

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CuZn30 PİRİNÇ MALZEMESİNDE NUMUNE
BOYUTUNUN HALL-PETCH BAĞINTISINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hülya DEMİRCİ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Dr.Öğr. Üyesi Sunal Ahmet PARASIZ

Eylül 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CuZn30 PİRİNÇ MALZEMESİNDE NUMUNE
BOYUTUNUN HALL-PETCH BAĞINTISINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hülya DEMİRCİ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT

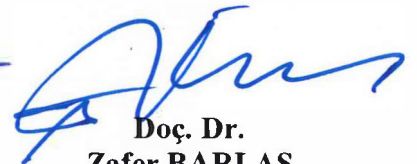
Bu tez 12.09.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Dr.Öğr. Üyesi
S. Ahmet PARASIZ
Jüri Başkanı



Doç. Dr.
Murat ÖZSOY
Üye



Doç. Dr.
Zafer BARLAS
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Hülya DEMİRCİ

12.09.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda yardım ve desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Sunal Ahmet PARASIZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Bursa Teknik Üniversitesi laboratuvar olanakları konusunda desteğini esirgemeyen Sn. Ferruh DUŐDUBAK'a ve imalat olanakları konusunda bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli meslektaşım Furkan TÜNE'ye teşekkür ederim.

Ayrıca deneyler aşamasında yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Bursa Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümlerinde görev yapan değerli hocalarıma, labarotuvuar sorumlularına ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Hall-Petch Denklemi ve Tarihçesi	3
2.2. Pirinç Malzemelerin Özellikleri	6
2.3. Yeniden Kristalleştirme Tavı.....	8
2.4. Yüzey Tabakası Modeli.....	10
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM	13
3.1. Materyal	13
3.2. Yöntem	14
3.2.1. Numune boyutları.....	14
3.2.2. Tavlama işlemi	14
3.2.3. Basma testinin uygulanması.....	15

BÖLÜM 4.

ARAŞTIRMA BULGULARI	16
4.1. Tane Boyutu Ölçüm Sonuçları.....	16
4.2. Tane Boyutuna Göre Basma Testi Sonuçları	18
4.3. Numune Boyutuna Göre Basma Testi Sonuçları	21
4.4. Farklı Numune Boyutları için Hall-Petch Sabitlerinin Belirlenmesi..	23

BÖLÜM 5.

TARTIŞMA	31
----------------	----

BÖLÜM 6.

SONUÇLAR.....	33
KAYNAKLAR	35
ÖZGEÇMİŞ	36

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Anlık kesit alanı
Al	: Alüminyum
As	: Arsenik
A_0	: İlk kare kesit alanı
d	: Numunenin ortalama tane boyutu
D	: Numune çapı
Fe	: Demir
HMK	: Hacim merkezli kübik
k_H	: Hall sabiti
k_P	: Petch sabiti
l	: Numunenin ortalama tane boyutu
L	: Anlık uzunluk
L_0	: Numunenin deney başındaki ölçüm uzunluğu
Mn	: Mangan
Ni	: Nikel
P	: Kuvvet
Pb	: Kurşun
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
t	: Numune kalınlığı
YMK	: Yüzey merkezli kübik
α	: Pirinçte bulunan YMK yapıdaki faz
β	: Pirinçte bulunan HMK yapıdaki faz
ϵ	: Birim şekil değişimi
$k(\epsilon)$: Belirli birim şekil değişimindeki Hall-Petch sabiti
w	: Numune genişliği
σ_0	: Sürtünme gerilmesi

σ_{ak}	: Akma gerilmesi
$\sigma(\varepsilon)$: Belirli birim şekil değişimindeki akma gerilmesi
$\sigma_0(\varepsilon)$: Belirli birim şekil değişimindeki sürtünme gerilmesi
μ	: Yüzey tanelerinin tüm kesit içinde kapladıkları alanın oranı
σ_i	: İç tabakadaki tanelerin akma gerilmesi
σ_y	: Yüzey tanelerinin akma gerilmesi
ΔL	: Uzama miktarı



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Düşük karbonlu çeliklerde belirli birim şekil değişimi için tane boyutu ve akma gerilmesi arasındaki ilişki (oda sıcaklığında)	6
Şekil 2.2. Pirinç faz diyagramı.....	8
Şekil 2.3. Soğuk deformasyon ve sonrasında uygulanan tavlama ile malzemenin tane yapısında meydana gelen değişiklik	9
Şekil 2.4. Farklı çapa sahip basma numuneleriyle gerçekleştirilen deneylerden elde edilen akma eğrileri.....	10
Şekil 2.5. Yüzey tabakası tanelerinin ve iç tanelerin şematik görünümü.....	11
Şekil 2.6. Yüzey tabakası oranının numune çapı ve tane boyutuna göre değişimi...	12
Şekil 3.1. Farklı boyutlardaki mikro basma numuneleri.....	14
Şekil 4.1. 500°C de 1 saat tavllanmış kare kesit kenarı a) 3,2 mm b) 2 mm c) 1,5 mm ve d) 1 mm olan numunelere ait mikroyapı fotoğrafları.....	16
Şekil 4.2. 650°C de 1 saat tavllanmış kare kesit kenarı a) 3,2 mm b) 2 mm c) 1,5 mm ve d) 1 mm olan numunelere ait mikroyapı fotoğrafları.....	17
Şekil 4.3. 700°C de 2 saat tavllanmış kare kesit kenarı a) 3,2 mm b) 2 mm c) 1,5 mm ve d) 1 mm olan numunelere ait mikroyapı fotoğrafları.....	17
Şekil 4.4. Kare kesit kenarı 1 mm olan numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması	19
Şekil 4.5. Kare kesit kenarı 1,5 mm olan numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması.....	19
Şekil 4.6. Kare kesit kenarı 2 mm olan numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması	20

Şekil 4.7. Kare kesit kenarı 3,2 mm olan numunelerin ortalama gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması.....	20
Şekil 4.8. 500 °C sıcaklıkta tavllanmış numunelerin ortalama gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin numune boyutuna göre karşılaştırılması	21
Şekil 4.9. 650 °C sıcaklıkta tavllanmış numunelerin ortalama gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin numune boyutuna göre karşılaştırılması	22
Şekil 4.10. 700 °C sıcaklıkta tavllanmış numunelerin ortalama gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin numune boyutuna göre karşılaştırılması.....	22
Şekil 4.11. 3,2 mm kalınlığındaki numunelerin $\epsilon=5\%$ için Hall-Petch denklemi eğrisi	23
Şekil 4.12. 3,2 mm kalınlığındaki numunelerin farklı birim şekil değişimleri için elde edilen Hall-Petch eğrileri	24
Şekil 4.13. 2 mm kalınlığındaki numunelerin farklı birim şekil değişimleri için elde edilen Hall-Petch eğrileri.....	25
Şekil 4.14. 1,5 mm kalınlığındaki numunelerin farklı birim şekil değişimleri için elde edilen Hall-Petch eğrileri	25
Şekil 4.15. 1 mm kalınlığındaki numunelerin farklı birim şekil değişimleri için elde edilen Hall-Petch eğrileri	26
Şekil 4.16. Farklı boyutlardaki numunelerin $\epsilon=10\%$ için elde edilen Hall-Petch eğrileri	26
Şekil 4.17. Farklı kalınlıklardaki numunelere ait Hall-Petch σ_0 sürtünme gerilmesinin gerçek birim şekil değiştirmeye göre değişimi.....	27
Şekil 4.18. Farklı kalınlıklardaki numunelere ait Hall-Petch k değerinin gerçek birim şekil değiştirmeye göre değişimi.....	28
Şekil 4.19. Tane boyutu 10 mikrometre ve 100 mikrometre olan hayali malzemeden farklı kalınlıklardaki numunelerin Hall-Petch eğrileri.....	30

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Pirinçlere katılan başlıca elementlerin pirincin mekanik özelliklerine olan etkisi	7
Tablo 3.1. Başlıca pirinç bileşimleri ve mekanik özellikleri	13
Tablo 4.1. Numune boyutlarına ve tavlama koşullarına göre elde edilen tane boyutu ölçüm sonuçları.....	18
Tablo 4.2. Farklı kalınlıklardaki numuneler için belirlenen Hall-Petch σ_0 sürtünme gerilmesinin gerçek birim şekil değiştirme oranlarına göre sayısal değerleri	27
Tablo 4.3. Farklı kalınlıklardaki numuneler için belirlenen Hall-Petch $k(\epsilon)$ değerinin gerçek birim şekil değiştirme oranlarına göre sayısal değerleri	28
Tablo 4.4. Tane boyutu 10 mikrometre olan farklı kalınlıklardaki temsili numunelerin akma gerilmesi değerleri	29
Tablo 4.5. Tane boyutu 100 mikrometre olan farklı kalınlıklardaki temsili numunelerin akma gerilmesi değerleri	29

ÖZET

Anahtar kelimeler: CuZn30, Hall-Petch, boyut etkisi, tane boyutu

Bilindiği üzere tane boyutu küçüldükçe, malzemelerin akma dayanımı artar. Tane boyutu ile akma dayanımı arasındaki bu ilişkiyi gösteren bağıntı Hall-Petch denklemi olarak bilinir. Bu ilişkiye göre malzemeye özgü olan k ve σ_0 sabitleri bilinirse, tane boyutuna göre malzemenin akma dayanımı hesaplanabilir. Hall-Petch bağıntısı Armstrong tarafından akma gerilmesi bölgesini de içerecek şekilde genişletilmiştir.

Bu çalışmanın amacı CuZn30 pirinç malzemesinde numune boyutunun Hall-Petch bağıntısına olan etkisinin incelenmesidir. Bu amaçla başka bir çalışmada elde edilen deneysel veriler akademik kurallar dahilinde kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada, soğuk haddelenmiş olarak temin edilmiş deney malzemesinden farklı boyutlarda basma numuneleri üretilmiş ve bu numuneler üç farklı sıcaklıkta tavlansak farklı tane boyutlarına sahip yapılar elde edilmiştir. Bu numunelerle gerçekleştirilen basma testleri sonucunda farklı numune boyutu ve tane boyutuna sahip numunelere ait gerçek gerilme - gerçek birim şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir.

Bu çalışmada söz konusu çalışmada elde edilen bu gerçek gerilme - gerçek birim şekil değiştirme verileri kullanılarak farklı numune boyutları için, belirli birim şekil değiştirme değerlerinde Hall-Petch denklemleri, dolayısıyla Hall-Petch sabitleri elde edilmiştir. Elde edilen Hall-Petch sabitleri numune boyutuna göre farklılık göstermektedir. Numune boyutu küçüldükçe elde edilen $k(\epsilon)$ değerleri artmakta ve $\sigma_0(\epsilon)$ değerleri düşmektedir.

Bu sonuçlar, numune boyutu küçüldüğünde akma gerilmesinde meydana gelen düşüşü açıklamak için önerilen yüzey tabakası modeli ile açıklanabilir. Numune boyutu küçüldükçe dayanımı düşük olan yüzey tanelerinin kesitte kapladığı alanın oranı artar, bu da malzemenin akma gerilmesinin düşmesine yol açar. Bu düşüş kaba taneli yapı için daha belirgin olarak gerçekleşir. Neticede, deneylerin 2 mm, 1 mm gibi kalınlıklara sahip numunelerle gerçekleştirilmesi durumunda, belirlenen Hall-Petch sabit değerleri numune boyutundan etkilenmektedir. Numune boyutundan bağımsız malzemeye özgü Hall-Petch sabitlerinin belirlenebilmesi için, yüzey tabakası oranı ihmal edilebilir mertebede olan kalın numunelerle deneylerin gerçekleştirilmesi gerekir. Tezin son kısmında gerçekleştirilen teorik hesaplama, numune boyutu etkisinden bağımsız malzemeye özgü Hall-Petch sabitlerinin belirlenmesi için, kalınlığı en az 8 mm olan numunelerle deneylerin gerçekleştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

INVESTIGATION OF EFFECT OF SPECIMEN SIZE ON THE HALL-PETCH RELATIONSHIP FOR CuZn30 BRASS

SUMMARY

Keywords: CuZn30, Hall Petch, size effect, grain size

It is well known that as grain size decreases, the strength of the material increases. Hall-Petch relationship gives the relationship between grain size and the yield strength of a material. If the Hall-Petch constants of the material are known, the yield strength of the material can be calculated. The Hall-Petch relationship was generalized to include flow stress regions as well.

The aim of this study is to investigate the effect of specimen size on the Hall-Petch relationship in CuZn30 brass. To do this, the experimental results of another study are used. At that study, different sizes of compression specimens were machined from as received cold-rolled CuZn30 sheets, which were then annealed at three different temperatures to produce different grain sizes. Via compression tests, true stress-true strain curves for different specimen, and grain sizes were obtained.

In this study, by utilizing these true stress-true strain values, Hall-Petch constants for different specimen sizes were determined at various strains for CuZn30. A variation was found in the determined values of the Hall-Petch constants with respect to specimen size. As specimen size has decreased, an increase in the determined $k(\epsilon)$ values, and a decrease in the $\sigma_0(\epsilon)$ values was observed.

This result can be explained by the surface layer model, which was proposed to explain the decrease in the flow stress of material when specimen size is decreased. As specimen size decreases, the ratio of the surface layer (grains) in the cross-section area increases, and consequently, the flow stress of the material decreases. Besides, the decrease in the flow stress is more significant for coarse grain size when compared to fine grain size cause of the increase in the surface layer ratio is more significant for coarse grain-sized specimens when specimen size is decreased. As a result, the determined Hall-Petch constants are depended on the specimen size when 2 mm or 1 mm thick specimens were used in the experiments. To determine specimen size independent Hall-Petch constants, the experiments were performed with specimens that are thick enough in which the surface layer ratio can be neglected. The theoretical calculations made for a hypothetical material indicate that to find a specimen size-independent, Hall-Petch constant specimens with a thickness of at least 8 mm should be used to determine a specimen size-independent Hall-Petch constants.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Endüstride metal esaslı malzemelerin üretiminde ve şekillendirilmesinde çeşitli yöntemler kullanılır ve uygulanan yöntemlere bağlı olarak malzeme belirli özellikler kazanır. Malzemenin mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etki eden bu kazanımlar alaşımlama ile sağlanabileceği gibi, çeşitli ısıl işlemler uygulanarak da sağlanabilir. Metallerde uygulanan bu ısıl işlemler genel olarak malzemenin süneklik ve tokluk özelliklerini iyileştirmek, akma ve çekme dayanımını arttırmak, aşınma dayanımı kazandırmak ya da malzemenin işlenebilirlik özelliğini iyileştirmek amacıyla uygulanmaktadır.

