

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YEREL AĞ VERİ AKTARIM KABLOLARINDA KULLANILAN
TİCARİ SAFLIKTAKİ BAKIRA UYGULANAN ISIL İŞLEM
PARAMETRELERİNİN EMPEDANS VE GERİ DÖNÜŞ KAYBI
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DİLEK DAĞDELEN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ ve MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YEREL AĞ VERİ AKTARIM
KABLOLARINDA KULLANILAN TİCARİ
SAFLIKTAKİ BAKIRA UYGULANAN ISIL
İŞLEM PARAMETRELERİNİN EMPEDANS
VE GERİ DÖNÜŞ KAYBI ÜZERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DİLEK DAĞDELEN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ ve MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF.DR. ERDEM ATAR

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF
HEAT TREATMENT PARAMETERS
APPLIED TO COMMERCIAL PURE
COPPER USED IN LAN DATA
TRANSMISSION CABLES ON IMPEDANCE
AND RETURN LOSS PROPERTIES**

DILEK DAGDELEN
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCE and
ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. ERDEM ATAR**

**GEBZE
2023**



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/07/2023 tarih ve 2023./40 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 08/08/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Dilek Dağdelen 'ın tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. ERDEM ATAR

ÜYE : Prof. Dr. Mehmet Tarakçı

ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Safa Yılmaz

ONAY

Gebze Teknik ÜniversitesiEnstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Yerel ağ veri aktarım kablolarının üretimi sırasında yapılan tel çekme prosesiyle Cu-ETP soğuk deformasyona uğramaktadır. Soğuk deformasyona uğrayan metalik malzemenin mekanik özellikleri (çekme, kopma mukavemeti, akma dayanımı) yükselmektedir. Tel çekme soğuk deformasyon prosesi sonucunda metal malzemede oluşan deformasyon sertleşmesi veya kalıntı gerilmelerin giderilmesi için normalizasyon tavlama ısı işlemi uygulanmaktadır. Normalizasyon tavlama sırasında Cu-ETP tel, akım verilerek belirli bir sıcaklığa ulaştırılan kaskalar etrafında döndürülerek tavlama işlemi yapılmış olur. Makine hızı (m/dk) olarak hesaplanmaktadır.

Tüm bu metalurjik işlemlerin ardından Cu iletkenin % uzama, mukavemet değerleri ile iletkenlik değerleri değişmiş olmaktadır. Dolayısıyla bu parametrelerle birlikte istenilen 100-110 Ω aralığındaki empedans değeri ve Return Loss (geri dönüş kaybı) -20dB ile -80 dB aralığında farklılıklar gösterecektir.

Bu çalışmada %93.75 oranında soğuk deformasyona uğrayan Cu-ETP, 120 ile 250°C arasında değişen sıcaklıklarda birer saatlik tavlama ısı işlemi uygulanmıştır ve ardından Cu-ETP numunelerinin elektriksel direnç değişikliği, mekanik özellikleri ve mikroyapıları incelenmiştir. Yeniden kristalleşme tavlama gerçekleştirilen sıcaklık değerlerinden yapılan sonuçlara göre kritik görülen 140°C, 160°C, 180°C ve 250°C, sıcaklıklarda tavlama işlemi yapılan Cu-ETP tellerden Cat6 U/UTP kablo üretilmiş ve empedans, Next, geri dönüş kaybı sonuçları incelenmiştir. Bu sonuçlara göre 180°C’de tavlama işlemi yapılan Cu-ETP ile üretilen kablonun empedans, Next ve geri dönüş kaybı değerlerinin uygun geldiği bu değerin altında yapılan tavlamalardaki empedans, next, geri dönüş kaybı sonuçlarının uygun olmadığını görülmüştür. Tüm test sonuçları karşılaştırıldığında %93,75 soğuk deformasyona uğramış %99,90 saflıktaki Cu-ETP’nin yeniden kristalleşme tavlama sıcaklığının 180°C olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: soğuk işlem, tavlama, kablo, bakır, elektrolitik bakır (ETP), ticari saf bakır, ısı işlem, tel çekme, empedans, return loss, mikroyapı, ekstrüzyon, izolasyon.

SUMMARY

During the production of local network data transmission cables, the Cu-ETP undergoes cold deformation through a wire drawing process. The mechanical properties of the metallic material subjected to cold deformation (tensile strength, breaking strength, yield strength) are improved. To eliminate deformation hardening or residual stresses that occur in the metallic material as a result of the cold deformation process, a normalization annealing process is applied. Normalization annealing process is applied to the Cu wire by rotating it around the pulleys, which are brought to a certain temperature by the given current. Machine speed calculated as (m/min). After all these metallurgical processes, the % elongation, strength values and conductivity values of the Cu conductor have changed. Therefore, with these parameters, the desired impedance value in the range of 100-110 Ω and the Return Loss (return loss) will vary between -20dB and -80 dB.

In this study, Cu-ETP, which underwent cold deformation to the extent of 93.75%, was subjected to one-hour annealing heat treatment between 120 and 250°C, followed by an examination of the electrical resistance changes, mechanical properties, and microstructures of Cu-ETP samples. As a result of the obtained findings, the temperature and time in the annealing process were determined based on the results of the tests and subsequently transformed into cable form, following the copper wire drawing process carried out in Niehoff wire drawing machines, along with an examination of all its electrical and mechanical properties. Four temperature and time parameters were selected here based on the results of the tests and were later transformed into cable form. When all the test results were examined, it was concluded that the recrystallization annealing temperature was 180 for a crushing rate of 93.75%.

Key Words: cold working, annealing, cable, copper, electrolytic copper (ETP) commercial pure copper, heat treatment, wire drawing, impedance, return loss, microstructure, extrusion, insulation.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada çalışmam boyunca benden desteklerini esirgemeyen başta tez danışmanım Prof. Dr. Erdem Atar olmak üzere, Nexans Türkiye Ar-Ge Direktörü Kamil Mutlu'ya, Araştırma Görevlisi Tufan Gümüşlü'ye, Kalite Kontrol Müdürü Onur Mercan'a, Kalite Kontrol Şefi Kerem Dizman'a, Kalite Kontrol Şefi Gökem Uslu'ya, Üretim Kıdemli Uzmanı Namık Kemal Keskin'e ve diğer Nexans Tuzla Ar-Ge Departmanı çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	V
SUMMARY	VI
TEŞEKKÜR	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2. BAKIR HAKKINDA GENEL BİLGİLER	2
2.1. Bakır ve Genel Özellikleri	3
2.2. Bakır Üretimi ve Şekillendirme Yöntemleri	8
2.2.1 Tel Çekme Yöntemi	13
2.3. Soğuk Deformasyon ve Tavlama	14
2.3.1. Soğuk Deformasyon	14
2.3.2. Tavlama	15
2.3.2.1. Toparlanma Aşaması	16
2.3.2.2. Yeniden Kristalleşme Aşaması	18
2.3.2.3. Tane Büyümesi Aşaması	23
2.4. Bakırın Yeniden Kristallenmesi Üzerine Çalışmalar	26
2.5. Bakır Kullanım Alanları	29
2.5.1 Data Kabloları	30
2.5.1.1. Data Kablolarında İletkenin Özellikleri	31

2.5.1.2. Empedans, Next, Geri Dönüş Kaybı (Return Loss)	35
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
3.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzeme ve Yöntem	37
3.2. Yeniden Kristalleşme Tavlamaları (Isıl İşlemleri)	39
3.3. İncelenen Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	40
3.3.1. Sertlik Testleri	41
3.3.2. Çekme Testleri	42
3.4. İncelenen Numunelerin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi	43
3.4.1. Elektriksel Direnç ve İletkenlik Değerinin Belirlenmesi	43
3.4.2. Empedans Değerinin Belirlenmesi	43
3.4.3. NEXT (Near and Cross Talk) Değerinin Belirlenmesi	45
3.4.4. Geri Dönüş Kaybı Değerinin Belirlenmesi	46
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME	48
4.1. Soğuk Deformasyon ve Yeniden Kristalleşme Tavlamalarının Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi	48
4.2. Soğuk Deformasyon ve Yeniden Kristalleşme Tavlamalarının Elektriksel Özellikler, Empedans, Next, Geri Dönüş Kaybı Üzerine Etkisi	53
4.2.1. Elektriksel Direnç ve İletkenlik Ölçüm Sonuçları	53
4.2.2. Empedans, NEXT, Geri Dönüş Kaybı (Return Loss) Ölçüm Sonuçları	55
5. GENEL SONUÇLAR	60
KAYNAKÇA	61
ÖZGEÇMİŞ	65
EKLER	66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
Cu-ETP	: Elektrolitik bakır
Mpa	: megapaskal
FCC	: Yüzey merkezli kübik
Ω	: direnç
O	: oksijen
Bi	: Bizmut
Pb	: Kurşun
Ag	: Gümüş
Cat 5e	: Kategori 5 gelişmiş yerel ağ veri aktarım kablosu
Cat 6	: Kategori 6 yerel ağ veri aktarım kablosu
mHz	: megahertz
dB	: Desibel
RL	: Return Loss (Geri Dönüş Kaybı)
<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
Ω	: direnç

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Bakır atomunun elektron dizilimi	3
2.2 Bakır üretim süreci	10
2.3 Ticari Amaçlı Üretilen Bakır ve Kullanım Alanları	11
2.4 Tel Çekme İşlemi	13
2.5 Soğuk Deformasyon ve Tavlama İle Malzemede Meydana Gelen Değişikliklerin Şematik Gösterimi	15
2.6 Bükülmüş Tek Kristalli Bir Metalin Poligonizasyonu	17
2.7 Tanelerin Çekirdeklenmesi ve Büyümesi	19
2.8 Soğuk işlem oranının yeniden kristalleşme üzerine etkisi (sabit sıcaklıkta)	21
2.9 Soğuk Deformasyon Oranının Tane Büyüklüğüne Etkisi	21
2.10 Yeniden Kristalleşme İçin Gereken Kritik Soğuk Deformasyon Miktarı İle Tane Boyutu	22
2.11 Tavlama Sıcaklığı ve Tane Büyüklüğü	24
2.12 Demir Metali Örneğinin Tavlama Sıcaklık ve Zamana Bağlı Olarak Ortalama Tane Büyüklüklerinin Değişimi	25
2.13 Anormal Tane Büyümesi	26
2.14 DSC Çalışmasında Saptanan Yeniden Kristalleşme Sıcaklıkları	27
2.15 a) 10°C/dk Isıtma Hızındaki DSC Eğrisi b) 20°C/dk Isıtma Hızındaki DSC Eğrisi c) 30°C/dk Isıtma Hızındaki DSC Eğrisi	28
3.1 8 mm Çapındaki Cu-ETP Filmaşın	38
3.2 2,20 mm Çapındaki Cu-ETP Tel	38
3.3 0,55 mm Çapındaki Cu-ETP Tel	38
3.4 Yeniden Kristalleşme Tavlamalarının Gerçekleştirildiği Binder ED 115 Etüvün Görünümü	40
3.5 Yeniden Kristallenme Tavlamaları Yapılan Numunelerin Mikro Sertlik Ölçümlerinde Kullanılan Sertlik Cihazı	41
3.6 Zwick 1446 Çekme Test Cihazı	42
3.7 Yeniden Kristalleşme Tavlamaları Yapılan Numunelerin Elektriksel Direnç Ölçümlerinde Kullanılan Miliohm metre	43
3.8 Örnek Empedans Ölçüm Grafiği	44
3.9 Network Analyzer	45

3.10	Örnek NEXT Ölçüm Grafiği	46
3.11	Per Yapıdaki İzoleli Cu-ETP	46
3.12	Örnek Geri Dönüş Kaybı (Return Loss) Sonuç Grafiği	47
4.1	Farklı Sıcaklıklarda Tavlanmış Bakır Telin a). Boyuna ve b). Enine Kesit Sertlik Ölçüm Sonuçları	49
4.2	%93,75 Soğuk Deformasyon Oranına Sahip ve Farklı Sıcaklıklarda Tavlanmış Bakır Telin Boyuna Kesitlerinde Oluşan Sertlik İzlerine Ait Optik Mikroskop Görüntüleri	51
4.3	Yeniden Kristalleşme İşlem Sıcaklıklarına Bağlı Olarak İncelenen Numunelere Ait Çekme Mukavemeti ve % Kopma Uzaması Değerlerinin Değişimi	52
4.4	a). %93,75 Soğuk Deformasyon ve b).180°C Sıcaklığında Yeniden Kristalleşme Tavlama Isıl İşlemine Tabi Tutulmuş Bakır Telin Boyuna Kesit Optik Mikroskop ve SEM Mikroyapı Görüntüleri	52
4.5	0,55 mm Çapındaki Cu-ETP'ye Uygulanan Yeniden Kristalleşme Tavlamalarının Elektriksel Direnç ve İletkenlik Üzerine Etkisi	55
4.6	140°C, 160°C, 180°C, 250°C Tavlama İle Üretilen Cu-ETP Tellerden Yapılan Cat 6 U/UTP Kabloların NEXT Sonuçları	57
4.7	140°C, 160°C, 180°C, 250°C Tavlama İle Üretilen Cu-ETP Tellerden Yapılan Cat 6 U/UTP Kabloların NEXT Sonuçları	58
4.8	140°C, 160°C, 180°C, 250°C Tavlama İle Üretilen Cu-ETP Tellerden Yapılan Cat 6 U/UTP Kabloların Geri Dönüş Kaybı (Return Loss) Sonuçları	59

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Bakırın fiziksel ve kimyasal özellikleri	4
2.2 Cu-ETP Bileşimi	5
2.3 Cu-ETP Fiziksel Özellikler	6
2.4 Cu-ETP Mekanik Özellikler	7
2.5 Bakır Üretiminde Kullanılan Mineraller	8
3.1 Cu-ETP Malzemesine Ait a). Optik Emisyon Spektroskopisi Kimyasal Analizi ve b). Referans Tanım ve Limit Değerleri	39
3.2 İncelenen Cu-ETP Numunelerinin Çekme Mukavemeti Kopma Uzaması Sertlik ve Elektriksel Direnç Ölçüm Sonuçları	40

1. GİRİŞ

Yerel iletişim ağları yani Local Area Network (LAN) kabloları diğer adıyla ethernet kabloları veya data kabloları bilindiği üzere endüstride, bilgisayarlarda, haberleşme ağlarında sunucu odalarındaki veri aktarımında kullanılmaktadır. Ethernet kabloları 8 adet polimerik malzemeyle ekstrüde edilen iletken bakır telin 2'li gruplar halinde büküldükten sonra yine polimerik malzemeyle kaplanmasıyla oluşmaktadır. İletken olarak kullanılan bakır %99,90 saflık oranına sahip elektrolitik bakır (Cu-ETP) olarak bilinen metaldir.

Ethernet kablolarında kablonun yüksek kalitede veri aktarım özelliğini sağlamak için kontrol edilen birkaç parametre mevcuttur. Bu parametrelerden en önemlisi empedans, reaktans, direnç, Return Loss (Geri Dönüş Kaybı) olarak bilinir. LAN kablolarında iletken olarak kullanılan bakıra yapılan soğuk deformasyon ve ısıt işlemler sonucunda meydana gelen uzama değişkenliği, elastik ve plastik deformasyon değerleri kablodaki direnç, reaktans, empedans, geri dönüş kaybı gibi değer aralıklarını yani ölçüm sırasında meydana gelen frekans dalga boylarını değiştirmektedir.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Yapılan çalışma sonucunda sıcaklık-zaman (malzeme kinetiği) parametrelerini optimize ederek elektriksel değerleri iyileştirmek, kablodaki direnç, reaktans, empedans ve geri dönüş kaybı (return loss) değişiminin iletkenin mekanik özellik değişiminden kaynaklandığını bilimsel yöntemlerle ortaya koymak ve çalışma sonucunda mevcut LAN kablolarının elektriksel özelliklerinde ve veri aktarımında iyileştirme yaparak verimi arttırmak, Cu % uzama ve elastik-plastik deformasyon değerlerinin farklılığından dolayı oluşabilecek elektriksel parametrelerden kaynaklı uygunsuzluklarını ortadan kaldırmak, optimum sıcaklık-zaman parametrelerini belirleyerek üretim sürekliliği ve kapasitesini arttırmak Dünya genelinde maden ve dolayısıyla Cu rezervlerinin azalması, artan maden ve enerji fiyatları ile tedarik problemleri düşünüldüğünde meydana gelebilecek hurda miktarını azaltarak maliyeti düşürmek, nihai ürünün iyileştirilmesiyle ülke ekonomisine katkıda bulunmak hedeflenmiştir.

2. BAKIR HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Bakır madeni geçmişi itibariyle insanlık tarihi kadar eski olan bir maden olarak öne çıkmaktadır. Uzun yıllar boyunca insanlar tarafından kullanılan, sanayi alanı içerisinde büyük öneme sahip olan bakır, istenilen şekli alabilme noktasında kolay şekillenen bir madde olduğundan dolayı kullanışlı bir maden olarak görülen kırmızı ve kahverengi tonları arasında bir renge sahip olan bir metal olarak ifade edilebilmektedir.

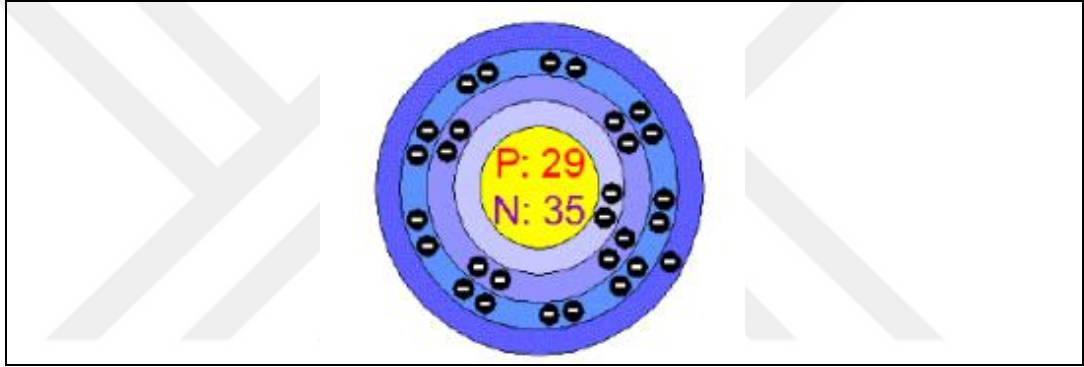
Demirin keşfinden önceki dönem içerisinde ilkel çağ olarak kabul edilen dönemde bakır, insanlar tarafından kalay ile karıştırılarak kullanılmakta veya alaşım uygulanarak bronz elde edilerek kullanılmakta ve bu madenler aracı ile çeşitli silahlar ve araçlar elde edilmekteydi. Günümüze dek bakır madeni önemi korumuş ve halen daha birçok ürün içerisinde kullanım alanı bulmaktadır. Çoğunlukla renginden kaynaklı olarak süs eşyalarında kullanılan bakır bunun yanında madeni paralarda da kullanılmaktadır. Elektrik iletkenliği özelliği sebebi ile elektrik iletkenliğinin gerekli olduğu yerlerde esnek kablo yapımında ve bobinler içerisinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Günümüzde en fazla kullanılan metaller arasında yer alan bakırın ortalama küresel tüketim miktarının 15 milyon ton civarında olduğu ifade edilmektedir. Sanayi alanında meydana gelen değişim ve gelişimlere paralel olarak bakır meteline olan talepte de değişim yaşanmış ve artış meydana gelmiştir. Bir ülkede bakır madenin kullanım miktarı ülkenin gelişmişlik düzeyi ile doğrudan ilişkili olmaktadır. [1].

Gelişen ve değişen toplumsal yaşam içerisinde elektriğin giderek önem kazanması bu alanın gelişmesine neden olmuş, elektrik iletkenliği yüksek olan bakırın elektrik ile ilişkili biçimde kullanılmasında artış meydana gelmiştir. Küresel anlamda üretilen bakırın 4'te 3'lük kısmının elektrik iletkenliği bağlamında kullanıldığı ifade edilmektedir. Bu anlamda bireysel ve toplumsal yaşamın elektriğe duyduğu ihtiyacın artması durumunda ilerleyen yıllarda bakır madenine olan ihtiyacın daha fazla olacağı öngörülmektedir [2].

2.1. Bakır ve Genel Özellikleri

Dünya üzerinde bulunan tüm maddeler temelde atomlardan oluşmaktadır. Atom ise içerik bakımından elektron, proton ve nötronlardan oluşmaktadır. Atom içerisinde merkezde atom çekirdeği bulunmaktadır ve çekirdek içerisinde nötron ve protonlar birlikte yer almaktadır. Bakır atomu içerisinde ise 29 elektron ve proton, 35 nötron bulunmaktadır. Atom numaraları proton sayısı bağlamında belirlendiğinden dolayı bakırın atom numarası 29 olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.1’de bakır atomunun dizilimi yer almaktadır [1].



Şekil 2.1: Bakır Atomunun Elektron Dizilimi.

Bakır, simgesel olarak “Cu” simgesi ile tanımlanmaktadır. Bakırın önemli bir metal olmasında etkili olan özellikleri şu şekilde sıralanabilmektedir [1];

- Korozyon direnci,
- Orta derecedeki mukavemet,
- Yüksek ısı iletkenliği,
- Renginden dolayı dekoratif amaçla kullanılabilmesi,
- Yüksek elektrik iletkenliği,
- Şekil verilmesinin kolay olması.

Tablo 2.1 içerisinde bakırın kimyasal ve fiziksel özelliklerine yer verilmektedir [1].

Tablo 2.1 Bakırın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.

Atom Ağırlığı	63,546 g/mol
Atom Numarası	29
Brinell Sertliği	874 MN. m^{-2}
Buharlaştırma Isısı	300,4 kJ/mol
Elektrik Direnci	16,78n Ω .m(20°C’de)
Elektrik İletme Özelliği	%99,95
Erime Isısı	43 k.cal (1 kg bakırın erimesi için gerekli ısı miktarı)- 13,26 kJ/mol
Erime Noktası	1083.0 °C (1356,15 K, 1981,4 F)
Görünüş	Metalik Kahverengi
Grup, Periyot, Blok	11, 4, d
Isı İletkenlik	401 W/(m.K)
Isı Kapasitesi	24,440 (25°C)J/(mol.K)
Isıl Genleşme	16,5 mm/(m.K) (25°C’de)
Kaynama Noktası	2567.0 °C (2840,15 K, 4652,6 F)
Kristal Yapı	Kübik
Mohs Sertliği	3
Sınıfı	Geçiş Elementi
Simgesi	Cu
Vickers Sertliği	369 MN. m^{-2}
Yoğunluğu	8,96 gr/cm ³

Bakır, yüksek iletkenlik özelliğiyle tanınan bir metaldir ve elektriksel uygulamalarda geniş çapta kullanılan bir malzemedir. Bakırın elektriksel özellikleri, onun kristal yapısıyla ilgilidir. Bakır, yüzey merkezli kübik (FCC) kristal yapısına sahiptir ve bu yapısı, serbest elektronların rahatlıkla hareket etmesini sağlar. Bakırın valans elektronları dış kabuk seviyesinde bulunur ve serbest elektronlar olarak davranır. Bu serbest elektronlar, elektrik akımının iletiminde etkin rol oynamaktadır.

Bakırın düşük direnç değeri, serbest elektronların çarpışmalarının az olmasından kaynaklanır. Bu sayede, bakır genellikle elektrik kabloları, devre kartları ve elektriksel bağlantılar gibi uygulamalarda tercih edilen bir malzemedir [1].

Bakır, kırmızı renkte bir ağır metaldir. Bakır, kolayca bükülebilir ve ince teller veya levhalar haline getirilebilir, şekillendirilebilir ve sıcak veya soğuk işlenebilir. Dövme, şekillendirme ve presleme işlemlerinde yaygın olarak kullanılır. Bakır, döküme uygun değildir. Dökme bakır parçalarının yüzeyinde hava kabarcıkları olduğu için dokusu oldukça gözeneklidir. Bu nedenle, diğer metallerle alaşım yaparak kullanılır. Gümüşten sonra elektrik ve ısıyı en iyi ileten metaldir. Kuru hava bakırı etkilemezken, nemli havada yavaş yavaş yeşil bir bakır karbonat tabakası oluşur. Buna “bakır çalığı” denir. Bu nedenle, kalaysız kaplarda oluşan yeşil renk zehirli olduğundan içerisinde yiyecek pişirme amaçlı kullanılmaz. Bakır, asitlerle reaksiyona girerek tuzlarını oluşturur ve bu tuzlar zehirli olabilir [3].

