

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

**MİKRO ŞEKİLLENDİRMEDE YÜZEY TABAKASI  
MODELİNİN FARKLI TANE BOYUTLARINA GÖRE  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Onur KARADAĞ**

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

**Mart 2019**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKRO ŞEKİLLENDİRMEDE YÜZEY TABAKASI  
MODELİNİN FARKLI TANE BOYUTLARINA GÖRE  
İNCELENMESİ**

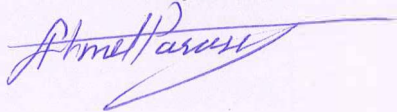
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Onur KARADAĞ**

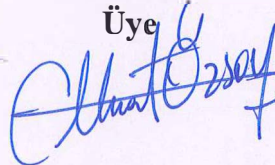
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT

Bu tez 21.03.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

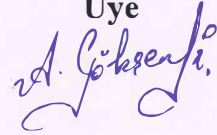
**Dr. Öğr. Üyesi Sunal  
Ahmet PARASIZ  
Jüri Başkanı**



**Doç. Dr. Murat  
ÖZSOY  
Üye**



**Doç. Dr. Ali  
GÖKŞENLİ  
Üye**



## BEYAN

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

Onur KARADAĞ

21.03.2019



## TEŞEKKÜR

Bu tez Tübitak“115M653” nolu “Mikroekstrüzyon Benzeşimleri İçin Bir Malzeme Bünye Modelinin Oluşturulması” 3501 Kariyer Geliştirme Programı tarafından desteklenerek oluşturulmuştur. Numune hazırlama sürecinde yardımını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Murat Özsoy ve Sakarya Üniversitesi Teknikerlerinden Metin Günay’a teşekkür ederim. Deneysel yöntemlerin uygulamasında yardımlarını esirgemeyen İstanbul Teknik Üniversitesi akademisyenlerinden Prof. Dr. Şafak Yılmaz , Doç Dr. Turgut Gülmez, Dr. Öğr. Üyesi Canan Gamze Güteryüz Parasız ve Arş. Gör. Raşid Ahmed Yıldız’a teşekkür ederim. Sonlu Elemanlar Yöntemi üzerine yapılan çalışmalar için yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi akademisyenlerinden Prof. Dr. Mehmet Fırat ve Araştırma Görevlisi Arda Toros Akşen’e teşekkür ederim.

Benden bilgilerini ve tecrübelerini eksik etmeyen Değerli tez Hocam Dr. Öğr. Üyesi Sunal Ahmet Parasız’a en kalbi teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu süreçte bana her konuda destek olan Değerli Hocam Doç. Dr. Hüseyin Pehlivan’a teşekkür ederim.

Son olarak beni bu yaşa kadar türlü emeklerle büyütmüş ve bir yerlere gelmemi sağlamış aileme en kalbi duygularıyla teşekkür ederim.

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım...

## İÇİNDEKİLER

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| TEŞEKKÜR .....                        | i  |
| İÇİNDEKİLER .....                     | ii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ ..... | iv |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                | v  |
| TABLOLAR LİSTESİ .....                | ix |
| ÖZET .....                            | x  |
| SUMMARY .....                         | xi |
| BÖLÜM 1.                              |    |
| GİRİŞ .....                           | 1  |
| BÖLÜM 2.                              |    |
| MİKRO ŞEKİLLENDİRME .....             | 4  |
| 2.1. Tane Boyutu Etkisi.....          | 4  |
| 2.2. Numune Boyutu Etkisi.....        | 8  |
| BÖLÜM 3.                              |    |
| MATERYAL VE YÖNTEM.....               | 23 |
| 3.1. Numune Hazırlama Süreci.....     | 23 |
| 3.2. Mikro Basma Deneyleri.....       | 25 |
| BÖLÜM 4.                              |    |
| DENEYSEL SONUÇLAR.....                | 31 |

|   |    |
|---|----|
| BÖLÜM 5.  |    |
| MİKRO-BOYUTTA MALZEME DEFORMASYONUNUN<br>MODELLENMESİ İÇİN YÜZEY TABAKASI MODELİNİN YENİ BİR<br>ŞEKİLDE UYGULANMASI ..... | 50 |
| BÖLÜM 6.  |    |
| SONLU ELEMEN ANALİZLERİNİN YAPILMASI .....  | 51 |
| BÖLÜM 7.  |    |
| SONUÇLAR .....  | 61 |
| 7.1. Gelecekteki Çalışmalar .....   | 63 |
| KAYNAKLAR .....   | 64 |
| ÖZGEÇMİŞ .....  | 65 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|                 |  |
|-----------------|--|
| $\sigma_0$      | : Sürtünme gerilmesi   |
| $k$             | : Hall-Petch eğimi   |
| $d$             | : Numunenin ortalama tane boyutu                             |
| $\varepsilon$   | : Basma sonucu birim şekil değişimi                          |
| $\sigma$        | : Akma gerilmesi   |
| $\mu$           | : Yüzey tanelerin tüm kesit içinde kapladıkları alanın oranı |
| $\sigma_i$      | : İç tabakadaki tanelerin akma gerilmesi                     |
| $\sigma_y$      | : Yüzey tanelerinin akma gerilmesi                           |
| D               | : Numune çapı  |
| F               | : Basma kuvveti  |
| $A_0$           | : İlk kare kesit alanı                                       |
| $\Delta h$      | : Basma sonucu numune yüksekliğindeki değişim                |
| $h_0$           | : Numunenin ilk yüksekliği                                   |
| $\sigma_g$      | : Gerçek gerilme   |
| $\varepsilon_g$ | : Gerçek birim şekil değişimi                                |
| $\sigma_s$      | : Yüzey tanelerinin akma gerilmesi                           |
| E               | : Elastisite modülü  |
| V               | : Poisson oranı  |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 2.1. Mikro şekillendirme ile üretilmiş çeşitli metal komponentlerin bir fotoğrafı [3]..... 4
- Şekil 2.2. a) Dairesel kesitli b) Dikdörtgen kesitli numunede iç ve yüzey tanelerinin şematik olarak gösterilmesi[4] ..... 7
- Şekil 2.3. Yüzey tanelerinin kesitte kapladıkları alanın numune çapı ve tane boyutuna göre değişimini gösteren mikroyapı fotoğrafları [4]..... 9
- Şekil 2.4. Farklı çapa sahip basma numuneleriyle gerçekleştirilen deneylerden elde edilen akma eğrileri [7]. Numune çapları grafikte belirtilmiştir..... 10
- Şekil 3.1. Farklı boyutlardaki mikro basma numunelerini gösteren bir fotoğraf..... 12
- Şekil 3.2. Metalografik incelemede kullanılan zımparalama cihazı ..... 12
- Şekil 3.3. Metalografik incelemede kullanılan elektrolitik parlatma ve dağlama cihazı ..... 13
- Şekil 3.4. 500°C’de tavllanmış kare kesit kenarı a) 3,2 mm b) 2 mm c) 1,5 mm ve d) 1 mm olan numunelere ait mikroyapı fotoğrafları..... 14
- Şekil 3.5. 650°C’de tavllanmış kare kesit kenarı a) 3,2 mm b) 2 mm c) 1,5 mm ve d) 1 mm olan numunelere ait mikroyapı fotoğrafları..... 14
- Şekil 3.6. 700°C’de tavllanmış kare kesit kenarı a) 3,2 mm b) 2 mm c) 1,5 mm ve d) 1 mm olan numunelere ait mikroyapı fotoğrafları..... 15
- Şekil 4.1. 700°C’de tavllanmış farklı boyutlarda olan 4 numuneye ait kuvvet-deplasman eğrileri. numune boyutları (kare kesit kenar uzunlukları) grafikte belirtilmiştir. .... 17
- Şekil 4.2. Kare kesit kenar uzunluğu 3,2 mm ve a) tane boyutu 43  $\mu m$  (500°C’de tavllanmış), b) tane boyutu 100,2 $\mu m$  (650°C’de tavllanmış), c) tane boyutu 205,8  $\mu m$  (700°C’de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrileri..... 19



- Şekil 4.3. Kare kesit kenar uzunluğu 2 mm 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 ..... 20
- Şekil 4.4. Kare kesit kenarı 1,5 mm 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..... 21
- Şekil 4.5. Kare kesit kenarı 1 mm 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..... 22
- Şekil 4.6. a) 500 °C b) 650 °C c) 700 °C sıcaklıkta tavllanmış numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin numune boyutuna göre karşılaştırılması. Numune boyutları (kare kesit kenar uzunlukları) ve tane boyutları grafiklerde belirtilmiştir. .... 23
- Şekil 4.6. a) 500 °C b) 650 °C c) 700 °C sıcaklıkta tavllanmış numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin numune boyutuna göre karşılaştırılması. Numune boyutları (kare kesit kenar uzunlukları) ve tane boyutları grafiklerde belirtilmiştir. (Devamı) ..... 24
- Şekil 4.7. Kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması. Tavlama sıcaklıkları ve tane boyutları grafiklerde belirtilmiştir. .... 25
- Şekil 4.7. Kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması. Tavlama sıcaklıkları ve tane boyutları grafiklerde belirtilmiştir.(Devamı)..... 26
- Şekil 4.8. Kare kesit kenarı 3,2 mm olan kare kesitli en büyük boy numunelerde %0,2 akma dayanımının bir bölü karekök tane boyutuna göre değişimi ..... 29

|   |    |
|---|----|
| Şekil 5.1. 500°C’de tavllanmış, 3,2 mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm kare kesit kenarına sahip numunelerde, belirli birim şekil değiştirme değerleri için akma gerilmesinin yüzey tanelerinin kesitte kapladıkları alan oranına göre değişimi ..... | 32 |
| Şekil 5.2. 650°C’de tavllanmış 3,2 mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm kare kesit kenarına sahip numunelerde, belirli birim şekil değiştirme değerleri için akma gerilmesinin yüzey tanelerinin kesitte kapladıkları alan oranına göre değişimi .....  | 33 |
| Şekil 5.3. 700°C’de tavllanmış 3,2 mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm kare kesit kenarına sahip numunelerde, belirli birim şekil değiştirme değerleri için akma gerilmesinin yüzey tanelerinin kesitte kapladıkları alan oranına göre değişimi .....  | 33 |
| Şekil 5.4. 500°C’de tavllanmış kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numuneler için yüzey tabakası modeli ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması .....                       | 37 |
| Şekil 5.5. 650°C’de tavllanmış kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numuneler için yüzey tabakası modeli ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması .....                       | 40 |
| Şekil 5.6. 700°C’de tavllanmış kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numuneler için yüzey tabakası modeli ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen alma eğrilerinin karşılaştırılması .....                       | 42 |
| Şekil 6.1. Sonlu elemanlar analizleri için oluşturulan mikro-basma deney modeli....   | 44 |
| Şekil 6.2. Numune Modelinin kesit görünümü .....  | 45 |
| Şekil 6.3. Numune modeli meshli kesit görünümü .....  | 45 |
| Şekil 6.4. 500°C’de tavlanan a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde kesit görüntüden elde edilen eşdeğer gerilme değerleri dağılımı .....  | 47 |
| Şekil 6.5. 650°C’de tavlanan a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde kesit görüntüden elde edilen eşdeğer gerilme değerleri dağılımı .....  | 49 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 6.6. 700°C’de tavlanan a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde kesit görüntüden elde edilen eşdeğer gerilme değerleri dağılımı .....                               | 51 |
| Şekil 6.7. 500°C’de tavllanmış a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde deneysel ve sonlu elemanlar benzeşimleri ile elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması ..... | 53 |
| Şekil 6.8. 650°C’de tavllanmış a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde deneysel ve sonlu elemanlar benzeşimleri ile elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması ..... | 55 |
| Şekil 6.9. 700°C’de tavllanmış a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde deneysel ve sonlu elemanlar benzeşimleri ile elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması ..... | 57 |

## TABLolar LİSTESİ

|   |    |
|---|----|
| Tablo 3.1. Farklı numune boyutu ve tavlama sıcaklıkları için elde edilen tane boyutu değerleri.....   | 15 |
| Tablo 4.1. 500°C’de tavllanmış 4 farklı numune boyutu için belirli gerçek birim şekil değişimi değerlerine karşılık gerçek gelen gerilme değerleri.....                                   | 27 |
| Tablo 4.2. 650°C’de tavllanmış 4 farklı numune boyutu için belirli gerçek birim şekil değişimi değerlerine karşılık gelen gerçek gerilme değerleri.....                                   | 27 |
| Tablo 4.3. 700°C’de tavllanmış 4 farklı numune boyutu için belirli gerçek birim şekil değişimi değerlerine karşılık gelen gerçek gerilme değerleri.....                                   | 28 |
| Tablo 4.4. Kare kesit kenarı 3,2 mm olan farklı tane boyutlarına sahip en büyük boy numuneler için basma deneyleri ile elde edilen %0,2 akma dayanımı değerleri.....                      | 29 |
| Tablo 5.1. Basma deneylerinde kullanılan kare kesitli numunelerde yüzey tanelerinin oranı .....   | 31 |
| Tablo 5.2. 500°C, 650°C ve700°C ‘de tavlanan malzemeler için belirli gerçek birim şekil değiştirme değerlerinde hesaplanan yüzey tanelerinin ve iç tanelerin akma gerilme değerleri ..... | 34 |
| Tablo 5.3. 500°C’de tavllanmış ve kare kesit kenar 3,2mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm olan numuneler için oluşturulan yüzey tabakası modeli ile hesaplanan akma gerilmesi değerleri .....        | 35 |
| Tablo 5.4. 650°C’de tavllanmış ve kare kesit kenar 3,2mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm olan numuneler için oluşturulan yüzey tabakası modeli ile hesaplanan akma gerilmesi değerleri.....         | 36 |
| Tablo 5.5. 700°C’de tavllanmış ve kare kesit kenar 3,2mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm olan numuneler için yüzey tabakası modeli ile hesaplanan akma gerilmesi değerleri.....                     | 36 |

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Mikro Şekillendirme, Yüzey Tabaka Modeli, Boyut etkisi Tane Boyutu

Makro şekillendirme yöntemlerinin mikro şekillendirmeye uyarlanmasında malzemenin tane boyutu çok ciddi önem kazanmaktadır. Daha önceleri mikro boyutta malzemenin mekanik davranışını inceleyen birçok araştırma yapılmıştır. Bunlardan en bilineni yüzey tabaka modelidir. Bu çalışmada yüzey tabaka modeli yeni bir şekilde uygulanarak yüzey tanelerinin tane boyutuna bağlı olarak değiştiği ortaya konmuştur.

Çalışmada, soğuk haddelenmiş halde üretilen CuZn30 pirinci, sırasıyla 3,2 : 2 :1,5 : 1 mm olan 4 farklı kare kesitli numune, 500°C, 650°C'de 1 saat ve 700°C'de 2 saat süreyle tavlansmıştır. Bu numunelerle bir takım mikro basma deneyleri yapılmıştır. Bilgisayar ortamında yapılan simülasyonlar üzerinde sonlu eleman yöntemi uygulanarak, oluşturulan yüzey tabaka modelinin geçerliliği incelenmiştir.

# **INVESTIGATION OF SURFACE LAYER MODEL ACCORDING TO DIFFERENT GRAIN SIZES IN MICRO FORMING**

## **SUMMARY**

Keywords: Micro-forming, surface layer model, grain size, size effect,

In the adaptation of the macro forming methods to micro forming, the grain size of the material becomes very important. In the past, many studies have been conducted investigating the mechanical behavior of micro-sized material. The most common of these is the surface layer model. A new method of surface model from this surface was revealed that the surface grains changed depending on the grain size.

In the study, CuZn30 rice in cold rolled condition, samples of 4 different square sections were 3.2: 2: 1.5: 1 mm, annealed at 500°C, 650°C at 1 hour and at 700 °C for 2 hours. A number of micro upsetting tests with these samples. The validity of the surface layer model was investigated by applying the finite element method on the simulations made in computer.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Teknolojinin gelişmesiyle minyatürleşme olarak adlandırılan trend giderek önem kazanmaktadır. Artık günlük yaşantımızın vazgeçilmezi haline gelen cep telefonları, bilgisayar ve diğer elektronik cihaz ve aletler mikro boyutta parçalardan oluşmaktadır. Günümüzde bazı tıbbi ve elektro mekanik ürünler dahil olmak üzere gittikçe daha fazla ürün, konnektör pimi, direnç kapağı, vida, temas yayı gibi mikro ölçekli çok sayıda metal parça içermektedir [1].

Mikro imalat en az milimetre altı aralıkta iki boyuta sahip bileşenlerin teknik, ekipman ve sistemlerin imalatı ile alakalı bir yöntemdir. Mikro şekillendirme ise mikro imalat yöntemlerinden biridir. Mikro şekillendirme yüksek üretim hızı, maliyetin ve malzeme kaybının düşük olması gibi avantajları nedeniyle, bu alandaki alternatif metodlara kıyasla ümit vaat eden bir üretim yöntemidir. Bununla beraber, malzemenin makro boyutlardan mikro boyutlara inmesiyle birlikte boyut etkileri ortaya çıkmaktadır ve bu yüzden makro boyuttaki geleneksel metal şekillendirme yöntemlerle ilgili mevcut bilgi birikimi mikro şekillendirme için geçerliliğini yitirmektedir. Dolayısıyla, mikro boyutta gerçekleştirilen imalat yöntemleri için malzemenin mekanik davranışlarında meydana gelen değişikliklerin göz önüne alınması gerekmektedir [2].

Metal şekillendirme yöntemlerinde malzemenin davranışlarının öngörülmesi adına bilgisayar ortamında gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinin oldukça önemli bir yeri vardır. Sonlu eleman analiz yöntemleri sayesinde, malzeme ve imalat yöntemi ile ilgili malzeme seçimi, uygulanacak kuvvet, kalıp ile ilgili parametreler gibi birçok parametre hakkında bilgiler sağlanır.

Boyut etkileri yüzünden metal şekillendirme yöntemlerinin benzeşimlerinde kullanılan geleneksel malzeme modelleri de mikro şekillendirme benzeşimleri için kullanılamamaktadır. Dolayısıyla, mikro şekillendirme için uygun malzeme modellerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu tez kapsamında bir dizi mikro basma deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçların kullanılmasıyla mikro-boyutta malzeme deformasyon davranışının modellenmesi için daha önce önerilmiş olan yüzey tabakası modeli yeni bir şekilde uygulanmış ve yüzey tabakası modelinin kullanılmasıyla mikro boyutta malzeme deformasyon davranışının gerçeğe yakın bir şekilde modellenebileceği gösterilmiştir. Ayrıca, yüzey tabakası modelinin uygulanmasında tane boyutu da dikkate alınmıştır.

Tezin birinci bölümünde, mikro şekillendirme esnasında malzemenin deformasyonu sırasında ortaya çıkan boyut etkileri hakkında literatür çalışması yapılmıştır. İlk olarak mikro şekillendirmede, numune boyutunun küçülmesiyle ortaya çıkan boyut etkileri hakkında literatür çalışması yapılmıştır. Ardından mikro şekillendirme ve tane boyutu arasındaki ilişki hakkında literatür çalışması yapılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, mikro basma deneyleri için malzeme, numune hazırlama süreci ve deney düzeneği hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca numunelerin metalografik işlem sonuçları verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde, deney sonucu elde edilen verilerin bilgisayar ortamında çözümlenmesiyle farklı numune ve tane boyutlarına sahip numunelere ait deneysel sonuçlar verilmiş ve deneysel sonuçlar yorumlanmıştır.

Tezin dördüncü bölümünde mikro şekillendirmede malzeme deformasyon davranışının modellenmesi için yüzey tabakası modeli yeni bir şekilde uygulanmıştır. Yüzey tabakası modeli hesaplanan akma gerilmesi değerleri deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Yüzey tabakası modelinin bu tezdeki gibi uygulanmasıyla mikro boyutta malzeme deformasyon davranışının başarılı bir şekilde modellenmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir.



Tezin beşinci bölümünde yüzey tabakası modeli ile hesaplanan akma gerilmelerinin kullanılmasıyla mikro-basma deneylerinin sonlu elemanlar benzeşimleri gerçekleştirilmiştir. Benzeşim sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yüzey tabakasının modelinin bu tezdeki gibi uygulanmasıyla mikro şekillendirme benzeşimlerinde malzeme deformasyon davranışının başarılı bir şekilde modellenmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir.

## BÖLÜM 2. MİKRO ŞEKİLLENDİRME

Elektromekanik ve tıp alanları gibi çeşitli endüstri alanlardaki gelişmelerle birlikte minyatürleşmeye olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Minyatürleşme çok küçük parçaların güvenilir ve ekonomik bir şekilde üretilmesi uğraşısını beraberinde getirmiştir. Günümüzde, söz konusu mikro parçaların çoğu, hassas talaşlı imalat, foto kimyasal ve elektro litografi gibi mikro elektromekanik işlemler tarafından üretilmektedir. Maliyeti yüksek olan bu üretim yöntemlerinin verimi de düşüktür [2].

Mikro şekillendirme, yüksek verim, minimum atık malzeme ve mükemmel mekanik özellikler gibi avantajlarından dolayı mikro parçaların üretimde umut veren yöntemlerden biridir [2]. Mikro şekillendirme plastik deformasyonla, en az bir ortogonal görünümü  $1 \text{ mm}^2$  içine alınabilen bir parça veya bir geometrik ayrıntı imal etme süreci olarak tanımlanabilir. Mikro şekillendirme ayrıca milimetre altı değerlerde en az iki boyuta sahip parçaların veya yapıların üretimi olarak tanımlanır [2]. Şekil 2.1.'de mikro şekillendirme ile üretilmiş çeşitli parçalara ait bir fotoğraf gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Mikro şekillendirme ile üretilmiş çeşitli metal komponentlerin bir fotoğrafı [3]

Makro boyutta geleneksel metal şekillendirme yöntemlerinin mikro boyutlara uyarlanması ile mikro boyutta metal şekillendirme yöntemleri oluşturulmuştur. Ancak

makro boyutta geleneksel olarak gerçekleştirilen metal şekillendirme yöntemleri mikro boyutlara taşındığında, malzeme ve imalat yöntemine özgü olarak ortaya çıkabilen ve “boyut etkisi” olarak adlandırılan davranış değişiklikleri meydana gelmektedir. Bu açıdan mikro boyutta gerçekleştirilen şekillendirme işlemleri tasarlanırken malzeme davranışında meydana gelen bu değişiklikler göz önüne alınması gerekir. Dolayısıyla dünya genelinde, özellikle gelişmiş ülkelerde mikro boyuttaki metal şekillendirme yöntemleri üzerinde araştırmalar giderek artmaktadır [4].

Minyatürleşme ile ürün ve işlem ölçülerinin küçülmesine karşın, tane boyutu gibi malzemenin mikro yapısı ile ilgili boyutlar sabit kalır. Makro boyuttaki bir kesitte çok sayıda tane bulunmaktadır. Her bir tanede mekanik özellikler anizotropik olsa da, çok kristalli malzemede özellikler homojen devamlılık gösterir. Bununla birlikte deforme olmuş parça boyutu mikro boyutlara küçüldüğünde, plastik deformasyon davranışı, deformasyon bölgesinde bulunan sadece birkaç taneyle karakterize edilir. Bu durumda malzeme özellikleri artık homojen değildir ve mikro boyutta plastik deformasyon davranışının temsili için geleneksel malzeme modelleri de artık geçerliliğini yitirir.

Boyutların küçülmesiyle mikro ölçekteki bir metal şekillendirme işleminde hem tane boyutunun numune boyutuna oranı hem de numune yüzey alanının hacme oranı belirgin bir şekilde artış göstermektedir [4]. Yani, mikro boyutta numune boyutu bölü tane boyutu oranı küçük ve yüzey alanı bölü hacim oranı yüksektir. Yüzey alanı bölü hacim oranının artması sürtünmeyi de etkilemektedir. Dolayısıyla mikro boyutlara inildikçe sürtünmenin önemi artmaktadır. Bu nedenlerden dolayı mikro şekillendirmede gerçekleşen plastik deformasyon geleneksel plastik şekil verme işlemlerine göre farklılık gösterir.

## 2.1. Tane Boyutu Etkisi

Uzun bir süredir tane büyüklüğünün malzemenin mekanik davranışlarını etkilediği bilinmektedir. Tane boyutu mekanik özellikler arasında özellikle malzemenin akma gerilmesi üzerinde oldukça etkilidir. 1950’lerde Hall ve Petch deneysel olarak demirin akma dayanımı olan  $\sigma_{ak}$ ’nın ortalama tane çapının kareköküyle ters orantılı olarak

değiştiğini bulmuşlardır [5]. Bu duruma Hall- Petch etkisi denilmektedir. Şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\sigma_{ak} = \sigma_0 + kd^{\frac{-1}{2}} \quad (2.1)$$

" $\sigma_0$ ", sürtünme gerilmesi olarak adlandırılır ve "k" Hall-Petch eğimi olarak bilinir. " $\sigma_0$ ", ve "k" malzemeye ait sabitlerdir. Bu ilişki Armstrong tarafından şekil değişimi de dikkate alınarak genişletilmiş ve aşağıdaki ifade edilmiştir [5]:

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{\frac{-1}{2}} \quad (2.2)$$

Yukarıdaki denklemlerde de görüldüğü üzere malzemenin tane boyutunun küçülmesiyle akma gerilmesi artmaktadır. Dayanımdaki artışın nedeni çok taneli malzemelerde bulunan tane sınırlarıdır. Malzemenin tane boyutu küçüldükçe tane sınırları artar. Dolayısıyla, tane boyutunun küçülmesi, tane sınırlarını arttıracığından malzemenin akma gerilmesi de artmış olacaktır.

## 2.2. Numune Boyutu Etkisi

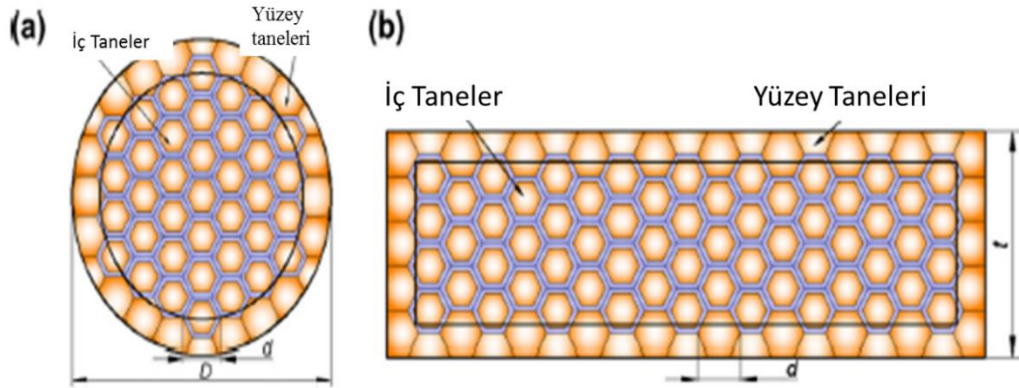
Mikro boyutta deformasyon davranışları ve mikro boyuttaki mekanik özelliklerde boyut etkisinin araştırılması için birçok çalışma yapılmıştır. Boyutları sistematik olarak küçültülen numunelerle gerçekleştirilen basma ve çekme deneylerinde, boyutların küçülmesiyle malzemenin akma dayanımının ve akma gerilmesinin düştüğü görülmüştür. Engel ve Eckstein mikro şekillendirmede numune boyutu akma gerilmesi ilişkisini açıklamak için yüzey tabaka modelini önermişlerdir. Bu modele göre malzeme iç ve yüzey tabakası (ya da yüzey taneleri) olmak üzere iki bölümden oluşur [4].

