

## Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen AISI 316 Paslanmaz Çelik ve Karbonlu Çelik Çiftlerinin Mekanik Özelliklerinin ve Mikroyapılarının İncelenmesi

Yeliz ALNAK<sup>\*1</sup>, Ali ÖZER<sup>2</sup>, Vedat SAVAŞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Sivas

<sup>2</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji Mühendisliği Bölümü, Sivas

<sup>3</sup>Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ

Geliş tarihi: 21.04.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

### Öz

Sürtünme karıştırma kaynağı, belirli bir hızda dönen bir pim metaler arasında sürtünmesiyle oluşan ısıyı kullanarak, benzer veya benzer olmayan malzemeleri katı halde kaynaklamak için kullanılan bir katı hal kaynak tekniğidir. Kaynak, kaynak yapılacak malzemelerden daha sert olan ve tükenmeyen bir pim ile yapılır. Bu çalışmada AISI 316 östenitik paslanmaz çelik ve sade karbonlu çelikler sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir. Birleştirilen çelik plakalar 3 mm kalınlığa, 60 mm genişliğe ve 120 mm uzunluğa sahiptir. Deneylerde omuz çapı 16 mm, pim uzunluğu 2,7 mm olan eşkenar üçgen profilli tungsten karbür uç kullanılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı 710 dev/dak devir sayısı ve 63 mm/dak ilerleme hızında ve takıma 1,5° açı verilerek gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı bölgelerinin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenerek, en uyumlu kaynak çiftinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan mekanik testlerin ve mikroyapı analizlerinin sonuçlarından, en uyumlu kaynak çiftinin AISI 316-AISI 1010 olduğu ortaya çıkmıştır. Mekanik testlerde AISI 316-AISI 1010 çelik çiftinin 618,81 MPa çekme değeri ile diğer kaynak çiftlerinden daha iyi olduğu görülmüştür. Mikroyapıları incelendiğinde tane boyutunun malzemenin mukavemetini büyük ölçüde etkilediği, özellikle büyük tanelerin görüldüğü yerlerde malzemenin mukavemetinin düştüğü gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürtünme karıştırma kaynağı, Paslanmaz çelik, Karbonlu çelik, Mekanik özellikler, SEM

### Investigation of Mechanical Properties and Microstructures of AISI 316 Stainless Steel and Carbon Steel Pairs Combined by Friction Stir Welding

#### Abstract

Friction stir welding is a solid state welding technique used to weld similar or dissimilar materials in a solid state, using the heat generated by the friction of a pin rotating at a certain speed between metals. Welding is done with a non-consumable pin that is harder than the materials to be welded. In this study, AISI 316 austenitic stainless steel and plain carbon steels were joined by friction stir welding. Steel plates joined have a thickness of 3 mm, a width of 60 mm and a length of 120 mm. Tungsten carbide tip with an equilateral triangle profile with a shoulder diameter of 16 mm and a pin length of 2.7 mm was used in the

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Yeliz ALNAK, [ytas@cumhuriyet.edu.tr](mailto:ytas@cumhuriyet.edu.tr)

experiments. The friction stir welding was performed at a speed of 710 rpm and a welding speed of 63 mm/min, at an tilt angle of 1.5 ° to the tool. It is aimed to determine the most compatible weld pair by examining the microstructure and mechanical properties of the welded areas. From the results of the mechanical tests and microstructure analysis, it has been revealed that the most compatible welding pair is AISI 316-AISI 1010. In mechanical tests, it was seen that the AISI 316-AISI 1010 steel pair had the best value among other weld pairs with a tensile value of 618,81 MPa. When the microstructures were examined, it was observed that the grain size greatly affected the strength of the material, and the strength of the material decreased, especially where large grains were seen..

**Keywords:** Friction stir welding, Stainless steel, Carbon steel, Mechanical properties, SEM

## 1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte endüstriyel uygulamalarda işlevselliği arttırmak adına pek çok farklı malzeme bir arada kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemelerin tek parça olarak üretilmesi mümkün olmadığı için ayrı ayrı üretilip daha sonra uygun bir birleştirme tekniği ile birleştirilmesi gerekmektedir. Birleştirme tekniklerinden biri olan kaynak, üretilmesi zor malzemelerden karmaşık parçaların meydana getirilmesine olanak sağlayan eşsiz bir yöntemdir. Üretim yöntemlerine alternatif olarak kullanılmayan kaynak, tamamlayıcı bir süreçtir [1].

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, kaynak yapılacak levhanın uzunluğu boyunca yüksek hızda dönen bir pim belirli bir hızda ilerletilmesi işlemidir. Birleştirme işleminde, kaynaklanacak malzemeden daha sert olan bir malzemeden yapılmış tükenmeyen bir pim kullanılır [2]. İş parçasında çok az çarpılma meydana gelmesi, kaynak bölgesinde mükemmel metalürjik özellikler, kaynak sırasında ilave metal kullanılmaması, çatlak olmaması, farklı kalınlıktaki malzemelerin birleştirilebilmesi açısından oldukça faydalı bir kaynak yöntemidir [3]. Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin birleştirilmesi için bu koşullarda sertliklerini koruyabilecek özel pimler ve güçlü kaynak makineleri gerekir [4].

İyi bir kaynak için, dönme hızı (devir sayısı), ilerleme hızı, dalma derinliği, eğim açısı, uç geometrisi, omuz çapı gibi parametrelerin doğru belirlenmesi gerekir. Bu sayede karıştırma bölgesinde ince taneli yapılar ve iyi mekanik özellikler elde edilebilir [5].

Dönme ve ilerleme hızlarının değişken olarak alındığı parametrelerle yapılan çalışmalardan Aktarer ve arkadaşları [6] sabit ilerleme hızı ve üç farklı takım dönme hızı kullanarak birleştirdikleri benzer olmayan dissimilar kaynakta en yüksek mukavemet değerinin ve en fazla uzamanın 1250 dev/dak dönme hızında gerçekleştiğini görmüşlerdir. Reynolds ve arkadaşları [7] sabit ilerleme hızı ve iki farklı dönme hızlarında similar kaynak birleştirmeleri yapmışlardır. Düşük devir sayısı ile yaptıkları kaynakta mm başına ısı girdisinin daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Bundan dolayı kaynak merkezinde daha küçük tanecikli yapılar elde edildiğini belirtmişlerdir. Bozkurt ve Boumerzough [8] yalın halde (HSS), CrN ve AlTiN kaplı takım malzemesi kullanarak sürtünme karıştırma kaynağını gerçekleştirmişler. Sabit dönme hızı ve iki farklı ilerleme hızı kullandıkları birleştirmelerde en iyi kaynak bağlantılarını AlTiN ile kaplanmış takımla elde etmişlerdir.

Pim geometrilerine bakıldığında yine çok farklı geometriler ile başarılı birleştirmeler yapılmıştır. Başak ve arkadaşları [9] sabit ilerleme hızı ve dönme hızı ile birleştirdikleri kaynakta altı farklı tipte pim kullanmışlardır. En uygun birleştirmeyi üçgen vidalı uç ile elde etmişlerdir. Ayrıca çekme dayanımı ve darbe dayanım özellikleri üzerinde takım omuz çapının levha kalınlığı oranına etkisini araştıran Nathan ve arkadaşları [10] 5 mm kalınlığında HSLA çeliğini sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. İlerleme ve dönme hızını sabit tutarak beş farklı omuz çapına sahip pim kullanmışlardır.

