

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HELİSEL NERVÜRLÜ ALÜMİNYUM BORU EKSTRÜZYONU

MEHMET DENİZ DÖLEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İMAL USULLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. MEHMET EMİN YURCİ**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HELİSEL NERVÜRLÜ ALÜMİNYUM BORU EKSTRÜZYONU

Mehmet Deniz DÖLEN tarafından hazırlanan tez çalışması 30.11.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Mehmet Emin YURCİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Mehmet Emin YURCİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin SÖNMEZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Turgut GÜLMEZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Talaşsız imalat yöntemleri arasında yer alan ekstrüzyon prosesini incelediğim, bir uygulamasını yaptığım ve sonlu eleman analiz yöntemi ile desteklediğim yüksek lisans tezi çalışmamda, ekstrüzyon prosesinin bilinmeyenlerini açıklığa kavuşturabilmek için yapılmış sayısız çalışmanın bir adım ötesine geçebilmeyi kendime hedef olarak belirledim. Bu nedenle alışlagelmiş profillerden farklı olarak, matris ağzından çıkarken hem boyuna hem de dönel hareket etmesi gereken helisel nervürlü alüminyum bir borunun ekstrüzyon prosesi ile imalatını inceledim.

Yıllarını İmal Usulleri Programı' na adanmış, hem lisans hem de yüksek lisans yıllarım boyunca üzerimde büyük emeği olan, özellikle yüksek lisans tezi çalışmam süresince desteğini esirgememiş, tez danışmanım ve değerli hocam Prof. Mehmet Emin YURCİ' ye teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim boyunca akademik ve mesleki anlamda hayatıma yön vermiş tüm hocalarıma, araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve öğrenci arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez kapsamında incelediğim helisel nervürlü alüminyum profilin fikir ve patent sahibi olan, birlikte çalışmaktan keyif duyduğum, profilin imali safhasında aynı heyecanı ve tecrübeleri paylaştığım Mak. Müh. Gürel BAL başta olmak üzere, ekstrüzyon konusunda desteğini esirgemeyip beni aydınlatan ASAŞ Alüminyum San. ve Tic. A.Ş. ve Azim Alüminyum Profil Metal San. ve Dış Tic. Ltd. Şti. çalışanlarına, profilin imalatını gerçekleştirmiş Gensa Alüminyum İnşaat ve Tic. Ltd. Şti çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Son olarak, beni büyüten, bugünlere gelmemi sağlayan ve emeklerini ödeyemeyeceğim sevgili ailem ile bugüne kadar desteklerini esirgemeyen tüm dostlarıma şükranlarımı sunarım.

Ağustos, 2011

Mehmet Deniz DÖLEN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Bulgular	3
BÖLÜM 2.....	5
EKSTRÜZYON	5
2.1 Ekstrüzyon Nedir?	5
2.2 Temel Ekstrüzyon Yöntemleri	6
2.2.1 Direkt Ekstrüzyon.....	6
2.2.2 Endirekt Ekstrüzyon	8
2.2.3 Püskürtmeli Ekstrüzyon	10
2.3 Ekstrüzyon Presi ve Takımları	11
2.3.1 Pres Seçimi.....	12
2.3.2 Alıcı	12
2.3.3 Istampa	14
2.3.4 Matris Kaydırıcı ve Döner Matris Başlığı.....	14
2.3.5 Matris.....	15
2.3.6 İlave Donanımlar.....	18
2.4 Ekstrüzyonda Malzeme Akış Tipleri ve Özellikleri.....	19

2.4.1	Direkt Ekstrüzyonda Malzeme Akışı	20
BÖLÜM 3	.....	24
EKSTRÜZYON UYGULANAN MALZEMELER	.....	24
3.1	Metal ve Alaşımlarının Şekil Değiştirme Kabiliyetleri	24
3.2	Çeliklerin Ekstrüzyonu.....	29
3.3	Bakır Ekstrüzyonu	29
3.4	Kurşun ve Kalay Ekstrüzyonu	29
3.5	Titanyum Ekstrüzyonu	29
3.6	Zirkonyum Ekstrüzyonu	30
3.7	Berilyum Ekstrüzyonu	30
3.8	Nikel Ekstrüzyonu	30
3.9	Magnezyum Ekstrüzyonu.....	30
3.10	Alüminyumun Ekstrüzyonu	31
3.10.1	Alüminyumun Özellikleri	31
3.10.2	Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	34
3.10.3	Alaşımlama Elementlerinin Alüminyuma Kazandırdıkları	35
3.10.4	Alüminyum Alaşımlarının Ekstrüzyon Edilebilirliği.....	38
BÖLÜM 4	.....	43
YUMUŞAK ve ORTA SERTLİKTEKİ ALAŞIMLARIN EKSTRÜZYONU	.....	43
4.1	Ürün Şekil ve Boyutları.....	43
4.2	Şekil ve Form Faktörleri	44
4.3	Önemli Ekstrüzyon Parametrelerinin Analizi	45
4.3.1	Proseste Üretilen Profil Boyu	45
4.3.2	Ekstrüzyon Basıncı	47
4.4	Farklı Tip Profillerin Ekstrüzyonu	50
4.5	İçi Boş Profillerin Ekstrüzyonu	51
4.6	Verimlilik Kontrolü	54
4.7	Isıl İşlemler	56
4.8	Mekanik ve Fiziksel Testler	58
4.9	Ekstrüzyon Hataları	58
BÖLÜM 5	.....	62
SONLU ELEMEN YÖNTEMLERİ (FEM) ve KARŞILAŞTIRILMALARI	.....	62
5.1	ALE Yöntemi	63
5.2	UL ve SS Yöntemleri	65
BÖLÜM 6	.....	67
FEM DESTEKLİ EKSTRÜZYON PROSESİ İNCELEMESİ ve EKSTRÜZYON PARAMETRELERİNİN ANALİZİ	.....	67
6.1	FEM ile Ekstrüzyon Basıncı Analizi	67
6.2	FEM ile Sıcaklık Oluşumu Analizi.....	69
6.3	FEM ile Hız Alanları Analizi.....	74

6.4 FEM ile Gerilme ve Gerinim Analizi	76
BÖLÜM 7.....	80
EKSTRÜZYONUN TERMODİNAMIĞI ve ALÜMİNYUMUN ISIL İŞLEMİ.....	80
7.1 Direkt Ekstrüzyonda Isı Dengesi.....	80
7.2 Önemli Değişkenlerin Sıcaklık Artışındaki Etkileri.....	82
7.3 Isıl İşlemin Temel Prensipleri	86
7.3.1 Difüzyon.....	87
7.3.2 Dökümlerin Homojenizasyonu	89
7.3.2.1 Dendrit Oluşumu	89
7.3.2.2 Çekirdeklenme	89
7.3.2.3 Kimyasal Homojenizasyon Tavlamaşı	91
7.3.3 Çökeltme Sertleştirme Tavlamaşı	91
7.3.3.1 Çözündürme Tavlamaşı.....	91
7.3.3.2 Çökeltme Prosesi.....	92
7.3.3.3 Isıl İşlemele Çökelme Kontrolü.....	93
7.3.3.4 Çökeltme Sertleştirmesi	94
7.4 Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi	97
7.4.1 Katı Çözünmüş Halden Çökelme.....	97
7.4.2 Al-Cu Alaşımlarında Çökelme	99
7.4.3 Isıl İşleme Yatkın Ticari Alüminyum Alaşımları	100
7.5 Isıl İşlemlerle Dayanım Artırma.....	100
7.5.1 Çözündürme Tavlamaşı	101
7.5.2 Aşırı Isıtma	102
7.5.3 Dengesiz Ergime	104
7.5.4 Yetersiz Isıtma.....	104
7.5.5 Çözündürme Tavlamaşı Zamanı	105
7.5.6 Yüksek Sıcaklıkta Oksidasyon	106
7.5.7 Çözündürme Tavlamaşı Çökeltme Sertleştirmesi Yapılması.....	106
7.6 Su Verme.....	107
7.6.1 Su Verme Oranının Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi.....	108
7.6.2 Suyu Daldırmalı Su Verme	109
7.6.3 Sprey Soğutma.....	110
7.6.4 Soğutma Şiddeti ve Soğutma Ortamı	110
7.6.5 Su Verme Oranını Etkileyen Diğer Faktörler.....	111
7.7 Yaşlandırma Sertleştirmesi	113
7.7.1 Doğal Yaşlandırma	113
7.7.2 Yapay Yaşlandırma.....	114
BÖLÜM 8.....	117
EKSTRÜZYON MATRİSLERİNDE MALZEME AKIŞI VE KAYNAMANIN İNCELENMESİ.....	117
8.1 Kaynak Kalitesini Etkileyen Faktörler	118
8.2 Odalı Matrislerde Metal Akışı	119
8.3 Önemli Parametrelerin Kaynamaya Etkisi	124
8.4 Kaynama Odası Tasarımının Kaynamaya Etkisi.....	130

8.5	Ön oda ve Kaynak Odası Tasarımının Kaynamaya Birlikte Etkisi	136
BÖLÜM 9	.....	141
UYGULAMA	.....	141
9.1	Uygulamanın Amacı ve İçeriği.....	141
9.2	DEFORM-3D ve FEM Modelinin Oluşturulması	143
9.2.1	DEFORM-3D	143
9.2.2	Tasarlanan Helisel Nervürlü Alüminyum Boru	144
9.2.3	Matrislerin Tasarımı.....	145
9.2.4	FEM Modeli Oluşturulmasındaki Problemler	150
9.2.5	DEFORM-3D Yazılımında Kullanılan Matris Modeli	152
9.2.6	FEM Modeli ve Simülasyon Parametreleri	155
9.3	FEM Analizinin Sonuçları ve Yorumlanması.....	161
9.4	Profilin Fabrika Ortamında İmali.....	168
9.5	Profilin İncelenmesi ve Testi	171
BÖLÜM 10	.....	176
SONUÇ ve ÖNERİLER	.....	176
KAYNAKLAR	.....	178
ÖZGEÇMİŞ	.....	181

SİMGE LİSTESİ

v_n	Matristen çıkış hızı
W	İşlenebilirlik
ϕ_{Fr}	Şekil değiştirme kabiliyeti
σ_A	Akma gerilmesi
R	Numune yarıçapı
L	Numune boyu
A_0	Blok kesit alanı
A_1	Profil kesit alanı
Z	Bağıl ekstrüzyon edilebilirlik
A_c	Alıcı boşluğu kesit alanı
L_b	Blok boyu
A_e	Profil kesit alanı
L_r	Proseste üretilen profil boyu
$E.R$	Ekstrüzyon oranı
T_E	Ekstrüzyon sıcaklığı
v_E	Ekstrüzyon hızı
T_s	Çözelti sıcaklığı
T_m	İlk ergime başlangıç sıcaklığı
σ_z	Z eksenindeki gerilme değeri
Z	Belirli bir referans düzleminden pozitif yönde uzaklık
P_θ	Kaynak yüzeyindeki maksimum basınç
Y	Malzemenin mevcut sıcaklıktaki akma gerilmesi
P	Basınç
T	Sıcaklık
V	Hız
w_{max}	Kontak süresi

KISALTMA LİSTESİ

FEM	Final Element Method
CAD	Computer Aided Design
UL	Updated Lagrangian Method
SS	Eulerian Method
ALE	Arbitrary Lagrangian Eulerian Method
CRS	Computational Reference Mesh System
MRS	Material Reference Mesh System

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Ekstrüzyon prosesinin prensibi [1].....	5
Şekil 2.2 Direkt ekstrüzyon [2].....	7
Şekil 2.3 Endirekt Ekstrüzyon [2].....	8
Şekil 2.4 Direkt ve endirekt ekstrüzyonda yük veya basıncın ram hareketi ile değişimi [1].....	8
Şekil 2.4 Püskürtmeli ekstrüzyon yöntemlerinin şematik gösterimi; (a) ileriye püskürtme, (b) geriye püskürtme, (C) karışık püskürtme [2].....	10
Şekil 2.6 Direkt Ekstrüzyon Presi. 1, destek; 2, matris ve matris takımları; 3, kesici; 4, alıcı; 5, hareketli piston kafası; 6, stampa; 7, hareketli silindir kafası; 8, yağ tankı ve sürücü kontrol bölümü [1].....	11
Şekil 2.7 Endirekt Ekstrüzyon Presi. 1, destek; 2, matris ve matris takımları; 3, kesici; 4, alıcı; 5, hareketli piston kafası; 6, stampa; 7, sızdırmazlık elemanı; 8, hareketli silindir kafası; 9, yağ tankı ve sürücü kontrol bölümü [1].....	11
Şekil 2.8 Alıcı [1]	13
Şekil 2.9 İstampa [1]	14
Şekil 2.10 Üç ve iki parçalı matris takımları [1]	16
Şekil 2.11 Odalı matris [1]	17
Şekil 2.12 Matris takımının parçaları [1]	17
Şekil 2.13 Prese bağlı diğer harici donanımlar [1].....	18
Şekil 2.14 Ekstrüzyonda malzeme hızı. a) Tipik akış, b) İstenen akış [3]	20
Şekil 2.15 Direkt ekstrüzyonda malzemenin izlediği yol [2].....	21
Şekil 2.16 Direkt ekstrüzyonda malzeme akış tipleri [2]	21
Şekil 3.1 CuZnPb3'ün sıcaklığa bağlı olarak işlenebilirlik karakteristikleri (numune çapı 10mm, uzunluğu 50mm) [2]	26
Şekil 4.1 Profili çevreleyen çember çapı [1]	44
Şekil 4.2 Çevrim sayısına bağlı olarak çıkış uzunluğu değişimi [1]	46
Şekil 4.3 İstampa hızına bağlı ekstrüzyon basıncı değişimi [1].....	47
Şekil 4.4 Farklı ekstrüzyon oranlarında ekstrüzyon hızının zamana bağlı değişimi [1]	48
Şekil 4.5 Sabit istampa hızı ve ekstrüzyon oranı için farklı blok sıcaklıklarında hızlanma eğim açısı [1].....	49
Şekil 4.6 Yapısal profil ekstrüzyonunun adımları [1].....	51
Şekil 4.7 Kaynaksız boru ekstrüzyonu [1]	52
Şekil 4.8 Kaynama odalı içi boş profil ekstrüzyonu a)proses, b)matris [1]	53

Şekil 4.9	Ekstrüzyonda sıcaklık ve hız kontrolü [1]	55
Şekil 4.10	Ekstrüzyonda sıcaklık ve hız kontrol algoritması (T_m - ilk ergime başlangıç sıcaklığı) [1]	55
Şekil 4.11	6000 serisi alaşımlarda tipik ekstrüzyon hataları [1]	59
Şekil 4.12	Blok döküm ve ekstrüzyon proseslerinde hatalara karşı kontroller	61
Şekil 5.1	Farklı FEM sistemlerinde CRS ve MRS bağlantıları	64
Şekil 5.2	MRS yüzeyine CRS izdüşümü [12]	65
Şekil 6.1	Ekstrüzyon basıncı ve ıstampa konum ilişkisinin yazılımsal ve gerçek bulgularının kıyası [13]	68
Şekil 6.2	İş parçasında ve ekstrüzyon takımlarında sıcaklık gelişimi [13]	70
Şekil 6.3	Bloğun %4 - %50 - %95' nin basılmış olduğu durumlarda sıcaklık dağılımları [13]	72
Şekil 6.4	Deformasyon bölgesi ve civarında seçilen noktalar [13]	73
Şekil 6.5	Deformasyon bölgesinin içinde ve dışında seçilen noktalardaki sıcaklık gelişimi [13]	73
Şekil 6.6	Bloğun a)%4 ve b)%80 basılmış halindeki hız alanları dağılımı [13]	74
Şekil 6.7	Bloğun %97' sinin basılmış olduğu bir uygulamada hız vektörlerinin dağılımı [13]	75
Şekil 6.8	Farklı ıstampa hızlarında maksimum çıkış sıcaklıkları [12]	75
Şekil 6.9	Bloğun %4 - %17,5 - %50' nin basılmış olduğu durumlarda efektif gerinim dağılımları [13]	76
Şekil 6.10	Deformasyon bölgesinin içinde ve dışında seçilen noktalardaki efektif gerinim gelişimi [13]	77
Şekil 6.11	Farklı sıcaklıklarda efektif gerilme dağılımı (370-400-430-450 °C) [11]	78
Şekil 6.12	Merkezden farklı uzaklıklarda eksenel gerinim farklılıkları [11]	79
Şekil 7.1	Direkt ekstrüzyonda sürtünme mekanizmaları	81
Şekil 7.2	Direkt ekstrüzyonda ısı dengesi	82
Şekil 7.3	Çıkış sıcaklığının etkileri [1]	83
Şekil 7.4	6063 alaşımı için farklı blok uzunluklarında ıstampa hızı-çıkış sıcaklığı ilişkisi [1]	84
Şekil 7.5	6063 alaşımı için farklı matris yüzey durumları için ıstampa hızı-çıkış sıcaklığı ilişkisi [1]	85
Şekil 7.6	6063 alaşımı için matris ağızını kapsayan çember çevresine dayalı olarak ıstampa hızı-çıkış sıcaklığı ilişkisi [1]	85
Şekil 7.7	6063 alaşımı için simülasyon ve deney sonuçları elde edilen ıstampa hızı-çıkış sıcaklığı kıyası [1]	86
Şekil 7.8	İki farklı metal birbirleri içerisinde difüzyonu [8]	88
Şekil 7.9	Sıvı faz içerisinde dendrit oluşumu [8]	89
Şekil 7.10	Örnek bir A-B alaşımında %30 B ihtivasi için faz geçiş diyagramı [8]	90
Şekil 7.11	α matrisi içerisinde θ çökeltisinin oluşumu ve gelişimi	92
Şekil 7.12	Al-Cu faz diyagramı	93
Şekil 7.13	1 hafta 545 °C' de bekletilmiş, aniden 25 °C'ye düşürülmüş ve a) 400 °C'de b) 300 °C' de 12 saat bekletilmiş Al-5Cu alaşımının mikro yapısı [8] .	94
Şekil 7.14	130 °C' de sertleştirilmiş Al-4Cu alaşımının mikro yapıya ait sertlik durumu [8]	94
Şekil 7.15	Al-4Cu için yaşlandırma zamanı-sertlik ilişkisi [8]	95

Şekil 7.16	Al-Cu-Mg üçlü faz diyagramı (4Cu-1Mg alaşımı için) [8]	96
Şekil 7.17	Al-Cu faz diyagramı üzerinde tavlama bölgeleri [8]	98
Şekil 7.18	Sıcaklığın fonksiyonuna göre çözünme durumu a) Mg-Si oranı 1.73:1 b) Si artışına göre [8]	103
Şekil 7.19	Farklı alaşımların soğuma oranı-dayanım ilişkisi [8]	108
Şekil 7.20	Farklı alaşımların çekme gerilmesinin %95' ine tekabül eden zaman-sıcaklık-dayanım eğrileri [8]	109
Şekil 7.21	Kesit kalınlığı ve su verme ortamının alüminyumun soğumasına etkisi [8]	111
Şekil 7.22	13mm kalınlığındaki 7075 alüminyum alaşımının farklı su verme ortamlarında yüzey kalitesinin soğumaya etkisi [8]	112
Şekil 7.23	6061 alüminyum alaşımının yaşlandırma karakteristiği	115
Şekil 8.1	Metal akışı incelemesi için özel olarak hazırlanan tel ihtiva eden parçalı blok [14]	120
Şekil 8.2	Çekirdek üzerinde metal akışı [14]	122
Şekil 8.3	Çekirdekten odalara doğru deformasyon bölgeleri [14]	122
Şekil 8.4	Kaynama odasında deformasyon bölgeleri ve ölü metal bölgeleri [14]	123
Şekil 8.5	Kaynak odasında malzeme akışı [14]	124
Şekil 8.6	Kaynama çizgilerinin mikro yapısı a) Blok sıcaklığı 430 ⁰ C, matriz ağzı uzunluğu 3mm, boru kesit kalınlığı 1,7mm b) Blok sıcaklığı 400 ⁰ C, matriz ağzı uzunluğu 6mm, boru kesit kalınlığı 1,7mm [18]	129
Şekil 8.7	Sıcaklığın malzemenin kaynamasındaki önemi (Sıkıştırma oranı %44,4) [25]	131
Şekil 8.8	Kaynama odası geometrisinin kaynamaya etkisi a)10mm, b)15mm, c)20mm [25]	132
Şekil 8.9	Valberg deneyinde kullanılan matris geometrisi [28]	133
Şekil 8.10	Kontak basıncı, hız ve efektif gerilmenin kaynak odasındaki dağılımı [28]	136
Şekil 8.11	Ekstrüzyon limit diyagramı [27]	136
Şekil 8.12	Matris montajı ve profil ölçüleri [27]	137
Şekil 8.13	Küçük ön oda ile küçük ve orta büyüklükteki kaynama odasının ekstrüzyon limit diyagramına etkisi [27]	139
Şekil 8.14	Büyük ön oda ile küçük,orta ve büyük kaynama odasının ekstrüzyon limit diyagramına etkisi [27]	139
Şekil 8.15	Ön oda ve kaynama odası boyutlarının ekstrüzyon limit diyagramına etkisi [27]	140
Şekil 9.1	Nervürlü alüminyum borunun ölçülendirilmiş kesit görünüşü	144
Şekil 9.2	Helisel nervürlü alüminyum borunun bilgisayar destekli modeli	145
Şekil 9.3	İmalatta kullanılacak ekstrüzyon kalıbının ölçülü yarım kesit görünüşü	146
Şekil 9.4	Modifiye edilmiş odalar (üst), standart boru ekstrüzyon odaları (alt)	149
Şekil 9.5	FEM yazılımında 1/8' i modellenmiş dişli	151
Şekil 9.6	Simülasyonda kullanılacak ekstrüzyon kalıbının ölçülü yarım kesit görünüşü	153
Şekil 9.7	İmalatta (üst) ve simülasyonda (alt) kullanılacak matrislerin üç boyut yarım kesit görünüşleri	154
Şekil 9.8	Simülasyon bileşenleri	155

Şekil 9.9	6061 alüminyum alaşımı için gerinim oranı 100 (mm/mm)/s olduğu durumda sıcaklığa bağlı akma gerilmesi-gerinim ilişkisi (Temperature=Sıcaklık °C).....	159
Şekil 9.10	FEM analizi sonucunda elde edilen düz nervürlü boru	161
Şekil 9.11	Standart odalı ekstrüzyonda kaynama yüzeylerindeki gerilme.....	162
Şekil 9.12	Genişletilmiş odalı ekstrüzyonda kaynama yüzeylerindeki gerilme.....	163
Şekil 9.13	Kaynama bölgesindeki sıcaklık dağılımı	163
Şekil 9.14	Ekstrüzyon genelinde sıcaklık dağılımı.....	164
Şekil 9.15	Başlangıçta ıstampa tarafından uygulanan yük grafiği	165
Şekil 9.16	Prosesin devamındaki ıstampa tarafından uygulanan yük grafiği	165
Şekil 9.17	Proses genelinde gerilme değerleri	166
Şekil 9.18	Proses genelinde gerinim değerleri	167
Şekil 9.19	Proses genelinde gerinim hızı değerleri.....	167
Şekil 9.20	Proses genelinde ekstrüzyon hızı değerleri	168
Şekil 9.21	Helisel nervürlü alüminyum boru matris bileşenleri	170
Şekil 9.22	Fabrika ortamında üretilmiş helisel nervürlü alüminyum boru	171
Şekil 9.23	Test numunesi.....	172
Şekil 9.24	Geometrik test mastarı	174

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Alıcı içindeki malzeme akışını etkileyen faktörler [2].....	19
Çizelge 3.1 Çeşitli alaşımların burulma deneyinde elde edilen şekil değiştirme özellikleri [2]	27
Çizelge 3.2 İşlenebilirlik ile ekstrüzyon edilebilirlik arasındaki ilişki [2]	27
Çizelge 3.3 Ekstrüzyon malzemeleri [2].....	28
Çizelge 3.4 Alüminyumun özgül ısısı [6]	33
Çizelge 3.5 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [7].....	35
Çizelge 3.6 Alüminyum ve alaşımlarının homojenizasyon sıcaklıkları ve bazı ekstrüzyon parametreleri [2]	41
Çizelge 3.7 Alüminyum alaşımlarının bağıl ekstrüzyon edilebilirliği, $z = 30-50$ orta, $z = 50-150$ kolay, $z < 30$ zor [2]	42
Çizelge 4.1 Alüminyum profillerinin ekstrüzyon zorluklarına göre sınıflandırılması [1]	50
Çizelge 4.2 Yumuşak ve orta setlikteki alaşımlar için blok sıcaklığı ve ekstrüzyon hızları [1].....	51
Çizelge 4.3 Farklı yumuşak ve orta sert alaşımlar için sertleşme fazları [1]	57
Çizelge 4.4 Bazı 6000 serisi alaşımlar için ısıtma işlemleri [1]	57
Çizelge 7.1 6061 ve 6063 alaşımı ekstrüzyon ürünlerinin çözündürme ve çöktürme sertleştirme ısıtma işlem parametreleri [8].....	101
Çizelge 7.2 6061 alaşımı için çözündürme ısıtma işleminin dayanıma etkisi [8]	105
Çizelge 8.1 Magnezyum içeriğine göre ekstrüzyon yükündeki değişimler [18]	125
Çizelge 8.2 460°C blok sıcaklığı, 6mm matris ağız uzunluğu ve 1,7mm boru kesit kalınlığı koşullarında maksimum ekstrüzyon yükleri [19]	126
Çizelge 8.3 4,5mm matris ağız uzunluğu ve 1,7mm boru kesit kalınlığı koşullarında maksimum ekstrüzyon yükleri [19]	127
Çizelge 8.4 400°C blok sıcaklığı ve 4,5mm matris ağız uzunluğu koşullarında maksimum ekstrüzyon yükleri [19]	127
Çizelge 8.5 400°C blok sıcaklığı ve 1,7mm boru kesit kalınlığı koşullarında maksimum ekstrüzyon yükleri [19]	128
Çizelge 8.6 Genişletme testi sonuçları [18]	128
Çizelge 8.7 Farklı koşullar altında çekilmiş profillerin yüzey durumları [19]	130
Çizelge 8.8 2D ve 3D modellerin veri kıyası ve a,b,c kaynak odası uzunluklarının parametrelere etkileri [25].....	132
Çizelge 8.9 Valberg deneyi sonuçları [28]	133
Çizelge 9.1 Blok başlangıç mesh özellikleri.....	156

Çizelge 9.2	6061 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.....	157
Çizelge 9.3	6061 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.....	157
Çizelge 9.4	6061 alüminyum alaşımının diğer fiziksel özellikleri.....	158
Çizelge 9.5	Diğer simülasyon parametreleri ve özellikleri	160
Çizelge 9.6	Fabrika üretim parametreleri.....	171

HELİSEL NERVÜRLÜ ALÜMİNYUM BORU EKSTRÜZYONU

Mehmet Deniz DÖLEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Mehmet Emin YURCİ

Alüminyumun yıllık 30 milyon tondan fazla olmak üzere günümüzde dünyada en çok tüketilen demir dışı madendir. Alüminyumun çeliğe göre çok daha hafif olması, doğası gereği yüzeyinde korozyona dayanıklı bir film oluşturabilmesi, işlenebilme kabiliyetinin yüksek olması, çeşitli elementlerle yapılan alaşımlarının yumuşak çeliklerin dayanımının bile üzerine çıkabilmesi, doğal gümüş rengi ve iyi bir yüzey kalitesi sağlaması nedeniyle hem inşaat, otomotiv, havacılık, deniz ve demiryolu taşıtları sektörlerinde hem de mimari uygulamalarda gerek konstrüktif gerekse de dekoratif amaçlarla tercih edilmektedir.

Alüminyuma yukarıda sayılan temel özelliklerinin yanı sıra çeşitli elementlerle farklı alaşımları oluşturularak da çok farklı özellikler kazandırılmaktadır. Bu sayede alüminyumun uygulama alanları her geçen gün artmaktadır. Bu talebe cevap verebilmek içinse şekillendirme yöntemleri de çeşitlenmekte ve geliştirilmektedir. Bu tez çalışmasının odak noktası ise ekstrüzyon ile şekillendirme olacaktır. Ekstrüzyon yöntemi, çok çeşitli kesitlerin ve karmaşık geometrilerin iyi yüzey kalitesinde ve hızlı üretilmesini sağlayan önemli bir plastik şekil verme yöntemidir.

Fakat günümüzde üretilen alışlagelmiş profillerin yanında gerek dekoratif gerekse de işlevsel amaçlarla farklı tip profillerin ekstrüzyon yöntemi ile imalatı talep edilir olmuştur. Bu yeni talepler doğal olarak yeni araştırmaların yapılmasını gerektirmektedir. Bu tez çalışması kapsamında helisel nervürlü alüminyum bir borunun ekstrüzyon yöntemiyle imal edilebilirliği sorgulanacaktır. Bu amaçla geçmişten günümüze kadar yapılmış araştırmalar temel olarak alınacak ve matris tasarımı ile

parametreler açısından ne gibi değişiklikler yapılabileceği öne sürülecektir. Daha sonra FEM analizleri ile çeşitli testler yapılarak uygulanan kriterler doğrulanacak ve fabrika ortamında profilin deneme çekimi gerçekleştirilecektir.

Üretilen profil daha sonra geometrik kontrole tabi tutulacak ve çeşitli yargılara varılacaktır. Sonuç olarak ekstrüzyon yöntemiyle helisel nervürlü bir borunun üretilebileceği belirtilecek, fakat geometrik kararlılık açısından ileriye yönelik yapılması gereken araştırmalar açısından bazı yaklaşımlarda bulunulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum ekstrüzyonu, dönel simetrik parça ekstrüzyonu, FEM, ekstrüzyonun termodinamiği, alüminyumun ısıl işlemi, ekstrüzyonda malzeme akışı ve kaynama

EXTRUSION OF HELICAL RIBBED ALUMINUM TUBE

Mehmet Deniz DÖLEN

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Mehmet Emin YURCI

Aluminum is the world's most widely consumed non-ferrous metal with more than 30 million tons a year. Aluminum is much lighter than steel, has a natural silver color, a corrosion-resistant film on the surface, good surface quality, high ability to be processed and with alloying elements aluminum can reach above the strength of the soft steel alloys. Because of these properties aluminum, it is widely preferred in various sectors like construction, automotive, aviation, marine, and rail vehicles as well as architectural applications for decorative and constructive purposes.

çeşitli elementlerle yapılan alaşımlarının yumuşak çeliklerin dayanımının bile üzerine çıkabilmesi, doğal gümüş rengi ve iyi bir yüzey kalitesi sağlaması nedeniyle hem inşaat, otomotiv, havacılık, deniz ve demiryolu taşıtları sektörlerinde hem de mimari uygulamalarda gerek konstrüktif gerekse de dekoratif amaçlarla tercih edilmektedir.

In addition to the above-mentioned basic properties of aluminum, with the addition of different alloying elements, various features are attainable. So, areas of application of aluminum is increasing with each passing day. Respond to this request, methods of forming are diversified and developed. Forming with extrusion will be the focus of this thesis. Extrusion, is an important method of plastic forming for fast manufacturing of a wide variety of profiles and complex geometries with good surface quality.

But today, for decorative and functional purposes, manufacturing of different types of profiles with extrusion method has been demanded. So it is obvious that the new demands requires new researches. Within the scope of this thesis, the availability of the extrusion of a helical ribbed aluminum pipe will be questioned. For this purpose, based on trials conducted from the past to the present, what changes can be made in terms of mold design and parameters will be brought forward. Then, some various tests with FEM analysis method will be done to verify the mold design and parameters and profile will be extruded at the factory environment.

Then, the extruded profile will be examined for geometrical accuracy and some conclusions will be reached. As a result it will be mentioned that a helical ribbed pipe can be produced by extrusion method, but in terms of geometrical accuracy some approaches for future research will be made.

Keywords: Extrusion of aluminum, extrusion of rotational symmetric parts, FEM, thermodynamics of extrusion, heat treating of aluminum, metal flow and welding in extrusion

1.1 Literatür Özeti

Ekstrüzyon prosesi, diğer imalat yöntemleri kullanıldığında çok uzun zaman alacak veya üretilmesi imkansız olan profillerin imalatının hızlı ve verimli olarak gerçekleştirilmesine imkan vermektedir. Bu nedenle günümüzde birçok tasarım ekstrüzyon ürünlerini içerir hale gelmekte ve bu sayede global çerçevede ekstrüzyon prosesiyle yıllık üretim kapasitesi sürekli artmaktadır.

Geçmişten günümüze kadar faaliyet göstermiş tesislerde ekstrüzyon prosesinin alt prosesleri birbirinden ayrı bölümler olup, mevcut bir fabrikanın içersinde ayrı ayrı gruplandırılmıştır. Oysa artan talepler ekstrüzyon prosesinin otomatikleştirilmesini, alt proseslerin birbiriyle bağlantılı olmasını ve artan kalite beklentileri nedeniyle insan faktörünün azaltılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle yeni açılan birçok tesis bloğun dökümünden ürünün paketlenmesine kadar neredeyse tamamen otomatik çalışmaktadır.

Otomatikleşen tesislerde kullanılan bilgisayar kontrolleri, proses parametreleri üzerinde sıkı bir kontrole imkan vermekte, sürekli üst kalitede ürün üretime imkan sağlamaktadır. Kullanılan bilgisayar kontrollü sistemlere günümüze kadar yapılmış araştırmaların temel oluşturduğunu vurgulamak gerekir. Bu araştırmalar ekstrüzyon parametrelerinin açıklanmasında, bu parametrelerdeki değişimlerin ne yönde etki ettiklerini göstermekte son derece faydalı olmuşlardır ve bu tez çalışması kapsamında ayrıntılı olarak örneklendirilmişlerdir. Her araştırmanın kapsamı içersinde hız ve sıcaklık

ana parametreler olurken, tüm diğer parametreler bu iki parametreye doğrudan veya dolaylı olarak etki eden değişkenler olarak ele alınmışlardır.

Proses parametrelerindeki iyileştirmelerin yanı sıra matris tasarımında gelişmeler de literatürde yer alan çalışmaların başka bir odak noktasıdır. Bir kalıbın tasarımında yapılacak değişimlerin üç farklı amacı vardır. Bunlar verimliliğin artırılması, maliyetin düşürülmesi ve kalitenin yükseltilmesidir. Verimliliğin artırılması bir matriste birim zamanda basılacak blok sayısının (veya metal ağırlığının) yükseltilmesi ile sağlanmaktadır. Bu da prosesin yüksek hızda gerçekleştirilmesi anlamına gelmektedir. Yüksek hız beraberinde yüksek güçler ve yüksek sıcaklıklar getirecek olup, bu parametreler ekstrüzyonun sınırlandırıcı faktörleridir. Bir kalıbın maliyeti, kullanılan malzeme türünden çok matris kütüğünün ne kadar sürede işlendiğine dayanmaktadır. Çünkü günümüzde kullanılan matris malzemeleri birkaç çeşitten oluşmaktadır ve bu konudaki gelişmeler malzeme alanındaki gelişmelerin takipçisi olmaktadır. Bir kalıbın makineleme zamanı kullanılan çeşitli ve farklı yöntemlere ve kalıbın detayına göre maliyetinde belirleyici unsur olmaktadır. Üretilen profilin kalitesi ile kalıbın kalitesi birbirleriyle yakından ilgilidir. Büyük sürtünmelere ve sıcaklıklara maruz kalan bir kalıbın ömrünün uzun olması, özellikle de matris ağzının geometrik yapısının uzun süre toleranslar içinde kalması yüksek çevrim sayısında kalıbın maliyetini düşürecek ve verimliliğini artıracaktır.

Yukarıda bahsedilen bu özellikler nedeniyle yeni bir ürünü oluşturmak için parametrelerin ve matris tasarımının literatürdeki mevcut çalışmaların ışığında seçilmesi ve oluşturulması gerekmektedir. İmalat öncesi yapılan tüm çalışmaları ön hazırlıklar olarak nitelendirecek olursak, bu çalışmaların maliyetini ve deneme yanılma çevrimlerini minimize etmek her kuruluşun birleştiği ortak nokta olmaktadır. Bu amaçla geliştirilen FEM (Sonlu Eleman Analiz) yazılımlarının önemi son yıllarda oldukça artmıştır. FEM yazılımları sayesinde sanal ortamda prosesin tüm parametrelerinde ve kalıbın tasarımında istenilen değişikliklerin yapılması mümkün olmakta ve sürekli iyileştirme çalışmaları çok az maliyetle sürdürülebilmektedir. Her ne kadar FEM yazılımlarının %100 doğru sonuç veremediği bilinse de, elde edilen verilerin gerçeğe ne kadar yakın olduğu, parametresel ve tasarımsal olarak oldukça yönlendirici olduğu her araştırmada ortaya konulmuştur.

1.2 Tezin Amacı

Ekstrüzyon yöntemiyle üretilen profilleri incelediğimizde, metalin şekillendirmesinin bloğun basıldığı yön ile aynı olduğunu görmekteyiz. Sonuç olarak üretilen profillerin neresinden kesit alırsak alalım tüm örnekler birbiriyle aynı olmaktadır. Fakat günümüzde ortaya atılan yeni tasarımlar görsel, işlevsel veya her iki açıdan da dönel simetrik parçaların üretilmesini talep etmektedir. Literatürde bu tarzda hiçbir uygulamaya halen rastlanmamakla birlikte, çeşitli kuruluşların bu konuda araştırma yaptığı bilinmektedir. Özellikle Japon endüstrisinde küçük boyutta çelik helisel dişli imalatında ekstrüzyon yönteminin incelendiği bazı yazılı metinlerde görülmektedir.

Bu çalışmanın oluşturulmasında tasarımsal amaçlarla yola çıkılmıştır. Görsel açıdan ve montaj/demontaj zamanlarını azaltmak amacıyla yeni bir istif rafı sistemi tasarlanmış ve bu projede dışında helisel nervürlere sahip bir alüminyum borunun sütun olarak kullanılması talep edilmiştir. Bu tip bir alüminyum borunun hızla ve büyük oranda talep edileceği ortadadır. Bu nedenle ekstrüzyon yöntemi üzerine odaklanılmıştır. Fakat daha önce helisel nervürlü bir borunun imalatı yapılmadığından matris tasarımı ve parametreler açısından yöntemin incelenmesi gerekmiştir. Bu tez kapsamında literatürde boru imalatı açısından incelenmiş örnekler temel alınarak çeşitli yaklaşımlara gidilmiş ve FEM yazılımından elde edilen veriler doğrulama amacıyla kullanılmıştır. En nihayetinde kalıbın imali gerçekleştirilmiş ve fabrika ortamında basılarak profilin imal edilebilirliği doğrulanmıştır. Daha sonra profil üzerinde yapılan incelemelerle geliştirici bazı yaklaşımlar ileri sürülmüştür.

1.3 Bulgular

Helisel nervürlü alüminyum boru ekstrüzyonu için standart bir boru kalıbı seçilmiş ve üzerinde çeşitli modifikasyonlar yapılmıştır. Özellikle malzemenin matris ağzına gelmeden önce dönel hareketine başlaması amacıyla matris odalarının son kısımlarına dönel hareket sağlayacak boşaltmalar yapılmıştır. Kullanılan sonlu eleman analiz programının odalara ayrılan malzemenin kaynama odasında tekrar birleşmesini simule edememesi nedeniyle yazılımsal inceleme için helisel nervürlü olmayan, doğrusal nervürlü bir borunun imali için gereken matris modeli geliştirilmiştir. Bu amaçla helisel nervürlü borunun matris ağzında dönme esnasında ne kadar yol kat edeceği CAD

programı ile tespit edilmiş ve doğrusal nervürlü boru kalıbının matris ağzı uzunluğu CAD programında bu ölçüde büyütülmüştür. Bu büyüme oranının %7 olması gerektiği gözlemlenmiştir.

Daha sonra literatür çalışmaları örnek alınarak mevcut blok çapı, nervür helis açısı, ekstrüzyon oranı, matris ağzı uzunluğu ve ıstampa hızı için diğer parametreler seçilmiştir. Yirminin üzerinde detaylı olarak yürütülen, uzun süreli FEM simülasyonları sonucunda istenilen sonuçlar elde edilmiş, 127 mm çapında 500 mm uzunluğunda bir bloğu kullanarak 12,5° helis açısına sahip 6 eş nervürlü, nervür dahil 30 mm dış çapında, nervür hariç 25 mm dış çapında ve 19,8 mm iç çapında profil için blok sıcaklığının 500°C, matris ve alıcı sıcaklığının 470°C, ıstampa hızının 10 mm/s olması durumunda proses sonrasında ilave bir çözündürme tavlamasına ihtiyaç duymadan doğru yapılmış bir çökeltme sertleştirme tavlamasıyla maksimum dayanımda profilin imal edilebileceği doğrulanmıştır.

Simülasyonların ardından fabrika ortamında istenilen profil çekilmiş ve profilin imal edilebilirliği doğrulanmıştır. Bunun yanı sıra fabrika ortamında sonradan yapılan çökeltme sertleştirme tavlaması gözlemlenmemiş ve profil üzerinde sertlik ölçümü gerçekleştirilmemiştir. Atölye ortamında özel olarak hazırlanmış masterlar ile profilin ölçüsel doğruluğu test edilmiş fakat bu noktada çeşitli tutarsızlıklarla karşılaşmıştır. Üretilen profilin baş, orta ve son kısımları ile farklı çevrimlerde elde edilen profiller arasında nervür hatvesinin değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Her ne kadar istif rafı tasarımı amacıyla istenen bu profilde ölçüsel açıdan düşük tolerans aralığı istenmese de, ileriye yönelik olarak bu yöntemin işlevsel açıdan düşük tolerans aralığında profillerin imalinde kullanılması ihtiyaç dahilinde gözükmemektedir. Bu açıdan incelendiğinde nervür hatvesinin proses sonrası gerdirmeye işleme ve proses boyunca matris ağzından çıkan boru sıcaklığının değişmesiyle ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu sebepten ötürü proses sonrası gerdirmeye işleminin kontrol altına alınması ve prosesin isothermal ekstrüzyon olarak uygulanması gerektiği önerilmiştir. Mevcut çalışmanın ise ileriye yönelik temel oluşturacağı düşünülmektedir.

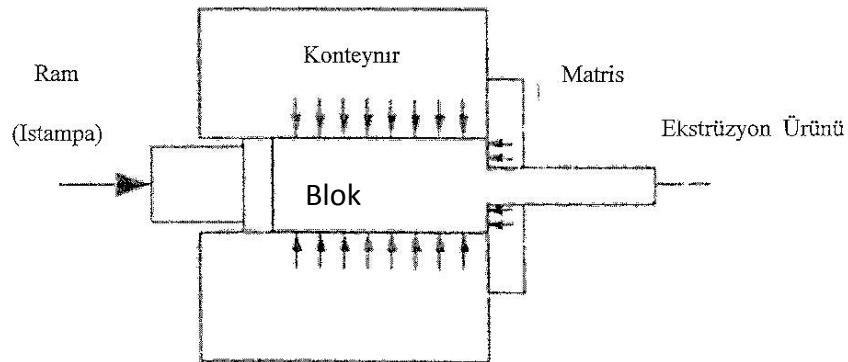
BÖLÜM 2

EKSTRÜZYON

Bu bölümde ekstrüzyon yöntemi kısaca açıklanacak olup, alışlageldik ekstrüzyon yöntemlerinden bahsedilecektir. Daha sonraki bölümlere temel bilgi sağlaması açısından ekstrüzyon takımlarına ve ekstrüzyondaki akış tiplerine kısaca değinilecektir.

2.1 Ekstrüzyon Nedir?

Ekstrüzyon önceden bu işlem için hazırlanmış bir metal bloğun sıkıştırma vasıtasıyla bloktan daha küçük kesit alanına sahip matris boşluğundan akmaya zorlandığı plastik deformasyon prosesidir. Ekstrüzyon dolaylı bir sıkıştırma prosesidir. Dolaylı sıkıştırıcı kuvvet, blok ile alıcı ve matris arasındaki reaksiyon vasıtasıyla gelişir ve bu kuvvetler yüksek değerlere ulaşırlar. Ekstrüzyon, alaşım ve kullanılan metoda bağlı olarak soğuk veya sıcak şekilde gerçekleşebilir. Sıcak ekstrüzyonda blok, plastik deformasyonu kolaylaştırmak için ön ısıtmaya tabi tutulur. Ekstrüzyon prensibinin temeli Şekil 2.1' de gösterilmektedir [1].



Şekil 2.1 Ekstrüzyon prosesinin prensibi [1]

Ekstrüzyon yöntemi ile çubuklar, borular, şeritler ve birçok dolu ve boşluklu profillerin imalatı yapılabilmektedir. Özellikle ince kesitli karmaşık şekillerden oluşan profillerin üretiminde ekstrüzyon yöntemi ön plana çıkmaktadır.

2.2 Temel Ekstrüzyon Yöntemleri

Ekstrüzyon yöntemleri malzemenin akış yönüne ve kuvvetin uygulanış biçimine göre sınıflandırılmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yöntemler direkt ve endirekt ekstrüzyon ile püskürtmeli ekstrüzyondur. Bunun yanı sıra yeni kullanılmaya başlanan yöntemler de mevcuttur. Bu yöntemler ileriki bölümlerde, sahip oldukları faydaları vurgulanarak açıklanacaktır.

2.2.1 Direkt Ekstrüzyon

Direkt ekstrüzyonda, alıcı içerisindeki blok, ıstampa tarafından itilerek diğer uçtaki matrisin profil deliğinden geçirilir (Şekil 2.2). Direkt ekstrüzyonda metal akış yönü ıstampa hareketinin yönü ile aynıdır. Bu proses esnasında blok, alıcının cidarlarında rölatif olarak kayar. Meydana gelen sürtünme kuvveti ram basıncının oldukça artmasına sebep olur [1].

Geleneksel olarak direkt ekstrüzyon prosesi 3 ayrı bölümden oluşur:

- Blok yığılır ve basınç hızlıca tepe noktasına çıkar.
- Basınç düşer ve ekstrüzyon kararlı durumda ilerler.
- Basınç minimuma indikten sonra kısa bir "atma" şeklinde keskin bir biçimde artar [1].

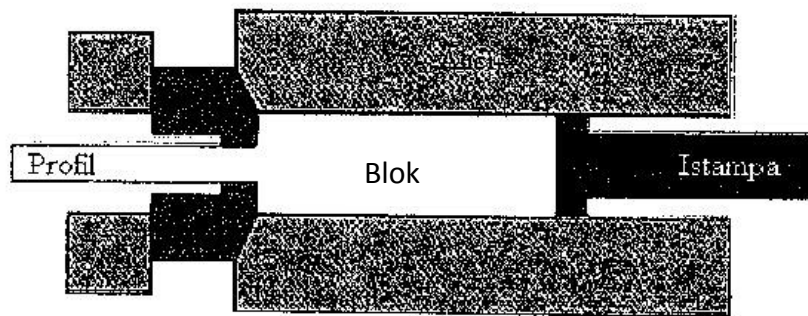
Kuvvetin minimuma ulaştıktan sonra tekrar yükselmesinin sebebi ıstampanın strok sonuna yaklaşması ve strok sonunda, disk şeklinde küçük bir blok parçasının, radyal olarak akıp matris deliğine girmesi esnasında ıstampanın önünde bulunan ön levha ve matris alın yüzeylerinde büyük sürtünme kuvvetlerinin oluşmasıdır. Direkt ekstrüzyon yöntemi, takım düzenlemesi basit ve işletme yönünden kolay olduğundan oldukça tercih edilen bir yöntemdir. Direkt ekstrüzyon, matris dizaynı ve şekline göre som çubuklar, odalı borular ve odalı veya som profillerin imalatında uygulama alanı bulur.

Direkt ekstrüzyon yönteminin avantajları şunlardır:

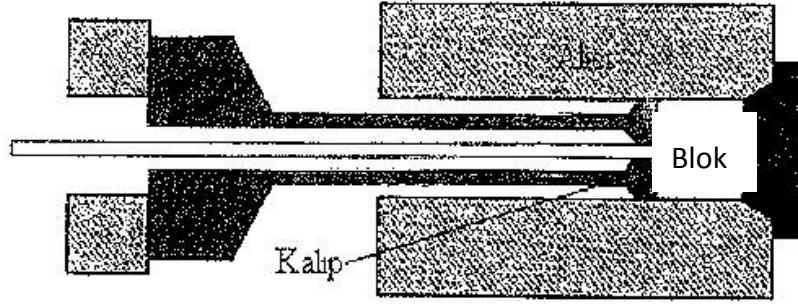
- İstenilen uzunluk, çap ve kalınlıkta yan mamul imal olanağı sağlar.
- Çeşitli dolu ve içi boş profiller kolaylıkla elde edilir.
- Takım düzenlenmesi kolaydır.
- İşletme yönünden kolaylıklar sağlar.
- Matris çapı, alıcı iç çapı tarafından sınırlanmamaktadır.

Direkt ekstrüzyon yönteminin dezavantajları ise şunlardır:

- Gerekli ekstrüzyon kuvveti, endirekt ve hidrostatik ekstrüzyon yöntemlerinden daha yüksektir. Bundan dolayı da ekstrüzyon oranı ve hızı istenildiği kadar yükseltilememektedir.
- Blok ile alıcı arasındaki sürtünme uzun blokların kullanılmasını önlemektedir.
- Ekstrüzyon artığı (ara iş) fazladır.
- Malzeme akışı indirekt ve hidrostatik ekstrüzyon yöntemlerinden daha düzensiz olmaktadır.
- Ekstrüzyon hataları oluşabilmektedir.
- Takım ömrü kısadır [2].



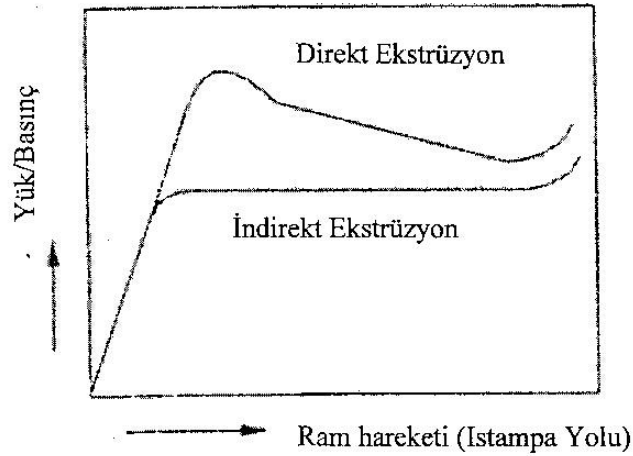
Şekil 2.2 Direkt ekstrüzyon [2]



Şekil 2.3 Endirekt Ekstrüzyon [2]

2.2.2 Endirekt Ekstrüzyon

Endirekt ekstrüzyonda, boşluklu istampanın önündeki matris alıcıya göre rölâtif olarak hareket eder fakat blok ve alıcı arasında Şekil 2.3' te de gösterildiği gibi rölâtif olarak bir yer değiştirme yoktur. Bu yüzden bu proses blok yüzeyi ve alıcı arasında sürtünmenin olmaması ile karakterize edilir ayrıca blok merkezinin de sınır bölgelerine göre rölâtif bir yer değiştirmesi yoktur. Bu yöntemle birlikte blok yüzeyi ile alıcı cidarı arasında sürtünme oluşmadığından gerekli ekstrüzyon kuvveti azalmaktadır. Yükleme veya basıncın dolaylı ekstrüzyon prosesinde ram hareketi ile değişimi direkt ekstrüzyonunki ile bir kıyaslama oluşturacak biçimde Şekil 2.4' te gösterilmiştir [2].



Şekil 2.4 Direkt ve endirekt ekstrüzyonda yük veya basıncın ram hareketi ile değişimi [1]

Uygulanan kuvvet önce yükselerek bir maksimum değere ulaşır daha sonra bu maksimum değerin hemen aşağısında sabit bir şekilde devam eder ve ıstampa strok sonuna yaklaştığında yeni bir zirve yaparak sürecini tamamlar. Bunun sebebi ise matris yüzeyi ve alıcının dip kısmında büyük sürtünme kuvvetleri meydana gelmesidir. İşlem bu noktada sonlandırılır. Bu anda endirekt ekstrüzyonun kayıp miktarı %5-10 dur [2].

Endirekt ekstrüzyon yönteminin avantajları şunlardır:

- Direkt ekstrüzyon yöntemine göre yaklaşık %20-30 arasında kuvvet kazancı sağladığından; daha büyük ekstrüzyon oranları, daha yüksek ekstrüzyon hızları, daha düşük blok sıcaklığında çalışma imkanı sağlamaktadır.
- Kullanılan yüksek ıstampa kuvveti ya ince et kalınlıklı profillerin ekstrüzyonunda ya da düşük blok sıcaklıklarında çalışmayı sağlamak için kullanılır.
- Blok merkezinin blok çevresinden daha hızlı hareketi önlendiğinden blok uzunluğunun ıstampa basıncından bağımsızlığı sağlanmaktadır. Bu nedenle blok uzunluğu ekstrüzyon kuvveti tarafından sınırlanmayıp, içi boş ıstampanın uzunluğu ve rijitliği ile sınırlanmaktadır.
- Ekstrüzyon artığı (ara iş) daha kısa olmaktadır.
- Malzeme akışı daha ideal olmaktadır.
- Blok ile alıcı arasında sürtünmeden dolayı sıcaklık artışı oluşmadığından yüzey çatlaklarından kaynaklanan hatalar azalmaktadır.
- Takımların ömrü, özellikle de alıcıdaki iç gömleğin ömrü, cidar sürtünmesinin önlenmesi nedeniyle artmaktadır.

Endirekt ekstrüzyon yönteminin dezavantajlarıise şunlardır:

- Profil veya çubuk boyutları, içi boş ıstampanın delik çapı ile sınırlanmaktadır.
- ıstampanın uzunluğu, eğme gerilmesiyle sınırlanmaktadır.
- Matris ölçüsü, alıcı çapı ile sınırlanmaktadır.
- Kompleks kesitlerin ekstrüzyonuna uygun bir yöntem değildir.
- Takımların düzenlenmesi zor olmaktadır.

- Blok yüzeyindeki impüriteler mamül yüzeyine geçeceğinden birçok durumda blok yüzeyini ekstrüzyondan önce bir ön işleme tabi tutmak gerekir [2].

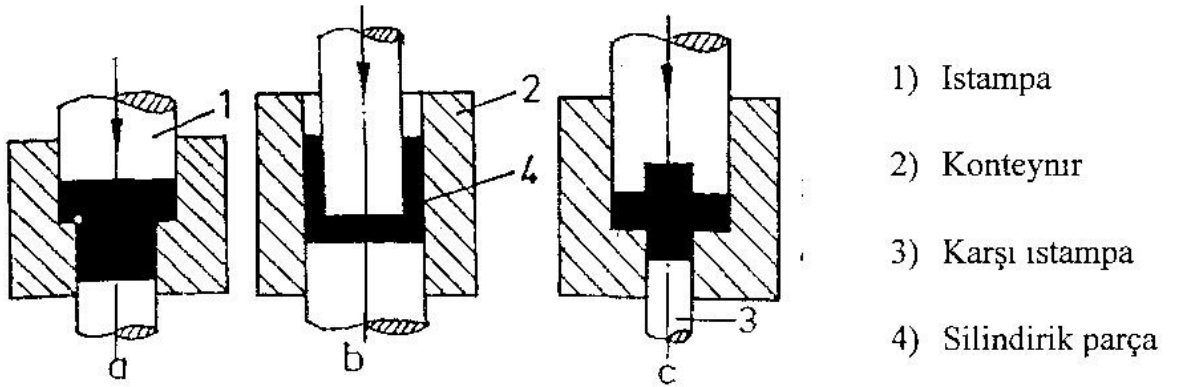
2.2.3 Püskürtmeli Ekstrüzyon

Püskürtmeli ekstrüzyon yöntemi genellikle dönel simetriye sahip içi boş ya da dolu parçaların imalatında kullanılır. Bu yöntemde çapı, imal edilecek borunun dış çapına eşit olan alıcı (veya matris) içine yerleştirilen ekstrüzyon malzemesine, ıstampa ile basarak biçim verilir. ıstampa önündeki ön levhanın çapı, imal edilecek borunun iç çapına eşittir. Alıcı içindeki malzeme ıstampa ile ön levhanın çevresinden akarak yükselir ve silindirik kap biçimini alır [2].

Püskürtmeli ekstrüzyon yöntemi ile ilaç sanayinde çeşitli borular, metal sanayinde basınçlı borular, sübaplar ve çeşitli küçük makine parçaları imal edilmektedir.

Püskürtmeli ekstrüzyon malzemesi olarak demir dışı metaller (alüminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımları, çinko, pirinç, kurşun, kalay) ve çeşitli çelikler kullanılır. Püskürtmede kullanılacak malzemelerin akma sınırının ve sertliğinin düşük, uzama ve büzülme özelliklerinin yüksek olması istenir [2].

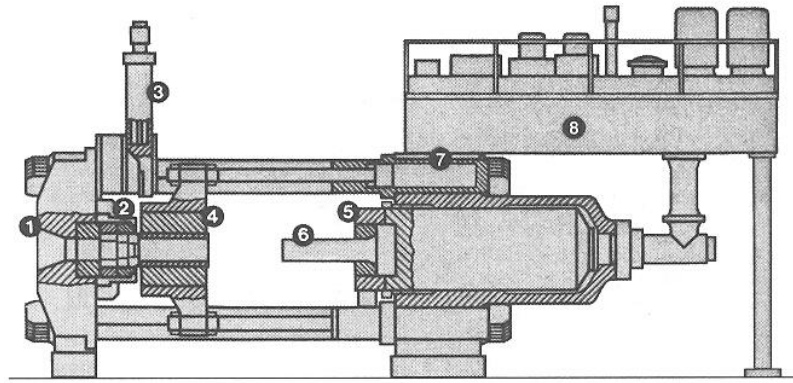
Püskürtme ekstrüzyonu ileri, geri ve karışık püskürtme olmak üzere üçe ayrılır. Şekil 2.5' de püskürtme yöntemleri şematik olarak gösterilmektedir.



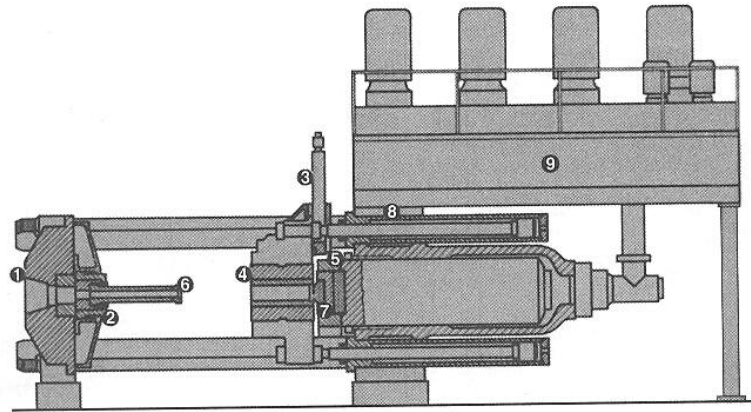
Şekil 2.5 Püskürtmeli ekstrüzyon yöntemlerinin şematik gösterimi; (a) ileriye püskürtme, (b) geriye püskürtme, (c) karışık püskürtme [2]

2.3 Ekstrüzyon Presi ve Takımları

Pres, bloğun ekstrüzyon matrisinden geçmesi için gerekli gücü uygular. Bu bölümde kısaca direkt ve endirekt ekstrüzyon presleri gösterilecek (Şekil 2.6 ve Şekil 2.7) ve önemli bileşenlerin açıklaması yapılacaktır. Bu sayede ekstrüzyon işleminin nasıl gerçekleştiğini anlamak ve ekstrüzyon preslerinin önemli bileşenlerini tanımak mümkün olacaktır. Bu bileşenlerin bazıları ekstrüzyon parametrelerinden etkilenmekte ve prosesin sonuçlarını belirlemektedir. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7



Şekil 2.6 Direkt Ekstrüzyon Presi. 1, destek; 2, matris ve matris takımları; 3, kesici; 4, alıcı; 5, hareketli piston kafası; 6, stampa; 7, hareketli silindir kafası; 8, yağ tankı ve sürücü kontrol bölümü [1]



Şekil 2.7 Endirekt Ekstrüzyon Presi. 1, destek; 2, matris ve matris takımları; 3, kesici; 4, alıcı; 5, hareketli piston kafası; 6, stampa; 7, sızdırmazlık elemanı; 8, hareketli silindir kafası; 9, yağ tankı ve sürücü kontrol bölümü [1]

2.3.1 Pres Seçimi

Bir ekstrüzyon presinin seçilmesinde temel faktör ekstrüzyon için gerekli olan birim basınçtır. Ton (MN) cinsinden verilen kapasiteye sahip bir pres için alıcı çapı daha küçük olduğunda, daha yüksek birim basınç elde edilebilir. Alıcı çapı arttıkça, alıcı içerisindeki özgül basınç düşer ve sonuç olarak ekstrüzyon kabiliyeti de düşer. Belirli durumlarda özel ekstrüzyonlar için presin birim basıncı veya özgül basıncı gereken basınçtan daha büyük olmak zorundadır. Ekstrüzyon için gereken basınç; alaşım ve onun durumuyla, ekstrüzyon oranı, uzunluk ve blok sıcaklığı, ekstrüzyon hızı ve çemberin çapıyla değişiklik gösterebilir [1].

Ekstrüzyon ürününün fiziksel ve mekanik özelliklerini arttırmak amacıyla düşük blok sıcaklıkları ve yüksek hızlar kullanıldığında, yeterli kapasiteye sahip bir pres her zaman için tavsiye edilir. Gerilmelere dayanabilmesi için presin rijit bir yapıya sahip olması gereklidir. Modern presler ön gerilmeli konstrüksiyonlar kullanırlar, bu şekilde ekstrüzyon ürününün toleranslarında sapma olmamaktadır. Ayrıca presler kesin doğru ve ayarlanabilir dizilişlere sahip olmalıdırlar, bu şu anlama gelmektedir: ıstampa, konteymr ve matris aynı merkezde uzanmalıdır [1].

2.3.2 Alıcı

Alıcı ekstrüzyon presinin pahalı bir bileşenidir. Bir ekstrüzyon fabrikasının karlılığı alıcı ve diğer ekstrüzyon takımlarının ömürleriyle yakından ilişkilidir. Alıcının yanlış kullanımdan ötürü hasara uğramasını engellemek için özen gösterilmelidir. Alıcı yüksek sıcaklıklardaki yüksek gerilmelere dayanacak şekilde dizayn edilmiştir. Ancak matris sonuna ulaşıldığında alıcının gerilmesi çok daha yüksek değerlere ulaşır çünkü burada ekstrüzyon işlemi ilerlemiş, blok uzunluğu azalmış, basınç ve sıcaklık daha yüksek değerlerde daha uzun süre uygulanmıştır [1].

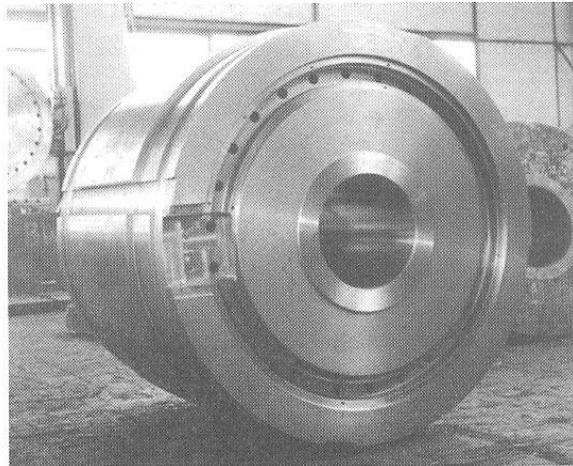
Gömlek-alıcı montajı için aşağıdaki gibi bazı dizayn kriterleri vardır:

- İç basınç (alıcı gömleğinin içerisindeki basınç), P_c ; pres gücünün, gömlek çapının alanına oranıdır. Birimi ise (ton/lb.in^2) veya (N/mm^2) dir.
- Alıcının maksimum dış çapı

- Dikdörtgen alıcılar için genişlik/yükseklik oranı.

Normal olarak tüm dünyada yuvarlak şekilli alıcı gömlekleri hem yuvarlak ve som bloklarda kullanılır. Sadece çok az sayıdaki türde pres hem yuvarlak hem de dikdörtgen alıcılar ile çalışabilirler. Dikdörtgen alıcıları kullanmanın iki avantajından biri uçakların yere inmesinde kullanılan büyüklükte geniş profiller üretmek ve daha sonra özgül pres yükünü azaltacak olan daha üniform malzeme akışını sağlamaktır [1].

Alıcı, ısıya maruz kaldığında her yöne serbestçe genişleyecek şekilde monte edilmelidir. Gömleklerin aşınmasına karşı bir garanti oluşturmak için alıcı eksenel olarak dönebilmelidir. Alıcı, presin boyuna eksenini doğrultusunda hidrolik olarak hareket ettirilen alıcı tutucusuna bağlanmıştır. Alıcı, kendi içerisine ya da tutucusunun içerisine yerleştirilen rezistanslı ısıtma birimi vasıtasıyla 427 °C civarındaki sıcaklıklara kadar ısıtılır. Büyük kapasitedeki preslerin devasa alıcılarının kütle ve uzunluklarından dolayı gömleklerin iç sıcaklığının alıcıya ait konvansiyonel ısıtıcı elementlerle sürdürülebilmesi oldukça zordur. Ekstrüzyon sıcaklığının daha iyi kontrol edilebilmesi için çok bölgesel kontrol aletleri geliştirilmiştir. Isıtıcılar bağımsız olarak altı bölgeden kontrol edilmektedir. Alıcıya takılan indüksiyon ısıtıcısı 500 °C' a kadar ısıtma yapabilmektedir. Eğer alıcı gömlekleri uygun bir çelikten yapılmışsa ve de doğru bir şekilde dizayn edilmiş bir alıcıya monte edilmiş ise 30000 ila 40000 çevrime kadar dayanabilir [1].



Şekil 2.8 Alıcı [1]

2.3.3 Istamp

Günümüzde çekici sistemlerin kullanıldığı, özellikle Al6063 gibi yumuşak alaşımların ekstrüzyonunda, ön levha ile birleştirilen ıstampa standart bir teknik haline gelmiştir. Ekstrüzyon preslerinin çoğunluğu günümüzde ön levhalı sistemlere dönüştürülmüştür ki göz önüne alınması gereken birçok faktör vardır. Alıcı çapı ile yardımcı bloğun dizilişi ve yardımcı bloğun dizaynı bu faktörler arasındadır. Uzman üreticiler tarafından karşılanan birkaç ön levha dizaynı mevcuttur. Ön levhanın başarılı bir şekilde birleştirilmesine ait operasyon pratiğe olduğu kadar dizayna da bağlıdır [1].

Dizayndan ayrı tutulmak suretiyle yardımcı bloğun performansını belirleyen faktörler şu şekildedir:

- Yağlama
- Diziliş
- Ön ısıtma
- Ön levha ve alıcı arasındaki açıklık

Daha önceden de belirtildiği gibi ıstampa'nın çabuk bir şekilde serbest bırakılması modern ekstrüzyon preslerinin temel özelliklerinden biridir [1].



