

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İKİZ MERDANELİ SÜREKLİ DÖKÜM YÖNTEMİYLE  
ÜRETİLEN AA6016 ALAŞIMININ MİKRO VE  
MAKRO YAPISAL İNCELENMESİ**

Makine Müh. Ayşe ERDEN

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Tez Danışmanı :Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN

**(İSTANBUL, 2006)**

**İÇİNDEKİLER**

	Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ .....	v
ÇİZELGE LİSTESİ .....	viii
GARAFİK LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1 GİRİŞ.....	1
2 ALÜMİNYUM ÜRETİMİ .....	4
2.1 Birincil Alüminyum Üretimi .....	6
2.1.1 Boksit.....	7
2.1.2 Alümina (Alüminyum Oksit) .....	8
2.1.3 Saf Alüminyumun Elde Edilmesi.....	9
2.2 İkincil Alüminyum Üretimi .....	12
3 ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI .....	17
3.1 Alüminyum Alaşimleri.....	19
3.2 Çökelme Sertleşmesi Gösteren Alüminyum Alaşimleri.....	21
3.3 Alüminyum Birliği İşaretleme Sistemi .....	22
3.4 Alaşım Elementlerinin Alüminyum Alaşımına Etkileri.....	23
3.5 AlMgSi Alaşimleri (6xxx serisi) .....	26
3.5.1 AlMgSi (6XXX) Alaşımının Fiziksel Kimyasal ve Mekanik Özellikleri.....	28
3.6 Alüminyum Alaşımının Isıl İşlemleri.....	34
3.7 Alüminyum ve Alaşımının Diğer Malzemelerle Teması .....	35
3.7.1 Alüminyum ve Alaşımının Demir ve Çelik ile Teması.....	35
3.7.2 Alüminyum ve Alaşımının Demir Dışı Metallerle Teması .....	36
3.7.3 Alüminyum ve Alaşımının Metal Dışı Malzemeler ile Teması .....	36
4 ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI.....	37
4.1 Ulaştırma Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum ve Alaşimleri .....	37
4.2 Ambalaj Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum ve Alaşimleri .....	44

4.3	Gıda Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum ve Alaşimleri .....	45
4.4	Elektrik/Elektronik Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum ve Alaşimleri .....	46
4.5	İnşaat Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum ve Alaşimleri.....	46
4.6	Diğer Kullanım Alanları.....	46
4.7	Alüminyum ve Alaşımalarının Yeni Kullanım Alanları .....	47
5	ALÜMİNYUM VE ALMİNYUM ALAŞIMLARININ KOROZYON DAVRANIŞI .....	50
5.1	Alüminyum Alaşımalarının Korozyon Karakteristiği.....	60
5.2	Alüminyum ve Alaşımalarının Korozyon Çeşitleri.....	64
5.2.1	Çukurcuk Korozyonu .....	64
5.2.2	Gerilmeli Korozyon.....	67
5.2.3	Filiform Korozyon.....	70
5.2.4	Galvanik Korozyon .....	72
5.2.5	Tane içi Korozyonu .....	74
6	ÇÖKELME SERTLEŞMESİ .....	76
6.1	Çökeltme Serleşmesi Isıl İşlemi .....	76
6.2	Isıl işlemlerle Mukavemet Arttırma .....	82
6.3	Alüminyum Alaşımalarında Çökeltme.....	82
6.4	Yaşlandırma.....	84
7	ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ DÖKÜM PROSESLERİ.....	87
7.1	Sürekli Döküm Prosesi (DC Döküm).....	87
7.1.1	Sürekli Döküm Değişkenleri .....	91
7.1.1.1	Döküm Sıcaklığı.....	91
7.1.1.2	Döküm Hızı .....	92
7.1.1.3	Kalıp Tipi.....	93
7.1.1.4	Metal Yüksekliği .....	95
7.1.1.5	Su Akış Hızı .....	95
7.2	İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemi.....	97
7.2.1	Nümerik Modelleme.....	98
7.2.2	Makroskopik Kusurlar .....	101
7.2.2.1	Yapışma.....	101
7.2.2.2	Bükülme .....	102
7.2.3	Yüzey Kusurları.....	105
7.2.4	İç Yapı Kusurları .....	106
8	DENEYSEL .....	110

8.1	AA6016 Malzemesi.....	110
8.2	Deney Numunelerinin Üretimi ve Hazırlanışı.....	114
8.3	Sürekli Döküm ve İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemiyle Elde Edilen Döküm Halindeki Numunelerin Karşılaştırılması.....	116
8.4	Sürekli Döküm ve İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemiyle Elde Edilen Numunelerin Isıl İşlem Sonrası Karşılaştırılması.....	124
8.5	Sürekli Döküm ve İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemiyle Elde Edilen Numunelerin Isıl İşlem Sonrası Şekillendirme ve Mekanik Özellikleri.....	127
11	SONUÇ.....	131
	KAYNAKLAR.....	132

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Alüminyum akış diyagramı .....	7
Şekil 2.2 Soderberg tipli hücre şekli .....	9
Şekil 2.3 Prebaked tipli hücre .....	10
Şekil 4.1 Audi A gövdede kullanılan alüminyum parçalar.....	39
Şekil 4.2 AA6016 alaşımından T4 temperinde üretilen Audi A kapısı .....	39
Şekil 4.3 Toplam ağırlığa göre yakıt tasarrufu .....	40
Şekil 4.4 Araç ömrü boyunca yakıt tüketimi .....	41
Şekil 4.5 Araba parçalarının kullanım ömrü.....	43
Şekil 5.1 %0,2 Mn içeren alüminyum alaşımının üzerinde bulunan oksit .....	50
Şekil 5.2.a 25°C de alüminyum oksit tabakası .....	51
Şekil 5.2.b 400°C de alüminyum oksit tabakası .....	51
Şekil 5.2.c 500°C de alüminyum oksit tabakası .....	52
Şekil 5.3 500°C ve üzerindeki sıcaklıklarda $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kristalinin ve amorf alüminanın oluşumu .....	52
Şekil 5.4 Hadde yağı ve makro hadde izleri .....	54
Şekil 5.5 Hücre ve tane sınırları.....	54
Şekil 5.6 Alüminyumun yüzeyinde bulunan olası hatalar ve kusurlar .....	55
Şekil 5.7 Büyük açılı ve küçük açılı tane sınırı .....	55
Şekil 5.8 Alkali yüzey temizleme işlemi görmüş 1050 alaşımının SEM de alınan görüntüsü .....	56
.....	57
Şekil 5.9 Yüzeye yakın bölgelerde meydana gelen safsızlıklar.....	56
Şekil 5.10 Katı çözelti içerisindeki bakır.....	57
Şekil 5.11.a İkinci fazda değişik korozyon öncesi durum.....	58
Şekil 5.11.b İkinci fazda değişik korozyon sonrası durum.....	58
Şekil 5.12.a Anodik korozyon .....	59
Şekil 5.12.b Katodik korozyon .....	59
Şekil 5.13 İç yapıdaki intergranül ve çukurcuk korozyonunun görünümü.....	60
Şekil 5.14 Yüzeyi kaplanmamış alüminyumda görülen çukurcuk korozyonu .....	65
Şekil 5.15 İçerisinde bakır bulunan alüminyum alaşımında gözlenen çukurcuk korozyonu ...	65
.....	65
Şekil 5.16 Çukurcuk korozyonu mekanizması .....	67
Şekil 5.17 Hidrojen atomunda bulunan hidronyum iyonlarının azalması .....	69
Şekil 5.18 Kırılma yönü boyunca hidrojen atomları yayılması .....	69
Şekil 5.19 Kırılma yönü boyunca oluşan kırılma yolu .....	70
Şekil 5.20 Filiform korozyonu örnek 1.....	71
Şekil 5.21 Filiform korozyonu örnek 2.....	71
Şekil 5.22 Filamanın oluşumu ve büyümesi.....	72
Şekil 5.23 Alüminyum metalinin bakır karşısında galvanik korozyona uğraması .....	72
Şekil 5.24 Anodik ve katodik tane içi korozyon.....	74
Şekil 5.25 Tane sınırlarında oluşan çökeltme, boşalma.....	75
Şekil 5.26 Al 4,5 wt % Mg alaşımında görülen tane içi korozyonunun tipik morfolojik yapısı.....	75
Şekil 6.1 Çökeltme sertleşmesi faz diyagramı.....	77
Şekil 6.2 Suda soğutma ile hızlı soğutma işlemi .....	78

Şekil 6.3	Solüsyona alma sonrasında su verme ile hızlı soğutulan aşırı doymuş katı çözeltide B elementinin A elementi içerisindeki durumu ve hızlı soğuma esnasında meydana gelen donmuş boşluklar .....	79
Şekil 6.4	Yaşlandırma esnasında yayınmada B atomlarının A kafesinin belirli bölgelerinde kümelenmesi. Bu kümelenmeler GP (Guinier-Preston) bölgeleri olarak adlandırılmaktadırlar. Bu GP bölgeleri, disk, çubuk veya küre formunda oluşabilmektedirler .....	80
Şekil 6.5	İkinci orta adım. Oluşan GP bölgeleri, birbirini tutan nükleon topluluklarının birbirine bağlı bir orta faz oluşturmaya olanak sağlar. A atomları bu düzlemdeki oluşumu bozmak için çevrelerler .....	80
Şekil 6.6	Üçüncü orta adım. Oluşan çökelmelerin genişlemesi ile birbirine bağlı orta faz oluşumları gevşer ve iç yüzeyde dislokasyonlar gözlenir .....	80
Şekil 6.7	Başarılı bir yaşlandırma sonucunda elde edilen denge fazı.....	81
Şekil 6.8	Varsayılan bir Al-Cu alaşımının TTT eğrileri.....	81
Şekil 6.9	Al-Cu ikili denge diyagramının alüminyumca zengin ve pratikte kullanılan kısmını göstermektedir .....	83
Şekil 6.10.a	Al içinde Cu nun maksimum Çözünürlüğü .....	85
Şekil 6.10.b	% 0.4 Cu-Al alaşımının yaşlandırma işlemi ve oluşan yapılar.....	85
Şekil 7.1	Bilet yapım prosesinin fonksiyonel blok diyagramı.....	87
Şekil 7.2	Döküm ve ergitme proseslerinin fonksiyonel blok diyagramı .....	87
Şekil 7.3	Sürekli döküm prosesinin şematik görünüşü.....	88
Şekil 7.4	Döküm sıcaklığının DC döküm biletin tane boyutuna etkisi .....	92
Şekil 7.5	İzolasyonlu modüler kalıp sistemi.....	95
Şekil 7.6	DC bilet döküm değişkenlerini tipik akış diyagramı.....	96
Şekil 7.7	Belli başlı değişkenlerin bilet kalitesine etkileri.....	97
Şekil 7.	İkiz merdaneli sürekli döküm makinesi çalışma şeması .....	98
Şekil 7.9	Sonlu hacim grid'i, katı parça, etkin gerilme oranı, güncel model üzerinde basınç izobarları.....	99
Şekil 7.10.a	Kalınlığa bağlı bant sıcaklığı değişimi .....	99
Şekil 7.10.b	Kalınlığa bağlı ayırma kuvveti değişimi .....	100
Şekil 7.10.c	Kalınlığa bağlı haddeleme sıcaklığı değişimi.....	100
Şekil 7.10.d	Kalınlığa bağlı kullanılan güç değişimi.....	100
Şekil 7.11	AA1200 alaşımında bombeli duruma örnek.....	102
Şekil 7.12	İkiz merdaneli sürekli dökümle üretilen bantların özel yükleme altındaki şekilleri .....	103
Şekil 7.13	Gerilme ve özel yükleme altında oluşan bombeli ve bombesiz durumlar.....	104
Şekil 7.14	Al 0,3wt%Fe alaşımında görülen yüzey boşluğu örneği .....	105
Şekil 7.15	Şerit bant ve haddeleme yüzeyi arasındaki etkileşim.....	106
Şekil 7.16	AA6111 alaşımında kanal boyunca görülen segregasyon .....	107
Şekil 7.17	AA6111 alaşımında görülen deformasyon segregasyonu .....	108
Şekil 7.1	İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemiyle üretilmiş AA3003 alaşımının içyapısı .....	109
Şekil 8.1	Döküm halindeki malzemenin döküm yönüne paralel ve dik yöndeki tane yapısı .....	116
Şekil 8.2	DC yöntemi ile üretilen AA6016'nın Optik mikroskop ( 500x) altındaki yapısı ..	117
Şekil 8.3	TRC yöntemi ile üretilen AA6016'nın Optik mikroskop ( 500x) altındaki yapısı .....	117

Şekil 8.4	DC yöntemi ile üretilen AA6016'nın Optik mikroskop (1000x) altındaki yapısı .....	118
Şekil 8.5	TRC yöntemi ile üretilen AA6016'nın Optik mikroskop (1000x) altındaki yapısı.....	118
Şekil 8.6	Yüzey segregasyonunda bulunan Al-Si partiküllerinin elektron mikroskobu görüntüsü ve EDX spektri.....	119
Şekil 8.7	TRC yöntemi ile üretilen AA6016'nın Optik mikroskop (500x) altında intermetalik bileşenlerinin segregasyonları.....	120
Şekil 8.8	DC yöntemi ile üretilen AA6016'nın Optik mikroskop (1000x) altında intermetalik bileşenlerinin segregasyonları.....	121
Şekil 8.9	TRC ile üretilmiş AA6016'nın elektron mikroskobunda çekilen görüntüsü .	121
Şekil 8.10	DC ile üretilmiş AA6016'nın elektron mikroskobunda (500x) çekilen görüntüsü .....	122
Şekil 8.11	Yüzeye yakın intermetalik partiküllerin yarı kantitatif analizleri .....	122
Şekil 8.12	TRC yöntemi ile üretilen AA6016'nın optik mikroskopta (200x) ölçülen tane boyutu .....	123
Şekil 8.13	DC yöntemi ile üretilen AA6016'nın optik mikroskopta (200x) ölçülen tane boyutu .....	124
Şekil 8.14	T4 ısıl işlemi sonrası TRC döküm tekniği ile üretilmiş malzemede intermetalik partikül dağılımı ve geometrisi.....	127
	..... “	
Şekil 8.15	DC döküm tekniği ile üretilmiş malzemede intermetalik partiküllerin tipik görüntüsü .....	128
Şekil 8.16	TRC ve DC metodlarla üretilmiş AA6016 alaşımının T4 kondüsyonunda Şekillendirilebilirlik Sınır Diyagramı.....	130

**ÇİZELGE LİSTESİ**

	Sayfa
Çizelge 2.1	Alüminyum Kullanım Ömürleri ve Geri Kazanma Oranları..... 13
Çizelge 2.2	Hurdaların Değerlendirilmesinde Geri Kazanım Oranları ..... 14
Çizelge 3.1	Alüminyum alaşımlarının gösterim sistemi..... 20
Çizelge 3.2	Hurdaların Değerlendirilmesinde Geri Kazanım Oranları ..... 21
Çizelge 3.3	Alüminyum alaşımlarının ALCOA'ya göre tasnifi..... 22
Çizelge 3.4	AlMgSi alaşımlarının kimyasal bileşimleri..... 29
Çizelge 3.5	AlMgSi alaşımlarının mekanik özellikleri ..... 30
Çizelge 3.6	AlMgSi alaşımlarının fiziksel özellikleri ..... 31
Çizelge 3.7	AlFeSi alaşımlarında gözlenen fazlar ve kristal yapıları..... 33
Çizelge 3.8	Döküm yapısında gözlenen fazlar ve kristalleşme özellikleri ..... 33
Çizelge 5.1	Alüminyum ve alaşımlarının atmosferik korozyondaki çekme dayanım kayıpları ..... 61
Çizelge 5.2	Alüminyum ve alaşımlarının çeşitli atmosferlerdeki ortalama aşınma miktarları ..... 62
Çizelge 5.3	Galvanik Seri ..... 73
Çizelge 7.1	Alüminyum alaşımlarının likidüs ve döküm sıcaklıkları ..... 91
Çizelge 8.1	EN AW-6016..... 110
Çizelge 8.2	AA 6016 Alaşımının Fiziksel ve Elastik Özellikleri ..... 110
Çizelge 8.3	AA6016 Alaşımının Mekanik Özellikleri ..... 111
Çizelge 8.4	AA6016 Alaşımının Kimyasal Bileşimi..... 111
Çizelge 8.5	AA6010 alaşımının soğuk şekillendirmesi..... 111
Çizelge 8.6	Soğuk şekillendirme parametreleri ..... 112
Çizelge 8.7	AA6016 alaşımının işlenebilirliği ve kaynak edilebilirliği ..... 112
Çizelge 8.8	AA6016 Alaşımının İşlenebilme ve kaynak edilebilme parametreleri ..... 113
Çizelge 8.9	AA6016 Alaşımının Korozyon dayanımı..... 113
Çizelge 8.10	Korozyon ve Anodlama Parametre Açıklamaları ..... 113
Çizelge 8.11	AA6016 Alaşımının Anodlaması ..... 114
Çizelge 8.12	TRC yöntemi ile üretilen AA6016 alaşımının kimyasal bileşimi ..... 114
Çizelge 8.13	DC yöntemi ile üretilen AA6016 alaşımının kimyasal bileşimi ..... 115
Çizelge 8.14	İkiz Merdaneli Sürekli döküm ve DC döküm tekniği ile üretilen ürünlerin mekanik özellikleri ..... 127
Çizelge 8.15	1,15mm kalınlığındaki DC ile üretilmiş AA6016'nın mekanik özellikleri..... 128
Çizelge 8.16	1,15mm kalınlığındaki TRC ile üretilmiş AA6016'nın mekanik özellikleri .... 129



## GRAFİK LİSTESİ

	Sayfa
Grafik 5.1 Oksit tabakasının maruz kaldığı asidik ve bazik ortamdaki aktivasyonu.....	53

## ÖNSÖZ

Çalışmamda, ikiz merdaneli sürekli döküm ve sürekli döküm teknikleri ile üretilmiş AA6016 alaşımının, otomotiv sektörünün beklentilerine cevap vermeyi hedefleyen performans bilgileri incelenmiştir. Konvansiyonel üretim metodu olan sürekli döküm (DC) ve ikiz merdaneli sürekli döküm metodu (TRC) ile üretilmiş malzemelerin döküm halindeki ve ısıl işlem uygulanmış haldeki mikro ve makro yapıları, mekanik karakterizasyon teknikleri uygulanarak incelenmiştir. Alaşımın performansının otomotiv endüstrisinin beklentilerini karşılaması hedeflenmiştir.

Bu çalışma esnasında gerçekleştirilen deneylerin birçoğu ASSAN Alüminyum Tuzla tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Bu olanağı sağlayan ASSAN Alüminyum A.Ş'ye ve tüm çalışmada bilgi birikimini ve deneyimlerini esirgemeyen Ar-Ge Müdürü Sayın Dr. Murat Dünder'a, tüm akademik kariyerim boyunca her zaman yanımda olan ve yol gösteren öğretmenim Sayın Prof. Dr. Ayşegül Akdoğan'a ve tüm hayatım boyunca ışığı ile yolumu aydınlatan annem, Sayın S. Fisun Erden'e en derin teşekkürlerimi bildiririm.

## ÖZET

Günümüzde otomotiv sektöründe üretim maliyetleri dikkate alınarak yakıt tasarrufu daha da çok önem kazanmıştır. Bunun sonucunda da daha hafif otomobillerin imalatı gündeme gelmiştir. Bu açılardan mükemmel dayanım/ağırlık oranına sahip alüminyum rakipsiz bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Alüminyum çeliğin %69'una yakın bir ağırlık ile aynı güç faktörünü sağlamaktadır. Enerji tüketimini ve emisyonu azaltmak yolunda yakıt tüketiminin daha verimli olduğu araçlara karşı büyüyen talep otomotiv uygulamalarının ihtiyaç duyduğu yaşlanabilir alüminyum alaşımlarının geliştirilmesini hızlandırmıştır.

Otomotiv sektörünün çevre mevzuatı, yakıt tasarrufu ve güvenlik beklentileri sebebiyle hafif malzeme kullanma eğilimi döküm parçalarının yanı sıra dış ve iç panel gibi çok önemli uygulamalarda da alüminyum alaşımlarının kullanılmaya başlanmasını sağlamıştır. Ancak maliyet faktörü temel kısıtı oluşturmaktadır. Levha olarak kullanılan parçaların büyük bölümü 6000 serisinden olan AA6016 alaşımından imal edilir. İkiz merdaneli sürekli döküm tekniği ile üretilen AA6016 alaşımı, sürekli döküm tekniği ile üretilen AA6016 alaşımına kıyasla üretim maliyetinin düşük olması avantaj sağlar. İkiz merdaneli sürekli dökümdeki yüksek katılma hızlarının mikro yapıya kazandırdığı özellikler mekanik performansın da olumlu yönde etkilenmesini sağlamaktadır. İkiz merdaneli sürekli döküm tekniğinde katılma mekanizmaları göz önüne alındığında 6000 serisi alaşımların üretimi verimlilik ve metalürjik açıdan yetersiz olabileceği düşüncesi hakimdir. Tüm bunların aksine AA6016 alaşımının sürekli döküm tekniği ile üretimi ve endüstriyel ölçekte istenen kondisyonda üretimi otomotiv sektörünün beklentilerini karşılayacak metalürjik ve mekanik performansta üretilebilmektedir.

Çalışmamda otomotiv sektörünün derin çekme ve şekil verme operasyonlarında kullanılan ve ikiz merdaneli sürekli döküm tekniği ile üretilen AA6016 alaşımının döküm hali, T4 ve T62 kondisyonlarındaki mikro-makro yapısal karakterizasyonu deneylerle incelenmiş, sonuçlar malzemenin mekanik performansı ile birleştirilerek sunulmuştur. Mekanik testler şekillendirilebilirlik sınır diyagramı (FLD) yardımı ile derin çekme operasyonlarının gerilim ve uzama koşullarında analiz edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum 6016 alaşımı, ikiz merdaneli sürekli döküm, DC döküm

**ABSTRACT**

Automotive sector is in tendency of employing aluminum alloys for inner and outer panel applications along with cast pieces that have found extensive applications for a long time. Major driving forces motivating this attempt are concentrating around environmental regulations, fuel efficiency and safety issues. But cost of aluminum stands in front of many applications banning them to be used extensively. Most of the outer and inner panel applications require 6000 series aluminum alloys due to their satisfactory performance matching with the compliance of the auto manufacturers. Continuous casting technology offers cost effective solutions for the production of 6000 series alloys. Solidification mechanisms operating in continuous casting technology is known to be inefficient and prone to develop microstructural defects. Contrary to the general speculations and previous studies, AA6016 alloy has been satisfactorily produced in industrial scale by employing twin roll continuous casting technology.

Introduction of unique microstructural features due to very high solidification rate of twin roll casting technology significantly contribute to the mechanical properties. In the present study, micro and macrostructural features of twin roll cast AA6016, majorly employed for deep drawing and forming operations of automotive industry, were investigated at their T4 and T62 tempers. Microstructural characteristics were correlated with the mechanical performance. Evaluation of mechanical performance were enriched by determining limiting strains under biaxial deformation condition by constructing its FLD (Forming Limit Diagram).

**Keywords:** Aluminium alloy AA6016, twin roll casting, DC casting.

## 1. GİRİŞ

Alüminyumu diğer metallere göre birçok alanda avantajlı kılan en önemli ana özelliklerini; hafifliği, hafifliğine karşın alaşımlandırıldığında yeterli mukavemeti göstermesi, tekrar defalarca kullanılabilirliği, yüksek korozyon direnci, çekilebilirliği, şekillendirilebilirliği, dövülebilirliği, işlenebilirliği, yüksek ısı ve elektriksel iletkenliği, ışık ve ısı yansıtıcılığı olarak sıralayabiliriz.

Demirden üç kat daha hafif olan alüminyum, alaşımlandırılmak suretiyle demire yakın mukavemette bir malzemeye dönüşebilmektedir. Böylece, örneğin alüminyumun otomotiv sanayinde kullanımı, aracın ağırlığını azaltarak yakıt tüketimini düşürmekte, buna karşılık yük kapasitesini arttırmaktadır.

Alüminyum normal atmosfer koşullarında oksijen ile reaksiyona girerek kendi yüzeyinde doğal bir koruyucu film tabakası oluşturur. Ortalama  $635 \times 10^{-9}$  cm kalınlığında olan bu alümina tabakası alüminyumu korozyondan korur. Anotlama, boyama ve laklama alüminyumun korozif etkilere karşı koruyucu özelliğini artıran diğer uygulamalardır.

Mükemmel elektrik iletkenliği nedeniyle alüminyum, elektrik enerjisi iletim ve dağıtımının başlıca elemanları olan yalıtılmış hava hattı, yeraltı güç kabloları ve ek malzemelerde, bu alanlarda kullanılan bakırın yerini almıştır. Alüminyumun önemli diğer bir özelliği de mükemmel bir ısı ve ışık yansıtıcısı olmasıdır. Bu özelliği sayesinde aydınlatma aksamalarında ve ısı yataklarında yaygın olarak alüminyum kullanılmaktadır.

Toksit ve bulaşıcı olmayan alüminyumun neredeyse alternatifsiz olduğu diğer bir kullanım alanı da gıda ve ilaç ambalaj uygulamalarıdır. 0,007 mm kalınlığında dahi alüminyum folyo tam olarak ışık, aroma ve gaz geçirgensizliğe sahiptir.

Masif olarak yanmaz özellikte olan alüminyum mikro parçalar haline getirildiğinde büyük ısı açığa çıkararak yanar. Bu özelliği nedeniyle roketlerde yakıt olarak kullanılabilir. Bu özelliği nedeniyle roketlerde yakıt olarak kullanılabilir.

Diğer metallere göre neredeyse %100 geri dönüşümlü olan alüminyumun geleceğin metali olmasını sağlayacak en önemli ana unsurlardan birisi de ekolojik özelliğidir. Dünyada, özellikle gelişmiş ülkelerde, kamuoylarının 1980'lerde doruğa ulaşan çevre korumacılığı baskısıyla ve 1973 ile 1979 yıllarındaki petrol krizleriyle hızlanan sınırlı kaynakların en ekonomik, çevreyi en az kirletecek ve daha az enerji tüketecek şekilde kullanımı gibi kriterler, alüminyumu alternatif

malzemelere göre avantajlı hale getirmektedir. Sahip olduğu birçok özellikler nedeniyle sanayideki bu gelişmelere uygun bir ortam sağlamaktadır.

Her ne kadar birincil üretimde çok miktarda enerji harcanıyorsa da, son yıllarda yapılan araştırmalar, enerji dengesi açısından, kullanım ömrü dolan alüminyumun birincil üretimin sadece %5'i kadar enerji kullanılarak yeniden kullanıma sunulması, uzun vadede alüminyumun ikame malzemelerden tasarruf sağlaması yanında, çevre atıklarının azalması yönüyle de daha ekonomik ve çevre dostu olduğunu göstermektedir.

Alüminyumun dünya kabuğunda neredeyse sınırsız miktarda bulunması gerçeği de bu metalin sahip olduğu diğer bir üstünlüktür.

Günümüzde üretim maliyetleri dikkate alınarak yakıt tasarrufunun daha çok önem kazanacağı, bunun sonucunda da daha hafif otomobillerin imalatı gündeme getirilecektir. Bu açılardan mükemmel dayanım/ağırlık oranına sahip alüminyum rakipsiz bir malzeme durumundadır. Alüminyum çeliğin %69'una yakın bir ağırlık ile aynı güç faktörünü sağlamaktadır.

Enerji tüketimini ve emisyonu azaltmak yolunda yakıt tüketiminin daha verimli olduğu araçlara karşı büyüyen talep otomotiv uygulamalarının ihtiyaç duyduğu yaşlanabilir alüminyum alaşımlarının geliştirilmesini hızlandırmaktadır. Araç gövdelerinde kullanılan tüm alüminyum parçalar arasında levha ürünlerinin miktarı her geçen gün artmaktadır. İç ve dış paneller levha ürünlerinin en bilinen uygulamalarıdır. Asrın başından beri kullanılan çeliğin performansı ile eşdeğer performans gösterebilen 6000 serisi alaşımlar bu uygulamalar için en önemli adaylardır. Bu tür uygulamalar için gerekli olan karakteristik özellikler; yüksek mukavemet, yüksek peklilik/ağırlık oranı, iyi şekillenebilirlik ve korozyon dayancısı, AA6016 alaşımında mevcuttur.

Üretimdeki maliyet etkin çözümler veya alüminyum alaşımlarının yaşam çevrimlerinin etkin hale getirilmesi sadece alüminyum sektörü ile sınırlı kalmayıp, alüminyum alaşımlarını birçok uygulamada kullanılabilecek konuma getirecektir. Konvansiyonel üretim metodu olan DC (direct chill) döküm ve ardından uygulanan sıcak haddeleme prosesine göre alüminyum alaşımlarının İkiz merdaneli sürekli döküm tekniği ile üretimi belirtilen maliyet engelini aşılmasında ve dolayısıyla yaygın olarak kullanılmasına öncülük edecektir.

Bu yeni üretim metodunun düşük operasyon ve ilk yatırım maliyetleri, bir alaşımdan diğerine geçişteki esnekliği ve nihai ürün üretim zamanının kısa olması gibi unsurlar metodun önemli ve

güçlü ekonomik yönleridir. Avantajlar bununla sınırlı kalmayıp katılaşma mekanizmasının sebep olduğu üstün bazı mikroyapısal özellikler ve bu yapının iyi tasarlanmış bir alt prosese göstereceği reaksiyon ikiz merdaneli sürekli döküm tekniği ile üretilmiş levhaların kabul sürecini hızlandırmaktadır (Alüminyum Raporu, 2004).

Bu çalışmada; ikiz merdaneli sürekli döküm tekniği ile üretilmiş AA6016 alaşımının otomotiv sektörünün beklentilerine cevap vermeyi hedefleyen performans bilgileri incelenmiştir. Döküm halindeki veya ısıl işlem uygulanmış malzemeler üzerinde mikroyapısal ve mekanik karakterizasyon teknikleri uygulanmış ve malzeme performansının otomotiv endüstrisinin beklentilerini karşılaması hedeflenmiştir.

## 2. ALÜMİNYUM ÜRETİMİ

Alüminyum cevherinden birincil alüminyum ve hurdadan ikincil alüminyum üretilir. Bunların kullanım amaçlarına göre alaşımlandırılması ile külçe döküm ve işleme ingotları üretilir. Üretilen bu yarı mamuller dökme, haddeleme, çekme ve dövme işlemlerine tabi tutarak uç ürünler meydana getirilir. Alüminyuma özgü terimler aşağıda açıklanmıştır;

- **BOKSİT:** Birincil alüminyum üretiminde temel girdi olan alüminanın elde edildiği cevher gurubu.
- **ALÜMİNA (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):** Birincil alüminyumun elde edildiği hammadde
- **BİRİNCİL ALÜMİNYUM:** Alüminanın elektroliz yöntemiyle indirgenmesi ile üretilen alüminyum
- **İKİNCİL ALÜMİNYUM:** Yeni ve/veya eski hurdadan üretilen alüminyum
- **DÖKÜM ÜRÜNÜ:** Sıvı metalin kalıp içine çeşitli yöntemlerle dökülmesi ve katılarak kalıbın şeklini alması ile elde edilen ürün.
- **EKSTRÜZYON ÜRÜNÜ:** Alüminyumun bir kalıp içerisinde preslenerek elde edilen boyu kesitine göre oldukça uzun ürün (boru, çubuk,profil)
- **İLETKEN:** Elektrik enerjisinin iletimi için sürekli döküm, ekstrüzyon yöntemleri ile elde edilen filmanın soğuk çekilmesiyle üretilen örgülü tel halat.
- **YASSI ÜRÜN:** Hadde tezgahlarında elde edilen ürün (levha, folyo, şerit, disk).
- **YARI ÜRÜN:** Alüminyumun işlenmesi sonucunda elde edilen, fakat kendisi de başka bir işlemde girdi olabilen ürün (profil, levha, folyo, şerit, disk).
- **YENİ HURDA:** Üretim ve metal işleme kademelerinde çıkan alüminyum artık
- **ESKİ HURDA:** Çeşitli kullanım alanlarında ömrünü doldurmuş alüminyum parçalar.

Ülkemizde birincil alüminyum üreten tek kuruluş, şu anda özelleştirilmiş olan ve üretimini sürdürmeye çalışan “Eti Alüminyum A.Ş. Genel Müdürlüğü”dür. Özel sektör kuruluşları ağırlıklı olarak ikincil alüminyum ve buna dayalı sadece yarı ürün ve/veya uç ürün üretimi alanında faaliyet göstermekte olup, bir anlamda alüminyum işleyen kuruluşlardır.



Günümüzde, alüminyum yarı ürününün ve alüminyum ürünlerinin farklı sınıflandırılmalarına rastlanılmaktadır. Alüminyumla ilgili kuruluşların teknolojileri, kullanım alanları ile buldukları ülkelerin gümrük, uluslararası ticaret ve endüstriyel sistemlerine göre farklılıklar gösteren sınıflandırmalar yapılmasına rağmen, ülkemizde daha çok alüminyum üretim ve teknolojisine dayanılarak düzenlenmiş aşağıdaki sınıflandırma, alüminyumla ilgili kuruluşlarca benimsenmiştir (Alüminyum Raporu, 2004).

#### Döküm Ürünleri:

- Döküm İngotu(Alaşımli külçe, alaşımsız külçe, elektrik iletken)
- İşleme İngotu(Ekstrüzyon ürünlerinin üretiminde kullanılan yuvarlak ve köseli ingot ve hadde mamulleri üretiminde kullanılan yassı ingot)
- Sürekli Döküm Levha (filmaşın) ve çubuk
- Granüle Alüminyum
- Toz Alüminyum

#### Hadde Ürünleri:

- Sıcak Hadde (levha rulo): 6 mm ve daha üst kalınlıkta
- Soğuk Hadde (levha, rulo,şerit,disk): 0,2 mm-6 mm
- Folyo: 7-200 mikron

#### Ekstrüzyon Ürünleri:

- Çeşitli Profiller
- Alüminyum Teller

#### Parça Döküm Ürünleri:

- Kum Döküm Ürünleri
- Kokil Döküm Ürünleri
- Basınçlı Döküm Ürünleri

Kullanım alanlarına göre yapılan diğerk bir sınıflandırma ise, Şu Őekildedir:

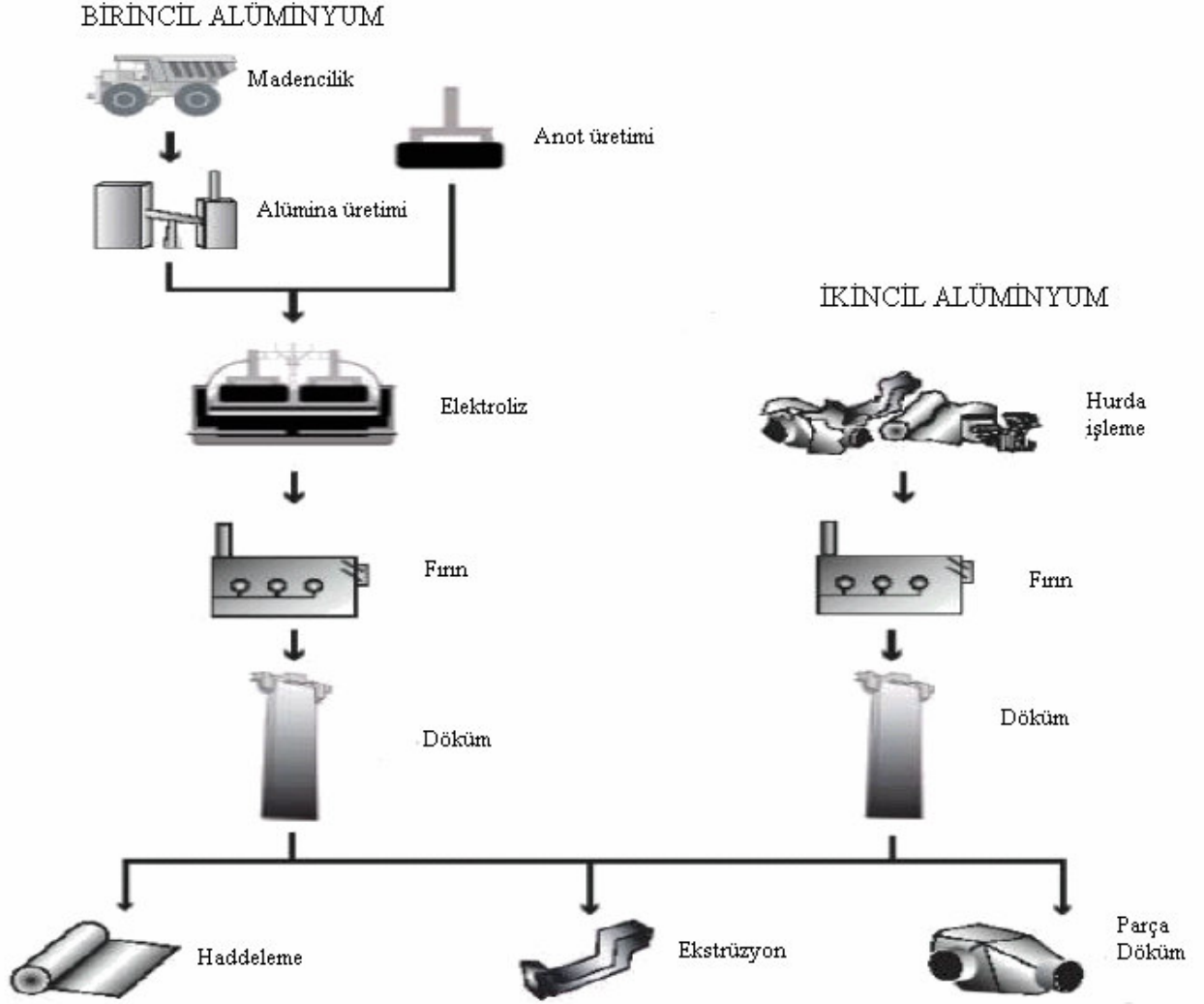
- Külçe
- Alüminyum Toz ve Pullar
- Ekstrüzyon rnleri
- Levha
- İletkenler
- Folyo
- Döküm rnleri

## 2.1 Birincil Alüminyum retimi

Birincil alüminyum üretiminde birbirlerini takip eden beŐ ana üretim aŐamasını uygulama zorunluluğu vardır:

- Boksit madeni işletmeciliği,
- Boksit cevherinden alümina retimi (Kırma, ğtme, zmlendirme, ktrme, Kalsinasyon)
- Alüminadan elektroliz yolu ile sıvı alüminyum retimi (Ergimiş Tuz Elektrolizi)
- Sıvı alüminyumun alaŐımlandırılarak dökümü,
- Döküm ürünlerinden ekstrüzyon ve haddeleme iŐlemleriyle yarı ve/veya uç ürün retimi.

Son zamanlarada yaygınlaşan anlayıŐ; boksit işletmeciliği ve alümina üretimi, sıvı alüminyum üretimi ve dökümhaneler, haddehaneler ve profil üretimleri farklı alanlarda kurulmaktadır. Fakat çok az sayıda da olsa Şekil 2.1’de görüldüğü üzere tüm bu kademelerin bir arada yapıldığı tesisler de vardır. Tüm bu kademelerin bir arada gerçekleŐtirildiđi Seydişehir Alüminyum gibi tesisler ‘‘Entegre Tesisler’’ olarak tanımlanmaktadır (Alüminyum Raporu, 2004).



Şekil 2.1 Alüminyum akış diyagramı ( Alüminyum Raporu, 2004 )

### 2.1.1 Boksit

Farklı bileşikleri olmasına karşın, alüminyum metali üretiminde boksit cevherleri kullanılmaktadır. Boksit ( $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ ) bir mineralden çok, minerallerden teşekkül etmiş bir mineraller topluluğudur ve alüminyum cevherlerine verilen genel isimdir.

1821 yılında M.Pierre Berthier'in Güney Fransa'da Arles yakınlarında "Le Baux" kasabasında bulunduğu için cevher bu ismi almıştır. Mineralojik bileşimlerine göre birincil alüminyum üretiminin hammadde kaynağı olan boksitler 3 ana grupta toplanırlar: Gibsitik

( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )[ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ] boksitler, böhmitik ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )[ $\text{AlO}(\text{OH})$ ] boksitler ve diasporitik ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )[ $\text{AlO}(\text{OH})$ ] boksitler.

Boksitler içerdikleri demir minerallerinin cins ve oranlarına bağlı olarak; kahve, kırmızı, pembe, açık sarı, kirli sarı, bej, gri ve alacalı gibi çok değişik renklerde olabilmektedirler. Fiziksel ve petrografik görünümleri oldukça değişiktir. Toprağımsı ve kirli görünüme sahip olanların yanında masif, oldukça sert ve parlak olanları da mevcuttur.

Boksit cevheri üretimi, genellikle açık ocak işletmeciliği ile yapılmaktadır. Ticari olarak işletilebilen boksit cevherinin  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tenörü %30-65 arasında değişmektedir ve elde edilen boksitin %85'i birincil alüminyum üretimine yöneliktir. Birincil alüminyum üretiminin ikinci kademesi olan alümina üretiminin yapıldığı tesislerin büyük çoğunluğunda işlenen boksitlerin en az %40'ının  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , en fazla %15'inin  $\text{SiO}_2$  içermesi, diğer bir deyimle silis modülünün ( $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ ) en az 7 olması gerekmektedir. Birincil alüminyum üretiminde kullanılan boksitlerin, kimyasal ve mineralojik bileşenlerine bağlı olmak koşulu ile, 4-5 tonundan 2 ton alümina ve 2 ton alüminadan da yaklaşık 1 ton alüminyum elde edilmektedir.

### 2.1.2 Alümina (Alüminyum Oksit)

Birincil alüminyum üretiminde ikinci kademe bayer prosesi ile gerçekleştirilen alümina üretimidir. Boksit cevheri yıkandıktan sonra kırılıp öğütülür. Öğütülüp, ham pul haline getirilmiş boksitler, yüksek ısı ve basınçta sudkostik ( $\text{NaOH}$ ) çözeltisi ile reaksiyona sokulurlar. Kimyasal yolla cevherdeki alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sodyum alüminat ( $\text{NaAlO}_2$ ) çözeltisi ve demir, silis, titanyum vb. gibi safsızlıkları içeren sıvı faza alınır. Çözünmeyen bileşenler tankın dibine çökerek, oluşan atıklar (kırmızı çamur) ayrılır. Yıkanmış çamur, özel baraja sevk edilip depolanarak, içerdği sudkostiğin çevreyi kirletmesi önlenir.

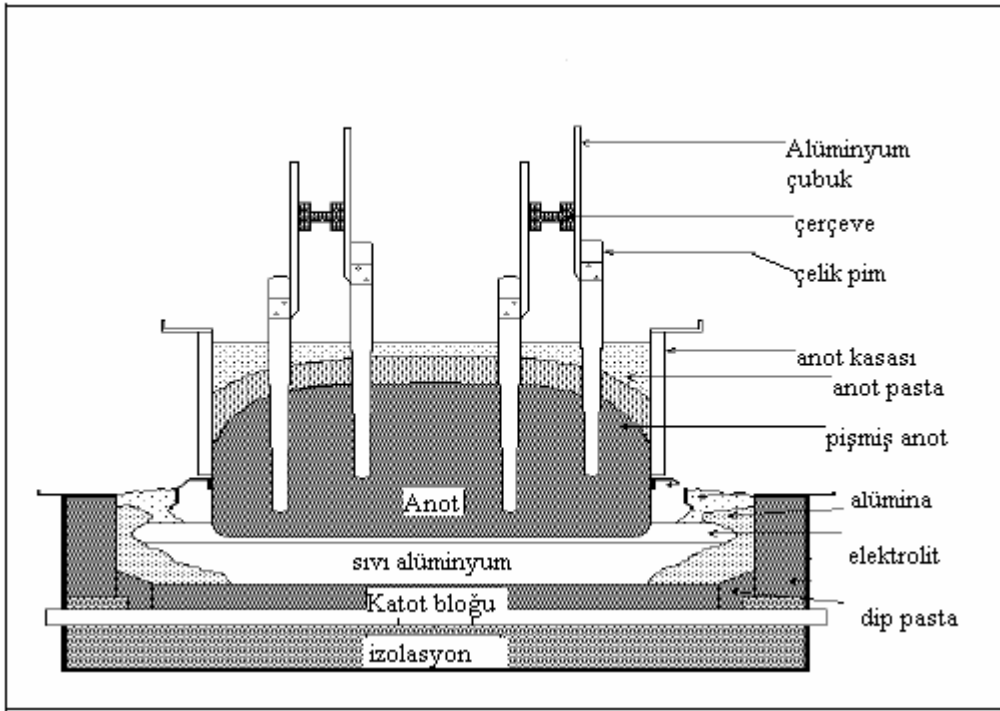
Başka bir tanka gönderilen istenilen temizlikteki sodyum alüminat çözeltisi, aşılana tabanda alüminyum hidroksit (Hidrat)  $\text{Al}(\text{OH})_3$  kristali halinde çöktürülür. Elde edilen hidrat, akışkan yataklı veya döner fırınlarda 1100-1200°C sıcaklıkta, kimyasal bağlı suyu uçurmak amacıyla, kalsine edilerek alümina elde edilmektedir.