“Cu-ETP elektrolitik bakır” terimi, bir tür bakır alaşımını ifade eder. “Cu-ETP” kısaltması, İngilizce “Electrolytic Tough Pitch Copper” ifadesinin baş harfleridir. [4].

ETP bakır, düşük oksijen içeriği ve yüksek iletkenlik özellikleri ile bilinir. Elektrolitik rafine edilirken, oksijen ve diğer istenmeyen katkı maddeleri alaşımdan uzaklaştırılır, böylece bakırın saflığı artar. Cu-ETP elektrolitik bakır, özellikle elektrik ve elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Örneğin, elektrik kabloları, elektrik devreleri, transformatörler, elektrik motorları ve diğer elektriksel uygulamalarda kullanılır [5].

Tablo 2.2’de Cu-ETP’nin içerisinde bulunan elementlerin yüzde oranları verilmiştir. [6].

Tablo 2.2: Cu-ETP Bileşimi.

Cu [%]	O [%]	Bi [%]	Pb [%]
Min 99.90	Max 0.04	Max 0.0005	Max 0.005

Bu bileşim verilerine göre, Cu-ETP elektrolitik bakırın bileşimi; bakır (Cu) minimum %99.90, oksijen (O) maksimum %0.04, bismut (Bi) maksimum %0.0005 ve kurşun (Pb) maksimum %0.005 şeklindedir. Bu verilere dayanarak, Cu-ETP elektrolitik bakırın yüksek saflıkta bir malzeme olduğu söylenebilir. Bakırın minimum %99.90 oranında bulunması, malzemenin yüksek elektrik iletkenliği ve

diğer özelliklerinin korunmasını sağlar. Oksijen, bismut ve kurşun gibi diğer elementlerin düşük miktarlarda bulunması, malzemenin istenmeyen özelliklerin oluşumunu engelleyerek mükemmel performansını sürdürmesine yardımcı olur. Bu bileşim, Cu-ETP elektrolitik bakırın endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasını destekler. Yüksek saflık düzeyi ve düşük miktarda bulunan diğer elementler, elektrik ve elektronik sektöründe güvenilirlik, performans ve işlenebilirlik sağlayan önemli faktörlerdir [6].

Tablo 2.3 'te Cu-ETP'nin fiziksel özellikleri gösterilmiştir [6].

Tablo 2.3: Cu-ETP Fiziksel Özellikler.

Erime Noktası [°C]	Yoğunluk [g/cm ³]	Özgül Isı Kapasitesi [kJ/kgK]	Termal Koşul [W/mK]	Elektriksel Koşul [MS/m]	Termal Genleşme Katsayısı [10-6/K]
1083	8.9	0.394	390	> 58	17.7

Cu-ETP elektrolitik bakırın ergime noktası 1083°C olarak verilmiştir. Bu yüksek ergime noktası, malzemenin yüksek sıcaklıklarda dayanıklı olmasını sağlar. Yoğunluk değeri 8.9 g/cm³ olarak belirtilmiştir. Bu yoğunluk değeri, malzemenin göreceli olarak yoğun bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Özgül ısı kapasitesi 0.394 kJ/kgK olarak verilmiştir. Bu değer, Cu-ETP elektrolitik bakırın birim kütle başına ne kadar ısı enerjisi depolayabileceğini gösterir. Termal iletkenlik değeri 390 W/mK olarak belirtilmiştir. Bu yüksek termal iletkenlik özelliği, Cu-ETP elektrolitik bakırın ısıyı etkili bir şekilde iletebildiğini gösterir. Bu özellik, ısı dağılımı ve soğutma uygulamalarında tercih edilmesini sağlar. Elektriksel iletkenlik değeri > 58 MS/m olarak verilmiştir. Bu değer, Cu-ETP elektrolitik bakırın yüksek elektrik iletkenliği özelliğini gösterir. Bu nedenle, elektrik ve elektronik uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen bir malzemedir. Son olarak, termal genleşme katsayısı 17.7 x 10-6/K olarak belirtilmiştir. Bu değer, Cu-ETP elektrolitik bakırın sıcaklık değişikliklerine karşı nasıl tepki vereceğini gösterir. Termal genleşme katsayısı düşük olduğunda, malzemenin termal stabilitesi artar. Bu fiziksel özellikler, Cu-ETP elektrolitik bakırın elektrik iletkenliği, ısı transferi, dayanıklılık ve termal stabilite gibi önemli

özelliklerle donatılmış olduğunu gösterir. Bu da malzemenin geniş bir endüstriyel kullanım yelpazesine sahip olmasını sağlar [6].

Tablo 2.4'te verilen değerlere göre, Cu-ETP elektrolitik bakırın mekanik özelliklerini değerlendirebiliriz. [6].

Tablo 2.4: Cu-ETP Mekanik Özellikler.

	Kopma Mukavemeti [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	Uzama [%]	Sertlik [MN.m-2]	Bükme Oranı [GW]
R360	> 360	> 320	> 2	> 110	1
R290	290-360	> 250	> 4	90-110	0
R240	240-300	> 180	> 8	65-95	0
R220	220-260	> 140	> 33	40-65	0

Gerilme direnci, akma dayanımı, uzama, sertlik ve bükme oranı gibi faktörler, malzemenin mekanik performansını belirlemektedir. R360 sınıfı Cu-ETP elektrolitik bakır, gerilme direnci açısından en yüksek değere sahiptir, minimum 360 MPa. Akma dayanımı da minimum 320 MPa'dır. Uzama oranı minimum %2 olarak belirtilmiştir. Sertlik değeri minimum 110 olarak verilmişken, bükme oranı 1 olarak belirtilmiştir. R290 sınıfı Cu-ETP elektrolitik bakır, gerilme direnci 290-360 MPa aralığında değişirken, akma dayanımı minimum 250 MPa'dır. Uzama oranı minimum %4, sertlik değeri ise 90-110 aralığında değişmektedir. Bükme oranı ise 0 olarak belirtilmiştir. R240 sınıfı Cu-ETP elektrolitik bakır, gerilme direnci 240-300 MPa arasında değişirken, akma dayanımı minimum 180 MPa'dır. Uzama oranı minimum %8 olarak belirtilmiştir. Sertlik değeri ise 65-95 aralığında değişmektedir. Bükme oranı 0 olarak belirtilmiştir. R220 sınıfı Cu-ETP elektrolitik bakır, gerilme direnci 220-260 MPa arasında değişirken, akma dayanımı minimum 140 MPa'dır. Uzama oranı minimum %33, sertlik değeri ise 40-65 aralığında değişmektedir. Bükme oranı 0 olarak belirtilmiştir. Bu verilere dayanarak, Cu-ETP elektrolitik bakırın farklı sınıflarının mekanik özelliklerinin çeşitlilik gösterdiği görülmektedir. Bu mekanik özellikler, malzemenin kullanıldığı uygulamalarda dayanıklılık, esneklik ve şekillendirilebilirlik gibi faktörlerin değerlendirilmesinde önemlidir. Hangi sınıfın tercih edileceği, kullanım amacına ve talep edilen mekanik özelliklere bağlı olacaktır

Elektriksel iletkenlik kapsamında Cu-ETP; elektrik iletkenliği kimyasal bileşime, soğuk deformasyon seviyesine ve tane boyutuna bağlıdır. Kúçük bir tane boyutunun yanı sıra yüksek bir deformasyon seviyesi iletkenliği azaltır [6].

Korozyon direnci açısından Cu-ETP; doğal ve endüstriyel atmosferlerin yanı sıra denize yakın bölgelerdeki atmosferlere (tuzlu suyun koroziv olması nedeniyle), içme suyu, oksitleyici olmayan asitler, alkali çözeltiler ve nötr tuzlu çözeltilere karşı dayanıklıdır. Amonyak, halojenür, siyanür ve hidrojen sülfid çözeltileri ve atmosferleri, oksitleyici asitler ve deniz suyu (özellikle yüksek akış hızlarında) dayanıklı değildir. Oksijen içeriği nedeniyle Cu-ETP, yüksek sıcaklıklarda indirgeyici atmosferlerde hidrojen kırılğanlığına dirençli değildir [6].

2.2. Bakır Üretimi ve Şekillendirme Yöntemleri

Bakır, endüstriyel anlamda büyük öneme sahip olan ve içeriğinde pek çok mineralin bulunduğu bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Küresel anlamda bakır üretimi için kullanılan mineraller ve oranları Tablo 2.5 içerisinde yer almaktadır [7].

Tablo 2.5: Bakır Üretiminde Kullanılan Mineraller.

Mineraller	Miktar (%)
Kalkozit	50
Kalkopirit	25
Oksit mineralleri	15
Doğal bakır	6
Enarjit	3
Diğer sülfür mineralleri	1

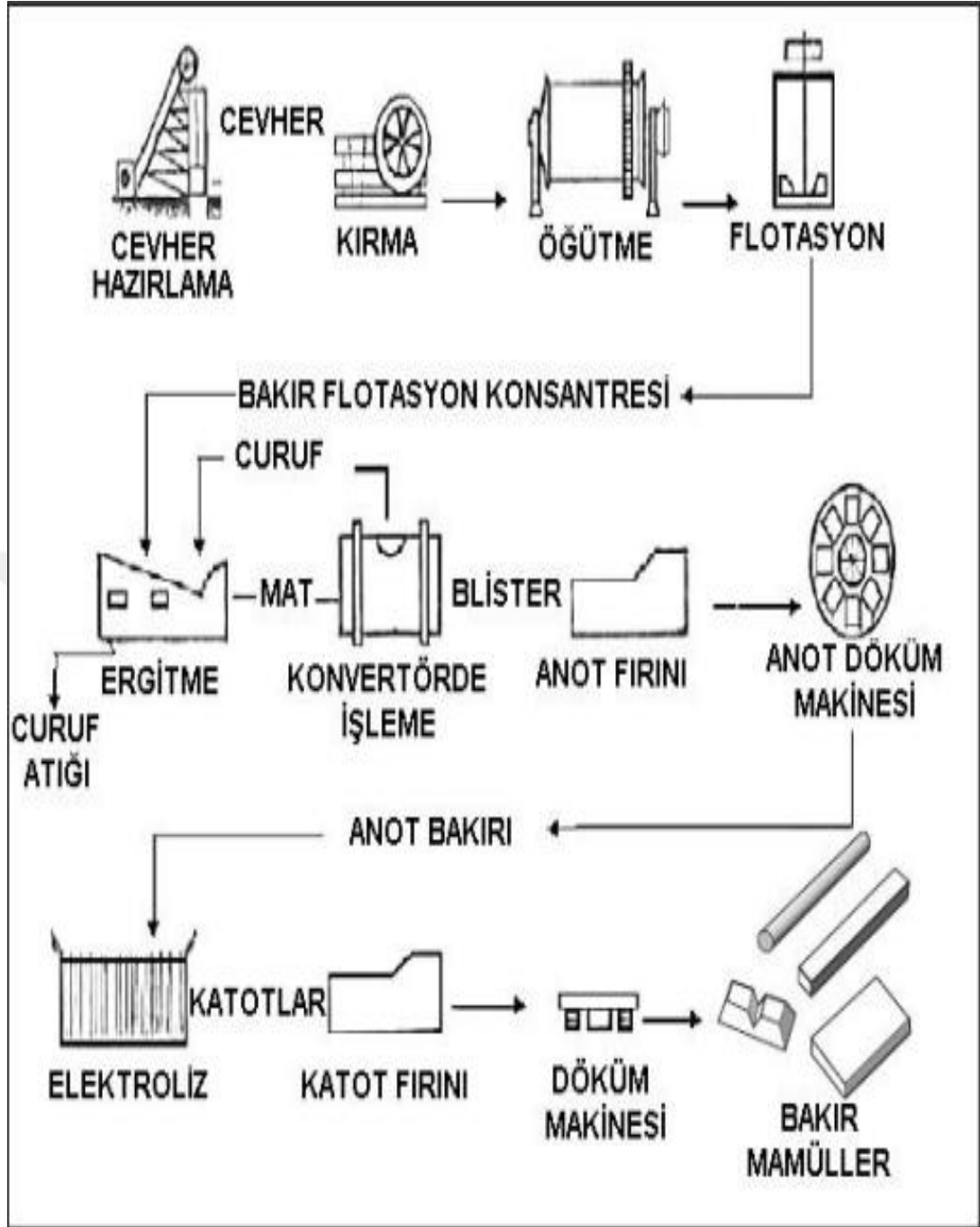
Doğada içerisinde bakır barındıran 150'den fazla mineral bulunduğu ifade edilmektedir. Bakır mineralleri küresel anlamda yaygın şekilde bulunan, pek çok farklı alanda karşımıza çıkabilen ve birçok maden yatağı içerisinde rastlayabileceğimiz mineraller olarak ifade edilmektedir. Dünya genelinde bulunan bakır madenlerinin %15'lik kısmının oksitli, %85'lik kısmının sülfürlü mineral barındırdığı ifade edilmektedir [7].

Öncelikli olarak yasal yükümlölüklerle uygun olmasıyla birlikte gerekli çevresel, jeolojik ve ekonomik şartların sağlanması sonucunda cevherler işletilebilmektedir. Bu bağlamda konumuz kapsamında küresel çapta bakır üretiminin %80’lik kısmı sülfür bazlı cevherler aracılığı ile yapılmaktadır. İçeriğinde bakır barındıran mineral sayısının 160’dan fazla olduğu düşünülmektedir. Küresel bakır rezervinin büyük çoğunluğu “kalkopirit filizi” biçiminde bulunmaktadır. Cevherlerden saf bakır üretimi için “pirometalurjik, hidrometalurjik ve elektrometalurjik” yöntemler kullanılmaktadır. Pirometalurjik yöntemlerde oksitli, sülfürlü ve nabit bakır içeren cevherlere, hidrometalurjik yöntemler ise düşük tenörlü olan oksitli bakır cevherlerine uygulanan yöntemler olarak tanımlanmaktadır. Elektrometalurjik yöntemler ise, yukarıda ifade edilen iki yöntemin birlikte uygulanmasını ifade eden yöntemi tanımlamaktadır. Bu anlamda, pirometalurjik yöntemler aracılığı ile saf olmayan bakır elde edilmekte; bu bakır elektrolitik arıtma aracılığı ile saf katot bakır haline getirilmektedir. Benzer biçimde hidrometalurjik yöntemlerle sulu çözelti içerisine alınan bakır, elektro-kazanım metodu ile katot içerisinde saf biçimde toplanabilmektedir [7].

Birincil olarak bakır üretimi, içerisinde bakır bulunan cevherin çıkarılması ile başlamaktadır. Bu anlamda üç temel bakır madenciliği yöntemi bulunmaktadır; yer altı madenciliği, açık maden işletmeciliği, liç yöntemi. Küresel anlamda en yaygın madencilik biçimi açık maden işletmeciliği olarak görülmektedir [7].

Cevherin çıkarılmasının ardından öncelikle kırılma, daha sonra öğütme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlemlerin ardından flotasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen bakır konsantresi içerisinde yaklaşık olarak %30 bakır bulunmaktadır. Bu işlemlerin ardından ergitme işlemine geçilir ve bu işlem kavurma prosesi ile birlikte ilerleyebilmektedir. Bu sayede içerik olarak %50-70 oranın bakır içeren bir mat elde edilmektedir. Elde edilen mat, konverör aracılığı ile işlenmekte ve %98-99 oranın bakır içeren “blister bakır” üretimi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen blister bakır, ateşe elektrorafinasyon ve rafinasyon işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için tekrardan ergitme ve anot döküm yöntemi ile saf hale getirilmektedir. Elektrorafinasyon işlemi sonrasında, kattotta elde edilen bakır en az %99,99 oranında saf haldedir [7].

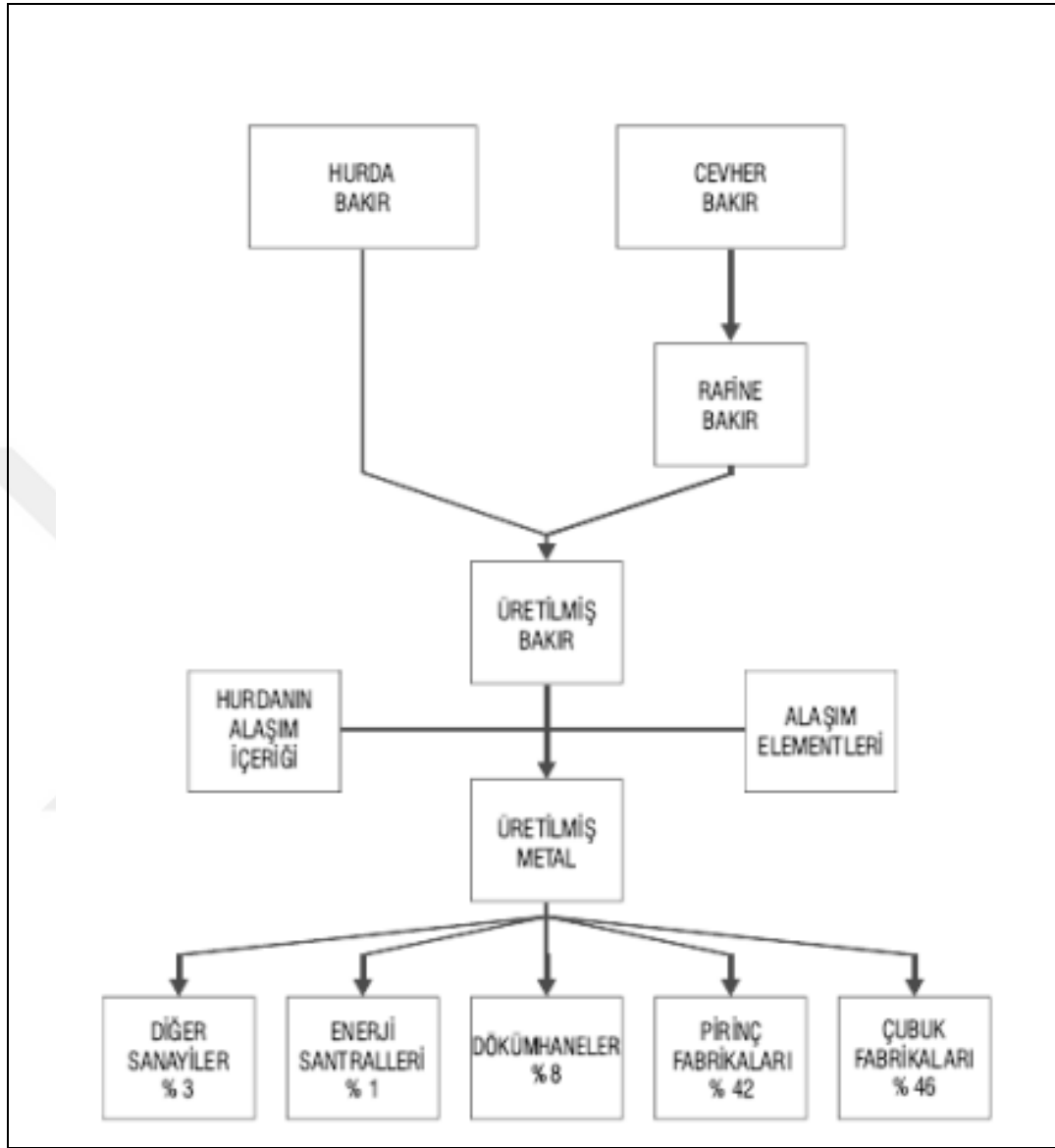
Bakır üretim biçimleri ve işleyişi süreci Şekil 2.2 içerisinde ifade edilmektedir [8].



Şekil 2.2: Bakır Üretim Süreci.

Alternatif anlamda hidrometalurjik metot bağlamında bakır, düşük tenöre sahip olan oksitli cevherler içerisinde elektro-kazanım ve liç süreçleri sonucunda ortaya çıkarılmaktadır. Bu sonuç, elektrorafinasyon ile aynı ürünü ortaya çıkarmaktadır. Cevher aracılığı ile oluşturulan bakır üretimi “birincil bakıl üretimi” biçiminde ifade edilirken hammadde olarak hurda kullanılması sonucu üretilen bakır “ikincil bakır üretimi” biçiminde adlandırılmaktadır. Hurda olarak ifade edilen ürünler kullanım ömrü dolmuş bakırlar, imalat atıkları ve bakır hurdaları içerisinde barındırmaktadır.

Ticari anlamda üretilen bakır ve bu bakırın kullanım alanları Şekil 2.3 içerisinde ifade edilmektedir. [8].



Şekil 2.3: Ticari Amaçlı Üretilen Bakır ve Kullanım Alanları.

Pek çok metal şekillendirme işlemi, metallerin çoğunlukla plastik şekil değiştirme yapmaları sonucunda meydana gelebilmektedir. Metal şekillendirme işlemlerinden en eski olanı çekiç aracılığı ile döverek metale şekil verme işlemidir. Bu şekilde kütle ile şekillendirme yöntemleri; haddeleme, çubuk ve tel çekme, dövme ve ekstrüzyon olmak üzere dört biçimde gerçekleşmektedir.

Bakırın mekanik özellikleri tam olarak endüstri sektörünün ihtiyaçlarını karşılayamadığından dolayı bakır farklı metaller ile alaşım yapılır ve bu biçimde

kullanılır. Ana madeni bakır olmakla birlikte içerisinde mangan, çinko, nikel, kalay ve alüminyum gibi madenler eklenerek alaşımlar elde edilmektedir.

Kırma ve öğütme aşısında çıkarılan bakır cevherleri, öğütme işlemiyle küçük parçalara ayrılır. Bu işlem, kırıcılar ve öğütücüler kullanılarak yapılır. Cevherin boyutu küçültülerek daha işlenebilir hale getirilir. Bakır cevherleri daha fazla işlenebilirlik sağlamak için kırma ve öğütme işlemlerine tabi tutulur. Kırıcılar, cevherleri büyük parçalara ayırırken öğütücüler, bu parçaları daha da inceleyerek istenilen boyuta getirir. Daha küçük boyuttaki cevherler, metalurjik işlemler için daha uygun bir forma sahip olur ve bakırın ayrıştırılması için daha etkili bir şekilde kullanılabilir [7].

Zenginleştirme doğrultusunda bakır cevheri, zenginleştirme adımlarıyla bakır içeriği artırılarak arıtılır. Zenginleştirme işlemi, flotasyon ve elektromanyetik ayırma gibi fiziksel ve kimyasal yöntemlerle gerçekleştirilir. Bu aşamada, bakır cevherinden diğer mineraller ve katı parçacıklar ayrıştırılır ve bakır içeriği artırılır. Zenginleştirme sürecinin bir sonraki adımında, bakır içeriği artırmak için çeşitli fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanılır. Flotasyon, cevherde bulunan bakırı zenginleştirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu süreçte, cevher öğütülerek ince parçacıklar elde edilir ve bu parçacıklar özel kimyasallar kullanılarak havuzlara eklenir. Kimyasallar, bakır mineralini hidrofobik hale getirir ve kabarcıklar oluşturarak cevherin yüzeyine yapışmasını sağlar [7].

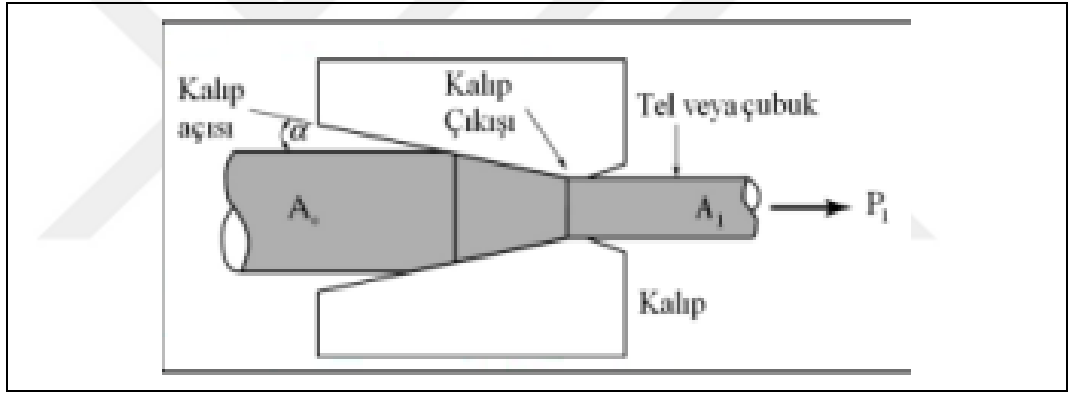
Şekillendirme ve işleme etkinliklerine dair üretilen bakır, genellikle haddeleme, dövme veya döküm gibi şekillendirme işlemlerine tabi tutularak istenen ürün formuna getirilir. Bu aşamada, bakır farklı ürünler için teller, levhalar, borular, plakalar, çubuklar ve diğer formlarda şekillendirilebilir.

