MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI KOŞULLARDA DÖVÜLMÜŞ KURŞUNSUZ PİRİNÇ MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

GÖKHAN ATAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2021

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI KOŞULLARDA DÖVÜLMÜŞ KURŞUNSUZ PİRİNÇ MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

GÖKHAN ATAY

(523218019)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2021

ÖNSÖZ

Öncelikle beni doğduğumdan bugüne hiçbir zaman yalnız bırakmayan ve her daim destekleriyle, ellerini sürekli omzumda hissettiğim, daima bana olan güvenleriyle bu uzun hayat yolculuğunda her zaman yanımda olan annem, babam ve ablalarıma sonsuz minnetlerimi sunuyorum.

Marmara Ünivesitesinde Lisans eğitimim sırasında tanıştığım ve hayatımın dönüm noktalarından sayabileceğim, pek çok projede çalışma fırsatı bulup, tecrübeleriyle hayatıma anlam katan, her zaman yol gösteren ve Yüksek Lisans eğitimimde de her türlü desteği ve imkanı sağlayarak yanımda olan Sayın **Prof. Dr. Yusuf KAYNAK** Hocama çok teşekkür ederim.

Ayrıca tezimin deneyleri ve analizlerinde hiç yorulmadan yanımda olan başta Ar-Ge merkezi çalışanları olmak üzere desteğini esirgemeyen tüm Torun Bakır çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma, Torun Bakır A.Ş firması tarafından yapılan proje başvurusu sonucunda TÜBİTAK TEYDEB Projesi kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK'a ve çalıştığım firma olan Torun Bakır'a desteğinden dolayı çok teşekkür ederim.

08.2021 **Gökhan ATAY**

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ……. ii
İÇİNDEKİLER ii
ÖZET…… iii
ABSTRACT v
SEMBOLLER vii
KISALTMALAR viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
1. GİRİŞ…… 1
1.1 Literatür Değerlendirmesi 8
2. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER 11
2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi 11
2.2 Dövme Proses Deney Düzeneği 12
2.3 Talaşlı İmalat Deney Düzeneği 13
2.4 Dövme Süreci ve Talaşlı İmalat Süreci Deney Tasarımı 14
2.5 Ölçümler ve Analiz 14
3. DÖVME PARAMETRELERİNİN MALZEMEDEKİ MİKROYAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ 20
3.1 Mikroyapı Sonuçları 22
3.2 Faz Analizi Sonuçları 28
3.3 Mikrosertlik Sonuçları 34
3.4 Çentik Darbe Testi Sonuçları 40
4. TALAŞLI İMALAT TEST VE ANALİZLERİ 48
4.1 Kesme Kuvvetleri Sonuçları 48
4.2 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları 52
4.3 Boyutsal Doğruluk Sonuçları 56
5. SONUÇLAR 62

ÖZET

FARKLI KOŞULLARDA DÖVÜLMÜŞ KURŞUNSUZ PİRİNÇ MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Sıhhi tesisatta kullanılan ürünlerin kurşunsuz pirinçten imal edilmesi zorunluluğu son yıllarda bu malzemeden imal edilen ürünlere olan talepte çok ciddi artışa sebep olmuştur. Kurşunlu pirinçlerle kıyaslandığında, uzun ve sürekli talaş, çapak, takımda yığma ağız, kabul edilemez yüzey kalitesi sorunu gibi sebeplerden dolayı talaşlı imalatı hayli zorlaşmaktadır. Bu tezde, kurşunsuz pirinç malzemelerin mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin kontrolü ile bahsi geçen talaşlı imalat sorunlarını minimize eden birim zamandaki üretim hacmini arttıracak talaşlı imalat sürecinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında, Kurşunsuz Pirinç Malzemelerin, sıcak dövme sürecindeki ; Dövülecek malzemenin bakır oranı, dövme öncesi numune sıcaklığı, dövme sonrası kriyojenik soğutma yöntemi, tavlama süresi girdi parametrelerinin malzemenin mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenerek iyi derecede talaş kırılabilirliğine sahip olan Kurşunlu Pirinç Malzemelerin işlenebilirlik performansına yakın ve yüksek performanslı talaşlı imalat süreci elde edilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Faz oranı, tane boyutu gibi mikroyapısal özellikler ve mikrosertlik, kırılma enerjisi gibi mekanik özelliklerin belirlenmesi için test ve analizler gerçekleştirilmiştir. Dövme işlemindeki parametrelerin belirlenmesi sonrasında talaşlı imalat testleri delik delme operasyonu olarak gerçekleştirileştirilmiştir. Talaşlı imalat testleri sonrasında kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir.

İlk bölümde kurşunsuz pirinç malzemelerin genel özellikleri ve talaşlı imalat için işlenebilirlik performansları ve ayrıca mikroyapısal ve mekanik özellikler ile ilgili kapsamlı bir literatür araştırması gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 2'de sırasıyla, deneylerde kullanılan iş malzemesi, teknik ekipmanlar ve özellikleri vb. gibi bilgiler, dövme ve talaşlı imalat sürecinde kullanılan parametrelerin bulunduğu deney tasarımları ve deney sonrası yapılan ölçüm ve analizlerde kullanılan ölçüm ekipmanlarının özellikleri, ölçüm metotları sunulmuştur.

Bölüm 3'de, girdi parametrelerine bağlı olarak değişen mikroyapısal ve mekanik özellikler değerlendirilmiştir.

Bölüm 4'de, talaşlı imalat testleri sonrası, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü, boyutsal doğruluk gibi kalite özellikleri değerlendirildi. Genel olarak, malzemedeki %Cu oranının dövme sürecindeki parametrelerin, kriyojenik soğutmanın ve tavlama parametrelerinin işlenebilirliği etkileme derecesiyle ilgili analiz sonuçları sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kurşunsuz Pirinç Malzeme, Mikroyapı ve Faz Oranı, Mekanik Özellikler, Sıcak Dövme Süreci, Talaşlı İmalat

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MACHİNABİLİTY OF LEAD FREE BRASS MATERİALS FORGED WİTH VARİOUS CONDITIONS

The necessity of manufacturing products used in sanitary systems from lead-free brass has led to a significant increase in the demand for products made of this material in recent years. Compared to leaded brasses, machining becomes very difficult due to reasons such as long and continuous chips, burrs, built up edge in the tool, and unacceptable surface quality problems. In this thesis, studies have been carried out to develop the machining process that will increase the production volume per unit time, which minimizes the mentioned machining problems by controlling the microstructural and mechanical properties of lead-free brass materials.

Within the scope of this thesis, in the hot forging process of Lead-Free Brass Materials; Studies on obtaining a high performance machining process close to the machinability performance of Lead Brass Materials with good chip breakability by examining the effect of input parameters of the copper ratio of the forged material,test sample temperature before forging, cryogenic cooling method after forging, annealing time on the microstructural and mechanical properties of the material. Tests and analyzes were carried out to determine microstructural properties such as phase ratio, grain size and mechanical properties such as microhardness and fracture energy. After the determination of the parameters in the forging process, the machining tests were carried out as a hole drilling operation. After the machining tests, cutting forces, surface roughness and dimensional accuracy analyzes were carried out.

In the first part, a comprehensive literature search was carried out on the general properties of lead-free brass materials and their machinability performance for machining, as well as microstructural and mechanical properties.

In Chapter 2, the work material, technical equipment and properties etc. used in the experiments are given respectively. information such as, the experimental designs with the parameters used in the forging and machining process, and the characteristics of the measurement equipment used in the measurements and analyzes after the test, measurement methods are presented.

In Chapter 3, the microstructural and mechanical properties that change depending on the input parameters are evaluated.

In Chapter 4, quality characteristics such as cutting force and surface roughness, dimensional accuracy were evaluated after machining tests. In general, analysis results related to the effect of %Cu ratio in the material on forging process parameters, cryogenic cooling and annealing parameters on machinability are presented.

Keywords: Lead Free Brass Material, Microstructure and Phase Ratio, Mechanical Properties, Hot Forging Process, Machining Process

SEMBOLLER

f : İlerleme değeri (mm/dak)

N : Devir (dev/dak)

Ra : Yüzey pürüzlülüğü

F_f :İlerleme kuvveti (N)

T :Sıcaklık (ºC)

Zn :Çinko

Cu :Bakır

Pb :Kurşun

As :Arsenik

AI :Alüminyum

Sn :Kalay

Ni :Nikel

Bi :Bizmut

Si :Silisyum

Sb :Antimon

HB :Brinell sertliği

HV :Vickers sertliği

H_2O_2 :Hidrojen Peroksit

$(NH_4)_2S_2O_8$: Amonyum Persülfat

H_2O : Su

KISALTMALAR

LN_2 : Sıvı azot (Liquid Nitrogen)

α : Alfa fazı

β : Beta fazı

β' : Beta üssü fazı (düzenli)

γ : Gama fazı

YMK : Yüzey merkezli kübik

HMK : Hacim merkezli kübik

HSP : Hegzagonal Sıkı Paket

sn : Saniye

dk-dak : Dakika

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Kurşun oranı düşük pirinç malzemeleri işlerken karşılaşılan problemler..... 1

Şekil 1.2. Sektördeki bazı pirinç alaşım ürünleri 3

Şekil 1.3. Cu-Zn Denge Diyagramı [14] 4

Şekil 1.4. Pirinç malzemelerin şekillendirilebilirliği üzerine bakır ve kurşun elementlerinin etkisi [10]..... 6

Şekil 2.1 CW511L ekstrüze çubuk malzemesi..... 11

Şekil 2.2 a)Dövülmüş çapaklı CW511L numunesi, b)Çapak kesme prosesi c) Dövülmüş CW511L numunesi..... 11

Şekil 2.3 Dövme presi ve deney düzeneği 12

Şekil 2.4 Soğutma kabini konveyöre konumlandırılması 13

Şekil 2.5 Dinamometre ve talaşlı imalat test alanı 13

Şekil 2.6 Deneylerde kullanılan kesici takım..... 14

Şekil 2.7 Dövme sürecinde ve sonrasında numune hazırlama ve incelemeler için kullanılan cihazların görselleri 16

Şekil 2.8 Mekanik test ölçüm ve analizlerinde kullanılan cihazların görselleri..... 17

Şekil 2.9 Talaşlı imalat deneyi ve sonrasında kalite ölçüm ve analizlerinde kullanılan cihazların görselleri 18

Şekil 3.1 Cu-Zn Denge Diyagramı-Soğutma Süreci 20

Şekil 3.2 %Cu oranlarına bağlı mikro yapıdaki değişim 22

Şekil 3.3 Farklı % Cu oranınlarındaki ekstrüze çubuk malzemenin 750°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikroyapıdaki değişimi..... 24

Şekil 3.4 Farklı % Cu oranınlarındaki ekstrüze çubuk malzemenin 780°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikroyapıdaki değişimi..... 25

Şekil 3.5 780°C dövme sıcaklığı sonrası 1 dk soğutulmuş numuneler için %Cu oranı ve tavlama sürelerindeki değişimin tane boyutları üzerine etkisi 26

Şekil 3.6 Farklı % Cu oranınlarındaki ekstrüze çubuk malzemenin 810°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikroyapıdaki değişimi..... 27

Şekil 3.7 %Cu oranlarına bağlı mikro yapıdaki β fazları değişimi 29

Şekil 3.8 %Cu oranlarına bağlı dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemenin mikroyapısındaki β fazları değişimi 29

Şekil 3.9 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 750°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikroyapıdaki % beta faz dağılımındaki değişim 30

Şekil 3.10 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 750°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı % beta faz dağılımındaki değişim 31

Şekil 3.11 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 780°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikroyapıdaki % beta faz dağılımındaki değişim 32

Şekil 3.12 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 780°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı % beta faz dağılımındaki değişim 32

Şekil 3.13 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 810°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikroyapıdaki % beta faz dağılımındaki değişim 33

Şekil 3.14 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 810°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı % beta faz dağılımındaki değişim 34

Şekil 3.15 %Cu oranlarına bağlı mikrosertlik değerlerinin dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemede değişimi 36

Şekil 3.16 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 750°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikrosertlik değerlerindeki değişim 37

Şekil 3.17 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 780°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikrosertlik değerlerindeki değişim 38

Şekil 3.18 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 810°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikrosertlik değerlerindeki değişim 39

Şekil 3.19 Cu oranındaki değişime bağlı dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemeden hazırlanmış çentik numunelerinin kırılma sonrası yüzeylerindeki değişim 40

Şekil 3.20 %Cu oranındaki değişime bağlı dövülmemiş ekstrüze çubuklardaki tokluk değerlerindeki değişim..... 41

Şekil 3.21 750-810°C dövme sıcaklıklarındaki mikroyapısal dağılım 42

Şekil 3.22 %61,7 Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemenin farklı dövme sıcaklıklarında şekillendirilmesi sonrası, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan numunelerde tavlama süresine bağlı tokluk değerlerindeki değişim..... 43

Şekil 3.23 %62,9 Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemenin farklı dövme sıcaklıklarında şekillendirilmesi sonrası, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan numunelerde tavlama süresine bağlı tokluk değerlerindeki değişim..... 44

Şekil 3.24 %63,4 Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemenin farklı dövme sıcaklıklarında şekillendirilmesi sonrası, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan numunelerde tavlama süresine bağlı tokluk değerlerindeki değişim..... 46

Şekil 4.1 750°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası oluşan kesme kuvvetlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)..... 50

Şekil 4.2 780°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası oluşan kesme kuvvetlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)..... 51

Şekil 4.3 810°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası oluşan kesme kuvvetlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)..... 52

Şekil 4.4 750°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası delik yüzeylerindeki pürüzlülük değerlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)..... 54

Şekil 4.5 780°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası delik yüzeylerindeki pürüzlülük değerlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)..... 55

Şekil 4.6 810°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası delik yüzeylerindeki pürüzlülük değerlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)..... 56

Şekil 4.7 750°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası delik çapı boyutsal doğruluk değerlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)..... 58

Şekil 4.8 780°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası delik çapı boyutsal doğruluk değerlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)..... 59

Şekil 4.9 810°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası delik çapı boyutsal doğruluk değerlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)..... 60

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Farklı %Cu oranlarına sahip CW511L malzemesinin yüzdesel kimyasal kompozisyonu [4] 12

Tablo 2.2 CW511L malzemesine ait özellikler [4, 25, 26] 12

Tablo 2.3 Dövme ve talaşlı imalat testleri için belirlenen dövme ve kesme parametreleri. 14

1. GİRİŞ

Pirinç, genel olarak %5 ile %40 konsantrasyonlarda çinko içeren bakır alaşımları olarak bilinir. Pirinç imal edilirken mukavemet, korozyon direnci, işlenebilirlik vb. özellikleri değiştirmek için farklı alaşım elementleri ilave edilebilir[1]. Bu bağlamda en önemli unsur, mükemmel talaş kırılması, düşük takım aşınması ve yüksek kesme parametreleri ile ilgili olan kurşundur. Ancak kurşun, insana ve doğaya karşı ciddi tehlike oluşturur ve vücut tarafından atılamayan 2. sınıf kanserojen grupta yer alır [2, 3]. Özellikle içme sularının temas ettiği pirinç alaşımlarından üretilen boru, bağlantı elemanları vb. komponentlerdeki alaşım içerisinde kurşun element oranı %0,20'den fazla olmaması gerekmektedir. CW511L malzeme standart alaşım oranları da bunu desteklemektedir [4]. Bu tez çalışmasında sıcak dövme ile şekillendirilip, talaşlı imalat deneylerinin üzerinde gerçekleştirildiği malzeme kurşunsuz pirinç malzemelerden CW511L'dir. Pirinç alaşımında, kesme esnasında yarı akışkan kurşun tabakasının sürtünmeyi azaltmasıyla yağlayıcı gibi hareket ederek ve küçük süreksiz talaşların oluşumunu teşvik ederek işlenebilirliği iyileştirmekte[5, 6], işleme sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve dolayısıyla da kesici takım ömrü iyileşmektedir. Kurşunun işlenebilirlik için bu derece önemli bir element olması, kurşunsuz pirinç alaşımlarında işlenebilirlik açısından çeşitli problemlerin oluşmasına ve bu malzemelerin işlenmesi sürecinde oluşan uzun talaşlar ve azalan takım ömrü ile verimliliğin düşmesine, süreçlerin aksamasına yol açmaktadır[6].



Şekil 1.1. Kurşun oranı düşük pirinç malzemeleri işlerken karşılaşılan problemler

Konvansiyonel kurşunlu pirinç çubuklar, üstün işlenebilirlikleri nedeniyle birçok imalat sektöründe (yani hidrolik bileşenlerin, bağlantı parçalarının, valflerin vb. imalatı) yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretilen komponentlerin gelişmiş işlenebilirlik için aday olan kurşunsuz pirinç alaşımlarına başarılı şekilde uyarlayabilmek için mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin anlaşılması kritik öneme sahiptir. Sonuç olarak, kurşunsuz pirinç

malzemelerin üretim sürecinde malzeme-mikroyapı ve faz oranı-mekanik özellikler talaşlı imalat ilişkilerinin kapsamlı ve sistematik olarak araştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Mevcut çalışmada da yeni nesil çevre dostu pirinç alaşımlarının dövülebilirlik ve işlenebilirlik kabiliyetlerinin iyileştirilmesi için çalışmaları içermektedir. Yapılacak çalışma bu alandaki endüstriyel uygulamalara da çok önemli katkı sağlayarak, faydalı bilginin oluşmasına yardımcı olacaktır. Bu tez kurşunsuz pirinç malzemenin işlenebilme performansını kurşunlu pirinç malzemenin işlenebilme performansı seviyelerine yakınlaştırmayı ve dolayısıyla işlenebilirliğini iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

Pirinç kullanım amacına göre farklı metalleri de barındıran ve temel hammaddesi bakır, çinko olan genellikle dövme-işlenebilirlik açısından mükemmel, korozyon direnci ısıl ve elektrik iletkenliği de iyi ve görsel görünümleri sebebiyle bu sektörün en önemli alaşım alaşım gruplarından biridir. Bu nedenle son derece geniş bir kullanım alanı mevcuttur[7, 8].

Pirinç malzeme uygun bir dövme sürecinden sonra herhangi bir ısıl işleme tabi tutulmadan mükemmel mekanik özellikler sergilemektedir [8].

Bakır ve alaşımlarının bileşenleri otomobil imalatında ve makine yapımı vb. pek çok uygulamalarda kullanılırken, iyi elektriksel iletkenlikleri sebebiyle motorlu taşıt ve makinelerdeki elektrik ve elektronik ünitelerin işlevselliği için vazgeçilmezdir. Diğer yandan burçlar, yataklar, kayar elemanlar ve makinelerde, tesislerde geniş bir kullanım alanına sahiptir[9]. Pirinç ayrıca, sıhhi tesisatta oldukça fazla kullanılan bir bakır alaşımıdır. Boru, profil, vana, pompa, su saatleri, kol saatindeki çok küçük parçalar gibi birçok nesne pirinç alaşımlarından üretilmektedir. Pirincin mukavemeti, sızdırmazlığı ve işlenebilirliği çok iyi olup fiyatı da gayet uygun sınırlar içindedir. Ana metal olarak bakır ve çinkodan meydana gelen pirinç alaşımlarının büyük bir çoğunluğu kurşunludur. Kurşunun doğada çok olması, düşük sıcaklıkta ergimesi ve kolay şekillendirilebilmesi gibi birçok nedenler kullanılmasını cazip kılmaktadır. Pirinç alaşımları yüksek ısı ve elektrik iletkenliğinin yanı sıra anti bakteriyel özelliğe sahiptir ve bu nedenle elektrik ve elektronik, otomotiv, sağlık sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



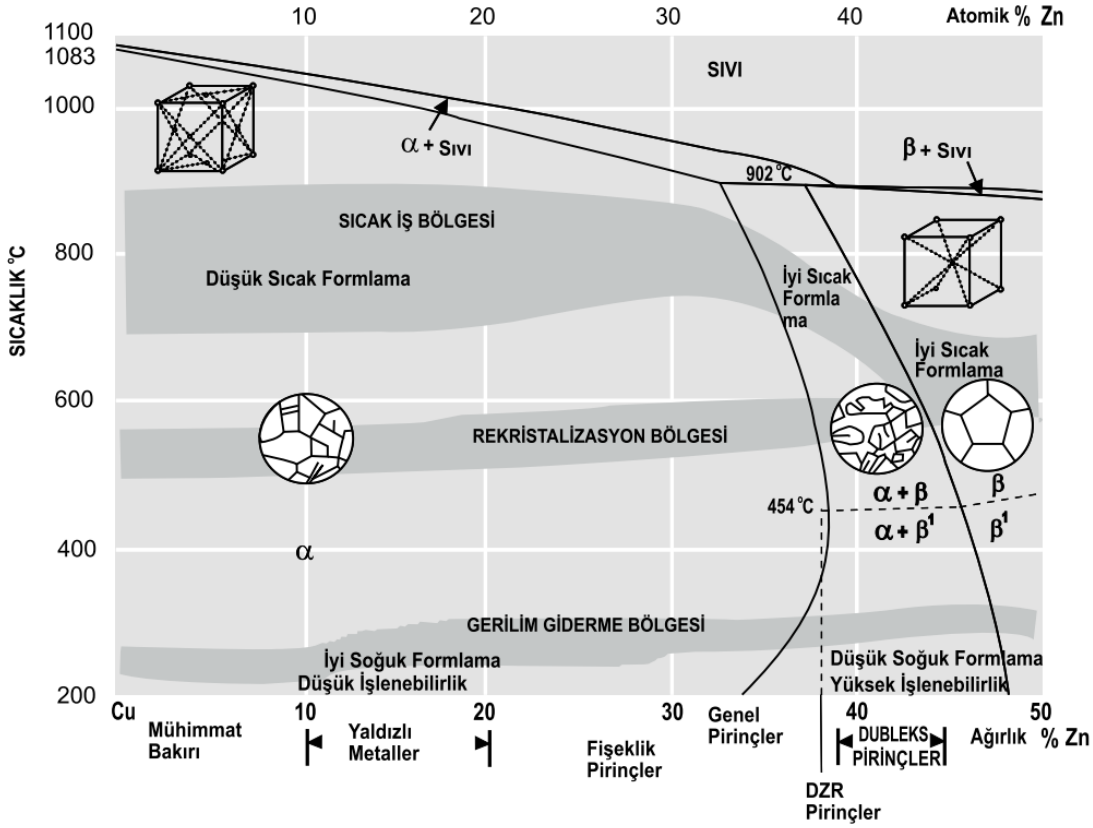
Şekil 1.2. Sektördeki bazı pirinç alaşım ürünleri

Pirinç malzemeler en basit anlamda yapılarına göre alfa ve alfa-beta pirinçleri olarak sınıflandırılabilir. Bakır elementine yaklaşık %35'e kadar çinko eklendiğinde, üniform bileşimde katı bir çözelti oluşturmak üzere çözünür. Çinko içeriğindeki artışla birlikte, orijinal katı çözelti (α fazı) ve daha yüksek çinko içeren çözelti (β fazı) içeren bir karışım üretilir. Alfa-beta veya dubleks olarak da adlandırılan %35-45 çinko içeren bu tip pirinçler bu iki fazın karışımlarından oluşmaktadır[10]. Alfa-beta pirinçlerde, çinko içeriğinin β-fazı içinde arttığı yüksek sıcaklıklarda iyi seviyede plastik şekillendirilebilirliğe sahiptir[11].

Alfa pirinçleri olarak adlandırılan alaşım çeşitleri ise, minimum %63 bakır elementi içermektedir[10]. Katılaşma esnasında pirinçteki yapıda α ile birlikte β' fazı da bulunabilmektedir. Bu durum alaşım bileşiminin α veya α+ β' sınırına yakınlığına ve soğuma hızına bağlı değişebilmektedir. Alfa piriçleri de sarı alfa pirinçleri ve kızıl pirinçler olarak sınıflandırılır ve daha çok soğuk işlem uygulamalarına yatkındırlar[12]

Beta fazı, oda sıcaklığında alfa'dan daha sert ve daha kırılgandır; bu nedenle α+ β alaşımların soğuk işlemesi alfa pirinçler'e göre daha zordur. Yüksek sıcaklıklarda, beta fazı daha plastik hale gelir ve bu alaşımların çoğu mükemmel sıcak çalışma özellikleri ile tek fazlı beta bölgesine ısıtılabilir. [13]

Sıcak dövme sırasında belirli bir miktar sünek beta fazı oluşturulamadığında, pirinç malzeme zayıf sıcak dövülebilirlik davranışı sergiler. Bu yüzden bakır oranı yüksek olan alfa pirinçler yüksek sıcaklığa direncinden dolayı sıcak dövmeye uygulanamaz, ayrıca böyle bir pirinç malzeme zayıf mekanik özellikler (örn. Çekme mukavemeti) gösterir. Bu problemle başa çıkmak için beta fazının, Cu içeriği yaklaşık % 61 olan bir pirinç malzemenin dövülmesi ve dövülmüş olan pirinç malzemenin bir ısıl işleme tabi tutulmasıyla ortadan kalkması sağlanabilir. [8] Buna karşın, dubleks pirinçler çinko içeriğinin β-fazı içinde arttığı yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi deforme olabilirliğe sahiptir[11].



Şekil 1.3. Cu-Zn Denge Diyagramı [14]

Bakır-çinko faz diyagramı pirinçlere uygulanmak için hayali olarak sadeleştirilmiştir. Sıvı bölgede bakır ve çinkonun tamamen çözünebilir olduğu görülebilir. Bakırın daha fazla katılaştığı kısımda birincil alfa fazı ve çinko tarafında ise birincil beta fazı vardır. Katı çizgisinin altında görülebilir üç bölge: alfa, alfa+beta, beta fazlarıdır. %50'den daha fazla çinko içeren alaşımlar göz önüne alınmaz çünkü bu tarz alaşımlar çok kırılgandır ve pratik uygulamalar için kullanışlı değildir.

Alfa fazı, bakır gibi yüzey merkezli kübik bir kafes yapısına sahiptir, maksimum içeriğe kadar çinko bazı bakır atomları ile yer değiştirir ve bunların özellikleri metalinkine benzerdir. Mühendislikte α katı çözeltisi olarak adlandırılmaktadır. α-pirinci kolay soğuk işlemeye tabi tutulabilir ve YMK (yüzey merkezli kübik) yapısına sahip olması nedeniyle talaşsız olarak imalatı gerçekleşmektedir.Bakır alaşımda, çinko oranın artması ile mukavemette artış sağlanır. α fazı süneklik ve mukavemet özelliklerini bir arada bulundurmaktadır [11].