Şekil 2.9 Istamp [1]

2.3.4 Matris Kaydırıcı ve Döner Matris Başlığı

Matris kaydırıcı veya döner matris başlığı, matris ve yardımcı ekipmanların takılı bulunduğu preslerin başlıca bileşenleridir. Matris kaydırıcılar pres orijini ile dik açı

yapacak şekilde hareket ederler. Hem matris kaydırıcılar hem de döner matris başlıkları presin karşı kızağında konumlandırılmışlardır. İlave dışarı atıcı deliğe sahip matris kaydırıcıları genellikle bir ya da iki matris barındırmak için dizayn edilirler, oysaki döner matris başlıkları iki matrisi taşıyabilirler. Döner matris başlığının kullanıldığı durumlarda; matrisi yenisiyle değiştirme, düzeltme ve soğutma, presin her zaman aynı tarafında yapılabilir. Matrisler ve matris taşıyıcıları ve de yedekleri kolay ve hızlı bir şekilde değiştirilebilmeleri için U profilli açıklığa sahip matris kaydırıcıları ya da döner matris başlıklarının içerisine yerleştirilmişlerdir. Son gelişmeler büyük kapasiteli ekstrüzyon preslerinin matris taşıyıcılarının bazı özellikleri üzerinde meydana gelmiştir. Bunların içinde hassas kesme ve kutucuklu tip matris ısıtma için matris konumlandırma aygıtı da vardır. Orta büyüklükteki preslerle karşılaştırıldığında matris istif uzunluğu fazla olduğu için matrisin kesme yüzü termal genleşme ve büzölmelerden dolayı konum itibarıyla bir miktar değişmektedir. Kesme yüzü uygun şekilde konumlandırılmadığında matris yüzüne alüminyum bulaştığı görülür ve de bu sonraki bloklarda kıvrımlar ve/veya kabarcıklara neden olur. Kovanlı ısıtıcı, matris sıcaklığını stabil tutmak ve matris değişim durumunda matris sıcaklığını tespit etmek ve görüntülemek için kutucuklu tip matrisin içerisine gömülmüştür [1].

2.3.5 Matris

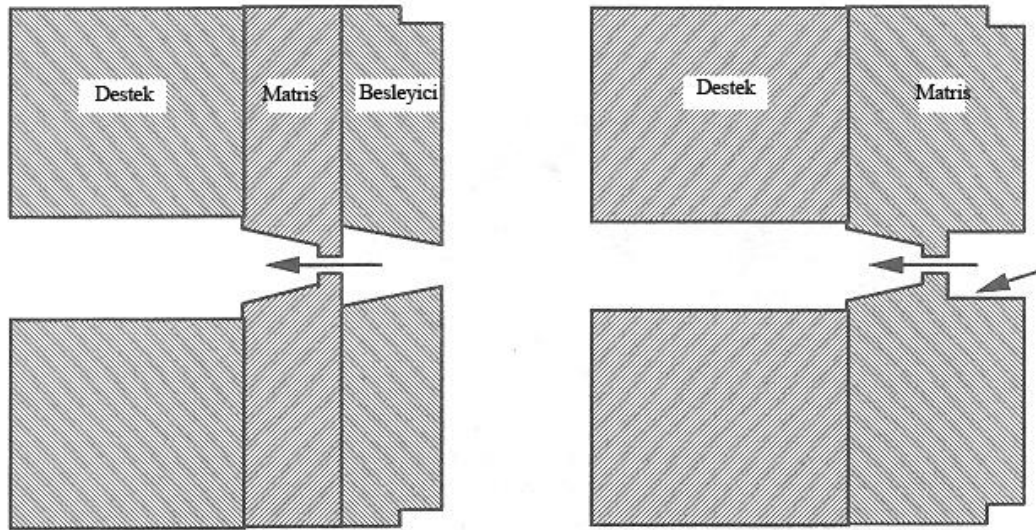
Matris, bir disk şeklinde olup üzerinde imal edilecek profilin kesiti kanal şeklinde açılmıştır. Matris, bloğa basınç altında profil şeklini veren ve en çok değiştirilen takımdır. Bu nedenle matris, profilin tüm detaylarını ve toleranslarını içerir. Matriste oluşacak hatalar, direkt olarak profile yansır. Bu hatalar, özellikle şekil, yüzey ve boyut hatalarıdır [3].

Matris dizaynı ve şekli, ekstrüzyon basıncını, hızını, çıkış sıcaklığını, malzeme akışını ve sürtünmeyi etkiler. İnce kesitli profillerin ekstrüzyonunda basınç oldukça yüksek olmaktadır ve yüksek basınç altındaki matriste, eğilme ve çatlamları önlemek için matris desteklenir. Destek, matrisin arkasına konan bir ekstrüzyon takımıdır. Matris, ekstrüzyon presinde tek başına çalışmaz. Destek ve ön oda gibi diğer takımlarla bir grup oluşturarak görev yapar. Malzeme akışım ve profil yüzeylerinin düzgünleştirilmesi için sürtünmeyi azaltan işlemler uygulanır. Bunlar; yağlama, matris yüzeylerinin taşlanması,

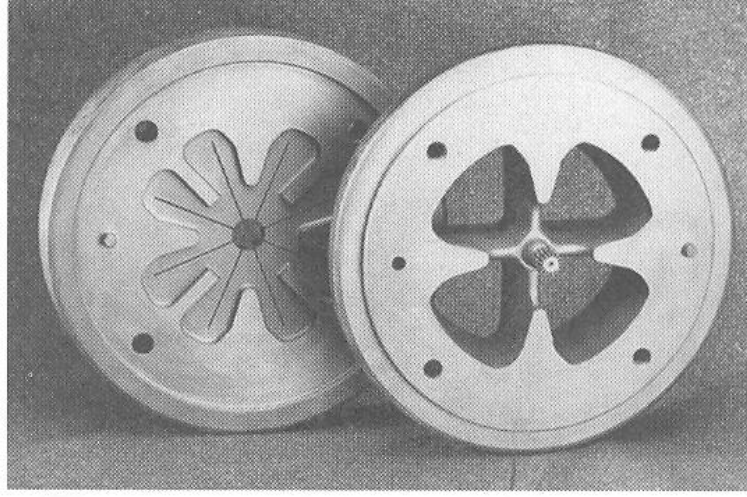
matris kanalının leplenmesi, matris kanalına nitrasyon uygulanması ve matris kanal uzunluğunun düzenlenmesidir [3].

Ekstrüzyon yönteminde dolu profiller için basit matrisler kullanıldığı gibi, içi boş profillerde odalı, köprülü ve spider matrisler kullanılmaktadır. Ekstrüzyon yönteminde malzeme akışı, ekstrüzyon edilen malzemeye göre çok farklı olduğundan matris deliğinin giriş tarafının şekli ve kesit boyutları karakteristik büyüklük olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle çeşitli malzemeler ve çok çeşitli profiller üzerinde denemeler yapılarak uygun malzeme akışım sağlayacak delik giriş şekilleri elde edilmeye çalışılmıştır. Alüminyum alaşımlarında dik açılı matrislerin daha uygun olduğu görülmüştür, fakat deliğin dik kenarlarının çabuk aşınması ve çubuğun yüzey kalitesinin bozulması nedeniyle bu kenarlar yuvarlatılmıştır. Ekstrüzyon basıncını bir miktar arttırmasına rağmen bu yuvarlatmalar, özellikle plastik özelliği düşük alaşımların ekstrüzyonunda yüzey çatlamlarının önlenmesine yardım etmektedir [2,4]

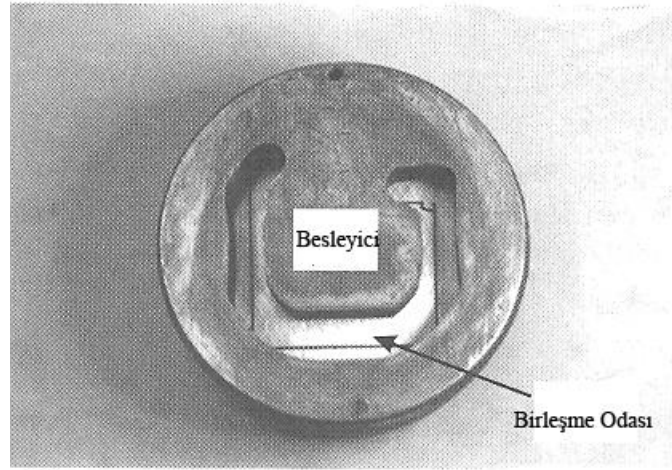
Aşağıdaki şekillerde çeşitli matrislerle, bu matrislere öncülük eden ve destek veren diğer elemanları görebiliriz.



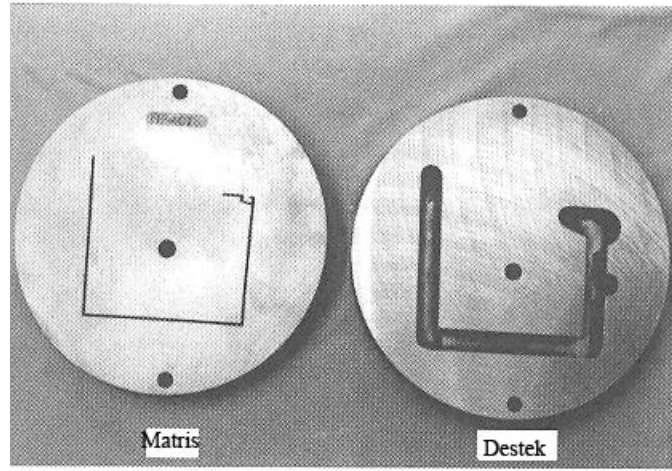
Şekil 2.10 Üç ve iki parçalı matris takımları [1]



Şekil 2.11 Odalı matris [1]



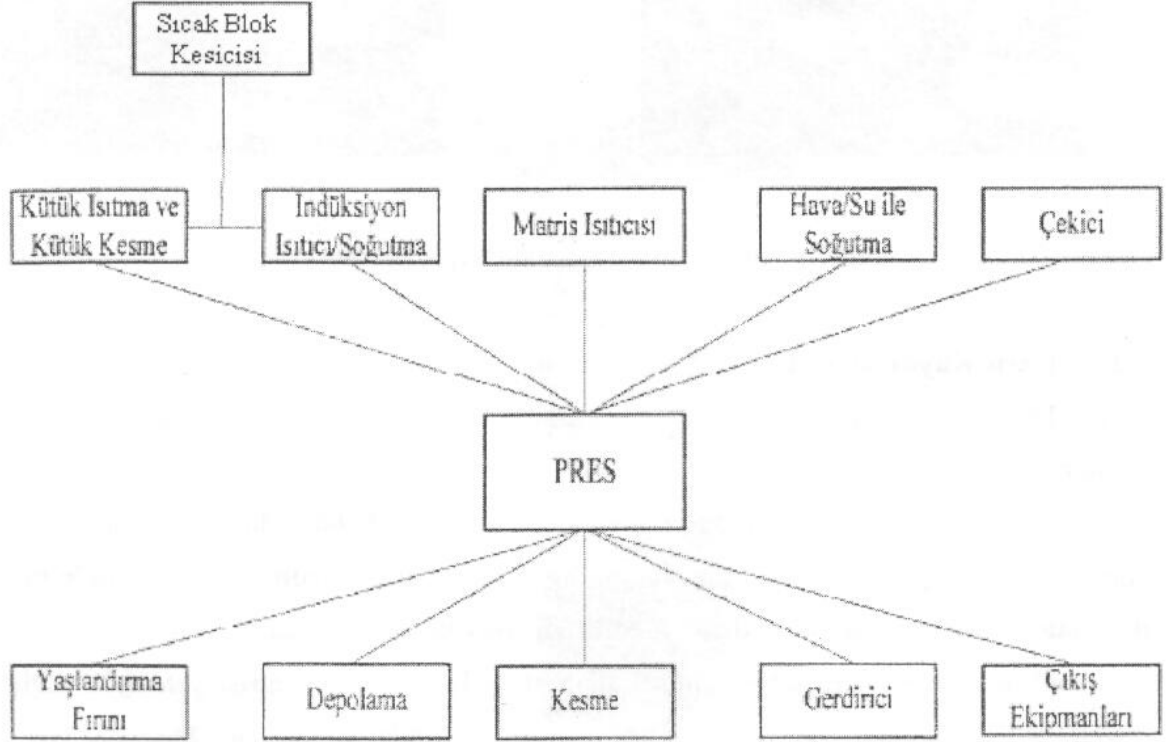
(a)



(b)

Şekil 2.12 Matris takımının parçaları [1]

2.3.6 İlave Donanımlar



Şekil 2.13 Prese bağlı diğer harici donanımlar [1]

Entegre bir alüminyum ekstrüzyon sisteminde blok ısıtmadan yaşlandırma fırınlarına kadar kullanılan ekipmanlar aşağıdakilerdir:

- Blok ısıtma sistemi (indüksiyon veya gazlı sistemler) ve buna entegre blok kesme sistemi,
- Şoklu indüksiyon ısıtıcısı/suyla soğutma,
- Çok odalı veya tek hücreli matris fırınları,
- Ayrı veya kombine olmak üzere hava ve suyla soğutma sistemleri,
- Müşteri talebine göre tekli ya da çiftli çekici,
- Otomatik tutma sistemli gerdiriciler,
- Profil kesiciler ve ölçü sistemleri,

- Depolama sistemleri,
- Yaşlandırma fırınları [1].

2.4 Ekstrüzyonda Malzeme Akış Tipleri ve Özellikleri

Ekstrüzyon işleminde, genellikle aralıklı bir çalışma yapılmakta, yani ilk blokun ekstrüzyonundan sonra ikinci blok alıcıya yerleştirilmekte ve böylece blokta sıcaklık farklılıkları ortaya çıkmaktadır. Ayrıca blok ile alıcı ön levha, matris yüzeyi ve kanalında sürtünme oluşmaktadır. Bu durumda blok ön kısmında, blok sonuna kadar eşit olmayan akış durumları ortaya çıkmaktadır. Farklı akış durumları, ekstrüzyon kuvvetinin değişmesine, malzeme kesiti ve boyunda farklı malzeme özelliklerine ve diğer ekstrüzyon hatalarına sebep olmaktadır. İstenmeyen bu etkenleri ortadan kaldırmak için alıcıdaki malzeme akışının incelenmesi gerekmektedir.

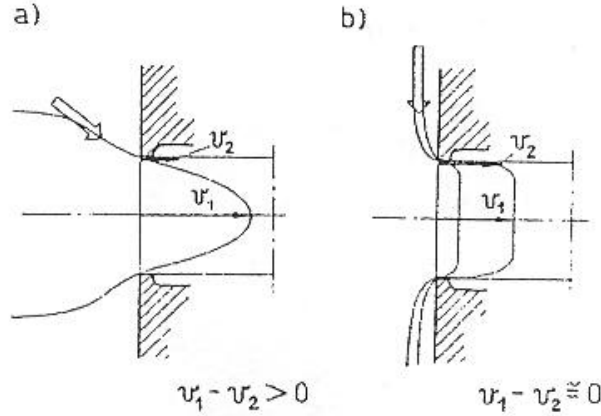
Ekstrüzyon işlemi esnasında malzemenin hareketi yani malzemenin akışı imalatın kalitesini çok büyük oranda etkilemektedir. Malzeme akışının düzenli veya düzensiz olması mamulün kaliteli veya kalitesiz (çeşitli ekstrüzyon hataları) olmasına sebep olur. Aynı zamanda ekstrüzyon kuvvetlerinin belirlenmesinde de önemli rol oynamaktadır. Malzeme akışına, birinci derecede ekstrüzyon edilen malzemenin özellikleri olmak üzere çok sayıda işlem faktörü etkilemektedir. Çizelge 2.1' de malzeme akışını etkileyen tüm faktörler verilmiştir [2].

Çizelge 2.1 Alıcı içindeki malzeme akışını etkileyen faktörler [2]

Faktörler	Olasılıklar
1- Yöntem	Direkt, endirekt, hidrostatik
2- Yağlama	Yağlamalı, yağlamasız
3- Sıcaklık	Soğuk, sıcak
4- Matris biçimi	Düz, konik, tek delikli, çok delikli
5- İş parçası	Plastiklik özelliği
6- Mamul biçimi	Çubuk, profil, boru, tel
7- Ekstrüzyon oranı	Küçük, büyük

Sürtünmeler, blok merkezindeki malzemenin blok çevresindeki malzemeye göre daha hızlı akmasına neden olur. Bu durum, daha düzensiz bir malzeme akışına ve ölü

bölgelerin artmasına neden olur. Mümkün olduğu kadar, bloğun merkezindeki malzemenin akış hızı ile bloğun çevresindeki malzemenin akış hızı arasındaki farkı azaltmak gerekir. Hız farkları ne kadar azalır, malzeme akışı o kadar ideal akış tipine yaklaşır ve ölü bölgeler de azalır. Şekil 2.14' de tipik akış ve arzu edilen akış gösterilmiştir [3].



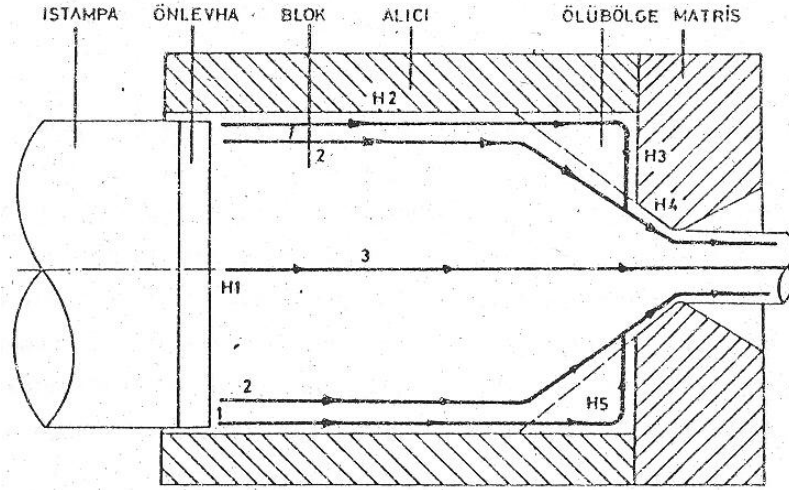
Şekil 2.14 Ekstrüzyonda malzeme hızı. a) Tipik akış, b) İstenen akış [3]

2.4.1 Direkt Ekstrüzyonda Malzeme Akışı

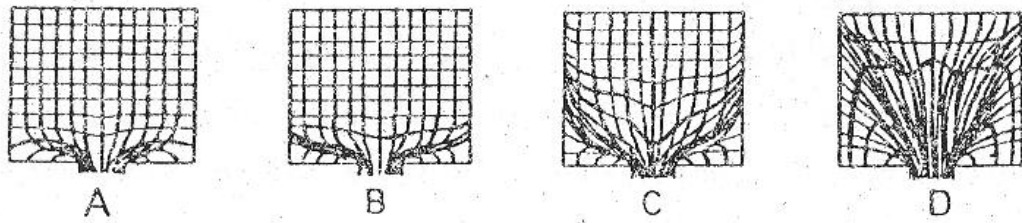
Malzemenin alıcı içindeki hareketini, malzemenin plastikliği ve blok ile takımlar arasındaki dış sürtünme önemli ölçüde etkilemektedir. Bloğun plastikliğinin homojen olmaması; blok içinde sıcaklık dağılımının farklı oluşundan, alıcı, ıstampa, matris, blok sıcaklıklarının farklı oluşundan ve bloğun iç yapısından kaynaklanmaktadır. Dış sürtünme ise Şekil 2.15' de gösterildiği gibi blok ile ön levha yüzeyi (H1), alıcı yüzeyi (H2), matris alın yüzeyi (H3) ve matris delik yüzeyi (H4) arasındaki sürtünmeden meydana gelmektedir. Ayrıca blok ile ölü bölge yüzeyi (H5) arasında da sürtünme meydana gelmektedir (ölü bölge oluşmuş ise).

Bloğun çevresi şekildeki 1 veya 2 yolunu izleyerek matrisi terk etmektedir. Ancak 1 yolu, 2 yolundan daha uzundur. Alıcı içindeki malzeme tabiat kuvvetleri gibi en kısa yolu takip etmekte dolayısıyla 2 numaralı yolu seçmektedir. Bu nedenle vasıtasız ekstrüzyonda küçük veya büyük bir ölü bölge meydana gelir. Blok yüzeyi ile takım yüzeyleri arasındaki sürtünme blok çevresini engellemeye çalışırken, blok merkezi hiçbir engellemeye karşılaşmadan akacaktır. Tüm bu faktörlerin aynı anda ekstrüzyon

işlemini etkilemesi neticesinde farklı akış tipleri oluşmaktadır. Şekil 2.16' da gösterilen A,B,C,D akış tiplerinden A tipi ideal akış tipini ve D tipi ise istenmeyen akış tipini karakterize etmektedir. [2]



Şekil 2.15 Direkt ekstrüzyonda malzemenin izlediği yol [2]



Şekil 2.16 Direkt ekstrüzyonda malzeme akış tipleri [2]

A tipi akışta, bloğun alıcıdan ayrılışı mümkün olabilecek en düzenli bir şekilde olmaktadır. Bloğun plastik akışı, matrise çok yakın bir şekil değiştirme bölgesinde olmakta ve bloğun ekstrüzyon edilemeyen kısmı biçim değiştirmeden matris yönünde hareket etmektedir. Bloğun ön kısımları tabaka tabaka şekil değiştirme bölgesine girmektedir. Bu akış tipi, alıcı iç cidarında, matris yüzeyinde, matris deliği yüzeyinde sürtünmenin olmadığı ve homojen malzemelerde oluşmaktadır. Bütün sınır yüzeylerinde sürtünme olmadığından bloğun çevresi frenlenmeden kolayca hareket edecektir. Bunun neticesinde bloğun bütün kütlesi aynı hızla hareket etmektedir. Sürtünme, etkili bir yağlama yöntemi ile yok edilebilir. Ancak bu yüksek yağlama etkisine rağmen blok merkezi ve blok çevresinden daha hızlı akmaktadır [2].

Blok ile alıcı arasındaki sürtünmenin sıfır kabul edildiği, fakat matris ve matris tutucusu yüzeylerinde meydana gelen sürtünmenin ihmal edilemeyerek kadar küçük olmadığı durumlarda homojen malzemelerde B tipi akış meydana gelir. Bu durumda, kenar bölgelerinin matris deliği doğrultusundaki radyal akışı engellenir ve bunun sonucu olarak daha büyük bir kayma gerilmesi meydana gelir. Böylece A tipine göre daha büyük bir ölü bölge ve genişlemiş bir biçim değiştirme bölgesi oluşur. Bloğun merkezinde biçim değiştirme düzgün olarak meydana gelir [2].

C tipi malzeme akışı, alıcı cidarında, matris ve matris tutucu yüzeyinde, matris deliğinde sürtünme olduğunda ve homojen malzemelerde oluşur. Bloğun çevresi daha alıcı cidarında frenlenmekte ve bloğun merkezi az direnç görmesi nedeniyle matris deliği yönünde hareket etmektedir. Şekil değiştirme, B tipine göre matrisin çok uzaklarında kayma başlar. Kayma bölgesi kesin hatalarla ortaya çıktıkça, şekil değiştirmenin homojenliği gittikçe kaybolur. Matristen dışarıya çıkan her bir kesit sürtünme etkisiyle bloğun iç kısmı ile irtibatta kaldığından müteakip kesitler için çıkış açıklığı sürekli olarak daralır. Bundan dolayı şekil değiştirme miktarları çubuk ucundan sonuna gittikçe artar. B tipinde görülen çubuğun ortasında yaklaşık sabit şekil değiştirme bu tipte olmaz. Sürtünme nedeniyle frenlenen çevre malzemesi ile hareket eden merkez malzemesi arasındaki kayma bölgesi, ekstrüzyon malzemesine ve ekstrüzyon şartlarına göre az veya çok şekilde bloğa çekilir. Bu durumda ölü bölge büyür. Ekstrüzyon ilerledikçe merkeze doğru büyüyen kayma bölgesinden kirler ve yağlama malzemeleri kayma bölgesi boyunca blok içine akarlar ve ekstrüzyon edilmiş çubuk yüzeyine çıkma tehlikesi doğururlar [2].

D tipi malzeme akışı, C tipinde olduğu gibi, sadece sürtünmenin çok olduğu durumlarda değil ayrıca ekstrüzyon malzemesinin şekil değiştirme direncinin blok kenar bölgesinde, blok içine göre fazla olduğu durumlarda meydana gelir. Şekil değiştirme matristen çok uzakta başlar. Ekstrüzyon işleminin başlangıcında malzeme akışının yönü, ön levhanın dış kenarından matris profiline doğrudur. Bu nedenle D tipinde oluşan ölü bölge C tipinden daha büyüktür. Buna bağlı olarak kayma gerilmelerinin meydana geldiği koni bölgesi daha büyük ve belirgindir. Bu akış tipinin olduğu durumlarda hiç istenmeyen ekstrüzyon hataları meydana gelir. D tipi akış ekstrüzyon asla istenmeyen akış tipidir [2].

Yukarıda bahsedilen bu akış tipleri, belirli araştırmalar sonucu elde edilmiştir. Fakat bu akış tiplerinin bu derece kolay anlaşılabilir olması, yapılan araştırmalarda kullanılan malzemelerin fazla karmaşık olmayan matrislerden geçirilmesinden ileri gelir. Oysa yakın zamanlarda bazı araştırmacılar bu akış tiplerinin arasında yer alan detaylı bir sınıflandırmaya gitmişlerdir. A_1 ve B_1 diye adlandırılan akış tiplerinde malzemenin sadece matristen akış şekli dikkate alınmamış, alıcı cidarında malzemenin gösterdiği farklı akışlar dikkate alınmıştır. Bunun nedeni matristen benzer şekilde akan malzemenin her koşul altında alıcı cidarından aynı şekilde akmadığını detaylı olarak göstermektir.

Bunların yanı sıra günümüzdeki teknolojik imkanlar çok karmaşık profilli ve kesitte değişken kalınlıklı parçaların ekstrüzyon edilmesini getirmekte ve mümkün kılmaktadır. Bu tip karmaşık şekilli parçalarda hiçbir zaman net akışı kestirebilmek mümkün olmamaktadır. Belirli simülasyonlarla elbet bir ölçüye kadar yaklaşmak mümkün olsa da, yukarıdaki sınıflandırmalara girmeyecek akış şekilleri mevcuttur. Buna ilaveten bir matristen farklı profillerin çıkarıldığı yöntemler de mevcuttur. Bu tip ekstrüzyonda profillerin şekillerine göre merkezden ne kadar uzağa yerleştirdikleri önemlidir. Çünkü blok içerisinde homojen bir akışın elde edilebilmesi için matris deliklerinin konumlandırılması son derece önemlidir. Unutulmamalıdır ki kesit kalınlaştıkça malzemenin bloktan hacimsel olarak çıkışı artacak fakat malzemenin matrisi terk ediş hızı ise düşecektir. Bunun tersi olarak ince kesitlerde de çıkış hızı artacak fakat hacimsel akış daha yavaş olma meyilinde olacaktır. Bu koşullar altında bloğun matris merkezine göre homojen olarak deforme olması ve akması gerekmektedir. Aksi takdirde matrisi terk eden malzeme düz olarak ilerlemeyip sapma gösterecektir. Bu da ürünün ıskartası anlamına gelmektedir. Akış tipleri ekstrüzyon parametreleri ile de ilişki halindedir. İleriki bölümlerde bazı parametrelerin istenmeyen akış tiplerine yol açması nedeniyle tercih edilemediğini göreceğiz.

EKSTRÜZYON UYGULANAN MALZEMELER

Bu bölümde öncelikle ekstrüzyon edilebilirlik kavramı ortaya konulacaktır. Ardından hangi malzemelerin bu kavramı uygun olduğu ortaya konacaktır. Bu malzemeleri ortaya koyarken öncelikle alüminyum haricindekilerden bahsedilecektir. Bu çalışmanın konusu alüminyum üzerine olduğundan tüm malzemeler kısaca ortaya konulduktan sonra alüminyumun ekstrüzyonu hakkında geniş bir bilgi verilecektir.

Genel olarak ekstrüzyon harici plastik şekil verme yöntemlerinde kullanılan malzemeler ekstrüzyon ile de şekillendirilebilmektedir. Fakat tahmin edilebileceği gibi günümüzde teknoloji sürekli gelişmekte, buna paralel olarak da preslerde ve takımlarda da önemli gelişmeler kaydedilmektedir. Bunların sonucu olarak da ekstrüzyon uygulanabilen malzemeler de gittikçe artmaktadır. Her malzeme belirli ekstrüzyon şartlarında farklı davranışlara sahiptir. Kimleri kolay kimileri ise ancak özel şartlar altında ekstrüzyon ile şekillendirilebilmektedir. Genel olarak plastiklik özelliği yüksek olan malzemelere soğuk olarak, diğerlerine ise sıcak olarak ekstrüzyon uygulanmaktadır.

3.1 Metal ve Alaşımlarının Şekil Değiştirme Kabiliyetleri

Şekil değiştirme ve ekstrüzyon edilebilme, ekstrüzyon malzemesine ve şekil değiştirme şartlarına bağlı karışık parametrelerdir. Şekil değiştirme kavramı, bir malzemenin hangi kolaylıkta ve düzgünlükte şekil değiştirebildiğine işaret eder. Bir malzemenin kolay şekil değiştirebilmesi, verilen şartlarda geçerli olan şekil değiştirme mukavemeti (akma gerilmesi) σ_A bağlıdır ve şekil değiştirebilirlik ise, şekil değiştirebilme kabiliyeti φ_{Fr} ile orantılıdır. Buna göre şekil değiştirilebilirlik;

$$W = \varphi_{Fr} / \sigma_A \quad (1.1)$$

Şekil değiştirme parametreleri φ_{Fr} ve σ_A 'yı ekstrüzyon işlemi sırasında tayin etmek çok zordur ve işlenebilirlik (W), genellikle laboratuvar şartlarında belirlenir. Bulunan sonuçlar, ekstrüzyon denemelerinin yerini alamaz, ancak, bu denemeleri tanımlayabilir. φ_{Fr} ve σ_A 'nın ölçülmesi için, sıcak şekil değiştirmede, burulma deneyi en uygun deneydir. σ_A zorlamanın çeşidinden yani şekil değiştirme yönteminden hemen hemen bağımsız olduğundan, şekil değiştirme kabiliyeti şekil değiştirme esnasında etkili olan gerilme durumuna bağlıdır. Bu nedenle, burulma deneyinde ölçülen kırılma şekil değiştirmesi, ekstrüzyon için geçerli olacak şekil değiştirme kabiliyetine uygun değerler vermediği için ölçülen değerde düzeltme yapılmalıdır. Böylece ekstrüzyon deneyine uygun φ_{Fr} değerleri elde edilir [2].

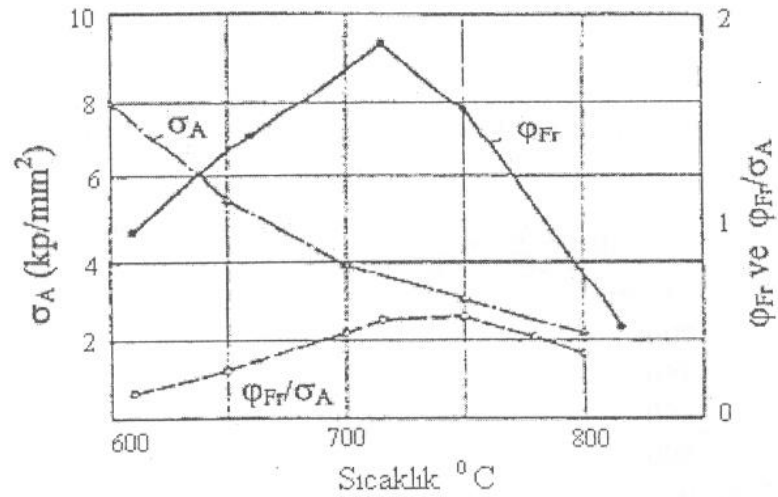
Kantitatif hesaplama bağıntıları uygun olmadığı için, burulma testinde ölçülen şekil değiştirilebilirlik; farklı metalleri, farklı malzeme koşullarına ve deformasyon koşullarını karşılaştırmak için kullanılabilir. Bu tür bir karşılaştırma Şekil 3.1' de görüldüğü gibi yapılmıştır. Burada CuZn39Pb3 için şekil değiştirme mukavemeti (akma gerilmesi), şekil değiştirme kabiliyetinin ve şekil değiştirebilirliğin değişimi sıcaklığa bağlı olarak gösterilmiştir [2].

Diyagramda da görüldüğü gibi en iyi şekil değiştirebilirlik, 740°C civarında iken maksimum yumuşaklık 715°C' dedir. Bu şartlar altında, hangi şekil değiştirme sıcaklığının optimum olduğunun tespiti için, seçilen ekstrüzyon şartlarında malzemenin şekil değiştirme kabiliyeti sınırına ve ekstrüzyon presinin kapasitesine bağlıdır. Şekil değiştirme kabiliyeti düşük olan malzemeler, burulma deneyi sırasında kırılma öncesi çatlaklar gösterir. Çizelge 3.1' de çeşitli ekstrüzyon malzemelerinde sıcak burulma deneyi ile elde edilen şekil değiştirme özellikleri bir arada verilmiştir [2].

İşlenebilirlik (φ_{Fr} / σ_A), ekstrüzyon edilebilirlikle göreceli bir değer verir. İşlenebilirlik ile ekstrüzyon edilebilirlik arasındaki bağıntı tam olarak güvenilir değildir. Dolayısıyla gerçeği yansıtmaz. Buna rağmen Çizelge 3.2' de yer alan sınıflandırma işe yarayabilir. Birçok alüminyum ve alüminyum alaşımının, nikel alaşımlarının ve yüksek dayanımlı çeliklerin de içinde bulunduğu birçok malzemenin ekstrüzyon edilebilirliği çok dar sınırlar arasındadır [2].

Ekstrüzyon edilebilirlik, aşağıda belirtilen birçok parametreye bağlı olarak değerlendirilir:

- Şekil değiştirebilirlik,
- Ekstrüzyon sıcaklığı,
- Çalışma sıcaklığı aralığı,
- Kuvvet ihtiyacı ve özgül basınç,
- Sabit ekstrüzyon kuvvetinde çıkış sıcaklığı,
- Maksimum ekstrüzyon hızı,
- Maksimum ekstrüzyon oranı [2].



Şekil 3.1 CuZnPb3'ün sıcaklığa bağlı olarak işlenebilirlik karakteristikleri (numune çapı 10mm, uzunluğu 50mm) [2]

Çizelge 3.1 Çeşitli alaşımların burulma deneyinde elde edilen şekil değiştirme özellikleri [2]

Malzeme	Şekil değiştirme sıcaklığı (°C)	(kp/mm ²) $\varphi = 6s^{-1} \sigma_A$	N_{Fr}	φ_{Fr}	φ_{Fr} / σ_A
CuZn39Hb(Ms58)	700	4,0	5,5	1,7	0,43
CuZn37(Ms63)	750	5,2	6,5	2,1	0,40
CuZn30(Ms70)	800	6,2	5,5	1,7	0,27
CuZn35Ni	800	3,0	15,5	4,9	1,64
CuZn18Zn20(Ns6218)	950	9,0	4,8	1,5	0,17
CuNi3Si	900	17,8	11,6	3,7	0,21
CuAl10F(AlBz10Fc)	800	5,2	25,0	7,9	1,52
X3CrNiMo1805	1100	12,5	9,0	2,8	0,22
X10CrNiMoTi1810	1150	17,3	9,0	2,8	0,16
X10NiCrAlTi3220	1150	17,8	19,0	6,0	0,34
CuNi10Fe	950	9,2	10,4	3,3	0,36
AlMgSi0,5	500	4,2	65,0	20,5	5,10
AlMgSi1	520	4,2	11,8	3,4	0,81
AlZnMg1	500	6,0	6,8	1,9	0,32
AlMg3	500	8,2	5,0	1,7	0,21
AlMg1	450	7,0	52,0	16,4	2,34
AlCuMgPb	380	12,9	1,2	0,6	0,04
AlSi5	460	5,0	13,3	6,6	1,32
N_{Fr} :Devir $\varphi_{Fr} = R \cdot \pi \cdot N_{Fr} / L$ R=5 mm L=50mm					

Çizelge 3.2 İşlenebilirlik ile ekstrüzyon edilebilirlik arasındaki ilişki [2]

φ_{Fr} / σ_A (kp/mm ²)	Ekstrüzyon edilebilirlik
<0,2	Zayıf
0,2-0,4	Orta
0,4-1,5	İyi
>1,5	Çok iyi

Çizelge 3.3 Ekstrüzyon malzemeleri [2]

Metal Grubu	Malzeme İşareti	Malzeme bileşimleri %						Ekstrüzyon Sıcaklığı °C	Spesifik Ekst. Basıncı kp/mm	Malz.Ekst. oranı A ₀ /A ₁
		Cu	Zn	Sn	Al	Pb	Ni			
Cu ve Cu-Zn Alaşımları	b-Cu	99,99						900	60-90	280
	Ms58	58	42					700	50-70	700
	SoMs				1-2	1,3-2		700	50-70	700
	58PbAl	58	40					700	50-70	700
	Ms63	63	37					750	50-70	600
	Ms68	68	32					800	55-80	450
	SoMs71	70	29	1				900	70-100	80
	SoMs78	76	22	1-2				900	70-100	80
Bronzlar	AlBz4	96			4			920	70-100	100
	AlBz9	91			9			850	70-100	100
	SnBz4	96		4				750	70-100	30
	SiBz8	92						700	70-100	30
	PbBz2	96					Si2	700	70-100	30
	PbBz4	96				4		650	70-100	30
	SoBz	90					Ml4	800	70-100	30
	AgBz	98					Ag2	900	60-80	50
Cu-Ni Alaşımları	ÇuNi30	70					30	900	70-100	30
	CuNiZn	72	10				18	850	40-80	80
	Ni98					Mn1,5	98	1100	70-100	200
Zn ve Zn alaşımları	saf çinko		99,5					200	70-100	60
	ZnAl4		96		4			300	70-100	90
	ZnCu4	4	96					350	70-100	50
	ZnAlCu	1	96		4			350	70-100	50
Al ve alaşımları		Al	Mg	Mn	Cu	Si	Zn			
	AlMn	98		1,2				500	40-80	500
	AlMgSi	96	1,2	0,8				480	40-80	250
	AlMgMn	97	2,5	1				450	40-80	100
	AlMg3	96	3	0,2				450	60-100	80
	AlMg5	94	5	0,5				420	60-100	70
	AlMg7	92	7	0,5				420	60-100	60
	AlMg9	90	9	0,5				400	60-100	60
Mg ve Mg alaşımları	AlZnMc	90	2,7	0,5	1		6	400	60-100	80
	Saf mg		99,8	1,2				300	40-80	200
	MgMn		98	2				420	40-80	100
	MgAl3	3	97					400	40-80	80
Çelik		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mg			
	C çeliği	0,1	0,3	0,1				1300	40-60	120
		1,0	1,5							
	k alaşımlı	0,4	0,6		0,8	2	0,2	1270	40-60	120
	paslanmaz	0,15	1,0	0,5	12			1200	40-60	90
		0,5	2,0		19	11,50		1210	60-100	90
	Hız çeliği	2,0	0,3		12			1160	100-120	70
Sferodöküm		3,5	0,4	2,7				1075		

3.2 Çeliklerin Ekstrüzyonu

Çelik borular ve profiller genellikle St37, St42 St52 karbon çeliklerinden imal edilmektedir. Bununla birlikte az miktarda, gerekli olduğu durumlarda, kaliteli çelikler (örneğin; paslanmaz ve asitlere dayanıklı çelikler), ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirilebilmektedir. Çelikler de nikel alaşımları gibi zor ekstrüzyon edilen malzeme gurubundandır. Şekil değiştirme dirençleri yüksek olduğundan gerekli ekstrüzyon kuvvetini belli değerlerde tutabilmek için 1000-1300 °C' lik yüksek sıcaklıklar kullanılmaktadır. Ancak bu durumda takımlarda aşınma problemleri ortaya çıkmaktadır [2,5].

3.3 Bakır Ekstrüzyonu

Bakır ve alaşımları, ekstrüzyon sıcaklığı 600-1000 °C arasında olan guruptandır. Ekstrüzyonda kullanılan bakır ve alaşımları; bakır-çinko alaşımları (pirinç, özel pirinç), bakır- kalay alaşımları (kalay bronz), bakır-alüminyum alaşımları (alüminyum bronz), bakır-nikel alaşımları ve bakır-nikel-çinko alaşımlarıdır [2,5].

3.4 Kurşun ve Kalay Ekstrüzyonu

Oda sıcaklığı ile 300 °C arasında ekstrüzyon edilebilen malzeme gurubunu oluşturur. Bu grup sadece kurşun ve kalay veya iki elementin birbiriyle olan alaşımlarını ve bu elementlerinin en önemlileri antimon, bakır, gümüş ve kadmiyum olan elementlerle olan alaşımları içerir. Bu ekstrüzyon malzemeleri genel olarak borular, yumuşak lehim telleri ve kablo kaplamalarında kullanılır [2,5].

3.5 Titanyum Ekstrüzyonu

Titanyum yüksek ergime sıcaklığına sahiptir (1668 °C) ve 822 °C'nin altında hegzagonal (a) ve bu sıcaklığın üzerinde kübik hacim merkezli (fj) bir yapıya sahiptir. Korozyon dirençleri yüksektir ve tercih edilen yüksek özgül dayanıma sahiptir. Bu alaşımın ekstrüzyonuyla profil, boru ve çubuklar elde edilir. Titanyum alaşımları, dayanım arttırıcı olarak alüminyum ve vanadyum, krom, mangan, molibden ve bakır alaşım elementlerini içerirler [2,5].

3.6 Zirkonyum Ekstrüzyonu

Korozyon dayanımının ve sıcak dayanımlarının yüksek olması nedeniyle, nükleer reaktörlerde konstrüksiyon elemanı ve radyoaktif çubukları için zarf malzemesi olarak kullanılır. Zirkonyumun ekstrüzyonu sırasında takımlara sıvanması önemli bir problemdir. Bunun için çok iyi yağlama yapmak gerekir. Aynı zamanda bloğa ekstrüzyondan önce bir gömlek geçirilmektedir. Dökülen bloklar çoğu durumda bakır ve pirinçle kaplanır. Gömlek, gaz absorpsiyonunu önler [2,5].

3.7 Berilyum Ekstrüzyonu

Berilyum, yüksek ısı kapasitesi ve sıcaklığa dayanıklılığı yanında korozyon direncinin de yüksek olması nedeniyle nükleer mühendislik ve uçak teknolojisinde kullanılmaktadır. Döküm yöntemi ile imal edilen blokta kaba tane oluşumu ve buna bağlı olarak kırılabilirlik ve çatlama eğilimi, döküm tekniği açısından engellenememektedir. Bu nedenle berilyum bloklar sinter tekniğiyle hazırlanmaktadır. Ekstrüzyon blokları, toz malzemelerin soğuk sıkıştırılması ve koruyucu atmosferde sinterleme ile üretilmektedir [2,5].

3.8 Nikel Ekstrüzyonu

1000 °C' nin üzerinde ekstrüzyon edilen malzeme gurubundadır. Nikel alaşımlarında yapılan yan mamüllerin makine mühendisliğinde, kimya mühendisliğinde, elektrik mühendisliğinde, elektronik mühendisliğinde, güç istasyonlarında ve nükleer teknolojisinde birçok kullanım alanı vardır. Nikel ve nikel alaşımlarının korozyon dirençlerinin yüksek olması ve yüksek sıcaklıkta iyi mukavemet özellikleri göstermesi bu metalin önemini arttırmıştır [2,5].

3.9 Magnezyum Ekstrüzyonu

Magnezyum alaşımlarının özellikleri, alüminyum alaşımlarının özelliklerine benzemektedir. Yoğunluk ile mukavemet değerleri arasında çok uygun bir değer vardır. Bu özelliklerinden dolayı havacılıkta, uzay ve reaktör teknolojisinde kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, hegzagonal kristal yapısına sahip olduklarından alüminyumdan daha zor şekil değiştirme derecesine sahiptir. Bloğun homojenleştirilmesi, akma dayanımı

düşürür fakat ekstrüzyon işleminden önce uzun süre tavlama Mg4A13 fazı ile heterojen bileşenlerin çözünmesi ve bu sayede iyi bir ekstrüzyon edilebilirliğin sağlanması için gereklidir [2,5].

3.10 Alüminyumun Ekstrüzyonu

Alüminyum yüksek mukavemetli olduğu kadar hafif bir metaldir. Hatta bazı alaşımlarının dayanımı yumuşak çelikleri bile geride bırakmaktadır. Bu nedenlerden ötürü endüstride yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Bu bölümde bu çalışmanın da ana noktası olan alüminyumun özellikleri hakkında bilgiler verilecek ve çalışmanın ilerisi için bilgilendirme yapılacaktır.

3.10.1 Alüminyumun Özellikleri

Özgül ağırlığı $2,7 \text{ gr/cm}^3$ olan alüminyum; demir ($7,9 \text{ gr/cm}^3$) ve bakırın ($8,9 \text{ gr/cm}^3$) üçte biri kadar ağırdır. Bu özellik bilhassa taşımacılık endüstrisinde önem arz etmektedir. Bu da artan yükleme kapasitesi ve hızlarla enerji tasarrufuna katkıda bulunur. Alüminyumun başlıca özellikleri şunlardır:

- Alüminyum havayla temas ettiğinde yüzeyi üzerinde ince bir oksit filmi oluşur ve bu yolla metal korozyondan korunmuş olur. Ayrıca anodizasyon (eloksal) yardımıyla korozyon direnci çok daha etkili hale getirilebilir. Konstrüksiyonlar, binalar ve ev aletlerinde bu özellikten yararlanılmaktadır.
- Alüminyumun kolayca şekillendirilebilmesi folyo, çubuk, boru ve kablo gibi çeşitli formlar için malzemeyi üretime elverişli kılar. Alüminyum günümüzde karmaşık odalı ekstrüzyonlar da en iyi materyal olarak kabul edilmektedir.
- Alüminyum zehirsiz ve kokusuzdur. Yüzeyi pürüzsüz, kolayca yıkanabilir ve üzerinde mikrop barınmadığından hijyeniktir. Bu özelliklerden dolayı içecek kutularında ve folyolama ile yiyecek paketlemede yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.
- Düşük sıcaklıklarda çelik gibi malzemeler gevrekken alüminyum sünek yapısını korur.

- Saf alüminyumun çekme dayanımı yüksek değildir fakat alaşım veya temperlemeye bağlı olarak artışlar gerçekleşir. Yapılacak uygulamaya göre en uygun dayanım karakteristiğini gösteren alüminyum alaşımını seçebiliriz. Bazı alaşımlar çekme dayanımı bakımından çelikten daha güçlü ya da ona yakın değerler verebilirler.
- Alüminyuma kolaylıkla kimyasal veya elektrokimyasal olarak yüzey işlemi ya da boyama yapılabilir. Her şeyden önce anodizasyon ve boyama işlemleri ile mükemmel korozyon direnci ve geniş bir renk varyasyonu yakalanır. Böylelikle alüminyum, binaların iç ve dış yapılarında ve evlerdeki elektrikli cihazlarda sıkça kullanılır.
- Alüminyumun elektrik iletkenliği bakırın %60 kadardır bununla birlikte alüminyumun yoğunluğu bakırın yaklaşık üçte biri kadardır. Bu özelliklerinden dolayı alüminyum güç iletim kablolarında, ampullerde ve diğer elektrikli uygulamalarda kullanılır.
- Alüminyumun ısı iletkenliği çeliğin ısı iletkenlik değerinin üç katıdır. Bu özelliği pişirme gereçlerinde, klimalarda, ısı eşanjörlerin de ve otomobil motor parçalarında alüminyumdan yararlanmamızı sağlar. Ayrıca alüminyum güneş kolektörleri gibi enerji depolama ekipmanlarında da kullanılmaktadır.
- Alüminyum manyetik değildir. Böylelikle alüminyum CD'lerde ve denizcilikte pusulalarda kullanılır.
- Alüminyum ısı, ışık ve elektrik dalgalarını büyük ölçüde yansıtır. Bu özellik; aynalar, kızılötesi kurutucular, aydınlatma ekipmanları gibi yerlerde kullanılmasını sağlar. Ayrıca alüminyum, binalarda izolasyon malzemesi olarak da kullanılır.
- Alüminyum kolaylıkla geri dönüşebilir. Ayrıca düşük ergime sıcaklığından dolayı işlem ekonomik olarak gerçekleşir. Enerji ve kaynakların korunduğu günümüzde alüminyum ideal bir malzeme olarak göze çarpmaktadır [5].

Alüminyumun sayılan bu özelliklerine ek olarak bazı fizikokimyasal özelliklerinden de kısaca bahsetmek yararlı olacaktır. Alüminyum, periyodik tablonun "3A" grubundandır; atom numarası 13, atom çapı 1,43Å, iyon çapı 0,86 Å ve atom ağırlığı 26,97 g/mol'dür. Alüminyum yüzey merkezli kübik kristal kafesine sahiptir. Her bir alüminyum

atomu komşu on iki iyon tarafından çevrelenmiş olduğundan koordinasyon sayısı 12'dir. Alüminyum kafesinin bir elementel küpünün kenar uzunluğu a ; kafes parametresi %99,97'lik metalde $4,046 \pm 0,004\text{\AA}$ ve %99,996'lık metalde $4,0413 + 0,001\text{\AA}$ (yuvarlatılmış olarak: $4,04\text{\AA}$) dur. Elementel küpte birbirine en yakın komşu iki iyon arasındaki mesafe $2,86\text{\AA}$ 'dur [6].

Hem sıvı hem katı alüminyumun yoğunluğu artan safiyet derecesiyle orantılı olarak düşer. %99,25 saflıktaki alüminyumun yoğunluğu $2,727\text{ g/cm}^3$ iken bu değer %99,4 da $2,706$ ve %99,75 de $2,703$ olmaktadır. Alüminyumun ergime noktası artan saflık derecesi ile yükselmektedir. %99,2 saflıkta ergime noktası 657°C iken, %99,996 saflıkta bu değer $660,24^\circ\text{C}$ olmaktadır. Alüminyumun ısı iletkenliği artan safiyet derecesi ile büyür. Bu, %99,489 Al' lu bir metal için 200°C 'de $0,5$ ve %99,70 Al'lu bir metal için $0,531\text{ cal/cm.s}^\circ\text{C}$ 'dir. Alüminyumun viskozitesi saflığı azaldıkça azalırken, elektrik iletkenliği saflığı ile doğru orantılıdır. Alüminyumun özgül ısısının değerleri ise aşağıdaki çizelgede görülmektedir [6].

Çizelge 3.4 Alüminyumun özgül ısısı [6]

Sıcaklık $^\circ\text{C}$	0°C 'den belirtilen sıcaklığa kadar ortalama özgül ısı	Gerçek özgül ısı $\text{cal/g. } ^\circ\text{C}$	Atom ısısı $\text{cal/g.Atom } ^\circ\text{C}$
0		0,2220	5,99
100	0,2259	0,2297	6,20
200	0,2297	0,2374	6,40
300	0,2386	0,2451	6,61
400	0,2374	0,2519	6,82
500	0,2413	0,2606	7,04
600	0,2452	0,2683	7,25
657 (katı)	0,2473	0,2727	7,36
657 (sıvı)	0,3904	0,2502	6,75
700	0,3818	0,2523	6,81
800	0,3654	0,2571	6,93
900	0,3541	0,2619	7,07
1000	0,3451	0,2667	7,19

Alüminyumun mekanik özellikleri ile ilgili olarak şunları söylemek mümkündür. Mekanik özellikler de büyük ölçüde safiyet derecesine bağlıdır. Yüksek safiyetteki alüminyum teknik safiyetteki metale nazaran çok daha yumuşak ve sünekler, mekanik mukavemeti ise daha düşüktür. % 99,25 Al'lu bir metalin elastiklik modülü 7100 kg/mm² 'dir, çok saf alüminyumun ki ise ancak 6700 kg/mm² 'dir. Dövülmüş ve tavllanmış %99,2'lik alüminyumun Brinell sertliği 24 kg/mm² civarındadır, % 99,9'luk alüminyumun ki 15 kg/mm²'dir. %99,996 safiyetindeki soğuk haddelenmiş alüminyum %75'lik bir incelmeden sonra takriben 27, yumuşatılmış halde 12-15 kg/mm² Brinell sertliğine sahiptir. Çekme dayanımı soğuk haddelenmiş halde 11-13 kg/mm² ,tavlanmış iken 3,5 -6 kg/mm² dir [6].

3.10.2 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum'a çeşitli özellikler vermesi için çeşitli alaşım elementleri karıştırılır. İlave edilen metallere göre sınıflandırma yapılır. Bir alaşım 4 rakamdan oluşan notasyon ile tamamlanır. 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 [7].

Minimum %99,00 saf alüminyum içeren 1xxx grubunun son iki rakamı minimum alüminyum yüzdesini göstermektedir. Buna göre 1030, yabancı madde bakımından bir kontrol gerektirmeyen, minimum alüminyum miktarı %99,30 olan bir alüminyumu 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 [7].

Çizelge 3.5 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [7]

<i>Alaşım Grubu</i>	<i>Ana Alaşım Elementi ve Tipik Özellikler</i>
<i>1XXX</i>	<i>Alaşımsız alüminyum (minimum %99 Al);</i> Yüksek korozyon direnci, kolay birleşme özelliği, düşük dayanım, düşük işleme kabiliyeti, yüksek elektrik iletkenliği ve termal iletkenlik.
<i>2XXX</i>	<i>Bakır'lı alaşım;</i> Yüksek dayanım, nispeten düşük korozyon direnci, işlenebilme kabiliyeti çok iyi, ısıtılabilir.
<i>3XXX</i>	<i>Manganez'li alaşım;</i> Düşük-orta arası dayanım, iyi korozyon direnci, işleme kabiliyeti düşük.
<i>4XXX</i>	<i>Silisyum'lu alaşım;</i> Ekstrüzyon işlemi için kullanışlı değildir
<i>5XXX</i>	<i>Magnezyum'lu alaşım;</i> Düşük sayılabilecek dayanım, denizcilikte mükemmel korozyon direnci, çok iyi kaynak kabiliyeti.
<i>6XXX</i>	<i>Silisyum ve magnezyum'lu alaşım;</i> Ekstrüzyonda en popüler alaşımdır, iyi ekstrüzyon edilebilme özelliği, iyi dayanım, iyi korozyon direnci, iyi işlenebilme kabiliyeti, iyi kaynak kabiliyeti, iyi plastik şekillendirilme kabiliyeti.
<i>7XXX</i>	<i>Çinko'lu alaşım;</i> Çok yüksek dayanım, talaşlı işlenebilme kabiliyeti iyi, ısıtılabilir.
<i>8XXX</i>	<i>Demir ve Silisyum'lu alüminyum alaşımı</i>
<i>9XXX</i>	<i>Yeni bulunan alaşımlar (Örnek: Lityum'lu alaşımlar)</i>

3.10.3 Alaşımlama Elementlerinin Alüminyuma Kazandırdıkları

Bakır: Bakırın düşük sıcaklıklarda ısıtılabilir ve yüksek sıcaklıklarda ise diğer alaşım elementleri ile meydana getirdiği ara fazlar, malzemenin mukavemetini artırır. Artan dayanımı suni yaşlandırma ile biraz daha artırmak da mümkündür. Bununla birlikte bakır, korozyon direncini düşürür, tavlınmış durumda çukurcu korozyonu meydana gelmesine yol açabilir.

Magnezyum: Magnezyum yüksek mukavemet, süneklik ile korozyon mukavemeti ve kabiliyeti sağladığı gibi malzeme yoğunluğunu da düşürmez. Bakır ile birlikte kullanıldığı alaşımlarda bakırın düşürdüğü sünekliği artırma görevini görür. Fakat bu tavlamlar sonucu olur. Suni yaşlandırma öncesi soğuk işlem uygulanması magnezyumun dayanıma katkısını artırırken doğal yaşlandırma ile aynı şey yapılacak olursa dayanım düşer.

Magnezyum tane sınırlarında yüksek anodik faz olarak çökelir. Fazlası kırılma ve stres korozyonu yaratır. En fazla 5xxx alaşımlarında %5,5 olarak kullanıldığı görülmüştür.

Magnezyum manganez ile birlikte kullanıldığında yüksek dayanım, yüksek korozyon dayanımı ve iyi kaynak kabiliyeti sağlar. Bu iki elementten herhangi birinin gereğinden fazla kullanımı çatlama riskini yükseltir ve işlenebilirliği azaltır. Manganez magnezyuma oranla dayanım artırmada iki kat etkilidir fakat magnezyumun çökmesi daha düzenli olduğundan, stabil bir alaşım oluşturmak için manganez ile birlikte alaşımlama yapılır.

Mg₂Si (magnezyum silisit) yapacak miktarda magnezyum ve silisyum ihtiva eden alaşımlar ısıtılma tabii tutulabilen ve kolay işlenebilen alaşımlardır. Bu alaşımlar 3 grup altında toplanabilir. İlk grup bu bileşikten %1,5'ten daha az ihtiva edenlerdir. Bu gruba örnek olarak verilebilecek 6063 alaşımında magnezyuma oranla silisyum biraz daha fazladır. Ekstrüzyon için son derece ideal bir alaşımdır. En iyi ekstrüzyon uygulanabilen alaşım %1.1 magnezyum silisit içerir. Ekstrüzyon sonrası havada soğutmak yeterli olmaktadır. Süneklik ve dayanım dengesini elde etmek için ise suni yaşlandırma uygulanabilir. Koroziyon açıdan dayanıklı olduğunu söylemek mümkündür.

İkinci grup %1,5'ten fazla ihtiva edenlerdir. Ayrıca T6 temperlemesinde dayanım kazanmak için %0,3 bakır ilavesi ve tane kontrolü için katkıları da içerirler. En iyi örnek olarak 6061 alaşımı verilebilir. Dayanımları birinci gruba göre daha fazladır. Çözülme tavlama sıcaklığı birinci gruba göre yüksek olup su vermeye karşı duyarlıdır. Bu gruba giren alaşımlara ayrı bir çözülme tavlama, sonrasında hızlı bir su verme ve suni yaşlandırma yapılır.

Üçüncü grup ise her iki gruba oranla çok daha fazla magnezyum silikat içerir. Silisyum fazla olduğundan dolayı rekristalizasyon sıcaklığında tane sınırı çatlaması meydana gelmektedir. Bu yüzden rekristalizasyon sıcaklığını yukarı çekme amacıyla çeşitli eklentiler ilave edilir. Kurşun ve bizmut ilavesi işlenebilirliği artırır. Örnek olarak 6351, 6009 ve 6010 alaşımları verilebilir.

Silisyum: Silisyum miktarı arttıkça çekme ve akma mukavemeti artış gösterir. Alaşımın içerisinde silisyum ihtiva eden fazın şekli ve dağılımı önemlidir. 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. Oluşabilecek bu farklı tane formları nedeniyle, bazı tane iyileştirici katkıları kullanılır. Özellikle titanyum ve boron tane büyüklüğünü ve biçimini ayarlamak için kullanılan katkılardır. Üretim ve ısıtım sırasında tane büyüklüğünü ve yeniden kristalleşme davranışının kontrolü için mangan, krom ve zirkonyum ilave edilir. Tane kontrolü ile gerilmeli korozyon çatlamasına karşı direnç, yüksek tokluk ve iyi şekil alabilirlik elde edilir. Yüksek sıcaklık dayanımı da beraberinde gelir.

Çinko: Alüminyum-Çinko alaşımları genellikle en yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarıdır. Çinko, alüminyum alaşımlarının işleme kabiliyetini artırır. Sıcak yırtılmaya sebep olmasına rağmen diğer alaşım elementleri ile bu kötü özellik ortadan kaldırılabilir.

Manganez: 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 haddemeleme sırasında çatlak teşekkülüne yol açar. Mn, %10 Mn-Al alaşımı halinde alaşıma ilave edilir.

Manganez ilave edildiğinde rekristalizasyon sıcaklığında artış görülmektedir. Bu sayede sıcak işlemlerde tane büyümesi engellenerek lifli yapı elde edilir. Su vermeye olan hassasiyet de artmaktadır. İntermetalik çökelmenin az olması için gereksiz miktarda ihtivasından kaçınılmalıdır.

Demir: Alüminyum alaşımlarında demire genellikle rastlanır. Redüksiyon ve izabe işlemlerinde istenmeyerek de olsa bir miktar demir alaşımda kalır. Demir alüminyum alaşımlarında hiç istenmeyen bir kalıntıdır. Mümkün oldukça uzaklaştırılması gerekmektedir. Alüminyum veya diğer elementlerle intermetalik bileşik yapmış ikinci bir faz olarak bulunur. Kablolarda sürünme dayanımını artırmak için tercih edilir. Tane büyüklüğünü azaltır , böylece dayanım ve sünekliği birlikte sağlar. Fakat bu durum sadece Al-Cu-Ni alaşımlarında geçerli olup belirli miktarları için geçerlidir.

Titanyum: Titanyum genellikle, boksitte çok az miktarda bulunan bir empüredir. Tane iyileştirici olarak sonradan katılmaktadır.

Zirkonyum: Zirkonyum tane küçültücü gerilmeli korozyona mani olan ve yüksek sıcaklıkta sürtünme mukavemetini arttıran bir alaşım elemanıdır.

Krom: Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarında korozyona karşı mukavemeti artırır ve gerilmeli korozyon ihtimalini azaltır. Krom, alaşıma %2 Cr-Al esas alaşım halinde ilave edilir, AlMgSi alaşımlarının sıcak şekillendirme işlemlerinde yeniden kristalleşmeyi geciktirici rol oynar.

Kalay: Metal ergidikten soma ilavesi oldukça kolaydır. Alüminyum alaşımlarında kalay, düşük ve yüksek sıcaklıklarda dayanımı düşürür.

Kurşun: Özellikle kalay ve bizmut ile kullanıldığında alaşımın işlenebilme kabiliyetini arttırır. 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 curuflanmayı azaltmak ve yeniden ergime esnasında magnezyumun yanarak kaybolmasını önlemek için berilyum ilave edilir.

Sodyum: Sodyum, alüminyum-silisyum alaşımlarım 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 sodyum, sıcak yırtılmaya yol açabileceği gibi korozyon mukavemetim de düşürür [3,7,9]

Bunların haricinde alüminyum alaşımlarına daha birçok element ilavesi yapılabilmektedir. Her katkı farklı özellikleri elde etmek veya başka bir katkının yaratacağı olumsuz etkileri önleyebilmek amaçlıdır.

3.10.4 Alüminyum Alaşımlarının Ekstrüzyon Edilebilirliği

Ekstrüzyon edilebilirlik, maksimum ekstrüzyon hızı ile değerlendirilebilecek bir durumdur. Bu olgu prosesin maliyet ve verimliliği hakkında fikir vericidir. Bir alaşımın ekstrüzyon edilebilirliğini yükseltmede sıcaklık ve hız parametreleri ile deformasyon bölgesindeki (özellikle de matristeki) gerilme durumu en önemli faktörlerdir. Mondolfo

tarafından yapılmış bir çalışmada ekstrüzyon edilebilirliğin ölçüsü tüm proses parametrelerini aynı tutup sadece ekstrüzyon oranını değiştirerek elde edilmeye çalışılmıştır. Bu durumda yüzeyde çatlaklar oluşmadan ulaşılabilecek en yüksek ekstrüzyon hızını bulmak amaçlanmıştır. Zasadzinski ise daha farklı bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmada ise deformasyon geometrisini kontrol altında tutarak optimum sıcaklık ve hız parametrelerini tayin ederek maksimum çıkış hızına ulaşmak amaçlanmıştır. Bu nedenle matris geometrisinde çeşitli değişiklikler yapılmış ve en ideal hız-sıcaklık parametrelerinin hesabı için çeşitli varsayımlar öne sürülmüştür [1].

Reiso ise blokların proses öncesi tavlama sıcaklığının endüstriyel uygulamalardaki ekstrüzyon edilebilirliği artırması üzerine çalışmalar yürütmüştür. Yükselen ön tavlama sıcaklıkları ile birlikte hem ekstrüzyon edilebilirlikte hem de mekanik özellikler ve yüzey kalitesinde hızlı bir yükseliş olduğunu göstermiştir. Ekstrüzyon kabiliyetinin daha fazla artırılması için ise bloğun homojenizasyon tavlama sıcaklığına tabi tutulmasının önemini vurgulamıştır [1].

Alüminyum alaşımlarının ekstrüzyonu için genellikle dairesel, nadiren de düz bloklar, döküm yöntemiyle hazırlanmaktadır. Bloklar, ekstrüzyondan önce genellikle homojenleştirme işlemine tabi tutulurlar. Homojenleştirme işlemi görmemiş bloklar, aşağıda belirtilen nedenlerden dolayı mamul kalitesini ve ekstrüzyon edilebilirliği kötü yönde etkilemektedirler;

- Tane sınırı segregasyonları, düşük ergime noktalı ötektikler ve kırılgan intermetalik bileşikler metalin işlenebilirliğini zorlaştırır.
- Aşırı doymuş olarak çözünmüş alaşım bileşenleri (örneğin; Al_6Mn , $AlFeMn$, Mg_2Si), yüksek sıcaklıkta akma gerilmesini yükselttiklerinden metalin işlenebilirliğini zorlaştırırlar.
- Magnezyum, demir, zirkon gibi belirli alaşım elemanları, çözünmüş yada ayrılmış durumda yeniden kristalleşmeyi engellerler. Bu etki, özellikle $AlMgSi(Mn)$ alaşımlarının ekstrüzyonunda renk anodizasyonunda önemli derecede rol oynar.
- Sürekli dökümden sonra soğuma sırasında $AlMgSi$ alaşımlarında Mg_2Si çökmesi, ekstrüzyon edilen kesitlerin sertleşebilirliğini azaltır ve yüzey parlaklığını düşürür.

- Tane ayrışmaları (örneğin; çözülmemiş alaşımlama elementlerinin konsantrasyonlarındaki farklılık), eloksal işleminden sonra bünyeye bağlı çizgiler oluşturur.
- Heterojen tane ve tane sınırı ayrışmaları, bünyede ton farklılıklarına neden olarak profilin parlaklığını azaltır.
- Döküm bloklarına ısıtma işlemleri uygulanarak bu etkiler kısmen veya tamamen kaldırılabilirler. Uygulamada yaygın olarak kullanılan tavlama sıcaklıkları Çizelge 3.5' de verilmiştir [2].

