

Proje Başlığı:

**Mikroekstrüzyon Benzeşimleri İçin Bir Malzeme Bünye Modelinin
Oluşturulması**

Proje No:

115M653

Proje Yürütücüsü:

Dr. Öğr. Üyesi SUNAL AHMET PARASIZ

ÖNSÖZ

Bir süre öncesine kadar büyük hacimler kaplayan cep telefonu, müzik çalar, kişisel bilgisayar, fotoğraf makinesi gibi günlük hayatta kullandığımız pek çok teknolojik ürün artık avcumuzun içine sığmaktadır. Minyatürleşme olarak adlandırılan bu teknoloji trendi günlük hayatta rahatça taşınabilen, bütünleşik fonksiyonlara sahip ürünlere yönelik artan tüketici taleplerinin yanında, tıp, otomotiv, opto-elektronik, savunma sanayi gibi farklı sektördeki uygulamalar tarafından sürüklenmektedir.

Minyatürleşme küçük boyutlara sahip cihaz, makine ve aletleri oluşturan minyatür metalik parçaların imal edilmesi uğraşını da beraberinde getirmiştir. Minyatür metalik parçaların imalatında, mikro-şekillendirme, yani mikro ölçekte metallerin plastik şekillendirilmesi, en uygun yöntemlerden biridir. Bunun yanında, “boyut etkileri” olarak adlandırılan ve minyatürleşme ile ortaya çıkan malzeme davranış değişiklikleri yüzünden, geleneksel metal şekillendirme yöntemleri için hali hazırda oldukça oturmuş olan bilgi birikimi, mikro şekillendirme işlemleri için direkt kullanılamamaktadır. Boyut etkileri mikro şekillendirme proseslerinde öngörülebilirlik ve güvenilirlik açısından ciddi sorunlara yol açmaktadır. Dolayısıyla, minyatürleşme ile birlikte, dünyada başta Almanya, ABD, Japonya olmak üzere Güney Kore, Çin, Hong Kong, Tayvan gibi endüstrileşmiş uzak Asya ülkelerinde, mikro-şekillendirme konusunda yapılan araştırmaların sayısı giderek artmaktadır. Türkiye’de Vestel, Arçelik gibi elektronik eşya sektöründe küresel ölçekte boy gösteren firmaların yanısıra, minyatürleşme etkisi altında olan diğer bazı ürünleri imal etmekte olan firmalar için, minyatürleşme ve mikro-şekillendirmenin giderek önem kazanması kaçınılmazdır. Bu konuda gelişmelerin gerisinde kalınmaması açısından, minyatür parçaların imalatına yönelik araştırmaların Türkiye’de de gerçekleştirilmesi, gerekli bilgi birikiminin oluşturulması ve ihtiyaç duyulduğuna danışılabilir araştırmacıların bulunması gereklidir.

Günümüzde geleneksel metal şekillendirme işlemlerinin tasarımında sonlu elemanlar analizi yaygın olarak kullanılmaktadır. Plastik şekil verme yöntemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar ortamında analiz edilmesi için, malzemenin deformasyon davranışını doğru bir şekilde yansıtan malzeme modelleri kullanılması şarttır. Benzer şekilde mikro-şekillendirme işlemlerinin tasarımında da sonlu elemanlar analizlerinin kullanılması, tasarım sürecini iyileştirip hızlandıracaktır. Bununla birlikte, mikro şekillendirme işlemlerinin bilgisayar ortamında modellenmesinde, boyut etkileri geleneksel malzeme modellerinin kullanılmasını kısıtlamaktadır.

Bu proje kapsamında mikro-ekstrüzyon ve benzeri mikro-şekillendirme işlemlerinin bilgisayar ortamında modellenmesinde kullanılabilir iki farklı malzeme modeli geliştirilmiştir. Söz konusu

modellerin geçerliliğinin gösterilebilmesi için farklı boyutlardaki numunelerle mikro-ekstrüzyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca söz konusu bu mikro-ekstrüzyon deneyleri yeni malzeme modellerinin uygulanması ile sonlu elemanlar yöntemiyle bilgisayar ortamında modellenmiş ve ekstrüzyon kuvvetleri yakın bir şekilde tahmin edilmiştir. Küçük boyutlu numunelerin ekstrüzyonunda, mikro-şekillendirme için geliştirilen her iki malzeme modeli de geleneksel malzeme modeline göre daha iyi sonuç vermiştir.

Mikro-şekillendirme konusunda “Mikroekstrüzyon Benzeşimleri İçin Bir Malzeme Bünye Modelinin Oluşturulması” başlıklı bu proje, TÜBİTAK tarafından 3501 ulusal genç araştırmacı kariyer geliştirme programı kapsamında desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ	2
BÖLÜM 3. GEREÇ VE YÖNTEM	6
3.1. Deney Malzemesi ve Numune Hazırlama Süreci.....	6
3.2. Mikro Basma Deneyleri.....	10
BÖLÜM 4. BULGULAR.....	11
4.1. Deneysel Sonuçlar.....	10
4.2. Mikro-şekillendirme Malzeme Modeli 1.....	20
4.3. Mikro-şekillendirme Malzeme Modeli 2.....	25
4.3.1 Tane boyutunun akma gerilmesi üzerine etkisinin hesaplanması.....	25
4.3.2 Numune boyutunun akma gerilmesine etkisinin hesaplanması.....	27
4.3.3 Malzeme modelinin doğrulanması.....	29
4.4. Mikro-ekstrüzyon Deneyleri.....	33
4.5. Mikro-ekstrüzyon Benzeşimleri.....	38
4.5.1 Malzeme Modeli 1 kullanılarak gerçekleştirilen benzeşim sonuçları.....	39
4.5.2 Malzeme Modeli 2 kullanılarak gerçekleştirilen benzeşim sonuçları.....	41
BÖLÜM 5. TARTIŞMA.....	44

BÖLÜM 6. SONUÇLAR.....	46
KAYNAKLAR	47

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Mikro şekillendirme için a) Kim ve diğerleri b) Yu ve diğerleri tarafından önerilen malzeme modelleri ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması	4
Şekil 2.2. Mikro şekillendirme için a) Liu ve diğerleri tarafından önerilen b) yüzey tabakası malzeme modelleri ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması	5
Şekil 3.1. Farklı boyutlardaki mikro basma numunelerini gösteren bir fotoğraf.....	7
Şekil 3.2. Metalografik incelemede kullanılan zımparalama cihazı.....	7
Şekil 3.3 Metalografik incelemede kullanılan elektrolitik parlatma ve dağlama cihazı	8
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.....	8
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.....	9
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.....	9
Şekil 4.1 700°C'de tavllanmış farklı boyutlarda olan 4 numuneye ait kuvvet- deplasman eğrileri.....	11
Şekil 4.2 Kare kesit kenar uzunluğu 3.2 mm ve a) tane boyutu 43 µm (500°C'de tavllanmış), b) tane boyutu 100,2µm (650°C'de tavllanmış), c) tane boyutu 205,8 µm (700°C'de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrileri.....	12
Şekil 4.3 Kare kesit kenar uzunluğu 2 mm ve a) tane boyutu 45 µm (500°C'de tavllanmış), b) tane boyutu 74 µm (650°C'de tavllanmış), c) tane boyutu 146,2 µm (700°C'de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri.....	13

Şekil 4.4 Kare kesit kenarı 1,5 mm ve tane boyutu a) 33,5 µm (500°C'de tavllanmış), b) 77,8 µm (650°C'de tavllanmış), c) 137,6 µm (700°C'de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri.....	14
Şekil 4.5 Kare kesit kenarı 1 mm ve tane boyutu a) 51,6 µm (500°C'de tavllanmış), b) 81,6 µm (650°C'de tavllanmış), c) 125,4 µm (700°C'de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri.....	15
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.....	17
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.....	19
Şekil 4.8 Kare kesitli bir numune için yüzey ve iç tanelerin şematik gösterilmesi....	21
Şekil 4.9 Belirli gerçek gerilme değerlerinde iç taneler (ya da makro boyutta çok-kristal malzeme) için akma gerilmesi ile tane boyutu arasındaki ilişki.....	23
Şekil 4.10 a) 3.2 mm b) 2 mm c) 1.5 mm and d) 1 mm kare kesit kenarına sahip numunler için deneysel olarak elde edilen ve malzeme modeli 1 ile tahmin edilen akma eğrilerinin karşılaştırması.....	24
Şekil 4.11 Farklı numune boyutu tavlama sıcaklığı (yani tane boyutu) kombinasyonları için malzeme modeli 1 ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma gerilmeleri arasındaki yüzde fark.....	25
Şekil 4.12 Hekzagonal kesitli bir tane için tane içi ve tane sınırı tabakasının şematik bir gösterimi.....	27
Şekil 4.13 Kare kesitli bir numunede yüzey tabakası ve iç tanelerin şematik olarak gösterimi.....	27
Şekil 4.14. CuZn30 malzemesi için, belirli gerçek birim şekil değiştirme değerlerinde akma gerilmesinin bir bölü kare kök tane boyutuna göre değişimi.....	30

Şekil 4.15. Tane içi ve tane sınırı bölgeleri için gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrileri.....	31
Şekil 4.16. Comparison of predicted and experimental flow curves of specimens with a cross-section edge length of Kesit kenarı a)3.2 mm b) 2 mm c) 1.5 mm and d) 1 mm olan numunler için deneysel ve malzeme modeli ile tahmin edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması.....	32
Şekil 4.17 Farklı numune boyutu tavlama sıcaklığı (yani tane boyutu) kombinasyonları için malzeme modeli 2 ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma gerilmeleri arasındaki yüzde fark.....	32
Şekil 4.18. Mikro-ekstrüzyon deneylerinde kullanılan kütüklerin şematik gösterimi..	33
Şekil 4.19 Deneysel mikro-ekstrüzyon aparat setinin montaj resmi.....	34
Şekil 4.20 Mikro-ekstrüzyon kalıp geometrisinin yarı görünüşü.....	34
Şekil 4.21 Mikro-ekstrüzyon deneylerinde kullanılan kalıbın şematik resmi.....	34
Şekil 4.22 Kalıbı oluşturan parçalardan birinin resmi.....	35
Şekil 4.23 a) Kalıp yuvası ve zımba ile birlikte kalıp parçalarını b) Zımba ile birlikte kalıp parçalarını gösteren fotoğraflar.....	35
Şekil 4.24 bir miko-ekstrüzyon deneyi sırasında çekilen kalıp aparatına ait iki fotoğraf	36
Şekil 4.25 İleri yönde mikro-ekstrüzyon aparat setinin montaj teknik resmi.....	36
Şekil 4.26 2 mm kalınlığındaki kütüklerin sonlu elemanlar analizinde kullanılan model	37
Şekil 4.27 a) 2 mm and b) 0.9 mm kütüklerde ekstüzyon sonrası toplam eşdeğer plastik birim şekil değiştirme dağılımı.....	38
Şekil 4.28 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütükler için deneysel olarak elde edilen ve makro-boyutta geleneksel malzeme modeli ve mikro şekillendirme için geliştirilen birinci malzeme modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle tahmin edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	39
Şekil 4.29 a) 2 mm and b) 0.9 mm kütüklerde ekstüzyon sonrası toplam eşdeğer plastik birim şekil değiştirme dağılımı.....	40

Şekil 4.30 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütükler için deneysel olarak elde edilen ve makro-boyutta geleneksel malzeme modeli ve mikro şekillendirme için geliştirilen birinci malzeme modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle tahmin edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetlerinin yüzde farkı.....	41
Şekil 4.31 a) 2 mm and b) 0.9 mm kütüklerde ekstüzyon sonrası toplam eşdeğer plastic birim şekil değiştirme dağılımı.....	42
Şekil 4.32 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütükler için deneysel olarak elde edilen ve makro-boyutta geleneksel malzeme modeli ve mikro şekillendirme için geliştirilen ikinci malzeme modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle tahmin edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	43
Şekil 4.33 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütükler için deneysel olarak elde edilen ve makro-boyutta geleneksel malzeme modeli ve mikro şekillendirme için geliştirilen ikinci malzeme modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle tahmin edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetlerinin yüzde farkı.....	43

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1. Farklı numune boyutu ve tavlama sıcaklıkları için elde edilen tane boyutu değerleri.....	10
Tablo 4.1. Mikro-ekstrüzyon deneylerinde kullanılan kütüklerin boyutları	33
Tablo 4.2 Mikro-ekstrüzyon kalıp boyutları.....	34

ÖZET

Sonlu elemanlar yöntemi ile benzeşimler geleneksel metal şekillendirme proses tasarımında çok önemli bir araç haline gelmiştir. Metal şekillendirme yöntemleriyle minyatür parçaların imal edilmesi teknolojisi olan mikro-şekillendirme, mikro-komponentlerin seri imalatı için potansiyel bir yöntemdir. Bununla birlikte, sonlu elemanlar analizlerinin mikro-şekillendirme proses tasarımında kullanılabilmesi için, boyut etkilerini dikkate alan malzeme modellerinin kullanılması gereklidir. Bu projede, mezo/mikro boyutta malzeme deformasyon davranışını modellemek için kullanılabilecek iki farklı malzeme modeli geliştirilmiştir. Modellerin birinde yüzey modeli ve Hall-Petch bağıntısı birlikte kullanılmış, diğerinde ise yüzey modeli ve kompozit model kombinasyonu kullanılmıştır. Yeni geliştirilen bu malzeme modellerinin doğrulanması için, farklı boyutlarda numunelerle mikro-basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve yeni malzeme modellerinin kullanılmasıyla yapılan teorik hesaplamalarla deneyler sonucu elde edilen akma eğrileri doğru bir şekilde tahmin edilmiştir. Bu iki malzeme modelinin daha ileri bir şekilde doğrulanması için mikro-ekstrüzyon deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, geliştirilen malzeme modellerinin kullanılmasıyla mikro-ekstrüzyon deneylerinin sonlu elemanlar analiziyle benzeşimleri de gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar yakın bir şekilde elde edilmiştir edilmiştir. Deneyselsel sonuçlarının benzeşimler ile yakın bir şekilde tahmin edilmesi, yeni geliştirilen malzeme modellerinin mikro-ekstrüzyon gibi mikro-şekillendirme işlemlerinde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Mikro-şekillendirme, mikro-ekstrüzyon, boyut etkileri, yüzey modeli, kompozit model, Hall-Petch bağıntısı

ABSTRACT

Finite element method (FEM) simulations have become a crucial tool in conventional metal forming process design. Microforming, which is a technology for the production of miniature parts by metal forming, is a potential process for mass production of microcomponents. However, to use finite element analysis in the design of microforming processes, material models that take into account size effects are needed. In this project, two different material models were developed to model material deformation at the meso/micro-scale. In one of the models, the surface layer model and the Hall-Petch relationship were combined. In the other the composite model and the surface layer model were combined. To validate these newly developed material models, scaled-down compression tests were conducted, and a good agreement between predicted and experimental flow curves was obtained. To further verify the two material models, micro-extrusion experiments were also performed. Finite element analysis simulations of the micro-extrusion experiments were carried out by implementing the newly developed material models. A reasonable agreement between the experimental and predicted micro-extrusion results was found, which validates the utilization of the newly developed material models in microforming process simulations such as microextrusion.

Keywords: Micro-forming, micro-extrusion, size effect, surface model, composite model, Hall-Petch relationship

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle minyatürleşme olarak adlandırılan trend giderek önem kazanmıştır. Günlük yaşantımızın vazgeçilmezi haline gelen cep telefonları, bilgisayar ve diğer elektronik cihaz ve aletler mikro boyutta parçalardan içermektedir. Bunların dışında, günümüzde tıp, savunma, opto-elektronik gibi alanlarda kullanılan birçok mekanik ve elektro-mekanik ürün, konnektör pimi, direnç kapağı, vida, temas yayı gibi mikro ölçekli çok sayıda metal parça içermektedir. Minyatürleşme trendi, bu tür minyatür parçaların imalat uğraşısını beraberinde getirmiştir.

Mikro-şekillendirme söz konusu minyatür metal parçaların üretilmesinde kullanılabilecek mikro imalat yöntemlerinden biridir. Mikro-şekillendirme yüksek üretim hızı, düşük maliyet ve malzeme kaybı gibi avantajları nedeniyle, kullanılabilecek diğer alternatif metodlara göre öne çıkmaktadır. Bununla beraber, malzemenin makro boyutlardan mikro boyutlara inmesiyle birlikte boyut etkileri ortaya çıkmakta 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.

Metal şekillendirme yöntemlerinde malzemenin davranışlarının öngörülmesi için bilgisayar ortamında gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinin oldukça önemli bir yeri vardır. Sonlu eleman analizleri sayesinde, malzemelerin mekanik davranışı, proses kuvveti, ürün geometrisi, kalıp parametreleri gibi birçok parametre hakkında bilgi sağlanır.

Bununla birlikte, boyut etkileri yüzünden metal şekillendirme proses benzeşimlerinde kullanılan geleneksel malzeme modelleri mikro şekillendirme benzeşimleri için kullanılamamaktadır. Dolayısıyla, mikro şekillendirme için boyut etkilerini göz önüne alan uygun malzeme modellerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu proje kapsamında mezo/mikro boyutta malzeme deformasyon davranışını modellemek için kullanılabilecek iki farklı malzeme modeli geliştirilmiştir. Modellerin birinde yüzey modeli ve Hall-Petch bağıntısı birlikte kullanılmış, diğerinde ise yüzey modeli ve kompozit model kombinasyonu kullanılmıştır. Yeni geliştirilen malzeme modellerinin doğrulanması için, farklı boyutlarda numunelerle mikro-basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve malzeme modelleriyle yapılan teorik hesaplamalarla deneysel olarak elde edilen akma eğrileri doğru bir şekilde tahmin edilmiştir. Bu iki malzeme modelinin daha ileri bir şekilde doğrulanması için mikro-ekstrüzyon deneyleri de gerçekleştirilmiş ve geliştirilen malzeme modellerinin kullanılmasıyla mikro-ekstrüzyon deneylerinin sonlu elemanlar yöntemiyle benzeşimleri gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar

yakın bir şekilde tahmin edilmiştir. Deneysel sonuçlarının benzeşimler ile yakın bir şekilde tahmin edilmesi, yeni geliştirilen malzeme modellerinin mikro-ekstrüzyon gibi mikro-şekillendirme işlemlerinde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Minyatürleşme olarak adlandırılan trend ile birlikte son yirmi otuz yıl içinde, minyatür metal parça imalatına talep son derece belirgin bir şekilde artmıştır. Bu da, düşük malzeme sarfiyatı, üstün mekanik özellikler, yüksek üretim hızı gibi avantajlarından dolayı, mikro-ölçekte metal şekillendirme işlemi olan mikro-şekillendirmeye olan ilginin atmasına yolaçmıştır. Dolayısıyla, ekstrüzyon gibi birçok metal şekillendirme işlemi minyatür metal parçaların imalatı için mikro boyutlara uyarlanmıştır. Bununla birlikte, mikro-ölçekte ortaya çıkan boyut etkileri geleneksel metal şekillendirme için bir hayli oturmuş olan bilgi birikiminin mikro-şekillendirme de olduğu gibi kullanılmasını engellemektedir. Mikro-ölçekte malzeme davranışında değişiklikler meydana gelmektedir. Bir mikro-şekillendirme prosesini gerçekleştirmede, geleneksel bir metal şekillendirme prosesinin boyutları küçültülür. Bununla birlikte, tane boyutu gibi iş malzemesinin mikroyapısı ile boyutlar aynı kalır. İş parçası boyutları tane boyutu ile karşılaştırılabilir olacak kadar küçüldüğünde işparçası kesidinde çok az sayıda tane bulunur. Tek bir tanenin deformasyonu anizotropiktir ve boyutuna, konumuna, şekline ve yönlenmesine bağlı olarak kesitte bulunan her tanenin, kesidin toplam deformasyonu üzerine etkisi olur. Bunun sonucunda, homojen olmayan deformasyon gerçekleşir, kalıplar tarafından uygulanan kuvvetlere malzemenin cevabında değişiklikler meydana gelir. Netice olarak, imalatta kesinlik ve tekrar edilebilirlik azalır. Bu da, mikroşekillendirmede proses kuvvetde saçınımına, nihai ürün şeklinde düzensizliklere ve anomaliye yol açar (Engel ve Eckstein, 2002; Kals ve Eckstein, 2000; Vollertsen vd., 2006; Justinger ve Hirt, 2009; Raulea vd., 2001; Chan vd.,2011; Chan vd., 2010; Parasiz vd., 2007; Geißdörfer vd., 2006; Geiger vd., 2007; Gao vd.,2015).

İlave olarak, mikro-ölçekte, işparçasında yüzey alanı bölü hacim oranı ciddi bir şekilde yükselir. Dolayısıyla, sürtünme gibi yüzeyle ilgili olaylar daha önemli hale gelir. Neticede, minyatürleşme ile toplam proses kuvveti içinde sürtünmeye harcanan kuvvetin payı artar. (Kals ve Eckstein, 2000; Geiger vd.,1996; Altan vd., 2013). Bunun yanında, mikro-çekme ve mikro-basma deneylerinin yapıldığı birçok çalışmada, tane boyutu sabit tutulduğunda, numune boyutu küçüldükçe akma gerilmesinin düştüğü gözlemlenmiştir (Miyazaki vd., 1978; Miyazaki vd., 1979; Kals ve Eckstein, 2000; Raulea vd., 2001; Engel ve Eckstein, 2002; Gau vd., 2007; Chan vd.,2012). Bu malzeme davranışının açıklanması için yüzey tabakası modeli önerilmiştir, Engel ve Eckstein (2002). Yüzey tabakası modeline göre, bir malzeme, yüzey taneleri ve hacim (iç)

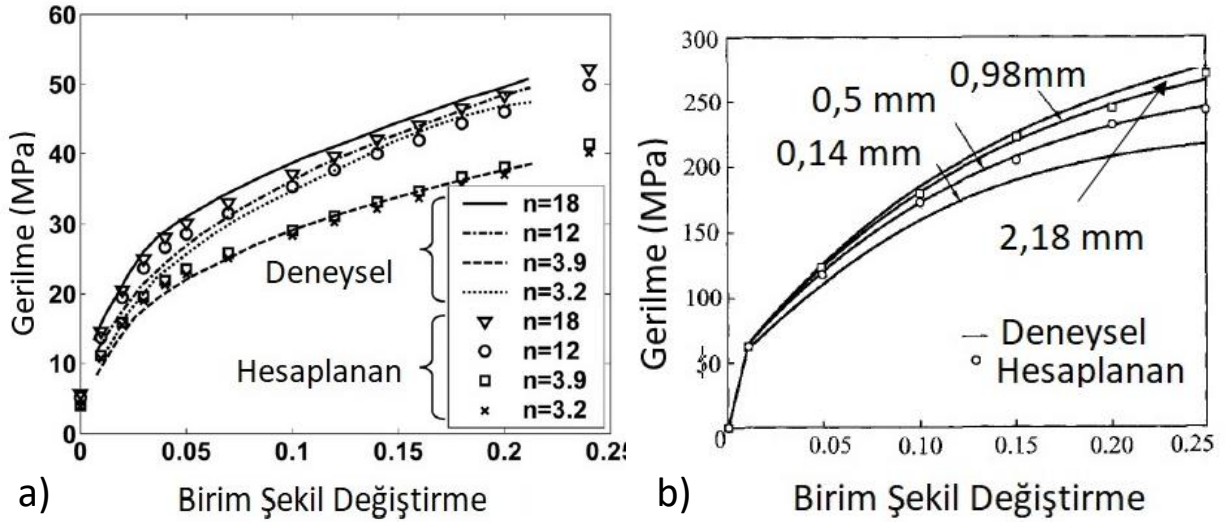
taneleri olmak üzere, iki kısma ayrılır. Yüzey tanelerinde tane sınırı daha azdır ve deformasyon sırasında yüzey taneleri daha az kısıtlanır. Dolayısıyla, yüzey tanelerinin dayanımı, hacim tanelerine göre düşüktür. Mikro-ölçekte, boyutlar küçüldüğünde, yüzey tanelerinin toplam kesit alanındaki payları ciddi bir şekilde artar ve bu yüzden minyatürleşme ile malzemenin dayanımı, yani akma gerilmesi düşer.

