

**ALAŞIMLI ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN TALAŞLI  
İMALAT YÖNTEMİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN  
İNCELENMESİ**  
**Oğuz KURT**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALAŞIMLI ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN TALAŞLI İMALAT YÖNTEMİYLE  
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**Oğuz KURT**  
0000-0001-7052-131X

Prof. Dr. M.Cemal ÇAKIR  
0000-0003-0816-4029  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

## TEZ ONAYI

Oğuz KURT tarafından hazırlanan "ALAŞIMLI ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN TALAŞLI İMALAT YÖNTEMİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. M.Cemal ÇAKIR

**Başkan** : Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR  
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
0000-0003-0816-4029  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Prof. Dr. Agah UĞUZ  
0000-0002-9244-3671  
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ  
0000-0003-3350-1509  
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa  
Bilimleri Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN  
Enstitü Müdürü

..!..!..!

**Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

12/09/2019

Oğuz KURT

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ALAŞIMLI ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN TALAŞLI İMALAT YÖNTEMİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

**Oğuz KURT**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. M.Cemal ÇAKIR

Alüminyum köpük malzemeler; başta savunma sanayi olmak üzere birçok teknolojik alanda dikkat çekmeyi başarmış yeni nesil malzemelerdir. Geri dönüşüm oranlarının, basma yükleri altında mekanik enerji emme kabiliyetlerinin ve ses ve ısı yalıtım özelliklerinin yüksek olmasından dolayı alüminyum köpük malzemelerin önümüzdeki yıllarda birçok uygulamada tercih edilmesi kaçınılmazdır. Her ne kadar tercih edilebilir özelliklere sahip olsa da alüminyum köpüklerin talaşlı imalatla şekillendirilmesi konusunda literatürde yeteri kadar çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, eriyikten üretilen  $0,85 \text{ gr/cm}^3$  yoğunluğundaki bir alüminyum köpük kütüğün talaşlı imalat süreçleri ile işlenebilirliği ele alınmıştır. Alüminyum köpük malzemeden üretilmiş kütüğe frezeleme ve delme operasyonları sonrası nihai parça elde edilmiştir. Talaşlı imalat işlemlerinde farklı kesme parametrelerinin etkileri irdelenmiş ve en uygun kesme koşulları oluşturulmaya çalışılmıştır. Çalışmada Al köpük malzemeden talaşlı imalat yöntemiyle üretilen test parçası askeri amaçla kullanılacak bir parça olup gerek imalat gerekse montaj proseslerinin kalitesi büyük önem taşımaktadır. Malzeme yoğunluğunun diğer köpük uygulamalarına göre yüksek oluşunun nedeni de parçanın bu askeri amaçlı kullanımındır.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum köpük, talaşlı imalat, işlenebilirlik  
**2019, viii + 63 sayfa.**

## ABSTRACT

MSc Thesis

### INVESTIGATING THE MACHINABILITY OF ALLOYED ALUMINUM FOAMS BY METAL CUTTING

**Oğuz KURT**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. M.Cemal ÇAKIR

Aluminum foam materials are the new generation materials that have managed to attract attention in many technological fields, including the defense industry. It is inevitable that aluminum foam materials will be preferred in many applications in future due to their high recycling rates, mechanical energy absorption under compressive loads and high sound and heat insulation properties. In spite of these desirable properties, there is not enough work in the literature about machinability aluminum foams by metal cutting. In this study, the machinability of an aluminum foam billet with a density of  $0.85 \text{ g/cm}^3$  produced via melt route is discussed. The final product was obtained by milling and drilling operations on the aluminum foam billet. The effects of different cutting parameters in machining processes are investigated and optimum cutting conditions are tried to be established. In the present study, the test piece to be produced by Al foam material by machining is a part to be used for military purposes and the quality of both manufacturing and assembly processes is of great importance. The reason for the high density of the material compared to the other foam applications is the military use of the part.

**Key words:** Aluminum foam, machining, machinability  
**2019, viii + 63 pages.**

## TEŞEKKÜR

Öncelikle birlikte çalışmaktan büyük zevk duyduğum teknik ve moral desteğinden dolayı danışman hocam Prof. Dr. M. Cemal Çakır'a teşekkürlerimi sunarım.

Yapılan test ve deney çalışmaları için kesici takımları sağlayan Onur Alp Karaaslan şahsında Kyocera Unimerco'ya, Özgür İrfan şahsında InovaTools'a ve Sedat Yılmaz şahsında YG-1'e,

Yine test ve deney çalışmalarında tezgah, bağlama ve diğerk ekipmanlar konusunda desteklerini esirgemeyen patronum Mustafa Tamar'a,

Çalışmalar için benimle mesailere kalan çalışma arkadaşlarıma,

Ve özellikle hayatımın her anında yanımda olan, yoğun çalışma temposunda bazı ilişki ve sorumluluklar anlamında eksik bıraktığım yanlarımı hoş gören ve kayıtsız şartsız desteklerini esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Oğuz KURT  
12/09/2019

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Talaşlı İmalat.....	26
2.2. Frezeleme.....	27
2.3. Dik Kesme Mekanikliği.....	27
2.4. Talaşlı İmalat İşlemlerinde Isı ve Sıcaklık.....	30
2.5. Kesici Takımlar.....	32
2.6. Kesici Takım Özellikleri ve Malzemeleri.....	32
2.7. Kesici Takım Aşınması.....	35
2.8. İş Parçası Malzeme Özellikleri ve Takım Bozulması.....	35
2.9. Polar Diyagramda İncelenen Malzeme Faktörleri.....	35
2.10. Malzeme Özellikleri, Takım Aşınması ve Takım Bozulması.....	37
2.11. Takım ve Kesme Parametrelerinin Seçimi, Takım Aşınması ve Polar Diyagramlar.....	38
2.12. Yekpare Karbür Takımlarda Takım Aşınması.....	41
2.13. Kesici Takımlarda Aşınma Tipleri.....	42
2.14. Serbest Yüzey Aşınması.....	43
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	44
3.1. Materyal.....	44
3.1.1. Kullanılan Kesici Takımlar.....	46
3.1.2. Kesici Takımların İşlem Öncesi Görünümleri.....	47
3.2. Yöntem.....	48
4. BULGULAR.....	51
4.1. İşleme Sonrası Alüminyum Köpük.....	51
4.2. İşleme Sonrası Kesici Takımlar.....	52
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	55
KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	63



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
AFS	Alüminyum köpük Sandviç
CBN	Cubic Boron Nitride – Kübik Bor nitrür
CVD	Chemical Vapour Deposition – Kimyasal Buhar Biriktirme
DT	Diferansiyel Termal
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
PCBN	Poly Crystalline Boron Nitride – Çok Kristalli Kübik Bor Nitrür
PCD	Poly Crystalline Diamond – Çok Kristalli Elmas
PVD	Physical Vapour Deposition – Fiziksel Buhar Biriktirme
SHBB	Split Hopkinson Basın. Barı
TG	Termo-Gravimetrik

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Al köpük malzemenin Plato stresi ve sıkışma eğrisinin şematik gösterimi.....	1
Şekil 1.2. Kalıplama metoduyla dökülmüş alüminyum köpük parçaları .....	2
Şekil 1.3. (a) Ferrari 360 ve 430 spider modelinde yan rayların dayanıklılığını arttırmak için kullanılan alüminyum köpük parçası; ve (b) Audi A7 modelinde kullanılan küçük çarpışma soğurucu parçasına ait görseller .....	3
Şekil 2.1. Alaşımli bir alüminyum köpük örneği .....	5
Şekil 2.2. Alüminyum esaslı köpük malzemenin endüstride kullanımına bazı örnekler: (a) Otomotivde A-B sütunları, (b) Otomotivde çarpışma kutuları (crash-box), (c) Otomotivde motor bağlantı mesnetleri, (d) Demiryolu endüstrisinde taban döşemeleri, (e) Savunma endüstrisinde patlamaya karşı zırhlar .....	6
Şekil 2.3. Alüminyum esaslı köpük malzemenin diğer kullanımın alanlarına bazı örnekler: (f) Sandviç panel örneği, (g) İnşaat sektöründe dış cephe kaplaması örneği, (h) İnşaat sektöründe tuğla konfigürasyonlu dış cephe dekoru, (i) Audi'nin araba fuarında kullandığı curve araba standı .....	7
Şekil 2.4. (a) 12 segmentli koni, (b) Koni segmentlerin kalibrasyonu için kullanılan kalıp, (c) Şekillendirilmiş segment, (d) AFS koni, (e) Ariane-5 kargo roketinin genel görünümü.....	13
Şekil 2.5. Alüminyum esaslı köpüklere istenilen 3-boyutlu şekillerin verilmesi için kullanılan mevcut 3 yöntem: (a) Kalıp içerisinde son-şekle-yakın köpürtme, (b) Kullanılacağı profil içerisinde köpürtme, (c) Küçük küreler halinde köpürtüp kullanılacağı profilin içerisine doldurma (APM teknolojisi).....	15
Şekil 2.6. Gözenek yapılarına göre köpük metal görselleri. (a) Kapalı hücreli köpük metal, (b) Açık hücreli köpük metal.....	19
Şekil 2.7. Metal ve metalik köpük yapıların gerilme-uzama davranışları görseli .....	20
Şekil 2.8. Hüresel katıya ait bir gerilme-uzama eğrisi ve önemli parametreler .....	21
Şekil 2.9. (a) Açık hücreli köpükteki hücrenin konsept modeli, (b) Hücrenin tek eksenli sıkıştırılması sonucu hücre kenarı bükülmesinin gösterimi .....	21
Şekil 2.10. Magnezyum alaşımlarına gösterimi ve kullanılan harf kodlarının anlamları .....	23
Şekil 2.11. Çeşitli metallere ait delik delme ve frezeleme işlemleri için spesifik güç tüketim değerleri.....	25
Şekil 2.12. Yan birikmenin işleme esnasındaki maruz kalınan kuvvetler üzerindeki etkisi .....	25
Şekil 2.13. Dik ve eğik kesme işlemlerinin geometrileri .....	28
Şekil 2.14. Dik kesmede meydana gelen deformasyon bölgeleri .....	28
Şekil 2.15. Dik kesmede mekaniğine ait görsel .....	30
Şekil 2.16. Kesme bölgesindeki ısı oluşmasına neden olan üç bölge .....	31
Şekil 2.17. Kesici takımların özelliklerinin karşılaştırılması.....	34
Şekil 2.18. En uygun uç yaklaşımı.....	34
Şekil 2.19. (a) iş parçası malzemelerinin potansiyel işlenebilirliklerini kontrol eden malzeme faktörleri cinsinden sınıflandırılmaları için bir polar diyagram örneği, (b) her bir malzeme faktörünün verilen bir referans malzemeye (ortadaki koyu renkli çizgi ile çevrili alan) göre, X malzemesinin işlenebilirliğine (taralı alan) olan önem derecesini gösteren bir polar diyagram .....	36
Şekil 2.20. Tipik malzeme özelliklerine bağlı aşınma şablonu örnekleri .....	37

Şekil 2.21. Kesici takım ve kesme koşullarının seçimi ile talaş kaldırma işleminde baskın olacak takım bozulması ve aşınma tipinin belirlenmesi sürecinde iş parçası malzemesinin adezyon (yapışma) eğilimi ve sünekliliğinin etkisi.....	38
Şekil 2.22. Kesici takım ve kesme koşullarının seçimi ile talaş kaldırma işleminde baskın olacak takım bozulması ve aşınma tipinin belirlenmesi sürecinde iş parçası malzemesinin pekleşme eğiliminin etkisi.....	39
Şekil 2.23. Kesici takım ve kesme koşullarının seçimi ile talaş kaldırma işleminde baskın olacak takım bozulması ve aşınma tipinin belirlenmesi sürecinde iş parçası malzemesinin termal iletkenlik (düşük) özelliğinin etkisi.....	39
Şekil 2.24. Kesici takım ve kesme koşullarının seçimi ile talaş kaldırma işleminde baskın olacak takım bozulması ve aşınma tipinin belirlenmesi sürecinde iş parçası malzemesinin sertlik özelliğinin etkisi .....	40
Şekil 2.25. Kesici takım ve kesme koşullarının seçimi ile talaş kaldırma işleminde baskın olacak takım bozulması ve aşınma tipinin belirlenmesi sürecinde iş parçası malzemesinin aşındırıcılık özelliğinin etkisi .....	40
Şekil 2.26. Meydana gelen aşınma kesici takımın yenilenebilme olasılığını belirler. Soldaki tercih edilen bir durumken, sağdaki görseldeki aşınma durumlarından her zaman kaçınılmalıdır .....	42
Şekil 2.27. Serbest yüzey aşınması .....	43
Şekil 3.1. Parçaların bağlaması için kullanılan Lang marka mengene .....	44
Şekil 3.2. Kesme işlemleri için kullanılan 5 eksenli işleme merkezi (DMG DMU-75 MonoBLOCK) ve bağlanmış parçaya ait görsel .....	45
Şekil 3.3. Kyocera markalı 3 ağızlı Ø12 karbür kesici takım görseli. ....	46
Şekil 3.4. Inovatools markalı 3 ağızlı Ø12 karbür kesici takım görseli. ....	46
Şekil 3.5. YG-1 markalı 3 ağızlı Ø12 karbür kesici takım görseli.....	46
Şekil 3.6. YG-1 markalı 2 ağızlı Ø12 karbür kesici takım görseli.....	46
Şekil 3.7. İşleme öncesi kesici takımın kesici ağızlarının genel görüntüsü .....	47
Şekil 3.8. Alüminyum köpüğün işleme için kullanılan bölgeleri ve operasyonların bölgesel dağılımı .....	49
Şekil 3.9. OP-200'e ait dört bölge için oluşturulan takım yolu ve iş parçası görseli.....	49
Şekil 4.1. Bütün operasyonlar sonunda alüminyum köpüğe ait görseller.....	51
Şekil 4.2. Üç farklı işleme stratejisi (soldan sağa; eksene paralel – kontura paralel – eş merkezli) ile oluşturulan aynı özellikteki dikdörtgen cepler ve 3B kontur ....	52
Şekil 4.3. 1 numaralı takıma ait aşınma miktarı : 437 $\mu$ .....	52
Şekil 4.4. 2 numaralı takıma ait aşınma miktarı : 127 $\mu$ .....	53
Şekil 4.5. 3 numaralı takıma ait aşınma miktarı : 277 $\mu$ .....	53
Şekil 4.6. 4 numaralı takıma ait aşınma miktarı: 482 $\mu$ .....	53
Şekil 4.7. 1 numaralı takım ile aynı özellikte olan takıma ait kaba işleme sonrası aşınma miktarı.....	54
Şekil 5.1. Ticari ürüne ait işlenen parçanın üstten görünüşü. ....	56

## ÇİZELGELER DİZİNİ

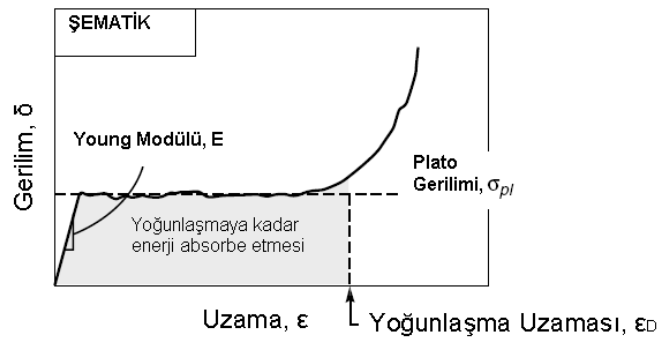
### Sayfa

Çizelge 2.1. Alaşım elementlerinin alüminyuma etkileri.....	8
Çizelge 2.2. Bazı elementlerin ikili alaşımlar için alüminyum içerisindeki çözünürlük sınırları.....	11
Çizelge 2.3. Otomotiv endüstrisinde ortalama alüminyum kullanımı.....	24
Çizelge 2.4. Alaşım grupları ve çeşitlerine göre işlenebilirlik değerleri ( 1: çok iyi, 5: çok kötü).....	26
Çizelge 2.5. Alaşım grupları ve çeşitlerine göre işlenebilirlik değerleri ( 1: çok iyi, 5: çok kötü).....	33
Çizelge 3.1. Kullanılan kesici takımlara ait özellikler.....	47
Çizelge 3.1. Kullanılan Kesme Parametreleri ( $V_c$ : m/dak, $N$ : dev/dak, $f_z$ : mm/ağız, $V_f$ : mm/dak, $a_e$ : mm).....	48
Çizelge 5.1. Kullanılan kesici takımların radyal boşluk açıları.....	55

## 1. GİRİŞ

Köpük metaller başta alüminyum olmak üzere farklı metallere meydana gelen, toplam hacminin büyük bir kısmının gaz ile dolu olduğu boşluklar içeren ve gözeneklerden oluşan yapılardır. Metalik köpükler polimer tabanlı köpüklere göre üstün özelliklere sahiptir. Çok düşük özgül ağırlıkları vardır, yüksek mukavemet ve gaz geçirgenliklerinin yanında yüksek sıcaklıklarda daha dengeli durumdadırlar, yanmaya karşı daha dirençlidirler ve yanma sırasında herhangi bir zehirli duman oluşturmamaları bu üstün özelliklerden sadece birkaçıdır. Bu özelliklere ek olarak, herhangi bir kirlilik problemi oluşturmaksızın tamamen geri dönüştürülebilirler (Baron 2007, Bach ve ark. 2002 ve Hutzler 1997). Gözenekli yapıları sayesinde köpük metaller, dolu malzemelere göre alışılmadık dışında birtakım özelliklere sahiptirler. Ezilebilirler, sıkıştırıldıklarında plato stresi özelliği gösterirler ve deformasyon sırasında poisson oranları değişkenlik arzeder. İyi mekanik özellik (özellikle mukavemet ve rijitlik) ve düşük yoğunluğun mükemmel bir birleşimi olmaları en önemli avantajlarıdır (Banhart 2000).

Köpük malzemeler darbe yönünden bağımsız olmak üzere yüksek darbe enerjisini sönmüleyebilme özelliğine sahiptirler. Titreşim sönmüleme, elektromanyetik koruma, ısı ve ses yalıtımında oldukça başarılıdır (Banhart 2007). Köpük metaller bilinen malzemelere kıyasla elde edilmesi güç olan ve genellikle birbiriyle çelişen birçok özelliğin bir arada olduğu benzersiz yapılardır. Örneğin; çok düşük yoğunluk, çok iyi titreşim sönmüleyebilme kabiliyeti, yüksek rijitlik ve mukavemet, çarpma enerjisini soğurabilme özelliği, düşük ısı iletkenlik ve manyetik geçirgenlik gibi özellikler başlıcalarıdır (Ashby ve ark. 2000).



Şekil 1.1. Al köpük malzemenin Plato stresi ve sıkışma eğrisinin şematik gösterimi (Yu ve ark. 1997).

Metalik köpüklerin üretim yöntemlerinin ilk kez patentlenmesinden bu yana çok uzun zaman geçmiş olsa da bu malzemeler henüz ticari olarak yaygınlaşmış değildir (Şekil 1.2). Bu durumun en büyük nedenleri arasında, parçaların tasarımsal uygunsuzluğu, test prosedürlerinin ve süreçlerinin eksikliği ile üretim yöntemlerinin diğer malzemelere kıyasla karmaşık ve pahalı olması gösterilebilir. Metal köpükler halen tam anlamıyla karakterize edilmiş ve üretim prosesi bakımında yeteri kadar anlaşılabilmiş değildir. Bu da yeterli ölçüde ve bilinçli bir kontrol mekanizmasının henüz oluşmamasındaki engellerin başında gelmektedir.

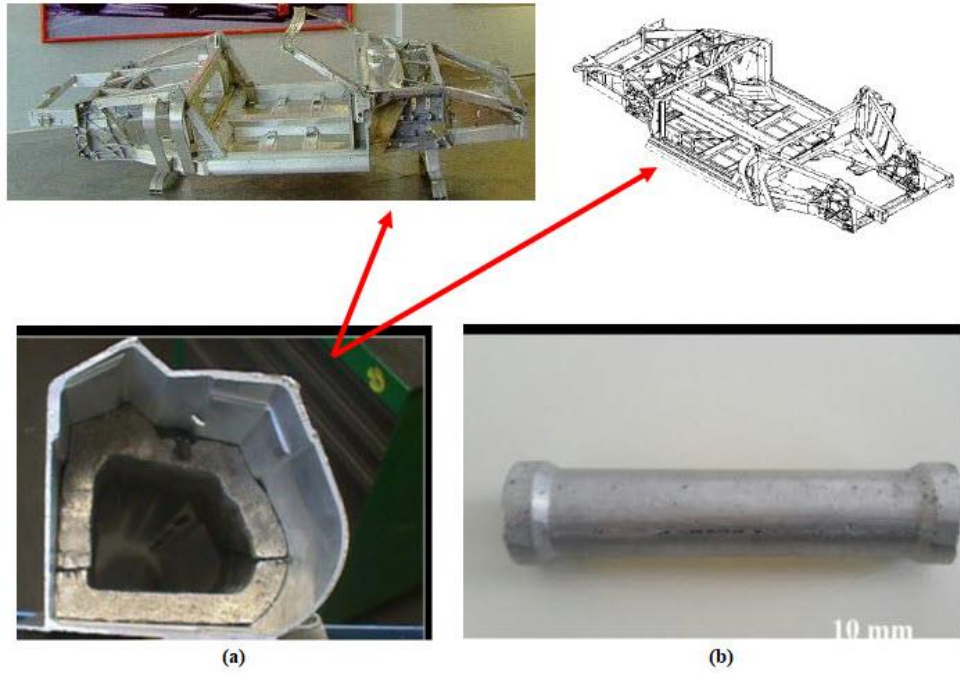


**Şekil 1.2.** Kalıplama metoduyla dökülmüş alüminyum köpük parçaları (Alulight 2006).

Malzemelerin işlenebilirliğini değiştiren birtakım özellikler mevcuttur. Bu özellikleri, malzemeleri oluşturan alaşım elementler, yapıyı oluşturan fazların şekli, boyutu ve hacimsel oranı, mikro-yapıları, gözenekliliği ve fiziksel özellikleri şeklinde sıralamak mümkündür (Tash ve ark. 2006). Dolayısıyla talaşlı imalattaki parametreler ile köpük yapıda bulunan alaşım elementlerinin alüminyum esaslı metal köpüğün özelliklerini

değiştirerek, işlenebilirliğine olumlu veya olumsuz olmak üzere etki etmesi kaçınılmazdır.

Alüminyum esaslı köpük malzemeler yeni nesil teknolojik ürünlerdir. Bu sebeple şimdiye kadar ikincil işlemleri çok az sayıda yayına konu olmuştur (Sığırtmaç ve ark 2012, Sığırtmaç ve ark 2008, Sığırtmaç ve ark. 2009 ve Matz ve ark. 2016). İkincil işlemlerle ilgili çalışmaların hızlanmasıyla birlikte çözüm ve önerilerin ortaya çıkması bu malzemelerin kullanılabilirliğini arttırarak yaygınlaşmasını sağlayacaktır. Birbirinden farklı şekillere sahip olan parçaların, daha kısa hazırlık süreleri ve düşük maliyetler nedeniyle tercih sebebi olan talaşlı imalat yöntemleri de (frezeleme, tornalama, vb.) alüminyum köpükler için ikincil işlemlerdir. Köpük metallerin talaşlı imalatıyla ilgili çalışma sayısı çok sınırlıdır.



**Şekil 1.3.** (a) Ferrari 360 ve 430 spider modelinde yan rayların dayanıklılığını arttırmak için kullanılan alüminyum köpük parçası; ve (b) Audi A7 modelinde kullanılan küçük çarpışma soğurucu parçasına ait görseller (Garcia-Moreno 2016).

Bu çalışma, birçok avantaja sahip olan ve her alanda yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat operasyonlarının metal köpüklerin şekillendirilmesinde de kullanılabilirliğini, talaşlı imalat koşullarını, sürece etki eden faktörleri ve alaşım elementlerini göz önünde bulundurarak incelemeyi amaçlayan ve inceleyen bir çalışmadır. Çalışmada, alüminyum

köpük malzemelerin farklı kesme hızları ve farklı ağız başı ilerleme parametreleri kullanılarak işlenebilirliği incelenmiştir. Kesme parametreleri belirlenirken kullanılan kesici takımlar için önerilen katalog değerleri ile birlikte talaş inceltme faktörü de göz önünde bulundurulmuştur. Talaşlı imalat ile işlenebilirliğin incelenmesi için savunma sanayinde kullanılan bir ürüne ait parça seçilerek bu ürün talaş kaldırma metotları uygulanarak elde edilmeye çalışılmıştır.