Alüminyum ve alaşımları, ekstrüzyon edilebilirliklerine göre üç grupta sınıflandırılırlar ve Çizelge 3.6' da bazı alaşımlar örnek olarak verilmiştir;

- Kolay ekstrüzyon edilebilenler: Saf alüminyum, AlMn, AlMgI, AlMgSi_{0,5}, AlMgSi_{0,8}
- Orta zorlukta ekstrüzyon edilebilenler: AlMg₂₋₃, AlMgSi, AlZnMg
- Zor ekstrüzyon edilebilenler: AlCuMg, AlCuMgPb, AlZnMgCu, AlMg > %3Mg [2]

Çizelge 3.6 Alüminyum ve alaşımlarının homojenizasyon sıcaklıkları ve bazı ekstrüzyon parametreleri [2]

Malzeme	Aşırı tavlama sıcaklığı (°C)	En az bekleme süresi (saat)	Konteynır sıcaklığı (°C)	Blok sıcaklığı (°C)
A199,8 .. 99,9	580-600	6	380	420
A199,9Mg0,5 .. 2	560-580	6	390	430
AlMg	600-620	6	430	450-480
AlMg1	550-560	12	390	430
AlMg3	530-540	12	425	460
AlMg5	500-520	12	410	460
AlMgMn	550-560	12	420	450
AlMg4,5Mn	520-540	12	410	450
AlMgSi0,5	560-580	6	410	460-480
AlMgSi1	560-570	6	430	450-500
AlMgSiPb	430-450	12	360	350-400
AlCuBiPb	420-440	12	360	350-380
AlCuMgPb	430-450	12	360	350-420
AlCuMg1	480-490	12	400	420-450
AlZnMg1	460-480	12	480	500-530
AlZnMgCu0,5	470-480	12	400	420-430
AlMgSi1	560-570	6	430	450-500
AlMgSiPb	430-450	12	360	350-400
AlCuBiPb	420-440	12	360	350-380
AlCuMgPb	430-450	12	360	350-420
AlCuMg1	480-490	12	400	420-450
AlZnMg1	460-480	12	480	500-530
AlZnMgCu0,5 ..	470-480	12	400	420-430

Çizelge 3.7 Alüminyum alaşımlarının bağıl ekstrüzyon edilebilirliği, $z = 30-50$ orta, $z = 50-150$ kolay, $z < 30$ zor [2]

Malzeme No. AA	Malzeme	Bağıl ekstrüzyon edilebilirlik (Z)
EC	Al99,9	150
1060	Al99,6	150
1100	Al99	150
2011	AlCuBiPb	15
2014	AlCuSiMnMg	20
2024	AlCuMg1	15
3003	AlMn	100
5052	AlMg2,5	80
5083	AlMg4,5Mn	20
5086	AlMg4	25
5154	AlMg3,5Cr	50
5254	AlMg3,5Cr	50
5454	AlMg2,7Mn	50
5456	AlMg5Mn	20
6061	AlMgSi1	60
6063	AlMgSi0,5	100
6066	AlMgSiCuMn	40
6101	AlMgSi (elektrik iletkeni)	100
6151	AlMgSiFe (demir alaşımlı)	70
6463	AlMgSi0,8	100
7001	AlZnMgCu2,5	7
7075	AlZnMgCu1,5	10
7079	AlZnMgCu0,5	10

YUMUŞAK ve ORTA SERTLİKTEKİ ALAŞIMLARIN EKSTRÜZYONU

Alüminyum alaşımlarının ekstrüzyonu alaşımlama, kullanılan takımlar ve matris tasarımı açısından günümüzdeki en gelişmiş teknolojiler arasından yer almaktadır. Kullanılan bloğun kimyasal alaşımı ve uygulanacak işlemi belirleyen en önemli faktördür. Alüminyum alaşımları içersinde teknik ve ekonomik bakımdan en yaygın kullanılan alaşımlar, 6000 serileridir. Bunların içi boş veya kompleks profiller olarak çekilebilmesinin kolaylığı, tavlama işlemlerinin kolaylığı, elektrik iletkenliğinin, mekanik özelliklerinin, yüzey kalitesinin, korozyon dayanımının ve kaynak kabiliyetinin iyi olması, başlıca tercih sebebidir [1].

6000 serisi alaşımlarla çalışmanın kolaylığı, bu seri içinde birçok alaşımın türetilmesini sağlamıştır. Bunlardan bazıları yüksek oranda alaşım elementlerinden bulundurulur. Bu sayede yüksek yapısal dayanıma sahip olurlar. Özellikle 6061 (Al-Mg-Si-Cu) ve 6082 (Al-Si-Mg-Mn) alaşımları bu amaçla kullanılmaktadır. 6061 ise özellikle iyileştirilmiş tokluğu ile tercih edilmektedir. Bunun sebebi ise bu alaşımın su verme ve yaşlandırma işlemlerine iyi cevap vermesi ve kaynak bölgelerinde istenen özellikleri yakalayabilmesidir. Korozyon ve yüzey kalitesi ile soğuk ve sıcak dövme işlemlerinde her iki alaşım çok iyi sonuçlar vermektedir [1].

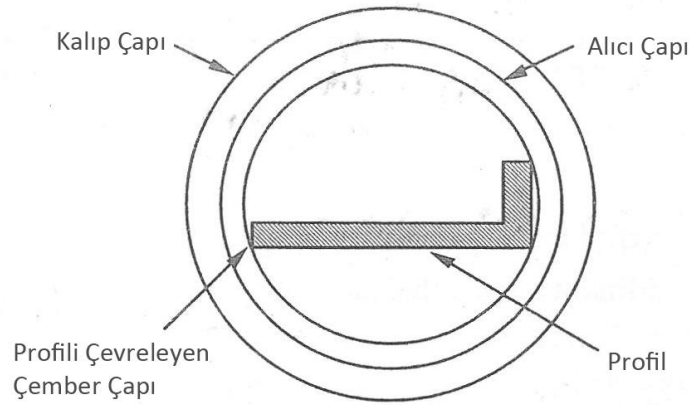
4.1 Ürün Şekil ve Boyutları

6000 serilerinin bazıları (özellikle 6063, 6101, 6463) yüksek ekstrüzyon edilebilir özelliklere sahiptir. Be sayede kompleks şekillerin ekstrüzyonu mümkün olabilmektedir. Ürünün şekil ve boyutları çeşitli geometrik ifadeler ile açıklanabilmektedir:

- Profilin kesit alanı
- Profilin çevre uzunluğu
- Profilin çevresinden geçen çemberin çapı

Aşağıdaki şekilde profil çevresinden geçen çemberi görmekteyiz. Bu çemberin etkilerini şöyle sıralamak mümkündür:

- Profilin ölçüsel kalitesi
- Oksit ve metalik olmayan kalıntıların prosese dahil oluşu
- Ekstrüzyon sonunda metalin akışı



Şekil 4.1 Profili çevreleyen çember çapı [1]

Direkt ekstrüzyonda metal akışı, bloğun merkezinden çevreye doğru gidildikçe yavaşlamaktadır. Bunun bir sonucu olarak daha büyük çaplı çevresel çembere sahip profiller, daha sıkı hızı kontrolü gerektiren proseslerdir. Bunun yanı sıra profil çevresinden geçen çember çapı ile alıcı çapı arasındaki fark arttıkça, bloğun yüzeyindeki oksit ve diğer yabancı materyallerin prosese dahil olma yatkınlığı artmaktadır. Fakat profili çevreleyen çemberin çapı arttıkça, proses sonu yüzeysel dalgalanmayı azaltmak için, proses sonunda fireye ayrılan blok parçası miktarı da artmaktadır [1].

4.2 Şekil ve Form Faktörleri

Şekil faktörü profilin farklı bölümlerindeki kesitleri dikkate almadan, ekstrüzyon edilebilirliği gösteren bir ölçüttür.

$$\text{Şekil Faktörü} = \text{Profil kesitinin çevresi} / \text{Birim boy başına ağırlık} \quad (4.1)$$

Şekil faktörünün büyümesi profil kesitinin kompleksliğinin artması ile veya kesit kalınlığının düşmesi ile mümkün olmaktadır. Şekil faktörü şunlara etki etmektedir:

- Üretim miktarı
- İmalat bedeli
- Takım maliyeti

Laue ve Stenger yaptıkları çalışmada daha farklı bir faktör öne sürmüşlerdir. Form faktörü adını verdikleri bu kavram, şekil faktörüne göre daha detaylı bir yaklaşım getirmektedir [1].

$$\text{Form Faktörü} = \text{Profili çevreleyen çemberin çapı} / \text{Minimum kesit kalınlığı} \quad (4.2)$$

4.3 Önemli Ekstrüzyon Parametrelerinin Analizi

4.3.1 Proseste Üretilen Profil Boyu

Ekstrüzyonda bir bloktan elde edilecek malzeme uzunluğu kolayca hesaplanabilir. Burada hacim sabitliği ilkesi esastır:

$$A_c \times L_b = A_e \times L_r \quad (4.3)$$

A_c alıcının kesit alanı (başka bir deyişle bloğun kesit alanı), L_b bloğun efektif olarak kullanılan kısmının uzunluğudur. Ekstrüzyon işleminin sonunda bloğun bir kısmı fireye ayrılmak zorunda olduğundan bu bölüm efektif kullanılan bölüme dahil edilemez. A_e profilin kesit alanı iken, L_r ise proseste üretilen profil boyudur [1].

Her ne kadar yukarıdaki eşitlikle çeşitli tahminlere gidilebilse de, üretilen profilin birim boyuna karşılık gelen ağırlık bilinmediği sürece, yapılan tahminler yanıltıcı olabilmektedir. Bunun nedenlerini şöyle sıralamak mümkündür:

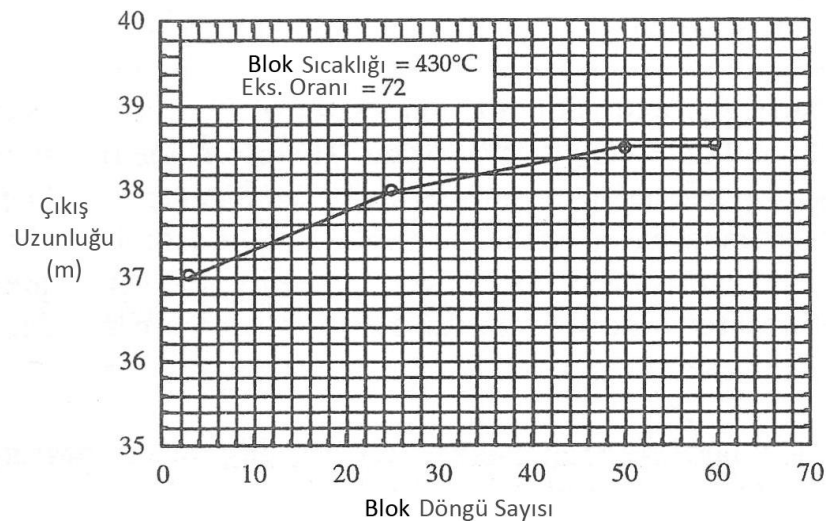
- Ekstrüzyon sıcaklığına ve hızını bağlı olarak matrisi terk eden malzemede meydana gelecek kendini çekmeler
- Kalıbın tipi, tasarımı ve yardımcı matris parçaları
- Gerdirme kuvveti

- Soğuma sırasında kendini çekmeler
- Alaşımın kimyası

Yukarıda sıralanan bu nedenlerden dolayı üretilen profil uzunluğu hesabında, profilin birim uzunluğu başına ağırlığı hesaba katılmaktadır. Uygulamalarda blok uzunluğu, sıcaklık ve fire kalınlığı sabit tutularak yapılmış deneylerde, üretilen profil uzunluğunu etkileyen faktörlerin aşağıdakiler olduğu tespit edilmiştir:

- Matriste zamanla meydana gelen şekilsel bozukluklar
- Ekstrüzyon oranı
- Ekstrüzyon hızı
- Kullanılan blok sayısı

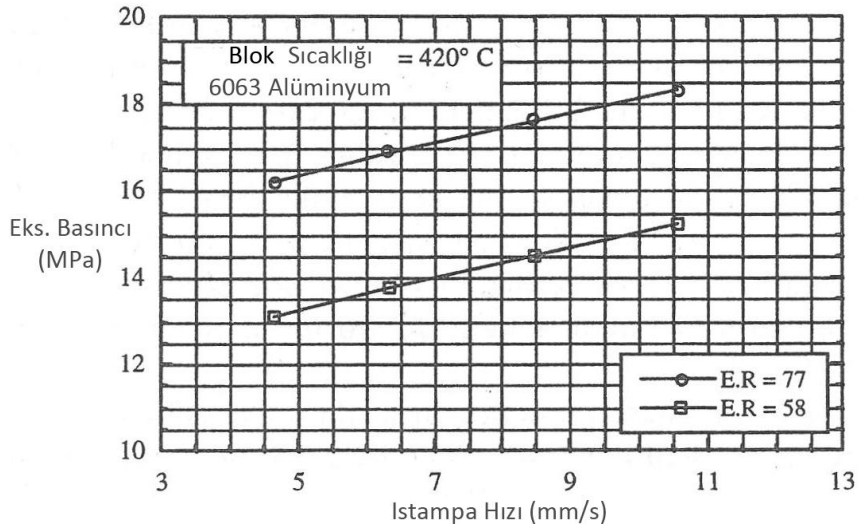
Ekstrüzyon işleminde yüksek basınç ve sıcaklıkların oluşması, kalıbın deformasyonuna neden olan başlıca faktördür. Yapılan incelemeler sonucunda matris merkezinden dışa doğru gidildikçe deformasyonların azaldığı görülmüştür. Matris üzerinde en yüksek sıcaklığa, matristen malzemenin çıkmasından hemen önce ulaşılmaktadır. Bu nedenle matrisin çıkış ağzında matris malzemesinin sertliğinin diğer yerlere göre daha çok azaldığını söylemek mümkündür. Bu nedenle aşağıdaki grafikte de görülebileceği gibi kullanılan blok sayısı arttıkça matris ağzında meydana gelecek deformasyon da artmakta ve bu nedenle çekilen profil uzunluğunda da artış meydana gelmektedir [1].



Şekil 4.2 Çevrim sayısına bağlı olarak çıkış uzunluğu değişimi [1]

4.3.2 Ekstrüzyon Basıncı

Ekstrüzyon prosesini gerçekleştirmek için gereken basınç birçok etkene bağlıdır. Basitçe söylemek gerekirse yüksek ekstrüzyon oranı yüksek basınç gerektirmektedir. Prosesin gerçekleşmesi için öncelikle gerekecek basınca uygun pres seçimi yapılmalıdır. Saha, yaptığı çalışmalarda ekstrüzyon basıncının farklı ekstrüzyon oranlarında ve farklı ıstampa hızlarında nasıl değiştiğini incelemiştir. Bu çalışmalar sonucunda aşağıdaki gibi bir grafik elde etmiştir [1].



Şekil 4.3 Istampa hızına bağlı ekstrüzyon basıncı değişimi [1]

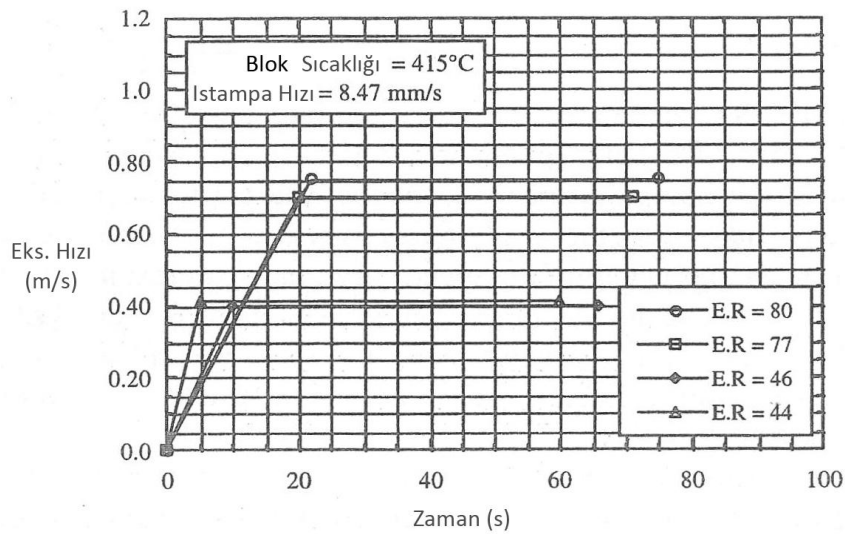
Yukarıdaki grafikte de görülebileceği gibi artan ekstrüzyon oranlarında ve artan ıstampa hızlarında, prosesin gerektirdiği basınç doğru orantılı şekilde artış göstermektedir.

Günümüzde yüksek kapasiteyle çalışan modern tesislerde çekici sistemleri kullanılmaktadır. Çekiciler, presten parça çıkmaya başladığı zaman profilin baş kısmından tutarak ıstampa ile koordineli bir şekilde ürünü çekerler. Çekiciler aşağıdaki faydaları sağlamaktadır:

- İş gücünü düşürüp üretimi artırmak
- Fireyi azaltmak
- Matristen malzeme akışını kontrol etmek
- Presi durdurmadan çekilen profili istenilen ölçülerde kesmek

Ekstrüzyon prosesinde hız (profilin çıkış hızı) sıfırdan başlayarak belirli bir değere kadar yükselmektedir. Bu yükseliş belirli bir zaman almakta ve daha sonra sabit bir seviyede ilerlemektedir (her ne kadar proses bu durumda karalı halde olmasa da öyle kabul edilmektedir). Saha, bu konu üzerinde de çeşitli çalışmalar yapmıştır ve bunların doğrultusunda ekstrüzyon hızını öncelikli olarak etkileyen iki faktör üzerinde durmuştur [1].

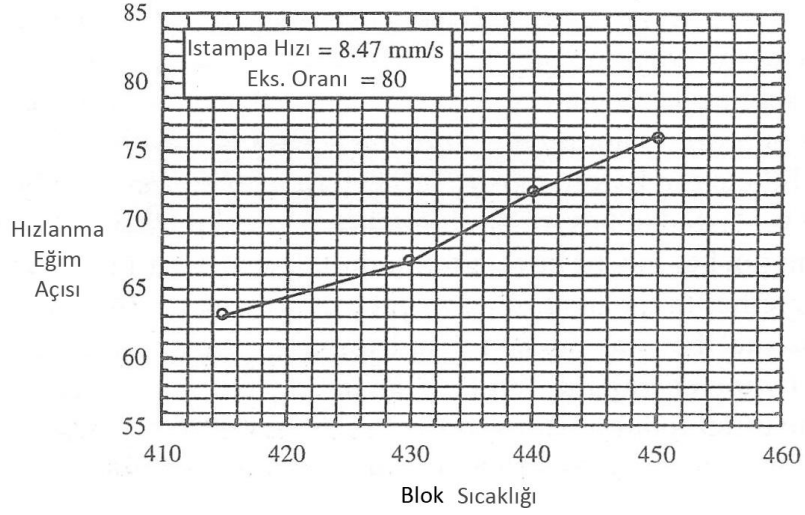
Saha öncelikle sabit blok sıcaklığı ve uzunluğu ile sabit ıstampa hızı kullanarak, ekstrüzyon oranının çıkış hızı üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuç olarak aşağıdaki grafikte görüldüğü gibi ekstrüzyon hızının ekstrüzyon oranıyla doğru orantılı olarak arttığını göstermiştir. Bu durum hacim sabitliği ilkesine bağlıdır. Artan ekstrüzyon oranı, aynı blok kesit alanından, daha az kesit alanlı profil çekilmesi anlamına gelmektedir. Bu da çıkış yapacak malzeme hızında da artış olacağı anlamına gelmektedir. Bununla birlikte yine grafikte görüleceği gibi hızın ilk baştaki artış eğrisinin eğimi artan ekstrüzyon oranı ile düşmektedir. Başka bir deyişle malzeme akışının kararlı hale oturması artan ekstrüzyon oranıyla daha uzun süre almaktadır [1].



Şekil 4.4 Farklı ekstrüzyon oranlarında ekstrüzyon hızının zamana bağlı değişimi [1]

Saha'nın diğer çalışması da önceden belirtildiği gibi blok sıcaklığı ile ekstrüzyon hızı arasındaki bağlantıyı kurmaya yöneliktir. Yine yukarda sayılan parametreleri sabit tutarak farklı sıcaklıkta bloklarla testler yapmış ve sonuç olarak artan blok

sıcaklıklarında çıkış hızındaki ivmenin (hızın sabitlendiği ana kadarki) yükseldiği anlaşılmıştır. Bu durum aşağıdaki grafikte de gösterilmiştir [1].



Şekil 4.5 Sabit ıstampa hızı ve ekstrüzyon oranı için farklı blok sıcaklıklarında hızlanma eğim açısı [1]

Fakat blok sıcaklığının seçiminde bir üst sınır da vardır. Yüksek sıcaklıklarda başlayan proseslerde doğal olarak çıkış sıcaklığı da yükselmektedir. İvmelenmenin hızlandırılması için blok sıcaklığı şu koşullara bağlı kalınarak artırılabilir:

- Çıkış sıcaklığı malzemenin çözelti sıcaklığı bölgesinde seyretmelidir. Ancak bu sayede ısıl işlemde sonrasında istenilen özellikler yakalanabilir.
- Çıkış sıcaklığı malzemenin sıcak yırtılma sıcaklığının altında olmalıdır.

Hızlanma zamanını azaltmak ve dolayısıyla üretim miktarını artırmak için aşağıdaki yöntemler kullanılabilir. Unutmamak gerekir ki günümüzde halen deneme yanılma yöntemiyle bu yaklaşımlar sağlanmaktadır:

- Aynı blok sıcaklığında ıstampa hızını artırmak
- Matrizen aynı anda birden fazla profil çekerek ekstrüzyon oranını düşürmek
- Sabit ıstampa hızı için blok başlangıç sıcaklığını yükseltmek
- Optimum blok homojenizasyonu sağlayarak veya alaşımlama elementleri kullanarak alaşımın ekstrüzyon edilebilirliğini yükseltmek [1]

4.4 Farklı Tip Profillerin Ekstrüzyonu

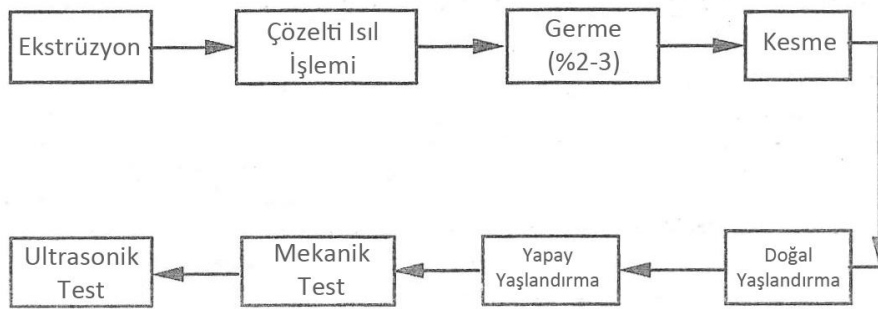
Tam dolu, yarı-oyuk ve içi boş profillerin ekstrüzyonunda, genel yapısal amaçlar için yumuşak ve orta sertlikteki alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Bunlar AlMgSi0.5, AlMgSi1, AlZnMg1 ve bazı tavlanamayan AlMg alaşımlarıdır. Laue ve Stenger bu yapısal şekilleri zorluklarına göre belirli gruplara ayırmışlardır. Çizelge 4.1’ de bunları görmek mümkündür [1].

Çizelge 4.1 Alüminyum profillerinin ekstrüzyon zorluklarına göre sınıflandırılması [1]

Kategori	Tip	Örnekler
A	Basit çubuk	
B	Şekli bar	
C	Standart kesitler	
D	Basit içi dolu kesitler	
E	Yarı-boş kesitler	
F	Kesitlerinde ani değişiklikler olan geniş ince kesitler	
G	Dar girişli zor dil formlarına sahip kesitler	
H	Tüpler	
J	Basit içi boş kesitler	
K	Zor içi boş, iki veya daha çok delikli kesitler	
L	Harici uzantılı içi boş kesitler	
M	İçe uzantılı içi boş kesitler	
N	Büyük veya geniş içi boş kesitler	

Yukarıda sayılan alaşımlar içerisinde manganez ilave edilmiş AlMgSi1 alaşımı diğerlerine oranla daha yüksek yapısal dayanıma sahiptir. Daha yüksek alaşım oranına sahip

olduğu için proses sonrası daha hızlı soğutulması gerekmektedir. Bu sayede maksimum dayanıma ulaşmış olur. Bu nedenle matrisi, katı çözelti sıcaklığının altında terk eden alaşımlarda proses sonrası ikinci bir tavlama ve su verme işlemi gerçekleştirilmelidir. Daha sonrasında ise doğal yaşlandırma uygulanması tercih edilen bir durumdur. Ekstrüzyon sonunda dalgalanmaları ve yüzeysel hataları önlemek için bloğun %10-20 sini fire olarak ayırmak gerekmektedir. Ama tam oranı bulmak için ekstrüzyonun son bölümünde çıkan malzemeye çeşitli testler uygulanması daha verimli olmaktadır. Şekil 4.6’ da tipik bir ekstrüzyon fabrikasındaki aşamaları görmek mümkündür [1].



Şekil 4.6 Yapısal profil ekstrüzyonunun adımları [1]

Çizelge 4.2’ de ise ısıtım işlemi uygulanabilen veya uygulanamayan çeşitli alaşımlara ait blok sıcaklığı ve çıkış hızları ile ilgili veriler bulunmaktadır.

Çizelge 4.2 Yumuşak ve orta setlikteki alaşımlar için blok sıcaklığı ve ekstrüzyon hızları [1]

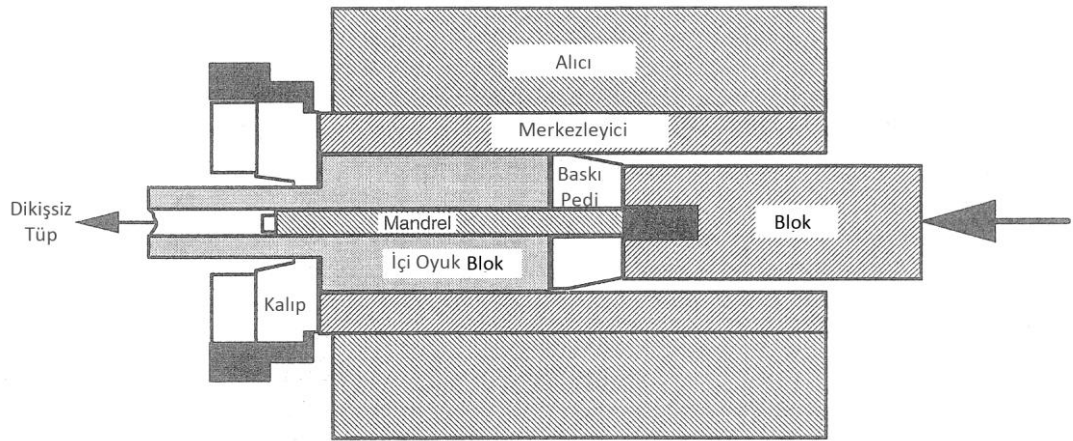
Alaşım	Tip	Blok Sıcaklığı		Çıkış Hızı	
		°F	°C	ft/min	m/min
1060	Isıl İşlem Yapılamayan	788	420	164–328	50–100
1100	Isıl İşlem Yapılamayan	806	430	164–262	50–80
3003	Isıl İşlem Yapılamayan	842	450	98–230	30–70
5052	Isıl İşlem Yapılamayan	842	450	16–33	5–10
5154, 5254, 5454	Isıl İşlem Yapılamayan	860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

4.5 İçi Boş Profillerin Ekstrüzyonu

İçi boş profillerin ekstrüzyonunda iki farklı yöntem kullanılmaktadır:

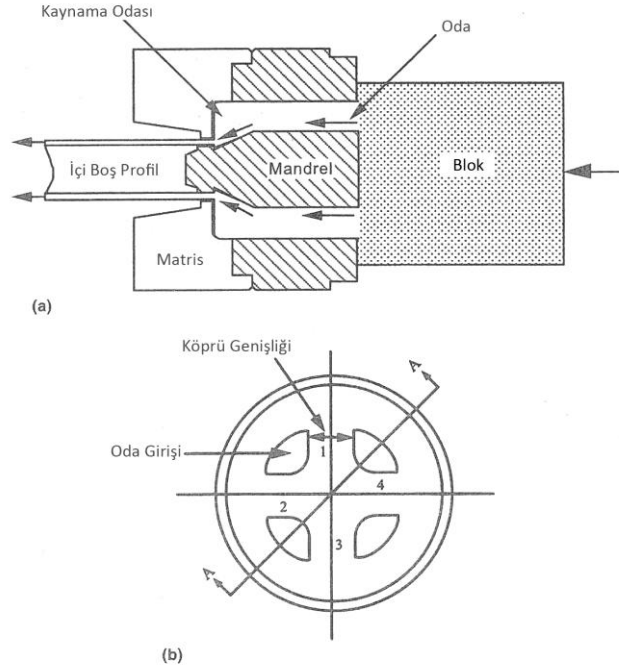
- Kaynaksız ekstrüzyon
- Kaynaklı ekstrüzyon

Her iki tip ekstrüzyonda da profilin dış hatları matrisin kendisi tarafından verilirken, profilin iç kısmı ise bir mandrel tarafından şekillendirilmektedir. Kaynaksız ekstrüzyonda kullanılan mandrel ya ıstampa üzerine sabitlenmiş durumdadır veya ıstampadan bağımsız olarak farklı bir mekanizma ile kontrol edilmektedir. Bu yöntem çok basit ve çoğu zaman boru şeklindeki profillerin imalatı ile sınırlandırılmış bir yöntemdir. Bu yöntemin en büyük sorunu mandrelin kontrol edilmesi ve içi önceden delinmiş bir bloklara ihtiyaç duymasındır. Şekil 4.7’ de bu tip ekstrüzyona ait şekil bulunmaktadır.



Şekil 4.7 Kaynaksız boru ekstrüzyonu [1]

Kaynaklı ekstrüzyonda ise bir kaynama odasına ihtiyaç vardır. Şekil 4.8’ de şematik olarak bunun gösterimi mevcuttur.



Şekil 4.8 Kaynama odalı içi boş profil ekstrüzyonu a)proses, b)matris [1]

Kaynama odalı ekstrüzyonun birçok avantajlı yönü bulunmaktadır:

- İçi boş profillerin çok uzun boyutlarda çekilebilmesi
- Çok ince kesitli profillerin üretilmesine imkan sağlaması
- Kompleks geometriye sahip profillerin üretilebilmesi

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi ilerleyen metal öncelikle iki veya daha fazla odaya ayrılmaktadır. Odaların üzerinde bulunduğu matris parçası aynı zamanda mandreli de üzerinde taşımaktadır. Odalardan ilerleyen metal daha sonra bu ayrı kollardan kaynama odasına dolmaktadır. Böylece mandrel profilin iç kısmını şekillendirirken, matris ise dışını şekillendirir ve metal de kaynama odasında birleşmiş olur. Kaynama bölgesindeki hava prosesin başında ortamı terk ettiğinden, kaynama hava ile etkileşim olmadan gerçekleşir. Bu da çok iyi olarak nitelendirilebilecek bir kaynak olur [1].

İçi dolu profillerin ekstrüzyonu ile karşılaştırılacak olunursa, içi boş profillerin ekstrüzyonunda farklı olarak şunlara rastlanmaktadır:

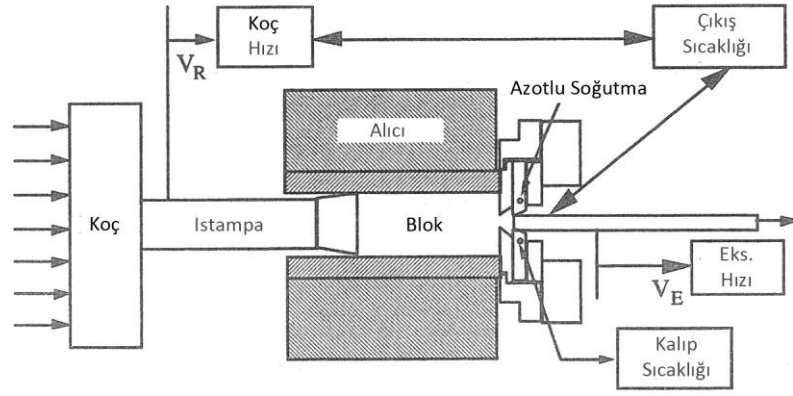
- Kaynama bölgesine doğru akan metal odalardan geçerken ilave bir sürtünme kuvvetini yenmek zorundadır. Bu da ekstrüzyon kuvvetinin artmasına neden olmaktadır.
- Bloklar 500°C'ye varan sıcaklıklara kadar ısıtılmak zorundadır ki ancak böylece odalara rahatça ayrılabilir. Bunun yanı sıra matris ve ilave takımlar da bloğun 50-70°C altına kadar ısıtılmak zorundadır. Bu şekilde kalın kesitli profillerin ekstrüzyonu da mümkün kılınmış olmaktadır.
- Kaynak bölgelerinin yeri çok iyi tespit edilmeli ve mümkün olabildiğince görünmeyen kısımlarda tutulmalıdır. Çünkü eloksal işleminin sonunda bile bazen kaynak izlerini zor da olsa görebilmek mümkün olabilmektedir.
- Odaların sayısı ekstrüzyon oranı, alaşımın ekstrüzyon edilebilirliği, pres kapasitesi ve profilin dışından geçirilen çember çapına bağlı olarak seçilmelidir [1]

4.6 Verimlilik Kontrolü

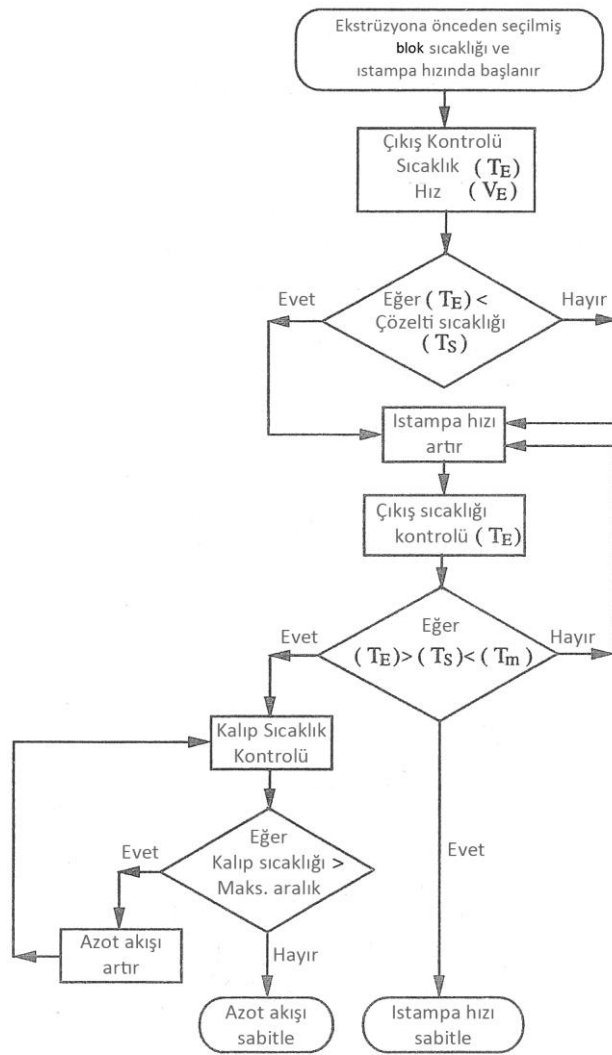
Ekstrüzyon için verimlilik birim zamanda iyi kalitede ne kadar ekstrüzyon yapıldığı ile ölçülmektedir. Üretimi artırmanın belli başlı yöntemleri şunlardır:

- Sabit hız, blok boyutu ve çıkan profil uzunluğu için fire miktarını olabildiğince minimize etmek.
- Pres kapasitesi ve çıkış tezgahı uzunluğu göz önünde bulundurularak maksimum uzunlukta blok kullanmak.
- Sıcaklık yükselmesi göz önünde bulundurularak ekstrüzyon hızını iyileştirmek.

Yukarıdaki yöntemler içerisinde hız ve sıcaklık kontrolü hem en önemli hem de prosesin diğer parametrelerine baz oluşturan başlıca unsurdur. Ekstrüzyon hızını artırmadan önce, belirli bir blok boyutu, ekstrüzyon oranı ve matris cinsine göre blok sıcaklığını optimize etmek gerekmektedir. Blok sıcaklığının optimizasyonunun yapılması önceden de belirtildiği gibi ilk hızlanma zamanını düşürme amaçlı olmalıdır. İvme artırılırken hız çatlaması veya sıcak yırtılma meydana gelmemesine dikkat edilmelidir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10' da hız ve sıcaklık kontrolüne ilişkin, uygulanması hızlı kontrol methodları gösterilmektedir [1].



Şekil 4.9 Ekstrüzyonda sıcaklık ve hız kontrolü [1]



Şekil 4.10 Ekstrüzyonda sıcaklık ve hız kontrol algoritması (T_m - ilk ergime başlangıç sıcaklığı) [1]

Günümüzde yeni üretilen modern ekstrüzyon presleri, çok çeşitli kontrol sistemlerine sahip olmakla birlikte yukarıdaki tüm kontrolleri otomatik olarak yapabilmektedir. Daha basit sistemlere sahip olan ekstrüzyon tesisleri için ise yukarıdaki kontrol methodları, çeşitli kontrol cihazlarından yardım alınarak gerçekleştirilebilir ve yüksek üretim adetli profiller için en verimli şekilde üretim yapılabilir [1].

Bilindiği gibi her alaşım kendine özgü ergime sıcaklığına sahiptir. Bununla birlikte her alaşım prosese farklı şekilde tepkiler verebilmektedir. Tam bir iyileştirme süreci için bazı ilave koşulları da göz önünde bulundurmak gerekir:

- Sıcak yırtılma gibi yüzey hataları. Bunlar çıkış sıcaklığının ergime başlangıç sıcaklığına ulaşması ile gerçekleşirler.
- Matris üzerinde lokal sıcaklığın artması ile matrisin aşınması.
- Proses sonu çıkış tezgahında çözelti tavlama için, hava ile soğutma veya daha kalın kesitler için su spreyi ile soğutma yapılabilmesi için çıkış sıcaklığının çözelti tavlama sıcaklığının üzerinde olması gerekmektedir [1].

4.7 Isıl İşlemler

Ekstrüzyon prosesi sonundaki soğutmada profil malzemesinde metalürjik ve geometrik değişimler meydana gelir. Alaşımın çeşidine ve profilin kesit kalınlığına göre soğutma sistemi havalı, sulu veya ikisinin kombinasyonu şeklinde olabilmektedir [1].

Günümüzde güvenlik ve gürültü emisyon koşullarına dayanarak hızlı hava jetleri geliştirilmiş durumdadır. Bunlar konvansiyonel sistemlere göre iki-üç kat daha etkili soğutma yapabilmektedirler. Daha hızlı soğutma için su spreyleri kullanılmaktadır. Su jetlerini profilin farklı kısımlarına yönlendirilerek homojen soğutma sağlanabilmektedir. Kesit kalınlığına göre detaylı bir analiz yapılarak yüksek kinetik enerjili su tanecikleri minimum distorsiyon ve minimum kalıntı gerilmesiyle endüstriyel çapta soğutma sağlayabilmektedirler [1].

Yumuşak ve orta sertlikteki alüminyum alaşımları sertlik ve dayanım gibi mekanik özellikleri karşılayabilmek için ideal şekilde ısıtılmalı ve ısıtılmalıdır. Isıl işleme yatkın bütün alüminyum alaşımları için iki aşama söz konusudur. Öncelikle çözelti tavlama ve sonrasında çökelme sertleştirme tavlama. İlk aşamada gerekli sertliği verecek kimyasal birleşimleri oluşturacak elementlerin alaşım içinde yoğun oranda çözünmesi sağlanır. İkinci aşamada ise bu elementlerin gerekli bileşiği oluşturması sağlanır. Çizelge 4.3’ de farklı alaşımlar için sertleşmeyi sağlayan fazlar görülmektedir [1].

Çizelge 4.3 Farklı yumuşak ve orta sert alaşımlar için sertleşme fazları [1]

Alaşım	İlk Sertleşme Fazları
1xxx	FeAl_3 , Fe_2SiAl_5
3xxx	MnAl_6 , $(\text{FeMn})\text{Al}_6$
5xxx	Mg_2Al_3
6xxx	Mg_2Si

6000 serisi alaşımlarda ekstrüzyon çıkış sıcaklığından doğrudan hava ile soğutma yeterlidir. Fakat bazı durumlarda su ile soğutma da gerekmektedir. Bu durumda şunu söyleyebiliriz ki, soğutucu havanın hızı ve ekstrüzyon yüzeyi üzerindeki hava sıcaklığı başarılı bir soğutma üzerindeki en önemli etkidir. Mevcut alaşımın katı çözelti sıcaklığından ne kadar hızlı soğutulduğu, bir sonraki yaşlandırma tavlamasından elde edilecek sonuç üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle de profilin kesit kalınlığı ve alaşımın kimyası göz önünde bulundurulmak zorundadır [1].

İnce kesitli ve matrisi katı çözelti sıcaklığı üzerinde terk eden profillerde hava ile soğutma yeterli olmaktadır. Fakat bazı alaşımlarda, özellikle 6061’de, malzeme katı çözelti sıcaklığına ulaşamayabilir ve bu nedenle çözelti oluşturmak için ilave bir tavlama gerekli olmaktadır. Bu da özel ısıtılma fırınlarında gerçekleştirilir ve yatay su jeti ya da dikey suya daldırma ile son bulur. Distorsiyonları önlemek için polimer glikol çözeltisi de kullanılabilir. İşlem sonrası profili düzeltme ve ısıtılma işleminden kalan iç gerilmeleri alma amacıyla %1,5-3 arasında gerdirmeye yapılması gerekir. Çizelge 4.4 ‘ de bazı 6000 serisi alüminyum alaşımlarının ısıtılma sıcaklıkları bulunmaktadır [1].

Çizelge 4.4 Bazı 6000 serisi alaşımlar için ısıtılma işlemleri [1]

Alaşım	özünme Isıl İşlemi			Sertleştirme Isıl İşlemi			
	Sıcaklık		Temper	Sıcaklık		Saat	Temper
	°F	°C		°F	°C		
6005	985	530	T1	350	175	8	T5
6061	985	530	T4	350	175	8	T6
6063	970	520	T4	350	175	8	T6
				360	182	6	T6
6066	990	530	T4	350	180	8	T6
6070	1015	545	T4	320	160	18	T6
6262	1000	540	T4	350	175	12	T6

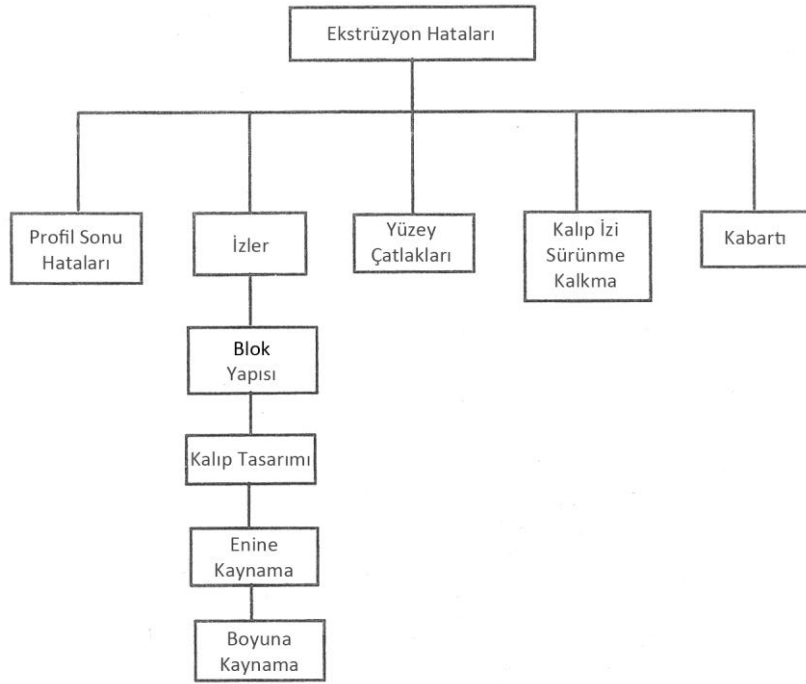
4.8 Mekanik ve Fiziksel Testler

Genellikle çoğu alüminyum ekstrüzyon imalatçısı için mimarı ve dekoratif amaçlı profiller için sertlik değeri tek kriterdir. Bununla birlikte endüstriyel ve yapısal uygulamalar için çekme, basma ve kesme testleri de gerekli görölmektedir. Bu testler için numuneler genelde ekstrüzyonun son kısmından alınırken, bazen baş, orta ve son kısımlardan alınan numunelerin kıyaslanması da gerekli olmaktadır [1].

Makro dağlama ile farklı noktalardan alınan örneklerin tane yapısını incelemek mümkündür. Özellikle profil çevresinde ve ince kesit kalınlığına sahip bölgelerin uç kısımları yeniden kristalleşme açısından yoğun alanlardır. Bununla birlikte dağlama yöntemi ile profilin son kısmındaki kalıntıları da tespit etmek mümkündür. Bu kalıntılar genelde bloğun dışındaki oksit tabakasının ekstrüzyona dahil olmasıyla meydana gelmektedir. Bu yüzden blok sonunda fireye ayrılacak kısmın yüzdesi iyi hesaplanmalı veya blok ile alıcı arasındaki sıcaklık farklı öyle ayarlanmalı ki alıcı yüzeyine yapışan oksit tabakası ayrılarak prosese dahil olmamalıdır [1].

4.9 Ekstrüzyon Hataları

şekil 4.11' de özellikle 6000 serisi alaşımlarında görölen ekstrüzyon hatalarına yönelik bir tablo bulunmaktadır. Ekstrüzyon fabrikalarında bu tip hataların tespiti ve önleyici tedbirler almak son derece gerekli olup, tüm ekstrüzyon prosesi hakkında bilgi sahibi olmayı gerektirmektedir.



Şekil 4.11 6000 serisi alaşımlarda tipik ekstrüzyon hataları [1]

Yukarıdaki ekstrüzyon hataları aşağıdaki değişkenlerin biri veya birkaçının etkisi altında gerçekleşebilmektedir:

- Blok dökümü
- Metalürjik değişkenler
- Blok ve alıcının ilk sıcaklıkları
- Ekstrüzyon oranı
- Matris tasarımı
- Ekstrüzyon hızı
- Ekstrüzyon sıcaklığı
- Yağlama sistemi

Genel olarak hataların çoğu maksimum verimlilik için blok fire miktarının düşük tutulmasından kaynaklanmaktadır. Direkt yağlamasız alüminyum ekstrüzyonunda bloğun oksitlenmiş dış yüzeyi öncelikle alıcıya yapışır ve prosese dahil olmaz. Fakat bloğun %70'inin basılmasının ardından ilerleyen süreçte, ıstampaya yakın olan metal içe doğru akmaya başlar. Toz boya veya sıvı boya ile sonlandırılacak yüzeyler için

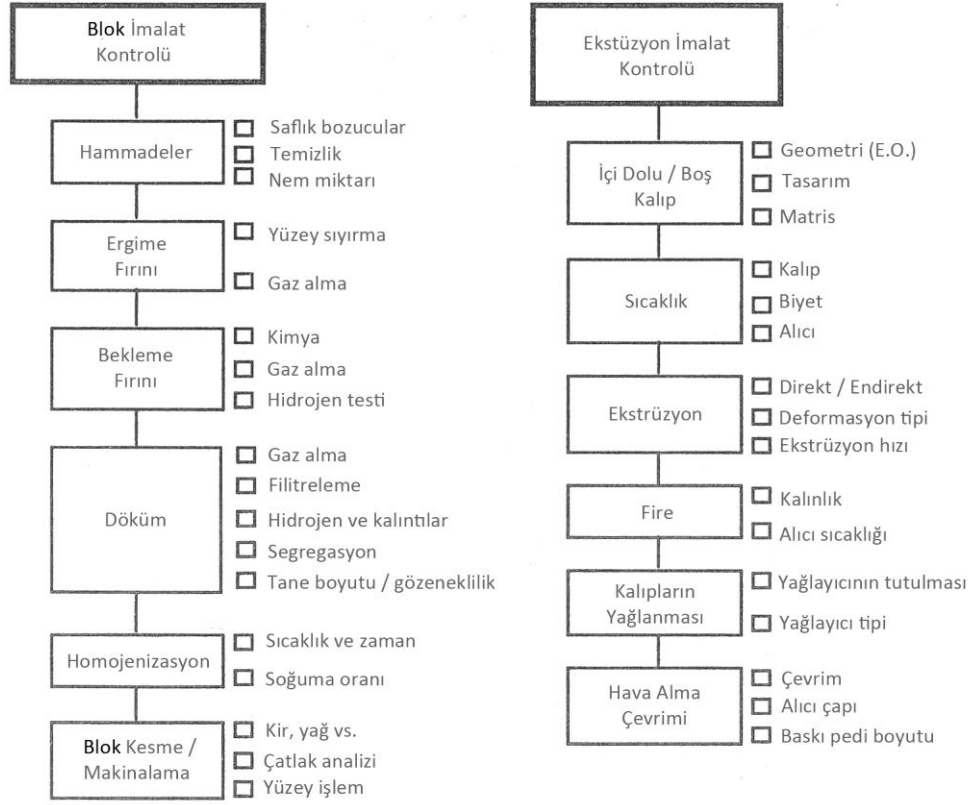
oluşacak yüzey hataları önemsiz gibi durabilir. Fakat eloksal kaplama yapılacak ve görsel açıdan önemli profiller için fire kalınlık kontrolü şarttır [1].

Yukarda sayılan hataların bazıları ise matris yüzeyine alüminyum oksit tabakasının yapışması ile meydana gelmektedir ve genellikle kaba bir yüzey ile sonuçlanmaktadır. Sıcak ekstrüzyon prosesinde oluşan alüminyum oksit, matris çeliğine yapışma eğilimindedir. Matris yüzeyinde oksit tabakası oluşmasının nedenleri şunlardır:

- Alaşımın kimyası
- Matriste sıcaklık artışı
- Sıcaklığı doğrudan etkileyen ekstrüzyon hızı
- Matris geometrisi
- Matrisin sertliği ve yüzey kalitesi

Genel olarak belirtmek gerekirse, matris yüzeyindeki sıcaklık artışı ile oksit tabakasının oluşumu birbiri ile doğru orantılıdır. Aynı zamanda blok çevrim sayısı arttıkça da bu film tabakası kalınlaşmaktadır. Bu oksit tabakası kaba bir yüzeye sahiptir ve doğal olarak bu kaba yüzey yapısı çekilen profile de yansımaktadır. Bunun yanı sıra matris yüzeyine yapışan çok sert oksit parçacıkları veya yabancı sert partiküller çekilen profilde boylu boyunca izler meydana getirirler [1].

Ekstrüzyon imalatçısının başlıca görevi profili en az hatayla üretmektir. Bu amaçla bazı kalite kontrol süreçlerini oluşturmak ve doğrulamak zorundadır. Şekil 4.12' de bu kalite unsurları sıralanmıştır.



Şekil 4.12 Blok döküm ve ekstrüzyon proseslerinde hatalara karşı kontroller

SONLU ELEMAN YÖNTEMLERİ (FEM) ve KARŞILAŞTIRILMALARI

Günümüz pazarında rekabetin artması nedeniyle alüminyum çeşitliliği hızla artmaktadır. Yüksek kaliteli, düşük maliyetli, kısa çevrimli yeni ürün tasarımları pazarda lider olmanın başlıca koşuludur. Bu nedenle proses ve matris tasarımı konularında sürekli bir iyileştirme söz konusudur. Bilgisayarların kabiliyetlerinin yükselmesi ve gelişen sonlu eleman analiz yöntemleriyle alüminyum ekstrüzyonundaki teknik sorunların çözülmesi daha kolay hale gelmiştir. Bu sayede hem ekipman kalitesi hem de ürün verimliliği iyileştirilmiş olmaktadır [11].

Alüminyum ekstrüzyonu serbest yüzeylerin, ısıya bağlı değişimlerin, büyük ölçekli deformasyonların ve kompleks geometrilerin üzerine yoğunlaşıldığı bir imalat yöntemidir. Geliştirilen üç boyutlu sonlu eleman yöntemleri ile tüm ekstrüzyon sürecini detaylı olarak hızlı ve pratik bir şekilde öngörmek mümkün olabilmektedir. Geliştirilen Lagrange, Euler ve yerine göre her iki yöntemin de kullanıldığı yaklaşımlar duruma göre yetersizlikler göstermektedirler. Bunun nedeni ekstrüzyon prosesinin başlangıç aşamasında değişken bir yapıya sahip olması, ardından kararlı bir sürece geçmesi ve sonlara doğru tekrar değişken olmasıdır. Bu nedenle alüminyum ekstrüzyonunun simülasyonu şu sıralar basit geometrilerle, küçük uzunluk/çap oranlarıyla, başlangıç fazı veya kararlı fazla sınırlandırılmış durumdadır [13].

Ekstrüzyon prosesinin sonlu eleman yöntemi ile modellenebilmesi için üç farklı formülasyon kullanılabilmektedir. Süreksiz güncellenmiş Lagrange formülasyonunda

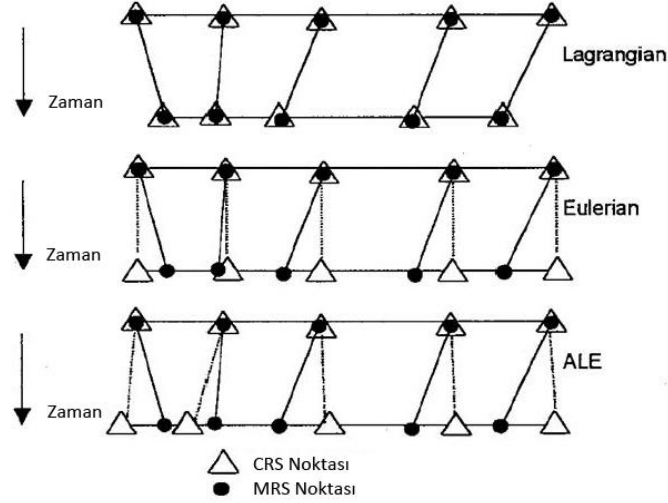
(UL) sonlu eleman yöntemi deformasyona uğrayan bloklara uygulanmaktadır. Bu yöntemde malzeme akışı sezgisel olarak tahmin edilebilmektedir. Analizin uzun zaman almasına rağmen, elde edilmesi çok güç hatta imkansız olan verileri tahmin etmesi mümkündür. Buna malzemenin odalara bölünmesi ve kaynama odasında birleşmesi, çıkışta profilin yön değiştirmesi veya burulması ve yüklerin öngörülmesi dahildir [12].

Kararlı durum Euler yaklaşımı (SS) ise blok ağını (mesh) uzayda sabitlenmiş olarak varsayar. Bu yaklaşım çok hızlıdır fakat süreksiz hallerdeki verileri ve termo-mekanik gelişmeleri gerçek hayattakine uygun veremez. Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) formülasyonu ise yukarda bahsedilen iki yöntemin arasındadır. Bu sayede UL yönteminde kararsızlığa neden olan sıkça ağ (mesh) yenileme prosedürü ile SS yöntemindeki çok fazla sapma gösteren veri problemlerinin önüne geçilmiş olmaktadır [12].

5.1 ALE Yöntemi

ALE yöntemi Euler ve Lagrange yöntemlerinin avantajlarını birleştirmek üzere oluşturulmuştur. Bu yöntem Hirt ve Donea tarafından katı-sıvı etkileşimini göstermek üzere modellenmiştir. Daha sonra ise katı fazda büyük deformasyonlara uğrayan malzemelerin modellenmesi amacıyla kullanılmıştır [12].

ALE yöntemi iki farklı ağ (mesh) kullanmaktadır. Bunlardan ilk CRS (Computational Reference Mesh System) olup, sonlu eleman hesaplamalarının yapıldığı ağıdır. İkincisi ise MRS (Material Reference Mesh System) olup, deformasyona uğrayan malzemeyi takip etmektedir. Şekil 5.1' de her üç yöntemde de kullanılan CRS ve MRS noktaları gösterilmektedir [12].



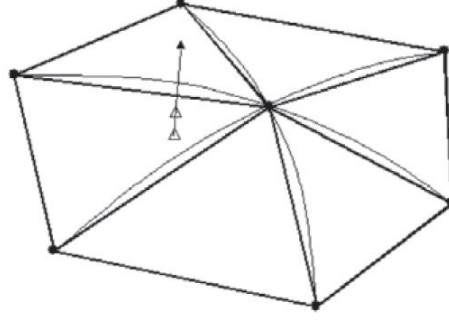
Şekil 5.1 Farklı FEM sistemlerinde CRS ve MRS bağlantıları

ALE işleminin başlangıcında CRS ve MRS ağı aynı noktalara sahip olacak şekilde oluşturulmaktadır. Zamanla ekstrüzyon prosesi ilerledikçe malzeme Lagrange formülasyonuna göre hareket ederken, Euler formülasyonunda ağı oluşturan noktalar uzayda sabit olarak görülür. ALE yönteminde CRS noktalarının konumları simülasyonun gerektirdiği şekilde yenilenir [12].

ALE yönteminde MRS ve CRS, ekstrüzyon yönünde hareket eden altı yüzlü veya dört yüzlü elemanlardan oluşmaktadır. CRS' nin hareketi üç yönde değişmektedir. Noktalar ekstrüzyon yönüne dik olan düzlem üzerinde Lagrange yöntemine göre güncellenirken, ekstrüzyon yönünde sabitlenmiştir. Bunu gerçekleştirmek için CRS ile MRS başlangıçta üst üste seçilmektedir. Lagrange yöntemi hesaplamalar için CRS' yi kullanmaktadır. Bu hesaplamalar sonucu CRS deformasyona uğradığında ve geometrisini değiştirdiğinde, yeni koordinatlar ve sayısal değişkenler elde edilir ve MRS' nin güncelleştirilmesi için kullanılır. Bu sırada CRS değiştirilmez. Zaten CRS her adım başlangıcında MRS ile üst üste bindirildiğinden, MRS enterpolasyonu yapıldığında, CRS' nin de yeni yeri bulunmuş olur. Ek olarak bir CRS enterpolasyonu gerekmez [12].

MRS güncellemesinin ardından, CRS' yi MRS ile kesişecek şekilde güncellemek gerekir. Fakat MRS noktaları ekstrüzyon yönünde pozisyonlarını korumaktadır. Genellikle CRS noktalarının güncellenmesi MRS yüzeyi üzerine iz düşüm alınarak yapılmaktadır. Fakat MRS yüzeyi her zaman düz kalmaz. Bu durumda MRS yüzeyini bozmadan CRS' yi

güncellemek imkansız olur. Bunun için MRS noktaları eğrisel bir yüzey oluşturmak için kullanılır. Daha sonra CRS noktası bu yüzey üzerine iz düşürülür (Şekil 5.2) [12].



Şekil 5.2 MRS yüzeyine CRS izdüşümü [12]

CRS ve MRS güncellendikten sonra, noktaları bir daha üst üste binemez. Fakat MRS için CRS' nin güncellenmiş halinden yola çıkılarak hesaplamalar yapıldığından MRS' nin saklanması zorunlu değildir. ALE yöntemindeki bu ağ güncelleme yöntemi sayesinde blok ile matrisler arasındaki kontak tanımlamaları tutarlı kalmaktadır [12].

5.2 UL ve SS Yöntemleri

UL yöntemi matristen ayrılarak serbest kalan yüzeyleri tanımlamada çok başarılıdır. Fakat kompleks geometrilerde ve çok büyük deformasyonlarda ciddi sınırlamaları vardır. Bunun nedeni büyük deformasyonlar sonucu meydana gelen büyük ağ deformasyonları sonucu ve sıkça mecbur kalınan ağ yenilemesi (remesh) durumu yüzünden hesaplamaların sonuçlarının gerçeklikten uzaklaşmasıdır. Bu nedenle UL yönteminin ekstrüzyonun kararlı halinde kullanılması doğru sonuç verememektedir [13].

SS (Euler) yöntemi ise kompleks geometrilerde ve büyük deformasyonlarda başarılı sonuçlar verirken, serbest yüzey oluşumuna izin vermediği için ekstrüzyonun değişken fazında kullanılmaya uygun değildir. Bunun yanı sıra ekstrüzyon işleminin başlangıcındaki ani sıcaklık, gerilme, gerinim ve gerinim oranı değişimleri SS yönteminin başarısız olduğu noktalardır. Buna ilaveten kararlı durumda olsa bile kısalan bloğun ve uzayan profilin tanımlanması da SS yöntemi tarafından mümkün olmamaktadır [13].

Tüm bunlardan ötürü bu yöntemlerin kullanıldığı sonlu eleman analiz yöntemleri ya ekstrüzyonun hemen başındaki veya sonuna doğru olan kararsız bölgelerin analizi ya da

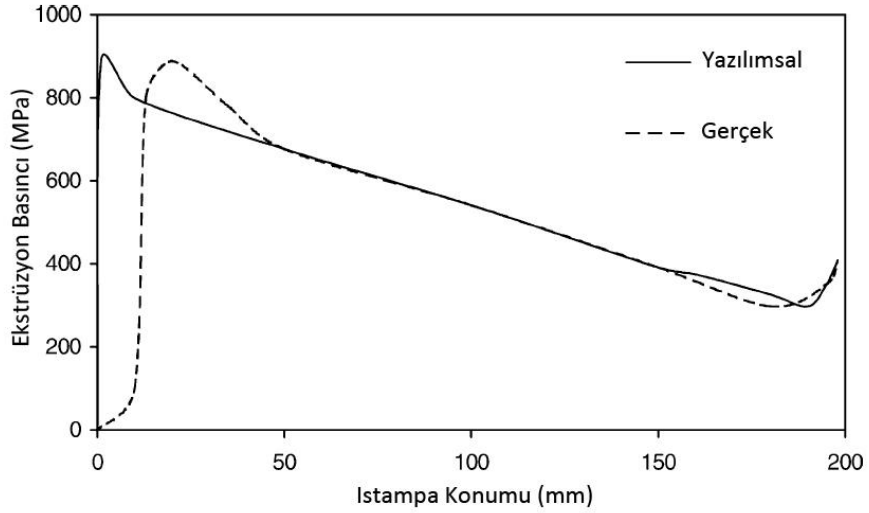
ekstrüzyonun kararlı halde bulunduğu durum ile sınırlı kalmaktadır. Bunun yanı sıra bilgisayar ile analiz zamanının çok uzun tutabilmesinden dolayı basit matris geometrileri, gerçek dışı blok boyutları ve düşük blok uzunluğu/çapı oranlarında kalınması nedeniyle pratiklikten çıkmaktadırlar [13].

FEM DESTEKLİ EKSTRÜZYON PROSESİ İNCELEMESİ ve EKSTRÜZYON PARAMETRELERİNİN ANALİZİ

Önceki konular içerisinde belirtildiği gibi sonlu eleman analiz yöntemleri günümüzde ekstrüzyon işlemleri öncesi hazırlıklarda bir standart işlem haline gelmiştir. Bu sayede matris tasarımı ve deneme-yanılma işlemlerindeki zaman ve maliyet kayıpları en aza indirilmektedir. Bu konu başlığı altında bugüne kadar yapılmış ve literatürde örnek olarak gösterilmiş bazı sonlu eleman analizlerini inceleyip, aynı zamanda ekstrüzyon prosesi içerisinde değişim gösteren veya önceden seçilen önemli parametreleri açığa kavuşturacağız. Bu sayede sonlu eleman analiz yazılımlarının ekstrüzyon prosesindeki güvenilirliğini de ortaya koymuş olacağız.

6.1 FEM ile Ekstrüzyon Basıncı Analizi

Şekil 6.1’ de tipik bir ekstrüzyon işlemindeki basınç ve ıstampa konumu verilerinden oluşturulmuş bir grafik bulunmaktadır. Kesikli çizgilerle gösterilmiş olan grafik gerçekteki verileri gösterirken, düz çizgi ile gösterilen grafik ise sonlu eleman analiz programı ile elde edilmiştir [13].



Şekil 6.1 Ekstrüzyon basıncı ve ıstampa konum ilişkisinin yazılımsal ve gerçek bulgularının kıyası [13]

Grafiklerden anlaşılacağı gibi, proses başlangıcında basınç eğrisi simülasyonda bir anda yükselirken, gerçekte basınç gelişimi bu şekilde olmamaktadır. Bunun başlıca nedeni normalde bloğun çapının alıcının çapıyla eşit olmamasıdır. Bu nedenle de bloğun alıcıyı tam olarak doldurması sırasındaki dövme işleminin sonlu eleman analizinde hesaba katılmamasından ileri gelmektedir. Çünkü bloğun alıcıya yerleştirilmesi ve merkezlenmesinde kolaylık sağlamak için genelde blok ve alıcı iç çapları aynı seçilmektedir [13].

Blok kalıba doğru sıkıştırılmaya başlandığında sonlu eleman yazılımları elastik deformasyonları hesaba ya hiç katmamakta veya belirli bir yaklaşım ile öngörmektedir. Bunun nedeni analiz yazılımlarının daha çok ekstrüzyonun büyük kısmını oluşturan plastik deformasyona odaklanmasıdır. İlk baştaki basıncın pik yapmasının ardından, ekstrüzyon basıncında ani ama kısa bir düşüş görülmektedir. Bu da matristen çıkışın başladığı ana kadar sıcaklıkta ani yükselme olması ve yüksek sıcaklıkta plastik deformasyonun da daha az basınç gerektirmesinden ileri gelmektedir. Bu düşüşün ardından proses kararlı bir hale oturur ve basınçta, artan ıstampa hareketiyle doğru orantılı bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu düşüş bloğun sürekli kısalmasından ve doğal olarak blok-alıcı temas alanının azalması sonucu sürtünmenin azalmasından kaynaklanmaktadır. İleride belirtileceği gibi prosese boyunca sürekli sıcaklık yükselmesi de basınçtaki sürekli düşüşün diğer bir nedeni olmaktadır [13].

Prosesin sonuna yaklaşıldığında ise ekstrüzyon basıncında ani bir yükselme başlamaktadır. Prosesin başından beri doğrusal akışa yakın olarak akan metal, proses sonuna doğru dar bir alan kaldığından radyal bir akışa zorlanmaktadır. Bu da metalin hem kendi iç sürtünmesinden ileri gelen hem de ıstampa ucundaki baskı pedine sürtünmenin neden olduğu bir basınç artışına sebep olmaktadır. Hem simülasyon hem de pratik grafiklerinde bunu gözlemlmek mümkündür. Fakat aralarındaki fark simülasyondaki ani yükselişin çok geç başlamasıdır. Alışılmış simülasyon yazılımlarında bloğun kimyası analizlere dahil edilmemektedir. Blok yüzeyindeki oksit tabakasının kalınlığı arttıkça, proses sonuna doğru görülen radyal akış daha erken başlamaktadır. Bu durum çeşitli araştırmalarda yapılan kafes-model testlerinde de kanıtlanmıştır. Sonuç olarak blok malzemesi, baskı pedi ile blok sürtünmesi, sıcaklık, matris ağzı ile blok çapı arasındaki radyal mesafe farkı ve blok yüzeyi kimyası proses sonu basınç artışı üzerinde etki eden nedenlerdir. Bundan ötürü sert alaşımlarda bloğun bazen %15' i gibi büyük bir kısmı bile fireye atılabilmektedir [13].