Son yıllarda, sonlu elemanlar analizleri metal şekillendirme proses tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır ve metal şekillendirme proses benzeşimlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için, doğru sonuç veren malzeme modellerinin kullanılması gereklidir. Benzer şekilde, sonlu elemanlar analizlerinin mikro-şekillendirme proses tasarımında kullanılması oldukça faydalı olacaktır. Bununla birlikte, boyut etkileri geleneksel malzeme modellerinin mikroşekillendirme benzeşimlerinde kullanılmasını kısıtlamaktadır. Dolayısıyla, mikro-şekillendirme benzeşimleri için boyut etkilerini hesaba katan malzeme modelleri gereklidir.

Neticede, boyut etkilerini dikkate alan malzeme modellerinin geliştirilmesi için çok sayıda araştırma yapılmıştır (Chan vd., 2011; Kim vd., 2007; Yu vd., 2006; Lai vd., 2008; Peng vd., 2009; Liu vd., 2012; Chan ve Fu, 2011). Bu çalışmaların önemli kısmında, numune boyutunda azalmaya karşılık malzeme akma gerilmesinde meydana gelen düşmeyi sergileyen bir malzeme modeli oluşturmak amaçlanmış ve neredeyse hepsinde yüzey tabakası modeli kullanılmıştır (Vollertsen vd., 2006; ; Kim vd., 2007; Yu vd., 2006; Lai vd., 2008; Peng vd., 2009; Liu vd., 2012). Yüzey tanelerinin kesitteki payları hem tane hem de numune boyutuna bağlı olduğu için, geliştirilen malzeme modellerinin hemen hemen hepsi, hem tane hem de numune boyutunu dikkate almıştır. Tane boyutunun akma gerilmesi üzerine etkisinin dikkate alınması için genellikle Hall-Petch bağıntısı kullanılmış, bununla birlikte bazı çalışmalarda kompozit model de kullanılmıştır.

Kim vd. bir ölçekleme parametresi eklemek suretiyle Hall-Petch bağıntısını modifiye ederek numune boyutunu dikkate alan bir malzeme modeli geliştirmiştir, Kim vd. (2007). Kalınlık boyunca 3,2, 3,9, 12 ve 18 tane bulunan alüminyum numunlerden elde edilen akma eğrileri, kalınlık boyunca 3,2 tane içeren numune hariç, yakın bir şekilde tahmin edilmiştir, Şekil 2.1a. Diğer bir çalışmada yüzey tabakası modeli kullanılmış ve mikro-şekillendirme ile ilgili bir malzeme modeli geliştirilmiştir, Yu vd. (2006). Numune boyut etkisinin dikkate alınması için Hall-Petch bağıntısı modifiye edilmiştir. Yüzey tanelerinin akma gerilmesinin tek Kristal akma gerilmesine eşit olduğu kabulüyle, Hall-Petch denklemindeki sürtünme gerilmesi yüzey tanelerinin akma gerilmesi olarak alınmıştır. Çapı 2,18 mm ve 0,14 mm olan tel numunelerden elde edilen akma eğrileri kullanılarak çapı 0,98 mm ve 0,5 mm olan numunelerin akma eğrileri yakın bir şekilde hesaplanmıştır, Şekil 2.1b. Ayrıca, bir ölçeklendirme faktörü kullanılmış ve sabit tane boyutu için akma gerilemesindeki

düşmenin numune boyutundaki düşmeyle orantılı olduğu analitik gösterilmiştir. Bunun yanında, numune boyutu küçüldüğünde Hall-Petch bağıntısından sapma meydana geldiği ve büyük tane boyutları için sapmanın oldukça büyük olduğu analitik olarak gösterilmiştir.



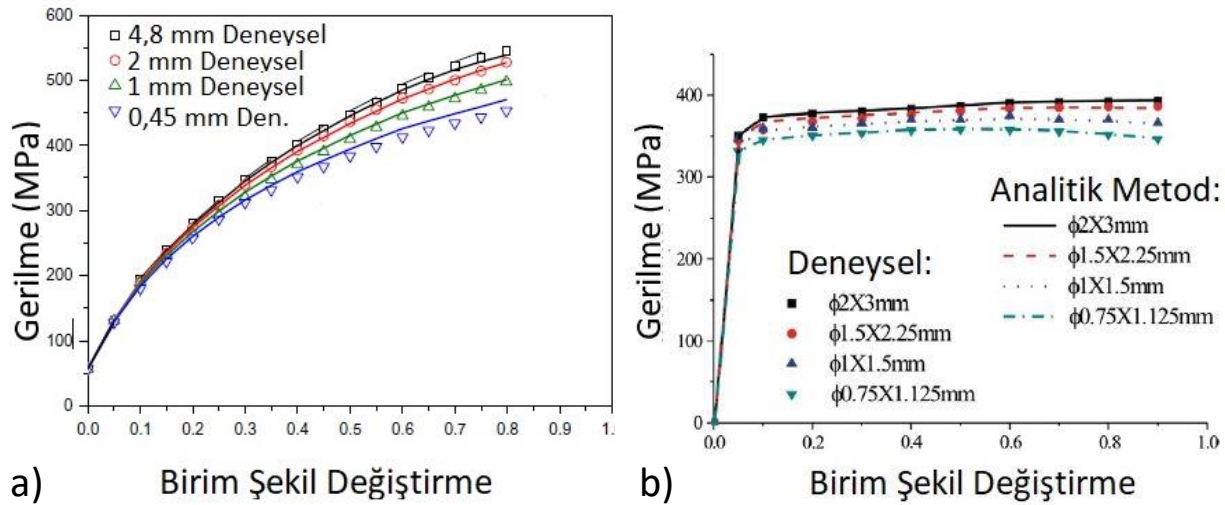
Şekil 2.1. Mikro şekillendirme için a) Kim ve diğerleri b) Yu ve diğerleri tarafından önerilen malzeme modelleri ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması

Bir başka çalışmada mezo/mikro-ölçekte şekillendirme için malzeme modeli geliştirilmiştir (Lai vd., 2008; Peng vd., 2009). Hem numune ve hem de tane boyut etkisinin dikkate alınması için yüzey tabakası modeli ve Hall-Petch bağıntısı birlikte kullanılmıştır. Numune boyut etkisinin dikkate alınması için, bir ölçeklenme parametresiyle Hall-Petch denklemi modifiye edilmiştir. Makro boyutlu çok-kristal malzemenin deformasyonunun modellenmesi için en büyük boyutlu numuneye ait akma gerilmesi eğrisi kullanılmış ve yüzey tanelerinin tek kristal gibi deforme olduğu kabulü yapılmıştır. Dolayısıyla, yüzey tanelerinin deformasyon davranışı, hesaplanan tek kristal akma eğrisi ile temsil edilmiştir. Deneysel malzeme modeli ile deneysel akma eğrileri yakın bir şekilde tahmin edilmiştir.

Diğer bir çalışmada numune ve tane boyutu etkisinin dikkate alınması için yüzey tabakası modeli ve kompozit model birlikte kullanılmıştır, Liu vd. (2012). Kompozit modele göre, bir malzeme sert tane sınırı bölgesinden ve yumuşak tane içlerinden oluşur. Söz konusu çalışmada, yüzey tanelerinde tane sınırı sertleşmesi etkisinin olmadığı ve yüzey tabakası akma gerilmesinin tane içi akma gerilmesine eşit olduğu kabul edilmiştir. Çapı 4,8, 2, 1 ve 0,45 mm olan basma numunelerinin akma eğrileri malzeme modeli ile yakın bir şekilde tahmin edilmiştir, Şekil 2.2a.

Diğer bir çalışmada çeşitli kalınlık ve tane boyutuna sahip saf bakır folyolarla çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir, Chan ve Fu (2011). Kalınlık boyunca bulunan tane sayısı azaldıkça numunelerin akma gerilmesinin neredeyse lineer olarak düştüğü gösterilmiştir. Kalınlık boyunca farklı sayıda tane içeren numunelerin akma gerilmesinin hesaplanması için kompozit model kullanılmıştır. Kalınlığı boyunca safdece 1,2 tane bulunan numunenin akma gerilmesi tane içi akma gerilmesini modellemek için kullanılmıştır. Kalınlık boyunca iki tane içeren numuneler için sınır koşulları yüzey tanelerine benzer olduğu için, yüzey tanelerinin akma gerilmesi olarak bu numunelerin akma gerilmesi ile temsil edilmiştir.

Chan vd. tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise malzeme bünye modeli oluşturmak için yüzey tabakası modeli kullanılmıştır, Chan vd. (2011). Yüzey ve iç tanelerinin akma gerilmeleri farklı yüzey tabakası oranına sahip en büyük ve en küçük boyutlu numunelerin akma eğrilerine göre hesaplanmıştır. Deneysel akma eğrileri yüzey tabakası modeli ile yakın bir şekilde tahmin edilmiştir, Şekil 2.2b.



Şekil 2.2. Mikro şekillendirme için a) Liu ve diğerleri tarafından önerilen b) yüzey tabakası malzeme modelleri ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması

Yukarıda bahsedilen yüzey tabakası ve Hall-Petch denkleminin birlikte kullanıldığı malzeme modellerinde, yüzey tanelerinde bulunan tane sınırları ihmal edilmiş ve yüzey tanelerinin deformasyon davranışının, izole edilmiş tek kristalleri gibi olduğu kabul edilmiştir (Yu vd. 2006; Lai vd. 2008; Peng vd. 2009). Bu proje kapsamında oluşturulan ilk modelde, yüzey tabakasında bulunan tane sınırlarının da dikkate alınmasıyla, numune ve tane boyu etkisinin hesaplanması için için yüzey tabakası modeli ve Hall-Petch denklemi birlikte kullanılmıştır. Benzer şekilde,

yukarıda bahsedilen, yüzey tabakası modelinin ve kompozit modelin birlikte kullanıldığı çalışmada (Liu vd. 2012), yüzey tabakasında bulunan tane sınırları ihmal edilmiş ve yüzey tanelerinin, tane içi gibi deforme olduğu kabulü yapılmıştır. Bu proje kapsamında oluşturulan ikinci bir malzeme modelinde ise, yüzey tabakasında bulunan tane sınırları da dikkate alınarak, numune ve tane boyutunu etkisinin hesaplanması için yüzey tabakası modeli ve kompozit model kullanılmıştır.

Oluşturulan malzeme modellerinin doğrulanması için, farklı numune ve tane boyutlarına sahip numunelerle mikro-basma deneyleri yapılmış ve akma gerilmesi eğrileri elde edilmiştir. En büyük boyutlu basma numunelerine ait akma eğrilerinden malzeme modellerine ait sabitler hesaplanmıştır. Oluşturulan malzeme modelleri ile farklı numune ve tane boyutuna sahip numunelerin deneysel akma eğrileri yakın bir şekilde tahmin edilerek malzeme modellerinin doğruluğu gösterilmiştir. İlave olarak, oluşturulan malzeme modellerinin, mikro-şekillendirme proses benzeşimlerinde kullanılabileceğini göstermek için, farklı boyutlardaki numunelerle mikro-ekstrüzyon deneyleri yapılmıştır. Yeni malzeme modellerinin uygulanmasıyla mikro-ekstrüzyon deneylerinin bilgisayar ortamında sonlu elemanlar analiziyle benzeşimleri yapılmış ve deneysel mikro-ekstrüzyon kuvvetleri yakın bir şekilde tahmin edilmiştir. Böylece, oluşturulan malzeme modellerinin, mikroekstrüzyon gibi mikro-şekillendirme proseslerinin bilgisayar ortamında benzeşimlerinde kullanılabileceği gösterilmiştir.

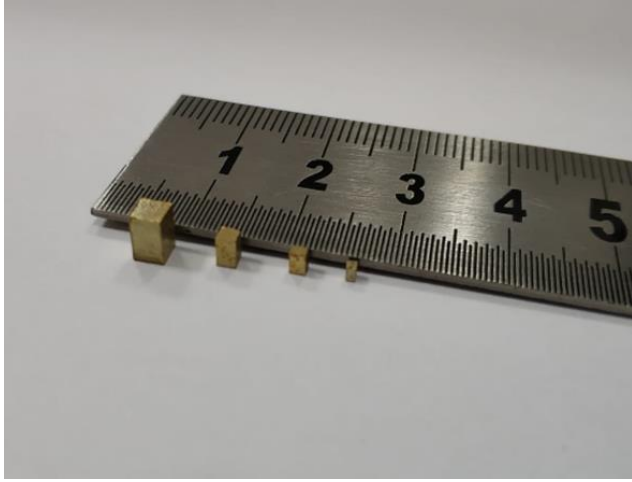
3. GEREÇ ve YÖNTEM

3.1 Deney Malzemesi ve 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 tavlanabilir. Bu tez kapsamında hem numune boyutları sistematik olarak küçültülmüş hem de aynı boyutlardaki numuneler farklı koşullarda tavlanarak farklı tane boyutuna sahip numuneler oluşturulmuştur. Bu şekilde farklı numune boyutu bölü tane boyutu oranına sahip numunelerle deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deney malzemesi CuZn30 α -pirincidir. Soğuk haddelenmiş 3,2 mm kalınlığında levha şekilde temin edilen CuZn30 pirinç malzemedan 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 tavlانmıştır. 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

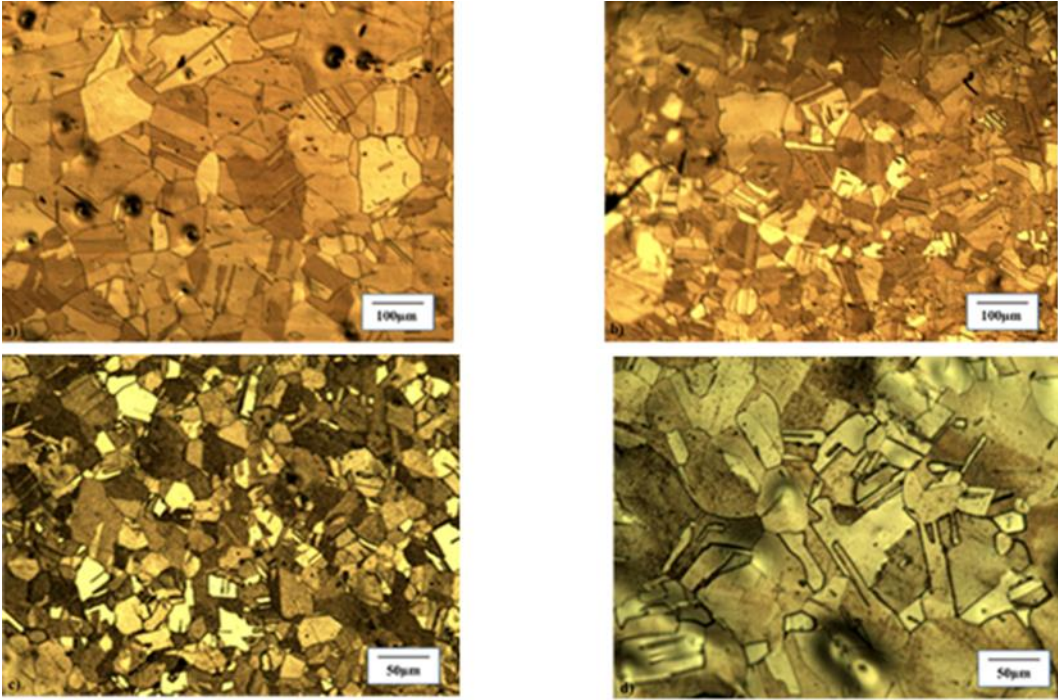


Şekil 3.2 Metalografik incelemede kullanılan zımparalama cihazı

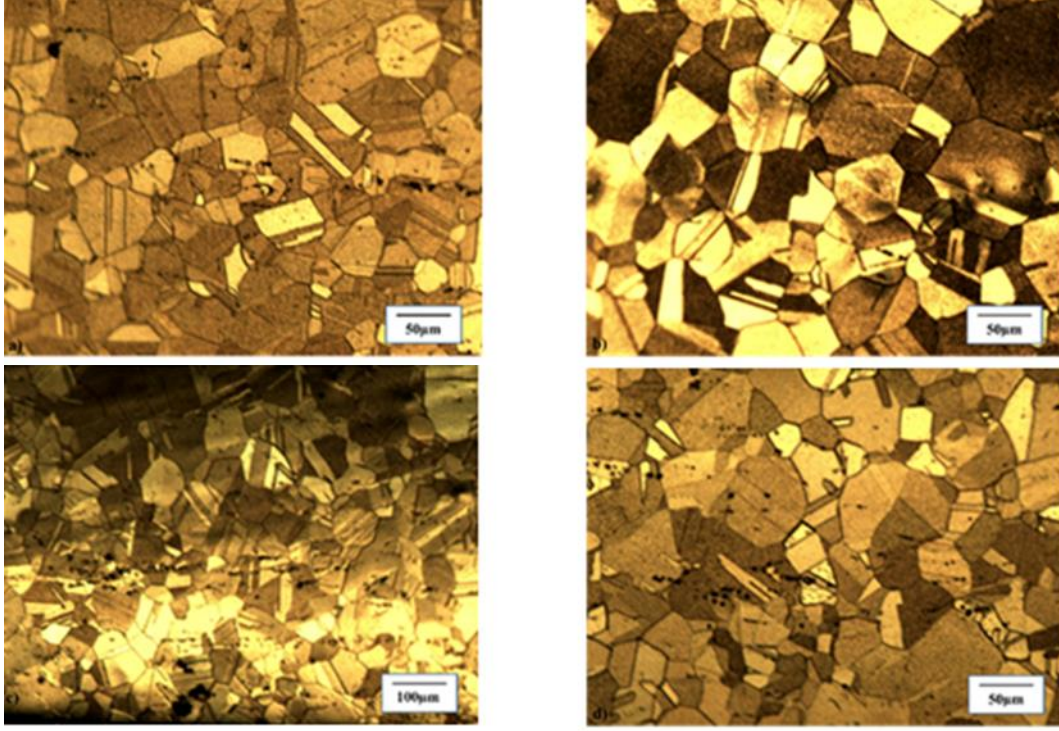


Şekil 3.3 Metalgrafik incelemede kullanılan elektrolitik parlatma ve dağlama cihazı

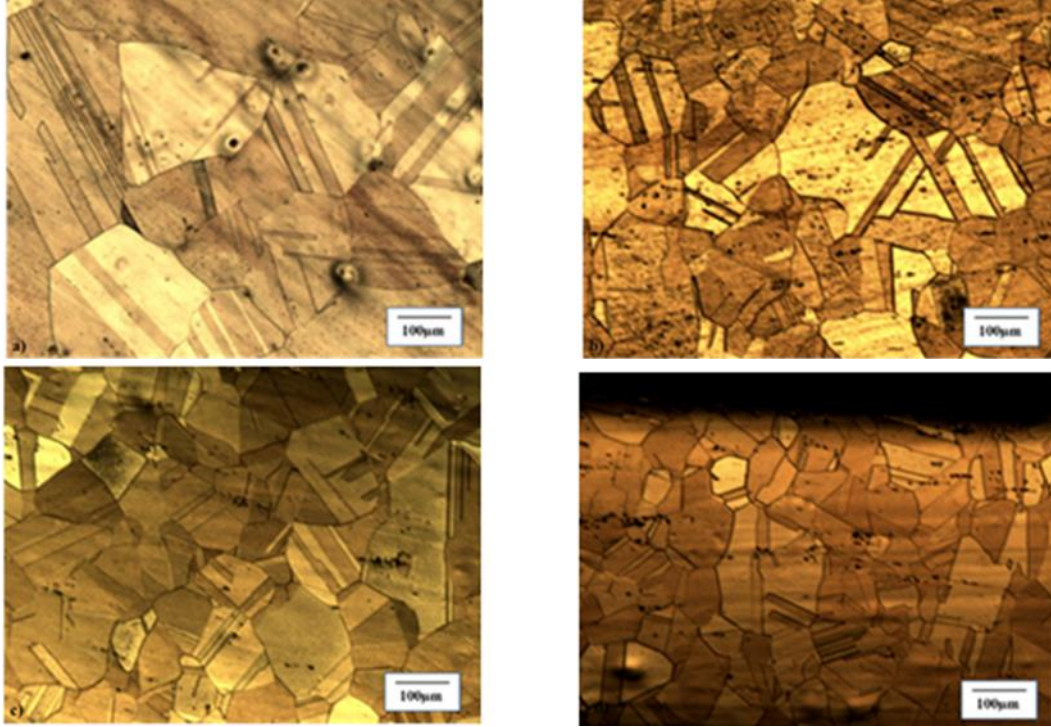
Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6'da farklı tavlama koşulları ve numune boyutu kombinasyonlarına ait metalgrafik inceleme sonucu elde edilen bazı mikro yapı fotoğraflarından bazıları gösterilmiştir. Çekilen mikroyapı fotoğrafları üzerinde metalgrafik inceleme yapılmış ve kesim metodu uygulanarak her tavlama sıcaklığı numune boyutu kombinasyonu için ortalama tane boyutu belirlenmiştir. Belirlenen söz konusu ortalama tane boyutları standart sapma değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere belirli bir numune boyutu için tavlama sıcaklığı arttıkça ortalama tane boyutu artmaktadır.



