

Araştırma Makalesi / Research Article

Isıl İşlemin Bakır Kaplı Çelik Boruların Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

Ozan KOYUNCU<sup>1</sup>, Burak ÇELİK<sup>2</sup>, Yasin AKGÜL<sup>3</sup>, Alper İNCESU<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Bant Boru San. ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Departmanı, 41480 Gebze/Kocaeli, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5529-5059>, okoyuncu@bantboru.com

<sup>2</sup> Bant Boru San. ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Departmanı, 41480 Gebze/Kocaeli, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4013-5837>, burak\_clk@windowslive.com

<sup>3</sup> K-O Faktör Teknoloji ve Mühendislik, 78050, Karabük, Türkiye/ 3Karabük Üniversitesi, Demir Çelik Enstitüsü, 78050, Karabük,  
Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5643-5968>, yasinakgul@karabuk.edu.tr

<sup>4</sup> K-O Faktör Teknoloji ve Mühendislik, 78050, Karabük, Türkiye/ 3Karabük Üniversitesi, Demir Çelik Enstitüsü, 78050, Karabük,  
Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4404-4331>, alperincesu@karabuk.edu.tr

Geliş/ Received: 22.02.2023;

Kabul / Accepted: 09.04.2023

**ÖZET:** Bakır kaplı çelik borular, özellikle otomobil fren sistemleri olmak üzere birçok ürünün hidrolik sistemlerinin temel bileşenleridir. Otomotiv endüstrisinde kullanılmak üzere üretilen bakır kaplı çelik boruların sahip olmaları gereken mekanik özellikler kabul kriterleri ile belirlenmiştir. Ancak bu mekanik özelliklerin yanı sıra üretim aşamasında havşa açma gibi prosesler için boruların şekillendirilme kabiliyetleri (süneklikleri) de oldukça önemlidir. Bu çalışmada, ısıl işlem ile bakır kaplı çelik boruların süneklik değerlerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, ısıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun ve 6 farklı ısıl işlem parametresi ile elde edilmiş bakır kaplı çelik boruların mikroyapısal ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Optimum tavlama ısıl işlem parametresi ile 450 °C ve 120 dk. 'da 118,7±0,6 HV Vickers sertlik, 315,7±0,6 MPa çekme mukavemeti, 262,7±10,3 MPa akma mukavemeti, 36,9±0,9% kopma uzaması ve 1260 Bar patlatma dayanım değerleri elde edilmiştir. Dolayısıyla, ısıl işlem ile bakır kaplı çelik borunun sırasıyla, sertlik, çekme mukavemeti, akma mukavemeti, patlatma dayanımı değerlerinde yaklaşık %7,05 düşüş, %8,84 düşüş, %6,49 artış, %16,00 düşüş görülürken kopma uzamasında ise yaklaşık %55,04 artış gerçekleştiği elde edilen sonuçlardan görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Bakır kaplı çelik boru, Mekanik özellikler, Mikroyapı, Kırık yüzey, Tavlama.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: alperincesu@karabuk.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Koyuncu, O., Çelik, B., Akgül Y., İncesu, A. (2023). Isıl İşlemin Bakır Kaplı Çelik Boruların Mikroyapısına ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 177-192.

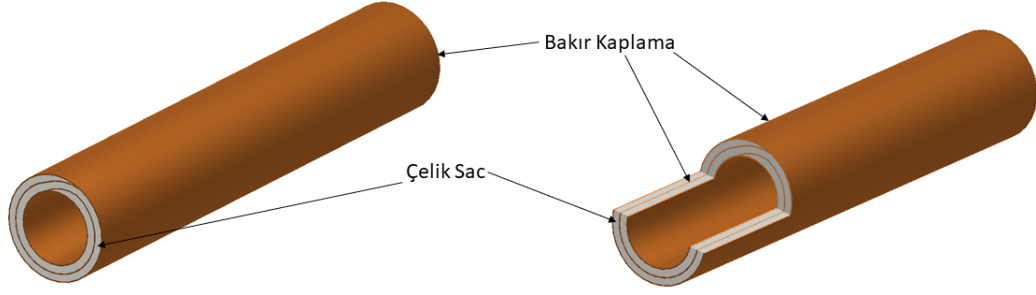
## Investigation of the Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Copper Clad Steel Pipes

**ABSTRACT:** Copper-clad steel pipes are essential components of hydraulic systems for many products, especially automobile brake systems. The mechanical properties of copper-clad steel pipes produced for the use in automotive industry have been determined by acceptance criteria. However, in addition to these mechanical properties, the shaping capabilities (ductility) of the pipes are also very important for processes such as countersink boring during the production phase stage. In this study, it was aimed to improve the ductility values of copper-clad steel pipes by heat treatment. In this context, the microstructural and mechanical properties of copper-clad steel pipes without heat treatment and copper-clad steel pipes obtained with 6 different heat treatment parameters were investigated comparatively. The optimum annealing heat treatment parameter is 450 °C and 120 min. obtained with values as, 118.7±0.6 HV Vickers hardness, 315.7±0.6 MPa tensile strength, 262.7±10.3 MPa yield strength, 36.9±0.9% elongation at break and 1260 Bar bursting strength. Therefore, by this heat treatment, approximately 7.05% decrease, 8.84% decrease, 6.49% increase and 16.00% decrease are observed in the hardness, tensile strength, yield strength, bursting strength values of the copper-clad steel pipe, respectively, the elongation at break is approximately increase as 55.04%.

**Keywords:** Copper clad steel pipe, Mechanical properties, Microstructure, Fracture surface, Annealing.

### 1. GİRİŞ

Bakır kaplı çelik saclar tabakalı metalik kompozit malzeme olarak, kırılma tokluğu, mukavemet, elektriksel iletkenlik, korozyon ve radyasyon direnci arasındaki optimum denge nedeniyle elektrik endüstrileri, otomobil, zırh ve füzyon reaktörü uygulamalarında kullanılan en başarılı lamine metal matris kompozit türleri arasındadır (Liu ve ark., 2018). Çelik saclar bakır kaplamak için elektro kaplama, kimyasal kaplama, difüzyon bağlama, magnetron püskürtme, ark kaynağı, patlatma kaynak, rulo bağlama, vb. gibi birçok farklı kaplama yöntemi kullanılabilir (Ravichandran ve ark., 1996; Kim ve ark., 2004). Otomobil boru endüstrisinde, soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde, dış çapı 4,6 mm ila 10,6 mm arasındaki boruları, üç katmanlı elektro kaplama yöntemi ile üretilmiş bakır kaplı çelik sacların 720° kıvrıldıktan sonra lehimlenerek 1050 °C'ye ısıtıldıktan sonra yavaş soğutulması ile elde edilmektedirler. Cu kaplama kalınlığı yaklaşık 3–5 µm'dir. Cu kaplamanın kalınlığı: Fe substrat oranı yaklaşık 1:100–150:1'dir. Bundy Tube (Bundy, 1932) olarak da bilinen kaynaklı çift cidarlı çelik borular, ayrıca “Bakır Kaplı Çift Cidarlı Çelik Boru” veya “Bakırlı Çift Cidarlı Çelik Boru” olarak da adlandırılmaktadır (Şekil 1). Özellikle otomobil fren sistemleri ve kompresör bileşenleri olmak üzere birçok ürünün hidrolik sistemlerinin temel bileşenidir (Klakurková ve ark., 2017). Fren yağının iletim yolu olarak kullanılan fren borusu, bir otomobilin en önemli parçalarından biri olarak kabul edilir ve frenin işlevi üzerinde büyük etkisi vardır (Han ve Park, 2004).