Bayer yönteminde 70'li yıllardan bu yana kaydedilen en önemli gelişme kalsinasyon işleminin döner fırın yerine akışkan yataklı fırınlarda yapılmasıdır. Bunun dışında bu yöntemi radikal

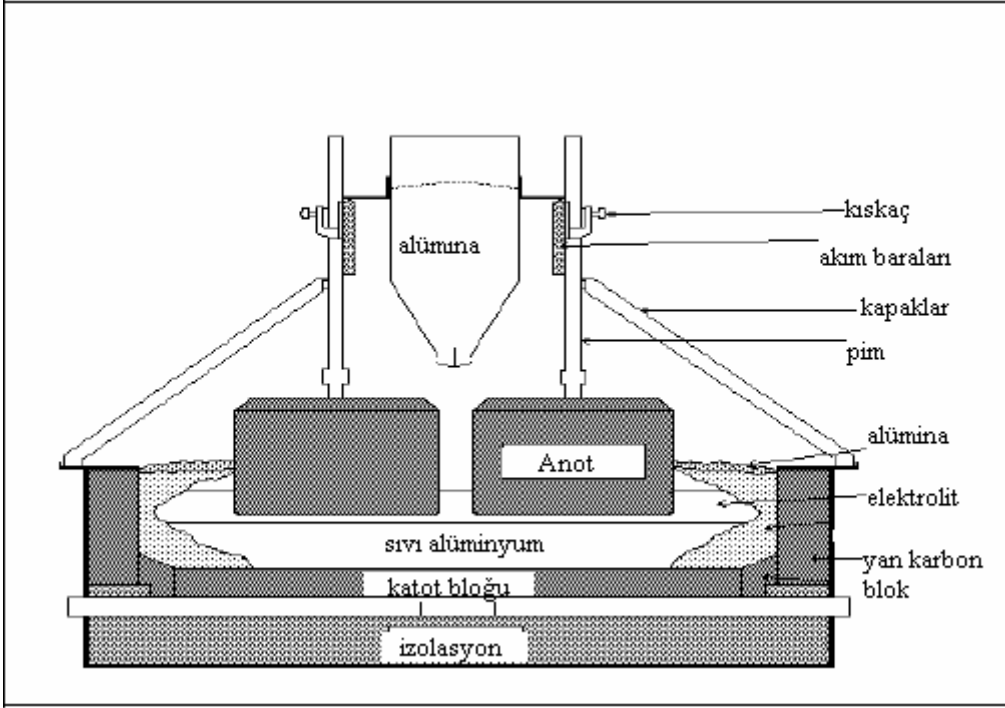
biçimde geliştirme veya değiştirme yönünde dünya çapında önemli bir çaba gözlenmemektedir. Alümina tesisleri, genellikle boksit cevherlerinin yakınına kurulmaktadır.

Her ne kadar tenörü ve mineralojik yapısına bağlı olsa da genellikle %56  $Al_2O_3$  tenörlü cevher işleyen Seydişehir Alüminyum Tesislerinde olduğu gibi, 2 ton boksit cevherinden yaklaşık 1 ton alümina elde edilmektedir ( Askelad, 1994).

### 2.1.3 Saf Alüminyumun Elde Edilmesi



Şekil 2.2 Soderberg tipli tane şekli ( Alüminyum Raporu, 2004 )



Şekil 2.3 Prebaked tipli tane (Alüminyum Raporu, 2004 )

Alümina üretiminden sonraki aşama, alüminanın ergimiş kriyolit banyosunda elektrolizi ile metalik alüminyuma dönüştürülmesidir. Birincil alüminyum, alüminanın alüminyum elektroliz tanelerinde yüksek akım (100-400 kA) altında, 960-970°C sıcaklıkta elektrolit adı verilen kriyolit-alüminyum florür ergimiş tuz ergiyiği içinde çözünmesi, ayrışması ve indirgenmesi sonucu nötrleşen alüminyum metalinin tabanda birikmesi ile elde edilmektedir. Proses sırasında alüminanın parçalanmasıyla açığa çıkan oksijen ise petrol koku ve bağlayıcı olarak taş kömürü zifti'nden oluşan anot karbonu ile birleşir ve CO<sub>2</sub>, CO, C<sub>n</sub>H<sub>n</sub> gazlarını oluşturur. Elektrolitteki reaksiyonlar sonucu gaz fazına geçen flor bileşikleri ise CO<sub>2</sub>, CO, C<sub>n</sub>H<sub>n</sub> gazları ile birlikte gaz temizleme sistemine gitmektedir. Tabanda biriken sıvı alüminyum belirli periyotlarla kapalı vakum potalarıyla çekilip, alaşımlandırma ve kalıplara dökülmek üzere dökümhane birimine gönderilmektedir.

Dökümhane Ünitesinde üretilen yassı, yuvarlak ve külçe şeklindeki ara ürünler piyasaya verilmektedir. Yassı ingotlar haddehane ünitesinde istenen kalınlıklarda levha ve daha ileri aşamada folyo haline dönüştürülmekte, yuvarlak ingotlar ise ekstrüzyon tezgahlarında kalıplardan geçirilerek istenen şekillerde profil haline getirilip uç ürün haline getirilmekte, külçeler ise tekrar eritilip, amaca göre alaşımlandırılıp istenen formlarda kalıplara dökülmektedir.

Genel olarak, ağırlıkça 2 ton alüminadan da 1 ton alüminyum elde edilmektedir. Bu kademedeki üretim maliyetinde en önemli girdi elektrik enerjisidir.

Günümüz dünyasında, ticari boyutta birincil alüminyum üretiminin tamamı alüminyum elektroliz tanelerinde gerçekleştirilmektedir. Hall-Heroult yöntemi olarak bilinen elektroliz yoluyla alüminyum üretim prosesi yerine, alternatif yöntemler üzerinde uzun süreden beri çalışılıyor ve hatta bazı pilot tesisler kurulmuş olsa da, bu yöntemlerin endüstriyel uygulama alanı bulacaklarına dair tüm ümitler kaybolmuş gibidir. 100 yılı aşkın süredir geçerli olan klasik yöntemin daha uzun yıllar bizimle birlikte olacağı artık kesinleşmiş ve araştırmalar bu yöntemin performansını artırma yönünde yoğunlaştırılmıştır. Dünyada yapım halinde olan ve planlanan tüm birincil alüminyum tesisleri Hall Heroult yöntemine dayalıdır (Alüminyum Raporu, 2004).

Boyutları, tipleri ve sayıları tesislere göre değişen elektroliz tanelerinin her biri bağımsız üretim birimi olup elektriksel olarak birbirlerine seri bağlanmışlardır. Günümüzde tüm endüstriyel alüminyum tesislerindeki tanelerin yapısı; Anot, Katot ve Bara Sistemi ile kategorize edilmektedir. Bu konstrüksiyon elemanları arasında tesislerin teknolojisini ve teknoloji seviyesini tanımlayan fonksiyon olarak görülen, özellikle modern teknolojilerde tane hizmetleri için kurulu sistemleri taşıyan ve tanelerin de rejimini büyük ölçüde belirleyen Anot en önemlisidir. Endüstriyel taneler anotlarına göre iki kategoriye ayrılmaktadırlar: Şekil 2.2’de koklaşma sürecinin tane üzerinde olduğu sürekli anot tipi olan Soderberg taneler ve Şekil 2.3’de koklaşma sürecinin başka bir birimde gerçekleştiği kesikli anot tipli olan Prebake taneler görülmektedir.

Her iki tane tipinde de temel proses ve kullanılan hammaddeler aynı olmasına rağmen, işletme parametre ve hizmetleri arasında bazı farklar vardır. Prebaked anotlu sistemler, sayıları 12-20 arası değişen dikdörtgen prizması şeklinde olan ve anot fabrikasında hazırlanan pişirilmiş petrol koku ve taş kömürü zifti karışımının üst ortasında alt kısmı çelik pimlerle tutturulup, alüminyumdan oluşan pimin üst parçası ile anot çerçevesine bağlanmasından oluşur. Prebake anotlu sistemler, reaksiyona giren karbon kütle yanında, son yıllarda tam olarak otomatik hale gelen kabuk kırma, kontrollü alümina ve diğer hammadde şarjları ile anot etkisi söndürme teçhizatları ile donatılmışlardır. Prebake sistemlerde kabuk kırma, hammadde şarjı ve anot etkisi söndürme işlemleri otomatik olarak yapılmasına karşın, Soderberg sistemlerde bu işlemler genellikle özel araçlar vasıtasıyla manuel olarak yapılmaktadır.

Öte yandan Prebake sistemlerde tam bir kontrol olanağı nedeniyle, Soderberg'e göre, başta enerji olmak üzere tüm birim girdi tüketimleri oldukça düşüktür, üretilen metal kalite ortalaması da daha yüksektir.

Her iki tip tanelerde katot sistemi değişmemektedir. Diğer bir deyimle, örneğin Prebake anotlu tanelere özgü olarak tanımladığımız bir katot şekli bulunmamaktadır. Metal çekme sistemi de her iki tip tane için de aynıdır.

## 2.2 İkincil Alüminyum Üretimi

Alüminyum üretiminde Şekil 2.1'de görüldüğü üzere bir döngü söz konusudur. İkincil alüminyum üretiminde metal kaynağı olarak alüminyum hurda kullanılmaktadır. Alüminyum hurdaların başlıca iki kaynağı vardır:

- İşlem ve döküm ürünlerinin üretimi sırasında oluşan geri kazanma olasılığı %100 olan Yeni Hurda,
- Kullanım ömrünü doldurmuş geri kazanma olasılığı yapısı, şekli ve et kalınlığına göre %30-95 arasında değişen Eski Hurda

Defalarca yeniden kullanılabilir bir metal olan alüminyumun alanlarına göre kullanım ömürleri ve teknolojik gelişmelerin sağladığı geri kazanma oranları Çizelge 2.1'de verilmiştir. Bir ülkede değerlendirilen yeni hurda miktarı alüminyum sanayiinin kapasitesi ve kapasite kullanım oranı ile; eski hurda miktarı ise ülkenin alüminyum geçmişi ile doğru orantılıdır. Alüminyumun geri dönüşümü ile ilgili uygulamalar iki kategoride tanımlanmaktadır (Alüminyum Raporu, 2004).

Alüminyum üretimi sırasında çıkan hurdaların yani yeni hurdanın tekrar aynı ürünün üretilmesinde değerlendirilmesi veya kullanılmış içecek kutularının tekrar içecek kutusu üretiminde kullanılması kapalı döngü geri dönüşüme örneğidir. Çeşitli alüminyum hurda malzemelerini, alaşım elementlerini ve hatta birincil alüminyumunu bir arada kullanarak döküm alaşımları üretmekse açık döngü geri dönüşüme örnektir. Kapalı döngü geri dönüşümde



malzemenin özelliğini yitirmesi ihtimali vardır. Kapalı ve açık döngü geri dönüşüm arasında seçim yapılırken, metalin en yüksek artı değeri kazanması için piyasadaki hurda yeterliliği, geri dönüşümün ekonomikliği gibi hususlar dikkate alınmaktadır.

Çizelge 2.1 Alüminyum Kullanım Ömürleri ve Geri Kazanma Oranları (İ.Alüminyumun Sektördeki Yeri ve Önemi, Y. Temürtürkan, K. S. Kabukcu II.Alüminyum Sempozyumu, Mayıs 2003-Seydişehir)

KULLANIM ALANI	KULLANIM ÖMRÜ ( YIL )	GERİKAZANMA ORANI %	
		25 YIL ÖNCE	GÜNÜMÜZDE
YENİ HURDA	0	100	100
OTOMOTİV	10 - 30	50	95
YAPI	30 - 50	70	85
AMBALAJLAMA	1/2 - 2	5-20	30

Alüminyumun yeniden değerlendirilmesi; hurda toplanması, tasnifi ve hazırlanması ergitme, rafinasyon, alaşımlama gibi süreçleri içermektedir. Kirlenmiş hurdaların yeniden kullanılabilmesini sağlamak ve çoğu alüminyum hurdalarının yüksek yüzey alanı/hacim oranı nedeniyle artan ergitme kaybını en aza indirmek özel önem taşımaktadır.

Çizelge 2.2 Hurdaların Değerlendirilmesinde Geri Kazanım Oranları (Alüminyumun Sektördeki Yeri ve Önemi, Y. Temürtürkan, K. S. Kabukcu II. Alüminyum Sempozyumu, Mayıs 2003- Seydişehir )

Hurda Cinsi	Geri Kazanım Oranı %		
	R. Fırını	D Fırını	İ Fırını
Levha, Kırpıntı, Araiş	87	90	93
Preslenmiş Talaş, Folyo	80	85	90
Döküm Makine Parçaları	85	88	-
İçecek Kutuları	75	85	85
Şişe Kapakları	65	70	75

Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi alüminyum hurdalarının cinslerine göre gruplandırılması gerekir. Ergitme oranını yükseltmek, elde edilecek sıvı metalin kirlenmesini önleyerek eriyik kalitesini yükseltmek ve emisyonu azaltmak amacıyla boyalı ve yağlı hurda malzemeler ergitme öncesi boyadan ve yağdan arındırılırlar. Nemin giderilmesi amacı ile ön ısıtma uygulanması da bir diğer ergitme öncesi işlemdir.

İkincil alüminyum üretiminde fırınlar döner, reverber ve indüksiyon fırınlar kullanılmaktadır. Kullanılacak fırın tipini belirlemede ergitilecek hurdanın cinsi, büyüklüğü ve kirlilik derecesi göz önünde bulundurulmaktadır. Ergitilecek hurdanın cinsine ve yapılmak istenen ürünün özelliklerine göre mevcut ergitme tekniklerinden bir veya birkaçı kullanılmaktadır. İkincil alüminyum üretiminde kullanılan fırınlarda hurdaların yapısına göre geri kazanım oranları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Bir kısmı devrilebilir olan, daha çok düşük değerli, çok demirli alüminyum hurdalar ve alüminyum cürufunun ergitilmesi için tercih edilen döner fırınlarda, ergitme işleminde yakıt olarak fuel oil veya gaz yakıtlar ve genellikle oksijen brülörler kullanılır. Brülörden refrakter duvarına iletilen ısı, dönme sırasında ısınmış refrakterle temas eden şarj malzemelerinin ısınmasını sağlar. Metalden önce şarj edilen flux, eriyerek metal yüzeyine çıktığından sıvı alüminyumun havayla temasını keserek oksitlenmeyi engeller. Ergitme firesinin düşük olduğu, ısı veriminin %55 civarında olduğu ve çok çeşitli hurda malzemenin ergitilebildiği bu fırınlarda rafinasyon işlemleri ve alaşımlama yapılamaz. Ayrıca yüksek miktarda yaklaşık 1 ton sıvı alüminyum için 300 kg kullanılan tuzlu fluxtan dolayı oluşan atık da çevresel etkisinden dolayı göz ardı edilemez. Döner fırınlar büyük parçalar için uygun fırınlar değildir. Reverber fırınlar özellikle büyük hurdaların şarj edilebilmesi için uygun fırınlardır. Fakat geniş kapaklara sahip olması hem kaçakların artmasına hem de şarj sırasında yüksek ısı kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle verimleri döner fırınlara göre daha düşüktür. Ancak baca gazının yanma havasının veya şarjın ön ısıtılmasında kullanılması ile ısı verimi %20’den %40’a kadar yükseltilebilir.

Curuf oluşumu nedeniyle alüminyum kaybı da döner fırına göre yüksektir. Yani yüzey alanı/hacim oranı yüksek hurda malzemelerin ergitilmesi için uygun değildir. Ancak bu fırınlarda rafinasyon ve alaşımlama yapılabilmektedir. İndüksiyon fırınları temiz ve küçük hurda malzemelerin ergitilmesi için uygundur. Isıl verimi % 40 civarındadır. Tutma amaçlı da kullanılabilir. Elektromanyetik karıştırma ile şarj ve alaşım metallerinin uygun biçimde karıştırılması sağlanır. Fırın sıcaklığı otomatik olarak kontrol edilebilir. Yanma gazının olmaması ve flaks kullanımının çok az olması çevreye zarar vermemesi açısından önemlidir.

Alüminyumun geleceği açısından en büyük tehdit bizzat alüminyumun, alüminyum hurdasının, kendisinden gelmektedir. 1980'den itibaren ikincil alüminyum sektöründeki büyüme hızı, birincil

alüminyumdan daha büyüktür. Son 20 yılda birincil alüminyum üretimindeki büyüme yaklaşık %2,5 iken, ikincil sektördeki bu değer %5'dir. Her iki ürün sınırlı alanlar dışında birbirlerini ikame ettiklerinden hurda toplama ve yeniden değerlendirme yatırımlarının artması birincil alüminyumun aleyhinedir. Grafik 1'de görüldüğü gibi toplam alüminyum üretimi içinde ikincil alüminyumun payı artmaktadır (Alüminyum Raporu, 2004).

Alüminyum sektörü ile ilgili ileriye dönük trendler hazırlanırken, ikincil üretim konusu da dikkatle incelenmelidir. Geri dönüşüm, alüminyum sektörünün gerek arz, gerek talep cepheğinde etkilidir. Uzun vadede birincil alüminyum üretimi, yarı mamul alüminyum metali talebinin büyük bölümünü karşılamaya devam edecektir. Fakat ikincil üretimin de önemini giderek arttırması beklenmektedir. Birincil üretim; 1975 yılında toplam alüminyum arzının %81'ini karşılarken, bu oran 2003 yılında %71'e gerilemiştir. 1975-2003 döneminde birincil alüminyum üretimi ortalama yılda %2,9 artış gösterirken, aynı dönemde ikincil üretimdeki büyüme yılda ortalama %5,1 olarak gerçekleşmiştir. Uzun vadede ise; ikincil üretimdeki büyümenin devam etmekte birlikte ivme kaybedeceği ve yılda %3,3 civarında gerçekleşebileceği beklenmektedir.

Son yıllarda birincil alüminyum üretimi konusunda söz sahibi olan büyük bazı firmalar birincil alüminyum sahasında büyümeyi daha küçük bağımsız firmalara bırakarak ikincil alüminyum sanayiine yatırım yapmaya başlamışlardır. Ekonomik kriterler nedeniyle Birincil alüminyuma olan talep hızında düşme yanında, ekolojik baskıların etken olduğu çevre ile ilgili yaptırımlarında etkili olduğu bir gerçektir. Bu gelişmeler, hurda toplanması ile ilgili bir çok organizasyonlara gidilmesine ve yeni toplama tekniklerinin bulunmasına yol açmıştır.

Dünyadaki gelişmelere paralel olarak, ülkemizde de alışveriş merkezlerinde ve yerleşim alanlarında alüminyum kutu toplama merkezleri kurulması, halkın da bu konuda bilinçlendirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca bilinçlendirme faaliyetlerinin daha ilköğretimden başlatılarak çevre sorunlarına duyarlı bir nesil yetiştirilmesi amaçlanmalıdır.

### 3. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Periyodik cetvelin III A gurubunda bulunan ve atom numarası 13, atom ağırlığı 26.89 olan +3 değerlikli bir element olan alüminyumun 20°C'taki yoğunluğu 2,7gr/cm<sup>3</sup>, ergime noktası 659,8°C, kaynama noktası 2450°C, ısınma ısısı 0.224Cal/gr(1000°C'ta), erime ısısı 400Cal/gr, 20°C'taki elektriksel iletkenliği bakırın %65'i, ısı iletkenliği 0,5, ışık yansıtılabilirliği %90 olup, bu özellikler alaşım elementleri katılarak büyük ölçüde değiştirilebilmektedir [3].

İlk sırada düşük yoğunluğun olmak üzere bazı temel özellikleri ile diğer metallere göre başlıca üç noktada seçkinleşir:

- Alaşımalarında daha da belirgin olan dayanım / yoğunluk oranının (özellik dayanım) yüksekliği, hafifletilmelerine öncelik verilen konstrüksiyonların çoğu için alüminyum uygun bir malzeme olmasını sağlar. Örneğin uçak, silah, taşınabilir kamp donatımı vb.
- Elektrik iletkenliğinin yoğunluğu oranı bakımından tüm metal malzemelerin önünde gelen alüminyum, yüksek gerilim hatlarında bakırın yerini almaktadır.
- Havada ve diğer birçok ortamda korozyona dayanıklı oluşu, alüminyuma dekoratif görünüm kazandırarak mimari uygulamalarda ve ev araçlarının üretiminde de geniş bir alan açmıştır (Davis, 1999).

Elektrokimyasal gerilim serisindeki konumu nedeniyle asal bir metal olmayan alüminyumun korozyona dayanıklılığı, havada veya sulu çözeltilerde yüzeyi kaplayan okti tabakasından ileri gelir. Bu koruyucu tabaka, bozulduğunda doğal oksitlenmeyle bile yeniden oluşur; ayrıca ortamda bulunabilecek asitler ne kadar oksitleyici ise o kadar kararlı davranır. Örneğin derişik nitrik asit alüminyum kaplarda nakledilebilmektedir. Öte yandan anılan oksit tabakasını çözebilen derişik alkaliler alüminyumu korozyona uğratar.

En az %99,5 saflıktaki alüminyumun elektrik iletkenliği bakırınkinin sadece %62'sine, yoğunluğu nedeniyle, iletken hacminin ve lehimlenebilirliğin önemli olmadığı uygulamalarda alüminyum bakırın yerini almıştır (Burger, 1995).

Alüminyum düşük elastiklik modülü, herhangi bir konstrüksiyonun çelikten yapılma durumuyla karşılaştırıldığında, rijitliğin azalmasına yol açar. Isıl genleşme katsayısının ise çeliğinkinin

yaklaşık iki katı oluşu alçak sıcaklık için tank ve boru hatlarının yapımında göz önünde tutulmalıdır.

Yüzey merkezli kübik (YMK) kafese sahip olan alüminyumun sıcak ve soğuk şekil değiştirme kabiliyeti çok iyidir. Ekstrüzyon yöntemiyle her türlü, profil üretilebildiğinden pencere, kapı ve otomobil gövdeleri için değişik profil serileri geliştirilmiştir. Böylece tasarımcının öngördüğü biçimler basit montajlarla gerçekleştirilebilir.

Alüminyum manyetik değildir; düşük bir yorulma dayanımı gösterir, bu nedenle, yorulma hasarı sonuçta düşük gerilimlerde bile gözlenebilir. Düşük erime sıcaklığı nedeniyle, alüminyumun, yüksek sıcaklık performansı iyi değildir. Son olarak, alüminyum alaşımlarının sertlikleri düşük olduğu için aşınma dayanıklılıkları kötüdür (Davis, 1999).

Alüminyum doğada bileşikler halinde bulunur. Yer kabuğundaki yaklaşık olarak %8 civarındaki içeriğiyle alüminyum, oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü elementtir. Bu kadar çok bulunmasına rağmen varlığı 1808 yılında İngiliz Sir Humphry Davy tarafından tespit edilen bu metalin ticari anlamda üretim teknolojisi ancak 1886 yılında Paul Louis Toussaint Héroult (Fransa) ve Charles Martin Hall(ABD) birbirlerinden habersiz şekilde ayrı ayrı çalışarak geliştirilmiştir. Günümüzde Hall-Héroult yöntemi olarak halen kullanılan bu yöntemde bu iki bilim adamı, alüminyum oksitini ergimiş kriyolit içinde çözündürülerek üzerinden güçlü bir elektrik akımı geçirildiğinde, alüminyumun elektrolitin altında sıvı halde biriktiğini fark etmişlerdir. Bu yöntemin keşfinden sadece iki yıl sonra, 1888'de İsviçre'nin Neuhausen kentinde Schweizerische Metallurgische Gesellschaft tarafından Héroult patentiyle, yine aynı yıl A.B.D.'deki Pittsburgh kentinde Pittsburgh Reduction Company tarafından Hall patentiyle ilk alüminyum elektrolizhaneleri kurulmuştur.

Bundan sonra bu alanda çok hızlı teknik ve ekonomik gelişmeler yaşanmaya başlamış, 1900 yılına gelindiğinde İsviçre ve Amerika ile birlikte Fransa(1889), İngiltere(1896), Almanya(1898) ve Avusturya(1899) da alüminyum üreten ülkeler arasındaki yerlerini almıştır. 1900 yılında dünya birincil alüminyum toplam yıllık üretimi 8.000 ton iken, 1913 yılında 65.000 tona, 1920 yılında 128.000 tona, 1938 yılında 537.000 tona, 1946 yılında 681.000 tona, 2002 yılında 22-23 milyon tona ve 2003 yılında ise 25-27 milyon ton seviyelerine yükselmiştir.

Yaklaşık 110 yıl önce ticari anlamda üretimine başlanan alüminyum, insanoğlunun binlerce yıl boyunca kullandığı bakır, kalay ve kurşunun bugünkü toplam üretimlerinden çok daha fazla bir

miktarda üretilmektedir. Günümüzde geriye kazanılmış (ikincil) alüminyumla birlikte toplam yıllık alüminyum arzı yaklaşık 30 milyon tona ulaşmışken, bakır 14,7 milyon ton, çinko 8,6 milyon ton, kurşun 6 milyon ton, magnezyum 0,4 milyon ton, kalay 0,2 milyon ton ve çelik 858 milyon ton seviyelerinde üretilmektedir. Demir-çelik üretiminin yanında bu miktar küçük görülebilir. Ancak, ürettiği katma değer açısından bakıldığında; yıllık 22.000.000 ton alüminyumun katma değer karşılığı 150.000.000 ton demir-çeliğe eşdeğer olduğu görülmektedir.

### 3.1 Alüminyum Alaşımları

Alüminyumun düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci gibi üstünlüklerinden makina, taşıt ve yapı endüstrisinde geniş oranda yararlanılması, ancak dayanım özelliklerinin alaşımlama yoluyla iyileştirilmesinden sonra gerçekleştirilebilmiştir. Dayanımın çökeltme sertleşmesiyle artırılabilmesinin bulunması da alüminyum alaşımlarının geliştirilmesinden çok büyük rol oynamıştır (Kleiner, 2001).

Metalik karakteristiklere sahip kimyasal elementlerin çoğu, alüminyumla kolayca alaşım yapabilirler. Ancak bunlardan sadece birkaçı ticari alüminyum esaslı alaşımlarda temel alaşım elementi olarak yer alırlar. Ayrıca çok sayıda başka elementler de alaşımın özelliklerini iyileştirmek için destekleyici alaşım katkıları olarak kullanılır (Davis, 1999). Alüminyum alaşımları, üretim metoduna bağlı olarak iki büyük gruba ayrılabilir:

**Dövme ve Dökme Alaşımlar:** İmal usulünün değişik gereklerini yansıtacak şekilde, plastik deformasyonla şekillendirilmiş olan dövme alaşımların mikrosyapısı ve bileşimi, dökme alaşımlardan, önemli ölçüde farklılık gösterir. Her bir büyük grup içinde alaşımlar, Isıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşımlar olarak sınıflandırılır.

Alüminyum alaşımları Çizelge 3.1'de verilmiş olan kodlama sistemine göre gösterilir. İlk numara, esas alaşım elementlerini ifade ederken, kalan numaralar alaşımın belirli bir bileşimini gösterir.

Çizelge 3.1 Alüminyum alaşımlarının gösterim sistemi (Askelad, 1994).

<b>Dövme Alaşımlar</b>		
1xxx	Ticari saflıkta Al (>%99 Al)	Yaşlandırılmaz
2xxx	Al-Cu ve Al-Cu-Li	Yaşlandırılabilir
3xxx	Al-Mn	Yaşlandırılmaz
4xxx	Al-Si ve Al-Mg-Si	Mg içeriyorsa yaşlandırılabilir
5xxx	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6xxx	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7xxx	Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
8xxx	Al-Li, Sn, Zr veya B	Yaşlandırılabilir
<b>Dökme Alaşımlar</b>		
1xxx	Ticari saflıkta Al	Yaşlandırılmaz
2xxx	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3xxx	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Bazıları yaşlandırılabilir
4xxx	Al-Si	Yaşlandırılmaz
5xxx	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
7xxx	Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
8xxx	Al-Sn	Yaşlandırılabilir

Dayanım artışı, alaşımın ısı işlem görmüş ya da soğuk şekil değiştirme sertleşmesi uygulanmış olmasına bağlı olarak, T veya H temper gösterimleriyle ifade edilir. Diğer gösterimler, alaşımın tavllanmış (O), çözüldürme ısı işlemine tabi tutulmuş (W) ya da üretildiği gibi kullanıldığını (F) anlatır. T veya H'den sonra yazılan numaralar, soğuk şekil değiştirme sertleşmesi miktarını, belirli bir ısı işlem türünü ya da alaşımın gördüğü işlemlerin diğer özel gösterilişlerini gösterir (TS 1321,1986). Tüm bu ifadeler Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.



Çizelge 3.2 Alüminyum alaşımlarının temper gösterimi (TS 1321, 1986).

F	Üretildiği gibi (sıcak şekillendirilmiş, dövme, dökme, vs.).
O	Tavlanmış (mümkün olan en yumuşak durumda)
H	Soğuk şekillendirilmiş
	H1x: Sadece soğuk şekillendirilmiş (x, soğuk şekillendirme ve dayanım artırma miktarını gösterir.
	H2x: Soğuk şekil değişimi görmüş ve bir miktar tavlanmış
	H3x: Soğuk şekil değişimi görmüş ve düşük bir sıcaklıkta kararlı hale getirilmiş
W	Çözündürme işlemi uygulanmış
T	Yaşlandırma ile sertleştirilmiş
	T1: Üretim sıcaklığından soğutulup doğal yaşlandırılmış
	T2: Üretim sıcaklığından soğutulup soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
	T3: Çözündürülmüş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
	T4: Çözündürülmüş ve doğal yaşlandırılmış
	T5: Üretim sıcaklığından soğutulup doğal yaşlandırılmış
	T6: Çözündürülmüş ve yapay yaşlandırılmış
	T7: Çözündürülmüş ve aşırı yaşlandırma ile kararlı yapı elde edilmiş
	T8: Çözündürülmüş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış
	T9: Çözündürülmüş, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş
	T10: Üretim sıcaklığından soğutulup soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

### 3.2 Çökme Sertleşmesi Gösteren Alüminyum Alaşımları

Çökme sertleşmesi gösteren dövme Al alaşımlarından yukarıda kısaca bahsedilmiştir, ancak özellikle aşağıdaki gruplara ait olanlar büyük önem taşımaktadırlar.

AlCuMg (2000 serisi) alaşımlarda çekme dayanımı 440 MPa dolayına yükseltmek mümkündür. Magnezyumun etkisiyle hızlanan yaşlanma oda sıcaklığında gerçekleşir. Bakır miktarının fazla olması dayanıklılığı azaltır. Bu sakınca malzeme yüzeyine saf alüminyumdan ince bir tabaka giydirerek giderilebilir. En yaygın kullanılan Al-Cu-Mg alaşımları 2014 ve 2024'tür. 2014'ün ısıtma işlemleri doğal ve yapay yaşlandırma şartlarıyla sınırlıdır; 2024'ün yapay yaşlandırmaya karşı hassasiyeti çözüme alınmış metalin plastik şekillendirmesi ile artar.

AlMgSi (6000 serisi) alaşımları en çok 320 MPa düzeyinde orta dayanımlı malzemelerdir. En yüksek dayanım seviyeleri 6066 ve 6070 tarafından sağlanır. 0,2 sınırı yapay yaşlandırmada 260Mpa'a, doğal yaşlandırmada ise 110 MPa'a ulaşabilir. Korozyona dayanıklılıkları iyi olup, parlatma ve anodizasyona elverişlidir. Si miktarının artması dayanımı arttırır, fakat gerilmeli korozyon direncini düşürür. Bu gruptaki alaşımların çoğu dayanımı arttırmak ve tane boyutunu kontrol etmek amacıyla Mn veya Cr içerirler. Dayanımın artırılması için Cu ilavesi de yapılır, ancak %50'den fazlası gerilmeli korozyon direncini düşürür.

AlZnMg (7000 serisi) alaşımları, yüksek dayanımlı ve orta dayanımlı genel amaçlı alaşımları içerirler. Bu grup mekanik özellikler ve korozyon davranışı bakımından optimum çözümü yansıtır. Yaklaşık 350 MPa'lık çekme dayanımlarıyla AlCuMg alaşımlarının altında kalmakla birlikte, kimyasal etkilere karşı daha dirençlidirler (Arnold, 1993; Burger, 1995).

### 3.3 Alüminyum Birliği İşaretlendirme Sistemi

Alüminyum alaşımları için tam olarak geçerli olan bir standart sistemi bulunmamakla birlikte, en sık kullanılan Alüminyum Assosiation'a ait olan sınıflandırmadır. Çizelge 3.3'de görüldüğü üzere alüminyum alaşımlarının işaretlendirilmesi için dört tam sayılı endeks sistemi kullanılır. Bunlardan birincisi alaşımı gruplandırmaya, son ikisi de alaşımı tanıtmaya yani alüminyumun saflık derecesini göstermeye yarar. İkinci sayı ise alaşımın geçirdiği değişiklikleri veya yabancı madde miktarlarının limitlerini gösterir.

Çizelge 3.3 Alüminyum alaşımlarının ALCOA'ya göre tasnifi (Ersümer, 1960)

Esas Alaşım Elemanı	Alaşım Grubu
Min. %99,00 Alüminyum	1xxx
Bakır	2xxx
Manganez	3xxx
Silisyum	4xxx
Magnezyum	5xxx
Magnezyum ve Silisyum	6xxx
Çinko	7xxx
Diğer Elementler	8xxx
Kullanılmayan Seriler	9xxx

Minimum %99,00 saf alüminyum içeren 1xxx grubunun son iki sayısı minimum alüminyum yüzdesini göstermektedir. Buna göre 1030, yabancı madde bakımından bir kontrol gerektirmeyen, minimum alüminyum miktarı %99,30 olan bir alüminyum gösterir.

2xxx den 8xxx'e kadar olan alaşım gruplarında, dört tam sayıdan son ikisi özel bir anlam taşımayıp, ancak gruptaki muhtelif alaşımları ayırt etmeye yarar.

### **3.4 Alaşım Elementlerinin Alüminyum Alaşımlarına Etkileri**

Alüminyum iyi olan birçok özelliğinin (hafiflik, iyi haddelenebilme özelliği, yüksek elektrik iletkenliği, korozyona karşı mukavemet, manyetik olmayışı vs.) yanı sıra dökme ve mekanik özellikleri çok kötüdür. Kötü olan bu özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla alüminyuma ilave alaşım elementleri katılmıştır. Alaşımların kullanılma yerlerine göre seçimlerinin yapılabilmesi açısından, alaşım elementlerinin alüminyum üzerindeki etkileri bilinmelidir. Alüminyuma en fazla ilave edilen alaşım elementleri ve etkileri şunlardır:

**Bakır:** En fazla tanınan alüminyum alaşımları bakır ihtiva edenlerdir. Bakır düşük sıcaklıklarda ısıtılma işlemi ile, yüksek sıcaklıklarda ise diğer alaşım elementleri ile meydana getirdiği ara fazlar dolayısıyla malzemenin mukavemetini artırır. Döküm alaşımlarına %4-12 oranında ilave edilirse çekilme ve sıcak yırtılmayı düşürür. Dövme alaşımlarında plastik şekil verme ile işlemeyi zorlaştırabileceğinden, umumiyetle %5 den fazla bakır kullanılmaz. Korozyon mukavemetini düşürür, tavlanmış durumda pitting meydana gelmesine yol açabilir. Yaşlanma ile sertleştirildiğinde intergranüler kırılmaya ve gerilemeye başlarlar ve alaşımın korozyona karşı mukavemeti düşer (Coşkun, 2001). Alüminyum bakır alaşımları, ev eşyası, otomotiv sanayi, uçak sanayi, vakum temizleyicileri, çamaşır makinesi parçaları ve piston imalatında kullanılır (Anonim, 1988). Al-Cu denge diyagramında yatık bir solvüs eğrisinin bulunması, yaşlandırma sertleşmesini mümkün kılar; bakırın alüminyum içerisinde katı fazla çözünürlüğü, yüksek sıcaklıkla artar. Böylece çökeltme sertleşmesi mümkün olmaktadır. Çökeltmenin teknik özelliklere yapacağı etki, çökeltme fazının miktarına boyutlarına ve dağılımına bağlıdır. Ayrıca çökeltmeden önce yapılan soğuk işlem derecesi özellikler üzerinde etkili olur (Alüminyum Raporu, 2004).

Magnezyum: Dövme Al-Mg alaşımları %1-6, dökme Al-Mg alaşımları %4-10 oranında magnezyum ihtiva ederler. Magnezyum yüksek mukavemet, süneklik ile korozyon mukavemeti ve kaynak kabiliyeti sağladığı gibi malzeme yoğunluğunu da düşürmez (Arnold, 1993). Magnezyum silisit yapacak miktarda magnezyum ve silisyum ihtiva eden alaşımlar ısıtılma tabii tutulabilen ve kolay işlenebilen alaşımlardır. Bu tip alaşımlar korozyona karşı da mukavimdirler. Silisyum miktarı söz konusu orandan fazla ise, alaşım mukavemeti suni yaşlandırma ile arttırılabilir. Dövme Al-Mg alaşımlarında Na'un kabul edilebilir maksimum miktarı %0.001 dir. Na yüksek sıcaklıklarda işlenen Al-Mg alaşımlarında boşluk ve çatlakların teşekkülüne yol açar. Magnezyum miktarının %2'den fazla olduğu durumda bu tür gevreklik ortaya çıkar. Sodyumun gevrekliğine yol açışının esas sebebi, ara faz içinde çözünmeyip, bazı şartlarda, serbest kalarak hidrojen absorpsiyonu ile NaH şekline dönüşmesi ve gevrek bir faz yapması olabileceği gibi, dövme sıcaklığında sıvı fazda bulunabilecek bir ara fazın ortaya çıkmasına yol açması da olabilir. Magnezyum, Al + %10 Mg'lu esas alaşım olarak alaşımına katılır (Güven, 2003).

Silisyum: Al-Cu alaşımlarından sonra en tanınmış alüminyum alaşımları Al-Si alaşımlarıdır. Silisyum döküm alaşımlarına akışkanlığı arttırmak ve sıcak yırtılmayı düşürmek için ilave edilir. Bu alaşımların mukavemet değerleri yüksek değildir, silisyum miktarı arttıkça çekme ve akma mukavemeti artış gösterir. Alaşımının bileşiminden çok silisyum ihtiva eden fazın şekli ve dağılımına bağlıdır. Küçük ve yuvarlak primer faz veya ötektik yapı yüksek mukavemet ve süneklik verir. İğne şeklindeki silisyumlu faz çekme mukavemetini arttırmakla beraber süneklik, darbe ve yorulma mukavemetini düşürür. Al-Si alaşımlarında Si plastisiteyi düşürür. 700 K'nın üzerinde alaşım süperplastik özellik gösterir. Silisyum alaşımına %13-22 Si'lu esas alaşımı halinde ilave edilir (Hirsch, 1997).

Çinko: Alüminyum-Çinko alaşımları genellikle en yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarıdır. Çinko alüminyum alaşımlarının işleme kabiliyetini arttırır. Sıcak yırtılmaya sebep olmasına rağmen diğer alaşım elementleri ile bu kötü özellik ortadan kaldırılabilir. Magnezyum ve çinko beraberce ısıtılma tabii tutulabilir, alüminyum alaşımı meydana getirirler; bunların bir kısmı yüksek mukavemetli alüminyum bazlı ticari alaşımları meydana getirirler. Çinko %25 Zn-Al esas alaşımı halinde alaşıma verilir.

**Manganez:** Manganez dövme alüminyum alaşımlarında en fazla kullanılan alaşım elementlerindedir, buna mukabil döküm alaşımlarında ise daha limitli olarak kullanılır. Manganez korozyon mukavemetini düşürmeden mekanik özellikleri iyileştirir. %0.75'e kadar Mn ilavesi, döküm alaşımlarında sertliği artırır, sünekliği azaltır. Dövme alaşımlarında Mn, yüksek mukavemet, korozyona karşı dayanıklılık ve iyi kaynak kabiliyeti verir. Fazla miktarda Mn veya Mg veya her iki elementin fazlaca bir arada olması haddeleme sırasında çatlak teşekkülüne yol açar. Mn, %10 Mn-Al alaşımı halinde alaşımına ilave edilir.

**Demir:** Alüminyum alaşımlarında demire genellikle rastlanır. Redüksiyon ve izabe işlemlerinde istenmeyerek de bir miktar demir alaşımında kalır. Al-Cu-Ni grubu alaşımlarında, demir yüksek sıcaklıkta mukavemet arttırmak için bulunur. Al-Fe alaşımlarının plastik şekil alma kabiliyeti ara kimyasal bileşiklerin boyut ve dağılımına bağlıdır. Demir, alüminyumla FeAl ara fazını meydana getirir. Oda sıcaklığında, katı çözeltiye girmeyen demirli ara faz, ısıtılma tabii tutulabilen alaşımlarda alaşımın mukavemetini düşürür. Demir alaşımına, %10 Fe-Al alaşımı halinde ilave edilir.

**Titanyum:** Titanyum genellikle, boksitte çok az miktarda bulunan  $TiO_2$ 'den gelen bir empüredir. Bunun haricinde döküm alaşımlarında tane küçültücü olarak kullanılır. Titanyum, alaşımına %4-10 Ti-Al alaşımı halinde ilave edilir.

**Zirkonyum:** Zirkonyum tane küçültücü gerilmeli korozyona mani olan ve yüksek sıcaklıkta sürünme mukavemetini arttıran bir alaşım elemanıdır. Zirkonyum alaşımına %5,5 Zr-Al esas alaşım halinde ilave edilir.

**Krom:** Krom, katı halde çok düşük çözünürlüğü olan  $CrAl_7$  ara kimyasal bileşiği meydana getirir.  $CrAl_7$  kaba bir ara kimyasal bileşim olmasına rağmen Fe, Mn veya Ti ilavesi ile bu kaba metaller arası kimyasal bileşik elimine edilebilir. Krom anodizasyon işleminde altın sarısı renk vermesi için kullanılır. %0.15-0.25 oranında krom, Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarında korozyona karşı mukavemeti artırır ve gerilmeli korozyon ihtimalini azaltır. Krom, alaşımına %2 Cr-Al esas alaşım halinde ilave edilir.

Fosfor: Fosfor, genellikle boksitte bulunan fosfatlardan gelen tali bir empürite elemanıdır. Ötektik üstü alüminyum-silisyum alaşımlarına silisyumlu primer fazın daha küçük ve daha muntazam dağılmış olarak bulunması için ilave edilir.

Kalay: Metal ergidikten sonra ilavesi oldukça kolaydır. Alüminyum alaşımlarında kalay, düşük ve yüksek sıcaklıklarda daşanımı düşürür. Kalay yatak olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının en önemli bileşenlerinden biridir.

Kurşun: Özellikle, kalay ve bizmut ile kullanıldığında alaşımın işlenebilme kabiliyetini artırır. %0.5'den aşağı miktarlarda ilave edilir. Alüminyum içersindeki erirliği çok düşüktür.

Bor: Genellikle %0.01 oranında kullanılır. Titanyumla beraber iyi bir tane küçültücüsüdür.

Berilyum: Yüksek magnezyumlu (%4 ve daha fazla) döküm alaşımlarında curuflaşmayı azaltmak ve yeniden ergime esnasında magnezyumun yanarak kaybolmasını önlemek için berilyum ilave edilir.

Sodyum: Sodyum, alüminyum-silisyum alaşımlarını modifiye etmek için kullanılır. Sodyum ihtiva eden alüminyum alaşımlarında mekanik özelliklerde süneklik ile darbe mukavemetinde çok düşme, sertlikte de çok az artma yapmakla beraber %0.01 mertebesindeki Na sıcak yarılmaya yol açabileceği gibi korozyon mukavemetini de düşürür (Kleiner, 2001).

### **3.5 AlMgSi Alaşımları (6xxx serisi)**

6000 serisi olarak bilinen AlMgSi alaşımları iyi ekstrüzyon edilebilirlikleri, yüksek korozyon dayanımları, sıcak deformasyon sonrasında temiz yüzey ve orta derecede dayanım elde edebilmek için uygulanan süreçlerin düşük maliyetli olması ile tanınırlar. Dünya alüminyum ekstrüzyon üretiminin yaklaşık %80'inden fazlasını 6000 serisi alaşımlar, bu serinin %70'inde AA 6063 grubu oluşturmaktadır (Court, 2001).

Alüminyum-magnezyum-silisyum alaşımları  $Mg_2Si$  fazı partikülleri ihtiva ederler.  $Mg_2Si$  metallerearası bileşiğinin Mg:Si oranı 1.73'dür, maksimum çözünürlüğü %1.85'dir ve sıcaklıkla azalır (ASM, 1997). Bu faz solüsyona alma ısıl işlemi esnasında çözünür ve yapay yaşlandırma esnasında küçük bir miktar çözelir. Sonuç olarak, bu fazın miktarı ve dağılımı alaşıma uygulanan ısıl işlemin süresi ve derecesini gösterir. Ayrıca yapıda  $Mg_2Si$  oluşumundan artan silisyum partikülleri mevcut olabilir (ASM, 1997).

6000 serisi alaşımlardaki alaşım elementlerinden silisyumun oranı %0.2-0.7 arasında, magnezyumun oranı ise %0.35-0.9 arasında değişmektedir. AA 6000 serisi alüminyum alaşımlarındaki en önemli empürite elementi olan demir için bazı standartlarda alt ve üst sınırlar belirlenmiş, diğerlerinde ise sadece üst sınır verilmiştir. Empürite elementlerinden titanyum ile çinkonun miktarının genelde %0.1-0.2'nin altında olması istenilmekle birlikte, bazı standartlarda toplamı %0.15'in altında olması gereken "diğer empüriteler" grubuna dahil edilmişlerdir. Empürite elementlerinden bakır ve kromun ağırlığının %0.05-0.12'nin altında olması istenirken alaşımdaki manganez miktarının alt ve üst sınırları arasındaki fark geniş olup, %0.1-0.3 arasında değişmektedir (Court, 2001). Al-Mg-Si alaşımları bileşimleri açısından üç gruba ayrılırlar.