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 (mm)	Tavlama Sıcaklığı					
	500 °C		650 °C		700 °C	
	Tane Boyutu (µm)	Standart Sapma (µm)	Tane Boyutu (µm)	Standart Sapma (µm)	Tane Boyutu (µm)	Standart Sapma (µm)
3,2	43	10,7	100,2	48,6	205,8	74,5
2	45	11,4	74	25,3	146,2	80
1,5	33,5	6,6	70,8	25,6	137,6	52,6
1	51,6	12,6	81,6	28	125,4	42,4

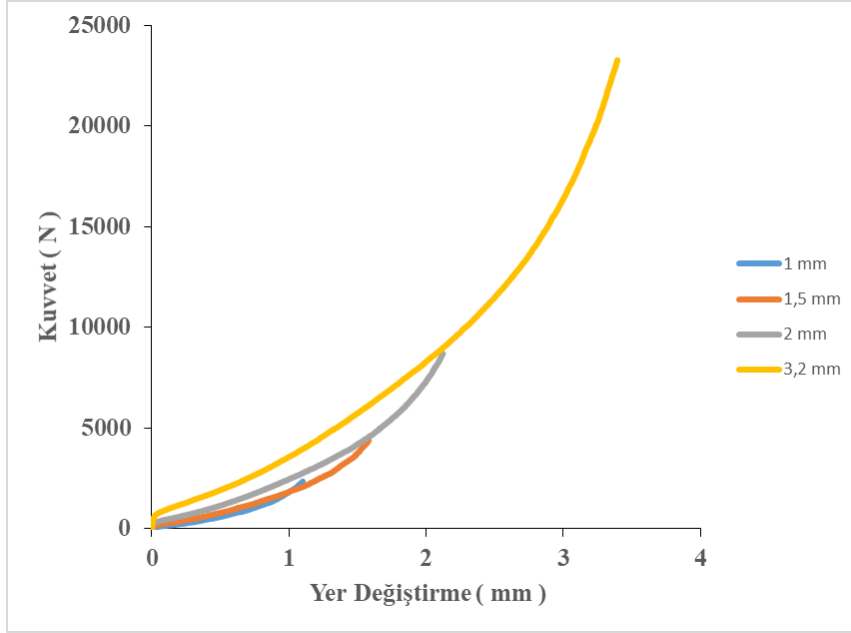
3.2. Mikro-basma deneyleri

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 (kesit kenarı 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 düşünülmüştür. Video ekstansometre ile gerçekleştirilen 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 dönüştürülmektedir. Mikro basma deneylerinde ise sorun, yükseklikleri 1,5 ve 4,8 mm arasında değişen numunelerin çok kısa olmalarıdır. 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 ölçülmüştür. Deney sonrasında numunelerin boyları mikrometre ile ölçülmüş ve video ekstansometre ile ölçülen deplasman değerleri ile karşılaştırılmış. Video ekstansometre tarafından ölçülen 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 ölçülüp kaydedilen deplasman değerlerinin gerçeğe oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir.

4. BULGULAR

4.1. 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 tavlannmış farklı boyutlara sahip 4 numuneye ait kuvvet deplasman eğrileri örnek olarak verilmiştir.



Şekil 4.1 700°C'de tavlannmış 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 dnüştürölmüş ve gerçek gerilme ve gerçek Şekil değişimi grafikleri oluşturulmuştur.

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

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

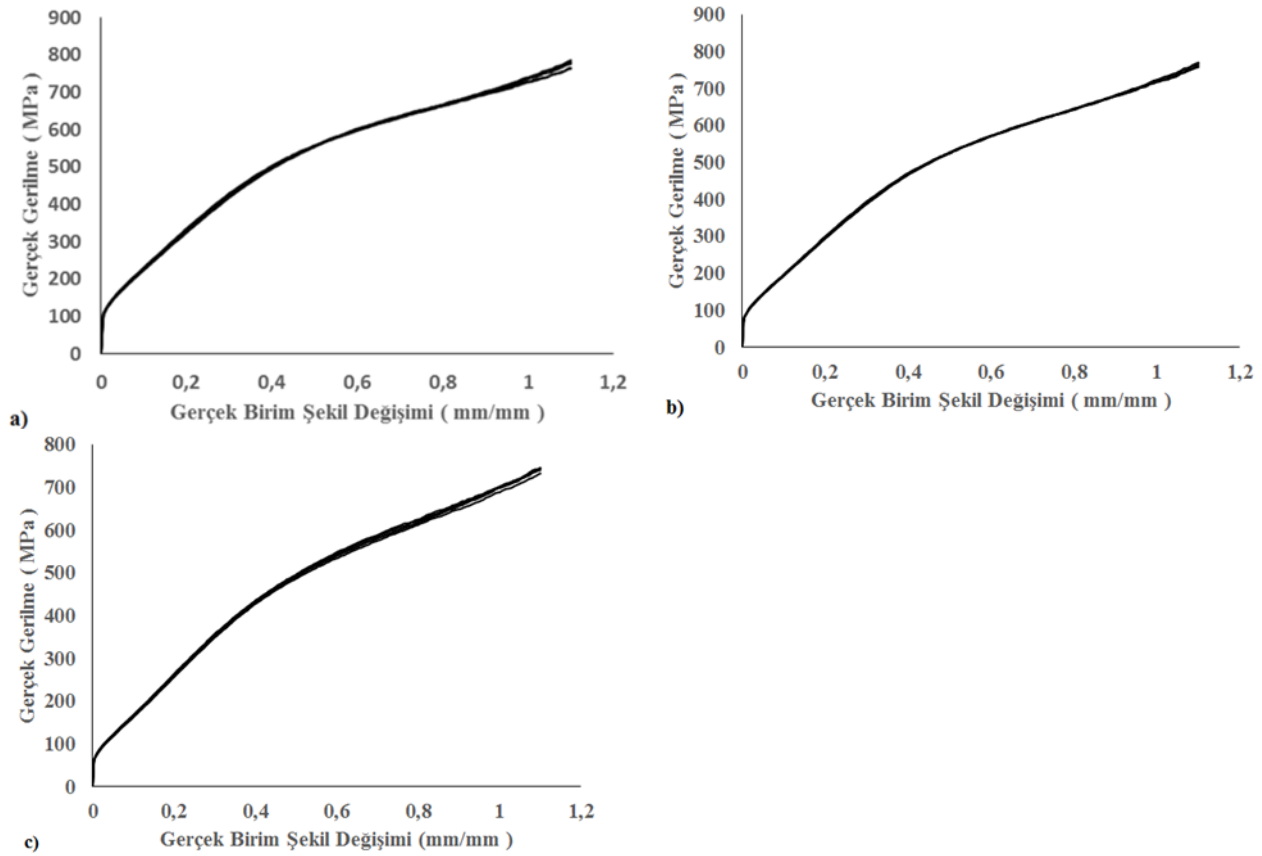
$$\sigma_g = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (4.3)$$

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

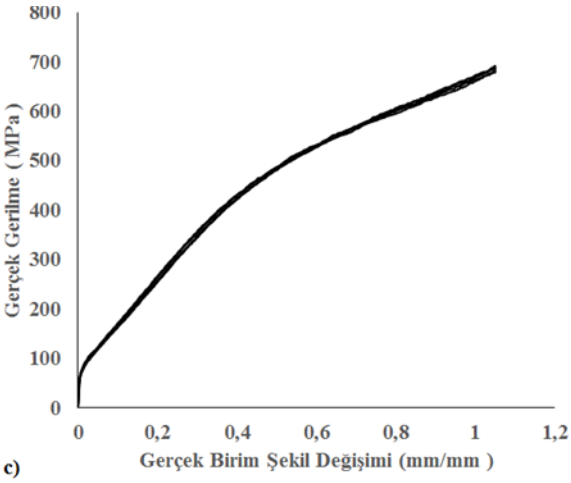
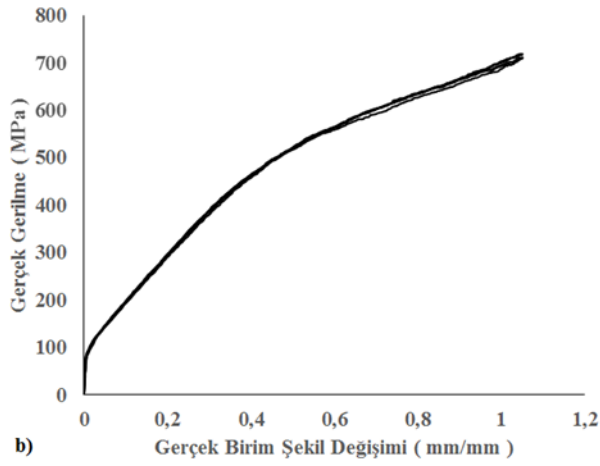
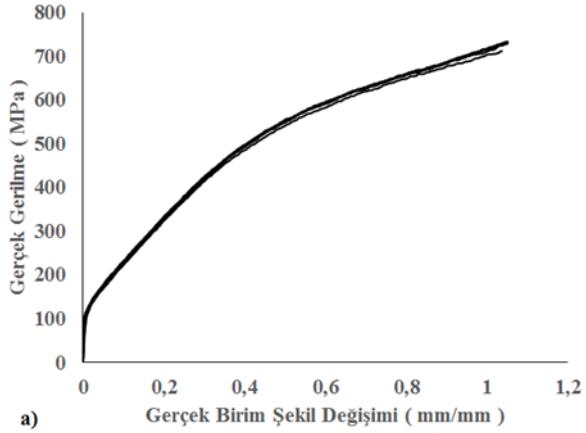
“F” basma kuvveti olarak tanımlanıp birimi Newton'dur. Numunenin ilk kesit alanı “A₀” ile temsil edilmektedir. Numunenin basma kuvveti sonucu birim Şekil değişimi, ε'dur ve birimi mm/mm' dir. h₀, numunenin ilk yüksekliği ve Δh, basma sonucu numune yüksekliğindek meydana gelen

değişimdir. “ σ_g ”, gerçek gerilme ve “ ϵ_g ” gerçek birim şekil değişimi olarak tanımlanmıştır. Bu şekilde her bir numune boyutu tane boyutu kombinasyonu için gerçek gerilme-şekil değişimi eğrileri elde edilmiştir.

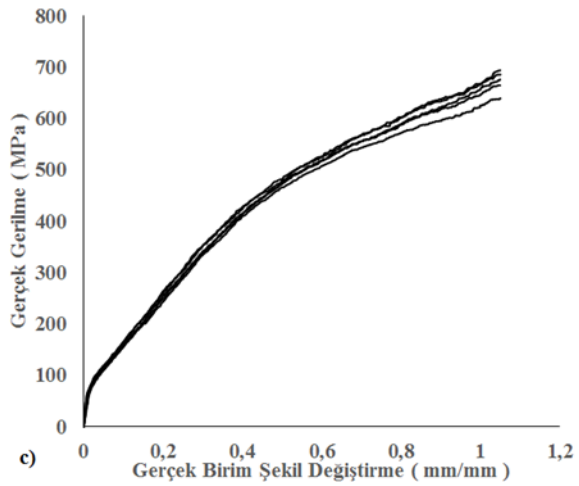
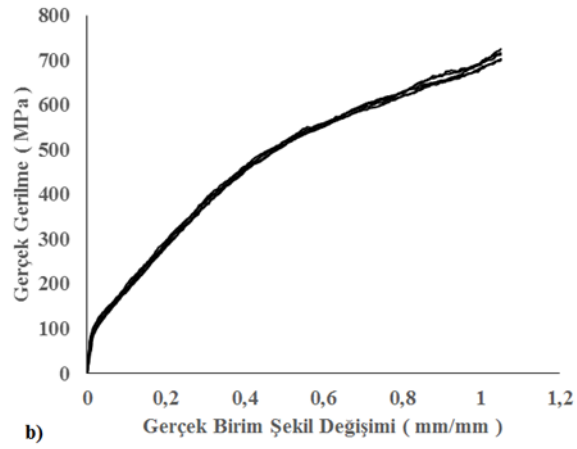
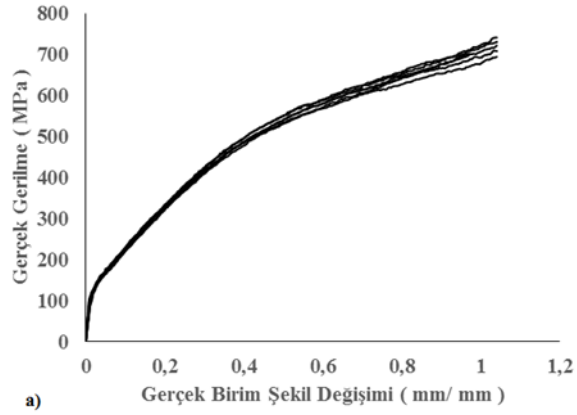
Şekil 4.2’de kare kesit kenar uzunluğu 3.2 mm ve tane boyutu a) 43 μm b) 100,2 μm c) 205,8 μm olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme gerçek birim şekil değiştirme eğrileri aynı grafikte gösterilmiştir. Şekil 4.3’de kare kesit kenar uzunluğu 2 mm ve tane boyutu 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.



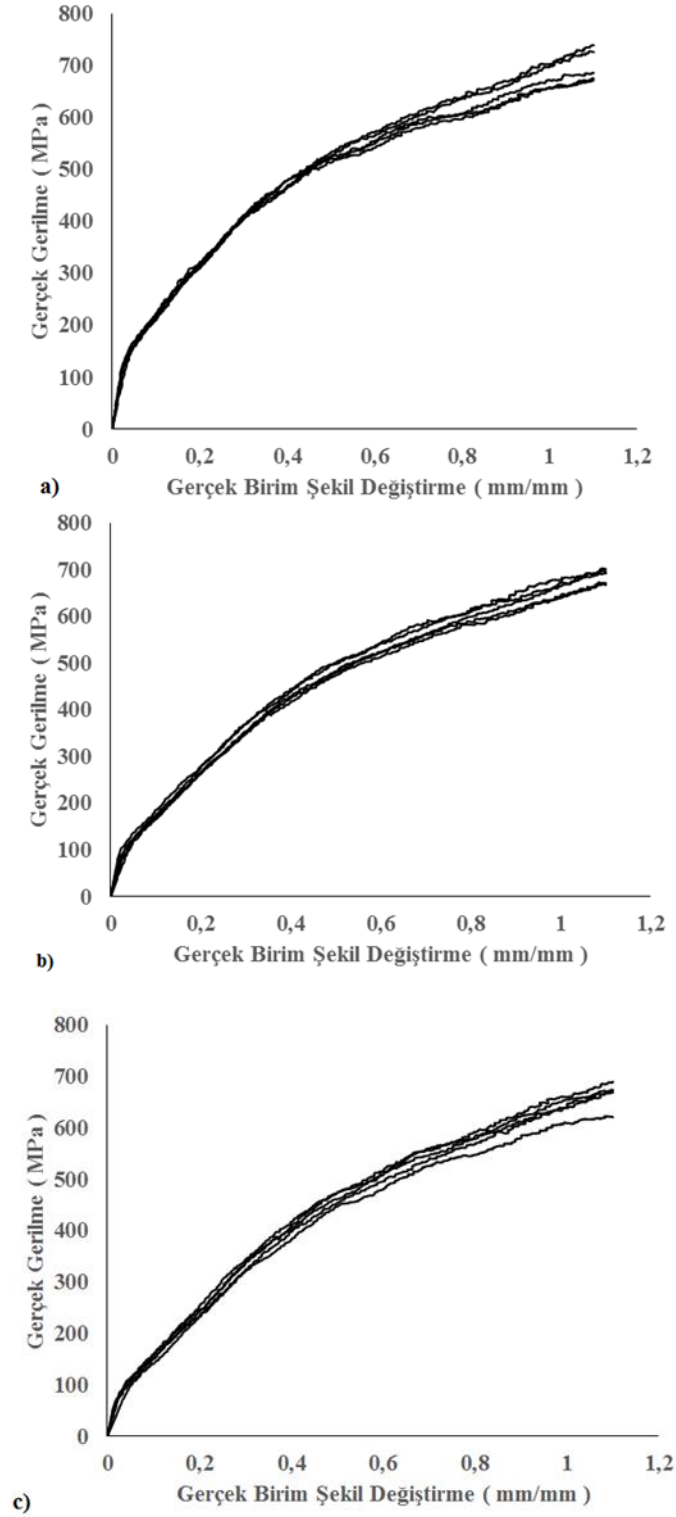
Şekil 4.2 Kare kesit kenar uzunluğu 3.2 mm ve a) tane boyutu 43 μm (500°C’de tavllanmış), b) tane boyutu 100,2 μm (650°C’de tavllanmış), c) tane boyutu 205,8 μm (700°C’de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri



Şekil 4.3 Kare kesit kenar uzunluğu 2 mm ve a) tane boyutu 45 μm (500°C'de tavllanmış), b) tane boyutu 74 μm (650°C'de tavllanmış), c) tane boyutu 146,2 μm (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 μm (500°C'de tavllanmış), b) 77,8 μm (650°C'de tavllanmış), c) 137,6 μm (700°C'de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri

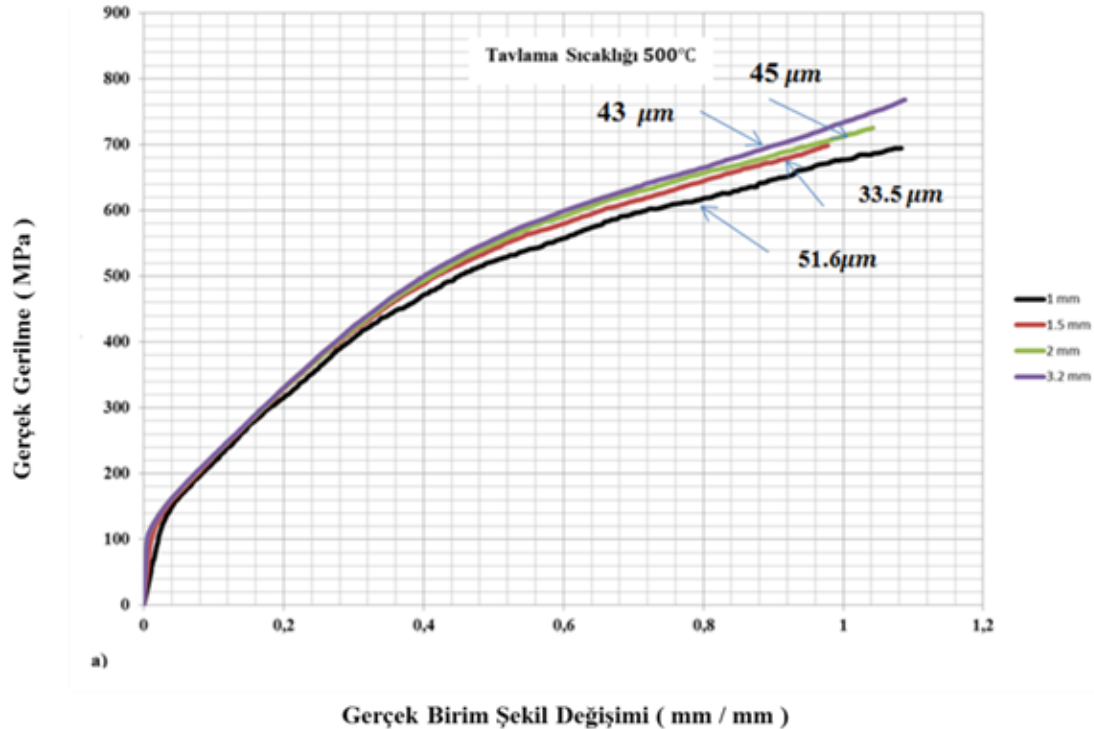


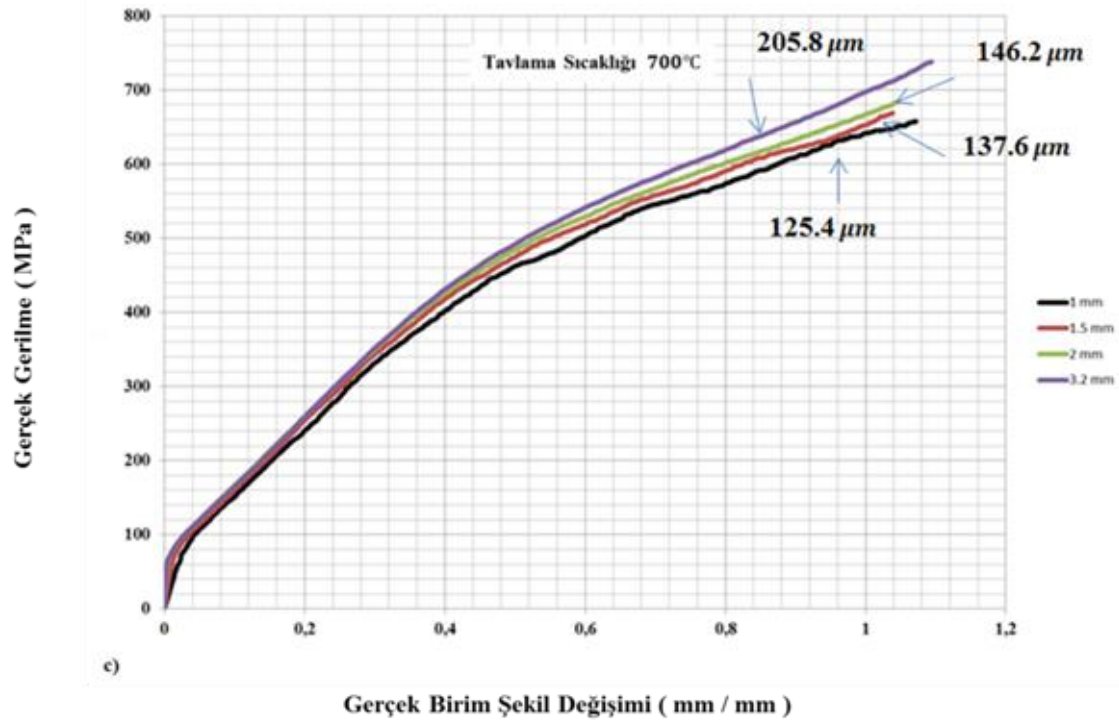
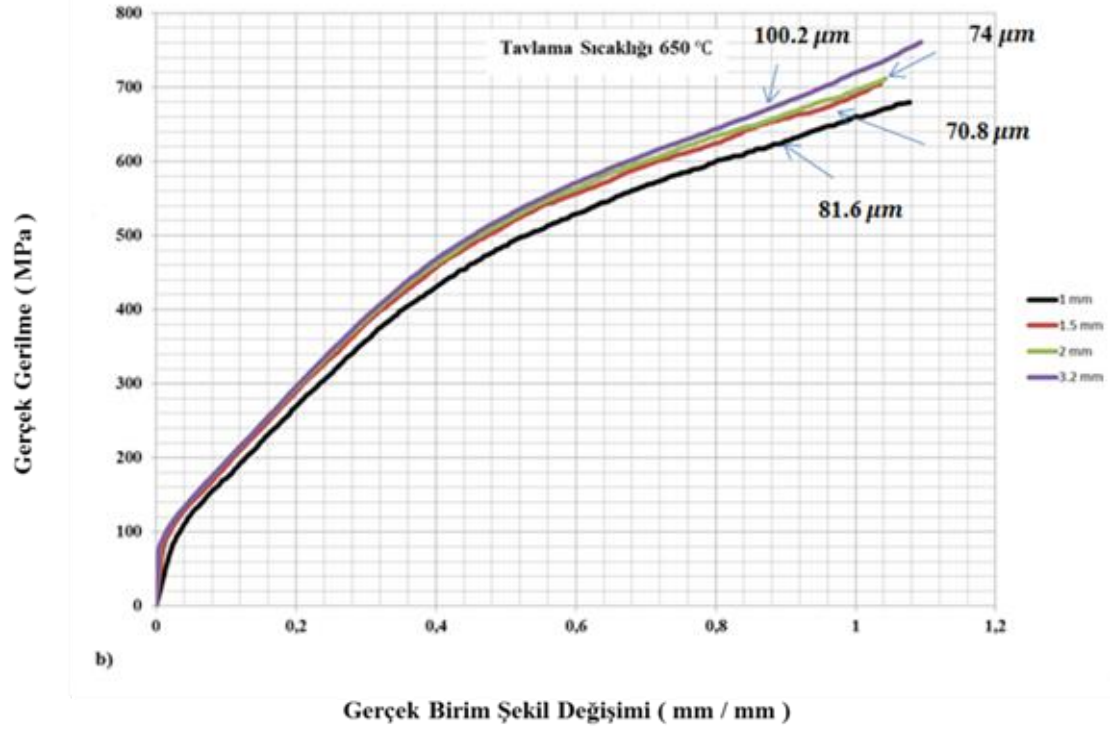
Şekil 4.5 Kare kesit kenarı 1 mm ve tane boyutu a) 51,6 μm (500°C'de tavllanmış), b) 81,6 μm (650°C'de tavllanmış), c) 125,4 μm (700°C'de tavllanmış) olan numunelerle gerçekleştirilen basma deneyleri sonucu elde edilen gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişimi eğrileri

Grafikler incelendiğinde numune boyutlarının küçülmesiyle genel itibariyle saçının 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 µm olan) numunelere ait akma eğrilerinde açıkça görülmektedir.