Şekil 1. Bakır Kaplı Çift Cidarlı Çelik Borunun şematik görünümü

Genel olarak, iki metal arasında iyi bir ara yüzey bağlanma özellikleri için metalurjik olarak alaşım elementinin matris içerisinde yüksek katı-katı çözünürlüğü esastır. Bu nedenle, ara yüzey bağlanma durumu, ara yüzey alaşım elementlerinin difüzyon davranışından da doğrudan etkilenmektedir. Kaplama ara yüzündeki alaşım difüzyonu, alaşım elementlerinin atomları arasındaki etkileşime atfedilen bir tür ara yüzey metalurjik bağına aittir (Liu ve ark., 2019). Cu ve Fe'nin birbiri içerisinde düşük çözünürlüğe sahip metaller olduğu göz önünde bulundurulduğunda birleştirme prosedürü, fren boru üretiminde mekanik özellikleri düşürmesi bakımından sorun olarak meydana çıkmaktadır (Liu ve ark., 2018). Bu nedenle, bakır kaplı çelik plakaların ara yüzey bağlanma mukavemetini geliştirmek için faydalı olan, alaşım elementi difüzyonunu ve kaplama ara yüzünde Cu ve Fe'nin kendi aralarında çözünürlüğünü teşvik etmek için makul tavlama işlemi gereklilik olarak görülmektedir. Al-Ghamdi ve Hussein (Al-Ghamdi ve Hussain, 2016) yaptıkları çalışmada tavlama sıcaklığının ve süresinin bakır kaplı çelik sacın bağ kuvveti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Tavlamanın sacın sünekliğini ve şekillendirilebilirliğini geliştirdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, kaplanmış sac 700°C'nin üzerinde tavlandığında, Cu tabakası ciddi şekilde katmanlara ayrıldığı, bunun da bağ kuvvetinde ciddi bir düşüşe sebep olduğu belirlenmiştir. Lee ve diğerleri (Lee ve ark., 2007) rulo yapıştırma ile elde ettikleri paslanmaz çelik/alüminyum/bakır kaplı metal levhalara tavlama ısıl işlemi uygulamıştır. 300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bakır katmanında yeniden kristalleşme ve tane büyümesi meydana geldiği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada ise, endüstriyel uygulamalara yönelik olarak nispeten düşük sıcaklıklarda ve farklı sürelerde uygulanan ısıl işlemin bakır kaplı çelik saclardan elde edilmiş otomobil bakır kaplı çelik boruların (fren borularının) mikro yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Malzemeler ve Boru Üretimi

Çalışmada kullanılan 4,75 mm çapa sahip bakır kaplı çelik borular (fren boruları) Bant Boru A.Ş.'den temin edilmiştir. Bant Boru A.Ş. Tablo 1'de kimyasal bileşimi ve Tablo 2'de mekanik özellikleri verilen sac malzemeyi bakır kaplayarak ve ardından bakır kaplı saca "roll forming" (boru şeklinde şekillendirme) yöntemi uygulayarak fren borularını üretmektedir. Çizelge 1 ve Çizelge 2'deki sonuçlar boru üretiminde kullanılan saclardan deneysel olarak elde edilmiştir. Fren borusu üretiminde çift katlama yapılmakta ve bakırın ergime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklık uygulanarak, çelik yüzeyler arasında bakırın kaynaklanması gerçekleştirilmektedir.

**Çizelge 1.** Fren borusu üretiminde kullanılan DC03 kalite sac malzemenin kimyasal bileşimi (ağ.%)

C	Mn	Si	P	S	N	Al	Cr	Ni	Cu	B	Mo	Fe
0,04	0,23	0,007	0,013	0,014	0,027	0,033	0,03	0,021	0,043	0,001	0,002	Kalan

**Çizelge 2.** Fren borusu üretiminde kullanılan DC03 kalite sac malzemenin mekanik özellikleri

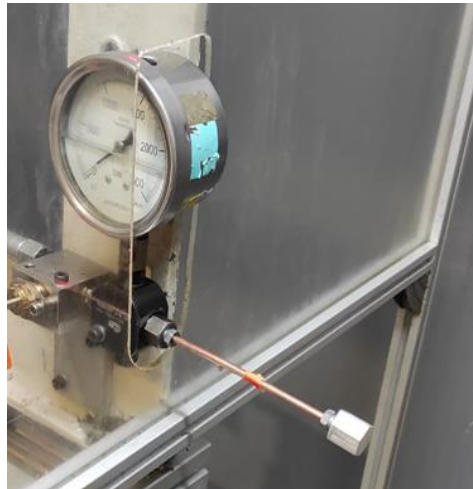
Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV1)
346,3±2,1	192±1	37,4±0,2	102±1

## 2.2. Tavlama Isıl İşlemi

Tavlama ısıl işlemi Protherm 1200 marka ısıl işlem fırınında herhangi bir koruyucu atmosfer kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Numunelerde ani ısınmaya bağlı oluşabilecek iç gerilmeleri önlemek için düşük bir ısıtma hızı (5 °C/dk.) ile numuneler oda sıcaklığından tavlama sıcaklığına kadar ısıtılmışlardır. Ardından belirlenen tavlama sıcaklığında belirlenen sürelerde bekletildikten sonra fırından çıkarılıp havada soğutulmuşlardır. Tavlama ısıl işlemi için 2 farklı sıcaklık (350 °C ve 450 °C) ve 3 farklı süre (30 dk., 60 dk. ve 120 dk.) olmak üzere 6 farklı parametre oluşturulmuştur.

## 2.3. Karakterizasyon Çalışmaları ve Mekanik Deneyler

Borularda tavlama parametrelerine bağlı olarak meydana gelen mikroyapısal farklılıklar, Nikon Eclipse MA200 ters metalürjik optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Ayrıca Enerji Dağılımı Spektroskopisi (EDS) ile SEM görüntüleri üzerinde alansal ve çizgisel elementel analizler gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonrası elde edilen kırık yüzeyler de SEM analizine tabi tutulmuşlardır. Çekme testleri Zwick/Roell Z600 Üniversal Test Makinesinde 2 mm/dk. test hızında TS EN ISO 6892-1 (ISO 2016) metalik malzemelerde çekme deney standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Boruların kesit alanına uygun olarak uzamanın ölçüldüğü test boyu 20 mm olarak alınmıştır. Vickers mikrosertlik testi, Q10 A+ QNESS mikrosertlik test cihazı ile 1000g yük ve 15 sn bekleme süresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ortalama sertlik değerleri 5 farklı noktadan alınan ölçümlerden hesaplanmıştır. Patlatma testi, ASTM A 254, SAE J 1677 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2) (SAE International, 2004 ve ASTM, 2019).

**Şekil 2.** Patlatma testi için parçanın test düzeneğine bağlanması

Patlatma testi için Enerpac firmasına ait pompanın içerisine DOT 3 hidrolik fren sıvısı doldurulmuş ve testi yapılacak olan parçanın bir ucu kör tapa ile kapatılmıştır. Uygulanan basınç ve patlama anındaki test sonuçları 2500 Bar'lık analog manometre de görüntülenmektedir. Patlatma testi sonrası parçanın görüntüsü Şekil 3'te gösterilmiştir.