Başlangıçta düşük erime sıcaklığına sahip alüminyum ve alaşımları sürtünme karıştırma

kaynağıyla birleştirilmeye başlanmıştır. Yapılan çalışmalarda hem pim geometrileri hem de farklı devir sayıları ve ilerleme hızlarında birleştirmeler yapılmıştır. Oluşan kaynak bölgelerinin mekanik özellikleri ve mikroyapıları incelenmiştir. Boz ve Kurt [11] Al 1080 alüminyum alaşımını farklı pim tasarımı kullanarak birleştirmişler ve kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. En iyi birleştirmeyi 0,85 ve 1,10 hatveli pim ile elde etmişlerdir. Elangovan ve Balasubramanian [12] AA6061 alüminyum alaşımının kaynağı için düz silindirik, konik silindirik, dişli silindirik, üçgen ve kare olmak üzere beş farklı pim üzerinde çalışmışlardır. Bu beş takım profilinden kare profilli takımın diğer takımlara göre kusursuz kaynaklar ürettiğini belirtmişlerdir. Şık ve arkadaşları [13] AA2024 alüminyum alaşımını üç farklı devir sayısı, iki farklı ilerleme hızında birleştirmişlerdir. En yüksek sertlik, en yüksek çekme dayanımı ve en yüksek eğme yorulma dayanımı değerlerini 1500 dev/dak-200 mm/dak parametresi ile kaynakladığı numunelerde gerçekleştiğini görmüşlerdir. Sabit ilerleme hızı ve sabit devir sayısı ile AA5251 alüminyum alaşımını birleştiren Haşçalık ve arkadaşları [14] beş farklı pim geometrisi kullanmışlardır. En mukavemetli birleştirmeyi kare piramit geometrisine sahip pim ile gerçekleştirdiğini belirtmişlerdir.

Daha sonra sürtünme karıştırma kaynağının alanı karbonlu çelikler, paslanmaz çelikler ve polimerlerde dahil olmak üzere çeşitli materyallere kadar genişlemiştir [22]. Fujii ve arkadaşları [15] IF steel, S12C, S35C olmak üzere üç farklı karbon çeliğini farklı ilerleme hızları ve sabit devir sayısında birleştirmişlerdir. Birleştirme sonrası bu çeliklerin mekanik özellikleri ve mikroyapılarını incelediklerinde kaynak koşullarının her üç çeliği de önemli ölçüde etkilediklerini görmüşlerdir. AISI 1018 karbonlu çeliği birleştiren Lienert ve arkadaşları [16] en büyük takım aşınmasının tam ısınmamış soğuk metalin hareketi esnasında oluştuğunu belirtmişlerdir. Bunu önlemek için ön ısıtma, düşük dalış değeri, ön delik uygulamaları yapılabileceğini belirtmişlerdir. Meran ve Canyurt [4] AISI 304 ostenitik paslanmaz çelik plakaları

eşkenar üçgen uç profili kullanarak birleştirmişlerdir. Devir sayıları, ilerleme hızları, takım baskı kuvvetleri ve takım açılarının birleştirmeye etkisini araştırmışlardır. Maksimum mukavemeti 950 dev/dak devir sayısı, 60 mm/dak ilerleme hızı, 9 kN'luk takım baskı kuvveti ve 1,5 derecelik eğim açısında elde etmişlerdir. AISI 304 plakayı Lakshminarayanan [17] ise konik uç profili kullanarak birleştirmiştir. Çalışmasında farklı ilerleme hızı, devir sayısı ve omuz çapı kullanarak optimum değeri elde etmeye çalışmıştır. En iyi sonuçları 441 dev/dak devir sayısı, 118 mm/dak ilerleme hızı ve 17,5 mm omuz çapında elde etmiştir. Yine AISI 304 çelik plakayı birleştiren Park ve arkadaşları [18] kaynak dikişinin mikroyapısını ve sigma fazı oluşumunu incelemişlerdir. Kaynak bölgesindeki iç yapının alüminyumda elde edilen yapıya benzediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca sigma fazı oluşumuna rastlanmadığını belirtmişlerdir. Meran ve arkadaşları [19] birleştirdikleri AISI 304 paslanmaz çeliğinde kaynaklı bölgenin çekme mukavemetlerini, sertlik değerlerini ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Ayrıca takım dalma açısının kaynak dikişinde önemli bir etkisinin olduğunu gözlemlemişlerdir. Bilgin ve Meran [20] farklı kaynak parametreleri kullanarak birleştirdikleri AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin birleştirilmesinde takım dönme ve ilerleme hızının etkilerini incelemişlerdir. İlerleme hızını sabit tutup devir sayılarını değiştirerek yaptıkları birleştirmelerde en iyi mekanik direnç değerini 1120 dev/dak devir sayısında elde etmişlerdir. Devir sayısını sabit tutup ilerleme hızlarını değiştirdiklerinde ise en iyi mekanik direnç değerini 125 mm/dak ilerleme hızında elde etmişlerdir. AISI 409 ferritik paslanmaz çeliği birleştiren Cho ve arkadaşları [21] birleştirme işleminde dışbükey karıştırıcı uç kullanmışlardır. Karıştırma bölgesinde oldukça ince taneli bir mikroyapı elde etmişlerdir.

Ayrıca bu gibi benzer (similar) metallerin yanı sıra benzer olmayan (dissimilar) metallerde sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin Çakır ve Çelik [23] Al 5754-Cu malzeme çiftini farklı takım dönme ve ilerleme hızlarında, 0 ve 1 mm takım

konumlandırması yaparak sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Karıştırıcı ucu bakıra nazaran daha yumuşak olan alüminyum tarafına 1 mm kaydırarak deneylerini gerçekleştirdiklerinde daha iyi mekanik değerler elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Kimapogon ve Watanabe [24], alüminyum alaşımı ile düşük karbonlu çelik plakayı birleştirmişlerdir. En iyi dayanıma sahip kaynak dikişlerini, tabandan 0,2 mm mesafede olduğu pim uzunluğunda elde etmişlerdir. Aghaei ve Dehghani [25], çalışmalarında, sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen Monel 400 ve AISI 316 paslanmaz çeliğin mikroyapı ve mekanik özelliklerine dönme ve ilerleme hızlarının etkilerini araştırmışlardır. Kusursuz kaynakları, ilerleme hızı 50 ila 100 mm/dak olan 400 dev/dak hızında elde etmişlerdir. Jafarzadegan ve arkadaşları [5], AISI 304 ile St37 çeliğini sabit ilerleme hızında, iki farklı takım dönme hızlarında ve takıma 3 derecelik açı vererek sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmiş ve kaynak mikroyapısı incelemişlerdir. Kaynak alanında ana metaller dışında dört farklı bölge bulmuşlardır. Yine Jafarzadegan ve arkadaşları [26], AISI 304 ile St37 çeliğini sabit ilerleme ve takım dönme hızında ve birleştirmişler, sürtünme karıştırma kaynağı sırasında oluşan yüksek sıcaklık ve deformasyonun St37 karbon çeliğindeki östenitin yeniden kristalleşmesine sebep olduğunu, bu taneciklerin sürtünme karıştırma kaynağından sonra soğuyarak ince ferrit ve perlitte dönüştüğünü belirtmişlerdir. Metadinamik yeniden kristalleşmenin 304 paslanmaz çelik östenit tanelerinde oluştuğunu ve karıştırma bölgesinde tane küçülmesine neden olduğunu ileri sürmüşlerdir. Karıştırma bölgesinin sertliğinin, her iki çeliğin karıştırma bölgesinde tane küçülmesine bağlı St37 temel metalinden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Kaynağın, St37 çeliğine göre daha yüksek mukavemet ve sünekliğe sahip

olduğunu ve enine çekme örneklerinin kırılmasının St37 çeliğinde gerçekleştiğini görmüşlerdir. Sharma ve Dwivedi [27], tavlama işlemine tabi tuttıkları yapı çeliği ve ferritik paslanmaz çeliği birleştirmişlerdir. Çekme deneyi sonrasında enine kaynak numunesinin gerilme mukavemetinin, yapı çeliği ana metalinden daha yüksek, ferritik paslanmaz çelik ana metalinden daha düşük olduğunu, boyuna kaynak numunesinin çekme mukavemetinin ise her iki ana metalden çok daha yüksek olduğunu görmüşlerdir.

