

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MİKRO/MEZO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİ İÇİN BİR  
MALZEME MODELİNİN OLUŞTURULMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**Yasin Kuddusi KUTUCU**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı**

**MART 2023**



**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MİKRO/MEZO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİ İÇİN BİR  
MALZEME MODELİNİN OLUŞTURULMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**Yasin Kuddusi KUTUCU**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi Sunal Ahmet PARASIZ**

**MART 2023**



Yasin Kuddusi KUTUCU tarafından hazırlanan “Mikro/Mezo Şekillendirme İşlemleri İçin Bir Malzeme Modelinin Oluşturulması” adlı tez çalışması 13.03.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı **Makina Tasarım ve İmalat** Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

### **Tez Jürisi**

**Jüri Başkanı : Doç. Dr. Ahmet DEMİNER** .....  
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

**Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi S. Ahmet PARASIZ (Danışman)** .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi : Doç. Dr. Osman Hamdi METE** .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi : Doç. Dr. Serdar ASLAN** .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi : Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU** .....  
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Mikro/Mezo Şekillendirme İşlemleri İçin Bir Malzeme Modelinin Oluşturulması” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../20.....).

Yasin Kuddusi KUTUCU





*Anne ve babam başta olmak üzere tüm aileme...*



## TEŞEKKÜR

Doktora sürecim boyunca bilgi birikimi ve tecrübesini benden esirgemeyen; sabır ve kararlılıkla zorlukları aşmamda yardımcı olan, kişisel ve kurumsal etik değerlere olan hassasiyeti ile kendime örnek aldığım tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Sunal Ahmet PARASIZ hocama teşekkürü bir borç bilirim. Tez izleme komitesindeki hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Serdar ASLAN ve Doç. Dr. Osman Hamdi METE sabır ve ilgiyle bu sürece destek vermiş ve değerli bilgi ve tecrübelerini benden esirgememişlerdir, kendilerine saygı ve şükranlarımı sunarım.

Çetin doktora sürecimi ilgiyle takip eden, sadece engin bilgi ve tecrübelerini paylaşmakla kalmayıp aynı zamanda manevi moral ve destek veren sayın hocalarım Prof. Dr. Mehmet FIRAT ve Prof. Dr. Kenan GENEL'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Deney numunelerinin hazırlanması sürecindeki katkılarından ötürü Doç. Dr. Murat ÖZSOY hocama, deney sürecindeki katkılarından ötürü Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ ve Prof. Dr. Şafak YILMAZ, Dr. Öğr. Üyesi Canan Gamze GÜLERYÜZ PARASIZ hocalarıma ve sevgili dostum Dr. Raşid Ahmet YILDIZ'a teşekkürü bir borç bilirim. Bu süreçte konuyla ilgili bilgi ve tecrübelerinin yanında moral desteğini de benden esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Muhammet YALÇIN'a içten teşekkürlerimi sunarım. Benzeşim çalışmalarındaki katkılarından ötürü çalışma arkadaşım Arş. Gör. Toros Arda AKŞEN'e teşekkür ederim.

Son olarak ömür yolculuğunda edindiğim rütbe ve mevkilerin hakiki sahibi, akıl ve kalbime ilmek ilmek işledikleri hayat düsturlarıyla yolumu aydınlatan sevgili anne ve babama, beni bir kardeşten öte evlat gibi sevip muamele eden, destekleyip gözeten sevgili ablalarıma; bu süreçte sabır ve ilgisiyle desteğini hep yanımda hissettiğim sevgili eşime; varlıklarıyla umutlarımı yeşerten beni hayata bağlayan göz nuru evlatlarıma; hasılı tüm aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. (Proje No: 115M653).

Yasin Kuddusi KUTUCU



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>ix</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>xi</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>SİMGELER</b> .....	<b>xv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xix</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xxv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Literatür Çalışması .....	6
<b>2. MALZEME MODELİ</b> .....	<b>11</b>
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA</b> .....	<b>17</b>
3.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması .....	17
3.2. Mikro Basma Deneyleri .....	27
3.2.1. Mikro basma deneyi sonuçları .....	28
3.3. Deney Sonuçları ile Malzeme Modelinin Doğrulanması .....	37
3.4. Literatürdeki Farklı Çalışmalar ile Modelin Doğrulanması .....	40
<b>4. MİKRO-EKSTRÜZYON DENEYLERİ VE BENZEŞİMLERİ</b> .....	<b>49</b>
4.1. Mikro-ekstrüzyon Deneyleri .....	49
4.2. Mikro-ekstrüzyon Benzeşimleri .....	53
<b>5. SONUÇLAR</b> .....	<b>59</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>61</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>64</b>



## **KISALTMALAR**

**YMK** : Yüzey merkezli kübik yapı

**CuZn30** : Fişek pirinci





## SİMGELER

$\sigma_{AK}$	: Akma gerilmesi değeri [MPa]
$\alpha$	: Yüzey tabakası oranı
$\sigma_i$	: İç tanelerin akma gerilmesi değeri [MPa]
$\sigma_y$	: Yüzey tanelerin akma gerilmesi değeri [MPa]
$\sigma_0$	: Çok kristalli yapıda tane içinde plastik deformasyon oluşturmak için gerekli gerilme değeri [MPa]
$k$	: Tane sınırı bölgesinde plastik deformasyon oluşturulması için gerekli gerilme değeri ile ilgili katsayı [MPa.mm <sup>1/2</sup> ]
$m$	: Oryantasyon Faktörü
$\tau_0$	: Tane içinde aktif kayma sistemi üzerindeki kritik kayma gerilmesi bileşeni [MPa]
$k_s$	: Tane sınırı bölgesinde plastik deformasyon oluşturmak için gerekli kayma gerilmesi değeri ile ilgili katsayı [MPa.mm <sup>1/2</sup> ]
$\sigma_{ay}$	: Yüzey tabakası akma gerilmesi değeri [MPa]
$\sigma_{ai}$	: İç tanelerin akma gerilmesi değeri [MPa]
$F$	: Basma Kuvveti [Newton]
$A_0$	: İlk kesit alanı [mm <sup>2</sup> ]
$\epsilon$	: Birim şekil değişimi (mm/mm)
$h_0$	: Numune yüksekliği
$\Delta h$	: Basma sonucu kısalma farkı (mm)
$\sigma_g$	: Gerçek Gerilme (MPa)
$\epsilon_g$	: Gerçek Birim şekil değişimi (mm/mm)
$t;L,w$	: Ekstrüzyon Kütüğü boyut ölçüleri (mm)
$t_0$	: Ekstrüzyon kalıbı giriş ölçüsü (mm)
$t_f$	: Ekstrüzyon kalıbı çıkış ölçüsü (mm)
$\alpha_k$	: Ekstrüzyon kalıp açısı (derece)



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1.</b> CuZn 30 malzemenin kimyasal bileşimi.....	18
<b>Tablo 3.2.</b> Tane boyutu değerleri .....	27
<b>Tablo 3.3.</b> Ortalama deney sonuçları ile modele göre hesaplanan eğriler arasındaki hata oranı değerleri.....	40
<b>Tablo 3.4.</b> Zeng tarafından yapılan çalışmadaki deney sonuçları ile modele göre hesaplanan eğriler arasındaki hata oranı değerleri. ....	45
<b>Tablo 3.5.</b> Engel tarafından yapılan çalışmadaki deney sonuçları ile modele göre hesaplanan eğriler arasındaki hata oranı değerleri. ....	47
<b>Tablo 4.1.</b> Mikro-ekstrüzyon kütüklerinin boyutları.....	50
<b>Tablo 4.2.</b> Mikro-ekstrüzyon işlemlerinde kullanılan kalıpların ölçüleri.....	51



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Mikro şekillendirmeye üretilmiş farklı boyutlardaki metal ürünler. ....	1
Şekil 1.2. Minyatürleşme ile görülen akma eğrisindeki düşüş ve saçınımın artması [3]. .....	3
Şekil 1.3. İndirekt ekstrüzyonla üretilmiş bir mikro parçada görülen şekil anomalisi [3]. ....	4
Şekil 1.4. Yüzey alanı / hacim oranının minyatürleşme ile değişimi. ....	4
Şekil 1.5. İç taneler ve yüzey tanelerinin şematik gösterimi. ....	5
Şekil 1.6. Numune boyutu ve tane boyutuna bağlı olarak yüzey tanelerinin kesitteki oranı [3]. ....	6
Şekil 2.1. Yüzey taneleri ve iç tanelerin şematik gösterimi. ....	12
Şekil 3.1. CuZn 30 malzemenin SEM analiz sonuçları. ....	18
Şekil 3.2. Çeşitli büyüklüklerde mikro basma deney numuneleri. ....	19
Şekil 3.3. Metalografik incelemede kullanılan zımparalama cihazı ....	20
Şekil 3.4. Kesme metodunun uygulanmasına dair bir örnek (Çizgi uzunluğu 300 mikrondur). ....	21
Şekil 3.5. Mikroskop altındaki mikrometre yardımıyla ölçü alınmasına ait bir örnek (uzun çizgilerin arası 100 mikrondur). ....	21
Şekil 3.6. Metalografik incelemede kullanılan elektrolitik parlatma cihazı. ....	22
Şekil 3.7. a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm ve d) 3,2 mm kare kesit kenarına sahip 500 °C'de tavllanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları. ....	23
Şekil 3.8. a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm ve d) 3,2 mm kare kesit kenarına sahip 650 °C'de tavllanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları. ....	23
Şekil 3.9. a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm ve d) 3,2 mm kare kesit kenarına sahip 700 °C'de tavllanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları. ....	24
Şekil 3.10. 1 mm kare kesit kenarına sahip a) 500 °C b) 650 °C ve c) 700 °C'de tavlanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları. ....	25
Şekil 3.11. 1,5 mm kare kesit kenarına sahip a) 500 °C b) 650 °C ve c) 700 °C'de tavlanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları. ....	25
Şekil 3.12. 2 mm kare kesit kenarına sahip a) 500 °C b) 650 °C ve c) 700 °C'de tavlanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları. ....	26
Şekil 3.13. 3,2 mm kare kesit kenarına sahip a) 500 °C b) 650 °C ve c) 700 °C'de tavlanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları. ....	26
Şekil 3.14. Tavlama sıcaklığı 700°C' olan farklı boyutlardaki numunelere ait kuvvet deplasman eğrileri. ....	29
Şekil 3.15. 3.2 mm kare kesit kenar uzunluğuna sahip ve a) tane boyutu 43 µm (500°C'de tavllanmış), b) tane boyutu 100,2µm (650°C'de tavllanmış), c) tane boyutu 205,8 µm (700°C'de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri. ....	31

- Şekil 3.16.** 2 mm kare kesit kenar uzunluğuna sahip ve a) tane boyutu 45  $\mu\text{m}$  (500°C’de tavllanmış), b) tane boyutu 74  $\mu\text{m}$  (650°C’de tavllanmış), c) tane boyutu 146,2  $\mu\text{m}$  (700°C’de tavllanmış olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri. .... 32
- Şekil 3.17.** 1,5 mm kare kesit kenar uzunluğuna sahip ve tane boyutu a) 33,5  $\mu\text{m}$  (500°C’de tavllanmış), b) 77,8  $\mu\text{m}$  (650°C’de tavllanmış), c) 137,6  $\mu\text{m}$  (700°C’de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri.. 33
- Şekil 3.18.** 1 mm kare kesit kenar uzunluğuna sahip ve tane boyutu a) 51,6  $\mu\text{m}$  (500°C’de tavllanmış), b) 81,6  $\mu\text{m}$  (650°C’de tavllanmış), c) 125,4  $\mu\text{m}$  (700°C’de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri.. 34
- Şekil 3.19.** a) 500 °C b) 650 °C c) 700 °C tavlama sıcaklığındaki numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin numune boyutuna göre karşılaştırılması. Numune boyutları (kare kesit kenar uzunlukları) ve tane boyutları grafiklerde belirtilmiştir. .... 36
- Şekil 3.20.** a) 1 mm b) 1.5 mm c) 2 mm d) 3.2 mm kare kesit kenar uzuluğuna sahip numunelerin ortalama gerçek gerilme - gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması. Tavlama sıcaklıkları ve tane boyutları grafiklerde belirtilmiştir. .... 37
- Şekil 3.21.** Belirli gerçek gerilme değerlerinde iç taneler (ya da eşdeğeri olan makro boyuttaki çok kristal malzeme) için akma gerilmesinin bir bölü karekök tane boyutuna göre değişimi ..... 38
- Şekil 3.22.** a) 3.2 mm b) 2 mm c) 1.5 mm and d) 1 mm kare kesit kenarına sahip numunler için deneysel olarak elde edilen akma gerilmelerinin oluşturulan malzeme modeli ile hesaplanan akma eğrileri ile karşılaştırması. Tav sıcaklıkları grafiklerde yanda belirtilmiştir. .... 39
- Şekil 3.23.** Aynı tane büyüklüğüne sahip farklı kalınlıklarda mikro-çekme numunelerine ait akma eğrileri. a) tane büyüklüğü 23  $\mu\text{m}$ , b) tane büyüklüğü 70  $\mu\text{m}$  ve c) tane büyüklüğü 113  $\mu\text{m}$ . .... 41
- Şekil 3.24.** C1200 alaşımı için Çok kristalli makro yapının (iç tanelerin) seçilen gerçek birim şekil değişimi noktalarındaki akma gerilmesi değerlerinin, tane büyüklüğüne göre değişimi. .... 42
- Şekil 3.25.** a) tane büyüklüğü 23  $\mu\text{m}$  b) tane büyüklüğü 70  $\mu\text{m}$  ve c) tane büyüklüğü 113  $\mu\text{m}$  olan çeşitli kalınlıklardaki numunelerin deneysel ve yeni modele göre hesaplanan akma eğrilerinin karşılaştırılması. .... 44
- Şekil 3.26.** 79  $\mu\text{m}$  tane büyüklüğüne sahip çeşitli çaplardaki CuZn15 alaşımının mikro basma deneyine ait akma eğrileri [1]. .... 46
- Şekil 3.27.** CuZn15 alaşımından aynı tane büyüklüğüne sahip farklı boyutlardaki numunelerin deneysel ve hesaplanan akma gerilmesi eğrilerinin karşılaştırılması. .... 47
- Şekil 4.1.** Dikdörtgen kesitli Mikro-ekstrüzyon deney kütüklerinin şematik gösterimi. .... 49
- Şekil 4.2.** Montaj halindeki Mikro-ekstrüzyon aparat setinin şematik görünümü. .... 50
- Şekil 4.3.** Mikro-ekstrüzyon kalıbı kesit görünümü. .... 51
- Şekil 4.4.** Mikro-ekstrüzyon kalıbı ölçüleri şematik görünümü. .... 51

<b>Şekil 4.5.</b> 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki numunler için normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetinin karşılaştırılması.....	52
<b>Şekil 4.6.</b> 2 mm'lik kütüklerin sonlu elemanlar yöntemiyle benzeşimlerinde kullanılan model.....	53
<b>Şekil 4.7.</b> a) 2 mm and b) 0.9 mm kalınlığındaki kütüklerin benzeşiminde ekstrüzyon işlemi sonrasında toplam eşdeğer plastik birim şekil değiştirme değerlerindeki dağılım. ....	55
<b>Şekil 4.8.</b> 2 mm ve 0.9 mm kalınlığındaki kütüklerin tahmini ve deneysel olarak elde edilen maksimum ekstrüzyon basıncı değerlerinin karşılaştırılması. ....	56
<b>Şekil 4.9.</b> 0.4 ve 0.9 mm kalınlığındaki kütüklerin geleneksel makro model ve geliştirilen yeni model kullanılarak elde edilen maksimum ekstrüzyon basıncı değerlerinin karşılaştırılması.....	57
<b>Şekil 4.10.</b> 2 mm ve 0.9 mm kalınlığındaki kütüklerin tahmini ve deneysel olarak elde edilen maksimum ekstrüzyon basıncı değerleri ile 0,4 mm.lik kütük için tahmini sonuçların karşılaştırılması. ....	58





## MİKRO-EKSTRÜZYON BENZEŞİMLERİ İÇİN BİR MALZEME MODELİNİN OLUŞTURULMASI

### ÖZET

Son yıllarda metal şekillendirme uygulamalarında proses tasarım aşamasında sonlu elemanlar benzeşimlerinden gitgide daha çok yararlanılmakta ve gerçeğe yakın sonuçlar alınmaktadır. Geleneksel metal şekillendirme yöntemlerinin mikro-meso boyutta uygulanmasından ibaret olan mikro şekillendirme işlemlerinde minyatürleşmenin doğal sonucu olarak ortaya çıkan boyut etkileri nedeniyle; geleneksel metal şekillendirme işlemlerinde kullanılan malzeme modelleri yetersiz kalmaktadır. Bu tez kapsamında Hall-Petch bağıntısı ve yüzey tabakası modeli birlikte kullanılarak mikroşekillendirme uygulamalarında kullanılacak bir malzeme modeli oluşturulmuştur. Yüzey tanelerinin deformasyonunun modellenmesinde Sachs Modeli, iç tanelerinin deformasyonunun modellenmesi içinde Taylor Modeli, Hall-Petch bağıntısı birlikte kullanılmıştır.

Geliştirilen malzeme modeline göre, bir malzemeye ait Hall-Petch sabitlerinin bilinmesi durumunda, her hangi bir numune boyutu-tane boyutu kombinasyonu için malzemeye ait akma eğrileri hesaplanabilmektedir. Geliştirilen malzeme modeli, ayrıca, bir malzemenin belirli bir tane boyutuna ait bir akma eğrisinin bilinmesi durumunda, söz konusu tane boyutu için her hangi başka bir numune boyutuna ait akma eğrisinin hesaplanarak tahmin edilmesine izin vermektedir.

Yeni geliştirilen malzeme modelini doğrulamak amacıyla CuZn30 alaşımından imal edilmiş farklı tane ve numune boyutuna sahip numunelere mikro basma deneyleri uygulanmış ve 12 farklı numune tane boyutu kombinasyonu için akma eğrileri elde edilmiştir. En büyük numune boyutuna ait üç akma eğrisi kullanılarak deney malzemesinin Hall-Petch sabitleri belirlenmiş ve bu Hall-Petch sabitlerinin malzeme modeline yerleştirilmesiyle, 12 deneysel akma eğrisi ortalama % 2,68 hata oranıyla tahmin edilmiştir. Ayrıca modelin doğruluğu literatürde farklı numune ve tane boyutu kombinasyonları için gerilme –genleme eğrileri mevcut iki farklı alaşıma ait gerilme-genleme eğrileri için de gösterilmiştir. Bu tez kapsamında oluşturulan yeni model ile hesaplanan tahmini akma gerilme değerlerinin, bu malzemelere ait deneysel akma eğrileri ile sırasıyla %3,45 ve %3,56 hata oranıyla uyumlu olduğu gösterilerek, modelin geçerliliği farklı malzemeler için de ilave olarak gösterilmiştir.

Oluşturulan malzeme modelinin mikro-şekillendirme işlemlerinin benzeşimlerinde kullanılabilirliğinin gösterilmesi amacıyla mikro-ekstrüzyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, malzeme modeli kullanılarak sonlu elemanlar analizleri yapılmış ve deneysel sonuçlar ortalama %3 hata oranıyla yakın bir biçimde tahmin edilmiştir. Bu sayede geliştirilen modelin mikro-şekillendirme uygulamalarında kullanılacağı ortaya konulmuştur.



## **A MATERIAL MODEL FOR MICRO/MESOFORMING SIMULATIONS**

### **SUMMARY**

In recent years, finite element simulations have been increasingly used in process design for metal forming applications, and accurate results are obtained. Due to the size effects that occur as a natural result of miniaturization in microforming processes, material models used in conventional metal forming processes are insufficient to use. Microforming is the application of traditional metal forming methods to fabricate products that have critical features within submillimeter dimensions; In this thesis, the surface layer model and the Hall-Petch relationship are combined to model the deformation of materials at the meso/micro-scale. In addition, Sachs model and Taylor model are implemented in Hall-Petch relationship to model the deformation of surface and inner grains, respectively.

According to the newly developed material model, if the Hall-Petch constants of a material are known, flow curves of the material can be calculated for any specimen size-grain size combination. Alternatively, if a flow curve for a particular grain size of a material is known, the yield curve for that particular grain size for any other sample size can be calculated.

In order to validate the newly developed material model, scaled down micro-compression tests were carried out with samples of different grain and specimen sizes which are machined from cold-rolled CuZn30 and flow curves were obtained for 12 different sample size- grain size combinations. The Hall-Petch constants of the test material were determined by using the 3 flow curves of the largest sample size. By implementing these Hall-Petch constants in the material model, 12 experimental yield curves were estimated. A good agreement between the experimental and predicted flow curves was obtained. In addition, the validity of the model has been demonstrated for two different alloys as well. The stress-strain curves for different sample and grain size combinations of these alloys were found in the literature. Again, a good agreement between the experimental and predicted flow stress values are obtained. By this way, the validity of the model is shown for different materials, as well.

Finally, micro-extrusion experiments were carried out to demonstrate the usefulness of the newly developed material model for simulations of micro-forming processes. Billets with two different thicknesses were extruded. By implementing the newly developed model, finite element simulations were performed as well. A reasonable agreement between the experimental and predicted maximum extrusion pressures were obtained. By this way, it has been demonstrated that the developed model can be used in simulations of micro-forming processes such as micro-extrusion.



## 1. GİRİŞ

Özellikle son 30 yıl içinde günlük hayatımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelen bilgisayar, cep telefonu, kulaklık, müzik seti gibi elektronik ürünler başta olmak üzere; elektronik, tıp, savunma sanayi, opto-elektronik gibi birçok alanda kullanılan cihazların önceki muadillerine nazaran daha küçük boyutlarda üretildiğine şahit olmaktayız. Minyatürleşme olarak tabir edilen bu trend neticesinde bahsi geçen cihazlarda kullanılan mikro boyuttaki bileşenlere olan ilgi ve ihtiyaç artmıştır [1]. Bu bileşenlerin önemli bir kısmını Şekil 1.1’de de görüldüğü üzere vida, konnektör pimi, temas yayı, direnç kapağı vb. gibi mikro boyutta metal parçalar oluşturmaktadır. Minyatürleşme trendi sözü edilen bileşenlerin ucuz ve güvenilir bir şekilde imal edilebilme uğraşısını beraberinde getirmiştir.



**Şekil 1.1.** Mikro şekillendirmeye üretilmiş farklı boyutlardaki metal ürünler.

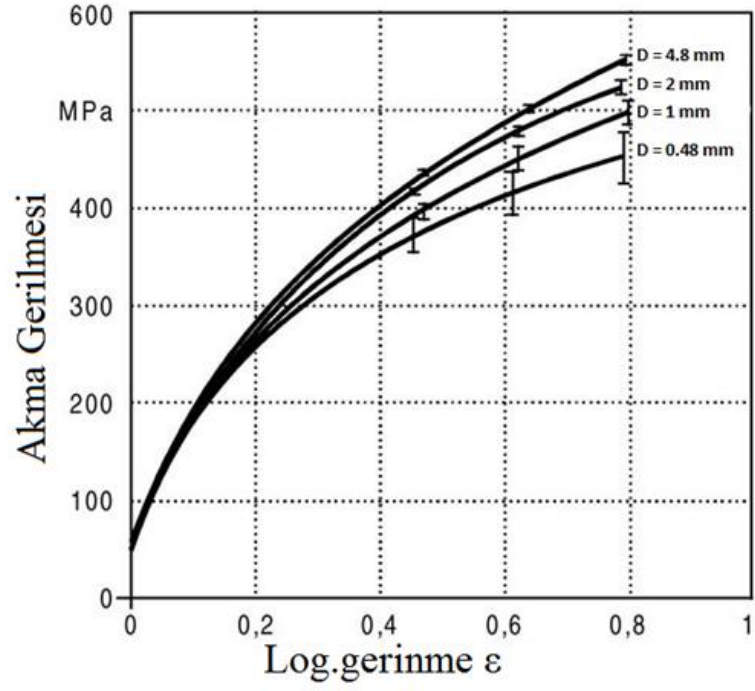
Mikro imalat yöntemleri medikal uygulamalarda da sıkça kullanılmaktadır. Vücuttaki doku ve organlarda herhangi bir zararıya sebep olmadan müdahale edilebilecek

boyutlarda bileşenlere olan ihtiyaç bu alandaki mikro imalat uygulamalarının gelişmesini hızlandırmıştır. Ayrıca mikro imalat yöntemleri sadece mikro ve mezo boyutlardaki parçaların üretimiyle sınırlı kalmamakta, büyük boyutlu ürünlerde uygulanan mikro ölçekli işlemleri de kapsamaktadır. Bu duruma makro boyutlu türbin kanadına açılan mikro boyutlu soğutma kanalları örnek olarak gösterilebilir.

Anlamı itibariyle mikro milimetrenin altındaki ölçüleri ifade etmek için kullanılan bir tabir olup 1 mikrometre milimetrenin binde biridir, mezo ifadesi ise birkaç milimetre kadar olan büyüklükleri ifade etmektedir. Mikro imalat yöntemleri, makro boyutta uygulanan geleneksel imalat yöntemlerinin mikro ölçekli imalata uyarlanmış halidir. Mikro-imalat yöntemlerinden biri olan mikro-şekillendirme malzeme kaybının az olması, iyileştirilmiş mekanik özellikler ve yüksek üretim hızı gibi üstün yönleri nedeniyle ön plana çıkmaktadır.