Malzeme biliminde dayanım, malzemenin plastik şekil değiştirmeye olan direnci şeklinde tanımlanmaktadır. Malzemenin mikro yapısında bulunan kusurlar şekil değişimine engel teşkil edecek şekilde davranır ve böylece malzemenin akma direncini artırır. Bu kusurlar noktasal, çizgisel, yüzeysel ya da hacimsel sınıflandırılabilir. Noktasal kusurlara örnek olarak ara yer atomu, boşyer gibi kusurlar gösterilirken, çizgisel kusurlara yani dislokasyonlara kenar dislokasyonu, vida dislokasyonu ya da ikisinin de bulunduğu karışık dislokasyonlar örnek verilebilir. Yüzeysel kusurların iki boyutlu olduğu söylenebilir ve tane sınırları, faz sınırı, ikiz oluşumu, dizi hatası ve dış yüzeyler gibi oluşumları içerir. Hacimsel kusurlar ise boşluklar, çatlaklar veya çökelti gibi makro ölçekte görülen kusurlardır. Tüm bu kusur ve hatalar malzemenin teorikteki muntazam içyapıya sahip olmasına engel teşkil eder. Bu sebeple malzemenin bu kusur ve hataların göz önüne alınarak incelenmesi önem arz etmektedir.

Malzemenin mikro yapısında bulunan tüm yapılar karakteristik özelliklerine bağlı olarak farklı kazanım ve oluşumlara olanak sağlarlar. Bu oluşumlardan biri olan

taneler, nanometreden milimetreye kadar farklı birçok büyüklükte olabilir. Tanelerin büyüklükleri ve sınırları, dislokasyonların uzunluklarını ve hareketlerini sınırlar ve böylece malzemenin daha zor akmasına sebep olur.

Tane boyutu ile akma direnci arasındaki bu ilişki, ilk olarak 1951 yılında bu bağıntıyı tanımlayan Hall [1] ile 1953 yılında benzer çalışma ile bu kuramı destekleyen Petch [2] tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmaların akabinde yapılan araştırmalar ile malzemenin tane boyutunun küçülmesiyle akma dayanımının arttığı malzeme bilimi tarafından kabul görmüştür.

Sürekli gelişen günümüz endüstrisi, yeni ihtiyaç ve talepleri karşılamak amacıyla ürettiği cep telefonu, televizyon, bilgisayar gibi birçok ürün için küçük boyutlarda parçalara ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeple mikro ebatlarda üretim yapma gereksinimi doğmuş ve dolayısıyla mikro boyutta malzeme deformasyonu araştırma konusu olmuştur.

Bu çalışmanın amacı, numune boyutunun Hall-Petch sabitlerinin üzerine etkisinin incelenmesi ve açıklanmasıdır.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Hall-Petch Denklemi ve Tarihçesi

Metaller, atomların üç boyutta düzgün ve tekrarlanır nitelikte dizildiği kristal kafes yapılarına sahiptirler. Bu kristal yapılar teoride kusursuz dizilimli olarak ele alınsalar bile gerçekte kristalleşme süreci tamamlandığında, bu düzenin malzeme içinde kusursuz bir şekilde gerçekleşmediği, yer yer kesintiye uğradığı görülür. Bu kesintiler kristal düzenin yöneliminin birden değişmesiyle kendini gösterir ve böylece içyapıları aynı fakat yönelimleri farklı birçok kümeden oluşan düzensiz bir yapı meydana gelir. Malzeme biliminde aynı yapıya sahip olan bu kristal kümelerine tane adı verilirken, tanelerin aralarındaki düzlemsel bölgelere ise tane sınırı adı verilir [3].

Tane sınırları ile malzemenin şekil değiştirme kabiliyeti arasındaki ilişki incelendiğinde, tane sınırlarının malzemenin şekil değişimini olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Mikroyapıdaki tane sınırlarının yoğunluğu arttıkça dolayısıyla tanelerin boyutu küçüldükçe malzemenin şekil değişimine gösterdiği direnç diğer bir deyişle malzemenin akma dayanımı artar.

Düşük karbonlu çeliklerin mekanik özelliklerini etkileyen faktörler üzerine araştırmalar yapan E. O. Hall, 1951 yılında yayınladığı bildiride tane boyutu ve akma noktası arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir teori önermiştir. E. O. Hall tane boyutu arttığında, alt ve üst akma dayanımının arasındaki farkın azalacağını öngörür ve tane boyutu ile alt akma noktası arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bilinmektedir ki dislokasyonlar herhangi bir engel ile karşılaştıklarında ilerleme hareketleri engellenir, bu da deformasyon işleminin devam edebilmesi için gerekli olan gerilmenin artmasına sebep olur. Tane sınırları da buna benzer bir engel teşkil eder. Dislokasyonlar tane

sınırlarında yığıldığında, kayma düzleminin ucundaki gerilme yoğunluğu artar ve en nihayetinde tane sınırının akmasına sebep olur. E. O. Hall, tane boyutu ile akma dayanımı arasında tanımladığı bu ilişkiyi, deneysel olarak elde ettiği verileri kullanarak aşağıdaki eşitlik (Denklem 2.1) ile formülize etmiştir.

$$\sigma_{ak} = \sigma_0 + \frac{k_H}{\sqrt{d}} \quad (2.1)$$

Burada d ortalama tane boyutu, σ_0 malzemenin tane sınırı etkisi dikkate alınmadığında sahip olduğu akma dayanımı, k_H Hall sabitidir [1]. Görüldüğü üzere malzemenin ortalama tane boyutu küçüldükçe akması için gerekli olan gerilme artmaktadır. Burada σ_0 ve k_H malzemeye özgü olan sabit değerlerdir. σ_0 , çok taneli bir malzemenin tane sınırından ve boyutundan etkilenmeksizin akması için gerekli olan gerilmedir. k_H ise tane boyutunun malzemenin akma dayanımı üzerinde meydana getirdiği etkiyi ifade eden sabit bir büyüklüktür.

Petch'in çalışması ise çeliklerin gevrek kırılma davranışına odaklanmıştır. Kaba taneli malzemelerin gevrek kırılmaya ince taneli malzemelere göre daha eğilimli oldukları bilinmekteydi. Petch çalışmasıyla, ferritik tane boyutu ile akma dayanımındaki değişikliği ölçerek malzemelerin gevrek kırılma davranışı konusundaki detaylara ışık tutmayı amaçlamıştır. Bu sebeple Petch, düşük karbonlu çelik, dökme demir ve spektrografik demir numuneleri gevrek kırılmayı elde etmek amacıyla sıvı azot sıcaklıklarında gerilme testine tabi tutmuştur. Numunelerin yüzey kusurlarından arındırılmasına ve test makinesinin doğru aksenal yükleme sağlamasına özel dikkat göstererek akma dayanımı ve kopma mukavemetini ölçen Petch bu araştırma sonucunda Denklem 2.2'de görülen bağıntıyı elde etmiştir.

$$\sigma_{ak} = \sigma_0 + \frac{k_p}{\sqrt{l}} \quad (2.2)$$

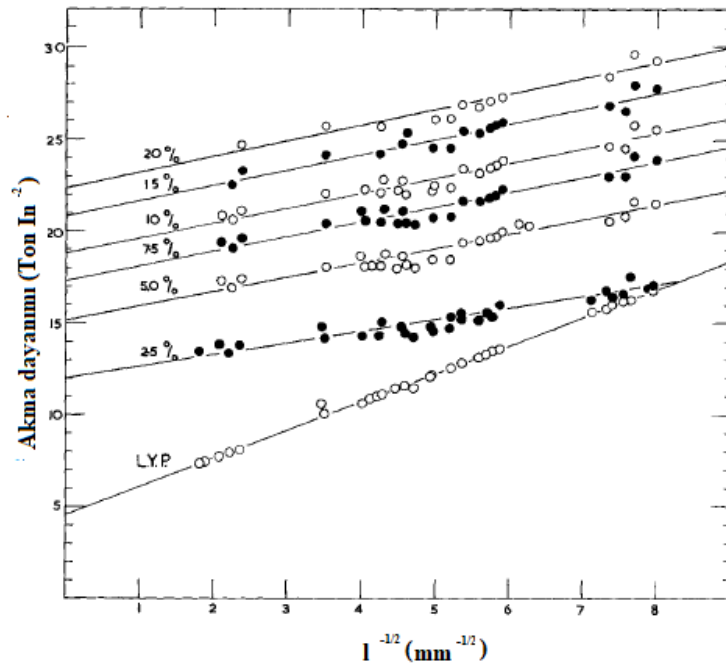
Burada σ_{ak} akma dayanımını, l ortalama tane boyutunu temsil etmektedir. σ_0 ve k_p değişmez sabit değerlerdir. Deneyde bir miktar plastik deformasyon gözlemlenmiştir fakat Petch çalışmasında bunun ihmal edilebilir düzeyde etki ettiğini açıklamıştır [2].

Petch sonuçları ile Hall sonuçları arasında mükemmel bir örtüşme vardır. Hatta Hall tarafından tahmin edilen alt ve üst akma dayanımı arasındaki ilişki bile doğrulanmıştır. Hall tarafından öngörüldüğü gibi, tane büyüklüğü 0,04 mm'ye yükseldiğinde alt ve üst akma dayanımı aralarındaki fark sıfıra düşmüştür [4].

Petch çalışmasında ayrıca karbon içeriğinin tane büyüklüğü bağıntısını etkilemediğini bununla birlikte, artan perlit miktarının pekleşme oranını arttırdığını açıklamıştır [4].

Hall ve Petch, elde ettikleri bu bağıntılar ile malzemenin akma sınırı ile tane boyutu arasındaki ilişkiyi tanımlamışlardır. Bu bağıntıya göre ortalama tane boyutunun büyüklüğü, σ_0 sürtünme gerilmesi ve k sabiti bilinen bir malzeme için akma dayanımı bulunabilir.

Hall-Petch bağıntısı ve mikrosertlik üzerine araştırmalarda bulunan Armstrong ve arkadaşları, 1962 yılında yayınladıkları makalede Şekil 2.1.'de görülen grafiği de elde etmişlerdir. Grafikte oda sıcaklığındaki düşük karbonlu çeliklerde belirli birim şekil değişimi için tane boyutu ve akma gerilmesi arasındaki ilişki görülmektedir. Aynı birim şekil için, tane boyutu küçüldükçe malzemenin akması için gerekli olan gerilme miktarı artmaktadır.



Şekil 2.1. Düşük karbonlu çeliklerde belirli birim şekil değişimi için tane boyutu ve akma gerilmesi arasındaki ilişki (oda sıcaklığında) [5]

Armstrong ve arkadaşları elde ettikleri tane boyutu – akma gerilmesi ilişkisini Denklem 2.3 ile tanımlamışlardır [6]. Buradan anlaşıldığı üzere, ortalama tane boyutunun büyüklüğü, belirli şekil değiştirme büyüklüğü içinsürtünme gerilmesi ve k sabiti bilinen bir malzeme için herhangi bir uzama değerine karşılık gelen akma gerilmesi bulunabilir.

$$\sigma(\epsilon) = \sigma_0(\epsilon) + k(\epsilon)d^{\frac{-1}{2}} \quad (2.3)$$

2.2. Pirinç Malzemelerin Özellikleri

Pirinç, bakır ve çinko elementlerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen bir alaşımdır. Endüstriyel bir pirinç alaşımında çinko miktarı en fazla % 46 oranında bulunur. Pirinçler, kolay şekil alabilme özelliği, yüksek mekanik direnç, korozyona karşı dayanıklılık, ergime ve döküm kolaylığı gibi birçok avantajı sebebiyle endüstride birçok alanda tercih edilirler.

Pirinçlerin bileşiminde %20'ye kadar çinko içeren türleri parlaklığı ve rengi dolayısıyla kuyumculukta ve küçük dekoratif parçaların yapımında kullanılır. Çinko yüzdesi 28 ile 36 arasında olanlar dövülebilir alaşımlardır; bunların en önemlisi, fişek kovanlarının veya lamba duylarının yapımında kullanılan %33 çinko içeren çekme pirincidir. Çinko oranı yüzde 40 veya daha fazla olanlar ise talaş kaldırma pirinci olarak kullanılır.

Tablo 2.1. Pirinçlere katılan başlıca elementlerin pirincin mekanik özelliklerine olan etkisi [7].

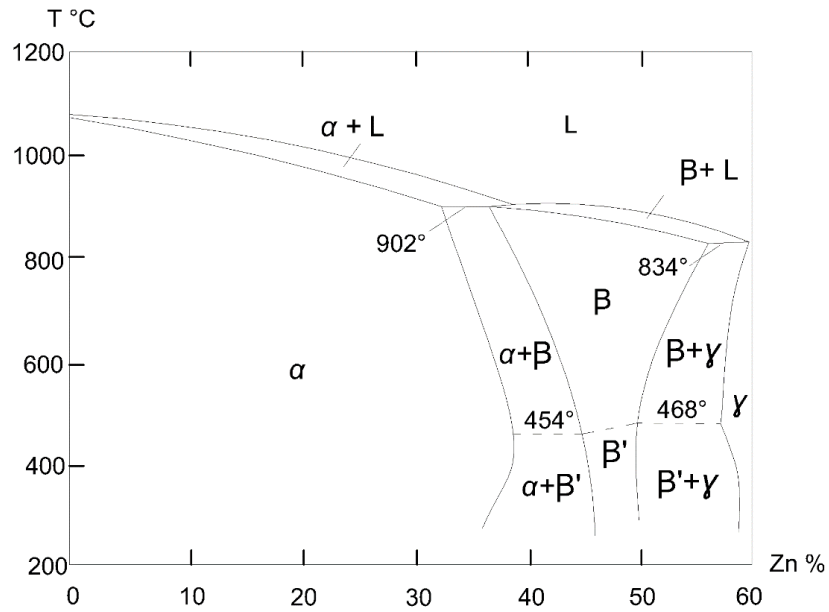
Element	Miktar (%)	Etkilediği Özellik
Kurşun (Pb)	1 - 3	İşlenebilirlik
Mangan (Mn)		
Alüminyum (Al)		
Silisyum (Si)	0,75 – 2,5	Akma Dayanımı
Nikel (Ni)		500 N/mm ² 'ye kadar
Demir (Fe)		
Alüminyum (Al)		
Arsenik (As)	0,4 – 1,5	Korozyon Dayanımı
Kalay (Sn)		

Pirinçlere sahip oldukları mekanik dayanımı ve aşınmaya karşı dayanıklılığı arttırmak amacıyla % 1 ile 5 oranında kalay, alüminyum, demir, nikel, mangan gibi elementler katılır ve böylece yüksek mukavemetli pirinçler elde edilir. Bu pirinçlerde, kırılma gerilmesi 50 kg/mm² değerine, uzama ise %30 oranına ulaşır. Tablo 2.1.'de pirinçlere katılan başlıca elementlerin pirincin mekanik özelliklerine olan etkisi görülmektedir.