Bakır üretimi, çevresel ve sosyal etkileri göz önünde bulunduran sürdürülebilirlik prensipleriyle gerçekleştirilir. Üretim süreci, çevre koruma tedbirlerini içeren madencilik ve endüstriyel uygulamaları kapsar. Ayrıca, sağlık ve güvenlik önlemleri de üretim sürecinin önemli bir parçasıdır.

Bu tez çalışmasında kullanılan saf bakır teller, tel çekme soğuk deformasyon yöntemiyle oluşturulmuştur.

2.2.1 Tel Çekme Yöntemi

Bakır tel çekme işlemi, bakır metalinin farklı şekillerde işlenmesinde önemli bir yöntemdir. Bu işlem, belirli kalınlıktaki bakır çubukların basınç yardımıyla tel çekme makinesinde bulunan kalıplardan geçirilerek daha ince (ya da hedeflenen incelikte) tel haline getirilmesidir. Bu işlem, nihai kalınlığa ulaşana kadar kademeli olarak gerçekleştirilir. Genel anlamda incelendiğinde tel kesitlerinin yapısının çoğunlukla dairesel olduğu görülmektedir fakat bu teller bazı durumlarda altıgen ve kare şeklinde de çekilebilmektedir. Dairesel kesitler kullanıldığında çoğunlukla saplama ve cıvata gibi elamanlar üretilmektedir. Bu bağlamda bunlar daha büyük kesitlere sahip olmaktadır. Tel çekme işlemi Şekil 2.4’de içerisinde ifade edilmektedir [9].



Şekil 2.4 Tel Çekme İşlemi.

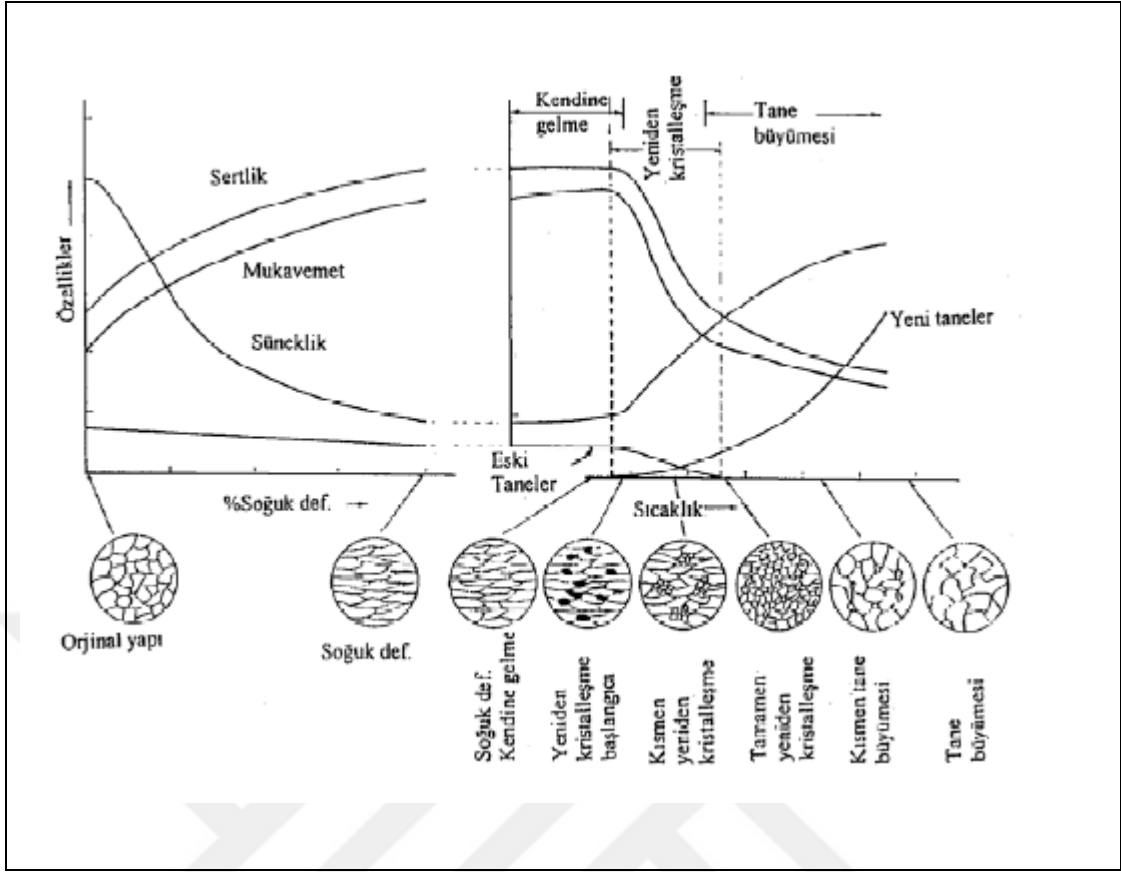
Soğuk çekme işlemi yapıldıktan sonra tel işlenemeyecek kadar sertleşirse sertleşmenin giderilmesi için yeniden kristalleşme tavı yapılır. Genellikle, sıcak haddelenmiş olan çekilecek telin kolay çekilebilmesi için ön tavlama yapılarak tel çekme işlemine başlanır. Çekme işlemi yapıldıktan sonra malzeme sertleşir ve çekilemeyecek duruma gelir. Tel çekmeye devam edebilmek için yeniden kristalleşme uygulanır [10].

2.3. Soğuk Deformasyon ve Tavlama

2.3.1. Soğuk Deformasyon

Soğuk deformasyon, malzemenin plastik şekil verme yöntemleri ile uygulanan işlemlere verilen genel isim olarak öne çıkmaktadır [9]. Metal oda sıcaklığında veya $0,3T_m$ 'ye kadar (T_m mutlak ergime sıcaklığıdır.) olan sıcaklıklarda deforme olursa mikroyapı da ciddi şekilde deforme olur. Soğuk deformasyon sırasında enerjinin büyük bir kısmı proses esnasında ısı olarak açığa çıkar. Ancak enerjinin %10 kadarı metal içerisinde boşluklar, dislokasyonlar ve istif hataları şeklinde depolanmış halde bulunur. Daha düşük çalışma sıcaklığında deformasyon oranı büyüdükçe depolanan enerji miktarı da artar. Metal ve metal alaşımları çalışmalarında soğuk işlem ve ısıtılmanın sonucu olarak soğuk işlenmiş yapıda önemli değişiklikler görülmüştür [11]. Plastik şekil verme ile birlikte dislokasyon hareketleri gerçekleşmektedir ve yeni dislokasyonların oluşmasına olanak sağlamaktadır. Soğuk işlem sonrasında çekme ve kopma mukavemetinin artmasının nedeni ise deformasyon sertleşmesi olarak ifade edilmektedir. Deformasyon sertleşmesi, dislokasyonların birbirlerinin hareketlerini kısıtlamaları sebebi ile meydana gelmektedir. Soğuk işlem sonrasında malzemede meydana gelen mukavemet artışı ile soğuk işlem miktarı arasında bir orantı bulunmaktadır. Tavllanmış olan malzeme için dislokasyon yoğunluğu 10^6 - 10^8 cm^{-2} civarında bulunmaktadır. Soğuk işlem sonrasında bu miktar 10^{12} cm^{-2} değerine gelmektedir [9]. Metalin kafes yapısında meydana gelen gerilimin artmasıyla birlikte dislokasyonların sayısı da artar, bu iki etken nedeniyle mikroyapı bozulur. Soğuk deformasyon sırasında taneler ve kayma düzlemleri deformasyon yönüne göre hizalanır, Deformasyon oranının artmasıyla birlikte orjinal taneler önemli derecede deforme olur ve daha küçük tanelere bölünürler. Farklı metaller soğuk deformasyona bağlı olarak farklı yönelimler geliştirirler. Buna ek olarak, yapı içerisinde oluşan boşluk konsantrasyonunun deformasyon oranıyla birlikte artmasıyla elektron hareketi azaldığından iletkenlik düşer, direnç yükselir. [11].

Şekil 2.5'te metale uygulanan soğuk deformasyon ve soğuk deformasyonun ardından yapılan tavlama aşamalarında mikroyapısal değişimler ile sertlik, mekanik özellikler üzerindeki değişimler şematik olarak gösterilmiştir [12].



Şekil 2.5: Soğuk deformasyon ve tavlama ile malzemede meydana gelen değişikliklerin şematik gösterilişi.

2.3.2. Tavlama

Isıl işlem, metal veya alaşımların özelliklerini değiştirmek veya geliştirmek amacıyla uygulanan bir dizi termal işlem yöntemini ifade eder. Isıl işlem, malzemelerin dayanıklılığını artırabilir, mukavemetini artırabilir, yüzey özelliklerini iyileştirebilir veya mikroyapıyı değiştirebilir [13]. Yapı içerisindeki tekstür miktarı, deformasyon miktarı ve türüyle, sıcaklığıyla ve kristal kafes yapısıyla artış gösterir. Soğuk işlenmiş malzemeler yüksek enerjili durumdadır ve bu nedenle de termodinamik açıdan dengesizdir. Soğuk işlem uygulanan metalleri daha yumuşak bir hale getirir. Tavlama ile birlikte, soğuk deformasyondan çımış metalde depolanan enerji azalmasına rağmen, depolanan enerji “driving force” yani itici veya başlatıcı enerjiyi sağlar, genellikle tavlama oda sıcaklığında kendiliğinden oluşmaz. Depolanan enerjinin difüzyonla azalması kaçınılmazdır, difüzyon sürecini başlatmak için gereken aktivasyon enerjisi normalde oda sıcaklığında yetersizdir. Bu nedenle

ısıtma, malzemeyi daha düşük bir enerji durumuna dönüştürmek için gereken termal aktivasyonu sağlamak için gereklidir, Yüksek sıcaklıklarda, aktivasyon enerjisi termal enerjideki artışla sağlanır. İç kafes gerilmeleri tavlama sırasında azalır mukavemet azalırken de süneklik artar. Sıcaklık artışıyla difüzyon oranı logaritmik olarak artış gösterir. Unutulmamalıdır ki, bazı düşük ergime sıcaklığına sahip metaller oda sıcaklığından daha düşük yeniden kristallenme noktasına sahiptir ve bu metaller soğuk işlemle sertleştirilemez. Örneğin; Kurşun, kalay, ve çinko soğuk işlemle sertleştirilemez çünkü bu metallerin yeniden kristalleşme sıcaklıkları oda sıcaklığının altındadır. [11]

Tavlama, 3 aşamada meydana gelir; Toparlanma, yeniden kristallenme ve tane büyümesi. [11]

2.3.2.1. Toparlanma Aşaması

Toparlanma yeniden kristalleşme meydana gelmeden önce tavlamanın başlangıç durumudur. Depolanan iç gerilim enerjisinin dislokasyonların daha düşük enerjili konfigürasyon durumlarına yeniden düzenlenmesiyle toparlanma aşaması sağlanmış olur. Burada, tane şekilleri ve tane yönelimi aynı kalır. Mukavemet ve süneklik büyük ölçüde etkilenmez. Birçok fiziksel özellik (elektriksel, termal vb.) soğuk işlem uygulanmadan önceki orijinal hallerine toparlanmış olur. Isıtma sırasında, soğuk işlem görmüş numune ısı olarak enerji açığa çıkaran reaksiyonlara maruz kalır ve dolayısıyla deforme olmamış numuneyle karşılaştırıldığında döngü boyunca daha az güce ihtiyaç duyar. Çakışan yeniden kristallenme ve toparlanma aşamalarında ısı açığa çıktığı unutulmamalıdır. Toparlanma aşamasında daha az ısı salınımı vardır. Elektriksel direnç, yeniden kristalleşmeden önce neredeyse tamamen düzelir (toparlanır). Toparlanma aşaması, deforme olmuş metalin yüksek açılı tane sınırlarının yer değiştirmesi ya da hareketi olmadan kusurların ortadan kaldırılması ve yeniden düzenlenmesi olarak da tanımlanabilir. Toparlanma boyunca, birkaç temel proses gerçekleşir [11];

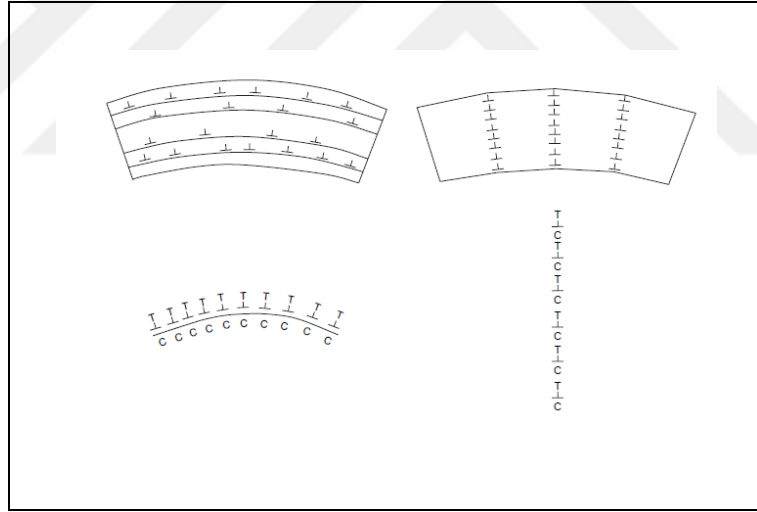
1- Noktasal kusurların özellikle boşluk kusurlarının ortadan kaldırılması [11]

2- Dislokasyonların daha düşük enerjili pozisyonlara geçecek şekilde yeniden düzenlenmesi [11]

3- Alt tane sınırlarına kenetlenmiş alt tanele formlarının büyümesi [11]

Düşük sıcaklıklarda, boşluklar, tavlama görmüş ve soğuk işlem görmüş metalin dislokasyon hareketleriyle oluşur. Tavlama ile birlikte ortadan kalkan bu durum elektriksel direncin azalmasıyla elektrik yükünü taşıyan değerlik elektronlar daha az dağınık duruma geçerler. İzotermal değişiklikler sırasında bakırın elektriksel direncindeki değişime Toparlanma aşaması özellikle yüksek sıcaklıklarda başlangıçta çok hızlıdır ve zaman arttıkça yavaşlar ve dengeye ulaşır. Soğuk deformasyon miktarı ne kadar büyükse, toparlanmanın başlangıç durumu o kadar hızlı gerçekleşir. Biraz daha yüksek sıcaklıklarda dislokasyonların yeniden düzenlenmesi meydana gelir ve bu süreçte karşıt dislokasyonların (burgers vektörüne göre) ortadan kalkması gerçekleşir [11].

Dislokasyonların yeniden düzenlenmesi termal enerji yardımıyla oluşur. Dislokasyonların yeniden düzenlenmesinde önemli süreçlerden bir tanesi poligonizasyondur. Poligonizasyon, kenar dislokasyonlarının düşük açılı eğim sınırlarına yeniden düzenlenmesidir. Şekil 2.6.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Bükülmüş tek kristalli bir metalin poligonizasyonu.

Poligonizasyon için gereken itici güç enerjisi toplam gerinim enerjisindeki bir azalmadır. Poligonizasyon sırasında, plastik deformasyon ile birlikte bozulan ve bükülen kristal düzlemler düzleşmeye başlar. Dislokasyonlar, düşük açılı eğim sınırlarına doğru birbirlerinin üzerinde hizalanacak şekilde hareket ederler [11].

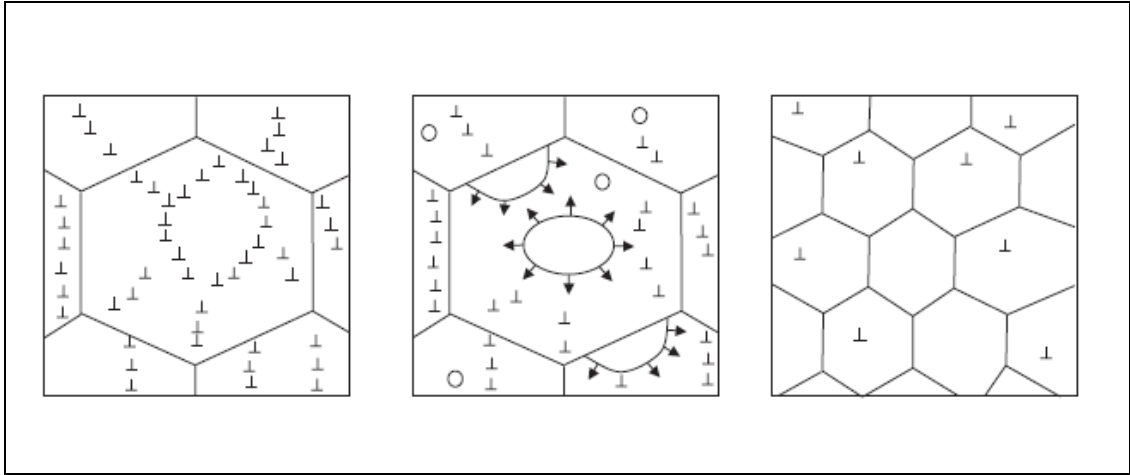
2.3.2.2. Yeniden Kristalleşme Aşaması

Yeniden kristalleşme aşaması, soğuk işlem görmüş metal matrisinin çekirdeklenmesi ve gerilim içermeyen tanelerin büyümesi olarak tanımlanabilir. Yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip olan Soğuk işlem görmüş taneler daha düşük dislokasyon yoğunluğuna sahip yeni tanelerle yer değiştirir. Dislokasyon yoğunluğu 10^8 ile 10^{11} cm^2 oranından 10^6 - 10^7 cm^2 oranlarına düşer. Yeniden kristalleşme ile birlikte yeni yönelimler, tane boyutları ve yeni tane şekilleri meydana gelir. Yeniden kristalleşme için gereken itici güç toparlanma aşamasında tüketilemeyen depolanmış enerjiden karşılanır. Yeniden kristalleşme ile birlikte, metalin soğuk işlem görmeden önceki halinde sahip olduğu mekanik özelliklere yaklaşır. Sertlik, çekme ve akma mukavemeti, yüzde uzama gibi mekanik özellikler küçük bir sıcaklık aralığında değişiklik gösterir. Elektriksel iletkenlik gibi fiziksel özellikler toparlanma aşamasında artış gösterdiği gibi artışı yeniden kristallenme aşamasında da devam eder [11].

Toparlanma ve yeniden kristalleşme tamamen farklı iki süreçlerdir. Toparlanma sabit bir sıcaklıkta başlar ve zamanla azalır. Diğer yandan, yeniden kristalleşme çekirdeklenme ve tane büyümesi aşamalarından oluşur ve bu yavaş başlar sonra dengelenmeden önce maksimum hıza ulaşır. Buna göre izotermal yeniden kristalleşme eğrileri tipik olarak sigmoid şekillidir [11]. Kuluçka döneminde yüksek açılı tane sınırlarından oluşan alt tanelerin birleşmesi ile kararlı çekirdekler meydana gelir.

Çekirdeklenme sırasında iki kuvvet yarış halindedir; Çekirdeklenme yeni taneler üretecek deforme olmuş matristeki gerilim enerjisini azaltır; Termal enerji yeterince büyük olana kadar çekirdek oluşmaz. Yeniden kristalleşme için itici güç toparlanma aşamasından sonra matristeki kalan enerjiden sağlanır. Çekirdeklenme yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip yüksek gerilim enerjilerinin olduğu tane sınırları, tanelerin birleştiği üçlü noktalar ve poliganizasyon sırasında oluşan alt taneler gibi bölgelerde meydana gelir. Yeniden kristalleşme katılaşmadan biraz farklıdır. Katılaşma sırasında, eğer embriyo ya da atom kümesi kritik boyuta ulaşamazsa bu atom kümesi veya embriyo eriyik içerisinde yeniden çözünür. Ama tavlama sırasında, embriyo yeniden çözünmez, bir embriyo yeterli enerjiye ulaşana kadar yeterli atomu kendine çeker ve çekirdeği oluşturur. Böylece kuluçka süresi embriyoların geri dönmeden büyümesinde geçerkenki süreye denk gelir [11].

Yeni tanelerin çekirdeklenmesi ve alt tane sınırları Şekil 2.7.'te gösterilmiştir [16].



Şekil 2.7: Tanelerin çekirdeklenmesi ve büyümleri.

Gerilimin olmadığı yeni tanelerin büyümesi büyük açılı tane sınırlarının yer değiştirmesi ile oluşmuş poligonalize matriste gerçekleşir. Çekirdekler deforme olmuş metal matrisin içine doğru yavaş yavaş büyür ve metalin tamamını ele geçirir. 30°-40° tane sınırı açılına sahip yeni yüksek açılı tane sınırlarının yüksek hareketliliği nedeniyle yeni tanelerin büyümesi gerçekleşir. Büyüme oranı, zamandan bağımsızdır fakat deformasyon oranı ve tavlama sıcaklığı ile artış gösterir. Eğer çekirdeklenme hızı yüksekse ve büyüme hızı düşükse ince taneler oluşur, eğer çekirdeklenme hızı düşük, büyüme hızı büyükse mükroyapıda büyük tane boyutları görülür. Soğuk deformasyon miktarının artışı hem çekirdeklenme hızını hem de büyüme hızını artırır ve yeniden kristalleşme sıcaklığını düşürür. Yeniden kristalleşme sırasında ve büyük oranlarda gerçekleşmiş soğuk deformasyon durumunda, çekirdeklenme hızı büyüme hızından büyüktür ve daha ince taneler oluşur. Daha düşük soğuk deformasyon oranlarında, yeniden kristalleşmeyi başlatmak için yüksek sıcaklık gereklidir [11].

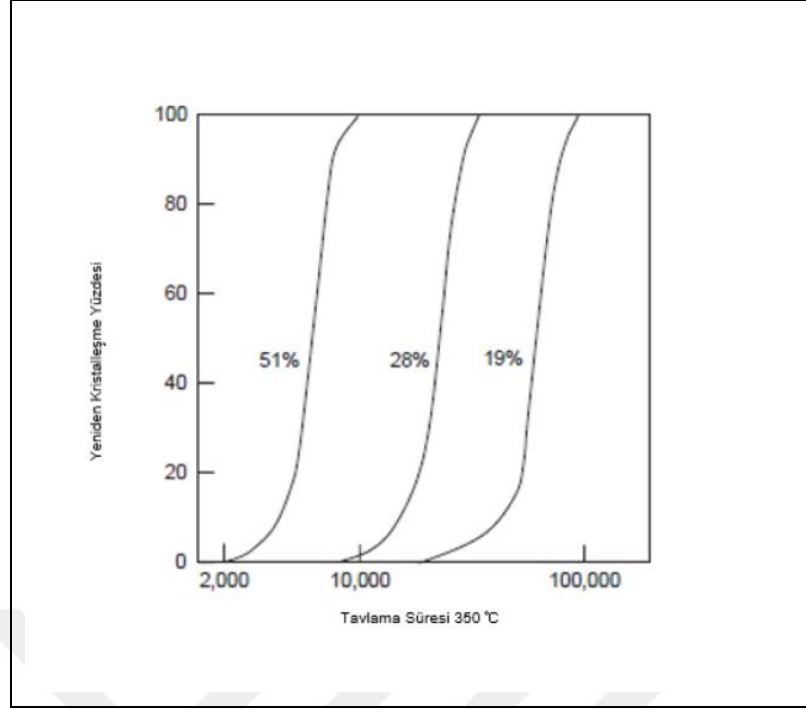
Yeniden kristalleşmeyi etkileyen ana faktörler;

- 1- Sıcaklık ve zaman
- 2- Soğuk deformasyon oranı
- 3- Metalin saflığı- safsızlığı
- 4- Orijinal tane boyutu
- 5- Deformasyon sıcaklığı

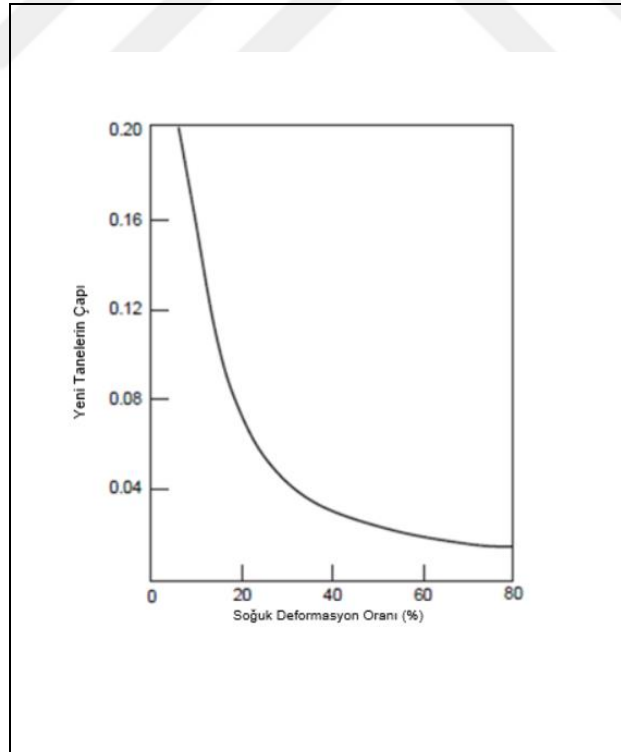
Olmak üzere tanımlanabilir [11].