Birinci grupta Mg ve Si'un toplam miktarı %1.5 geçmez. Bu elementler neredeyse dengelenmiş durumdadırlar veya az miktarda fazla silisyum içerirler. Bu grubun tipik bir alaşımı AA 6063'tür (ASM, 1997). AA 6063 alaşımının ekstrüzyon yöntemiyle üretilen profillerinin en yaygın kullanıldığı sektörler, inşaat/mimari (cephe kaplama, pencereler, kapılar, dekorasyon, mobilya) otomotiv, elektrik/elektronik ve makina imalat sektörleridir. AA 6063 alaşımının eloksallı kaplanabilme özelliği de son derece iyidir (Uchida, 1996). Bu kolay ekstrüze edilebilen alaşım nominal olarak %1.1  $Mg_2Si$  içerir. Solüsyona alma işlem sıcaklığı 500 °C'nin hemen üzeridir. Bu alaşım ekstrüzyondan sonra ayrı bir ısıl işleme gerek duymaz, presten sonra havada soğutulabilir ve orta seviyede dayanım, iyi süneklik ve mükemmel korozyon direnci elde etmek için yapay olarak yaşlandırılır (ASM, 1997).

İkinci grup nominal olarak %1.5 veya daha fazla Mg + Si ve T6 temperinde mukavemeti arttıran %3 Cu gibi diğer katkıları içerir. Manganez, krom ve zirkonyum gibi elementler tane yapısını kontrol etmek için kullanılır. Bu gruptaki alaşımlar, AA 6061 yapısal alaşım gibi, T6 temperinde birinci grup alaşımlardan yaklaşık olarak 70 MPa daha yüksek dayanım gösterirler. Bu alaşımlar

birinci gruptan daha yüksek solüsyona alma sıcaklığı gerektirirler, su vermeye duyarlıdırlar. Bundan dolayı, hızlı su verme ve yapay yaşlandırmanın takip ettiği ayrı bir solüsyona alma işlemine gerek duyarlar (ASM, 1997).

Üçüncü grup alaşımlar ilk iki gruptaki kadar magnezyum ve önemli miktarda fazla silisyum içerirler. %0.2 fazla silisyum %0.8  $Mg_2Si$  içeren alaşımın dayanımını yaklaşık olarak 70 MPa artırır. Fazla silisyumun dah yüksek miktarlara daha az faydalıdır. Bununla birlikte fazla magnezyum  $Mg_2Si$ 'nin çözünürlüğünü azalttığı için istenmez. Fazla silisyum içeren alaşımlarda silisyumun tane sınırlarındaki segregasyonu rekristalize olmuş yapılarda tane sınırı kırılmasına yol açar. Manganez, krom veya zirkonyum ilavesi ısıtma işlemi esnasında rekristalizasyonu önleyerek silisyumun etkisini ortadan kaldırır. Bu grubun belli başlı alaşımları AA6351 ve yakın geçmişte geliştirilen AA6009 ve AA6010'dur. Bu grup alaşımlara kurşun veya bizmut ilavesi (AA6262) talaşlı işlenebilirliği kolaylaştırır. (ASM, 1997).

### 3.5.1 AlMgSi (6XXX) Alaşımlarının Fiziksel Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

AlMgSi alaşımlarının ana bileşenleri magnezyum ve silisyum olup, bu elementler yapıdaki  $Mg_2Si$  metaller arası bileşimini oluşturur. Genellikle demir, manganez ve krom gibi elementler düzenleyici olarak bulunur. Bazen korozyon direncinden ödün vermeksizin az miktarda çinko veya bakır ilavesi mukavemeti artırır. İletkenlerde titanyum ve vanadyumu almak için boron, tane boyutunu kontrol etmek için zirkonyum veya titanyum bulunur. Malzemenin talaşlı işlenebilirliğini arttırmak için kurşun veya bizmut ilave edilir (Court, 2001).

Endüstride en çok kullanılan AlMgSi alaşımlarının kimyasal bileşimleri Çizelge 3.4'de verilmiştir. AA 6063 alaşımının Mg ve Si içerikleri  $Mg_2Si$  oluşturacak şekilde seçilir ve dengelenmiş alaşım olarak nitelendirilirler. Yapı içerisinde çoğunlukla serbest Mg ve Si bulunmamaktadır. Silisyumun bir kısmı Al-Fe-Si fazlarının oluşumunda yer almaktadır. Çok sınırlı olmakla birlikte bazı hallerde dökülebilirliği iyileştirmek için serbest veya fazla silisyuma müsaade edilmektedir. (Lodgard, 1999). Serbest veya fazla Mg korozyon direncini artırır, fakat mukavemet ve deformasyon kabiliyetini azaltır. Deformasyon kabiliyetini azaltarak ekstrüzyon edilebilirliği olumsuz etkilediğinden fazla Mg kesinlikle istenmez. Aşırı silisyum ise daha yüksek mukavemeti deformasyon kabiliyetinden ödün vermeden sağlar. Ancak yüksek dayanım değerleri



elde etmek amacıyla alaşımdaki silisyum oranının artırılması durumunda silisyumun çökmesi sonucu yüzeyde “dark spots” olarak adlandırılan hatalar oluşabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Çizelge 3.4 AlMgSi alaşımlarının kimyasal bileşimleri (ASM, 1997).

Alüminyum Alaşımı	ISO No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer El. Herbiri Top.	
6061	AlMgSiCu	0,4-0,8	0,30-0,7	0,15-0,40	0.15	0,8-1,2	0,04-0,35	0.25	0.5	0.05	0.15
6063	AlMg <sub>0,5</sub> Si	0,2-0,6	0.35	0.1	0.1	0,45-0,9	0.1	0.1	0.1	0.05	0.15
6082	AlSiMgMn	0,7-1,3	0.5	0.1	0,4-0,1	0,6-1,2	0.25	0.2	0.1	0.05	0.15
6101	E-AlMgSi	0,3-0,7	0.5	0.1	0.03	0,35-0,8	0.3	0.1	----	0.05	0.15

Ticari alaşımların kafes parametresi magnezyum ve silisyum ilavesi ile kontrol edilir. Alaşımdaki bakır, manganez, çinko ve krom çoğunlukla çok düşük miktarlarda mevcut olduğundan ölçülebilir bir etkisi yoktur. Yine demir, titanyum, bor gibi elementlerinde kafes parametresi üzerine önemli bir etkisi olmamaktadır.

AlMgSi alaşımları kırılcıma en dayanıklı alüminyum alaşımlarıdır, berilyum ilavesi bu dayanımı artırır. %99,99 alüminyumdan hazırlanmış alaşımlarda yapılan testlerde elektroparlatma ve anodizasyon (eloksal) sonrasında %85 oranında ışığı yansıtma özelliği görülmüştür (Erarslan, 1999).

AlMgSi alaşımlarında manganez, krom, zirkonyum gibi çökelti oluşturan elementler bulunduğu, homojenizasyon işlemi sırasında yüksek sıcaklıkta çökelen fazlar (~500 °C) oluşacaktır. Bu çökelti ekstrüzyon sürecinde ince bir alttane yapısı oluşturarak yeniden kristalleşmeyi önler ve ekstrüzyon sonrasında lifli yapının korunması sağlanır. Oluşan bu altyapı daha sonraki yaşlandırma işlemi ile oluşacak mukavemet artışının daha fazla olmasına neden olur. Ancak dispersoid oluşturan elementler alaşımı su vermeye daha duyarlı yaparlar. Bu da yaşlandırma işleminden sonraki soğuma hızının azalması durumunda, yaşlandırma işlemi ile elde edilebilecek dayanımın azalmasına neden olur. Altyapı oluşumu, su verme duyarlılığının

artmasının neden olacağı kaybı, süneklik ve tokluğu artırarak karşılar (Lodgard, 1999). Çizelge 3.5’de sık kullanılan bazı AlMgSi alaşımlarının farklı ısıl işlemlerindeki mekanik değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.5 AlMgSi alaşımlarının mekanik özellikleri (ASM, 1997).

Alaşım Tipi	Isıl İşlem	Çekme Dayanımı MPa	Akma Dayanımı MPa	Uzama %	Sertlik HB	Kayma Dayanımı MPa	Elastisite Modülü GPa
6061	0	125	55	30	30	85	69
	T4	240	145	25	65	165	69
	T6	310	275	17	95	205	69
6063	0	90	50	-	25	70	69
	T1	150	90	-	42	95	69
	T4	170	90	-	-	-	69
	T5	185	145	-	60	115	69
	T6	240	215	-	73	150	69
6101	T6	220	195	-	71	140	69

Suni yaşlandırılmış düşük miktarda fazla silisyum içeren %0.4-0.5 Mg’lu alaşımlarda elektrik direnci %50-55 IACS mertebesindedir. Daha fazla magnezyum, manganez ve bakır bu iletkenliği düşürür. Bu iletkenlik tabii yaşlandırılmış alaşımlarda daha da düşüktür. Endüstride en çok kullanılan AlMgSi alaşımlarının fiziksel özellikleri Çizelge 3.6’da gösterilmektedir

Çizelge 3.6 AlMgSi alaşımlarının fiziksel özellikleri (ASM, 1997).

Alaşım Tipi	Ortalama Isıl Gen. Katsayısı $\mu\text{m/m} \cdot ^\circ\text{C}$	Yaklaşık Ergime Aralığı $^\circ\text{C}$	Isıl İşlem	Isıl İletkenlik $25^\circ\text{C}$ $\text{W/m}^\circ\text{C}$	Elektriksel İletkenlik $20^\circ\text{C}$ IACS	Elektriksel Direnç $20^\circ\text{C}$ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
6061	23,6	580-650	0	180	155	0,0365
			T4	154	132	0,043
			T6	167	142	0,040
6063	23,4	615-655	0	218	191	0,030
			T1	193	165	0,035
			T5	209	181	0,032
			T6, T83	200	175	0,033
6101	23,4	620-655	T6	218	188	0,030
			T61	222	194	0,030
			T63	218	191	0,030
			T64	226	198	0,028
			T65	218	191	0,030

Krom, manganez, zirkonyum, demir ve bakırın AlMgSi alaşımlarının tokluğu üzerindeki etkilerini araştıran bir çalışmada, akma dayanımı arttıkça çentik darbe duyarlılığının azaldığı görülmüştür. Katı çözeltideki bakırın tokluğa hiçbir etkisi yokken manganez ve zirkonyum ilavesi ile tokluk artmaktadır (Kleiner, 2001).

Ticari alaşımlar özellikle manganez veya krom içerirlerse %10 oranında daha yüksek dayanım gösterebilirler. Tamamen sertleştirilmiş alaşımların çekme testinde, taneler arası kırılma eğilimi görülebilir. Fakat manganez ilavesi bu eğilimi azaltır. Bu kırılma eğilimine plaka şeklinde çökelen silisyumun nedeni olduğu düşünülmektedir (Kleiner, 2001).

AlMgSi alaşımlarında sıcaklığın değişmesi ile birlikte dayanım değerlerinin değiştiği de bilinmektedir. Sıcaklığın artmasıyla AlMgSi alaşımlarının dayanımının azaldığı görülmektedir.

Döküm sonrası soğuma, hamajenizasyon sınırı soğuma yada daha sonraki ısı ve mekanik süreçler sırasında alüminyum alaşımlarındaki en önemli safsızlık olarak bulunan demir, alüminyum ve silisyum ile birleşerek malzemenin kendine gelme, yeniden kristalleşme, yapı, şekillendirilebilirlik, yüzey temizliği ve elektrik direnci gibi özelliklerini etkileyen çeşitli fazlar oluşturur. Alüminyum alaşımlarında oluşan bu Al-Fe ve Al-Fe-Si metallerarası bileşiklerin

morfolojileri, kristal yapıları ve bileşimleri ürünün mekanik özelliklerini, korozyon direncini ve yüzey kalitesini belirleyeceğinden üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Ancak, bu bileşiklerin miktarlarının azlığı ve boyutlarının küçüklüğü, incelenmelerini zorlaştırmaktadır. Seyreltik Al-Fe-Si alaşımlarının yavaş soğuması sırasında oluşan kararlı metallar arası bileşikler  $\theta$ -Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub>, Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si ve  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi fazlarıdır. Bunlardan başka, alaşımın soğuma hızına ve bileşimine bağlı olarak bazı kararsız fazlar da oluşabilir. Çizelge 3.7’de Al-Fe-Si sistemi üzerinde yapılan çeşitli çalışmalarda gözlenmiş olan fazlar listelenmiştir. Çizelgede tanımlanamayan bazı fazlar bulunmasının nedeni ise bu faz kristallerinin küçük ve genellikle yarı kararlı olmaları dışında X ışınları analizi için yeterli miktarda malzeme elde edilmesinin de zorluğudur. Sürekli döküm metodu ile üretilen AA6063 alaşımları üzerinde yapılan bir çalışmada malzemenin kristalleşme özellikleri ile birlikte oluşan fazların yapısı da incelenmiştir. Sürekli döküm yöntemiyle üretilen bir biletin homojenliği katı-sıvı arayüzey şekli ile tanımlanır. Sözü edilen çalışmada aynı arayüzey şeklinin biletin tane büyüklüğü ve tane yapısının aynı olmasını sağladığı ancak, soğuma hızına bağlı olarak katı çözelti konsantrasyonu ve fazların değişiklik gösterdiği saptanmıştır. Çalışmada gözlenen fazlar ve bunlara ait kristal yapıları Çizelge 3.8’de görülmektedir. Buna göre döküm yapıda genellikle Al-Fe-Si fazları bulunmakta, katılaşma azaldıkça Mg<sub>2</sub>Si fazı ortaya çıkmaktadır (Askelad, 1994).

Çizelge 3.7 AlFeSi alaşımlarında gözlenen fazlar ve kristal yapıları.

Faz	Kristal Yapı	Kafes parametreleri A°
Al <sub>3</sub> Fe	C - merkezli	a = 15.49, b = 8.08,
Al <sub>13</sub> Fe <sub>4</sub>	Monoklinik (C 2/m)	c = 12.48, β = 107.75
Al <sub>m</sub> Fe	Hmk	a = 8.84, c = 21.60
Al <sub>9</sub> Fe <sub>2</sub>	Monoklinik	a = 8.90, b = 6.35,
		c = 6.32, β = 93.4
Al <sub>6</sub> Fe	C-merkezli ortorombik	a = 6.49, b = 7.44, c = 8.79
Al <sub>x</sub> Fe	Bilinmiyor	Bilinmiyor
α-AlFeSi	Hmk	a = 12.56
α-AlFeSi	Basit kübik	a = 12.52
α <sup>I</sup> -AlFeSi	Hegzagonal	a = 12.30, c = 26.20
α <sup>II</sup> -AlFeSi	C – merkezli	a = 12.70, b = 36.20
q <sub>1</sub> AlFeSi	Ortorombik	c = 12.70
α <sub>τ</sub> -AlFeSi	C – merkezli	a = 27.95, b = 30.62
	Ortorombik	a = 20.73, β = 97.74
q <sub>2</sub> AlFeSi	Monoklinik	a = 12.50, b = 12.30
		c = 19.70, α = 97.74
β-AlFeSi	Monoklinik	a = 6.12, b = 6.12
		c = 41.50, α = 91
β* -AlFeSi	Monoklinik	a = 8.90, b = 4.90
		c = 41.60, β = 92
Al <sub>3</sub> FeSi	C – merkezli	a = 17.80, b = 10,25,
γ-AlFeSi	Monoklinik	c = 8.90, β = 132
Al <sub>4</sub> FeSi <sub>2</sub>	Tetragonal	a = 6.14, c = 9,48
δ-AlFeSi		

Çizelge 3.8 Döküm yapısında gözlenen fazlar ve kristalleşme özellikleri (ASM 1997).

Katılma Süresi (sn)	Soğuma hızı (°C/sn)	Döküm yapıda gözlenen fazlar
13.4	6.12	α (kübik) <sup>1</sup> + az γ <sup>2</sup> + Mg <sub>2</sub> Si
11.7	8.28	α (kübik) <sup>1</sup> + az + Mg <sub>2</sub> Si
9.53	9.87	α (kübik) <sup>1</sup> + α (hegzagonal) <sup>3</sup>
8.25	13.83	α (kübik) <sup>1</sup> + çok γ <sup>2</sup>
7.42	15.75	α (kübik) <sup>1</sup> + az γ <sup>2</sup>
6.66	20.67	α (kübik) <sup>1</sup>

### 3.6 Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri

**F:** Fabrikasyon maksadı ile kullanılan ürünler için; ısıtılma işlem veya biçimlendirme neticesinde sertlik miktarının üzerinde, özel kontrol gerektirmeyen üretimlere uygulanır. Bu üretimlerin mekanik özellik limitleri yoktur.

**O:** Tavlamada tekrar kristalize edilmiş; Isıl işlem görmemiş yumuşak mamuller için kullanılır.

**H:** Germede sertleştirilmiş ve kısmi tavllanmış ürünlerin kodu olup; alaşımlı metalin kısmi olarak tavlama için yeterli oda sıcaklığında ısıtılma işlemine tabi tutulmuş yada tabi tutulmamış ve soğuk işlem ile sertleştirilmiş üretimlere uygulanır. Sağ tarafa ilk numaradan sonra eklenen ikinci numara gerilim sertleşmesinin seviyesini ve elde edilen minimum çekme dayanımını ifade eder.

**H1:** Germe sertleştirilmesi yapılmış; ısıtılma işlem tarafından yumuşatılmaya istenilen gücü elde etmek için germe sertleştirilmesine tabi olan malzemelere uygulanır (çeyrek sert).

**H2:** Germe sertleştirilmesi yapılmış ve sonra stabilize olmayan tavllanmış malzemeler için kod adıdır (yarı sert) (sert).

**H3:** Germe sertleştirilmesi yapılmış ve sonra stabilize edilmiş malzemelerin kod adı olup; germe sertleştirilmesine sahip olan ve sonra direnç kuvvetini daha aşağı çekmek ve şekil alabilme kabiliyetini arttırmak için, düşük sıcaklıkta stabilize edilen üretimler için uygulanır. Bu kondisyon oda sıcaklığında derece derece yaşlandırılan stabilize edilmeyen magnezyum ihtiva eden alaşımlar için uygulanır.

**W:** Çözeltiye alma ısıtılma işlemi yapılmış fakat stabilize edilmemiş ürünlerin kod adı olup; Çözeltiye alma ısıtılma işlemine tabi tutulmuş ve soğutulmuş daha sonra oda sıcaklığında yaşlandırılmış alaşımlar için uygulanabilen bir ısıtılma işlemidir.

**T:** Isıl işlemle sertleştirilmiş malzemenin kod adı olup, ilgili ısıtılma işlemler aşağıdaki şekilde uygulanır.

**T1:** Sıcak şekillendirmeden sonra soğutulmuş ve tabi yaşlandırılmış

**T2:** Tavllanmış (sadece döküm malzemeler için)

**T3:** Çözeltiye alma ısıtılma işlemi yapılmış ve sonra soğuk işlenmiş

**T4:** Çözeltiye alma ısıtılma işlemi yapılmış ve sabit şartlarda tabi olarak yaşlandırılmış

**T5:** Sıcak ekstrüzyondan sonra soğuma yapılmış ve sonra suni olarak yaşlandırılmış

**T6:** Çözeltiye alma ısıtma işlemi yapılmış ve suni yaşlandırılmış

**T7:** Çözeltiye alma ısıtma işlemi yapılmış ve sonra stabilize edilmiş

**T8:** Çözeltiye alma ısıtma işlemi yapılmış, soğuk işlenmiş ve sonra suni yaşlandırılmış

**T9:** Çözeltiye alma ısıtma işlemi yapılmış, suni yaşlandırılmış ve soğuk işlem yapılmış

**T10:** Suni yaşlandırılmış ve sonra soğuk işlenmiş

**T11:** Sıcak şekillendirmeden sonra, soğutulmuş, soğuk işlem yapılmış ve tabii yaşlandırılmış

**T12:** Sıcak biçimlendirmeden sonra, soğutulmuş, soğuk işlem yapılmış ve suni olarak yaşlandırılmış (Aluminium For Future, 2004).

### **3.7 Alüminyum ve Alaşımlarının Diğer Malzemelerle Teması**

Günümüzde özellikle iyi korozyon dayanımı özelliğinden dolayı alüminyum malzemeler inşaat ve otomotiv sektörlerinde demir-çelik, demir dışı metaller ve metal dışı olan malzemeler ile birlikte kullanılmaya başlamışlardır. Bunun sonucunda, aralarında bir takım etkileşimler meydana gelmektedir.

#### **3.7.1 Alüminyum ve Alaşımlarının Demir ve Çelik ile Teması**

Alüminyum demir veya çelik ile deniz suyu veya yoğunlaşmış nem gibi iyi elektrolitik özellikler taşıyan endüstriyel ortamları paylaştığında saldırgan davranır. Bu ortamlarda demir ve çelikten yapılan konstrüksiyonları korumak için galvanizleme, çinko veya kadmiyum kaplama, çinko oranı zengin boyalar ile boyama veya metal püskürtme uygulanabilir.

### **3.7.2 Alüminyum ve Alaşımlarının Demir Dışı Metallerle Teması**

Alüminyum demir dışı metallerden bakır ve bakır bileşikleri, krom ve kadmiyum kaplama ile aynı ortamda bulunduğu zaman korozyona uğramaktadır. Alüminyum ve demir dışı metaller arasında meydana gelen korozyonu önlemek için laklama, boyama veya conta ile birleştirme yöntemleri uygulanabilmektedir.

### **3.7.3 Alüminyum ve Alaşımlarının Metal Dışı Malzemeler ile Teması**

Alüminyum'un endüstriyel uygulamalarına aynı ortamı paylaştığı beton, sıva ve lifli yapıştırıcılar gibi metal dışı malzemelere karşı korozyon dayanımı yüksektir. Yinede bazen bu malzemelerin karışımı alüminyum ve alaşımları üzerinden korozif etki oluşturabilir. Bu malzemelerin alüminyum ile teması sonrasında malzeme üzerinde göze hoş görünmeyen lekeler oluşabilir. Bu duruma benzer bir etki de alüminyum malzemenin inşaat sektöründe kullanıldığı durumlarda beton veya tuğla ile teması sonrasında gözlenebilir. Bu durumun önüne malzemelerin birleşme yerlerine bazı boşluklar bırakarak veya ayraçlar konularak geçilebilir (Zhuang, 2000).

Plastik malzemeler genel olarak alüminyum malzemelerde korozif etki yaratmazlar.

Yapıştırıcılar alüminyum malzemeleri birleştirmede kullanılırlar. Alüminyum malzemeye zarar vermemek için birlikte kullanılan yapıştırıcıların içerisinde %1'den daha fazla klorid bulunmamalıdır. (örneğin NaCl)



## 4 ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI

Kullanım alanına göre özelliklerinden kaynaklanan bazı avantajları ve yeni alaşımların getirdiği bazı alanlarda artan oranda çeliğe ikame olanakları nedeniyle, sanayiinin tüm alanlarında alüminyum tüketimi diğer metallere göre daha fazla artmaktadır. Teknolojinin gelişme paralelinde alüminyum kendisine yeni kullanım alanları bulmakta, üretim metotları, ürün tasarımı ve kalite kontrol için Ar-Ge çalışmalarına ağırlık verilerek devam edilmektedir (Yılmaz, 2003).

### 4.1 Ulaştırma Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum ve Alaşımları

Otomotiv sektöründe eski zamanlardan beri yoğun bir rekabet ortamı bulunmaktadır. 1920'lerden itibaren çelik, otomotiv sanayinde konstrüksiyonun ana hammaddesi olarak kullanılmıştır.

Otomobil üreticileri için malzeme seçim kriterlerini etkileyen bir çok değişken bulunmaktadır. Yirmibirinci yüzyılda önemli hale gelen yakıt sarfiyatı, küresel ısınma ve sınırlı enerji kaynakları gibi sorunlar bu sektörde malzeme seçimini etkileyen başlıca faktörlerdir. Örneğin Amerika Birleşik Devletleri'nde otomotiv üretiminde egzoz emisimi, düşük yakıt sarfiyatı, kullanıcı güvenliği gibi kıstaslarda bir takım zorunluluklar vardır. Günümüzde bu kıstasları yerine getirmek adına, otomobil üreticileri makinanın verimliliğini arttırmak için hibrit sistemler gibi yeni güç kaynakları ve aracın ağırlığın hafifletecek yeni malzemeler geliştirmeye çalışmaktadırlar (Sears, 1997).

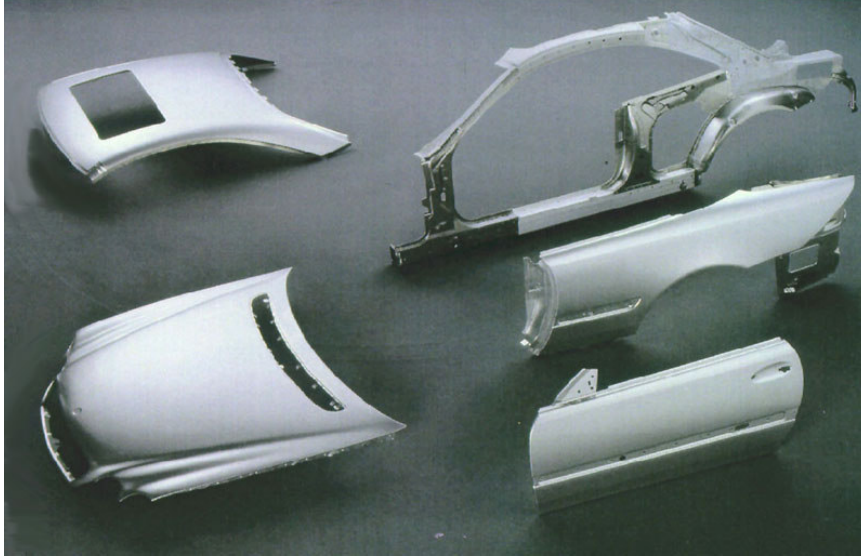
Aracın ağırlığında sağlanabilecek tasarruf özellikle yakıt sarfiyatı açısından oldukça önemlidir. Araçların güvenliğini, performansını, konforunu müşteri istekleri doğrultusunda arttırmaya yönelik sistemler, aracın toplam ağırlığına oldukça fazla yük eklemiştir. Örneğin anti-blok sistemler, hava yastıkları, karoselin güvenlik katsayısını attırmak araca fazladan ağırlıklar eklenmesine neden olmaktadır. Henüz toplam ağırlığa oranladığımızda çok büyük değişiklikler kaydedilmemiş olsada günümüzde mühendisler bu konuda yeni modeller geliştirmek için çalışmalarına devam etmektedirler. Eğer bu başarılmış olursa hafif malzemelerin kullanımında hızlı bir artış yaşanacaktır. Örneğin aracın toplam ağırlığından %10'luk bir miktar azaltılabilirse bu %5,5'luk bir yakıt tasarrufuna tekabül etmektedir. Bu da bize ağırlığın yakıt verimliliği üzerinde ne kadar önemli olduğunu kanıtlamaktadır. Örneğin, ağırlık tasarrufu üreticilerin aynı araç performansını daha küçük bir motor hacmi ile elde etmelerini, daha küçük motor hacmi le daha düşük transmisyon sağlanmasını ve bu sayede de daha küçük yakıt deposuna ihtiyaç

duyulmasını sağlıyor. Bunun sonucu olarak ağırlıktaki %10'luk tasarruf bize yaklaşık olarak %8-10'luk yakıt tasarrufu sağlıyor.

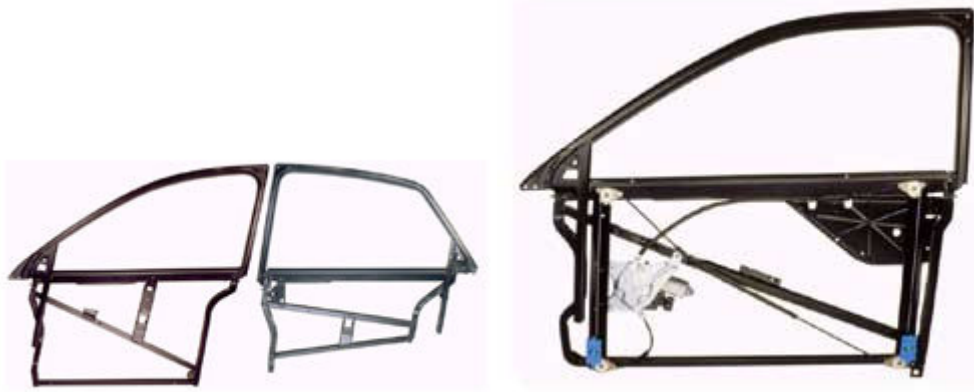
Sonuç olarak, otomobil üretiminde kullanılan malzemeler çevre üzerinde önemli bir etkiye neden olmaktadır. Hafif malzemelerin kullanılması bize hem ağırlıktan tasarruf hem de yakıt ekonomisi sağlar. Otomotiv sektöründe ağırlıktan tasarruf için oluşan kanı dünyada çelik tüketiminin azalmasına, plastik ve alüminyum gibi alternatif hafif malzemelerin kullanımının artmasına neden olacaktır (Aluminium in the Automotive Industry, 2005).

Arabalarda hafif metallerin kullanılmaya başlanması ile alüminyum ve otomotiv endüstrisi arasında bir işbirliği başlamıştır. Bunun sonucu olarak birçok avrupa araba üreticileri ürettikleri araçların çeşitli parçalarında alüminyum kullanmaya başlamışlardır. Bu parçalara örnek olarak döküm yöntemiyle elde edilen silindir kafaları, vites kutusu, jantlar ve ekrüzyon yöntemiyle elde edilen ve yassı mamüllerden radyatör, tampon, koltuk kızıkları, yan koruma bariyeri verilebilir. Bu örneklerle araç içerisinde kullanılan toplam alüminyum parça ağırlığı 65 kg kadar yükselmiştir, buda toplam araç ağırlığının yaklaşık %6'sına tekabül etmektedir.

Günümüzde otomotiv üreticileri artan iç rekabet ve çevreyi koruma talebinden dolayı yeni bir zorlayıcı etken ile karşı karşıya kalmışlardır. Bunun sonucu olarak, güvenlik ve konfordan vazgeçmeden, verimli üretim yaparak ve üretim maliyetlerini düşürerek daha az çevreyi kirleten ve daha kolay geri dönüşüm sağlanabilen araçlar üretmekle karşı karşıya kalmıştır. Avrupada bulunan otomotiv üreticileri ürettikleri araçlarda yaklaşık 65 kg kadar alüminyum kullanmaktadırlar. Bu oran her yıl yaklaşık % 4 oranında bir artış göstermektedir. Bu artışa örnek olarak İskandinavya otomotiv üreticisi olan Volvo'nun en geniş modelinde 140kg alüminyum kullanılması ve Alman otomotiv üreticisi Audi'nin 1994 yılında A8 modelini "herşey alüminyum" sloganıyla piyasaya sürmesi gösterilebilir (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 ).



Şekil 4.1 Audi A8 gövdede kullanılan alüminyum parçalar

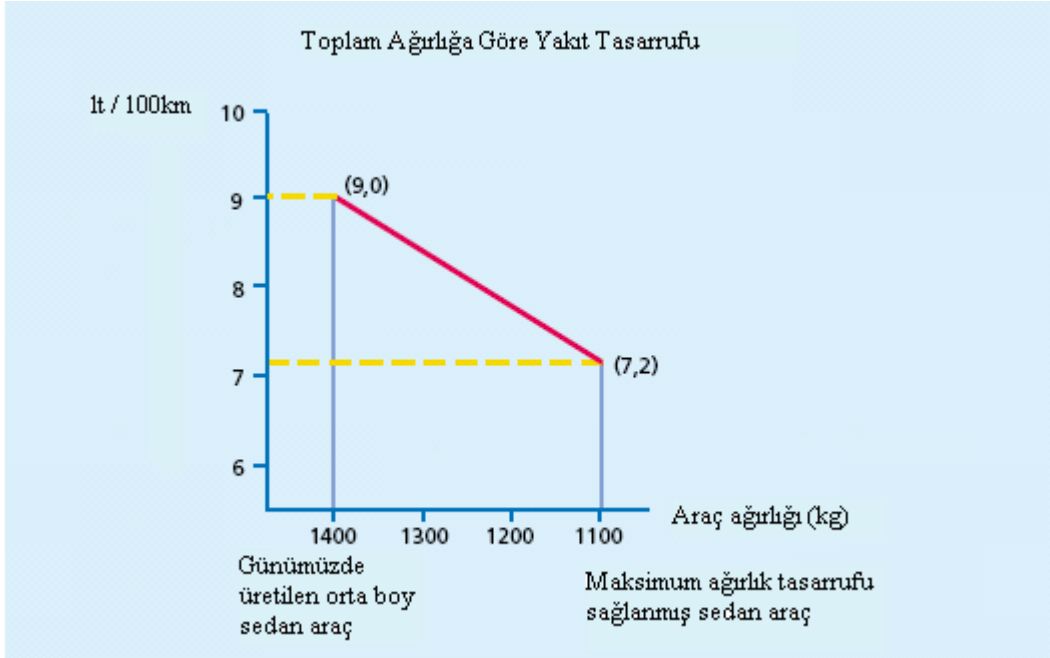


Şekil 4.2 6016 alaşımından T4 temperinde üretilen Audi A8 kapısı

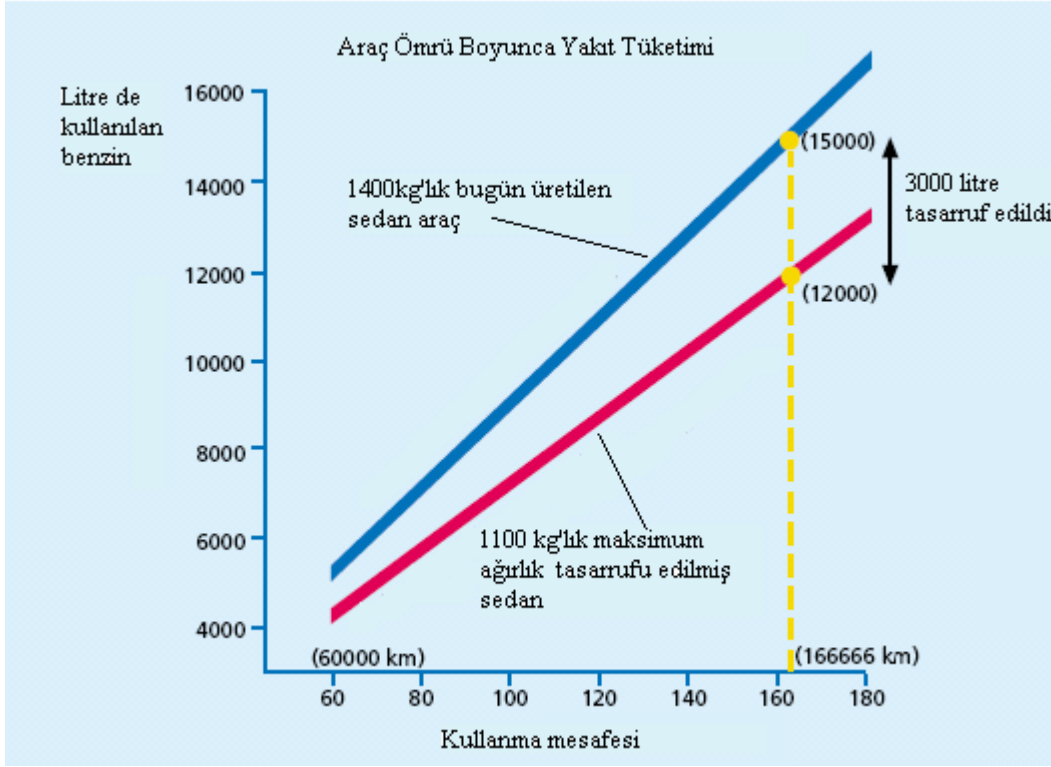
Ağırlık bu amaçlara ulaşmada çok önemli bir anahtar faktördür. Toplam ağırlıktan azaltılacak her 100kg, yakıt sarfiyatında 0,6 litre/100km bir azalmaya, bununla doğru orantılı olarak egzoz gaz emisyonunda azalmaya ve çalışma maliyetlerinde düşmeye neden olacaktır (Aluminium fort he Future, 2004).

Alüminyum güvenlik, konfordan ve güvenilirlikten fedakarlık etmeden ağırlığı azaltmada anahtar malzemedir. Alüminyum, düşük özgül ağırlığından dolayı, (bakır ve çeliğe göre özgül

ağırlığı yaklaşık 1/3 daha düşüktür) yüksek dayanım ve araç üretiminde geniş kullanım alanı ile, ortalama ağırlıktaki bir araçtan (1400kg) yaklaşık 300kg'lık bir ağırlık azaltılmasına olanak sağlar. Bu da aracın toplam ağırlığının yaklaşık %20'sine tekabül etmektedir. Şekil 4.3'te ve Şekil 4.4'te görüleceği üzere aracın kullanım ömrü göze alındığında 3000 litrelik bir yakıt tasarrufu sağlanmaktadır. Bu sayede de aracın gaz emisyonunda %20'lik bir azalma sağlanmaktadır.



Şekil 4.3 Toplam ağırlığa göre yakıt tasarrufu



Şekil 4.4 Araç ömrü boyunca yakıt tüketimi

Örneğin bazı parçalarda çelik yerine aynı kalınlıkta alüminyum kullanılabilir. Buda parça ağırlığını yaklaşık %65 azaltmaktadır. Kullanılan parçaların geneline bakıldığında çelik yerine alüminyum kullanabilmek için parçanın kalınlığının çeliğin sahip olduğu rijitliği elde etmek için artırılması gerekmektedir. Konstrüksiyonda kullanılan alüminyum-çelik çevrim katsayısı genel olarak 1,5'tur, yani örneğin 0,8mm kalınlıktaki çelik parçayı alüminyumdan imal edebilmek için parça kalınlığı 1,2mm kalınlığa artırılmaktadır. Bu durumda bile toplam ağırlık azaltılması % 50 olmaktadır.

Araçlarda kullanılan alüminyum parçaların yaklaşık %80'i döküm yöntemiyle elde edilen parçalardır, örneğin vites kutusu, silindir kafaları, pistonlar ve motor blokları. Gelecekte ekstrüzyon ve haddeleme ile üretilen alüminyum parçaların aracın gövde konstrüksiyonunda kullanılmasında artış olacağı beklenmektedir (Aluminium in the Automotive Industry, 2005).

Alüminyum yalnız hafif değil aynı zamanda da dayanıklıdır. Bu özelliğinden dolayı birçok taşıtın gövde yapısında örneğin, uçak, hızlı tren, kamyon vs. Kullanılmaktadır. Araçlarda konstrüksiyonun güvenliği, çarpma esnasında yapının kinetik enerjiyi absorbe etme kapasitesine ve sağlamlığına bağlıdır.

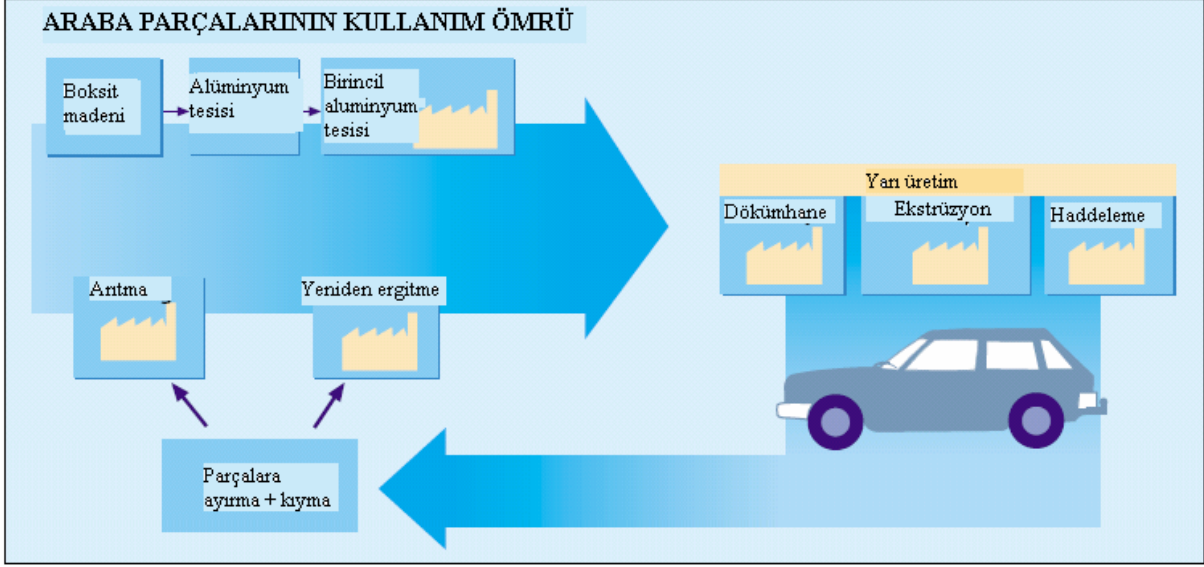
Bir yapının sağlamlığı sadece malzemenin özelliklerine bağlı değildir, aynı zamanda yapının hangi değişik komponentlerle tasarlandığına ve birleştirildiğine de bağlıdır. Gövde parçalarına baktığımızda 1,2mm kalınlıkta bir alüminyum parça, 0,8mm kalınlığındaki elik parçayla aynı dayanımı göstermekle beraber onun yarı hafifliğindedir. Tasarım olarak yaklaştığımızda ise, alüminyum uygun alanlarda çelikten çok daha kolay ekstrüzyon ile şekillendirilebilmektedir. Bu kolaylık tasarımıda, birleşme yeri sayısını azaltmakta, böylece de toplamda rijitlik artmaktadır. Sonuç olarak %50 ağırlık azaltılmasıyla beraber toplamda yapının güçlendirilmesi de sağlanır.

Yapının kinetik enerjiyi absorbe etme kapasitesi kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine, tasarıma ve birleştirme yöntemine bağlıdır. Bir çok çarpma testi sonucunda, yapıda alüminyum kullanılması ile yapının iyileştirilebileceği gözlenmiştir. Yolcuların güvenliği de aracın kritik durumlarda sergilediği eğilime bağlıdır. Araçta ortalama % 50 daha hafif gövde kullanmak, 100km/saat hızla gidilirken fren mesafesini yaklaşık bir araç boyu kadar kısaltır. Aynı zmanada ağırlığın hafifletilmesi yerçekimi kuvvetinin azalmasıyla aracın yol tutuşunda %15 ila %20 arasında bir iyileşmeye ve ivmelenmede en az % 10'luk bir artışa neden olur.

Otomotivde kullanılan alüminyumun geri düşünümü başlı başına bir başarıdır. Kullanım ömrünü tamamlayan araçların yapısında bulunan alüminyum parçalar %95 oranında hırbir kalite kaybı olmadan geri dönüştürülebilirler. Alüminyumun geri dönüştürülmesi ile primer alüminyum üretiminde ihtiyaç duyulan enerjiden %95 tasarruf edilmiş olur. Alüminyum manyetik olmadığından hurda alüminyum diğer metallerden kolayca ayrılabilir. Araçlarda kullanılan parçalarda genelde %80 civarında yüksek kaliteli alüminyum döküm parçalar kullanılır. Geri kalanı ise ekstrüzyon ve haddaleme ile üretilen parçalardır. şu anada araçlarda kullanılan tüm alüminyum malzemeler döküm alaşımları olarak geri dönüştürülmektedir. Dövme parçaların araçlarda kullanılmasında artış olacağını düşünürsek, geri dönüştürülen bu malzemeler dövme parçaların üretiminde kullanılacaktır. Bu parçaların bir kısmı kolay çıkarılır parçalar olduğundan aracın üzerinden alınırken bir kısımda doğranmiş hurdadan yeni teknoloji lazer spektroskopları ile ayıklanmaktadır.

Avrupa otomotiv endüstrisi alüminyumun boksit madeninden başlayarak çıkarılışı ve işlenişinin ekolojik analizlerini kolaylaştırmak için bilgi bankası şeklinde bir ekolojik profil oluşmuştur. Bu toplanan bilgilere göre alüminyum üretimi ve işlenmesinde kullanılan enerjide son kırk yılda bire ten fazla azalma olmuştur ve bu azalmanın devam etmesi beklenmektedir. Bu bilgiler otomotiv

üreticilerinin, araçların ve parçalarının kullanım ömrünün araştırılmasına olanak sağlamaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Araba parçalarının kullanım ömrü

Audi A 8 modelininin tanıtımında yaptığı sunumda, alüminyum kullanımı ile aracın ağırlığında geleneksel ağırlıkla karşılaştırıldığında %40'lık bir iyileştirme sağladıklarını ve gövdenin %70'inde kullanılan alüminyum malzemenin geri dönüşümden elde edilmesi ile ilk kilometrelerde bile enerji avantajı sağlandığını belirtmiştir.

Ekonomik açıdan bakıldığında bir çok otomotiv parçası şimdiden en uygun maliyete sahip olduklarından alüminyumdan üretilmektedirler, örneğin silindir kafaları, radyatörler gibi. Diğer bir çok parça içinde aracın kullanım ömrü göze alındığında en ekonomik malzeme alüminyumdur. Alüminyumdan üretilen ekstrüzyon parçalar sayesinde zor şekilli bölgeler için döküm yapmaktan kurtulmuş oluruz. Alüminyum panellerin tamiri de diğer geleneksel malzemelerden yapılan parçaların tamirine kıyasla hem daha kolay hem de daha az maliyetlidir.

Bugün avrupada yılda yaklaşık 5,6 milyon ton alüminyum üretilmektedir. Bu toplam miktarın 3,9 milyon tonunu primer alüminyum, 1,6 milyon tonunu da geri dönüştürülen alüminyum oluşturmaktadır. Otomotiv sektörü ise bugün bu miktarın 1,2 milyon tonunu kullanmaktadır. Önümüzdeki on yılda otomotiv endüstrisinin talebinin iki katına çıkması, toplam tüketimin yüzde yirmi artmasına neden olacaktır. Gelecekte sektörde alüminyum kullanımının artmasıyla artacak

alüminyum kaynağının karşılanması ise bekleneneği gibi zor olmayacaktır. Çünkü dünyada önümüzdeki 400 yıl boyunca yetecek miktarda boksit madeni rezervi bulunmaktadır. Ham alüminyumun üretim miktarı otomotiv sektöründen gelecek talep doğrultusunda artış gösterecektir. Ayrıca bu artışla doğru orantılı olarak alüminyumun geri dönüşüm miktarı da artacaktır.