Bu çalışmada, korozyona dayanıklı ve yüksek mukavemetli malzemeler olan östenitik paslanmaz çelikler (AISI 316) ile karbonlu çelikler (AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070) uygun çalışma koşullarında kullanılmak üzere sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirilmişlerdir. Dolayısıyla düşük maliyetli ve ara yüzey uyumluluğu (mukavemet, sertlik, yüzey kalitesi) yüksek olan malzemeler elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, östenitik paslanmaz çelik (AISI 316) ve sade karbonlu çelikler (AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070) üniversal freze tezgâhında 710 dev/dak devir sayısı ve 63 mm/dak ilerleme hızında birleştirilmiştir. Kaynaklı bölgelerinin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiş, en uyumlu kaynak çifti belirlenmeye çalışılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada östenitik paslanmaz çelik ve sade karbonlu çelikler sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir. Çelik plakalar 3 mm kalınlığa, 60 mm genişliğe ve 120 mm uzunluğa sahiptir. Ana metallerin kimyasal bileşimleri Çizelge 1’de verilmiştir.

**Çizelge 1.** AISI 316 östenitik paslanmaz çelik ve karbonlu çeliklerin kimyasal bileşimi

| Malzemeler | Kimyasal bileşim |        |        |       |       |       |       |
|------------|------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|            | C                | Cr     | Ni     | Si    | Mn    | P     | S     |
| AISI 316   | 0,03             | 16,967 | 10,023 | -     | 0,993 | -     | -     |
| AISI 1010  | 0,119            | 0,017  | 0,018  | 0,087 | 0,495 | 0,017 | 0,013 |
| AISI 1030  | 0,306            | 0,029  | 0,025  | 0,026 | 0,512 | 0,032 | 0,018 |
| AISI 1050  | 0,538            | 0,029  | 0,027  | 0,035 | 0,389 | 0,115 | 0,003 |
| AISI 1070  | 0,659            | 0,029  | 0,024  | 0,049 | 0,559 | 0,019 | 0,02  |

Deneylerde kullanılan plakalara karıştırıcı ucun malzeme ile temasında yüke maruz kalmaması için birleşme noktasını ortalayacak şekilde 7 mm çapında bir delik açılmıştır. Şekil 1’de görüldüğü

gibi omuz çapı 16 mm, pim uzunluğu 2,7 mm olan eşkenar üçgen profilli tungsten karbür uç kullanılmıştır. Takım açısı  $1,5^\circ$ ’dir.



Şekil 1. Tungsten karbür karıştırıcı uç

Deneyler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada paslanmaz çelik farklı devir sayıları ve ilerleme hızları kullanılarak kendisi ile birleştirilmiş, 710 dev/dak devir sayısı, 63 mm/dak ilerleme hızındaki kaynak parametrelerinde malzemeler homojen olarak karışmış, optimum mekanik ve mikroyapı özellikleri elde edilmiştir. Deneylerin ikinci aşaması olan paslanmaz çelik-sade karbonlu çelik çiftlerinin kaynaklanmasına 710 dev/dak devir sayısı, 63 mm/dak ilerleme hızı ile devam edilmiştir.

Kaynağın mekanik özellikleri, çekme, çentik darbe ve mikrosertlik deneyleri yapılarak incelenmiştir. Çekme deneyleri için numunelere, 1 mm/dak’lık çekme hızı ile çekme kuvveti uygulanmıştır.

Mikrosertlik incelemesi sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemelerin kaynak bölgelerinden alınan metalografi numunelerinin kaynak bölgesi boyunca normal metal, ısıdan etkilenmiş kaynak metali bölgesi olarak 1,5 kg yük altında 15 sn bekletilerek, 1 mm aralıklarla ilerletilip mikrosertlik testine tabi tutularak yapılmıştır. Çentik darbe deneyi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Kaynağın mikroyapısı Optik Mikroskop (OM, Nikon Eclipse L150) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, TESCAN MIRA3 XMU) ile incelenmiştir. Optik Mikroskopta incelemek için ilk önce kaynaklı numuneye zımparalama ve parlatma işlemi yapılmıştır. Daha sonra %65’lik nitrik asitten (HNO<sub>3</sub>) 5 ml, %99,6’lık saf alkolden 95 ml karıştırılarak 100 ml’lik stok dağlama çözeltisi

hazırlanmıştır. Daldırma usulüyle 3 sn tüm numune daldırılıp bekletilerek derhal saf su ve alkol ile temizlenmiştir. Kurulandıktan sonra mikroskopta incelenmek üzere hazır hale getirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemeler hem yüzey morfolojisi, hem elementel dağılım için hem de çekme, çentik darbe ve kayma deneylerine tabi tutulduktan sonra bu deneylerden elde edilen kırık yüzeyler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

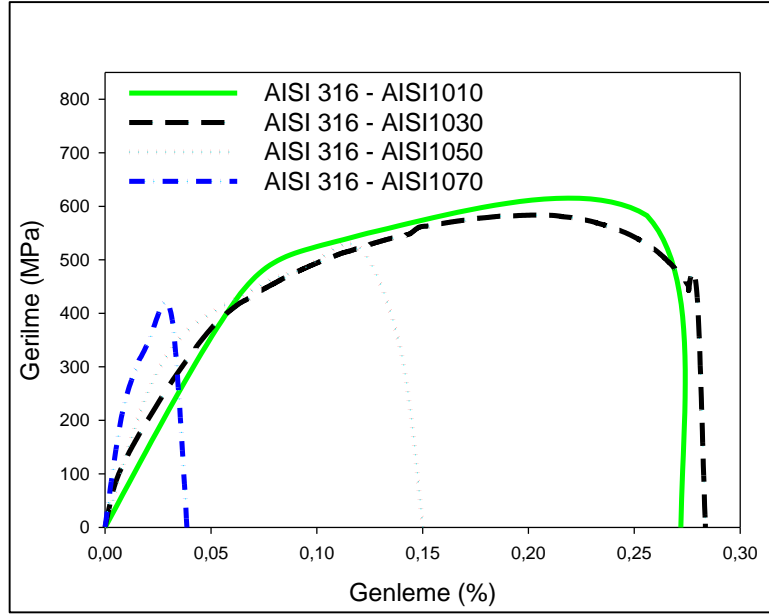
Kaynak esnasında ısınma soğuma şartlarından dolayı oluşabilecek yeni fazlar ve Fe için genlemeden dolayı oluşacak faz kaymaları ve safsızlıkların da faz analizi X ışınları difraksiyonu ile gerçekleştirilmiştir.

### 3. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

#### 3.1. Mekanik Deney Sonuçları

##### 3.1.1. Çekme Deneyi

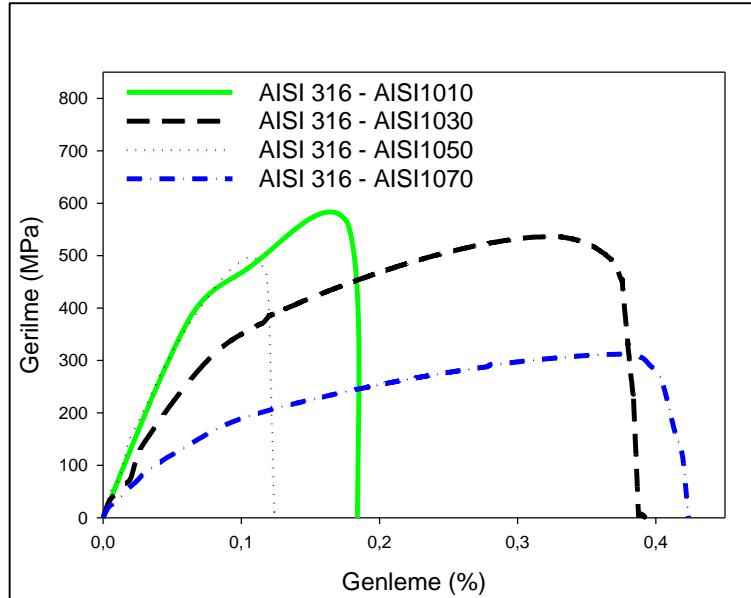
AISI 316-AISI 10X0 serisi çekme değerleri Şekil 2’de görülmektedir. Grafikler incelendiğinde çekme gerilmesi 618,81 MPa değerine sahip AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftinin en iyi çekme değerine sahip olduğu görülmektedir. Bunu 583,58 MPa çekme gerilmesi değeri ile AISI 316-AISI 1030 kaynak çifti, daha sonra 532,69 MPa çekme değeri ile AISI 316-AISI 1050 kaynak çifti takip etmektedir. Son olarak 423,79 MPa çekme gerilmesi ile AISI 316-AISI 1070 kaynak çifti en düşük çekme gerilmesi değerine sahiptir.