Pirinçler kurşun ilavesi ile mükemmel şekilde işlenebilmektedirler. Genellikle kurşun %3'e kadar ilave edilir. Burada kurşun ilavesinin sünekliliği azaltıcı etkisi önemsenmeyecek derecede azdır.

Endüstriyel öneme sahip en fazla %46 çinko içeren pirinç alaşımları, Şekil 2.2.'deki gibi 2 önemli faz bölgesine sahiptirler. α fazı, YMK (yüzey merkezli kübik) kristal yapılı bir katı çözelti ve β fazı HMK (hacim merkezli kübik) yapılı Cu-Zn bileşiğidir. Pirinçlerin akma dayanımı 250–500 MPa aralığında değişmektedir. İkili denge

diyagramında Zn, Cu içerisinde %37'ye kadar çözünmektedir ve alfa (α) fazını oluşturmaktadır. Zn miktarındaki artışın sonucu olarak ikinci faz beta (β) oluşmaktadır. Bu iki fazdan α oda sıcaklığında sünek ve kolay haddelenebilir olduğundan ekstrüzyon ile üretim konusunda avantaj sağlamaktadır [7].



Şekil 2.2. Pirinç faz diyagramı [7].

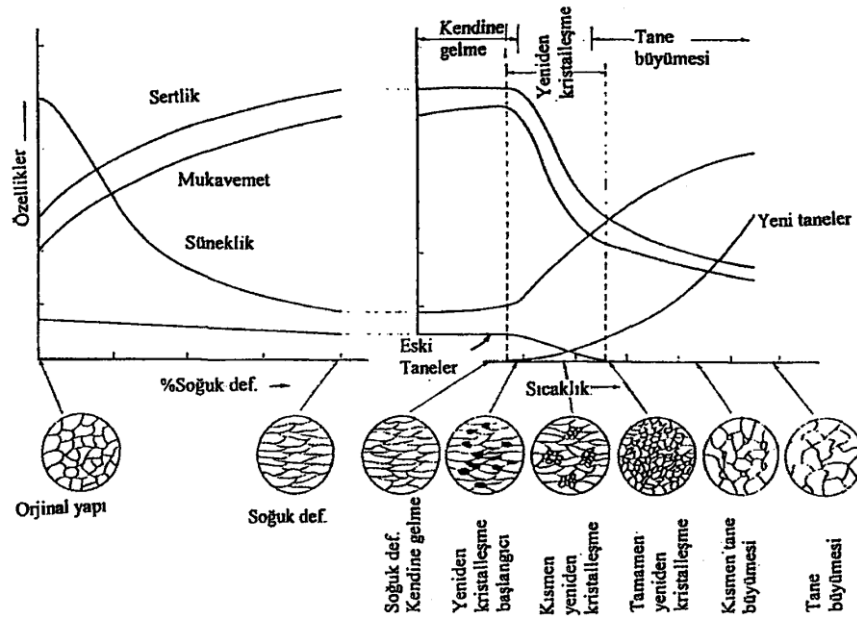
Alaşımli pirinçler özellikle işlenmiş parçalar şeklinde (kondansatör ve ısı değiştirici borular) veya yüksek bir mekanik dayanımla birlikte büyük bir sızdırmazlık isteyen döküm parçalar şeklinde (vanalar, musluklar, basınçlı gaz ve sıvılar için karterler) endüstride yaygın olarak kullanılır.

2.3. Yeniden Kristalleştirme Tavı

Yeniden kristalleşme, soğuk deforme olmuş malzemedeki tane boyutlarının yeniden düzenlendiği bir ısıl işlemdir. Bu uygulama sonrasında malzeme soğuk deformasyon ile kazanmış olduğu mekanik özelliklerin hepsini kaybeder.

Soğuk deforme olmuş malzeme ısıl işleme tabi tutulduğunda öncelikle toparlanma evresinden geçer. Bu evrede deformasyon sonucu oluşmuş dislokasyonlar yeniden

düzene girer ve hatta bir kısmı yok olur. Tanelerin değişime uğramadığı bu evreden sonra malzeme yeniden kristalleşme evresine girer ve çekirdeklenme başlar. Çekirdeklenme ve tane büyümesi sonucunda malzeme nihai tane boyutuna ulaşır. Eğer çekirdek hızlı oluşur ve yavaş büyürse birçok kristal oluşur. Böylece küçük tane boyutları elde edilmiş olur. Eğer çekirdeklenme çekirdek büyüme hızına göre daha yavaş gerçekleşirse iri taneler elde edilir.

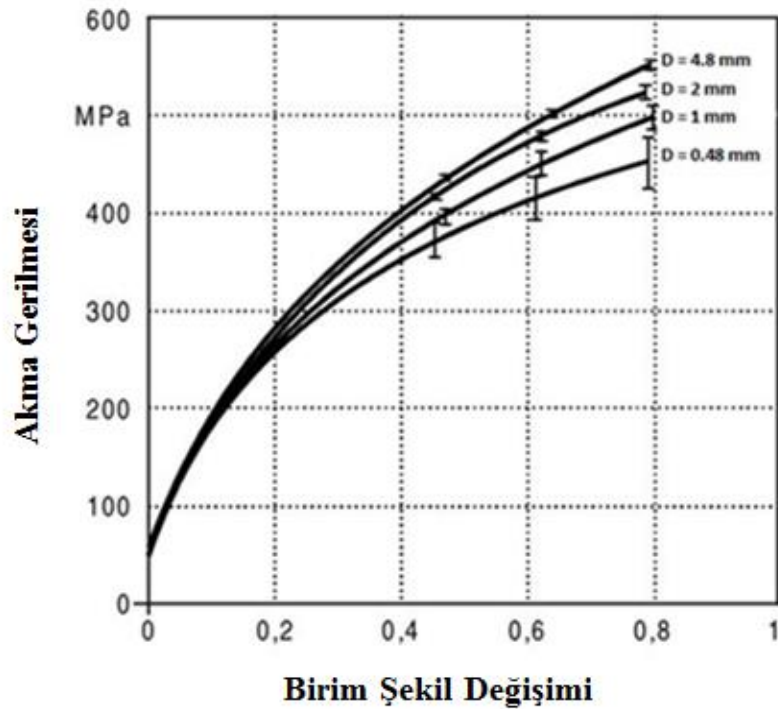


Şekil 2.3. Soğuk deformasyon ve sonrasında uygulanan tavlama ile malzemenin tane yapısında meydana gelen değişiklik [8].

Şekil 2.3.'te soğuk deforme olmuş malzemenin mekanik özellikleri ve yeniden kristalleşme işleminin safhaları gözükmektedir. Tavlama öncesi sertliği yüksek olan deforme olmuş malzeme düşük bir süneklığe sahiptir, bu da gevrek bir mikro yapı anlamına gelir. Yeniden kristalleşme sonrasında malzeme kırılğan yapıdan sünek yapıya geçmiş olur. Böylece sertliği ve süneklığı optimize edilmiş ideal mekanik özelliklere sahip bir mukavemet elde edilmiş olur [8].

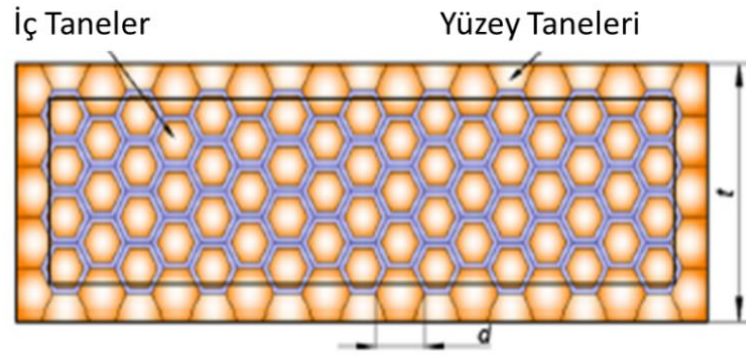
2.4. Yüzey Tabakası Modeli

Malzeme biliminde akma gerilmesi malzemeye ait bir büyüklük olarak ele alınsa da araştırmalar akma dayanımının numune boyutuna bağlı olduğunu göstermiştir. Farklı çapa sahip basma numuneleriyle gerçekleştirilen deneylerden elde edilen akma eğrileri Şekil 2.4.'te görülmektedir [9]. Bu grafikte görüldüğü üzere numune çapı küçüldükçe malzemenin sahip olduğu akma dayanımı düşmektedir.



Şekil 2.4. Farklı çapa sahip basma numuneleriyle gerçekleştirilen deneylerden elde edilen akma eğrileri [9]. Numune çapları grafikte belirtilmiştir.

Engel ve Eckstein, numune boyutunun akma gerilmesine olan etkisini yani, numune boyutu küçüldükçe düşen akma dayanımını açıklamak için, yüzey tabakası modelini öne sürmüşlerdir. Yüzey tabakası modeline göre malzeme iç kısım ve yüzey tabakası olmak üzere iki kısımdan oluşur [10]. Engel ve Eckstein'in tanımladığı yüzey tabakası (yüzey taneleri) ve iç taneler Şekil 2.5.'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Yüzey tabakası tanelerinin ve iç tanelerin şematik görünümü [11].

Plastik deformasyon sırasında dislokasyonların tane sınırlarında yığılması sebebiyle tane sınırlarının akmayı zorlaştırdığı bililmektedir. Yüzey tabakasında bulunan tanelerde ise serbest yüzeyler bulunduğundan dolayı dislokasyonlar daha az kısıtlanır. Böylece yüzey taneleri dislokasyon hareketine izin vererek iç tanelere göre daha kolay deformasyona uğramaktadır. Dolayısıyla, yüzeyde bulunan tanelerin iç tanelere göre dayanımları daha düşüktür.

Bu modele göre malzemenin akma gerilmesi, iç tanelerin ve yüzey tanelerinin akma gerilmelerinin toplamıdır ve Denklem 2.4'teki bağıntı ile tanımlanabilir [10].

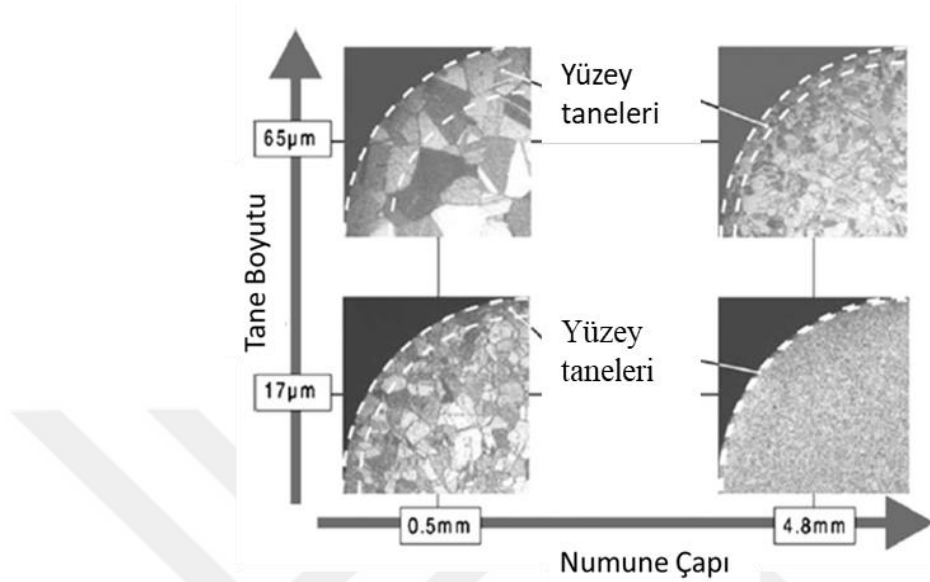
$$\sigma = \mu\sigma_y + (1 - \mu)\sigma_i \quad (2.4)$$

Burada " σ " malzemenin akma gerilmesi, " μ " ise yüzey tanelerinin tüm kesit içinde kapladıkları alan oranıdır. " σ_i " içerdeki tanelerin, " σ_y " ise yüzey tanelerinin akma gerilmesidir.

Şekil 2.5.'teki gibi dikdörtgen kesitli bir numune için yüzey tabakası oranı Denklem 2.5 ile bulunabilir.

$$\mu = \frac{t.w - (t-2d).(w-2d)}{t.w} \quad (2.5)$$

Burada t numunenin kalınlığı, w numunenin genişliği, d ise ortalama tane boyutudur. Yüzey tabakası oranı μ , birimsiz bir büyüklüktür.



Şekil 2.6. Yüzey tabakası oranının numune çapı ve tane boyutuna göre değişimi [10].

Şekil 2.6.'da görüldüğü üzere aynı tane boyutu için, numune boyutu azaldıkça dayanımı düşük olan yüzey tanelerinin tüm kesit alanı içindeki oranı artar. Bu sebeple malzemenin toplam akma dayanımı da düşmüş olur. Diğer bir ifade ile malzemede "tane boyutu/numune boyutu" oranı arttıkça, yüzey tabakasının kesit içindeki oranı artar ve böylece malzemenin toplam akma gerilmesi düşer.

Ayrıca numune boyutunun küçülmesi, kesitte bulunan tanelerin miktarının azalmasından dolayı, homojen olmayan bir deformasyona neden olmaktadır. Bu durum deney verilerinde en küçük boylardaki numune sonuçlarındaki saçınım ile kendini göstermektedir.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Araştırmada, %30 çinko ile %70 bakır elementine sahip olan soğuk haddelenmiş CuZn30 α -pirinci kullanılmıştır. Aynı bileşime sahip farklı oranlarda element içeren bazı pirinç türleri ve mekanik özellikleri Tablo 3.1.'de görülmektedir.