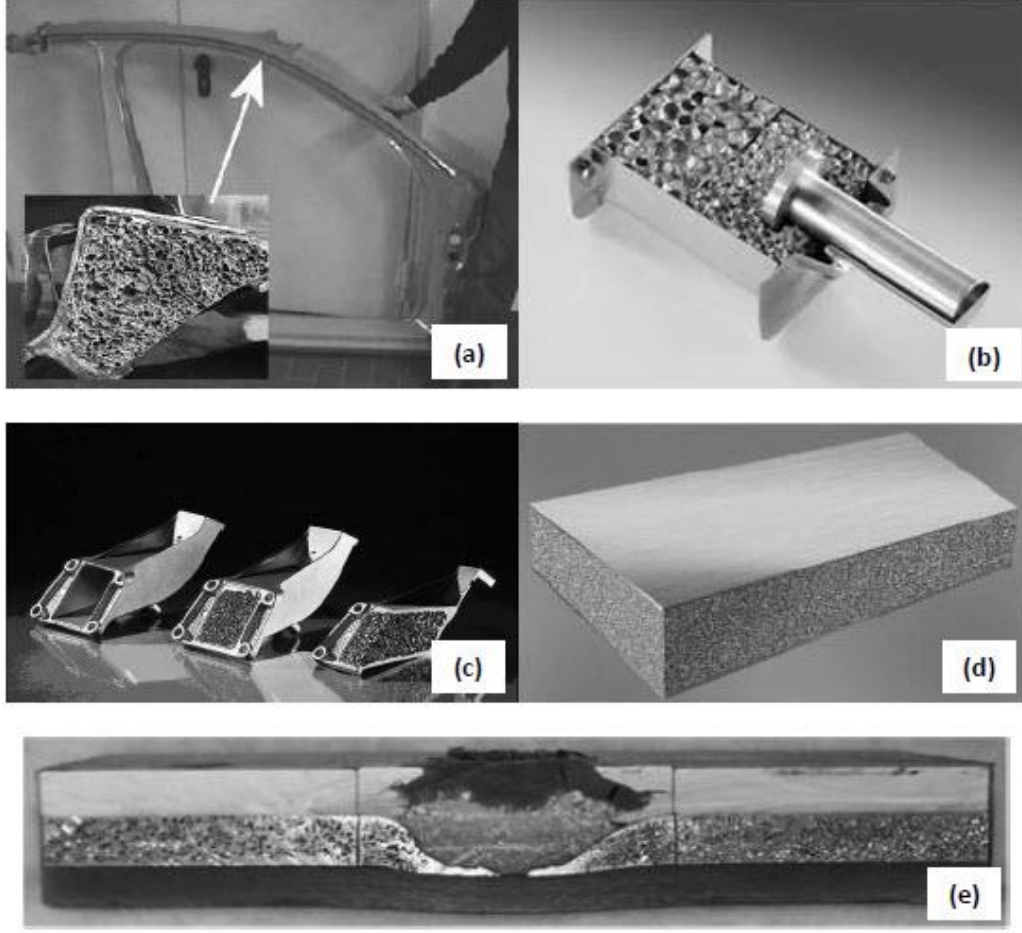
## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek darbe ve titreşim sönümlenme kapasitesi ile düşük ısı iletkenlik gibi özellikler metal köpüklerin önemli ve benzersiz özellikleridir (Şekil 2.1). Bu özelliklerin bir arada tek yapıda bulunması sebebiyle birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve yakın zamanda pek çok çalışma bu malzemeler üzerine yoğunlaşmıştır.



Şekil 2.1. Alaşımli bir alüminyum köpük ( $AlMg_4Si_8$ ) örneği (Helwig ve ark. 2011)

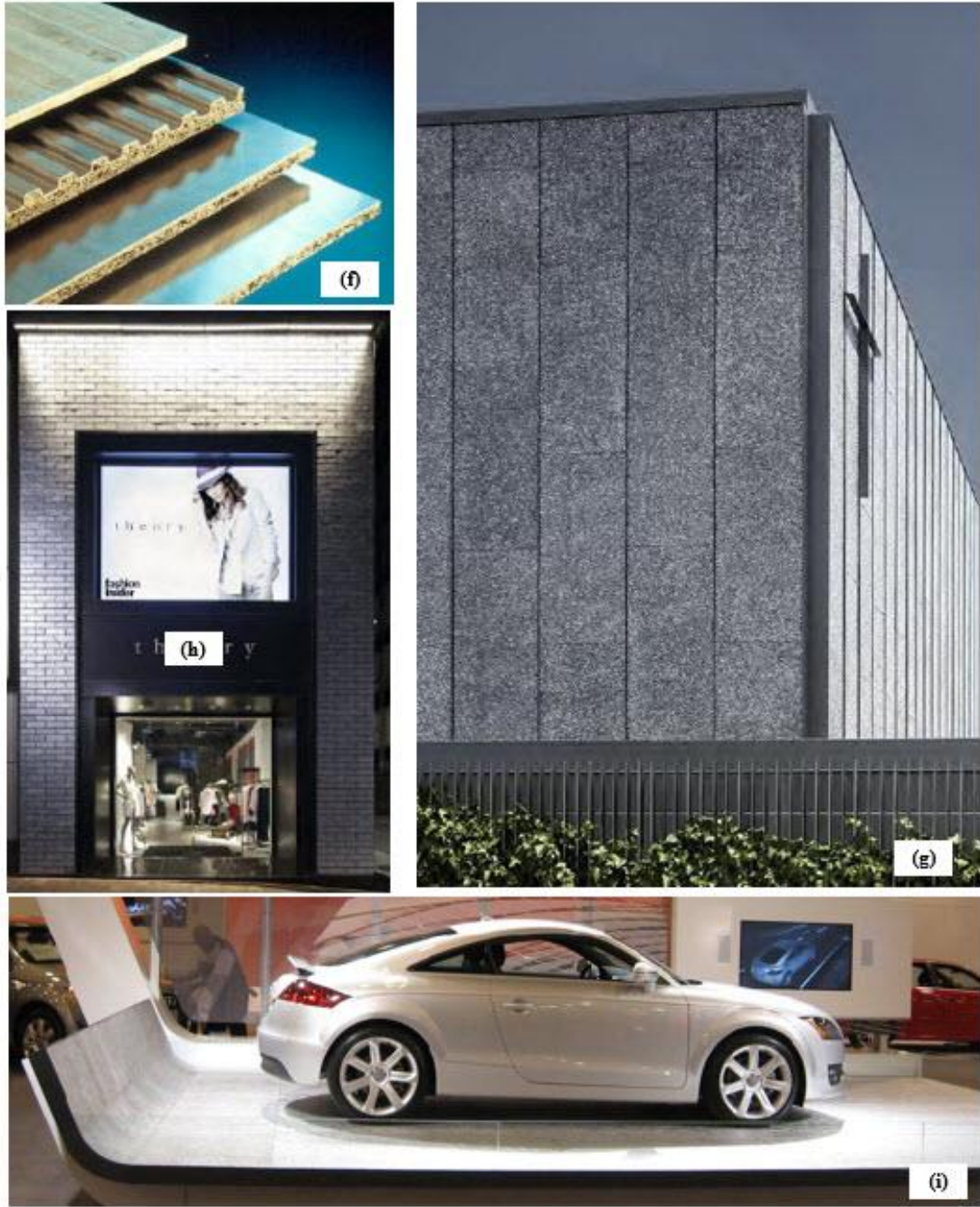
İlk zamanlarda, hem çok bilinmemesi hem de üretim maliyetlerinin oldukça yüksek olması ve özellikle üretimleri aşamasında kullanılan yöntemlerinin tekrarlanabilirlik ile ilgili problemlerinden dolayı pek tercih edilmiyordu. Fakat, zaman içinde bilimsel araştırmalar ve teknolojik gelişmeler sayesinde artık endüstriyel uygulamalarda köpük malzemelere sıkça rastlanmaktadır (Şekil 2.2 ve Şekil 2.3). Otomotiv sektöründe, yan raylar, kapı ve taban kaplamaları, tampon kısmında yer alan çarpışma kutuları (crash-box), tavan ile gövdeyi birbirine bağlayan A ve B-sütunları ile motor bağlantı mesnetlerinde; gemilerin kompartımanında; tren vagonlarının taban ve yan panellerinde; genel ve özel maksatlı ses yalıtım uygulamalarında; elektromanyetik kalkanlarda ve zırh levhalarında, havacılık sektöründe ağırlık azaltma gibi uygulamalar metal köpüklerin temel kullanım alanlarına birer örnektir. (Ashby ve ark. 2000, Schaeffler ve ark. 2008, Stöbener ve ark. 2009 ve , Toksoy ve ark. 2010).



**Şekil 2.2.** Alüminyum esaslı köpük malzemenin endüstride kullanımına bazı örnekler: **(a)** Otomotivde A-B sütunları, **(b)** Otomotivde çarpışma kutuları (crash-box), **(c)** Otomotivde motor bağlantı mesnetleri, **(d)** Demiryolu endüstrisinde taban döşemeleri, **(e)** Savunma endüstrisinde patlamaya karşı zırhlar [Banhart 2007, Stöbener ve ark. 2009 ve Schaeffler ve ark. 2005].

Toz metalürjisi (köpürtücü madde ekleyerek), ergimiş metale direkt gaz enjeksiyonu ve ergimiş metale köpürtücü madde ekleme olmak üzere köpüklerin üretiminde temelde 3 yöntem kullanılmaktadır. Bunların arasında en yaygın olanı ise toz metalürjisidir (Shang ve ark. 2008).

Metal matrisin köpürmesi hassas bir süreçtir. Bu aşamaya birçok üretim parametresi, köpürtme işlemini oluşturma sırasında kullanılan tozların ergitilmesi için sıcaklık artışı gibi, etki etmekte ve köpüğün fiziksel özelliklerini belirlemektedir. Bu etkiler, malzeme yoğunluğu, hücre yönelimi, basma mukavemeti gibi özellikler üzerinde değişiklikleri beraberinde getirir (Simacik ve ark. 1999 ve Matijasevic ve ark. 2006).



**Şekil 2.3.** Alüminyum esaslı köpük malzemenin diğer kullanımın alanlarına bazı örnekler: **(f)** Sandviç panel örneği, **(g)** İnşaat sektöründe dış cephe kaplaması örneği, **(h)** İnşaat sektöründe tuğla konfigürasyonlu dış cephe dekoru, **(i)** Audi'nin araba fuarında kullandığı curve araba standı (Anonim 2019a)

Yoğun yapıda alüminyum için alaşım elementlerinin etkileri Çizege 2.1'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Alaşım elementlerinin alüminyuma etkileri (Ensarioğlu 2014)

<b>Alaşım elementi</b>	<b>Etki</b>
Bizmut (Bi)	Ergime sıcaklığı düşük diğer bazı elementler gibi (Pb, Sn, Cd vb.) işlenebilirliği artırır. Katı halde çözünürlüğü düşüktür ve yumuşak, kolay ergiyen bir faz oluşturur ki bu da talaşın ırılmasını ve aynı zamanda kesici takım üzerinde yağlayıcı etki meydana gelmesini sağlar. Al-Cu ve Al-Mg-Si alaşımlarında, Pb-Bi ilavesi 1:1 oranında yapılır ve böylece Pb'nin oluşturduğu büzülme, Bi'nin oluşturduğu genişleme ile telafi edilir.
Bor (B)	Tane küçültücü olarak ve ayrıca V, Ti, Cr, Mo elementlerini çökeltmek için kullanılır. Tane küçültücü olarak B tek başına (%0,005-%0,1 kadar) kullanılabilir de 5:1 Ti-B ilavesi daha etkili olmaktadır.
Kalsiyum (Ca)	Al içerisinde çözünürlüğü çok düşüktür ve CaAl <sub>4</sub> metal-lerarası bileşimini oluşturur. %5 Ca ve %5 Zn içeren alaşım grubu, süperplastik özelliklere sahiptir. Si ile birleşerek Al içerisinde neredeyse çözünmeyen CaSi <sub>2</sub> 'yi oluşturur ve böylece iletkenliği artırır. Al-Mg-Si alaşımlarında yaşlandırma kabiliyetini düşürür. Al- Si alaşımlarında ise mukavemeti artırır ve uzamayı azaltır.
Krom (Cr)	Elektrik direnci üzerinde çok etkilidir. Al-Mg, Al-Mg-Si ve Al-Mg- Zn alaşım gruplarına en çok %0,35 oranında eklenir. Bu aşılığında; Mn, Fe ve Ti gibi elementlerle kaba taneli bileşenler oluşturur. Cr; tanecik yapısını kontrol etmede, Al-Mg alaşımlarında tanecik büyümesini engellemede ve Al-Mg-Si / Al-Mg-Zn alaşımlarının sıcak işlemlerinde yeniden kristalleşmeyi engellemede kullanılır.
Bakır (Cu)	Al-Cu alaşımları, genellikle diğer bazı alaşım elementlerinin yanında %2-10 Cu içerir. Bu alaşımlar, çözeltiye alma ve ardından yaşlandırma işlemine cevap verir ve mukavemetleri artarken uzamaları azalır. Mukavemet artışı, %4-6 Cu ilavesinde maksimum olur. Katılama çatlağı riski artar ve bu sebeple, kaynak edilebilirlik düşer.
Bakır-Magnezyum (Cu-Mg)	Al-Cu alaşımlarına Mg ilavesinin temel faydası, çözeltiye almayı takiben yapılan su verme işlemiyle sağlanan mukavemetin artmasıdır.

**Çizelge 2.1.** Alaşım elementlerinin alüminyuma etkileri (Ensarioğlu 2014) (devam)

<b>Alaşım elementi</b>	<b>Etki</b>
Bakır-Magnezyum ve diğer elementler (Cu-Mg ve diğer)	Fe içeren Al-Cu-Mg alaşımları, boyutsal kararlılık ve yatak malzemesi olma özellikleri ile karakterize edilirler. Yüksek sıcaklıklarda mukavemet ve sertliklerini korumaları da tipik özelliklerindedir. Ancak, Al-%4Cu-%0,5Mg alaşımında %0,5 Fe ilavesi dâhi, eğer Si içeriği FeSi olarak demiri bağlayacak kadar mevcut değilse, ısıl işlem koşullarında çekme mukavemetini düşürmektedir.
Demir (Fe)	Al içerisindeki en çok rastlanan katışkı elementidir. Katı haldeki çözünürlüğü çok düşüktür (~%0,04) ve dolayısıyla bu miktarın üzerindeki tüm içerik metaller-arası (Al ve diğer elementlerle) ikincil faz olarak bulunur.
Lityum (Li)	Li kalıntıları, ergimiş alüminyumun oksidasyon hızını artırır ve yüzey karakteristiklerini değiştirir. Çökeltme sertleşmesine imkân verir.
Magnezyum (Mg)	Katı halde çözünürlüğü %17,4'e kadar varsa da kullanılan alaşımlarda Mg içeriği % 5,5'u geçmez. Mg ilavesi, sünekliği çok azaltmadan, hissedilir şekilde mukavemeti artırır. Bu alaşımların korozyon direnci ve kaynak edilebilirliği iyidir. Deformasyon sertleşmesi kapasitesini artırır. Bu sebeple ekstrüzyon işlemleri zor ve pahalıdır.
Magnezyum – Mangan (Mg-Mn)	Bu alaşımların; korozyon direnci yüksek ve kaynak edilebilirliği iyi ve deformasyon sertleşmesine uğradığında mukavemeti yüksektir. Mg veya Mn'nin miktarı artırıldığında malzemenin üretim zorluğu (sıcak haddelemede çatlak oluşumu vb.) artar.
Magnezyum – Silisyum (Mg-Si)	Bu iki elementin her birinin %1,5'a kadar ilave edilmesi ile oluşan Mg <sub>2</sub> Si'nin maksimum çözünürlüğü %1,85'tir. Yaşlandırma sonrası homojen bir şekilde çökeltir ve mukavemeti artırır. Bu alaşımların ekstrüzyonu kolay ve ekonomiktir.
Mangan (Mn)	Mn, katı çözelti halinde de çökelmiş halde metaller-arası faz bünyesinde de mukavemeti artırır. Süneklik ve korozyon direncine çok fazla olumsuz etkisi yoktur. Isıl işlem uygulamalarına imkân vermez.
Çinko (Zn)	Al-Zn alaşımları uzun zamandır bilinse de sıcak çatlama ve gerilme korozyonu çatlama sorunları nedeniyle kullanım alanı dar kalmıştır. Dövme alüminyum alaşımlarda en yüksek çekme özelliklerine sahip alaşımlar, diğer elementleri de içeren Al-Zn alaşımlarıdır.



**Çizelge 2.1.** Alaşım elementlerinin alüminyuma etkileri (Ensarioğlu 2014) (devam)

<b>Alaşım elementi</b>	<b>Etki</b>
Nikel (Ni)	Nikelin katı halde çözünürlüğü %0,04'ü geçmez. Bu oranın üzerinde, genellikle Fe ile oluşturduğu çözünmez metallere arası bir faz halinde bulunur, %2'ye kadar ilavesi, mukavemeti artırır. Al-Ni alaşımları artık kullanılmasa da nikel, Al-Cu ve Al-Si alaşımlarına ilave edilmekte ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetin ve sertliğin artırılmasının yanında genleşme katsayısının düşürülmesi sağlanmaktadır.
Silisyum (Si)	Fe'nin ardından en yüksek oranda bulunan (%0,01-0,15) katışkı elementidir. Akışkanlığı artırır. Tek başına ısı işlemi uygulanabilen bir alaşım oluşturmaz, ancak, Mg ile birlikte %1,5'lara kadar kullanılarak Mg <sub>2</sub> Si oluşumunu sağlar ve ısı işlemi uygun bir alaşım oluşmasına katkıda bulunur.
Çinko – Magnezyum (Zn–Mg)	Al-Zn alaşımlarına eklenen Mg, %3-7,5 Zn oranlarında en yüksek mukavemet değerlerini verir. Mg ve Zn, MgZn <sub>2</sub> oluşturarak, Al-Zn alaşımlarının ısı işlemi cevap verme kabiliyetini büyük oranda artırır. Al-Zn alaşımlarına Mg ilavesi, mukavemeti de artırır. MgZn <sub>2</sub> konsantrasyonunun %0,5'ten başlayarak %12'ye kadar çıkarılması, soğuk suda su verme kapsamında mukavemetin giderek artmasını sağlar. MgZn <sub>2</sub> için gerekli olandan daha fazla Mg ilavesi de çekme mukavemetini arttırmaktadır.
Çinko – Magnezyum – Bakır (Zn–Mg-Cu)	Al-Zn-Mg alaşımlarına Cu ve küçük miktarlarda Cr-Mn ilavesi, ticari olarak mevcut en mukavemetli alaşımı meydana getirir. Bu alaşım sisteminde Zn ve Mg yaşlanma sürecini kontrol eder. Cu ise aşırı-doymuşluk kapasitesini yükselterek yaşlandırma hızını artırır. Cu, ayrıca, ısı işlemi su vermeye karşı hassasiyeti artırır. Genel olarak, Cu, Al-Zn-Mg alaşımlarının korozyona karşı direncini düşürürken gerilme korozyonu direncini artırır. Az miktarlarda ilave edilen alaşım eklemeleri (Cr, Zr, gibi) mekanik özellikler ve korozyon direnci üzerinde önemli etkiler yapar.
Zirkonyum (Zr)	%0,1-0,3 aralığında Zr ilavesi, yeniden kristalleşmeyi engelleyen metallere arası ince yapılı çökelti oluşumunu sağlar. Zr ilavesi, özellikle Al-Zn-Mg alaşımlarında olmak üzere çeşitli alaşımlarda, yeniden kristalleşme sıcaklığını arttırmak ve tanecik yapısını kontrol etmek için, giderek artan sıklıkta kullanılmaya başlanmıştır.

Alaşım elementlerinin alüminyum içerisinde çözünürlük sınırlarına ait bilgiler Çizelge 2.2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Bazı elementlerin ikili alaşımlar için alüminyum içerisindeki çözünürlük sınırları (Davis 1993’’ten değiştirilerek alınmıştır).

	Sıcaklık [° C]*	Sıvı halde çözü. [% ağır]	Katı halde çözü. [% ağır]
<b>Ti</b>	665**	0,15	1
<b>Cr</b>	660**	0,41	0,77
<b>Mn</b>	660	1,95	1,82
<b>Pb</b>	660	1,52	0,15
<b>Fe</b>	655	1,87	0,052
<b>Ni</b>	640	6,12	0,05
<b>Si</b>	580	12,6	1,65
<b>Cu</b>	550	33,15	5,67
<b>Mg</b>	450	35	14,9
<b>Zn</b>	380	95	82,8
<b>Sn</b>	230	99,5	<0,04

\* Aksi belirtilmedikçe ötektik reaksiyon

\*\* Perimetrik reaksiyon

Yüksek sıcaklıklarda yüksek çözünürlüğe, oda sıcaklığında ise çok düşük çözünürlüğe sahip olma yeteneği ısıtma işlemin uygulanabilir olduğu alaşımların tipik bir özelliğidir. Fakat, bu şartı yerine getirdiği halde ısıtma işlem sonucu mukavemetleri neredeyse değişmeyen ikili alaşımlar da bulunmaktadır (Al-Si, Al-Mg, Al-Zn, Al-Mn alaşımları, gibi). 2xxx (Al-Cu), 6xxx (Al-Mg- Si) ve 7xxx (Al-Zn) seri alaşımları ısıtma işlemine tabi tutulduğunda sonuçlar tatmin edici olmaktadır (Davis 1993).

Alüminyum köpüklerin bu üstün özellikleri çok dikkat çekici olduğundan birçok çalışmaya konu olmakta ve literatürde yerini almaktadır.

Örneğin; otomotiv sektöründe kullanılan araçların çarpışma kutularının (crash-box) enerji sönümlenme davranışı deneysel ve sayısal anlamda incelenmiştir. Bu incelemede yarı- statik ve dinamik deformasyon hızları baz alınmış ve iki farklı ölçü ile üç farklı kalınlığı bulunan köpük malzeme kullanılmış ve deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçların birbirini doğruladığı gözlemlenmiştir (Toksoy ve ark. 2010). Yine aynı çalışmada kritik bir köpük yoğunluğuna sahip çarpışma kutularının, boş çarpışma kutularına göre daha düşük bir verimliliğe sahip olduğu görülmüştür. Ancak, bu kritik yoğunluk değerinin üzerindeki bir

yoğunluğa sahip olan çarpışma kutularının ise boş olanlara göre daha yüksek performans sağladığı gözlemlenmiştir.

90'lı yılların sonunda ise kapalı hücreli alüminyum alaşımlı köpüklerin çekme ve basma gerilme-gerinme davranışları ölçülmüş ve yorumlanmıştır. Çalışma sonunda malzemenin gerilimde yarı-kırılgan, basma altında ise sünek bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Akma dayanımı ve kalıcı deformasyonu belirleyen boşaltma modülünün değerleri çekme – basma bakımında eşit olduğu ve bağıl yoğunlukla doğrusal olmayan bir şekilde arttığı görülmüştür. Ayrıca, malzemedeki zayıf oksit arayüzleri ve üretim kusurlarının, test sonuçlarını ciddi ölçüde etkilediği tespit edilmiştir (McCullough ve ark. 1999).

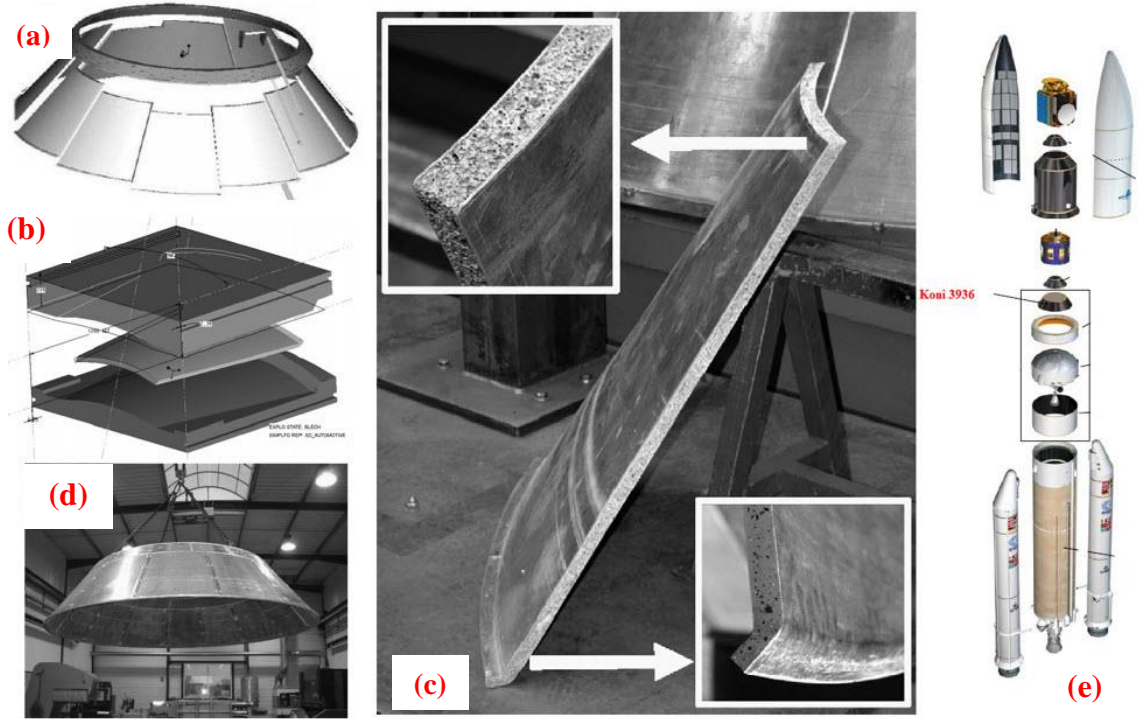
Metal köpüklerin darbeli çarpışma altındaki dinamik davranışları hem temel hem de mühendislik uygulamalarında büyük ilgi çekmektedir. Yapılan her testte köpük metal üzerine farklı hızlarda mermi atılarak, merminin darbe hızı ve kırma derinliği kaydedilmiştir. Her ne kadar plato stresinin statik kuvvet olarak kullanılmasının, merminin kapalı hücreli alüminyum köpükler üzerindeki etkisi sırasında hareketini öngörmede yetersiz olsa da, sayısal sonuçlar bu malzemelerin diğer metallere göre enerji sönümlerinin daha iyi olduğunu göstermiştir (Pang ve ark. 2017).