Şekil 2. AISI 316-AISI 10X0 serisi çekme değerleri

AISI 316-AISI 10X0 serisi kayma gerilmesi değerleri Şekil 3'te görülmektedir. Grafikler incelendiğinde en iyi kayma gerilmesi değeri AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftine ait olup 582,74 MPa'dır. Bu değeri 529,52 MPa ile AISI 316-AISI

1030 kaynak çifti ve 498,03 MPa kayma gerilmesi değeri ile AISI 316-AISI 1050 kaynak çifti izlemektedir. Çekme gerilmesi değerinde olduğu gibi en düşük kayma gerilmesi değeri AISI 316-AISI 1070 kaynak çiftine ait olup 311,94 MPa'dır.



Şekil 3. AISI 316-AISI 10X0 serisi kayma değerleri

Çekme ve kayma gerilmesi değerlerine baktığımızda AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftinin en yüksek, AISI 316-AISI 1070 kaynak çiftinin en düşük gerilme değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

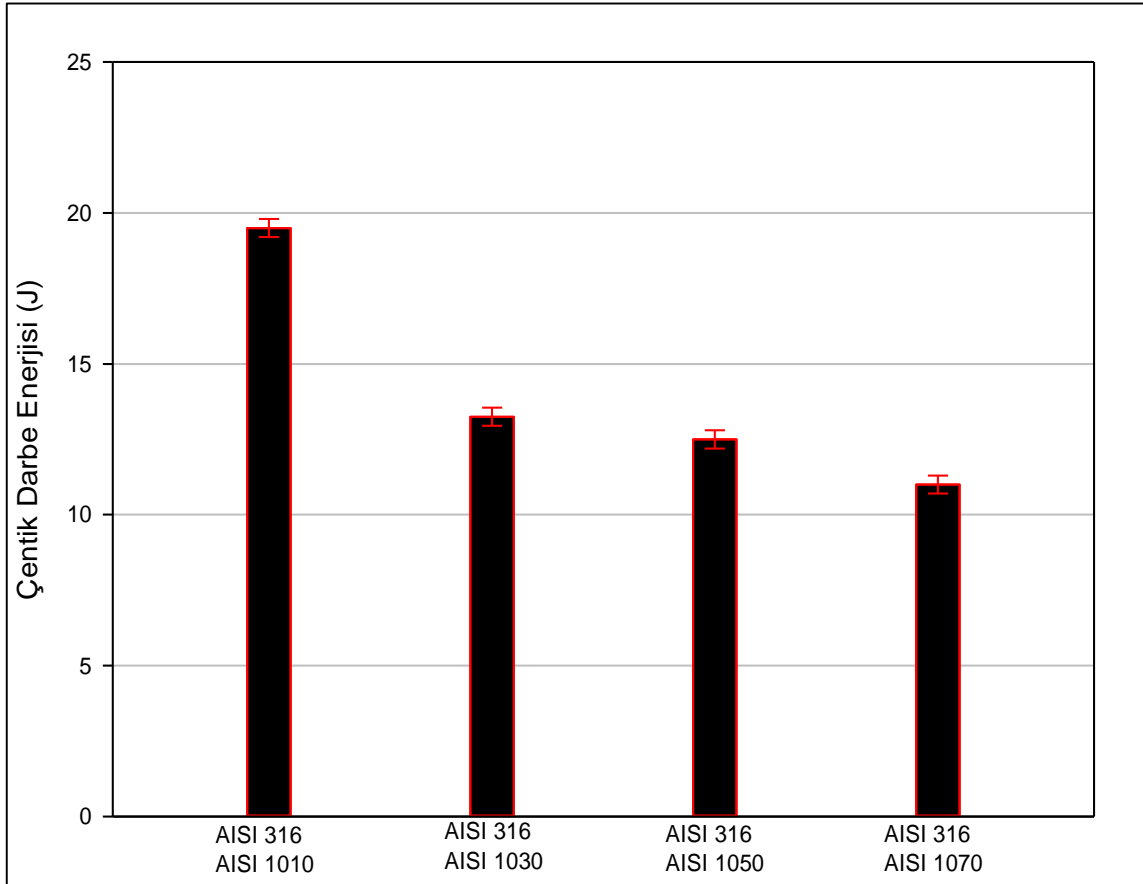
En düşük gerilme değerine sahip olan AISI 1070 karbonlu çeliğinin diğer karbonlu çeliklere göre karbon oranının fazla olması nedeniyle perlitik yapıya en yakın çeliktir. İçerisinde daha fazla karbon içermesinden dolayı elementlerin geçişine izin vermemesi sebebiyle mekanik tutunmasının diğer karbonlu çeliklere göre daha kötü olduğu, bu nedenle en düşük mukavemetinde bu kaynak çiftinde çıktığı düşünülmektedir.

Diğer taraftan AISI 316 çeliğinin yüksek miktardaki alaşım elementine karşılık AISI 1010

karbonlu çeliğinde alaşım elementinin olmaması, 1010 çeliğine difüze olan element miktarını attırmaktadır. Aynı zamanda 316 ve 1010 çeliklerinin sertliklerinin hemen hemen aynı olması ve 1010 çeliğinin içine difüze edebilen element miktarının fazla olması nedeniyle AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftinin mukavemetinin diğer kaynak çiftlerine göre daha iyi çıktığı düşünülmektedir.

### 3.1.1. Çentik Darbe Deneyi

AISI 316-AISI 10X0 serisinde 19,5 J ile en yüksek kırılma enerjisine sahip AISI 316-AISI 1010 çelik çifti diğerlerine göre daha sünek davranış göstermektedir. Şekil 4'te çentik darbe deney sonuçları grafik halinde verilmiştir.

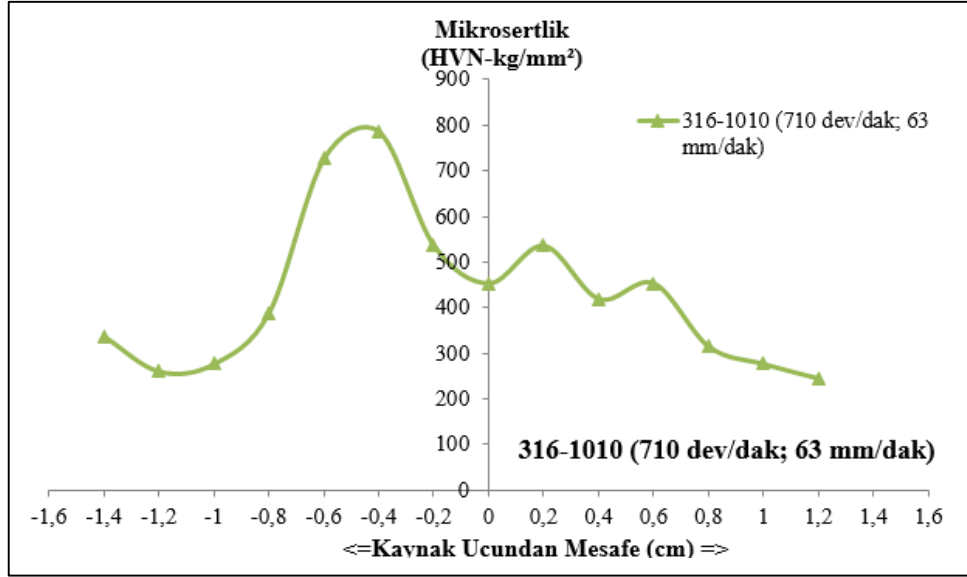


Şekil 4. Çentik darbe deney sonuçları grafikleri

### 3.1.2. Mikrosertlik Deneyi

Şekil 5'teki grafikte her iki tarafın 1 cm civarındaki yerlerinde kaynak bölgesi oluşmuştur. Bu bölgenin solunda ve sağında malzemelerin kendi sertliklerinin olduğu görülmektedir. Orta bölgedeki