Metal fizik teorisine göre, yüzeyde bulunan tanelerin iç tanelere göre dayanımları daha düşüktür. Bunun nedeni ise dislokasyon yığılma mekanizmasıdır. Tane sınırları dislokasyon engelidir ve plastik deformasyon sırasında dislokasyonlar tane sınırlarında yığılır. Yüzey tanelerinde bulunan serbest yüzeylerde ise dislokasyon

yığılması gerçekleşmez. Ayrıca, yüzey tanelerinin deformasyonu iç tanelere göre komşu olan taneler tarafından daha az kısıtlanır. Bu sayede yüzey taneleri iç tanelere göre daha kolay deformasyona uğramaktadır. Yani, iç tanelere göre dayanımları daha düşüktür. Yüzey tabakası modeli numune boyutu ve tane boyutu arasında bir geometrik boyut ilişkisi tanımlayarak, akma gerilmesindeki azalmayı açıklar. Bu modele göre malzemenin akma gerilmesi aşağıdaki denklemde ifade edilmektedir [4].

$$\sigma = \mu\sigma_y + (1 - \mu)\sigma_i \quad (2.3)$$

” $\sigma$ ” malzemenin akma gerilmesi olarak tanımlanmıştır. “ $\mu$ ” ise yüzey tanelerin bütün kesit içinde kapladıkları alanın oranıdır.” $\sigma_i$ ” iç tabakadaki tanelerin akma gerilmesidir.” $\sigma_y$ ” ise yüzey tanelerin akma gerilmesidir. Yüzey tabakası ve iç taneler Şekil 2.2.’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. a) Dairesel kesitli b) Dikdörtgen kesitli numunede iç ve yüzey tanelerinin şematik olarak gösterilmesi[4]

Dairesel kesitli numune için numune kesitinde yüzey tabakasının oranı aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\mu = \frac{\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi(D-2d)^2}{4}}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4d(D-d)}{D^2} \text{ olur.} \quad (2.4)$$

“D” numune çapı olarak tanımlanmıştır. “d” ise ortalama tane boyutu olarak tanımlanmıştır.

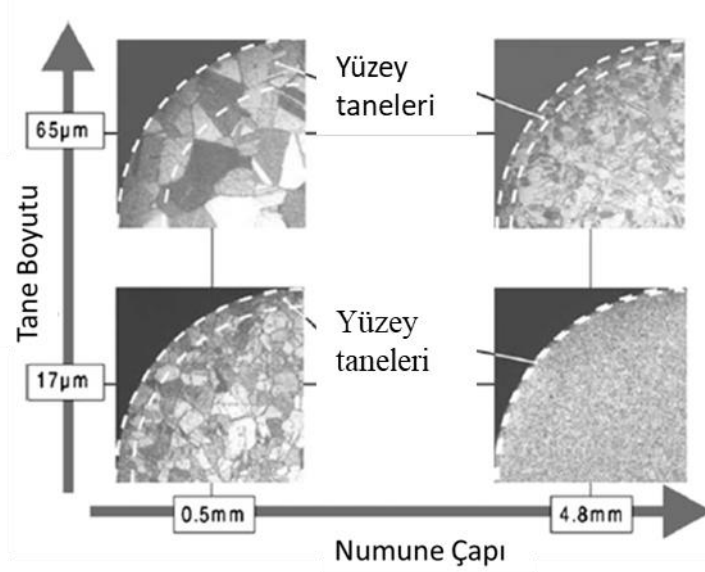
Eğer  $D=2d$  olursa  $\mu=1$  olacağından tüm taneler yüzey tanesi olacaktır. Eğer  $D \gg d$  olursa  $\mu \cong 0$  olur. Bu değer 0'a yaklaştıkça tüm kesit iç tanelerden oluşmaya başlar.

Kare kesitli bir numunede yüzey tanelerin kesitteki oranı aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\mu = \frac{(t^2 - (t-2d)^2)}{t^2} = \frac{4d(t-d)}{t^2} \text{ olur.} \quad (2.5)$$

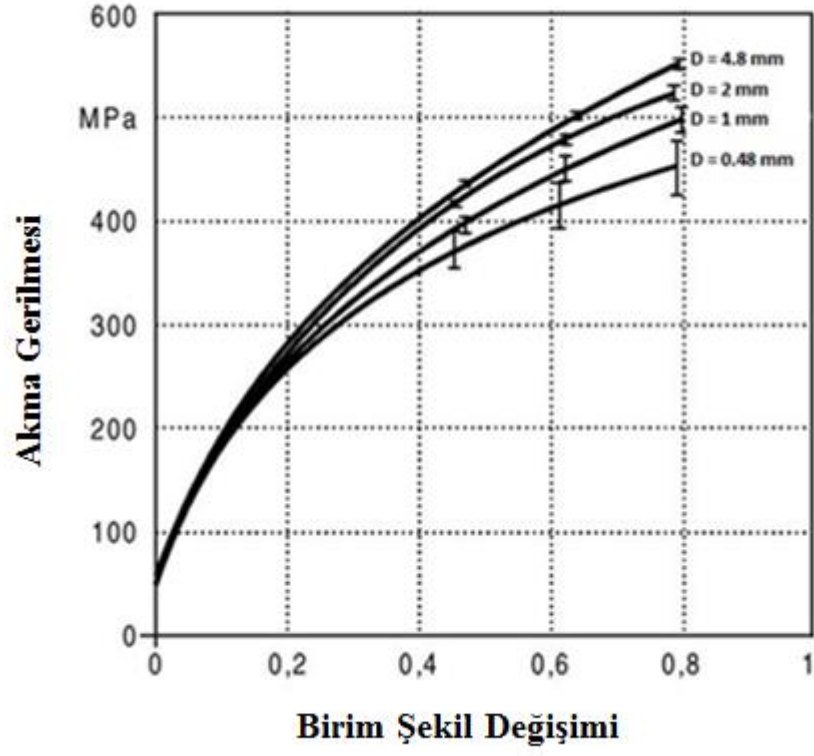
Denklemden t kare kesit kenarı, d ise ortalama tane boyutudur. Burada da görüldüğü gibi  $t=2d$  olduğu zaman  $\mu=1$  olacağından tüm taneler yüzey tabakasında olacaktır. Eğer  $t \gg d$  olursa  $\mu \cong 0$  olur. Bu değer 0'a yaklaştıkça iç tanelerin sayısı toplam tane sayısına eşit olacaktır.

Yüzey tabakası modelini numune boyutu ve tane boyutu arasındaki ilişki bakımından incelersek artan tane boyutu ve azalan numune boyutu ile Şekil 2.3.'de görüldüğü gibi yüzey tanelerinin payı artmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi metal fizik teorisine göre, yüzey tanelerin akma gerilmesi içteki tanelere göre daha düşük olduğundan yüzey tanelerinin numunedeki toplam tanelere göre oranı arttıkça, malzemenin akma gerilmesinde azalma olacaktır.



Şekil 2.3. Yüzey tanelerinin kesitte kapladıkları alanın numune çapı ve tane boyutuna göre değişimini gösteren mikroyapı fotoğrafları [4]

Şekil 2.3.'de görüleceği gibi yüzey tabakası modeline göre malzemede  $D/d$  (numune çapı/tane çapı) oranı arttıkça, yüzey tabakasının kesit içindeki oranı azaldığı için, malzemenin akma gerilmesi artmaktadır. Bu oran yine Şekil 2.3.'de görüldüğü gibi tane boyutunun küçülmesiyle de artmaktadır. Ayrıca numune boyutunun küçülmesiyle birlikte kesitte bulunan tane sayısı azalmakta ve bu da homojen olmayan bir deformasyonun oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum deney sonuçlarında saçınımın artmasına sebep olmaktadır. Engel U.'nun çalışmasında bu durum gözlenebilir [7]. Söz konusu çalışmada ortalama tane çapı  $79 \mu m$  olan pirinç bir malzemedен çıkarılan 4,8: 2: 1 ve 0,48 mm çapa sahip numuneler ile mikro basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve gerilme-birim şekil değişimi eğrileri oluşturulmuştur. Şekil 2.4.'de görüldüğü gibi numune çapı küçüldükçe akma gerilmesi düşmektedir. Ayrıca numune çapının küçülmesiyle kesitte bulunan tane sayısı azalmakta ve bu da homojen olmayan deformasyona sebep olmaktadır. Bu durumda deney verilerinde saçınımın artmasına sebep olmaktadır.



Şekil 2.4. Farklı çapa sahip basma numuneleriyle gerçekleştirilen deneylerden elde edilen akma eğrileri [7]. Numune çapları grafikte belirtilmiştir.



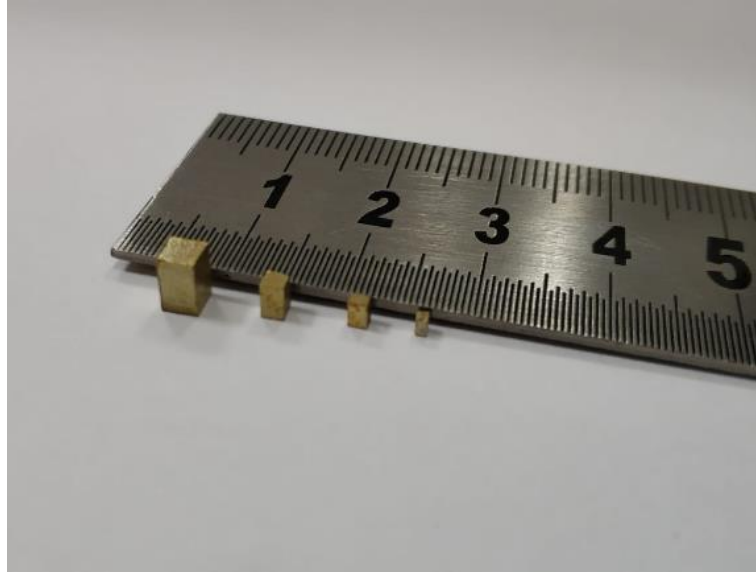
## BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

### 3.1. Numune Hazırlama Süreci

Mikro şekillendirmede iş parçası kesitindeki tanelerin sayısı oldukça düşük olduğu için deformasyon ve akma gerilmesi ile ilgili boyut etkileri ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla mikro-şekillendirme araştırmalarında numune boyutları sistematik olarak küçültülerek farklı numune boyutu bölü tane boyutu oranına sahip numuneler elde edilir. Bu şekilde hazırlanan numunelerle gerçekleştirilen deneyler ile deformasyon ile ilgili boyut etkileri incelenir. Ayrıca, farklı numune boyutu bölü tane boyutu oranları elde etmek için aynı numune boyutuna sahip numuneler farklı tane boyutlarına sahip olacak şekilde farklı koşullarda tavlabilir. Bu tez kapsamında hem numune boyutları sistematik olarak küçültülmüş hem de aynı boyutlardaki numuneler farklı koşullarda tavlansak farklı tane boyutuna sahip numuneler oluşturulmuştur. Bu şekilde farklı numune boyutu bölü tane boyutu oranına sahip numunelerle deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deney malzemesi CuZn30  $\alpha$ -pirincidir. Soğuk haddelenmiş şekilde temin edilen CuZn30 pirinç malzemedeki kare kesitli minyatür basma numuneleri çıkarılmıştır. Minyatür basma numunelerinin kare kesit kenarları sırasıyla 3,2, 2, 1,5, 1 mm'dir ve yükseklik/kesit kenarı oranı 1,5 olarak belirlenmiştir. Farklı boyutlara sahip numunelere ait bir fotoğraf Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Üç gruba ayrılan numuneler 500 ve 650°C'de 1 saat ve 700°C'de ise 2 saat tavlansmıştır. Tavlama işleminden sonra seçilen bazı numuneler üzerinde tane boyutunun belirlenmesi için metalografik inceleme yapılmıştır. Tane boyutunun belirlenmesi için seçilen numunelere sırasıyla zımparalama, elektrolitik parlatma ve dağlama işlemleri yapılmıştır. Elektrolitik parlatma ve dağlama işlemleri için Sakarya Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında Buehler marka elektrolit parlatma ve dağlama

cihazında işlem yapılmış ve ardından mikro yapı görüntüleri alınarak kesim metoduyla ortalama tane boyutları belirlenmiştir. Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.'de metalografi laboratuvarında kullanılan zımparalama ve elektrolitik parlatma/dağlama cihazlarının fotoğrafları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Farklı boyutlardaki mikro basma numunelerini gösteren bir fotoğraf

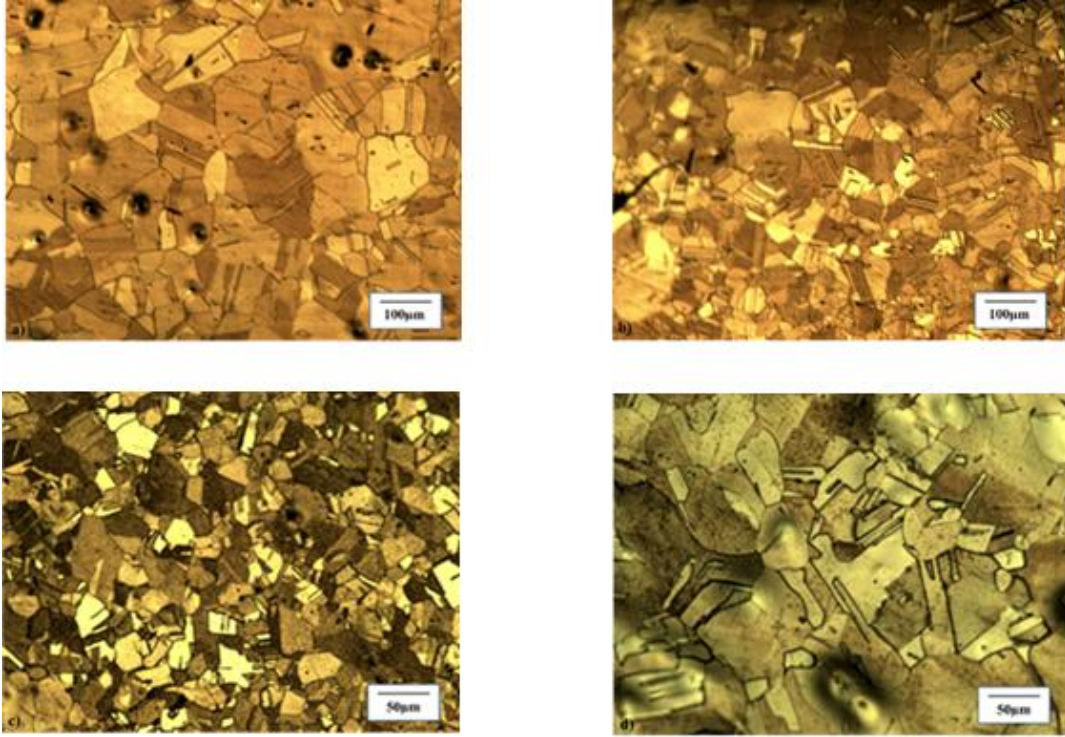


Şekil 3.2. Metalografik incelemede kullanılan zımparalama cihazı

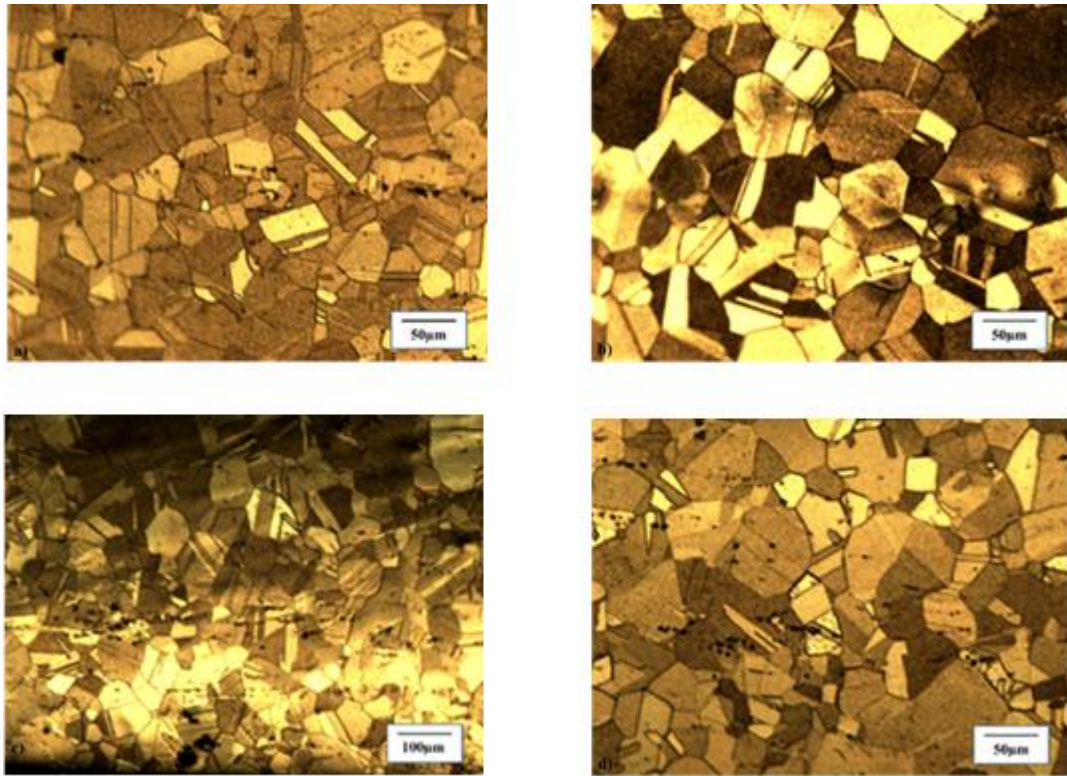


Şekil 3.3. Metalografik incelemede kullanılan elektrolitik parlatma ve dağlama cihazı

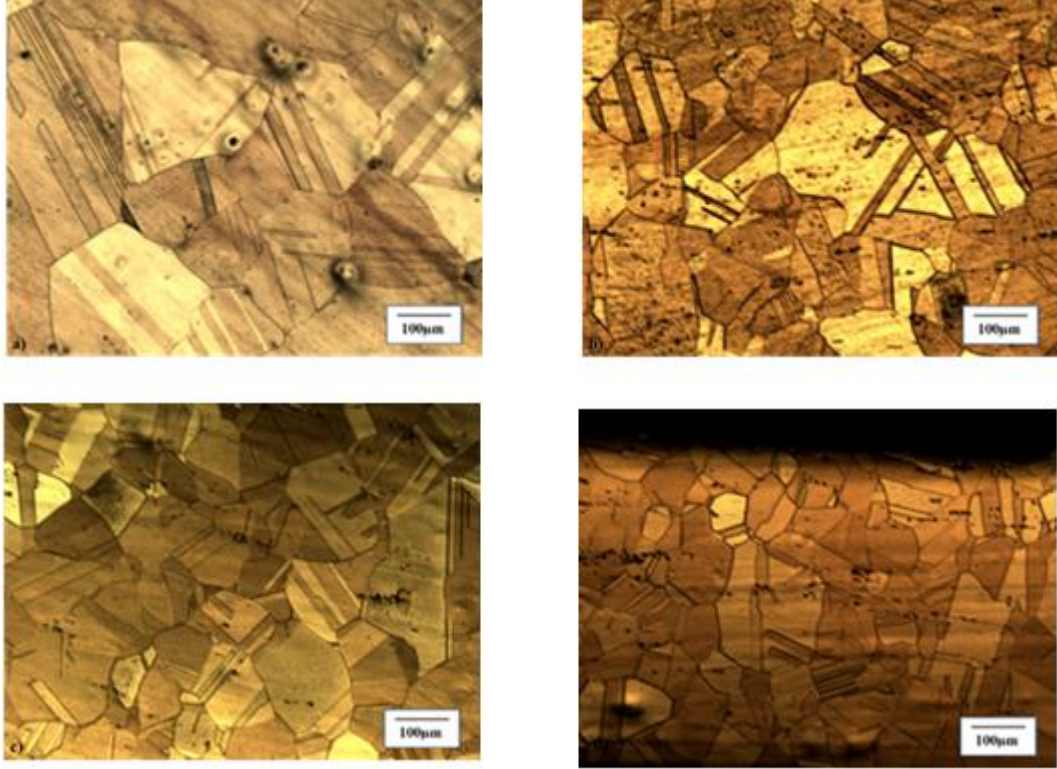
Şekil 3.4. , 3.5. ve 3.6.'da farklı tavlama koşulları , numune boyutu kombinasyonlarına ait metalografik inceleme sonucu elde edilen mikro yapı fotoğraflarından bazıları gösterilmiştir.



Şekil 3.4. 500°C'de tavllanmış kare kesit kenarı a) 3,2 mm b) 2 mm c) 1,5 mm ve d) 1 mm olan numunelere ait mikroyapı fotoğrafları



Şekil 3.5. 650°C'de tavllanmış kare kesit kenarı a) 3,2 mm b) 2 mm c) 1,5 mm ve d) 1 mm olan numunelere ait mikroyapı fotoğrafları



Şekil 3.6. 700°C'de tavllanmış kare kesit kenarı a) 3,2 mm b) 2 mm c) 1,5 mm ve d) 1 mm olan numunelere ait mikroyapı fotoğrafları

Tablo 3.1. Farklı numune boyutu ve tavlama sıcaklıkları için elde edilen tane boyutu değerleri

| Numune Kalınlığı<br>(mm) | Tane Boyutu Değerleri (µm) |        |        |
|--------------------------|----------------------------|--------|--------|
|                          | 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  |

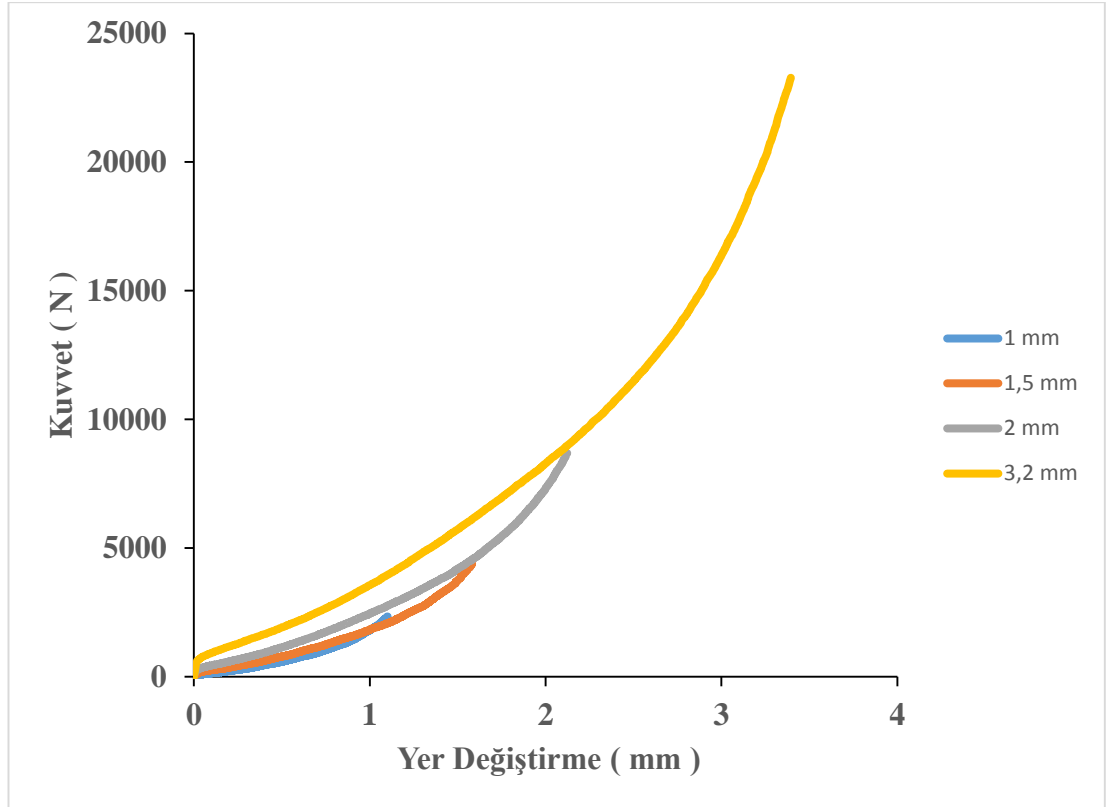
### 3.2. Mikro Basma Deneyleri

Talaşlı imalatla üretildikten sonra tavlanan minyatür numunelerle basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Basma deneyleri İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Deneyler Laboratuvarında bulunan 5 Ton kapasiteli Shimadzu marka vida tahrikli çekme makinasından gerçekleştirilmiştir. Basma deneyleri sırasında çekme makinasının üst kafası en büyük boy (3,2 mm) numune için 1,6 mm/dk hızla hareket ettirilmiştir. Üst kafanın hızı diğer boy numunelerin deneylerinde oransal olarak azaltılmıştır. Böylece farklı boylara sahip numunelerin basma

deneylerinde birim şekil değiştirme hızının aynı olması sağlanmıştır. Deney sırasında minyatür basma numuneleri basma plakalarının arasına konulmuştur. Mikro basma deneyleri sırasında, numunenin boyunda meydana gelen kısılmanın video ekstansometre ile ölçülebileceği düşünölmüştür. Video ekstansometre ile gerçekteştirilen çekme deneylerinde, numunelerin ölçü boyu üzerine iki çizgi yapıştırılmakta ya da çizilmekte, deney sırasında ölçü boyu üzerindeki bu çizgilerin hareketi video ekstansometre tarafından kaydedilmekte ve makinede bulunan yazılım tarafından uzama değerlerine dönüştürölmektedir. Mikro basma deneylerinde ise sorun, boyları 1,5 ve 4,8 mm arasında değişen numunelerin çok kısa olmasıdır. Özellikle en küçük boy numunelerin üzerine video ekstansometre tarafından kaydedilebilecek belirgin referans çizgileri koymak olanaksız olduğundan, video ekstansometre tarafından takip edilecek çizgiler, deney numunelerinin basılmasında kullanılan basma plakalarının üzerine yerleştirilmiştir. Deneylerde numune boyunda meydana gelen kısılma video ekstansometre ile bu şekilde ölçölmüştür. Deney sonrasında numunelerin boyları mikrometre ile ölçölmüş ve video ekstansometre ile ölçölen deplasman değerleri ile karşılaştırılmış. Video ekstansometre tarafından ölçölen değerle numunenin ilk ve son boyu arasındaki fark karşılaştırıldığında, deney sonrasında elastik deformasyonun geri gelmesinden kaynaklı farka karşılık gelen bir fark olduğu belirlenmiştir. Yani deneyler sırasında video ekstansometre tarafından ölçölüp kaydedilen deplasman değerlerinin gerçekte oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir.

## BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR

Farklı boyutlara sahip kare kesitli minyatür numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucunda kuvvet deplasman eğrileri elde edilmiştir. Şekil 4.1.'de 700°C' de tavllanmış farklı boyutlara sahip 4 numuneye ait kuvvet deplasman eğrileri örnek olarak verilmiştir.



Şekil 4.1. 700°C'de tavllanmış farklı boyutlarda olan 4 numuneye ait kuvvet- deplasman eğrileri. numune boyutları (kare kesit kenar uzunlukları) grafikte belirtilmiştir.

Kuvvet ve deplasman değerleri aşağıda verilen denklemler kullanılarak gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değişimi değerlerine dönüştürülmüş ve gerçek gerilme ve gerçek şekil değişimi grafikleri oluşturulmuştur.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (4.2)$$

$$\sigma_g = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (4.3)$$

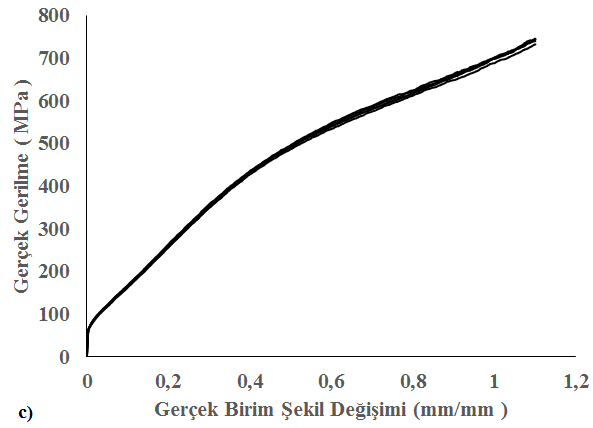
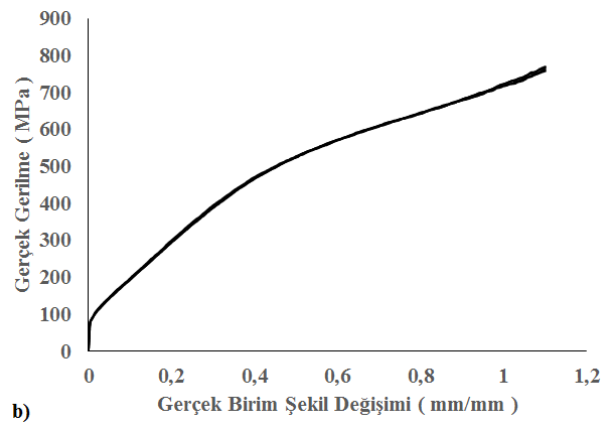
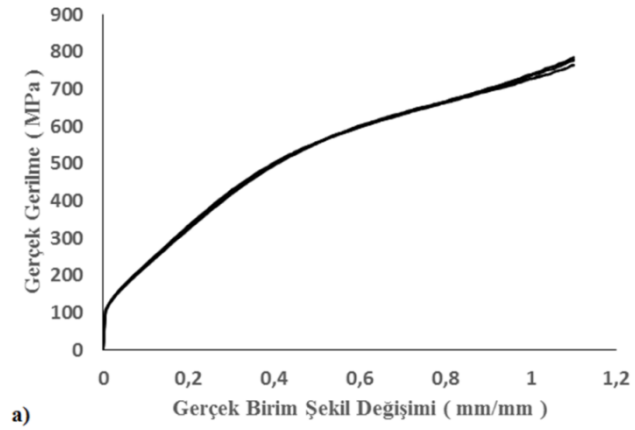
$$\varepsilon_g = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4.4)$$

“F” basma kuvveti olarak tanımlanıp birimi Newton’dur. Numunenin ilk kare kesit alanı “A<sub>0</sub>” ile temsil edilmektedir. Numunenin basma kuvveti sonucu birim şekil değişimi “ε” olarak tanımlanmış olup birimi mm/mm’dir. Δh basma sonucu numune yüksekliğindeki değişim olarak tanımlanmıştır. “h<sub>0</sub>” numunenin ilk yüksekliği olarak tanımlanmıştır. “σ<sub>g</sub>”, gerçek gerilme olarak tanımlanmıştır. “ε<sub>g</sub>” gerçek birim şekil değişimi olarak tanımlanmıştır.

