



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SÜPERPLASTİK ZN-22AL ALAŞIMININ ODA SICAKLIĞINDAKİ MİKRO
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Mehmet Emin ÇETİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 / 09 / 2017

Tezin Savunma Tarihi : 06 / 10 / 2017

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU
İkinci Danışman Yrd. Doç. Dr. Ömer Necati CORA

Trabzon 2017

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Mehmet Emin ÇETİN tarafından hazırlanan**

**SÜPERPLASTİK ZN-22AL ALAŞIMININ ODA SICAKLIĞINDAKİ MİKRO
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 12 /09/2017 gün ve 1718 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU

Üye : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN

Üye : Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Üye : Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK

Üye : Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Programında yapılmıştır.

Doktora çalışmam boyunca bilgi, tecrübe ve yardımlarını benden eksik etmeyen tez danışmanım Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU'na ve ikinci danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ömer Necati CORA'ya teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim. Doktora tez çalışmama verdikleri desteklerden dolayı değerli hocalarım Prof. Dr. Gençaga PÜRÇEK'e ve Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI'ya teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmam boyunca yardımlarından dolayı Arş. Gör. Dr. Muhammet DEMİRTAŞ'a, Arş. Gör. Harun YANAR'a ve ağabeyim Yrd. Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN'e şükranlarımı sunarım.

Bütün hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini benden esirgemeyen, eğitimim için her türlü zorluğa katlanan anneme ve babama, her koşulda yanımda olan kardeşlerime minnettarım.

Doktora tez çalışması boyunca her zaman manevi desteğini yanımda bulduğum, yoğun çalışmalar esnasında sabırla beni destekleyen sevgili eşime ve oğluma sevgilerimi sunarım.

Mehmet Emin ÇETİN
Trabzon 2017

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘Süperplastik Zn-22Al Alaşımının Oda Sıcaklığındaki Mikro Şekillendirilebilirliğinin İncelenmesi’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/10/2017

Mehmet Emin ÇETİN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLOLAR DİZİNİ.....	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Eş Kanallı Açısal Ekstrüzyon (EKAE).....	3
1.3. Süperplastik Davranış.....	5
1.4. Süperplastik Şekillendirme İşlemi.....	9
1.5. Erichsen Testi	11
1.6. Mikro Derin Çekme İşlemi.....	12
1.7. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	22
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	24
2.1. Deneysel Çalışmalar	24
2.1.1. Eş Kanallı Açısal Ekstrüzyon İşlemleri.....	24
2.1.2. Çekme Deneyleri	26
2.1.3. Şekillendirilebilirlik (Erichsen) Testleri.....	27
2.1.4. Mikro Derin Çekme Deneyleri	29
2.2. Sayısal Çalışmalar	33
2.2.1. Şekillendirilebilirlik (Erichsen) Analizleri	33
2.2.2. Mikro Derin Çekme Analizleri.....	35
3. BULGULAR VE İRDELEME.....	38
3.1. Deneysel Bulgular	38
3.1.1. İç Yapı ve Tane Boyutu.....	38
3.1.2. Çekme Deneyi Bulguları	41
3.1.3. Şekillendirilebilirlik (Erichsen) Deneyi Bulguları	51

3.1.4.	Mikro Derin Çekme Deneyi Bulguları	62
3.2.	Sayısal Bulgular.....	73
3.2.1.	Şekillendirilebilirlik (Erichsen) Analizleri	73
3.3.	Mikro Derin Çekme Analizleri.....	92
4.	SONUÇLAR.....	98
5.	ÖNERİLER	100
6.	KAYNAKLAR.....	101
7.	EKLER	109
ÖZGEÇMİŞ		



Doktora Tezi

ÖZET

SÜPERPLASTİK ZN-22AL ALAŞIMININ ODA SICAKLIĞINDAKİ MİKRO
ŞEKİLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Emin ÇETİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU

İkinci Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ömer Necati CORA

2017, 108 Sayfa, 23 Sayfa Ek

Bu tez çalışması ile süperplastik özellik gösteren Zn-22Al alaşımının oda sıcaklığındaki deformasyon davranışı ve şekillendirilebilirliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, alaşımın içyapısında farklı tane boyutları elde edebilmek amacıyla önce iki adımlı eş kanallı açısız ekstrüzyona (EKAE) ve sonrasında farklı sürelerde ısıl işleme tabî tutulmuştur. Böylece, mikron altı tane boyutu seviyesinden mikron üstü tane boyutuna kadar farklı tane büyüklüğüne sahip mikroyapılar elde edilmiştir. Alaşıma EKAE uygulandıktan hemen sonra ortalama tane boyutu 200 nm, farklı sürelerde ve 250 °C’de uygulanan ısıl işlemlerden sonra ise tane boyutu yaklaşık 2,60 µm olarak elde edilmiştir. İstenen tane boyutlarının elde edilmesinden sonra alaşımın oda sıcaklığındaki deformasyon davranışı tek eksenli (çekme testi), iki eksenli (Erichsen testi) gerilme hali ve şekillendirilebilirliği de mikro-derin çekme yöntemi ile deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analiz için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve analizler LS-Dyna ticari yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. İncelenen tane boyutu aralığında, tane boyutunun artmasıyla birlikte maksimum uzama ve sınır tepe yüksekliği (STY) değerlerinde azalma gözlenmiş ve sonuç olarak mikron altı tane boyutuna sahip numunelerin kopmaya kadar en yüksek uzama (% 400) ve STY değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan alaşım mikro derin çekme işlemine tabî tutulmuş ve 1,66, 1,84, 2 ve 2,25 sınır çekme oranlarında başarılı bir şekilde şekillendirilebilmiştir. Deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilen mikro derin çekme işlemi sonuçları süperplastik Zn-22Al alaşımının mikro imalat için tercih edilebilir bir malzeme olabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşırı plastik deformasyon, Mikro derin çekme, Ultra ince taneli yapı, Şekillendirilebilirlik

Doctoral Thesis

SUMMARY

THE INVESTIGATION OF MICRO FORMABILITY OF SUPERPLASTIC ZN-22AL
ALLOY ON ROOM TEMPERATURE

Mehmet Emin ÇETİN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Advisor: Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU
Co-Advisor: Ass. Prof. Dr. Ömer Necati CORA
2017, 108 Pages, 23 Pages Appendix

This thesis aims to determine the deformation behavior and formability of Zn-22Al alloy, which shows superplastic properties at room temperature. For this purpose, two-step equal channel angular extrusion (ECAE) and subsequent heat treatments were performed to obtain different grain sizes in the microstructure. Thus, microstructures with grain sizes ranging from micron to submicron size were obtained. The average grain size was obtained as 200 nm upon ECAE while the grain size of 2.60 μm was achieved after heat treatments carried out 250 °C for different durations. Upon achieving the desired grain sizes, the deformation behavior of the alloy at room temperature was investigated experimentally and numerically under uni-axial loading (tensile test) and bi-axial loading (Erichsen test) conditions, and also formability of the alloy was studied by micro deep drawing method. The finite element method was used for the numerical analysis, and the analyses were performed with LS-Dyna commercial package. The maximum elongation and limiting dome height (LDH) values decreased with increasing grain size, and it was determined that the samples with submicron size had the highest elongation (400%) and LDH values until failure. The alloy, on the other hand, was subjected to micro-deep drawing experiments and formed successfully with limiting drawing ratios of 1.66, 1.84, 2 and 2.25. Experimental and numerical micro-deep drawing results imply that the superplastic Zn-22Al alloy can be preferred for micro manufacturing.

Keywords: Severe plastic deformation; Ultra-fine grained structure; Formability; Micro deep drawing

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. (a) Keskin köşe geçişine sahip ve (b) dış köşesi yuvarlatılmış EKAE kalıplarının şematik resimleri [11]	3
Şekil 1.2. EKAE işleminde kullanılan temel rotalar ve bunların uygulanış biçimlerini gösteren şematik resimler [11]	4
Şekil 1.3. Süperplastik davranış gösteren malzemelerde tane boyutunun deformasyon hızı ve kopmaya kadar uzama değerlerine etkisi [15].....	6
Şekil 1.4. Zn-22Al ikili faz diyagramı [46].....	7
Şekil 1.5. Malzemenin akma dayanımının deformasyon hızı ile logaritmik değişimi [24] ..	8
Şekil 1.6. Malzemenin kopmaya kadar uzamasının deformasyon hızı ile değişimi [24].....	8
Şekil 1.7. Hava üfleme yönteminin şematik gösterimi (a) sacın alt ve üst kalıp arasına yerleştirilmesi, (b) şekillendirme işleminin gaz basıncı altında gerçekleşmesi, (c) ve (d) şekillendirilmiş parçanın kalıptan ayrılması [14]	10
Şekil 1.8. EKAE işlemi uygulanmış çelik çubuk içinde numunelerin pozisyonu minyatürize Erichsen kalıbının şematik gösterimleri [55]	11
Şekil 1.9. Nüme ve tane boyutunun akma mukavemeti üzerine etkisi [9]	12
Şekil 1.10. Mikro derin çekme işleminin şematik gösterimi ve boyutlar [58]	13
Şekil 1.11. Mikro derin çekme ile üretilmiş mikro kaplar [59].....	13
Şekil 1.12. Esnek mikro derin çekme aparatı [60]	14
Şekil 1.13. Mikro ve makro derin çekme farkı [61]	15
Şekil 1.14. Mikro derin çekilmiş titanyum mikro kaplar [10].....	15
Şekil 1.15. Dikdörtgen şekilli çekilmiş kaplar [64].....	16
Şekil 1.16. 1,7 mikro derin çekme oranında çekilmiş kabın SEM görüntüsü [65]	17
Şekil 1.17. Mikro derin çekilmiş kapların SEM görüntüsü (a) yağlayıcısız çekilmiş (b) kunduz yapı ile çekilmiş [66].....	18
Şekil 1.18. (a) 0,28 mm, (b) 0,13 mm ve (c) 0,07 mm sac kalınlıklarında mikro derin çekilmiş numuneler [69]	19
Şekil 1.19. EKAE uygulanmış ve kaba taneli bakırın farklı kalınlıklarda mikro derin çekilmiş örnekleri [8].....	19
Şekil 1.20. Parlatılmamış kalıpla iki kademedede çekilmiş mikro kaplar [72].....	20
Şekil 1.21. Geometrik olarak küçültülerek CuZn37 sacdan çekilmiş mikro kaplar [74]	21
Şekil 1.22. Irthia ve Green'in çalışmalarında kullandıkları (a) kesme kalıpları (b) farklı çaptaki saclar (c) farklı çaplardaki saclar (d) farklı proses ölçülerinde potlar [75]	22
Şekil 2.1. Şematik EKAE kalıbı ve geometrik parametreleri.....	25
Şekil 2.2. EKAE işlemi uygulanmış kütleli numune içerisinde çekme, Erichsen, metalografi numunesi ve mikro derin çekme numunelerinin konumu	26

Şekil 2.3. Çekme numunesinin boyutları	27
Şekil 2.4. Deneylede kullanılan Erichsen kalıp sisteminin şematik gösterimi.....	28
Şekil 2.5. Mikro derin çekme deney düzeneğinin a) sabit alt ve b) hareket edebilir üst parça grupları	31
Şekil 2.6. Mikro derin çekme deney düzeneğinin kesit görünümü	31
Şekil 2.7. Kesme kalıbı.....	32
Şekil 2.8. 2,4 derin çekme oranında çekilmiş bakır sac	33
Şekil 2.9. Erichsen testinin sonlu elemanlar modeli ve sınır şartları.....	35
Şekil 2.10. Mikro derin çekme deneyinin sonlu elemanlar modeli ve sınır şartları	37
Şekil 3.1. Zn-22Al alaşımının EKAE sonrası mikro yapısını gösteren TEM resimleri (a) düşük büyütme (b) yüksek büyütme	39
Şekil 3.2. EKAE sonrası tavllanmış numunelerin mikroyapılarını gösteren SEM resimleri (a) 150 dakika için, (b) 1 gün için, (c) 6 gün için, (d) 8 gün için	40
Şekil 3.3. İki adımlı EKAE işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	42
Şekil 3.4. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 150 dakika tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerilme-şekil değiştirme grafikleri. 43	43
Şekil 3.5. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 1 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerilme-şekil değiştirme grafikleri	43
Şekil 3.6. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerilme-şekil değiştirme grafikleri	44
Şekil 3.7. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerilme-şekil değiştirme grafikleri	44
Şekil 3.8. EKAE işlemi uygulanmış durumda ve EKAE işlemi sonrası 250 °C’de farklı tavlama süreleri sonrasında çekme deneyleri ile elde edilen kopmaya kadar uzama değerlerinin deformasyon hızına bağımlılığı.....	45
Şekil 3.9. EKAE işlemi uygulanmış durumda ve EKAE işlemi sonrası 250 °C’de farklı tavlama süreleri sonrasında çekme deneyleri ile elde edilen akma gerilmesi değerlerinin deformasyon hızına bağımlılığı	47
Şekil 3.10. İki adımlı EKAE işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki yük-yer değiştirme grafikleri.....	51
Şekil 3.11. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’ de 150 dakika tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki yük-yer değiştirme grafikleri	52
Şekil 3.12. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 1 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki yük-yer değiştirme grafikleri	52
Şekil 3.13. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki yük-yer değiştirme grafikleri	53
Şekil 3.14. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki yük-yer değiştirme grafikleri	53

Şekil 3.15. EKAE işlemi uygulanmış durumda ve EKAE işlemi sonrası 250 °C’de farklı tavlama süreleri sonrasında Erichsen testleri ile elde edilen STY değerlerinin deformasyon hızına bağımlılığı.....	54
Şekil 3.16. EKAE işlemi uygulanmış durumda ve EKAE işlemi sonrası 250 °C’de farklı tavlama süreleri sonrasında Erichsen testleri ile elde edilen maksimum yük değerlerinin deformasyon hızına bağımlılığı	56
Şekil 3.17. Kesit fotoğraflarının alınma noktalarını gösteren yük-yer değiştirme eğrileri: (a) EKAE uygulanmış numune için (b) EKAE sonrası 250 °C’de 8 gün süreyle uygulanan tavlama sonucu elde edilen numune için. (c) iki eksenli yükleme altında şekillendirilmiş numunelerin kesit fotoğrafları ve (d) EKAE uygulanmış numune 5 Numaralı noktadaki kesit fotoğrafının büyütülmüş hali. (e) 5 numaralı noktanın kutup bölgesindeki boşluk oluşumunu gösteren optik mikroskop görüntüsü. (f) 5 numaralı noktanın flanş bölgesindeki boşluk oluşumunu gösteren optik mikroskop görüntüsü.	59
Şekil 3.18. EKAE işlemi uygulanmış numunelerin uygulanan deformasyon hızlarına ait tepe yüzey görünüşleri: (a-c) $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, (d-f) $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, (g-i) $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 8 gün uygulanmış numunelerin uygulanan deformasyon hızlarına ait tepe yüzey görünüşleri: (j-l) $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, (m-o) $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, (p-r) $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	61
Şekil 3.19. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 1,66 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait yük-yer değiştirme grafikleri	64
Şekil 3.20. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 1,84 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait yük-yer değiştirme grafikleri	64
Şekil 3.21. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 2 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait yük-yer değiştirme grafikleri	65
Şekil 3.22. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 2,25 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait yük-yer değiştirme grafikleri	65
Şekil 3.23. 1,66 oran ve 0,6 sac kalınlığında mikro derin çekilmiş süperplastik Zn-22Al alaşımının kesitinin sağ, sol, tepe ve radyus bölgelerinden alınmış mikro yapılarının SEM görüntüleri.....	66
Şekil 3.24. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 1,66 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri.....	68
Şekil 3.25. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 1,84 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri.....	69
Şekil 3.26. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 2 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri.....	69

Şekil 3.27. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 2,25 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait kalınlık- eğri boyunca uzaklık grafikleri.....	70
Şekil 3.28. Küresel zımba ile yapılan derin çekme işleminde malzeme cidarında oluşan kalınlık değişimi ile bu çalışmada 2,25 derin çekme oranında mikro derin çekme uygulanmış 0,6 kalınlıklı numunenin kalınlık değişiminin karşılaştırılması [91,92].....	70
Şekil 3.29. 1,66 derin çekme oranında mikro derin çekilmiş numuneler a) 0,2 mm kalınlıklı b) 0,4 mm kalınlıklı c) 0,6 mm kalınlıklı	71
Şekil 3.30. 1,84 derin çekme oranında mikro derin çekilmiş numuneler a) 0,2 mm kalınlıklı b) 0,4 mm kalınlıklı c) 0,6 mm kalınlıklı	71
Şekil 3.31. 2 derin çekme oranında mikro derin çekilmiş numuneler a) 0,4 mm kalınlıklı b) 0,6 mm kalınlıklı.....	72
Şekil 3.32. 2,25 derin çekme oranında mikro derin çekilmiş numuneler a) 0,4 mm kalınlıklı b) 0,6 mm kalınlıklı.....	72
Şekil 3.33. Çekme testinin sayısal modelinin ağ yapısı	74
Şekil 3.34. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen gerçek gerilme- gerçek şekil değiştirme grafikleri	74
Şekil 3.35. İki adımlı EKAE işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerçek gerilme- gerçek şekil değiştirme grafikleri.....	76
Şekil 3.36. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 150 dakika tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerçek gerilme- gerçek şekil değiştirme grafikleri	76
Şekil 3.37. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 1 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerçek gerilme- gerçek şekil değiştirme grafikleri.....	77
Şekil 3.38. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerçek gerilme- gerçek şekil değiştirme grafikleri	77
Şekil 3.39. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerçek gerilme- gerçek şekil değiştirme grafikleri	78
Şekil 3.40. İki adımlı EKAE işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarında log σ - log ϵ grafikleri.....	79
Şekil 3.41. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 150 dakika tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarında log σ - log ϵ grafikleri.....	79
Şekil 3.42. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 1 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarında log σ - log ϵ grafikleri.....	80
Şekil 3.43. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarında log σ - log ϵ grafikleri.....	80
Şekil 3.44. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarında log σ - log ϵ grafikleri.....	81

Şekil 3.45. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	84
Şekil 3.46. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	84
Şekil 3.47. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	85
Şekil 3.48. 250 °C’de 150 dakika tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	85
Şekil 3.49. 250 °C’de 150 dakika tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	86
Şekil 3.50. 250 °C’de 150 dakika tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	86
Şekil 3.51. 250 °C’de 1 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	87
Şekil 3.52. 250 °C’de 1 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	87
Şekil 3.53. 250 °C’de 1 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	88
Şekil 3.54. 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	88
Şekil 3.55. 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	89
Şekil 3.56. 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	89
Şekil 3.57. 250 °C’de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	90
Şekil 3.58. 250 °C’de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	90

Şekil 3.59. 250 °C’de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	91
Şekil 3.60. İki adımlı EKAE işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızındaki gerilme - şekil değiştirme grafiği	92
Şekil 3.61. İki adımlı EKAE işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızındaki gerçek gerilme - gerçek şekil değiştirme grafiği	93
Şekil 3.62. İki adımlı EKAE işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızındaki $\log \sigma$ - $\log \varepsilon$ grafiği	93
Şekil 3.63. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 1,66 oranda yapılan mikro derin çekme işleminin sayısal olarak modellenmesine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri.....	95
Şekil 3.64. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 1,84 oranda yapılan mikro derin çekme işleminin sayısal olarak modellenmesine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri.....	96
Şekil 3.65. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 2 oranda yapılan mikro derin çekme işleminin sayısal olarak modellenmesine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri	96
Şekil 3.66. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 2,25 oranda yapılan mikro derin çekme işleminin sayısal olarak modellenmesine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri.....	97
Şekil 7.1. Üst çene	109
Şekil 7.2. Üst taban.....	110
Şekil 7.3. Dişi-1,66-0,2.....	111
Şekil 7.4. Dişi-1,66-0,4.....	112
Şekil 7.5. Dişi-1,66-0,6.....	113
Şekil 7.6. Dişi-2-0,2.....	114
Şekil 7.7. Dişi-2-0,4.....	115
Şekil 7.8. Dişi-2-0,6.....	116
Şekil 7.9. Dişi-2,25-0,2.....	117
Şekil 7.10. Dişi-2,25-0,4.....	118
Şekil 7.11. Dişi-2,25-0,6.....	119
Şekil 7.12. Pot-6	120
Şekil 7.13. Pot-4	121
Şekil 7.14. Zimba-6	122
Şekil 7.15. Zimba-5	123
Şekil 7.16. Zimba-4	124
Şekil 7.17. Merkezleme pimi.....	125
Şekil 7.18. Yay itici pim.....	126
Şekil 7.19. Alt taban bağlantı parçası	127

Şekil 7.20. Alt taban	128
Şekil 7.21. Yay tutucu	129
Şekil 7.22. Yay pimi	130
Şekil 7.23. Yay	131



TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Mikro derin çekme işlemi parametreleri ve kalıp ölçüleri	30
Tablo 2. Erichsen testinin sonlu elemanlar modelinde kullanılan eleman sayıları	34
Tablo 3. Mikro derin çekme deneyinin sonlu elemanlar modelinde kullanılan eleman sayıları.....	36
Tablo 4. Zn-22Al alaşımına bütün prosesler uygulandıktan sonra elde edilen kopmaya kadar uzama değerleri	46
Tablo 5. Zn-22Al alaşımına bütün prosesler uygulandıktan sonra elde edilen akma gerilmesi değerleri	48
Tablo 6. Zn-22Al alaşımına bütün prosesler uygulandıktan sonra elde edilen sınır tepe yüksekliği değerleri.....	55
Tablo 7. Zn-22Al alaşımına bütün prosesler uygulandıktan sonra elde edilen maksimum yük değerleri	56
Tablo 8. Mikro derin çekilen numunelerin şekillendirilebilirliğini etkileyen parametreler	72
Tablo 9. Zn-22Al alaşımına MAT 64 malzeme parametreleri	82
Tablo 10. Erichsen testlerinin deneysel ve sayısal kalınlık değişimlerinin karşılaştırılması için hesaplanan korelasyon katsayıları.....	91
Tablo 11. 2×10^{-1} deformasyon hızı için MAT 64 malzeme parametreleri	94
Tablo 12. Mikro derin çekme deneylerinin deneysel ve sayısal kalınlık değişimlerinin karşılaştırılması için hesaplanan korelasyon katsayıları	97

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

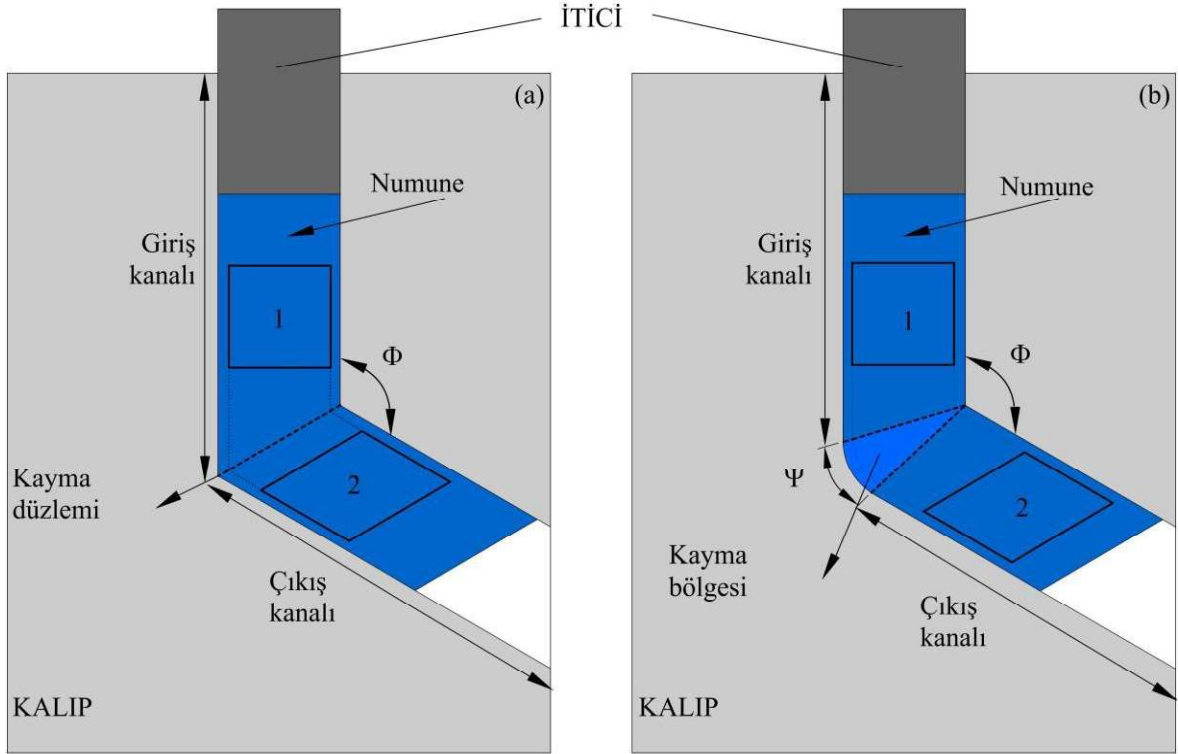
Mühendislik malzemelerinin kullanım yerine bağlı olarak kendilerinden beklenen özellikleri sağlaması için malzemelere uygulanan işlemler yıllardır süregelen bir araştırma, geliştirme faaliyetidir. Bu amaçla yapılan çalışmalardan birisi de eş kanallı açısal ekstrüzyon (EKAE) işlemidir ve bu yolla malzemenin tane boyutu küçültülmekte buna bağlı olarak malzemelerin mekanik özellikleri iyileştirilmektedir [1–3]. EKAE işlemi sonrasında malzemelerin tane boyutları makro ve mikro seviyelerden mikron altı seviyelere getirilmekte ve ultra ince tane (UİT) yapılı malzemeler elde edilmektedir [4]. Bu durum malzemelerin mekanik özelliklerinde genel olarak iyileşmelere sebep olması nedeniyle pek çok mühendislik uygulaması için önemli ölçüde avantajlar meydana getirmektedir. UİT ve nano yapılı malzemeler medikal sektörde ve mikro elektro mekanik sistemlerinde kullanılacak küçük parçaların üretimine imkan sağladıkları için mikro şekillendirme uygulamaları için öne çıkan adaylardır [5–7]. Malzemelerin üretiminde kullanılan genel şekillendirme işlemleri ekstrüzyon, derin çekme, sıcak ve soğuk haddeleme ve dövme olarak sıralanabilir ve bu yöntemler mikro imalatta boyutların minyatürize edilmesiyle kullanılabilir [8]. Bu yöntemlerden biri olan derin çekme imalat yöntemi havacılık, otomotiv, mutfak gereçleri ve plastik sanayii gibi birçok sektörde uygulama alanına sahiptir. Bu yöntemin boyut olarak küçültülmüş hali “mikro-derin çekme” işlemi olarak adlandırılmakta ve en az iki boyutu mm altındaki ölçülere sahip parçalar imal edilmektedir. Makro boyutta gerçekleştirilen metal şekillendirme işlemlerinden farklı olarak, mikro derin çekme işleminde; tane boyutu (grain size), numune boyutu (specimen size) ve numunede yer alan en küçük detay (feature size) etkileri mikro şekillendirme işlemlerinde malzeme davranışını önemli ölçüde etkilemektedir [9]. Yüksek iş verimliliği, düşük üretim maliyeti, iyi ürün kalitesi ve mekanik özellikleri, nete yakın veya net şekil avantajlarından dolayı mikro parça üretimi mikro şekillendirme teknolojisini gelecek vadede bir yöntem durumuna getirmektedir [10]. Yapılan son çalışmalar makro boyutta uygulanan şekil verme yöntemlerinin daha küçük boyutlarda uygulanmasında boyutları milimetre ölçülerinde olan parçaların imalatı için kullanılan mikro-şekil verme yöntemlerinde, UİT malzemelerin kaba taneli malzemelere göre daha iyi sonuçlar verdiğini

göstermiştir [5,11]. Eğer UİT yapısı EKAE ile elde edilmişse, mikro şekillendirme sonucu üretilen parçaların yüzey pürüzlülükleri daha düşük değerler almakta ve parça boyutları daha hassas elde edilmektedir [11,12].

Süperplastik malzemeler yüksek sıcaklıklarda ve düşük deformasyon hızlarında olağanüstü yüksek çekme uzaması gösteren ince taneli çok kristalli yapılarıdır [13]. Bazı malzemelerin olağanüstü yüksek çekme uzaması gösterme davranışı süperplastik şekillendirme teknolojisinin ortaya çıkmasına ve gelişimine yol açmıştır. Süperplastik şekillendirme (SPŞ), kompleks biçimli parçaların tek bir şekillendirme prosesinde üretilebildiği ve nete yakın biçimde boyutlar elde edilebilen bir şekillendirme işlemidir ve özellikle havacılık, iletişim, tıp ve mimarlık alanlarında geniş bir uygulama alanına sahiptir [14]. Malzemelerin süperplastik özellik gösterebilmeleri için 10 µm'den küçük tane boyutuna sahip olmaları gerekmektedir. Bunun yanında malzemeler süperplastik davranışı Kelvin cinsinden ergime noktalarının yarısının üzerindeki derecelerde ve $10^{-4} - 10^{-2} s^{-1}$ deformasyon hız aralığında gösterirler [13,15]. SPŞ için yüksek sıcaklık ve düşük deformasyon hızlarına ihtiyaç duyulması yöntemi dezavantajlı gibi göstermektedir. Fakat tane boyutunun küçültülmesinin süperplastik davranışın elde edildiği deformasyon hızını yükselttiği ve sıcaklığı düşürdüğü yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir [15,16]. Tek eksenli yükleme koşulları altında süperplastik malzemelerin deformasyon mekanizmaları ve süperplastisite gereklilikleri bugüne kadar çok geniş bir şekilde incelenmiştir [13,15,17–26]. Şu durum açıkça belirtilmelidir ki tane boyutu bir malzemenin sabit bir sıcaklıkta süperplastik uzamasını etkileyen en önemli yapısal parametredir [27]. Tane boyutu esas olarak, süperplastik deformasyon mekanizması olarak bilinen tane sınırı kaymasını (TSK) etkiler [21,24,27]. Daha küçük tane boyutu etkili TSK için daha fazla tane sınır alanı anlamına gelir ve daha yüksek süperplastik uzama meydana getirir. Tane boyutu, tek eksenli yükleme koşulları altında süperplastik davranışı etkileyen deneysel bir parametre olan deformasyon hızı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Zn-22Al alaşımının ortalama tane boyutunun mikron altı değerlere indirilmesi, söz konusu alaşımın yüksek deformasyon hızlarında ve oda sıcaklığında bile süperplastik özellik göstermesine imkân sağlamaktadır [28–36]. Bu durum dubleks yapıdaki Zn-22Al alaşımını, süperplastik davranış ve deformasyon mekanizmalarının incelenmesi açısından model bir malzeme haline getirmektedir [16,17]. Aynı zamanda mikro imalat açısından Zn-22Al alaşımının oda sıcaklığında şekillendirilebilirliğinin incelenmesi önemli bir gerekliliktir.

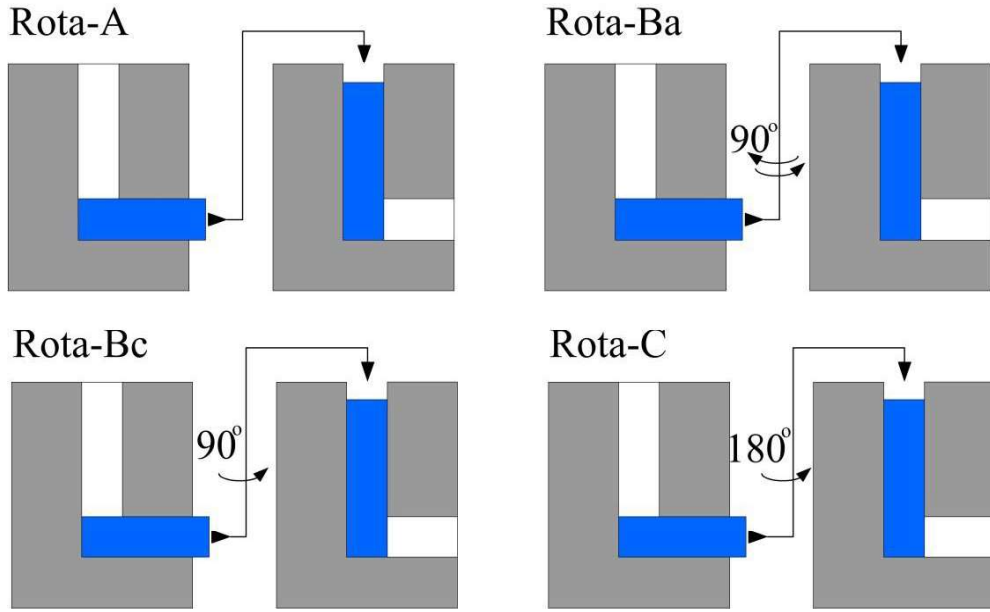
1.2. Eş Kanallı Açısal Ekstrüzyon (EKAE)

EKAE işleminin uygulama prensibi şematik olarak Şekil 1.1’de verilmiştir. EKAE kalıplarında kalıp iç köşe açısı (Φ) ve dış köşe yuvarlatma açısı (Ψ) önemli kalıp değişkenleridir. Dış köşe yuvarlatma açısı $\Psi=0^\circ$ olan kalıp Şekil 1.1 (a) ve $\Psi>0^\circ$ olan kalıp Şekil 1.1 (b)’de gösterilmiştir. EKAE işleminden kullanılan kalıp, ‘L’ şekilli bir kalıptır ve eşit kesitli iki doğrusal kanalın, aralarında Φ kalıp açısı oluşacak şekilde kesişmeleri sonucu oluşur [11,37]. Bu işlem sırasında çubuk biçimli numune giriş kanalına yerleştirilir. Çubuk şekilli numune hemen hemen kanal ile aynı kesit geometrisine sahiptir. EKAE işlemi bir hidrolik pres yardımı ile gerçekleştirilmekte ve numune giriş kısmından çıkış kısmına hidrolik presin piston kısmına montajı yapılmış ve sabit hızlı bir itici ile itilmektedir. Numune, giriş ve çıkış kanallarının kesiştiği kritik kayma düzlemine geldiğinde basit kayma mekanizması ile plastik deformasyona maruz kalır. Şekil 1.1 (a)’da gösterilen 1 numaralı kübik eleman kayma düzleminde plastik deformasyona uğrayarak çıkış kanalında 2 numaralı kübik elemana dönüşür [11].



Şekil 1.1. (a) Keskin köşe geçişine sahip ve (b) dış köşesi yuvarlatılmış EKAE kalıplarının şematik resimleri [11]

EKAE işlemlerinde kullanılan rotalar ve bu rotaların uygulanış prensiplerini gösteren resimler Şekil 1.2’de gösterilmiştir. EKAE işlemi çok pasolu gerçekleştirilecekse, farklı kayma düzlemlerinde deformasyonun devam ettirilmesi amacıyla numune kalıba yerleştirilirken bir önceki giriş pozisyonundan farklı bir pozisyonda yerleştirilir ve bu durum farklı bir rota olarak adlandırılır. Farklı rotalar farklı düzlemde ve yönde deformasyona sebep olur ve bu da beraberinde tane boyutu ve tane morfolojisi gibi içyapısal özelliklerde önemli değişiklikler meydana getirir [11,38]. Bununla birlikte EKAE işleminin uygulanması sırasında farklı işlem rotaları tane inceltme hızını değiştirmektedir. Rota-Bc numunelerin birbirini takip eden pasolar arasında aynı yönde 90° döndürülmesi ile uygulanır. Numunenin birbirini takip eden pasolar arasında 90° döndürülmesi yolu ile kalıba ait deformasyon düzlemi numunenin farklı düzlemlerine etki eder. Açısal yönelim farkı dislokasyon sınırları arasında daha etkin bir şekilde artar ve bu durumun sonucu olarak bu rotada tane inceltme hızı diğer rotalara göre daha hızlı gerçekleşir [11,39].



Şekil 1.2. EKAE işleminde kullanılan temel rotalar ve bunların uygulanış biçimlerini gösteren şematik resimler [11]

1.3. Süperplastik Davranış

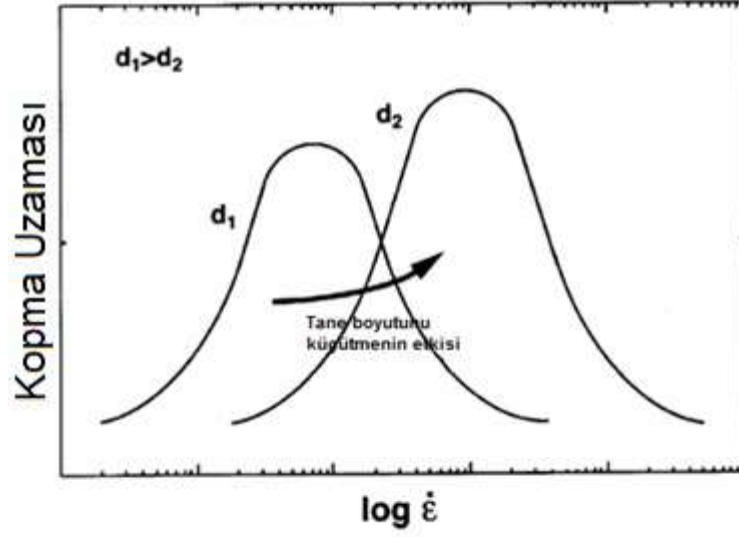
Bir malzemenin süperplastik davranış gösterebilmesi için şu 3 şartın yerine getirilmesi gereklidir [27]:

- a) stabil halde mikro kristal yapı ($d < 10-15 \mu\text{m}$)
- b) $0,4 T_e$ (T_e : Malzemenin ergime sıcaklığı) 'nin üzerinde deformasyon sıcaklığı
- c) özel bir deformasyon aralığı (10^{-4} s^{-1} , den 10^{-2} s^{-1} , e kadar)

Malzemelerde süperplastik davranış deneysel parametreler olan deformasyon hızı ve sıcaklıktan etkilenmektedir. Aynı zamanda içyapısal parametreler olan tane boyutu, tanelerin şekli, tane sınırlarının karakteristiği ve faz yapısı malzemelerin süperplastik davranışını etkilemektedir [40].

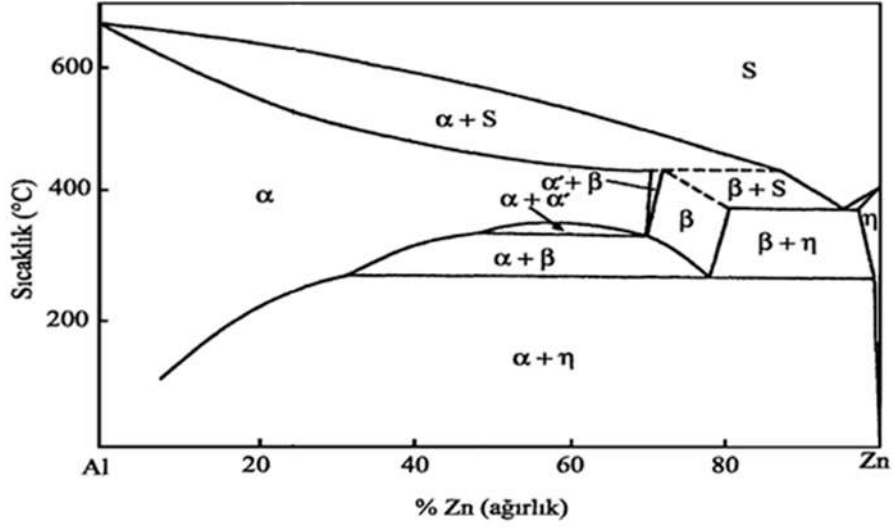
Tane sınırı kaymasının süperplastik davranış gösteren malzemelerin temel deformasyon mekanizması olduğu birçok çalışmada gösterilmiştir [21,24,27]. Söz konusu malzemelerde yüksek miktarda uzama malzemelerin ince tane yapısına sahip olması ile gerçekleşebilir [15,41]. Malzemelerin süperplastik davranış gösterebilmeleri için $10 \mu\text{m}$ 'den küçük tane boyutuna sahip olmaları gerektiği bilinmektedir [13,15]. Daha yüksek uzamalı süperplastik davranış elde edebilmek için sıcaklık ve deformasyon hızı sabit tutulmalı ve tane boyutu küçültülmelidir [15].

Kaibyshev [27] çalışmasında tane boyutu ve süperplastik davranışın oluştuğu deformasyon hızı arasındaki ilişkiyi " $\dot{\epsilon} \sim d^{-b}$ " denklemiyle ifade etmiştir ($\dot{\epsilon}$: deformasyon hızı, d : tane boyutu, $b=2-3$). Bu denklem, tane boyutunun küçültülmesiyle süperplastik davranışın kazanıldığı deformasyon hızının arttığını göstermektedir. Aynı çalışmada süperplastik malzemeler için akma dayanımı ve tane boyutu arasındaki ilişki " $\sigma \sim d^a$ " denklemiyle ifade edilmiştir (σ : akma dayanımı, $a=0,7-2$). Bu denklemden akma dayanımının tane boyutunun küçültülmesiyle azaldığı çıkarımı yapılabilir. Kawasaki ve Langdon [15] çalışmalarında tane boyutunu küçültmenin, süperplastik davranışın elde edildiği deformasyon hızını yükseltmesi etkisinin yanı sıra, süperplastik uzamada da pozitif yönde artışa imkân sağladığını söylemişlerdir (Şekil 1.3). Tane boyutunun süperplastik davranışa yukarıda anlatılan katkılarından bir diğeri de, süperplastik davranışın elde edildiği sıcaklık değerini düşürmesidir [27].



Şekil 1.3. Süperplastik davranış gösteren malzemelerde tane boyutunun deformasyon hızı ve kopma uzaması değerlerine etkisi [15]

Süperplastik davranış gösteren malzemelerin eş eksenli tanelerden oluşan bir mikro yapıya sahip olmaları ve bu tanelerin tane sınırlarının geniş açılı olması çok önemlidir [40]. Süperplastik davranış için alaşımların faz yapıları dikkate alınmalıdır. Zn-Al alaşımlarında tane sınırı kayması η/η ve η/α faz sınırlarında α/α faz sınırlarına göre çok daha etkin ve fazla gerçekleşmektedir [40,42–45]. İkili Zn-Al faz diyagramı Şekil 1.4'te verilmiştir. Tane sınırlarının faz yapılarının yanı sıra malzemede bulunan fazlarda süperplastik davranışı etkilemektedir. Alaşımda bulunacak ikinci fazın tane büyümesini engelleyerek süperplastik davranışı etkilediği ve bu etkinliğinin ince yapıli olması ve mikro yapıda homojen olarak dağılması ile artabileceği belirtilmektedir [27]. Bu nedenle bir malzemede büyük miktarda süperplastik uzama davranışı elde etmek için ikinci faz veya faz parçacıkları içyapısal gereklilik olarak görülmektedir [40].



Şekil 1.4. Zn-22Al ikili faz diyagramı [46]

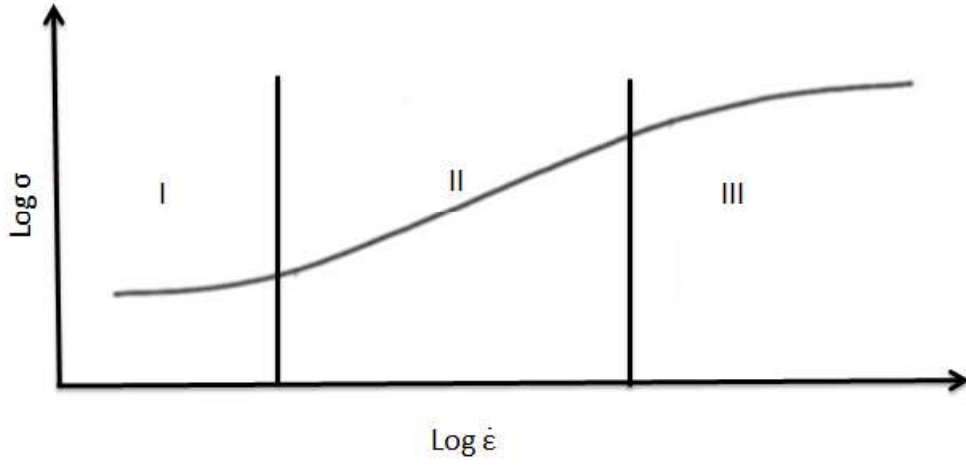
Süperplastik malzemeleri karakterize eden temel denklem Denklem (1)'de [47–49] verilen bünye denklemidir.

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^m \dot{\varepsilon}^n \quad (1)$$

Bu denklemde 'σ' akma gerilmesi, 'K' malzeme sabitini, 'ε' şekil değiştirmeyi, 'm' deformasyon sertleşme üssünü, 'ε̇' deformasyon hızını, 'n' ise deformasyon hızı duyarlılık üssünü göstermektedir.

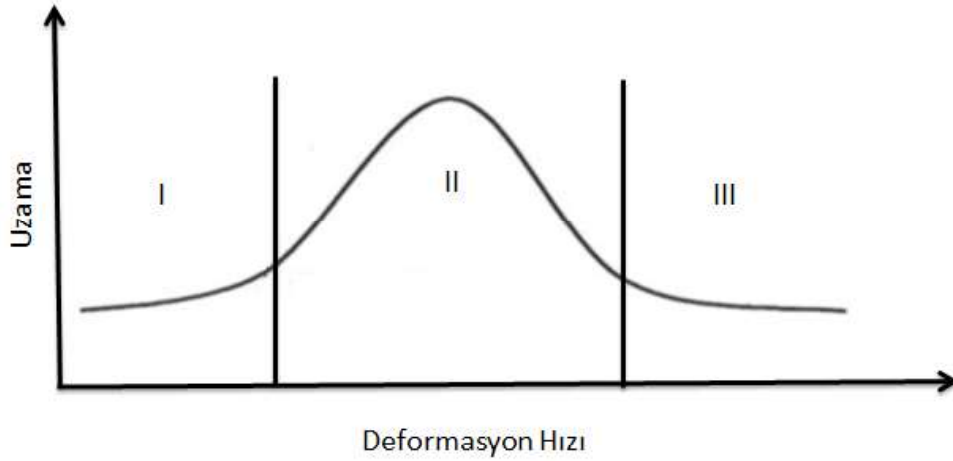
Süperplastik malzemelerin deformasyon hızındaki artış akma gerilmesinde artışa sebep olur (Şekil 1.5) Bu artış log σ- log ε̇ eğrisinde görüldüğü gibi S şeklindedir ve 3 bölgeye ayrılmıştır. Bölge II'de deformasyon hızı duyarlılık üssü maksimum değer alır ve süperplastik davranışın oluştuğu deformasyon hızı aralığını ifade eder. Bölge I ve Bölge III' de (daha düşük ve daha yüksek deformasyon hızları) deformasyon hızı duyarlılık üssü düşüktür. Deformasyon hızı duyarlılık üssü denklem 2'den bulunabilir:

$$n = \frac{d(\log \sigma)}{d(\log \dot{\varepsilon})} \quad (2)$$



Şekil 1.5. Malzemenin akma dayanımının deformasyon hızı ile logaritmik değişimi [24]

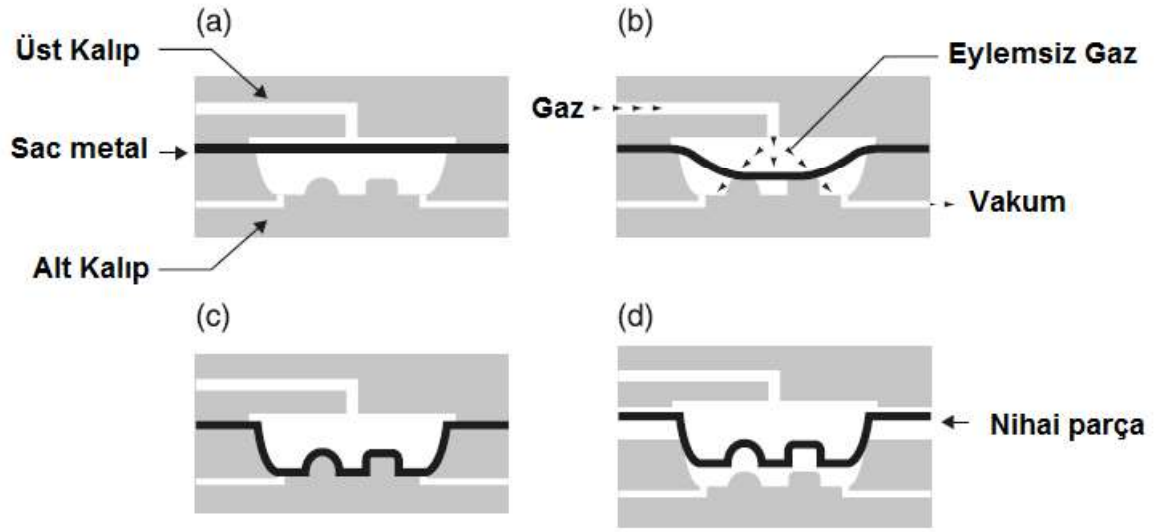
II. bölgede yüksek n değeri nedeniyle numunede boyun verme olayını geciktirdiği ve bu durumun numune boyunca daha düzgün bir deformasyon oluşumuyla sonuçlandığı ve süperplastik davranış açısından maksimum uzamanın II. bölgede elde edildiği belirtilmiştir (Şekil 1.6) [27].



Şekil 1.6. Malzemenin kopma uzamasının deformasyon hızı ile değişimi [24]

1.4. Süperplastik Şekillendirme İşlemi

SPŞ, kompleks biçimli parçaların tek bir şekillendirme prosesinde üretilebildiği son geometriye yakın biçimde sonuç elde edilebilen bir şekillendirme işlemidir ve özellikle havacılık, iletişim, tıp ve mimarlık alanlarında geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir [14]. Malzemelerin süperplastik özellik gösterebilmeleri için $10\ \mu\text{m}$ 'den küçük tane boyutuna sahip olmaları gerekmektedir. Bunun yanında malzemeler süperplastik davranışı Kelvin cinsinden ergime noktalarının yarısının üzerindeki derecelerde ve $10^{-4} - 10^{-2}\ \text{s}^{-1}$ deformasyon hız aralığında gösterirler [13,15]. SPŞ için yüksek sıcaklık ve düşük deformasyon hızlarına ihtiyaç duyulması yöntemi dezavantajlı konuma sokmaktadır. Ancak tane boyutunun küçültülmesinin, süperplastik davranışın elde edildiği deformasyon hızını yükselttiği ve sıcaklığı düşürdüğü yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir [14,15]. Bu alanda yapılan çalışmalar; süperplastik şekil verme işlemi $10^{-4} - 10^{-2}\ \text{s}^{-1}$ deformasyon hız aralığında 20-30 dk arasında sürerken, EKAE işlemi ile yoluyla elde edilen UİT yapılı bir malzeme kullanıldığı zaman 30-60 saniyede SPŞ işleminin tamamlanabileceği gösterilmiştir [50]. Literatürde SPŞ'nin malzemelere uygulanması için çeşitli yöntem ve teknikler belirtilmiştir. Bunlardan sac malzemeler için kullanılanlar hava üfleme ile şekillendirme, vakum şekillendirme, derin çekme ve difüzyon yapıştırma ile birleştirilmiş hava üflemedir. Dökülmüş kütle şeklindeki malzemeler için ise, dövme ve ekstrüzyon işlemleridir [14]. SPŞ işlemini sürtünme karıştırma işlemi uygulanmış Al 7075 alaşımına Erichsen testine benzer bir yöntem olan zımba ile şekillendirme yöntemiyle Dutta vd. [51] yüksek sıcaklıkta uygulamışlardır. SPŞ şekillendirme işlemlerinde en çok kullanılan yöntem hava üfleme ile şekillendirmedir. Bu yöntemin uygulanmasında şekillendirme için gaz, vakum ortamı ve yüksek sıcaklık uygulamaları gereklidir. Yöntemin prensip şeması Şekil 1.7'de gösterilmiştir. Bu nedenle, SPŞ işleminin oda sıcaklığında klasik şekillendirme işlemlerinden biri olan derin çekme veya daha küçük boyutlarda uygulanan mikro derin çekme işlemi ile gerçekleştirilmesi önem kazanmaktadır.

