

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BASINÇLI DÖKÜM KALIPLARINDA YOLLUK  
SİSTEMLERİNİN TASARIMI ve SİMÜLASYONUNUN  
İNCELENMESİ**

Makine Mühendisi Ahmet Gözen

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüseyin SÖNMEZ**

**İSTANBUL, 2007**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xi
ÖNSÖZ .....	xii
ÖZET .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Basınçlı Döküm Yönteminin Avantajları .....	4
1.2 Basınçlı Döküm Yönteminde Sınırlamalar .....	4
1.3 Basınçlı Döküm Tekniğindeki Yöntemler .....	5
1.3.1 Püskürtme Döküm .....	5
1.3.2 Pres Döküm .....	5
1.4 Basınçlı Döküm Alaşımları .....	6
1.4.1 Yüksek Basınçlı Döküm Alaşımları .....	7
1.4.2 Düşük Basınçlı Döküm Alaşımları .....	9
1.5 Basınçlı Döküm Makineleri .....	10
1.5.1 Sıcak Kamaralı Döküm Makineleri .....	11
1.5.1.1 Pistonlu Makineler .....	11
1.5.1.2 Havalı Makineler .....	12
1.5.2 Soğuk Kamaralı Makineler .....	13
1.5.2.1 Yatay Soğuk Kamaralı Döküm Makinesi .....	14
1.5.2.2 Düşey Soğuk Kamaralı Döküm Makinesi .....	14
2. BASINÇLI DÖKÜM KALIPLARI.....	16
2.1 Sabit ve Hareketli Kalıp Yarıları .....	16
2.2 Kalıp Malzemeleri .....	18
2.3 Maçalar .....	20
2.4 İticiler.....	21
2.5 Yolluk Sistemleri .....	22
2.6 Havalandırma ve Hava Kanalları .....	25
2.7 Taşıma Boşluğu.....	28
2.8 Kalıplarında Soğutulması.....	30
3. BASINÇLI DÖKÜMDE YOLLUK SİSTEMİ .....	31
3.1 Yolluk Sisteminin Tasarımı .....	31
3.2 Yolluk Sistemi ve Bölümleri.....	32
3.2.1 Giriş Kısmı ve Yayıcı .....	34
3.2.2 Yolluk Kısmı .....	37

3.2.3	Meme Kısmı .....	40
3.2.4	Çeşitli Yolluk Şekilleri .....	45
3.3	Basınçlı Döküm Kalıplarında Genel Konstrüksiyon Kuralları .....	49
3.4	Yolluk Sisteminin Boyutlarının Makine Kapasitesiyle Dengelenmesi ( $P - Q^2$ Diyagramı) .....	50
4.	<b>YOLLUK SİSTEMLERİNİN SİMÜLASYONU</b> .....	56
4.1	Giriş .....	56
4.2	Yolluk Sisteminin Optimizasyonu.....	58
4.3	Döküm Simülasyonunda Temel Esaslar .....	62
4.3.1	Korunum Denklemleri .....	62
4.3.1.1	Kütlenin Korunumu .....	63
4.3.1.2	Momentumun Korunumu.....	64
4.3.1.3	Enerjinin Korunumu .....	67
4.3.2	Akış Denklemleri.....	67
4.3.3	Serbest Yüzey Denklemi.....	69
4.3.4	Yüzey Gerilimi .....	70
4.3.5	Damlacık Denklemleri .....	70
4.3.5.1	Reynolds Transport Teoremi.....	71
4.3.5.2	Tek Partikül Denklemi.....	73
4.3.5.3	Kütlenin Korunumu .....	74
4.3.5.4	Lineer Momentumun Korunumu.....	74
4.3.5.5	Enerjinin Korunumu .....	76
4.3.5.6	Partiküle Olan Isı Transferi .....	78
4.3.5.7	Partiküllerin Çevresindeki İş Miktarı .....	78
4.3.6	Ortalama Hacimde Damlacık Denklemi .....	80
4.3.6.1	Hacim Ortalaması .....	80
4.3.7	Döküm Analizinde Kullanılan Birleştirilmiş Diferansiyel Denklemler .....	82
4.4	Nümerik Simülasyonda Temel Esaslar.....	83
4.4.1	Front Tracking.....	83
4.4.2	“Level Set” Metodu .....	84
4.4.3	Volume-Of-Fluid Yaklaşımı .....	85
4.4.3.1	SLIC.....	86
4.4.3.2	PLIC.....	87
5.	<b>BİLGİSAYAR DESTEKLİ SİMÜLASYON UYGULAMASININ İNCELENMESİ</b> .....	89
5.1	Giriş .....	89
5.2	Basınçlı Döküm Prosesi.....	91
5.2.1	Metal Alaşımının Seçimi .....	91
5.2.2	Kalıptaki Maçaların Dizaynı .....	95
5.2.3	Yolluk Sisteminin ve Taşırma Boşluklarının Tasarımı .....	97
5.2.4	Kalıp Malzemesinin Seçimi .....	100
5.3	Simülasyon işlemi ve Sonuçları .....	101
5.3.1	Basınç Dağılımı.....	101
5.3.2	Sıcaklık Dağılımı.....	102
5.3.3	Kalıbın Doldurulma Zamanı .....	103
5.3.4	Porozite Kontrolü .....	104
6.	<b>SONUÇLAR</b> .....	106