Yeniden kristalleşme için sıcaklık tek başına bir etken değildir; metal alaşımının kompozisyonuna ve soğuk deformasyon oranına bağlıdır. Yeniden kristalleşme sıcaklıkları ticari saflıktaki metallerin mutlak ergime sıcaklıklarının 0,3 ile 0,5'i arasındadır. Yeniden kristalleşme sıcaklığı mikroyapının 30 dakika içinde %50 değişime uğradığı sıcaklık veya 1 saat içerisinde tamamen değişikliğe uğradığı sıcaklık olarak da tanımlanır [11]. Toparlanma aşaması, yeniden kristalleşmeyi etkileyebilir, kayda değer bir toparlanma aşaması meydana geldiğinde, yeniden kristalleşme eğilimi düşer, yani daha yüksek bir sıcaklık yeniden kristalleşme için gerekli olabilir. Sıcaklık ve zaman arasında bir git gel (trade-off) olmasına rağmen, yeniden kristalleşme yüksek sıcaklık artış oranlarında zamandan daha baskın olur. Çoğu kinetik süreç için sıcaklığı 11°C artırmak, reaksiyon hızını iki katına çıkarır. Yeniden kristallenmenin tamamlandığı noktada ısıtma devam ettiğinde tane büyümesi meydana gelir [11].

Yeniden kristalleşme aşamasında, soğuk deformasyon oranı arttıkça yeniden kristalleşmenin meydana geldiği sıcaklık düşer ve daha kısa sürede yeniden kristalleşme meydana gelir. Şekil 2.8.'da sabit sıcaklıkta farklı oranlarda soğuk deformasyona uğramış metalin yeniden kristalleşme eğrisi gösterilmiştir. Soğuk işlem oranı arttıkça, yeniden kristalleşme süresi şiddetle azalmıştır . Ayrıca kuluçka süresi yüksek oranda soğuk işlenmiş metalde daha kısadır. Çünkü soğuk deformasyona uğramış metalin kafes yapısında gerilim fazladır ve dislokasyon yoğunluğu yüksektir. Bu sayede, yüksek soğuk deformasyonlu metallerde daha küçük boyutlu taneler oluşur (Şekil 2.9.'de gösterilmiştir.) [11].

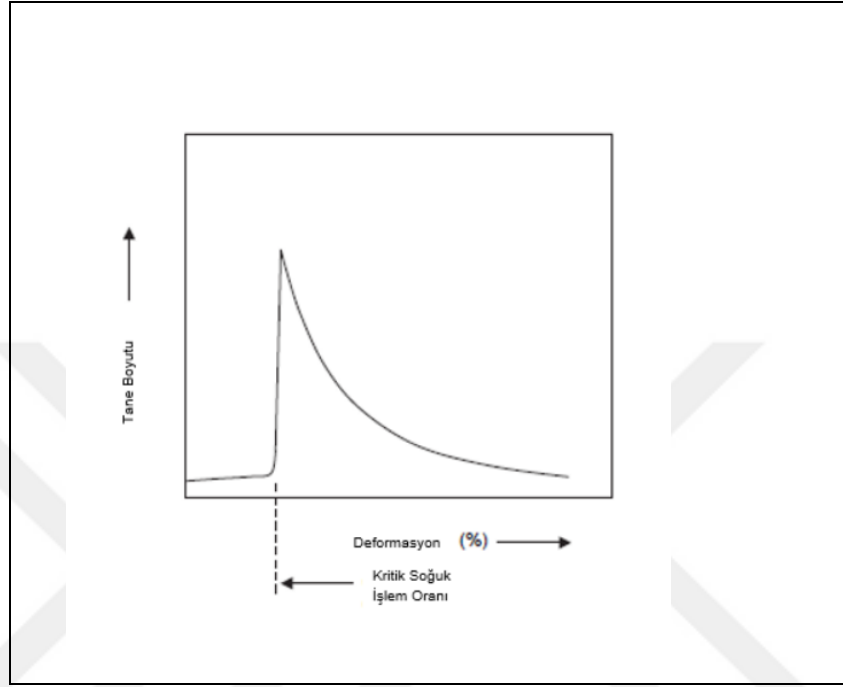


Şekil 2.8: Soğuk işlem oranının yeniden kristalleşme üzerine etkisi (sabit sıcaklıkta)



Şekil 2.9: Soğuk deformasyon oranının tane büyüklüğüne etkisi

Yeniden kristalleşmenin gerçekleşmesi için yeniden kristalleşme eşik değeri gereklidir. Eğer soğuk işlem oranı çok düşükse, yeniden kristalleşmeyi başlatmak için depolanmış olan enerji yeterli olmaz. Şekil 2.10'de kritik soğuk deformasyon oranıyla tane büyüklüğü oranına ait grafik verilmiştir [11].



Şekil 2.10: Yeniden kristalleşme için gereken kritik soğuk deformasyon miktarı ile tane boyutu.

Düşük deformasyon oranlarında, alt tanecikler ısınmayla oluşur ve büyür, fakat bu alt taneciklerin aralarındaki sınırlar düşük açılı sınırlar olarak kalır ve yeniden kristalleşme meydana gelmez. %2'den %20'ye kadar değişebilen düşük soğuk deformasyon oranlarında yeniden kristalleşme ergime noktasına yakın yerlerde bile oluşmaz [11].

Yeniden kristalleşme aşaması, metallerin saflık değerine göre incelendiğinde çok saf metaller alaşımlı durumlarıyla karşılaştırıldığında daha düşük yeniden kristalleşme sıcaklıklarına sahip oldukları görülmüştür. Safsızlıklar ya da ince ikinci fazlı parçacıklar tane sınırını yer değişimini yavaşlatır. Sonuç olarak, impürite (safsızlık) varlığı yeniden kristalleşmeyi geciktirir. Safsızlıkların olduğu durumda, tane büyümesi daha yavaştır, çekirdeklenme ve ince yeniden kristalleşmiş tane boyutları için daha fazla zaman gerekir. Katı çözelti safsızlıkları, dislokasyonlar ve tane sınırları ve bunların yavaş hareket etmesi, yeniden kristalleşme sıcaklığının

yükselmesini sağlar. İkincil fazlar yeniden kristalleşme sıcaklığını yükseltme eğilimi gösterir. Alaşım elementlerinin az miktarda katılması yeniden kristalleşme için gerekli sıcaklık değerini şiddetle artırır. Ama bu hızlı artışla birlikte, yeniden kristalleşme sıcaklığı maksimum değere ulaşır ve sonra düşer. Bazı elementler diğerlerinden daha etkilidir. Örnek olarak bakır için Zn'nin en uygun katılma oranı %5'dir. Zirkonyum alüminyumun yeniden kristalleşmesinde oldukça etkilidir [11].

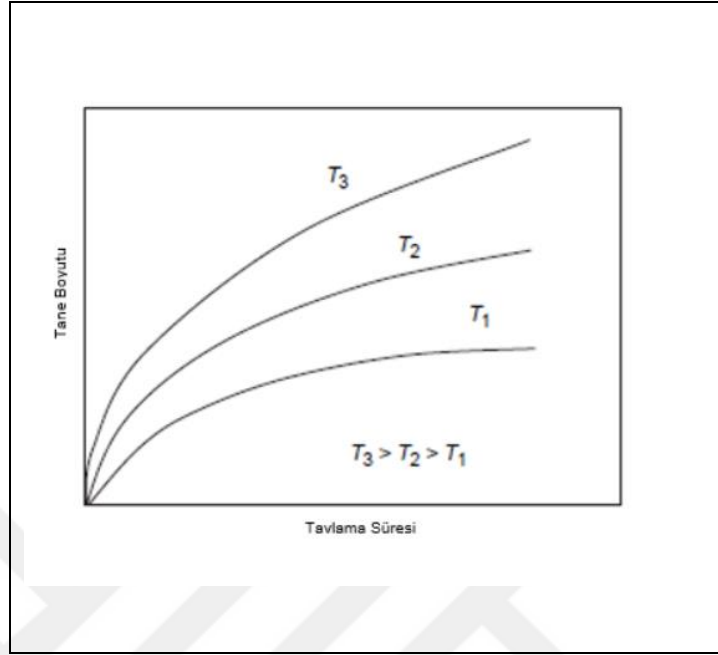
Küçük başlangıç tane boyutları, yeniden kristalleşme aşamasında daha küçük tanelerin oluşmasına neden olur. Tane sınırları soğuk deformasyon boyunca dislokasyon hareketlerini durdurur, bu nedenle tane sınırları oldukça gergin hale gelirler, tane sınırları yüksek enerjili bölgeler olduğundan yeniden kristalleşme sırasında çekirdeklenme açısından daha aktiftir. Nihai tane boyutları, tavlama sıcaklığı ve süresinden ziyade deformasyon oranına daha çok bağlıdır [11].

2.3.2.3. Tane Büyümesi Aşaması

Yeniden kristalleşme aşaması tamamlandıktan sonra, yani poligonizasyon matrisi yeni gerilimsiz taneler ile yer değiştirdiğinde tavlama arttıkça ortalama tane büyüklüğü artar. Bu proses tane büyümesi olarak bilinir ve tane sınırlarının yer değiştirmesi ile sağlanır. Yeniden kristalleşme soğuk deformasyonla depolanan iç gerilim enerjisini tüketir ama tane sınırları hala ara sonlu bir ara yüzey enerjisine sahiptir. Malzeme hala termodinamiksel açıdan yarı kararlıdır, kararlı hale geçmesi için, yağı tek bir tane veya kristal yapı haline gelmesi gerekmektedir. Bazı taneler büyür ama bazıları küçülür ve yok olur çünkü malzemenin hacmi sabittir, büyüme sırasında ise tane sayısı azalır. Daha küçük taneler daha büyük taneler tarafından tüketildiğinde tane sayısı azalır ve var olan tanelerin ortalama büyüklükleri artar. Tane büyümesi için itici güç (driving force) tane sınırlarındaki serbest enerjiden karşılanır. Buradaki serbest enerji yeniden kristalleşme için gereken itici güçten daha küçüktür. Tane büyümesi iki şekilde gerçekleşir; Normal tane büyümesi ve anormal yani süreksiz tane büyümesi. Süreksiz tane büyümesi tane kabalaşması ya da ikincil yeniden kristalleşme olarak da adlandırılmaktadır [11].

Yeniden kristalleşen tanelerde kenar sayısı ne kadar az olursa, tanelerdeki eğrilik ovallik ne kadar keskinse ve oluşumları hızlıysa taneler komşu taneler tarafından emilmeye başlanır. Altıdan az kenarı olan iç bükey eğriliğe sahip taneler

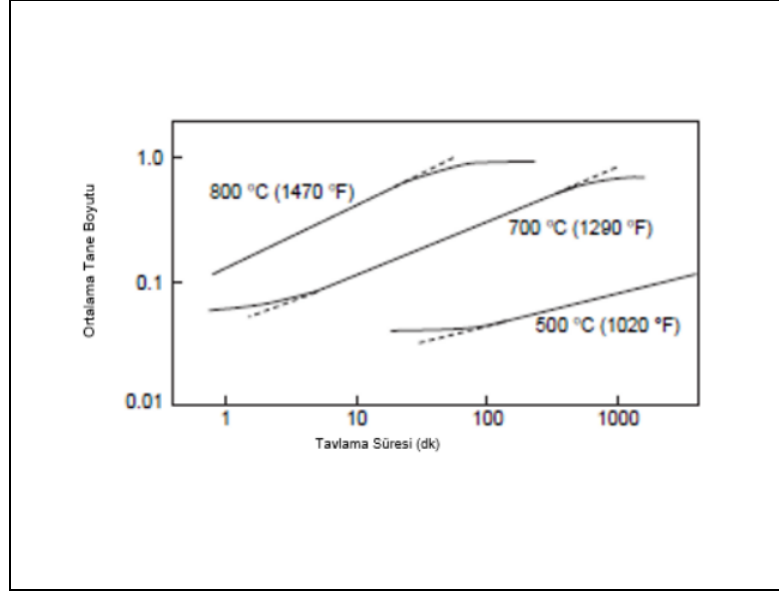
dengede değildir ve küçülme eğilimi gösterirler. Altıdan fazla dış bükey eğriliğe sahip taneler büyüme eğilimi gösterir. Şekil 2.11.'de gösterilmiştir [11].



Şekil 2.11: Tavlama sıcaklığı ve tane büyüklüğü [11]

En küçük taneler en az sayıda kenara sahip olanlardır ve komşu büyük taneler tarafından en hızlı şekilde tüketilir. Sınırlar, kendi eğrilik merkezlerine doğru hareket etme eğilimindedirler çünkü düzleştiklerinde yüzey alanlarını azaltırlar. Üç tane sınırı arasındaki açı denge açısı olan 120°'ye doğru hareket etme eğilimindedir. Tane sınırlarının hareketi ile ortaya çıkan atomların difüzyonundan tane büyümesi meydana gelir. Atomlar, daha fazla komşu atoma sahip olduğu dış bükey konumdan ziyade, iç bükey şekilli olduğunda daha dengeli durumdadır. Böylece, tane sınırları eğrinin merkezine doğru hareket eder. Taneler , sabit sürede artan sıcaklıkla sabit sıcaklıkta artan süreye göre daha hızlı büyüme gösterirler. Tane sınırı hareket oranı çözünen ve yönelim gösteren içeriğe bağlıdır. İkincil faz parçacıklar tane büyümesini yavaşlatma eğilimi gösterir [11].

Şekil 2.12.'de demir metalinin toparlanma aşamasında düşük sıcaklık ve kısa sürelerle tavlama sürecinin sapmalarını göstermektedir. Ayrıca levha örneği yüksek sıcaklıklarda uzun tavlama süresindeki sınırlayıcı etkileri göstermektedir [11].

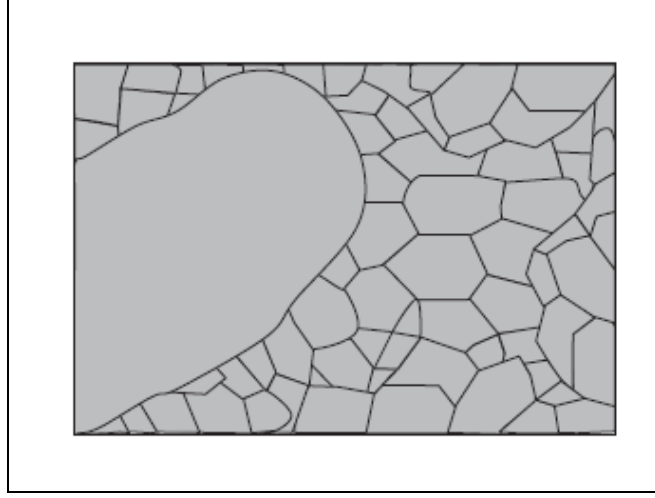


Şekil 2.12: Demir metali örneğinin tavlama sıcaklık ve zamanına bağlı olarak ortalama tane büyüklüklerinin değişimi [17]

Şekil 2.12.'deki demir örneği grafiği incelendiğinde yüksek sıcaklıklarda kısa tavlama sürelerinde tane boyutunun diğerlerinden daha büyük olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, yeniden kristalleşme mikroyapısı deformasyon mikroyapısına eş değer olabilir fakat, yeniden kristalleşme tavlama sıcaklık ve zamanına bağlı olarak da değişiklik gösterebilir [11].

Süreksiz tane büyümesi olarak da bilinen anormal tane büyümesi yüksek tavlama sıcaklıklarında, tane kabalaşması, ikincil yeniden kristalleşme çok hızlı meydana gelir. Anormal tane büyümesi, matris tanelerinin normal büyümesi engellendiğinde ve sıcaklık birkaç yeni özel tanenin engelleyici kuvvetinin üstesinden gelmesine ve orantısız büyümeyi engellemesine yetecek büyüklüğe geldiğinde tane büyümesi gerçekleşir. Şekil 2.13.'te anormal tane büyümesine ait bir çizim gösterilmiştir [11].



Şekil 2.13: Anormal tane büyümesi.

Başlangıçta taneler yavaş büyür, daha sonra boyutlarına göre hızlı bir büyüme ile büyüme gösterir (santimetre boyutunda). Anormal tane büyümesi, tane sınırlarının başlangıçta mevcuttaki ikincil fazlı ince tanelerin çökmesiyle meydana gelir. Kalıntıların varlığı (inklüzyonlar) malzemeyi tane büyümesine karşı dirençli hale getirir. Böyle malzemeler doğası gereği ince tanelidir. Fakat bu direnç yüksek sıcaklıklarda bozulabilir Bunun sonucu süresiz ve ekstra büyük taneler ile sonuçlanabilir. Sıcaklık yeterince yüksekse ve süre yeterliyse çökelen ikincil fazla parçacıklar kabalaşabilir, sayıları azalabilir hatta yeniden çözülebilirler [11].

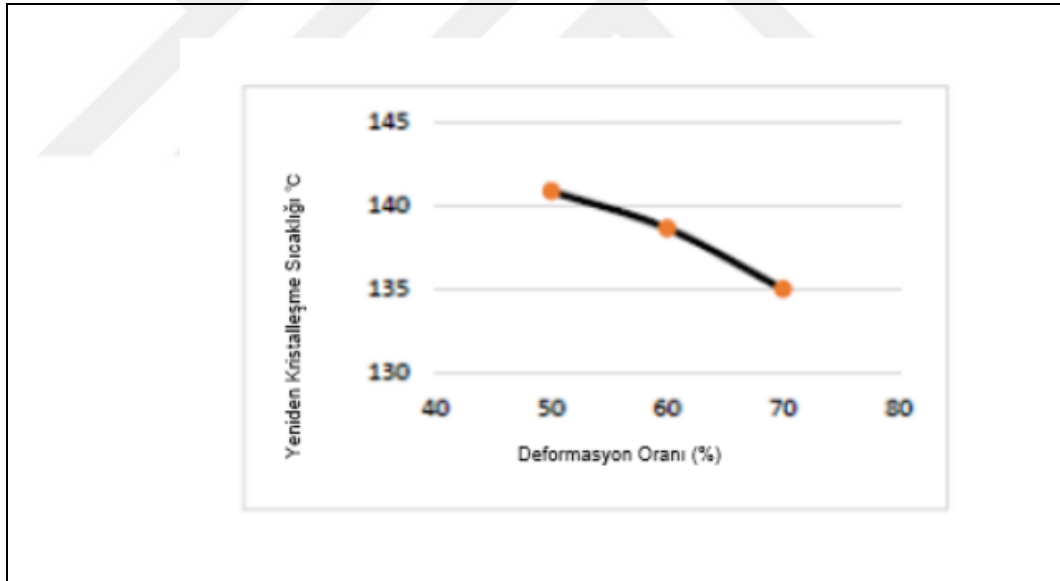
2.4. Bakırın Yeniden Kristallenmesi Üzerine Çalışmalar

Literatürde saf bakırın belirli oranda soğuk deformasyona uğraması sonrası yeniden kristalleşmesi üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır, bu çalışmalara ait detaylar aşağıda verildiği şekildedir.

Çelikyürek ve diğ. yaptıkları çalışmada soğuk deformasyonun, saf bakırın yeniden kristallenme sıcaklığına ve tane büyüklüğüne olan etkisini optik mikroskop ve DSC ile incelemişlerdir. Bu çalışma için, %70, %60 ve %50 deformasyon oranlarında saf bakır kullanılmıştır. Saf bakıra, soğuk deformasyon işlemi uygulamadan önce 675°C sıcaklıkta 36 saat argon dolu bir kutuda homojenleştirilmiş daha sonra %70, %60 ve %50 oranlarında hidrolik pres kullanılarak soğuk deformasyon uygulanmıştır. Preslenen numuneler, DSC (differential scanning

calorimeter) ile analiz edilmiştir. (ısıtma hızı: 10°C/dk) Bu teknik, malzemelerdeki faz dönüşümünü tespit etmek için en önemli tekniklerden biridir [18].

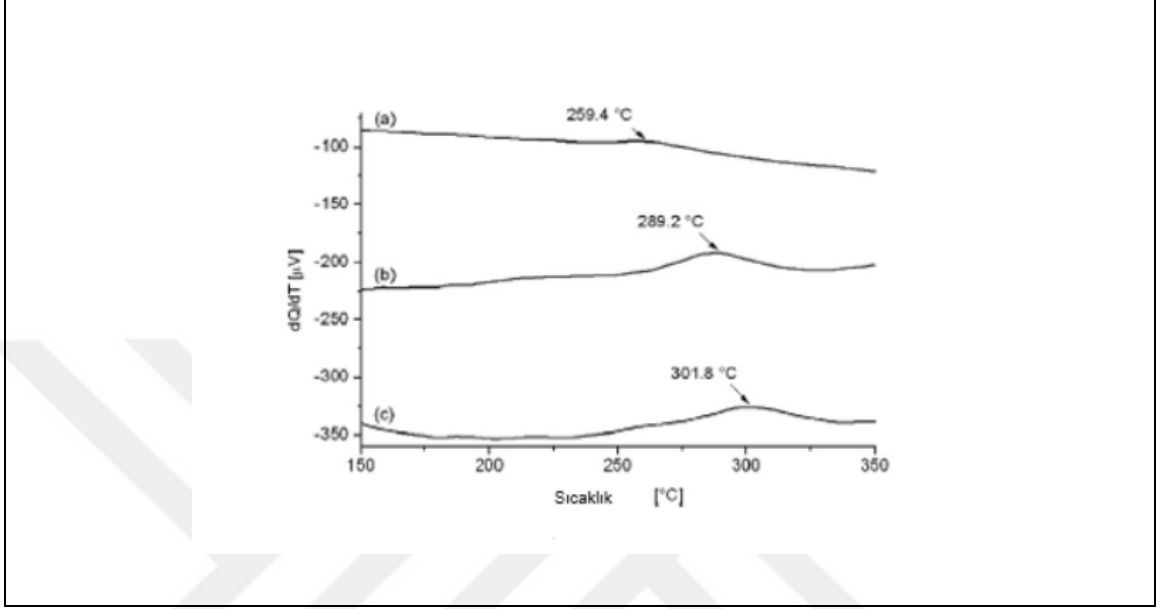
DSC analizine göre, %50 soğuk deformasyona uğramış saf bakırın yeniden kristallenme sıcaklığı yaklaşık 142°C, %60 soğuk deformasyona uğrayan saf bakırın yeniden kristallenme sıcaklığı 138°C, %70 soğuk deformasyona uğrayan saf bakırın ise 135°C'dir. Yapılan analize göre, soğuk deformasyon oranı arttıkça, yeniden kristallenme oranının düştüğü tespit edilmiştir. Çalışmanın devamında, DSC cihazı tüm numuneler için sıcaklık 150°C'ye süre de 196 saate sabitlenmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak numunelerde tane büyümleri de incelenmiştir. Tane boyutları incelendiğinde yeniden kristallenme sıcaklığı düşük olanın yani deformasyon oranı yüksek olanın tane büyüklüğünün en yüksek olduğu numuneye ait olduğu tespit edilmiştir (%70 soğuk deformasyona uğramış bakır). Şekil 2.14'da yapılan çalışmada DSC analiziyle saptanan yeniden kristalleşme sıcaklıkları grafiksel olarak gösterilmiştir [18].