Pirinç alaşımlarında yaklaşık %32-37 arası çinko içeren yapıda bir miktar β fazı mevcuttur ve bu faz da hacim merkezli kübik (HMK) kristal kafes yapısı gösterir[11]. β fazı mükemmel bir sıcak dövülebilme özelliğine sahiptir, β' fazı zayıf bir soğuk şekil değiştirebilirliğe sahiptir. β' fazı , bakır ve çinkonun kafesin köşelerinde ve merkezinde sırayla ve alternatif bir şekilde pozisyon aldığı, sıralanmış bir kafestir.

Maksimum %39'luk çinkonun bakır içerisindeki katı çözünürlüğünün 454 derecenin üstünde ve altında azaldığı gözlemlenebilir. Bu sıcaklığın üstünde düzensiz β fazı yukarıda, düzenli β' fazı aşağıda kalacak şekilde bir çizgi ile bölünür. Gerçekleşen bu dönüşüm sonucunda yüksek sıcaklıkta β fazında, hacim merkezli kübik (HMK) yapıda rastgele dağılan Zn ve Cu atomları düzene girmektedir.

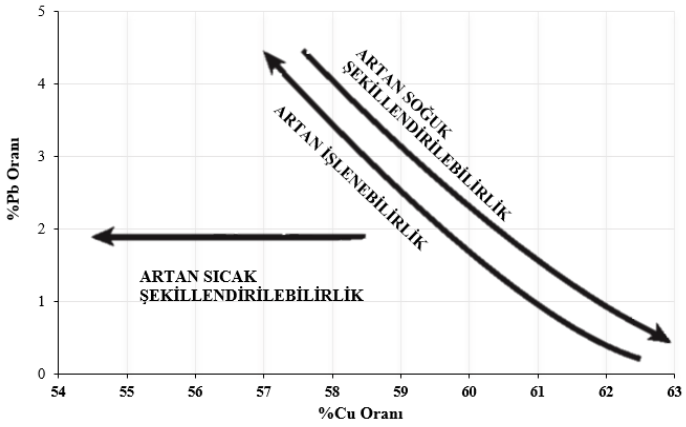
Bundan sonraki kısımlarda β' fazı, yerine daha basit şekilde ifade edebilmek adına β terimi kullanılacaktır. Pirinçte görülen diğer bir faz da gama (γ) fazıdır. Bu faz yapısında, alaşım % 45'ten fazla çinko içermektedir. γ pirinci bünyesinde sert Cu_2Zn_3 kristallerini barındırdığından ne sıcak ne de soğuk olarak işlenebilir. Endüstriyel kullanım alanı yoktur[12, 15].

Malzemedeki yapıyı ve özellikleri değiştiren parametrelerden biri tavlamadır. Genel olarak tavlama işlemi belli sıcaklıklarda malzemeyi yumuşatarak, süneklik ve tokluk gibi özelliklerini geliştirmek için yapılan işlem olarak tanımlanabilir. İşlem, ısıtma, bekleme ve soğutma olarak üç aşamadan meydana gelir. Soğutma genelde kendine halinde soğutma şeklinde gerçekleştirilmektedir. Isıl işlem ortamı, ısıtma hızı, bekleme sıcaklığı ve süresi alaşımlardaki pek çok farklı özelliğin oluşmasında önemli etmenlerdendir. [11] Fakat en önemlileri tavlama sıcaklığı ve süresidir.

İmalatta dövme pirinç malzemelerde yaygın olarak kullanılan ısıl işlem yöntemlerine gerilim giderme, yumuşatma tavlaması ve çözünürlük tavlaması örnek olarak verilebilir.

Gerilim giderme yaklaşık %20'den daha fazla çinko içeren pirinçler için önemli bir ısıl işlem türüdür. Bazı pirinçler ani sıcaklık değişimleri sonucu gerilme korozyon çatlamasından kolay etkilenir. Bu işlemle artık gerilmeleri dağıtılır ve çatlak oluşumuna duyarlılık azalır. Yumuşatma tavlaması, soğuk deforme edilmiş malzemenin yumuşaması ve daha fazla deforme edilebilir hale gelmesi için kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıklar seçildiğinde daha uzun işlem süreleri, yüksek sıcaklıkta ise daha kısa tavlama süreleri kullanılmaktadır. Çözünürlük tavlamasında ise dövme sonrası dövülmüş kısımlardaki artık beta fazını, alfa fazına dönüştürmek için kullanılır. Çünkü yapıdaki artık beta fazları suyla temasa açıksa korozyona uğrayabilir. Bu tip pirinçler için mikroyapısal olarak istenen faz dağılımının elde edilmesi açısından 450-550°C tavlama sıcaklıklarından ortalama yaklaşık 2 saat bekleme süresi uygulanmalıdır.

Şekil 1.4'de görüldüğü üzere kurşun ve bakır alaşım oranların malzemenin dövülebilirliği ve talaşlı işlenebilirliği üzerine etkisini gösteren grafik sunulmuştur. Yukarıda sunulmuş olan Cu-Zn denge diyagramındaki durumu destekler niteliktedir. Bu sebeple kullanılacak kurşunun tamamen pirinç alaşımlarından elimine edilmesi ve azaltılabilmesi için olabildiğince bakır oranı düşük malzemeler seçim kriteri olabilmektedir zaten bu aşamada pirinç malzemenin üretimi esnasında farklı özellikler elde etmek için kullanılan diğer alaşım elementleri devreye girmektedir ve bu alanla ilgili de literatürde çalışmalar mevcuttur.



Şekil 1.4. Pirinç malzemelerin şekillendirilebilirliği üzerine bakır ve kurşun elementlerinin etkisi [10]

Bilindiği üzere talaşlı imalat sürecinde birçok mühendislik malzemesinin özellikle kurşunsuz pirinç malzemelerinin de dahil olduğu işlenmesi zor malzemelerin talaşlı

işlenebilirliklerini iyileştirmeye yönelik çeşitlik çalışmalar mevcuttur. Özellikle ısıl işlem süreçleriyle malzemenin faz oranlarında değişim sağlanarak malzemenin işlenebilirlik performansıyla ilgili çalışmalar daha çok ön plandadır. Fakat bunlar daha çok ekstrüze çubuk malzeme üzerine uygulanmış çalışmalardır. Dövme ile şekillendirilmiş malzemeler ile ilgili kapsamlı ve sistematik çalışmalar mevcut değildir.

Literatürde konuyla ilgili çalışmalar incelendiğinde, Pantazopoulos ve arkadaşları, geleneksel kurşunlu pirinçlerden olan CuZn39Pb3 (CW614N) ve CuZn36Pb2As (CW602N) malzemelerinin mikroyapı analizi, mekanik davranışı ve kırılma mekanizmalarını incelemiştir. Bakır oranı yüksek olan CW602N malzemede diğerine kıyasla daha düşük β fazı içerdiği ve daha düşük sertlikte olduğu, tokluğunda faz yapısına bağlı düşüş gösterdiğini çalışmalarında ortaya koymuşlardır.β fazının varlığına bağlı olarak malzemede meydana gelen kırılma mekanizması ile ilgili ayrıntılı çalışmalar yapılmadığı literatürden görülmektedir[16] .

Nobel ve ark. kurşunsuz alaşımlardan CW510L, CW511L, CW724R, CW508L ve kurşunlu alaşımlardan ise CW614N işlenebilirliğini inceleyip kıyaslamıştır. Bu malzemelerin tornalama ile işlenmesi sonrasında, talaş kırılabilirliği, talaş formu ve takım ömrü açısından incelemeler gerçekleştirilmişlerdir. Bu çalışmada farklı kaplamalarda karbür kesici takım kullanılmış ve yapılan testler esnasında sıcaklık ve kuvvet sonuçları da kaydedilmiştir [6].

Toulfatzis ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ekstrüzyon ile üretilmiş silindirik kurşunsuz pirinç malzemelerin ısıl işlem sonrasında mikroyapıları ve beta faz oranları incelemiş ve bu çıktıların malzemenin işlenebilirliğine etkisini irdelemişlerdir[17]. Yine farklı bir çalışmada kurşunsuz pirinç alaşımlara ısıl işlem uygulanması ve bu ısıl işlem sonrasındaki beta fazındaki değişim ve bunun sonucunda yapılan talaşlı imalat testiyle de talaş kırılabilirliğini araştırmışlardır [18].

Pantazopoulos ve arkadaşları kurşunsuz pirinç alaşım (CW510L ve CW511L) malzemelere yapılan ısıl işlemin malzemenin çentik darbe testiyle yapılarak belirlenen kırılma enerjisine etkisi ve yorulma ömrüne etkisini araştırmışlardır[19].

Bununla birlikte kurşunsuz pirinç malzemelerden olan ve teze konu olan CW511L malzemelerin Arsenik, Bizmut vb. gibi alaşım elementi ilaveleriyle birlikte talaşlı imalat performansını artırmaya yönelik çalışmalar da mevcuttur.

Özetle bunlara ek olarak, talaşlı imalat ile ilgili yapılan çalışmalarda ekstrüze çubukların kullanıldığı ve farklı kesme hızları ve ilerlemelerde deneylerin gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir.

1.1 Literatür Değerlendirmesi

Literatürde malzemedeki bakır oranlarının değişiminin malzemenin dövülebilme ve yeniden kristalleşme sıcaklığını kayda değer ölçüde etkilediği görülmüştür. Aynı zamanda bakır oranındaki değişim malzemenin mikroyapısal dağılımını etkilemekte ve alfa ve beta faz dağılımını da etkilemektedir. Dolayısı ile bakır oranındaki değişimin malzemenin faz yapısını ve nihayetinde işlenebilme performansını etkileyeceği değerlendirilmektedir.

Tezdeki bir diğer kontrol edilebilir girdi parametresi ise malzemenin dövme sıcaklığıdır. Dövmede malzemenin sıcaklığı pirinç malzemenin deformasyon kabiliyetini etkilemekle birlikte, deformasyonla şekillendirme sürecinde malzemenin pekleşme davranışını da etkileyeceği bilinmektedir. Pekleşme davranışı ise malzemenin talaşlı imalat sürecini etkilemektedir. Dövme sonrası malzemenin oda sıcaklığına ulaşması için geçen süre, diğer bir ifade ile soğuma hızı da malzemenin mikroyapısının ve faz oranının şekillenmesinde önemli değişken olduğu değerlendirilmektedir. Böylece malzemenin soğuma sürecinin malzemenin mikroyapısı ve mekanik özelliklerine etkisi ortaya konulmuş olacaktır. Ayrıca kazanılan mikroyapısal özelliklere bağlı olarak tavlama sürecinin tamamen elimine edilme ihtimali de mevcuttur ki bu durumda ilave bir operasyon devre dışı yapılarak imalat sürecini kısaltmaktadır.

Tavlama operasyonu ve özellikle de tavlama süresi malzemenin korozyon dayanımını hem de son mikroyapısal özelliklerini dolayısı ile de mekanik özelliklerini ve en nihayetinde talaşlı işlenebilirliğini etkileyebilecek önemli kontrol edilebilir değişkendir.

Elektrik ekipmanları, hassasiyet gerektiren işlerin yapıldığı teçhizat parçalarının ve sıhhi tesisat olmak üzere soğutma ve ısıtma gibi birçok sistemde kullanılan ürünlerin imalatında yaygınca kullanılan pirinç malzemelerin talaşlı imalatı ile ilgili çalışmaların özeti yukarıda sunulmuştur. Özellikle kurşunsuz pirinç malzemelerin işlenebilme performansının iyileştirilmesine yönelik kapsamlı ve sistematik çalışmaların yapılması

elzemdir. İlk defa bu çalışmada kurşunsuz pirinç malzemelerin maksimum işlenebilirlik performansı için dövme sürecindeki parametrelerin etkisi kapsamlı olarak incelenmiştir.

Pirinç alaşım malzemelerinin sıcak dövme operasyonu ile şekillendirilmesi sonrasında malzemede istenen mikroyapısal ve mekanik özelliklere göre kendi halinde soğumaya veya fanlı konveyör sistemlerinde soğutmaya maruz bırakılmaktadır. Literatür incelendiğinde kriyojenik soğutma yönteminin çeşitli malzemelerin talaşlı imalatında farklı operasyonlarda kullanıldığı [20-22], işlenebilirlik performansını artırdığı [23] ve bununla birlikte insan sağlığı ve çevre açısından zararlarının olmadığına yönelik pek çok sayıda çalışma mevcuttur. [24] Bununla birlikte, herhangi bir malzemenin dövme sonrası kriyojenik soğutma ile hızlı soğutulup malzemedeki mikroyapısal ve mekanik özelliklerini geliştirip, oluşan yapının talaşlı işlenebilirliğine etkisi üzerine literatürde herhangi bir çalışma mevcut değildir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER

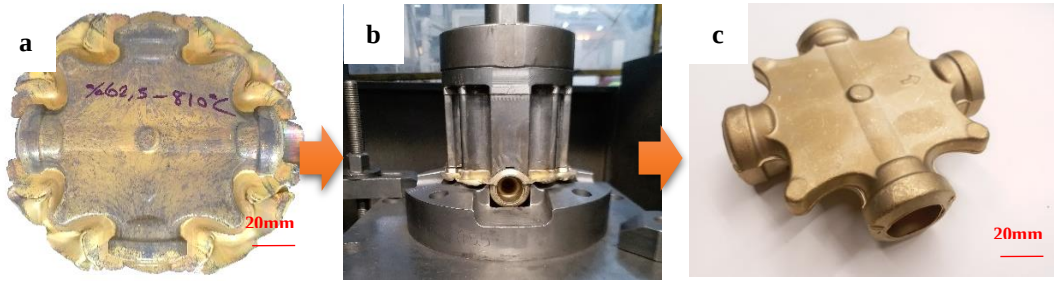
2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi

Şekil 2.1'de görseli sunulmuş olan Ø50 boyutlarında, üç farklı %Cu oranında ekstrüze çubuk malzeme Türk menşeili SARBAK firmasından tedarik edilmiştir. Dövme deneyleri öncesinde çubuk malzemeler her bir dövme numunesi için Ø50 x 66 mm boylarında testerede kesilmiştir. Bu bölümde genel olarak, farklı spektlerde üretilmiş olan dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemelerin kompozisyonu ve bazı özelliklerine yer verilmiştir.



Şekil 2.1 CW511L ekstrüze çubuk malzemesi

Dövme deneyleri sonrasında şekillendirilmiş olan numunenin görüntüsü aşağıda sunulmuştur. Talaşlı imalat testleri için dövme süreci ile şekillendirilmiş olan bu numuneler Şekil 2.2 (b) görselindeki çapak kesme prosesinden sonra (c) görselindeki son şeklini almıştır ve talaşlı imalat deneylerinde bu numune kullanılmıştır.



Şekil 2.2 a)Dövülmüş çapaklı CW511L numunesi, b)Çapak kesme prosesi c) Dövülmüş CW511L numunesi

Üç farklı %Cu oranında üretilmiş olan CW511L alaşım malzemesinin kimyasal kompozisyonu yapılmış olan spektral analiz sonucu Tablo 2.1'de, CW511L malzemesine ait özellikler ise Tablo 2.2'de sunulmuştur.

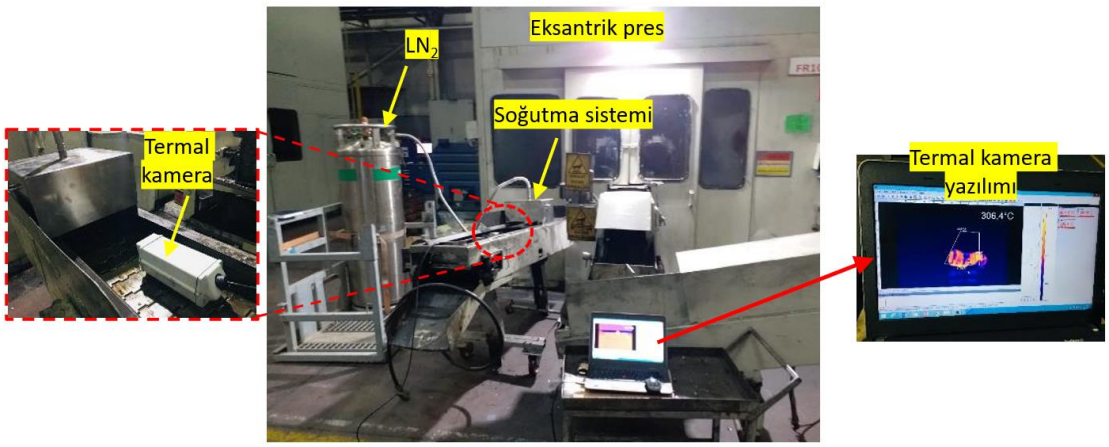
Tablo 2.1. Farklı %Cu oranlarına sahip CW511L malzemesinin yüzdesel kimyasal kompozisyonu [4]

Malzeme	Cu	Zn	Pb	As	Al	Sn	Ni	Bi	Si	Sb
%61,7 Cu	61,7	Kalan	0,181	0,106	0,003	0,004	0,0002	0,003	0,011	0,004
%62,9 Cu	62,9	Kalan	0,174	0,117	0,003	0,009	0,001	0,003	0,002	0,003
%63,4 Cu	63,4	Kalan	0,164	0,106	0,003	0,005	0,002	0,003	0,006	0,002
EN12165	61,5	Kalan	-	0,02	-	-	-	-	-	-
Standart	63,5	-	0,2	0,15	0,05	0,1	0,3			

Tablo 2.2 CW511L malzemesine ait özellikler [4, 25, 26]

İş Parçası	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (kN/mm^2)	Sertlik (HB)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Termal İletkenlik (W/m°K)
CW511L	313	100	70-110	850-900	114

2.2 Dövme Proses Deney Düzeneği



Şekil 2.3 Dövme presi ve deney düzeneği

Dövme deneyleri Hydromec-550 ton otomatik preste gerçekleştirilmiştir. Dövme sonrasında kriyojenik soğutma sırasında soğutucunun (sıvı azot) parçaya homojen bir şekilde uygulanabilmesi için ısı iletim katsayısı düşük ve kriyojenik sıcaklıklara dayanıklı olan 304L paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Sıvı azot tankından tasarımlanan metal saca soğutucu transferi paslanmaz çelikten üretilen esnek hortum yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sac malzemeden üretilen soğutma kabini konveyör üzerine

konumlandırılarak testlerin gerçekleştirilmesi için hazır hale getirilmiş ve dövme testlerinde kullanılmıştır. Şekil 2.4'de kabinin konveyör üzerine konumlandırılmış hali görülmektedir. Dövme ile şekillendirilen parçalar konveyörden hareket ederek soğutma kabininde soğutulmuştur. Dövme testlerinde kullanılan kriyojenik soğutma ekipmanları konveyör ile entegre edilmiştir. Kullanılan sıvı azot (LN_2 – Liquid Nitrogen) tankı Şekil 2.3'de gösterilmiştir ve 15 bar çalışma basıncına sahiptir.



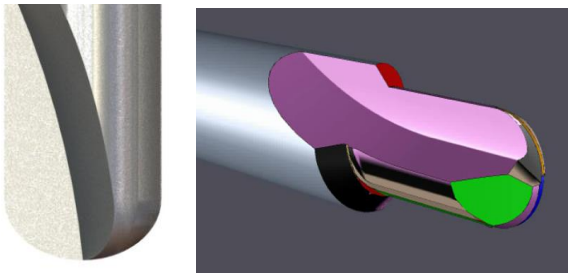
Şekil 2.4 Soğutma kabini konveyöre konumlandırılması

2.3 Talaşlı İmalat Deney Düzeneği



Şekil 2.5 Dinamometre ve talaşlı imalat test alanı

Talaşlı imalat deneyleri Fanuc-Robodrill a-D21MiB5 model tezgahta gerçekleştirilmiştir. Deneylerde iş parçası işleme esnasında bor yağıyla soğutulmuştur.Deneysel çalışma kapsamında Ø12 küresel başlı karbür kesici takım özel olarak üretilmiş ve deneylerde kullanılmıştır. Şekil 2.6'da ilgili görsel sunulmuştur.



Şekil 2.6 Deneylerde kullanılan kesici takım

2.4 Dövme Süreci ve Talaşlı İmalat Süreci Deney Tasarımı

Dövme süreci testleri üç farklı %Cu oranına sahip malzeme üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dövme sürecinde 750, 780 ve 810 °C dövme sıcaklıkları seçilmiştir. Dövülmüş olan deney numuneleri hızlı bir şekilde, 1 dk kriyojenik soğumaya maruz bırakılmıştır. Tavlama fırınlarında tavlama süreci için 480°C tavlama sıcaklığında 60,120 ve 180 dakika tavlama süreleri seçilmiştir. Talaşlı imalat deneyleri için ise, işleme parametreleri olarak 3000 devir ve 300 mm/dak ilerleme değeri kullanılmıştır. Testler için belirlenen koşul ve parametreler Tablo 2.3'te sunulmuştur.

Tablo 2.3 Dövme ve talaşlı imalat testleri için belirlenen dövme ve kesme parametreleri

Bakır Oranı (%)	Dövme Sıcaklığı (°C)	Tavlama Süresi (dk)	Soğuma Süresi (dk)	Devir (dev/dk)	İlerleme (mm/dk)
61,7	750	60			
62,9	780	120	1 (LN_2)	3000	300
63,4	810	180			

2.5 Ölçümler ve Analiz

Şekil 2.7, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da sırasıyla dövme deneyleri, mikroyapısal incelemeler ve analizler, mekanik testler ve analizler ve son olarak da işleme ve sonrasında gerçekleştirilen kalite ölçümlerinde kullanılan ekipmanların, ölçüm ve analiz cihazlarının görselleri sunulmuş ve aşağıda sırasıyla resim numarasına göre cihazlar ve özellikleri açıklanmıştır;

1. Dövme testleri esnasında sıcaklık ölçümleri ±2°C veya %±2 hassasiyetinde ve 382x288 piksel çözünürlükte Optris PI 400 infrared kamera ile yapılmıştır. Kamera ile -20-100, 0-250, 150-900 ve 200-1500 °C temel aralıklarında sıcaklık

ölçümleri yapılabilmektedir. Infrared kamera fotoğrafı, kameranın pozisyonlanması ve yazılımdan elde edilen görüntüler aşağıda Şekil 2.7'de 1 nolu görselde sunulmuştur.

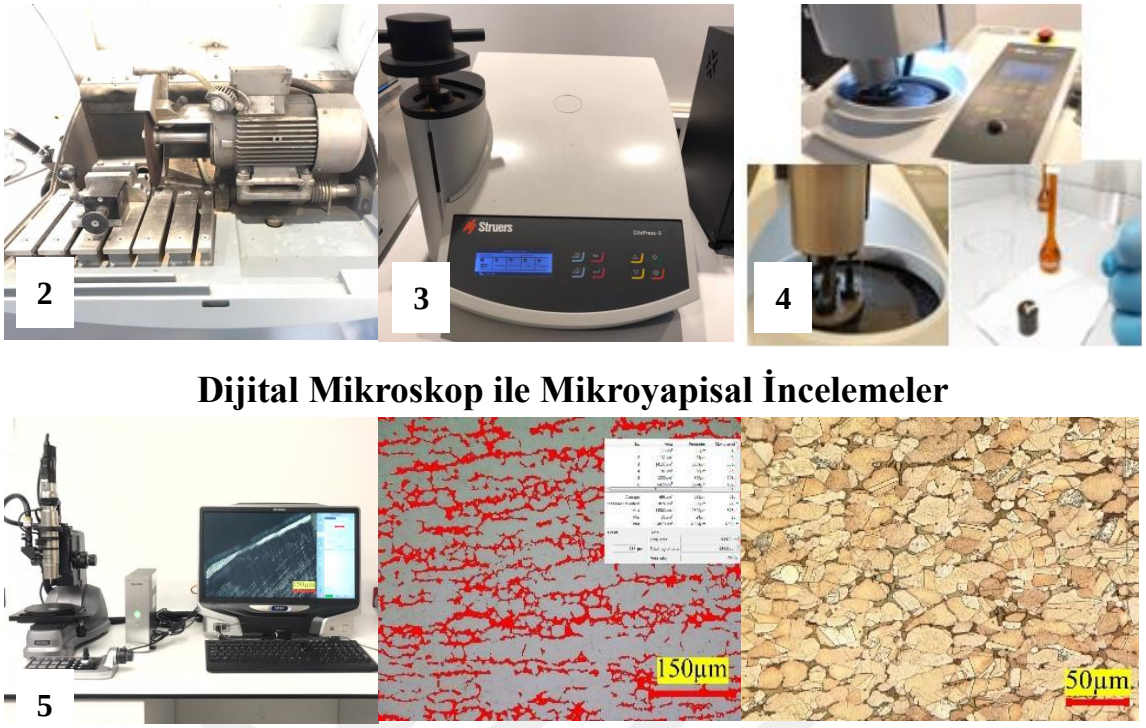
2. Dövme deneyleri öncesi ve sonrası mikroyapısal incelemelerin yapılması gereken tüm deney numuneleri analizler için Struers Labotom-5 marka numune kesme cihazı yardımıyla kesilmiştir.

3. Tavlanmamış, 60 dk tavlanmış,120 dk tavlanmış ve 180 dk tavlanmış olarak ayrı ayrı kesilmesinin akabinde deney parçasından alınmış olan numuneler sırasıyla Struers CitoPress-5 sıcak bakalite alma cihazında bakalite alınmıştır.

4. Bakalite alma işlemi sonrasında Struers Tegramin-20 marka zımparalama ve parlatma cihazında parlatılmıştır. Pirinç dağlama solüsyonu olarak 30 mL H_2O, 3.5 mL H_2O_2 ve 4.25g $(NH_4)_2S_2O_8$ 'dan oluşan karışım kullanılmıştır. Faz analizleri için ilk aşamada yaklaşık 10 sn lik dağlama süresi kullanılmıştır. Mikroyapı ve tane boyutu analizleri için ise beta faz analizlerinin ardından yeniden parlatma işlemi gerçekleştirilip mikroyapıdaki tüm fazların dağılımını görmek için yaklaşık 35 sn dağlama süresinde tüm numuneler dağlanmıştır.