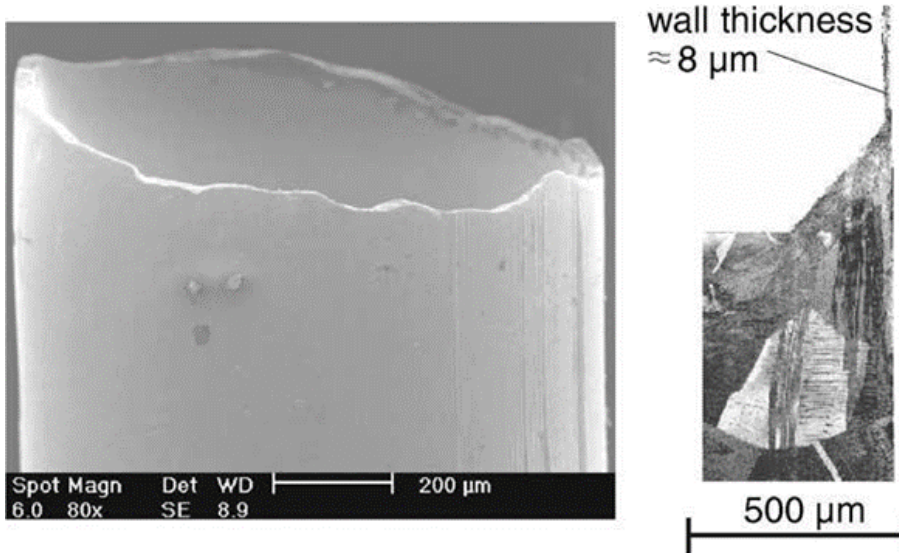
Geleneksel imalat yöntemleri mikro boyuta taşınırken malzeme ve imalat işlemine özgü olan ve 'boyut etkisi' olarak isimlendirilen malzemenin davranışında değişiklikler meydana gelmektedir. Bir mikro şekillendirme işleminde tüm boyutlar küçülürken; tane büyüklüğü gibi numuneyi oluşturan malzemeye ait mikro yapı ile ilgili boyutlar sabit kalmaktadır. Numunenin deforme olan kesitinde numune boyutu, tane boyutu ile kıyaslanabilecek kadar küçüldüğünde, kesitte bulunan her bir tanenin deformasyon davranışına etkisi belirgin hale gelebilmektedir. Böylelikle deformasyona uğrayan kesitteki herhangi bir tane, numunenin toplam deformasyon hareketi için kritik öneme haiz olabilmektedir. Tek bir kristalin, yani tanenin davranışı anizotropik olup; boyutu, şekli, konumu ve kristal yönelmesine göre her bir tane, bulunduğu numune kesitinin deformasyonunu etkileyebilmektedir. Sonuç olarak plastik şekil değişimine uğrayan kesitte, az sayıda tane kaldığında malzemede homojen olmayan deformasyon davranışı gözlemlenir. Malzeme; uygulanan şekil değişimine karşı beklenmedik tepkiler verebilir [2-14].

Yapılan çalışmaların birçoğunda minyatürleşme ile birlikte deney verileri arasındaki saçınımın arttığı gözlemlenmiştir. Bu kounda en çok atıf alan çalışmalardan birinde aynı tane boyutuna sahip 4.8, 2, 1 ve 0.48 mm çapa sahip numuneler ile gerçekleştirilen mikro-basma deneyinden elde edilen verilerle oluşturulmuş gerilme gerinme grafiklerinde numune boyutu azaldıkça saçınımdaki artış görülmektedir [3] (Şekil 1.2).



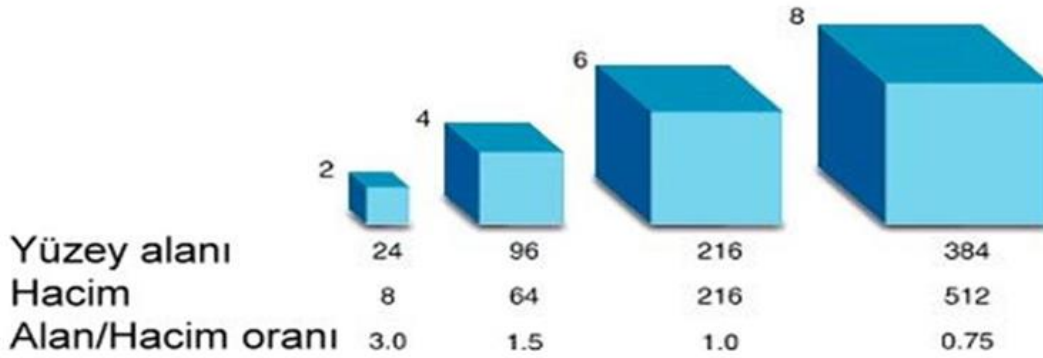
**Şekil 1.2.** Minyatürleşme ile görülen akma eğrisindeki düşüş ve saçınımın artması [3].

Numune boyutlarının minyatürleşmesiyle ortaya çıkan söz konusu bu homojen olmayan deformasyon davranışı sonucu mikroşekillendirmede nihai ürün şekillerinde anomaliler meydana gelebilir; bu durum Şekil 1.3'te indirek ekstrüzyon yoluyla üretilmiş 8 mikrometre cidarlı 500 mikrometre çaplı bir mikro parçada açıkça görülmektedir [3].



**Şekil 1.3.** İndirekt ekstrüzyonla üretilmiş bir mikro parçada görülen şekil anomalisi [3].

Tüm bunlara ek olarak, mikro ölçekte iş parçası boyutlarının küçülmesiyle birlikte birim hacme düşen yüzey alanı (yüzey alanı/hacim oranı) şekil 1.4'te görüldüğü üzere lineer olarak artmaktadır. Bu durum yüzeyleri ve sürtünme gibi yüzeye ilgili özellikleri ön plana çıkarmaktadır. Bu sebeple mikro şekillendirme işlemlerinde sürtünmeye harcanan kuvvetin toplam proses kuvvetleri içindeki oranı minyatürleşme ile birlikte artmaktadır [15].

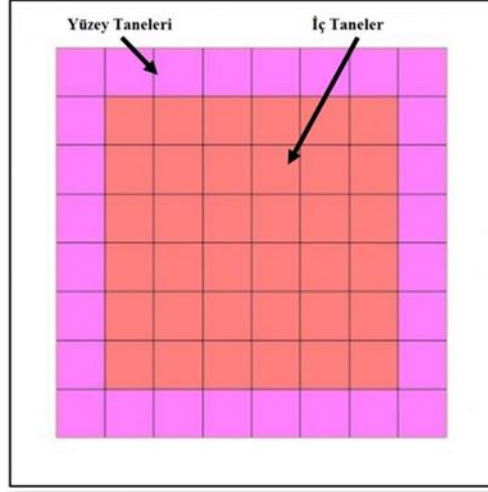


**Şekil 1.4.** Yüzey alanı / hacim oranının minyatürleşme ile değişimi.

Minyatürleşmeyle artan yüzey alanı bölü hacim oranı ile ilişkili olarak mikro basma ve mikro çekme testlerinin gerçekleştirildiği çok sayıda çalışmada tane büyüklüğü sabit tutulmak kaydıyla numune boyutları küçüldükçe malzemelerin akma gerilmesi değerlerinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir [3]. Mikro şekillendirme işlemlerinde numune boyutuna göre akma gerilmesinde meydana gelen düşme ile ilgili olarak Engel



ve Eckstein yüzey tabakası modelini önermişlerdir [3]. Bu modele göre malzeme iç ve yüzey tabakası (ya da yüzey taneleri) olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır (Şekil 1.5).



**Şekil 1.5.** İç taneler ve yüzey tanelerinin şematik gösterimi.

İçerdeki tanelere nazaran yüzey tanelerinin dayanımları düşüktür. Bunun iki ana sebebi vardır:

Tane sınırları dislokasyonları engelleyip yığılmasına sebep olur böylelikle dayanım artar. Bu durum iç tanelerin diğer tanelerce çepeçevre kısıtlanmış olması sebebiyle iç bölgede etkisini gösterir, fakat yüzey tanelerinin serbest yüzeylerinde dislokasyon hareketleri kısıtlanmadığı için iç tanelerinde olduğu gibi yığılma gerçekleşmez.

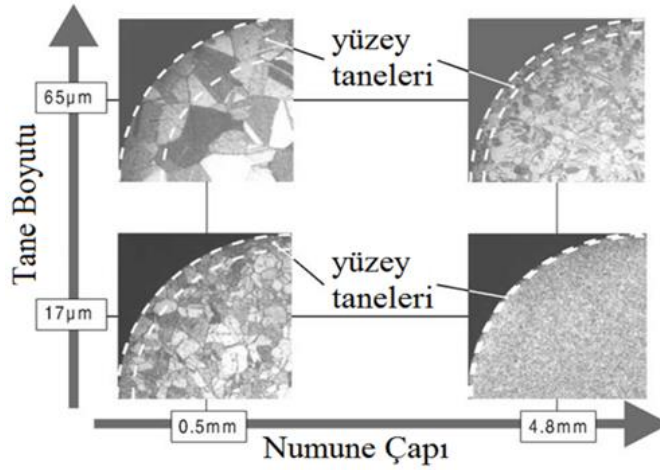
İç tanelerin deformasyon hareketi kendilerini çepeçevre saran komşu taneler sebebiyle kısıtlanmıştır. Fakat yüzey taneleri serbest yüzeylerde rahatça deforme olabilirler, yani deformasyonları iç tanelere göre nispeten daha az kısıtlıdır.

Dolayısıyla, yüzey tanelerinin dayanımı iç tanelerden daha düşüktür. Bu durumda deforme olan kesitteki yüzey taneleri oranı ne kadar çoksa malzemenin akma gerilmesi değerleri o kadar düşük olacaktır. Yüzey tabakası modeli bu durumu numune ve tane boyutuna bağlı olarak aşağıdaki denklemde şu şekilde ifade etmektedir.

$$\sigma = \alpha\sigma_y + (1 - \alpha)\sigma_i \quad (1.1)$$

" $\sigma$ " malzemenin akma gerilmesidir. " $\alpha$ " ise yüzey tabakasının, yani yüzey tanelerinin tüm kesitte kapladıkları alanın oranıdır." " $\sigma_i$ " iç tanelerinin akma gerilmesidir." " $\sigma_y$ " ise yüzeydeki tanelerin akma gerilmesidir.

Deformasyona uğrayan bir numunede, yüzey tabakasının toplam kesitteki oranı hem numune boyutu hem de tane büyüklüğüne bağlıdır, bu durum Şekil 1.6'da açıkça görülmektedir. Belirli bir tane boyutu için numune boyutu küçüldüğünde, yüzey tanelerinin toplam kesitteki oranı artmakta, öte yandan, aynı numune boyutu için tane boyutunun artması da yüzey tanelerinin toplam kesit içinde kapladığı alanı arttırmaktadır. Bu sebeple yüzey tabakası modelini kullanan çalışmaların neredeyse tamamında geliştirilen malzeme modelleri hem numune hem tane büyüklüğünü göz önüne almaktadır. Neticede yüzey tabakası modeline göre, minyatürleşmeyle, yüzey tanelerinin tüm kesitte kapladığı alanın oranı artmakta, bu da yüzey tabakası modeline göre malzemenin akma gerilmesini düşürmektedir.



**Şekil 1.6.** Numune boyutu ve tane boyutuna bağlı olarak yüzey tanelerinin kesitteki oranı [3].

### 1.1. Literatür Çalışması

Son 15 20 yıldır metal şekillendirme işlemlerinde tasarım sürecini hızlandırmak gayesiyle dijital ortamda gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinden oldukça yaygın bir şekilde yararlanılmaktadır. Sonlu elemanlar analizleri sayesinde; proses kuvveti, malzemenin mekanik davranışı, ürün geometrisi gibi imalat prosesinde hayati önem taşıyan birçok parametre hakkında bilgi sağlanır. Bu analizlerde güvenilir sonuçların elde edilmesi ise uygun malzeme modelinin kullanımına bağlıdır. Bununla

birlikte, söz konusu boyut etkileri nedeniyle mikro-şekillendirme işlemlerinde geleneksel malzeme modelleri geçerliliklerini yitirmektedir. Bu nedenle mikro-şekillendirme benzeşimleri için boyut etkilerini gözönünde bulunduran malzeme modellerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu motivasyonla boyut etkilerini hesaba katan bir malzeme modelinin geliştirilmesi amacıyla birçok çalışma yapılmıştır [8, 16-21]. Bu çalışmaların önemli bir kısmında minyatürleşme ile proses kuvvetlerinde ve bununla bağlantılı olarak akma eğrilerinde görülen saçınım gözardı edilmiş olup, sadece minyatürleşme ile birlikte akma gerilmesi değerlerindeki düşüşü sergileyen bir malzeme modelinin oluşturulması amaçlanmıştır. Bu çalışmaların hemen hepsinde yüzey tabaka modeli kullanılmıştır [8, 17-21]. Genellikle, tane büyüklüğünün etkisini hesaba katmak için Hall-Petch bağıntısından yararlanılmıştır [16-19]. Diğer bazı çalışmalarda ise kompozit modelden yararlanılmıştır [20,21].

Kim ve arkadaşları tane büyüklüğü etkisiyle birlikte numune boyutunun etkisini de hesaba katabilmek amacıyla Hall-Petch bağıntısına ölçeklendirme parametreleri (scaling parameters) eklemiştir [16]. Shen ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise yüzey tabaka modeli ve Hall-Petch bağıntısı birlikte kullanılarak başka bir malzeme modeli oluşturulmuştur [17]. Bu modelde yüzey tanelerinin izole edilmiş tek kristal gibi deforme olduğu farz edilerek; yüzey tanelerin akma gerilmesi değeri olarak Hall-Petch bağıntısındaki sürtünme gerilmesi  $\sigma_0(\epsilon)$  değerleri kullanılmış, iç tanelerin akma gerilmesi değerlerinin ise çok-kristal makro malzemenin akma gerilmesi değerlerine eşit olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmada da bir öncekine benzer şekilde bir ölçeklendirme faktörü kullanılmıştır. Tane boyutu sabit tutulmak kaydıyla numune boyutundaki küçülme ile akma gerilmesi değerlerindeki azalmanın lineer olduğu analitik olarak ortaya koyulmuştur. Buna ek olarak bu çalışmada numune boyutları küçüldükçe Hall-Petch bağıntısından sapma meydana geldiği ve tane boyutu büyüdükçe sapmanın daha belirgin hale geldiği ortaya konmuştur.

Lai ve arkadaşları da yüzey tabakası modelinin Hall-Petch bağıntısıyla bir arada kullanıldığı bir malzeme modeli önermişlerdir [18,19,22,23]. Bu modele göre Hall-Petch bağıntısına bir boyut faktörü (scale factor) eklenerek bağıntının yeniden düzenlenmesi suretiyle numune boyutunun akma gerilmesine etkisi hesaba katılmaya çalışılmıştır. Yüzey tanelerinin izole edilmiş tek kristal, iç tanelerin ise çok kristalli

makro malzemeye eşdeğer kabul edildiği çalışmada malzeme modelindeki katsayıların bulunmasında en küçük kareler metodundan yararlanılmıştır.

Diğer farklı iki çalışmada ise numune boyutunun etkisini hesaba katabilmek için yüzey tabakası modeli, tane büyüğünün etkisini hesaba katmak için ise kompozit model kullanılmıştır [20,21]. Her iki modelde de iç tanelerin çok-kristal makro malzeme gibi davrandığı kabul edilerek, iç tanelerin deformasyon davranışını modellemek için kompozit malzeme modeli kullanılmıştır. Kompozit malzeme modelinde bir malzemenin, dayanımı yüksek tane sınırları ve yumuşak tane içlerinden oluştuğu kabul edilir [23,24]. Buna ek olarak her iki modelde de yüzey tanelerinde tane sınırlarının olmadığı, dolayısıyla yüzey tanelerinde tane sınırı sertleşmesi olmadığı da kabul edilmiştir. Bu çalışmalardan Lui ve arkadaşlarının hazırladığı modelde yüzey tanelerinin, kompozit modeldeki tane içi gibi deforme olduğu yaklaşımı mevcut iken, Li ve arkadaşlarının hazırladığı modelde ise yüzey taneleri izole edilmiş tek kristal gibi deforme olduğu kabul edilmiştir [20,21].

Yukarıda bahsi geçen yüzey tabakası modelinin kullanıldığı malzeme modellerinin tümünde yüzey tanelerinin, ya izole tek kristal gibi ya da çok-kristal bir malzemenin tane içi gibi deforme olduğu kabul edilmiş, yüzey tanelerindeki tane sınırları görmezden gelinmiştir [17-23]. Yüzey taneleriyle komşu taneler arasında tane sınırları olması sebebiyle bu yaklaşımlar çok gerçekçi değildir. Bu nedenle, yüzey tanelerinin akma gerilmesi izole bir tek kristalden farklı olmalıdır. Dahası yüzey tanelerinin izole tek kristal kabul edildiği birçok çalışmada yüzey tanelerinin akma gerilmesinin hesaplanması için mümkün olan en düşük oryantasyon faktörü değeri olan '2' seçilmiştir [18,19,21-23]. Bu seçim yüzey tanelerinin deformasyon davranışının modellenmesi için deformasyona göre en uygun yönelmiş bir tek kristalin akma gerilmesi değerlerinin kullanıldığı anlamına gelmektedir. Böylelikle yüzey taneleri arasındaki yönelme farklılıkları göz ardı edilmiş, her birinin yönelmesinin aynı ve deformasyona en uygun olduğu kabul edilmiştir. Bu kabul de benzer şekilde pek gerçekçi bir yaklaşım değildir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmada ise numune boyutu ve tane büyüğünün akma gerilmesine etkisinin (boyut etkisi) dikkate alınması için, yüzey tabakası modeli ve Hall-Petch bağıntısı bir arada kullanılmakla birlikte hem yüzey tabakasındaki tane sınırlarının etkisi ve hem de yüzey taneleri arasındaki yönelme farklılıkları hesaba katılmıştır. Bunun gerçekleştirilmesi için, yüzey tanelerinin deformasyon davranışının modellenmesinde

Sachs malzeme modeli kullanılmıştır. Sachs modelinde çok taneli bir malzemede her bir tanenin izole edilmiş tek kristal gibi deforme olduğu kabul edilmekle birlikte rastgele yönlenmiş taneler için ortalama bir oryantasyon faktörü kullanılır [24,26,27]. Söz konusu bu oryantasyon faktörünün kullanılması sayesinde yüzey tabakasının akma gerilmesi hesabında rastgele yönlenmiş yüzey tanelerinin yönlenme farklılıkları dikkate alınmış olur. Bununla birlikte, Sachs modeli tane sınırı dayanım artışı etkisini içermemektedir, Sachs oryantasyon faktörünün genelleştirilmiş Hall-Petch bağıntısında kullanılmasıyla yüzey tabakasındaki tane sınırlarının etkisi de hesaba katılmış olur. İç taneler ise önceki çalışmaların genelinde kabul edildiği üzere, çok taneli makro malzeme gibi davrandığı kabul edilerek, deformasyon davranışının modellenmesi için Taylor malzeme modeli kullanılmıştır. Benzer şekilde Taylor malzeme modeli tane sınırlarındaki sertleşmenin etkisini içermediğinden Taylor oryantasyon faktörünün genelleştirilmiş Hall-Petch bağıntısında kullanılmasıyla tane sınırı sertleşmesinin iç tanelerin akma gerilmesine etkisi hesaba katılmıştır. Bu tez kapsamında geliştirilen modele göre belirli gerçek birim şekil değişimi değerleri için malzemeye özgü Hall-Petch sabitlerinin kullanılmasıyla mikro/mezo boyutta her hangi bir numune boyutu/tane boyutu kombinasyonu için malzemeye ait akma gerilme değerleri hesaplanabilmektedir. İlave olarak, geliştirilen malzeme modeli bir malzemenin belirli bir tane büyüklüğü için akma gerilmesi değerlerinin bilinmesi durumunda, aynı tane büyüklüğü için her hangi bir numune boyutuna ait akma gerilmesi değerlerinin de hesaplanabilmesi imkanını sunmaktadır. Literatürde mevcut diğer malzeme modelleri bu imkanı sunmamaktadır. Bu tez kapsamında oluşturulan malzeme modelinin diğer önemli bir avantajı ya da farkı budur



## 2. MALZEME MODELİ

Mikro şekillendirme proses benzeşimleri (simülasyon) için mikro boyutta malzeme davranışlarını göz önünde bulunduran bir malzeme modeline ihtiyaç vardır. Önceden söz edildiği gibi, yapılan çalışmalar mikro şekillendirme işlemlerinde numune boyutları küçüldükçe akma gerilmesi değerlerinin düştüğünü ortaya koymuştur. Bu sebeple oluşturulacak malzeme modelinin bu malzeme davranışını hesaba katıyor olması gerekir. Bu tezde bahsi geçen boyut etkisini dikkate almak için yüzey tabakası modeli kullanılmıştır.

Mikro-şekillendirme işlemlerinin benzeşiminde kullanılacak başarılı bir malzeme modeli, hem numune hem tane büyüklüğünün akma gerilmesi üzerindeki etkisini hesaba katıyor olmalıdır. Tane büyüklüğünün akma gerilmesine etkisini dikkate almak için Hall-Petch bağıntısından faydalanılmıştır. Hall-Petch bağıntısına göre akma gerilmesi değeri tane büyüklüğünün karekökü ile ters orantılıdır. Hall-Petch bağıntısı plastik akma bölgesini kapsayacak şekilde gerçek birim şekil değişimi ( $\varepsilon$ ) değerlerine bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir [28]:

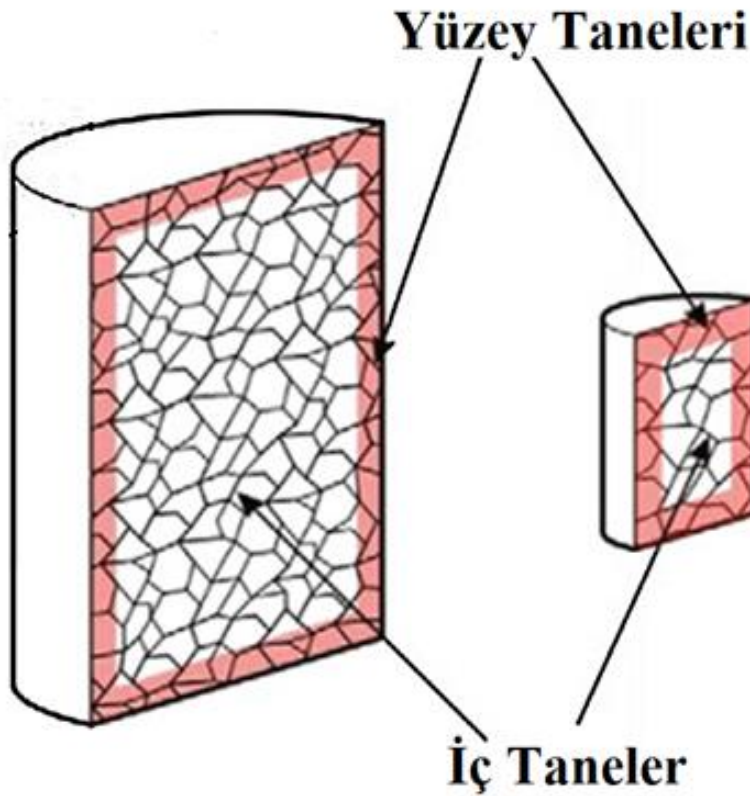
$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_o(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Yukarıdaki denklemde  $\sigma_o(\varepsilon)$  ve  $k(\varepsilon)$  belirli gerçek birim şekil değişimi değerlerindeki malzeme sabitleridir.  $\sigma_o(\varepsilon)$  çok kristalli yapıda tane içinde plastik deformasyon oluşturmak için gerekli gerilme değeridir.  $k(\varepsilon)$  ise tane sınırı bölgesinde plastik deformasyon oluşturulması için gerekli gerilme değeri ile ilgili olup  $d$  ortalama tane büyüklüğü değeridir. Denklemde Taylor oryantasyon faktörünün kullanılmasıyla daha genelleştirilmiş bir Hall-Petch denklemi, diğer bir deyişle tane büyüklüğüne bağlı akma gerilmesini veren genelleştirilmiş bir Hall-Petch denklemi önerilmiştir [28].

$$\sigma(\varepsilon) = m(\tau_o(\varepsilon) + k_s(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) \quad (2.2)$$

Denklemden  $m$  Taylor oryantasyon faktörü,  $\tau_o(\varepsilon)$  tane içinde aktif kayma sistemi üzerindeki kritik kayma gerilmesi bileşenidir.  $k_s(\varepsilon)$  ise tane sınırı bölgesinde plastik deformasyon oluşturmak için gerekli kayma gerilmesi değeri ile ilgilidir.