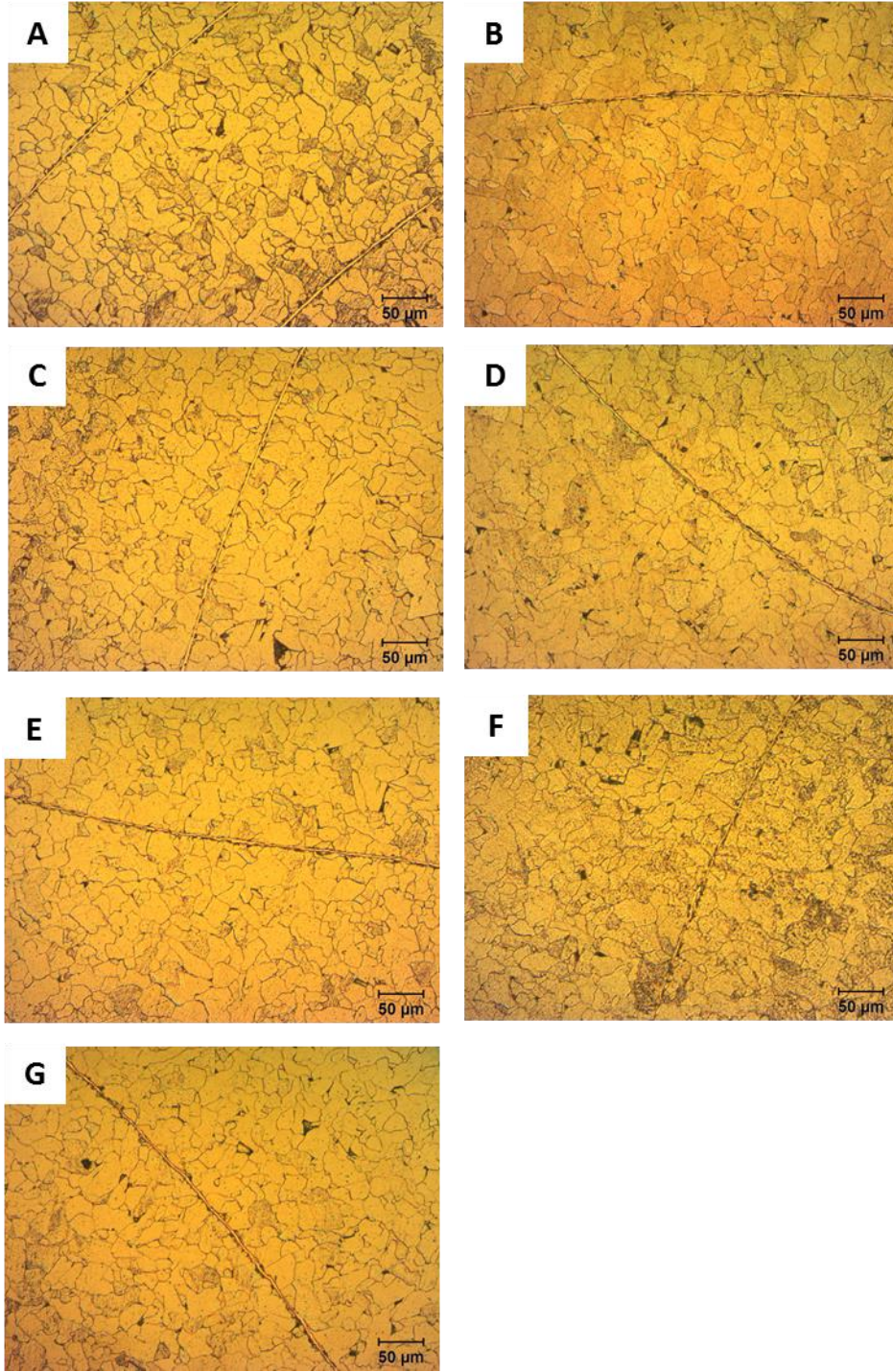


Şekil 3. Patlatma testi sonrası parçanın örnek görüntüsü

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

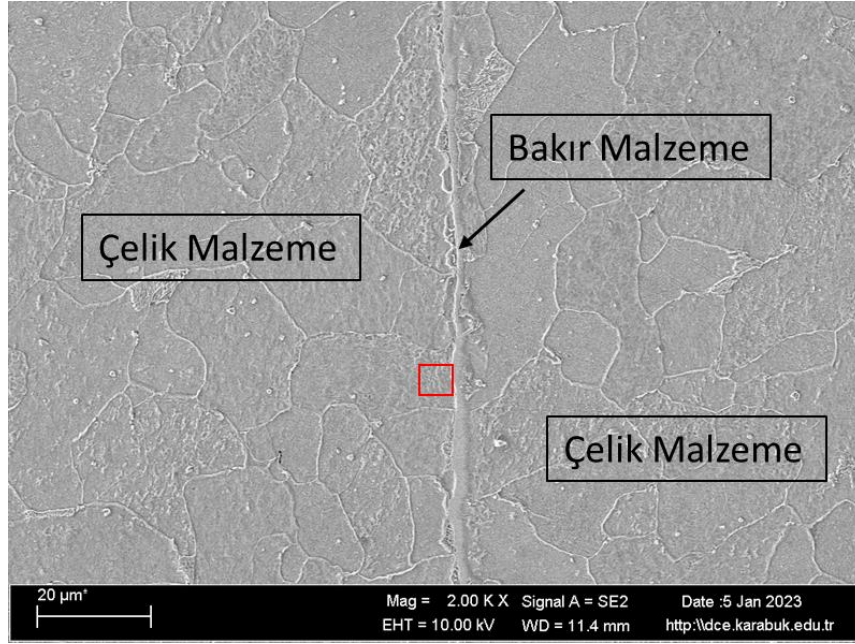
#### 3.1. Mikroyapısal Özellikler

Isıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun ve 6 farklı ısıl işlem parametresi ile elde edilmiş bakır kaplı çelik boru numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 4'te sunulmuştur. Numunelerin çok düşük karbonlu çelik olması sebebiyle perlit fazı oluşumu oldukça düşüktür. Birbirleri ile kıyaslama yapıldığında ise optik mikroskop görüntülerinde numunelerin tane ve faz yapısında belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Yapılan tane boyutu ölçüm sonuçlarına göre ısıl işlemsiz borunun ortalama tane boyutu  $14,5 \mu\text{m}$ , sırasıyla 30, 60, 120 dk.  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ısıl işlem görmüş numunelerin ortalama tane boyutu  $22,8 \mu\text{m}$ ,  $23,9 \mu\text{m}$  ve  $19,4 \mu\text{m}$ , sırasıyla 30, 60, 120 dk.  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ısıl işlem görmüş numunelerin ortalama tane boyutları ise  $21,5 \mu\text{m}$ ,  $24,4 \mu\text{m}$  ve  $21,9 \mu\text{m}$ 'dir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde tavlama ısıl işlemi ile birlikte bir miktar tane irileşmesi meydana gelmiş ancak farklı ısıl işlem parametreleri arasında tane boyutu bakımından belirgin bir farklılaşma olmadığı anlaşılmıştır. Çünkü uygulanan ısıl işlem sıcaklıkları ( $350\text{-}450 \text{ }^\circ\text{C}$ ), çeliğin rekristalizasyon tavlama sıcaklığının ( $\sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (Choi ve ark., 2002) ve faz yapısında değişiklik olması için gerekli östenit sıcaklığının altındadır.