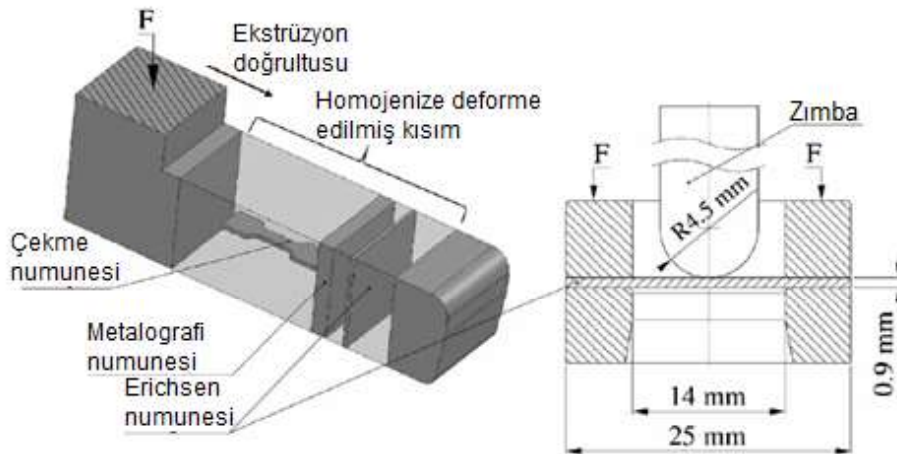


Şekil 1.7. Hava üfleme yönteminin şematik gösterimi (a) sacın alt ve üst kalıp arasına yerleştirilmesi, (b) şekillendirme işleminin gaz basıncı altında gerçekleşmesi, (c) ve (d) şekillendirilmiş parçanın kalıptan ayrılması [14]

Zn-22Al alaşımı ticari anlamda kullanmak için IBM tarafından 1965 yılında ilk patent alınan alaşımdır [14]. İlerleyen yıllarda da bu alaşımın SPŞ işlemlerinde kullanımı araştırılmaya devam etmiştir. Literatürde süperplastik Zn-22Al alaşımının şekillendirilebilirliği 120-200 °C arası sıcaklıklarda [52], 150-200 °C [53] hava üfleme SPŞ yöntemiyle Tsao vd. tarafından incelenmiştir. Bir başka çalışmada Zn-22Al alaşımının mikro şekillendirme işleminde kullanımı incelemek için Yeh vd. [54] sıcak basma yöntemiyle ince taneli hale getirilmiş Zn-22Al alaşımını kullanarak düz dişli imal etmişlerdir. Burada ortaya çıkan en önemli özellik şekillendirme işlemlerinde belirli bir sıcaklık değerine ihtiyaç duyulmasıdır. Zn-22Al alaşımının ortalama tane boyutunun mikron altı değerlere indirilmesi, söz konusu alaşımın yüksek deformasyon hızlarında ve oda sıcaklığında bile süperplastik özellik göstermesine olanak sağlamaktadır [28-36]. Alaşımın oda sıcaklığında yapılan süperplastik davranış incelemelerinde tek eksenli yüklemeler kullanılmıştır [28-36]. Yapılan literatür incelemesinde Zn-22Al alaşımı için oda sıcaklığında şekillendirilebilirliğinin deneysel ve sayısal olarak mikro derin çekme ve Erichsen testleri ile incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır.

1.5. Erichsen Testi

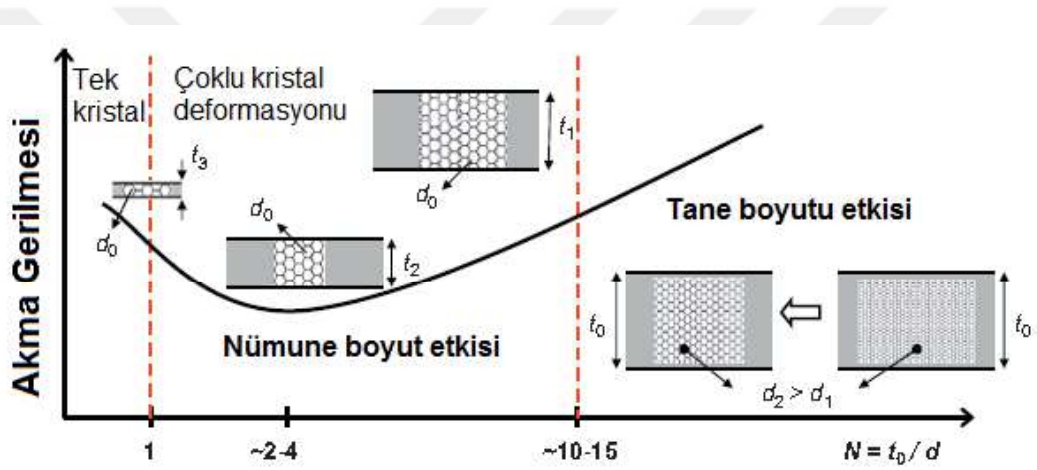
Erichsen testi sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini belirleme açısından önemli bir yöntemdir. Bu yöntemle sac parça uç kısımlarından sabitlenmektedir. Sonrasında zımbaya ilerleme verilmekte ve zımbanın numunede çatlak oluşturduğu anda test durdurulup zımbanın ilerleme mesafesi kaydedilerek test sonlandırılmaktadır. Erichsen testinin yapılış esasları TS EN ISO 20482 standardı ile belirlenmiştir. Bu standarttaki kalıp ölçüleri belirli oranlarda minyatürize edilerek büyük çaplarda sac çaplarının elde edilemediği EKAE [11,55,56] ve sürtünme karıştırma prosesi (FSP) [57] işlemleri yoluyla UİT hale getirilmiş numunelerin şekillendirilebilirliği incelenmektedir. Bu çalışmalardan biri de Saray vd.'nin [55] farklı rotalar takip edilerek eş kanallı açısız ekstrüzyon (EKAE) ile üretilmiş çok ince taneli mikro yapının ara yer atomsuz çeliğin (IF steel) iki eksenli uzama şekillendirilebilirliğine etkisini inceledikleri çalışmadır. Şekil 1.8' de EKAE yöntemi ve akabinde Erichsen numunesi ve çekme testi numunesi elde edilmesi gösterilmiştir. Saray vd. [55] kaba ve ince taneli IF çeliğinin şekillendirilebilirliğini minyatürize edilmiş Erichsen testi ile belirlemişlerdir. Rota-C ve rota Bc takip edilerek yapılan EKAE ile ultra ince taneli mikro yapı eş eksenli taneli olarak elde edilmiş ve rota A takip edilerek yapılan EKAE ile karşılaştırıldığında daha iyi bir şekillendirme elde etmişlerdir. Ultra ince taneli mikro yapının iki eksenli şekillendirmede eş dağılımsız tane akışının neden olduğu portakal kabuğu etkisini azalttığını belirtmişlerdir.



Şekil 1.8. EKAE işlemi uygulanmış çelik çubuk içinde numunelerin pozisyonu minyatürize Erichsen kalıbının şematik gösterimleri [55]

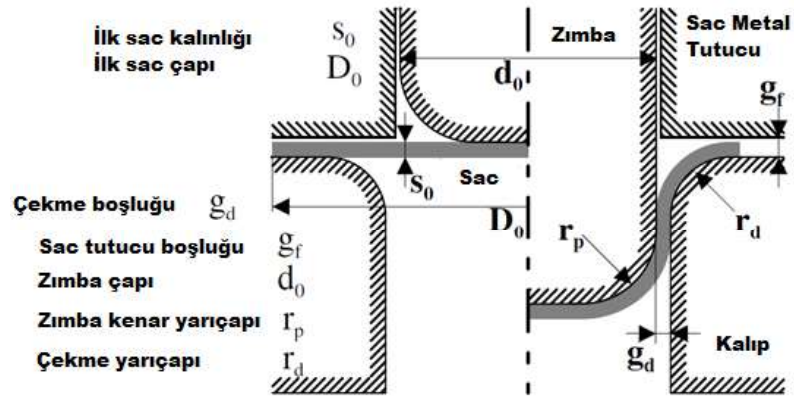
1.6. Mikro Derin Çekme İşlemi

Mikro derin çekme işleminde, makro derin çekme işleminden farklı olarak boyutların küçülmesi nedeniyle bazı boyut etkileri ortaya çıkmaktadır. Şekil 1.9'da numune boyut etkisinin ve tane boyutu etkisinin akma mukavemeti üzerine etkisi gösterilmiştir. Numune kalınlığının (t_0), tane boyutuna (d) oranı olarak boyut etkisi (N) $\left[N = \frac{t_0}{d}\right]$ şeklinde ifade edilebilir. Yapılan çalışmalar sonucunda N değerinin 1-15 aralığında olması durumunda numune boyut etkisinin, 15'den büyük değer alması durumunda ise tane boyutu etkisinin baskın olduğunu göstermiştir [9].



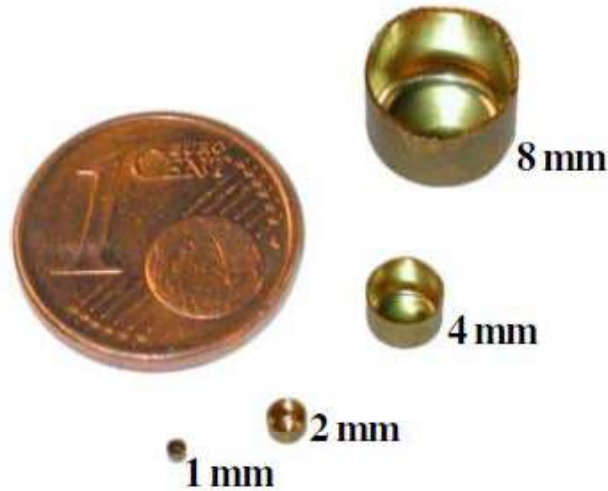
Şekil 1.9. Nümune ve tane boyutunun akma mukavemeti üzerine etkisi [9]

Saotome vd. [58] 0,05, 0,1, 0,2 ve 1 mm kalınlıktaki düşük karbonlu çeliğin mikro derin çekme karakteristiklerini belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmalarında inceledikleri mikro derin çekme işleminin şematik gösterimi Şekil 1.10'da verilmiştir. Yaptıkları çalışmalarda zımba çapının sac kalınlığına oranının (d_0/s_0) artması halinde, sınır çekme oranının azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 1.10. Mikro derin çekme işleminin şematik gösterimi ve boyutlar [58]

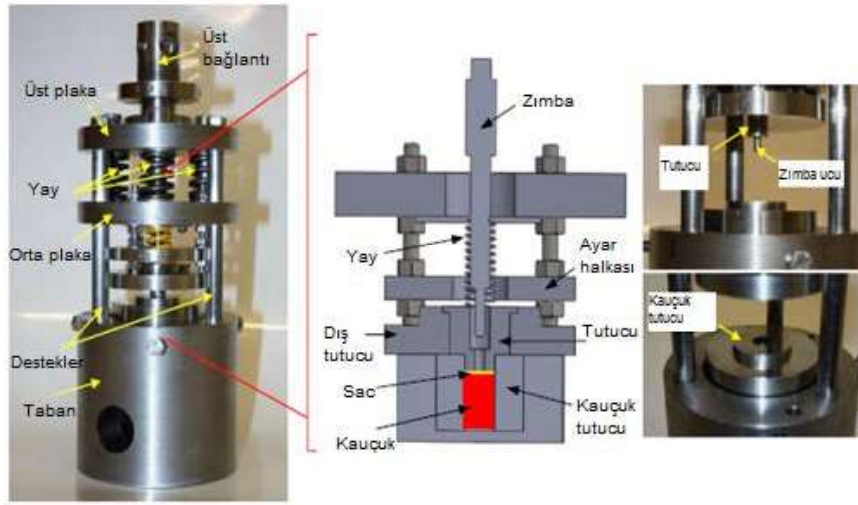
Witulski vd. [59] kalınlığı 80 μm ve 300 μm arasında değişen CuZn37 sac malzemesi ile 1 ve 8 mm arasında değişen çaplardaki kapların mikro derin çekme deneylerini ve sonlu eleman analizini gerçekleştirerek çekme boşluğu gibi geometrik parametreleri saptamada enine anisotropi, sürtünme ve işlem sapmalarının etkilerini belirlemeye çalışmışlardır. Mikro derin çekme ile edilmiş mikro kaplar Şekil 1.11’de gösterilmiştir. Ürün toleransları dahilinde takım geometrisindeki sapmaların mikro derin çekme sonucu üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olabileceği sonucuna ulaşmışlardır.



Şekil 1.11. Mikro derin çekme ile üretilmiş mikro kaplar [59]

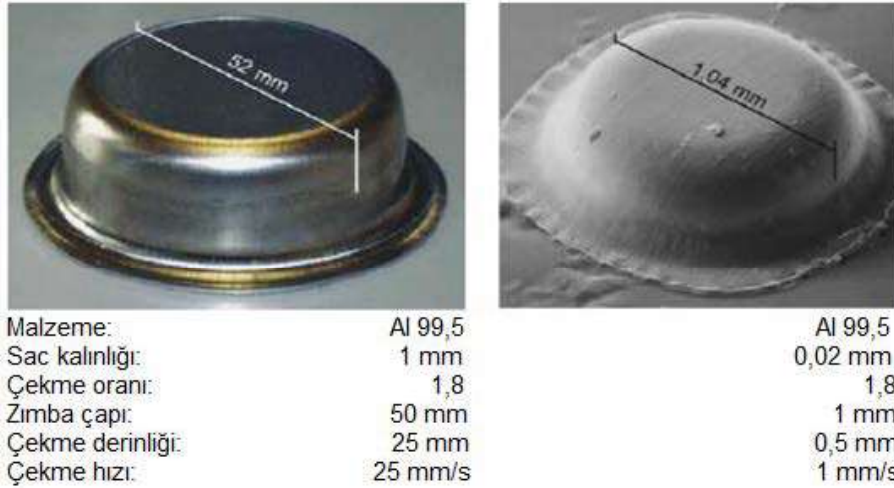
Irthia vd. [60] sac kalınlığı 60-100-150 μm değişen SS304 malzemesinin mikro derin çekilebilme kabiliyetini 4 mm çapta zımba ve esnek şekillendirme aparatı kullanarak (Şekil 1.12), farklı ayar halkası ve tutucu arası boşluk (pozitif ve negatif), farklı sürtünme

katsayısı ve anisotropi parametrelerini göz önüne alarak deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. SS304 malzemesinin esnek kalıp kullanılarak geniş bir en-boy oranında mikro derin çekilebileceğini, anisotropik etkinin parçanın şekillendirilme kalitesini etkilediğini, ayar halkası ve tutucu arası boşluğun azaltılmasıyla elde edilen ürünlerde maksimum incelmenin oluştuğunu, sac ve tutucu arasında yüksek sürtünme katsayısı olması durumunda şekillendirilebilirliğin azaldığını söylemişlerdir.



Şekil 1.12. Esnek mikro derin çekme aparatı [60]

Mikro ve makro derin çekme arasındaki farklılıkları belirlemek amacıyla 20 μ m kalınlıktaki Al 99.5 sac ile 25 μ m kalınlıktaki yumuşak çeliğin (DIN 1.0335) mikro derin çekme işlemi 1 mm çaptaki zımba kullanılarak; 1 mm kalınlığında Al 99.5 sac ve 1.35 mm kalınlığında St 15 sacların da makro derin çekme işlemi 50 mm çapındaki bir zımba kullanılarak Vollertsen vd. [61] tarafından gerçekleştirilmiştir. Mikro derin çekme işlemi ile elde edilen silindirik parçanın flanş bölgesinde kırışıklıklar gözlemlenirken, makro derin çekme ile elde edilen parçada bu tür bir soruna rastlanılmamıştır (Şekil 1.13). Analizler sonucunda mikro-derin çekme işlemindeki sürtünme etkilerinin makro derin çekme işlemindeki etkilerden daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu etki literatürde sürtünmenin boyutsal etkisi (friction size effect) olarak adlandırılmaktadır [61].



Şekil 1.13. Mikro ve makro derin çekme farkı [61]

Jie vd. [10] titanyum sac levhaların mikro derin çekme testlerini yapmışlardır. Çalışmalarında 20-100 mikron arası sac kalınlıkları için 600-750°C arasında farklı sıcaklıklarda ısıl işlem uygulayarak farklı tane boyutunda numuneler elde etmişlerdir. Mikro derin çekme testlerinde 0,7, 2 ve 4 mm çapında zimbalar kullanmışlardır. Mikro sac metal şekillendirmede tane boyutu etkisinin deformasyon davranışı ve şekillendirilebilmeye etkisini incelemişlerdir. Mikro derin çekilmiş titanyum mikro kaplar Şekil 1.14'te gösterilmiştir. Çalışmaları ile; titanyum sacların mikro çekmedeki akma gerilmesinin sac kalınlığının artışıyla ve tane boyutunun düşmesiyle arttığı, çatlak davranışının sac kalınlığının azalmasıyla kesme çukurundan kayma ayırımına değiştiği, mikro derin çekmenin şekillendirilebilirliğinin mikro kap ölçüsünün azalmasıyla ve tane boyutunun artmasıyla kötüleştiği sonuçlarını elde etmişlerdir.



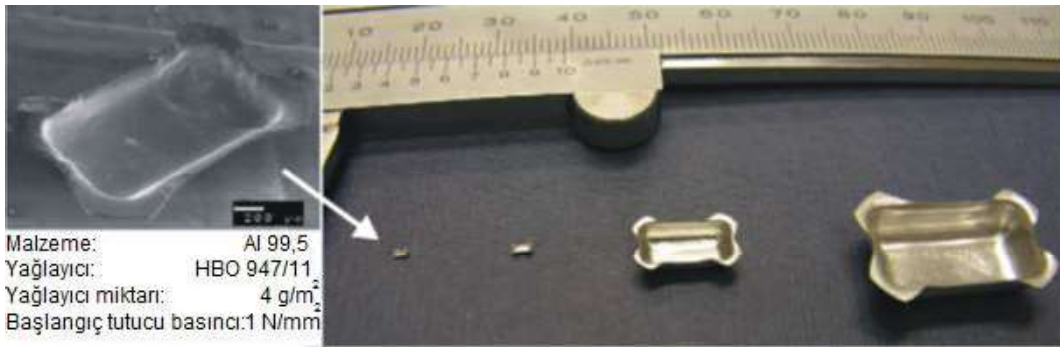
Şekil 1.14. Mikro derin çekilmiş titanyum mikro kaplar [10]

Yeh vd. [62] mikro şekillendirmede her kalınlık ve her tane boyutu için malzeme davranışını ifade edecek yeni bir malzeme modeli önermişlerdir. Dinamik sonlu elemanlar

ve Hill teorisi kullanarak C 1200 bakır malzemesini silindirik mikro derin çekme işlemine tabi tutmuşlar ve sac kalınlığının küçültülmesi nedeniyle ortaya çıkan tane boyutu ve kalınlık etkilerinin şekillendirilebilirliğe etkisini incelemişlerdir.

Vollertsen vd. [63] mikro derin çekme işlemi 1 mm zımba çapıyla farklı zımba hızlarında (1, 10 ve 100 mm/s) Al 99.5 malzemesi için gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada Sürtünme katsayısının makro şekillendirmede olduğu gibi zımba hızının artışıyla azaldığı ve sınır çekme oranının zımba hızından incelenen aralıkta (1-100 mm/s) bağımsız olduğu belirlenmiştir. 0,02 mm kalınlıktaki Al 99,5 malzemesi için hızdan bağımsız olarak 1,8 çekme oranı saptanmıştır.

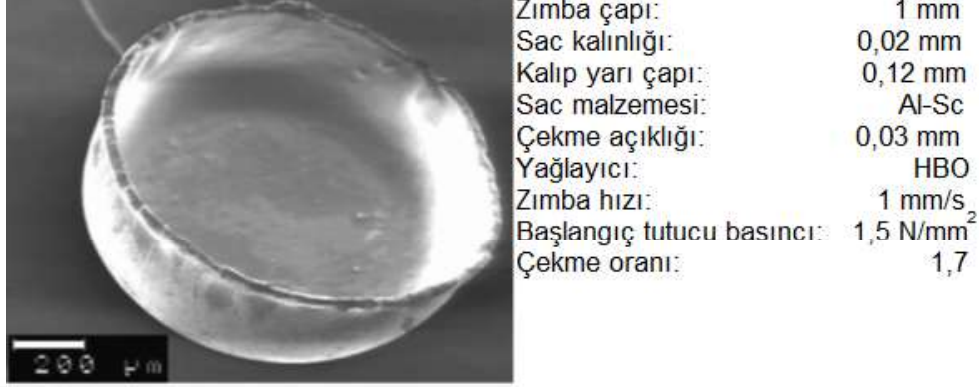
Hu [64] çalışmasında dikdörtgen kapların derin çekme işleminde tribolojik boyut etkisini incelemiştir (Şekil 1.15). Deneyler için 0,015' ten 0,2 mm kadar kalınlığı değişen Al 99,5 malzemesi, 1,5x0,75 mm² 'den 20x10 mm²'ye kadar alanı değişen dikdörtgen zımba kullanmıştır. Daha önceki çalışmalarında silindirik parçaların derin çekilmesinden elde edilen sürtünme fonksiyonlarını boyut bağımlı sonlu eleman simülasyonlarında kullanmıştır. Deneylerden ve simülasyonlardan elde edilen zımba kuvveti-hareket eğrisi sonuçlarının karşılaştırılmasından silindirik parçaların derin çekilmesi için geçerli olan sürtünme fonksiyonlarının dikdörtgen parçaların derin çekilmesi içinde geçerli olduğunu belirlemişlerdir.



Şekil 1.15. Dikdörtgen şekilli çekilmiş kaplar [64]

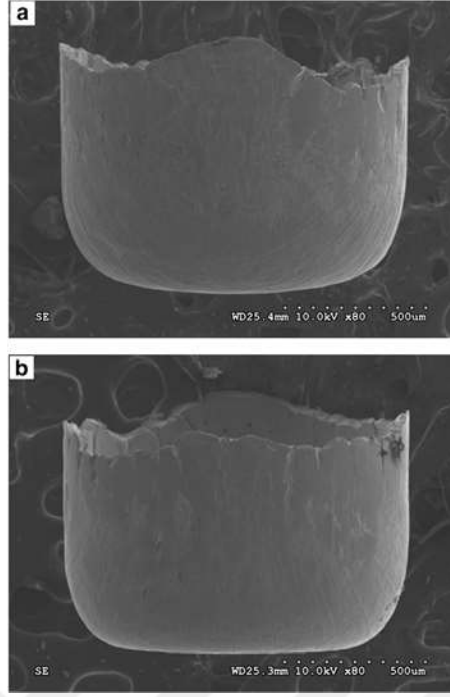
von Bargaen vd. [65] Al-2Sc ince metal levhalarının mikro derin çekme işlemindeki limit çekme oranını belirlemek için 1 mm çapında zımba kullanmışlardır. 20 µm kalınlığındaki levha PVD magnetron püskürtme ile üretilmiştir. 1.7 limit çekme oranı elde edilmiştir (Şekil 1.16). Üretilen mikro kaplar yapay olarak yaşlandırılmıştır. Kaplar

yaşlandırma öncesi ve sonrası olmak üzere ultra mikro sertlik testine göre karakterize edilmiştir.



Şekil 1.16. 1,7 mikro derin çekme oranında çekilmiş kabin SEM görüntüsü [65]

Gong vd. [66] çalışmalarında PIIID (plasma immersion ion implantation and deposition) işlemi ile DLC (diamond like carbon) film kaplı sac tutucuları ve kalıplar üretmeyi ve sonrasında mikro kapları işlem görmüş kalıplarda şekillendirmeyi amaçlamışlardır. Zimba hareketi- çekme kuvveti eğrisine farklı yağlama durumlarının etkisini, sınır çekme oranını, yüzey kalitesini de tartışmışlardır. Sac malzemesi olarak haddelenerek sertleştirilmiş bakır C1100 kullanmışlardır. DLC film kaplamasının çekme kuvvetini azalttığını ve sınır çekme oranını artırdığını belirtmişlerdir. Seri üretim için DLC film kaplamasının uygun bir yağlayıcı olarak seçilebileceğini söylemişlerdir (Şekil 1.17).



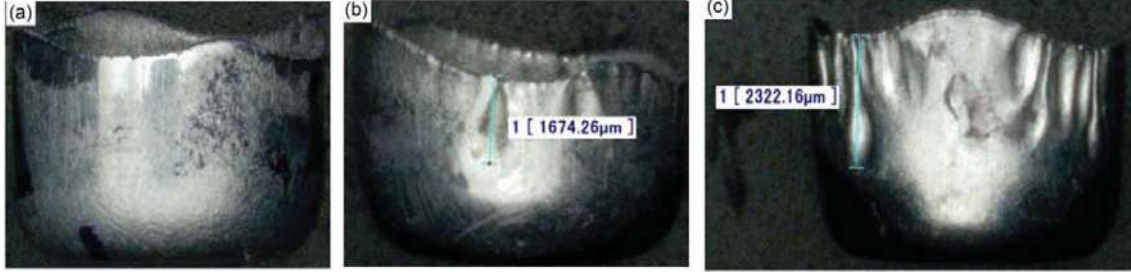
Şekil 1.17. Mikro derin çekilmiş kapların SEM görüntüsü (a) yağlayıcısız çekilmiş (b) kunduz yapı ile çekilmiş [66]

Geng vd. [67] derin çekme işleminde tek kristal ham bakır metalin yerel yarıлма durumunu çalışmak için bir seri derin çekme deneyi ve eş özellikleri içeren SEM simülasyonu yapmışlardır. Simülasyon sonuçlarının kristal modelin tek kristalin şekillendirme karakteristiklerini tanımlama ve olası yarıлма bölgesini tahmin etmede yeterli olduğunu söylemişlerdir.

Gau vd. [68] östenit paslanmaz çelik 304 malzemesini kullanarak mikro derin çekme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra geniş kap yüksekliği/ kap dış çapı oranında mikro kaplar elde edebilmek için mikro derin çekme işlemi takiben 2 kademeli incelterek çekme uygulamışlardır. Önerilen işlem ile sacların en az 900 °C'de 3 dakikadan fazla tavlama durumunda güçlü bir yöntem olduğu kanısına varmışlardır.

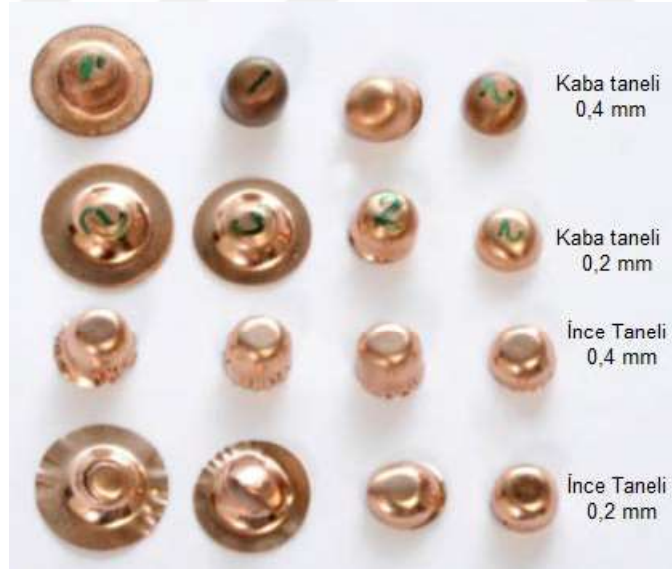
Hadi vd. [69] sacdaki hata gelişimini mikro şekillendirme boyunca farklı sac kalınlıkları ve eş merkezli olmayan yer değiştirmeler kullanarak deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sac kalınlığının, eşik bir değerden fazla olduğu zaman kırılmanın oluşabileceği, sac kalınlığının eşik bir değerden az olduğunda iş parçasında buruşmanın oluşacağı ve sac kalınlığını azaltmanın geniş bir buruşma alanı ile sonuçlanacağı

sonuçlarına ulaşmışlardır (Şekil 1.18). Malzeme olarak alüminyum AA1235 kullanmışlardır.



Şekil 1.18. (a) 0,28 mm, (b) 0,13 mm ve (c) 0,07 mm sac kalınlıklarında mikro derin çekilmiş numuneler [69]

Molotnikov vd. [8] sac kalınlığının mikro derin çekme işlemine etkisini iri taneli ve ultra-ince taneli bakır saclar kullanarak incelemişler ve tane büyüklüğünün sabit tutulup sac kalınlığının küçültülmesi halinde boyut etkisinin ortaya çıktığını ifade etmişlerdir (Şekil 1.19).



Şekil 1.19. EKAЕ uygulanmış ve kaba taneli bakırın farklı kalınlıklarda mikro derin çekilmiş örnekleri [8]

Fu vd. [70] bakır sacların mikro bileşen bükme ve derin çekme işlemlerini beraber yapmışlardır. Boyut etkisini incelemek için kalıp dizaynında ve deformasyon işlemi

simülasyonunda benzerlik teorisini kullanmışlardır. En küçük detay etkisini farklı zımba çapları kullanarak çalışmışlardır. Deneysel çalışmalara dayanarak deformasyon yükünün tane boyutunun artışı ile azalacağı fakat bu azalışın saç metalin kesitinde az tane olduğunda belirgin olmadığını tespit etmişlerdir. Şekillendirilen parçanın boyutu azaldığında ve tane boyutu arttığında deformasyonun homojen olmadığını belirtmişlerdir. Bunun düzenli olmayan geometriye ve şekillenen parçanın pürüzlü yüzeye sahip olmasına öncülük edeceğini söylemişlerdir.

Manabe vd. [71] paslanmaz çelik (SUS304) aşırı ince 20 μm metal levhadan 500 μm çaplı mikro kap üretmişlerdir. Mikro derin çekmede yüzey pürüzlülüğünün sonlu elemanlar modelinin geçerliliğini doğrulamak için yeni yüksek hassasiyette ardışık saç bükme ve çekme düzeneği geliştirmişlerdir. Çekilen kabın değerlendirilmesi için kap geometrisi, kalınlık şekil değiştirme dağılımı ve yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Deneysel ve sayısal mikro derin çekmenin karşılaştırılmasıyla yüzey pürüzlülüğü parametresi göz önüne alınarak yapılan sonlu eleman simülasyonunun iki kademeli mikro derin çekme için geçerli olduğunu belirtmişlerdir.

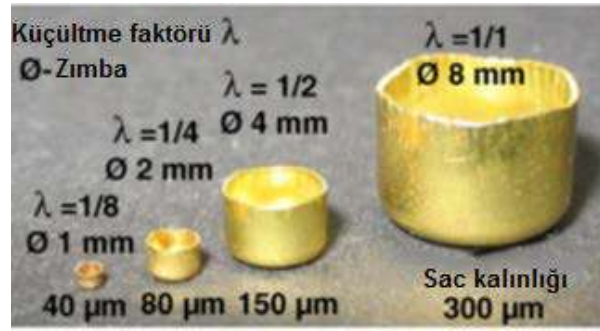
Manabe vd. [72] çalışmalarında “mili” ölçüdeki silindirik kabın iki kademeli derin çekme işlemini, hem deneysel hem de sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir (Şekil 1.20). Parlatılmış ve parlatılmamış deney seti kullanılarak elde edilmiş şekillendirme sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Takım yüzey pürüzlülüğünün, çekilebilirlik ve ürün tamlığı üzerine etkisini, yüzey pürüzlülüğü dikkate alınarak yapılan sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Deneylerde paslanmaz çelik sac, SUS 304-H, malzemesi kullanmışlardır. Takım pürüzlülüğünün büyük oranda sürtünme davranışını ile bağlantılı olduğu fakat yüzey pürüzlülüğünün 0,1 μm 'den küçük olduğu durumlarda takım pürüzlülüğünün kabın yüzey kalitesini etkilemediğini söylemişlerdir.



Şekil 1.20. Parlatılmamış kalıpla iki kademede çekilmiş mikro kaplar [72]

Vollertsen vd. [73] mekanik mikro derin çekme işlemindeki sürtünmeyi incelemişler ve buna ek olarak lazer ışık demetinin zımba olarak görev yaptığı yeni bir mekanik olmayan derin çekme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları 50 μm kalınlığındaki Al 99.5 sacının lazer derin çekme ile yapılabileceğini ve 4 mm çaptaki kalıp ile yapılan derin çekmenin umut veren sonuçlar ortaya çıkardığını göstermiştir.

Justinger ve Hirt [74] çapları 8 mm ile 1 mm arasında değişen zımbalarla değişen tane boyutlarında kalınlıkları 40 μm ve 300 μm arasında değişen CuZn37 ince metal levhalarla derin çekme yapmışlardır (Şekil 1.21). Tane boyutunun sac kalınlığına değişen oranlarında artan pürüzlülük kap geometrisini büyük ölçüde etkilerken, zımba kuvvetlerinde olağanüstü küçük değişimler gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile içinde farklı sayıda taneler içeren bir küp hacim modeli ile bulgularını açıklamaya çalışmışlardır. Önerdikleri model Taylor faktörlerini hesaba katarak hangi mikro şekillendirme işleminin tek tane yönelmesinden etkilendiğini belirlemek ve mikro derin çekmedeki zımba kuvvetine karşın mikro çekme veya mikro basmada akma gerilmesi belirlenmesi arasındaki farkı açıklamak için kullanılmıştır.



Şekil 1.21. Geometrik olarak küçültülerek CuZn37 sacdan çekilmiş mikro kaplar [74]

Irthia ve Green [75] çalışmalarında SUS 304 sacların sac çapı, proses boyutları arasında büyüklük farkı ve kauçuk tipinin mikro derin çekilebilirliğe etkisini deneysel ve sayısal olarak kauçuk kalıp kullanarak incelemişlerdir (Şekil 1.22). Çalışmaları ile daha az maliyetli ve yüksek kalitede mikro parça üretiminin mümkün olabileceğini söylemişlerdir.



Şekil 1.22. Irthia ve Green'in çalışmalarında kullandıkları (a) kesme kalıpları (b) farklı çaptaki saclar (c) farklı çaplardaki saclar (d) farklı proses ölçülerinde potlar [75]

Mikro derin çekme alanı üzerine çok sayıda çalışma ele alınarak incelenmiş ve ilgili çalışma örnekleri özetlenmiştir. Yapılan literatür incelemesinde mikro derin çekme alanında bir çok malzeme üzerinde deneysel ve sayısal olarak çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Zn-22Al alaşımının mikro derin çekilebilirliğinin incelenmesi adına yapılan çalışmalara ise literatürde rastlanmamıştır.

1.7. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Tane boyutunun küçültülmesinin süperplastik davranışın elde edildiği deformasyon hızını yükselttiği ve sıcaklığı düşürdüğü yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir [15,16]. Süperplastik malzemelerden Zn-22Al alaşımının ortalama tane boyutunun mikron altı değerlere indirilmesi, söz konusu alaşımın yüksek deformasyon hızlarında ve oda sıcaklığında bile süperplastik özellik göstermesine olanak sağlamaktadır [28–36]. Bu durum dubleks yapıdaki Zn-22Al alaşımını, süperplastik davranış ve deformasyon mekanizmalarının incelenmesi açısından model bir malzeme haline getirmektedir [16,17]. Tek eksenli yükleme koşulları altında süperplastik malzemelerin deformasyon mekanizmaları ve süperplastisite gereklilikleri bugüne kadar çok geniş bir şekilde incelenmiştir [13,15,17–26]. Tane boyutunun azaltılması, maksimum süperplastik uzama elde edilen deformasyon hızının [15] artmasına yol açar ve böylece nispeten yüksek deformasyon hızlarında süperplastik özellik gözlenir. Süperplastik şekillendirme işlemleri genel olarak düşük deformasyon hızlarında gerçekleştirildiği için üretim süresi uzamakta

ve bu da elektrik sarfiyatı ve seri üretim açısından bir takım mali yükler getirmektedir. Bu nedenle süperplastik şekillendirme işleminde yüksek deformasyon hızlarına ulaşılması mali açıdan kazanım elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Bununla birlikte, iki eksenli yükleme koşulları SPŞ'yi karakterize etmek için daha uygun bir yöntemdir ve süperplastik malzemelerin iki eksenli yükleme koşulları altında şekillendirilebilirliğine tane boyutunun etkileri ayrıntılı olarak incelenmemiştir. Buna ek olarak, tek eksenli ve çift eksenli yükleme koşulları altında süperplastik malzemelerin şekillendirilebilirliğini karşılaştıran özel bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmanın amaçlarından birincisi, tane boyutunun, tek eksenli ve iki eksenli yükleme koşulları altında süperplastik Zn-22Al alaşımının şekillendirilebilirliği üzerine etkilerini araştırmak ve bunların sonuçlarını karşılaştırmaktır.

Zn-22Al alaşımında elde edilen aşırı tane incelmesinin bu alaşımın mikro şekillendirilebilirlik davranışına olan etkisi mikro imalat yöntemlerinden biri olan mikro derin çekme yöntemi kullanılarak henüz deneysel ve sayısal olarak incelenmemiştir. Literatür araştırmaları mikro Zn-22Al alaşımı için bu kapsamda bir çalışmanın yapılmadığını göstermektedir. Bu nedenle bu çalışmanın ikinci amacı ise ultra ince taneli (UİT) hale getirilen Zn-22Al alaşımının oda sıcaklığındaki mikro derin çekilebilirliğini deneysel ve sayısal olarak incelemek, sonuçlarını karşılaştırmak ve Zn-22Al alaşımının mikro imalat için tercih edilebilir bir malzeme olup olamayacağını belirlemektir. Zn-22Al mikro derin çekilebilirliğinin araştırılması diğer süperplastik alaşımlar içinde yol gösterici olacaktır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında süperplastik Zn-22Al alaşımının oda sıcaklığındaki deformasyon davranışı çekme testi, minyatürize edilmiş Erichsen testi ve mikro derin çekme yöntemi kullanılarak deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmalar için Erichsen ve mikro derin çekme testlerinin katı modelleri oluşturulup analizler için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır.

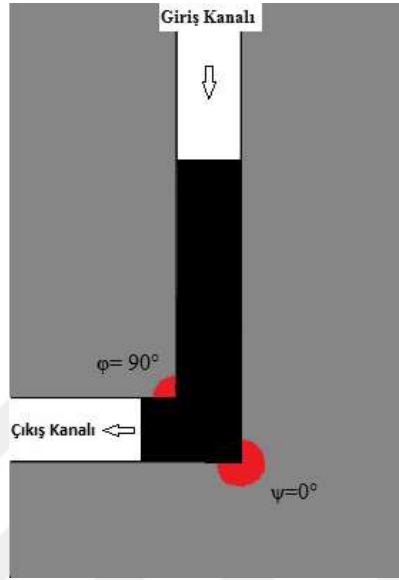
2.1. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalara, alaşımın döküm yoluyla elde edilmesiyle başlanmıştır. Bu tez çalışmasında deney malzemesi olarak Zn-22Al alaşımı kullanıldı. Zn-22Al alaşımı % 99,9 saflıkta çinko ve % 99,9 saflıkta alüminyum alaşımlarından kokil döküm yoluyla elde edildi. Döküm işleminden sonra alaşım 375 °C'de 24 saat boyunca homojenizasyon tavlamasına tabi tutuldu. Sonrasında EKAE işlemi gerçekleştirilmiştir. EKAE işlemi takiben ısıtma işlemleri, mikro yapı incelemeleri, çekme testleri, Erichsen testleri ve mikro derin çekme deneyleri gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki bölümlerde bu işlemlerin detayları verilmiştir.

2.1.1. Eş Kanallı Açısal Ekstrüzyon İşlemleri

EKAE işlemi için, yukarıda üretim süreci verilen Zn-22Al alaşımından 13x13x120 mm³ boyutlarında numuneler talaşlı imalat ile hazırlandı. Numuneler eş eksenli mikro yapıda çinko açısından zengin η fazı ve alüminyum açısından zengin α fazı elde etmek için 375 °C'de 48 saat boyunca ikinci kez homojenizasyona tabi tutuldu ve sonrasında alaşıma su verildi. EKAE işlemlerinde kalıp açısı $\phi = 90^\circ$ ve dış köşe yuvarlatma açısı $\psi = 0^\circ$ olan 13x13 mm² kanal kesitine sahip kalıp ile gerçekleştirildi (Şekil 2.1). EKAE işleminden önce kalıp 350 °C'ye kadar ısıtıldı. Numune kalıbın giriş kısmına yerleştirildi. Kalıp ve numune arasında ısıtma dengesi için 5 dakika bekletildi. EKAE işlemi 1 mm/s'lik ekstrüzyon hızında rota Bc (her pasodan sonra uzunlamasına yön boyunca 90° çevirme) takip edilerek 350 °C 'de 4 paso gerçekleştirildi. Sıcak EKAE işlemi takiben oda

sıcaklığında rota Bc takip edilerek 4 paso gerçekleştirildi. 4 paso sıcak EKAE ile aşırı plastik deformasyon destekli dinamik yeniden kristalleşme ile ince taneli mikro yapı ve sonrasında oda sıcaklığında 4 paso soğuk EKAE ile mikron altı seviyelerde tane boyutuna sahip mikro yapı elde etmek amaçlandı.

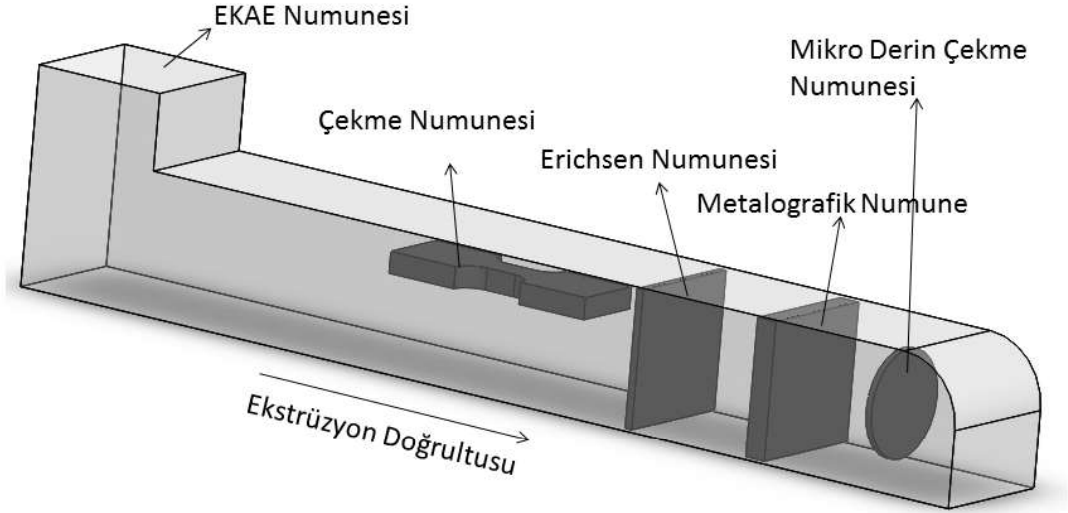


Şekil 2.1. Şematik EKAE kalıbı ve geometrik parametreleri

EKAE uygulanmış numuneler tane boyutunun değişiminin izlenmesi amacıyla aynı sıcaklıkta farklı sürelerde tavlamalara tabi tutuldu. Isıl işlem sıcaklığına karar verilirken Senkov ve Myshlyaev'in [76] çalışması referans alındı. Numuneler hassas sıcaklık kontrolüne sahip bir fırında EKAE işlemi sonrasında 250 °C'de 150 dakika, 1 gün, 6 gün ve 8 gün bekletildi. Tavlama sonrası bütün numuneler musluk suyuna daldırıldı ve ısıl işlem süreci bitirildi.

Aşırı plastik deformasyona uğratılmış Zn-22Al alaşımında, 480 °C'lik düşük ergime noktasına bağlı olarak oda sıcaklığında depolanması sırasında kendi kendine tavlama yoluyla sınırlı tane büyümesinin oluşabileceği bilinmektedir [77,78]. Bu nedenle, kendiliğinden tavlamanın etkilerini en aza indirmek için EKAE ve EKAE sonrası tavlama işlemlerinden hemen sonra, mümkün olan en kısa sürede mikro yapı incelemeleri, çekme testleri ve Erichsen testleri ve mikro derin çekme deneyleri yapıldı. Kütleli formdaki Zn-22Al alaşımının EKAE öncesi ve uygulanan işlemler sonrasında içyapıda ortaya çıkan değişimler EKAE numunesindeki konumları Şekil 2.2'de verilen metalografi numuneleri kullanılarak incelendi. Metalografi numuneleri ekstrüzyon doğrultusuna dik

kesitten tel elektro-erezyon (wire-EDM) ile kesilerek çıkarıldı. Numunelerin yüzeyleri sırasıyla 400, 800, 1000, 2000 numaralı zımparalar kullanılarak zımparalandı. Bütün örnekler çuha yardımıyla 0,3 µm büyüklüğünde alümina ile parlatıldı.



Şekil 2.2. EKAЕ işlemi uygulanmış kütsel numune içerisinde çekme, Erichsen, metalografi numunesi ve mikro derin çekme numunelerinin konumu

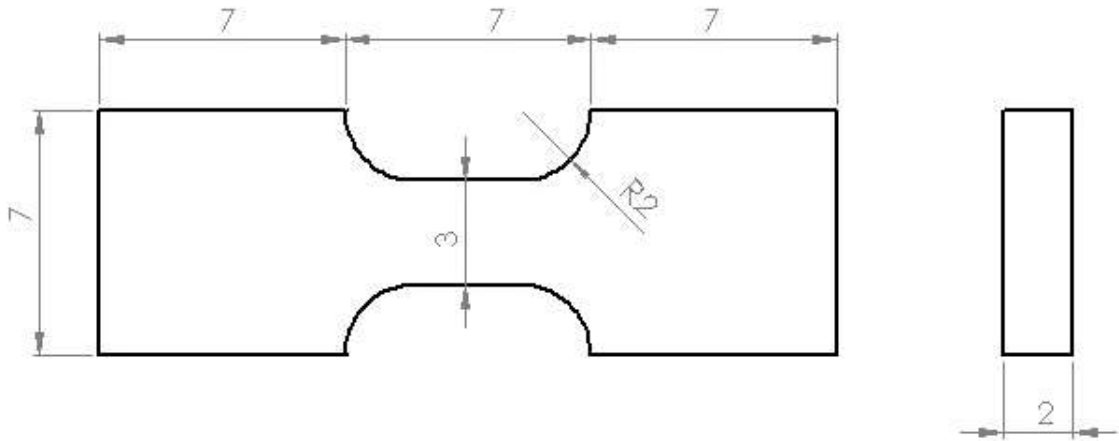
İki adımlı EKAЕ işleminden sonra numunelerin içyapısı, geçirimli elektron mikroskobu (transmission electron mikroskop-TEM) kullanılarak incelendi. TEM incelemelerinde 200 kV'ta çalıştırılan FEI Tecnai F20 model bir mikroskop kullanıldı.

EKAЕ sonrası ısıt işlem uygulanmış numunelerin mikro yapıları SEM kullanılarak incelendi. Numuneler SEM incelemesinden önce 5 gram CrO₃, 0,25 gram Na₂SO₄ ve 100 mililitre H₂O içeren solüsyon içerisinde dağlandı. Çekilen içyapı resimlerinden faydalanılarak EKAЕ sonrası ısıt işlem uygulanmış numunelerin ortalama tane boyutu değerleri lineer kesiştirme yöntemi ile belirlendi.

2.1.2. Çekme Deneyleri

Zn-22Al alaşımının EKAЕ işlemleri ve EKAЕ işlemleri sonrası 250 °C'de farklı sürelerde uygulanan ısıt işlemler sonrasında sahip olduğu mekanik özellikler oda sıcaklığında çekme deneyleri ile belirlendi. Çekme deneyleri Şekil 2.2'de konumları ve Şekil 2.3'te boyutları verilen numuneler kullanılarak gerçekleştirildi. Zn-22Al alaşımının

mekanik özellikleri ekstrüzyon doğrultusuna dik kesitten tel elektro-erezyon (wire-EDM) ile kesilerek EKAE doğrultusu ile aynı doğrultuda çıkarılan örnekler ile belirlendi. Çekme deneyleri oda sıcaklığında 1×10^{-1} ve $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ aralığında değişen deformasyon hızlarında Instron 3382 üniversal çekme-basma cihazı ile gerçekleştirildi. Cihaza bağlı video tipi bir uzama ölçer (ekstansiyometre) yardımıyla çekme örneklerinde meydana gelen uzamalar belirlendi. Deneyler sırasında uygulanan yük ve meydana gelen uzama değerleri bir bilgisayar yardımıyla kaydedilerek, gerilme-uzama diyagramları çizdirildi. Çekme deneyleri her bir durum için en az üç defa tekrarlandı. Alaşımın akma ve çekme dayanımları ile kopma uzaması değerleri bu ölçümlerin ortalaması alınarak belirlendi. Kendiliğinden tavlamanın etkilerini en aza indirmek için EKAE ve EKAE sonrası tavlama işlemlerinden hemen sonra, mümkün olan en kısa sürede çekme testleri gerçekleştirildi.

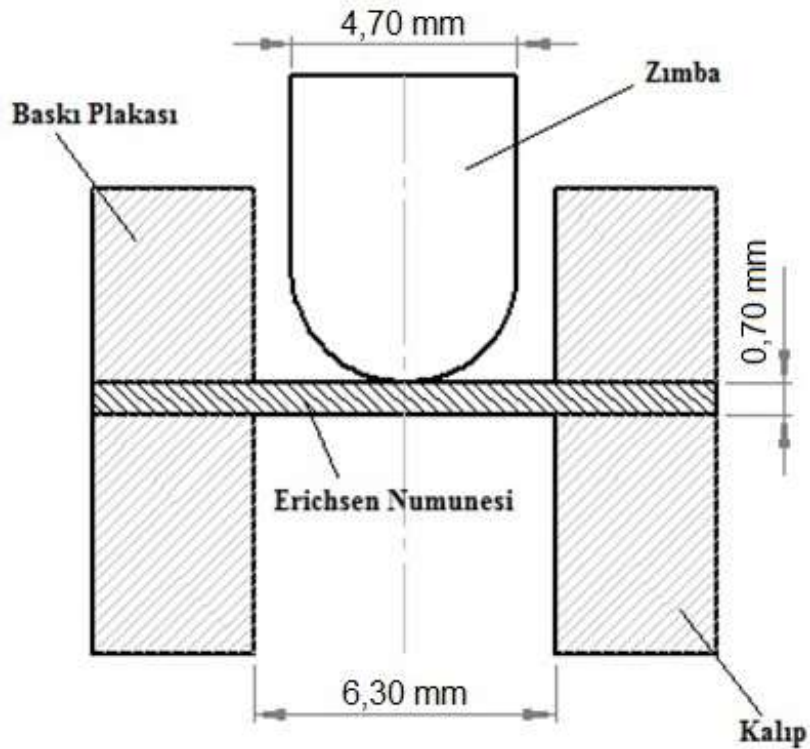


Şekil 2.3. Çekme numunesinin boyutları

2.1.3. Şekillendirilebilirlik (Erichsen) Testleri

EKAE uygulanmış ve EKAE sonrası 250 °C'de farklı sürelerde tavlamalara tabi tutulmuş Zn-22Al alaşımının şekillendirilebilirliği Erichsen testleri ile belirlendi. Erichsen testleri Instron 3382 üniversal çekme-basma cihazına bağlanan Erichsen kalıbı kullanılarak yapıldı. TS EN ISO 20482 standardında belirtilen kalıp ölçüleri 1/4 ölçeğinde küçültülerek Şekil 2.4'te ölçüleri ve ana boyutları verilen kalıp sistemi elde edildi. Erichsen testleri Şekil 2.2'de konumları verilen numuneler kullanılarak gerçekleştirildi. EKAE numunelerinden 13mm x 13mm x 0,7 mm boyutlarında örnekler tel elektro-erezyon ile

kesildi. Kesilen numunelerin yüzeyleri sırasıyla 400, 800, 1000, 2000 numaralı zımparalarla zımparalandı. Çuha yardımıyla bütün örnekler 0,3 µm büyüklüğünde alümina ile parlatıldı. Bu sayede yüzeydeki çizikler giderilerek çatlak başlangıcı olabilecek kusurlar giderildi. Şekillendirilebilirlik testleri oda sıcaklığında, yağlayıcı kullanmadan $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızlarında Instron 3382 üniversal çekme-basma cihazı ile gerçekleştirildi. Deneyler sırasında ortaya çıkan kuvvet ve meydana gelen çökme değerleri bir bilgisayar yardımıyla kaydedilerek, kuvvet-yer değiştirme diyagramları çizdirildi. Diyagramlarda çatlağın başladığı çökme değeri sınır tepe yüksekliği (STY) olarak adlandırıldı. Testler her bir durum için en az üç defa tekrarlandı. Numunelerden elde edilen en yüksek kuvvet ve STY değerleri bu ölçümlerin ortalaması alınarak belirlendi. Deney sonrasında örneklerin yüzey özellikleri ve deformasyon karakteristikleri taramalı elektron mikroskobu ile incelendi. Kendiliğinden tavlamanın etkilerini en aza indirmek için EKAE ve EKAE sonrası tavlama işlemlerinden hemen sonra, mümkün olan en kısa sürede Erichsen testleri gerçekleştirildi.