Numune boyutu etkisinin dikkate alınması için yüzey tabakası modeli kullanılmıştır. Önceden belirtildiği gibi yüzey tabakası modelinde, malzemelerin iç taneler ve yüzey taneleri olarak iki bölgeden oluştuğu kabul edilir. Yüzey taneleri ve iç taneler şematik olarak Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.1.** Yüzey taneleri ve iç tanelerin şematik gösterimi [11].

Bu yöntemde malzemenin akma gerilmesi iç taneler ve yüzey tanelerinin akma gerilmesi değerlerinin, bu kısımların kesitteki oranlarıyla çarpımlarının toplamıdır, denklem 1.1.

Daha önce denklem 1.1’de belirtildiği gibi  $\sigma_{ai}$  ve  $\sigma_{ay}$  sırasıyla iç bölge ve yüzey tabakasının akma gerilmesi değerleri,  $\alpha$  ise yüzey tabakasının toplam kesitteki oranıdır.

Dikdörtgen kesitli bir malzeme için,  $\alpha$  (yüzey tabakası oranı) takriben şu şekilde hesaplanabilir:



$$\alpha = \begin{cases} 1 - \frac{(w - 2d)(t - 2d)}{wt} & t \geq 2d \\ 1 & t < 2d \end{cases} \quad (2.3)$$

Denklemde w ve t sırasıyla dikdörtgen kesitin genişliği ve kalınlığı, d ise ortalama tane büyüklüğüdür.

Denklem 2.2; Taylor oryantasyon faktörünün kullanılmasıyla iç tanelerin akma gerilmesi ( $\sigma_{ai}$ ), Sach oryantasyon faktörünün kullanılmasıyla da yüzey tanelerin akma gerilmesi ( $\sigma_{ay}$ ) hesaplanabilir. Sachs ve Taylor modellerinin her ikisi de çok-kristal malzemenin deformasyon davranışını tek kristal deformasyonu ile ilişkilendiren birer malzeme modelleridir. Bu tez çalışmasında daha önce yapılan birçok çalışmada olduğu gibi iç taneler çok-kristal makro malzemeye eşdeğer kabul edilmiş ve iç tanelerin deformasyon davranışını modellemek için Taylor modeli kullanılmıştır. Taylor malzeme modeli çok-kristal bir yapıda, her bir tanenin deformasyonunun komşu taneler tarafından kısıtlanmış olduğu gerçeğini dikkate alır. Dolayısıyla, tane sınırlarında komşu taneler birbiriyle uyumlu şekilde deforme olur ve bu kısıta göre çok kristaldeki tüm tanelerin aynı deformasyon koşulları (aynı birim şekil değişimi) altında olduğu kabulü yapılmıştır. Taylor modeline göre komşularıyla uyumlu deforme olması için, her tanede 5 kayma sistemi birlikte çalışmalıdır ve YMK kristal yapı için Taylor oryantasyon faktörü (m) 3.06 olarak hesaplanmıştır. Bu YMK metallerde belirli bir deformasyonu en az enerjiyle yerine getiren 5 kayma sistemi için hesaplanmış ortalama oryantasyon faktörüdür. YMK metallerde kristalin yönlenmesi ne olursa olsun, deformasyonu en az enerjiyle yerine getirecek kayma sistemlerinin ortalama oryantasyon faktörü 3,06 değerini almaktadır. Taylor modeli tane sınırı etkisini dikkate almadığından, tane büyüklüğü etkisinin hesaba katılması için daha önce önerildiği gibi genelleştirilmiş Hall-Petch bağıntısında Taylor oryantasyon faktörü kullanılabilir. Böylece iç tanelerin akma gerilmesi denklem 2.2’de Taylor oryantasyon faktörü kullanılmasıyla aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\sigma_{ai}(\varepsilon) = 3.06(\tau_o(\varepsilon) + k_s(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) \quad (2.4)$$

Daha önce belirtildiği gibi, yüzey tabakası modelinin kullanıldığı önceki birçok çalışmada yüzey taneleri izole tek kristal gibi kabul edilmiş, yüzey tabakasındaki tane sınırlarının akma gerilmesine olan etkisi ihmal edilmiştir [17-23]. Dahası bu

çalışmaların bir kısmında tek kristal akma gerilmesi değerlerinin hesaplanması için en düşük oryantasyon faktörü değeri olan 2 kullanılmıştır [18,19,21-23]. Bu, yüzey tanelerinin akma davranışının modellenmesinde, deformasyona en uygun yönlenmeye sahip olan, yani olabilecek en düşük gerilme değerinde deformasyona uğrayan tek kristalin akma eğrisinin kullanılması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla yüzey tanelerinin yönlenmesindeki farklılıklar dikkate alınmamış ve tüm yüzey tanelerinin deformasyona en uygun şekilde yönlendiği farz edilmiştir. Diğer bazı çalışmalarda ise yüzey taneleri, tane sınırları ve tane içlerinden oluşan iç tanelerin, tane içleri gibi deforme olduğu kabul edilmiştir.

Halbuki, yüzey tanelerinin deformasyonu, serbest yüzeyleri bulunması sayesinde, iç taneler gibi tam kısıtlanmış değildir. Dolayısıyla, yüzey taneleri için, komşu tanelerle aynı biçimde deformasyona uğrama koşulu geçerliliğini yitirir. Taylor modeli, yüzey tanelerinin bu kısmi kısıtlanmış halini tam yansıtmamaktadır. Yüzey taneleri gerilme durumuna göre, daha rahat deforme oldukları için yüzey tanelerinin deformasyon davranışının modellenmesi için, daha serbest bir deformasyon ön gören Sachs modeli kullanılabilir. Taneler arası oryantasyon farkının dikkate alındığı Sachs modeli komşu taneler arası tane sınırlarındaki uyum koşulunu sağlamaz. Sachs modelinde çok taneli bir yapıdaki her bir tanenin izole edilmiş tek bir kristal gibi deforme olduğu kabul edilir. Bununla birlikte rastgele yönlenmiş taneler için ortalama bir oryantasyon faktörü kullanılır. Sachs modelinde YMK malzemeler için ortalama oryantasyon faktörü değeri ( $m$ ) 2.23 olarak hesaplanmıştır. Böylelikle Sachs modelinin kullanılmasıyla yüzey tanelerinin yönlenmelerindeki farklılıklar dikkate alınmış olur. Bununla beraber, Sachs modeli de tane büyüklüğü, yani tane sınırı etkisini dikkate almamaktadır. Genelleştirilmiş Hall-Petch bağıntısında (Denklem 2.2) Sachs oryantasyon faktörünün kullanılması sayesinde yüzey tanelerinin deformasyon hareketinin modellenmesinde hem yüzey taneleri arasında yönlenme farkının, hem de (yüzey taneleri için) tane sınırlarının etkisini dikkate alan bir denklem oluşturulabilir:

$$\sigma_{ay}(\varepsilon) = 2.23(\tau_o(\varepsilon) + k_s(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) \quad (2.5)$$

Denklem 2.4 ve denklem 2.5'nin denklem 1.1'e yerleştirilmesiyle; mikro/mezo boyutta bir malzemenin akma gerilmesi değerleri aşağıdaki denklemle hesap edilebilir:

$$\sigma(\varepsilon) = \alpha 2.23(\tau_o(\varepsilon) + k_s(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) + (1 - \alpha)3.06(\tau_o(\varepsilon) + k_s(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) \quad (2.6)$$

İç tanelerin akma gerilmesi; yüzey tabakası oranı ihmal edilebilecek kadar küçük olan çok-kristalli bir makro malzemenin akma gerilmesine eşdeğer kabul edilebilir:

$$\sigma_{ai}(\varepsilon) = 3.06 \left( \tau_o(\varepsilon) + k_s(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}} \right) = \sigma_o(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

$m_{\text{Sachs}}/m_{\text{Taylor}} = 2.23/3.06 = 0.73$  olduğundan yüzey tabakasının akma gerilmesi aşağıdaki gibi de hesaplanabilir:

$$\sigma_{ay}(\varepsilon) = 0.73\sigma(\varepsilon) = 0.73(\sigma_o(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) \quad (2.8)$$

Denklem 2.7 ve denklem 2.8'in, denklem 1.1'de yerine yazılmasıyla aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\sigma = (1 - \alpha)(\sigma_o(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) + \alpha 0.73(\sigma_o(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) \quad (2.9)$$

Denklem 2.9'un yeniden düzenlenmesiyle mikro/mezo boyutta bir malzemenin akma gerilmesi aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$\sigma(\varepsilon) = (1 - 0.27\alpha) (\sigma_o(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) \quad (2.10)$$

Denklem 2.10'un kullanılmasıyla bir malzemenin belirli birim şekil değıştirme değerleri için Hall-Petch sabitlerinin bilinmesi durumunda, her hangi bir numune boyutu, tane boyutu kombinasyonu için akma gerilmesi değerleri hesaplanabilir.

Alternatif olarak olarak, mikro/mezo ölçekte malzemenin akma gerilme değerleri şu şekilde de hesaplanabilir:

$$\sigma(\varepsilon) = (1 - 0.27\alpha) \sigma_{ai}(\varepsilon) \quad (2.11)$$

Bu denklemde  $\sigma_{ai}(\varepsilon)$  iç tanelerin akma gerilmesidir. 2.11 numaralı denkleme göre mikro/mezo ölçekteki malzemenin akma gerilmesini hesaplamak için iç tanelerin

akma gerilmesini saptamak gereklidir. 2.11 numaralı denklem iç tanelerin akma gerilmesini hesaplamak için yeniden düzenlenilerek şu şekilde yazılabilir:

$$\sigma_{ai}(\varepsilon) = \frac{\sigma(\varepsilon)}{(1 - 0.27\alpha)} \quad (2.12)$$

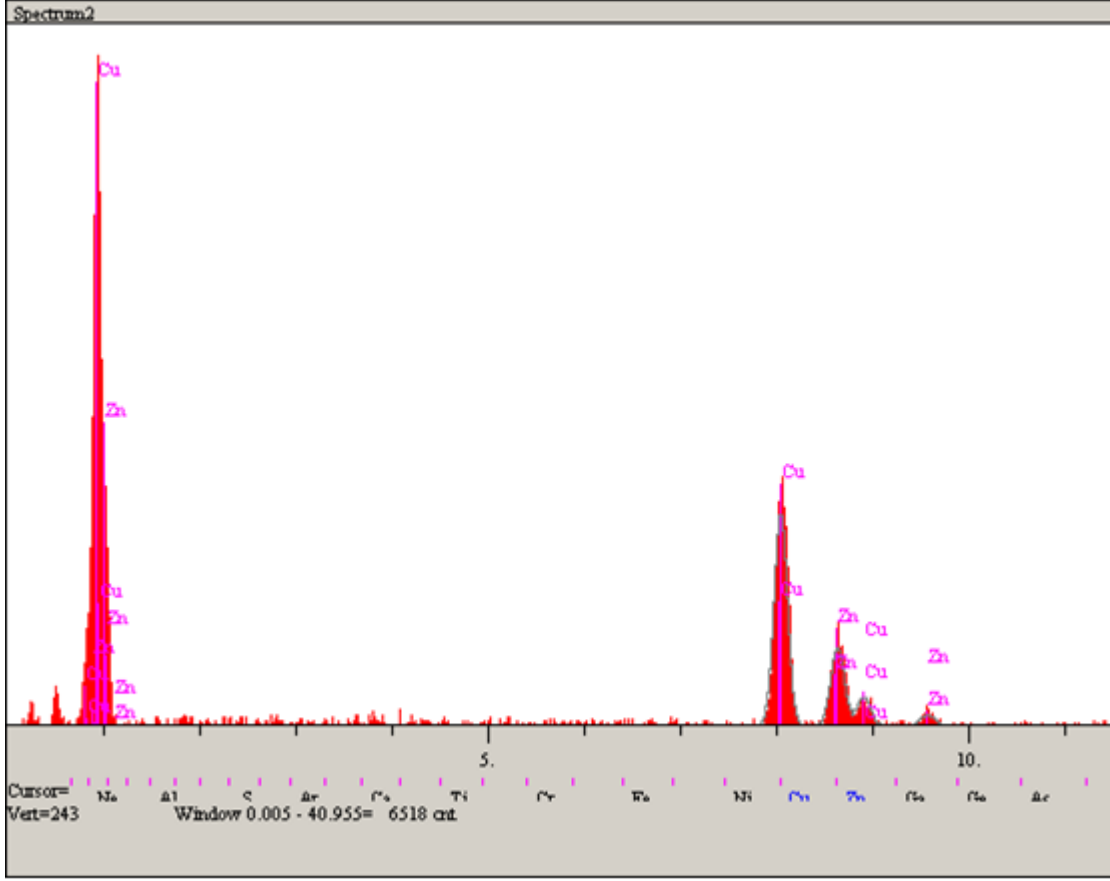
Belirli bir numune boyutu ve tane boyutu kombinasyonuna ait akma eğrisi  $\sigma(\varepsilon)$  bilinen bir malzeme için, iç tanelerin akma gerilmesi değerleri  $\sigma_{ai}(\varepsilon)$ , söz konusu bu tane büyüklüğü için, denklem 2.12 kullanılarak hesaplanabilir. İç tanelerin akma gerilmesi değerlerinin hesaplanmasından sonra, bu malzemede aynı tane büyüklüğü için herhangi bir numune boyutuna ait akma gerilmesi değerleri denklem 2.11 kullanılarak hesaplanabilir. Daha önce de değinildiği üzere denklem 2.11 e göre hesaplanan iç tanelerin akma gerilmesi değerleri, yüzey tabakası ihmal edilebilecek kadar küçük olan makro boyuttaki çok kristalli malzemenin akma gerilmesi değerleri olarak da kabul edilebilir.

### **3. DENEYSEL ÇALIŞMA**

#### **3.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması**

Mikro-şekillendirme işlemlerinde, (aynı malzemeden imal edilmiş parçalar açısından) parça geometrisine ait boyutlar küçülürken tane büyüklüğü sabit kalmakta böylelikle minyatürleşme sonucu iş parçası kesitinde az sayıda tane bulunmaktadır. Bu durum akma gerilmesi ve deformasyon ile ilgili boyut etkilerine sebep olmaktadır. Buradan hareketle mikro şekillendirme ile ilgili çalışmalarda numune büyüklüğü sistematik olarak minyatürleştirilerek farklı tane boyu / numune boyu oranlarına ulaşılması amaçlanır. Bu yolla hazırlanan numunelerle deneyler gerçekleştirilip deformasyon ile ilgili boyut etkileri incelenir. Bunun yanı sıra aynı çalışmalarda belirli bir numune boyutu için tavlama koşullarına göre farklı tane boyutları oluşturmak suretiyle de çeşitli tane boyutu/numune boyutu değerleri elde edilebilmektedir. Bu çalışmada boyutları sistematik olarak minyatürleştirilen numuneler belirli koşullarda tavlama suretiyle birbirinden farklı tane boyutu / numune boyutu kombinasyonuna sahip deney numuneleri elde edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deney malzemesi soğuk haddelenmiş 3,2 mm kalınlığında levha şekilde temin edilmiş olan CuZn30 pirinç alaşımıdır. CuZn30 üstün pekleşme davranışı nedeniyle şekillendirme işlemleri için uygun bir malzemedir. Minyatür parçaların malzeme taşınımı açısından imalat sonrası, yeterli sertliğe sahip olmaları gerekir. Mikro-şekillendirme işlemleriyle üretilen CuZn30 parçalar bu koşulu sağlamaları açısından tercih edilmektedir. Ayrıca bağlantı pimi gibi elektrik iletkenliği istenen mikro-boyutlu parçaların imalatında tercih edilmelerinin diğer bir sebebi de elektrik iletkenliğinin ve korozyon direncinin yüksek olmasıdır.



**Şekil 3.1.** CuZn 30 malzemenin SEM analiz sonuçları.

Deney malzemesinin kimyasal kompozisyonunun tespit edilmesi için taramalı elektron mikroskobunda (SEM) analiz yapılmıştır. Pirinç plakanın SEM analiz sonuçları yukarıdaki Şekil 3.1’de görülebilir.

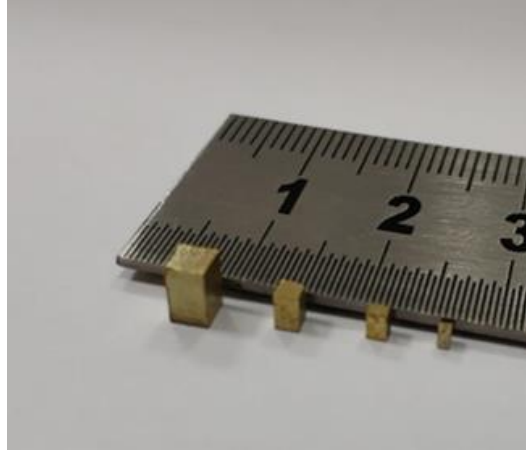
Ayrıca analiz sonuçları ve kimyasal bileşim Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

**Tablo 3.1.** CuZn 30 malzemenin kimyasal bileşimi.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
Cu	Ka	126.92	7.122	68.320	wt.%	
Zn	Ka	48.18	4.388	31.680	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

CuZn 30 malzemedan kare kesitli minyatür basma numuneleri talaşlı imalat ile çıkarılmıştır (Şekil 3.2). Yükseklik /kare kesit kenar oranı 1.5 olacak şekilde; 3.2 mm 2 mm 1.5 mm ve 1 mm kare kesit kenarına sahip numuneler 3 ayrı gruba bölünüp farklı

tane büyüklüklerinin elde edilmesi amacıyla; 1 saat süreyle 500 °C ve 650 °C’de ve 2 saat süreyle de 700 °C’de tavlannmıştır. CuZn30 pirincinin erime sıcaklığı 954 °C olup yeniden kristalleşme sıcaklığı 340 °C civarındadır. Yüksek sıcaklıklarda pirinç malzemenin bileşimindeki bakır ve çinkonun oksitlenme durumu sözkonusu olabilmektedir, bu sebeple en yüksek tavlama sıcaklığı 700 °C olarak seçilmiştir.



**Şekil 3.2.** Çeşitli büyüklüklerde mikro basma deney numuneleri.

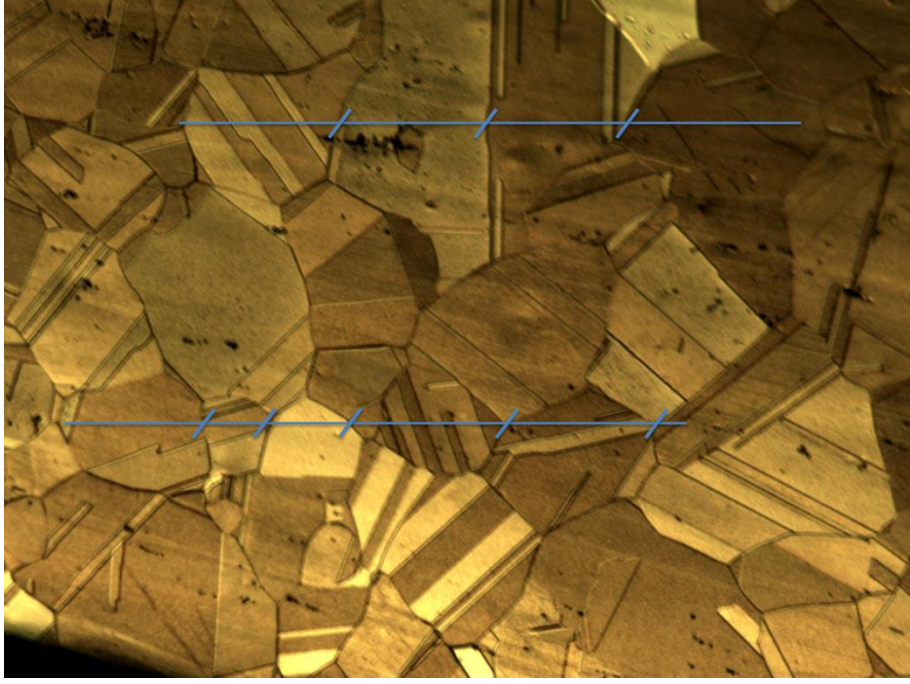
Tavlama işlemini takiben rastgele seçilen numuneler üzerinde tane boyutunun belirlenmesi amacıyla metalografik inceleme yapılmıştır. Numuneler önce zımparalama (Şekil 3.3) işlemine tabi tutulmuştur.



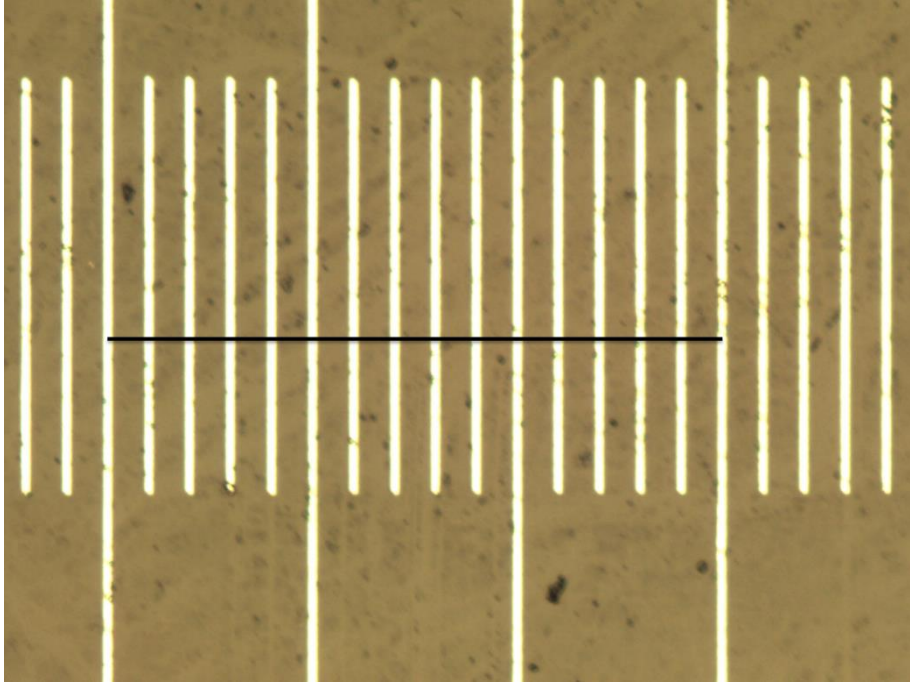
**Şekil 3.3.** Metalografik incelemede zımparalama işleminin gerçekleştirildiği cihaz.

Zımparalama işleminde sırasında sırasıyla 60, 240, 320, 400, 600, 800 ve 1000 numaralı zımpara kağıtları kullanılmıştır. Her bir kademedeki numuneler sabunlu su ile iyice yıkanmış ve bir önceki kademedeki kaynaklanan kalıntı kalmaması sağlanmıştır. Daha sonra numuneler Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan Buehler marka elektrolitik parlatma ve dağlama (Şekil 3.4) cihazında fosforik asit çözeltisinde 8 – 10 Volt gerilimde 40 - 50 saniye sürelerde elektrolitik parlatma işlemine tabi tutulmuş sonrasında voltaj değerleri onda birine düşürülerek (0.8 -1 Volt) 8 ila 10 saniye kadar elektrolitik dağlama işlemine tabi tutulmuştur, böylelikle mikro yapı görüntüleri elde edilmiştir. Akabinde mikroyapı görüntüleri üzerinden kesim metoduyla numunelere ait ortalama tane boyutları hesaplanmıştır. Aynı büyütmedeki mikroskop altındaki skala görüntüsünden ölçü alınarak gerçekleştirilen kesme metoduna dair bir örnek ve mikrometre görüntüsü Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te görülmektedir.





**Şekil 3.4.** Kesme metodunun uygulanmasına dair bir örnek (Çizgi uzunluğu 300 mikrondur).

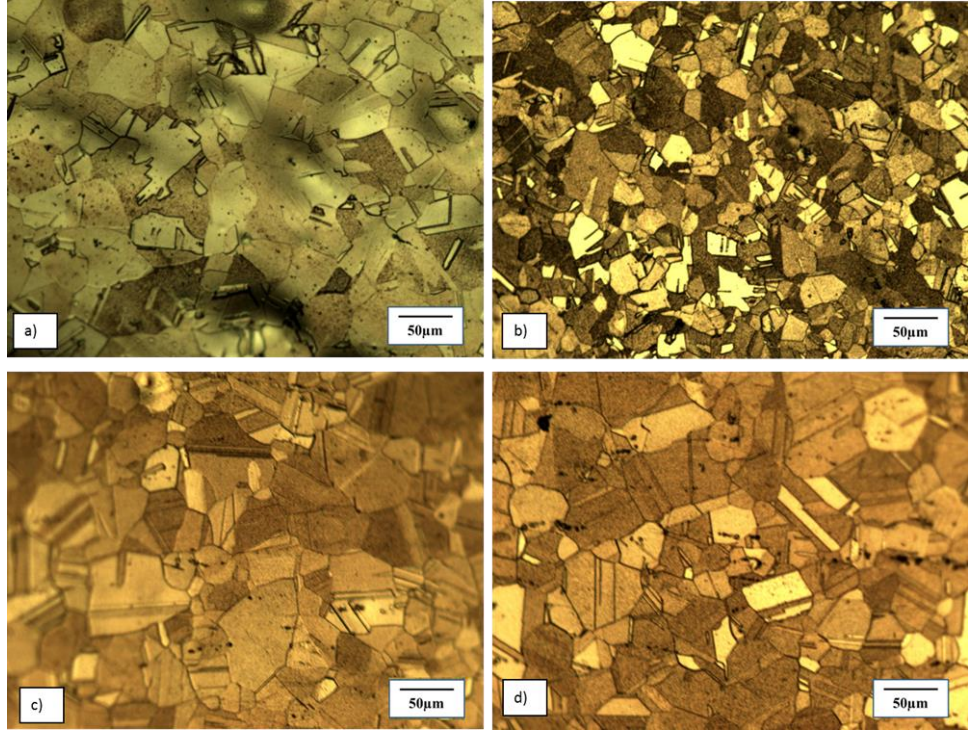


**Şekil 3.5.** Mikroskop altındaki mikrometre yardımıyla ölçü alınmasına ait bir örnek (uzun çizgilerin arası 100 mikrondur).