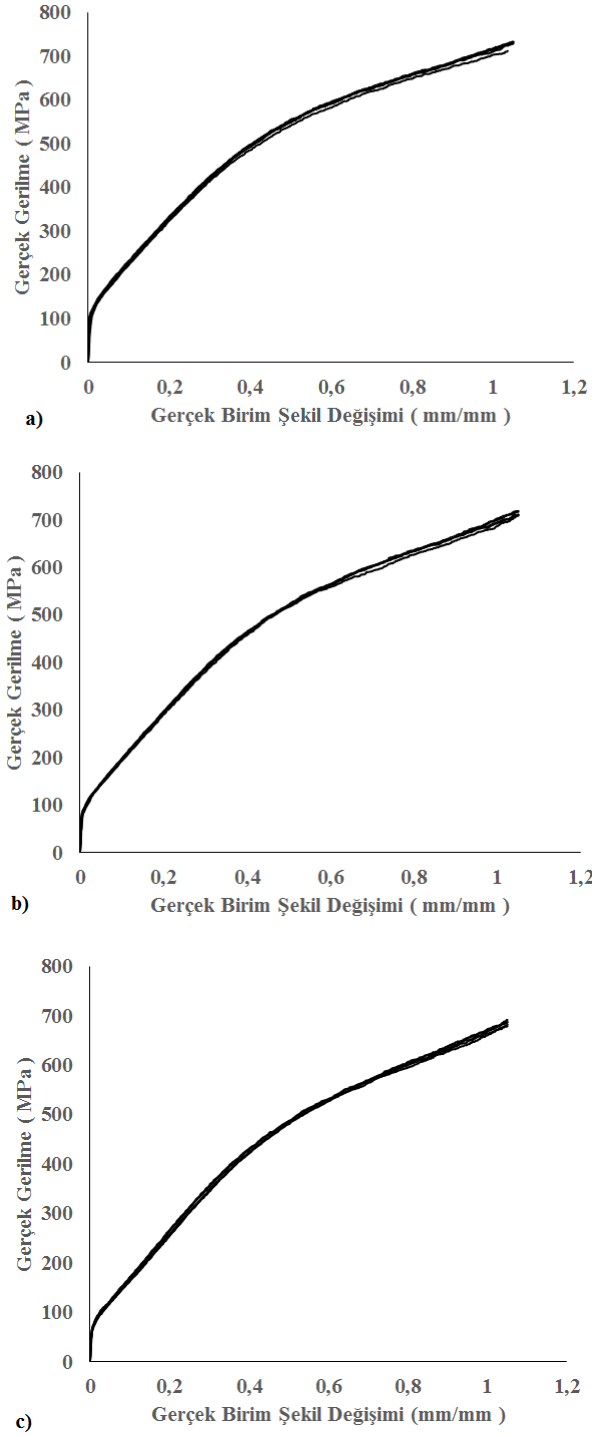
Bu şekilde her bir numune boyutu tane boyutu kombinasyonu için gerçek gerilme-gerçek şekil değişimi eğrileri elde edilmiştir.

Şekil 4.2.’de kare kesit kenar uzunluğu 3,2 mm ve tane boyutu a) 43 μm b) 100,2μm c) 205,8 μm olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen eğriler aynı grafikte gösterilmiştir. Şekil 4.3.’de kare kesit kenar uzunluğu 2 mm ve tane boyutu a) 45 μm b) 74 μm c) 146,2 μm olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen eğriler aynı grafikte gösterilmiştir. Şekil 4.4.’de kare kesit kenar uzunluğu 1 mm ve tane boyutu a) 51,6 μm b) 81,6 μm c) 125,4 μm olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen eğriler aynı grafikte gösterilmiştir.

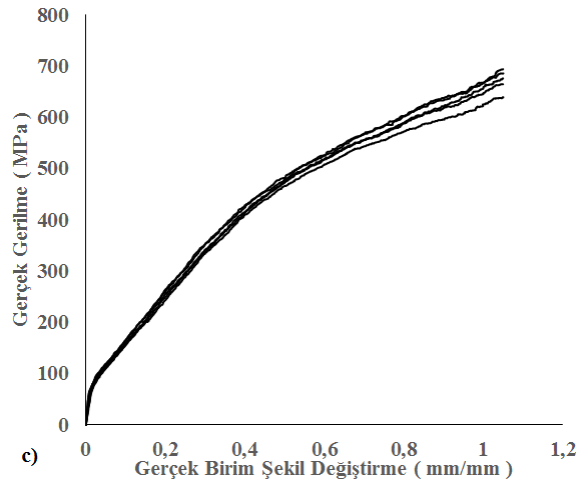
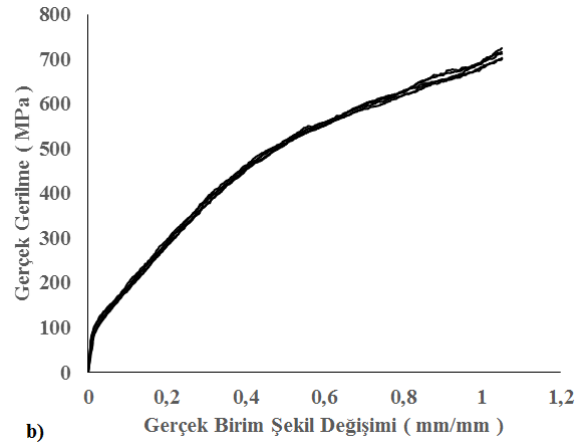
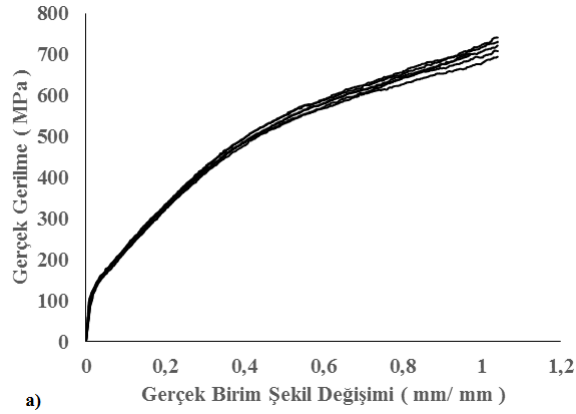




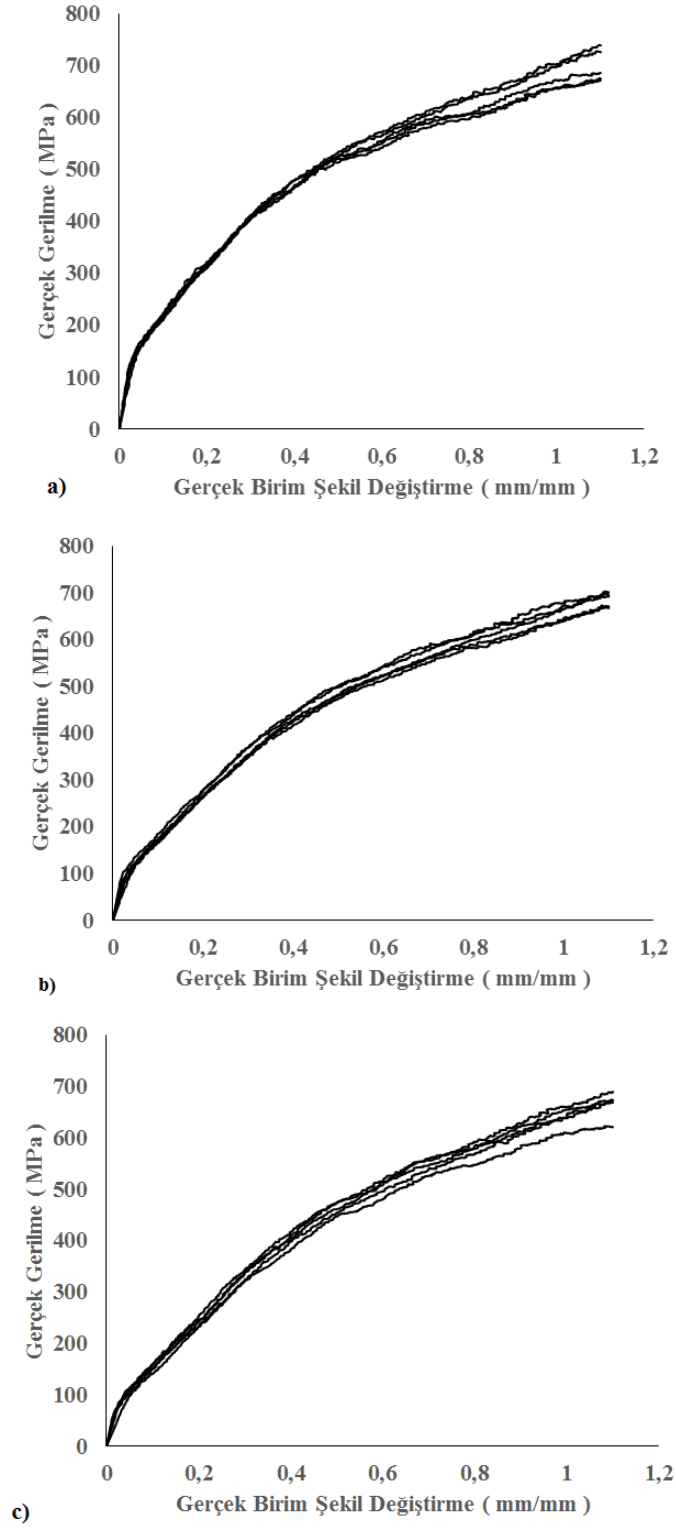
Şekil 4.2. Kare kesit kenar uzunluğu 3,2 mm ve a) tane boyutu  $43 \mu m$  ( $500^{\circ}C$ 'de tavllanmış), b) tane boyutu  $100,2 \mu m$  ( $650^{\circ}C$ 'de tavllanmış), c) tane boyutu  $205,8 \mu m$  ( $700^{\circ}C$ 'de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrileri



Şekil 4.3. Kare kesit kenar uzunluğu 2 mm 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 4.4. Kare kesit kenarı 1,5 mm 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

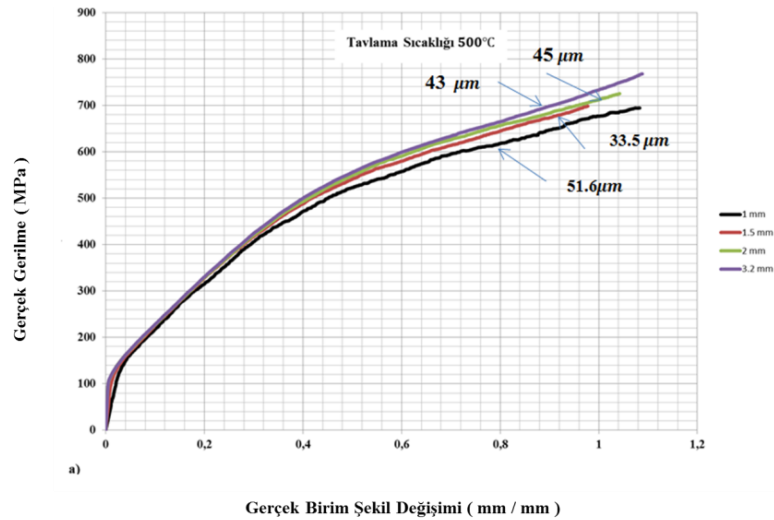


Şekil 4.5. Kare kesit kenarı 1 mm ve tane boyutu a) 51,6 μm (500°C’de tavlınmış), b) 81,6 μm (650°C’de tavlınmış), c) 125,4 μm (700°C’de tavlınmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri

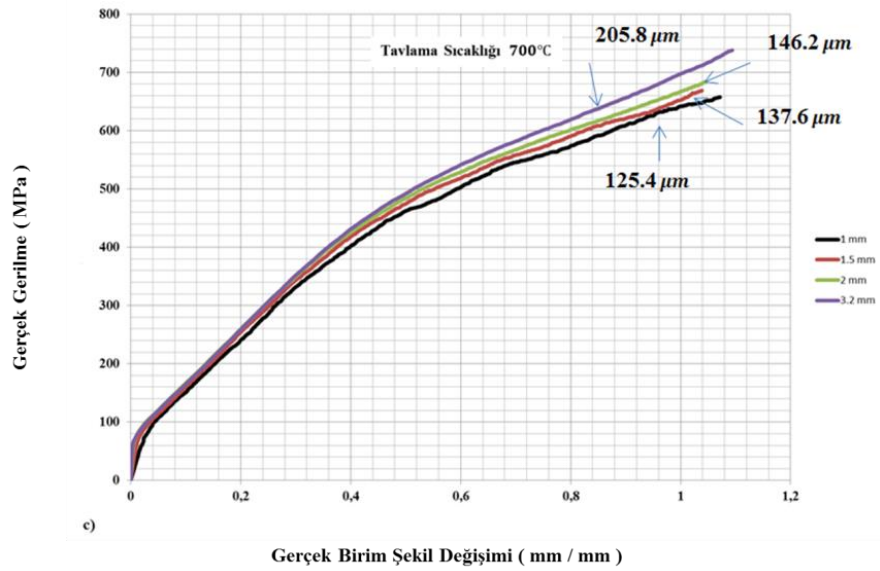
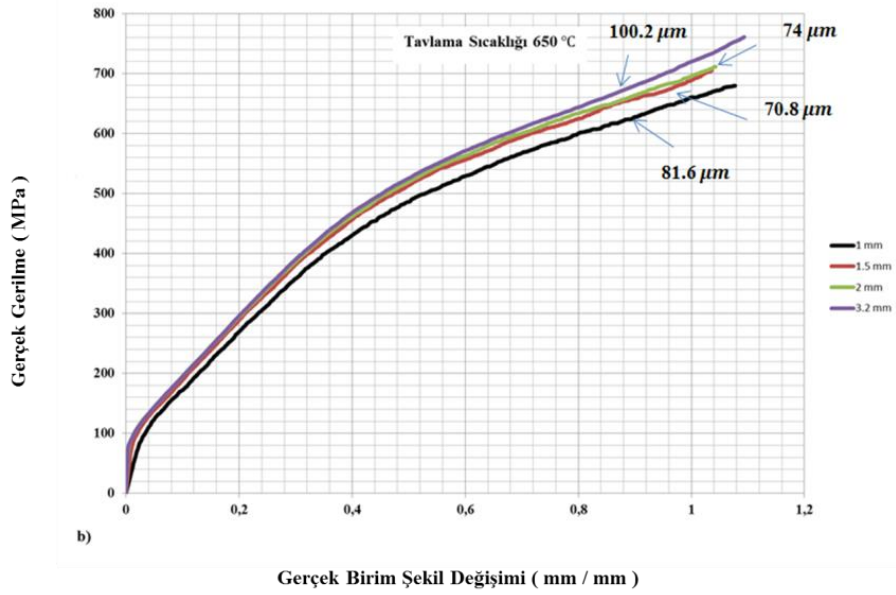
Grafikler incelendiğinde numune boyutlarının küçülmesiyle genel itibariyle saçınımın arttığı gözlenmiştir. Bu durum en bariz bir şekilde numune boyutunun en küçük (kare kesit kenarı 1 mm) tane boyutunun en yüksek olduğu 700°C’de tavllanmış (tane boyutu 125,4  $\mu\text{m}$  olan) numunelere ait akma eğrilerinde açıkça görülmektedir.

Numune boyutunun azalmasıyla birlikte malzemenin mekanik davranışındaki homojenlik tanelerin yönlenmesine bağlı olarak değişmektedir. Mikro boyutlara inildikçe numunede bulunan tane sayısı azaldığından, her bir tanenin yönlenmesi (oryantasyonu) malzemenin mekanik davranışını etkileyecektir. Bu sebeple numune boyutunun küçülmesiyle saçınımın artması beklenmektedir.

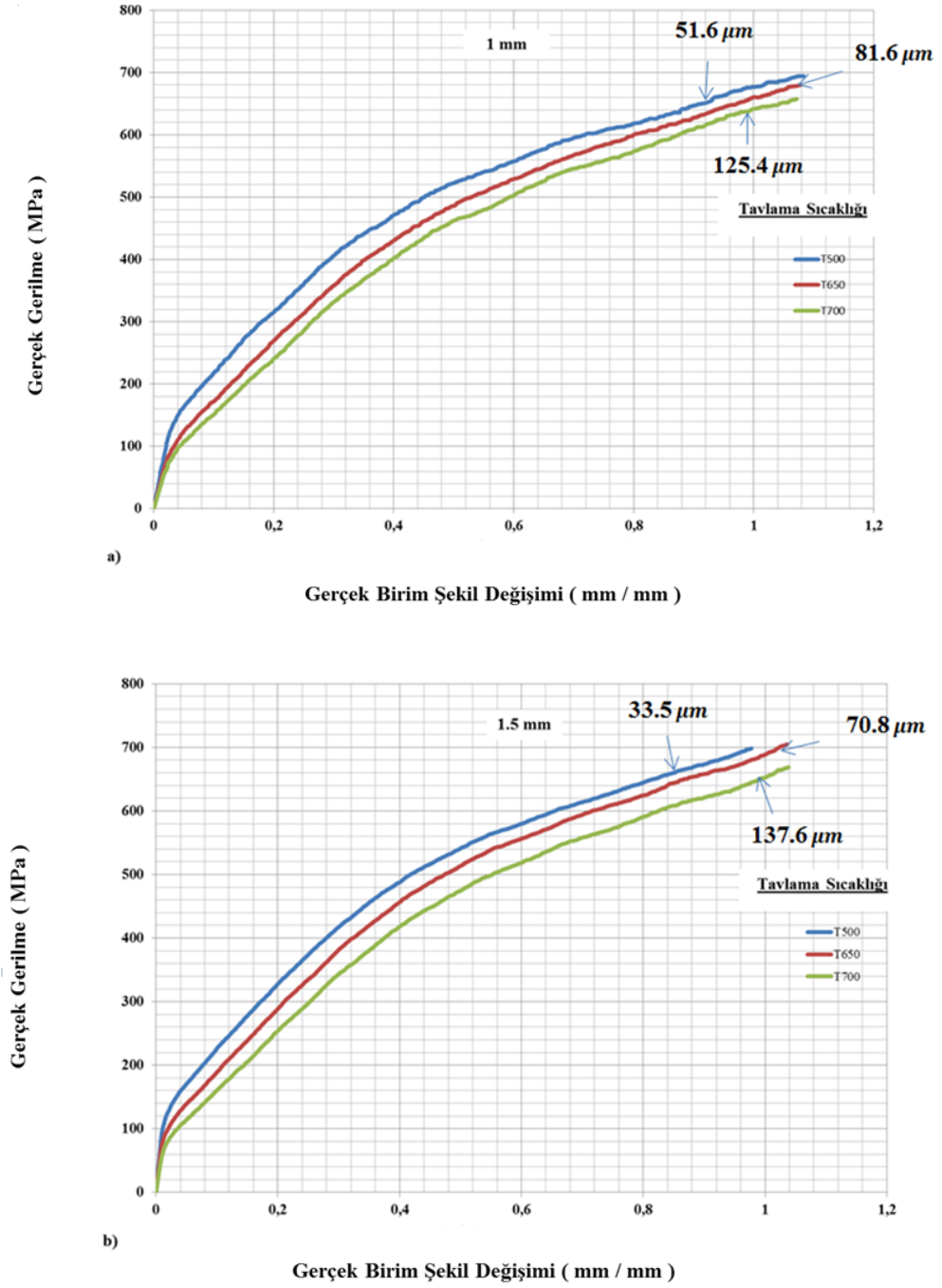
Her bir numune boyutu, tane boyutu (tavlama sıcaklığı) kombinasyonuna ait ortalama bir gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrisinin elde edilmesi için Matlab programında kod yazılmış ve yazılan bu kod ile her bir numune boyutu ve tane boyutu (tavlama sıcaklığı) için ortalama bir gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrisi elde edilmiştir Aynı tavlama sıcaklığı için farklı numune boyutlarına ait ortalama eğriler Şekil 4.6.’da gösterilmiştir. Şekil 4.7.’de ise elde edilen söz konusu ortalama akma eğrileri aynı numune boyutu için farklı tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılmıştır.



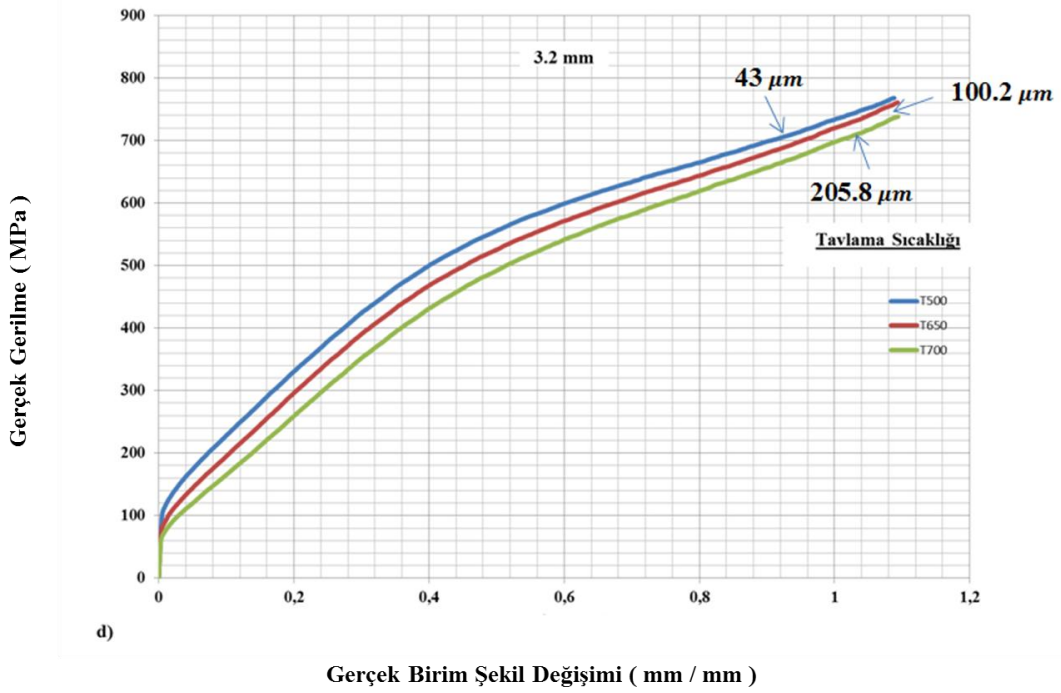
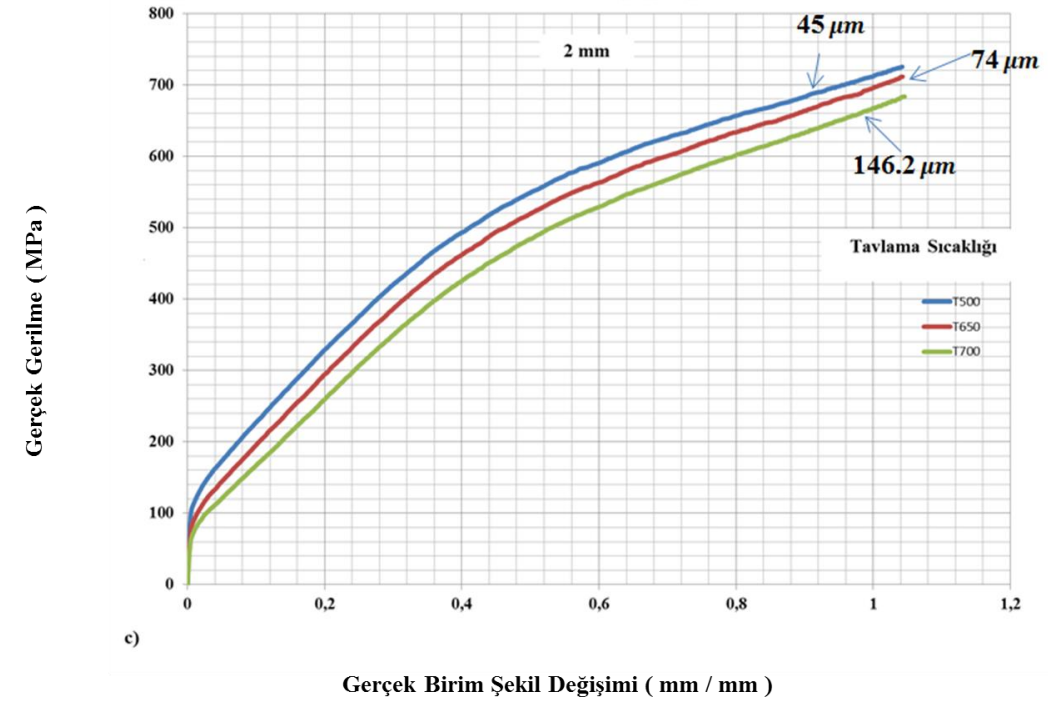
Şekil 4.6. a) 500 °C b) 650 °C c) 700 °C sıcaklıkta tavllanmış numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin numune boyutuna göre karşılaştırılması. Numune boyutları (kare kesit kenar uzunlukları) ve tane boyutları grafiklerde belirtilmiştir.



Şekil 4.7. a) 500 °C b) 650 °C c) 700 °C sıcaklıkta tavllanmış numunelerin ortalama gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin numune boyutuna göre karşılaştırılması. Numune boyutları (kare kesit kenar uzunlukları) ve tane boyutları grafiklerde belirtilmiştir. (Devamı)



Şekil 4.8. Kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numunelerin ortalama gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması. Tavlama sıcaklıkları ve tane boyutları grafiklerde belirtilmiştir.



Şekil 4.9. Kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numunelerin ortalama gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin tavlama sıcaklığına göre karşılaştırılması. Tavlama sıcaklıkları ve tane boyutları grafiklerde belirtilmiştir. (Devamı)

Grafiklerde görüldüğü üzere, aynı tavlama sıcaklığı için yani birbirine yakın tane boyutları için numune boyutu azaldıkça akma gerilmesinin düştüğü gözlenmektedir.