5. Mikroyapı görüntüleri, faz analizleri, ve tane boyutu analizleri gibi görüntüleme işlemlerinde, KEYENCE VHX-6000 digital optik mikroskop, VH-Z100R RZx100x1000 KEYENCE lens, VH-Z500R RZx500x5000 ve "KEYENCE software" yazılımı kullanılmıştır.

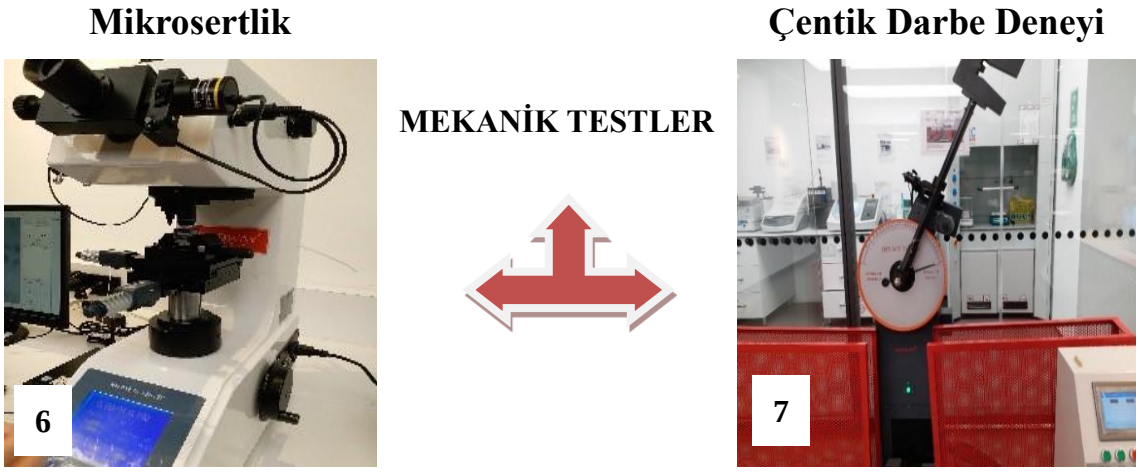




Şekil 2.7 Dövme sürecinde ve sonrasında numune hazırlama ve incelemeler için kullanılan cihazların görselleri

6. Zımparalama ve parlatma işlemleri tamamlanmış metalografik numunelerin sertlik değerlerinin ölçülmesi için HARDWAY MHVD 1000IS model mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Mikrosertlik testleri ISO 6507-1 standartlarına uygun şekilde uygulanmış ve analiz edilmiştir. Vickers yöntemiyle yapılan ölçümlerde HV/ 100 g/f yük , 10 saniye uygulama süresi tercih edilmiştir.

7. Çentik darbe deneyleri, HARDWAY JBS 300B model çentik darbe cihazında 150 J kapasiteli sarkaç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test için dövülmüş parçalardan Fanuc dik işleme merkezinde özel olarak tasarlanan aparata bağlanarak TS EN ISO 148.1 standardına uygun olarak numuneler (7.5x10x55 mm) elde edilmiş ve akabinde yine aynı standarda uygun olarak çentik açabilmek için özel takım tasarlanıp üretilmiş ve çentikler açılmıştır. Deneyler sonucunda çentik ucunda meydana gelen gerilme etkisi ile numunenin kırılması için harcanan enerji belirlenmektedir.



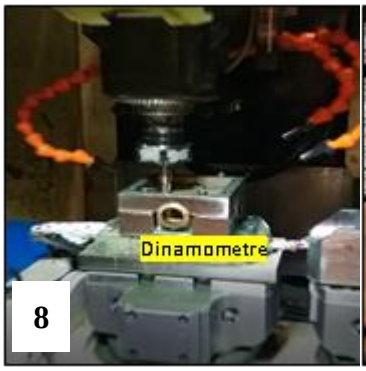
Şekil 2.8 Mekanik test ölçüm ve analizlerinde kullanılan cihazların görselleri

8. Delik delme işlemleri sırasında maksimum 10 kN'a kadar kesme kuvvetleri ölçümü yapabilen , 0-70 °C sıcaklık aralığında ve su altında çalışabilen Kistler 9129AA tipi çok bileşenli dinamometre kullanılarak ölçülmüştür. Kuvvet sonuçları, LabAmp sistemi Tip 5167A amplifikatör kullanılarak bilgisayar aktarılmıştır. Dinamometre Dynoware yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Bilindiği gibi, delik delme işlemlerinde F_f kuvveti ilerleme kuvvetini ifade etmekte ve deneylerdeki ana kuvvet olarak ölçülmüştür.

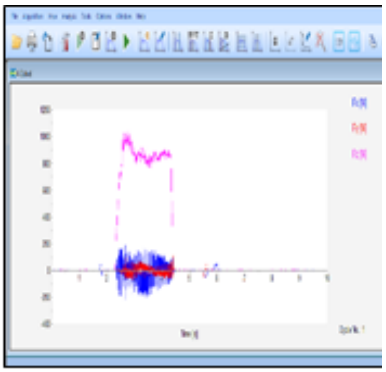
9. Çapsal sapmaların ölçümünde kullanılan CMM cihazı ve ölçüm düzeneği şekildeki 9 numaralı görselde sunulmuştur. Her bir deney parametresinin delik delme sonrası, çaplarının ölçümleri 4 noktadan Wenzel LH 87 model koordinat ölçüm cihazında (CMM) gerçekleştirilmiştir.

10. Deneysel çalışmalar kapsamında, delik delme operasyonu ile deneyleri gerçekleştirilen parçaların iç çap yüzey pürüzlülükleri ölçülerek kıyaslanmıştır. Ölçümlerde parçaların aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü, Ra, dikkate alınmıştır. Şekil'de gösterilen Mitutoyo Surftest SJ-500 yüzey pürüzlülüğü cihazı ve ölçüm standı kullanılmıştır. Bir numunenin artimetik ortalama yüzey pürüzlülüğü değerini belirlemek için dörtten az olmamak üzere ölçüm yapılmıştır. Sonrasında ise bu ölçümlerin ortalaması alınarak ortalama Ra değeri belirlenmiştir.

Dinamometre

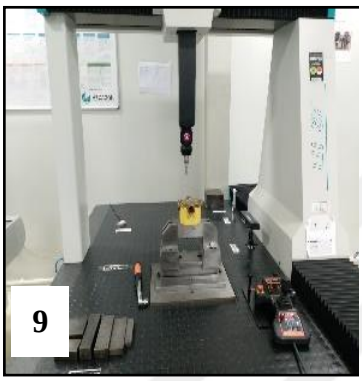






3 Boyutlu Koordinat Ölçüm Cihazı

Yüzey Pürüzlülük Cihazı



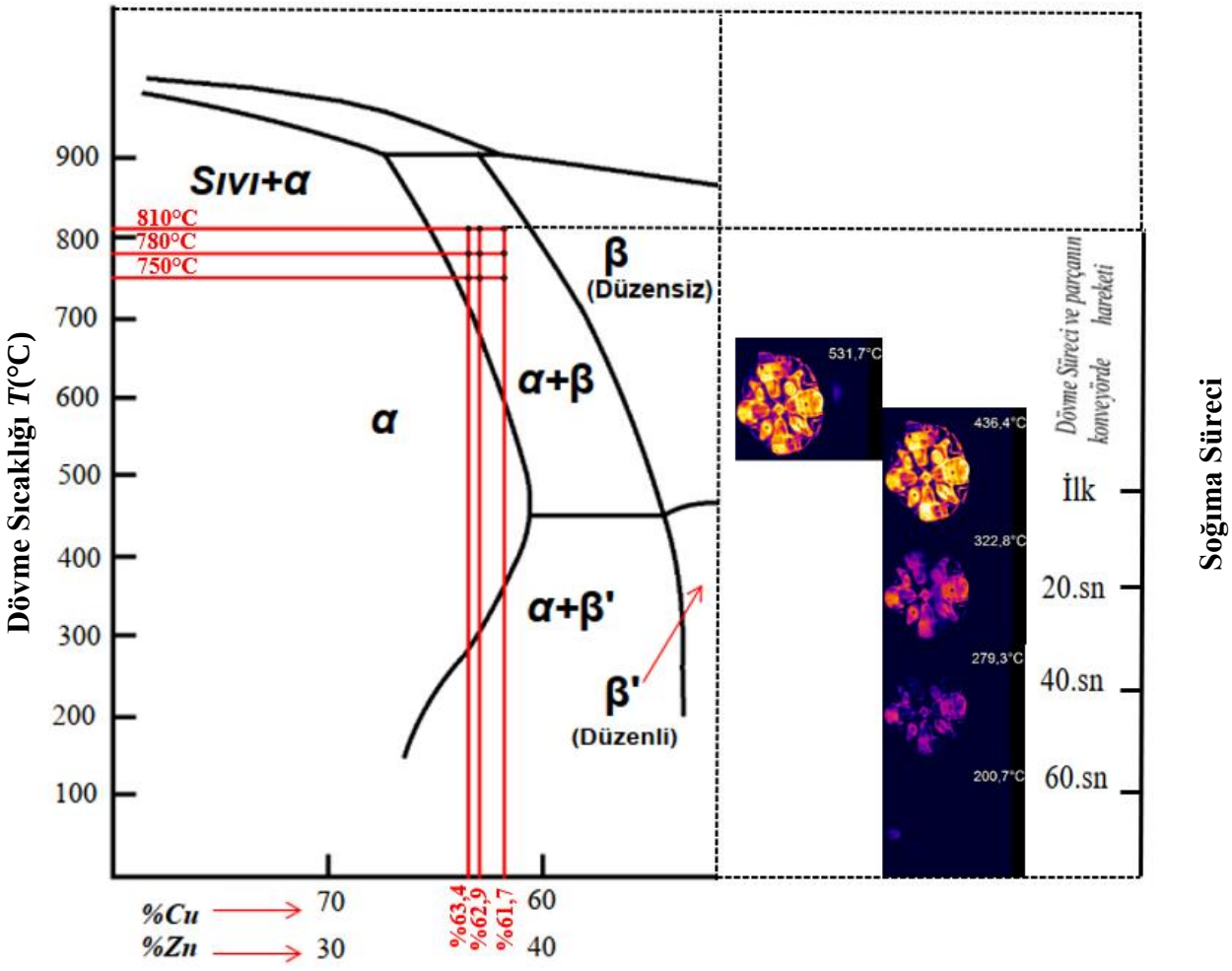
KALİTE-KONTROL ÖLÇÜMLERİ



Şekil 2.9 Talaşlı imalat deneyi ve sonrasında kalite ölçüm ve analizlerinde kullanılan cihazların görselleri

3. DÖVME PARAMETRELERİNİN MALZEMEDEKİ MİKROYAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ

Parametreleri daha iyi anlayabilmek ve deneysel süreçlerin sonrasında mikroyapısal özellikleri daha iyi değerlendirebilmek için sonuçlar sunulmaya başlamadan önce Şekil 3.1'de sunulan Cu-Zn diyagramında 750, 780 ve 810°C dövme sıcaklıklarında, %61.7, %62.9 ve %63.4 Cu oranlarındaki fazlar açısından girdiği aralıklar sunulmuştur.



Şekil 3.1 Cu-Zn Denge Diyagramı-Soğutma Süreci

%Zn oranının artmasıyla Cu oranını azalmaktadır ve bu iki oranın birbirini tamamladığını düşünebiliriz ve bu iki element pirinç malzemelerin ana elementlerindendir ve mikroyapıdaki fazlar üzerine önemli oranda etkisi bulunmaktadır. %63,4 Cu oranındaki

hammadde, 750°C dövme sıcaklığında yaklaşık olarak a+β bölgesine geçiş kısmındadır bu bölgede α fazı miktarının epey fazla olup, β fazı miktarının az olduğu durumdur. Dolayısıyla bu sınıra yaklaştıkça HMK yapıdaki β fazlarının azalmasıyla dövülebilirlik kabiliyetinin azalabileceği ve malzemenin hızlı soğusa da bu β fazlarının yapıda kalması daha zor olabilecektir, dolayısıyla %Cu oranının artmasıyla yapıda daha az beta fazı kalacaktır. Bunun sebebi faz bölgesinin a+ β bölgesinden, a bölgesine kaymasıdır. Tüm %Cu oranlarında dövme sıcaklığının artmasıyla birlikte faz bölgesi, β faz bölgesine daha fazla yaklaşmaktadır.

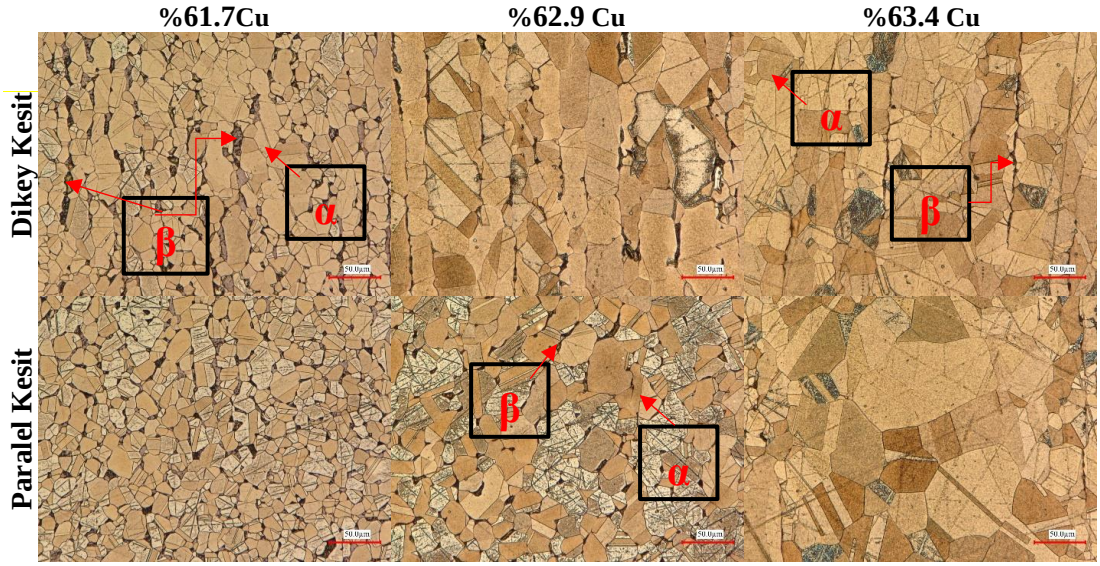
Eğer %63,4 bakır ve yaklaşık %35,9 çinko içeren bir alaşımın dönüşümünü ele alırsak sıvıdan katıya ve katı dönüşümü sırasında 900 derece civarında sıvı ve katı arasında ufak bir sıcaklık aralığı oluşur, katılaşma yaklaşık 750°C'ye kadar tamamen a ve β fazlarından oluşmaktadır, bu noktada alfa fazı büyük β fazı taneleri arasında katı halde diken gibi çıkmaya başlar, 750°C'de yapı a fazlarından oluşur. Yaklaşık 270°C'ye kadar soğutulan yapı alfa fazlarından oluşurken, bu noktadan sonra alfa fazlarının bir kısmı yapıda kalırken bir kısmı β' fazına dönüşür. Bunlar çok düşük soğuma hızlarındadır, eğer soğuma hızı yüksek ise, 800°C'den itibaren (su verme işlemi veya kriyojenik soğutma gibi), β fazı oda sıcaklığında normal soğutmaya göre daha fazla oranda kalır. Yani dönüşümler çok düşük hızlarda gerçekleştiği sürece faz diyagramına bağlı kalırlar.

Deneysel süreçte kullandığımız parametrelerin bulunduğu bölgeyi daha iyi ifade edebilmek açısından Cu-Zn diyagramının tamamı değil gerekli kısmı sunulmuştur buna ek olarak kriyojenik soğutma süreci yaklaşık ortalama 1 dk boyunca gerçekleştirilmiştir ve her bir deney numunesi için soğutma esnasında sıcaklıkların değişimleri termal kamera ile kontrol edilmiştir. Dövme presinde 750-780 ve 810°C dövme sıcaklıklarında dövülen numuneler, üst kalıptan otomatik bir mekanizma vasıtasıyla konveyöre aktarılmaktadır. Burda geçen kısa bir sürenin ardından konveyör çıkışında parça sıcaklığı ortalama 500-600°C civarındadır. Soğutma kabinine alınan parça, ilk aşamada 450°C civarlarındayken, 20.saniye sonunda yaklaşık 320°C'lere, 40.sn sonunda 280°C ve 1 dakika sonunda 150-200°C sıcaklığına soğutulmuştur ve bu kısmı özetleyen görseller Şekil 3.1'deki Cu-Zn diyagramında soğuma süreci kısmında sunulmuştur.

3.1 Mikroyapı Sonuçları

Mikroyapısal dağılım malzemenin şekillendirilmesi sırasında kullanılan parametrelerin etkisiyle önemli derecede değişimlere sebebiyet verebilmektedir. Bu duruma malzemedeki yeniden kristalleşme sıcaklığının önemli oranda etkisi olmaktadır. Yeniden kristalleşme esnasında, plastik deformasyona uğratılmış malzemede nispeten yumuşak, düşük dislokasyon dağılıma sahip kristallerin oluştuğu ve büyüdüğü gözlenir. Yeniden kristalleşme sıcaklığı elbette birkaç değişkene bağlıdır. Tavlama sıcaklığındaki süre, alaşımın kimyasal bileşimi ve plastik deformasyon miktarı ve türü önemlidir. Malzemenin tane boyutu ve deformasyon sıcaklığı gibi değişkenler de yeniden kristalleşme sıcaklığını etkilemektedir[27].

Malzemenin mikroyapısal özelliklerini ortaya koymak için tahribatlı muayene edilme süreci başlatılmıştır. Farklı spektlerde üretilmiş hammalzemenin dövme öncesi özelliklerinin incelenmesi için sırasıyla kesilen numuneler, bakalite alınıp, zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilmiştir ve Keyence dijital mikroskopta mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı %Cu oranlarında üretilmiş olan numunelerin dövme süreci öncesi işlem görmemiş mikroyapılarına ait görüntüleri Şekil 3.2'de sunulmuştur. Genel itibariyle pirinç mikroyapı görüntüsü üzerinde α ve β fazları gösterilmiştir. En basit anlamıyla ayırt etmek için koyu renkli olanları β fazı ve açık renkli kalan taneleri de α fazları olarak ifade edebiliriz. Mikroyapıda %Cu oranının artmasına bağlı tane boyutlarının arttığı ve β fazlarının azaldığı görülmektedir.



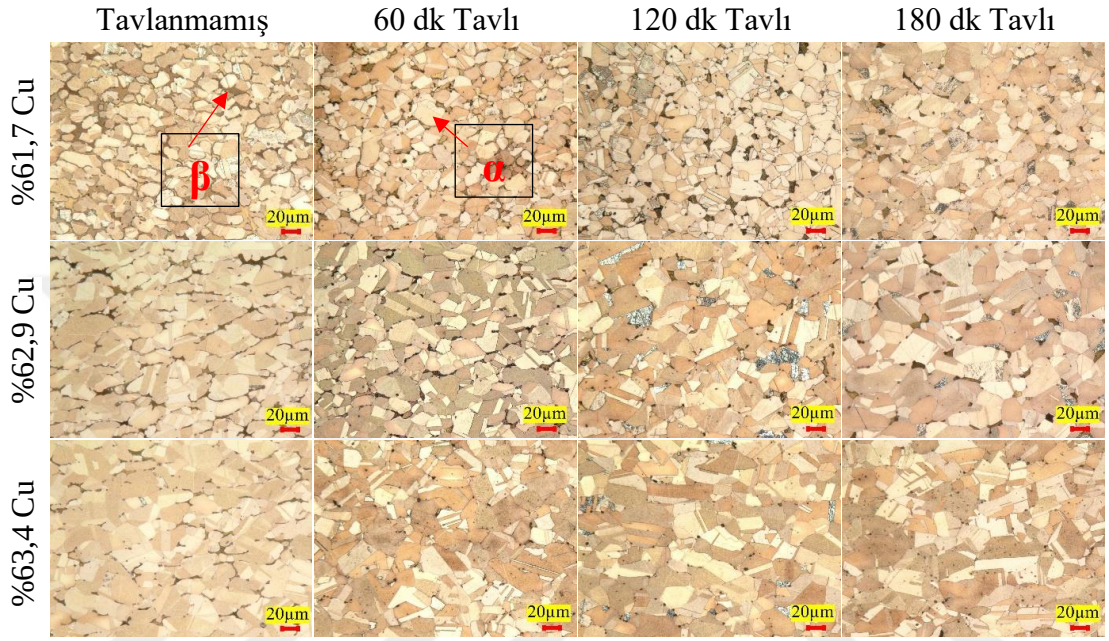
Şekil 3.2 %Cu oranlarına bağlı mikro yapıdaki değişim

Şekil 3.3 ve Şekil 3.6 arasındaki görsellerde sırasıyla 750-780 ve 810 °C dövme sıcaklıklarında yapılan deneyler sonucunda oluşan mikroyapısal dağılımlar sunulmuştur. Görüntüler incelendiğinde, dövme sıcaklığının önemli oranda mikroyapıda değişimlere sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. İş parçası malzemesinin metalurjik tepkisini kontrol etmek için dövme sıcaklığının kontrolü önemli bir parametredir. Meydana gelen pekleşme ve yeniden kristalleşmenin boyutu, dövme sıcaklığına bağlı olmaktadır. İşlem sıcaklığına bağlı olarak dövme sırasında metalurjik dönüşümler de meydana gelebilmektedir. Dövme işleminden sonra tavlama süreçlerinin elimine edilmesi ve sürelerinin minimize edilmesi isteniyorsa, mikroyapısal dağılımın dikkate alınması özellikle önemlidir[28].

Özellikle %61,7 Cu oranındaki malzemede dövme sıcaklığının 810°C olduğu durumda beta fazlarının daha küçük parçalara bölünerek daha farklı bir dağılım gösterdiği görülmüştür. %61,7 Cu oranlı malzemede 810°C'de alfa fazlarının daha karmaşık bir dağılım gösterdiğini de söylemek mümkündür. Dövme sıcaklığının artmasıyla alfa fazları az da olsa düşük sıcaklıklara nazaran düzenli bir yapıya ulaşmaktadır bu durum %62,9-63,4 Cu oranındaki 810°C'de dövülmüş numunelerde de geçerlidir. Dövme sıcaklığının artmasıyla daha homojen bir mikroyapı dağılımı oluşmaktadır[29].

Şekil 3.3'de 750°C dövme sıcaklığında dövülmüş olan üç farklı %Cu oranındaki hammaddelerin kriyojenik soğutmaya maruz bırakılması sonrası, tavlama işlem süresinin mikroyapısal dağılımlar üzerine etkisini göstermektedir. Tavlanmamış numunelerden alınan mikroyapı görsellerinde %beta fazı dağılımlarının tavlanmış olanlara göre daha fazla olduğu, %Cu oranının artmasıyla tanelerin bir miktar büyüdüğü ve tıpkı %Cu oranında olduğu gibi tavlama süresinin artmasıyla da tanelerin büyüdüğü görülmektedir. Sıcak dövme aralığındaki veya biraz üzerindeki sıcaklıklarda malzeme metalurjik faz dönüşümüne uğramakta ve termal etkilerden kaynaklı gerçekleşen bu durum hacimdeki değişiklikle ilişkilidir. Dövme sıcaklığının dönüşüm sıcaklığı ile ilişkisi ve soğutma yöntemi ve soğuma hızı dövme sonrası geliştirilecek metalurjik mikro yapıyı belirlemektedir [30] ve ayrıca kontrollü soğutma, dövme işleminden sonra bozulmayı önlemek ve mikro yapıyı kontrol altında tutmak için önemlidir [28]. Yapıda hızlı soğumanın etkisiyle beta fazları tane sınırlarında oluştuğu görülmektedir. Hızlı soğutulduğu durumlarda; beta fazı tane sınırlarına çökelmekte ve alfa fazının ise çökelmesi engellenmektedir. Bu durum ile, yapısında %60 Cu, %40 Zn sıcak işlenen pirinçlerden

olan Muntz metalinde karşılaşıldığı ve soğuma hızına bağlı olarak yapıdaki alfa ile beta fazlarının oranı değişkenlik gösterdiği ifade edilmektedir. [28]. Hızlı soğuyan döküm alaşımlarında da alaşımın daha güçlenerek iyi çekme dayanımı ve sertlik değerleri veren küçük taneler oluştuğunu belirtmiştir. [30]. Bu yüzden dövme sonrası henüz tavlanmamış deney numunelerinde hızlı soğutmanın etkisiyle yapıdaki taneler daha küçüktür.

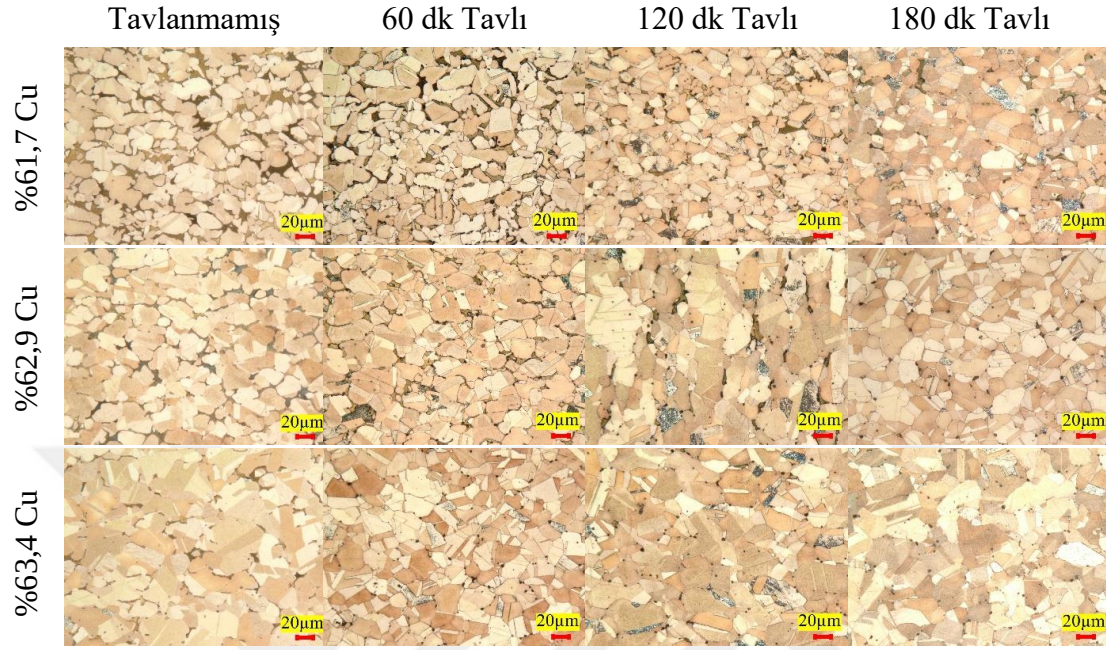


Şekil 3.3 Farklı % Cu oranınlarındaki ekstrüze çubuk malzemenin 750°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikroyapıdaki değişimi

780°C dövme sıcaklığında dövülmüş olan üç farklı %Cu oranındaki hammaddelerin kriyojenik soğutmaya maruz bırakılması sonrası, tavlama işlem süresinin mikroyapısal dağılımlar üzerine etkisi Şekil 3.4'de sunulmuştur. 750°C dövme sıcaklığında olduğu gibi Tavlanmamış numunelerde %beta fazı dağılımlarının tavlanmış olanlara göre daha fazla olduğu, %Cu oranı veya tavlama süresinin artmasıyla da tanelerin büyüdüğü görülmektedir.