Sonuç olarak otomotiv sektöründe alüminyumun kullanımının artması, enerji tasarrufu sağlanmasına ve çevre kirliliğinin önüne geçilmesine olanak sağlayacaktır. Verimli ve düşük maliyetli üretim yapabilmek için önümüzdeki yıllarda otomotiv sektörü ve alüminyum üreticileri arasındaki işbirliğinde artış gözlenecektir. Avrupa alüminyum endüstrisi yirminci yüzyılda nasıl sivil havacılık sektörünün gelişmesinde havacılık firmaları ile işbirliği yaptıysa yirmibirinci yüzyılda da bu gelişmeler ışığında otomotiv sektörüyle olan bağlarını güçlendirecektir (Aluminium in the Automotive Industry, 2005).

Deniz araçlarında alüminyum, kamaralardan başlamak üzere gezinti teknelerine, kuru yük gemilerinin gövde kompartımanlarını oluşturan yapısal parçalardan tüm üst bina inşasına kadar ve pervanelerin üretiminde çok yoğun olarak kullanılmaktadır. Kriyojenik gazların(düşük sıcaklık) deniz yoluyla taşınmasında ağırlıktan kazanılan miktarın daha fazla gaz taşınmasında kullanılabilmesi için kriyojenik gaz tankları da alüminyumdan imal edilmektedir.

Hızlı tren konseptini hazırlayan altyapıda malzeme bilimindeki yeni alaşımların katkısı büyük olmuştur. Japonya da imal edilen ETR500 isimli hızlı tren şasesi ve vagon gövdeleri yüksek mukavemetli Al-Zn-Mg temelli alaşımlardan üretilmektedir.

## **4.2 Ambalaj Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum ve Alaşımları**

Son yıllarda alüminyumun en hızlı gelişen kullanım alanlarından birisi de ambalaj sektörüdür. Daha fazla miktardaki diğer ikame ambalaj malzemeleri ile sağlanan korumayı, alüminyum birkaç mikron kalınlıkla çok daha etkin bir şekilde sağlayabilmektedir. Alüminyumun homojen yapısı, ince folyo(alüminyum kağıt) şeklinde üretilebilmesi, hava geçirmezliği ve kolay şekillenebilmesi onu ideal bir ambalaj malzemesi yapar.



Alüminyum ambalajın su, gaz, buhar, ışık ve mikroorganizma geçişini engellemesi, sıcak ve soğuğa dayanıklılığı, hava değişimlerinden ve çevreden etkilenmemesi özellikle bu niteliklerin arandığı gıda ve ilaç sektöründe ihtiyacı karşıladığı gibi, mor ötesi ve kızılötesi ışınlara karşı da koruyucu olması yeni geliştirilen ürünlere de hitap edebilmesine olanak sağlamaktadır. Folyo olarak vakumlu ambalajlarda, metalize film (alüminyum kaplı plastik) olarak da ısı ile kapanan ambalajlarda (yoğurt, ilaçlar vb.) en fazla tercih edilen malzemedir. Alüminyum folyo paketlemenin oluşturduğu katı metal katmanı, tam bir ürün koruması sağlamakta, bu arada yüksek bir kuvvet-ağırlık oranı ve uzun ömür temin etmektedir (Güven, 2003).

Alüminyum folyo, cilalanabilir, boyanabilir ve üzerine baskı yapılabilir. Bazı durumlarda alüminyum ambalaj kullanımı olmadan gıdaların aroma ve hijyenik özellikleri garanti edilememektedir. Ayrıca son 10 yılda alüminyum paketleme uygulamalarında kullanılan malzemenin ortalama kalınlığı yaklaşık %30 azalmıştır.

Gıda endüstrisinde nispeten düşük asiditeye sahip sıvıların proses edildiği tank ve iletildiği borular korozyon dayançlı alüminyum alaşımlarından üretilmektedir. Yine aynı sıvıların ve kimyasalların taşımacılığı da benzer alaşımlardan üretilen tanklarla yapılmaktadır. Yakıt tankları, rafinerilerde tankların ve boruların ısı yalıtım elemanları çok yoğun olarak alüminyum alaşımlarından imal edilmektedir.

Tahıl siloları ve tahıl nakliyatında kullanılan kamyon kasaları nakliyattaki verimliliğin arttırılabilmesi için yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarından üretilmektedir. Sözü edilen bu uygulama özellikle ABD nin orta bölgelerinde Avustralya ve Almanya da çok yaygındır.

### **4.3 Gıda Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum ve Alaşımları**

Alüminyumun en yaygın kullanıldığı alanlardan birisi de içecek kutularıdır. Dünyada kullanılan metal kutuların % 80'i alüminyumdur. Bunun nedenleri hafif, açılması kolay, darbeye dayanıklı, sağlam, geri kazanılabilir oluşu ve çabuk soğutma özellikleridir. Toplumun çevre bilincinin artması ve alüminyum üreticilerinin desteğiyle alüminyum içecek kutularını toplama ve geri kazanım programları hızla gelişmiştir. Bu durum özellikle alüminyumun yüksek Pazar payının böyle projeleri gerekli kılan yatırımları teşvik ettiği ülkeler için daha geçerlidir (Yılmaz, 2003).

#### **4.4 Elektrik/Elektronik Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum ve Alaşımları**

Alüminyum son derece iletken bir metaldir. Alüminyum kullanımının Avrupa'da %10'u, ABD'de %9'u, Japonya'da %7'si elektrik ve elektronik sektörüne aittir. Çelik özlü alüminyum iletkenler, yüksek voltajlı elektrik nakil hatlarında tercih edilen tek malzeme olmuştur. Alüminyum, yeraltı kablolarında, elektrik borularında ve motor bobin sarımında da yaygın şekilde kullanılmaktadır. Şaseler, yongalar, transistor soğutucuları, veri kayıt diskleri ve cihaz kasaları alüminyumun elektronikteki ana kullanım alanlarıdır (Güven, 2003).

#### **4.5 İnşaat Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum ve Alaşımları**

Hafifliği, yüksek korozyon direnci, uzun ömürlülüğü, düşük bakım maliyetleri, geri kazanma imkanı ve metalin çok yönlülüğü ve sonsuz değişik şekilde profil elde edebilme olanağı nedenleri ile binaların çatı ve cephe kaplamalarında, kapı ve pencerelerinde, merdivenlerde, çatı ve inşaat iskelelerinde, sera yapımında da yoğun şekilde kullanılan alüminyum, sağlamlığı yanında eloksal kaplama sayesinde dekoratif görünümü sayesinde inşaat sektörüne de birçok seçenekler sunmaktadır. Son yıllarda yapılardaki alüminyum, dünya çapında gelişme göstermiş ve çok büyük bir pazar payı elde etmiştir.

Alüminyumun çeliğe alternatif olarak köprülerin önemli bazı yerlerinde bir yapı elemanı olarak kullanılması, köprülerin kullanım kapasitelerini arttırabilmektedir. Hafifliği ve diğer yapı malzemelerine göre avantajlı bir ağırlık/mukavemet oranına sahip olmasının yanı sıra alüminyum, oldukça yüksek korozyon mukavemetine sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı köprülerin bakım masraflarını azaltarak kullanım ömrünü uzatır. Alüminyum bir köprünün faydalı yük taşıma (araçlar) kapasitesini arttırırken, ölü yük ağırlığını (köprünün kendi ağırlığı) azaltmaktadır (Yılmaz, 2003).

#### **4.6 Diğer Kullanım Alanları**

Alüminyum ve alaşımları, diğer sektörlerle kıyaslandığında daha küçük oranlarda olmak üzere, buzdolabı, dondurucu, havalandırma, spor ekipmanları ve mutfak aletleri yapımında da kullanılmaktadır.

#### 4.7 Alüminyum ve Alaşımlarının Yeni Kullanım Alanları

Alüminyum kullanımı her gün biraz daha artarken sürekli olarak yeni kullanım sahaları da ortaya çıkmaktadır. Yeni bir kullanım sahası oluşmadan önce yeni üretim teknolojileri ve uygulama fikirlerinin oluşması daha sonra da bunların geliştirilip ilk ürünlerin ortaya çıkması gerekmektedir. Ardından zaman içinde yeni bir pazar ya da yeni kullanım sahası oluşmaktadır. Bu nedenle potansiyel yeni kullanım sahalarının belirlenebilmesi için yeni üretim teknolojileri ve fikirleri incelenmelidir.

Yeni kullanım sahası olarak alüminyum piller, enerjinin gelecekte daha da değerli olacağı düşünülürse, geniş bir uygulama sahası bulacaktır. Alüminyum-sülfür pilleri bu uygulamaların ilk örneklerini oluşturmaktadır. Bu piller ile 250Wh/kg verimliliğe çıkmak mümkün olmaktadır. Diğer bir örnek olarak da alüminyum hava-yakıt pilleri verilebilir. Günümüzde kurşun ya da Ni-Cd aküler ile çalışan elektrikli taşıtların menzilin alüminyum piller ile 100 km'den 300 km'ye çıkarılabileceği hesaplanmaktadır. Alüminyum akümülatörler normal kurşunlu akümülatörlere göre yedi kat daha enerji yoğun sistemlerdir. Ancak hala maliyet çok yüksek olduğundan kullanımının yaygınlaşabilmesi için maliyet düşürmek üzere araştırmalar devam etmektedir. Alüminyum piller için diğer önemli bir saha da cep telefonu ve taşınabilir bilgisayarlardır.

Geçen 40 yıl içinde alüminyum köpük üretimi ile ilgili bir çok çalışma yapılmış olup bir çok metot denenmiştir. Ancak günümüze kadar yoğunluk, homojenlik, tane boyutu gibi konularda kontrolsüzlük nedeniyle alüminyum köpükler uygulama sahasına pek girememişlerdi. Bugün bir çok firma alüminyum köpük kullanımıyla ilgili çalışma yapmakta ve bir kısmı da uygulamaya geçmiş durumdadır. Ancak halen çözülmesi gereken önemli bir unsur olan maliyet, alüminyum köpüğün yaygın kullanımını engellemektedir. Alüminyum köpük üretim maliyetinin endüstriyel ölçekteki seri-üretim metotlarıyla düşeceği beklenmektedir.

Alüminyum köpük ürünlerinin en önemli uygulama alanları taşımacılık sektöründe araçların konstrüksiyonunda, yapısal parçalar ve enerji soğurumlu parçalardır. Alüminyum köpük kullanımı yüksek mukavemeti, korozyon direnci, ısıya dayanıklılığı, enerji, ses, titreşim soğurması, yanıcı olmaması gibi bir çok üstün özelliği sayesinde hızlı bir artış trendi içine girecektir. Otomotiv sektörü alüminyum köpük kullanımında potansiyeli yüksek saha olarak

görülmektedir. Özellikle son yıllarda araçların daha düşük yakıt tüketimi için daha hafif olması ve çevre kirliliğini azaltmak için kullanılan malzemelerin geri-dönüşebilir olması önem kazanmasıyla alüminyum köpük alternatif bir malzeme olarak ön plana çıkmaktadır. Otomotivde alüminyum köpük kullanımının üç önemli avantajı vardır. Bunlar enerji soğurması, hafif konstrüksiyon ve yalıtkan bir malzeme olmasıdır. Ayrıca araçların motor kısmında hem ısıya dayanıklı hem de ses ve ısı yalıtkanlığı olan alüminyum köpük potansiyel bir malzemedir.

Diğer önemli yeni bir kullanım sahası da rijitlik/ağırlık oranının önemli olduğu havacılık sektörüdür. Alüminyum köpükten üretilmiş plaka ve sandviç paneller özellikle çok pahalı olan bal-peteği yapıli kompozit malzemelere alternatif bir malzemedir. Denizcilikte alüminyum köpük kullanımı yine hafiflik ve korozyon direnci nedeniyle oldukça avantajlı bir malzemedir. Özellikle seri üretim yerine özel üretimin önemli olduğu gemicilik sektöründe alüminyum köpük üretim metodu sayesinde iyi bir alternatiftir. Alüminyumun en çok kullanıldığı sektör olan inşaat sahasında da alüminyum köpük tercih edilecek bir malzemedir. Binalarda giydirme cephelerde, ara bölmelerde, çatı kaplamalarında iyi bir yalıtım malzemesi olması sayesinde kullanılmaktadır. Ayrıca ses izolasyonu ve soğurması sayesinde viyadüklerde, otobanlarda ses emici bariyer olarak kullanılmasına başlanmıştır. Hareketli köprülerin ve prefabrik yapıların yapılmasında alüminyum köpük oldukça avantajlı bir malzemedir. Alüminyum köpük endüstriyel uygulamalarda oldukça yüksek bir potansiyele sahiptir. Elektronik cihazlarda, makinelerde çok karmaşık şekilli parçaların üretilebilmesi sayesinde yaygın kullanımı olacak bir malzemedir.

Son zamanlarda katı hal ile sıvı hal arasında yer alan yarı-katı halde şekil verme işlemi yeni bir teknoloji olup büyük avantajlar içermektedir. Yüksek basınçlı döküm sıkıştırımalı döküm ile karşılaştırıldığında tikso-form işlemi daha ince et kalınlığı daha temiz yüzey, daha hassas boyut toleransları, daha yüksek mekanik ve fiziksel özellikler, daha düşük boşluk, daha homojen bir içyapı gibi avantajlar sağlamaktadır. Bu teknolojinin en önemli avantajlarının başında diğer üretim teknikleri ile karşılaştırıldığında daha hızlı, esnek ve düşük maliyetli olmasıdır.

Alüminyum esaslı kompozitler son 30 yıldır üzerinde ağırlıklı olarak çalışılan yeni malzeme grubunun başında gelmektedir. Fiber, iğne yapıli ve parçacık takviyeli bir çok alüminyum esaslı kompozit bulunmaktadır. Alüminyum esaslı kompozitlerin üretilmeleri için bir çok metot geliştirilmiştir. Toz metalurjisi, kompozit döküm metotları ve infiltrasyon metotları gelmektedir.

Günümüze kadar alüminyum alaşımları değişik kompozisyonlarda ve farklı ısıl işlemler ile farklı özelliklerde bir çok kullanım sahası bulmuştur. Ancak gelişen teknolojinin ihtiyacı daha mukavemetli, sert, düşük yoğunluklu, üstün özelliklere sahip malzemeler geliştirilmekte ve bunların başında da Alüminyum esaslı kompozitler gelmektedir. Özellikle otomotiv sektöründe bir çok uygulama sahası bulan bu kompozitlerin kullanım sahaları her gün biraz daha genişlemektedir. Bu malzemelerin en büyük avantajları arasında yüksek aşınma dayanımı, sertlik ve mukavemet gelmektedir. Hala maliyet açısından pahalı olan alüminyum esaslı kompozitler yeni üretim teknolojilerinin ve seri üretimlerin yapılmasıyla rekabetçi maliyetlerle üretilmeye başlanmıştır.

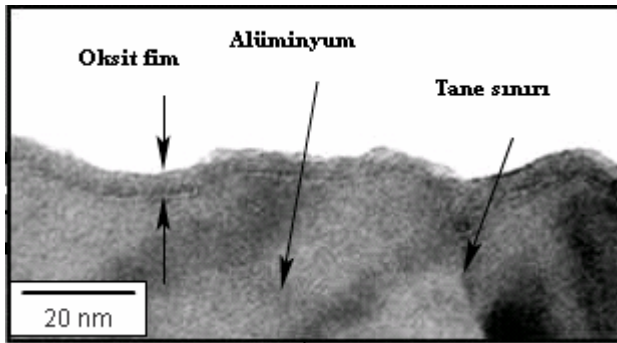
Alüminyum savunma sanayii açısından da önemi ve kullanım alanları hızla artmaktadır. Çeşitli roket ve füze sistemlerinde alüminyum alaşımları değişik miktarlarda kullanılmaktadır. Roket ya da füzenin türlerine göre (topçu roketleri, havadan-havaya, havadan-karaya, yerden havaya, anti-tank vb.) ve alt komple/parçalarına göre (harp başlığı, motor, gövde) alüminyum ve ürünleri tercih edilebilmektedir. Roket ya da füze türünden bağımsız olarak, bir roket/füzede kullanılabilecek alüminyum alaşımları ve ısıl işlem türlerini göstermektedir. Aerodinamik yüklere maruz kalan dış yapısal parçalarda genellikle yüksek mukavemet sağlayan ve ısıl işlem yapılabilen 2XXX, 6XXX, 7XXX serisi alaşımlar kullanılmaktadır. Bunların hadde ürünleri çoğunlukla plakalar şeklinde tedarik edilmekle ancak özellikle gövde üretimlerinde ekstrüzyon ya da döküm teknolojileri ile şekillendirilmiş parça ya da taslaklar da kullanılmaktadır.

1979 yılından itibaren alaşım araştırma ve geliştirme çalışmalarında alüminyum-lityum alaşımları üzerine olan ilgi artmıştır. Alüminyuma eklenen her %1 lityum yoğunluğu %3 kadar düşürürken elastik modülü ise %5 artırmaktadır. Alüminyum içinde %4.2 çözünürlüğe sahip lityum, genellikle %1-3 arasında kullanılmaktadır. Bu alaşımların yorulmaya karşı dayanıcı, çok düşük sıcaklıklardaki (kriyogenik) tokluğu, düşük yoğunluğu ve yüksek mukavemeti özellikle yakıt tankları için cazip olmaktadır. AA2094, AA2095, AA2195, AA2197, AA2219 roketlerde kullanılan alaşımlardan en önemlileridir (Alüminyum Raporu, 2004).

## 5 ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KOROZYON DAVRANIŞI

Alüminyum, yüksek elektronegatif potansiyelli bir metaldir. Normal denge gerilimi  $-1,67\text{ V}$ 'tur. Buna rağmen, alüminyumun dış hava şartlarına, bir çok zayıf asit çözeltilerine, çoğu nötr çözeltilere ve suya karşı oldukça yüksek bir dayanımı vardır. Örneğin yarı soy bir metal olan bakırın korozyon hızı klorürlü çözeltilerde alüminyumdan daha yüksektir. Alüminyum asit ortamlara bırakıldığında hidrojen reaksiyonu ile korozyona uğrar. Korozyon hızı küçülen pH değeri ile artar. Asetik asit, formik asit ve yağ asitleri alüminyumun ilginç bir özelliğidir. Bunun nedeni ise  $\text{Al}^{+3}$  iyonlarının hidroksil iyonları ile reaksiyona girerek suda çözünür  $\text{AlO}_2^-$  iyonlarına dönüşmesidir ( Temel, 2001).

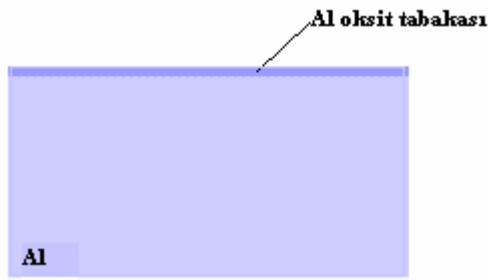
Alüminyumun korozyon davranışı yüzey özelliklerine ve yüzeye yakın bölgenin özelliklerine bağlıdır. Alüminyumun korozyon direncinin yüksek olması yüzey davranışının pasif olabilmesine bağlıdır. Bu sebepten dolayı alüminyum atmosferde bulunan oksijen ile yüzeyinde Şekil 5.1'de görüldüğü gibi ince ve katı bir alüminyum oksit tabakası oluşturarak metali diğer korozyonlara karşı korur. Çok yumuşak yüzeylerde en iyi durum alüminyumun yüzeyinin sürekli bir oksit tabakasıyla korunmasıdır. Yüzeyde oluşan oksit tabakasının kimyasal formülü (5.1)'de verilmiştir;



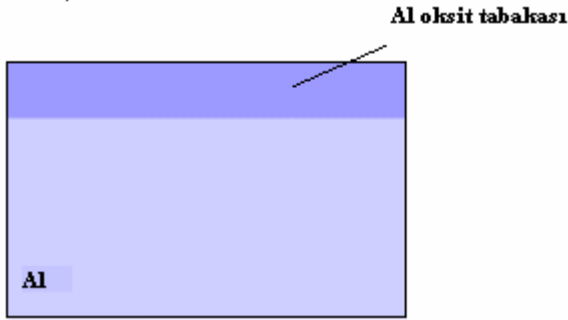
Şekil 5.1 %0,2 Mn içeren alüminyum alaşımının üzerinde bulunan oksit tabakası (Burstein GT, Aluminium and Aluminium Alloys (bölüm 4)

Bazı özel durumlara bağlı olarak, oksit filmi çevreden etkilenebilir ve koruyucu özelliği değişkenlik gösterir. Yağmurlu dış ortamda kalan veya kaynayan suda bırakılan alüminyumun oksit tabakası nemlenir ve suda kaynama ortamına mağruz kalan alüminyum üzerinde daha sert ve kalın bir oksit tabakası oluşur.

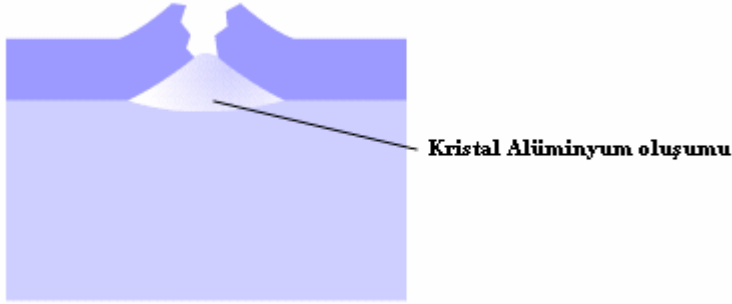
Yüksek sıcaklığa mağruz kalan alüminyumun oksit tabakasında bir takım değişiklikler meydana gelir. Çelik 5.2.a , Çelik 5.2.b ve Çelik 5.2.c’de bu değişiklikler görölmektedir.



Çelik 5.2.a 25°C de alüminyum oksit tabakası

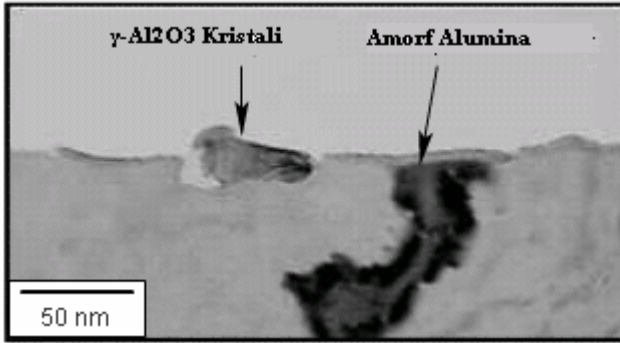


Çelik 5.2.b 400°C de alüminyum oksit tabakası



Şekil 5.2.c 500°C de alüminyum oksit tabakası

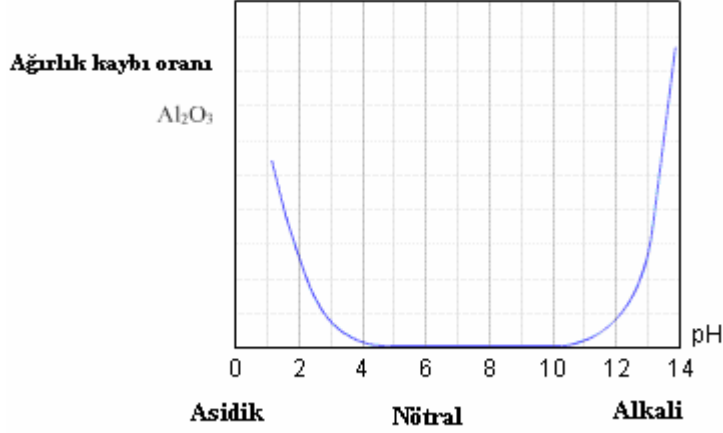
Alüminyum 450°C'nin üzerindeki sıcaklıklara ısıtıldığında, yüzeyde bulunan amorf oksit tabakasının kalınlığı artar. Ancak bu oksidasyon içerisindeki alüminyum konsantrasyonu azalır. Eğer 500°C ve üzerindeki sıcaklıklara çıkılırsa Şekil 5.3'te görüldüğü gibi kristalin amlumina oluşur ve yüzeyde amorf oksit tabakasıyla birlikte yer alır.



Şekil 5.3 500°C ve üzerindeki sıcaklıklarda  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kristalinin ve amorf aluminanın oluşumu.

Alüminyum oksit tabakası asitlerle (HF, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) ve alkalilerle (NaOH) temas ettiğinde kolayca çözünür. Oksit tabakasının hızla çözünmesini takiben alüminyumda hızla koroze olamaya başlar. Grafik 5.1'de oksit tabakasının maruz kaldığı asidik ve bazik ortamdaki aktivasyonu görülmektedir.





Grafik 5.1 Oksit tabakasının maruz kaldığı asidik ve bazik ortamdaki aktivasyonu

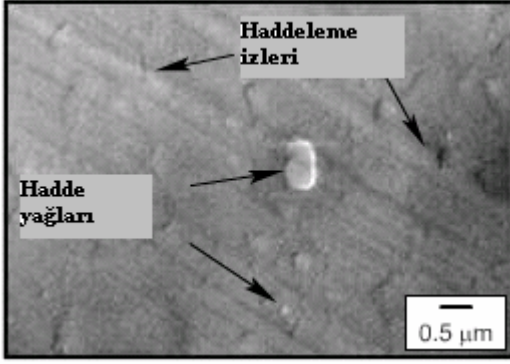
Ne yazık ki normal şartlarda alüminyum yüzeyi mükemmel değildir. Yüzeyde oluşan amorf oksit tabakasının alüminyum korozyondan koruma başarısı, alüminyumun yüzeyinde bulunan iki tip oluşumdan dolayı azalır. Bunlar;

Alüminyumun üretim prosesi esnasında oluşan bozukluklar;

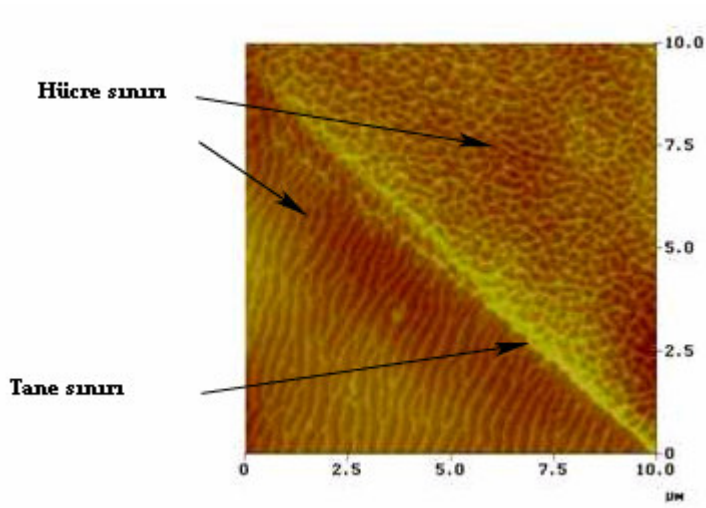
- İzler
- Makro hadde izleri (Şekil 5.4)
- Hadde yağları (Şekil 5.4)

Mikro yapıdaki oluşan bozukluklar;

- Tane, dendrit sınırları (Şekil 5.5)
- Tane sınırları (Şekil 5.5)
- İntermetalikler



Şekil 5.4 Hadde yağı ve makro hadde izleri



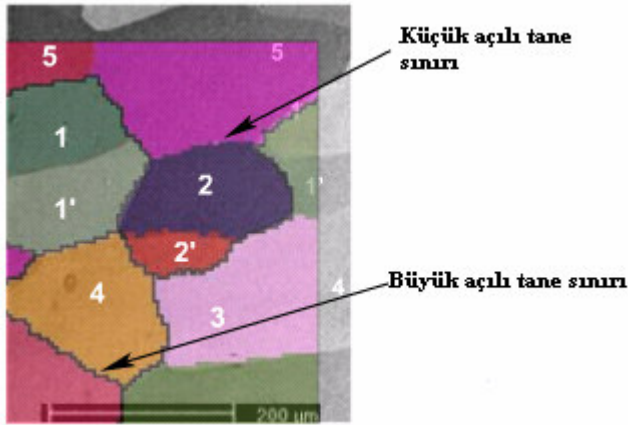
Şekil 5.5 Tane ve tane sınırları

Gerçek şartlardaki alüminyumun yüzeyi incelendiğinde, alüminyumun yüzeyinde bir çok hatalar olduğu gözlenmektedir (Şekil 5.6). Ancak toplam yüzeye oranla hatalı yüzey oldukça küçüktür. Buna rağmen alüminyumun koroze olmasında bu hatalar oldukça etkilidir.



Şekil 5.6 Alüminyumun yüzeyinde bulunan olası hatalar ve kusurlar

Alüminyumun tane yönelimide korozyonu etkileyen bir faktördür. Şekil 5.7’de büyük açılardaki tane sınırları, lokal korozyona sebebiyet verecek şekilde yönelmişlerdir. Bu tip yönelmeler özellikle Al-Mg alaşımları olan 5XXX serisi alaşımlarda gözlenir.

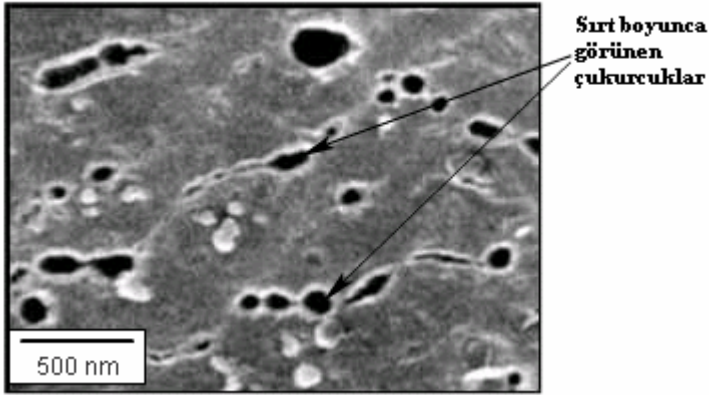


Şekil 5.7 Büyük açılı ve küçük açılı tane sınırı

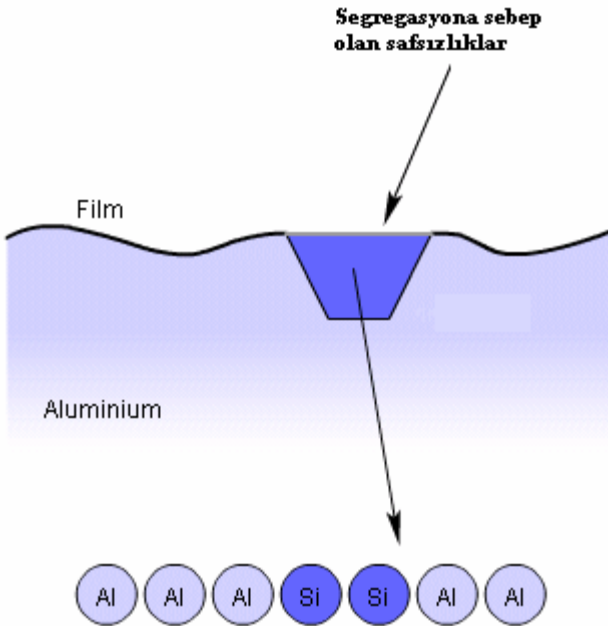
Normal şartlarda alüminyum %100 saf olarak bulunmaz, içerisinde bir takım kalıntılar barındırır. Bu kalıntıların en belirgin olanları, bakır, demir ve silisyumdur. Demir ve silisyumun alüminyum içerisinde katı çözünürlüğü düşüktür ve katılaşma sırasında tane sınırlarında ince segregasyonlara sebep olurlar. Bu partiküller boyutlarına, dağılımlarına ve reaktivitelerine göre tane sınırlarında segregasyonlara sebep olurlar ve bu ölçülerde alüminyum oksit filmini etkilerler. Aynı zamanda

alkali yüzeyin temizlenmesi ve parlatılmasının ardından nano ölçekli numunede sertlik derecesinin artmasına sebep olurlar (Şekil 5.8). Yüzeğe yakın bölgelerde meydana gelen bu sertlikler Şekil 5.9’da görüldüğü üzere daha çok çukurcuk şeklinde gözlenirler.

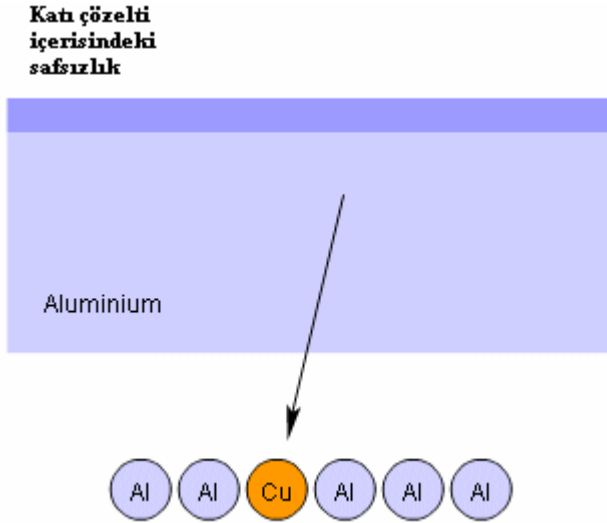
Katı çözelti içerisinde bakır da az olarak bulunur. Bakırka demir ve silikon gibi yüksek sıcaklıklarda tane sınırlarında segregasyona sebep olur (Şekil 5.10).



Şekil 5.8 Alkali yüzey temizleme işlemi görmüş 1050 alaşımının SEM de alınan görüntüsü.



Şekil 5.9 Yüzeğe yakın bölgelerde meydana gelen safsızlıklar.



Şekil 5.10 Katı çözeltili içerisindeki bakır.

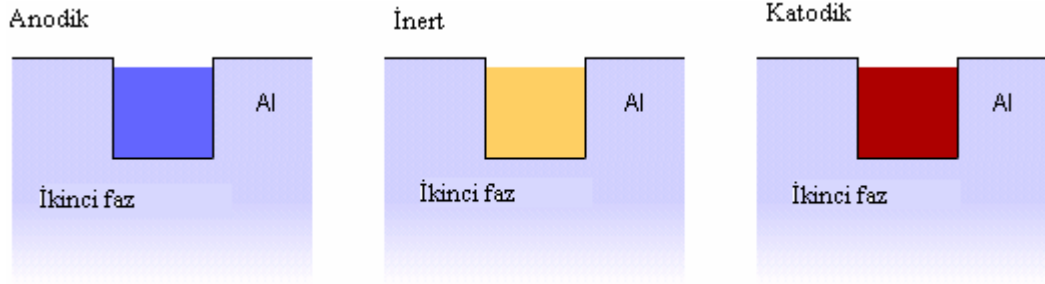
Alüminyum içerisine alaşım oluşturmak için en sık eklenen elementler Cu, Mn, Si, Mg ve Zn'dur. Bu elementler katı çözünürlük limitleri içerisinde alüminyumun içerisine katıldıklarında, alüminyumun korozyona dayanımını değiştirirler.

Genellikle alüminyumdan daha düşük potansiyeli olan metaller alaşım içerisine katıldığında, alüminyumun korozyon dayanımını arttırlar. Ters olarak alüminyumdan potansiyeli yüksek olan metaller alaşıma katıldığında, alüminyumun korozyon dayanımını düşürürler. Ancak bu yargıya rağmen bazı istisnalarda mevcuttur. Örneğin gümüşün potansiyeli alüminyumdan düşük olmasına karşın, alaşıma eklendiğinde alüminyumun korozyon dayanımını azaltır.

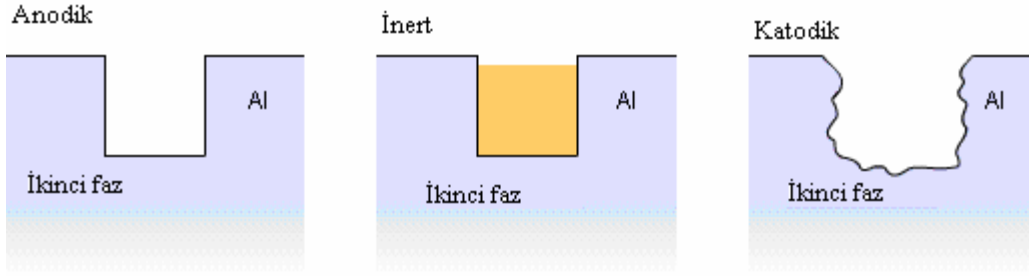
Alüminyumun korozyon potansiyeli elektrode referansı ile ölçülür. En yaygın elektrotlar Ag/AgCl 'dir. Kalomel elektrotlar çoğunlukla değişik konsantrasyonlarda ve doymuş halde ticari olarak bulunurlar.

Ticari uygulamalarda alüminyumun alaşımlandırılması istenilen mekanik özelliklere ulaşmak için gerçekleştirilir. Cu, Mn, Si, Mg ve Zn elementleri alüminyumda katı çözünürlük sınırını arttırmak ve ikinci faz partiküllerin, yani intermetaliklerin, oluşumunu geciktirmek için eklenirler. İkinci faz partiküller katılma sırasında, dendrit tane sınırlarındaki segregasyon sırasında ve ayrıca aşırı doymuş katı çözeltinin çökmesi sırasında oluşurlar. İkinci faz

partiküllerin korozyon dayanımı üzerinde aşırı bir etkisi vardır, özellikler çukurcuk korozyonu, intergranül korozyonu ve gerilmeli korozyon kırılması üzerinde (Şekil 5.11 a ve Şekil 5.11 b).

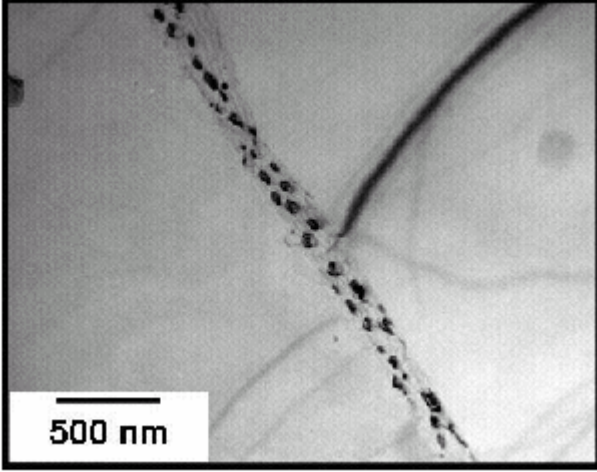


Şekil 5.11 a İkinci fazda değişik korozyon öncesi durum

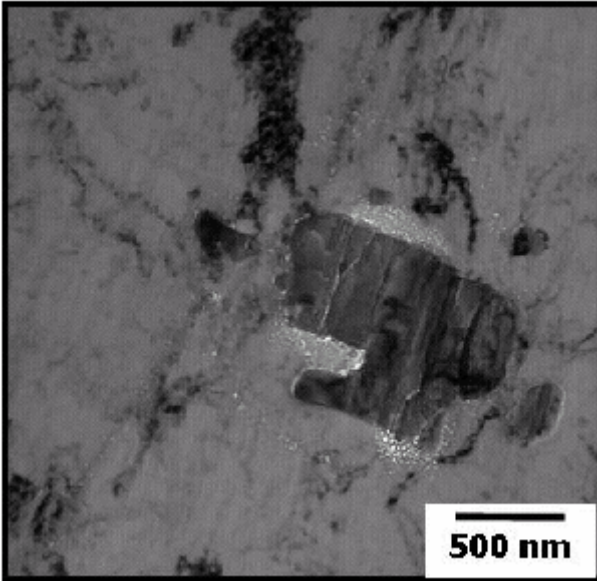


Şekil 5.11 b İkinci fazda değişik korozyon sonrası durum.

Şekil 5.12 a ve b 'de anodik ve katodik korozyona ait mikro yapılar görülmektedir.

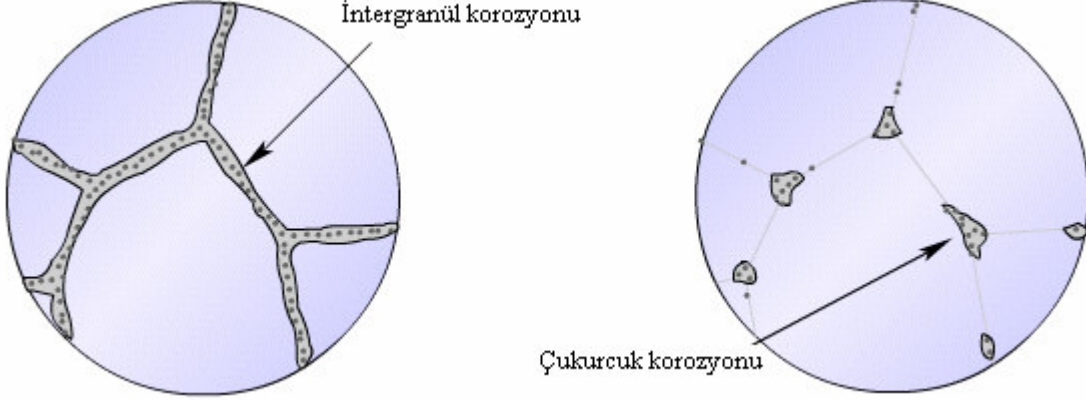


Şekil 5.12 a Anodik korozyon.



Şekil 5.12 b Katodik korozyon.

İkinci faz çökelmelerinin çok azı zararsızdı. Özellikle tane sınırlarında meydana gelen ikinci faz çökelmeleri intergranül korozyonuna veya çukurcuk korozyonuna sebep olurlar (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 İç yapıdaki intergranül ve çukurcuk korozyonunun görünümü.

### 5.1 Alüminyum Alaşımlarının Korozyon Karakteristiği

Alüminyum alaşımları bakır, manganez, silisyum, magnezyum ve çinko yanında diğer bazı metalleri de az miktarlarda içerirler. Saf alüminyuma oranla, alaşımların daha iyi mekanik özellikleri ancak daha düşük korozyon dayanımları vardır. Bununla beraber, bazı sanayi dallarında, özellikle havacılıkta, alüminyum alaşımları geniş ölçüde kullanılır.

Alüminyum ve alaşımları, HCl çözeltilerinde kararlı değildirler. Kuvvetli negatif potansiyellerinden dolayı pek çok elektropozitif metallerle (bakır, platin, demir, nikel, kalay) temasında alüminyum alaşımlarının korozyonu çok artar.

Alüminyum ve alaşımları, özellikle alkalilere karşı duyarlıdırlar. Korozyon hızı baz konsantrasyonu ile birlikte artar. Amonyak, sodyum hidroksit, kalsiyum hidroksit ve baryum hidroksite karşı dayanıksızlığı bu gruba girer. Nötr tuz çözeltileri alüminyumu az etkiler. Alüminyum ve alüminyum alaşımları orta saldırganlığa sahip atmosferde oldukça dayanıklıdır. Ancak saldırganlığı arttırıcı gaz ve katı parçacıklarla yüklü endüstriyel ve deniz atmosferinde bu malzemeler çukurcuk korozyonuna karşı duyarlılık gösterirler.



Alüminyum alaşımlarını korozyona karşı karşı korumada başvurulan etkin bir önlem alüminyum ile giydirmedir. Genellikle çift taraflı giydirilen tabakaların kalınlığı parça kalınlığının % 4'ü kadardır. 20 yıllıkkullanım sonunda giydirilmiş tabakanın kalınlığından en çok % 30 kaybettiği saptanmıştır. Çizelge 5.1'de alüminyum ve alaşımlarının atmosferik korozyondaki çekme dayanımı kayıpları verilmiştir.(Davis, 1999)

Çizelge 5.1 Alüminyum ve alaşımlarının atmosferik korozyondaki çekme dayanımı kayıpları(Davis, 1999)

Atmosfer türü	Süre (yıl)	Malzemeye göre % çekme dayanımı kayıpları				
		1100-H14	3003-H14	6051-T4	2017-T3	2017-T3(giydirilmiş)
Kırsal	19,15	0	0	0	2	0
	20,15	0	0	2	3	1
Endüstri	20,14	13	19	24	24	6
	20,55	10	10	19	23	6
Deniz	18,15	31	20	37	56	6
	20,37	5	2	14	17	3
	19,67	3	0	10	8	0

Çizelge 5.2’de alüminyum ve alaşımlarının çeşitli atmosferlerdeki korozyon hızları belirtilmiştir.

Çizelge 5.2 Alüminyum ve alaşımlarının çeşitli atmosferlerdeki ortalama aşınma miktarları ( $\mu\text{m}$ )  
(Davis, 1999)

Atmosfer türü	Süre (yıl)	Malzeme				
		Ağırlık kaybından hesaplanan ortalama aşınma ( $\mu\text{m}$ )				
		1100-H14	3003-H14	6051-T4	2017-T3	2017-T3(giydirilmiş)
Kırsal	19,15	1,50	0,25	0,25	1,50	0,25
	20,15	1,50	1,75	1,50	2,00	1,50
Endüstri	20,14	-	-	-	-	-
	20,55	14,75	19,00	18,00	24,75	1,50
Deniz	18,15	11,50	12,00	9,15	44,50	11,50
	20,37	5,50	7,00	6,75	-	-
	19,67	-	-	1,50	-	1,00

Döküm alüminyum alaşımlarından düşük mukavemetli döküm alaşımları, yüksek derecedeki korozyona dayanımı ile saf alüminyuma yaklaşır. Orta mukavemetli döküm alüminyum

alaşımalarının yaşlandırılmış ve tavlanmış halleri, saf alüminyum ve düşük dayanımlı dökme alüminyum alaşımlarından daha az korozyon dayanımına sahiptirler. Yüksek mukavemetli dökme alüminyum alaşımlarının korozyon dayanımları, orta mukavemetli alaşımlardan çokdaha az, fakat buna rağmen düşük mukavemetli alaşımlardan biraz daha azdır. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarından en kullanılanı, düşük korozyon dayanımı olan duralumindir. Lokal ve tane sınırı korozyonuna duralumin de çok rastlanır. En tehlikeli korozyon, mukavemet kaybı ile ilgili olarak tane sınırı korozyonudur. Tane sınırı korozyonunun nedeni, 100°C'nin üzerindeki ısıtmadan sonra yavaş sertleştirme yaparak homojen katı çözültiden  $CuAl_2$ 'nin çökertilmesidir. Yüksek alaşımlı magnalyum, korozyona duraluminden daha dayanıklıdır. Bunun nedeni, daha fazla elektronegatif olan magnalyumdaki güçlendirici bileşen  $Mg_2Al_3$ 'tür. Bu tip olaylarda yüzeydeki kalıntılar hızlı bir şekilde çözünür ve alaşımın yüzeyi eş potansiyel haline gelir. Bununla beraber eğer magnalyumdaki anodik kalıntılar yüzey boyunca çökerse (örneğin tane sınırları boyunca) o da tane sınırı korozyonuna duyarlı hale gelir (Temel, 2001).