Şekil 2.14: DSC Çalışmasında Saptanan Yeniden Kristallenme Sıcaklıkları.

Saf bakırın yeniden kristallenmesi ile ilgili yapılan bir diğer çalışma Benchabane ve diğ tarafından DSC analizi ve mikrosertlik ölçüm yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada, 2 mm kalınlığında %99,999 saflıkta ve %70 soğuk deformasyona uğramış bakır numunelere argon gazı kullanılarak DSC analizi yapılmıştır. Analizde 10°C/dk, 20°C/dk, 30°C/dk ısıtma hızlarında ölçümler

yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre %70 soğuk deformasyona uğramış saf bakırın 10°C/dk ısıtma hızında yeniden kristallenme sıcaklığı 259,4°C, 20°C/dk, ısıtma hızında 289,2°C, 30°C/dk ısıtma hızında 301,8°C olduğu anlaşılmıştır. Şekil 2.15'te analiz sonuçları grafik halinde verilmiştir [19].



Şekil 2.15: a) 10°C/dk ısıtma hızındaki DSC eğrisi, b) 20°C/dk ısıtma hızındaki DSC eğrisi, c) 30°C/dk ısıtma hızındaki DSC eğrisi.

%70 soğuk deformasyona uğramış saf bakırın sertlik değeri 100 g yük kullanılarak 100 HV olarak ölçülmüştür. Yeniden kristalleşme sonrası farklı ısıtma hızlarında analizi yapılan numunelerin sertlik değerleri 50 HV olarak tespit edilmiştir, DSC analizlerinde gerekli olan aktivasyon enerjisi 58 kJ/mol olarak tespit edilmiştir, mikrosertlik ölçümü için ise gerekli olan enerji yapılan hesaplamalara göre 52 kJ/mol'dür. Yeniden kristalleşme kinetiği incelendiğinde mikrosertlik ölçümleri ile DSC analizi için gerekli olan aktivasyon enerjileri birbiriyle uyumlu olduğu anlaşılmıştır [19].

Jakani ve diğerlerinin yapmış olduğu bir çalışma Cu-ETP'deki safsızlık oranının yeniden kristalleşme sıcaklığına olan etkisini incelemek üzerinedir. Tel çekme işlemiyle %38 oranında soğuk deformasyona uğramış olan Cu-ETP'ye impürte olarak Sülfür katılmıştır. Sülfürün katılmasıyla birlikte, yeniden kristalleşme kinetiği yavaşlar ve S safsızlık içeriği arttığında kuluçka süresi uzar. Bu olguyu açıklamak için bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar

sonucunda, <001> düzlemindeki taneler yüksek oranda yönelimi bozulmuş tane sınırlarına yakın dislokasyon bölgelerinin birleşmesi yoluyla önce çekirdeklenmiştir. Çalışmanın sonucunda, kükürt safsızlıklarının çekirdek oluşumu için gerekli olan toparlanma sürecini ve aynı zamanda da tane sınırlarının hareketliliğini geciktirdiği anlaşılmıştır [20].

Ticari saflıktaki bakıra uygulanan tel çekme soğuk deformasyonu ve tavlama işlemi ile ilgili yapılan bir diğer çalışmada, Cu-ETP ve Cu-OF (oksijensiz ticari bakır) M315 Nieoff tel çekme makinesiyle 2,22 mm çapından 0,66 mm ve 0,53 mm çaplarına indirilmiştir. Çalışma kablolar için kullanılması hedeflenen bakırlar arasında yapıldığından, kablolarda gereken uzamanın minimum %18 olduğu belirtilmiştir. Bu hedeflenen %18'lik uzamayı elde etmek, makine hızı, tavlama için uygulanan voltaj ve bakır türüne göre değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Hat hızının 20 m/dk olduğu durumda 0,66 mm çapındaki bakırlar arasında Cu-ETP Cu-OF'den daha düşük % uzama değeri göstermiştir. 0,53 mm çapındaki bakırlara makine hızı 9 m/dk olduğunda Cu-OF'nin uzama değerinin Cu-ETP'den daha yüksek olduğu görülmüştür. 0,66 mm çapında 11 m/dk hat hızıyla yapılan tavlama işleminde ise (akımlı tavlama) Cu-ETP Cu-OF'den daha yüksek uzama değerine sahip olduğu görülmüştür. Çalışmada yapılan deneylerde uzama değerlerindeki farklılıkların iki farklı kompozisyona sahip ticari bakırların sahip oldukları safsızlık atomlardan ve oranlarından kaynaklabileceği görülmüştür. Ayrıca aynı çaptaki metallerin ve 0,66 mm ile 0,53 mm çaplarındaki aynı kompozisyonlara sahip metallerin farklı tavlama akımlarındaki uzama değerleri de karşılaştırılarak mekanik özelliklerin tüm bu değişkenlerden etkilenebildiği ortaya koyulmuştur [21].

2.5. Bakır Kullanım Alanları

Endüstriyel alan içerisinde bakır çoğunlukla yüksek elektrik iletkenliği bulunduğu için kullanılmaktadır. Elektrik iletkenliğinin yanı sıra korozyon direncinin yüksek olması ve kolay şekil verilebilmesi sebebiyle bakır kullanımı yüksektir. Bakırın başlıca kullanım alanları şu şekilde ifade edilebilmektedir [8];

- Tel yapımı,
- Motor bobini,
- Radyatörler ve yağ soğutucuları,

- Transformatörler,
- Elektrik iletim hatları,
- Ark ocaklarında elektrot tutucu ve kollarının yapımı,
- Jeneratörler.

Ekonomik anlamda meydana gelen gelişim ve dönüşümler bağlamında güncel hayat standartlarında meydana gelen yükselme bireylerin elektrik, elektronik ve endüstriyel ihtiyaçlarının artmasına neden olmuştur. Bu artış özü itibariyle bakıra olan ihtiyacında artmasına neden olmuştur. Bakır yerine farklı iletken maddeler kullanılsa da bu maddelerin çoğunlukla bakır kadar iyi iletkenliğe sahip olmaması bakıra olan ihtiyacın sürekli olarak devam etmesine neden olmaktadır [22].

Elektrik sektörünün yanı sıra iletişim sektörü içerisinde de bakır kullanımı yaygındır. Günlük hayat içerisinde kullanımı gittikçe yaygınlaşan cep telefonlarının ve internet kablolarının ADSL ve HDSL kabloları içerisinde bakır teller bulunmaktadır. Bakır alaşımları ve bakır madeni bilgisayarlar, cep telefonları ve network kabloları için vazgeçilmez hammadde konumunda bulunmaktadır [23].

İnşaat sektörü içerisinde de bakır kullanımı yaygındır. İnşaat alanında doğrudan bakır ve bakır alaşımları kullanılmakta, özellikle plastik borulardan daha sağlam ve ısıya karşı daha dayanıklı olması sebebiyle bakır borular sıklıkla kullanılmaktadır. çatı ve yağmur suyu sistemlerinde de dayanıklılığı sebebi ile bakır yüksek oranda kullanılan maddeler arasında yer almaktadır [22].

Bakırın kullanım alanları incelendiğinde %20'lik kısmın bronz ve pirinç gibi alaşım biçiminde inşaat ve makine sektöründe kullanıldığı, %80'lik kısmın ise elektrik ve elektronik sektöründe kullanıldığı görülmektedir [24].

2.5.1 Data Kabloları

Data kabloları, temel anlamı itibariyle bir cihaz içerisinden bir başka cihaza veri aktarımı gerçekleştirmek maksadı ile kullanılan kablolar olarak ifade edilebilmektedir. İçerisinde veri barındıran tüm cihazlarda data kablosu mevcut bulunmaktadır. Özellikle cep telefonu, bilgisayar ve tablet gibi günlük hayatta bireyler tarafından sıklıkla kullanılan cihazlar data kablolarını en fazla kullanan cihazlar arasında yer almaktadır [25].

Data kabloları çeşitli amaçlar için kullanılabilir. Bu bağlamda data kablolarının en önemli özelliği olarak iki taraflı veri aktarımı sağlaması özelliği öne çıkmaktadır. Data kabloları aracılığı ile iki cihaz arasında hızlı ve güvenli bir biçimde veri aktarımı gerçekleştirilebilmektedir. Ancak bu noktada data kabloları yalnızca uyumlu cihazlar arasında veri aktarımı işlemini gerçekleştirebilmektedir. Uyumlu olmayan cihazlar, data kablosuna sahip olsalar dahi veri aktarımı işlemi gerçekleştirilememektedir [26].

Data kabloları içerisinde sıklıkla kullanılan bir kablo çeşidi olarak karşımıza “halojen free kabloları” çıkmaktadır. Bu kablo biçiminin yaygın ve sıklıkla kullanılmasının temel nedeni olası yangın durumlarında ısı yalıtımını engelleme özellikleri olarak görülmektedir. Bu kablolar acil durum aydınlatmalarında, anons sistemleri içerisinde, yağın alarm sisteminde, basınç fanlarında, yağın suyu sistemleri içerisinde ve yangın tahliye asansörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır [27].

Data kabloları aracılığı ile uyumlu cihazlar arası veri aktarımının çok kolay ve hızlı biçimde gerçekleştirilmesi data kablolarının yaygın biçimde kullanılmasını sağlamış, yangın durumlarında iletişimin ve kurtarma faaliyetlerinin kesilmemesi için halojen free kablolarının kullanılması da insan hayatı açısından büyük önem arz etmektedir. Cep telefonlarından veri aktarmak ve cihazın şarjını doldurabilmek için data şarj kabloları kullanılmaktadır. Pek çok alan içerisinde data kabloları etkin biçimde faaliyet göstermektedir [25].

Data kablolarında “USB, Micro USB, HDMI ve AUX” şeklinde birçok farklı çıkış ucu bulunmaktadır. Kablolar kullanılacak cihazın girişine göre farklılık göstermektedir. En fazla kullanılan data kablosu halojen free kablolarıdır [26].

2.5.1.1. Data Kablolarında İletkenin Özellikleri

Elektriğin iletilebilmesi amacı ile pek çok farklı malzeme kullanılmaktadır fakat iletkenlik bakımından en sık kullanılan maddelerin başında bakır gelmektedir. Bakırla birlikte bakır kaplı çelik, bakır alaşımları ve alüminyum gibi malzemelerde iletkenlik maksadı ile kullanım bulunmaktadır. Bu malzemelerin sıklıkla kullanılma nedenleri arasında ucuz olmaları, elektrik iletkenliklerinin iyi olması ve doğada kolayca bulunabilir olması gibi özellikler bulunmaktadır [28].

Elektrik kabloları içerisinde kullanılan birçok farklı metal bulunmaktadır. Kablo yapma alanı içerisinde en iyi iletkenliği sağlayabilmek için farklı metal teller,

birçok farklı uygulama alanı içerisinde kullanım yeri bulmaktadır. Bu bağlamda bakır teller, elektrik iletkenliği bağlamında en yaygın kullanılan tellerdir. Bakır teller belirli durumlarda kalay, gümüş ve nikel gibi farklı metaller ile kaplanabilmektedir. Bu işlemin temel sebebi farklı ısı dereceleri içerisinde çalışabilmek için bakırın güçlendirilmesidir. Altın madeni de iletken madenler arasında yer almakla birlikte çok yüksek maliyete sahip olması sebebi ile çok az tercih edilmektedir. Altının yüksek maliyetli olmasının yanı sıra çok kırılgan bir yapıya sahip olması da sıklıkla kullanılmamasına neden olmaktadır [29].

Gümüş temelde bakırdan daha fazla iletkenliğe sahip olsa da maliyet anlamında bakırdan daha maliyetli olması nedeni ile altın kadar az olmasa da çok fazla tercih edilmemektedir. Kablolama alanı içerisinde kullanım bulan bir başka maden alüminyum olarak öne çıkmaktadır. Elektrik bileşenlerinin birbirleri ile bağlanmasında etkin bir biçimde kullanılan alüminyum, bakırdan sonra en fazla kullanılan ve iyi bir iletkenliğe sahip olan madenlerin başında gelmektedir. Bunun temel nedenleri arasında maliyetinin gümüşten daha düşük olması da bulunmaktadır [28].

En çok kullanılan iletken metaller arasında bakır yer almaktadır. Fiziksel nitelikleri içerisinde termal ve elektriksel iletkenlik miktarının yüksek olması, lehimlenebilir ve yumuşak olması, erime noktasının yüksek olması, diğer metallere göre daha dirençli olması gibi özellikler bulunmaktadır. [29];

İyi bir iletkenidir Bakır madeni iyi bir iletken ancak düşük dirençli bir maden olarak öne çıkmaktadır. Alüminyum kabloların bakır kablolardan iki kat fazla dirençli olduğu bilinmektedir. Bu anlamda alüminyum kablonun enerji kaybı bakır kabloya nazaran iki kat daha yüksektir. Bakır kablo, direnç anlamında düşük olsa da enerji verimliliği anlamında daha verimlidir. Şekil vermenin kolaydır. Bakır madeni kolay şekil alabilen bir yapıya sahiptir ve bu sebeple kırılmadan veya çatlamadan yeterli olacak ölçülere kadar gerilebilmektedir. Bakır metal, elektrik kabloları bağlamında tel çekme açısından kullanışlıdır. Bakır metalinin sahip olduğu kimyasal özellikler elektrik iletkenliğinin sağlanmasını gerekli ölçütleri karşılamaktadır. Aşınmadan koruması ve dayanıklı olması bağlamında bakır teller elektrik iletiminde sıklıkla kullanılmaktadır. İklimsel değişimler bağlamında bakır teller diğer metallere göre daha dayanıklıdır. Yüksek ısılara dayanıklıdır. Elektrik kabloları içerisinde belirli bir noktadan akım geçerken yüksek voltajlar nedeni ile telde ısınma meydana gelmektedir. Yüksek gerilime sahip olan elektrik hatları içerisinde ısı miktarında

belirli aralıklarla artış ve azalma meydana gelmektedir. Teller bu sıcaklık değişimine sürekli olarak uyum sağlayamamaktadır. Bu noktada bakır, yüksek sıcaklık toleransına sahip olması itibariyle kablolar içerisinde kullanıldığından daha uzun ömürlü elektrik kabloları üretilmesine olanak sağlamaktadır. Küresel standartlar; Küresel anlamda elektrik alanı içerisinde kullanılacak bakır tellerin belirli bir standartta uygun olarak üretilmesi gerekmektedir. Bu kablolar genellikle tüm bina tasarımları ile uyumlu olmaktadır. Bu özelliği itibariyle bakır kablolar sıklıkla tercih edilmektedir. Doğada fazla miktarda bulunur. Bakır madeninin doğada fazla miktarda bulunması kullanım miktarını arttırmaktadır. Hem kolay çıkarılması hem de kolay işlenmesi bakımından bakıra olan ilgi yüksektir [29].

Bakır metalinden sonra elektrik iletkenliği anlamında en fazla kullanılan maden alüminyum olarak görülmektedir. Alüminyum kullanılarak üretilen ilk elektrik kabloları 1900'li yıllarda uygulanmaya başlamıştır. Bu kablo çeşidinin kullanımı 2. Dünya Savaşı sonrası dönemde artış göstermiş ancak ilerleyen zaman içerisinde daha iyi iletkenlik sağladığı için bakır kablolar tercih edilmeye başlanmıştır. Alüminyumun iletken olarak kullanılmasındaki temel nedenler; Kolay şekil verilebilirliğidir. Alüminyum hafif bir maden olduğu için kolayca şekil alabilmektedir. Bu özelliği bağlamında uzun mesafeli bağlantılarda sıklıkla kullanım alanı bulmaktadır. Alüminyum kabloların desteklenmesi ve çekilmesi bakıra kıyasla nispeten daha kolay ve hafiftir. Alüminyum alaşıma sahip bir telin bükülmesi için daha az bir kuvvet gerekmektedir ve bükülme işleminin ardından telde çok az geri yaylanma gerçekleşmektedir. Bakır iletkenler ile kıyaslandığında alüminyum iletkenlerin daha ekonomik olduğu görülmektedir. Alüminyum kablolar bakır kablolarla kıyasla daha ucuz maliyete sahip olduğundan uzun mesafelerde sıklıkla kullanımı tercih edilmektedir. Bakıra göre daha az iletkenliğe sahip olsa da alüminyum iletkenler daha ucuz ve hafif olması sebebiyle kullanılmaktadır. Ağırlığın önemli olduğu bazı makine parçalarında, uçak kablolarında ağırlık tasarrufu için sıklıkla alüminyum iletkenler tercih edilmektedir [28].

Alüminyum iletkenlerin bakıra kıyasla yarattıkları olumsuzluklar da bulunmaktadır. Alüminyumun korozyon direnci daha hassas olmakla birlikte periyodik bakım ve değişime ihtiyaç duymaktadır. Belirli metalle ve su alüminyum korozyona uğratmaktadır ve fazla miktarda korozyon yangın riskini ortaya çıkarmaktadır. Bu bağlamda alüminyum iletken kullanılan alanların bakım ve onarımının sürekli olarak yapılması gerekmektedir [30].

Bakır ve alüminyumdan sonra bir diğer kullanılan iletken metal gümüşdür. Gümüş, temelde en iyi iletken olmasına karşın maliyeti sebebi ile daha az tercih edilmektedir. Gümüş tellerin elektrik iletkenliğinin iyi olmasının yanında ısı iletkenliği de yüksektir. Bununla birlikte yüksek korozyon direnci gümüşü uzun vadeli kullanımlarda önemli bir konuma taşımaktadır. Tüm bunların yanında gümüşün kolay şekil almaması ve özellikle yüksek maliyetli olması yalnızca belirli alanlar içerisinde kullanılan bir iletken olmasına neden olmaktadır [29].

Isı direnci ve iletkenliği bağlamında gümüş, motor kontrol anahtarlarında ve elektrik kontaklarında çoğunlukla kullanılmaktadır. Özellikle hoparlör sistemlerinde optimum sese ulaşabilmek için gümüş teller kullanılmaktadır [28].

İletkenlik özelliği bulunan bakır kaplama malzemeler de bulunmaktadır; Kalay Kaplama Bakır, lehimleme yardımcısı olarak kullanılan kalaylı bakırlar, 150°C'den yüksek olmayacak sıcaklıklara sürekli olarak maruz kalan iletkenler için kullanılmaktadır. Kalaylı bakır normal bakır iletkenlerden daha maliyetlidir. Bu bağlamda, lehim daldırma ve elle döndürme işlemlerinin olması durumunda kalaylı bakır tercih edilerek masraftan ve emekten tasarruf edilerek denge maliyet ve emek dengesi kurulmaktadır. Gümüş Kaplama Bakır: Tel üzerinde elektro kaplama ve saf gümüş ile elde edilen gümüş kaplama bakır, soğutma işlemine maruz kalmakta ve bu işlem sonrasında ebatlanarak tavlanmaktadır. En küçük gümüş kalınlığı 40 mikrometre olarak ifade edilmektedir. Yüksek maliyete sahip olmasına rağmen, 150°C ve 200 °C arası sıcaklıklara uygun olması itibarıyla kullanım bulmaktadır. Ayrıca gümüş kaplama bakırın lehimlenmesi kolaydır. Nikel Kaplama Bakır: Çalışma sıcaklıklarının 200°C ve 260°C civarlarında bulunması sonucunda gümüş kalama bakırın kullanımına uygun olmayan bu çalışma alanında nikel kaplama bakır kullanılmaktadır. Nikel kaplamanın ölçütü en az 50 mikrometre olarak belirlenmiştir. Nikel, gümüş ve kalaya göre daha geç ısınmaktadır [31].

İletkenlik özelliği bulunan bakır kaplama malzemeler kullanım ve iletkenlik ömürleri bağlamında birbirlerinden ayrılmaktadır. Kalay kaplama bakır, kalay ve bakır oksidasyonunun geçişi sebebiyle 150°C'den yüksek sıcaklıklarda ısı iletkenliğinde, lehimlenebilirliğinde ve elektrik iletkenliğinde bozulma meydana gelmektedir. Gümüş kaplama bakır kalay kaplama bakıra göre daha dayanıklıdır ve 200°C'lik sıcaklıklara kadar ısı ve elektrik iletkenliğinde, lehimlenebilirliğinde bozulma yaşanmamaktadır ancak 200°C'den yüksek sıcaklıklarda gümüş kaplama bakırda bozulmalar meydana gelmektedir. En dayanıklı kaplama nikel kaplamadır.

260°C'lik sıcaklıklara kadar nikel kaplı bakırda sorun meydana gelmemekte ve ısı, elektrik iletkenliği en iyi şekilde devam etmektedir [30].

Temas direnci bağlamında kalay kaplama bakırda temas direnci belirli bir zaman sonra artış göstermektedir ve bu durum sabit değil, değişkendir. Gümüş kaplama bakırın temas direnci düşük düzeydedir. Nikel kaplama bakırda ise, temas direnci zaman içerisinde değişim göstermektedir. Belirli durumlarda kaplama çelik terminal kullanılabilir [29].

Çalışma sıcaklığı ve lehimlenebilirlik bağlamında kalay kaplama bakırda lehimlenebilirlik düzeyi iyi olsa da bu durum kullandıkça bozulma eğilimindedir. Çalışma sıcaklığı olarak en fazla 150°C'lik ısıya kadar kullanılabilir. Gümüş kaplama bakırda lehimlenebilirlik kalay kaplama bakıra göre çok daha iyidir ve çalışma sıcaklıkları en fazla 200 °C civarındadır. Nikel kaplama bakırda ise aktif akı gerekmektedir. Çalışma sıcaklıkları 260°C'lere kadar çıkmaktadır [28].

2.5.1.2. Empedans, Next, Geri Dönüş Kaybı (Return Loss)

Data kablolarının kapasite durumu, kullanılan kablo tipi ve teknolojiye bağlı olarak değişiklik gösterir. İletişim ağlarında genellikle Ethernet kablolama standartları kullanılır ve bu standartlar belirli bir veri hızı ve kapasiteyi destekler [32].

Cat5e ve Cat6 kablolar, Ethernet ağlarında yaygın olarak kullanılan kablolama standartlarıdır. Cat5e, 1 Gigabit/s veri hızına (1000 Mbps) ve 100 MHz bant genişliğine kadar destek sağlarken, Cat6 10 Gigabit/s veri hızına (10.000 Mbps) ve 250 MHz bant genişliğine kadar destek sağlar. Cat6a ise 10 Gigabit/s veri hızına ve 500 MHz bant genişliğine kadar destek sağlar [33].

Return Loss, iletilen verilerin iletim hattı açısından bir kısmının geri yansmasıyla sinyalin kayba uğramasının ölçüsünü belirtmektedir. Return Loss, kabloya gönderilen bir sinyalin kablonun başlangıcında veya sonunda ne kadar yansıdığını ifade eder. Return Loss (RL), genellikle desibel (dB) cinsinden ifade edilir. Pozitif bir Return Loss değeri, daha az yansıma ve daha iyi sinyal iletimi anlamına gelir. Negatif bir Return Loss değeri ise yansımanın daha fazla olduğunu ve sinyal kalitesinin etkilendiğini gösterir [34].

Return Loss, sinyal yansımalarını tespit ederek kablonun performansını ve iletim kalitesini değerlendirmeye yardımcı olur. Bu nedenle, veri kablolama

sistemlerinin tasarımı ve uygulamasında Return Loss değerleri dikkate alınarak sinyal kalitesi ve bütünlüğü optimize edilir [34].