Şekil 2.4. Deneylerde kullanılan Erichsen kalıp sisteminin şematik gösterimi

2.1.4. Mikro Derin Çekme Deneyleri

Zn-22Al alaşımının iki adımlı EKAE işleminden sonra mikro şekillendirilebilirliği mikro derin çekme yöntemiyle incelendi. Mikro derin çekme deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için şekillendirme kalıplarının tasarımında; kalıp malzemesinin seçimi, kalıp boyutlarının belirlenmesi, takımların teknik resimlerinin çizimi iş adımları takip edilerek sonrasında imalat işlemine geçildi. İşlenebilirlik, dayanım ve maliyet göz önünde bulundurularak 1040 kalıp çeliğinin kullanılması kararlaştırıldı. Kalıp malzemelerinin temininden sonra imalat resimlerinin oluşturulabilmesi için, kalıp ölçülerinin belirlenmesi aşamasına geçildi. Her bir derin çekme oranı için kalıp ölçüleri ayrı ayrı belirlendi (Tablo 1). Kalıp, hareket edebilir üst ve sabit alt parça olmak üzere iki ana parça grubundan oluşturuldu (Şekil 2.5). Hareket edebilir üst parça grubu dışı kalıp, üst taban ve üst çeneden oluşmakta ve çekme cihazının hareketli çenesine bağlanmaktadır. Sabit alt parça grubu zımba, pot, pimler, alt taban ve yay grubundan oluşturuldu ve her iki ana parça grubu Şekil 2.6'da gösterildi. Mikro derin çekme deney düzeneğine ait ayrıntılı teknik resimler Ekler bölümünde verildi. Kalıpta kullanılan yay farklı denemelerden sonra 33 N/mm rijitliğinde seçildi.

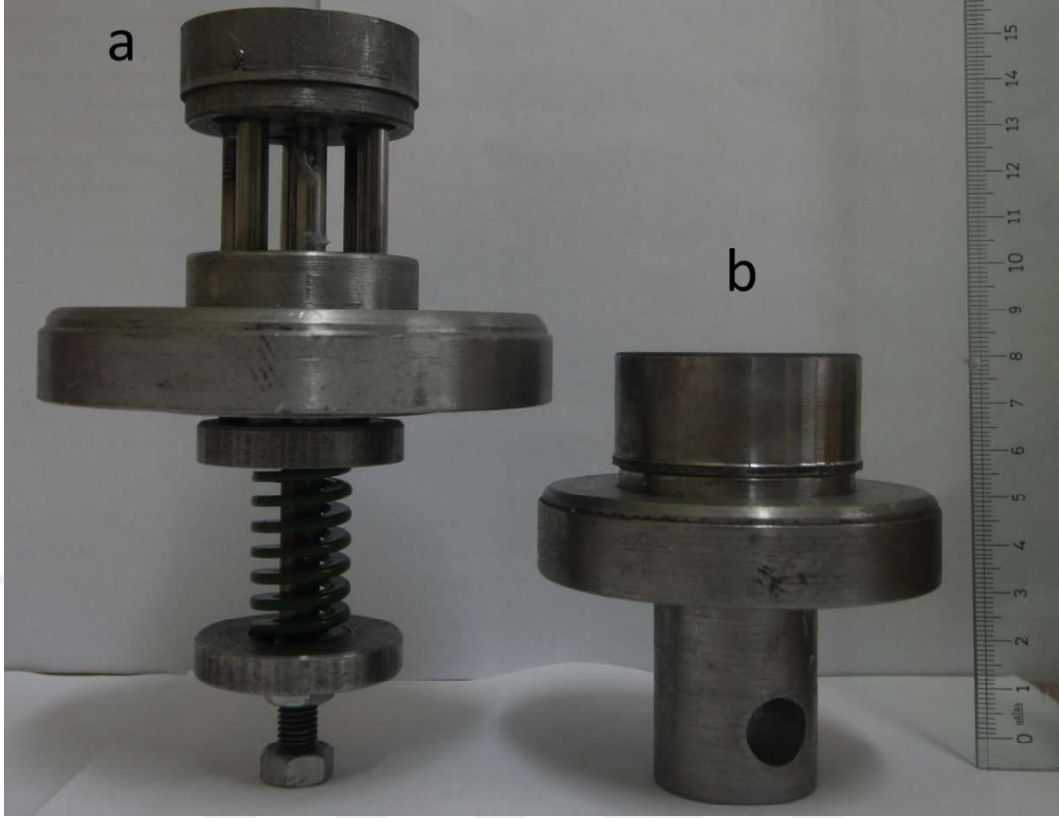
Mikro derin çekme işleminde yağlayıcı seçimi önemli bir parametredir. Mikro derin çekme deneylerinde kullanılacak yağlayıcı seçimi için $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında 1,66 derin çekme oranında ve 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm sac kalınlıklarında stearin, polietilen film ve zeytinyağı yağlayıcı olarak kullanılarak mikro derin çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Polietilen film ve zeytinyağının yağlayıcı olarak kullanıldığı deneylerde başarılı sonuç elde edilemezken stearinin yağlayıcı olarak kullanıldığı deneylerde derin çekme işlemi başarıyla tamamlanarak yırtılma olmadan derin çekilmiş kaplar elde edilmiştir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında yapılan mikro derin çekme deneylerinde yağlayıcı olarak stearin kullanılmıştır.

Derin çekme oranı; derin çekme işleminde yırtılma olmadan çekilebilecek sac çapının zımba çapına oranı olarak ifade edilir. Bu tez çalışması kapsamında Şekil 2.2'de numune alma konumları verilen numuneler kullanılarak 1,66, 1,84, 2,0 ve 2,25 derin çekme oranlarında mikro derin çekme deneyleri başarıyla tamamlandı. (Tablo 1). Mikro derin çekme numuneleri EKAE numunelerinden 0,2 mm, 0,4 mm ve 0,6 mm kalınlığında tel elektro-erezyon ile kesildi. Bunu takiben 8, 9, 9,2 ve 10 mm çaplarında numuneler, Şekil 2.7'de verilen kesme kalıbı kullanılarak 0,2 mm, 0,4 mm ve 0,6 mm kalınlığında ve

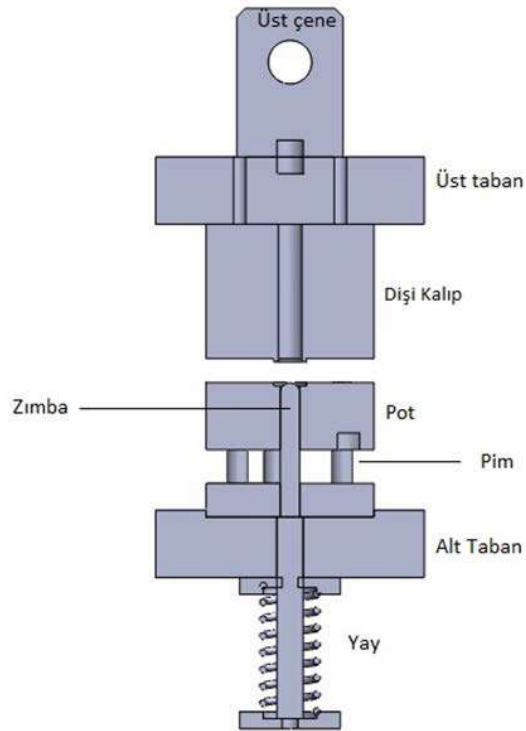
13x13 mm² boyutlarındaki numunelerden elde edildi. Kesilen numunelerin yüzeyleri elmas ege ile zımparalandı. Mikro derin çekme deneyleri oda sıcaklığında, $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında Instron 3382 üniversal çekme-basma cihazında yukarıda imalat süreci verilen ve Şekil 2.5'te resmi gösterilen kalıpla gerçekleştirildi. Testler her bir durum için en az üç defa tekrarlandı. Deneyler sırasında ortaya çıkan kuvvet ve meydana gelen yer değiştirme değerleri bir bilgisayar yardımıyla kaydedilerek, kuvvet-yer değiştirme diyagramları çizdirildi. Numunelerden elde edilen en yüksek kuvvet değerleri bu ölçümlerin ortalaması alınarak belirlendi. Deney sonrasında örneklerin kesitlerinde meydana gelen kalınlık değişimleri ve kap yükseklikleri taramalı elektron mikroskobu yardımıyla incelendi.

Tablo 1. Mikro derin çekme işlemi parametreleri ve kalıp ölçüleri

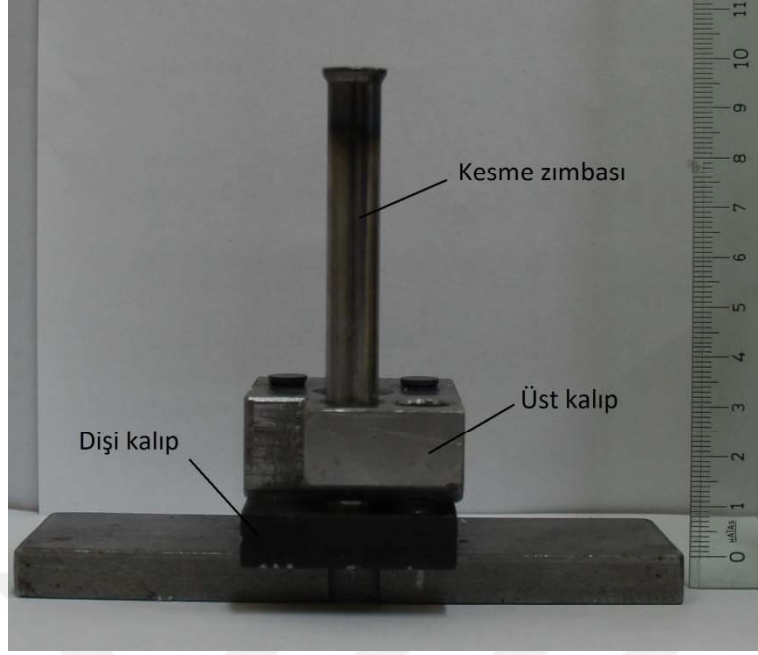
Numune Kalınlığı (mm)	Numune Çapı (mm)	Zimba Çapı (mm)	Çekme Oranı (mm)	Dişi Kalıp Çapı (mm)	Dişi Kalıp Omuz Yarı Çapı (mm)
0,2	10	6	1,66	6,4	1
0,4	10	6	1,66	6,8	1
0,6	10	6	1,66	7,2	1
0,2	9,2	5	1,84	5,4	1
0,4	9,2	5	1,84	5,8	1
0,6	9,2	5	1,84	6,2	1
0,2	8	4	2	4,4	1
0,4	8	4	2	4,8	1
0,6	8	4	2	5,2	1
0,2	9	4	2,25	4,4	1
0,4	9	4	2,25	4,8	1
0,6	9	4	2,25	5,2	1



Şekil 2.5. Mikro derin çekme deney düzeneğinin a) sabit alt ve b) hareket edebilir üst parça grupları

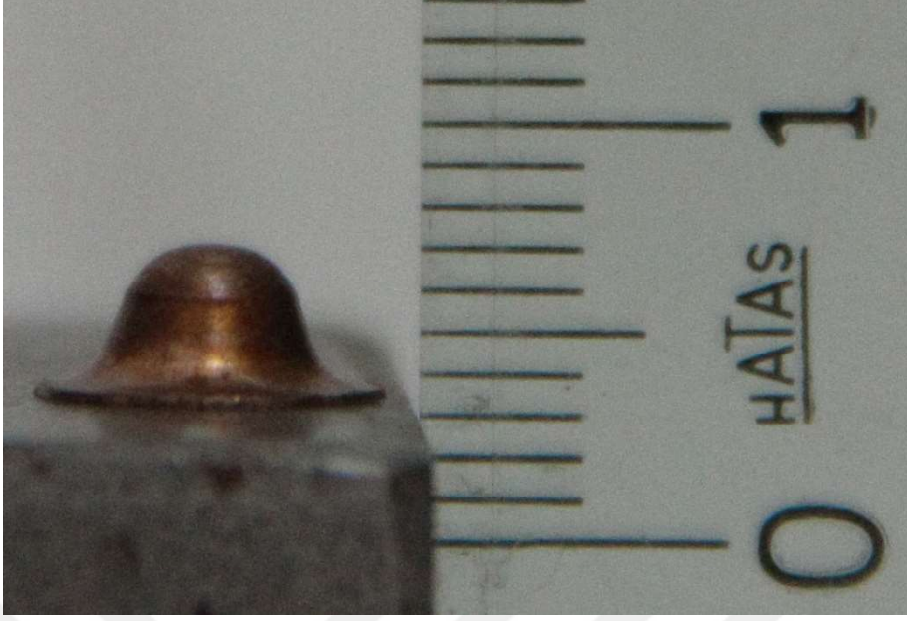


Şekil 2.6. Mikro derin çekme deney düzeneğinin kesit görünümü



Şekil 2.7. Kesme kalıbı

Bu tez çalışmasında imalatı gerçekleştirilen mikro derin çekme deney düzeneğinin düzgün çalışıp güvenilir sonuçlar verdiğini teyit etmek amacıyla bu deney düzeneği ile ön çalışmalar gerçekleştirilerek literatürde mevcut bulunan bir çalışmayla kıyaslama yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda Molotnikov vd.'nin [8] çalışması referans kabul edilmiştir. Molotnikov vd. çalışmalarında sac kalınlığının (0,2 mm ve 0,4 mm) mikro derin çekme işlemine etkisini iri taneli (saf bakır) ve ultra-ince taneli bakır (EKAE uygulanmış) saclar kullanarak incelemişlerdir. Çalışmalarında 0,2 mm kalınlıklı saf bakır 2,1 derin çekme oranında başarıyla derin çekmişlerdir. Literatürde mevcut bulunan çalışmadan daha iyi sonuç elde etmek amacıyla, 2,4 derin çekme oranının denenmesi kararlaştırılıp bu amaçla 0,2 kalınlıklı saf bakır sac temin edilmiş ve kesme kalıbı yardımıyla 9,6 mm çapında kesilmiştir. 9,6 mm çaplı ve 0,2 mm kalınlıklı bakır sac 4 mm çaplı zımba kullanılarak $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında derin çekme işlemine tabi tutulmuştur. 0,2 kalınlıklı saf bakır sac 2,4 çekme oranında başarıyla mikro derin çekilmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. 2,4 derin çekme oranında çekilmiş bakır sac

2.2. Sayısal Çalışmalar

Tez çalışmasının bu bölümünde süperplastik Zn-22Al alaşımının oda sıcaklığındaki deformasyon davranışının Erichsen testi ve şekillendirilebilirliğin ise mikro derin çekme yöntemi ile sayısal olarak incelenmesi için yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Erichsen testi ve mikro derin çekme deneylerinin sayısal olarak modellenmesinde LS-Dyna sonlu elemanlar yazılımı ve katı modelleme yazılımları Solidworks ve Hypermesh kullanılmıştır. Süperplastik malzemelerin deformasyon davranışlarının sayısal olarak modellenmesine imkan sağlayan malzeme modeli LS- DYNA’da bulunan MAT 64 “Strain Rate Sensitive Power Law” Malzeme modelidir [49]. Bu şekilde herhangi bir kabul ve yaklaşımdan bağımsız olarak malzemenin özellikleri deneysel veriler kullanılarak fiziksel davranışına benzer bir şekilde modellenebilmektedir [79].

2.2.1. Şekillendirilebilirlik (Erichsen) Analizleri

Erichsen deneyleri Ls-Dyna sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak 3-boyutlu olarak modellendi. Sonlu elemanlar analizi yapılırken sırasıyla sonlu elemanlar ağının oluşturulması, malzeme özelliklerinin girilmesi, sınır şartlarının belirlenmesi, çözümün yaptırılması ve sonuçların değerlendirilmesi yolları izlendi. Sonlu elemanlar ağının

oluşturulmasında Hypermesh (Altair Engineering, Troy Michigan, ABD) yazılımı kullanılmıştır. Solidworks (Dassault Systemes, Fransa) 3 boyutlu katı modelleme programında Erichsen kalıp bileşenleri “yüzey elemanı” olarak çizildi ve “IGES_igs” formatında kaydedildi. Kalıp bileşenleri ayrı ayrı Hypermesh programına aktarılarak sonlu elemanlar ağ örgüsü oluşturuldu. Sacın kalınlığı diğer boyutlarına göre çok küçük olduğu için kabuk elemanlarla modellendi. Sac için tam integrasyonlu üçgen ve dörtgen kabuk elemanlar (Element Type 16) kullanıldı. Modelleri oluşturan kalıp, zımba ve baskı plakası için kalınlık boyunca 3 integrasyon noktasına sahip Belytschko-Tsay (Element Type 2) kabuk eleman kullanıldı.

Analizler dört çekirdekli, 2.66 GHz işlemci, 4 GB ön bellek, 1 GB ekran kartına sahip bir kişisel bilgisayar ve açık adım (explicit) çözüm tekniği kullanılarak gerçekleştirildi. Modeldeki sac, kalıp, zımba ve baskı plakası için kullanılan eleman sayı ve tipleri Tablo 2’de gösterildi.

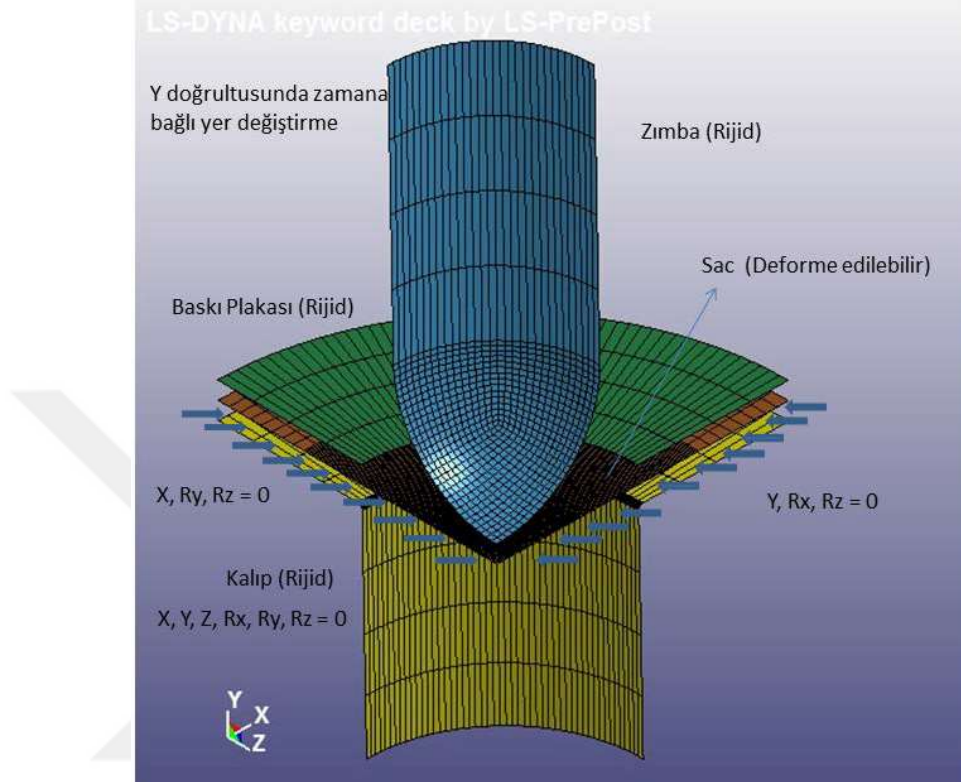
Tablo 2. Erichsen testinin sonlu elemanlar modelinde kullanılan eleman sayıları

Parça Adı	Sac	Kalıp	Zımba	Baskı Plakası
Eleman Sayısı	3058	1250	1400	250
Eleman Tipi	Kabuk (Element Type 2)	Kabuk (Element Type 2)	Kabuk (Element Type 2)	Kabuk (Element Type 2)

Zn-22Al alaşımı için sonlu eleman analizlerinde, deformasyon duyarlılık üssünü esas alan MAT64 malzeme modeli kullanıldı. Sayısal analizlerde kullanılan malzeme modeli parametreleri 1×10^{-1} , 1×10^{-2} , $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan çekme deneylerinden elde edildi.

Sacın kenar bölgesindeki elemanların hareket ve yer değiştirme olmayacak şekilde bütün yönlerde serbestlik dereceleri sınırlandırıldı. Bununla birlikte sacın x yönünde ötelenmesi, y ve z yönlerinde dönmesi sınırlandırıldı. Aynı zamanda sacın y yönünde ötelenmesi, x ve z yönlerinde dönmesi sınırlandırıldı. Analizler gerçekleştirilirken baskı plakası, zımba ve kalıp rijit olarak modellendi. Zımba ve baskı plakasının y eksenine doğrultusu dışındaki bütün serbestlik dereceleri sınırlandırıldı. Kalıbın ise bütün yönlerde serbestlik dereceleri sınırlandırıldı. Erichsen deneyinin sonlu elemanlar modeli problemin

eksenel simetrik olması nedeniyle çeyrek model olarak oluşturuldu. Modellenen problemin tüm sınır şartları detaylı olarak Şekil 2.9’da gösterildi.



Şekil 2.9. Erichsen testinin sonlu elemanlar modeli ve sınır şartları

Sonlu eleman analizlerinde kullanılan bütün modellerde sac-sac tutucu, sac-kalıp, sac-zimba temas bölgelerindeki sürtünme katsayısı ön analizlerden sonra 0,05, 0,05 ve 0,2 olarak belirlendi. Bu çalışmada bütün temas yüzeyleri için metal şekillendirme işlemlerinde temas ve sürtünme açısından başarılı sonuçlar veren LS-DYNA temas kartlarından “yüzeyden yüzeye şekillendirme” kartı kullanıldı.

2.2.2. Mikro Derin Çekme Analizleri

Mikro derin çekme deneylerinin 3-boyutlu sayısal modellenmesi için Ls-Dyna sonlu elemanlar programı kullanıldı. Sonlu elemanlar analizinden önce elemanların oluşturulmasında Hypermesh (Altair Engineering, Troy Michigan, ABD) yazılımı kullanıldı. 3 boyutlu katı modelleme programı olan Solidworks (Dassault Systemes, Fransa) kullanılarak mikro derin çekme kalıp bileşenleri yüzey olarak çizildi ve

“IGES_.igs” formatında kaydedildi. Sonlu elemanlar ağ örgüsü oluşturmak için kalıp bileşenleri ayrı ayrı Hypermesh programına aktarıldı. Sacın kalınlığı diğer boyutlarına göre çok küçük olduğu için kabuk elemanlar kullanılması kararlaştırıldı. Sacın sonlu eleman modelinde tam integrasyonlu üçgen ve dörtgen kabuk elemanlar (Element Type 16) kullanıldı. Kalıp, zımba ve baskı plakasının sonlu eleman modelinde kalınlık boyunca 3 integrasyon noktasına sahip Belytschko-Tsay (Element Type 2) kabuk eleman kullanıldı.

Analizler açık adım (explicit) çözüm tekniği kullanılarak dört çekirdekli, 2.66 GHz işlemci, 4 GB ön bellek, 1 GB ekran kartına sahip bir kişisel bilgisayar ile gerçekleştirildi. Tez çalışması kapsamında 0,2 mm, 0,4 mm ve 0,6 mm kalınlığında, 8, 9, 9,2 ve 10 mm çaplarında numuneler ve 4 mm, 5 mm ve 6 mm çaplarında zımbalar kullanılarak 1,66, 1,84, 2,0 ve 2,25 derin çekme oranlarında mikro derin çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Mikro derin çekme deneyleri numune kalınlığı, zımba çapı ve çekme oranı göz önüne alınarak sayısal olarak modellendi. Bu kapsamda 10 farklı mikro derin çekme modeli oluşturuldu. Modeller oluşturulurken farklı çap ve genişlikteki sac, zımba, kalıp ve baskı plakası bileşenleri farklı modellerde aynı eleman sayısında modellendi. Modellerdeki eleman sac, kalıp, zımba ve baskı plakası için kullanılan eleman sayıları Tablo 3’te gösterildi.

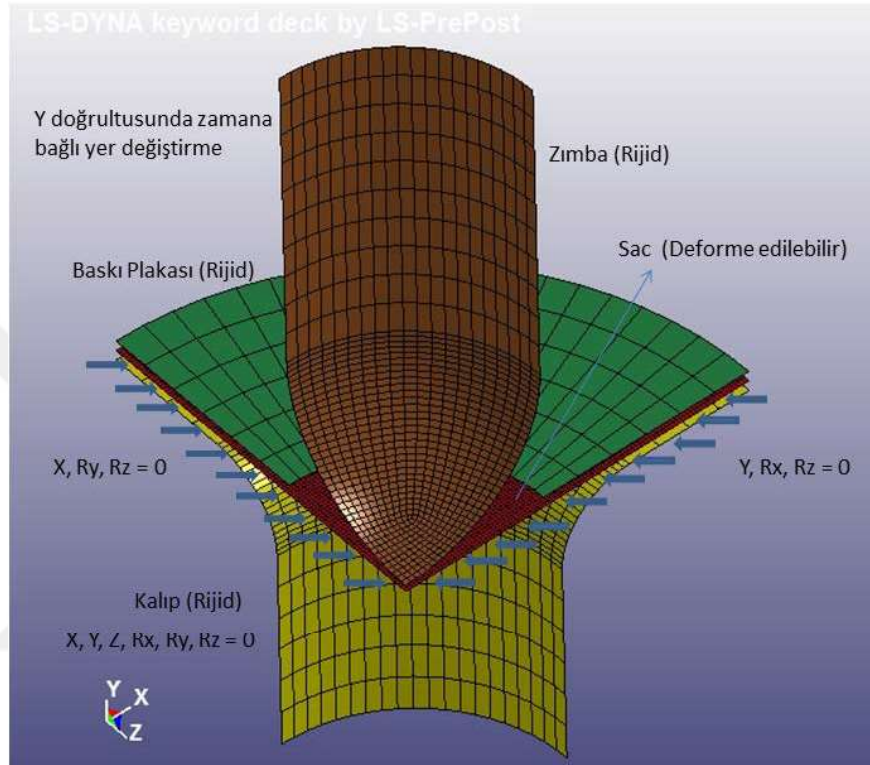
Tablo 3. Mikro derin çekme deneyinin sonlu elemanlar modelinde kullanılan eleman sayıları

Parça Adı	Sac	Kalıp	Zımba	Baskı Plakası
Eleman Sayısı	7500	600	900	120
Eleman Tipi	Kabuk (Element Type 16)	Kabuk (Element Type 2)	Kabuk (Element Type 2)	Kabuk (Element Type 2)

Mikro derin çekme deneylerinin sonlu eleman analizlerinde, deformasyon duyarlılık üssünü dikkate alan MAT64 malzeme modeli kullanıldı. Sayısal analizlerde kullanılan malzeme modeli parametreleri $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan çekme deneylerinden elde edildi.

Mikro derin çekme deneylerinin sayısal olarak analiz edilebilmesi için modellerde sacın y ve z yönlerinde dönmesi, x yönünde ötelenmesi sınırlandırıldı. Bununla birlikte sacın x ve z yönlerinde dönmesi, y yönünde ötelenmesi sınırlandırıldı. Sonlu eleman analizlerinde kalıp, baskı plakası ve zımba rijit olarak modellendi. Kalıbın bütün yönlerde

serbestlik dereceleri sınırlandırıldı. Baskı plakası ve zımbanın ise y eksenine doğrultusunda bütün serbestlik dereceleri sınırlandırıldı. Mikro derin çekme deneyinin sonlu elemanlar modeli çeyrek model olarak oluşturulmuştur. Problemin sınır şartları Şekil 2.10’da detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Mikro derin çekme deneyinin sonlu elemanlar modeli ve sınır şartları

Bu çalışmada Erichsen testlerinin sayısal sayısal modellenmesinde olduğu gibi mikro derin çekme deneylerinin sayısal modellenmesinde LS-DYNA temas kartlarından “yüzeyden yüzeye şekillendirme” kartı kullanıldı. Mikro derin çekme deneylerinin sonlu eleman analizlerinde kullanılan bütün modellerde sac-sac tutucu, sac-kalıp, sac-zimba temas bölgelerindeki sürtünme katsayısı ön analizlerden sonra 0,05, 0,05 ve 0,2 olarak belirlendi.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Tez çalışmasının bu bölümünde, öncelikle oda sıcaklığında gerçekleştirilen çekme deneylerinden, Erichsen testlerinden ve mikro derin çekme deneylerinden elde edilen bulgular verilerek irdelenmeye çalışılmıştır. Daha sonra sayısal olarak modellenen Erichsen testleri ve mikro derin çekme deneylerinin bulguları irdelenmiştir.

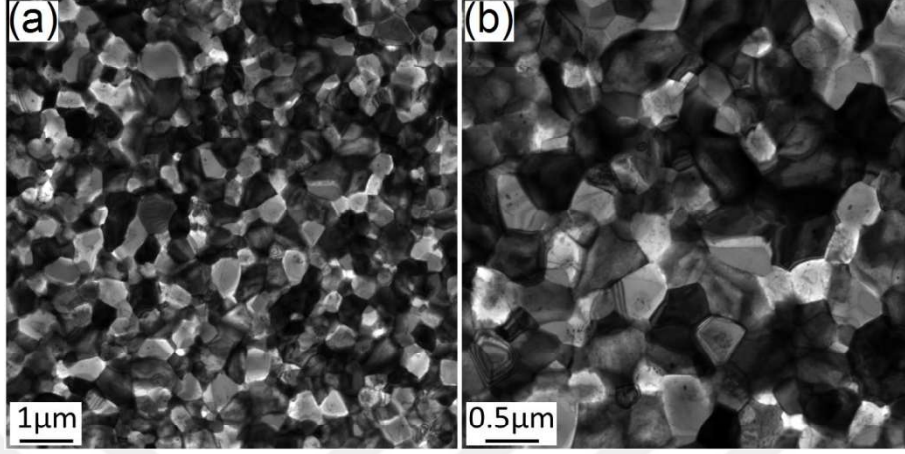
3.1. Deneysel Bulgular

Bu tez çalışmasında iki adımlı (EKAE) ve EKAE sonrası ısıtma işlemler, mikron altı tane boyutlarından mikron tane boyutlarına kadar değişen boyutlarda mikro yapı elde etmek için Zn-22Al alaşımına uygulanmıştır. Alaşıma EKAE uygulandıktan sonra 200 nm ortalama tane boyutu elde edilmiştir. Tane boyutu 250 °C’de farklı zaman periyotlarında uygulanan tavlamalardan sonra 2,60 μm ‘e kadar çıkmıştır. Süperplastik Zn-22Al alaşımının oda sıcaklığında deformasyon davranışı çekme testi ve Erichsen testi ile deneysel olarak incelenmiştir Artan tane boyutuyla tek eksenli yükleme altında elde edilen maksimum uzama ve iki eksenli yükleme altında elde edilen sınır tepe yüksekliği (STY) değerleri azalmıştır. Alaşımın oda sıcaklığında mikro şekillendirilebilirliği mikro derin çekme yöntemiyle iki adımlı EKAE sonrası deneysel incelenmiştir. Alaşım 1,66, 1,84, 2 ve 2,25 sınır çekme oranlarında başarıyla mikro derin çekilmiştir.

3.1.1. İç Yapı ve Tane Boyutu

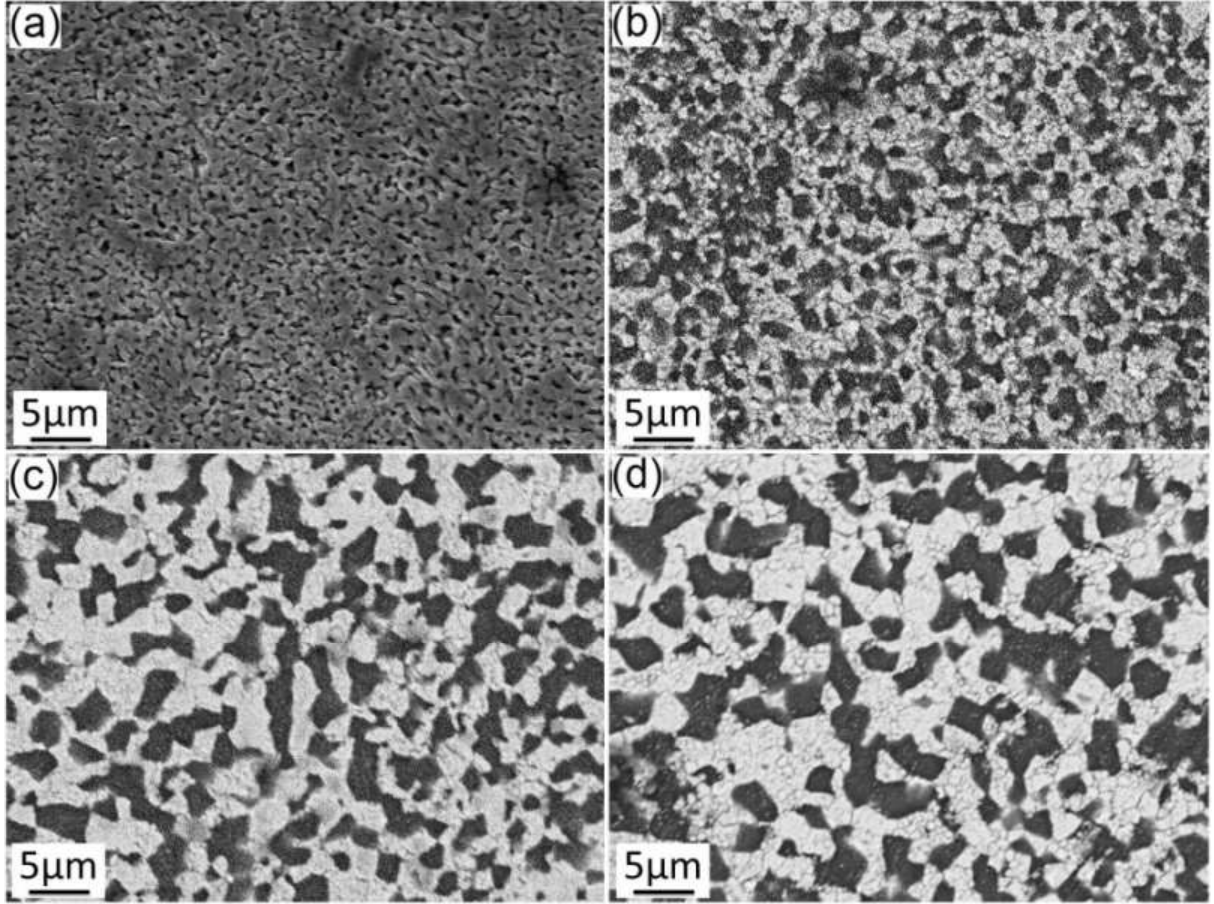
Deneysel olarak kullanılan Zn-22Al alaşımının iki adımlı EKAE işlemi uygulanmış durumdaki iç yapısına ait TEM resmi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Verilen iç yapı resimlerine bakıldığında EKAE işlemi sonucunda eş eksenli mikro yapıda çinko açısından zengin η fazı (koyu renkli) ve alüminyum açısından zengin α fazı (açık renkli) içeren çok ince tanelerden oluşan bir yapının meydana geldiği görülmektedir. Ek olarak her iki faz da mikro yapı boyunca homojen bir şekilde dağılmıştır. Zn-22Al alaşımının iki adımlı EKAE işlemi uygulanmış durumdaki ortalama tane boyutu 200 nm olarak lineer kesiştirme

yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen tane boyutu Zn-22Al alaşımı için EKAE yöntemi kullanılarak elde edilen en küçük ortalama tane boyutudur [17].



Şekil 3.1. Zn-22Al alaşımının EKAE sonrası mikro yapısını gösteren TEM resimleri (a) düşük büyütme (b) yüksek büyütme

Zn-22Al alaşımına 250 °C’de 150 dakika, 1 gün, 6 gün, 8 gün EKAE işlemini takiben uygulanan tavlamalardan sonra oluşan iç yapıya ait SEM resimleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Tavlama sonucunda nano boyutta ve nano boyuttan başlayarak tane irileşmesi ile mikro boyutta taneler içeren Zn-22Al numuneler elde edilmiştir. Tavlama numunelerinin ortalama tane boyutu lineer kesiştirme yöntemiyle belirlenmiştir. 250 °C’de 150 dakika uygulanan tavlama sonrası elde edilen ortalama tane boyutu 750 nm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.2 (a)). Çalışmanın bundan sonraki kısmında EKAE işlemi uygulanmış ve EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 150 dakika tavlama uygulanan numuneler “mikron altı tane boyutlu numuneler” olarak isimlendirileceklerdir. 250 °C’de uygulanan tavlama süresinin 1 gün ve 6 güne çıkartılması daha fazla tane büyümesine yol açmıştır. 1 gün için 1,8 μm ve 6 gün için 2,4 μm ortalama tane boyutuna sahip mikro yapılar elde edilmiştir (Şekil 3.2 (b-c)). Bununla birlikte, tavlama süresinin 8 güne çıkarılmasının tane boyutu üzerinde etkisinin az olduğu görüldü ve 8 gün için ortalama tane boyutu 2,6 μm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.2 (d)). 250 °C’de 1gün, 6 gün ve 8 gün uygulanan tavlamalarda belirlenen tane boyutları 1 μm’den büyük olduğu için bu numuneler çalışmanın bundan sonraki kısımlarında “mikron tane boyutlu numuneler” olarak isimlendirilecektir.



Şekil 3.2. EKA sonrası tavllanmış numunelerin mikroyapılarını gösteren SEM resimleri (a) 150 dakika için, (b) 1 gün için, (c) 6 gün için, (d) 8 gün için

Zn-22Al alaşımının tane büyüme mekanizması Senkov ve Myshlyaev [76] tarafından çalışılmıştır. Çalışmalarında alaşımı farklı sıcaklıklarda farklı zaman periyotlarında tavlama yapmışlardır. Bunun sonucunda statik tavlama boyunca tane büyüme kinetiğini açıklayan ampirik bir formül önermişlerdir:

$$d_o^5 - d_t^5 = Bt \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

Bu formülde: d_0 ilk tane boyutunu, d_t tavlama uygulanan süre sonunda elde edilen tane boyutunu, t saniye cinsinden tavlama süresini, R gaz sabitini, T ise Kelvin cinsinden tavlama sıcaklığını göstermektedir. B sabitinin değeri $3,5 \times 10^4$ 'tür. Formülde yer alan Q değeri aktivasyon enerjisi olup değeri 83000 J/mol 'dür [76]. Kendi çalışmamızdaki sıcaklık ve tavlama sürelerini göz önüne alarak bağıntıdaki d_t değerini 150 dakika, 1 gün, 6 gün ve 8 gün için hesapladığımızda; sırasıyla tavlama sonrası ortalama tane boyutlarını

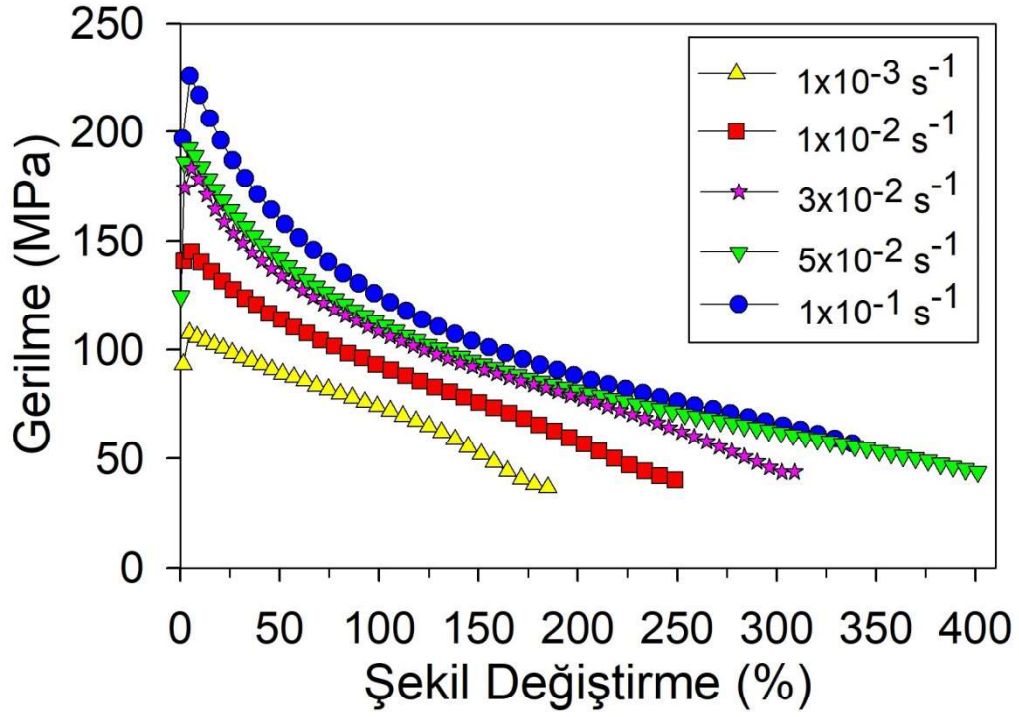
1,1, 1,72, 2,47 ve 2,62 olarak buluruz. Bu sonuçlar göstermektedir ki; gerçek mikro yapılardan ölçülen ve (2) bağıntısı kullanarak hesaplanan ortalama tane boyutları 1 gün, 6 gün ve 8 gün tavlama zaman periyotları için uyumludur. Bu çalışmada hesaplanan ortalama tane boyutu değerlerinin doğruluğu Senkov ve Myshlaev [76] 'in çalışmasındaki ampirik formülle kanıtlanmıştır. Senkov ve Myshlaev [76] çalışmalarında Zn-22Al alaşımının tane büyümesini kontrol eden mekanizma olarak tane sınırı çözünürlüğü difüzyonunu önermişlerdir. Mevcut çalışmada da, tane sınırı yer değiştirmesini kontrol eden tane sınırı çözünürlüğü difüzyonunun Zn-22Al alaşımının tane büyümesinden sorumlu olduğu sonucuna varılabilir.

Farklı tavlama zaman periyotları için belirlenen tane boyutlarından tane büyüme hızının artan tavlama zamanı ile azaldığı açıkça görülmektedir. Bunun sebebi artan tane boyutuyla tane sınırlarının yüzey enerjilerindeki değişimdir. Daha küçük tane boyutu daha fazla tane sınırı alanı demek olduğu için bu durum toplamda daha yüksek yüzey enerjisine sebep olur. Böylece UİT taneli yapı oluşumu nedeniyle EKAE boyunca tane sınırlarının yüzey enerjisini artar [80]. Dahası süperplastik malzemeler, tane sınırlarının yüzey enerjisini düşürme eğilimi gösterirler ve bu da tane büyümesi için itici güç sağlar [27]. Tavlama sürecinin başlangıç aşamalarında yüksek yüzey enerjili tane sınırları nedeniyle hızlı bir tane büyümesi gerçekleşmektedir. Artan tavlama süresi tane sınırlarının yüzey enerjisi azalttığı için, bu sürece ek olarak tane büyüme hızı düştüğü için, daha kararlı bir mikro yapı gözlenmiştir.

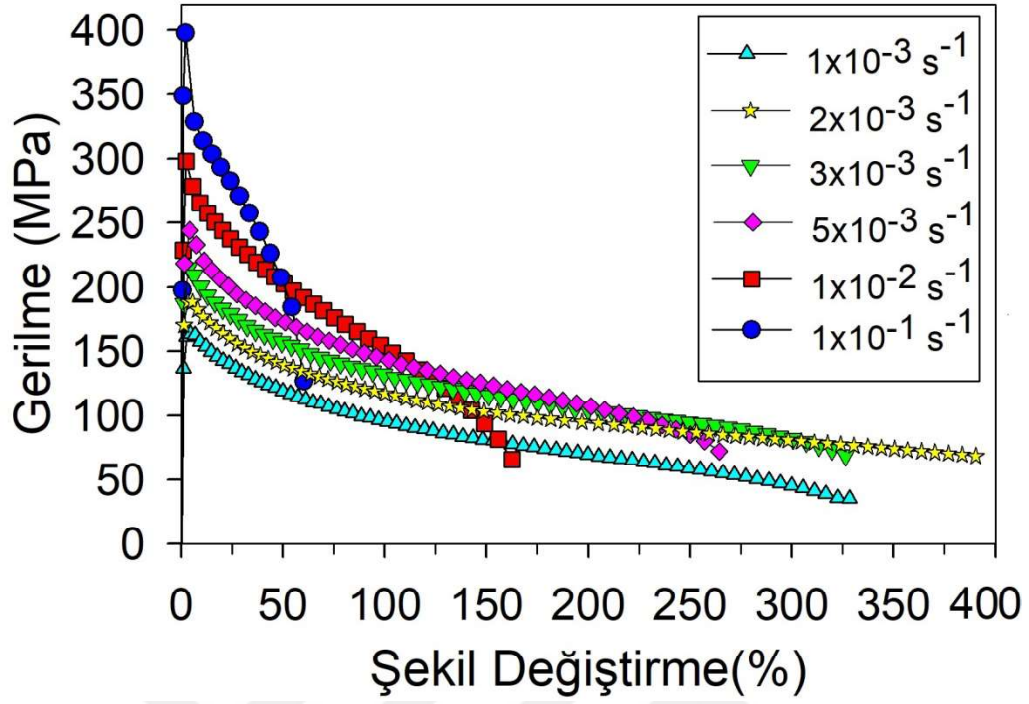
3.1.2. Çekme Deneyi Bulguları

Zn-22Al alaşımının iki adımlı EKAE işlemi uygulanmış durumdaki ve EKAE işlemi sonrası 250 °C'de 150 dakika, 1 gün, 6 gün, 8 gün uygulanan tavlama zamanlarının Zn-22Al alaşımının gerilme-uzama davranışına etkisi sırasıyla Şekil 3.3-3.7'de gösterilmiştir. Mikron altı tane boyutlu numuneler için bütün deformasyon hızlarında şekil değiştirme yaklaşık %5'teyken gerilme maksimum değere ulaştıktan sonra keskin bir deformasyon yumuşaması görülmüştür. Aynı zamanda 1 gün tavllanmış numunede de bütün deformasyon hızlarında deformasyon yumuşaması görülmüştür. Fakat 1 gün tavllanmış numune için deformasyon hızının artması deformasyon yumuşaması yeterliliğini düşürmüştür. 6 gün ve 8 gün tavllanmış numunelerde deformasyon yumuşaması sadece $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ düşük deformasyon hızında görülmüştür. Bu numuneler için $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ve

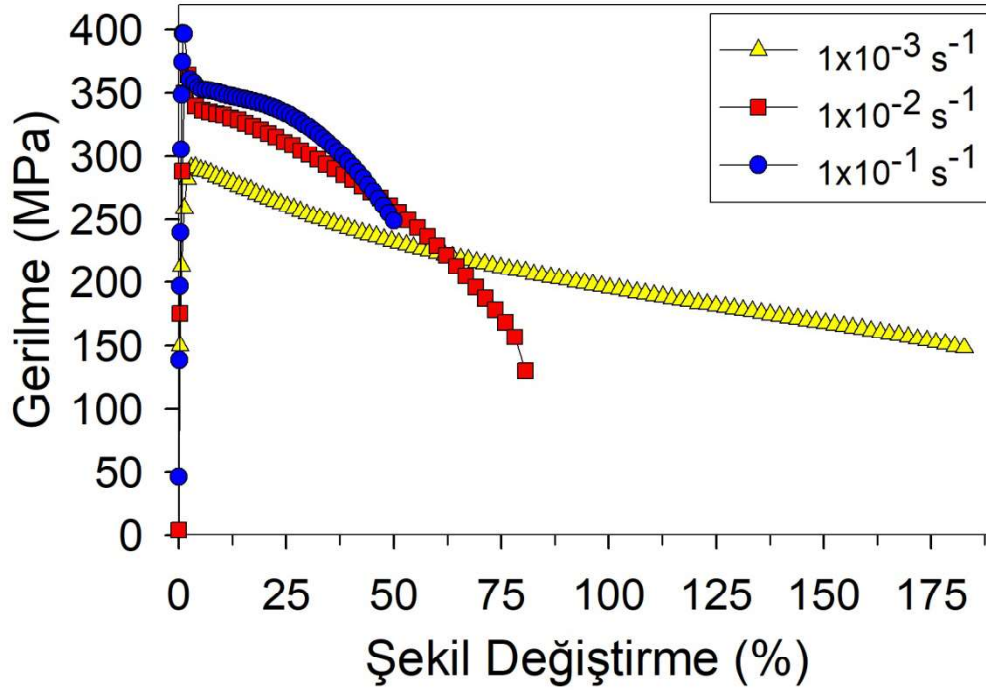
$1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ yüksek deformasyon hızlarında belirgin deformasyon sertleşmesi görülmüştür. Bu iki numune için deformasyon sertleşmesinin etkisi $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızından $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızına ve artan tavlama süresi ile artmıştır.