Bakır içeren diğer alüminyum alaşımları en az korozyona dayanıklı dökümlerdir ve daha az saldırgan ortamlar için uygundur.

Alüminyum alaşımların döküm özellikleri döküm kalitesine bağlıdır. Gözenekli dökümler daha fazla korozyona uğrar. Pürüzlülüğün azaltılması korozyon dayanımını artırır.

Alüminyum alaşımlarından 1XXX serisi içerisinde bulunan alaşımların bir çok ortamdaki korozyon dayanımları çok yüksektir. Korozyon dayanım değeri alaşıma katılan diğer metallerin miktarının artması ile ters orantılı olarak azalma gösterir. 1XXX serisi alaşımların içinde bulunan saf olmayan malzemelerin hepsi korozyon dayanımını azaltıcı etki yapmazlar. Hatta bu alaşım serisi içindeki bazı alaşımların içinde bulunan saf olmayan malzemeler korozyon dayanımını artırıcı etkiye sahiptirler.

Ana alaşım elemanı bakır olan 2XXX serisi alaşımlar taneler arası korozyon, tabaka korozyonu ve gerilimli korozyon çatlamasına hassastırlar.

3XXX serisinde bulunan alaşımlar yüksek korozyon dayanımlarından dolayı gıda sektöründe ve mimaride kullanılırlar.

5XXX serisi alüminyum alaşımları yüksek korozyon dayanımları ile inşaat malzemeleri yapımında, kimya sanayiinde, besin depolama işlemlerinde ve denizel ortamlarda kullanılır. Gerilmeli korozyon çatlamasına duyarlılığı azaltmak için yoğun şekil değiştirmeden kaçınmak gerekir.

6XXX serisi alaşımların kolay işlenebilmesi ve yüksek korozyon dayanımı önemli üstünlükleridir. Alaşım içindeki bakır oranının artması korozyon dayanımını düşürür.

Isıl işlemle sertleştirilebilen 7XXX serisi alüminyum alaşımları korozyon dayanımı bakımından bir çok kullanım alanı için yeterli olmakla beraber diğer alaşımların gerisindedir. Önemli üstünlükleri sayılan yüksek mekanik dayanımlarında, taneler arası korozyon ve gerilmeli korozyon çatlamasına yol açabilecek etken ortamlarda da yararlanabilmek için 7XXX serisi alaşımlar, 1XXX ve 6XXX serisi alaşımlar giydirilerek kullanılırlar. Giydirilen malzemeler ana alaşımı katodik olarak korurlar ve korkulan korozyon türlerine karşı önemli ölçüde dayanımı arttırırlar.

## **5.2 Alüminyum ve Alaşımlarının Korozyon Çeşitleri**

Alüminyum ve alaşımlarında görülen korozyona, genellikle alüminyum oksit tabakasında meydana gelen kusurlar, izler ve intermetalik partiküllerden sebep olur. Bunun sonucunda değişik tip korozyonlar meydana gelir ; çukurcuk korozyonu, tane içi korozyonu, galvanik korozyon, filiform korozyonu ve gerilmeli korozyon.

### **5.2.1 Çukurcuk korozyonu**

Çukurcuk korozyonu, lokal korozyonun çok sade bir örneğidir. Çukurcuk korozyonun karakteristiği, sadece metal yüzeyinde küçük bir bölgeyi etkilemesidir. Ancak küçük bir bölgede oluşmasına rağmen katodik yüzey üzerinde anodik reaksiyonlarla metay yapısında hızlı bozunmalara sebebiyet verir. Oluşan çukurcuk sayısı alaşımın cinsine göre farklılıklar gösterir.

Örneğin 1XXX serisi alaşımlarda  $1 \text{ cm}^{-2}$  lik alanda 100 çukurcuk gözlenirken, içerisinde bakır bulunan 2XXX serisi alaşımlarda bu oran  $1 \text{ cm}^{-2}$  lik alanda 1000 çukurcuk olarak gözlenir.



Şekil 5.14 Yüzeyi kaplanmamış alüminyumda görülen çukurcuk korozyonu.[2]



Şekil 5.15 İçerisinde bakır bulunan alüminyum alaşımında gözlenen çukurcuk korozyonu.[2]

Alüminyumda görülen çukurcuk korozyonunun meydana gelme formülü oldukça karışıktır, bu mekanizma iki adımdan oluşur.

Alüminyumda görülen çukurcuk korozyonunun başlangıcını öncelikle yüzeydeki oksit tabakasında meydana gelen kusurlar yada alaşımın içerisinde bulunan elementlerin meydana getirdiği segregasyonlar ve çevrede bulunan klor gibi agresif saldırganlar oluşturur. Kloridler lokal olarak oksit tabakasını bozarlar ve yüzeyde mikro çatlaklara sebebiyet verirler. Yüzeyde başlayan birçok çukurcuğun sadece birkaçı yayılır. Yapılan araştırmalar bize, alüminyumda görülen çukurcuk korozyonunun sürekli olmadığını göstermektedir. Formül (5.2)'de kimyasal olarak korozyonun nasıl meydana geldiği görülmektedir [1].



Çukurcukların yayılması birkaç ara adımda meydana gelir;

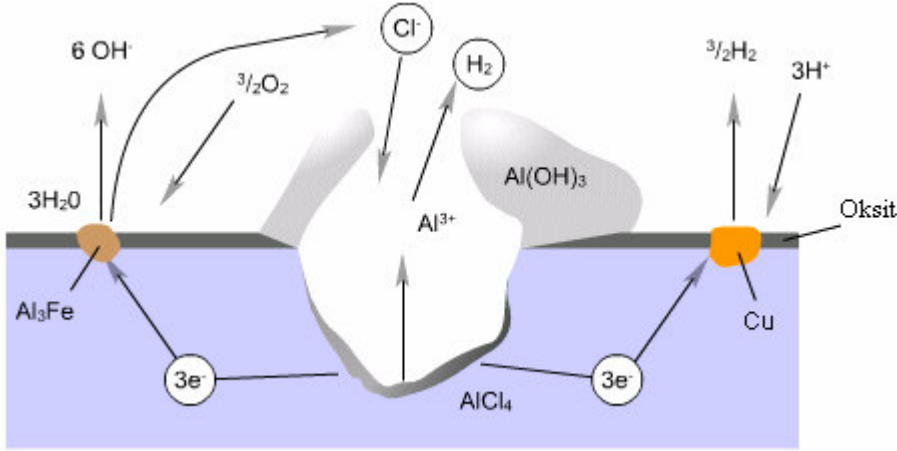
- Oluşmaya başlayan çukurcuk içerisinde alüminyum çözünür:  $2Al + 2Al^{+3} + 3e^-$ ,  $Al^{+3}$  kationları  $Cl^-$  anyonları ile reaksiyona girerek ara bileşik olan  $AlCl_4^-$ ü oluştururlar. Oluşan bu ara bileşiğin hidrolizi sonucunda çukurcukların dibinde asidik ortam oluşur ve  $H^+$  iyonlarının reaksiyon sonrası açığa çıkmasından dolayı ortam  $pH < 3$  olur. Bu aşırı saldırgan ortam çukurcukların çoğalmasına neden olur.
- $Al^{+3}$  iyonları dip tarafta yoğunlaşırlar. Burada daha alkali olan ortamda hidrojen gazının katodik prosesi :



ve su azalması :



sonucu çukurcuğun dışına yayınırlar. Bunun sonucu olarak hidroksil oluşur ve çukurcuğun sınırlarına doğru yayınırlar. Bu beyaz korozyondan kalan tortu sonuç olarak çukurcuğun girişini kapatır ve oluşabilecek iyonik reaksiyonları engeller (Şekil 5.16) .



Şekil 5.16 Çukurcuk korozyonu mekanizması [2]

### 5.2.2 Gerilmeli Korozyon

Gerilmeli korozyon bir sistem olarak bulunur. Oluşması için üç şartın aynı anda gerçekleşmesi gerekir :

- Kolay etkilenen alaşım
- Korozyon kırılmasını gerçekleşmesine uygun kritik ortam
- Yeterli yüksek gerilim yüklemesi

Gerilmeli korozyonda aynı anda gerçekleşmeden kasıt, bu üç faktörün negatif bir sinerjiyle aynı anda etki etmesidir. Kırılma enerjisindeki azalma bazı durumlarda, kuvvet uygulanmazken dahi ön korozyona sebep verebilir. Yani kırılma enerjisindeki azalma tek başına gerilmeli korozyona etki etmemektedir [2].

Alüminyum içerisindeki çatlama yolu baskın olarak intergranülerdir. Çatlak tane sınırları boyunca ilerler.

Gerilmeli korozyonun oluşumunu açıklayan birçok teori ve model vardır. Bunun ana sebebi, bu tip korozyonun tek bir modelle açıklanamayacak kadar karmaşık olmasıdır. Bunun sonucu olarak

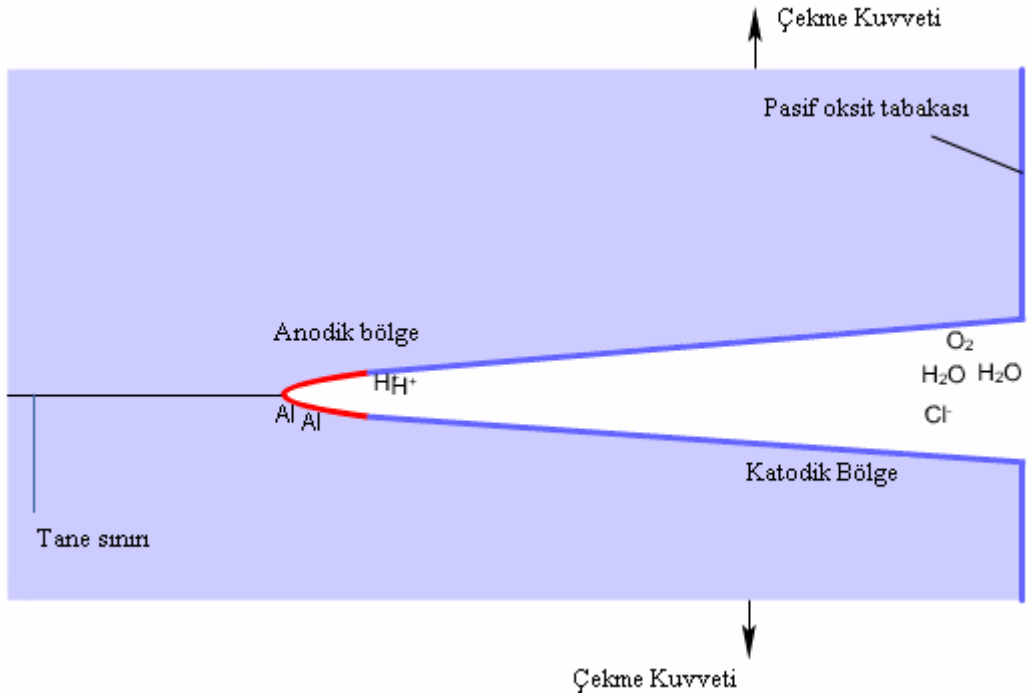
birçok teori ve modelin kombinasyonu ile gerçeğe en yakın model elde edilmiş olur. Alüminyum için açıklanması gerekli en önemli iki model, anodik bozulma teorisi ve hidrojenin neden olduğu kırılmadır.

Tane sınırları boyunca oluşan anodik bozulma teorisinde bozulma nedeni, elektrokimyasal olarak daha az asil fazların tane sınırlarında çökmesidir. Buna en güzel örnek, duyarlı AlMg alaşımlarında oluşan  $\beta$ -Al<sub>8</sub>Mg<sub>5</sub> fazıdır. Daha fazla asil olan fazların tane sınırlarında çökmesi ise, tane sınırlarına bitişik bölgedeki daha fazla asil olan fazların bu bölgeleri boşaltarak tane sınırlarına yönelmesi ile gerçekleşir. Böylece tane sınırları boyunca anodik bir yol oluşmuş olur. Buna tipik bir örnek olarak 2XXX serisi alaşımların tane sınırlarında oluşan zengin bakır fazı ( CuAl<sub>3</sub> veya CuMgAl<sub>3</sub>) verilebilir.

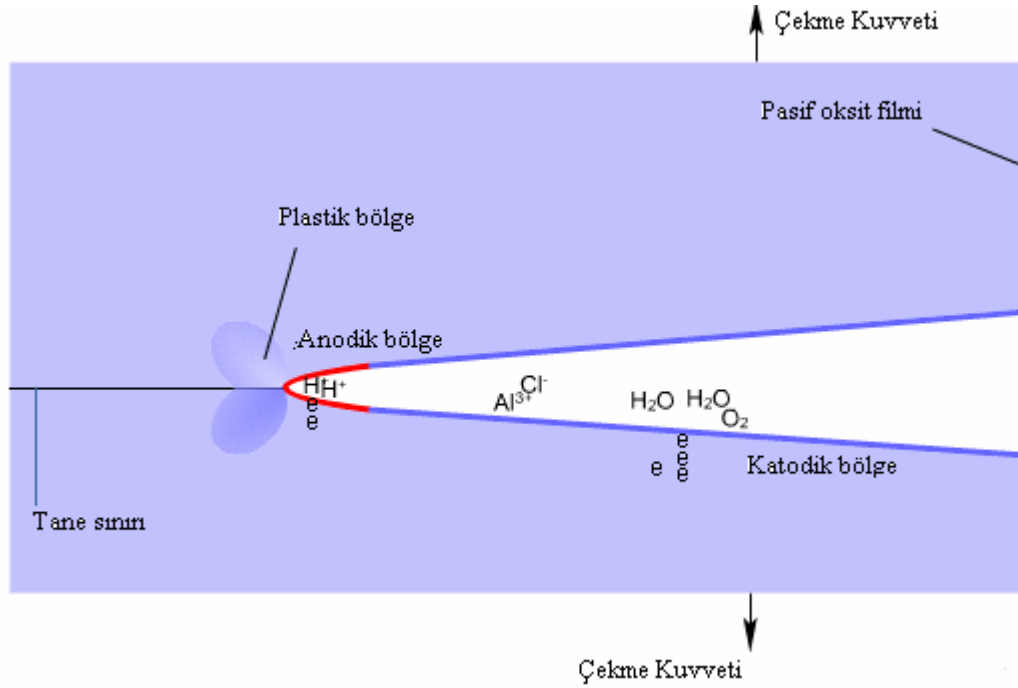
Ayrıcalıklı kırılma tipi anodik bozulmada yüksek gerilim yoğunluğundan dolayı, kırılma bölgesine yakın bölgede plastik deformasyon meydana gelir. Plastik deformasyon içerisinde yer alan metalin anodik bozulma oranı artar [3].

Hidrojenin neden olduğu kırılmada ise, hidrojen atomunda bulunan hidronyum iyonlarının azalması sonrasında kırılma yönü boyunca Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'de görüldüğü gibi hidrojen atomları yayınır ve kırılma yönü boyunca kırılma bir yol oluşturarak kırılmaya sebep olurlar.

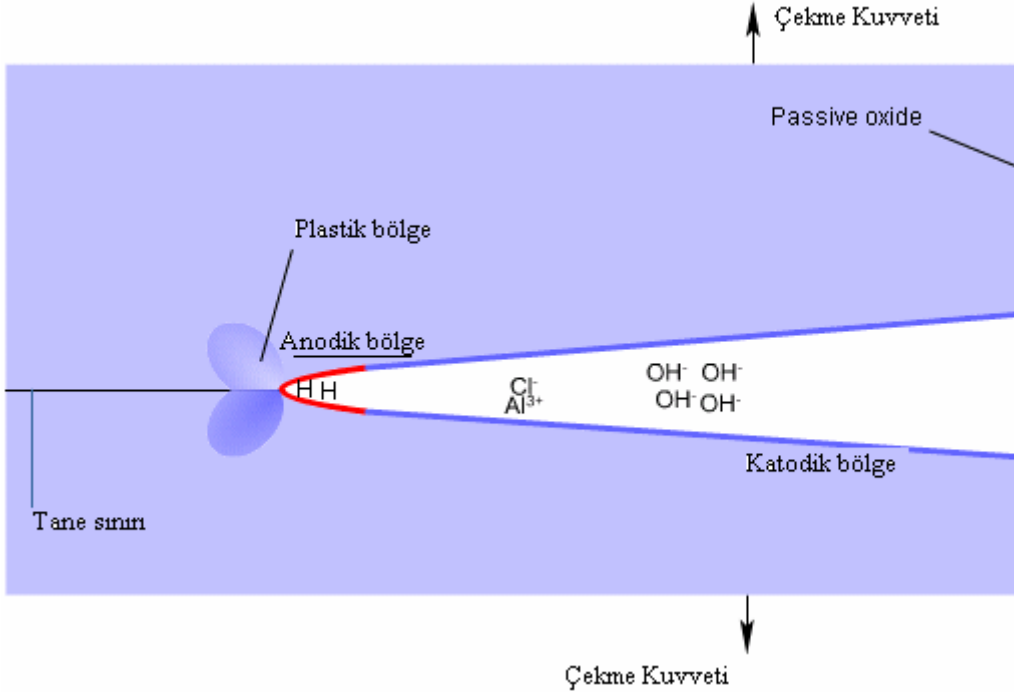




Şekil 5.17 Hidrojen atomunda bulunan hidronyum iyonlarının azalması [2]



Şekil 5.18 Kırılma yönü boyunca hidrojen atomları yayınması [2]



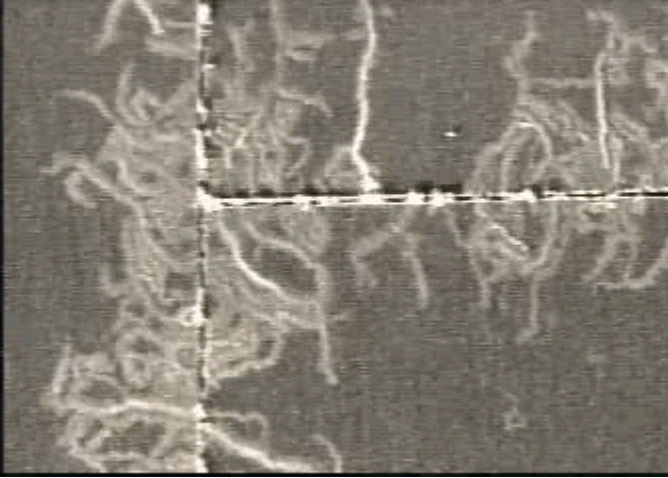
Şekil 5.19 Kırılma yönü boyunca oluşan kırılma yolu [2]

### 5.2.3 Filiform Korozyon

Filiform korozyon organik kaplamaların altında görülen bir tip korozyondur ve genellikle ortam neminin %40 ila %90 arasında olduğu yerlerde görülür. Bu tip korozyonun oluşma nedeni genellikle kaplama sırasında meydana gelen bir hata veya mekanik yolla yüzeyde oluşan çiziklerdir. Filiform korozyon yüzeyde meydana gelen bir etki olmakla beraber genelde ana olarak dış yüzey problemidir. Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de kabuk altı korozyonuna örnekler verilmiştir.

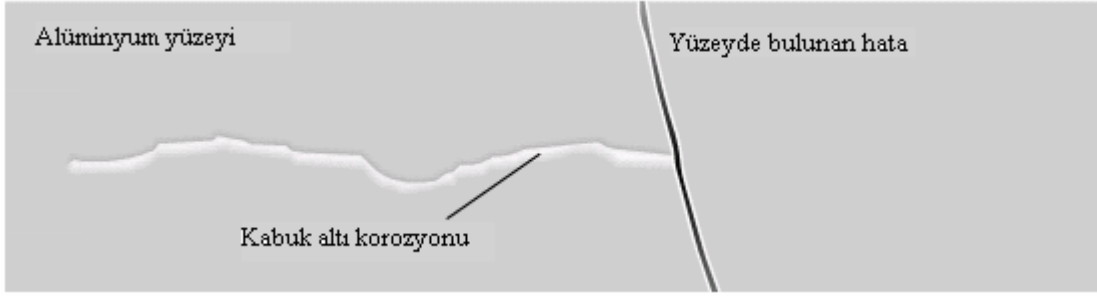


Şekil 5.20 Filiform korozyonu örnek 1 [2]



Şekil 5.21 Kabuk altı korozyonu örnek 2 [2]

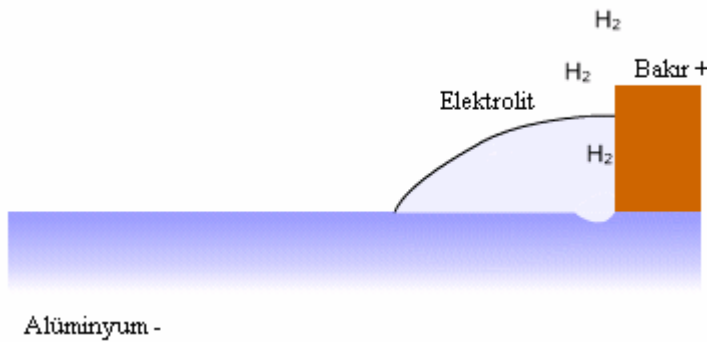
Filamanın karşısında bulunan kaplamanın altındaki alüminyum yüzeyi anodik yayılma ile koroze olur. Kaplama hatası olarak yüzeyde bulunan izler korozyon ortamı ile zorlanarak yüzeyde bir kuyruk gibi büyür, böylece filaman büyür (Şekil 5.22). Filamanlar asla birbirleri ile kesişmezler ve daha önceden var olan yönlümelri izlerler.



Şekil 5.22 Filamanın oluşumu ve büyümesi.

#### 5.2.4 Galvanik Korozyon

Galvanik korozyon, lokal olarak meydana gelen bir korozyon tipidir. Oluşması için aralarında en 50mV'luk bir potansiyel farkı olan iki metalin veya alaşımın birbirleri ile korozif bir elektrod aracılığıyla direkt teması gerekmektedir. Bu iki metalden daha az asil olanı korozyon reaksiyonu esnasında anod görevini üstlenecektir. Aşağıdaki Şekil 5.23'de daha az asil olan alüminyum metalinin bakır karşısında galvanik korozyona uğraması gösterilmiştir [1].



Şekil 5.23 Alüminyum metalinin bakır karşısında galvanik korozyona uğraması

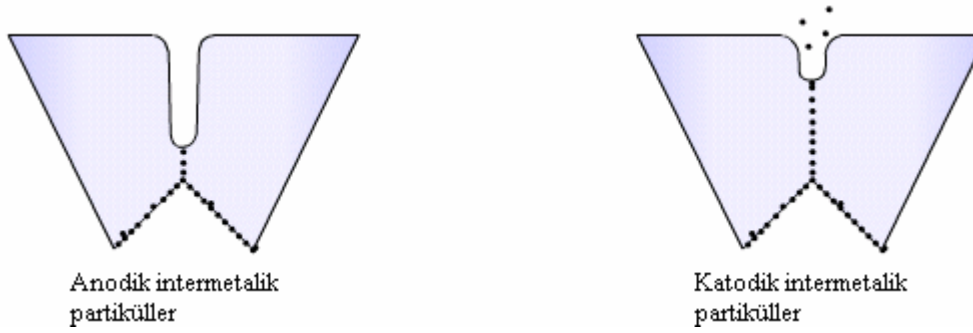
Metallerin sahip oldukları potansiyelleri gösteren tabloya galvanik seri denir. Galvanik seri sayesinde ilgili çevre koşullarında hangi metali hangi metalle kullanmamız gerektiğine kolaylıkla karar verebilmekteyiz (Çizelge 5.3) .

Çizelge 5.3 Galvanik Seri

Metal	Ph 7,5 olan deniz suyu ortamında potansiyel (mV)
Gümüş	+149
Nikel	+46
Bakır	+10
Kurşun	-259
Çelik	-335
Kadmium	-519
Alüminyum	-667
Çinko	-806
Kalay	-809

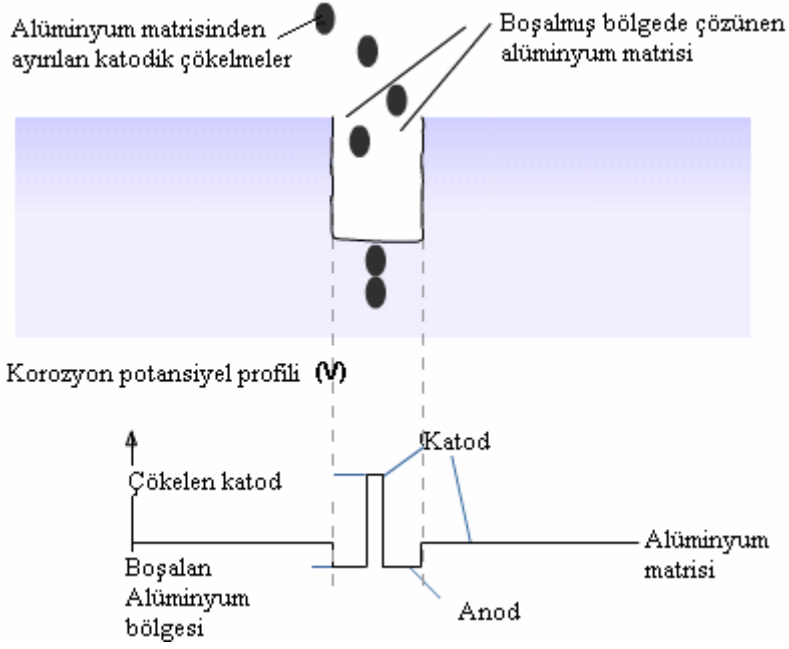
### 5.2.5 Tane içi Korozyonu

Tane içi veya kristal içi olarak adlandırılan korozyon tipinde, tanenin kendisine belirgin bir saldırı olamamasına karşın tane sınırlarına veya yakın bölgeye olan saldırıdır. Bu tip saldırı tane sınırı ile tanenin sınıra yakın bölgesi arasında oluşan potansiyel farkından meydana gelir. Bu korozyon tipi daha çok 2XXX, 5XXX, 7XXX ve az miktarda 6XXX serilerinde gözlenmektedir. Tane sınırlarına yakın bölgede bulunan intermetalik kristaller yarı sürekli bir oluşuma giderlerse bu bölgede tane içi korozyonuna sebebiyet verebilirler. Bu çökeltme Şekil 5.24'te görüldüğü gibi anodik veya katodik olabilir.

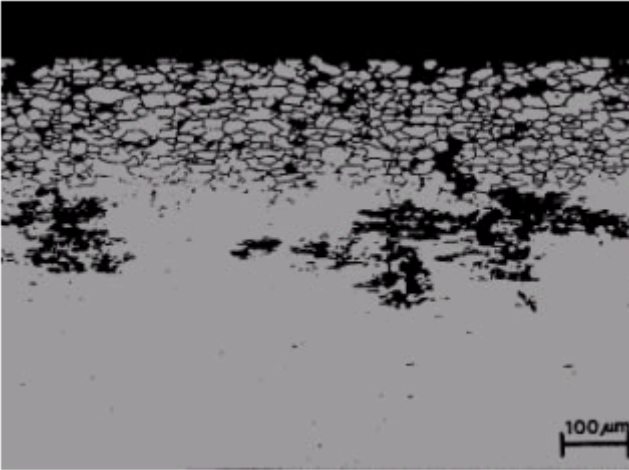


Şekil 5.24 Anodik ve katodik tane içi korozyon. [2]

Yinede tane sınırlarında meydana gelen çökeltmenin tek sorumlusu tane içi korozyonu değildir. Tane sınırlarındaki çökeltme esnasında çözülmüş halde olan Cu ve Mg atomları tane sınırı boyunca yayınır ve tane sınırına komşu bölgede bir boşluk yaratırlar. Örneğin 2XXX serisi alaşımlarında, bu boşluk genellikle Cu atomları tarafından yaratılır, bu bölge komşu olan alüminyum matrisine ve tane sınırında katodik intermetalik partiküllerin bulunduğu bölgeye göre daha düşük potansiyele sahiptir. Sonuç olarak tane içi korozyonunda alaşımlar mikro galvanik eşleşmeler doğrultusunda yönlenebilirler ve bu oluşumda genellikle bakır atomlarının yayılması ile oluşan boşluklar gözlenmektedir. Bu oluşan bölge çökelmelerden hariç kalmaktadır (Şekil 5.25 ve Şekil 5.26).



Şekil 5.25 Tane sınırlarında oluşan çökeltme, boşalma [2].



Şekil 5.26 Al %4,5 Mg alaşımında görülen tane içi korozyonunun tipik morfolojik yapısı [2].

## 6 ÇÖKELME SERTLEŞMESİ

Bir metalin kristal yapısının plastik şekil değişimine karşı direncini artırabilmek için genel olarak üç önemli yöntem vardır. Bunlar soğuk şekil verme, katı çözeltili sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesidir. Bugün çok yüksek dayanımlı alaşımların elde edilmesi bu yöntemlerin bir veya bir kaçının birlikte kullanılmasına bağlıdır.

Alaşım elementleri esas metale özelliklerini değiştirmek ve arzu edilen karakteristikleri kazandırmak için eklenir. Alaşım elementlerinin katı çözeltili içine girmesiyle, elektriksel iletkenlik ve süneklikte azalma, sertlik ve mekanik dayanımda artma gözlenir. Bu durum katı çözeltili sertleşmesi veya alaşım sertleşmesi adını alır.

Çökeltme sertleşmesi ilk olarak Duralumin'e adını veren Alman Metal Şirketi Dürener firması tarafından Birinci Dünya savaşı sırasında zeplinlerde kullanıldı. Yine  $\alpha$  bölgesinde tavlanan alüminyum alaşımlı perçinler, suda soğutulmuş buz dolabına konur, gerektiği zaman alınarak yumuşak halde hemen perçinlenirdi.

Yaşlandırma sırasında oluşan çökeltilerin intermetalik bağlantılı olma durumlarında ulaşılan sertlik çok daha yüksek olur ve bu durum istenen bir durumdur. Çünkü böylesi çökelti ana malzemenin zorlanması sırasında dislokasyonlarca parçalanıp plastik şekil değiştiremezler. Çökeltilerin türü, dağılımı, miktarı, ortalama çap ve uzaklığı etkili olmaktadır.

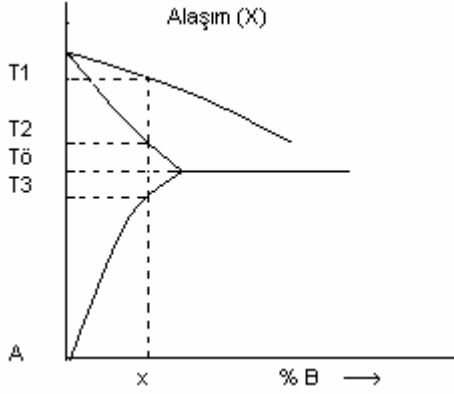
$$R_{eH} \approx \text{sabit} \times \frac{G}{\lambda} \quad (6.1)$$

### 6.1 Çökeltme Sertleşmesi Isıl İşlemi

Çökeltme sertleşmesi, bazı alaşımlar için sertlik ve dayanımı arttırmak amacıyla geliştirilmiş temel sertleştirme mekanizmasıdır ve çözünmenin temel karakteristiğine dayanır. Bu metodun prensibi genelleştirilmiş olarak Şekil 6.1' deki şematik diyagramla ifade edilmiştir. Sıvı X alaşımı denge şartlarının altına soğutulursa,  $T_1$  sıcaklığında katılaşmanın başlar ve  $T_2$  sıcaklığında biter.  $T_3$ 'e erişinceye kadar fazda herhangi bir değişiklik yoktur. Soğutmaya devam edildiğinde, ikinci



bir faz katılaşmanın sınırı aşılrken tane sınırları ve kayma düzlemleri boyunca çökeler. Bu çökelen faz, esas metal, sıvı metal veya bir ara faz olabilir.



Şekil 6.1 Çökeltme sertleşmesi faz diyagramı

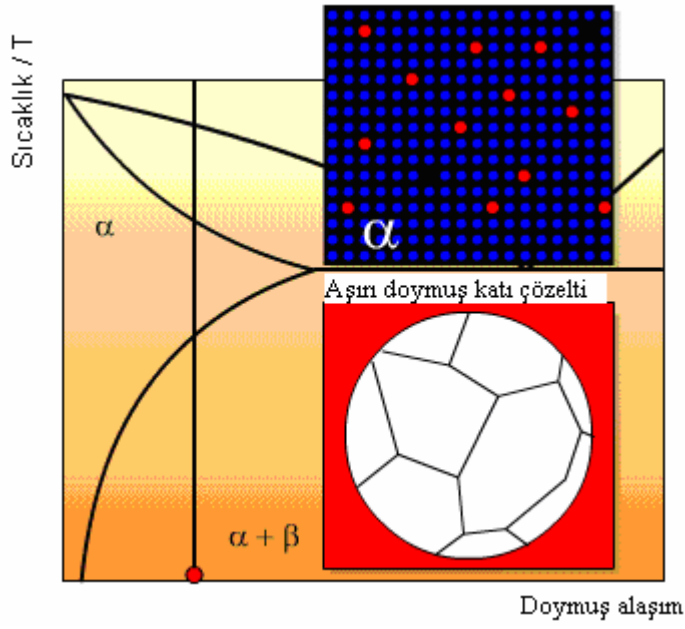
Başka bir deyişle, soğutma hızı, çok hızlı ise tamamlanmamış çökeltme elde ederiz. Gerçekte çoğu alaşımda  $T_2$  ve  $T_3$  sıcaklıkları arasındaki hızlı soğuma, çözültideki bütün ikinci faz içeriğini muhafaza etmeye müsaade etmek için yeterlidir. Örneğin alaşım aşırı doymuştur. Çözültideki B atomları fazla olduğundan çökeltmenin meydana gelmesine eğilim vardır. Uygulama süresinde çökeltmenin meydana gelip gelmemesi difüzyon hızına bağlıdır. Difüzyon yeterince hızlı ise, çökeltme oda sıcaklığında meydana gelir. Bu durumda alaşım doğal yaşlanır. Çoğu alaşımda, oda sıcaklığında difüzyon çok yavaştır.  $T_3$  den daha düşük sıcaklıklara ısıtma, difüzyonu artırır ve çökeltmeye müsaade eder. Bu durumda alaşım yapay olarak daha hızlı yaşlanır. Çökeltme sertleşmesi üç temel aşamayı izleyen işlem gerektirir (Tekin, 1984).

- Çözündürme ısıl işlemi
- Hızlı soğutma
- Çökeltme (yaşlandırma) işlemi

Çözündürme ısıl işlemi alaşımın Şekil 6.1'de belirtilen  $T_3$  sıcaklığının üzerine,  $T_0$ 'nün altına, ısıtılması ve homojen yapı elde etmek için bir süre bu sıcaklıkta tutulmasını içerir.  $T_3$ , müsaade edilen tam çözünme için en düşük sıcaklıktır ve  $T_{02}$  yarı kararlı olabilen ötekten erimesinden kaçınmak için kullanılan maksimum sıcaklıktır. Pratikte mümkün olan en yüksek sıcaklık en hızlı difüzyonu elde etmek için kullanılır. Örneğin, Al-Cu' da 2024 (%4.5 Cu ağırlıkça içerir) 500°C

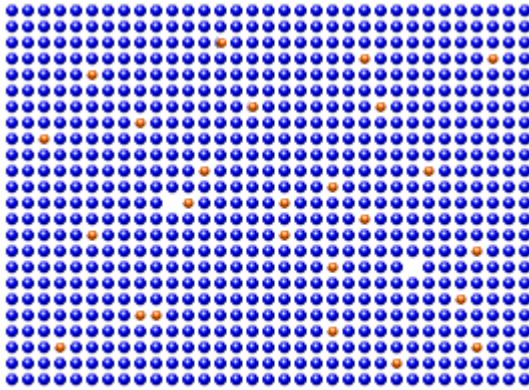
ötektik sıcaklığına sahiptir ve çözündürme ısıl işlemi normal olarak 488-500°C arasında gerçekleşir.

Hızlı soğutmada numune, düşük sıcaklığa, genelde oda sıcaklığına, suda soğutma işlemi ile hızlı olarak soğutulur. Soğutma ortamı genelde oda sıcaklığında sudur. Suda hızlı soğutmadan sonra alaşım örneğinin yapısı aşırı doymuş katı çözelti içerir. Bizim X alaşımımızın yapısı, düşük sıcaklığa hızlı soğutmadan sonra Şekil 6.2'de a noktasında,  $\alpha$  fazının aşırı doymuş katı çözeltisini içerir.



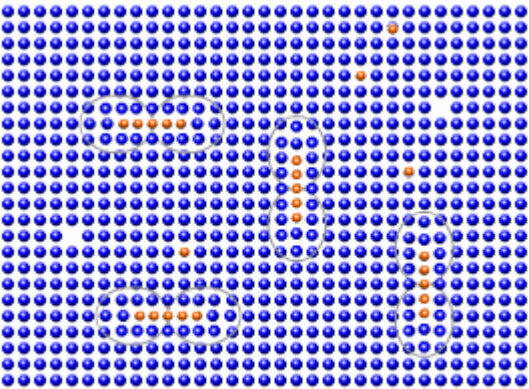
Şekil 6.2 Suda soğutma ile hızlı soğutma işlemi [2].

Yaşlanma esnasında aşırı doymuş katı çözeltili, denge konumuna dönüşmeye çalışacaktır.(Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7).



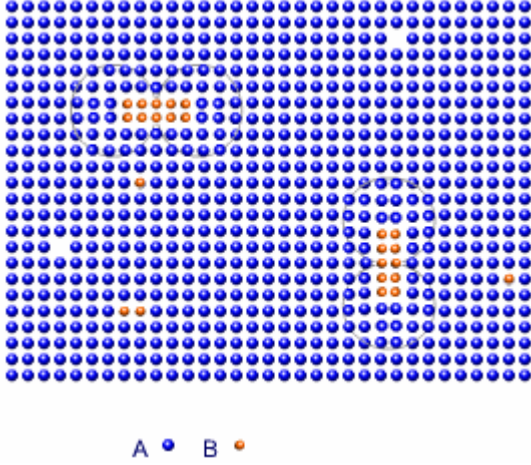
A • B •

Şekil 6.3 Solüsyona alma sonrasında su verme ile hızlı soğutulan aşırı doymuş katı çözeltilide B elementinin A elementi içerisindeki durumu ve hızlı soğuma esnasında meydana gelen donmuş boşluklar [2].

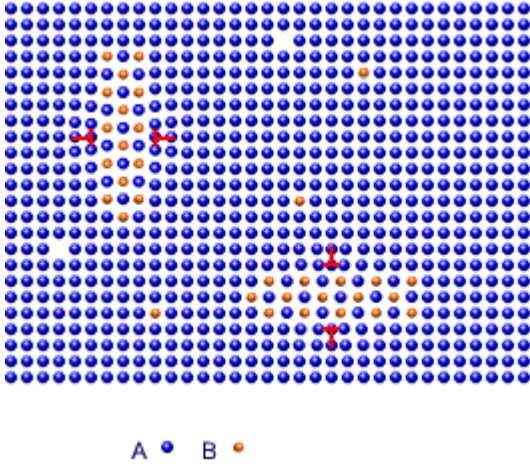


A • B •

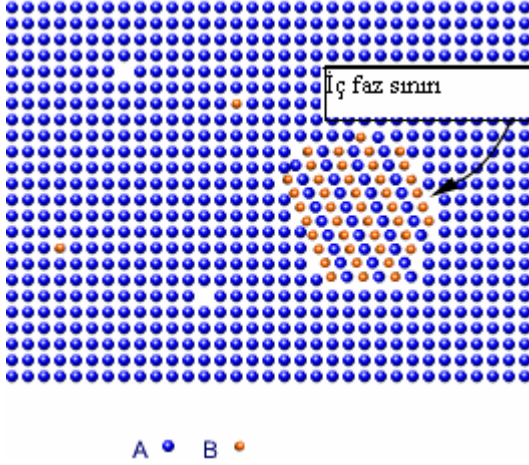
Şekil 6.4 Yaşlandırma esnasında yaygınlaşan B atomlarının A kafesinin belirli bölgelerinde kümelenmesi. Bu kümelenmeler GP (Guinier-Preston) bölgeleri olarak adlandırılmaktadırlar. Bu GP bölgeleri, disk, çubuk veya küre formunda oluşabilmektedirler [2].



Şekil 6.5 İkinci orta adım. Oluşan GP bölgeleri, birbirini tutan nükleon topluluklarının birbirine bağlı bir orta faz oluşturmasına olanak sağlar. A atomları bu düzlemdeki oluşumu bozmak için çevrelerler [2].

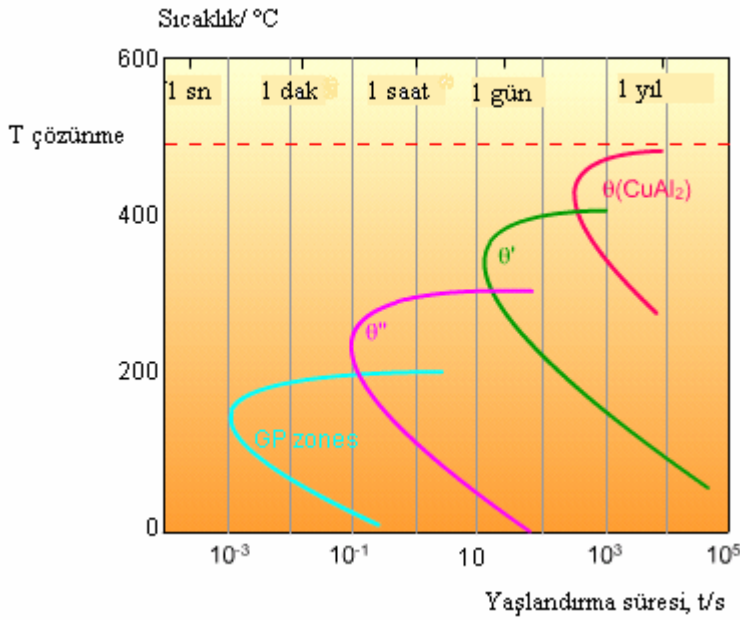


Şekil 6.6 Üçüncü orta adım. Oluşan çökelmelerin genişlemesi ile birbirine bağlı orta faz oluşumları gevşer ve içyüzeyde dislokasyonlar gözlenir [2].



Şekil 6.7 Başarılı bir yaşlandırma sonucunda elde edilen denge fazı.

Oluşan çökelmelerin kinetik yapısını TTT diagramları sayesinde çözümlenebilmektedir. Pratik bir bakış açısı ile, TTT diagramları bize sıcaklık ve bileşime bağlı açığa çıkan dönüşüm kinetiğini göstermektedir. Bu bilgi özellikle alüminyum üreticilerine, hangi alaşım için hangi tip yaşlandırma uygulanması konusunda bilgi vermektedir. Aşağıda Şekil 6.8’de varsayılan bir Al-Cu alaşımının TTT eğrileri görülmektedir [2].



Şekil 6.8 Varsayılan bir Al-Cu alaşımının TTT eğrileri [2].

Tüm yaşılandırılabilen alaşımlarda, tane sınırlarına yakın bölgelerde, çökelmelerden ve diğer oluşumlardan arınmış, boş bir bölge bulunur. Bu bölgelere çökelmelerden arınmış bölge denir.

Yaşılandırma (çökelme) işlemi, sertlik ve dayanımda arzu edilen artma meydana gelinceye kadar, malzemeyi uygun sıcaklıkta tutmayı gerektirir. Alaşımda ince dağınmış çökeltinin teşekkülü, çökelme sertleşmesi işleminin amacıdır. Aşırı doymuş çökelti kararsız olduğundan, ikinci fazın çökmesi için kesin eğilim vardır. İşlem sıcaklığında  $\alpha$  çözeltilsinin kabul etmek istemediği fazla B atomları belli kristalografik düzlemlere doğru difüzyon eğilimindedir.

## 6.2 Isıl işlemlerle Mukavemet Arttırma

Metallerde dengeli soğuma süresinde oluşan yapılar kararlı olup belirli özelliklere sahiptirler. Denge diyagramları bileşim ve sıcaklığa bağlı olarak oluşan kararlı fazları ve faz dönüşüm sıcaklıklarını gösterir. Bu durumda soğuma süresinde faz dönüşümleri zorlayıcı etki bulunmaksızın kendiliğinden tamamlanır. Ancak kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleri ile sağlanan aşırı koşullar altında, (su içinde soğutma gibi) denge hali faz dönüşümleri kısmen veya tamamen önlenir. Bu koşullarda elde edilecek bazı denge dışı yarı kararlı fazlar üstün özelliklere sahip olabilirler. Bu ilkelere dayanarak endüstride çeşitli ısıl işlemler geliştirilmiştir. Çeliklere uygulanan su verme sertleştirilmesi ile bazı alüminyum alaşımlarına uygulanan çökelme veya yaşlanma sertleşmesi bunlara birer örnek olarak gösterilebilir.