2 cm'lik kısımdaki kaynak bölgesinde intermetalik birikme ve Fe-Cr, Fe-Ni ve Cr-Ni alaşımın sertleşmesinden dolayı kaynak bölgesindeki sertliğin yükseldiği görülmektedir. 316-1010 çeliklerinin sertlikleri 550-780 kg/mm<sup>2</sup> seviyelerindedir.



Şekil 5. 316-1010 çelik çiftinin mikrosertlik değeri

### 3.2. Mikroyapı Deney Sonuçları

Mikroyapı deney sonuçlarında kaynaklı bölgeler optik mikroskopta, çekme, kayma ve çentik darbe deneylerinden elde edilen kırık yüzeyler taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiş ve XRD ile faz analizleri yapılmıştır.

#### 3.2.1. Optik Mikroskop

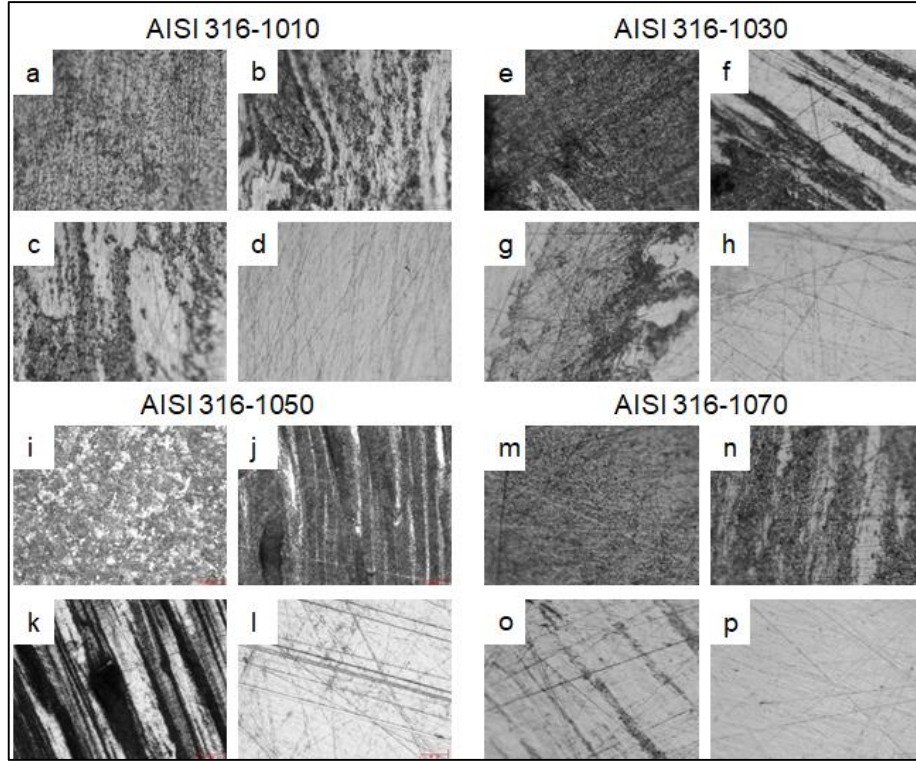
Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelerin mikroyapıları optik mikroskopta incelenmiştir. Şekil 6'da AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.

AISI 1010 çeliğinin görüldüğü Şekil 6.a'da koyu gri görünen yerlerin perlit, açık renkte görülen yerlerin ise ferrit olduğu düşünülmektedir. Şekil 6.b'de paslanmaz çelikten karbonlu çeliğe doğru karıştırma bölgelerinin olduğu kaynak bölgesinin

orta kısmı görülmektedir. Şekil 6.c'de paslanmaz çeliğin içerisine karbonlu çelikteki perlit ve ferritin gruplar halinde karıştığı görülmektedir. Şekil 6.d'de ise yapının tamamen paslanmaz çelik olduğu gözlemlenmektedir.

Şekil 6.e'de AISI 1030 karbonlu çelik görülmekte, Şekil 6.f'de kaynak bölgesine doğru ilerledikçe paslanmaz çeliğin içerisinde 1030 karbonlu çeliğin varlığı göze çarpmaktadır. Burada yüksek miktarda Krom ve Nikel içeren paslanmaz çelik ile karbonlu çelikte fazların birbiri içinde çözünmediği gözlemlenmektedir. Ayrıca yüzeyde siyah renkte görülen bölgelerin ısıdan dolayı çökelmiş karbür partiküllerinin olduğu düşünülmektedir. Şekil 6.g'de karıştırıcı ucun dönmesinden kaynaklı malzemeler birbiri içine akmış durumda, orta kısımların 1030, kenarların ise paslanmaz çelik olduğu, Şekil 6.h'de ise paslanmaz çelik yapı görülmektedir.





Şekil 6. AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 6.i'de beyaz renklerde görünen bölgelerin ferrit, koyu gri-siyah görünen bölgelerin perlite olduğu AISI 1050 çeliği görülmektedir. Yapısında 0,5 oranında karbon içeren AISI 1050 yaklaşık %35 içeren ferrit, yaklaşık %65 oranında perlite içermektedir. Şekil 6.j'de karbonlu çelik tarafından kaynak bölgesine girildiğinde ferrit miktarının azaldığı, perlite miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca bloklar halinde görülen beyaz renkler kalıntı ostenit varlığını göstermektedir. Kaynaklı bölge 800-900 °C gibi yüksek sıcaklıklardan aniden 723 °C'nin altına düştüğünde ostenit fazı dönüşemeyip, kalıntı ostenit olarak yüksek gerilimli bölgelerin perlite plakaları arasında kalmasına ve böylece genlemenin de düşük olması ile düşük uzama göstermesine neden olmuştur. Kaynağın orta noktasına gelindiği Şekil 6.k'da yapıda beyaz ve hiç dağlanamamış paslanmaz çeliğin varlığı göze çarpmaktadır. Ayrıca paslanmaz çeliğin yanında perlite miktarı fazlaşmış, ferrit ise azalmıştır. Şekil 6.l'de yapının tamamen paslanmaz çelik olduğu görülmektedir.

Şekil 6.m'de kaynaklı 1070 karbonlu çeliği, Şekil 6.n'de ise 1070 çeliğinden kaynak bölgesine geçiş görülmektedir. Burada karbonlu çeliğin içerisinde yer yer paslanmaz çeliğin varlığı görülmekte olup kaynağın orta bölgesi olan Şekil 6.o'da ise yapıda daha fazla paslanmaz çelik ve bu çeliğin içerisinde blok blok 1070'in olduğu göze çarpmaktadır. 1070 çeliğinin yüksek miktarda karbon içermesinden dolayı sert olması ve bunun sonucunda 316 paslanmaz çeliğinin 1070 karbonlu çeliğini deforme edememesi sebebiyle malzeme akışının olmadığı düşünülmektedir. Şekil 6.p'de ise 316 paslanmaz çeliği görülmektedir.