2008 yılında ise İYTE 'de yapılan yüksek lisans çalışmasında, alüminyum köpük içeren hafif sandviç yapıların patlamaya karşı verdikleri tepkileri incelenmiştir. Çalışmada sandviç yapının öğelerinin yüksek hızda mekanik özelliklerini karakterize etmek için SHBB Test Metodu kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar, sandviç yapıların uygun ara ve yüzey malzeme kombinasyonu oluşturulduğunda aynı ağırlıktaki yekpare malzemeye kıyasla %50 ~150 daha fazla enerji sönümleyebildiğini göstermiştir. Elde edilen sayısal sonuçlara göre, 9 cm'lik sandviç yapının, 10 kg TNT'nin patlama yüküne karşı en verimli performansı ara yüzey malzemesi için kullanılan 6,3 cm ile 7,2 cm'lik alüminyum köpük göstermiştir (Ergönenç 2008)

Yine 2008 yılında Uludağ Üniversitesi'nde yapılan bir doktora çalışmasında ise, Fraunhofer Enstitüsü'nden (Almanya) temin edilen AlSi7 alüminyum köpük malzemenin farklı statik ve dinamik koşullarındaki mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu inceleme



sonucunda, akma ve yoğunlaşma noktasının hassas bir şekilde tespiti yapılarak, dinamik koşullar altında çarpma hızına bağlı enerji sönümlenme davranışları karakteristik olarak tanımlanmıştır (Oka 2009).



**Şekil 2.4.** (a) 12 segmentli koni, (b) Koni segmentlerin kalibrasyonu için kullanılan kalıp, (c) Şekillendirilmiş segment, (d) AFS koni, (e) Ariane-5 kargo roketinin genel görünümü [Anonim 2019b, Schwingel ve ark. 2007] .

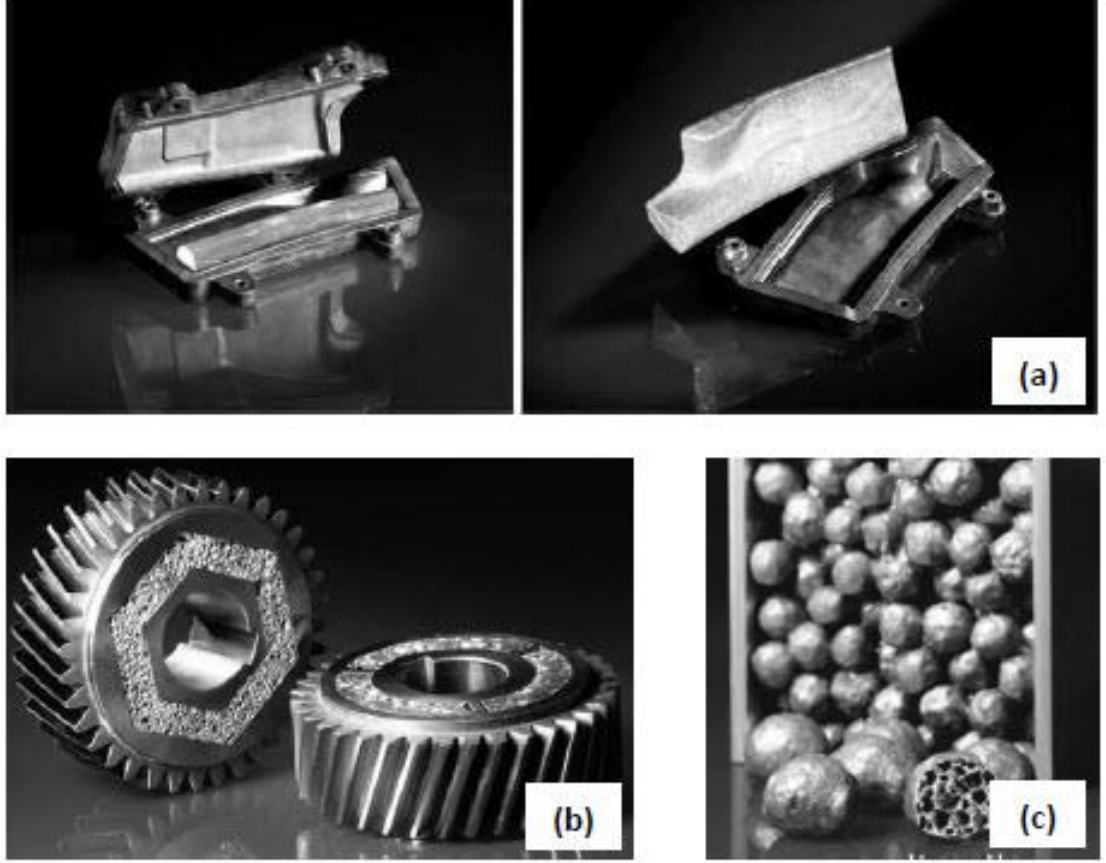
Alüminyum köpükler, panel şekillerin haricinde farklı şekillerde de kullanılmaktadır. Kullanılacağı yere ve amacına göre 3-boyutlu form alması istenmektedir. Metal köpüklerin 3-boyutlu şekillendirilmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır (Şekil 2.4). Köpürtülecek malzemeyi sınırlayan kalıpların içerisinde köpürtülerek, boş bir kalıp veya profil içerisinde köpürtülerek ve küresel veya elipsler halinde köpürtülüp kullanılmak istenen profil veya geometri içerisine doldurarak (APM teknolojisi) parça üretimi olmak üzere; 3 boyutlu form alması için kullanılan en yaygın 3 yöntemdir (Türker 2009). Bu 3 yöntemden ilk ikisi için kalıp tasarımları, köpürtülecek malzemenin geometrisinin ve etkileşimde olacağı yan malzemeler, kalıp içerisindeki konumu için ön çalışma/hazırlık gerekmektedir. APM metodunda ise, küresel yapıların profil içine yerleştirilmesi ve küreleri profile bağlayan yapıştırıcıdaki (yüksek maliyet, geri dönüşümün zorluğu, ağırlık

artışı vb.) problemler, bu yöntemin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engeldir (Banhart ve ark. 2008). Bir Fransız/Alman araştırma projesi kapsamında, alüminyum köpük sandviç malzemesi uzay uygulamalarında da test edilmiştir (Brother ve ark. 2007, Schwingel ve ark. 2007). Klasik sandviç malzemeleri elde etmek için özel ve yoğun bir işlem sürecine gerek varken, AFS ise otomotiv teknolojilerinden de bilindiği üzere seri üretime bir o kadar uygundur. Bu tür malzemelerin uzay uygulamalarında maliyeti azaltacağı düşünülerek Ariane-5 isimli kargo roketinde kullanılan koni parçası (cone-3936) test parçası olarak seçilmiştir (Şekil 2.4). İlk aşamada malzeme mekanik ve termal özellikler göz önüne alınarak yoğun bir şekilde test edilmiştir. FEM vasıtasıyla bu deneylerin sonuçları, yük altındaki davranışları simüle etmek ve tasarımı buna göre optimize etmek için kullanılmıştır. AFS'ye uygun üretim yöntemleri kullanılarak, koni tasarlanmıştır. Fırlatma sırasındaki yükler altında simüle edilmiş ve FEM tarafından yapılan öngörülerle karşılaştırıldığında çok iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar içinde en göze çarpan detaylar arasında üst çapı 2.6 m ve alt çapı 3.9 m, yüksekliği 0.8 m olan ve yaklaşık 200-210 kg ağırlığındaki son prototip, AFS ile yeniden tasarlanıp üretildiğinde 140 kg geliyordu. Bu sonuç havacılık ve uzay uygulamalarında alüminyum köpüğün ne kadar önemli bir yeri olacağının kanıtlarından biri olmuştur.

LKR Ranshofen (Avusturya) ve Alman otomobil üreticisi BMW (Almanya), ortak bir çalışma sonucunda alüminyum köpük ilaveli bir motor montaj braketini tasarlamışlardır. Bu braket, alüminyum malzemedeki yapılarak içi, alüminyum köpük ile doldurulmak suretiyle üretilmiştir. Üretilen braket, içi boş olan braketle göre kıyasla ihmal edilecek miktarda ağırlığı artmıştır. Fakat, yeni braketin sertliği ciddi oranda yükselmiştir. Bu tür kompozitlerin kırılma tokluğu yüksek olduğundan, böylece olası çarpma durumlarındaki güvenlik arttırılmıştır (Banhart 2007).

Alüminyum köpüklerin yapıştırıcılarla, bağlantı elemanlarıyla (cıvata, somun vb.) ve kaynakla birleştirilebilir olduğu yapılan deneylerde onaylanmıştır. Tasarımın diğer şartlarıyla uyumlu olmaları koşuluna bağlı olarak standart epoksi yapıştırıcıların, ekonomik ve mekanik olarak etkili oldukları, cıvata ve somun bağlantısının geliştirilen modellere göre tasarlanmış olması yeterli tutturma kabiliyeti sağlayabildiği, yanlış

tasarlanan bağlantı elemanlarının ise düşük yüklerde bile dayanıksız olduğu görülmüştür (Olurin ve ark. 2000).



**Şekil 2.5.** Alüminyum esaslı köpüklere istenilen 3-boyutlu şekillerin verilmesi için kullanılan mevcut 3 yöntem: **(a)** Kalıp içerisinde son-şekle-yakın köpürtme, **(b)** Kullanılacağı profil içerisinde köpürtme, **(c)** Küçük küreler halinde köpürtüp kullanılacağı profilin içerisine doldurma (APM teknolojisi) (Stöbener ve ark. 2009).

Literatürde karşılaşılan ikincil işlemler arasında; cıvata ile bağlama [Olurin ve ark. 2000, Sediakova ve ark. 1997), kaynak ile birleştirme (Pogibenko ve ark. 2001), mekanik (preste) form verme (Contorno ve ark. 2006), lazer ve tel erozyon (EDM) ile kesme (Sığırtmaç ve ark. 2009) ve lazerle eğme (Guglielmotti ve ark. 2009) vardır.

İncelenmiş olan ikincil işlemlerden kaynak ile birleştirme yönteminde, füzyon kaynağı kullanılarak alüminyum köpükten yapılar üretmenin temelde mümkün olduğu gösterilmiştir (Pogibenko ve ark. 2001).

10mm kalınlığında kapalı hücre yapılı 0,55 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğundaki sandviç yapılı AlMgSi alüminyum köpük malzemenin belirli parametreler dahilinde lazer ve tel erozyonla kesimi gerçekleştirilmiştir. Çalışma, 10 mm'den daha düşük kalınlıktaki ince plakalar için hassas yüzeylere ihtiyaç duyulmaması, hücre yapısındaki değişimlerin göz ardı edilebileceği kabul edilen uygulamalarda, lazer kesme yöntemiyle, tel erozyonla kesmeye göre 150 – 200 kat daha fazla hızlara ulaşılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, kaynak ve cıvata ile bağlama uygulamalarının gerçekleştirildiği bu çalışmada kaynak ve cıvata (M8) bağlantılarının çekme dayanımları ölçülmüş ve cıvatalı (yapıştırıcı karışım ile) bağlantının kaynaklı bağlantıya göre daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir (Sığırtmaç ve ark. 2009).

AFS panelleri için lazer ile bükme işleminin uygulanabilirliği denenmiştir. Bu köpüklerin karmaşık yapısına rağmen, çok iyi biçimlendirilebilir olduğu gözlemlenmiş ve işlem parametrelerinin uygun bir kombinasyonu ile çok yüksek bükülme açlarına ulaşılmıştır. Bu işlemde lazerle ısıtma sırasında malzemenin erimesini önlemek için koruyucu bir gaz kullanılması tavsiye edilmiştir (Guglielmotti ve ark. 2009).

Köpük malzemelerin genel yapısının incelendiği bir çalışmada kapalı hücreli ve sandviç yapılı alüminyum alaşımlı köpüklerin tel erozyon (EDM) ve lazerle kesme işlemleri incelenmiştir. Parçaların kullanım alanları ile birlikte, hücre yapıları, gözeneklerinin boyutu en önemli belirleyici parametreler olarak gözlemlenmiştir (Sığırtmaç ve ark. 2008).

Bir alüminyum köpük sandviç (AFS) malzemesi, V-kalıp bükme ve haddeleme ile oluşturulmuştur. V-bükülmüş bölümlerin, alüminyum köpük göbeğinin kayma kırılması ve göbek kapağı tabaka arayüzünde delaminasyon görülmüştür. Bu, bir martı kanadı kusuruna ve oluşabilecek sınırlı bir kesit derinliğine yol açmıştır. Buna karşılık, haddeleme işlemi kabul edilebilir profil derinliğine sahip uzun bölümlerin üretimine imkan vermiştir. Sonuç olarak haddeleme işlemiyle, V-kalıp bükme işlemine göre, malzemenin şekillendirilebilirliği daha yüksek çıkmıştır (Weiss ve ark. 2018).

Üretiminde kullanılan parametreler ve alaşım elementleri, alüminyum alaşımlı köpüğün özelliklerini değiştirerek işlenebilirliğini etkileyecektir. Metalik köpük malzemelerin yapısal ve işlevsel özelliklerini belirleyen bazı özellikler bulunmaktadır. Gözenekler işlevsellik ve yapısal anlamda köpükler üzerinde oldukça belirleyicidir. Bu nedenle gözenek dağılımı, miktarı ve yapısının belirlenmesi metalik köpük malzemelerin karakterizasyonunun ilk adımını oluşturur (Degisher ve ark. 2002).

Benzer yoğunluktaki alüminyum köpüklerin farklı mekanik davranışlar gösterebileceğini ve bunun; yoğunluk dağılımı, köpük yüzeyindeki kabuk, gözenek yönelim yönü gibi faktörlerden kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu faktörleri üretim sürecinin ve parça geometrisinin belirlediğini bildiren araştırmacı, malzeme özelliklerindeki sapmaların kabuklu yüzey veya daha sünek gözenek duvarı ile azaltılabileceğini önermiştir (Nosko ve ark. 2010).

7075, 6061 ve AlSi<sub>7</sub> alaşımları kullanılarak toz metalurjisi ile elde edilen 3 farklı alüminyum köpüğün aksenal kırılma davranışları incelenmiştir. Köpüklerin üretim aşaması ve alaşımı oluşturan bileşimdeki değişiklikler, köpüğün gözenek yapısı üzerine etki ettiği gözlemlenmiştir. 7075 ve 6061 alaşımlarından elde edilen köpüklerin gözenek yapılarının daha düzenli olduğu (eşit yuvarlaklık indeksi), AlSi<sub>7</sub>'den elde edilen köpüğün ise daha düzensiz ve geniş aralıklı bir gözenek yapısının meydana geldiği görülmüştür. Mikroyapı ve boşluklardaki düzensizliği azaltmak, kırılma sırasında köpüğün stabilitesini arttırabileceği ve bu azalmanın da sadece köpüğün üretimi sırasındaki parametrelerinin optizasyonu ile mümkün olduğu belirtilmiştir (Campana ve ark. 2008).

Alüminyum köpükler ağaç, mercan, kemik, sünger ve ekmek gibi hücreli yapıdadır. Alüminyum köpük yapısının yoğunluğu 1 gr/cm<sup>3</sup> olarak bilinen suyun yoğunluğundan düşük olup <0,81 gr/cm<sup>3</sup> değerindedir, bu yüzden suda yüzebilmektedir [Banhart 2001 ve Gibson ve ark. 1997).

Metal köpüklerin mükemmel enerji sönümleyebilme kapasiteleri sayesinde kara taşıtlarında tampon olarak kullanıldığı birçok uygulama mevcuttur. Hafif ama yüksek dayanıma sahip alüminyum sandviç yapılar otomotiv sektöründe ağırlık azaltmak için

yapılan birçok projede oldukça başarılı olmuştur. Bahsi geçen bu sandviç paneller arabalardaki kullanılan bilindik çelik panellere göre yaklaşık olarak 8 kat daha sağlam olup, %25 daha hafiftir (Yu ve ark. 1998).

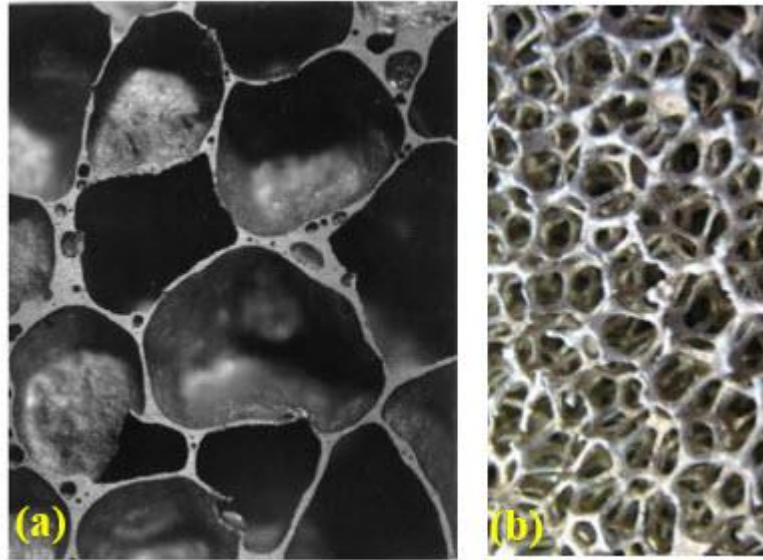
Metalik köpükler iyi darbe sönümlenme özellikleri sayesinde son yıllarda zırh sistemlerinde de tercih edilmeye başlanmıştır. Yu ve arkadaşları geliştirdikleri zırh sisteminde en önde darbeyi karşılayacak seramik veya kompozit malzemeden yapılmış çarpma plakası, arkasında ise darbe ile gelen şok dalgalarını hücre duvarları sayesinde farklı yönlere dağıtma özelliğindeki metalik köpük, en arkada da deforme olarak darbe enerjisini sönümleyen ve genellikle polimerden yapılan destek plakası kullanarak zırhın performansını iyileştirmişlerdir (Yu ve ark. 2004).

İçyapının köpük şeklinde olması darbe yönüne bağlı olmaksızın yüksek darbe enerjilerini sönümlenme kabiliyetini ve aynı zamanda hafifliği sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda iç yapısını daha iyi koruyabilmesi , bunun yanında kuvvet yönünden bağımsız olarak darbe ve titreşim sönümleyebilmesi, elektromanyetik kalkan özelliği bu tür yapıların en büyük özelliklerinden biridir (Banhart 2001).

Talaşlı imalat; farklı geometri ve boyutlarda parçaların kolayca elde edilmesi, pratikte çokça karşılaşılan tasarım değişikliklerine hızlı cevap vermesi, kalıp ihtiyacını ortadan kaldırması, karmaşık ve zor formların kolaylıkla oluşturulabilmesi ve esnek olması gibi sebeplerden dolayı büyük avantajlara sahip olan bir imalat yöntemidir. Malzemeye, istenen şeklin kalıp kullanarak ve köpürme aşamasında verilemeyeceği için, kalıp içindeki ısı dağılımının optimize edilmesine olan ihtiyacı bitirecek ve köpük ile kalıbın ısıl genleşme farklılıklarından oluşan kalıntı gerilmeler de meydana gelmeyecektir (Stöbener ve ark. 2009, Yu ve ark. 1998).

Üç boyutlu gözenekli bir yapıya sahip olan köpüklerin, mekanik özellikleri açık veya kapalı gözenek yapılarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Gözenekler birbirlerinden bağımsız halde yani her bir gözenek hücre duvarı ile birbirinden ayrılmış durumda ise bu tip köpüklere kapalı hücreli köpükler adı verilmektedir. Açık hücreli köpükler ise gözenekleri arasında bağlantı olan köpüklerdir. Her köpük malzemenin

tamamen kapalı veya tamamen açık gözenekli bir yapıya sahip olmasını beklemek doğru değildir. Literatürde bulunan birçok gözenekli malzemenin hem kapalı hemde açık gözenegi bünyesinde barındırdığına sık sık rastlanılmıştır (Degeisher ve ark. 2002, Evans ve ark. 1998). Kapalı hücreli gözenekleri bulunan köpüklerin yapılan çalışmalar sonucunda açık hücreli gözeneklere sahip olan köpüklere göre daha yüksek mukavemet, rijitlik ve darbe dayanımına sahip olduğu kanıtlanmıştır. Hücre duvarları tarafından ayrılmış olan gözeneklerin içini kaplayan gaz, basma sırasında hücre duvarlarının hareketi etmesi sebebiyle sıkıştığından basıncı artırır ve bu basınçtaki artış da elastik modülü hesaplamalarında oldukça önemli rol oynar (Queheillalt ve ark.2004). Bir başka çalışmada ise açık gözenekli yapıya sahip olan köpüklerin rijitliğinin düşük olmasına karşın, kapalı gözenekli yapıya sahip olan köpüklere göre yüksek ısı taşınımına imkan veren özelliği sayesinde yüksek güç üreten cihazlarda son derece etkili bir soğutucu mekanizma olarak kullanım alanı bulunduğu irdelenmiştir. Evans ve arkadaşları metal köpüklerin birbiriyle kıyaslandığında şaşırtıcı biçimde farklı özelliklere sahip olduklarını ortaya çıkarmışlardır (Evans ve ark. 1998).

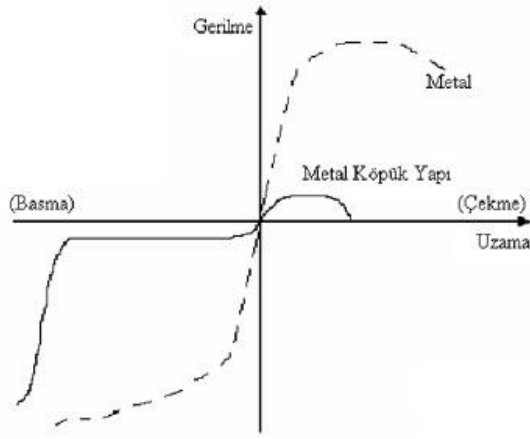


**Şekil 2.6.** Gözenek yapılarına göre köpük metal görselleri. (a) Kapalı hücreli köpük metal (Gibson ve ark. 2000), (b) Açık hücreli köpük metal (Vesenjak ve ark. 2012).

Metal köpükler üç bölgeye ayrılabilir: karakteristik bir basma gerilme-gerinim davranışı gösterirler. Düşük gerinimlerde ( $< \% 1-2$ ) elastik deformasyon gösteren köpükler  $\% 60-80$  gerinime kadar gerilmenin sabit olduğu bir platoya sahiptirler. Basma

gerilme-gerinim grafiğinin üçüncü bölgesinde ise yoğunlaşma gerinimine ulaşarak hücre duvarlarının yıkılıp birleşmesi ile yoğunlukları artmaktadır. Gerilmenin sabit olduğu uzun plato sayesinde metalik gözenekli malzemeler belirli bir gerilme sınırını aşmadan enerji sönümleyebilme yeteneğine sahiptirler (Daxner ve ark. 1999, Kadar ve ark. 2005, Yan ve ark. 2012).