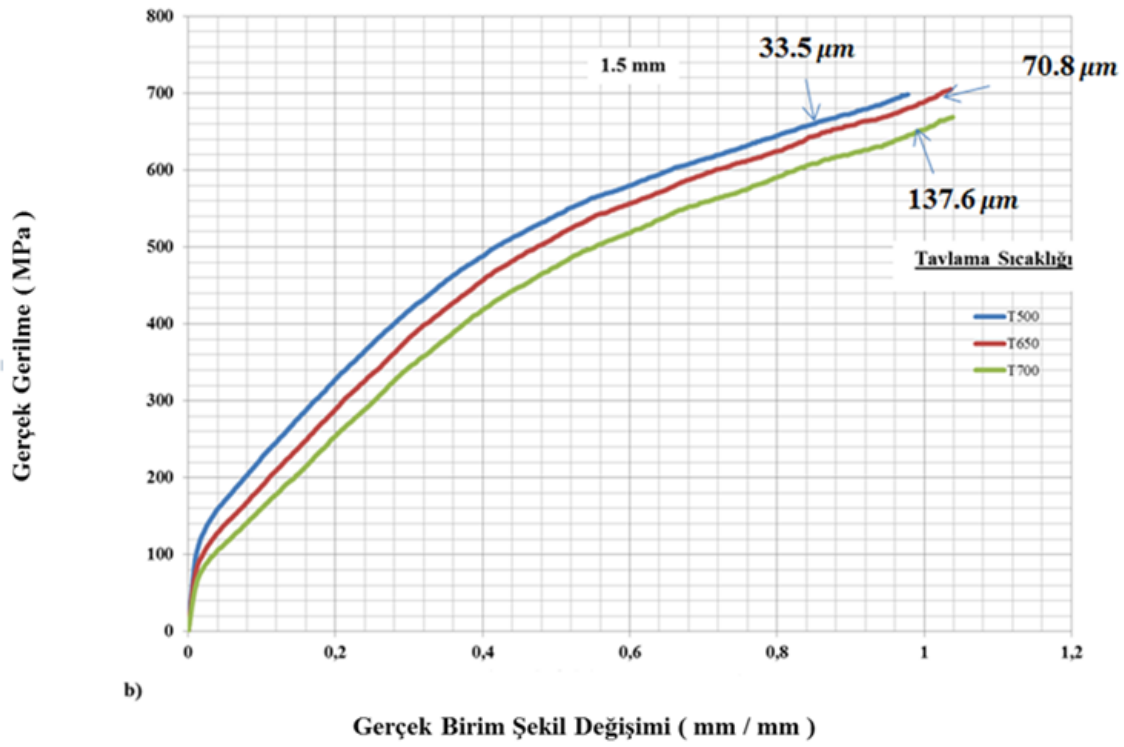
Numune boyutunun azalmasıyla birlikte malzemenin mekanik davranışındaki homojenlik tanelerin yönlenmesine bağlı olarak değişmektedir. Mikro boyutlara inildikçe numunede bulunan tane sayısı azaldığından, her bir tanenin yönlenmesi (oryantasyonu) malzemenin mekanik davranışını etkileyecektir. Bu sebeple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

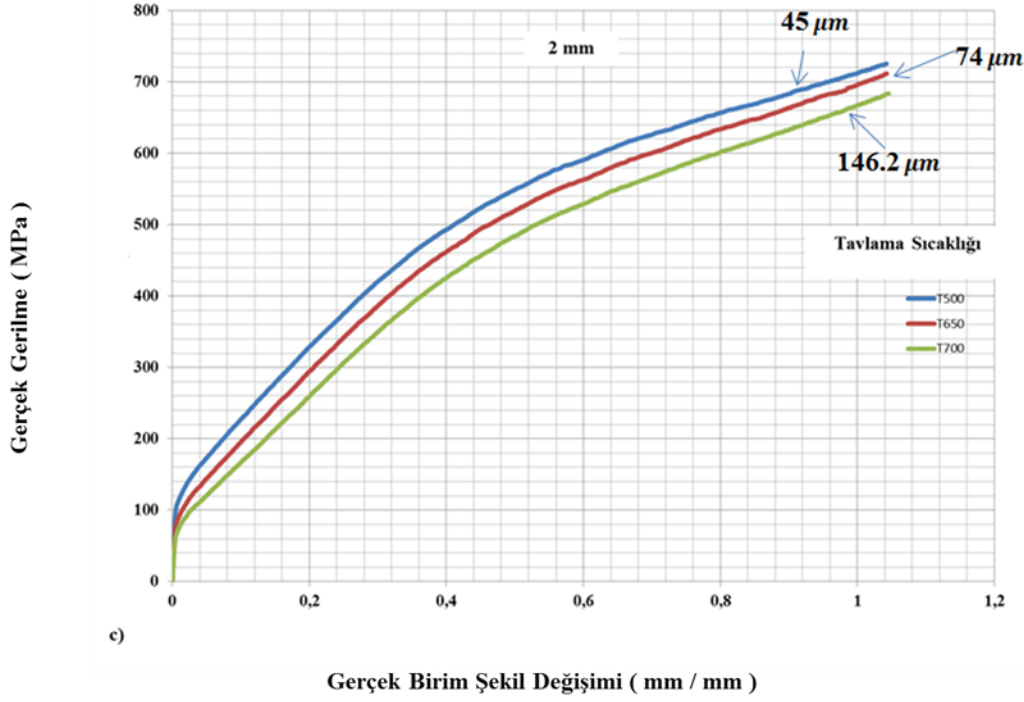
Her bir numune boyutu, tane boyutu (tavlama sıcaklığı) kombinasyonuna ait ortalama bir gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrisinin elde edilmesi için Matlab programında kod yazılmış ve yazılan bu kod ile her bir numune boyutu ve tane boyutu (tavlama sıcaklığı) için ortalama bir gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrisi elde edilmiştir Aynı tavlama sıcaklığı için farklı numune boyutlarına ait ortalama gerçek gerilme gerçek birim şekil değiştirme eğrileri 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.



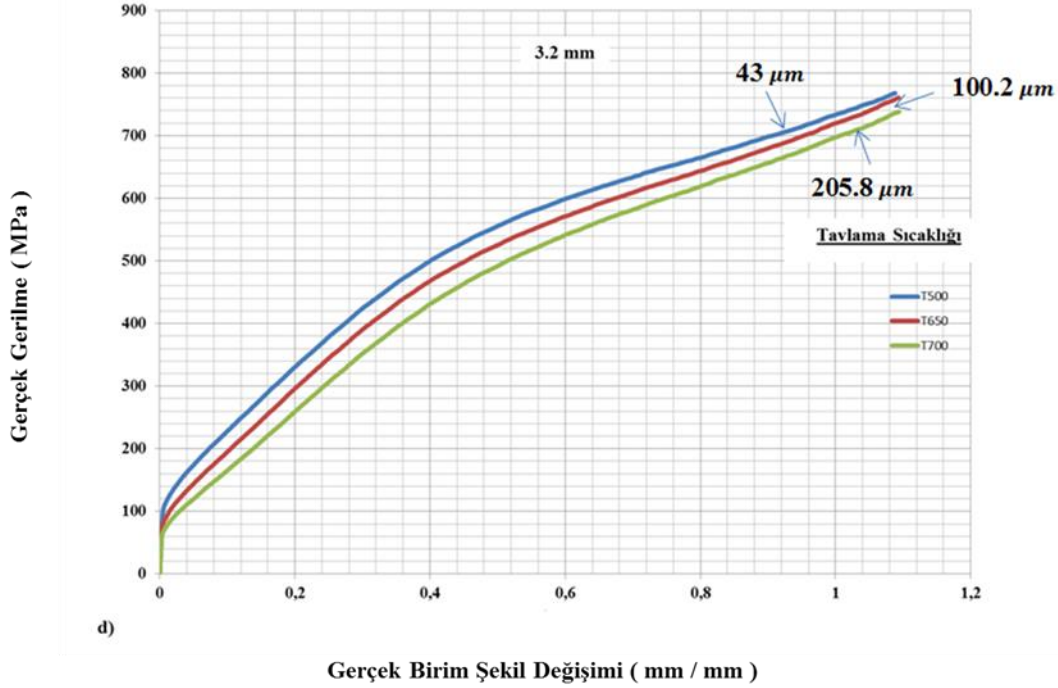


Şekil 4.6 a) 500 °C b) 650 °C c) 700 °C sıcaklıkta tavllanmış numunelerin ortalama gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin numune boyutuna göre karşılaştırılması. Numune boyutları (kare kesit kenar uzunlukları) ve tane boyutları grafiklerde belirtilmiştir.





c)



d)

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.

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

4.2 Mikro-şekillendirme Malzeme Modeli 1

Daha önce de belirtildiği gibi mikro-şekillendirme proseslerinin doğru bir şekilde benzeşimlerini gerçekleştirmek için, mikro boyutta malzeme davranışını gösteren malzeme modellerine ihtiyaç vardır. Yine daha önce belirtildiği gibi, mikro-şekillendirme konusunda gerçekleştirilen bir dizi çalışma, numune boyutu küçüldükçe akma gerilmesinin düştüğünü göstermiştir. Dolayısıyla, mikro-şekillendirme için geçerli bir malzeme modelinin bu malzeme davranışını sergilemesi gerekir. Bu çalışmada, söz konusu bu boyut etkisinin dikkate alınması için yüzey tabakası modeli kullanılmıştır.

Ayrıca, mikro-şekillendirme için geçerli bir malzeme modelinin numune boyutu ile birlikte tane boyutu etkisini de nazara alması gerekir. Bu proje kapsamında geliştirilen 1. Malzeme modelinde, tane boyutunun akma gerilmesi üzerindeki etkisinin hesaba katılması için Hall-Petch denklemi kullanılmıştır. Hall-Petch denkleminde, bir malzemenin akma dayanımı tane boyutunun kare köküyle ters orantılıdır. Hall-Petch akma gerilmesi bölgesini de içerecek şekilde genişletilmiştir, Armstrong vd. (1962).

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_o(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

Burada, $\sigma_o(\varepsilon)$ ve $k(\varepsilon)$ belirli birim şekil değiştirme değerlerindeki malzeme sabitleridir. $\sigma_o(\varepsilon)$ çok-kristal bir malzemede tane içlerinde plastik deformasyon meydana getirmek için gerekli gerilmedir. $k(\varepsilon)$ tane sınırı yakınlarında plastik deformasyon yaratmak için gerekli gerilme ile ilişkilidir. Denklemde Taylor yönlenme faktörünün eklenmesiyle, daha genel bir Hall-Petch ilişkisi, yani akma gerilmesinin tane boyutuna bağlı olarak değişimini gösteren daha genel bir denklem de önerilmiştir, Armstrong vd. (1962):

$$\sigma(\varepsilon) = m(\tau_o(\varepsilon) + k_s(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) \quad (4.6)$$

Denklemde m yönlenme faktörüdür, $\tau_o(\varepsilon)$ tane içinde aktif kayma sistemleri üzerindeki ortalama kayma gerilmesi bileşenidir, $k_s(\varepsilon)$ ise tane sınırlarında plastik deformasyon meydana getirmek için gerekli kayma gerilmesi ile ilişkilidir.

Tane boyutunun akma gerilmesi üzerindeki etkisinin hesaba katılması için yüzey tabakası modeli kullanılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi, yüzey tabakası modelinde, malzemenin yüzey tabakasından (yüzey taneleri) ve iç kısımdan (iç ya da hacim tanelerinden) oluştuğu kabul edilir. Şekil 4.8'de kare kesitli bir numunede yüzey tabakası ve iç taneler şematik olarak gösterilmiştir. Bir malzemenin akma gerilmesi, yüzey tabakasının ve iç tanelerinin akma gerilmelerinin ağırlıklı ortalamasıdır. Dolayısıyla, bir malzemenin akma gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

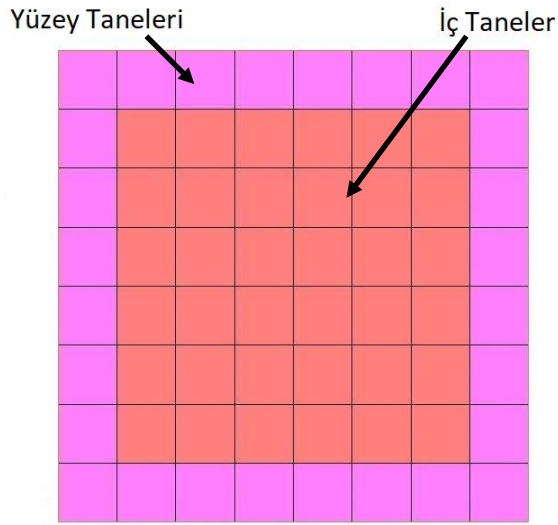
$$\sigma = \alpha\sigma_{fs} + (1 - \alpha)\sigma_{fi} \quad (4.7)$$

Denklemden, σ_{fs} ve σ_{fi} sırasıyla yüzey tabakasının ve iç kısmın akma gerilmeleri, α ise yüzey tabakasının malzeme kesit alanına oranıdır.

Dikdörtgen kesidi bulunan bir numune için, yüzey tabakasının alan oranı α , yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\alpha = \frac{2d(a+b) - 4d^2}{ab} \quad (4.8)$$

Denklemden a ve b dikdörtgen kesidin kenarları, d ise malzemenin ortalama tane boyutudur.



Şekil 4.8 Kare kesitli bir numune için yüzey ve iç tanelerin şematik gösterilmesi

İki farklı yönelme faktörünün kullanılmasıyla Denklem 2'ye göre yüzey tabakasının ve iç kısmın akma gerilmeleri, yani σ_{fs} , ve σ_{fi} , hesaplanabilir. Bir üst sınır model olan Taylor modeline göre, çok-kristal bir malzemede, tüm tanelerde makro deormasyona eşit aynı deformasyon meydana gelir ve komşu taneler arasında tane sınırları boyutca deformasyonun uyumlu bir şekilde gerçekleşmesi için beş bağımsız kayma sisteminin çalışması gerekir. α -pirinci gibi yüzey merkezli kübik, YMK metaller için ortalama yönelme faktörü, $m=3,06$ olarak hesaplanmıştır. İç tanelerin deformasyonları komşu taneler tarafından tam bir şekilde kısıtlanmıştır ve tane sınırları boyunca deformasyon uyumluluğunun sağlanması gerekir. Dolayısıyla, iç taneler için yönelme faktörü değeri olarak 3,06 alınabilir.

$$\sigma_{fi}(\epsilon) = 3.06(\tau_o(\epsilon) + k_s(\epsilon)d^{-1/2}) \quad (4.9)$$

Bununla birlikte, yüzey tanelerinin tane sınırları daha azdır ve deformasyonları komşu taneler tarafından tamamen kısıtlanmış değildir. Dolayısıyla, yüzey taneleri için, tüm tanelerde aynı gerilmenin meydana geldiğini kabul eden ve bir alt sınır model olan Sachs modeli kullanılabilir. YMK metallerde Sachs modeli için yönlenme faktörü 2,23 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, yüzey tanelerinin akma gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\sigma_{fs}(\varepsilon) = 2.23(\tau_o(\varepsilon) + k_s(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) \quad (4.10)$$

Denklem 4.9 ve 4.10'nun Denklem 4.7'ye yerleştirilmesiyle bir malzemenin akma gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\sigma = \alpha 2.23(\tau_o(\varepsilon) + k_s(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) + (1 - \alpha)3.06(\tau_o(\varepsilon) + k_s(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) \quad (4.11)$$

İç kısmın (iç tanelerin) akma gerilmesinin, σ_{fi} , yüzey taneleri oranı ihmal edilebilecek kadar küçük makro boyutlu çok-kristal malzenin akma gerilmesine, $\sigma(\varepsilon)$ eşit olduğu düşünülebilir.

$$\sigma_{fi}(\varepsilon) = 3.06(\tau_o(\varepsilon) + k_s(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) = \sigma_o(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

$m_{Sachs}/m_{Taylor} = 2,23/3,06 = 0,73$ olduğu için yüzey tabakasının akma gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\sigma_{fs}(\varepsilon) = 0.73\sigma(\varepsilon) = 0.73(\sigma_o(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) \quad (4.13)$$

Denklem 4.12 ve 4.13'ün Denklem 4.7'ye yerleştirilmesiyle bir malzemenin akma gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

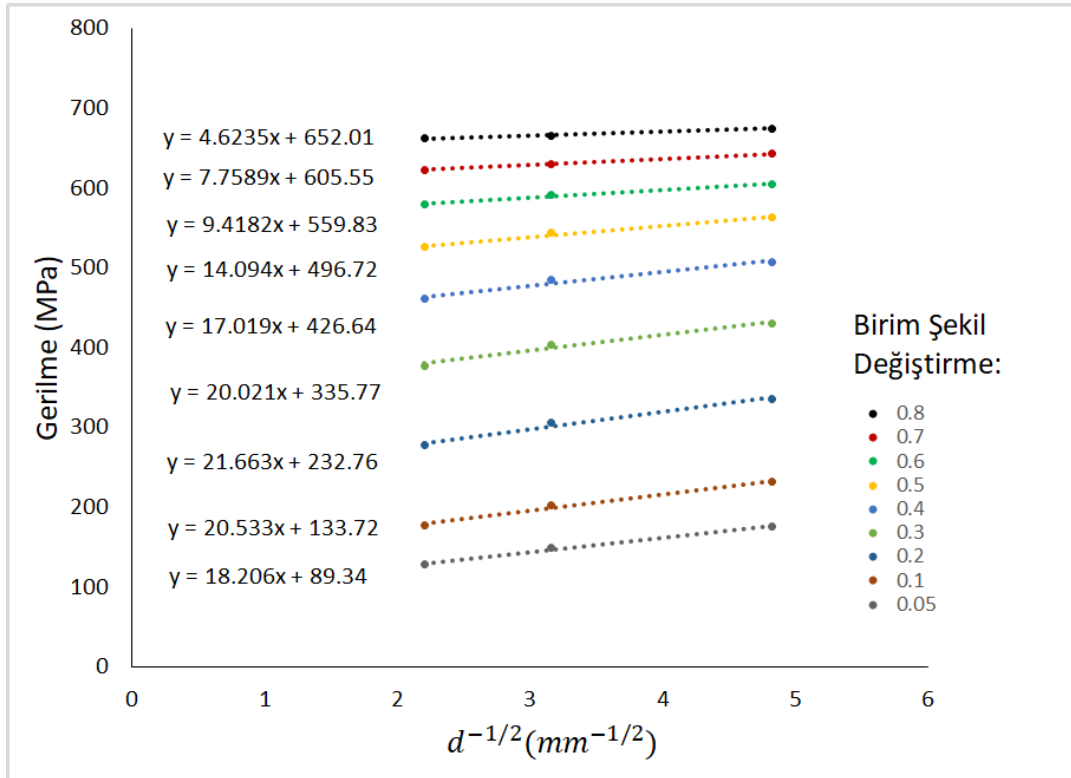
$$\sigma = (1 - \alpha)(\sigma_o(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) + \alpha 0.73(\sigma_o(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) \quad (4.14)$$

Denklem 4.14'ün yeniden düzenlenmesiyle, mikro-şekillendirme için bir malzemenin akma gerilmesinin hesaplanmasında aşağıdaki ifade kullanılabilir:

$$\sigma = \sigma_o(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}} - 0.27\alpha(\sigma_o(\varepsilon) + k(\varepsilon)d^{-\frac{1}{2}}) \quad (4.15)$$

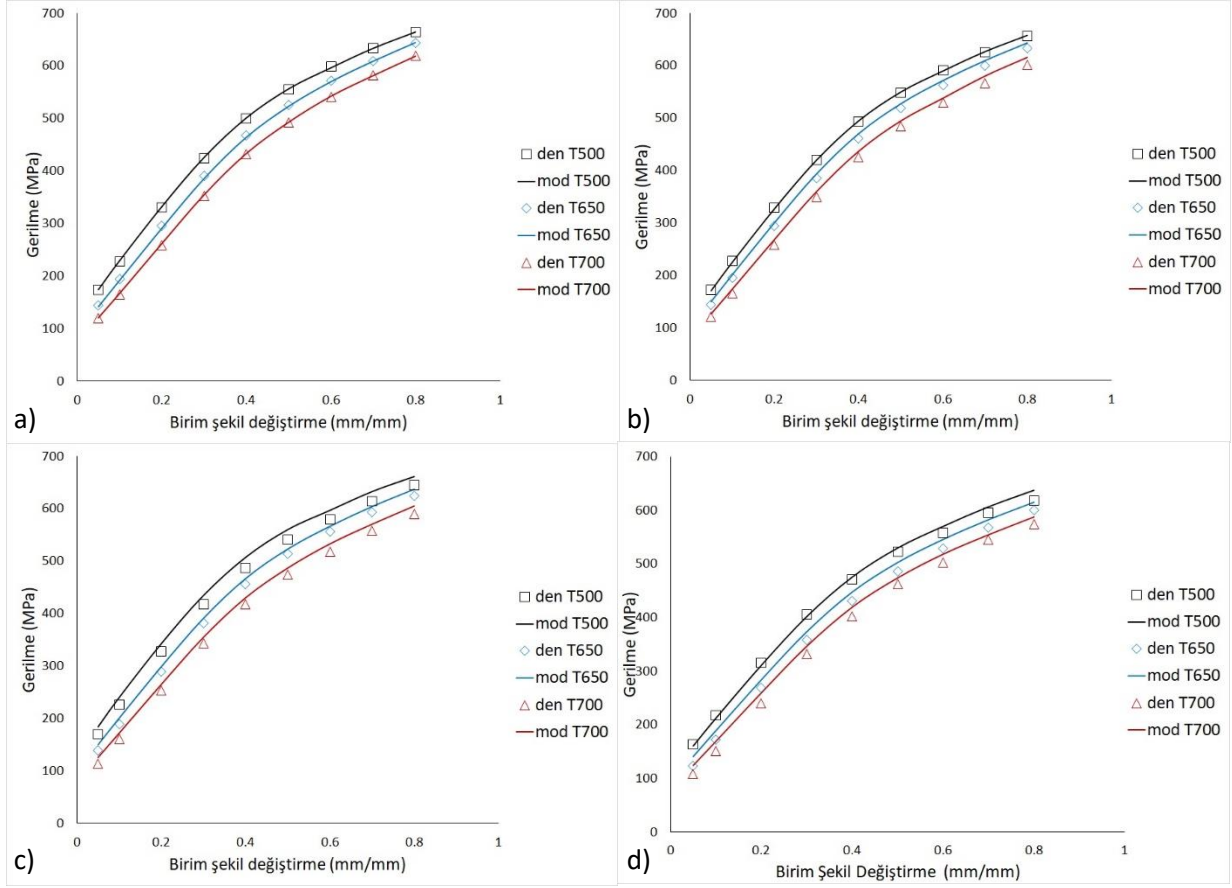
Denklem 4.15'in kullanılmasıyla numune ve tane boyutuna göre bir malzemenin akma gerilmesi hesaplanabilir. Bunun için malzemeye özgü Hall-Petch sabitleri olan $\sigma_o(\varepsilon)$ ve $k_s(\varepsilon)$ 'nin belirlenmesi gerekir. H-P sabitlerinin belirlenmesi için, ilk önce farklı tane boyutları için çok-kristal malzemenin akma gerilmesinin $\sigma(\varepsilon)$ (ya da iç tanelerin akma gerilmesi, $\sigma_{fi}(\varepsilon)$) hesaplanması gerekir. İç tanelerin akma gerilmelerinin belirlenmesi için, kare kesit kenarı 3,2 mm olan en büyük boy numunelere ait akma gerilme eğrileri kullanılabilir. Bununla birlikte, yüzey tanelerinin kesitte kapladığı alanın oranı en büyük boy numuneler için hala büyük olduğu için, büyük boy numunelerin akma gerilmeleri iç tanelerin (ya da makro boyutlu çok-kristal malzemenin) akma gerilmesi olarak

kabul edilemez. Her tane boyutu için en büyük boy numunelerin akma gerilmesi ve yüzey tabakasının oranı bilinmektedir. Denklem 5.15'te tek bilinmeyen, iç tanelerin akma gerilmesidir, $(\sigma_{fi}(\epsilon))$ $(\sigma_{fi}(\epsilon) = \sigma_o(\epsilon) + k_s(\epsilon)/d^{-1/2})$. Dolayısıyla, belirli gerçek birim şekil değiştirme değerlerinde, üç farklı tane boyutu için, iç tanelerin akma gerilmeleri hesaplanabilir. Şekil 4.9'da belirli gerçek birim şekil değiştirme değerleri için, iç tanelerin akma gerilmelerinin bir bölü kök tane boyutuna göre değişimi gösterilmiştir. Veri noktalarından doğrular geçirilmiştir. Belirli şekil değiştirme değerleri için, doğruların y eksenini kestiği noktalar $\sigma_o(\epsilon)$ değerlerini ve doğruların eğimleri ise $k_s(\epsilon)$ değerlerini verir.