Tablo 3.1. Başlıca pirinç bileşimleri ve mekanik özellikleri [7].

Malzeme	Sertlik	Çekme Dayanımı (N / mm ²)		Akma Dayanımı (N / mm ²)	Uzama %	
		min	max		2,5 mm altında min	2,5 mm üzerinde min
CuZn10	H050	240	290	max 140	36	45
	H080	280	360	min 200	13	20
	H110	350	-	min 290	4	8
CuZn15	H055	260	310	max 170	36	45
	H085	300	370	min 150	16	25
	H105	50	420	min 250	4	12
	H125	410	-	min 360	-	-
CuZn28	H055	270	350	max 160	40	50
	H095	350	430	min 170	21	33
CuZn30	H125	410	490	min 260	9	15
	H150	480	-	min 430	-	-
CuZn33	H055	280	380	max 170	40	50
	H095	350	430	min 170	23	31
	H125	420	500	min 300	6	13
	H150	500	-	min 450	-	-

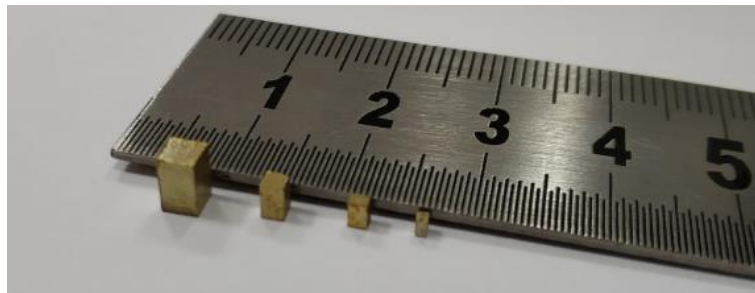
Tablo 3.2. (Devamı)

Malzeme	Sertlik	Sertlik Çekme		Akma Dayanımı (N / mm ²)	Uzama %	
		Dayanımı (N / mm ²) min	max		2,5 mm altında min	2,5 mm üzerinde min
	H055	300	370	max 180	38	48
CuZn36	H095	350	440	min 170	19	28
CuZn37	H125	410	490	min 300	8	12
	H150	480	560	min 430	3	-
	H170	550	-	min 500	-	-

3.2. Yöntem

3.2.1. Numune boyutları

Soğuk haddelenmiş levhadan çıkarılan kare kesitli minyatür basma numunelerinin kenar boyutları Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi sırasıyla 3,2 mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm'dir ve numuneler yükseklik/kesit kenarı oranı 1,5 olarak imal edilmiştir [11].



Şekil 3.1. Farklı boyutlardaki mikro basma numuneleri [11].

3.2.2. Tavlama işlemi

Elde edilen pirinç numuneler, farklı sıcaklıklarda yeniden kristalleştirme tavına tabi tutulmuş böylece numunelerin farklı tane boyutuna sahip olması sağlanmıştır. Metalografik incelemede malzemelerin içyapıları hakkında detaylı bilgi sahibi olmak için ortalama tane boyutu analizi yapılır ve bu analiz optik mikroskop altında ASTM

E112 standardına göre uygulanır. Bu analizin uygulanması için öncelikle numunelerin bazı metalografik yöntemlerle hazırlanması gereklidir. Bu kapsamda numune ana parçadan kesilir, bir kalıba alınır, kademeli yüzey zımparalama işlemleri ile parlatılır ve uygun dağlayıcılarla dağlanır. Dağlanan numune yüzeyinde görülen tane sınırları, manuel olarak ya da yazılım aracılığı ile tane boyutunun belirlenmesini sağlar.

Bu çalışmada numuneler 500°C ve 650°C’de 1 saat, 700°C’de ise 2 saat tavlansak üç farklı tane boyutu elde edilmiştir. Tavlamanın ardından mikro yapı görüntüleri alınarak kesim metoduyla ortalama tane boyutları belirlenmiştir.

3.2.3. Basma testinin uygulanması

Akma eğrisi oluşturulurken gerçek gerilim ve genleme değerleri boyun verme noktasına kadar Denklem 3.1 ile bulunabilir.

$$\sigma = \left(\frac{P}{A_0}\right) \cdot \left(\frac{A_0}{A}\right) \quad \varepsilon = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (3.1)$$

Burada P ölçülen kuvvet değeri (N), A anlık kesit alanı (mm²), A₀ numunenin başlangıçtaki kesit alanıdır.

Plastik deformasyon sırasında hacmin değişmeyeceği varsayımına dayanarak Denklem 3.2 bağıntısı elde edilebilir.

$$A_0 L_0 = AL \quad \frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \quad (3.2)$$

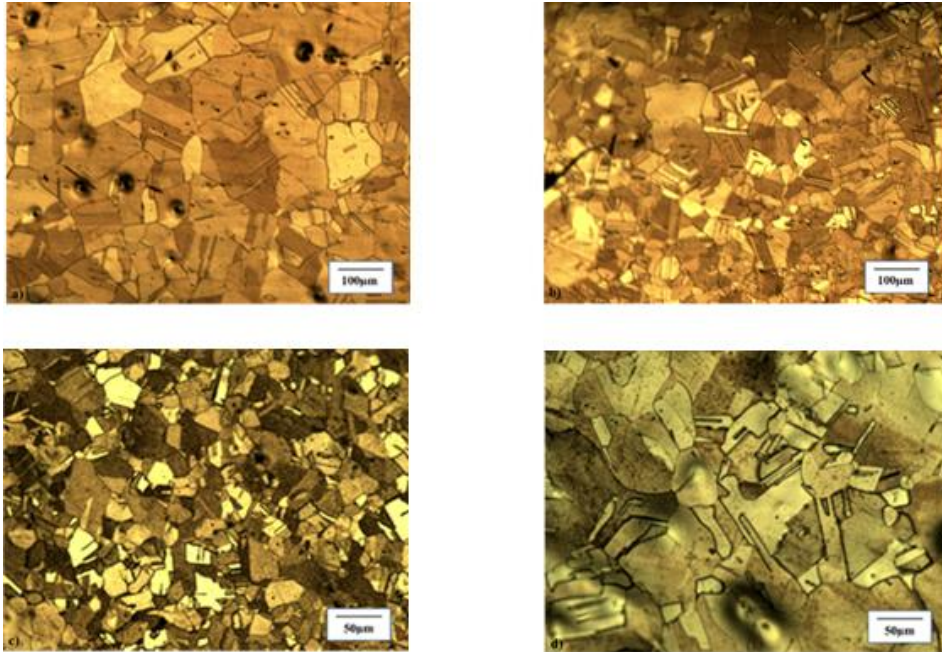
Bu denklemde L anlık uzunluğu, L₀ numunenin deney başındaki ölçüm uzunluğunu, ΔL uzama miktarını vermektedir.

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

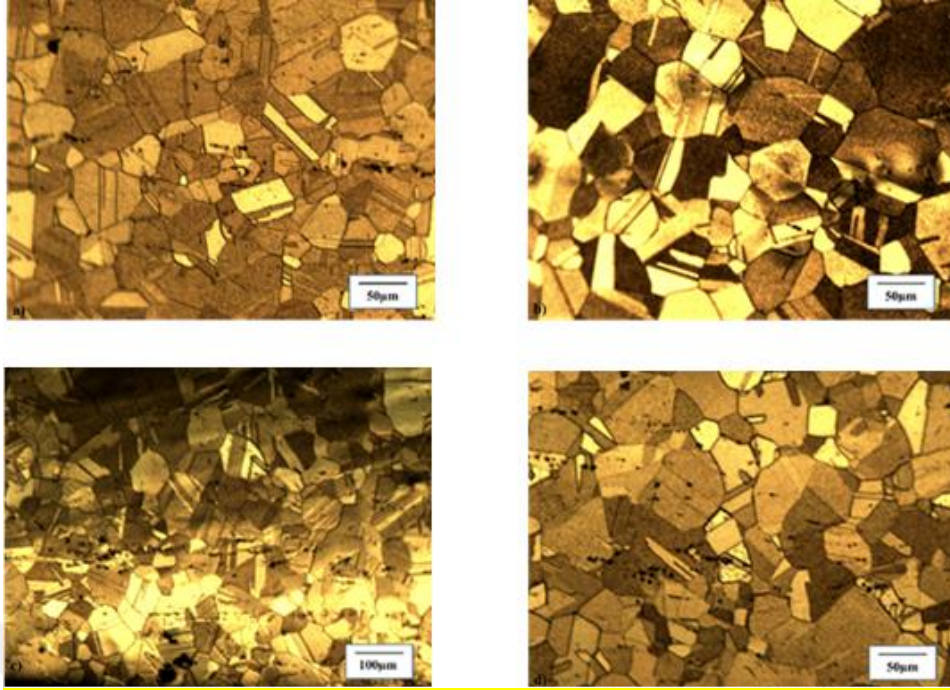
4.1. Tane Boyutu Ölçüm Sonuçları

Literatürde tane boyutu, orijinal tane sınırı ile sınırlanan tane alanının büyüklüğü olarak tanımlanmaktadır. Örneğin ikiz bantlarının yer aldığı tanelerde, ikiz sınırlarının taneyi iki veya daha fazla parçaya ayırması göz önüne alınmaz ve bu durumda tanenin sadece orijinal sınırları göz önüne alınarak, tek tane olarak kabul edilir.

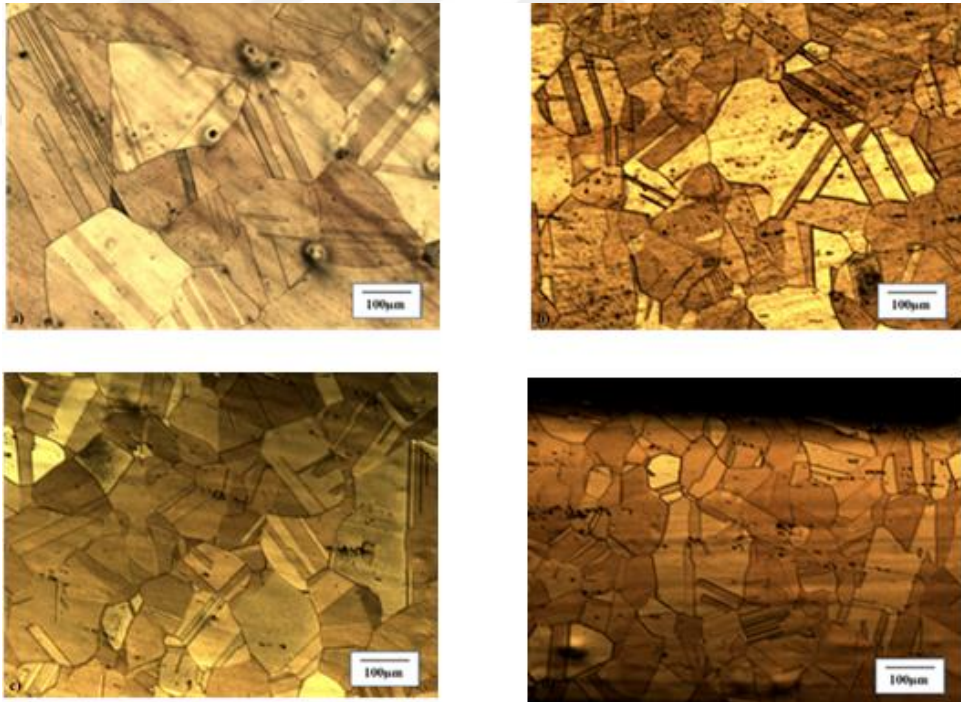
Bu çalışmada ise, 500 °C ve 650 °C’de 1 saat, 700 °C’de 2 saat tavlanan numunelerin tane boyutlarının saptanmasında ikiz tane sınırları da dikkate alınmıştır. Yapılan metalografik inceleme sonucu elde edilen mikro yapı fotoğrafları, tavlama koşullarına ve numune boyutlarına göre Şekil 4.1., Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.’te gösterilmiştir.



Şekil 4.1. 500°C’de 1 saat tavllanmış kare kesit kenarı a) 3,2 mm b) 2 mm c) 1,5 mm ve d) 1 mm olan numunelere ait mikroyapı fotoğrafları [11]



Şekil 4.2. 650°C'de 1 saat tavllanmış kare kesit kenarı a) 3,2 mm b) 2 mm c) 1,5 mm ve d) 1 mm olan numunelere ait mikroyapı fotoğrafları [11].



Şekil 4.3. 700°C'de 2 saat tavllanmış kare kesit kenarı a) 3,2 mm b) 2 mm c) 1,5 mm ve d) 1 mm olan numunelere ait mikroyapı fotoğrafları [11]

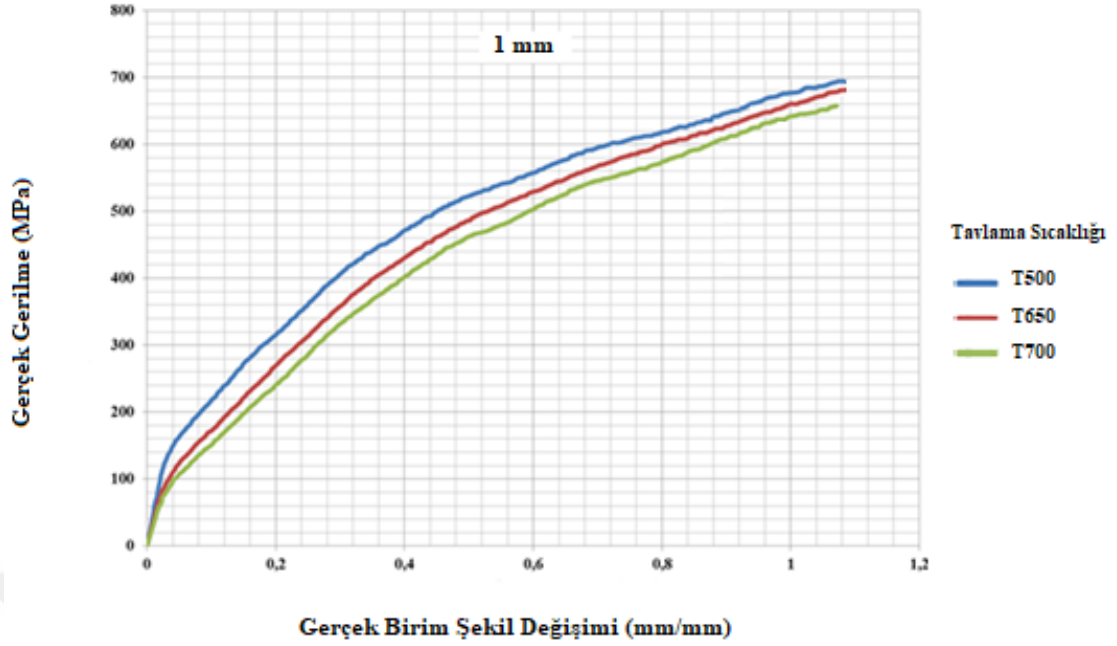
İkiz sınırlarının da dikkate alınmasıyla elde edilen tane boyutları μm cinsinden Tablo 4.1.'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere tavlama sıcaklığının artmasıyla daha kaba taneli numuneler elde edilmiştir.

