksimum yük sınırına ulaşılmış ve bu yükte yırtılma oluşmamıştır. Ancak kaynaklı numunede malzeme kalınlığının yaklaşık 3.4 katı oluşan çukur derinliği kaynak bölgesinde kaynak hatalarının oluşmadığına işaret etmekte dolayısıyla kaynak bölgesinin şekillenebilirliği hakkında fikir vermektedir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan edeler.

The author of this article declares that materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. There is no conflict of interest in this study.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Siyambaş Y., Turgut Y., HSLA Çeliğinin Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Çap Değişimi ve Çapak Yüksekliği Üzerindeki Etkilerinin Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Araştırılması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 8(320–334), (2020).
- [2] Erişir E., Bilir, OG., Sözer, YE., Ararat, Ö., Davut, K., Partial austenitisation and TBF Steel Composed of Ferrite, Bainitic Ferrite, and Austenite, Materials Science And Technology, 39(1), 105–116 (2023).
- [3] Kenneth, Gibbs, P. (2019). Strain Path Effect on Austenite Transformation And Ductility in Strain Path Effect on Austenite Transformation And Ductility in TBF 1180 Steel, MSc Thesis, School Of Technology Brigham Young University, Utah, 1-5.
- [4] Billur, E., Çetin, B., Gürleyik, M., New Generation Advanced High Strength Steels: Developments, Trends And Constraints, International Journal of Scientific and Technological Research, 2(50-62) (2016).
- [5] Mohrbacher H, Yang J-R, Chen Y-W, Rehr J, Hebesberger T., Metallurgical Effects of Niobium in Dual Phase Steel, Metals, 10(1-3), (2020).
- [6] Hidroğlu, M. (2022). Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilen Yüksek ve Ultra Yüksek Dayanımlı Otomotiv Çeliklerinin Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 1-149.
- [7] Hidroğlu, M., Kahraman, Ü., Kahraman, N., The Effect Of AC And MFDC Resistance Spot Welding Technology on Mechanical Properties Of New Generation Automotive Steels, Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences, 27(4), (2021).
- [8] Huin, T., Dancette, S., Fabrègue D., Dupuy, T., Investigation of The Failure of Advanced High Strength Steels Heterogeneous Spot Welds, Metals, 6 (1-19), (2016).
- [9] Aydın, H., Yılmaz, İ. Ö., Bilici, A. Y., Elektrik Direnç Punta Kaynağı ile Birleştirilen TBF/DP600 Çeliklerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 37(609-624), (2022).
- [10] Başer, A.T., Resistance Spot Welding of Zn-Coated Third Generation Automotive Steels Using Mid-Frequency Direct Current Technology, Transactions of The Indian Institute of Metals, 76(49–57), (2023).
- [11] Uyguntürk, E. (2020). Titanyum Boruların TIG ve Lazer Kaynak Yöntemleri ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 1-3.
- [12] Quintino, L., Costa, A., Miranda, R., Yapp, D., Kumar, V., Kong, C. J., Welding With High Power Fiber Lasers – A Preliminary Study, Materials And Design, 28(1231–1237), (2007).
- [13] Stadler, M, Gruber, M, Schnitzer, R, Hofer, C., Microstructural Characterization of a Double Pulse Resistance Spot Welded 1200 MPa TBF Steel, Welding in the World, 64(335-343), (2020).
- [14] Stadler, M., S., Chnitzer, R., Gruber, M., Hofer, C., Improving the Mechanical Performance of a Resistance Spot Welded 1200 MPa TBF Steel, International Journal Of Materials Research, 112(262-265), (2021).
- [15] Salminen, A., Farrokhi, F., Unt, A., Poutiainen, I., Effect of Optical Parameters on Fiber Laser Welding Of Ultrahigh Strength Steels and Weld Mechanical Properties at Subzero Temperatures, Journal of Laser Applications, 28(2), (2016).
- [16] Altay, M. (2021). Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Yüksek Mukavemetli DP1200 Çeliğinde Lazer Kaynak Parametrelerinin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 1-138.
- [17] Tunçel, O. (2020). Lazer Kaynağı ile Birleştirilmiş Farklı Türdeki Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Mekanik ve Mikroyapı İlişkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 86-164.
- [18] Akay, A. A., Kaya, Y., Kahraman, N., Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen X60, X65 ve X70 Çeliklerin Kaynak Bölgesinin Etüdü,

- Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 3 (2), 34-42, (2013).
- [19] Tuncel, O., Aydın, H., Davut, K., “Effect of heat input on HAZ softening in fiber laser welding of 22MnB5 steel.”, *Optics and Laser Technology*, 1-7, (2023).
- [20] Jia, Q., Guo, W., Wan, Z., Peng, Y., Zou, G., Tian, Z., Zhou, Y.N., Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar joints between QP and boron alloyed martensitic steels, *Journal of Materials Processing Tech.*, 259;58–67, (2018).
- [21] Dinda, S. K., Sk, M.B., Roy, G.G., Srirangam, P., Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Welded Dissimilar Steel To Fe–Al Alloy Joints, *Materials Science & Engineering A*, 677(182–192), (2016).
- [22] Di, H., Sun, Q., Wang, X., Li, J., Microstructure And Properties in Dissimilar/Similar Weld Joints Between DP780 And DP980 Steels Processed By Fiber Laser Welding, *Journal of Materials Science & Technology*, 33(1561-1571), (2017).
- [23] Jia, Q., Guo, W., Wan, Z., Peng, Y., Zou, G., Tian, Z., Zhou, Y.N., Microstructure And Mechanical Properties Of Laser Welded Dissimilar Joints Between QP and Boron Alloyed Martensitic Steels, *Journal Of Materials Processing Tech.*, 259(58–67), (2018).
- [24] Huan P., Wang, X., Yang, L., Zheng, Z., Hu, Z., Zhang, M., C., C., Effect of Martensite Content On Failure Behavior Of Laser Welded Dual-Phase Steel Joints During Deformation, *Journal of Materials Engineering And Performance*, 28(1801-1809), (2019).
- [25] Hamidinejad, S.M., Hasanniya, M.H., Salari, N., Valizadeh, E., CO<sub>2</sub> Laser Welding of Interstitial Free Galvanized Steel Sheets Used in Tailor Welded Blanks, *Int Journal of Advanced Manuf Technol*, 64(195–206), (2013).
- [26] Bandyopadhyay, K., Panda, S. K., Saha, P., Investigations Into the Influence of Weld Zone on Formability of Fiber Laser-Welded Advanced High Strength Steel, *Journal of Materials Engineering And Performance*, 23(1465–1479), (2014).