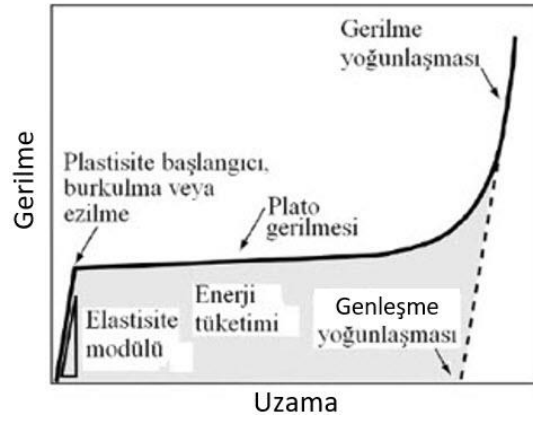
Şekil 2.7’de örneği verilen alüminyum köpüklerin tipik gerilme-uzama grafikleri göz önüne alındığında köpük yapı, katı metalik yapıya göre açık bir şekilde karşılaşılmayan lineer elastik bir davranış göstermektedir. Çekme gerilmesi tarafında maksimum gerilme küçük uzamalara karşılık gelir (genellikle %1-4) (Banhart 2000, Degisher ve ark. 2002, Gibson 2000).



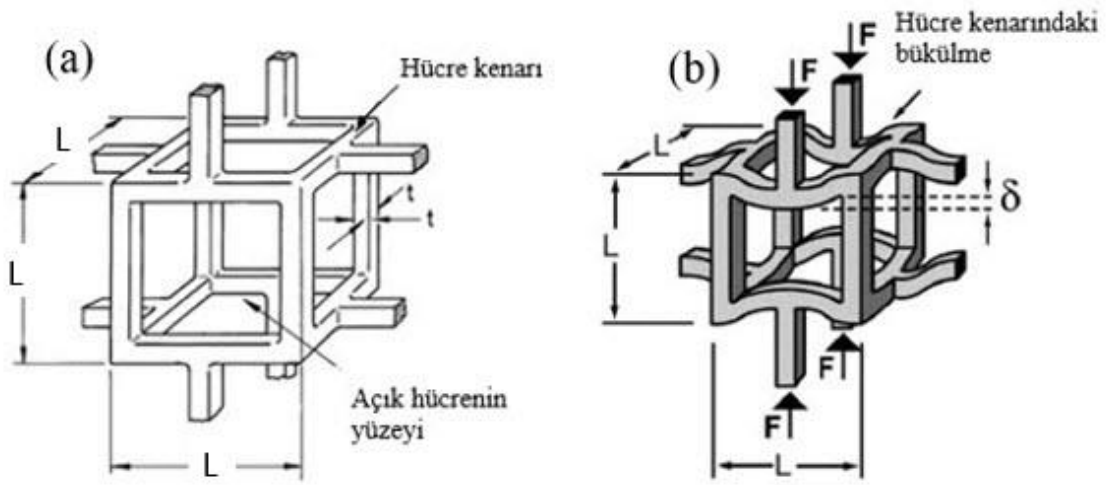
**Şekil 2.7.** Metal ve metalik köpük yapıların gerilme-uzama davranışları görseli (Hutzler 1997).

Şekil 2.8’de hücrel bir katının basma etkisinde gerilme-uzama eğrisi gösterilmiştir. E modülünün hakim olduğu sınıra kadar lineer elastik davranış göstermektedir. Gerilme devam ettiğinde elastik sınır aşılar hücre kenarları akma, eğilme ve kırılma gösterir. Takip eden yükleme sonucu, neredeyse sabit olan ve plato gerilmesi olarak adlandırılan gerilmenin hakim olduğu bölgede yapıdaki çöküş devam eder. Çöküş süreci hücrenin karşı yüzü gerilme etkisine girene kadar devam eder. Bu noktadan sonra genleme yoğunlaşması başlar ve gerilme eğrisi dik bir eğimle yükselir (Schaeffler ve ark. 2005, Yan ve ark. 2012).





**Şekil 2.8.** Hüresel katkıya ait bir gerilme-uzama eğrisi ve önemli parametreler (Scheaffler ve ark. 2005).



**Şekil 2.9.** (a) Açık hücreli köpükteki hücrenin konsept modeli, (b) Hücrenin tek eksenli sıkıştırılması sonucu hücre kenarı bükülmesinin gösterimi (Scheaffler ve ark. 2005).

Hem kapalı hemde açık hücreli metalik köpüklerin mikroyapıları, hem hücre geometrisi (hücre boyutu, şekil ve oryantasyon) hem de hücre duvarı özellikleri ile karakterize edilebilir. Açık hücreli metalik köpükler öncelikle hücre kenarlarının bükülmesiyle deforme olur. Kapalı hücreli metalik köpüklerin ise gerilmekten ziyade mekanik özelliklerini düşüren hücre yüzeylerinin bükülmesiyle (yüzeylerinin eğrilmesinin bir sonucu olarak) deforme oldukları gözlemlenmiştir (Yu ve ark. 2004).

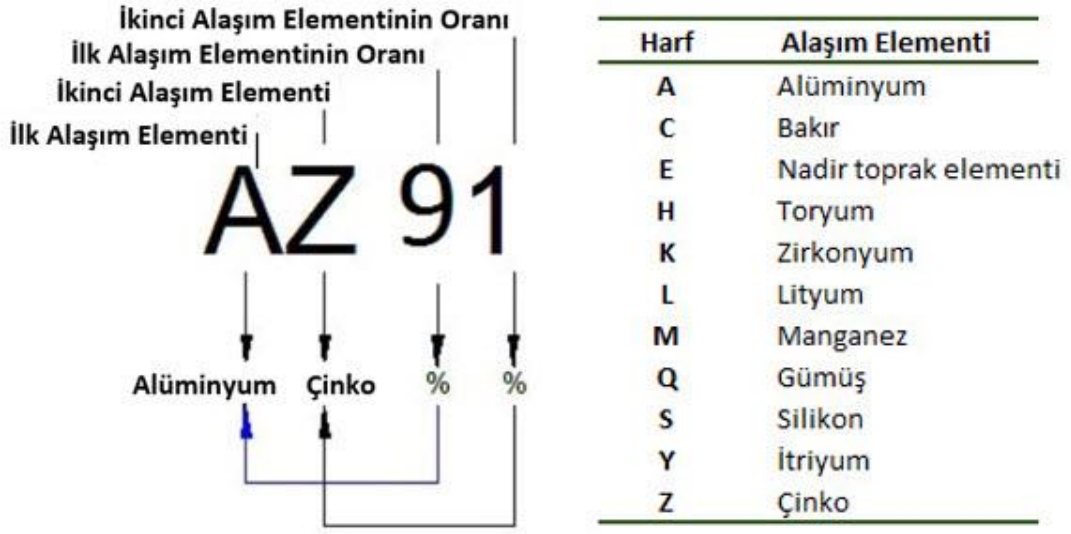
Ana ar-ge alanları halen köpürme ve stabilizasyon mekanizmalarının araştırılmasına odaklanmış, yeni şişirici maddelerin geliştirilmesi, imalat işlemlerinin optimizasyonu ve imalat maliyetlerinin azaltılmasını kapsamaktadır (Lefebvre ve ark. 2008).

**İşlenebilirlik;** belirli şartlar altında işlenecek katı bir malzenin kalitesidir. İşlenebilirlik, takım ve iş parçası üzerindeki etkisi ve talaşların kalitesi ile ilgili işleme sürecinin çıktı parametreleri ile değerlendirilir. Bu parametreler işleme sürecinde mekanik, termal ve kimyasal etkileşimlerden etkilenir. Alüminyum ve magnezyum bazlı hafif metal alaşımları genel olarak iyi işlenebilirlik sunar. Aynı sertlikteki bir çelik ile karşılaştırıldığında alüminyum için kesme kuvvetleri yaklaşık % 30 daha düşüktür. Nispeten düşük kesme kuvvetleri nedeniyle, yüksek paso ve yanal adım kullanarak alüminyum ve magnezyum alaşımlarını işlemek mümkündür. Hem magnezyum hem de alüminyum alaşımları iyi bir termal iletkenliğe sahiptir. İş parçası ile kesici takım arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan ısı, metal boyunca talaş oluşum bölgesinden uzaklaşır (De Leo 2010).

Magnezyum yapısal metaller içindeki en hafifi olarak bilinmektedir. Magnezyum alaşımlarına ait gelişmeler, hafif malzemelerin giderek daha zorlu koşullarda çalışabilmesi için endüstri gereksinimlerinden kaynaklanmaktadır. Magnezyum alaşımları, alüminyum ve alaşımlarının sadece üçte ikisi için, düşük yoğunluklu olmaları nedeniyle tasarımcılar için her zaman çekici olmuştur (Duffy 1996). Plastik kadar hafif ve bir metal kadar sert olan magnezyum özellikle günümüzde otomotiv ve demiryolu endüstrisinde çok sık tercih edilen magnezyum ve magnezyum alaşımları, metalların içinden en kolay işlenebilen ve işleme sırasında yüksek hızlara ulaşılmasına imkan verir. Tornalama, delme ve frezeleme gibi konvansiyonel tüm operasyonlar magnezyum parçaları üzerinde rahatlıkla gerçekleştirilebilir. Alüminyum, magnezyumdaki en önemli alaşım elementlerinden biridir. Birçok alaşım, kütlelerinin %10'undan daha fazla Al içerir. Bunlara; AZ, AE, AM ve AS türü alaşımları örnek olarak verilebilir (Buldum ve ark. 2013). Şekil 2.10'te Mg-Al alaşımlarına ait girdilerin bilgileri verilmiştir.

Günümüzün ilgisi, mevcut otomotiv endüstrisi için bir sorun haline gelen enerji tüketimini ve hava kirliliğini azaltmak için daha fazla yakıt tasarrufu sağlayan araçlara olan talebin artmasına odaklanmış durumdadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda yola çıkan araştırmacılar, otomotiv parçalarının gereksinimlerini karşılayan uygun bir malzeme bulmak için birçok araştırma yapmışlar ve bunlara her geçen günde yenileri

eklenmektedir. Bu çalışmalar sonucunda ortalama yakıt tüketimini düşüren devrimler günümüzde magnezyum ve magnezyum alaşımlarındaki ilgiyi canlandırdı. Ayrıca, otomotivde magnezyum alaşımlarının uygulanması, bu alaşımların direksiyon simitleri, direksiyon kolunu parçaları, gösterge panelleri, koltuklar, dişli kutuları ve hava giriş sistemleri gibi otomotiv bileşenlerinde gelişmelere ve başarılı uygulamalara tanık olmuştur (Musfirah ve ark. 2012).



**Şekil 2.10.** Magnezyum alaşımlarına gösterimi ve kullanılan harf kodlarının anlamları (Horst ve ark. 2002).

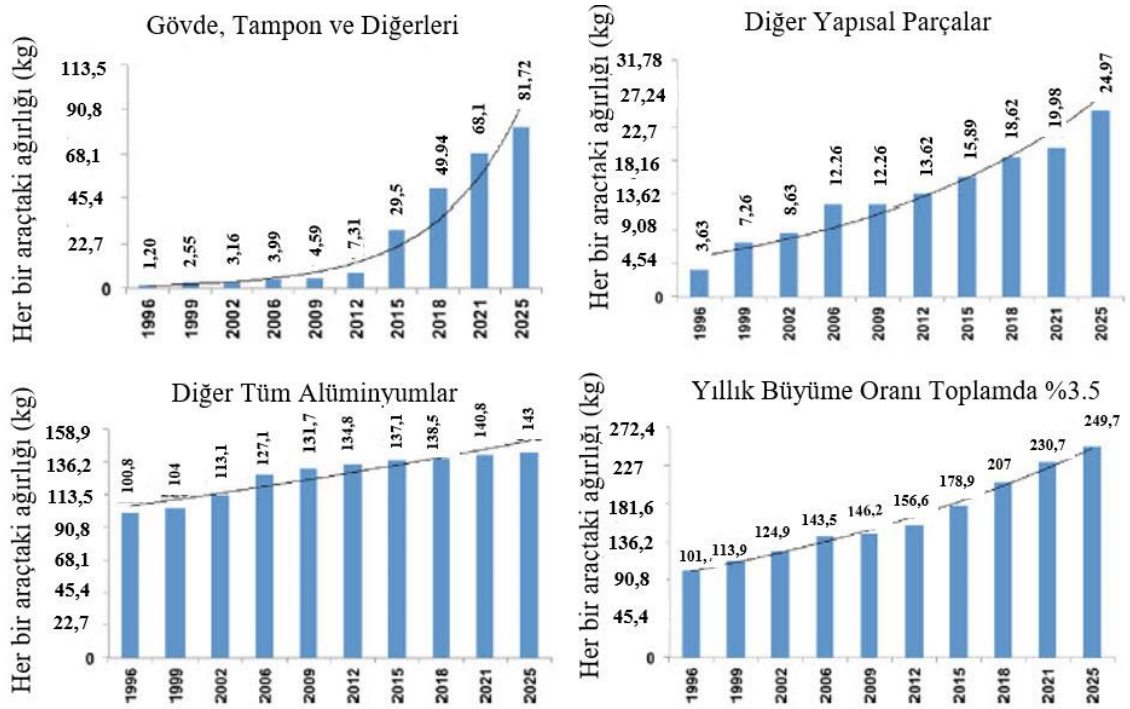
İmalat sanayinde alüminyum alaşımlarının kullanımı son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Bunun nedeni, öncelikli olarak hafif olması ve gücü tek bir malzemede bir araya getirme yetenekleridir. Dolayısıyla, alüminyum alaşımlarının işlenmesi hacimsel oranlarda büyük ölçüde artmıştır. Böylece talaş hacmi, havacılık gibi bir endüstrinin belirli bölümlerinde işlenmiş malzemenin orijinal hacminin %80'ini temsil etmektedir (Santos ve ark. 2016).

Sünek malzemelerin işlenmesi sırasında, büyük bir talaş-takım temas alanı meydana gelir. Dolayısıyla ortaya çıkan yüksek talaş kalınlığı oranı, yüksek kesme kuvvetlerin, işleme gücüne ve ısı oluşumuna neden olur. Öte yandan kesme mukavemeti nispeten düşük olduğundan her ne kadar talaş-takım temas alanı büyük olsa da alüminyumun işlenmesi kolay kabul edilmektedir (Trent ve ark. 2000). Alüminyum alaşımları işlenirken kesici takım aşınmasının en büyük sorunu sert parçacıkların ( $Al_2O_3$ , SiCp ve Si) alaşım içinde

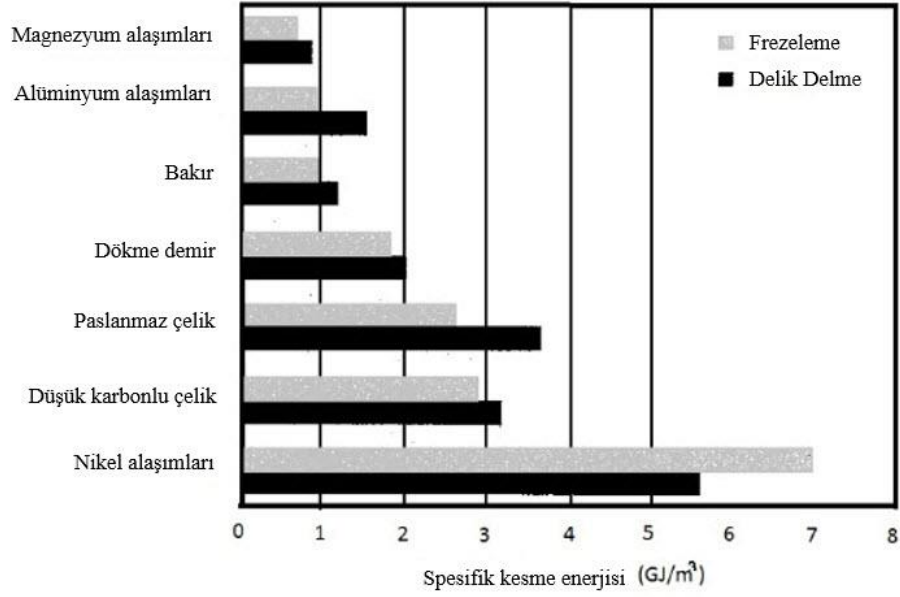
oraya çıkmasıdır. Yüksek hız çelikleri ile işleme esnasında ortalama 300 m/dak kesme hızı ile iyi bir takım ömrü elde edildiği gözlemlenmiştir (Kelly ve ark. 2002).

Magnezyumun avantajları daha önceki yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur. Örneğin; kesici takım ömrünün daha uzun olması, gerekli güç tüketiminin daha az olması, yüksek kesme hızlarına olanak vermesi gibi önemli derecede avantajları bulunmaktadır. İşleme sırasında aşırı ısınmayı önlemek amacıyla kullanılacak kesici takımların olabildiğince keskin olması önemlidir (Smith 1993).

**Çizelge 2.3.** Otomotiv endüstrisinde ortalama alüminyum kullanımı (Smith 1993).

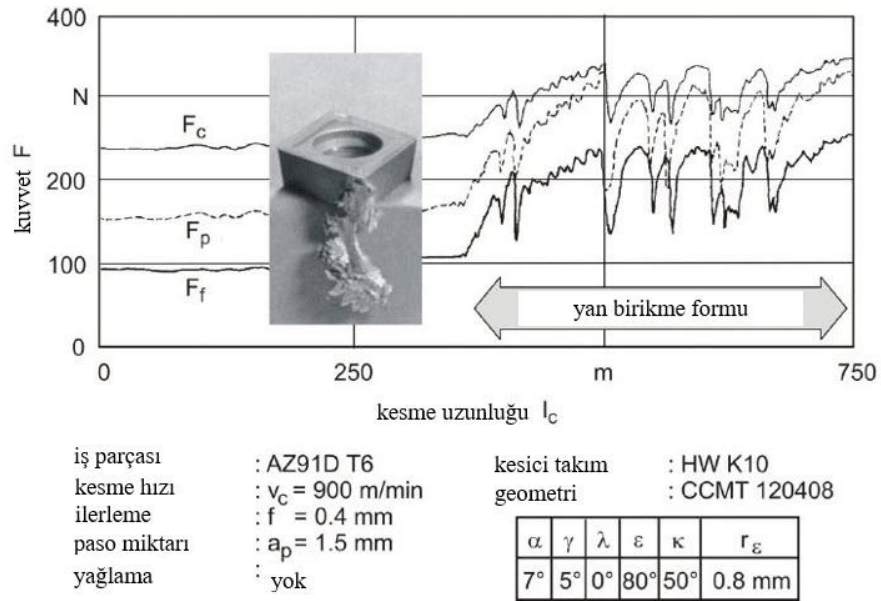


Çok düşük ve çok yüksek kesme hızları iş parçası ile kesici takım arasındaki kimyasal etkileşimi hızlandırır. Düşük kesme hızları, talaşların kesici takıma yapışmasına ve malzeme özelliklerinden dolayı birikme kenarı oluşturur. Yüksek kesme hızlarında ise kesme bölgesindeki sıcaklık yükselir ve o bölgedeki alüminyum sünek hale gelir. Bu da iş parçası ile kesici takım arasında reaksiyona girip aldatıcı yan birikme meydana gelebilir (Tomac ve ark. 1991).



**Şekil 2.11.** Çeşitli metallere ait delik delme ve frezeleme işlemleri için spesifik güç tüketim değerleri (Smith 2004).

Alüminyum alaşımları dökme alüminyum alaşımları ve dövme alüminyum alaşımları olmak üzere iki gruba ayrılır. Bunlara ek olarak alaşım elementlerinin sağladığı özellikler dikkate alınarak bu özelliklere göre de kendi aralarında sınıflandırma yapılabilir. Örneğin; ısıl işlem uygulanabilir, yaşlandırma işlemi uygulanabilir vb. (Songmene ve ark. 2011).



**Şekil 2.12.** Yan birikmenin işleme esnasındaki maruz kalınan kuvvetler üzerindeki etkisi (Tomac ve ark. 1991).

Alaşım grupları ve çeşitlerine göre işlenebilirlik değerleri Çizelge 2.5.’te gösterilmektedir.

**Çizelge 2.4.** Alaşım grupları ve çeşitlerine göre işlenebilirlik değerleri ( 1: çok iyi, 5: çok kötü) (Ensarioğlu ve ark. 2014, Anonim 2019c).

Alaşım grubu		Alaşım sistemi	Göreceli işlenebilirlik
Saf		%99,9 Al	5
Dövme	Sertleştirilmemiş	Al-Mn	4-5
		Al-Mg	3-5
		Al-Mg-Mn	3-4
	Sertleştirilmiş	Al-Mg-Si	3-4
		Al-Cu-Mg	2-3
		Al-Cu-Si-Mg	3
		Al-Zn-Mg-Cu	2
Dökme	G-Al-Si	3	
	G – Al-Si-Mg	2-3	
	G – Al-Si-Cu	2	
	G – Al-Mg	2	
	G – Al-Mg-Si	2	
	G – Al-Cu-Ti	2	
	G – Al-Si-Cu-Mg-Ni	2-3	

## 2.1. Talaşlı İmalat

Birçok mekanik parçanın son olarak şekillendirilmesi talaşlı işlemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Talaşlı imalat, 200 yılı aşan tarihi ile yoğun bir şekilde araştırılmakta olup 19.yy’ın ortalarında, işlemenin fiziksel mekanigi çalışılmaya başlanmıştır. 1940-1950 yılları arası, işleme araştırmalarının “Altın Çağı” olarak bilinmektedir ve metal kesme mekaniği temelinin talaş olduğu bilgisinin geliştiği dönemdir (Morehad 2007). Döküm, dövme, haddeleme, sıcak şekillendirme ve soğuk şekillendirme gibi yöntemlerle üretilmiş mühendislik malzemelerinin şekil, boyut ve yüzey kalitesi bakımında hazır ve son haline getirilmesi için çoğunlukla talaşlı imalat yöntemleri ile talaş kaldırma işlemleri uygulanmaktadır. En yaygın kesme işlemleri tornalama, frezeleme, delik delme ve bunları takiben honlama, broşlama, form kesme gibi özel işlemlerdir. Tüm metal kesme işlemlerinin mekanik prensipleri aynı olmakla birlikte bunların geometri ve kinematikleri birbirilerinden farklı olabilir. Talaşlı imalat işleminde, iş parçasını istenilen geometriye/forma getirmek için, parça üzerindeki fazlalıklar uygun

takım tezgahı ve kesici takım kullanılarak istenilen boyutlar ve yüzey kalitesi sağlanır (Shaw 1989).

## **2.2. Frezeleme**

Frezeleme prensip olarak, dönen çok uçlu bir kesici takım ile iş parçasını doğrusal hareketi sonucunda meydana gelen bir talaş kaldırma işlemidir. Frezelemenin, yüksek işleme verimliliği, iyi yüzey kalitesi, hassasiyet ve istenen şeklin oluşturulmasındaki esnekliği en önemli avantajlarından (Çakır 2010).

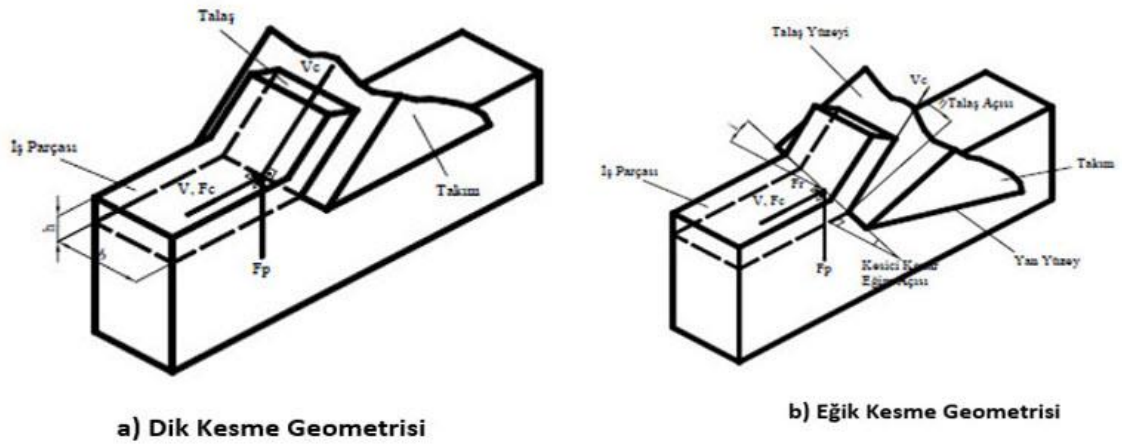
Frezeleme uzun yıllardır popüler olan ve gün geçtikçe, tezgahlar, kontrol üniteleri ve kesici takımlardaki değişimler sonucunda son kullanıcıların isteklerine cevap verecek şekilde gelişmeye devam etmektedir. Günümüzde, işleme merkezleri olarak bilinen tezgahlar frezeleme işlemlerinde en yaygın kullanılan tezgahlardır (Çakır 2010).

Frezeleme işlemi sadece gerçekleştirilen işlem tipleri açısından değil, aynı zamanda kullanılan tezgah, kesici takım ve işlenen iş parçası açısından da büyük farklılıklar göstermektedir. Sistemde bulunan tüm ekipmanların ve iş parçasının özellikleri işlemi önemli ölçüde etkilemektedir (Çakır 2010).