Tablo 4.1. Numune boyutlarına ve tavlama koşullarına göre elde edilen tane boyutu ölçüm sonuçları (μm)

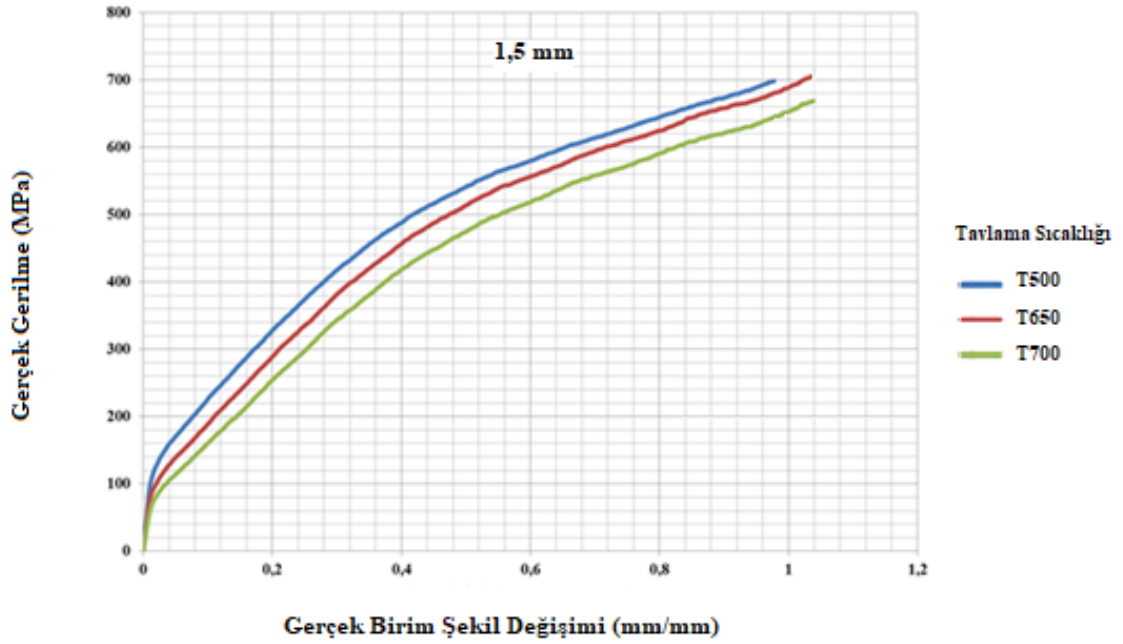
		Tavlama Sıcaklığı		
		500 °C (1 saat)	650 °C (1 saat)	700 °C (2 saat)
Numune Boyutu Kesit Kenarı (mm)	1 mm	15,8	14,9	27,8
	1,5 mm	10,3	15,6	29,3
	2 mm	10,9	18,4	33,4
	3,2 mm	10,7	26	44,6

4.2. Tane Boyutuna Göre Basma Testi Sonuçları

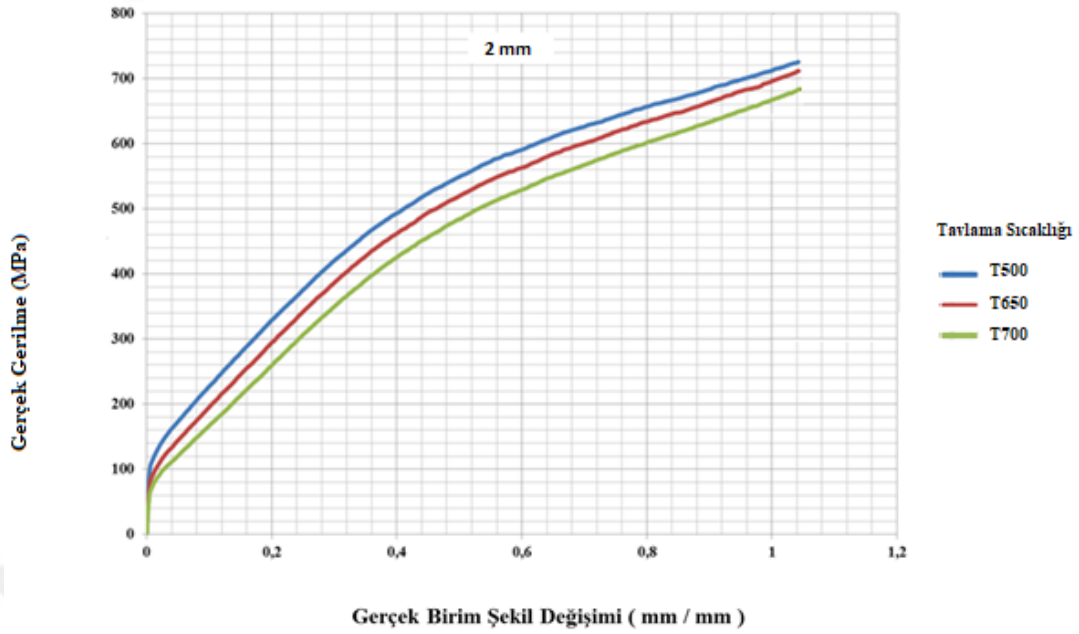
Bu çalışmada, her bir koşul için, yani her numune boyutu tavlama sıcaklığı kombinasyonu için, numunelerin gerçek gerilme - gerçek birim şekil değişimi eğrilerinden ortalama bir eğri elde etmek adına Matlab programı kullanılmıştır. Aşağıdaki şekillerde (Şekil 4.4., Şekil 4.5., Şekil 4.6., Şekil 4.7.) aynı boyutlara sahip basma numunelerinin, farklı sıcaklıklarda tavlınması sonucu sahip olduğu farklı tane boyutlarına göre ortalama gerçek gerilme - gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin kıyaslanması görülmektedir.



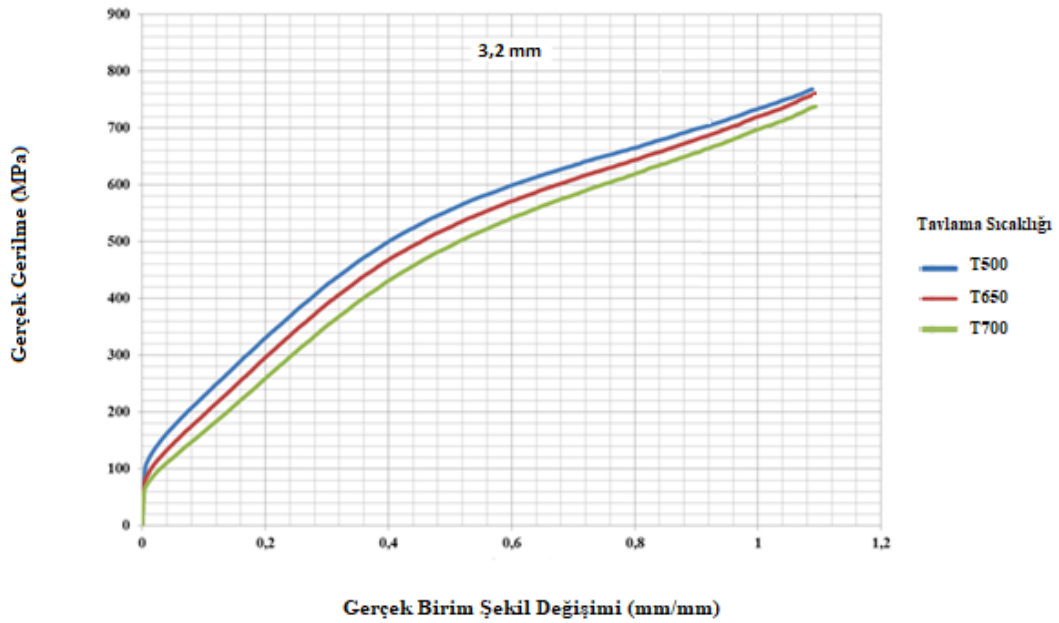
Şekil 4.4. Kare kesit kenarı 1 mm olan numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması [11].



Şekil 4.5. Kare kesit kenarı 1,5 mm olan numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması [11].



Şekil 4.6. Kare kesit kenarı 2 mm olan numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması [11].



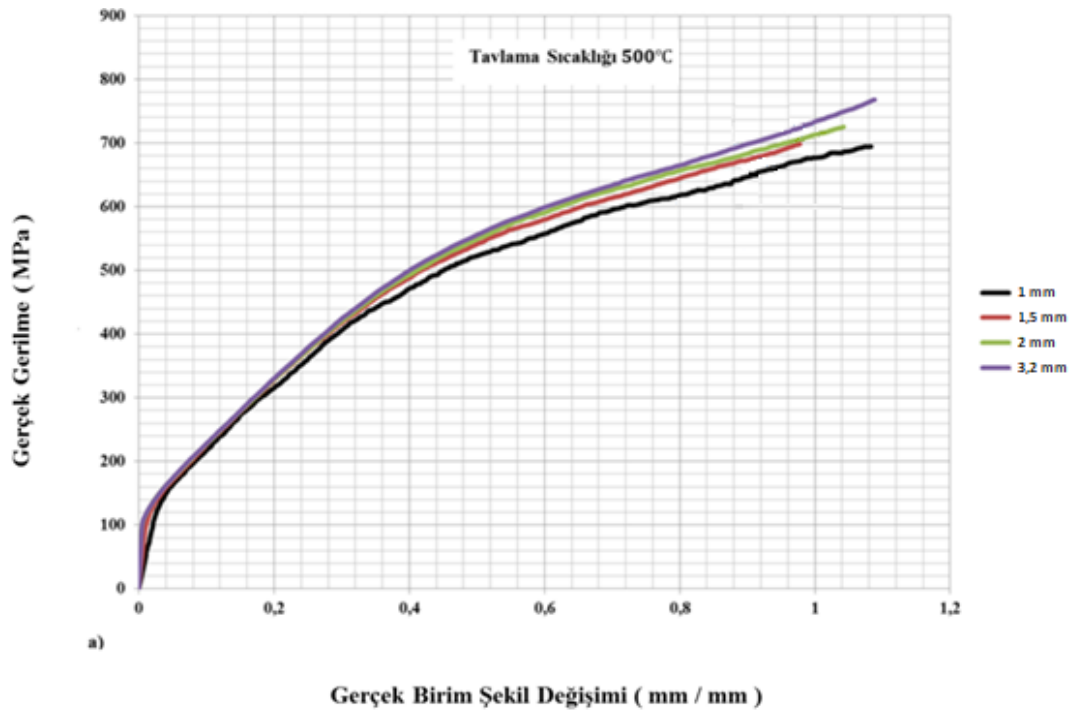
Şekil 4.7. Kare kesit kenarı 3,2 mm olan numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması [11].

Verilen ortalama gerçek gerilme - gerçek birim şekil değişimi eğrileri incelendiğinde, tavlama sıcaklığının artmasıyla belirli bir birim şekil değiştirmede malzemenin akma gerilmesi değeri düşmektedir. 500 °C’de tavlanan numunelerin, daha yüksek

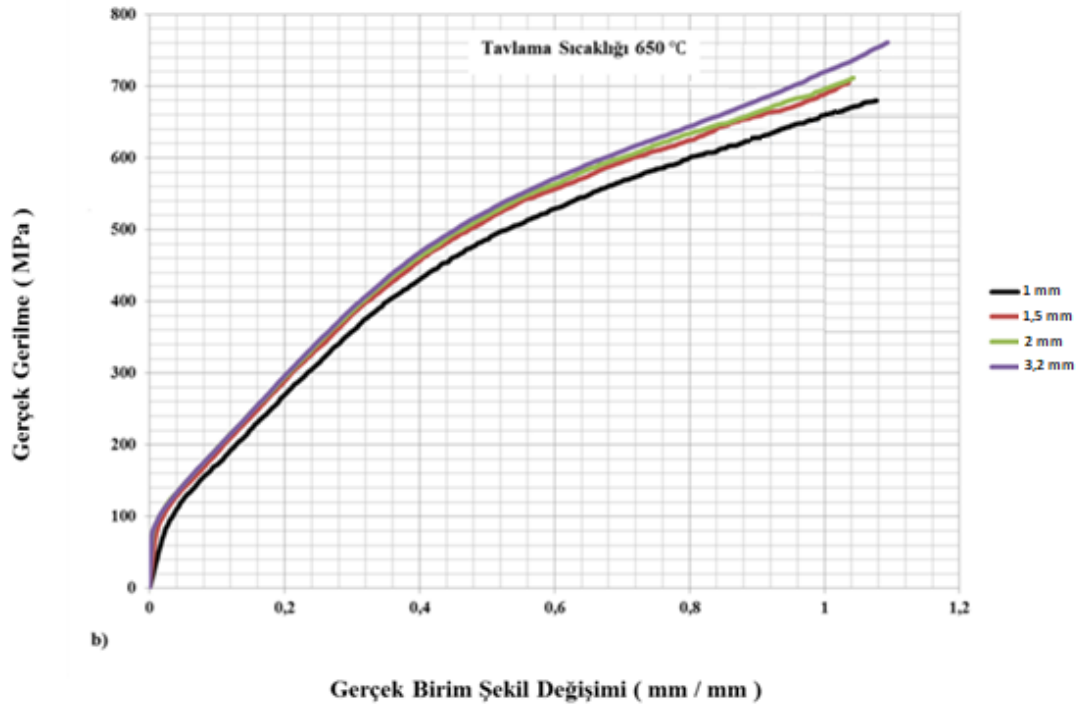
sıcaklıklarda tavlanan numunelerle kıyaslandığında, dört farklı numune boyutunda da en yüksek gerilme değerine sahip olduğu görülmektedir.