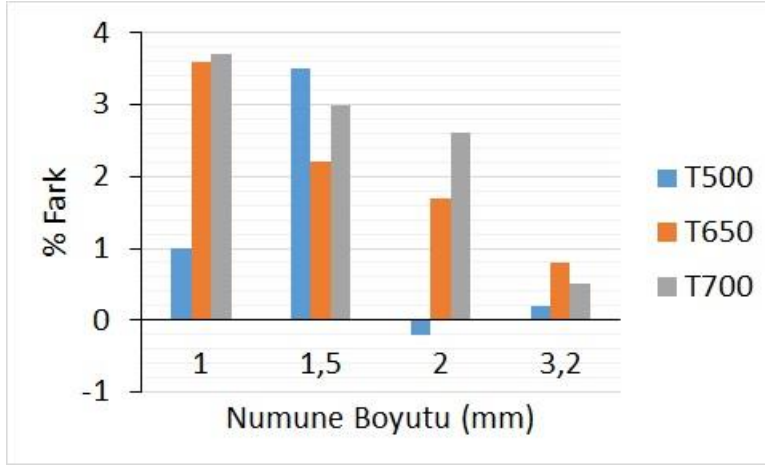
Şekil 4.9 Belirli gerçek gerilme değerlerinde iç taneler (ya da makro boyutta çok-kristal malzeme) için akma gerilmesi ile tane boyutu arasındaki ilişki

Belirlenen Hall-Petch sabitleriyle Denklem 4.15' e göre tüm numune tane boyutu kombinasyonları için akma gerilmeleri hesaplanabilir. Şekil 4.10'da hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma eğrileri karşılaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü üzere, deneysel olarak elde edilen akma eğrileri yeni malzeme modeli ile yakın bir şekilde tahmin edilmiştir.



Şekil 4.10 a) 3.2 mm b) 2 mm c) 1.5 mm and d) 1 mm kare kesit kenarına sahip numunler için deneysel olarak elde edilen ve malzeme modeli 1 ile tahmin edilen akma eğrilerinin karşılaştırması. Numunelerin tavlama sıcaklıkları grafiklerde belirtilmiştir.

Her numune boyutu tavlama sıcaklığı (ya da tane boyutu) kombinasyonu için belirli birim şekil değiştirme değerlerine karşılık gelen deneysel akma gerilmesi ve malzeme modeli ile hesaplanan akma gerilmesi değerleri karşılaştırılmış ve yüzde ortalama fark değerleri Şekil 4.11'de sergilenmiştir. Şekilde görüleceği üzere numune boyutu azaldıkça hata yüzdesi genel olarak artmaktadır. Ayrıca kesit kenarı 1,5 mm olan numunler hariç, 650°C ve 700°C'de tavlanan daha kaba taneli malzemelere göre 500°C'de tavlanan ince taneli malzemeye ait akma gerilmeleri malzeme modeli ile daha yakın bir şekilde tahmin edilmiştir. En küçük boy yani kare kesit kenarı 1 mm olan numunler için 500°C, 650°C ve 700°C'de tavlanan numunlerine ait akma gerilmeleri değerleri malzeme modeli ile sırasıyla ortalama %1, %3,6 ve %3,7 farkla tahmin edilmiştir.



Şekil 4.11 Farklı numune boyutu tavlama sıcaklığı (yani tane boyutu) kombinasyonları için malzeme modeli 1 ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma gerilmeleri arasındaki yüzde fark

4.3. Mikro Şekillendirme Malzeme Modeli 2

4.3.1. Tane boyutunun Akma gerilmesi üzerine etkisinin hesaplanması

Bu proje kapsamında mikro-şekillendirme için geliştirilen 2. malzeme modelinde, tane boyutunun dikkate alınması için ilk defa Kocks tarafından önerilen kompozit malzeme modeli kullanılmıştır, Kocks (1970). Kompozit malzeme modeline göre, çok-kristal bir malzemede tane içlerine göre tane sınırı bölgesi çok daha hızlı pekleşir ve bu nedenle, çok-kristal bir malzeme dayanımı daha yüksek tane sınırı bölgelerinden ve dayanımı daha düşük tane içlerinden oluşur. Dolayısıyla, çok-taneli bir malzemenin akma dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanabilir, Meyers ve Ashworth (1982):

$$\sigma = A_{GI}\sigma_{GI} + A_{GB}\sigma_{GB} \quad (4.16)$$

Denklemden, σ , σ_{GI} ve σ_{GB} sırasıyla çok-kristal malzemenin, tane içlerinin ve tane sınırı ağının akma gerilmesidir. A_{GI} ve A_{GB} çok-kristal bir malzemenin kesidinde tane içi ve tane sınırı bölgelerinin alan oranıdır. Küresel taneler için söz konusu alan oranları hesaplanabilir, Meyers ve Ashworth. Benzer şekilde, hegzagonal kesitli taneler için de söz konusu bu tane içi ve tane sınırı alan oranları aşağıdaki gibi hesaplanabilir, Liu vd. (2012):

$$A_{GI} = \left(1 - \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{t}{d}\right)^2 \quad (4.17)$$

$$A_{GB} = \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{2t}{d} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{d}\right) \quad (4.18)$$

Denklemlerde d tane boyutu, t tane sınırı tabakası kalınlığıdır. Şekil 4.12'de hegzagonal keside sahip bir tane şematik olarak gösterilmiştir. Denklem 4.17 ve 4.18'in 4.16'ya yerleştirilmesiyle, bir malzemenin akma gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir, Liu vd. (2012):

$$\sigma = \sigma_{GI} + \frac{8}{\sqrt{3}}t(\sigma_{GB} - \sigma_{GI})d^{-1} - \frac{16}{3}t^2(\sigma_{GB} - \sigma_{GI})d^{-2} \quad (4.19)$$

Tanelerin farklı kesitleri için, tane içi ve tane sınırı alan oranları dikkate alındığında, t ve d'nin ortalama değerleri olan \bar{t} ve \bar{d} 'nin kullanılması daha doğru sonuç verecektir. Böylece, Denklem 4.19 aşağıdaki şekle dönüşür, Liu vd. (2012):

$$\sigma = \sigma_{GI} + \frac{8}{\sqrt{3}}\bar{t}(\sigma_{GB} - \sigma_{GI})\bar{d}^{-1} - \frac{16}{3}\bar{t}^2(\sigma_{GB} - \sigma_{GI})\bar{d}^{-2} \quad (4.20)$$

\bar{t} ve \bar{d} değerleri yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanır, Liu vd. (2012):

$$\bar{d} = \frac{\pi}{4}d, \quad \bar{t} = 1,57t \quad (4.21)$$

$\bar{t}\bar{d}^{-1}$ yaklaşık olarak $2td^{-1}$ 'e eşittir. Dolayısıyla Denklem 4.20 aşağıdaki denkleme dönüşür, Liu vd. (2012):

$$\sigma = \sigma_{GI} + \frac{16}{\sqrt{3}}t(\sigma_{GB} - \sigma_{GI})d^{-1} - \frac{64}{3}t^2(\sigma_{GB} - \sigma_{GI})d^{-2} \quad (4.22)$$

Tane boyutuna göre tane sınırı tabakası kalınlığının aşağıdaki denkleme göre değiştiği kabul edilmiştir, Meyers ve Ashworth (1982):

$$t = kd^n \quad (0 < n < 1) \quad (4.23)$$

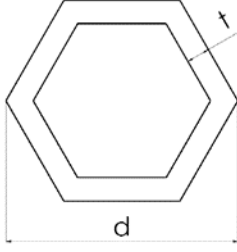
k ve n malzeme sabitleridir. Denklem 4.23'ün denklem 4.22'ye yerleştirilmesi ile, bir malzemenin akma gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir, Liu vd. (2012):

$$\sigma = \sigma_{GI} + \frac{16}{\sqrt{3}}k(\sigma_{GB} - \sigma_{GI})d^{n-1} - \frac{64}{3}k^2(\sigma_{GB} - \sigma_{GI})d^{2n-2} \quad (4.24)$$

Tane boyutu mikrometre mertebelerinde ($d > 1 \mu\text{m}$) olduğunda, k^2d^{2n-2} terimine göre kd^{n-1} terimi çok daha büyük değer alır, dolayısıyla k^2d^{2n-2} terimi ihmal edilebilir. Bu durumda, denklem 4.24 aşağıdaki denkleme dönüşür, Liu vd. (2012):

$$\sigma = \sigma_{GI} + \frac{16}{\sqrt{3}}k(\sigma_{GB} - \sigma_{GI})d^{n-1} \quad (4.25)$$

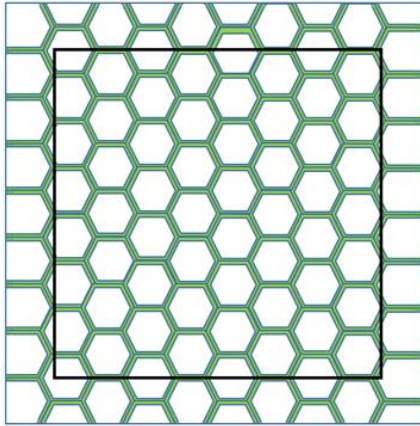
σ_{GI} ve σ_{GB} 'nin bilinmesi durumunda Denklem 4.25 kullanılarak tane boyutuna bağlı olarak malzemenin akma gerilmesi hesaplanabilir. Tane içinin akma gerilmesi, σ_{GI} 'nin, Hall-Petch denklemindeki sürtünme gerilmesi, σ_0 'a eşit olduğu kabul edilmiştir, Meyers ve Ashworth (1982):



Şekil 4.12 Hekzagonal kesitli bir tane için tane içi ve tane sınırı tabakasının şematik bir gösterimi

4.3.2. Numune boyutunun akma gerilmesine etkisinin hesaplanması

Bu proje kapsamında mikro şekillendirme için geliştirilen ikinci malzeme modelinde de numune boyutunun akma gerilmesine etkisinin hesaplanmasında yüzey tabakası modeli kullanılmıştır. Daha önce belirtildiği üzere, yüzey tabakası modeline göre malzeme yüzey taneleri ve iç taneler olmak üzere iki kısımdan oluşur ve malzemenin akma gerilmesi Denklem 4.7 kullanılarak hesaplanabilir. Kare kesitli bir numunede yüzey tabakası ve iç kısım Şekil 4.13' de şematik olarak gösterilmiştir. Yüzey tabakası yaklaşık olarak bir tane kalınlığındadır.



Şekil 4.13 Kare kesitli bir numunede yüzey tabakası ve iç tanelerin şematik olarak gösterimi

İç tanelerin akma gerilmesi, σ_{fi} 'nin hesaplanması için Denklem 4.25 kullanılabilir. Daha önce belirtildiği gibi, tane içinin akma gerilmesi, $\sigma_{G1}(\epsilon)$ 'nin, Hall-Petch denklemindeki (Denklem 4.5) sürtünme gerilmesi, $\sigma_o(\epsilon)$ 'na eşit olduğu kabul edilebilir, Meyers ve Ashworth (1982). Ayrıca, daha önce bahsedildiği gibi, Taylor yönlenme faktörünü içeren daha genel bir Hall-Petch denklemi de önerilmiştir, Denklem 4.6, Armstrong vd. (1962). Denklem 4.6'da sürtünme gerilmesini veren bileşen aşağıda gösterilmiştir.

$$\sigma_o(\epsilon) = m\tau_o(\epsilon) \quad (4.26)$$

Daha önce bahsedildiği gibi, bir üst sınır modeli olan Taylor modeline göre, bir çok-kristal malzemede, tüm tanelerde, makroskobik deformasyona eşit olan, aynı deformasyon meydana gelmekte ve tane sınırları boyunca deformasyonun uyumlu bir şekilde gerçekleşmesi için en az beş bağımsız kayma sisteminin aktif olması gereklidir. α -pirinci gibi YMK metaller için yönlenme faktörü $m=3,06$ olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, deformasyonu (komşu taneler tarafından) tam bir şekilde kısıtlanan, iç tanelerde tane sınırları boyunca deformasyon uyumunun sağlanması için, yönlenme faktörü $m=3,06$ olmalıdır. Dolayısıyla, iç taneler için sürtünme gerilmesi aşağıdaki gibidir:

$$\sigma_{o,IG}(\varepsilon) = 3,06 \tau_o(\varepsilon) = \sigma_o(\varepsilon) \quad (4.27)$$

Yüzey taneri de tane sınırı tabakasından ve tane içlerinden oluşur, sadece yüzey taneleri tamamen tane sınırları, yani diğer taneler tarafından kuşatılmış değildir. Dolayısıyla, yüzey tanelerinin deformasyonu komşu taneler tarafından tamamen kısıtlanmış değildir. Serbest yüzeyleri boyunca deformasyonun (komşu tanelerle) uyumlu olmasına gerek yoktur. Bu nedenle, yüzey taneleri için, tüm tanelerde aynı gerilmenin oluştuğunu kabul eden, bir alt sınır modeli olan Sachs modeli kullanılabilir. Sachs modeline göre YMK metaller için yönlenme faktörü, m 2,23 olarak hesaplanmıştır. $m_{Sachs}/m_{Taylor} = 2,23/3,06 = 0,73$ olduğu için, yüzey taneleri için sürtünme gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\sigma_{o,SG}(\varepsilon) = 2,23 \tau_o(\varepsilon) = 0,73\sigma_o(\varepsilon) \quad (4.28)$$

Sürtünme gerilmesi, $\sigma_o(\varepsilon)$, tane içi akma gerilmesine eşit olduğu için, $\sigma_{GI}(\varepsilon)$ ve mikro şekillendirmedeki iç tanelerin ve makro boyuttaki tane çoktaneli malzemelerin tane içi akma gerilmesi aynı olduğundan, yüzey tanelerinin tane içi akma gerilmesi, $\sigma_{GI,SG}$, çoktaneli malzemelerin (ya da iç tanelerin) tane için akma gerilmesinin, σ_{GI} %73'ne eşittir.

$$\sigma_{GI,SG}(\varepsilon) = 0,73\sigma_{GI}(\varepsilon) \quad (4.29)$$

Denklem 4.25'e benzer bir denklemle yüzey tanelerinin akma gerilmesi, σ_{fs} hesaplanabilir. Bununla birlikte, iç tanelere göre yüzey tanelerinin tane sınırı tabakası alan oranı farklı olduğu için, yüzey taneleri için tane sınırı tabakası alan oranı hesaplanmalıdır. Yüzey tanelerinde, tane sınırları daha azdır. Dolayısıyla, iç tanelere göre, yüzey taneleri tane sınırı tabakası alan oranı, $A_{GB,SG}$ daha azdır. İç tanelere göre yüzey taneleri için tane sınırı tabakası alan oranının %25 daha olduğu kabulü yapılmıştır. Dolayısıyla yüzey taneleri için tane sınırı tabakası alan oranı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$A_{GB,SG} = \frac{3}{4} A_{GB} = 2\sqrt{3} \frac{2t}{d} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{d}\right) \quad (4.30)$$

Buradan, yüzey taneleri akma gerilmesi aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$\sigma_{fs} = (1 - A_{GB,SG})\sigma_{GI,SG} + A_{GB,SG}\sigma_{GB} \quad (4.31)$$

Denklem 4.29 ve 4.30'un Denklem 4.31'e yerleştirilmesiyle, yüzey tanelerinin akma gerilmesi aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$\sigma_{fs} = 0.73\sigma_{GI} + 4\sqrt{3}t(\sigma_{GB} - 0.73\sigma_{GI})d^{-1} - 16t^2(\sigma_{GB} - 0.73\sigma_{GI})d^{-2} \quad (4.32)$$

Tane boyutu mikrometre mertebelerinde ($d > 1 \mu\text{m}$) olduğunda, k^2d^{2n-2} terimine göre kd^{n-1} terimi çok daha büyük değer alır, dolayısıyla k^2d^{2n-2} terimi ihmal edilebilir. Bu durumda, denklem 4.32 aşağıdaki denkleme dönüşür:

$$\sigma_{fs} = 0.73\sigma_{GI} + 4\sqrt{3}t(\sigma_{GB} - 0.73\sigma_{GI})d^{-1} \quad (4.33)$$

Denklem 4.25 ve 4.33'ün denklem 4.7' yerleştirilmesiyle mikro-şekillendirmede malzemenin akma gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\sigma = (1 - 0,27\alpha)\sigma_{GI} + \left[4\sqrt{3}\alpha(\sigma_{GB} - 0.73\sigma_{GI}) + (1 - \alpha)\frac{16}{\sqrt{3}}(\sigma_{GB} - \sigma_{GI})\right]td^{-1} \quad (4.34)$$

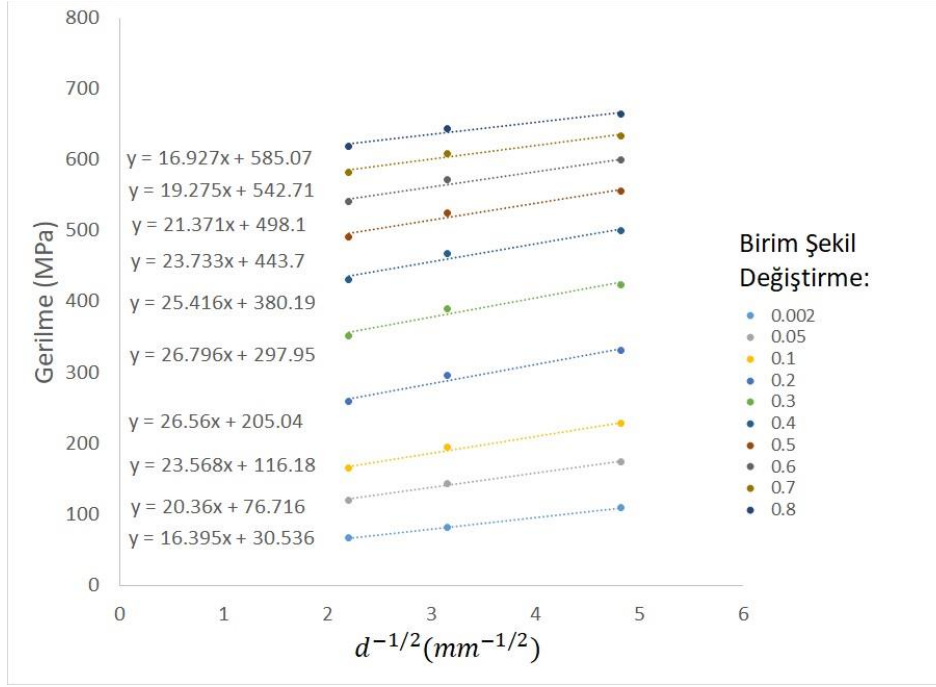
Denklem 4.23'ün Denklem 4.34' yerleştirilmesiyle aşağıdaki denklem elde edilebilir:

$$\sigma = (1 - 0,27\alpha)\sigma_{GI} + \left[4\sqrt{3}\alpha(\sigma_{GB} - 0.73\sigma_{GI}) + (1 - \alpha)\frac{16}{\sqrt{3}}(\sigma_{GB} - \sigma_{GI})\right]kd^{n-1} \quad (4.35)$$

Denklem 4.35 hem numune hem de tane boyutu etkisini dikkate alır.