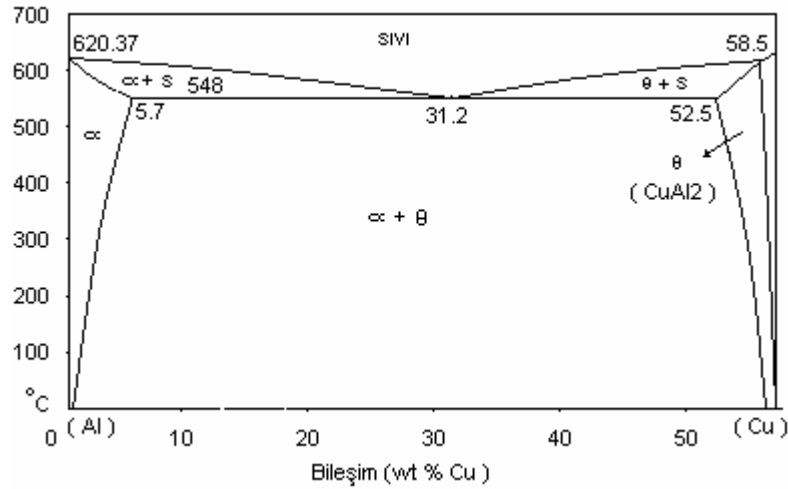
Bir ana faz içinde çok küçük parçacıklar halinde çökelmiş ikinci bir faz şekil değiştirmeyi çok kısıtlar, dolayısıyla sertlik ve mukavemet artar. Bu ikinci faz genellikle aşırı doymuş bir fazdan kontrollü çökeltme yöntemi ile elde edilir. Bu yöntem birbirlerini sıcaklığa bağlı olarak sınırlı oranda eriten sistemlere uygulanır. Bunun en tipik örneği Al-Cu alaşımlarıdır.

## 6.3 Alüminyum Alaşımlarında Çökelme

Yapısal ürünler için kullanılan alüminyumun çoğu alüminyum alaşımları şeklindedir. Yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk özelliklerinden dolayı alüminyum üretiminin büyük bir kısmı nakil araç gereçleri ve hareketli makina parçalarında kullanılır. 190° nin üzerinde metalin akma dayanımını şiddetle düşmesi sebebiyle bölgesel ısı uygulamalarının yada yangın tehlikesinin

olduğu büyük yapılarda çeliğin yerini alması uygun değildir. Alüminyum alaşımlarının çoğu kolaylıkla ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirilebilir ve ayrıca alüminyum, derin çekme işlemlerinde de oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Alüminyuma katılan en önemli alaşım elemanları bakır, magnezyum, silisyum ve berilyumdur. Bu elemanlar katı eriyik oluştururlar. Endüstride alüminyum alaşımları dövme alaşımlar (hadde ürünü) ve dökme alaşımları olarak iki guruba ayrılırlar. Alüminyum alaşımlarında katı eriyik sertleşmesinden başka soğuk şekil verme ve çökelme sertleşmesi işlemleri ile de mukavemet artışı sağlanır. Özellikle bakır içeren dövme alaşımlara uygulanan çökelme sertleşmesi veya yaşlanma sertleşmesi uygulamada önemli yer tutar. Bakırın alüminyumda erime oranı sıcaklığa bağlıdır. Yüksek sıcaklıkta katı eriyik halinde olan bir alaşım dengeli soğuma sırasında doyma sıcaklığına gelince ikinci faz tane sınırı boyunca çöker. Eğer soğuma çok hızlı olursa ikinci faz ayrışamaz, sonuçta bakırca aşırı doymuş tek faz elde edilir. Bu durumdaki alaşım kontrollü ısıtılıp mikroskopaltı düzeyde çökelme sağlanırsa sert ve mukavemeti yüksek bir metal elde edilir. Bu işleme çökelme yada yaşlanma sertleşmesi denir. Bakırın yanında magnezyum ve mangan içeren alüminyum alaşımları duralümin adı ile uçak endüstrisinde çok fazla kullanılır. (Şekil 6.9, Al-Cu ikili denge diyagramının alüminyumca zengin ve pratikte kullanılan kısmını göstermektedir. Metal Handbook 8. Cilt ; Metalografi, Yapılar ve Faz Diyagramlarından alınmıştır.)



Şekil 6.9 Al-Cu ikili denge diyagramının alüminyumca zengin ve pratikte kullanılan kısmını göstermektedir. (Metal Handbook 8. Cilt ; Metalografi, Yapılar ve Faz Diyagramları)

## 6.4 Yaşlandırma

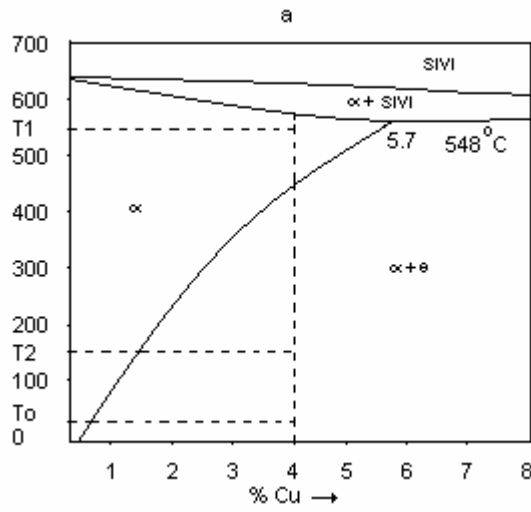
Al-Cu dizgesinde bir katı çözeltiliye yüksek sıcaklıklarda tek faz bölgesinde çözündürme ısı işlemi uygulanır ve sonra birden, çözünlülüğün çok daha az olduğu oda sıcaklığına soğutulursa (su verme işlemi) katı çözeltili aşırı doymuş katı çözeltili olarak yarı kararlı duruma girer. İşte bu aşırı doymuş çözeltili, oda sıcaklığında ya da düşük sıcaklıklarda ısıtılarak, yarı kararlı durumdan kararlı duruma geçebilir.

Bu olay, metalürjide daha önce gördüğümüz gibi, denge dışı durumlarda çökme diye anılır. Bu çökme sonucu su verilmiş yapının sertliği artar. Oda sıcaklığında ya da biraz daha yüksek sıcaklıklarda, sertliğin süreye bağlı olarak artmasına, metalürjide, yaşlanma ya da çökme sertleşmesi; bunu gerçekleştiren ısı işlemede yaşlandırma denir.

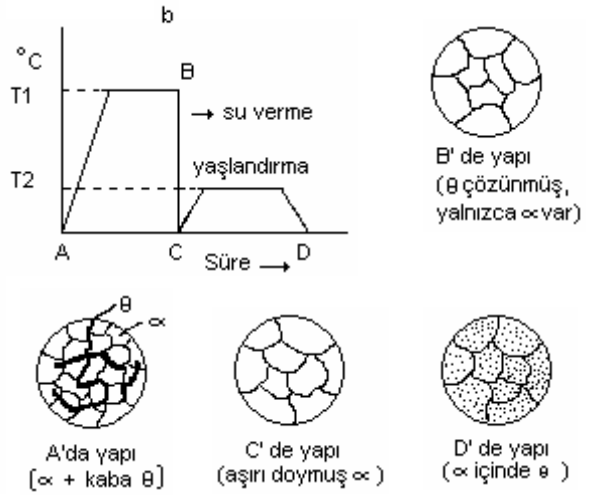
Yaşlanma olayının en belirgin olarak görüldüğü alaşımlar Al-Cu alaşımlarıdır. Al-Cu dizgesinde % 5.7 Cu olan en yüksek çözünlülük değeri altında kalmak koşulu ile, bileşimleri % 1 Cu ile % 4.5 Cu arasında değişen bir dizi alaşım, 500° C sıcaklıkta çözündürme ısı işlemi uygulandıktan sonra su verilip 150° C 'de bekletilirse buna suni yaşlandırma denir. Eğer su verilmiş numune doğal olarak oda sıcaklığında bekletilirse buna tabii (doğal) yaşlandırma denir. Her iki durumda da bekleyen numunenin arttığı gözlenmiştir. Oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda bekletilen numunenin yaşlanma işlemi hızlanır. Ayrıca % Cu arttıkça yaşlandırma etkisi artar.

Eğer % 4 Cu bileşimli bir Al-Cu alaşımı  $T_1$  sıcaklığındaki çözündürme ısı işleminden sonra yavaşça soğutulacak olursa Şekil 6.10' da bulunan A noktasındaki yapı oluşur.( Callister, 1990)





85



Şekil 6.10 a) Al içinde Cu nun maksimum Çözünürlüğü

b) % 0.4 Cu-Al alaşımının yaşlandırma işlemi ve oluşan yapılar

$\alpha$  tane sınırlarında çökelmiş kaba  $\beta$  fazı çökeltileri görülür. Bu faz  $\text{CuAl}_2$  bileşiğidir;  $\alpha$  tane sınırlarında çökmesiyle yapıyı gerçekleştirir.

Yavaş soğuma yerine  $500^\circ\text{C}$  sıcaklıktan bu alaşıma su verilirse,  $\theta$  fazı çökmesi için gerekli yayınma gerçekleşemez ve C deki gibi  $\alpha$  aşırı doymuş çözeltisi oluşur. Bu aşırı doymuş çözelti oda sıcaklığında kendiliğinden, daha yukarı sıcaklıklarda ise hızlandırılmış olarak aşırı doymuşluk durumundan, D'de de görüldüğü gibi, çökeltim yoluyla çıkar. Su verilmiş alaşım  $-20^\circ\text{C}$  de tutulacak olursa aşırı doymuş katı çözelti, çökelmeye yol açmadan, yarı kararlı durumunu korur.

Yukarıda anlatılanlar yalnızca Al-Cu alaşımı için geçerli değildir. Al-Mg alaşımlarının davranışları da benzer biçimdedir. Bu alaşımlarda  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  bileşiği; AlMgSi alaşımlarında ise  $\text{Mg}_2\text{Si}$  bileşiği oluşur. Eğer alaşım AlMgCuSi alaşımı ise bu kez  $\text{Mg}_2\text{Si}$  ve  $\text{CuAl}_2$  her ikisi birlikte çöker. Sertleşmeye yol açan bunların oluşumudur.

Yapay yaşlandırma sıcaklığı oda sıcaklığından  $200^\circ\text{C}$ 'a dek arttırıldıkça, çökeltme ve bunun sonucu sertleşme hızlanır. Sertliğin en yüksek değerine ulaştığı noktada ışık mikroskopunda, yapıda çökeltiler görülmez. Ancak aşırı yaşlandırılmış ve yumuşatılmış yapılarda çökeltileri görmek olasıdır.

Çökelme sertleşmesinin meydana gelebilmesi için uygulanacak alaşımlarda bazı özellikler aranır. Bunlar;

- Denge diyagramı azalan sıcaklıkla, azalan katı çözeltiliyi göstermelidir. Yani denge diyagramı bir solvüs eğrisine sahip olmalıdır.
- Matris yumuşak ve sünek, çözeltili ise sert ve gevrek olmalıdır. Yaşlanabilir pek çok alaşımda çökelti sert intermetalik bir bileşiktir.
- Alaşım su alabilmelidir. (ikinci fazın soğuma ile engellenebilmesi)
- Çökelti maksimum mukavemet ve sertliği sağlayabilmek için matris yapısı ile uyumlu olmalıdır. Dahası, çökeltinin şekli, boyutu ve dağılımı kontrol edilebilmelidir.

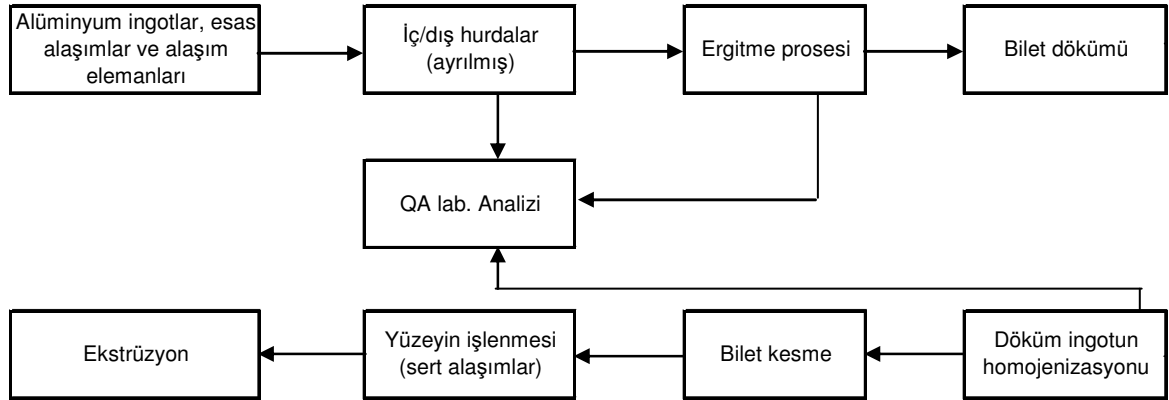
Yaşlanma veya çökelme sertleşmesi metodu en çok alüminyum alaşımları için kullanılır. Bunun nedeni Cu,Mg içeren alaşımları yukarıda bulunan 4 özelliğe kusursuz sahip olmalarıdır. Ayrıca yapının sertleşmesine, oluşan fazların bağdaşıklığı yol açmaktadır. GP bölgecikleri ile çökeltileri  $\alpha$  fazı ile tam bir süreklilik ve bağdaşıklık gösterirler.  $\theta''$  fazının kristal yapısı tetragonaldir ve alüminyum birim hücrelerine iki yönde tam uyur, üçüncü yönde ise uyumsuzdur. İşte bu nedenle yapı içinde sıkışma doğar. Bu sıkışma bağdaşıklık gerinimlerine yol açar. Yaşlanma olayının yarattığı sertleşme işte buradan kaynaklanmaktadır. Bu olay en iyi alüminyum ve alaşımlarında gerçekleştiği için pratikte en çok bu alaşımlar kullanılır.( Onaran, 1995)

## 7 ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ DÖKÜM PROSELERİ

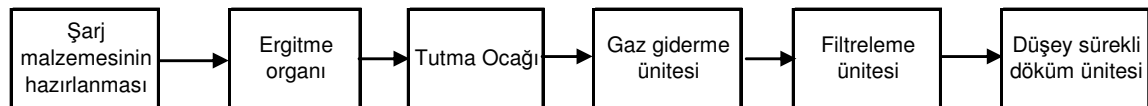
Alüminyum ve alaşımlarının üretiminde iki temel yöntem bulunmaktadır. Bunlardan biri kısaca DC döküm olarak adlandırılan sürekli döküm yöntemi, diğeri ise kısaca TRC olarak adlandırılan ikiz merdaneli sürekli döküm yöntemidir.

### 7.1 Sürekli Döküm Prosesi (DC Döküm)

Bugün endüstride alüminyum biletlerin dökümünde en fazla kullanılan metod olan sürekli döküm yöntemi 1933'te W.T. Ennor tarafından geliştirildi. Şekil 7.1'de bilet yapım prosesinin fonksiyonel blok diyagramı gösterilmeyecektir. Şekil 7.2 ergitme ve döküm proseslerin temel aşamalarını göstermektedir. Ham madde girişiyle son döküm prosesi arasında birçok işlem vardır (Saha, 2000).

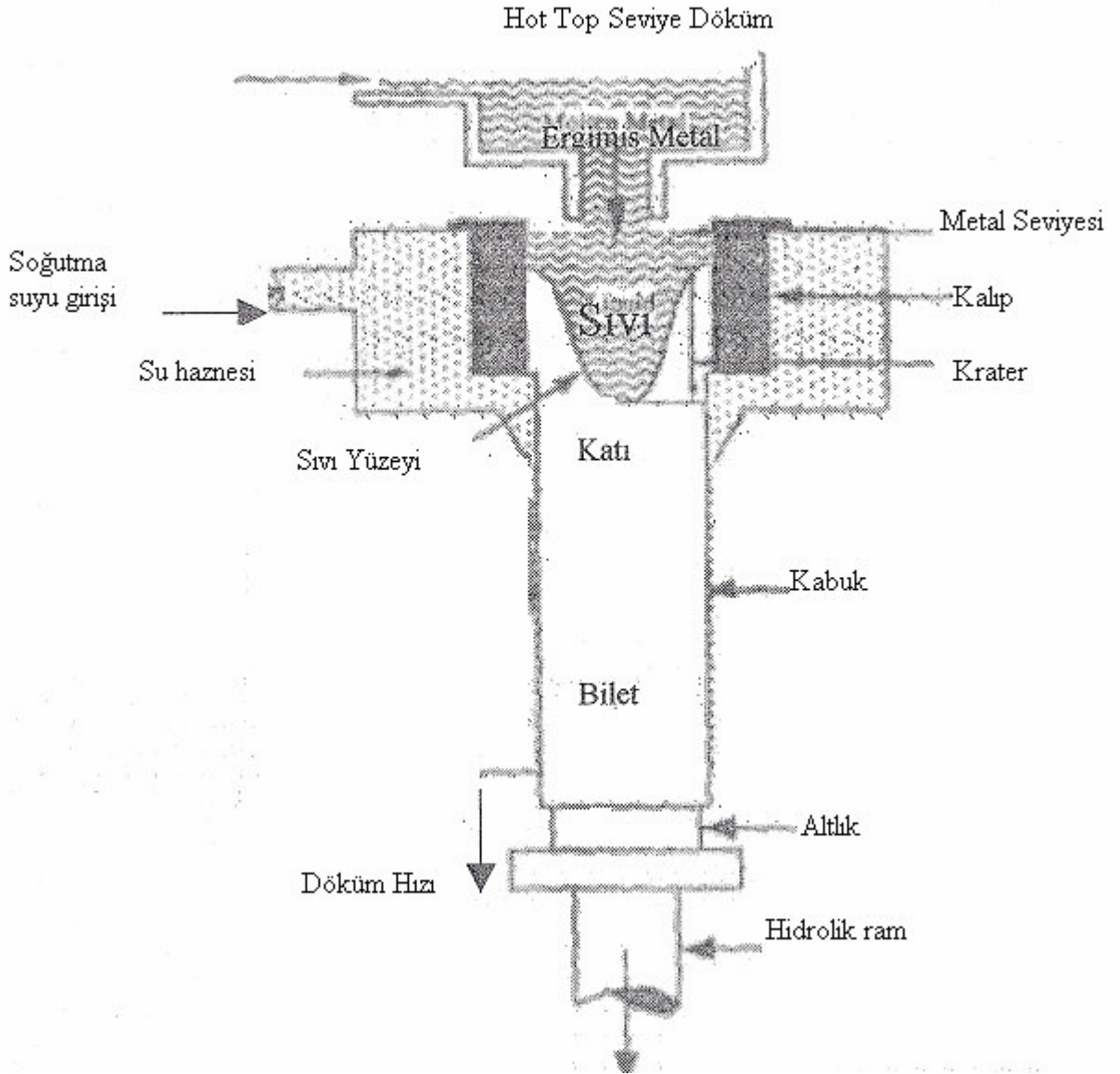


Şekil 7.1 Bilet yapım prosesinin fonksiyonel blok diyagramı (Saha, 2000)



Şekil 7.2 Döküm ve ergitme proseslerinin fonksiyonel blok diyagramı (Saha, 2000)

Geleneksel tip sürekli döküm ile üretilen bilet ve ingotların katılaşması iki soğutma modu ile gerçekleştirilir. Sıvı metal başlangıçta kristalizatör olarak adlandırılan altlığa dökülür. Sıvı metal kalıbın içersinde belirli bir seviyeye geldiği zaman, blok (altlık) sıvı metal akışına eşit hızla aşağıya doğru indirilir. Bu proste döküm mamulünün enine kesit şeklini kalıp şekli belirler, genellikle hadde ve dövme mamuller için dikdörtgen şekilli kalıp, ekstrüzyon üreticileri için daire kesitli, çubuk ve teller için kare kalıplar kullanılır. Sürekli döküm prosesinin şematik görünüşü Şekil 7.3’de gösterilmiştir.



Şekil 7.3 Sürekli döküm prosesinin şematik görünüşü (Saha, 2000)

Altlık zincirli veya hidrolik sistemle aşağıya doğru belirli hızlarla çekilir. Su soğutmalı kalıp duvarına temas eden sıvı metal hemen katılarak bir kabuk teşkil eder. Sıvı-katı geçişi ile oluşan büzülmeden dolayı kabuk içeriye doğru büzülerek ısı geçişini önleyen bir hava boşluğu oluşturur. Daha sonra katılaşmada oluşan büzülme nedeniyle bu kabuk kalıp cidarından ayrılır. Bu şekilde kabuğun oluşumu ve büzülme, kalıptan biletin sürekli olarak çıkartılmasına (sürekli döküme) imkan verir. Katılaşma hızı yavaşlar, bu arada taneler arası ve dendiritler arası cephelerden ingotun veya biletin mekezindeki sıvı kütesinin basıncı ve katılaşma ile oluşan kılcallık etkisi ile dışarıya doğru ötektikçe zengin bir sıvı akımı başlar ve alaşım elementleri (ters segregasyon) kabuğu yığılırlar, hatta bilet yüzeyine çıkarak tekrar kalıpta teması başlatırlar ve hemen ardından katılarak yeniden büzülürler. Kalıp içerisinde kalıp duvarı vasıtası ile gerçekleştirilen ısı transferi ile katılaşmaya “birincil soğuma” adı verilir. Bu bölgede birçok mekanizmanın varlığından dolayı katılaşma çok karmaşıktır. Kalıbın hemen altındaki su püskürtücüleri bilet yüzeyine su spreyi püskürtürler ve ikinci soğutma periyodunu başlatırlar. Su verme, katılaşma hızında ani bir artışa neden olur ve bu olay, tane ve altyapıdaki değişimlerden rahatlıkla gözlenebilir. Ancak ingot merkezine yaklaştıkça soğuma hızı azalır ve yapı dereceli olarak kabalaşır. Yüzeğe uygulanan soğutma suyu altyapıda kaba dendiritik tanelerden, ince dendiritik tanelere geçişi hemen sağlar. Ancak kolonsal kaba tanelerden eşeksenli tane yapısına geçiş hemen sağlanamaz. Bunun ana nedeni; eşeksenli tanelerin çekirdeklenebilmesi için bir kritik büyüme hızının varlığıdır. Ergiyiğin büyük bir bölümünün katılaşmasından hemen sonra bilet içerisinde metalin kendini çekmesinden dolayı huni şeklinde bir boşluk oluşur. Diğer bir ifade ile biletin içerisinde daima sıvı metal derinliği mevcut olur, buna “sump” (krater) denir (Burger, 1999).

Krater derinliği döküm koşullarına bağlıdır. Döküm hızı  $V_c$ , katılaşma hızı  $V_s$  değerini belirler. Katılaşma hızı küçük olduğunda daha derin krater oluşur,  $\theta$  açısı küçülür. Katılaşma esnasındaki çökeltiler, tane boyutu gibi yapısal özellikler  $V_c$  den çok  $V_s$  tarafından belirlenmektedir.

Kaba tane-ince tane geçişi olduktan sonra yapı, bilet merkezine doğru ilerlerken bir süre incelmeye devam eder ve daha sonra dereceli olarak kabalaşır. Eşeksenli tanelerin çekirdeklenebilmesi ve büyüebilmeleri için, büyüme hızının (arayüzey ilerleme hızı) belirli bir değerin üzerinde olması gerekir. Döküm hızı normal olarak 50-100 mm/dak. arasındadır. Sürekli dökümdeki katılaşma hızı, su soğutmasız kokil kalıplara dökülen biletlere göre hemen hemen 10

defa daha fazladır. Katılma hızları arasındaki bu fark döküm yapısında önemli değişiklikler meydana getirir. Sürekli dökümde taneler ve inklüzyonlar, kokil döküme göre önemli ölçüde daha incedir, hızlı katılma nedeniyle sürekli döküm biletlerde ters ingot segregasyonu hemen hemen hiç yoktur. Yani enine kesit boyunca kimyasal bileşimde çok az bir fark görülür. İngot segregasyonu, kokil dökümün dezavantajlı bir karakteristiğidir. Sürekli dökümde hızlı ısı iletimi yapıdaki tanelerde alaşım elementlerinin eşitlenmesini engeller, dolayısı ile aşırı doymuşluk ve tane segregasyonu yavaş soğutulan kokil döküme nazaran daha fazladır. Ancak ingot segregasyonunun (makrosegregasyon) tersine aşırı doymuşluk ve tane segregasyonu homojenizasyonla giderilebilir. Sürekli dökümde, dökümün dış kabuğunda alaşım elementlerince zengin bir “katmerleşme” bölgesi gelişebilir. Bu da bir ingot segregasyonu tipidir, homojenizasyonla giderilemez. Fakat bu segregasyon yüzeye yakın dar bir bölgede sınırlandırıldığından talaş kaldırma işlemi ile giderilebilir (Burger, 1999).

DC dökümde farklı alaşımlar ve bilet boyutları farklı kalıplar gerektirirler. Modüler kalıp sistemi mevcut döküm makinesinin kapasitesini çok fazla arttırabilir. Modüler tasarım kalıp bileşenlerinin hızlı değişimine imkân verir. Bu tasarım aynı makinede farklı hızlarda ve farklı boyutlarda bilet dökümüne olanak sağlar (Saha, 2000).

Yeni eğilim programlanabilir lojik kontrol sistemiyle donatılmış büyük DC döküm makineleri kullanma yönündedir. Sensör ve programlanabilir lojik kullanarak otomatik sistemler şimdi döküm işleminin birçok parametresini kontrol edebilmektedirler (Saha, 2000).

Diğer tekniklerle karşılaştırıldığında DC döküm sisteminin özellikle sert 2xxx ve 7xxx serisi alaşımlar açısından birçok avantajları vardır (Saha, 2000):

- Metal Segregasyonu minimumdur
- Geniş ingotlar üretebilir
- Farklı hızlarda döküm imkanı sağlar
- Sert alaşımlarda çatlak oluşumunu minimize eder

- Ergimiş metali düşük sıcaklıkta yavaş ve üniform bir şekilde transfer eder (Saha, 2000)

### 7.1.1 Sürekli Döküm Değişkenleri

Alüminyum bilet dökümünde üretim performansını etkileyen belli başlı değişkenler şunlardır (Saha, 2000).

- Döküm sıcaklığı
- Döküm hızı
- Kalıp tipi
- Metal yüksekliği
- Su akış hızı

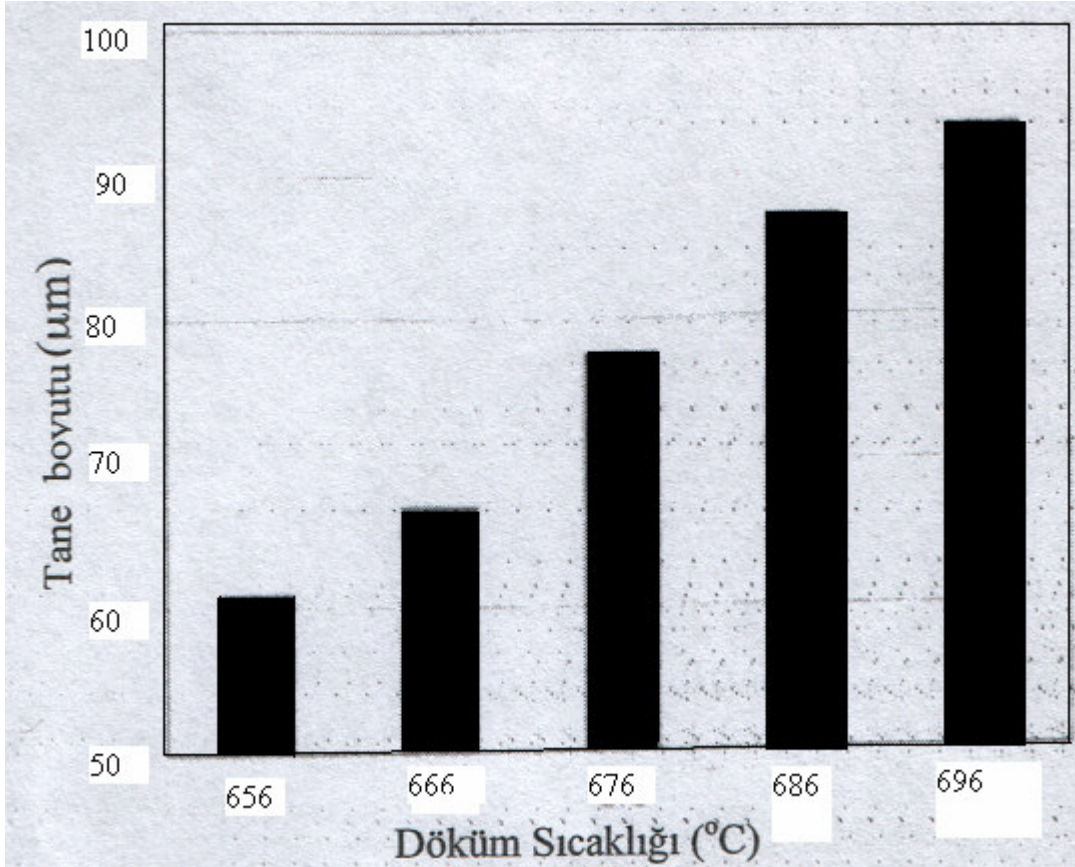
#### 7.1.1.1 Döküm Sıcaklığı

Ocaktaki ergimiş metal sıcaklığı gaz absorpsiyonunu ve oksid oluşumunu önlemek için mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Metal döküm ünitesine dökülen alaşımın sıcaklığı, likidüs sıcaklığının 28°C üzerindeki bir sıcaklığa ulaşmalıdır. Bazı yaygın alüminyum alaşımlarının likidüs ve döküm sıcaklıkları Çizelge 7.1 de verilmiştir (Saha, 2000).

Çizelge 7.1 Alüminyum alaşımlarının likidüs ve döküm sıcaklıkları (Saha, 2000).

Alaşım Sistemi	Likidüs Sıcaklığı °C	Döküm Sıcaklığı °C
Al, AlMn	660	688
AlMg, AlMgSi	650	680
AlCuMg, AlZnMgCu	640	670

AlMgSi alaşım biletlerinin sürekli dökümü ile ilgili yapılan bir çalışmada farklı döküm sıcaklıklarında tane boyutlarının farklı olduğu gözlenmiştir. (Şekil 7.4) Döküm sıcaklığı azaldıkça tane boyutu küçülmektedir (Dündar vd., 2002).



Şekil 7.4 Döküm sıcaklığının DC döküm biletin tane boyutuna etkisi (Dündar vd., 2002).

#### 7.1.1.2 Döküm Hızı

Döküm hızı DC dökümdeki en önemli parametrelerden biridir. Bilet boyutu ve alaşım tipi döküm hızını belirler. Dikey yarı sürekli döküm prosesinde AA6063 alaşımı için döküm hızları çapı 178mm olan bilet için 130 mm/dak, çapı 230 mm olan bilet için 100 mm/dak dır (Saha, 2000).



### 7.1.1.3 Kalıp tipi

Kalıp malzemesi hafiflik, iyi işlenebilirlik ve iyi ısı iletkenlik gibi özellikleri karşılamalıdır. Alüminyum alaşımları olan 6061 ve 5052 alaşımları uygun kalıp malzemeleridir. DC kalıbı öyle dizayn edilir ki, soğutma suyu ilk önce kalıp duvarlarına temas eder ve daha sonra kalıptan çıkan döküm yüzeyine püskürtülür. Bu DC döküm prensipleri göz önüne alınarak çeşitli tip kalıplar tasarlanmıştır (Saha, 2000).

Şu anlaşılmıştır ki, DC ingotta bulunan yüzey ve yüzey altı kusurlar soğuma esnasında kabuk oluştuktan sonra meydana gelen boşlukla ilgilidir. Boşluk kalıba olan ısı akışını yavaşlatır ve katılaştıran metalin tekrar ergimesi kusurlara yol açar. Bu kusurlar ingotun yüzeyinin işlenmesini (sıyırma) zorunlu kılar ve dökülen alaşıma ve malzemenin kullanılacağı uygulamaya bağlı olarak en iyi ingot kalitesinin sağlanması için DC prosesinin modifiye edilmesini gerektiren nedenlerden birini teşkil eder (Ertan vd, 2000).

Optimal bilet yüzey kalitesi elde etmek için kalıp tasarımları gelişmeye devam etmektedir. Kalıp tasarımındaki son gelişmeler soğutulan kalıp duvarlarındaki ısı transferinin, bilet yüzey kalitesini ve malzemenin ekstrüzyon edilebilirliğini arttırmak için azaltılması yönündedir. Yaygın kalı tasarımları Air Slip (ABD), AirVeil (Almanya) ve Showa Process (Japonya) şu an bilet döküm endüstrisinde mevcuttur. Ayrıca büyük alüminyum üreticilerinin çoğu kendi bilet döküm kalıp sistemlerini üretmektedirler (Saha, 2000).

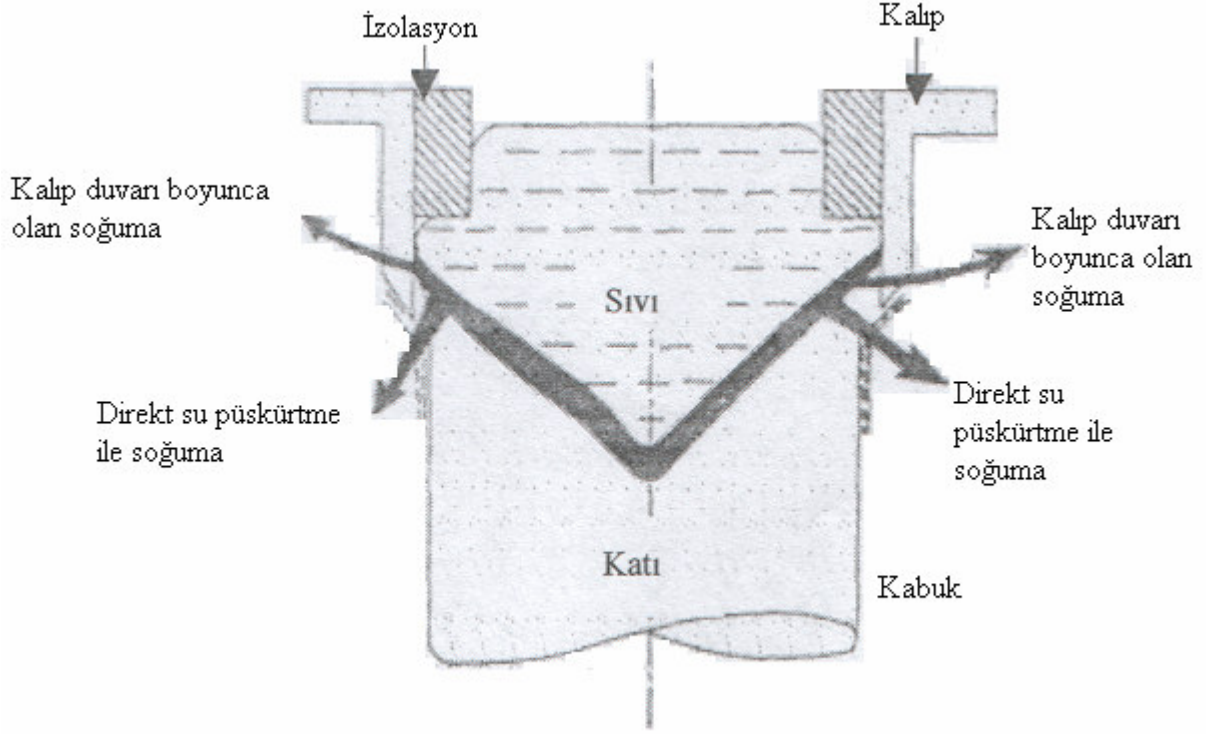
Air Slip kalıp teknolojisi 1983 yılında geliştirilmiş, mükemmel bir yüzey ve yapı özellikleri elde etmek için MaxiCast hot-top döküm donanımına ilave edilmiştir. AirSlip teknolojisinde döküm arayüzeyi olarak geçirgen grafit halkalı kısa kalıplar kullanılır. Döküm esnasında, proses gazı az miktardaki yağlayıcı ile bir hava yatağı oluşturularak ergimiş metali kalıptan ayırır ve izole eder. Bu hava yatağı pürüzsüz bir yüzey oluşmasını sağlar ve yüzey altı segregasyonu minimuma indirir. Genelde, kalıp boyu bilet çapı büyüdükçe veya döküm hızı azaldıkça artar. Hava yatağı sayesinde ele alınan çaptaki kalıpta diğer kalıp teknolojileri ile karşılaştırıldığında çok farklı döküm hızlarında ve soğuma alanlarında çalışabilir (Ertan vd, 2002).

AirSlip teknolojisi ile geniş bir alaşım sahasında ticari üretim yapılmaktadır, alaşım aralığı 1100 den 7150 ye kadar değişmektedir. Yüzey görünüşü dökülen alaşım kompozisyonundan etkilenir AirSlip teknolojisi hem büyük hem de küçük çaplı biletlerin üretilmesinde büyük avantajlar sağlar. Bilet yüzeyindeki oksit tabakasının sığ olması vasıtasız ekstrüzyonda bilet yüzeyinden daha az miktarda malzeme kaldırılacağı anlamına gelir (sıyırma). Ters segregasyon tabakası tüm alaşımlar için 1 mm olarak sınırlanmıştır (Saha, 2000).

AirSlip teknolojisinin sağladığı avantajlar (Hirsch, 1997):

- Daha yüksek döküm hızlarında çalışılmasına müsaade eder ve produktivitenin artmasını sağlar.
- Daha iyi metalurjik özelliklere sahip bilet üretilmesini sağlar ve bu ekstrüzyon verimliliğini artırır.
- Metalurjik özelliklerin iyileştirilmesi ve daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmesi ekstrüzyon kalıbının ömrünü uzatır.
- Daha iyi mekanik özelliklere sahip bilet üretilir.

Auchterloine, geniş alaşım sahasında ve farklı çaplarda bilet dökümü için kullanılan hız tablalı ve değişken özellikli olan bir başka başarılı modüler kalıp sistemi tarif etmiştir. Tipik bir izolasyonlu kalıp sistemi Şekil 7.5'te gösterilmiştir. Kalıp duvarından olan soğuma mevcut izolasyonla azaltılmıştır. Sonuç olarak bu sistem pürüzsüz bir yüzey, ince bir kabuk ve üniform mikroyapı sağlar (Saha, 2000).



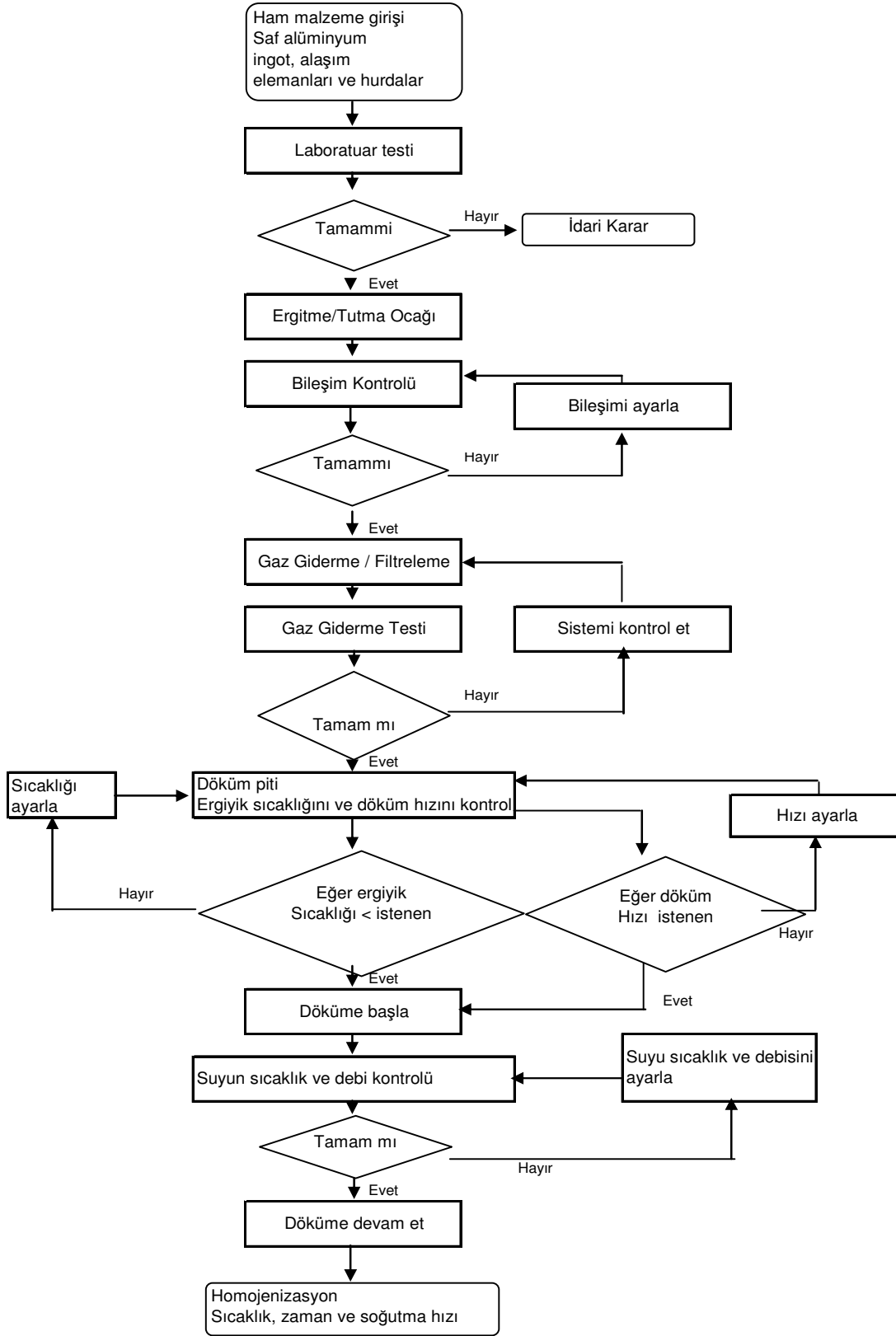
Şekil 7.5 İzolasyonlu modüler kalıp sistemi (Saha, 2000).

#### 7.1.1.4 Metal Yüksekliği

Metal yüksekliği, kalıbın dibinden sıvı metal yüzeyine kadar olan mesafedir ve genellikle en az 51 mm olarak alınır (Saha, 2000).

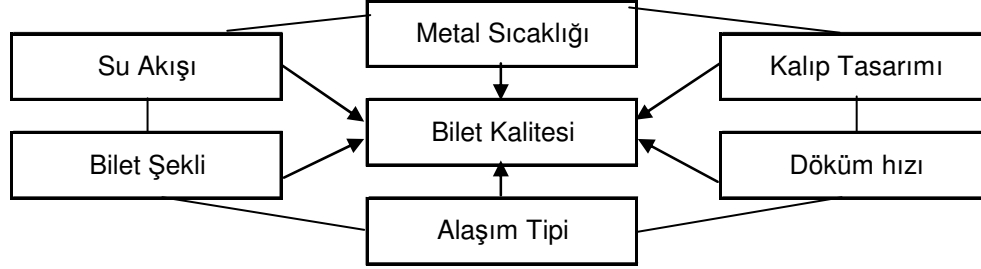
#### 7.1.1.5 Su Akış Hızı

DC döküm esnasında yaklaşık olarak 1Mj/kg ısı ingottan transfer edilmelidir. Su sıcaklığı ve akış hızı öyle ayarlanmalıdır ki su ingotun bütün yüzeyine temas edebilsin ve yüzey boyunca aşağıya aksın. Suyun ingot yüzeyinden sekmesi önlenmelidir (Saha, 2000). Döküm değişkenlerinin tipik akış diyagramı Şekil 7.6'da gösterilmiştir.



Şekil 7.6 DC bilet döküm değişkenlerini tipik akış diyagramı (Saha, 2000).

Özet olarak, DC döküm biletinin kalitesi ve üretim performansı Şekil 7.7’de kapalı zincir şeklinde gösterilen faktörlerden etkilenmektedir.

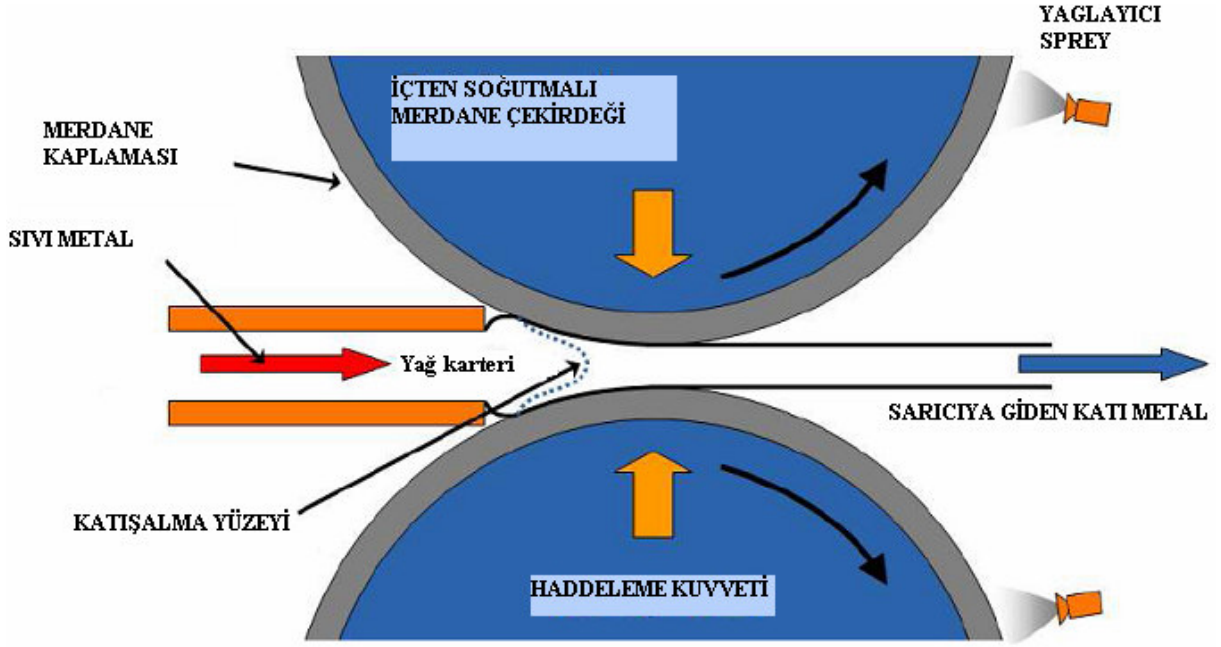


Şekil 7.7 Belli başlı değişkenlerin bilet kalitesine etkileri (Saha, 2000)

## 7.2 İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemi

İkiz merdaneli döküm makineleri alüminyum endüstrisinde yaklaşık son 50 yıldır kullanılmaktadırlar. Genellikle ikiz merdaneli sürekli döküm yöntemiyle imal edilebilen alüminyum alaşımlarının donma sıcaklıkları birbirine yakındır ve döküm kalınlıkları 6mm civarındadır. Her ne kadar bu yöntem ile yüksek kaliteli levhalar üretilebilse de, üretilebilen alaşım çeşidi ve üretim verimi düşüktür. Geçtiğimiz son 10 yılda bu negatif etkilerin önüne geçebilmek için birçok araştırma yapılmıştır.