### 3.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu

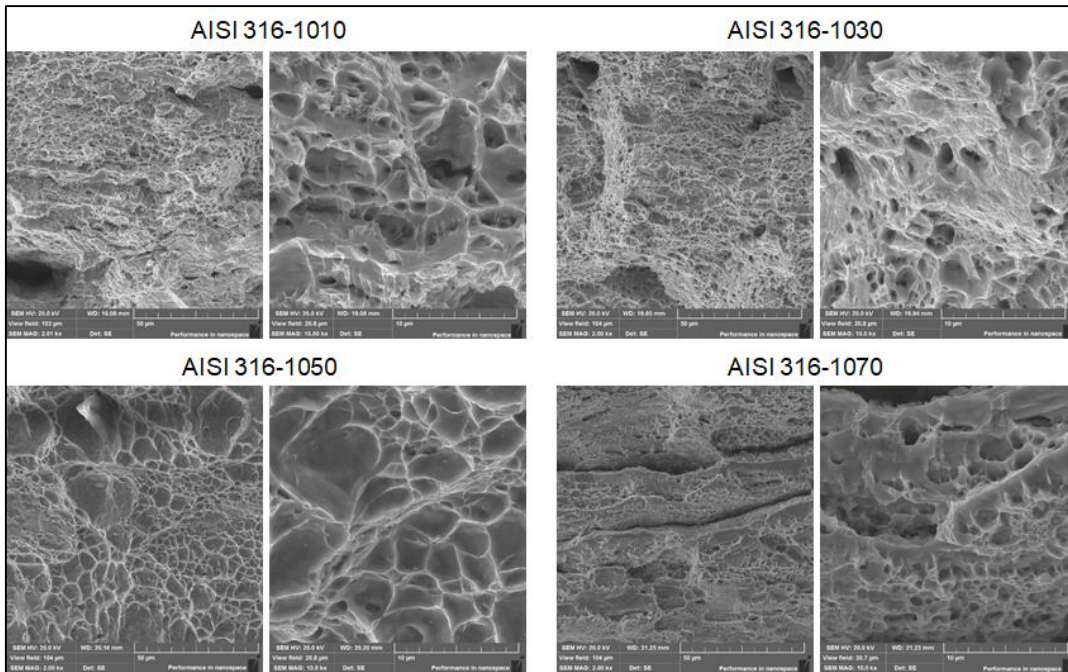
Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen AISI 316-AISI 10X0 çelik çiftlerinin çekme, kayma ve çentik darbe deneyleri sonrası oluşan kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir.

### 3.2.2.1. Çekme Deneyi Sonrası Oluşan Kırık Yüzeylerin SEM Görüntüleri

Şekil 7’de AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin çekme deneyi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir. AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftinde görüldüğü üzere içeriden oluşmaya başlayan çekme boşlukları aracılığıyla malzemedeki iç yüzey alanının düştüğü ve sünek kırılma oluştuğu gözlemlenmiştir. Tane morfolojileri genellikle fiber yapılı olup yüksek miktarda süneklik gösteren tanelerle birlikte klivaja sahip olan tanelerde görülmektedir. Isıdan etkilenen bölge civarında meydana gelen kopma hem kısmen büyümüş ve yeniden kristalleşmiş taneler hem de küçük ve sünen taneler içermektedir.

AISI 316-AISI 1030 kaynak çiftinin SEM analizine baktığımızda, tane içerisinde çukurların oluştuğu görülmektedir. Bu çukurların büyüyerek malzemeyi deformasyona uğrattığı ve kırılmaya maruz bıraktığı düşünülmektedir.

AISI 316-AISI 1050 kaynak çiftinin kırık yüzeyleri incelendiğinde büyümüş taneler görülmektedir. Büyümüş tanelerde sünekliği azalttığı için tanenin şekil değiştirme kapasitesini olumsuz yönde etkiler ve kırılma olayını hızlandırır. Bu çelik çiftinin tane büyüklüğünün genellikle AISI 316-AISI 1010 ve AISI 316-AISI 1030 çelik çiftlerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda da AISI 316-AISI 1010 ve AISI 316-AISI 1030 çelik çiftlerinden daha az sünek olduğu ve daha çabuk kırıldığı düşünülmektedir.



Şekil 7. AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin çekme deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

AISI 316-AISI 1070 kaynak çiftinin kırık yüzeyleri incelendiğinde, yüksek sertlik ve mukavemetten dolayı kaynak bölgesinde olan daralma diğer çelik çiftlerine nazaran daha az görülmüştür. Yüksek sıcaklıktan dolayı taneler aşırı büyümüş ve soğurken çekmesinden dolayı da gözenek oluşumu

gözlemlenmiştir. Delaminasyona bağlı olarak kaynak yüzeyinden 1mm içeride karıştırma ısısından dolayı yüksek sıcaklıkla büyümüş aşırı taneler ve plakanın kalınlığı doğrultusunda aşağı yönlü aşırı büyümüş taneler oluştuğu gözlemlenmiştir.

### 3.2.2.2. Kayma Deneyi Sonrası Oluşan Kırık Yüzeylerin SEM Görüntüleri

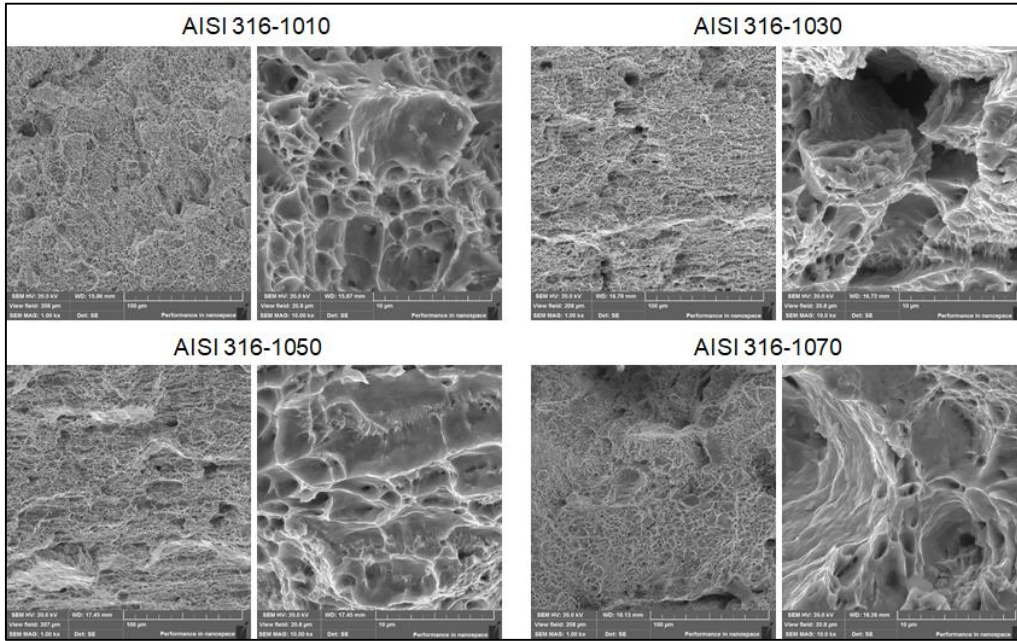
Şekil 8’de AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin kayma deneyi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir. AISI 316-AISI 1010’da küçük tanelerin etrafında dinamik yeniden kristalleşme ile büyümüş taneler görülmektedir. Çekme boşluklarının birleşerek büyüdüğü ve alan azaltarak düşük genleme ile kısmi sünek şekilde kırıldığı düşünülmektedir.

AISI 316-AISI 1030 çelik çiftine baktığımızda deformasyon çatlakları, sünek taneler, sünek tanelerin dinamik olarak yeniden kristalleşmesi ile büyümüşür. Her birinde çekme boşluğu olduğu

gözlemlenmiş ve büyüyen çekme boşlukları yüksek çatlak enerjisi oluşturmuştur. Bu ise yapıda sünek-gevrek kırılma özelliklerini göstermiştir.