Her bir tane ve numune boyutu için Matlab programı ile elde edilen ortalama akma eğrilerinde belirli birim şekil değiştirme değerlerine karşılık gelen akma gerilmeleri Tablo 4.1. , 4.2. ve 4.3.'te verilmiştir. Bu değerler daha sonraki bölümde anlatılacağı üzere mikro-boyutta malzeme deformasyonunun modellenmesi için yüzey tabakasının yeni bir şekilde uygulanmasında, yüzey ve hacim (iç) tanelerin akma gerilmelerinin hesaplanmasında kullanılmışlardır. Tablo 4.1'de 500 °C'de, Tablo 4.2.'de 650 °C'de ve Tablo 4.3.'te 700 °C'de tavlanan ve kare kesit kenarı 3,2 mm, 2 mm, 1,5 mm, 1 mm olan numuneler için belli birim şekil değişimi değerlerine karşılık gelen gerilme değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1. 500°C'de tavllanmış 4 farklı numune boyutu için belirli gerçek birim şekil değişimi değerlerine karşılık gerçek gelen gerilme değerleri

| 3,2 mm     |               | 2 mm       |               | 1,5 mm     |               | 1 mm       |               |
|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|
| $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ | $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ | $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ | $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ |
| 0,05       | 173,8464      | 0,05       | 173,2169      | 0,05       | 170,5432      | 0,05       | 163,3177      |
| 0,1        | 228,2299      | 0,1        | 227,3749      | 0,1        | 226,425       | 0,1        | 217,7012      |
| 0,2        | 330,5538      | 0,2        | 328,7274      | 0,2        | 328,0641      | 0,2        | 315,416       |
| 0,3        | 424,3057      | 0,3        | 420,5184      | 0,3        | 417,3922      | 0,3        | 406,064       |
| 0,4        | 499,9815      | 0,4        | 492,989       | 0,4        | 487,563       | 0,4        | 471,3927      |
| 0,5        | 555,72        | 0,5        | 548,8849      | 0,5        | 541,0082      | 0,5        | 522,5931      |
| 0,6        | 599,0848      | 0,6        | 590,5476      | 0,6        | 579,8202      | 0,6        | 557,538       |
| 0,7        | 633,6924      | 0,7        | 626,0281      | 0,7        | 613,8302      | 0,7        | 595,2332      |
| 0,8        | 664,8498      | 0,8        | 656,6181      | 0,8        | 644,7123      | 0,8        | 617,7903      |
| 0,9        | 698,5351      | 0,9        | 683,1168      | 0,9        | 673,5479      | 0,9        | 647,0953      |
| 1          | 733,3466      | 1          | 711,8792      | 1          | 704,6085      | 1          | 676,7031      |

Tablo 4.2. 650°C'de tavllanmış 4 farklı numune boyutu için belirli gerçek birim şekil değişimi değerlerine karşılık gelen gerçek gerilme değerleri

| 3,2 mm     |               | 2 mm       |               | 1,5 mm     |               | 1 mm       |               |
|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|
| $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ | $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ | $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ | $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ |
| 0,05       | 143,9281      | 0,05       | 144,3118      | 0,05       | 139,4227      | 0,05       | 123,9637      |
| 0,1        | 195,0571      | 0,1        | 195,3954      | 0,1        | 189,0369      | 0,1        | 172,0923      |
| 0,2        | 295,9889      | 0,2        | 294,4364      | 0,2        | 288,8828      | 0,2        | 269,3377      |
| 0,3        | 390,468       | 0,3        | 386,0622      | 0,3        | 382,0121      | 0,3        | 358,0897      |
| 0,4        | 468,1059      | 0,4        | 461,8929      | 0,4        | 456,2911      | 0,4        | 430,5476      |
| 0,5        | 525,3513      | 0,5        | 519,7278      | 0,5        | 513,7332      | 0,5        | 486,127       |
| 0,6        | 571,2815      | 0,6        | 562,8934      | 0,6        | 556,5103      | 0,6        | 528,919       |
| 0,7        | 609,0178      | 0,7        | 600,4722      | 0,7        | 593,8826      | 0,7        | 567,5217      |

Tablo 4.2. (Devamı)

| 3,2 mm     |               | 2 mm       |               | 1,5 mm     |               | 1 mm       |               |
|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|
| $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ | $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ | $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ | $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ |
| 0,8        | 643,6264      | 0,8        | 633,6259      | 0,8        | 624,5326      | 0,8        | 600,1329      |
| 0,9        | 679,7152      | 0,9        | 663,7058      | 0,9        | 658,1247      | 0,9        | 627,8308      |
| 1          | 719,9341      | 1          | 695,7868      | 1          | 688,6106      | 1          | 660,4553      |

Tablo 4.3. 700°C'de tavllanmış 4 farklı numune boyutu için belirli gerçek birim şekil değişimi değerlerine karşılık gelen gerçek gerilme değerleri

| 3,2 mm     |               | 2 mm       |               | 1,5 mm     |               | 1 mm       |               |
|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|
| $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ | $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ | $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ | $\epsilon$ | $\sigma(MPa)$ |
| 0,05       | 119,7587      | 0,05       | 120,6562      | 0,05       | 114,1971      | 0,05       | 108,0082      |
| 0,1        | 165,3305      | 0,1        | 166,8312      | 0,1        | 160,5375      | 0,1        | 150,803       |
| 0,2        | 259,1117      | 0,2        | 259,2297      | 0,2        | 254,1303      | 0,2        | 240,8427      |
| 0,3        | 352,0239      | 0,3        | 349,7096      | 0,3        | 343,5935      | 0,3        | 332,0145      |
| 0,4        | 431,3776      | 0,4        | 425,3093      | 0,4        | 418,2727      | 0,4        | 402,4239      |
| 0,5        | 491,7794      | 0,5        | 483,9438      | 0,5        | 474,3461      | 0,5        | 462,1718      |
| 0,6        | 541,5992      | 0,6        | 528,9856      | 0,6        | 518,3191      | 0,6        | 503,1167      |
| 0,7        | 581,764       | 0,7        | 567,1883      | 0,7        | 558,0593      | 0,7        | 545,5179      |
| 0,8        | 619,1597      | 0,8        | 601,5957      | 0,8        | 590,4454      | 0,8        | 573,9769      |
| 0,9        | 656,2923      | 0,9        | 632,9711      | 0,9        | 621,2036      | 0,9        | 608,713       |
| 1          | 697,5328      | 1          | 667,426       | 1          | 652,4471      | 1          | 641,8474      |

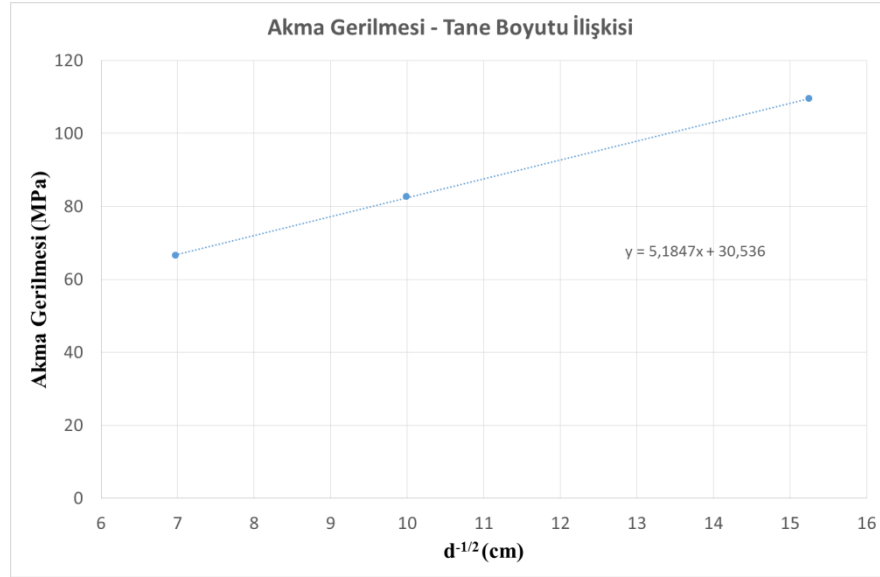
Boyutlar büyüdükçe numunelerin kesitlerinde bulunan tane sayısı artar. Dolayısıyla kare kesit kenarı 3,2 mm olan en büyük boy numunelerde diğerlerine nazaran daha fazla tane vardır. Çok taneli makro boyutta numune davranışı gösteren, ya da çok taneli makro boyutta numune davranışa en yakın davranış sergileyen numuneler, en büyük boy, yani kare kesit kenarı 3,2 mm olan numunelerdir. Söz konusu bu en büyük boy numuneler, için her bir tane boyutuna ait ortalama akma gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerinden, % 0,2 akma gerilmeleri belirlenerek, malzemenin Hall-Petch sabitleri belirlenmiştir. Grafikselsel olarak belirlenen %0,2 akma gerilmesi değerleri Tablo 3.4.'te verilmiştir. Görüldüğü gibi tane boyutu arttıkça akma gerilmesi azalmaktadır. Bilindiği üzere Hall-Petch bağıntısı tane boyutu ile akma dayanımı arasındaki ilişkiyi belirleyen bir denklemdir.

Şekil 4.8.'de 3,2 mm kare kesitli numuneler için %0,2 akma dayanımının bir bölü karekök tane boyutuna göre değişimi gösterilmiştir. Burada da görüleceği üzere akma

dayanımı tane boyutunun karekökünün tersiyle doğru orantılı değişmektedir. Deney malzemesine ait Hall-Petch sabitleri  $\sigma_0 = 30,54$  MPa ve  $k = 5,19$  MPa $\text{cm}^{\frac{1}{2}}$  olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.4. Kare kesit kenarı 3,2 mm olan farklı tane boyutlarına sahip en büyük boy numuneler için basma deneyleri ile elde edilen %0,2 akma dayanımı değerleri

| Tane boyutu ( $\mu\text{m}$ ) | %0,2 Akma Gerilmesi (MPa) |
|-------------------------------|---------------------------|
| 43                            | 109,5                     |
| 100,2                         | 82,61                     |
| 205,8                         | 66,5                      |



Şekil 4.10. Kare kesit kenarı 3,2 mm olan kare kesitli en büyük boy numunelerde %0,2 akma dayanımının bir bölü karekök tane boyutuna göre değişimi

## BÖLÜM 5. YÜZEY TABAKASI MODELİNİN YENİ BİR ŞEKİLDE UYGULANMASI

### 5.1. Yüzey Tabakası Modelinin Yeni Bir Şekilde Uygulanması

Mikro-şekillendirme için geçerli bir malzeme modelinin, numune boyutu küçüldükçe malzemenin akma gerilmesinde meydana gelen azalmayı tahmin etmesi gerekir. Bunun sağlanması için bu tez kapsamında yüzey tabakası modeli kullanılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi yüzey tabakası modeline göre malzeme yüzey tanelerinden ve hacim (iç) tanelerden oluşur ve Denklem 1.3 kullanılmasıyla malzemenin akma gerilmesi, “ $\sigma$ ” , yüzey tanelerinin akma gerilmesi, “ $\sigma_s$ ”, hacim tanelerinin akma gerilmesi, “ $\sigma_i$ ” ve yüzey tanelerinin kesitte kapladığı alanın oranına “ $\mu$ ” göre hesaplanabilir. Yüzey tabakası modeline göre malzemenin akma gerilmesinin hesaplanması için yüzey tanelerinin ve hacim tanelerinin akma gerilmelerinin belirlenmesi gerekir.

Şimdiye kadar mikro şekillendirmede malzeme deformasyon davranışının modellenmesinde, yüzey tabakası modelinin kullanıldığı araştırmalarda tek bir tane boyutu için hesaplama yapılmıştır. Söz konusu araştırmaların bir kısmında ise tane boyutundan bağımsız olarak yüzey tanelerinin akma eğrisinin tane boyutundan bağımsız olarak, tüm tane boyutları için aynı olduğu kabulü ile hesaplamalar yapılmıştır. Söz konusu bu bir kısım araştırmada yüzey tanelerinin tek kristal malzemeler gibi deforme olduğu kabulü ile yüzey tanelerinin akma eğrisi tek kristal için hesaplanan akma eğrisiyle temsil edilmiştir.

Bu tez kapsamında, yüzey tanelerinin akma eğrisinin tane boyutuna göre değişkenlik gösterebileceği düşünülmüştür. Şekil 4.5.’te verilen akma eğrilerine göre farklı tane

boyutlarına sahip CuZn30 pirinç malzemeleri için yüzey tabakasının (yüzey tanelerinin) akma eğrileri hesaplanabilir.

Aynı koşullarda, yani aynı sıcaklık ve sürede tavlanan farklı boyuttaki numunelerin tane boyutları nispeten birbirine yakın olduğu için, bu numuneleri oluşturan yüzey ve hacim tanelerinin akma gerilmeleri de birbirine yakındır. Dolayısıyla bu numuneleri oluşturan yüzey ve hacim taneleri için ortalama bir akma gerilmesi hesaplanabilir.

Yüzey tanelerinin akma gerilmesi hacim tanelerine göre daha düşüktür. Numune boyutu azaldıkça yüzey tanelerinin toplam kesitte kapladıkları alanın oranı artar ve malzemenin akma gerilmesi düşer. Yani, sabit bir tane boyutu ya da birbirine yakın tane boyutları için numune boyutu azaldıkça, yüzey tanelerinin toplam kesitte kapladıkları alanın oranı orantılı bir şekilde artar. Dolayısıyla, tane boyutu sabit tutulursa ya da birbirine yakın tane boyutları için, numune boyutu küçüldükçe akma gerilmesinin doğru orantılı bir şekilde düşmesi gerekir. Bir başka deyişle, birbirine yakın tane boyutuna sahip numunelerde, numune boyutu azaldıkça, yüzey tanelerinin toplam kesitte kapladığı alan artar ve bu artışa ters orantılı bir şekilde malzemenin akma gerilmesi düşmelidir.

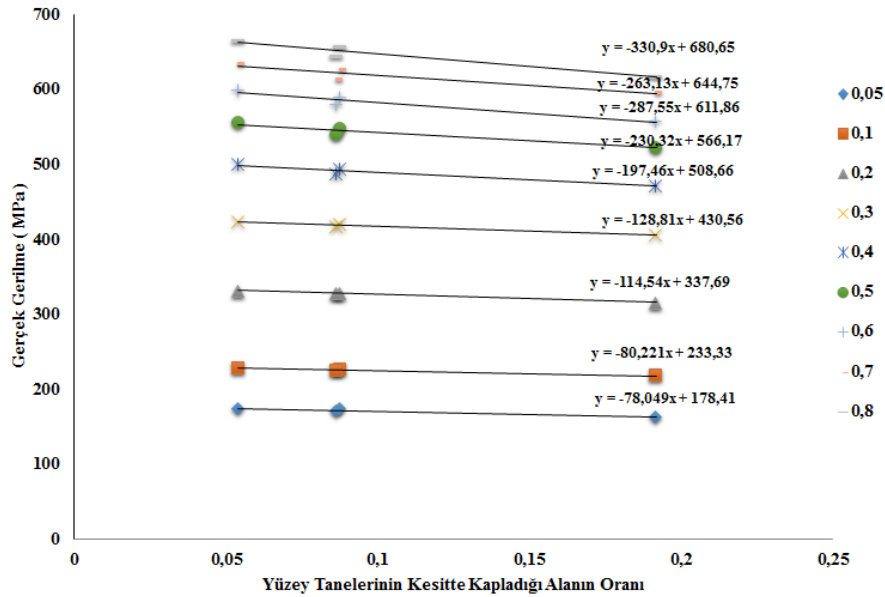
Denklem 2.3'ün kullanılmasıyla kare kesitli numunelerde her bir numune ve tane boyutu kombinasyonu için yüzey tanelerinin toplam kesitte kapladıkları alanın oranı hesaplanabilir. Tablo 5.1.'de tüm numune boyutu tavlama sıcaklığı (tane boyutu) kombinasyonları için malzemenin hesaplanan yüzey tabakası oranları verilmiştir.

Tablo 5.1. Basma deneylerinde kullanılan kare kesitli numunelerde yüzey tanelerinin oranı

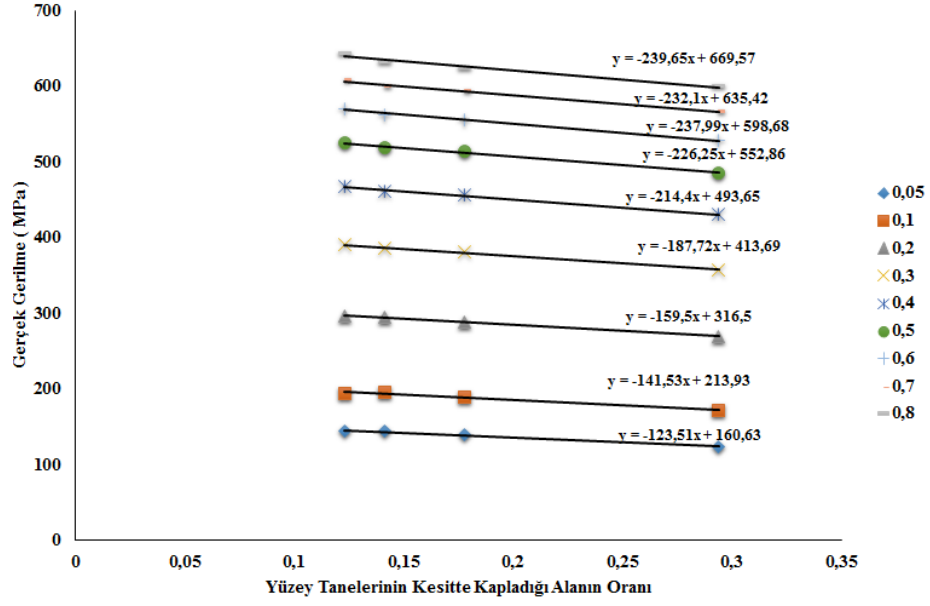
| Kare Kesit Numune<br>Uzunluğu | Tavlama Sıcaklığı 500°C | Tavlama Sıcaklığı 650°C | Tavlama Sıcaklığı 700°C |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                               | %Yüzey Oranı            | %Yüzey Oranı            | %Yüzey Oranı            |
| 3,2 mm                        | 5,3735                  | 12,2916                 | 24,3738                 |
| 2 mm                          | 8,7072                  | 14,1086                 | 26,8413                 |
| 1,5 mm                        | 8,64                    | 17,8016                 | 33,0019                 |
| 1 mm                          | 19,1728                 | 29,3877                 | 43,0705                 |

Daha önce belirtildiği gibi, yüzey tabakası modeline göre, tane boyutu sabit tutulursa, ya da birbirine yakın tane boyutlarına sahip farklı boyuttaki numuneler için, numune

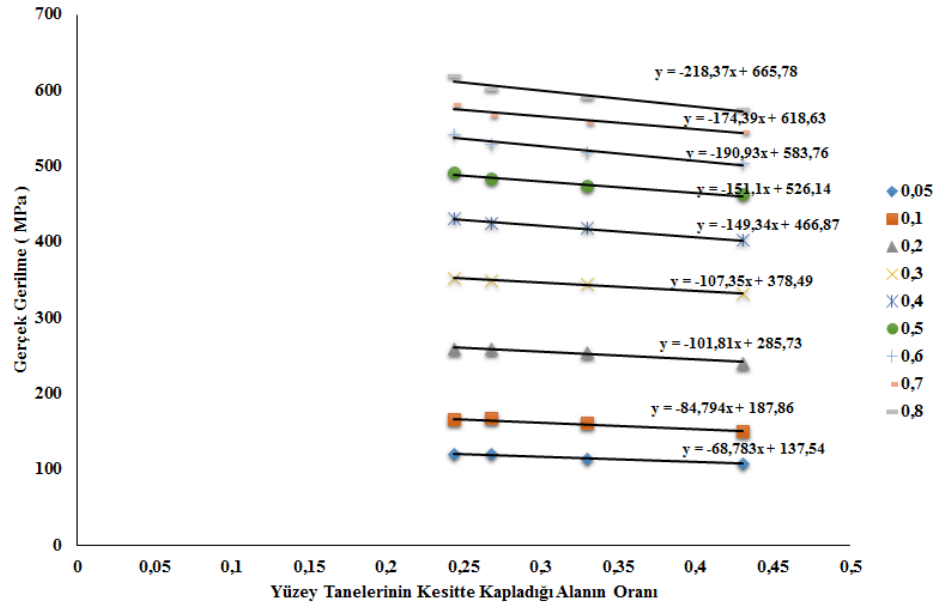
boyutu küçüldükçe, yüzey tanelerinin toplam kesitte kapladığı alan orantılı bir şekilde artmalıdır. Malzemenin akma gerilmesi ise yüzey tanelerinin toplam kesitte kapladığı oranın artmasına ters orantılı olarak düşmelidir. Bu yaklaşımla aynı sıcaklıkta tavlanan farklı boyuttaki numunelerin tane boyutları nispeten birbirlerine yakın olduğu için, her bir tav sıcaklığı için, belirli birim şekil değiştirme değerlerinde, akma gerilmesinin değişimi yüzey tanelerinin toplam kesitte kapladıkları alanın oranına göre aynı grafikte gösterilmiştir. Şekil 5.1. , 500°C’de tavllanmış numunelerde akma gerilmesinin yüzey tanelerinin toplam kesitte kapladıkları orana göre değişimi gösterilmiştir. Şekil 5.2. ve 5.3.’te ise sırasıyla 650°C’de ve 700°C’de tavllanmış numuneler için, belirli birim şekilde değiştirme değerlerinde, akma gerilmesinin yüzey tanelerinin toplam kesitte kapladıkları alan oranına göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.1. 500°C’de tavllanmış, 3,2 mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm kare kesit kenarına sahip numunelerde, belirli birim şekil değiştirme değerleri için akma gerilmesinin yüzey tanelerinin kesitte kapladıkları alan oranına göre değişimi



Şekil 5.2. 650°C'de tavlannmış 3,2 mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm kare kesit kenarına sahip numunelerde, belirli birim şekil değiştirme değerleri için akma gerilmesinin yüzey tanelerinin kesitte kapladıkları alan oranına göre değişimi



Şekil 5.3. 700°C'de tavlannmış 3,2 mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm kare kesit kenarına sahip numunelerde, belirli birim şekil değiştirme değerleri için akma gerilmesinin yüzey tanelerinin kesitte kapladıkları alan oranına göre değişimi

Grafiklerden görüleceği gibi her bir tavlama sıcaklığı için belirli bir birim şekil değiştirme değerinde yüzey tanelerinin toplam kesitte kapladıkları alan oranının artmasıyla akma gerilmesi düşmektedir. Grafiklerde, belirli bir gerçek birim şekil değiştirme değerinde farklı yüzey tanesi oranına karşılık gelen akma gerilmesi

değerlerine, excel programı vasıtasıyla birer doğru uydurulmuş ve birbirlerine nispeten yakın tane boyutları için, yani aynı tavlama sıcaklığı için, malzeme akma gerilmesinin yüzey tanelerinin kesitte kapladıkları alan oranında meydana gelen artışa ters orantılı olarak düştüğü gösterilmiştir. Uydurulan doğruya ait doğru, denklemleri de grafik üzerinde gösterilmiştir. Bu denklemlerde x yüzey tanelerinin kesitte kapladıkları oranı, y değeri ise gerçek akma gerilmesi değerini vermektedir. Söz konusu bu denklemler yardımıyla, her bir tavlama sıcaklığı için, yani birbirlerine nispeten yakın tane boyutları için belirli gerçek birim şekil değiştirme değerlerinde malzemeye ait yüzey tanelerinin ve hacim tanelerinin ortalama akma gerilmeleri hesaplanabilir. Tamamen yüzey tanelerinden oluşan bir malzeme için yüzey tanelerinin oranı 1 değerini alır. Denklemlerde yüzey taneleri oranını belirten x'in değerine 1 verilerek belirli bir tav sıcaklığı ve gerçek birim şekil değiştirme değeri için yüzey tanelerinin ortalama akma gerilmesi hesaplanabilir. Tamamen hacim tanelerinden oluşan teorik bir malzemede ise yüzey tanelerinin oranı 0 değerini alır. Denklemlerde yüzey tanelerinin oranına sıfır değeri verilmesiyle, belirli bir tavlama sıcaklığı ve gerçek birim şekil değiştirme değeri için hacim tanelerinin ortalama akma gerilmesi hesaplanabilir. Bu şekilde, 500°C, 650°C ve 700°C' de tavllanmış malzemeler için belirli gerçek birim şekil değiştirme değerlerinde hesaplanan yüzey taneleri ve hacim taneleri ortalama akma gerilmeleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Tablolardan görüleceği üzere yüzey tanelerinin akma gerilmeleri her bir tavlama sıcaklığı için farklılık göstermektedir. Bir başka deyişle, yüzey taneleri akma gerilmeleri tane boyutuna göre değişkenlik göstermektedir. Daha önce belirtildiği gibi literatürde farklı tane boyutları için yüzey tanelerinin akma gerilmelerinin hesaplandığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Hatta bazı çalışmalarda yüzey tanelerinin tane boyutundan bağımsız olarak tek bir akma eğrisine sahip olduğu kabulü ile hesaplama yapılmıştır.

Tablo 5.2. 500°C, 650°C ve 700°C 'de tavlanan malzemeler için belirli gerçek birim şekil değiştirme değerlerinde hesaplanan yüzey tanelerinin ve iç tanelerin akma gerilme değerleri

| $\epsilon$ | 500°C (43,275 $\mu\text{m}$ ) |                  | 650°C (81,65 $\mu\text{m}$ ) |                  | 700°C (153,65 $\mu\text{m}$ ) |                  |
|------------|-------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|
|            | $\sigma_i$ (MPa)              | $\sigma_y$ (MPa) | $\sigma_i$ (MPa)             | $\sigma_y$ (MPa) | $\sigma_i$ (MPa)              | $\sigma_y$ (MPa) |
| 0,05       | 178,41                        | 100,361          | 160,63                       | 37,12            | 173,54                        | 68,757           |
| 0,1        | 233,33                        | 153,109          | 213,93                       | 72,4             | 187,86                        | 103,066          |
| 0,2        | 337,69                        | 223,15           | 316,5                        | 157              | 285,73                        | 183,92           |



Tablo 5.2. (Devamı)

| $\epsilon$ | 500°C (43,275 $\mu\text{m}$ ) |                  | 650°C (81,65 $\mu\text{m}$ ) |                  | 700°C (153,65 $\mu\text{m}$ ) |                  |
|------------|-------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|
|            | $\sigma_x$ (MPa)              | $\sigma_y$ (MPa) | $\sigma_x$ (MPa)             | $\sigma_y$ (MPa) | $\sigma_x$ (MPa)              | $\sigma_y$ (MPa) |
| 0,3        | 430,56                        | 301,75           | 413,69                       | 225,97           | 378,49                        | 271,14           |
| 0,4        | 508,66                        | 311,2            | 493,65                       | 279,25           | 466,87                        | 317,53           |
| 0,5        | 566,17                        | 335,85           | 552,86                       | 326,61           | 526,14                        | 375,04           |
| 0,6        | 611,86                        | 324,31           | 559,68                       | 360,69           | 583,76                        | 392,83           |
| 0,7        | 644,75                        | 381,62           | 635,42                       | 403,32           | 618,63                        | 444,24           |
| 0,8        | 680,85                        | 349,95           | 669,57                       | 429,92           | 665,78                        | 447,41           |
| 0,9        | 711,83                        | 365,66           | 708,19                       | 431,8            | 700,17                        | 479,01           |
| 1          | 745,57                        | 373,78           | 746,5                        | 445,92           | 745,76                        | 491,38           |

Her bir tavlama sıcaklığı için yüzey tanelerinin ve iç tanelerin akma gerilmeleri ve her numune ve tane boyutu kombinasyonu için yüzey tanelerinin oranı bilindiğine göre, Denklem 1.1 kullanılarak, her bir numune boyutu, tavlama sıcaklığı (tane boyutu) kombinasyonu için belirli bir gerçek birim şekil değiştirme değerinde akma gerilmesi hesaplanabilir. Yüzey tabakası modeline göre, yani Denklem 2.1'e göre elde edilen akma gerilmesi değerleri Tablo 5.3. , 5.4. ve 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.3. 500°C'de tavllanmış ve kare kesit kenar 3,2mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm olan numuneler için oluşturulan yüzey tabakası modeli ile hesaplanan akma gerilmesi değerleri

| 3,2 mm     |                | 2 mm       |                | 1,5 mm     |                | 1 mm       |                |
|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|
| $\epsilon$ | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ | $\sigma$ (MPa) |
| 0,05       | 174,216        | 0,05       | 171,6141       | 0,05       | 171,6666       | 0,05       | 163,4458       |
| 0,1        | 229,0193       | 0,1        | 226,345        | 0,1        | 226,3989       | 0,1        | 217,9494       |
| 0,2        | 331,5352       | 0,2        | 327,7167       | 0,2        | 327,7937       | 0,2        | 315,7295       |
| 0,3        | 423,6384       | 0,3        | 419,3442       | 0,3        | 419,4308       | 0,3        | 405,8635       |
| 0,4        | 498,0495       | 0,4        | 491,4667       | 0,4        | 491,5994       | 0,4        | 470,8014       |
| 0,5        | 553,7937       | 0,5        | 546,1155       | 0,5        | 546,2703       | 0,5        | 522,0112       |
| 0,6        | 596,4085       | 0,6        | 586,8223       | 0,6        | 587,0157       | 0,6        | 556,7286       |
| 0,7        | 630,6107       | 0,7        | 621,8386       | 0,7        | 622,0155       | 0,7        | 594,3006       |
| 0,8        | 663,0691       | 0,8        | 652,0377       | 0,8        | 652,2602       | 0,8        | 617,4072       |
| 0,9        | 693,2285       | 0,9        | 681,6881       | 0,9        | 681,9209       | 0,9        | 645,4595       |
| 1          | 725,5918       | 1          | 713,1973       | 1          | 713,4473       | 1          | 674,2874       |