Karmaşık katılaşma karakteristiğini ve haddelemesini çözebilmek için bir dizi nümerik modellemeler geliştirilmiştir ( Godet vd, 2004). Deneysel çalışmalar ve nümerik modellemeler sonucunda daha ince kalınlıklarda döküm yapmanın üretim verimliliğini arttırdığı ve maliyetleri düşürdüğü gözlenmiştir.



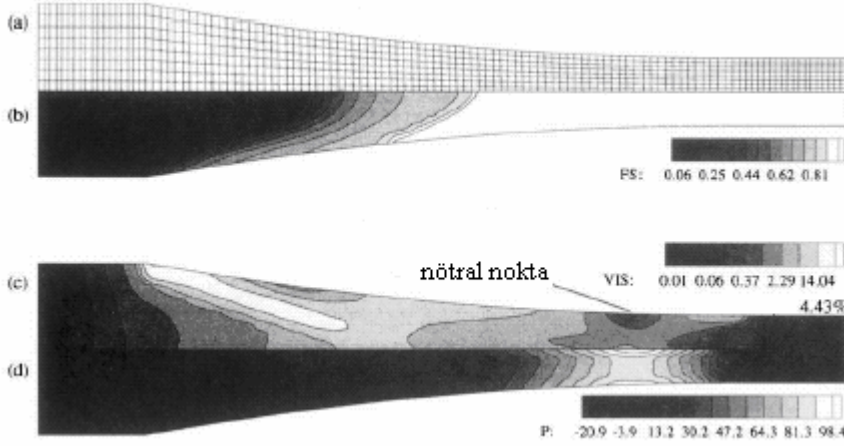
Şekil 7.8 İkiz merdaneli sürekli döküm makinesi çalışma şeması.

İkiz merdaneli sürekli dökümde Şekil 7.8’de görüldüğü gibi , ergitme fırınından gelen erimiş metal su soğutmalı haddelere doğru yönelir, burada katılaştır ve haddelenir. Dikey ve yatay olmak üzere iki tip ikiz merdaneli sürekli döküm makinesi bulunur. Metalin levha düzleminin yönlendirilmesine göre dikey veya yatay tip olarak ayrılırlar. Dikey veya yatay tiplerin merdane boyutları endüstride farklı boyutlarda kullanılmaktadır. Kullanılan makinenin özelliklerine bağlı olarak döküm kalınlıkları 0,7mm’den 6,5mm’e kadar değişebilmektedir. Döküm işlemi boyunca merdaneler üzerinde sürekli olarak kayganlaştırıcı hadde yağları kullanılır, böylece üretilen alüminyum şerit levhaların paslanmaz çelik olan döküm merdane yüzeylerine yapışmaları önlenir.

Günümüzde ortaya çıkan gelişmeler sayesinde 1XXX, 2XXX, 3XXX, 5XXX, 6XXX ve 8XXX gibi birçok alaşım serisi bu yöntemle üretilmektedir.

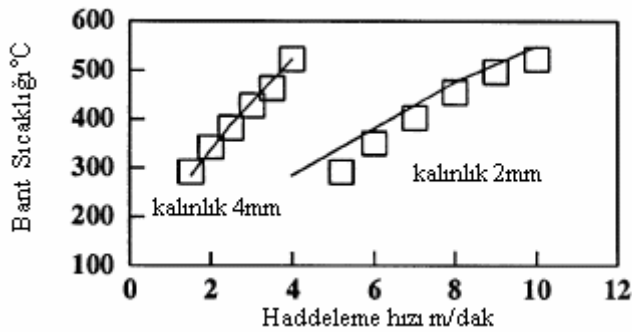
### 7.2.1 Nümerik Modelleme

En sık kullanılan nümerik model Oxford üniversitesinde prof. Bradbury [4 ve5] tarafından geliştirilen metalin katı ile yarı katı durumu arasındaki deformasyonunu inceleyen modeldir. Bu modelde ortogonal olmayan lineer koordinatlı ve hacim kontrollü metot kullanılır. Merdanelerde karşılan tipik hacim kontrolü örneği Şekil 7.9’da görülmektedir.

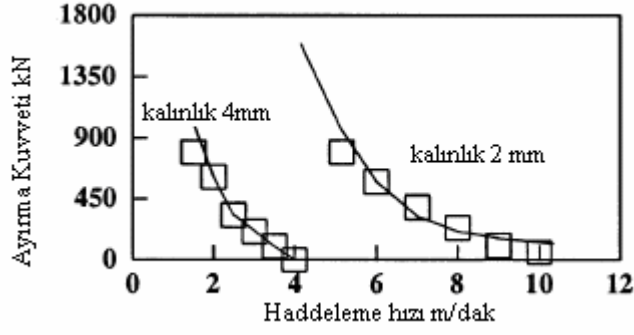


Şekil 7.9 a) Sonlu hacim grid'i, b) Katı parça, c) Etkin gerilme oranı, d) Güncel model üzerinde basınç izobarları.

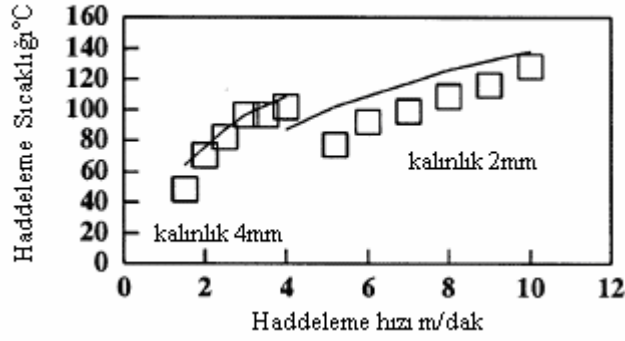
Katı parçaların tipik etkin gerilme ve basınç sonuçları Şekil 7.9 b, c ve d'de görülmektedir. Farklı kalınlıkta olan iki malzemenin haddeleme hızının fonksiyonu olarak, deneysel ve ölçülmüş değerlerinin karşılaştırması Şekil 9.3'de görülmektedir. Şekil 7.10 a ve b'de ise öngörülen malzeme kalınlığı ve haddeleme sıcaklığı gösterilmektedir. Bu şekillerden de anlaşılacağı üzere yapılan deneysel çalışmalar bize teori ve pratiğin aynı paralelde olduğunu göstermiştir (Hunter vd., 2000)



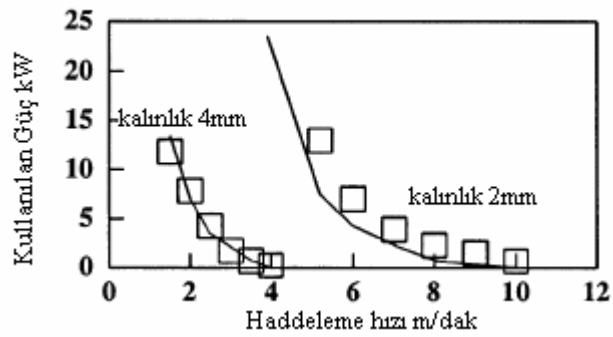
Şekil 7.10.a Kalınlığa bağlı bant sıcaklığı değişimi.



Şekil 7.10 b Kalınlığa bağlı ayırma kuvveti değişimi.



Şekil 7.10 c Kalınlığa bağlı haddeleme sıcaklığı değişimi.



Şekil 7.10 d Kalınlığa bağlı kullanılan güç değişimi.



Bu model tarafından öngörülen bir diğer özellik de, yağ karterinin tabanında artan hızın katı veya yarı katı metalin deformasyondan dolayı geriye hareket etmesinin sonucunda haddeleme hızından küçük olmasıdır.

## 7.2.2 Makroskopik Kusurlar

İkiz merdaneli sürekli döküm yönteminde en sık karşılaşılan makroskopik hatalar yapışma ve bükülmedir.

### 7.2.2.1 Yapışma

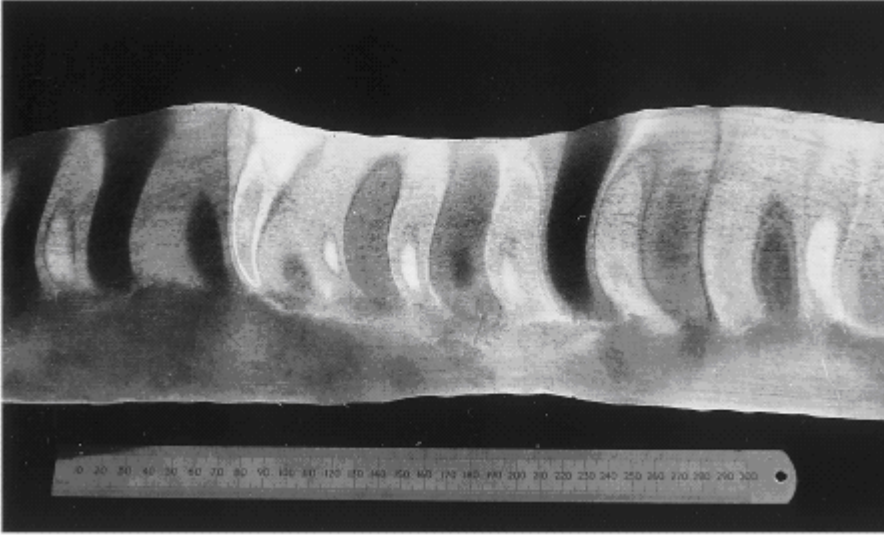
Yaklaşık 6mm kalınlıktaki döküm malzemelerinde metalin döküm haddelerine yapışması çok önemli bir hata değildir. Ticari uygulamalarda döküm merdanesi üzerinde metal oksit katmanı oluşur ve sadece aralıklı olarak yağlayıcıların kullanılmasına ihtiyaç duyulur. Döküm malzemesinin kalınlığı azaldıkça yapışma faktörü önem kazanmaya başlar. Yeterli miktarda yağlayıcı kullanılmadığı durumlarda metal her iki merdanelinin de yüzeyine yapışıp kalabilir ve ayrılma esnasında hasar görek parçalanabilir. Bu sebeple 2mm ve daha ince kalınlıklarda döküm işlemi gerçekleştirildiğinde yüksek miktarlarda yağlayıcı kullanılır. Metalin merdane yüzeyine parçalı yapışma durumunda ise merdane yüzeyinin kaplamasına zarar verebilir ve bu sebepten dolayı zarar gören merdane yüzeyi sürekli olarak malzeme üzerine yapışmaya başlar. Tecrübeler göstermektedir ki, yapışmanın önüne uygun kalınlık için uygun miktarda yağlayıcı kullanılarak geçilebilir. Çok kalın döküm malzemelerinde ise ısı transferi oranı düşük kaldığından yağlayıcılar metal üzerine yapışmaktadır (Li vd, 1995). Tipik olarak malzemenin merdaneyi terk etme hızı katı hal haddelemesinden dolayı merdanelinin hızından %4 ila %10 daha yüksektir.

Deneysel çalışmalar bize yüzeye uygulanan yağlamanın üniform olarak dağılmasının yağlama oranı kadar önemli olduğu göstermiştir. Yüksek kalınlıklarda meydana gelen metal oksit tabakasının yüzeyden yapışarak ayrılması mı yoksa yağlayıcılar kullanılarak yüzeye yapışmanın engellenmesinin mi daha uygun bir yöntem olduğu henüz netlik kazanmamıştır. Sadece daha fazla katı malzeme özelliği gösteren metallerde yağlayıcıların kullanılması daha uygun gözükmektedir. En başarılı yöntem sıcak hadde merdaneleri üzerine püskürtülen su bazlı grafit emilimi sonucunda ortaya çıkmıştır. Püskürtülen suyun mutlaka hadde dönme turunu tamamlamadan kurumuş olması gerekmektedir. Bu işlemi gerçekleştirmek için bilgisayar

kontrollü grafit emilim pompası kullanılmaktadır. Kullanılan bu pompanın basma oranı malzemenin yürüme hızına, kalınlığına ve alaşım çeşidine bağlı olarak değişir. Genellikle Mg içeren alüminyum alaşımları daha az yapışma özelliği gösterirler, özellikle alaşım içerisinde %2'den daha fazla Mg bulunduğu durumlarda yapışmaya daha da az rastlanır.

### 7.2.2.2 Bükülme

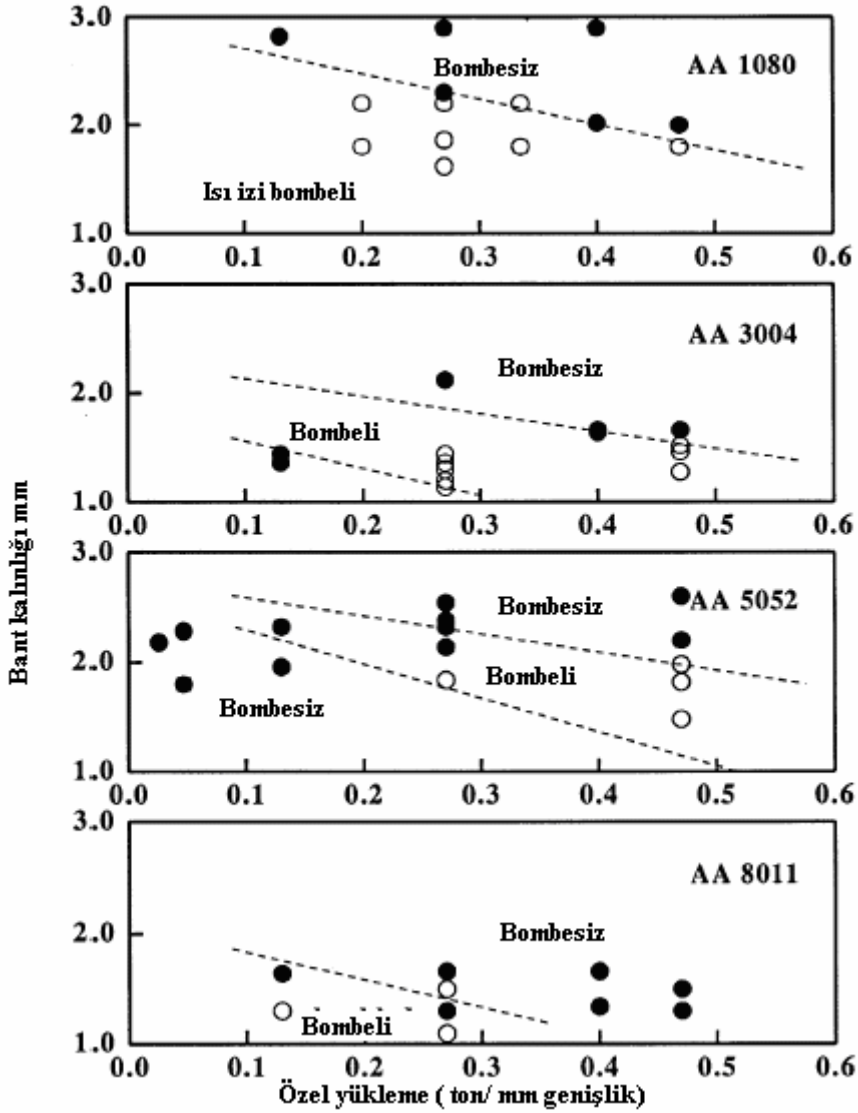
Bükülme kusuruna örnek Şekil 7.11'de görülmektedir. Bu örnekte levhanın bir kenarı kısa diğer kenarı daha uzundur, bunun sonucu olarak da malzemede bukule şeklinde ek bir oluşum meydana gelmiştir. Malzeme miktarı orta veya kenar bölgelerden azalıp bukule de artmaktadır. Deneysel çalışmalarda oluşan buklenin genellikle tek bir kenarda oluştuğu gözlenmiştir. Bazı nadir koşullar altında bukleden dolayı oluşan uzun kenarın kısa kenarın iki katına kadar çıkabildiği görülmüştür. Oluşan bukule malzeme bobin olarak sarılmadan önce sağ kenarda sol kenara kayabilmektedir. Bu değişim döküm makinesinin ayarlarıyla bağlantılı değildir.



Şekil 7.11 AA1200 alaşımında bombeli duruma örnek.

Yeniden bukule oluşumu genişliği veya yüklemeyi azaltarak sağlanabilir. Yapılan deneysel çalışmaların örnekleri Şekil 7.12'de görülmektedir. Bu değişim sabit bir doğrultu üzerinde gerçekleşmez, malzeme üzerinde değişken halde gözlenir. Genellikle uygulanan yük azaltıldığında bukule oluşumunda azalma görülür. Fakat yüklemeyi azaltmak malzeme üzerinde yapışmaya veya izlere neden olur. Genellikle malzemenin bir kenarı sıkı, diğer tarafı gevşek

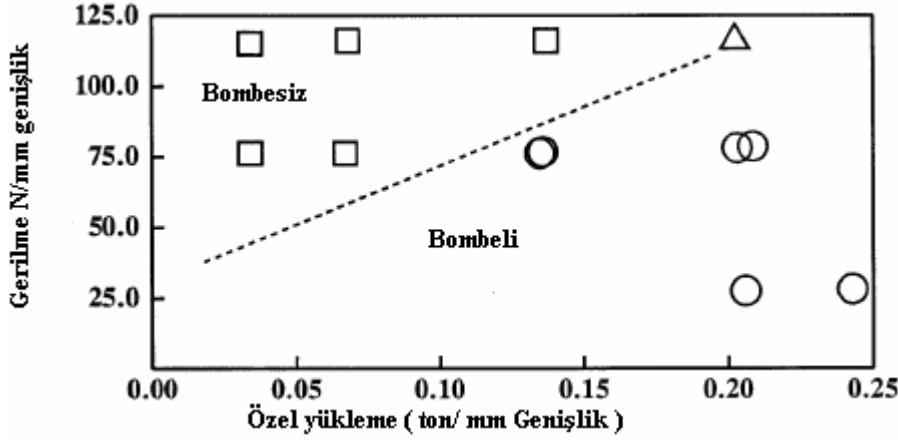
olur. Ancak genellikle gevşeklik merkez hatta görülür. Saflık derecesi yüksek alaşımlarda genellikle ısı çizgileri sıkı kenarda görülür. Donma aralığı geniş olan alaşımlarda yüzey kalitesi çıplak gözle daha düzgün görülse de, metalurjik inceleme de uzun olan kenarın aşırı derecede deforme olduğu ve kısa kalan kenarın uzun kenara göre daha az haddelendiği sonucuna ulaşılır (Hunt vd, 2000).



Şekil 7.12 İkiz merdaneli sürekli dökümle üretilen bantların özel yükleme altındaki şekilleri.

Oluşan hataları karakterize etmek için birçok deney yapılmıştır. Buna göre arka sardırma merdanesinde geriye doğru gerdirme yapmanın bukle oluşumunu azalttığı gözlenmiştir. Bazı alaşımlar bukle oluşumuna daha meyillidir. Örneğin AA1200 alaşımı AA1100 alaşımı ile çok

yakın kimyasal kompozisyona sahip olmasına rağmen, AA1100'e göre bukle oluşumuna çok daha meyillidir (Şekil 7.13).



Şekil 7.13 Gerilme ve özel yükleme altında oluşan bombeli ve bombesiz durumlar.

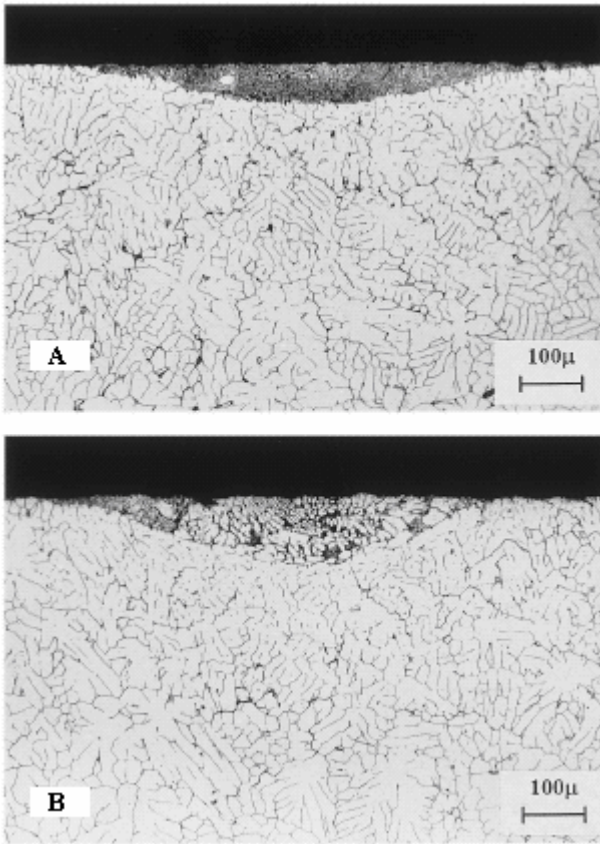
Yapılan araştırmalar sonucunda haddeme esnasında oluşan buklelerin birçok değişik faktörden ortaya çıktığı sonucuna ulaşılmıştır. Sıvı metal besleme sıcaklığı, kullanılan yağlayıcı miktarı, hadde merdanesi yüzeyinde bulunan herhangi bir şekil bozukluğu veya malzeme çıkış pozisyonu malzemenin bir kenarında metal yığılmasına neden olabilmektedir. Bu bölgede artan haddeme oranı malzeme yüzeyinde seyrek çukurcuklar oluşmasına neden olur. Kalın levhalarda malzemenin sertliği ve haddenin gerilimi bukle oluşumuna sebep olur. Malzemenin kalınlığı azaldığında levhanın sertliği de azalacaktır ve katılaşma sürecinin hassaslığı artacaktır. Bunun sonucunda buklelenme başlayacaktır. Bu oluşumun önüne geçmek için yağlayıcılar devreye girecektir. Fazla haddelenen kısım hadde merdanesinin yüzeyinden film tabakasını sıyırıp alacak, ısı transfer katsayısını arttıracak ve katı miktarını arttıracaktır (Godet vd, 2004).

Sonuç olarak bukle oluşumunun katılaşma süreci esnasında meydana gelen ve malzemenin çeşitli bölgelerinde kaymalara sebep olan bir oluşum olduğu tespit edilmiştir. Bu oluşum makine ve haddeme koşullarına bağlı olarak yeterli incelikte olan tüm malzemelerde karşılaşılan bir durumdur.

### 7.2.3 Yüzey Kusurları

İkiz merdaneli sürekli döküm yönteminde bir çok yüzey hatasıyla karşılaşmaktadır, bunların içinde en önemlisi yüzey kaymasıdır.

Yüzey kayması kusuru, yüzeyde yüksek konsantrasyonlu intermetalik parçacıklar içeren, çözülmüş metalce zengin, çukurcuklardır. Bu çukurcukların oluşumu serttir ve akış yönüne doğru soğuk haddemesi yapılırken deforme edilmeleri oldukça zordur. Bu çukurcukların boyutları 0.05mm genişlik ve 0.01mm derinlikten 1.5mm genişlik ve 0.1mm derinliğe kadar değişebilmektedir. Aşağıda Şekil 7.14’de bu çukurcuklara örnek görülmektedir.



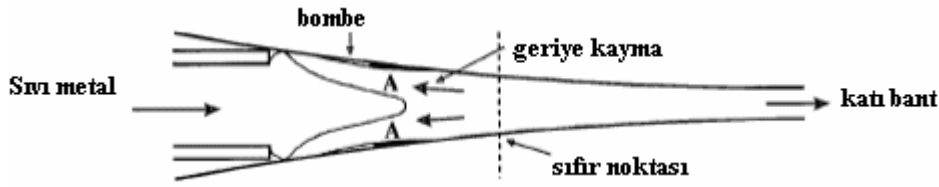
Şekil 7.14 Al 0,3wt%Fe alaşımında görülen yüzey boşluğu örneği. a) 1. tip yüzey boşluğu örneği.

b) 2. tip yüzey boşluğu örneği.

Oluşan bu çukurcukların büyüklüklerinin ölçülmesi ve miktarlarının belirlenmesi malzemenin eni boyunca birim uzunluklarda yapılır. Deneysel çalışmalar ve araştırmalar sonucunda, döküm

makinesinin yeterli yükseklikte yüklenmesi ile oluşan çukurcukların daha küçük ve seyrek olduğu belirlenmiştir. Bu çukurcukların sıklıkları öncelikle alaşım cinsine bağlıdır. Örneğin AA1100 alaşımı çukurcuk oluşumuna oldukça meyilli olmasına karşın, AA3003 alaşımında bu oluşum gözlenmez (Godet vd, 2004).

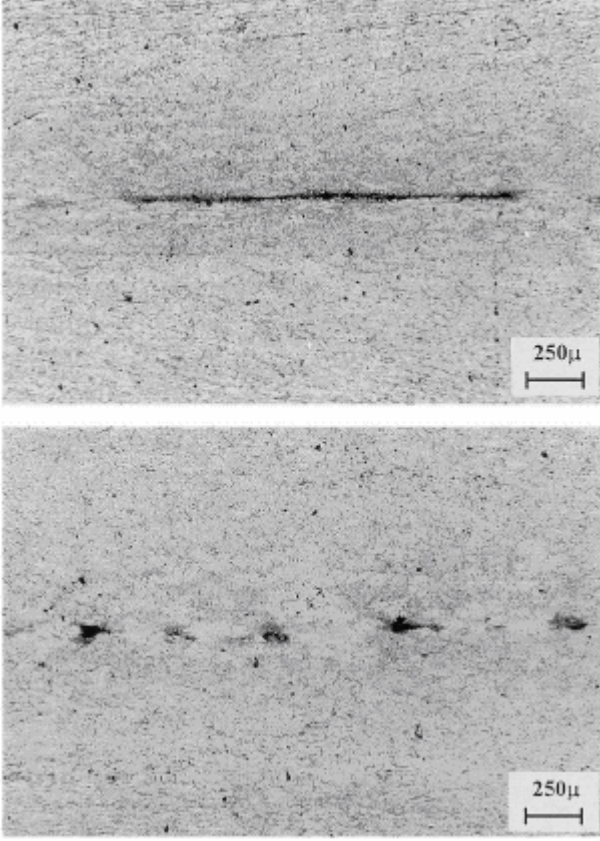
Araştırmalar sonucunda oluşan bu çukurcukların döküm merdanesi ile yarı katı metal arasında açılan aralıktan kaynaklandığı anlaşılmıştır. Oluşan bu aralık daha sonra zengin metal çözeltisi ile dolar. Başlangıçta malzemenin çıkış noktasında yarı katı metal merdanenin üzerinde katılaşıyor ve merdaneye aynı hızda merdanede oluşan aralığa doğru yönelir. Yağ karteri yakınında yarı katı malzemenin hızı, geriye yönelmenin katı ve yarı katı metali deforme etmesinden dolayı merdanenin hızından daha düşük olur. Hızdaki bu değişimler Şekil 7.15’de gösterilen A bölgesinde sıkışmış kuvvetler doğmasına neden olur.



Şekil 7.15 Şerit bant ve haddeleme yüzeyi arasındaki etkileşim.

#### 7.2.4 İç Yapı Kusurları

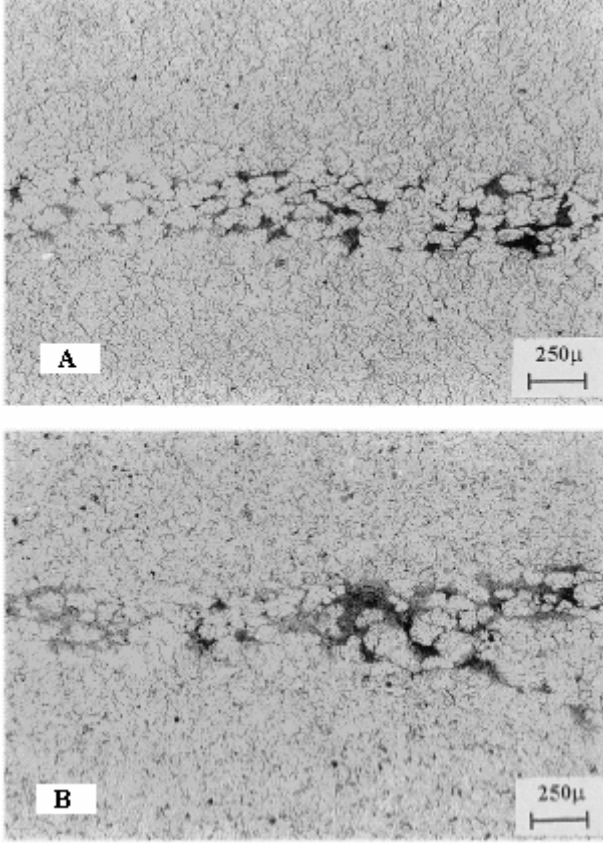
İç yapı bozuklukların başında kanal segregasyonu, deformasyon segregasyonu ve bağlı yapı kusuru gelmektedir. Kanal segregasyonları, döküm yönünde yönelmiş silindirik yapıdaki düşük ergime noktalarına sahip bölgelerdir (Şekil 7.16).



Şekil 7.16 AA6111 alaşımında kanal boyunca görülen segregasyon.

Deformasyon segregasyonları ise, merkez hattı boyunca sıralanmış düşük ergime noktalarına sahip bölgelerdir ( Şekil 9.10).



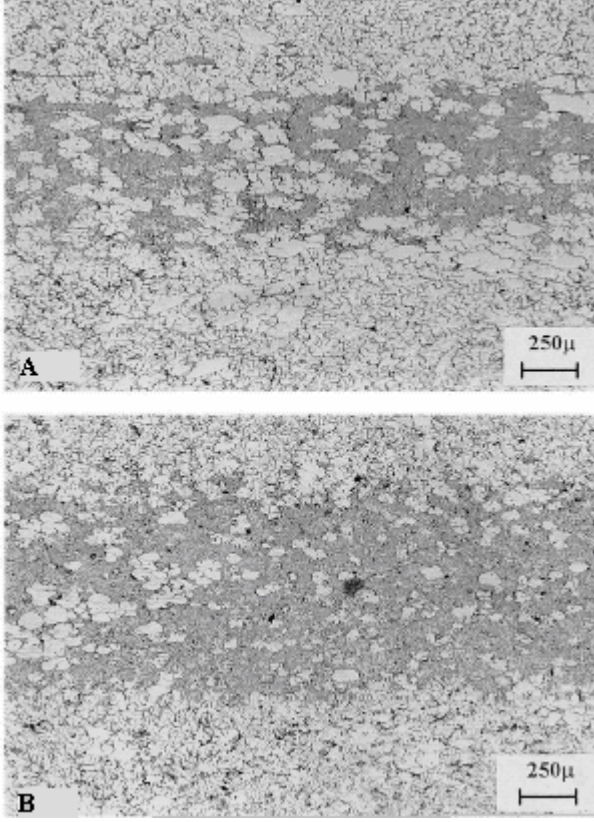


Şekil 7.17 AA6111 alaşımında görülen deformasyon segregasyonu. a) boylamasına, b) enlemesine.

Bu tip segregasyonlar, deformasyon sürecinin çok hızlı geliştiği durumlarda, katı ve sıvı metalin birlikte deforme olması ve sıvı metalin katı içerisinde sıkışmasıyla meydana gelir. Böylece katı metal içerisinde küçük sıvı bölgeleri oluşur (Hunt vd, 2000). Bunlar döküm yönü boyunca oluşmazlar (Şekil 7.17).

Bağlı yapı kusuru oluştuğunda, malzemenin üst yüzeyinde merkez hattı segregasyonundan oldukça farklı tane yapısı oluşur (Şekil 7.18).





Şekil 7.18 İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemiyle üretilmiş AA3003 alaşımının iç yapısı. a)merkez, b)yüzey

Tüm bu görülen morfolojik yapılar, haddeleme ve katılaşma süreçlerinde meydana gelir. Bu değişik yapıların oluşumunun önüne döküm makinesinin yükleme miktarı azaltılarak ve döküm kalınlığı sabit tutularak geçilebilir. Bu da döküm oranını arttırmaya denktir.

## 8. DENEYSEL

Çalışmada, ikiz merdaneli sürekli döküm tekniği ile üretilmiş AA6016 alaşımının otomotiv sektörünün beklentilerine cevap vermeyi hedefleyen performans bilgileri incelenmiştir. Döküm halindeki veya alt prosesler uygulanmış malzemeler üzerinde mikroyapısal ve mekanik karakterizasyon teknikleri uygulanmış ve malzeme performansının otomotiv endüstrisinin beklentilerini karşılaması hedeflenmiştir.

### 8.1 AA6016 Malzemesi

Ana alaşım elementi Mg olan 6000 serisi alaşımlar, AlMgSi veya AlMgMnSi bileşiklerinden meydana gelirler. EN AW-6016 standardında belirtilen özellikleri Çizelge 8.1’de görülmektedir.

Çizelge 8.1 EN AW-6016 [2]

Kompozisyon	Alaşım Ailesi	Alaşım Cinsi	Alaşım Serisi	Alaşım alt serisi
AlXXXX	Dökme alaşımlar	Sertleştirilebilir	AlMgSi	AlMgSi

AA6016 alaşımının sahip olduğu fiziksel özellikleri, kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 8.2, Çizelge8.3 ve Çizelge 8.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 8.2 AA6016 Alaşımının Fiziksel ve Elastik Özellikleri [2]

Temper	Elastik			Fiziksel							
	$E$	$G$	$\nu$	$T_{katı}$	$T_{sıvı}$	$C_p$	$\alpha$	$P$	$\rho_{el}$	$\lambda$	EC
	MPa	MPa		°C	°C	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	$\mu\text{m}$ m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	kg m <sup>-3</sup>	n $\Omega$ m	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	%IACS
<b>O</b>	69500	26100	0.33	610	655	898	23.4	2700			
<b>T1</b>	69500	26100	0.33	610	655	898	23.4	2700	35	195	49.5
<b>T4</b>	69500	26100	0.33	610	655	898	23.4	2700	36	187	48
<b>T5</b>	69500	26100	0.33	610	655	898	23.4	2700	32	209	54
<b>T6</b>	69500	26100	0.33	610	655	898	23.4	2700	32	209	54

Çizelge 8.3 AA6016 Alaşımının Mekanik Özellikleri [2]

Form	TEMPER				
	O	T1	T4	T5	T6
Min gerilme dayanımı %0,2 (Mpa)	-	-	65	-	195
Gerilme dayanımı %0,2 (Mpa)	50	90	90	185	215
Azami çekme dayanımı (Mpa)	-	-	130	-	245
Çekme dayanımı (Mpa)	100	150	160	220	245
Kopma gerilmesi (Mpa)	70	95	105	140	150
% Min. Uzama A5	-	-	15	-	10
% Uzama A5	27	25	20	13	13
% Min Uzama A50	26	24	20	13	12
Min Brinel Sertlik	-	-	45	-	75
Brinel Sertlik	25	45	50	75	85
Vickers Sertlik	25	45	55	80	90

Çizelge 8.4 AA6016 Alaşımının Kimyasal Bileşimi [2]

Elementler	%
Si	1.0 - 1.5
Mg	0.25 - 0.6
Fe	<= 0.50
Zn	<= 0.20
Mn	<= 0.20
Cu	<= 0.20
Ti	<= 0.15
Cr	<= 0.1
Diğer elementler	<= 0.05

Levha veya şerit formunda şekillendirilerek kullanılabilirler. Şekillendirilebilme kabiliyetleri Çizelge 8.5 ve Çizelge 8.6'da görüleceği üzere oldukça iyidir.

Çizelge 8.5 AA6016 Alaşımının Soğuk Şekillendirmesi [2].

Temper	Soğuk Şekillendirme				
	CFA	CFDA	CFPA	CFSPA	EXTR
<b>O</b>					
<b>T1</b>	5	5		5	
<b>T4</b>	5	5		5	
<b>T5</b>	5	4	3	4	
<b>T6</b>	4	4		4	

Çizelge 8.6 Soğuk Şekillendirme Parametreleri [2]

Parametreler	
CFA	Soğuk şekillendirme endeksi
CFDA	Derin çekme endeksi
CFPA	Esnek şekillendirme endeksi
CFSPA	Dönerek şekillendirme endeksi
EXTR	Uzama endeksi
MAA	Çatlak ilerleme endeksi
WEEB	Ergitme kaynağı endeksi
WEGA	Oksijen kaynağı endeksi
WEAA	Ark kaynağı endeksi
WESA	Dikiş üzeri kaynak endeksi
BRAZA	Katılma sıcaklığı altında kaynak edilebilme endeksi
SOLDA	Lehimlenebilme endeksi

Çeşitli ısı işlemlerle dayanımlarını, korozyon dayanımlarını ve şekillendirilebilme yeteneklerini geliştirirler. Özelliklerinde elde edilen bu iyileşme ısı işlem sonrasında gerçekleştiğinden, füzyon kaynağı kaynak edilmemiş durumdaki özelliklerini yarıya indirir. 6016 alaşımı iyi kaynak edilebilen, kolay şekillendirilebilen, T4 temperinde stabil davranış gösteren, yüksek korozyon direnci olan ve genellikle dengelenmiş özellikler gösteren bir alaşımdır. AA6016 alaşımının işlenebilirliği, kaynak edilebilirliği ve korozyon direnci özellikleri Çizelge 8.7’de ve Çizelge 8.9’de görülmektedir. Bu alaşım özel kullanım şartlarına uyum sağlamak için çeşitli temperlerde kullanılabilir (Court vd, 2001).

Çizelge 8.7 AA6016 alaşımının işlenebilirliği ve kaynak edilebilirliği [2]

Temper	İşlenebilirlik	Kaynak Edilebilirlik						
		MAA	WEEB	WEGA	WEAA	WESA	BRAZA	SOLDA
<b>O</b>			5	5	6		6	5
<b>T1</b>	4		5	5	6	5	6	5
<b>T4</b>	4		5	5	6	5	6	5
<b>T5</b>	5		5	5	6	5	6	5
<b>T6</b>	5		5	5	6	5	6	5

Çizelge 8.8 AA6016 Alaşımının İşlenebilme ve Kaynak edilebilme parametreleri [2]

Puanlama değerleri	
-	Hakkında bilgi yok
1	Uygulanamaz
2	Uygun değil
3	Önerilmez
4	Abul edilebilir
5	İyi
5-6	İyiden Çok iyiye
6	Çok iyi
7	Mükemmel

Çizelge 8.9 AA6016 Alaşımının Korozyon dayanımı [2]

Temper	Korozyon							
	COA	COIA	COMA	CORA	SCOA	EXCA	ICOA	PCA
O	6	5	5	6	-	6	6	5
T1	6	5	5	6	6	6	6	5
T4	6	5	5	6	6	6	6	5
T5	6	5	5	6	6	6	6	5
T6	6	5	5	6	6	6	6	5

Çizelge 8.10 Korozyon ve Anodlama Parametre Açıklamaları [2]

Korozyon ve Anodlama Parametre Açıklamaları	
COA	Korozyon endeksi
COIA	Endüstriyel korozyon endeksi
COMA	Denizel atmosfer korozyon endeksi
CORA	Kırsal atmosfer korozyon endeksi
SCOA	Gerilme korozyon endeksi
EXCA	Kabuk altı korozyonu endeksi
ICOA	Tane içi korozyonu endeksi
PCA	Çukurcuk korozyonu endeksi
ANBA	Parlak anodlama endeksi
ANCA	Renkli anodlama endeksi
ANHA	Sert anodlama endeksi
ANPA	Korumalı anodlama endeksi

Çizelge 8.11 AA6016 Alaşımının Anodlaması [2]

Temper	Anodlama			
	ANBA	ANCA	ANHA	ANPA
O	5	6	6	6
T1	5	6	6	6
T4	5	6	6	6
T5	5	6	6	6
T6	5	6	6	6

Alüminum 6016 alaşımı, otomotiv sektöründe araç gövde sacı olarak dış panel uygulamalarında kullanılmaktadır.

## 8.2 Deney Numunelerinin Üretimi ve Hazırlanışı

Sürekli döküm (DC döküm) ile üretilen ve ikiz merdaneli sürekli dökümle (TRC) üretilen malzemeleri karşılaştırmak için öncelikle her iki yöntemle de döküm bobinleri elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu bobinlerden kimyasal analizler için A4 boyutunda levha numuneleri alınmıştır. Mekanik özelliklerini belirleyebilmek için ise standartlara uygun çekme tesiti deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu numunelerin bir kısmı döküm halini incelemek için kullanılmış, diğerleri ise T4 ve T62 kondüsyonları edindirildikten sonra incelenmiştir.

İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemi ile üretilen AA6016 deney numuneleri endüstriyel ölçekte olan döküm makinalarında 9 ton ağırlığında bobinler olarak üretilmiştir. ASSAN Alüminyum Tesislerinde 2200 mm genişliğindeki FATA-Hunter Speed Caster döküm makinalarında 1800 mm genişliğinde ve 5mm kalınlığındaki bobinlerden elde edilen deney numunelerinin kimyasal bileşimi Çizelge 8.12 de verilmiştir. Bobinler AMAG Rolling GmbH, Avusturya firmasında uygulanan 2 pas haddeleme prosesleri ile 1,15mm ve 2,5 mm kalınlığa kadar inceltmişlerdir.

Çizelge 8.12 TRC yöntemi ile üretilen AA6016 alaşımın kimyasal bileşimi.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
1,06	0,17	0,07	0,07	0,34	98,25

Sürekli döküm yöntemi ile üretilen AA6016 deney numuneleri ise yine AMAG Rolling GmbH, Avusturya firmasında 9 ton ağırlığındaki bobinler olarak üretilmiştir. 2000mm genişliğindeki FATA-Hunter sürekli döküm makinelerinde 1800 mm genişliğinde ve 5mm kalınlığındaki bobinler olarak üretilen malzeme, firmada uygulanan 2 pas haddeleme prosesleri ile 1,15mm ve 2,5 mm kalınlığa kadar inceltirilmiştir. Sürekli döküm yöntemi ile üretilen AA6016 deney numunelerinin kimyasal bileşimleri Çizelge 8.13 de verilmiştir.

Çizelge 8.13 DC yöntemi ile üretilen AA6016 alaşımın kimyasal bileşimi.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
1,11	0,17	0,08	0,07	0,35	98,17

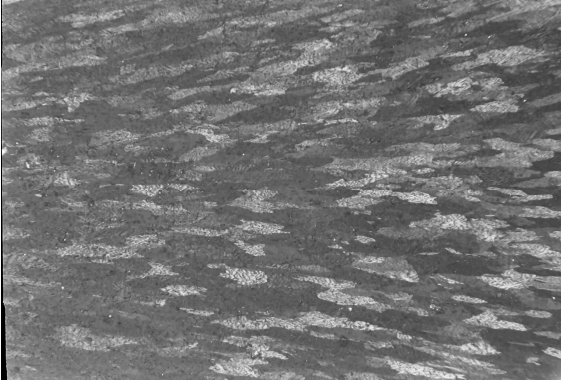
T4 kondüsyonu için endüstriyel ölçekte sürekli tavlama fırınları kullanılmıştır. T4 kondüsyonu malzemenin 540°C’de, 90 saat süreyle çözeltiye alınması ardından su ile soğutulması ve 5 gün süreyle oda sıcaklığında doğal yaşlanmaya tabi tutulması ile sağlanmıştır. Malzemeler, mekanik testler için EN standartlarında öngörüldüğü şekilde haddeleme yönüne 90° açı yapacak şekilde hazırlanmıştır. Araç parçalarının şekillendirildikten ve araca monte edildikten sonra uygulanan boyama işleminde uygulanan sıcaklık ve süre malzemenin T62 kondüsyonundaki sertliğine ulaşmasını sağlar. Bu koşulları simüle edebilmek ve malzemenin boya pişirme sıcaklığındaki reaksiyonunu görebilmek için T4 kondüsyonundaki malzeme 205°C de 30 dakika süreyle tavlansmıştır.

Döküm hali, T4 ve T62 kondüsyonlarındaki levhaların mikroyapısal incelemeleri döküm yönüne paralel ve dik yönde gerçekleştirilmiştir. Numuneler standart metalografik numune hazırlama tekniği ile SiC kaplı aşındırıcılarla parlatma aşamasına kadar getirilmiş, 3 µm elmas ve ardından koloidal silika ile parlatılmıştır. Makro ve mikroyapısal incelemeler Zeiss Axiotech Vario model optik mikroskopla gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal bileşenler %0,5 HF çözeltisi ile dağlanarak incelenmiştir. Tane yapısı Barker çözeltisi ile dağlanmış, numuneler çapraz polarize ışık altında incelenmiştir.