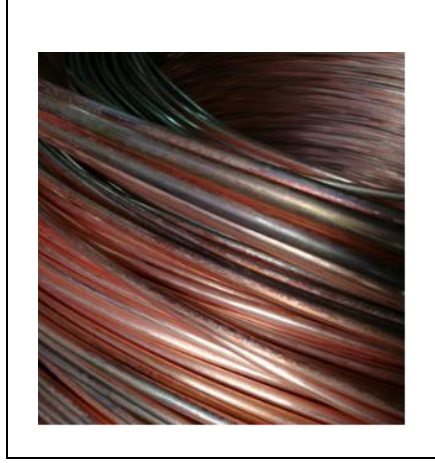


3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, Sarkuysan Elektrolitik Bakır San. A.Ş. firmasından tedarik edilen 8 mm çapında %99,90 saflıktaki elektrolitik bakır (electrolytic tough pitch copper, Cu-ETP) çubuğa/filmaşine uygulanan soğuk deformasyon ve yeniden kristalleşme ısıl işleminin, Cu-ETP data kablolarının elektriksel iletkenlik, direnç, geri dönüşüm kaybı (return-loss) ve empedans özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzeme ve Yöntem

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan %99,90 saflıktaki elektrolitik Cu-ETP filmaşinin (Şekil 3.1) optik emisyon spektroskopisi kullanılarak belirlenen kimyasal kompozisyonu Tablo 3.1’ de verilmiştir. Tablo 3.1’ den de görülebileceği gibi incelenen bakır yaklaşık olarak %0,04 civarında oksijen ve ayrıca çok az miktarda da gümüş içermektedir. Soğuk deformasyon ve yeniden kristalleşme çalışmalarına yönelik olarak 8 mm çapında %99,90 saflıktaki Cu-ETP filmaşin ilk olarak tel çekme yöntemi ile 2,20 mm çapına indirilmiş ve daha sonra uygulanan ara tavlama ısıl işlemi ile gerçekleştirilen ilk soğuk deformasyon işleminin etkileri ortadan kaldırılmıştır. Bu aşamadan sonra 2,20 mm çapındaki Cu-ETP tel, ikinci olarak tekrar tel çekme işlemine tabi tutulmuş ve yerel ağ veri aktarım (data) kablolarında kullanılan nihai kullanım çapı olan 0,55 mm’ye %93,75’lik ezme oranıyla düşürülmüştür (Şekil 3.2’de 2,20 mm çapındaki bakırın görüntüsü, Şekil 3.3.’de 0,55 mm çapındaki bakırın görüntüsü verilmiştir).



Şekil 3.1: 8 mm çapındaki Cu-ETP filmaşın.



Şekil 3.2: 2,20 mm çapındaki Cu-ETP tel.



Şekil 3.3: 0,55 mm çapındaki Cu-ETP tel.

Tablo 3.1: Cu-ETP malzemesine ait a) optik emisyon spektroskopisi kimyasal analizi ve b) referans tanım ve limit değerleri.

Element	Limit Değeri	Element	Limit Değeri
% Cu	≥ 99.90	ppm Pb	≤ 5.0
ppm Se	≤ 2.0 and b, d	ppm Si	c
ppm Te	≤ 2.0 and b, d	ppm Sn	c
ppm Bi	≤ 2.0 and b, d	ppm Ni	c
ppm Cr	a	ppm Fe	≤ 10.0 and c
ppm Mn	a	ppm Zn	c
ppm Sb	≤ 4.0 and a	ppm Co	c
ppm As	≤ 5.0 and a	ppm S	≤ 15.0
ppm Cd	a	ppm Ag	≤ 25.0
ppm P	a	ppm O	≤ 400

(a)

Ref. Tanımları	Limit Değeri
a (As + Cd + Cr + Mn + P + Sb)	≤ 15 ppm
b (Bi + Se + Te)	≤ 3 ppm
c (Co + Fe + Ni + Si + Sn + Zn)	≤ 20 ppm
d (Se + Te)	≤ 3 ppm

(b)

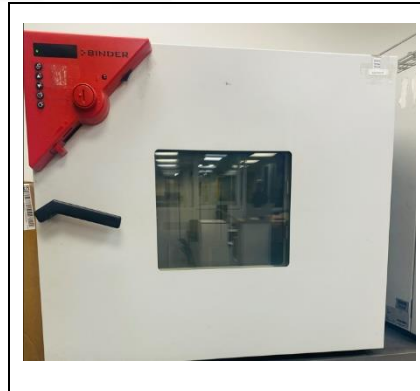
3.2. Yeniden Kristalleşme Tavlamları (Isıl İşlemleri)

Yeniden kristalleşme tavlmasına başlamadan önce sırası ile 2,20 mm ve %93,75'lik soğuk deformasyon oranına sahip 0,55 mm çapına indirilmiş Cu-ETP tel numunelerin çekme mukavemeti, kopma uzaması, sertlik ve elektriksel direnç ölçüm sonuçları Tablo 3.2' de verilmiştir. %93,75'lik soğuk deformasyon oranıyla 0,55 mm çapa indirilmiş Cu-ETP numunesinin yeniden kristalleşme sıcaklığının tespiti için farklı sıcaklıklarda bir saat süre ile yeniden kristalleşme tavlamları gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında uygulanan yeniden kristalleşme tavlama sıcaklıkları, Bölüm 2.3' te detaylı olarak verildiği üzere soğuk deformasyon oranı, deformasyon sıcaklığı, kimyasal kompozisyon veya empürite içerikleri gibi parametrelerin etkileri nedeni ile geniş bir aralıkta değişim gösterdiği dikkate alınarak 120 °C ile 250 °C arasında 10 °C arttırılarak belirlenmiştir. Soğuk deformasyona uğramış bir malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının belirlenmesinde de malzeme bilimi ve mühendisliği alanında genel bir yaklaşım olarak literatürde mevcut olan soğuk deformasyona tabi tutulmuş bir metalik esaslı

malzemenin belirli bir sıcaklıkta yaklaşık bir saat tavlama işlemi sonrasında malzemenin soğuk deformasyona uğramadan önceki mekanik özelliklere (sertlik ve/veya çekme mukavemeti) ait değerlerine ulaşıldığı sıcaklık söz konusu malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı olarak kabul edilir kabulü uygulanmıştır. Yeniden kristalleşme tavlamaları, sıcaklık kontrolünün sıkı bir şekilde sağlanabilmesi için maksimum 300°C'ye kadar çıkabilen Binder ED 115 (Şekil 3.4) marka etüvde normal atmosfer şartlarında, 0,55 mm çapındaki 3000 metre uzunluğunda tel çekme operasyonu ile çekilen bakır telden elde edilen 2 metre uzunluğunda numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.2: İncelenen Cu-ETP numunelerin çekme mukavemeti, kopma uzaması, sertlik ve elektriksel direnç ölçüm sonuçları.

Malzeme Özellikleri	2,20 mm Ø Cu-ETP	0,55 mm Ø Cu-ETP
Çekme mukavemeti (N/mm ²)	260,884	503,46
% Kopma Uzaması (mm/mm)	36,482	1,47
Sertlik (HV _{0.1})	71,338	115,043
Direnç (Ω.m)	4,409	90,02



Şekil 3.4: Yeniden kristallenme tavlamalarının gerçekleştirildiği Binder ED 115 marka etüvün görünümü.

3.3. İncelenen Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Yeniden kristalleşme tavlamaları öncesinde 2,20 mm ve %93,75'lik soğuk deformasyon oranına sahip 0,55 mm çapına indirilmiş Cu-ETP numunelere sertlik ve

çekme testleri uygulanmıştır. %93,75'lik soğuk deformasyon oranına sahip 0,55 mm çapına indirilmiş Cu-ETP numunelere ise 120 °C ile 250 °C arasında bir saat süre ile tavlama işlemleri sonrasında mekanik özelliklerdeki değişimleri belirlemeye yönelik olarak sertlik ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Sertlik Testleri

Sertlik ölçümleri, yeniden kristalleşme tavlamaları öncesinde ve sonrasında incelenen numunelerin standart metalografik yöntemler kullanılarak hazırlanmış olan boyuna ve enine kesitleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri 100 gr. indentasyon yükü kullanılarak Anton-Paar (MHT-10) marka mikro sertlik ölçüm cihazında standart Vickers indenter (batıcı uç) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.5'te sertlik cihazı gösterilmiştir.) Vickers sertlik ölçümü yumuşak ve sert malzemelere uygulanabilen bir sertlik yöntemi olup kare tabanlı piramit formunda elmas batıcı ucun uygulanan indentasyon yükü altında incelenen numune yüzeyine batırılması sonucunda numune yüzeyinde kare şekilli bir iz oluşturma esasına dayanmaktadır. Oluşan kare şekilli izin simetrik olan köşegenlerin ortalamasının alınarak iz yüzey alanının hesaplanması ve daha sonra uygulanan indentasyon yüküne bölünmesi ile Vickers sertlik değeri belirlenmektedir.



Şekil 3.5: Yeniden kristallenme tavlamaları yapılan numunelerin mikro sertlik ölçümlerinde kullanılan sertlik cihazı.

Deneyisel çalışmalarda incelenen her bir numune için sertlik ölçüm sonuçları, sertlik ölçümü yapılan yüzeyler üzerinde üç farklı bölgeden elde edilen sertlik ölçüm değerlerinin ortalaması olarak verilmiş olup yeniden kristalleşme tavlamaları

öncesinde ve sonrasında deneysel çalışmalarda incelenen numunelerin sertlik değerlerinin karşılaştırılmasında diğer bir ifade ile tavlama esnasında malzemede meydana gelen mekanik özellik değişimlerin ve yeniden kristalleşme sıcaklığının belirlenmesinde kullanılmıştır.

3.3.2. Çekme Testleri

Yeniden kristalleşme tavlamaları öncesinde ve sonrasında deneysel çalışmalarda incelenen numuneler, Zwick marka 1446 model çekme test cihazında çekme testlerine tabi tutulmuştur. (Şekil 3.6’de çekme testi gösterilmiştir.) Çekme testleri ile incelenen numunelere ait çekme mukavemetleri ve kopma uzamaları belirlenmiştir. İncelenen her bir numune için çekme testi aynı koşullar altında üç kez tekrar edilmiş ve numunelere ait çekme mukavemetleri ve kopma uzamaları bu üç değerın ortalaması olarak verilmiştir. Zwick Roell 1446 10 kN yük kapasitesine sahip bir çekme test cihazıdır. Çekme testi yapılacak numunelerin boyları 20 cm olarak belirlenmiştir. Test hızı 100 mm/dk olmakla birlikte numunenin esnekliğini gidermek için uygulanan ön yük 1 N’dur. % kopma uzamasının tespiti için ekstansometre kullanılmıştır.



Şekil 3.6: Zwick 1446 Çekme Test Cihazı

3.4. İncelenen Numunelerin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi

3.4.1. Elektriksel Direnç ve İletkenlik Değerinin Belirlenmesi

Tavlama işleminin ardından her bir numunenin elektriksel direnç değerleri Resistomat 2316 miliohm metre cihazıyla ölçülmüştür. Miliohm metrede, iki adet ölçüm kablosu ve sabit bir akım kaynağı kullanılarak metal telin direnci ölçülür. (Şekil 3.7’te Direnç ölçümü ortam sıcaklığından doğrudan etkilendiği için ortam sıcaklığının $20^{\circ}\text{C} \pm 2$ olması son derece önemlidir. Ayrıca direnci ölçülecek metal parça miliohm metreye bağlandıktan 10 dk ortam sıcaklığına gelmesi beklenmesi gerekir. Miliohm metrede 0,55 tavllanmış bakır numunelerin direnç ölçümü için 100 mA sabit akım uygulanmıştır. Numune boyları 2 metre olacak şekilde özel olarak hazırlanmıştır. Şekil 3.7’te görüldüğü gibi 2 metre uzunluğunda bakır tel yatay tablanın iki ucundaki bölümlere sabitlenir ve bir uçtan bir uca akım verilerek direnç ölçümü gerçekleştirilir.

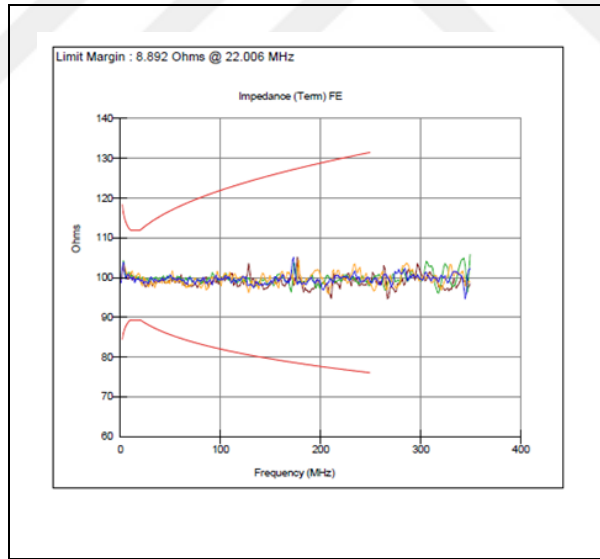


Şekil 3.7: Yeniden kristalleşme tavlamaları yapılan numunelerin elektriksel direnç ölçümlerinde kullanılan miliohm metre.

3.4.2. Empedans Değerinin Belirlenmesi

140°C , 160°C , 180°C , 250°C sıcaklıklarda tavlama işlemi yapılan bakır teller plastik ile kaplandıktan sonra ikili gruplar halinde büküldükten sonra her bir ikili grup yani per büküm yapı bir araya getirilerek kablo özü oluşturulmuştur ve öz yapısı

üretildikten sonra kablo dış kılıfı ekstrüzyon prosesi ile gerçekleştirilerek Cat 6 U/UTP yapıda yerel ağ veri aktarım kablosu üretilmiştir. Üretilen 4 adet kablodan 100'er metre numune alınmıştır. 100'er metre 4 farklı kablo numunesi ağ analizörü (network analyzer) yardımıyla empedans değer analizi yapılmıştır. Her bir 100 metrelik numunenin birer ucu network analyzer cihazına bağlanmıştır ve ölçüm empedans ölçümünün alt limit değeri 90 ohm üst limit değeri 120 ohm'dur. Ölçüm sonucunda elde edilen grafiklerde ölçümü yapılan iletkenlerin bu limit değerleri aralığında birbirine yakın şekilde gelmesi istenir. 100 ohm değeri en ideal değer olarak bilindiğinden üretilen kablo kalitesinde 100 ohm empedans değeri oldukça önemlidir. Empedans ölçümünde ilgili grafikte x koordinatında Frekans (MHz) gösterilir. Frekans aralık değeri 0 ile 400 olarak sabittir. Şekil 3.8'de empedans grafiği örneği verilmiştir. Şekil 3.9'de network analyzer gösterilmiştir. Empedans, Elektriksel direnç (R) değerine bağlıdır. Elektriksel direnç değeri yükseldikçe, empedans değeri de artış gösterir ve grafik üzerinde iletkenlerin üst değere yaklaşmasına neden olur.



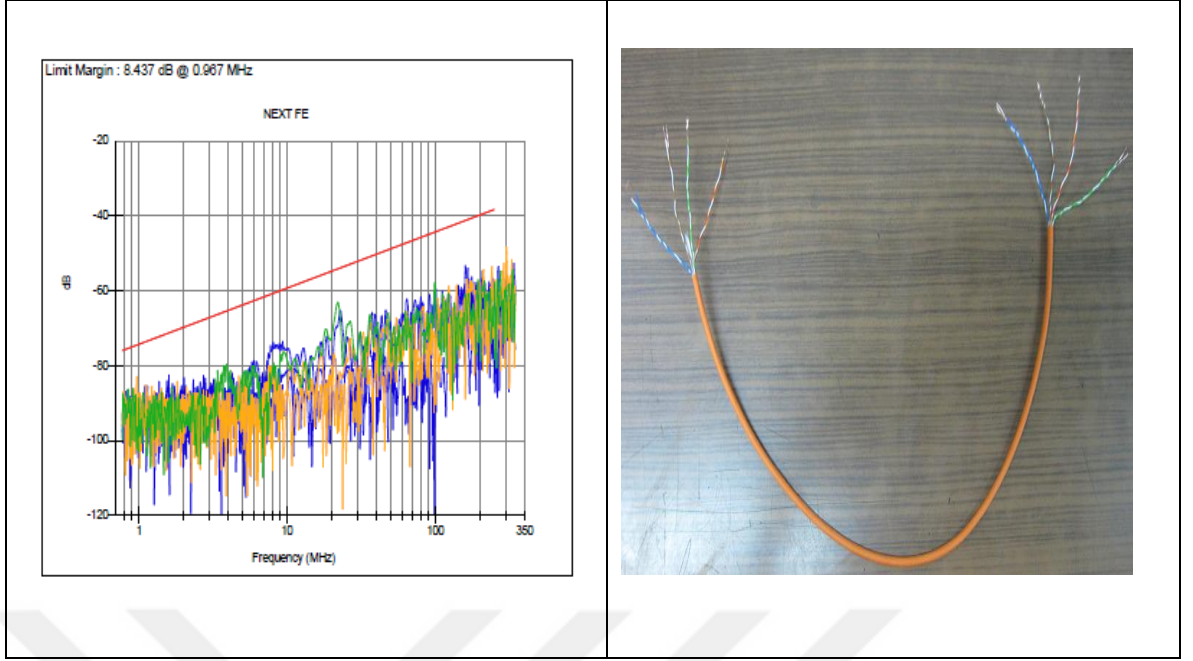
Şekil 3.8: Örnek Empedans ölçüm grafiği.



Şekil 3.9: Network Analyzer.

3.4.3. NEXT (Near and Cross Talk) Değerinin Belirlenmesi

NEXT değeri empedans değeri ile aynı yöntemle ölçülmüştür. 140°C, 160°C, 180°C, 250°C sıcaklıklarda tavlama işlemi yapılan iletkenlerden üretilen 100 metre kablo numunesi network analyzer test cihazına bağlanır ve ölçüm gerçekleştirilir. NEXT değeri ikili bükülen per yapıların birbirlerine olan sinyal girişimlerinden etkilendiği için (Bölüm 2.5.2.1’de belirtildiği şekilde) per yapılarıdaki hatvelerin bozulmaması bakır telin mukavemet özelliğiyle doğrudan ilgilidir. Mukavemetin yaklaşık 240 N/mm² değerlerinde olması gerekmektedir. Bu yaklaşık değerin üzerinde olan bakır iletken per büküm yapılırken şekil vermek zordur. Next değerinin -60 desibel limit değerinin altında tüm per yapılmış iletken ölçüm değerleri üst üste binmiş şekilde grafikte yer almalıdır. Grafiklerin x koordinatı empedans ölçümünde olduğu gibi 0- 350/400 frekans (MHz) aralığında verilir. Şekil 3.10.’de örnek NEXT ölçüm grafiği verilmiştir. Şekil 3.11.’de per yapısıyla birlikte izoleli iletkenler gösterilmiştir.

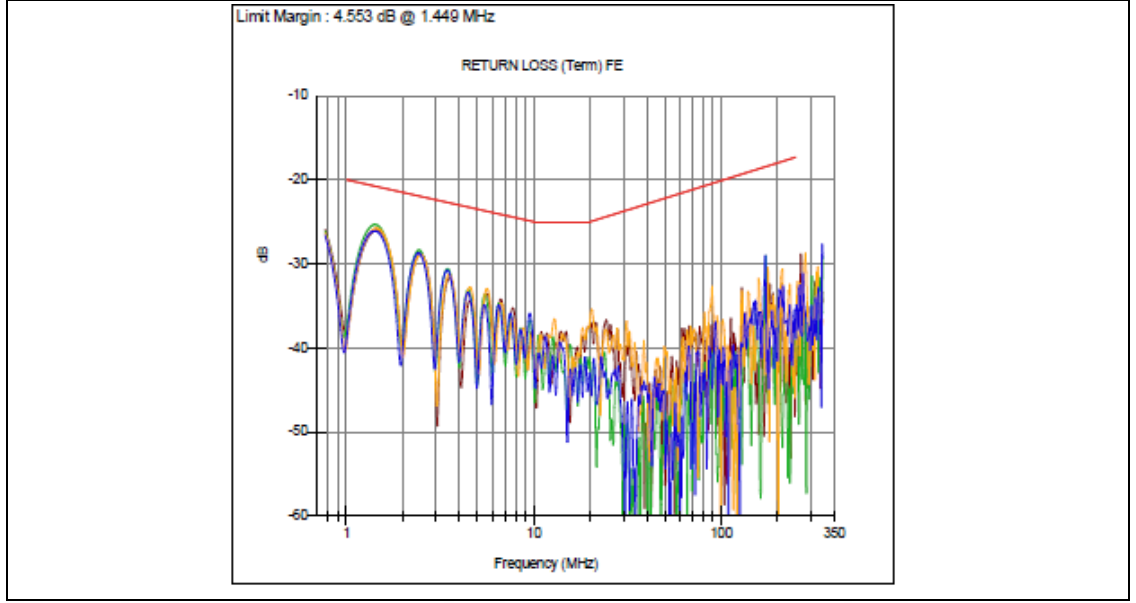


Şekil 3.10: Örnek NEXT ölçüm grafiği

Şekil 3.11: Per yapıdaki izoleli CuETP

3.4.4. Geri Dönüş Kaybı Değerinin Belirlenmesi

140°C, 160°C, 180°C, 250°C sıcaklıklarında tavllanmış Cu-ETP ile üretilen kablo numuneleri empedans ve next ölçümlerine benzer şekilde network analyzer yardımıyla ölçülür ve diğer iki ölçüme benzer grafik elde edilir. Geri dönüş kaybında (return loss) üst limit değer -20 db'dir ve ölçümün yapıldığı frekans aralığı (x koordinatında verilir.) 0-350/400 MHz aralığındadır. Bu ölçümde de numunenin return loss değerinin limit değerinin altında olması istenir ve diğer ölçümlerdeki gibi 4 adet perin yani 8 adet izoleli Cu-ETP'nin grafik üzerinde çakışması istenmektedir. Return loss değeri, empedans uygunsuzluğuyla doğrudan ilgilidir. Şekil 3.12.'te örnek geri dönüş kaybı grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Örnek geri dönüş kaybı sonuç grafiği.

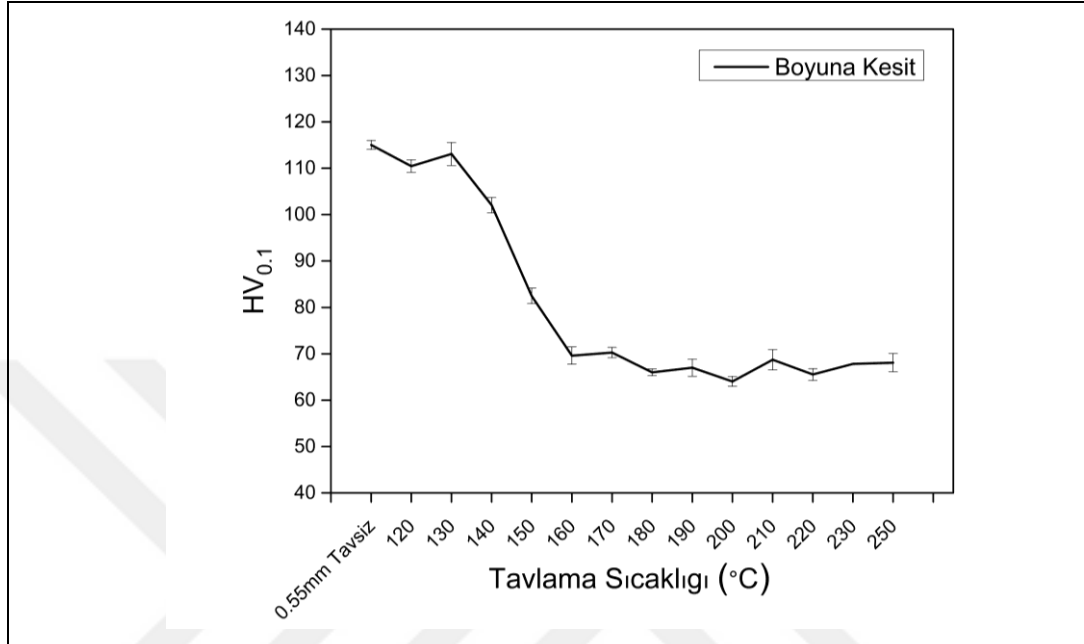
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

2,20 mm çapından 0,55 mm çapa tel çekme yöntemi ile indirilmiş %99,90 ticari saflıktaki Cu-ETP tele uygulanan %93.75 oranındaki soğuk deformasyonun ve akabinde uygulanan yeniden kristalleşme tavlamalarının mikroyapı ve mekanik özellikler, elektriksel iletkenlik ve direnç, geri dönüşüm kaybı (return-loss) ve empedans özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmaya yönelik gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları aşağıda verilmiştir.