4.3. Numune Boyutuna Göre Basma Testi Sonuçları

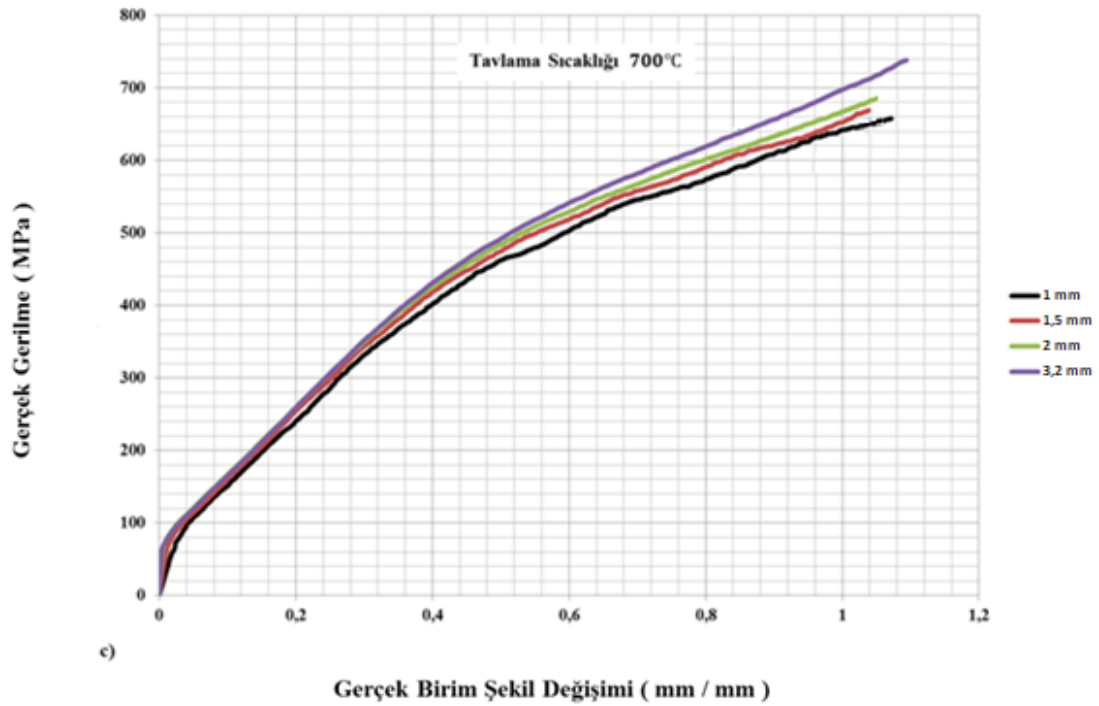
Elde edilen veriler ayrıca numune boyutuna göre de incelenmiştir. Aynı koşullarda tavlanan, kare kesit kenarı 1 mm, 1,5 mm, 2 mm ve 3,2 mm olan numunelerden elde edilen ortalama gerçek gerilme - gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin kıyaslanması Şekil 4.8., Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da görülmektedir.



Şekil 4.8. 500 °C sıcaklıkta tavllanmış numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin numune boyutuna göre karşılaştırılması [11].



Şekil 4.9. 650 °C sıcaklıkta tavllanmış numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin numune boyutuna göre karşılaştırılması [11].



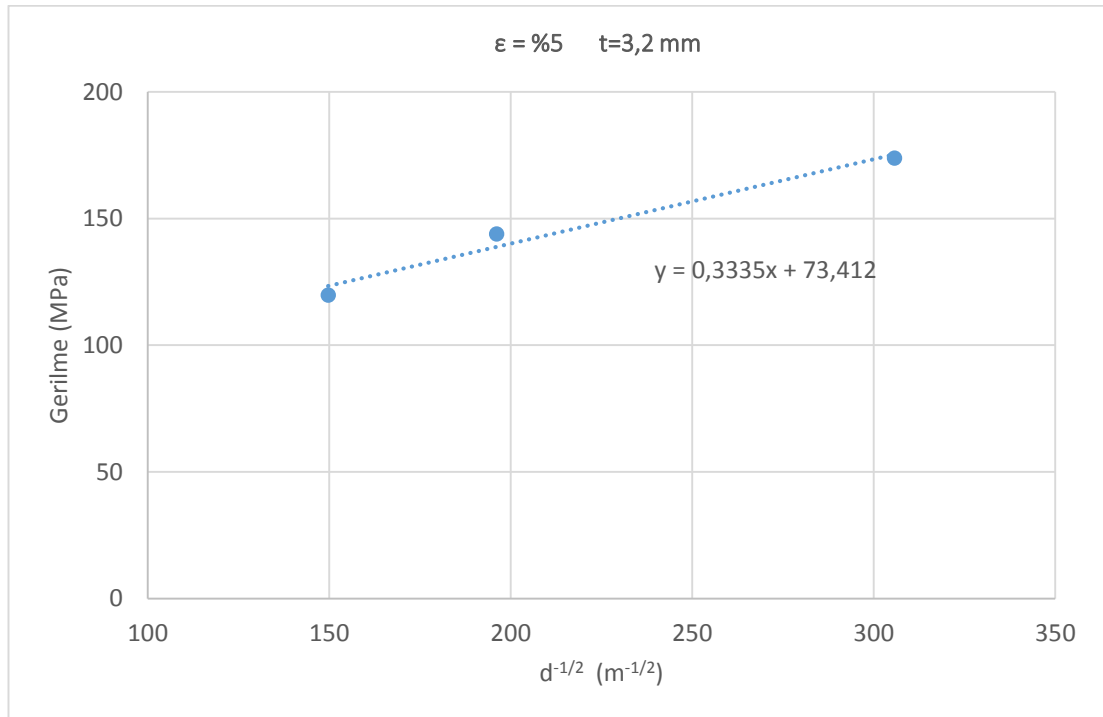
Şekil 4.10. 700 °C sıcaklıkta tavllanmış numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin numune boyutuna göre karşılaştırılması [11].

Verilen grafiklerde görüldüğü üzere aynı tavlama koşulları için, yani tane boyutlarının birbirine yakın olduğu durum için, numune boyutu küçüldükçe malzemenin gerçek gerilme değeri düşmektedir. Kare kesit ebatı 3,2 mm olan numunelerin, daha küçük ebatlardaki numunelerle kıyaslandığında, üç tavlama koşulunda da en yüksek gerilme değerine sahip olduğu görülmektedir.

Numune boyutu büyüdükçe, numunelerin kesitlerinde bulunan tane sayısı artar. Dolayısıyla kare kesit ölçüsü 3,2 mm olan en büyük boy numuneler, diğerlerine nazaran daha fazla tane içermektedir. Bu sebeple bu numuneler, çok taneli makro boyutta numune davranışına en yakın davranış sergileyen numunelerdir.

4.4. Farklı Numune Boyutları için Hall-Petch Sabitlerinin Belirlenmesi

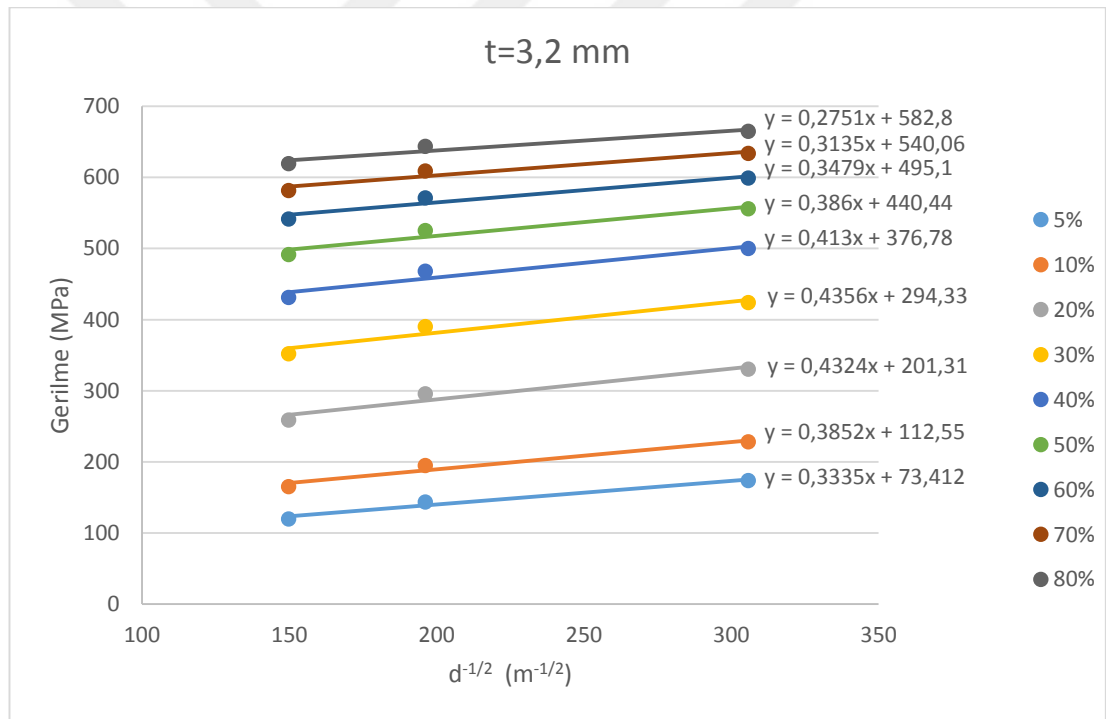
Şekil 4.11.'de kare kesit kenarı 3,2 mm olan en büyük boy numuneler için, %0,5 gerçek birim şekil değiştirme değerinde akma gerilmesinin, bir bölü tane boyutunun kareköküne göre değişimi gösterilmiştir. Veri noktalarına, excel programı yardımıyla ortalama bir doğru oluşturulmuştur.



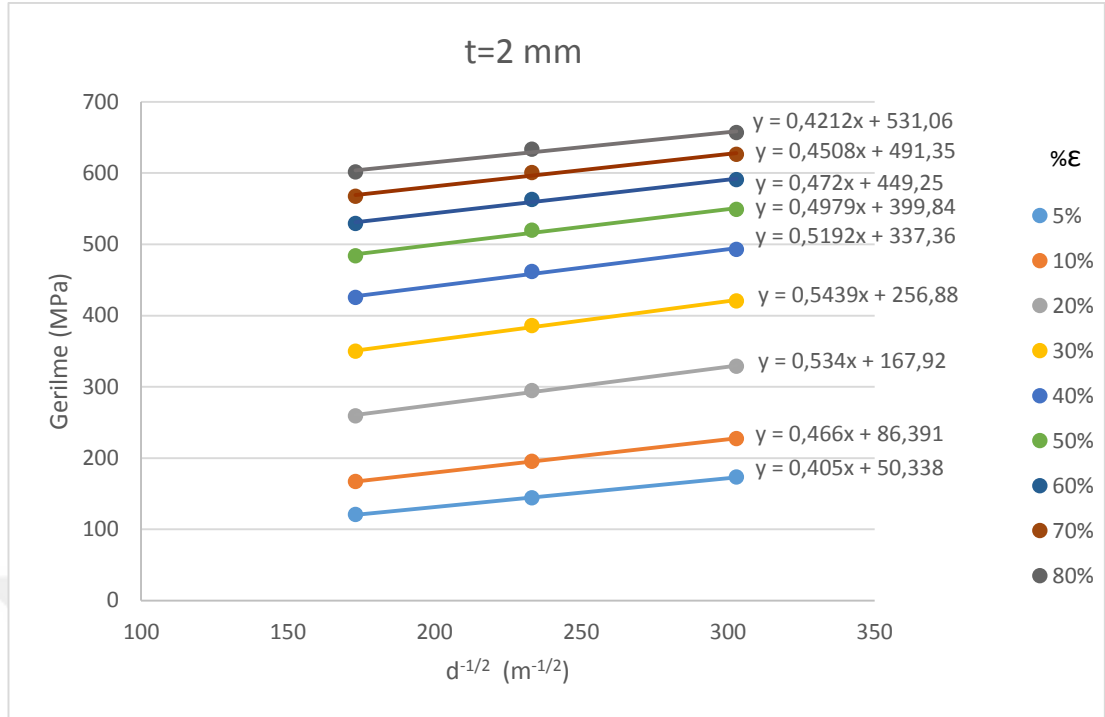
Şekil 4.11. 3,2 mm kalınlığındaki numunelerin $\epsilon=5\%$ için Hall-Petch denklemi eğrisi

Denklem 2.3'te tanımlanan Hall-Petch bağıntısı göz önüne alındığında Şekil 4.11'deki doğrusunun eğiminin $k(\varepsilon)$ sabiti olduğu görülür. Doğrunun dikey eksenini kestiği değer ise, Hall-Petch denkleminde $\sigma_0(\varepsilon)$ sürtünme gerilmesi değeridir.