Tablo 5.4. 650°C’de tavllanmış ve kare kesit kenar 3,2mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm olan numuneler için oluşturulan yüzey tabakası modeli ile hesaplanan akma gerilmesi değerleri

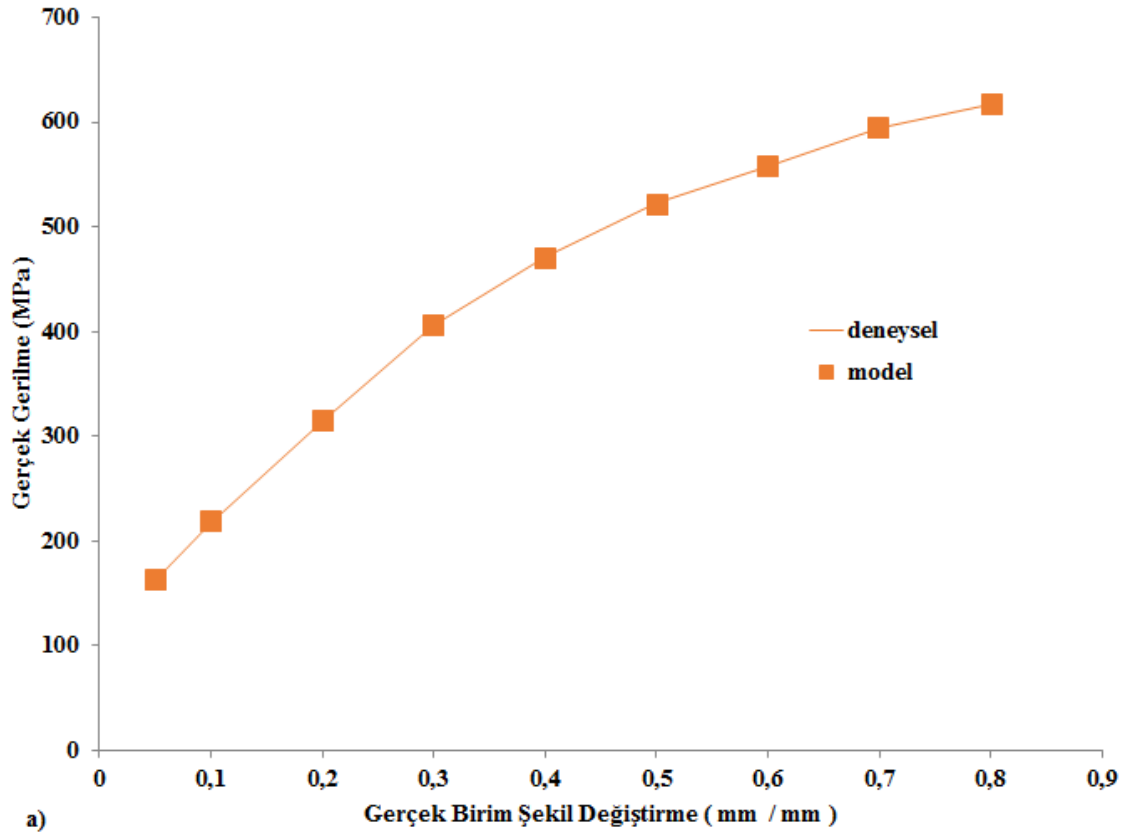
| 3,2 mm     |                | 2 mm       |                | 1,5 mm     |                | 1 mm       |                |
|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|
| $\epsilon$ | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ | $\sigma$ (MPa) |
| 0,05       | 145,4487       | 0,05       | 143,2044       | 0,05       | 138,6432       | 0,05       | 124,3333       |
| 0,1        | 196,5337       | 0,1        | 193,9621       | 0,1        | 188,7353       | 0,1        | 172,3377       |
| 0,2        | 296,8949       | 0,2        | 293,9968       | 0,2        | 288,1064       | 0,2        | 269,6267       |
| 0,3        | 390,6162       | 0,3        | 387,2053       | 0,3        | 380,2728       | 0,3        | 358,5235       |
| 0,4        | 467,2968       | 0,4        | 463,4011       | 0,4        | 455,4833       | 0,4        | 430,6429       |
| 0,5        | 525,0503       | 0,5        | 520,9393       | 0,5        | 512,5838       | 0,5        | 486,3704       |
| 0,6        | 569,4272       | 0,6        | 565,1029       | 0,6        | 556,3139       | 0,6        | 528,7403       |
| 0,7        | 606,8912       | 0,7        | 602,6739       | 0,7        | 594,1024       | 0,7        | 567,2113       |
| 0,8        | 640,1132       | 0,8        | 635,7587       | 0,8        | 626,9084       | 0,8        | 599,1425       |
| 0,9        | 674,2173       | 0,9        | 669,1952       | 0,9        | 658,988        | 0,9        | 626,9655       |
| 1          | 709,5539       | 1          | 704,0923       | 1          | 692,9918       | 1          | 658,1666       |

Tablo 5.5. 700°C’de tavllanmış ve kare kesit kenar 3,2mm, 2 mm, 1,5 mm ve 1 mm olan numuneler için yüzey tabakası modeli ile hesaplanan akma gerilmesi değerleri

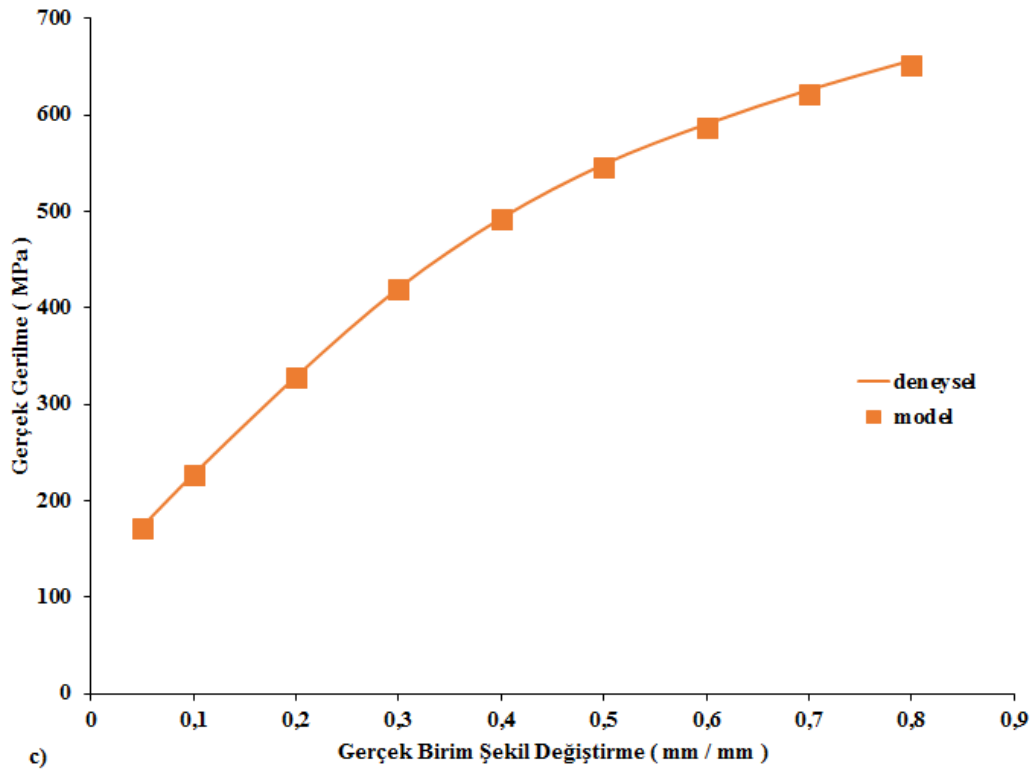
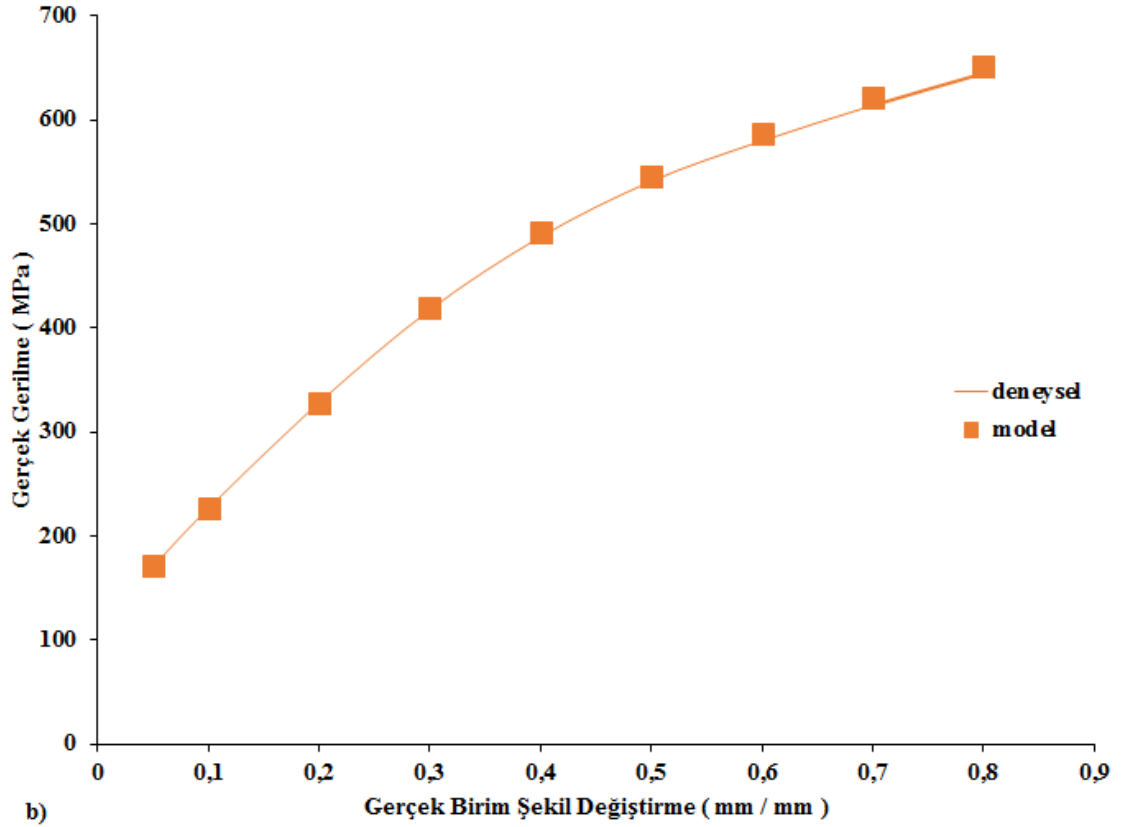
| 3,2 mm     |                | 2 mm       |                | 1,5 mm     |                | 1 mm       |                |
|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|
| $\epsilon$ | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ | $\sigma$ (MPa) |
| 0,05       | 120,775        | 0,05       | 119,0778       | 0,05       | 114,8403       | 0,05       | 107,9148       |
| 0,1        | 167,1925       | 0,1        | 165,1002       | 0,1        | 159,8764       | 0,1        | 151,3388       |
| 0,2        | 260,9151       | 0,2        | 258,4029       | 0,2        | 252,1308       | 0,2        | 241,8799       |
| 0,3        | 352,3248       | 0,3        | 349,6759       | 0,3        | 343,0625       | 0,3        | 332,2538       |
| 0,4        | 430,4702       | 0,4        | 426,7852       | 0,4        | 417,585        | 0,4        | 402,5485       |
| 0,5        | 489,3113       | 0,5        | 485,5828       | 0,5        | 476,2741       | 0,5        | 461,0605       |
| 0,6        | 537,2232       | 0,6        | 532,512        | 0,6        | 520,7495       | 0,6        | 501,5255       |
| 0,7        | 576,1246       | 0,7        | 571,8215       | 0,7        | 561,078        | 0,7        | 543,5193       |
| 0,8        | 612,555        | 0,8        | 607,1667       | 0,8        | 593,7137       | 0,8        | 571,7269       |
| 0,9        | 646,265        | 0,9        | 640,8079       | 0,9        | 627,183        | 0,9        | 604,9153       |
| 1          | 683,7581       | 1          | 677,4812       | 1          | 661,8098       | 1          | 636,1973       |

Tablo 5.3. , 5.4. ve 5.5.’te verilen, yüzey tabakası modeli ile hesaplanan değerler Tablo 4.1. , 4.2. ve 4.3.’te gösterilen deneysel verilere oldukça yakındır. Dolayısıyla, yüzey tabakası modeli ile farklı numune ve tane boyutuna sahip numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonuçları oldukça hassas bir şekilde tahmin edilmiştir. Her bir numune ve tane boyutu için yüzey tabakası modeli ile hesaplanan eğriler ve deneyler

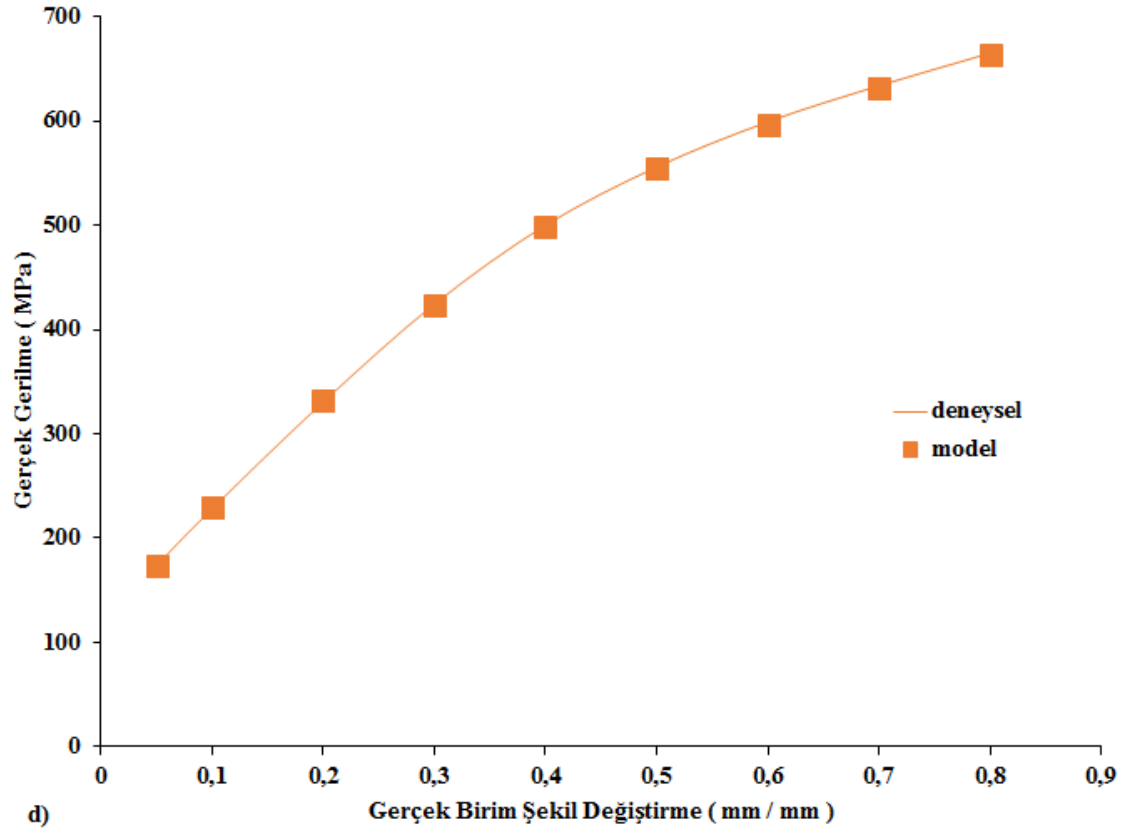
sonucu elde edilen ortalama eğriler aynı grafikte Şekil 5.4. , 5.5. ve 5.6.'da gösterilmiştir. Bu grafiklerden de görüleceği üzere yüzey tabakası modeli ile deneysel veriler oldukça doğru bir şekilde tahmin edilmektedir.



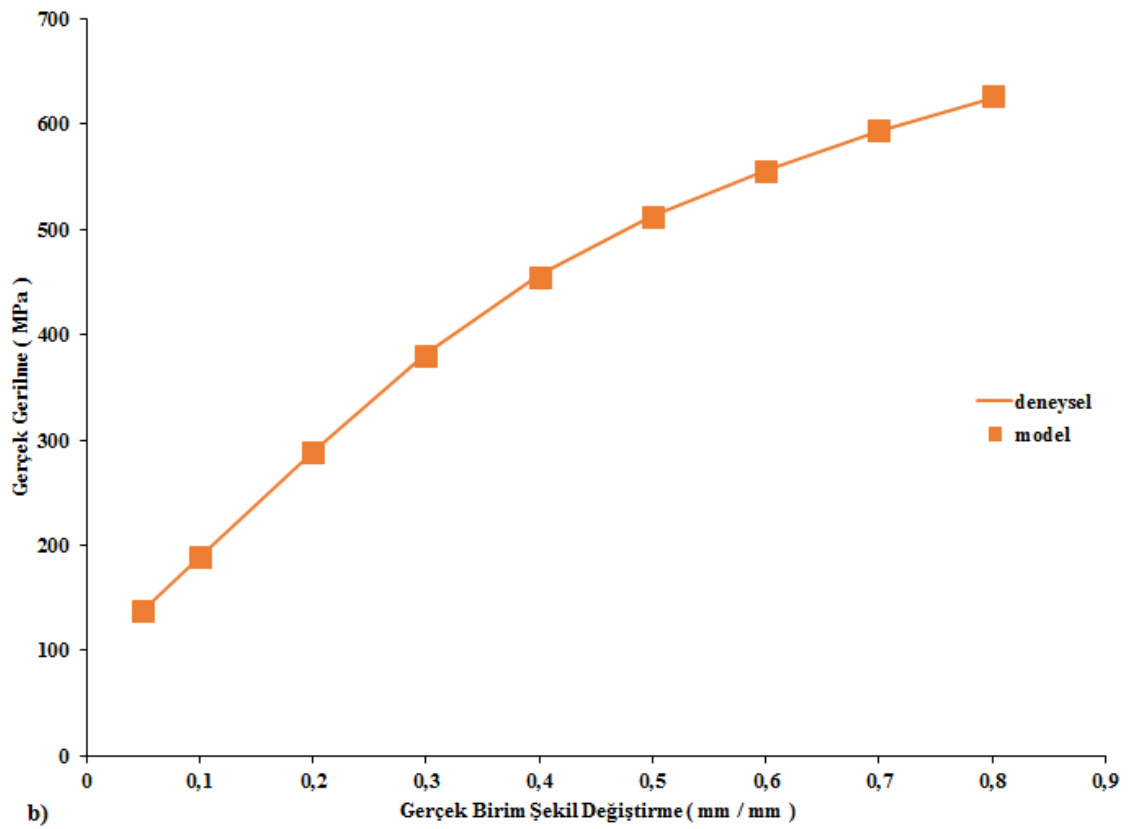
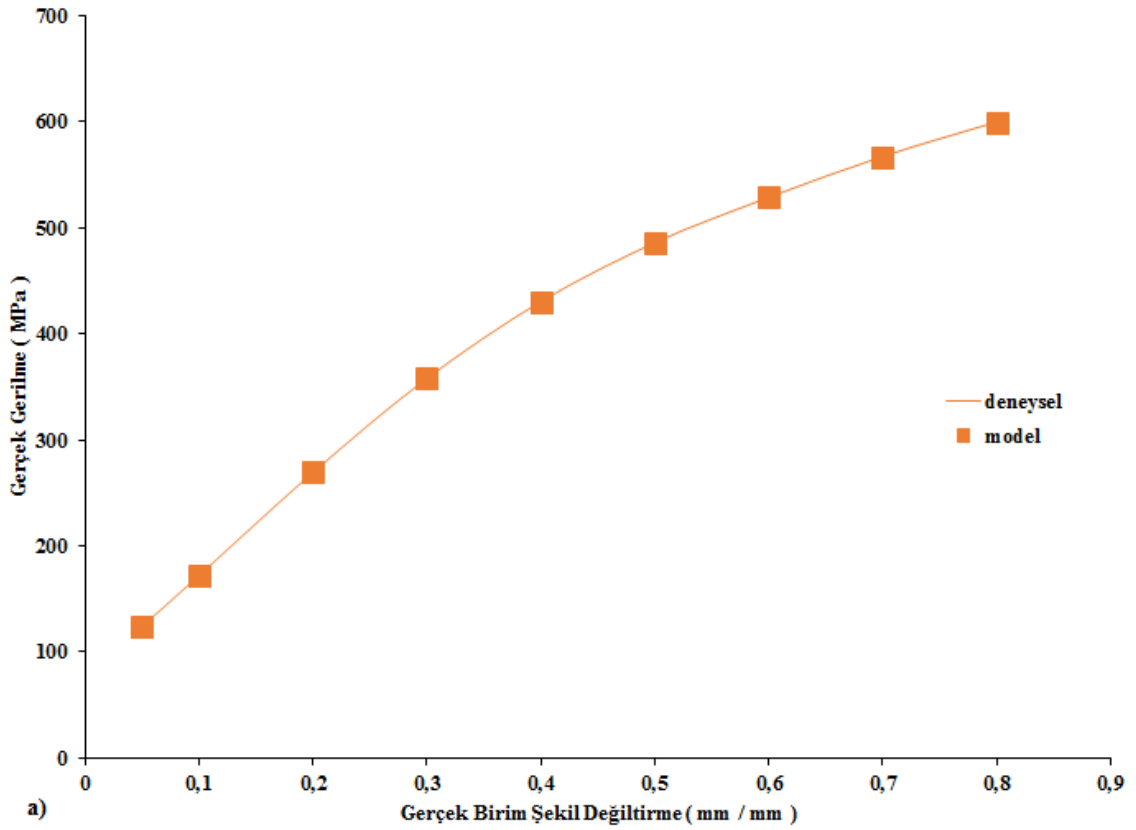
Şekil 5.4. 500°C'de tavllanmış kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numuneler için yüzey tabakası modeli ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması



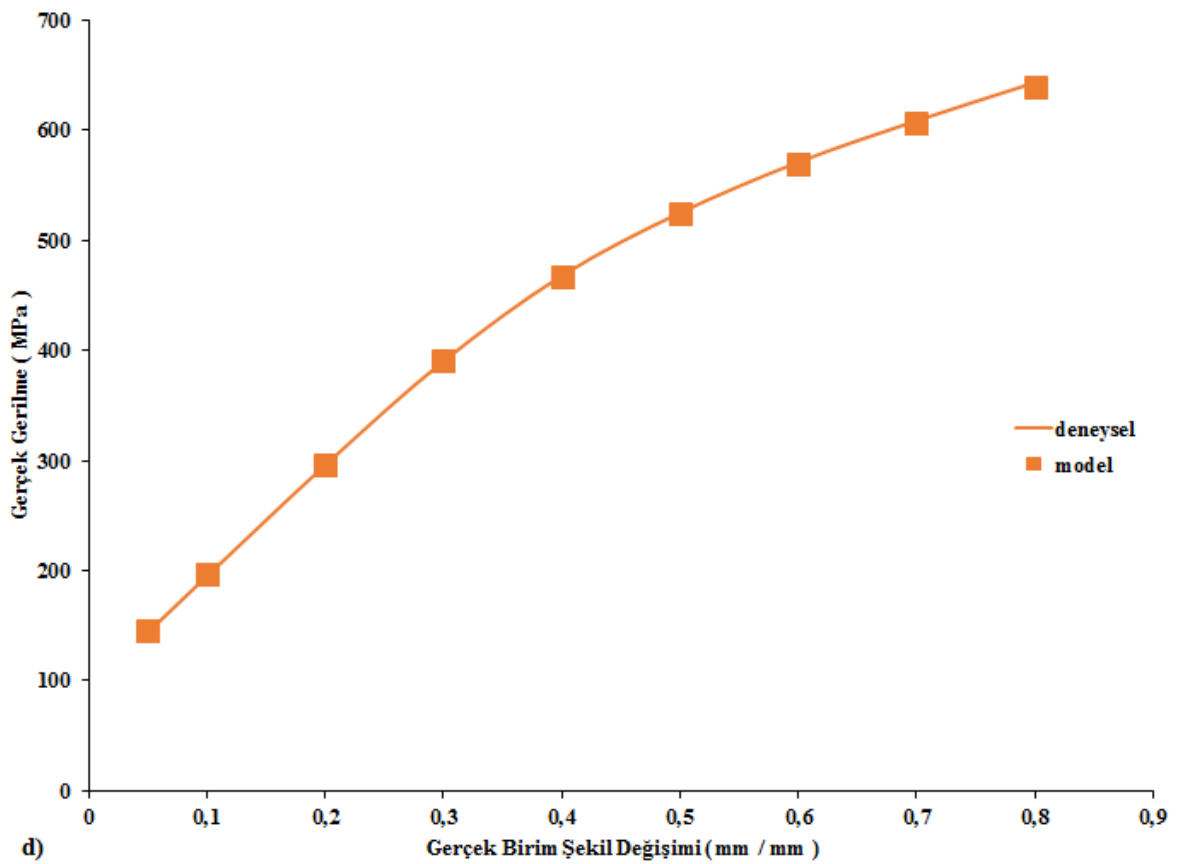
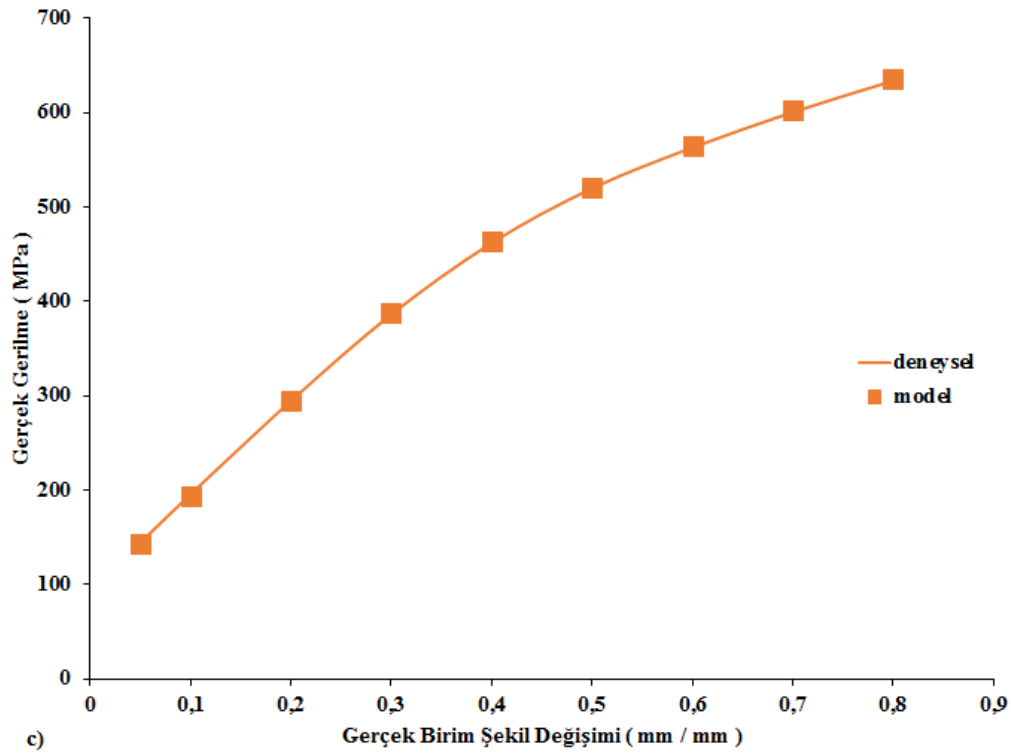
Şekil 5.4. 500°C'de tavllanmış kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numuneler için yüzey tabakası modeli ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması (Devamı)