Her ne kadar dövme sonrası numuneler kriyojenik soğutma yöntemiyle hızlı soğumaya maruz bırakılsa da, bir sonraki adım olan farklı sürelerde tavlama işleminin ardından kendi halinde soğumaya bırakılan deney numuneleri daha yavaş bir şekilde soğutulmuştur. Genellikle yavaş soğuyan parçalarda metalin tane boyutu artarak kaba bir mikroyapı dağılımı göstermektedir kabalaşan bu taneler bir alaşımın elemanlarının ayrılmasına izin verip, yapıyı zayıflatmaktadır[30]. Tanelerin yapısı ne kadar küçükse yapı o kadar

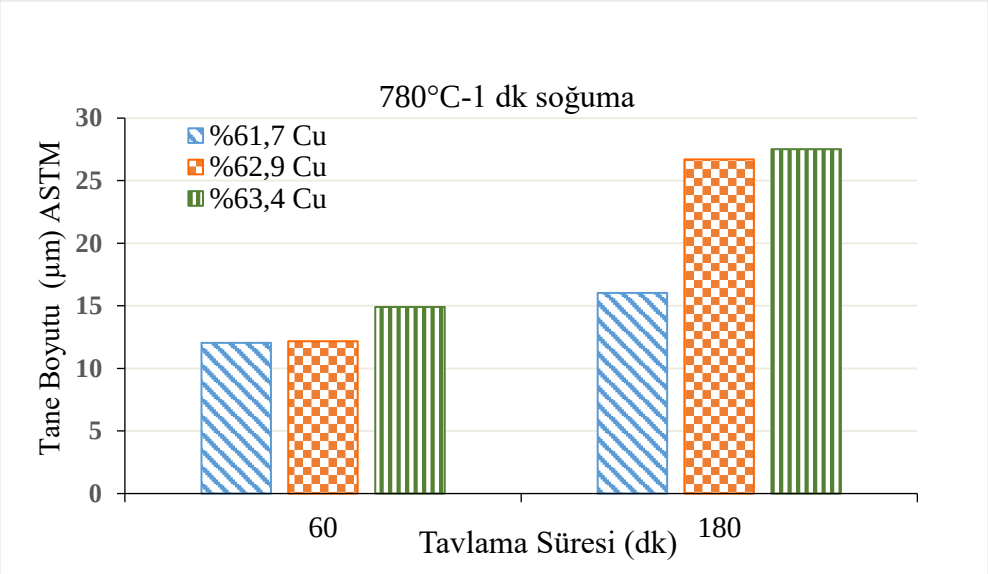
güçlüdür[31]. Dövme sıcaklığının artırılmasının %61,7 Cu oranındaki malzeme haricinde mikroyapısal dağılımda sınırlı derece değişim gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.4 Farklı % Cu oranınlarındaki ekstrüze çubuk malzemenin 780°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikroyapıdaki değişimi

%Cu oranı, tavlama süresi değişkenlerinin tane boyutlarına etkisini görebilmek için 780°C'de dövülmüş, 60 dk ve 180 dk tavlanmış numunelerde ASTM E112 [25] standardına göre tane boyutu analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar ise Şekil 3.5'de sunulmuştur. % Cu oranının artmasıyla tane boyutlarında artış meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca sonuçlardan anlaşıldığı üzere tavlama süresinin artmasıyla da tane büyüklükleri artmaktadır. Bu durum mikroyapıdaki durumu destekler niteliktedir. Tavlama sıcaklığına hızlı ısıtma ve kısa tavlama süreleri ince-küçük tane boyutlarını destekler. Daha büyük tane boyutları ise sınırlı deformasyon ve uzun tavlama sürelerinin bir kombinasyonu ile elde edilir[27]. %63,4 Cu oranındaki 60 dk tavlanmış malzeme taneleri epey küçükken 180 dk tavlamada taneler bir miktar büyümüştür.

Tavlamanın genel amacı metali işlemeye hazırlamak için yeniden kristalleştirmek ve yumuşatmaktır. Tavlamalar genellikle belirli bir çekme dayanımı elde etmek için tane boyutu üretmek üzere gerçekleştirilir.Tane boyutu, tavlama parametrelerinin uygun seçimi ile kontrol edilebilir[27].



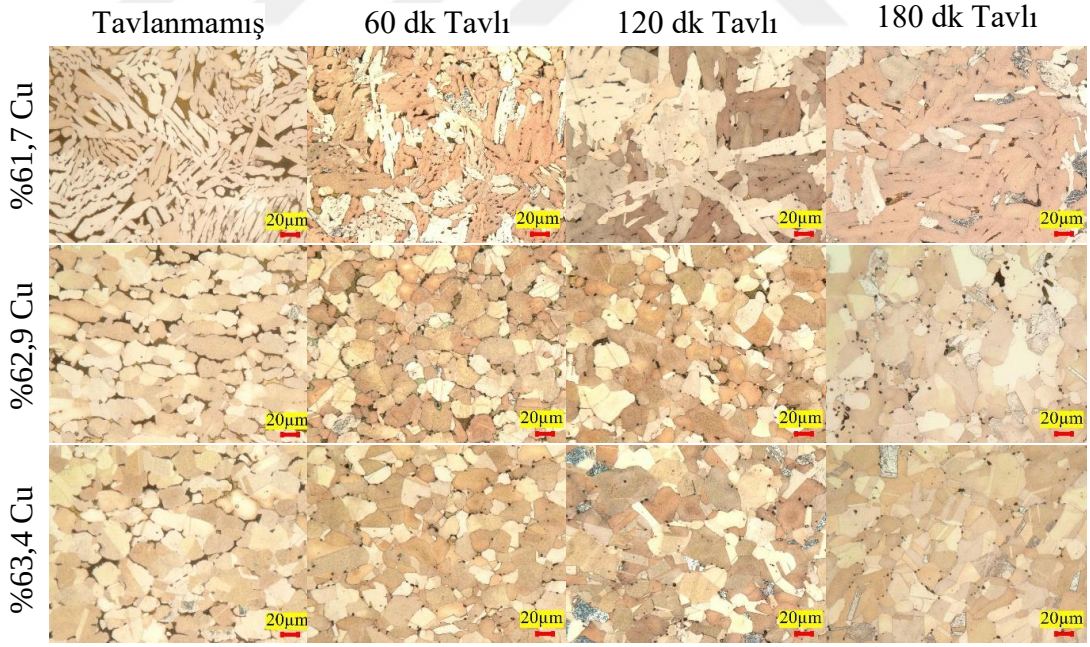
Şekil 3.5 780°C dövme sıcaklığı sonrası 1 dk soğutulmuş numuneler için %Cu oranı ve tavlama sürelerindeki değişimin tane boyutları üzerine etkisi

Deneyleri gerçekleştirilen maksimum dövme sıcaklığı olan 810°C'de elde edilen sonuçlar ise Şekil 3.6'da sunulmuştur. Tüm mikroyapı görüntüleri bir arada değerlendirildiğinde, dövme sıcaklığının %61,7 Cu oranındaki numunelerde, diğer sonuçlarla kıyaslandığında yüksek dövme sıcaklığında daha etkin bir değişim olduğu şeklinde yorumlayabiliriz. Yüksek sıcaklıklarda tanelerin dağılımı konusunda farklılıklar göze çarpmaktadır. Mikroyapısal değişimlerle ilgili ayrıntılı yorumları beta fazı analizi kısmında daha net bir şekilde yapmak daha mümkündür. %61,7 Cu oranındaki mikroyapıdaki beta fazları daha parçalı bir yapı göstermiştir.

Bakır oranının en düşük olduğu durumda yapı Zn elementi bakımından zengindir ve bu elementin ergime sıcaklığı Cu elemetinden daha düşüktür dolayısıyla 810°C gibi yüksek dövme sıcaklığına çıkıldığında beta fazları açısından zengin olan yapı hızlı soğutma etkisiyle, alaşım elementleri dendritik mikroyapının iç kısmında eşit olmayan bir dağılım oluşturur, daha yüksek soğutma hızları ile birlikte ve kristalleşmenin başlangıcında eriyik ve katı faz arasındaki bileşimde daha büyük farklılıklar ile kolayca toparlanamamış dendritik bir yapı elde edilmiş olur[27]. Literatürde, Alüminyum alaşımları[32-34], bazı bakır alaşımları[27, 35, 36], ostenitik çelikler[35] vb. daha pekçok malzemede bu dendritik ve interdentrik segregasyonlara benzer yapılarla karşılaşılmıştır. Yine buna benzer bir yapı CW510L malzemede [17] ve kurşunlu alaşımlardan CW614N malzemede[37] görülmüş ve Widmanstätten yapısı olarak adlandırılan bu yapının beta fazı

üzerinde alfa fazlarıyla kesişen asiküler kristallerden oluşan bir yapı olabileceği belirtilmiştir[17]. Elde edilen bu bilgiler ışığında, bahsi geçen mikroyapıda dendritik bir dağılım veren malzemelerin ortak özelliği yüksek Zn içermesi ve hızlı soğutmaya maruz bırakılması, beta fazı yüzdesinin fazla olmasıdır ve %61,7 Cu oranındaki malzemede bu durumu destekler niteliktedir. Genel olarak döküm sürecinde karşılaşılan bu mikroyapısal dağılım, katılaşmanın hızlı bir şekilde olduğu durumlarda oluşmaktadır. Yine bu çalışmalarda yapıyı daha iyi yorumlayabilmek için dendritik kollar arasındaki mesafeye bakılmaktadır. Malzemenin soğumasının hızlı olduğu durumda dendtritler daha ince yapıda kol aralığına sahip iken, yavaş olduğu durumlarda kol aralığı daha da genişleyip kaba dendritik bir yapı elde edilmektedir[35]. Dendritler arası mesafenin küçülmesiyle mekanik özellikler iyileşmektedir.

Mikroyapısal dağılımda da tavlama süresinin artmasına bağlı yapıdaki taneler genişlemekte ve küresel hale gelmektedir. Bunun sebebi olarak ise, tavlama sonrası numunelerin ortam şartlarında kendi halinde soğumaya bırakılması ve yavaş soğutulması olduğu düşünülebilir. Soğuma oranının azalmasına bağlı dendtrit kolları arası mesafe artar[32].



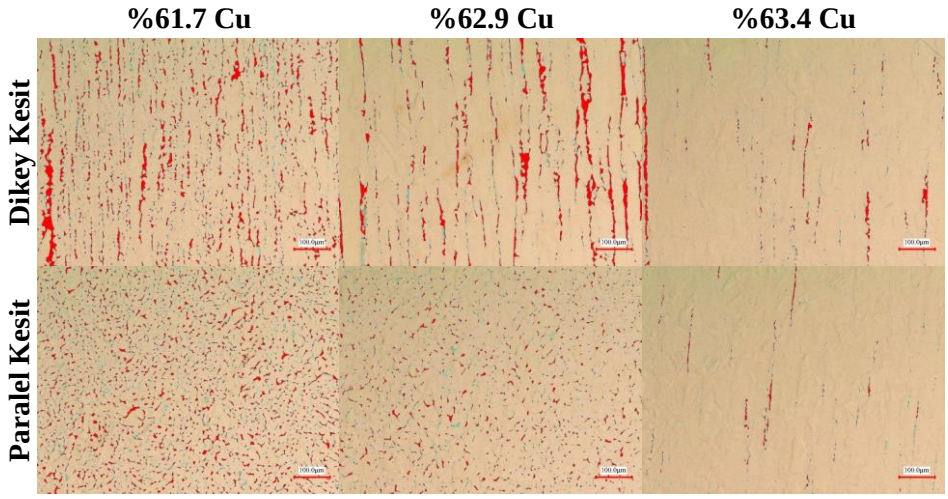
Şekil 3.6 Farklı % Cu oranınlarındaki ekstrüze çubuk malzemenin 810°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikroyapıdaki değişimi

3.2 Faz Analizi Sonuçları

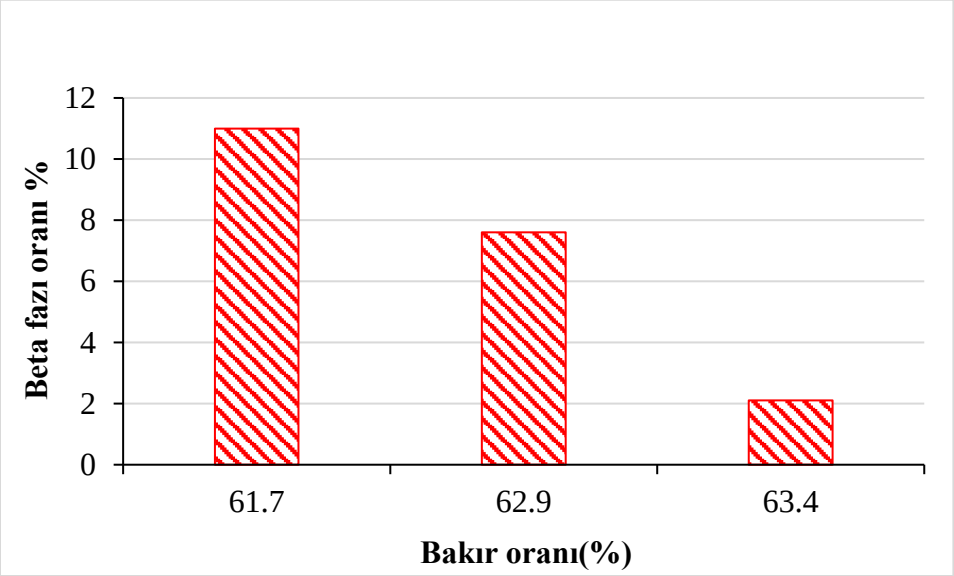
Çalışma kapsamında yapılan testlerde elde edilmesi planlanan en önemli çıktılardan biri yapıdaki beta fazlarının yüzdesel dağılımıdır ve talaşlı imalatı etkileyen en önemli unsurlardan biri %beta fazı oranı ve dağılımıdır. Mikroyapı sonuçları kısmında alfa ve beta fazlarının dağılımları yorumlanmış ve beta fazlarının koyu renkli olanlar olduğu belirtilmişti. Bu kısımda faz analizi mikroyapısal dağılımlarında beta fazları kırmızı renk ile daha belirgin bir şekilde ifade edilmiştir. %Cu oranının en düşük olduğu %61,7 oranlı malzeme durumunda diğerlerine nazaran çok daha yüksek β intermetalik faz yüzdesi içermektedir. Cu-Zn denge diyagramı ele alındığında (Şekil 3.1), beta fazı yüzdesinin Zn elementi yüzdesi dolayısıyla %Cu oranı içeriği ve termomekanik işlem tarafından kontrol edilmektedir ve beklendiği gibi çinkoca zengin olan ve buna bağlı %Cu oranının en düşük olduğu durumda beta fazı yüzdesi, Zn içeriği ile artan bir eğilim göstermiştir.

Hacim merkezli kübik kristal yapıya sahip sıralı tip bir intermetalik faz olan beta fazı (CuZn), (Cu) katı çözeltiyi ifade eden yüzey merkezli kübik kristal, α-fazından yapıca daha sert ve daha az sünektir. Çinko ise hegzagonal sıkı paketli (HSP) kafes yapısında bulunmaktadır[9].İşlenebilirlik için bu fazların dağılımı ve boyutları önemli etkiye sahiptir[38]. Beta fazının varlığı, alaşımın sünekliğini, dolayısıyla işleme sonrası oluşan talaşların segmentasyonunu düşürmektedir. Beta fazlarının sergilediği morfoloji ve yapıdaki % dağılımının artışı sertlikte bir miktar artışa ve düşük sünekliğe sebep olur, sonuç olarak artan beta fazıyla birlikte işlenebilirlik ve işleme sırasında talaş kırma kabiliyeti de artar[17, 37].

Keyence VHX-6000 marka dijital mikroskop kullanılarak her Cu oranına ait çubuklardan alınan numunelerde faz analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7). Aşağıdaki mikroyapıdan da görüldüğü gibi %Cu oranının artmasıyla β fazlarında azalma meydana gelmiştir (Şekil 3.8). %61,7 Cu oranına sahip malzemede ortalama β fazı yaklaşık %11 civarında iken, %63,4 Cu oranına sahip malzemede β fazlarında %81 azalarak yaklaşık %2 civarında ölçülmüştür.

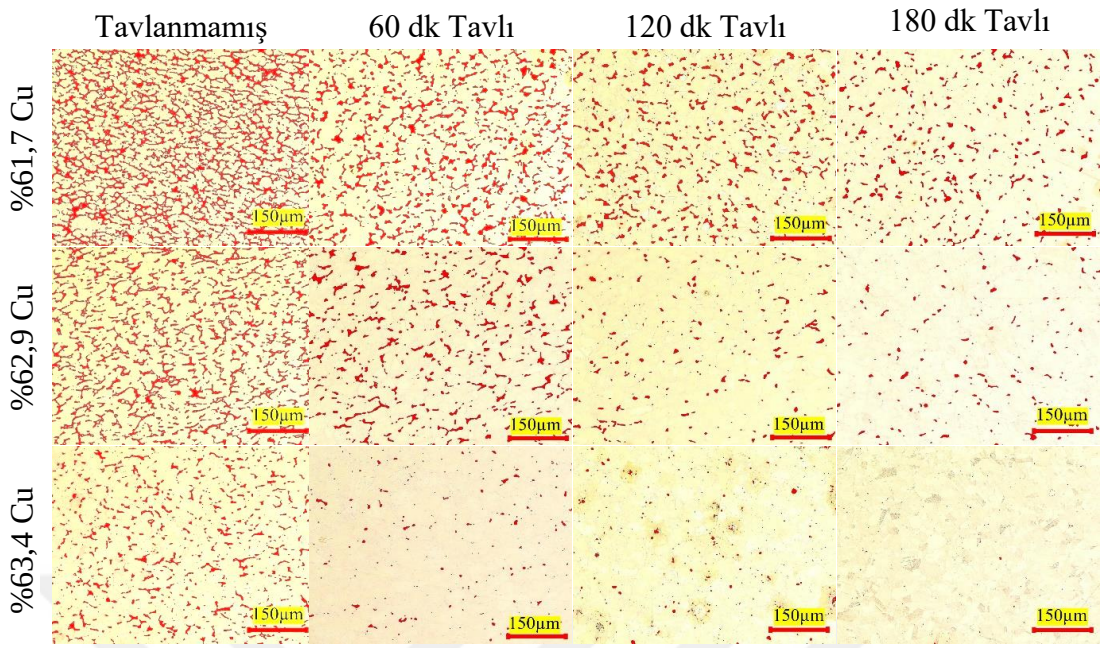


Şekil 3.7 %Cu oranlarına bağlı mikro yapıdaki β fazları değişimi



Şekil 3.8 %Cu oranlarına bağlı dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemenin mikroyapısındaki β fazları değişimi

750°C dövme sıcaklığında dövülmüş olan üç farklı %Cu oranındaki hammaddelerin kriyojenik soğutmaya maruz bırakılması sonrası, tavlama işlem süresinin %beta fazı mikroyapısal dağılımlar üzerine etkisi Şekil 3.9'da sunulmuştur.



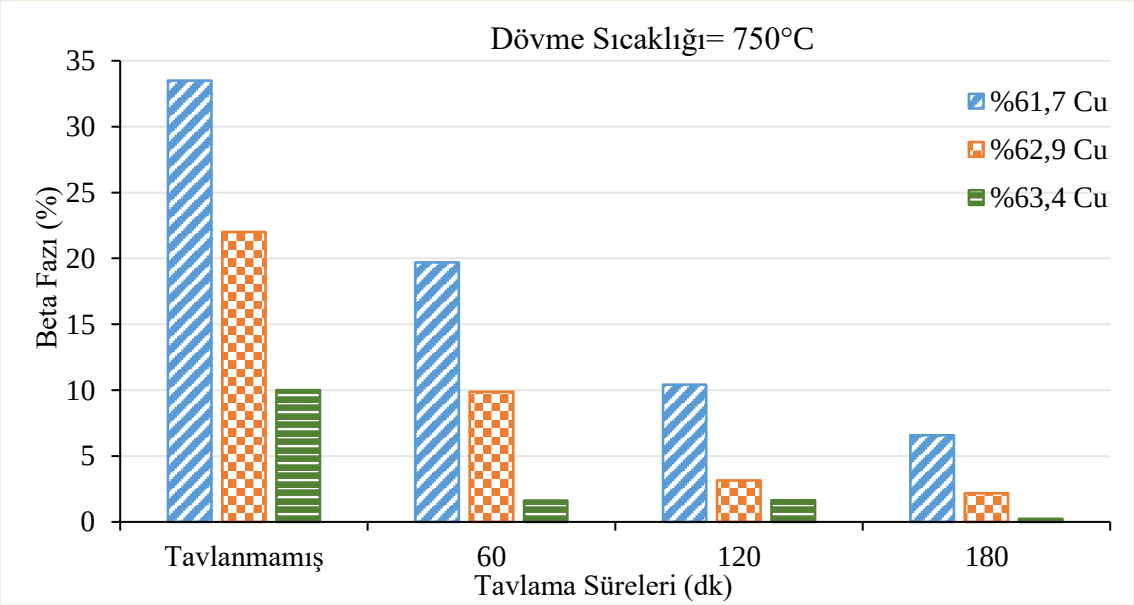
Şekil 3.9 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 750°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikroyapıdaki % beta faz dağılımındaki değişim

Yukarıdaki mikroyapısal beta faz dağılımlardan alınan sonuçlara göre sunulmuş olan Şekil 3.10'daki grafikte, %Cu oranının ve tavlama süresinin değişmesinin %beta fazlarının dağılımında önemli oranda değişkenlik sağladığı görülmektedir. Grafiği %Cu oranı açısından incelediğimizde, Cu oranının artmasıyla yapıdaki beta fazları azalan bir dağılım göstermiştir. Bu durum, yapıdaki %Cu oranının artmasıyla azalan çinko dağılımıyla açıklanabilir. Beta fazı çinko elementi açısından zengin bir fazdır. Özellikle %61,7 Cu oranındaki malzeme yüksek dövme sıcaklıklarında işlem esnasında %beta fazlarının yüzdesel olarak maksimum olduğu noktalara çıkar ve yapıdaki bu beta fazları kriyojenik soğutma ile hızlı soğutulmasıyla birlikte pirinç malzeme iç yapısında, beta fazını hapseder[27]. Yani yavaş soğutma gibi yapıdaki beta fazlarının çözünüp alfa fazına dönüşmesi için gerekli zaman ve sıcaklık tanınmamaktadır.

Dövme öncesi ekstrüze çubuk malzeme ve dövme sonrası malzemenin % beta fazları dağılımda önemli değişimler göze çarpmaktadır. %61,7 Cu oranındaki ekstüze çubuk %11 beta fazı içeriyorken, dövme sonrası yaklaşık %205 oranında artışla %33,5 beta fazı elde edilmiştir. %62,9 Cu oranında %7,6 beta içeren ekstrüze çubuk yaklaşık %164 artış

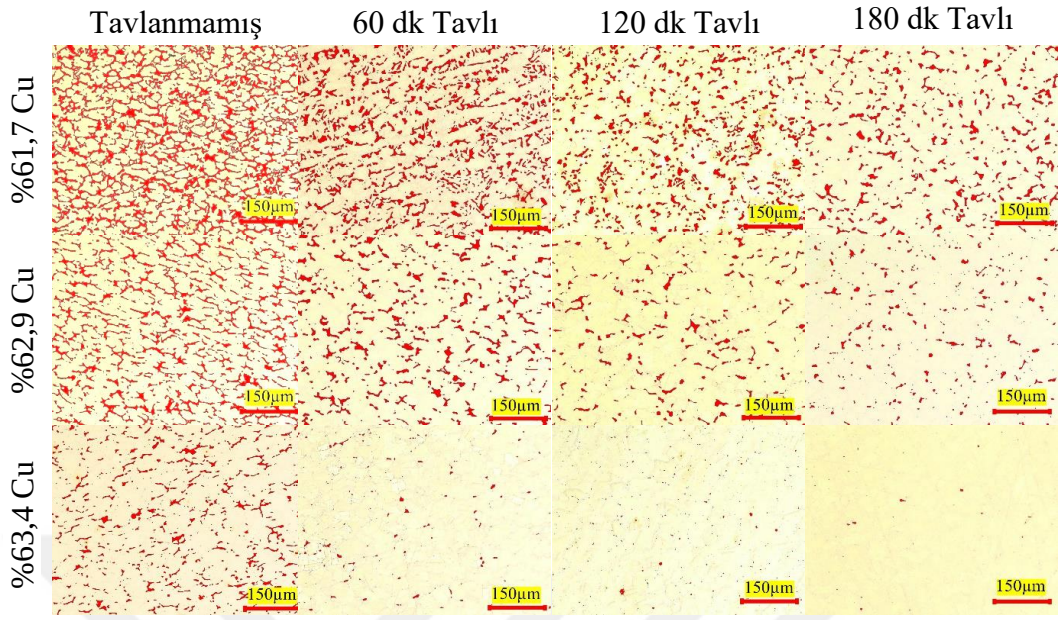
göstermiş ve yaklaşık %20 beta fazı yüzdesi ölçülmüştür. %63,4 Cu oranında ise %377 oranında artış meydana gelmiştir.