4.3.3 Malzeme Modelinin Doğrulanması

Denklem 4.35'in kullanılarak numune ve tane boyutuna göre malzemenin akma gerilmesi hesaplanabilir. Ama ilk önce Denklemdaki bilinmeyenlerin ($\sigma_{GI}(\varepsilon)$, $\sigma_{GB}(\varepsilon)$, k , n) belirlenmesi gerekir. Hall-Petch denklemindeki sürtünme gerilmesi, $\sigma_o(\varepsilon)$, tane içi akma gerilmesi, $\sigma_{GI}(\varepsilon)$, olarak alınabilir. Kare kesit kenarı 3,2 mm olan en büyük boy numunler için yüzey tanelerinin oranı minimum olduğu için, en büyük boy numunelere ait akma eğrilerinin, yani gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrilerinin çok-kristal malzemenin akma eğrilerini temsil ettiği kabul edilebilir. Dolayısıyla, sürtünme gerilmesi, $\sigma_o(\varepsilon)$ 'nin belirlenmesi için en büyük boy numunelerin akma eğrileri kullanılabilir. Şekil 14'de %0,2 akma dayanımı ve belirli birim şekil değiştirme değerlerine karşılık gelen akma gerilmesi değerleri bir bölü kare kök tane boyutuna göre çizdirilmiştir. Veri noktalarından geçirilen doğruların y eksenini kestiği değerler belirli birim şekil değiştirme değerleri için sürtünme gerilmesi, $\sigma_o(\varepsilon)$ değerlerini vermektedir. Sürtünme gerilmesi, ya da %0,2 tane içi akma gerilmesi, 30,536 MPa ($\sigma_o(0.002) = 30,536 \text{ MPa}$) olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.14 CuZn30 malzemesi için, belirli gerçek birim şekil değiştirme değerlerinde akma gerilmesinin bir bölü kare kök tane boyutuna göre değişimi

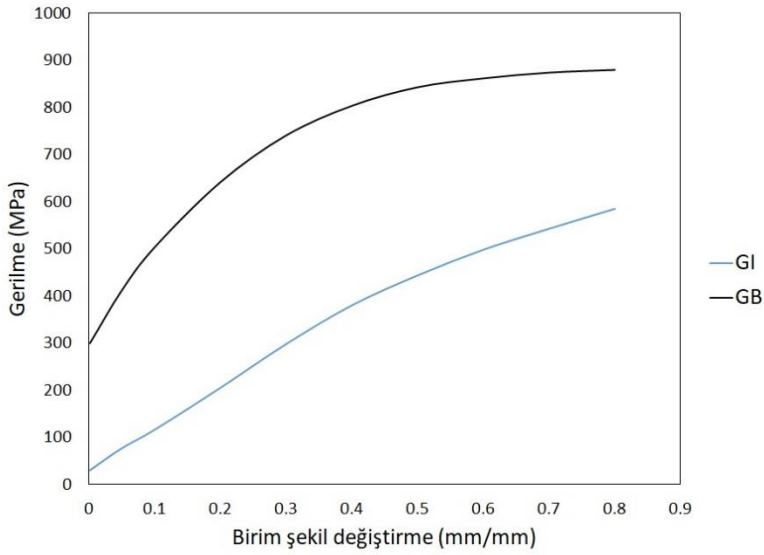
%0,2 tane sınırı tabakası akma gerilmesi değeri 300 MPa olarak seçilmiştir ($\sigma_0(0.002) = 300$ MPa). Bu değer deneysel sonuçlara en uygun sonuçları verdiği için seçilmiştir. Bununla birlikte, %0,2 akma gerilmesi değerinin sonuçlara etkisi azdır. Daha büyük bir akma gerilmesi seçilmesi durumunda daha dar bir tane sınırı tabakası, daha düşük bir akma gerilmesi seçilmesi durumunda ise daha kalın bir tane sınırı tabakası hesaplanır. Her iki durumda da malzemenin Denklem 4.35'e göre hesaplanan akma gerilmesi değeri çok değişmez. Denklem 4.35'deki kalan bilinmeyenler tane sınırı tabaka kalınlığı t 'nin hesaplanmasında kullanılan k ve n değerleridir. k ve n değerleri en büyük boy numunelerin (farklı tane boyutları için) %0,2 akma gerilmesi değerleri kullanılarak hesaplanmış ve tane sınırı tabaka kalınlığı t 'nin tane boyutuna göre değişimi gösteren aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir.

$$t = 0.17d^{0.557} \quad (4.36)$$

Dolayısıyla, bu çalışmada kullanılan CuZn30 malzemesine ait Denklem 4.23'teki k ve n değerleri sırasıyla 0,17 ve 0,557'dir. Belirlenen bu k ve n değerlerinin Denklem 4.35'te yerleştirilmesiyle bu çalışmada kullanılan CuZn30 malzemesi için numune ve tane boyutuna göre akma gerilmesi aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$\sigma = (1 - 0,27\alpha)\sigma_{GI} + \left[4\sqrt{3\alpha}(\sigma_{GB} - 0,73\sigma_{GI}) + (1 - \alpha)\frac{16}{\sqrt{3}}(\sigma_{GB} - \sigma_{GI}) \right] 0.17d^{-0,443} \quad (4.37)$$

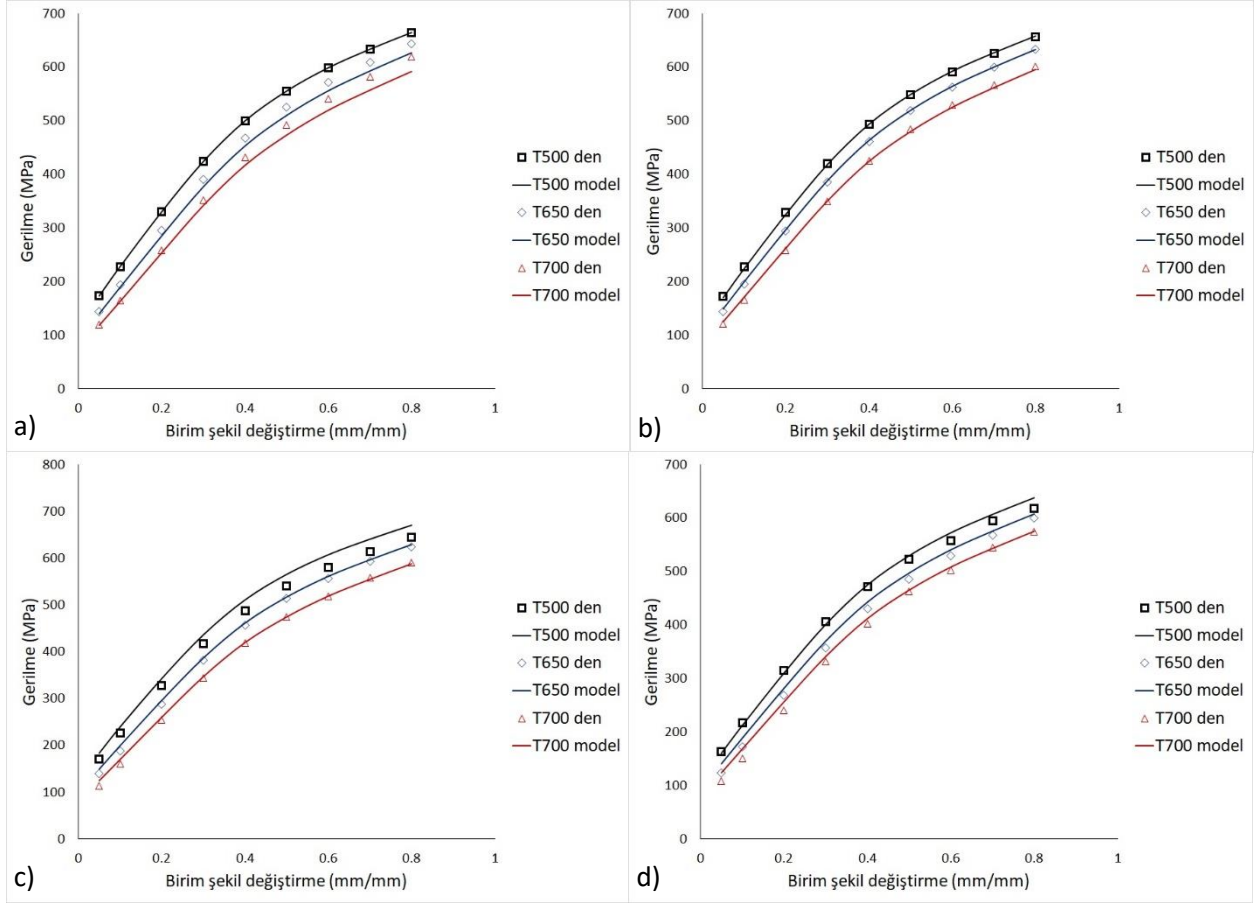
Son olarak, belirli gerçek birim şekil değiştirme değerleri için tane sınırı akma gerilmelerinin, $\sigma_{GB}(\epsilon)$, belirlenmesi gereklidir. Tane sınırı akma gerilmelerin belirlenmesinde en büyük boy numunelerin belirli birim şekil değiştirmelerdeki akma gerilmeleri kullanılmıştır. Tane boyutu ve tane içi akma gerilmeleri bilinmektedir, tane sınırı akma gerilmesi tek bilinmeyendir. Şekil 4.15'te tane içi ve tane sınırı akma gerilmelerinin gerçek birim şekil değiştirmeye göre değişimi gösterilmiştir.



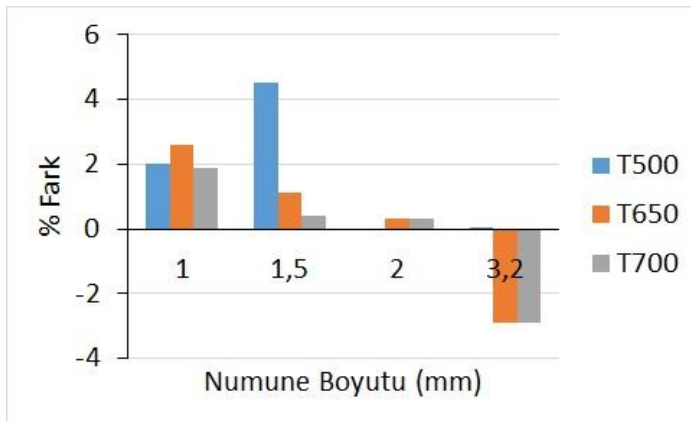
Şekil 4.15 Tane içi ve tane sınırı bölgeleri için gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrileri

Belirli birim şekil değiştirme değerleri için tane içi ve tane sınırı akma gerilmeleri artık bilindiği için, numune ve tane boyutuna göre malzemenin akma gerilmeleri hesaplanabilir. Malzeme modeli ile tahmin edilen ve deneysel olarak elde edilen akma eğrileri Şekil 4.16'da karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüleceği üzere deneysel eğriler geliştirilen ikinci malzeme modeli ile de yakın bir şekilde tahmin edilmiştir.

Her numune boyutu tavlama sıcaklığı (ya da tane boyutu) kombinasyonu için belirli birim şekil değiştirme değerlerine karşılık gelen deneysel akma gerilmesi ve malzeme modeli 2 ile hesaplanan akma gerilmesi değerleri karşılaştırılmış ve yüzde ortalama fark değerleri Şekil 4.17'de sergilenmiştir. Şekilde görüleceği üzere numune boyutu 500°C'de tavlanan ve 3,2 mm ve 2 mm boyutlu numunelerin akma gerilmeleri neredeyse hatasız bir şekilde model tarafından tahmin edilmiştir. En küçük boy, yani kare kesit kenarı 1 mm olan numunler için 500°C, 650°C ve 700°C'de tavlanan numunlerine ait akma gerilmeleri değerleri malzeme modeli 2 ile sırasıyla ortalama %1, %2,6 ve %1,9 farkla tahmin edilmiştir.



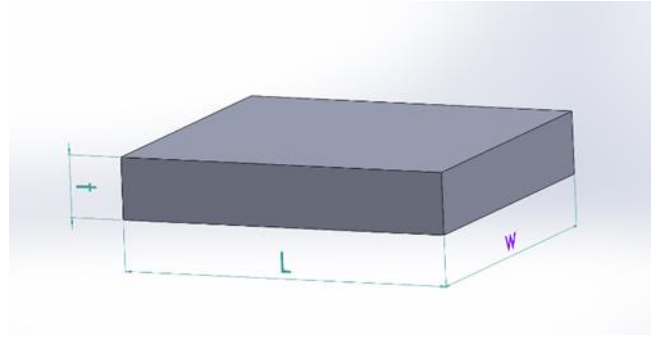
Şekil 4.16 Kesit kenarı a)3.2 mm b) 2 mm c) 1.5 mm and d) 1 mm olan numunler için deneysel ve malzeme modeli 2 ile tahmin edilen akma eğrilerinin karşılaştırılması. Tavlama sıcaklıkları grafiklerin sağında belirtilmiştir.



Şekil 4.17 Farklı numune boyutu tavlama sıcaklığı (yani tane boyutu) kombinasyonları için malzeme modeli 2 ile hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen akma gerilmeleri arasındaki yüzde fark

4.4. Mikro-ekstrüzyon Deneyleri

Yeni oluşturulan malzeme modellerini bir mikro-şekillendirme işleminde doğrulamak için mikroekstrüzyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numune boyutunun ekstrüzyon kuvveti üzerindeki etkisini incelemek için, 2 mm ve 0,9 mm kalınlığında kütükler, yarı kalıp açısı 30° olan kalıplar kullanılarak ekstrüze edilmişlerdir. Düzlem birim şekil değiştirme koşuluna yakın bir deformasyon koşulu elde etmek için, dikdörtgen kesitli kütükler (numuneler) kullanılmıştır. Şekil 4.18'de mikro-ekstrüzyon deneylerinde kullanılan kütük şematik olarak gösterilmiş ve kütük boyutları Tablo 4.1'de özetlenmiştir. Kütükler soğuk haddelenmiş CuZn30 malzemesinden talaşlı imalat ile hazırlanmış ve 500°C'de bir saat tavlamaştır. 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütükler için ortalama tane boyutları sırasıyla 45 μm and 51,6 μm 'dir.

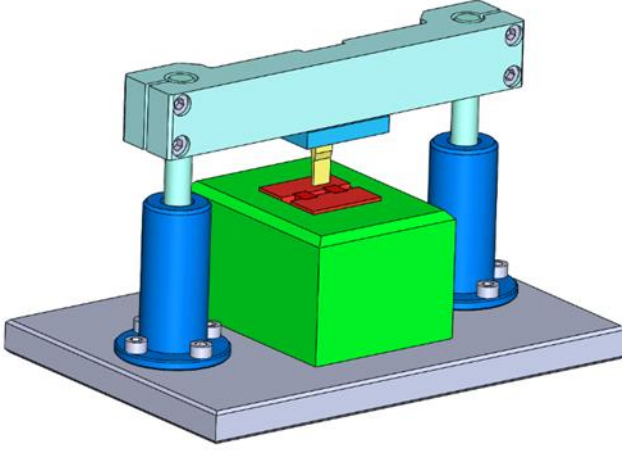


Şekil 4.18 Mikro-ekstrüzyon deneylerinde kullanılan kütüklerin şematik gösterimi

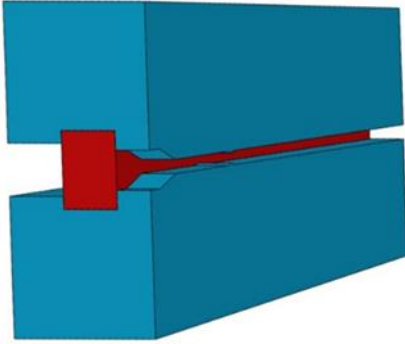
Tablo 4.1 Mikro-ekstrüzyon deneylerinde kullanılan kütüklerin boyutları

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

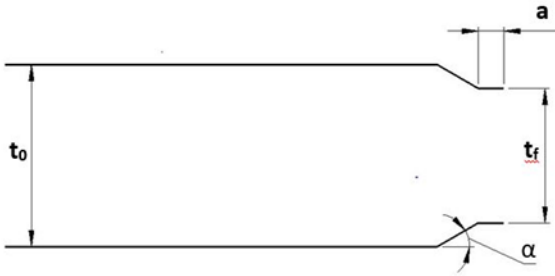
Mikro-ekstrüzyon deneylerini gerçekleştirmek ve kuvvet-deplasman davranışının elde edilmesi için Şekil 4.19'da şematik olarak gösterilen ileri mikro-ekstrüzyon aparat seti tasarlanmış ve imal edilmiştir. Kalıp tel erozyon yöntemiyle imal edilmiştir. Mikro-ekstrüzyon kalıbının geometrisi şematik olarak Şekil 4.20 ve 4.21'de gösterilmiştir. Mikro-ekstrüzyon kalıp boyutları Tablo 4.2'de özetlenmiştir. Her iki ekstrüzyon boyutu için ekstrüzyon oranı 1.33'tür.



Şekil 4.19 Deneysel mikro-ekstrüzyon aparat setinin montaj resmi



Şekil 4.20 Mikro-ekstrüzyon kalıp geometrisinin yarı görünüşü

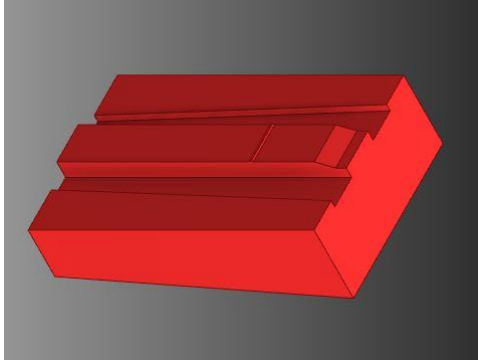


Şekil 4.21 Mikro-ekstrüzyon deneylerinde kullanılan kalıbın şematik resmi

Tablo 4.2 Mikro-ekstrüzyon kalıp boyutları

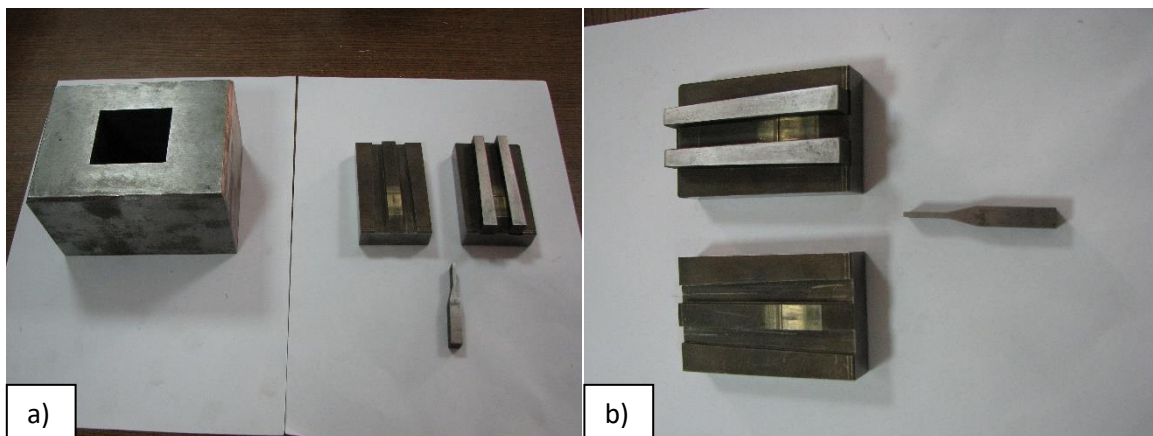
t_0 (mm)	t_f (mm)	α	a (mm)
2.1	1.58	30°	0.4
1	0.75	30°	0.2

Kalıp imalat kolaylığı ve numunenin ekstrüzyon sonrası çıkarılabilir olması için iki parça olarak tasarlanmış. Şekil 4.22'de kalıbı oluşturan parçalardan biri şematik olarak gösterilmiştir.



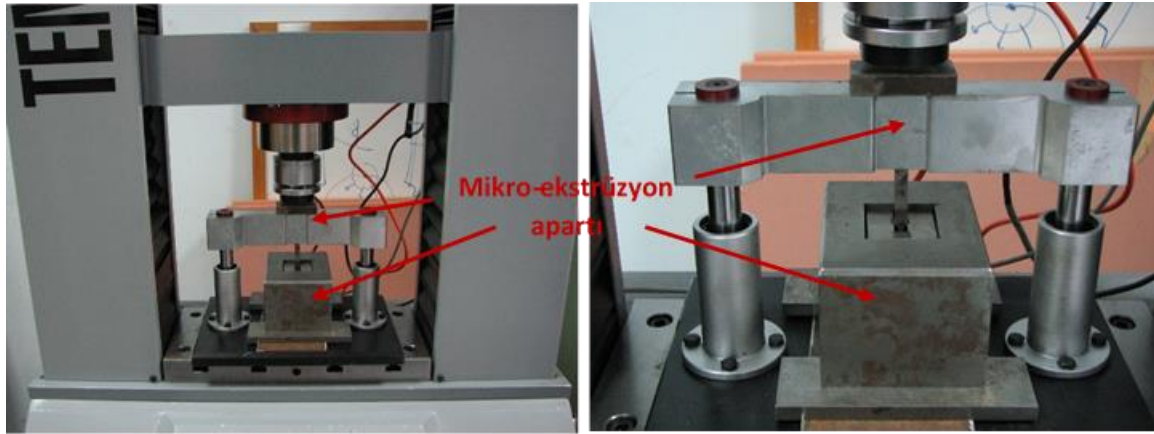
Şekil 4.22 Kalıbı oluşturan parçalardan birinin resmi.

Kalıplar ekstrüzyon öncesinde eğik yüzeyli (konik) kalıp yuvasının içine yerleştirilmektedir. Ekstrüzyon sırasında kalıbın kalıp yuvasına sıkı bir şekilde yerleşmesi için, kalıpların dış kısmı ve kalıp yuvası eğik (konik) olarak tasarlanıp imal edilmiştir. Ayrıca, kalıpların kalıp yuvasına yerleştirilmesi sırasında, kalıp ve kovan kısmının yan kısımlarında bulunan kanallara, sıkı geçme eğik (konik) kamalar çakılmaktadır. Böylece, ekstrüzyon sırasında malzemenin basıncın etkisi ile kovan ve kalıp bölümlerinin yan kısımlarına sızıp çapak oluşturması engellenmiştir. Kalıp tel erozyon yöntemiyle imal edilmiştir. Şekil 4.23a'da kalıp yuvası ve zımba ile birlikte kalıp parçalarını gösteren bir fotoğraf görülmektedir. Şekil 4.23b'de ise zımba ile birlikte kalıp parçaları gösterilmiştir. Şekilde üstteki kalıp parçasına, kalıp ve kovan bölümlerinin iki yanında bulunan kamalar yerleştirilmiştir. Altaki parçada ise kalıp ve kovan kısmının yanında bulunan kamaların yerleştirildiği iki kanal görülmektedir.