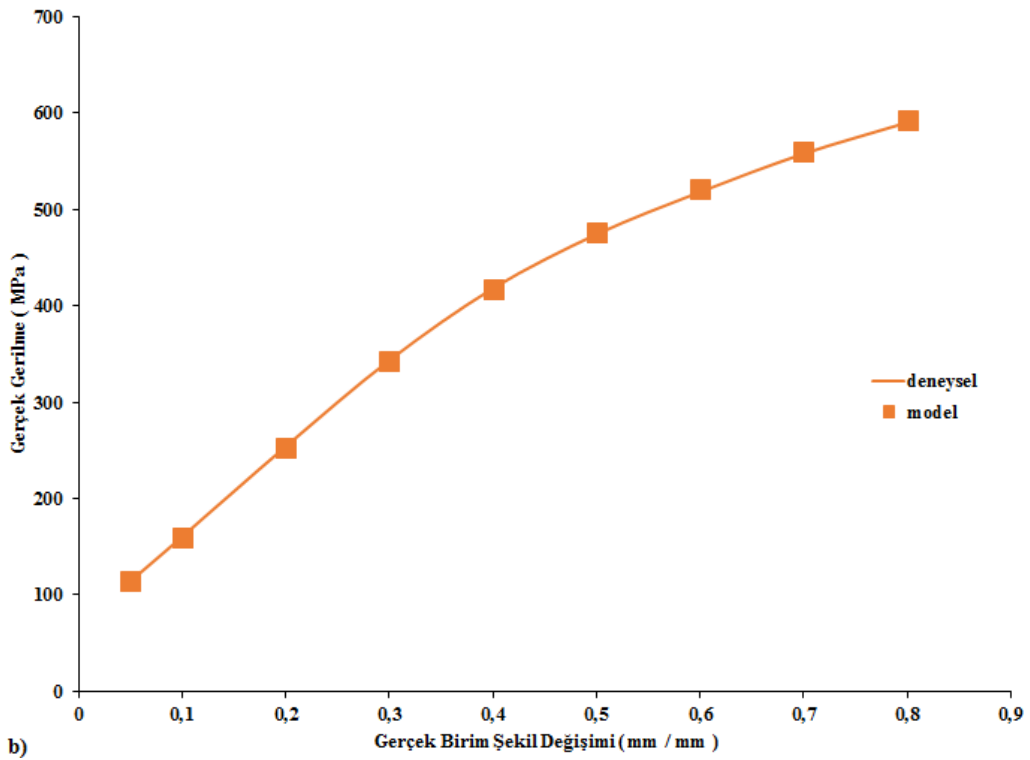
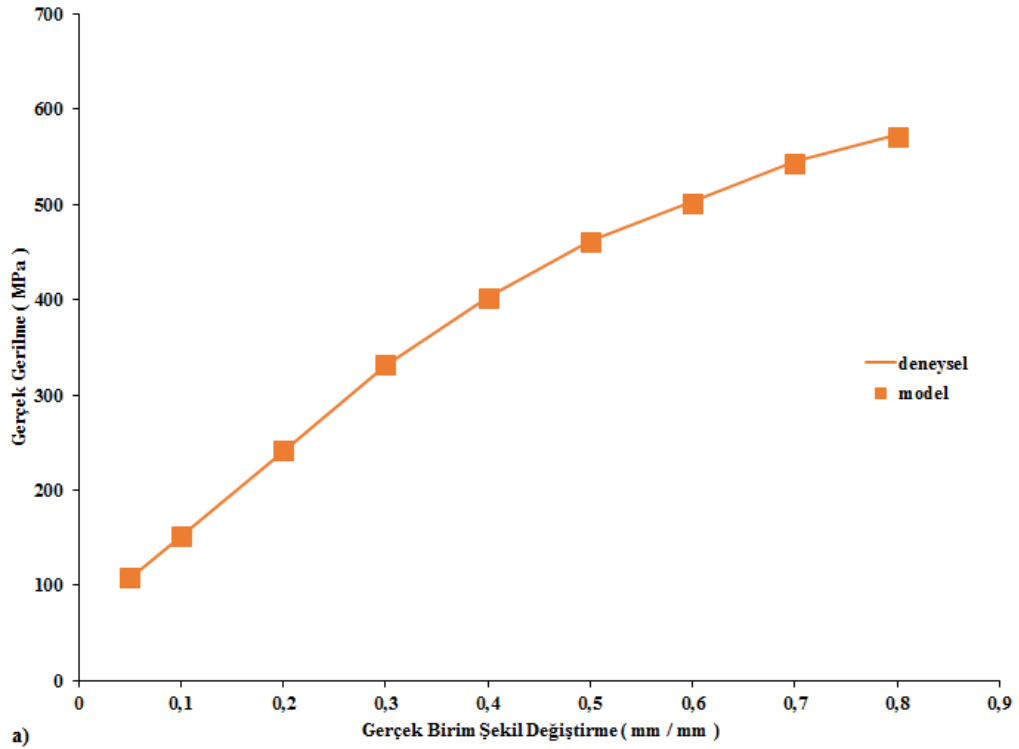
Şekil 5.4. 500°C’de tavllanmış kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numuneler için yüzey tabakası modeli ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması (Devamı)



Şekil 5.5. 650°C'de tavllanmış kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numuneler için yüzey tabakası modeli ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması

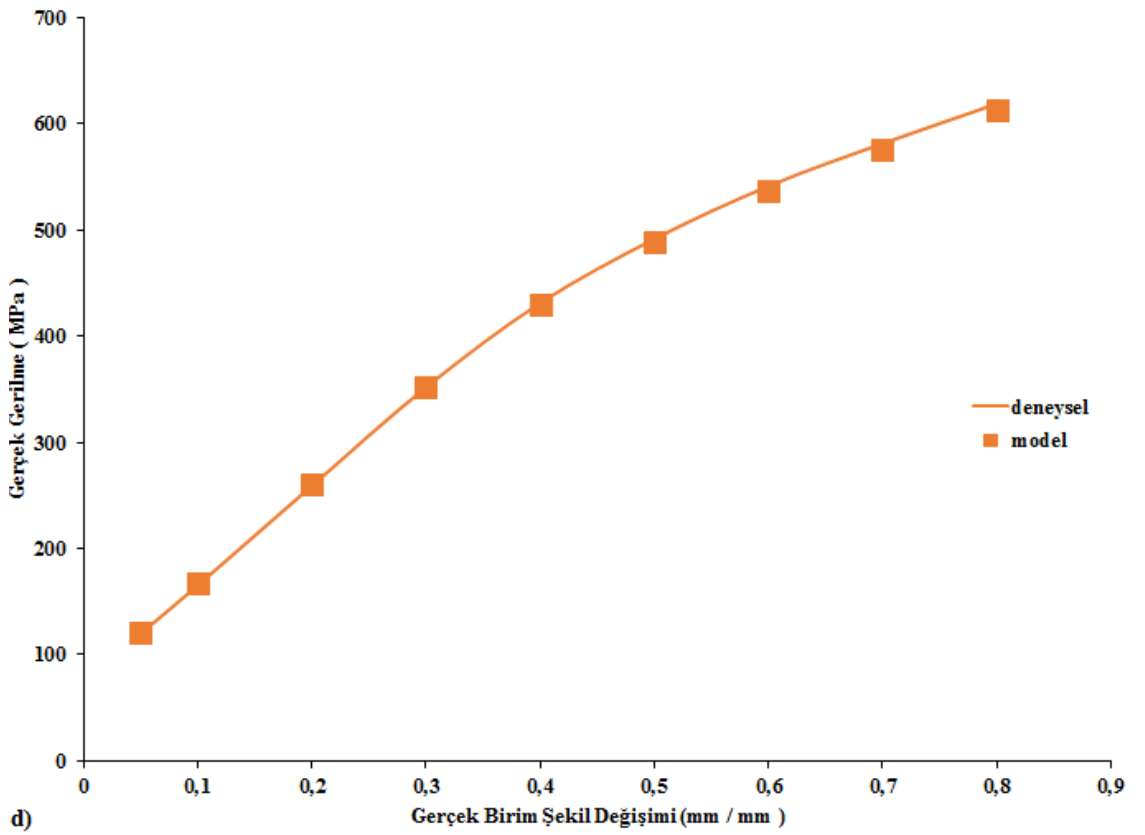
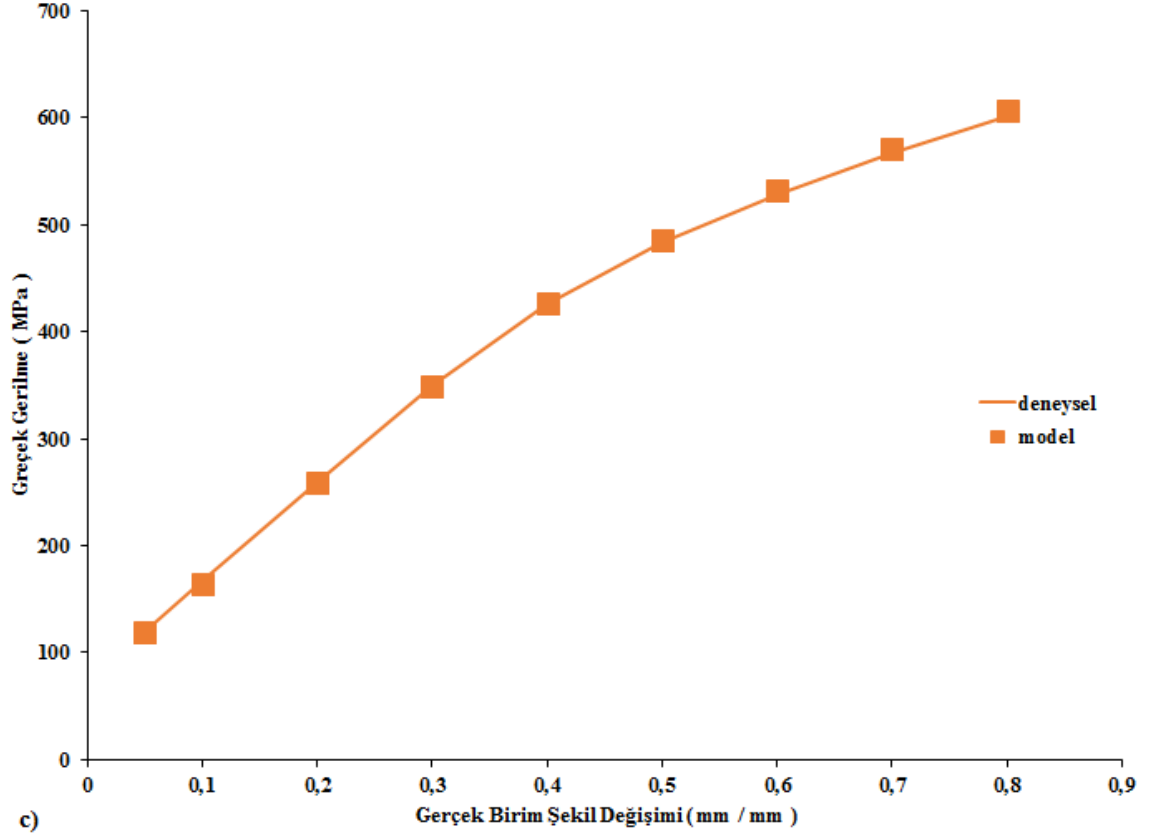


Şekil 5.5. 650°C’de tavllanmış kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numuneler için yüzey tabakası modeli ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması (Devamı)



Şekil 5.6. 700°C'de tavllanmış kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numuneler için yüzey tabakası modeli ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen alma eğrilerinin karşılaştırılması

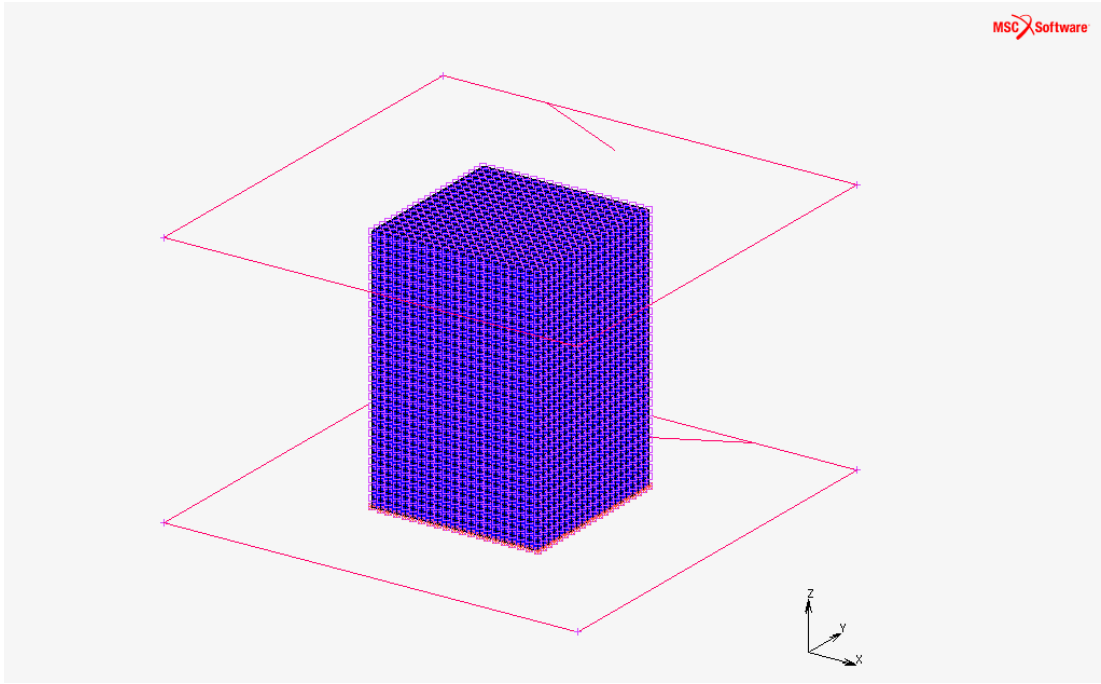




Şekil 5.6. 700°C'de tavlanmış kare kesit kenarı a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm olan numuneler için yüzey tabakası modeli ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen alma eğrilerinin karşılaştırılması (Devamı)

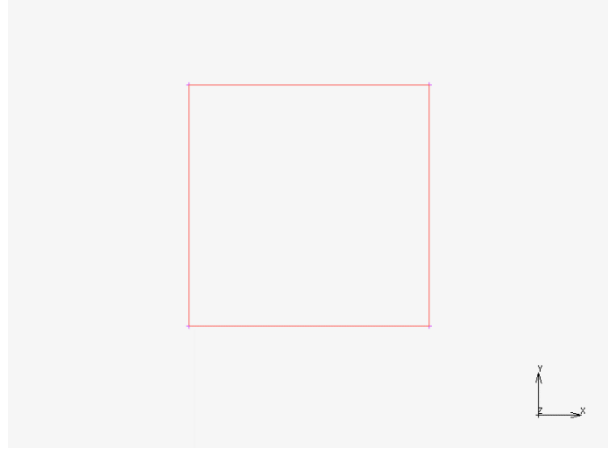
## BÖLÜM 6. SONLU ELEMAN ANALİZLERİNİN YAPILMASI

Yüzey tabakası modelinin yeni bir şekilde uygulanması ile elde edilen akma eğrilerinin kullanılmasıyla mikro basma deneylerinin bilgisayar ortamında sonlu elemanlar benzeşimleri de gerçekleştirilmiştir. Söz konusu sonlu elemanlar benzeşimlerin gerçekleştirilmesinde Marc ticari yazılımı kullanılmıştır. Benzeşimlerin gerçekleştirilmesinde öncelikle basma deneyinin bir modeli programda oluşturulmuştur. Oluşturulan model Şekil 6.1.'de verilmiştir.



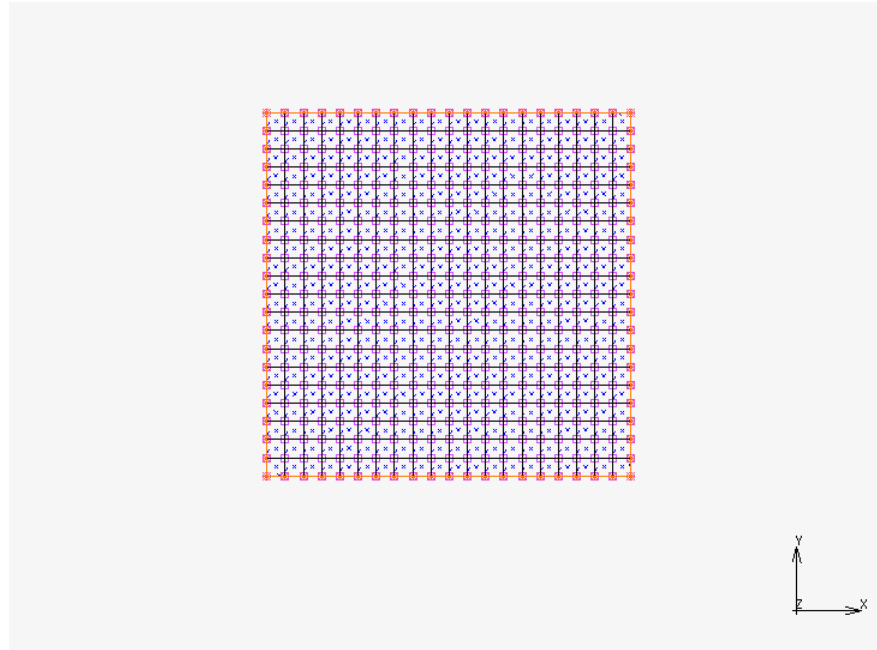
Şekil 6.1.Sonlu elemanlar analizleri için oluşturulan mikro-basma deney modeli

Modelin oluşturulmasında, ilk önce Marc programı içinde bulunan Geometry&Mesh menüsünden basma numunesinin kesiti gerekli komutlar kullanılarak çizilmiştir.(Şekil 6.2.)



Şekil 6.2. Numune Modelinin kesit görünümü

Sonlu Eleman Analizlerinin yapılabilmesi için numune model kesiti küçük parçalara ayrılmıştır. Şekil 6.3.'de numune modelinin mesh atılmış kesit görüntüsü alınarak verilmiştir.

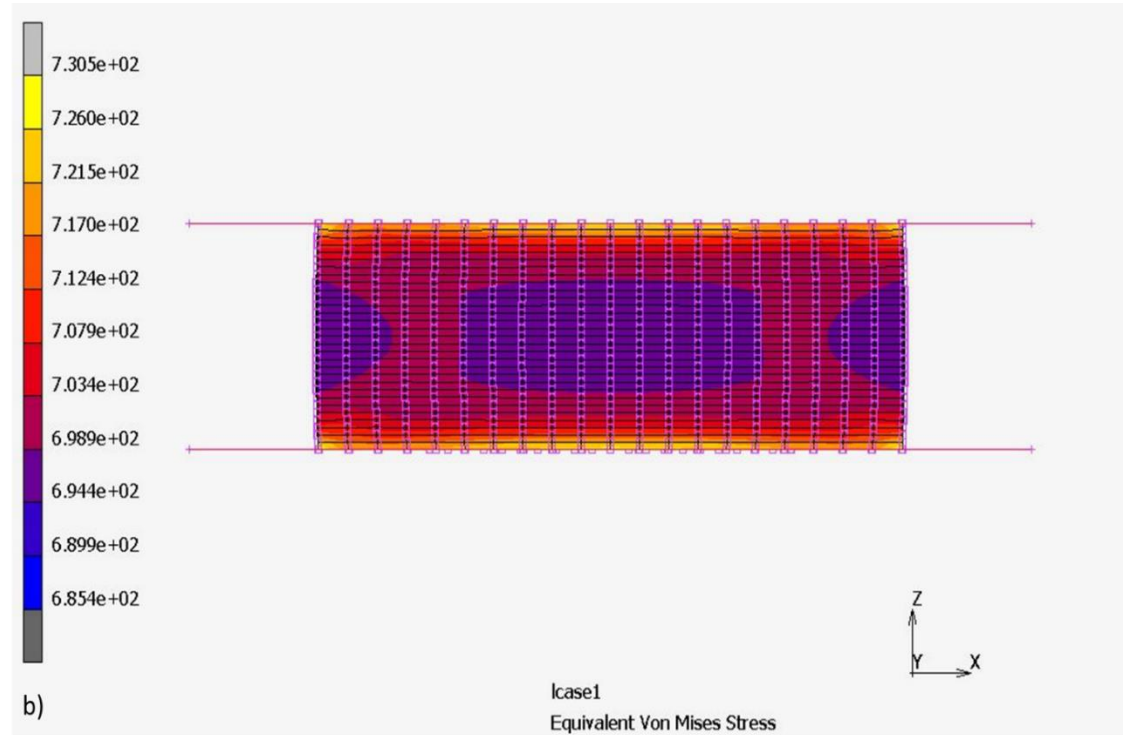
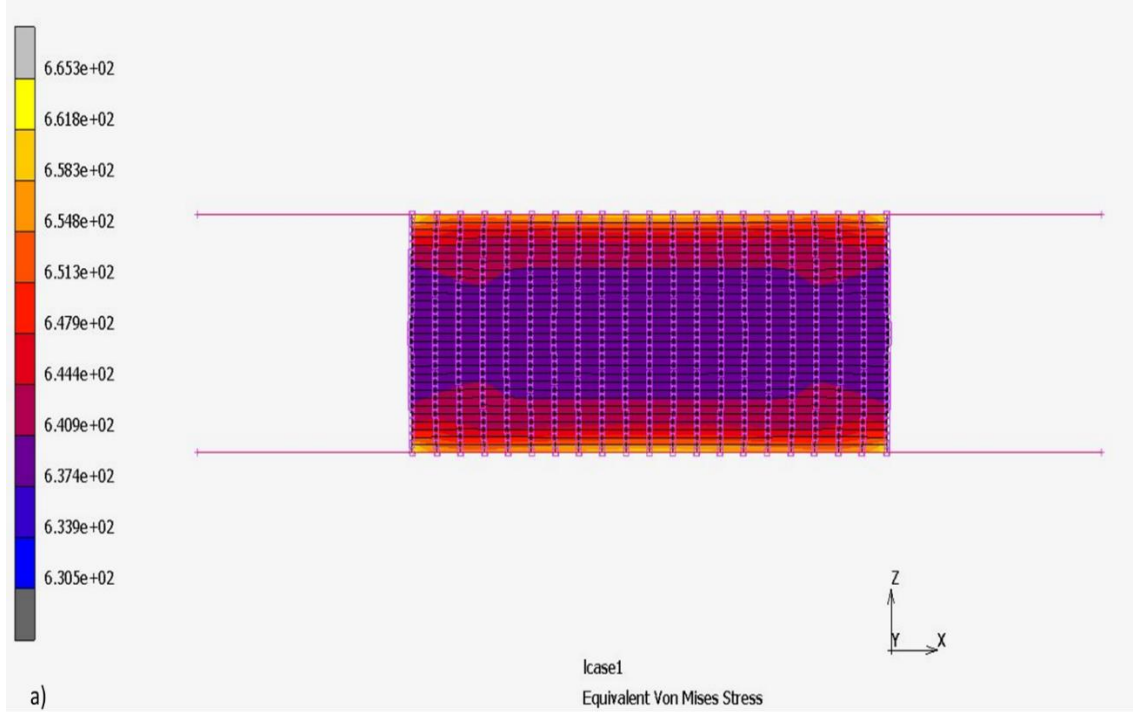


Şekil 6.3. Numune modeli meshli kesit görünümü

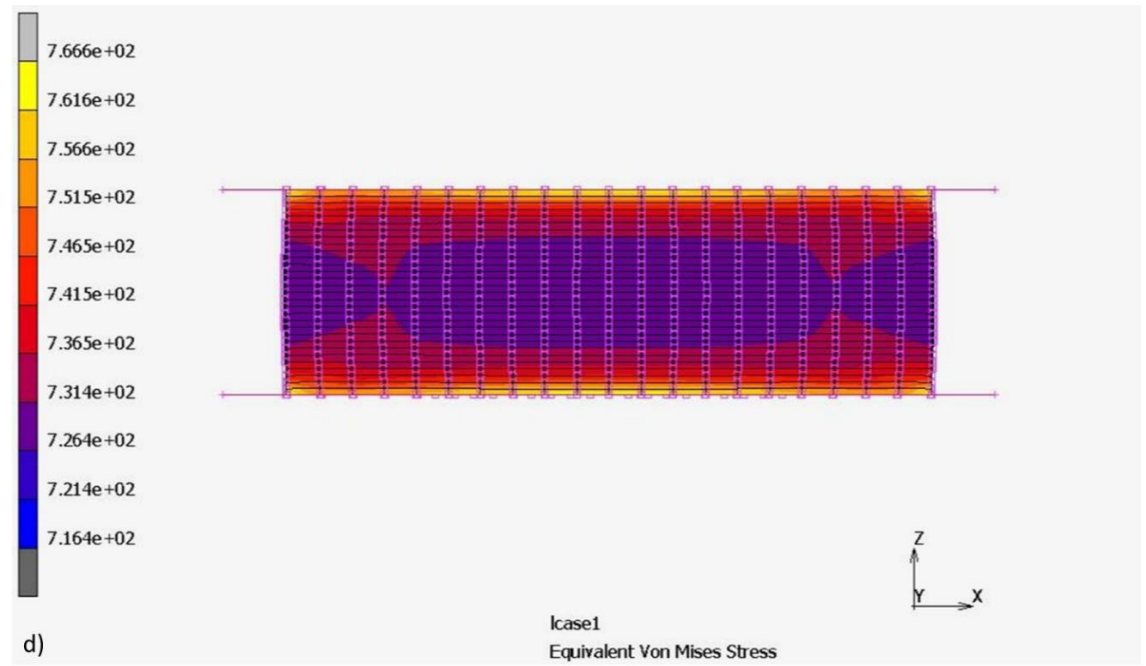
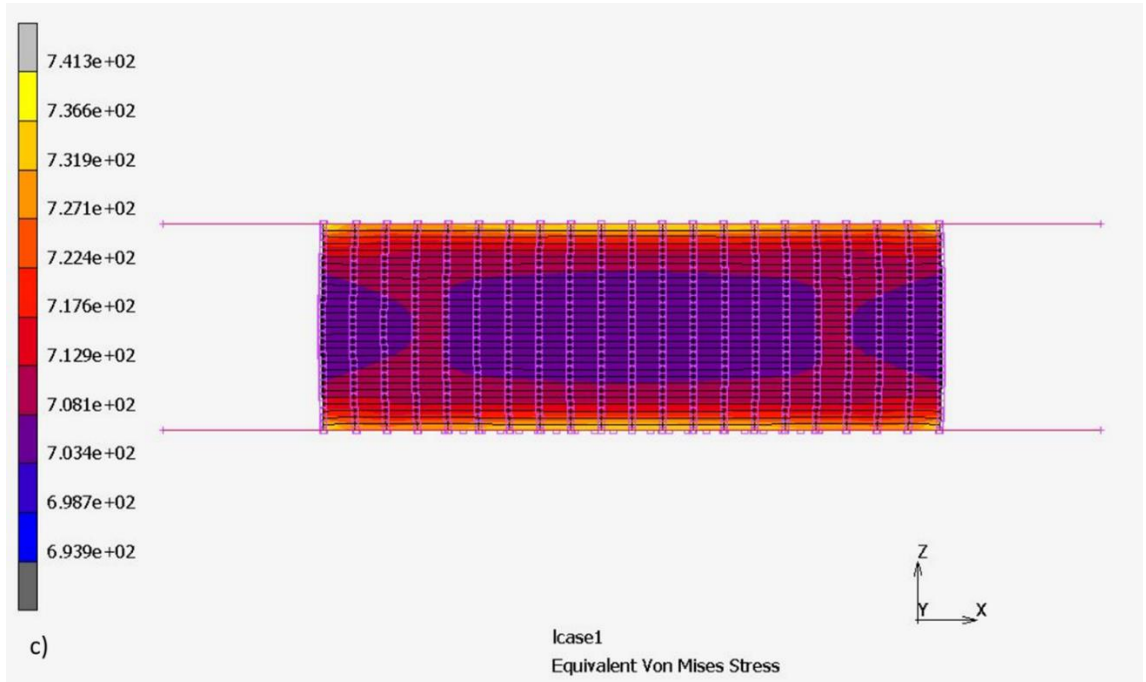
Basma deneyi 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Deney numunesinin modellenmesinde 8 düğüm noktalı ve her düğüm noktasında 3 serbestlik derecesi olan hex8 eleman tipi seçilmiştir. Numune modellenmesinde kullanılan eleman sayısı 12000'dir.

Şekil 6.1.'de görüldüğü gibi model basma deney numunesi, üst ve alt basma aparatı olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Üst ve alt basma aparatı rijit geometri olarak, deney numunesi ise elastik ve plastik deformasyona uğrayan bir malzeme olarak modellenmiştir. Benzeşimlerde numune hareketsiz olan alt aparatın üstünde durmaktadır ve üst aparat aşağı doğru hareket ederek numune yüksekliğinde %X değişim meydana getirecek şekilde numuneyi deforme etmektedir. Numune ile aparatlar arasında coulomb sürtünmesi tanımlanmıştır. Deneysel olarak elde edilen akma eğrilerinde sürtünmenin etkisi ihmal edildiğinden, sonlu elemanlar analizlerinde sürtünme katsayısı olarak 0,01 gibi çok düşük bir sürtünme katsayısı kullanılmıştır. Marc ticari yazılımı ile oluşturulan modelde deney malzemesi ile ilgili tüm parametreler modele uygulanmıştır. MSC Marc ticari programına malzeme özellikleri olarak elastisite modülü, E, 114000 MPa, poisson oranı,  $\nu$ , 0,33 ve malzemenin plastik deformasyonda nasıl davranacağını modelleyen gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme grafiği için her bir numune boyutu tane boyutu kombinasyonu için yüzey tabakası modeli ile elde edilen akma gerilmesi değerleri veri olarak girilmiştir. Her bir numune boyutu tane boyutu kombinasyonu için bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak basma analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sonlu elemanlar benzeşimleri sonucu numunelerde meydana gelen Von Mises Eşdeğer Gerilme dağılımı elde edilmiştir.