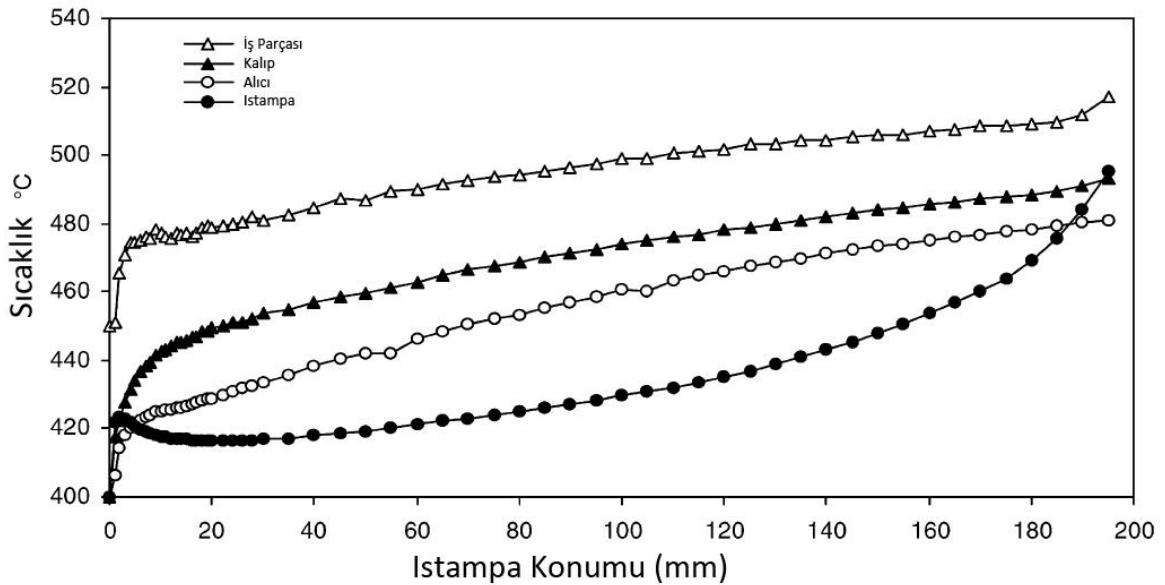
Basınç ile ilgili tüm bu analizler göstermektedir ki ekstrüzyon prosesi parametreler açısından ilk başta değişken hal, sonrasında kararlı hal ve daha sonra tekrar değişken hal ile gelişmektedir. Yapılan kıyaslamalar ile de anlaşılabileceği gibi, öngörü amaçlı yapılan simülasyonlar çok değerli veriler ortaya koymaktadır. Bu değerlerin gerçekteki verilerle birebir örtüşmesi beklenemez. Buna rağmen maksimum ekstrüzyon basıncı tahmini, izotermal ekstrüzyon gerçekleştirmek için ekstrüzyon basıncı-ıstampa pozisyonu optimizasyonu ve bloğun fireye ayrılan kısmının optimize edilmesi için gerekli iyileştirmelerin yapılması amacıyla sonlu eleman analiz yazılımlarının kullanılması zaman ve maliyet açısından önemli karlar sağlayabilir [13].

6.2 FEM ile Sıcaklık Oluşumu Analizi

Optimum ekstrüzyon işleminin iyi bir sıcaklık kontrolü ile gerçekleştirilir. Proses boyunca sıcaklık bloğun hem kesiti boyunca hem de uzunluğu boyunca farklılık göstermektedir. Fakat verimlilik, makro-mikro yapı, mekanik özellikler, boyutsal kararlılık açısından ulaşılan maksimum sıcaklık etkili olmaktadır. Proses boyunca sıcaklık ölçümleri yapmak çok zordur ve genelde tahmine dayalı ilerlemektedir. Matris sıcaklığı ölçümleri veya matristen çıkan profil sıcaklığı ölçümleri hiçbir zaman maksimum sıcaklığı gösteremez.

Çünkü maksimum sıcaklık matris içindeki malzemenin iç kısmında ve matris-malzeme temas yüzeylerinde açığa çıkmaktadır. Matristeki düz yüzeyler, köşeler veya kanallar malzemeyi lokal olarak farklı sıcaklıklara çıkartmaktadır [13].

Aşağıdaki şekilde sonlu eleman yazılımı ile elde edilmiş grafikler yer almaktadır. Bunlarda iş parçası, matris, alıcı ve ıstampadaki proses boyunca sıcaklık gelişimleri görülmektedir. İçlerinde en önemlisi ise iş parçasının ulaştığı maksimum sıcaklıktır. Görüldüğü gibi iş parçasında proses başlangıcındaki ani 20°C ' lik sıcaklık artışının ardından düzenli ve eğimi çok daha az bir artış söz konusudur. Totalde ise 60°C ' lik bir artış analizler sonucu gözlemlenmektedir. Bloğun başlangıçta sahip olduğu üniform sıcaklık ve sabit ıstampa hızlarında proses boyunca iş parçası sıcaklığının sürekli artması beklenen bir durumdur. Ekstrüzyon prosesinde sıcaklık oluşumunun büyük kısmı sürtünmelerden ve malzeme içindeki deformasyondan kaynaklanmaktadır. Malzeme içersinde ise %10 gibi çok küçük bir mekanik enerji hapsolmaktadır. Bu enerji dislokasyonlar, tane sınırları ve diğer mikro yapı değişimleri gibi kristal hatalarının oluşturulmasında harcanmaktadır [13].



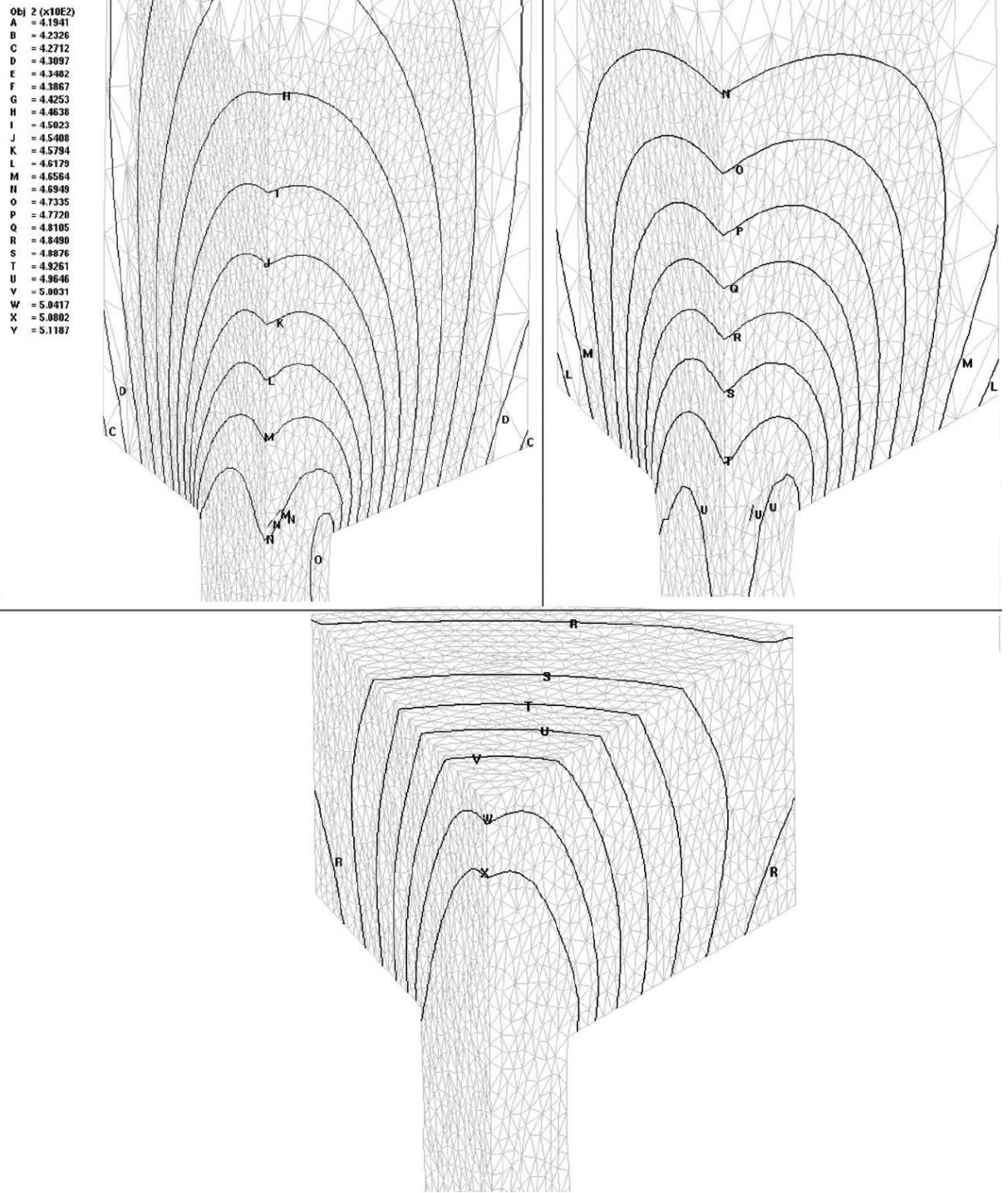
Şekil 6.2 İş parçasında ve ekstrüzyon takımlarında sıcaklık gelişimi [13]

İlk değişken halin sonunda sıcaklık artış hızındaki azalmanın çeşitli nedenleri vardır. Bunlar şöyle sıralanabilir;

- Ekstrüzyon basıncındaki azalmaya da neden olan ve malzemenin plastik şekil değiştirmesi için harcanan mekanik işteki düşüş,
- Azalan blok uzunluğu ile birlikte azalan sürtünme sonucu daha az ısı oluşumu,
- Matris ağzından çıkış yapan profilin sıcaklığın bir kısmını beraberinde uzaklaştırması.

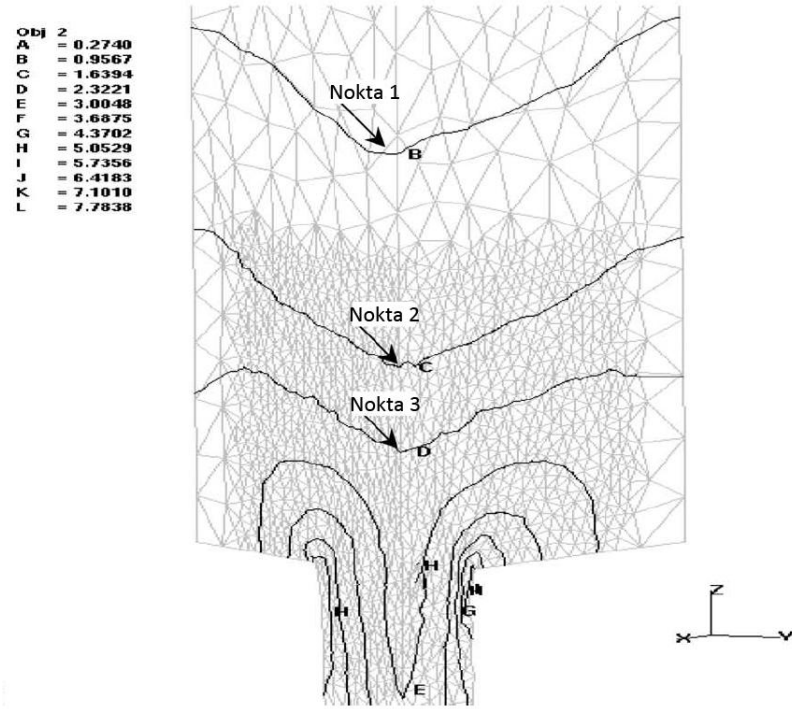
Şekil 6.2’ de kullanılan takımlardaki sıcaklık değişimleri de görülmektedir. Alıcı ve matraste proses başlangıcından itibaren sürekli bir yükseliş bulunmaktadır. Fakat ıstampa sıcaklığında proses başlangıcında ani bir yükselme ve sonrasında düşüş olmaktadır. Blok sıcaklığı başlangıçta tüm takımların sıcaklığına göre ortalama 50⁰C daha yüksek seçilmektedir. Bu nedenle proses başında ıstampa ile bloğun temas etmesi sonucu, ıstampa sıcaklığında ani bir yükselme gözlemlenmek mümkündür. Ardından bloğun sadece ıstampa ile değil alıcıyla da temas halinde bulunması ıstampa civarındaki blok parçasında ve dolayısıyla ıstampa sıcaklığında düşüş olmasının nedenidir. Fakat sonrasında deformasyon bölgesinden sıcaklığın bloğun diğer bölgelerine de taşınması sonucu sıcaklık artışı blok ile temas halindeki ıstampayı da etkilemektedir [13].

Şekil 6.3’ de prosesin başlangıcında, ortasında ve son kısmında sıcaklık dağılımlarının nasıl olduğunu bir analiz örneği ile görebiliriz.

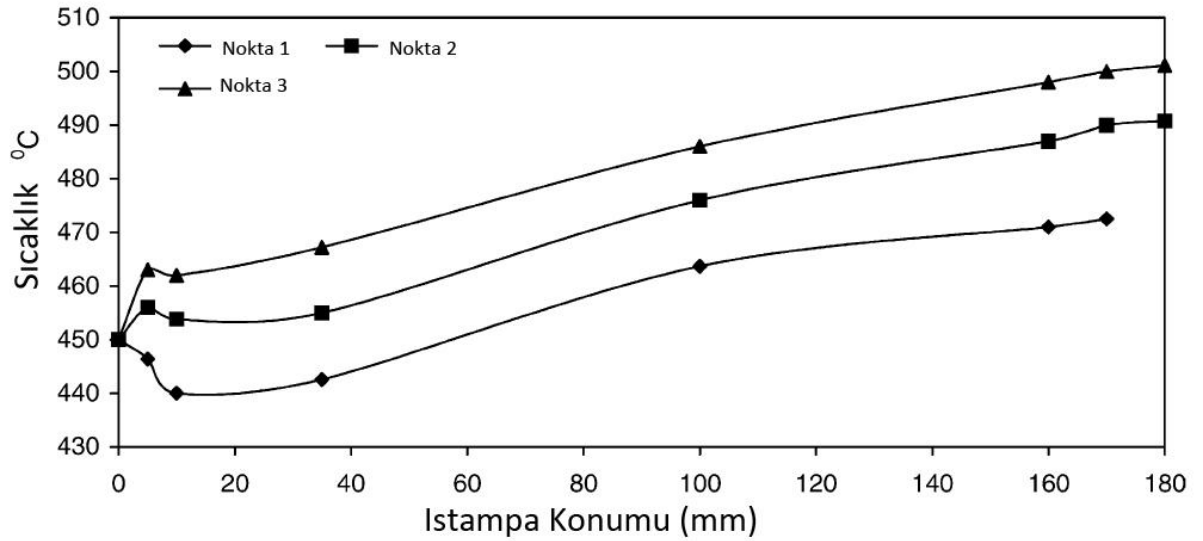


Şekil 6.3 Bloğun %4 - %50 - %95' nin basılmış olduğu durumlarda sıcaklık dağılımları [13]

Bununla birlikte yukarıda söz edilen sıcaklık değişimlerinin deformasyon bölgesinden uzaklaştıkça nasıl değiştiğini de Şekil 6,4 ile belirtmek mümkündür.



Şekil 6.4 Deformasyon bölgesi ve civarında seçilen noktalar [13]



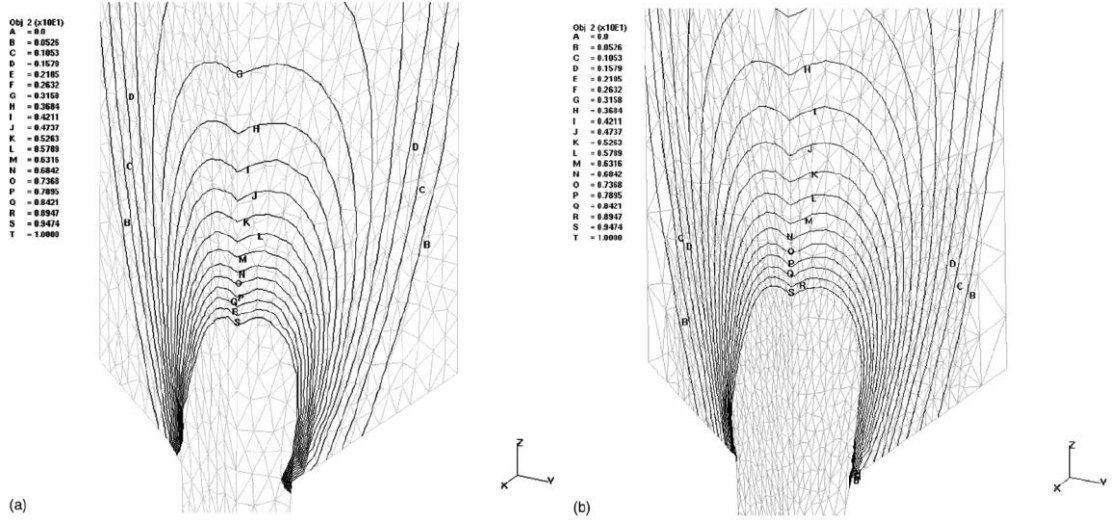
Şekil 6.5 Deformasyon bölgesinin içinde ve dışında seçilen noktalardaki sıcaklık gelişimi [13]

Şekil 6.5' de görüldüğü gibi matris üzerinde en yüksek sıcaklık çıkış bölgesinde görülmektedir. Bunun nedeni yine matris-blok sürtünmesi ve deformasyon olmaktadır. Matris ağzı formuna göre (profil şekli de denilebilir) sıcaklığın homojen olarak dağılmama ihtimalinin de olduğunu tahmin etmek güç değildir. Sıcaklık ve basınç ile ilgili her türlü homojen olmayan durum ve bu parametrelerin sürekli olarak değişimleri

matris yorulmasını beraberinde getirmektedir. Bu durumda optimizasyonu düşünmek zorunlu hale gelmektedir. Bu yüzden ya matris ağzının güçlendirilmesi yoluna gidilmekte veya basınç ve sıcaklığı matris çıkış bölgesinde sabit tutabilmek için izotermal ekstrüzyonu uygulamak tercih edilmektedir [13].

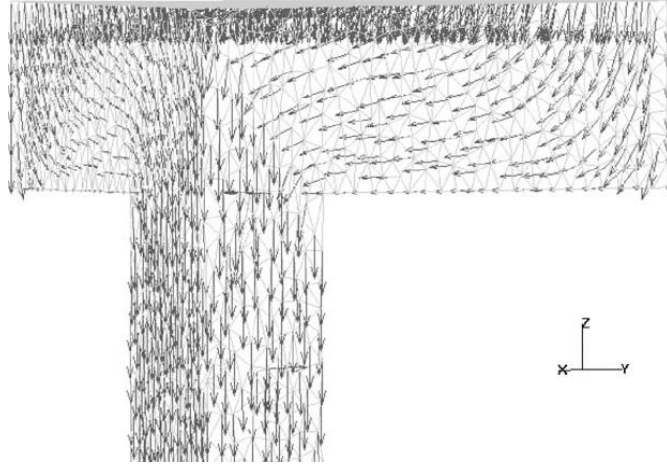
6.3 FEM ile Hız Alanları Analizi

Alüminyum ekstrüzyonundaki alışlagelmiş görüşler, ilk plastik deformasyon basınının yenilmesinden ve profilin kalıbın ucundan çıkmasının ardından prosesin kararlı halde devam ettiğini ve bloğun kesitindeki herhangi bir noktada hızın sabit olduğunu belirtmektedir. Sonlu eleman analiz yazılımları sayesinde tüm çevrim boyunca birçok değişken gibi malzeme akış hızının da ön görülmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 6.6 Bloğun a)%4 ve b)%80 basılmış halindeki hız alanları dağılımı [13]

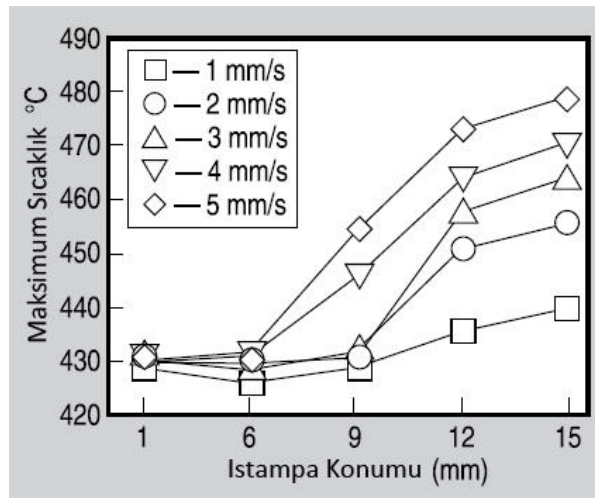
Yukarıdaki şekillerde proses başlangıcında ve sonrasındaki kararlı halde hız akışının nasıl gerçekleştiğini görmekteyiz. Bu iki şekli karşılaştırdığımızda prosesin ilerledikçe bloğun ön kısmında, ölü metal bölgesi civarında, malzeme akışının daha aktif hale geldiğini görebiliriz. Aynı zamanda proses ilerledikçe bloğun arka kısmındaki malzemenin de gittikçe daha hızlı bir şekilde prosese dahil olduğunu, bu bölgedeki artan hız ile kanıtlamak mümkündür. Proses sonuna doğru ise önceden de bahsedildiği gibi radyal akış daha belirgin olmaktadır. Bu da aşağıdaki şekilde görülmekte ve proses sonundaki basınç yükselmesine de sebep oluşturmaktadır [13].



Şekil 6.7 Bloğun %97' sinin basılmış olduğu bir uygulamada hız vektörlerinin dağılımı [13]

Bu noktada prosesin kararlı hali bozulmuş olmakta ve ne Lagrange yöntemi ne de Euler yöntemi buradaki proses dinamiklerini tam olarak analiz edememektedir. Bu nedenle çoğu sonlu eleman analiz yazılımı bu noktada gerçekçi sonuç vermeyeceğini belirtmekte ve bloğun, gerekli profil hacminden %10-15 civarında daha yüksek hacimde seçilmesini tavsiye etmektedir [13].

Verimliliği artırmak için ekstrüzyonda daha yüksek ekstrüzyon oranlarına ulaşmaya çalışmak doğru bir yargıdır. Fakat yüksek ekstrüzyon oranlarına sahip bir proseste ıstampa hızının daha yavaş olacağını da ihmal etmemek gerekmektedir. Bunu standart bir içi boş profilin ekstrüzyonunda elde edilen değerlerle örnekleyerek açıklamak mümkündür.

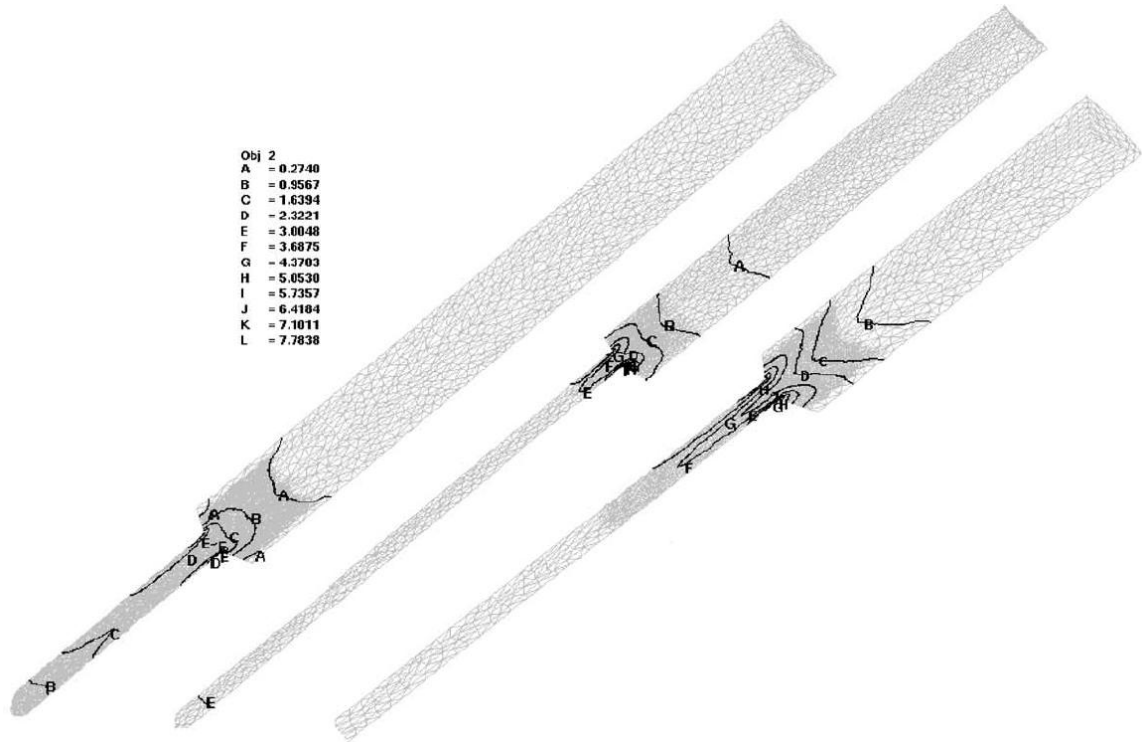


Şekil 6.8 Farklı ıstampa hızlarında maksimum çıkış sıcaklıkları [12]

Şekil 6.8’ de görüldüğü gibi örnek bir profil ekstrüzyonunda ıstampanın 1 mm/s hızıyla hareket etmesini gerektirecek bir ekstrüzyon oranında verimliliği yükseltmek amaçlanırken matris çıkış sıcaklığına önce bir düşüş meydana gelmekte ve ardından yükseliş başlamaktadır. Bu da verimliliği artırmak amaçlanırken sıcaklık gibi önemli bir parametrenin dalgalanmasına neden olunmakta ve bu yüzden profil kalitesinde homojenlikten uzaklaşılacağı tahmin edilebilmektedir. Bununla birlikte düşük hızlarda genelde tercih edilen çözelti sıcaklığının üstüne çıkmak mümkün bile olamamaktadır. Bunun yanı sıra aynı ekstrüzyon oranında ıstampa hızının artırılması düşünülebilir. Fakat unutulmamalıdır ki ıstampa hızını artırmak gerekli ekstrüzyon basıncı üzerinde yükselmeye neden olmaktadır. Bu basınç ise hiçbir zaman limitsiz olmayıp, kalıbın dayanımıyla sınırlandırılmaktadır [12].

6.4 FEM ile Gerilme ve Gerinim Analizi

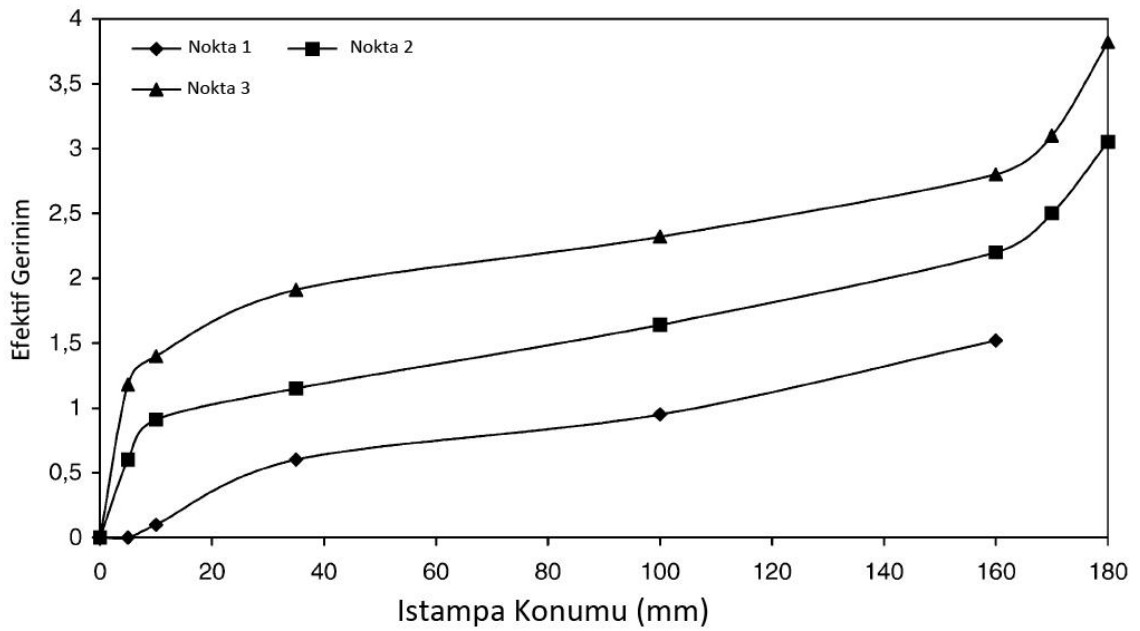
Ekstrüzyon prosesinin kararlı hal olarak kabul edilen fazındaki kararsızlığını gerinim ile ıstampa konumunu bir grafiğe dökerek açıklamak mümkündür. Şekil 6.9’ da prosesin farklı aşamalarında blok içersindeki gerinimlerin nasıl değiştiğini görmek mümkündür.



Şekil 6.9 Bloğun %4 - %17,5 - %50' nin basılmış olduğu durumlarda efektif gerinim dağılımları [13]

Proses ilerledikçe deformasyonun bloğun arka kısımlarına doğru ilerlemesi, başka bir deyişle proses ilerledikçe bloğun arka bölgesinin prosese dahil olmaya başlaması, söz tarafından fiziksel modelleme tekniği ile yapılmış başka bir teorik çalışmayla da örtüşmektedir [13].

Deformasyon bölgesi civarında gerininin nasıl değiştiği ise Şekil 6.10' da görülmektedir. Proses başlangıcında deformasyon bölgesinin çekirdeğinde gerinimde ani bir yükselme meydana gelmektedir. 2 numaralı nokta ile gösterilen alanda belirli bir mesafeden sonra gerinim yükselme eğimi yumuşarken, 3 numaralı bölgede (çekirdekte) artış devam etmektedir. 1 numaralı olan ve çekirdekten daha uzak olan bölgede ise gerinim artışı prosesin değişken fazından sonra artış göstermeye başlamaktadır. Bloğun %80' i çekildikten sonraki bölümde ise 2 ve 3 numaralı bölgelerde gerinimde ani bir yükselme meydana gelir. Yine bu durum ekstrüzyonun kararlı kabul edilen fazında halen birçok parametrede değişiklik olduğunu gösteren başka bir durumdur [13].

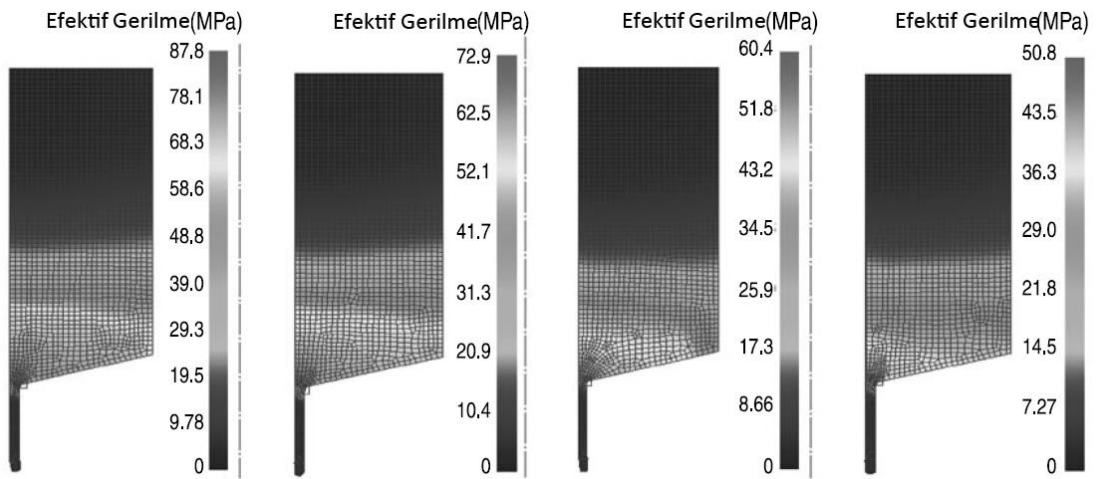


Şekil 6.10 Deformasyon bölgesinin içinde ve dışında seçilen noktalardaki efektif gerinim gelişimi [13]

Blok deformasyona uğrarken sıcaklıktaki değişimler diğer parametrelerin sürekli değişmesine neden olmaktadır. Genel olarak sıcaklığın artması malzemenin akma gerilmesinde daha fazla düşüşe neden olmaktadır. Sıcaklığın bloğun arka bölgesine

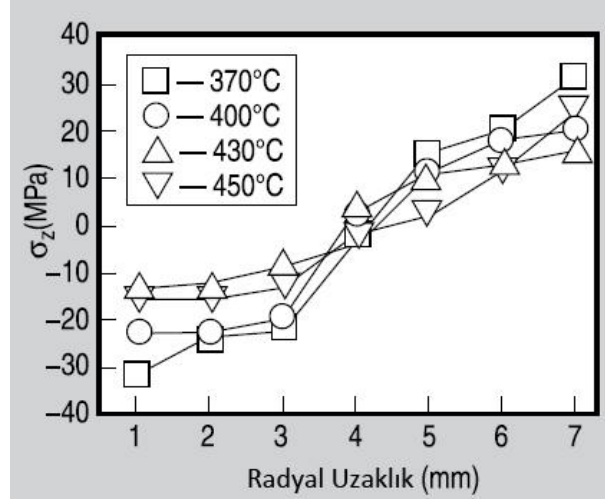
doğru ilerlemesi ile buradaki malzemenin deformasyona daha hazır halde olmasını ve bu nedenle de gerininin artmasını sağlamaktadır. Bu durum deformasyon bölgesinin genişlemesi ve ölü metal bölgesinin ufalması ile desteklenebilir [13].

Ekstrüzyon sıcaklığının seçimi sıcak ekstrüzyonun en önemli noktasıdır. Çok düşük blok sıcaklığında malzemenin deformasyon direnci yüksek olacaktır (Şekil 6.11). Bu durumda matris ömrü azalacaktır. Blok sıcaklığı gereğinden yüksek seçilirse profil yüzeyinde oksidasyon artacak ve başka yüzey hatalarıyla birlikte kalitesiz bir profil elde edilecektir. Deformasyona halindeki blok içersinde çok farklı sıcaklık dağılımları olması bloğun farklı bölgelerinin birbirinden çok farklı deformasyon dirençlerine sahip olması anlamına gelmektedir. Sıcaklık farklı yüzünden ortaya çıkacak termal gerilme farkları ve deformasyonun homojen olarak dağılmaması sonucunda gerilmenin uygunsuz dağılımı söz konusu olacak ve elde edilen profilde hatalar meydana gelecektir. Bu nedenle sıcaklık kontrolü bu açıdan da önemli olmaktadır [11].



Şekil 6.11 Farklı sıcaklıklarda efektif gerilme dağılımı (370-400-430-450 °C) [11]

Matris ağzındaki sürtünme direncinden ötürü malzeme yüzeyi ek bir çekme gerilmesine maruz kalır. Bu gerilme belirli bir değerin üzerine çıktığında ise yüzeyde çatlaklar meydana gelir. Çatlak oluşumu hem hıza hem de sıcaklığa bağlı bir faktördür [11].



Şekil 6.12 Merkezden farklı uzaklıklarda eksenel gerinim farklılıkları [11]

Şekil 6.12 sıcaklığa ve radyal konuma bağlı olarak eksenel gerilmedeki değişimi göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda merkeze yakın noktalarda basma gerilmesinin hakim olduğu ve merkezden yüzeye doğru (dışarı) gidildikçe basma gerilmesinin yerini çekme gerilmesinin aldığını görmekteyiz. Sıcaklık artışıyla birlikte merkez ile yüzey arasındaki çekme-basma gerilmesi farkının azaldığı da aynı grafikte açıkça görülmektedir. Fakat belirli bir değerin üzerinde bu fark tekrar artmaktadır. Bu sayısal analiz sonucunda daha yüksek sıcaklıklarda profilin içinde matristen çıktıktan sonra kalan gerilmenin düştüğünü fakat belirli bir değerden sonra tekrar artışa geçtiğini söylemek mümkündür. Bunun nedeni ise belirli bir sıcaklıktan sonra alüminyum yüzey ile matris yüzeyi arasındaki adezyon kuvvetinin artmasıdır [11].

Sıcaklık matris açısından da önemli olmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklar ekstrüzyonun daha kolay yapılabilmesini sağlarken, tane büyümesine de zemin hazırlamış olmaktadır. Proses öncesi kalıbın ısıtılması gerekirken bu sıcaklık bloğun sıcaklığından biraz daha az olmalıdır. (Yaklaşık 50°C kadar) çok yüksek matris sıcaklığı kalıbın dayanımını doğrudan düşürecek ve ısıl yorulma olarak kendini gösterecektir. Daha yüksek blok sıcaklığında ise matris yine olumsuz etkilenecektir [11].

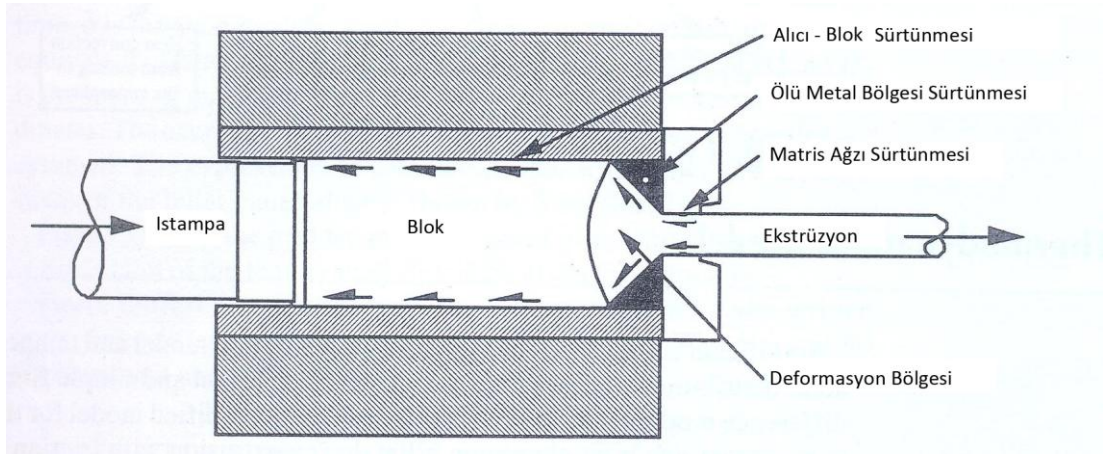
EKSTRÜZYONUN TERMODİNAMİĞİ ve ALÜMİNYUMUN ISIL İŞLEMİ

Bilindiği gibi termodinamik kelimesi hareket halindeki nesneye ait sıcaklık çalışmalarını belirtmektedir. Bütün termodinamik sistemler bir enerji kaynağına ve oluşan ısı enerjisini kaynaktan alıp taşıyacak bir taşıyıcı ortama sahiptirler. Ekstrüzyon da bir termodinamik sistem içermekte olup, ısı oluşumu hem deformasyon hem de sürtünme nedeniyle oluşmaktadır. Bu ısı enerjisinin bir kısmı çekilmiş profil üzerinde kalırken, bir kısmı da alıcıya, takımlara iletilir ve diğer bir bölümü de henüz çekilmemiş bloğun sıcaklığını artırır. Ekstrüzyondaki bu termodinamik faaliyetler 1960' tan beri birçok araştırmacı tarafından incelenmektedir. Günümüzde ise sonlu elemanlar yöntemi ile ekstrüzyondaki sıcaklık oluşumlarına da öngörüler getirilebilmektedir [1].

Bu konu başlığı altında ekstrüzyonun termodinamiğini inceleyeceğiz. Bunun yanı sıra alüminyumun faz diyagramları yardımıyla hem alüminyumun ısı işlemleri üzerinde duracağız hem de ekstrüzyondaki sıcaklık kontrolünün çekilen profilin kimyasal yapısı yönünden de ne kadar önemli olduğunu vurgulayacağız.

7.1 Direkt Ekstrüzyonda Isı Dengesi

Şekil 7.1' de ekstrüzyon işlemindeki ısı kaynaklarını görebilmek mümkündür. Deformasyon işinin büyük bir kısmı ısı enerjisine dönüşmektedir. Bu sıcaklık artışı yüz santigrat dereceyi bulmaktadır. Üç farklı noktada bulunan sürtünme işi ise hem biyette hem de çekilmiş profiledeki sıcaklığı değiştirmektedir.

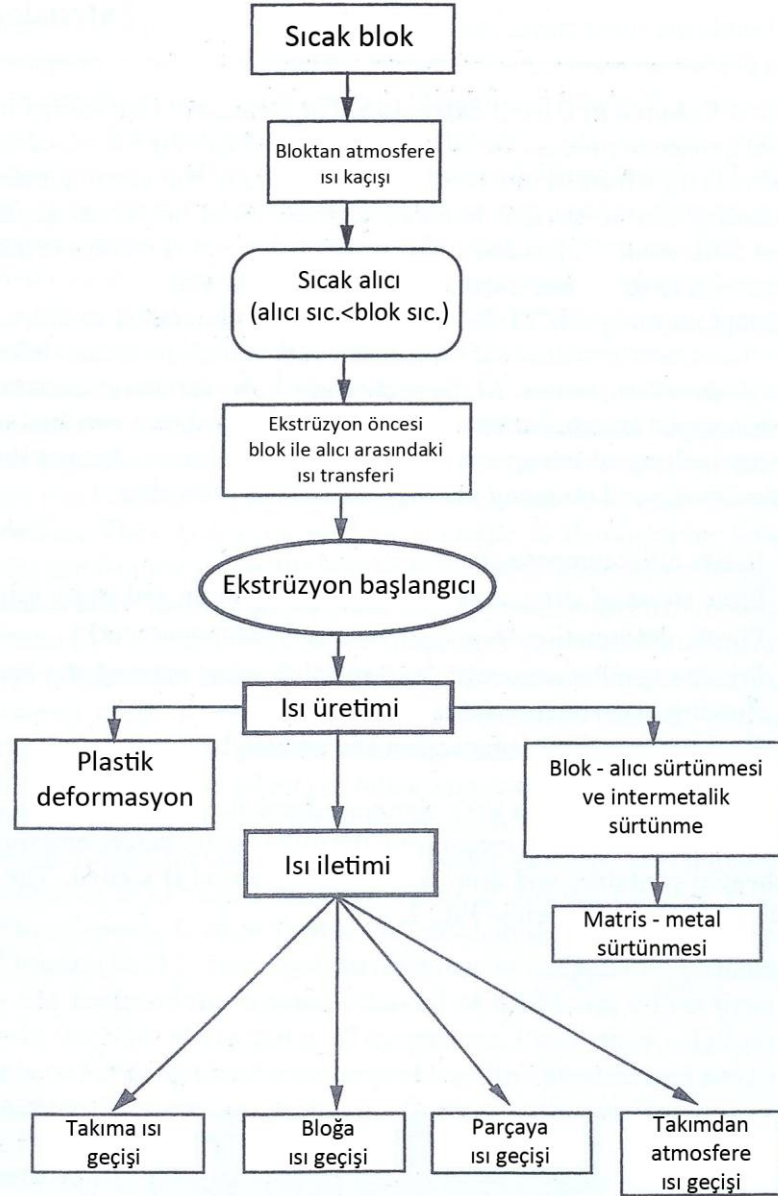


Şekil 7.1 Direkt ekstrüzyonda sürtünme mekanizmaları

Sıcaklık ekstrüzyondaki en önemli parametrelerden biridir. Sıcaklığın artması malzemenin akma gerilmesini düşürür ve bu nedenle de deformasyon kolaylaşır. Aynı zamanda lokal sıcaklığın çok yükselmesi de ekstrüzyon hızını sınırlayıcı faktör olmaktadır. Çünkü lokal sıcaklıktaki çok yüksek artış beraberinde alüminyumun ergimesine neden olacaktır. Ekstrüzyondaki sıcaklık değişimleri şu faktörlere bağlıdır:

- İlk blok sıcaklığı
- Belirli bir sıcaklıkta, gerinimde ve gerinim oranında alaşımın akma gerilmesi
- Plastik deformasyon
- Sürtünmeler
- Isı transferi (kondüksiyon ve konveksiyon yoluyla)

Endüstriyel kapsamda düşünüldüğünde ekstrüzyonda sıcaklık değişimleri bloğun ön ısıtma fırınından alınmasından başlar, çekilen profilin dışarıya ısı yaymasıyla son bulur. Bu nedenle Şekil 7.2' de görüldüğü gibi daha geniş çaplı bir analiz gerekmektedir [1].

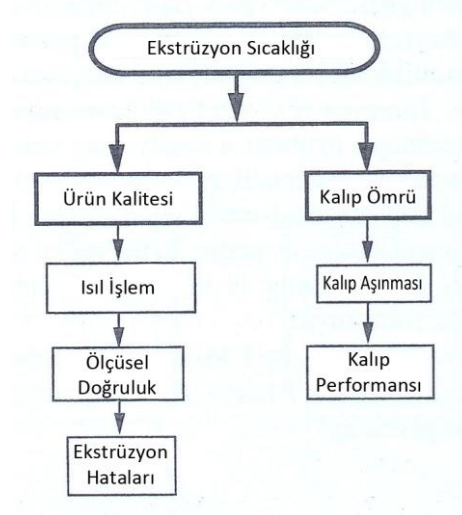


Şekil 7.2 Direkt ekstrüzyonda ısı dengesi

7.2 Önemli Değişkenlerin Sıcaklık Artışındaki Etkileri

Daha önceden de bahsedildiği gibi ekstrüzyon için en kritik sıcaklık, çekilen profilin çıkış sıcaklığıdır. Eğer deformasyon ve sürtünmeler ile üretilen ısı enerjisi dışarıya yayılan ısı enerjisinden daha büyük ise bu durumda sıcaklıkta bir artış olacağı şüphesizdir. Bunun tersi de aynen geçerlidir. Isı enerjisinin iletimi şüphesiz belirli bir zaman gerektirmektedir ve bu durum alaşıma, ekstrüzyon şartlarına ve belirli bir ıstampa hızının üzerinde ısıyı oluşturan asıl faktörlere bağlıdır [1].

Matrisin hemen çıkışında profilin sıcaklığı bazı nedenlerden ötürü çok önem taşımaktadır. Ekstrüzyon sıcaklığı ürün kalitesi ve matris ömrü açısından Şekil 7.3’ de görülen açılardan önemlidir. Ürün açısından düşünüldüğünde çıkış sıcaklığı ısı işlemleri, boyutsal toleransları ve ekstrüzyon hataları açısından belirleyici unsur olmaktadır. Matris açısından düşünüldüğünde ise aşınma ve performansta yine çıkış sıcaklığı belirleyici etken olmaktadır [1].



Şekil 7.3 Çıkış sıcaklığının etkileri [1]

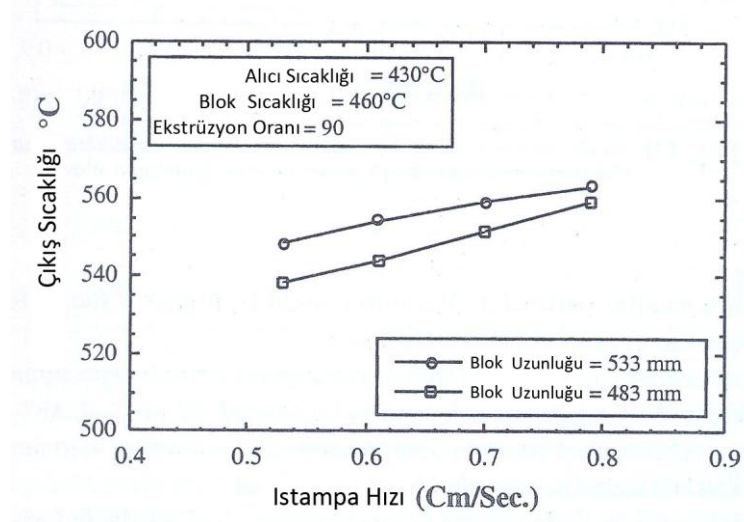
Blok içersindeki sıcaklık dağılımı birçok faktöre bağlıdır. Bunlar blok malzemesinin özelliği, sürtünme koşulları, ıstampa hızı, ekstrüzyon oranı, dış çevre ve matris tipidir. Bu faktörleri şöyle açıklayabiliriz:

- **Malzeme özellikleri:** Blok malzemesinin mekanik özellikleri deformasyon sonucu üretilen ısı enerjisi ve sınır bölgelerdeki sürtünme ile üretilen ısı enerjisi açısından belirleyici olmaktadır. Belirli bir sıcaklık, gerinim ve gerinim oranı koşulunda malzemenin akma gerilmesinin büyüklüğü üretilen ısı enerjisinin büyüklüğü açısından bir öngörü sağlar.
- **Sürtünme:** Sürtünme açısından bakılacak olursa sürtünme kayma gerilmesinin yüksekliği, sürtünme nedeniyle üretilen ısı enerjisini belirlemektedir.
- **Istampa hızı:** Ekstrüzyonda sıcaklık artışı ıstampa hızı ile doğru orantılıdır. Bunun nedeni artan gerinim oranında daha fazla ısı enerjisinin ortaya çıkması ve ıstampa hızı ile gerinim oranının doğru orantılı olmasıdır. Istampa hızı azaldıkça üretilen ısı

enerjisinin dışa yayımı için daha çok zaman sağlanmış olacaktır. Özellikle alüminyumun ısıyı çok iyi ilettiğini de unutmamak gerekir.

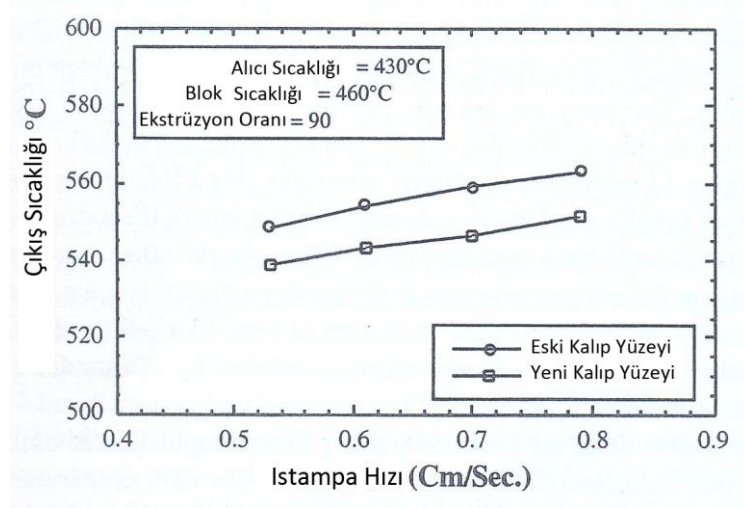
- Ekstrüzyon oranı: Yüksek ekstrüzyon oranında ortaya çıkan ısı enerjisinin de büyük olacağını tahmin etmek güç değildir. Buradaki neden yüksek gerinim sonucu plastik deformasyonun daha aşırı boyutlarda olmasıdır.
- Dış çevre uzunluğu: Matris geometrisini içine alan çemberin çapındaki büyüme, üretilen ısı enerjisini artırmaktadır. Bunun nedeni aynı matris ağzı uzunluğunda daha geniş çembere sahip matristeki sürtünme yüzeyinin daha büyük olacağıdır.

Sıcaklık ölçümleri ekstrüzyon parametreleri ile çıkış sıcaklığı arasındaki bağlantıları anlamakta oldukça yardımcı olmaktadır. Bu nedenle ekstrüzyon oranı, ilk blok sıcaklığı, ekstrüzyon hızı ve matris ağzı durumlarını içeren çeşitli testler araştırmacılar tarafından ele alınmıştır. Çıkış sıcaklıkları ise profilin matris ağzından hemen çıktığı anda ölçülmüştür. Bu testlerin sonucunda elde edilen grafiklerin yardımıyla sözü geçen değişkenlerin sıcaklık oluşumu üzerindeki etkilerini şöyle ele alabiliriz [1].



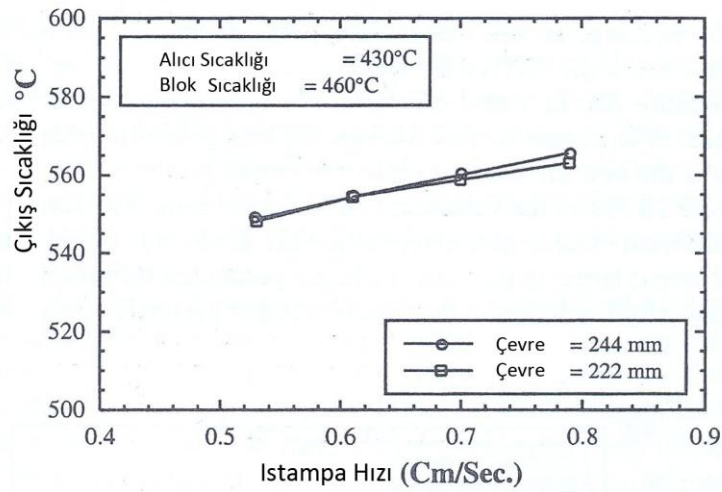
Şekil 7.4 6063 alaşımı için farklı blok uzunluklarında ıstampa hızı-çıkış sıcaklığı ilişkisi [1]

Şekil 7.4' te blok uzunluğunun çıkış sıcaklığına nasıl etki ettiğini görmekteyiz. Tahmin edilebileceği gibi blok uzunluğu artırıldığı zaman alıcı-blok sürtünme yüzey alanı daha geniş olmaktadır. Bu nedenle de ortaya çıkacak ısı enerjisinin büyüklüğü ve bu sayede sıcaklıktaki artış beklenildiği gibi olacaktır.



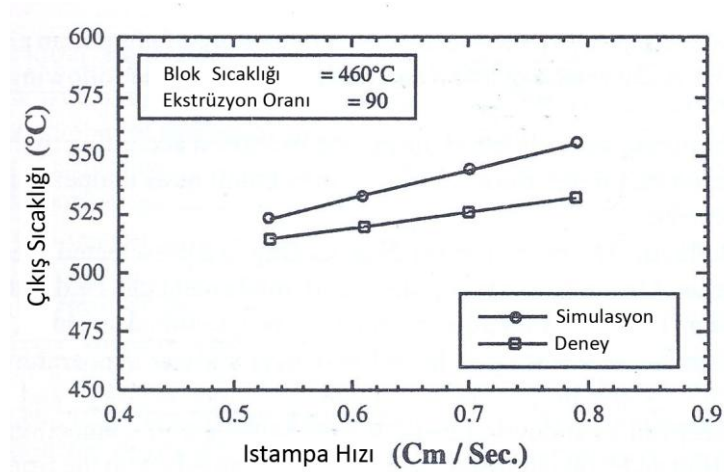
Şekil 7.5 6063 alaşımı için farklı matris yüzey durumları için ıstampa hızı-çıkış sıcaklığı ilişkisi [1]

Matris ağzının sıcaklık oluşum üzerindeki etkisi ise yukarıdaki grafikte görülmektedir. Yeni bir matris ağzı nitritlenmiş sert bir yüzeye sahiptir. Böyle bir yüzey alüminyumun üzerine yapışmasına engel olmaktadır. Fakat zamanla matris ağzının aşınması sonucu yumuşama meydana gelmektedir. Yumuşak matris ağzı ise alüminyumun üzerine yapışmasına engel olamamakta ve bu nedenle pürüzlü bir yüzey meydana gelmektedir. Kısacası yeni bir matris ağzında kayma sürtünmesi meydana gelirken, eskimiş bir matris ağzında yapışma sürtünmesi meydana gelmektedir. Tahmin edilebileceği gibi bu şartlar altında eski matris ağzında sürtünmenin daha fazla olması nedeniyle daha fazla ısı oluşumu söz konusu olmaktadır.



Şekil 7.6 6063 alaşımı için matris ağzını kapsayan çember çevresine dayalı olarak ıstampa hızı-çıkış sıcaklığı ilişkisi [1]

Yapılan çalışmalarda matris dış çevre uzunluğundaki artışın sıcaklığa etkisi de gözlemlenmek istenmiştir. Şekil 7.6' da böyle bir örnek çalışmanın sonucu görülmektedir. Önceden de bahsedildiği gibi matris ağzındaki sürtünme alanının artması sıcaklığın yükselmesine neden olmaktadır. Fakat ileride de söz edileceği gibi bu durumun sıcaklık artışı üzerindeki etkisi diğer faktörlere göre oldukça önemsiz olmaktadır.



Şekil 7.7 6063 alaşımı için simülasyon ve deney sonuçları elde edilen ıstampa hızı-çıkış sıcaklığı kıyası [1]

Son olarak da sonlu eleman analiz programlarında elde edilen verilerin gerçekteki verilerle ne ölçüde örtüştüğünü gösteren grafik yukarıda görülmektedir. Önceki bölümlerden hatırlanacağı gibi FEM yazılımları ekstrüzyonda oluşan gerçek gerilme ve basınç değerlerine göre daha yüksek değerler vermekteydi. Yukarıda görüldüğü gibi benzer nokta-eleman yaklaşımları ile çözümlemelere giden FEM yazılımları sıcaklık değerlerinde de gerçektekilere göre daha yüksek sonuçlar vermektedir.

7.3 Isıl İşlemin Temel Prensipleri

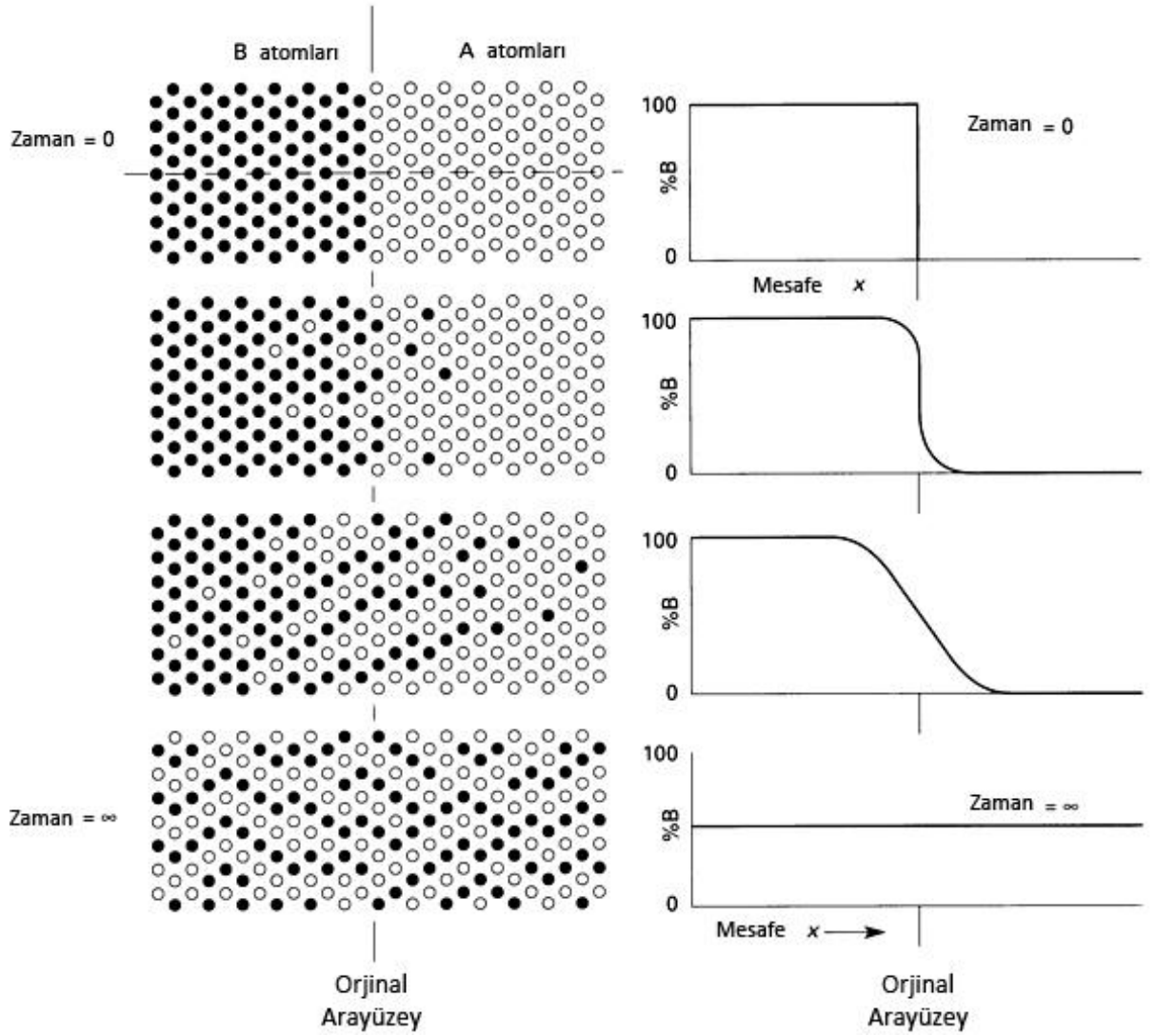
Isıl işlemlerin temel prensipleri demir esaslı olan veya olmayan tüm alaşımlar için aşağı yukarı aynıdır. Fakat çeliklerde yüksek öneme sahip olan ötektoid dönüşümler demir esaslı olmayan alaşımlarda nadiren görülür ve bu nedenle önemli biraz daha azdır. Bunun yanı sıra kimyasal homojenizasyon her alaşım tipi için önemli bir konu olmaktadır. Demir-dışı alaşımların tavlınmasında difüzyon bu yüzden yüksek önem arz etmektedir [8].

Soğuk işleme sonrası tavlamar ve döküm parçalardaki homojenizasyon tavlamarları yüksek öneme sahipken, alüminyum parçalarda çözelti oluşturma tavlaması, çökelti sertleştirme tavlaması ve yaşlandırma sertleştirmesi önemli olmaktadır. Bu konu başlığı altında ısı işlemin temel prensiplerinden söz edip, alüminyumda tavlamar ile elde edilecek mekanik özellik değişimleri de vurgulanacaktır.

7.3.1 Difüzyon

Çoğu metal ve alaşımda difüzyon kristal içerisindeki kullanılmayan bir boşluğa atomun hareket etmesi ve böylece ortaya çıkacak diğer boşluklara da diğer atomların kayması ile meydana gelir. Atomlar katı fazdaki bir maddede bile sürekli titreşim halinde olduğundan yavaş da olsa sözü edilen yer değiştirmeler sürekli meydana gelmektedir [8].

Alaşımlarda difüzyon kimyasal bir süreçte gelişmektedir. Bunun gerçekleşmesi için alaşımı oluşturan iki metal birbirleri içerisinde çözünebilir olmalıdır. Fakat çözünebilirlik değeri iyi bilinmeli ve buna göre uygulama yapılmalıdır. Çünkü çözünebilirlik sınırının üzerine çıktığında ikinci bir fazın çökmesi meydana gelmektedir. Şekil 7.8' de difüzyonu basitçe açıklayan bir şekil görmekteyiz [8].



Şekil 7.8 İki farklı metal birbirleri içersinde difüzyonu [8]

Yukarıda da görüldüğü gibi difüzyon ve zaman birbirlerine eksponansiyel olarak bağıntılıdır. Atomların hareket kabiliyetlerinin sıcaklık ile artış gösterdiği de düşünülecek olursa, alaşıma bağlı olmakla birlikte sıcaklıktaki her $10^0K'$ lık artış difüzyon işlemini (ilgili ısı işlemi) iki kata kadar artırabilmektedir [8].

Difüzyon kristal içerisinde atomların yer değiştirmesi ile meydana geldiği gibi ara yer difüzyonu şeklinde de gerçekleşebilmektedir. Eğer ki çözünen atom çözüldüğü ortamdaki atomlardan daha küçük ise bu atomların arasına yerleşebilir ve daha sonra ilerleyişini sürdürebilir. Bu tarz bir difüzyon iki atomun yer değiştirdiği difüzyon mekanizmasına göre daha az aktivasyon enerjisine ihtiyaç duyar [8].

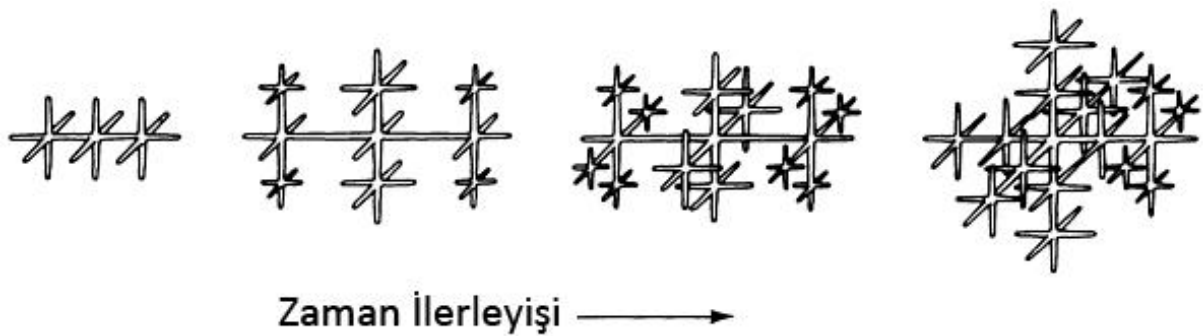
Kristal içinde gerçekleşen difüzyon mekanizmalarının yanında, tane sınırlarında meydana gelen difüzyonlar daha fazla öneme sahiptirler. Tane sınırı difüzyonlarını bu kadar önemli yapan nokta, özellikle düşük sıcaklıklarda bile hızlı bir seyir izlemesidir. Buradaki difüzyon hızı tane içindeki difüzyonlara göre daha büyüktür. Tane sınırı difüzyonu çökelmeleri ve faz değişimlerini tetikler ve ısıt işlemlerde malzemeye mekanik özelliklerini kazandıran esas etkenler de bunlar olmaktadır [8].

7.3.2 Dökümlerin Homojenizasyonu

Ekstrüzyon işleminde kullanılan alüminyum bloklar de dahil olmak üzere dökülmüş metaller mekanik proseslere girmeden önce homojenizasyon tavlamasına tabi tutulurlar. Bu tip tavlamalarda zaman, sıcaklık, difüzyon oranı ve parça şekli önemli unsurlar olmaktadır. Öncelikle metallerin katılaşmasını incelersek, bu tavlamanın önemini daha iyi kavramış oluruz [8].

7.3.2.1 Dendrit Oluşumu

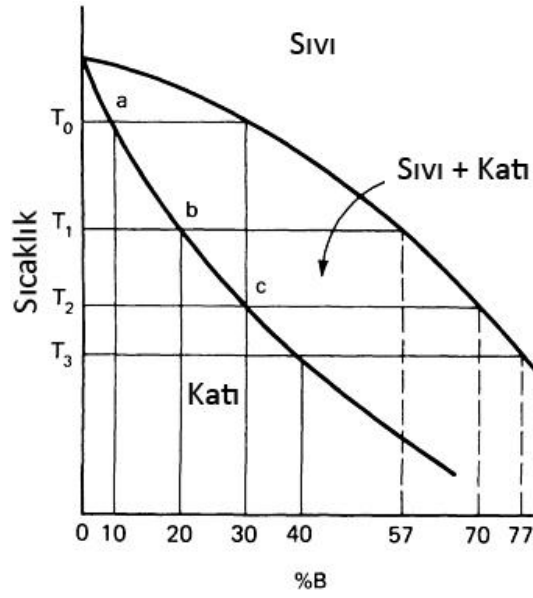
Metallerin katılaşması sırasında sıvı fazdan katı faza geçilirken oluşan kristaller dallı bir yapıya sahip olurlar. Bu tip yapılar dendrit olarak adlandırılır. Çeperlerde başlayan katılaşma sonucu oluşan dallar, merkezdeki sıcak metale doğru büyüyerek uzantılar oluştururlar. Merkezde ise birçok dendritin kollarının çarpışması söz konusu olur. Aşağıdaki şekilde dendrit oluşumunu görmek mümkündür [8].



Şekil 7.9 Sıvı faz içerisinde dendrit oluşumu [8]

7.3.2.2 Çekirdeklenme

Birçok alaşımın katılaşması sırasında kimyasal segregasyonlar dendrit oluşumunu tetiklemektedir. Şekil 7.10 ile örnek vererek bu durumu açıklayabiliriz.



Şekil 7.10 Örnek bir A-B alaşımında %30 B ihtivası için faz geçiş diyagramı [8]

%30 B elementi içeren bir alaşım düşünecek olalım. Bu alaşımın sıvı fazdan soğutularak katılaştırıldığını düşünelim. Yavaş bir soğuma yapılırsa grafikten de görülebileceği gibi ilk oluşacak kristaller %10 oranında B elementi içerecektir. Fakat soğuma yavaş yavaş devam ettikçe kristal içersine B atomları difüze olacak ve alaşım katılaştığında kristal tekrar %30 oranında B elementi içerecektir. Bunun nedeni katılaşma ilerledikçe kristal dendritler oluşturarak büyürken mutlaka katılaşma çizgisinin takip edilmesi gerektiğindendir [8].