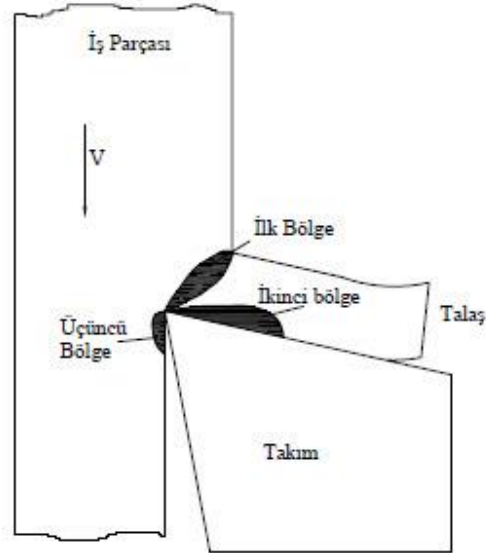
## **2.3. Dik Kesme Mekanikliği**

Yaygın olarak kullanılan kesme işlemleri üç boyutlu ve kompleks geometrilere sahip olmasına rağmen, metal talaş kaldırma işleminin genel mekanikliğini açıklamak için basit iki boyutlu dik kesme kullanılmaktadır. Kesici takımın kesme ağzı dik kesme işleminde, iş parçası ile takımın göreceli hareketine dik bir konumdadır. Daha karmaşık üç boyutlu eğik kesme işlemleri; genellikle ortogonal kesme işleminde uygulanmış geometrik ve kinematik şekil değiştirmelerle değerlendirilir. Şekil 2.13'de dik ve eğik kesme işlemlerine ait basit bir şekilde görselleştirilmiştir. Dik kesme işleminde, kesme kenarı kesme hızına dik olan takım kullanılmaktadır. Kesme genişliği (b) ve kesme derinliği (paso) (h) boyutunda bir metal talaş, iş parçasından kesilerek ayrılmaktadır. Dik kesmede, kesme işleminin kesici takımın kesme kenarı boyunca uniform olduğu kabul

görmektedir. Bu kabul doğrultusunda, malzemenin yanına yayılma olmaksızın iki boyutlu düz gerilime sahip şekil değiştirme meydana gelmektedir. Bu sayede kesme kuvvetleri yalnız esas kesme kuvveti ( $F_c$ ) ve pasif kuvvet (takım kuvveti) ( $F_p$ ) olup kesme hızı ve normali doğrultusunda oluşmaktadır. Bununla beraber eğik kesme işleminde kesme kenarı eğim açısıyla yönlendirilerek ek olarak radyol doğrultuda üçüncü bir kuvvet ( $F_r$ ) görev alır (Altıntaş 2017).



Şekil 2.13. Dik ve eğik kesme işlemlerinin geometrileri (Altıntaş 2017).



Şekil 2.14. Dik kesmede meydana gelen deformasyon bölgeleri (Taylan 2006).



Dik kesme işlemine ait kesit görünüşünün şematize edildiği Şekil 2.14’de anlaşılacağı gibi kesme işleminde üç adet şekil değiştirme (deformasyon) bölgesi bulunmaktadır. Takımın kesme kenarı iş parçasına dalarken takımın malzeme içerisinde hareketiyle bir talaş formu oluşmaya başlar ve birincil kayma bölgesi oluşur. Malzemenin kesilmesiyle beraber oluşan talaş kısmen şekil değiştirerek kesici takımın talaş yüzeyi boyunca hareket etmesiyle oluşan talaşta ikincil deformasyon bölgesi meydana gelir. Takımın yan yüzeyinde bulunan sürtünme bölgesinde ise üçüncül deformasyon bölgesi oluşur. Kesme işlemiyle oluşan talaş, ilk aşamada takımın talaş yüzeyine yapışarak yapışma bölgesini oluşturur.

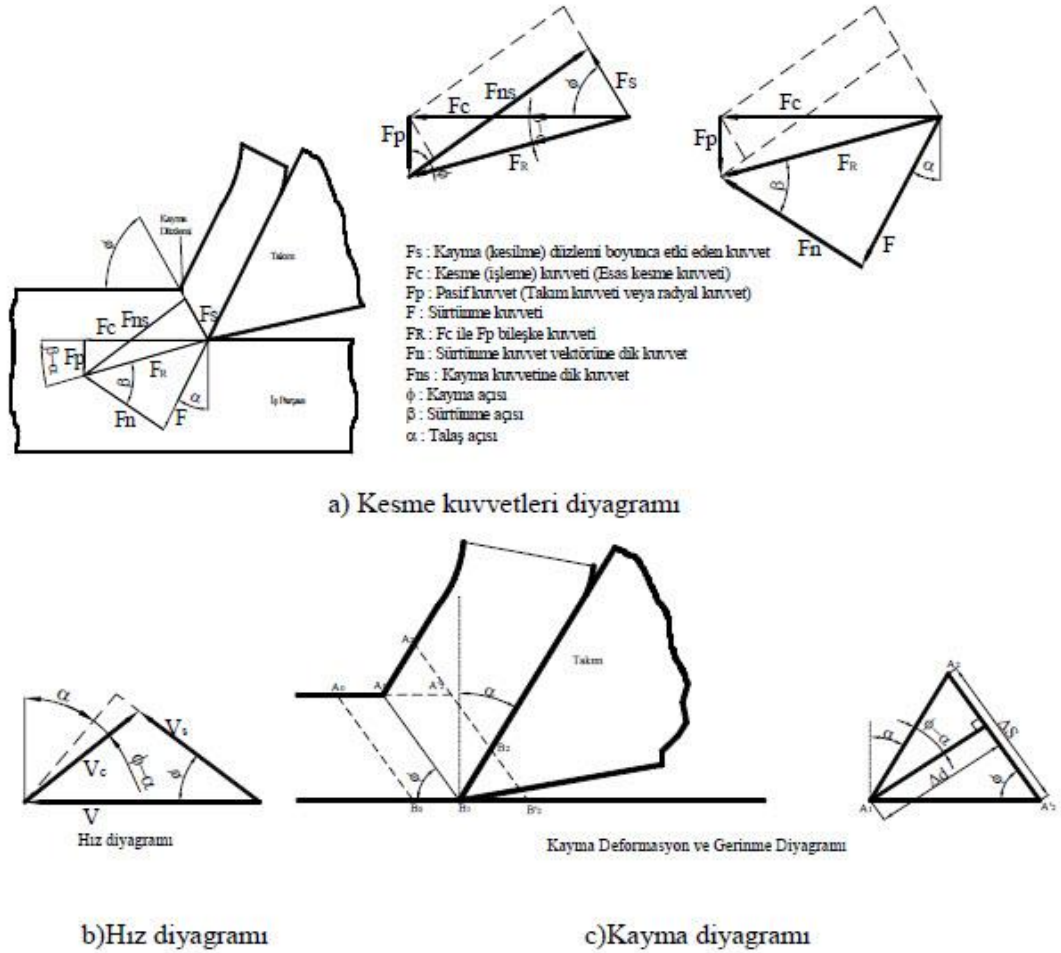
Kayma alanındaki (talaşın takım talaş yüzeyindeki ilerlediği yer) sürtünme gerilmesi malzemenin kayma gerilmesiyle neredeyse aynıdır. Talaşın yapışma aşaması bitince, talaş yüzeyinde sürekli kayma sürtünmesinin sonucu olarak talaş akması başlar. Talaşın takımdan ayrılmasıyla, takımın talaş yüzeyi ile olan teması biter. Buradaki temas uzunluğu kesme hızı, takım geometrisi ve malzeme özelliklerinden etkilenir. Birincil kesme bölgesinin analizinde basitçe iki çeşit kabul vardır.

Merchant ince tabakaların kesme bölgesinin tahmin edilmesi için bir dik kesme modeli geliştirmiştir. Lee, Shaffer, Palmer ve Oxley plastisite kanunlarıyla uyumlu olarak kayma deformasyon bölgesinde yapılan “kayma açısı tahmini” için kendilerine ait analiz gerçekleştirmişlerdir. Birincil kayma deformasyon bölgesi yapılan çalışmada ince alanlar için tahmin edilmiştir. Deformasyon geometrisi ve kesme kuvvetlerine ait görsel Şekil 2.15’te gösterilmektedir.

Kesme kenarının köşeli olduğu pah veya radyüs bulundurmadığı varsayımı doğrultusunda ince kayma bölgesindeki deformasyonlara dikkat çekilmiştir. Kayma açısı ( $\phi$ ), kesme hızı ( $V$ ) ve kayma düzlemi doğrultuları arasındaki açıdır. Kayma düzlemindeki kayma gerilmesi ( $\tau_s$ ) ve normal gerilme ( $\sigma_s$ ) sürekli olarak bulunmaktadır. Talaş üzerinde oluşan bileşke kuvvet ( $F_R$ ) kayma bölgesine uygulanmış olup talaş-talaş yüzeyi arasındaki bölgede ortalama daimi sürtünme olduğu varsayılarak hesaplanır. Burada bileşke kuvvet ( $F_R$ ), kesme kuvveti ( $F_C$ ) ile takım kuvveti ( $F_P$ ) in bileşkesidir (Altıntaş 2017).

$$F_R = \sqrt{F_c^2 + F_p^2} \quad (3.1)$$

Takım kuvveti veya pasif kuvvet kesilmemiş talaş kalınlığı doğrultusunda, esas kesme kuvveti veya işleme kuvveti ise kesme hızı doğrultusundadır (Altıntaş 2017).

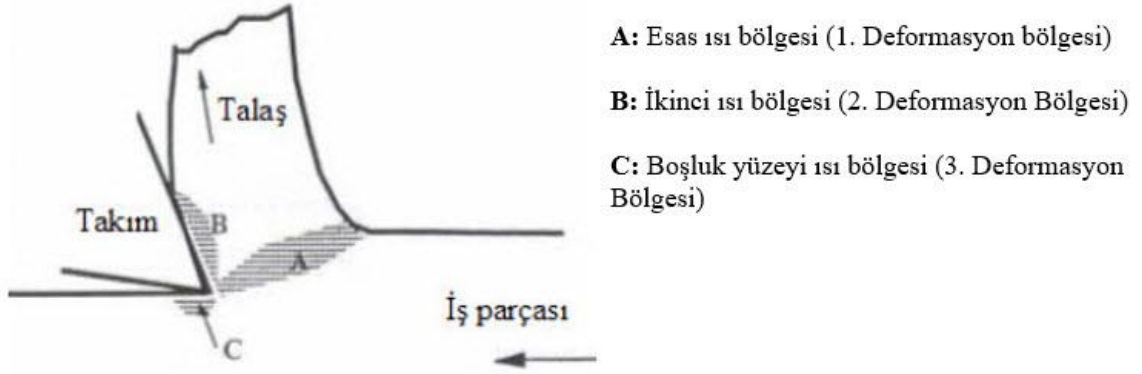


Şekil 2.15. Dik kesmede mekaniğine ait görsel (Altıntaş 2017).

## 2.4. Talaşlı imalat İşleminde Isı ve Sıcaklık

Talaşlı imalat işlemlerinde talaş kaldırmak için kullanılan güç genellikle ısıya dönüşerek talaşın, iş parçasının ve kesici takımın sıcaklığının artmasına neden olur. Sıcaklıktaki artış, metal kesme işlemi sırasında oluşan ısı ve bu ısının işleme bölgesinden

uzaklaştırılmasına bağlı olarak değişmektedir (Zhang 1991). İşlem sırasında meydana gelen bu ısı sonucu sıcaklığın artması kesici takımın performansını ve iş parçasının kalitesini doğrudan etkiler (Sandvik Coromant 1994). Kesme bölgesinde ısının oluşmasına neden olan üç bölge bulunmaktadır. Bu bölgeler Şekil 2.16’te gösterilmiştir.



**Şekil 2.16.** Kesme bölgesindeki ısı oluşmasına neden olan üç bölge (Köksal 2000).

A- Kayma düzlemi: Bu bölgede meydana gelen plastik deformasyon önemli bir ısı kaynağı olup oluşan ısının çoğu talaşa aktarılır.

B- Takım-talaş ara yüzeyi temas bölgesi: Bu bölgede ise kayma düzlemine ilave bir plastik deformasyon oluşurak kayma hareketinden dolayı ısının oluşumu açısından önemli derecede etkilidir.

C- Takım yan yüzeyi: Talaşın kaldırılması sonucu yeni oluşan iş parçası yüzeyinin takım yüzeyine sürtünmesiyle ısı ortaya çıkar. Yan yüzey aşınmasıyla birlikte buradaki sürtünme de artar (DeGarmo ve ark. 1997).

Kesme işlemi sırasında meydana gelen ısı kesici takımın aşınmasına sebep olur ve takım ömrünü doğrudan etkiler. Kesme bölgesinde oluşan ısının büyük bir kısmı talaş, iş parçası, kesici takım ve işlemin yapıldığı ortam tarafından uzaklaştırılır. Uzaklaştırılan ısının miktarı ise iş parçasının malzemesi, kesme işleminde kullanılan parametreler, kesici takımın malzemesi ve geometrisi ile mevcut kesme şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu parametrelerden kesme hızının kesme sıcaklığı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Kesme hızının yüksek olması metal kesme işlemideki deformasyon ve

sürtünme için kullanılan birim zamandaki enerji miktarını artırır ve ısı ile sıcaklığın yükselmesine sebep olur (Zhang 1991). Yüksek sıcaklık kısa takım ömrünün ve kesme hızının sınırlandırılmasının ana etkenidir. Dolayısıyla son yıllarda, yüksek sıcaklık etkilerine dayanıklı kesici takım geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Kesme bölgesindeki meydana gelen sıcaklık çoğunlukla takım ile talaş temasına, kesme kuvvetlerinin şiddetine ve iş parçası ile kesici takımın sürtünmesine bağlıdır. Buna bağlı olarak düşük kesme hızları iş parçasının iletilen ısıyı ve sıcaklığı arttırabilir. Öte yandan yüksek kesme hızları ise enerjinin büyük bir kısmının talaş yardımıyla atılmasını ve kesici takım ile iş parçasının olabildiğince az miktarda ısıya maruz kalmasını sağlayabilir. Metal kesme işlemlerinde kesme bölgesinde oluşan ısının büyük bir kısmı talaş yardımıyla uzaklaştırılmaktadır. Kesici takım, talaştaki ısıdan ancak talaş ve kesici takım arasında temas olduğu müddetçe etkilenir. Oluşan ısının büyük bir çoğunluğu kayma bölgesinden meydana geldiği için takım ve talaş arasındaki temasın ölçüsü performansı doğrudan etkilemektedir. Küçük talaş açıları ile oluşan küçük kayma açıları iş parçasına iletilecek ısıyı arttırma eğilimi gösterebilir (Sandvik Coromant 1994).

## **2.5. Kesici Takımlar**

Bir takım tezgahında iş malzemesine istenilen şekli vermek için kullanılan aletler kesici takım olarak tanımlanmaktadır. En optimum kesici takım malzemesi ve kesici geometrisi ile işlenecek iş parçası malzemesinin uyumu, sorunsuz ve verimli bir işleme süreci için çok önemlidir. Prosesin tümünün başarılı olması kesici takım ve iş parçası malzemesinin uyumunun yanında, kesme parametreleri, takım yolu, ortamın şartlandırılması gibi diğer parametrelere de bağlıdır. Günümüzde mevcut olan kesici takım malzemelerinin değişik uygulamalarındaki performansları; takım ömrüne, talaş kaldırma miktarına ve yüzey hassasiyeti ile takım maliyetlerine bağlı olarak değişiklik gösterir.

## **2.6. Kesici Takım Özellikleri ve Malzemeleri**

Her yapılacak uygulama için en doğru kesici takım seçimi, takım malzemesi ve performansı hakkında temel anlamda bir bilgi birikimi gerektirir. Her bir operasyon için işlenmesi planlanan iş parçası malzemesi, geometrisi, işleme koşulları ve yüzey kalitesi

önemli girdilerdir. Kesme işlemlerinde mekanik darbelere karşı dayanıklı olmak yüksek tokluk özelliğine bağlıdır. Kesme işlemi sırasında talaş ile kesici uç arasında reaksiyon meydana gelmemeli, hızlı ısınma ve soğumalar oluştuğu için yüksek termal şok direnç etkisine dayanaklı bir takım seçimi yapılmalıdır (De Vos ve ark. 2016). Kesici takım malzemelerini; iç yapıları, ömürleri, mekanik ve fiziksel özellikleri ve imalat şekillerine göre aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

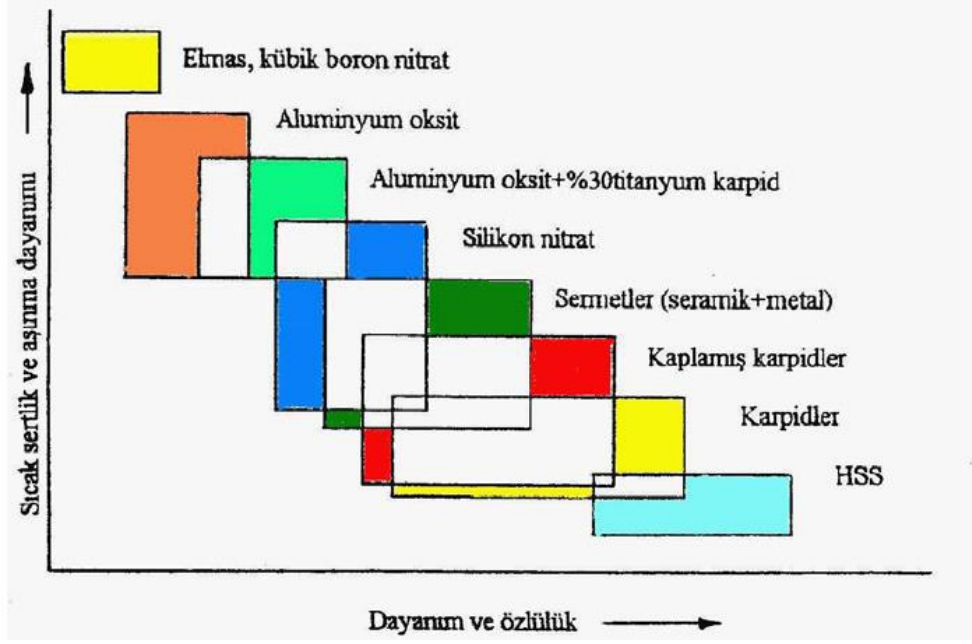
- ❖ Karbon çelikleri ve takım çelikleri,
- ❖ Yüksek hız çelikleri,
- ❖ Sert maden uçlu kesiciler,
- ❖ Seramikler,
- ❖ Sermetler,
- ❖ Siyalonlar,
- ❖ Coroniteler,
- ❖ Elmaslar,
- ❖ CBN,
- ❖ PCBN.

Mevcut şartlarda, yüksek kesme hızı ve ilerleme aralıklarında, kesici takım malzemesinden beklenen üç temel özellik vardır (Seco Tools 2004);

- **Aşınma direnci:** Aşınmaya karşı dayanma yeteneği
- **Tokluk:** Kırılmaya karşı dayanma yeteneği
- **Sıcak sertlik:** Yüksek sıcaklıklarda kimyasal kararlılığını ve sertliğini sürdürme yeteneği.

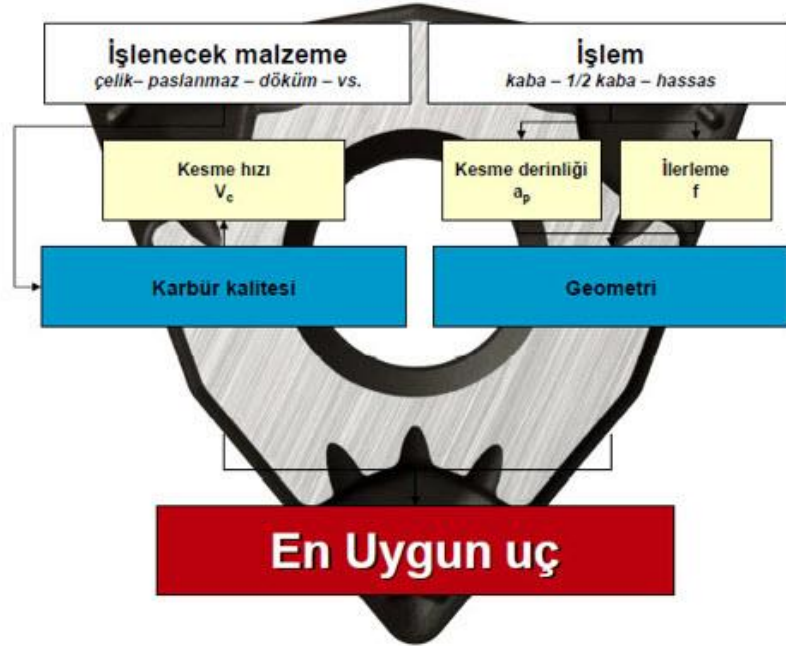
Tüm bu özellikler dahilinde genel uygulamalarda başarılı olan bir kesici takımın bazı karakteristik yetenekleri vardır. Bunlar serbest yüzey aşınması ve deformasyona dayanıklı olması, kütle kırılmasına dayanıklı olması, iş parçası malzemesi ile reaksiyon vermemesi, oksitlenmeye, difüzyona dayanabilmesi ve ani termal değişikliklere karşı dirençli olmasıdır.

Kesici takımların özelliklerinin karşılaştırılması Şekil 2.17'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 2.17. Kesici takımların özelliklerinin karşılaştırılması (Seco Tools 2004).

Yapılan deneyler ve çalışmalar doğrultusunda en uygun takım seçimi konusunda bazı yaklaşımlarda bulunulmuştur. Şekil 2.18’de kesici takım, iş parçası, proses bilgisi, geometri ve kesme parametreleri ile en uygun uç yaklaşımı verilmiştir.



Şekil 2.18. En uygun uç yaklaşımı (Seco Tools 2004).

## **2.7 Kesici Takım Aşınması**

Aşınma, katı cisimlerin kuru yüzeylerinin birbiriyle sürtünmeleri sonucu yaşanan malzeme kayıplarıdır. ASTM G40-93 standartlarına göre aşınma; “kullanılan malzemelerin, başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulmalarıdır” şeklinde tanımlanmaktadır. Diğer bir ifade ile izafi hareket yapan elemanlarda sürtünme sonucu yaşanan erozyon ve kayıplardır (De Vos ve ark. 2016).

Kesici takımların hepsi talaş kaldırma işlemleri esnasında aşınır ve bu aşınma durumu kesici takımın ömrü bitene kadar sürer. Kesici kenar ömrü dakika cinsinden ifade edilir ve günümüzde takım ömrü eskiye kıyasla daha azdır. Genellikle 15 dakikalık zaman referans alınarak bazı durumlarda biraz daha fazla olabilmektedir. Kesici takımların ömrü, kabul edilebilir parametrelerin limitlerinde çalışması halinde ortaya çıkan zaman olarak hesaplanmaktadır (De Vos ve ark. 2016).

## **2.8. İş Parçası Malzeme Özellikleri ve Takım Bozulması**

İşlenmek istenen iş parçası işlenebilirliğinin talaş kaldırma işlemi, özellikle takım bozulması ve takım aşınması üzerindeki etkisi belirleyicidir. İşlenebilirlik talaşlı imalat uygulamalarının çeşidine bağlıdır. Örneğin bir malzeme bazı uygulamalarda yüksek işlenebilirliğe sahipken, bazılarında ise tam tersi davranış sergileyebilir. İşlenebilirlik performansı, özel kriterleri sağlayan farklı karakteristikleri veya miktarları içeren bir polar diyagram ile tanımlanabilir (De Vos ve ark. 2016).

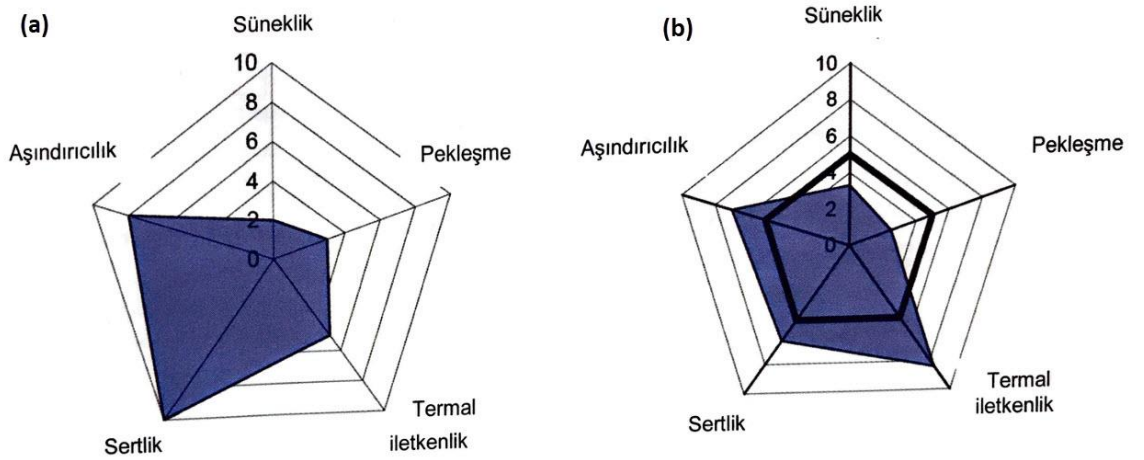
## **2.9. Polar Diyagramda İncelenen Malzeme Faktörleri**

İşlenebilirliği belirleyen 5 önemli iş parçası özelliği bulunmaktadır. Bu özellikler tek tek veya birlikte olmak koşuluyla iş parçasının işlenebilirliğine etki ederler. Bu özellikler aşağıda verilmiştir (De Vos ve ark. 2016).