KAYNAKLAR.....	107
ÖZGEÇMİŞ.....	108

## SİMGE LİSTESİ

$t$	İdeal doldurma zamanı (sn)
$k$	Deneysel sabit (sn/ mm)
$T_1$	Erimiş metalin kalıba girerkenki sıcaklık değeri ( $^{\circ}C$ )
$T_2$	Minimum akış sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )
$T_3$	Kalıp yüzeyinin sıvı metal ile temas etmeden önceki sıcaklık değeri( $^{\circ}C$ )
$P_s$	Sürtünme katsayısı
$Z$	Dönüştürme faktörü ( $^{\circ}C/\%$ )
$T_c$	Döküm kalınlığı (sn)
$\rho$	Alaşımın öz ağırlığı( $gr/mm^3$ )
$G_d$	Girişin derinliği (mm)
$G_v$	Girişin hızı (mm/sn)
$J$	Alaşım için deney sabiti ( $gr/mm^2$ )
$E_i$	Sıvının içeri iletim kanalındaki enerjisi (kcal)
$E_o$	Sıvının dışarı iletim kanalındaki enerjisi (kcal)
$H_t$	Toplam enerji kaybı (kcal)
$P_i$	İçeri iletim kanalındaki basınç ( $N/mm^2$ )
$P_o$	Dışarı iletim kanalındaki basınç ( $N/mm^2$ )
$v_i$	İçeri iletim kanalındaki hız (mm/sn)
$v_o$	Dışarı iletim kanalındaki hız (mm/sn)
$\rho$	Yoğunluk ( $gr/mm^3$ )
$P$	Piston yüzeyindeki basınç ( $N/mm^2$ )
$v_g$	Sıvı metalin boşluk girişindeki hızı (mm/sn)
$P_h$	Enjeksiyon silindirdeki basınç ( $N/mm^2$ )
$P_{acc}$	Akümülatör basıncı ( $N/mm^2$ )
$v$	Silindirinin haznesinin doldurulma esnasında ergimiş metalin hızı (mm/sn)
$P$	Silindirinin haznesinin doldurulma esnasındaki basınç değeri ( $N/mm^2$ )
$A$	Silindir haznesinin alanı ( $mm^2$ )
$A_h$	Enjeksiyon silindirinin alanı ( $mm^2$ )
$v_{dry}$	Pistonu hareket ettiren ilk basınç ( $N/mm^2$ )

$v$	Pistonun hızı (mm/sn)
$\bar{F}$	Güç (J/sn)
$\bar{v}$	Silindir haznesinin doldurulması esnasındaki hız (mm/sn)
$\alpha$	Güç ve hız vektörleri
$  $	Vektör modülleri
$P$	Piston yüzeyindeki basınç ( $N/mm^2$ )
$a$	Makine performans değerinin sabiti
$\Omega$	3 boyutlu A bölgesinde bir nokta
$\bar{n}$	Normal vektörü
$\rho'_x, \rho'_y$	Öz ağırlığın x ve y koordinatlarında birinci türevi
$u, v$	Parçacıkların x ve y yönlerindeki hızları (mm/sn)
$\bar{u}$	Akışkanın hızı (mm/sn)
$\rho$	Akışkanın öz ağırlığı ( $gr/mm^3$ )
$\Delta$	Laplace 'daki koordinat yönü
$\bar{h}$	Neumann datası ( $\Gamma_N$ üzerinde tanımlanmış bir vektör)
$I$	3x3 tanımlanmış bir matris
$\bar{n}$	$\Gamma$ 'ye doğru normalden dışarıya doğru çıkan vektör
$T$	Sıcaklık ( $^{\circ}C$ )
$\alpha$	Termal yayılma katsayısı
$V_T$	Ergimiş metalin toplam hacmi ( $mm^3$ )
$V_C$	Yapılan dökümün hacmi ( $mm^3$ )
$V_O$	Taşma kanallarının hacmi ( $mm^3$ )
$f_p$	Pistonun basma miktarının yüzdeliği
$D$	Pistonun basan yüzeyinin alanı ( $mm^2$ )
$L_S$	Pistonun basan bölümünün uzunluğu ( $mm$ )
$t_{fill}$	Kalıbın doldurulma zamanı (sn)