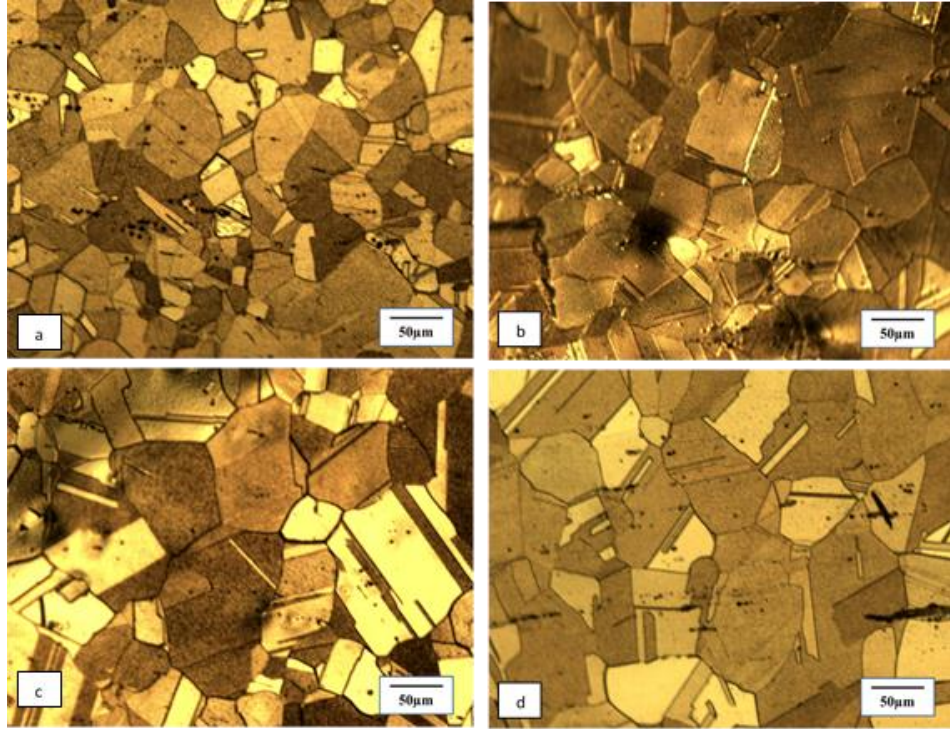


**Şekil 3.6.** Metalografik incelemede kullanılan elektrolitik parlatma cihazı.

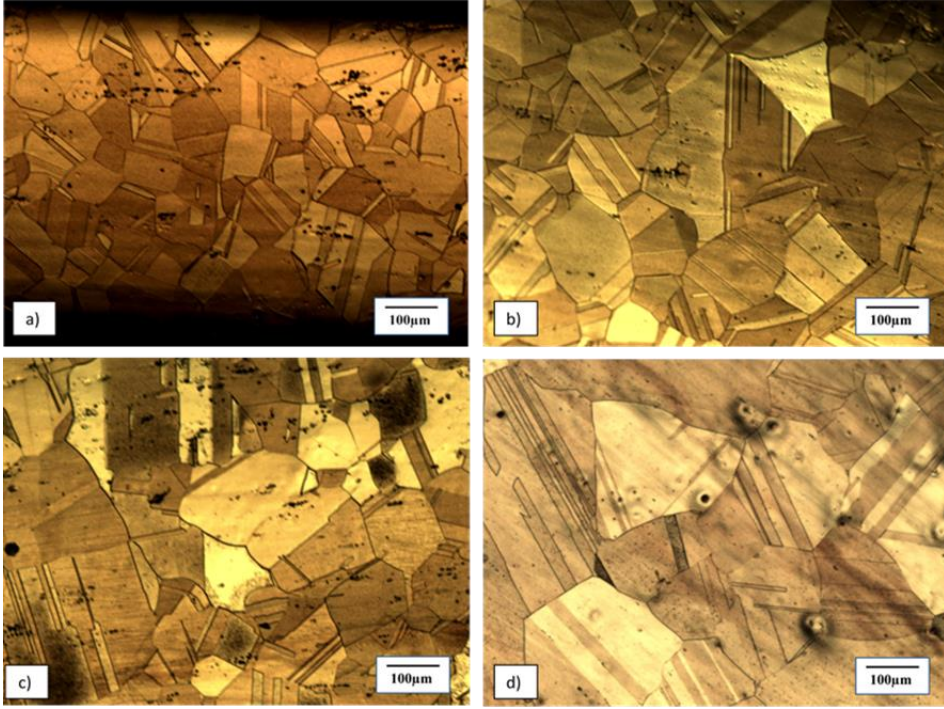
Metalografik inceleme neticesinde 500 °C'de 1 saat tavlanan numunelerden elde edilen mikro yapı görüntüleri Şekil 3.4'te, 650 °C'de 1 saat tavlanan numunelerden elde edilen mikro yapı görüntüleri Şekil 3.5'te, 700 °C'de 2 saat tavlanan numunelerden elde edilen mikro yapı görüntüleri ise Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



**Şekil 3.7.** a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm ve d) 3,2 mm kare kesit kenarına sahip 500 °C’de tavllanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları.



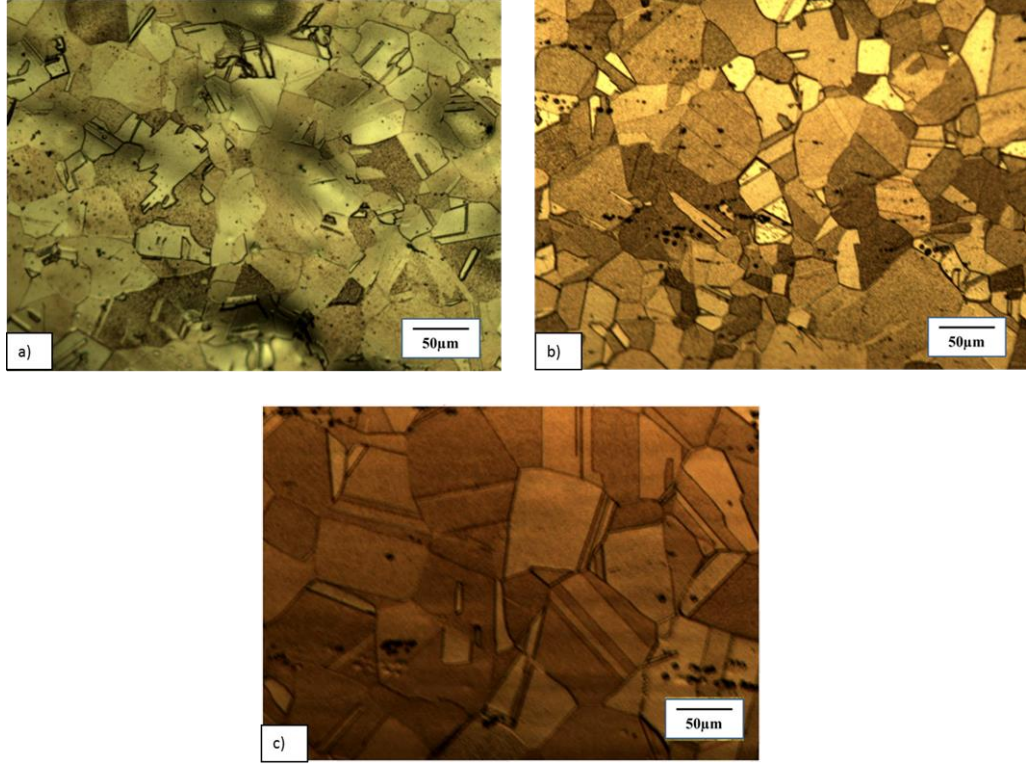
**Şekil 3.8.** a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm ve d) 3,2 mm kare kesit kenarına sahip 650 °C’de tavllanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları.



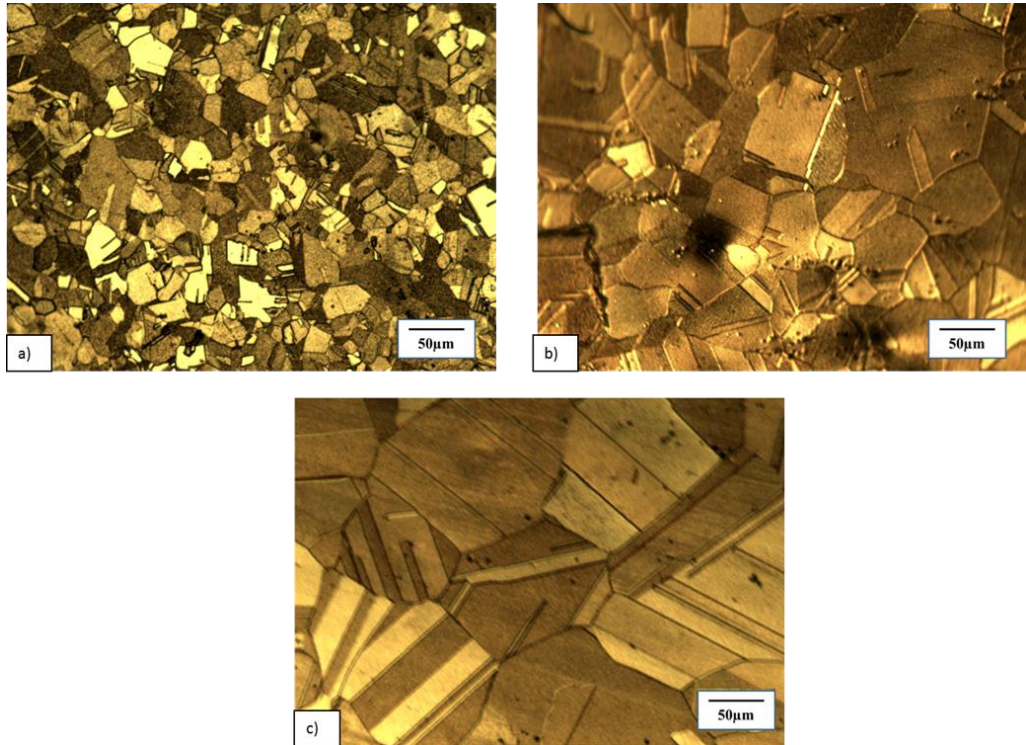
**Şekil 3.9.** a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm ve d) 3,2 mm kare kesit kenarına sahip 700 °C’de tavllanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları.

Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde tek fazlı bir yapı olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında tav ikizleri ve inklüzyonlar olduğu gözlemlenmiştir.

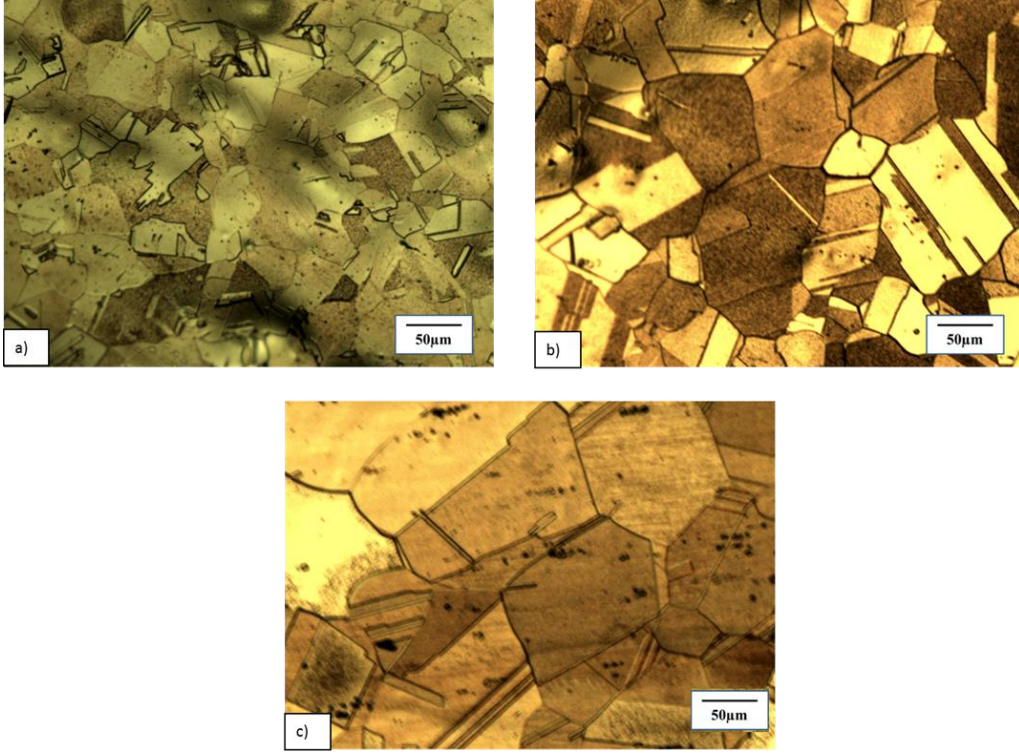
Aynı kare kesit kenarına sahip numunelerin farklı tavlama sıcaklıklarına ait mikroyapı görüntüleri 1 mm. kare kesit kenarına sahip numuneler için Şekil 3.10’da; 1,5 mm. kare kesit kenarına sahip numuneler için Şekil 3.11’de; 2 mm. kare kesit kenarına sahip numuneler için Şekil 3.12’de; 3,2 mm. kare kesit kenarına sahip numuneler için Şekil 3.13’te gösterilmiştir.



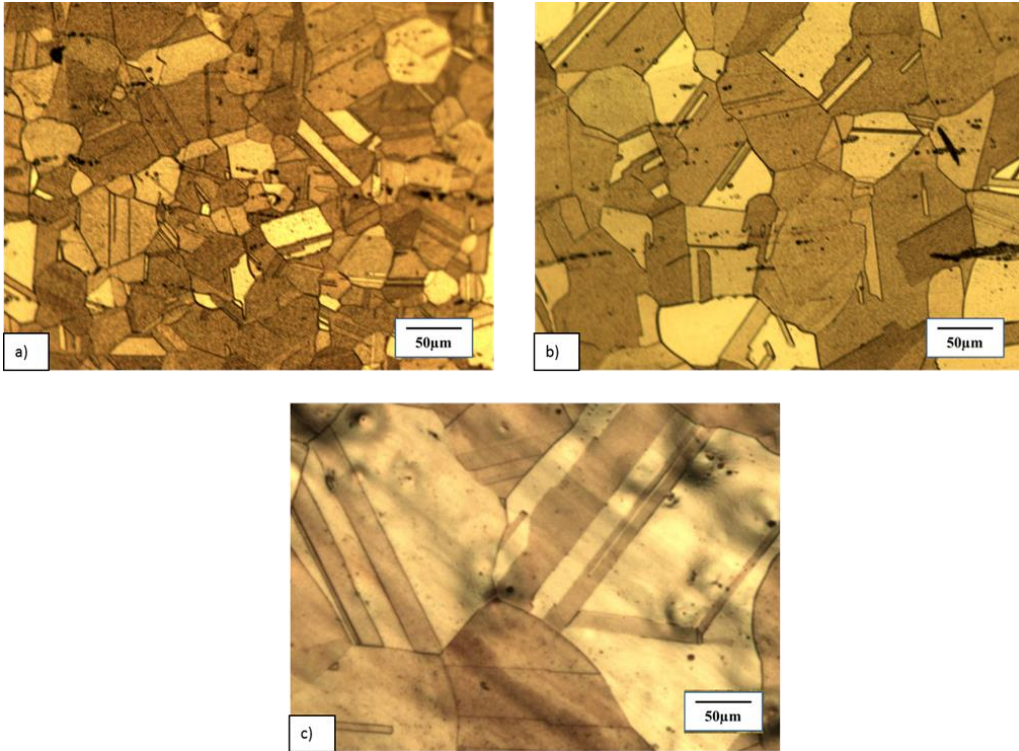
**Şekil 3.10.** 1 mm kare kesit kenarına sahip a) 500 °C b) 650 °C ve c) 700 °C’de tavllanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları



**Şekil 3.11.** 1,5 mm kare kesit kenarına sahip a) 500 °C b) 650 °C ve c) 700 °C’de tavllanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları



**Şekil 3.12.** 2 mm kare kesit kenarına sahip a) 500 °C b) 650 °C ve c) 700 °C’de tavllanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları



**Şekil 3.13.** 3,2 mm kare kesit kenarına sahip a) 500 °C b) 650 °C ve c) 700 °C’de tavllanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları

Herbir numune büyüklüğü – tavlama sıcaklığı koşulundaki numuneler için elde edilen tane boyutu değerleri Tablo 3.2’de görülmektedir.

**Tablo 3.2.** Tane boyutu değerleri

Numune Kalınlığı (mm)	Tane Boyutu Değerleri ( $\mu\text{m}$ )		
	Tavlama Sıcaklığı		
	500 °C	650 °C	700 °C
3.2 mm	43	100,2	205,8
2 mm	45	74	146,2
1,5 mm	33,5	70.8	137,6
1 mm	51,6	81,6	125,4

### 3.2. Mikro Basma Deneyleri

Birçok kütle metal şekillendirme işleminde ve benzeri mikro-şekillendirme işlemleri sırasında iş parçasında büyük şekil değişimleri meydana gelmektedir. Bu açıdan, malzemelere ait akma eğrilerinin elde edilmesinde çekme deneyine nazaran, çok daha büyük şekil değişimlerine kadar akma eğrinin elde edilmesine izin veren basma deneyleri tercih edilebilmektedir.

Bu çalışmada talaşlı imalat (CNC Freze) ile üretilip farklı tavlama koşullarına tabi tutulan mikro-basma numuneleri ile mikro basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler için İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan 5 ton kapasiteli servo kontrollü vida tahrikli Shimadzu marka çekme cihazı kullanılmıştır. Deneyler deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Basma hızı en büyük numune için (3,2 mm kare kesitli) 1.6 mm/dak olup diğer boyuttaki numuneler için numune boyutuna orantılı bir şekilde azaltılmıştır ( basma hızı 2 mm.lik numune için 1 mm/dak, 1.5 mm.lik numune için 0.75 mm/dak, 1 mm.lik numune için ise 0.5 mm/dak). Bu sayede farklı boyutlardaki numuneler için deformasyon hızı aynı olması sağlanmıştır.

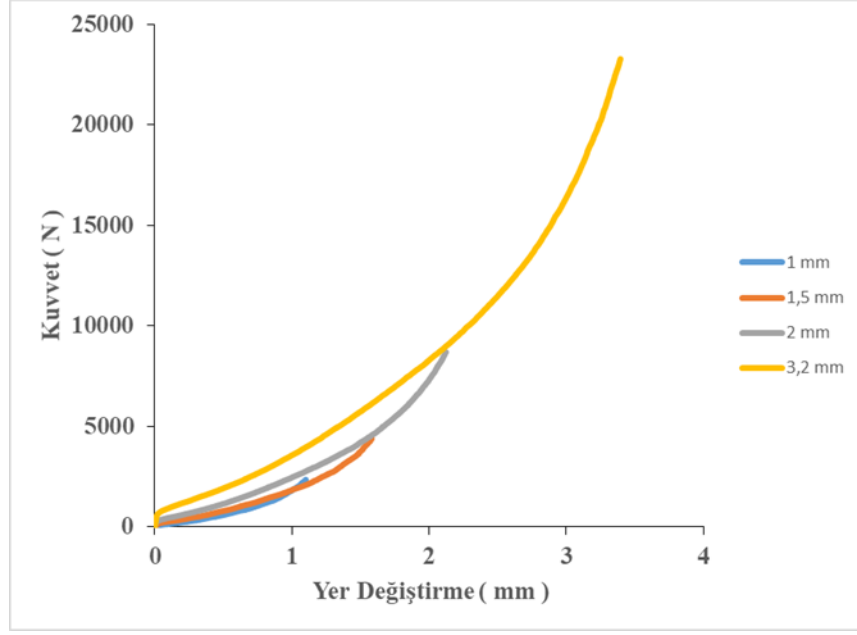
Mikro basma deneyleri esnasında şekil değişiminin doğru ölçülebilmesi için video ekstansometre kullanılmıştır. Bu metotta numune ölçü boyu üzerine çizgiler çizilmekte veya çizgili ince bir kağıt yapıştırılmakta, basmanın etkisiyle numune boyu kısalmaya başladıkça çizgiler birbirine yaklaşmaktadır. Çizgilerin hareketi video ekstansometre tarafından kaydedilmekte ve cihazda bulunan yazılım sayesinde yerdeğiştirme değerlerine dönüştürölmektedir. Mikro basma numunelerinin boyutları 4,8 ile 1,5 mm. arasında değişmekte olup özellikle küçük boyutlu numunelerde ölçü aralığında video kamera tarafından takip edilebilecek kadar belirgin çizgiler yerleştirmek ya da çizmek neredeyse imkansızdır. Bu sebeple referans çizgileri minyatür numunelerin arasına konulduğu basma plakaları üzerine yerleştirilmiş ve ölçümler bu surette yapılmıştır.

Deneyle sonrasında numunelerin son yükseklikleri mikrometre ile ölçölmüş ve video ekstansometreden okunan değerler ile karşılaştırılmış ve aradaki farkın elastik deformasyon seviyesinde olduğu görölmektedir video ekstansometreden okunan değerlerin doğruluğu teyit edilmiştir.

### **3.2.1. Mikro Basma Deneyi Sonuçları**

Farklı büyüklükteki minyatür kare kesitli numunelerle basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve numunelere ait kuvvet deplasman grafikleri elde edilmiştir. Örnek olarak Şekil 3.14'te 700°C' de tavlannmış farklı büyüklüklerdeki birer numuneye ait elde edilen deneysel kuvvet uzama eğrileri aynı grafikte gösterilmiştir.