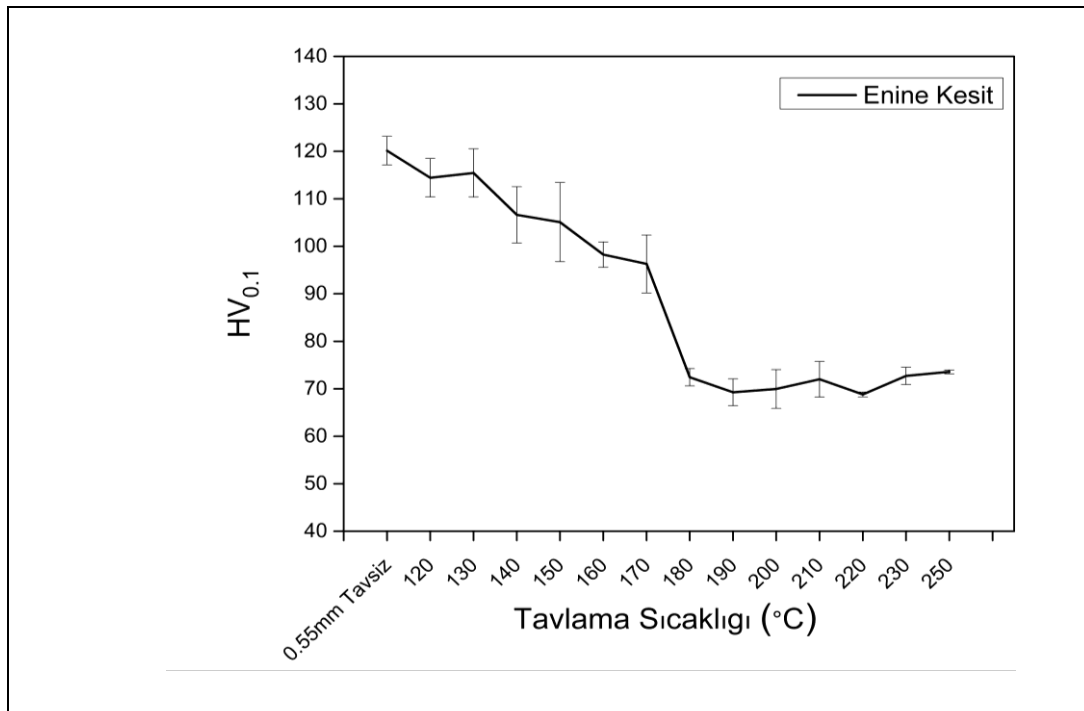
4.1. Soğuk Deformasyon ve Yeniden Kristalleşme Tavlamalarının Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi

Tel çekme yöntemi ile 2,20 mm çapından 0,55 mm çapına getirilen bakır tele uygulanan soğuk deformasyon işlemi sonrasında numunenin sertliği 71,34 HV_{0.1}' den 115,10 HV_{0.1} (Tablo 3.2) yükseldiği belirlenmiştir. Bu tez çalışmasının “2.3. Soğuk Deformasyon ve Tavlama” başlıklı bölümde de detaylı olarak verildiği üzere ticari saflıktaki bakır tele uygulanan %93.75' lik orandaki soğuk deformasyon esnasında malzemede dislokasyon yoğunluğunun yanı sıra boşluk oluşumu gibi yapısal hatalarının artmasının meydana getirmiş olduğu deformasyon sertleşmesi sonucunda bakır telin sertliğinde önemli oranda artış meydana geldiği belirlenmiştir. 0,55 mm çapına ve %93.75' lik soğuk deformasyon oranına sahip bakır teller üzerinde 120 ile 250 °C arasında değişen farklı sıcaklıklarda bir saat süre ile gerçekleştirilen yeniden kristalleşme tavlama işlemlerine tabi tutulan bakır telin boyuna ve enine kesitlerinde gerçekleştirilen sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.1' de verilmiştir. Genel olarak yeniden kristalleşme tavlama işlem sıcaklıkları arttıkça incelenen bakır tel numunenin hem boyuna hem de enine ölçülen sertlik değerlerinin azaldığı ve belirli bir tavlama sıcaklığından sonra dikkate değer bir değişim göstermeksizin yataya ulaştığı belirlenmiştir. Şekil 4.1 detaylı olarak incelendiğinde soğuk tel çekme işlemi ile deforme edilen bakır telin sertliğinde (115 HV_{0.1}) 120 ile 140 °C arasındaki sıcaklıklarda kademeli bir şekilde azalma gerçekleşerek 106 HV_{0.1} düştüğü belirlenmiştir. 140 ile 180 °C arasında ise incelenen bakır telin sertliğinde çok hızlı bir düşüş meydana gelmiş ve 180 °C' de soğuk deformasyon öncesi sertlik

değeri olan 71 HV_{0.1} yakın sertlik değerine (69±2 HV_{0.1}) ulaştığı belirlenmiştir. 180 ile 250 °C arasındaki sıcaklıklarda sertlikte bir miktar azalma olmakla birlikte çok dikkate değer bir değişim göstermeden sertliğin sabit kaldığı belirlenmiştir (~ 67±2 HV_{0.1}).



(a)

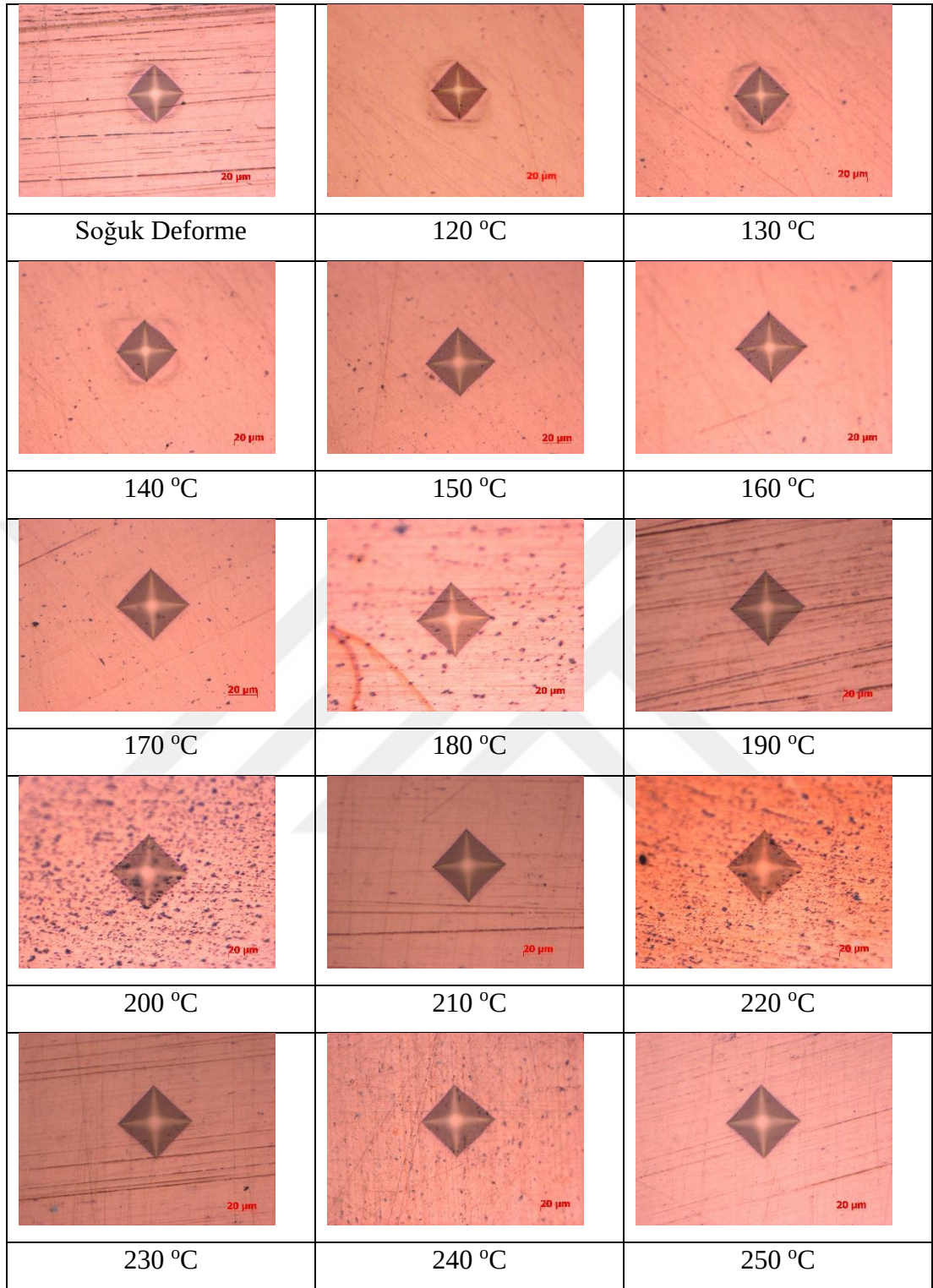


(b)

Şekil 4.1: Farklı sıcaklıklarda tavllanmış bakır telin a) boyuna ve b) enine kesit sertlik ölçüm sonuçları.

Soğuk işlem görmüş ve 120 ile 250 °C arasındaki sıcaklıklarda bir saat süre tavllanmış numunelerin boyuna kesitlerinde gerçekleştirilen sertlik ölçümleri sonrasında numunelerin yüzeylerinde oluşan sertlik izlerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.2’ de verilmiştir. Şekil 4.2’ den de net olarak görülebileceği gibi artan tavlama işlem sıcaklıkları ile sertlik iz boyutlarının Şekil 4.1a’ da verilen sertlik ölçüm sonuçlarına uygun olarak büyüdüğü/genişlediği belirlenmiştir.

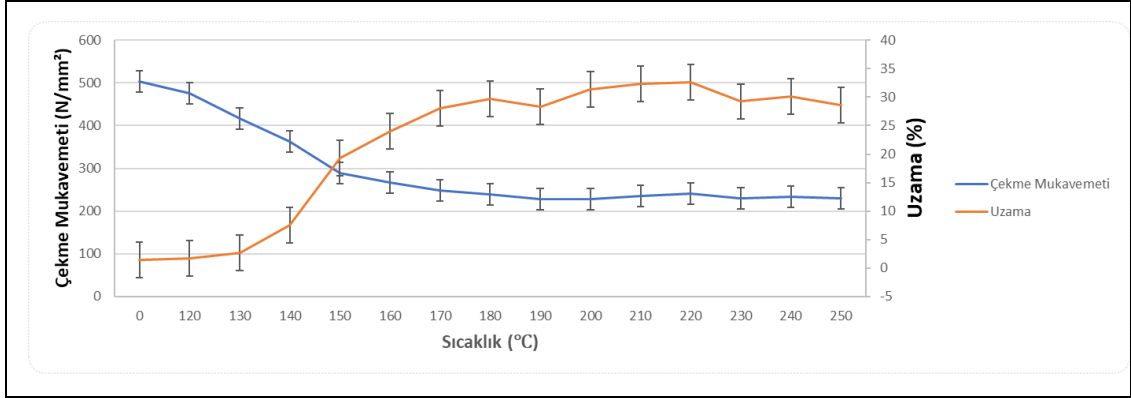
Soğuk tel çekme işlemi görmüş ve 120 ile 250 °C arasındaki sıcaklıklarda yeniden kristalleşme tavlama ısıl işlemlerine tabi tutulmuş bakır tele uygulanan çekme testleri sonrasında elde edilen çekme mukavemeti ve % kopma uzaması değerleri Şekil 4.3’te verilmiştir. 0,55 mm çapına ve %93,75’ lik soğuk deformasyon oranına sahip bakır telin Tablo 3.3’ te verilen çekme (503 N/mm²) ve % kopma uzaması (%1,5mm/mm) değerleri dikkate alındığında genel olarak tele uygulanan tavlama işlem sıcaklığı arttıkça bakır telin mukavemeti azalırken sünekliğinin diğer bir ifade ile kopma uzamasının arttığı ve belirli bir sıcaklık aralığından sonra söz konusu mukavemet özelliklerinde dikkate değer bir değişimin olmadığı belirlenmiştir. İncelenen bakır telin mukavemeti 120 ile 180 °C’ de gerçekleştirilen tavlama işlemleri sonrasında hızlı bir şekilde azalma gösterirken % kopma uzaması değerlerinin (sünekliğin) hızlı bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Sertlik ölçüm sonuçlarına (Şekil 4.1) benzer şekilde 180 °C’de uygulanan tavlama işlemi sonrasında soğuk işlem görmemiş 2,20 mm çapına sahip bakır telin (Tablo 3.3) yaklaşık olarak mukavemet (260,9 N/mm²) ve süneklik (%36,5) değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. 180 °C ile 250 °C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen tavlama işlemlerinin numunenin çekme mukavemeti ve % kopma uzaması değerleri üzerinde dikkate değer bir değişim yapmadığı ve bu sıcaklık aralığında her iki mekanik özelliğinin yaklaşık olarak sabit kaldığı belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen sertlik ve çekme test sonuçları dikkate alınarak soğuk tel çekme işlemi görmüş ve 180 °C sıcaklıkta yeniden kristalleşme tavlama ısıl işlemlerine tabi tutulmuş numunelerin boyuna kesitlerinde metalografik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalara ait örnek çalışmalar Şekil 4.4’ de verilmiştir. Bu tezin “Bölüm 2.3. Soğuk Deformasyon ve Tavlama” kısmında detaylı olarak verildiği üzere soğuk tel çekme işlemi ile soğuk deformasyona uğratılmış Cu-ETP’nin taneleri deformasyon yönünde şiddetli ve belirgin bir şekilde uzadığı görülmektedir.



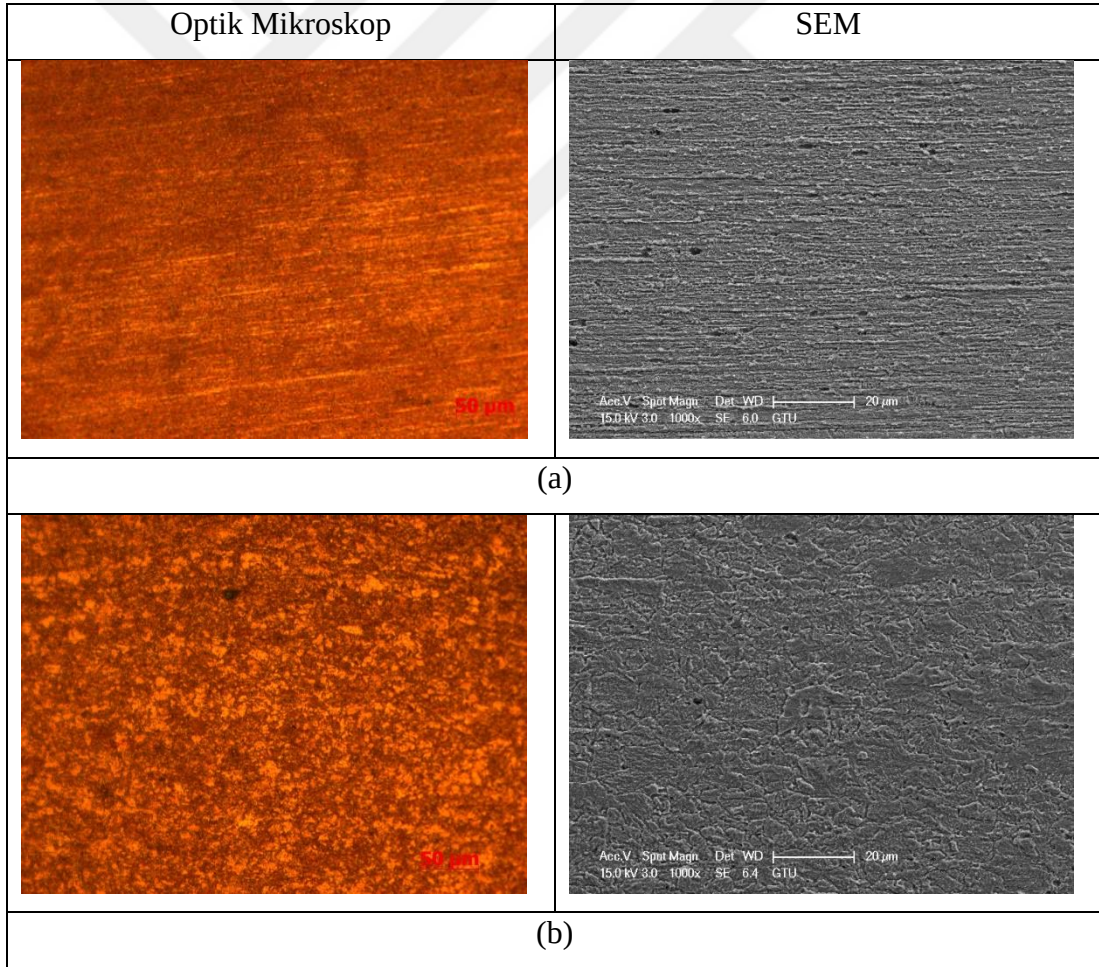
Şekil 4.2: %93,75 soğuk deformasyon oranına ve farklı sıcaklıklarda tavllanmış bakır telin boyuna kesitlerinde oluşan sertlik izlerine ait optik mikroskop görüntüleri.

180 °C’de yeniden kristalleşme tavlama işlemine tabi tutulan bakır telin optik mikroskop görüntüsünde ise uygulana soğuk deformasyon işleminin etkisinin

tamamen ortandan kalktığı ve yapının yeni tanelerden oluştuğu belirlenmiştir. Bu durumun daha önce yukarıda verilen sertlik ve çekme test sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 4.3: Yeniden kristalleşme işlem sıcaklıklarına bağlı olarak incelenen numunelere ait çekme mukavemet ve % kopma uzama değerlerinin değişimi.



Şekil 4.4: a). %93,75 soğuk deformasyon ve b). 180 °C sıcaklığında yeniden kristalleşme tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş bakır telin boyuna kesit optik mikroskop ve SEM mikroyapı görüntüleri.

Bu tez çalışmasında %93.75'lik soğuk deformasyona sahip ticari saflıktaki bakır tele uygulanan yeniden kristalleşme tavlama ısı işlemleri sonrasında gerçekleştirilen sertlik ölçümleri, çekme testleri ve mikroyapısal çalışmaların sonuçları ile soğuk deformasyona uğramış bir malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının belirlenmesinde de malzeme bilimi ve mühendisliği alanında genel bir yaklaşım olarak literatürde mevcut olan soğuk deformasyona tabi tutulmuş bir metalik esaslı malzemenin belirli bir sıcaklıkta yaklaşık bir saat tavlama işlemi sonrasında malzemenin soğuk deformasyona uğramadan önceki mekanik özelliklere (sertlik ve/veya çekme mukavemeti) ait değerlerine ulaşıldığı sıcaklık söz konusu malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı olarak kabul edilir kabulü birlikte değerlendirildiğinde bu çalışma kapsamında incelenen bakır telin yeniden kristalleşme sıcaklığı 180 °C olarak belirlenmiştir.

4.2. Soğuk Deformasyon ve Yeniden Kristalleşme Tavlamalarının Elektriksel Özellikler, Empedans, Next, Geri Dönüş Kaybı Üzerine Etkisi

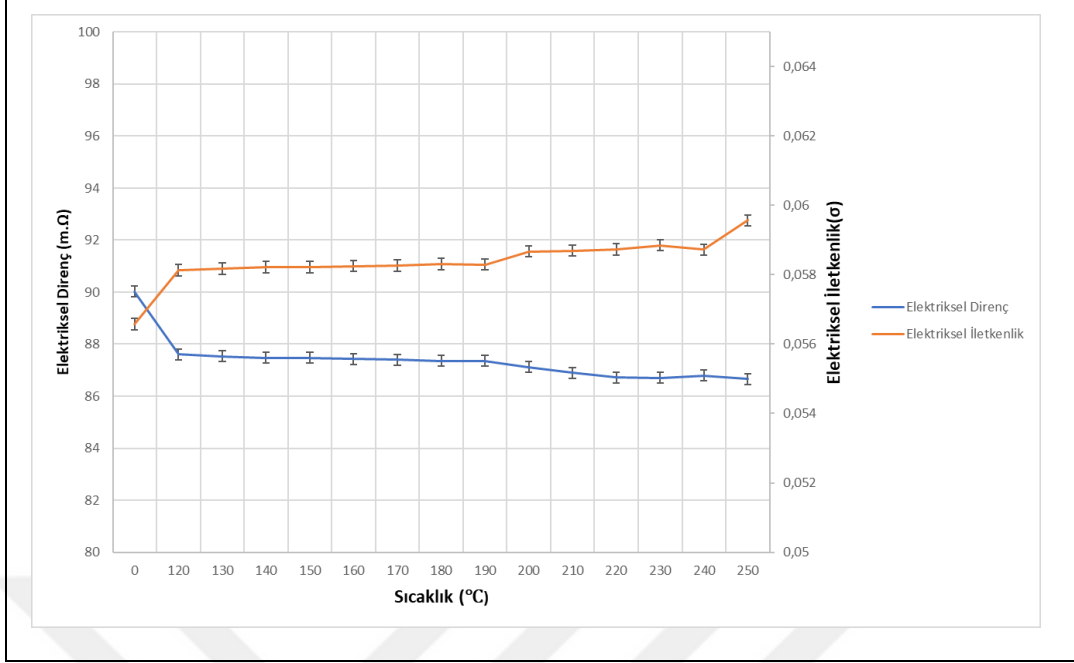
0,55 mm çapına ve %93,75'lik soğuk deformasyon oranına sahip Cu-ETP'ye 120 ile 250 °C arasında uygulanan yeniden kristalleşme tavlamalarının söz konusu malzemenin elektriksel iletkenlik ve direnç, empedans, Next ve geri dönüş kaybına etkileri ve ölçüm sonuçları aşağıda sırası ile verilmiştir.

4.2.1. Elektriksel Direnç ve İletkenlik Ölçüm Sonuçları

120 ile 250 °C arasındaki sıcaklıklarda uygulanan tavlama ısı işlemlerine tabi tutulmuş bakır telde gerçekleştirilen elektriksel direnç ölçüm sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir. Uygulanan soğuk tel çekme işlemi ile 0,55 mm çapa indirilen bakır telin elektriksel direnç değeri (90 Ω .m) dikkate alındığında genel olarak gerçekleştirilen tavlama ısı işleminin numunenin elektriksel direnç değerlerini, tavlama işlem sıcaklığına bağlı olarak, düşürürken elektriksel iletkenlik değerlerini de beklenen şekilde arttırmıştır. Şekil 4.5' den net olarak görüleceği gibi soğuk deformasyona tabi tutulan numunenin elektriksel iletkenlik ve direnç değerleri tavlama işlem sıcaklığına bağlı olarak kademeli bir artış sergilemektedir. 120°C yapılan tavlama işlemi

sonrasında soğuk deformasyona tabi tutulmuş Cu-ETP'nin elektriksel direnci yaklaşık 90 Ω .m değerlerinden 87-88 Ω .m değerine hızlı bir düşüş gösterirken 130 ile 180 °C arasında yapılan tavlama işlemleri sonrasında çok az bir düşüş göstererek yaklaşık olarak 87-86 Ω .m değerlerine ulaşmıştır. 180 °C den daha yüksek işlem sıcaklıklarında numunenin elektriksel direncinde çok dikkate değer bir dönüşümün olmadığı ve yaklaşık olarak 86 Ω .m civarında olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda tavlama işlem sıcaklıklarına bağlı olarak incelenen numunenin elektriksel iletkenlik değerleri de benzer bir davranış sergilediği belirlenmiştir.

İncelenen numunelerde, uygulanan tavlama işlem sıcaklıklarına bağlı olarak, ölçülen elektriksel iletkenlik ve direnç değerleri dikkate alındığında bu tez çalışmasının “2.3. Soğuk Deformasyon ve Tavlama” bölümünde detaylı olarak verildiği üzere soğuk deformasyona tabi tutulan metalik esaslı malzemelerin elektriksel direnç ve iletkenlik özellikleri üzerinde uygulanan tavlama ısıl işleminin safhalarından olan toparlanma (recovery) aşamasının oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmektedir. Bu safhada, soğuk deformasyon sonrası oluşan zıt işaretli dislokasyonların bir birini yok etmesi ve aynı işaretli dislokasyonların daha düşük enerjili bir düzene geçmesinin yanı sıra boşluk gibi yapısal hataların ve deformasyon sonucu oluşan gerilmenin azalması nedeni ile malzemenin elektriksel iletkenlik ve direnç gibi fiziksel özelliklerinde çok dikkate değer gelişmenin meydana geldiği belirtilmiştir. İlave olarak yeniden kristalleşme ve tane büyümesi kademelerinin ise toparlanma kademesi kadar söz konusu fiziksel özellikler üzerinde etkisi olmadığı rapor edilmiştir. Bu durum bu çalışmanın sonuçları ile oldukça uyumluluk göstermektedir. İncelenen bakır telde ölçülen en hızlı direnç düşü 120°C yapılan tavlama işlemi sonrasında elde edilmiş olup daha önce yukarıda verilen ve söz konusu malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı olan belirtilen 180 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda çok belirgin bir azalma görülmemiştir.