Beta fazı açısından en önemli parametrelerden olan tavlama süresi açısından bakıldığında ise sürenin artmasıyla yapıdaki beta fazlarının varlığının azaldığı görülmektedir. 750°C dövme sıcaklığında yapılan testlerde en yüksek beta fazları tavlanmamış koşulda oluşmuştur ve özellikle %Cu oranının en düşük olduğu %61,7 Cu oranlı malzemedeki durumda beta fazları %33,5 seviyelerine kadar artmıştır. Tavlanmamış durumdaki %61,7 Cu oranındaki numuneden, %63,4 Cu oranındaki numuneye yaklaşık %70 daha az beta fazı dağılımı elde edilmiştir. %61,7 Cu oranında tavlanmamış numuneden, 180 dk tavlama uygulanmış numuneye %80 civarında beta fazlarında azalma meydana gelirken, %62,9 Cu oranında bu azalma yaklaşık %90 ve %63,4 Cu oranında ise %98 civarındadır.



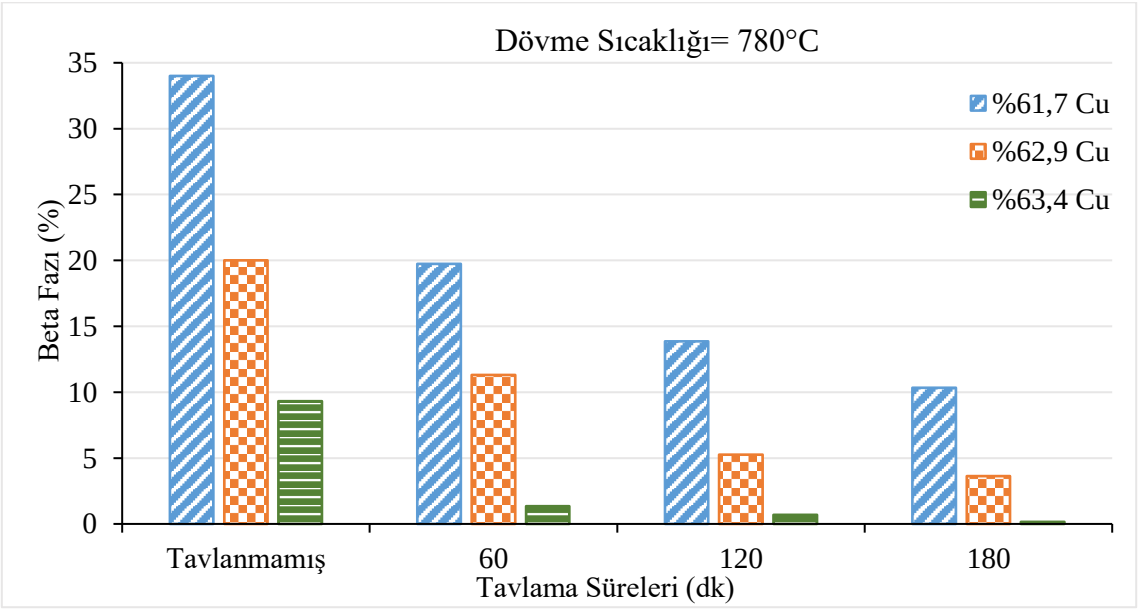
Şekil 3.10 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 750°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı % beta faz dağılımındaki değişim

780°C dövme sıcaklığında dövülmüş olan üç farklı %Cu oranındaki hammaddelerin kriyojenik soğutmaya maruz bırakılması sonrası, tavlama işlem süresinin %beta fazı mikroyapısal dağılımlar üzerine etkisi Şekil 3.11'de sunulmuştur. 750°C dövme sıcaklığında olduğu gibi tavlanmamış numunelerde %beta fazı dağılımlarının tavlanmış olanlara göre daha fazla o lduğu, %Cu oranı veya tavlama süresinin artmasıyla beta fazlarının azaldığı görülmektedir. Dövme sıcaklığının artırılmasıyla beta fazları dağılımında 750°C' deki yapıdan farklı önemli değişimlere sebebiyet vermemiştir.



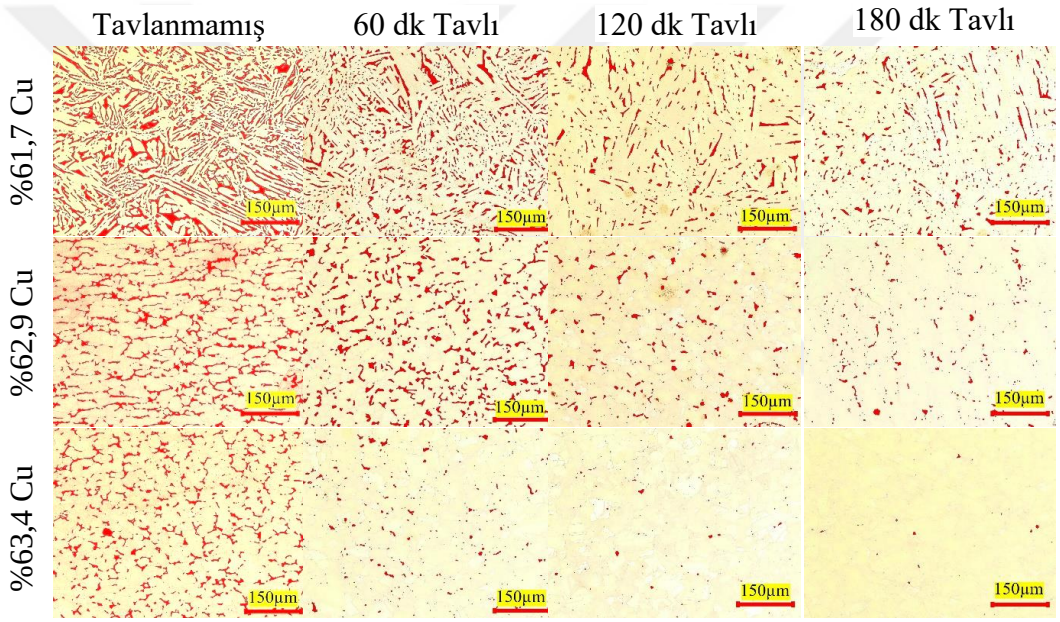
Şekil 3.11 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 780°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikroyapıdaki % beta faz dağılımındaki değişim

780°C dövme sıcaklığında gerçekleştilen deneyler sonucunda tavlama süresi ve %Cu oranı etkisi gösteren grafik Şekil 3.12'de sunulmuştur. Dağılım 750°C dövme sıcaklığında olduğu gibidir.



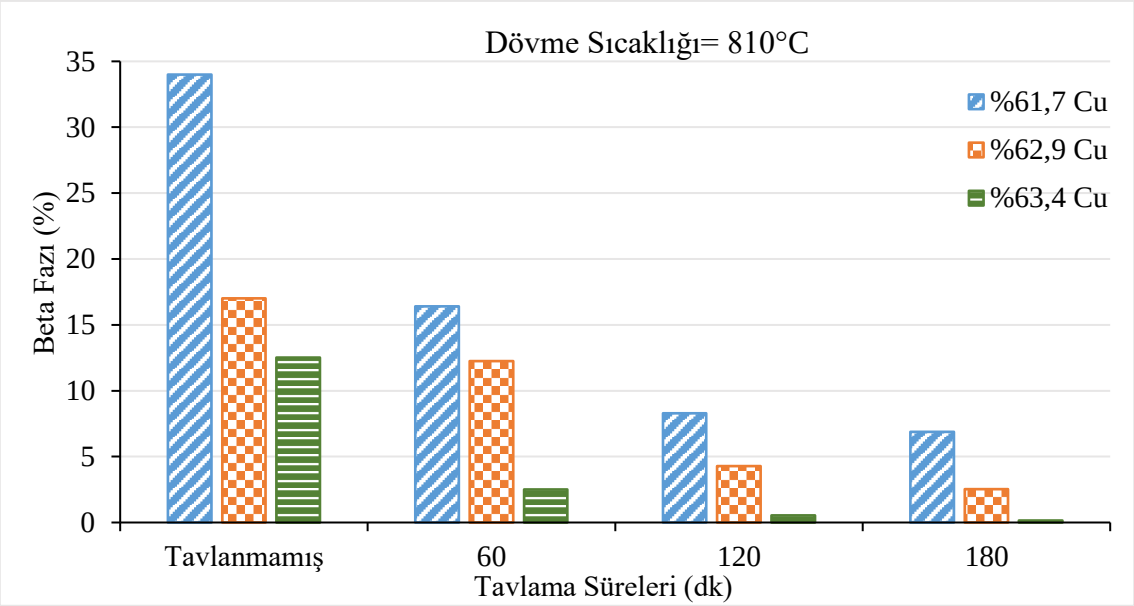
Şekil 3.12 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 780°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı % beta faz dağılımındaki değişim

Farklı %Cu oranındaki hammaddelerin 810°C dövme sıcaklığında şekillendirilmesi sonrası kriyojenik ile soğutulan numunede, tavlama işlem süresinin %beta fazı mikroyapısal dağılımlar üzerine etkisi Şekil 3.13'de sunulmuştur. 750 ve 780°C dövme sıcaklıklarında olduğu gibi tavlanmamış numunelerde %beta fazı dağılımlarının tavlanmış olanlara göre daha fazla olduğu, %Cu oranı veya tavlama süresinin artmasıyla beta fazlarının azaldığı görülmektedir. %61,7 Cu oranındaki koşullarda beta fazlanın daha parçalı bir yapıda oluştuğu ve oluşan bu yapının Widmanstätten yapısı olarak adlandırılan yapıyla benzerlik taşıdığı, çinko elementi açısından daha zengin alaşımlarda, hızlı soğumayla birlikte daha çok oluşabilen dağılımlar olduğu ve gerekli ayrıntıları mikroyapı sonuçları kısmında açıklanmıştır.



Şekil 3.13 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 810°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikroyapıdaki % beta faz dağılımındaki değişim

810°C dövme sıcaklığında gerçekleştilen deneyler sonucunda tavlama süresi ve %Cu oranı etkisi gösteren grafik Şekil 3.14'de sunulmuştur. Dağılım 750-780 ve 810°C dövme sıcaklıklarında olduğu gibidir ve tavlanmamış koşul ile 180 dk tavlı koşul arasında beta fazı dağılımı açısından %61,7 Cu oranı için %80 değişim mevcuttur. Diğer değişim oranları da dövme sıcaklığının değişmesiyle önemli değişimlere sebebiyet vermemiştir.



Şekil 3.14 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 810°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı % beta faz dağılımındaki değişim

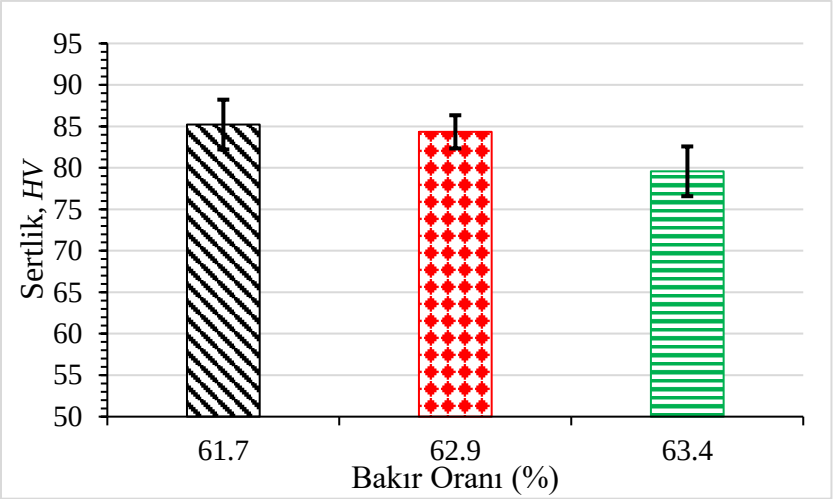
3.3 Mikrosertlik Sonuçları

Dövme süreci malzemenin plastik deformasyona uğratılarak tane yapısında önemli değişimlere sebebiyet veren bir prosestir ve dolayısıyla sertlik değerlerinde de buna bağlı olarak artış meydana gelmektedir. Herhangi bir işlem görmemiş dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemelerin sertlik değerleri Şekil 3.15'de 75 HV ile 85 HV iken dövme işlemi ile şekillendirilmesi sonrasında bu değer aralığı yaklaşık 80-120 HV sertlik değerlerine kadar artış göstermiştir. Bu durumun oluşmasında dövme sonrası numunenin sıvı azot ile hızlı soğutma sürecine tabi tutulmasının önemli derecede etkisi bulunmaktadır. Dövme esnasında Cu-Zn diyagramında yüksek sıcaklıklara çıkıldığında anlık olarak düzensiz beta faz (β') oranı olarak yaklaşık %50 oranlarının üzerine çıkar HMK yapıdaki beta fazının artmasıyla dövülebilirlik kolaylaşır, yapıya sertlik kazandıran bu beta fazları hızlı soğutma süreciyle birlikte yapıda daha fazla beta fazının kalmasını sağlar. Bu sebepledir ki hızlı soğutma yapıyı sertleştirmektedir. Fakat gerçekleştirilen deneylerde kullanılan soğutma yöntemi suda soğutmadan ayrı bir etki bırakan kriyojenik soğutmadır. Kriyojenik soğutma veya sıvı azot yardımlı soğutma adıyla da karşımıza çıkan bu yöntemde sıvı azot malzemeyi soğutarak termal yumuşamaya engel olmakta ve malzemeyi sertleştirme

eğilimindedir[39]. Özellikle çinkoca zengin yani %Cu oranının az olduğu ve dolaylı olarak % beta fazının fazla olduğu malzemelerde dövme esnasında yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerine çıkıldıktan sonra yapıda düzensiz beta fazı yüzdesi çok yüksek seviyelere kadar çıkmaktadır. Bu kısımda β→α dönüşümü tamamen gerçekleşmeden kriyojenik soğutma etkisiyle pirinç malzeme iç yapısında beta fazları hapsedilmekte [27] ve bunun sonucunda yapıda daha fazla beta fazı kalmakta ve buna bağlı mikrosertlik değerlerinde normale göre daha fazla bir artış olmaktadır.

Kurşunsuz alaşımlarda elementin yokluğunun veya az miktarda bulunmasının, malzemenin sünekliğini önemli ölçüde artırdığı ve bununda işlenebilirliği kötü etkilemesi beklenmektedir. Dolayısla bu aşamada Cu-Zn oranlarının doğru oranda olması ve farklı soğutma yöntemleriyle dolayısıyla beta fazlarının dağılımıyla istenen sertlik değerlerine ulaşmak mümkündür[16].

Kurşun içermeyen veya minimum seviyede içeren alaşımların mikroyapısındaki % beta fazlarının dağılımının artmasıyla ortam şartlarında sertlik değerlerinde genel bir artış ve süneklikte azalma meydana gelir[17]. Yapıya sertlik kazandıran HMK yapıdaki beta fazlarının dağılımının da %Cu oranının artmasıyla azaldığı bir önceki kısımda sunulmuş olan faz analizi sonuçlarında belirtilmişti. Dolayısıyla beta fazlarının azalmasıyla da sertlik değerlerinde azalma meydana gelmektedir ve Şekil 3.15'de mikrosertlik değerleri bu durumu destekler niteliktedir. Yine mikroyapı sonuçlarında tane boyutlarının artmasının sertlik değerlerinde etkisi olduğundan bahsedilmiş ve %Cu oranının artmasıyla tane boyutlarının büyüdüğü gözlemlenmişti ve buna bağlı olarak malzeme sünekleşmektedir. CW511L malzemenin herhangi işlem görmemiş dövme öncesi ekstrüze çubuk halindeki mikrosertlik değerleri, %61,7 Cu oranındaki malzeme için 85 HV, %62,9 Cu oranında 84 HV iken , %63,4 Cu oranın da ise yaklaşık 79 HV olarak ölçülmüştür.



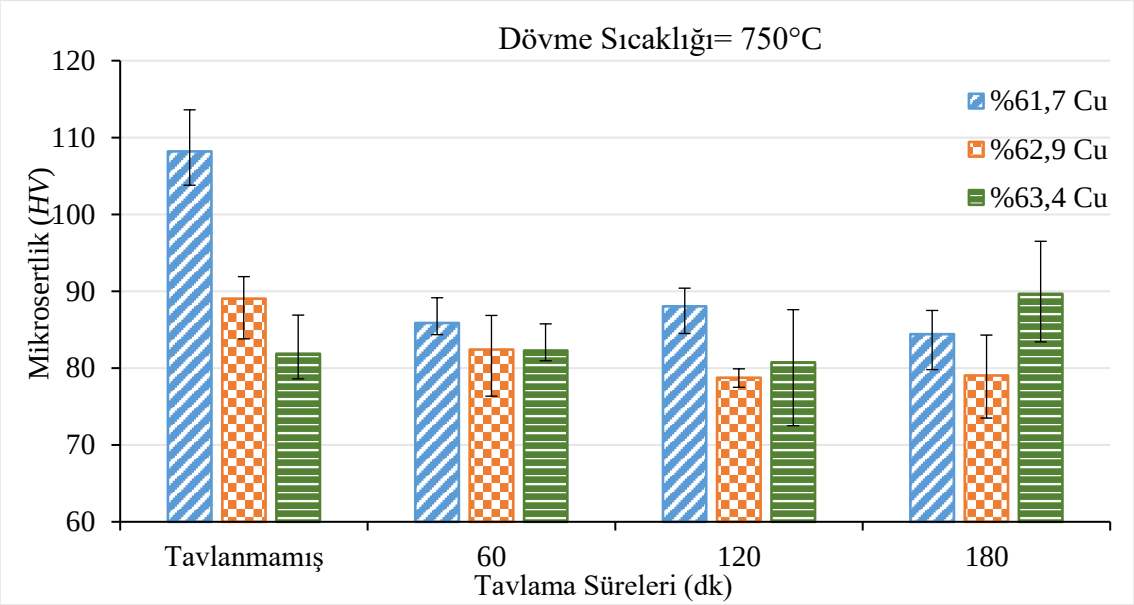
Şekil 3.15 %Cu oranlarına bağlı mikrosertlik değerlerinin dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemede değişimi

Dövme deneyleri sonrasında kesilen CW511L malzemelerin mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Şekil 3.16'da 750°C'de dövülmüş, üç farklı %Cu oranındaki numunelerin kriyojenik soğutma ile soğutulması sonrasında tavlama süresine bağlı sertlik değerlerindeki değişim sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere, %Cu oranının mikrosertlik değerleri açısından önemli değişimlere sebebiyet verdiği özellikle tavlanmamış numunelerde görülmektedir.

Yapılan ölçümlerde en yüksek mikrosertlik değeri %Cu oranının en düşük olduğu durumda yani %61,7 Cu oranındaki numunenin dövme sonrası kriyojenik soğutulması sonrası herhangi tavlama işlemine maruz bırakılmadığı koşulda meydana gelmiştir. Ölçülen bu değer yaklaşık 108 HV olup, dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemenin mikrosertliğine göre yaklaşık %27 daha fazladır. Yine tavlanmamış deney numuneleri dikkate alındığında %62,9 Cu oranındaki numunenin dövme sonrası kriyojenik soğutulması akabinde ölçülen değer yaklaşık 89 HV olup, dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemenin mikrosertliğine göre yaklaşık %6 daha fazla olurken, %63,4 Cu oranındaki numunede ise bu değişim oranı yaklaşık %3 civarında olmuştur. Tavlanmamış deney numunelerinde maksimum ve minimum Cu oranındaki malzemelerde mikrosertlik değerleri açısından yaklaşık %25 değişim görülmektedir.

Mikroyapı sonuçlarının yorumlandığı kısımda belirtildiği üzere tane yapısının küçülmesiyle yapı o kadar güçlenmektedir [31] ve %Cu oranının azalmasıyla mikroyapısal sonuçlardan görüldüğü üzere tane boyutları da küçülmektedir ve yapı güçlenerek

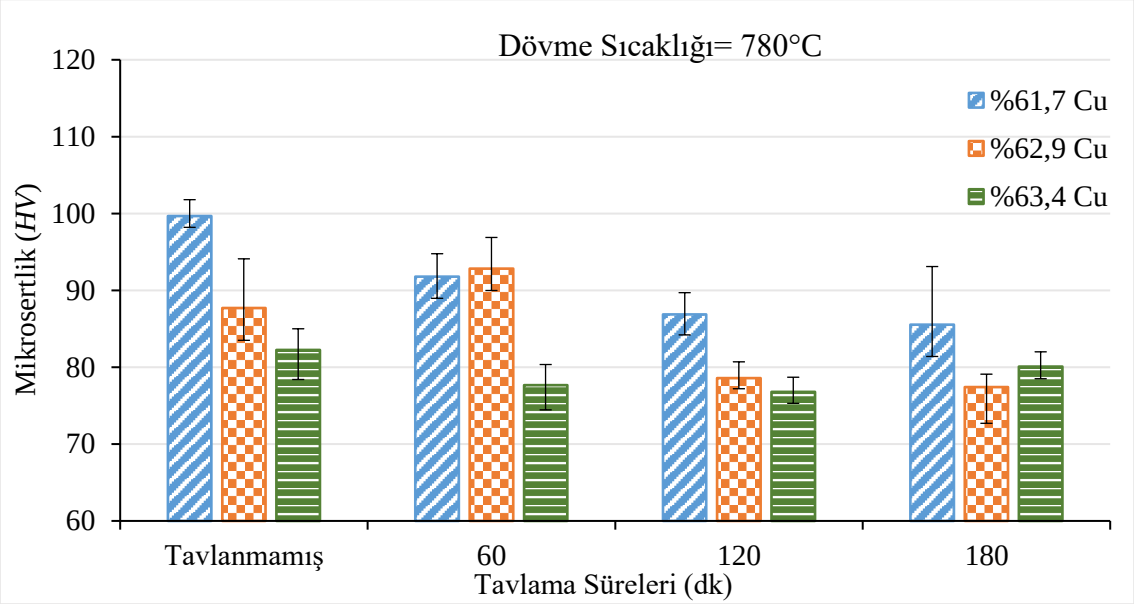
mikrosertlik değerlerinde artış olmuştur. Tavlama, metallerin ve alaşımların yumuşatılması için uygulanan bir ısıl işlemdir[27]. Tavlama işlemi uygulanmış pirinçte, tane boyutunun artmasıyla hem mukavemetin hem de sertliğin azaldığı ve uzamanın arttığı bildirilmiştir[30]. Grafikten görüldüğü üzere, tavlanmamış %61,7 Cu oranındaki numuneden aynı %Cu oranındaki 180 dk tavlı numuneye yaklaşık %22 oranında mikrosertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir.



Şekil 3.16 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 750°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikrosertlik değerlerindeki değişim

780°C dövme sıcaklığında, üç farklı %Cu oranındaki numunelerin dövme ile şekillendirilip kriyojenik soğutma ile soğutulması sonrasında tavlama süresine bağlı numune alınıp mikrosertlik değerleri ölçülmüş ve Şekil 3.17'de sunulmuştur. Genel olarak 750°C dövme sıcaklığında olduğu gibi %Cu oranının ve tavlama süresinin artmasıyla mikrosertlik değerlerinin azaldığını söylemek mümkündür. Ölçülen sertlik değerleri incelendiğinde en yüksek sertlik değeri %61,7 Cu oranındaki malzemede 100 HV ile herhangi bir tavlamam işleminin olmadığı koşulda olmuştur. Grafikten görüldüğü üzere, tavlanmamış koşul dikkate alındığında %61,7 Cu oranın ortalama sertlik değeri yaklaşık 99,7 HV olurken bu değer, %62,9 Cu oranlı malzemede %12 azalarak yaklaşık 88 HV ve %63,4 Cu oranlı malzemede ise yaklaşık %18 azalma olmuş ve yaklaşık 82 HV olarak ölçülmüştür. Tavlanmamış %61,7 Cu oranındaki numuneden aynı %Cu oranındaki 180 dk

tavlı numuneye yaklaşık %14 oranında mikrosertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir.

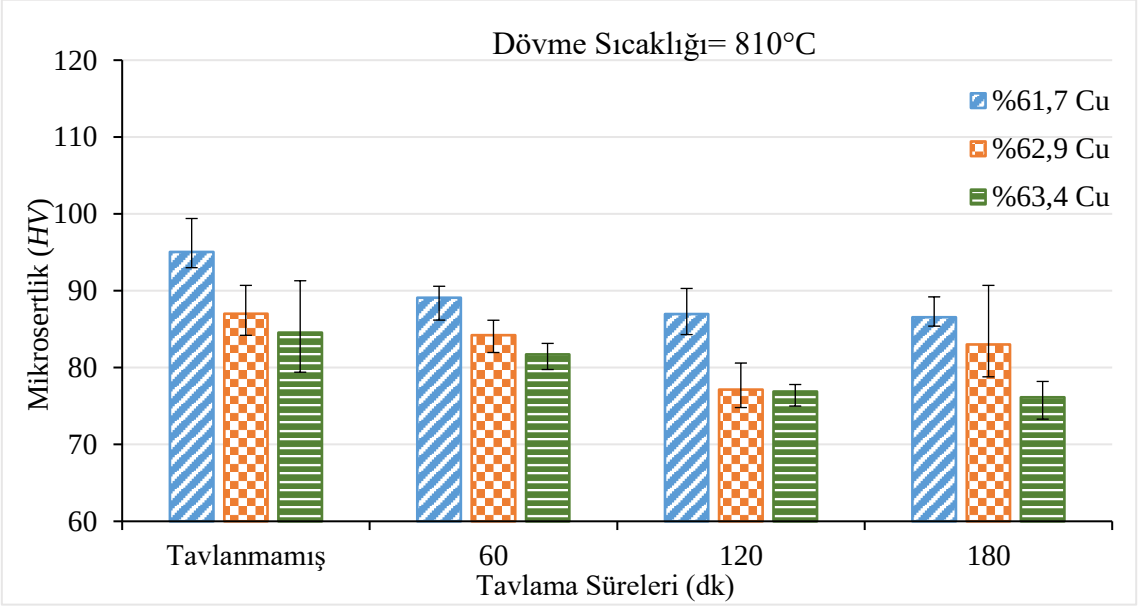


Şekil 3.17 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 780°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikrosertlik değerlerindeki değişim

Gerçekleştirilen deneylerde en yüksek dövme sıcaklığı parametresi olan 810°C'de farklı %Cu oranlarında ve tavlama sürelerinde oluşan mikrosertlik değerleri Şekil 3.18'de sunulmuştur. En yüksek sertlik değeri diğer grafiklerde olduğu gibi %61,5 Cu oranında ve herhangi tavlama prosesine tabi tutulmayan deney numunesinde 95 HV olmuştur. Tavlanmamış koşulda oluşan bu sertlik değeri dövülmemiş ekstrüze deney numunesinin sertlik değerinden yaklaşık olarak %11 artış göstermiştir. En düşük sertlik değeri ise %63,5 Cu oranındaki malzemede, 180 dk tavlama süresi uygulanması sonrasında yaklaşık 76 HV olarak ölçülmüştür. Grafikten görüldüğü üzere, tavlanmamış koşul dikkate alındığında %61,7 Cu oranın ortalama sertlik değeri yaklaşık 95 HV olurken bu değer, %62,9 Cu oranlı malzemede %8,5 azalarak yaklaşık 87 HV ve %63,4 Cu oranlı malzemede ise yaklaşık %11 azalma ile birlikte yaklaşık 84,5 HV olarak ölçülmüştür. Tavlanmamış %61,7 Cu oranındaki numuneden aynı %Cu oranındaki 180 dk tavlı numuneye yaklaşık %9 oranında mikrosertlik değerinde azalma olmuştur.