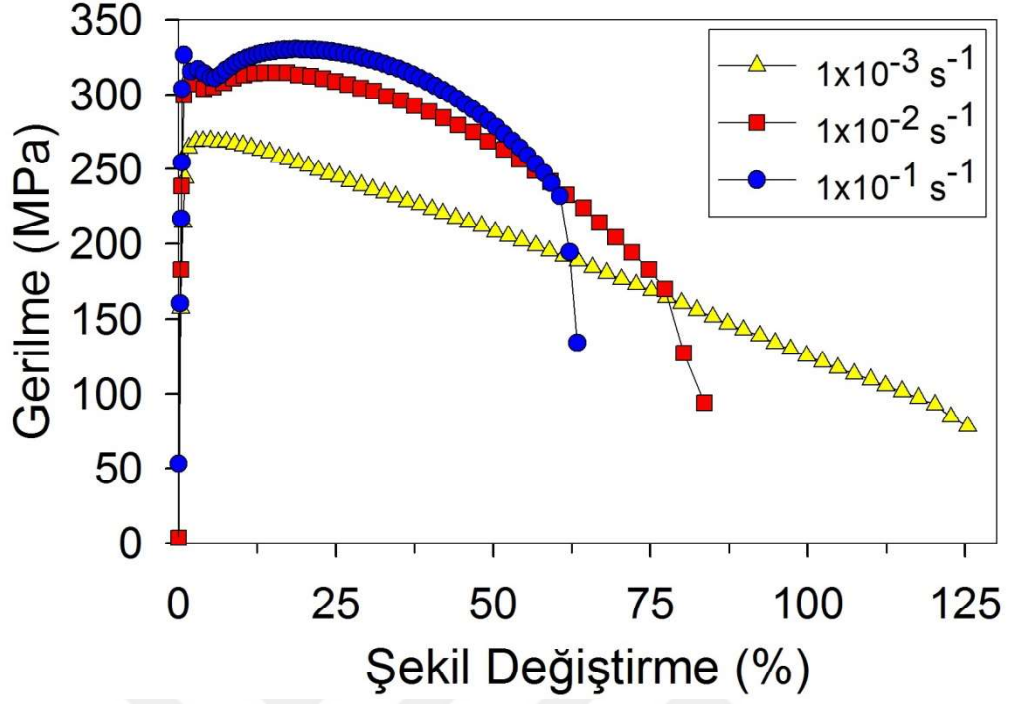
Şekil 3.3. İki adımlı EKAE işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerilme-şekil değişirme grafikleri



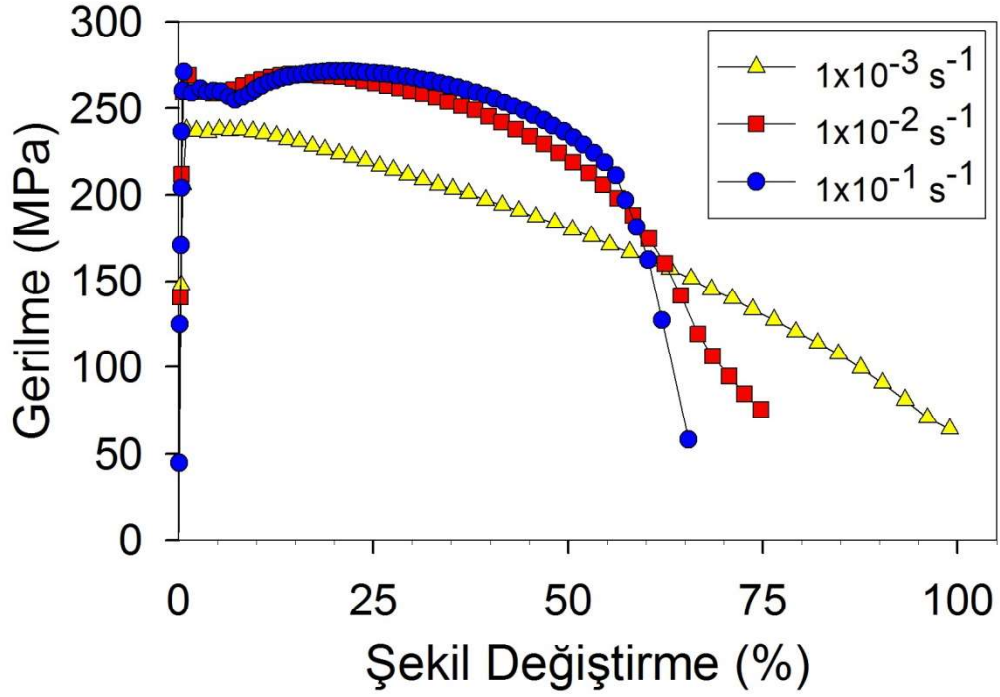
Şekil 3.4. İki adımlı EKAЕ işlemi sonrası 250 °C’de 150 dakika tavlanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerilme-şekil değiştirme grafikleri



Şekil 3.5. İki adımlı EKAЕ işlemi sonrası 250 °C’de 1 gün tavlanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerilme-şekil değiştirme grafikleri



Şekil 3.6. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerilme-şekil değiştirme grafikleri



Şekil 3.7. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerilme-şekil değiştirme grafikleri

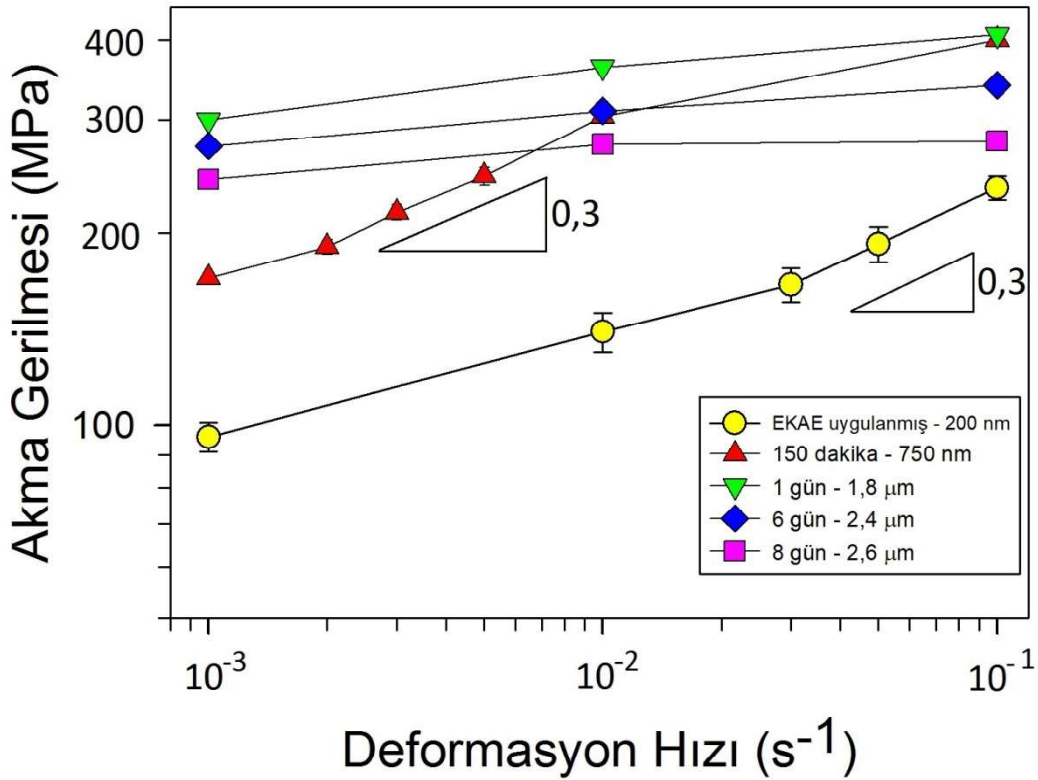
Tablo 4. Zn-22Al alaşımına bütün prosesler uygulandıktan sonra elde edilen kopma uzaması değerleri

Numune	Farklı Deformasyon Hızlarında Kopma Uzaması (%)							
	1×10^{-3}	2×10^{-3}	3×10^{-3}	5×10^{-3}	1×10^{-2}	3×10^{-2}	5×10^{-2}	1×10^{-1}
EKAE uygulanmış	183±15	-	-	-	250±16	305±30	400±15	340±20
150 dakika tavllanmış	328±20	390±9	325±8	265±5	162 ± 5	-	-	60 ± 5
1 gün tavllanmış	185±15	-	-	-	92 ± 5	-	-	63 ± 2
6 gün tavllanmış	125±5	-	-	-	82 ± 5	-	-	63 ± 2
8 gün tavllanmış	100±8	-	-	-	75 ± 8	-	-	65 ± 3

Zn-22Al alaşımının; iki adımlı EKAE işlemi uygulanmış durumda ve EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 150 dakika, 1 gün, 6 gün, 8 gün uygulanan tavlamlar sonrasında çekme deneyleri ile elde edilen akma gerilmesi değerlerinin deformasyon hızına bağımlılığını gösteren grafik Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Akma gerilmesi değerlerinin ortalaması ve sapma değerleri Tablo 5’te verilmiştir. Mikron altı tane boyutlu numuneler için akma gerilmesinin deformasyon hızına çok fazla duyarlı olduğu görülmektedir. Buna ek olarak artan deformasyon hızı akma gerilmesinde artışa sebep olmuştur. Bununla birlikte, neredeyse deformasyondan bağımsız akma gerilmeleri, özellikle yüksek deformasyon hızlarında, mikron altı tane boyutlu numuneler için elde edilmiştir. EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 1 gün uygulanan tavlamlar sonrasında tane boyutunun 200 nm’den 1,8 µm’ye çıkması bütün deformasyon hızları için akma gerilmesinde artışa sebep olmuştur. Fakat EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 6 gün ve 8 gün uygulanan tavlamlar sonrasında tane boyutunun 200 nm’den 2,4 µm ve 2,6 µm’ye çıkması akma gerilmelerinde önemli derecede azalmaya sebep olmuştur. Böylece bu alaşım için kritik bir tane boyutu değeri olduğu ve bu değerin altında tane boyutunun düşürülmesinin de akma gerilmesini azalttığı sonucuna varılabilir. Benzer gözlemler oda sıcaklığında süperplastik özellik gösteren Zn-Al alaşımları içinde elde edilmiştir [19,81]. Kritik bir tane boyutunun altında süperplastik olmayan bölgeden süperplastik olan bölgeye geçişin olduğu vurgulanmıştır. Böylece tane boyutunun azaltılması, daha fazla tane sınırlarında oluşan daha kolay tane sınırı kaymasının (TSK) bir sonucu olarak akma gerilmesini de azaltır [19,81]. Benzer olarak, bu

çalışmada da kritik bir tane boyutunun (yaklaşık 1.8 μm) altındaki daha fazla tane küçülmesi, baskın bir deformasyon mekanizması olan TSK'nın varlığına bağlı olarak akma gerilmesinde bir düşüş ile sonuçlanmıştır.

Süperplastik özellik gösteren mikron altı tane boyutlu numuneler için en uygun süperplastik bölgedeki deformasyon hızı duyarlılık üssü parametreleri (n değerleri) akma gerilmesi-deformasyon hızı eğrilerinin eğimi kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 3.9). Maksimum uzamaların elde edildiği bölgelerdeki n değerleri 0,3 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, 200 nm'den 750 nm'ye kadar tane boyutunun artırılması, en yüksek süperplastik uzama ile birlikte en yüksek m -değerine sahip optimum süperplastik bölgeyi, beklendiği gibi nispeten düşük deformasyon hızlarına kaydırmıştır [15].



Şekil 3.9. EKAЕ işlemi uygulanmış durumda ve EKAЕ işlemi sonrası 250 °C'de farklı tavlama süreleri sonrasında çekme deneyleri ile elde edilen akma gerilmesi değerlerinin deformasyon hızına bağımlılığı

Tablo 5. Zn-22Al alaşımına bütün prosesler uygulandıktan sonra elde edilen akma gerilmesi değerleri

Numune	Farklı Deformasyon Hızlarında Akma Gerilmesi (MPa)							
	1×10^{-3}	2×10^{-3}	3×10^{-3}	5×10^{-3}	1×10^{-2}	3×10^{-2}	5×10^{-2}	1×10^{-1}
EKAE uygulanmış	96±5	-	-	-	140±7	166±10	188±12	235±10
150 dakika tavllanmış	170±1	190±5	215±8	245±4	304±5	-	-	400±6
1 gün tavllanmış	300±3	-	-	-	363±3	-	-	408±3
6 gün tavllanmış	273±2	-	-	-	310±1 0	-	-	340±10
8 gün tavllanmış	242±4	-	-	-	275±7	-	-	278±3

Mikron altı tane boyutlu numuneler bütün deformasyon hızlarında deformasyon yumuşaması davranışı göstermişlerdir. Mikron tane boyutlu numunelerde ise deformasyon hızlarına bağlı olarak hem deformasyon sertleşmesi hem de deformasyon yumuşaması davranışı görülmüştür. Literatürde daha önce yapılmış çalışmaları göz önüne alarak deformasyon sertleşmesi davranışı; tane boyutuna [82] ve süperplastik deformasyon boyunca oluşan dislokasyon biriktirme prosesine [83] bağlıdır. Bilindiği üzere dinamik rekristalizasyon süperplastik malzemelerde deformasyon yumuşamasına neden olan ana sebep olarak kabul edilmektedir [82,84–86]. Aynı zamanda, tek eksenli gerilme testi sırasında gerçek deformasyon hızında azalma, malzeme deformasyon hızına duyarlıysa, deformasyon yumuşamasına neden olan bir başka faktör olarak rapor edilmiştir [86]. Bu sonuçlarla ilgili olarak, bu çalışmada mikron altı tane boyutlu numuneler için deformasyon yumuşaması davranışı dinamik rekristalizasyona bağlanabilir. Mikron altı tane boyutlu numuneler için oldukça yüksek n değerleri elde edilmiştir. EKAE uygulanmış numune için 3×10^{-2} - $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızları arasında Şekil 3.9'da gösterildiği gibi 0,3 n değeri elde edilmiştir. 1×10^{-3} - $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızları arasında da EKAE işlemi sonrası 250 °C'de 150 dakika tavlama uygulanmış numune için Şekil 3.9'da gösterildiği gibi 0,3 n değeri elde edilmiştir. Böylece, süperplastik deformasyon boyunca deformasyon hızındaki değişimin deformasyon yumuşamasını etkileyen başka bir neden olduğu düşünülebilir. Dislokasyonun, baskın deformasyon mekanizması olan tane sınırı kaymasına katkıda bulunduğu bilinmektedir ve bunlar, süperplastik deformasyon sırasında dislokasyon çıkış

düğümü gibi davranan tane sınırlarında kaybolurlar [27]. Böylece, mikron altı tane boyutlu numuneler için dislokasyonların neden olduğu belirgin bir deformasyon sertleşme etkisi gözlenmemiştir. Diğer taraftan, mikron tane boyutlu numuneler için belirgin deformasyon yumuşama davranışı sadece $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızı için geçerlidir. Bu numuneler süperplastik davranışlarını kaybetmişler ve deformasyon hızına duyarlı hale gelmişlerdir. Böylece, mikron tane boyutlu numuneler için düşük deformasyon hızlarında yeterli zamanın olması nedeniyle deformasyon yumuşaması sadece dinamik rekristalizasyon yoluyla gerçekleşmektedir. Bunun yanında, deformasyon boyunca deformasyon hızındaki değişim etkin bir rol oynamamıştır.

Mikron tane boyutlu numuneler için deformasyon sertleşmesi deformasyon boyunca artan dislokasyon yoğunluğuna bağlıdır [83]. Yetersiz zaman nedeniyle dinamik rekristalizasyon etkinliğini kaybettiği için, dislokasyon stoklama prosesi mikron tane boyutlu numuneler için 1×10^{-1} ve $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ yüksek deformasyon hızlarında gerçekleşmiştir. Yukarıda vurgulandığı gibi, deformasyon sertleşmesi mikron tane boyutlu numunelerde daha belirgin olmakta 1×10^{-2} 'den $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızlarına kadar ve tavlama zamanıyla artmaktadır. Bunun sebebi artan tavlama zamanıyla iç enerjide seviyesindeki değişimdir. EKAE yoluyla elde edilen ÜİT oluşumu boyunca yüksek iç enerji oluşmakta ve bu da dinamik rekristalizasyon için itici güç sağlamaktadır [87]. Artan tavlama zamanı iç enerjide azalma ile sonuçlanmıştır. Böylece, deformasyon sertleşmesi davranışı diğer mikron tane boyutlu numunelerden (Şekil 3.3-Şekil 3.4) farklı olarak EKAE sonrası $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1gün tavllanmış numune için (Şekil 3.5) yüksek deformasyon hızlarında etkili olmamıştır. Çünkü, $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1gün tavllanmış numune $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 6 gün ve 8gün tavllanmış numuneler ile karşılaştırıldığında az miktarda dinamik rekristalizasyon oldukça yüksek iç enerji nedeniyle hala etkindir. Bu nedenle, $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1 gün tavllanmış numune için dislokasyon yoğunluğundaki artış sınırlandırılmış ve deformasyon sertleşmesi davranışı gözlenmemiştir.

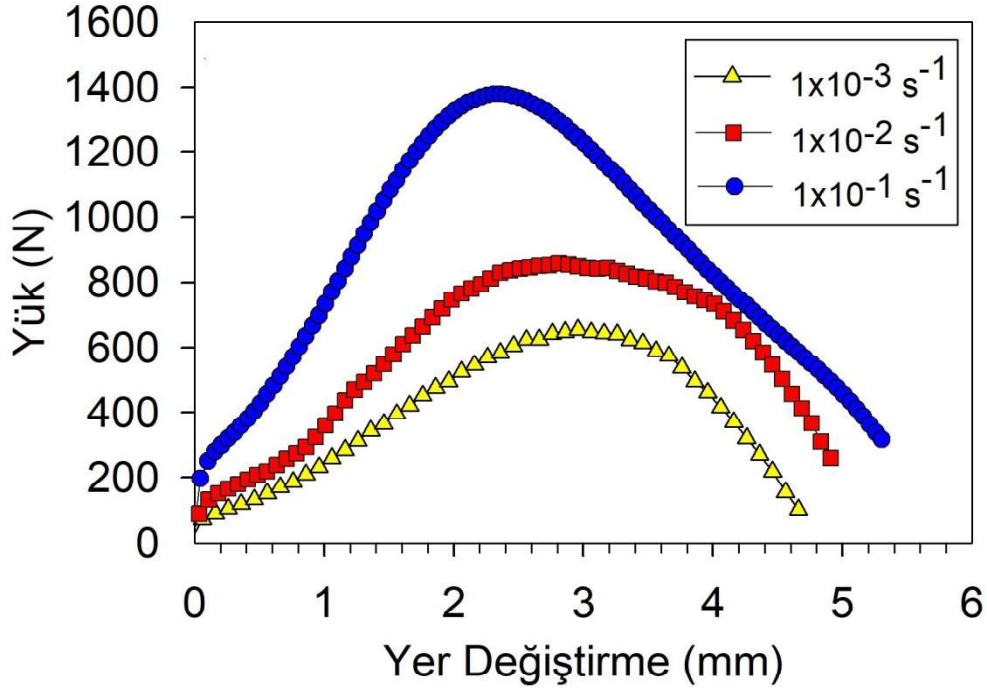
Bu çalışmanın sonuçları göstermektedir ki kopma uzaması güçlü bir şekilde Zn-22Al alaşımının tane boyutuyla ilişkilidir. Tane boyutunu azaltmanın maksimum süperplastik uzama elde edilen deformasyon hızını azalttığı iyi bilinmektedir [15]. Dahası, daha küçük tane boyutu erken hataya sebep olacak iç boşlukların büyümesine yeterli zaman olmadığı için yüksek deformasyon hızlarında daha yüksek uzama ile sonuçlanır [15]. Bu çalışmada uygulanan prosesler sonucu oluşturulan bütün numuneler için elde edilen uzama değerleri mevcut literatürle uyumludur. 200 nm tane boyutuna sahip numune için elde edilen

maksimum uzama $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ yüksek deformasyon hızında elde edilirken, tane boyutunu artırmak maksimum uzamanın elde edildiği deformasyon hızını daha düşük hızlara kaydırmıştır. Tane boyutu 750 nm ve 2,6 μm arasında değişen numuneler oldukça düşük deformasyon hızlarında maksimum uzama göstermişlerdir. Tane boyutundaki herhangi bir artış kopma uzaması değerlerinde düşmeye neden olmuştur. Buna örnek olarak EKAE uygulanmış numune için % 400 olan maksimum uzamanın EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 150 dakika tavlama uygulanmış numune için %390’a düşmesi gösterilebilir. Diğer mikron boyutlu tane içeren 250 °C’de 1gün, 6 gün ve 8 gün tavlama uygulanmış numuneler süperplastik özelliklerini kaybetmişler ve sırasıyla % 183, % 125 ve % 100 maksimum uzamalar göstermişlerdir. Uzamanın tane boyutuna bağımlılığı tane sınırı kaymasının etkinliğine tabidir. Daha düşük tane boyutu, tane sınırı alanının artması anlamına geldiğinden, tane sınırı kayması, daha fazla süperplastik uzama sağlayan daha fazla tane sınırında etkili bir şekilde gerçekleşir [41].

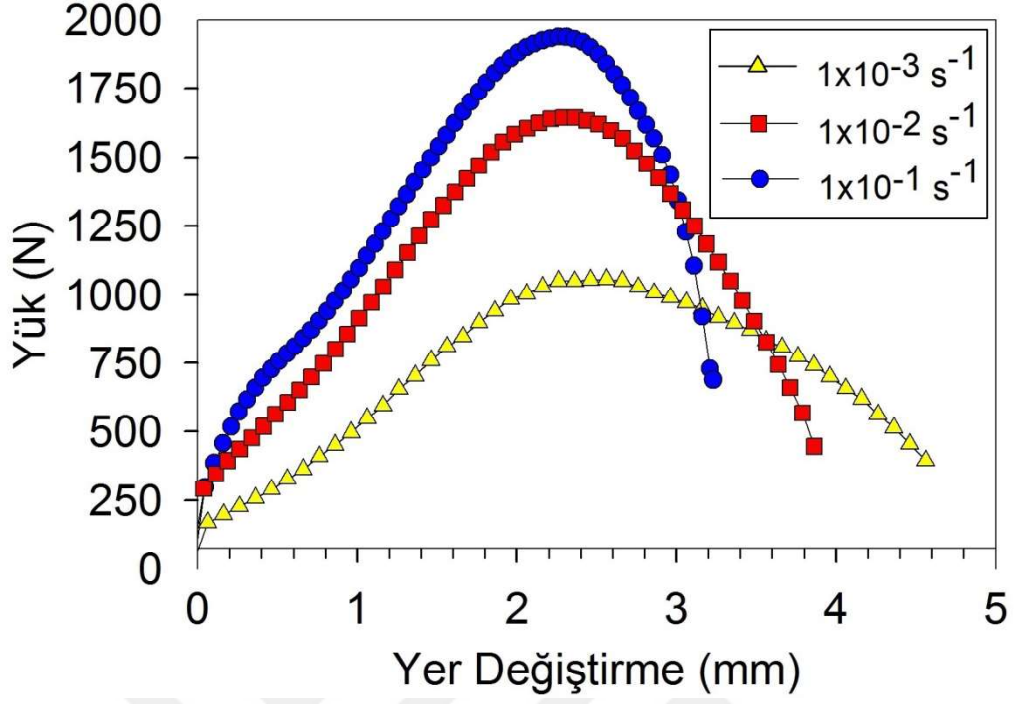
Bu çalışmada, iki adımlı EKAE işlemi oda sıcaklığında $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ yüksek deformasyon hızında %400 uzama ile sonuçlanmıştır. Fakat, Zn-22Al alaşımı için daha büyük tane boyutuyla oda sıcaklığında daha yüksek uzama önceki bir çalışmada elde edilmiştir [29]. O çalışmada %500 civarında uzama 600 nm tane boyutuna sahip numune ile edilmiştir. Bundan başka olarak, aynı çalışmada 570 nm tane boyutuna sahip Zn-22Al alaşımı % 300 civarında daha düşük süperplastik uzama göstermiştir. Uzamalardaki bu farklılık iki numunenin farklı oranda silisyum katışkısı içermesine bağlanmıştır. %500 civarında uzama gösteren numunedeki silisyum katışkısını içeriği 10 ppm’ den küçük iken, %300 civarında düşük uzama gösteren numunede silisyum katışkısının içeriği 1500 ppm’ dir. Silisyum katışkısının deformasyon mekanizmasını etkilemediği, fakat kırılma davranışını değiştirdiği ve yüksek silisyum katışkı içeriğinin oldukça düşük süperplastik uzamayla sonuçlandığı vurgulanmıştır [29]. Benzer davranış Zn-22Al alaşımına demir katışkısı eklenmesi durumu için de rapor edilmiştir [88]. Demir katışkısındaki herhangi bir artış süperplastik uzamada büyük ölçüde azalma ile sonuçlanmıştır. Bu çalışmada Zn-22Al alaşımının katışkı elementleri içeriği üretim sürecinde kontrol edilmemiştir. Bu durum döküm yoluyla edilen Zn-22Al alaşımının yüksek miktarda saf olmayan atomlara sahip olduğunu belirtmektedir. Bu nedenle, mevcut çalışmamızın en küçük tane boyuna sahip olmasına rağmen, EKAE uygulanan alaşımının nispeten düşük süperplastik uzamasının, kontrolsüz döküm işleminden gelen yüksek seviyedeki yabancı maddelerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

3.1.3. Şekillendirilebilirlik (Erichsen) Deneyi Bulguları

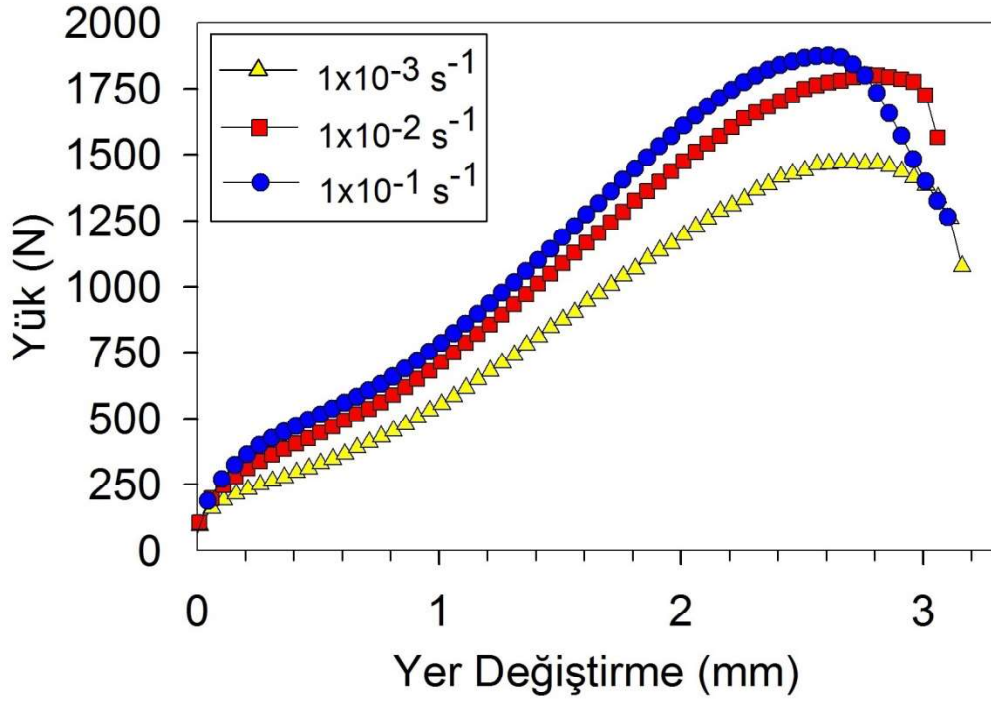
Zn-22Al alaşımına iki adımlı EKAE işlemi uygulanmış durumda ve EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 150 dakika, 1 gün, 6 gün, 8 gün uygulanan tavlamalar sonrasında uygulanan Erichsen testleri sonrasında elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 3.10-Şekil 3.14’te gösterilmiştir. Bütün eğrilerin bitiş noktaları çatlak başlangıcını göstermektedir. Genel olarak bütün numuneler yük maksimum değere ulaşıncaya kadar benzer yük-yer değiştirme davranışı göstermişlerdir (Şekil 3.10-3.14). Yük-yer değiştirme eğrisinin en yüksek değerinden sonra mikron altı tane boyutlu numuneler için yük hafifçe azalmış ve büyük ölçüde yük düşüşü gerçekleştikten sonra çatlak oluşmuştur. (Şekil 3.10-Şekil 3.11). Diğer taraftan mikron tane boyutlu numuneler için yük-yer değiştirme eğrisinin en yüksek değerinden sonra ani bir düşüş gözlenmiş ve çatlak başlangıcı hemen gerçekleşmiştir (Şekil 3.12- Şekil 3.14). Daha küçük tane boyutunun numunede oluşacak çatlaklığı geciktirdiği sonucuna ulaşılmıştır.



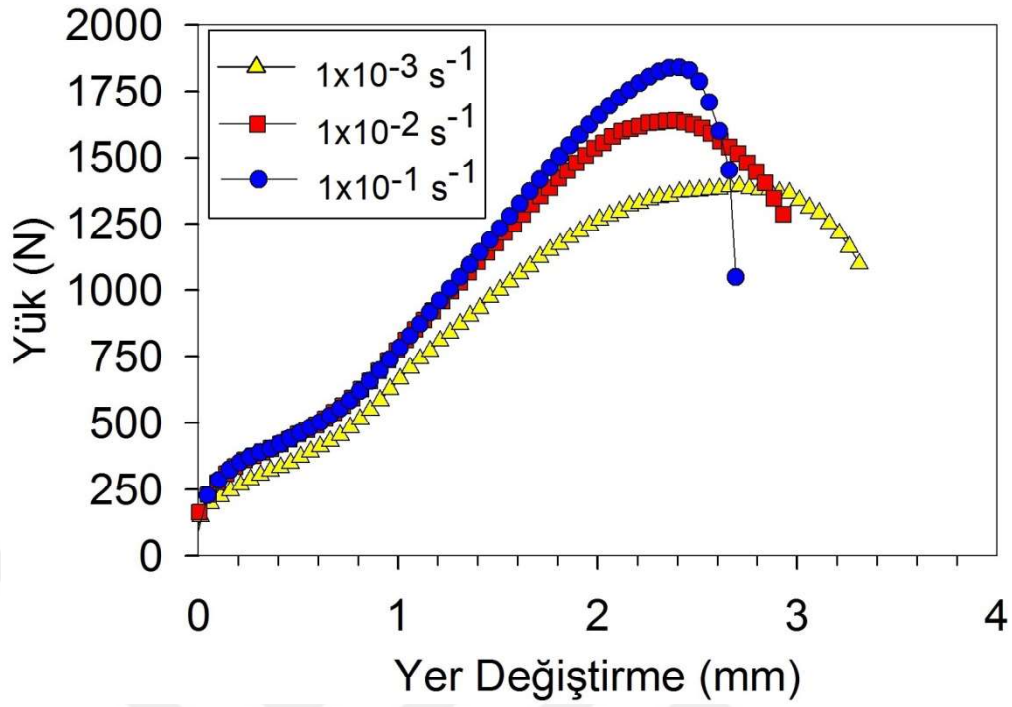
Şekil 3.10. İki adımlı EKAE işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki yük-yer değiştirme grafikleri



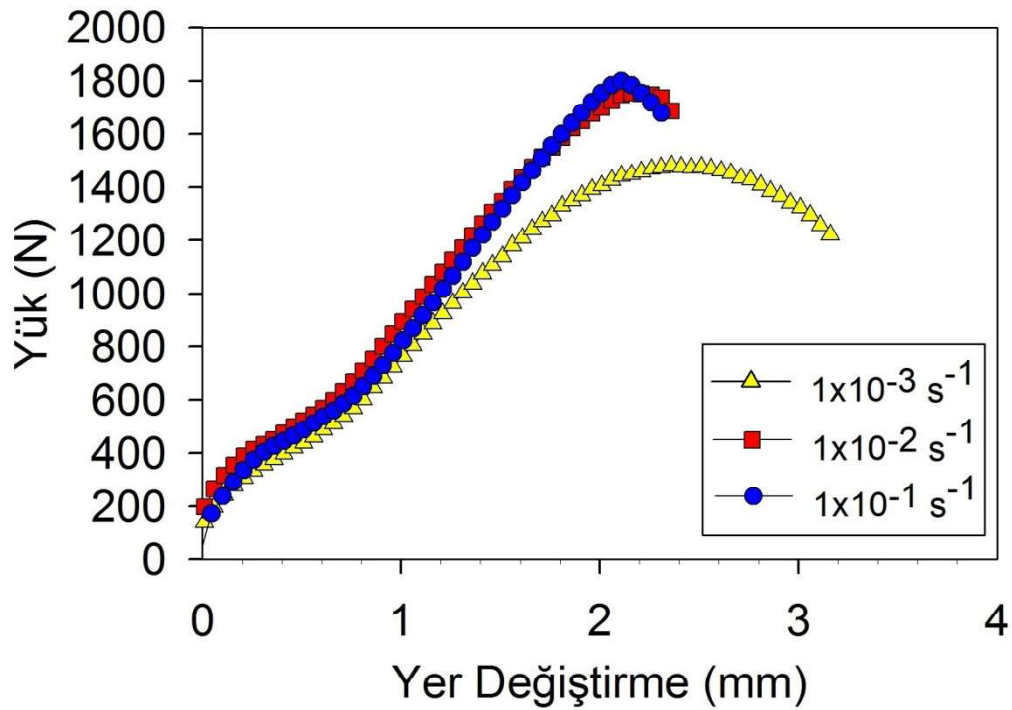
Şekil 3.11. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’ de 150 dakika tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki yük-yer değıştirme grafikleri



Şekil 3.12. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’ de 1 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki yük-yer değıştirme grafikleri

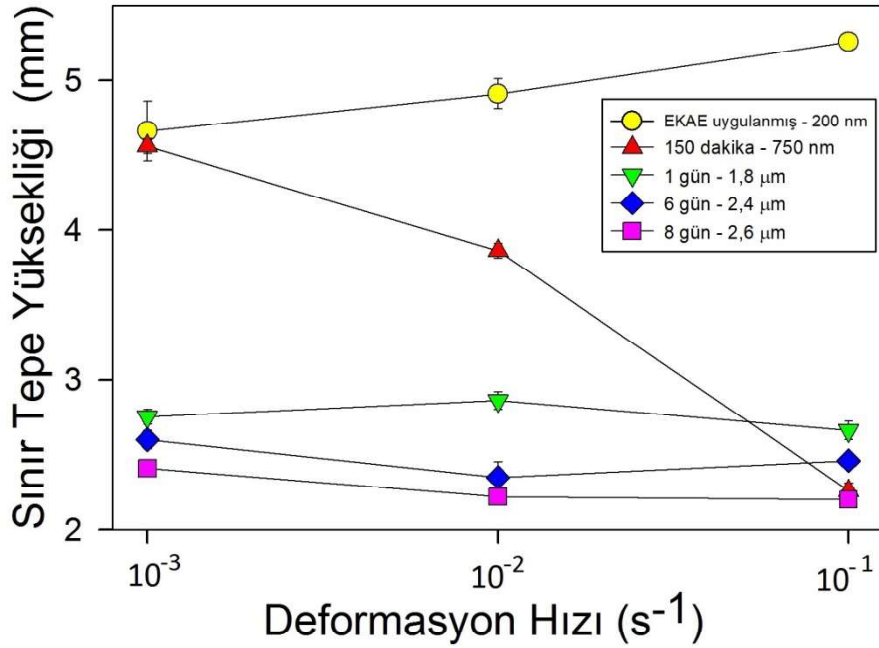


Şekil 3.13. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki yük-yer değiştirme grafikleri



Şekil 3.14. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki yük-yer değiştirme grafikleri

Sınır tepe yüksekliğindeki değişim ve deformasyon hızları arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Yük-yer değiştirme eğrileri kullanılarak belirlenen sınır tepe yüksekliği (STY) değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir. Tek eksenli çekme deneyleri (Şekil 3.8) ve iki eksenli şekillendirilebilirlik testleri (Şekil 3.15) arasında numunelerin deformasyon davranışları açısından sonuçları incelediğimizde mükemmel bir uyum olduğu göze çarpmaktadır. Zn-22Al alaşımına iki adımlı EKAE işlemi uygulanmış durumda oda sıcaklığında gerçekleştirilen Erichsen testlerinde maksimum yer değiştirme $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında 5,26 mm olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda 1×10^{-2} ve $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızlarında da sırasıyla 4,86 mm ve 4,71 mm gibi nispeten yüksek yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Deformasyon hızını düşürmek tek eksenli çekme deneylerinde olduğu gibi STY değerlerini düşürmüştür. Başka bir deyişle, tane boyutundaki artış, tek eksenli çekme deneylerinde maksimum uzamada azalmaya neden olduğu gibi STY değerlerinde de azalmaya sebep olmuştur. EKAE işlemi sonrası 250 °C'de 150 dakika tavllanmış numunede en düşük deformasyon hızı olan $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 'de en yüksek STY değeri 4,56 mm olarak belirlenmiştir. Tane boyutundaki daha fazla artış STY değerinde önemli ölçüde azalmaya sebep olmuştur. 250 °C'de 1 gün, 6 gün ve 8 gün tavllanmış numunelerde 3 mm'nin altında STY değerleri elde edilmiştir.

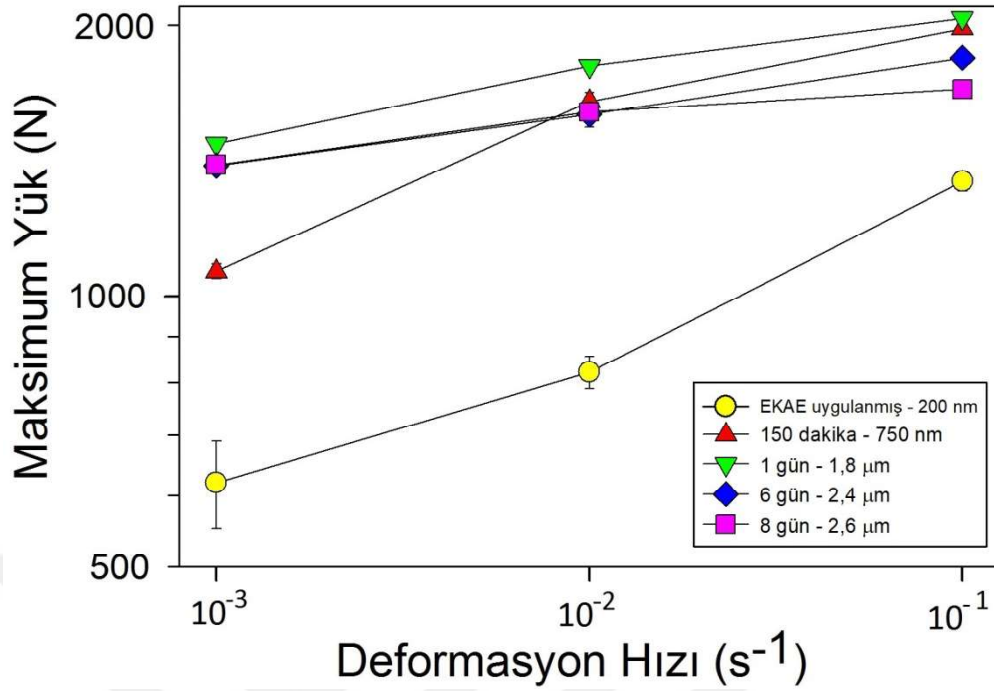


Şekil 3.15. EKAE işlemi uygulanmış durumda ve EKAE işlemi sonrası 250 °C'de farklı tavlama süreleri sonrasında Erichsen testleri ile elde edilen STY değerlerinin deformasyon hızına bağlılığı

Tablo 6. Zn-22Al alaşımına bütün prosesler uygulandıktan sonra elde edilen sınır tepe yüksekliği değerleri

Numune	Farklı Deformasyon Hızlarında Sınır Tepe Yüksekliği (mm)		
	$1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	$1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$	$1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$
EKAE uygulanmış	$4,71 \pm 0,2$	$4,86 \pm 0,1$	$5,26 \pm 0,05$
150 dakika tavlannmış	$4,56 \pm 0,05$	$3,86 \pm 0,05$	$2,26 \pm 0,05$
1 gün tavlannmış	$2,75 \pm 0,05$	$2,86 \pm 0,06$	$2,66 \pm 0,06$
6 gün tavlannmış	$2,6 \pm 0,06$	$2,35 \pm 0,1$	$2,46 \pm 0,05$
8 gün tavlannmış	$2,41 \pm 0,05$	$2,22 \pm 0,15$	$2,2 \pm 0,1$

şekillendirilebilirlik deneylerinden elde edilen maksimum yükler ve deformasyon hızları arasındaki ilişkiyi gösteren grafik şekil 3.16'da verilmiştir. Yük-yer değiştirme eğrileri kullanılarak belirlenen maksimum yük değerleri Tablo 7'da gösterilmiştir. şekillendirilebilirlik deneylerinden elde edilen maksimum yük ve deformasyon hızı arasındaki ilişki de aynı zamanda çekme deneyleriyle tutarlıdır. Mikron altı tane boyutlu numuneler için oluşan maksimum yükün deformasyon hızına duyarlı olduğu grlmştir. Bununla birlikte, mikron tane boyutlu numunelerde farklı deformasyon hızları ile oluşan yük değişimi çekme deneylerindeki deformasyon hızları ile değişen gerilme değerleriyle benzer eğilimleri gösterdi ve deformasyon hızına göre maksimum yüklerin belirgin bir şekilde değiştiği belirlendi.



Şekil 3.16. EKAЕ işlemi uygulanmış durumda ve EKAЕ işlemi sonrası 250 °C’de farklı tavlama süreleri sonrasında Erichsen testleri ile elde edilen maksimum yük değerlerinin deformasyon hızına bağlılığı

Tablo 7. Zn-22Al alaşımına bütün prosesler uygulandıktan sonra elde edilen maksimum yük değerleri

Numune	Farklı Şekil Değiştirme Hızlarında Maksimum Yük (N)		
	1x10 ⁻³ s ⁻¹	1x10 ⁻² s ⁻¹	1x10 ⁻¹ s ⁻¹
EKAЕ uygulanmış	620 ± 69	822 ± 34	1340 ± 34
150 dakika tavllanmış	1065 ± 20	1644 ± 37	1981 ± 21
1 gün tavllanmış	1475 ± 3	1800 ± 3	2035 ± 3
6 gün tavllanmış	1395 ± 2	1590 ± 50	1839 ± 10
8 gün tavllanmış	1398 ± 60	1600 ± 70	1697 ± 80

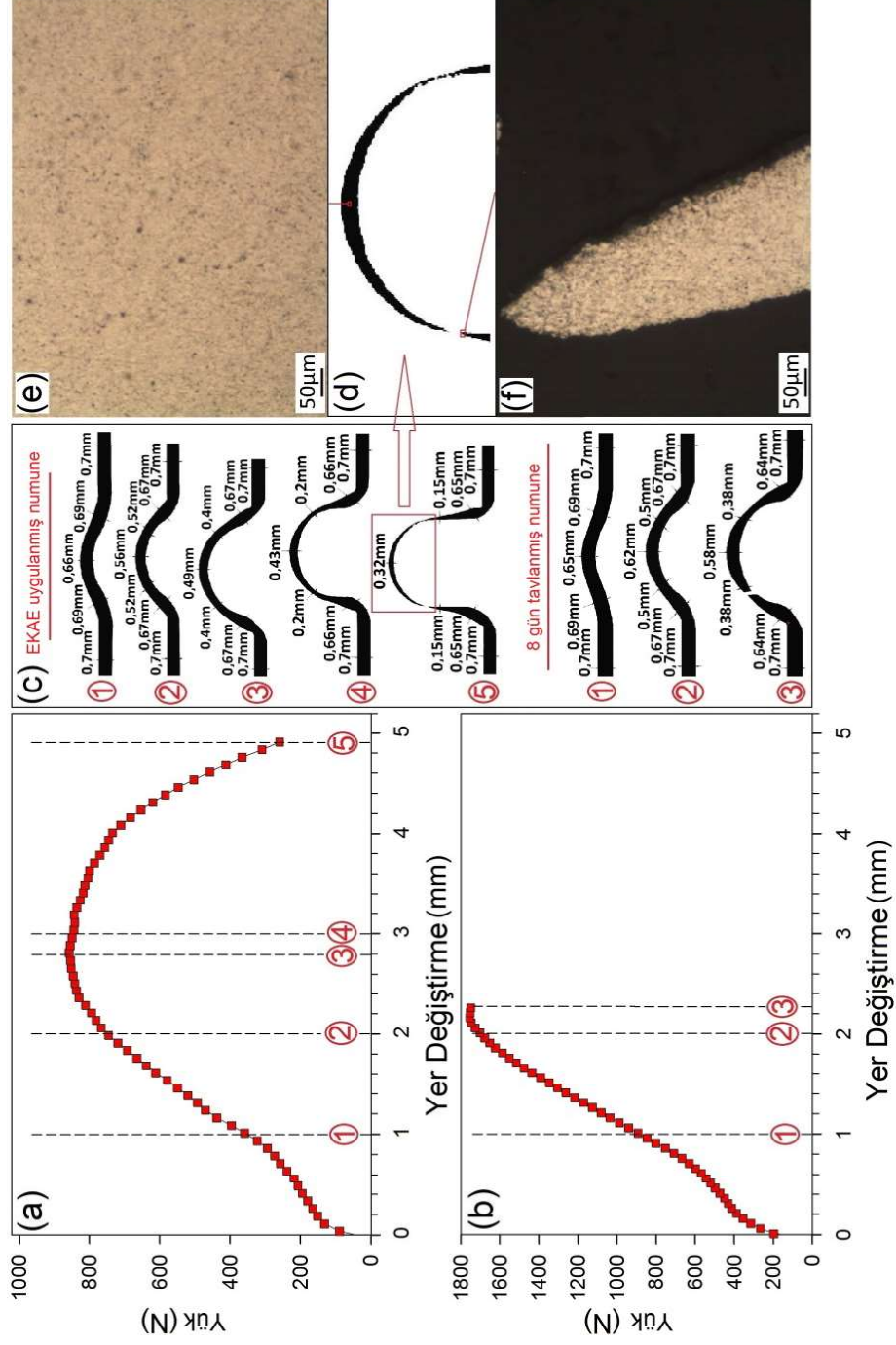
İki eksenli yükleme altında Erichsen testleriyle elde edilen tane boyutunun deformasyon homojenitesine etkisini incelemek amacı ile EKAЕ sonrası elde edilen mikron altı tane boyutlu numune ve EKAЕ sonrası 250 °C’de 8 gün uygulanan tavlamlar

sonucu elde edilen mikron tane boyutlu numune seçilmiştir. Erichsen testleri $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılmıştır. Testler Şekil 3.17 ((a) ve (b))’de verilen yük-yer değiştirme eğrilerinde gösterilen belirli noktalarda durdurulmuştur. Görüldüğü gibi yük maksimum noktaya ulaşmadan önce 2 noktada (nokta 1 ve 2) durdurulmuştur. EKAE sonrası elde edilen numune için testler yük-yer değiştirme eğrilerinin en yüksek noktasında (nokta 3) ve zımba ilerlemesinin 3 mm olduğu en yüksek noktanın hemen sonrasında (nokta 4) durdurulmuştur. Belirlenen noktalarda testler durdurularak kesiti alınan Erichsen numunelerinin kalınlık değişimini gösteren resimler Şekil 3.17(c)’de gösterilmiştir. Genel olarak EKAE uygulanmış ve EKAE sonrası $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de 8 gün uygulanan tavlama sonucunda elde edilen numunelerin her ikisi içinde kalınlık azalması yük maksimum noktaya ulaşmaya kadar benzer davranış göstermişlerdir (Her iki numune içinde nokta 1 ve nokta 2 (Şekil 3.17 (c))). Elastik deformasyon noktasını takiben, plastik deformasyonun ilk aşaması her iki numunede de büyük ölçüde incelmeye olmadan iki eksenli eğme yoluyla gerçekleşmiştir. 1 mm zımba ilerlemesinde, örnek ve zımba arasındaki sürtünme düşük olduğu için numunelerin diğer kısımlarına göre kutup bölgeleri daha az oranda incelmeye rağmen her iki numunede büyük ölçüde homojen olarak incelmeye uğramıştır. Tepe yüksekliği 2 mm’ye ulaştığı zaman, sacın sabitlenmiş noktalarından flanş kısımlarına geçiş bölgelerinde numunelerin kalınlığı her iki numune içinde çok fazla değişmemiş ve 0,67 mm olmuştur. Geçiş bölgelerinin dışında, ikinci aşamada numunelerin flanş ve kutup bölgeleri homojen davranışta deforme olmuştur. İkinci aşamada EKAE uygulanmış numunenin flanş ve kutup bölgesi kalınlıkları 0,56 ve 0,52 mm olarak ölçülmüştür. Yük en yüksek noktaya ulaştığında EKAE uygulanmış numunenin kutup kısmı flanş kısmından (0,4 mm) biraz daha kalın olarak 0,49 mm olarak ölçülmüştür. Numunenin kutup kısmındaki kalın parça bu bölgedeki daha az iki eksenli çekme gerilmesi [51] ve sürtünmenin ters etkisi yoluyla şekillenmiştir [7]. En yüksek tepe noktasını geçtikten sonra flanş kısımlarındaki deformasyon yerelleşmesi nedeniyle yük düşmeye başlamıştır. Buna ek olarak EKAE işlemi uygulanmış numunede 0,2 mm’ye kadar kalınlık azalması gözlenmiştir (Şekil 3.17 (c) nokta 4). EKAE işlemi sonrası $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de 8 gün uygulanan tavlama sonucunda elde edilen numunede deformasyon yerelleşmesi olmayan gevrek kırılma meydana gelmiştir (Şekil 3.17 (c) nokta 3). Buna karşılık EKAE işlemi uygulanmış numune sünek kırılma göstermiş ve oldukça yüksek STY değerleri bu örnek için belirlenmiştir. Bu bulguları göz önüne alarak tane boyutunun deformasyon homojenizasyonuna etkisinin yük maksimum noktaya ulaşmaya kadar belirgin olmadığı

sonucuna ulaşabiliriz. Bununla birlikte, bu aşamadan sonra tane boyutu deformasyon yerelleşmesi karakterinin üzerine oldukça fazla etkiye sahiptir. Daha ince tane boyutu kırılma modunu gevrek kırılmadan sünek kırılmaya dönüştürür ve boyun vermeyi erteler. Bunun sonucu olarakta oldukça yüksek STY değeri elde edilir.

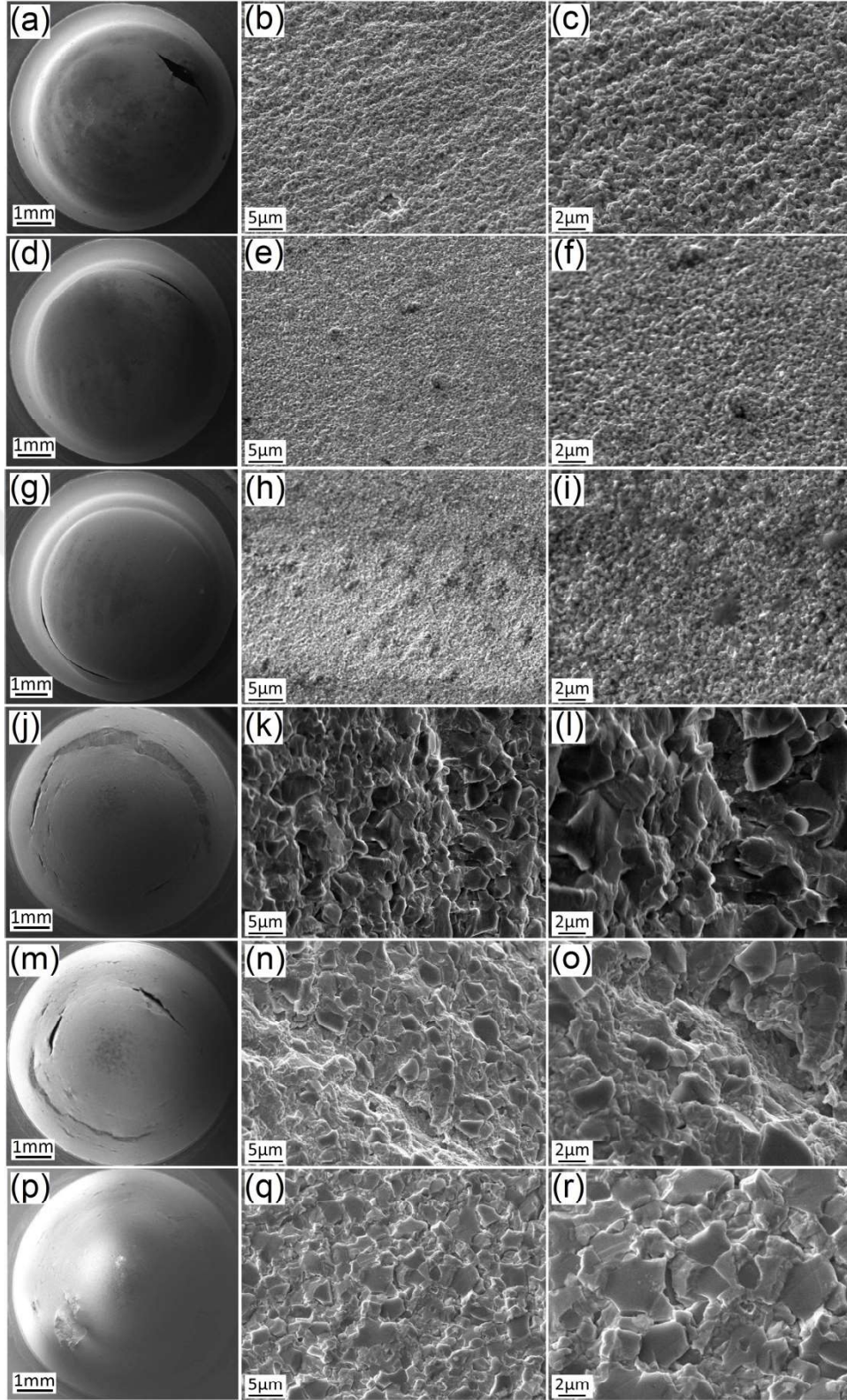
EKAE işlemi uygulanmış numune için kırılma yeri kabın tepe noktasından orta (ekvator) kısmına doğru kaymıştır (Şekil 3.17 (d)). Benzer gözlemler süperplastik Al 7075 alaşımı içinde literatürde yer almaktadır [51]. Bu şekillenme EKAE işlemi uygulanmış numunenin uzaması boyunca boşluk veya gözenek oluşumu nedeniyle gerçekleşmiş olabilir. Çünkü süperplastik deformasyon sırasında geniş çaplı boşluk oluşumunun meydana geldiği iyi bilinmektedir [89,90]. Kırılma, yüksek süperplastik uzama sırasında bu boşlukların birleşmesinden kaynaklanmaktadır. Tepenin kutup bölgesinde, tepenin kalınlığı yönünde etki eden ek basma gerilmesi boşluk oluşumunu ve boşluğun büyümesini engelleyebilir [51]. Bu önermeyi açıklamak için Erichsen testi uygulanmış numunelerin SEM resimleri alınmıştır (Şekil 3.17 ((e)-(f)). Şekil 3.17 (e)'de EKAE işlemi uygulanmış numunenin kutup kısmında sınırlı sayıda boşluk oluşumu görülmektedir. Böylece, tepenin kutup kısmındaki kalınlıktaki daha fazla azalma az boşluk oluşumu yoluyla engellenmiştir. Bundan başka olarak, yüksek uzama kuvveti seviyesi nedeniyle numunenin özellikle dış yüzeyinde aşırı sayıda boşluk meydana gelmiştir (Şekil 3.17 (f)). Bununla birlikte, bu boşlukların birleşiminin sonucu olarak kırılma numunenin flanş kısmında meydana gelmiştir [51].

Erichsen testlerinde yüksek STY değerleri mikron altı tane boyutlu numuneler için elde edilmiştir. Bu numunelerin Erichsen testleri sonucu belirlenen maksimum yükleri zımba hızına duyarlı olduğu için STY değerlerinin yüksek olması n değerlerinin yüksek olmasına bağlanmıştır. Zımba yükünün en yüksek değerine ulaşıldıktan sonra, tepe deformasyon yerelleşme bölgesinin deformasyon hızı, numunelerin kalan kısımlarından daha yüksek olmuştur. Deformasyon hızlarındaki bu fark, yüksek n -değerinden ötürü boyun verme bölgesinde akma gerilmesinde bir artış ile sonuçlanmıştır. Bunun sonucu olarak deformasyon bu bölgede durmuştur ve aynı anda tepenin diğer kısımlarında deformasyon başlamıştır. Dolayısıyla, ani boyun verme gelişmesi gecikmiştir. Bunun yanında flanş bölgesindeki numune kalınlığı önemli ölçüde azalana kadar yarı-kararlı plastik akış meydana gelmiş ve bu da yükte ve yüksek STY değerinde hafif bir azalmaya neden olmuştur.



Şekil 3.17. Kesit fotoğraflarının alınma noktalarını gösteren yük-yer değiştirme eğrileri: (a) EKAE uygulanmış numune için (b) EKAE sonrası 250 °C'de 8 gün süreyle uygulanan tavlama sonucu elde edilen numune için. (c) iki eksenli yükleme altında şekillendirilmiş numunelerin kesit fotoğrafları ve (d) EKAE uygulanmış numune 5 Numaralı noktadaki kesit fotoğrafının büyütülmüş hali. (e) 5 numaralı noktanın kutup bölgesindeki boşluk oluşumunu gösteren optik mikroskop görüntüsü. (f) 5 numaralı noktanın flanş bölgesindeki boşluk oluşumunu gösteren optik mikroskop görüntüsü.