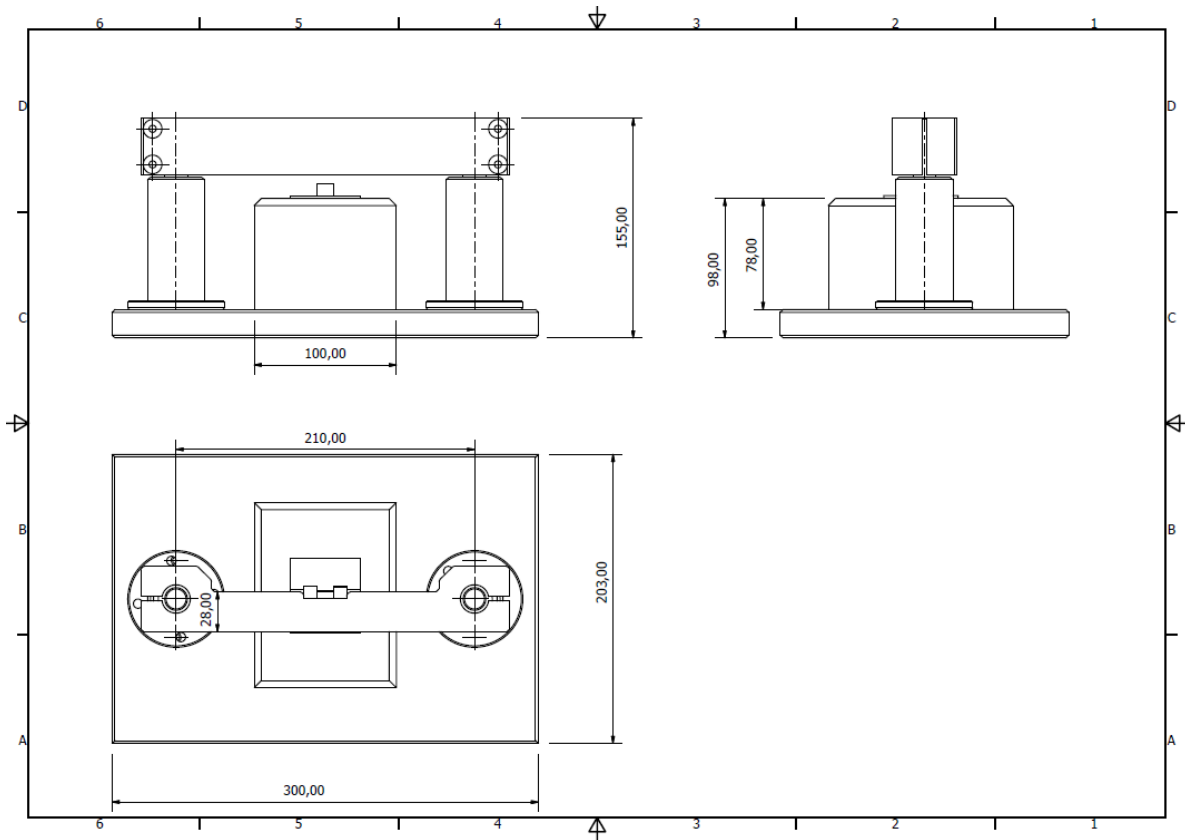


Şekil 4.23 a) Kalıp yuvası ve zımba ile birlikte kalıp parçalarını b) Zımba ile birlikte kalıp parçalarını gösteren fotoğraflar

Şekil 4.24 bir miko-ekstrüzyon deneyi sırasında çekilen kalıp aparatının iki fotoğrafı gösterilmiştir. Şekil 4.25'te ise ileri yönde mikro-ekstrüzyon aparat setinin montaj teknik resmi gösterilmektedir.



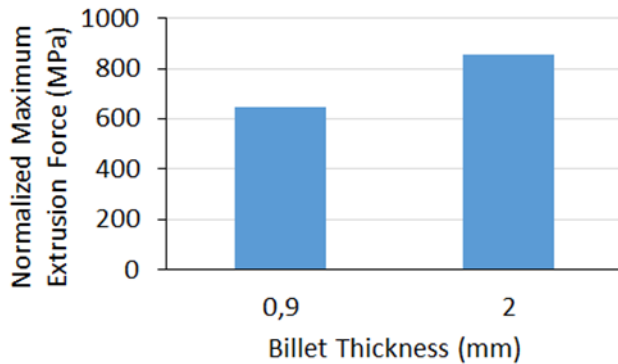
Şekil 4.24 bir miko-ekstrüzyon deneyi sırasında çekilen kalıp aparatına ait iki fotoğraf



4.25 İleri yönde mikro-ekstrüzyon aparat setinin montaj teknik resmi

Mikro-ekstrüzyon deneyleri mikro-basma deneylerinin gerçekleştirildiği Shimadzu çekme makinasında gerçekleştirilmiştir. Mikro-ekstrüzyon deneyleri kuru sürtünme koşullarında gerçekleştirilmiştir. 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütüklerin ekstrüzyonlarındaki koç hızı sırasıyla 5 mm/dak ve 2,25 mm/dak'dır.

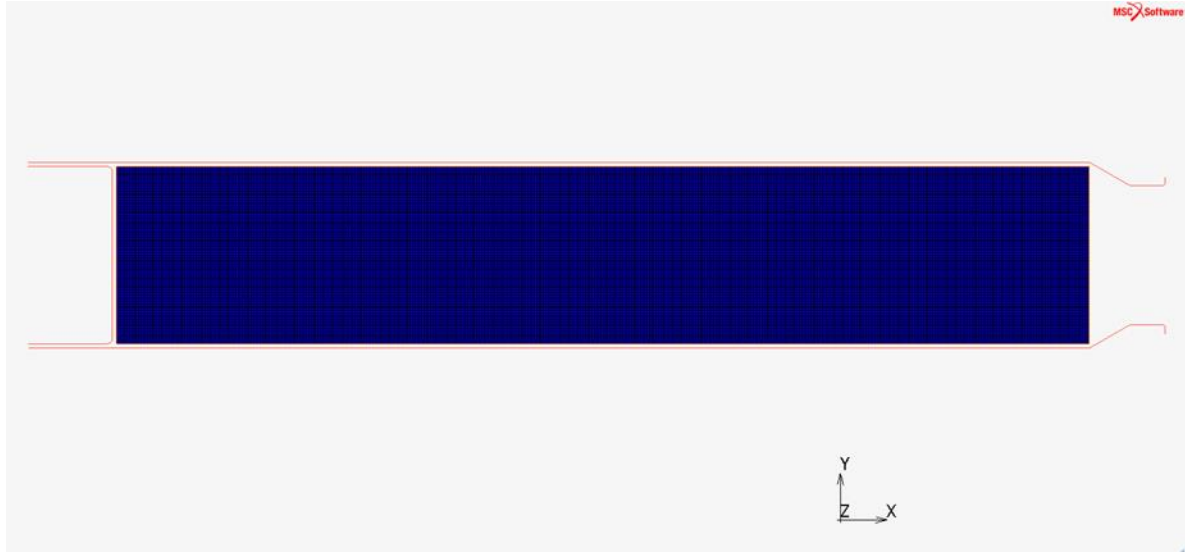
Mikro-ekstrüzyon deneylerinden sonra kuvvet-deplasman eğrileri çizdirilmiş ve her bir deney için en büyük ekstrüzyon kuvveti belirlenmiştir. Daha sonra her iki ekstrüzyon boyutu için ortalama en büyük ekstrüzyon kuvveti hesaplanmıştır. 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütüklerin ortalama en büyük ekstrüzyon kuvveti sırasıyla 18090 N ve 3310 N'dur. Ortalama en büyük ekstrüzyon kuvvetinin hesaplanmasında 6 deneyin ortalaması alınmıştır. Her iki ekstrüzyon boyutu için en büyük ekstrüzyon kuvvetinin karşılaştırılabilmesi için, ortalama en büyük ekstrüzyon kuvvetleri kovan kalınlığına ve genişliğine bölünmüş ve en büyük ekstrüzyon kuvvetleri normalize edilmiştir. Her iki ekstrüzyon boyutu için normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetleri Şekil 4.26'da karşılaştırılmıştır. 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütüklerin normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetleri sırasıyla 852,9 MPa ve 649 MPa'dır. Beklendiği gibi, daha küçük boyutlu ekstrüzyon için normalize en büyük ekstrüzyon kuvveti daha düşüktür. Bu sonuç mikro-basma deney sonuçları ile uyumludur. Mikro-basma deneylerinde daha küçük boyutlu numunlerin akma gerilmeleri daha düşüktü. Bunun dışında, mikro-ekstrüzyon deneylerinin başında, kovana yerleştirilen kütük, kovan hacmini tam olarak doldurmamaktadır. Yani, kütükler kovana göre biraz daha küçüktür. Her iki ekstrüzyon boyutu için de kovan ile kütük arasındaki açıklık yaklaşık 0,05 mm'dir. Daha büyük boyutlu kütükle kıyaslandığında, daha küçük boyutlu kütük kovan hacminde oransal olarak daha az yer kaplamaktadır. Daha küçük boyutlu numunelerin normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetinin daha küçük olmasının diğer bir nedeni de budur.



Şekil 4.26 Her iki kütük (numune) boyutu için normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetinin karşılaştırılması

4.5. Mikro-ekstrüzyon benzeşimleri

Yeni geliştirilen malzeme modellerinin doğrulanması için, MSC Mark programının kullanılmasıyla mikro-ekstrüzyon deneylerinin bilgisayar ortamında sonlu elemanlar metodu analizleri ile benzeşimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.27’de sonlu elemanlar analiz modeli verilmiştir. Düzlem şekil değiştirme dört noktalı kuadrilateral element kullanılarak, düzlem birim şekil değiştirme koşullarında 2 boyutlu, 2D analiz yapılmıştır. Modelde, kütük kalınlığı boyunca 80 eleman vardır ve 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütüklerin modellenmesinde sırasıyla 35200 ve 38400 eleman kullanılmıştır.



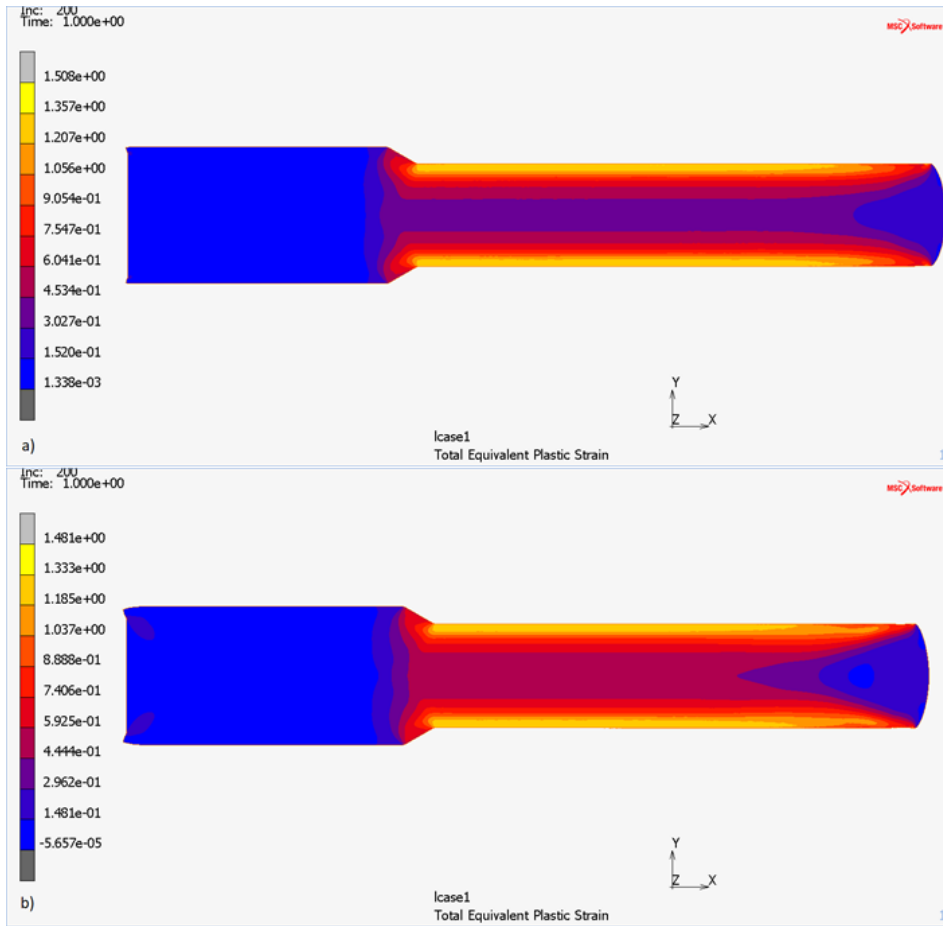
Şekil 4.27 2 mm kalınlığındaki kütüklerin sonlu elemanlar analizinde kullanılan model

Şekil 4.27’de görüldüğü gibi, benzeşimde hareketli koç, kütük, kovan ve kalıp olmak üzere dört kısım vardır. Kütük dışındaki diğerleri rijit geometriler olarak modellenmiştir. Kütük ile rijit geometriler arasında, yani kütük ile koç, kovan ve kalıp arasında sürtünme katsayısı 0,12’dir ve kulomb sürtünmesi tanımlanmıştır.

Mikro-ekstrüzyon deneylerinde, mikro-basma deneylerinde kullanılan kütük ve numunelerin boyut ve geometrileri oldukça farklıdır. Dolayısıyla, kütükler ve basma numuneleri için yüzey tabakası oranı farklıdır. Bu nedenle, geliştirilen yeni malzeme modelleri ile hesaplanan basma numunelerine ait akma eğrileri mikro-ekstrüzyon benzeşimlerinde kullanılamaz. Her iki kütük boyutu için yüzey tabakası oranı denklem 4.8 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu yüzey tabakası oranları ile, geliştirilen her iki malzeme modeline göre, her iki boyuttaki kütük için akma gerilmeleri hesaplanmıştır.

4.5.1 Malzeme Modeli 1 kullanılarak gerçekleştirilen benzeşim sonuçları

Mikroşekillendirme için geliştirilen birinci malzeme modeline göre her iki boy kütüğe ait akma eğrisi hesaplanmış ve hesaplanan bu akma eğrilerinin kullanılmasıyla sonlu elemanlar benzeşimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.28'de benzeşimlerle elde edilen 2 mm ve 0,9 mm kalıyndaki kütüklerin ekstrüzyon sonrası deformasyon (birim şekil değıştirme) dağılımları gösterilmiştir. Beklendiği gibi, aşırı kayma deformasyonu meydana gelen dış kısımlarda, toplam eşdeğer plastik birim şekil değıştirme en büyük değeri almıştır.

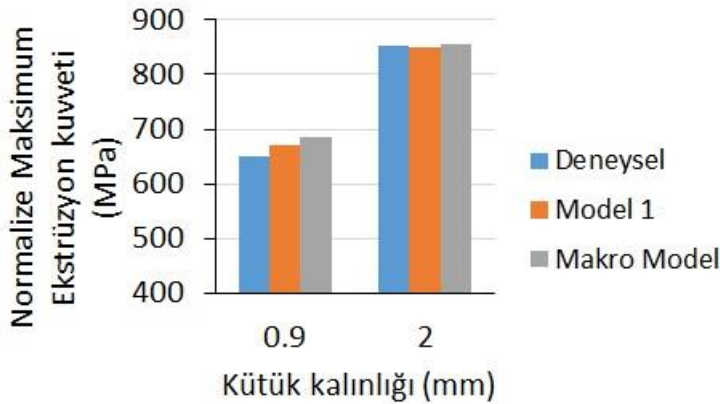


Şekil 4.28 a) 2 mm and b) 0.9 mm kütüklerde ekstrüzyon sonrası toplam eşdeğer plastik birim şekil değıştirme dağılımı

Bunun dışında, benzeşimler sonrasında, kuvvet-deplasman eğrileri çizdirilmiş ve her iki ekstrüzyon boyutu için en büyük ekstrüzyon kuvveti belirlenmiştir. En büyük ekstrüzyon kuvvetinin kovan kalınlığı ve genişliğine bölünmesiyle, her iki ekstrüzyon boyutu için normalize en büyük ekstrüzyon kuvveti elde edilmiştir. İlave olarak, benzeşimler geleneksel makro-boyutta malzeme modelinin

kullanılmasıyla da gerçekleştirilmiştir. En büyük boy basma numunelere ait akma eğrisi makro-boyutta malzeme davranışına en yakın davranışı sergilediği için, 500°C 'de tavllanmış en büyük boy numunelere ait akma eğrisinin kullanılmasıyla sonlu elemanar benzeşimleri gerçekleştirilmiş ve her iki boyut için benzer şekilde normalize en büyük ekstrüzyon kuvveti elde edilmiştir.

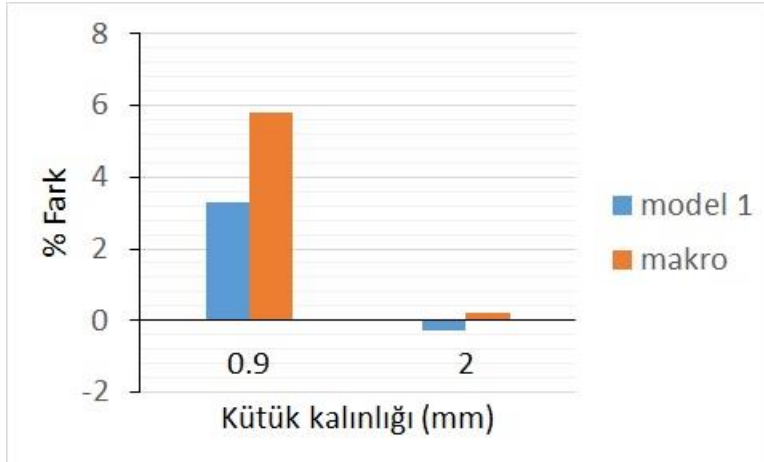
Şekil 4.29' da deneysel olarak elde edilen ve geleneksel makro-boyutta malzeme modeli ve geliştirilen birinci mikro-şekillendirme malzeme modeli ile tahmin edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetleri karşılaştırılmıştır. 2 mm kalınlığındaki, büyük boy kütüklerin ekstrüzyonunda, deneysel olarak elde edilen en büyük ekstrüzyon kuvveti, hem geleneksel makro-boyutta malzeme modelinin hem de mikro-şekillendirme için geliştirilen birinci malzeme modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle yakın bir şekilde tahmin edilmiştir. 0,9 mm kalınlığındaki, küçük boyutlu kütüklerin mikro-ekstrüzyonunda ise, deneysel olarak elde edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvveti, geleneksel malzeme modelinin kullanıldığı benzeşimlere göre, mikro-şekillendirme için geliştirilen 1. Malzeme modelinin kullanıldığında daha yakın bir şekilde tahmin edilmiştir.



Şekil 4.29 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütükler için deneysel olarak elde edilen ve makro-boyutta geleneksel malzeme modeli ve mikro şekillendirme için geliştirilen birinci malzeme modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle tahmin edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.30' da 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütükler için deneysel olarak elde edilen ve makro-boyutta geleneksel malzeme modeli ve mikro şekillendirme için geliştirilen birinci malzeme modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle tahmin edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetlerinin yüzde farkı gösterilmiştir. Büyük boyutlu kütüklerin maksimum ekstrüzyon kuvveti makro malzeme modeli ve malzeme modeli 1 ile sırasıyla %0,2 ve -%0,2 farkla, yani oldukça yakın bir şekilde tahmin edilmiştir. Küçük boyutlu kütüklerin maksimum ekstrüzyon kuvveti

ise, makro malzeme modeli ile %5,8 farkla tahmin edilirken, malzeme modeli 1 ile %3,3 farkla tahmin edilmiştir. Küçük boyutlu kütüklerin en büyük ekstrüzyon kuvvetinin daha yakın bir şekilde tahmin edilmesi, geliştirilen bu yeni mikro-şekillendirme malzeme modelinin mikroekstrüzyon gibi mikro-şekillendirme proses benzeşimlerinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini doğrulamıştır.

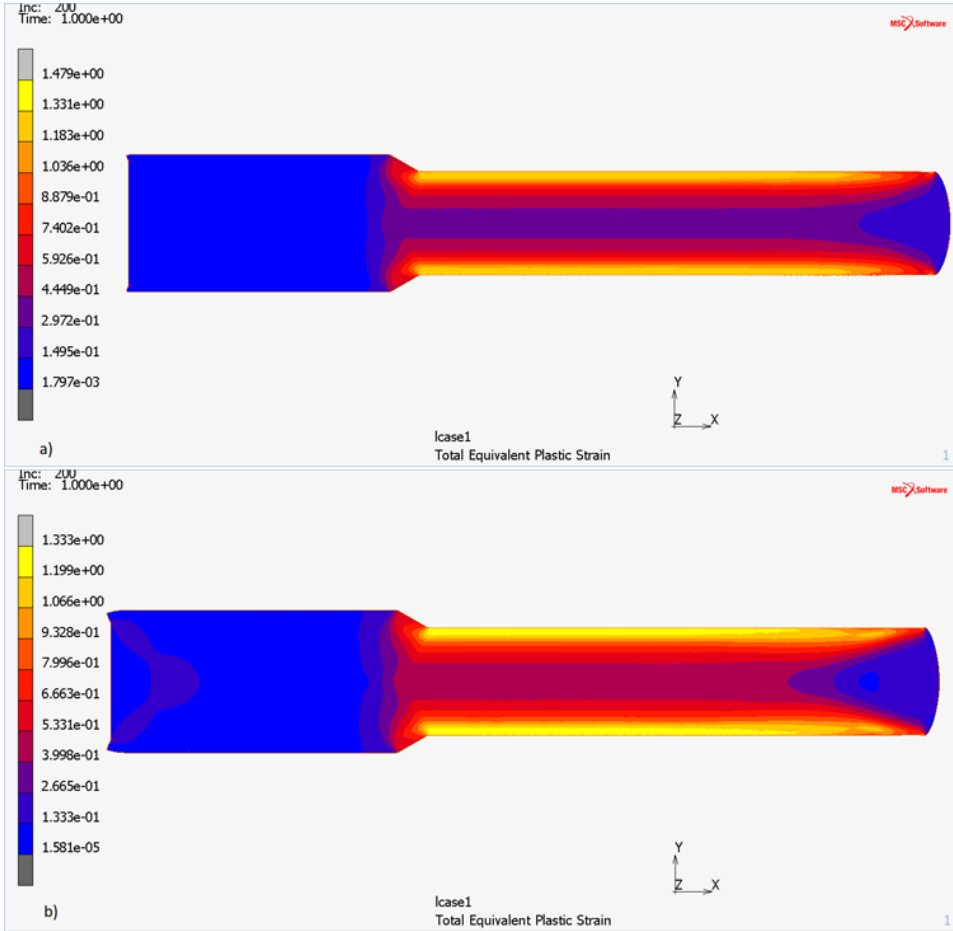


Şekil 4.30 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütükler için deneysel olarak elde edilen ve makro-boyutta geleneksel malzeme modeli ve mikro şekillendirme için geliştirilen birinci malzeme modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle tahmin edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetlerinin yüzde farkı

4.5.2 Malzeme Modeli 2 kullanılarak gerçekleştirilen benzeşim sonuçları

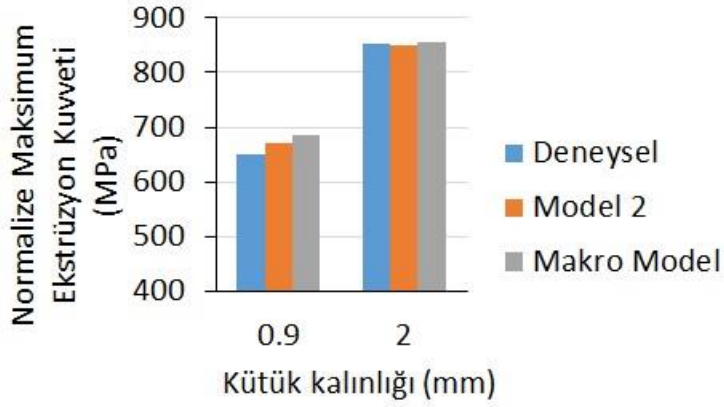
Birinci malzeme modeli için yapıldığı gibi mikroşekillendirme için geliştirilen ikinci malzeme modeline göre her iki boy kütüğe ait akma eğrisi hesaplanmış ve hesaplanan bu akma eğrilerinin kullanılmasıyla sonlu elemanlar benzeşimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.31’de benzeşimlerle elde edilen 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütüklerin ekstrüzyon sonrası deformasyon (birim şekil değiştirme) dağılımları gösterilmiştir. Beklendiği gibi, aşırı kayma deformasyonu meydana gelen dış kısımlarda, toplam eşdeğer plastik birim şekil değiştirme en büyük değerlerini almıştır.