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Ottmar Mergenthaller tarafından 1890 yılında geliştirilen, matbaa harflerinin tek bir parça halinde dökümünü sağlayan dizgi makinesi.....	2
Şekil 1.2 Basınçlı dökümle imal edilmiş çeşitli parçalar .....	6
Şekil 1.3 Sıcak kamaralı döküm makinesinin ana bileşenlerinin gösterimi.....	12
Şekil 1.4 Basınçlı hava ile çalışan makinenin basit görünüşü.....	13
Şekil 1.5. Yatay soğuk kamaralı basınçlı döküm makinesi .....	14
Şekil 1.6. Düşey soğuk kamaralı döküm makinesi ve çalışma prensibi .....	15
Şekil 2.1 Hareketli (a) ve sabit (b) kalıp yarılarının incelenmesi.....	17
Şekil 2.2 Maça tiplerine örnekler .....	20
Şekil 2.3: Hareketli Maça yerleşimlerine örnek .....	21
Şekil 2.4 İtici pimlerin örnek konumları .....	22
Şekil 2.5 Basınçlı dökümle üretilen parçadaki havalandırma kanalının gösterimi. (a) Tahliye girişi, (b) hava tahliye kanalları, (c) döküm parçası, (d) mandal, (e) vakum hattı.....	27
Şekil 2.6 Havalandırma boşluğu ve hava tahliye kanalı dizaynı. (a) döküm parçası, (b) havalandırma boşluğu, (c) itici pim, (d) çekirdek.....	29
Şekil 2.7 Basınçlı döküm kalıbına soğutma kanallarının yerleştirilmesi.....	30
Şekil 3.1 Sıcak kamara ve dikey soğuk kamara enjeksiyon makineleri için yolluk örnekleri. (a) Merkezi yolluk girişi, (b) dıştan yolluk girişi, (c) Dıştan ikili yolluk girişi.....	33
Şekil 3.2 Yolluk sistemi içersinde giriş ve yayıcı kısmı .....	34
Şekil 3.3 Yolluk sistemi içersinde yayıcı tiplerine örnekler .....	35
Şekil 3.4 Yayıcı tipleri a. Konik geçişli, b. ve c. İtici, d tek yön yönlendirmeli, e. Konik arkadan kesmeli .....	36
Şekil 3.5 Yolluk sistemi içersinde yolluk kısmı (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998).....	37
Şekil 3.7 Yolluk kanalı tipleri (A) kör yolluk kanalı, (B) T yolluk kanalı, (C) Fan yolluk kanalı, (D) Ofset yolluk kanalı .....	39
Şekil 3.8 Çeşitli meme kısımlarının gösterimi .....	40
Şekil 3.9 Meme kısmının ince tutulmasının sonuçları.....	41
Şekil 3.10 Geniş yüzeyli ince cidarlı basınçlı döküm parçalarının meme kısımları .....	43
Şekil 3.11 Meme kısmının farklı dizaynları.....	44
Şekil 3.12 Silindirik ve boru şekilli döküm parçaları için yolluk girişleri.....	46
Şekil 3.13 Çeşitli yolluk konumları. (a) Kalıp boşluğu, (b) yolluk girişi, (c) hava cebi .....	46
Şekil 3.14 Farklı yolluk türleri ile kullandıkları basınçlı döküm makineleriyle ilişkisini	