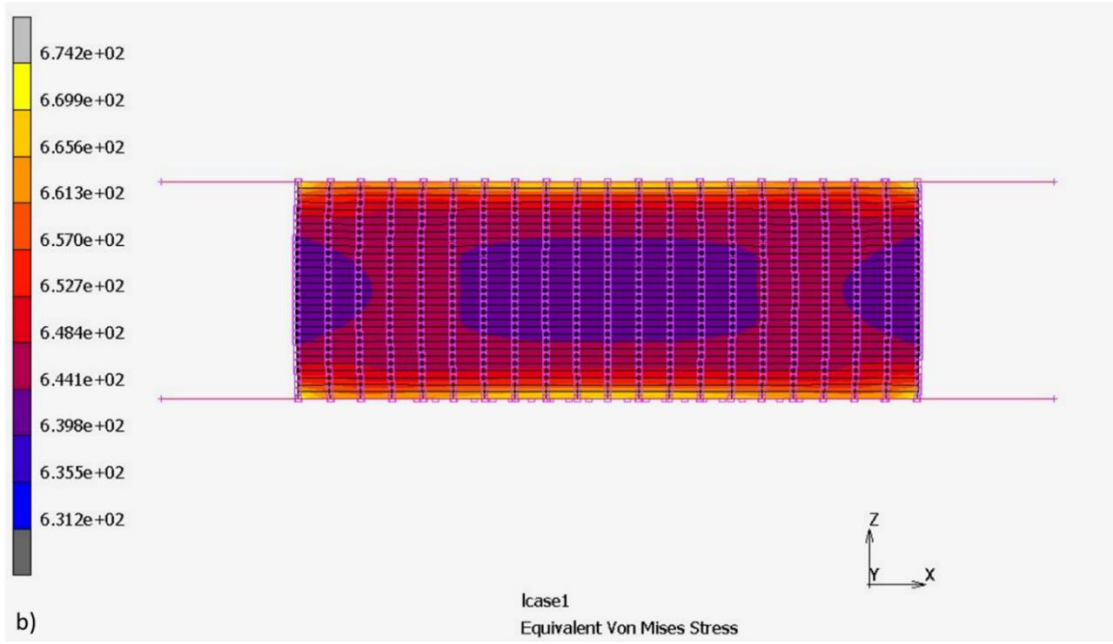
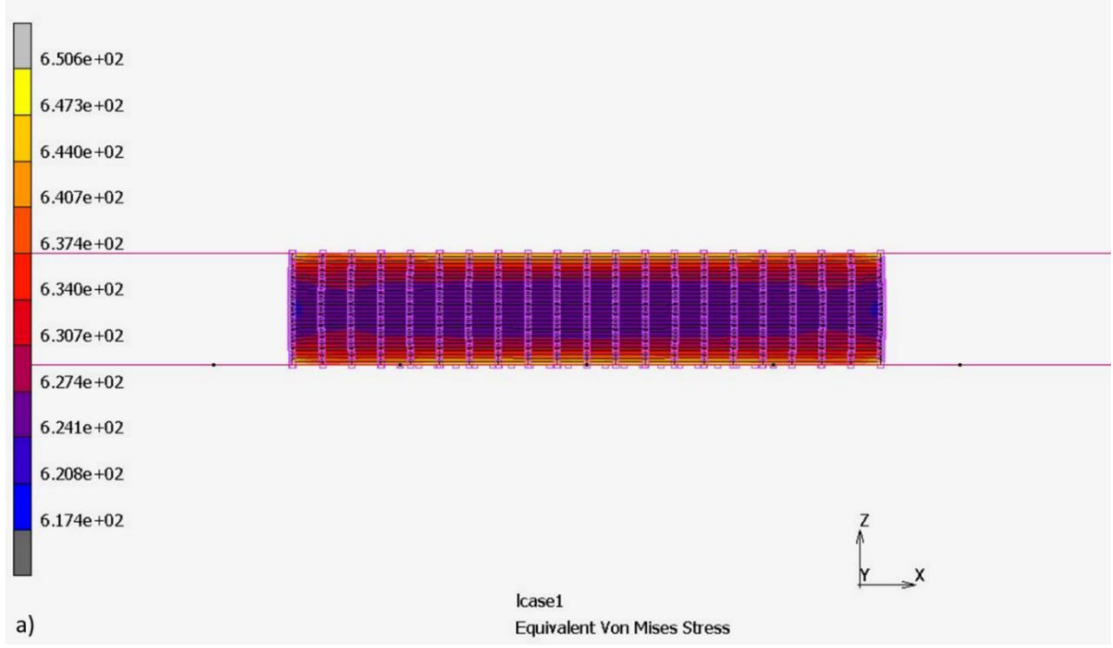
Mikro basma deneyler benzeşimleri sonucu elde edilen Von Mises Eşdeğer Gerilme dağılımı, Şekil 6.4. , Şekil 6.5. , Şekil 6.6.' da gösterilmiştir.



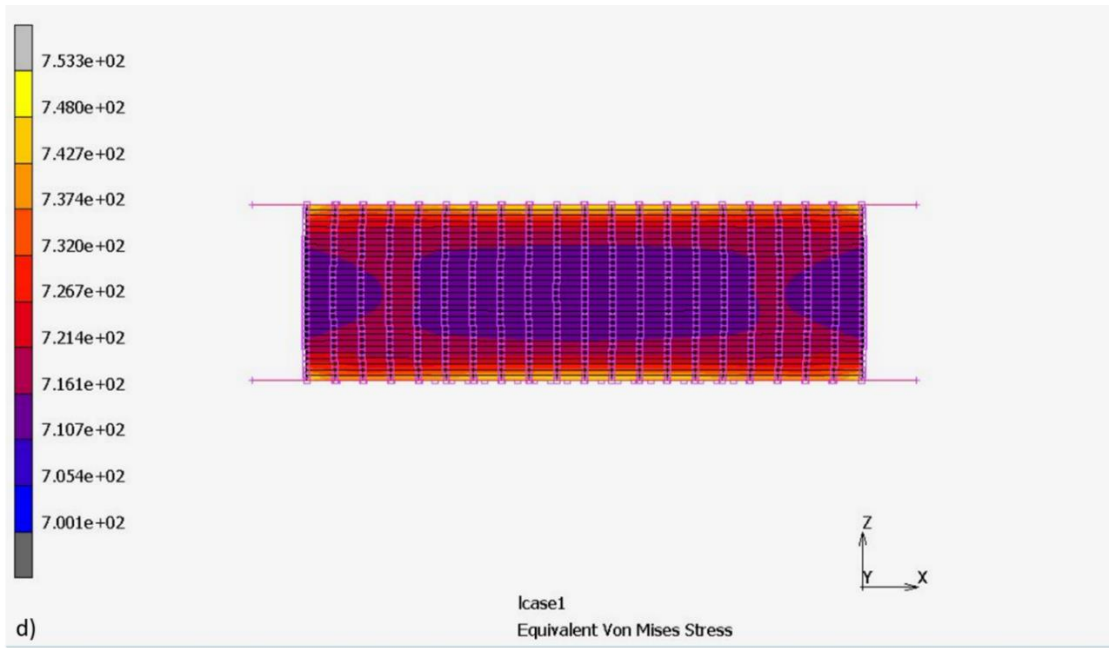
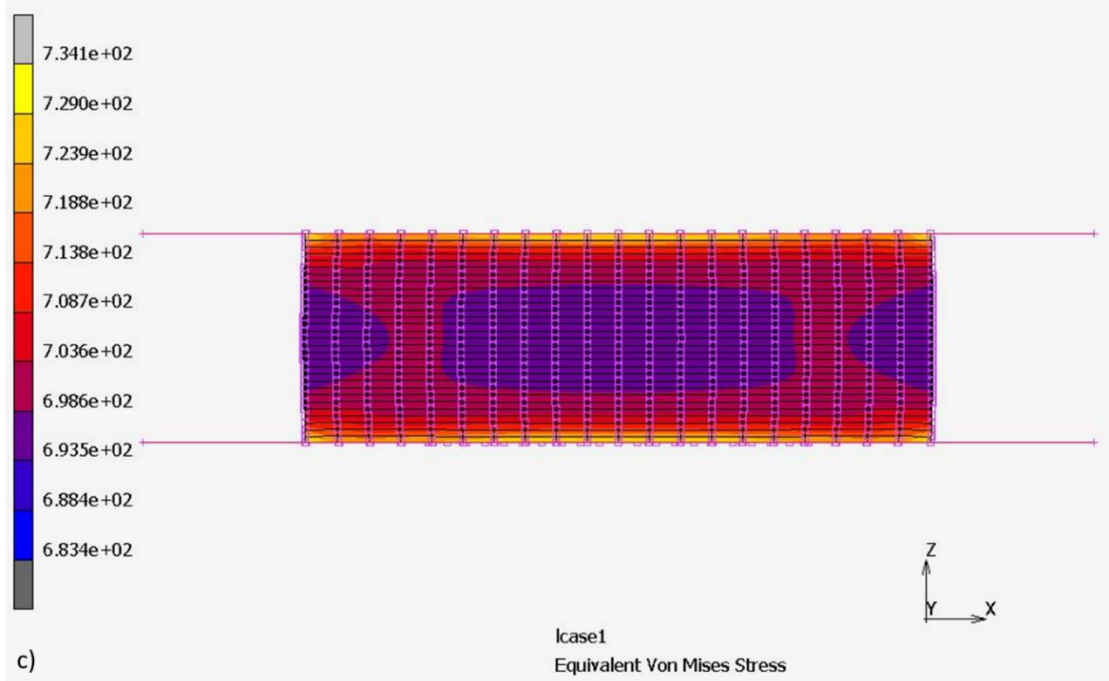
Şekil 6.4. 500°C'de tavlanan a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde kesit görüntüden elde edilen eşdeğer gerilme değerleri dağılımı



Şekil 6.4. 500°C’de tavlanan a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde kesit görüntüden elde edilen eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (Devamı)

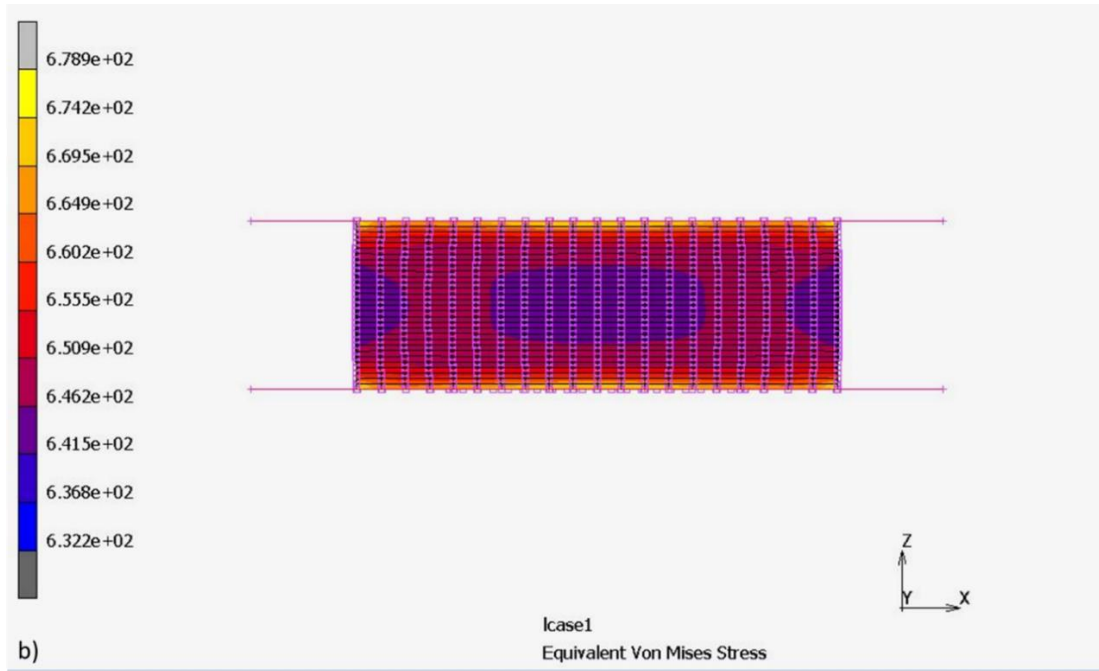
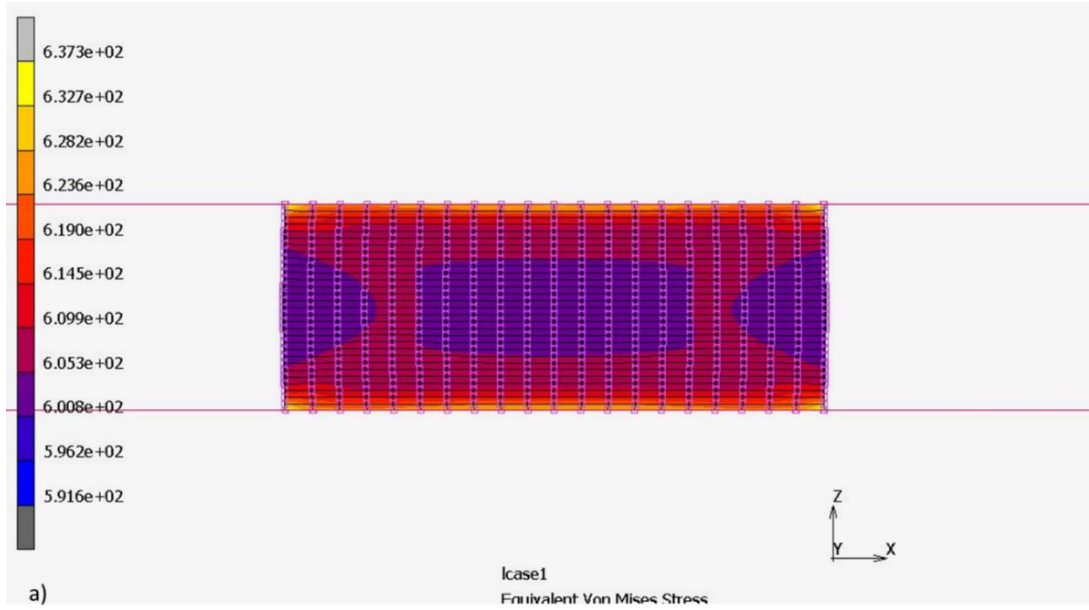


Şekil 6.5. 650°C’de tavlanan a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde kesit görüntüden elde edilen eşdeğer gerilme değerleri dağılımı

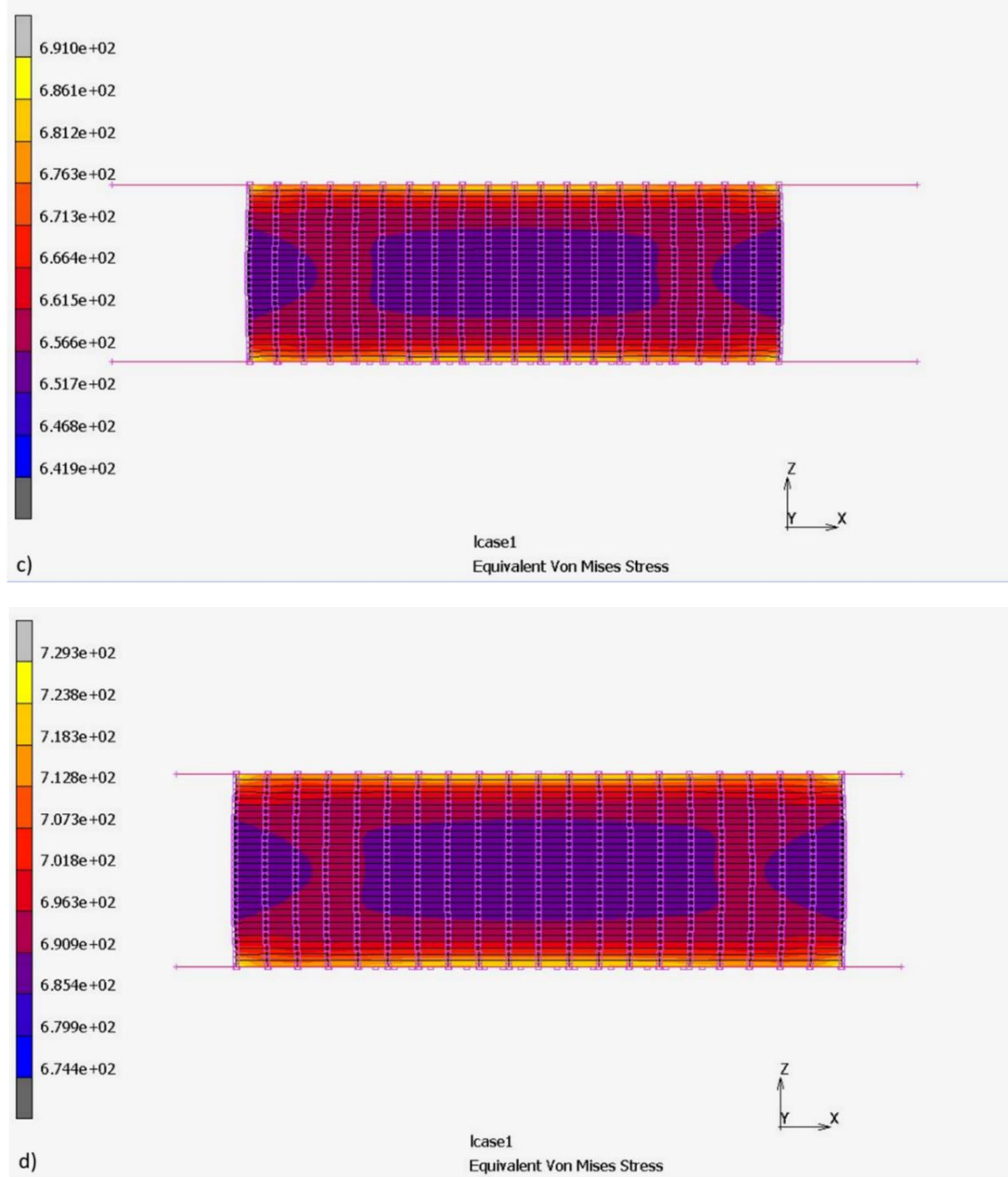


Şekil 6.5. 650°C’de tavlanan a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde kesit görüntüden elde edilen eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (Devamı)





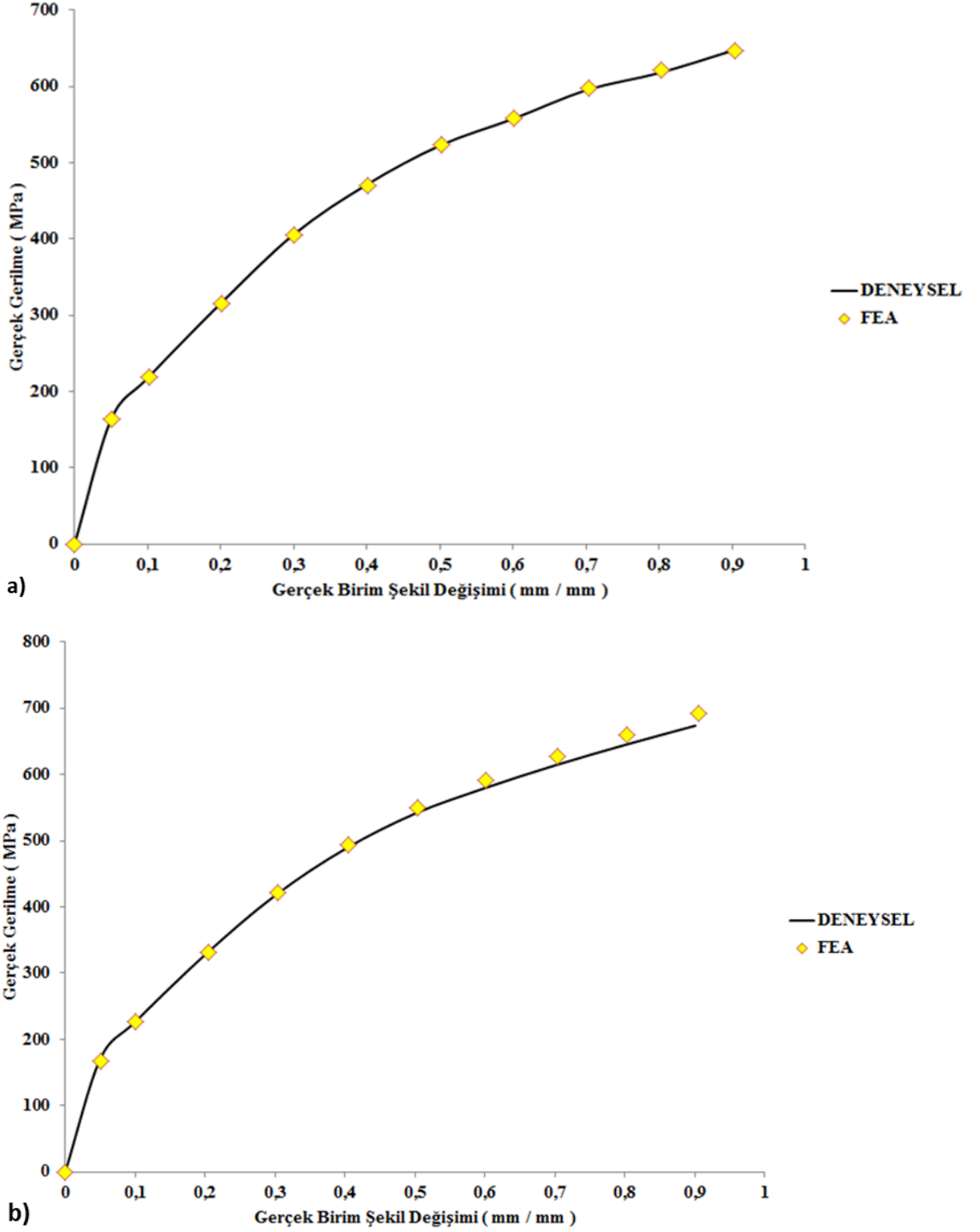
Şekil 6.6. 700°C'de tavlanan a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde kesit görüntüden elde edilen eşdeğer gerilme değerleri dağılımı



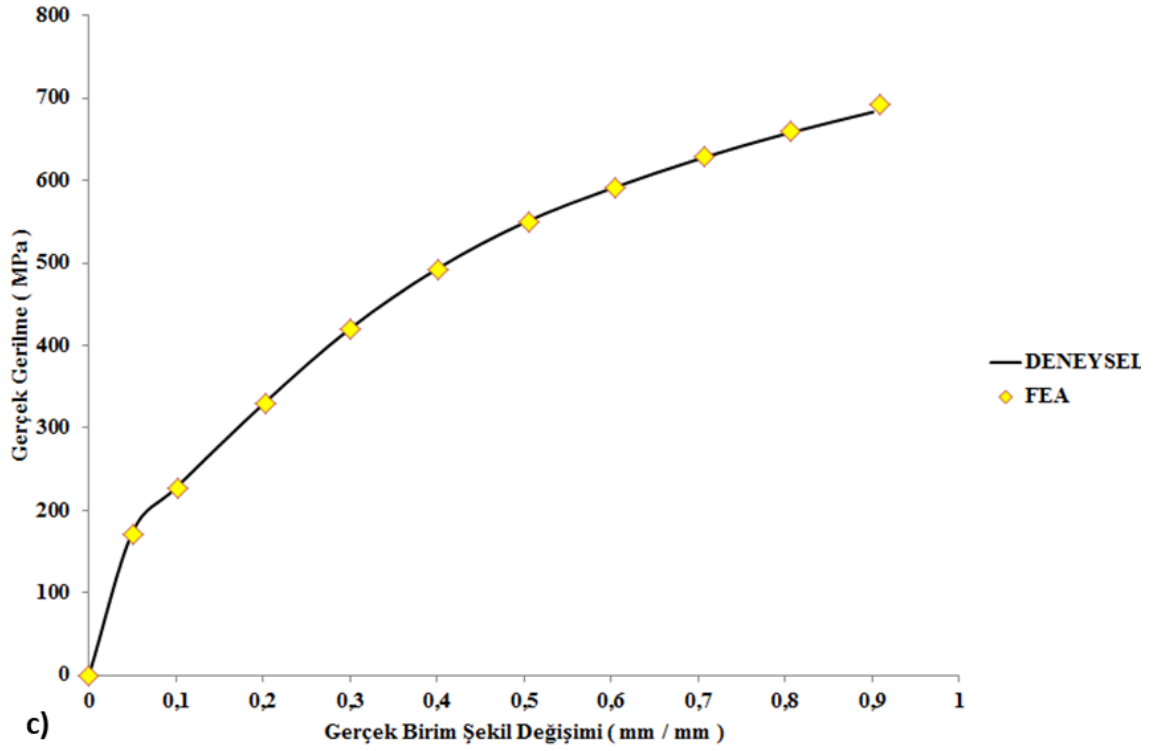
Şekil 6.6 700°C'de tavlanan a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde kesit görüntüden elde edilen eşdeğer gerilme değerleri dağılımı (Devamı)

Şekillerde görülen skala üzerindeki değerler MPa cinsinden belirtilmiştir. Şekiller incelendiğinde numune boyutu arttıkça ve tane boyutu küçüldükçe akma gerilmesi değerinin aynı deplasman değeri için arttığı gözlemlenebilir. Bilgisayar ortamında uygulanan Sonlu Eleman Analiz yöntemi sonucu ayrıca numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri elde edilerek Excel ortamında işlenip Gerçek Gerilme-Gerçek

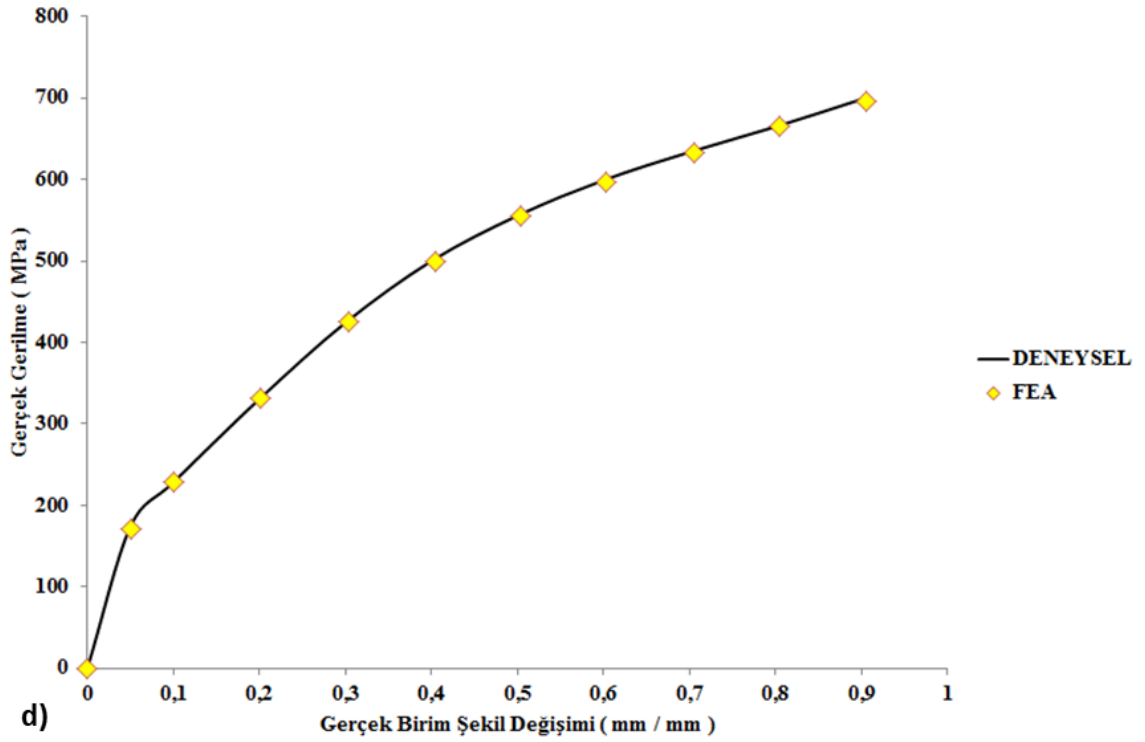
Birim Şekil Değişimi değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler deneysel olarak elde edilen akma eğrileri ile kıyaslanmıştır. Her numune tane boyutu kombinasyonu için kıyaslamalar Şekil 6.7. , Şekil 6.8. , Şekil 6.9. 'da verilmiştir.