Hızlı soğumada ise ilk oluşan kristaller yine %10 B elementi içermek zorundadır. T_1 sıcaklığına ulaşıldığında ise kristalin dışında %20 B oranı mevcut olacaktır. Fakat hızlı soğuma sonucu kristal merkezi hala %10 içerir durumda kalacaktır. Merkez ile dış bölüm arasında %10-20 arasında değişen oranlar olacaktır. Hızlı soğuma sonucu B atomlarının difüzyonu için yeterli zaman olmayacaktır. Bu durumda katılaşma yavaş soğumada olduğu gibi T_2 değil T_3 sıcaklığında olmaya zorlanacaktır. Katılaşma devam ettikçe ortalama oranı tutturabilmek için dendrit kolları büyümeye devam edecek ve birbirleriyle çarpışacaktır. Son katılan bölgeler ise %40 B elementi oranına sahip olacaktır. Böylece ortalama alaşım oranı %30 olan fakat iç yapı içerisinde %10-40 arasında dalgalanan bir yapı meydana gelecektir [8].

7.3.2.3 Kimyasal Homojenizasyon Tavlaması

Katılaşma sonucu malzeme içerisinde oluşan yukarıda sözü edilen bu mikrosegregasyonları kimyasal homojenizasyon tavlaması ile gidermek mümkündür. Yüksek sıcaklıklarda kısa süreli tavlamalar iyi sonuç vermektedir, fakat oksidasyon gibi sorunları göz ardı etmemek gerekir [8].

Bunun yanı sıra malzemenin kesit kalınlığını düşürecek prosesler sonrasında (haddeleme, ekstrüzyon, dövme vb.) homojenizasyon süresi kısalmaktadır. Bunun nedeni hem dendrit kollarının malzeme içine yayılması hem de düşen kesit kalınlığı sayesinde difüzyon mesafesinin daralmasıdır [8].

Demir dışı alaşımlarda, yavaş soğumada tek katı fazı olurken, hızlı soğumada iki fazlı bir katı meydana gelebilmektedir. Bunun nedeni çekirdeklenme olurken, henüz katılaşmayan sıvının ötektik hale gelmesi ve bölgesel olarak çoklu fazlı yapı oluşturmasıdır. Bu fazların çözülmesi yine bu tavlamayla mümkün olabilmektedir [8].

7.3.3 Çökeltme Sertleştirme Tavlamaları

Metali sertleştirmek için yapılan tavlamalarda dislokasyonların hareketini engelleyecek partiküller ne kadar düzgün yayılırsa, o kadar daha sert bir malzeme elde etmek mümkündür. Bunun için yüksek sıcaklıkta tek faz halinde bulunan fakat soğutulduğunda başka bir faza çökelen bir alaşım seçilir. Daha sonra çökeltme sertleştirme tavlaması ile bu fazın homojen olarak dağılımı gerçekleştirilir. Çözücü ile çözünen atomlar arasındaki büyüklük farkları gerilmelere neden olmakta ve dislokasyonların önünü keserek gelişmelerini engellemektedir. Bu sayede malzemenin sertleşmesi sağlanmış olmaktadır [8].

7.3.3.1 Çözündürme Tavlaması

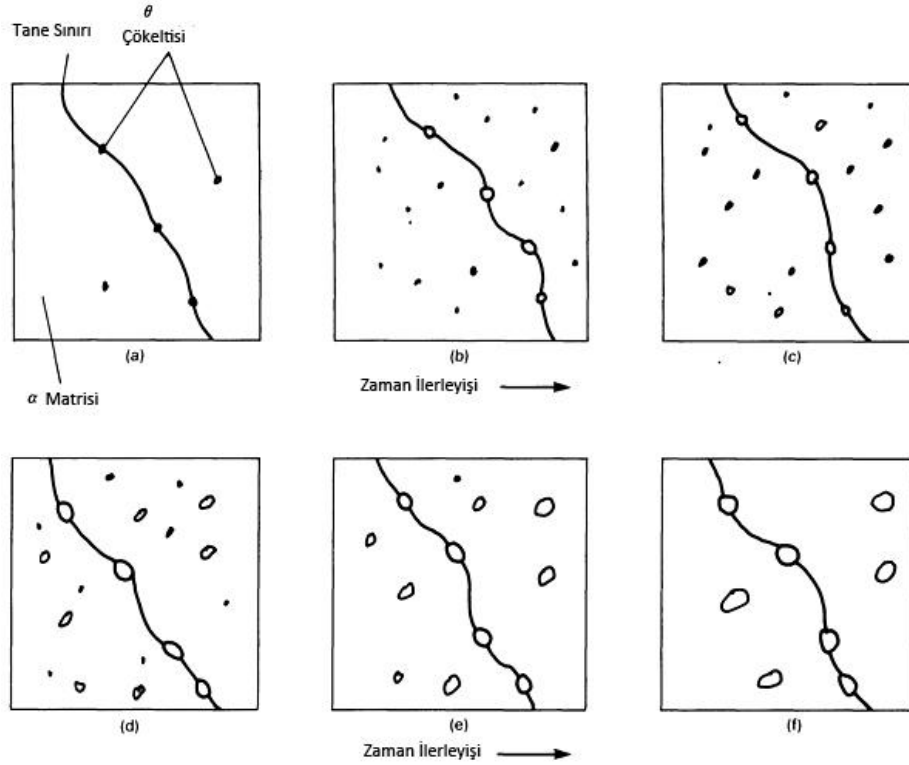
Çökeltme sertleştirme tavlaması öncesinde alaşım, çözünen maddenin çözünmesi için gerekli bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve böylece tek fazlı bir yapı elde edilir. Bu sıcaklıkta belirli bir süre beklenerek yapıda homojenlik sağlanır. Bu işlem çözündürme tavlaması olarak isimlendirilir. Ardından su verme veya benzeri bir işlemle ani bir soğutma yapılır ve bu sayede çökeltme oluşmasının önüne geçilir. Bunun sonucunda çözünen

bakımından çok zengin ve bu nedenle de oldukça kararsız bir yapı elde edilmiş olunur [8].

7.3.3.2 Çökeltme Prosesi

Çözündürme tavlaması ardından, alaşım bu sefer katılaşma eğrisi altındaki bir noktaya kadar tekrar ısıtılır ve bir süre bu sıcaklıkta tutulur. Bu sayede çökeltme başlar. Çökeltme meydana gelen kısımlarda çözünen atom yoğunluğu arttığından, çevre matriste bu yoğunluk düşmektedir. Böylece çözünen yoğunluğunun değişkenlik gösterdiği bir gradyan malzeme içersinde oluşmuş olur [8].

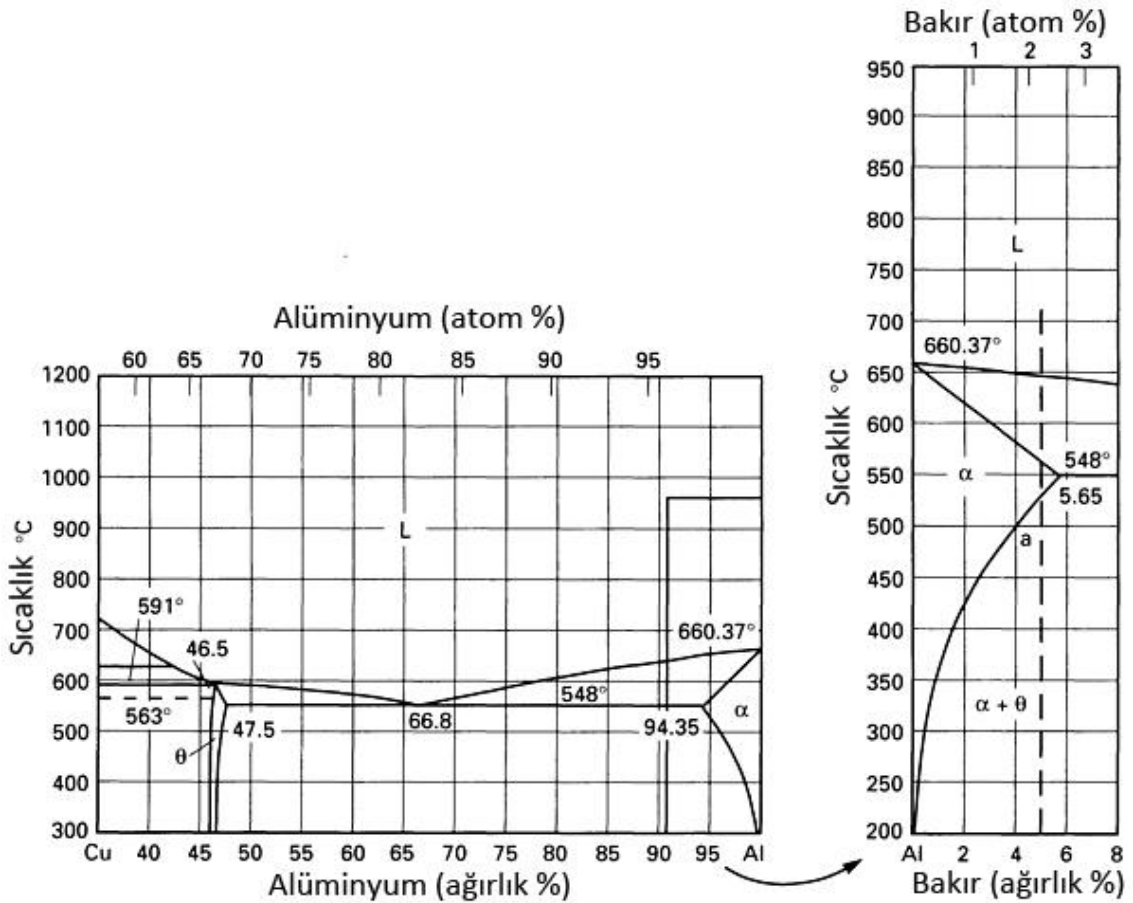
Malzeme içersinde oluşan çökeltiler belirli bir denge durumuna ulaştıktan sonra halen yüksek sıcaklıkta bulunmaya devam ettikçe, bu sefer yapısal olarak küçük olan çökeltiler tekrar çözünerek yapısal olarak daha büyük olan çökeltilerle birleşir ve onların büyümesini sağlarlar. Büyümeler genelde tane sınırları ve çevresinde yoğunlaşma eğilimindedir. Tüm bu işlemin sonucunda sayıca daha az ama daha büyük çökeltiler meydana gelmiş olur. Şekil 7.11 bu büyümeyi görsel olarak açıklamaktadır [8].



Şekil 7.11 α matrisi içersinde θ çökeltisinin oluşumu ve gelişimi

7.3.3.3 Isıl İşleme Çökelme Kontrolü

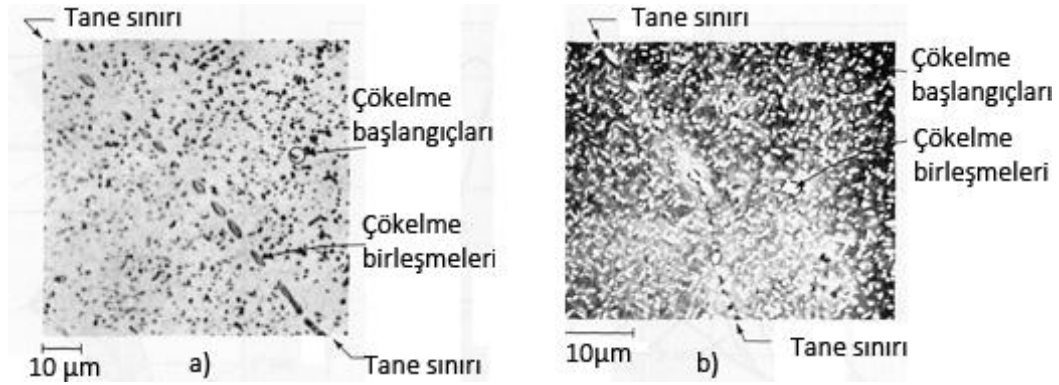
Gereken özellikler için çökelme sertleştirme tavlaması ampirik olarak hesaplanmaktadır. Genellikle yüksek sıcaklıklar daha az çekirdeklenme ve bunun sonucunda daha kaba bir çökelme oluşturur. Sıcaklık daha da arttıkça çökelmeler çözünerek yok olur. Şekil 7.12' deki grafik ve Şekil 7.13 yardımıyla alüminyuma ait şöyle bir örnek verilebilir.



Şekil 7.12 Al-Cu faz diyagramı

%5 bakır alaşımlı bir alüminyuma ait grafiği incelediğimizde çözündürmenin yapılabileceği sıcaklık aralığı 530-560°C olmaktadır. Bir hafta boyunca 545°C' de tutulduktan sonra aniden soğutulan ve sonrasında 400°C ve 300°C' de çökelme sertleştirme tavlamasına tabi tutulan alaşımların tane yapılarını görmek mümkündür. Burada da anlaşılmaktadır ki çökelme işleminde daha yüksek sıcaklıklar, düşük sıcaklıklara göre daha kaba ikinci bir fazın oluşmasına imkan sağlamaktadır. Fakat hem bu alaşımda hem de diğer alaşımlarda bu oluşumlar bu kadar basit olmamaktadır.

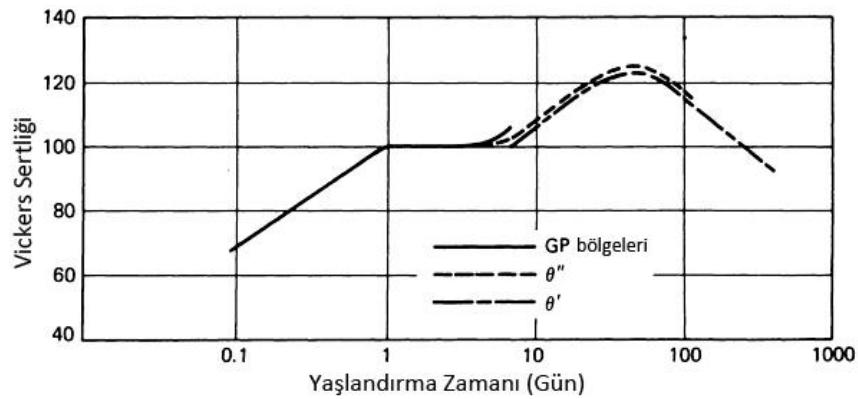
Denge koşuluna ulaşmadan önce elde edilecek ikinci fazın iki farklı alt ve yarı-stabil fazı oluşmaktadır. Bu fazlar bakırca zengin bölgelerde oluşmakta ve Guinier-Preston bölgeleri (GP-Zones) olarak adlandırılmaktadır. Fakat bu yarı-stabil bölgeler oldukça küçüktür ve ortalama 50 adet atomun büyüklüğü kadardır [8].



Şekil 7.13 1 hafta 545 °C' de bekletilmiş, aniden 25 °C'ye düşürülmüş ve a) 400 °C'de b) 300 °C' de 12 saat bekletilmiş Al-5Cu alaşımının mikro yapısı [8]

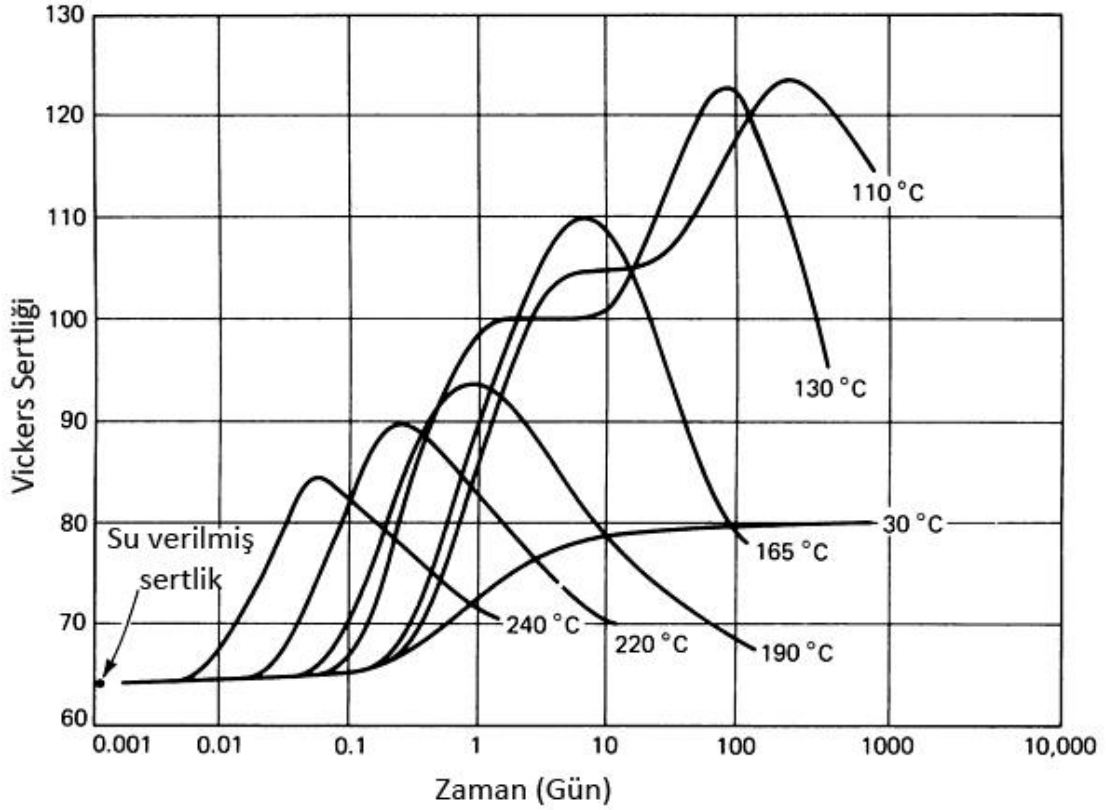
7.3.3.4 Çökelme Sertleştirme

Şekil 7.14' de Al-4Cu alaşımının tavlama süresi-sertlik grafiği bulunmaktadır. Yüksek dayanım ince ve sık olarak çökeltilerin yayıldığı çökelme sertleştirme tavlamaları ile elde edilir. Grafikte de görülebileceği gibi bu alaşım için çökelme sertleştirme tavlaması sonrasında elde edilmiş sertlik değeri, aynı alaşımın çözündürme tavlaması sonucundaki değerin yaklaşık iki katıdır. Ayrıca en yüksek sertlik değeri ikinci fazın denge durumunda oluşacak diye bir kesinlik söz konusu da değildir. Görüldüğü gibi yarı-stabil geçiş fazlarının daha ince yapılı olarak yayıldığı durumda en yüksek sertlik değeri okunmuştur [8].



Şekil 7.14 130°C' de sertleştirilmiş Al-4Cu alaşımının mikro yapıya ait sertlik durumu [8]

Şekil 7.15' deki grafikte ise yine önceden vurgulanan bir durumu açıklığa kavuşturmak mümkündür. Görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklar daha az sayıda çökelti oluşturduğundan sertlik değerini düşürmektedir. Daha düşük sıcaklıklar ise daha ince taneli ve sayısal açıdan zengin çökelti oluşturduğundan, sertlik olarak da yüksek değerleri sağlamaktadır [8].

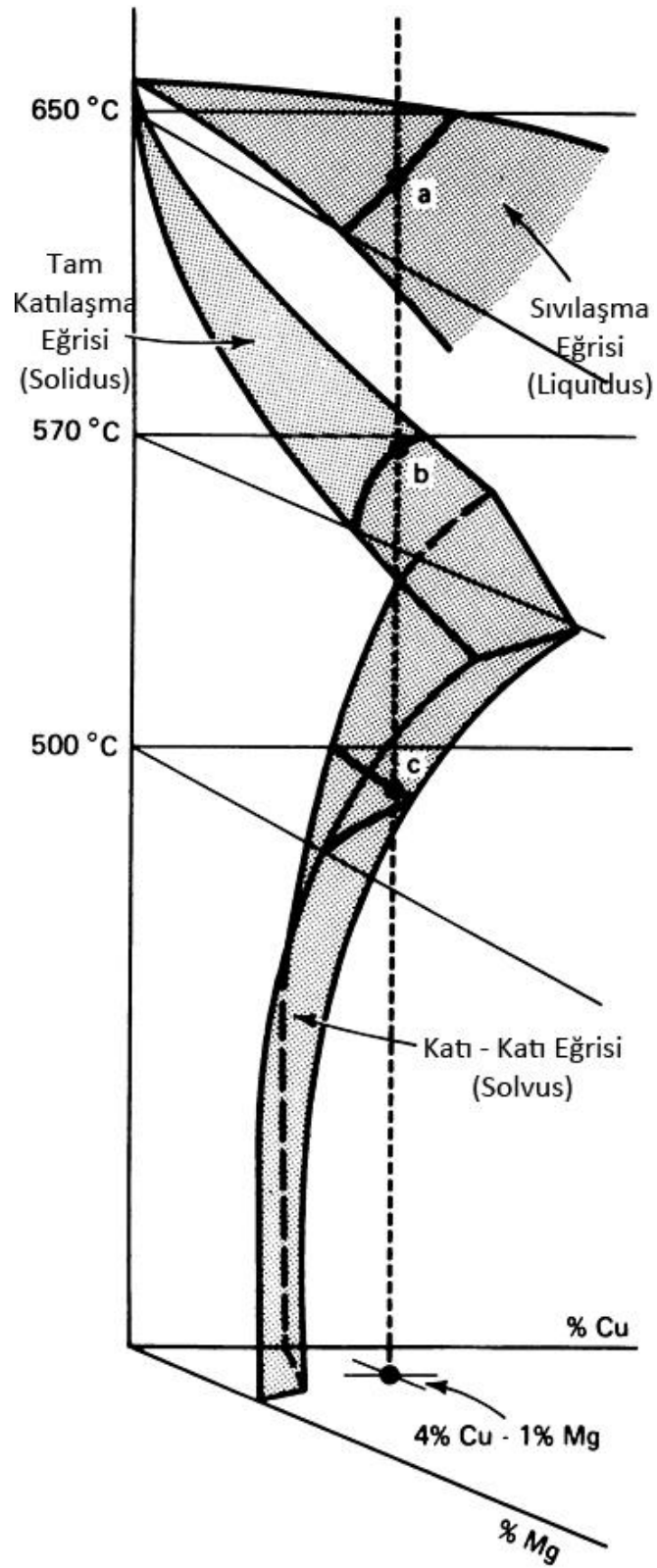


Şekil 7.15 Al-4Cu için yaşlandırma zamanı-sertlik ilişkisi [8]

Ticari ve çökeltme ile sertleştirilebilen birçok alaşımda ortam sıcaklığında çökelti oluşumu çok az olmaktadır. Bu da sertlik değerinde önemli bir artış olmamasını beraberinde getirmektedir. Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi 30°C' de sertlik değerinde önemli bir artış elde edilememiştir. Oda sıcaklıklarında yapılan tavlamlar doğal yaşlandırma olarak isimlendirilirken, bundan daha yüksek sıcaklıklarda yapılan tavlamlar çökeltme sertleştirme tavlama olarak isimlendirilir [8].

Ticari alaşımlarda çoğunlukla birden fazla element ana alaşımlamayı yapmakta ve birçok da az miktardaki element yardımcı katkı olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle tek elemente bağlı faz diyagramları yanıltıcı olabilmektedir. Bu nedenle ana elementleri

içeren üçlü faz diyagramları dikkate alınmalıdır. Aşağıdaki diyagramı kullanarak bu durumu 2024 alüminyum alaşımı üzerinden örnekleyebiliriz [8].



Şekil 7.16 Al-Cu-Mg üçlü faz diyagramı (4Cu-1Mg alaşımı için) [8]

Alüminyumda şekilden de anlaşılacağı gibi likidüs sıcaklığı 650°C , solidüs sıcaklığı 570°C ve solvus sıcaklığı ise 500°C ' dir. Çözündürme tavlamasında $500-570^{\circ}\text{C}$ arasında kalmak gerektiği açıktır. Fakat 2024 alaşımındaki bakır ve magnezyum oranlarını dikkate alarak inceleme yaptığımızda bu aralık $488-499^{\circ}\text{C}$ aralığında sınırlı kalmaktadır. Görüldüğü gibi alaşımı yüksek malzemelerde tavlama sıcaklık aralıkları daha katı sınırlarla çevrilmiş olmaktadır [8].

7.4 Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi

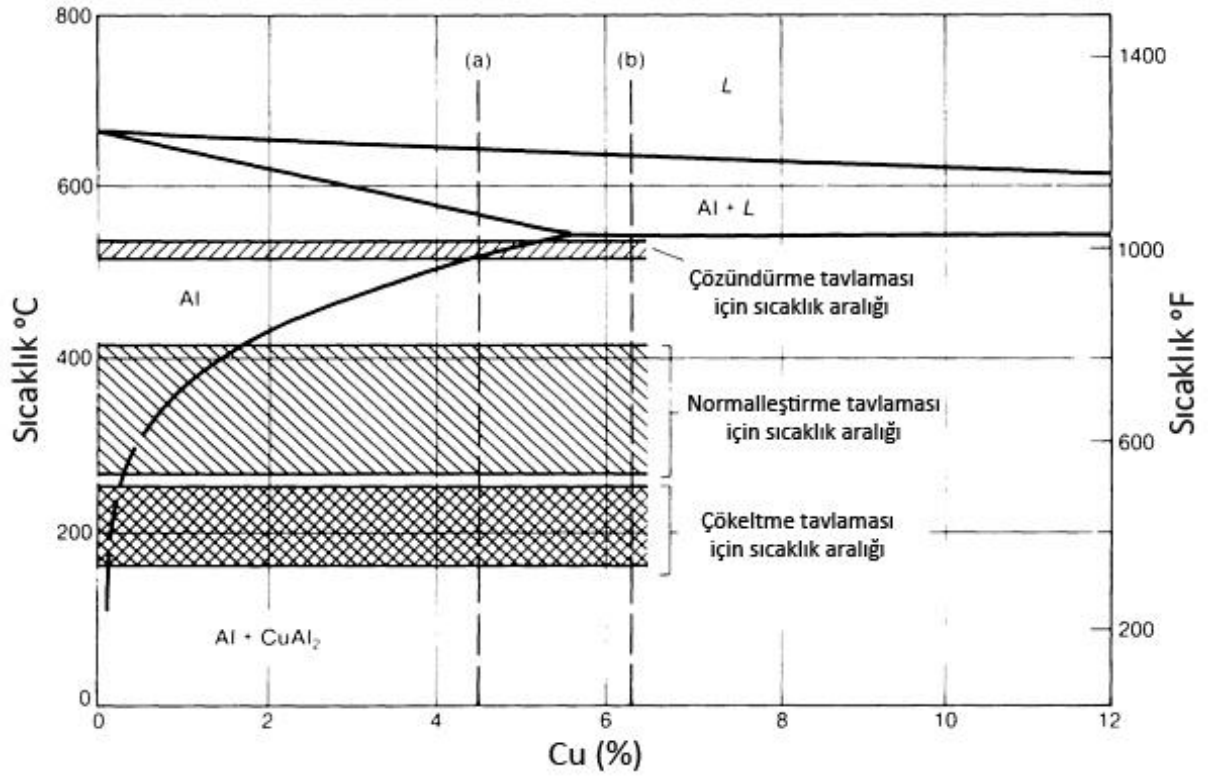
Önceki başlık altında açıklandığı gibi ısıtma ve soğutma işlemlerini kapsayan ısıl işlemler malzemenin mekanik özellikleri, metalürjik yapısı, kalıntı gerilmeleri, sertliği ve dayanımı ile ilgili değişimleri sağlamak açısından ciddi bir öneme sahiptir. Bazı alaşımlar ısıl işleme cevap verir iken bazıları ise ısıl işleme yatkınlık açısından oldukça zayıftır. Özellikle ısıl işleme duyarsız alaşımların dayanımlarını artırmak için soğuk işlemler tercih edilmektedir. Fakat malzemeyi ısıtarak dayanımını düşürüp, tokluğunu artırmak ise hem ısıl işleme yatkın hem de yatkın olmayan alaşımların ortak yönleridir.

7.4.1 Katı Çözünmüş Halden Çökelme

Çökeltme ile sertleştirilen alaşım sistemlerinde sıcaklık ile doğru orantılı olarak çözünmenin artması prensibinden faydalanılmaktadır. Çoğu ikili alüminyum alaşımları çökeltme ile sertleştirilemeyen tiptendir. Al-Si ve Al-Mn ikili alaşımları bunlara örnek olarak verilebilir. Bunların haricinde çökeltme sertleştirmesine iyi cevap veren alüminyum alaşımları ise şunlardır:

- CuAl_2 ile sertleşen alüminyum-bakır sistemleri
- Alüminyum-bakır-magnezyum sistemleri (magnezyum ile sertliği oldukça artan)
- Mg_2Si ile sertleşen alüminyum-magnezyum-silisyum sistemleri
- MgZn_2 ile sertleşen alüminyum-çinko-magnezyum sistemleri
- Alüminyum-çinko-magnezyum-bakır sistemleri

Şekil 7.17' deki grafikte Al-Cu ikili alaşım sisteminin faz diyagramıdır. Burada çözündürme ısıt işlemleri, normalleştirme tavlama ve çökeltme sertleştirme tavlama için sıcaklık aralıklarını görmek mümkündür.



Şekil 7.17 Al-Cu faz diyagramı üzerinde tavlama bölgeleri [8]

Çökeltme sertleştirmesinden en iyi verimi alabilmek için süper yoğunluktaki katı çözeltiler kullanılmak zorundadır. Bu çözeltilerde çözünen elementin ince taneli ve homojen olarak yayılması optimum sonuç için bir zorunluluktur. Önceden elde edilecek olan bu süper yoğunluktaki alaşım, sonrasındaki doğal veya yapay yaşlandırma için istenen difüzyonun hemen ve hızlı gerçekleşmesine imkan vermektedir. Bu sayede önce çökelti çekirdeklenmesi ve hemen ardından da bunların büyümesi sonucu çökeltiler oluşur. Çökelti oluşumunun en başında oluşan çekirdekler halen çözünmüşlük fazında bulunuyor olup, aynı kristal yapısını paylaşmaktadırlar. Bu durumda çözen ve çözünen atomlar arasındaki aşırı boyut farkı dislokasyonların önünü keserek malzeme içinde hem büyük gerilmeler yaratır ama bunların birlikte çok yüksek sertlik de kazandırır. Fakat bu değişimler çözünen açısından zengin mikro yapıları meydana getirir [8]

Bu yapılar Guinier-Preston bölgeleri olarak adlandırılırlar ve yarı-stabil (kararsız) durumdadırlar. GP alanlarının tam şekli, boyutu ve dağılımı alaşım içersindeki oluşma mekanizmalarına ve parçanın temel ve mekanik işlem geçmişiyle bağıntılıdır. Bu alanlar X-Ray veya elektron mikroskobu ile görülebilecek durumdadırlar. Bir genelleme yapmak gerekirse küresel GP alanları çözücü ile çözünen atomlarının boyutları birbirine yakınsa oluşur. Eğer ki çözücü ve çözünen atomları arasındaki farklar büyük ise bu durumda birbirine paralel ve disk şeklinde GP alanları ortaya çıkar [8].

Önceden de söylendiği gibi GP alanları kararsız durumdadırlar ve daha baskın çökeltilerin varlığında ayrışma eğilimi gösterirler. Bu çözülme, baskın çökeltilerin etrafında çökeltisiz ve sade görünümlü bölgeler meydana getirir. GP alanlarının çözülerek oluşturduğu bu son hal denge halinde ve sertleşmeye etkisi olmayan çökelti içeren yapılardır [8].

7.4.2 Al-Cu Alaşımlarında Çökelme

Her ne kadar bu tez kapsamındaki uygulama için kullanılacak alaşım Al-Cu alaşımı olmasa da, bakırın çoğu alüminyum alaşımında bulunmasından ve çökeltme sertleştirmesinde baş rolü oynayan element olmasından dolayı kısaca üstünde durmakta fayda vardır. Yukarıda Al-Cu faz diyagramında da gösterildiği gibi çözünme ve çökeltme için gerekli ısı işlem aralıkları oldukça açıktır. %5,65' lik bakır ihtivasına kadar çözünme ısı işlemi sıcaklığı yavaşça artmaktadır. Alt çizgi olan solvus çizgisi üzerinde bakır katı alüminyum içinde tamamıyla çözünebilmektedir. Eğer yeterince süre beklenirse bakır tamamen çözülecektir. Solvus çizgisi altında ise iki ayrı faz katının içinde bulunmaktadır. İkinci faz çökelti sertleştirmesi için gereklidir. Çökeltme sertleştirmesi sıcaklığında beklendikçe süper yoğunluktaki alaşımda önce GP bölgeleri ardından yarı-stabil fazlar ve en son denge halindeki ikinci faz (Al_2Cu) oluşmaktadır. En sert hal yarı-stabil ve kararlı fazın bir arada bulunduğu andır. Daha ileriye gidildiğinde sadece kararlı faz kalırken sertlik değeri de bir miktar azalır ve bu haldeki malzeme "aşırı yaşlandırılmış" olarak adlandırılır.

7.4.3 Isıl İşleme Yatkın Ticari Alüminyum Alaşımları

Bunlar birkaç istisna dışında üçlü ve dördlü alaşım sistemleridir. Hepsinde de çökteltme ile sertleştirme yaratan çözünenler bulunmaktadır. Dayanımları ve sertlikleri ısıtılma ile artırılabilen alaşımlar 2xxx, 6xxx, 7xxx (7072) hariç, 2xxx.0, 3xxx.0 ve 7xxx.0' dır. Bunlardan bazıları ilk sertleştirici olarak bakır veya bakır-silisyum içerir. Fakat çoğu ısıtılma işlemi görebilen alaşımlar Mg, Cu, Si, Zn karışımları içerirler [8].

Düşük bir Mg ilavesi çökteltme sertleştirme tetiklemek için yeterlidir ve daha çok ilave edilmesi çökteltmeyi hızlandıracaktır. Özellikle 6xxx alaşımlarında orantılı tutularak Mg_2Si oluşturulması sağlanır. 2xxx ve 7xxx alaşımlarına göre 6xxx alaşımları işlenebilirlik, kaynak edilebilirlik, korozyon dayanımı açısından daha iyi olup dayanım olarak ise orta ama çoğu koşul için iyi sayılan dayanım değerlerine sahiptirler [8].

Çoğu ısıtılma işlemi yatkın alaşım sistemi çok kademeli çökteltme ve Al-Cu sistemine benzer dayanım değişiklikleri sergilemektedir. Her esas ve yardımcı katkı fiziksel, mekanik ve elektrokimyasal değişimlere hizmet etmektedir. Örneğin bazı alaşımlar gereğinden fazla silisyum içermektedir. Bilinçli yapılan bu durumda silisyumun sadece az bir kısmı çökteltme sertleştirme hizmet ederken, geri kalan kısmı dökülebilirlik artırmak, çatlama riskini azaltmak ve aşınma dayanımını yükseltme görevini yerine getirir. Ayrıca aşınma dayanımı Mg, Ni, Fe ilaveleriyle de desteklenmektedir. Lityum ve germanyum içeren alüminyum alaşımları ise birçok özellik açısından mükemmel olsa da maliyet ve üretilebilirlik açısından dezavantajlıdır. Bu nedenlerle uzay sanayisinde kullanım alanı bulmaktadırlar [8].

Ana alaşımlayıcının bakır olduğu alüminyum alaşımlarında magnezyum yerine kalay, kadmiyum, indiyum ve bunların karışımları katılarak çökteltme sertleştirme hızlandırılabilir. Gümüş, lityum ve başka partikül oluşturunca katkıları ise önümüzdeki senelerde yerlerini alacaktır [8].

7.5 Isıl İşlemlerle Dayanım Artırma

Isıl işlemlerle dayanım artırma üç adımda gerçekleştirilir:

- Çözündürme Isıl İşlemi: Çözünebilen fazların ayrıştırılması.

- Su Verme: Aşırı doygun katı çözelti oluşturulması.
- Yaşlandırma Sertleştirme: Doğal veya yapay yaşlandırma ile çökeltme oluşturma.

7.5.1 Çözündürme Tavlama

Önceden de bahsedildiği gibi çöktürmenin avantajlarını elde edebilmek için öncelikle katı çözelti oluşturmak şarttır. Böylece sertleştirmeyi sağlayacak parçacıklar alaşım içine dahil edilebilmektedir. Bu işlemde homojen bir katı çözelti elde edebilmek için alaşım belirli bir süre yüksek sıcaklıkta bekletilir. Bu işlemin sıcaklığı alaşımın kompozisyon limitleri ve elde olmayan sıcaklık sapmaları göz önünde bulundurularak elde edilir. Bu sıcaklık solvus ile ötektik sıcaklık arasında genel bir aralık olsa da yüksek alaşımlı malzemelerde çoklu fazların varlığı nedeniyle bu aralık gittikçe daralarak 10°C'lik bir aralığa kadar sıkışabilmektedir [8].

Farklı alüminyum alaşımları ile ilgili çözündürme ve çöktürme sertleştirme tavlamalarına ait sıcaklık aralıklarını çeşitli kaynaklardan elde etmek mümkündür. Burada tüm alaşımları vermektense, tez konusu içinde içerisinde yoğunlaşmış ve ekstrüzyonda çok yaygın kullanılan 6061 ve 6063 alaşımlarına ait sıcaklık aralıklarını vermek yeterli olacaktır (Çizelge 7.1) [8].

Çizelge 7.1 6061 ve 6063 alaşımı ekstrüzyon ürünlerinin çözündürme ve çöktürme sertleştirme ısı işlem parametreleri [8]

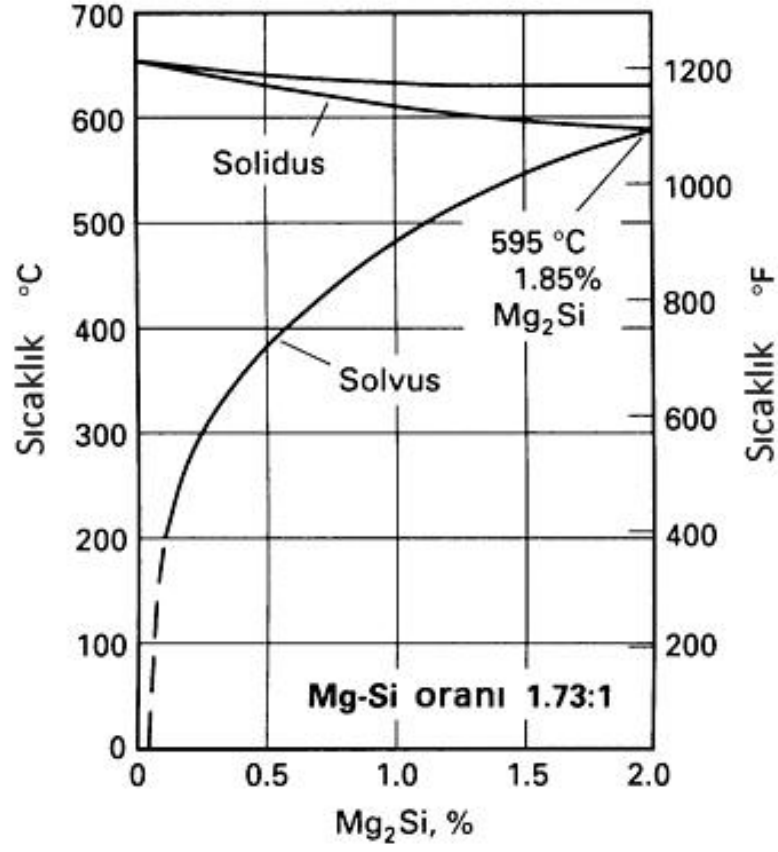
Alaşım	Ürün Tipi	Çözündürme Tavlama			Çöktürme Sertleştirme Tavlama			
		Metal Sıcaklığı °C	°F	Tavlama Tipi	Metal Sıcaklığı °C	°F	Süre (saat)	Tavlama Tipi
6061	Ekstrüzyon Ürünleri	530	985	T4	175	350	8	T6
				T4510	175	350	8	T6510
				T4511	175	350	8	T6511
		530	985	T42	175	350	8	T62
6063	Ekstrüzyon Ürünleri	520	970	T1	205	400	1	T5
		520	970	T4	175	350	8	T6
		520	970	T42	175	350	8	T62

7.5.2 Aşırı Isıtma

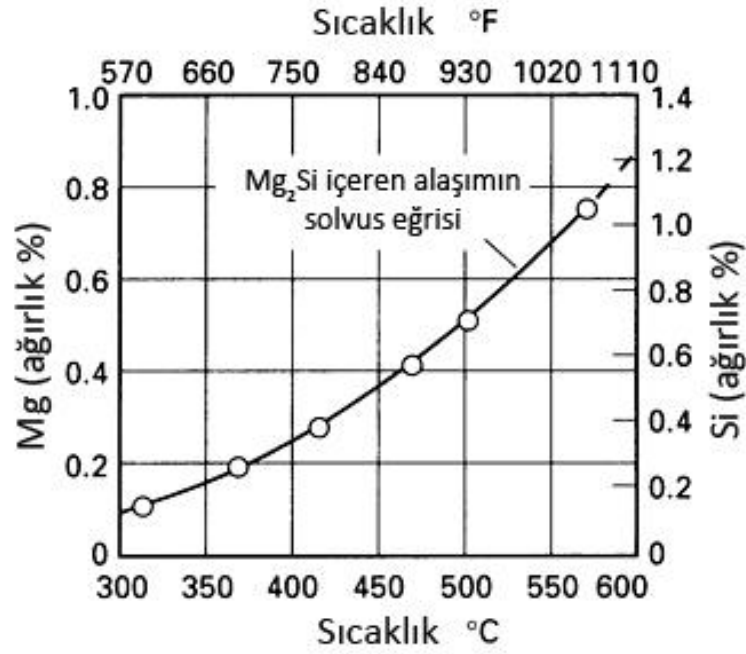
Ötektik sıcaklığı aşmamaya mutlaka dikkat edilmelidir. Eğer ötektik ergime meydana gelecek olursa çekme dayanımında, süneklikte, kırılma tokluğunda hızlı bir düşüş meydana gelecektir. Aşırı ısıtmaya maruz kalan malzemelerde tane sınırı ergimeleri meydana gelecektir ve bu nedenle bu durumdaki malzemeler kabul edilemez olarak sınıflandırılacaklardır. Buna rağmen tane sınırı ergimeleri gözle veya tahribatsız muayenelerle genellikle anlaşılamaz [8].

Çözündürme tavlamasında bu nedenle alt sınır önceden belirtildiği gibi solvus eğrisi iken, üst sınır da ötektik sıcaklık olmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda üst sınırı aşmamak için bir güvenlik mesafesi bırakılırken, benzer şekilde çözünme ve difüzyonun daha hızlı olması için de alt sınırdan da bir o kadar uzaklaşmaya çalışılmaktadır [8].

Üçlü ve dörtlü alaşım sistemlerinde ilave edilen elementlerin çözünürlüğe ve ötektik sıcaklığa etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin magnezyum ilavesi Al-Cu alaşımının ötektik sıcaklığını aşağıya çekmektedir. Önceden bununla ilgili bir grafik de örnek olarak verilmişti. Al-Mg-Si alaşımlarında da benzer durumlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin %1,08 Mg_2Si içeren alaşımda, bazı alaşım elementlerinin yüksek sıcaklıkta kompleks yapılar oluşturabilmeleri nedeniyle ötektik sıcaklık $595^{\circ}C$ olduğu halde çözündürme tavlamasının üst sınırı $540^{\circ}C$ ' ye kadar çekilebilmektedir. Şekil 7.18' deki grafiklerde Mg_2Si oranı ile Mg ve Si' nin ayrı ayrı oranlarının çözünebilirliğe etkileri görülebilmektedir [8].



(a)



(b)

Şekil 7.18 Sıcaklığın fonksiyonuna göre çözünme durumu a) Mg-Si oranı 1.73:1 b) Si artışına göre [8]

Grafiklerden de okunabileceği gibi Mg_2Si yüzdesindeki artış solvus eğrisini yukarı çekerken solidüs eğrisini ise aşağı çekmektedir. İkinci grafikte ise Mg_2Si ve Si' nin beraber alaşım içersinde bulunduğu durumda ise solvus eğrisindeki artış Si ilavesi arttıkça daha fazla eğimle yükselmektedir. Buradan Si ilavesinin çözünübilirliği oldukça yükseltebildiğini teşhis etmek mümkündür.

7.5.3 Dengesiz Ergime

Dengesiz ergime durumu yüksek hızlı ısıtma uygulanan tavlamalarda ortaya çıkabilmektedir. Örneğin bakır alaşımlayıcılı bir alüminyum alaşımında Al_2Cu bileşiğinin katı içinde tam olarak çözülebilmesi belirli bir tavlama hızında gerçekleşir. Zamandan tasarruf etme amacıyla çok hızlı ısıtma yapılması bu bileşiğin tam olarak çözülmesini engeller. Hatta aynı yüksek hızda ötektik sıcaklığın üstüne çıkılırsa ergime Al_2Cu ile matris ara bölgelerinde başlar [8].

Üçlü ve dörtlü sistemlerde ise bu durum daha da karmaşık bir hal almaktadır. Farklı fazlar bu alaşımlarda farklı çözülme sıcaklıklarına sahiptirler. Bu yüzden dengesiz ergime oluşumu alaşım tipine, çökelti boyutuna ve ısınma hızına göre değişiklik gösterir. Bu nedenle hızlı ısıtma ekipmanları almadan önce bu durum mutlaka gözden geçirilmelidir [8].

7.5.4 Yetersiz Isıtma

Parçalar tarafından alınan ısıнын, parçayı gerekli sıcaklığın altındaki bir sıcaklıkta tutması sonucu tahmin edilebileceği gibi çözünme tam olarak gerçekleşmeyecektir. Bu nedenle sonraki işlemlerde istenen yoğunluğa ve çökelti sertleşmesine ulaşmak mümkün olmayacaktır. Bu durumu 6061 alaşımı ile Çizelge 7.2 ile örneklendirmek gerekirse:

Çizelge 7.2 6061 alaşımı için çözündürme ısıl işleminin dayanıma etkisi [8]

Çözündürme Tavlaması		Çekme Dayanımı		Akma Dayanımı	
°C	°F	MPa	ksi	MPa	ksi
6061-T6		1.6 mm (0.064 in.)			
493	920	301	43.7	272	39.4
504	940	316	45.8	288	41.7
516	960	333	48.3	305	44.3
527	980	348	50.5	315	45.7

Görüldüğü gibi çözündürme tavlaması sıcaklığı artırıldıkça son işlemde sonraki çekme ve akma gerilmelerinde de artış olduğu açıktır.

7.5.5 Çözündürme Tavlaması Zamanı

Çözündürme tavlaması zamanı bütün çökeltilerin ve çözünmemiş maddelerin katı çözelti içinde tam olarak çözünmeleri için gerekli minimum zamandır. Bu zamanın aşılması daha ileri bir değişiklik sağlamaz fakat ekonomik açıdan gereksiz masraf yaratmış olur. Çözündürme tavlaması zamanı farklı koşullar altında bir dakikadan yirmi saate kadar zaman alabilmektedir. Bu tez konusuyla ilgili olarak 6061 ve 6063 alaşımları için çeşitli örnekler önceden verilmişti. Bu tavlamanın gerçekleştirildiği havalı fırınlarda dört önemli nokta bulunmaktadır:

- Fırına yüklenen malzemeler hava akışına karşı minimum direnç gösterecek şekilde yerleştirilmelidir.
- Malzemeler doğal ısı dağılımına da minimum direnç göstermelidir.
- Parçaların üzerinden homojen ve eşit miktarda hava akışı sağlanmalıdır. (Pratikte parçalar arası en az 50 mm mesafe olmalıdır.)
- Fırına yüklenen malzeme miktarı azaldıkça, parçaların ısınma hızı artar [8].

7.5.6 Yüksek Sıcaklıkta Oksidasyon

Bu durum her ne kadar yanlış isimlendirilmiş olsa da, içerik olarak yüksek sıcaklıkta malzeme yüzeyinden içeriye yoğun hidrojen difüzyonu ile ilgilidir. Fırın atmosferi ve nem ile tetiklenen bu olay alüminyum alaşımının özelliklerinde düşüşler meydana getirmektedir. Özellikle yüzeyde kabarmalar, iç kesimlerde düzensizlikler ve boşluklar yaratmaktadır. Bu hatalar ultrasonik muayenelerle veya metalografik yöntemlerle tespit edilmektedir. 2xxx ve 7xxx alaşımları yüksek sıcaklıktaki oksidasyonlara karşı zayıftırlar. Bunların yanı sıra ekstrüzyon parçalar, dövme parçalara göre daha hassastırlar. İmalat yöntemleri sonucunda yüzeyde meydana gelen koruyucu oksit tabakası kaldırılırsa yüzey hidrojen nüfuzuna karşı yine hassaslaşmaktadır [8].

Nemi minimize etmek için kurutma kullanılabilir. Boru konstrüksiyonlarda tahliye kanalları mutlaka açılmalıdır. Su verme tanklarının dizaynı ve yeri konusundaki kararlar fırınların bulunduğu yere göre yapılmalıdır. Fırınlarda karşılaşılan en tehlikeli saflık bozucu etken sülfürdür. Sülfür, şekillendirme proseslerinden kalan artıklar, yağlayıcılar veya fırında daha önceden magnezyum tavlama yapıldıysa bu tavlama kullanılan koruyucu sülfürdioksit atmosfer artıkları tarafından kaynaklanır. Her ne kadar nedenleri kolayca sayılsa da kaynağın tespiti yine de zordur. Bu nedenle koruyucu olarak fluoborat bileşikler kullanılmaktadır. Bu sayede nemi ve diğer safsızlaştırıcıların etkisi azaltılmaktadır. Fakat yan etki olarak bu bileşikler bazı parçalar üzerinde kararmaya ve lekelenmeye neden olabilmektedir. Bu durum ek olarak yüzey soyma gerektirebilmektedir. Bu açıdan oksidasyona neden olan sorunu çözmek, katkıları kullanmaktan her zaman daha etkili ve kesin çözüm olmaktadır. Oksidasyon sonucu yüzeyde oluşacak kabartılar temizlenebilir ve kritik olmadıkça çok önemsenmemektedir. Fakat hidrojen parça içine kadar ilerlemiş ve boşluk oluşturmuşsa, bu kabul edilebilir olmamaktadır [8].

7.5.7 Çözündürme Tavlama Çöktürme Sertleştirme Yapılması

Bazı alaşımlar sıcak işlemler sonrası havada veya suda soğutma hızına karşı duyarsızlardır. Her koşulda bu alaşımlar çöktürme sertleştirme iyi cevap vermektedirler. İnce kesitli 6061, 6063, 6463 ve 7005 alaşımından mamul ekstrüzyon parçalarında bu durum geçerlidir. Ekstrüzyonda ulaşılmış sıcaklıklardan

soğutulduklarında bu alaşımlar ilave bir çözündürme tavlaması gerektirmeden doğrudan çökeltme sertleştirmesine tabi tutulabilirler. Bu durumda bile son sertlikleri, ilave bir çözündürme yapıldığı zaman elde edilecek sertlik kadar olur [8].

7.6 Su Verme

Isıl işlemlerde en kritik adım su verme işlemidir. Su vermedeki esas amaç çözündürme tavlaması sonucu oluşan katı çözeltiyi hızla soğutarak süper yoğun bir alaşım elde etmektir. Bununla birlikte sadece çözünen atomları yerinde tutmak değil, aynı zamanda farklı alanların oluşmasını ve düşük sıcaklıkta hızlı bir difüzyon elde etmek için gerekli kafes boşluğu sayısını korumak da amaçlanmaktadır. Bu sırada tabii ki de çok küçük miktarda çökelti meydana gelmektedir ve bunlar ileride dayanım artırmaya katkı sağlamayacak şekilde geri dönüşü olmadan etkilerini kaybetmektedirler [8].

Su verme sırasında meydana gelen çökelmeler mekanik özelliklere ve korozyon dayanımına olumsuz etkilerde bulunurlar. Bu yüzden bu çökelmeleri engellemek için mümkün oldukça hızlı soğutma uygulanması gerekir. Böylece mümkün olan en yoğun çözelti elde edilir ve çökeltme sertleştirmesinde optimum sonuç alınır [8].

Karmaşık şekilli olmayan parçalar suya daldırma veya su püskürtme ile soğutulurken, kompleks yapılı parçalar ile kalınlıkları değişken parçalar özel ortamlarda yavaşça soğutulmaktadır. Bu ortam çok sıcak veya kaynayan su ya da sulu polyalikline glycol vb. olabilir [8].

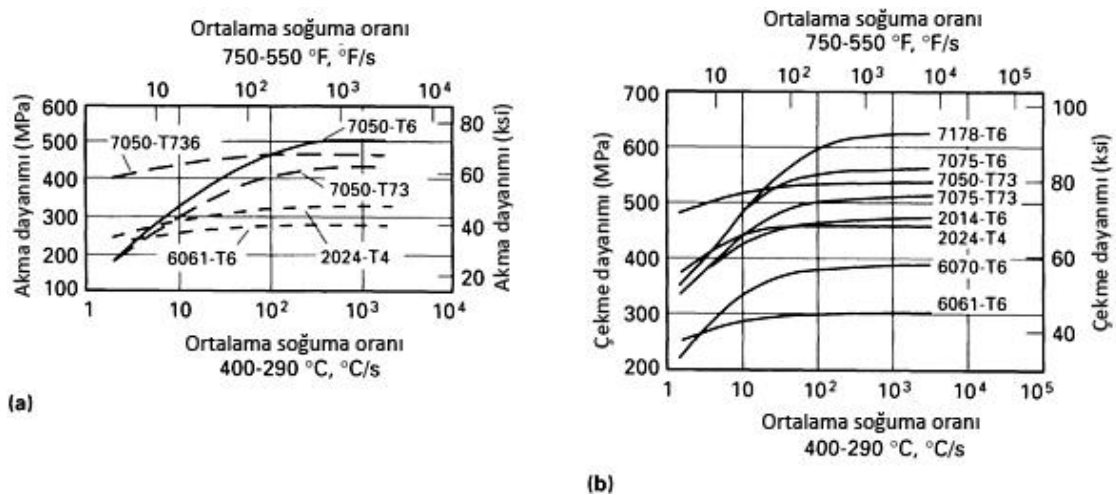
Eğer ki su verme esnasında çökeltme olabildiğince engellenmek isteniyorsa, bunu gerçekleştirmek için iki önemli duruma dikkat edilmelidir. Bunlardan ilki, tavlama fırınından su verme ortamına mümkün olan en kısa sürede malzemeyi sokmaktır. Bunun nedeni her malzemenin sıcaklık kaybederken belirli bir aralıkta maksimum çökeltme hızına ulaşmasıdır. Bu aralıktan ne kadar kısa sürede çıkılırsa, asıl yapılacak çökeltme sertleştirmesi için iyi bir zemin hazırlanmış olacaktır. İkinci gereklilik ise, malzemedan ısıyı çekecek ortamın hacmi, ısı emiş katsayısı ve akış hızı öyle bir seçilmelidir ki soğutma sırasında minimum çökeltme meydana gelsin. Aksi takdirde devamlılığı bölünen su verme işlemleri malzemenin tekrar ısınmasına veya yavaş soğumasına neden olacaktır [8].

Boyutsal toleranslar içersinde kalabilmek için bazı dövme ve döküm parçalar fanlı veya fansız olarak havada soğutulmaktadır. Bu parçalarda çökelme sertleşmesi sınırlıdır, fakat elde edilecek dayanım ve sertlik yeterli derecelerde olmaktadır. Benzer şekilde ekstrüzyon ile imal edilen parçalar ilave bir çözündürme tavlmasına gerek duymadan havada veya nem ile soğutulabilmektedir. Bunlar genellikle ince kesitli parçalar olmaktadır. Yine ekstrüzyon mamulü kalın kesitli parçalar ise daldırma veya spreyleme ile soğutulmak zorundadır [8].

Daha az komplike olan 6063 ve 7005 gibi alaşımlar hava ile soğutulmaya uygundur ve mekanik özellikleri bundan fazla etkilenmemektedir. Önceden de belirtildiği gibi bu tarz su verme oranı düşük olan uygulamalarda dövme, döküm ve kompleks parçalarda distorsiyon engellenmiş olur. Bununla birlikte parçanın içi ve dışı arasındaki sıcaklık farklılıklarından doğacak kalıntı gerilmelerin de önüne geçilmiş olunur [8].

7.6.1 Su Verme Oranının Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Su verme oranı diğer bir anlamda malzemeden ne kadar hızlı ısı çekildiğinin göstergesidir. Genellikle en iyi dayanım ve tokluk değerleri yüksek soğuma hızlarıyla elde edilmektedir. Aynı zamanda korozyon dayanımı ve gerilme korozyon çatlakları gibi özellikler de iyileşmektedir. Soğutma tiplerinin karşılaştırılmasında ortalama soğutma oranını incelemek daha faydalı olmaktadır. Aşağıdaki grafiklerde farklı alüminyum alaşımlarının soğuma oranlarındaki değişimin son dayanımlara nasıl etki ettiği görülebilmektedir [8].

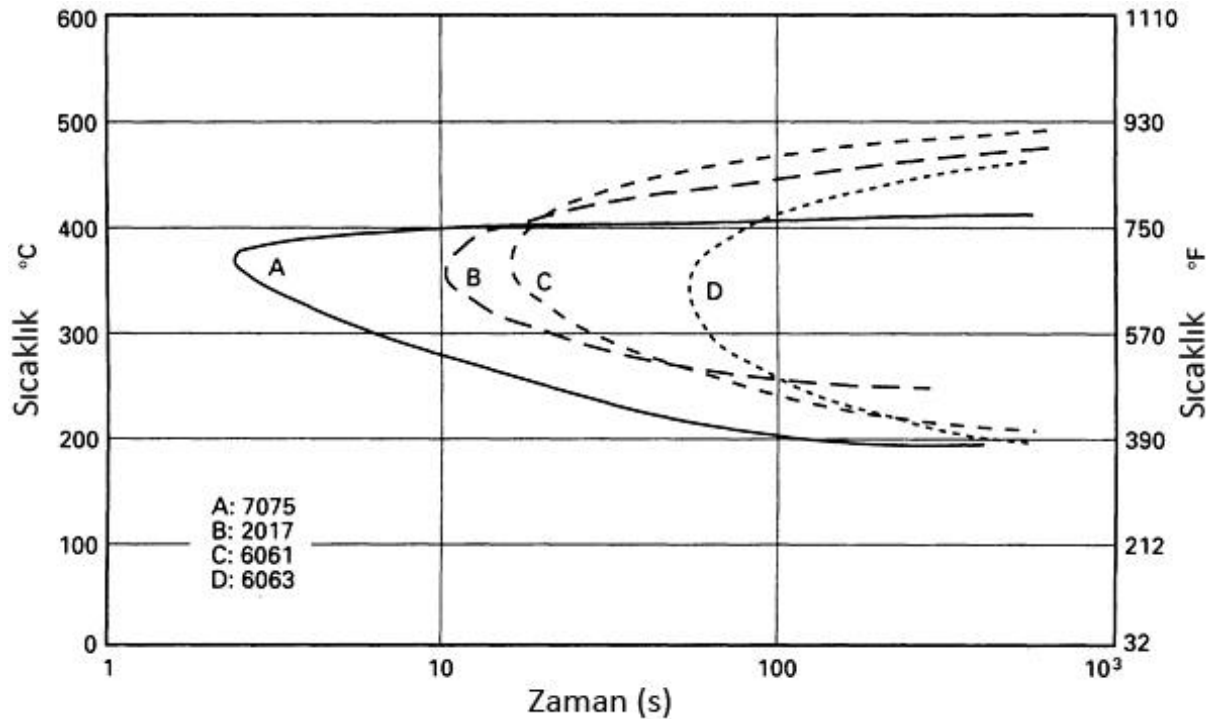


Şekil 7.19 Farklı alaşımların soğuma oranı-dayanım ilişkisi [8]

Grafiklerde görüldüğü gibi tüm alüminyum alaşımları yükselen su verme oranlarında artan dayanıma sahip olmaktadır. Fakat dikkat çeken nokta her alaşımın su verme hızındaki artışa farklı dayanım artma eğimi ile tepki vermesidir. Dayanım artışı eğiminin daha az olduğu alaşımlar su verme oranına daha az duyarlı malzemelerdir. Bunlar arasında önceden bahsettiğimiz ve ekstrüzyonda sıkça kullanılan 6061 alaşımı da bulunmaktadır. Bu nedenle sıcak ekstrüzyon prosesi bu alaşımda çözündürme tavlaması rolünü üstlenmektedir ve proses sonrası havada fanlı soğutma çoğu zaman yeterli olmaktadır. Parçanın kesit kalınlığına ve parçanın matristen çıkış sıcaklığına bağlı olarak bu genelleme yanılabilir de [8].

7.6.2 Suya Daldırmalı Su Verme

Bu tarz su verme işlemleri malzemenin fırından çıktıktan ne kadar süre sonra suya daldırıldığı ve su sıcaklığı ile kontrol edilmektedir. Örneğin 7075 gibi yüksek dayanımlı bir alüminyum alaşımı 415°C sıcaklığa geldiğinde artık suya girmiş olmalıdır. Genelde alaşımlar C-eğrilerine göre soğutulmaktadır. Şekil 7.20' de bununla ilgili bir grafik bulunmaktadır.



Şekil 7.20 Farklı alaşımların çekme gerilmesinin %95' ine tekabül eden zaman-sıcaklık-dayanım eğrileri [8]

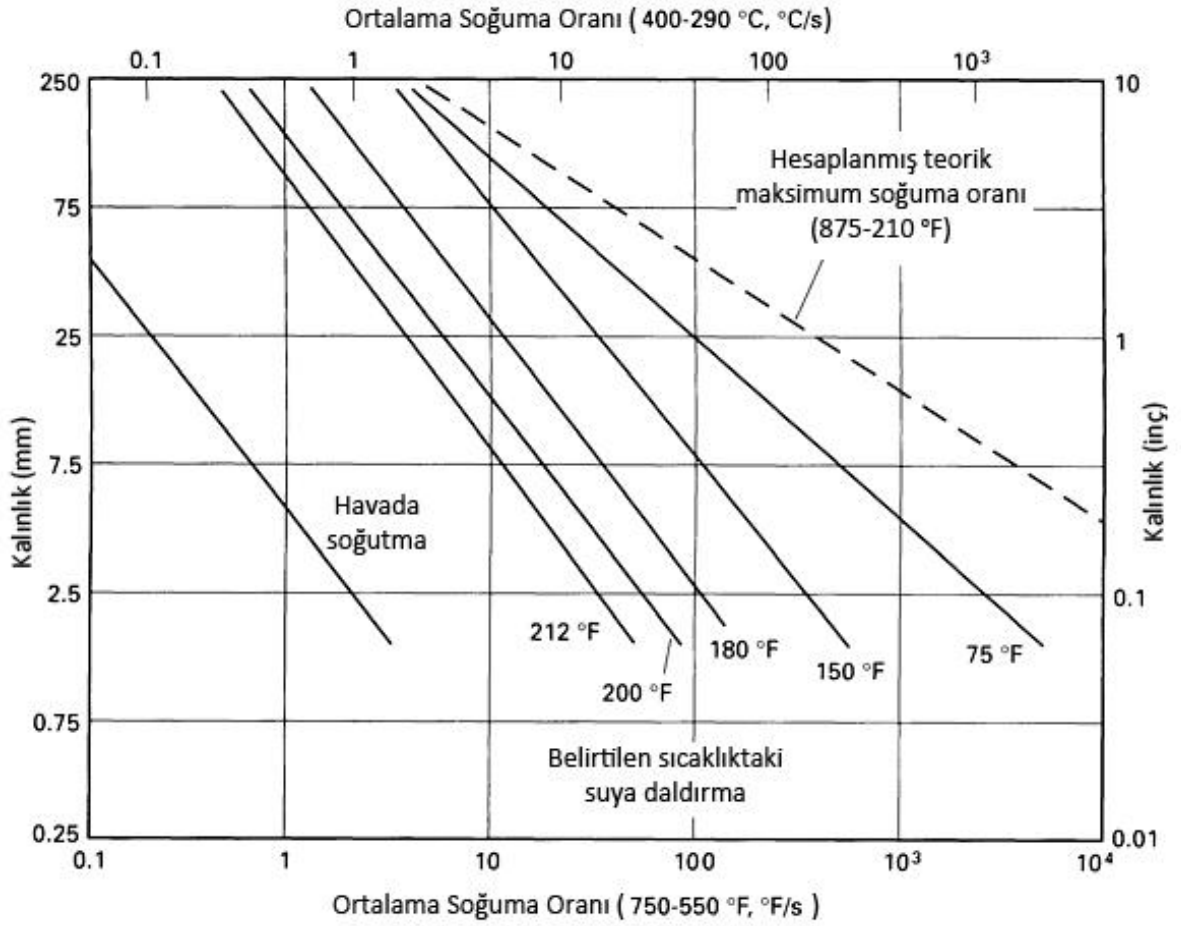
Buradaki eğriler zaman-sıcaklık-özellik eğrileri olup elde edilebilecek maksimum çekme gerilmesinin %95' inin nasıl elde edilebileceğini göstermektedir. C-eğrileri Fink ve Willey tarafından öne sürülmüştür ve herhangi bir malzeme özelliği için farklı eğriler oluşturulabilir. C-eğrilerini oluştururken temel çıkış noktası çökelme oluşma hızıdır. Yüksek sıcaklıklarda difüzyon hızlı olmasına rağmen çökelme çekirdeklenmeleri yavaştır, çünkü yüksek sıcaklıklarda malzeme süper yoğunluk durumunda değildir. Düşük sıcaklıklarda ise süper yoğunluğa yaklaşıldığı halde çökelme yine yavaştır çünkü bu sefer de difüzyon hızı yavaştır. Ara sıcaklıklarda ise çökelme oluşumu en yüksek değerlerdedir. İşte bu nedenle eğriler C formunda olmaktadır ve soğuma açısından kritik sıcaklık aralığını ortaya çıkarmaktadırlar. Maksimum dayanım ve sertlik için C-eğrilerinin bulunduğu sıcaklık aralığı en kısa zamanda geçilmek zorundadır. Grafiklerden okunabileceği gibi 6061 ve 6063 alaşımları çökelti oluşturma konusunda diğer alaşımlara göre daha yavaş bir seyir göstermektedirler. Bu nedenle de hava ile soğutma çoğu zaman yeterli olabilmektedir [8].

7.6.3 Sprey Soğutma

Sprey soğutmada su verme oranı suyun hızı ve birim alan başına düşen su hacmi ile kontrol edilmektedir. Parçanın sprej içersinden geçiş hızı da diğer önemli bir durumdur. Su verme işleminin başlarında lokal sıcaklık yükselmeleri son derece kaçınılması gereken bir durumdur. Genellikle nozüllerin tıkanması veya suyun belirli bölgelerde düzenli tahliye edilememesi yüzünden meydana gelir. Malzemenin iç ısı dış yüzeyleri tekrar ısıtabilir ve önemli ölçüde dayanım kaybı yaşanabilmektedir. Hatta bu durum malzemenin genelinde yapılacak yetersiz su vermeye göre daha kötü durumlara neden olur [8].

7.6.4 Soğutma Şiddeti ve Soğutma Ortamı

Soğutucu ortamın birçok özelliği soğutma hızını etkilemektedir. Soğutucunun kaynama noktası, viskozitesi, yoğunluğu, ısı iletkenliği, özgül ısı vb. özellikleri bunlar arasında gösterilebilir. Burada alüminyumun farklı su sıcaklıklarında ve havada soğutulmasına göre soğutma hızının değişimini örnek vermek yeterli olacaktır. Bunun haricinde farklı ortamların sağladığı verileri de literatürde bulmak mümkündür.