göstermektedir .....	47
Şekil 3.15 Çok gözlü kalıplar için yolluk dizaynı. (A) yatay soğuk kamaralı basınçlı döküm makineleri için basınç odasının alt kısmında hilal şeklinde bölme bulunmaktadır. a kalıp boşluğu, b basınç odasının kapalı tarafı. B, C, D dizaynları yatay soğuk kamaralı basınçlı döküm makineleri içindir. E, F, G dizaynları sıcak kamara makineleri ve dikey soğuk kamara makineleri için uygundur.....	49
Şekil 3.16 Pistonun doldurulması, yolluk, kalıp boşluğu girişi ve Bar-Meir sonrasında havalandırma boşluklarının şemayla gösterimi .....	52
Şekil 3.17 Çeşitli akış oranları için kalıp çizgisini gösteren $P-Q$ diyagramı. Akış oranı eksenini $Q$ 'da doğrusal ölçek kullanılarak oluşturulmaktadır.....	54
Şekil 3.18 Çeşitli akış oranları için kalıp çizgisini gösteren $P-Q^2$ grafiği. Akış oranı eksenini $Q^2$ de doğrusal ölçek kullanılarak oluşturulmuştur .....	55
Şekil 3.19 Akış katsayısının(C) kalıp çizgisi üzerindeki etkisini gösteren $P-Q^2$ diyagramı. Giriş alanı $A_g = 0.0151 m^2$ .....	55
Şekil 4.1 Geleneksel Deneme-Yanılma Yöntemi ile Optimizasyon Tekniğiyle Desteklenmiş Yöntemin karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.2 Yolluk sistemindeki çeşitli dizayn varyasyonlarının optimizasyonu(Procast, 2003)	60
Şekil 4.3 Kartezyen koordinatlardaki kontrol hacmi .....	64
Şekil 4.4 Diferansiyel hacimde oluşan gerilim .....	65
Şekil 4.5 Serbest yüzey ve serbest yüzeydeki gerilmeler .....	70
Şekil 4.6 Sistem, kontrol hacmine doğru birbirini izleyen iki zamanda hareket etmekte .....	71
Şekil 4.6 Yüzeylerin tanımlanması.....	81
Şekil 4.7 Ara yüzeyin SLIC yaklaşımıyla yeniden oluşturulması.....	86
Şekil 4.8: Ara yüzeyin PLIC yaklaşımıyla yeniden oluşturulması.....	87
Şekil 5.1 Aracın ön kısmına monte edilmiş spot lambası. ....	89
Şekil 5.2 Montajlı parçalar içersinde dirsek kısımları. ....	90
Şekil 5.3 Dirsek parçasının çeşitli yönlerden resimleri .....	90
Şekil 5.4 Hareketli maçalar .....	95
Şekil 5.5 Dirsek parçasındaki delikler. ....	96
Şekil 5.6 Dirsek parçasındaki talaşlı işleme bölgeleri. ....	96
Şekil 5.7 Delikler için dizayn edilmiş maça bloğu. ....	97
Şekil 5.8 Örnek parçada meme ve yolluk kısımları.....	97

Şekil 5.9 yüzük tipi meme ve yolluk kısmı.....	98
Şekil 5.10 Fan tipi meme ve yolluk kısmı.....	99
Şekil 5.10 Yüzük Tipi Taşırma Boşluğu.....	99
Şekil 5.11 Sabit ve Hareketli kalıp yarıları. ....	100
Şekil 5.12 Döküm işlemi esnasında parça üzerindeki basınç dağılımı.....	101
Şekil 5.13 Döküm işlemi esnasında parça üzerindeki sıcaklık dağılımı.....	102
Şekil 5.14 Döküm işleminde kalıp doldurma zamanın gösterimi .....	103
Şekil 5.15 Döküm sonrası oluşan hava kabarcıkları.....	104

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Basınçlı döküm Alüminyum alaşımları.....	7
Çizelge 1.2 Basınçlı döküm Magnezyum alaşımları.....	8
Çizelge 1.3 Basınçlı döküm Bakır alaşımları.....	8
Çizelge 1.4 Basınçlı döküm Çinko alaşımları.....	9
Çizelge 2.1 Basınçlı döküm kalıplarının malzemeleri.....	18
Çizelge 2.2 Basınçlı döküm kalıplarının malzemeleri.....	19
Çizelge 2.3 Farklı alaşımlarda hava tahliye kanallarının derinlikleri.....	28
Çizelge 3.1 Alaşım çeşitleri.....	38
Çizelge 5.1 Zamak#3, Zamak#5 ve Zinc ZA-8 alaşımlarının mekanik özellikleri.....	92
Çizelge 5.2 Zamak#3, Zamak#5 ve Zinc ZA-8 alaşımlarının kimyasal özellikleri.....	93
Çizelge 5.3 Zamak#3'ten beklenen performans özellikleri.....	93
Çizelge 5.4 Zamak#5'ten beklenen performans özellikleri.....	94
Çizelge 5.5 ZA-8'ten beklenen performans özellikleri.....	94