**Şekil 4.** A) Isıl işlemsiz numuneye, B-D) sırasıyla 30, 60, 120 dk. 350 °C’de ısıl işlem görmüş numunelere, E-G) sırasıyla 30, 60, 120 dk. 450 °C’de ısıl işlem görmüş numunelere ait optik mikroskop görüntüleri.

Uygulanan ısıl işlemin çelik-bakır ara yüzeyine olan etkisini incelemek için Şekil 5’te örnek olarak verildiği üzere, numunelerin kırmızı kare ile gösterildiği gibi bakır malzeme hattına temas eden çelik bölgelerinden SEM-EDS analizi yapılmıştır.



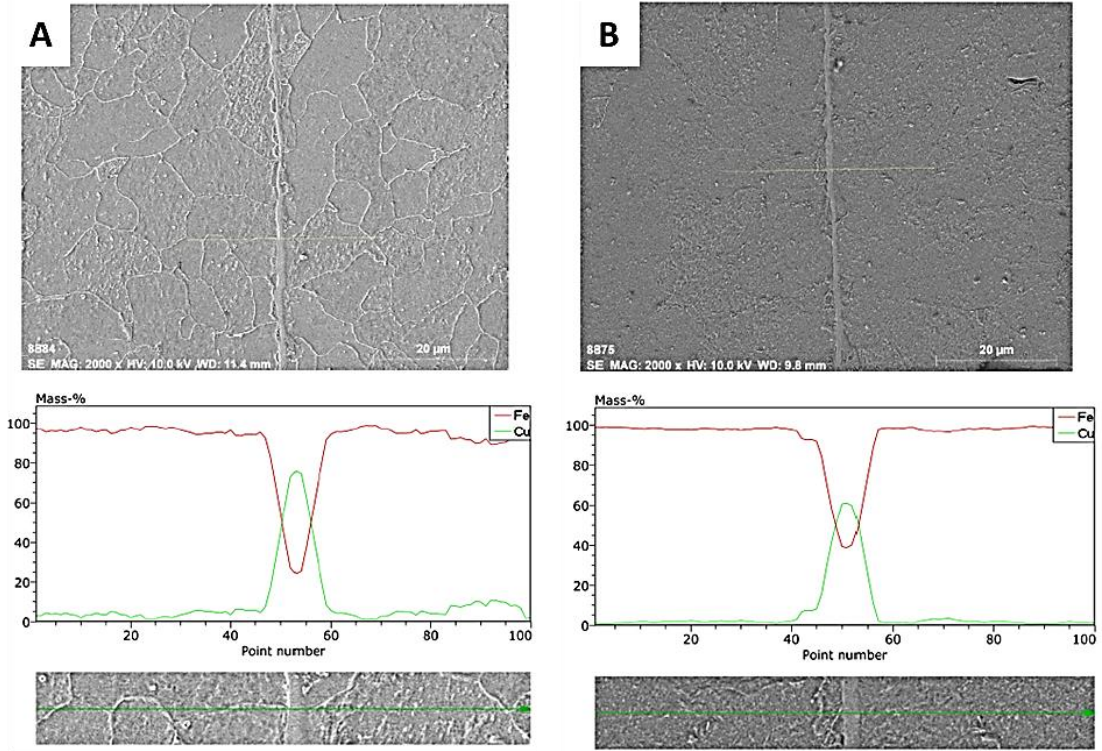
**Şekil 5.** Bakır kaplı çelik boruların mikroyapısı ve SEM-EDS analizi için bakır hattına yakın seçilen örnek bölgenin gösterimi

Çizelge 3'te numunelerin çelik tarafından bakır hattına temas eden bölgelerinden yapılan SEM-EDS bölge analizi sonuçları sunulmuştur. Sonuçlara göre uygulanan ısıl işlem ile beraber bakır hattına temas eden çelik içerisindeki bakır miktarının nispeten artmış olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, ısıl işlemin çelik-bakır ara yüzeyinde bakırdan çelik tarafına doğru atomik kütle transferi etkileşimini arttırdığı şeklinde yorumlanabilmektedir. Sadece ısıl işlem sıcaklığının artışı ile dahi, ara yüzeyin etkileşiminin artmasında daha olumlu etkiye sahip olduğu söylenebilmektedir.

**Çizelge 3.** Numunelerin bakır malzeme hattına yakın bölgelerdeki SEM-EDS bölge analizi sonuçları

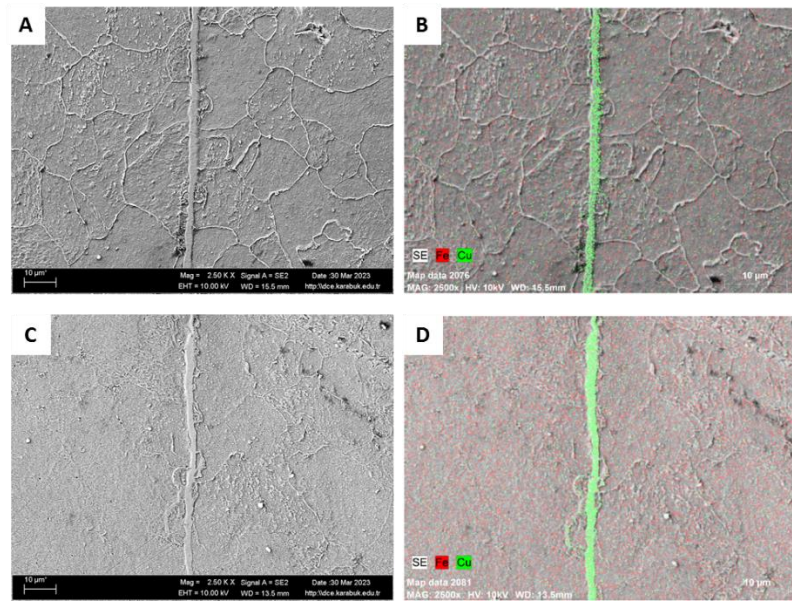
Numune	Bakır Oranı (ağ. %)
Isıl İşlemsiz	1,22
350 °C-60 dk. Isıl işlemlili	3,21
450 °C-60 dk. Isıl işlemlili	6,25

Ara yüzey etkileşimi ayrıca, Şekil 6'da gösterildiği üzere SEM-EDS çizgi analizi ile de incelenmiştir. Çizgi analizi sonucunda ısıl işlem gören numunenin, ısıl işlem görmemiş numuneye kıyasla daha homojen bir geçiş gösterdiği görülmektedir. Bir başka deyişle, çelik-bakır arayüzeyinde, ısıl işlem gören numunenin (Şekil 6B) Fe/Cu oranları, ısıl işlem görmemiş numuneye (Şekil 6A) kıyasla birbirine daha yakındır. Bu sonuç, SEM-EDS bölge analizi sonuçlarını doğrulamaktadır.



Şekil 6. A) ısıtılmış, B) 450 °C-120 dk. ısıtılmış numunelerin çizgi analiz sonucu

Nitekim, Zhang ve ark. döküm yöntemi ile ürettikleri Fe-Cu bimetal malzemenin Fe/Cu arayüzünde Fe atomlarının, Cu tarafının iç kısmına daha fazla yayılabildiğini, ancak Cu atomlarının, Fe tarafının içine zorlukla dağılabildiğini tespit etmişlerdir (Zhang ve ark., 2020). Uygulanan tavlama ısıtılması ile birlikte difüzyon aktivasyonunun artarak çelik içerisindeki Cu miktarının arttığı hem Çizelge 3'teki sonuçlardan hem de Şekil 6'da çizgi EDS görsellerinden anlaşılmaktadır. Ancak bahsedilen difüzyonunun sadece bakır-çelik arayüzünde ve bakır hattının temas ettiği çelik bölgelerinde olduğu Şekil 7'de verilen SEM-Haritalama sonuçlarında görülmektedir. Yani bakırın çeliğin iç bölgelerine kadar difüzyonu söz konusu değildir.