Üç grafik bir arada değerlendirildiğinde, tavlanmamış numuneler 750, 780 ve 810 °C dövme sıcaklıklarında %Cu oranının değişmesiyle doğrusal azalan bir dağılım gösterirken,

tavlanmış numunelerde kendi arasında net bir dağılım gözlemlenmemiş, yine tavlama süresinde olduğu gibi %63,4 Cu oranındaki sonuçlarda da bu düzensiz dağılım göze çarpmaktadır. Fakat dövme sıcaklığının artmasıyla daha düzenli bir dağılım ortaya konulmuştur. Bu durumun yüksek sıcaklıklarda dövme esnasında malzeme iç yapısında beta fazlarının artması ve hızlı soğutmanın etkisiyle beta fazlarının çözünmeden daha düzenli bir şekilde yapıda kalmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. Bu durum faz analizi sonuçlarına dayanarak da desteklenebilir. Bakır oranının minimum olduğu %61,7 Cu içeren malzemede beta fazlarının dağılımı maksimum seviyededir ve Cu oranının artması ile beta fazlarının dağılımı yüzdesel olarak azalmaktadır, tavlama süresinin artmasının da benzer bir etkisi bulunmaktadır yani yapıdaki beta fazları yok denecek kadar az seviyelere düşmektedir. Dolayısıyla beta fazının olmadığı ve homojen bir dağılımın olmadığı kısımlarda sertlik değerleri açısından doğrusal olmayan bir dağılım ile karşılaşılabilmektedir.



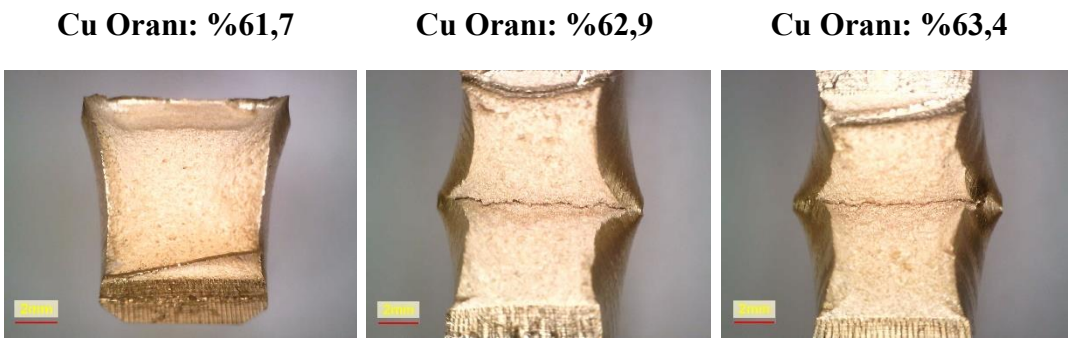
Şekil 3.18 Farklı %Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerin 810°C dövme sıcaklığında dövülmesi sonrası tavlama süresine bağlı mikrosertlik değerlerindeki değişim

3.4 Çentik Darbe Testi Sonuçları

Darbe Deneyi, malzemelerin dinamik zorlamalar altında kırılması için gereken enerji miktarını belirlemek ve metalik malzemelerin gevrek kırılma göstereceği alanlarda mekanik özellikleriyle ilgili bir fikir elde etmek için yapılır. [35].

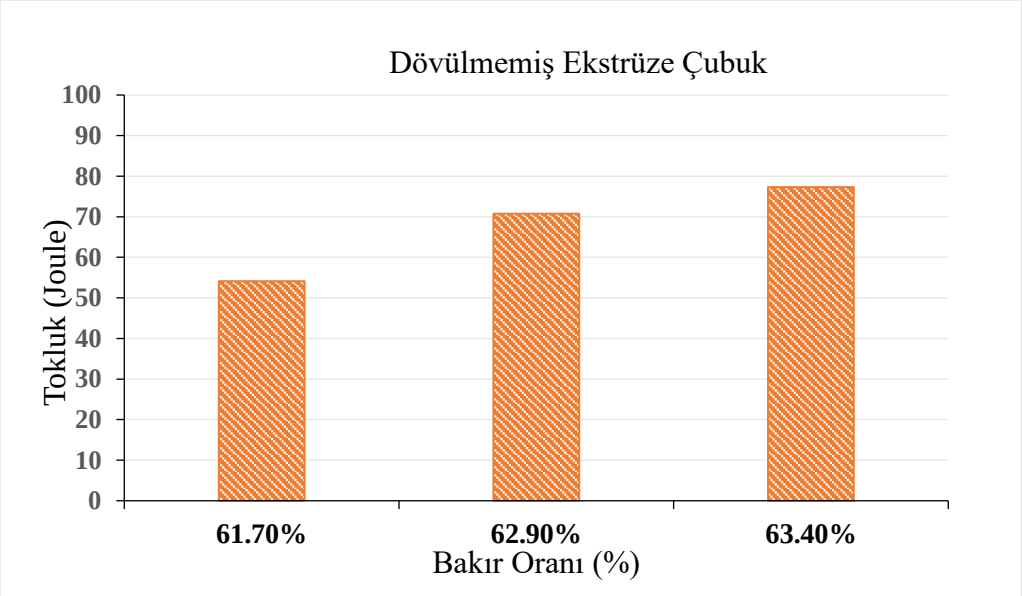
Küçük taneli çelikler, kaba tanelilerden daha iyi darbe enerjisine sahiptir. Tane boyutu ile geçiş sıcaklığı doğru orantılıdır. Çeliğin mikro yapısı çentik tokluğunda önemlidir. Mikro yapı bileşim ve mekanik özelliklerden bağımsız olarak çeliğin tokluğuna etki edebilir. Temperlenmiş martenzit veya beynitik yapı diğer mikro yapılara kıyasla en yüksek çentik tokluğu ve en düşük geçiş sıcaklığı sağlar [38] Malzemenin şekillendirilmesi, alaşım elementleri, soğutma prosedürleri, tavlama vb. süreçler istenen mikroyapısal faz ve tane boyutu dağılımının elde edilmesi ve malzemenin kırılma davranışı üzerinde önemli derece etkiye sahiptir ve bu davranış işlenebilirlik ve talaş kırılabilirliği gibi talaşlı imalat çıktılarıyla ilişkilidir[40, 41].

İlk olarak dövülmemiş olan farklı Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemelerden standarda uygun 7.5x10x55 mm boyutlarında çıkartılıp, çentik testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.19'da bu numunelerin %Cu oranına bağlı olarak kırılma yüzeyindeki değişimin görüntüleri sunulmuştur. Görüntüler incelendiğin %61,7 Cu oranındaki numunede kırılma tam olarak gerçekleşmiştir. Cu oranının %62,9 ve %63,4 olduğu durumlar daha birbirine benzer sünek bir kırılma davranışı görülmüştür.



Şekil 3.19 Cu oranındaki değişime bağlı dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemeden hazırlanmış çentik numunelerinin kırılma sonrası yüzeylerindeki değişim

Şekil 3.20'de dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemedeki %Cu oranındaki değişimin tokluk değerlerindeki değişime etkisi sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, %Cu oranının artmasıyla tokluk değerlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Önceki kısımda sunulmuş olan mikrosertlik sonuçlarında %Cu oranının artmasıyla değerlerin azaldığı görülmekteydi, burda da sertliklerle ters ilişkili bir dağılımla toklukların arttığı görülmüştür. %61,7 Cu oranında tokluk değeri yaklaşık 54 J iken, %62,9 Cu oranındaki malzemede %30 değişim göstererek 70 J ve %63,4 Cu oranında ise yaklaşık %43 değişimle 77 J olarak ölçülmüştür. Nispeten daha düşük beta fazı yüzdesine sahip olan, %63,4 Cu oranındaki ekstrüze çubuk malzemede (Şekil 3.8) ve ortaya çıkan mikroyapı, üç eksenli bir gerilim durumunda diğerlerine nazaran boşluk büyümesine ve birleşmeye karşı dirençlidir ve daha düzgün bir uzama verir. Artan uzama miktarı ise daha iyi birim şekil değişirme hassasiyeti ve boyunlaşma oluşumuna direnç ile bağlantılıdır[42]. Bu yüzden, %Cu oranının maksimum olduğu malzeme sünekleşip, tokluk değerlerinde artışa sebebiyet vermiş ve ekstrüze çubuk malzemedeki mikrosertlik değerleri de %Cu oranının artmasıyla, azalarak tam tersi bir dağılım sergilemiştir.

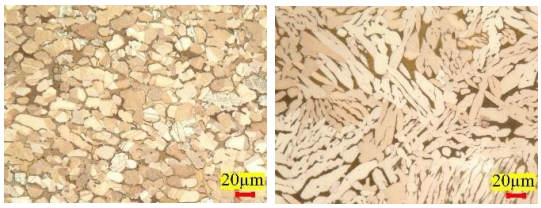


Şekil 3.20 %Cu oranındaki değişime bağlı dövülmemiş ekstrüze çubuklardaki tokluk değerlerindeki değişim

Şekil 3.22'de %61,7Cu oranındaki malzemenin farklı dövme sıcaklıklarında ve tavlama süresinin değişmesiyle elde edilen tokluk değerleri sunulmuştur. Dövme sıcaklıklarının tokluk değerleri açısından önemli değişimlere sebebiyet verdiği, genel itibariyle dövme sıcaklığının artmasına bağlı deneyleri gerçekleştirilen her bir tavlama koşulunda tokluk

değerlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Şekil 3.21'deki görselde görüldüğü gibi soldaki 750°C, sağdaki ise 810°C dövme sıcaklığında %61,7 Cu oranındaki tavlanmamış numuneden elde edilen mikroyapı görüntüleridir. 750°C'de beta fazları dağılımı uzunlamasına ve genelde aynı yönde yapıca daha birbirine yakın bir dağılım gösterirken, dövme sıcaklığının artmasıyla, α / β fazı sınırlarındaki yüzey enerjisi artmaktadır[42] ve malzemenin kriyojenik soğutulmasıyla birlikte beta fazları daha rastgele, daha parçalı ve farklı yönlerde de uzayan bir dağılımla Widmanstätten yapısına benzer bir dağılımla tane sınırlarına çökelme göstermiştir. Kritik sıcaklıkların üzerinde, bileşim alaşımlarının sünekliğinin ve tokluğunun belirgin şekilde artabilmektedir. Yüksek sıcaklıkta oluşan düzensiz faz, düzenli yapıdan çok daha kolay deforme olmaktadır[1].

750°C dövme sıcaklığında ölçülen tokluk değeri yaklaşık 36 J iken bu değer, %39 oranında artarak 810°C dövme sıcaklığında yaklaşık 50 J olarak ölçülmüştür. Beta fazları normal şartlarda kırılmaya eğilimli HMK kafes sistemine sahip sert fazlardır. Dolayısıyla daha düzgün tek yönde ilerleyen beta fazları, tane sınırı ve arayüzeyinde yüzey enerjisini azaltarak taneler arası gevrek kırılma davranışı gösterirken, parçalı yapıda malzemenin kırılması için gereken enerji daha fazladır ve bu yüzdendir ki tokluk değerleri özellikle %61,7 Cu oranıda özellikle 810°C dövme sıcaklığında daha fazla olmuştur.

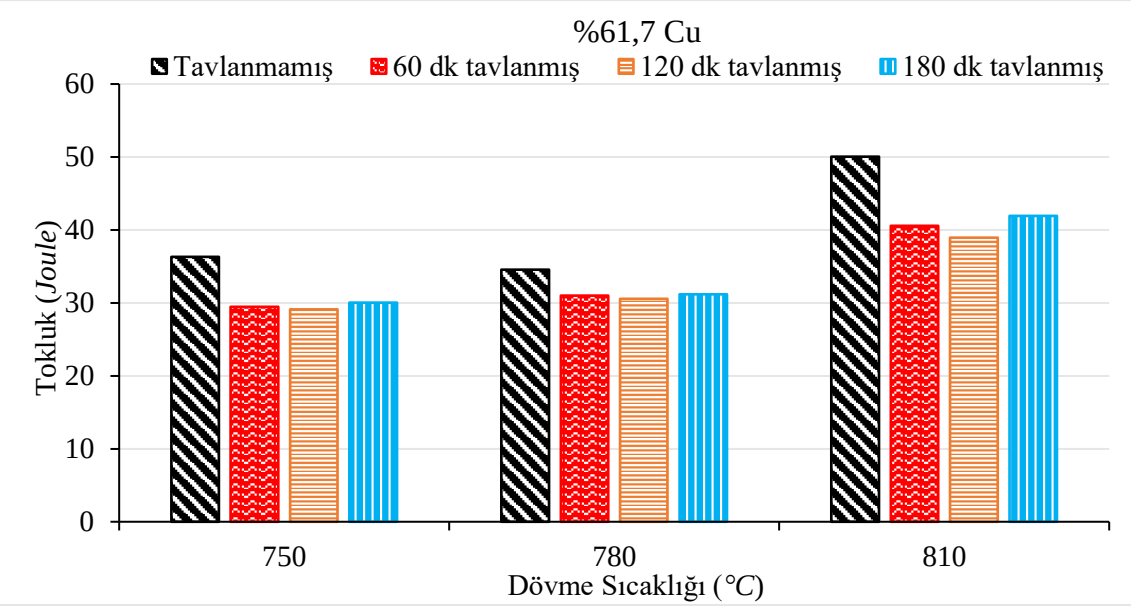


Şekil 3.21 750-810°C dövme sıcaklıklarındaki mikroyapısal dağılım

Tavlama süreciyle birlikte tokluk değerlerinde azalma olmuştur. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre en yüksek tokluk değeri 810°C dövme sıcaklığında dövülüp, herhangi tavlama işlemine maruz bırakılmadığı durumda oluşmuştur. Ölçülen değer yaklaşık 50 J olup, dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemenin tokluk değerine göre yaklaşık %7,5 daha azdır. Grafikteki minimum tokluk değeri ise ekstrüze çubuktaki tokluk değerine göre yaklaşık %46 azalarak 29 J civarında ölçülmüştür.

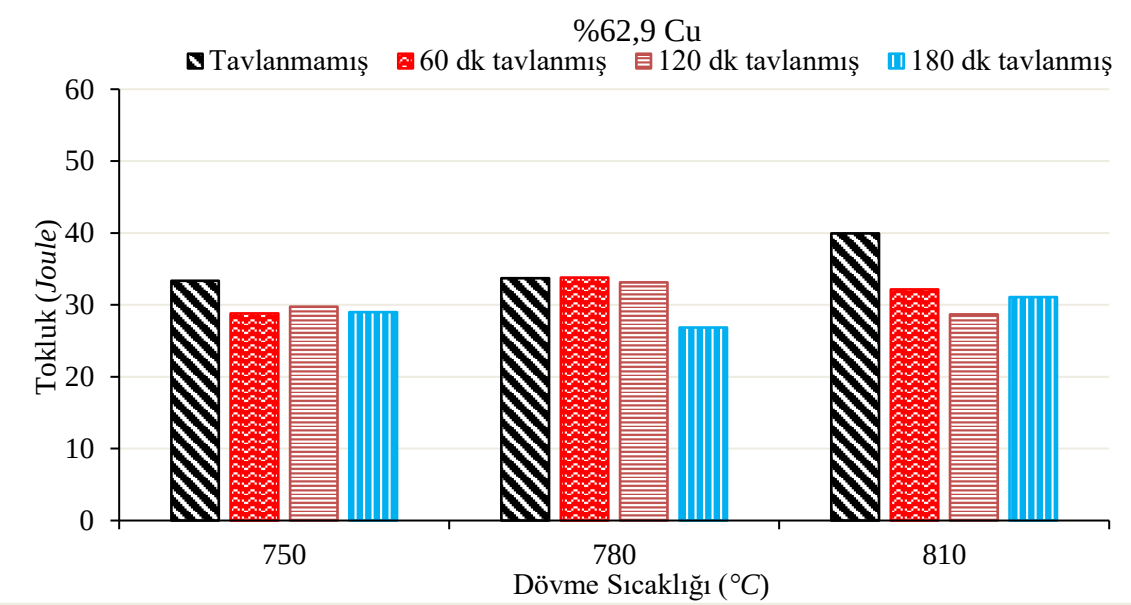
Normal şartlarda, tavlama işlemi genel itibariyle malzemedeki süneklik ve/veya tokluğunun özelliklerinin arttırılması amacıyla yapılan bir ısıl işlemdir [27].

Yapılan deneyler sonucunda tavlama işlemi ile birlikte tokluk değerlerinde, 750°C dövme sıcaklığındaki numunelerde ortalama % 20 azalan bir değişim, 780°C'de yaklaşık ortalama %9, 810°C dövme sıcaklığında ise ortalama % 20 bir azalma oluşmuştur. Tavlama süreleri açısından tokluk değerlerinin birbirine yakın değerlerden oluştuğu gözlemlenmiştir. Yine bu konuyla bağlantılı olan diğer konu ise, tavlama süresinin artmasıyla, azalan mikrosertlik değerleridir. Normal şartlarda, sertlik değerlerinin azalmasıyla, tokluk değerlerinin artması beklenirken, her ikisinin artması şaşırtıcıdır. Bu konuyla ilgili yapılan bir çalışmada, CW510L (CuZn42) ve CW511L (CuZn38) alaşımlarının kırılma enerji sonuçları ısıl işlem sonrası kıyaslanmış CW511L malzemede ısıl işlem uygulandığında darbe enerjisinde %20 civarında azalma görülmüştür. Her iki alaşımda da ısıl işlem sonrası ve öncesi durum sertik-tokluk değerleri açısından kıyaslandığında sertlik ve tokluk sonuçlarının birbiriyle doğru orantılı arttığı ve azaldığı görülmüştür. Bu durumun malzemenin hızlı soğutulması sonrasında malzemedeki pekleşme davranışından olabileceği tahmin edilmektedir[19]. Fakat daha net sonuçlar için mikroyapısal olarak daha derinlemesine ayrıntılı çalışmaların yapılması gerektiği düşünülmektedir.



Şekil 3.22 %61,7 Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemenin farklı dövme sıcaklıklarında şekillendirilmesi sonrası, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan numunelerde tavlama süresine bağlı tokluk değerlerindeki değişim

%62,9Cu oranındaki malzemenin farklı dövme sıcaklığı ve tavlama süresinin değişmesiyle elde edilen tokluk değerleri Şekil 3.23'de sunulmuştur. %61,7 Cu oranında olduğu gibi, tavlamayla birlikte tokluk değerlerinde azalma oluşmuştur. Fakat %61,7 Cu oranından farklı olarak tavlanmış numuneler kararlı bir dağılım vermemesine rağmen kendi aralarında birbirine yakın tokluk değerleri oluşturmuştur. Tavlanmamış numunelerde ise tıpkı %61,7 Cu oranlı malzemedeki gibi dövme sıcaklığının artmasına bağlı tokluk değerinde artış meydana gelmiştir. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre en yüksek tokluk değeri 810°C dövme sıcaklığında dövülüp, herhangi tavlama işlemine maruz bırakılmadığı durumda oluşmuştur. Ölçülen değer yaklaşık 40 J olup, dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemenin tokluk değerine göre yaklaşık %43 daha düşük olmuştur. Grafikteki minimum tokluk değeri ise ekstrüze çubuktaki tokluk değerine göre yaklaşık %62 azalarak 27 J civarında ölçülmüştür. Tavlama işlemi ile birlikte 750°C dövme sıcaklığındaki numunelerde ortalama % 12 azalan bir değişim, 780°C'de çok küçük bir değişim ve 810°C dövme sıcaklığında ise ortalama % 25 bir azalma oluşmuştur.

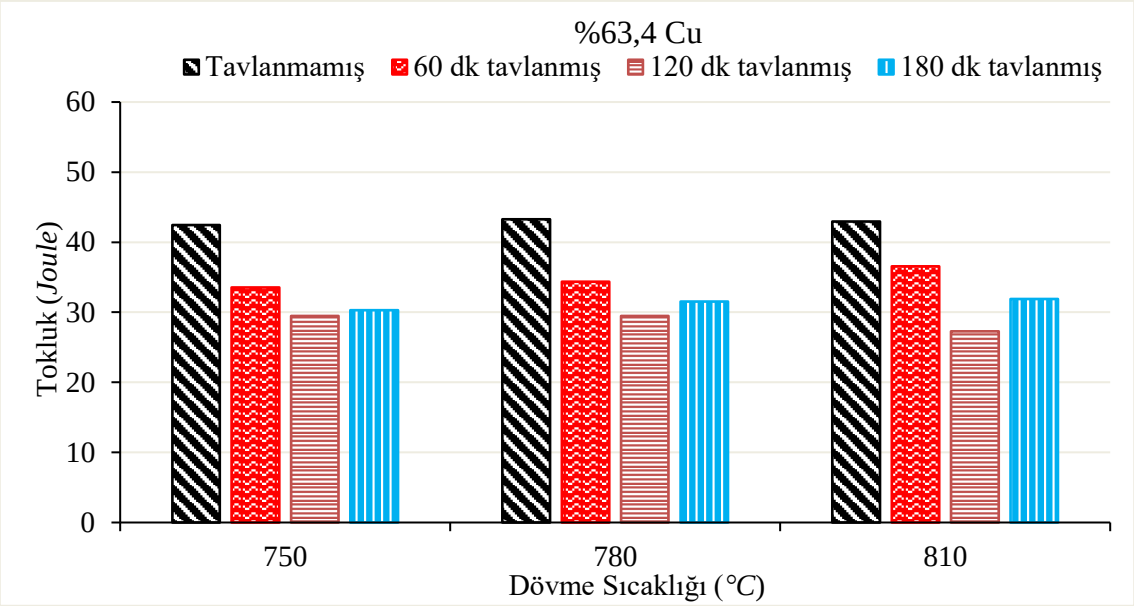


Şekil 3.23 %62,9 Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemenin farklı dövme sıcaklıklarında şekillendirilmesi sonrası, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan numunelerde tavlama süresine bağlı tokluk değerlerindeki değişim

Şekil 3.24'de ise %63,4 Cu oranındaki malzemenin farklı dövme sıcaklığı ve tavlama süresinin değişmesiyle elde edilen tokluk değerleri sunulmuştur. Bu malzemenin dövme öncesinde diğer %Cu oranlarına nazaran alfa fazının baskınlığına ve dolayısıyla daha

düşük yüzdede sert beta fazı içermesi ve o dövme sıcaklıklarına çıkıldığı anda yüksek oranda düzensiz beta fazı seviyesinin elde edilememesiyle birlikte dövme sıcaklığının %63,4 Cu oranındaki malzemede tokluk değerleri üzerine etkisi sınırlı olmuştur. Bu durum özellikle 810°C dövme sıcaklığına bakıldığında göze çapmaktadır. Tavlama süreciyle birlikte ise tokluk değerlerinde bir miktar azalma olmuştur. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre en yüksek tokluk değeri yaklaşık 43 J olup, dövülmemiş ekstrüze çubuk malzemenin tokluk değerine göre yaklaşık %44 daha azdır. Grafikteki minimum tokluk değeri ise ekstrüze çubuktaki tokluk değerine göre yaklaşık %65 azalarak 27 J civarında ölçülmüştür. Tavlama işlemi ile birlikte 750°C dövme sıcaklığındaki numunelerde ortalama % 27 azalma gerçekleşirken, 780°C'de yaklaşık %25 olmuş ve 810°C dövme sıcaklığında ise ortalama % 26 bir azalma olmuştur. Tavlama süreleri açısından sürenin artmasıyla birlikte tokluk değerlerinde azalma olmuş fakat 180 dk tavlı numunelerde bir miktar artış oluşmuştur bu durum yapıdaki beta fazının 180 dk tavlanmış numunelerde tamamına yakınının alfa fazına dönüşmesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Her üç grafik bir arada değerendirildiğinde, tavlanmamış koşuldaki numunelere odaklanıldığında, sırasıyla 750 ve 780° dövme sıcaklıklarında, %61,7Cu oranından %62,9 Cu oranına numunelerde birbirine yaklaşık %2-4 civarında tokluk değerleri artarak yakın değerler elde edilirken, %61,7Cu oranından %63,4 Cu oranına tokluk değeri ortalama yaklaşık %28 oranında artış göstermiştir. Mikrosertlik değerleri açısından da bu parametrelerde Cu oranının artmasıyla sertlik değerleri azalmıştı, bu açıdan sertlik- tokluk arasında ters orantı beklendiği gibi mevcuttur. Fakat 810° dövme sıcaklığında %Cu oranının azalmasına rağmen tokluk değerinin maksimum değerlere çıkması buna ek olarak önceki kısımda sunulan mikrosertlik değerlerinin de tokluk değerleri gibi artış göstermesi göze çarpan sonuçlardan biridir. Bu durum sadece tavlanmamış koşulda değil tüm tavlama koşullarında mevcuttur. Bunun sebebini ise, dövme sonrası malzemede oluşan mikroyapıyasal değişimlere bağlı Şekil 3.21'de açıklanmıştır.