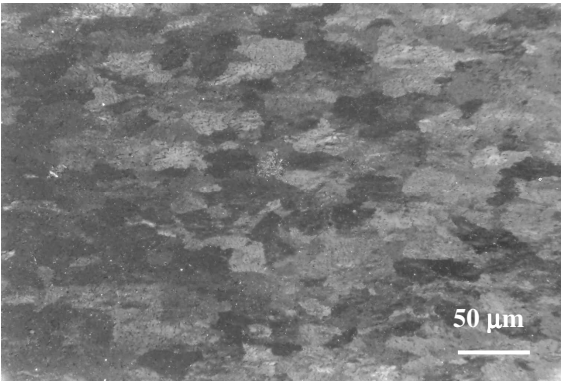
Mikroyapısal bileşenlerin yarı kantitatif analizleri Oxford marka EDS bağlı JEOL 5600 taramalı elektron mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 8.3 Sürekli Döküm ve İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemiyle Elde Edilen Döküm Halindeki Numunelerin Karşılaştırılması

Sürekli döküm ve ikiz merdaneli sürekli döküm tekniği ile üretilen malzemelerin döküm halindeki karakteristik özelliği levha kalınlığı boyunca tane yapısında görülen heterojenliktir. Tane boyutundaki bu heterojenliğin başlıca sebebi döküm işlemi esnasında meydana gelen soğuma gradyanıdır. Sıvı metalin döküm merdanelerine temasındaki çok yüksek katılma hızları aşırı doymuş bir kabuk oluşturmaktadır. Katılmış metalin döküm yönünde merdaneler arasında ilerlemesi sürecinde metal kendine empoze edilen merdane aralığından geçmeye zorlanır. Bu esnada metal, özellikle aşırı doymuşluğun olduğu dış kabuk kalınlığı kadar bir derinlikte, sınırlıda olsa plastik deformasyona uğrar. Yüksek katılma hızının sebep olduğu karakteristik çok küçük tanelere sahip ( $< 2-3 \mu\text{m}$ ) bölge kalınlığının  $1/3$ 'ü ne karşılık bölgede yerini nisbeten daha büyük ve döküm yönünde uzamış tanelere bırakır. Katılmanın bu özgün karakteri, döküm hızına bağlı olarak levhanın döküm yönü ve buna dik yönde sergilediği tane yapısının iki farklı görüntüsü Şekil 8.1'de görülmektedir.



(a)

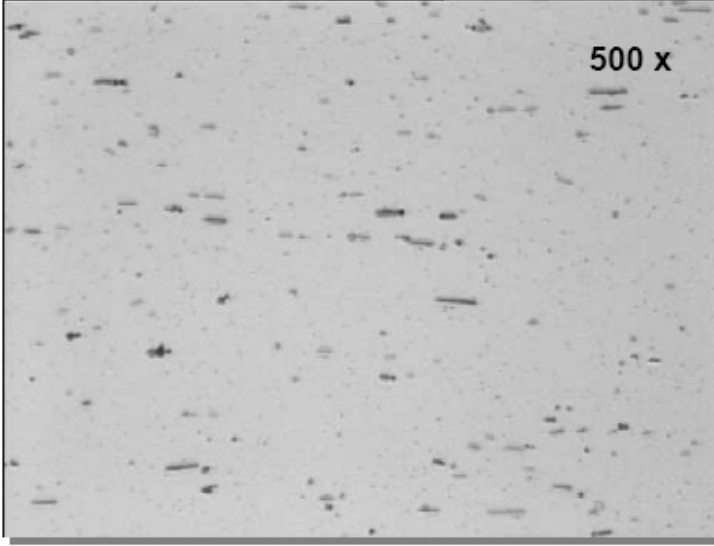


(b)

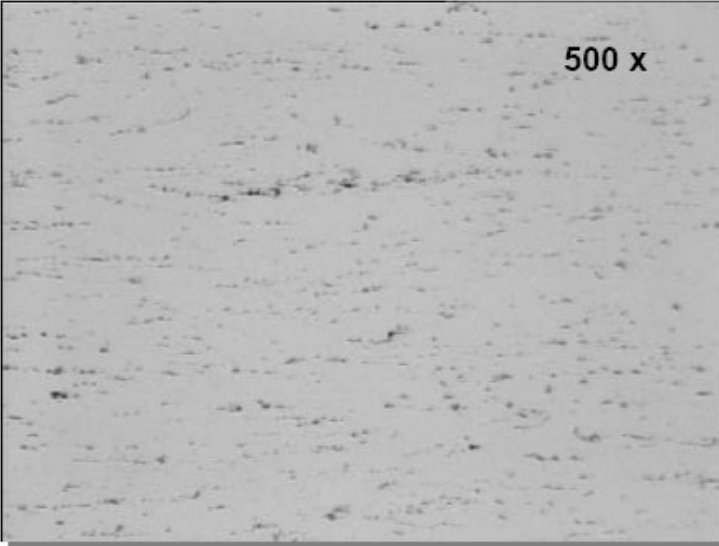
Şekil 8.1 Döküm halindeki malzemenin döküm yönüne paralel (a) ve dik yöndeki tane yapısı (b).



Döküm kalınlığının azaltılması sonucunda dış kabukta plastik olarak deforme edilen kabuğun toplam hacminin kalınlığa göre artması beklenen bir sonuçtur. Görüldüğü üzere tanelerin döküm yönüne göre açılı olan pozisyonları Şekil 8.2 ve Şekil 8.3’de daha dar bir açı oluşturmaya başlar.

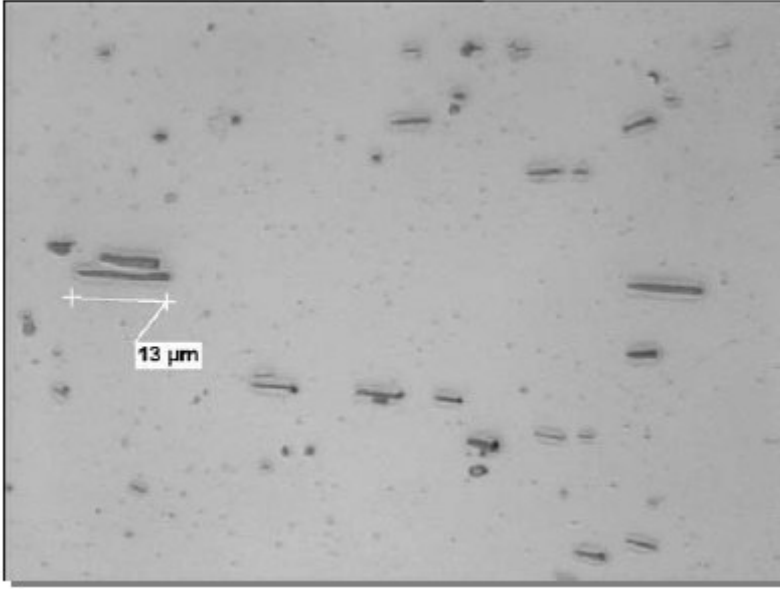


Şekil 8.2 DC yöntemi ile üretilen AA6016’nın Optik mikroskop ( 500x) altındaki yapısı.

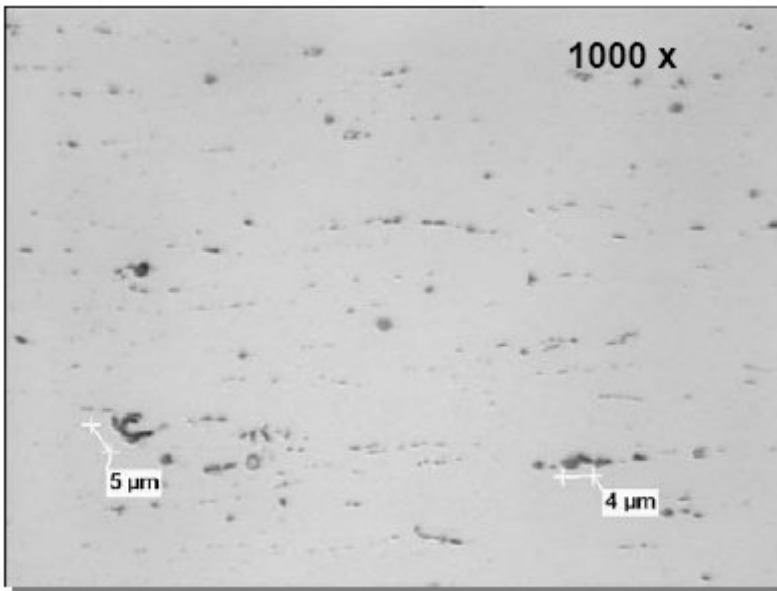


Şekil 8.3 TRC yöntemi ile üretilen AA6016’nın Optik mikroskop ( 500x) altındaki yapısı.

Bu etki tane sınırlarına çökelen intermetalik partiküllerin döküm yönünde sıralanmasına sebep olur. Levhanın merkez düzlemi eş eksenli tanelerden oluşmaktadır. Sürekli döküm tekniği ile üretilen diğer tüm alaşımlarda olduğu gibi, merkez hattı segregasyonları katılaşma mekanizmasının kaçınılmaz sonucudur ve bu alışımda da gözlenmiştir (Şekil 8.4, Şekil 8.5).

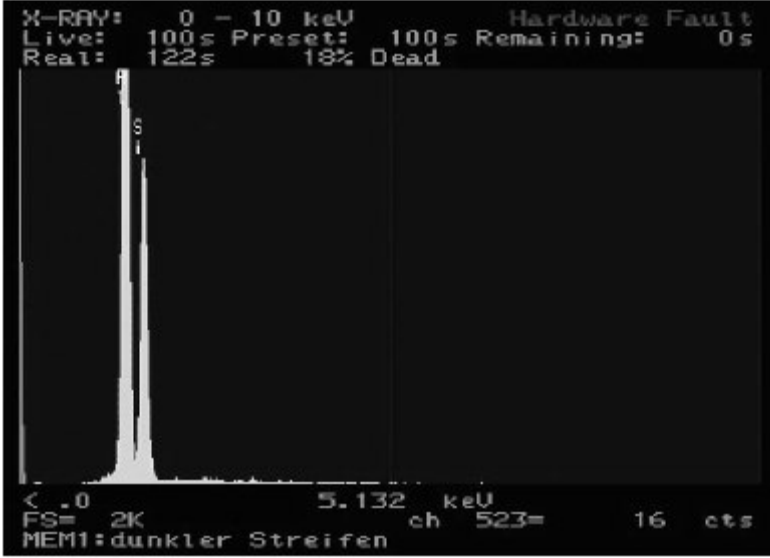


Şekil 8.4 DC yöntemi ile üretilen AA6016'nın Optik mikroskop (1000x) altındaki yapısı.



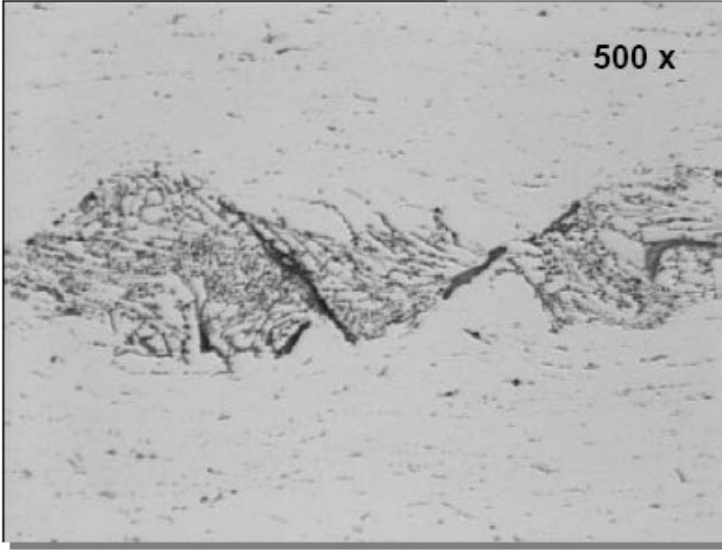
Şekil 8.5 TRC yöntemi ile üretilen AA6016'nın Optik mikroskop (1000x) altındaki yapısı.

Merkez hattı segregasyonlarının tüpü andıran yapıları merkez düzlemindeki tanelerin eşeksensli karakterini değiştirmemiştir. Alaşımın elektron mikroskobu görüntüsü ve EDX spektri Şekil 8.6’te görülmektedir. ( Miller vd, 2000).

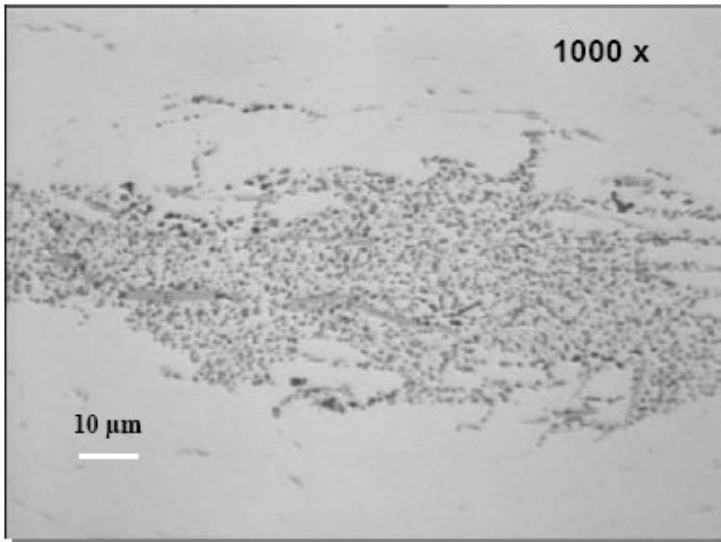


Şekil 8.6 Yüzey segregasyonunda bulunan Al-Si partiküllerinin elektron mikroskobu görüntüsü ve EDX spektri.

Şekil 8.7 ve Şekil 8.8’de görülen, birbirinden belirgin şekilde ayırdedilebilen segregasyon paternleri, uygulanan spesifik döküm şartlarında gözlenmiştir. Bunlardan bir tanesi çözünen ve alaşımı oluşturan elementlerce zengin merkez hattı segregasyonları, diğerleri ise dağınık şekilde yer alan çökeltilerdir (Court vd, 2001). Yüzeyden belirli bir sınırlı derinliğe kadar boyutları 1-3  $\mu\text{m}$  boyutundaki intermetalik partiküller mikro yapının temel bileşenlerini oluşturur.

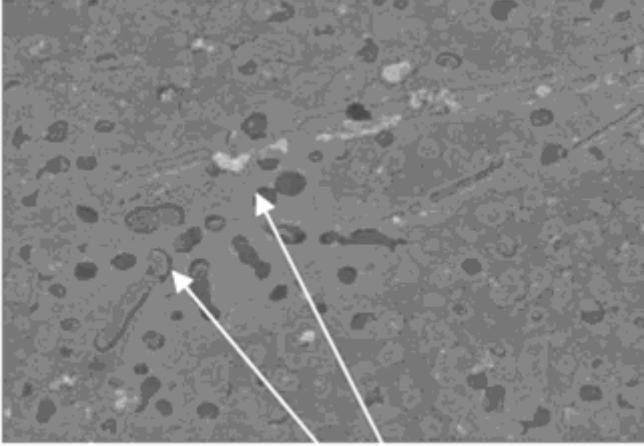


Şekil 8.7 TRC yöntemi ile üretilen AA6016'nın Optik mikroskop (500x) altında intermetalik bileşenlerinin segregasyonları.



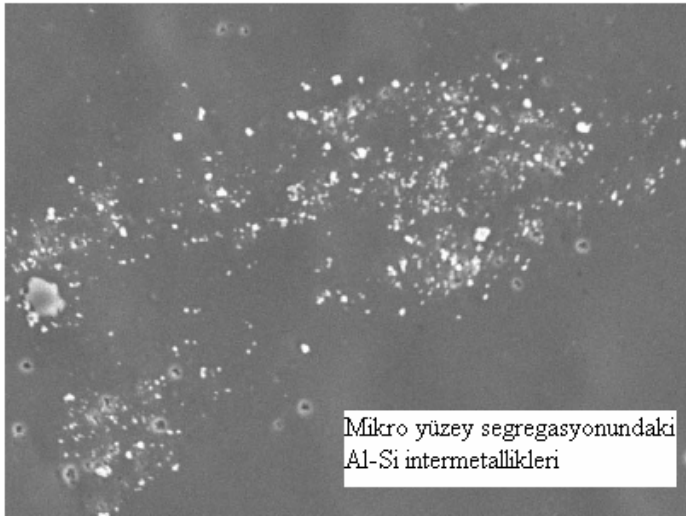
Şekil 8.8 DC yöntemi ile üretilen AA6016'nın Optik mikroskop (1000x) altında intermetalik bileşenlerinin segregasyonları.

AA6016 alaşımı için gözlemlenen dört temel intermetalik faz mevcuttur bunlar; yaşlanma mekanizmasında ve sertlikte etkin  $Mg_2Si$ ,  $\alpha-AlFeSi(Mn)$ ,  $(Al_5Fe_3Si(Mn))$  ve  $\beta-AlFeSi$  (sünekliği azalmasına sebep olan  $Al_5FeSi - \pi$ -fazıdır ( $Al_8FeMg_3Si_6$  - Mg elementini bağlama eğilimindedir). Döküm halinde Çin yazısı karakterlerini andırırlar, kimi fazlarda Mn, Fe ile yer değiştirir. Bu oluşumlar Şekil 8.9 ve Şekil 8.10'da görülmektedir.



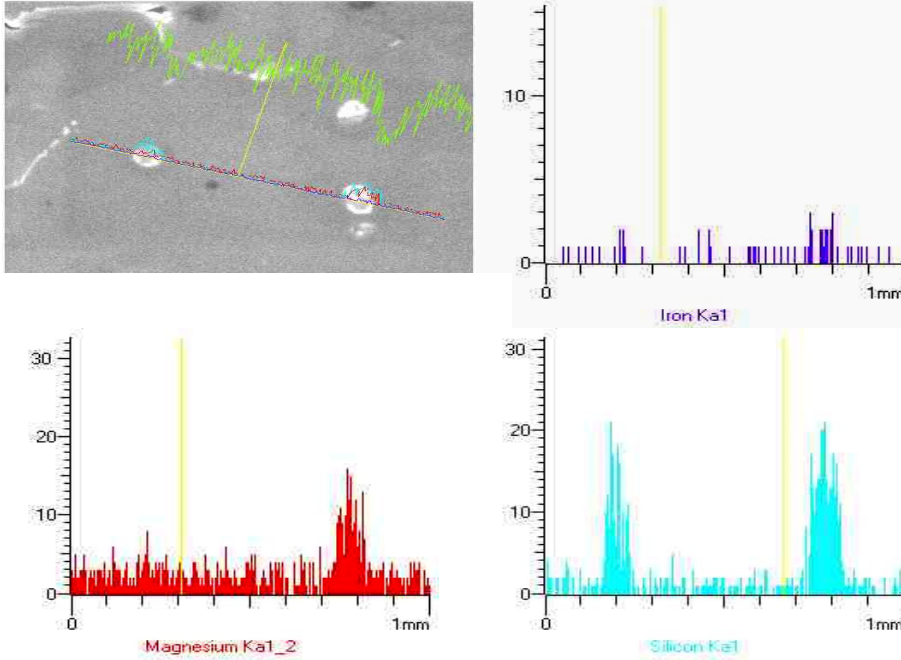
Al-Si intermetalik faz partikülleri

Şekil 8.9 TRC ile üretilmiş AA6016'nın elektron mikroskobunda çekilen görüntüsü.



Şekil 8.10 DC ile üretilmiş AA6016'nın elektron mikroskobunda (500x) çekilen görüntüsü.

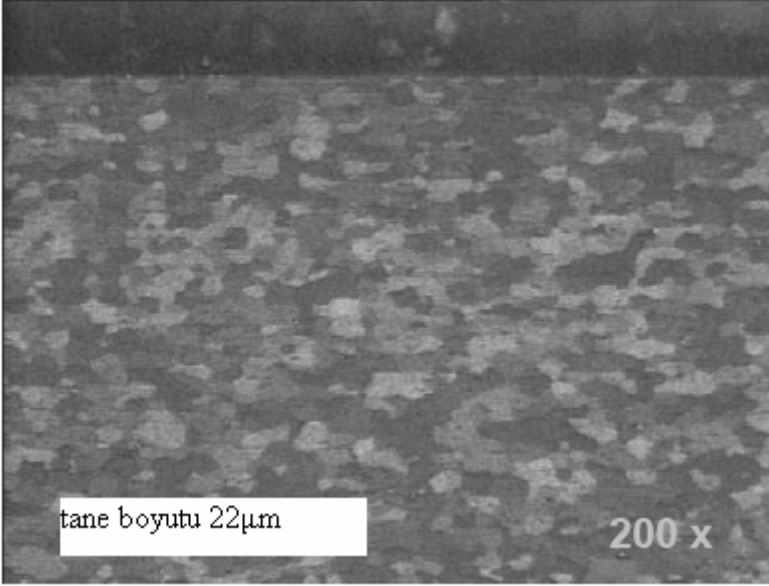
Şekil 8.11’de görülen EDS in yarı kantitatif karakterizasyon metodları uygulanarak bahsi geçen intermetalik partiküllerin kimyasal içeriği belirlenmiştir. Bu partiküller temel olarak  $Mg_2Si$  ve  $\pi$  fazlarıdır.



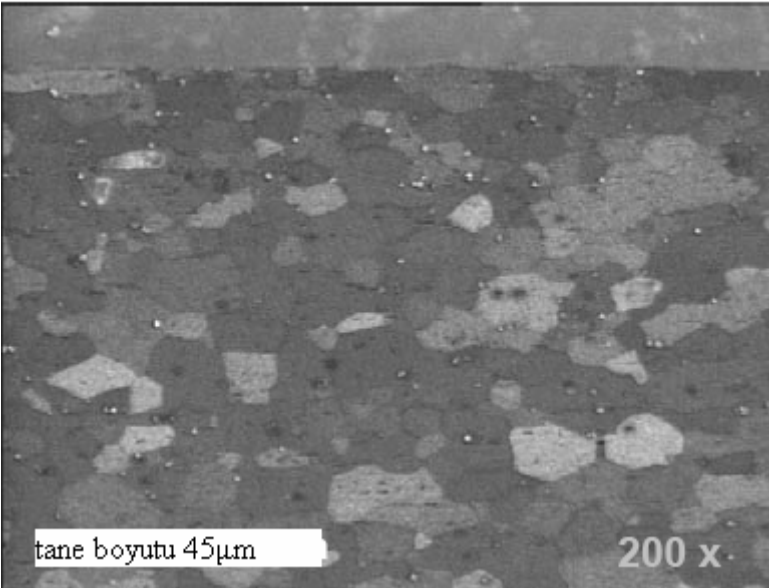
Şekil 8.11 Yüzeğe yakın intermetalik partiküllerin yarı kantitatif analizleri.

Döküm halindeki levhanın genel mikroyapısını oluşturan segregasyonlar morfolojileri itibariyle levha serbest yüzeyinden merkez düzlemine kadar düzenli bir değişim göstermektedir. Serbest yüzeyde ve sınırlı derinliğe kadar olan bölgede çok küçük ve düzenli dağılmış partiküller mikroyapının temel bileşenleriyken, yongayı andıran morfolojideki partiküller katılmanın daha yavaş gerçekleştiği çeyrek düzlemden başlamaktadır. Şekil 8.12 ve Şekil 8.13’de görüldüğü üzere partikül boyutlarının daha büyük ancak kimyasal içeriklerinin aynı olması bunun açık kanıtıdır. Bunlar mikroyapıyı oluşturan ikinci tip partiküller olarak tanımlanmıştır. Bu tip segregasyonlar, dendrit veya orijinal tane yapısının kol aralıklarında yer almaktadırlar (Ertan vd, 2002).

Merkez düzlemini işgal eden ve merkez hattı segregasyonu olarak tanımlanan segregasyon biçimi sahip oldukları yoğun alaşım elementi içeriğinden dolayı, çok belirgin ötektik taneler nadir olarak rastlansa da bireysel ve çok kaba intermetalik fazlardan oluşmaktadırlar.



Şekil 8.12 TRC yöntemi ile üretilen AA6016'nın optik mikroskopta (200x) ölçülen tane boyutu.



Şekil 8.13 DC yöntemi ile üretilen AA6016'nın optik mikroskopta (200x) ölçülen tane boyutu.

Her ne kadar genel mikroyapı morfoloji olarak birbirinden farklı iki intermetalik partikül geometrisi içerse de TRC döküm eşdeğerlerine kıyasla, partiküllerinin boyut ve dağılımı olarak çok düzenlidir. Aynı alaşımın DC döküm örneklerinde partikül boyutları 6  $\mu\text{m}$  dan büyük ve

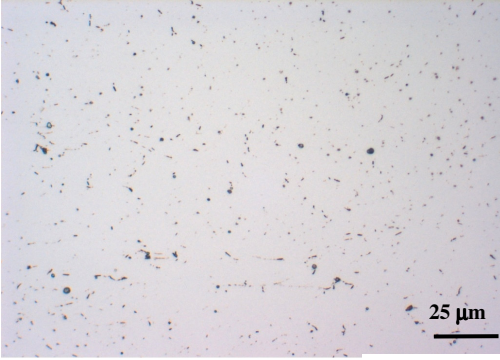
boy/en oranları bir çubuk geometrisi oluşturacak kadar büyüktür. Bu geometrileriyle partiküller her zaman için haddelenme ile birlikte kendilerini haddeleme yönüne göre konumlandırma eğilimindedirler.

#### **8.4 Sürekli Döküm ve İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemiyle Elde Edilen Numunelerin Isıl İşlem Sonrası Karşılaştırılması**

İkiz merdaneli sürekli döküm teknikleri ile üretilmiş numuneler 1,15 mm ye soğuk haddeleme ile haddelenmiş ve sürekli tavlama fırınlarında çözeltiye alma işlemine (T4) tabi tutulmuşlardır. Mikroyapısal karakterizasyon, T4 kondüsyonunda ve 5 günlük oda sıcaklığında doğal yaşlandırma sonrası yapılmıştır. Bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla DC dökümle üretilmiş ve sıcak haddeleme ile alt prosesleri gerçekleştirilmiş diğer numunelere de eşdeğer proses adımları uygulanmıştır.

Çözeltiye alma işlemi aynı zamanda yeniden kristalleştirme safhasını da geçtiği için yeni tanelerin oluşması sağlanmıştır. Çözeltiye alma işlemi ikiz merdaneli sürekli döküm tekniği ile üretilen levhanın levha kalınlığı boyunca boyutları 30 µm dan küçük tanelere sahip olmasını sağlamıştır. Aynı malzemenin döküm kalınlığındaki düzensiz tane yapısı göz önüne alındığında nihai kalınlıkta malzemenin tane yapısının tüm kalınlık boyunca çok düzenli ve eş eksenli olduğu belirtilmiştir. Ortalama tane boyutu DC dökümle üretilen eşdeğerinin neredeyse yarısı kadardır. Literatürde yer alan diğer çalışmalarda da belirtildiği üzere en son uygulanacak yeniden kristalleştirme işlemi öncesinde malzemenin sahip olduğu ve yeniden kristalleşmede çekirdeklenme etkisi yaratacak ikincil faz partiküllerinin boyut ve dağılımları yeniden kristalleşen malzemenin tane boyutlarını etkilemektedir (Uchida vd, 1996). Çalışmamızda her iki döküm tekniği ile de üretilen malzemeden elde edilen tane yapıları literatürde belirtilen temel bilgi ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

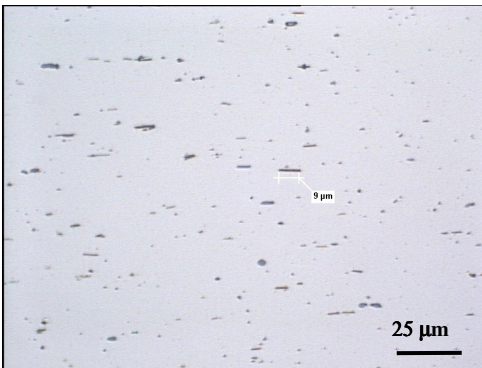




Şekil 8.14 T4 ısıl işlemleri sonrası TRC döküm tekniği ile üretilmiş malzemede intermetalik partikül dağılımı ve geometrisi.

Her iki döküm yöntemi ile elde edilen malzemenin T4 ısıl işlemleri sonrası mikroyapısal bileşenleri de incelenmiştir. Şekil 8.14 ikiz merdaneli sürekli döküm tekniği ile üretilmiş AA6016 alaşımının sahip olduğu intermetalik partikül dağılımı ve morfolojisini göstermektedir. Döküm halindeki malzemenin dendritler arası bölgeyi işgal eden kaba, yonga görüntülü intermetalik partiküllerinin T4 işlemleri sonrası, beklendiği gibi, küçüldüğü ve yuvarlaklaştığı tesbit edilmiştir.

Şekil 8.15’de görüldüğü üzere, DC döküm tekniği ile üretilmiş AA6016 alaşımı haddeleme yönüne göre kendini pozisyonlandırmış çok daha büyük intermetalik partiküllere sahiptir. Sahip oldukları en/boy oranı bunun en başlıca sebebidir ve haddeleme operasyonunda malzemenin akış yönü ile bu yönlendirme güçlenir.



Şekil 8.15 DC döküm tekniği ile üretilmiş malzemede intermetalik partiküllerin tipik görüntüsü.

Her iki döküm tekniğinin farklı katılma karakteristikleri, bu partiküllerin boyut ve dağılımlarını belirler. DC döküm tekniğinin çok daha yavaş gerçekleşen katılma hızlarına karşılık sürekli döküm tekniğinin döküm hızında etkisi ile ulaştığı 700-800 °C/s lik katılma hızları çok daha küçük partiküllerin oluşmasına sebep olur. Kalınlık boyunca gözlemlenen göreceli morfoloji ve sınırlı da olsa partikül boyutundaki değişiklik döküm merdane aralığındaki ısı transferi ile açıklanabilir. Sıvı metalin merdanelere teması ile çok hızlı katılan metal, matrisin aşırı doymuş karakterinin yanısıra çok küçük partikül yapısı içerir. Oluşan ilk kabuk ısı transferinin etkinliğini bir bariyer etkisi yaratarak azaltır dolayısıyla daha sonra katılan iç bölgelerin partikül boyutları azalan katılma hızı ile orantılı olarak daha büyük olur (Anger, 2005).

DC döküm ve sıcak haddeleme metodu ile üretilen malzemenin daha büyük partikülleri özellikle alt proseslerin soğuk haddeleme safhasında kırılarak birden fazla sayıda parçaya ayrılırlar. Dikkatli gözlemlerle aynı parçanın fragmanları rahatlıkla tesbit edebilir. Partiküllerin keskin ve köşeli kenar profilleri partiküllerin yakın komşuluğundaki sünek alüminyum matrisde yüksek gerilimler ve ilgili plastik deformasyonun oluşmasına sebep olur. Daha sonraki safhalarda bu bölgelerde partikül matris ara yüzeyinin açılarak boşlukların oluşması kaçınılmazdır. Malzemenin, özellikle soğuk haddeleme aşamasında ince kalınlıklara haddelenmesi bu mekanizmanın daha kolay gelişmesine sebebiyet verir.

### **8.5 Sürekli Döküm ve İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemiyle Elde Edilen Numunelerin Isıl İşlem Sonrası Şekillendirme ve Mekanik Özellikler**

T4 kondüsyonu için endüstriyel ölçekte sürekli tavlama fırınları kullanılmıştır. Malzemenin T4 kondüsyonundaki ve T62 kondüsyonundaki sertliğe ulaşması için numune hazırla bölümünde belirtilen işlemler uygulanmıştır. Bu işlemlerin sonucunda ulaşılan mekanik değerler Çizelge 8.14'te görülmektedir.

Çizelge 8.14 İkiz Merdaneli Sürekli döküm ve DC döküm tekniği ile üretilen malzemelerin mekanik özellikleri.

	İkiz Merdaneli Sürekli Döküm		DC Döküm	
	T4	T62	T4	T62
Akma Mukavemeti (MPa)	110	230	105	210
Çekme Mukavemeti (MPa)	220	275	210	260
Düzenli uzama (%)	22	9	23	10
Toplam uzama ( $A_{50}$ )	29	12	29	13
Toplam uzama ( $A_{80}$ )	26	-	26	-
n (4-6 %)	0,29	-	0,31	-
r (8-12%)	0,64	-	0,65	-

Sürekli döküm ve DC döküm orijinli AA6016 alaşımı birbirlerine çok yakın mekanik özellikler sergilemiştir. Sürekli döküm orijinli malzemenin T4 ve T62 kondüsyonları nisbeten daha yüksek akma ve çekme mukavemetine sahiptir. Numunenin uzamasının ölçüldüğü mesafe ne olursa olsun, ki otomotiv sektöründe  $A_{80}$  kabul görür, her iki malzeme neredeyse aynı uzama değerleri sergilemiştir. Düzenli uzama en yüksek yüke kadar sertleşme oranı ile kontrol edilirken, düzenli uzama sonrası uzama miktarı uzama sertleşmesi ve uzama oranı duyarlılığına bağlıdır.

Her iki malzeme içinde düzenli uzama miktarı toplam uzama değerinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Sürekli döküm tekniği ile üretilmiş malzemenin bahsi geçen kondüsyonları için mekanik özellikler literatürde yayınlanmış ilgili diğer çalışmalarda belirtilen ve üretim orijinleri

DC döküm olan diğer malzemelerle elde edilen sonuçlarla uyumludur ve EN standartlarına göre otomotiv üreticilerinin spesifikasyonlarında sağlamaktadır (Bottema vd, 2000).

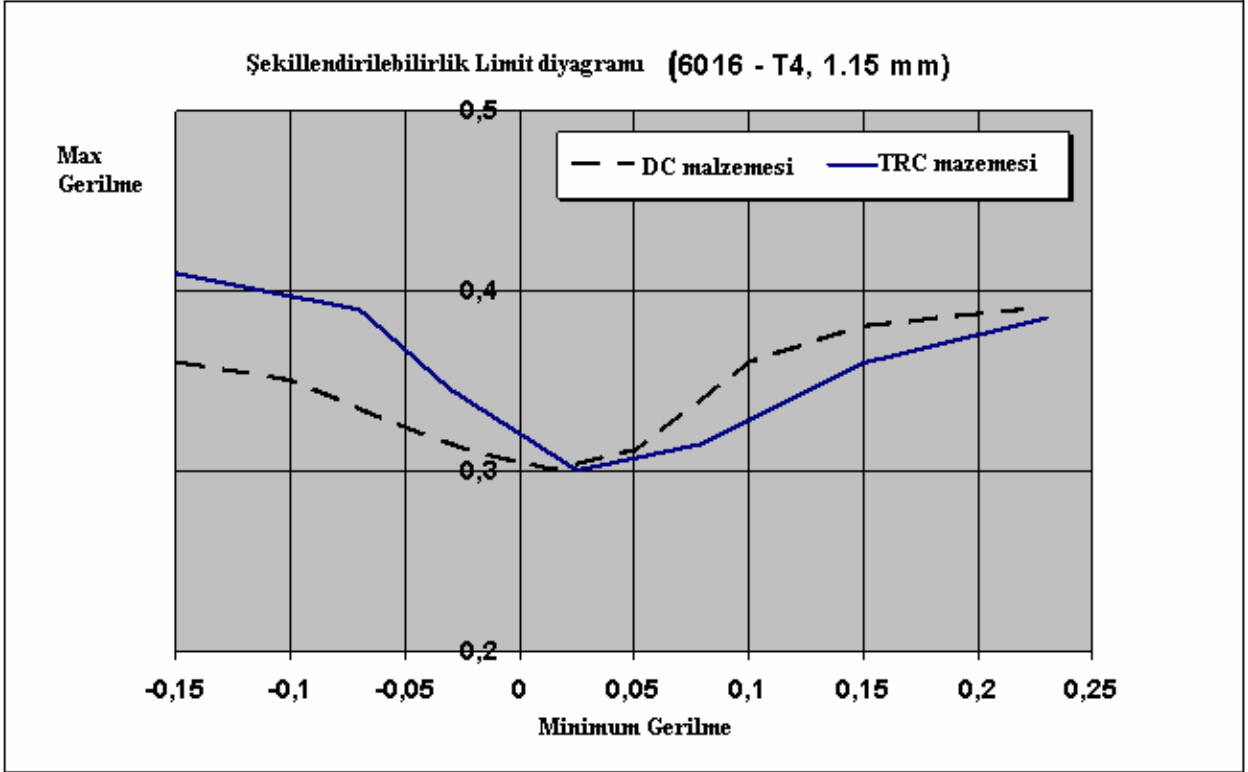
Çizelge 8.15 1,15mm kalınlığındaki DC ile üretilmiş AA6016'nın mekanik özellikleri

DC	R <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>80</sub>	A <sub>u</sub>	r <sub>(10)</sub>	n <sub>(5-10)</sub>
90°	109	224	28.4	23.6	0.65	0.305
45°	113	226	31.3	25.5	0.45	0.285
0°	118	236	27.3	22.6	0.77	0.303

Çizelge 8.16 1,15mm kalınlığındaki TRC ile üretilmiş AA6016'nın mekanik özellikleri.

TRC	R <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>80</sub>	A <sub>u</sub>	r <sub>(10)</sub>	n <sub>(5-10)</sub>
90°	108	205	27.4	23.2	0.62	0.276
45°	105	208	29.2	23.8	0.61	0.280
0°	105	209	27.0	22.7	0.70	0.277

Malzemenin endüstriyel presle levha şekillendirme uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan durum olan çok eksenli şekillendirme koşullarında sınır uzama değerlerini tesbit edebilmek amacıyla mekanik karakterizasyonu şekillendirilebilirlik sınır diyagramı (FLD) oluşturulmuştur. Şekil8.16’da görülen FLD, malzemenin şekillendirildiği kondüsyon olan T4 kondüsyonunda gerçekleştirilmiştir. Aynı test karşılaştırmalı sonuçlar için DC döküm orijinli malzeme içinde yapılmıştır.



Şekil 8.16 TRC ve DC metodlarla üretilmiş AA6016 alaşımının T4 kondüsyonunda Şekillendirilebilirlik Sınır Diyagramı.

DC döküm metodu ile üretilmiş malzemenin diyagramın sağ tarafı için,  $\epsilon_{Min,Maks} > 0$ , TRC döküm tekniği ile üretilmiş malzemedan, marjinal de olsa, yüksek sınır uzama değerleri sergilemektedir. Bu bilgi DC dökümden üretilmiş malzemenin nisbeten daha büyük değere sahip uzama sertleşmesi üsteli açısından değerlendirildiğinde, lokal incelmelerin gecikeceğinden ve yayılmış bir deformasyon ve incelmelerin olacağı tahmin edildiğinden, sonuçlar anlamlıdır. Diyagramın sol tarafında ise sürekli döküm tekniği ile üretilmiş alaşım, daha yüksek limit değerlere sahip olduğu görülmektedir.

## 9. SONUÇ

Döküm parametrelerinin istendiği doğrultuda kontrol edilmesi ve yönlendirilmesi ile mikroyapısal özelliklerin belirli ölçülerde düzenlenebileceği bu çalışmada gösterilmiştir. Bu çalışmada da tüm çaba döküm yüzeyinde yüzey segregasyonlarının minimum ölçülerde veya hiç oluşmaması yönünde harcanmıştır ve başarılı olunmuştur. Bu çabalar sayesinde sadece mükemmel bir yüzey görüntüsü elde edilmekle kalınmamış aynı zamanda döküm üretkenlik değerleri açısından da böylesine yüksek katılma sıcaklık aralığına sahip bir alaşım için çok yüksek üretkenlik değerlerine ulaşılmıştır.

DC döküm ve sıcak haddeme rotası ile üretilen malzemenin sahip olduğu büyük ve hadde yönünde yönelmiş tanelerin aksine, TRC döküm tekniği ile üretilmiş malzemenin çok küçük ve düzenli olarak dağılmış intermetalik partikülleri Şekil 8.14'teki mikroyapı fotoğraflarında görülmektedir.

“Portakallanma” olarak bilinen ve büyük tanelere sahip malzemenin yüksek deformasyonlara maruz olduğu zaman ortaya çıkan yüzey kusur, TRC döküm tekniği ile üretilmiş malzemenin sahip olduğu çok küçük tane yapısı sayesinde engellenebilmiştir.

TRC ile elde edilen malzemenin sadece tek eksenli çekme testi sonuçları değil, kompleks deformasyon şartlarında sınır uzama değerlerini ifade eden FLD eşdeğerinde DC döküm malzeme ile neredeyse eşit sınır uzama değerleri sergilemektedir.

Sürekli döküm tekniği ile üretilmiş alaşımın kimyasının, özellikle Si içeriğinin, mekanik performans üzerindeki etkisinin ve döküm merdanelerine ilk temas eden ve aşırı doymuşluk özelliğine sahip dış kabuğun, çözeltiyeye alma ve yaşlanma kinetiğinin daha detaylı çalışmalarla açıklanmaya ihtiyacı vardır.

**KAYNAKLAR**

Aluminium For The Future, (2004), EAA European Aluminium Association

Aluminum in the Automotive Industry, (2005), EAA European Aluminium Association.

Alüminyum Raporu, (2004), TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası

Anonim, (1988), "Nonferrous Metals", Machine Design, 121:205-210

ASM, (1997), ASM Handbook.

Askelad, D.R., (1994), The Science and Engineering of Materials, Pws Publishinh Company, Boston

Arnold, S.A., (1993), J. Metals, 45 (6), 12.

Anger, G., (2005), "New Developments in Heat Treatable Aluminum Automotive Sheet", 2<sup>th</sup> International Light Metals Conferance 8-10 Haz. 2005, Avusturya

Bottema, J., Haszler, A., Miller, W.S., Semet, P., Vieregge, A., Wittebrood, A.J., Zhuang, L., (2000), "Recent Development in Aluminum Allaoy's For thr Automotive Industry", Material Science Engineering, A280: 37-49

Burger, G.B., Gupta, A.K., Jeffret, P.W. and Lloyd, D.J., (1995), Materials Characterization, 35:23-39.

Callister, W., (1990), "Materials Science and Engineering", Utah Universty, Utah

Court, S.A, Hirth, S.M., Lloyd, D.J., Marchall, G.J., (2001), "Effects of Si on the Aging Behaviour and Formability of Aluminum Allaoy's Based on AA6016", Material Science Engineering, A319-321: 452-456

Davis, J.R., (1999), Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, Ohio.

Dundar, M., Sarioglu, K., Birol, Y., Akkurt, A.S., and Romanowski, C., (2002), ed. Das, S., Automotive Alloys, TMS.

Ertan, S, Dundar, M., Birol, Y., Sarioglu, K. Romanowski, C., (2000), Light Metals, TMS.

Ertan, S., Dundar, M., Sarioglu, K., Birol, Y., and Romanowski, C., (2002), Light Metals, TMS.

Godat, M., Steiner, B., Staubli, T., "Mainstrip TRC Production Plant", (2004)

Li, B.Q., "Producing Thin Strips by Twin-Roll Casting - Part I: Process Aspects and Quality Issues", Journal of Metals, No. 5, 1995, pp. 29-33.

Güven, V., Mustafaoğlu, M., (2003), "Dünya ve Türkiye'de Alüminyum Pazarı ve Ticareti", Alüminyum Sempozyumu ve Sergisi, 13-15 Mayıs 2003, Seydişehir

Hirsch, J., (1997), Materials Science Forum; 242:33.

Hirth, S.M., Marshall, G.J., Court, S.A., Lloyd, D.J., (2001), Materials Science and Engineering; A319-321: 452.

Hunt, J.D., Lokyer, S., Yun, M., (2000), "Twin roll casting of aluminium alloys", Materials Science and Engineering, A280:116-123

Kleiner, S., Henkel, C., Schulz, P. and Uggowitzer, P.J., (2001), Aluminium; 77:185.

Lodgard, A., Ryum, N., (1999), "Precipitation of Dispersoids Containing Mn and/or Cr in Al-Mg-Si Alloys", Material Science Engineering, A283:144-152

Miller, W.S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, Smet, P.De, Haszler, A., Vieregge, (2000), Materials Science and Engineering, (A280), 37.

Muraoka, Y. and Miyaoka, H., (1993), J. Mater. Proc. Tech., 38: 655.

Onaran, K., (1995), "Malzeme Bilimi", Bilim Teknik Yayınevi

Saha, P.K., (2000), Aluminum Extrusion Technology, ASM International, Ohio.

Sears, K., Automotive Engineering: "Strategic Overview", (1997), 1: 55.

Temel, A., (2001), "Alüminyumun Elektrokimyasal ve Korozyon Karakteristiği", Makine&Metal Dergisi, 114:37-41

Tekin, E., (1984), "Demirdışı Metaller ve Alaşımlarının Uygulamalı Optik Metalografisi", SEGEM Yayınları

Uchida, H., Yoshida, H., (1996), "Improvement in Paint Bake Response of an Al-Mg-Si Alloy by Reversion", The Minerals, Metals&Materials Society : 97-103

Yılmaz, M., (2003), "Alüminyum Sektöründe Yeni Kullanım Alanları", II. Alüminyum Sempozyumu ve Sergisi, 13-15 Mayıs 2003, Seydişehir

Zhuang L., Haan R.De, Bottema J., Lahaye C.T.W. and Smet P. De, (2000), Materials Science Forum; 331-337:1309.

## **ELEKTRONİK KAYNAKLAR**

[1] [www.eaa.net](http://www.eaa.net)

[2] [www.aluminium.org](http://www.aluminium.org)

[3] [www.aluminium.matter.org](http://www.aluminium.matter.org)



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	24.09.1980	
Doğum yeri	İstanbul	
İlkokul	1986-1991	Özel Ahmet Şimşek İlkokulu
Ortaokul	1991-1996	Özel Saint Joseph Fransız Ortaokulu
Lise	1996-1999	Özel Saint Joseph Fransız Lisesi
Lisans	1999-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fak. Makine Mühendisliği Bölümü

**Çalıştığı kurum(lar)**

2002-2004	Denge Yapı San. Ürünleri LTD ŞTİ
2004-2006	ASSAN Demir ve Sac San. A.Ş
2006-devam ediyor	Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. - Şişecam