1. Sertlik ve deformasyon direnci.
2. Aşındırıcılık ve aşınma eğilimi.
3. Süneklik.
4. Pekleşme, örneğin deformasyon sırasında akma mukavemetinin artması.
5. Düşük termal iletkenlik ve/veya düşük özgül ısı.

Yukarıda verilen 5 önemli malzeme faktörleri direkt olarak talaşlı imalat işlemiyle ilgili olmasalar da herhangi bir malzeme için beklenen veya potansiyel işlenebilirlik, kesici takımı veya kesme parametrelerini hiç dikkate almaksızın sadece bu faktörler kullanılarak belirlenebilir (De Vos ve ark. 2016).

Herbir özelliğin seçilen bir iş parçasının işlenebilirliğinde ne denli bir etkide bulunduğu belirlenmesi için Şekil 2.19'de gösterildiği gibi bir polar diyagram çizilmiştir (De Vos ve ark. 2016)..



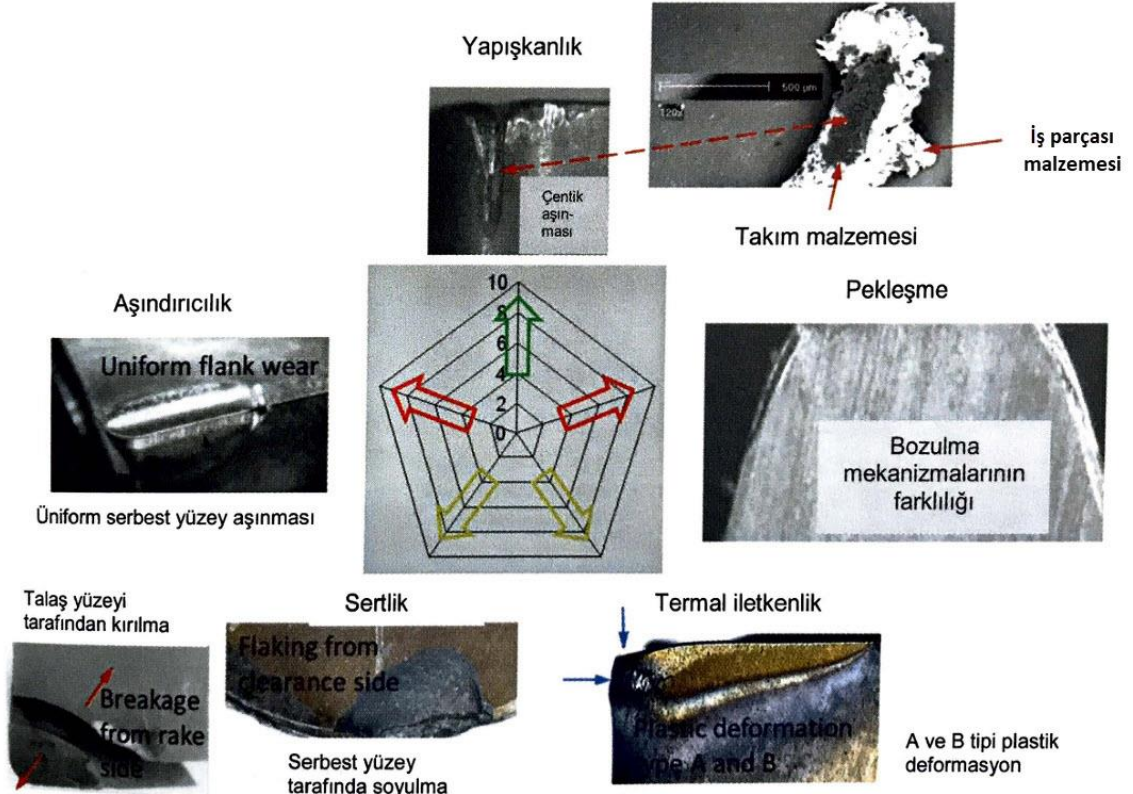
**Şekil 2.19.** (a) iş parçası malzemelerinin potansiyel işlenebilirliklerini kontrol eden malzeme faktörleri cinsinden sınıflandırılmaları için bir polar diyagram örneği, (b) her bir malzeme faktörünün verilen bir referans malzemeye (ortadaki koyu renkli çizgi ile çevrili alan) göre, X malzemesinin işlenebilirliğine (taralı alan) olan önem derecesini gösteren bir polar diyagram (De Vos ve ark. 2016).



## 2.10. Malzeme Özellikleri, Takım Aşınması ve Takım Bozulması

Kesici takım özellikleri ve uygulamada kullanılan kesme parametreleri, verilen bir iş parçasının işlenebilirliğini fazlasıyla etkileyen bir faktördür. İşlenebilirlik seviyesinin kesme parametrelerindeki ayarlamalar/optimizasyonu yardımıyla ne denli iyileştirilebileceğinin, bir polar diyagram oluşturularak, gösterilmesi mümkündür. Polar diyagramların kullanımı ile uygun bir kesici takımın seçimleri birbirine çok benzerdir. Kesici takım özellikleri ve kesme parametreleri bir veya daha fazla malzeme faktörünün etkisini dengeleyecek nitelikte seçilir (De Vos ve ark. 2016).

Seçilen bir iş parçası malzemesinin işlenebilirliği kesici takımların aşınma ve bozulmasını direkt olarak etkiler. Polar diyagram yardımıyla belirli bir iş parçası malzemesinin özelliğine bağlı işlenebilirliğinin, oluşması beklenen aşınma tipi konusunda nasıl bir belirleyiciliğe sahip olacağı Şekil 2.20’de gösterilmektedir (De Vos ve ark. 2016).

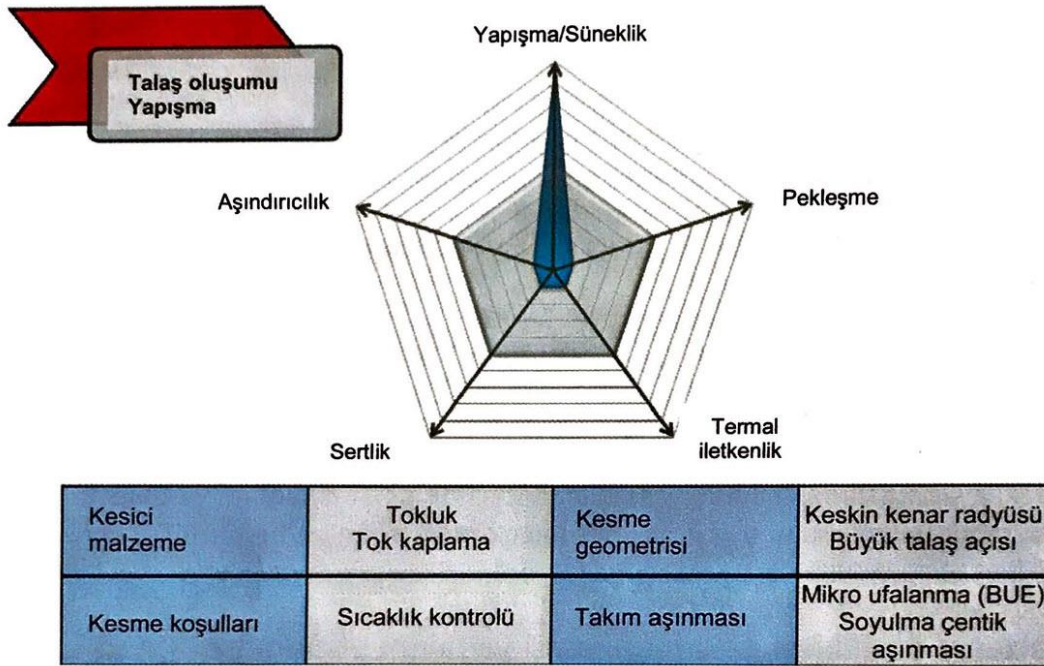


Şekil 2.20. Tipik malzeme özelliklerine bağlı aşınma şablonu örnekleri (De Vos ve ark. 2016).

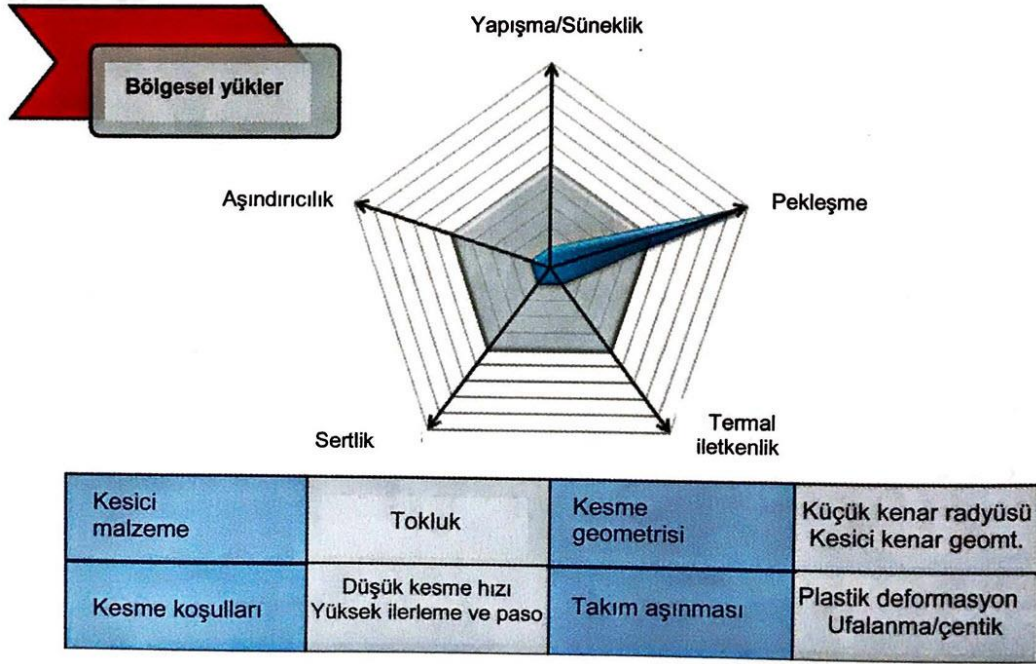
## 2.11. Takım ve Kesme Parametrelerinin Seçimi, Takım Aşınması ve Polar Diyagramlar

İş parçası malzeme özelliklerinden her biri (yapışma/süneklik, pekleşme, termal iletkenlik, sertlik, aşındırıcılık) takım ve kesme verilerinin seçimini ve buna göre hangi takım bozulması ve aşınma tipinin daha baskın bir şekilde meydana gelebileceğini belirlemektedir.

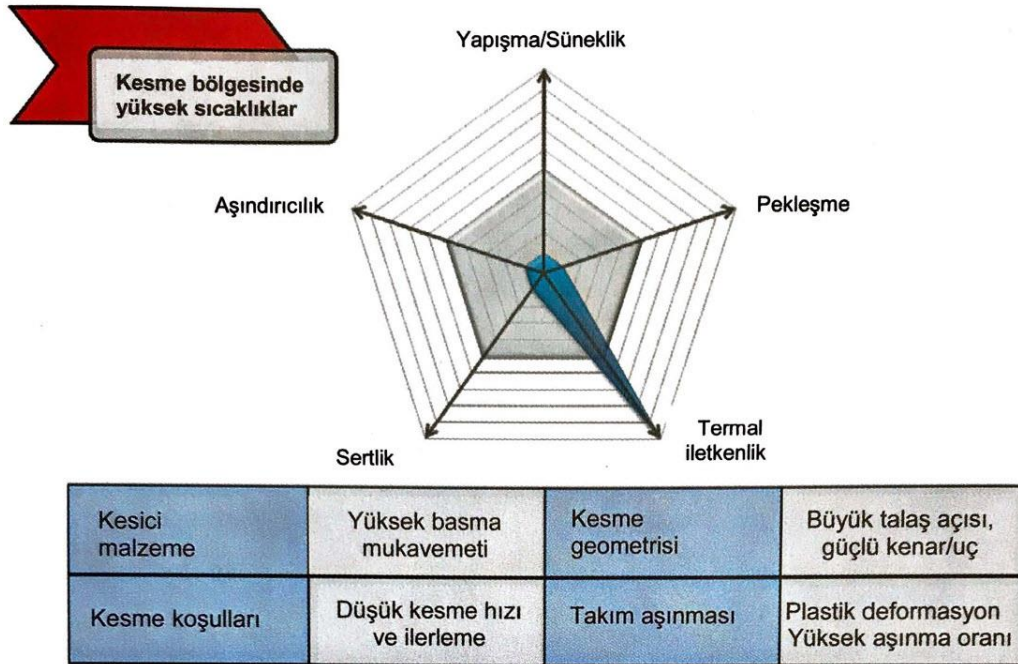
Şekil 2.21'dan Şekil 2.25'e kadar bu 5 iş parçası özelliği, bu özelliklerin etkileri, kesici takım ve kesme koşullarının nasıl belirleneceği ile ilgili genel bir değerlendirme verilmiştir. Gösterilen her bir şekilde işlenebilirlik derecelerinin değerlendirilmesinde ana problemlerin neler olduğu da belirtirmiştir (De Vos ve ark. 2016).



**Şekil 2.21.** Kesici takım ve kesme koşullarının seçimi ile talaş kaldırma işleminde baskın olacak takım bozulması ve aşınma tipinin belirlenmesi sürecinde iş parçası malzemesinin adezyon (yapışma) eğilimi ve sünekliğinin etkisi (De Vos ve ark. 2016).

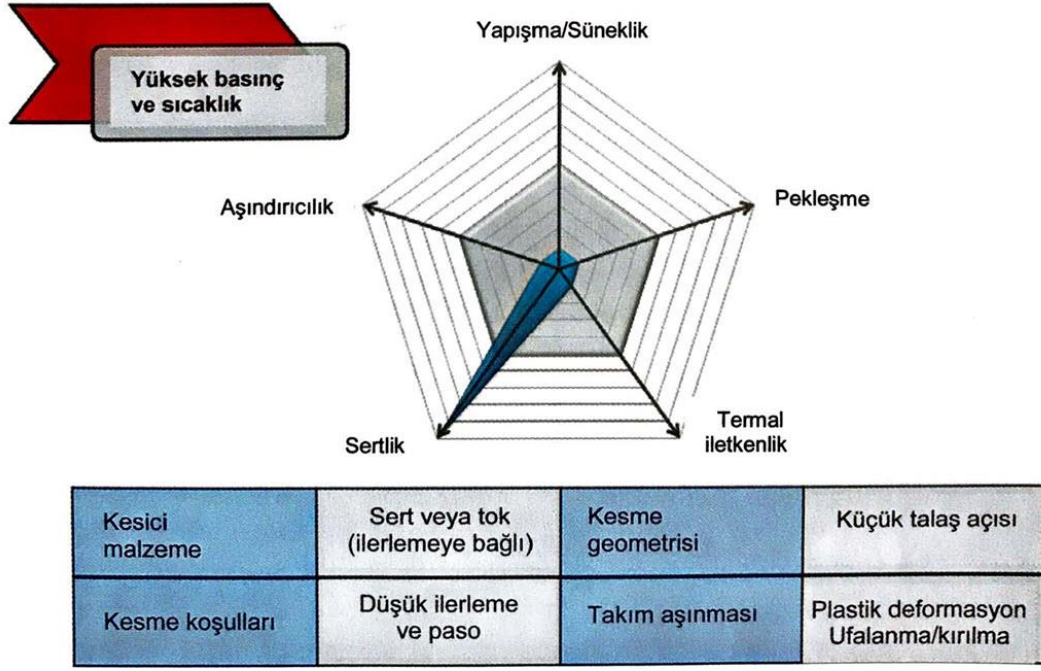


**Şekil 2.22.** Kesici takım ve kesme koşullarının seçimi ile talaş kaldırma işleminde baskın olacak takım bozulması ve aşınma tipinin belirlenmesi sürecinde iş parçası malzemesinin pekleşme eğiliminin etkisi (De Vos ve ark. 2016).

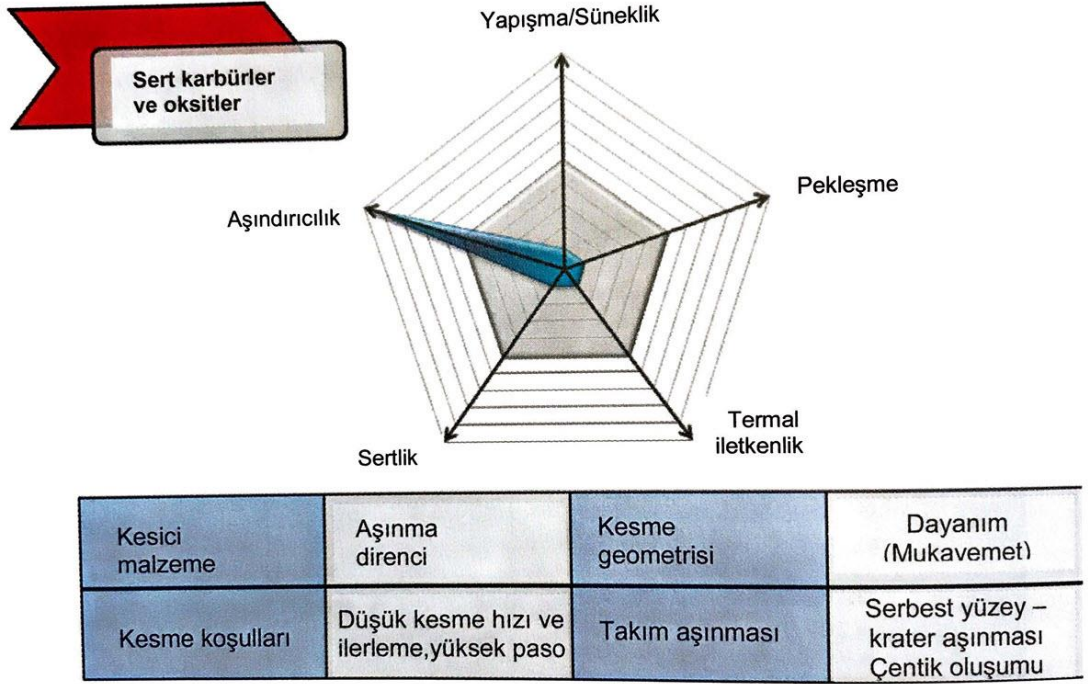


**Şekil 2.23.** Kesici takım ve kesme koşullarının seçimi ile talaş kaldırma işleminde baskın olacak takım bozulması ve aşınma tipinin belirlenmesi sürecinde iş parçası malzemesinin termal iletkenlik (düşük) özelliğinin etkisi (De Vos ve ark. 2016).





**Şekil 2.24.** Kesici takım ve kesme koşullarının seçimi ile talaş kaldırma işleminde baskın olacak takım bozulması ve aşınma tipinin belirlenmesi sürecinde iş parçası malzemesinin sertlik özelliğinin etkisi (De Vos ve ark. 2016).



**Şekil 2.25.** Kesici takım ve kesme koşullarının seçimi ile talaş kaldırma işleminde baskın olacak takım bozulması ve aşınma tipinin belirlenmesi sürecinde iş parçası malzemesinin aşındırıcılık özelliğinin etkisi (De Vos ve ark. 2016).

## 2.12. Yekpare Karbür Takımlarda Takım Aşınması

Karbür takımlarda, aynı takma uçlu takımlarda olduğu gibi, kesme işlemi sırasında maruz kaldığı termal, kesme kuvveti, titreşim vb gibi etkenlerden dolayı aşınırlar. Fakat, karbür takımlar takma uçlu takımlara göre yapı olarak farklıdır. Bu farklılıktan dolayı, takımın nasıl bozulacağı ya da takımın özelliklerine hangi aşınma tipinin etki edeceği farklılık gösterecektir.

Kesici takımın kesici bir kenarı üzerindeki takım aşınma şekli ve boyutunun ayırt edilmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır;

- Görsel incelemeler için büyüteç kullanılması.
- Kesme kuvvetlerindeki artış daha fazla güç tüketimini tetiklediği bilinen bir gerçektir. Bu olay aslında takım aşınmasının bir kanıtı olabilir. Ancak, güç tüketiminin anlık ve belli periyotlarla ölçülmesi kolay uygulanabilen bir işlem olmadığından çok tercih edilen bir yöntem değildir.
- Talaşın rengini incelemekte takımın aşınması ile ilgili bilgi verir. Kesici kenarların üzerinde ortaya çıkan aşınma, kesme işlemi esnasında ısının değişimini gösterir ve bu da talaşın renginde değişime sebep olur.
- İşlenmiş yüzeyin kontrolünde aşınma hakkında ipucu vermektedir. Kontrol sonucu, yüzey kalitesinin, boyutlarının, şeklinin veya yüzey pürüzlülüğünün değişimi yine kesici kenarın aşınmasına bağlı olabilir.
- Aşınmamış bir kesici takım çapak oluşumuna neden olmaz. Dolayısıyla, çapak oluşumu varsa, kesici kenarın geometrisinde değişiklik olduğu ve bu değişimin de kesici kenarın aşınmış olabileceği ihtimali düşünülmelidir. Bu durum demir-dışı metaller ve süper alaşımlarda farklılık gösterebilmektedir.

Karbür takımların takma uçlu takımlara göre farklılıklarından en çok göze çarpanı ise şüphesiz boyutudur. Karbür takımlar için aşınma veya bozulma söz konusu ise bu değerlendirmeyi yaparken kesici takımın boyu kesinlikle atlanmamalıdır. Takım aşınmasının çeşidi ve müsaade edilen maksimum aşınma miktarı, kesici takımın tipi ve boyutuna bağlı olarak değişiklik gösterir (De Vos ve ark. 2016).

Günümüzde kullandığımız ve geri kazanımı olan her ürün gibi karbür takımlarda yenilenecek tekrar tekrar kullanılabilir. Karbür takımların yenilenebilirliği çok önemli ve atlanmaması gereken bir işlemdir. Ne kadar fazla aşınmaya izin verilirse takımın yenilenebilirliğinin olasılığı aynı oranda azalacaktır (De Vos ve ark. 2016).

Bu yüzden kesici takımların optimum şekilde ömürlerinin kullanılabilmesi için kesici takım firmalarının önerdiği/katalog değerler göz önünde bulundurularak, işleme esnasında kullanılan kesme parametrelerinin takibi ve işleme anındaki takımın tepkileri kayıt altına alınmalıdır. Bu yaklaşımla kullanılan kesici takımların ömür analizleri rahatça yapılabilir ve yenilenebilir limiti aşmadan takım tekrar kullanılabilir hale getirilmesi mümkün olur.



**Şekil 2.26.** Meydana gelen aşınma kesici takımın yenilenebilme olasılığını belirler. Soldaki tercih edilen bir durumken, sağdaki görseldeki aşınma durumlarından her zaman kaçınılmalıdır (De Vos ve ark. 2016).

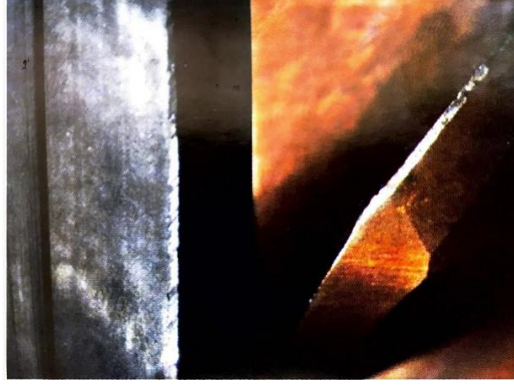
### 2.13. Kesici Takımlarda Aşınma Tipleri

Kesici takımlardaki özellikler işleme sırasında kesici takımın hangi tipteki aşınmaya maruz kalabileceğini etkiler. Örneğin;

- Kesme işleminde büyük talaş derinlikleri titreşimi tetikler. Özellikle büyük kesici kenar uzunluğuna sahip kesici takımlar kesici kenar uzunluğu küçük olanlara göre daha fazla titreşim oluştururlar. Talaş derinliğinin fazla kullanıldığı büyük kesme kenar uzunluğu olan kesici takımların meydana gelen titreşim sonucu kesici kenarında ufalanmalar görülür.