Benzer şekilde, benzeşimler sonrasında, kuvvet-deplasman eğrileri çizdirilmiş ve her iki ekstrüzyon boyutu için en büyük ekstrüzyon kuvveti belirlenmiştir. En büyük ekstrüzyon kuvvetinin kovan kalınlığı ve genişliğine bölünmesiyle, her iki ekstrüzyon boyutu için normalize en büyük ekstrüzyon kuvveti elde edilmiştir.

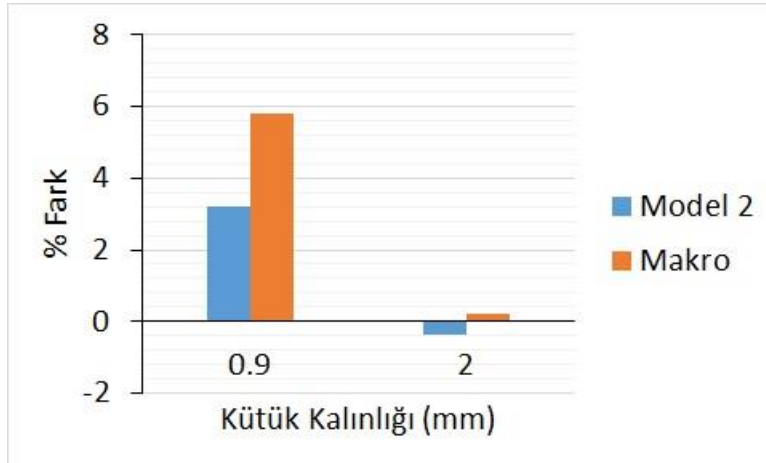


Şekil 4.31 a) 2 mm and b) 0.9 mm kütüklerde ekstrüzyon sonrası toplam eşdeğer plastic birim şekil değiştirme dağılımı

Şekil 4.32' de deneysel olarak elde edilen ve geleneksel makro-boyutta malzeme modeli ve geliştirilen ikinci mikro-şekillendirme malzeme modeli ile tahmin edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetleri karşılaştırılmıştır. 2 mm kalınlığındaki, büyük boy kütüklerin ekstrüzyonunda, deneysel olarak elde edilen en büyük ekstrüzyon kuvveti, hem geleneksel makro-boyutta malzeme modelinin hem de mikro-şekillendirme için geliştirilen ikinci malzeme modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle yakın bir şekilde tahmin edilmiştir. 0,9 mm kalınlığındaki, küçük boyutlu kütüklerin mikro-ekstrüzyonunda ise, deneysel olarak elde edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvveti, geleneksel malzeme modelinin kullanıldığı benzeşimlere göre, mikro-şekillendirme için geliştirilen ikinci malzeme modelinin kullanılması durumunda daha yakın bir şekilde tahmin edilmiştir. Küçük boyutlu kütüklerin en büyük ekstrüzyon kuvvetinin yakın bir şekilde tahmin edilmesi, geliştirilen bu diğer mikro-şekillendirme malzeme modelinin de mikroekstrüzyon gibi mikro-şekillendirme proses benzeşimlerinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini doğrulamıştır.



Şekil 4.32 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütükler için deneysel olarak elde edilen ve makro-boyutta geleneksel malzeme modeli ve mikro şekillendirme için geliştirilen ikinci malzeme modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle tahmin edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.33 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütükler için deneysel olarak elde edilen ve makro-boyutta geleneksel malzeme modeli ve mikro şekillendirme için geliştirilen ikinci malzeme modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle tahmin edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetlerinin yüzde farkı

Şekil 4.33' de 2 mm ve 0,9 mm kalınlığındaki kütükler için deneysel olarak elde edilen ve makro-boyutta geleneksel malzeme modeli ve mikro şekillendirme için geliştirilen ikinci malzeme modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle tahmin edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetlerinin yüzde farkı gösterilmiştir. Büyük boyutlu kütüklerin maksimum ekstrüzyon kuvveti makro malzeme modeli ve malzeme modeli 2 ile sırasıyla %0,2 ve -%0,4 farkla, yani

oldukça yakın bir şekilde tahmin edilmiştir. Küçük boyutlu kütüklerin maksimum ekstrüzyon kuvveti ise, makro malzeme modeli ile %5,8 farkla tahmin edilirken, malzeme modeli 2 ile %3,2 farkla tahmin edilmiştir. Küçük boyutlu kütüklerin en büyük ekstrüzyon kuvvetinin daha yakın bir şekilde tahmin edilmesi, geliştirilen bu yeni mikro-şekillendirme malzeme modelinin mikroekstrüzyon gibi mikro-şekillendirme proses benzeşimlerinde başarılı bir şekilde kullanılabilceğini doğrulamıştır.

5. TARTIŞMA

Bu proje kapsamında farklı numune ve tane boyutuna sahip numunelerle mikro-basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu numunelere ait akma eğrileri elde edilmiştir. Akma eğrileri karşılaştırıldığında literatürle uyumlu şekilde aynı tavlama sıcaklığında tavllanmış, birbirine yakın tane boyutuna sahip numuneler için numune boyutu küçüldükçe akma gerilmesinin düştüğü görülmüştür (Miyazaki vd., 1978; Miyazaki vd., 1979; Kals ve Eckstein, 2000; Raulea vd., 2001; Engel ve Eckstein, 2002; Gau vd., 2007; Chan vd., 2012). Söz konusu bu boyut etkisinin açıklanması için literatürde yüzey tabakası modeli öne sürülmüştür, Engel ve Eckstein (2002).

Bu proje kapsamında, mikro-şekillendirme benzeşimlerinde kullanılacak iki farklı malzeme modeli geliştirilmiştir. Mikro-şekillendirme için geliştirilen her iki malzeme modeli de akma gerilmesi üzerine hem numune ve hem de tane boyutunun etkisini dikkate almaktadır. Oluşturulan her iki malzeme modelinin kullanılmasıyla farklı numune ve tane boyutuna sahip numunelere ait deneysel olarak elde edilen akma eğrileri yakın bir şekilde tahmin edilmiştir.

Mikroşekillendirme için geliştirilen birinci malzeme modelinde akma gerilmesi üzerine numune boyutu ve tane boyutu etkisinin dikkate alınması için sırasıyla yüzey tabakası modeli ve Hall-Petch denklemi birlikte kullanılmıştır. En büyük boy numunelere ait akma eğrileri kullanılarak, tane boyutuna göre iç tanelerin akma eğrileri hesaplanmış, iç tanelerin akma eğrileri kullanılarak da belirli birim şekil değiştirme değerleri için Hall-Petch sabitleri hesaplanmıştır. Daha sonra mikroşekillendirme için geliştirilen bu birinci malzeme modelinin kullanılmasıyla farklı numune ve tane boyutuna sahip numunler için deneysel olarak edilen akma eğrileri tahmin edilmiştir. Deneysel akma eğrilerinin yakın bir şekilde tahmin edilmesiyle, mikro şekillendirme için oluşturulan bu birinci malzeme modelinin geçerliliği doğrulanmıştır.

Literatürde karşılaşılan, mikro ölçekte malzeme deformasyonunun modellenmesinde yüzey tabakası ve Hall-Petch denkleminin birlikte kullanıldığı malzeme modellerinde, yüzey tanelerinde bulunan tane sınırları ihmal edilmiş ve yüzey tanelerinin deformasyon davranışının, izole edilmiş tek kristalleri gibi olduğu kabul edilmiştir (Yu vd. 2006; Lai vd. 2008; Peng vd. 2009). Benzer şekilde, literatürde malzemelerin mikro ölçekte deforasyonunun modellenmesinde yüzey tabakası

modelinin ve kompozit modelin birlikte kullanıldığı bir çalışmada, yüzey tabakasında bulunan tane sınırları ihmal edilmiş ve yüzey tanelerinin, tane içi gibi deforme olduğu kabulü yapılmıştır, Liu vd. 2012.

Bu proje kapsamında, mikro-şekillendirme proses benzeşimlerinde kullanılabilecek ikinci bir malzeme modeli daha geliştirilmiştir. Bu modelde numune ve tane boyutunun akma gerilmesi üzerine etkisinin sergilenmesi için sırasıyla yüzey modeli ve kompozit malzeme modeli birlikte kullanılmıştır. Modelde, malzemelerin mikro-ölçekte deformasyon davranışının modellenmesinde, yüzey ve iç taneler için, tane sınırı ve tane içi akma gerilmeleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Böylece, yüzey taneleri için de tane sınırlarının akma gerilmesine olan etkisi dikkate alınmıştır. Oluşturulan malzeme modeli ile farklı numune ve tane boyutları için deneysel olarak elde edilen akma eğrileri yakın bir şekilde tahmin edilmiştir. Böylece, mikro-şekillendirme için oluşturulan ikinci malzeme modelinin de geçerliliği doğrulanmıştır.

Bu proje kapsamında, yeni oluşturulan malzeme modellerinin bir mikro-şekillendirme işleminde doğrulanmasına yönelik olarak mikroekstrüzyon deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Numune boyutunun ekstrüzyon kuvveti üzerindeki etkisini incelemek için, 2 mm ve 0,9 mm kalınlığında kütükler ekstrüze edilmişlerdir. Mikro-ekstrüzyonda numune boyutunun küçülmesiyle normalize edilmiş maksimum ekstrüzyon kuvvetinin düştüğü gözlemlenmiştir. Literatürde farklı numune boyutları ile gerçekleştirilen mikro-ekstrüzyon deneylerine ait normalize maksimum ekstrüzyon kuvvetinin sergilendiği ve karşılaştırıldığı bir çalışma ile karşılaşmamıştır.

Mikro-şekillendirme için geliştirilen her iki malzeme modelinin mikro-ekstrüzyon gibi bir mikro-şekillendirme proses benzeşimlerinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermek için, mikro-ekstrüzyon deneyleri ve benzeşimleri de gerçekleştirilmiştir. 2 mm ve 0,9 mm kalınlığına sahip dikdörtgen kesitli kütüklerle gerçekleştirilen ekstrüzyon deneylerinde, mikro-basma deneylerinde olduğu gibi küçük boyutlu kütüklerin mikro-ekstrüzyonu için gerekli normalize en büyük ekstrüzyon kuvvetinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Daha sonra, mikro-şekillendirme için geliştirilen her iki malzeme modelinin kullanılmasıyla sonlu elemanlar benzeşimleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, söz konusu benzeşimler geleneksel makro-boyutta malzeme modelinin kullanılmasıyla da gerçekleştirilmiştir. Büyük boy, 2 mm kalınlığındaki kütüğün ekstrüzyonunda deneysel olarak elde edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvveti, hem geleneksel makro-boyutta malzeme modelinin, hem de mikro-şekillendirme için geliştirilen her iki malzeme modelin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle çok yakın bir şekilde tahmin edilirken; küçük boy, 0,9 mm kalınlığındaki kütüğün mikro-ekstrüzyonunda, deneysel olarak elde edilen normalize en büyük ekstrüzyon kuvveti, geleneksel makro-boyutta malzeme modelinin

kullanıldığı benzeşimlere göre mikro-şekillendirme için geliştirilen her iki malzeme modelin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzeşimlerle daha yakın bir şekilde tahmin edilmiştir. Küçük boy numunelere ait normalize maksimum ekstrüzyon kuvveti makro malzeme modeli kullanılmasıyla %5.8 hata ile tahmin edilirken, mikro-şekillendirme için geliştirilen malzeme modeli 1 ve malzeme modeli 2 ile sırasıyla %3,3 ve %3,2 hata ile tahmin edilmiştir. Literatürde farklı numune boyutları ile gerçekleştirilen mikro-ekstrüzyon deneylerine ait sonlu elemanlar benzeşimlerinin gerçekleştirildiği bir çalışma ile karşılaşılmamıştır.

6. SONUÇLAR

1. Farklı numune ve tane boyutuna sahip numunelerle mikro basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve aynı tavlama sıcaklığında tavllanmış, birbirine yakın tane boyutuna sahip numuneler için numune boyutu küçüldükçe akma gerilmesinin düştüğü görülmüştür.
2. Mikro-şekillendirme benzeşimlerinde kullanılacak iki farklı malzeme modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan her iki malzeme modelinin kullanılmasıyla farklı numune ve tane boyutuna sahip numunelere ait akma eğrileri yakın bir şekilde tahmin edilmiştir.
3. En küçük boy, yani kare kesit kenarı 1 mm olan mikro basma numunleri için 500°C, 650°C ve 700°C'de tavlanan numunlerine ait akma gerilmeleri değerleri sırasıyla malzeme modeli 1 ile %1, %3,6 ve %3,7 ve malzeme modeli 2 ile ise %1, %2,6 ve %1,9 farkla tahmin edilmiştir. Dolayısıyla, malzeme modeli 1'e göre, malzeme modeli 2 ile en küçük boyutlu numunelerin akma eğrileri az da olsa daha yakın bir şekilde tahmin edilmiştir.
4. İki farklı boyuta sahip numunelerde mikro-ekstrüzyon deneyleri gerçekleştirilmiş. Mikro-ekstrüzyonda numune boyutu küçülmesiyle normalize edilmiş maksimum ekstrüzyon kuvvetinin düştüğü gözlemlenmiştir.
5. Yine, oluşturulan her iki malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen benzeşimlerde, makro malzeme modeli kullanılmasına göre, küçük boyutlu numunelerin mikro-ekstrüzyonunda maksimum ekstrüzyon kuvveti daha yakın bir şekilde tahmin edilmiştir. Makro malzeme modeli ile maksimum ekstrüzyon kuvveti %5,8 hata ile tahmin edilirken, mikro şekillendirme malzeme modeli 1 ve malzeme modeli 2 ile sırasıyla %3,3 ve %3,2 hata ile tahmin edilmiştir. Bu sonuç geliştirilen malzeme modelinin mikro-ekstrüzyon gibi mikro-şekillendirme işlemlerinin benzeşimlerinde kullanılabilceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Altan, T., Ngaile, G., Shen, G. 2013. Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications. Ohio: ASM International.
- Armstrong, R.W., Codd, I., Douthwaite, R.M., Petch, N.J. 1962. "Plastic Deformation of Polycrystalline Aggregates", *Philos Mag*, 7, 45–58
- Chan, L.W., Fu, M.W. 2011. "Experimental studies and numerical modeling of the specimen and grain size effects on the flow stress of sheet metal in microforming". *Mater Sci Eng A*, 528, 7674–7683
- Chan, W.L., Fu, M.W., Lu, J. 2011. "The size effect on micro deformation behaviour in micro-scale plastic deformation", *Mater Des*, 32,198-206.
- Chan, W.L., Fu, M.W., Lu, J., Liu, J.G. 2010. "Modeling of grain size effect on micro deformation behavior in micro-forming of pure copper", *Mater Sci Eng A*, 527, 6638-6648
- Chan, W.L., Fu, M.W., Yang, B. 2012. "Experimental studies of the size effect affected microscale plastic deformation in micro upsetting process", *Mater Sci Eng A*, 53,: 374– 383
- Engel, U., Eckstein, R. 2002. "Microforming—from basic research to its realization", *J Mater Process Technol*, 125–126, 35–44
- Gao, Z., Peng L, Yi P, Lai X. 2015. "Grain and geometry size effects on plastic deformation in roll-to-plate micro/meso-imprinting process", *J Mater Process Technol*, 219, 28-41
- Gau, J.T., Principe C, Wang J. 2007. "An experimental study on size effects on flow stress and formability of aluminum and brass for microforming", *J Mater Process Technol*, 184, 42–46
- Geiger, M., Geißdörfer S, Engel U. 2007. "Mesoscopic model: advanced simulation of microforming processes", *Prod Eng Res Dev*, 1
- Geiger, M., Vollertsen F, Kals R. 1996. "Fundamentals on the Manufacturing of Sheet Metal Microparts", *CIRP Ann*, 45, 277-282
- Geißdörfer, S., Engel U, Geiger M. 2006. "FE-simulation of microforming processes applying a mesoscopic model", *Int J Mach Tools Manuf*, 46, 1222–1226
- Justinger, H., Hirt G. 2009. "Estimation of grain size and grain orientation influence in microforming processes by Taylor factor considerations", *J Mater Process Technol*, 209, 2111-2121

- Kals, T.A., Eckstein R. 2000. "Miniaturization in sheet metal working", *J Mater Process Technol*, 103, 95-101
- Kim, G.Y., Ni J, Koc M. 2007. "Modeling of the size effects on the behavior of metals in microscale deformation processes", *J Manuf Sci Eng ASME*, 129, 470–476
- Kocks, U.F. 1970. "The Relation between Polycrystal Deformation and Single-Crystal Deformation", *Metallurgical Transactions*, 1, 1121-1143.
- Lai X., Peng L., Hua P., Lan S., Ni J. 2008. "Material behavior modelling in micro/meso-scale forming process with considering size/scale effects", *Comput Mater Sci*, 43, 1003–1009
- Liu J.G., Fu M.W., Chan W.L. 2012. "A constitutive model for modeling of the deformation behavior in microforming with a consideration of grain boundary strengthening", *Comput Mater Sci*, 55, 85–94
- Meyers, M.A., Ashworth, E. 1982. "A model for effect of grain size on the yield stress of metals", *Philos. Mag.*, A 46, 737–759
- Miyazaki, S., Shibata, K., Fujita, H. 1978 "Effect of specimen thickness on mechanical properties of polycrystalline aggregates with various grain sizes", *Acta Metall.*, 27, 855–862
- Miyazaki, S., Fujita, H., Hiraoka, H. 1979 "Effect of specimen size on the flow stress of rod specimens of polycrystalline Cu–Al Alloy", *Scripta Metall.*, 13, 447–449
- Parasiz S.A., Kinsey B., Krishnan N., Cao J., Li M. 2007. "Investigation of deformation size effects during microextrusion", *J Manuf Sci Eng*, 129, 690-697
- Peng L., Lai X., Lee H., Song, J., Ni, J. 2009. "Analysis of micro/mesoscale sheet forming process with uniform size dependent material constitutive model", *Mater Sci Eng A*, 526, 93–99
- Raulea L.V., Goijaerts A.M., Govaert L.E., Baaijens F.P.T. 2001. "Size effects in the processing of thin metal sheets", *J Mater Process Technol*, 115, 44-48
- Vollertsen F., Schulze Niehoff H., Hu Z. 2006. "State of the art in micro forming", *Int J Mach Tools Manuf*, 46, 1172–1179
- Yu, S., Hu-ping, Y., Xue-yu, R. 2006. "Discussion and prediction on decreasing flow stress scale effect", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16, 132-13

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. Öğr. Üyesi SUNAL AHMET PARASIZ
Proje No:	115M653
Proje Başlığı:	Mikroekstrüzyon Benzeşimleri İçin Bir Malzeme Bünye Modelinin Oluşturulması
Proje Türü:	3501 - Kariyer
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	MURAT ÖZSOY
Danışmanlar:	MEHMET FIRAT
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SAKARYA Ü. MÜHENDİSLİK F. MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/09/2015 - 01/06/2018
Onaylanan Bütçe:	249125.0
Harcanan Bütçe:	205232.47
Öz:	<p>Bir süre öncesine kadar büyük hacimler kaplayan cep telefonu, müzik çalar, kişisel bilgisayar, fotoğraf makinesi gibi günlük hayatta kullandığımız pek çok teknolojik ürün artık avcumuzun içine sığmaktadır. Minyatürleşme olarak adlandırılan bu teknoloji trendi günlük hayatta rahatça taşınabilen, bütünlük fonksiyonlara sahip ürünlere yönelik artan tüketici taleplerinin yanında, tıp, otomotiv, opto-elektronik, savunma sanayi gibi farklı sektördeki uygulamalar tarafından sürüklenmektedir.</p> <p>Minyatürleşme küçük boyutlara sahip cihaz, makine ve aletleri oluşturan minyatür metalik parçaların imal edilmesi uğraşını da beraberinde getirmiştir. Minyatür metalik parçaların imalatında, mikro-şekillendirme, yani mikro ölçekte metallerin plastik şekillendirilmesi, en uygun yöntemlerden biridir. Bunun yanında, ?boyut etkileri? olarak adlandırılan ve minyatürleşme ile ortaya çıkan malzeme davranış değişiklikleri yüzünden, geleneksel metal şekillendirme yöntemleri için hali hazırda oldukça oturmuş olan bilgi birikimi, mikro şekillendirme işlemleri için yetersiz kalmaktadır. Boyut etkileri mikro şekillendirme proseslerinde öngörülebilirlik ve güvenilirlik açısından ciddi sorunlara yol açmaktadır. Dolayısıyla, minyatürleşme ile birlikte, dünyada başta Almanya, ABD, Japonya olmak üzere Güney Kore, Çin, Hong Kong, Tayvan gibi endüstrileşmiş uzak Asya ülkelerinde, mikro-şekillendirme konusunda yapılan araştırmaların sayısı giderek artmaktadır. Türkiye?de Vestel, Arçelik gibi elektronik eşya sektöründe küresel ölçekte boy gösteren firmaların yanısıra, minyatürleşme etkisi altında olan diğer bazı ürünleri imal etmekte olan firmalar için, minyatürleşme ve mikro-şekillendirmenin giderek önem kazanması kaçınılmazdır. Bu konuda gelişmelerin gerisinde kalınmaması açısından, minyatür parçaların imalatına yönelik araştırmaların Türkiye?de de gerçekleştirilmesi, gerekli bilgi birikiminin oluşturulması ve ihtiyaç duyulduğuna danışılacak araştırmacıların bulunması gereklidir.</p> <p>Günümüzde sonlu elemanlar benzeşimleri geleneksel metal şekillendirme proses tasarımıyla çok önemli bir araç haline gelmiştir. Metal şekillendirme yöntemleriyle minyatür parçaların imal edilmesi teknolojisi olan mikro-şekillendirme, mikro-komponentlerin seri imalatı için potansiyel bir yöntemdir. Bununla birlikte, sonlu elemanlar analizlerinin mikro-şekillendirme proses tasarımıyla kullanılabilmesi için, boyut etkilerini hesaba katan malzeme modellerinin kullanılması gereklidir. Bu projede, mezo/mikro boyutta malzeme deformasyon davranışını modellemek için kullanılabilecek iki farklı malzeme modeli geliştirilmiştir. Modellerin birinde yüzey modeli ve Hall-Petch bağıntısı birlikte kullanılmış, diğerinde ise yüzey modeli ve kompozit model kombinasyonu kullanılmıştır. Yeni geliştirilen malzeme modellerinin doğrulanması için, farklı boyutlarda numunelerle mikro-basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve yeni malzeme modellerinin kullanılmasıyla yapılan teorik hesaplamalarla deneyler sonucu elde edilen akma eğrileri doğru bir şekilde tahmin edilmiştir. Bu iki malzeme modelinin ilave olarak doğrulanması için mikro-ekstrüzyon deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, geliştirilen malzeme modellerinin kullanılmasıyla mikro-ekstrüzyon deneylerinin benzeşimleri de gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar yakın bir şekilde elde edilmiştir edilmiştir. Deneysel sonuçlarının benzeşimler ile yakın bir şekilde tahmin edilmesi, yeni geliştirilen malzeme modellerinin mikro-ekstrüzyon gibi mikro-şekillendirme işlemlerinde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.</p>
Anahtar Kelimeler:	Mikro-şekillendirme, mikro-ekstrüzyon, boyut etkileri, yüzey modeli, kompozit model

Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu
Mu?:

Hayır

TÜBİTAK