Şekil 3.24 %63,4 Cu oranına sahip ekstrüze çubuk malzemenin farklı dövme sıcaklıklarında şekillendirilmesi sonrası, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan numunelerde tavlama süresine bağlı tokluk değerlerindeki değişim

4. TALAŞLI İMALAT TEST VE ANALİZLERİ

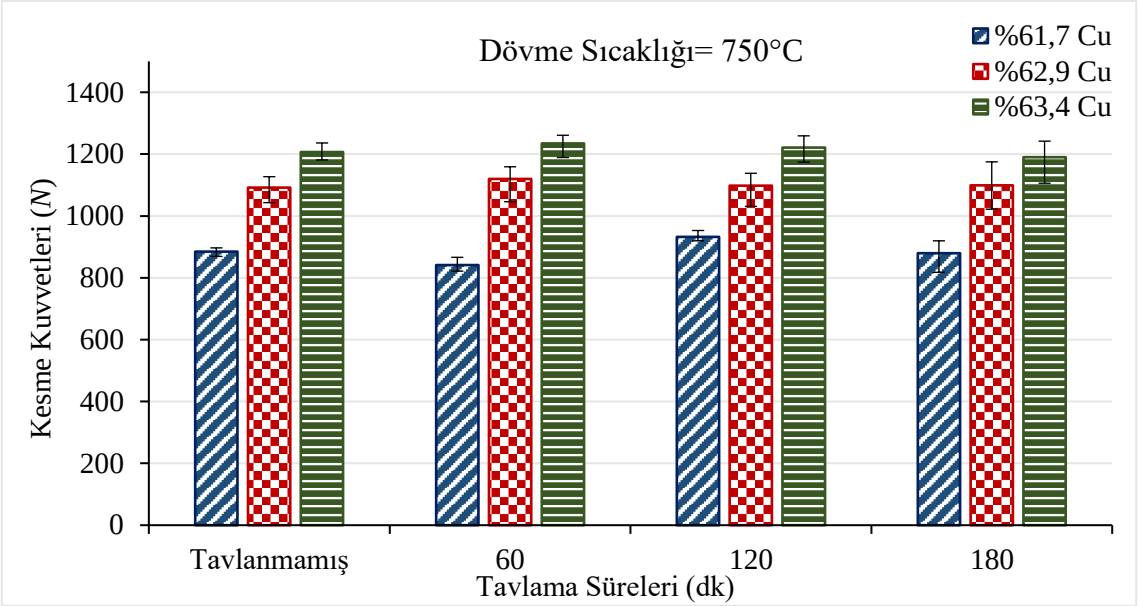
4.1 Kesme Kuvvetleri Sonuçları

Bakır alaşımlarından olan CW511L kurşun oranı düşük pirinç malzemelerdendir ki bu sebeple diğer pirinç alaşımlarına nazaran işlenmesi daha zordur[16]. Dolayısıyla bu durum yüksek kesme kuvvetlerine ve işleme ile ilgili farklı tipte problemlere sebebiyet verebilmektedir[2]. Bu operasyonda kesici takıma etki eden esas kesme kuvveti ilerleme kuvvetidir. Normal şartlarda talaşlı imalat kesme parametrelerinden olan devir, ilerleme ve kesici takım geometrisi kesme kuvvetlerinde ve işlenebilirlik özellikleri üzeride önemli değişimlere sebebiyet veren unsurlardır. Fakat bu tez çalışması kapsamında, malzemenin ve dövme parametrelerinin işlenebilirlik üzerine etkisi inceleneceğinden tüm talaşlı imalat deneyleri 3000 dev/dak ve 300 mm/dak ilerleme parametrelerinde gerçekleştirilmiştir.

Alaşımların işlenebilirliği, alaşımın mikro yapısı ile mekanik özellikleri ile bağlantılıdır. Güç tüketimi mekanik özelliklere bağlıyken, işlenebilirlik kabiliyeti ise metalin mikroyapısal değişimlerine bağlıdır [27]. Bu durumda beta fazları ve dolayısıyla sertlik de etkilenmektedir. Sonuç olarak herbiri birbiriyle bağlantılıdır. Talaşlı işlenebilirlik, β-faz içeriğinden ve α-faz kristallerinin boyutundan etkilenen fazlar arası sınırların boyutu artırılarak iyileştirilir. Yumuşak malzemeler genellikle sert alaşımlara nazaran daha az enerji tüketmektedir ve takım aşınmaları daha az oluşmaktadır. Daha ince tane boyutları mekanik özellikler açısından faydalıdır ve daha ince taneli metaller, kaba yapıya sahip olanlardan daha güçlü ve daha sünektir ve bu durum işlenebilirliği daha iyi konuma getirmektedir. Ek olarak, malzeme yapısında oluşabilen düzensizlikler de talaş kırılabilirliğini ve dolayısıyla işlenebilirliği etkileyebilmektedir [38].

Şekil 4.1'de 750°C dövme sıcaklığında şekillendirilip kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası oluşan kesme kuvvetlerinin ortalama değerleri görülmektedir. Grafik incelendiğinde, %Cu oranının önemli oranda etkisi olduğu görülmektedir. Özellikle bu üç %Cu oranının da CW511L yani aynı malzeme olduğu düşünüldüğünde gerçekleşen değişimlerin işlenebilirlik açısından önemli farklar oluşturduğu görülmüştür. Faz analizleri sonuçlarının sunulduğu kısımda %Cu oranının azalmasıyla %beta fazlarının dağılımının arttığı belirtilmişti ve buna bağlı daha fazla β-fazı dağılımı ve daha ince α-

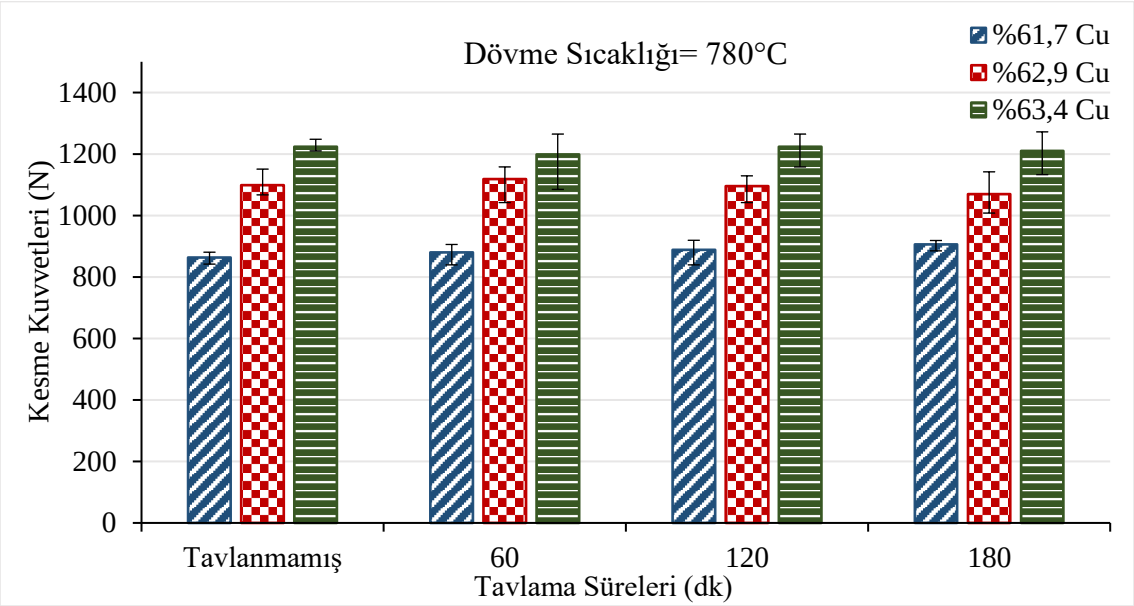
kristalleri, daha uzun interfaz sınırları oluşturma eğiliminde olduğu durumlardaki mikroyapısal dağılımlar işlenebilirliği olumlu anlamda etkilemektedir[38]. Tavlanmamış deney numunelerinin işlenmesi esnasında, %Cu oranının artmasıyla kesme kuvvetlerinin arttığı ve işlenebilirlikte azalma meydana geldiği görülmektedir. Yüksek oranda YMK kafes yapıdaki sünek α fazı ve düşük miktarda kurşun içeren alaşımlarda temas bölgesinde oluşan yüksek sürtünmeyle birlikte kesme kuvvetlerinde artış meydana gelebilmektedir[6]. %Cu oranının artmasına bağlı artan α fazlarıyla birlikte kesme kuvvetlerindeki artış bu durumu doğrulamaktadır. Yine farklı bir çalışmada, farklı bakır alaşımları üzerine işlenebilirlik testleri gerçekleştirilmiş ve kesme kuvvetleri açısından en yüksek değerler çinkoca fakir ya da bakır açısından zengin diyebileceğimiz alaşımlarda elde edildiği görülmüştür ayrıca bu çalışmada kurşunun etkisi de belirtilmiştir[43]. %61,7 Cu oranında 885 N kuvvet elde edilirken, %62,9 Cu oranında yaklaşık %23 artarak ortalama 1092 N ve %63,4 Cu oranında ise yaklaşık %36 oranında artış olup 1207 N kuvvet değeri oluşmuştur. Görüldüğü gibi %Cu oranının en düşük olduğu durumda %beta fazlarınca baskın ve alfa fazlarının da tane boyutlarının daha küçük olmasıyla kesme işlemi daha da kolaylaşmıştır. Tane boyutları açısından daha ince yapıda olan taneler kaba yapılı tanelere nazaran yapıyı güçlendirip işlenebilirliği artırmaktadır[27]. 750°C dövme sıcaklığındaki numunelerde maksimum kuvvet değeri yaklaşık 1234 N ile %63,4 Cu oranındaki 60 dk tavlanmış deney numunesinden elde edilmiştir. Minimum kuvvet değeri ise yine 60 dk tavlanmış numunelerden Cu oranının %61,7 olduğu durumda yaklaşık 842 N olarak elde edilmiştir. Elde edilen minimum kuvvet değerinden maksimum kuvvete yaklaşık %47 oranında değişim meydana gelmiştir.



Şekil 4.1 750°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası oluşan kesme kuvvetlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)

780°C dövme sıcaklığında şekillendirilip kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası oluşan kesme kuvvetlerinin değişimi grafiksel olarak Şekil 4.2'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, tıpkı 750°C dövme sıcaklığında olduğu gibi %Cu oranının bariz bir etkisi olduğu görülmektedir. Tavlanmamış deney numunelerinin işlenmesi esnasında, %Cu oranının artmasıyla kesme kuvvetlerinin arttığı ve buna bağlı işlemenin zorlaştığı ifade edilebilir. Yine oransal olarak karşılaştırmak açısından, tavlanmamış numuneler dikkate alındığında işleme esnasında %61,7 Cu oranındaki malzemede 864 N kuvvet elde edilirken, %62,9 Cu oranında yaklaşık %27 artarak ortalama 1099 N ve %63,4 Cu oranında ise yaklaşık %42 oranında artış olup 1224 N kuvvet değeri ölçülmüştür. Dövme sıcaklığının bir kademe artırılmasıyla değişim yüzdeleri de bir miktar artmıştır. 780°C dövme sıcaklığında şekillendirilmiş numunelerde delik delme işlemi esnasında oluşan minimum kuvvet değeri tavlanmamış numunelerden Cu oranının %61,7 olduğu durumda yaklaşık 864 N olarak elde edilirken, maksimum kuvvet değeri ise yaklaşık 1224 N ile %63,4 Cu oranındaki 120 dk tavlanmış deney numunesinde oluşmuştur. Elde edilen

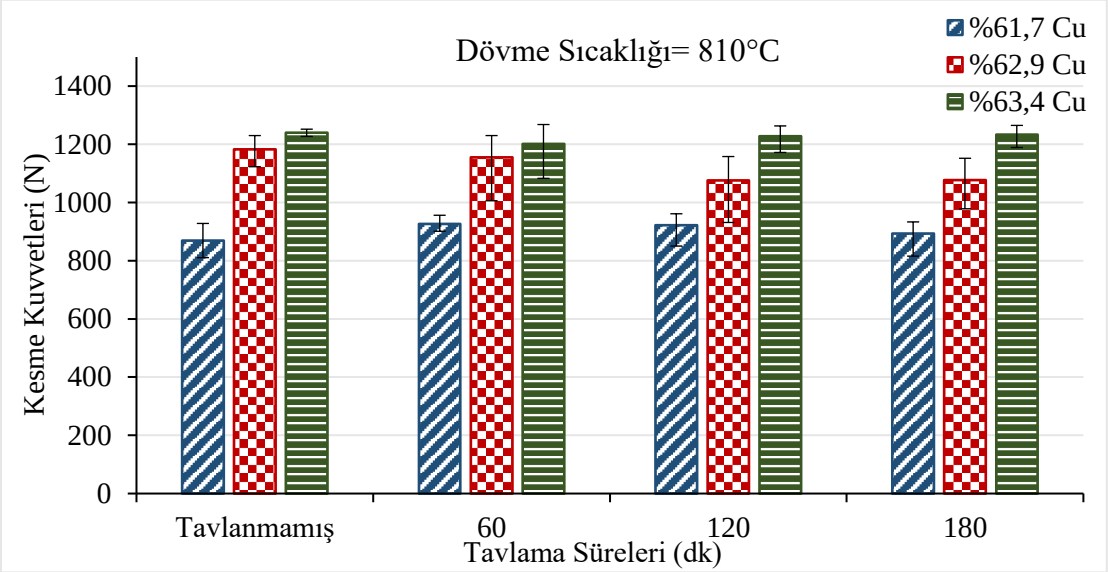
minimum kuvvet değerinden maksimum kuvvet değerine yaklaşık %42 oranında değişim meydana gelmiştir.



Şekil 4.2 780°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası oluşan kesme kuvvetlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)

Şekil 4.3'de 810°C dövme sıcaklığında şekillendirilip kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası oluşan kesme kuvvetlerindeki değişimin grafiği sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, %Cu oranının 750-780°C dövme sıcaklıkları grafiklerinde olduğu gibi önemli oranda etkisinin olduğu görülmektedir. Tüm tavlama sürelerindeki deney numunelerinin işlenmesi esnasında, %Cu oranının artmasıyla kesme kuvvetlerinin arttığı ve işlenebilirlikte azalma meydana geldiği bu dövme sıcaklığı parametresinde de durumu desteklemektedir. Yine tavlanmamış koşuldaki sonuçlar dikkate alındığında, %61,7 Cu oranında 869 N kuvvet elde edilirken, %62,9 Cu oranında yaklaşık %36 artarak ortalama 1183 N kuvvet değeri elde edilmiş ve bu oran daha düşük dövme sıcaklıklarına göre oluşan en büyük değişim yüzdesi olmuştur. %63,4 Cu oranında ise yaklaşık %43 oranında artış olup yaklaşık 1240 N kuvvet değeri oluşmuştur. 810°C dövme sıcaklığında şekillendirilmiş numunelerde delik delme işlemi esnasında oluşan en yüksek ve en düşük değerler açısından değerlendirildiğinde ise minimum kuvvet değeri tavlanmamış

numunelerden Cu oranının %61,7 olduğu durumda yaklaşık 869 N olarak ölçülürken, maksimum kuvvet değeri ise yaklaşık 1240 N ile %63,4 Cu oranındaki yine tavlanmamış deney numunesinde oluşmuştur. Elde edilen minimum kuvvet değerinden maksimum kuvvet değerine yaklaşık %43 oranında değişim meydana gelmiştir.



Şekil 4.3 810°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası oluşan kesme kuvvetlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)

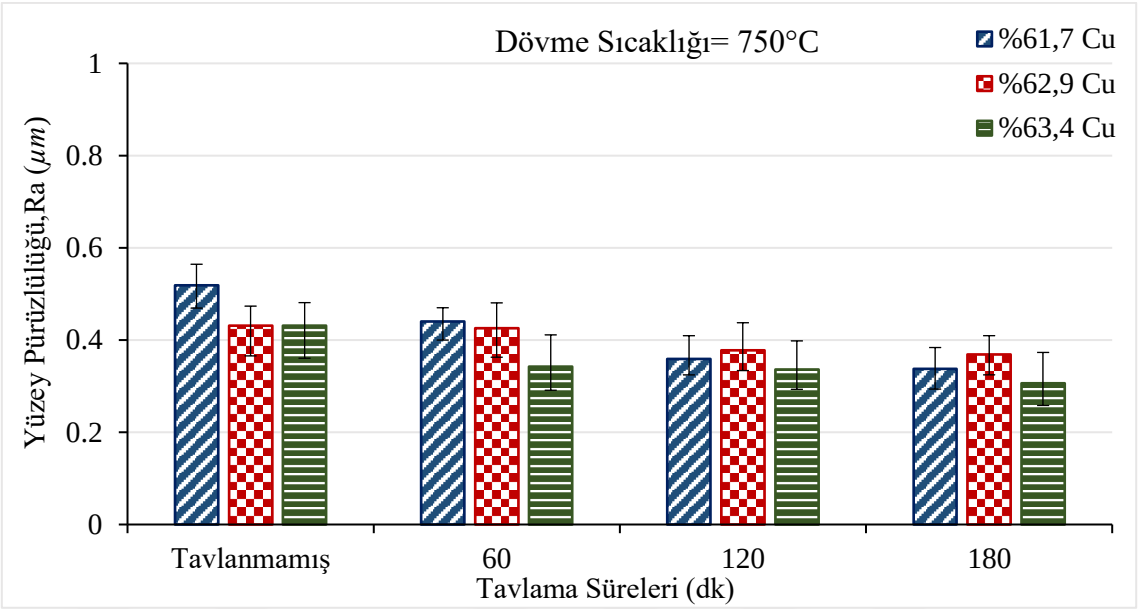
4.2 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

İşlenen parçaların yüzey kalitesi talaşlı imaat sonrası istenen bir özelliktir ve bu yüzey kalitelerinin iyi olması her zaman en önemli sorumluluklardan biri olmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün parçaların yorulma ömrünü, korozyonunu, sürtünme ve ısıl iletkenliğini etkilediği bilinmektedir[44].

Yüzey pürüzlülüğü normal şartlar altında talaşlı imalat parametrelerinden olan ilerleme ve kesici takım uç yarıçapından etkilenmektedir[45]. Fakat bu çalışmada sabit devir, ilerleme ve kesici takım kullandığımızdan daha çok dövme parametrelerinin ve dolayısıyla malzemedeki değişimin talaşlı imalatı nasıl etkilediği ve dolayısıyla elde edilecek yüzey kalitesinin göstereceği değişim hakkında bilgi elde edilmiştir. Uygun olmayan şekilde taşlanmış kesici takımların pirinç gibi yumuşak malzemeleri kazıma eğilimi vardır, bu da

kötü yüzey kalitesine yol açmaktadır Tavlama mukavemetin yanı sıra işlenebilirliği ve yüzey pürüzlülüğünü de etkiler. [27].

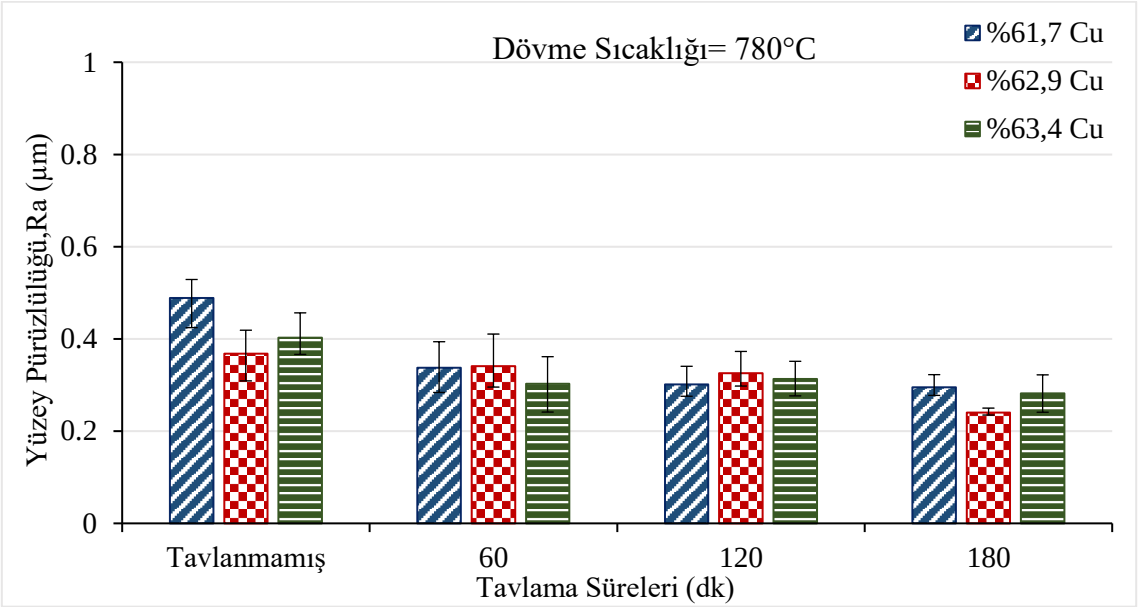
Yapılan talaşlı imalat testleri sonrası delik yüzeylerinden pürüzlülük değerleri Ra cinsinden ölçülmüştür. Şekil 4.4'de 750°C dövme sıcaklığında şekillendirilen üç farklı %Cu oranındaki numunelerin kriyojenik soğutma işleminin ardından, tavlama parametrelerindeki değişime bağlı delik delme operasyonu sonrası yüzeylerdeki pürüzlülük değerlerindeki değişim sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, genel olarak uzun süreli tavlanan numuneler hariç tutulduğunda %Cu oranının artmasıyla pürüzlülük değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. Cu oranının artmasıyla dış yüzeyin sünekleşmesiyle daha iyi bir yüzey kalitesi elde edildiği sonucuna varılabilir. Zaten sert malzemeler daha kırıntılı talaş verirken, sünek malzemelerde bir miktar daha sürekli talaş oluşumuyla daha iyi yüzey elde edildiği söylenebilir.Tavlanmamış deney numunelerinde oluşan pürüzlülük değerleri dikkate alındığında, en yüksek pürüzlülük değeri %61,7 Cu oranındaki malzemede olmuştur. Bu koşulda ölçülen değer ortalama 0,52µm civarındadır. %62,9 Cu oranında ise ölçülen ortalama 0,43 µm pürüzlülük değeriyle %61,7 Cu oranındaki malzemeden yaklaşık %17 daha az bir değer oluştururken, yine %63,4 Cu oranında yaklaşık %17-18 oranında değişim gözlemlenmiştir. Tavlama süreleri açısından değerlendirildiğinde ise her bir % Cu oranındaki malzemede de tavlama süresinin artmasıyla pürüzlülük değerlerinde azalan bir dağılım gözlemlenmiştir. Tavlanmamış %61,7 Cu oranındaki deney numunesinde oluşan pürüzlülük değeri ortalama 0,52 µm iken, 180 dk tavlı %61,7 Cu oranındaki numunede bu değer %35 azalarak 0,34 µm olarak ölçülmüştür. Grafikteki maksimum pürüzlülük değeri %61,7 Cu oranındaki tavlanmamış deney numunesinde 0,52µm iken, minumum pürüzlülük değeri ise %63,4 Cu oranındaki 180 tavlı deney numunesinde 0,31 µm olarak ölçülen değerdir. Minimum yüzey pürüzlülüğü değerinden maksimum pürüzlülük değerine yaklaşık %68 değerinde değişim gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4 750°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası delik yüzeylerindeki pürüzlülük değerlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)

780°C dövme sıcaklığında şekillendirilmiş olan üç farklı %Cu oranındaki numune kriyojenik soğutma işleminin ardından, tavlama parametrelerindeki değişime bağlı delik delme operasyonu sonrası yüzeylerdeki pürüzlülük değerlerindeki değişimi Şekil 4.5'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, tavlama süresinin artmasıyla pürüzlülük değerleri azalan bir dağılım gösterirken %Cu oranının değişimine bağlı net bir dağılım gözlemlenmemiştir. Tavlama işlemine maruz bırakılmayan deney numunelerinde oluşan pürüzlülük değerleri dikkate alındığında, en yüksek pürüzlülük değeri %61,7 Cu oranındaki malzemede olmuştur. Bu koşulda ölçülen değer ortalama 0,49 µm civarındadır. %62,9 Cu oranında ise ölçülen ortalama 0,37 µm pürüzlülük değeriyle, %61,7 Cu oranındaki malzemeden yaklaşık %24 daha az bir değer oluştururken, %63,4 Cu oranındaki malzemede ise yaklaşık %18 oranında azalma olmuştur. Tavlama süreleri açısından değerlendirildiğinde ise 750°C dövme sıcaklığında olduğu gibi her bir % Cu oranındaki malzemede de tavlama süresinin artmasıyla pürüzlülük değerlerinde azalan bir dağılım olmuştur. Tavlanmamış %61,7 Cu oranındaki deney numunesinde oluşan pürüzlülük değeri ortalama 0,49 µm iken, 180 dk tavlı %61,7 Cu oranındaki numunede bu değer %39 azalarak 0,30 µm olarak ölçülmüştür. Grafikteki maksimum pürüzlülük

değeri %61,7 Cu oranındaki tavlanmamış deney numunesinde 0,49 µm iken minumum pürüzlülük değeri ise %62,9 Cu oranındaki 180 tavlı deney numunesinde 0,24 µm olarak ölçülen değerdir. Minimum yüzey pürüzlülüğü değerinden maksimum pürüzlülük değerine yaklaşık %104 değerinde değişim bulunmaktadır.