AISI 316-AISI 1050 çelik çiftine baktığımızda, küçük tanelerin yanı sıra blok blok büyük taneler görülmektedir. Yer yer küçük çatlaklarında olduğu, bu çatlakların büyüerek gevrek kırılmaya neden olduğu düşünülmektedir.

AISI 316-AISI 1070 çelik çiftinde sünek küçük tanelerin etrafında dinamik yeniden kristalleşme ile büyümüş taneler görülmektedir. AISI 1050 de olduğu gibi çatlakların büyüerek gevrek kırılmalara neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8. AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin kayma deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

### 3.2.2.3. Çentik Darbe Deneyleri Sonrası Oluşan Kırık Yüzeylerin SEM Görüntüleri

Şekil 9’da çentik darbe deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerin SEM görüntüleri görülmektedir.

AISI 316-AISI 1010 çelik çiftinin deformasyonun başlangıcında yüksek enerji ile gevrek tipte kırılma

oluşturduğu düşünülmektedir. Daha sonra bu yüksek enerjinin ısıdan etkilenmeyen küçük taneler tarafından absorbe edilerek çatlak ilerlemesini biraz yavaşlattığı ve böylece kırılma enerjisinin yüksek değerlerde olduğu düşünülmektedir.

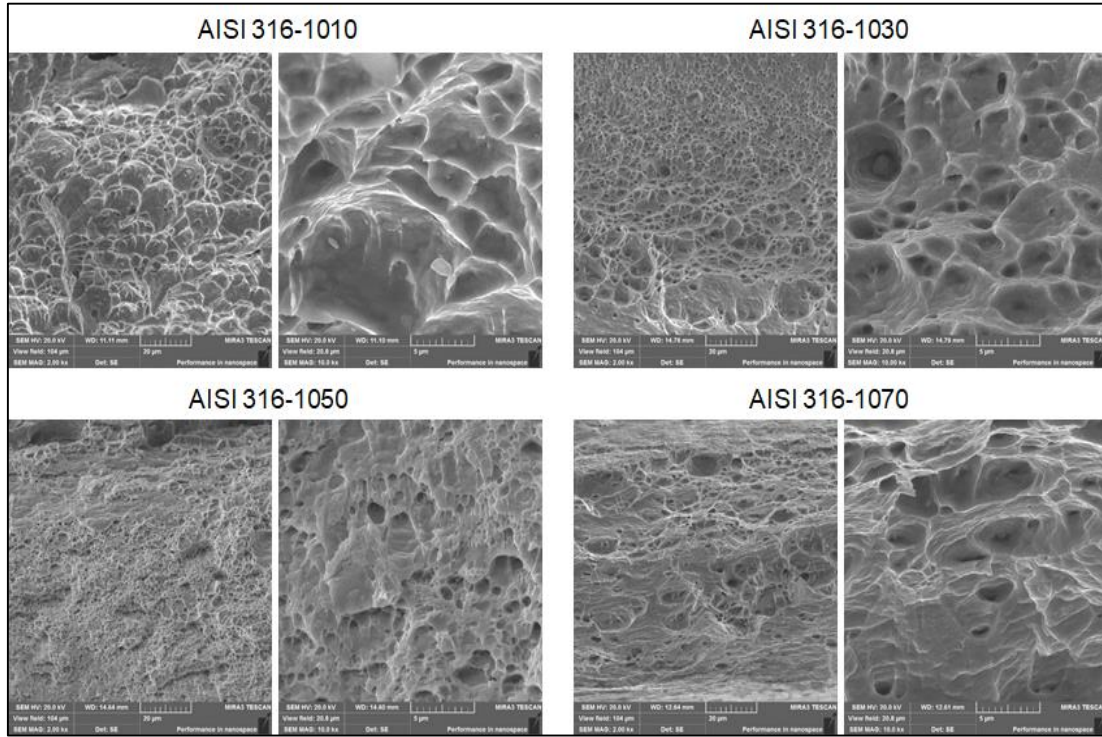
AISI 316-AISI 1030’da çatlak ilerlerken sürekli küçük taneli yapılara denk gelmiş ve bu ise çatlak

enerjisini durdurucu yönde rol oynamış ve çekme boşluklarına benzer sünme bölgelerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Çatlak büyüdüktan sonra iç yüzeydeki ısıdan etkilenmiş bölgelere denk gelen çatlak ucunun büyük tanelerin genlememesi nedeniyle kırılmaya uğradığı düşünülmektedir.

AISI 316-AISI 1050 kaynaklanmış çelik çiftinde, malzemenin sertliğindeki ve mukavemetindeki

artıştan dolayı ve yapıda yüksek sıcaklıkla birlikte meydana gelmiş büyük tanelerin zor genlemesinden dolayı darbe enerjisinde de düşüş gözlenmiştir.

AISI 316-AISI 1070 kaynak çiftine baktığımızda, darbe enerjisinden sonra etkili olan çatlak enerjisinin, malzemenin mukavemeti ve sertliğinden dolayı gevrek kırılmaya neden olduğu düşünülmektedir.

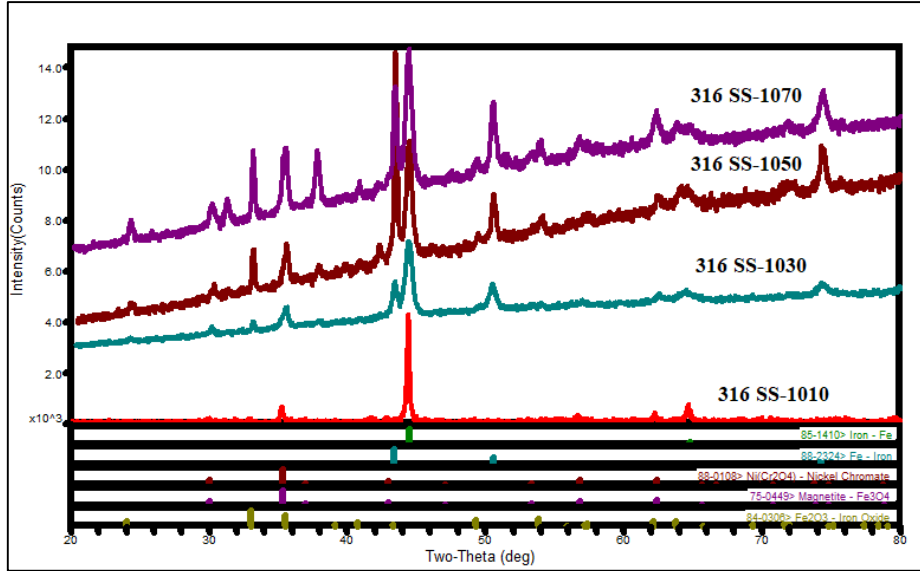


**Şekil 9.** AISI 316-AISI 10X0 kaynak çiftlerinin çentik darbe deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

### 3.2.3. X Işını Difraksiyonu

Şekil 11'de XRD desenlerinden görüldüğü üzere, AISI 1010 ile kaynaklanan 316 paslanmaz çelik, 1010'un ferritik yapısından dolayı HMK kristal kafeste bulunmaktadır. Bu fazda tane büyümesi çok az ve kalıntı östenit miktarı çok düşük seviyededir. Karbon miktarının artması ile YMK kristal kafesi yine  $43.8^\circ$ 'de (111) piki ile kendini göstermekte ve artan C oranlarında çok yüksek miktarda YMK kafes yapısı görülmektedir. Bunun sonucu olarak da

316 östenitik paslanmaz çeliğinin 10X0 karbonlu çelik serisine kaynaklanabilirliğinde karışma problemleri ile birlikte mukavemette ve sertlikte düşüşler gözlenmesi olasıdır. Sertlik çok fazla malzeme yapısından etkilenmezken, özellikle mukavemetin düşmesinin sebebinin kalıntı östenit miktarındaki artış ve iç gerilmeler olduğu, bunların da yapıda uyumsuzluklara sebep olarak büyük tane-küçük tane ayrımını meydana getirdiği düşünülmektedir.