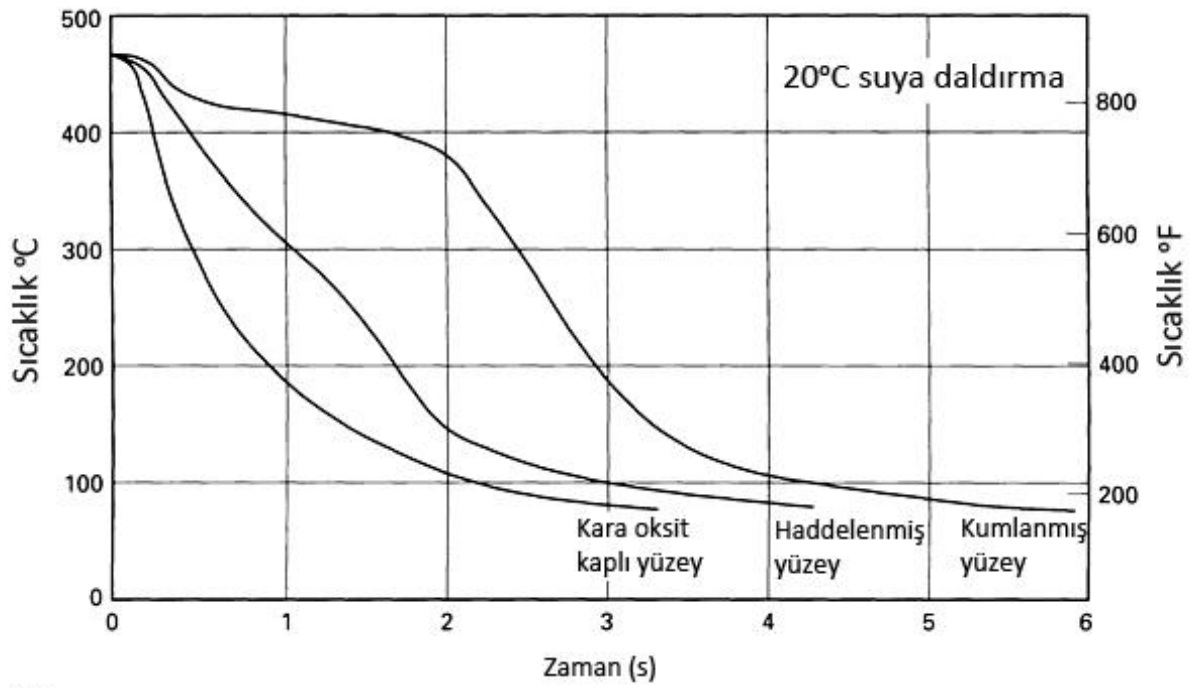
Şekil 7.21 Kesit kalınlığı ve su verme ortamının alüminyumun soğumasına etkisi [8]

Şekil 7.21' de görüldüğü gibi su sıcaklığındaki artış, su ile parça arasındaki sıcaklık farkını azalttığından soğuma hızını düşürecektir. En düşük soğuma hızı ise hava ile yapılan soğutmada meydana gelmektedir. En yüksek soğutma ise günümüzde spreyleme yöntemi ile elde edilmiş olup yaklaşık 200⁰C/s hızındadır.

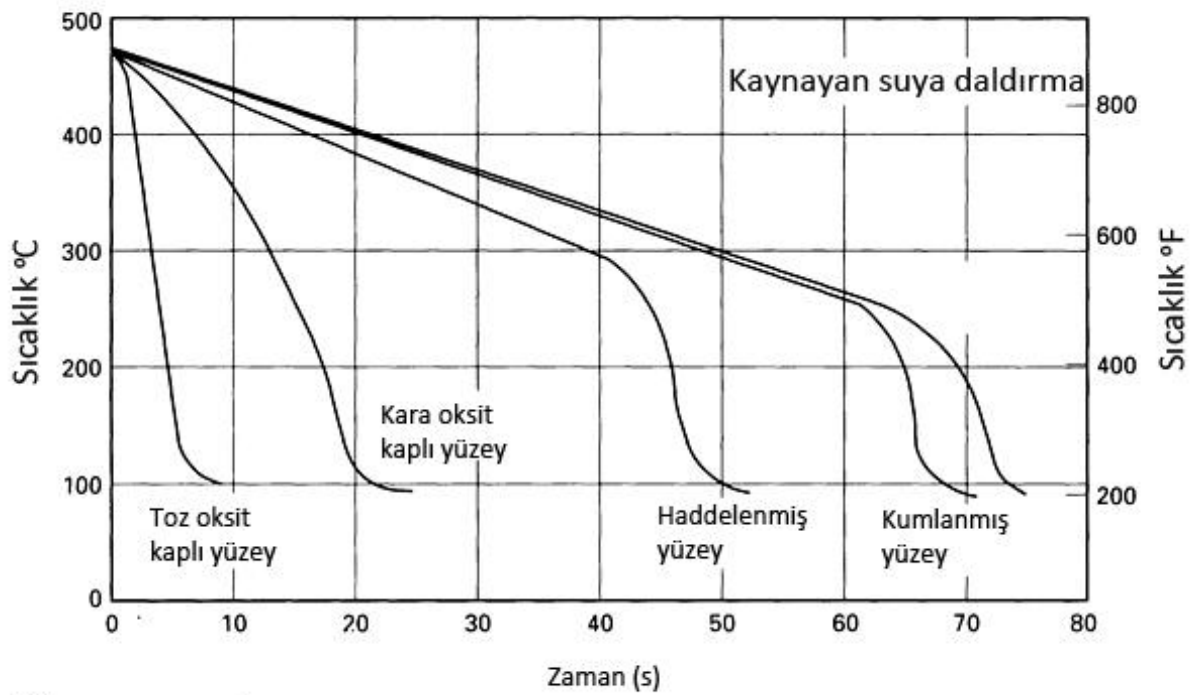
7.6.5 Su Verme Oranını Etkileyen Diğer Faktörler

Bunlar arasında en önemlilerini belirtmek yeterli olacaktır. Özellikle parçanın yüzey durumu bunların başında gelir. Parlak, cilalı, temiz ve kaplamalı yüzeylerde yüzey alanındaki düşüş doğal olarak su verme oranında da düşüğe neden olacaktır. Bunun tersi olarak oksit filmi ve lekeler ise su verme oranını artırır. Fakat fazla pürüzlü parçalar ise oluşacak buharın yüzeyde tutunmasını sağlayacağından ters etki yaparak

su verme oranının düşmesine neden olurlar. Bu durumu Şekil 7.22' deki grafikler en iyi şekilde açıklamaktadır.



(a)



(b)

Şekil 7.22 13mm kalınlığındaki 7075 alüminyum alaşımının farklı su verme ortamlarında yüzey kalitesinin soğumaya etkisi [8]

Ayrıca parça kalınlığı ve karmaşıklığı su verme oranını etkileyen diğer faktörlerdir. Kompleks parçalarda ve kalınlığı değişen ekstrüzyon ürünlerinde lokal olarak su verme oranının düşmesi meydana gelir. Uygunsuz spreyleme de aynı benzer duruma neden olabilmektedir. Bunun haricinde birçok parçanın aynı anda su verildiği ortamda, parçaları yerleştirilme şekli de önemli konular arasındadır.

7.7 Yaşlandırma Sertleştirilmesi

Çözündürme tavlaması ve su vermenin ardından yapılan son adım yaşlandırma işlemidir. Yaşlandırma, oda sıcaklığında yapıldığı gibi (doğal yaşlandırma) çökeltme sertleştirme tavlaması ile de (yapay yaşlandırma) gerçekleştirilebilmektedir [8].

Oda sıcaklığında birkaç gün içerisinde dayanımı artan alaşımlar mevcuttur. Bunlara ek olarak yapay yaşlandırma yapılarak dayanımlarını daha da artırmak mümkündür. Diğer alaşımlar ise oda sıcaklığında çok yavaş sertleşirler. Bu alaşımlara ise yapay yaşlandırma yapmak şarttır. 2xxx alaşımları gibi bazı alaşımlar yapay yaşlandırma öncesi soğuk işleme tabi tutulurlar. Eğer ki soğuk işlemler ile yapay sertleştirme sonucu elde edilecek dayanımdan daha yükser bir dayanım elde edilmişse, bu durumda tekrar ısıl işlem yapmaktan kaçınılmalıdır [8].

7.7.1 Doğal Yaşlandırma

Genel olarak söylenebilir ki alaşımlayıcı yoğunluğu arttıkça çözündürme tavlaması ve su verme işlemleri yapmak zorunlu hale gelmektedir. Bu durum dövme 6xxx alaşımları, bakır içeren 7xxx alaşımları ve tüm 2xxx alaşımları için geçerlidir. Bu alaşımlar ve özellikle 2xxx serileri doğal yaşlandırma ile iyi sertlik özelliğine sahip olurlar. T3 ve T4 ısıl işlemlerine tabi tutulan bu alaşımlar yüksek çekme, akma ve yorulma dayanımına sahip olurken, kırılma toklukları da artmış olur. Bu alaşımlarda bu işlemler sonucu yüksek yoğunluklu alaşım elde edilirken hızlı soğuma ile boşlukların tekrar dolması sonucu GP alanlarının oluşumu ve sonuç olarak 4-5 gün içerisinde maksimum dayanım değerleri elde edilir. Bir haftadan sonra ise dayanımlarda bir iyileşme gözlemlenmez. 2xxx alaşımlarının aksine 6xxx ve 7xxx alaşımları oda sıcaklığında daha stabil olup, mekanik özelliklerindeki değişimler yıllar alır [8].

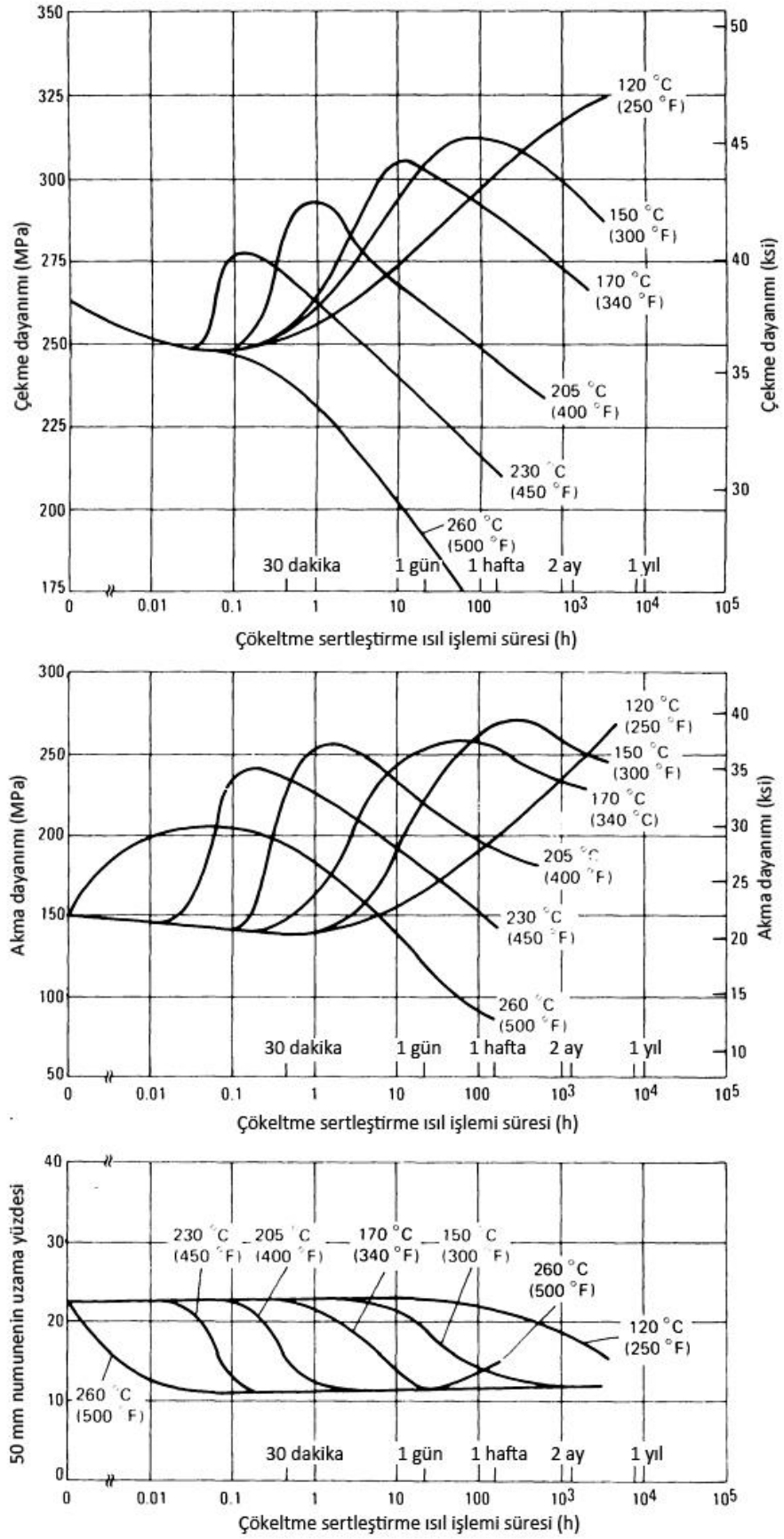
Su verme sonrası doğal yaşlandırma ile dayanım arttığından, bu tip alaşımlarda su verme sonrası yapılacak tüm şekillendirme prosesleri çok kısa sürede tamamlanmalıdır. Eğer ki su verme ile şekillendirme prosesleri arasında zaman olacaksa, parçaların soğuk odalarda bekletilmesi gerekmektedir [8].

T3 ve T4 tavlamaları doğal yaşlandırma öncesi yapılan şekillendirme prosesleri ile ayrılırlar. Düzeltme amaçlı yapılan haddeleme ve germe işlemleri %1-4 arası dayanım artışı sağlar. Daha fazla artırmak içinse soğuk haddeleme ve ekstra germe işlemleri yapılır. T3 yapılan alaşımlarda sonradan çökeltme sertleştirmesi işlemi uygulanmaz. Doğal yaşlandırmaya bırakılırlar [8].

7.7.2 Yapay Yaşlandırma

Düşük sıcaklık ve uzun zamanlı proseslerdir. 115-190⁰C arası sıcaklıklarda 5-48 saat arasında sürebilen tavlamalardır. Zaman-sıcaklık dönüşümlerine dikkat ederek bu tavlamaları yapmak gerekmektedir. Daha büyük ölçekli çökeltir elde etmek için yüksek sıcaklıklar ve uzun zaman gerekir. Fakat büyük ölçekli çökeltmeler elde ederken bunların sayıca az ve birbirinden uzakta olmaları da istenir. Çekme dayanımını maksimum yapan çevrimler, akma dayanımını veya korozyon dayanımını maksimum yapan çevrimlerle aynı olmadığından istenen özelliğe göre tavlama yapmak yerinde olacaktır [8].

Çökeltme sertleştirmeleri T5-T10 arasındaki tavlamalardır. Burada oluşan çökeltmeler mikroskop altı olsa da dağlama ile ayırt edilebilirler. Çökeltirler tip, hacim, boyut ve dağılım olarak farklı olabilirler. Çünkü malzemenin ilk halinden etkilenirler. Malzemenin rekristalize edilip edilmemesi, su verme sonrası soğuk işlem görüp görmediği, ne kadar süre boyunca kaç derecede tavlama yapıldığı, çökeltmelerin özelliklerini etkilemektedir. Şekil 7.23' teki grafiklerde 6061 alaşımı için çekme dayanımı, akma dayanımı ve uzama değerleri bulunmaktadır [8].



Şekil 7.23 6061 alüminyum alaşımının yaşlandırma karakteristiği

T6-T7 tavlamları çözüldürme tavlaması ve su verme sonrası çökeltme işlemi yapılan tavlamlardır. T6 tavlamları diğer özellikleri feda etmeden elde edilen maksimum dayanımı sağlamaktadırlar. T7 tavlamları ise fazla yaşlandırılmış olarak isimlendirilirler. Bunlarda bazı özellikleri iyileştirmek için dayanımdan ödün verilir. Mesela yüksek sıcaklıkta çalışacak parçaların boyutsal toleranslarını koruması için veya çarpılmaları önleme amacıyla iç gerilmeleri azaltmak için vb. Bu nedenle T7 tavlamları daha çok dökme ve dövme parçalarda kullanılmaktadır ve çökeltme sertleştirme sıcaklıkları T6 tavlamlarından daha büyüktür. Tavlama sıcaklıkları çok net sonuçlar vermeyen ampirik hesaplamalara dayanır [8].

EKSTRÜZYON MATRİSLERİNDE MALZEME AKIŞI VE KAYNAMANIN İNCELENMESİ

İçi oyuk profillerin ekstrüzyonunda blok bir matris içersinden geçmeye zorlanır. Bu matris profilin dış şeklini belirlemektedir. Eğer blok önceden delinmemişse, bu durumda blok devamında mandrel barındıran odalara doğru itilir. Bu sayede odalara bölünen blok kaynama odasında mandrelin etrafında kaynar ve matristen dışarı itilir. Sonuç olarak da içi boş profillerin ekstrüzyonu mümkün olur.

Günümüze kadar yapılan araştırmalarda, kaynama odasında meydana gelen kaynamanın kalitesi tahribatlı muayenelerle anlaşılmıştır. Çekilen profil ya bükülür ya da ağız kısmından yırtmaya zorlanır. Halen de en gerçekçi sonuçlar tahribatlı testler sonucu elde edilmektedir. Fakat literatüre kazandırılan bazı çalışmalar çeşitli teorik yaklaşımları bize sunmuştur.

Bu bölüm içersinde kaynama ve matris tasarımı üzerine yapılan bazı araştırmaları inceleyeceğiz. Bu sayede tez kapsamında incelenecek nervürlü boru profili için gerekli matris tasarımında ne gibi yaklaşımlarda bulunulduğunu ortaya çıkartmış olacağız. Öncelikle kaynama kriterleri üzerine temel bazı açıklamaları yaptıktan sonra, esas incelemeye geçmeden önce malzemenin odalardan kaynama odasına kadar nasıl bir yol izlediğini açıklamak yerinde olacaktır.

8.1 Kaynak Kalitesini Etkileyen Faktörler

Kaliteli kaynak oluşması için ilk öne sürülen kriterler matris dizaynına dayanıyordu. Uzun bir süre boyunca da kaynak odası ile matris çıkışı arasındaki ekstrüzyon oranının iyi bir kaynak için önemli bir parametre olduğu söyleniyordu. Daha sonrasında araştırmacılar kaynama odasında yeterli bir yüzey basıncını elde etme üzerine yoğunlaştılar. Akeret isimli araştırmacı iyi bir kaynak için birleşme yüzeyindeki basıncın, malzemenin akma kriterinden en az 3 kat fazla olması gerektiğini vurgulamıştır. Bourqui isimli araştırmacı ise kaynama odasındaki basıncın matris girişindeki basınca oranının 0,5 olması gerektiğini belirtmiştir [28].

FEM analizlerinin geliştiği günümüzde, malzemenin matris içersindeki plastik deformasyonunu gözlemlemek ve çok çeşitli veriler elde etmek mümkün olmaktadır. FEM analizlerinin yardımıyla iyi bir kaynak için yukarıda söylenenlerin kesin ve net yargılar olamayacağı ortaya çıkmış olup, bu genellemelerin yapılamamasının nedenlerini şöyle sıralayabiliriz:

- Kaynağın dayanımı sadece prosesin mekanik özelliklerine bağlı olmamakla birlikte, kullanılan malzemenin metalürjisine göre de değişkenlik gösterir. Buna malzemenin dökümü ve proses anına gelinceye kadar geçirdiği ısı işlemler de dahildir.
- Aynı koda sahip alaşımların birebir aynı kimyasal bileşime sahip olması beklenemez. Bu durumda art arda çekilen blokların birbirleri üzerine bindikleri noktalarda farklı kimyasal bileşik oluşturması mümkün olabilir. Bu konunun ihmal edilmemesi gerekir.
- Bazen oksitlerin ve gaz boşluklarının işleme dahil olup istenmeden kaynak odasına çekildiği prosesler meydana gelir. Bu durumda sürtünme davranışı matrsten kalıba değişiklik gösterir. Ölü metal bölgesinin şekli bu açıdan kaynak kalitesine etki edebilir.
- Gerçekte uzunlamasına bir kaynak düşünüldüğünde, farklı uygulamalarda farklı kaynak kalınlıklarının elde edildiği gözden kaçırılmamalıdır. Bu durumda kaynaktan ne kadar bir dayanım istendiği sorusu göz ardı edilmemelidir.

- Ekstrüzyon başladığı gibi devam eden bir proses değildir. Hem sıcaklık hem de malzemenin akışı sürekli değişim gösterir. Bu nedenle çekilen profilin her noktasında aynı kaynak dayanımını elde etmek zordur.
- Kaynak kalitesi için her değişkenin yaratacağı sonuçları test etmek oldukça masraflıdır.

Yukarıda bahsedilen bu şartları göz önünde bulundurarak, ekstrüzyonda kaynama odasında gerçekleşen kaynağın kalitesini etkileyen faktörler olarak şunları saymak mümkündür:

- Kullanılan profil malzemesinin kimyası ve özellikleri
- Blok ve alıcı sıcaklığı
- Ekstrüzyon basıncı
- Ekstrüzyon oranı
- Ekstrüzyon hızı
- Matris şekli ve matris ağzının uzunluğu
- Oda sayısı ve büyüklüğü
- Mandrel şekli
- Profilin kesit kalınlığı

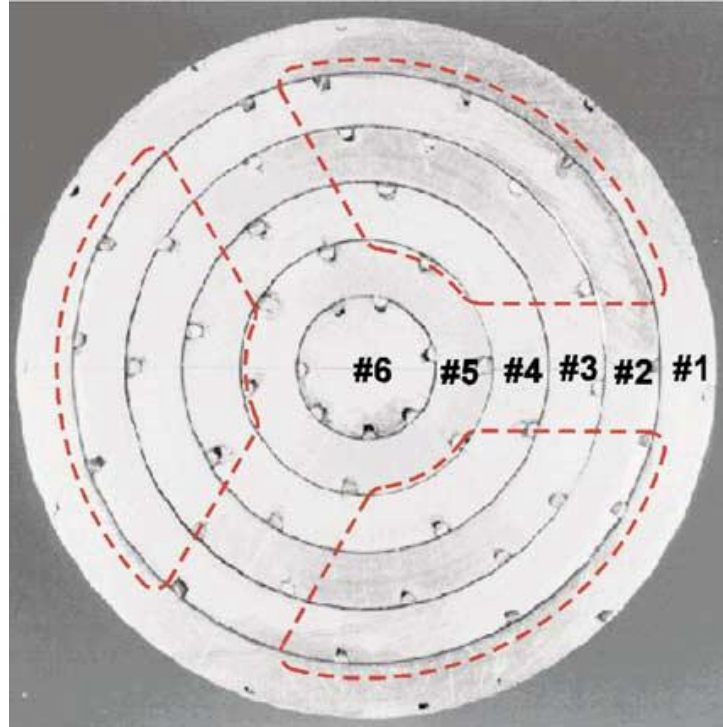
Tüm bu sayılan faktörlere ait literatürde yapılmış bazı çalışmalar mevcuttur. Fakat bu çalışmalar genellikle basit bir boru profilinin ekstrüzyonu üzerinden yapılmış incelemelerdir. Buna rağmen bu tezin konusu için aydınlatıcı çalışmalar olup, her birinde yukarıda sayılan etkenlerin bir kısmı üzerine çalışmalar mevcuttur. Tüm bu faktörleri incelemeden önce odalarda ve kaynama bölgesinde malzemenin nasıl ilerlediğini incelemek yerinde olacaktır [28].

8.2 Odalı Matrislerde Metal Akışı

FEM yazılımları ile yakın zamana kadar yapılan çalışmalarda metal akışının, simülasyonlardaki gibi olup olmadığı konusunda belirli çalışmalar yapılmaya

alışılmıştır. Bu çalışmalarda iki boyutlu akışa karşı çeşitli sayısal yaklaşımlarda bulunulmuş ama halen  boyutlu bir sayısal modelleme yapılamamıştır. Bu nedenle  boyutlu FEM yazılımlarının başarısını inceleme amacıyla pratik bir deney literatürde mevcuttur. Bu alışma yardımıyla matris içersinde malzemenin nasıl ilerlediğini gözlemlmek mümkün olmuştur. Bununla birlikte odalı matrislerle içi boş profiller çekilirken oluşabilecek kaynak hatalarının tespitine yardımcı olmak amacıyla da metalin hangi kısımlarının prosese dahil olduğunu bilmek gereklidir.

Odalara ve kaynama odasına malzemenin nasıl giriş yaptığı ve buralarda nasıl ilerlediğini tespit edebilme amacıyla çok yararlı bir çalışma literatürde mevcuttur. Bu çalışmada aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi altı farklı parçadan oluşan blok ve her parçanın birleştiği bölgelerde belirli sayılarda teller bulunmaktadır. Tüm bu kullanılan parçalar iki çeşit alaşımdan oluşmaktadır. Bunlar AA1050 ve AA1100 alüminyum alaşımlarıdır. Ana blok parçaları sırasıyla 1050 ve 1100 alaşımları olarak değişirken, teller ise 1100 alaşımından imal edilmiştir. Farklı alaşımların seçilmesindeki neden, bu alaşımların dağlama sonrası farklı renkler alması ve böylece akışın ayırt edilebilir olmasıdır [14].



şekil 8.1 Metal akışı incelemesi için özel olarak hazırlanan tel ihtiva eden parçalı blok [14]

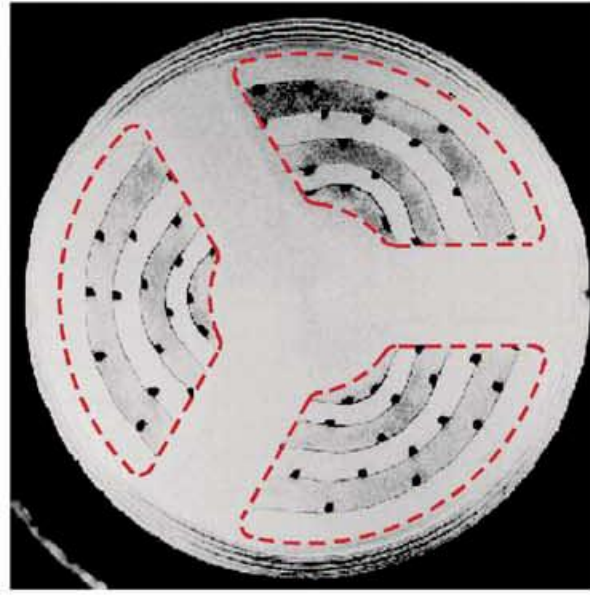
Yapılan çalışmada parçalardan oluşan blok ilk önce basılıp, ardından başka tek parçadan oluşan bir blok basılmıştır. Akışı incelemek amacıyla aşağıdaki durumlara dikkat edilmiştir:

- İlk blok ile ikinci blok arasındaki sınır incelenerek ölü metal bölgesinin biçimi ortaya çıkartılmaya çalışılmıştır.
- Birbirine komşu halkaların sınırları incelenerek blok içersindeki malzeme akışı gözlemlenmeye çalışılmıştır.
- Akış çizgilerini ortaya çıkartmak için tellerin pozisyonları incelenmiştir.

Odaların girişine kadar olan malzeme akışı: Birinci halka içersine yerleştirilmiş teller oldukça derine gömülmüşlerdir ve ilerleyen derinliklerde görülmez olmuşlardır. Bunun nedeni alıcı cidarındaki sürtünmedir. Yine aynı nedenden ötürü birinci halkanın yüzey alanında artış meydana gelmiştir. Çünkü sürtünme yüzünden halkanın dış yüzeyinin prosese dahil olması engellenmektedir [14].

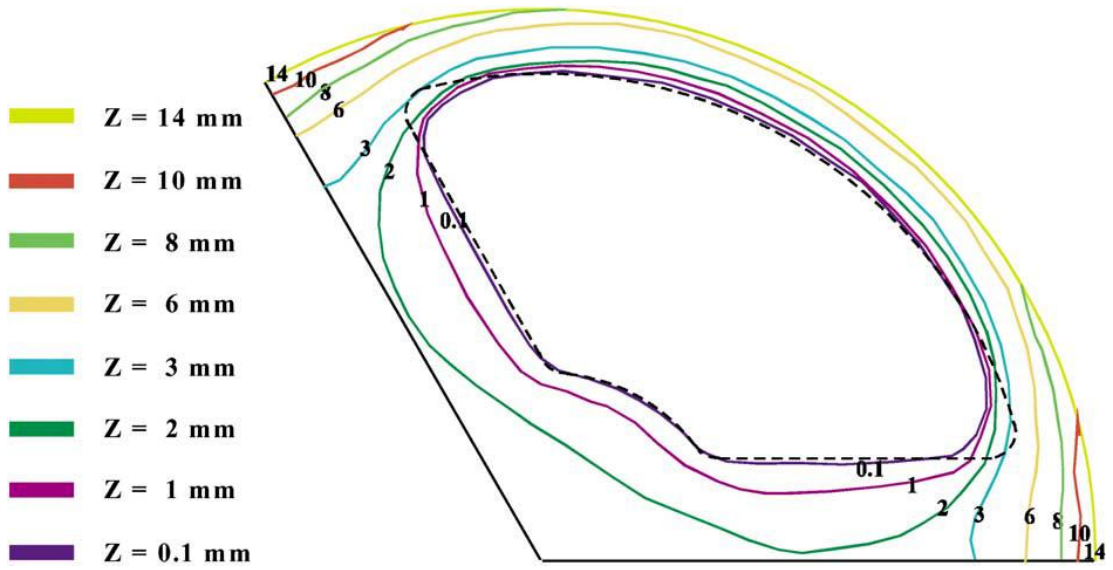
Malzeme odalar içersine doğru yöneldikçe odaların merkezindeki teller hala açık ve net görülebilirken, odalar arasındaki köprülerin üzerlerine denk gelen tellerin yok olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte önceki çalışmalar da göz önünde bulundurulduğunda en büyük ölü metal bölgelerinin köprülerin üzerinde bulunduğu netleştirilmiştir. Buradaki çalışmada köprülerin yaklaşık 11mm üzerinde tellerin prosese daha fazla dahil olamadıkları görülmüştür [14].

Halkaların deformasyonu incelendiğinde ise 4,5 ve 6. Numaralı halkaların odalara yaklaşıldıkça üçgen formunu almaya başladıkları gözlemlenmiştir. Bunun nedeni bu halkaların köprüler ve matris merkezi tarafından odalara yöneltilmeye zorlanması ve böylece bu bölgelerde radyal, eksenel ve çevresel yer değiştirmelerin söz konusu olmasıdır. 6 numaralı halka ise oda girişine yakın bir noktada tamamen çevresel hareket gösterir ve çevresel deformasyonun en yüksek görüldüğü bölge olur. Aşağıdaki şekillerde yukarıda bahsedilen durumlar çerçevesinde malzeme deformasyonuna ve ölü bölgelerin konumlarına açıklık getirmektedir [14].



(f) $Z = 0.1\text{mm}$

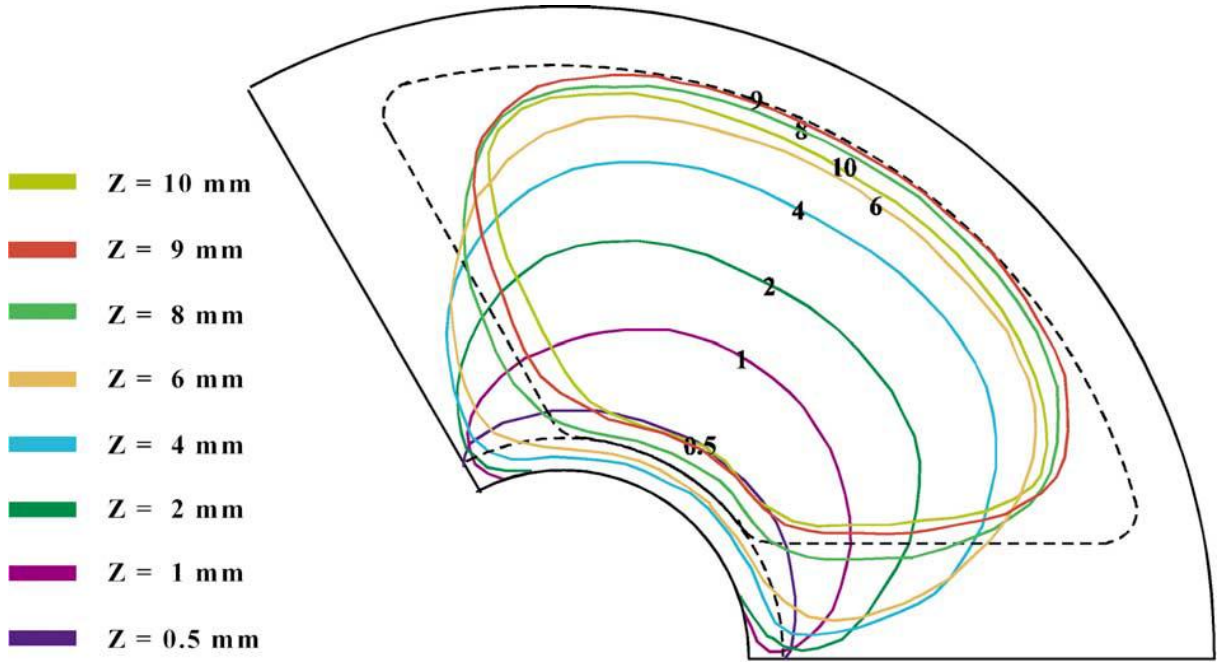
Şekil 8.2 Çekirdek üzerinde metal akışı [14]



Şekil 8.3 Çekirdekten odalara doğru deformasyon bölgeleri [14]

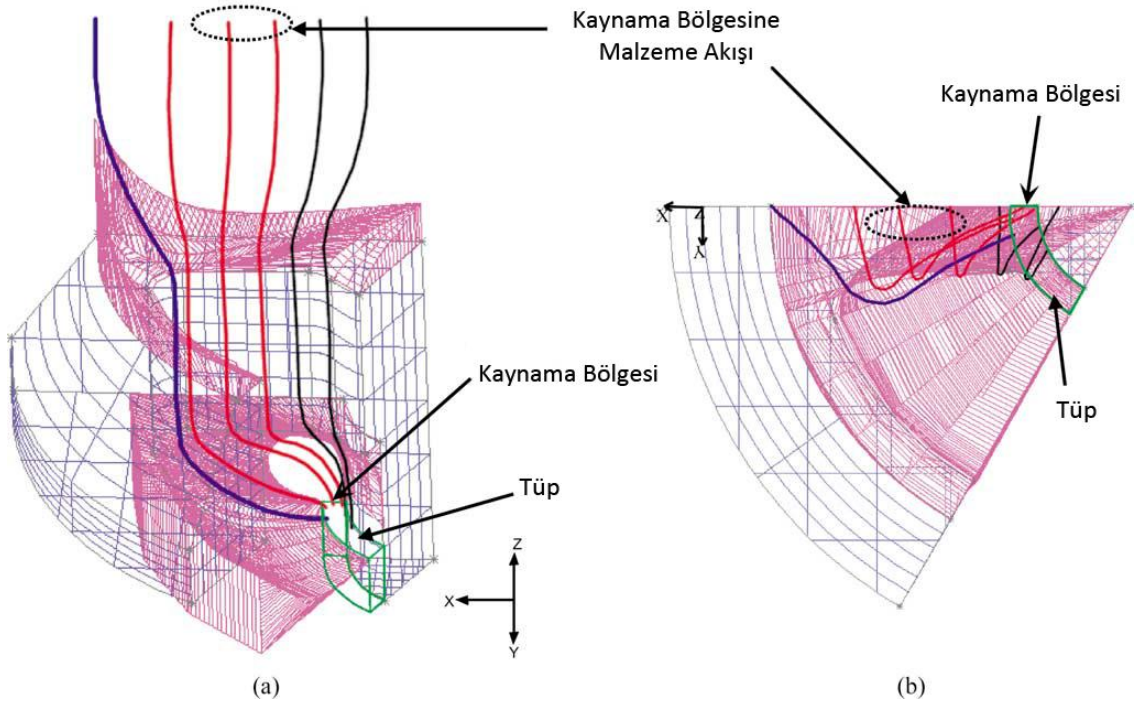
Kaynama odasında malzeme akışı: Bu bölümde malzeme matris çıkışına doğru yönlendirildiğinden büyük oranda radyal ve çevresel yer değiştirme söz konusudur. Tellerin odalara girmeden hemen önceki konumlarıyla kaynama odasına girildiği andaki konumları incelendiğinde odalardaki malzeme akışının önemli bir değişiklik göstermediği ve ekstrüzyon yönünde bir akış gerçekleştirildiği açıklığa kavuşturulmuştur. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi kaynama odasının sonlarına doğru çekilecek profilin şekli ile neredeyse aynı bir kaynama bölgesi mevcuttur ve malzeme

kaynama odasının son milimetresine kadar halen bu bölgeye tamamen girmemiş durumdadır. Bu koşul altında malzemenin kaynama bölgesine doğru olan hareketinin oldukça yavaş olduğunu söyleyebiliriz. Elde edilen veriler ve gözlemlerle çizilmiş kapalı eğrilerin iç kısımları bir önceki şekildeki gibi deformasyon bölgesini ve dış kısımları ise ölü bölgeleri göstermektedir [14].



Şekil 8.4 Kaynama odasında deformasyon bölgeleri ve ölü metal bölgeleri [14]

Kaynama odasına malzeme akışı: Aşağıdaki şekil tüm elde edilen verilerin kullanılmasıyla oluşturulmuş malzeme akışını göstermektedir. Görüldüğü gibi kesikli çizgilerden oluşan elips, ekstrüzyonun stabil halinde malzemenin kaynamaya dahil olan kısmını göstermektedir. Yine açıkça görülmektedir ki blok yüzeyindeki malzeme ekstrüzyona aktif olarak dahil olmamaktadır. Ancak ekstrüzyonun ilerleyen safhalarında bu bölümler kaynama bölgesine dahil olmaktadır. Zaten çoğu zaman yüzeyi temiz olmayan blokların çekilmesi sırasında ekstrüzyonun son bölümlerinde kaynama hataları olduğu bilinmektedir [14].



Şekil 8.5 Kaynak odasında malzeme akışı [14]

İki boyutta yapılan malzeme akışı incelemeleri, akış çizgilerinin hiperbolik tanjant fonksiyonu şeklinde olduğunu göstermiştir. Ancak üç boyutlu olarak akışı tam anlamıyla formüle etmek çok zordur ve bunun üzerinden gerinim hesapları yapmak daha da zordur. Ancak radyal, çevresel ve eksenel hareketlerin varlığının bilincinde teorik akış hızı hesapları yapmak mümkün olabilir. Akış hızlarının üzerinden ise gerilme ve gerinim hesaplarına devam edilebilir. Bu durumda FEM analizlerinin yardımına başvurulması tüm bu süreci şüphesiz hızlandıracaktır [14].

8.3 Önemli Parametrelerin Kaynamaya Etkisi

Ekstrüzyonda kaynama kalitesi esas olarak iki etkene bağlıdır. Bunlardan birincisi kaynayacak malzemenin kontak yüzeylerindeki basınç ve diğeri ise kontak süresidir. Her iki etkenin de artışı kaynağın kalitesini artırıcı rol oynar. Bunu düşünecek olursak, ekstrüzyondaki diğer tüm parametrelerde yapılan değişiklikler kontak basıncı ve süresini artırıyorsa, kaynak kalitesine olumlu yönde etki eder diyebiliriz. Literatürde bu yönde yapılmış iki çalışma ile bu konuyu örneklendirebiliriz. Her iki çalışma da kaynamayı farklı yönlerde yaptığı testlerle nitelendirmiştir. İlk çalışma boru ağzını gerdirme ile tahribatlı muayene yaparak kaynak kalitesini ölçerken, diğer çalışma ise

yüzey pürüzlülüğü ve kaynama hatlarının belirginliği açısından bir yaklaşımda bulunmuştur.

Öncelikle belirtmek gerekir ki tez kapsamında incelenen nervürlü boru 6061 alaşımından imal edilecek olsa da bu konu başlığı altında inceleyeceğimiz çalışmalar 7003 alaşımını esas almıştır. Fakat malzeme bileşimlerini incelediğimizde esas alaşımlayıcılar olarak silisyumun 6061 alaşımında biraz daha fazla olduğunu ve magnezyumun ise aynı yüzdesel oranda olduğunu söyleyebiliriz. Bunların haricinde 7003 alaşımında manganın biraz daha yüksek ve çinkonun bir hayli yüksek olduğunu söyleyebiliriz. Fakat esas alaşımlayıcıların oranındaki yakınlık, her iki çalışmanın 6061 alaşımı için de bir örnek teşkil edeceğini göstermektedir.

Basit bir boru profilinin çekildiği çalışmalarda malzeme içersindeki magnezyum oranının, blok sıcaklığının, matris ağzı uzunluğunun boru et kalınlığının ve dolayısıyla ekstrüzyon oranının, ekstrüzyon hızının ve ekstrüzyon basıncının etkileri incelenmiştir.

Öncelikle malzeme kimyasından bahsetmek yerinde olacaktır. Magnezyum ve silisyum içeren alüminyum alaşımlarında esas alaşımlayıcı magnezyum olup, silisyum oranlı olarak ve ihtiyaca göre dahil edilmektedir. Bu durum daha önceki konularda da açıklanmıştı. Yapılan çalışmalarda farklı magnezyum içeriğine sahip alaşımlar kullanılmıştır. Çizelge 8.1’ de de görüldüğü gibi veriler, magnezyum oranının artışı ile birlikte ekstrüzyonu gerçekleştirmek için daha fazla yük gerektiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 8.1 Magnezyum içeriğine göre ekstrüzyon yükündeki değişimler [18]

Blok Sıcaklığı (°C)	Matris Ağzı Uzunluğu (mm)	Kesit Kalınlığı (mm)	Maksimum Ekstrüzyon (ton) Yükü		
			DENEY		FE
			Mg 0.6	Mg 1.0	Mg 1.0
400	4.5	1.7	510	510	530
430	4.5	1.7	500	506	520
460	4.5	1.7	429	457	480
400	3	1.7	507	508	512
400	4.5	1.7	510	511	515
400	6	1.7	511	513	516
400	4.5	1.5	500	502	510
400	4.5	1.7	500	501	508

Bu durumda magnezyumun kaynak kabiliyetini artırma özelliği, magnezyum ile birlikte artan ekstrüzyon basıncı ve dolayısıyla kontak basıncındaki artış, kaynak kalitesini yükseltici rol oynayacaktır. Fakat bu noktada boru ağzını gerdirerek açma testlerinde magnezyum ilavesiyle birlikte boru ağzındaki esnekliğin düşeceği görüldüğünde şaşırmamak gerekir. Bunun nedeni magnezyum ilavesi ile birlikte Mg_2Si çökeltisinin artacağı ve malzemenin yüksek dayanım kazanırken sünekliğinin azalacağıdır [18].

Ekstrüzyon oranı, ekstrüzyon basıncını etkileyen diğer bir faktördür. Ekstrüzyon oranındaki artış, proses için gerekli basıncı hızla artırmaktadır. Bu durumda Çizelge 8.2’de de görülebileceği gibi temas yüzeylerindeki basıncın da hızla yükselmesi sonucu daha iyi ve derinlemesine işleyen bir kaynak oluşmaktadır. Buradaki P_0/Y ifadesi kaynak kalitesi için bir kriter olarak kabul edilmiştir. P_0 kaynak yüzeylerindeki maksimum basınç değeri iken, Y ise malzemenin mevcut sıcaklıktaki akma gerilmesidir. Başka bir deyişle bu oranın artması kaynak nüfuziyetinin ve kalitesinin bir göstergesidir.

Çizelge 8.2 460°C blok sıcaklığı, 6mm matris ağzı uzunluğu ve 1,7mm boru kesit kalınlığı koşullarında maksimum ekstrüzyon yükleri [19]

Ekstrüzyon Oranı	Maksimum Yük(t)	Maksimum Blok Sıcaklığı (°C)	Maksimum Mandrel Sıcaklığı (°C)	Maksimum Kaynama Odası Sıcaklığı (°C)	Maksimum P_0/Y
37	465.4	518.2	416.5	428.0	4.7
43	482.2	530.3	420.7	420.7	5.4
50	505.7	538.8	429.2	429.2	6.0

Blok sıcaklığındaki artış ekstrüzyon sıcaklığını da yukarı çekecektir, fakat proses için gereken yükte düşüş de meydana getirecektir. Ekstrüzyon basıncındaki düşüş bir an için bize kaynak bölgesindeki basıncın düşeceğini ve bu nedenle kaynak kalitesinde azalma meydana geleceğini düşündürtebilir. Bu doğru olmakla birlikte yükselen sıcaklığın malzemenin akma gerilmesini de aşağı çekeceğini unutmamak gerekir. Bu durumda Çizelge 8.3’ ten de anlaşılabilir ki ekstrüzyon basıncındaki düşüşe göre malzemenin akma gerilmesindeki düşüş daha fazla olmaktadır ki, bu koşullar altında kaynak kalitesinin artacağını söylemek mümkün olmaktadır.

Çizelge 8.3 4,5mm matris ağzı uzunluğu ve 1,7mm boru kesit kalınlığı koşullarında maksimum ekstrüzyon yükleri [19]

Blok Başlangıç Sıcaklığı (°C)	Maksimum Yük (t)	Maksimum Blok Sıcaklığı (°C)	Maksimum Mandrel Sıcaklığı (°C)	Maksimum Kaynama Odası Sıcaklığı (°C)	Maksimum P_0/Y
400	529.3	507.2	413.4	421.8	4.3
430	518.2	515.4	418.5	426.1	4.6
460	477.6	534.8	425.7	425.7	5.2

Çekilen borunun kesit kalınlığı düşünüldüğünde, ekstrüzyon oranını ihmal etmemek gerekmektedir. Çünkü kesit kalınlığındaki artış ekstrüzyon oranının düşüreceğinden, kaynak yüzeylerindeki basınç düşüşü de ekstrüzyon basıncının düşmesi ile kaçınılmaz olacaktır. Bu durumda kaynak kalitesinde de düşüş şüphesiz beklenir. Fakat aynı ekstrüzyon oranına sadık kalınarak kesit kalınlığının neden olacağı değişimin analizini yapmak gereklidir. Aynı ekstrüzyon oranında farklı kesit kalınlıklarındaki boruların ekstrüzyonunda Çizelge 8.4' teki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 8.4 400°C blok sıcaklığı ve 4,5mm matris ağzı uzunluğu koşullarında maksimum ekstrüzyon yükleri [19]

Maksimum Kesit Kalınlığı (mm)	Maksimum Yük (t)	Maksimum Blok Sıcaklığı (°C)	Maksimum Mandrel Sıcaklığı (°C)	Maksimum Kaynama Odası Sıcaklığı (°C)	Maksimum P_0/Y
1.5	532.1	514.50	417.7	424.2	4.5
1.6	530.7	512.3	415.6	422.9	4.3
1.7	529.3	507.2	413.4	421.8	4.3

Görüldüğü gibi aynı ekstrüzyon oranında kesit kalınlığındaki artış maksimum ekstrüzyon yükünde çok az bir düşüşe neden olur. Bu durum düşük kalınlıktaki kesitten malzemenin daha zor ama daha derinlemesine yoğrulmasından ileri gelir. Malzemenin geniş kesitten daha rahat çıkabilmesi sonucu basınçta ihmal edilecek kadar bir düşüş ve kaynak kalitesinde son derece önemsiz bir azalma beklenebilir.

Şimdiye kadarki kriterler sadece ekstrüzyon basıncındaki artışları tetikleyen parametreler idi. Matris ağzının uzunluğu ise ekstrüzyon basıncıyla ilgili olduğu kadar kontak zamanı ile de ilgilidir. Odalardan geçip kaynama odasında ilerleyen malzemenin, çıkışa göre kaynama odasında daha yavaş aktığını düşünebiliriz. Fakat bir önceki konuda bahsedildiği gibi kaynama, kaynama odasının son kısımlarında oluşmaya başlamaktadır. Bu durumda matris çıkış ağzının uzunluğu ise kaynama süresini de artırmaktadır.

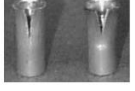
Çizelge 8.5 400⁰C blok sıcaklığı ve 1,7mm boru kesit kalınlığı koşullarında maksimum ekstrüzyon yükleri [19]

Matris Ağız Uzunluğu (mm)	Maksimum Yük (t)	Maksimum Blok Sıcaklığı (°C)	Maksimum Mandrel Sıcaklığı (°C)	Maksimum Kaynama Odası Sıcaklığı (°C)	Maksimum P_0/Y
3	524.6	506.1	411.2	419.7	3.5
4.5	529.3	507.2	413.4	421.8	4.3
6	536.9	509.8	418.6	425.9	5.8

Çizelge 8.5’ te matris çıkış ağız uzunluğunun maksimum basınca etkisi de görülmektedir. Şüphesiz ki bir artış gözlemek mümkündür. Fakat diğer parametrelerin sağladığı artış göz önünde bulundurulduğunda buradaki artış çok kritik değildir. Çünkü ekstrüzyondaki toplam sürtünme alanları düşünüldüğünde, matris çıkış ağzının uzunluğundaki artışın neden olacağı yüzey çok küçük kalmaktadır. Böylece matris çıkış ağız uzunluğundaki artışın sıcaklığı çok az artırdığı fakat bunun yanında kaynama basıncını ve zamanını bir hayli artırdığını söyleyebiliriz.

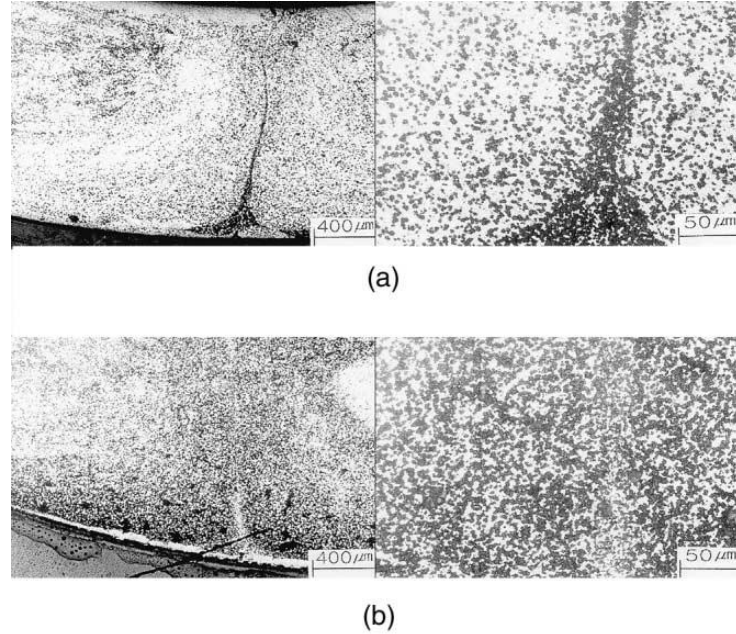
Bu konuyu mevcut iki çalışmanın deneysel sonuçlarıyla noktalamak faydalı olacaktır. Öncelikle boru ağzının gerdirme ile yırtma testlerini örnek verelim (Çizelge 8.6).

Çizelge 8.6 Genişletme testi sonuçları [18]

Kesit Kalınlığı (mm)	Blok Sıcaklığı (°C)	Matris Ağız Uzunluğu (mm)	Genişleme Oranı (ψ)		P_0/Y
			Mg 0.6	Mg 1.0	
1.5	400	4.5			1.062 1.022 4.5
1.7	400	4.5			1.056 1.018 4.3
1.7	430	4.5			1.069 1.025 4.6
1.7	460	4.5			1.075 1.050 5.2
1.7	400	3			1.019 1.019 3.5
1.7	400	6			1.075 1.050 5.8

Farklı magnezyum içerikli malzemelerle, farklı kesit kalınlıkları, blok sıcaklıkları ve matris ağzı uzunluklarıyla gerçekleştirilen testlerde elde edilen genleşme oranları ve kaynak basıncı/akma gerilmesi oranları yukarıdaki tabloda görülmektedir. Elde edilen sonuçlar ise şöyledir:

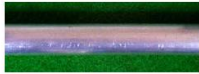
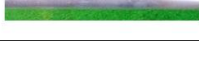
- Blok sıcaklığındaki artış ekstrüzyon kuvvetini düşürmektedir. Bununla birlikte matris ağzı uzunluğundaki artış ise ekstrüzyon kuvvetini çok az artırmıştır. Magnezyum miktarındaki artış da ekstrüzyon kuvvetini artırmıştır. Bununla birlikte ekstrüzyon oranındaki artış yine ekstrüzyon kuvvetini artırıcı rol oynamıştır.
- Kaynama yüzeyindeki basınç/akma gerilmesi oranı ilk blok sıcaklığının en yüksek olduğu ve matris ağzı uzunluğunun en fazla olduğu uygulamada görülmüştür. Bu durumda genleşme oranındaki en büyük artışın olduğu uygulamanın da bu olması beklenen bir durumdur.
- Blok sıcaklığındaki artış genleşme oranını artırmaktadır.
- Blok sıcaklığındaki artış kaynama çizgilerinin oluşma ihtimalini azaltmaktadır. Matris ağzı uzunluğu arttıkça kaynama hatları gibi akış çizgilerinin görülebilirliği azalmaktadır. Şekil 8.6 bu duruma bir örnek teşkil etmektedir [18].



Şekil 8.6 Kaynama çizgilerinin mikro yapısı a) Blok sıcaklığı 430°C, matris ağzı uzunluğu 3mm, boru kesit kalınlığı 1,7mm b) Blok sıcaklığı 400°C, matris ağzı uzunluğu 6mm, boru kesit kalınlığı 1,7mm [18]

Bir önceki çalışmaya benzer koşullarda gerçekleştirilen deneylerde, ürünlerin yüzey kaliteleri üzerine yapılan çalışmalarda ise daha yönlendirici sonuçlar elde edilmiştir. Her ne kadar blok sıcaklığındaki artış kaynak çizgileri gibi akış çizgilerinin görünümünü azaltsa da yüzey pürüzlülüğünde artan sıcaklıkla birlikte artışlar meydana gelmektedir. Bununla birlikte matris ağzı uzunluğundaki artış ile yüzey pürüzlülüğünde düşüş görülmektedir. Ağız uzunluğunun sıcaklık üzerindeki etkisinin daha zayıf olması nedeniyle daha kaliteli yüzeyler için daha düşük sıcaklıkların ve daha uzun matris ağızlarının seçilmesi gerektiği açıkça ortaya çıkmıştır. Çizelge 8.7’ de görülen pürüzlülük değerleri bu durumu desteklemektedir.

Çizelge 8.7 Farklı koşullar altında çekilmiş profillerin yüzey durumları [19]

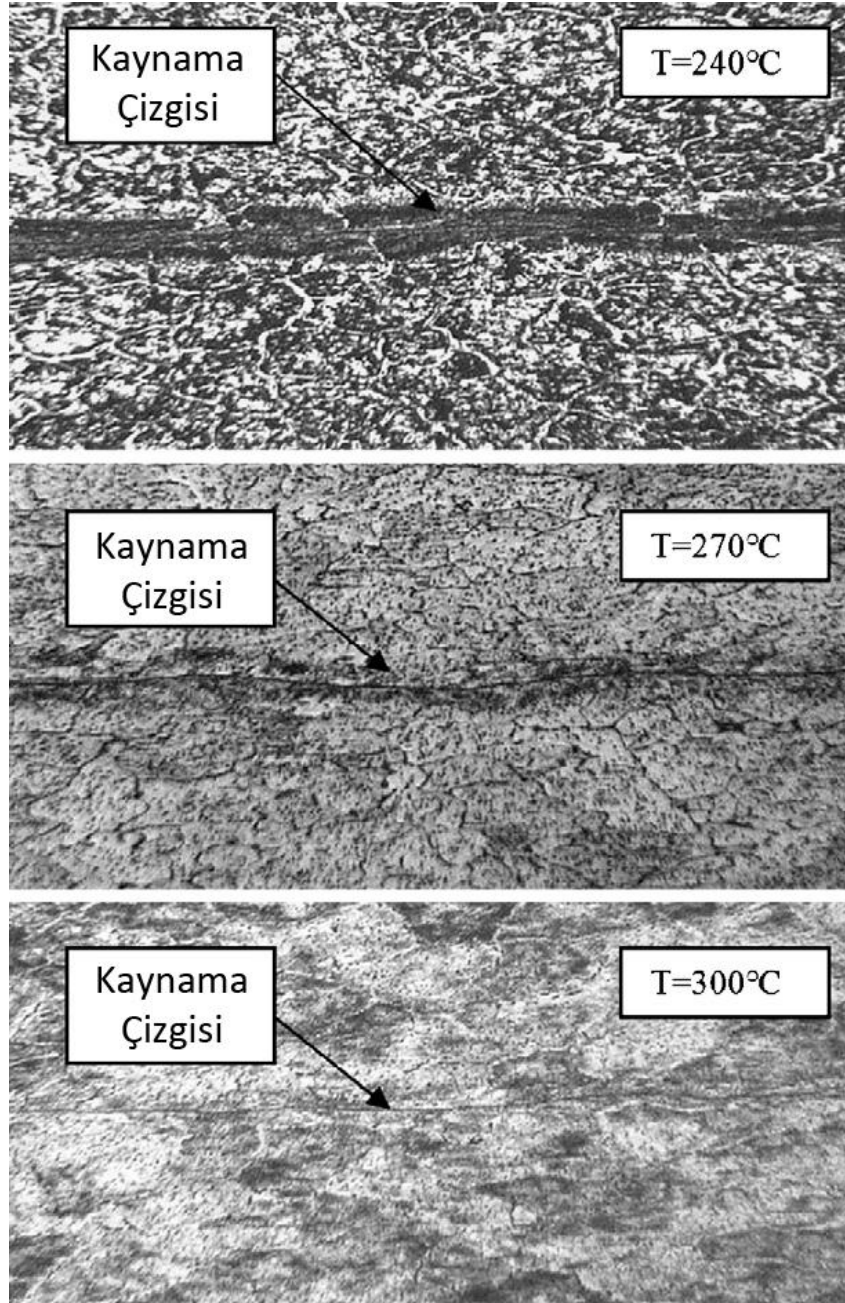
Kesit Kalınlığı (mm)	Blok Başlangıç Sıcaklığı (°C)	Matris Ağız Uzunluğu (mm)	Yüzey Durumu	Yüzey Pürüzlülüğü
1.5	400	4.5		0.315
1.7	400	4.5		0.313
1.7	400	4.5		0.313
1.7	430	4.5		0.502
1.7	460	4.5		0.478
1.7	400	3		0.453
1.7	400	4.5		0.313
1.7	400	6		0.307

8.4 Kaynama Odası Tasarımının Kaynamaya Etkisi

Odalardan geçen malzeme kaynama odasında birleşeceği zaman tüm ekstrüzyon parametreleriyle birlikte kaynama odasının tasarımı da kaynak kalitesi ve kaynağın gerçekleşip gerçekleşmemesine etki etmektedir. Bu konu başlığı altında yine iki farklı çalışmadan örnekler vereceğiz.

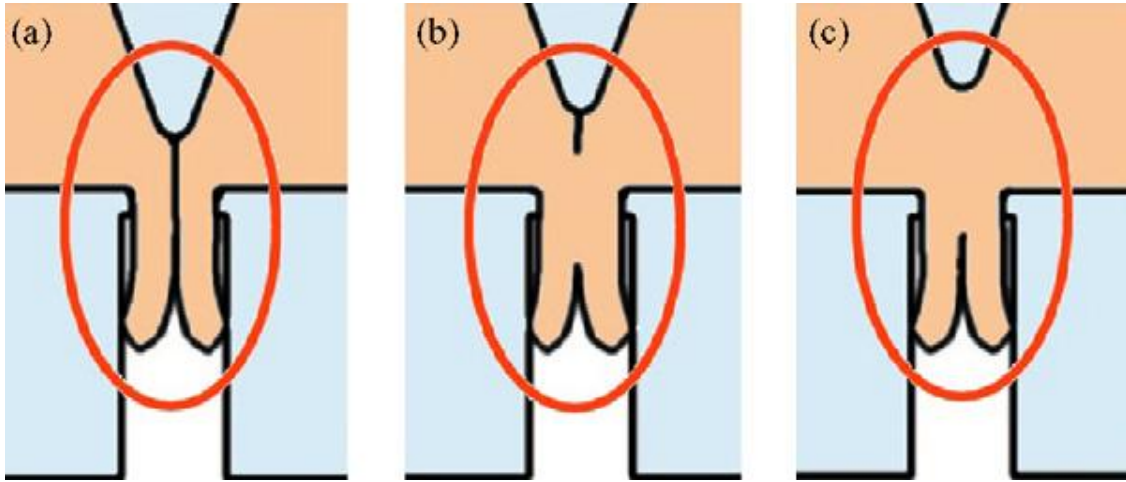
İlk bahsedeceğimiz çalışma doğrudan bu konu üzerine eğilmiştir. Kaynama odası mümkün olduğu kadar dar olmalıdır. Fakat kaynama odasının yüksekliği ise ne kadar

fazla olursa kaynağın kalitesi ve bitmiş ürünün yüzey kalitesi o kadar iyi olmaktadır. Bununla birlikte ideal basınçlar ve kaynak odasının tam olarak doldurulabilmesi de daha geniş ölçülerde mümkün olmaktadır. Bu ikisi birbirine zıt kavramlar olup her açıdan verimli orta noktayı tespit edebilmek gerekir. Bunun yanı sıra sıcaklık faktörü de önemlidir. Proses sıcaklığındaki artış yüzey kalitesini artırırken kaynak çizgilerinin görünümünü de azaltmaktadır. Şekil 8.7' de sıcaklığın etkisini görmek mümkündür.



Şekil 8.7 Sıcaklığın malzemenin kaynamasındaki önemi (Sıkıştırma oranı %44,4) [25]

Yapılan bu çalışmada 2D ve 3D simülasyonlar yapılmış ve elde edilen sonuçlar ile çeşitli yargılara varılmıştır. Sonuçları Şekil 8.8 ve Çizelge 8.8 yardımıyla açıklayabiliriz.



Şekil 8.8 Kaynama odası geometrisinin kaynamaya etkisi a)10mm, b)15mm, c)20mm [25]

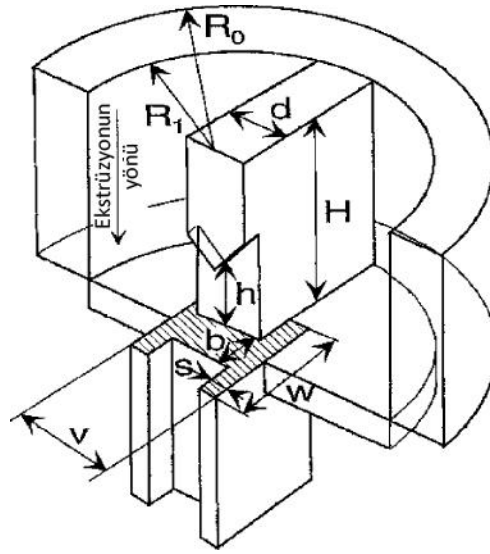
Çizelge 8.8 2D ve 3D modellerin veri kıyası ve a,b,c kaynak odası uzunluklarının parametrelere etkileri [25]

Test	2D model				3D model			
	p (MPa)	T (°C)	v (mm/s)	w_{max} (s)	p (MPa)	T (°C)	v (mm/s)	w_{max} (s)
a	48	482	10.4	1.7	50	481	9.2	1.4
b	65	485	8.5	2.16	64	478	8.2	2.3
c	77	484	4.2	2.16	80	479	4.5	2.9

Sonuç olarak görülmektedir ki kaynak odası kalınlaştıkça iki önemli değişim gerçekleşmektedir. Bunlardan ilki kaynama yüzeyinin genişlemesi ve böylece kontak yüzeyinin artması, diğeri ise kesişen yüzeylerdeki normal basıncın artmasıdır. (a) şeklinde görülen kaynağın başarısızlığının sebebi çok dar olan kaynak odasında gerekli basıncın elde edilememesidir. (b) şeklinde ise kaynak başlangıcı çıkışa yakın olmaktadır fakat (c)' de ise kaynak odasının bütününün başarılı doluşu ve mümkün olan en uzun kontak süresi elde edilmiştir. Buna rağmen çalışmanın yapıldığı firma her koşulda optimumu sağlamak açısından 15 mm yüksekliğindeki kaynak odasının kullanımını tercih etmiştir.

Diğer çalışmada ise kaynak kriterleri belirlenmiştir. Burada farklı parametreler sunulmuştur. Maksimum basınç, basınç-zaman, basınç-zaman-akış durumları göz

önünde bulundurularak farklı parametreler öne sürülmüş ve kararlılık açısından çeşitli deneylerle başarıları karşılaştırılmıştır. Bu araştırmaların yapılması sırasında Valberg deneyi olarak adlandırılan bir çalışma sunulmuştur. Burada özel H profillerinin imalatında, profil merkezinde boyuna kaynak edilmesi amaçlanmıştır. Bu sırada kaynak odasının tasarımında değişiklikler yaparak iyi bir kaynaktan başarısız bir kaynağa kadar bazı incelemeler yapılmıştır. Şekil 8.9' da deneyin yapıldığı kaynak odasını ve tasarımsal parametreleri görebiliriz.