Erichsen testleri sonrası tane boyutunun numunelerin yüzey kalitesine etkisini incelemek amacıyla EKAE sonrası elde edilen en küçük tane boyutuna sahip numune ve EKAE sonrası 250 °C’de 8 gün uygulanan tavlama sonucu elde edilen en büyük tane boyutlu numune seçilmiştir. Erichsen numunelerinin yüzeyleri SEM ile incelenmiş ve tepelerin yüzey görünümü Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Genelde EKAE uygulanmış numuneler EKAE sonrası tavlama numunelere göre bütün zımba hızlarında daha pürüzsüz tepe yüzeylerine sahiptir. Her iki durumda da bu fark, farklı tane boyutlarına sahip iki numunede gözlenen farklı deformasyon mekanizmalarına atfedilmiştir. Şekil 3.18 (b, c, e, f, h, i)’de verilen EKAE uygulanmış numunelerin tepe yüzeylerinin SEM resimlerinden, yüzeydeki taneli morfoloji elde edildiği için tane sınırı kaymasının kanıtları açıkça görülebilmektedir. Birçok tanede bu durum belli yönelim olmaksızın görünmektedir. Böylece, komşu tanelerin yüzey seviye farklarının olmaması nedeniyle numunelerin yüzeyleri oldukça pürüzsüzdür ve neredeyse bütün tane sınırlarında tane sınırı kayması meydana gelmektedir [7]. Bu durumdan ayrı olarak, EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 8 gün tavlama numunelerin tepe yüzeyleri Erichsen testi sonrası pürüzlü hale gelmiştir (Şekil 3.18 (j)-(r)). Bu durum EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 8 gün tavlama numunelerin 2,6 µm olarak oldukça büyük tane boyutu nedeniyle tane sınırı kaymasının olmamasına bağlanabilir. Diğer bölümlerde tane boyutunun yük en büyük değeri aşıcaya kadar deformasyon homojenitesi üzerinde büyük bir etkisinin olmadığı belirtilmişti. Ayrıca tane boyutunun, maksimum yüke ulaşılan tepe yüksekliği değerleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı da belirtilebilir. Maksimum yüke ulaşılan tepe yüksekliği değerleri bütün mikron altı tane boyutlu ve mikron tane boyutlu numuneler için $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ’de $\sim 2,5-3$ mm, $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ’de $\sim 2,3-2,8$ mm ve $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ’de $\sim 2,1-2,3$ mm aralıklarındadır. Karşıt olarak, tepe yüzeylerinin morfolojik özellikleri, iki eksenli gerilme altında gerçekleşen Erichsen testleri sırasında tane boyutunun deformasyon mekanizmasını ve yüzey kalitesini etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle, yüksek kaliteli yüzey elde etmek için süperplastik malzemelerin tane boyutunu azaltmak faydalıdır.



Şekil 3.18. EKAET işlemi uygulanmış numunelerin uygulanan deformasyon hızlarına ait tepe yüzey görüntüleri: (a-c) $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, (d-f) $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, (g-i) $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. EKAET işlemi sonrası $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 8 gün uygulanmış numunelerin uygulanan deformasyon hızlarına ait tepe yüzey görüntüleri: (j-l) $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, (m-o) $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, (p-r) $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

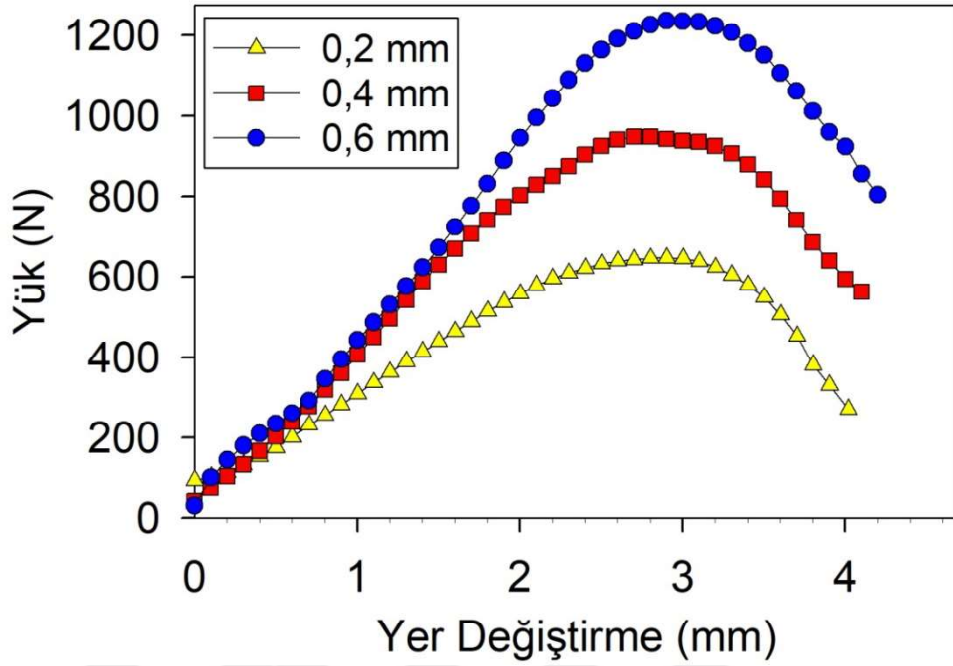
Süperplastik uzama durumunda olduğu gibi, süperplastik malzemelerin kırılması için katışkıların kritik faktör olduğu bilinmektedir. Katışkılar deformasyon sırasında çukurların ve boşlukların oluşumunu ve dolayısıyla numunelerin yüzey kalitesini etkiler [29]. Yüksek oranda katışkı olması durumunda, birçok mikro boşluk katkı maddelerinin etrafında çekirdekleşmekte ve kırılmaya neden olan mikro çatlaklar oluşturmak için birbirine bağlanmaktadır [29]. Bu çalışmada, alaşımın katışkı seviyesi üretim süreci boyunca kontrol edilmediğinden yüksek düzeyde katışkı ihtiva etmekte ve bu katkı maddelerinin EKAE ve EKAE işlemleri sonrası uygulanan tavlama işlemlerinden sonra nasıl dağıldığı bilinmemektedir. Bu katışkılarının dağılımındaki mikro boşlukların bulunma ihtimalini içeren herhangi bir farklılık, EKAE ve EKAE işlemleri sonrası 250 °C'de 8 gün tavlama sonrası elde edilen farklı yüzey kalitelerine neden olabilir. Bu nedenle, EKAE ve EKAE işlemleri sonrası tavlama işlemlerinden sonra farklı yüzey kalitesi, alaşımın yüksek katışkı seviyesinin varlığına ve uygulanan işlemlerden sonra katışkılarının dağılımına bağlanabilir.

3.1.4. Mikro Derin Çekme Deneyi Bulguları

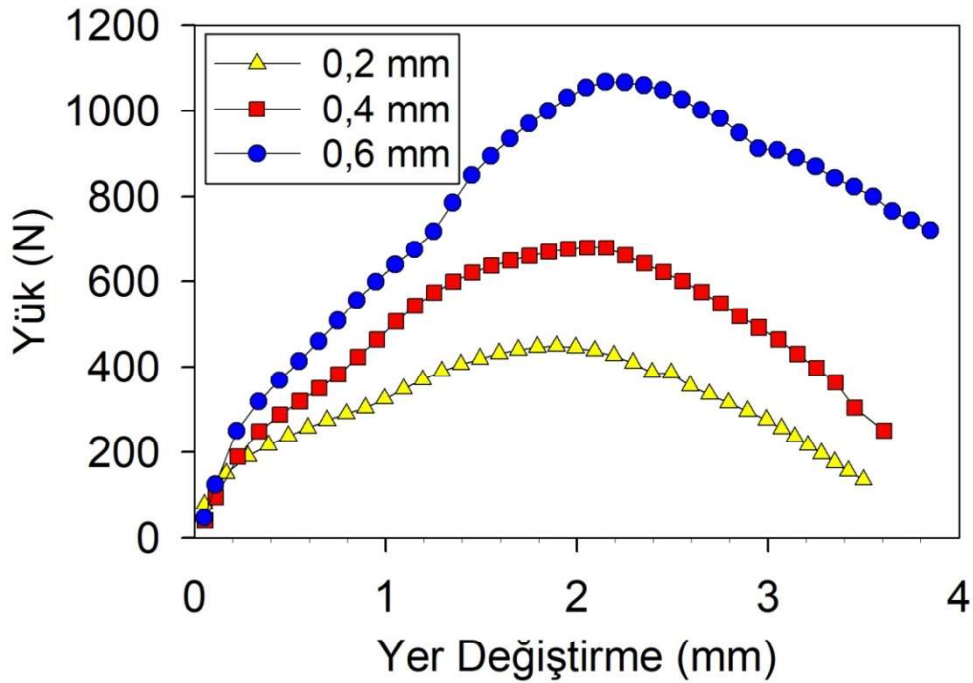
Mikro derin çekme deneyleri 1,66, 1,84, 2 ve 2,25 derin çekme oranlarında 0,2, 0,4 ve 0,6 mm sac kalınlıklarındaki numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Farklı zımba kalınlıkları ve farklı derin çekme oranlarında yapılan bütün deneylerde deformasyon hızı sabit olup $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 'dir. Zn-22Al alaşımına iki adımlı EKAE işlemleri yapılmış durumda uygulanan mikro derin çekme deneyleri sonrasında elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 3.19-3.22' de gösterilmiştir. Bütün eğrilerin bitiş noktaları numunede çatlak ve yırtılma olmadan başarıyla tamamlanan derin çekme işlemlerini göstermektedir. Genel olarak bütün numuneler yük maksimum değere ulaşıncaya kadar benzer yük-yer değiştirme davranışı göstermişlerdir. (Şekil 3.19-3.22). Yük-yer değiştirme eğrisinin en yüksek değerinden sonra 1,66 ve 1,84 derin çekme oranlarında uygulanan deneylerdeki numuneler için yük hafifçe azalmış ve büyük ölçüde yük düşüşü gerçekleştikten sonra çatlak ve yırtılma olmadan deney sonlandırılmıştır. (Şekil 3.19-3.20). Diğer taraftan 2 ve 2,25 derin çekme oranlarında uygulanan deneylerdeki numuneler için yük-yer değiştirme eğrisinin en yüksek değerinden sonra ani bir düşüş gözlenmiş ve çatlak başlangıcı ve yırtılma gerçekleşme olasılığı nedeniyle zımba ilerlemesi durdurulmuştur. (Şekil 3.21-3.22). Daha küçük derin çekme oranlarında yırtılma daha geç oluşurken, derin çekme oranı arttıkça yırtılma oluşması daha erken gerçekleşmektedir. 1,66 ve 1,84 derin çekme oranlarında her üç

kalınlık içinde çatlak ve yırtılma olmadan derin çekme işlemi başarıyla tamamlanmıştır. 2 ve 2,25 derin çekme oranlarında ise sadece 0,4 ve 0,6 mm kalınlıklarındaki numuneler başarı ile derin çekilebilmiştir. Benzer sonuçlar Saotome vd.'nin [58] çalışmasında da görülmüştür. Zımba çapının sac kalınlığına oranının (d_0/s_0) artması halinde, başka bir ifadeyle sac kalınlığının azaldığı durumlarda sınır çekme oranının azaldığı tespit etmişlerdir [58]. 1,66 oran ve 0,6 mm sac kalınlığında mikro derin çekilmiş süperplastik Zn-22Al alaşımının kesitinin sağ, sol, tepe ve radyus bölgelerinden alınmış mikro yapılarının SEM görüntüleri Şekil 3.23'de gösterilmiştir. Bu şekildeki mikro yapılarda mikro derin çekme sonucunda yırtılma meydana gelmediği için boşluk oluşumu görülmemektedir. 2 ve 2,25 derin çekme oranlarında 0,2 mm sac kalınlıklı derin çekilemeyen numunenin durumu bu önermeyle açıklanabilir. Numunenin derin çekilmesi sırasında boşluk veya gözenek oluşumu nedeniyle yırtılma gerçekleşmiş ve dolayısıyla derin çekilememe durumu gerçekleşmiş olabilir. Çünkü süperplastik deformasyon sırasında geniş çaplı boşluk oluşumunun meydana geldiği iyi bilinmektedir [89,90]. Yırtılma, süperplastik Zn-22Al alaşımının mikro derin çekilmesi sırasında bu boşlukların birleşmesinden kaynaklanmaktadır.

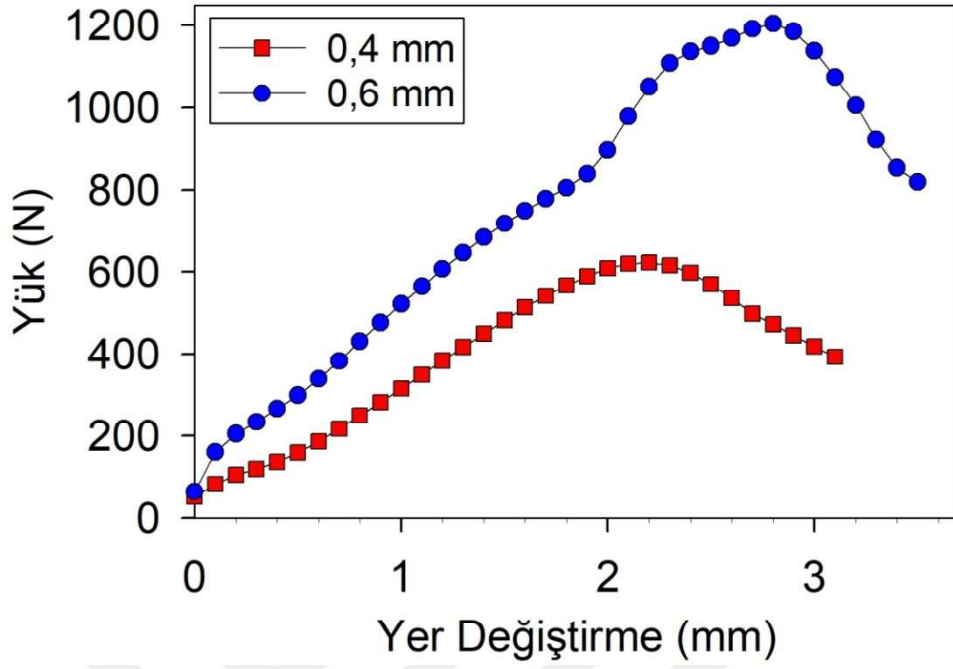
Şekil 3.19- Şekil 3.22'den görüleceği gibi, kalınlığın azalması ile derin çekmede oluşan maksimum yüklerin azaldığı açıktır. Böylece daha az kalınlıktaki numuneleri derin çekmek için daha büyük kalınlıktaki numunelere kıyasla daha az kuvvete ihtiyaç duyulduğu sonucuna ulaşılabilir. Bunun yanında kalınlık azaldıkça derin çekmede elde edilen kap yükseklikleri de azalmıştır.



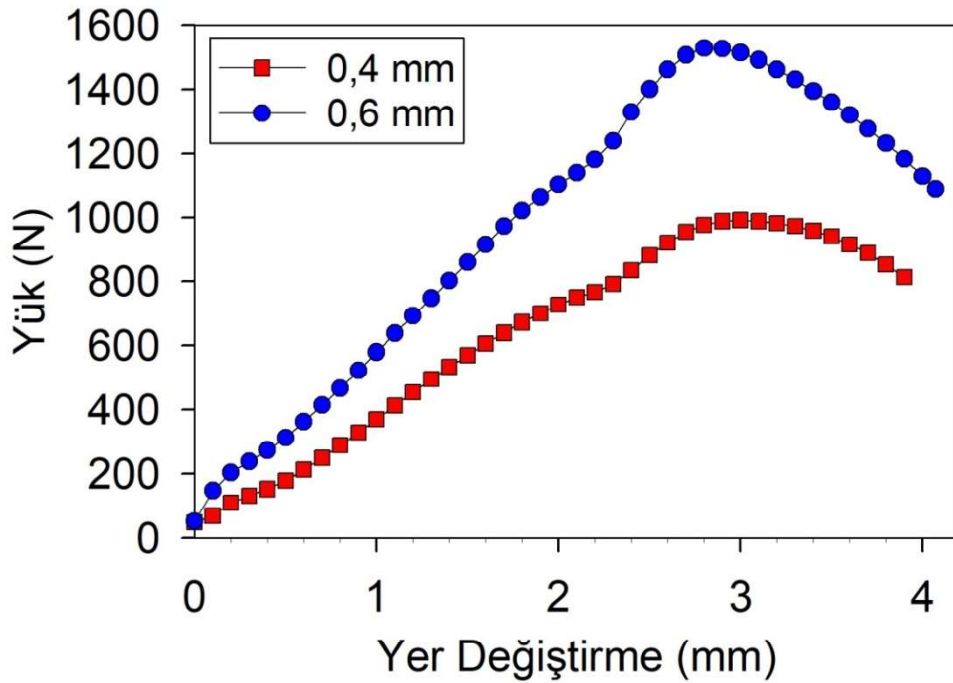
Şekil 3.19. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımlının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 1,66 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait yük-yer değiştirme grafikleri



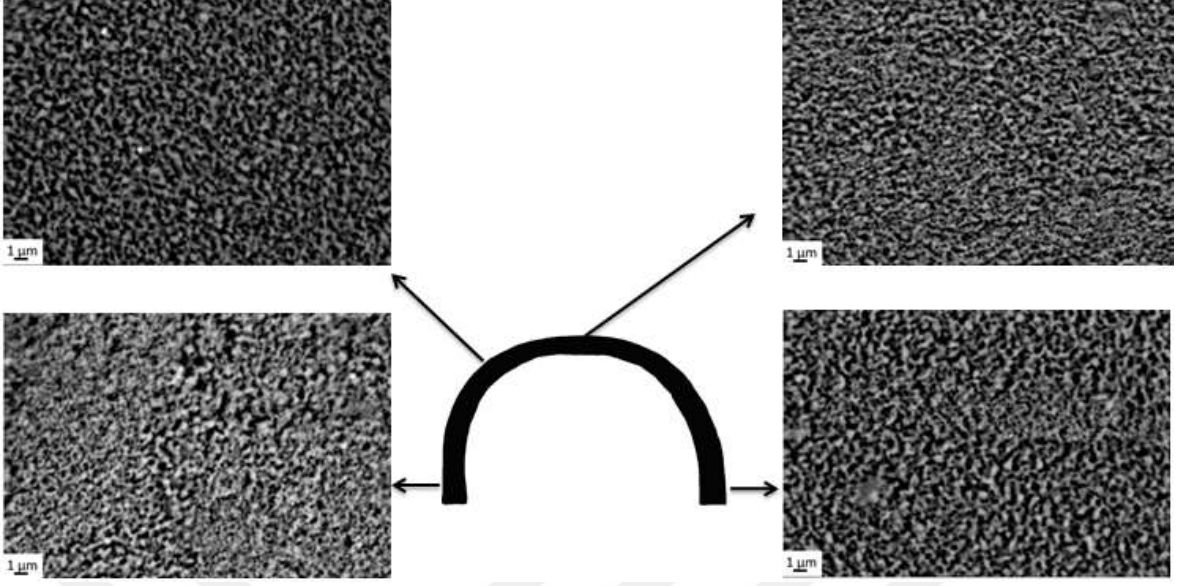
Şekil 3.20. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımlının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 1,84 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait yük-yer değiştirme grafikleri



Şekil 3.21. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 2 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait yük-yer değiştirme grafikleri



Şekil 3.22. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 2,25 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait yük-yer değiştirme grafikleri



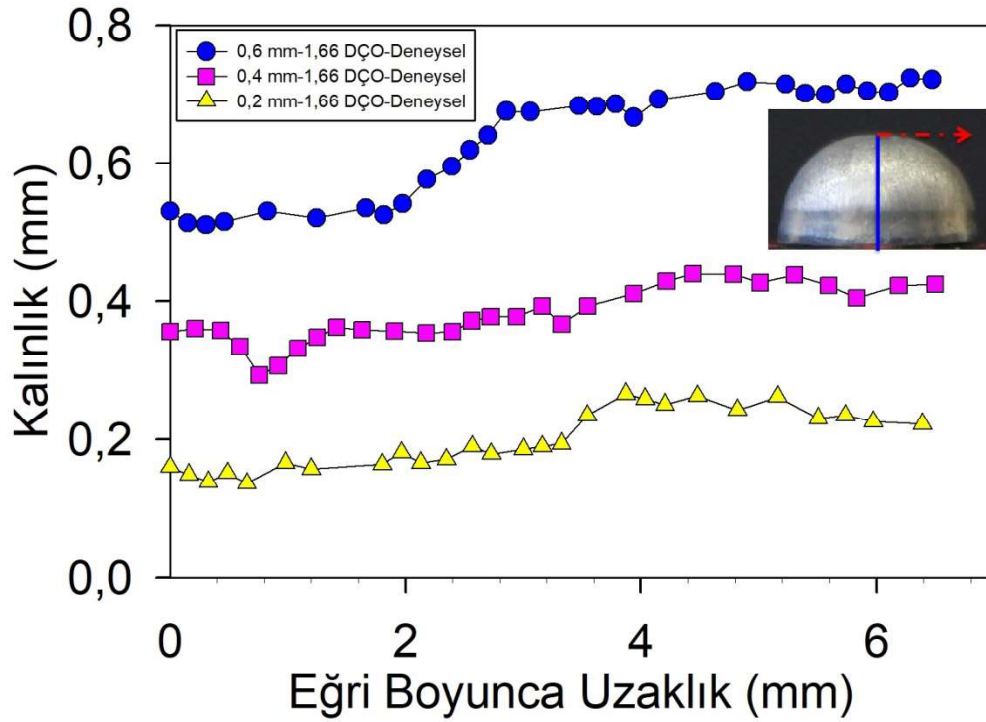
Şekil 3.23. 1,66 oran ve 0,6 sac kalınlığında mikro derin çekilmiş süperplastik Zn-22Al alaşımının kesitinin sağ, sol, tepe ve radyus bölgelerinden alınmış mikro yapılarının SEM görüntüleri

Mikro derin çekilmiş numunelerin kalınlık değişimlerini incelemek için, mikro parçalar orta kesitlerinden bu iş için özel bir aparat kullanarak tel elektro erozyon ile kesildi. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak kesilen numunelerin kesit profillerinin resmi çekildi. Kalınlık ölçümleri için İmageJ programı kullanıldı. Mikro derin çekilmiş numunelerin kalınlık değişimi, numunenin eğri uzunluğu boyunca kalınlığı ölçülerek elde edildi. Zn-22Al alaşımına iki adımlı EKAE işlemi uygulanmış durumda uygulanan mikro derin çekme deneyleri sonrasında derin çekme oranları göz önüne alınarak çizilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri Şekil 3.24-3.27' de gösterilmiştir. Şekil 3.24-3.27' de gösterilen grafiklere genel olarak bakıldığında 0,6 mm başlangıç kalınlığına sahip mikro parçanın zımba köşesinin etrafındaki düzensiz kalınlık dağılımının ve şiddetli incelmenin, 0,2 mm ve 0,4 mm başlangıç kalınlığına sahip derin çekilmiş numunelerden daha belirgin olduğu gözlemlenebilir. 1,66 derin çekme oranında ise, 0,2, 0,4 ve 0,6 mm kalınlıklı numunelerde başlangıç numune kalınlığının sırasıyla yaklaşık % 32, % 27, % 15 oranlarında maksimum kalınlık incelmesi meydana gelmiştir. 0,2 mm, 0,4 mm ve 0,6 mm kalınlıklı numunelerde 1,84 çekme oranında başlangıç numune kalınlığının yaklaşık % 32, % 28, % 26 oranlarında maksimum kalınlık incelmesi görülmüştür. 2 derin çekme oranında 0,4 mm ve 0,6 mm kalınlıklı numuneler başlangıç numune kalınlığının yaklaşık % 21, % 23'ü oranında incelmıştır. Son olarak 2,25 çekme

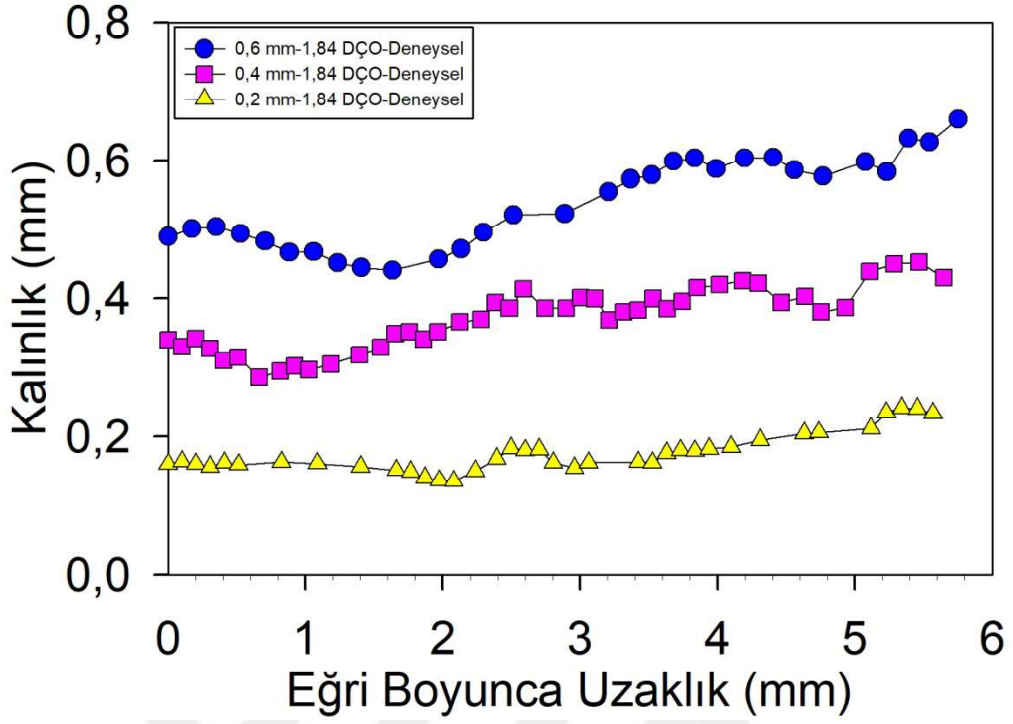
oranında 0,4 mm ve 0,6 mm kalınlıklı numuneler için maksimum kalınlık incelmesi %53 ve %55'tir. Yan duvar kalınlığı kademeli olarak alt yarıçaptan kabın kenarına doğru artmaktadır. Kalınlık incelmesi değerlerini derin çekme oranı açısından incelediğimizde sınır çekme oranı olarak belirlediğimiz 2,25 derin çekme oranında her iki sac kalınlığı için %50'nin üzerinde bir incelme meydana gelmiştir.

Şekil 3.24-3.27'de gösterilen grafiklerden elde edilen sonuçlar, cidar kalınlığının zımba tabanından itibaren incelendiğini, zımbanın yarıçap başlangıcından hemen sonra boyun verme bölgesinin oluştuğunu, boyun verme bölgesinden sonra derin çekilen kabın ağız kısmına doğru gidildikçe kalınlaşmaların arttığı ve tekrar bir boyun verme bölgesinin oluştuğunu göstermektedir. Elde edilen bu değerlerin literatür ile benzerlik gösterdiği karşılaştırmalı olarak Şekil 3.28'de gösterilmiştir. Johnson W ve Özkan'ın [91,92] derin çekme prosesini inceledikleri çalışmalarda derin çekilen kaplarda oluşan boyunlaşma bölgelerini, zımba yarıçapında meydana gelen incelme bölgesi ve kap duvarında oluşan kalınlaşma bölgesi olarak tanımlanmıştır. Johnson W ve Özkan'ın [91,92] çalışmalarında belirttiği cidar kalınlığı değişimi Şekil 3.24-3.27'te elde edilen cidar kalınlığı değişimi ile örtüşmektedir. Küresel zımba ile yapılan derin çekme işleminde malzeme cidarında oluşan kalınlık değişimi ile bu çalışmada 2,25 derin çekme oranında mikro derin çekme uygulanmış 0,6 kalınlıklı numunenin cidar kalınlık değişiminin karşılaştırılması Şekil 3.28'de gösterilmiştir ve literatürle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Sac bünyesinde çekme etkisinden dolayı kuvvetler ortaya çıkmakta ve bu kuvvetler malzemenin kalınlığında değişimlere yol açmaktadır. Ürünün tabanının kalınlığı iş parçasının zımbanın ucuna temas eden bölgesinin zımba etrafında bükülmesinden dolayı azalır. Zımbanın hareketinden dolayı zımbanın iş parçasına temas ettiği bölgede, iki eksenli çekme gerilmesi meydana gelir. İş parçasının çevre genişliğinin azalması iş parçasının dış yüzeyindeki malzemenin radyal olarak kalıbın içerisine doğru çekilmesi ile gerçekleşir. Bu durum sonucunda iş parçası çevresel olarak basmaya, radyal yönde de çekmeye zorlanır. Kalıp içerisine çekilen iş parçasının kalınlığında bu iki zorlanma ve şekil değişimi nedeniyle artış meydana gelir [93]. Bir başka deyişle, sacın başlangıç çapı malzemenin içinden geçmeye zorlandığı kalıp boşluğu çapından büyük olduğu için bu bölgede çevresel olarak basma ve radyal yönde de çekme gerilmeleri oluşur ve bu durum malzeme yığılmasına sebep olur [91,92]. Derin çekilmiş parçaların dış kısımlarında kendini gösteren kalınlaşma X bölgesinde gerçekleşmekte ve et kalınlığı bu bölgenin son bulunduğu noktada yeniden artmaktadır (Şekil 3.28). Bir başka açıdan bu durum X bölgesinin bitiminde iş parçasında boyun verme

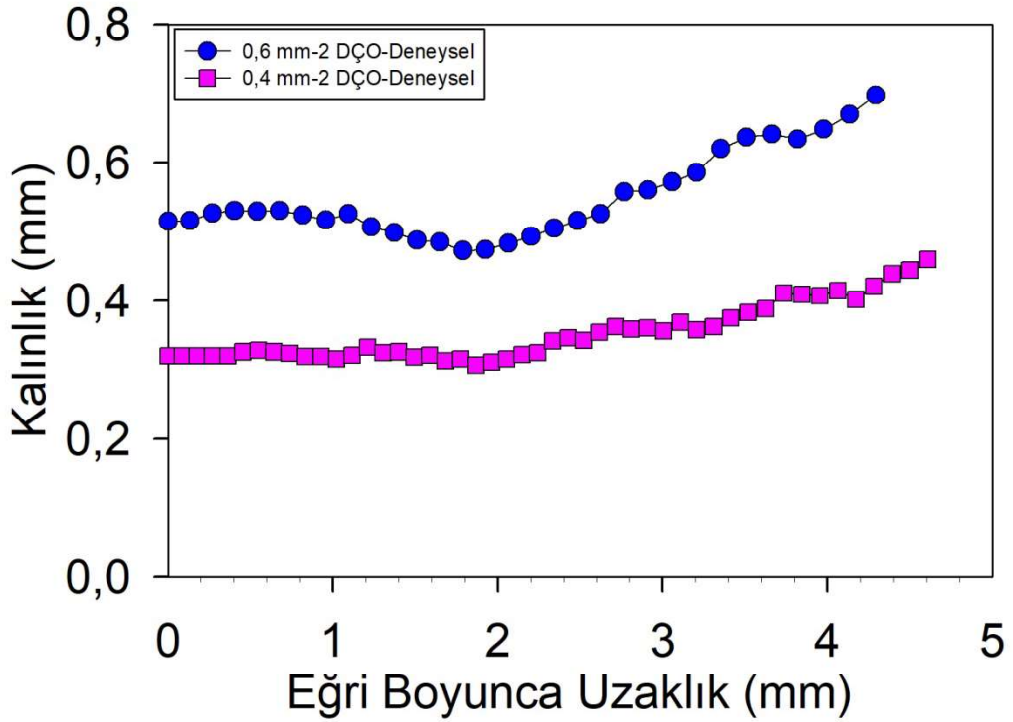
oluşumu ile açıklanabilir. (Şekil 3.28) [91,92]. Y bölgesinde sac kalıp ile zımba arasında uzamaya çalışırken, zımba çevresi ve kalıp çekme kenarı boyunca kayma ve eğilmeye çalışmaktadır. Bu durum sonucunda Şekil 3.28’de B ile gösterilen bölgede, ikincil bir boyunlaşma, eğilmenin meydana geldiği noktada gerçekleşmektedir.



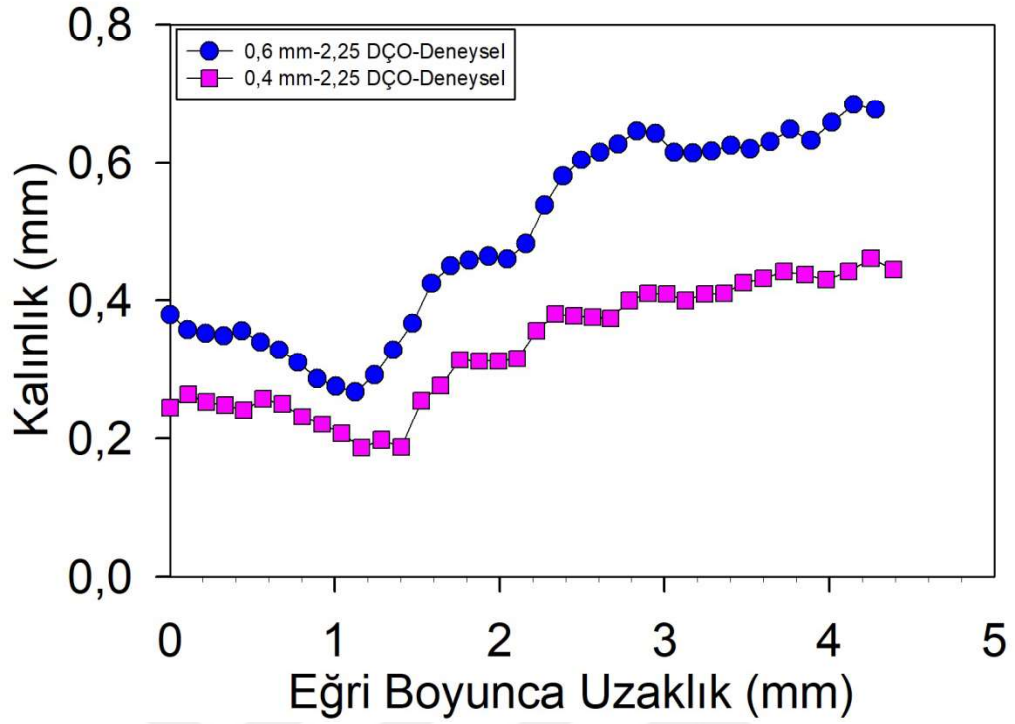
Şekil 3.24. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 1,66 derin çekme oranında (DÇO) yapılan mikro derin çekme deneyine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



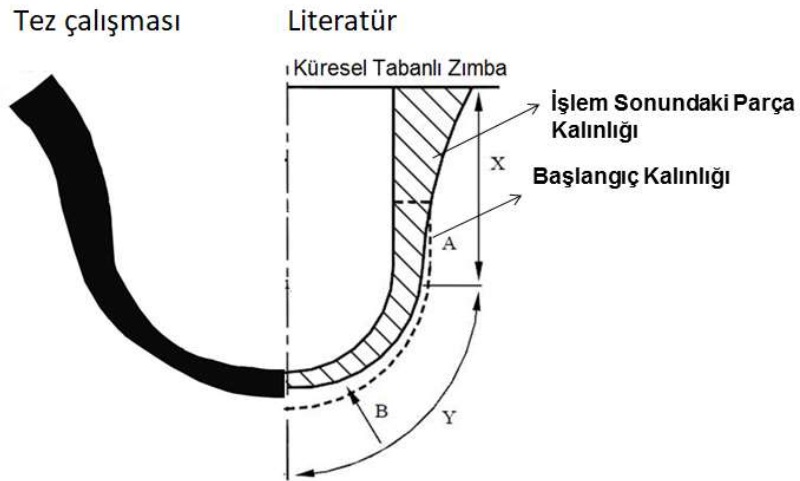
Şekil 3.25. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 1,84 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



Şekil 3.26. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 2 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



Şekil 3.27. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 2,25 derin çekme oranında yapılan mikro derin çekme deneyine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



Şekil 3.28. Küresel zımba ile yapılan derin çekme işleminde malzeme cidarında oluşan kalınlık değişimi ile bu çalışmada 2,25 derin çekme oranında mikro derin çekme uygulanmış 0,6 kalınlıklı numunenin kalınlık değişiminin karşılaştırılması [91,92]

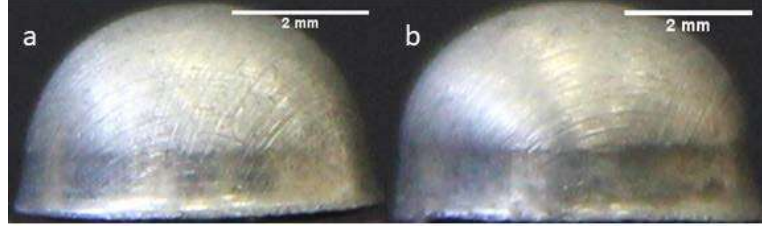
Mikro derin çekme deneyinde 1,66, 1,84, 2, 2,25 derin çekme oranlarında çekilebilen numuneler Şekil 3.29-Şekil 3.32’de gösterilmiştir. Mikro derin çekme işleminde farklı çekme oranlarında farklı çaplı zımbalar ve farklı çaplı saclar kullanılmıştır. Farklı derin çekme oranlarında şekillendirilebilirliği karşılaştırabilmek için kap yüksekliği/zımba çapı şekillendirilebilirlik parametresi olarak tanımlanmıştır [60]. Bu çalışma için numunelerde elde edilen kap yüksekliği/zımba çapı değerleri Tablo 8’de gösterilmiştir. Bunun yanında farklı kalınlıklarda aynı çekme oranında derin çekilen numunelerin yük-yer değiştirme eğrilerinden elde edilen maksimum yük değerleri de Tablo 8’de gösterilmiştir. Tablo 8’de verilen her bir derin çekme oranı için kap yüksekliği değerlerini numune kalınlıkları açısından incelediğimizde numune kalınlığı arttıkça derin çekilebilir kap yüksekliği artmaktadır. Tablo 8’de verilen her bir derin çekme oranı için maksimum yük değerlerini numune kalınlıkları açısından incelediğimizde ise numune kalınlığı arttıkça numuneyi çekebilmek için gerekli maksimum yük değeri de artmaktadır. Kap yüksekliğinin zımba çapına oranı değerlerine baktığımızda ise 1,66 derin çekme oranından 2,25 derin çekme oranına gidildikçe ve aynı zamanda kap yüksekliğinin zımba çapına oranı numune kalınlığı arttıkça artmıştır (Tablo 8). 0,6 sac kalınlığında ve 2,25 çekme oranında çekilen numunede bu değer en yüksek değeri olan 1’ e ulaşmıştır.



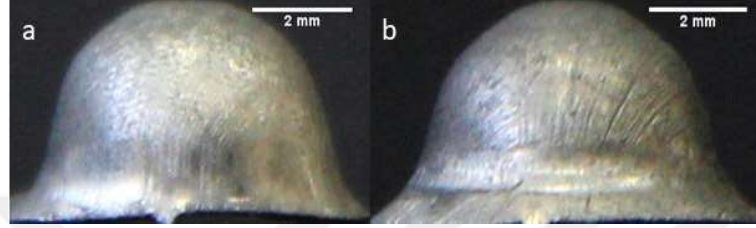
Şekil 3.29. 1,66 derin çekme oranında mikro derin çekilmiş numuneler a) 0,2 mm kalınlıklı b) 0,4 mm kalınlıklı c) 0,6 mm kalınlıklı



Şekil 3.30. 1,84 derin çekme oranında mikro derin çekilmiş numuneler a) 0,2 mm kalınlıklı b) 0,4 mm kalınlıklı c) 0,6 mm kalınlıklı



Şekil 3.31. 2 derin çekme oranında mikro derin çekilmiş numuneler
a) 0,4 mm kalınlıklı b) 0,6 mm kalınlıklı



Şekil 3.32. 2,25 derin çekme oranında mikro derin çekilmiş numuneler
a) 0,4 mm kalınlıklı b) 0,6 mm kalınlıklı

Tablo 8. Mikro derin çekilen numunelerin şekillendirilebilirliğini etkileyen parametreler

Zımba Hızı (mm/s)	Numune Kalınlığı (mm)	Numune Çapı (mm)	Zımba Çapı (mm)	Çekme Oranı (mm)	Kap Yüksekliği (mm)	Kap Yüksekliği/Zımba Çapı	Maksimum Yük (N)
1	0,2	10	6	1,66	4,02	0,67	646
1	0,4	10	6	1,66	4,11	0,685	945
1	0,6	10	6	1,66	4,23	0,705	1287
1	0,2	9,2	5	1,84	3,54	0,708	600
1	0,4	9,2	5	1,84	3,61	0,722	678
1	0,6	9,2	5	1,84	3,81	0,762	1023
1	0,2	8	4	2	-	-	-
1	0,4	8	4	2	3,16	0,79	622
1	0,6	8	4	2	3,43	0,8575	1204
1	0,2	9	4	2,25	-	-	-
1	0,4	9	4	2,25	3,95	0,9875	958
1	0,6	9	4	2,25	4	1	1493

Literatürde süperplastik Zn-22Al alaşımının şekillendirilebilirliği gazla şişirme (air-blowing) SPŞ yöntemiyle 120-200 °C arası sıcaklıklarda Tsao vd. [52] tarafından incelenmiştir. Zn-22Al alaşımının söz konusu çalışmada ortalama tane boyutu 0,7 µm'dir.

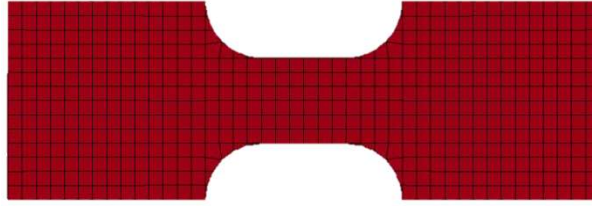
Numunenin SPŞ işleminde elde edilen toplam kap yüksekliği değerinin (H) numune yarıçapına (D) oranını (H/D) şekillendirilebilirlik parametresi olarak tanımlamışlardır ve bu parametre için maksimum 0,7 değerini elde etmişlerdir. Bu çalışma için oda sıcaklığında gerçekleştirilen mikro derin çekme deneylerinde maksimum kap yüksekliği 0,2 mm sac kalınlıklı ve 1,66 derin çekme oranlı numunede 4,02 mm olarak ölçülmüştür. Söz konusu numunenin mikro derin çekilmesinde kullanılan sacın yarıçapı 5 mm'dir. Böylece, bu çalışmada en küçük kalınlık ve en küçük derin çekme oranında elde edilen H/D değeri 0,804'tür. Sonuç olarak Tsao vd. maksimum 0,7 H/D oranına erişirken bu çalışmada ise 0,804 H/D oranı elde edilmiştir. Bu sonuçlar, tane boyutunun alaşımın süperplastik davranışında etkili olduğu gibi aynı zamanda şekillendirilebilirliği üzerinde de oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Tane boyutunu daha da küçültmek TSK'nın deformasyon mekanizması olarak etkin ve kolay bir şekilde gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bu da mikro derin çekme deneylerinde daha yüksek büyüklükte kap yüksekliğinin elde edilmesine imkân sağlamaktadır.

3.2. Sayısal Bulgular

Tez çalışmasının bu bölümünde süperplastik Zn-22Al alaşımının oda sıcaklığında deformasyon davranışı Erichsen testi ve mikro derin çekme testleri ile sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal bulgulardan ve deneysel bulgulardan elde edilen profil boyunca kalınlık değişimi değerleri karşılaştırılmıştır.

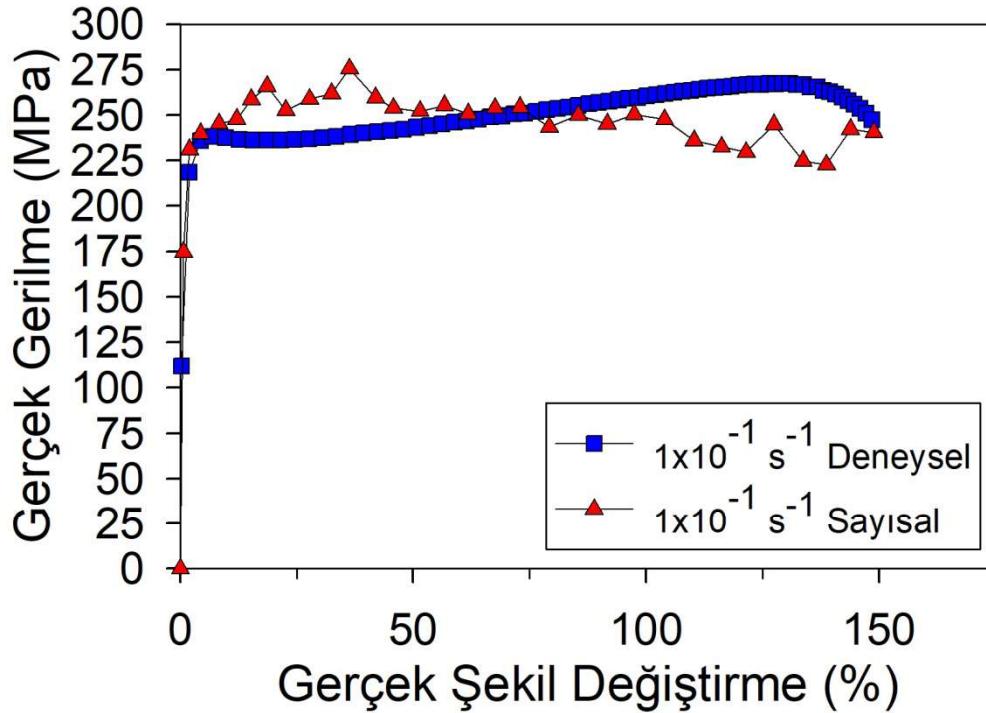
3.2.1. Şekillendirilebilirlik (Erichsen) Analizleri

Erichsen testinin sayısal şekillendirilebilirlik analizlerinde kullanılacak MAT 64 malzeme modelinin sayısal doğrulamasını yapmak için çekme deneylerinin sayısal modelleri oluşturulmuştur. Çekme testlerinin uygulandığı numunenin boyutları Şekil 2.3'te verilmiştir. Çekme testlerinin sayısal simülasyonu için kullanılan modelin ağ yapısı Şekil 3.33'te verilmiştir.



Şekil 3.33. Çekme testinin sayısal modelinin ağ yapısı

Malzeme modelini doğrulanması için Zn-22Al alaşımına EKAE sonrası $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında uygulanan çekme deneyinin sayısal modelinden elde edilen gerçek gerilme- gerçek şekil değiştirme grafikleri Şekil 3.34'te verilmiştir. Şekil 3.34 ayrıca karşılaştırma amacıyla deneysel verileri de göstermektedir. Şekilden deneysel ve sayısal olarak elde edilen gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme grafiklerinin uyumlu olduğu görülebilmektedir. Eğriler arasındaki farklılıkların sayısal hatalardan kaynaklandığı söylenebilir.



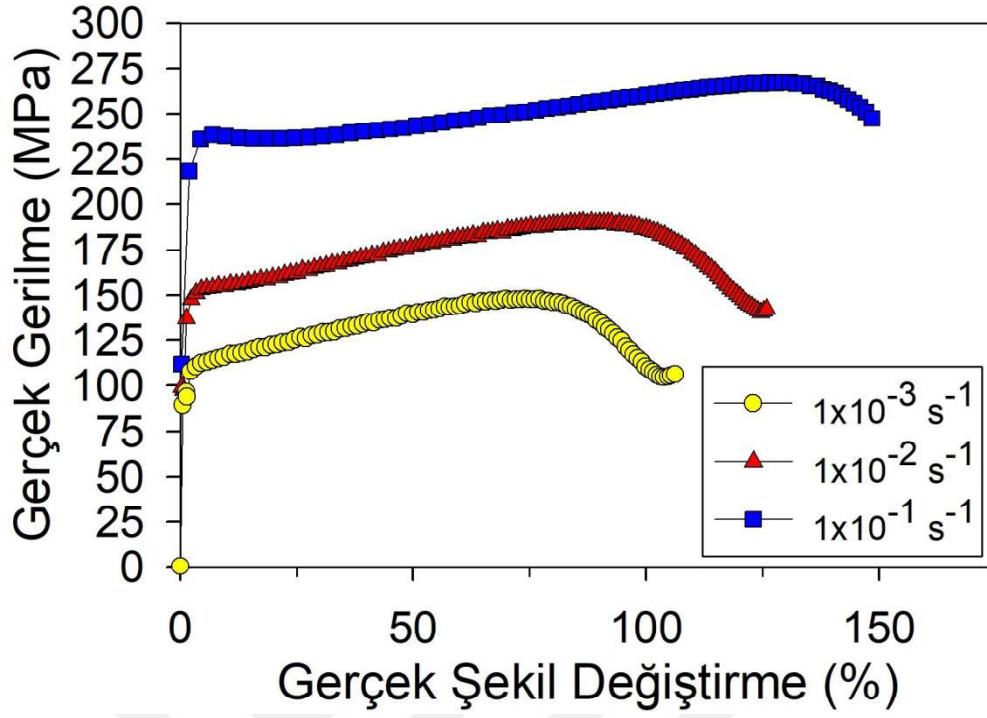
Şekil 3.34. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen gerçek gerilme- gerçek şekil değiştirme grafikleri

Süperplastik Zn-22Al alaşımının oda sıcaklığında gerçekleştirilen Erichsen testlerinin sayısal olarak modellenmesinde kullanılan işlem adımları Bölüm 2.2.1’de anlatılmıştır. Bu bölümde ise sayısal analizlerde kullanılan malzeme parametrelerinin belirlenmesi ve doğrulanması, deneysel ve sayısal bulgulardan elde edilen kalınlık değişimlerinin karşılaştırılması üzerine çalışılmış ve elde edilen bulgular verilmiştir.

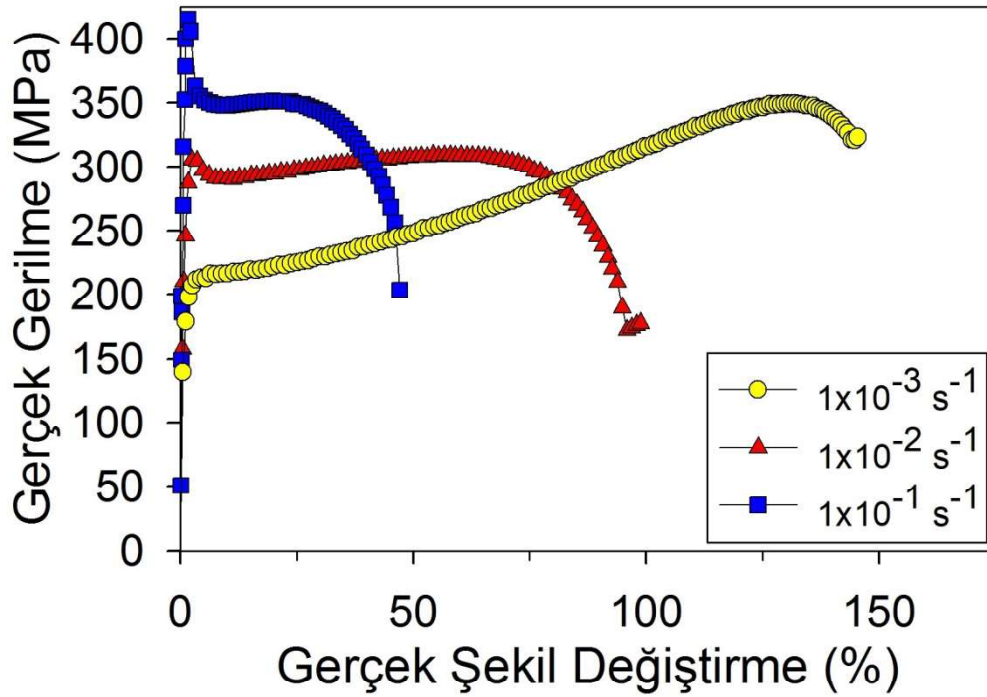
Süperplastik Zn-22Al alaşımı için Erichsen testinin sonlu eleman analizlerinde, deformasyon duyarlılık üssünü esas alan MAT64 malzeme modeli kullanıldı. MAT 64 malzeme modeli Denklem (1)’de [47–49] verilen bünye denklemini esas almakta ve bu denkleme göre çözüm yapılmaktadır.

$$\sigma = K \cdot \epsilon^m \dot{\epsilon}^n \quad (1)$$

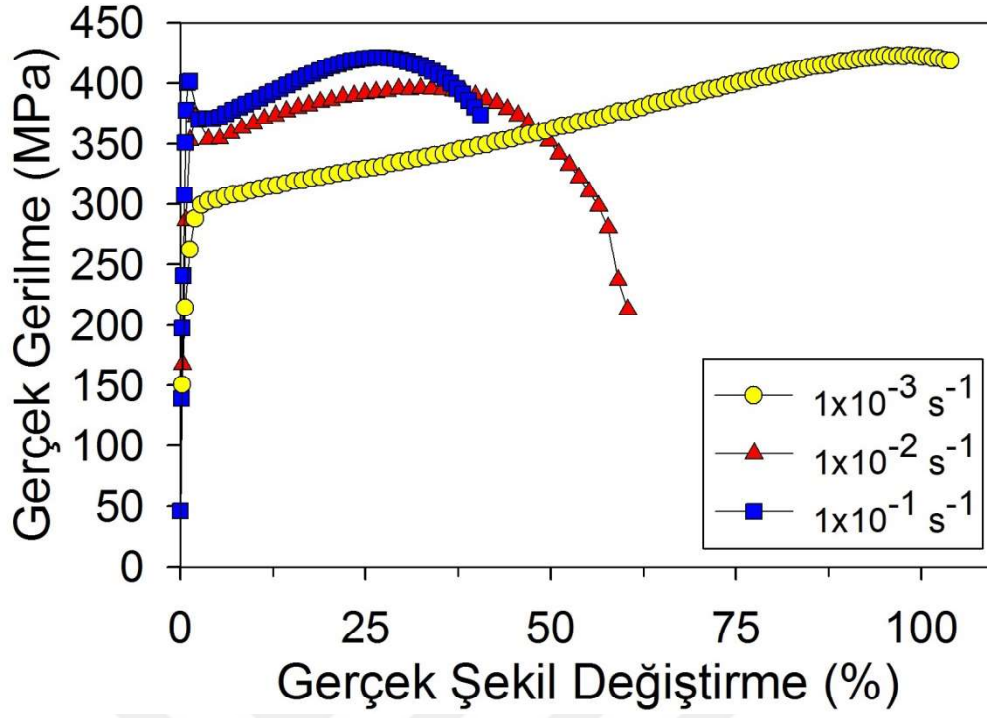
Bu denklemdeki değerlerden ‘K’ ve ‘m’ belirlenebilmesi için çekme deneylerinden elde edilmiş gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Zn-22Al alaşımına EKAE sonrası ve EKAE işlemini takiben 250 °C’de 150 dakika, 1 gün, 6 gün, 8 gün yapılan tavlama sonrası uygulanan çekme deneylerinden elde edilen mühendislik gerilmesi- mühendislik şekil değiştirmesi grafikleri Bölüm 3.1.2’de verilmiştir ve bu eğrilerden elde edilen sonuçlar aynı bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bunun yanında deformasyon hızı duyarlılık üssü değerleri de Tablo 5’te verilen akma gerilmesi değerleri kullanarak hesaplanmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan malzeme modeli parametrelerini belirlemek için Zn-22Al alaşımına EKAE sonrası ve EKAE işlemini takiben 250 °C’de 150 dakika, 1 gün, 6 gün, 8 gün yapılan tavlama sonrası $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızlarında yapılan çekme deneylerinden elde edilen mühendislik gerilmesi- mühendislik şekil değiştirmesi grafikleri kullanılarak, $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızlarında gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme grafikleri Şekil 3.35-3.39’da gösterilmiştir.