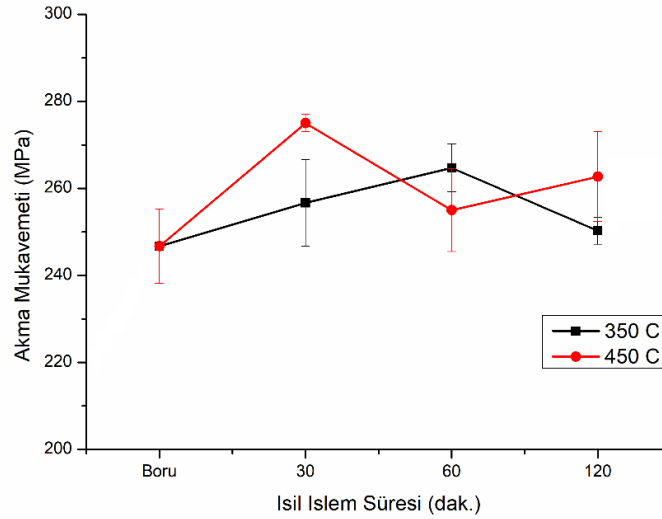


Şekil 7. A-B) ısıtılmış, C-D) 450 °C-120 dk. ısıtılmış numunelerin sırasıyla mikroyapı ve SEM-Haritalama sonucu



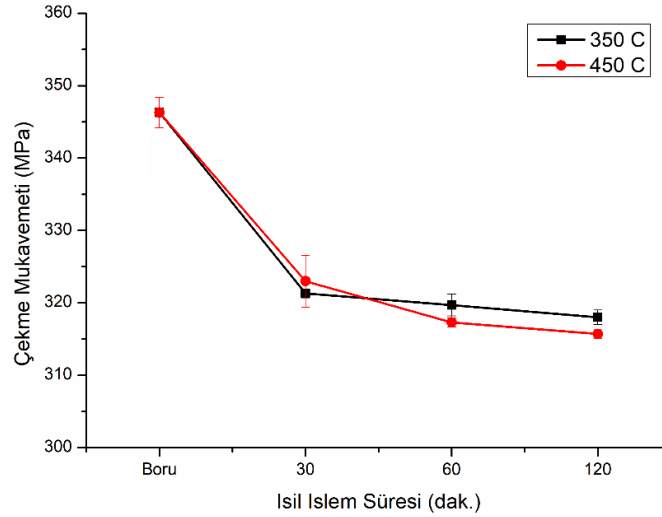
### 3.2.Çekme Testi Sonuçları

Isıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun ve 6 farklı ısıl işlem parametresi ile elde edilmiş bakır kaplı çelik boru numunelerine ait çekme testi sonuçları karşılaştırmalı grafiksel olarak Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 8'de ısıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun akma mukavemeti  $246,7 \pm 8,5$  MPa olarak tespit edilmiştir. Uygulanan tavlama ısıl işlem sıcaklık ve süresine bağlı olarak akma mukavemetinde dalgalanmalar olmakla beraber sürekli artış ya da sürekli azalış tarzında bir farklılaşma gözlemlenmemiştir. Bunun sebebi uygulanan ısıl işlem sıcaklıklarının çeliğin yeniden kristalleşme sıcaklıklarının ( $\sim 550$  °C) altında olmasına bağlı olarak çelik sac tabakasında dislokasyon hareketleri engelleyecek nitelikte çekirdeklenmelerinin meydana gelmemiş olmasından kaynaklanmaktadır (Kavarana ve ark., 2000). Her ne kadar uygulanan ısıl işlem sıcaklığı bakırın yeniden kristalleşme sıcaklığının ( $225$  °C) (Benchabane ve ark., 2008) üzerinde olsa da sac çeliğe bakır kaplama işlemi elektro kaplama yöntemiyle yapılmış ve çok ince bir kaplama kalınlığına sahip olmasından dolayı herhangi bir yeniden kristalleşme veya çekirdeklenme mekanizmasına mikroyapısal inceleme sonuçlarında rastlanmamıştır. Nitekim  $450$  °C-30 dk. ve  $350$  °C-60 dk.'da ulaşılan  $260$  MPa'ın üzerindeki akma mukavemeti değerlerinin sebebi tavlama sırasındaki bakır çelik arayüzeyinde meydana gelen difüzyondur. Difüzyonla birlikte gevşek ara yüzeyde atomların artan bağlanma kuvveti, tane sınırının kaymasını önleyen ve uygulanan gerilim altında akmaya karşı daha dirençli hale getirdiği düşünülmektedir (Zhang ve ark. 2020).

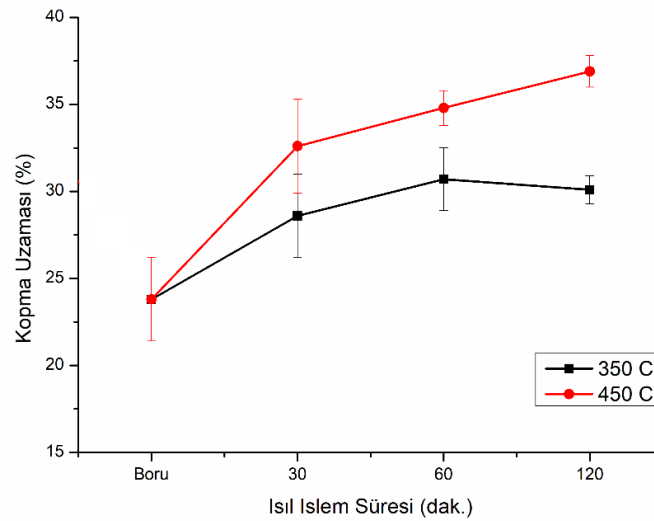


Şekil 8. Akma mukavemetinin tavlama süre ve sıcaklığına bağlı değişimi

Şekil 9'da numunelere ait çekme mukavemeti sonuçlarına göre ısıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun çekme mukavemeti  $346,3 \pm 2,1$  MPa olarak tespit edilmiştir. Uygulanan tavlama ısıl işlemi sıcaklık ve süresine bağlı olarak çekme mukavemeti değerlerinde keskin bir düşüş meydana geldiği gözlemlenmektedir. Ayrıca artan tavlama ısıl işlem süresine bağlı olarak çekme mukavemeti değerlerinin her iki tavlama sıcaklığında da azalan bir eğilimde değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. Bunun sebebi azalan dislokasyon yoğunluğu nedeniyle ısıl işlem uygulanmış bakır kaplı çelik borularda tavlama kaynaklı yumuşama (çekme mukavemetinde düşüş) meydana gelmesidir (Gu ve Song, 2019).