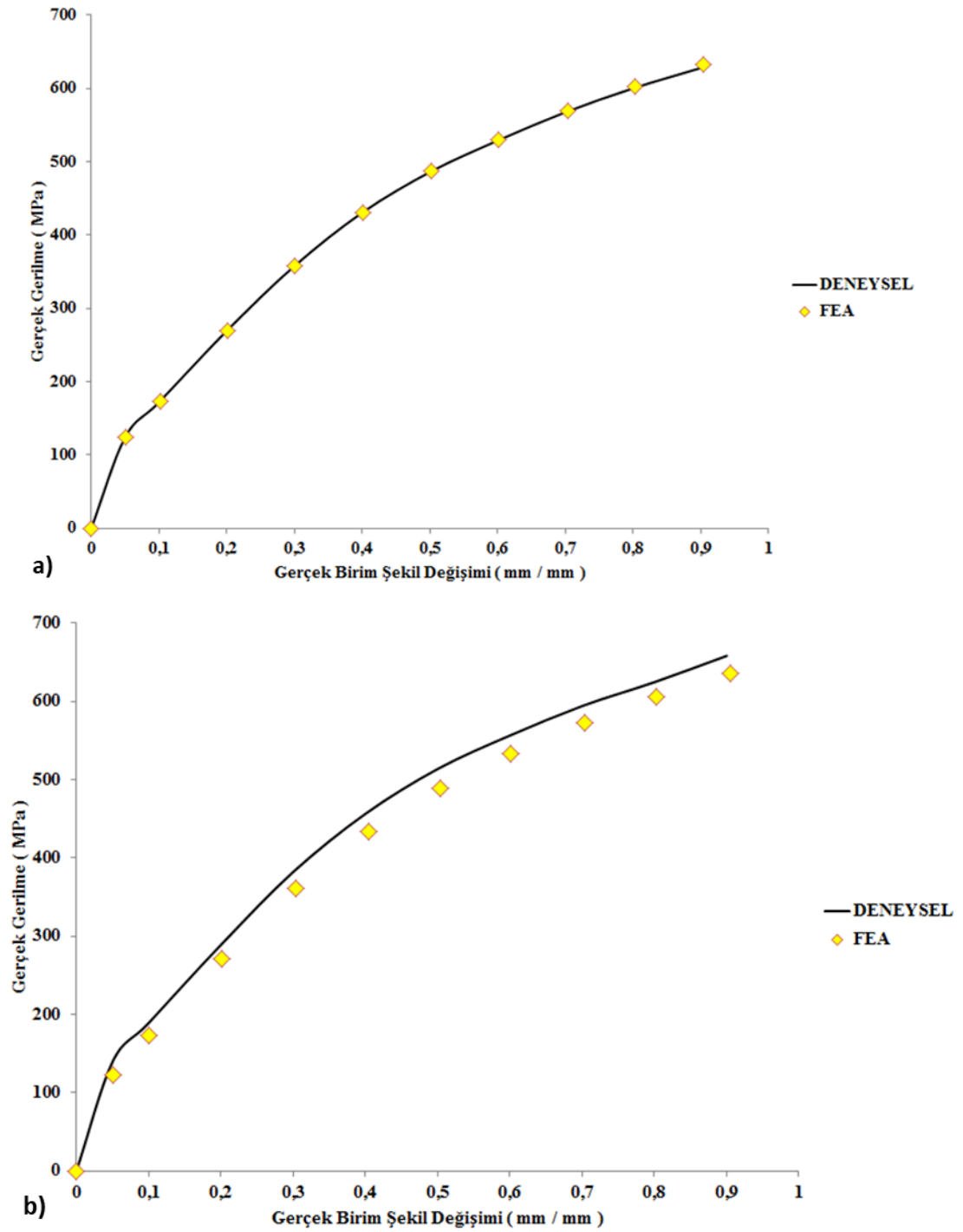
Şekil 6.7. 500°C'de tavllanmış a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde deneysel ve sonlu elemanlar benzeşimleri ile elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması



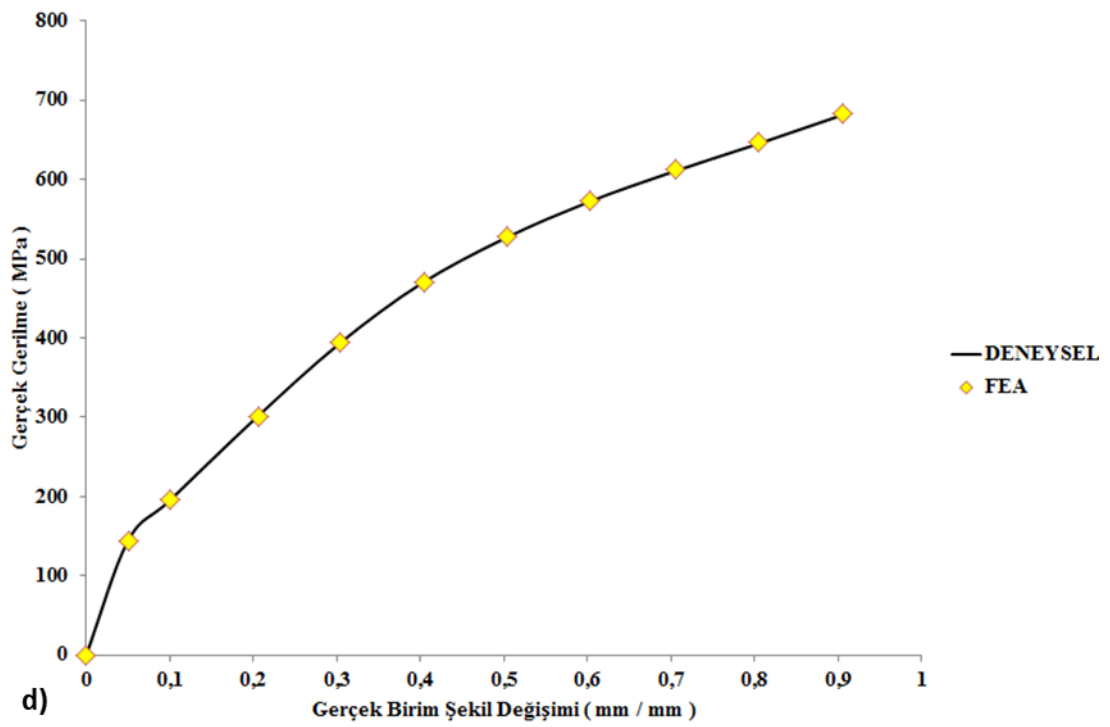
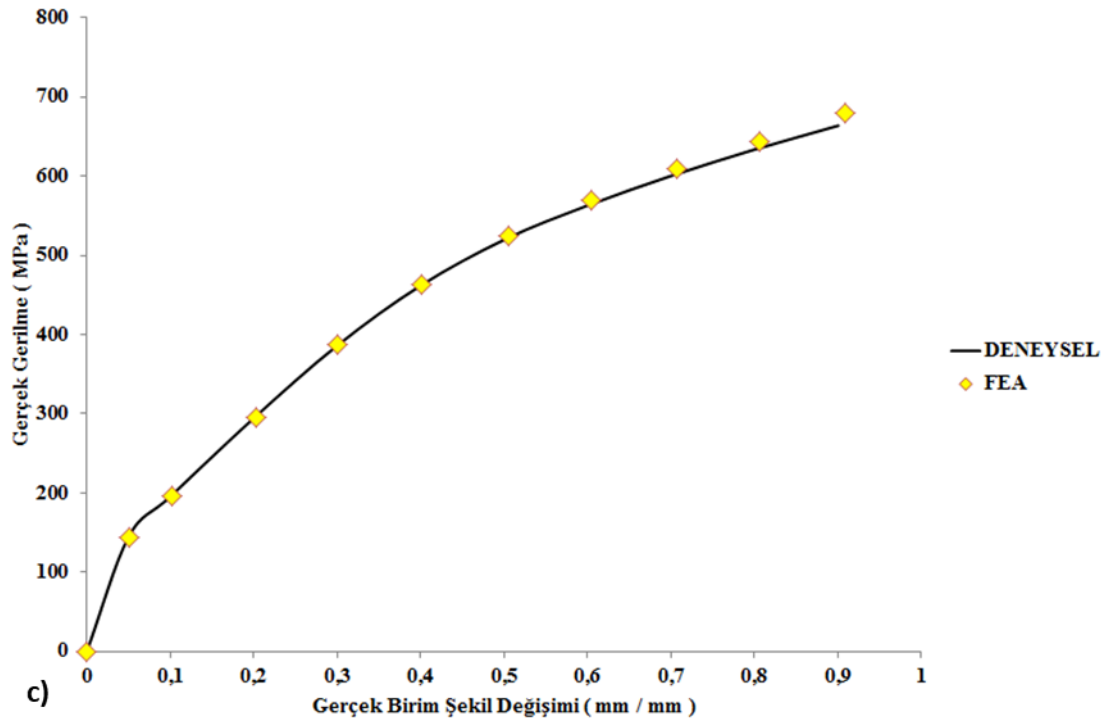
Şekil 6.7. 500°C'de tavllanmış a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde deneysel ve sonlu elemanlar benzeşimleri ile elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması (Devamı)



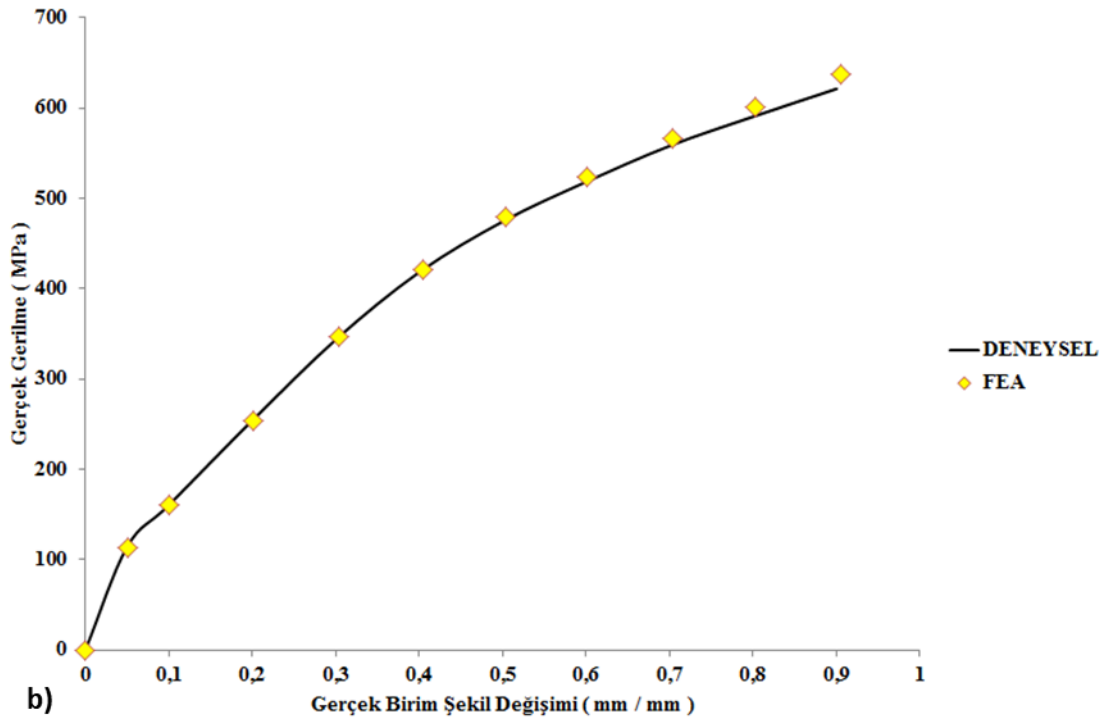
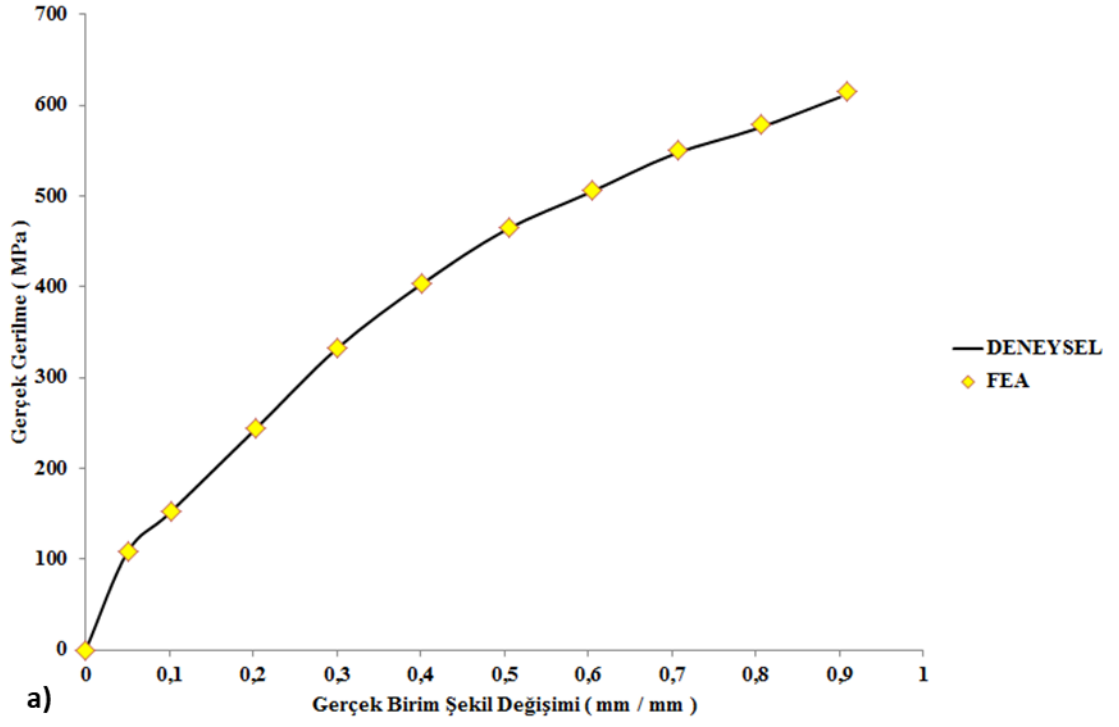
Şekil 6.7. 500°C'de tavllanmış a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde deneysel ve sonlu elemanlar benzeşimleri ile elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması (Devamı)



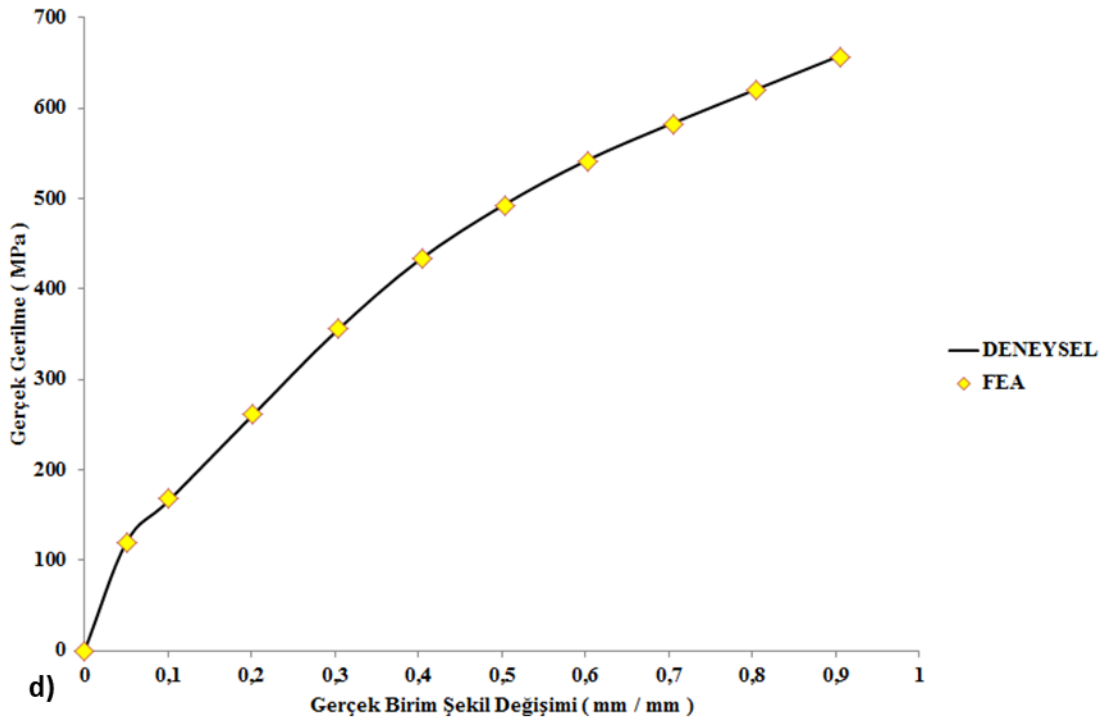
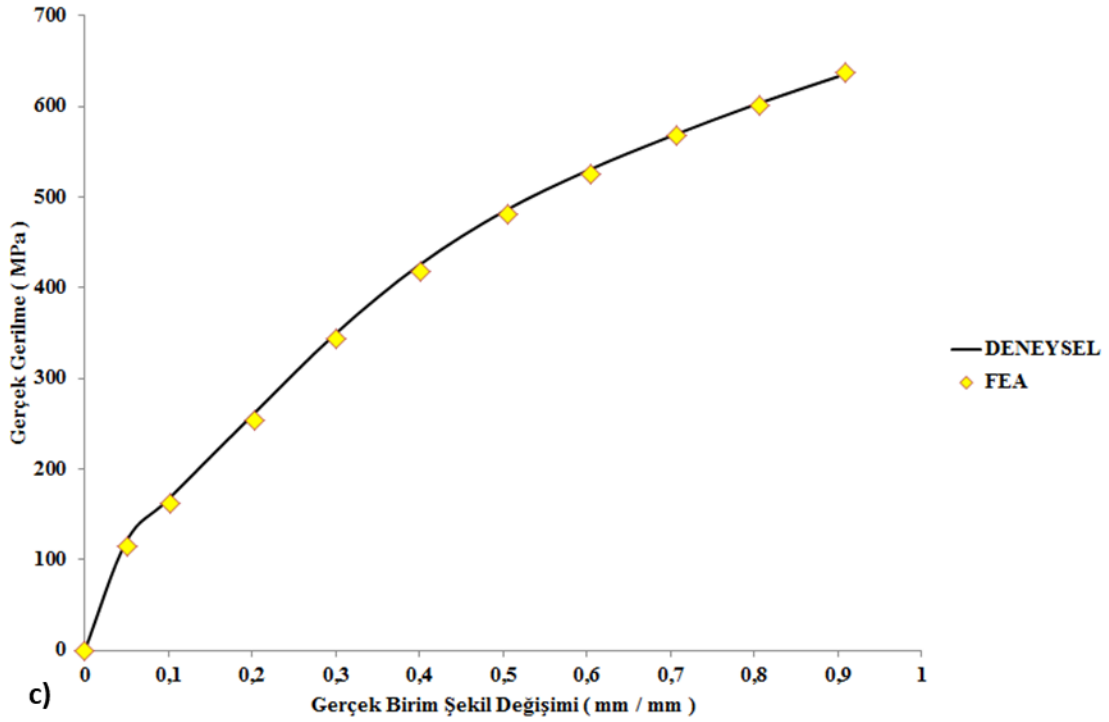
Şekil 6.8. 650°C’de tavllanmış a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde deneysel ve sonlu elemanlar benzeşimleri ile elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.8. 650°C'de tavllanmış a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde deneysel ve sonlu elemanlar benzeşimleri ile elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması (Devamı)



Şekil 6.9. 700°C'de tavllanmış a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde deneysel ve sonlu elemanlar benzeşimleri ile elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.9. 700°C'de tavllanmış a) 1 mm b) 1,5 mm c) 2 mm d) 3,2 mm boyutlara sahip numunelerde deneysel ve sonlu elemanlar benzeşimleri ile elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması (Devamı)

Grafiklerden görüleceği gibi farklı numune boyutu tane boyutu kombinasyonları için deneysel olarak elde edilen akma eğrileri yüzey tabakasının uygulanmasıyla



hesaplanan akma eğrilerinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen mikro-basma deney benzeşimleri ile oldukça yakın bir biçimde tahmin edilmiştir.

## BÖLÜM 7. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında CuZn30 alaşımından imal edilen boyutları sistematik bir şekilde azaltılan numunelerle mikro-basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aynı sıcaklıkta tavlanan numuneler için, yani benzer tane boyutuna sahip numuneler için numune boyutu küçüldükçe akma gerilmesinde bir düşüş gözlemlenmiştir.

Ayrıca, numune boyutu küçüldükçe, yani numune kesitinde bulunan tane sayısı azaldıkça, deneyler sonucunda elde edilen akma eğrilerinde saçınımın arttığı gözlemlenmiştir.

Bu tez kapsamında numune boyutu küçüldükçe akma gerilmesinde meydana gelen düşüşün hesaplanması için yüzey tabakası modeli kullanılmıştır. Daha önce söz konusu bu boyut etkisinin hesaplanmasında yüzey tabakası modelinin kullanıldığı diğer çalışmalarda sadece tek bir tane boyutuna sahip numuneler için hesaplamalar yapılmıştır. Bu çalışmaların bir kısmında yüzey tanelerinin tek kristaller gibi deforme olduğu kabulü yapılmış ve tane boyutundan bağımsız olarak yüzey tanelerinin akma eğrisi tek kristallerin akma eğrisi ile temsil edilmiştir. Bu tez kapsamında yüzey tabakası modeli farklı tane boyutuna sahip CuZn30 malzemeleri için uygulanmış ve yüzey taneleri akma gerilmesinin tane boyutuna göre değişiklik gösterdiği görülmüştür. Dolayısıyla, bu çalışmada metal bir malzemedeki en azından CuZn30 malzemesinde, birbirinden oldukça farklı tane boyutları için yüzey tanelerinin akma gerilmesinin farklı olduğu ancak birbirlerine nispeten yakın tane boyutları için ortalama bir yüzey taneleri akma gerilmesi değerinin söz konusu olabileceğini gösterilmiştir. Bir başka deyişle, yüzey tanelerinin akma gerilmesinin, tane boyutuna göre değiştiği ve tane boyutundan bağımsız tek bir yüzey tanesi akma gerilmesi değerinin söz konusu olmadığı gösterilmiştir.

Bu tez kapsamında yüzey tabakası modeli yeni bir şekilde uygulanmıştır. Aynı sıcaklıkta tavllanmış, tane boyutu birbirine yakın olan numunelerde boyutların küçülmesiyle akma gerilmesinde meydana gelen düşmenin, yüzey tanelerinin numune kesitinde kapladıkları alan oranının artmasına ters orantılı bir şekilde doğrusal olarak düştüğü gösterilmiştir. Söz konusu doğrusal ilişki kullanılarak, her tavlama sıcaklığı için, yani birbirlerine yakın tane boyutları için, yüzey ve hacim tanelerine ait ortalama akma gerilmeleri hesaplanmıştır. Hesaplanan yüzey ve hacim taneleri akma gerilemeleri kullanılarak tüm numune boyutu tane boyutu kombinasyonları için akma eğrileri hesaplanmıştır. Deneysel ve yüzey tabakası modeli ile hesaplanan akma eğrileri karşılaştırıldığında, deneysel eğrilerin yüzey tabakası modeli ile oldukça doğru bir şekilde tahmin edildiği görülmüştür. Dolayısıyla, yüzey tabakası modelinin bu tezdeki gibi uygulanmasıyla farklı tane boyutları için hesaplanan yüzey ve hacim taneleri akma gerilmelerinin, mikro/mezo ölçekte numune boyutu küçüldükçe akma gerilmesinde meydana gelen düşmenin modellenmesinde, yani tahmin edilmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Bunun dışında yüzey tabakası modeli ile farklı numune tane boyutu kombinasyonları için hesaplanan akma eğrilerinin kullanılmasıyla, sonlu elemanlar analizi mikro-basma deney benzeşimleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen mikro-basma deney benzeşimleri sonucu her bir numune boyutu tane boyutu kombinasyonu için kuvvet deplasman eğrileri elde edilmiş. Kuvvet-deplasman eğrilerinden yararlanılarak her bir numune boyutu tane boyutu mikro-basma benzeşimine ait gerçek birim şekil değiştirme-gerçek gerilme eğrileri, yani akma eğrileri oluşturulmuştur. Deneysel ve benzeşimlerle elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması sonucunda, deneysel akma eğrilerinin benzeşimlerle oldukça doğru bir şekilde tahmin edildiği görülmüştür. Dolayısıyla, yüzey tabakası modelinin bu tezdeki gibi uygulanmasıyla numune ve tane boyutuna göre hesaplanan akma eğrilerinin, sonlu elemanlar mikro-basma benzeşimlerinde başarıyla kullanılabileceği de gösterilmiştir.

### 7.1. Gelecekteki Çalışmalar

Bu tezde kullanılan CuZn30 malzemesinden imal edilmiş farklı boyutlara sahip minyatür işparçaları ile mikro-ekstrüzyon gibi bir mikro-şekillendirme işlemi deneysel olarak gerçekleştirilebilir. Yüzey tabakası modeli ile farklı boyutlara minyatür işparçalarının akma eğrileri hesaplanabilir. Yüzey tabakası modelinin bu tezde olduğu gibi uygulanmasıyla hesaplanan bu akma eğrilerinin kullanılmasıyla sonlu elemanlar mikro-ekstrüzyon benzeşimleri gerçekleştirilerek, deneysel ve benzeşimlerle elde edilen maksimum işlem kuvvetleri karşılaştırılmasıyla, yüzey tabakası modeli ile hesaplanan akma eğrilerinin mikro-ekstrüzyon gibi mikro-şekillendirme işlemleri benzeşimlerinde kullanılabileceği gösterilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Jain, V.K., Micromanufacturing Process, CRC Press, 2013.
- [2] W. L. Chan, M. W. Fu , J. Lu “The Size Effect on micro deformation behaviour in micro- scale plastic deformation “ W. L. Chan et al./ Materials and Design 32 (2011) 198-206.
- [3] Parasız, S.A., “Investigation and characterization of size effects in microforming processes” Phd. Thesis, University of New Hampshire, 2008.
- [4] J. G. Liu, M. W. Fu, W. L. Chan “ A Constitutive model for modeling of the deformation behavior in microforming with a consideration of grain boundary strengthening “ Computational Material Science (2012) 85-94.
- [5] T. T. Zhu , A.J. Bushby and D. J. Dunstan “ Materials Mechanical Size Effects: A Review “ Materials Technology, 2008, vol 23.
- [6] J. G. Liu, M. W. Fu, W. L. Chan “ A Constitutive model for modeling of the deformation behavior in microforming with a consideration of grain boundary strengthening “ Computational Material Science (2012) 85-94.
- [7] Gap Yon Kim, Jun Ni, Muammer Koc “Modeling of the Size Effects on the Behavior of Metals in Microscale Deformation Processes” Transactions of the ASME, 2007, vol. 129.

## ÖZGEÇMİŞ

Onur KARADAĞ 1991 yılında Kartal’da doğdu. 2015 yılında Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliğinden mezun oldu. Ardından Yaz-Kar Klima A. Ş.’de Makine Mühendisi olarak iş hayatına atıldı. Aynı zamanda Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Makine Tasarım Bilim Dalında yüksek ihtisasına başladı. 2016 yılı içerisinde hocaları Doç. Dr. Hüseyin Pehlivan ve Dr. Öğr. Üyesi Sunal Ahmet Parasız’ın teşvikleriyle Tübitak projesi olan 115M653 no’lu “Mikro Ekstrüzyon Benzeşimleri İçin Bir Malzeme Modelinin Oluşturulması” isimli projede proje asistanı olarak işe başladı. Ardından 2018 yılında Elektronik ve Haberleşme Sektörü için Ar-Ge çalışmaları yapan Profen İletişim Teknolojileri A.Ş’de Mekanik Tasarım Mühendisi olarak işe başladı. Şu sıralar buradaki işine devam etmektedir.