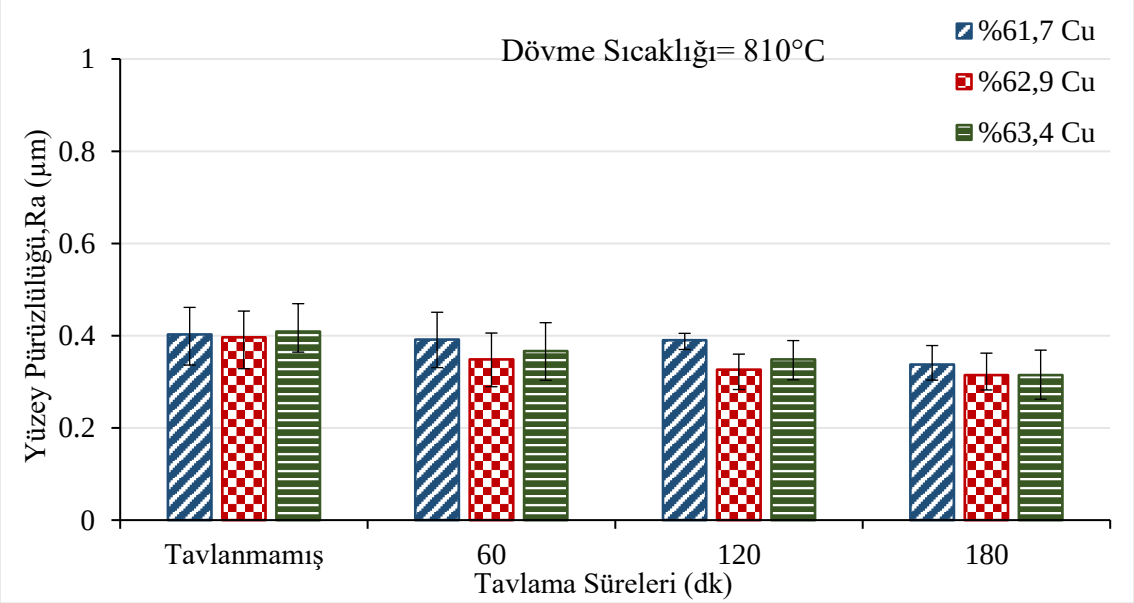


Şekil 4.5 780°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası delik yüzeylerindeki pürüzlülük değerlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)

Dövme sıcaklığının deneylerdeki en yüksek olduğu 810°C'de farklı %Cu oranlarındaki numunelerin dövülmesi ve kriyojenik soğutma işleminin ardından, tavlama parametrelerindeki değişime bağlı delik delme operasyonu sonrası yüzeylerdeki pürüzlülük değerlerindeki değişimi Şekil 4.6'da sunulmuştur.

Grafikte, tavlama süresinin artmasıyla pürüzlülük değerleri azalan bir dağılım göstermiştir fakat %Cu oranının en düşük olduğu %61,7 Cu oranındaki malzeme bu durumun dışında kalmıştır. Tavlanmamış koşul dikkate alındığında, özellikle 750-780°C dövme sıcaklıklarında % Cu oranının artmasıyla pürüzlülük değerlerinde daha belirgin değişimler gözlemlenmişken, 810°C dövme sıcaklığında birbirine çok yakın yüzey pürüzlülük değerleri elde edildiği görülmüştür. %Cu oranının diğerlerine nazaran en çok değişim gösterdiği 120 dk tavlanmış deney numunelerinde oluşan pürüzlülük değerleri dikkate alındığında, en yüksek pürüzlülük değeri %61,7 Cu oranındaki malzemede ortalama 0,39

µm olarak ölçülmüştür. %62,9 Cu oranında ise ölçülen ortalama 0,33 µm pürüzlülük değeriyle %61,7 Cu oranındaki malzemeden yaklaşık %15 daha az bir değer oluştururken, %63,4 Cu oranındaki malzemede ise yaklaşık %10 oranında azalma olmuştur. Tavlanmamış %63,4 Cu oranındaki deney numunesinde oluşan pürüzlülük değeri ortalama 0,41µm iken, 180 dk tavlı %63,4 Cu oranındaki numunede bu değer %24 azalarak 0,31 µm olarak ölçülmüştür. Grafikteki maksimum pürüzlülük değerleri %63,4 Cu oranındaki tavlanmamış deney numunesinde 0,41 µm iken minimum pürüzlülük değeri ise %62,9-63,4 Cu oranlarındaki 180 tavlı deney numunelerinde 0,31 µm olarak ölçülen değerlerdir. Minimum yüzey pürüzlülüğü değerinden maksimum pürüzlülük değerine yaklaşık %32 değerinde değişim bulunmaktadır. Dolayısıyla deneylerdeki dövme sıcaklığının en yüksek olduğu koşulda, tavlama süresinin pürüzlülük değerlerindeki değişim oranı minumum seviyelere kadar düştüğü şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 4.6 810°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası delik yüzeylerindeki pürüzlülük değerlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)

4.3 Boyutsal Doğruluk Sonuçları

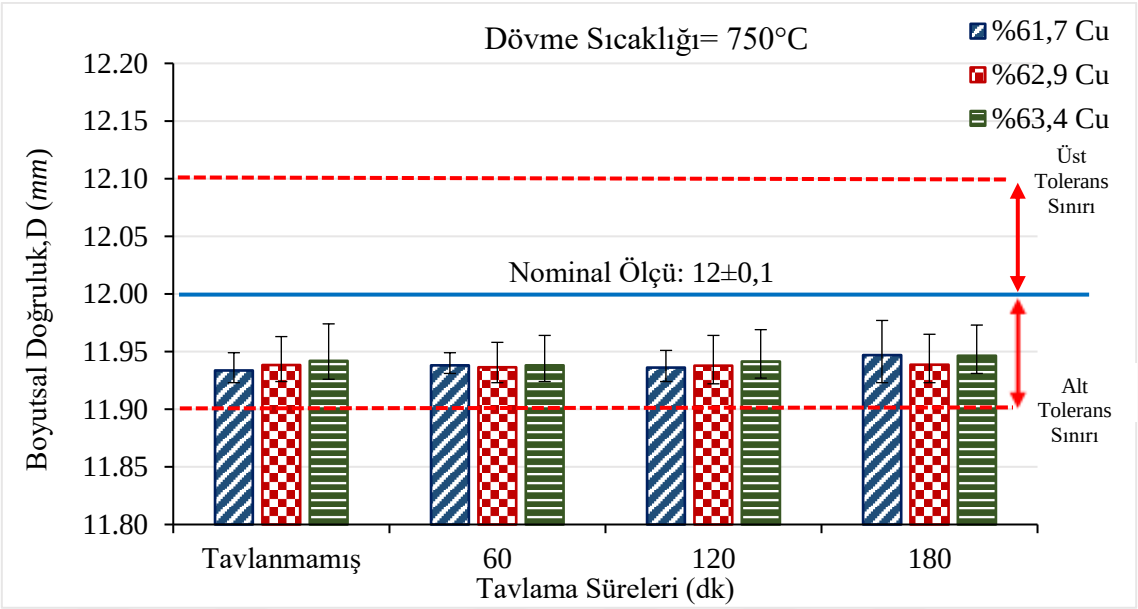
Bir önceki kısımda sunulmuş olan yüzey kalitesi özellikleri gibi, parça geometrindeki ölçüler, geometrik toleranslar büyük önem arzetmektedir. Özellikle sanayide, parçaların

imalatı sonrası istenen ölçülerde ve kalitede ürünlerin elde edilmesi için önemli çabalar içerisine girilmektedir. Parçanın şekillendirilmesi esnasında pekçok problemle karşılaşılabilmektedir. Daha yumuşak malzemeler, kesme takımının baskısı altında bükülme eğilimi gösterip boyutsal doğruluğu azaltabilmektedir. Yumuşak bakırlar ve pirinçler oldukça kolay işlenirken, yüksek mukavemetli alaşımlar, optimum üretim için karbür takım, taşlama ve birkaç durumda ısıl işlem gerektirebilir[27].

Talaşlı imalat parametrelerinden olan devir, ilerleme, kesici takım, tezgah, kullanılan soğutucu ve yağlayıcılar vb. daha pekçok etmen bu durumda etkendir. Deneylerde dövme parametrelerinden gelen etkiler ve malzemedeki değişimlerin bu boyutsal değişimleri nasıl etkilediğine dair bilgi elde edilmiştir.

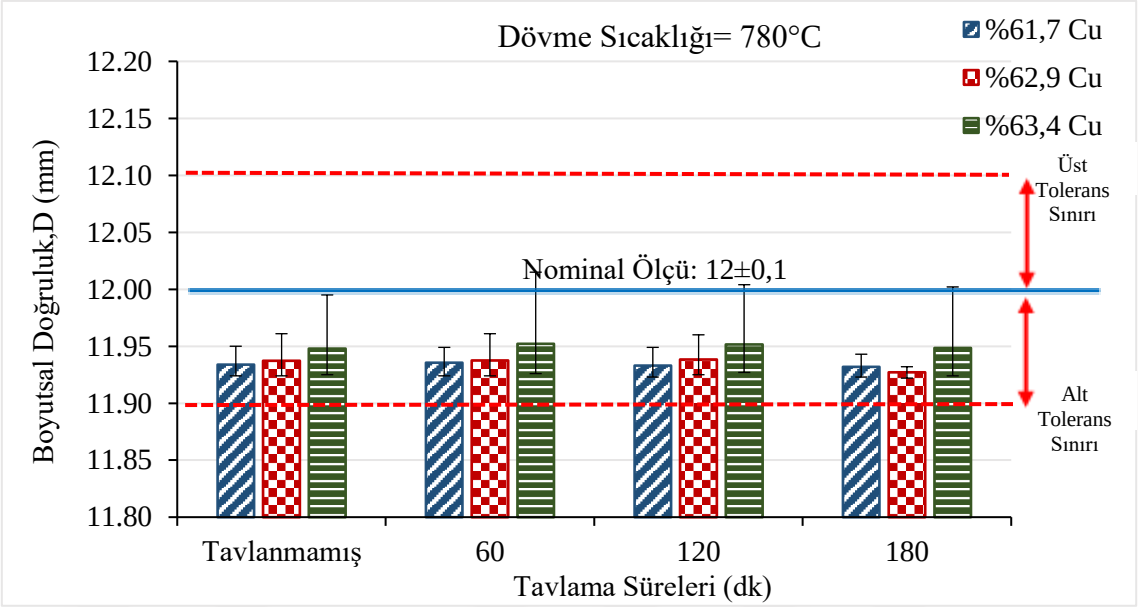
Şekil 4.7'de 750°C dövme sıcaklığında şekillendirilip kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası elde edilen Ø12 deliklerin parametrelere bağlı çapsal olarak değişimleri sunulmuştur. Tüm ölçümler CMM'de gerçekleştirilmiştir. Grafik incelendiğinde, tüm koşullarda delik çaplarının istenen tolerans aralığında olduğu %Cu oranının bir miktar etkisinin olduğu görülse de tavlama süresinin belirgin bir etkisinin olmadığı söylenebilir. Özellikle %63,4 Cu oranındaki numunelerdeki deliklerin nominal ölçüye daha yakın değerler aldığı da görülmektedir. %Cu oranının maksimum seviyede olduğu durum için malzemenin sünekleşmesiyle daha iyi bir yüzey topografyası elde edilmiş ve bu durumu önceki kısımda sunulmuş olan yüzey pürüzlülüğü değerleri de destekler niteliktedir. Fakat bunun uzun süreli olduğunu söylemek için seri koşullarda kesici takımla denemeler yapılması gerekmektedir. Zira sünekleşen malzemeden talaş kaldırma esnasında sürekli talaş durumu, uzun talaşlar vb. kesici takıma zarar verip yüzey pürüzlülüğü ve diğer kalite problemlerine sebebiyet verebilecektir. Bu grafiksel sonuçlarda büyük değişimlerin meydana gelmemesi normaldir çünkü boyutsal değişimlerde en önemli unsur kullanılan kesici takımın doğru boyutlarda olmasıdır. Fakat çalışma kapsamında malzeme ve dövme parametrelerinin etkisine bakılacağından düşük seviyelerde bile değişim olsa bunun etkisi değerlendirilecektir.

Tavlanmamış deney numunelerindeki delik çaplarının ölçüleri dikkate alındığında, %Cu oranının artmasıyla nominal ölçüye yakınlaştığı görülmektedir.



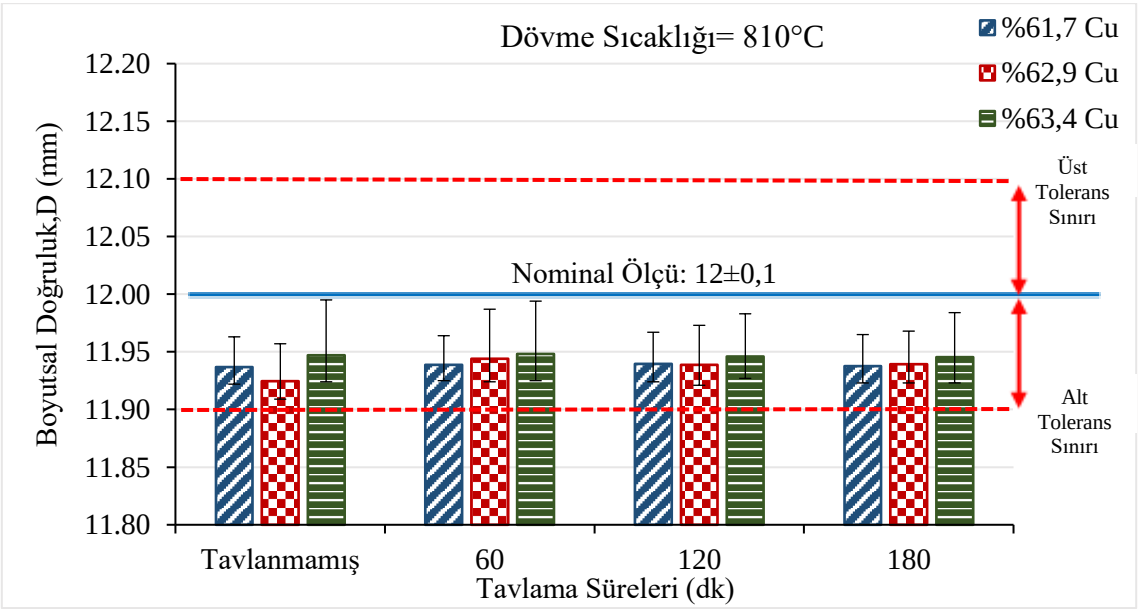
Şekil 4.7 750°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası delik çapı boyutsal doğruluk değerlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)

780°C dövme sıcaklığında şekillendirilip kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası elde edilen Ø12 deliklerin parametrelere bağlı çapsal olarak değişimleri Şekil 4.8'de sunulmuştur. 750°C dövme sıcaklığına benzer bir dağılımla bu grafikte de karşılaşılmaktadır ve %Cu oranının etkisi 750°C dövme sıcaklığındaki malzemeye göre daha belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. %Cu oranının artmasıyla nominal ölçü olan 12 çapındaki ölçüm sonucuna daha yakın değerler elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.8 780°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası delik çapı boyutsal doğruluk değerlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)

810°C dövme sıcaklığında şekillendirilip kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinde de 750-780°C dövme sıcaklıklarına benzer bir dağılım oluştuğu ve yine %Cu oranının maksimum olduğu noktada istenen ölçüm sonucuna daha yakın değerler elde edildiği, tavlama süresinin ve dövme sıcaklığının ise sonuçlarda bariz bir değişim göstermediği şekilde yorumlanabilir.



Şekil 4.9 810°C dövme sıcaklığında şekillendirilip, kriyojenik soğumaya maruz bırakılan deney numunelerinin, % Cu oranı ve tavlama sürelerine bağlı delik delme operasyonu sonrası delik çapı boyutsal doğruluk değerlerinin değişimi (İşleme parametreleri *N*:3000 dev/dak, *f*:300 mm/dak)

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, bakır alaşımlarından kurşunsuz pirinç malzemelerden olan CW511L malzemesinin dövme öncesi ve sonrası mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin incelenerek talaşlı imalat performansı incelenmiştir.

Dövme esnasında istenen sıcaklık değerlerinde deney numunesinin sıcak şekillendirilmesiyle yapıdaki %β fazları çok yüksek seviyelere çıkmaktadır ve bu durumda %Cu oranının önemli derece etkisi bulunmaktadır bu beta fazlarının çoğu dönüşüme uğramadan (düzenli yapıya geçmeden) kriyojenik soğutma etkisiyle yapıda kalması sağlanarak talaşlı imalat için önemli bir adım gerçekleştirilmiştir.

%Cu oranı, dövme sıcaklığı, tavlama süresi değişkenlerinin malzemenin mikroyapısal dağılımları üzerine etkisi incelenmiş ve gerçekleştirilen faz analizleri ve tane boyutu analizleriyle sonuçlar desteklenerek yapının daha iyi anlaşılması sağlanmıştır. Özellikle %61,7 Cu oranında 810°C dövme sıcaklığında meydana gelen Widmanstätten yapısı denen yapıya benzer dendritik yapının oluştuğu ve yapının genel malzeme özelliklerini de etkilediği ortaya konmuştur. % Cu oranının ve tavlama süresi parametrelerinin tane boyutlarında büyümeye sebebiyet verdiği, dövme sıcaklığının ise önemli oranda malzeme mikroyapısındaki α ve β fazlarının dağılımında değişimlere sebebiyet verebildiği ve kriyojenik soğutmanın da tüm bu koşulların sağlanmasında etkisi ortaya konmuştur.

Yine aynı değişkenlerin mikrosertlik değerleri üzerine etkileri değerlendirilmiştir ve beta fazlarıyla ilişkisi ortaya konmuştur. Genel olarak, %Cu oranının ve tavlama süresinin azalmasıyla beta fazlarının arttığı ve buna bağlı sertlik değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Tokluk değerleri açısından ise dövme sıcaklığının önemli oranda etkisinin olduğu özellikle dendritik yapının olduğu %61,7 Cu oranlı malzemede tokluk değerlerinin maksimum seviyelere çıktığı ve aynı zaman sertlik değerlerininde yüksek olduğu en önemli ayrıntılardandır. Beta fazının maksimum olduğu bu koşulda mikrosertlik değerleride en yüksek seviyelerdeyken tokluk değerlerinin de bu denli artışı düşündürücüdür. Kriyojenik soğutma etkisiyle yükek dövme sıcaklığından malzemede oluşan pekleşmeden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Daha derinlemesine mikroyapısal veya farklı tipte incelemeler yapılması gerekmektedir.

Ekstrüze çubuk malzeme ve dövme sonrası malzemedeki değişim mikroyapısal ve mekanik özellikler açısından kıyaslanmış ve önemli farklılıklar net olarak görülmüştür.

Dövme süreci sonrasında kriyojenik soğutma ile soğutulup farklı sürelerde tavlanan numuneler için talaşlı imalatta oluşan kesme kuvvetlerine bağlı olarak işlenebilirliği kolaylaştıran, istenen boyutsal doğruluk ve kalite özelliklerinin sağlanabilirliği, özetle istenen çıktıların elde edilebileceği durumlar için test ve analizler gerçekleştirilmiştir.

% Cu oranı ve dolaylı olararak beta fazlarının dağılımının etkisi kesme kuvvetlerinde net olarak ifade edilmiş ve pürüzlülük ve boyutsal doğruluklar da ayrıca yorumlanmıştr.

Sonuç olarak testlerin gerçekleştirildiği tüm numunelerin CW511L olmasına rağmen, standart aralıkta seçilmiş olan üç farklı %Cu oranındaki CW511lL malzemede mikroyapısal ve mekanik özellikler açısından bu denli değişimin olması ve buna bağlı olarak talaşlı imalat testlerinde işlenebilirlik açısından önemli oranda farkların oluşması çalışmayı önemli kılmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Francis, R., *The corrosion of copper and its alloys: a practical guide for engineers*. 2010: NACE International.
2. Chen, X., et al., *Study on the properties of Sn–9Zn–xCr lead-free solder.* Journal of Alloys and Compounds, 2008. **460**(1-2): p. 478-484.
3. Atsumi, H., et al., *High-strength, lead-free machinable α–β duplex phase brass Cu–40Zn–Cr–Fe–Sn–Bi alloys.* Materials Science and Engineering: A, 2011. **529**: p. 275-281.
4. TSE, *TS EN 12165*, in *Copper and copper alloys - Wrought and unwrought forging stock*. 2016.
5. La Fontaine, A. and V. Keast, *Compositional distributions in classical and lead-free brasses.* Materials characterization, 2006. **57**(4-5): p. 424-429.
6. Nobel, C., et al., *Machinability enhancement of lead-free brass alloys.* Procedia CIRP, 2014. **14**: p. 95-100.
7. № US6458222, П., *Metal material, brass and method for manufacturing the same*, in *Appl.: Toto Ltd (JP). Inv.: Matsubara*.
8. № US8303737B2, П., *Brass Material*, in *Appl.: San-Etsu Metals Co., Ltd (JP). Inv.: Kosaka*.
9. Collini, L., *Copper Alloys: Early Applications and Current Performance-Enhancing Processes*. 2012: BoD–Books on Demand.
10. Callcut, V., *The brasses: properties & applications.* Secend Edition, Copper Development Association Publication, Hemel Hepstead, 2005.
11. Zeren, B., *Soğuk çekilmiş alfa-beta pirincinde gerilim giderme tavlamasının kalıntı gerilim etkisinin incelenmesi*. 2019, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü.
12. Yazan, A., *Pirinç Alaşımlarının Çinkosuzlaşma Korozyonuna Alüminyum, Nikel Ve Kalay Alaşım Elementlerinin Etkileri*. 2014, Fen Bilimleri Enstitüsü.
13. 06.06.2021]; Available from: https://www.scribd.com/document/217917683/16-Chapter-7.
14. SARBAK, *Sarı Metal Pirinç*. 2010, Çerkezköy, Tekirdağ Sarbak Metal A.Ş Yayını.
15. Şentürk, B.S., *Pirinç alaşımlarının ekstrüzyonunda meydana gelen üretim hatalarının tespiti, nedenleri ve çözüm yolları*. 2007, Fen Bilimleri Enstitüsü.
16. Pantazopoulos, G.A. and A.I. Toulfatzis, *Fracture modes and mechanical characteristics of machinable brass rods.* Metallography, Microstructure, and Analysis, 2012. **1**(2): p. 106-114.
17. Toulfatzis, A., G. Pantazopoulos, and A. Paipetis, *Microstructure and properties of lead-free brasses using post-processing heat treatment cycles.* Materials Science and Technology, 2016. **32**(17): p. 1771-1781.

18. Toulfatzis, A.I., et al., *Final heat treatment as a possible solution for the improvement of machinability of pb-free brass alloys.* Metals, 2018. **8**(8): p. 575.

19. Toulfatzis, A.I., G.A. Pantazopoulos, and A.S. Paipetis, *Fracture mechanics properties and failure mechanisms of environmental-friendly brass alloys under impact, cyclic and monotonic loading conditions.* Engineering Failure Analysis, 2018. **90**: p. 497-517.

20. Gharibi, A. and Y. Kaynak, *The influence of depth of cut on cryogenic machining performance of hardened steel.* 2019.

21. Kaynak, Y., H. Karaca, and I. Jawahir, *Cutting speed dependent microstructure and transformation behavior of NiTi alloy in dry and cryogenic machining.* Journal of Materials Engineering and Performance, 2015. **24**(1): p. 452-460.

22. Kaynak, Y., et al., *Analysis of tool-wear and cutting force components in dry, preheated, and cryogenic machining of NiTi shape memory alloys.* Procedia CIRP, 2013. **8**: p. 498-503.

23. Kaynak, Y., et al., *Tool-wear analysis in cryogenic machining of NiTi shape memory alloys: A comparison of tool-wear performance with dry and MQL machining.* Wear, 2013. **306**(1-2): p. 51-63.

24. Pereira, O., et al., *Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304.* Journal of Cleaner Production, 2016. **139**: p. 440-449.

25. ASTM, *ASTM E112*, in *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. 2010.

26. [cited 2021; Available from: https://www.sarbak.com.tr/dokuman/alasimlar/tr/S511.pdf?v=1234.

27. Davis, J.R., *Copper and copper alloys*. 2001: ASM international.

28. Davis, R. and S. Semiatin, *ASM metals handbook, forming and forging.* ASM Int, 1998. **2110**: p. 1069-1110.

29. Irani, M. and A.K. Taheri, *Effect of forging temperature on homogeneity of microstructure and hardness of precision forged steel spur gear.* Materials Chemistry and Physics, 2008. **112**(3): p. 1099-1105.

30. Haque, M.M. and A.F. Ismail. *Effect of cooling rate on strength and fracture surfaces of alpha brass casting*. in *Advanced Materials Research*. 2008. Trans Tech Publ.

31. Smith, W.F., *Principles of materials science and engineering.* 1986.

32. Tunçay, T., *A356 alüminyum döküm alaşımlarında sıvı metal hareketinin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi. Gazi University Graduate School of Natural and Applied Sciences.* Gazi University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 2012.

33. TUNÇAY, T., *A356 Alaşımında Cu Miktarının Mikroyapı ve Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi.* Politeknik Dergisi, 2016. **19**(4): p. 585-592.

34. VATANSEVER, F., A.T. ERTÜRK, and S. KARABAY, *Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin T6 Isıl İşlemi ile İyileştirilmesi.* Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 2018. **20**(60): p. 797-803.

35. Handbook, M., *thedition Vol. 4: Heat Treating, edited by J.* R. Davis, G. M. Davidson, S. R. Lampman and T. B. Zorc, ASM International, Materials Park, Ohio, 1997: p. 841-879.

36. Okamoto, H. and T. Massalski, *Binary alloy phase diagrams.* ASM International, Materials Park, OH, USA, 1990.

37. Pantazopoulos, G. and A. Vazdirvanidis, *Characterization of the microstructural aspects of machinable-phase brass.* Microscopy and Analysis, 2008: p. 13.

38. Toulfatzis, A.I., et al., *Characterization and comparative machinability investigation of extruded and drawn copper alloys using non-parametric multi-response optimization and orthogonal arrays.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011. **57**(5-8): p. 811-826.

39. Yildiz, Y. and M. Nalbant, *A review of cryogenic cooling in machining processes.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008. **48**(9): p. 947-964.

40. Doostmohammadi, H. and H. Moridshahi, *Effects of Si on the microstructure, ordering transformation and properties of the Cu60Zn40 alloy.* Journal of Alloys and Compounds, 2015. **640**: p. 401-407.

41. Rajabi, Z. and H. Doostmohammadi, *Effect of addition of tin on the microstructure and machinability of α-brass.* Materials Science and Technology, 2018. **34**(10): p. 1218-1227.

42. Toulfatzis, A., *Characterization, cutting mechanisms and machinability of lead-free brasses*. 2019, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης των Υλικών.

43. Nobel, C., et al., *Experimental investigation of chip formation, flow, and breakage in free orthogonal cutting of copper-zinc alloys*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. **84**(5-8): p. 1127-1140.

44. Kurt, M., et al., *Dimensional analyses and surface quality of the laser cutting process for engineering plastics.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009. **41**(3-4): p. 259-267.

45. Vajpayee, S., *Analytical study of surface roughness in turning.* Wear, 1981. **70**(2): p. 165-175.