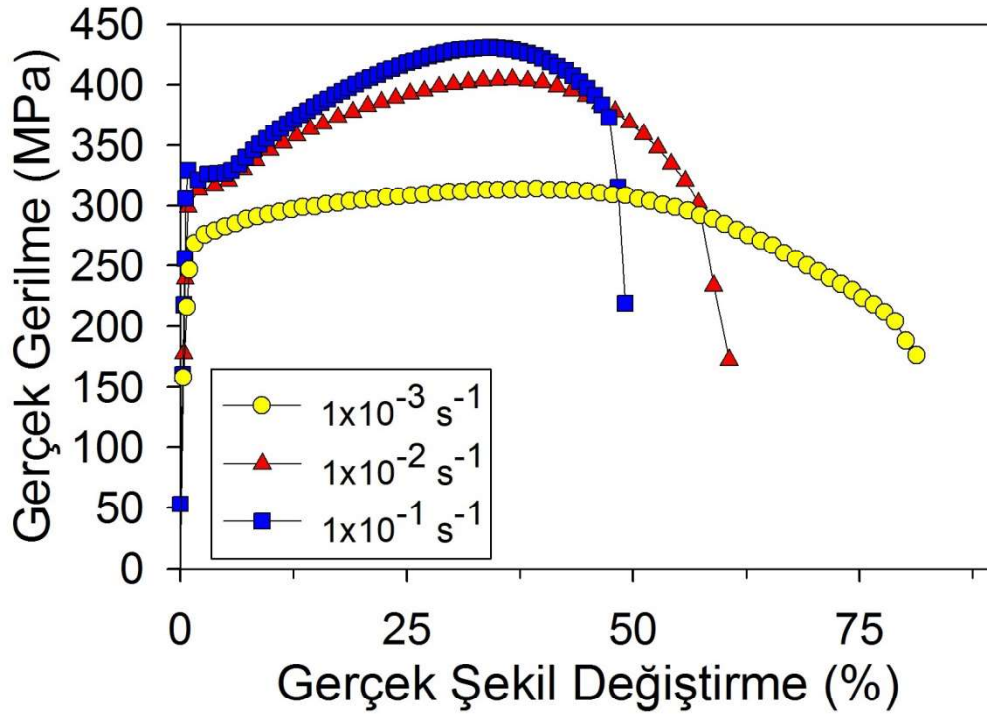
Şekil 3.35. İki adımlı EKAЕ işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerçek gerilme- gerçek şekil değıştirme grafikleri



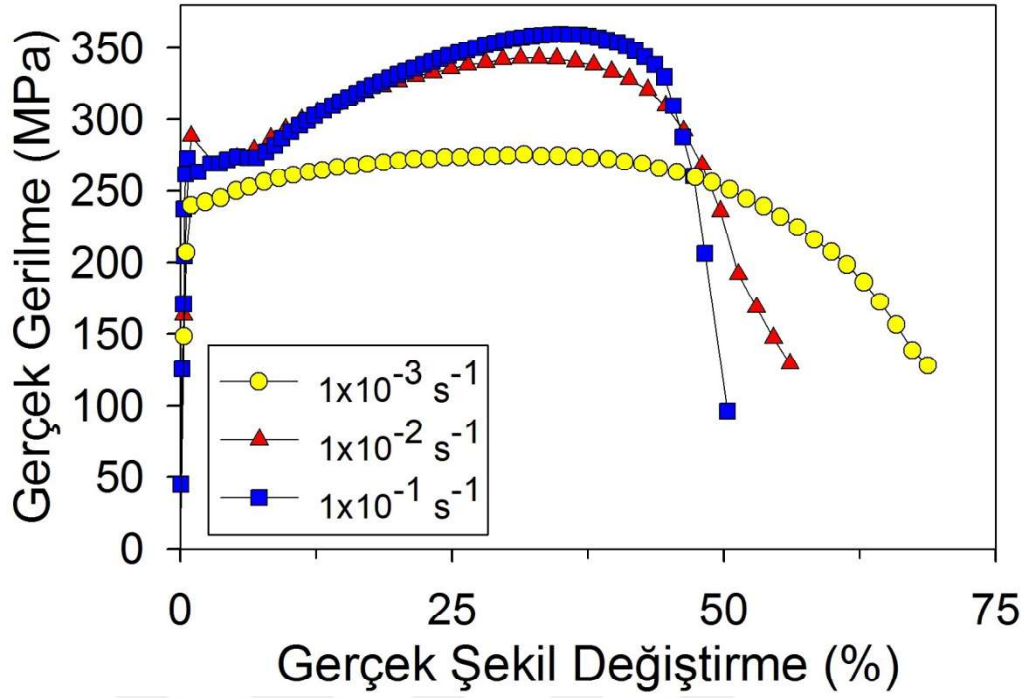
Şekil 3.36. İki adımlı EKAЕ işlemi sonrası 250 °C’de 150 dakika tavlanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerçek gerilme-gerçek şekil değıştirme grafikleri



Şekil 3.37. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 1 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerçek gerilme- gerçek şekil değişirme grafikleri



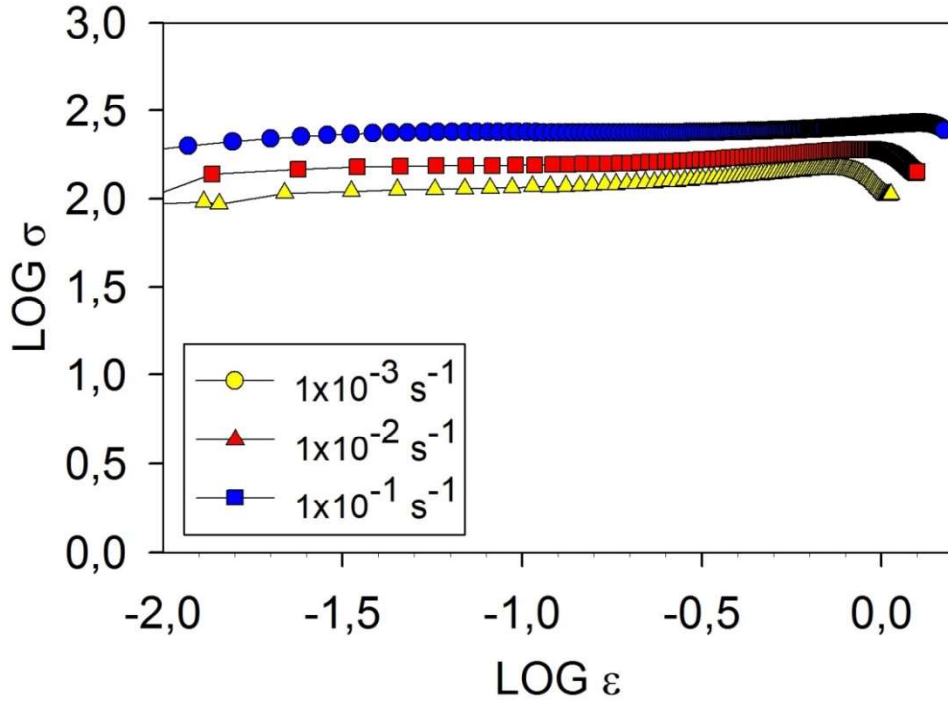
Şekil 3.38. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerçek gerilme- gerçek şekil değişirme grafikleri



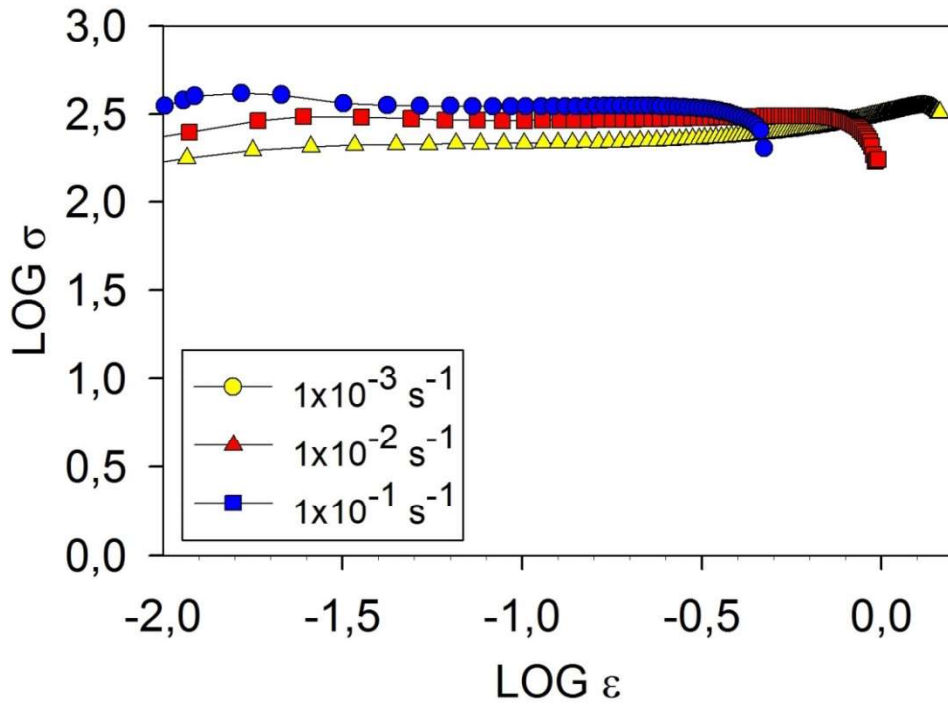
Şekil 3.39. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarındaki gerçek gerilme- gerçek şekil değişirme grafikleri

‘K’ ve ‘m’ değerleri gerçek gerilme-gerçek şekil değişirme eğrisinin her iki eksen için oluşturulan $\log \sigma$ - $\log \epsilon$ eksenlerinde tekrar çizilerek hesaplanmıştır. Bu eğrilerde $\log \sigma$ ’nın $\log \epsilon$ eğrisini 0 değerinde kestiği logaritmik gerilme değerinin ($\log \sigma$) ters logaritması alınarak ‘K’ değerini hesaplanmıştır [94]. Bunun yanında $\log \sigma$ - $\log \epsilon$ eğrisinin eğimi ‘m’ deformasyon sertleşme üssünü vermektedir [94]. Bu değerleri belirlemek için yukarıda verilen gerçek gerilme-gerçek şekil değişirme eğrileri kullanılarak her bir durum için $\log \sigma$ - $\log \epsilon$ eğrileri oluşturulmuş ve Şekil 3.40-3.44 arasında verilmiştir.

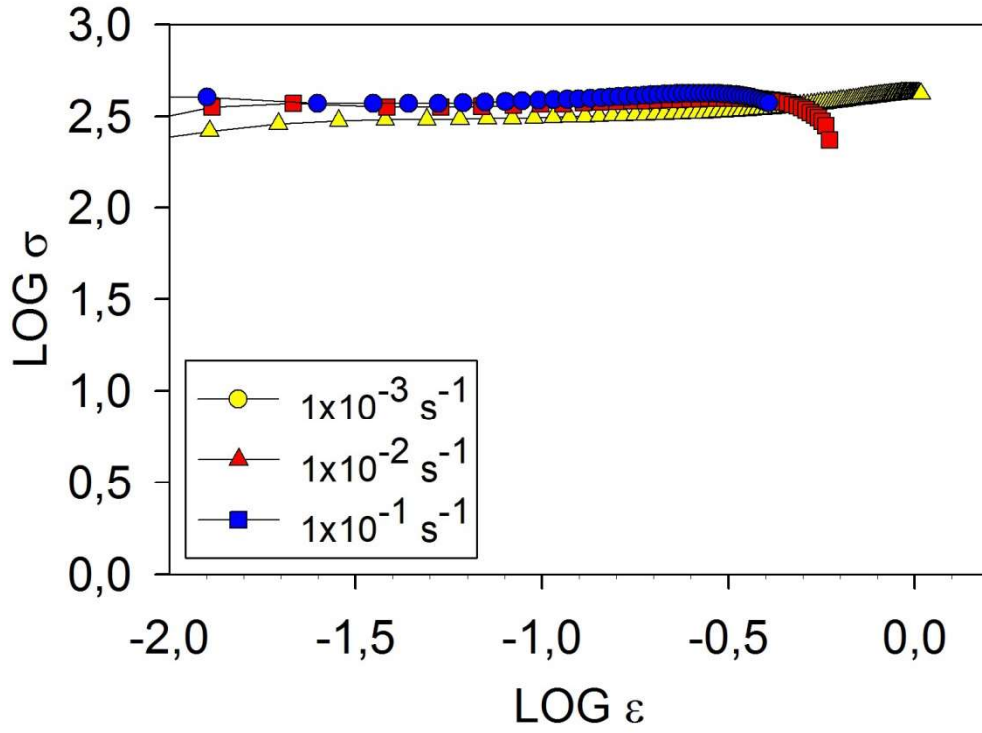
Zn-22Al alaşımına ait Şekil 3.35-3.39’da verilen $\log \sigma$ - $\log \epsilon$ grafikleri kullanılarak, EKAE sonrası ve EKAE işlemi takiben 250 °C’de 150 dakika, 1 gün, 6 gün, 8 gün yapılan tavlama kapsayan durumlar için Erichsen testinin sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan MAT 64 malzeme parametreleri Tablo 9’da verilmiştir.



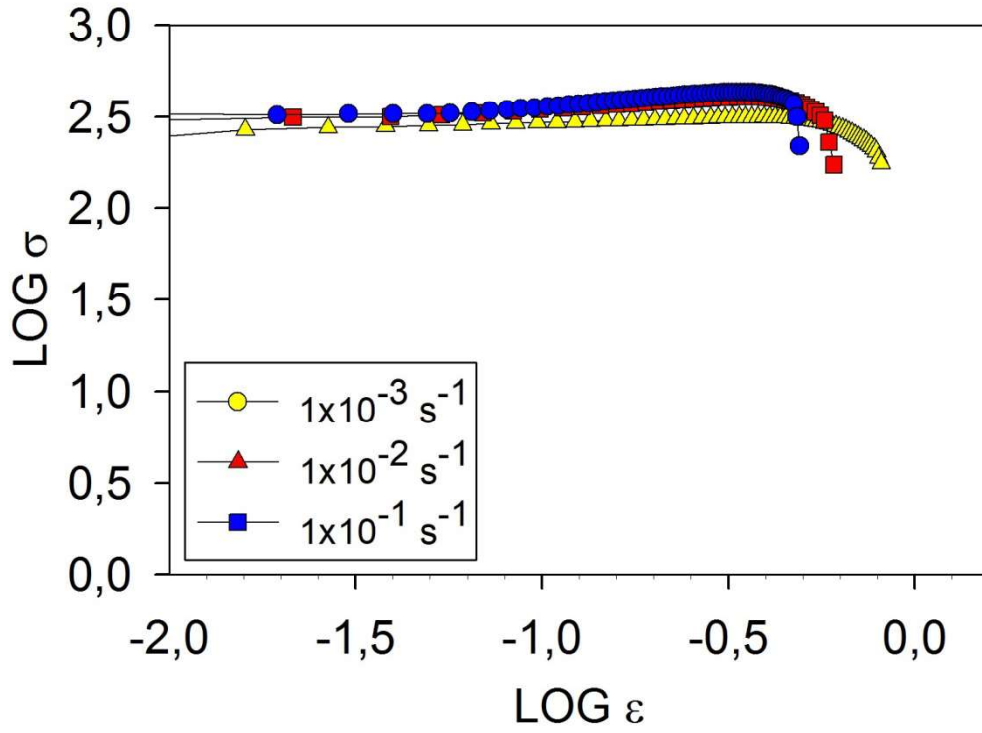
Şekil 3.40. İki adımlı EKAÉ işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarında log σ - log ϵ grafikleri



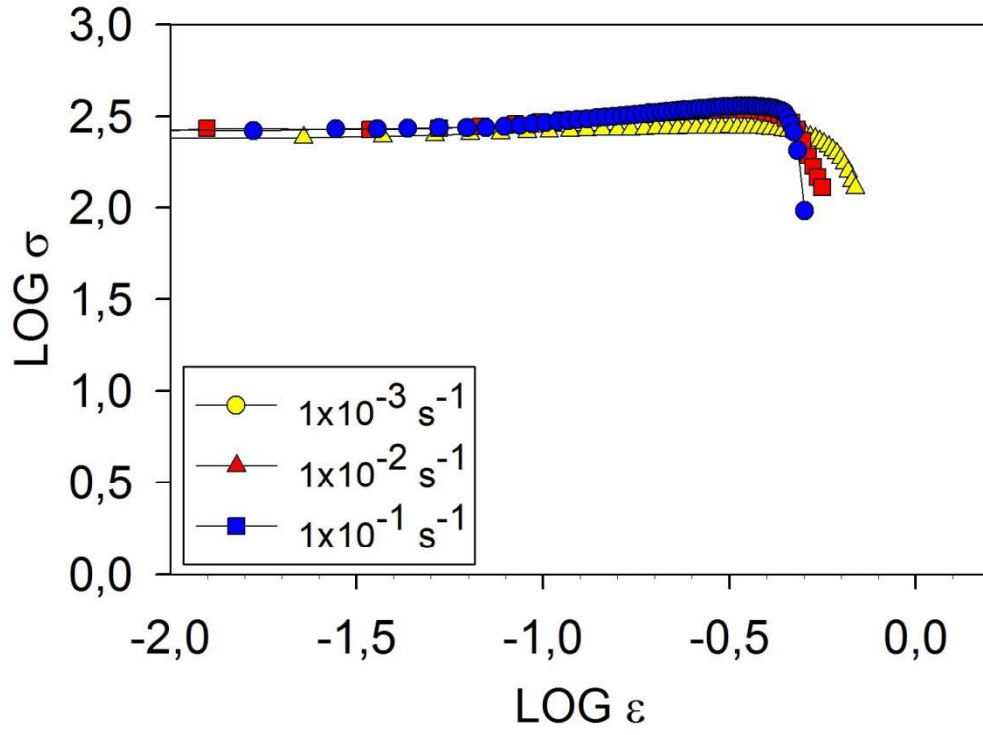
Şekil 3.41. İki adımlı EKAÉ işlemi sonrası 250 °C'de 150 dakika tavlanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarında log σ - log ϵ grafikleri



Şekil 3.42. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 1 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarında log σ - log ϵ grafikleri



Şekil 3.43. İki adımlı EKAE işlemi sonrası 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarında log σ - log ϵ grafikleri



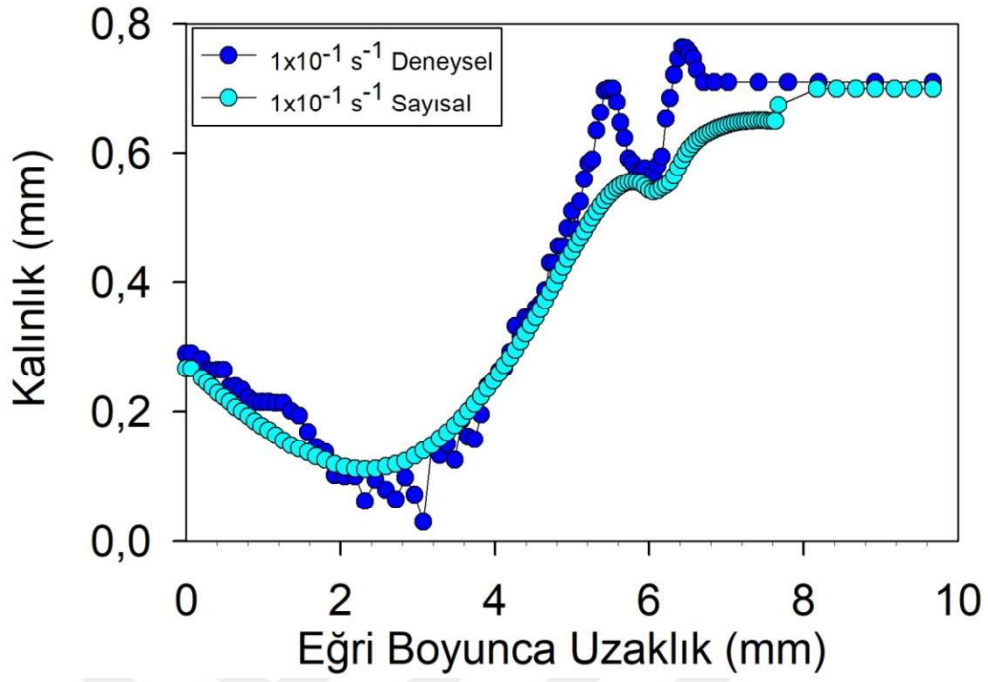
Şekil 3.44. İki adımlı EKAET işlemi sonrası 250 °C’de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının farklı deformasyon hızlarında log σ - log ϵ grafikleri

Tablo 9. Zn-22Al alaşımına MAT 64 malzeme parametreleri

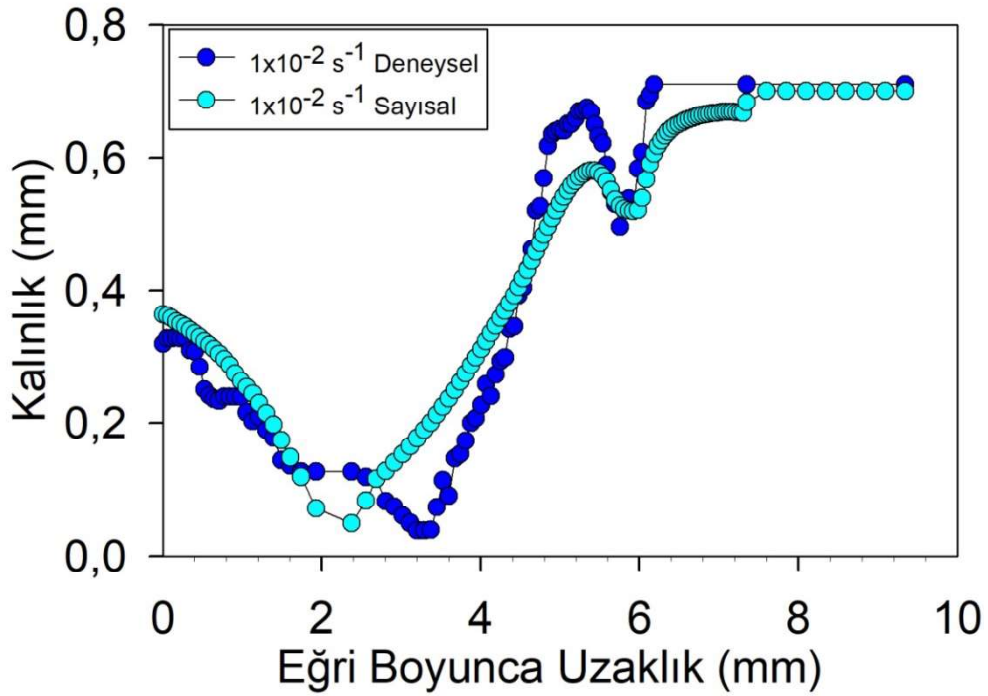
ZAMAN	Parametre	$1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$	$1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$	$1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$
Başlangıç	Yoğunluk (g/mm^3)	$5,2 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-9}$
	Poisson Oranı	0,3	0,3	0,3
	Elastisite Modülü (MPa)	13436	13436	13436
	Malzeme Sabiti (K) (MPa)	260	186	110
	Deformasyon Sertleşme Üssü	0,07	0,08375	0,074
	Deformasyon Hızı Duyarlılık İndisi	0,3	0,16	0,16
150 dk	Yoğunluk (g/mm^3)	$5,2 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-9}$
	Poisson Oranı	0,3	0,3	0,3
	Elastisite Modülü (MPa)	13436	13436	13436
	Malzeme Sabiti (K) (MPa)	338	302	309
	Deformasyon Sertleşme Üssü	0,015	0,029	0,135
	Deformasyon Hızı Duyarlılık İndisi	0,12	0,18	0,18
1 gün	Yoğunluk (g/mm^3)	$5,2 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-9}$
	Poisson Oranı	0,3	0,3	0,3
	Elastisite Modülü (MPa)	13436	13436	13436
	Malzeme Sabiti (K) (MPa)	416	371,5	407
	Deformasyon Sertleşme Üssü	0,053	0,017	0,115
	Deformasyon Hızı Duyarlılık İndisi	0,05	0,1	0,1
6 gün	Yoğunluk (g/mm^3)	$5,2 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-9}$
	Poisson Oranı	0,3	0,3	0,3
	Elastisite Modülü (MPa)	13436	13436	13436
	Malzeme Sabiti (K) (MPa)	416,9	386,8	302
	Deformasyon Sertleşme Üssü	0,137	0,11	0,053
	Deformasyon Hızı Duyarlılık İndisi	0,04	0,06	0,06
8 gün	Yoğunluk (g/mm^3)	$5,2 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-9}$
	Poisson Oranı	0,3	0,3	0,3
	Elastisite Modülü (MPa)	13436	13436	13436
	Malzeme Sabiti (K) (MPa)	354,8	331	269
	Deformasyon Sertleşme Üssü	0,17	0,145	0,037
	Deformasyon Hızı Duyarlılık İndisi	0,05	0,05	0,04

Tablo 9’da verilen MAT 64 malzeme parametreleri ve Şekil 2.6’da verilen sonlu elemanlar modeli ve sınır şartları kullanılarak Erichsen testleri sayısal olarak modellenmiştir. Zn-22Al alaşımına iki adımlı EKAE sonrası ve EKAE işlemini takiben 250 °C’de 150 dakika, 1 gün, 6 gün, 8 gün yapılan tavlama sonrası uygulanan

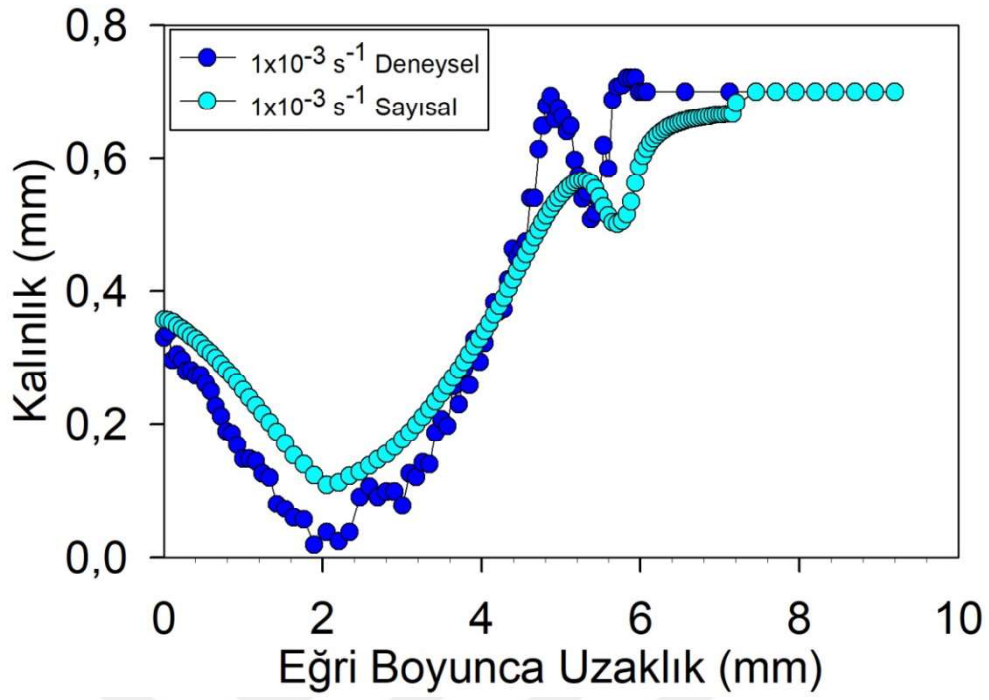
Erichsen testleri ile elde edilen ve aynı zamanda Erichsen testinin sayısal olarak modellenmesinden elde edilen, merkezden başlamak üzere eğri boyunca ölçülen kalınlık değişimi-eğri boyunca uzaklık grafikleri Şekil 3.45-3.59'te verilmiştir. Bu grafikleri incelediğimizde deneysel ve sayısal sonuçların büyük ölçüde uyum sağladığını söyleyebiliriz. Aynı zamanda söz konusu grafikleri “mikron altı tane boyutlu numuneler” için incelediğimizde kalınlık değişimlerinin deneysel ve sayısal olarak birbiriyle uyumlu olduğunu ve kırılma meydana gelen ve profil boyunca kalınlığın arttığı ve azaldığı bölgelerin doğru şekilde sayısal olarak tahmin edildiğini söyleyebiliriz (Şekil 3.45-Şekil 3.50) . “Mikron tane boyutlu numuneler” için ise grafikleri incelediğimizde büyük ölçüde kalınlık değişimi değerleri uyum sağlasa da kırılma meydana gelen bölgelerin tahmininde hatalar olduğu görülmektedir (Şekil 3.51 – Şekil 3.59). Erichsen testlerinin deneysel ve sayısal eğri boyunca ölçülen kalınlık değişimi-eğri boyunca uzaklık grafiklerinden hesaplanan korelasyon katsayısı değerleri Tablo 10'da verilmiştir. Erichsen testleri için deneysel ve sayısal veriler arasında en küçük pozitif ilişki $0,54 R^2$ değeri ile EKAE sonrası $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 8 gün tavlanan numunenin 1×10^{-3} deformasyon hızında yapılan çalışma için elde edilmiştir. Deneysel ve sayısal veriler arasında en büyük pozitif ilişki $0,97 R^2$ değeri nedeniyle EKAE işlemi sonrası Erichsen testine tabi tutulan numunenin $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan deneyi için saptanmıştır. Deneysel ve sayısal veriler arasındaki fark EKAE işlemi uygulanmış durumda Erichsen testi uygulanan numunelerde en az iken EKAE sonrası $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 8 gün tavlanan numunede en fazladır. Gevrek kırılmanın olduğu deneyler ile bu deneylerin sayısal modellenmesinden elde edilen değerler arasında farklar en fazladır. Erichsen testlerinin deneysel kalınlık değişimleri ve sayısal modellenmesinden elde edilen kalınlık değişimleri arasındaki farklar büyük ölçüde kırılmanın meydana geldiği bölgelerde görülmektedir. Bu durum “mikron tane altı boyutlu numunelerde” mikro yapıdaki boşlukların birleşerek sünek kırılma meydana getirmesi, “mikron tane boyutlu numunelerde” ise boşluk oluşumu beklenmeksizin gevrek kırılmanın meydana gelmesi ile açıklanabilir. Gevrek kırılmanın ani gerçekleşmesi nedeniyle deneyler ve sayısal veriler arasındaki fark daha da büyük olmuştur.



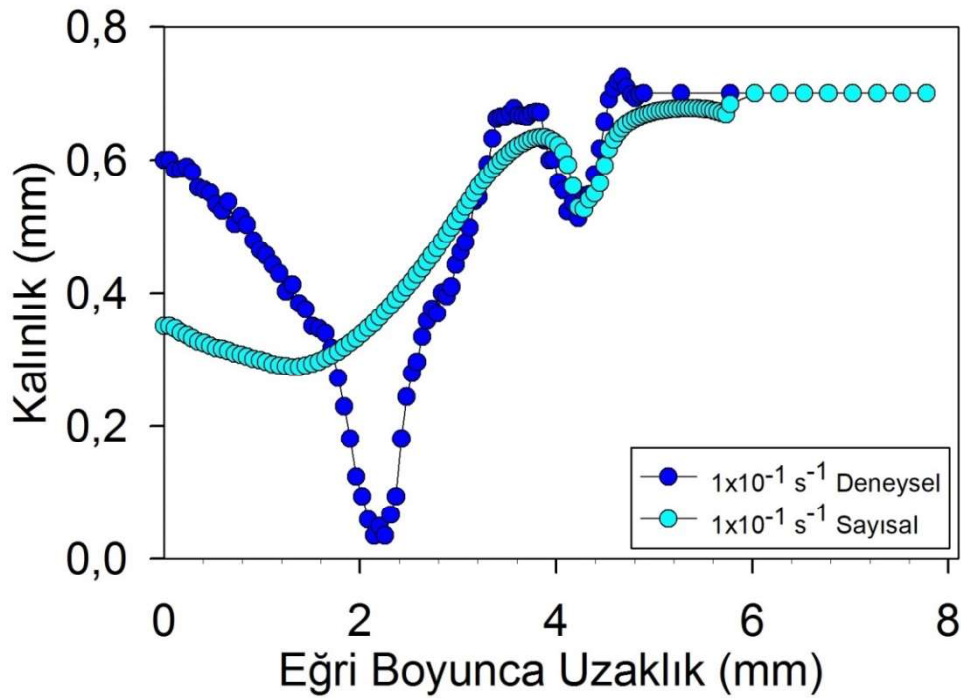
Şekil 3.45. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



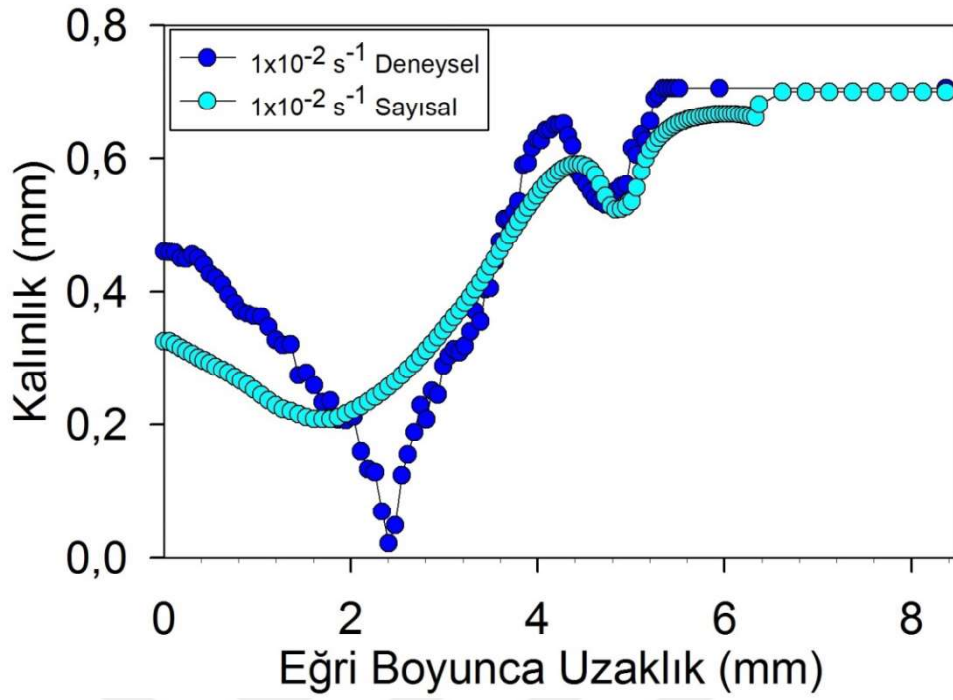
Şekil 3.46. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



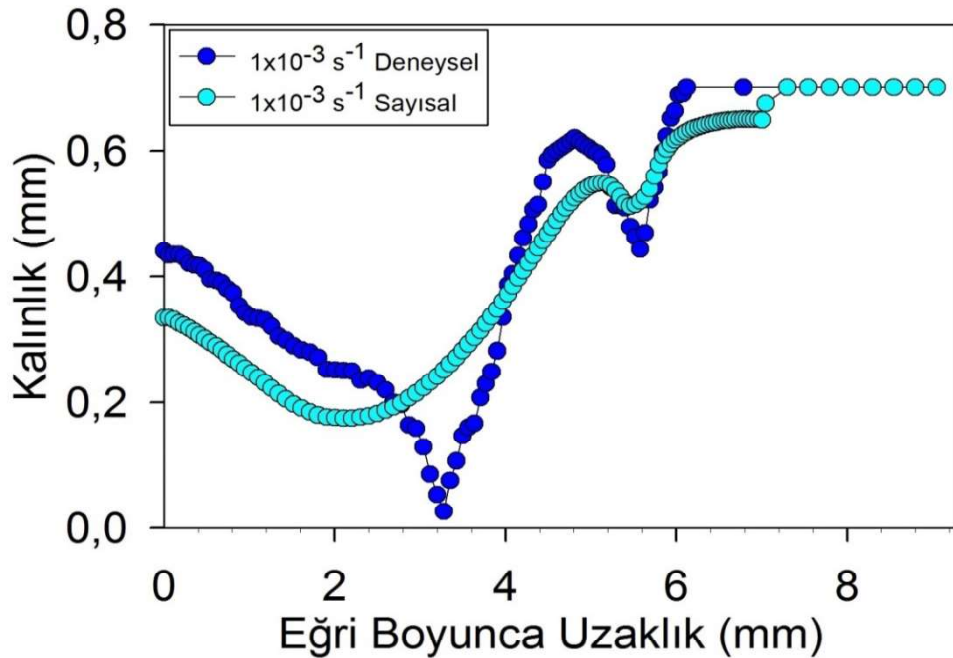
Şekil 3.47. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



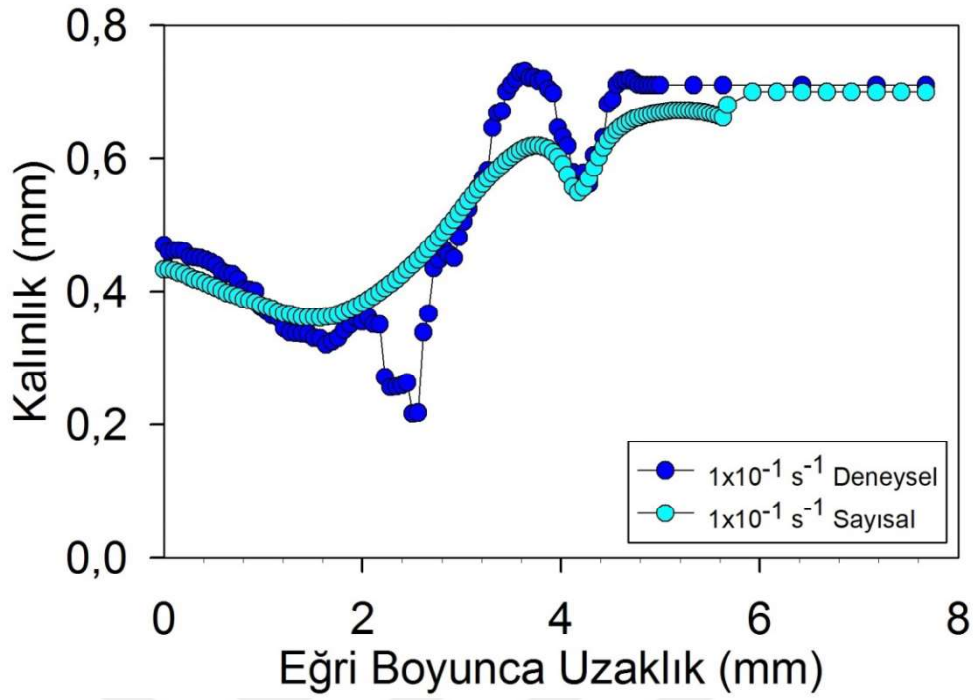
Şekil 3.48. 250 °C'de 150 dakika tavlanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



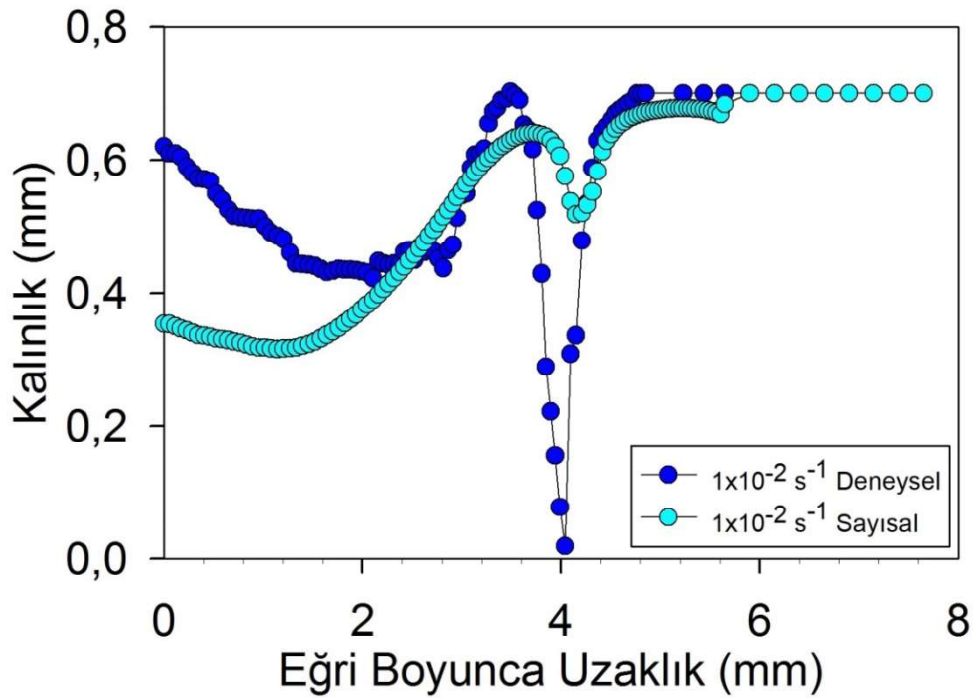
Şekil 3.49. 250 °C'de 150 dakika tavlanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



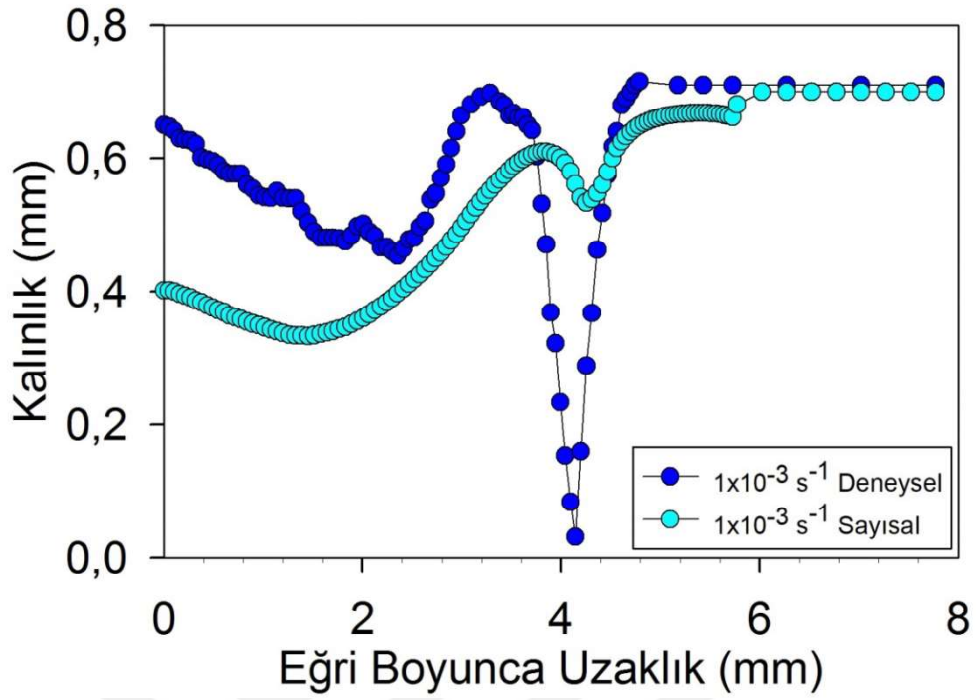
Şekil 3.50. 250 °C'de 150 dakika tavlanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



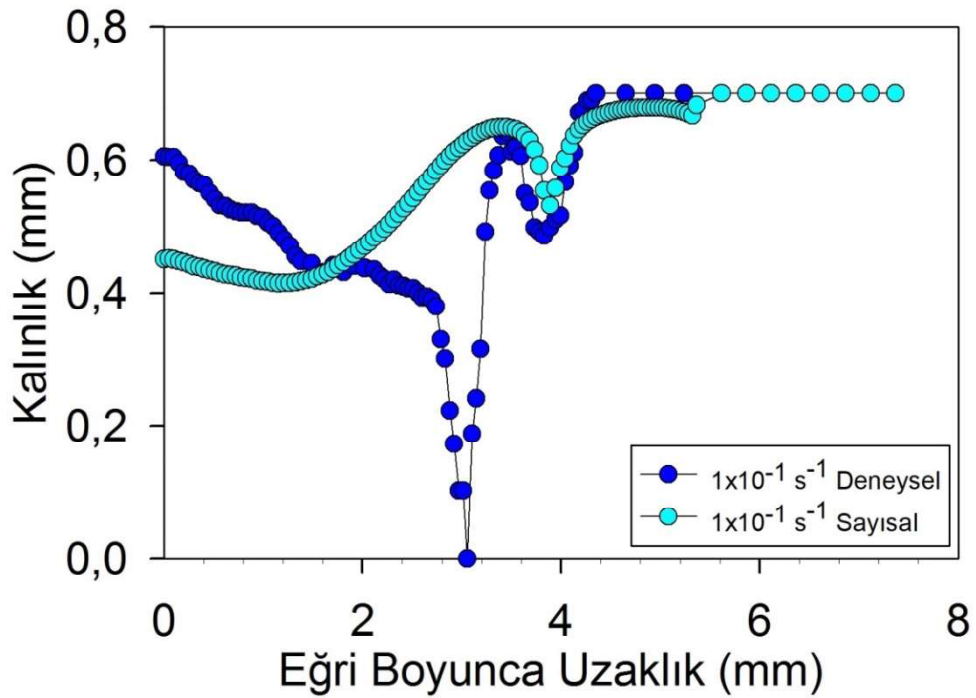
Şekil 3.51. 250 °C’de 1 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



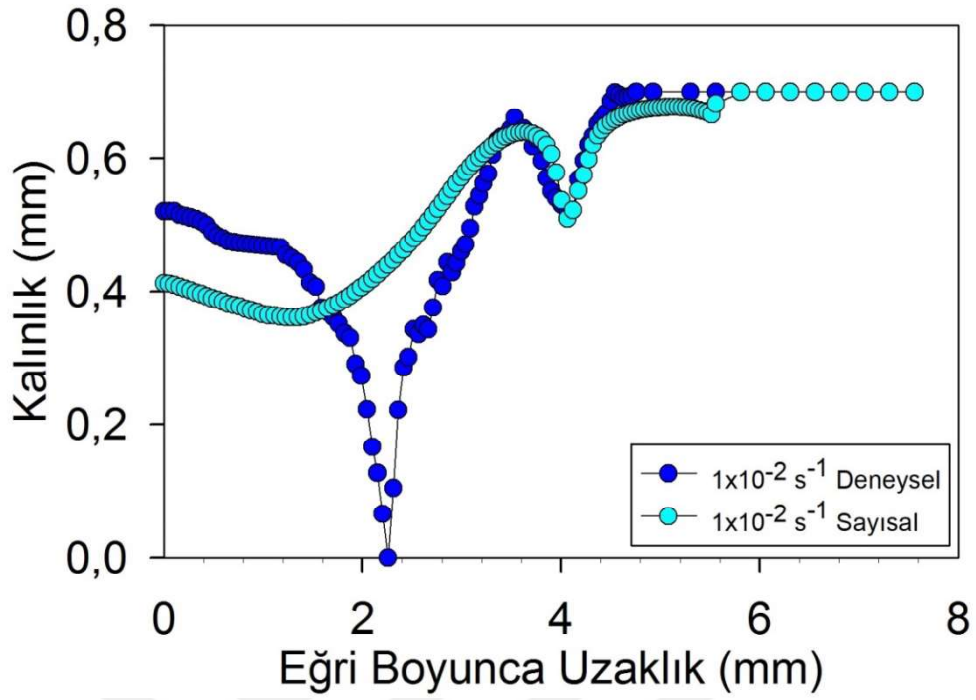
Şekil 3.52. 250 °C’de 1 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



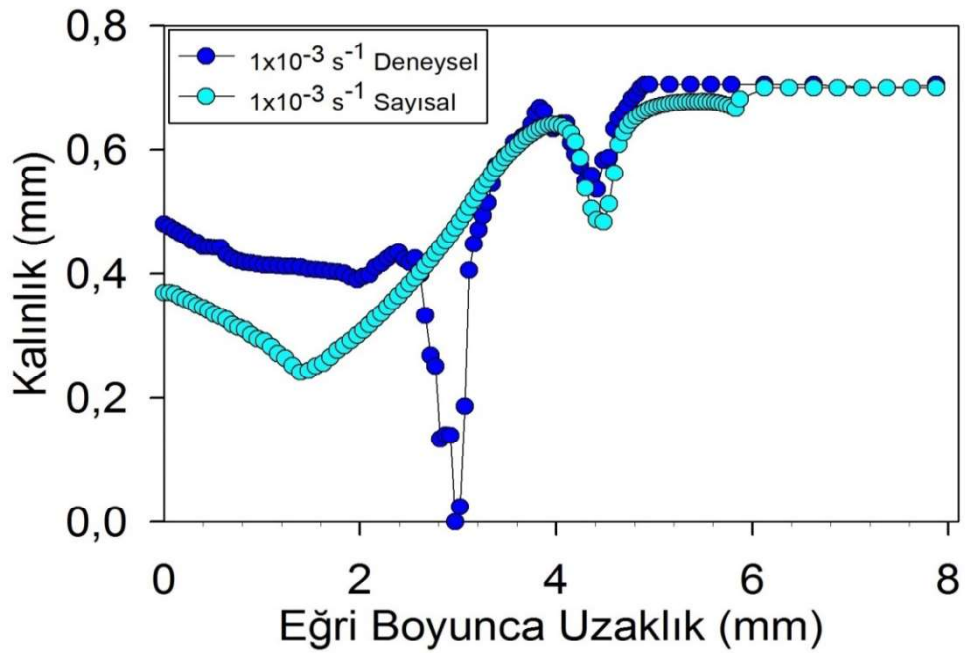
Şekil 3.53. 250 °C’de 1 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