Şekil 4.5: 0,55 mm çapındaki Cu-ETP'ye uygulanan yeniden kristalleşme tavlamlarının elektriksel direnç ve iletkenlik üzerine etkisi

4.2.2. Empedans, NEXT, Geri Dönüş Kaybı (Return Loss) Ölçüm Sonuçları

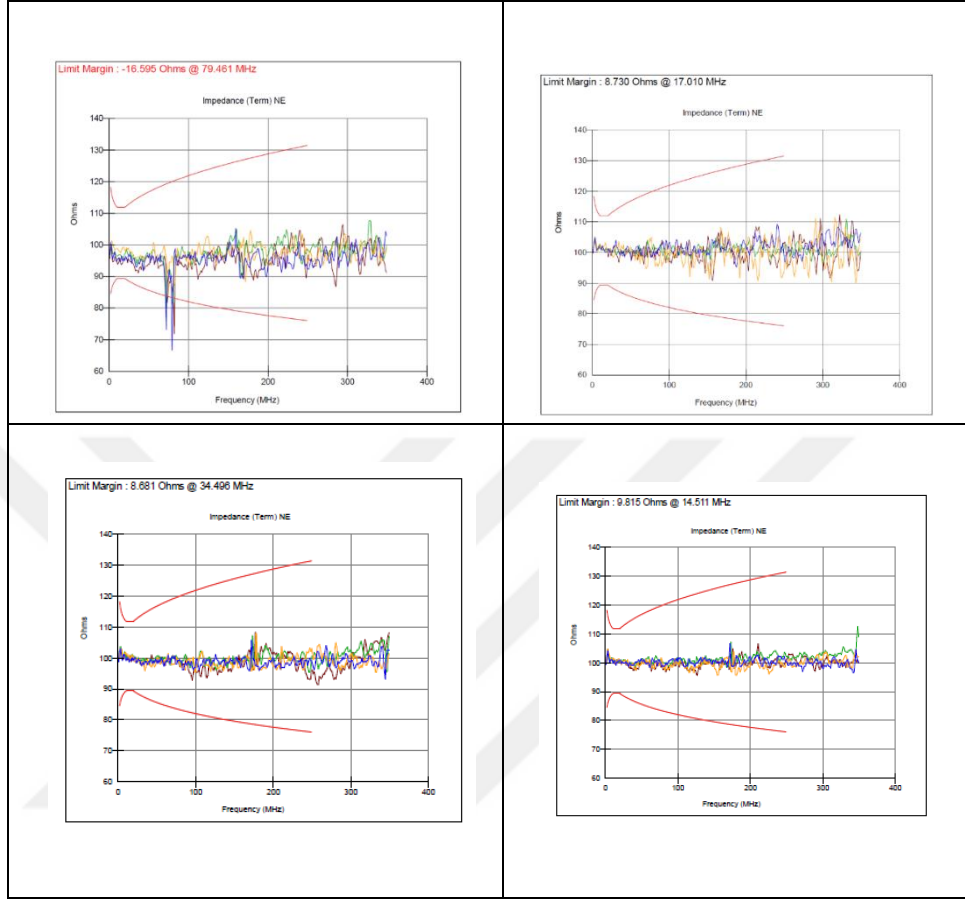
120 ile 250 °C arasında uygulanan yeniden kristalleşme tavlamları sonrasında incelenen numunenin mikroyapı, mekanik, elektriksel iletkenlik ve direnç ölçüm sonuçları dikkate alınarak 140°C, 160°C, 180°C ve 250°C sıcaklıklarda tavlama işlemine tabi tutulmuş bakır tellerden üretilen Cat 6 U/UTP kablolar üzerinde empedans, Next ve geri dönüş kaybı ölçümleri Network analiz cihazıyla gerçekleştirilmiş ve yapılan ölçüm sonuçları aşağıda karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Şekil 4.6.'da verilen empedans sonuçlarına göre 140 °C ile üretilmiş olan kablonun empedans sonucu verilen limit değerlerinin dışında olduğu görülmüştür. 160°C'de üretilen kablonun empedans sonucu limit değerler aralığına gelmiş olmakla birlikte perlerin frekans arttıkça üst üste binmeleri azalmakta, dalgalanmaları artmaktadır. Bununla birlikte empedans ölçüm sonucu uygun bulunmuştur. 180°C ve 250°C sıcaklıklarda tavllanmış bakır tellerden üretilen kabloların empedans sonuçları limit değerleri aralığında ve 100 ohm optimum değerinde frekans yükseldiğinde de üst üste binecek şekilde gelmiştir. Bu sonuçlar,

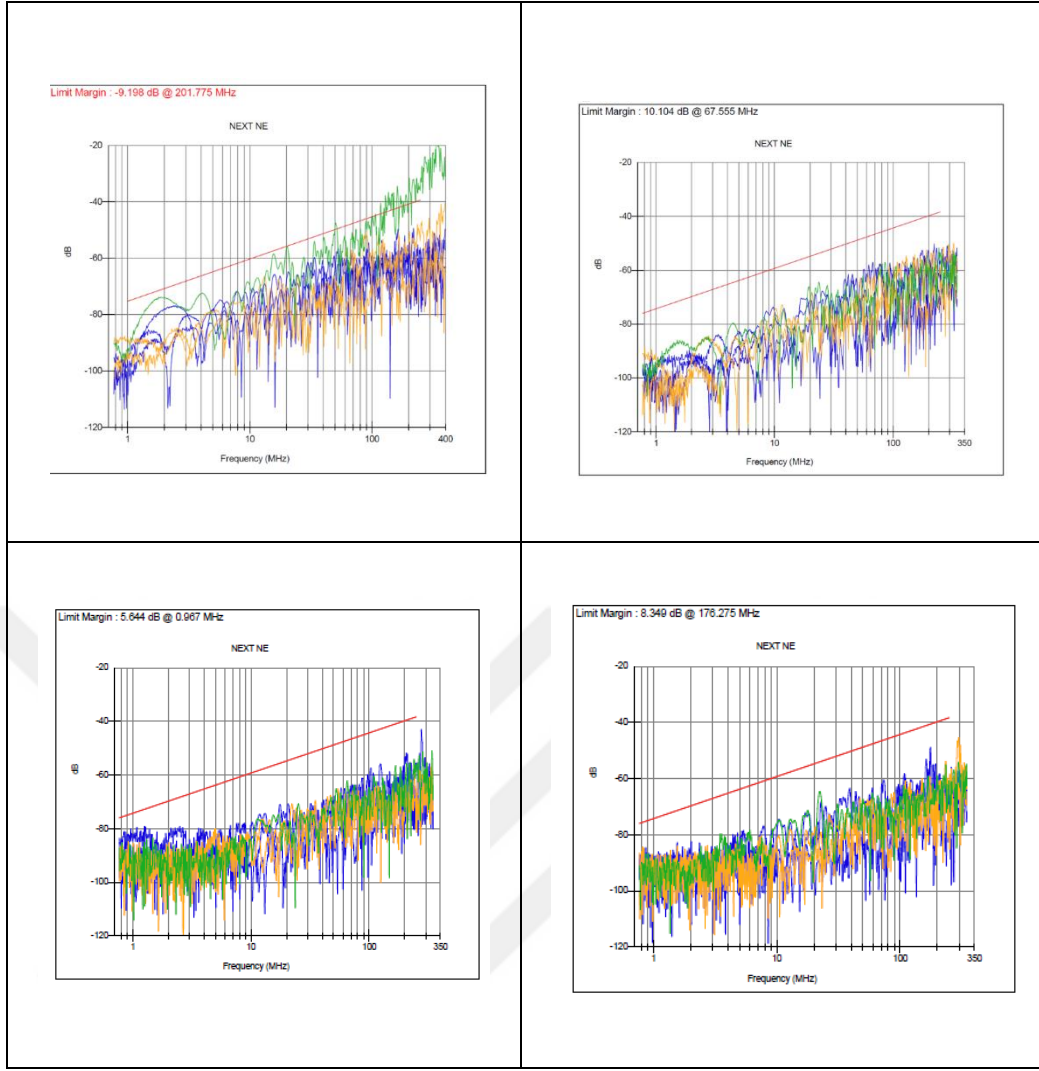
180°C ve daha yüksek sıcaklıklarda tavlama işlemi sonrasında üretilen kabloların empedans değerlerinin 180°C sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklarda tavlama işlemi (140°C ve 160°C) sonrası üretilen kabloların empedans değerlerinden daha uygun olduğunu göstermiştir.

Şekil 4.7.'de Next sonuçları verilmiştir. Next ölçüm sonuçları incelendiğinde 140°C tavlama sıcaklığında NEXT sonucu limit değerin üzerinde gelmiştir, 160°C, 180°C, 250 °C tavlamalara ait NEXT sonuçları limit değerin altında ve tüm per değerleri üst üste çakışmış şekildedir. Next değeri bölüm 3.4.'te açıklandığı gibi mekanik değerlerle doğrudan ilgilidir. 180°C altındaki tavlama sıcaklıkları sonrası elde edilen numunelerin çekme mukavemet değerlerinin, 180°C ve üzerindeki sıcaklıklarda tavllanmış numunelerin çekme mukavemet değerlerinden daha yüksek olması ile açıklanmıştır.

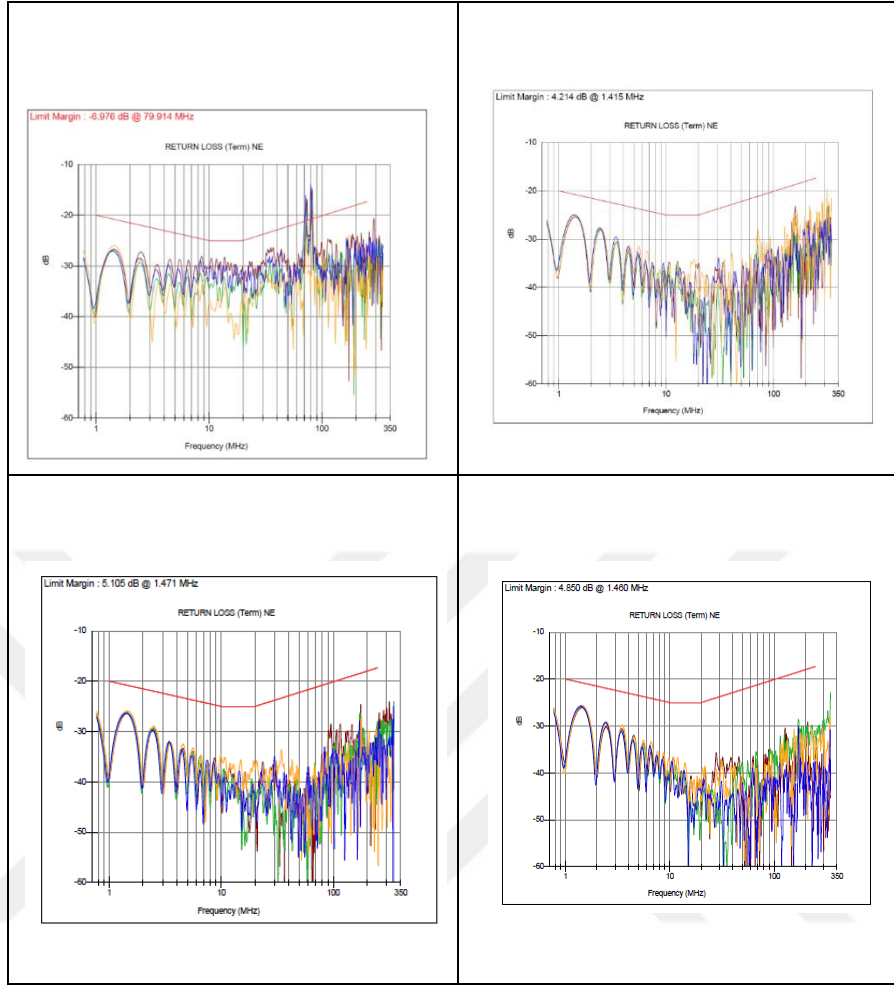
Şekil 4.8.'de verilen geri dönüş kaybı sonuçları da incelendiğinde empedans ve NEXT sonuçlarını destekler şekilde olduğu görülmektedir. 140°C'de yapılan tavlamaya ait geri dönüş kaybı sonucunun limit değerin üstüne çıktığı görülmüştür. Geri dönüş kaybı empedans ile doğrudan ilgilidir. Dolayısıyla elektriksel direnç değeri yükseldiğinde geri dönüş kaybı da empedans gibi azalmaktadır. Yapılan numune üretimlerindeki ölçüm sonuçlarında geri dönüş kaybı sonuçları karşılaştırıldığında 140°C'de tavlanan bakır telden üretilen kablonun geri dönüş kaybı sonucu limit değerin altında gelmiştir. 160°C, 180°C, 250°C lerde yapılan tavlamalardaki ölçüm sonuçları limit değer aralığında ölçülmüştür. Per sonuçlarında 180°C ve 250°C lerde üst üste çakışmalar daha fazladır. 250°C'ye ait sonuç incelendiğinde Bölüm 3.4'te de anlatıldığı gibi limit çizgisinin altında olan boşluk diğerlerinden daha büyüktür, buna göre 250°C'nin direnç değerinin 180°C, 160°C ve 140°C'tan daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, 4 farklı sıcaklıktaki tavlanan numunelerin empedans, NEXT ve geri dönüş kaybı sonuçlarına göre 180°C'nin altında üretilen kablolarda kullanılan bakır telin direnç ve mukavemet değerleri kablonun istenen elektriksel özelliklerini sağlamadığı görülmüştür.



Şekil 4.6: 140°C, 160°C, 180°C ve 250°C tavlama ile üretilen Cu-ETP tellerden-yapılan Cat 6 U/UTP kabloların Empedans Sonuçları.



Şekil 4.7: 140°C, 160°C, 180°C ve 250°C tavlama ile üretilen Cu-ETP tellerden yapılan Cat 6 U/UTP kabloların NEXT Sonuçları.



Şekil 4.8: 140°C, 160°C, 180°C ve 250°C tavlama ile üretilen Cu-ETP tellerden yapılan Cat 6 U/UTP kabloların Geri Dönüş Kaybı (Return Loss) Sonuçları.

5. GENEL SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, 8 mm çapında %99,90 saflıktaki elektrolitik bakır (electrolytic tough pitch copper, Cu-ETP) filmaşına soğuk tel çekme işlemi ile uygulanan %93,75 soğuk deformasyon oranının ve yeniden kristalleşme ısısal işleminin, Cu-ETP data kablolarının mikroyapı, mekanik özellikler, elektriksel iletkenlik, direnç, geri dönüşüm kaybı (return-loss) ve empedans özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve yapılan çalışmalar sonrasında elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

i- %93,75 oranında soğuk tel çekme işlemi ile deforme edilmiş bakır telin yeniden kristalleşme sıcaklığı, yapılan sertlik, çekme ve mikroyapı çalışmaları sonuçlarına göre 180°C olarak belirlenmiştir. Mikroyapısal çalışmalar 180°C’de yapılan tavlama ısısal işlemi ile soğuk deformasyon yapısının tamamen ortadan kalktığı ve mikroyapıda yeni tanelerin oluştuğunu göstermiştir.

ii- İncelenen bakır telin, tavlama işlem sıcaklığına bağlı olarak elektriksel direnç değerlerinin düştüğü ve elektriksel iletkenlik değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Dirençte en yüksek düşüş, 120 °C’de yapılan tavlama işlemi sonrasında ölçülürken (90 Ω .m değerlerinden 87-88 Ω .m değerine) söz konusu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen tavlama işlemleri sonrasında çok belirgin bir düşüş belirlenmemiş olup elektriksel ölçüm sonuçları da direnç ölçümlerinin aksine beklenildiği üzere artış yönünde benzer bir eğilim göstermiştir.

iii- 140°C, 160°C, 180°C ve 250°C sıcaklıklarda tavlama işlemine tabi tutulmuş bakır tellerden üretilen Cat 6 U/UTP kablolar üzerinde gerçekleştirilen empedans, Next ve geri dönüş kaybı ölçüm sonuçlarına göre 180°C’nin altında üretilen kablolarda kullanılan bakır telin direnç ve mukavemet değerleri kablonun istenen elektriksel özelliklerini sağlamadığını göstermiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Efe, G.F. (2010). Sic Takviyeli İletken Bakır Kompozitlerinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [2] Gökçe, H. (2020). Bakır malzemenin delinme performansının kesme kuvveti ve takım sıcaklığı açısından incelenmesi. *El-Cezeri*, 7(3), 1039-1053.
- [3] Nadaroğlu, H., Kalkan, E., & Demir, N. (2010). Removal of copper from aqueous solution using red mud. *Desalination*, 251(1-3), 90-95.
- [4] Varela, A. S., Kroschel, M., Reier, T., & Strasser, P. (2016). Controlling the selectivity of CO₂ electroreduction on copper: The effect of the electrolyte concentration and the importance of the local pH. *Catalysis Today*, 260, 8-13.
- [5] Zasadzińska, M., Knych, T., Smyrak, B., & Strzpek, P. (2020). Investigation of the dendritic structure influence on the electrical and mechanical properties diversification of the continuously casted copper strand. *Materials*, 13(23), 5513.
- [6] Aurubis (2023). Cu-ETP. Material Datashhet.
- [7] Gülfen, M., (2002). *Kalkopirit Cevherindeki Bakırın Sülfürik Asit Çözeltilisinde Çözünürlüğünün İncelenmesi*. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- [8] Koçak, H. (2006). Bakır Alaşımları El Kitabı. İstanbul: Yonca Ajans-Ofset Matbaacılık
- [9] Arıkan, M. M. (1991). Tel Çekme İşleminde Bakırın ve Bakır Oksit İnküzyonlarının Deformasyon Davranışı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] AY, İ., 2004, *İmalat Yöntemleri II*, Balıkesir Üniversitesi, <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/iy2/lecture10.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 1 Temmuz 2023].

- [11] Campbell F.C., (2008), Recovery, Recrystallization and Grain Growth, *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*, 1th Edition, ASM International, Ohio, 117-130
- [12] BOZKURT, N., 1994, *Isıl İşlem*, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Matbaası, İstanbul, 975, 404449
- [13] Mubarak, N. M., Anwar, M., Debnath, S., & Sudin, I. (2023). Heat Treatment. In *Fundamentals of Biomaterials: A Supplementary Textbook* (pp. 101-108). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [14] V. Singh, Physical Metallurgy, Standard Publishers Distributors, 1999
- [15] A.G. Guy, Elements of Physical Metallurgy, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Company, 1959
- [16] M.F. Ashby and D.R.H. Jones, Engineering Materials 2—An Introduction to Microstructures, Processing and Design, 2nd ed., Butterworth Heinemann, 1998
- [17] W.L. Mankins, Recovery, Recrystallization, and Grain-Growth Structures, Metallography and Microstructures, Vol 9, ASM Handbook, ASM International, 2004
- [18] Çelikyurek İ., Baksan B., Torun O., Tasdemir A., (2018), “Effect of Cold Work to Recrystallization Temperature and Grain Size of Cold Worked Pure Copper”
- [19] BENCHABANE, G., BOUMERZOUG, Z., THIBON, I., GLORİANT, T., 2008, Recrystallization of Pure Copper Investigated by Calorimetry and Microhardness, *Materials Characterization*, 59, 1425-1428.
- [20] Jakani S., Baudin T., Novion C.H., Mathon M.H., (2007), “Effect of Impurities On The Recrystallization Texture In Commercially Pure Copper-ETP Wires”

- [21] Banganayi C., Nyembwe K., Mageza K., (2020), “Annealer Curve Characteristics Of Electrolytically Refined Tough Pitch Copper (Cu-ETP) And Oxygen FreeUp-Cast (Cu-OF) For Electrical Cable Wires “
- [22] Sobolev, V. V., Guilemany, J. M., & Calero, J. A. (1999). Heat transfer during the formation of an HVOF sprayed WC–Co coating on a copper substrate. *Journal of Materials Processing Technology*, 96(1-3), 1-8.
- [23] Nazeer, F., Ma, Z., Gao, L., Wang, F., Khan, M. A., & Malik, A. (2019). Thermal and mechanical properties of copper-graphite and copper-reduced graphene oxide composites. *Composites Part B: Engineering*, 163, 77-85.
- [24] Yener, L. (2018). Çinko madenciliğimizi nasıl bir gelecek bekliyor. *Türkiye Madenciler Derneği Sektörden Haberler Bülteni*, 71, 42-73.
- [25] Suresh, S. S., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2017). Composition analysis and characterization of waste polyvinyl chloride (PVC) recovered from data cables. *Waste Management*, 60, 100-111.
- [26] Dang, C., Parpal, J. L., & Crine, J. P. (1996). Electrical aging of extruded dielectric cables: review of existing theories and data. *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, 3(2), 237-247.
- [27] Mirri, F., Orloff, N. D., Forster, A. M., Ashkar, R., Headrick, R. J., Bengio, E. A., & Pasquali, M. (2016). Lightweight, flexible, high-performance carbon nanotube cables made by scalable flow coating. *ACS applied materials & interfaces*, 8(7), 4903-4910.
- [28] Ye, H., Li, W., Li, Z., Li, X., Jin, Z., & Sheng, J. (2020). Effect of core materials on the electrical properties of superconducting conductor on round core cable. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4), 1-5.
- [29] Hu, H., Yan, J., Sævik, S., Ye, N., Lu, Q., & Bu, Y. (2022). Nonlinear bending behavior of a multilayer copper conductor in a dynamic power cable. *Ocean Engineering*, 250, 110831.

- [30] Gustavsen, B., Martinez, J. A., & Durbak, D. J. I. T. O. P. D. (2005). Parameter determination for modeling system transients-Part II: Insulated cables. *IEEE Transactions on power delivery*, 20(3), 2045-2050.
- [31] Wei, Y., Liu, M., Li, X., Li, G., Li, N., Hao, C., & Lei, Q. (2021). Effect of temperature on electric-thermal properties of semi-conductive shielding layer and insulation layer for high-voltage cable. *High Voltage*, 6(5), 805-812
- [32] Lv, Z., Bian, L., Feng, M., & Zhang, J. (2022). Capacity analysis of cable insulation crosslinking production process based on IoT big data. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2237, No. 1, p. 012028). IOP Publishing.
- [33] George, A. S., George, A. H., Baskar, T., & Pandey, D. (2022). The Transformation of the workspace using Multigigabit Ethernet. *Partners Universal International Research Journal*, 1(3), 34-43.
- [34] Öztürk, P., Alisoy, H., & Mutlu, R. (2020). CAT 6A U/FTP data kablosunun yüksek frekans parametrelerinin YSA ile tahmin modeli. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9 (IMSTEC Özel Sayı), 16-30.

ÖZGEÇMİŞ

Dilek Dağdelen 2014 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümünde başladığı lisans eğitimini 2019 yılında tamamladı. Ardından 2020 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Nexans Türkiye End. Tic. A.Ş. firmasında Ar-Ge Mühendisi olarak görevine devam etmektedir.



EKLER

Yayınlar

- Makale: Selim Hartomacıoğlu, Kamil Mutlu, Onur Mercan, Dilek Dağdelen, Görkem Uslu, Ömer Yiğitler, Çiğdem Uçar, (2021). Development and Evaluation of Fire Resistant Railway Signalling Cable
- Bildiri: Yerel Ağ Veri Aktarım Kablolarında Kullanılan Ticari Saflıktaki Bakıra Uygulanan Isıl İşlem Parametrelerinin Empedans ve Geri Dönüş Kaybı Üzerine Etkisinin İncelenmesi – 5. Uluslararası İstanbul Bilimsel Araştırmalar Kongresi
- Bildiri: Yerel Ağ Veri Aktarım Kablolarında Kullanılan Ticari Saflıktaki Bakıra Uygulanan Isıl İşlem Parametrelerinin Elektriksel ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisinin İncelenmesi -GTÜ 7. Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu