T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKSTRÜZYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN PARÇACIK TAKVİYELİ ALÜMİNYUM KOMPOZİT PROFİLLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Özgür Erdem YURT

Danışman	**Doç.Dr. Arif UZUN**
Jüri Üyesi	**Dr.Öğr. Üyesi Hakan ADA**
Jüri Üyesi	**Dr.Öğr. Üyesi Henifi ÇİNİCİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KASTAMONU – 2019

TEZ ONAYI

Özgür Erdem YURT tarafından hazırlanan "Ekstrüzyon yöntemi ile üretilen parçacık takviyeli alüminyum kompozit profillerin mekanik özelliklerinin incelenmesi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve **oy birliği** ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. Arif UZUN Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Henifi ÇİNİCİ Gazi Üniversitesi	.....

15/02/2019

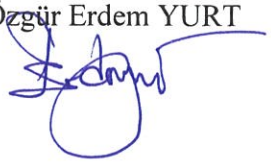
Enstitü Müdürü Prof.Dr.Hasbi YAPRAK .....

TAAHHÜTNAME

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildirir ve taahhüt ederim.

İmza

Özgür Erdem YURT



ÖZET

Yüksek Lisans

EKSTRÜZYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN PARÇACIK TAKVİYELİ ALÜMİNYUM KOMPOZİT PROFİLLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Özgür Erdem YURT
Kastamonu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Arif UZUN

Bu tez çalışmasında, uzunluk / çap (L / D) oranı ile belirlenen deformasyon modu ve enerji sönümleme kapasitesinin etkisini araştırmak için alüminyum esaslı %5-10-15-20 SiC ve %5-10-15-20 B4C takviyeli/takviyesiz dikişsiz boru biçimli profillller üzerinde bir dizi eksenel ezme testleri ve çekme testleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar öncelikli olarak toz metalurjisi yöntemi ile kompozit biyetlerin üretimi ile başlamıştır. Al tozları ile SiC ve B_4C parçacıkları ağırlıkça %5-10-15-20 oranında bilyeli karıştırıcı yardımıyla 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen karışım 600 Mpa basınç altında tek yönlü olarak sıkıştırılarak biyet haline getirilmiştir. Daha sonra biyetler 550°C sıcaklıkta özel olarak tasarlanmış ekstrüzyon kalıbında ekstrüze edilerek 12 mm çapında ve 2 mm et kalınlığında profillerin üretilmesi sağlanmıştır. Uzunluk / çap (L / D) oranının profillerin ezilebilirlik özelliği ve çekme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmak için dört farklı L/D oranı belirlenmiştir. Üretilen bu numunelerin ezilme davranışlarının belirlenmesi için 3 mm/dak deformasyon hızında basma testleri ve 1 mm/dk deformasyon hızında çekme testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üretilen malzemelerin sertlikleri, yoğunlukları ölçülmüş, optik ve taramalı elektron (SEM) mikroskoplarında görüntüleri alınmıştır. En yüksek sertlik değerleri %20 oranında parçacık içeren numunelerde elde edilmiştir. B_4C ve SiC içeren numuneler için elde edilen sertlik değerleri 54,4 Hv ve 49,5 Hv'dir. SiC içeren kompozit profillerde parçacık içeriğindeki artışa bağlı olarak maksimum gerilme değerlerinde artış tespit edilmiştir. B_4C içeren kompozit profillerde parçacık içeriğindeki artışa bağlı olarak maksimum gerilme değerlerinde artış/azalış şeklinde değişim gözlemlenmiştir. B_4C ve SiC içeren kompozit profillerde parçacık içeriğindeki artışa bağlı olarak birim uzama miktarında azalma tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Al profil, SiC, B_4C, ezilme davranışı, sıcak ekstrüzyon.

2018, 113 sayfa
Bilim Kodu: 91

ABSTRACT

MSc. Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF PARTICULATED REINFORCED ALUMINUM COMPOSITE PROFILES PRODUCED BY EXTRUSION METHOD

Özgür Erdem YURT
Kastamonu University

Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Materials Science And Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Arif UZUN

Abstract: In this study, a series of axial crush tests were performed on aluminium-based 5-10-15-20% SiC and 5-10-15-20% B_4C reinforced / unreinforced seamless pipe profiles to investigate the influence the deformation and tension mode and energy absorption capacity dictated by length/diameter (L/D) ratio. Experimental studies have started with the production of composite billets by the powder metallurgy method.Al powders and 5-10-15-20 % wgt. SiC particles and 5-10-15-20 % wgt. B_4C were mixed for 30 min in a ball mixer. The mixture was compressed into uni-directionally under pressure of 600 MPa. Then, the obtained billets were extruded at a specially designed extruded mold at 550°C to produce profiles with a diameter of 12 mm and a wall thickness of 2 mm. Four different L/D ratios were determined to investigate the effect of the length/diameter (L/D) ratio on the crashworthiness of the profiles. To determine the crushing and tension behavior of these samples, the quasi-static compression tests were carried out at a speed of 3 mm/min and 1mm/dk accordingly, the deformation mode changed with increasing L/D ratio in both types of materials. The hardnesses, densities of the produced materials were measured, images were taken on optical and scanning electron (SEM) microscopes. The highest hardness values were obtained in samples containing 20% particles. The hardness values obtained for the samples containing B_4C and SiC are 54,4 Hv and 49,5 Hv. In SiC-containing composite profiles, an increase in the maximum stress values was determined due to the increase in the particle content. In composite profiles containing B4C, there is an increase / decrease in the maximum stress values due to the increase in the particle content.Composite profiles containing B_4C and SiC have been shown to decrease the amount of unit elongation due to increase in particle content.

Key Words: Al profile, SiC, B_4C, crushing behavior, hot extrusion.

2018, 113 pages
Science Code: 91

TEŞEKKÜR

Tez danışmanlığımı üstlenerek araştırma konusunun seçimi ve yürütülmesi sırasında, değerli bilimsel uyarı ve önerilerinden yararlandığım Sayın Hocam Doç. Dr. Arif UZUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmamı destekleyerek bu tezin oluşmasında maddi manevi büyük katkısı ve desteği olan ve bünyesinde çalışmaktan mutluluk duyduğum Kastamonu Entegre Ağaç San. ve Tic. A.Ş. yönetimine ve mekanik bakım ve yardımcı işletmeler müdürü Galip Özden SÜZEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca deneysel ve analiz çalışmalarında destek sağlayan Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesine ve Merkezi Araştırma Laboratuvarına teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak her zaman yanımda olan ve benden desteğini esirgemeyen aileme ve kız arkadaşım Birgül Bayraktaroğlu'na çok teşekkür ederim.

Bu çalışma, Kastamonu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetimi Koordinatörlüğü tarafından KÜ-BAP03/2017-5 nolu proje ile desteklenmiştir.

Özgür Erdem YURT
Kastamonu, Şubat, 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ii
TAAHHÜTNAME iii
ÖZET iv
ABSTRACT v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
ŞEKİLLER DİZİNİ x
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ xi
GRAFİKLER DİZİNİ xiii
TABLOLAR DİZİNİ xv
1. GİRİŞ 1
2. ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLER 2
2.1. Matris Malzemesi 3
2.1.1. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler 3
2.2. Takviye Elemanı 5
2.2.1 B_4C Takviye elemanı 6
2.2.2. SiC Takviye elemanı 7
2.3. Parçacık Takviyeli AMK'lerin Üretim Yöntemleri 8
2.3.1. Karıştırmalı döküm 8
2.3.2. İnfiltrasyon metodu 9
2.3.3. Toz metalurjisi 10
2.4. AMK'lerin Mekanik Özellikleri 12
2.4.1 Akma ve çekme dayanımı 13
2.4.2 Süneklik 14
2.4.3 Elastisite modülü 16
2.5. Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları 17
3. EKSTRÜZYON TEKNOLOJİSİ 19
3.1. Ekstrüzyon Tanımı 19
3.2. Ekstrüzyon Yöntemleri 19
3.2.1. Direkt Ekstrüzyon 20
3.2.2. Endirekt Ekstrüzyon 21
3.3. Ekstrüzyon Mekaniği 22
3.3.1. Plastik Deformasyon ve Metal Akışı 22
3.3.2. Alın Kalınlığı 30
3.3.3. Plastik Gerinim ve Oranı 31
4. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ EKSTRÜZYONU 34
4.1. Yumuşak ve Orta Dereceli Alüminyum Alaşımların Ekstrüzyonu 34
4.1.1. Alaşımlar ve Ekstrüze Edilebilirlik 35
4.1.2. Ürün Şekilleri ve Boyutları 38
4.1.3. Katı Şekillerin Ekstrüzyonu 40
4.1.4. Tüplerin ve Boşluklu Şekillerin Ekstrüzyonu 41
4.2. Sert Alüminyum Alaşımların Ekstrüzyonu 45
4.2.1. Sert Alaşımların Ekstrüze Edilebilirliği 45

4.2.2. Alüminyum Kompozit Çubuk Profilleri 46
4.2.3. Ekstrüzyon Parametreleri 46
5. ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN EKSTRÜZYONU 48
5.1.Biyet Metalurjisi ve Akış Gerilimi..... 48
5.2 Kalıp Malzemeleri ve Kalıp Tasarımı 48
5.3. Ekstrüzyon Prosesi ve Hataları 49
5.4. Ekstrüzyonun Oluşumu..... 49
5.5. Toz Metalurjisi (T/M) Alaşım Ekstrüzyonları 50
5.6. Alüminyum Kompozit Çubuk Profiller 50
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 52
6.1. Malzeme 52
6.2. B_4C Ve SiC Takviyeli Çubuk Profil Üretimi..... 52
6.2.1. Tozların Karıştırılması 52
6.2.2 Presleme İşlemi 53
6.2.3 Ekstrüzyon İşlemi 54
6.3. Karekterizayon İşlemleri..... 54
6.3.1. Yoğunluk Ölçüm Metodu 54
6.3.2. Basma Deneyi 55
6.3.3. Çekme Deneyi..... 56
6.3.4. Mikrosertlik Ölçümü..... 57
6.3.5. Mikroyapısal Analizler..... 58
7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR 59
7.1. Kompozit Profillerdeki Yoğunluk Değişimi..... 59
7.2. Mikroyapısal Gözlemler..... 60
7.3. Kompozit Profillerdeki Sertlik Değişimi 66
7.4. Kompozit Profillerin Ezilme Davranışı 68
7.4.1. Saf Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı..... 69
7.4.2. %5 SiC Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı 72
7.4.3. %10 SiC Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı 75
7.4.4. %15 SiC Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı 78
7.4.5. %20 SiC Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı 81
7.4.6. Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı Üzerine SiC ve L/D ..... Oranının Etkisi 84
7.5. SiC Takviyeli Alüminyum Profillerin Çekme Davranışı..... 86
7.6. Saf Alüminyum ve Al-SiC Kompozit Profillerin Kırık Yüzey Analizi. 88
7.7. %5 B_4C Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı..... 90
7.7.1. %10 B_4C Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı..... 92
7.7.2. %15 B_4C Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı..... 95
7.7.3. %20 B_4C Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı..... 98
7.8. Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı Üzerine B_4C ve L/D ..... Oranının Etkisi 100
7.9. B_4C Takviyeli Alüminyum Profillerin Çekme Davranışı 102
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 104
KAYNAKLAR 106
ÖZGEÇMİŞ

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AMK	Alüminyum matrisli kompozit
MMK	Metal matrisli kompozit
EDS	Enerji dağılımı spektrometresi
E	Enerji emilimi
ED	Ekstrüzyon yönüne dik
EY	Ekstrüzyon yönünde
ER	Ekstrüzyon Oranı
Ec	Kompozit malzemenin elastisite modülü
EP	Parçacık veya fiberin elastisite modülü
ER1	En büyük kalıp açıklığı için ekstrüzyon oranı
ER2	Küçük kalıp açıklığı için ekstrüzyon oranı
E_M	Matrisin elastisite modülü
SEA	Spesifik enerji absorbesi
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TM	Toz metalurjisi
UTS	Maksimum çekme dayanımı
YS	Akma dayanımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Matris fazlarının sınıflandırılması 3
Şekil 2.2. Başlıca işlenilebilir alüminyum alaşımlarının alaşım ilişkilerinin gösterimi 4
Şekil 2.3. Karıştırmalı dökümün şematik gösterimi 9
Şekil 2.4. İnfiltrasyon yönteminin şematik görünümü 10
Şekil 2.5. Toz metalurjisi prosesinin şematik gösterimi 12
Şekil 2.6. Takviye elamanlarının farklı bileşenleri ile AMK'nin çekme dayanımı 15
Şekil 2.7. AMK'nin farklı Mg2Si oranı ile çekme davranışı 15
Şekil 3.1. Ekstrüyon işleminin şematik gösterimi 19
Şekil 3.2. Direkt ekstrüzyon şematik gösterimi 20
Şekil 3.3. Endirekt ekstrüzyon işleminin şematik gösterimi 21
Şekil 3.4. Direkt ve endirekt ekstrüzyon proseslerinde yük veya basıncın ıstampa hareketiyle değişimi 22
Şekil 3.5. Ekstrüzyonda dört farklı akış türü 23
Şekil 3.6. Doğrudan ekstrüzyonda biyetin metal akışı 25
Şekil 3.7. Endirekt ekstrüzyonda biyetin metal akış 25
Şekil 3.8. a) Ekstrüzyondan sonra geriye kalan 7075 alaşımının dağlanmış enine kesiti b) Ölü metal bölgeyi gösteren alın kesitinin şematik gösterimi 29
Şekil 3.9. Ekstrüzyon oranı ve yarı ölü metal bölge açısı arasındaki ilişki 29
Şekil 3.10. Ölü bölge ve alın kalınlığı arasındaki ilişki 30
Şekil 3.11. Kovan içindeki biyet geometrisi 32
Şekil 4.1. Yumuşakve orta mukavemetli ısıl işlem uygulanabilir alüminyum ekstrüzyonların temel süreci 35
Şekil 4.2. Ektrüde edilmiş alüminyum şekiller 39
Şekil 4.3. Çevre çemberi çapı, kovan çapı 39
Şekil 4.4. Odalı (porthole) matris 42
Şekil 4.5. Dikişsiz boru ekstrüzyonun prensibi 43
Şekil 4.6. Kaynak odasının (parçalı) şeması, içi boş ekstrüzyon (a) Mandrel çevresinde ve boşluk içine giden metal akışının şematik gösterim.. (b) Kalıp setinin biyet giriş yolu yüzeyi 44

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Sayfa

Fotoğraf 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların SEM görüntüsü 52
Fotoğraf 6.2. Çalışmada kullanılan karıştırıcı..... 53
Fotoğraf 6.3. Soğuk presleme kalıp takımı (a), sıkıştırma sonrası üretilen ..... biyet numune (b) 53
Fotoğraf 6.4. Ekstrüzyon sonrası üretilen kompozit profil ünitesi (a)..... Ekstrüzyon kalıbı (b) 54
Fotoğraf 6.5. Basma numunesi (a) ,Shımadzu marka Autograph AGS-X model üniversal test cihazı (b) 56
Fotoğraf 6.6. Çekme testi..... 57
Fotoğraf 6.7. Sertlik ölçüm cihazı..... 58
Fotoğraf 6.8. Mikroyapısal karakterizasyonlarda kullanılan cihazlar ,..... a) optic mikroskop b), SEM cihazı 58
Fotoğraf 7.1. %5 oranda B_4C içeren numuneden alınan SEM görüntüsü 61
Fotoğraf 7.2. Parçacık oranının bir fonksiyonu olarak kompozit Al-B_4C ..... boruların uzunlamasına kesitlerinden elde edilen mikro yapı..... görüntüleri a)%5, b)%10, c)%15, d)%20,..... 62
Fotoğraf 7.3. B_4C parçacıklarında oluşan kırılmalar 62
Fotoğraf 7.4. Al-B_4C kompozit boruların ekstrüzyon yönüne dik kesitlerden yönüne dik kesitlerinden elde edilen mikro yapı görüntüleri..... a)%5, b)%10, c)%15, d)%20 63
Fotoğraf 7.5. %5 oranda SiC içeren numuneden alınan SEM görüntüsü ve bu görüntü üzerinden alınan EDS sonucu..... 64
Fotoğraf 7.6. Parçacık oranının bir fonksiyonu olarak Al-SiC kompozit..... boruların uzunlamasına kesitlerinden elde edilen mikro yapı..... görüntüleri a)%5, b)%10, c)%15, d)%20..... 65
Fotoğraf 7.7. Al-SiC kompozit boruların ekstrüzyon yönüne dik kesitlerinden elde edilen mikro yapı görüntüleri a)%5, b)%10, c)%15, d)%20 66
Fotoğraf 7.8. Yarı statik sıkıştırma koşulları altında farklı L/D oranlarına ..... sahip saf Al profillerin deformasyon modları, a) Halka modu .... L/D:1, b) Elmas modu L/D:2, c-d) L/D:3 ve L/D:4 Euler modu 70
Fotoğraf 7.9. Yarı statik sıkıştırma koşulları altında farklı L/D oranlarına ..... sahip %5 SiC takviyeli Al profillerin deformasyon modları ..... a) Halka modu, L/D:1 b) Elmas modu L/D:2, c-d) L/D:3 ve..... L/D:4 Euler Modu..... 73
Fotoğraf 7.10. %10 SiC içeren Al profillerin deformasyon davranışları a)..... Halka modu,L/D:1 b) Elmas modu L/D:2, c-d) L/D:3 ve L/D:4 Euler..... 76
Fotoğraf 7.11. Alt lop üzerinde gerilim yığılmaları neticesinde oluşan çatlaklar 76
Fotoğraf 7.12. %15 SiC içeren Al profillerin deformasyon davranışları..... a) L/D:1,b) L/D:2, c) L/D:3 ve d) L/D:4..... 79
Fotoğraf 7.13. %20 SiC içeren Al profillerin deformasyon davranışları ..... a) L/D:1,b) L/D:2, c) L/D:3 ve d) L/D:4..... 82
Fotoğraf 7.14. Çekme yükü altında test edilen ekstrüde edilmiş saf Al ve.....

Al-SiC kompozit profillerin kırılma morfolojisi analizi (a) saf ..
Al (b) %5 SiC, (c) %10 SiC, (d) %15 SiC, (e) %20 SiC 89
Fotoğraf 7.15. Yarı statik sıkıştırma koşulları altında farklı L/D oranlarına .....
sahip%5 B_4C takviyeli Al profillerin deformasyon modları,.....
a) Halka modu b) Elmas modu, c-d) Euler Modu..... 90
Fotoğraf 7.16. %10 B_4C takviyeli Al profillerin deformasyon davranışları.....
a) L/D:1,b) L/D:2, c) L/D:3 ve d) L/D:4..... 93
Fotoğraf 7.17. %15 B_4C takviyeli Al profillerin deformasyon davranışları .....
L/D:1,b) L/D:2, c) L/D:3 ve d) L/D:4..... 96
Fotoğraf 7.18. %20 B_4C takviyeli Al profillerin deformasyon davranışları .....
L/D:1,b) L/D:2, c) L/D:3 ve d) L/D:4..... 99

GRAFİKLER DİZİNİ

Sayfa

Grafik 7.1. SiC ve B_4C takviyeli alüminyum çubuk profillere ait bağıl yoğunluk değerleri 60
Grafik 7.2. SiC ve B_4C takviyeli alüminyum çubuk profillere ait sertlik değişim değeri 68
Grafik 7.3. Saf alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri 71
Grafik 7.4. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için saf Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri..... 72
Grafik 7.5. %5 SiC takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri 74
Grafik 7.6. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %5 SiC takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri 75
Grafik 7.7. %10 SiC takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri .. 77
Grafik 7.8. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %10 SiC takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri..... 78
Grafik 7.9. %15 SiC takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri .. 80
Grafik 7.10. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %15 SiC takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerler..... 81
Grafik 7.11. Yarı statik test koşulları altında %20 SiC takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri 83
Grafik 7.12. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %20 SiC takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri 84
Grafik 7.13. Farklı oranlarda SiC içeren alümünyum profillerin L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen kuvvet değerleri . 85
Grafik 7.14. Farklı oranlarda SiC içeren alümünyum profillerin L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen enerji değerleri ... 86
Grafik 7.15. Farklı oranlarda SiC içeriğine sahip kompozit alüminyum profillerin gerilme – gerinim (a) ve UTS, YS ve birim uzama (b) eğrileri gerilme – gerinim 87
Grafik 7.16. %5 B4C takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri 91
Grafik 7.17. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %5 B_4C takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri..... 92
Grafik 7.18. %10 B_4C takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri 94
Grafik 7.19. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %10 B_4C takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri..... 95
Grafik 7.20. %15 B_4C takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri 97
Grafik 7.21. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %15 B_4C takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri..... 98
Grafik 7.22. %20 B_4C takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri 99
Grafik 7.23. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %20 B_4C takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri..... 100
Grafik 7.24. Farklı oranlarda B_4C içeren alüminyum profillerin L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen kuvvet değerleri... 101
Grafik 7.25. Farklı oranlarda B_4C içeren alümünyum profillerin L/D oranına ..

bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen enerji değerleri 102
Grafik 7.26. Farklı oranlarda B4C içeriğine sahip kompozit alüminyum profil.
lerin (a) gerilme – gerinim ve (b) UTS, YS ve birim uzama .....
eğrileri 103

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Bazı katkı malzemelerin karakteristik özellikleri 5
Tablo 2.2. Bor Karbürün Özellikleri 7
Tablo 2.3. Silisyum Karbürün Özellikleri 8
Tablo 2.4. Farklı matris ve takviye elemanına sahip AMK'lerin gerilme ..... özellikleri..... 14
Tablo 3.1. Direkt ekstrüzyon yönteminde malzeme akış tiplerinin ..... karakteristikleri 27
Tablo 4.1. Yumuşak ve orta dereceli alaşımların bağıl ekstrüdabilite dereceleri 37
Tablo 4.2. Çeşitli ekstrüze ürünler için yaygın olarak kullanılan alüminyum ... 38 alaşımlar .....
Tablo 4.3. Alüminyum ekstrüzyon profillerin sınıflandırılması 40
Tablo 4.4. Bazı yumuşak ve orta sertlikte alaşımlar için ekstrüzyon parametrelerinin karakteristik değerleri 41
Tablo 4.5. Boru ve içi boş kesitlerin üretimi için bazı alüminyum alaşımların .. kaynak özellikleri 43
Tablo 4.6. Çeşitli sert alaşımların ekstrüze edilebilirlik dereceleri 46
Tablo 4.7. Bazı sert alaşımların ekstrüzyon parametrelerinin karakteristik..... değerleri 47
Tablo 6.1 Numunelerin boy/çap (L/D) oranları 55

1. GİRİŞ

Alüminyum alaşımları yüksek mukavemet - ağırlık oranı ve mükemmel enerji sönümleme yeteneğinden dolayı yapısal uygulamalar için tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır. Örneğin otomotiv endüstrisinde alüminyum malzemeler hafif olduğu için ideal bir malzemedir. Ayrıca yolcuların güvenliğini artırabilir ve geri dönüşüm sonrası bile benzersiz özelliklerini koruyabilirler. Özellikle alüminyumdan imal edilmiş metalik boru biçimli kutular, yüksek mukavemet ile düşük ağırlık ve üretim sürecinin kolaylığı nedeniyle enerji emici olarak araç tasarımında tercih edilmektedir. Alüminyum profil tasarımında göz önünde bulundurulması gerekli olan hususların başında statik ve dinamik yükler başta gelmektedir. Malzemenin bu yükler karşısında sergileyeceği deformasyon davranışı oldukça önemlidir. Bu bakımdan geleneksel Al alaşımı profillere kıyasla parçacık takviyeli Al kompozit profillerin daha üstün mekaniksel davranış sergileyecekleri beklenmektedir.

Alüminyum kompozitlerin hazırlanmasında en önemli parametrelerden birisi kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkisi olan üretim yöntemleridir. Kompozit içerisindeki parçacık dağılımını etkileyen üretim yöntemleri verimlilik ve maliyet açısından da önem arzetmektedir. Bu çalışmada kompozit malzemelerin üretimi için toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. Literatürde seramik parçacık takviyeli Al kompozit profil malzemelerin hem üretimine hem de mekanik özelliklerin karaketerizasyonuna yönelik yeterli sayıda çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada dikişsiz boru biçimli SiC ve B_4C takviyeli Al kompozit profiller üretilmiş ve üretilen malzemelerin ezilme ve çekme davranışları incelenmiştir.

2. ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLER

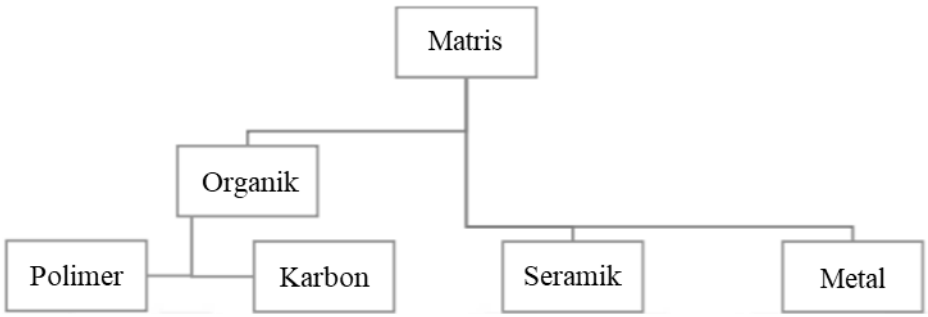
Alüminyum matrisli kompozitlerin (AMK) son 40 yılda birçok türü geliştirilmiştir. 1970'lerde kompozitler sürekli fiber takviyeli alüminyumdan oluşmaktaydı. 1980'lerde ise takviye elemanı whisker ve parçacık şeklinde olmuştur. 1990'larda ise, parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin gelişimi görüldü. 2000 yılından sonra üzerinde durulan ise yeni katkı maddeleri, nano yapılı matris alaşımlar ve nano katklılı kompozitlerdir (Srivatsan vd., 2018). Matris ve takviye kombinasyonu arasında aluminyum alaşımları düşük yoğunlukları, yüksek mukavemeti, yüksek tokluğu, korozyon direnci ve iyi işlenebilirliklerinden dolayı en çok tercih edilen malzemelerdir. Bu sebeple AMK'lerin otomotiv ve havacılık alanlarında kullanım ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Alüminyum matrisli kompozit malzemeler otomotiv endüstrisinde pistonlar, silindirler, motor blokları, frenler gibi çeşitli parçalarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte alüminyum temelli mikro ve nano boyutta Al_2O_3, B_4C, SiC, TiB_2, ZrO_2, Grafit ve SiO_2 parçacıkları otomotiv ve havacılık uygulamaları için üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri ortaya çıkararak mikro yapısal özellikleri değiştirmektedir (Ipekoglu vd., 2017). Bunlar arasında en kapsamlı arştırmaya konu olan malzeme SiC'dür (Thakur vd., 2001; Asif vd., 2011; Ghasali vd., 2017). Alüminyum matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak saf veya alaşımlı alüminyumlar kullanılmaktadır. Bununla birlikte, çoğu araştırma makalesi, alüminyum türünden çok harici faktörlerin bu kompozitlerin özellikleri üzerine etkisine yoğunlaşmıştır (Ghasali vd., 2017). Genellikle AMK'ler birincil ve ikincil işlemler kullanılarak üretilmektedir (Hashim ve Hashmi, 1999). AMK malzemelerin hazırlanmasında döküm ve toz metaruluji gibi birincil yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır (Torralba vd., 2000; Ghasali vd., 2006; Dobrzanski vd., 2017). Ekstrüzyon ve haddeleme gibi ikincil işlemler ise mikro yapı düzenlemek ve istenen şekil formunu vermek için tercih edilmektedir. Karmaşık şekilli parçaların üretilmesinde ekstrüzyon işlemi oldukça etkili bir prosestir. Bununla birlikte ekstrüzyon işlemi matris içerisine ilave edilen parçacıkların matris ile ara yüzey uyumuna katkı sağlayabilmektedir. Buna karşın deforme edilmesi güç olan sert parçacıkların varlığından dolayı AMK'lerin ekstrüze edilebilirliği zayıftır (Kang, Kim ve Kim, 2000).

2.1. Matris Malzemesi

Matris malzemesi, kompozit malzemelerdeki birincil fazdır ve üç ana işlevi vardır:

- Takviye malzemelerini, özellikle elyafları bir arada tutmak ve yükleri aralarında aktarmak, böylece elyaflar yükün çoğunu taşıyabilir,
- Katkı malzemesini fiziksel hasara, mekanik aşınmaya, kimyasal reaksiyonlara ve çevreye karşı korumak,
- Kompozit malzemede çatlakların çoğalmasını, sahip olduğu daha yüksek süneklik ve tokluk özellikleri ile azaltmak (Barbero, 1999; Beşergil, 2016; Kalpajian vd., 2009).

Ana matris fazları metal, seramik ve organiktir. "Organik matris" terimi, polimer ve karbon matrislerini içerir(Miracle vd., 2001). Şekil 2.1'de matris fazlarının sınıflandırılması gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Matris fazlarının sınıflandırılması (Miracle vd., 2001).

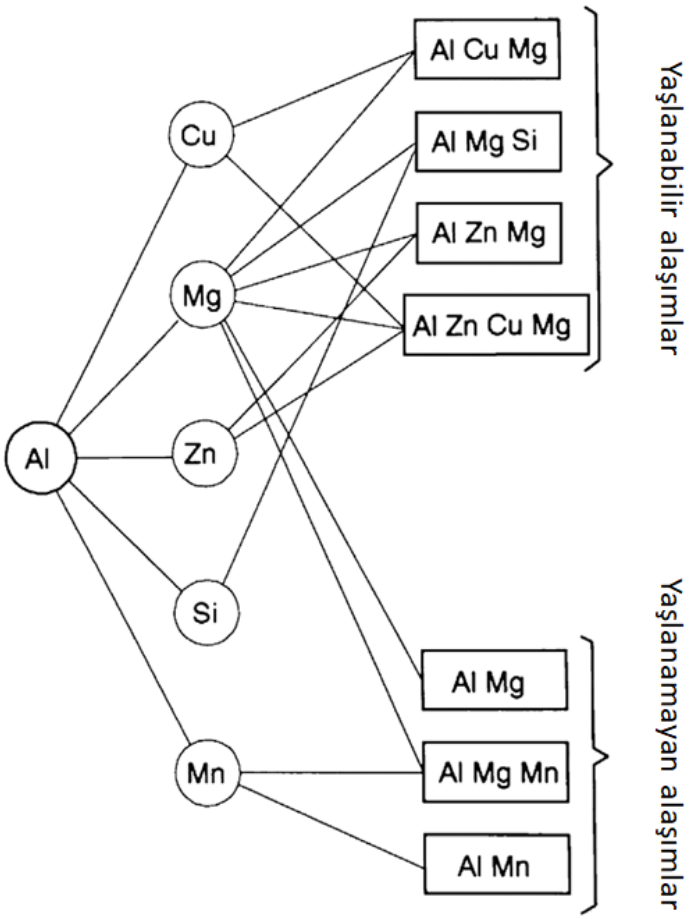
2.1.1 Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

Metal matrisli kompozit malzemeler (MMK)

MMK'lerde alüminyum, magnezyum, bakır, titantum ve alaşımları pratikte matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Alüminyum, oksijen ve silisyum'dan sonra yer kabuğundaki en fazla olan üçüncü elementtir. MMK'lerde matris olarak uygulanan malzemeler arasında, alüminyum en çok kullanılan metaldir. Bunun nedeni üstün mekanik avantajlarına ek olarak; hafif, korozyona dayanıklı, mükemmel ısı ve

elektrik iletkenliğine sahip, tamamen geri dönüşümü yapılabilen ve kolay şekil verilebilen malzemedir (Chawla, Chawla 2006; Ipekoglu vd., 2017).

Alüminyum alaşımları ısıl işlem görebilen ve ısıl işlem göremeyen alaşımlar olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bu alaşımlar, saf alüminyum alaşımları (1xxx serisi), manganez alaşımları (3xxx serisi), silisyum alaşımları (4xxx serisi) ve magnezyum alaşımları (5xxx serisi) içerir. Isıl işlem görebilen alüminyum alaşımları, saf alüminyum içerisine alaşım elementlerini ilave edilmesinden elde edilmektedir. Bu elementler bakır içeren (2xxx serisi), magnezyum ve silisyum içeren (6xxx serisi) ve çinko içeren (7xxx serisi) alaşımları oluşturmaktadır (Ipekoglu vd. 2017). Aşağıdaki Şekil 2.2'de yaşlandırılabilir alaşımlar ve yaşlandırılamayan alaşımlar gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Başlıca işlenilebilir alüminyum alaşımlarının alaşım ilişkilerinin gösterimi (Polmear, StJohn, Nie ve Qian, 2017).

2.2. Takviye Elemanı

Metal matrisli kompozitlerde en iyi takviye elemanını seçmek için, matris ile uyumluluk, kolay tedarik, gerilme mukavemeti, yoğunluk, ergime sıcaklığı, şekil ve boyut, kimyasal bileşim ve kristal yapı gibi koşullar değerlendirilmeli ve hesaplanmalıdır. Seramik malzemeler sertlik, rijitlik, dayanım ve yoğunluklarından dolayı takviye elemanı olarak çok yaygın kullanım potansiyeline sahiptirler. SiC, B_4C, Al_2O_3, MgO, Si_3N_4, TiB_2, TiC, BN, grafit, benzer oksitler, karbür, nitrür, bor malzemeleri parçacık, wisker ve fiber olarak metal matrisli kompozitlerde ve alüminyum matrisli kompozitlerde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Mekanik özelliklerinin geliştirmesi ile ilgili olarak sürekli fiberler en çok önerilen takviye malzemesidir fakat maliyetleri yüksektir. Diğer seçenek ise, daha az pahalı olan ancak mekanik özelliklerde daha az iyileşme sağlayan whisker ve kısa fiberlerdir. Matris malzemenin desteklenmesinde ve mekanik özelliklerinin arttırılmasında nispeten düşük fiyat oranları ve izotropik özellikler göstermesi sebebiyle parçacık takviyeleri en uygun özelliği göstermektedir. Bazı parçacık katkı malzemelerin karakteristik özellikleri Tablo 2.1 ‘de gösterilmektedir (Huntz, Maréchal, Lesage ve Molins, 2006).

Tablo 2.1. *Bazı katkı malzemelerin karakteristik özellikleri*

Malzeme	**Şekil**	**Elastik modül (Gpa)**	**Yoğunluk (gr/cm^3)**	**Termal iletim (W/mk)**	**Termal Genleşme Katsayısı ($10^{-6}/K$)**
B_4C	Parçacık	450	2.52	29	5-6
SiC	Parçacık	448	3.21	120	3.4
BN	Parçacık	90	2.1	2.5	3.8
Al_2O_3	Parçacık	300	3.6	0.3-0.9	10.3
TiC	Parçacık	320	4.94	29	7.4
TiB_2	Parçacık	370	4.5	27	7.4

2.2.1. B_4C Takviye elemanı

Bor karbür, üstün sertlik, yüksek elastiklik modülü, yüksek termal kararlılık, mükemmel kimyasal kararlılık, çok iyi korozyon direnci, yüksek darbe dayanımı gibi benzer fiziksel, mekaniksel ve kimyasal özelliklere sahip seramik bir malzemedir. Bu özellikler bor karbürü çok çeşitli mühendislik uygulamaları için tercih edilen bir malzeme haline getirmektedir. Bor karbür, yüksek ergime noktası ve termal dengesi nedeniyle refrakter uygulamalarında tercih edilmektedir. Bununla birlikte yüksek aşınma direnci nedeniyle aşındırıcı tozlar ve kaplamalar olarak kullanılır. B_4C yüksek sertliği ve düşük yoğunluğu nedeniyle balistik performansta üstünlük sağlar ve nükleer uygulamalarda yaygın olarak nötron radyasyon emicisi olarak kullanılır. (Domnich, Reynaud, Haber ve Chhowalla, 2011; Murray, 2013).

Alümina ve silisyum karbür ile karşılaştırıldığında B_4C üstün özelliklere sahip olsa da Al_2O_3 ve SiC, alüminyum matrisli kompozitlerinde en çok kullanılan takviye malzemesidir. Bunun nedeni, B_4C parçacıklarının yüksek maliyetli olması nedeniyle Al-B_4C kompozitlerini üretmenin daha yüksek maliyetli olmasına dayanmaktadır. Bununla birlikte, Al-Al_2O_3 ve Al-SiC'ye kıyasla, daha az yoğunluk, daha yüksek elastik modülü ve daha yüksek spesifik sertlik, B_4C katkılı alüminyum matrisli kompozit ile elde edilebilir. B_4C'nin bazı özellikleri tablo 2.2' te gösterilmiştir (Domnich vd., Murray, 2013).

Tablo 2.2. *Bor Karbürün Özellikleri (Yüksel,2004; Cengiz, 2016).*

Özellik	**Değer**
Yoğunluk	2.52 g/cm3
Rengi	Siyah
Ergime sıcaklığı	2445 °C
Spesifik ısı (j/mol.K)	50,88
Termal genleşme katsayısı	5.73 ppm/°C
Sertlik (Knoop 100g) (kg.mm^{-2})	2900-3580
Vickers mikrosertliği (Gpa)	31,5
Kırılma tokluğu (Mpa.m$^{-1/2}$)	2,9-3,2
Elastisite modülü (Gpa)	400-450
Kayma modülü (Gpa)	186,5
Eğme mukavemeti (Mpa) (25°C'de)	345
Çekme Mukavemeti (Mpa)	155
Elektrikel iletkenlik (25°C'de)	345
Termal iletkenlik (W/m. °C)	4,3

2.2.2. SiC Takviye elemanı

Silisyum karbür endüstride yaygın olarak kullanılan seramiklerden biridir. Sahip olduğu birçok özellikle, karmaşık yapıda mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. SiC iyi bir anti- korozif ve üstün tribolojik özellikler sunmasının yanında yüksek sıcaklıklarda iyi bir dayanım sunmaktadır. Mekanik parçaların üretilmesinde yaygın olarak kullanılan SiC örneğin; sızdırmazlık ekipmanların da, fırınların alt katmalarında ve sıcaklığın fazla olduğu yerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Silisyum karbür, tungsten karbür yerine iyi bir aşınma dayanımı uygulayıcısı olarak kullanılmaya başlamıştır. Karbür bileşikler sınıfında yer alan silisyum karbür 3,1 g/cm^3 özgül ağırlığa sahiptir. Doğada bileşik olarak bulunmayan SiC'in ana bileşenleri olan silisyum ve karbona doğada bol miktarda rastlanmaktadır. Bu malzeme çok sert, aşındırıcı bir malzeme olup, yüksek sürünme mukavemetine sahiptir. SiC ileri mühendislik malzemelerine ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılmakla birlikte, genel olarak saflık seviyesine göre; metalurjik, abrazif ve sinter amaçlı olmak üzere sınıflandırılmaktadırlar. Örneğin yüksek saflıkta sinter amaçlı kullanılırken saflık seviyesi % 97.5 veya altında olması durumunda refrakter olarak

kullanılmaktadır. Bu değerin altına da düştüğünde malzeme metalurjik uygulamalarda kullanılmaktadır. SiC'ün bazı özellikleri Tablo 2.3' te gösterilmiştir (Tanaka, 2002; Öğünç, 2006)

Tablo 2.3. *Silisyum Karbürün Özellikleri(Sokolov vd., 2012 ;URL-1, 2019).*

Özellik	**Değer**
Yoğunluk	3.1 g/cm3
Sertlik	2800 kg/mm^2
Ergime Sıcaklığı	3100±40 K
Elastik modülü	410 GPa
Poison oranı	0.21
Kırılma Tokluğu	$4.6Mpa.m^{\frac{1}{2}}$
Basma dayanımı	3900 Mpa
Özgül ısı	0,69 j/g.K
Isı iletim katsayısı	120 W/m.K°
Termal Genleşme Katsayısı	4.0 10^{-6} /C°

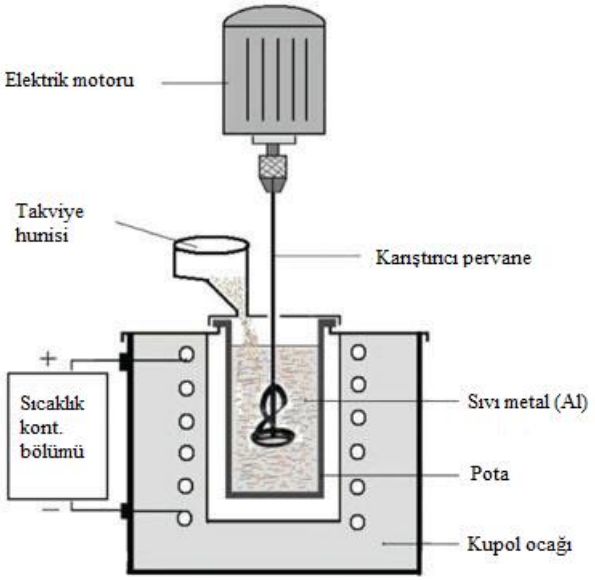
2.3. Parçacık Takviyeli AMK'lerin Üretim Yöntemleri

Bu bölümde AMK'lerin üretiminde en yaygın kullanılan üç yöntem hakkında bilgi verilmiştir. Bunlar; karıştırmalı döküm, infiltrasyon ve toz metalurjisi yöntemleridir.

2.3.1. Karıştırmalı döküm

Bu yöntemde, seramik parçacıklar çeşitli teknikler kullanılarak ergimiş matrise dâhil edilir. Ardından parçacıklar ve matris karıştırılarak bir kalıp içerisine dökümü gerçekleştirilir. Bu işlemde, yüksek sıcaklıklarda çalışılarak matris ile katkı malzemesi arasında kuvvetli bir bağ sağlanır. Karıştırmalı döküm birkaç yöntem ile gerçekleştirilir. Karma döküm veya karıştırımlı döküm teknikleri yapılıyor iken, sıcaklık sıvılaşma eğrisinin altına gelene kadar eriyik kuvvetli bir şekilde karıştırılır. Karıştırmalı döküm, düşük maliyetleri nedeniyle MMK'lerin üretimi için en çok tercih edilen sıvı faz üretim yöntemidir. Bu süreçte en iyi sonucu elde etmek için parçacıkların ıslanabilirliğine ve homojen dağılımına ihtiyaç vardır. Ayrıca porozite,

kümeleşme, oksidasyon ve arayüz reaksiyonu da kontrol edilmelidir. Mekanik karıştırma ile eriyen metal içine %20'ye kadar takviye parçacıklarını eklemek mümkündür, ancak parçacık boyutu, parçacık yüzey alanı, ve parçacıklar arasındaki mesafe gibi faktörleri optimize etmek çok önemlidir. Bu parametrelere bağlı olarak, parçacıkların belirli bir hacim oranından daha fazlasının eklenmesi, alüminyum eriyiği tarafından reddedilecektir (Kevorkijan, 1999; Yilmaz, 2004; Kainer, 2016).

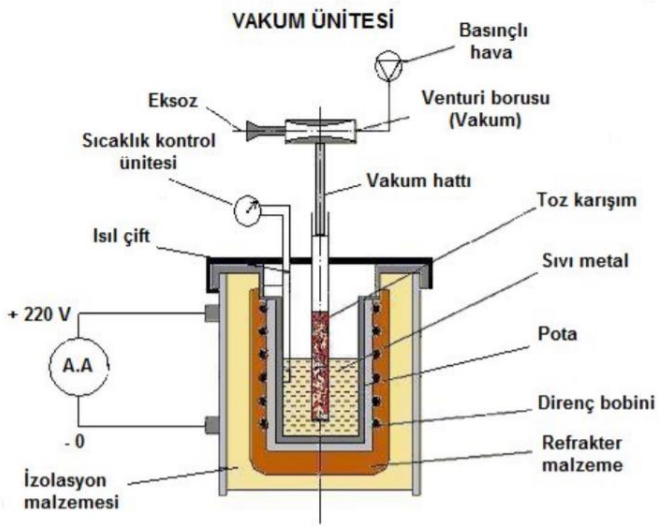


Şekil 2.3. Karıştırmalı dökümün şematik gösterimi (Calin, Pul ve Pehlivanlı, 2002).

2.3.2. İnfiltrasyon metodu

Sürekli fiberler ve kısa fiber takviyeli kompozitlerin üretilmesinde kullanıldığı gibi partikül takviyeli MMK malzemelerin üretilmesinde de verimli bir şekilde uygulanmaktadır. Bu yöntemde istenilen malzemenin özelliklerine göre döküm yapılacak kabın içerisine yerleştirilen fiberlerin yönlendirilmesi ve hacimsel oranı ayarlanır. Uygulanan yöntemde alüminyum alaşımı, asal bir gaz veya basınçlandırma cihazı gibi mekanik bir parçadan yararlanılarak gözenekli bir seramik kalıbının içine sokulur. Seramik kalıbın doldurulması sırasında ergimiş alüminyum matrisin viskozitesi, sürtünme etkisinden dolayı gerekli basınç üzerinde önemli bir husustur. Seramiğin sıvı alüminyum ile ıslatılması, alaşım bileşimine, seramik kalıbın

özelliklerine, seramiğin yüzey işlemine, yüzey geometrisine, arayüzey reaksiyonlara, zamana ve sıcaklığa bağlıdır (Srivatsan vd., 1991; Akbulut, 1994).



Şekil 2.4. İnfiltrasyon yönteminin şematik görünümü (Muharrem vd., 2009).

2.3.3. Toz metalurjisi

Toz, çeşitli şekillere ve bileşimlere sahip olabilen birçok küçük parçacıktan oluşan ve akışa benzer bir davranışı gösteren katı bir kütledir. Toz metalurjisi (T/M), metal veya metal olmayan tozların uygun bir yöntemle net şekle yakın bir şekilde sıkıştırılması ve yoğunlaştırması ile istenen malzeme özelliklerinin geliştirilmesi için yapılan bir yöntemdir. (Handbook, A. S. M., 1998).

Sıkıştırma ve sinterleme içeren toz metalurjisinin modern uygulamaları, Rus bilim adamı Sobolevskii tarafından platini şekillendirmek için daha iyi bir yol bulma çabasıyla başladı. Daha sonra, 1826'da keşfini ticari ürünlere dönüştürdü. Bununla birlikte, platin üretiminde ortaya çıkan diğer yöntemler ile toz metalürjisi bir yüzyıl boyunca unutuldu. 19. yüzyılın sonunda, elektrik lambaları için tungsten filamanları üretme ihtiyacının artmasıyla birlikte, yöntem tekrar gözden geçirildi. Sıkıştırılmış tungsten toz çubuklarının sinterlenmesi ve çıkarılması yoluyla, Coolidge; erime noktasından daha düşük sıcaklıklarda sünek tungsten telleri üretmeyi başardı. Bu sayede toz metalürjik uygulamalar geniş popülasyonlara ulaşmaya başladı. Daha sonra elektrik motorlarında bakır-grafit parçalar ve tungsten-bakır temas malzemeleri

gibi farklı malzemeler gelişmeye başladı. Ancak olayların asıl dönüşü, tungsten tel üretiminde elmas çekme plakalarının değiştirilmesi ihtiyacıydı. Arzu edilen sertlik ve uygulanabilirlik toz metalürjik tungsten karbürlerde birleştirildi ve daha iyi mekanik özellikler elde etmek için sisteme kobalt ilavesi sert alaşımların başlangıcı oldu (Tsukerman, 1965).

Toz metalurjisi (TM), çeşitli şekillendirme teknolojileri arasında en farklı üretim tekniğidir. TM farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarının sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürülmesidir. Bu işlem sırasında; karıştırılmış veya ön alaşımlanmış tozlar bir kalıba doldurulur, istenilen şekilde preslenir ve daha sonra parçacıkların sinterleme yolu ile atmosfer kontrollü bir fırında ısıl bağlanması sağlanır (Dikici, 2010).

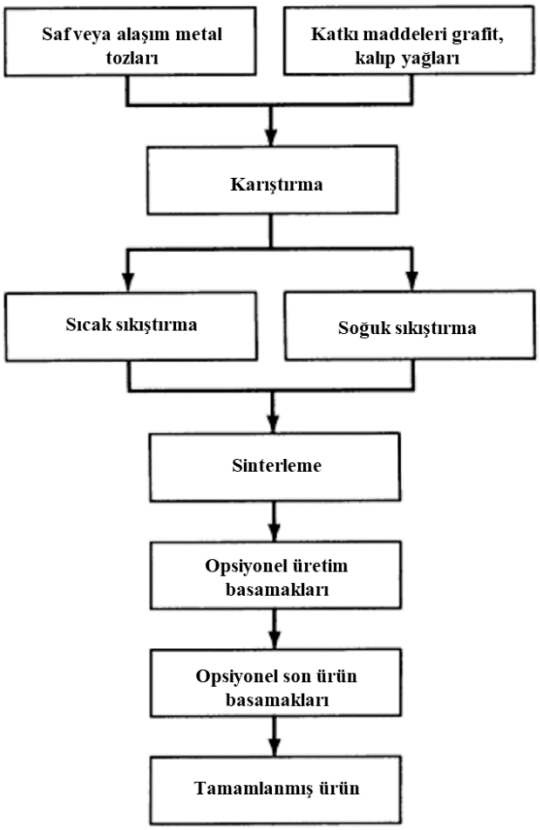
Günümüzde toz metalurjisi yöntemi ile son şekilli parça üretilebildiğinden geleneksel döküm yöntemlerine göre avantajlı bir tekniktir;

- Nispeten küçük enerji tüketimi ve uygulama kolaylığı ile düşük sıcaklıkta işleme koşulları,
- Refrakter ve reaktif metaller için uygulanabilirlik,
- Alaşım elementlerinin özelliklerinin kombinasyonu,
- Alaşımların yoğunluğunu, gözenekliliğini ve ilgili mekanik, elektriksel ve ısıl özelliklerin uyarlanması
- Aşırı işleme gerektirmeyen net şekilli, karmaşık ve yüksek hacimli son ürünler elde edilmesi sayesinde az malzeme kaybı (Handbook, A. S. M., 1998).

Öte yandan, sürecin bazı sakıncaları vardır. Toz üretimi sırasında oluşabilecek kirlilikler olası bir dezavantajdır. Bu nedenle, yüksek saflıkta toz üretimi bir zorunluluktur, ancak pahalıdır ve zordur. Aynı zamanda gözenekli gövde tüm ürünü oksidasyona ve diğer çevresel etkilere eğilimli yapabilir. Zayıf mekanik özellikler, gözeneklilik nedeniyle başka bir dezavantaj olabilir. Toz metalurjisi işleminin daha ayrıntılı bir şematik gösterimi Şekil 2.5'de görülebilir. T/M yöntemi daha düşük işlem sıcaklıklarına izin verdiğinden, bu aynı zamanda matris ve takviye fazları arasında daha az etkileşim anlamına gelir, bu nedenle sistemde tam bir homojenlik elde etmek önemlidir. Bu homojenliği sağlamak için harmanlama ve karıştırma adımları kullanılır. Bunları, tozları önceden şekillendirmek ve gözenekliliği azaltmak için kullanılan sıkıştırma işlemi takip eder. Sinterleme ise önceden şekillendirilmiş

kütleyi, difüzyonun hızlandırıldığı ve parçacığı birleştirmenin daha kolay olduğu yüksek sıcaklıklarda kimyasal olarak bağlar ve yoğunlaştırır. Bu ana adımların yanı sıra malzeme tercihlerine ve hedeflenen ürün özelliklerine göre toz hazırlama ve isteğe bağlı ikincil uygulamalar yapılabilir (Kumkumoğlu, 2016).

Parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretiminde Bu yöntemin avantajları düşük proses sıcaklıklarından dolayı daha az arayüzey reaksiyonlarının meydana gelmesi ve üretim kolaylığıdır. Fakat nispeten pahalıdır ve yüksek düzeyde hassasiyet gerektirir (Yilmaz, 1997).



Şekil 2.5. Toz metalurjisi prosesinin şematik gösterimi (Handbook, A. S. M., 1998).

2.4. AMK'lerin Mekanik Özellikleri

AMK'lerin takviye edilmemiş malzemelere göre üstün özellikleri şunlardır:

- Yüksek dayanım
- Daha iyi sertlik

- Azaltılmış yoğunluk (Ağırlık)
- Termal/Isı yönetimi
- Geliştirilmiş ve özel imal edilmiş elektrik performansı
- Geliştirilmiş abrazyon ve aşınma dayanımı
- Geliştirilmiş sönümleme kabiliyeti

Örneğin saf alüminyumun hacimce % 60 oranında sürekli alümina fiber ile desteklenmesi elastisite modülünü 70 Gpa'dan 240 Gpa'a çıkartmıştır (Surappa, 2003). Diğer taraftan genleşme katsayısı 24 ppm/°C'den 7 ppm/°C'ye düşmüştür. Bu yüzden yeterli oranda uygun katkı maddesi içeren alüminyum alaşımın çeşitli teknolojik özelliklerinin değiştirilmesinin mümkün olduğu ortaya çıkabilmektedir. AMK malzeme sistemleri, bugün mevcut tek-tip malzemenin rekabet edemeyeceği şekilde, özelliklerin üstün bir kombinasyonunu sunar. Yıllar boyunca, çeşitli mühendislik alanlarında yapısal, yapısal olmayan ve işlevsel uygulamalarda AMK'ler kullanılmaktadır. Bu sektörlerdeki AMK'lerin kullanılmasına yönelik ilk niyetler, performans, ekonomik ve çevresel faydaları içerir, ancak bunlarla sınırlı değildir. Örneğin, ulaşım sektöründeki AMK'lerin temel faydaları daha az yakıt tüketimi, daha az gürültü ve daha düşük hava kirliliği olan araçlardır (Surappa, 2003).

2.4.1. Akma ve çekme dayanımı

Mühendislik malzemelerinin en önemli özelliklerinden birisi akma dayanımıdır. Mühendislik uygulamalarında, parçaların dayanımını garanti etmek için malzemenin yüksek akma dayanımına sahip olması gereklidir. Alüminyum metal matrisli kompozitlerde matris malzemesine göre akma dayanımındaki artışın temel sebebi takviye malzemesinin elastik modülüdür. Benzer şekilde çekme dayanımı aynı kurallara uyar. Farklı katkı malzemeleri ile akma ve çekme dayanımının kıyaslanması Tablo 2.4'te gösterilmiştir (Miracle vd., 2001).

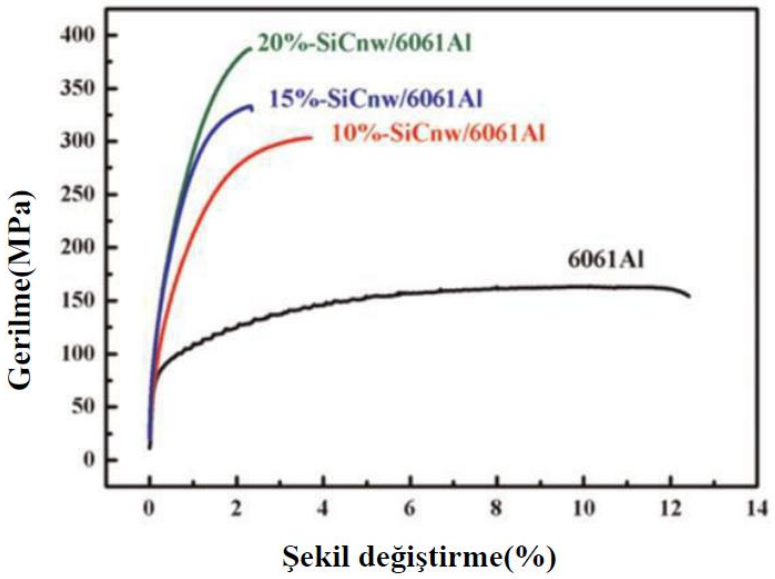
Tablo 2.4. Farklı matris ve takviye elemanına sahip AMK'lerin gerilme özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı (Mpa)	Çekme Dayanımı(MPa)	Elastik Modülü (GPa)	Uzama (%)
A356	200	255	75.2	4
A356-10 % SiC	262	276	77.2	0.7
A356-15 % SiC	296	303	92.4	0.4
A356-20 % SiC	296	317	95.8	0.5
Al-Si-Mg-10 % SiC	359	372	87.6	0.3
Al-Si-Cu-Mg-Fe- 10 % SiC	221	310	91	0.9
Al-Si-Cu-Mg-Fe-Ni-10 % SiC	248	303	108.2	0.5
Al-Cu	345	434	70	12
Al-Cu-20 % TiC	358	400	96	1.2

AMK'lerde dayanım gelişimi iki yaklaşımla açıklanabilir. AMK'ye bir kuvvet uygulandığında, stres daha az mukavemetli malzemelerden daha yüksek mukavemetli malzemeye doğru olacak şekilde matristen takviye malzemesine aktarılır. Bu doğrudan dayanım gelişimi olarak adlandırılmaktadır. Diğer yaklaşım ise, mukavemet artışının matris içinde gerçekleştiği, malzemenin mikro yapısı ve özelliklerinden dolaylı kuvvet gelişimidir (Kashyap, Ramachandra, Dutta, Chatterji, 2000; Chawla vd., 2006; Bodunrin, Alaneme ve Chown, 2015).

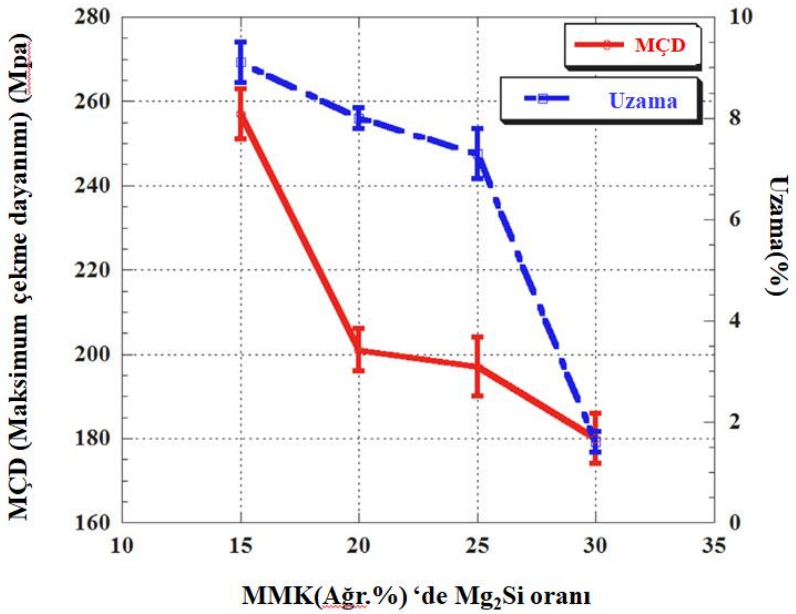
2.4.2. Süneklik

AMK malzemelerde, takviye elemanının hacimsel oranı arttığında, akma ve çekme dayanımının arttığı, normal olarak uzamanın azaldığı görülmektedir. Örneğin böyle bir durum Şekil 2.6'daki grafikte katkı malzemesinin artmasıyla dayanımın arttığını fakat şekil değiştirmenin azaldığını göstermektedir (Yang, Dong, Yu, P,M,G 2015).



Şekil 2.6. Takviye elamanlarının farklı bileşenleri ile AMK'nin çekme dayanımı (Yang vd., 2015).

Benzer şekilde, bir matris malzemesinin takviye edilmesi malzemenin mukavemetinde azalmaya neden olursa, uzamanın mantıksal olarak artması gerektiği söylenebilir. Bu durum (Şekil 2.7) gösterilmektedir (Emamy, Yeganeh, Razaghian ve Tavighi, 2013).



Şekil 2.7. AMK'nin farklı Mg2Si oranı ile çekme davranışı (Emamy vd., 2013).

Genel olarak kompozit malzemelerdeki kırılma, takviye malzemesinde, matris / takviye elemanı ara yüzeyinde veya parçacık topaklanması sebebiyle oluşan makro-gözeneklerde meydana gelir. Bu gerçekler göz önüne alındığında, kaba parçacıkların ince parçacıklara kıyasla daha fazla hataya maruz kalma eğilimi vardır (Jayashree, Shankar, Kini, Sharma ve Shetty, 2013). Harichandran ve diğ. (2016) mikro boyuttan nano boyuta kadar B_4C takviyesini saf alüminyumda incelemiş ve parçacık boyutundaki azalmanın uzama yüzdesini % 5'e kadar iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Parçacıkların hacimsel oranı ve metal matris içindeki dağılımları malzemenin mekanik özelliklerinin kontrolünde önemli rol oynamaktadır. Diğer bir ifadeyle AMK'nin en uygun özelliklerini sağlamak için katkı malzemesinin matris yüzeyi içinde ki dağılımı homojen bir biçimde olmalıdır (Jayashree vd., 2013).

2.4.3. Elastisite modülü

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin geliştirilmesindeki amaç, çekme gerilmesi ve şekil değişitirme modifikasyonun temel nedeni olan elastisite modülünü (Young modülü) arttırmaktır. Sürekli takviye durumunda, deneylerden elde edilen elastik modülünün, klasik karıştırma formülasyonlarından elde edilen değerlere yakın olduğu, parçacıklar gibi sürekli olmayan takviyeler durumunda ise, klasik teorilerin çok altında olduğu rapor edilmiştir. Bu nedenle, parçacık takviyeli metal matris kompozitler için farklı formüller geliştirilmiştir (Ipekoglu vd., 2017).

Evrensel olarak kullanılan modeller doğrusal ve doğrusal olmayan karışım kuralları şunlardır:

- Aşağıdaki gibi gösterilebilen doğrusal karışım kuralı veya Voigt modeli:

$$E_C = \varphi_P E_P + (1 - \varphi_P) E_M \tag{2.1}$$

- Ters karışım kuralı veya Reuss modeli

$$E_C = \left(\frac{\varphi_P}{E_M} + \frac{1 - \varphi_P}{E_M}\right)^{-1} \tag{2.2}$$

φ_P, Fiber veya parçacıkların hacim oranı, E_C kompozit malzemenin elastisite modülü , E_P , parçacık veya fiberin elastisite modülü, E_M matrisin elastisite modülüdür. Voigt modeli sadece uzun fiber kompozit malzemeler için uygun olmasına rağmen Reuss modeli katman kompozit malzemeler için uygundur (Ipekoglu vd., 2017).

2.5. Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin uygulamaları, yüksek fiziksel, mekaniksel ve tribolojik özellikleri nedeniyle alaşımlara kıyasla özellikle otomotiv ve havacılık alanlarında ilgisi sürekli olarak artmaktadır. Song vd., (1995) tarafından yapılan çalışmada AMK'lerin uçak gövdesi ve motor olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitler gaz türbini motorlarında fan çıkış kılavuz pervanesi olarak kullanılmıştır. % 40 hacimsel oranda silisyum karbür takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeden üretilen uçuş kontrol hidrolik manifoltunun etkili bir şekilde fayda sağladığı bilinmektedir. Ek olarak karbon fiber (sürekli) takviyeli AMK'lerin hubble uzay teleskobu için anten dalgası kılavuzu olarak kullanılmıştır. Al6061/bor fiber (sürekli) kompozit, uzay mekiğinin ana kargo bölmesinde bağlantı kirişi olarak kullanılmıştır (Song, Krauklis, Mouritz ve Bandyopadhyay, 1995).

Froes, (1994) otomotiv endüstrisinde hafif malzemelerin yakıt tüketimine önemli bir katkı sağlayabileceğini, çünkü taşıt ağırlığındaki % 10'luk bir azalmanın yakıt ekonomisinde %5,5 oranında bir artışa dönüştüğünü belirtmiştir. Günümüzde AMK'lerin motor bloğu, süspansiyon bileşenleri, gövde panelleri ve çerçeve elemanları olarak kullanılmasının çok yaygın olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte bağlantı çubukları, klima pompa flanşları, triger kayışı / zincir konveyörleri, alternatör gövdesi, şanzıman gövdesi, valf kapakları ve emme manifoldları içinde alüminyum matrisli nano kompozitlerden faydalanılmıştır (Macke, Schultz ve Rohatgi, 2012).

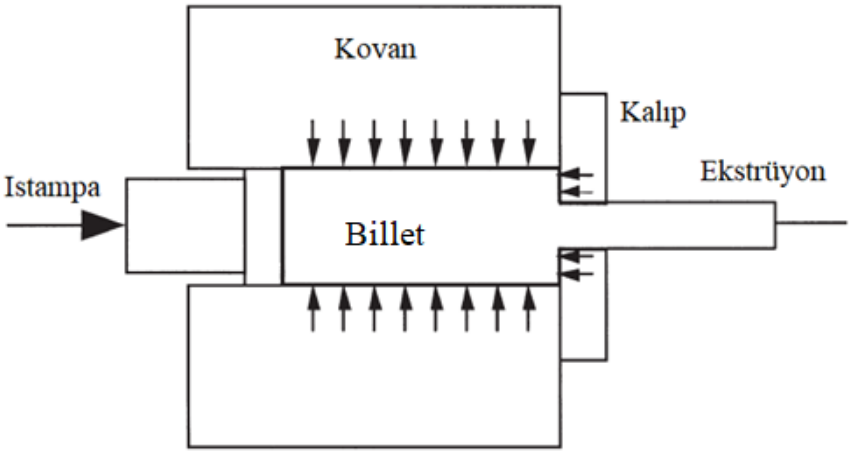
AMK'ler diğer alanlarda da kullanılmaktadır. Nükleer santrallerde, Al-B_4C kompozit malzemeleri nükleer kalkanlarda nötron emici olarak kullanılmaktadır. Benzer şekilde, gelişmiş askeri tanklarda SiC whisker-takviyeli alüminyum matriks

kompozitler tank paleti olarak üretilmiş ve bu sayede tankın ağırlığının azalması sağlanmıştır. Ayrıca Piston ve silindir gömleği uygulamalarında kısa fiber takviyeli AMK'ler kullanılmaktadır (Ipekoglu vd., 2017).

3. EKSTRÜZYON TEKNOLOJİSİ

3.1. Ekstrüzyonun Tanımı

Ekstrüzyon, bir metal bloğun (biyet) Şekil 3.1'de gösterildiği gibi biyetin daha küçük bir enine kesit alanına sahip kalıp açıklığı boyunca sıkıştırılmasıyla akmaya zorlandığı bir plastik deformasyon prosesidir. Bu metot ile çeşitli geometrilere sahip içi dolu ya da boşluklu kesit profiller üretilebildiği gibi karmaşık kesitli profiller de üretilebilmektedir. Ekstrüzyon, biyetin döküm yapısının dağıtılması için en iyi yöntemdir, çünkü biyet yalnızca sıkıştırma kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Ekstrüzyon, alaşıma ve kullanılan yönteme bağlı olarak soğuk veya sıcak yapılabilir. Sıcak ekstrüzyonda, biyet plastik deformasyonu kolaylaştırma amacıyla ısıtılır. Alüminyum, bakır, kurşun, magnezyum gibi metallerin alaşımları nispeten düşük akma dayanımı ve düşük ekstrüzyon sıcaklığına sahip oldukları için ekstrüzyon işleminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Saha, 2000; Bingöl, 2016).



Şekil 3.1. Ekstrüyon işleminin şematik gösterimi (Saha, 2000).

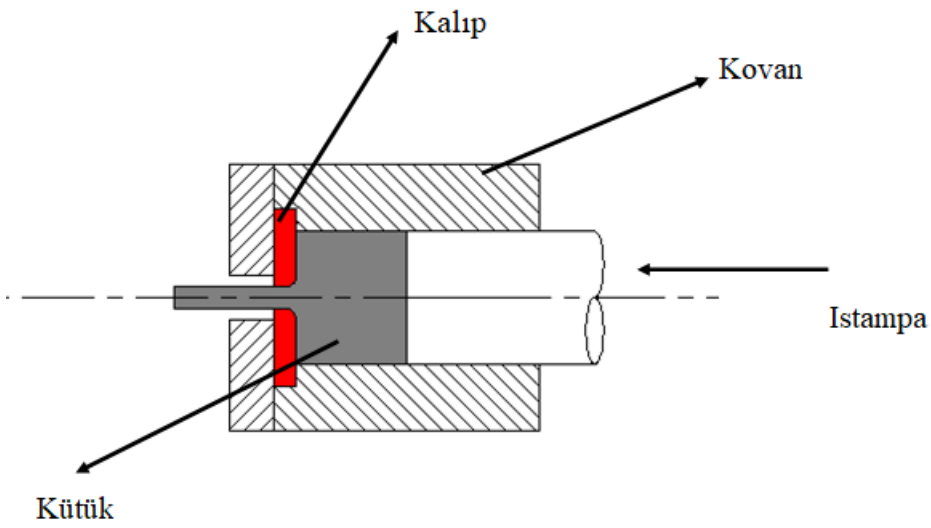
3.2. Ekstrüzyon Yöntemleri

Ekstrüzyon yöntemleri; malzemenin akma doğrultusu ve kuvvetin aktarılma biçimine göre dört ana başlıkta incelenebilir (Bayram, 2008). Bunlar;

- Direkt ekstrüzyon yöntemi
- Dolaylı ekstrüzyon yöntemi
- Püskürtmeli ekstrüzyon yöntemi
- Hidrostatik ekstrüzyon yöntemi

3.2.1. Direkt Ekstrüzyon

Alüminyum ekstrüzyonda kullanılan en önemli ve en yaygın yöntem doğrudan işlemden geçirmektir. Şekil 3.2'de, biyetin kabın içine yerleştirildiği ve kalıptan itme basıncı ile itildiği direkt ekstrüzyon prensibini gösterilmektedir. Bu yöntemde kalıp ve kovan hareket etmemekte plastik şekil değiştirme kalıba doğru hareket eden bir piston ile metal bloğunun sıkıştırılması ve metalin kalıptan çıkarılmasını sağlanmaktadır. Doğrudan ekstrüzyon, kalıbın şekline ve tasarımı göre katı çubuklar ve içi boş tüplerin imalatında kullanılmaktadır (Saha 2000; Bayram, 2008).



Şekil 3.2. Direkt ekstrüzyon işleminin şematik gösterimi (Kalkan, 2011).

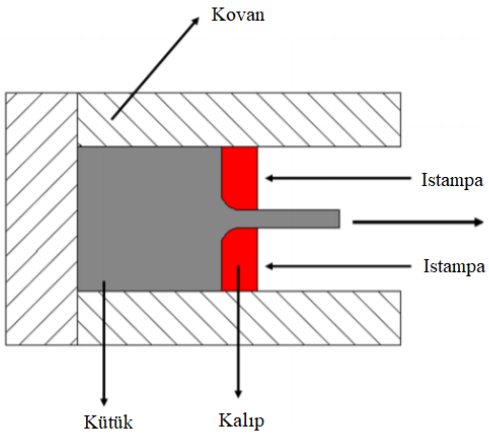
Direkt ekstrüzyon prosesi üç aşamadan oluşmaktadır.

1. Biyet kalıp üzerine yığılır ve basınç hızlı bir şekilde maksimum noktasına ulaşır.
2. Malzeme akmaya başladıktan sonra basınç düşer ve ekstrüzyon kararlı duruma geçer.

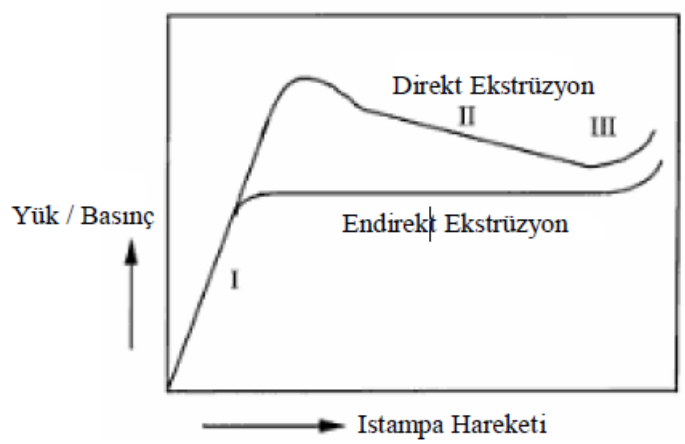
3. Basınç minimum değere geldikten sonra kısa bir pik ile basınç keskin bir şekilde artar. Bunun sebebi ise basıncın en düşük olduğu değere gelmesinin ardından takozdan arta kalan "koçan" sıkışmaya başladığından basınç aniden yükselmeye başlar (Saha, 2000; Başaran, 2010).

3.2.2. Endirekt Ekstrüzyon

Endirekt ekstrüzyon yönteminde kalıp, içi boş bir ıstampanın ucuna monte edilir ve ıstampa ile birlikte hareket eder (Şekil 3.3). Kalıp hareketli, takoz sabit olduğundan ıstampa kovana göre bağıl hareket yaparken; takoz ile kovan arasında bağıl bir hareket yoktur. Malzeme akışı ile zorlanma yönü tam zıttır. Bu yöntemle birlikte blok yüzeyi ile kovan cidarı arasında sürtünme oluşmadığından gerekli ekstrüzyon kuvveti azalmaktadır. Hem direkt hem de endirekt ekstrüzyon işlemlerinde kuvvetin veya basıncın, ıstampa hareketine bağlı olarak değişimi Şekil 3.4'te gösterilmektedir (Saha, 2000). Kuvvet önce yükselip bir tavan nokta yaptıktan sonra değişmeden yatay olarak devam eder ve ıstampa strok sonuna yaklaştığında tekrar yükselir. Bunun sebebi matris (kalıp) yüzeyi ile kovanın dip kısmında büyük sürtünme kuvvetleri meydana gelmesidir ve işleme bu anda son verilir. Tam bu anda direkt ekstrüzyon yönteminde ki kayıp miktarı %5 ile 10 arasındandır (Bayram 2008; Başaran 2010).



Şekil 3.3 Endirekt ekstrüzyon işleminin şematik gösterimi (Kalkan, 2011).



Şekil 3.4. Direkt ve endirekt ekstrüzyon proseslerinde yük veya basıncın ıstampa hareketiyle değişimi (Saha, 2000).

3.3. Ekstrüzyon Mekaniği

3.3.1. Plastik Deformasyon ve Metal Akışı

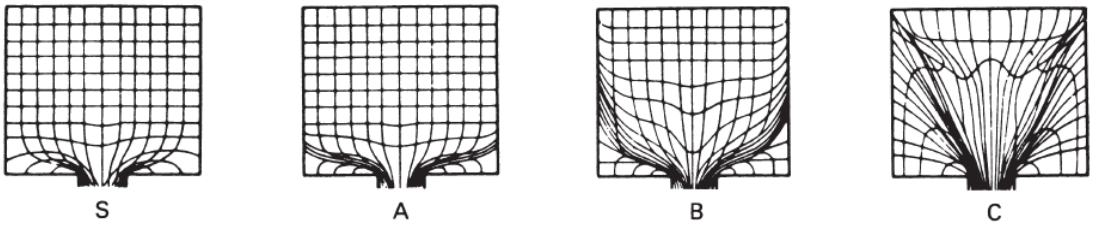
Metal şekillendirmede plastik deformasyon mekaniğini incelemek için plastiklik teorisi uygulanır ve bu sayede aşağıda belirtilen hususların analizine ve tahminine imkân sağlanır.

- Hızlar, gerilme ve gerinim oranları, metal akışı
- Sıcaklık ve ısı transferi
- Yerel malzeme dayanımının varyasyonu veya malzemenin akış dayanımı
- Yük, basınç ve enerji oluşturan gerilmeler

Plastik deformasyon mekaniği farklı şekil verme operasyonlarında arzu edilen geometri, metal akışı ve üretim için beklenen mekanik ve fiziksel özelliklerin nasıl olması gerektiğini öngörmektedir. Matematiksel denklemler farklı şekillendirme işlemleri için farklı bir yaklaşımla elde edilebilir. Basit homojen (tek eksenli) sıkıştırma veya gerilimde metal akma dayanımı değerine ulaştığında malzeme plastik olarak şekil değiştirir. Ekstrüde edilen diğer metallerle karşılaştırıldığında alüminyumun kesme akışındaki önemli fark, alüminyum kütüğün merkezinin ilk olarak ekstrüde edilmesi ve kütüğün çevresel kısmının daha sonra akması ve daha ciddi kesme deformasyonuna yol açmasıdır. Biyeti kovan yüzeyine itmek için

gereken kuvvet, biyet malzemesinin kesme mukavemetini aştığı anda, sıkışma sürtünmesi etkindir ve deformasyon biyetin büyük bölümünde kesme ile ilerlemektedir. Ekstrüzyon sırasında metal akışı, aşağıdaki birçok faktöre bağlıdır. Ekstrüzyonda gözlenen tipik akış şekilleri ise, Şekil 3.5' te gösterilmiştir (Saha, 2000).

- Biyet(kütük) sıcaklığında biyet malzeme özelliği
- Kütük-kovan arayüzü ve metal-kalıp ara yüzü sürtünmesi
- Ekstrüzyon oranı



Şekil 3.5. Ekstrüzyonda dört farklı akış türü (Saha, 2000).

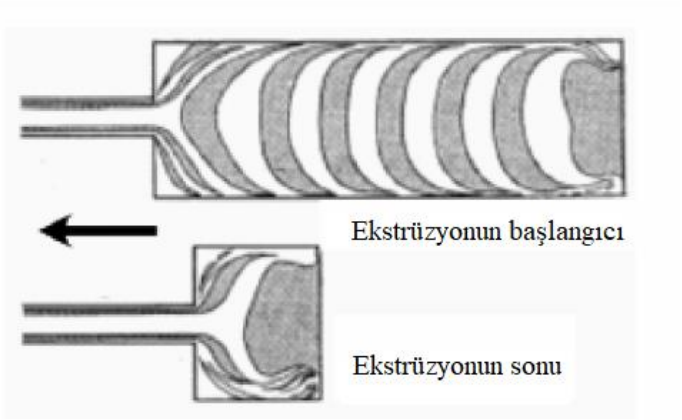
Akış deseni S'de biyetin kovandan ayrılışı mümkün olabilecek en düzenli bir şekilde olmaktadır. Biyetin plastik akışı, kalıba çok yakın bir şekil değiştirme bölgesinde olmakta ve biyetin ekstrüzyon edilemeyen kısmı, biçim değiştirmeden kalıp yönünde hareket etmektedir. Biyetin ön kısımları, tabaka tabaka şekil değiştirme bölgesine girmektedir. Bu akış tipi, kovan iç cidarında, kalıp yüzeyinde, kalıp deliği yüzeyinde sürtünmenin olmadığı ve homojen malzemelerde oluşmaktadır. Bütün sınır yüzeylerinde sürtünme olmadığından kovan çevresi frenlenmeden kolayca hareket edebilecektir. Bu sayede biyetin tamamı aynı hızla hareket etmektedir. Sürtünme, etkili bir yağlama yöntemiyle yok edilebilir. Ancak bu yüksek yağlama etkisine rağmen biyet merkezi, biyet çevresinden daha hızlı akmaktadır. Fakat ideal bir yağlama ile merkez ile çevresi arasındaki hız farkı minimuma indirilebilir (Başaran, 2011).

Akış deseni A, sürtünmenin kalıp arayüzeyinde olduğu homojen malzemelerin ekstrüzyonunda elde edilir. İndirekt ekstürüzyon için bu akış deseni uygundur. Kütüğün merkezindeki metal, çevredeki metalden daha hızlı hareket eder. Kütüğün

ön ucunun köşesinde, kalıp yüzü ve kovan duvarı arasında ayrı bir metal bölgesi oluşur ve bu alan ekstrüze edilemeyen ölü bölge olarak adlandırılmaktadır. Yüzeye yakın malzeme, merkezdeki deformasyona kıyasla kesme deformasyonuna uğrar ve ekstrüzyonun dış kabuğunu oluşturmak için kalıp açıklığına çapraz olarak akar (Saha, 2000; Çıtak, 2002).

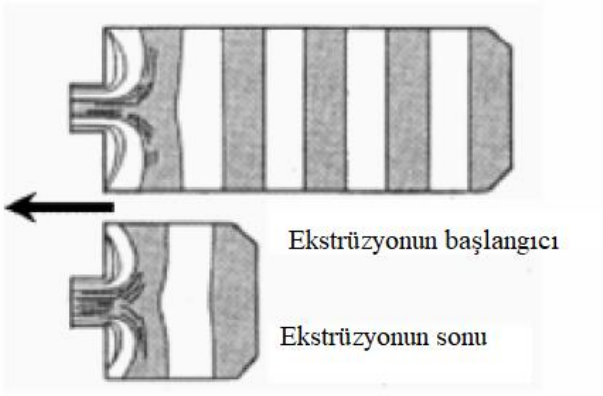
Akış deseni B, homojen malzemelerde hem kovan hem de kalıp arayüzlerinde sürtünme olduğunda elde edilir. Bu akış deseni doğrudan ekstrüzyon işlemleri için uygundur. Uzun bir ölü metal bölge oluşur. Bu durumdaki akış deseni A'daki ile karşılaştırıldığında daha fazla kesme deformasyonuna sahiptir. Ekstrüzyon, akış deseni A' ile kıyaslandığında homojen olmayan özelliklere sahiptir (Saha 2000; Çıtak, 2002).

Akış deseni C, homojen olmayan malzeme özelliklerine sahip biyetlerde veya biyette homojen olmayan bir sıcaklık dağılımı ile elde edilir. Malzemeler kovan duvarında daha ciddi kesme deformasyonuna uğrar ve ayrıca daha uzun bir ölü metal bölgesi oluşur. Şekil 3.6'da doğrudan ekstrüzyonda kütüğün (biyetin) metal akışı gösterilmektedir. Doğrudan ekstrüzyonda, kütük bekleme kovanında ilerler. Kayma sürtünmesi dış kütük yüzeyinde oluşur ve kütüğün merkezindeki metal akışı, kütüğün çevresindeki akıştan daha hızlıdır. Bu nedenle, kesme deformasyon alanı ölü metal bölge ve akış bölgesi arasında ortaya çıkar. Biyet yüzeyindeki oksit tabakası ve segregasyon, kütüğün arkasında ekstrüzyon ilerlemesi ile birikir. Ekstrüzyon sonunda biyet yüzeyi ekstrüze edilen biyetin arka tarafından akmaya başlar. Bu nedenle ekstrüzyon sırasında biyet yüzeyinin girmesini engellemek için dip kısmın kalınlığı uygun değerde ayarlanmalıdır. Aksi durumda ekstrüzyondaki bozukluklar ürün kalitesini bozar (Saha, 2000; Çıtak, 2002).



Şekil 3.6. Doğrudan ekstrüzyonda biyetin metal akışı (Sano, Ishikawa ve Yoshida, 2004).

Ekstrüzyon yöntemleri kütük ve kovan arasındaki bağıl hareket ile sınıflandırılabilir. Şekil 3.7'de endirekt ekstrüzyonda biyetin metal akışı gösterilmektedir. Endirek ekstrüzyonda; kovan, kütük ile birlikte ileri gider ve aralarında kesme sürtünmesi yoktur. Endirek ekstrüzyonda ekstrüzyon yükü sabittir ve doğrudan ekstrüzyondan yavaştır. Bu nedenle, sert alaşımlar dolaylı ekstrüzyonda kolayca ekstrüde edilebilir. Biyet metal akışı nispeten üniform olduğundan, ekstrüdatların yapısı ve özellikleri enine kesit ve ekstrüzyon sırasında aynıdır. Biyet yüzeyi endirekt ekstrüzyonda ekstrüde edilmektedir. Biyet yüzeyinde oksitlenme ve segragasyon mevcut olursa ürün kalitesini etkileyen hatalar olabilir. Bu nedenle biyet yüzeyinde oksitlenme ve segragasyonun uzaklaştırılması gerekmektedir (Çıtak, 2002).



Şekil 3.7. Endirekt ekstrüzyonda biyetin metal akışı (Sano vd., 2004).

Ekstrüzyon sırasında metal akışından dolayı alüminyum ekstrüzyon şekillerin özellikleri büyük ölçüde etkilenmektedir. Metal akışı çok sayıda faktör tarafından etkilenmektedir:

- Ekstrüzyon tipi
- Pres kapasitesi ve kovanın şekli ve büyüklüğü
- Hem kalıpta hem de kovanda sürtünme etkileri
- Kalıp türü, düzeni ve tasarımı
- Biyet uzunluğu ve alaşım türü
- Biyet ve kovanın sıcaklığı
- Ekstrüzyon oranı
- Kalıp ve takım sıcaklığı
- Ekstrüzyon hızı

Kalıp tipi, düzeni ve tasarımı ekstrüzyon sırasında biyet malzemenin mekanik çalışmasını değiştirebilir. İçi boş kalıplar, basit biçimli katı kalıplardan çok daha fazla mekanik iş yapar (Saha, 2000).

Çok karmaşık profillerin akış olayları henüz net olarak belirlenmiş değildir. Bu yüzden çalışmalar basit profil eksenli olmuştur. Profil ekstrüzyonu sırasında ve tüm biyet çevresinde ortaya çıkan bir ölü bölge mevcuttur. Akış bölgelerinin büyüklüğü, kalıp üzerindeki delik ile kalıp (matris) çevresi arasındaki uzaklığa bağlıdır. Bu uzaklık ne kadar fazlaysa ölü bölge o kadar büyük olmaktadır (Bayram, 2008).

Tablo 3.1. *Direkt ekstrüzyon yönteminde malzeme akış tiplerinin karakteristikleri (Başaran, 2010).*

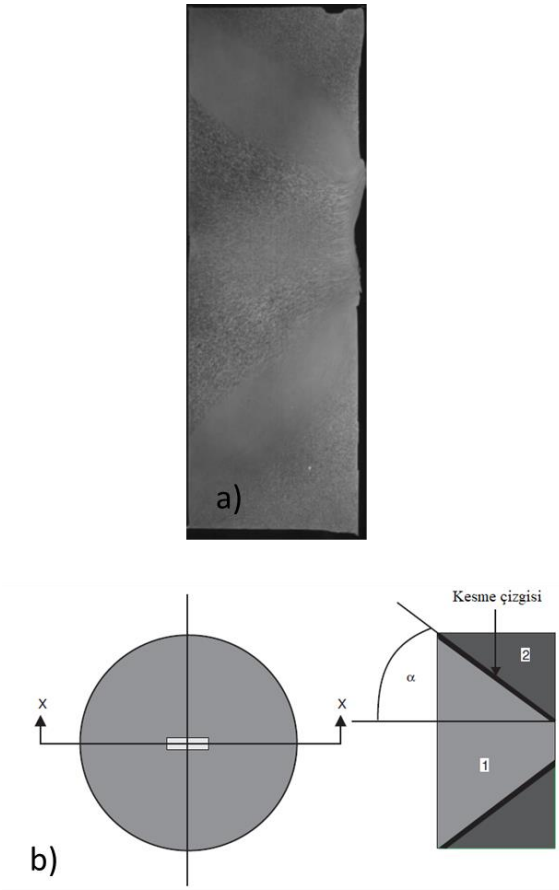
Akış tipi	**Ekstrüzyon malzemesi**	**Sürtünme**	**Ekstrüzyon hatası**	**Biçim değiştirme başlangıcı**	**Artık malzeme**	**Uygulamada karşılaşılan yerler**	**Akış tipinin hangi modelle edildiği**
S	Homojen	Yok	Yok	Matris girişinde	En az	Cam ile yağlama	Akış tipinin hangi modelle elde edildiği
A	Homojen	Yok	Yok	Matris yakınında	Az	Pb,Sn,Bi,Al(Yağlama ile)	Plastilin ve mum (Yağlama ile)
B	Homojen	Yüksek matriste ve kovanda	Yüzeyde çanak oluşumu	Matristen uzak	Çok	Cu, Al ve Al alaşımları ve Pb, Sn,Bi	Plastilin ve parafin
C	Homojen değil	Çok yüksek kovanda ve matriste	İkileme	Matristen çok uzak	En çok	Pirinç,Al,AlMg,AlZnMg,Mg	Değişik plastiğe sahip silindirik tabakalardan yapılmış mum

Ölü metal bölge kalıbın köşelerinde birikmektedir ve malzeme bu yüzey boyunca kayma gerilmesine maruz kalmaktadır. Malzeme, konik bir kalıp yüzeyi gibi davranan bu bölge üzerinde ekstrüzyon yapmaya devam edebilir. Eğer yeterli miktarda kalınlık sağlanmazsa (butt thickness), yüzey ve yüzey altı kusurları ürün üzerinde meydana gelebilir. Şekil 3.8a'da ekstrüzyon işlemi sonrasında geriye kalan Al7075 alaşımının dağlanmış enine kesiti gösterilmiştir. Şekil 3.8b'de ise ölü metal bölge net bir şekilde gösterilmektedir. Ölü metal bölge yarı açısı fonksiyonel formda temsil edilebilir:

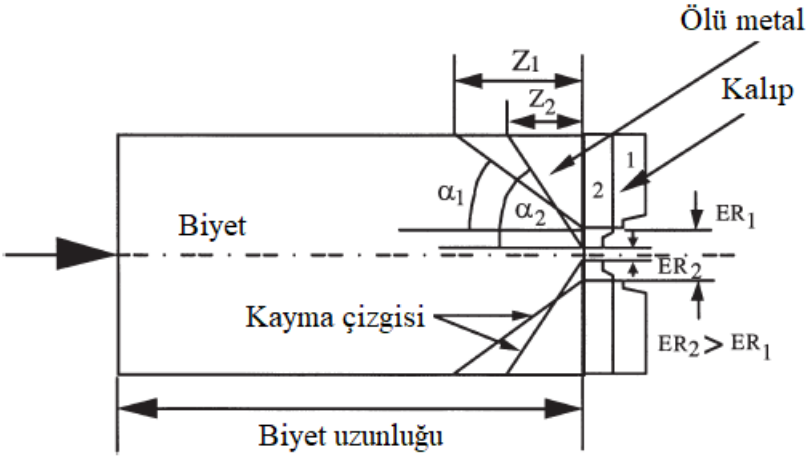
$$\propto = f(ER, \bar{\sigma}, m, m') \qquad (3.1)$$

Burada, ER; kovan delik alanı ve ekstrüzyonun toplam kesit alanı oranı ile tanımlanan ekstrüzyon oranıdır, $\bar{\sigma}$; akış oranı, m; kovan arayüzü ve biyet arası sürtünme faktörü, m' ; kalıp yatağı arayüzü ve metal akış arası sürtünme faktörüdür.

Aynı sürtünme koşulları altında bazı alaşım biyetleri için biyet-kovan arayüzü, ekstrüzyon oranı ile değişen ölü metal bölge yarı açısı α ve ER, Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Ekstrüzyon oranı arttıkça α artar, kesme açısının uzunluğu azalır. Şekil 3.9'da ER_1, en büyük kalıp açıklığı için ekstrüzyon oranı iken ER_2 daha küçük kalıp açıklığının ektstrüzyon oranıdır ve α_2 ise ER_2 ile ilişkili yarı ölü metal bölge açısıdır (Saha, 2000).



Şekil 3.8. a) Ekstrüzyondan sonra geriye kalan 7075 alaşımının dağlanmış enine kesiti b) Ölü metal bölgeyi gösteren alın kesitinin şematik gösterimi (Saha, 2000).



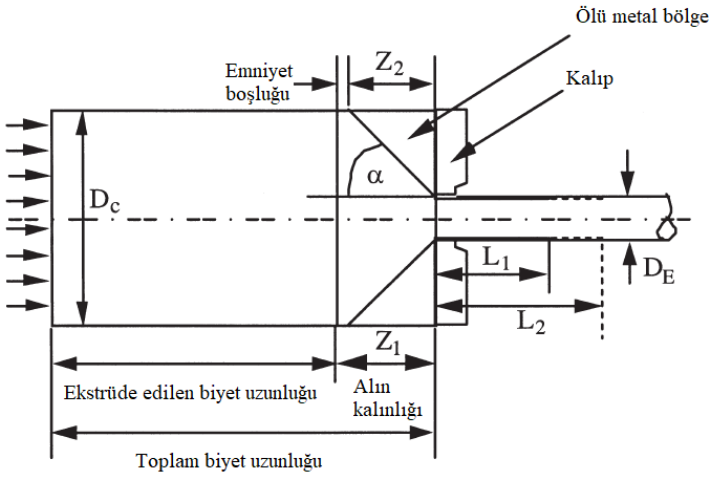
Şekil 3.9. Ekstrüzyon oranı ve yarı ölü metal bölge açısı arasındaki ilişki (Çıtak, 2002).

3.3.2. Alın Kalınlığı

Endüstrideki uygulamalara göre, direkt ekstrüzyon için standart alın kalınlığı, biyet uzunluğunun yüzde 10 ile 15 ‘i kadardır. Alın kalınlığı, ölü metal bölgenin, ekstrüzyon oranının, kalıp tipinin, biyet sıcaklığının, biyet kovan sürtünme ilişkisinin ve biyet malzemesi akış gerilmesinin bir fonksiyonu olabilir. Şekil 3.8’de alın kalınlığı ve ölü metal bölge konik yüzeyi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Ekstrüzyonun, güvenli sınır bölgesinde durdurulması oksit ve diğer metalik veya metalik olmayan kalıntıların ekstrüzyona akmasını önler. Aşağıdaki görüşleri daha iyi kavrayabilmek için alın kalınlığının eksenel kesitinin makro dağlaması üzerinde araştırmaların devam edilmesi tavsiye edilmektedir.

- Ekstrüzyon değişkenlerinin değişimi ile ölü metal bölge konik açısının değiştirilmesi
- Kalıp tiplerinin (katı veya içi boş) ve kalıp açıklığının (delik sayısı) değiştirilmesi ile birlikte ölü metal bölgenin değişimi
- Bir dizi ekstrüzyon ve kalıp değişkenleri için uygun alın kalınlığının belirlenmesi.
- Endirekt ekstrüzyon durumunda metal akışı ve ölü metal bölgenin oluşumu

Basınç, Şekil 3.10’da gösterildiği gibi güvenli sınır bölgesinde durdurulmalıdır (Çıtak, 2002).



Şekil 3.10. Ölü bölge ve alın kalınlığı arasındaki ilişki (Saha, 2000).

3.3.3. Plastik Gerinim ve Oranı

Metal akışını sayısal olarak araştırmak için, gerinim (deformasyon) ve gerinim oranını (deformasyon oranı) tanımlamak gerekir. Metal şekillendirme plastisitesi teorisinde, başlangıç koşulu, belli bir referans çerçevesi içerisinde kullanılamamaktadır. Bu nedenle, uzunluktaki değişim anlık uzunluktaki değişim ile ilişkili olmalıdır. Doğal veya etkin gerinim şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$d\bar{\epsilon} = \frac{dl}{l} \qquad \bar{\epsilon} = \int_{l_0}^{l} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \tag{3.7}$$

Burada; $\bar{\varepsilon}$ = Doğal veya etkin gerinim,

l_0= Başlangıç uzunluğu,

l =Final uzunluğudur.

Doğal gerinim $\bar{\epsilon}$, logaritmik bir fonksiyonun toplanması ile elde edilmektedir ve logaritmik gerinim olarak adlandırılmaktadır. Metal işlemede gerinim oransal kesit alanı ile verilmektedir. Hacim sabitlik ilişkisi ise şu şekilde verilmektedir.

$$A.l = A_0 l_0 \tag{3.8}$$

Burada;

A = Final alanı

A_0= Orijinal alan

Doğal gerinim şu şekilde verilmektedir:

$$\bar{\varepsilon} = ln \frac{l}{l_0} = \ ln \frac{A}{A_0} \tag{3.9}$$

Bu yüzden etkin gerinim ekstrüzyon durumunda şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$\bar{\varepsilon} = 2ln \frac{D_C}{D_E} = 2ln\sqrt{ER} \tag{3.10}$$

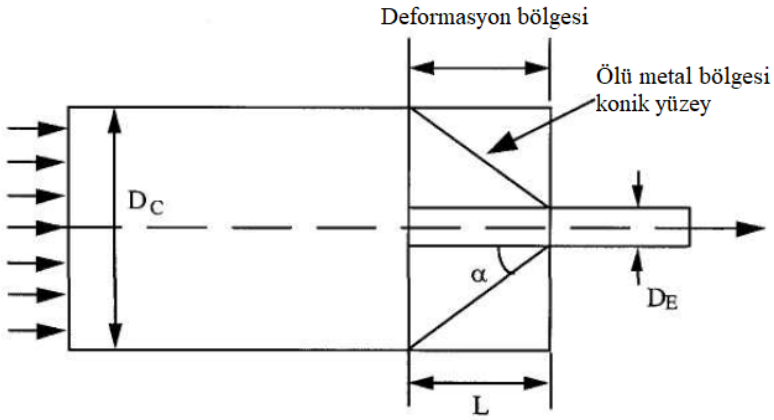
Burada;

D_C = Kovan iç çapı

D_E = Ekstrüze çubuğun eşdeğer çapı

ER = Ekstrüzyon oranı

Gerinim oranını belirlerken, deformasyon bölgesindeki karmaşık akış deseni sorun yaratır. Malzeme, deformasyon bölgesinden geçerken hızlı bir ivmeye uğrar ve bu nedenle akış stresini belirlemek için ortalama bir gerinme oranı tahmin edilmelidir. Deformasyon bölgesi Şekil 3.11'de gösterildiği gibi basitleştirmek için konik olarak kabul edilmektedir (Saha, 2000).



Şekil 3.11. Kovan içindeki biyet geometrisi (Saha,2000).

Geometriden, deformasyon bölgesinin uzunluğu şu şekilde verilir:

D_C = Kovan iç çapı

D_E = Ekstrüze çubuğun eşdeğer çapı

α = Ölü metal bölge yarı açısı

L = Deformasyon bölgesinin uzunluğu

Aynı ekstrüzyon oranı için eşdeğer çubuk çapı da belirlenebilir. Tek bir deliğin ekstrüzyon oranı şöyle tanımlanır:

$$ER = \frac{A_C}{A_E} \tag{3.11}$$

Burada;

A_C = Kovan çapının alanı

A_E = Ekstrüde çubuğun son alanı

Bu nedenle, ekstrüde edilmiş çubuğun eşdeğer çapı şu şekilde verilir:

$$D_E = \frac{D_C}{\sqrt{ER}} \tag{3.12}$$

Ortalama etkili gerinme oranı şöyledir:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{6V_R D_C^2 \tan\alpha}{D_C^3 - D_E^3} 2l_n \frac{D_C}{D_E} \tag{3.13}$$

Denklemde,

V_R = Ortalama ıstampa hızı

D_C = Kovan iç çapı

D_E = Ekstrüze çubuğun eşdeğer çapı

α =Ölü metal bölge yarı açısı (Saha, 2000).

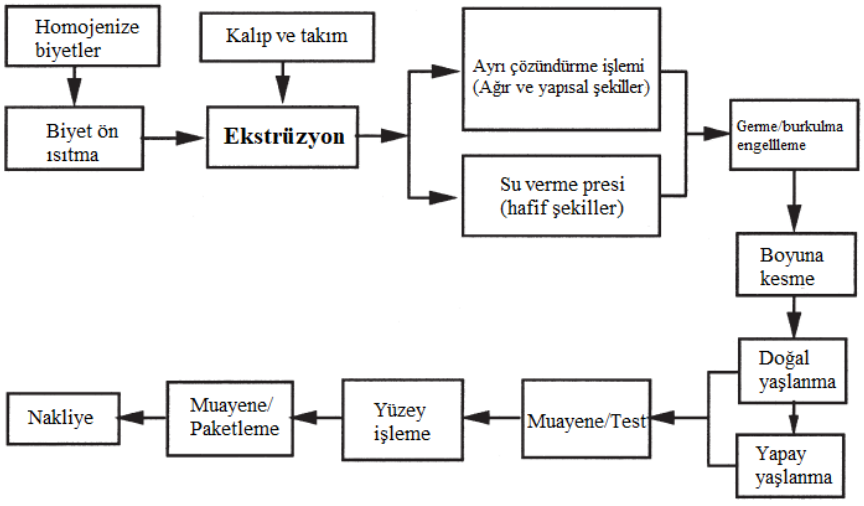
4. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ EKSTRÜZYONU

Alüminyum güçlü, dayanıklı ve hafif bir metaldir. Günümüzde alüminyumun bu üç özelliği de bünyesinde barındırması tercih edilen bir malzeme olmasını sağlamaktadır. Özellikle bazı tiplerinin dayanımı çelikten daha yüksek olan alüminyum alaşımları; ekstrüzyon profilleri olarak kullanılmaktadırlar. Bakır ve çinko ilaveli yüksek dayanımlı alaşımlar ve havacılık endüstrisi için lityum ilaveli alaşımlar geliştirilmekte olmalarına rağmen alüminyum alaşımlarının büyük bir çoğunluğu dikkatlice kontrol edilmiş; magnezyum, silisyum, mangan veya magnezyum-silisyum kombinasyonu gibi ilaveler içermektedir (Bingöl, 2001).

4.1. Yumuşak ve Orta Dereceli Alüminyum Alaşımların Ekstrüzyonu

Alüminyum alaşımlı şekillerin ekstrüzyonu, alaşım yapımı, pres tasarımı, kalıplama ve kalıp tasarımı açısından en ileri teknolojiyi temsil etmektedir. Biyet kimyası, alaşımın türünü ve uygulamalarını belirler. 6000 serisi alaşımlar, en iyi teknik ve ekonomik özelliklere sahip olup, içi boş ve karmaşık şekillerde ekstrüze edilebilirlik, ısıl işlem kolaylığı, iyi elektriksel iletkenlik, tatmin edici mekanik özellikler, iyi yüzey kalitesi, yüksek korozyon direnci ve çok çeşitli uygulamalar için iyi kaynak yapılabilirlik gibi özelliklere sahiptir. Her yıl birkaç milyon ton, 6000 serisi alaşım üretilmektedir. Uygulamalar, kapı ve pencere çerçeveleri, otomobil parçaları, bina yapıları, ısı eşanjörleri gibi karmaşık şekillere sahip profilleri içerir. 6000 serisi alaşımlarla çalışmak kolay olduğu için, dünya çapında farklı müşteri uygulamalarının gerekliliklerini yerine getirmede alaşımınların pek çok türevinin geliştirilmesine devam edilmektedir. Bazı 6000 serisi alaşımlar, yapısal uygulamalarda daha yüksek mukavemet elde etmek için daha yüksek alaşım elementlerine sahiptir. Genel olarak, 6061 (Al-Mg-Si-Cu) ve 6082 (Al-Si-Mg-Mn) serisi alaşımlar, yapısal uygulamalar için daha yüksek mekanik özellikler sunmaktadır. 6061 alaşımı, özel yapısal uygulamalarda önemli bir faktör olan geliştirilmiş tokluğa sahiptir. Bu alaşımlar su verme ve yaşlanma ısıl işlemine çok iyi yanıt verir ve kaynaklı birleştirmelerde kabul edilebilir özelliklere sahiptir. Korozyon ve son işlem açısından ise hem 6061 hem de 6082 mükemmel özelliklere sahiptir. Orta mukavemetli alaşımlar, Al-Zn-Mg ve Al-

Mg olmak üzere iki farklı alaşım kombinasyonuna ayrılır. Birincisi Al-Zn-Mg, ısıl işlem görebilen bir alaşım iken Al-Mg ise ısıl işlem göremez. Son 30 yılda Al-Zn-Mg alaşımları (7020, 7005, 7003 ve benzeri) özellikle demiryolu vagonları, yük taşıyıcı yapılar ve kaynaklı yapılar için kullanılmıştır. Ekstrüzyon işleminde presin basma sırasında ki ekstürzyon sıcaklığı 400 °C'nin biraz üzerine çıkması halinde bu alaşımlar ısıl işleme iyi tepki verir. Düşük bir su verme hassasiyetine sahiptirler ve kaynaktan etkilenen bölgelerde bile iyi mekanik özellik sergilerler. Bu alaşımlar karmaşık şekillerin ekstrüzyonu için önerilmez. Bu alaşımların katman kalkması ve gerilme-korozyon çatlaması gibi olumsuz özellikleri mevcuttur. Bu olumsuzluklar bileşimin ve prosesin kontrolü ile en aza indirgenebilir. Al-Mg alaşımlarının (5052, 5154, 5254 ve 5454) aynı zamanda orta mukavemetli ekstrüzyon alaşımları grubunda olduğu düşünülmektedir. Bu alaşımlar ayrıca korozyona dayanıklıdır. Ticari ve endüstriyel kullanımlar için yumuşak ve orta mukavemetli ısıl işlem görebilir alüminyum ekstrüze kesitler için genellikle Şekil 4.1'de gösterilen adımların dizisi kullanılarak yapılır. Isıl işlem görmeyen 5000 serisi alaşımlar için ekstrüzyonların nihai mekanik özellikleri soğuk şekillendirme işlemlerinden elde edilir (Saha, 2000).



Şekil 4.1. Yumuşak ve orta mukavemetli ısıl işlem uygulanabilir alüminyum ekstrüzyonların temel süreci (Saha,2000).

4.1.1. Alaşımlar ve Ekstrüze Edilebilirlik

Maksimum ekstrüzyon hızı ile ölçülebilen ekstruze edilebilirlik, ekstrüzyon işleminin maliyetini ve verimliliğini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Sıcaklık ve hız parametreleri, deformasyon bölgesindeki stres durumu ile birlikte, esas olarak kalıp bölgesinde, belirli bir alaşımın ekstrüze edilebilirliğinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Basit ve pratik bir ekstrüze edilebilirlik testi yöntemi, diğer işlem parametrelerini değiştirmeden maksimum ekstrüzyon hızında, üründe hata olmaksızın ekstrüzyon oranlarını değiştirmektir. Zasadzinski vd.,(1992) deformasyon geometrisinin kontrolü ve doğru sıcaklık ve hız prosesi parametrelerinin kontrolü ile geliştirilmiş ekstrüze edilebilirlik (maksimum çıkış hızı ile ölçülen) üzerine çalışmıştır. Çalışmada belirli bir ekstrüzyon için optimum (en uygun) sıcaklık ve hız koşullarını hesaplamada algoritma geliştirmişlerdir. Reiso, (1988) iki farklı AlMgSi alaşımının ekstrüze edilebilirliği belirlemek için endüstriyel ortamda biyetin ön ısıtma uygulamalarının sonucunu araştırmıştır. Normal üretim uygulamalarından farklı olarak biyet ön ısıtma uygulamaları kullanılarak ekstrüze edilebilirliğin yanı sıra mekanik özellikler ve yüzey kalitesinin önemli ölçüde iyileştirilebileceği gösterilmiştir. Yüksek biyet sıcaklıklarında ekstrüze edilebilirlikte keskin bir artış kaydedildiğini (araştırılan iki alaşımın %30'u ve %60'ı) ve ekstrüzyondan önce biyetleri homojenleştirerek daha fazla verim elde edildiği araştırmacı tarafından belirtilmiştir. Ek olarak ekstrüzyon hızında elde edilen artışın alaşıma bağımlı olduğunu gözlemişlerdir. Ayrıca, en yüksek ekstrüzyon hızında, normal ön ısıtma sıcaklık aralığında doğrudan ısıtılan biyetlerden daha iyi mekanik özelliklere ve geliştirilmiş yüzey kalitesine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bazı yumuşak ve orta dereceli alaşımların bağıl ekstrüze edilebilirlik dereceleri ise Tablo 4.1'de verilmiştir (Saha, 2000).

Tablo 4.1. Yumuşak ve orta dereceli alaşımların bağıl ekstrüze edilebilirlik dereceleri (Saha,2000).

Yumuşak ve orta dereceli alaşımların ekstrüze edilebilirlik dereceleri			
Alaşım ismi	Tür	Başlıca alaşım elementleri	Ekstrüze edilebilme oranı
1060	Isıl işlem uygulanamayan	Al(99.6)	150
1100	Isıl işlem uygulanamayan	Al(99),Cu	150
3003	Isıl işlem uygulanamayan	Mn,Cu	100
5052	Isıl işlem uygulanamayan	Mg	80
5154	Isıl işlem uygulanamayan	Mg	50
5254	Isıl işlem uygulanamayan	Mg	50
5454	Isıl işlem uygulanamayan	Mg,Mn	50
6061	Isıl işlem uygulanabilir	Mg,Si,Cu	60
6063	Isıl işlem uygulanabilir	Mg,Si	100
6060	Isıl işlem uygulanabilir	Mg,Si,Cu,Mn	40
6101	Isıl işlem uygulanabilir	Mg,Si	100
6463	Isıl işlem uygulanabilir	Mg,Si	100
a) 50-150, ekstrüze edilebilmesi kolay, 30-50, ekstrüze edilmesi kısmen zor			

Alaşımlar, ekstrüze edilebilirliklerine göre üç farklı gruba ayrılır:

I. Ekstrüze edilmesi kolay alüminyum alaşımları: Saf alüminyum, AlMn, AlMg1, AlMgSi0.5, ve AlMgSi0.8
II. Ekstrüze edilmesi kısmen zor olan alaşımlar: AlMg2-3, AlMgSi1, AlZnMg1
III. Ekstrüze edilmesi zor olan alaşımlar: AlCuMg, AlCuMgPb, AlZnMgCu, AlMg > 3%Mg

Genel olarak ekstrüze edilebilen alüminyum ürünlerinin ana tipleri için kullanılan alaşımlar, Tablo 4.2'de listelenmiştir (Saha, 2000).

Tablo 4.2. *Çeşitli ekstrüze ürünler için yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımları*

Ekstrüzyon şekilleri	**Alüminyum alaşımlar**
Tüpler borular	1060, 1100, 2014, 2024, 3003, 5083, 5086, 5154, 5454, 6061, 6063, 6351, 7075
Mimari şekiller	6063, 6061
Uçak parçaları	2014, 2024, 7075, 7178
Yapısal şekiller	5083, 5086, 6061, 6063, 6351, 7004
Elektrik baraları	6101, 1350

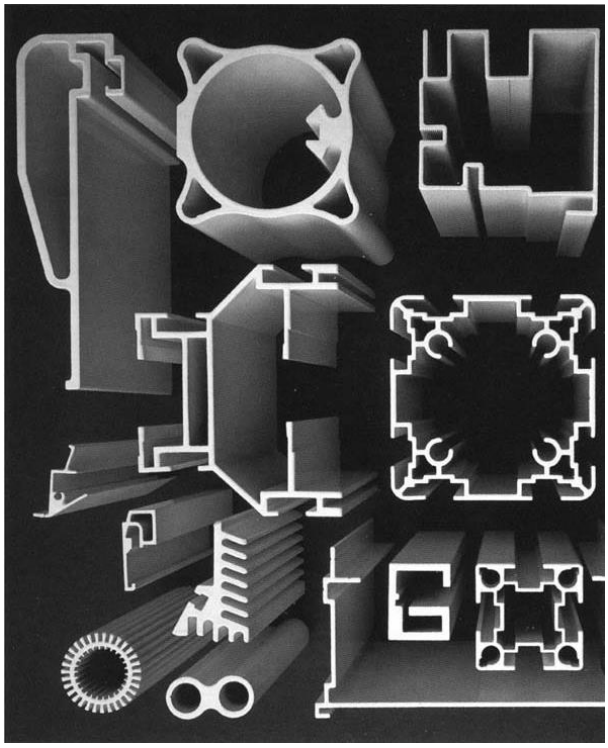
4.1.2. Ürün Şekilleri ve Boyutları

Bazı 6000 serisi alaşımlar (örneğin 6063, 6101 ve 6463), ekstrüzyonun çok karmaşık şekillere girmesine izin vererek daha yüksek ekstrüze edilebilirlik derecelerine sahiptir. Şekil 4.2'de ürün şekilleri ve boyutları geometrik konfigürasyonları verilmiştir. Geometriye dayanarak, aşağıdaki parametreler yaygın olarak ekstrüzyonların şekillerini ve boyutlarını tanımlamada kullanılır:

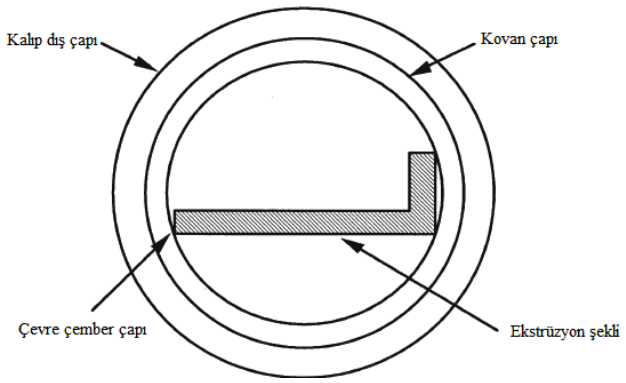
- Şeklin kesit alanı
- Şeklin çevresi
- Şeklin kesitini çevreleyen çemberin çapı

Şekil 4.3'de gösterildiği gibi çevre çember çapı ekstrüzyon kalıbını tasarlama ve yapımında yaygın olarak kullanılan bir terim ve kritik bir faktördür. Çevre çember çapı, ekstrüzyonun aşağıdaki belirtilen özelliklerini kontrol eder:

- Şeklin boyutsal kararlılığı
- Oksit ve metalik olmayan kalıntıların girişi
- Ekstrüzyon sonunda metal akışı



Şekil 4.2. Ektrüde edilmiş alüminyum şekiller (Saha, 2000).



Şekil 4.3. Çevre çemberi çapı, kovan çapı (Saha, 2000)

Doğrudan ekstrüzyon prosesinde metal, merkezde biyetin çevresinden daha hızlı akar**.** Böylece, daha büyük olan çevre çember çapı (Şekil 4.3), boyutsal stabiliteyi elde etmek ve metal akışını eşleştirmek için daha fazla kontrol gereklidir. Çevre çember çapı ve kovan deliği arasındaki boşluk ne kadar büyük olursa, biyet yüzeyinden veya ekstrüzyonun sonuna doğru ekstrüzyonun içine akacak diğer kaynaklardan kirlenme eğilimi o kadar yüksek olur. Çevre çember çapı ne kadar

büyükse, ekstrüzyonun sonunda dalgalanmayı en aza indirmek için gereken alın kalınlığı da büyüyecektir (Saha, 2000).

4.1.3. Katı Şekillerin Ekstrüzyonu

Katı şekilli ekstrüzyonlar genellikle AlMgSi0.5, AlMgSi1, AlZnMg1 ve bazı ısıl işlem görmeyen AlMg gibi yumuşak ve orta sertlikte alüminyum alaşımlarından üretilmektedir. Tablo 4.3'de ekstrüzyon profilleri üretilme zorluğuna göre sınıflandırılmaktadır. Bazı yumuşak ve orta sertlikte alaşımlar için ekstrüzyon parametrelerinin karakteristik değerleri Tablo 4.4'da verilmiştir. Gerçek biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı ürünün karmaşıklığına göre değişmektedir (Saha, 2000)

Tablo 4.3. *Alüminyum ekstrüzyon profillerin sınıflandırılması (Saha,2000).*

Kesit kategorisi	Kesit tipi	Örnekler
A	Basit çubuk	
B	Şekilli çubuk	
C	Standart kesitler	
D	Basit katı kesitler	
E	Yarı boşluklu kesitler	
F	Ani kesit geçişleri ve ince duvarlı kesit , geniş kesit	
G	Zor matris ve çok dar girişleri olan profi	
H	Tüpler	
J	Basit boşluklu kesitler	
K	İki veya daha fazla boşluklu kesit	
L	Dış çıkıntı tüp kesitler	
M	Tüp şekilleri iç çıkıntı ile veya K+L	
N	Büyük veya geniş boşluklu kesitler	

Tablo 4.4. *Bazı yumuşak ve orta sertlikte alaşımlar için ekstrüzyon parametrelerinin karakteristik değerleri (Saha,2000).*

		Biyet sıcaklığı		Çıkış sıcaklığı	
Alaşım	**Tip**	**°F**	**°C**	**ft/dk**	**m/dk**
1060	Isıl işlem uygulanamayan	788	420	164-328	50-100
1100	Isıl işlem uygulanamayan	806	430	164-262	50-80
3003	Isıl işlem uygulanamayan	842	450	98-230	30-70
5052	Isıl işlem uygulanamayan	842	450	16-33	5-10
5154, 5254, 5454	Isıl işlem uygulanamayan	860	460	20-49	6-15
6061	Isıl işlem uygulanabilir	806-932	430-500	16-82	5-25
6063	Isıl işlem uygulanabilir	896-932	480-500	115-262	35-80
6066	Isıl işlem uygulanabilir	797-860	425-460	66-115	20-35
6101	Isıl işlem uygulanabilir	896-932	480-500	115-262	35-80
6463	Isıl işlem uygulanabilir	896-932	480-500	115-262	35-80
7003	Isıl işlem uygulanabilir	824-977	440-525	16-69	5-21
7005	Isıl işlem uygulanabilir	824-977	440-525	16-46	5-14

4.1.4. Tüplerin ve Boşluklu Şekillerin Ekstrüzyonu

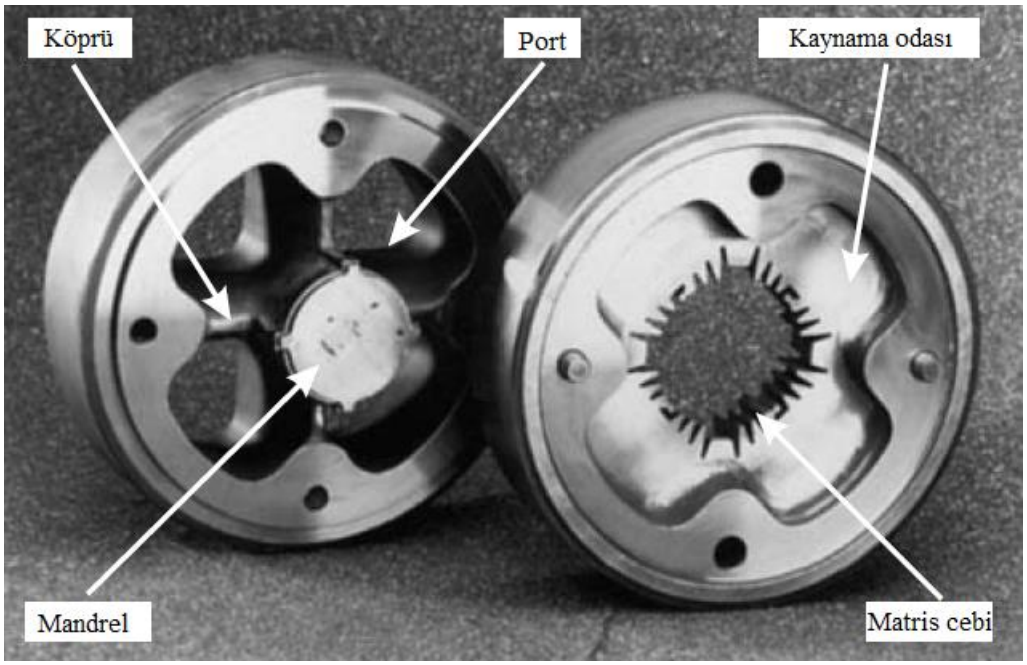
Tüpler ve boşluklu kesitler genel anlamda tüpün veya içi boş kesitlerin dış şeklini belirleyen bir kalıp içinden ekstrüze edilir ve kalıbın açıklığında bulunan bir mandrel iç şekli ve kesit kalınlığını belirler. Ürünün gerekliliklerine ve ekstrüze edilen alaşımın sınırlamalarına bağlı olarak sanayide içi boş şekillerin üretilmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

- Dikişsiz ektrüzyon: Ekstrüzyon kalıbında gövdeye sabitlenmiş bir mandrelin veya ıstampadan bağımsız olarak kontrol edilen hareketli bir mandrelin kullanılmasını ile yapılmaktadır. Bu işlem genellikle yuvarlak boru veya çok

basit içi boş şekillerle sınırlıdır ve ince duvarlı ürünler için pratik değildir. Dikişsiz ekstrüzyon yönteminin kesit görüntüsü Şekil 4.5'de gösterilmektedir.

- Kaynak bağlantıları ile ekstrüzyonlar: Kaynak odası kalıbı kullanılır.

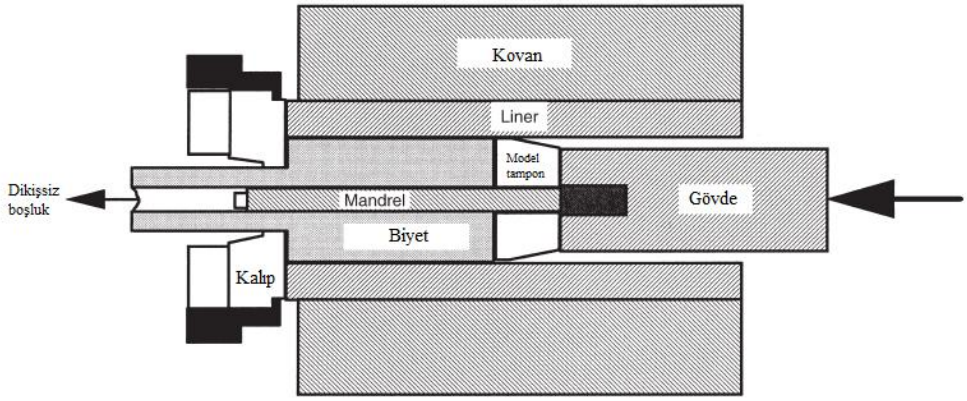
İçi boş profillerin ekstrüzyonunda köprülü, odalı ve spider matrisler kullanılmaktadır. Odalı matrisin görseli Şekil 4.4'de gösterilmektedir (Bayram, 2008; Saha, 2000).



Şekil 4.4. Odalı (porthole) matris (Bayram, 2008; Saha, 2000).

Yumuşak alaşımların boruları ve içi boş bölümleri genellikle kaynak odası tipi kalıpların kullanımı ile üretilir. Bu tip ürünler alüminyum ekstrüzyon endüstrisinde geniş bir uygulama aralığına sahiptir ve AlMn, AlMgSi ve bazı AlMg ve AlZnMg gibi alüminyum alaşımları için uygundur. Boru ve içi boş kesitlerin üretimi için bazı alüminyum alaşımlarının kaynak özellikleri Tablo 4.5'de gösterilmiştir. Kaynak odası işlemi aşağıdaki gibi bazı avantajlara sahiptir:

- İçi boş kesitler daha uzun bir uzunlukta ekstrüze edilebilir.
- Çok ince cidarlı boşluklu profiller üretilebilmektedir.
- Pek çok endüstriyel uygulama için, karmaşık kesitlerin ekstrüzyonunda kullanışlıdır.



Şekil 4.5 Dikişsiz boru ekstrüzyonun prensibi (Saha, 2000).

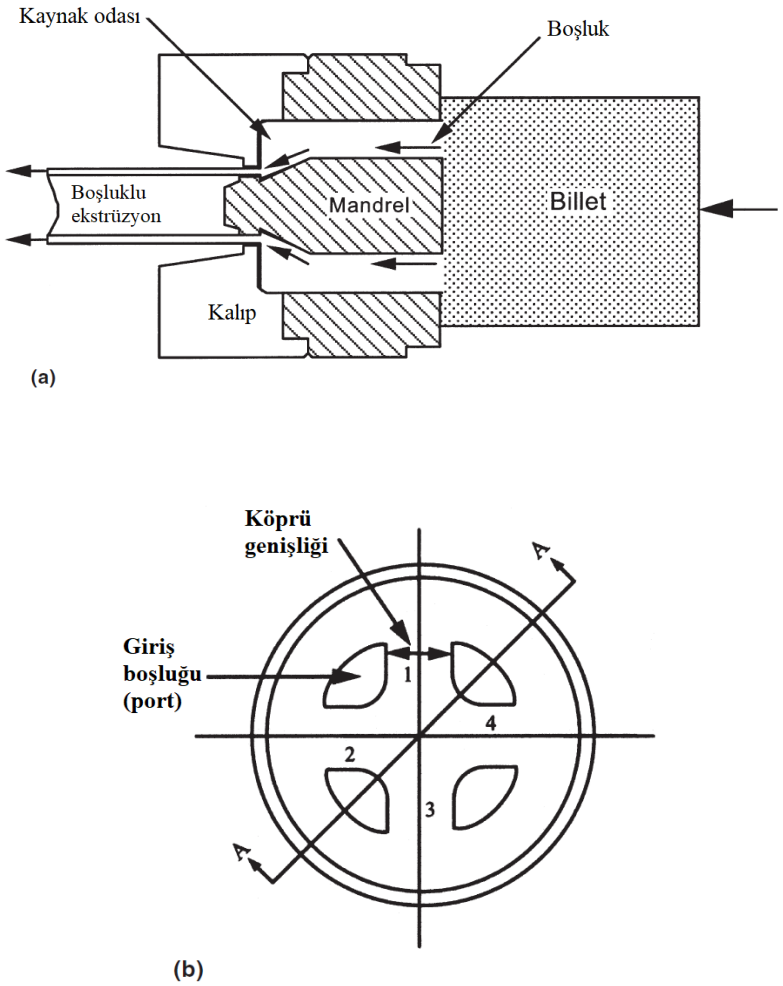
Tablo 4.5. *Boru ve içi boş kesitlerin üretimi için bazı alüminyum alaşımların kaynak özellikleri (Saha, 2000).*

Alaşım	**Kaynak özellikleri**
Saf Al	Çok iyi
AlMn	Çok iyi
AlMg1	Çok iyi
AlMgSi0.5	Çok iyiye yakın
AlMgSi1	Çok iyiye yakın
AlZnMg1	İyi
AlMgSi0.8	Çok iyiye yakın

Mandrel ile desteklenen köprü çevresi bölmelerindeki boşluların içine metal akmaya zorlanmaktadır. Bölmelerdeki boşluk boyunca akan metalin ayrı akışları, mandreli çevreleyen bir kaynak odasında bir araya getirilir ve metal, Şekil 4.6'da gösterildiği gibi, mandrel ve kalıp başlığı arası boşluğundan çıkmaktadır. Metal akışları, atmosferik kirlenmenin olmadığı kalıp içinde birleştirildiğinden mükemmel dayanımlı kaynak elde edilir. Katı bölümlerin ekstrüzyonu ile karşılaştırıldığında, içi boş kesitlerin ekstrüzyonları birkaç teknik özellik göstermektedir:

- Ekstrüzyon yükü daha yüksek hale gelir, çünkü metal kaynak odasına ulaşmadan önce portların içinden akması için sürtünmenin üstesinden gelmek zorundadır.
- Biyet sıcaklığı genellikle portlarda akışını kolaylaştırmak ve kaynak odasında uygun bir kaynak elde etmek için 500 °C'yi aşmalıdır.

- Kovan sıcaklığı nispeten yüksek olmalı ve biyet sıcaklığının 50 ila 70 °C'sinden az olmamalıdır. Tatmin edici ekstrüzyon ve kalın cidarlı kesitler ile kaynak yapmak için kovan sıcaklığı 450 °C ila 470 °C arasında olmalıdır.
- Küçük delikli şekiller, her bir boşluğun ekstrüzyon oranı, alaşımların ekstrüze edilebilirliği, pres ebadı ve minimum cidar kalınlığı ile çember çapı arasındaki ilişki göz önüne alınarak çok delikli, parçalı ekstrüzyon kalıpları kullanılarak üretilir (Saha, 2000).



Şekil 4.6. Kaynak odasının (parçalı) şeması, içi boş ekstrüzyon. (a) Mandrel çevresinde ve boşluk içine giden metal akışının şematik gösterim (b) Kalıp setinin biyet giriş yolu yüzeyi (Saha, 2000).

4.2. Sert Alüminyum Alaşımların Ekstrüzyonu

Sert alaşımların ekstrüzyonu temel olarak yumuşak ve orta mukavemetli alaşımların ekstrüzyon prosesiyle aynıdır. Tek fark, alaşımın kimyası, biyet sıcaklığı, ekstrüzyon hızı, çıkış sıcaklığı ve sertleştirme işlemi için su verme gibi işlem parametreleri üzerindeki etkisidir. Bazı gerekliliklerden dolayı sert alaşımlarda germe, kesme ve ısıl işlem gibi yardımcı adımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Alüminyum topluluğunun 5000 serisi orta ve daha sert mukavemetli alaşımlar, en önemli ticari ısıl işlem görmeyen alaşımları temsil etmektedir. Çalışma aralığı boyunca yüksek deformasyon direncine sahip oldukları için sıcak çalışma aralıkları çok sınırlıdır. Yüksek ekstrüzyon sıcaklıkları gereklidir ve ergimenin olması muhtemeldir. 5000 serisi alaşımlar, esas olarak saf alüminyumun gerektiği kadar iyi korozyon direncinin olduğu, ancak daha yüksek mukavemetin zorunlu olduğu uygulamalarda kullanılır. Alaşımlar ayrıca havacılık, gemi yapımı ve nakliye bileşenlerinde de kullanılır. Genel olarak % 5 ile % 6 magnezyum (Mg) ilavesi maksimum seviyedir. Bunun nedeni daha yüksek Mg'ye sahip olan alaşımların ekstrüze edilmesi zordur. Bunlar, taneler arası ve gerilmeli-korozyon çatlağına veya katman kalkmasına karşı daha hassastır. 7000 serisi, AlZnMgCu alaşım sistemleri çinko (Zn), magnezyum ve bakır (Cu) ve ayrıca krom (Cr), manganez (Mn) veya zirkonyum (Zr) ve sürekli mevcut olan kirlikler, demir (Fe) ve silisyum (Si) gibi katkı maddeleri içerir. Bu alaşımlar, yüksek deformasyon direnci ve nispeten düşük çalışma sıcaklıklarında ergime eğilimi olması nedeniyle çok kısa bir çalışma sıcaklığı aralığına sahiptir. Uçak endüstrisindeki küçük ve büyük şekilli ekstrüze kesitler için en yaygın kullanılan alaşım, yüksek mukavemetli bir ağırlık oranı sunan 7075'tir (Saha, 2000).

4.2.1. Sert Alaşımların Ekstüze Edilebilirliği

Tablo 4.6'da Sert alaşımların farklı ekstrüzyon oranları verilmiştir. Zasadzinski ve Misiolek, (1988) deforme edilmesi zor olan, kontrol edilebilir kovan sıcaklıkları uygulayarak bazı alaşımların ekstrüzyonunun araştırılması ile ilgili sonuçlarını sundu. Verilen işlem koşulları altında sınırlayıcı bir deformasyon olarak tanımlanan

ekstrüzyon için, çatlakların oluşmayacağı maksimum hız seçilmelidir. Bir diğer çalışmada Asboell, K., Jensrud, O., Reiso, O., ve Jacobsen, D., (1996) bazı 7xxx alaşımlarının ekstrüze edilebilirliği, ekstrüze edilmiş kesitte sıcak yırtılma veya hız çatlakları meydana gelmeden önce maksimum ekstrüzyon hızı olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, bu alaşımların ekstrüze edilebilirliğinin, Mg gibi bazı alaşım bileşenlerine sıkı bir şekilde bağlı olduğunu gösterirken, Zn içeriğine ise az bağımlı olduğunu göstermektedir (Saha, 2000).

Tablo 4.6. *Çeşitli sert alaşımların ekstrüze edilebilirlik dereceleri (Saha, 2000).*

Alaşım tanımı	**Tipi**	**Başlıca alaşım elementleri**	**Bağıl ekstrüze edilebilirlik (a)**
2014	Isıl işlem uygulanabilir	Cu, Si, Mn, Mg	20
2024	Isıl işlem uygulanabilir	Cu, Mg, Mn	15
5083	Isıl işlem uygulanamayan	Mg, Mn, Cr	20
5086	Isıl işlem uygulanamayan	Mg, Mn, Cr	25
5456	Isıl işlem uygulanamayan	Mg, Mn, Cr	20
7001	Isıl işlem uygulanabilir	Zn, Mg, Cu, Cr	7
7075	Isıl işlem uygulanabilir	Zn, Mg, Cu, Cr	10
7079	Isıl işlem uygulanabilir	Zn, Mg, Cu, Mn, Cr	10
(a) ≤ 25, ekstrüze edilebilmesi zor			

4.2.2. Ürün Şekilleri ve Boyutları

Ürün şekilleri ve büyüklüklerini tarif eden temel noktalar, 4.1.2'deki "Ürün Şekilleri ve Boyutları" bölümünde belirtilmiştir ve yumuşak ve sert alüminyum alaşımlarının ekstrüzyonu için esas olarak aynıdır.

4.2.3. Ekstrüzyon Parametreleri

Ekstrüzyon parametreleri (örneğin, biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı) alaşımın kimyasına tamamen bağlıdır. Kovan sıcaklığı başlangıçtaki biyet sıcaklığına göre

kontrol edilir. Bazı sert alaşımların ekstrüzyon parametrelerinin karakteristik değerleri, Tablo 4.7'de verilmiştir. Gerçek biyet sıcaklıkları ve ekstrüzyon hızları ürün karmaşıklığına göre değişir. Sıcaklıklar ve ekstrüzyon hızları son şekle ve ekstrüzyon oranına bağlıdır (Saha, 2000).

Tablo 4.7. *Bazı sert alaşımların ekstrüzyon parametrelerinin karakteristik değerleri (Laue vd., 1981).*

		Biyet sıcaklığı		**Çıkış hızı**	
		°F	**°C**	**ft/dk**	**m/dk**
Alaşım	**Tür**	788-842	420-450	5-11	1.5-3.5
2014-2024	Isıl işlem uygulanabilir	824-842	440-450	7-20	2-6
5083,5086,5456	Isıl işlem uygulanamaz	700-780	370-415	2-15	0.5-1.5
7001	Isıl işlem uygulanabilir	572-860	300-460	3-7	0.8-2
7075,7079	Isıl işlem uygulanabilir	572-824	300-460	2.5-6	0.8-1.8
7049,7150 7178	Isıl işlem uygulanabilir				
Not: Sıcaklıklar ve ekstrüzyon hızları son şekle ve ekstrüzyon oranına bağlıdır ve tabloda belirtilenden daha düşük biyet sıcaklıkları ile başlamak gerekli olabilir.					

5. ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN EKSTRÜZYONU

5.1. Biyet Metalurjisi ve Akış Gerilimi

Ekstrüzyon için alüminyum bazlı MMK biyetler, takviye için Al2O3, SiC, B4C ve diğer seramik parçacıklar kullanılarak ingot metalurjisi ile üretilebilir. Soğutulmuş kalıpta biyet yüzeyi alaşımındaki bileşen konsantrasyonundaki değişim biyet çevresi etrafında parçacık içermeyen bir bölgeye neden olur. Parçacıksız bölgenin derinliği kalıp tasarımına ve değişkenlerine bağlıdır ve bu minimum değere kadar kontrol edilebilir. Biyet kalite kontrol uygulamaları, standart alüminyum alaşımları için kullanılanlara benzer olup, parçacık yüzde hacim tutarlılığı, parçacık dağılımı, parçacık / matris reaksiyonu ve istenmeyen parçacıkların kümelenmemesi için ek kontrolleri içermektedir. Brusethaug vd., (1990) otomotiv uygulamaları için AlSi7Mg alaşımlarında takviye elamanı olarak SiC kullanımını araştırmıştır ve sonucunda AlSi7Mg alaşımının iyi sonuçlarla ekstrüze edilebileceğini bulmuşlardır. Mg içeren fazların katı çözeltiye getirilmesiyle maksimum ekstrüzyon hızı elde edilebilir. SiC parçacıklarının hacimce % 15 oranında eklenmesi, ekstrüzyon profilinin yüzey sıcaklığının daha hızlı bir şekilde artmasına neden olurken maksimum ekstrüzyon hızını % 30 ile % 40 oranında azaltır. Ekstrüzyon basıncı ise % 10 ile % 15 oranında artar (Saha, 2000).

5.2. Kalıp Malzemeleri ve Kalıp Tasarımı

Sıcak kalıp çeliği, tipik olarak AISI H13, dünya çapında alüminyum endüstrisinde alüminyum alaşımlarının ekstrüzyonu için standart bir kalıp malzemesi olarak kullanılır. Bununla birlikte, MMK'lerin ekstrüzyonunda, sert seramik parçacıklarının aşındırıcı etkisinden dolayı takım çeliğinden yapılan kalıplar kullanılmamaktadır. Uygun kalıp malzemelerinin ve kalıp tasarımının geliştirilmesi, alüminyum esaslı metal matrisin ekstrüzyonunda en büyük zorluk olmuştur. Dixon, (1992) ve Jeffery ve Holcomb, (1990), çeşitli kalıp materyalleri kullanarak hem kalıbın aşınmasını hem de kalıp tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Zhou ve ark., (2000) takım çeliğinin üç farklı kobalt (Co) içeren tungsten karbür (WC) gibi sert metallerle değiştirilmesi

ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar kanal şeklindeki bir kalıp kullanarak Al6061 alaşımına % 15 oranında Al_2O_3 eklemişler ve elde edilen ürünün ekstrüzyonunu denemişlerdir. Kullanılan sert kalıp metallerin, çeşitli ekstrüzyon koşulları altında alüminyum bazlı MMK'lerin ekstrüze edilmesi için uygun kalıp malzemeleri olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Ekstrüzyon işleminde meydana gelen kalıp aşınması karmaşık bir olaydır ve aşağıdaki birçok değişkenle bağlantılıdır.

- MMK matrisli alaşımlar
- Parçacık takviyesinin tipi ve miktarı
- Sıcaklık ve hız gibi ekstrüzyon parametreleri
- Ekstrüzyon oranı
- Profilin şekli

5.3. Ekstrüzyon Prosesi ve Hataları

Bilinen alüminyum alaşımları gibi alüminyum bazlı MMK'leri ekstrüze etmek için doğrudan veya dolaylı ekstrüzyon işlemleri kullanılmaktadır. Alüminyum bazlı MMK'lerin akış stresi, alüminyum matris alaşımından daha yüksek olduğundan, MMK'lerin ekstrüzyonun için daha yüksek basınçlar gerekmektedir. Ekstrüzyon değişkenleri ve MMK biyetin akış gerilimi arasındaki ilişki, örneğin sıcaklık, gerilim ve gerinim oranı önemli parametrelerdir. Seramik parçacık takviyesinden dolayı, MMK'ler alüminyum matris alaşımlarından daha düşük sünekliğe ve yükseltilmiş ekstrüzyon sıcaklığına sahiptir. Yüzey yırtılması, MMK'lerde yaygın bir ekstrüzyon kusurudur; Bu tür yırtılma, yüksek sıcaklıklarda kızıl gevrekliğin yanı sıra düşük sıcaklıklarda ve hızlarda sünekliğe bağlı yırtılma içerir (Saha, 2000).

5.4. Ekstrüzyonun Oluşumu

Lloyd, (1991) bir kompozitin ortam sıcaklığında çekme gerilimine maruz kalması durumunda parçacık kırıkları ve boşluk oluşumlarının meydana geldiğini incelemiştir. Parçacık ilavesinin temel faydalarından biri, malzemenin sertliğini veya elastik modülünü arttırmasıdır. Bu nedenle, tüp çekme gibi soğuk işlemlerin

malzeme sertliğini veya yoğunluğunu azaltmada etkili olabileceğini anlamak önemlidir. Klimowicz vd., (1994) tarafından % 20 hacim oranında Al_2O_3 parçacık takviyesinin Al6061 alaşımına eklenmesiyle ekstrüze edilen alüminyum kompozitin elastik modülü üzerinde soğuk şekillendirme etkisinin azalması incelenmiştir. Metalografik incelemede, bazı Al2O3 parçacıklarının kırılması nedeniyle modül kaybına neden olduğu görülmüştür. Sonuçlar, modülü en üst düzeye çıkarmak için soğuk çekme miktarının en aza indirilmesi gerektiğini göstermiştir.

5.5. Toz Metalurjisi (T/M) Alaşım Ekstrüzyonları

Doğrudan ekstrüzyonda işlem sırası, normal alüminyum alaşımları ile aynıdır, ancak malzemenin deformasyon özelliklerine ilişkin ince farklılıklar vardır. T/M kompozitlerinin normal alüminyum alaşımlarına kıyasla daha yüksek bir akış stresine sahip olmasından dolayı, daha yüksek ekstrüzyon basınçlarına ihtiyaç duymaktadır. Yüke karşı ıstampa yer değiştirme eğrileri T/M kompozitleri için kesme ve sürtünmenin üstesinden gelmek için katkısız alaşımlara kıyasla daha fazla iş gerektirir. Baştaki T/M biyet sıcaklığı doğrudan ekstrüzyonda kalıp ve kovandaki sürtünme, plastik deformayon ve ısı oluşumundan dolayı metal matrisin ergimesini başlangıçta önlemek için dikkatli olunmalıdır. Toz metalurjisi kompozit malzemeleri zaman zaman kalıp yatağındaki sürtünmeyi azaltmak ve yüzey kusurlarını önlemek için yağlanmış koşullarda ekstrüze edilir. Çoğu şekil kesme yüzeyi ve konik kalıplar kullanılarak üretilmektedir (Saha, 2000).

5.6. Alüminyum Kompozit Çubuk Profiller

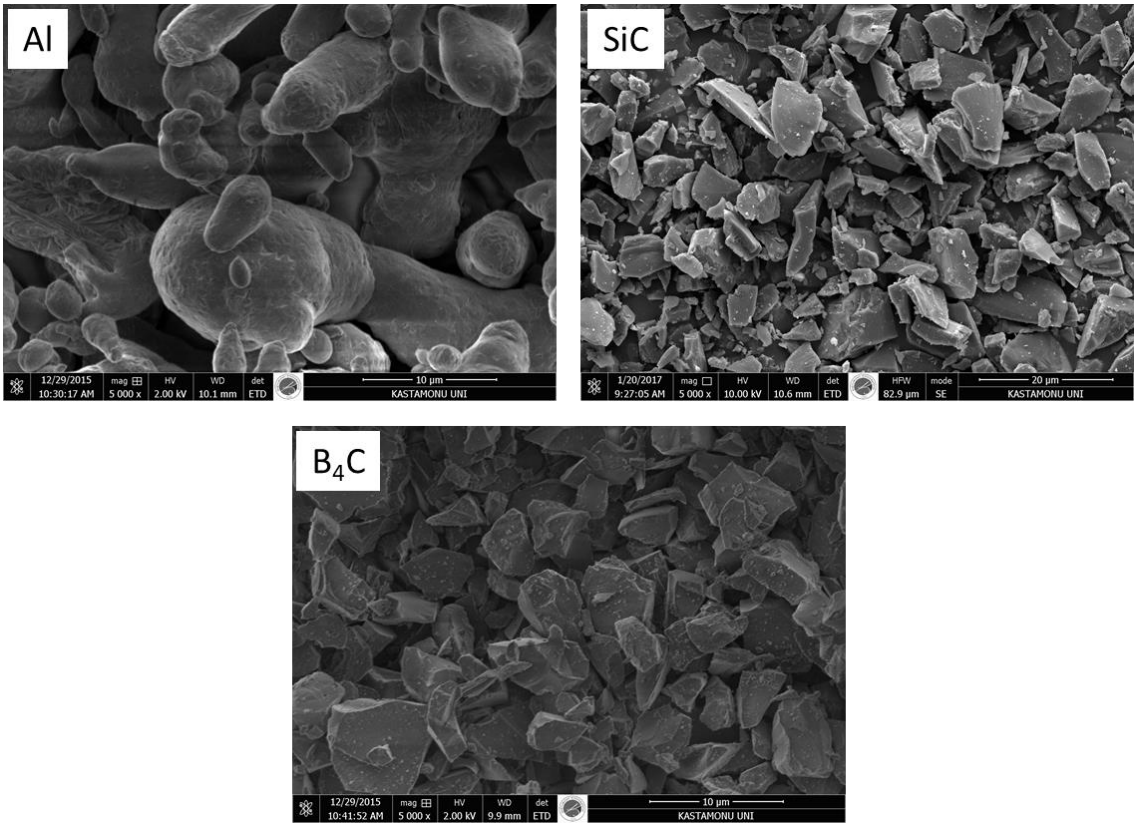
Boru biçiminde üretilecek olan kompozit malzemelerin ekstrüzyon işlemi bulk malzemelerin üretiminden farklıdır. Bunlara ilişkin olarak ekstrüzyon sürecinde yüzer maça ve parçalı ekstrüzyon kalıbı kullanılarak sırasıyla dikişli ve dikişsiz profil borular üretilebilmektedir. Bu prosesler AMK üretim sürecinde malzeme akışına etki etmektedir. Lim ve Gupta, (1991) Al/B_4C kompozit çubukların mekanik özellikleri ve mikro yapı değişiklikleri üzerinde ekstrüzyon sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Sikand vd., (2009) ise parçalı ekstrüzyon kalıbı kullanarak dikişsiz Mg tüpleri üretmişlerdir. Hwang vd., (2013) ise dikişsiz SiCp katkılı AZ61 magnezyum alaşım

kompozit tüplerin mikro yapı değerlendirmeleri ve mekanik özellikler üzerinde ekstrüzyon parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada çevresel ve yön boyunca daha üniform kalınlık dağılımı sağlamak için özel olarak tasarlanmış kalıplar kullanılmıştır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda matris malzemesi olarak Ecka granül firmasından Al tozu (% 99,5 saflıkta - <44 μm boyutunda) takviye elemanı olarakta Alfa Aesar firmasından SiC (<10 μm) ve Nurol A.Ş'den B_4C (<10 μm) tozları temin edilmiştir. Kullanılan tozlara ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Fotoğraf 6.1'de verilmiştir.



Fotoğraf 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların SEM görüntüsü

6.2. B_4C ve SiC Takviyeli Çubuk Profil Üretimi

6.2.1. Tozların Karıştırılması

Al esaslı kompozit çubuk profil üretimi için Al matris içerisine ağırlıkça %5,10,15 ve 20 oranlarında B_4C ve SiC parçacıkları ilave edilerek 30 dakika boyunca bilyalı

karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karışımda kullanılan bilya:toz oranı 2:1'dir. Fotoğraf 6.2'te çalışmada kullanılan karıştırıcının resmi gösterilmektedir.



Fotoğraf 6.2. Çalışmada kullanılan karıştırıcı

6.2.2. Presleme İşlemi

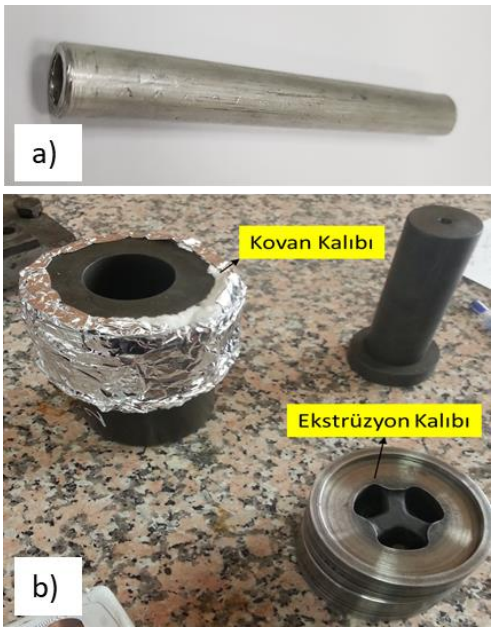
Karışım tozlar 120 ton basma kapasitesine sahip özel yapım hidrolik pres yardımıyla 600 MPa basınç altında çelik bir kalıp içerisinde (Fotoğraf 6.3a) soğuk olarak tek yönlü sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sonrası 40 mm çapında silindirik biyet numuneler üretilmiştir (Fotoğraf 6.3b).



Fotoğraf 6.3. Soğuk presleme kalıp takımı (a), sıkıştırma sonrası üretilen biyet numune (b)

6.2.3. Ekstrüzyon İşlemi

Üretilen biyet numuneler (Fotoğraf 6.4b) gösterilen ekstrüzyon kalıbı içerisine yerleştirilerek 550°C sıcaklıkta 3 saat ısıtılmıştır. Daha sonra dikey pres ünitesinde 1/11 oranında ekstrüzyon işleminden geçirilerek çapı 12 mm ve et kalınlığı 2 mm olacak şekilde kompozit profillerin üretilmesi sağlanmıştır (Fotoğraf 6.4a). Ayrıca ekstrüzyon işleminde kalıpların ısıtılması için özel olarak tasarlanmış seramik kelepçe ısıtıcılar kullanılmıştır.



Fotoğraf 6.4. Ekstrüzyon sonrası üretilen kompozit profil numune (a), Ekstrüzyon kalıbı (b)

6.3. Karakterizasyon İşlemleri

6.3.1 Yoğunluk Ölçüm Metodu

Üretilen numunelerin yoğunlukları (ρ_n) boyutsal büyüklükten dolayı Eşitlik. 6.1'de verilen formül kullanılarak numunelerin havadaki ağırlıklarının (m_h), hacmine (v) oranı ile hesaplanmıştır.

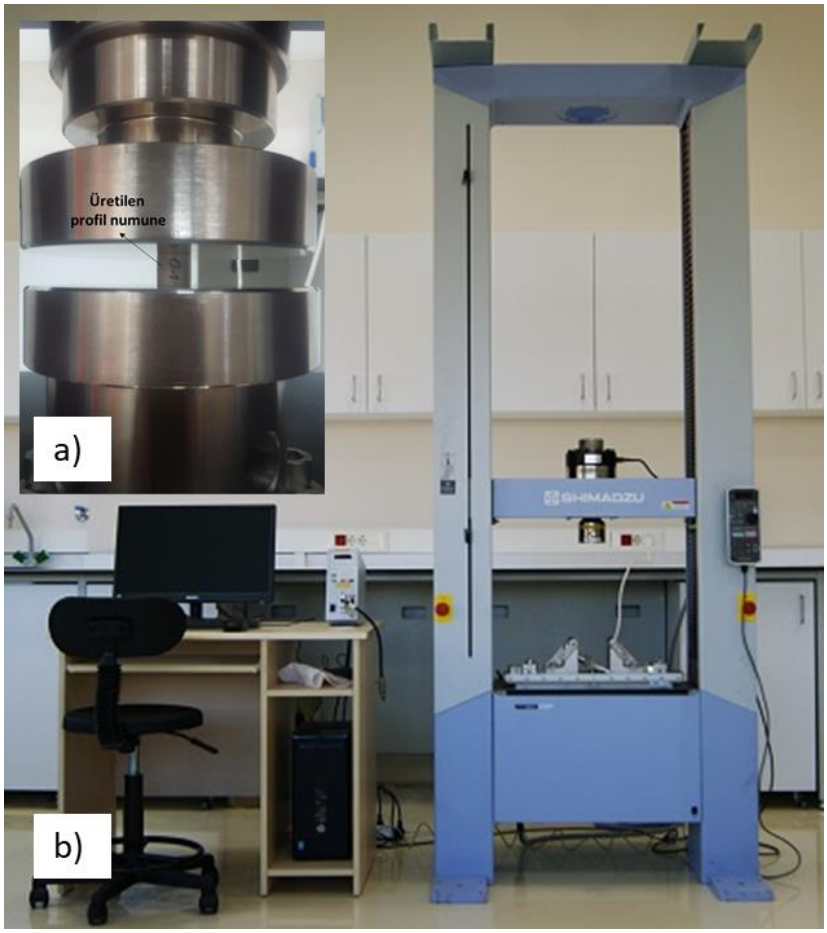
$$\rho_n = \frac{m_h}{v} \tag{6.1}$$

6.3.2. Basma Deneyi

Üretilen profil numuneler 4 farklı boy/çap (L/D) oranında kesilerek ezilme davranışlarının belirlenmesi için 3 mm/dak deformasyon hızında basma testlerine tabii tutulmuştur. Basma numune örneği fotoğraf 6.5a'da gösterilmiştir. Bu deneyler için Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Shımadzu marka Autograph AGS-X model üniversal test cihazı marka üniversal test cihazı kullanılmıştır (Fotoğraf 6.5b). Numunelerin boy/çap (L/D) oranları Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1. *Numunelerin boy/çap (L/D) oranları*

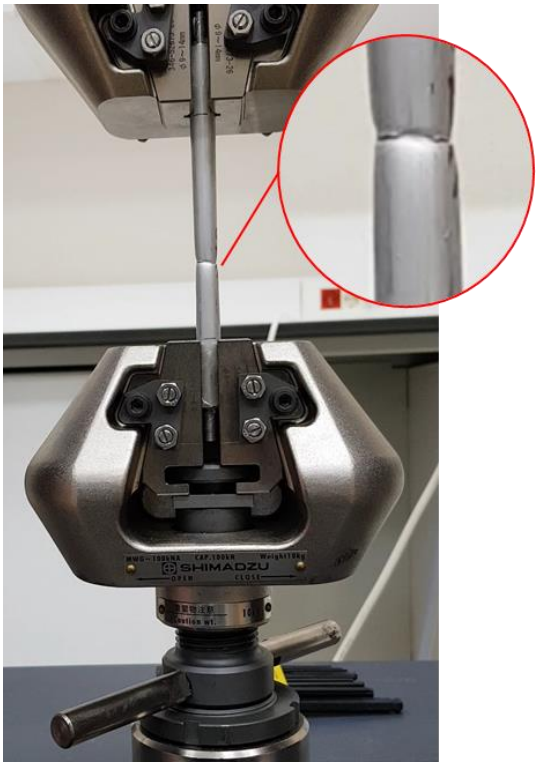
L: Boy (mm)	**D: Çap (mm)**	**L/D**
12	12	1
24	12	2
36	12	3
48	12	4



Fotoğraf 6.5. Basma numunesi (a) ,Shımadzu marka Autograph AGS-X model üniversal test cihazı (b)

6.3.3. Çekme Deneyi

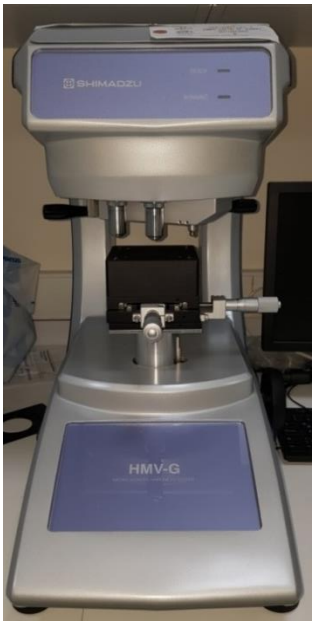
Üretilen saf alüminyum ve farklı oranlarda (% 5-10-15-20) SiC ve B_4C içeren alüminyum kompozit profillerin çekme özelliklerini belirlemek için Shımadzu marka Autograph AGS-X model üniversal test cihazın kullanılmıştır. Yapılan çekme testleri ASTM-E8 standartlarına göre 1 mm/dk deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir (Fotoğraf 6.6).



Fotoğraf 6.6. Çekme testi

6.3.4. Mikrosertlik Ölçümü

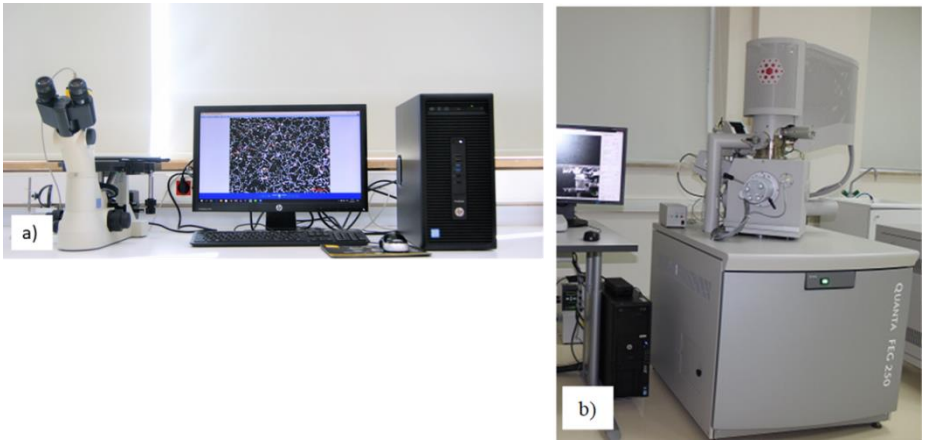
Sertlik ölçümleri Kastamonu Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Schimadzu (HMV-G) marka mikro sertlik cihazında yapılmıştır (Fotoğraf 6.7). Üretilen kompozit profillerin sertlik ölçümleri ekstrüzyon yönünde (EY) ve ekstrüzyon yönüne dik (ED) olacak şekilde hazırlanan kesit yüzeylerinden 200 g yük ($HV_{0.2}$) uygulanarak yapılmıştır. Mikro sertlik değerleri her numune için en az beş ölçümün ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.



Fotoğraf 6.7. Sertlik ölçüm cihazı

6.3.5. Mikroyapısal Analizler

Üretilmiş kompozit profillerin mikroyapısal analizleri optik mikroskop, SEM ve EDS aracılığıyla karakterize edilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde Kastamonu Üniversitesi, Makine Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan dijital kamera bağlantılı Leica marka optik mikroskop ve Merkezi araştırma Laboratuvarında bulunan FEI marka Quanta FEG 250 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Fotoğraf 6.8).

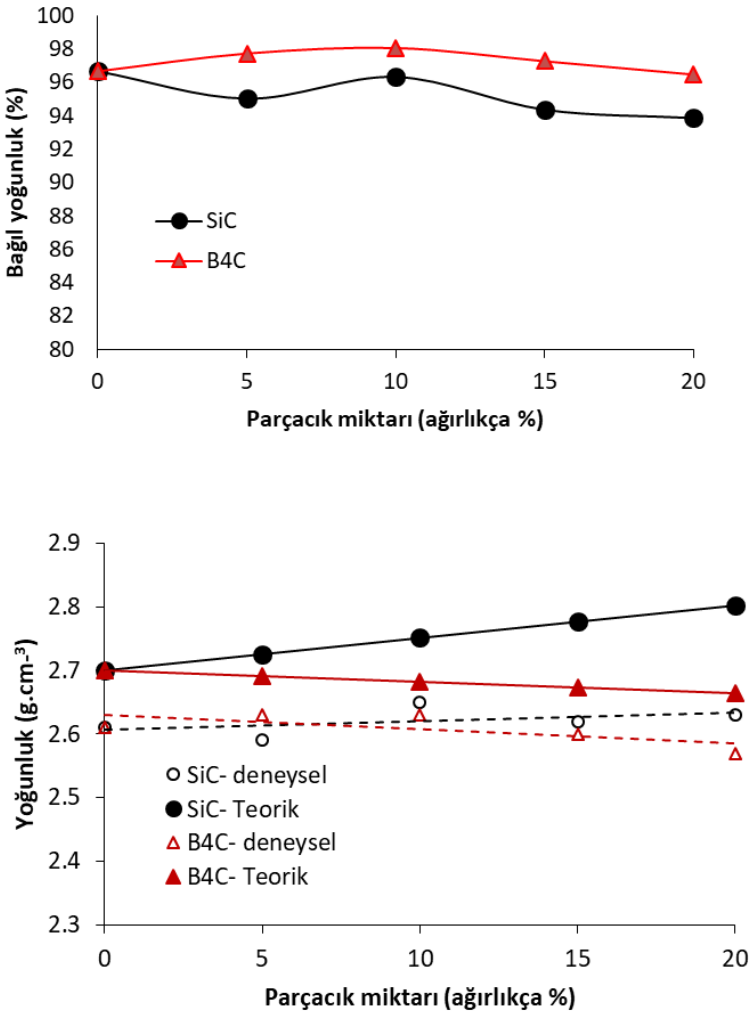


Fotoğraf 6.8. Mikroyapısal karakterizasyonlarda kullanılan cihazlar, a) optic mikroskop b), SEM cihazı

7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR

7.1. Kompozit Profillerdeki Yoğunluk Değişimi

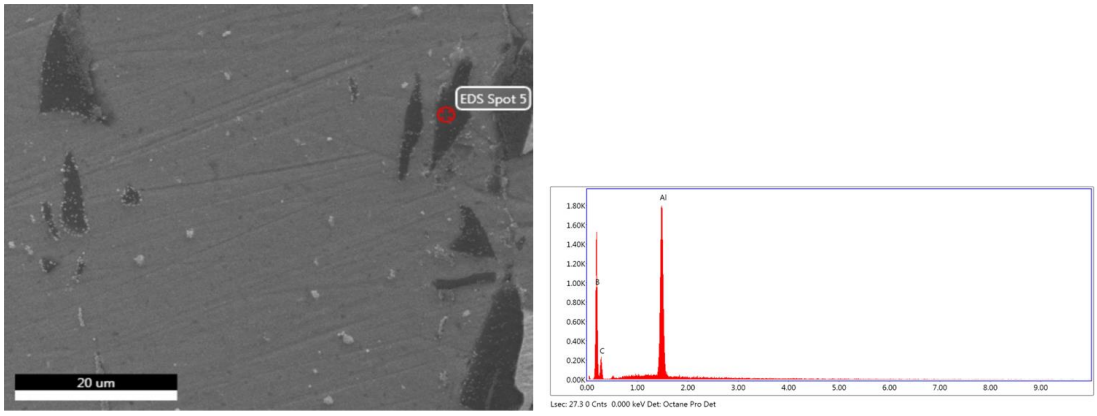
Grafik 7.1'de SiC ve B_4C takviyeli alüminyum çubuk profillerin parçacık oranına bağlı olarak bağıl yoğunluk değişimi ve deneysel ve teorik yoğunlukları verilmiştir. Aşağıdaki grafikte düz çizgi ile gösterilenler teorik, kesik çizgi ile belirtilen deneysel yoğunluktur. Grafiğe bakıldığında her iki numune türünde % 93'ün üzerinde bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Ayrıca SiC içeren çubuk profillerin B_4C içeren numunelere kıyasla daha düşük bağıl yoğunluk değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum SiC parçacıklarının B_4C parçacıklarına kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Üretilen kompozit çubuk profiller arasında en düşük bağıl yoğunluk değeri % 93,9 ile % 20 SiC içeren numunede elde edilmişken en yüksek bağıl yoğunluk değeri ise % 98,1 ile %10 B_4C içeren numunede elde edilmiştir. Her iki numune arasındaki oransal fark yaklaşık olarak % 4'tür. Aynı oranda parçacık içeren numuneler kıyaslandığında ortalama oransal fark % 2,6 dır. Bu değerler üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması açısından önem arz etmektedir. Çünkü Kompozit malzemelerde yoğunluk değişimi mekanik özellikleri etkileyen ayırt edici bir özelliktir. Örneğin yoğunluk oranı artarsa gözeneklilik azalır sertlik ve dayanım artar. Karakoç, Karabulut ve Çıtak, (2018) tarafından yapılan çalışmada sıcak ektrüzyon yöntemi ile üretilen %20 B_4C takviyeli Al6061 numunelerde % 99,97 oranında bağıl yoğunluk değerleri elde edildiği gözlenmiştir. Bu değer aynı oranda B_4C içeren çubuk profilin bağıl yoğunluk değerine (% 96,5) kıyasla yüksektir. Bu farkın üretim parametrelerinden kaynaklandığı açıkça anlaşılmaktadır.



Grafik 7.1. SiC ve B_4C takviyeli alüminyum çubuk profillere ait yoğunluk değerleri

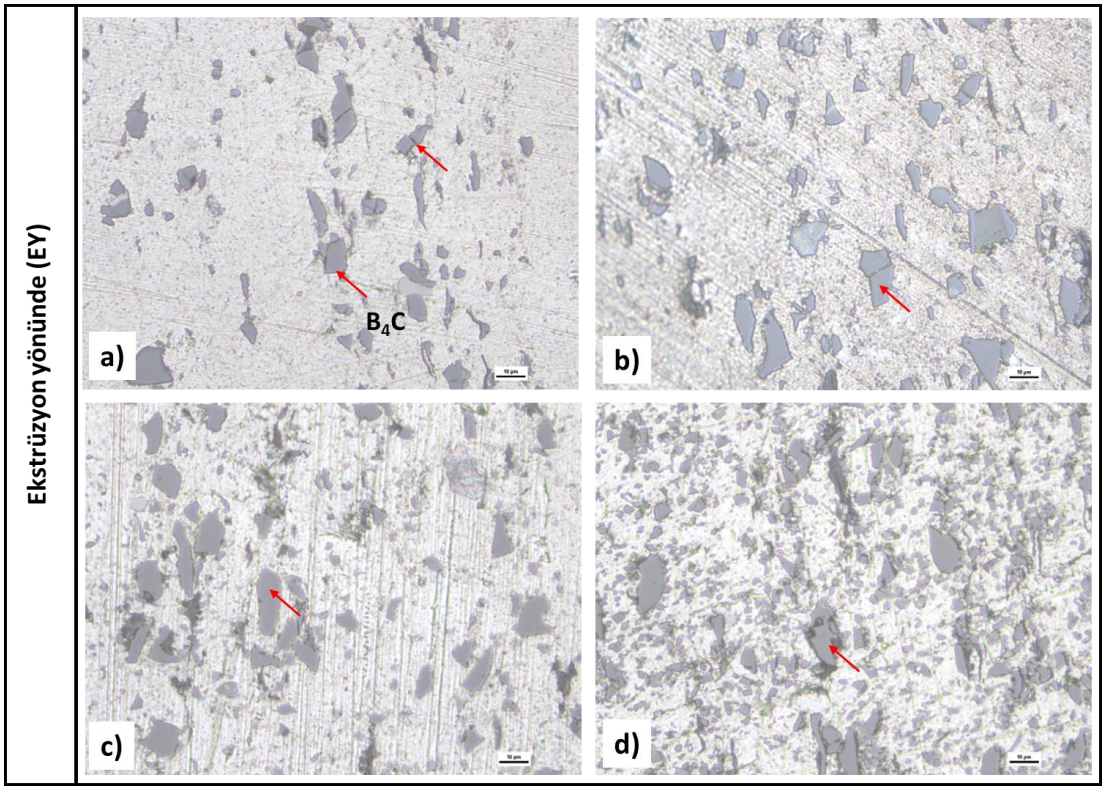
7.2. Mikroyapısal Gözlemler

Fotoğraf 7.1'de %5 oranda B_4C içeren numuneden alınan SEM görüntüsü ve bu görüntü üzerinden alınan enerji dağılım spektrometresi (EDS) sonucu verilmiştir. Buna göre koyu gri renkte görülen parçacıkların B_4C'e ait olduğu analiz sunucunda anlaşılmaktadır.

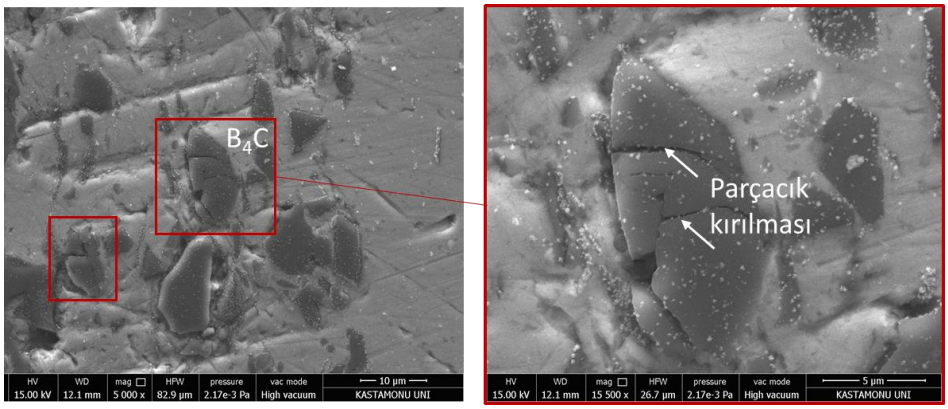


Fotoğraf 7.1. %5 oranda B_4C içeren numuneden alınan SEM görüntüsü

Fotoğraf 7.2'te parçacık oranının bir fonksiyonu olarak Al-B_4C kompozit boruların ekstrüzyon yönünde elde edilen mikro yapı görüntüleri verilmektedir. İncelenen mikroyapısal faktörler gözeneklilik, parçacık kümelenmeleri ve parçacık kırılması şeklinde 3 kategoride ele alınmıştır. Fotoğraf 7.2a, ve Fotoğraf 7.2b'de verilen mikro yapı resimlerinde yerel parçacık kümelenmelerine, mikro gözeneklere ve parçacık kırılmalarına önemli ölçüde rastlanmamıştır. Bununla birlikte B_4C parçacıklarının homojen olmayan bir dağılım sergiledikleri ve ekstrüzyon yönünde yönlendikleri de açıkça görülmektedir. Fotoğraf 7.2c ve fotoğraf 7.2d'de verilen mikro yapı resimlerinde parçacık miktarındaki artış ile birlikte bu yönlenmeler nispeten azalmış ve parçacık aglemerasyonları belirgin hale gelmiştir. Bununla birlikte B_4C parçacıklarında küçülmeler meydana gelmiştir. Bu durum ekstrüzyon işlemi sırasında uygulanan büyük kesme gerilmelerine bağlı olup, seramik parçacık kümelerinin parçalanmasına ve daha homojen bir parçacık dağılımına yol açabilir (Pakdel, Witecka, Rydzek, Shri ve Nicolosi, 2018). Fotoğraf 7.3'te verilen resimlere bakıldığında büyük boyutlu B_4C parçacıklarında yer yer kırılmalar meydana gelmiştir. Ekstrüzyon işlemi esnasında plastik deformasyona maruz kalan sünek matris ekstrüzyon kalıbı çıkışına doğru yönlenme eğiliminde iken özellikle büyük boyutlu B_4C parçacıkları plastik deformasyonu kısıtlama eğilimindedirler. Bu durumda parçacık etrafında oluşan yerel gerilmeler parçacıkların kırılma direncini aşmaktadır. Böylece olası kırılmalar meydana gelmektedir (Pakdel vd., 2018; Fard ve Akhlaghi, 2007).



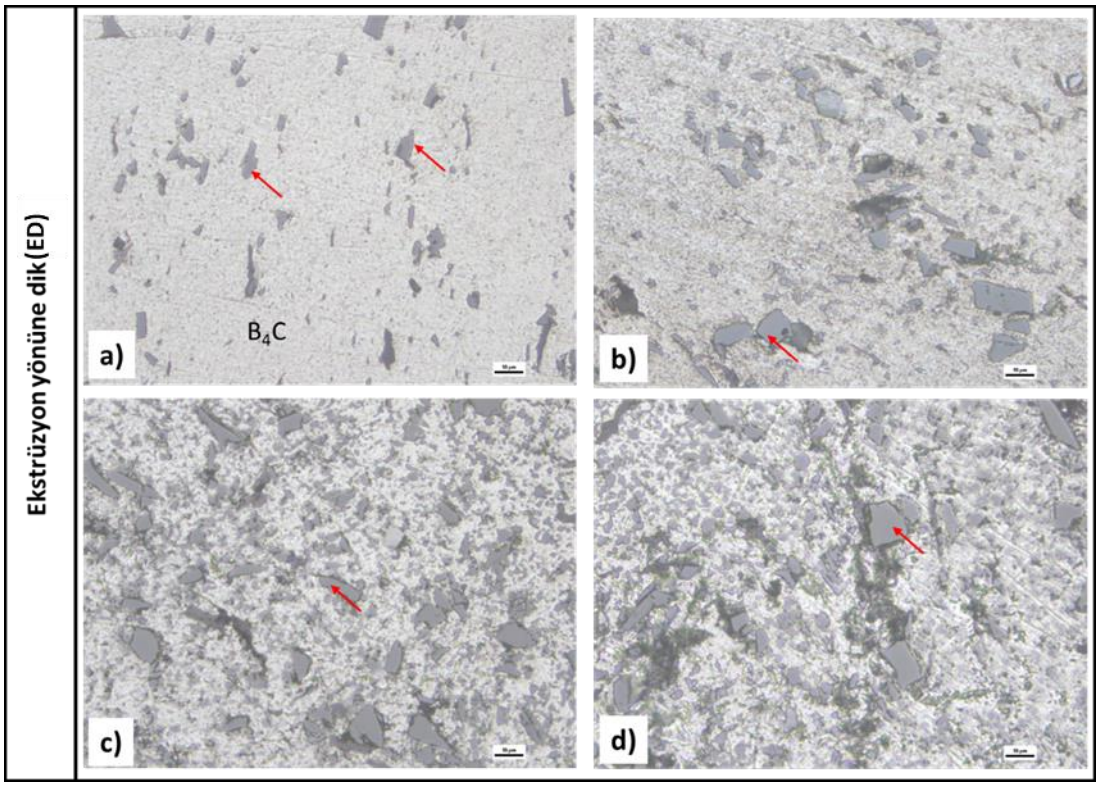
Fotoğraf 7.2. Parçacık oranının bir fonksiyonu olarak oranında Al-B_4C kompozit boruların uzunlamasına kesitlerinden elde edilen mikro yapı görüntüleri, a) %5, b) %10, c) %15, d) %20



Fotoğraf 7.3. B_4C parçacıklarında oluşan kırılmalar

Fotoğraf 7.4'te Al-B_4C kompozit boruların ekstrüzyon yönüne dik kesitlerinden elde edilen mikro yapı görüntüleri verilmektedir. Fotoğraf 7.4a'da verilen mikro yapı B_4C parçacıklarının ekstrüzyon yönünde olduğu gibi rastgele dağılım sergilediği görülmektedir. B_4C miktarındaki artışa bağlı olarak dağılım nispeten homojen hale gelmiş ise de parçacık boyutundaki dağılım farkı dikkat çekicidir (Fotoğraf 7.4

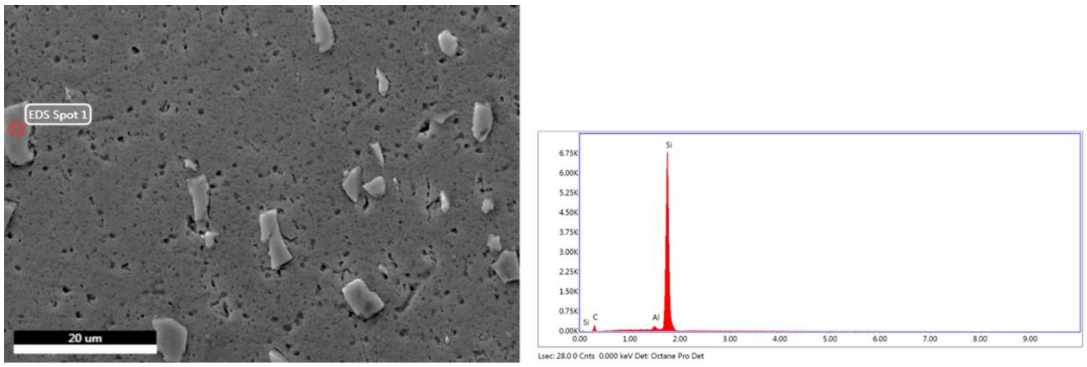
b,c,d). Daha önceden de bahsedildiği gibi bu durumun ekstrüzyon işlemi esnasında meydana gelen büyük kesme kuvvetlerinin etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte B_4C miktarındaki artış ekstrüzyon yönünde olduğu gibi parçacıkların kümelenmesine yol açmıştır. Bu durum yalnızca B_4C miktarına bağlı olmayıp ekstrüzyon işlemi esnasında deformasyon ile birlikte aşırı kesit daralmasına da bağlıdır.



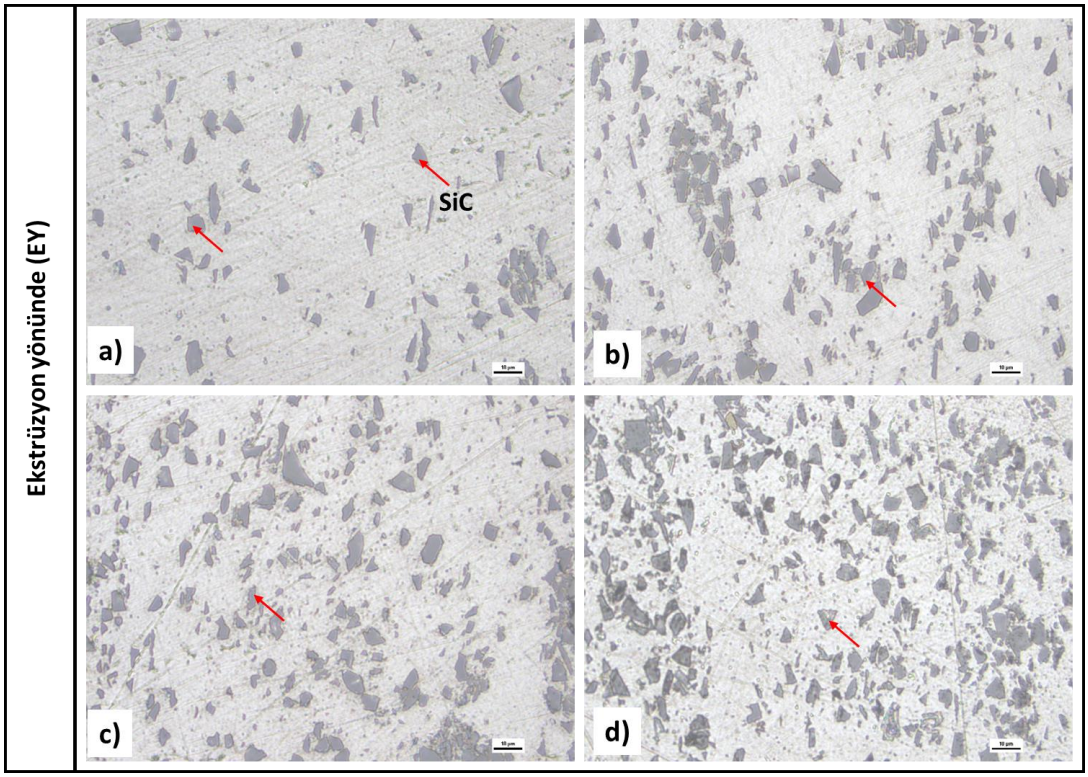
Fotoğraf 7.4. Al-B_4C kompozit boruların ekstrüzyon yönüne dik kesitlerinden elde edilen mikro yapı görüntüleri, a) %5, b) %10, c) %15, d) %20

Fotoğraf 7.5'de %5 oranda SiC içeren numuneden alınan SEM görüntüsü ve bu görüntü üzerinden alınan EDS sonucu verilmiştir. Buna göre SiC parçacığının tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Fotoğraf 7.6'da parçacık oranının bir fonksiyonu olarak Al-SiC kompozit boruların uzunlamasına kesitlerinden elde edilen mikro yapı görüntüleri verilmektedir. Elde edilen görüntülere bakıldığında SiC parçacıklarının ekstrüzyon işleminin bir sonucu olarak üretilen çubuk profilin ekseni boyunca yönlendirildiği görülmüştür. Ekstrüzyon işlemi esnasında SiC parçacıkları da Al matris malzemesi ile birlikte hareket etmeye zorlanır ve uygun şekilde parçacıklar akış yönü ile hizalanma eğilimindedir (Nair ve Karamis, 2010; Xin vd.,2017). Şahin

ve Eker (2011) tarafından yürütülen çalışmada döküm yöntemi ile üretmiş oldukları metal matrisli kompozit ürünleri sıcak ekstrüzyon ile 25 mm çapında çubuk formuna dönüştürmüşlerdir. Araştırmacılar yapmış olduğu çalışmada SiC parçacıklarının ekstrüzyon yönü boyunca yönlendirildiği gözlemlemişlerdir. Yapılan bu çalışmada ayrıca, mikro yapıda ekstrüzyon işlemi esnasında parçacıkların birbirleri ile yaklaşması sonucu band şeklinde kümelenmelerin meydana geldiği ve yönlenmelerin oluştuğu görülmektedir (Fotoğraf 7.6 c-d). Bu yönlenmeler malzemelerin anizotropik özellik sergilemelerine neden olacaktır. Başka bir ifade ile yönlenme boyunca veya yönlenmeye dik durumlarda farklı mekanik özellikler sergileyeceklerdir.

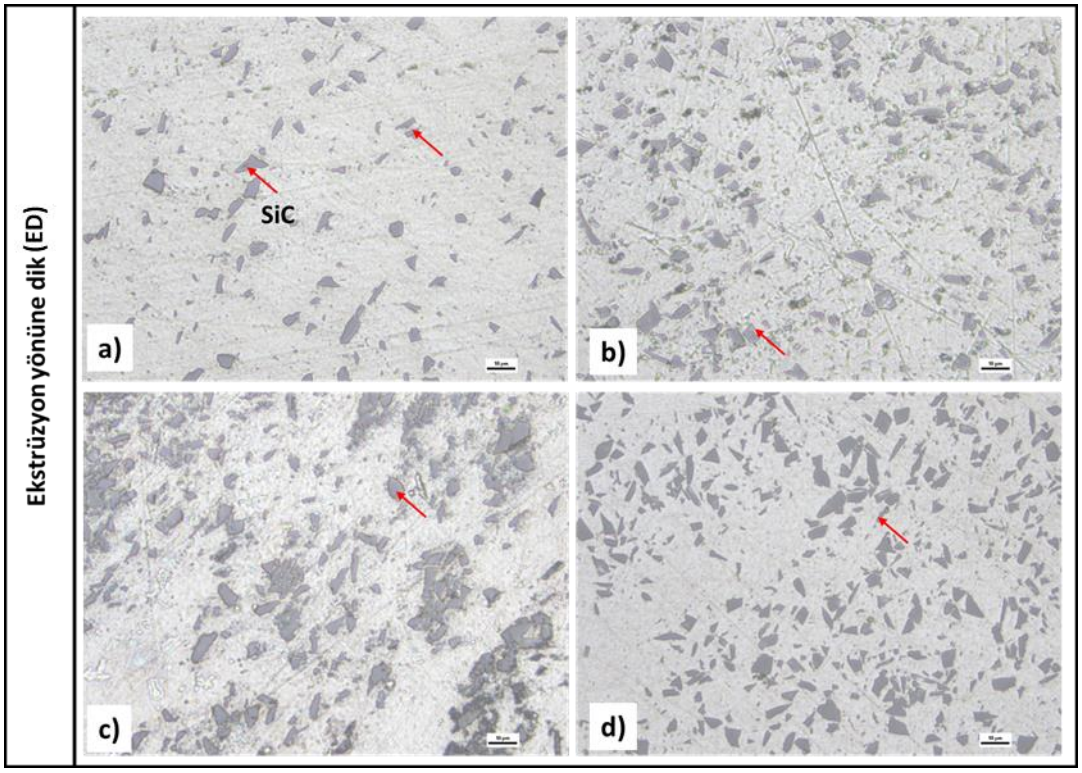


Fotoğraf 7.5. %5 oranda SiC içeren numuneden alınan SEM görüntüsü ve bu görüntü üzerinden alınan EDS sonucu



Fotoğraf 7.6. Parçacık oranının bir fonksiyonu olarak Al-SiC kompozit boruların uzunlamasına kesitlerinden elde edilen mikro yapı görüntüleri, a) %5, b) %10, c) %15, d) %20

Fotoğraf 7.7'de Al-SiC kompozit boruların ekstrüzyon yönüne dik kesitlerinden elde edilen mikro yapı görüntüleri verilmektedir. Fotoğraf 7.7a'da verilen mikro yapı SiC parçacıklarının nispeten homojen bir dağılım sergilediği görülmektedir. Buna karşın SiC miktarındaki artışa bağlı olarak yer yer parçacıklarda kümelenmeler gözlenmiştir. Fathy vd., (2014) tarafından yapılan çalışmada 8 µm parçacık boyutuna sahip Al/SiC kompozit malzemelerde SiC'ün hacimsel oranındaki artışın kümelenme konsantrasyonundaki artışa neden olduğu vurgulanmıştır. Yüksek yoğunlukta parçacık içeren numunelerin mikro yapılarına bakıldığında parçacık boyutu dağılımında belirgin bir farklılık olmadığı görülmektedir (Fotoğraf 7.7c-d).



Fotoğraf 7.7. Al-SiC kompozit boruların ekstrüzyon yönüne dik kesitlerinden elde edilen mikro yapı görüntüleri, a) %5, b) %10, c) %15, d) %20

7.3. Kompozit Profillerdeki Sertlik Değişimi

Grafik 7.2'de SiC ve B_4C takviyeli alüminyum çubuk profillere ait sertlik değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe bakıldığında her iki numune türünde parçacık miktarındaki artışa bağlı olarak sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir. Bu durum Eşitlik 7.1'de verilen karışım kuralı ile de analiz edilebilir (Kim, 2000). Bununla birlikte B_4C içeren numunelerin sertliği SiC içeren numunelere kıyasla yüksek çıkmıştır. Parçacık içermeyen saf alüminyum profillerin sertliği 39,4 Hv olarak ölçülmüştür. Bu değer ED ve EY yönleri için değişmemiştir.

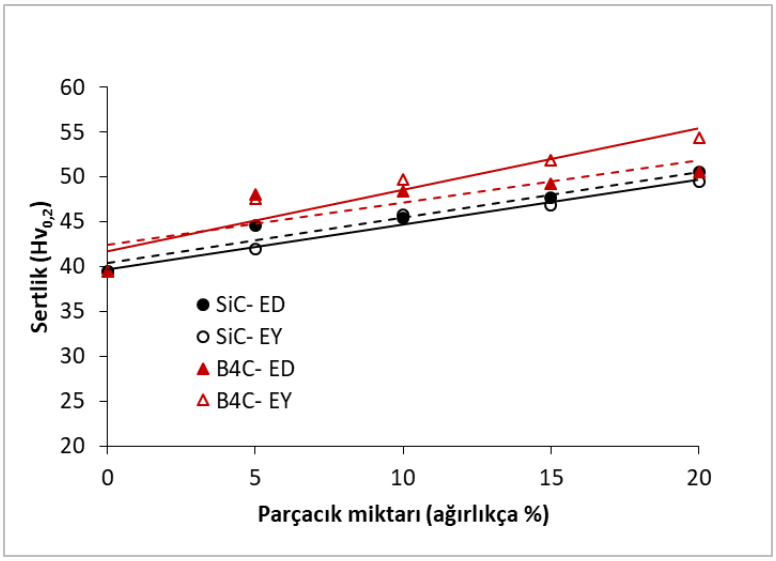
$$H_c = H_m f_m + H_r f_r \tag{7.1}$$

H_r, H_m ve H_c takviye, matris ve kompozitin sertliğidir. f_r ve f_m sırasıyla takviye ve matrisin hacim oranıdır.

ED yönünde %5 oranında parçacık içeren numuneler karşılaştırıldığında B_4C içeren numunelerin sertliği 48 Hv iken SiC içeren numunelerin sertliği ise 44,6 Hv'dir. Her iki numune arasındaki oransal fark %7,6 dır. Bu oransal fark parçacık miktarındaki artış ile birlikte azalmaktadır. %10 oranda parçacık içeren numuneler için B_4C takviyeli numunelerin sertliği 48,4 Hv iken SiC takviyeli numunelerin sertliği ise 45,4 Hv'dir. % 15 ve %20 oranlarında parçacık içeren numunelerde B_4C için elde edilen sertlik değerleri sırasıyla 49,3 Hv ve 50,6 Hv iken SiC takviyeli numuneler için sırasıyla 47,7 Hv ve 50,5 Hv'dir. Numuneler arasındaki oransal sertlik değişimi sırasıyla %3,3 ve % 0,2'dir.

EY yönünde %5 oranında parçacık içeren numuneler karşılaştırıldığında B_4C içeren numunelerin sertliği 47,6 Hv iken SiC içeren numunelerin sertliği ise 42 Hv'dir. Her iki numune arasındaki oransal fark %13,3'tür. %10 oranda parçacık içeren numuneler için B_4C takviyeli numunelerin sertliği 49,7 Hv iken SiC takviyeli numunelerin sertliği ise 45,8 Hv'dir. % 15 ve %20 oranlarında parçacık içeren numunelerde B_4C için elde edilen sertlik değerleri sırasıyla 51,9 Hv ve 54,4 Hv iken SiC takviyeli numuneler için sırasıyla 46,9 Hv ve 49,5 Hv'dir. Numuneler arasındaki oransal sertlik değişimi sırasıyla %10,6 ve % 9,9'dur.

Her iki numune türünde ED ve EY yönlerindeki sertlik değerleri karşılaştırıldığında önemli bir farkın olmadığı görülmektedir. Esasında ekstrüzyon yönünden ziyade parçacık oranındaki değişim sertlik değerlerine etki etmiştir (Ünlü, 2008; Fathy, Sadoun, Abdelhameed, 2014). El-Kady ve Fathy, (2014) matris içinde yeralan yüksek miktardaki seramik parçacıkların dislokasyon hareketine engel olduğunu ve bunun sonucunda kompozitin sertliğinin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca sertlik artışındaki olası sebepler iki farklı perspektif ile açıklanabilir. Birincisi parçacık oranının artmasıyla ekstrüzyon işlemi sırasında kesme kuvvetlerine maruz kalan parçacıkların kırılarak boyutlarının küçülmesi ve bu sayede yumuşak faz ile sert faz arasındaki ara yüzey alanının artmasıdır (Rahimian, Ehsani, Parvin ve Baharvandi, 2009). İkincisi ise iri taneli parçacıklardaki yapısal kusurların ince taneliye göre daha fazla olması durumunda kırılma eğiliminlerinin artmasıdır (El-Kady vd., 2013).



Grafik 7.2. SiC ve B_4C takviyeli alüminyum çubuk profillere ait sertlik değişim grafiği

7.4. Kompozit Profillerin Ezilme Davranışı

Üretilen profil numuneler 4 farklı boy/çap (L/D) oranında kesilerek ezilme davranışlarının belirlenmesi için 3 mm/dak deformasyon hızında basma testlerine tabii tutulmuştur. Bu çalışmada, ezilme parametrelerinin büyüklükleri kuvvet-deplasman eğrilerinden hesaplanmıştır. Bilindiği kadarıyla, enerji emilimi (E), ortalama ezilme kuvveti (F_{ort}) ve spesifik enerji absorbesi (SEA), ezilme değerini değerlendirmede önemli göstergeler olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Yin,Wen, Hou, ve Chen, 2011). Bir yapının enerji emilimi (E) şu şekilde hesaplanabilir:

$$E(d) = \int_0^d F(x)dx \tag{7.2}$$

Burada *d*, ezilme mesafesi ve *F(x)* ezilme kuvvetini göstermektedir. Belirli bir deformasyon için ortalama kuvvet aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$F_{ort} = \frac{E(d)}{d} \tag{7.3}$$

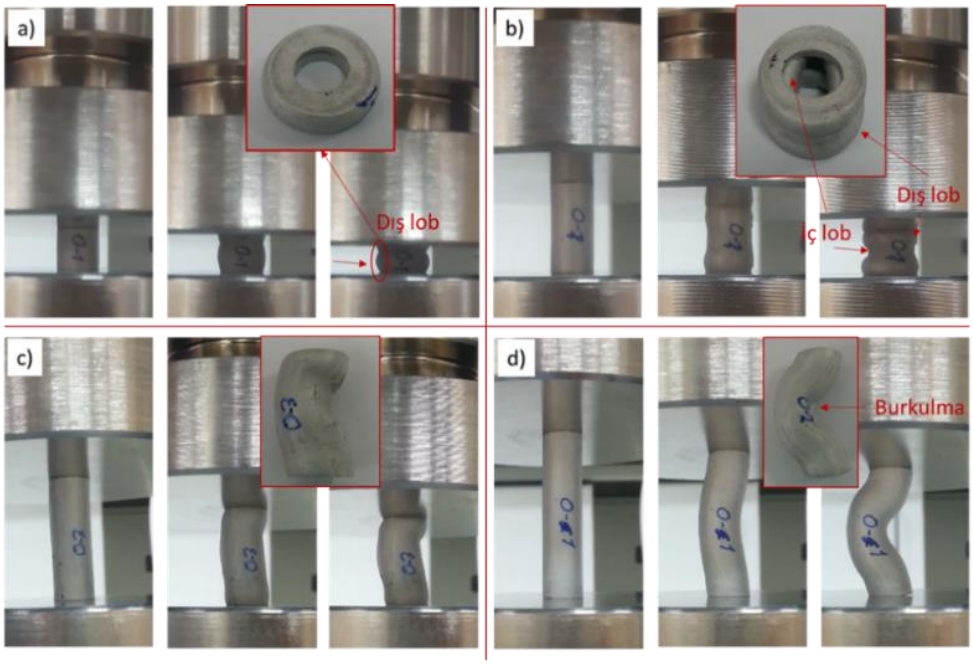
SEA, emilen enerjinin yapının kütlesine oranı olarak tanımlanır. Yani şöyle yazılabilir:

$$SEA(d) = \frac{E(d)}{M} \quad (7.4)$$

Burada *M*, yapının tüm kütlesini temsil eder. Yapı, *SEA*'sı yüksek olduğunda iyi bir enerji emme kapasitesine sahiptir.

7.4.1. Saf Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı

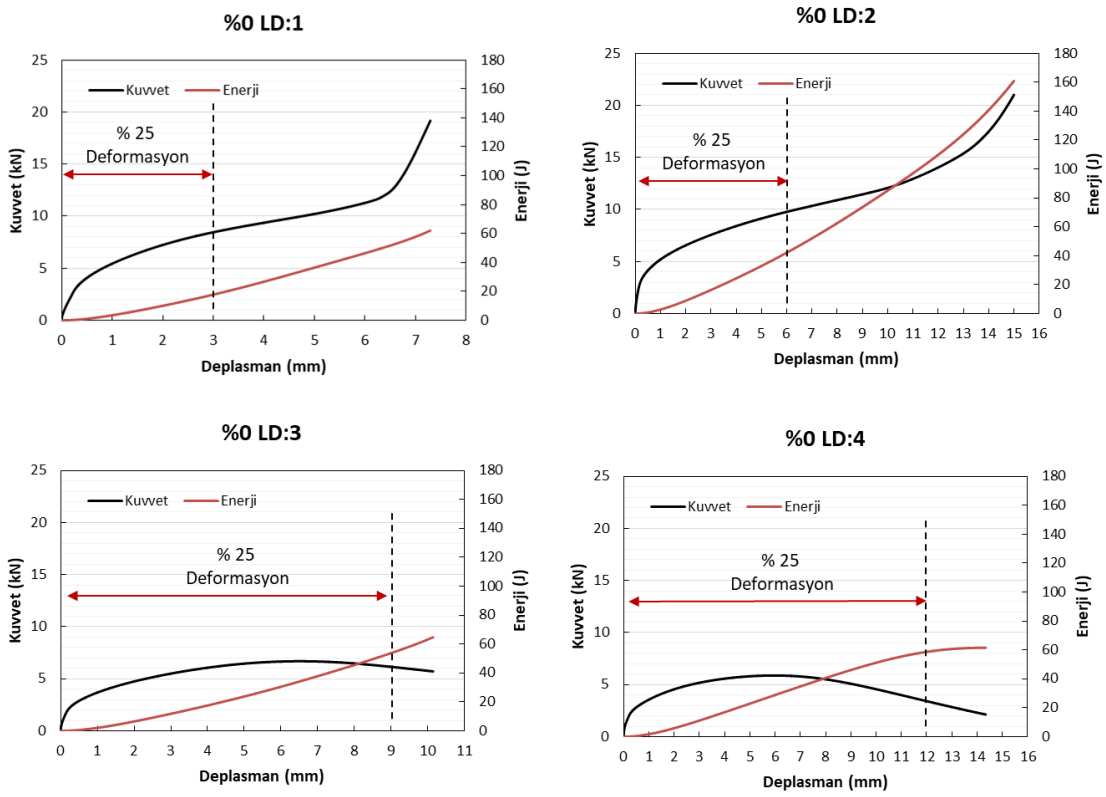
Yarı statik sıkıştırma koşulları altında farklı L/D oranlarına sahip saf Al profillerin deformasyon modları Fotoğraf 7.8'de gösterilmiştir. Genel olarak, artan profil uzunluğu ile birlikte simetrik halka modundan, asimetrik elmas moda ve Euler moduna ardışık olarak değişen bir eğilim söz konusudur. Parçacık içermeyen L/D:1 oranına sahip Al profilde büzülme deformasyonu nedeniyle tek bir lob oluşmuştur. Fotoğraf 7.8a'daki fotoğrafta gösterildiği gibi, dış lob içi boş profilin orta kısmında oluşmaya başlamıştır. Profil uzunluğu boyunca yalnızca tek düzenli katlanma meydana gelmiştir (Halka modu). L/D:2 oranına sahip numunede dış lob oluşumu profilin bitişik yüzeylerinde başlamışken iç lob ise numune ortasında oluşmuştur. Bu lob artan deformasyonla birlikte sıkıştırma sırasında iki karşılıklı dik doğrultularda eliptik şekilde katlanmayla sonuçlanmıştır (Fotoğraf 7.8b-Elmas mod). L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde ise herhangi bir lob oluşumu görülmemiştir (Fotoğraf 7.8c-d). Bu oluşumdan ziyade numunelerin orta kısımlarında deformasyon ekseninde burkulma (Euler modu) meydana gelmiştir (Guillow, Lu ve Grzebieta, 2001). Deformasyon sürecinde numune yüzeylerinde herhangi bir çatlağa rastlanmamıştır. Sıkıştırma sırasında, Euler burkulma modunu sergileyen profiller hariç tüm profiller katı sıkıştırma şeklinde davranış sergilemişlerdir.



Fotoğraf 7.8. Yarı statik sıkıştırma koşulları altında farklı L/D oranlarına sahip saf Al profillerin deformasyon modları, a) Halka modu L/D:1,b) Elmas modu L/D:2, c-d) L/D:3 ve L/D:4 Euler Modu

Yarı statik test koşulları altında saf alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri Grafik 7.3'te verilmiştir. Bu eğrilerin daha önce tartışılan deformasyon modlarıyla ilişkili yapıların türüne bağlı olarak farklı şekillerde olduğu Fotoğraf 7.8'de açıkça gösterilmektedir. L/D:3 ve L/D:4 oranlarına sahip numunelerin yük deplasman eğrilerinin L/D:1 ve L/D:2 oranlarına sahip numuneler ile karşılaştırıldığında belirgin bir farkın olduğu görülmektedir. L/D:1 oranına sahip numunelerin yük deplasman eğrisinde tek bir katlanmadan dolayı değişken genlikli dalgalanma görülmemiştir. Bunun yerine daha stabil yük –deplasman eğrisi elde edilmiştir. Benzer durum diğer numuneler için elde edilen eğrilerde de görülmektedir. Fakat L/D:3 ve L/D:4 oranlarına sahip numunelerin yük deplasman eğrilerinde deney esnasında sıkıştırma kuvveti maksimum değerine hızla yükselmiş ve sonrasında yavaş yavaş azalmıştır. İnce duvarlı alüminyum tüplerin ezilme davranışlarında elde edilen yük deplasman eğrileri değişken genlikle dalgalanmalar sergilemektedir. Bu dalgalanmalar tüplerin dış çeperlerinin katlanma formuna göre değişkenlik göstermektedir (Li vd., 2018). %25 deformasyon oranında L/D:1 oranına sahip numunelerde 8,45 kN'luk basma kuvvetti elde edilmiştir. Aynı deformasyon oranına sahip diğer numunelerde ise bu değerler farklılık göstermektedir. L/D:2 oranına sahip numunelerde 9,77 kN, L/D:3 oranına sahip numunelerde 6,15 kN ve L/D:4 oranına sahip numunelerde 3,42

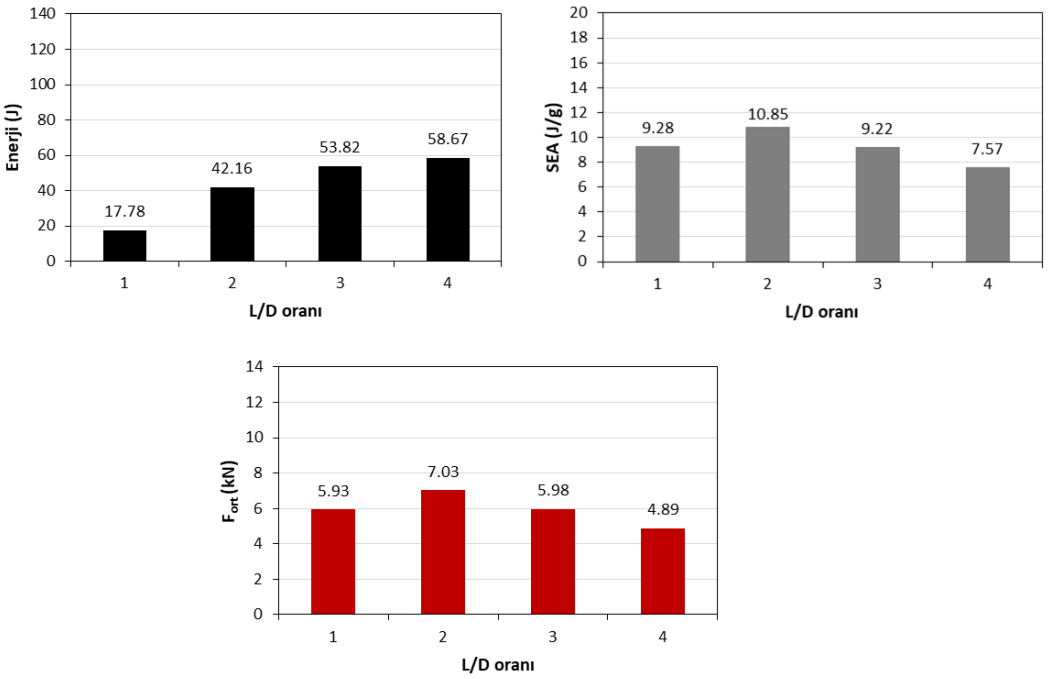
kN'luk basma kuvveti elde edilmiştir. L/D:3 ve L/D:4 oranındaki numunelerde maksimum kuvvete ulaştıktan sonra tekrardan azalma eğilimi gözlenmektedir. Bu durum burkulma kaynaklıdır. L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde maksimum kuvvet sırasıyla 6.68 kN ve 5.88 kN'dur. Bu değerler L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde %18 ve %12 deformasyon oranına karşılık gelmektedir. Daha fazla deformasyon miktarı basma kuvvetlerinde azalmaya yol açmaktadır. Bundan dolayı elde edilen bütün verileri karşılaştırmak için optimum deformasyon oranı olarak %25 belirlenmiştir.



Grafik 7.3. Saf alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri

Grafik 7.4'te L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen enerji (E), ortalama kuvvet (F_{ort}) ve spesifik enerji absorbe (SEA) grafikleri verilmiştir. Enerji grafiğine bakıldığında L/D oranındaki artışa bağlı olarak absorbe edilen enerji miktarıda artmıştır. Maksimum enerji değeri 58,67 J ile L/D:4 oranında elde edilmiştir. Alüminyum profillerin boyutsal oranı maksimum 4 kat iken enerji sönümleme değerleri arasındaki fark yaklaşık 3,3 kat kadardır. Spesifik enerji absorbe (SEA) değerlerine bakıldığında ise belirgin bir farklılık mevcuttur. Bu fark

L/D:2 oranına sahip numunede dikkat çekicidir. Maksimum SEA değeri 10,85 J/g ile bu numunede elde edilmiştir. Bu farkın deformasyon modundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıkıştırma esnasında profilin bitişik yüzeylerinde başlayan dış lop artan deformasyonla birlikte orta kısımda oluşan iç lob ile eliptik şekilde katlanma sergilemiştir. Maksimum F_{ort} değeri, SEA grafiğinde olduğu gibi L/D:2 oranına sahip numunede elde edilmiştir.

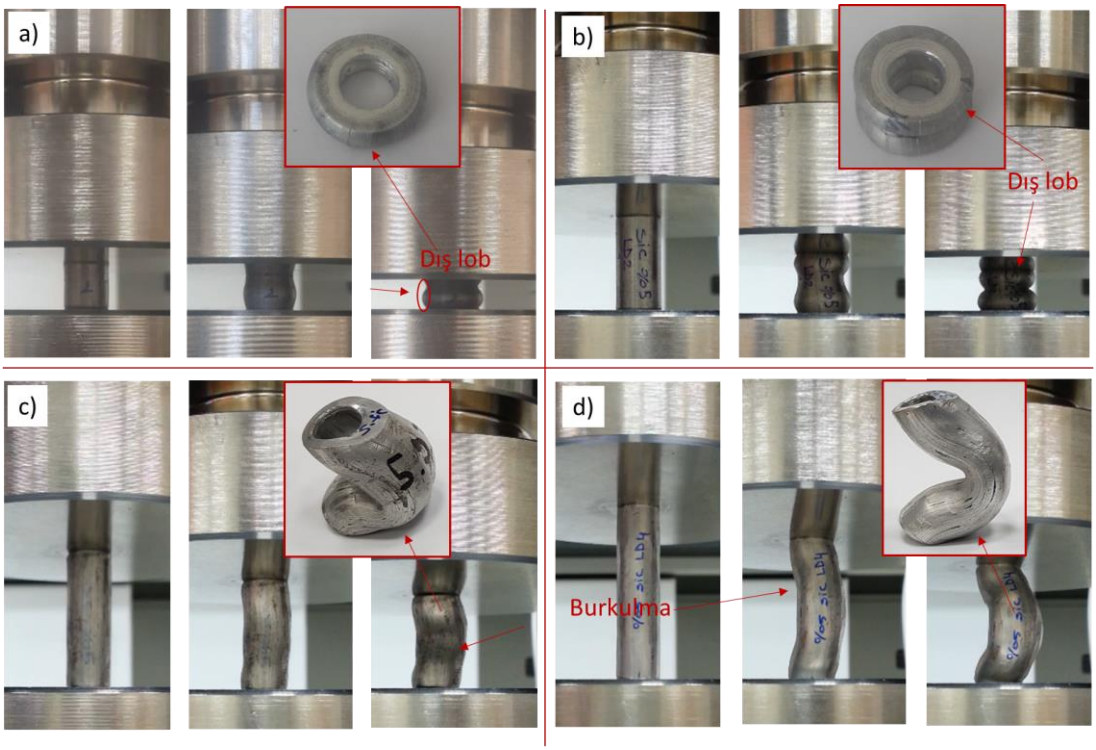


Grafik 7.4. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için saf Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri

7.4.2. %5 SiC Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı

Yarı statik sıkıştırma koşulları altında farklı L/D oranlarına sahip %5 SiC içeren Al profillerin deformasyon modları Fotoğraf 7.9'da gösterilmiştir. Saf Al profillerin deformasyon davranışına benzer şekilde artan profil uzunluğu ile birlikte simetrik halka modundan, asimetrik elmas moda ve Euler moduna ardışık olarak değişen bir eğilim söz konusudur. Fotoğraf 7.9a'daki fotoğrafta gösterildiği gibi, L/D:1 oranına sahip Al profilde dış lob içi boş profilin orta kısmında oluşmaya başlamıştır (Halka modu). L/D:2 oranına sahip numunelerde dış lob oluşumu saf Al profillerde olduğu gibi profilin bitişik yüzeylerinde başlamış ve deformasyon her iki lobun bir biri

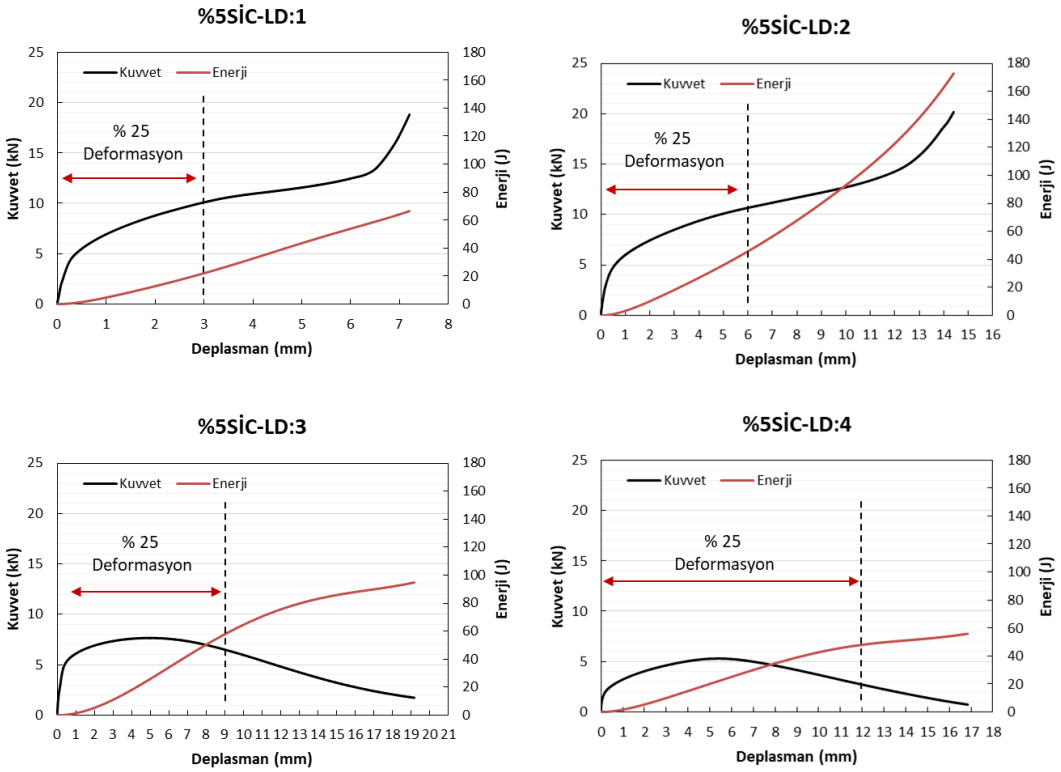
üzerinde katlanması ile sonlanmıştır (Fotoğraf 7.9b-Elmas mod). L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde ise herhangi bir lob oluşumu görülmemiştir (Fotoğraf 7.9 c-d). Bu oluşumdan ziyade numunelerin orta kısımlarında deformasyon ekseninde burkulma (Euler modu) meydana gelmiştir.



Fotoğraf 7.9. Yarı statik sıkıştırma koşulları altında farklı L/D oranlarına sahip %5 SiC takviyeli Al profillerin deformasyon modları, a) Halka modu L/D:1,b) Elmas modu L/D:2, c-d) L/D:3 ve L/D:4 Euler Modu

Yarı statik test koşulları altında %5 SiC takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri Grafik 7.5'te verilmiştir. Saf alüminyum profilin ezilme davranışına benzer bir deformasyon davranışı sergileyen SiC takviyeli alüminyum profil, L/D oranındaki değişime bağlı olarakta benzer davranış sergilemiştir. L/D:1 ve L/D:2 oranına sahip numunelerin yük deplasman eğrisinde kuvvet artışı sürekli iken L/D:3 ve L/D:4 oranlarına sahip numunelerin yük deplasman eğrilerinde deney esnasında sıkıştırma kuvveti maksimum değerine hızla yükselmiş ve sonrasında yavaş yavaş azalmıştır. Her dört numune türünde elde edilen kuvvet deplasman eğrilerinde değişken genlikle dalgalanmalar gözlenmemiştir. %25 deformasyon oranında L/D:1 oranına sahip numunelerde 10,09 kN'luk basma kuvveti elde edilmiştir. Aynı deformasyon oranına sahip diğer numunelerde ise bu değerler

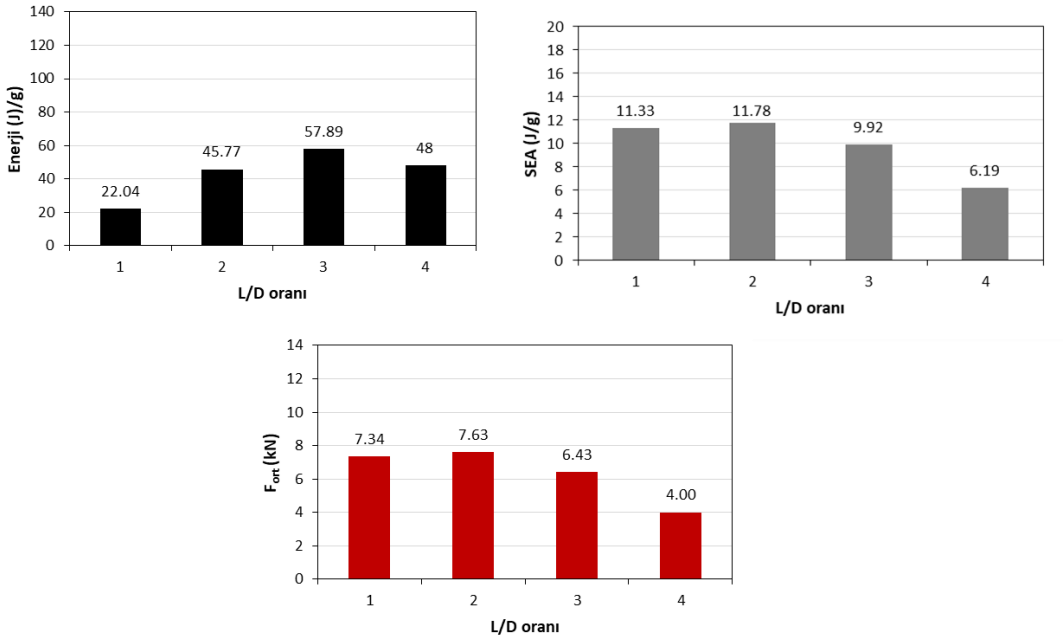
farklılık göstermektedir. L/D:2 oranına sahip numunelerde 10,67 kN, L/D:3 oranına sahip numunelerde 6,50 kN ve L/D:4 oranına sahip numunelerde 2,72 kN'luk basma kuvveti elde edilmiştir. L/D:3 ve L/D:4 oranındaki numunelerde maksimum kuvvete ulaştıktan sonra tekrardan azalma eğilimi gözlenmektedir. L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde maksimum kuvvet sırasıyla 7,66 kN ve 5,30 kN'dur. Bu değerler L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde %14 ve %11 deformasyon oranına karşılık gelmektedir. Daha fazla deformasyon miktarı basma kuvvetlerinde azalmaya yol açmaktadır.



Grafik 7.5. %5 SiC takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri

Grafik 7.6 'da %5 SiC içeren alümünyum profile ait L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen E, F_{ort} ve SEA grafikleri verilmiştir. Enerji grafiğine bakıldığında L/D:3 oranına kadar absorbe edilen enerji miktarı da artmış ve sonrasında azalmıştır. Maksimum enerji değeri 57,89 J ile L/D:3 oranında elde edilmiştir. Spesifik enerji absorbe (SEA) değerlerine bakıldığında ise belirgin bir farklılık mevcuttur. Bu fark L/D:2 oranına sahip numunede dikkat çekicidir. Maksimum SEA değeri 11,78 J/g ile bu numunede elde edilmiştir. Sıkıştırma esnasında profilin bitişik yüzeylerinde başlayan dış lop artan deformasyonla birlikte

orta kısımda oluşan iç lob ile eliptik şekilde katlanma sergilemiştir. Maksimum F_{ort} değeri, SEA grafiğinde olduğu gibi L/D:2 oranına sahip numunede elde edilmiştir. L/D:1 ve L/D:2 oranlarına sahip numunelerin F_{ort} değeri ve SEA değerleri arasında önemli bir farklılık meydana gelmemiştir.

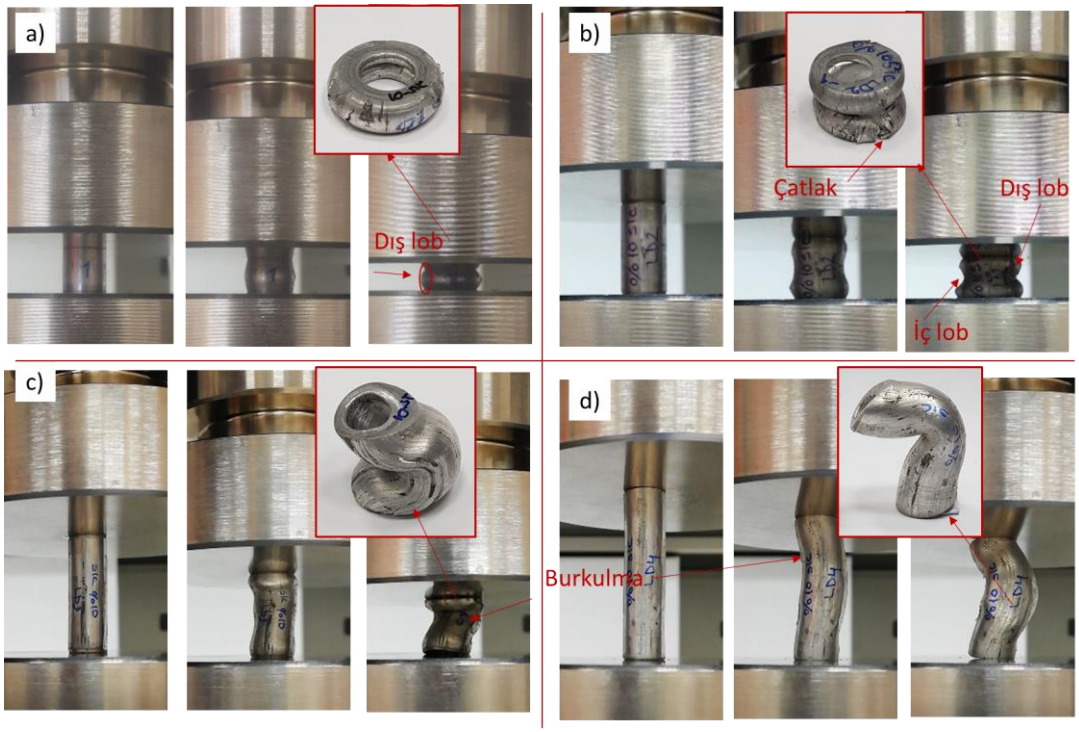


Grafik 7.6. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %5 SiC takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri

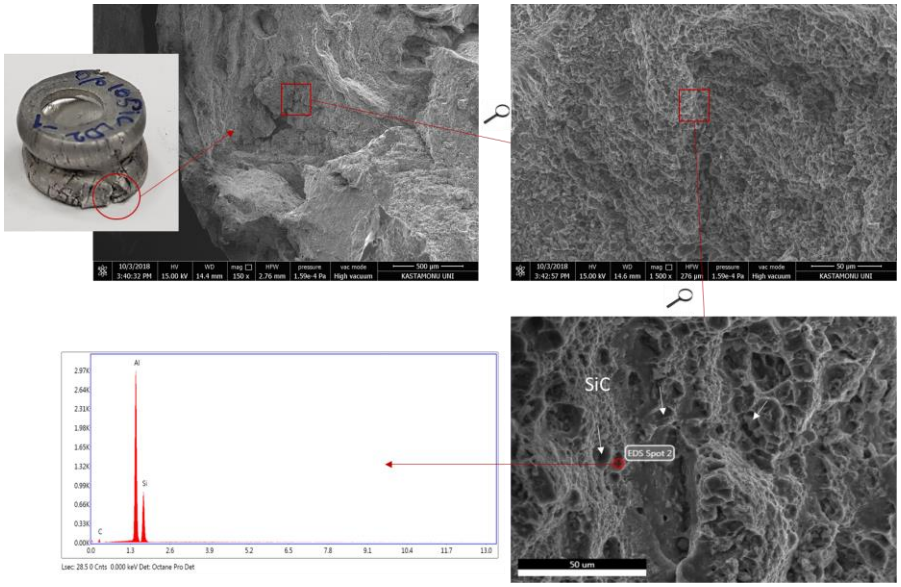
7.4.3. %10 SiC Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı

Fotoğraf 7.10'da %10 SiC içeren Al profillerin deformasyon davranışları gösterilmiştir. Fotoğraf 7.10a'ya bakıldığında artan deformasyon ile birlikte profil yüzeyinde dış lop oluşmuştur. Gerilim % 60 seviyelere geldiğinde ise dış lop üzerinde çatlak oluşumu gözlenmiştir. Profil uzunluğu boyunca yalnızca tek düzenli katlanma meydana gelmiştir (Halka modu). Fotoğraf 7.10b'de verilen L/D:2 oranına sahip numunelerde parçacık içermeyen ve %5 SiC içeren profillerin deformasyon davranışına benzer oluşum meydana gelmiştir. Sıkıştırma sırasında iki karşılıklı dik doğrultularda eliptik şekilde katlanma meydana gelmiştir. Fakat alt lop üzerinde gerilim yığılmaları neticesinde çatlaklar oluşmuştur (Fotoğraf 7.11). Bu durum parçacık miktarındaki artışa bağlı olarak daha belirgin hale gelmiştir. L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde ise herhangi bir lob oluşumu görülmemiştir (Fotoğraf

7.10 c-d). Bu oluşumdan ziyade numunelerin orta kısımlarında deformasyon ekseninde düzensiz burkulma (Euler modu) meydana gelmiştir.

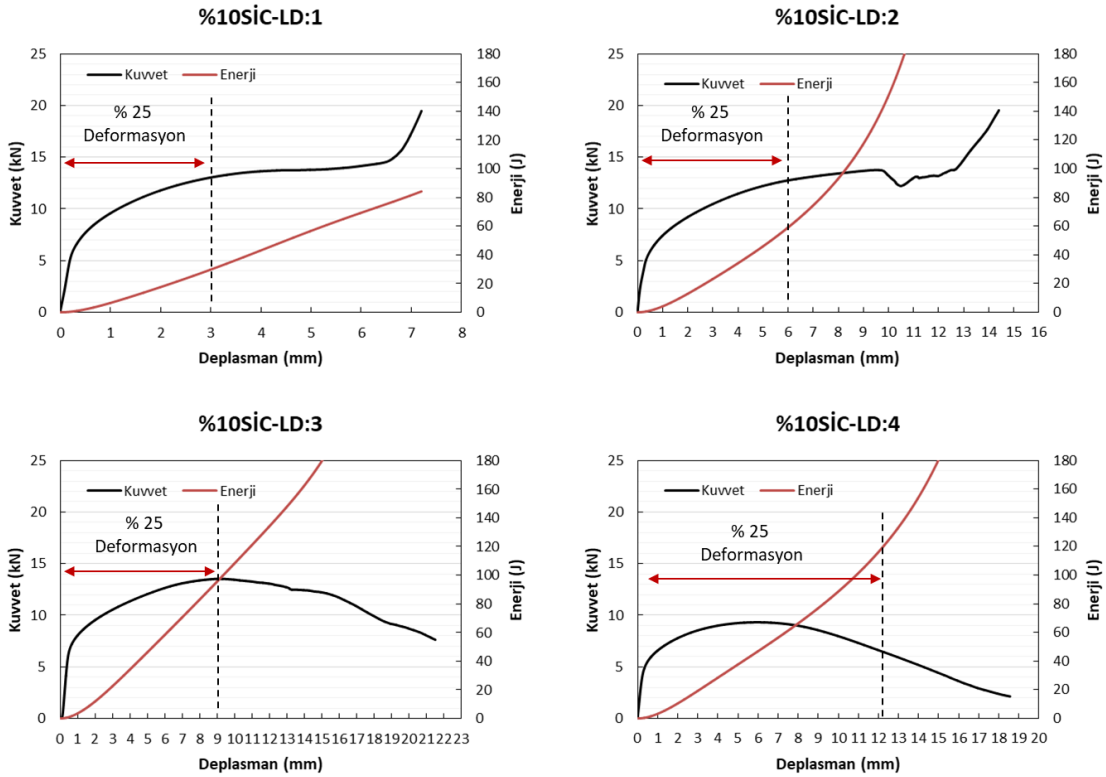


Fotoğraf 7.10. %10 SiC içeren Al profillerin deformasyon davranışları, a) Halka modu L/D:1,b) Elmas modu L/D:2, c-d) L/D:3 ve L/D:4 Euler Modu



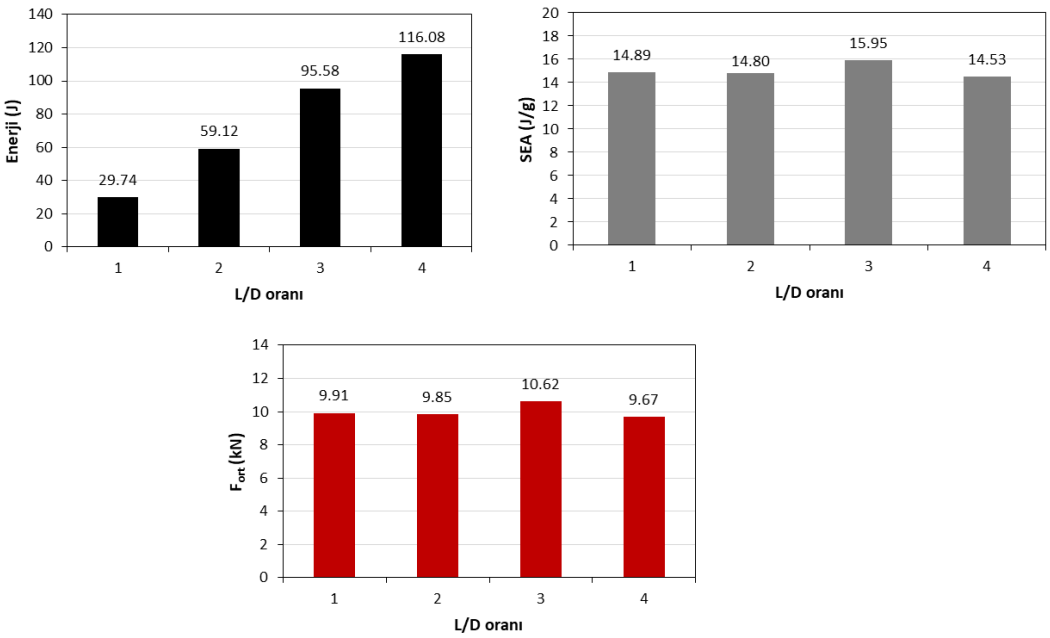
Fotoğraf 7.11. Alt lop üzerinde gerilim yığılmaları neticesinde oluşan çatlaklar

%10 SiC takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri Grafik 7.7'de verilmiştir. Grafiklere bakıldığında her dört numune türü için değişken genlikte dalgalanmalar gözlenmemiştir. Ancak L/D:2 oranına sahip numunede yaklaşık %42 oranında deformasyon sonucu meydana gelen gevrek yırtılma kuvvetin ani düşmesine neden olmuştur. Akabinde artan deformasyon ile birlikte numune katı cisim gibi davranış sergileyerek kuvvette artış meydana gelmiştir. L/D:3 oranına sahip numunelerde kuvvet azalması simetrik olmayan burkulma kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bu numuneler için burkulmanın meydana geldiği deformasyon oranı yaklaşık %25 tir. L/D:3 oranına sahip numunelerde ise daha düşük deformasyon oranlarında burkulma meydana gelmiştir. Bu oran yaklaşık %13 seviyelerindedir. %25 deformasyon oranında L/D:1 oranına sahip numunelerde 13,03 kN'luk basma kuvveti elde edilmiştir. Aynı deformasyon oranına sahip diğer numunelerde ise bu değerler farklılık göstermektedir. L/D:2 oranına sahip numunelerde 12,76 kN, L/D:3 oranına sahip numunelerde 13,52 kN ve L/D:4 oranına sahip numunelerde 7,61 kN'luk basma kuvveti elde edilmiştir.



Grafik 7.7. %10 SiC takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri

Grafik 7.8'de %10 SiC içeren alümünyum profile ait L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen E, F_{ort} ve SEA grafikleri verilmiştir. Enerji grafiğine bakıldığında L/D oranındaki artışa bağlı olarak absorbe edilen enerji miktarıda artmıştır. Benzer eğilim saf Al profiller içinde geçerlidir. Maksimum enerji değeri 116.08 J ile L/D:4 oranında elde edilmiştir. Alüminyum profillerin boyutsal oranı maksimum 4 kat iken enerji sönümleme değerleri arasındaki fark yaklaşık 3,9 kat kadardır. SEA değerlerine bakıldığında numuneler arasında önemli bir fark görülmemektedir. Maksimum SEA değeri 15,95 J/g ile L/D:3 oranına sahip numunede elde edilmiştir. Minimum SEA değeri ise 14,53 J/g ile L/D:4 oranına sahip numunede elde edilmiştir. F_{ort} değerine bakıldığında ise L/D oranlarındaki artışa bağlı olarak düşüş gözlemlenmiştir. L/D:4 oranına sahip numunede 4 kN'luk F_{ort} değeri elde edilmişken maksimum değer L/D:2 oranına sahip numunede 7,63 kN ile elde edilmiştir.

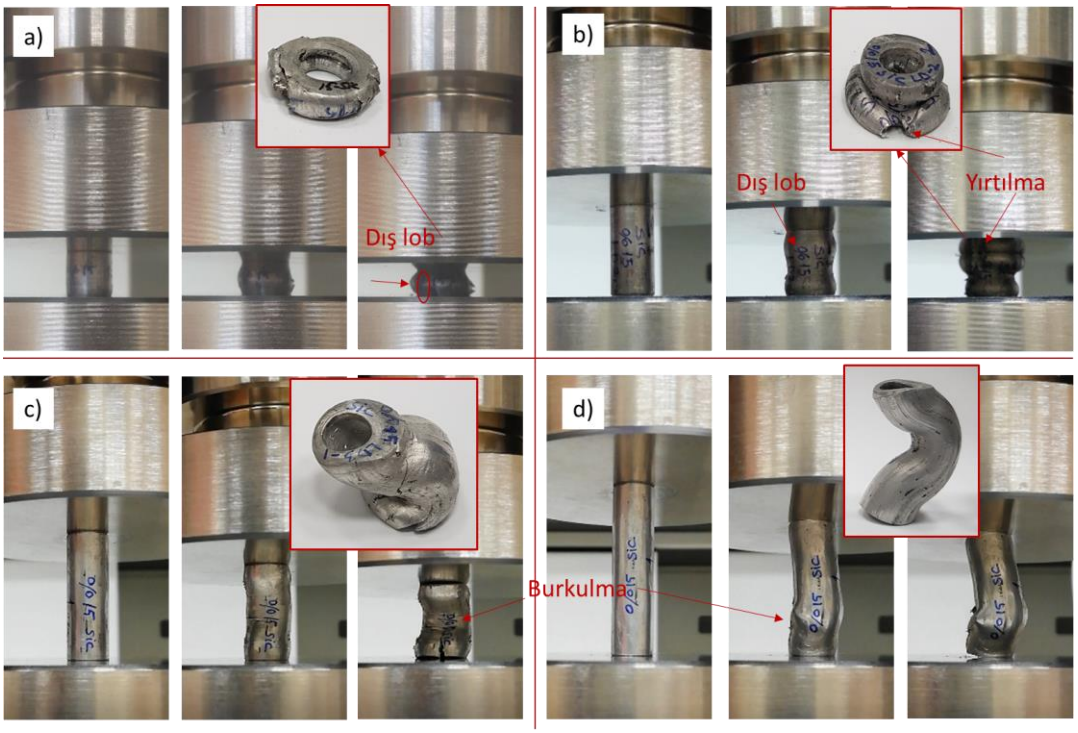


Grafik 7.8. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %10 SiC takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri

7.4.4. %15 SiC Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı

Fotoğraf 7.12'de %15 SiC içeren Al profillerin deformasyon davranışları gösterilmiştir. Resimlere bakıldığında basma gerilmelerine maruz kalan tüm numunelerde çatlak oluşumu gözlenmiştir. Fotoğraf 7.12a'da verilen L/D:1 oranına

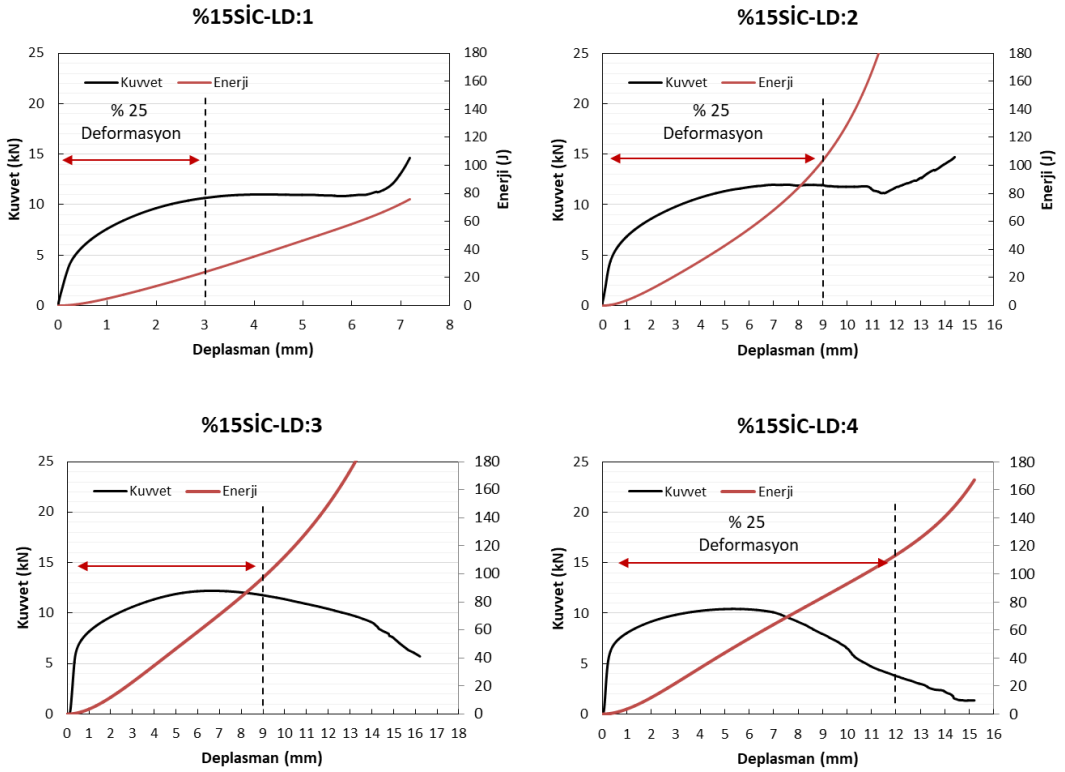
sahip numunede deformasyon sonrası parçacık oranının artışı kaynaklı dış lopta belirgin çatlaklar meydana gelmiştir. Bu durum parçacık miktarındaki artış ile gevrekliğin artışından kaynaklanmaktadır. L/D:2 oranına sahip numunede elmas mod şeklinde deformasyon meydana gelmiş olsa da üst lob üzerinde yırtılma meydana gelmiştir. Numune boyutundaki artış (L/D:3 ve L/D:4) ile birlikte bu yırtılmalar deformasyon boyunca gerilme yığılmalarının oluştuğu bölgelere doğru ilerlemiştir.



Fotoğraf 7.12. %15 SiC içeren Al profillerin deformasyon davranışları, a) L/D:1,b) L/D:2, c) L/D:3 ve d) L/D:4

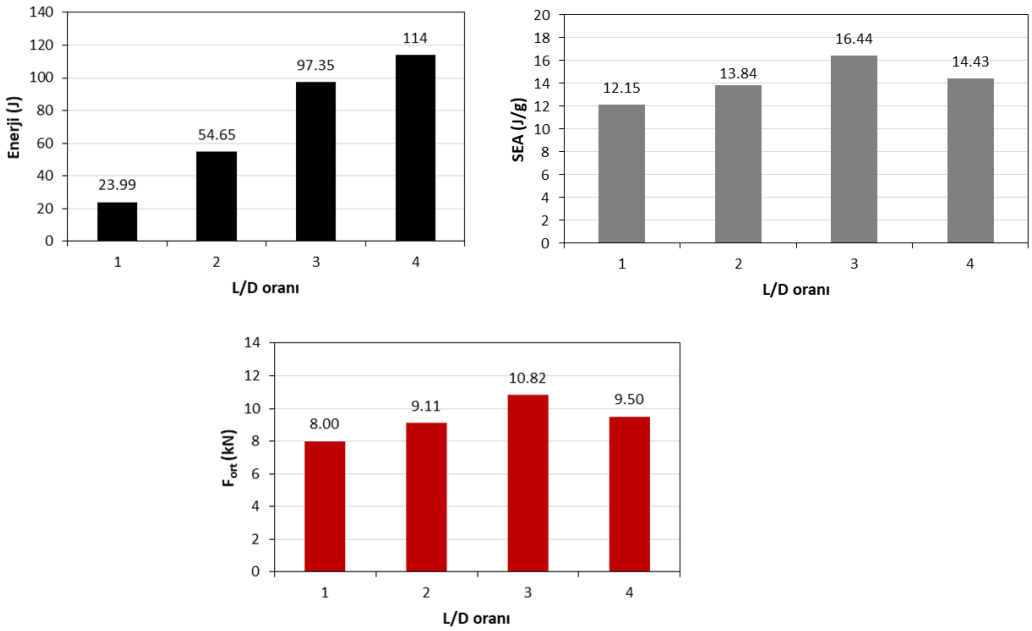
%15 SiC takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri Grafik 7.9'da verilmiştir. Elde edilen eğriler Saf Al, % 5 SiC ve 10 SiC içeren profillerin kuvvet deplasman eğrileri ile benzerlik sergilemektedir. %25 deformasyon oranında L/D:1 oranına sahip numunelerde 10.66 kN'luk basma kuvvetti elde edilmiştir. Aynı deformasyon oranına sahip diğer numunelerde ise bu değerler farklılık göstermektedir. L/D:2 oranına sahip numunelerde 11.74 kN, L/D:3 oranına sahip numunelerde 11.77 kN ve L/D:4 oranına sahip numunelerde 3.77 kN'luk basma kuvveti elde edilmiştir. L/D:3 ve L/D:4 oranındaki numunelerde maksimum kuvvete ulaştıktan sonra tekrardan azalma eğilimi gözlenmektedir. L/D:3 ve L/D:4 oranına

sahip numunelerde maksimum kuvvet sırasıyla 12.21 kN ve 9,31 kN'dur. Bu değerler L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde %19.19 ve %10.72 deformasyon oranına karşılık gelmektedir.



Grafik 7.9. %15 SiC takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri

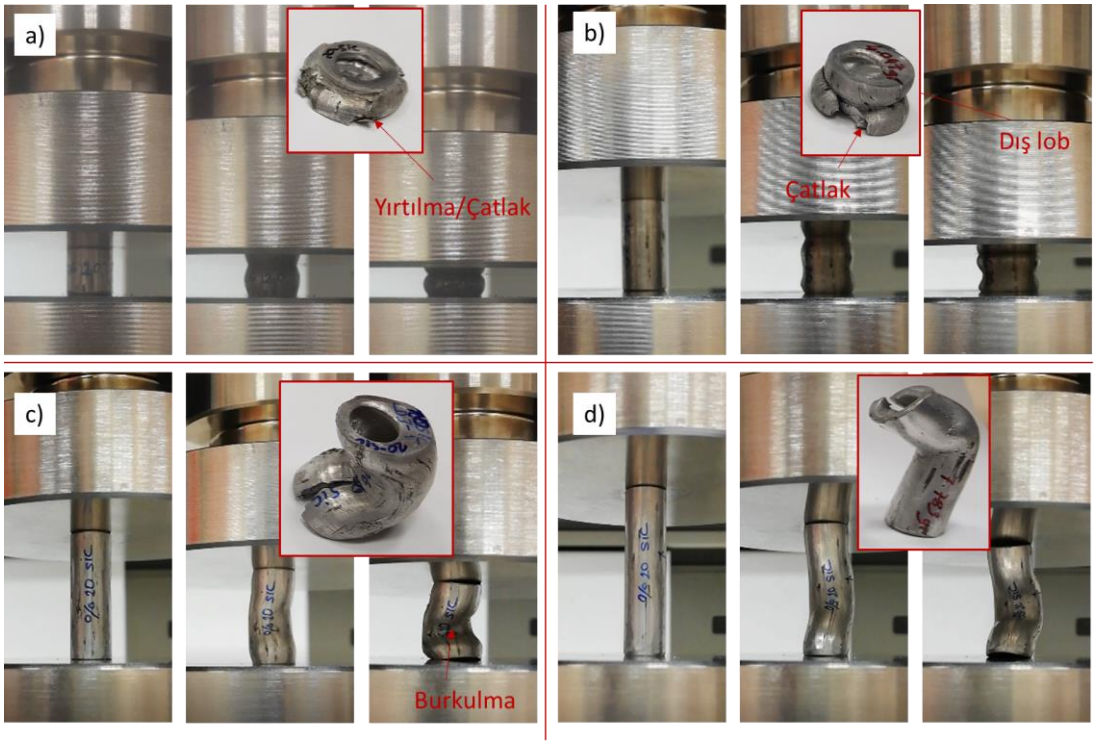
Grafik 7.10'da %15 SiC içeren alümünyum profile ait L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen E, F_{ort} ve SEA grafikleri verilmiştir. L/D:1 Enerji grafiğine bakıldığında boyutsal orandaki artış ile birlikte sönümlenen enerji değerleri artmıştır. Benzer eğilim %10 SiC içeren numunelerde gözlenmişti. Maksimum enerji değeri 114 J ile L/D:4 oranında elde edilmiştir. Buna karşın maksimum SEA değeri 16.44 J/g ile L/D:3 oranında sahip numunede elde edilmiştir. Bu fark kuvvet - deplasman eğrisinde kuvvet düşüşünün L/D:4 oranına kıyasla daha yavaş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. F_{ort} grafiğine bakıldığında maksimum SEA değerine sahip L/D:3 oranlarındaki numunede 10.82 kN'luk kuvvet elde edilmiştir. Bu değer maksimum seviyededir. Minimum F_{ort} değeri ise 8 kN ile L/D:1 oranına sahip numunede elde edilmiştir.



Grafik 7.10. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %15 SiC takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerler

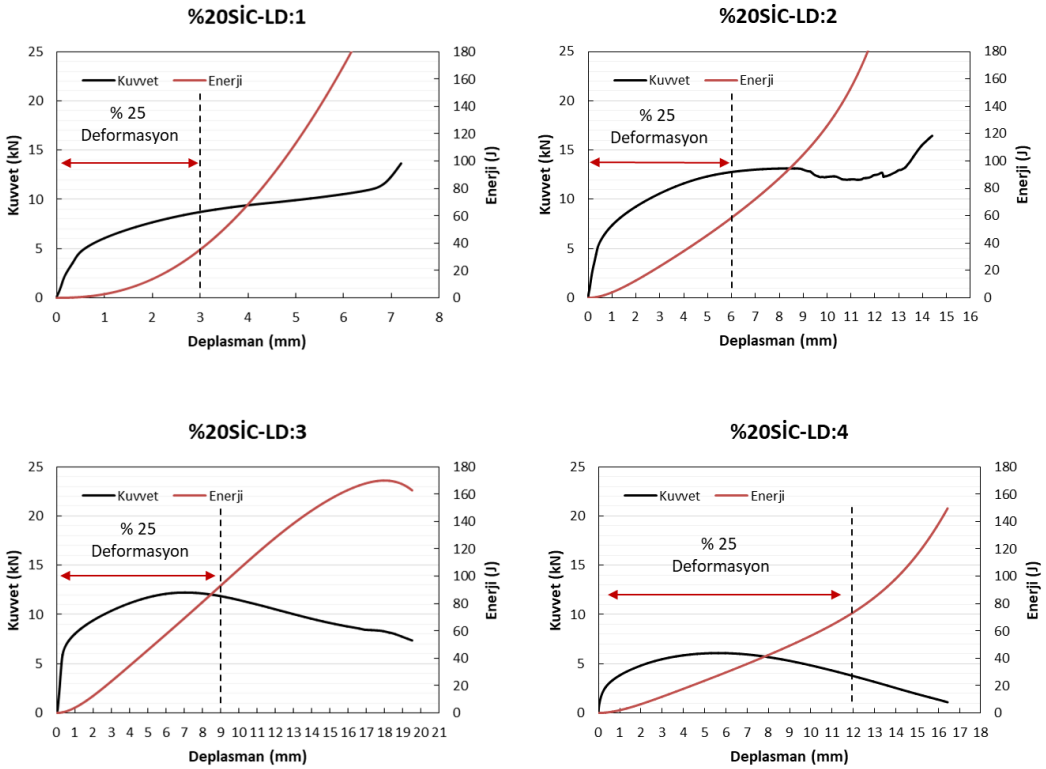
7.4.5. %20 SiC Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı

%20 SiC içeren Al profillerin deformasyon modları Fotoğraf 7.13'te gösterilmiştir. Saf Al profillerin deformasyon davranışına benzer şekilde artan profil uzunluğu ile birlikte asimetrik halka modundan, asimetrik elmas moda ve Euler moduna ardışık olarak değişen bir eğilim söz konusudur. Fotoğraf 7.13a'daki fotoğrafta gösterildiği gibi, L/D:1 oranına sahip profilde diğer numunelere (%10 SiC ve %15 SiC) kıyasla dış lob üzerinde daha belirgin yırtılmalar meydana gelmiştir. Dış lob içi boş profilin orta kısmında oluşmaya başlamıştır (Halka modu). L/D:2 oranına sahip numunelerde dış lob oluşumu diğer numunelerde olduğu gibi profilin bitişik yüzeylerinde başlamış ve deformasyon alt lopta yırtılmaların devam etmesi ile sonlanmıştır. Benzer durum %10 ve %15 SiC içeren numunelerde de gözlemlenmiştir (Fotoğraf 7.13b). L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerin orta kısımlarında deformasyon ekseninde asimetrik burkulma (Euler modu) ve yırtılma meydana gelmiştir.



Fotoğraf 7.13. %20 SiC içeren Al profillerin deformasyon davranışları, a) L/D:1, b) L/D:2, c) L/D:3 ve d) L/D:4

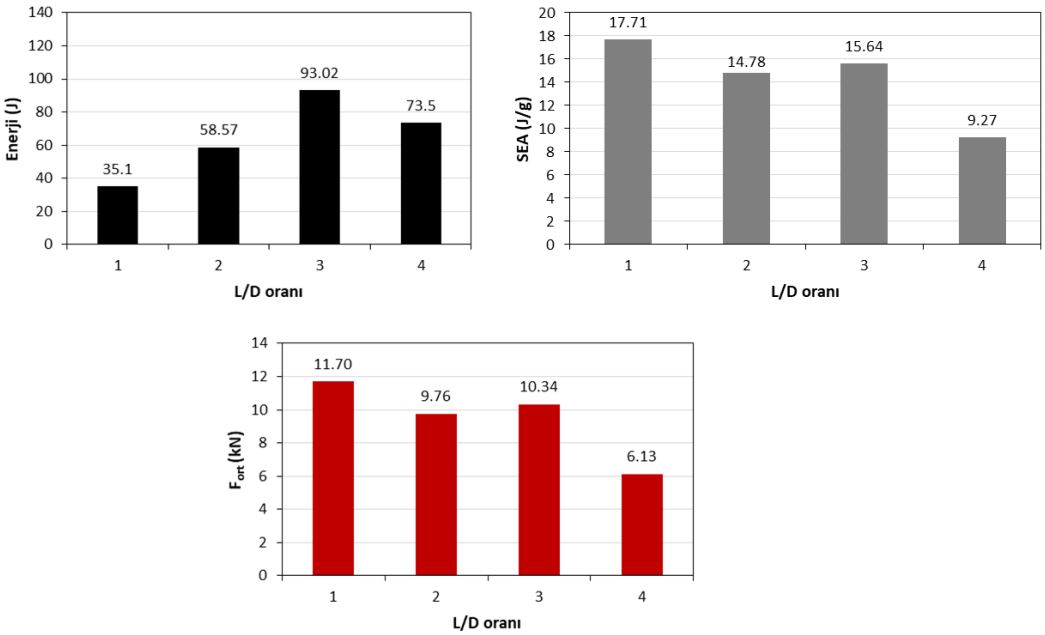
Yarı statik test koşulları altında %20 SiC takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri Grafik 7.11'de verilmiştir. Eğrilere bakıldığında (a) L/D:1 ve (b) L/D:2 oranına sahip numuneler için kuvvet artışı sürekli iken L/D:3 ve L/D:4 oranlarına sahip numunelerde durum farklılık göstermektedir. Bu numunelerde sıkıştırma esnasında kuvvet burkulma başlangıcına kadar artış gösterirken daha sonra azalmıştır. Bu durum eğilme momentindeki düşüşten kaynaklanmaktadır. %25 deformasyon oranında L/D:1 oranına sahip numunelerde 8.71 kN'luk basma kuvvetti elde edilmiştir. Aynı deformasyon oranına sahip diğer numunelerde ise bu değerler farklılık göstermektedir. L/D:2 oranına sahip numunelerde 12.78 kN, (c) L/D:3 oranına sahip numunelerde 11.86 kN ve (d) L/D:4 oranına sahip numunelerde 3.75 kN'luk basma kuvveti elde edilmiştir. L/D:3 ve L/D:4 oranındaki numunelerde maksimum kuvvete ulaştıktan sonra tekrardan azalma eğilimi gözlenmektedir. L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde maksimum kuvvet sırasıyla 12.22 kN ve 6.08 kN'dur. Bu değerler L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde %18.83 ve %11.97deformasyon oranına karşılık gelmektedir.



Grafik 7.11. Yarı statik test koşulları altında %20 SiC takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri

%20 SiC içeren alümünyum profile ait L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen E, F_{ort} ve SEA grafikleri Grafik 7.12'de verilmiştir. Enerji grafiğinde verilen değerler L/D:3 oranına kadar artış göstermişken, bu artış L/D:4 oranında düşmüştür. L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde maksimum kuvvet sırasıyla 12.22 kN ve 6.08 kN'dur. Kuvvetlerdeki azalma değeri enerji değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Numunelerde boyutsal oranın 4 kat değişmesi kütlesel farkın benzer oranda değişmesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla yalnızca E miktarlarındaki değişim sönümlenen enerji (SEA) miktarına etki etmemektedir. Bu durum aynı zamanda kütlesel oranında etkisini ortaya koymaktadır. Başka bir ifade ile L/D:1 oranına sahip numunede 35.1 J'luk enerji değeri elde edildiğinde L/D:4 oranına sahip numunede 73.5 J enerji değeri elde edilmiştir. Bu iki değer arasındaki oransal fark yaklaşık 2 kat değerinde olmasına rağmen boyutsal fark 4 kattır. Bundan dolayı SEA değerlerinde değişim meydana gelmiştir. Buna göre maksimum SEA değeri 17.71 J/g ile L/D:1 oranına sahip numunede elde edilmiştir. Minimum değer ise 9.27 J/g ile L/D:4 oranına sahip numunede elde edilmiştir. F_{ort} değeri ise SEA değerleriyle

benzer eğilim göstermektedir. Maksimum F_{ort} değeri L/D 1 oranına sahip numunede 11.70 kN olarak elde edilmiştir.

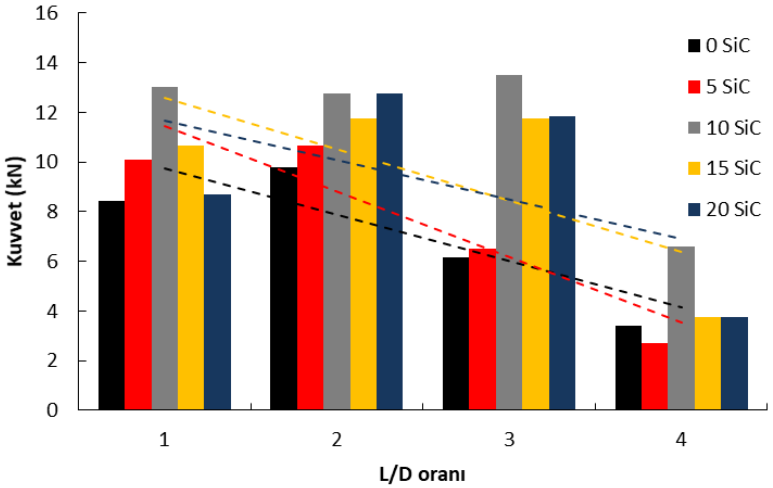


Grafik 7.12. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %20 SiC takviyeli Al profillerde elde edilen E, F_{ort} ve SEA değerleri

7.4.6. Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı Üzerine SiC ve L/D Oranının Etkisi

7.13'de verilen Grafikte farklı oranlarda SiC içeren alümünyum profillerin L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen kuvvet değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre L/D oranından bağımsız olarak tüm numunelerde maksimum kuvvetin %10 oranında SiC içeren numunelerde elde edildiği görülmektedir. Buna rağmen parçacık miktarından bağımsız olarak iki L/D oranında maksimum kuvvet değerleri elde edilmiştir. %0 ve %5 SiC içeren numunelerde L/D:2 oranı, %10, %15 ve %20 SiC içeren numuneler için ise L/D:3 oranı maksimum kuvvet değerleri vermiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre parçacık miktarındaki artış ile boyutsal oranda da artış sağlanabilecektir. Özellikle numunelerdeki boyutsal oran arttıkça burkulma ve yırtılma şeklinde deformasyonlar meydana gelmiştir. Elde edilen kuvvet–deplasman eğrilerinde bu durum açıkça gözlenmiştir. Burkulma sonrası L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde ezilmeye

karşı direnç eğilme momentinin zayıflamasından dolayı azalmıştır. SiC miktarındaki artış ile birlikte üretilen profillerin sertlik değerlerinde artış gözlenmiş olmasına rağmen (Grafik 7.13.) sıkışma esnasında numuneler farklı deformasyon modlarında davranış sergilemişlerdir. Artan SiC oranı şekil değiştirme kabiliyetini düşürdüğü gibi deformasyon anında yırtılmalara sebep olmuştur.

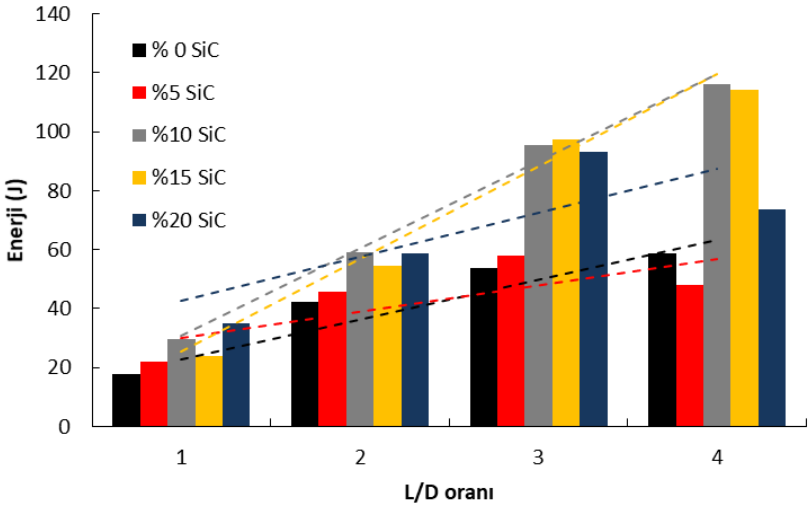


Grafik 7.13. Farklı oranlarda SiC içeren alüminyum profillerin L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen kuvvet değerleri.

Grafik 7.14'de verilen grafikte farklı oranlarda SiC içeren alüminyum profillerin L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen enerji değerleri karşılaştırılmıştır. Aşağıda verilen grafiğe göre enerji sıralaması;

$$L/D{:}\,4 > L/D{:}\,3 > L/D{:}\,2 > L/D{:}\,1$$

şeklindedir. L/D oranındaki artışa bağlı olarak enerji değişimi daha belirgin hale gelmiştir. Parçacık miktarına göre maksimum E değeri %10 ve %15 SiC içeren numunelerde elde edilmiştir.

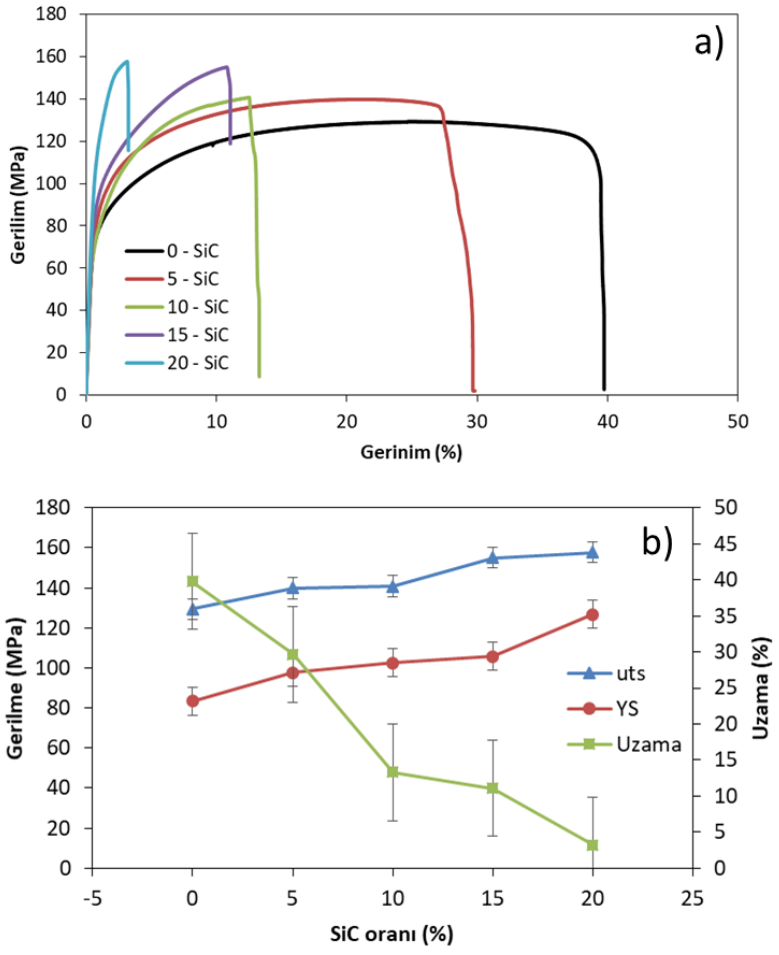


Grafik 7.14. Farklı oranlarda SiC içeren alümünyum profillerin L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen enerji değerleri

7.5 SiC Takviyeli Alüminyum Profillerin Çekme Davranışı

Çekme testi, en yüksek gerilme mukavemeti, akma dayanımı, Young modülü vb. gibi mekanik özellikleri belirlemek için kullanılan en yaygın yöntemdir (Jones, 1993). Mühendislik uygulamaları için kullanılan malzemeler genellikle bu özellikler temelinde seçilir. Gerilme özellikleri genellikle yeni malzemelerin geliştirilmesi sırasında ölçülür ve bu sayede farklı malzemeler ile karşılaştırılabilir. Grafik 7.15a'da saf alüminyum ve farklı oranlarda (%5-10-15-20) SiC içeren kompozit profillerin gerilim –gerinme eğrileri verilmiştir. Eğrilere bakıldığında parçacık içeriğindeki artışa bağlı olarak maksimum gerilme değerlerinde artış, birim uzama miktarında ise azalma gözlenmiştir. Benzer sonuçlar Zakari ve Rudi (2013) tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir. Özellikle %10-%20 oranlarında SiC içeren numunelerde oldukça zayıf süneklik gözlenmiştir. Düşük Al içeriği ve matristeki süreksizliğin artışı düşük birim uzama değerlerinin elde edilmesine yol açmıştır. Ekstrüzyon sırasında metal matriste plastik deformasyon meydana gelmekte ve bu nedenle yük, Al-SiC kompozitinin hasarı ile ilgili mekanizmaları tetikleyen sert takviye elemanına aktarılmaktadır (Reddy, Shakoor, Parande, Manakari, Ubaid, Mohamed, 2017). İlave edilen SiC parçacıklarının dislokasyon hareketlerini engelleyici yönde rol almaları gerilim artışının ayrıca nedeni olarak düşünülmektedir. Çekme testi esnasında SiC içeriğindeki artış ile daha az miktarlarda plastik

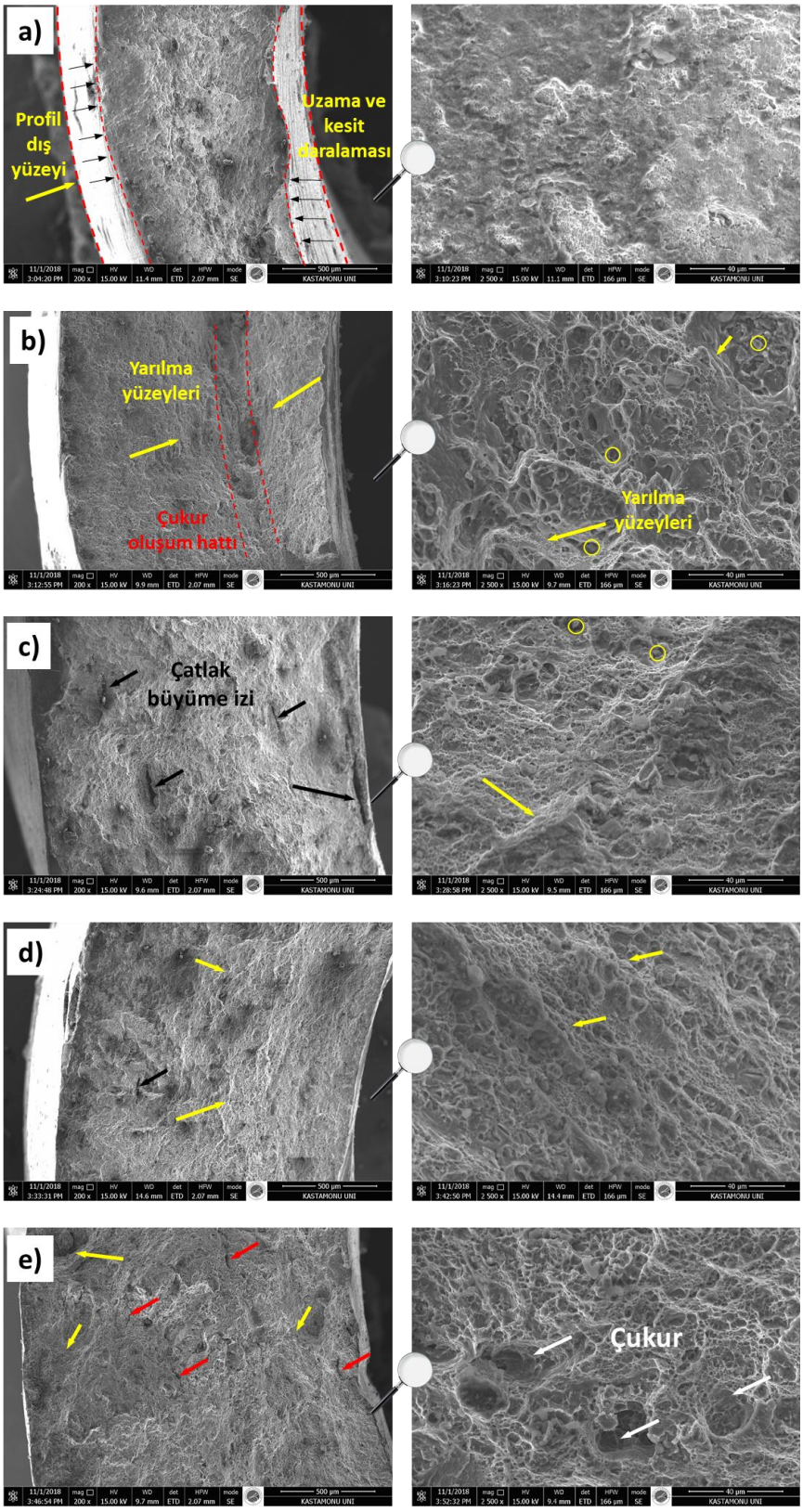
deformasyon meydana gelmektedir (Zakari ve Rudi, 2013). SiC parçacıkları arasında kayma işleminin gerçekleşmesi için daha yüksek akış gerilmelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Orowan mekanizmasına dayanarak, dislokasyon kayması için gerekli akış gerilimi parçacıklar arası mesafenin azalması ile artmaktadır (Bacon ve Dieter, 1988). İlave edilmiş SiC parçacıklarının bir fonksiyonu kompozit profillerin ortalama akma mukavemeti (YS), maksimum gerilme mukavemeti (UTS) ve birim uzama değerleri, Grafik 7.15b'de gösterilmiştir. Sonuçlara göre maksimum UTS ve YS değerleri %20 SiC içeren numunelerde sırasıyla ~150 MPa ve ~127 MPa olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte bu numunelerde yaklaşık %3 oranında birim şekil değişikliği elde edilmiştir. En yüksek birim şekil değiştirme oranı ise saf Al profillerde elde edilmiştir. Bu oran yaklaşık %40 seviyelerindedir. Aynı numunede elde edilen UTS ve YS değerleri sırasıyla ~129 MPa ve ~83 MPa'dır.



Grafik 7.15. Farklı oranlarda SiC içeriğine sahip kompozit alüminyum profillerin (a) gerilme – gerinim ve (b) UTS, YS ve birim uzama eğrileri

7.6. Saf Alüminyum ve Al-SiC Kompozit Profillerin Kırık Yüzey Analizi

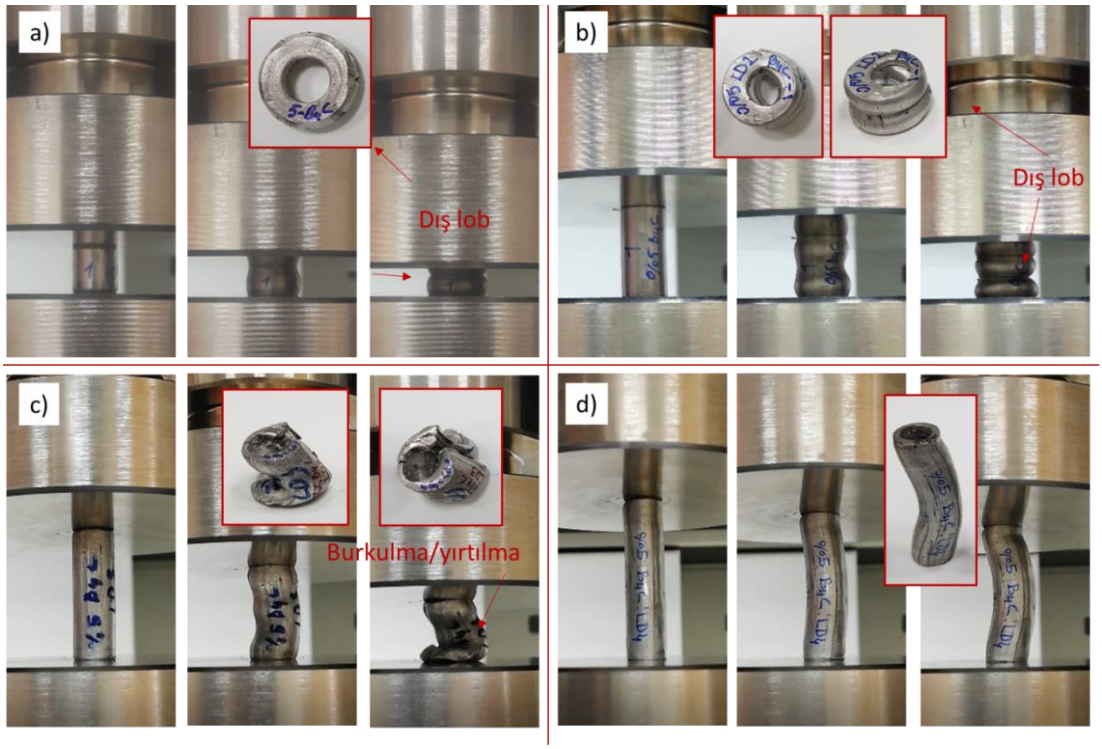
Çekme yükü altında test edilen ekstrüde edilmiş saf Al ve Al-SiC kompozit profillerin kırılma morfolojisi analizi Fotoğraf 7.14'te gösterilmektedir. Kırılmış çekme testi örneklerinin fraktografisine bakıldığında, SiC içermeyen profil numunede derin çukurlar ve düzensiz kırılma yüzeyi gibi çekme testi sırasında meydana gelen plastik deformasyon izleri görülmektedir (7.14a). %5 SiC içeren numunelerin kırık yüzeylerinde saf alüminyuma benzer deformasyon davranışı görülmektedir. Parçacık oranı arttıkça parçalanma yüzeyleri ve alt yüzey pürüzlülüğünün varlığı, kırılgan kırılma şeklini işaret etmektedir. Numunelerin kırılma yüzeyi üzerinde daha büyük büyütmelerdeki incelemeler, çatlakların matris ve SiC takviye fazları arasındaki alüminyum matris ve ara yüzey alanlarından geçtiğini göstermektedir. SiC parçacıklarının mikroyapıdaki diğer bölgelerden yeterince güçlü olduğu görülmektedir. Fotoğraf 7.14b-c'de numunelerin kırılma yüzeyinde bir kaç SiC parçacığı (daire ile işaretlenmiştir) gözlemlenebilir. Bu sonuç, SiC parçacıkları ile matris arasındaki bağ kuvvetinin, ara yüzey bölgesindeki geniş çaplı bağlanmayı önlemede yeterli olduğunu göstermektedir. Parçacık-matris arasındaki yüksek ara yüzey bağ kuvveti matris bölgelerinden SiC parçacıklarına çok iyi bir yük transferi sağlar. Sonuç olarak, bu numunelerin kırılma mekanizmalarının yüksek dayanımlı seramik parçacık içeren matris tarafından kontrol edildiği sonucuna varılabilir (Alizadeh, Eslami ve Babaee, 2018).



Fotoğraf 7.14. Çekme yükü altında test edilen ekstrüde edilmiş (a) saf Al ve Al-SiC kompozit profillerin kırılma morfolojisi analizi, (b) %5 SiC, (c) %10 SiC, (d) %15 SiC, (e) %20 SiC

7.7. %5 B_4C Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı

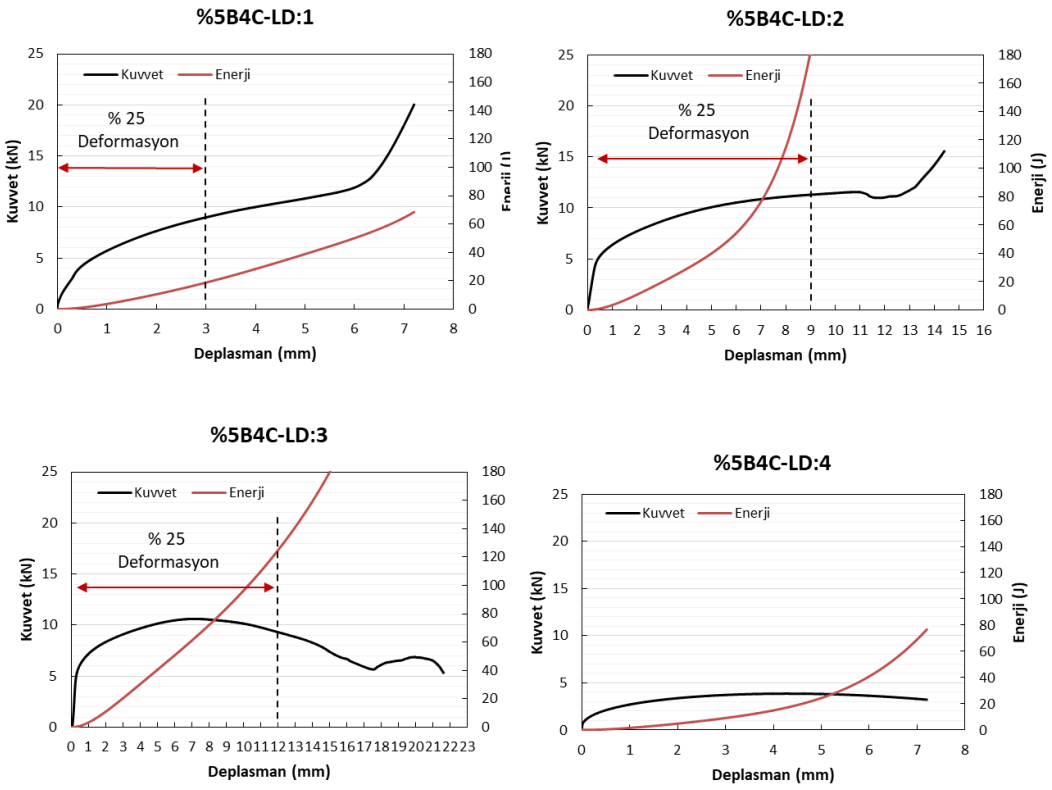
Yarı statik sıkıştırma koşulları altında farklı L/D oranlarına sahip %5 B_4C içeren Al profillerin deformasyon modları Fotoğraf 7.15'te gösterilmiştir. L/D:1 oranına sahip profilde katlanma (dış lob) profilin orta kısmında oluşmaya başlamıştır (Fotoğraf 7.15a- Halka modu). L/D:2 oranına sahip numunelerde dış lob oluşumu ise profilin bitişik yüzeylerinde bir biri üzerinde katlanması ile meydana gelmiştir (Fotoğraf 7.15b-Elmas mod). Benzer durumlar saf Al profil ve %5 SiC içeren Al profillerde de gözlenmiştir. L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde ise herhangi bir lob oluşumu görülmemiştir (Fotoğraf 7.15c-d). Bu oluşumdan ziyade numunelerin orta kısımlarında deformasyon ekseninde burkulma (Euler modu) ve yırtılmalar meydana gelmiştir. Burkulma davranışı saf Al profil ve %5 SiC içeren Al profillerde de gözlenmesine rağmen yırtılma olayı görülmemiştir.



Fotoğraf 7.15. Yarı statik sıkıştırma koşulları altında farklı L/D oranlarına sahip %5 B_4C takviyeli Al profillerin deformasyon modları, a) Halka modu, b) Elmas modu, c-d) Euler Modu

%5 B_4C takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri Ggrafik 7.16'da verilmiştir. Elde edilen eğriler %5 B_4C takviyeli alüminyum profillerin saf Al ve %5 SiC takviyeli Al profilin ezilme davranışına benzer bir deformasyon davranışı

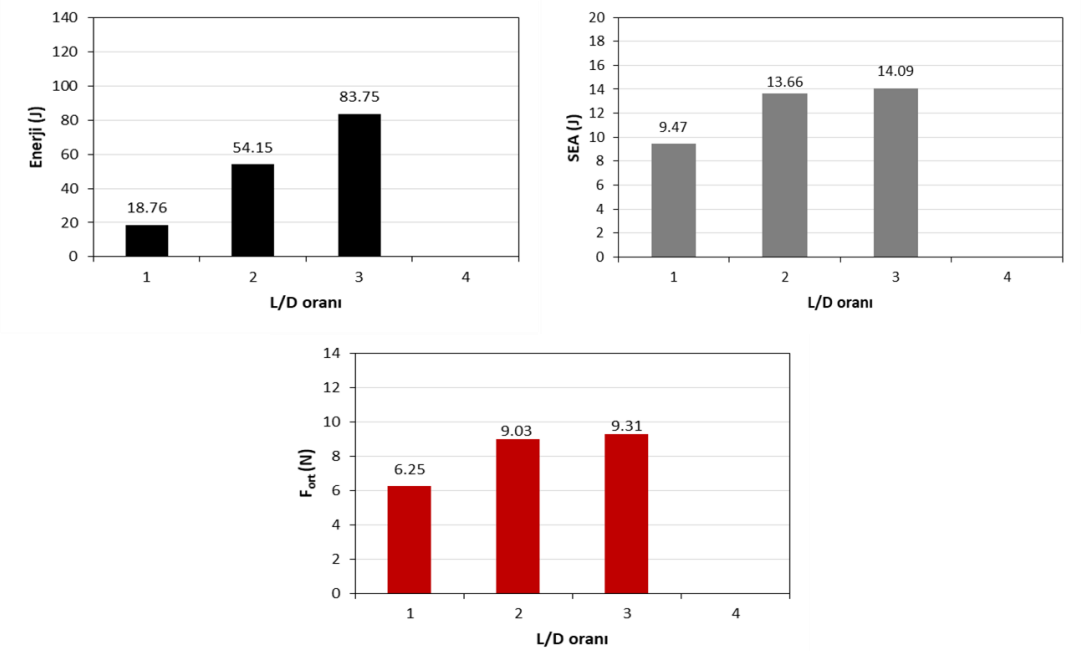
sergiledikleri görülmektedir. %25 deformasyon oranında L/D:1 oranına sahip numunelerde 9 kN'luk basma kuvveti elde edilmiştir. %5 SiC içeren numuneye kıyasla 1 kN'luk bir azalma söz konusudur. Aynı deformasyon oranına sahip diğer numunelerde ise bu değerler farklılık göstermektedir. L/D:2 oranına sahip numunelerde 10.51 kN ve L/D:3 oranına sahip numunelerde 10.39 kN basma kuvveti elde edilmiştir. L/D:4 oranına sahip numunelerde ise basma kuvveti giderek sıfır değerine yaklaştığı için %25 deformasyon miktarındaki değer elde edilememiştir. L/D:3 ve L/D:4 oranındaki numunelerde maksimum kuvvete ulaştıktan sonra tekrardan azalma eğilimi gözlemlendiği için her iki numunedeki maksimum kuvvet sırasıyla 10.61 kN ve 3.84 kN'dur. Bu değerler L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde %20.05 ve %9.52 deformasyon oranına karşılık gelmektedir.



Grafik 7.16. %5 B_4C takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri

Grafik 7.17'de L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen enerji (E), ortalama kuvvet (Fort) ve spesifik enerji absorbe (SEA) grafikleri verilmiştir. Enerji grafiğine bakıldığında L/D:3 oranına kadar absorbe edilen enerji miktarı artmıştır. Bu orana sahip profillerde maksimum enerji değeri 83.75 J olarak elde edilmiştir.

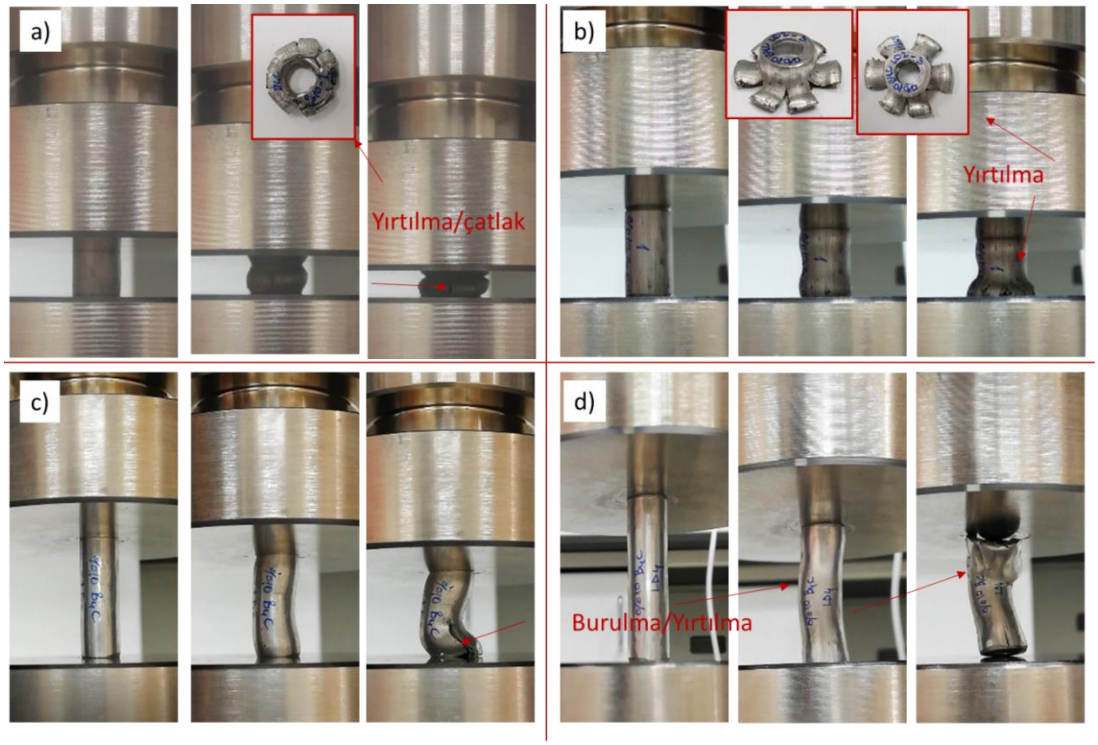
Spesifik enerji absorbe (SEA) değerlerine bakıldığında elde edilen enerji grafikleri ile benzer eğilimde olduğu görülmektedir. Maksimum SEA değeri 14.09 J/g ile L/D:3 oranına sahip numunede elde edilmiştir.



Grafik 7.17. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %5 B_4C takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri

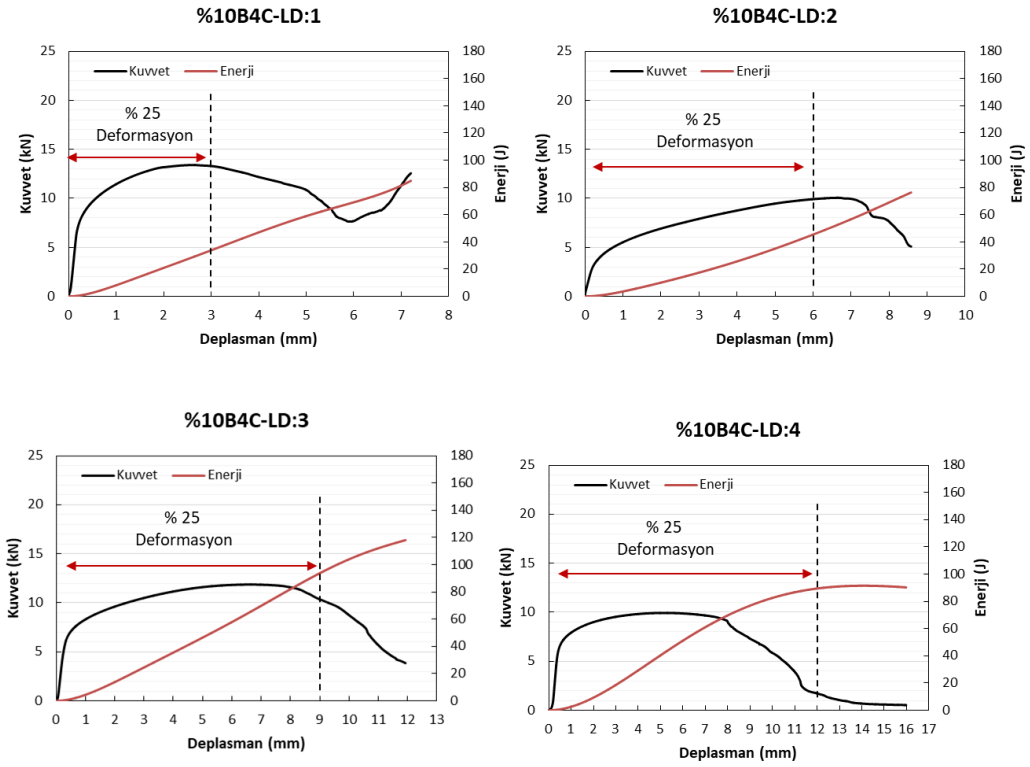
7.7.1. %10 B_4C Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı

%10 B_4C takviyeli Al profillerin deformasyon davranışları Fotoğraf 7.16'da gösterilmiştir. Her dört numune türünde numunelerin deformasyon yüzeylerinde önemli ölçüde çatlağa ve yırtılmalara rastlanmıştır. L/D:1 oranına sahip numunede dış lop oluşumu söz konusu iken dış yüzeydeki çatlak dikkat çekicidir. %5 B_4C içeren numunede benzer durum söz konusu olmamıştır. Parçacık miktarındaki artış ile birlikte numunelerdeki gevrekleşme eğilimi artmıştır. Özellikle L/D:2 oranına sahip numunelerde Elmas mod oluşumundan ziyade papatya çiçeği benzeri profil yüzeylerinde çatlama ve ayrışmalar meydana gelmiştir. Bu durum numunenin alt yüzeyinde başlamış ve deformasyon yüzeylerinde katlanmaya olanak tanımadan devam etmiştir. L/D:3 oranına sahip numunelerde artan deformasyon ile birlikte burkulma olayı gerçekleşmiş ve ekstrüzyon yönüne doğru yırtılma meydana gelmiştir. Benzer durum L/D: 4 oranına sahip numunelerde de gözlemlenmiştir.



Fotoğraf 7.16. %10 B_4C takviyeli Al profillerin deformasyon davranışları, a) L/D:1,b) L/D:2, c) L/D:3 ve d) L/D:4

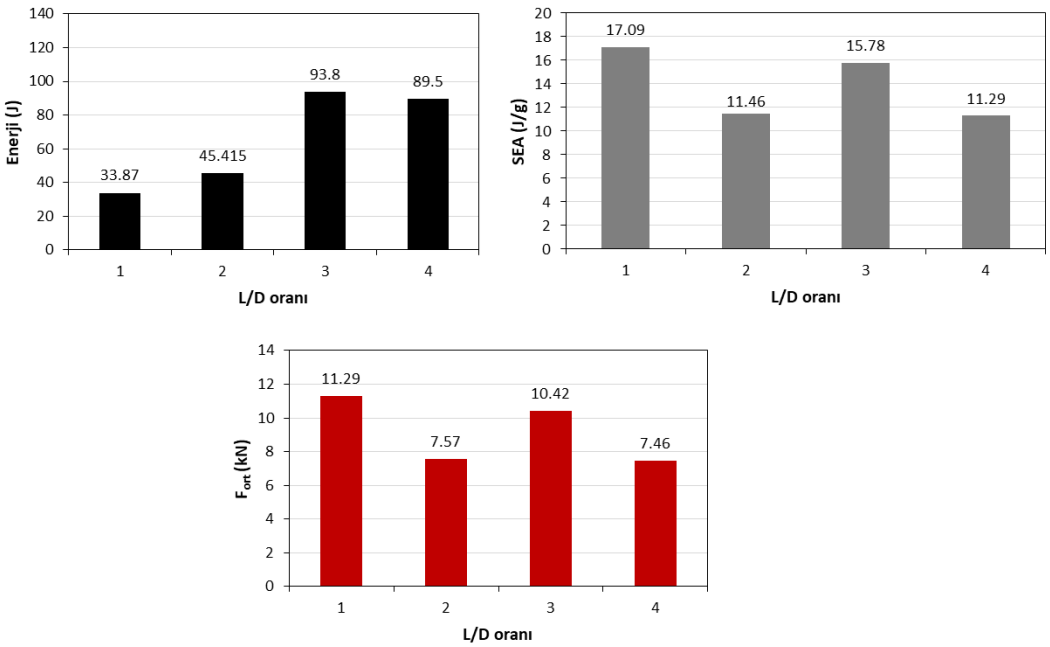
Grafik 7.18'de %10 B_4C takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri verilmiştir. Elde edilen eğrilerin %5 B_4C içeren numunelerin yük deplasman eğrilerinden farklı olduğu açıkça görülmektedir. %25 deformasyon oranında L/D:1 oranına sahip numunelerde 13.29 kN'luk basma kuvveti elde edilmiştir. Deformasyon miktarındaki artış yaklaşık %50 seviyelerine ulaştığında kuvvet değeri minumum seviyeye ulaşmıştır. Bu noktadan sonra tekrar kuvvet artışı yoğunlaşma ile birlikte gözlenmiştir. Kuvvet değerindeki düşüş deformasyon yüzeylerindeki yırtılma kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Kuvvet artışı ise katlanma yüzeylerinin birbiri üzerine temasından kaynaklanmaktadır. L/D:2 oranına sahip numunelerde 9.92 kN, L/D:3 oranına sahip numunelerde 10.35 kN ve L/D:4 oranına sahip numunede 1.72 kN basma kuvveti elde edilmiştir. Her dört numunede maksimum kuvvete ulaştıktan sonra tekrardan azalma eğilimi gözlenmektedir. Bu durum saf Al ve %5 B_4C içeren numunelerde yalnızca L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde görülmüştür.



Grafik 7.18. %10 B_4C takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri

Grafik 7.19'da % 10 B_4C içeren numunelere ait enerji (E), ortalama kuvvet (F_{ort}) ve spesifik enerji absorbe (SEA) grafikleri verilmiştir. Enerji grafiğine bakıldığında L/D:3 oranına kadar absorbe edilen enerji miktarı artmıştır. Bu orana sahip profillerde maksimum enerji değeri 93.8 J olarak elde edilmiştir. Alüminyum profillerin boyutsal oranı maksimum 4 kat iken enerji sönümleme değerleri arasındaki fark maksimum 2.64 kat kadardır. Spesifik enerji absorbe (SEA) değerlerine bakıldığında ise belirgin bir farklılık mevcuttur. Numunelerdeki enerji miktarındaki artış oranı boyutsal orandaki artış miktarından daha düşük olmasından dolayı kütle başına düşen enerji miktarları değişkenlik göstermiştir. Bu fark L/D:1 oranına sahip numunede dikkat çekicidir. Maksimum SEA değeri 17.09 J/g ile bu numunede elde edilmiştir. L/D:2 oranına sahip numunelerde 11.46 J/g, L/D:3 oranına sahip numunelerde 15.78 J/g ve L/D:4 oranına sahip numunede 11.29 J/g enerji değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte F_{ort} değerinin SEA grafiğine benzer eğilim sergilediği görülmektedir. %25 deformasyon miktarında elde edilen enerji değerleri boyutsal orandaki değişmeden dolayı farklılık göstermektedir. Böylece enerjinin

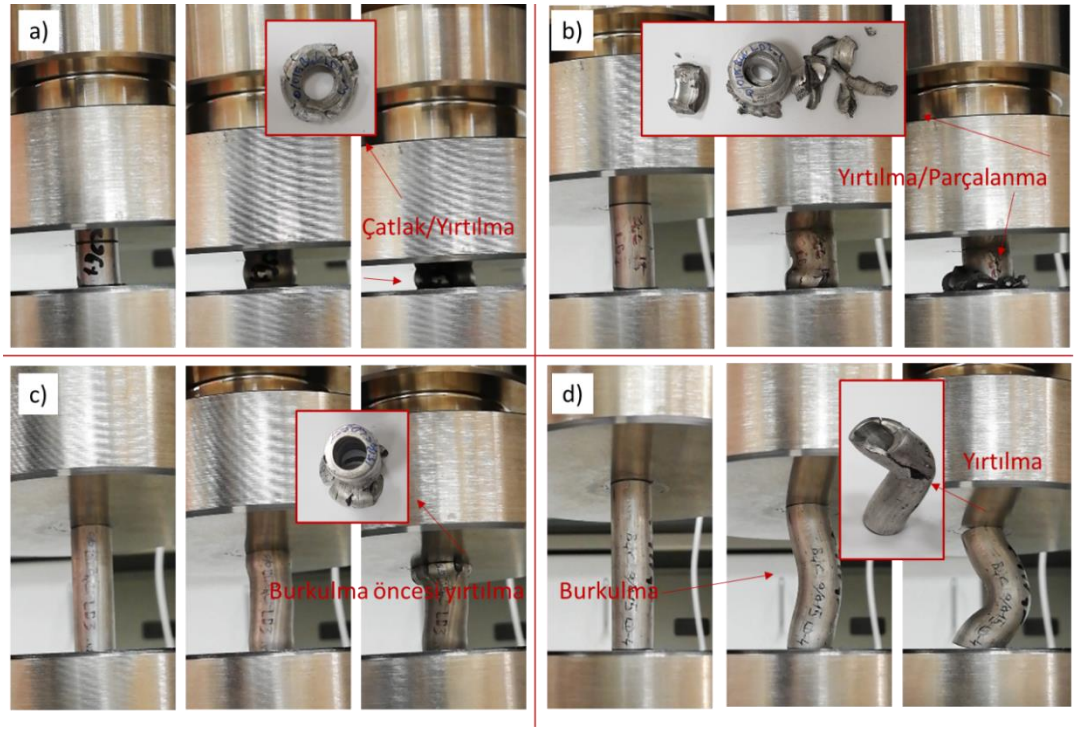
deformasyon mesafesine oranı değiştiğinden F_{ort} değeri değişmiştir. Maksimum F_{ort} değeri, L/D:1 oranına sahip numunede 11.29 kN olarak elde edilmiştir.



Grafik 7.19. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %10 B_4C takviyeli Al profillerde elde edilen E, F_{ort} ve SEA değerleri

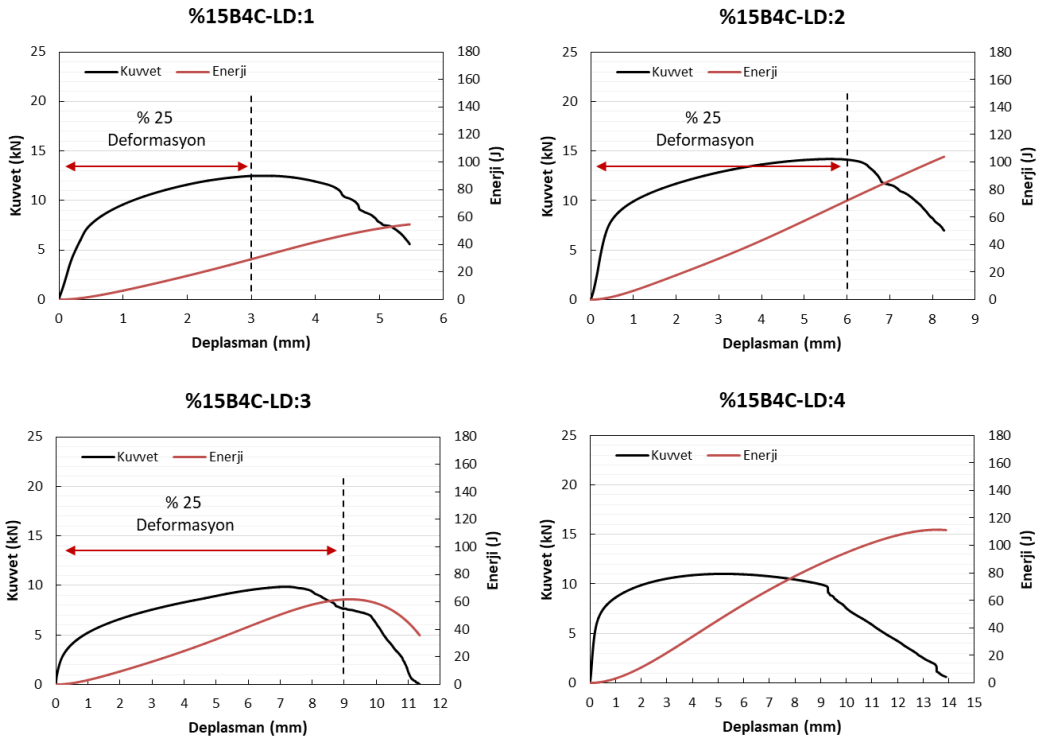
7.7.2. %15 B_4C Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı

Fotoğraf 7.17'de %15 B_4C içeren Al profillerin deformasyon davranışları gösterilmiştir. Parçacık miktarındaki artışa bağlı olarak numunelerdeki deformasyon davranışının değiştiği %15 B_4C içeren numunelerde açıkça görülmektedir. %10 B_4C içeren numunelerde olduğu gibi bu numunelerde de gevrek davranış gözlemlenmiştir.



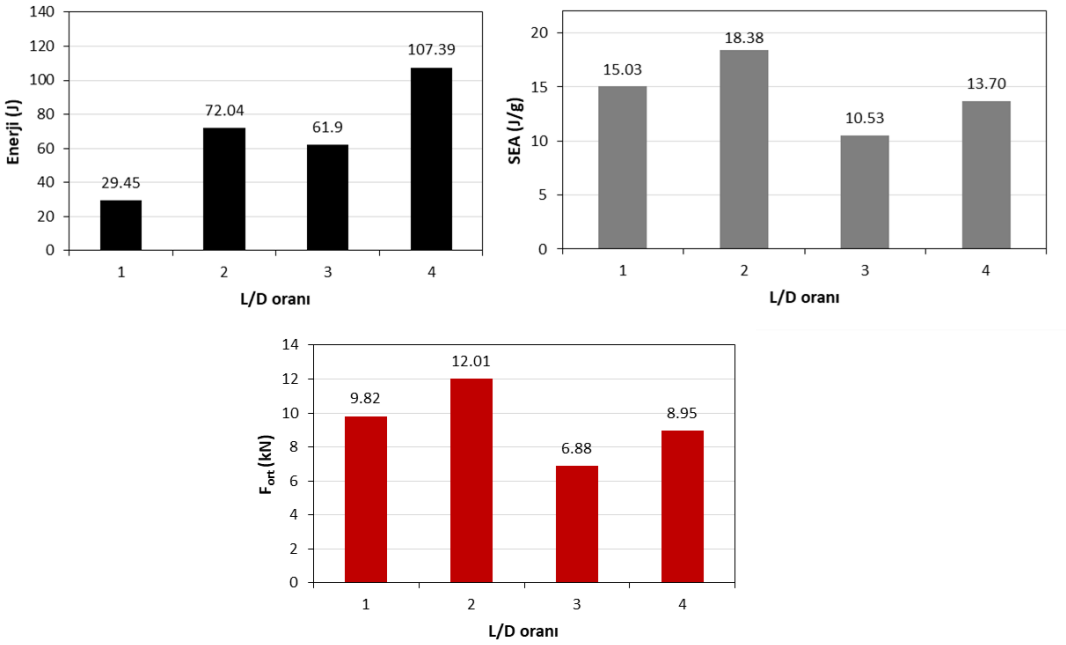
Fotoğraf 7.17. %15 B_4C takviyeli Al profillerin deformasyon davranışları, a) L/D:1,b) L/D:2, c) L/D:3 ve d) L/D:4

Grafik 7.20'de numunelerin yük deplasman eğrilerine bakıldığında kuvvet değerlerinde sürekli doğrusal bir artış gözlenmemiştir. Aksine çatlama ve yırtılmanın sonucu olarak hızlı kuvvet düşüşleri meydana gelmiştir. Bu durum L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde kuvvet değerinin sıfıra ulaşması ile sonuçlanmıştır. %25 deformasyon oranında L/D:1 oranına sahip numunelerde 12.48 kN'luk basma kuvveti elde edilmiştir. Aynı deformasyon oranına sahip diğer numunelerde ise bu değerler farklılık göstermektedir. L/D:2 oranına sahip numunelerde 14.12 kN, L/D:3 oranına sahip numunelerde 7.66 kN ve L/D:4 oranına sahip numunede 4.23 kN basma kuvveti elde edilmiştir.



Grafik 7.20. %15 B_4C takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri

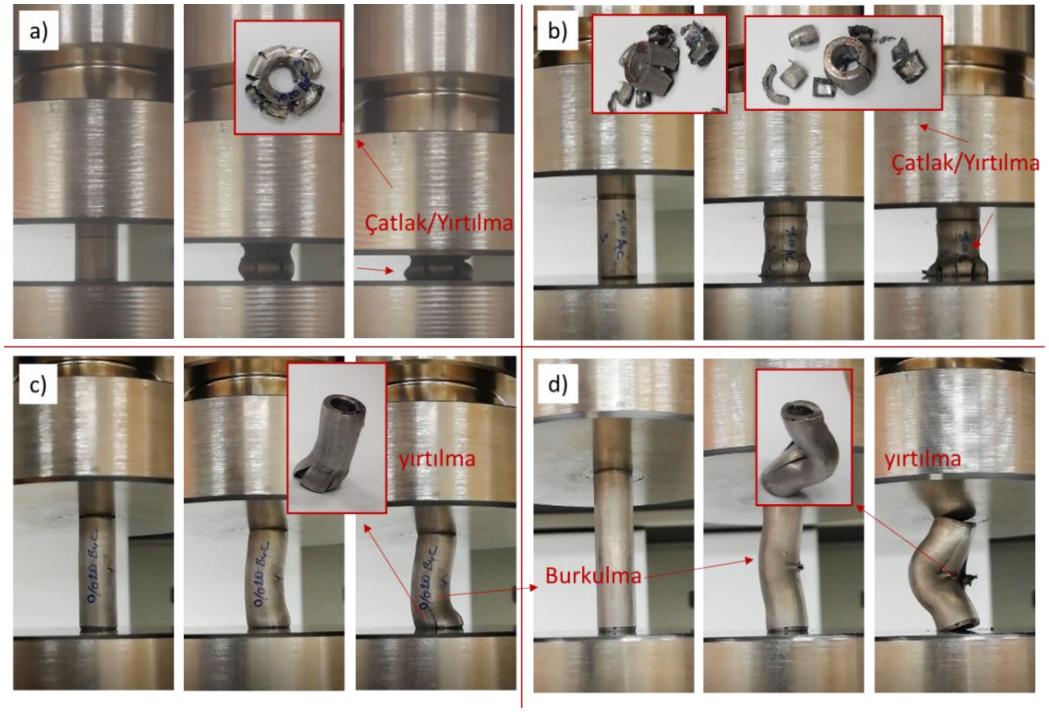
Grafik 7.21'de numunelerin enerji grafiğine bakıldığında maksimum enerji değeri 107.39 J ile L/D:4 oranında elde edilmiştir. Numunelerin maksimum enerji sönümleme değerleri arasındaki fark yaklaşık 3.64 kat kadardır. Spesifik enerji absorbe (SEA) değerlerine bakıldığında ise maksimum SEA değeri 18.38 J/g ile L/D:2 oranına sahip numunede elde edilmiştir. Maksimum F_{ort} değeri, SEA grafiğinde olduğu gibi L/D:2 oranına sahip numunede elde edilmiştir.



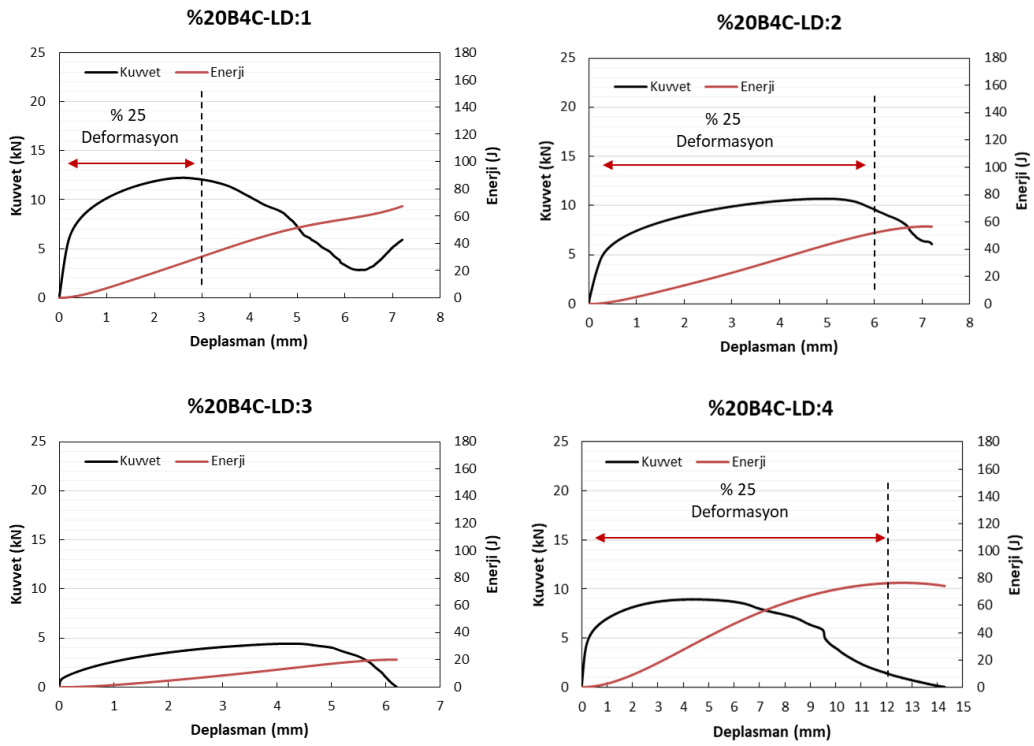
Grafik 7.21. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %15 B_4C takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri

7.7.3. %20 B_4C Takviyeli Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı

Fotoğraf 7.18'de %20 B_4C içeren numunelerin deformasyon davranışları incelendiğinde %10 ve %15 B_4C içeren numuneler ile benzer deformasyon davranışı sergiledikleri görülmektedir. Numune yüzeylerinde artan gerilme ile birlikte hem yırtılma ve çatlak oluşumu hem de parçalanma gözlenmiştir (Fotoğraf 7.18b). Grafik 7.22'de %25 deformasyon oranında maksimum basma kuvvetinin L/D:1 oranına sahip numunelerde 12.04 kN olarak elde edildiği görülmektedir. Boyutsal orandaki artış ile birlikte basma kuvvetine karşı anizotropik davranış sergilemeleri sonuçların farklılaşmasına yol açmıştır (Fotoğraf 7.18d).

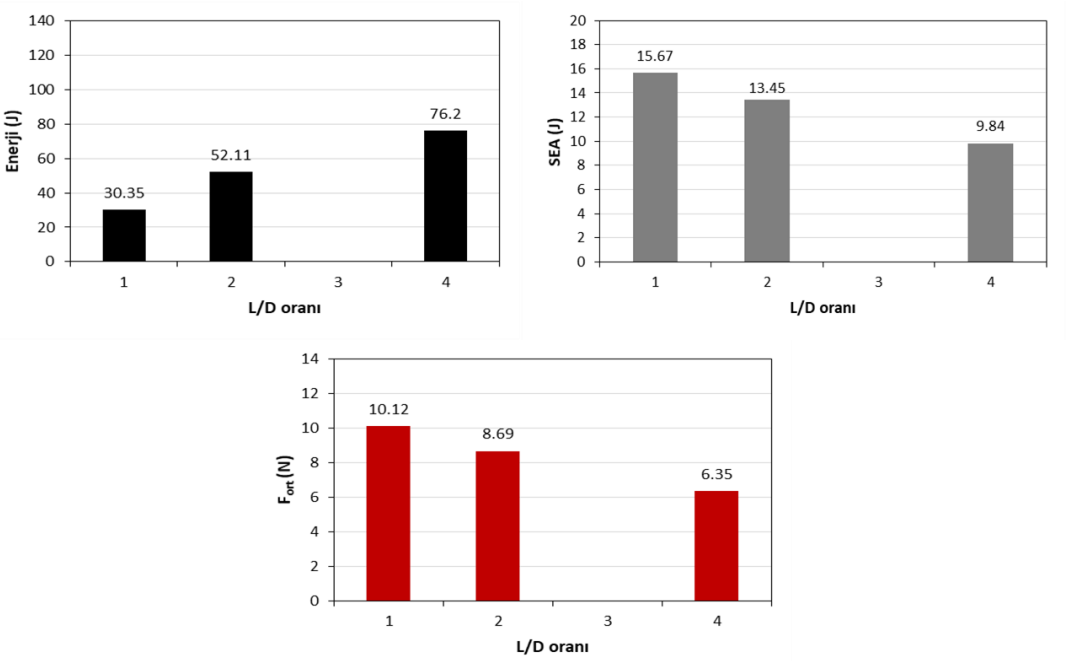


Fotoğraf 7.18. %20 B_4C takviyeli Al profillerin deformasyon davranışları, a) L/D:1,b) L/D:2, c) L/D:3 ve d) L/D:4



Grafik 7.22. %20 B_4C takviyeli alüminyum profillerin yük-deplasman eğrileri

Grafik 7.23'de verilen enerji grafiğine bakıldığında maksimum enerji değeri 76.2 J ile L/D:4 oranına sahip numunede elde edilmiştir. Buna karşın maksimum SEA değeri ise 15.67 J/g ile L/D:1 oranına sahip numunede elde edilmiştir. Maksimum F_{ort} değeri, SEA grafiğinde olduğu gibi L/D:1 oranına sahip numunede elde edilmiştir. L/D:3 oranına sahip numunelerde ise basma kuvveti giderek sıfır değerine yaklaştığı için %25 deformasyon miktarındaki değerler elde edilememiştir.

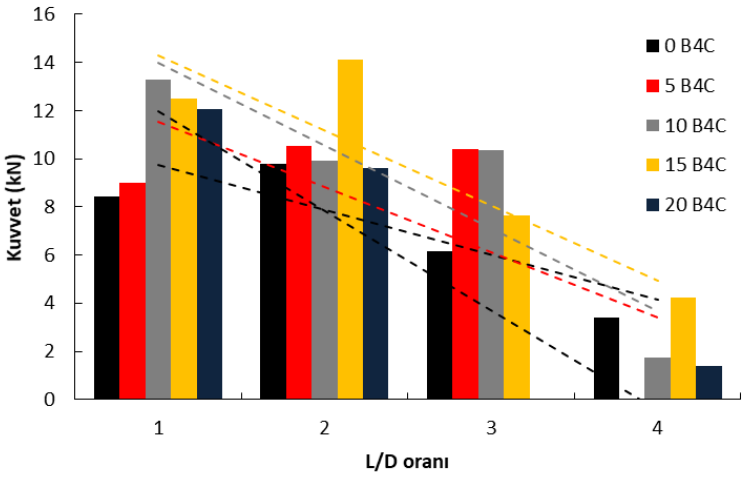


Grafik 7.23. L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için %20 B_4C takviyeli Al profillerde elde edilen E, Fort ve SEA değerleri

7.8. Alüminyum Profillerin Ezilme Davranışı Üzerine B_4C ve L/D Oranının Etkisi

Grafik 7.24'te verilen grafikte farklı oranlarda B_4C içeren alüminyum profillerin L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen kuvvet değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre L/D oranı arttıkça kuvvet değerlerinde azalma eğilimi söz konusudur. Bununla birlikte parçacık miktarındaki değişime bağlı olarak kuvvet değerlerindeki değişim de boyutsal orana göre farklılık sergilemiştir. L/D:1 ve L/D:2 oranına sahip numunelerde parçacık miktarındaki artış basma gerilmelerine karşı dayanımı artırırken L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde bu değişim zıt yönlü gerçekleşmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre boyutsal sınırlama yapıldığı takdirde

parçacık miktarlarında artış sağlanabilecektir. Özellikle numunelerdeki boyutsal oran arttıkça burkulma ve yırtılma şeklinde deformasyonlar meydana gelmiştir. Elde edilen kuvvet–deplasman eğrilerinde bu durum açıkça gözlenmiştir. Burkulma sonrası L/D:3 ve L/D:4 oranına sahip numunelerde ezilmeye karşı direnç eğilme momentinin zayıflamasından dolayı azalmıştır. B_4C miktarındaki artış ile birlikte üretilen profillerin sertlik değerlerinde artış gözlenmiş olmasına rağmen (Grafik 7.2) sıkışma esnasında numuneler farklı deformasyon davranışları sergilemişlerdir. Artan B_4C oranı şekil değiştirme kabiliyetini düşürdüğü gibi deformasyon anında yırtılmalara sebep olmuştur.

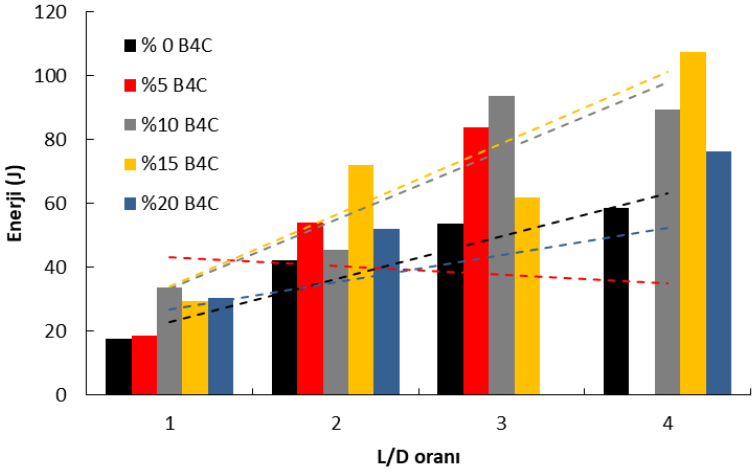


Grafik 7.24. Farklı oranlarda B_4C içeren alüminyum profillerin L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen kuvvet değerleri

Grafik 7.25'te verilen grafikte farklı oranlarda B_4C içeren alümünyum profillerin L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen enerji değerleri karşılaştırılmıştır. Aşağıda verilen grafiğe göre enerji sıralaması;

$$L/D{:}\,4 > L/D{:}\,3 > L/D{:}\,2 > L/D{:}\,1$$

şeklindedir. L/D oranındaki artışa bağlı olarak enerji değişimi daha belirgin hale gelmiştir. Parçacık miktarına göre maksimum E değeri %15 B_4C içeren numunelerde elde edilmiştir.

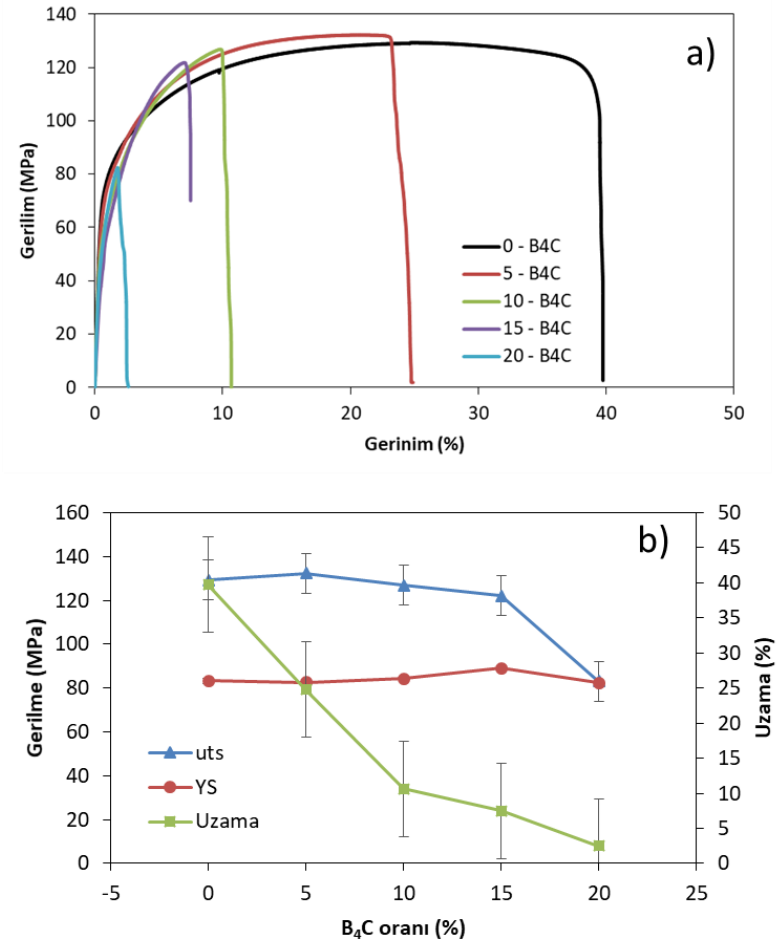


Grafik 7.25. Farklı oranlarda B_4C içeren alümünyum profillerin L/D oranına bağlı olarak %25 deformasyon için elde edilen enerji değerleri

7.9. B_4C Takviyeli Alüminyum Profillerin Çekme Davranışı

Grafik 7.26a'da saf alüminyum ve farklı oranlarda (%5-10-15-20) B_4C içeren kompozit profillerin gerilim – gerinme eğrileri verilmiştir. Eğrilere bakıldığında parçacık içeriğindeki artışa bağlı olarak maksimum gerilme değerlerinde artış/azalış şeklinde değişim gözlemlenirken birim uzama miktarlarında azalma gözlenmiştir. Özellikle saf alüminyumun çekme dayanımı %5 B_4C ilavesi ile maksimum değere (~132 MPa) ulaşmışken daha sonra tekrardan azalmıştır. Saf alüminyum mükemmel bir plastiklik sergilerken parçacık miktarındaki artış ile birlikte hem dayanım hem de plastiklikte azalma meydana gelmiştir. Parçacık hacim yüzdesi arttıkça topaklanmanın ve gözenekliliğin artması bu durumun olası nedeni olabilir. Parçacık topaklanması gevşek paketlenmiş parçacıklara neden olduğu gibi çekme gerilmeleri altında malzemeyi daha zayıf hale getirmektedir (Poovazhagan, Kalaichelvan, Rajadurai ve Senthilvelan, 2013). İlave edilmiş B_4C parçacıklarının bir fonksiyonu olan kompozit profillerin ortalama akma mukavemeti (YS), maksimum gerilme mukavemeti (UTS) ve birim uzama değerleri, Grafik 7.26b'de gösterilmiştir. Sonuçlara göre maksimum UTS ve YS değerleri %5 B_4C içeren numunelerde sırasıyla ~132 MPa ve ~83 MPa olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte bu numunelerde yaklaşık %25 oranında birim şekil değişikliği elde edilmiştir. En yüksek birim şekil değiştirme oranı ise saf Al profillerde elde edilmiştir. Bu oran yaklaşık %40 seviyelerindedir. Aynı numunede (Saf alüminyum) elde edilen

maksimum çekme dayanımı(UTS) ve akma dayanımı(YS) değerleri sırasıyla ~129 MPa ve ~83 MPa'dır. En düşük UTS ve YS değerleri ise %20 B_4C içeren numunelerde elde edilmiştir. Bu numunelerdeki birim şekil değiştirme miktarı yaklaşık %2 seviyededir.



Grafik 7.26. Farklı oranlarda B_4C içeriğine sahip kompozit alüminyum profillerin (a) gerilme – gerinim ve (b) UTS, YS ve birim uzama eğrileri

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı oranlarda (%0-5-10-15-20) SiC ve B_4C içeren dikişsiz boru biçimli profilller sıcak estrüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Öncelikli olarak toz metalurjisi yöntemi ile kompozit biyetler üretilmiştir. Al tozları ile SiC ve B_4C parçacıkları ağırlıkça %5-10-15-20 oranında bilyeli karıştırıcı yardımıyla 30 dakika boyunca karıştırmıştır. Elde edilen karışım 600 Mpa basınç altında tek yönlü olarak sıkıştırılarak biyet haline getirilmiştir. Daha sonra biyetler 550°C sıcaklıkta özel olarak tasarlanmış ekstrüzyon kalıbında ekstrüze edilerek 12 mm çapında ve 2 mm et kalınlığında profillerin üretilmesi sağlanmıştır. Üretilen profillerin uzunluk/çap (L/D) oranının ve parçacık içeriğinin ezilme ve çekme deformasyon davranışı üzerindeki etkileri araştırılarak aşağıdaki bilgi, bulgu ve sonuçlara ulaşılmıştır.

- ✓ SiC ve B_4C takviyeli alüminyum çubuk profillerde % 93'ün üzerinde bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir. SiC parçacıklarının B_4C parçacıklarına kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahip olmasından dolayı SiC içeren çubuk profillerin B_4C içeren numunelere kıyasla daha düşük bağıl yoğunluk değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Al-B_4C/SiC kompozit profillerin mikroyapılarında yerel parçacık kümelenmeleri, mikro gözenekler ve parçacık kırılmaları önemli ölçüde tespit edilmemiştir. Parçacık miktarındaki artış ile birlikte ekstrüzyon yönündeki yönlenmeler belirgin hale gelmiştir.
- ✓ Kompozit profillerde matris içinde yeralan yüksek miktardaki seramik parçacıkları deformasyon esnasında dislokasyon hareketlerine engelleyici yönde rol aldıklarından sertlikte artış meydana gelmiştir. En yüksek sertlik değerleri %20 oranında parçacık içeren numunelerde elde edilmiştir. B_4C ve SiC içeren numuneler için elde edilen sertlik değerleri 54,4 Hv ve 49,5 Hv'dir.
- ✓ Her iki numune türünde ED ve EY yönlerindeki sertlik değerlerinde önemli bir farkın olmadığı tespit edilmiştir.
- ✓ L/D oranından bağımsız olarak %25 deformasyon oranında maksimum kuvvetin %10 oranında SiC içeren ve %15 oranında B_4C içeren numunelerde

elde edildiği tespit edilmiştir.

- ✓ L/D oranı arttıkça burkulma ve yırtılma şeklinde deformasyonların meydana geldiği tespit edilmiştir.
- ✓ L/D oranı arttıkça her iki numune türünün deformasyon modu değişmiştir. Bu değişim Halka mod, Elmas mod ve Euler mod şeklinde gerçekleşmiştir.
- ✓ Al-B_4C/SiC kompozit profillerin L/D oranındaki artışa bağlı olarak enerji değişimi daha belirgin hale gelmiştir. SiC içeren numuneler için E değeri %10-%15, B_4C içeren numunelerde için ise %15 oranında maksimum değer elde edilmiştir.
- ✓ SiC içeren kompozit profillerde parçacık içeriğindeki artışa bağlı olarak maksimum gerilme değerlerinde artış tespit edilmiştir. Maksimum UTS ve YS değerleri %20 SiC içeren numunelerde sırasıyla ~150 MPa ve ~127 MPa olarak elde edilmiştir. Saf Al profillerde ise bu değerler sırasıyla ~129 MPa ve ~83 MPa olarak elde edilmiştir.
- ✓ B_4C içeren kompozit profillerde parçacık içeriğindeki artışa bağlı olarak maksimum gerilme değerlerinde artış/azalış şeklinde değişim gözlemlenmiştir birim uzama miktarlarında ise azalma gözlenmiştir. Maksimum UTS ve YS değerleri %5 B_4C içeren numunelerde sırasıyla ~132 MPa ve ~83 MPa olarak elde edilmiştir.
- ✓ B_4C ve SiC içeren kompozit profillerde parçacık içeriğindeki artışa bağlı olarak birim uzama miktarında azalma tespit edilmiştir. Saf Al profillerde yaklaşık %40 birim şekil değiştirme elde edilmişken %20 SiC ve B_4C içeren numunelerde bu oran sırasıyla yaklaşık %3 ve %2'dir.
- ✓ Üretilen kompozit profillere eğme deneyleri yapılabilir.
- ✓ Takviye elemanı değiştirilerek (örneğin oksitler) kompozit profillerin mekanik karakterizasyonu yapılabilir.

KAYNAKLAR

Akbulut, H. (1994). Alümina fiber takviyeli Al-Si metal matriksli kompozitlerin üretimi ve mikroyapı-özellik ilişkilerinin incelenmesi(Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Alizadeh, A., Eslami, M., & Babaee, M. H. (2018). Investigation on Microstructure, Mechanical Properties and Fracture Mechanism of Trimodal SiC Reinforced Al5083/Al2024 Aluminum Alloy Based Nanocomposites Fabricated by Mechanical Milling and Hot Extrusion Processes. *Transactions of the Indian Institute of Metals,* 71(9), 2325-2338.

Asif, M., Chandra, K., & Misra, P. S. (2011). Development of aluminium based hybrid metal matrix composites for heavy duty applications. Journal of *Minerals and Materials Characterization and Engineering, 10(14), 1337.*

Asboell, K., Jensrud, O., Reiso, O., & Jacobsen, D. (1996). Extrudability and Mechanical Properties of Some 7XXX-Series Alloys. In Proceedings of international alüminium extrusion technology seminar (Vol. 2, pp. 291-296). *Aluminium Association Inc, & Aluminium Extruders Council*.

Bacon, D., & Dieter, G. E. (1988). *Mechanical Metallurgy*: SI Metric Edition.

Barbero, E. J. 1999. *Introduction to Composite Materials Design*. Taylor & Francis, pp. 25-30, New York

Başaran, D. (2010) Alüminyum ekstrüzyonda fireyi azalatacak kalıp tasarım. Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknolojisi Enstitüsü*. Gebze.

Bayram, H. (2008). Ekstrüzyon yönteminde sıcaklık, ekstrüzyon hızı ve sürtünme parametrelerinin profil kalitesine etkisinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.

Beşergil, B. 2016. Kompozitler Temel İlkeler Test Metotları. Gazi Kitabevi, pp. 37,38,51,114,459,493,518, Ankara.

Bingöl, S. (2016) Kalıp girişinin ekstrüzyon edilebilirlik üzerindeki etkisi. *DÜMF Mühendislik Dergisi,* 7(1), 159-167.

Birol, Y. (2004). The effect of homogenization practice on the microstructure of AA6063 billets. *Journal of Materials Processing Technology,* 148(2), 250-258.

Bingöl, S., (2001). Sürekli Ekstrüzyonda Kaynama Olayı ve Kaynamaya Etki Eden Faktörlerin Arastırılması. Yüksek Lisans Tezi. *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.* İstanbul.

Bodunrin, M. O., Alaneme, K. K., & Chown, L. H. (2015). Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics. *Journal of materials research and technology*, 4(4), 434-445.

Brusethaug S., Reiso, O. and Ruch, W. Extrusion of Particulate-Reinforced Aluminium Billets Made by D.C. Casting, *Proc. Fabrication of Particulates Reinforced Metal Composites*, J. Masounave and F.G. Hamel, Ed., ASM International, 1990, p 173–180

Calin, R., Pul, M., & Pehlivanli, Z. O. (2012). The effect of reinforcement volume ratio on porosity and thermal conductivity in Al-Mgo composites. *Materials research*, 15(6), 1057-1063.

Chawla, N. C. K. K., & Chawla, K. K. (2006). Metal-matrix composites in ground transportation. *JoM*, 58(11), 67-70.

Chawla, K. K. (2013). Ceramic matrix composites. Springer Science & Business Media.

Cengiz, M. (2016). B4c Esaslı Kompozitlerin B4c/me Başlangıç Tozlarından Hareketle Spark Plazma Sinterleme (sps) Yöntemi İle Üretilmesi Ve Karakterizasyonu (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Çıtak H.C. (2002). Investigation of extrudability of different aluminium alloys by using the method of hot extrusion Master's Thesis, *Istanbul Technical University Institute of Science and Technology*. İstanbul.

Dixit, S., Kashyap, S., Kailas, S. V., & Chattopadhyay, K. (2018). Manufacturing of high strength aluminium composites reinforced with nano tungsten particles for electrical application and investigation on in-situ reaction during processing. *Journal of Alloys and Compounds*, 767, 1072-1082.

Dixon, W., (1992) Extrusion of Particulate-Reinforced Aluminum-Based Metal Matrix Composites, *Proc. Fifth International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Vol* 1, Aluminum Association and Aluminum Extruders Council.

Dikici, B. (2010). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Nikel Titanyum Alaşımlarının Üretimi Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.* İstanbul.

Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R. A., & Chhowalla, M. (2011). Boron carbide: structure, properties, and stability under stress. *Journal of the American Ceramic Society*, 94(11), 3605-3628.

Dobrzanski, L. A., Wlodarczyk, A., & Adamiak, M. (2006). The structure and properties of PM composite materials based on EN AW-2124 aluminum alloy reinforced with the BN or Al2O3 ceramic particles. *Journal of*

Materials Processing Technology, 175(1-3), 186-191.

Emamy, M., Yeganeh, S. V., Razaghian, A., & Tavighi, K. (2013). Microstructures and tensile properties of hot-extruded Al matrix composites containing different amounts of Mg2Si. *Materials Science and Engineering:* A, 586, 190-196.

El-Kady, O., & Fathy, A. (2014). Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites. *Materials & Design* (1980-2015), 54, 348-353.

Fard, R. R., & Akhlaghi, F. (2007). Effect of extrusion temperature on the microstructure and porosity of A356-SiCp composites. *Journal of materials processing technology,* 187, 433-4

Fathy, A., Sadoun, A., & Abdelhameed, M. (2014). Effect of matrix/reinforcement particle size ratio (PSR) on the mechanical properties of extruded Al–SiC composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(5-8), 1049-1056.

Froes, F. H. (1994). Advanced metals for aerospace and automotive use. *Materials Science and Engineering:* A, 184(2), 119-133.

Guillow, S. R., Lu, G., & Grzebieta, R. H. (2001). Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(9), 2103-2123.

Handbook, A. S. M. (1998). Powder metal technologies and applications. *ASM International*, 7, 1146.

Harichandran, R., & Selvakumar, N. (2016). Effect of nano/micro B4C particles on the mechanical properties of aluminium metal matrix composites fabricated by ultrasonic cavitation-assisted solidification process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering,* 16(1), 147-158.

Hashim, J., Looney, L., & Hashmi, M. S. J. (1999). Metal matrix composites: production by the stir casting method. *Journal of materials processing technology*, 92, 1-7.

Huntz, A. M., Maréchal, L., Lesage, B., & Molins, R. (2006). Thermal expansion coefficient of alumina films developed by oxidation of a FeCrAl alloy determined by a deflection technique. *Applied surface science,* 252(22), 7781-7787.

Hwang, Y. M., Huang, S. J., & Huang, Y. S. (2013). Study of seamless tube extrusion of SiCp-reinforced AZ61 magnesium alloy composites. The International *Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 68(5-8), 1361-1370.

Jayashree, P. K., Shankar, M. G., Kini, A., Sharma, S. S., & Shetty, R. (2013). Review on effect of silicon carbide (SiC) on stir cast aluminium metal matrix composites. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 3(3), 1061-1071.

Jones, D. R. H. (1993). *Engineering materials* (p. 358). London: Pergamon press.

Kashyap, K. T., Ramachandra, C., Dutta, C., & Chatterji, B. (2000). Role of work hardening characteristics of matrix alloys in the strengthening of metal matrix composites. *Bulletin of Materials Science*, 23(1), 47-49.

Kang, C. G., Kim, N. H., & Kim, B. M. (2000). The effect of die shape on the hot extrudability and mechanical properties of 6061 Al/Al2O3 composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 100(1-3), 53-62.

Kalkan, h. (2011). A combıned experımental-numerıcal ınvestıgatıon on alumınıum extrusıon. Doctoral dissertation, Atılım *University Institute of Science and Technology.* Ankara

Kalpakjian, S., Schmid, S. R. 2009. Manufacturing Engineering and Technology (Sixth Edition in SI Units). Pearson - Prentice Hall, pp. 216-222, New York.

Karakoç, H., Karabulut, Ş., & Çıtak, R. (2018). Study on mechanical and ballistic performances of boron carbide reinforced Al 6061 aluminum alloy produced by powder metallurgy. *Composites Part B: Engineering*, 148, 68-80.

Kevorkijan, V. M. (1999). Stabilisation in and rejection of ceramic particles from molten aluminium alloy: modelling and experimental testing. *Composites science and technology*, 59(16), 2363-2374.

Kim, H. S. (2000). On the rule of mixtures for the hardness of particle reinforced composites. *Materials Science and Engineering:* A, 289(1-2), 30-33.

Klimowicz, T. F., Dixon, W., & Inouye, S. (1994, November). The Effect of Cold Drawing on the Elastic Modulus of Aluminum Composite Driveshaft Tube,". In Advanced composites X: proceedings of the 10th Annual ASM/ESD Advanced Composites Conference, Dearborn, Michigan, USA, 7-10 November 1994 (p. 165). Asm Intl.

Kumar, M. (2017). Evaluation of Sliding wear behavior of Glass particle reinforced Aluminum alloy 6061 Metal Matrix Composites. *IJASRE*, 3.

Kumkumoğlu, F.(2016) B. Nikel-kobalt İlavesi Ve Öğütme Parametrelerinin Toz Metalurjisiyle Üretilmiş Tunsgten-bakır Alaşımlarında Korozyon Direnci Davranışına Etkisinin Karşılaştırmalı İncelemesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Laue, K., Stenger, H., Castle, A. F., & Lang, G. (1981). Extrusion: processes,

machinery, tooling (pp. 6-9). *Metals Park,* Ohio: American society for metals.

Lim, S. C. V., & Gupta, M. (2001). Enhancing the microstructural and mechanical response of a Mg/SiC formulation by the method of reducing extrusion temperature. *Materials Research Bulletin,* 36(15), 2627-2636.

Lloyd, D.J., Aspects of Fracture in Particulate Reinforced Metal Matrix Composites, *Acta Metall*., Vol 39, 1991

Macke, A., Schultz, B. F., & Rohatgi, P. (2012). Metal matrix composites. Adv. Mater. *Processes,* 170(3), 19-23.

Miracle, D. B., Donaldson, S. L., Henry, S. D., Moosbrugger, C., Anton, G. J., Sanders, B. R., ... & Scott Jr, W. W. (2001). *ASM handbook* (Vol. 21, pp. 107-119). USA: ASM international.

Murray, P. (2013). Low temperature synthesis of boron carbide using a polymer precursor powder route. *Doctoral dissertation, University of Birmingham*. England.

Muharrem, P. U. L., ÇALIN, R., ÇITAK, R., & ŞEKER, U. (2009). Düşük Takviyeli MgO-Al Kompozitlerin Vakumlu İnfiltrasyonunda Takviye Oranının İnfiltrasyon Davranışına Etkisi. Politeknik Dergisi, 12(3), 173-177

Nair, F., & Karamis, M. B. (2010). An investigation of the tribological interaction between die damage and billet deformation during MMC extrusion. *Tribology International,* 43(1-2), 347-355.

Nardone, V. C., & Prewo, K. M. (1986). On the strength of discontinuous silicon carbide reinforced aluminum composites. *Scripta Metallurgica,* 20(1), 43-48.

Nguyentat, T. (1994). Diffusion Bonding: An Advanced Material Process for Aerospace Technology. Web document published at http://www. vacets. org/vtic97/ttnguyen. htm.

Öğünç, H. (2006). Sıcak presleme ile sinterlenmiş α-SiC matriksli B4C kompozitlerinin özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul

Pakdel, A., Witecka, A., Rydzek, G., Shri, D. N. A., & Nicolosi, V. (2018). A comprehensive analysis of extrusion behavior, microstructural evolution, and mechanical properties of 6063 Al–B4C composites produced by semisolid stir casting. *Materials Science and Engineering:* A, 721, 28-37.

Polmear, I., StJohn, D., Nie, J. F., & Qian, M. (2017). Light alloys: *metallurgy of the light metals.* Butterworth-Heinemann.

Poovazhagan, L., Kalaichelvan, K., Rajadurai, A., & Senthilvelan, V. (2013). Characterization of hybrid silicon carbide and boron carbide nanoparticles-reinforced aluminum alloy composites. *Procedia Engineering*, 64, 681-689.

P.W. Jeffery and S. Holcomb., (1990) Extrusion of Particulate-Reinforced Aluminum Matrix Composites, *Proc. Fabrication of Particulate Reinforced Metal Composites,* ASM International,

Rahimian, M., Ehsani, N., Parvin, N., & reza Baharvandi, H. (2009). The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al–Al2O3 composites, made by powder metallurgy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(14), 5387-5393

Ramnath, B. V., Elanchezhian, C., Annamalai, R. M., Aravind, S., Atreya, T. S. A., Vignesh, V., & Subramanian, C. (2014). *Aluminium metal matrix composites–a review*. Rev. Adv. Mater. Sci, 38(5).

Reddy, M. P., Shakoor, R. A., Parande, G., Manakari, V., Ubaid, F., Mohamed, A. M. A., & Gupta, M. (2017). Enhanced performance of nano-sized SiC reinforced Al metal matrix nanocomposites synthesized through microwave sintering and hot extrusion techniques. Progress in Natural Science: *Materials International*, 27(5), 606-614.

Reiso O.,(1988) The Effect of Billet Preheating Practice on Extrudability of AlMgSi Alloys, *Proc. Fourth International Aluminum Extrusion Technology Seminar,* Vol 1, Aluminum Association and Aluminum Extruders Council.

Sano, H., Ishikawa, T., & Yoshida, Y. (2004). Study on the metal flow in extruded billet. *住友軽金属技報*, 45(1), 17-23.

Saha, P. K. (2000). Aluminum extrusion technology. *Asm International. Materials Park*, Ohio 44073-0002

Sahin, I., & Eker, A. A. (2011). Analysis of microstructures and mechanical properties of particle reinforced AlSi7Mg2 matrix composite materials. *Journal of materials engineering and performance*, 20(6), 1090-1096.

Sezer, M., (1975), Alüminyum Metalurjisi, TMMOB.

Shukla, M., Dhakad, S. K., Agarwal, P., & Pradhan, M. K. (2018). Characteristic behaviour of aluminium metal matrix composites: A review. *Materials Today: Proceedings, 5(2), 5830*-5836.

Sikand, R., Kumar, A. M., Sachdev, A. K., Luo, A. A., Jain, V., & Gupta, A. K. (2009). AM30 porthole die extrusions—A comparison with circular seamless extruded tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(18), 6010-6020.

Song, W. Q., Krauklis, P., Mouritz, A. P., & Bandyopadhyay, S. (1995). The effect

of thermal ageing on the abrasive wear behaviour of age-hardening 2014 Al/SiC and 6061 Al/SiC composites. *wear*, 185(1-2), 125-130.

Sokolov, P. S., Mukhanov, V. A., Chauveau, T., & Solozhenko, V. L. (2012). On melting of silicon carbide under pressure. Journal of Superhard Materials, 34(5), 339-341.

Srivatsan, T. S., Zhang, Y., & Harrigan Jr, W. C. (Eds.). (2018). Metal-Matrix Composites Innovations, Advances and Applications: *An SMD Symposium*

Surappa, M. K. (2003). Aluminium matrix composites: *Challenges and opportunities.* Sadhana, 28(1-2), 319-334.

Srivatsan, T. S., Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A., & Lavernia, E. J. (1991). Processing techniques for particulate-reinforced metal aluminium matrix composites. *Journal of Materials Science*, 26(22), 5965-5978.

Tanaka, H. (2002). Sintering of silicon carbide and theory of sintering. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 110(1286), 877-883.

Thakur, S. K., & Dhindaw, B. K. (2001). The influence of interfacial characteristics between SiCp and Mg/Al metal matrix on wear, coefficient of friction and microhardness. *Wear*, 247(2), 191-201.

Thevenot, F. (1990). Boron carbide—a comprehensive review. *Journal of the European Ceramic society*, 6(4), 205-225.

Torralba, J. M., Lancau, V., Martinez, M. A., & Velasco, F. (2000). P/M aluminum matrix composite reinforced with (AlCr2) p. *Journal of materials science letters*, 19(17), 1509-1512.

Tsukerman, S. A. (1965). Powder Metallurgy, Elsevier Ltd.

Ipekoglu, M., Nekouyan, A., Albayrak, O., & Altintas, S. (2017). Mechanical characterization of B 4 C reinforced aluminum matrix composites produced by squeeze casting. *Journal of Materials Research*, 32(3), 599-605.

URL-1. 04.01.2019 tarihinde https://accuratus.com/pdf/sicprops.pdf adresinden alınmıştır.

Ünlü, B. S. (2008). Investigation of tribological and mechanical properties Al2O3–SiC reinforced Al composites manufactured by casting or P/M method. *Materials & design*, 29(10), 2002-2008.

Wilm A., (1911) Metall., Vol 225 (No. 8),

Xin, L., Yang, W., Zhao, Q., Dong, R., Liang, X., Xiu, Z., Hussain, M., Wu, G. (2017). Effect of extrusion treatment on the microstructure and mechanical behavior of SiC nanowires reinforced Al matrix composites. *Materials Science and Engineering:* A, 682, 38-44

Yang, W., Dong, R., Yu, Z., Wu, P., Hussain, M., & Wu, G. (2015). Strengthening behavior in high content SiC nanowires reinforced Al composite. *Materials Science and Engineering:* A, 648, 41-46.

Yilmaz, H. S. (2004). Characterization of silicon carbide particulate reinforced squeeze cast Aluminum 7075 matrix composite. *Middle East Technical University Institute of Science and Technology*. Ankara.

Yilmaz, M. (1997). Production and Mechanical Behavior of Particulate Reinforced Aluminium Matrix Composites. *Ph.D Thesis, Istanbul Technical University*, Institute of science and Technology.İstanbul

Yüksel, F. (2014). Alüminyum Matrisli B4C Partikül Takviyeli Aşınma Direnci Yüksek Kompozit Malzemelerin Aşınma Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yin, H., Wen, G., Hou, S., & Chen, K. (2011). Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of honeycomb-filled single and bitubular polygonal tubes. Materials & Design, 32(8-9), 4449-4460.

Zasadzinski J. and Misiolek W.,(1988) Estimating Optimal Speed/Temperatures to Maximize Hot Extrusion Exit Speed, *Proc. Fourth In ternational Aluminum Extrusion Technology Seminar*, Vol 1, Aluminum Association and Aluminum Extruders Council.

Zasadzinksi J., Libura, W., Richert, J., and Misiolek, W.Z. (1992) Modeling of Temperature-Speed Parameters In Aluminum Extrusion, Proc.Fifth International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Vol 2, Aluminum Association and Aluminum Extruders Council.

Zhou, J., Duszczyk, J., Houdijk, P., Zitman, H., & Walstock, A. J. (2000). Extrusion of an aluminium matrix composite with hardmetal dies (2nd part). *Aluminium Extrusion*, 27-40.

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı	: Özgür Erdem YURT
Doğum Yeri ve Yılı	: Kastamonu-1987
Medeni Hali	: Bekâr
Yabancı Dili	: İngilizce
E-posta	: yurtozgurerdem@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise	: Amasya Lisesi,2004
Ön Lisans	: Ankara Üniversitesi/ Makine Bölümü,2007
Lisans	: Anadolu Üniversitesi/Kamu Yönetimi,2011
Lisans	: Celal Bayar Üniversitesi/Makine Mühendisliği,2012
Yüksek Lisans	: Kastamonu Üniversitesi/ 2016-

Mesleki Deneyim

İş Yeri	: Şahinler Makine 2012-2013 İzmir
İş Yeri	: İzmir Tüpraş Aliağa Rafinerisi 2013-2014
İş Yeri	: Kastamonu Entegre Ağaç Sanayi ve Ticaret A.Ş. 2015-(halen)