**Şekil 3.14.** Tavlama sıcaklığı 700°C’ olan farklı boyutlardaki numunelere ait kuvvet deplasman eğrileri.

Gerçek gerilme - gerçek birim şekil değişimi grafiğini oluşturabilmek için her bir deneye ait kuvvet ve deplasman değerleri aşağıda verilen denklemler kullanılarak gerçek gerilme ve gerçek şekil değişimi değerlerine dönüştürülmüştür.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.1)$$

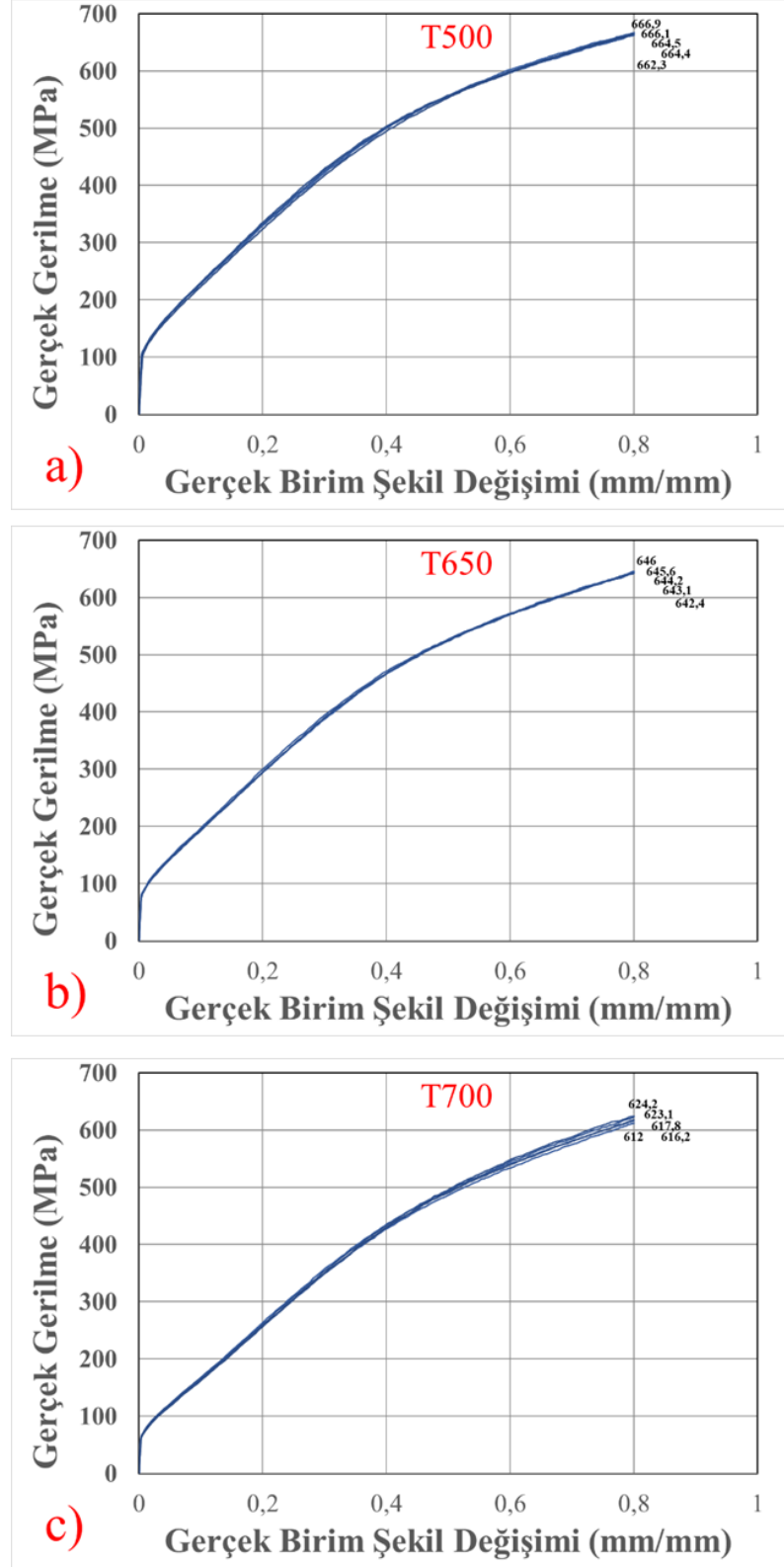
$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (3.2)$$

$$\sigma_g = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (3.3)$$

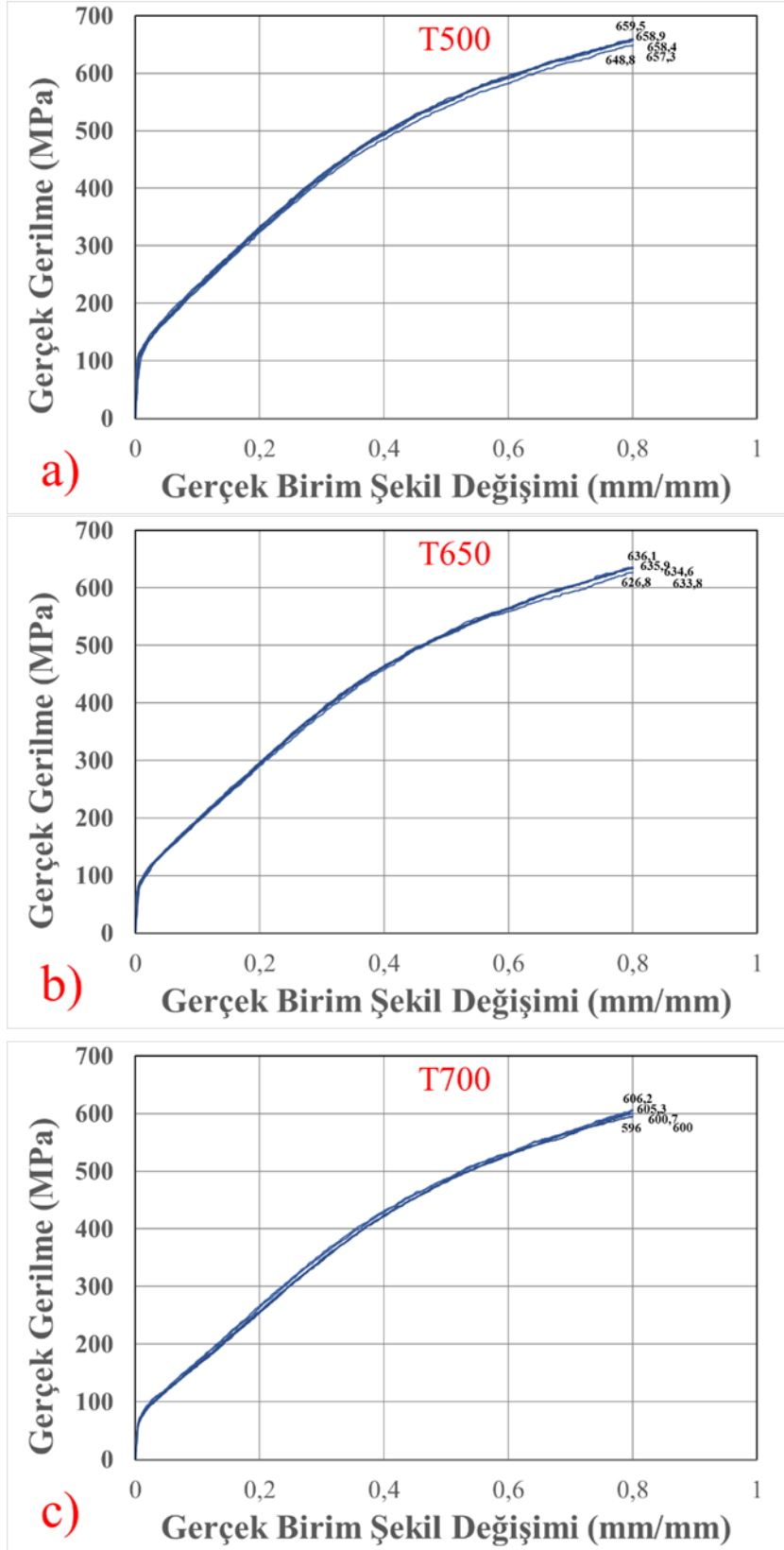
$$\varepsilon_g = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3.4)$$

Denklem 3.1’de F Newton cinsinden basma kuvvetidir. “A<sub>0</sub>” numunenin deney öncesi ilk kesit alanıdır. Birimi mm/mm, yani birimsiz olan, ε basma neticesinde numunede oluşan birim şekil değişimidir. h<sub>0</sub>, numunenin deney öncesi yüksekliği ve Δh, basma sonucu numunenin yüksekliğinde meydana gelen azalmadır. Gerçek gerilme “σ<sub>g</sub>” ve gerçek birim şekil değişimi ise “ε<sub>g</sub>” simgesiyle gösterilmiştir. Yukarıdaki formüllerin kullanılmasıyla her bir numune boyutu / tane boyutu kombinasyonu için gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrileri oluşturulmuştur.

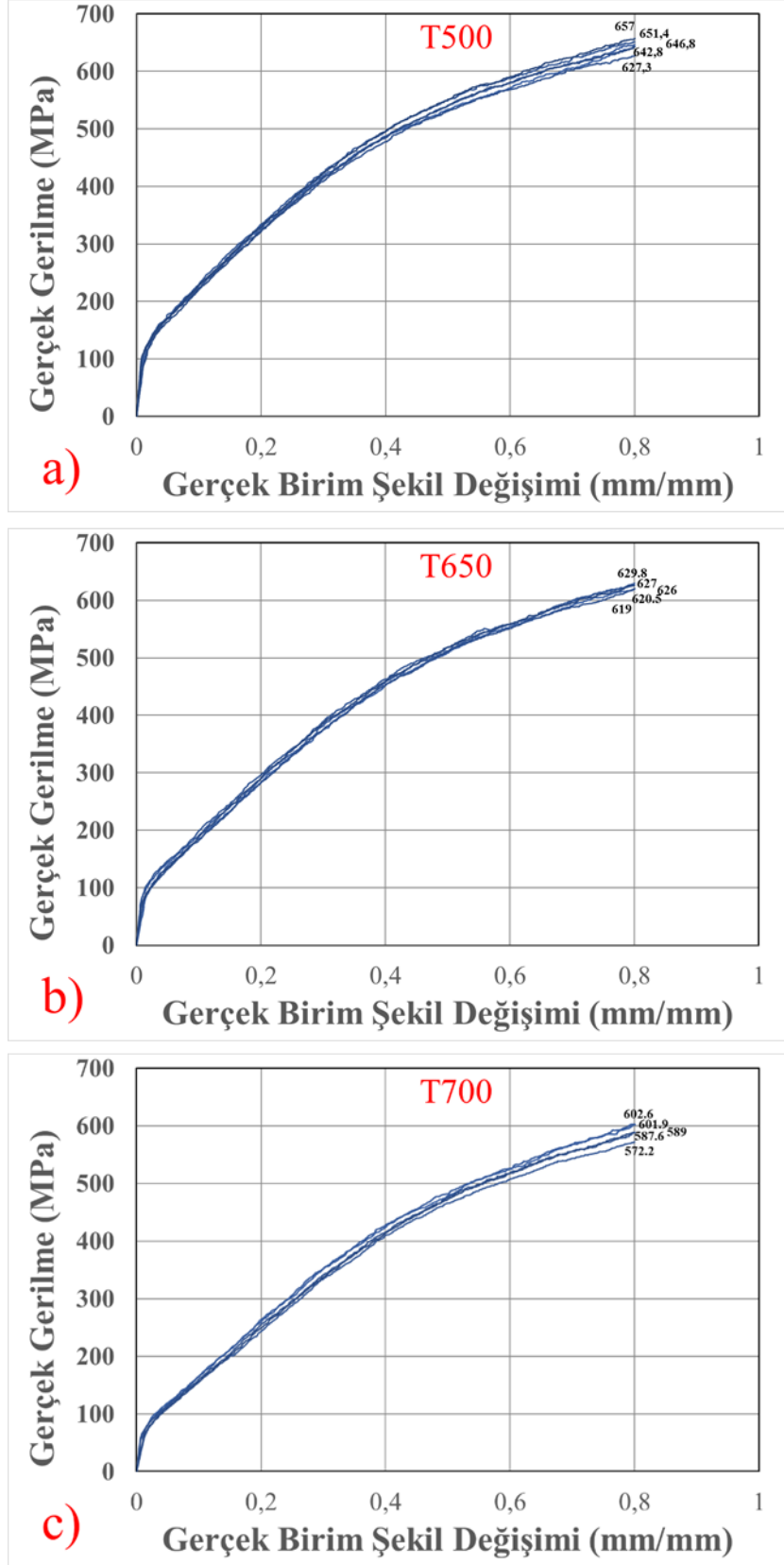
Şekil 3.15'te, Şekil 3.16'da, Şekil 3.17'de ve Şekil 3.18'de kare kesit kenar uzunluğu sırasıyla, 3.2 mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm olan numunelere ait gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrileri görülmektedir. Bu grafiklerin a, b, c şıklarında sergilenen akma eğrileri, sırasıyla 500°C'de, 650°C'de ve 700°C'de tavllanmış numunelere aittir.



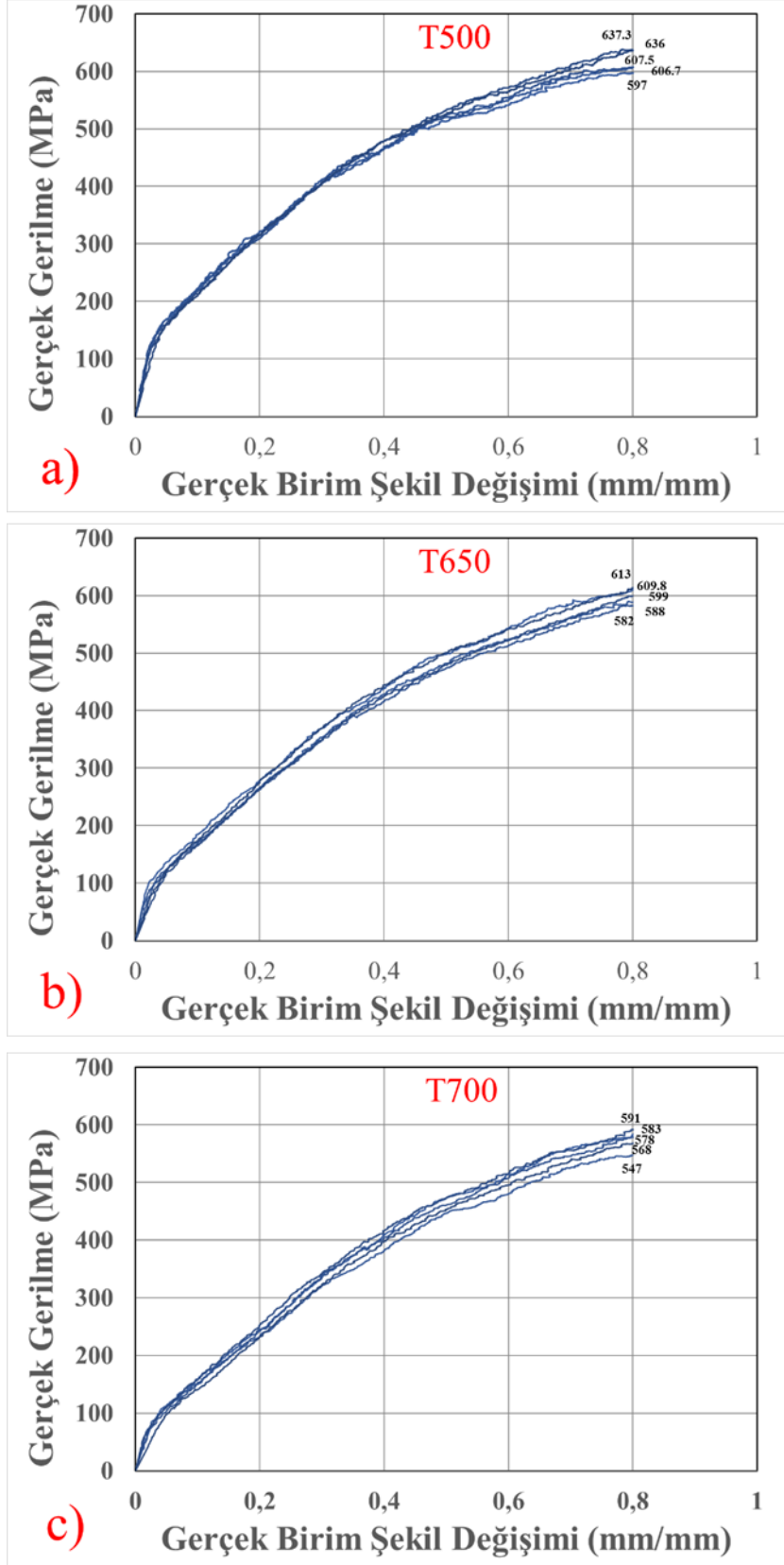
**Şekil 3.15.** 3.2 mm kare kesit kenar uzunluğuna sahip ve a) tane boyutu 43  $\mu\text{m}$  (500°C’de tavllanmış), b) tane boyutu 100,2 $\mu\text{m}$  (650°C’de tavllanmış), c) tane boyutu 205,8  $\mu\text{m}$  (700°C’de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri.



**Şekil 3.16.** 2 mm kare kesit kenar uzunluğuna sahip ve a) tane boyutu 45  $\mu\text{m}$  (500°C’de tavllanmış), b) tane boyutu 74  $\mu\text{m}$  (650°C’de tavllanmış), c) tane boyutu 146,2  $\mu\text{m}$  (700°C’de tavllanmış olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri.



**Şekil 3.17.** 1,5 mm kare kesit kenar uzunluğuna sahip ve tane boyutu a) 33,5  $\mu\text{m}$  (500°C’de tavllanmış), b) 77,8  $\mu\text{m}$  (650°C’de tavllanmış), c) 137,6  $\mu\text{m}$  (700°C’de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri.



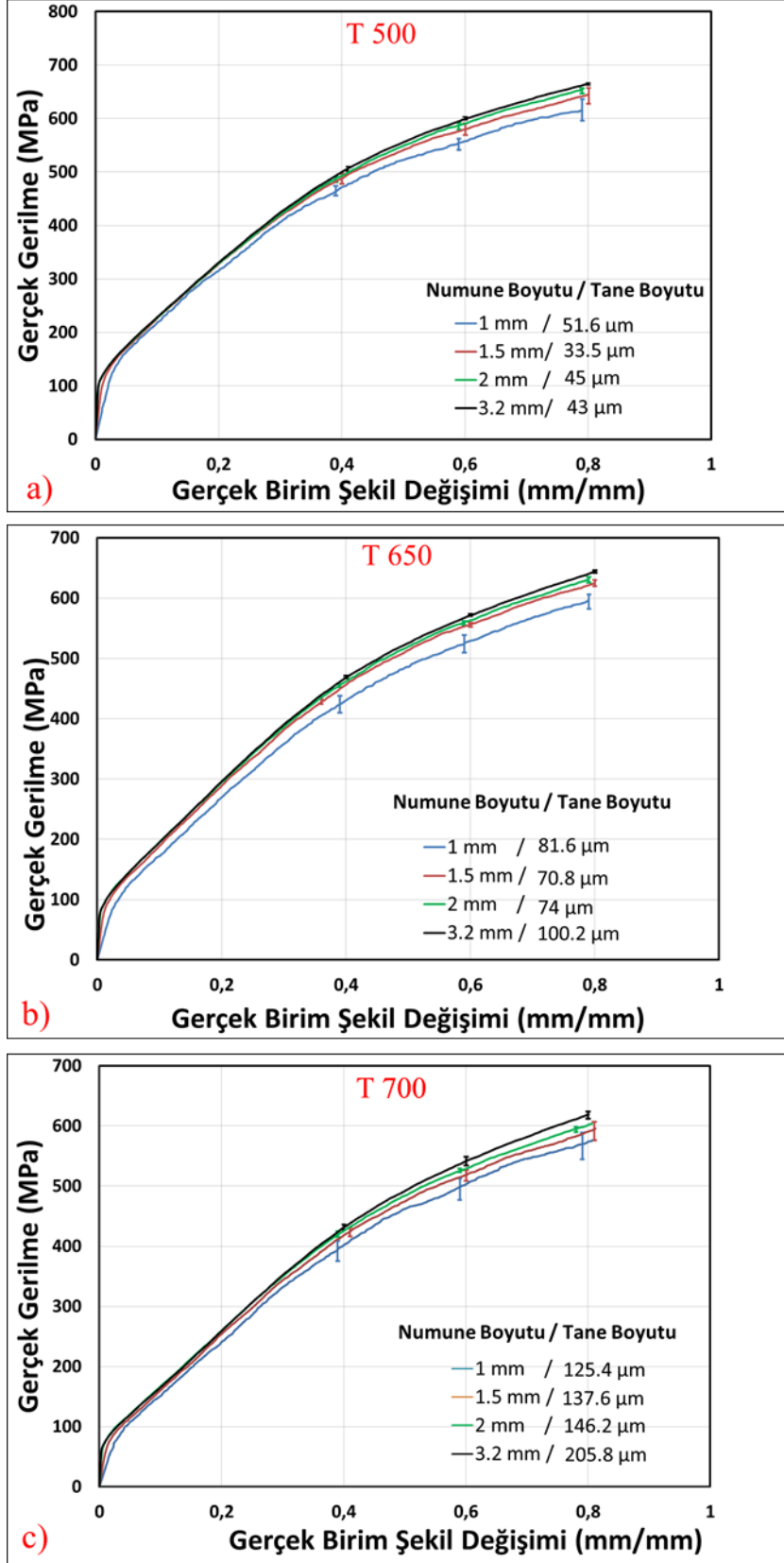
**Şekil 3.18.** 1 mm kare kesit kenar uzunluğuna sahip ve tane boyutu a) 51,6  $\mu\text{m}$  (500°C’de tavllanmış), b) 81,6  $\mu\text{m}$  (650°C’de tavllanmış), c) 125,4  $\mu\text{m}$  (700°C’de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri.

Şekil 3.15, 3.16, 3.17 ve 3.18’de verilen grafikler yakından incelendiğinde daha küçük boyutlu numunelerle gerçekleştirilen deneylerde, bir başka deyişle, boyutların küçülmesiyle genel olarak saçınımın arttığı görülmektedir. Bu durum numune boyutunun en küçük, yani kare kesit kenarı 1 mm olan ve en büyük tane boyutuna sahip 700°C’de tavllanmış (tane boyutu 125,4 µm olan) numunelere ait akma eğrilerinde açıkça görülmektedir.

Bahsedildiği gibi mezo-mikro ölçekte numune boyunun azalmasıyla birlikte homojen malzeme deformasyon davranışı tanelerin yönlenmesine bağlı olarak azalmaktadır. Mikro boyutlara inildikçe kesitteki küçülme ölçüsünde kesitte bulunan tane sayısının azalması sonucunda, her bir tanenin deformasyon üzerindeki etkisi, tanenin yönelimine, yerine ve boyutuna göre belirginleşebilmektedir. Bu nedenle numune boyutlarındaki azalma saçınımına yol açmaktadır

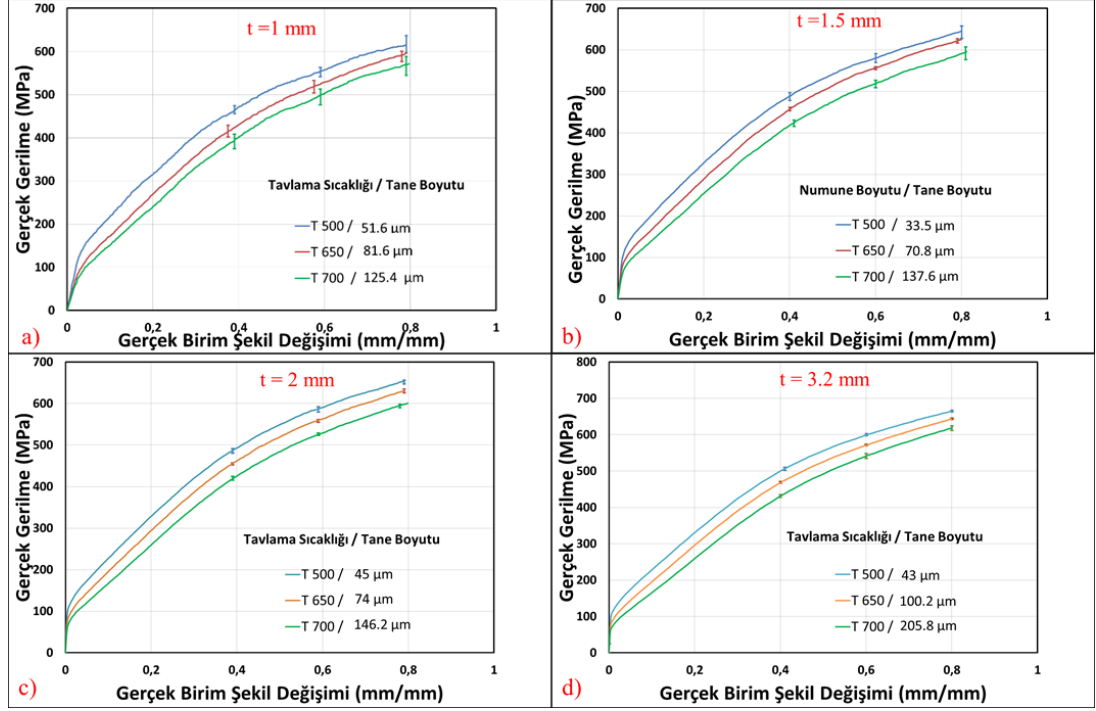
Matlab programı yardımıyla, bütün numune boyutu, tane boyutu (tavlama sıcaklığı) kombinasyonları için elde edilen deneysel akma eğrilerinin, yani deneysel gerilme-birim şekil değişimi değerlerinin ortalaması alınmış, böylece her bir numune boyutu ve tane boyutu (tavlama sıcaklığı) kombinasyonu için ortalama gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrisi oluşturulmuştur.

Aynı tavlama sıcaklığı için tüm numune boyutlarının her birine ait ortalama gerçek gerilme gerçek birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.19’da bir arada verilmiştir. Şekil 3.20’de ise ortalama akma eğrileri, aynı numune boyutu için tavlama sıcaklığı açısından karşılaştırılmıştır. Eğriler aynı koşullardaki numunelerin ortalama davranışını sergiledikleri için, eğriler üzerinde saçınım miktarı da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. a) 500 °C b) 650 °C c) 700 °C tavlama sıcaklığındaki numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin numune boyutuna göre karşılaştırılması. Numune boyutları (kare kesit kenar uzunlukları) ve tane boyutları grafiklerde belirtilmiştir.





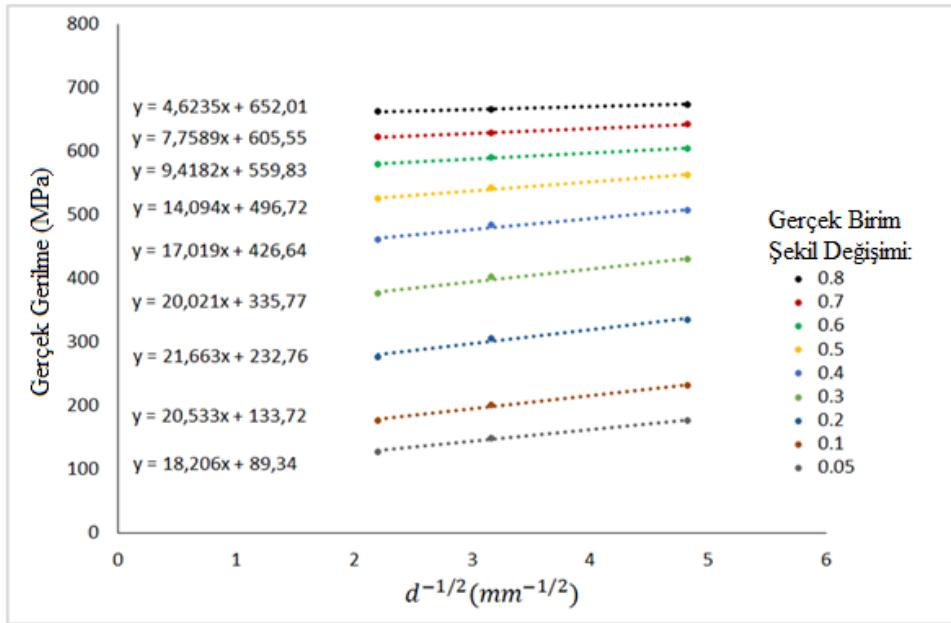
**Şekil 3.20.** a) 1 mm b) 1.5 mm c) 2 mm d) 3.2 mm kare kesit kenar uzunluğuna sahip numunelerin ortalama gerçek gerilme - gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması. Tavlama sıcaklıkları ve tane boyutları grafiklerde belirtilmiştir.

Grafiklerde görüldüğü üzere, birbirine yakın tane büyüklüğüne sahip numunelerde (tavlama sıcaklığı aynı olan); numuneler minyatürleştikçe malzemenin akma gerilmesi değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir.

### 3.3. Deney Sonuçları ile Malzeme Modelinin Doğrulanması

Denklem 2.11 kullanılarak her hangi bir tane büyüklüğü ve numune boyutu kombinasyonu için malzemenin akma gerilmesi değerleri hesap edilebilir. Bunun yapılabilmesi için Hall-Petch sabitleri olan  $\sigma_o(\epsilon)$  ve  $k(\epsilon)$  bulunmalıdır. Hall-Petch sabitlerinin belirlenmesi için öncelikle malzemenin farklı farklı tane büyüklüklerine ait akma gerilmesi değerlerini ( $\sigma_o(\epsilon)$  veya  $\sigma_{ai}(\epsilon)$ ) veren makro boyutlu numunelerle gerçekleştirilen deneylerle elde edilmiş akma eğrilerinin bulunması gerekir. 3,2 mm kare kesit kenar uzunluğuna sahip en büyük boyutlu numuneler için, yüzey tabakası oranının henüz ihmal edilemeyecek düzeyde olması nedeniyle bu numunelerin çok kristalli makro malzeme deformasyon davranışını tam olarak sergiledikleri söylenemez ve dolayısıyla en büyük boy numuneler için deneysel olarak elde edilmiş olan akma gerilmesi değerleri çok kristalli makro malzemenin akma gerilmesi (ya da iç tanelerin akma gerilmesi değerleri) olarak kullanılamaz. Bununla birlikte, en büyük

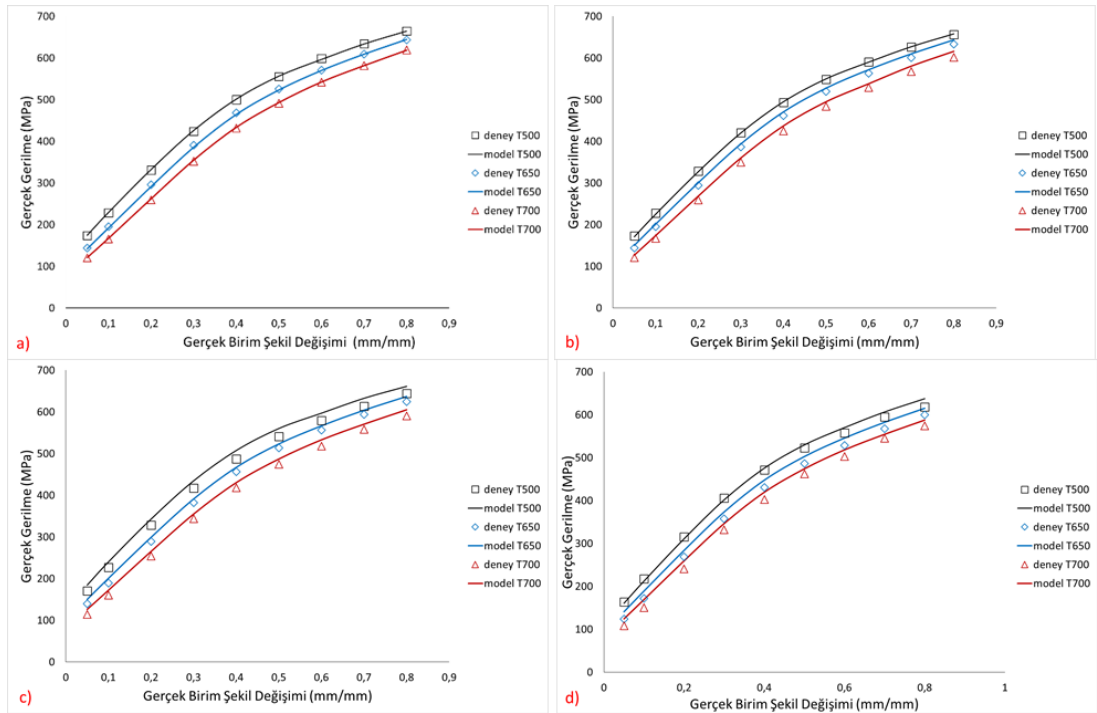
boyutlu numunelerin akma gerilmesi değerleri, belirli gerçek birim şekil değiştirme değerleri için iç tanelerin akma gerilmesi değerlerinin bulunmasında kullanılabilir. Belirli gerçek birim şekil değiştirme değerlerinde en büyük boyutlu numunelerin akma gerilmesi değerleri, bilinmektedir ve denklem 2.3 kullanılarak 3 farklı tane büyüklüğü için yüzey tabakası oranları da hesaplanabilir. Bu değerlerin denklem 2.12’de yerlerine yazılmasıyla; 3 farklı tane büyüklüğü için iç tanelerin akma gerilmesi değerleri ( $\sigma_{ai}(\epsilon)$ ), belirli gerçek birim şekil değişimine bağlı olarak, hesaplanabilir. Hall-Petch sabitlerini saptanması için, iç tanelerin belirli gerçek birim şekil değişimindeki akma gerilmesi değerlerinin, bir bölü karekök tane büyüklüğü değerlerine bağlı olarak değişimini gösteren grafik şekil 3.14’te gösterilmiştir. Her bir gerçek birim şekil değiştirme değeri için, veri noktalarına bir excell programı yardımıyla bir doğru uydurulmuştur. Doğrunun y düzlemini kestiği nokta  $\sigma_0(\epsilon)$  değerini, doğrunun eğimi ise  $k(\epsilon)$  değerini, belirli gerçek birim şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak, verir.



**Şekil 3.21.** Belirli gerçek gerilme değerlerinde iç taneler (ya da eşdeğeri olan makro boyuttaki çok kristal malzeme) için akma gerilmesinin bir bölü karekök tane boyutuna göre değişimi

Belirli gerçek birim şekil değişimi değerleri için belirlenen söz konusu bu Hall-Petch sabitlerinin denklem 2.10’de yerine yazılmasıyla her bir tane boyutu-numune boyutu kombinasyonu için akma gerilmesi değerleri hesaplanabilir. Hesaplanan akma gerilmesi değerleri ve deney sonuçları Şekil 3.22’de karşılaştırılmıştır. Hall-Petch sabitlerinin hesaplanmasında kullanılan iç tanelerin tahmini akma gerilmesi değerleri,

en büyük boyutlu numunelerin deneysel verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, Şekil 3.22’de görüldüğü üzere en büyük boyuttaki numuneler için deneysel akma gerilmesi verileri ile modele göre hesaplanan akma gerilmesi verileri neredeyse birebir örtüşmekte olup hata oranı % 0,3 ile %0,8 arasındadır. Bunun yanında daha küçük boyutlu numunelerin deneysel ve modele göre hesaplanan akma gerilmesi verilerinde de iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Ortalama deney sonuçları ile modele göre hesaplanan eğriler arasındaki ortalama hata oranı her bir gerçek birim şekil değişimindeki hata oranlarının ortalaması alınarak hesaplanmış ve Tablo 3.7’de listelenmiştir. Hata oranı % 0.3 ile % 5.96 arasında değişmekte olup genel olarak Hall-Petch sabitlerinin hesaplandığı 3.2 mm.lik numune boyutlarından uzaklaştıkça artmaktadır. Yine hata oranı belirgin bir biçimde tane boyutlarının küçük olduğu 500 °C’de tavlanmış numunelere ait basma deneyi verilerinde daha düşüktür. Genel ortalama hata oranı % 2,68 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3.22.** a) 3.2 mm b) 2 mm c) 1.5 mm and d) 1 mm kare kesit kenarına sahip numuneler için deneysel olarak elde edilen akma gerilmelerinin oluşturulan malzeme modeli ile hesaplanan akma eğrileri ile karşılaştırması. Tav sıcaklıkları grafiklerde yanda belirtilmiştir.

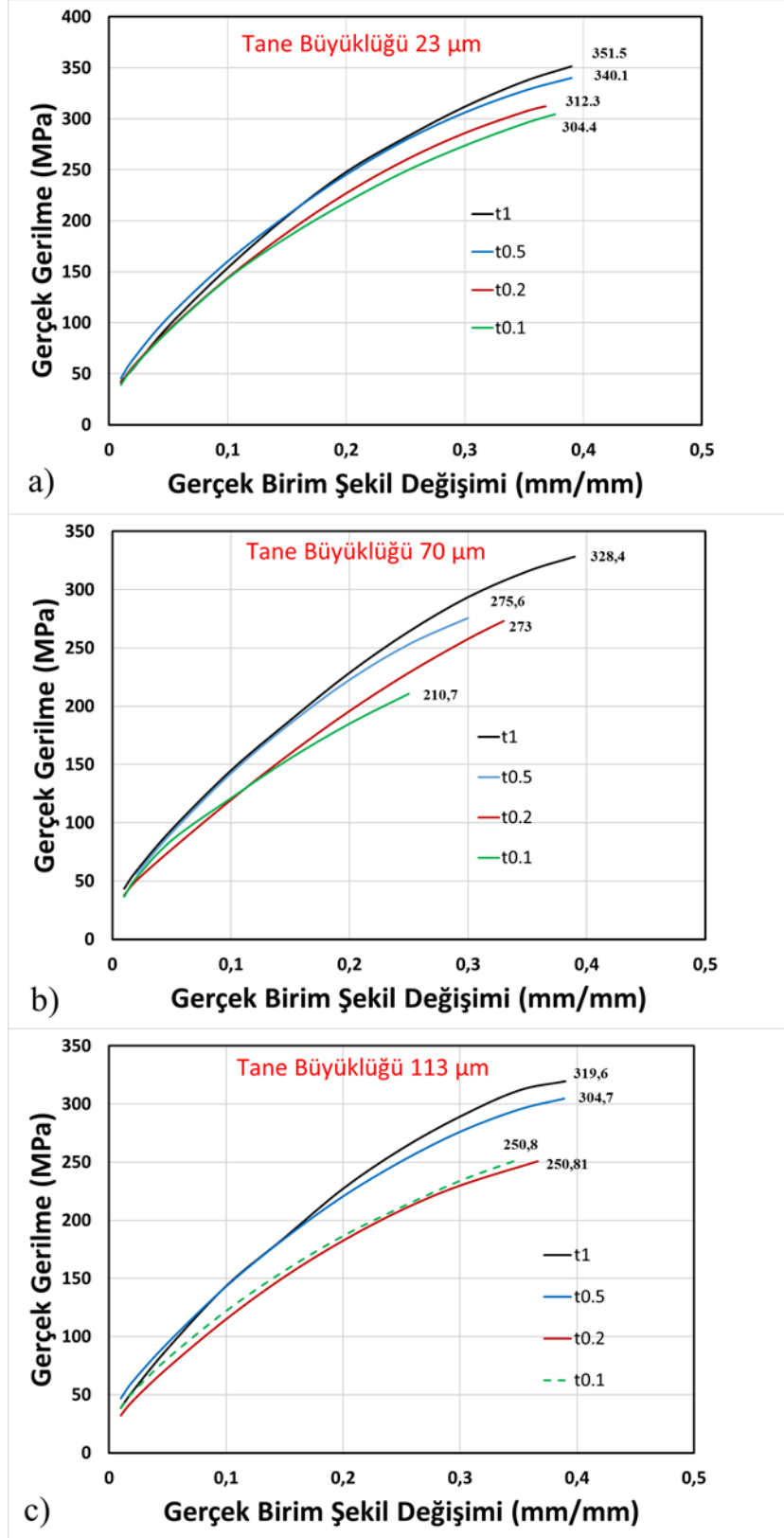
**Tablo 3.3.** Ortalama deney sonuçları ile modele göre hesaplanan eğriler arasındaki hata oranı değerleri.

Kare Kesit Kenar Uzunluğu (mm)	Ortalama Hata Oranı (%)		
	T 500	T 650	T 700
3.2 mm	0,3	0,8	0,56
2 mm	0,4	3	3
1,5 mm	4,3	3,3	4,3
1 mm	1,77	5,46	5,96

#### 3.4. Literatürdeki Farklı Çalışmalar ile Modelin Doğrulanması

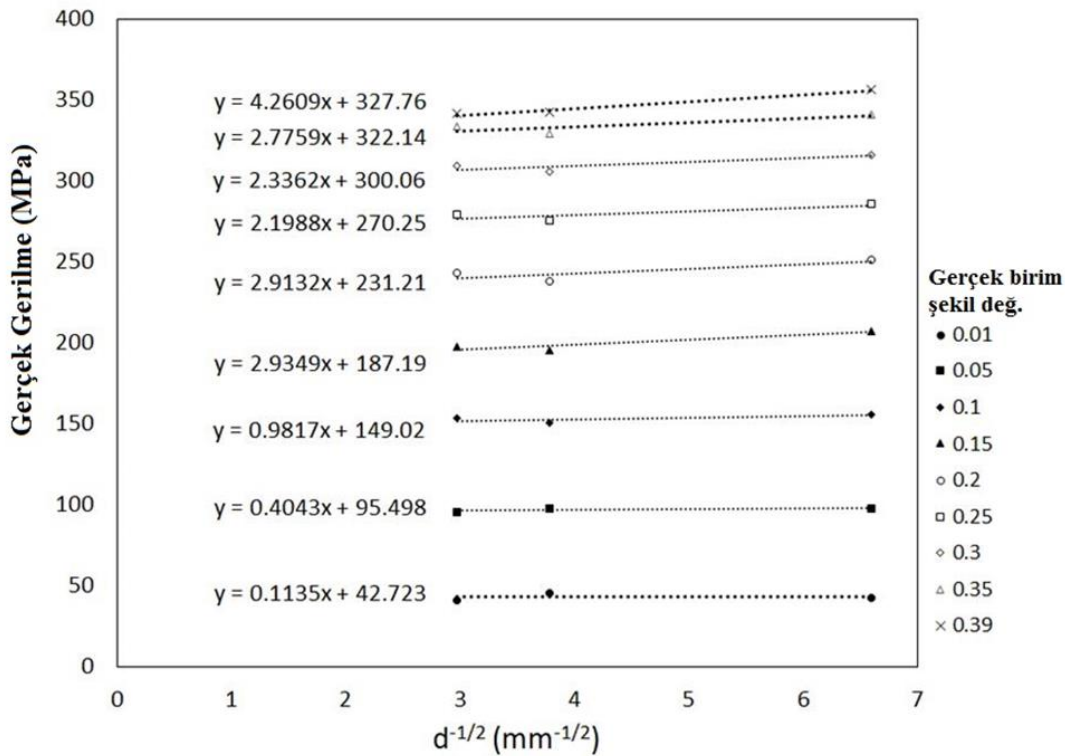
Mikro/mezo boyutta malzeme davranışı için önerilen modelin etkinliği; literatürde karşılaşılan iki farklı malzemeye ait deneysel akma eğrilerinin, yeni geliştirilen malzeme modeliyle hesaplanan akma eğrileri ile karşılaştırılmasıyla daha da doğrulanmıştır [1,29].

Zeng tarafından yapılan bir çalışmada, dört farklı numune kalınlığı (1 mm, 0,5 mm, 0,2 mm ve 0,1 mm) ve üç farklı tane büyüklüğü (23  $\mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m}$  ve 113  $\mu\text{m}$ ) için C1200 bakır malzemesine ait deneysel olarak elde edilmiş mikro-çekme eğrileri Şekil 3.23'de verilmiştir [29]. Numune ölçü boyunun 12.5 mm olduğu çekme deney verileri farklı iki çalışmada da kullanılmıştır [30,31].



**Şekil 3.23.** Aynı tane büyüklüğüne sahip farklı kalınlıklarda mikro-çekme numunelerine ait akma eğrileri. a) tane büyüklüğü 23  $\mu\text{m}$ , b) tane büyüklüğü 70  $\mu\text{m}$  ve c) tane büyüklüğü 113  $\mu\text{m}$ .

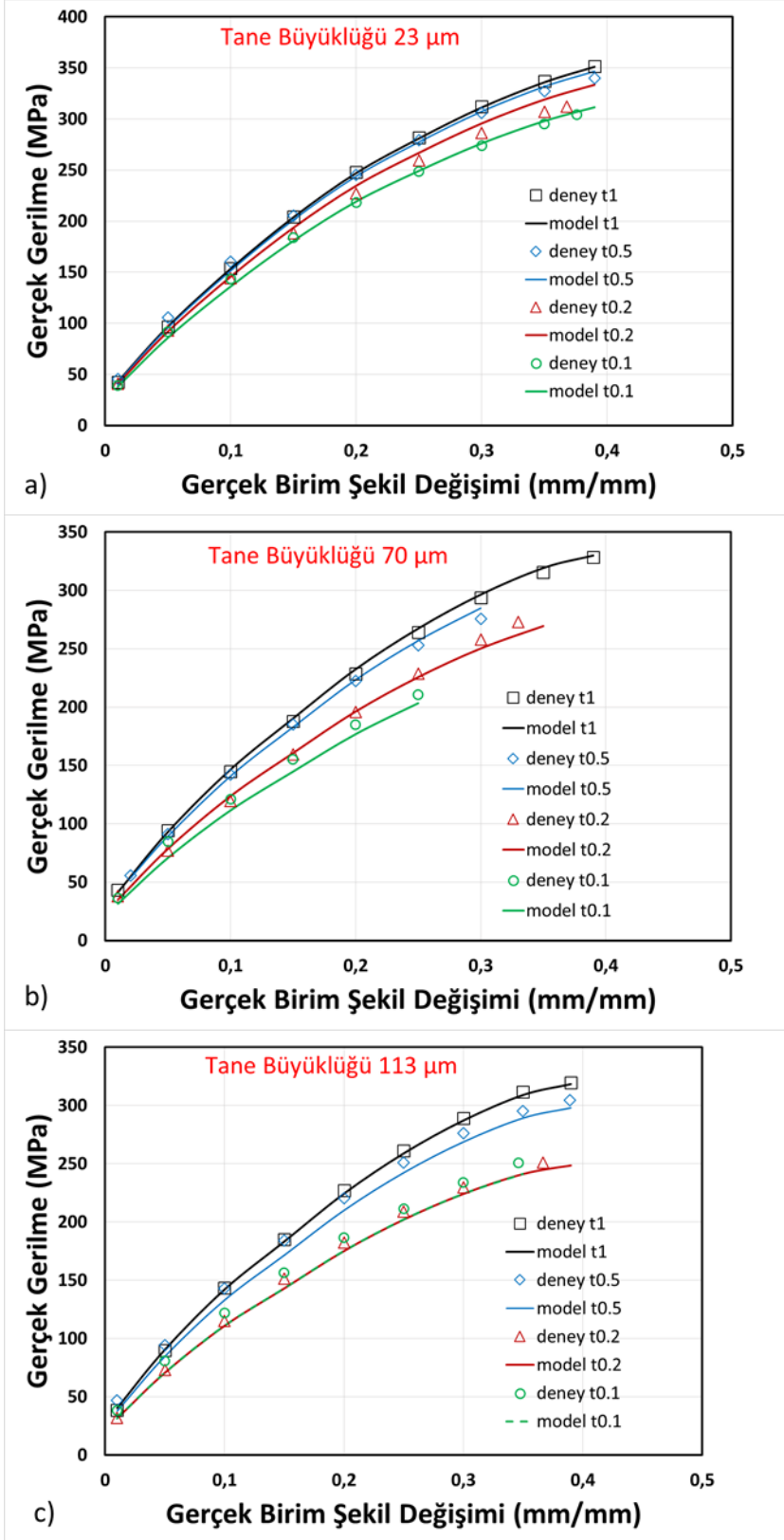
Malzemeye ait Hall-Petch sabitlerinin (belirli gerçek birim şekil değişimi değerlerinde) elde edilebilmesi için aynı yol izlenmiştir. Çok kristalli makro malzemenin 3 ayrı tane büyüklüğü için akma gerilmesi değerlerinin (iç tanelerin akma gerilmesi değerleri), belirli gerçek birim şekil değişim değerlerinde, hesaplanması için en büyük boyutlu 1 mm kalınlığa sahip numunelerin akma gerilmesi değerleri kullanılmıştır. Denklem 2.3'ün kullanılmasıyla en büyük boyutlu numunelerin 3 farklı tane büyüklüğü için yüzey tabakası oranı  $\alpha$  hesaplanmıştır. Sonrasında en büyük boyutlu numuneler için hesaplanan yüzey tabaka oranı  $\alpha$  ve akma gerilmesi değerleri denklem 2.12'de yerine yazılarak her bir tane büyüklüğü için çok kristalli makro malzemenin (iç tanelerin) akma gerilmesi değerleri, verilen gerçek birim şekil değişimine bağlı olarak, hesaplanmıştır. Çok kristalli makro malzemenin belirli gerçek birim şekil değişim değerleri için akma gerilmesi değerlerinin, tane büyüklüğünün 1 bölü karekökü değerine bağlı olarak değişimini gösteren bir grafik oluşturulmuştur (Şekil 3.24).



**Şekil 3.24.** C1200 alaşımı için Çok kristalli makro yapının (iç tanelerin) seçilen gerçek birim şekil değişimi noktalarındaki akma gerilmesi değerlerinin, tane büyüklüğüne göre değişimi.

Belirli gerçek gerilme değerleri için, veri noktalarına bir doğru uydurulmuş, doğrunun y eksenini kestiği noktadan  $\sigma_0(\epsilon)$  değerleri, eğiminden de  $k(\epsilon)$  değerleri, elde

edilmiştir. Sonrasında Hall-Petch sabitleri ve yüzey tabakası oranlarının denklem 2.10'da yerlerine yazılmasıyla, her bir tane büyüklüğü – numune boyutu kombinasyonu için malzemenin akma gerilmesi değerleri, belirli gerçek birim şekil değişimi için hesaplanmıştır. Modele göre hesaplanan akma eğrisi ve deneysel sonuçlar Şekil 3.25'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.25. a) tane büyüklüğü 23  $\mu\text{m}$  b) tane büyüklüğü 70  $\mu\text{m}$  ve c) tane büyüklüğü 113  $\mu\text{m}$  olan çeşitli kalınlıklardaki numunelerin deneysel ve yeni modele göre hesaplanan akma eğrilerinin karşılaştırılması.



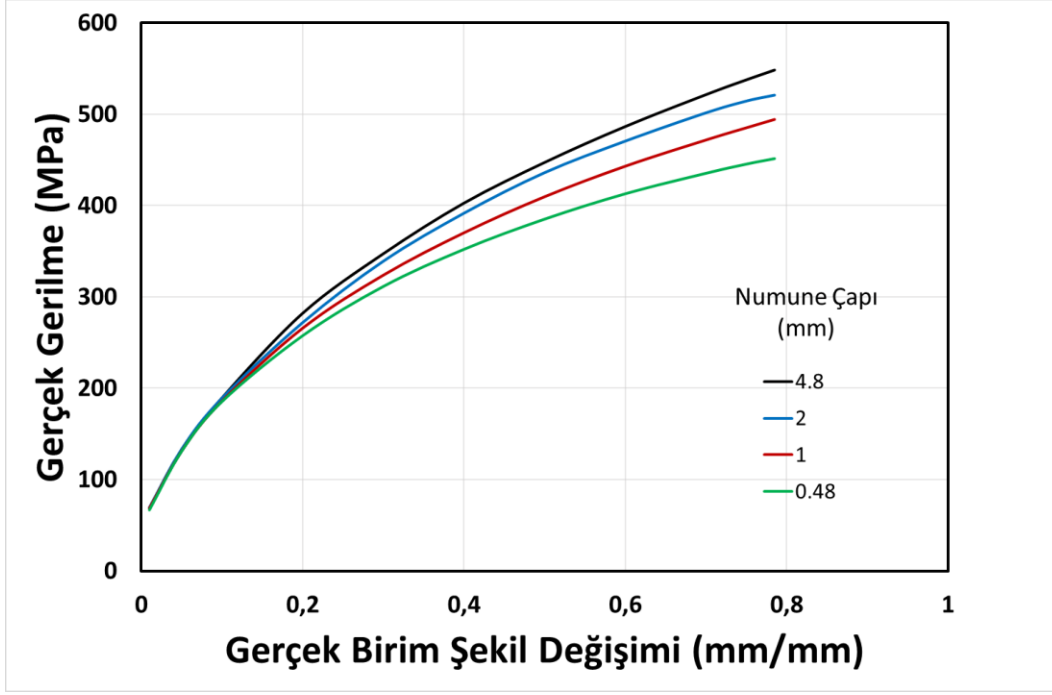
Hall- Petch sabitleri hesaplanırken en büyük boyutlu numunelerin akma eğrisi kullanılmıştır, dolayısıyla en büyük boyutlu, kalınlığı 1 mm olan numunelerin hesaplanan akma eğrisi ile deneysel akma eğrisi neredeyse birebir örtüşmekte olup basma deneyi verilerine benzer şekilde hesaplanan hata oranı en çok % 1,5 civarındadır. Bununla birlikte, daha küçük boyutlu numuneler için de deneysel ve model ile hesaplanan eğrilerin de % 8,8 ila % 1,9 arasında değişen hata oranları ile birbiriyle iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlemlenmektedir. Her bir eğriye ait deneysel ve hesaplanan gerçek gerilme değerleri arasındaki hata oranları Tablo 3.8’de gösterilmiştir. Tüm eğrilerle ait hata oranlarının ortalaması alınarak elde edilen genel hata oranı ortalama olarak %3,45 olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 3.4.** Zeng tarafından yapılan çalışmadaki deney sonuçları ile modele göre hesaplanan eğriler arasındaki hata oranı değerleri.

Numune Kalınlığı (mm)	Ortalama Hata Oranı (%)		
	Tane Boyutu ( $\mu\text{m}$ )		
	23	70	113
1	0,33	1,5	1,2
0,5	3,1	1,9	6,5
0,2	2,8	2,4	3,4
0,1	2,2	8,8	8,3

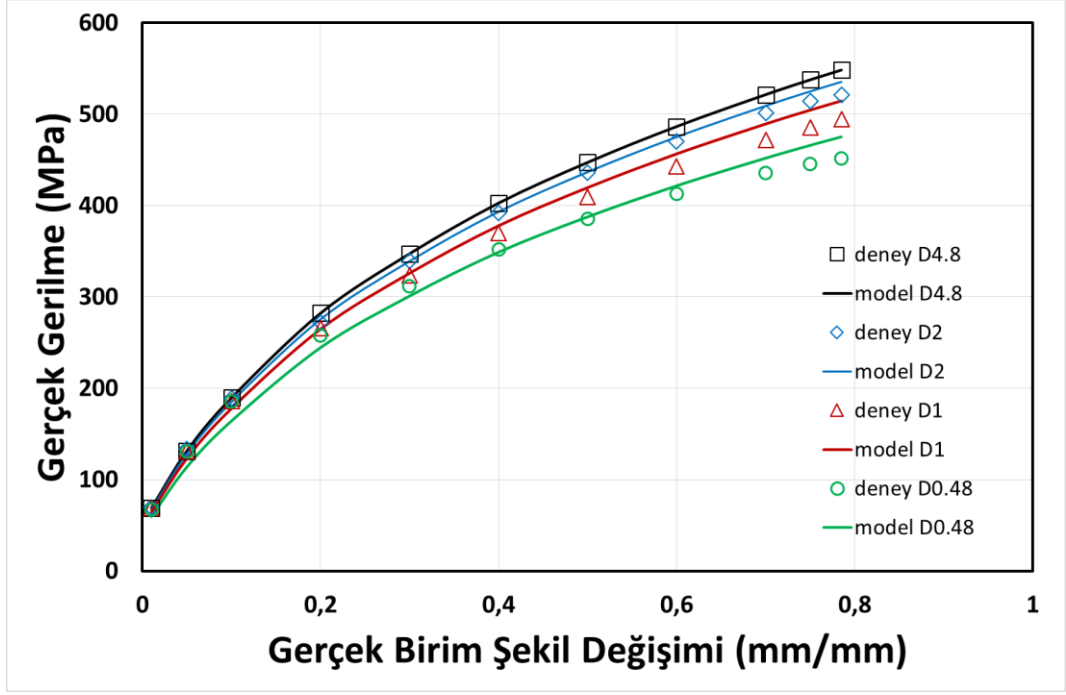
Tane büyüklüğü 113  $\mu\text{m}$  olan 0.1 ve 0.2 mm kalınlığındaki numuneler yalnızca yüzey tanelerinden oluşmaktadır, bu yüzden yüzey tabaka oranı  $\alpha$  1’dir. Sonuç olarak her ikisi için de modele göre aynı akma gerilmesi değerleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda her iki numunenin deneysel sonuçları da birbirine oldukça yakındır.

Daha önce belirtildiği gibi Engel ve Ekstein tarafından yapılan meşhur bir çalışmada, 79 mikron tane büyüklüğüne sahip ve 4,8 mm’den 0,48mm’ye kadar farklı çaplarda numunelerle gerçekleştirilen mikro-basma deneyleri ile elde edilen akma eğrileri Şekil 3.26’da gösterilmiştir [1].



**Şekil 3.26.** 79  $\mu\text{m}$  tane büyüklüğüne sahip çeşitli çaplardaki CuZn15 alaşımının mikro basma deneyine ait akma eğrileri [1].

Daha önce belirtildiği gibi, bir malzemenin belli tane büyüklüğü ve numune boyutundaki akma eğrisi biliniyorsa, denklem 2.12 kullanılarak, bu tane boyutu için iç tanelerin akma eğrisi (çok kristalli makro boyuttaki akma eğrisi) hesaplanabilir. İç tanelerin akma eğrisinin hesaplanmasıyla, bu malzemenin aynı tane büyüklüğünde farklı boyutlardaki numunelere ait akma eğrileri denklem 2.11 kullanılarak hesaplanabilir. Tane büyüklüğü ve numune çapı bilindiğinden, en büyük çaptaki numuneye ait yüzey tabakası oranı  $\alpha$  denklem 2.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan yüzey tabakası oranı ve en büyük çaplı numunelere ait akma gerilmesi değerlerinin denklem 2.12’de yerine yazılmasıyla, bu tane büyüklüğü için, iç tanelerin akma gerilmesi değerleri belirli gerçek birim şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Sonrasında, hesaplanan iç tanelerin akma gerilmesi değerleri ve ilgili numune çapına ait yüzey tabakası oranı  $\alpha$  değeri denklem 2.10’da yerine yazılarak, her numune çapına ait akma gerilmesi değerleri, belirli gerçek birim şekil değiştirme değerlerinde, hesaplanmıştır. Hesaplanan ve deneysel akma eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 3.27’de görülmektedir



**Şekil 3.27.** CuZn15 alaşımından aynı tane büyüklüğüne sahip farklı boyutlardaki numunelerin deneysel ve hesaplanan akma gerilmesi eğrilerinin karşılaştırılması.

İç tanelerin akma gerilmesi değerleri en büyük çaplı numunenin akma eğrisi kullanılarak hesaplandığından, en büyük çaplı numune için hesaplanan ve deneysel akma eğrileri doğal olarak birebir örtüşmektedir. Ayrıca daha küçük çaptaki numunelerin deneysel ve hesaplanan akma eğrileri birbirlerine oldukça yakın olup basma deneyi verilerine benzer şekilde hesaplanan ortalama hata oranları Tablo 3.9’da görülmektedir.

**Tablo 3.5.** Engel tarafından yapılan çalışmadaki deney sonuçları ile modele göre hesaplanan eğriler arasındaki hata oranı değerleri.

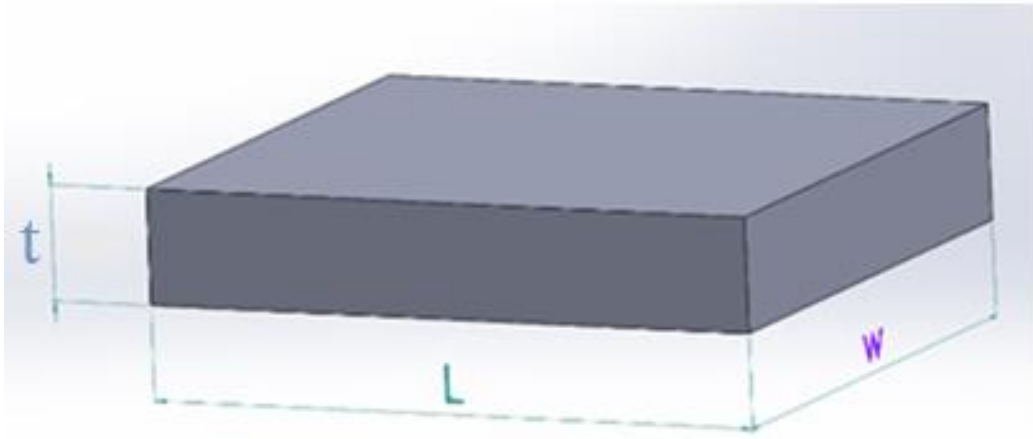
Numune çapı (mm)	Ortalama Hata oranı (%)
4	-
2	1,7
1	3,4
0,48	5,6

Tablo incelendiğinde referans boyuttan (iç tanelerin akma eğrisinin hesaplandığı en büyük boyutlu numune eğrisi) uzaklaştıkça hata oranının lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir. Tüm eğrilere ait hata oranlarının ortalaması olan genel hata oranı ise % 3,56 olarak hesaplanmıştır.

## 4. MİKRO-EKSTRÜZYON DENEYLERİ VE BENZEŞİMLERİ

### 4.1. Mikro-ekstrüzyon Deneyleri

Mikro şekillendirme uygulamaları için geliştirilen yeni malzeme modelinin mikro-şekillendirme işlem benzeşimlerinde kullanılabileceğini göstermek amacıyla mikro-ekstrüzyon deneyleri uygulanmıştır. Numune boyutunun ekstrüzyon kuvvetine etkisini incelemek amacıyla, 0,9 mm ve 2 mm kalınlığa sahip kütükler, 30° yarı kalıp açısına sahip kalıplar kullanılmasıyla ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuştur. Düzlem birim şekil değiştirme şartlarına benzer bir deformasyon durumu oluşturabilmek için, dikdörtgen kesitli kütükler (numuneler) kullanılmıştır. Mikro-ekstrüzyon deneylerinde kullanılan kütük şematik olarak Şekil 4.1’de gösterilmiş ve Tablo 4.1’de kütük boyutları da verilmiştir. Numuneler soğuk haddelenerek üretilmiş CuZn30 pirincinden talaşlı imalat ile çıkarılmış ve 500°C sıcaklıkta bir saat süreyle tavlamaştır. Metalografik inceleme sonucu 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki numuneler için ortalama tane büyüklükleri sırasıyla 45  $\mu\text{m}$  ve 50,4  $\mu\text{m}$  olarak tespit edilmiştir.

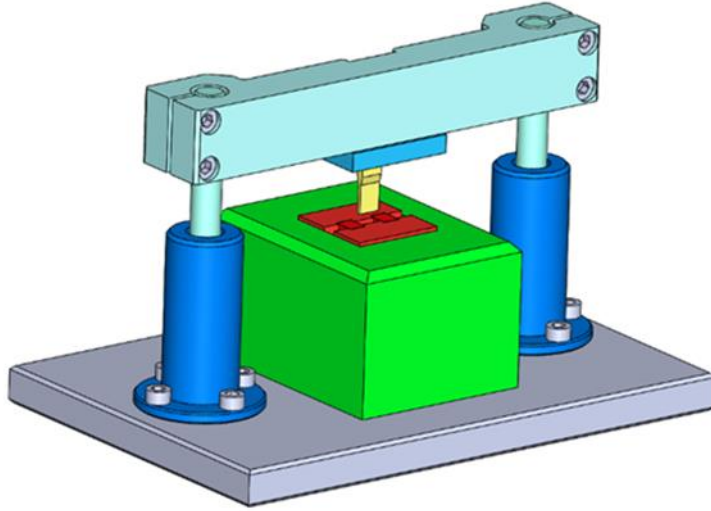


**Şekil 4.1.** Dikdörtgen kesitli Mikro-ekstrüzyon deney kütüklerinin şematik gösterimi.

**Tablo 4.1.** Mikro-ekstrüzyon kütüklerinin boyutları.

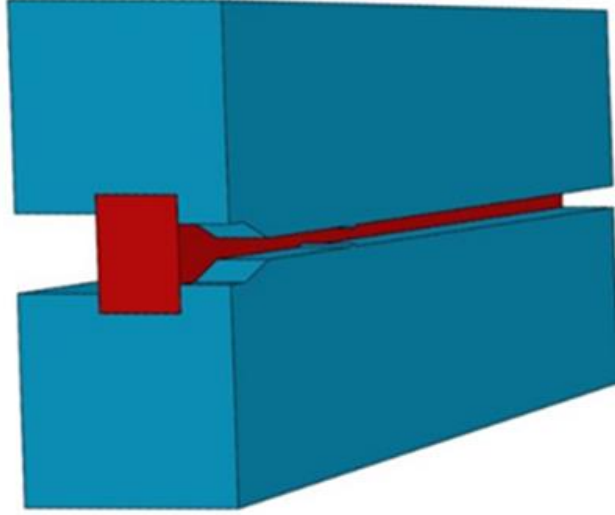
t (mm)	L (mm)	w (mm)
2	11	10.1
0.9	5.4	5.1

Mikro-ekstrüzyon deneyleri için Şekil 4.2’de şematik olarak gösterilen ileri yönde-mikro-ekstrüzyon aparatları tasarlanmış ve üretilmiştir.

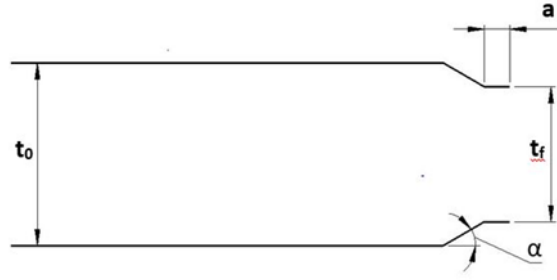


**Şekil 4.2.** Montaj halindeki Mikro-ekstrüzyon aparat setinin şematik görünümü.

Şekil 4.3 ve 4.4’te mikro-ekstrüzyon kalıplarının görünümü şematik olarak görülmektedir. Şekillerde şematik olarak gösterilen deney kalıpları tel erozyon yöntemiyle üretilmiştir.



**Şekil 4.3.** Mikro-ekstrüzyon kalıbı kesit görünümü.



**Şekil 4.4.** Mikro-ekstrüzyon kalıbı ölçüleri şematik görünümü.

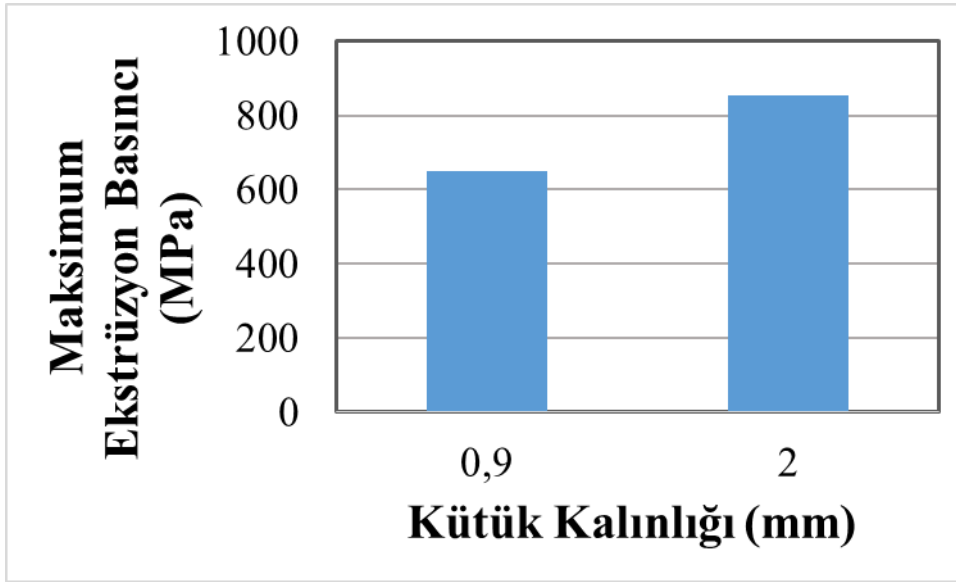
Tablo 4.2’de boyutları özetlenen iki ekstrüzyon kalıbı için de ekstrüzyon oranı 1.33’tür.

**Tablo 4.2.** Mikro-ekstrüzyon işlemlerinde kullanılan kalıpların ölçüleri.

$t_o$ (mm)	$t_f$ (mm)	$\alpha_k$	$a$ (mm)
2.1	1.58	30°	0.4
1	0.75	30°	0.2

Mikro-ekstrüzyon deneyleri de mikro-basma deneylerinin gerçekleştirildiği Shimadzu çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Kuru sürtünme şartlarında yapılan mikro ekstrüzyon deneylerinde 0,9 mm ve 2 mm kalınlığındaki numuneler için ekstrüzyon deneylerinde koç hızı orantısal olarak sırasıyla ve 2,25 mm/dak ve 5 mm/dak olarak belirlenmiştir.

Mikro-ekstrüzyon deneyleri neticesinde kuvvet-deplasman eğrileri elde edilmiş ve her ekstrüzyon işlemi için en büyük ekstrüzyon kuvveti belirlenmiştir. Sonrasında ortalama en büyük ekstrüzyon kuvveti her iki ekstrüzyon boyutu için de hesaplanmıştır. 0,9 mm ve 2 mm kalınlığındaki kütükler için ortalama en büyük ekstrüzyon kuvveti sırasıyla 3310 N ve 18090 N olarak hesaplanmıştır. 6 deneyin ortalaması alınarak ortalama en büyük ekstrüzyon kuvveti hesaplanmıştır. Her iki ekstrüzyon boyutuna ait en büyük ekstrüzyon kuvvetinin kıyas edilebilmesi için, ortalama en büyük ekstrüzyon kuvvetleri kovan kesit alanına (kovan kalınlığı ve genişliğinin çarpımı) bölünmüş ve maksimum ekstrüzyon basınçları bulunmuştur. Her iki ekstrüzyon boyutu için maksimum ekstrüzyon basıncı Şekil 4.5'te karşılaştırılmıştır.



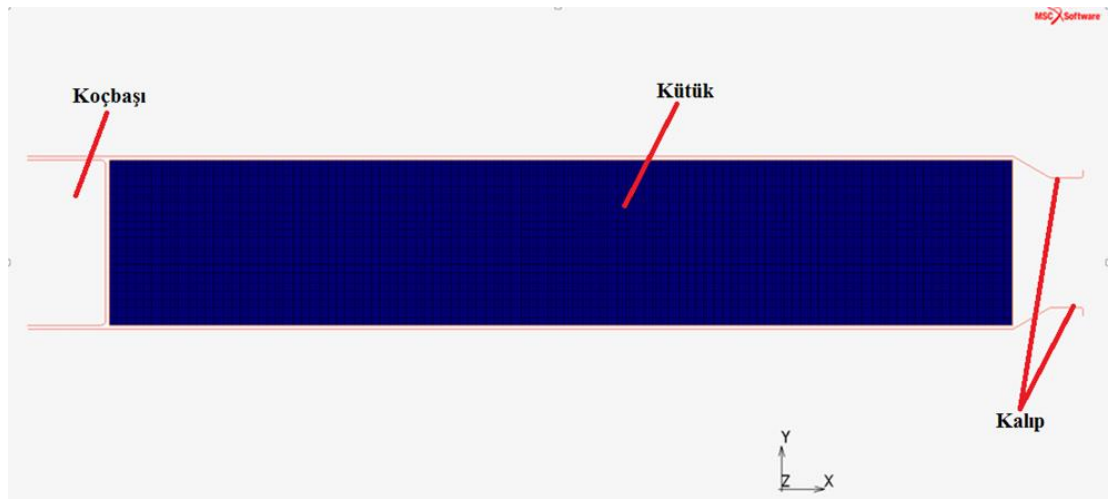
**Şekil 4.5.** 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki numunler için normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetinin karşılaştırılması.

0,9 mm ve 2 mm kalınlığındaki numuneler için en büyük ekstrüzyon basıncı sırasıyla 649 MPa ve 852,9 MPa'dır. Beklendiği gibi, en büyük ekstrüzyon basıncı daha küçük boyutlu ekstrüzyon için daha düşüktür. Bu netice küçük boyutlu numunelerin akma gerilmelerinin daha düşük olduğu mikro-basma deney sonuçları ile uyumludur. Bununla birlikte mikro ekstrüzyon kütükleri kovan hacminin tamamen doldurmamaktadır, kovanlarla kütükler arasında çok az bir boşluk vardır. Bu boşluk her iki ekstrüzyon boyutu için 0,05 mm.dir. Büyük olanla kıyaslandığında, küçük kütüğün kovan hacminde kapladığı alan oransal olarak daha azdır. Küçük kütüklerin maksimum ekstrüzyon basıncının daha küçük olmasının diğer bir sebebi de budur.



## 4.2. Mikro-ekstrüzyon Benzeşimleri

Geliştirilen yeni malzeme modelini doğrulamak için MSC Marc yazılımı kullanılarak mikro- ekstrüzyon deneylerinin dijital ortamda sonlu elemanlar metodu ile simülasyonu yürütülmüştür. Sonlu elemanlar analizi için oluşturulan model Şekil 4.6'da görülmektedir. Düzlem birim şekil değişimi durumu kabulü yapılarak (plane strain) 4 noktalı 4 kenarlı (quadrilateral) eleman tipi kullanılarak 2 boyutlu analiz gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde düzgün geometri mesh atılıp (fine mesh) kütük kalınlığı boyunca 80 parçaya bölünmüştür. 0.9 mm ve 2 mm kalınlığındaki kütükler için oluşturulan modeller sırasıyla toplamda 35200 ve 38400 elemana sahiptir.

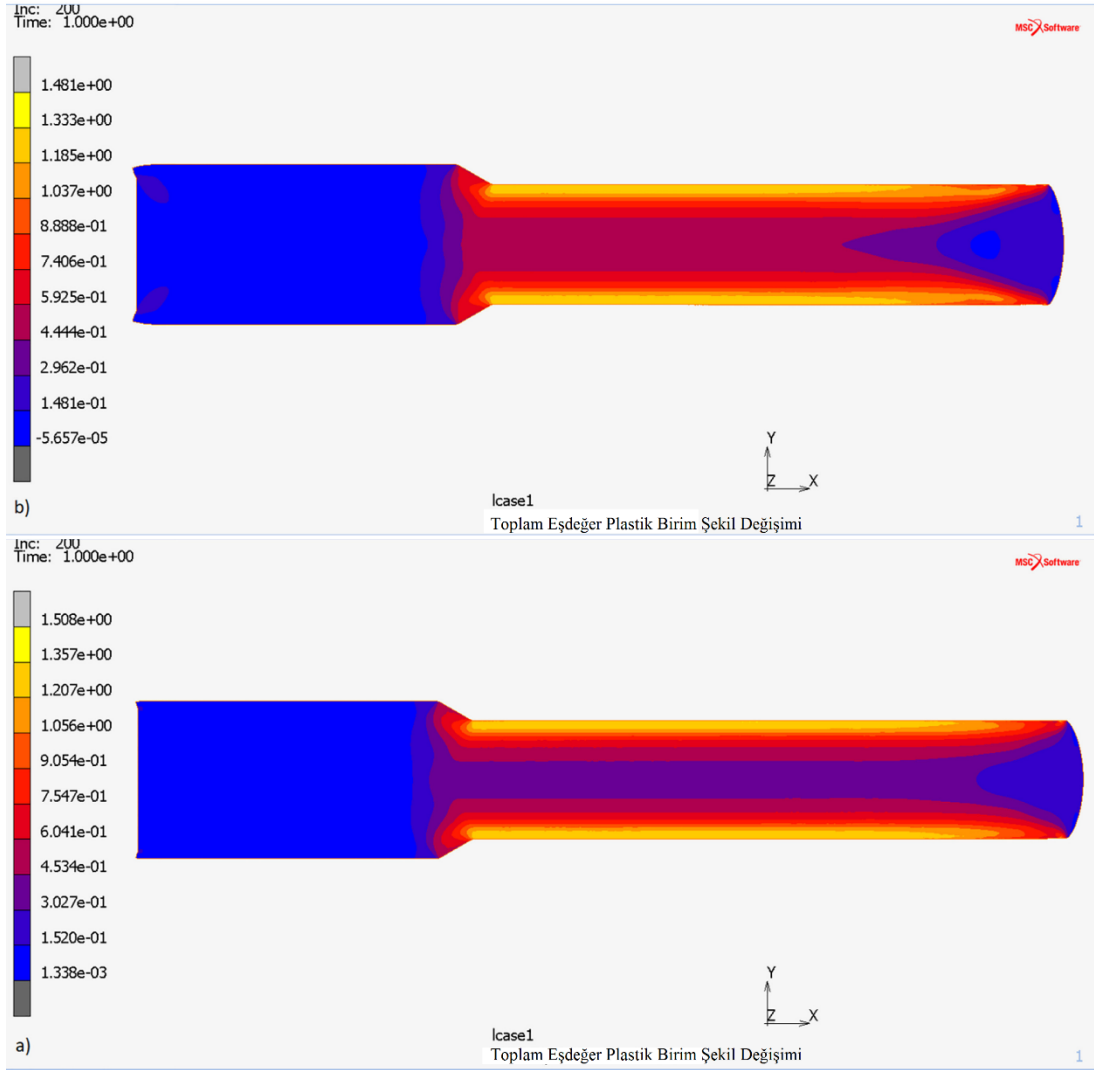


**Şekil 4.6.** 2 mm'lik kütüklerin sonlu elemanlar yöntemiyle benzeşimlerinde kullanılan model.

Şekil 4.6'da görülen model 4 ayrı parçadan oluşmaktadır. Bunlar hareketli koçbaşı, kovan, kütük ve kalıptır. Kütük hariç diğer tüm parçalar rijit katı olarak modellenmiştir. Kütük ile diğer rijit geometriler (koçbaşı kovan kalıp) arasında coulomb sürtünme şartları tanımlanmıştır. Sürtünme katsayısı 0.12 alınmıştır. Bu değer Krishnen ve ark. tarafından yapılan bir çalışmayla uyumlu olacak şekilde seçilmiştir. Bu çalışmada 0.76 mm.lik CuZn30 malzemenin mikro-ekstrüzyon testlerinde maksimum kuvvete göre hesap yapıldığında sürtünme katsayısı 0.1, ekstrüzyona uğrayan pim uzunluğuna göre hesap yapıldığında ise sürtünme katsayısı 0.16 olarak bulunmuştur [32].

Mikro basma deneylerinde kullanılan numunelerin şekil ve boyutları ile mikro-ekstrüzyon deneylerinde kullanılan kütüklerin şekil ve boyutları birbirinden oldukça

farklıdır. Dolayısıyla mikro basma numuneleri ile kütüklerin yüzey tabakası oranları da birbirinden farklıdır. Bu sebeple yeni geliştirilen model kullanılarak mikro basma numuneleri için hesaplanan akma eğrileri mikro ekstrüzyon analizleri için kullanmak doğru sonuç vermeyecektir. Denklem 2.3 kullanılarak her iki kütük boyutu için yüzey tabakası oranı hesaplanmış, denklem 2.10'da yerine yazılarak kütükler için akma eğrisi hesaplanmıştır. Hesaplanan eğriler kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. 0.9 mm ve 2mm kalınlığındaki kütükler için gerçekleştirilen analizler neticesinde elde edilen plastik gerinim (birim şekil değişimi) dağılımı Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Beklendiği gibi maksimum eşdeğer plastik birim şekil değiştirme bölgeleri, aşırı kayma deformasyonunun görüldüğü yüzey bölgelerindedir. Analizler tamamlandıktan sonra, yük-deplasman eğrileri oluşturulmuş ve her iki kütük boyutu için maksimum ekstrüzyon kuvveti değerleri elde edilmiştir. Maksimum ekstrüzyon kuvveti değerleri kovan kesit alanına bölünerek her iki boyuttaki mikro-ekstrüzyon işlemi için maksimum ekstrüzyon basıncı hesaplanmıştır.

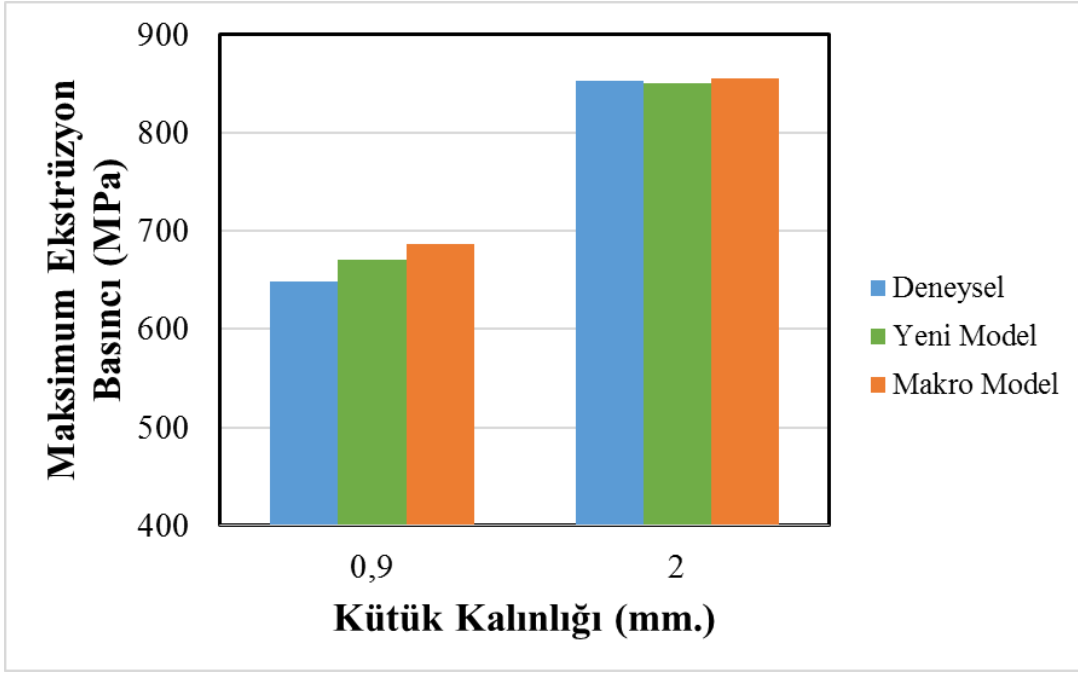


**Şekil 4.7.** a) 2 mm and b) 0.9 mm kalınlığındaki kütüklerin benzeşiminde ekstrüzyon işlemi sonrasında toplam eşdeğer plastik birim şekil değiştirme değerlerindeki dağılım.

Ayrıca makro boyut için geçerli geleneksel malzeme modeli kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan mikro basma deneyleri içinde çok-kristal makro boyutlu malzemenin akma eğrisine en yakın eğri, en büyük boyutlu numunenin akma eğrisidir. Bu sebeple sonlu elemanlar analizlerinde 500 °C’de tavllanmış en büyük boyutlu mikro basma numuneleriyle gerçekleştirilen mikro basma deneylerinden elde edilen ortalama akma eğrisi kullanılmış ve bir önceki ile aynı yol izlenerek maksimum ekstrüzyon basıncı hesaplanmıştır.

Deneysel mikro-ekstrüzyon sonuçlarıyla ve geleneksel malzeme modeli kullanılarak ve yeni geliştirilen malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri ile hesaplanan maksimum ekstrüzyon basınçları Şekil 4.8’de karşılaştırılmıştır. Büyük boyutlu 2 mm kalınlığa sahip kütük için yeni geliştirilen

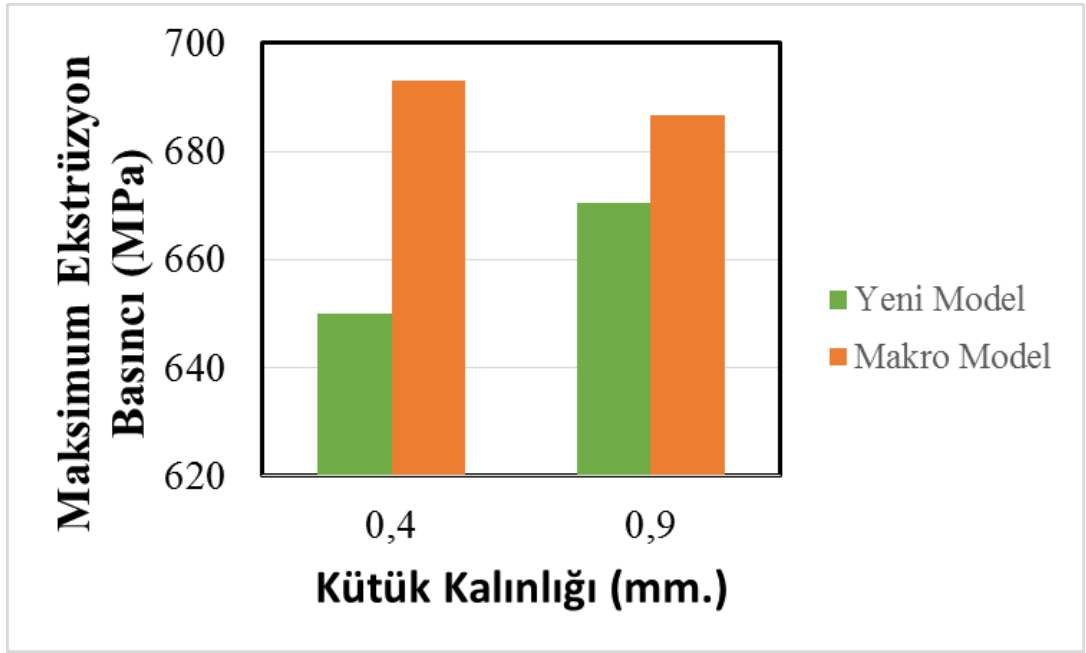
malzeme modeli ve geleneksel makro malzeme modeli kullanılarak tahmin edilen hesaplamalı tahmini sonuçlar, deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu olup makro model için hata oranı % 0,22; yeni geliştirilen modele göre hata oranı % 0,27'dir. Makro model maksimum kuvveti yukarıda yeni model ise daha aşağıda tahmin etmiştir. Bununla beraber, küçük boyutlu 0.9 mm kalınlığındaki kütük için yeni geliştirilen malzeme modeline göre hesaplanarak tahmin edilen sonuçlar, geleneksel modelle tahmin edilen sonuçlara kıyasla deneysel sonuçlara daha yakındır. Makro modelde hata oranı %5,8 iken yeni geliştirilen modelde hata oranı %3,3 seviyesindedir. Böylelikle yeni geliştirilen malzeme modelinin küçük boyutlu kütüğün maksimum ekstrüzyon basıncını daha iyi tahmin etmesi, yeni geliştirilen malzeme modelinin mikro ekstrüzyon gibi mikro şekillendirme uygulamalarının sonlu elemanlar analizlerinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini doğrulamıştır.



**Şekil 4.8.** 2 mm ve 0.9 mm kalınlığındaki kütüklerin tahmini ve deneysel olarak elde edilen maksimum ekstrüzyon basıncı değerlerinin karşılaştırılması.

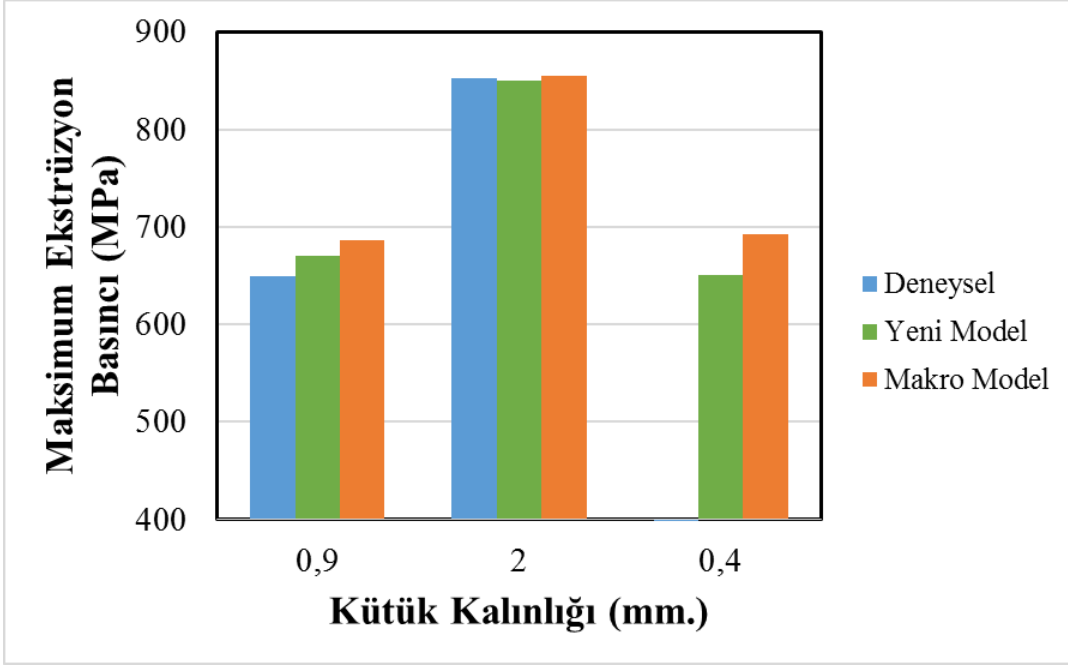
0.9 mm kalınlığındaki numune için, geleneksel makro malzeme modeli ve yeni geliştirilen malzeme modeli kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle tahmin edilen maksimum ekstrüzyon basınçları arasındaki fark büyük olmadığından; kalınlığı daha küçük olan, 0.4 mm kalınlığındaki bir kütük için her iki malzeme modeline göre sonlu elemanlar simülasyonları gerçekleştirilmiştir. 0.4 mm kalınlığındaki kütüğün yeni geliştirilen malzeme modeline göre sonlu elemanlar analizinde kullanılan akma eğrisi, numune boyutu ve 50,4 µm tane boyutuna göre denklem 2.11 kullanılarak hesap

edilmiştir. Geleneksel makro modelde ise önceden olduğu gibi 500 °C’de tavllanmış en büyük boyutlu mikro basma numunesinin ortalama akma eğrisi kullanılmıştır. 0.9 mm kalınlığındaki kütüğün sonlu elemanlar analizinde uygulanan koşulların aynısı 0.4 mm kalınlığındaki kütük için de uygulanmıştır. 0.9 ve 0.4 mm kalınlığındaki kütüklerin, geleneksel makro malzeme modeli ve yeni geliştirilen malzeme modeli kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle tahmin edilen maksimum ekstrüzyon basınçları şekil 4.9’da karşılaştırılmıştır. 0,9 mm. boyutu için iki model arasındaki fark %2,4 iken 0,4 mm. boyutu için fark %6,7 seviyesine çıkmıştır.



**Şekil 4.9.** 0.4 ve 0.9 mm kalınlığındaki kütüklerin geleneksel makro model ve geliştirilen yeni model kullanılarak elde edilen maksimum ekstrüzyon basıncı değerlerinin karşılaştırılması.

Grafikte görüldüğü üzere, kütük boyutu küçüldükçe geleneksel makro modele göre tahmin edilen ve yeni geliştirilen modele göre tahmin edilen maksimum ekstrüzyon basınçları arasındaki fark artmaktadır.



**Şekil 4.10.** 2 mm ve 0.9 mm kalınlığındaki kütüklerin tahmini ve deneysel olarak elde edilen maksimum ekstrüzyon basıncı değerleri ile 0,4 mm.lik kütük için tahmini sonuçların karşılaştırılması.

Şekil 4.10'da daha genel bir kıyaslama imkanı olması için 2 ve 0,9 mm.lik kütük kalınlığı için deneysel ve analiz sonuçları 0,4 mm. kalınlık için de analiz sonuçları aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmada mikro-mezo boyutta bir malzemenin deformasyon davranışının modellenmesi için yüzey tabakası modeli ve Hall-Petch bağıntısı bir arada kullanılmıştır. Yüzey tanelerinin deformasyon davranışının modellenmesi için Sachs modeli kullanılmıştır. Sachs modeli kullanılarak yüzey tanelerindeki oryantasyon farklılıkları hesaba katılmıştır. Ayrıca genelleştirilmiş Hall-Petch bağıntısına Sachs oryantasyon faktörünün eklenmesiyle yüzey tanelerindeki tane sınırlarının yüzey tanelerinin akma gerilmesine etkisi de hesaba katılmıştır. Aynı zamanda hem tane büyüklüğünün hem de numune boyutunun, malzemenin akma gerilmesi üzerindeki etkisini hesaba katan yeni malzeme modelini doğrulamak amacıyla farklı boyut ve tane büyüklüğüne sahip CuZn30 numunelerle mikro basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. En büyük boyutlu numunelere ait üç akma eğrisinin kullanılmasıyla deney malzemesine ait Hall-Petch sabitleri hesaplanmıştır. Daha sonra geliştirilen yeni model sayesinde farklı numune boyutu ve tane büyüklüklerine sahip CuZn30 numunelere ait bütün deneysel akma eğrileri tahmin edilmiştir. Hesaplanan tahmini eğriler ile deneysel eğriler arasında ortalama % 2,68 hata payı olduğu görülmüş böylece geliştirilen yeni modelin geçerliliği doğrulanmıştır. Ayrıca, literatürde karşılaşılan önceki çalışmalara ait 2 farklı malzemenin deneysel akma eğrileri de benzer şekilde bu tez kapsamında geliştirilen modelin kullanılmasıyla teorik olarak sırasıyla ortalama %3,45 ve %3,56 hata oranıyla hesaplanmış ve literatürdeki deneysel eğrilerle tahmini eğriler arasındaki uyum farklı alışımlar için de modelin etkinliği göstermiştir.

Alternatif olarak, bir malzemede belirli bir tane boyutu için akma eğrisinin bilinmesi durumunda, yeni geliştirilen malzeme modeli, Hall-Petch sabitlerinin hesaplanmasına ihtiyaç duymadan, o malzemede söz konusu tane boyutu için, her hangi farklı bir numune boyutuna ait akma eğrisinin teorik olarak hesaplanması imkanını sunmaktadır.

İlave olarak, mikro ekstrüzyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilen sonlu elemanlar yöntemi simülasyonları aracılığıyla geliştirilen yeni modelin bir mikro-

şekillendirme işlemi için kullanılabilirliği gösterilmiştir. 2 ve 0.9 mm kalınlığında dikdörtgen kesitli kütükler ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuştur. Küçük boyutlu kütükte, yüzey tabakası modeliyle açıklanan boyut etkisiyle uyumlu olarak daha düşük maksimum ekstrüzyon basıncı gözlenmiştir. Sonrasında geliştirilen yeni model kullanılarak mikro ekstrüzyon işlemlerinin sonlu elemanlar simülasyonları gerçekleştirilmiş, deney sonuçları ve simülasyon sonuçları arasında ortalama %3 hata payıyla makul bir uyum olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle geliştirilen yeni modelin mikroşekillendirme benzeşimlerinde kullanılabilirliği mikro ekstrüzyon yöntemi için gösterilmiştir.



## KAYNAKLAR

- [1 ] Jain, V.K., *Micromanufacturing Process*, CRC Press, 2013.
- [2] Vollersten, F., HU, Z., Niehoff, H.,S., Theiler, C, “State of the art in micro forming and investigations in micro deep drawing”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, No. 1-3, pp. 70-79,2004.
- [3] Engel U, Eckstein R. Microforming—from basic research to its realization. *J Mater Process Technol* 2002; 125–126: 35–44. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00415-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00415-6).
- [4] Kals TA, Eckstein R. Miniaturization in sheet metal working. *J Mater Process Technol* 2000; 103: 95-101. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00391-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00391-5).
- [5] Justinger H, Hirt G. Estimation of grain size and grain orientation influence in microforming processes by Taylor factor considerations. *J Mater Process Technol* 2009; 209; 2111-2121. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.05.008>.
- [6] Raulea LV, Goijaerts AM, Govaert LE, Baaijens FPT. Size effects in the processing of thin metal sheets. *J Mater Process Technol* 2001; 115: 44-8. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00770-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00770-1)
- [7] Chan WL, Fu MW, Lu J. The size effect on micro deformation behaviour in micro-scale plastic deformation. *Mater Des* 2011; 32: 198-206. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.011>.
- [8] Chan WL, Fu MW, Lu J, Liu JG. Modeling of grain size effect on micro deformation behavior in micro-forming of pure copper. *Mater Sci Eng A* 2010; 527: 6638-6648. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.009>.
- [9] Parasiz SA, Kinsey B, Krishnan N, Cao J, Li M. Investigation of deformation size effects during microextrusion. *J Manuf Sci E* 2007; 129: 690-7. <https://doi.org/10.1115/1.2738107>.
- [10] Geißdörfer S, Engel U, Geiger M. FE-simulation of microforming processes applying a mesoscopic model. *Int J Mach Tools Manuf* 2006; 46: 1222–6. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.01.019>.
- [11] Yalçın M. (2014). CuZn30 pirincinin mikro-ekstrüzyon işleminde boyut etkilerinin incelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- [12] Gao Z, Peng L, Yi P, Lai X. Grain and geometry size effects on plastic deformation in roll-to-plate micro/meso-imprinting process. *J Mater Process Technol* 2015; 219: 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.005>.
- [13] Gau JT, Principe C, Wang J. An experimental study on size effects on flow stress and formability of aluminum and brass for microforming. *J Mater Process Technol* 2007; 184: 42–6. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.003>.

- [14] Chan WL, Fu MW, Yang B. Experimental studies of the size effect affected microscale plastic deformation in micro upsetting process. *Mater Sci Eng A* 2012; 534: 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.11.083>
- [15] Kals, T.A., Eckstein R. 2000. “Miniaturization in sheet metal working”, *J Mater Process Technol*, 103, 95-101.
- [16] Kim GY, Ni J, Koc M. Modeling of the size effects on the behavior of metals in microscale deformation processes. *J Manuf Sci E* 2007; 129: 470–6. <https://doi.org/10.1115/1.2714582>.
- [17] Shen Y, Yu H, Ruan X. Discussion and prediction on decreasing flow stress scale effect. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2006; 16: 132-6. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(06\)60023-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(06)60023-X).
- [18] Lai X, Peng L, Hua P, Lan S, Ni J, Material behavior modelling in micro/meso-scale forming process with considering size/scale effects. *Comput Mater Sci* 2008; 43: 1003–9. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.02.017>.
- [19] Peng L, Lai X, Lee H, Song J, Ni J. Analysis of micro/mesoscale sheet forming process with uniform size dependent material constitutive model. *Mater Sci Eng A* 2009; 526: 93–9. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.06.061>.
- [20] Liu JG, Fu MW, Chan WL. A constitutive model for modeling of the deformation behavior in microforming with a consideration of grain boundary strengthening. *Comput Mater Sci* 2012; 55: 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.11.018>.
- [21] Li WT, Fu MW, Shi SQ. Study of deformation and ductile fracture behaviors in micro-scale deformation using a combined surface layer and grain boundary strengthening model. *Int J Mech Sci* 2017; 131–132: 924–937. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.07.046>.
- [22] Wang JL, Fu MW, Shi SQ. Influences of size effect and stress condition on ductile fracture behavior in micro-scaled plastic deformation. *Mater Des* 2017; 131: 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.06.003>.
- [23] Xu Z, Peng L, Bao E, Size effect affected springback in micro/meso scale bending process: Experiments and numerical modeling. *J Mater Process Technol* 2018; 252: 407–420. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.040>.
- [24] Kocks UF. The Relation between Polycrystal Deformation and Single-Crystal Deformation. *Metall Mater Trans* 1970; 1: 1121-1143. <https://doi.org/10.1007/BF02900224>.
- [25] Meyers MA, Ashworth E. A model for effect of grain size on the yield stress of metals. *Philos Mag A* 1982; 46: 737–759. <https://doi.org/10.1080/01418618208236928>.
- [26] Leffers T. On the misfit between the grains in a deformed sachs polycrystal and its relation to the inhomogeneous deformation of real polycrystals. *Scripta Metallurgica* 1975; 9: 261-4. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(75\)90203-3](https://doi.org/10.1016/0036-9748(75)90203-3).
- [27] Asaro R, Lubarda V. *Mechanics of solids and materials*. Cambridge University Press; 2006.

- [28] Armstrong RW, Codd I, Douthwaite RM, Petch NJ. Plastic Deformation of Polycrystalline Aggregates. *Philos Mag* 1962; 7: 45–58. <https://doi.org/10.1080/14786436208201857>
- [29] Zeng JF. Fundamental research on size-effect in microforming. Master's Thesis, National Taiwan University, 2003.
- [30] Yeh FH, Li CL, Lu YH. Study of thickness and grain size effects on material behavior in micro-forming. *J Mater Process Technol* 2008; 201: 237-241. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.138>
- [31] Yun W, Peilong D, Zhenying X, Hua Y, Jiangping W, Jingjing W. A constitutive model for thin sheet metal in micro-forming considering first order size effects. *Mater Des* 2010; 31: 1010-4. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.037>
- [32] Krishnan N, Cao J, Dohda K. Study of the Size Effect on Friction Conditions in Microextrusion-Part I: Microextrusion Experiments and Analysis. *Manuf Sci E* 2007; 129: 669-676. <https://doi.org/10.1115/1.238620>.

## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad :Yasin Kuddusi KUTUCU

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2013, Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Makine Tasarım ve İmalat

### MESLEKİ DENEYİM:

- 2010 yılından beri Sakarya Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Parasiz, S.A.; Kutucu, Y.K.; Karadag, O. 2021. On The Utilization Of Sachs Model İn Modeling Deformation Of Surface Grains For Micro/Meso Scale Deformation Processes, *Journal Of Manufacturing Processes* 68(1086), 1526-6125.

### DİĞER ESERLER:

- Kutucu, Y.K.; Kahraman Y.; Ogur A. 2014. Borlanmış Yüksek Alaşımli Çeliklerde Oluşan Artık Isıl Gerilmelerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi, SAÜ Fen Bilimleri Dergisi 18(3)