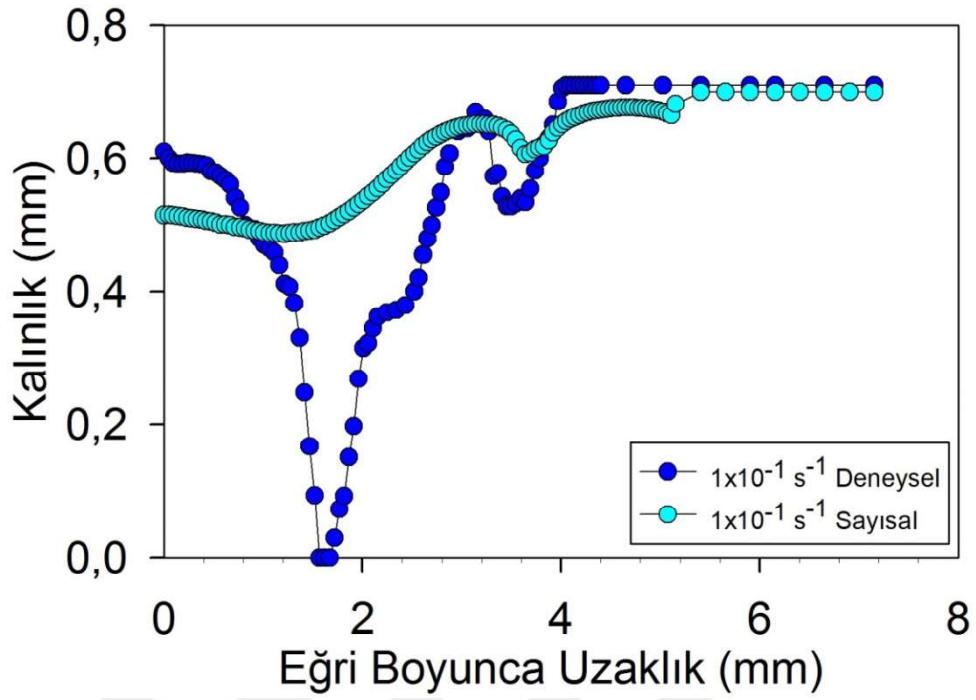
Şekil 3.54. 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



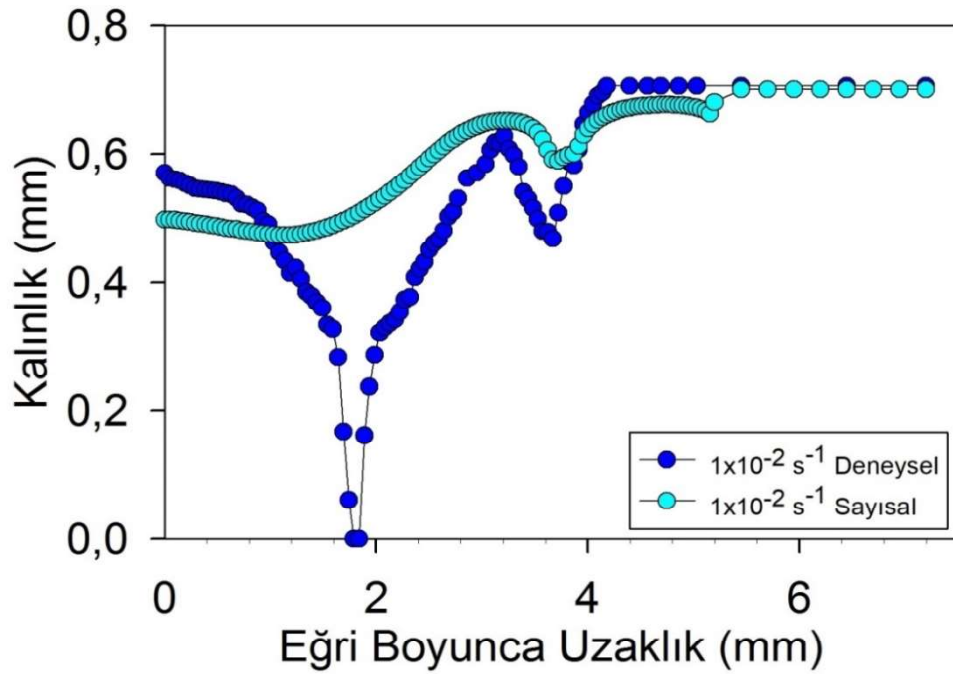
Şekil 3.55. 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



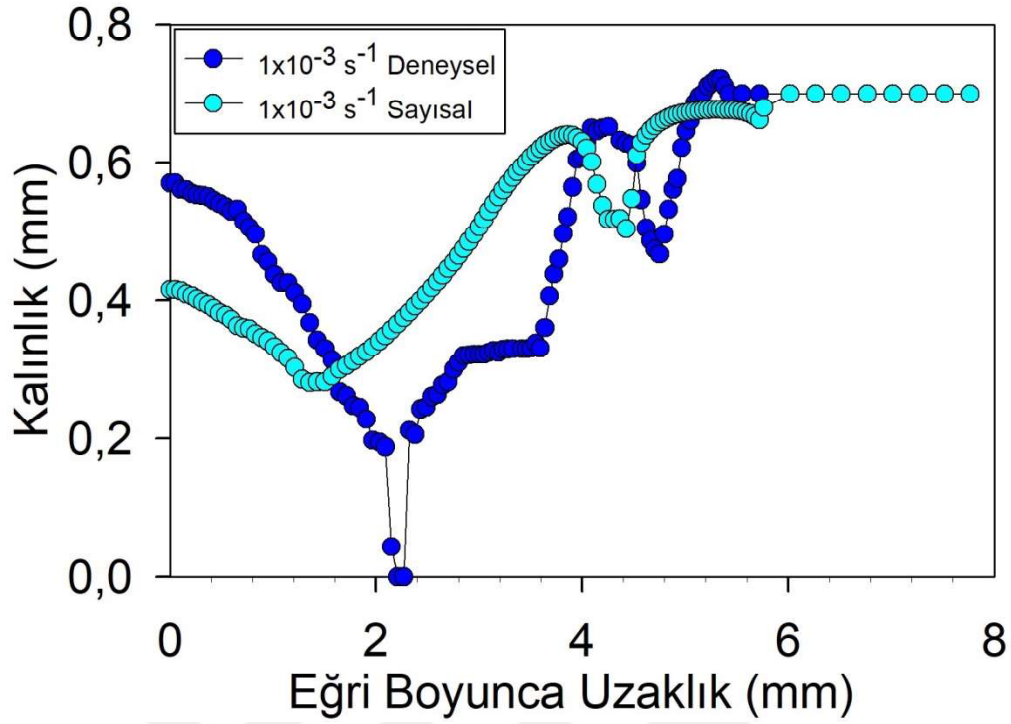
Şekil 3.56. 250 °C’de 6 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



Şekil 3.57. 250 °C'de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



Şekil 3.58. 250 °C'de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



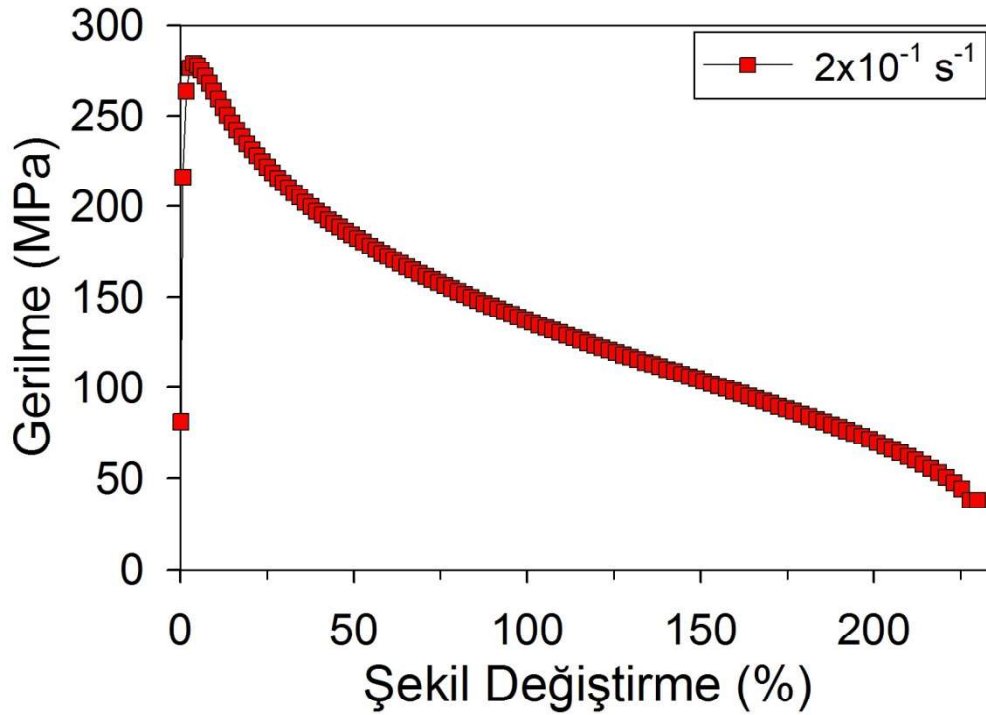
Şekil 3.59. 250 °C'de 8 gün tavllanmış Zn-22Al alaşımının $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında yapılan Erichsen testinden elde edilen kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri

Tablo 10. Erichsen testlerinin deneysel ve sayısal kalınlık değişimlerinin karşılaştırılması için hesaplanan korelasyon katsayıları

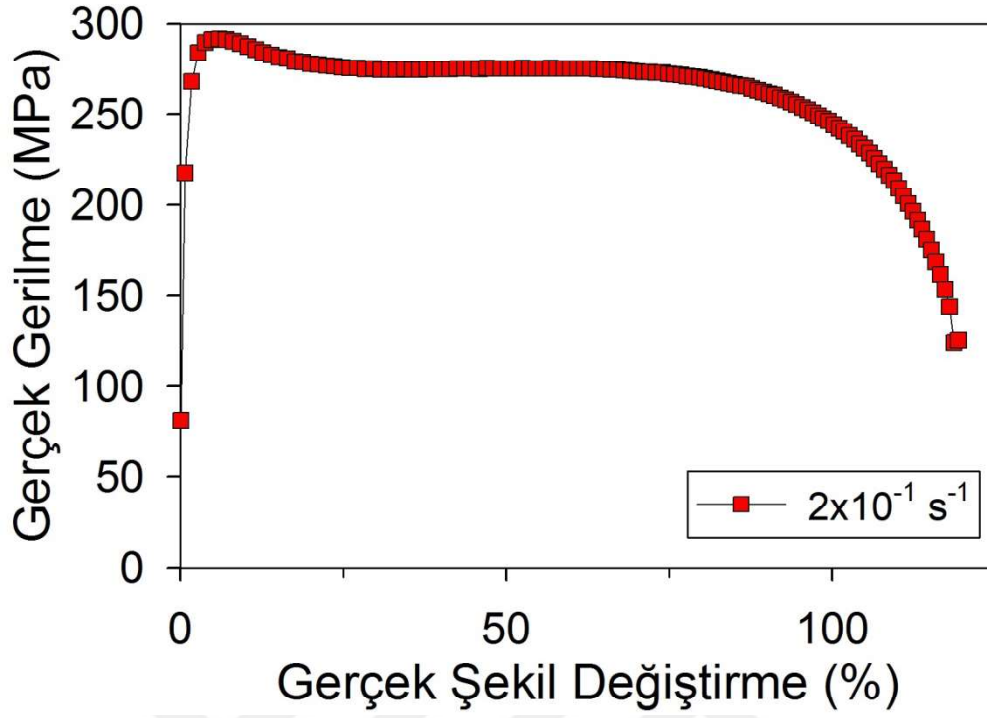
Numune	Farklı Deformasyon Hızları İçin R^2 Değerleri		
	1×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-1}
EKAE uygulanmış	0,96	0,94	0,97
150 dakika tavllanmış	0,85	0,86	0,71
1 gün tavllanmış	0,60	0,63	0,90
6 gün tavllanmış	0,87	0,82	0,55
8 gün tavllanmış	0,54	0,63	0,60

3.3. Mikro Derin Çekme Analizleri

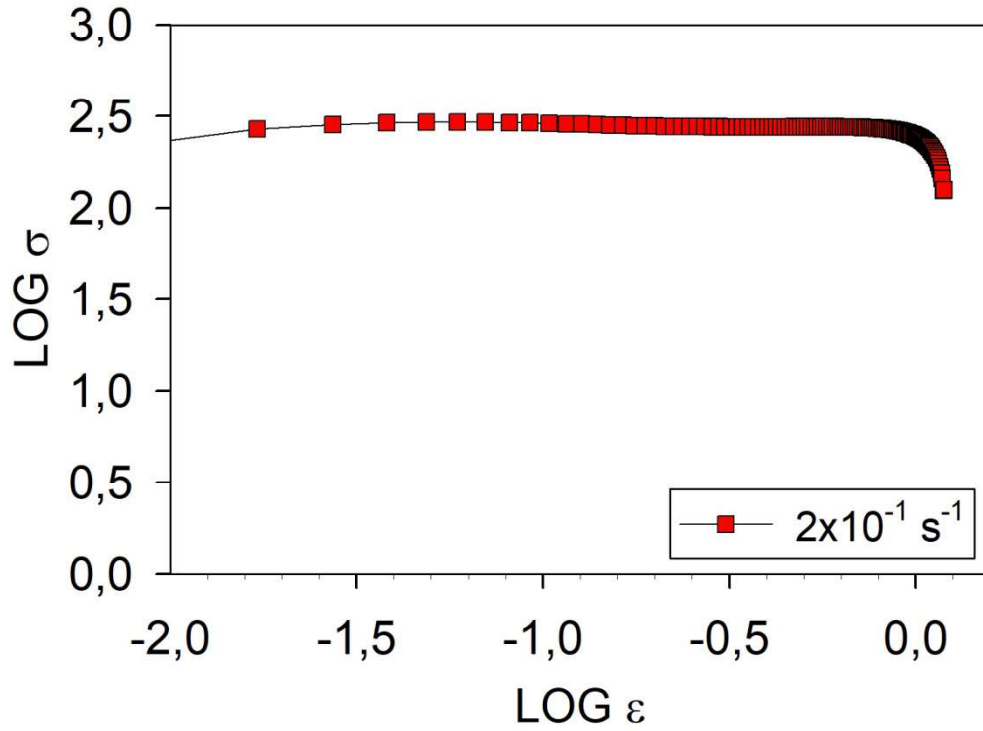
Mikro derin çekme deneylerinin gerçekleştirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar Bölüm 2.1.5’de ve mikro derin çekme deneyi sonuçları Bölüm 3.1.2’de detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Mikro derin çekme deneylerinin sayısal modelinin oluşturulması ise Bölüm 2.2.1’ de detaylı bir şekilde belirtilmiştir. Mikro derin çekme deneyleri $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında gerçekleştirilmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Sonlu elemanlar analizinde kullanılacak malzeme parametrelerinin belirlenmesi için $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında çekme deneyi yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla Zn-22Al alaşımına EKAE sonrası $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında çekme deneyi uygulanmıştır. Zn-22Al alaşımına ait $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızı için MAT 64 malzeme parametrelerinin belirlenmesinde Bölüm 3.2.1’de anlatılan yol izlenmiştir. Bu deneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 3.60’da, gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme grafiği Şekil 3.61’de, $\log \sigma$ - $\log \epsilon$ grafiği Şekil 3.62’de ve MAT 64 malzeme parametreleri Tablo 11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.60. İki adımlı EKAE işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızındaki gerilme - şekil değiştirme grafiği



Şekil 3.61. İki adımlı EKAE işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızındaki gerçek gerilme - gerçek şekil değişirme grafiği



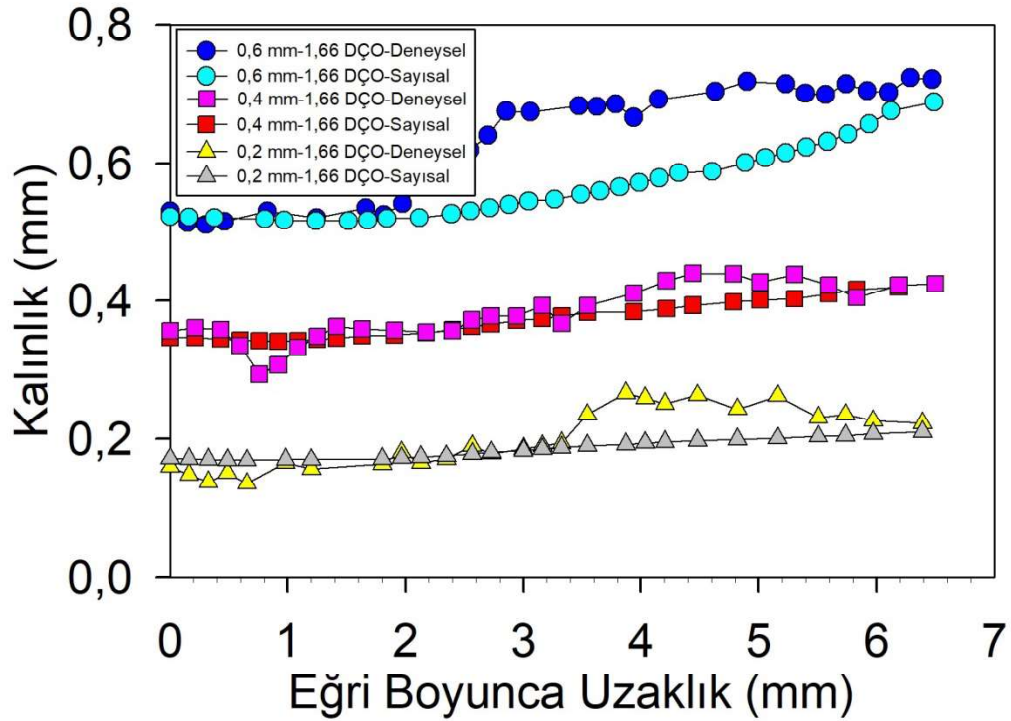
Şekil 3.62. İki adımlı EKAE işlemi uygulanmış Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızındaki log σ - log ϵ grafiği

Tablo 11. 2×10^{-1} deformasyon hızı için MAT 64 malzeme parametreleri

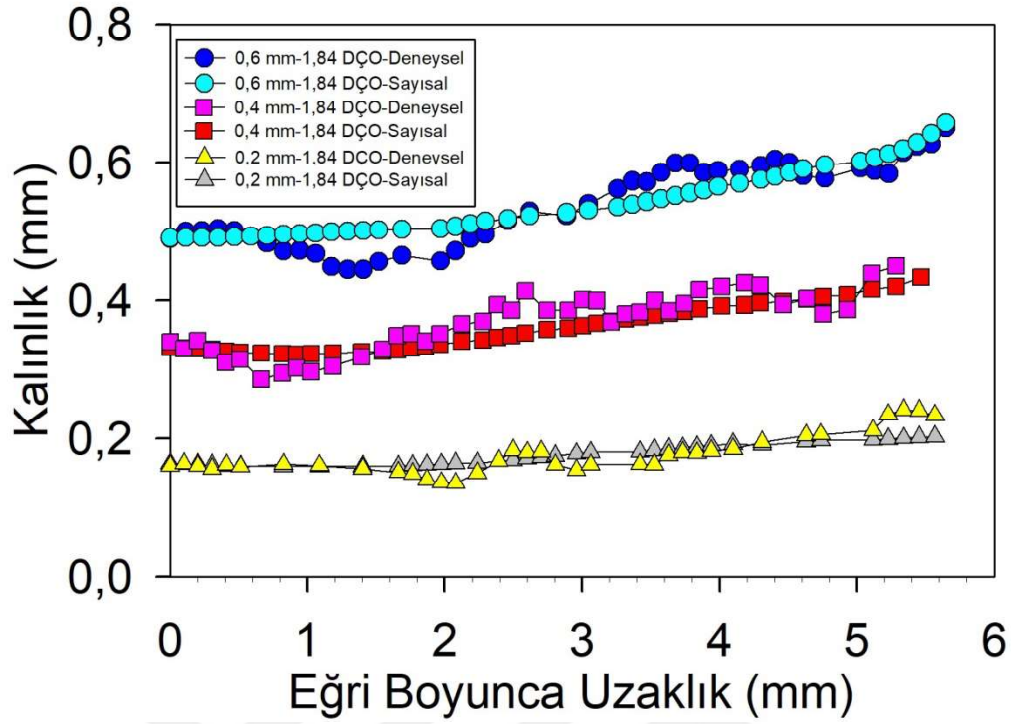
ZAMAN	Parametre	$2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$
Başlangıç	Yoğunluk (g/mm^3)	$5,2 \times 10^{-9}$
	Poisson Oranı	0,3
	Elastisite Modülü (MPa)	13436
	Malzeme Sabiti (K) (MPa)	245
	Deformasyon Sertleşme Üssü	0,06
	Deformasyon Hızı Duyarlılık İndisi	0,22

Tablo 11’de verilen MAT 64 malzeme parametreleri ve Şekil 2.7’de verilen sonlu elemanlar modeli ve sınır şartları kullanılarak mikro derin çekme deneyleri sayısal olarak modellenmiştir. Bölüm 3.1.4’ te 1,66, 1,84, 2 ve 2,25 derin çekme oranlarında 0,2, 0,4 ve 0,6 mm sac kalınlıklarında numuneler ile gerçekleştirilen mikro derin çekme deneylerinde numunelerin kesitinde meydana gelen kalınlık değişimi sonuçları verilmiştir. Zn-22Al alaşımına iki adımlı EKAE işlemi uygulanmış durumda uygulanan mikro derin çekme deneyleri ile elde edilen ve aynı zamanda mikro derin çekme işleminin sayısal olarak modellenmesinden elde edilen, merkezden başlamak üzere eğri boyunca ölçülen kalınlık değişimi-eğri boyunca uzaklık grafikleri Şekil 3.63-3.66’da verilmiştir. Bu grafikleri incelediğimizde deneysel ve sayısal sonuçların büyük ölçüde uyum sağladığını söyleyebiliriz. 1,66 oran için yapılan sayısal ve deneysel kalınlık değişimi grafiğini incelediğimizde kalınlık değişimlerinin büyük oranda bütün kalınlık boyunca uyumlu olduğu, ancak deneysel sonuçlarda yer yer saçılımların olduğunu söyleyebiliriz. 1,84 ve 2 çekme oranları için yapılan deneysel ve sayısal kalınlık değişimleri içinde benzer durumun geçerli olduğu grafiklerden anlaşılmaktadır. Fakat 2,25 çekme oranı için değerlendirme yaptığımızda bu durum şu şekilde değişmektedir. Çekme oranı arttıkça zımbanın ilerleme mesafesi artmış ve bunun sonucunda daha fazla kap yüksekliği 0,4 mm ve 0,6 mm sac kalınlıklı numuneler için elde edilmiştir. Bunun yanında daha önceki bölümlerde anlatıldığı şekilde numunedeki birincil boyun verme bölgesi grafiklerden daha bariz görülebilir hale gelmiştir. Nitekim 2,25 çekme oranı için elde edilen sayısal kalınlık değişimlerinde birincil boyun verme bölgesi tam olarak elde edilememiştir. Fakat kalınlık değişiminin ikincil boyun verme bölgesi büyük oranda deneysel değerlere yakın şekilde elde edilmiştir ve sayısal sonuçlar ve deneysel sonuçlar büyük ölçüde uyumludur. Mikro derin çekme deneylerinden ve deneylerin sayısal modellenmesinden elde edilen eğri

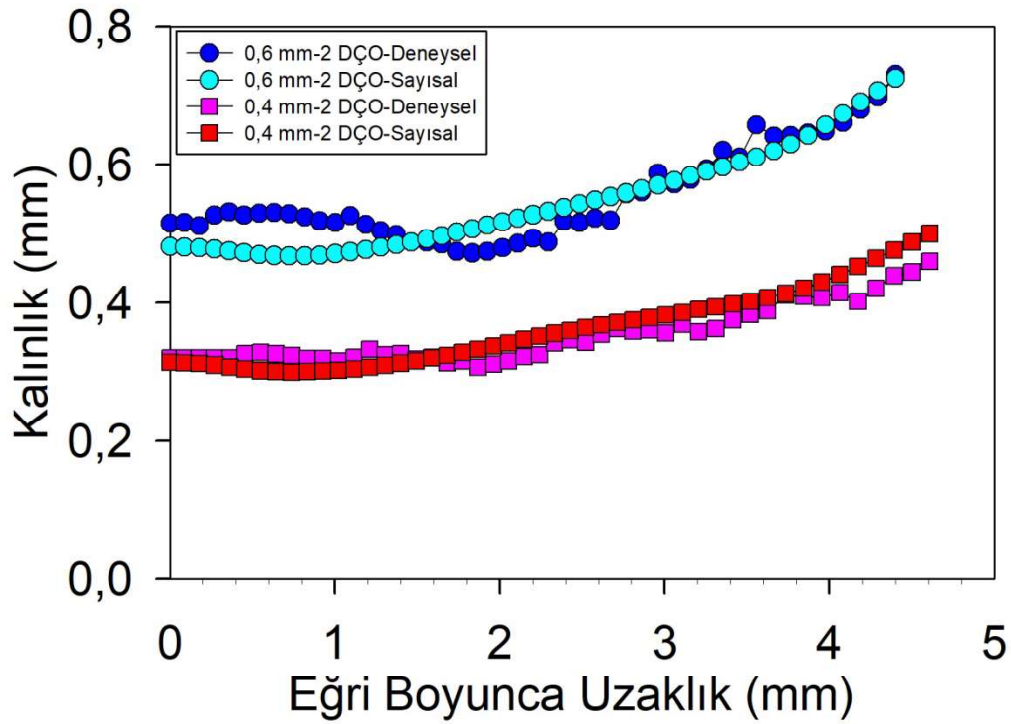
boyunca ölçülen kalınlık değişimi-eğri boyunca uzaklık grafiklerinden hesaplanan korelasyon katsayısı değerleri Tablo 12’de verilmiştir. Mikro derin çekme işlemi için deneysel ve sayısal veriler arasında en küçük pozitif ilişki $0,77 R^2$ değeri nedeniyle 0,4 mm kalınlıklı numune için 1,66 derin çekme oranda yapılan deneyde elde edilmiştir. Deneysel ve sayısal veriler arasında en büyük pozitif ilişki $0,89 R^2$ değeri nedeniyle 0,4 mm kalınlıklı numune için 2 derin çekme oranında yapılan deney için belirlenmiştir. Deneysel ve sayısal kalınlık değişimleri arasındaki fark ölçüm hatalarından kaynaklanmış olabileceği düşünölmektedir.



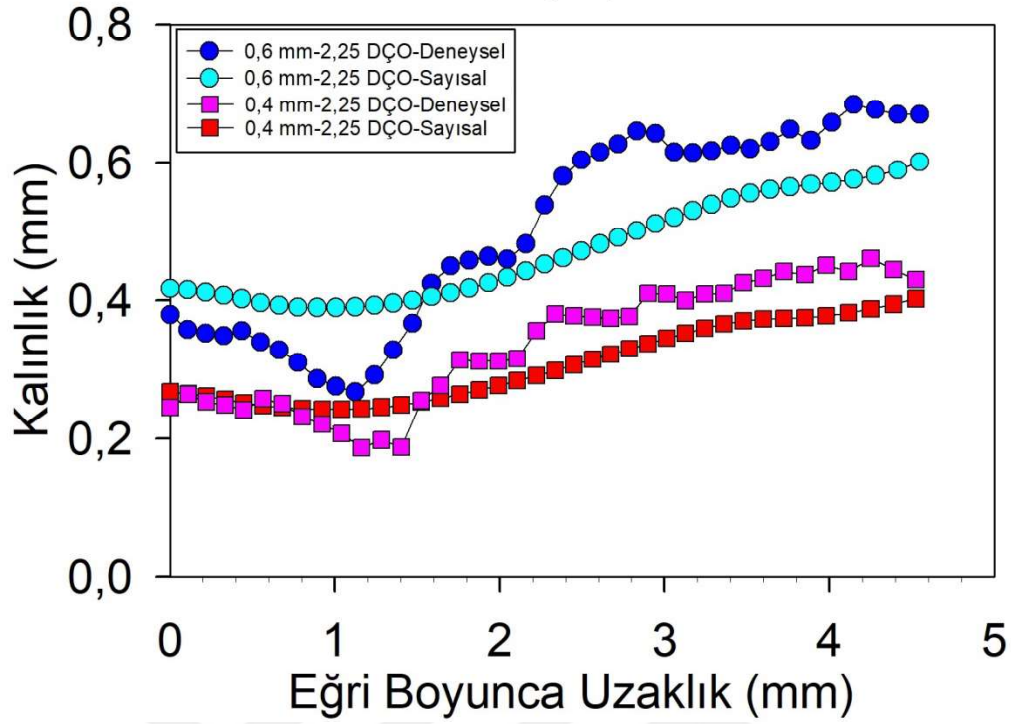
Şekil 3.63. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 1,66 DÇO’da yapılan mikro derin çekme işleminin sayısal olarak modellenmesine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



Şekil 3.64. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 1,84 DÇO' da yapılan mikro derin çekme işleminin sayısal olarak modellemesine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



Şekil 3.65. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 2 DÇO' da yapılan mikro derin çekme işleminin sayısal olarak modellemesine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri



Şekil 3.66. 200 nm tane boyutundaki Zn-22Al alaşımının $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında ve 2,25 DÇO' da yapılan mikro derin çekme işleminin sayısal olarak modellemesine ait kalınlık-eğri boyunca uzaklık grafikleri

Tablo 12. Mikro derin çekme deneylerinin deneysel ve sayısal kalınlık değişimlerinin karşılaştırılması için hesaplanan korelasyon katsayıları

Derin Çekme Oranı	Farklı Numune Kalınlıkları İçin R^2 Değerleri		
	0,2 mm	0,4 mm	0,6 mm
1,66	0,83	0,77	0,81
1,84	0,86	0,81	0,87
2	-	0,89	0,83
2,25	-	0,88	0,88

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tane boyutu ve deformasyon hızının süperplastik Zn-22Al alaşımının oda sıcaklığındaki deformasyon davranışına etkileri tek ve iki eksenli yükleme durumları için araştırılmıştır. Aynı zamanda numune kalınlığının mikro derin çekilebilirliğe ve sınır çekme oranına etkileri de incelenmiştir. Temel bulgular ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Eş kanallı açısız ekstrüzyon işlemi (EKAE), Zn-22Al alaşımının tane boyutunun azaltılması için gerçekleştirildi ve 200 nm'lik ortalama tane boyutu ile çok ince taneli mikroyapı elde edildi. EKAE işlemi sonrası tavlama, tane boyutlarını beklendiği gibi artırdı ve 250 °C'de 150 dakika, 1 gün, 6 gün ve 8 gün tavlama işleminden sonra sırasıyla 750 nm, 1,80 µm, 2,40 µm ve 2,60 µm tane boyutları elde edildi.
2. Tek eksenli (çekme) ve iki eksenli (Erichsen) test sonuçlarını dikkate alarak, alaşımın deformasyon davranışındaki değişimlerinin ve mekanik özelliklerinin tane boyutu ve deformasyon hızı ile iyi bir uyum içinde olduğu gözlemlendi. Tane boyutunun artırılması tek eksenli yüklemelerde maksimum uzamayı ve iki eksenli yüklemelerde sınır tepe yüksekliğini azaltmıştır.
3. Tane boyutunun artırılması, maksimum uzama ve sınır tepe yüksekliği değerlerinin elde edildiği deformasyon hızı değerlerini daha düşük değerlere taşımıştır. Kopmaya kadar oluşan maksimum uzama, EKAE uygulanmış numune için % 400'den, EKAE sonrası 250 °C'de 8 gün tavllanmış numunede için yaklaşık % 100'e düşerken, sınır tepe yüksekliği sırasıyla aynı numuneler için 5.26 mm'den 2.20 mm'ye düşmüştür.
4. Erichsen testinde yük en yüksek değerine ulaşmaya kadar tane boyutunun deformasyon homojenitesi üzerinde önemsiz bir etkisi olduğu tespit edildi. Bu noktanın ötesinde ise tane boyutu deformasyon bölgesinin karakteristiği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Buna örnek olarak, daha ince tane boyutu, kırılma modunu gevrek çatlaktan sünek çatlığa çevirmekte ve boyun vermenin büyümesini geciktirerek daha yüksek sınır tepe yüksekliği elde edilmesine sebep olmaktadır.
5. Özellikle tepelerin dış yüzeylerinde yüksek çekme gerilmesi nedeniyle oluşan çok sayıdaki boşluğun birleşmesi, EKAE uygulanmış durumdaki numunelerin orta (ekvator) bölgesinde çatlığa neden olmuştur. EKAE işlemi sonrası 250 °C'de 8 gün tavllanmış numuneler için önemli boşluk oluşumu olmaksızın gevrek çatlak görülmüştür.

6. Erichsen testlerinden elde edilen numune kesiti boyunca kalınlık değişimi değerleri ile Erichsen testinin sayısal olarak modellenmesinden elde edilen kalınlık değerleri için belirlenen korelasyon katsayıları 0,54 ve 0,96 arasında değişiklik göstermektedir.
7. Süperplastik Zn-22Al alaşımının oda sıcaklığında maksimum sınır çekme oranı 2,25 olarak gerçekleştirilmiştir.
8. Süperplastik Zn-22Al alaşımı için numune kalınlığının mikro derin çekilebilirliğe etkisi belirlenmiştir. 0,4 mm ve 0,6 mm kalınlıklı numuneler bütün çekme oranlarında çekilebilmiştir. Fakat 0,2 mm kalınlıklı numune yalnız 1,66 ve 1,84 çekme oranlarında çekilebilmiştir. Ayrıca mikro derin çekme deneylerinde numune kalınlığı 0,2 mm'den 0,4 mm'ye ve 0,4 mm'den 0,6 mm kalınlığa doğru arttıkça derin çekilebilir kap yüksekliği artmıştır.
9. 1,66 derin çekme oranında 0,2 mm kalınlıklı numune ile yapılan deneyde kap yüksekliğinin zımba çapına oranı 0,67 değerini alırken bu değer 2,25 derin çekme oranında 0,6 kalınlıklı numune ile yapılan deneyde en yüksek değer olan bire (1) ulaşmıştır. Aynı zamanda bu parametreyi farklı kalınlıklarda aynı derin çekme oranlarında yapılan deneyler açısından değerlendirdiğimizde kalınlık arttıkça kap yüksekliğinin zımba çapına oranı da artmıştır.
10. Mikro derin çekme deneylerini aynı derin çekme oranında farklı kalınlıklar için (0,2 mm, 0,4 mm ve 0,6 mm) yapılan deneyler açısından incelediğimizde en fazla kalınlığa sahip numunenin şekillendirilebilmesi için en fazla kuvvete ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.
11. Mikro derin çekme deneylerinden elde edilen numune kesiti boyunca kalınlık değişimi değerleri ile mikro derin çekme deneylerinin sayısal olarak modellenmesinden elde edilen kalınlık değerleri için belirlenen korelasyon katsayılarının 0,77 ve 0,88 arasında değişiklik gösterdiği saptanmıştır.
12. Süperplastik Zn-22Al alaşımının mikro imalat için tercih edilebilir bir malzeme olabileceği sonucuna varılmıştır.

5. ÖNERİLER

1. EKAE uygulanmış durumda ve EKAE sonrası farklı sürelerde tavlınmış Zn-22Al alaşımının daha yüksek deformasyon hızlarındaki şekillendirilebilirliği incelenebilir.
2. Tane boyutunu dikkate alan malzeme modellerinin (mikro mekanik modeller, kristal plastisite) kullanılarak mikro şekillendirme işlemlerinin sonlu eleman analizleri gerçekleştirilebilir.



6. KAYNAKLAR

1. Youssef, K.M., Scattergood, R.O., Murty, K.L., Horton, J.A. ve Koch, C.C., Ultrahigh strength and high ductility of bulk nanocrystalline copper, Applied Physics Letters, 87 (2005) 2003–2006.
2. Zhao, B.Y., Liao, X., Cheng, S., Ma, E. ve Zhu, Y.T., Simultaneously Increasing the Ductility and Strength of Nanostructured Alloys, Advanced Materials, 18 (2006) 2280–2283.
3. Kotan, H., Termal Kararlılığı Arttırılmış Demir Esaslı Ferritik Çelik Tozlarının Sıcak Pres Ve Sıcak Ekstrüzyon (ECAE) Yöntemleri İle Konsolidasyonu, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (2016) 171–179.
4. Valiev, R.Z. ve Langdon, T.G., Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement, Progress in Materials Science, 51 (2006) 881– 981.
5. Engel, U. ve Eckstein, R., Microforming-from Basic Research to Its Realization, Journal of Materials Processing Technology, 125-126 (2002) 35-44.
6. Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N. ve Engel, U., Microforming, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 50 (2001) 445-462.
7. Saray, O., Purcek, G., Karaman, I. ve Maier, H.J., Improvement of Formability of Ultrafine-Grained Materials By Post-SPD Annealing, Materials Science and Engineering A, 619 (2014) 119–128.
8. Molotnikov, A., Lapovok, R., Gu, C.F., Davies, C.H.J. ve Estrin, Y., Size Effects in Micro Cup Drawing, Materials Science and Engineering A, 550 (2012) 312-319.
9. Mahabunphachai, S. ve Koç, M., Investigation of Size Effects on Material Behavior of Thin Sheet Metals Using Hydraulic Bulge Testing at Micro/Meso-Scales, International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 48 (2008) 1014–1029.
10. Bin, G., MSEC2012-7411 Study of Size Effects on Deformation Behavior And Formability In in Micro Metal Forming of Ti Foil, ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference, June 2012, Indiana, USA, Conference Proceeding: 263–268.
11. Saray, O., Eş Kanallı Açısız Ekstrüzyon Yöntemi İle Yüksek Dayanımlı İf-Çeliğinin Geliştirilmesi Ve Yöntemin Bu Çelikten Üretilen Saclara Uygulanması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
12. Rosochowski, A., Presz, W., Olejnik, L. ve Richert, M., Micro-extrusion of Ultra-fine Grained Aluminium, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33 (2007) 137–146.

13. Langdon, T.G., Seventy-five Years of Superplasticity: Historic Developments and New Opportunities, Journal of Materials Science, 44 (2009) 5998–6010.
14. Ridley, N., Metals for superplastic forming, G., Giuliano, Ed., Superplastic Forming of Advanced Metallic Materials: Methods and Applications, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2011.
15. Kawasaki, M. ve Langdon, T.G., Principles of Superplasticity in Ultrafine-Grained Materials, Journal of Materials Science, 42 (2007) 1782–1796.
16. Tanaka, T., Makii, K., Ueda, H., Kushibe, A., Kohzu, M. ve Higashi, K., Study on Practical Application of a New Seismic Damper Using a Zn–Al Alloy With a Nanocrystalline Microstructure, International Journal of Mechanical Sciences, 45 (2003) 1599–1612.
17. Demirtas, M., Purcek, G., Yanar, H., Zhang, Z.J. ve Zhang, Z.F., Improvement of High Strain Rate and Room Temperature Superplasticity in Zn–22Al Alloy by Two-Step Equal-Channel Angular Pressing, Materials Science and Engineering A, 620 (2014) 233–240.
18. Demirtas, M., Purcek, G., Yanar, H., Zhang, Z.J. ve Zhang, Z.F., Achieving room temperature superplasticity in Zn-5Al alloy at high strain rates by equal-channel angular extrusion, Journal of Alloys and Compounds, 623 (2015) 213–218.
19. Demirtas, M., Purcek, G., Yanar, H., Zhang, Z.J. ve Zhang, Z.F., Effect of Equal-Channel Angular Pressing on Room Temperature Superplasticity of Quasi-Single Phase Zn–0.3Al Alloy, Materials Science and Engineering A, 644 (2015) 17–24.
20. Kawasaki, M. ve Langdon, T.G., Grain Boundary Sliding in a Superplastic Zinc-aluminum Alloy Processed Using Severe Plastic Deformation, Materials Transactions, 49 (2008) 84–89.
21. Kawasaki, M., Balasubramanian, N. ve Langdon, T.G., Flow Mechanisms in Ultra-Fine-Grained Metals with an Emphasis on Superplasticity, Materials Science and Engineering A, 528 (2011) 6624–6629.
22. Kawasaki, M., Figueiredo, R.B., Xu, C. ve Langdon, T.G., Developing Superplastic Ductilities in Ultrafine-grained Metals, Metallurgical Transactions A, 38A (2007) 1891–1898.
23. Langdon, T.G., Achieving superplasticity in ultrafine-grained metals, Mechanics of Materials, 67 (2013) 2–8.
24. Mohamed, F.A., Micrograin Superplasticity: Characteristics and Utilization, Materials, 4 (2011) 1194–1223.
25. Kawasaki, M., Figueiredo, R.B. ve Langdon, T.G., The Requirements for Superplasticity with an Emphasis on Magnesium Alloys, Advanced Engineering Materials, 18 (2016) 127–131.

26. Kawasaki, M., Langdon, T.G., Review: Achieving Superplastic Properties in Ultrafine-grained Materials at High Temperatures, Journal of Material Science, 51 (2015) 19–32.
27. Kaibyshev, O.A., Superplasticity of Alloys, Intermetallides and Ceramics, First Edition, Springer–Verlag, Berlin, 1992.
28. Xia, S.H., Wang, J., Wang, J.T. ve Liu, J.Q., Improvement of Room-Temperature Superplasticity in Zn–22 wt.%Al Alloy, Materials Science and Engineering A, 493 (2008) 111-115.
29. Uesugi, T., Kawasaki, M., Ninomiya, M., Kamiya, Y., Takigawa, Y. ve Higashi, K., Significance of Si Impurities on Exceptional Room-Temperature Superplasticity in a High-Purity Zn-22%Al Alloy, Materials Science and Engineering A, 645 (2015) 47–56.
30. Tanaka, T., Makii, K., Kushibe, A., Kohzu, M. ve Higashi, K., Capability of Superplastic Forming in the Seismic Device Using Zn–22Al Eutectoid Alloy, Scripta Materialia, 49 (2003) 361-366.
31. Hirata, T., Tanaka, T., Chung, S.W., Takigawa, Y. ve Higashi, K., Relationship Between Deformation Behavior and Microstructural Evolution of Friction Stir Processed Zn–22 wt.% Al Alloy, Scripta Materialia, 56 (2007) 477-480.
32. Tanaka, T., Watanabe, H. ve Higashi, K., Microstructure in Zn–Al Alloys after Equal- Channel-Angular Extrusion, Materials Transactions, 44 (2003) 1891-1894.
33. Tanaka, T. ve Higashi, K., Superplasticity at Room Temperature in Zn-22Al Alloy Processed by Equal-Channel-Angular Extrusion, Materials Transactions, 45 (2004) 1261-1265.
34. Kumar, P., Xu, C. ve Langdon, T.G., Mechanical Characteristics of a Zn–22% Al Alloy Processed to Very High Strains by ECAP, Materials Science and Engineering A, 429 (2006) 324-328.
35. Huang, Y. ve Langdon, T.G., Characterization of Deformation Processes in a Zn-22% Al Alloy Using Atomic Force Microscopy, Journal of Materials Science, 37 (2002) 4993-4998.
36. Yang, C.F., Pan, J.H. ve Chuang, M.C., Achieving High Strain Rate Superplasticity via Severe Plastic Deformation Processing, Journal of Materials Science, 43 (2008) 6260-6266.
37. Segal, V.M., Materials Processing by Pimple Shear, Materials Science and Engineering A, 197 (1995) 157-164.

38. Gholinia, A., Prangnell, P.B. ve Markushev, M.V., Effect of Strain Path on the Development of Deformation Structures in Severely Deformed Aluminium Alloys Processed by Ecae, Acta Materialia, 48 (2000) 1115–1130.
39. Zhu, Y.T. ve Lowe, T.C., Observations and Issues on Mechanisms of Grain Refinement During ECAP Process, Materials Science and Engineering A, 291 (2000) 46–53.
40. Demirtaş, M., Çinko-Esaslı Süperplastik Alaşımların Geliştirilmesi Ve Yapısal, Mekanik Ve Titreşim Sönümlenme Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
41. Nieh, T.G., Wadsworth, J. ve Sherby, O.D., Superplasticity in Metals and Ceramics, first ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
42. Kumar, P., Xu, C. ve Langdon, T.G., The Significance of Grain Boundary Sliding in the Superplastic Zn–22% Al Alloy After Processing by ECAP, Materials Science and Engineering A, 410–411 (2005) 447–450.
43. Shariat, P., Vastava, R.B. ve Langdon, T.G., An Evaluation of the Roles of Intercrystalline and Interphase Boundary Sliding in Two–Phase Superplastic Alloys, Acta Metallurgica, 30 (1982) 285–296.
44. Novikov, I.I., Portnoy, V.K., ve Terentieva, T.E., Analysis of Superplastic Deformation Mechanisms in Zn–22% Al Alloy on the Basis of Electron Microscopy Topographic Investigations, Acta Metallurgica, 25 (1977) 1139–1149.
45. Naziri, H., Pearce, R., Brown, M.R. ve Hale, K.F., Microstructural–Mechanism Relationship in the Zinc/Aluminum Eutectoid Superplastic Alloy, Acta Metallurgica, 23 (1975) 489–496.
46. Zhu, Y.H., General Rule of Phase Decomposition in Zn-Al Based Alloys (II) -On Effects of External Stresses on Phase Transformation, Materials Transactions, 45 (2004) 3083-3097.
47. Guo, Z.X., Higashi, K.N. ve Ridley, N., An Experimental Investigation of the Superplastic Forming Behavior of a Commercial Al-Bronze, Metallurgical Transactions A, 21 (1990) 2957-2966
48. Hallquist, J.O., LS-DYNA Keyword User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 970 (2007).
49. Samekto, H. ve Roll, K., Finite Element Analysis of Superplastic Forming Process Using Ls-Dyna, 4th European LS-DYNA Users Conference. Conference Proceeding: 1-16.

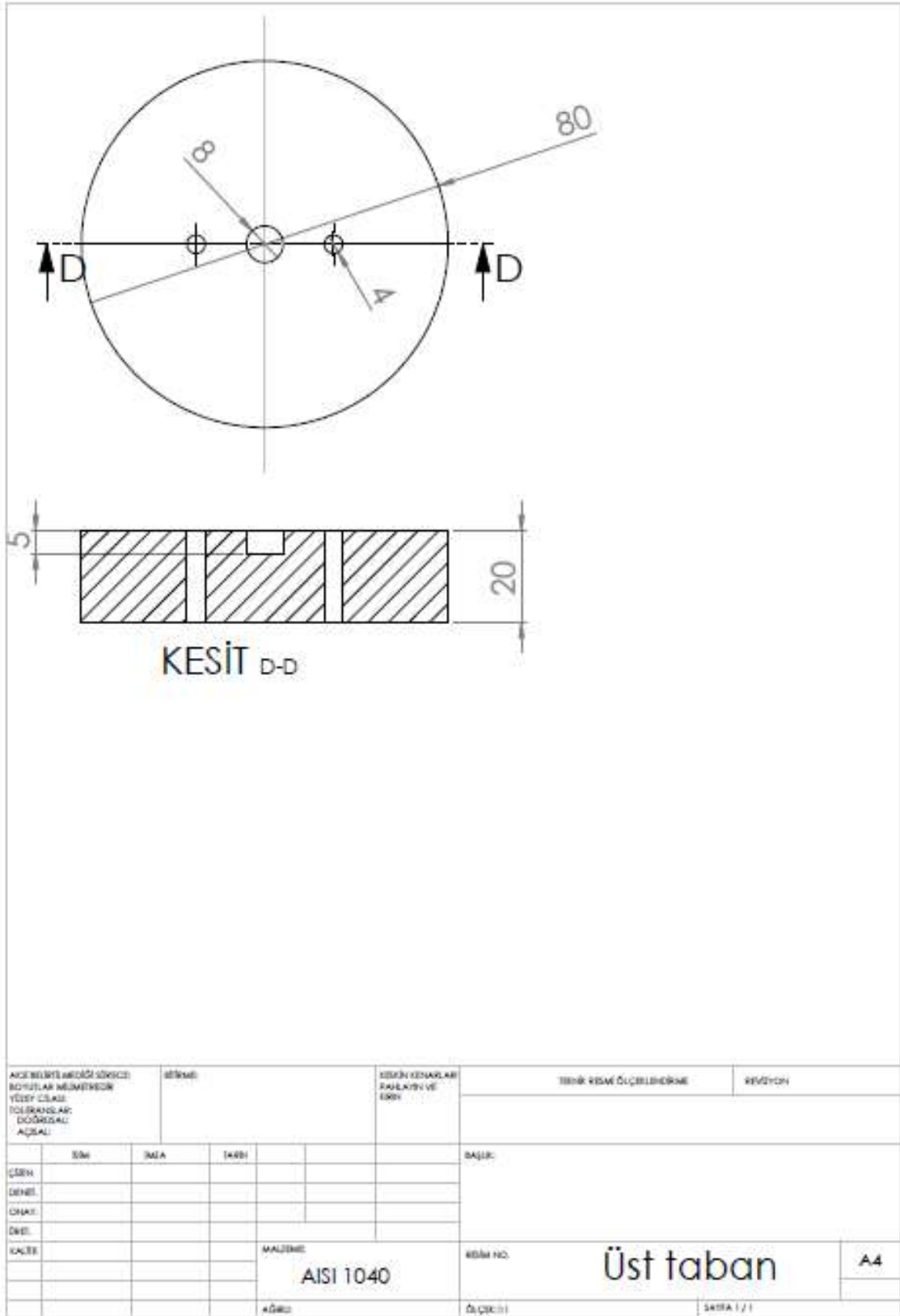
50. Horita, Z., Furukawa, M., Nemoto, M., Barnes, A. ve Langdon, T., Superplastic Forming At High Strain Rates After Severe Plastic Deformation, Acta Materialia, 48 (2000) 3633–3640.
51. Dutta, A., Charit, I., Johannes, L.B. ve Mishra, R.S., Deep Cup Forming by Superplastic Punch Stretching of Friction Stir Processed 7075 Al Alloy, Materials Science and Engineering A, 395 (2005) 173–179.
52. Tsao, L.C., Wang S.S., Yang, C.F. ve Chuang, T.H., The Ultra-High Rate Superplastic Forming of a Zn-22Al Thin Sheet Material, Zeitschrift fuer Metallkunde/Materials Research and Advanced Techniques, 92 (2001) 1227-1230
53. Tsao, L.C., Yeh, M.S., Lo, C.J., Wu, F.C. ve Chuang, T.H., Evaluation of Low Temperature Superplastic Formability for Zn-22Al Thin Sheets, Zeitschrift fuer Metallkunde/Materials Research and Advanced Techniques, 91 (2000) 613-617
54. Yeh, M.S., Lin, H.Y., Lin, H.T. ve Chang, C.B., Superplastic Micro-Forming with a Fine Grained Zn-22Al Eutectoid Alloy Using Hot Embossing Technology, Journal of Materials Processing Technology, 180 (2006) 17-22
55. Saray, O., Purcek, G., Karaman, I. ve Maier, H., Formability of Ultra-fine Grained Interstitial Free Steels, Metallurgical and Materials Transactions A, 44 (2013) 4194–4206.
56. O. Saray, Biaxial deformation behavior and formability of precipitation hardened ultra-fine grained (UFG) Cu-Cr-Zr alloy, Materials Science and Engineering A, 656 (2016) 120–129.
57. Sekban, D.M., Saray, O., Aktarer, S.M., Purcek, G. ve Ma, Z.Y., Microstructure, Mechanical Properties and Formability of Friction Stir Processed Interstitial-Free Steel, Materials Science and Engineering A, 642 (2015) 57–64.
58. Saotome, Y., Yasuda, K. ve Kaga, H., Microdeep Drawability Oof Very Thin Sheet Steels, J Journal of Materials Processing Technology, 113 (2001) 641–647.
59. Witulski, N., Justinger, H. ve Hirt, G., Validation of FEM Simulation for Micro Deep Drawing Process Modeling, AIP Conference Proceedings, 712 (2004) 952-957
60. Irthia, I., Green, G., Hashim, S. ve Kriama, A., Experimental and Numerical Investigation on Micro Deep Drawing Process of Stainless Steel 304 Foil Using Flexible Tools, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 76 (2014) 21–33.
61. Vollertsen, F., Hu, Z., Niehoff, H.S. ve Theiler, C., State of the Art in Micro Forming and Investigations into Micro Deep Drawing, Journal of Materials Processing Technology, 151 (2004) 70-79.