Şekil 9. Çekme mukavemetinin tavlama süre ve sıcaklığına bağlı değişimi



Şekil 10. Kopma uzamasının tavlama süre ve sıcaklığına bağlı değişimi

Şekil 10'da numunelere ait kopma uzaması sonuçlarına göre ısıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun kopma uzaması  $23,8 \pm 2,4$  olarak tespit edilmiştir. Borulara uygulanan farklı süre ve sıcaklıktaki tavlama ısıl işlemine bağlı olarak ise artan tavlama süresine bağlı olarak kopma uzamalarında her iki tavlama ısıl işlem sıcaklığında da artış trendi gözlemlenmektedir. 450 °C'de uygulanan tavlama ısıl işlemindeki uzama artışlarının 350 °C'de uygulanan tavlama ısıl işlemindeki uzama artışlarından her ısıl işlem süresi için daha yüksek olduğu belirgin bir şekilde grafikten anlaşılmaktadır. Bunun sebebi uygulanan tavlama ısıl işlemine bağlı olarak kalıntı gerilmelerin ve yüksek yoğunluklu dislokasyonların ortadan kalkmasıdır (Liu ve ark., 2018). Ayrıca artan ısıl işlem süresine bağlı olarak her iki sıcaklık için de standart sapma aralıklarında daralmaların meydana gelmesi borulardaki homojenliğin ve kararlılığın ısıl işlemle birlikte arttığını göstermektedir.

**Çizelge 4.** Numunelerin çekme deneyleri sonucunda elde edilen çekme dayanımı ve akma dayanımı değerleri

Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
Min. Kabul Kriteri	290	200
Isıl İşlemsiz	346,3±2,1	246,7±8,5
350 °C-30 dk.	321,3±0,6	256,7±10,0
350 °C-60 dk.	319,7±1,5	264,7±5,5
350 °C-120 dk.	318,0±1,0	250,3±3,1
450 °C-30 dk.	323,0±3,6	275,0±2,0
450 °C-60 dk.	317,3±0,6	255,0±9,5
450 °C-120 dk.	315,7±0,6	262,7±10,3

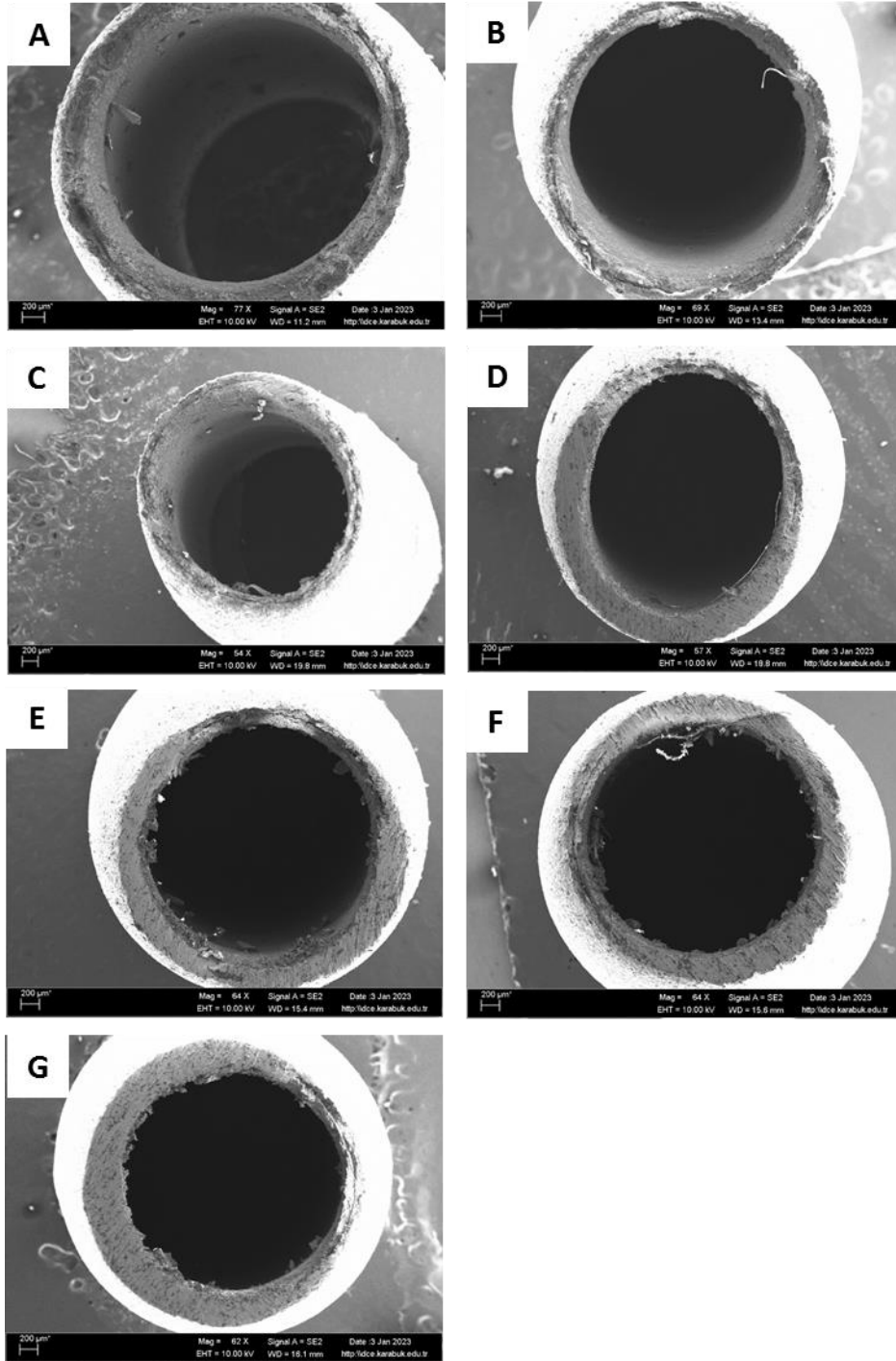
Çizelge 4'te numunelerin ve minimum kabul kriteri için çekme ve akma dayanımı değerleri verilmiştir. Çizelge 4'e göre ısıl işlem ile çekme ve akma dayanımı değerlerinde düşüş olmasına rağmen bakır kaplı çelik boruların min. kabul kriteri değerlerini karşıladıkları görülmektedir.

Şekil 11 ve Şekil 12'de çekme testi sonrası numunelerin kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri sunulmaktadır. Özellikle 450 °C'de daha belirgin olmak üzere, ısıl işlemlenmiş numunelerin daha geniş alanda boşluksuz ve bakır malzemeye ait olmayan kırılma yüzeylerine sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin bakır-çelik arayüzeyindeki difüzyona bağlı olarak iyileşen bakır-çelik arayüzey etkileşimi olduğu düşünülmektedir.