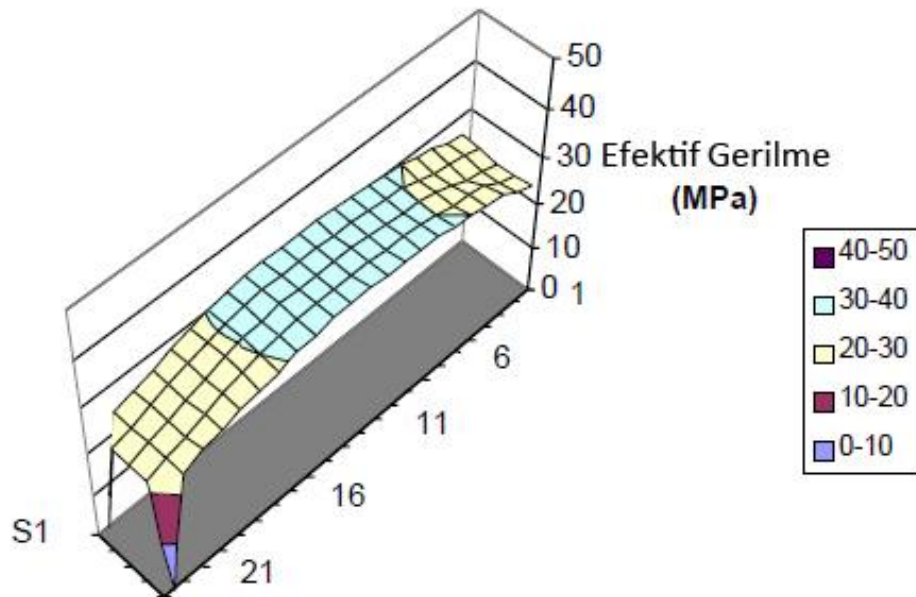
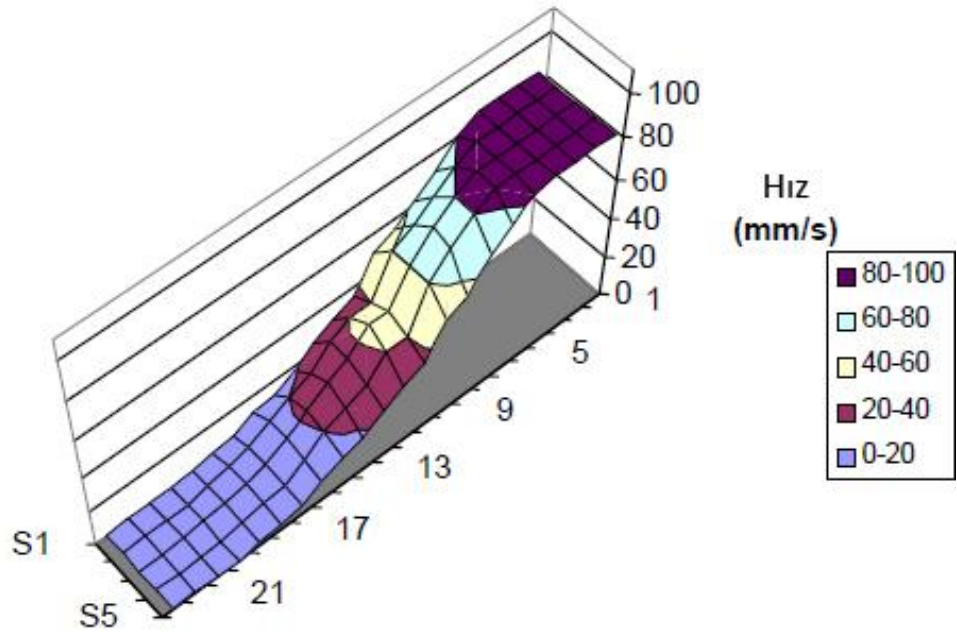
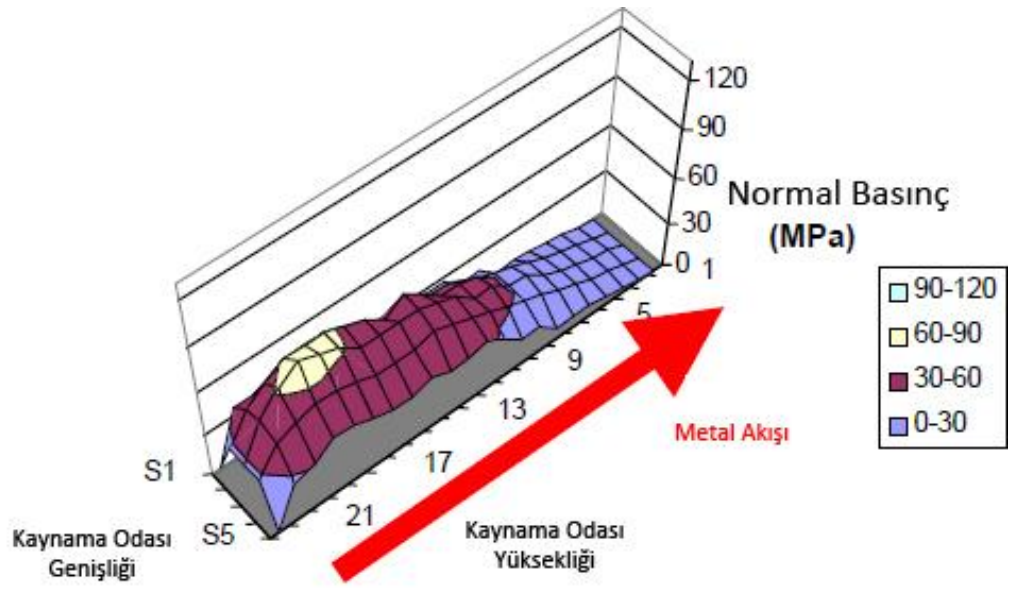
Şekil 8.9 Valberg deneyinde kullanılan matris geometrisi [28]

Yapılan deneylerde elde edilen profiller çekme testleri ve çatlak büyüme testlerine tabi tutulmuş ve böylece mekanik dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak Çizelge 8.9 elde edilmiş olup, bu tablo yardımıyla şu yargılara varmak mümkündür:

Çizelge 8.9 Valberg deneyi sonuçları [28]

Deney No.	Dil $h/b/a$	Ekstrüzyon oranı	İstampa hızı (mm/s)	Blok sıcaklığı (°C)	Alıcı sıcaklığı (°C)	Optik analiz	Kaynama odası	Kırılma bölgesi	Çekme dayanımı (MPa)
1	17/5/90°	25.6	5	515	450		Dolmuş	Dış kaynama hatından	300*
2			10			Başlangıçta enine çatlama	Dolmuş	"	300*
3			5	430	430		Dolmuş	"	300*
4	17/5/45°		5	515	450		Dolmuş	"	300*
5			10				Dolmuş	"	300*
6			5	430	430		Dolmuş	"	300*
7	10/3/90°	28.9	5	515	450	Kaynama yok	Dolmamış		—
8			10			Kaynama yok	Dolmamış		—
9	10/3/45°		5			Kaynamamış bantlar	Gaz boşluğu	"	313
10			10			Kaynamamış bantlar	Gaz boşluğu	"	318

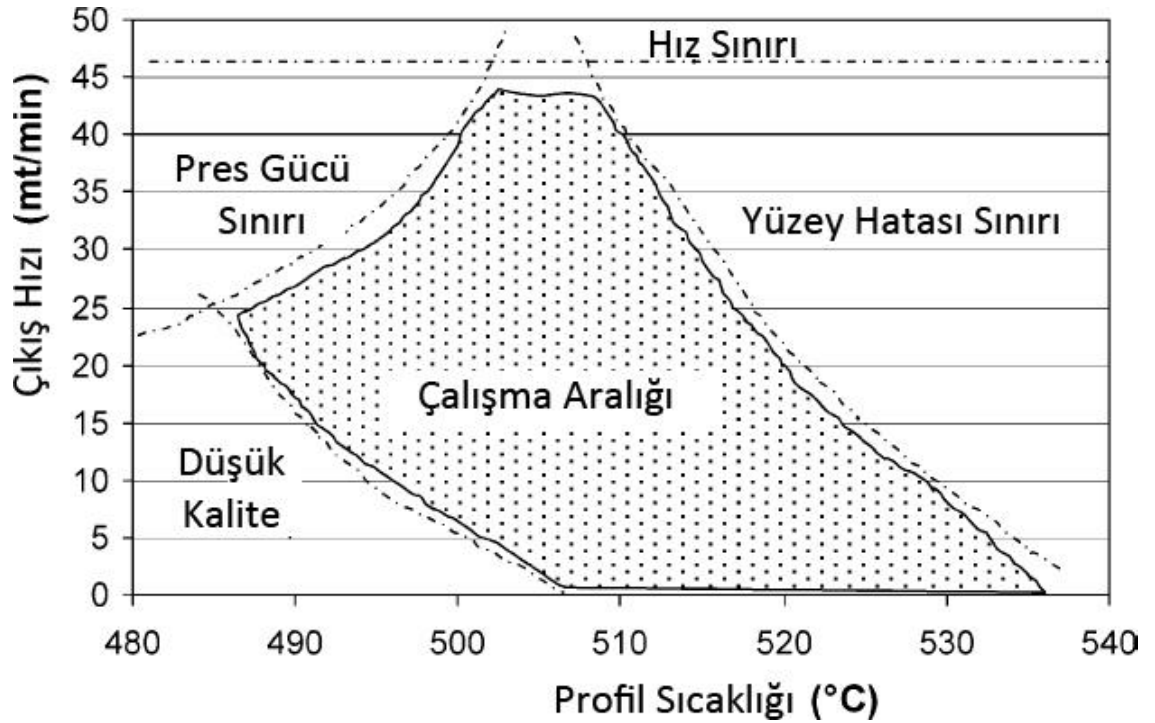
- Yüksek proses hızları kaynak bölgesinde yırtılmalara sebep olmakta ve kaynak kalitesi düşmektedir.
- Kaynama odasının uzunluğu arttıkça kaynak oluşumu sıfırdan bölgeye ve oradan da tam kaynak haline doğru gelişmektedir.
- Kaynak odasının tam olarak dolmaması kaynağın mekanik özelliklerini ve tokluğu oldukça düşürmektedir.
- Bu çalışma kapsamında kaynama odasının üç bölgeden oluştuğu ve bu bölgelerdeki değişimlerin şu şekilde olduğu vurgulanmıştır:
 - İlk bölge ölü bölgedir. Düşük hız mevcutken, basınç en yüksek değerdedir. Efektif gerilme ise en düşükten en yüksek değere doğru sıçrama yapar.
 - İkinci bölge esas kaynak bölgesidir ve basınçta düşüş meydana gelirken hızda artış olmaktadır. Efektif gerilme ise neredeyse aynı değerindedir.
 - Üçüncü bölge ise matris ağzı bölgesidir. Burada en düşük kontak basıncına ve en yüksek hıza ulaşılır. Efektif gerilme biraz düşmekle birlikte deformasyon maksimum değerindedir çünkü halen profile son şekli verilmemiştir. Şekil 8.10' da 6082 alaşımıyla yapılmış bu deney için kaynak odası içersindeki basınç, hız ve efektif gerilme değişimleri verilmiştir [28].



Şekil 8.10 Kontak basıncı, hız ve efektif gerilmenin kaynak odasındaki dağılımı [28]

8.5 Ön oda ve Kaynak Odası Tasarımının Kaynamaya Birlikte Etkisi

Ekstrüzyon prosesinde matris tasarım safhasının ne kadar önemli olduğunu şu ana kadar görmüş bulunmaktayız. Tahmin edilebileceği gibi operatörün değiştirebilme imkanına olduğu sadece iki parametre vardır. Bunlar bloğun ön tavlama sıcaklığı ile ıstampa hızıdır. Bu durumda kaliteli ve verimli bir ekstrüzyon işlemi proses parametreleri ile birlikte matris tasarımı üzerine yoğunlaşıldığında elde edilebilmektedir. Son olarak inceleyeceğimiz bu konu da literatürdeki bir çalışma ile desteklenecektir.



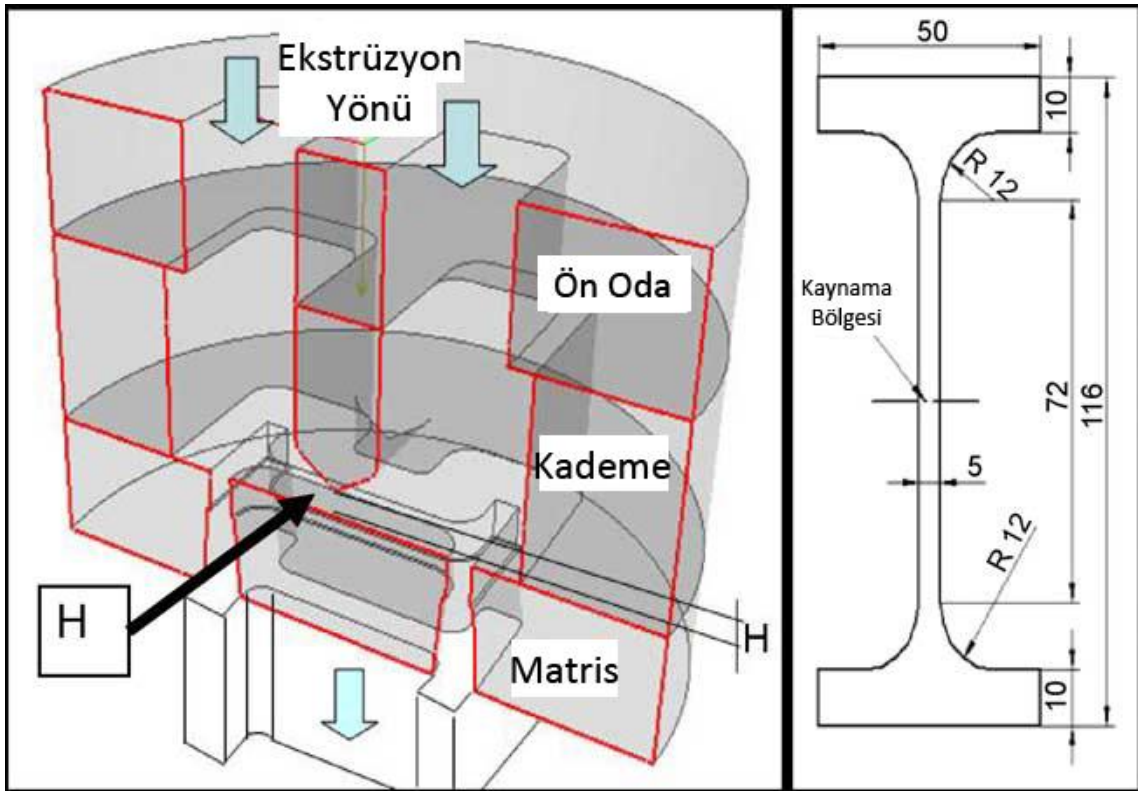
Şekil 8.11 Ekstrüzyon limit diyagramı [27]

Şekil 8.11' de ekstrüzyon limit diyagramı görmekteyiz. Bu diyagram dört önemli koşula dayandırılmıştır:

- Basınç gereksinimi
- Presin hız limitleri
- Mekanik özellikler
- Yüzey hataları

Tüm bu özelliklerin arasında ise çalışma alanı bulunmaktadır. Verimlilik açısından yüksek hızlarda çalışabilmek gereklidir. Bu nedenle çalışma alanının her zaman üst noktaları hedeflenmektedir. Ancak görüldüğü gibi hız sınırına yaklaştıkça çalışma alanı darlaşmakta ve proses üzerindeki kontrol zorlaşmaktadır.

Yırtılma uniform olmayan hızların ve yüksek sıcaklıkların bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Yüzey kusurları ise blok-matris bölgesindeki adhezyonun bir sonucudur ve yüzeyde kalkmalar veya çukurcuklar şeklinde kendini belli eder. Kaynama odasında elde edilen yetersiz basınç ise daha önceden de belirttiğimiz gibi kötü kaynak kalitesini doğurmaktadır. Fakat unutulmamalıdır ki bu çalışma alanı 6082 alaşımından H profilin ekstrüzyonu için tam olarak geçerlidir. Her profile ve her alaşıma tam olarak bu çalışma alanını uygulamak mantıklı değildir. Buradaki amaç bu grafikten yola çıkarak tasarımsal bazı genellemelere gitmektir [27].

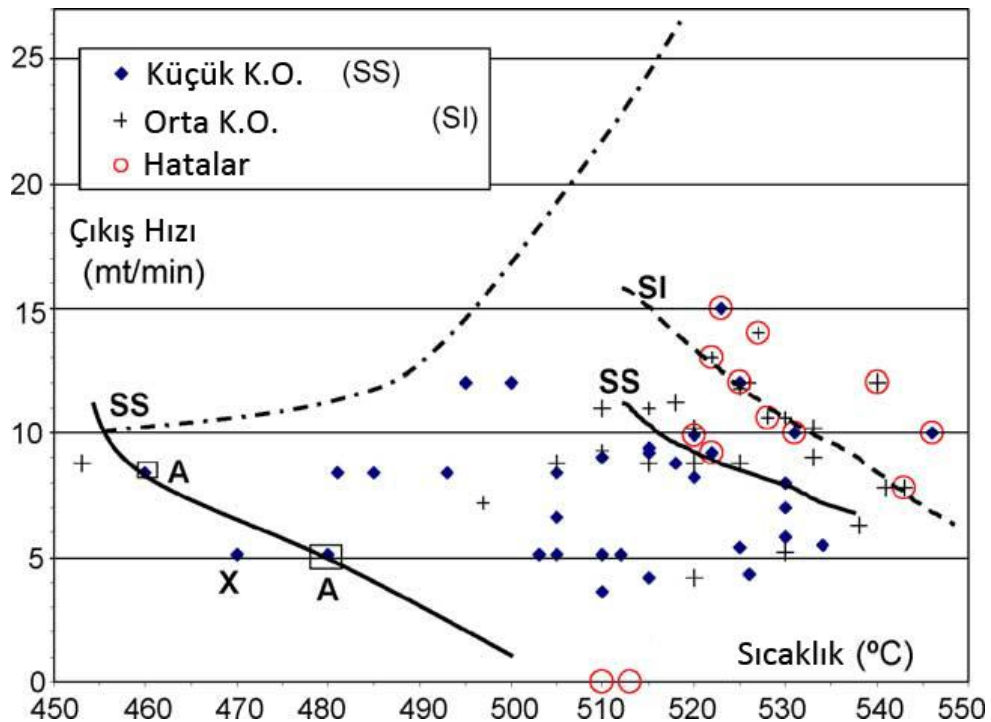


Şekil 8.12 Matris montajı ve profil ölçüleri [27]

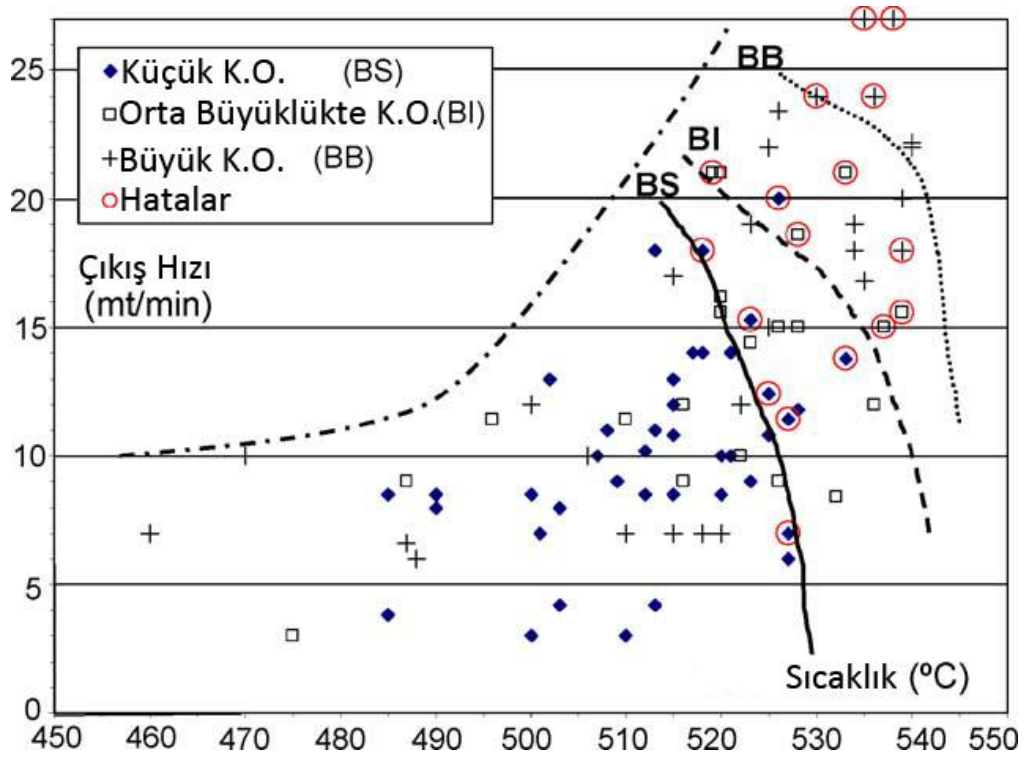
Deneyde Şekil 8.12' deki matris parçaları kullanılmıştır. Tasarımsal farklılıklar ön odalarda ve kaynak odasında yapılmıştır. Ön odalarda farklı iki tip kullanılmıştır. Kesit alanı olarak dar ve geniş olmak üzere seçimler yapılmıştır. Kaynak odasında ise

yükseklikler kısa, orta ve uzun olmak üzere tercihlerde bulunulmuştur. Her seçimde ekstrüzyon oranı sabit tutulacak şekilde prosesler gerçekleştirilmiştir ve farklı sıcaklıklara ön ısıtılmış bloklar kullanılmıştır. Deney sırasında her işlemde yüzey hataları oluşana dek proses hızı gittikçe artırılmış ve ardından düşürülerek iyi kaliteli profilin oluştuğu an denge anı olarak korunmuştur. Proses sonrası T6 tavlmasına tabi tutulan profiller üzerinde çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda uzama konusunda yorum yapmak pek mümkün olmamıştır. Çünkü profillerin kesit kalınlıkları matris tipine göre değişmektedir. Bu durumda bir bloktan elde edilebilecek parça uzunluğu da değişmiş olmaktadır. Fakat eş değer gerinim yorumu yapılabilmesi mümkündür. Çekme deneyinde boyunlanmanın olduğu yeri inceleyerek bunu yapmak mümkündür [27].

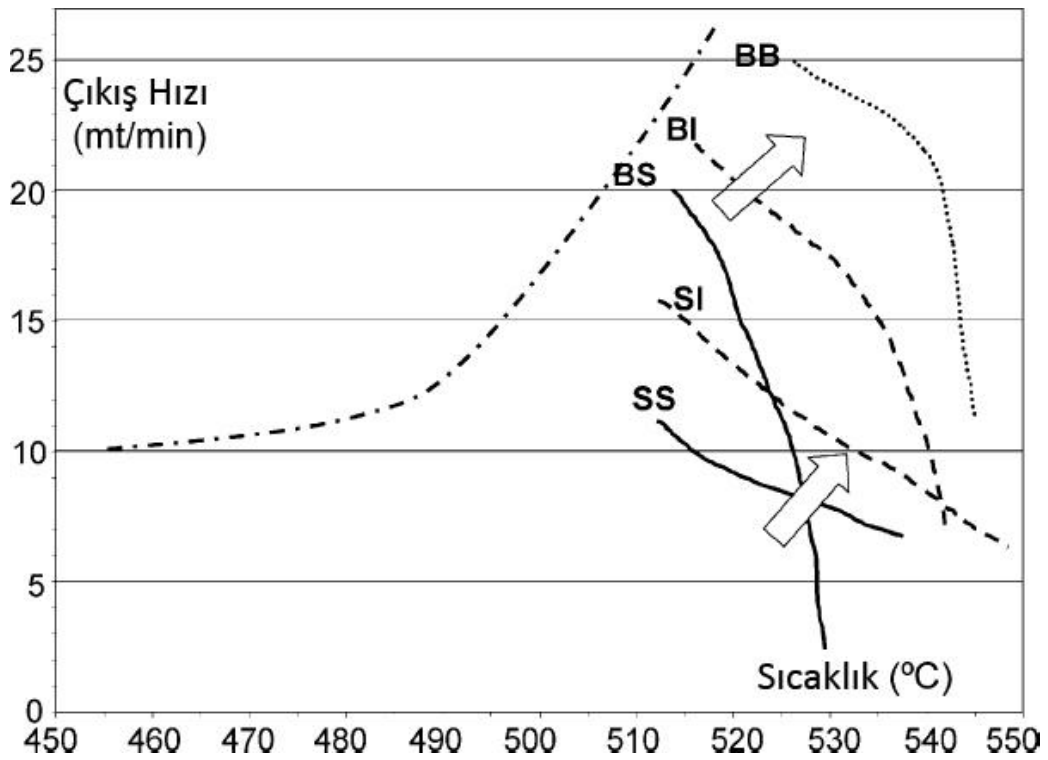
Yapılan çalışmalar sonucu profil kesit kalınlığı ile yırtılma arasında doğrudan bir bağlantı görülememiştir ve çalışmanın geri kalan kısmına profil kesit kalınlığı etkisiz olarak görülmüştür. Bunun yanı sıra büyük ön odaların olduğu uygulamalarda kaynak odası varyasyonları kırılma gerilmesine daha az etki etmiştir. Yüksek basınç elbette ki daha iyi bir kaynama demektir fakat yırtılma açısından yüksek basınçlı uygulamaların parametrelere daha hassas olduğu da görülmüştür. Uygulamanın sonuçlarını geniş bir şekilde Şekil 8.13, Şekil 8.14 ve Şekil 8.15' teki grafiklere dayanarak açıklayabiliriz.



Şekil 8.13 Küçük ön oda ile küçük ve orta büyüklükteki kaynama odasının ekstrüzyon limit diyagramına etkisi [27]



Şekil 8.14 Büyük ön oda ile küçük,orta ve büyük kaynama odasının ekstrüzyon limit diyagramına etkisi [27]



Şekil 8.15 Ön oda ve kaynama odası boyutlarının ekstrüzyon limit diyagramına etkisi
[27]

Yukarıdaki şekillerde çeşitli limit eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler anlaşılacağı gibi küçük ön odalarla büyük ön odalara aittir. Her iki tip ön oda için kullanılan kaynak odaları büyüklüklerine göre limit eğrileri de değişmiştir. Sırasıyla açıklayacak olursak, küçük ön odaların kullanıldığı uygulamada küçük kaynak odasından orta büyüklükteki kaynak odasına geçildiği anda yüzey hatası limit eğrisi sağ tarafa doğru ötelenmiş olmaktadır. Bu da hem izin verilen maksimum sıcaklığı artırmakta hem de daha önemlisi hız limitini yukarı taşımaktadır. Oranlandığında ise verimlilikte %40 artış sağlamak mümkün olmaktadır.

Büyük ön odaların kullanıldığı uygulamalarda ise benzer verimlilik artışı görülmektedir. Fakat ilginç olan durum ön odalar büyüdüğünde limit eğrilerinin konkavdan konvekse dönmeleridir. Bu durum çalışma alanının daha çok genişlemesi ve daha yüksek sıcaklıklarla daha hızlı çalışılması anlamına gelmektedir.

Bu sonuçlara bağlı olarak şunu söyleyebiliriz ki, ön odaların mümkün oldukça büyük seçilmesi verimlilik açısından önemlidir. Fakat burada bir limit durumu bulunması gerekir. Bu durum da matris malzemesinin dayanımıdır. Ön odalar büyütüldüğü zaman odalar arasındaki köprü bağlantılarının inceleyeceği tahmin edilebilecek bir durumdur. Daha ince bağlantılar demek basınca daha hassaslaşma anlamına gelir. Bu durumda proste gerekli basıncın mutlaka matris malzemesi üzerinde testinin yapılması zorunludur. Ancak bu şekilde optimum tasarıma gidilebilir. Matris tasarımcıları da aynı fikri paylaşmakta ve aynı matris malzemesi kullanılırken ön odalar konusunda daha fazla bir ilerleme yapmanın mümkün olmadığını belirtmektedirler.

Bu koşullar altında verimliliği artırmak için kaynak odasının genişletilmesi yönünde ilerleyebiliriz. Yüksek hızlara ve düşük ekstrüzyon basınçlarına büyük kaynama odaları ile ulaşmak mümkündür. Fakat şunu unutmamak lazımdır ki büyük kaynama odaları sürtünmenin artmasına neden olmaktadır. Bunun aksine gerinim, akma gerilmesi ve toplam ekstrüzyon kuvveti ise düşmektedir. Kaynak odası küçüldükçe bunların aksini söylemek mümkündür. Ön odalarda tasarımsal limitler bulunabilirken, kaynak odalarının tasarımında esneklik daha fazladır.

BÖLÜM 9

UYGULAMA

9.1 Uygulamanın Amacı ve İçeriği

Bu bölüme kadar incelenen konuların hepsi uygulama bölümünde yapılacak çalışmalara zemin hazırlamış bulunmaktadır. 2,3 ve 4 numaralı bölümlerde ekstrüzyon prosesi tanıtılmış ve alüminyumun ekstrüzyonu hakkında çeşitli bilgilendirmeler yapılmıştır. Daha sonra sonlu eleman analizinin faydaları ve bu konuyla ilgili yazılımların çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. 6 numaralı bölümde ise bugüne kadar sonlu eleman analizleri ile modellenmiş ekstrüzyon proseslerinden ve sonuçlarından örnekler verilerek bu tez çalışması kapsamında modellenecek prosesin parametre seçim temelleri oluşturulmuştur. Daha sonra alüminyumun ısıtılmasının öneminden bahsedilmiş ve ardından ekstrüzyon matrislerinde malzemenin akışı ve kaynamanın incelenmesi yapılmıştır.

Öncelikler bu çalışma kapsamında nelerin inceleneceğini belirtmek faydalı olacaktır. Helisel nervürlü bir alüminyum borunun ekstrüzyonu sırasında meydana gelebilecek çeşitli aksaklıkların önceden irdelenmesi gerekmektedir. Bu tip bir borunun ekstrüzyonu sırasında şu soru işaretleri akıllarda belirmektedir:

- Kaynama odasında görsel ve mekanik özellikler açısından uygun bir kaynamanın oluşması mümkün müdür?
- Alışlageldik bir borunun ekstrüzyonundan farklı olarak matriste değişiklik yapılması gerekir mi?

- Parametreler nasıl seçilmelidir ki hem verimli olmak açısından yüksek ıstampa hızlarında çalışılabilsin hem de profilin matristen çıkış sıcaklığı ek bir çözündürme tavlamasına ihtiyaç duymadan yüksek dayanıma sahip olsun?
- Tasarımda kullanılan helisel nervürlü boru, ekstrüzyon prosesinin ardından istenilen geometrik doğruluğa sahip olacak mı?

Tüm bu soruların esas kaynağı borunun dış nervürlerinden ileri gelmektedir. Standart kesitli bir borunun ekstrüzyonuna ait endüstride sayısız uygulama mevcuttur. Bununla birlikte standart bir boru kesiti, ekstrüzyon ürünleri içerisinde ekstrüzyon edilebilirlik açısından en basit içi boş profillerdir. Bunun sebebi boruların kesit kalınlıklarının profilin her yerinde aynı olması ve tüm ekstrüzyon proseslerinde olduğu gibi profilin matris ağzından tek ekseninde düz olarak çıkmasıdır. Oysa ki helisel nervürlü bir borunun kesit kalınlığı profilin bazı bölgelerinde diğer kısımlarına göre daha fazladır ve profil matris ağzından çıkarken dönel bir hareket yapmaktadır.

8 numaralı bölümde hem ekstrüzyonda malzeme akışını hem de kaynama oluşumunu incelemiştik. Matris ağzından dönel hareket yaparak çıkacak bir profil kaynama odasında girerken dönel bir hareket yapmaya yönlendirilmelidir. Bu durumda matriste standart bir boru profili imal edilen matrislere göre değişiklik yapılması zorunludur. Fakat bu değişikliğin kaynama kriterini nasıl etkileyeceği sorgulanmalıdır.

7 numaralı bölümde ise alüminyumun ısı işleminde bahsetmiştik. Bu konu kapsamında ekstrüzyon prosesinde uygun parametre seçimiyle proses sonrası çözündürme tavlama ihtiyacını ortadan kaldırmanın mümkün olabileceği belirtilmişti. Bunun sebebi sıcak ekstrüzyonun yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen bir proses olması ve ekstrüzyon oranına uygun ıstampa hızları ve doğru seçilmiş blok ve takım sıcaklıklarıyla, çözündürme tavlama sıcaklığında çıkış elde edilebilmesidir. Profilin matris ağzını terk etmesinden itibaren hızlı hava akımıyla soğutulması da sağlanabiliyorsa zaten çözündürme ısı işleminin ekstrüzyon prosesinin içine dahil olduğunu söylememiz mümkün olmaktadır. Proses sonrası kurallara uygun bir şekilde uygulanacak çökeltme sertleştirme tavlama ile T6 kalitesinde bir profil elde etmek teorik açıdan mümkün gözükmektedir.

Tüm bu beklentilerin yanında geometrik kararlılık bir tasarımın en önemli noktalarından biridir. Endüstride benzer araştırmalar içerisinde yer alan fakat daha önce ürün olarak hiç piyasaya sürülmemiş bu tip bir uygulamanın istenilen helis adımına (veya helis açısına) sahip olup olmadığı ise yapılacak uygulamanın sonucunda görülecektir. Tasarımda ve analizlerde üretilebilirlik mümkün gözükse de fabrika ortamında üretilebilirlik ancak gerçek bir uygulamayla doğrulanabilmektedir.

Bu bölüm içerisinde öncelikle şekillendirme prosesleri için geliştirilmiş üç boyutlu sonlu eleman analiz yazılımı olan DEFORM-3D ile yapılmış simülasyonları kullanarak proses için gerekli matris tasarımlarını doğrulayacağız ve optimum proses parametrelerini belirleyeceğiz. Daha sonra tasarlanan matrisleri kullanarak fabrika ortamında profilin üretimini gerçekleştireceğiz. Son olarak ise üretilen profil üzerinde çeşitli kontroller ve testler yaparak simülasyonlar ile fabrika uygulamasını birlikte değerlendireceğiz. 10 numaralı bölümde ise sonuçları değerlendirerek gerekli önermeleri paylaşacağız.

9.2 DEFORM-3D ve FEM Modelinin Oluşturulması

9.2.1 DEFORM-3D

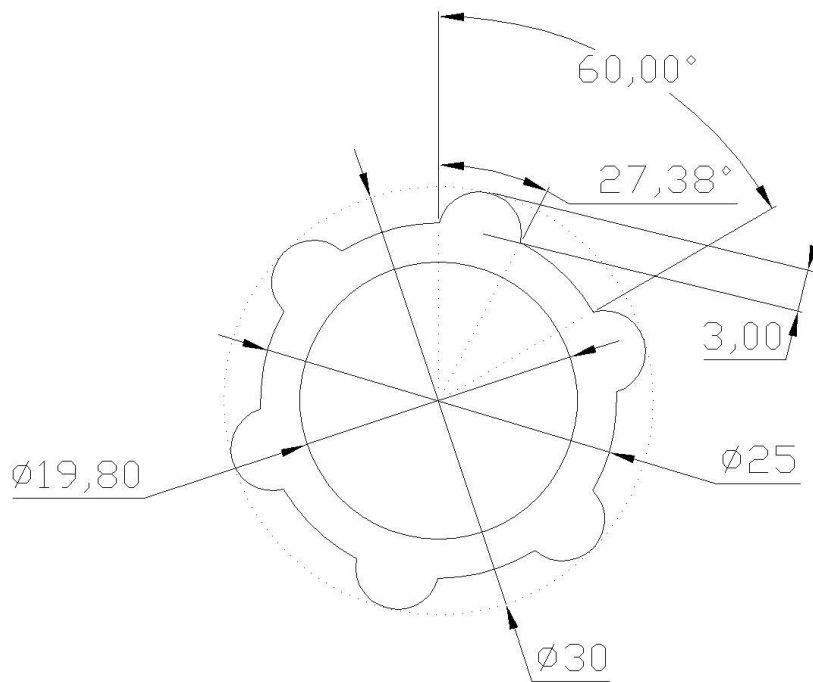
DEFORM-3D talaşlı ve talaşsız şekillendirme prosesleri ile takım dayanımı ve ısıtım işlem prosesleri üzerine yoğunlaşmış bir üç boyutlu sonlu eleman analiz programıdır. Kaplamalı veya kaplamasız olsun her türlü malzemenin yukarıda sayılan proseslerle alakalı olarak her çeşit sonlu eleman analizleri yapılabilen ve gerilme, gerinim, gerinim oranı, sıcaklık, hız, yer değiştirme ve hasar başta olmak üzere çok çeşitli ve detaylı sonuçlar alabilmek mümkündür. Yazılımın kendine ait bir mesh motoru bulunmakta ve otomatik veya kişisel olarak mesh özellikleri ayarlanabilmektedir. Bunun yanı sıra yazılımın kitaplığında birçok malzeme olmasına rağmen mevcut olmayan malzemelerin ise özellikleri rahatça eklenebilmektedir.

DEFORM-3D diğer sonlu eleman yazılımlarına benzer şekilde simülasyonun modellenmesinin yapıldığı bölüm, simülasyon ilerlerken mevcut durumun ve önceki adımların görsel ve sayısal olarak analiz edilebileceği bölüm ve simülasyon bitiminde birçok detaylı görsel ve sayısal sonuçların alınabildiği bölüm olmak üzere toplam üç ana kısımdan oluşmaktadır. Birçok FEM yazılımının aksine simülasyon işlerken mevcut

durumu gösterebilmesi ve herhangi bir hataya karşı müdahalenin yapılıp kalındığı yerden devam etmesini sağlaması açısından oldukça faydalı bir yazılım olmaktadır.

9.2.2 Tasarlanan Helisel Nervürlü Alüminyum Boru

Matrislerde yapılması gereken değişiklikleri belirleyebilmek amacıyla öncelikle üretilmesi istenen nervürlü alüminyum boru hakkında bilgi vermek gerekmektedir. Şekil 9.1' de tasarlanan profile ait kesit resmini görmekteyiz.



Şekil 9.1 Nervürlü alüminyum borunun ölçülendirilmiş kesit görünüşü

Yukarıdaki şekilde görülen nervürlü borunun ölçülerinin tamamı daha önceden de belirtilen bir istif rafı projesinin tasarımından ileri gelmektedir ve genel olarak görsel bir amaca dayalıdır. Bununla birlikte iç çap ve nervür haricindeki dış çap ise standart bir borunun ekstrüzyonu için kullanılan bir kalıbı modifiye ederek uygulama sürecini hızlandırabilmek amacıyla 19,80 mm ve 25 mm ölçüsünde tercih edilmiştir.

Tasarım sürecinde ortaya çıkarılan nervürlü borunun en önemli geometrik özelliği ise helis hatvesi (veya helis açısı) olmaktadır. İşlevsel açıdan büyük önem taşıyan bu özelliğin proses sonrası istenilen şekilde elde edilmesi amaçlanmaktadır. İstif rafı projesi için helis hatvesi değerinin tolerans aralığı geniş olmaktadır. Fakat üç boyutlu ortamda tasarlanmış parçanın helis hatvesi istenilen değere ne kadar çok yaklaşırsa,

ilerde daha farklı ve daha dar tolerans gerektiren benzer uygulamalarda ekstrüzyon yönteminin kullanılabilirliği o ölçüde ümit vaat edecektir. Şekil 9.2' de tasarlanan helisel nervürlü borunun üç boyutlu tasarım yazılımıyla elde edilmiş modelini görmekteyiz.

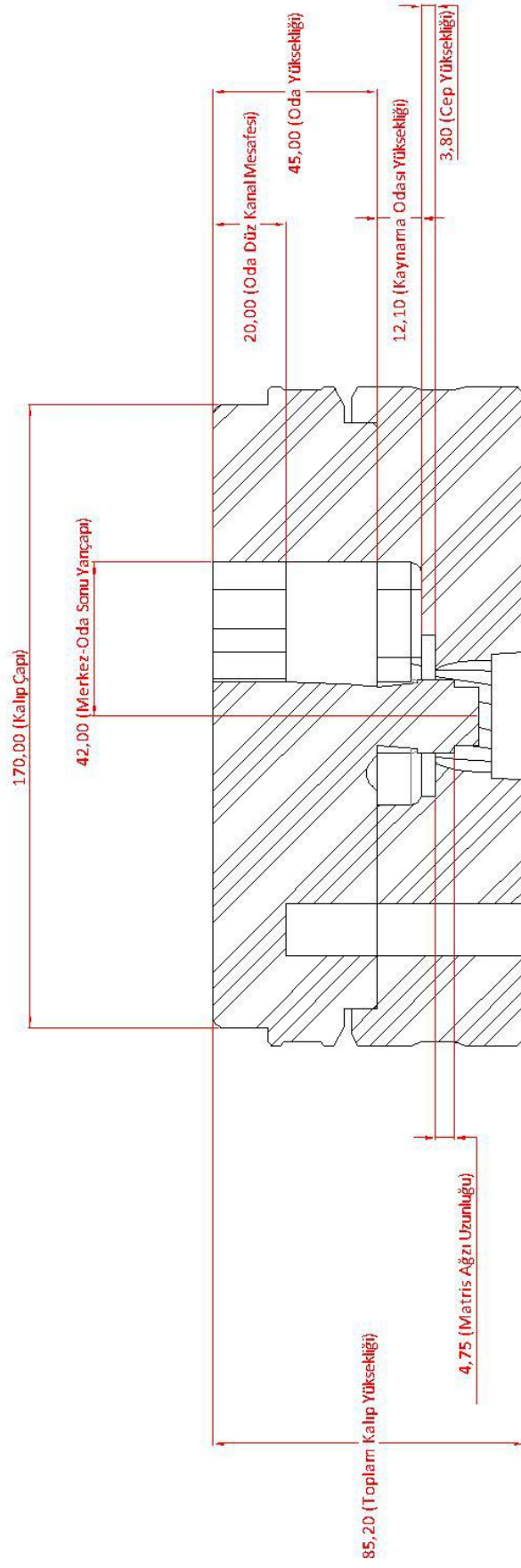


Şekil 9.2 Helisel nervürlü alüminyum borunun bilgisayar destekli modeli

Yukarıdaki şekilde helisel nervürlerin aşağı istikamette saat yönünün tersine döndüğünü görebiliriz. Tasarım sırasında elde edilen veriler doğrultusunda helis hatvesinin 355 mm olduğunu veya başka bir şekilde ifade edecek olursak helis açısının $12,5^\circ$ olduğunu söyleyebiliriz.

9.2.3 Matrislerin Tasarımı

Önceden de belirtildiği gibi profilin iç ve dış çaplarının belirlenmesinde endüstride kullanılan standart ekstrüzyon mamulü boruların ölçüleri esas alınmıştır. Bu nedenle üzerinde modifikasyonların yapılacağı matrisler olarak iç çapı 20 mm ve dış çapı 25 mm olan borular için standart haldeki ekstrüzyon matrisleri kullanılmıştır. Matrislerin ölçüsel ayrıntılarını ve bu ayrıntıların dayandığı temelleri Şekil 9.3 yardımıyla açıklayabiliriz.



Şekil 9.3 İmalatta kullanılacak ekstrüzyon kalıbının ölçülü yarım kesit görünüşü

Şekilde görülen kesit görünüşte kalıbın iki ayrı parçasının montaj hali bulunmaktadır. Üst taraftaki parça odaları ve sahip olduğu mandrel uzantısı sayesinde iç çapı oluştururken alt taraftaki parça ise matrisi ve dış çapı oluşturmaktadır. Birçok ölçü endüstride kullanılan ve daha önce bahsedilen boru kalıbı ile aynıdır. Matris üzerinde yapılan modifikasyonlar ise şöyle açıklanabilir. Öncelikle malzemenin kaynama bölgesine gelmeden önce gerekli dönel harekete hazırlanması gerekmektedir. Bu nedenle 45 mm yüksekliğindeki odaların ilk 20 mm' lik mesafesi düz geçilirken, sonraki 25 mm' lik kısımda odaların tek yönlü olarak genişletildiği Şekil 9.4' te görülmektedir. Bu genişletme sonucunda odalardan geçen malzeme kaynama odasına tek yönlü olarak genişleyerek girecek ve komşu odadan gelen malzemeyle kesişerek hem kaynamayı gerçekleştirecek hem de malzeme akışı yön vektörlerinin toplamı sonucunda dönel bir hareket kazanacaktır. Bu sayede bir yoğunlaşma etkisi de ortaya çıkmakta ve kaynama çizgilerinin görülmeyecek bir hal alması da beklenmektedir.

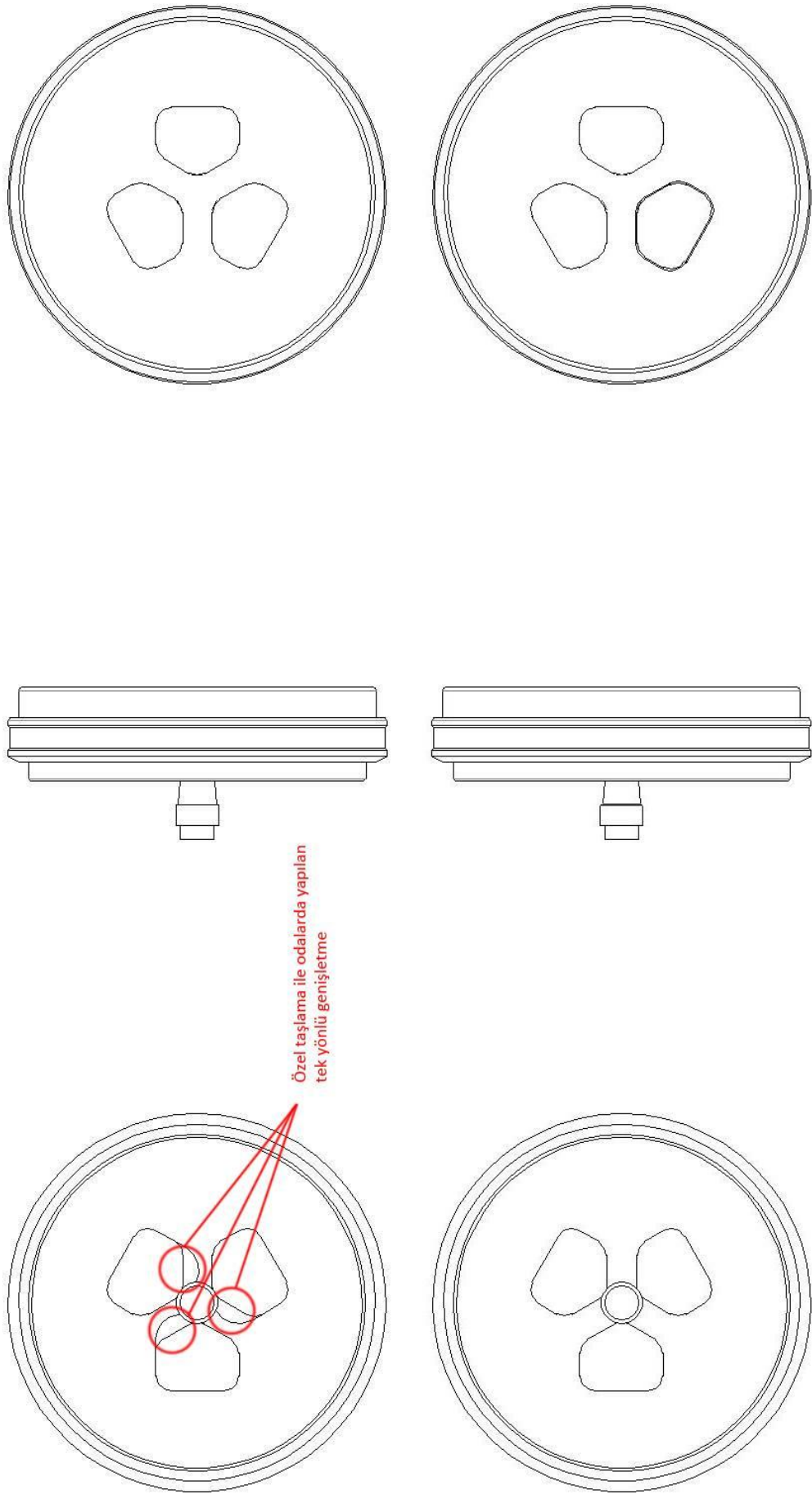
Bu açıklamanın ardından odaların neden tek yönlü genişletilirken odaların diğer duvarlarının daraltılmadığı (bu sayede malzemenin tamamı odadan dönerek çıkabilirdi) ve neden tüm odalara dönel bir hareket verilmediği gelebilir. Her iki durum da malzemenin daha uniform olarak döndürülebilmesini sağlayabilirdi. Fakat bahsedilen tipte odaların yapılabilmesi hem tamamen yeni bir matris yapılmasını gerektirecek hem de standart matris kullanılamayacağı için maliyetin artmasına neden olarak zaman kaybını da beraberinde getirecektir. Fakat şekilde görülen matris özel aparatlarla gerçekleştirilecek basit bir taşıma işleminin sonucunda elde edilebilmektedir. Uygun bir kaynama da sağlanabiliyorsa en az maliyet ve zaman ile uygun bir matris elde edildiği söylenebilir.

Bazı matris ölçülerinden de bahsetmek yararlı olacaktır. Şekil 9.3' te görülen 170 mm dış çapa sahip matrisler çoğu ekstrüzyon tesisinde kullanılan 127 mm (5 inç) bloklar için standarttır. Bununla birlikte boru ekstrüzyonunda genelde üç veya dört adet oda kullanılmaktadır ve odaları bölen köprülerin kalınlıkları gereken ekstrüzyon kuvvetine bağlı olarak kalıbın dayanabileceği şekilde minimum genişliğe sahip olmaktadır. Bu uygulamada köprü genişliği 14 mm olmaktadır. Böylece 8 numaralı bölümde bahsettiğimiz gibi maksimum büyüklükte odalar elde edilmeye çalışılarak kaynama için iyi bir zemin hazırlanmış olmaktadır. Yine aynı konu içerisinde örnek verilen bir

uygulamada kaynak odası yüksekliğinin 15 mm seçilmesinin iyi bir kaynama için yeterli olacağı vurgulanmıştı. Bu uygulamadaki matriste ise 12,1 mm' lik kaynama odası ardından gelen 3,80 mm' lik cep ile toplamda yaklaşık 16 mm' lik yüksekliğe ulaşmaktadır. Kaynamanın matris girişinden hemen önce tamamlandığını daha önce belirtmiştik. Bu durumda kaynama odası yüksekliği seçiminin de yeterli olacağını söylemek mümkün olmaktadır. Cep kullanımı değişken kesitli profillerde sıkça rastlanmaktadır. Bunun yanı sıra boru ekstrüzyonunda ise kullanılıp kullanılmaması matris tasarımcısının tercihine dayalı olmaktadır. Bu uygulamada ise nervür bulunan bölgede kesit kalınlığının değişimi söz konusu olduğundan cepli matris tercihi yapılmıştır. Cep kullanımının avantajlarını kısaca şöyle özetleyebiliriz:

- Daha rahat metal akışı
- Daha rahat plastik deformasyon
- Daha az sıcaklık artışı
- Daha düşük ekstrüzyon basıncı
- Daha küçük ölü metal bölgesi

Matris ağzı uzunluğu ise üzerinde duracağımız son ölçü olacaktır. Tasarlanan matris 4,75 mm 'lik matris ağzı uzunluğuna sahiptir. Yine 8 numaralı bölümde detaylı incelendiği gibi matris ağzı uzunluğunun çeşitli etkileri olmaktadır ve 4,5 mm' lik uzunluk her koşul göz önünde bulundurularak optimum değer olarak seçilmiştir. Bu uygulamadaki farkın ise önemsenmeyecek derecede olduğunu söyleyebiliriz. Burada mandrelin oluşturulmasına değinmek gerekmektedir. Matris imalatının çok daha ucuz olması amacıyla mandrel görevindeki parça odaların bulunduğu matris parçasına (porthole) sonradan kaynak edilmektedir. Bu kaynak işlemi sırasında veya ufak mandrel parçasının imalatında çeşitli farklılıklar olmaktadır. Bu yüzden kabul edilebilir düzeyde ufak ölçüsel oynamalar normal karşılanmaktadır. Bu uygulamada matris modifikasyon gördüğünden dolayı standart boru kalıbının mandrelle önce kesilerek çıkartılmıştır. Ardından oda çıkışlarına önceden bahsedilen özel taşlama işlemi yapılmış ve mandrel tekrar kaynatılmıştır. Matris ağzı uzunluğundaki sapma bu durumdan da kaynaklanmaktadır.



Şekil 9.4 Modifiye edilmiş odalar (üst), standart boru ekstrüzyon odaları (alt)

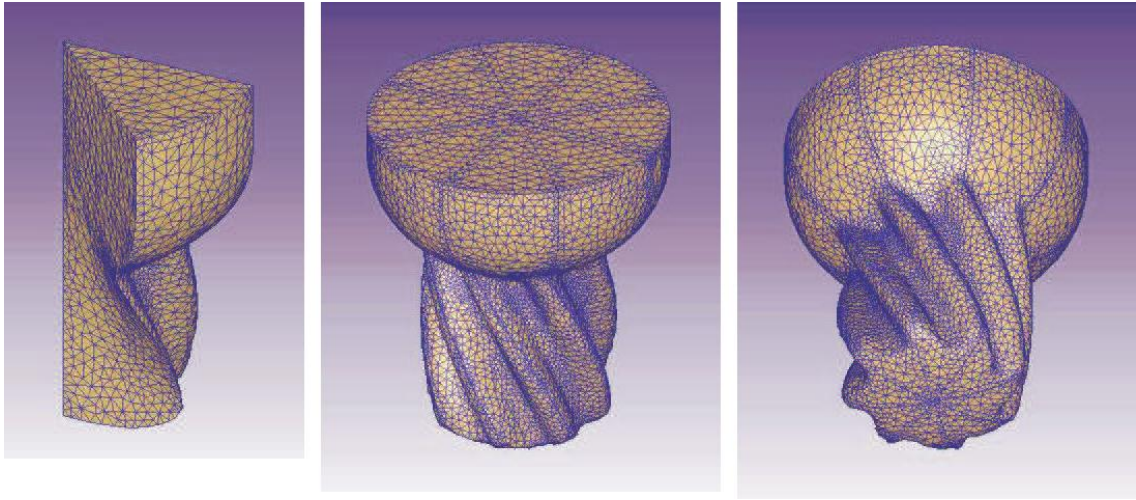
9.2.4 FEM Modeli Oluşturulmasındaki Problemler

Sonlu eleman analizleri zaman alan süreçlerdir. Fakat şekillendirme proseslerinde seri üretim öncesi yapılan yüksek maliyetli birçok denemenin önüne geçmekte benzersiz analizlerdir de. Ekstrüzyon prosesinde tasarlanan bir kalıbın denemelerinin fabrika ortamında yapılması, uygun olmadığı görölen matrislerin hurdaya ayrılarak yeni matrislerin imal edilmesi, bu sırada fabrika hattındaki durmalar ve boşa harcanan bloklar maliyetli olmakta ve zaman kaybettirmektedir. Sonlu eleman analizleri sayesinde çoğu zaman ilk deneme ile birlikte seri üretime geçmek mümkün olabilmektedir. Sonlu eleman analizlerinin kapsayacağı süreç mesh detayına ve istenilen analizlere göre değişiklik göstermektedir. Mesh detayının yüksek olması gerçeğe çok yakın sonuçlar elde ettirmekle birlikte analiz sürecine uzatmaktadır.

Bunun yanı sıra sonlu eleman analizlerinde ayrılan iş parçasının tekrardan kendisiyle birleşmesi henüz geliştirilmemiş bir süreçtir. Kendine nüfuz eden malzeme yazılım tarafından hata olarak nitelendirilmekte ve yeniden mesh etme sırasında tekrar kendisinden ayrılmaya zorlanmaktadır. Literatürde yapılan çalışmaların sadece birkaçında özel ek kullanıcı yazılımlarıyla kaynamanın simüle edildiği görölmüş veya birleşme bölümünde simülasyona müdahale edilerek mesh noktaları el ile birleştirilmiştir. Yapılan müdahaleler ya özel çalışma olmakla ya da çok zaman gerektirmekle sınırlıdır. Bunların haricindeki diğer sonlu eleman çalışmaları ise herhangi bir düzleme göre simetrik kesitli profillere, aynı matristen aynı tip profilin birden çok sayıda çıkartıldığı veya odalara ayrılıp daha sonra kaynatarak yine herhangi bir düzleme simetrik olabilecek profillere ait uygulamalar içermektedir. Tüm bu uygulamalarda matrisler ve iş parçası simetrik eksenlere göre ufak parçalara bölünmektedir. Bu sayede hem kaynama içeren uygulamalar iş parçasının kendine teması olmadan simüle edilmekte hem de kaynama olan veya olmayan tüm uygulamaların analiz süresi simetri eksen oranında azalmış olmaktadır. Örneğin içi boş bir borunun dört odalı matris ile ekstrüzyonunda kaynama bölgeleri köprülerin tam altında yer almaktadır. Bu durumda simülasyon modeli 90° açıyla çizilecek dört adet düzleme simetrik olduğundan, tüm modeli kullanmak yerine modelin 1/4' ü kullanılarak hem dörtte bir zamanda simülasyonu tamamlamak mümkün olmakta hem de simetri düzlemleri kaynama bölgeleri olduğundan malzemenin kendisiyle

çakışmadan kaynamanın simule edilmesi sağlanmış olmaktadır. Fakat bu şekilde oluşturulmuş bir simülasyonda kaynama sürekli başarılı bir şekilde gerçekleşiyormuş gibi görünür. Oysa ki kaynama düzlemlerinde malzemenin sahip olduğu gerilmeler incelenmeli, yorumlanmalı ve ardından kaynamanın meydana gelip gelmeyeceğine karar verilmelidir. Uygulama içersinde bu konuya yakından değineceğiz.

Önceden de belirtildiği gibi helisel nervürlü bir boru matrinden dönel bir hareketle geçmektedir. Başka bir deyişle parça herhangi bir düzlemsel simetriye sahip değildir. Fakat dönel olarak parça kendisini tekrar etmekte ve bu profil dönel simetrik olarak nitelendirilmektedir. DEFORM-3D dönel simetrik parçaların analizlerini yapabilmektedir. Kaynama olmayan dönel simetrik parçaların ekstrüzyonunda simülasyon istenilen oranda dilimlenir ve analiz modeli malzeme matrinden çıkana değin düzlemsel simetrik olarak nitelendirilir. Matrinden çıkan malzeme dönel hareket yapmaya başlayınca dönel simetri eğrisel düzlemleri profil diliminin iki yanı olarak kabul edilir. Şekil 9.5' te bunun bir örneğini görmekteyiz.



Şekil 9.5 FEM yazılımında 1/8' i modellenmiş dişli

Fakat helisel nervürlü boru dönel simetrik olsa da, bu koşul çerçevesinde uygulama dahilinde hazırlanmış simülasyonlar hiçbir sonuca ulaşmadan hata ile sonuçlanmışlardır. Helisel nervürlü borunun odalara ayrılmasının ve doğal olarak kaynama düzlemlerine sahip olmasının yazılımı hataya uğratan nokta olduğu düşünülmektedir. Bu şartlar altında DEFORM-3D yazılımında helisel nervürlü bir borunun hem tam ne de kısmi olarak modellenmesi şu an için yapılamamaktadır.

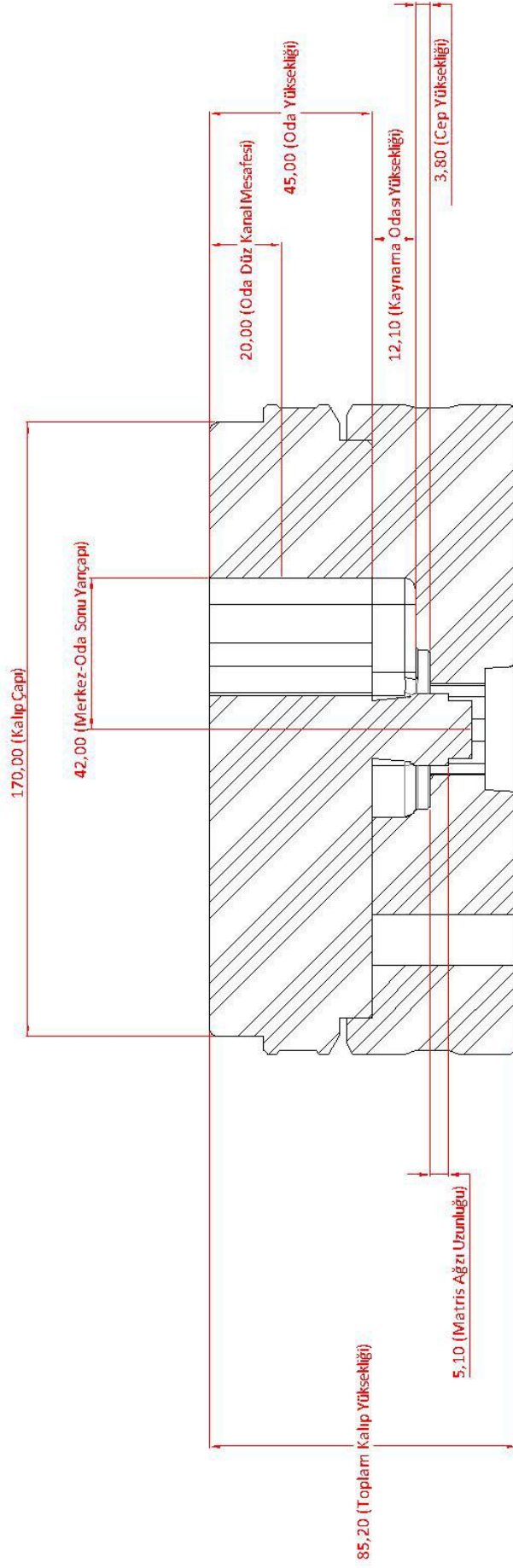
Uygulamanın amacı olan incelemelerin gerçekleştirilmesi için çeşitli değişiklikler yaparak farklı bir modelleme yapma yoluna gidilmiştir. Bir sonraki bölümde nasıl bir kalıbın modellemede kullanıldığını göreceğiz.

9.2.5 DEFORM-3D Yazılımında Kullanılan Matris Modeli

DEFORM-3D için oluşturulacak yeni matris modelinin helisel nervürlü bir boruyu şu an için simule edemeyeceğinden söz edildi. Bu durumda sonlu eleman analizi için yeni matris modelinin şu çerçevede düşünülmesi gerekmektedir:

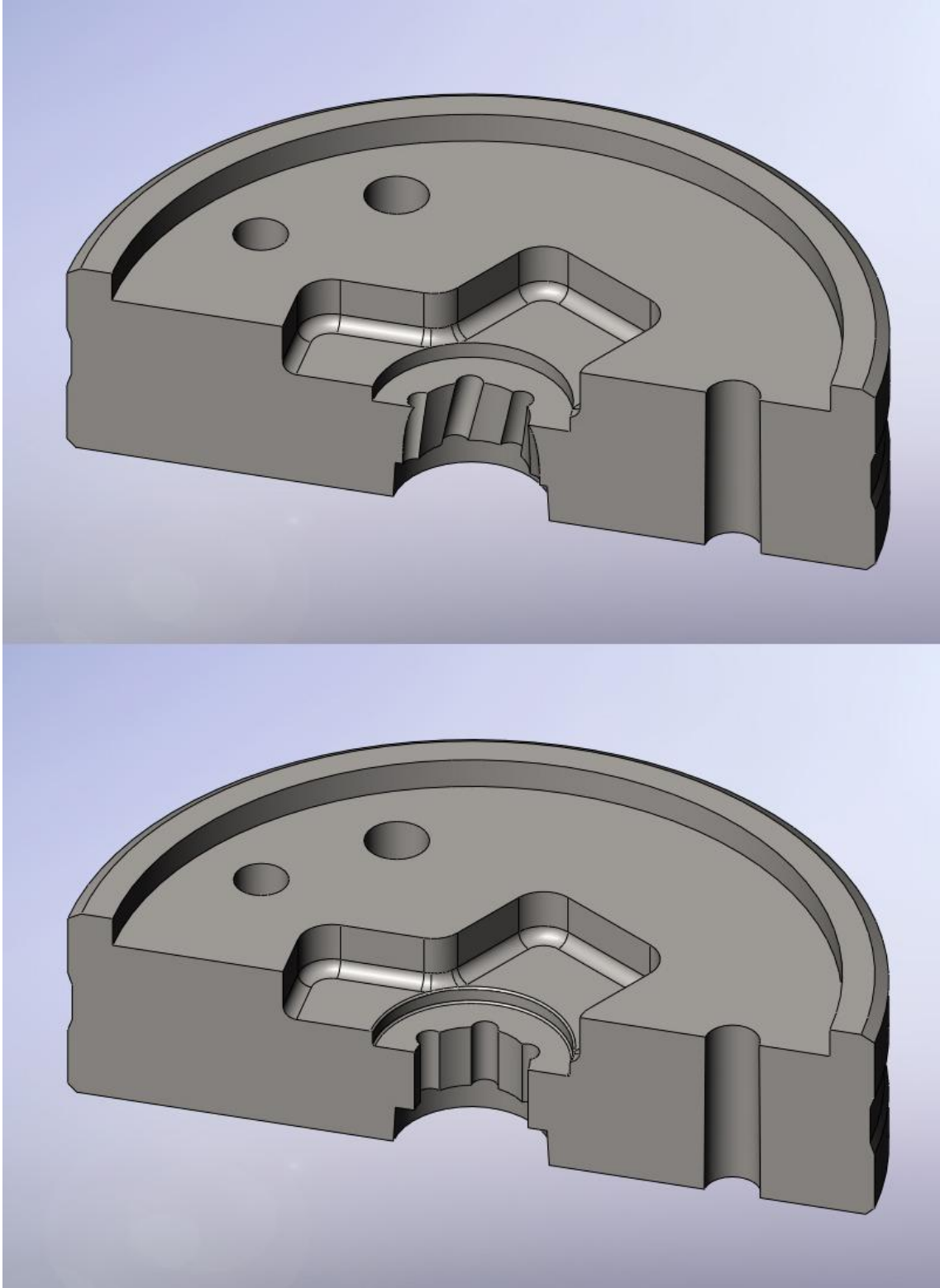
- Üç odadan meydana gelen matriste kaynama durumunun incelenebilmesi için kalıbın 1/3' ünün modellenmesi gerekmektedir.
- Helisel nervürlerin dönel simetrik olması nedeniyle düzlemsel simetri sağlayacak düz nervürlerin kullanılması gerçek kalıba en yakın simülasyonu sağlayacaktır.
- Matris ağzı uzunluğunun yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir.

Son maddeyi biraz daha açıklığa kavuşturmak faydalı olacaktır. Helisel nervürlü boru matris ağzından geçerken dönel bir hareket yapmaktadır. Bu durumda Şekil 9.3' te gösterilen 4,75 mm' lik dikey uzunluk borunun matris ağzından geçerken kat ettiği net yol değildir. Üç boyutlu tasarım programında yapılan ölçümler bu uygulamada borunun dönmeden kaynaklı olarak %7 daha uzun yol aldığını göstermektedir. Yani net yol 5,10 mm olmaktadır. Bu şartlar altında tasarlanacak düz nervürlü boru ekstrüzyonu simülasyonunda matris 5,10 mm' lik matris ağzı uzunluğuna sahip olmalıdır. Başta sürtünme, kaynama ve yüzey pürüzlülüğü olmak üzere matris ağzı uzunluğunun neden olduğu etkilerden daha önce bahsedilmişti. Sonuç olarak simülasyon için tasarlanan kalıbın ölçülü resmi Şekil 9.6' da görülmektedir.



Şekil 9.6 Simülasyonda kullanılacak ekstrüzyon kalıbının ölçülü yarım kesit görünüşü

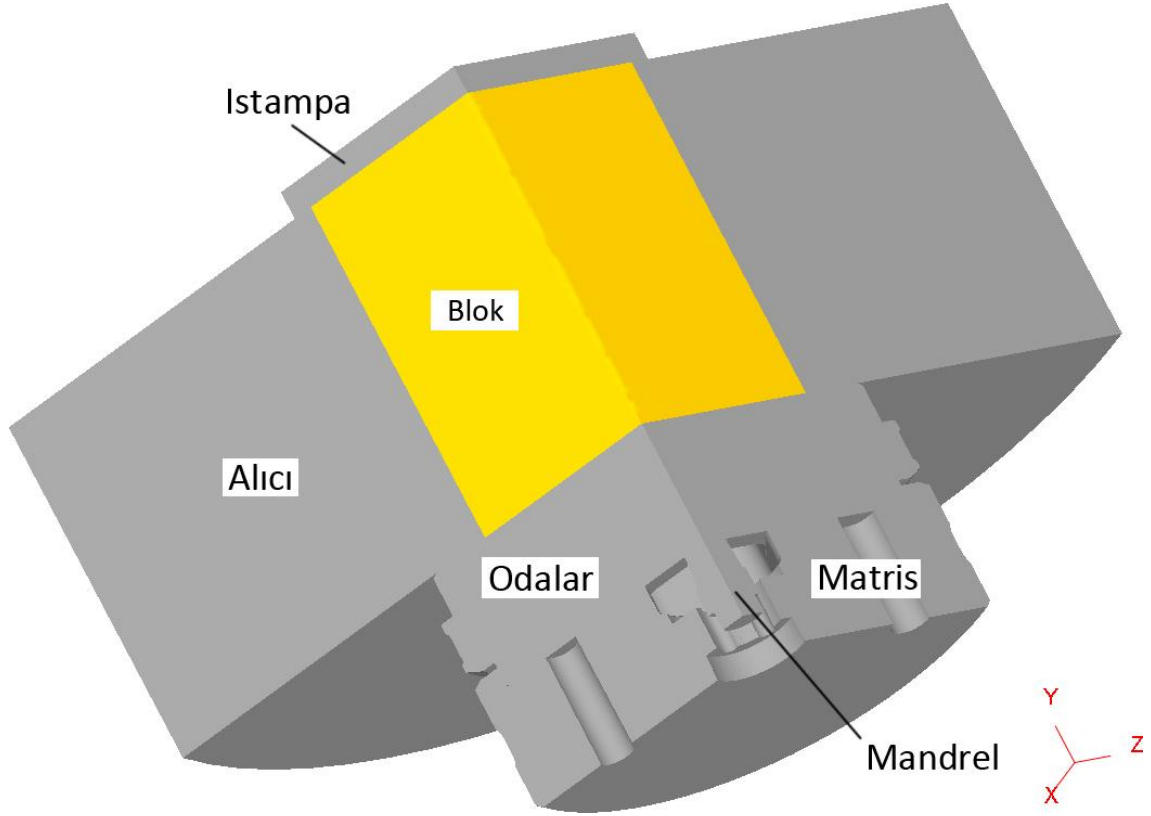
Şekil 9.7 yardımıyla daha net anlaşılması adına imalat ve simülasyonda kullanılacak matrislerin iç boyutlu yarım kesit görünüşlerini göstermek faydalı olacaktır.