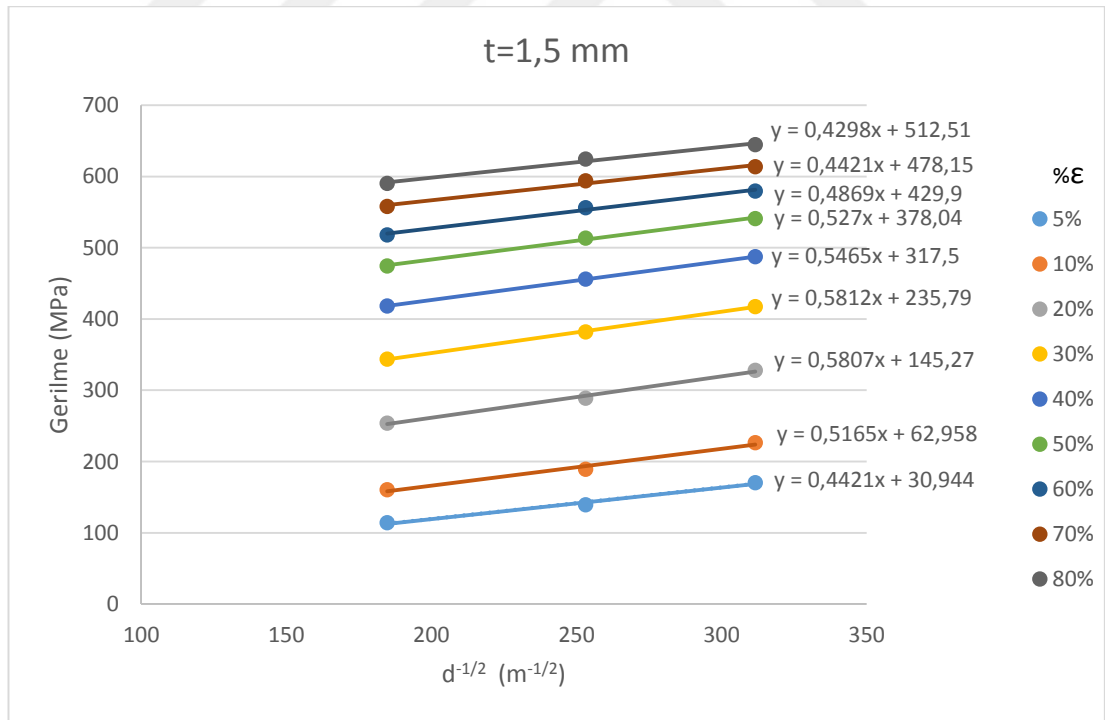
Benzer şekilde farklı birim şekil değiştirme değerleri için 3,2 mm kare kesit kenarına sahip numunelere ait Hall-Petch sabitleri belirlenebilir. Şekil 4.12.'de 3,2 mm kalınlığındaki numunelerin farklı birim şekil değişimleri için elde edilen Hall-Petch doğruları ve elde edilen Hall-Petch denklemleri gösterilmiştir. Benzer şekilde Şekil 4.13., 4.14. ve 4.15.'te; 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm kare kesit kenarına sahip numuneler için farklı birim şekil değiştirme değerlerinde elde edilen Hall-Petch doğruları gösterilmiştir.



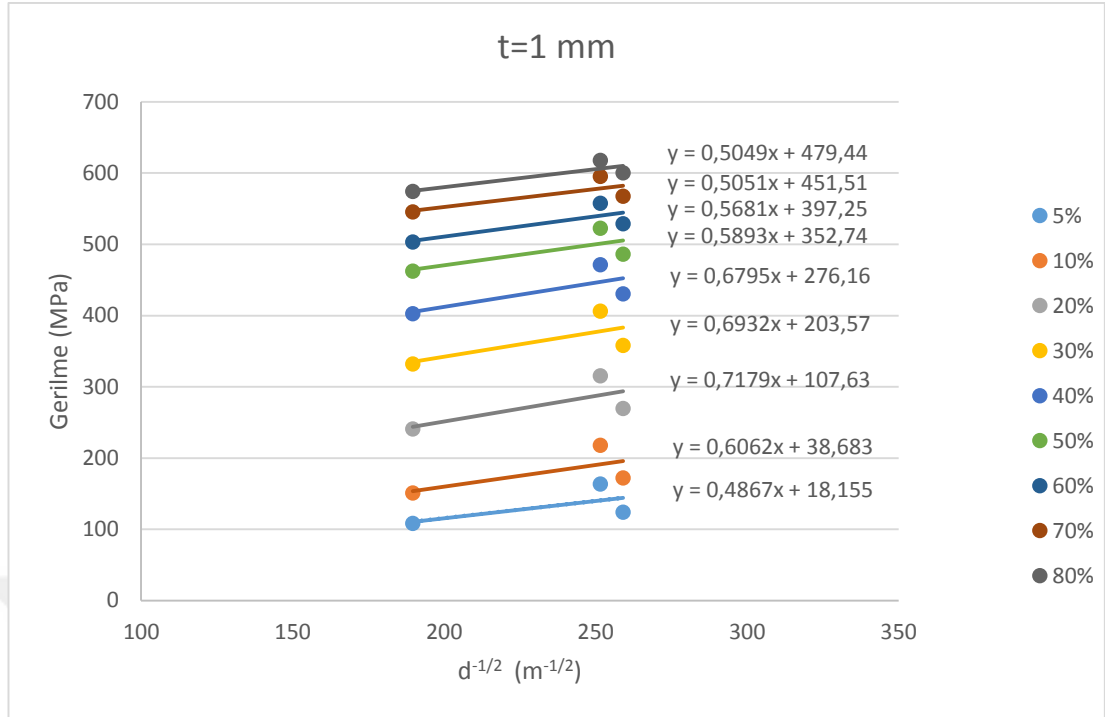
Şekil 4.12. 3,2 mm kalınlığındaki numunelerin farklı birim şekil değişimleri için elde edilen Hall-Petch eğrileri



Şekil 4.13. 2 mm kalınlığındaki numunelerin farklı birim şekil değişimleri için elde edilen Hall-Petch eğrileri

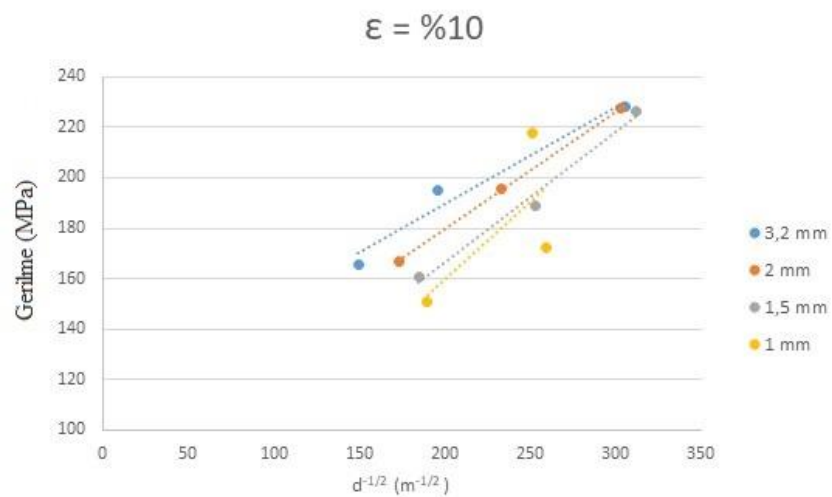


Şekil 4.14. 1,5 mm kalınlığındaki numunelerin farklı birim şekil değişimleri için elde edilen Hall-Petch eğrileri



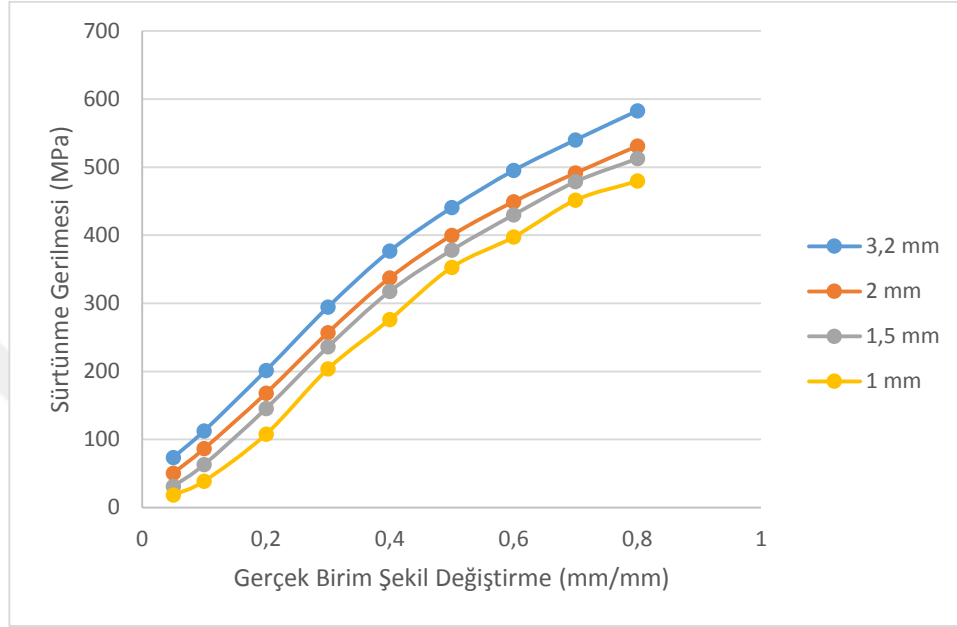
Şekil 4.15. 1 mm kalınlığındaki numunelerin farklı birim şekil değişimleri için elde edilen Hall-Petch eğrileri

Şekil 4.16.'da farklı boyutlardaki numuneler için %10 gerçek birim şekil değiştirme değerinde Hall-Petch doğruları aynı grafikte gösterilmiştir. Görüldüğü gibi doğruların eğimi ($k(\epsilon)$) ve eksenini kestiği değer ($\sigma_0(\epsilon)$) numune boyutuna göre değişmektedir. Numune boyutu küçüldükçe Hall-Petch doğrusunun eğimi artmakta ve bu da $k(\epsilon)$ değerinin daha büyük, $\sigma_0(\epsilon)$ değerinin daha küçük bulunmasına yol açmaktadır.



Şekil 4.16. Farklı boyutlardaki numunelerin $\epsilon=\%10$ için elde edilen Hall-Petch eğrileri

Şekil 4.17.'de farklı kalınlıklardaki numuneler için belirlenen Hall-Petch $\sigma_0(\varepsilon)$ sürtünme gerilmesi değerinin gerçek birim şekil değiştirme oranına göre değişimi görülmektedir. Görüldüğü üzere numune boyutunun küçülmesiyle belirlenen σ_0 sürtünme gerilmesi değeri de azalmaktadır.



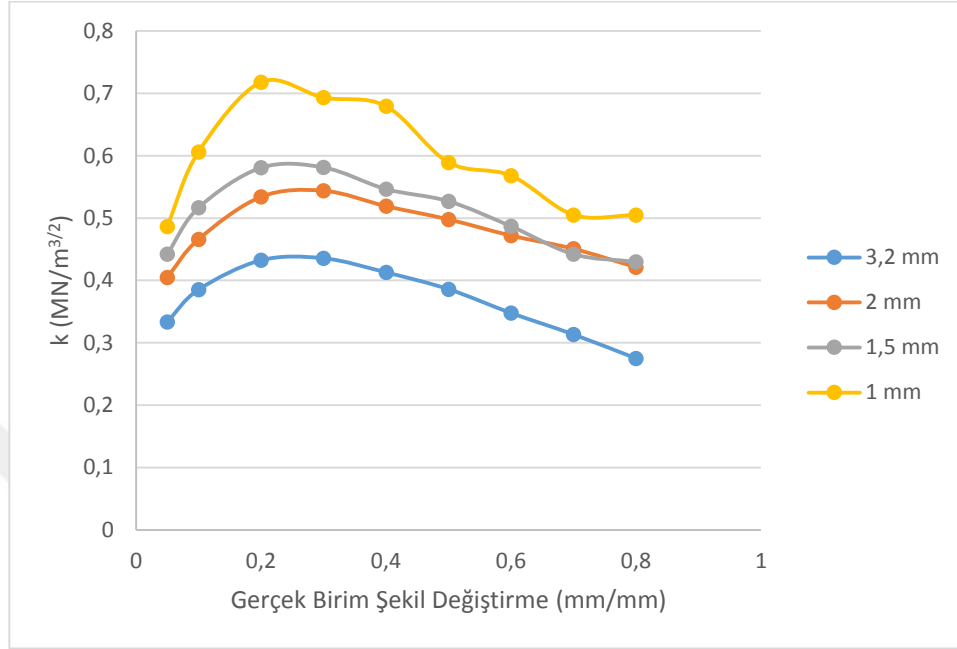
Şekil 4.17. Farklı kalınlıklardaki numunelere ait Hall-Petch σ_0 sürtünme gerilmesinin gerçek birim şekil değiştirmeye göre değişimi

Şekil 4.17.'de yer alan eğrilerdeki $\sigma_0(\varepsilon)$ sürtünme gerilmesinin sahip olduğu sayısal değerler, gerçek birim şekil değiştirme oranlarına göre aşağıdaki Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Farklı kalınlıklardaki numuneler için belirlenen Hall-Petch σ_0 sürtünme gerilmesinin gerçek birim şekil değiştirme oranlarına göre sayısal değerleri (MPa cinsinden verilmiştir.)

	Numune Boyutları				
	3,2 mm	2 mm	1,5 mm	1 mm	
Birim Şekil Değişimi (ε)	5%	73,41	50,34	30,94	18,16
	10%	112,55	86,39	62,96	38,68
	20%	201,31	167,92	145,27	107,63
	30%	294,33	256,88	235,79	203,57
	40%	376,78	337,36	317,50	276,16
	50%	440,44	399,84	378,04	352,74
	60%	495,10	449,25	429,90	397,25
	70%	540,06	491,35	478,15	451,51
	80%	582,80	531,06	512,51	479,44

Şekil 4.18.'de farklı kalınlıktaki numuneler için belirlenen $k(\epsilon)$ değerlerinin gerçek birim şekil değiştirme oranına göre değişimi görülmektedir. Görüldüğü üzere numune boyutunun küçülmesiyle, elde edilen $k(\epsilon)$ değeri artmaktadır.



Şekil 4.18. Farklı kalınlıklardaki numunelere ait Hall-Petch k değerinin gerçek birim şekil değiştirmeye göre değişimi

Şekil 4.18.'de sergilenen eğrilerdeki $k(\epsilon)$ büyüklüğünün sahip olduğu sayısal değerler, gerçek birim şekil değiştirme oranlarına göre aşağıdaki Tablo 4.3.'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Farklı kalınlıklardaki numuneler için belirlenen Hall-Petch $k(\epsilon)$ değerinin gerçek birim şekil değiştirme oranlarına göre sayısal değerleri ($\text{MN}/\text{mm}^{3/2}$ cinsinden verilmiştir.)