62. Yeh, F.H., Li, C.L. ve Lu, Y.H., Study of Thickness and Grain Size Effects on Material Behavior in Micro-Forming, Journal of Materials Processing Technology, 201 (2008) 237-241
63. Vollertsen, F. ve Hu, Z., Analysis of Punch Velocity Dependent Process Window in Micro Deep Drawing, Production Engineering, 4 (2010) 553-559.
64. Hu, Z., Realisation and Application of Size Dependent Fem-Simulation for Deep Drawing of Rectangular Work Pieces, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 4 (2011) 90-95.
65. Von Bargen, R., Hu, Z., Zoch, H.W. ve. Vollertsen, F., Effect of Heat Treatment on the Hardness of Micro Deep Drawn Cups of Al-2Sc, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 42 (2011) 1035–1039.
66. Gong, F., Guo, B., Wang, C. ve Shan, D., Micro Deep Drawing of Micro Cups by Using DLC Film Coated Blank Holders and Dies, Diamond and Related Materials, 20 (2011) 196–200.
67. Geng, X.L., Wang, B., Zhang, Y.J., Huang, J.X., Duan, M.M. ve Zhang, K.S., Effect of Crystalline Anisotropy and Forming Conditions on Thinning and Rupturing in Deep Drawing of Copper Single Crystal, Journal of Materials Processing Technology, 213 (2013) 574–580.
68. Gau, J.T., Teegala, S., Huang, K.M., Hsiao, T.J. ve Lin, B.T., Using Micro Deep Drawing With Ironing Stages to Form Stainless Steel 304 Micro Cups, Journal of Manufacturing Processes, 15 (2013) 298–305.
69. Hadi, S., Yu, H.L., Tieu, K. ve Lu, C., Simulation of Defects in Micro-Deep Drawing of an Aluminium Alloy Foil, AIP Conference Proceedings, 1532 (2013) 298–303.
70. Fu, M.W., Yang, B. ve Chan, W.L., Experimental and Simulation Studies of Micro Blanking and Deep Drawing Compound Process Using Copper Sheet, Journal of Materials Processing Technology, 213 (2013) 101-110.
71. Manabe, K., Shimizu, T., Koyama, H., Yang, M. ve Ito, K., Validation of FE simulation based on surface roughness model in micro-deep drawing, Journal of Materials Processing Technology, 204 (2008) 89-93.
72. Manabe, K., Shimizu, T. ve Koyama, H., Evaluation of milli-scale cylindrical cup in two-stage deep drawing process, Journal of Materials Processing Technology, 187–188 (2007) 245–249.
73. Vollertsen, F., Schulze Niehoff H. ve Wielage, H., Sheet Metal Micro Forming, 6th International Conference on Industrial Tools Material Processing Technologies June 2007, Bled, Slovenia, Conference Proceeding: 7–12.

74. Justinger, H. ve Hirt, G., Estimation of Grain Size and Grain Orientation Influence in Microforming Processes By Taylor Factor Considerations, Journal of Materials Processing Technology, 209 (2009) 2111–2121.
75. Irthia, I.K. ve Green, G., Evaluation of Micro Deep Drawing Technique Using Soft Die-Simulation and Experiments, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 89 (2017) 2363–2374.
76. Senkov, O.N. ve Myshlyaev, M.M., Grain Growth in a Superplastic Zn-22% Al Alloy, Acta Metallurgica, 34 (1986) 97–106.
77. Zhang, N.X., Kawasaki, M., Huang, Y. ve Langdon, T.G., The Significance of Self-Annealing in Two-Phase Alloys Processed by High-Pressure Torsion, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 63 (2014) 1-10.
78. Demirtas, M., Purcek, G., Yanar, H., Zhang, Z.J. ve Zhang, Z.F., Effect of Natural Aging on RT and HSR Superplasticity of Ultrafine Grained Zn-22Al Alloy, Materials Science Forum, 838–839 (2016) 320–325.
79. Acar, D., Ilık Hidromekanik Derin Çekme Prosesinin Sonlu Elemanlar Analizi ve Parametrik Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
80. Abbaschian, R., Abbaschian, L. ve Reed-Hill, R.E, Physical Metallurgy Principles, Fourth Edition, Cambridge Learning, Stamford, 2009.
81. Naziri, R. ve Pearce, R., The effect of grain size on workhardening and superplasticity in Zn/0.4% Al Alloy, Scripta Metallurgica, 3 (1969) 811–814.
82. Tan, J.C. ve Tan, M.J., Dynamic Continuous Recrystallization Characteristics in Two Stage Deformation of Mg–3Al–1Zn Alloy Sheet, Materials Science and Engineering A, 339 (2003) 124–132.
83. Wei, Y.H., Wang, Q.D., Zhu, Y.P., Zhou, H.T., Ding, W.J., Chino, Y. vd., Superplasticity and grain boundary sliding in rolled AZ91 magnesium alloy at high strain rates, Materials Science and Engineering A, 360 (2003) 107–115.
84. Bussiba, A., Ben Artzy, A., Shtechman, A., Ifergan, S., Kupiec, M., Grain Refinement of AZ31 and ZK60 Mg Alloys–Towards Superplasticity Studies, Materials Science and Engineering A, 302 (2001) 56–62.
85. Mohri, T., Mabuchi, M., Nakamura, M., Asahina, T., Iwasaki, H., Aizawa, T. ve Higashi, K., Microstructural Evolution and Superplasticity of Rolled Mg–9Al–1Zn, Materials Science and Engineering A, 290 (2000) 139–144.
86. Mcnelley, T.R., Lee, E.W. ve Mills, M.E., Superplasticity in a Thermomechanically Processed High–Mg, Al–Mg alloy, Metallurgical Transactions A, 17 (1986) 1035–1041.

87. Waitz, T., Kazykhanov, V. ve Karnthaler, H.P., Microstructure and Phase Transformations of HPT NiTi, Zehetbauer M.J.ve Valiev R.Z., Ed., Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004, 351–356.
88. Jiang, X.G., Yang, S.T., Earthman, J.C. ve Mohamed, F.A., Effect of Fe on Ductility and Cavitation in the Superplastic Zn-22 Pct Al Eutectoid, Metallurgical Transactions A, 27 (1996) 863–872.
89. Kawasaki, M. ve Langdon, T.G. The Development of Internal Cavitation in a Superplastic Zinc-Aluminum Alloy Processed by Ecap, Journal of Material Science, 43 (2008) 7360–7365.
90. Chokshi, A.H., Cavity Nucleation and Growth in Superplasticity, Materials Science and Engineering A, 410–411 (2005) 95–99.
91. Özkan, S., Alaşımlı Bakır Levhaların Derin Çekme Prosesinde Gerilme Analizi Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
92. Johnson, W., ve Mellor, P.B., Plasticity for Mechanical Engineers, D. Van Nostrand Company Ltd. London, 1962.
93. Savaşkan, T., Metallerde Plastik Şekil Verme Yöntemleri, Trabzon, 2013.
94. Sofuoğlu H., ve Rasty, J., Flow Behavior of Plasticine Used in Physical Modeling of Metal Forming Processes, Tribology International, 33 (2000) 523–529.

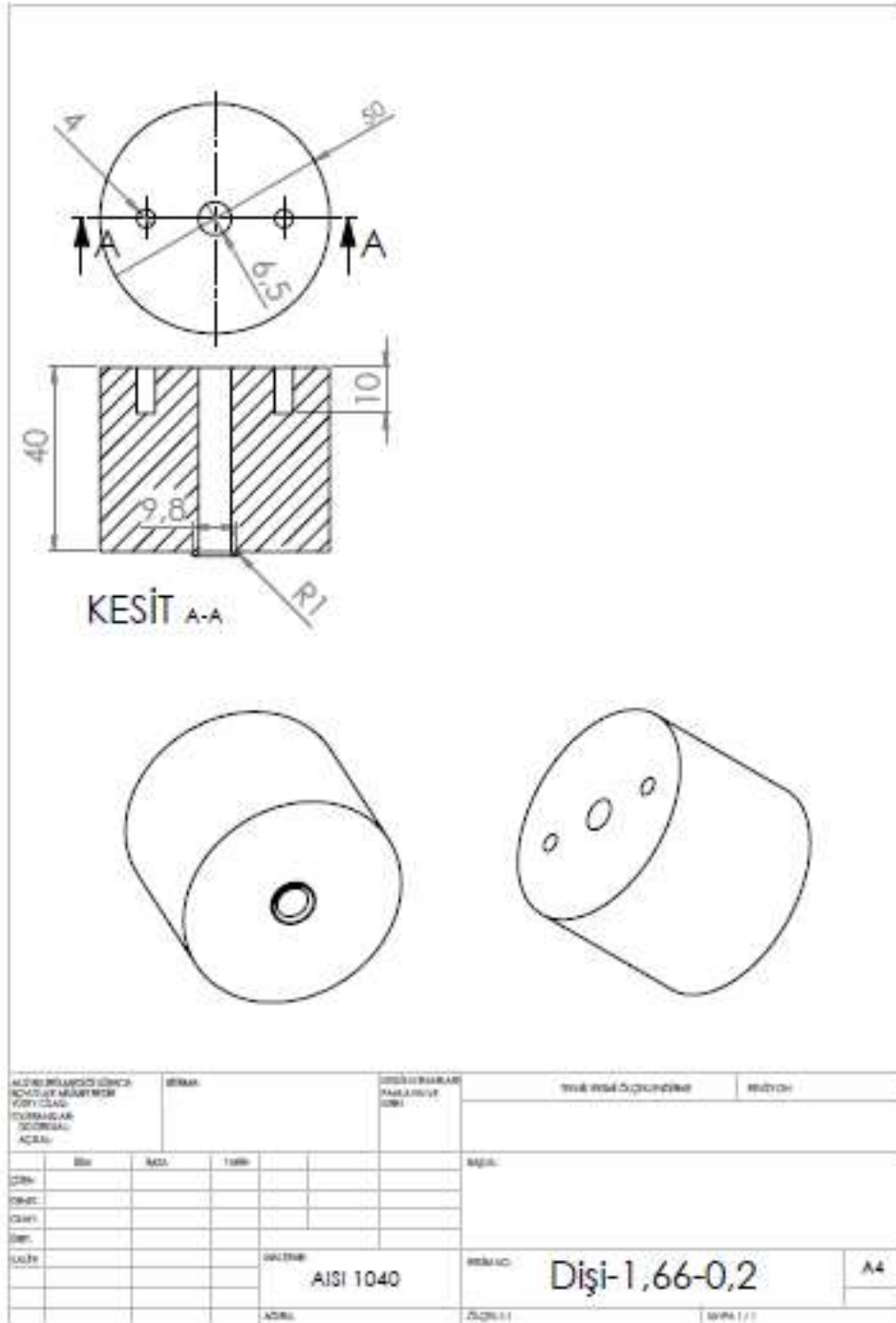
Ek 1'in devamı



Şekil 7.2. Üst taban

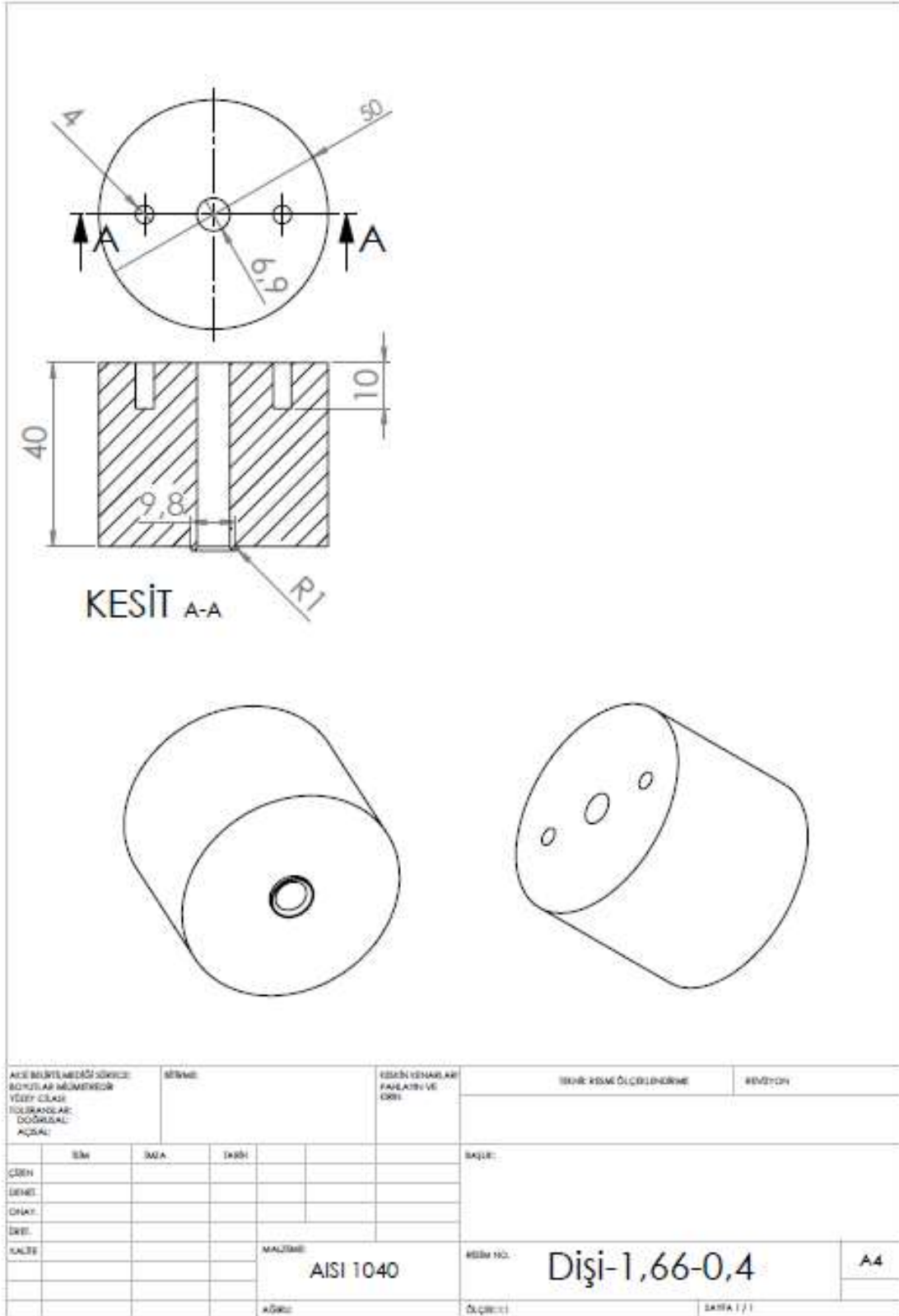
Ek 1'in devamı

Mikro derin çekme deney düzeneğinde “dişi” olarak adlandırılan parça tanımlanmasında ilk olarak parça ismi, daha sonra çekme oranı ve son olarak çekilen sac kalınlığı kullanılmıştır. Örnek: Dişi-1,66-6. 3 farklı çekme oranı ve 3 farklı kalınlık için 9 farklı dişi kalıp kullanılmıştır.



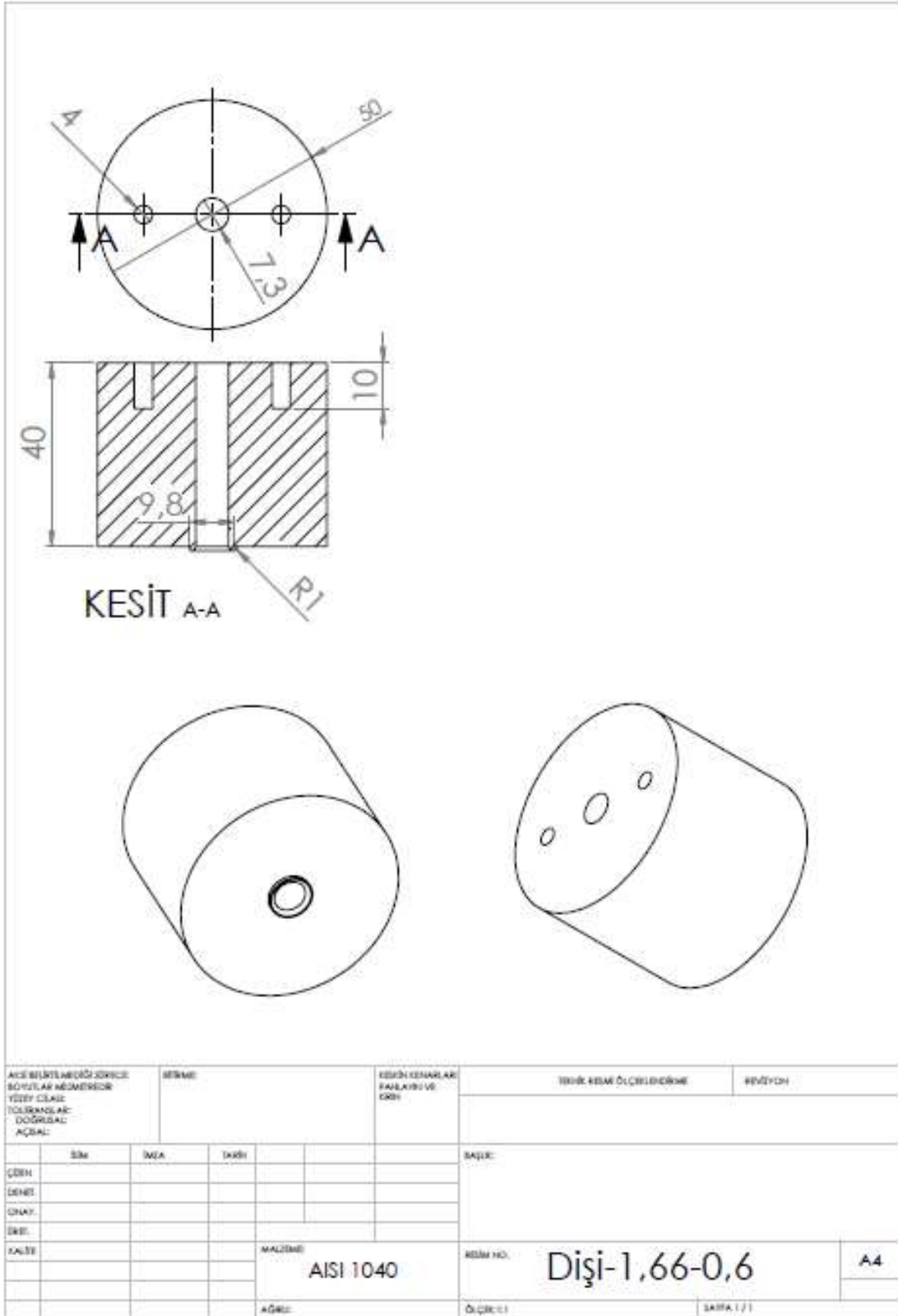
Şekil 7.3. Dişi-1,66-0,2

Ek 1'in devamı



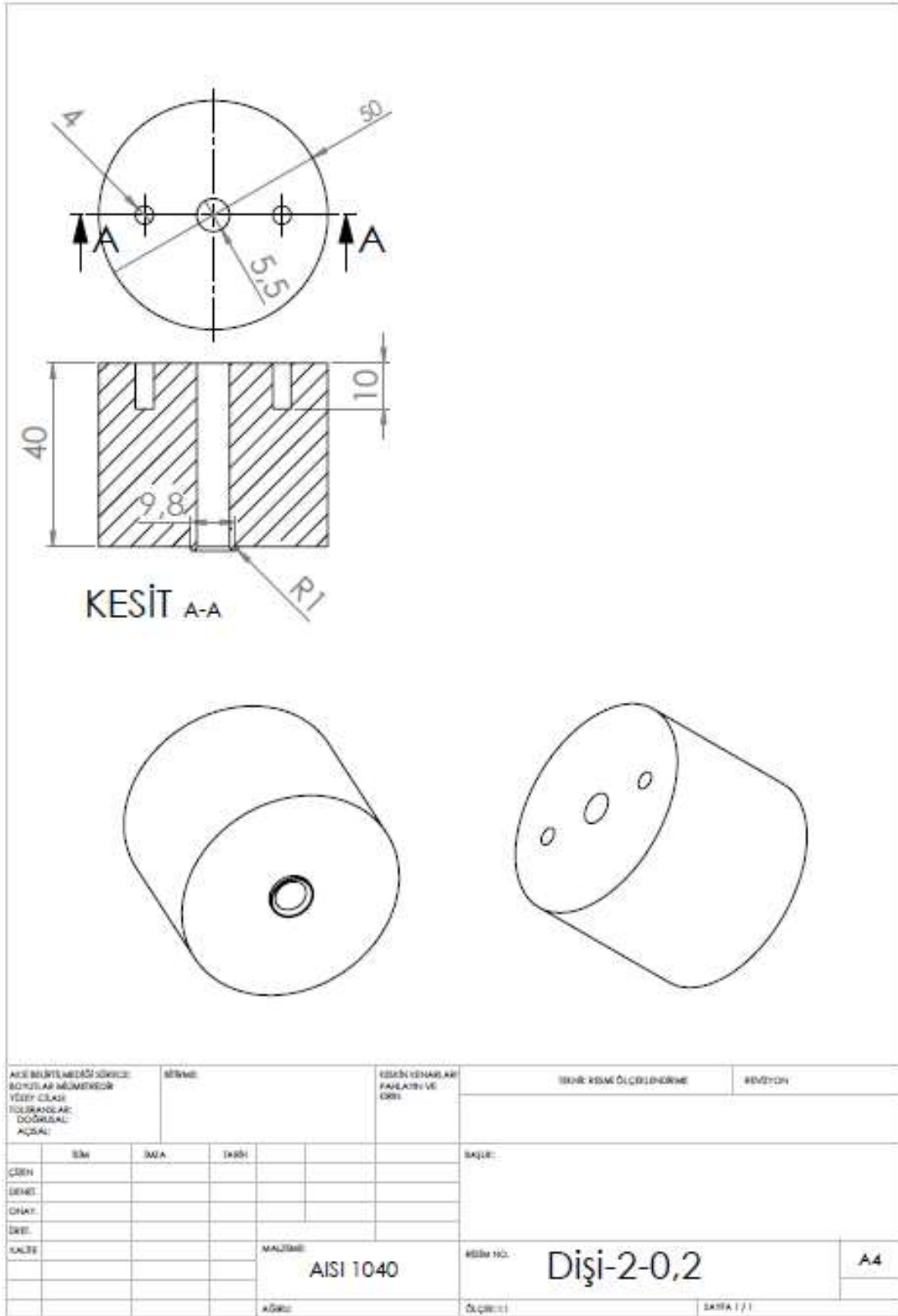
Şekil 7.4. Dişi-1,66-0,4

Ek 1'in devamı



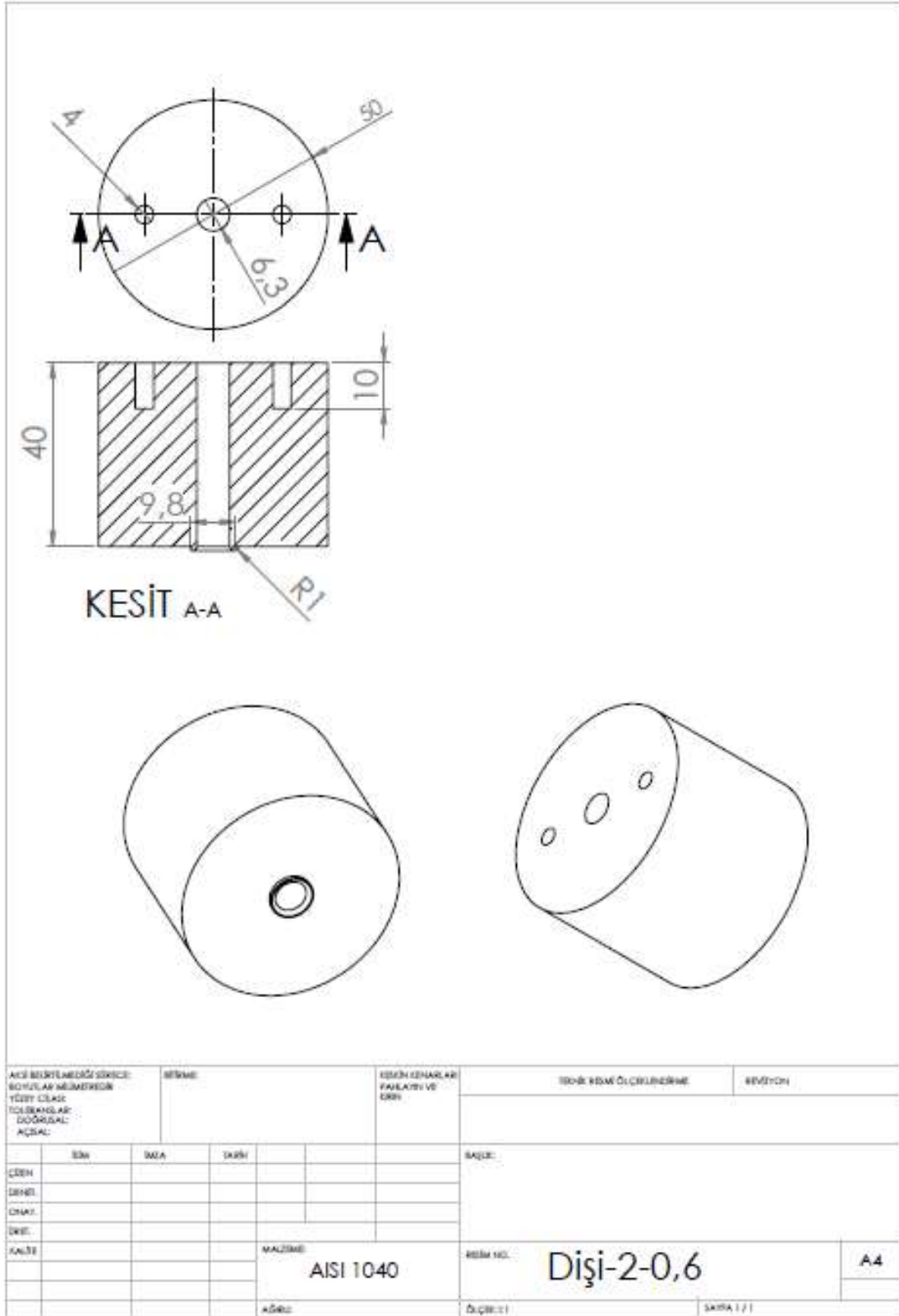
Şekil 7.5. Dişi-1,66-0,6

Ek 1'in devamı



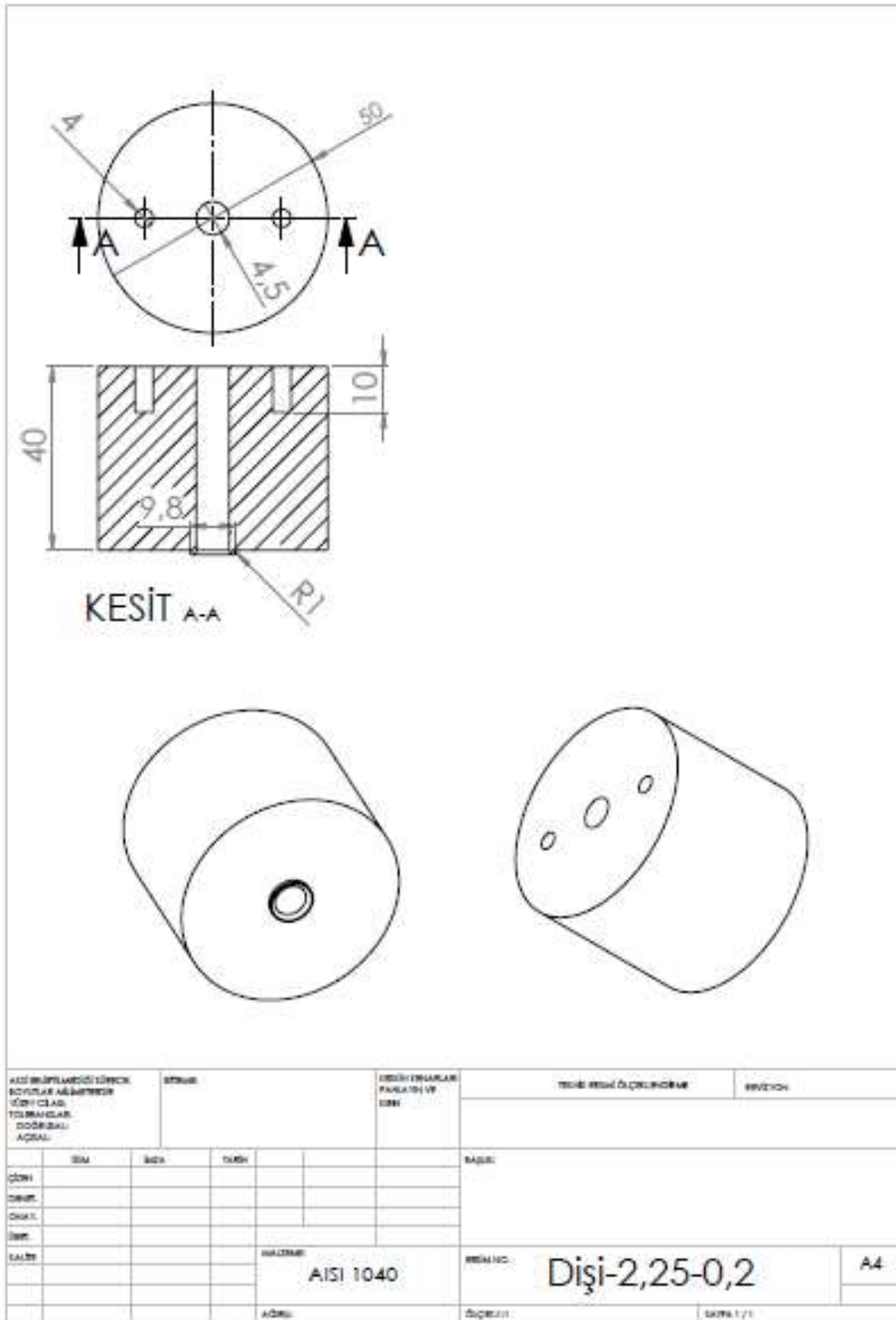
Şekil 7.6. Dişi-2-0,2

Ek 1'in devamı



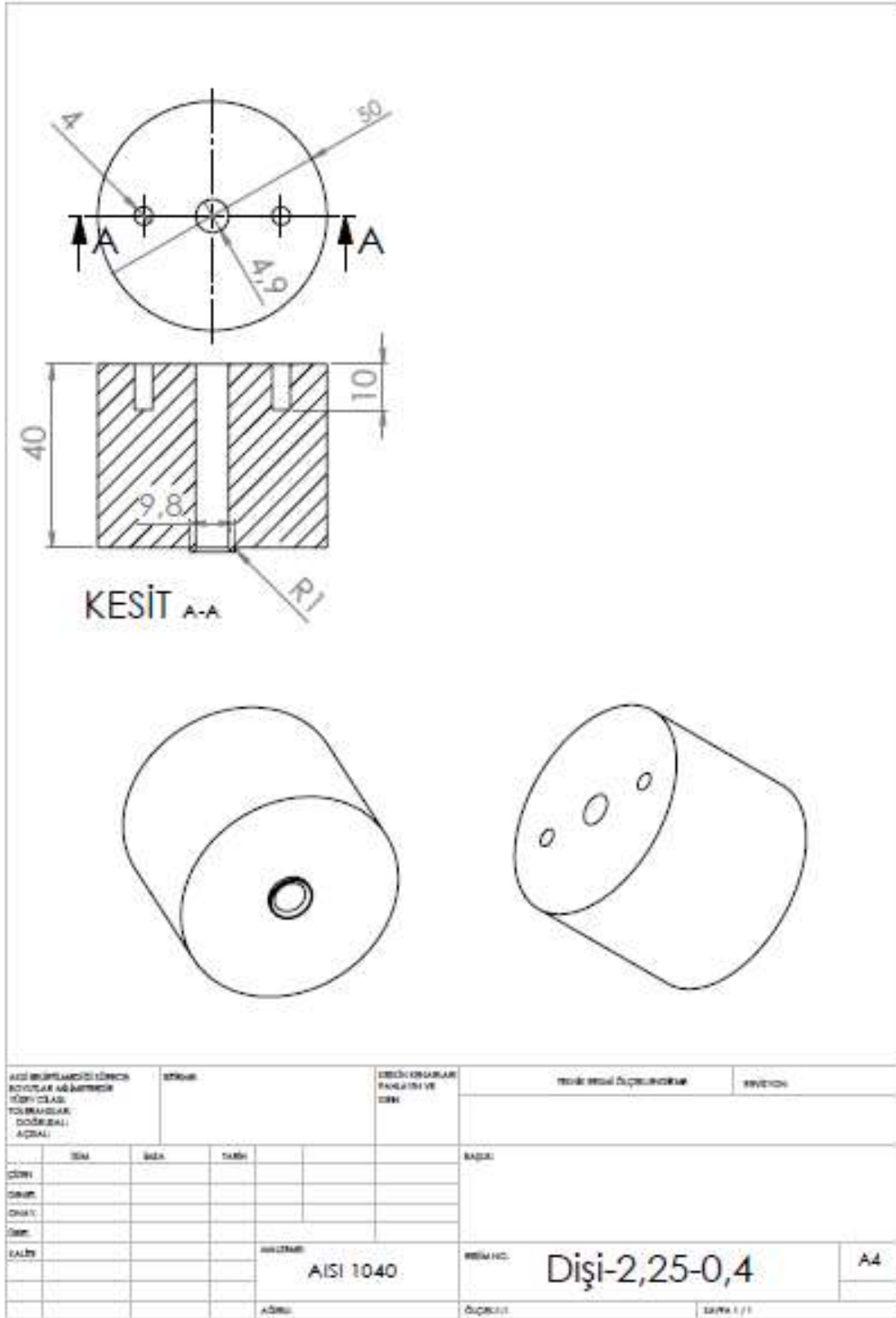
Şekil 7.8. Dişi-2-0,6

Ek 1'in devamı



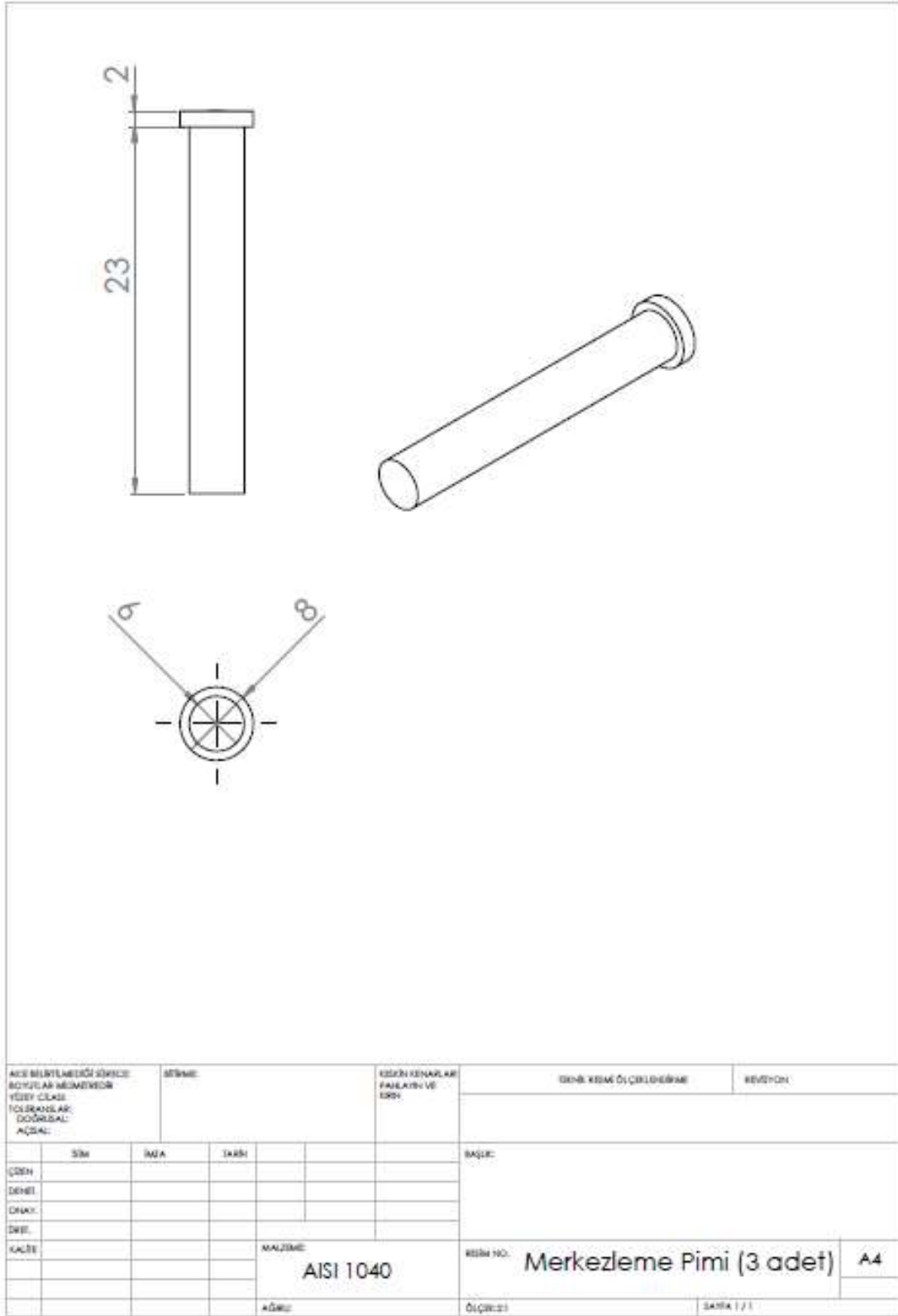
Şekil 7.9. Dişi-2,25-0,2

Ek 1'in devamı



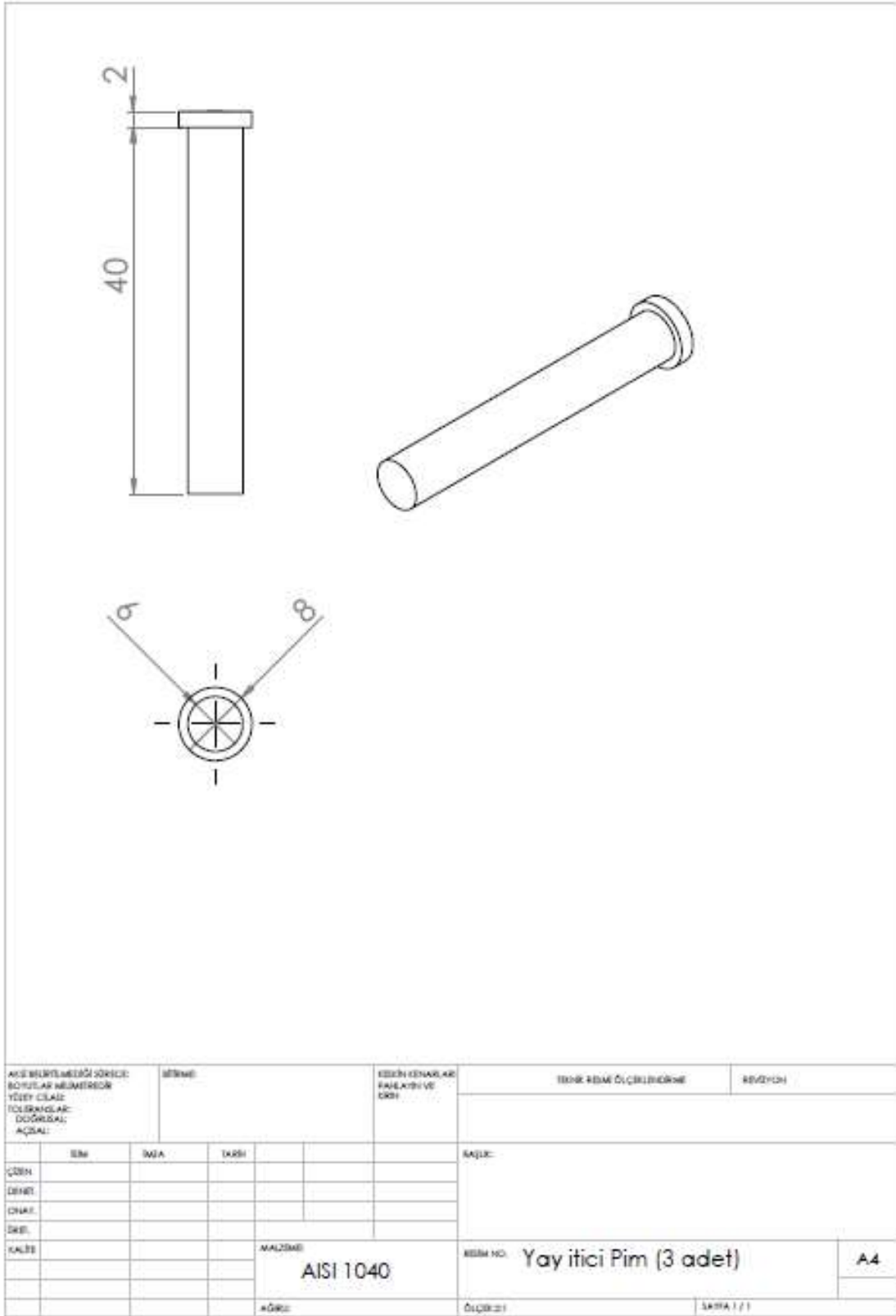
Şekil 7.10. Dişi-2,25-0,4

Ek 1'in devamı



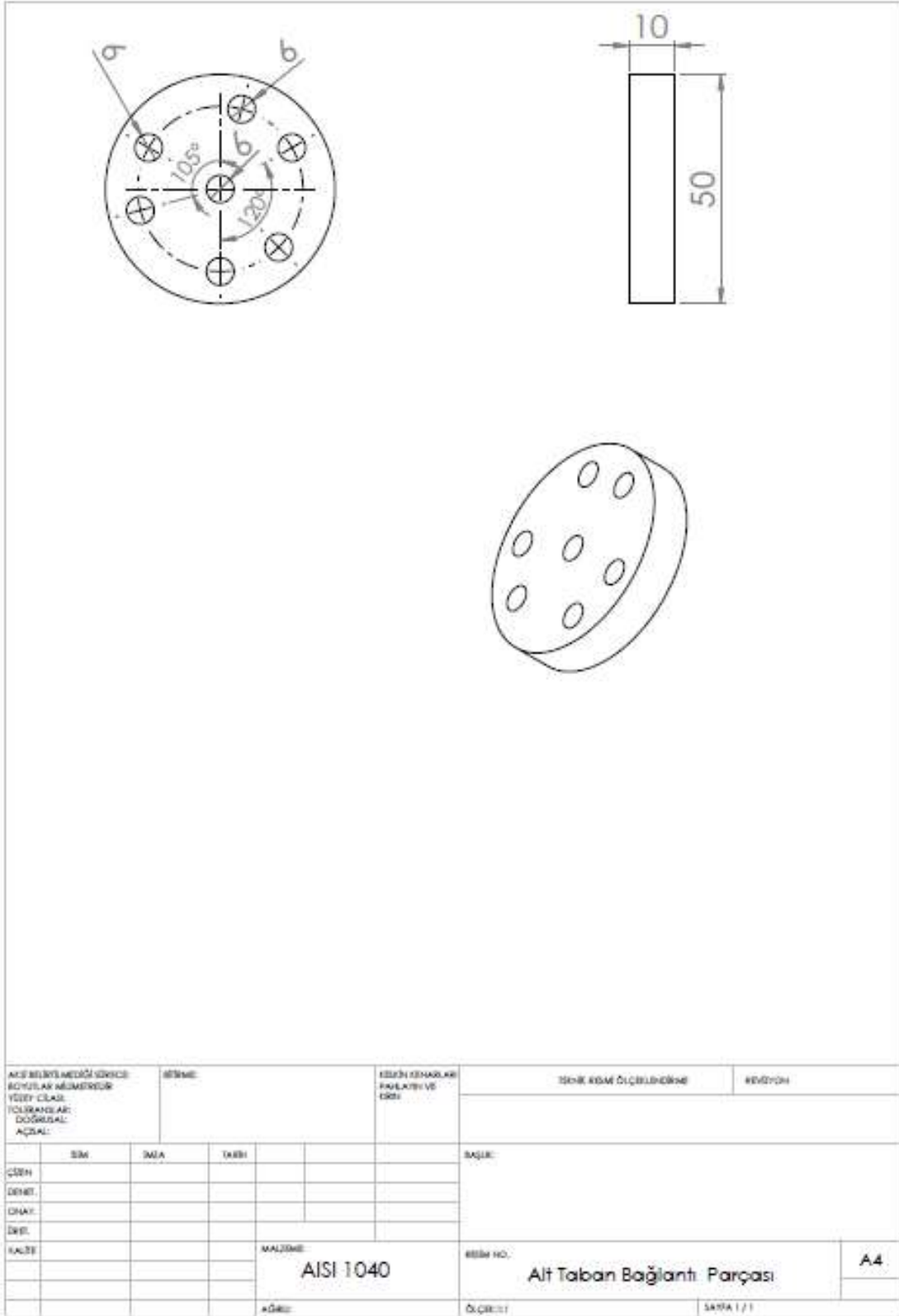
Şekil 7.17. Merkezleme pimi

Ek 1'in devamı



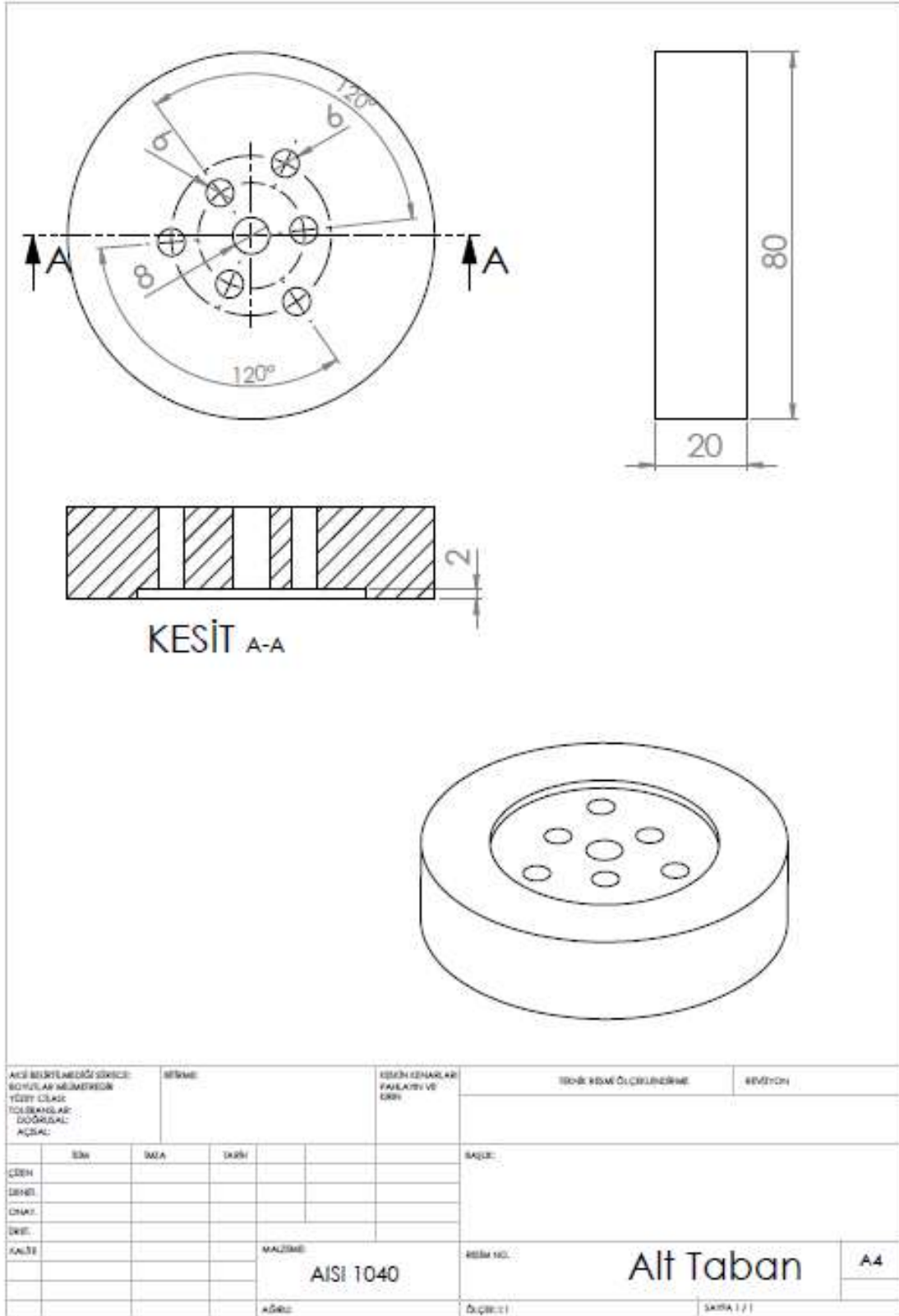
Şekil 7.18. Yay itici pim

Ek 1'in devamı



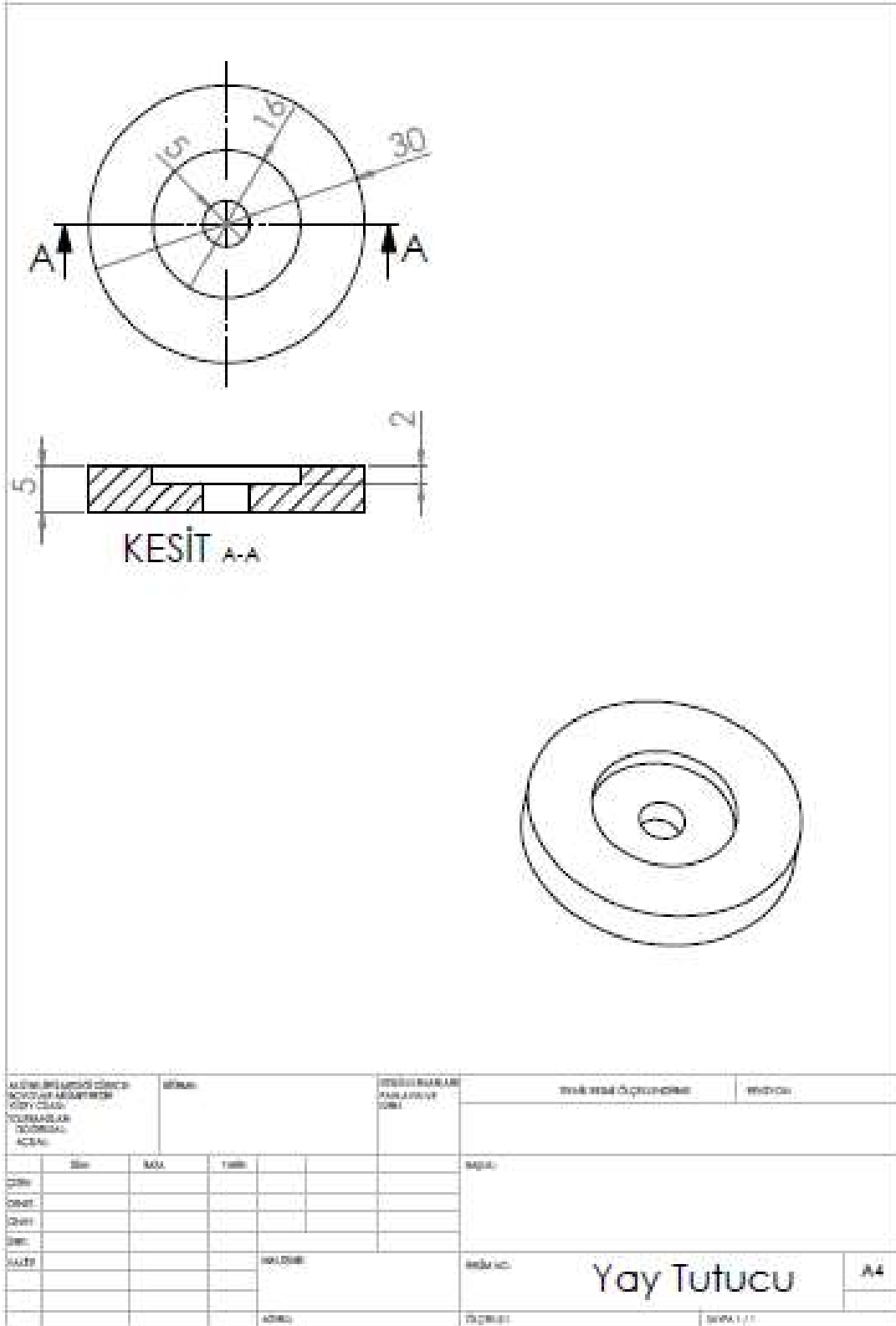
Şekil 7.19. Alt taban bağlantı parçası

Ek 1'in devamı



Şekil 7.20. Alt taban

Ek 1'in devamı



Şekil 7.21. Yay tutucu

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Emin ÇETİN; 1988 yılında Konya'da doğdu. Orta öğrenimini Konya Karatay S.D.M.P. Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2010 Bahar Yarı Yılında Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği lisans programını tamamladı. Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programını 2012 Bahar Yarı Yılında tamamladı. 2012 Güz Yarı Yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora programına başladı. 2010-2017 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik ABD'da araştırma görevlisi olarak görev yaptı. Halen Necmettin Erbakan Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. 2 adet SCI indexli makalesi, 2 adet yurt içi hakemli dergi makalesi, 5 adet yurt içi bildirisi vardır. İngilizce bilmektedir.

Doktora tezi kapsamındaki yayınları:

1. Cetin, M.E., Demirtas, M., Sofuoğlu, H., Cora, O.N. ve Purcek, G., Effects of grain size on room temperature deformation behavior of Zn-22Al alloy under uniaxial and biaxial loading conditions, Materials Science and Engineering A, 672 (2016) 78-87.
2. Çetin M.E., Demirtaş M., Sofuoğlu H., Cora Ö.N. ve Pürçek G., Süperplastik Zn-22Al Alaşımında Ultra İnce Tane Oluşumunun Oda Sıcaklığındaki Şekillendirilebilirliğe Etkisinin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi, 19. Ulusal Mekanik Kongresi, Trabzon, Türkiye, 24-28 Ağustos 2015, 334-343