## 2.14. Serbest Yüzey Aşınması

Kesici takım aşınmaları içinde en güvenilir ve öngürülmesi kolay olan serbest yüzey aşınmasıdır. Bu sebeple aşınmalar içinde en çok arzu edilen bir aşınma tipi olarak bilinir. Kesici kenar boyunca kısmen üniform bir abrazyon gibi görünür. Şekil 2.27’te serbest yüzey aşınmasına ait bir görsel verilmiştir.



**Şekil 2.27.** Serbest yüzey aşınması (De Vos ve ark. 2016).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. MATERYAL

Bu çalışmada yoğunluğu yaklaşık 0,85 gr/cm<sup>3</sup>, ölçüleri 90x200x35 mm ve bileşiminde %5-10 oranında MgO olan iki adet alaşımlı alüminyum köpük kütük kullanılmıştır. Çalışmada farklı kesici takım üreticilerine ait dört kesici takım (takımların seçimi kesici takım firmalarının önerileri doğrultusunda yapılmıştır), ısıtmalı takım tutucu, parçaların bağlanması için mengene ve aparatları, soğutma sıvısı ve maksimum devri 20.000 dev/dak olan 5 eksenli bir işleme merkezi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada kullanılan bağlama ekipmanı ve işleme merkezi Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Parçaların bağlanması için kullanılan Lang marka mengene.





**Şekil 3.2.** Kesme işlemleri için kullanılan 5 eksenli işleme merkezi (DMG DMU-75 MonoBLOCK) ve bağlanmış parçaya ait görsel.

### 3.1.1. Kullanılan Kesici Takımlar

Deney çalışmalarında kullanılan kesici takımlar Şekil 3.3, Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kyocera markalı 3 ağızlı Ø12 karbür kesici takım görseli.



Şekil 3.4. Inovatools markalı 3 ağızlı Ø12 karbür kesici takım görseli.



Şekil 3.5. YG-1 markalı 3 ağızlı Ø12 karbür kesici takım görseli.



Şekil 3.6. YG-1 markalı 2 ağızlı Ø12 karbür kesici takım görseli.

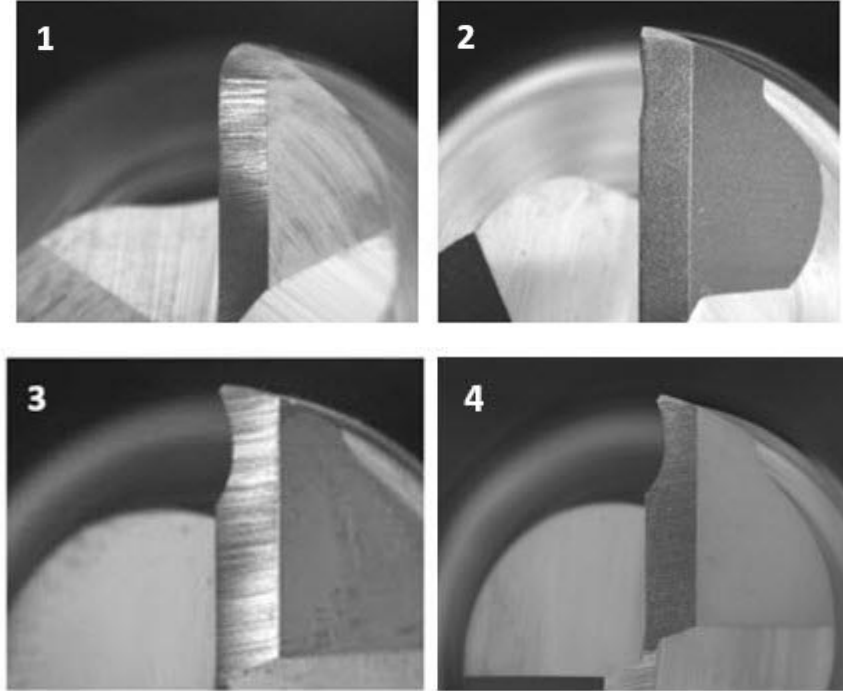
Takımların seçimi kesici takım firmaları ile birlikte yapılmış olup kullanılan kesme parametreleri ilgili takımın katalog değerleri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Takımların özellikleri ise Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Kullanılan kesici takımlara ait özellikler.

	MARKA	KOD	ÇAP	UÇ RADYUSU	HELİS BOYU	HELİS AÇISI	AĞIZ SAYISI	KAPLAMA
1	KYOCERA	43MLC	12	1	16	38°	3	-
2	INOVATOOLS	244	12	0	36	43°/47°	3	ZrN
3	YG-1	E5E49	12	0	25	45°	3	-
4	YG-1	E5930	12	0	16	25°	2	-

### 3.1.2. Kesici Takımların İşleme Öncesi Görünümleri

Kullanılan kesici uçların işleme öncesi görüntüleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Sıralama “Çizelge 3.1” ‘deki sıralama baz alınarak yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde Zoller ölçüm sistemleri kullanılmıştır.



**Şekil 3.7.** İşleme öncesi kesici takımların kesici ağızlarının genel görüntüsü.

## 3.2. YÖNTEM

Kesme parametreleri her bir kesici takımın katalog değerleri ve kesici takımın üretici firmalarının önerileri dikkate alınarak belirlenmiş ve Çizelge 3.2’de detaylı olarak gösterilmiştir. Çizelge 3.2 ‘de yer alan bölge ve operasyon tanımlamalarının parçadaki yerleri Şekil 3.8 ‘da, numune üzerine çıkartılan takım yollarına ait (OP-200’e ait dört bölge) görsel ise Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

Ayrıca; her kesme işleminde, alüminyum işleme işlemleri için kullanılan Blaser.Swisslube marka, Art. Nr. 01935-01 Blasocut BC 935 Kombi soğutma sıvısı kullanılmıştır.

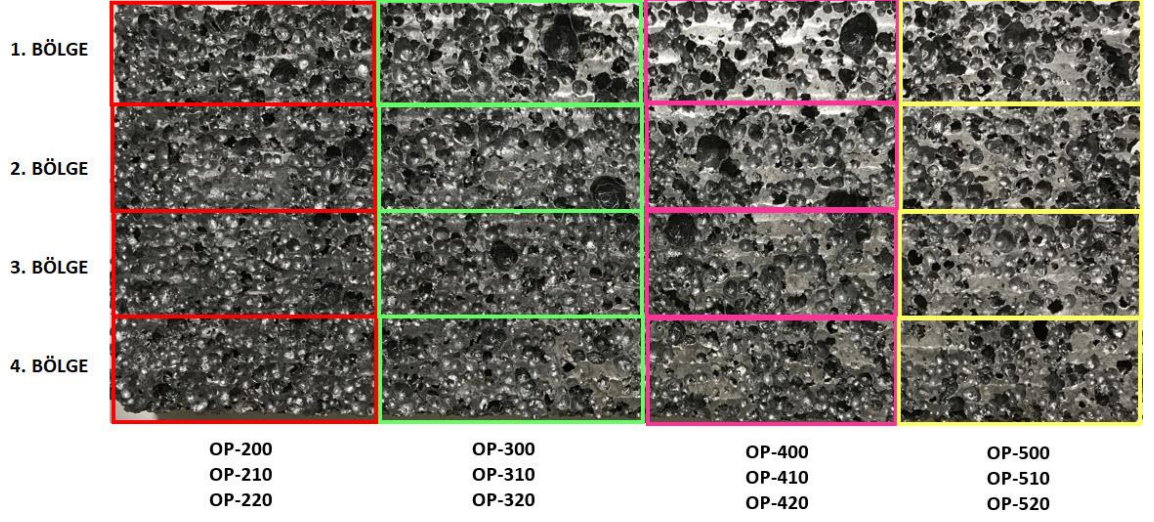
**Çizelge 3.2.** Kullanılan Kesme Parametreleri ( $V_c$ : m/dak,  $N$ : dev/dak,  $f_z$ : mm/ağız,  $V_f$ : mm/dak,  $a_e$ : mm)

	TAKIM NO 1				TAKIM NO 2				TAKIM NO 3				TAKIM NO 4			
	OP-200				OP-300				OP-400				OP-500			
	$V_c$	$N$	$f_z$	$V_f$	$V_c$	$N$	$f_z$	$V_f$	$V_c$	$N$	$f_z$	$V_f$	$V_c$	$N$	$f_z$	$V_f$
1. BÖLGE ( $a_e$ : 4mm)	392	10404	0.1527	4767	377	10000	0.1061	3182	300	8000	0.1432	2291	300	8000	0.1538	3691
2. BÖLGE ( $a_e$ : 5mm)	392	10404	0.1460	4558	377	10000	0.1014	3043	300	8000	0.1369	2191	300	8000	0.1471	3529
3. BÖLGE ( $a_e$ : 6mm)	392	10404	0.1444	4494	377	10000	0.1	3000	300	8000	0.135	2160	300	8000	0.145	3480
4. BÖLGE ( $a_e$ : 7mm)	392	10404	0.1444	4494	377	10000	0.1	3000	300	8000	0.135	2160	300	8000	0.145	3480
	TAKIM NO 1				TAKIM NO 2				TAKIM NO 3				TAKIM NO 4			
	OP-210				OP-310				OP-410				OP-510			
	$V_c$	$N$	$f_z$	$V_f$	$V_c$	$N$	$f_z$	$V_f$	$V_c$	$N$	$f_z$	$V_f$	$V_c$	$N$	$f_z$	$V_f$
1. BÖLGE ( $a_e$ : 4mm)	441	11704	0.1527	5363	452	12000	0.1061	3818	377	10000	0.1432	2864	377	10000	0.1538	4614
2. BÖLGE ( $a_e$ : 5mm)	441	11704	0.1460	5128	452	12000	0.1014	3651	377	10000	0.1369	2738	377	10000	0.1471	4412
3. BÖLGE ( $a_e$ : 6mm)	441	11704	0.1444	5056	452	12000	0.1	3600	377	10000	0.135	2700	377	10000	0.145	4350
4. BÖLGE ( $a_e$ : 7mm)	441	11704	0.1444	5056	452	12000	0.1	3600	377	10000	0.135	2700	377	10000	0.145	4350
	TAKIM NO 1				TAKIM NO 2				TAKIM NO 3				TAKIM NO 4			
	OP-220				OP-320				OP-420				OP-520			
	$V_c$	$N$	$f_z$	$V_f$	$V_c$	$N$	$f_z$	$V_f$	$V_c$	$N$	$f_z$	$V_f$	$V_c$	$N$	$f_z$	$V_f$
1. BÖLGE ( $a_e$ : 4mm)	490	13004	0.1527	5959	520	13800	0.1061	4391	450	11936	0.1432	3418	450	11936	0.1538	5507
2. BÖLGE ( $a_e$ : 5mm)	490	13004	0.1460	5698	520	13800	0.1014	4199	450	11936	0.1369	3268	450	11936	0.1471	5266
3. BÖLGE ( $a_e$ : 6mm)	490	13004	0.1444	5618	520	13800	0.1	4140	450	11936	0.135	3223	450	11936	0.145	5192
4. BÖLGE ( $a_e$ : 7mm)	490	13004	0.1444	5618	520	13800	0.1	4140	450	11936	0.135	3223	450	11936	0.145	5192

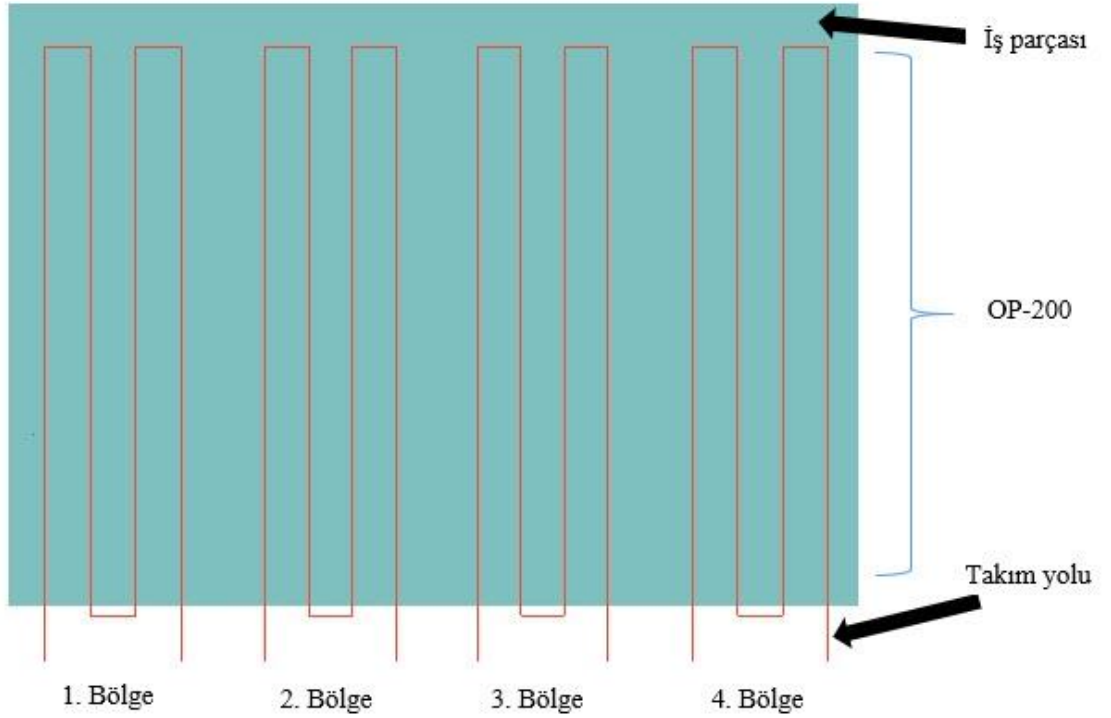
Çizelge 3.2’de yer alan  $V_c$ ; kesme hızını (m/dak),  $N$ ; devir sayısını (rpm),  $f_z$ ; diş başı ilerlemeyi (mm),  $V_f$ ; ilerleme hızını,  $a_e$ ; yanal adımı ifade etmektedir.

Kesme parametreleri için kesici takımların katalog değerlerinde önerilen ağız başı ilerleme ( $f_z$ ) ve kesme hızının ( $V_c$ ) maksimum-minimum ve ortalama olmak üzere üç farklı değeri referans alınmıştır. Ağız başı ilerleme değeri talaş inceltme faktörü hesabıyla farklı kesme genişlikleri ( $a_e$ ) için ayrı ayrı hesaplanarak ilerleme hızı bulunmuştur.

Yapılan çalışmada tüm bölgeler için sabit bir talaş derinliği kullanılmış olup ( $a_p$ ) bu değer 1 mm'dir.



Şekil 3.8. Alüminyum köpüğün işleme için kullanılan bölgeleri ve operasyonların bölgesel dağılımı.



Şekil 3.9. OP-200'e ait dört bölge için oluşturulan takım yolu ve iş parçası görseli.

Bir operasyon (örneğin: OP-200) içinde her bir bölge için (1.,2.,3. ve 4. Bölge olmak üzere) kesme hızı sabit tutularak devir hesaplanmıştır. Aynı zamanda farklı kesme genişliklerine göre ağız başı ilerleme bulunarak ilerleme hızı ( $V_f$ ) elde edilmiştir.



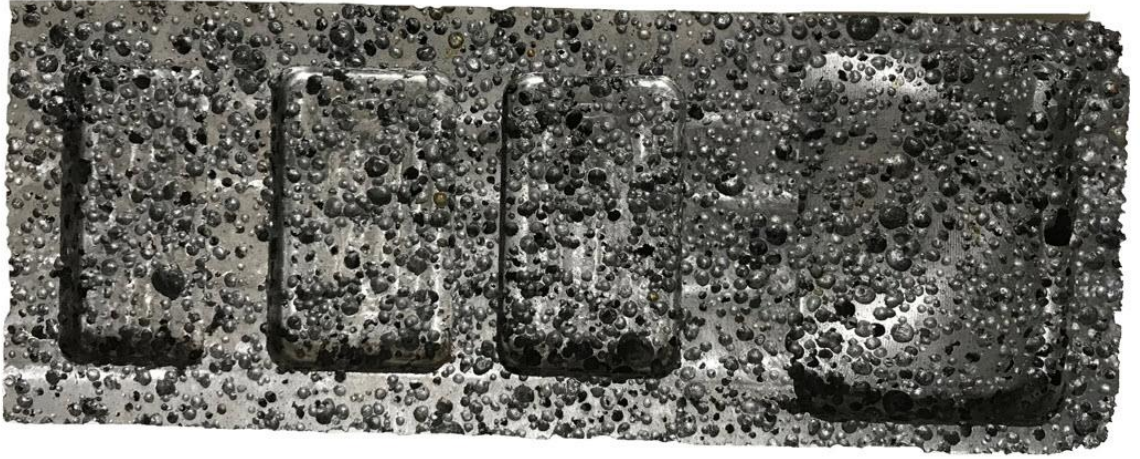
## 4. BULGULAR

### 4.1 İşleme Sonrası Alüminyum Köpük

Çalışmada kullanılan alüminyum köpüğe ait kütüklerin işlenirken; kullanılan takımın kesme işlemi sonrası aşınmaları, kesme koşullarının parçayı işlemeye olan etkileri, kesme işlemine hazırlık aşamalarında ve kesme işlemi esnasında karşılaşılan sorunlar ele alınmış olup sonuçlar aşağıda detaylandırılmıştır. Şekil 4.1’de her bir bölge için oluşturulan takım yolları için alüminyum köpüğün görselleri bulunmaktadır. Bu görseller her bir takım için Çizelge 3.2’deki değerlere göre 48 farklı kesme parametresi ile oluşturulan takım yollarından sonra elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Bütün operasyonlar sonunda alüminyum köpüğe ait görseller.

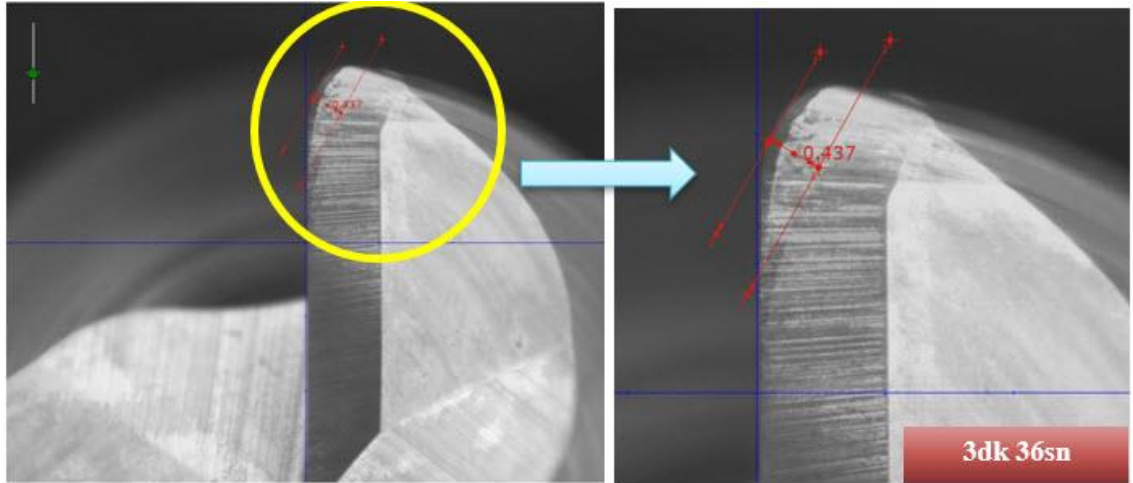


**Şekil 4.2.** Üç farklı işleme stratejisi (soldan sağa; eksene paralel – kontura paralel – eş merkezli) ile oluşturulan aynı özellikteki dikdörtgen cepler ve 3B kontur.

#### 4.2 İşleme Sonrası Alüminyum Köpük

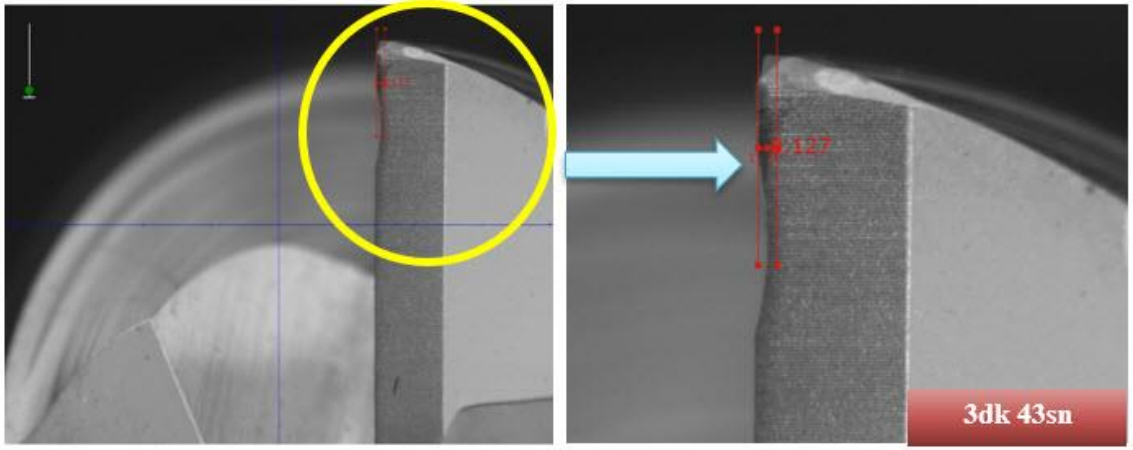
Alüminyum köpüğün işlenmesi sonrasında kesici takımlara ait çalışma süreleri ve bu süreler sonundaki aşınmalara ait aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da gösterilen takımların numaralandırılmasında Çizelge 3.1’deki sıralandırma esas alınmıştır.