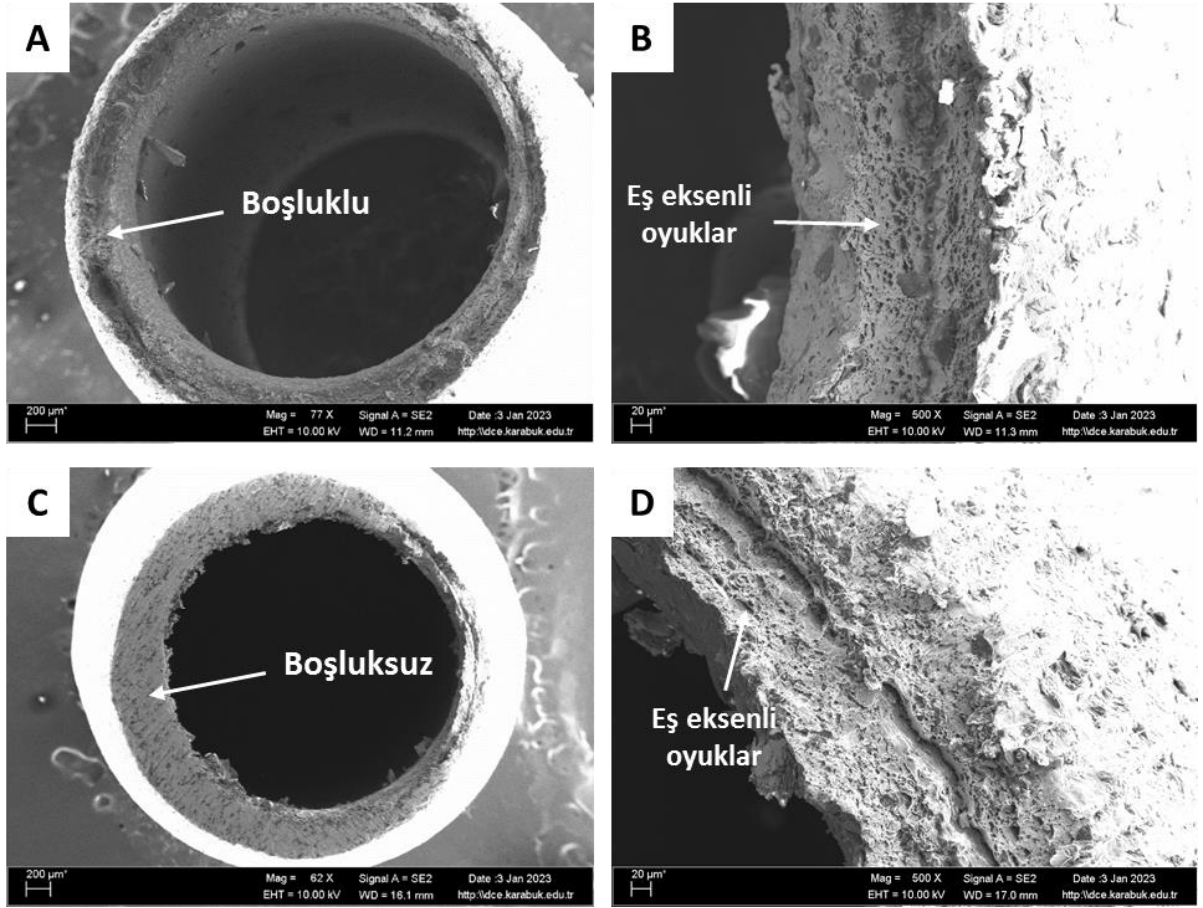
Kırık yüzey incelemelerinde de görüldüğü üzere ısıl işlemde hem sıcaklığın hem de sürenin artışı ayrı ayrı olarak çelik-bakır ara yüzey etkileşimini olumlu yönde etkilediği söylenebilmektedir. Çünkü artan süre ve sıcaklık ile numuneler, daha geniş alanda boşluksuz ve bakır malzemeye ait olmayan kırılma yüzeylerine sahiptirler. Ayrıca hem ısıl işlemlenmiş hem de ısıl işlemsiz numunenin kırık yüzeylerinde eş eksenli oyuklar (dimples) görülmektedir. Bu da numunelerin sünek kırıldığını göstermektedir.

### 3.3.Sertlik Testi Sonuçları

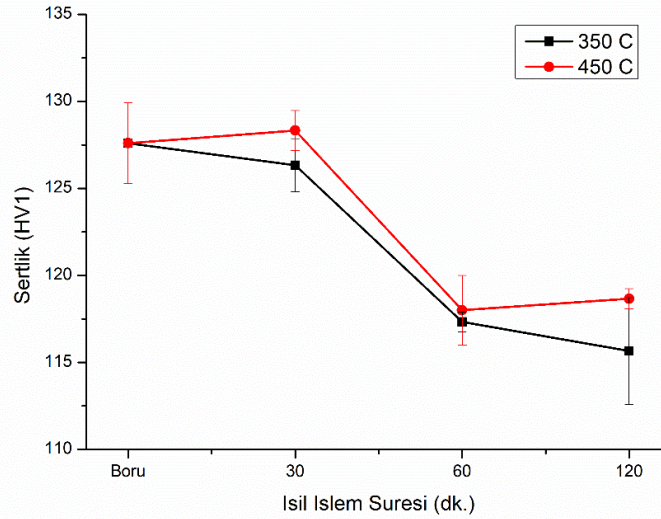
Vickers sertlik testinden elde edilen sonuçlar Şekil 13'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Isıl işlemsiz fren borusu ile 350 °C'de 30 dk. ve 450 °C'de 30 dk. tavllanmış numuneler karşılaştırıldığında (Şekil 13) standart sapma değerleri de göz önünde bulundurularak belirgin bir farklılığın meydana gelmediği söylenebilmektedir. Tavlama süresi 60 dk.'ya çıktığında ise sertlik değerlerinde yaklaşık %7 oranında belirgin bir düşüşün her iki tavlama sıcaklığı için de meydana geldiği görülmektedir. 60 dk. tavllanmış numuneler ile 120 dk. tavllanmış numuneler karşılaştırıldığında ise yine standart sapmaları ile birlikte değerlendirilecek olunursa belirgin bir farklılık görülmemektedir. Sertlik düşüşü istenilen durumlar için optimum tavlama süresinin her iki tavlama sıcaklığı için de 60 dk. olarak yeterli olduğu anlaşılmaktadır. 450 °C'de elde edilen sertlik değerlerinin tüm tavlama süreleri için 350 °C'de elde edilen sertlik değerlerinden az miktarda da olsa (yaklaşık 2 HV) yüksek olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Difüzyona bağlı olarak bakır atomlarının çelik sac plaka içerisine nüfuz ederek çözünmesine bağlı olarak çekme dayanım değerlerindeki değişime de paralel şekilde fren borularının sertliklerinde düşüş meydana geldiği söylenebilmektedir. Nitekim bakır-çelik arayüzeyinde Fe ve Cu elementlerinin birbiri içerisindeki difüzyonu, SEM-EDS analizlerinde (Şekil 5 ve Şekil 6) belirgin şekilde gözlemlenmiştir.



**Şekil 11.** Çekme testi sonrası A) Isıl işlemsiz numuneye, B-D) sırasıyla 30, 60, 120 dk. 350 °C’de ısıl işlem görmüş numunelere, E-G) sırasıyla 30, 60, 120 dk. 450 °C’de ısıl işlem görmüş numunelere ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri



Şekil 12. Çekme testi sonrası A-B) Isıl işlemsiz, C-D) 450 °C-120 dk. ısıl işlem görmüş numunelere ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri



Şekil 13. Mikro sertliğin tavlama süre ve sıcaklığına bağlı değişimi

### 3.4. Patlatma Testi

Numunelerin patlatma testi sonuçları Çizelge 5’te sunulmuştur. Çizelge 5’e göre uygulanan 350 °C’de uygulanan ısıl işlemler ile boruların patlatma dayanımı ortalama yaklaşık %11,6 düşerken, 450 °C’de uygulanan ısıl işlemler ile boruların patlatma dayanımı ortalama yaklaşık %15,3 oranında düştüğü görülmektedir. Boruların patlatma dayanımları ile çekme dayanımları benzer bir eğilim

göstermiş olup, uygulanan sıcaklık ve işlem süresinin artışı ile patlatma dayanımı düşüş göstermiştir. Mishima ve ark., T(°C) sıcaklığındaki borunun patlama basıncı  $P_B$ , borunun bu sıcaklıktaki nihai gerilme mukavemetinden de formül aracılığıyla hesaplanabildiğini belirtmişlerdir (Mishima ve ark., 1966).

$$P_B = \frac{200 \times t \times \sigma_B}{D}$$

Burada D ve t sırasıyla borunun dış çapı (mm) ve duvar kalınlığı (mm) ve  $\sigma_B$  borunun uzunlamasına yöndeki nihai çekme dayanımıdır (kg/cm<sup>2</sup>). Bu formülizasyona göre patlama basıncı ile çekme mukavemetinin doğrudan ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Tavlama ısı işlemi ile birlikte çekme mukavemetindeki düşüşlerin sebebi ise esas olarak, ferrit dislokasyonlarının yok edilmesinden kaynaklanmaktadır (Li ve ark., 2012).