Şekil 10. AISI 316-AISI 10X0 çelik çiftlerinin kaynak bölgelerinden alınmış XRD desenleri

#### 4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu makalede AISI 316 paslanmaz çeliği ile sade karbonlu çelikler sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak birleştirilmiştir. En uyumlu kaynak çiftini belirlemek amacıyla mekanik ve mikroyapı analizleri yapılmıştır.

Çalışma sonucunda;

- 1) 710 dev/dak ve 63 mm/dak ilerleme hızında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen AISI 316-AISI 10X0 çelik çiftlerine yapılan mekanik testlerden (çekme, çentik darbe, sertlik, kayma) ve mikroyapı analizlerinden en iyi sonuçların AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftinde olduğu ortaya çıkmıştır. Mekanik testlerde en yüksek çekme gerilmesi değeri 618,81 MPa, en yüksek kayma gerilmesi değeri 582,74 MPa ile AISI 316-AISI 1010 çelik çifti için bulunmuştur.
- 2) Kırılma enerjileri incelendiğinde AISI 316-AISI 1010'un 19,5 J ile en yüksek kırılma enerjisine sahip olduğu tespit edilmiş, dolayısıyla bu çelik çiftinin diğerlerine göre daha sünek olduğu belirlenmiştir.

- 3) Mikroyapı analizlerinde SEM ve OM sonuçları irdelendiğinde tane boyutunun ve plakaların delaminasyonunun, malzeme mukavemeti ve sertliğini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu numunelerde özellikle tane büyümesinin olduğu yerlerde düzensizliklerle birlikte mukavemetin de düştüğü gözlemlenmiştir. Küçük tane boyutuna ve sürekli dikişe sahip kaynakların daha yüksek çekme değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

#### 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, "Paslanmaz Çelik ve Sade Karbonlu Çelik Çiftlerinin Farklı Standartlarda Sürtünme Karıştırmalı Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi, Mekanik Özelliklerin ve Mikroyapıların İncelenmesi" adlı TÜBİTAK 118M791 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

#### 6. KAYNAKLAR

1. Cam, G., Mistikoglu, S., 2014. Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys. Journal of Materials Engineering and Performance, 23(6), 1936-1953.

2. Thomas, W.M., Threadgill, P.L., Nicholas, E.D., 1999. Feasibility of Friction Stir Welding Steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 4(6), 365–372.
3. Mishra, R.S., Ma, Z.Y., 2005. Friction Stir Welding and Processing. *Materials Science and Engineering R.*, 50, 1–78.
4. Meran, C., Canyurt, O.E., 2010. Friction Stir Welding of Austenitic Stainless Steels. *The Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 43(1), 432-439.
5. Jafarzadegan, M., Feng, A.H., Abdollah-zadeh, A., Saeid, T., Shen, J., Assadi, H., 2012. Microstructural Characterization in Dissimilar Friction Stir Welding Between 304 Stainless Steel and st37 Steel. *Materials Characterization*, 74, 28–41.
6. Aktarer, S.M., Sekban, M., Küçükömeroğlu, T., 2015. IF Çeliği ile AA6061 Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilebilirliği. *Kaynak Kongresi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, 20-21 Kasım 2015, 435-445.
7. Reynolds, A.P., Tang, W., Gnaupel-Herold, T., Prask, H., 2003. Structure, Properties, and Residual Stress of 304L Stainless Steel Friction Stir Welds. *Scripta Materialia*, 48, 1289–1294.
8. Bozkurt, Y., Boumerzoug, Z., 2018. Tool Material Effect on the Friction Stir Butt Welding of AA2124-T4 Alloy Matrix MMC. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(1), 29–38.
9. Basak, H., Kayır, Y., Turkyilmaz, E.H., 2018. Experimental Investigation of the Different Stirring Pin Forms Caused Force and its Effects of Joining on Friction Stir Welding. *El-Cezeri Science and Engineering Journal*, 4(2), 249–257.
10. Ragu Nathan, S., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Rao, A.G., 2016. Effect of Tool Shoulder Diameter on Stir Zone Characteristics of Friction Stir Welded HSLA Steel Joints. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69(10), 1861-1869.
11. Boz, M., Kurt, A., 2004. The Influence of Stirrer Geometry on Bonding and Mechanical Properties in Friction Stir Welding Process. *Materials & Design*, 25, 343-347.
12. Elengovan, K., Balasubramanian, V., 2008. Influences of Tool Pin Profile and Tool Shoulder Diameter on the Formation of Friction Stir Processing Zone in AA6061 Aluminium Alloy. *Materials & Design*, 29, 362-373.
13. Sık, A., Ertürk, I., Onder, M., 2010. A Study into Effects of Different Parameters on Mechanical Properties in Friction Stir Welding of AA 2024 Aluminium Alloy. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 16(2), 139-147.
14. Hascalık, A., Caydas, U., Unal, E., Karaca, F., 2007. The Effect of tip Geometry on the Friction Stir Selding of AA 5251 Alloy. *Electronic Journal of Machine Technologies*, 4, 1-7.
15. Fujii, H., Cui, L., Tsuji, N., Maeda, M., Nakata, K., Nogi, K., 2006. Friction Stir Welding of Carbon Steels. *Materials Science and Engineering: A.*, 429, 50-57.
16. Lienert, T.J., Stellwag, W.L., Grimmet, B.B., Warke, R.W., 2003. Friction Stir Welding Studies on Mild Steel Tool Durability and Steel Microstructure. *Supplement to the Welding Journal*, 1S-9S.
17. Lakshminarayanan, A.K., 2016. Enhancing the Properties of Friction Stir Welded Stainless Steel Joints Via Multi-criteria Optimization. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(4), 605-617.
18. Park, S.H.C., Sato, Y.S., Kokawa, H., Okamoto, K., Hirano, S., Inagaki, M., 2003. Rapid Formation of the Sigma Phase in 304 Stainless Steel During Friction Stir Welding. *Materials Science*, 49, 1175-1180.
19. Meran, C., Kovan, M., Alptekin, A., 2007. Friction Stir Welding of AISI 304 Austenitic Stainless Steel. *Materials Science and Engineering Technology*, 38(10), 829-835.
20. Bilgin, M.B., Meran, C., 2012. The Effect of Tool Rotational and Traverse Speed on Friction Stir Weldability of AISI 430 Ferritic Stainless Steels. *Materials & Design*, 33, 376-383.
21. Cho, H.H., Han, H.N., Hong, S.T., Park, J.H., Kwon, Y.J., Kim, S.H., Steel, R.J., 2011. Microstructural Analysis of Friction Stir Welded Ferritic Stainless Steel. *Materials Science and Engineering: A.*, 528(6), 2889-2894.

22. Nandan, R., DebRoy, T., Bhadeshia, H.K.D.H., 2008. Recent Advances in Friction-Stir Welding -Process, Weldment Structure and Properties. *Progress in Materials Science*, 53, 980–1023.
23. Cakır, R., Celik, S., 2018. Effect of Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al 5754-Cu. *El-Cezeri Science and Engineering Journal*, 4(1) 82–91.
24. Kimapong, K., Watanabe, T., 2004. Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel. *Welding Journal*, 83(10), 277S-282S.
25. Aghaei, A., Dehghani, K., 2015. Characterizations of Friction Stir Welding of Dissimilar Monel400 and Stainless Steel 316. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77, 573–579.
26. Jafarzadegan, M., Feng, A.H., Abdollah-zadeh, A., Saeid, T., Shen, J., Assadi, H., 2013. Microstructure and Mechanical Properties of a Dissimilar Friction Stir Weld Between Austenitic Stainless Steel and Low Carbon Steel. *Journal of Materials Science and Technology*, 29(4), 367–372.
27. Sharma, G., Dwivedi, D.K., 2017. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Steel Joint Developed Using Friction Stir Welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 1299–1307.