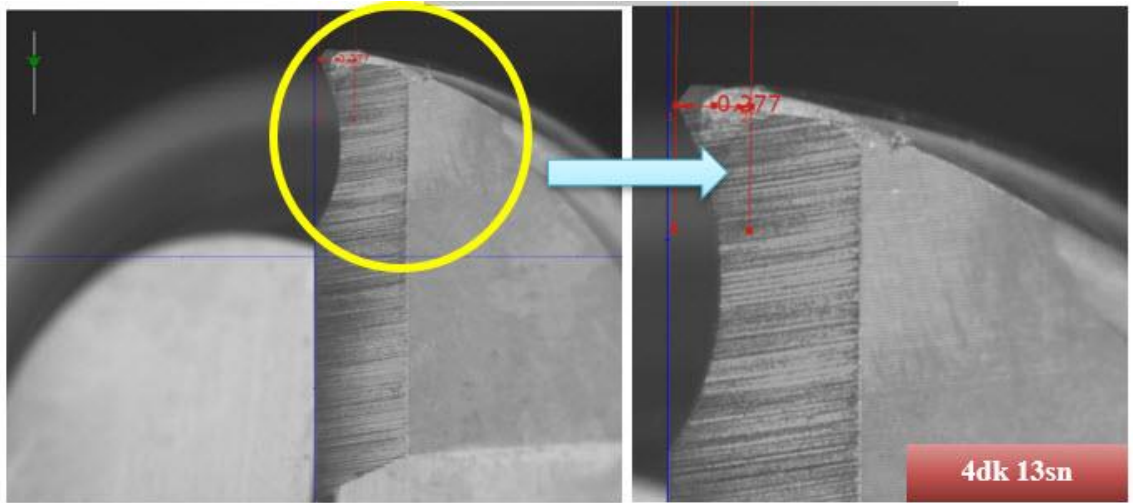


**Şekil 4.3.** 1 numaralı takıma ait aşınma miktarı : 437 µ

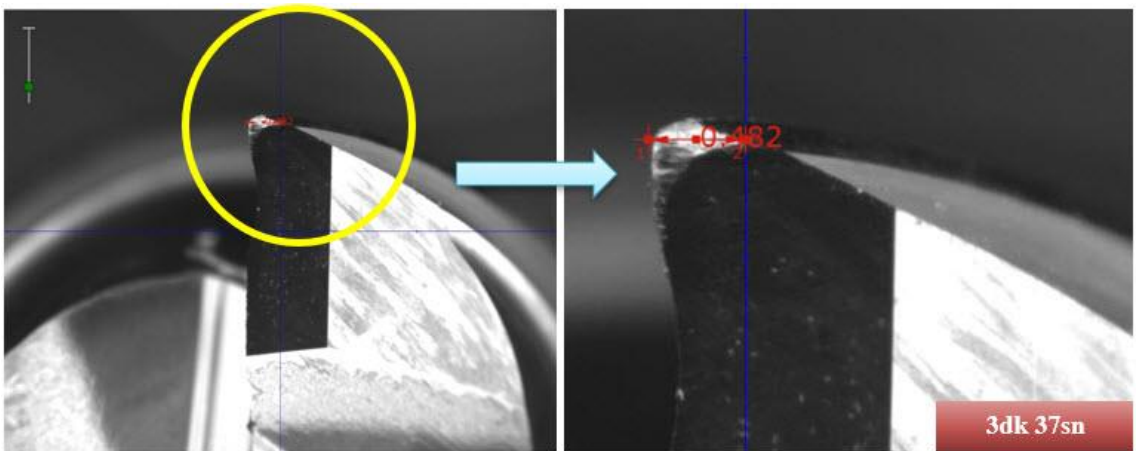




Şekil 4.4. 2 numaralı takıma ait aşınma miktarı : 127  $\mu$

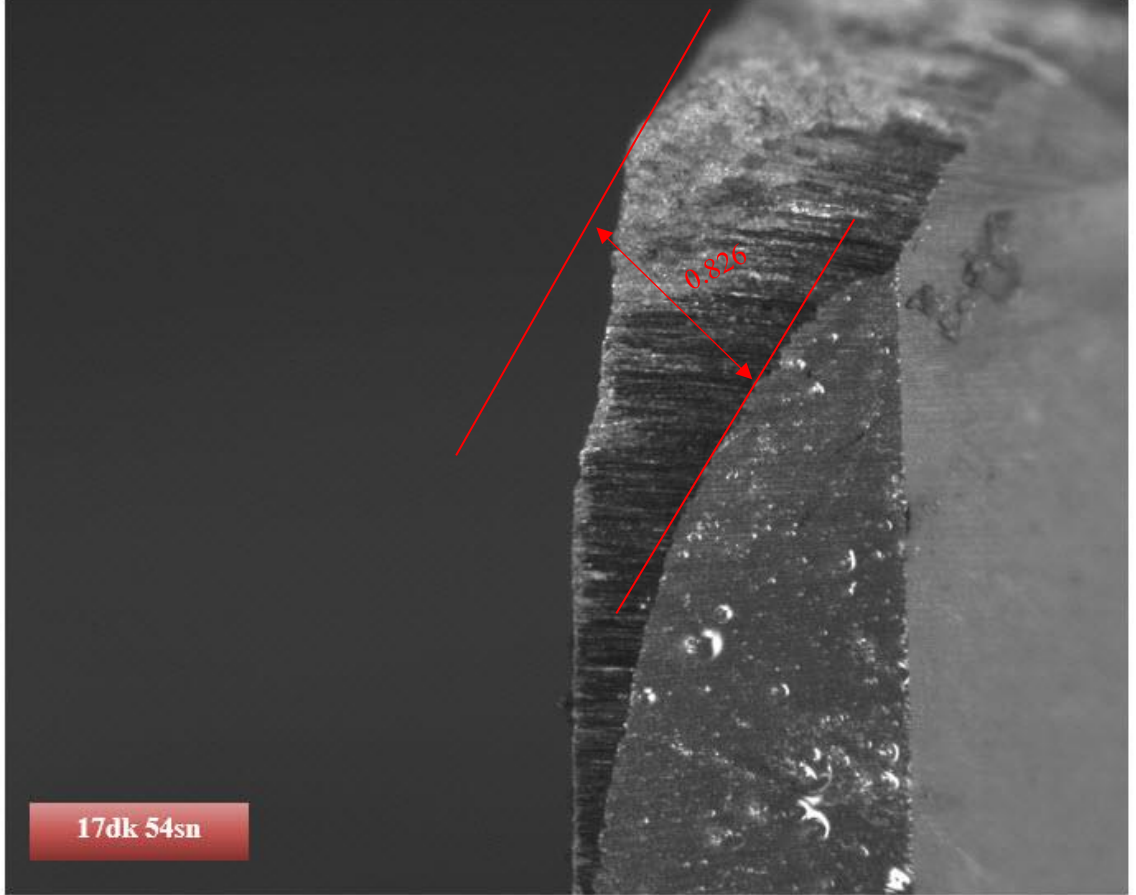


Şekil 4.5. 3 numaralı takıma ait aşınma miktarı : 277  $\mu$



Şekil 4.6. 4 numaralı takıma ait aşınma miktarı : 482  $\mu$

Savunma sanayinde kullanılan ticari ürünün montaj parçalarından olan test parçasını oluşturmak üzere, alüminyum köpük kütük malzemenin, 1 numaralı takım ile aynı özelliklere sahip olan bir takım ile (kullanılmamış sıfır takım), kaba işleme yapılmıştır. Bu işleme sonucunda takımda meydana gelen aşınma ve takım bozulması Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.7.** 1 numaralı takım ile aynı özellikte olan takıma ait kaba işleme sonrası aşınma miktarı: 826  $\mu$

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Mevcut alüminyum köpüklerden biri, savunma sanayinde kullanılan ticari bir ürünün geri tepme sonucu sönümlenmesi planlanan bir parçası seçilerek, işlenmiştir. Bu parçanın aynı zamanda konvansiyonel yöntemlerle montajı yapılmak istenmiş, ancak malzeme, köpük malzemenin ezilerek deforme olması nedeniyle 2. bağlamadaki işleme esnasında tam olarak sıkılamamış ve işlenememiştir. Buna çözüm olarak işlenmek istenen parçanın kütük ebatlarına fazladan 20-30 mm pay eklenmiş, elde edilen alüminyum köpüğün bu pay ile bir çerçeve içinde olacak şekilde tasarım değişikliğinin malzemenin 2. bağlamada işlenebilmesine olanak sağladığı görülmüştür. Son operasyon olarak su jeti veya tel erozyon ile bırakılan payın kesilmesiyle nihai parçanın elde edilmesi sağlanmıştır.

Mengene ve diğer konvansiyonel bağlamalarda problem çıkabileceği gözlemlenmiştir. Malzeme basma esnasında ezilme eğiliminde olduğu için tork anahtarı ile sıklıkça (limit olmaksızın) sıkılmakta, dolayısıyla ezme yapmayacak bir bağlantı şeklinin veya metodunun geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın devamında bağlama probleminin çözümü ve konvansiyonel yöntemlerle montajı konularına devam edilecektir. Yapılacak bu çalışmalarda ürünün konvansiyonel yöntemlerden helicoil çekme ve burç çakma işlemleri ile montajı yapılacak olup, montaj yeterliliğinin çekme testleri ile kontrolü incelenecektir. İşlemler sonucunda yüzey kalitesi yüzeydeki gözenekler ve boşlukların fazla olmasından dolayı gözlemlenememiştir.

**Çizelge 5.1.** Kullanılan kesici takımların radyal boşluk açıları

	<b>Radyal Boşluk Açısı</b>
<b>Takım No 1</b>	15.47°
<b>Takım No 2</b>	18.06°
<b>Takım No 3</b>	10.92°
<b>Takım No 4</b>	15.95°



**Şekil 5.1.** Ticari ürüne ait işlenen parçanın üstten görünüşü.

Mevcut yüzey incelendiğinde malzemenin özelliğinden dolayı oluşan kesintili talaşın yüzeyi çizdiği görülmektedir. Radyal boşluk açısı  $18,06^\circ$  olan 2 numaralı kesici takımın işleme sırasında talaşı daha rahat attığı ve aynı zamanda mevcut yüzeyler içerisinde kesintili talaşın yüzeyi en az çizdiği operasyon olduğu görülmüştür.

Takım aşınmaları incelendiğinde 1 numaralı takımın 3 dk 36 sn'lik işleme süresi sonunda  $437 \mu$ , 2 numaralı takımın 3 dk 43 sn'lik işleme süresi sonucunda  $127 \mu$ , 3 numaralı takımın 4 dk 13 sn'lik işleme süresi sonunda  $277 \mu$ , 4 numaralı takımın 37 sn'lik işleme süresi sonunda  $482 \mu$  aşındığı gözlemlenmiştir. Bu gözlemlerin sonucunda kaplaması (ZrN) olan tek takım konumundaki uç radyussuz üç ağızlı 2 numaralı takımın mevcut şartlarda aşınması en az olurken yine uç radyussuz ve kaplamasız olan üç ağızlı 4 numaralı takımın aşınması en fazla olmuştur. Üç ağızlı, kaplamasız ve uç yarıçapı 1 mm olan 1 numaralı takımın aşınmasının ise 4 numaralı takıma göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Aynı özellikte olan 3 ve 4 numaralı takımlardan iki ağızlı olan 3 numaralı takımın, üç ağızlı olan 4 numaralı takıma göre yaklaşık %57 daha az aşındığı saptanmıştır.

1 numaralı takım ile birebir aynı olan ve Şekil 14'te görülen takımın 17 dk 54 sn'lik kaba işleme süresi sonunda  $826 \mu$  aşındığı tespit edilmiştir. Kesici takımda meydana gelen serbest yüzey aşınmasının yanı sıra kesme işlemi yapan uçta ufalanma ve kopmaların olduğu görülmektedir.

Ayrıca yanal kesme işlemlerinde (cep açma, kontur işleme) malzeme üzerinde sıvama olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- Anonim2019a.**[https://www.alusion.com/files/ALUSION\\_28\\_Page\\_LowRes\\_Brochure.pdf](https://www.alusion.com/files/ALUSION_28_Page_LowRes_Brochure.pdf) (Erişim tarihi: 14.06.2019)
- Anonim2019b.**<http://www.arianespace.com/vehicle/ariane-5/>(Erişimtarihi: 26.07.2019)
- Anonim2019c.**[http://www.powertools.hu/dok/doc\\_0zu9rev2.pdf/](http://www.powertools.hu/dok/doc_0zu9rev2.pdf/)(Erişimtarihi:27.08.2019)
- Altıntaş, Y. 2017.** Üretim Otomasyonu: Metal Kesme Mekaniği, Takım Tezgahları Titreşimleri ve Bilgisayarlı Sayısal Denetim Tasarımı: Dik Kesme Mekaniği. Koç Üniversitesi Yayınları (KÜY), 1.Baskı, pp: 15-17.
- Alulight International GmbH. 2006.** Aluminium Foam Products. Product Technical Datasheet.
- Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G. 2000.** Metal Foams: A Design Guide. Butterworth-Heinemann, Boston.
- Bach, W., Ing., Fr. 2002.** Mechanical Behaviour of Separable Joints of Cellular Metallic Materials. Germany.
- Banhart, J. 2000.** Metallic foams: challenges and opportunities. *In Proc. Eurofoam*, MIT-Verlag Bremen, pp. 13-20.
- Banhart J. 2000.** Properties and applications for cast aluminum sponges. *Advanced Engineering Materials*, 2, 168-170
- Banhart, J. 2001.** Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46, 559-632.
- Banhart, J. 2007.** Metal foams - from fundamental research to applications: Frontiers in the Design of Materials. Editors: Baldev, R., Ranganathan, S., Mannan, S.L., Bhanu Sankara Rao, K., Matthew, M.D., Shankar, P., Universities Press Limited, India, pp: 279-289.
- Banhart, J., Seeliger, H.-W. 2008.** Aluminium foam sandwich panels: manufacture, metallurgy and applications. *Advanced Engineering Materials*, 10: 793-802
- Baron, J. 2007.** Aluminum Foam Technology Applied to Automotive Design. CYMAT Technologies Ltd, Canada.
- Brothers, A.H., Banhart, J. 2007.** Verfahren zur Herstellung eines Metallmatrix-Nanoverbundwerkstoffes, Metallmatrix- Nanoverbundwerkstoff und seine Anwendung, German Patent Application DE 10 2007 044 565.4.
- Buldum, B.B., Sık, A., Ozkul, I. 2013.** Investigation of Magnesium Alloys Machinability. *International Journal of Electronics: Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2013;2(3):261-268.
- Campana, F., Pilone, D. 2008.** Effect of wall microstructure and morphometric parameters on the crush behaviour of Al alloy foams. *Materials Science and Engineering: A*, 479(1-2): 58-64.
- Contorno, D., Felice, L., Fratini, L., Micari, F. 2006.** Forming of aluminum foam v/ sandwich panels: Numerical simulations and experimental tests. *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1-3): 364-367.
- Çakır, M.C. 2010.** Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri: Frezeleme. Dora Yayıncılık, Bursa, pp: 219-221
- Daxner T., Böhm H. J., Rammerstorfer H. G. 1999.** Mesoscopic simulation of inhomogeneous metallic foams with respect to energy absorption. *Comput. Mater. Sci.*, 16, 61-69.



- Davis, J. R. 1993.** Aluminum and aluminum alloys. *ASM International*, Ohio, USA, pp: 784.
- DeGarmo, E.P., Black, J.T., Kohser, R.A. 1997.** Materials and processes in manufacturing. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 214-652.
- Degisher H. P., Kriszt B. 2002.** Handbook of cellular metals. Wiley-vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- De Leo, L. 2010.** Residual stress and part distortion in milled aerospace aluminium. *Berichte aus dem IFW, Band 01/2010*.
- De Vos, P., Stahl, J-E. 2016.** Takım Bozulmaları En Pratik Çözümler, Seco Tools AB, Çeviri. Çakır, M.C., Fagersta, Sweden.
- Duffy, L.1996.** Magnesium Alloys: The Light choice for Aerospace. *Materials World*, v.4, pg 127-130.
- Ensarioğlu, C., Çakır, M.C., 2014.** Alüminyum köpüklerin işlenebilirliği: Kesme faktörlerinin ve alaşım elementlerinin etkisi üzerine incelemeler. Sözlü Sunum, Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2014), 23-25 Ekim, Bursa, Türkiye, s. 21-36.
- Ensarioğlu, C. 2014.** Alüminyum köpük malzemelerin toz metalürjisi yöntemi ile üretiminde üretim parametrelerinin malzemenin işlenebilirliği üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Doktora Tezi*, UÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Ergöneç, Ç. 2008.** Development and design of closed-cell aluminum foam-based lightweight sandwich structures for blast protection, *Master of Science Thesis*, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE), İzmir.
- Evans A. G., Hutchinson J. W., Ashby M. F. 1998.** Cellular metals, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 3, 288-302.
- Garcia-Moreno, F., 2016.** Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, *Materials* 2016, 9, 85.
- Gibson L. J., Ashby M. F. 1997.** Cellular Solids: Structure and Properties. 2nd ed., *Cambridge Solid State Science Series*, Cambridge University Press.
- Gibson L. J. 2000.** Properties and applications of metallic foams. Editors: Kelly A., Zweben C., *Comprehensive Composite Materials*, 2nd ed., Pergamon Press, Oxford, 821-842.
- Guglielmotti, A., Quadrini, F., Squeo, E. A., Tagliaferri, V. 2009.** Laser bending of aluminum foam sandwich panels. *Advanced Engineering Materials*, 11(11): 902-906.
- Helwig, H.-M., Garcia-Moreno, F., Banhart, J. 2011.** A study of Mg and Cu additions on the foaming behaviour of Al-Si alloys. *Journal of Materials Science*, 46(15): 5227-5236.
- Horst, E., Mordike, L., Friedrich, B. 2002.** Magnesium technology: metallurgy, design data applications. *Springer Science & Business*, pp: 84-86.
- Hutzler, S. 1997.** The Physics of Foams. *PhD Thesis*, University of Dublin, MIT Verlag Bremen. <http://www.iwu.fraunhofer.de/schaumzentrum/english/examples-z-slide.htm>
- Kadar, C. S., Kenesei P., Lendvai J., Rajkovits Z. S. 2005.** Energy absorption properties of metal foams. VI. évfolyam 1. szám, Budapest, Hungary.
- Kelly, J.F., Cotterell, M.G. 2002.** Minimal lubrication machining of aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 120(1-3), pp. 327-334.
- Köksal, S. 2000.** Face milling of nickel-based superalloys with coated and uncoated carbide tools. *PhD thesis*, School of Engineering, Coventry University, England, Coventry, 1-60.

- Lefebvre, L. P., Banhart, J., Dunand, D. C. 2008.** Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments. *Advanced Engineering Materials* 10(9), 775–787.
- Matijasevic, B., Banhart, J. 2006.** Improvement of aluminium foam technology by tailoring of blowing agent. *Scripta Materialia* (In Viewpoint Set no. 38), 54(4): 503-508.
- Matz, A., Kammerer, D., Jost, N. and Obwald, K., 2016.** Machining of Metal Foams with varying mesostructure using Wire EDM. 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII), Procedia CIRP 42 (2016) 263 – 267.
- McCullough, K.Y.G., Fleck, N.A., Ashby, M.F. 1999.** Uniaxial stress-strain behaviour of aluminium alloy foams. *Acta Materialia*, 47(8): 2323-2330.
- Morehead, M.D. 2007.** Machinability and Microstructure Stability during the Machining of Pure Copper and Titanium Processed By Equal Channel Angular Pressing. *MSc Thesis*, Clemson University, Clemson, 10-140.
- Musfirah A.H., Jaharah A.G. 2012.** Magnesium and Aluminum Alloys in Automotive Industry. *Journal of Applied Sciences Research*, 8(9): 4865-4875.
- Nosko, M., Simancik, F., Florek, R. 2010.** Reproducibility of aluminium foam properties: Effect of precursor distribution on the structural anisotropy and the collapse stress and its dispersion. *Materials Science and Engineering, A*, 527, 5900–5908.
- Oka, S.H. 2009.** Alüminyum köpük metalinin farklı yükleme koşullarındaki mekanik özelliklerinin deneysel ve matematiksel modellemesi. *Doktora Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- Olurin, O.B., Fleck, N.A., Ashby, M.F. 2000.** Joining of aluminium foams with V-fasteners and adhesives. *Journal of Materials Science*, 35: 1079 – 1085.
- Pang, X., Du, H. 2017.** Dynamic characteristics of aluminium foams under impact crushing. *Composites Part B*, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.12.044.
- Pogibenko, A.G., Konkevich, V.Y., Arbuzova, L.A., Ryazantsev' V.I. 2001.** The weldability of aluminium-based foam materials. *Welding international*, 15(4): 312-316.
- Queheillalt D. T., Katsumura Y., Wadley H. N. G. 2004.** Synthesis of stochastic open cell Ni-based foams: Synthesis of stochastic open cell Ni-based foams. *Scripta Materialia*, 50, 313-317.
- Sandvik Coromant. 1994.** Modern metal cutting—A practical handbook, English Edition, Sandvik Coromant, Sweden, I-III.
- Santos, M. C., Machado, A. R., Sales, W. F., Barrozo, M. A. S., & Ezugwu, E. O. 2016.** Machining of aluminum alloys: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(9-12), 3067–3080.
- Schaeffler, P., Rajner, W., Claar, D., Trendelenburg, T., Nishimura, H. 2005.** Production, properties; and applications of alulight closed-cell aluminum foams. The Fifth International Workshop on Advanced Manufacturing Technologies, London, Canada, pp: 151-156.
- Schaeffler, M., Colombo, P. (eds.) 2005.** Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications. Wiley-vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Schaeffler P., Berthold, P. 2008.** Processing and properties of Alulight aluminum foams and sandwich panels for shipboard applications. National Shipbuilding Research Program Panel on Product Development and Materials Technology, Biloxi, MS, USA.
- Schwingel, D., Seeliger, H.-W., Vecchionacci, C., Alwes, D. and Dittrich, J. 2007.** Aluminium foam sandwich structures for space applications. *Acta Astronaut.*, 61(1-6), 326-330.
- Seco Tools. 2004.** Machining Navigator: Technical Guide, Sweden.



- Sedliaková, N., Simancik, F., Kováčik, J., Minâr, P. 1997.** Joining of aluminium foams. Symposium Metallschaume, Bremen, Germany.
- Shang, J.T., Xuming, C., Deping, H. 2008.** Preparation of three-dimensional shaped aluminum alloy foam by two-step foaming. *Materials Science and Engineering: B*, 151(2): 157-162.
- Shaw, M.C. 1989.** Metal cutting principles. *Oxford University Press*, Oxford, 1-9
- Sığirtmaç, T., Çakır, M.C., Uğuz, A. 2008.** Alüminyum metal köpük malzemelerin kesme işlemlerinin incelenmesi. 4. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa.
- Sığirtmaç, T., Uğuz, A., Çakır, M.C. 2009.** Alüminyum köpük malzemelerin ikincil işlemlerinin incelenmesi. 11. Otomotiv Sempozyumu, TMMOB, Bursa.
- Sığirtmaç, T., Çakır, M.C., Uğuz, A., Ensarioğlu, C. 2012.** Alüminyum Köpük Malzemelerin İkincil İşlemleri Ve Bu İşlemlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi. 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi (TİMAK 2012), Balıkesir.
- Smith, W.F. 1993.** Structure and properties of engineering alloys. Second edition, McGraw-Hill, ISBN 0-70-112829-8.
- Smith, W.F. 2004.** Society of Manufacturing Engineers, forces at the cutting tool, tooling and manufacturing engineers handbook. McGraw-Hill, vol. , machining, pp: 1-19.
- Simancik, F., Minariková, N., Culak, S., Kovacik, J. 1999.** Effect of foaming parameters on the pore size. Metal Foams and Porous Metal Structures, Bremen, Germany, pp. 105 – 108.
- Songmene, V., Khettabi, R., Zaghbam, I., Kouam, J., Djebara, A. 2011.** Machining and machinability of aluminum alloys: Aluminium alloys, theory and applications. Editors: Kvackaj, T., Bidulsky, R., InTech Corp, pp 377-400.
- Stöbener, K., Rausch, G. 2009.** Aluminium foam-polymer composites: processing and characteristics. *Journal of Materials Science*, 44(6): 1506-1511.
- Taylan, F. 2006.** Alın Frezelemede Deney Şartlı VE Takım Aşınması Ölçüm Metodları, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Semineri*, 96 S. Isparta.
- Tash, M., Samuel, F.H., Mucciardi, F., Doty, H.W., Valtierra, S. 2006.** Effect of metallurgical parameters on the machinability of heat-treated 356 and 319 aluminum alloys. *Material Science and Engineering: A*, 434(1-2): 207-217.
- Toksoy, A.K., Güden, M. 2010.** Partial Al foam filling of commercial 1050H14 Al crash boxes: The effect of box column thickness and foam relative density on energy absorption. *Thin-Walled Structures*, 48(7): 482-494.
- Tomac, N., Tønnessen, K. 1991.** Formation of Flank Build-up in Cutting Magnesium Alloys. *Annals of the CIRP*, 40/1 79-82.
- Trent, E.M., Wright, P.K. 2000.** Metal cutting, 4th edition, Butterworth–Heinemann, USA, pp: 439, Chapter, 9.
- Türker, M. 2009.** Toz Metalürjisi Yöntemi ile Alüminyum Köpük Üretimi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.
- Vesenjak, M., Borovinšek, M., Ren, Z., Irie, S. and Itoh, S. 2012.** Behavior of Metallic Foam under Shock Wave Loading. *Metals*, 2, 258-264; doi:10.3390/met2030258.
- Weiss, M., Abeyrathna, B., Pereira, M. 2018.** Roll formability of aluminium foam sandwich panels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97:953–965.
- Yan C., Hao L., Hussein A., Raymont D. 2012.** Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 62, 32-38.

**Yu, M., Banhart, J. 1997.** Mechanical properties of metal foams. Fraunhofer USA Metal Foam Symposium, 07-08 October 1997, Stanton, Delaware (USA), in "Metal Foams", Editors: J. Banhart und H. Eifert, Verlag MIT, Bremen (1998), pp: 37–48.

**Yu C. J., Eifert H., Banhart J., Baumeister J. 1998.** Metal foams. *Advanced Materials and Processes*, 154 (5), 45-47.

**Yu C. J., Claar T. D., Eifert H. 2004.** Use of metal foams in armor systems. US Patent 6,698,331.

**Zhang, J.H. 1991.** Theory and technique of precision cutting. *Pergamon Press*, Oxford, pp: 1-50.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Oğuz KURT  
Doğum Yeri ve Tarihi : BURSA – 21/02/1989  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu  
Lise : Çelebi Mehmet Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı)  
Lisans : İnönü Üniversitesi  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Redoks Mühendislik (2016-..)  
Yazaki Otomotiv (2015-2016)  
Tezmaksan A.Ş. (2014-2015)

İletişim (e-posta) : kurt.ogz@gmail.com

Yayımları :

**Kurt, O., Ensarioğlu, C., Çakır, M.C. 2018.** Rule-Based Relations And Different Applications For Machining CAM Samples. Kasım 2018, 9th International Congress On Machining, Antalya.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

TEZ ÇOĞALTMA VE ELEKTRONİK YAYIMLAMA İZİN FORMU

Yazar Adı Soyadı	Oğuz KURT
Tez Adı	Alaümlü Alüminyum Kopyaların Tabanlı İmolat Üstümlü İsterebilitirizasyon İncelemesi
Enstitü	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Makine Mühendisliği
Tez Türü	Yüksek Lisans
Tez Danışmanı	Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR
Çoğaltma (Fotokopi Çekim) İzni Kısıtlama	<input type="checkbox"/> Patent Kısıt (2 yıl) <input type="checkbox"/> Genel Kısıt (6 ay) <input checked="" type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasına izin veriyorum.

Hazırlamış olduğum tezimin belirttiğim hususlar dikkate alınarak, fikri mülkiyet haklarım saklı kalmak üzere Bursa Uludağ Üniversitesi Kütüphane ve Dokümantasyon Daire Başkanlığı tarafından hizmete sunulmasına izin verdiğimi beyan ederim.

Tarih : 26/09/2019

İmza :