Şekil 9.7 İmalatta (üst) ve simülasyonda (alt) kullanılacak matrislerin üç boyut yarım kesit görünüşleri

9.2.6 FEM Modeli ve Simülasyon Parametreleri

Gerçeğe yakın sonuçlar verecek bir simülasyon için mümkün olduğunca gerçeğe yakın simülasyon koşulları yaratılmalıdır. Bu nedenle öncelikle modellemede ıstampa ve alıcı dahi duruma dahil edilmelidir. Şekil 9.8' de DEFORM-3D programında yaratılan simülasyon ortamı görülmektedir.



Şekil 9.8 Simülasyon bileşenleri

Yukarıda görüldüğü gibi model tek bir oda içermektedir ve simetri düzlemleri köprüleri ortadan ikiye kesecek şekilde konumlandırılmıştır. Üç boyutlu simülasyon modelinin oluşturmasının ardından bloğun matematiksel ifadesini belirlemek gerekmektedir. Bu durum mesh (ağ) oluşturmayı içerir. Mesh ne kadar detaylı olursa simülasyon o derece gerçeğe yakın sonuç vermektedir ve o ölçüde de uzamaktadır. Mesh oluştururken dikkat edilecek en önemli nokta matristeki en küçük radyuslu kenarın radyus ölçüsüdür. Çünkü en küçük mesh elemanının uzunluğu matristeki en küçük radyustan daha büyük olmamalıdır. DEFORM-3D yazılımında sürekli mesh güncelleme ve bloğun farklı bölgelerine göre farklı yoğunlukta (detayda) mesh oluşturma özelliği kullanılmıştır. Matristeki en küçük radyus 0,5 mm olduğundan en küçük mesh elemanı

değeri olarak 0,4 mm tercih edilmiştir. Mesh güncelleme esnasında mesh yoğunluğunu bölgesel olarak artırırken yazılımın şu özellikleri gözden geçirmesi istenmiştir:

- Matris yüzeyi eğrileri
- Gerinim
- Gerinim oranı

Matris yüzeyindeki ani değişikliklerin, gerinim ve gerinim oranındaki artışların oluşması durumunda bu bölgelerde mesh oranı otomatik olarak artırılmaktadır. Bu değişkenler arasına sıcaklığı da dahil etmek mümkündür ancak ekstrüzyonda şekil değiştirmenin olduğu her noktada gerinim değeri sıcaklık ile birlikte yükseldiğinden, sıcaklığın mesh detaylandırılmasında kullanılmaması uygun görülmüştür. Çizelge 9.1' de bloğun başlangıçtaki mesh özellikleri bulunmaktadır.

Çizelge 9.1 Blok başlangıç mesh özellikleri

MESH BAŞLANGIÇ VERİLERİ	
En Küçük Eleman Uzunluğu	0,4 mm
En Büyük Eleman Uzunluğu	3 mm
Eleman Boyut Oranı	7,5
Düğüm Sayısı	34680
Yüzey Poligon Sayısı	29530
Eleman Sayısı	159359

Mesh oluşturulmasının ardından blok malzemesinin seçilmesine sıra gelmektedir. Uygulamada, tasarımda da istenen ve ekstrüzyona en yatkın malzemelerden biri olan 6061 alüminyum alaşımı kullanılacaktır. Çizelge 9.2' de 6061 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi, Çizelge 9.3' te aynı alaşıma ait mekanik özellikler ve Çizelge 9.4' te ise diğer fiziksel özellikler (bunlar simülasyonda da kullanılacak) bulunmaktadır.

Çizelge 9.2 6061 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi

(% ağırlık)	
Al	95,8-98,6
Cu	0,15-0,40
Mg	0,8-1,2
Si	0,4-0,8
Cr	0,04-0,35
Fe	0-0,7
Mn	0-0,15
Zn	0-0,25
Ti	0-0,15

Çizelge 9.3 6061 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri

Tavlama	Çekme Testi Sonuçları					Sertlik	Kesme	
	Kopma Dayanımı		Akma Dayanımı		Uzama	Brinnell	Kesme Dayanımı	
	KSI	MPa	KSI	MPa	%		KSI	MPa
0	18	124	8	55	25	30	12	83
T4	35	241	21	145	22	65	24	165
T6	45	310	40	276	12	95	30	207

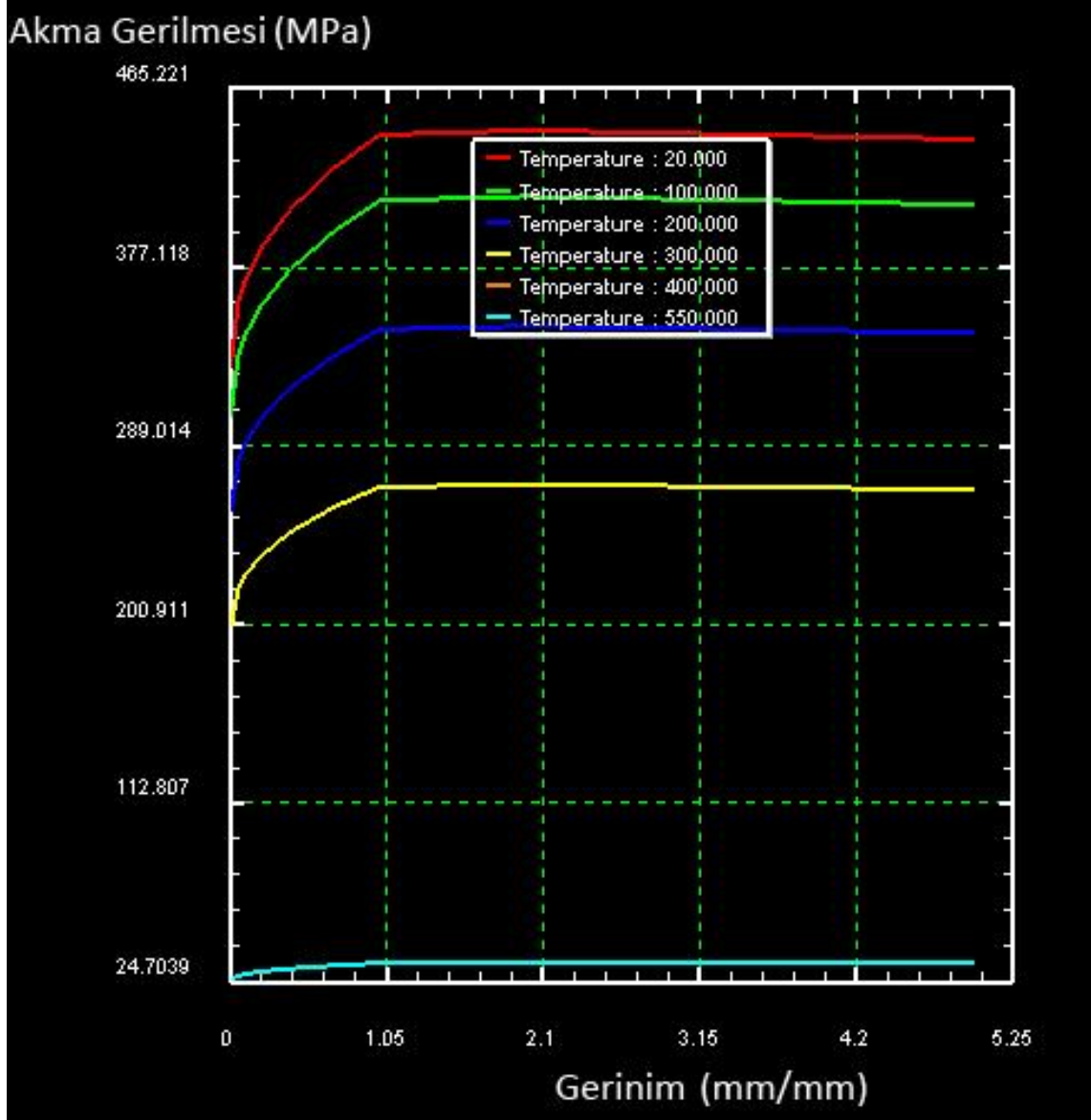
Alüminyumun tüm bu özelliklerinin yanında belirli bir gerinim oranı için sıcaklığa bağlı olarak gerilme-gerinim ilişkisinden bahsetmemiz gerekmektedir. Uygulama kapsamında yapılan yirmiye yakın farklı tasarımlı simülasyonun matematiksel çözüm temelleri Von-Mises akma teoremine dayanmaktadır. Von-Mises akma teoreminde bilindiği gibi iş parçasının maruz kaldığı gerilmeler gerininin, gerinim oranının ve sıcaklığın fonksiyonu olmaktadır. Fakat analizlerin sonuçlarını değerlendirmede üst sınır teoremine dayalı sonuçları esas almak günümüzde geçerliliğini korumaktadır. Üst sınır teoreminde Von-Mises akma kriterlerine ek olarak sürtünmenin ve diğer faktörlerin de

ele alındığı bilinmektedir. Fakat üst sınır yaklaşımı gerçek sonuçların biraz üstünde sonuç vermektedir.

Çizelge 9.4 6061 alüminyum alaşımının diğer fiziksel özellikleri

Yoğunluk	2700 kg/m ³
Ergime Aralığı	582-652°C
Özgül Isı Kapasitesi	0,896 J/kg ^o K
Özgül Isı Kapasitesi	2,43 N/mm ^{2o} C
Isı İletkenliği	180,18 W/m ^o K
Isıl Genleşme Katsayısı	23,6 micro m/m ^o K
Çözündürme Tavlama Sıcaklığı	529 °C
Yaşlandırma Sıcaklığı	177 °C (8 saat)
Young Modülü	68947,6 MPa
Poisson Oranı	0,3
Termal Genleşme	2,2e-5 (1/°C)
Mek.Enerjinin Isıya Dönüşüm Katsayısı	0,9
Isı Yayımlı Kabiliyeti	0,7

Buna rağmen bu koşulları barındırmayan alt sınır teoremine göre daha kullanışlıdır. Simülasyonların sonuçlarına bakılarak proses açısından kritik kaynama odası bölgesinde üst sınır teoremine dayalı olarak ortalama gerinim oranı 100 (mm/mm)/s, ortalama gerinim 0,15 mm/mm ve ortalama gerilme ise 100 Mpa olarak hesaplanmıştır. Şekil 9.9' u alüminyumun gerinim oranının 100 (mm/mm)/s olduğu durumda yukarıdaki değerler etrafındaki sıcaklık-akma gerilmesi-gerinim grafiğini verebiliriz.



Şekil 9.9 6061 alüminyum alaşımı için gerinim oranı 100 (mm/mm)/s olduğu durumda sıcaklığa bağlı akma gerilmesi-gerinim ilişkisi (Temperature=Sıcaklık °C)

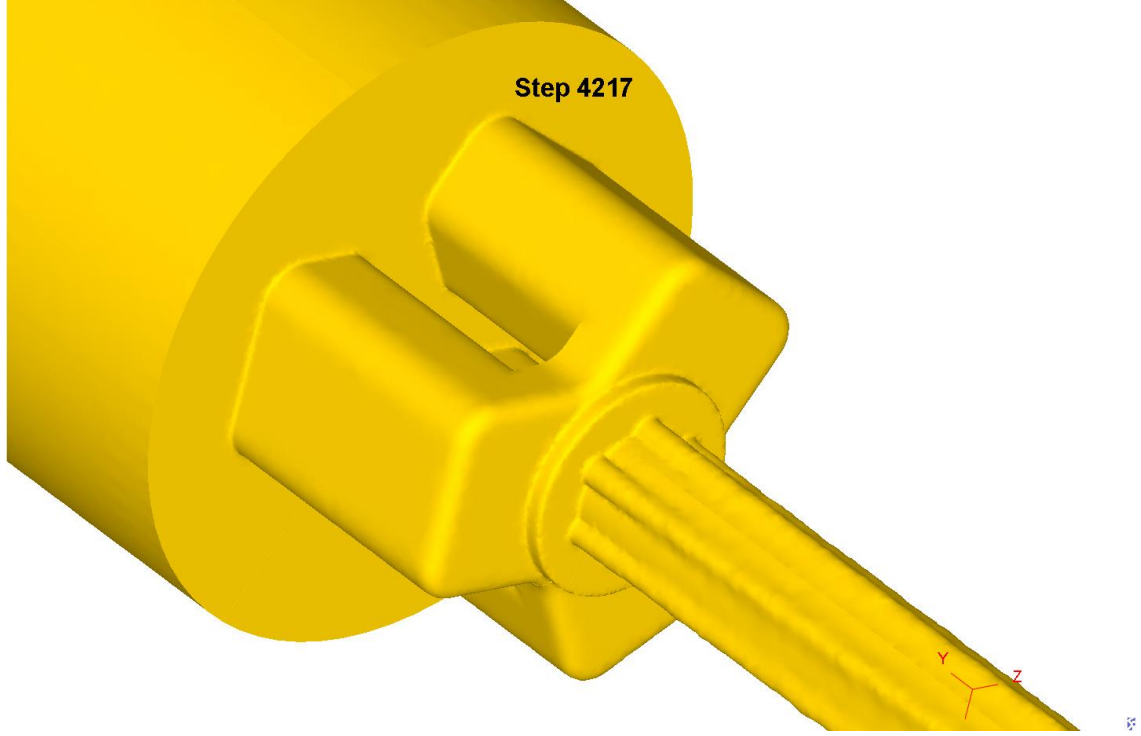
Buraya kadar belirtilen özelliklerin ardından simülasyonu başlatmadan önce objeler arası ilişkileri ve ıstampa hızı gibi kinematik koşulları belirtmek gerekmektedir. Ekstrüzyon için objeler arası ilişkiler sürtünme faktörünün tanımlanması ve objeler arasındaki ısı transfer katsayısıdır. Sürtünme faktörü olarak simülasyonlarda sabit kayma faktörü ele alınmıştır. Çizelge 9.5' te simülasyona ait diğer parametreler ve özellikler bulunmaktadır.

Çizelge 9.5 Diğer simülasyon parametreleri ve özellikleri

Blok Malzemesi	AL6061
Takım Malzemesi	H13
Blok Çapı	127 mm (50 inç)
Blok Uzunluğu	125 mm
Blok Başlangıç Sıcaklığı	500°C
Takım Başlangıç Sıcaklığı	470°C
Ekstrüzyon Oranı (Blok:Odalar)	3,86:1
Ekstrüzyon Oranı (Odalar:Matris)	12,93:1
Ekstrüzyon Oranı (Blok:Matris)	50:1
Köprü Yüksekliği	45 mm
Kaynama Odası Yüksekliği	12,10 mm
Matris Ağzı Uzunluğu	5,10 mm
Cep Yüksekliği	3,80 mm
Istampa Hızı	10 mm/s
Blok ile Matrisler Arasındaki Sürtünme Katsayısı	0,3 (Yağlı Yüzey)
Blok ile Istampa Arasındaki Sürtünme Katsayısı	0,7 (Kuru Yüzey)
Blok ile Matrisler Arasındaki Isı Transfer Katsayısı	$5 \text{ N.s}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
Takımlar ve Blok ile Hava Arasındaki Isı Transfer Katsayısı	$0,02 \text{ N.s}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
Blok Termal İletkenliği	$180,18 \text{ N.s}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
Blok Isıl Kapasitesi	$2,43 \text{ N.mm}^{-2}.\text{°C}^{-1}$
FEM Çevrimi (Adım/Zaman/Strok/Çıkan Profil Uzunluğu)	4217/23 mm/2,3 s/316 mm
FEM Çözüm Motoru	ALE Extrusion/CG/DI
Adım Başına Maksimum Poligon Uzunluğu	0,5
Remesh Tetikleme Nüfuz Derinliği	Relative 0,5

9.3 FEM Analizinin Sonuçları ve Yorumlanması

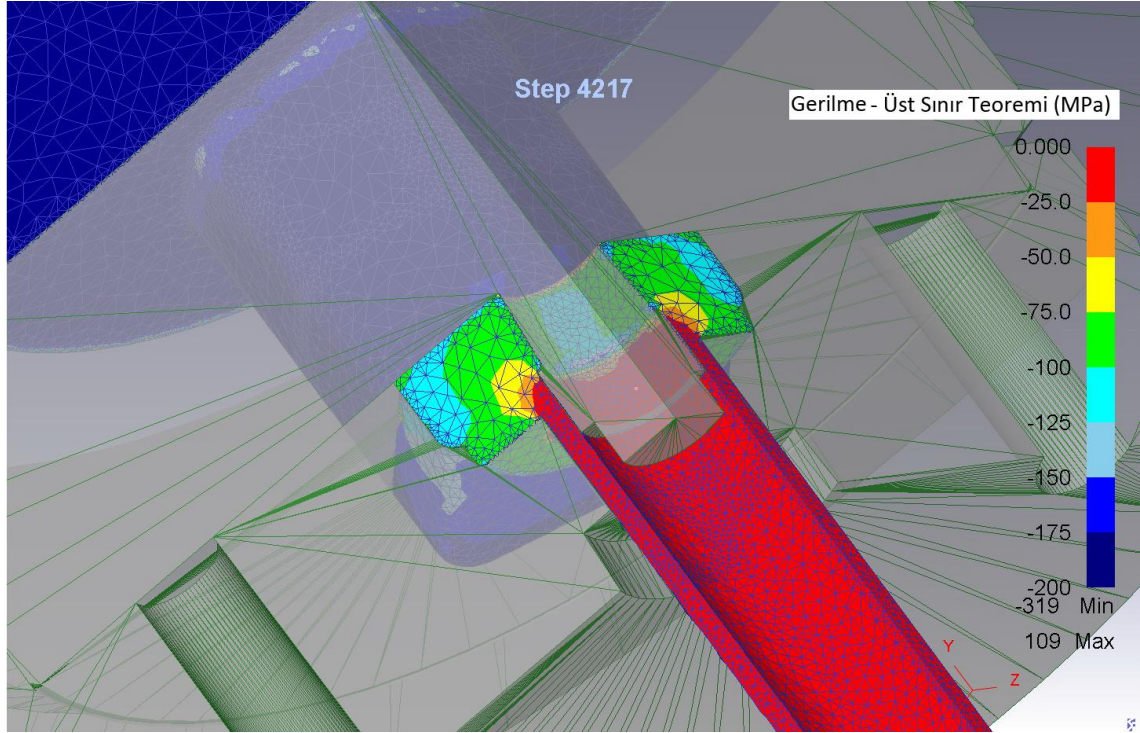
Bu bölümde DEFORM-3D sonlu eleman analiz programında elde edilen sonuçları açıklayıp yorumlayacağız. 1/3 oranında gerçekleştirilen analiz sonrası simetri düzlemlerinden yapılan çoğaltma ile simülasyon ile düz nervürlü bir borunun başarıyla elde edildiğini Şekil 9.10 ile gösterebiliriz.



Şekil 9.10 FEM analizi sonucunda elde edilen düz nervürlü boru

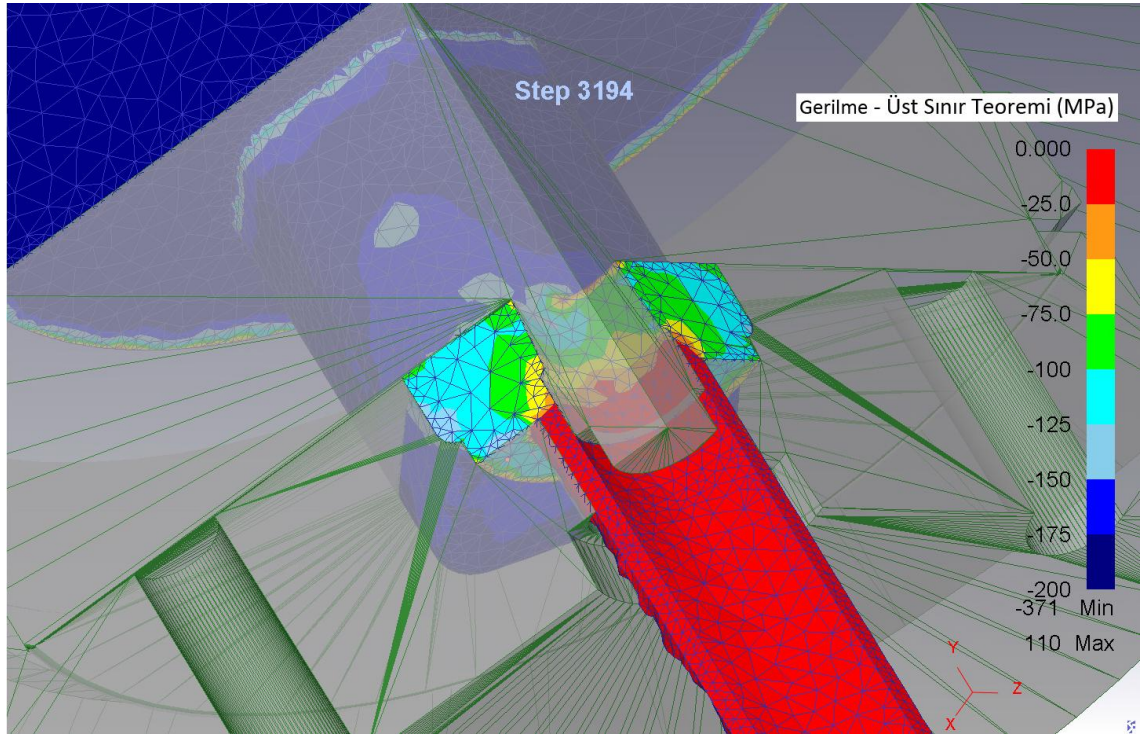
Öncelikle ilk inceleyeceğimiz konu kaynama oluşmasının mümkün olup olmadığı ve oda sonlarında yapılan gelişmelerin kaynamaya etkisinin nasıl olacağıdır. Bunu ortaya çıkarabilmek için iki farklı simülasyon yapılmıştır. Bunların ilkinde odalar standart boru kalıbındaki gibi kullanılmış ve ikincisinde ise genişletilmiş odalar kullanılmıştır. Sırasıyla Şekil 9.11 ve 9.12' de bu simülasyonların sonuçlarını görebiliriz. Şekillerden de anlaşılacağı gibi odaları genişletilmiş bir matriste kaynama yüzeylerinde daha yüksek gerilmeler elde edilmektedir. Bu durum önceki konularda örnek verilen çalışmalarla birebir örtüşmektedir. Bununla birlikte kaynama oluşumunun gerçekleşip gerçekleşmediğini sadece gerilme analiziyle belirlemek mümkün değildir. Hatırlanacağı gibi Akeret isimli araştırmacı iyi bir kaynak için birleşme yüzeyindeki gerilmenin,

malzemenin akma gerilmesi değerinden en az 3 kat fazla olması gerektiğini vurgulamıştı.

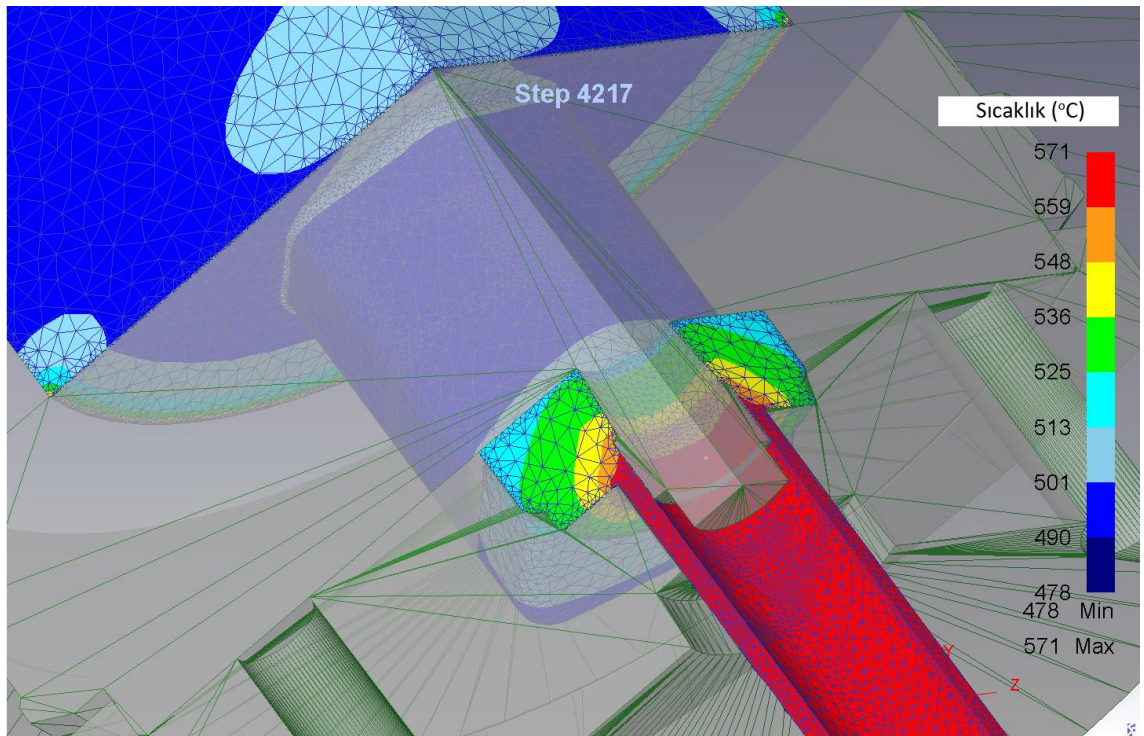


şekil 9.11 Standart odalı ekstrüzyonda kaynama yüzeylerindeki gerilme

Bu durumda öncelikle malzemenin kaynama bölgesine geldiği andaki akma gerilmesi değeri önem kazanmaktadır. Akma gerilmesi değerinin malzemenin o bölgedeki sıcaklığa bağlı olduğunu söyleyebiliriz. O halde sonlu eleman analizinin sıcaklık sonuçlarını şekil 9.13' de vererek incelememize devam edelim.

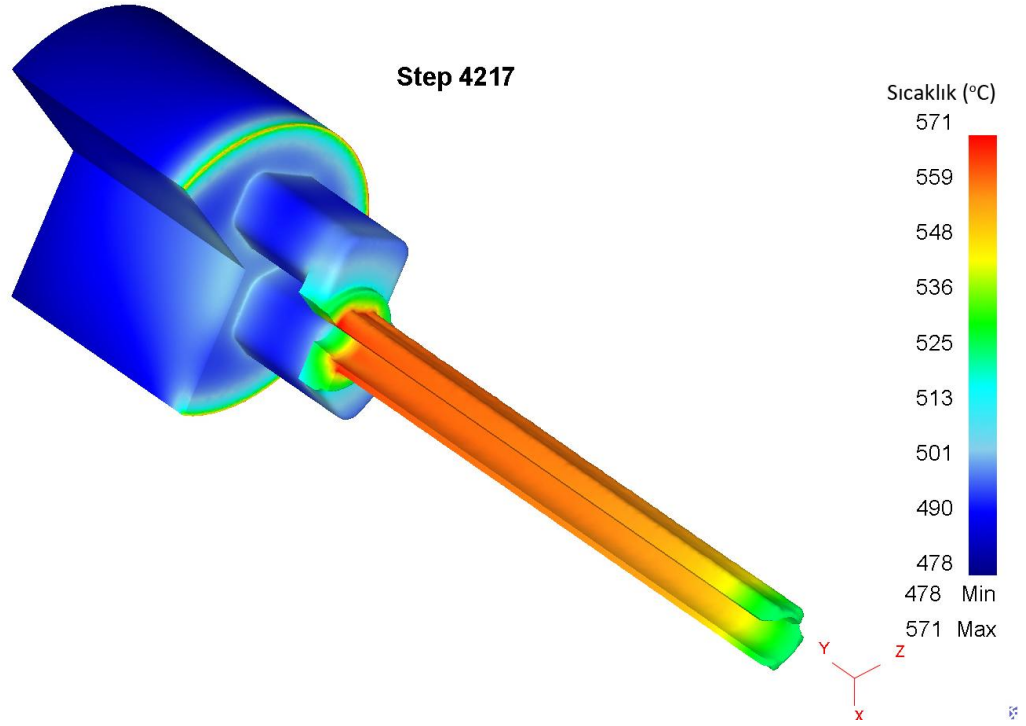


Şekil 9.12 Genişletilmiş odalı ekstrüzyonda kaynama yüzeylerindeki gerilme



Şekil 9.13 Kaynama bölgesindeki sıcaklık dağılımı

Görüldüğü gibi kaynama odasındaki sıcaklık değerleri 513°C ile 560°C arasında değişmektedir. Bu değerleri öğrendiğimize göre Şekil 9.9' a bakarak bu sıcaklık aralığında alüminyumun akma gerilmesi değerini öğrenebiliriz.



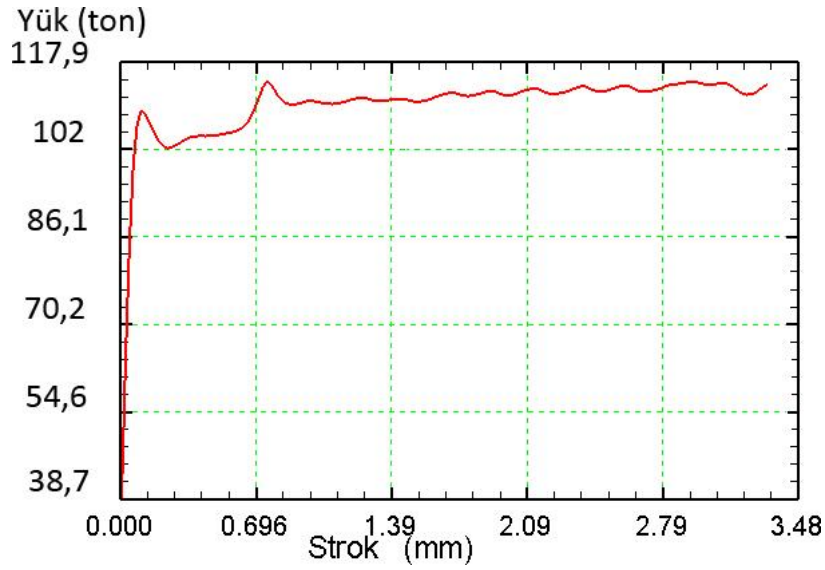
Şekil 9.14 Ekstrüzyon genelinde sıcaklık dağılımı

550°C ve üzerinde alüminyumun 0,1 mm/mm gerinim değerine karşılık gelen akma gerilmesi değerinin 25 MPa' civarında olduğu belirtilmiştir. Kaynama bölgesindeki gerilme ise 125 MPa ile 65 MPa arasında değişmektedir ki bu durum Akeret'in varsayımı doğrultusunda iyi bir kaynamanın elde edilebileceğini göstermektedir.

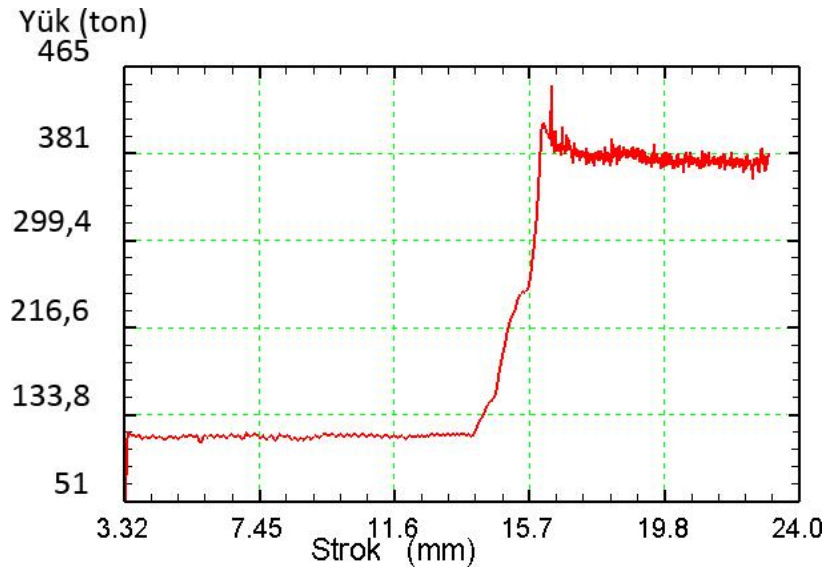
Şekil 9.14' te prosesteki genel sıcaklık dağılımı görülmektedir. Bu verileri analiz ederken Şekil 7.7' deki Saha' nın araştırmasına tekrardan dikkat etmemiz gerekmektedir. Bu çalışmada Saha simülasyon değerleriyle deney sonuçları arasında sıcaklık değeri bakımından ıstampa hızı arttıkça 25°C ve belki daha da üzerinde fark olduğunu göstermiştir. Tez konusuna ait analiz çalışmasında ise 565°C' lik bir çıkış tahmin edilmekte ve şayet Saha' nın çalışması dikkate alınacak olunursa 535°C civarında bir sonuç beklenmektedir. Bu değer ekstrüzyon prosesi sırasında çözündürme tavlama sürecinin de gerçekleşebildiğini bize göstermektedir. Bu durum 6061 alüminyum alaşımı için sıcaklık açısından son derece iyi bir sonuçtur. Bu sayede proses sonrası doğrudan çökeltme sertleştirme tavlama sürecine geçilebilir.

Simülasyon sonucu ıstampa kuvveti uyguladığı kuvvet değeri verisi pres seçiminde öneme sahiptir. Kullanılan FEM yazılımı sayesinde ıstampa kuvveti açısından Şekil 9.15' teki

başlangıç durumu ve Şekil 9.16' daki devam eden sürecin grafikleri gösterilebilmektedir.



Şekil 9.15 Başlangıçta ıstampa tarafından uygulanan yük grafiği

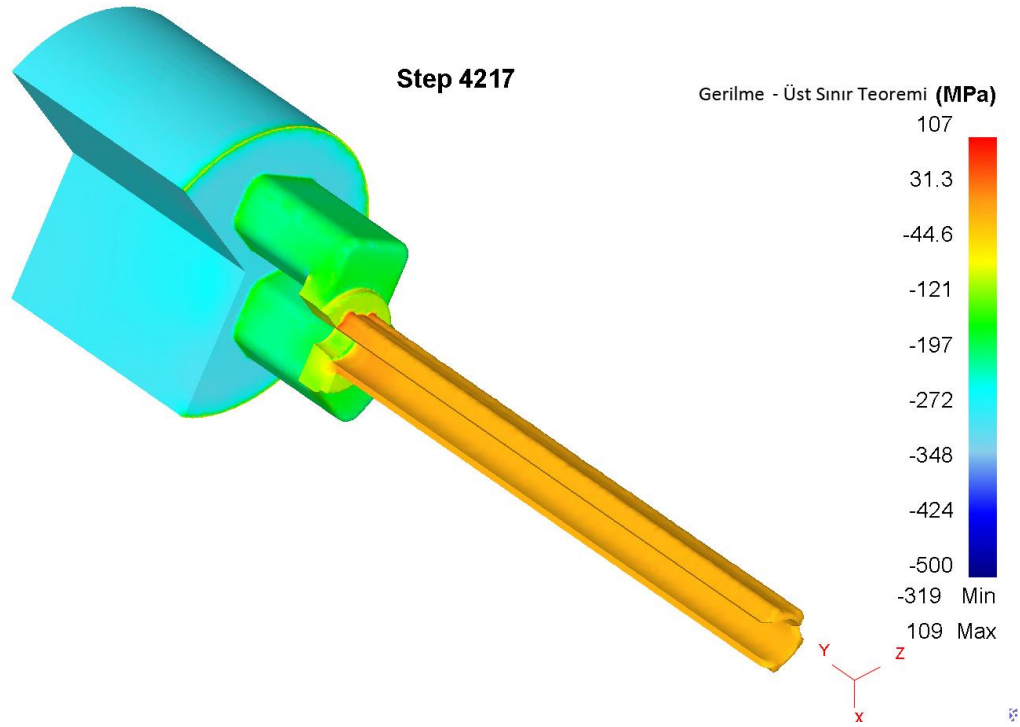


Şekil 9.16 Prosesin devamındaki ıstampa tarafından uygulanan yük grafiği

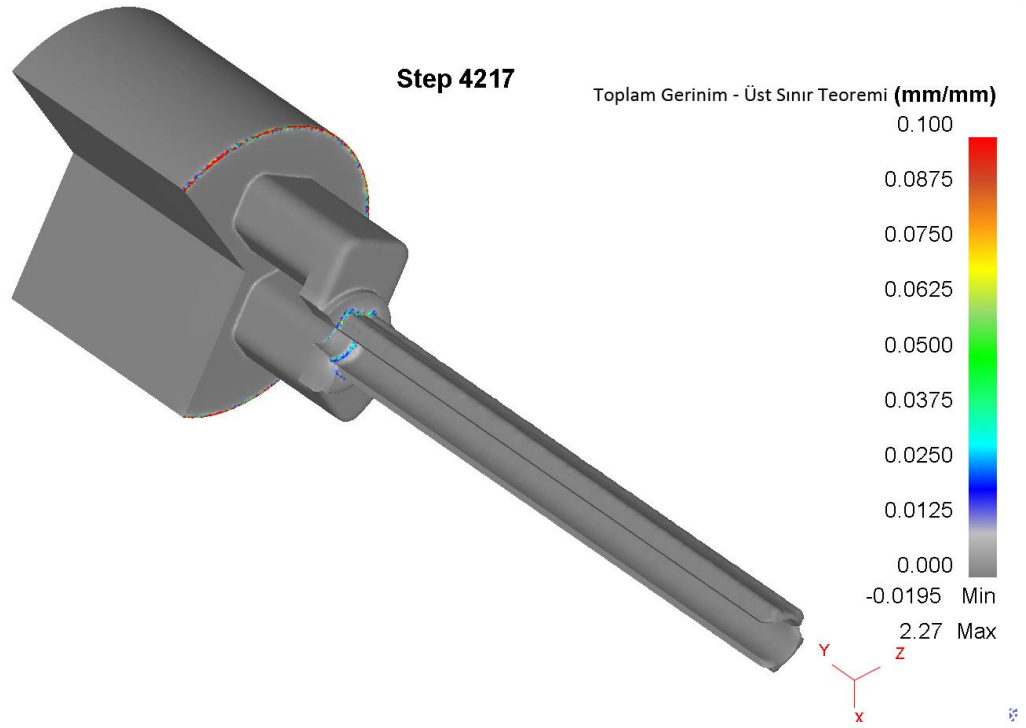
İlk grafik tipik bir ekstrüzyon işlemi başlangıcını göstermektedir. Aniden yükselen yük gereksinimi, malzeme elastik bölgeden plastik bölgeye geçtiği anda düşüşe geçer. Daha sonra odalara dolan malzemenin ilerleyen ıstampa hareketiyle sürtünme sonucu az da olsa yük gereksinimini artırdığı görülür. İkinci grafikte ise odaların tamamı dolduktan sonra matris ağzına yönelen malzeme nedeniyle yük gereksinimi maksimum seviyeye

düşer ve ardından blok hacmi küçüldükçe azalan sürtünme ile birlikte yük gereksinimi de düşmektedir.

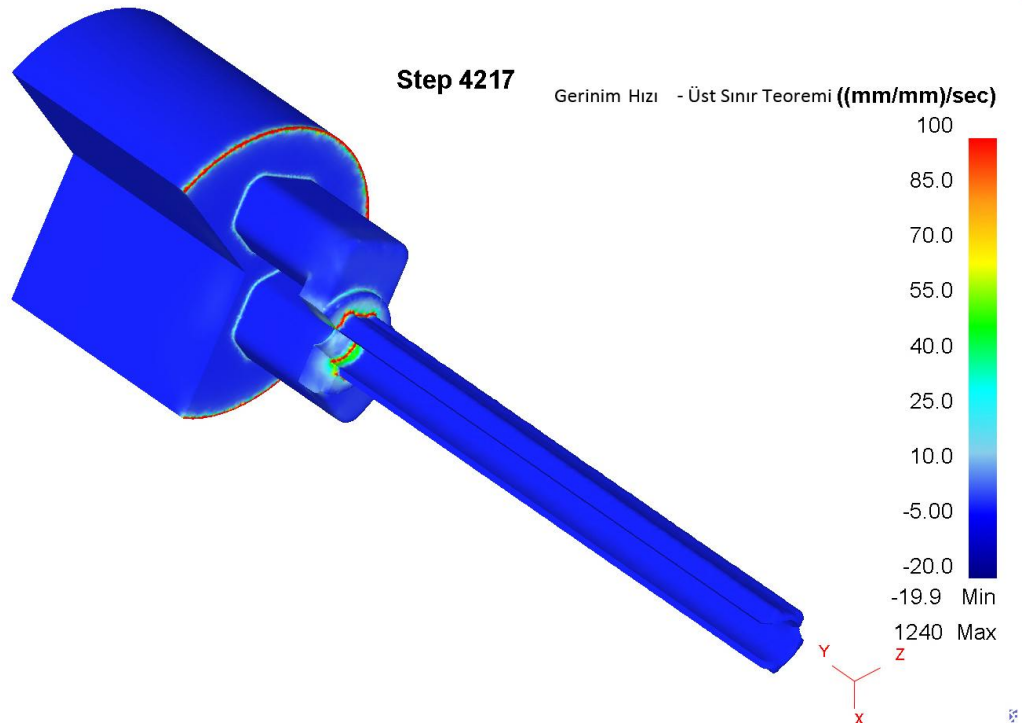
Bu analizler sonuçlarının haricinde bilgilendirme amaçlı olarak, elde edilen gerilme, gerinim, gerinim oranı ve hız değerlerini de paylaşmakta fayda vardır. Şekil 9.17, 9.18, 9.19 ve 9.20' de bu değerleri tüm proses genelinde görebiliriz.



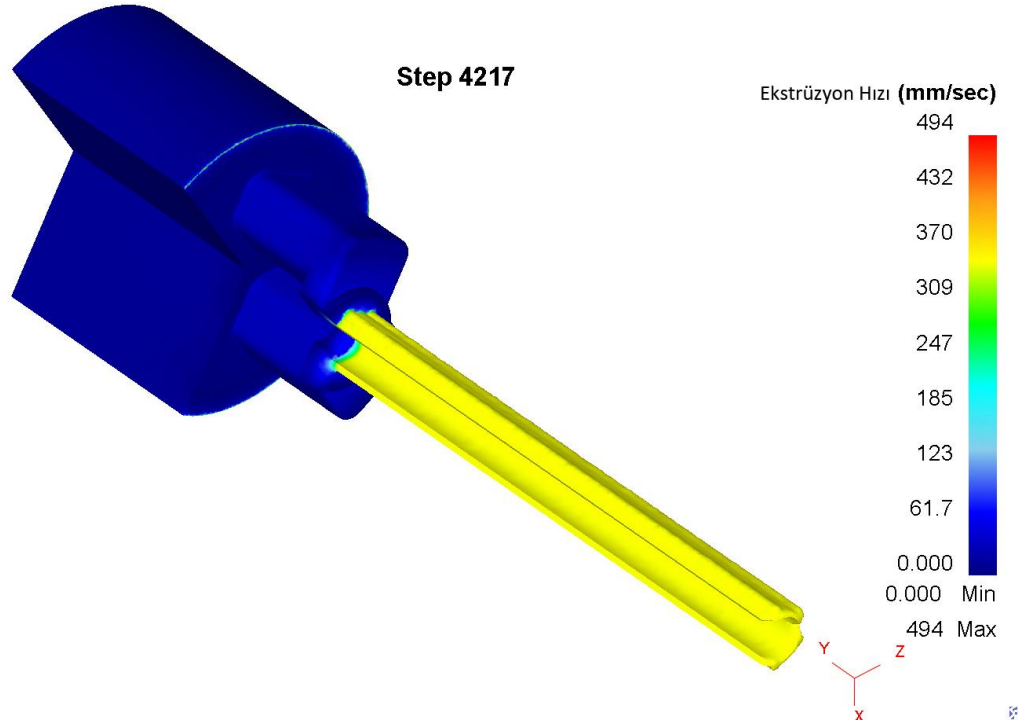
Şekil 9.17 Proses genelinde gerilme değerleri



Şekil 9.18 Proses genelinde gerinim değerleri



Şekil 9.19 Proses genelinde gerinim hızı değerleri



Şekil 9.20 Proses genelinde ekstrüzyon hızı değerleri

9.4 Profilin Fabrika Ortamında İmali

Literatürdeki önceki çalışmaları temel alan ve bunlara dayalı olarak çeşitli yaklaşımlarla helisel nervürlü bir borunun ekstrüzyon edilebilirliğini doğruladıktan sonra matrislerin imalat sürecine geçilmiştir (Şekil 9.21). Sonlu eleman analizleri kaynamanın iyi bir şekilde gerçekleşeceğini ve çıkış sıcaklığının seçilen parametrelerle çözündürme tavlamasına gerek bırakmayacak şekilde ortaya çıkacağını göstermektedir. Bunlara ek olarak mevcut olan diğer iki sorunun cevabı ise gerçek bir uygulamayı gerektirmektedir. Matriste yapılan tasarımsal değişikliklerin olumlu yönde etki edip etmeyeceği ve üretilecek borunun istenilen geometrik doğruluğa sahip olup olmayacağıdır.

Cevapları alabilmek için üretilen matrisler Gensa Alüminyum firmasına yapılacak ekstrüzyon işlemi için götürülmüştür. Bu tesiste deney 1000 tonluk bir ekstrüzyon presinde gerçekleştirilmiştir. Tesis ekstrüzyon işlemini otomatikleşmiş şekilde değil her

bir alt bölümün manüel olarak çalışmasıyla gerçekleştirmektedir. Standart üretim şeklini bozmamak amacıyla tesis matrisleri ve bloğu simülasyonlar sonucu elde edilen sıcaklığa kadar ısıtmamıştır. Bunun sonucu olarak üretilecek profillerin dayanımlarında beklenenden daha düşük bir değer elde edileceği beklenmektedir. Bu durumu belirttikten sonra Çizelge 9.6' da fabrikada gerçekleştirilen prosese ait parametreleri görebiliriz.

Ayrıca tesiste kullanılan preste profilin çıkış sıcaklığını ölçen bir aygıt bulunmamaktadır. Sadece matrislerin sıcaklıklarını belirli bir konumdan ölçen bir tertibat bulunmakta ama bu değer bilgilendirme ve matrisleri koruma amacıyla kullanıldığını söylemek gerekir. Profilin çıkış sıcaklığı bilinemediği için varsayımlar sertlik testine göre yapılacaktır.



Şekil 9.21 Helisel nervürlü alüminyum boru matris bileşenleri

Çizelge 9.6 Fabrika üretim parametreleri

Blok Malzemesi	AL6061
Takım Malzemesi	H13
Blok Çapı	127 mm (50 inç)
Blok Uzunluğu	550 mm
Blok Başlangıç Sıcaklığı	480°C
Takım Başlangıç Sıcaklığı	440°C
Istampa Hızı	10 mm/s
Pres Kapasitesi	1000 ton

9.5 Profilin İncelenmesi ve Testi

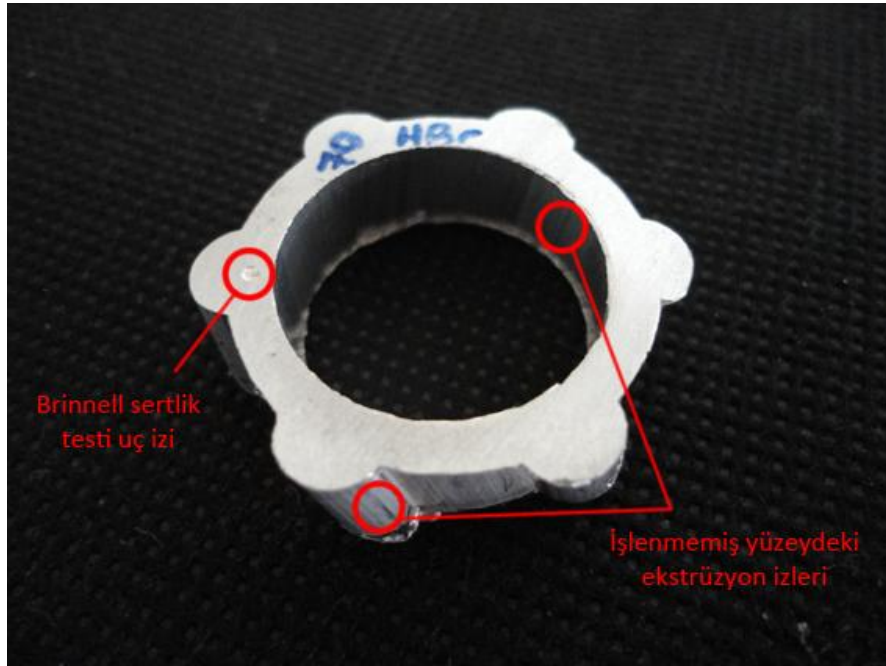
Şekil 9.22' de fabrika ortamında üretilmiş profilin çeşitli açılardan görünüşleri bulunmaktadır.



Şekil 9.22 Fabrika ortamında üretilmiş helisel nervürlü alüminyum boru

Resimlerden de görüldüğü gibi helisel nervürlü alüminyum borunun üretiminin ekstrüzyon yöntemiyle gerçekleştirilebilmesi mümkündür. Boru incelendiğinde yüzeyinde ham haldeki ekstrüzyon ürünlerinde görülebilecek çıkış izlerini görmek mümkündür. Fakat anodizasyon işleminin ardından bu izlerin tamamen ortadan kalkacağını unutmamak gerekir. Günümüzdeki tüm ekstrüzyon ürünleri bu işlemde geçmekte ve yüzeylerin kusursuz denilebilecek hale gelmektedir. Bununla birlikte borunun ne yüzeyinde ne de kesitinde kaynama çizgilerinin ve hatlarının gözle görülmesi mümkün olmaktadır. Bazı ekstrüzyon ürünlerinin yüzey işlemi görmemiş olanlarında kaynama hattının açıkça görülebildiğine endüstriyel uygulamalarda rastlamak mümkündür. Fakat burada hem malzemenin kaynama odası içersinde yoğrulması hem de elde edilmiş olduğu düşünülen uzun kontak zamanı ve yüksek sıcaklıktan ötürü kaynama hattının çıplak gözle görülemediğini söyleyebiliriz.

Önceden de belirttiğimiz gibi fabrikadaki üretim sonlu eleman analizlerinde kullanılan sıcaklık değerlerinde yapılmamıştır. Bu durumun malzeme dayanımını olumsuz yönde etkileyebileceği ortadadır. Bununla birlikte malzemeden işlevi gereği elde edilebilecek maksimum dayanım beklenmemektedir. Buna rağmen sonlu eleman analizi sonucu uygun görülen sıcaklık değerinin altında kalmanın etkisini araştırmak için ürüne sertlik testi yapılmıştır. Şekil 9.23' te test numunesini görebiliriz.

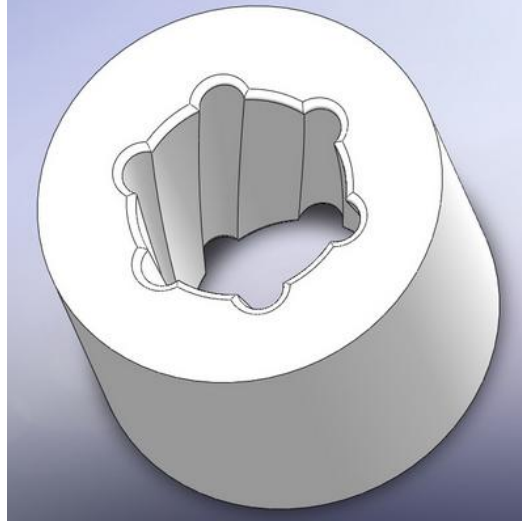


Şekil 9.23 Test numunesi

Yapılan sertlik testi sonucunda parçanın 70 Brinnell sertliğinde olduğu görülmüştür. Çizelge 9.3' e bakacak olursak bu değerin T4 tavlama 6061 alaşımının sahip olacağı maksimum değerin üzerinde fakat T6 tavlama ile sahip olacağı maksimum değerin ise altında olduğunu görmekteyiz. T4 ifadesi çözündürme ısı işlemine tabi tutulmuş ve ardından oda sıcaklığında doğal yaşlandırma uygulanmış bir ürünü nitelemektedir. T6 ifadesi ise çözündürme tavlama sonrasında yapay yaşlandırma uygulanmış bir ürünün göstergesidir. Bu durumda şunu söyleyebiliriz ki, mükemmel kontrol edilmiş bir ekstrüzyon prosesinin sonucunda T6 çökeltme sertleştirme tavlama yapılsa maksimum 95 Brinnell sertliği elde etmek mümkündür. Bu uygulamada profile proses sonrası standart bir T6 tavlama uygulanmıştır. Bu yapay yaşlandırma ekstrüzyon ürünleri için yaklaşık 177°C' de 8 saat bekletilmeyle gerçekleştirilmektedir. Sonuç olarak bu ekstrüzyon işleminin olması gerekenden daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirildiğini ve bunun sonucu olarak malzemenin yeterli bir çözündürme tavlama sıcaklığına ulaşamadığını söyleyebiliriz. Bu nedenle sertlik oluşturacak katkıların malzeme içerisinde yeterince çözünmemesi meydana gelmektedir. Sonuç olarak çökeltme sertleştirme tavlama sonrasında maksimum sertlik elde edilememiştir. Bununla birlikte eski tip bir tesiste, çıkan profili soğutan fanların hava akışlarının ne kadar yeterli olduğu ise ayrıca sorgulanması (üzerinde çalışma yapılarak netleştirilmemiş) gereken bir faktördür.

Üretilen profili geometrik olarak test etmek için profilin içinden geçeceği poliüretan masterlar yapılmıştır. Bu masterlar nervür helisinin istenilen hatvede (veya açıda) olup olmadığını kontrol etmek için kullanılacaktır (Şekil 9.24). Fakat öncesinde bir kumpas yardımıyla iç çap, nervür hariç dış çap ve nervürlü dış çap ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda sözü edilen ölçülerin 1/10 mm hassasiyetinde doğru olduğu görülmüştür. Bu kalıba verilen alüminyumun kendini çekme paylarının doğruluğunu göstermektedir. Masterlarla yapılan ölçümlerde 25 metre çekilmiş profilin baş, orta ve son kısımlarından alınan üç farklı boru numunesi kullanılmıştır. Baş ve orta kısım numunelerinden alınan örnekler masterın içinden geçememiştir. Dış ölçülerin çok iyi olmasına karşın bu durum helis açısının istenildiği gibi olmadığını göstermektedir. Son kısımdan alınan numune ise mastara yine zorlanarak girmiş ve poliüretanı sıyrarak

geçmeyi başarmıştır. Daha sonra masterlar %2 büyütülerek tekrar test yapılmış ve masterların tüm örnekleri içinden geçirebildiği görülmüştür.



Şekil 9.24 Geometrik test mastarı

Helis hatvesinin tüm profil boyunca eşit gitmemesi ve istenilen kararlılıkta olmaması iki nedene bağlanmaktadır. Bunlardan çözülmesi nispeten kolay olanı ekstrüzyon sonrası germe işleminin otomasyonudur. Uygulamanın yapıldığı tesiste germe işlemi kontrolsüz ve tecrübeye dayalı olarak yapılmaktadır. Hiçbir ekstrüzyon ürününde helisel nervür olmaması, manüel germenin bir sorun teşkil etmemesini sağlamaktadır. Fakat helisel nervürlü bir borunun gerdirildiği ölçüde helis hatvesi değişkenlik göstermektedir. Burada gerdirme sonrası malzemenin kendini ne kadar geri çektiği de araştırılması gereken bir başka durumdur. Bunun yanı sıra detaylıca araştırılması gereken diğer bir konu ise proses sıcaklığı faktörünün helis hatvesi üzerinde etkili olup olmadığıdır. Helisel nervür yüzünden parçanın dönel simetrik olması nedeniyle soğuma esnasında malzemenin hangi şekilde kendini çektiği bilinmeyen bir konudur.

Uygulama kapsamında elde edilen bu sonuçlar dahilinde ekstrüzyon ile bahsedilen şartlar altında üretilen helisel nervürlü alüminyum borunun istenilen istif rafı projesinde kullanılabilmesi mümkündür. Fakat helisel nervürün hatvesinin doğruluğu açısından ek bazı araştırmalar gerekmektedir. Bu araştırmaların helis hatvesinin daha kritik olduğu farklı uygulamaların ortaya çıkması durumunda mutlaka yapılması öngörülmektedir.

Bu uygulamada kullanılan helis hatvesiyle istenilen geometrik sonuçlara yaklaşmak mümkün olmuştur. Ancak ekstrüzyon ile ne kadar daha kısa hatveli (yüksek helis açılı) bir çalışma yapılabileceği farklı bir araştırmanın konusu olabilir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında helisel nervürlü bir alüminyum bir borunun ekstrüzyon yöntemiyle üretilebilirliği sorgulanmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle literatür araştırmaları yapılmış ve matris dizaynı ile proses parametreleri üzerine çeşitli yaklaşımlar irdelenmiştir. Ardından dönel simetrik bir parçanın kaynama bölgesine girmeden evvel dönel hareket kazanması gerektiği düşünülerek matris üzerinde çeşitli modifikasyonlara gidilmiştir. Bunu takiben mevcut uygulamanın parametrelerinin testi için DEFORM-3D sonlu eleman analiz programı kullanılmış ve yirminin üzerinde farklı simülasyonla matris geometrisi ve parametreler netleştirilmiştir. Simülasyonlar düz nervürlü bir borunun üretilebilirliği ile kısıtlanmak zorunda kalmış ve helisel nervürlü bir borunun simülasyonuna yaklaşılmaya çalışılmıştır. Proses sıcaklığı seçiminde parçanın sonradan ilave bir çözündürme tavlaması gerekmeden doğrudan çökeltme sertleştirme tavlamasına tabi tutulması amaçlanmıştır.

Matrislerin üretilmesinin ardından fabrika ortamında bir adet blok kullanılarak deneysel üretim gerçekleştirilmiş ve proses sonrası parça çeşitli incelemelere ve testlere tabi tutulmuştur. Bu incelemelerin sonrasında şu sonuçlara varılmıştır:

- Yapısal olarak helisel nervürlü alüminyum bir borunun ekstrüzyon yöntemi ile üretilebilirliği doğrulanmıştır.
- Kaynama matris içersinde başarıyla gerçekleşmiştir ve parçanın matris içersinde dönel hareket yaparak yoğrulması nedeniyle kaynak hattı çıplak gözle görülememektedir.

- Kalıbın oda çıkışlarında yapılan değişikliklerin borunun üretilebilirliğine katkısı olduğu görülmüştür.
- Simülasyonlarda istenilen sıcaklığın altında gerçekleştirilmek zorunda kalınan deneysel profile, sertlik değerinin 70 Brinnell değerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu değer T4 tavlamasında elde edilecek maksimum değer üzerinde fakat T6 tavlamaıyla elde edilebilecek maksimum değer altındadır. Proses istenilen sıcaklıkta gerçekleştirildiğinde T6 kalitesine daha yakın bir profil elde etmenin mümkün olduğu söylenebilir.
- Üretilen deneysel profilin iç çap, nervür hariç dış çap ve nervür dahil dış çapının istenilen ölçülerde ve 1/10 mm' den daha dar tolerans aralığında bulunduğu tespit edilmiştir.
- Helisel nervürün hatvesi bakımından profilin sabitlik göstermediği poliüretan masterlarla tespit edilmiştir. Bu durum manüel yapılan gerdirme işleminde bir standardın olmamasına bağlanmıştır. Bunun yanında helisel nervürlü bir borunun matrizen çıktıktan sonra soğurken hangi yönde kendini çektiği bilinmediğinden, söz konusu bu durumun da helis hatvesini etkileyebileceği düşünülmektedir. Ek olarak profilin matrizen proses ilerledikçe daha sıcak ayrıldığını hesaba katmamız gerekir. Prosesin çıkış sıcaklığına duyarlı olduğunun tespit edilmesi durumunda isothermal ekstrüzyon yönteminin tercih edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Saha, K.P., (2000). Aluminum Extrusion Technology, First Printing, ASM International, Ohio.
- [2] Sönmez, H., (1989). Metal Ekstrüzyonu, Eğitim Yayınları A.Ş., İstanbul
- [3] Bingöl, S., (2006). Çeşitli Ekstrüzyon Şartlarında Üretilen Alüminyum Alaşımı Ürünlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Arabacı, A., (1996). Ekstrüzyon Matrislerinde Kanal Uzunluğu ve Ön Odanın Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Bayram, H., (2008). Ekstrüzyon Yönteminde Sıcaklık, Ekstrüzyon Hızı ve Sürtünme Parametrelerinin Profil Kalitesine Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Sezer, M., (1975). Alüminyum Metalürjisi, TMMOB.
- [7] ASM International, (1991). ASM Metals Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Ohio.
- [8] ASM International, (1991). ASM Metals Handbook, Volume 4: Heat Treating, ASM International, Ohio.
- [9] Coşkun, A.O., (2001). 5000 serisi Alüminyum Magnezyum Alaşımlarının Döküm ve Termomekaniksel Prosesleri, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] SFTC, (2007). DEFORM 3D V6.1 User's Manual, Ohio.
- [11] Li, F., Li, L., Wang, X. ve Ma, X.L., (2010). "Optimizing the Seamless Tube Extrusion Process using the Finite Element Method", JOM, Vol.62 No. 3, 71-74.
- [12] Li, G., Yang, J., Oh, J.Y., Foster, M., ve Wu, W.. "Advancements of Extrusion Simulation in DEFORM-3D", Light Metal Age.
- [13] Zhou, J., Li, L. ve Duszczek, J., (2003). "3D FEM Simulation of the Whole Cycle of Aluminum Extrusion Throughout the Transient State and the Steady State Using the Updated Lagrangian Approach", Journal of Materials Processing Technology, (134), 383-397.

- [14] Kim., Y.T., Ikeda, K. ve Murakami, T., (2002). "Metal Flow in Porthole Die Extrusion of Aluminum", *Journal of Materials Processing Technology*, (121), 107-115.
- [15] Bariani, P.F., Bruschi, S. ve Ghiotti, A., (2006). "Physical Simulation of Longitudinal Welding in Porthole-Die Extrusion", *Annals of the CIRP*, Vol. 55, (1).
- [16] Li, Q., Smith, C.J., Harris, C. ve Jolly, M.R., (2003). "Finite Element Investigations upon the Influence of Pocket Die Designers on Metal Flow in Aluminum Extrusion, Part I. Effect of Pocket Angle and Volume on Metal Flow", *Journal of Materials Processing Technology*, (135), 189-196.
- [17] Li, Q., Smith, C.J., Harris, C. ve Jolly, M.R., (2003). "Finite Element Investigations upon the Influence of Pocket Die Designers on Metal Flow in Aluminum Extrusion, Part II. Effect of Pocket Geometry Configurations on Metal Flow", *Journal of Materials Processing Technology*, (135), 197-203.
- [18] Jo, H.H., Lee, S.K., Lee, S.B. ve Kim, B.M., (2002). "Prediction of Welding Pressure in the Non-Steady State Porthole Die Extrusion of Al7003 Tubes", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, (22) 753-759.
- [19] Jo, H.H., Lee, S.K., Jung, C.S. ve Kim, B.M., (2006). "A Non-Steady State FE Analysis of Al Tubes Hot Extrusion by a Porthole Die", (173) 223-231.
- [20] Saha, P., (1998). "Thermodynamics and Tribology in Aluminum Extrusion, Wear", (218), 179-190.
- [21] Biswas, A.K. ve Repgen, B.. "Isothermal and Isopressure Extrusion Results of Process Optimization in Various Extrusion Plants", SMS Schloeman Gmbh, Almanya
- [22] You-feng, H., Shui-sheng, X., Lei, C., Guo-jie, H. ve Yao, F., (2010). "FEM Simulation of Aluminum Extrusion Process in Porthole Die with Pockets", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, (20), 1067-1071.
- [23] Qamar, S.Z., Pervez, T., Arif, A.F.M. ve Sheikh A.K., (2007). "Effect of Process Parameters on Metal Flow and Dead Metal Zone in Extrusion", *Archives of Material Science*, (28), 118-123.
- [24] Qamar, S.Z., (2009). "Fem Study of Extrusion Complexity and Dead Metal Zone", *Archives of Materials Science and Engineering*, (36), 110-117.
- [25] Ceretti, E., Fratini, L., Gagliardi, F. ve Giardini, C., (2009). "A New Approach to Study Material Bonding in Extrusion Porthole Dies", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, (58), 259-262.
- [26] Miles, N., Evans, G. ve Middleditch, A., (1997). "Bearing lengths for Extrusion Dies: Rationale, Current Practice and Requirements for Automation", *Journal of Materials Processing Technology*, (72), 162-176.
- [27] Donati, L., ve Tomesani, L., (2005). "The Effect of Die Design on the production and Seam Weld Quality of Extruded Aluminum Profiles", *Journal of Material Processing Technology*, (164-165), 1025-1031.

- [28] Donati, L. ve Tomesani, L., (2004). "The Prediction of Seam Welds Quality in Aluminum Extrusion", Journal of Material Processing Technology, (153-154), 366-373.
- [29] Arif, A.F.M., Sheikh, A.K. ve Qamar, S.Z., (2003). "A Study of Die Failure Mechanizms in Aluminum Extrusion", Journal of Material Processing Technology, (134), 318-328.
- [30] Duan, X., Velay, X. ve Sheppard, T., (2004). "Application of Finite Element Method in the Hot Extrusion of Aluminum Alloys", Materials Science and Engineering, (369), 66-75.
- [31] Kialka, J.. "Isothermal Extrusion of Aluminum Alloys by Employing Force-Ram Speed Feedback", Institute of Non-Ferrous Metals Light Metals Division, Polonya.
- [32] Takahashi, M. ve Yoneyama, T.. "Isothermal Extrusion of Aluminum Alloys", Sumitomo Light Metal Industry Co. Ltd., Kanazawa University.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet Deniz DÖLEN
Doğum Tarihi ve Yeri : 11.06.1984 / İSTANBUL
Yabancı Dili : İngilizce, Almanca
E-posta : denizdolen@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Müh.	T.C. Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lisans	Makine Müh.	T.C. Yıldız Teknik Üniversitesi	2008
Lise	Fen - Matematik	Özel Alman Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010-2011	IND Endüstriyel Day. Tük. Ür. A.Ş.	İmalat Mühendisi
2007	ALDEM Çelik İnş. Mak. San. Ltd. Şti.	Stajyer
2006	MAS Pompa A.Ş.	Stajyer