Fren borusu patlatma testi kabul kriterlerine göre 4,75 mm çapa sahip borunun minimum 1100 Bar basınca dayanması gerekmektedir (SAE International, 2017 ve ASTM, 2019). Dolayısıyla ısı işlemi ve ısı işlemli tüm numunelerin bu değerin üzerinde olduğu söylenebilmektedir.

**Çizelge 5.** Numunelerin patlatma testi sonuçları

Numune	Basınç Değeri (Bar)
Isıl İşlemsiz	1500
350 °C-30 dk.	1340
350 °C-60 dk.	1320
350 °C-120 dk.	1320
450 °C-30 dk.	1290
450 °C-60 dk.	1260
450 °C-120 dk.	1260

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada bakır kaplı çelik boruların süneklilik değerlerinin iyileştirilmesi için farklı sıcaklık ve sürelerde ısı işlem uygulanmıştır. Isıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun ve 6 farklı ısı işlem parametresi ile elde edilmiş bakır kaplı çelik boruların mikroyapısal ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Uygulanan ısı işlemin numunelerin tane ve faz yapısında belirgin bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Ancak, kalıntı gerilmelerin ve azalan dislokasyon yoğunluğunun azalmasıyla dayanım değerlerinde düşüş görülürken uzama değerlerinde artış görülmüştür. Ayrıca, mikroyapı ve kırık yüzey incelemelerine göre çelik-bakır ara yüzeyinde difüzyona bağlı olarak iyileşme olduğu söylenebilmektedir. Dayanım değerlerinde düşüş görülmesine rağmen ısı işlem uygulanan tüm numuneler otomotiv sektörü fren borusu üretimi için gerekli mekanik özellikleri kabul kriterlerine göre karşılamaktadırlar. Dolayısıyla, bu çalışma göstermiştir ki dayanım değerlerini standartların altına düşürmeden bakır kaplı çelik boruların süneklilik değerleri ısı işlemler ile iyileştirilebilmektedir.

#### 5. TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmaya desteklerinden dolayı Bant Boru A.Ş. ye ve Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü'ne teşekkür ederler.

## 6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

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

## 7. YAZAR KATKISI

Ozan KOYUNCU çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, veri analizi ve yorumlama, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, Burak ÇELİK çalışmanın veri toplama, veri analizi ve yorumlama, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, Yasin AKGÜL çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, Alper İNCESU çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi aşamalarında, son onay ve tam sorumluluk kısımlarında katkı sağlamıştır.

## 8. KAYNAKLAR

- Al-Ghamdi K.A., Hussain G., SPIF of Cu/steel clad sheet: annealing effect on bond force and formability. *Materials and Manufacturing Processes* 31:758–763, 2016.
- ASTM, A254/A254M-12: Standard Specification for Copper-Brazed Steel Tubing, 2019.
- Benchabane G., Boumerzoug Z., Thibon I., Gloriant T., Recrystallization of pure copper investigated by calorimetry and microhardness. *Materials Characterization* 59:1425–1428, 2008.
- Bundy H.W., Method for making a tube, 1932.
- Choi J.Y., Seong B.S., Baik S.C., Lee H.C., Precipitation and recrystallization behavior in extra low carbon steels. *ISIJ International* 42:889–893, 2002.
- Gu J., Song M., Annealing-induced abnormal hardening in a cold rolled CrMnFeCoNi high entropy alloy. *Scripta Materialia* 162:345–349, 2019.
- Han K.T., Park J.S., On the Forming of Brake Tube-End with Double Wall Structure for Automobiles. In: *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics 1178–1184, 2004.
- ISO, 6892-1: Metallic materials. Tensile testing Method of test at room temperature, 2019.
- Kavarana F.H., Ravichandran K.S., Sahay S.S., Nanoscale steel-brass multilayer laminates made by cold rolling: microstructure and tensile properties. *Scripta Materialia* 42:947–954, 2000.
- Kim J.K., Huh M.Y., Lee J.C., Jee K.K., Engler O., Evolution of strain states and textures during roll-cladding in STS/Al/STS sheets. *Journal of Materials Science* 39:5371–5374, 2004.
- Klakurková L., Horynová M., Juliš M., Gejdoš P., The use of microstructural analysis for the evaluation of quality of double-wall tubes. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publication 269–27, 2017.

- Lee J.E., Bae D.H., Chung W.S, Kim K.H., Lee J.H., Cho Y.R., Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets. *Journal of Materials Processing Technology* 187:546–549, 2007.
- Li Y.J., Choi P., Goto S., Borchers C., Raabe D., Kirchheim R., Evolution of strength and microstructure during annealing of heavily cold-drawn 6.3 GPa hy pereutectoid pearlitic steel wire. *Acta Materialia* 60(9), 4005-4016, 2012.
- Liu B.X., An Q., Yin F.X., Wang S., Chen C. X., Interface formation and bonding mechanisms of hot-rolled stainless steel clad plate. *Journal of Materials Science* 54(17), 11357-11377, 2019.
- Liu B.X., Wei JY., Yang M.X., et al Effect of heat treatment on the mechanical properties of copper clad steel plates. *Vacuum* 154:250–258, 2018.
- Mishima Y., Aoki T., Itō G., Kiyooka S., Ono, K., Seki, Y., Sumitomo M., Takao, Z., Behavior of Cladding Tube under Coolant-Loss Accident Conditions. *Journal of Nuclear Science and Technology* 3(2), 72-82, 1966.
- Ravichandran K.S., Sahay S.S., Byrne J.G. Strength and ductility of microscale brass-steel multilayer composites. *Scripta Materialia* 35, 1996.
- SAE International, J1677, Tests and Procedures for Steel and Copper Nickel Tubing, 2004.
- SAE International, J527, Brazed Double Wall Low-Carbon Steel Tubing, 2017.
- Zhang G., Kang Y., Wang M., Xu H., Jia, H., Atomic diffusion behavior and diffusion mechanism in Fe–Cu bimetal casting process studied by molecular dynamics simulation and experiment. *Materials Research Express* 7(9):1-13, 096519, 2020.
- Zhang L.F., Gao R., Zhao B.L, Sun M., Jing K., Wang X.P., Hao T., Xie Z.M., Liu R., Fang Q.F., Liu C.S., Effects of annealing temperature and layer thickness on hardening behavior in cross accumulative roll bonded Cu/Fe nanolamellar composite. *Journal of Alloys and Compounds* 827:154312, 2020.