	Numune Boyutları				
	3,2 mm	2 mm	1,5 mm	1 mm	
Birim Şekil Değişimi (ϵ)	5%	0,3335	0,4050	0,4421	0,4867
	10%	0,3852	0,4660	0,5165	0,6062
	20%	0,4324	0,5340	0,5807	0,7179
	30%	0,4356	0,5439	0,5812	0,6932
	40%	0,4130	0,5192	0,5465	0,6795
	50%	0,3860	0,4979	0,527	0,5893
	60%	0,3479	0,4720	0,4869	0,5681
	70%	0,3155	0,4508	0,4421	0,5051
	80%	0,2751	0,4212	0,4298	0,5049

Bu açıdan, Hall-Petch sabitlerinin, yüzey tabakası oranının ihmal edilebilecek kadar küçük olan kalın numunelerle gerçekleştirilecek deneylerle belirlenmesi daha doğru sonuçlar verecektir.

Söz konusu bu numune kalınlığının yaklaşık olarak belirlenmesi amacıyla hayali bir malzeme için numune boyutunun Hall-Petch sabitlerine etkisi hesaplamalı olarak incelenmiştir. 10 ve 100 µm tane boyutuna sahip hayali malzemeler için yapılan hesaplamalarda, tane boyutu 10 µm olan malzemede yüzey ve iç tanelerinin akma gerilmelerinin sırasıyla 150 ve 250 MPa olduğu, tane boyutu 100 µm olan malzemede yüzey ve iç tanelerinin akma gerilmelerinin sırasıyla 120 ve 200 MPa olduğu kabulü yapılmıştır. Genişliği 10 mm ve kalınlığı 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 10 mm ve 12 mm olan çekme numuneleri için, Denklem 2.4'e göre yapılan hesaplama ile elde edilen malzeme akma gerilmesi değerleri ve bu akma gerilmesinin iç tanelere göre yüzde değişimi Tablo 4.4.'te verilmiştir. Benzer şekilde tane boyutu 100 µm olan malzeme için hesaplanan değerler ise Tablo 4.5.'te verilmiştir.

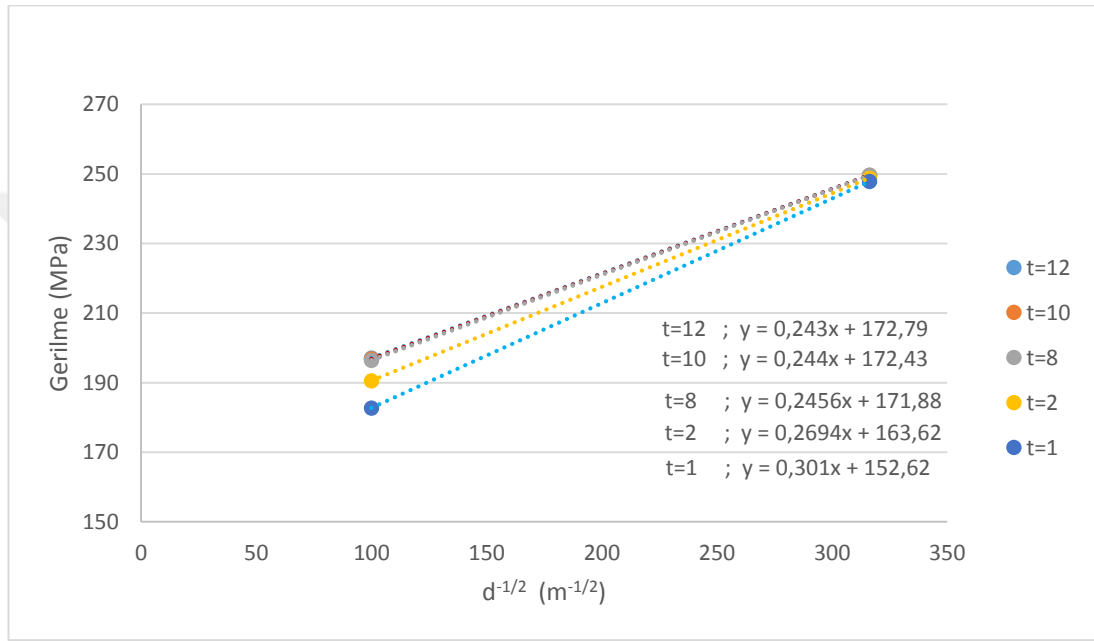
Tablo 4.4. Tane boyutu 10 mikrometre olan farklı kalınlıklardaki temsili numunelerin akma gerilmesi değerleri

t (mm)	w (mm)	Tane boyutu (mikrometre)	Yüzey Tabakası Oranı	Akma Gerilmesi (MPa)	Gerilme Değişimi %
1	10	10	0,022	247,804	-0,878
2	10	10	0,012	248,802	-0,479
8	10	10	0,004	249,551	-0,180
10	10	10	0,004	249,600	-0,160
12	10	10	0,004	249,634	-0,147

Tablo 4.5. Tane boyutu 100 mikrometre olan farklı kalınlıklardaki temsili numunelerin akma gerilmesi değerleri

t (mm)	w (mm)	Tane boyutu (mikrometre)	Yüzey Tabakası Oranı	Akma Gerilmesi (MPa)	Gerilme Değişimi %
1	10	100	0,216	182,720	-8,640
2	10	100	0,118	190,560	-4,720
8	10	100	0,045	196,440	-1,780
10	10	100	0,040	196,832	-1,584
12	10	100	0,036	197,093	-1,453

Hesaplanan bu değerlere göre bu hayali malzeme için farklı numune boyutlarına ait Hall-Petch eğrileri Şekil 4.19.'da gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde 8 mm, 10 mm ve 12 mm kalınlığında numuneler için Hall-Petch doğrularının hemen hemen çakışık olduğu, yani numune boyutundan etkilenmediği, bununla birlikte kalınlığı 2 mm ve 1 mm olan numuneler için Hall-Petch doğrularının aşağı doğru kaydığı ve eğimlerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.19. Tane boyutu 10 mikrometre ve 100 mikrometre olan hayali malzeme farklı kalınlıklardaki numunelerin Hall-Petch eğrileri

Hayali bir malzeme için yapılan bu hesaplama numune boyutundan bağımsız malzemeye özgü Hall-Petch sabitlerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneylerde numune kalınlığının en az 8 mm mertebesinde olması gerektiğini göstermektedir.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA

Engel U. tarafından önerilen yüzey tabakası modelinde açıklandığı üzere yüzey tanelerinin dayanımı daha düşüktür. Bu sebeple, yüzey tabakasının toplam alana oranı arttıkça akma dayanımı düşmektedir.

Teorik olarak tane boyutu aynı olan numunelerin akma dayanımlarının da aynı olması beklenir. Bununla birlikte numune boyutu küçüldükçe, yüzey tabakasının kesitte kapladığı alanın oranı artar. Özellikle numune boyutu 1-2 mm olduğunda, hatta 1 mm'nin altına düştüğünde, yüzey tabakasının oranında ciddi bir artış görülür. Bu oran tane boyutuna da bağlıdır ve numune boyutunun azalmasının yanında tane boyutunun artmasıyla da artar. Neticede yüzey tabakası/numune kesiti oranına göre, aynı tane boyutuna sahip numunelerin akma gerilmelerinin numune boyutuna göre değişebildiği görülmektedir.

Tane boyutu ile akma gerilmesi arasındaki ilişkiyi açıklayan Hall-Petch bağıntısındaki σ_0 sürtünme gerilmesi, tane sınırından yani tane boyutundan bağımsız olarak tanımlanan malzemeye özgü sabit bir büyüklüktür. Yine Hall-Petch bağıntısında bulunan k_p sabiti, tane boyutunun malzemenin akma gerilmesine olan etkisini tanımlayan, malzemeye ait sabit bir büyüklük olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada elde edilen analizler incelendiğinde ise, 1 ya da 2 mm kalınlıklara sahip numunelerle gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen σ_0 ve k_p değerlerinin, numune boyutundan etkilenebildiği görülmektedir. Bu sonuç Engel U. tarafından önerilen yüzey tabaka modeli ile açıklanabilir [10].

Numune boyutu küçüldükçe yüzey tabakasının toplam kesitte kapladığı alan artar ve bu da akma gerilmesinin düşmesine yol açar. Dolayısıyla, farklı boyutlarda numunelerle gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen Hall-Petch doğruları,

numune boyutu azaldıkça aşağıya doğru kayar. Bu da $\sigma_0(\epsilon)$ değerinin daha küçük değerler almasına yol açar. Ayrıca, kaba ve ince taneli yapılar karşılaştırıldığında, numune boyutu küçüldükçe kaba taneli yapı için yüzey tabakası oranında meydana gelen artış daha büyük olduğundan, kaba taneli yapılardaki akma gerilmesinde meydana gelen düşme daha büyük olur. Bu nedenle, numune boyutu küçüldükçe Hall-Petch eğrisinin eğimi, yani $k(\epsilon)$ sabiti artar. Ayrıca, belirlenen $\sigma_0(\epsilon)$ değerinin daha da küçük olmasına yol açar.

Hall-Petch sabitleri olan $k(\epsilon)$ ve $\sigma_0(\epsilon)$ malzemeye zđ sabitlerdir. Bununla birlikte yukarıdaki sonuçlar malzemeler için belirlenen bu sabitlerin numune boyutuna göre farklılık gösterebileceğini ortaya koymuştur. Hall-Petch konusunda yapılan birçok çalışmada kalınlığı 1-2 mm olan sac numunelerle çekme deneyi yapılmıştır. Özellikle 1-2 mm kalınlığında numunelerle yapılan deneylerle belirlenen Hall-Petch sabitlerinin numune boyutundan etkileneceği görülmektedir. Bu açıdan, Hall-Petch sabitlerinin, yüzey tabakası oranının ihmal edilebilecek kadar küçük olan kalın numunelerle gerçekleştirilecek deneylerle belirlenmesi daha doğru sonuçlar verecektir.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada CuZn30 pirinç malzemesinde numune boyutunun Hall-Petch olarak bilinen bağıntıya olan etkisinin incelenmiştir. Bu amaçla daha önce gerçekleştirilen bir çalışmada elde edilen deneysel veriler akademik kurallar dahilinde kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada, soğuk haddelenmiş olarak temin edilmiş deney malzemesinden farklı boyutlarda üretilen basma numuneleri üç farklı sıcaklıkta tavlansarak farklı tane boyutları elde edilmiştir. Bu numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucunda farklı numune boyutu ve tane boyutuna sahip numunelere ait gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir.

Bu çalışmada söz konusu çalışmada elde edilen bu gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme verileri kullanılarak farklı numune boyutları için, belirli birim şekil değiştirme değerlerinde Hall-Petch denklemleri, dolayısıyla Hall-Petch sabitleri elde edilmiştir. Belirlenen Hall-Petch sabitlerinin numune boyutuna göre farklılık gösterdiği görülmüştür.

Aynı tane boyutu için numune boyutu azaldıkça akma gerilmesi düşmektedir. Bu düşüş tane boyutu büyüdükçe belirginleşmektedir. Bunun sonucunda, daha küçük boyutlu numunelerle gerçekleştirilen deneylerde daha büyük $k(\epsilon)$ değerlerinin ve daha düşük $\sigma_0(\epsilon)$ değerlerinin elde edilmesine yol açmaktadır.

Söz konusu bu boyut etkisi yüzey modeli ile açıklanabilir. Yüzey tabakası modeline göre malzeme dayanımı daha düşük olan yüzey tanelerinden ve dayanımı daha yüksek olan iç tanelerden oluşur. Numune boyutu düştükçe yüzey tanelerinin kesitte kapladığı alan artar bu da numune boyutu azaldıkça akma gerilmesinin düşmesine yol açar. Tane boyutunun artması da yüzey tabakası oranının artmasına yol açar.

Numune boyutundan bağımsız malzemeye özgü Hall-Petch sabitlerinin belirlenmesi için, deneylerin yüzey tabakası oranı ihmal edilebilecek kadar küçük olan kalın numunelerle gerçekleştirilmesi gereklidir.

Hayali bir malzeme için yapılan teorik hesaplama, numune boyutundan bağımsız malzemeye özgü Hall-Petch sabitlerinin belirlenmesi için, çekme numunesi kalınlığının en az 8 mm mertebelerinde olması gerektiğini ortaya koymuştur.



KAYNAKLAR

- [1] E.O. Hall, Proc. Phys. Soc., Ser. B, Vol. 64, pp. 747-753, (1951)
- [2] N.J. Petch, J. Iron and Steel Institute, pp. 25-28, May 1953.
- [3] Onaran, Kâşif (2006). Malzeme Bilimi. Bilim Teknik Yayınevi. ISBN 975-540-017-6.
- [4] Mike Meier, Department of Chemical Engineering and Materials Science, University of California, Davis, September 13, 2004
- [5] R. Armstrong, I. Codd, R. M. Douthwaite, N. J. Petch, The Plastic Deformation of Polycrystalline Aggregates, February 8, 1961
- [6] Armstrong RW, Codd I, Douthwaite RM, Petch NJ. Philos Mag, 1962
- [7] YILMAZ, F., 2008, Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Müh., Sarbak seminerleri, Çerkezköy/İstanbul
- [8] Yıldırım, S. 2001. Saf Bakırın Yüksek Sıcaklıktaki Mekanik Davranışı: Dinamik Yeniden Kristalleşme ve Dinamik Tane Büyümesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Doktora Tezi
- [9] Gap Yon Kim, Jun Ni, Muammer Koc “Modeling of the Size Effects on the Behavior of Metals in Microscale Deformation Processes” Transactions of the ASME, 2007, vol. 129
- [10] J. G. Liu, M. W. Fu, W. L. Chan “ A Constitutive model for modeling of the deformation behavior in microforming with a consideration of grain boundary strengthening “ Computational Material Science (2012) 85-94
- [11] Karadağ, O. 2018. Mikro Şekillendirme Benzeşimleri İçin Bir Malzeme Modelinin Oluşturulması, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi

ÖZGEÇMİŞ

Hülya Demirci, 13.05.1990 yılında Bursa'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Bursa'da tamamladı. 2007 yılında Özel Melike Pınar Anadolu Lisesi'nden derece ile mezuniyetinin ardından üniversite öğrenimine başladı. 2008 yılında giriş yaptığı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2012 yılında onur derecesi olarak bitirmeyi hak kazandı. Özel sektörde çalışma hayatına devam ederken 2013 yılında Makine Mühendisliği Bölümü'nde Makine Tasarım ve İmalat Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Halen özel sektörde makine ve konstrüksiyon alanında Ar-ge departmanında görev yapmaktadır.