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada, basınçlı döküm tekniğinde iki önemli unsur olan giriş ve yolluk sistemlerinin bilgisayar destekli simülasyonunu sağlayacak ana unsurlar, matematiksel temeller ve dizayn için gerekli parametreler ortaya konulmaktadır. Bu temellerin ışığında, basınçlı döküm kalıplarının tasarımı ve simülasyonu incelenmektedir. Bununla birlikte simülasyon teknolojisini elinde bulunduran firmaların yabancı menşeli olduğu göz önüne alınırsa, bu çalışmanın, kendi öz kaynaklarımızla geliştirilebilecek basınçlı döküm simülasyon programlarının tasarımını sağlamak noktasında bir başlangıç niteliğinde sayılabileceğine ve yapılacak diğer projelerle bunun sağlanabileceğine inanmaktayım.

Bu çalışmamda benden her türlü desteğini esirgemeyen çok değerli hocam, sayın Prof. Dr. Hüseyin Sönmez'e, kaynak araştırmalarımda bana yardımcı olan Dr. Vural Aksakallı'ya içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

## ÖZET

Basınçlı döküm, seri bir şekilde hassas toleranslarda, düzgün yüzey kalitesinde parça üretimine izin veren, üretim maliyetlerinde tasarruf sağlayan bir üretim tekniğidir. Basınçlı dökümle küçük, karmaşık yüzey özelliklerine sahip ve yüksek adetlerde üretilen parçalar otomotiv ve diğer endüstriler tarafından yüksek miktarlarda kullanılmaktadır. Bu teknikte, kompleks metal/hava ara yüzeyindeki olayların kinematik ve dinamik olarak modellenmesi çok önemlidir. Bu çalışmada, giriş ve yolluk sistemlerinin dizayn metodolojileri temel alınarak yapılan incelemelerde basınçlı döküm prosesinin fiziksel ve matematiksel temellerinin daha iyi anlaşılması sağlanmaktadır. Basınçlı dökümdeki kalıp doldurma ve katılaşma süreçleriyle ilgili kritik parametrelerin hesaplanması incelenmektedir. Bu çalışmada, basınçlı döküm simülasyonunun incelenmesi, matematiksel ve fiziksel temelleri ele alınmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Yolluk sistemleri, Giriş sistemleri, Modelleme

## **ABSTRACT**

Pressure Die Casting offers cost savings due to its near net- to net shaping capabilities, and its smooth surface finish. Turning Pressure Die Casting for its ability to produce small, complex-shape, high volume parts, the automotive industry consume parts by the millions. In a casting process, which is characterized by topologically-complex metal/air interfaces having high density ratios and high surface tension, how to model the interfacial flow in kinematically and dynamically is a very important task. This work presents an enhancement of the current gating and runner system design methodologies based on a better understanding of the physics and mathematics of the die casing process. Accurate values of critical parameters involved in the die casting design process such as filling time and freezing time are calculated to allow more knowledgeable decision making during the design stage. As a contribution to study a theory of foundry simulation software the mathematical algorithm and physical algorithm compared in this thesis. A design scenarios were proposed and it supported by well known simulation applications for better understanding.

**Keywords:** Runner system, Gating system, Computational modeling.

## 1. GİRİŞ

Basınçlı döküm, sıvı metalin basınç etkisi altında yüksek hızla metalse kalıba doldurulması esasına dayanan döküm yöntemidir. Bu teknikteki ana elemanlardan olan metal kalıp; enjeksiyon işlemi sırasında oluşan gerilime maruz kalmakta, ergimiş metalin sahip olduğu ısıyı dağıtarak parçadan uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte hidrolik sistemle ergimiş metalin konumu, hızı ve ivmelenmesi kontrol edilerek kalıp boşluğunun istenilen sınırlar dahilinde doldurulması ve ergimiş metalin katılaşması sağlanmaktadır(ASM Handbook Volume 15, Casting,1998) .

Basınçlı dökümde kalıp iki yarımdan oluşmaktadır ve iki kalıp yarımı kapatılıp kilitlendikten sonra sıvı metal bir basma haznesine aktarılır. Haznedeki sıvı metal bir piston veya basınçlı hava vasıtasıyla kalıba doldurulur. Kalıp içersindeki hava, dolum esnasında kalıp yüzeylerindeki havalandırma deliklerinden dışarı atılmaktadır. Kalıp boşluğu doldurulduktan sonra katılaşma gerçekleşinceye kadar basınç uygulanmaktadır. Sonra kalıp açılır ve döküm parçası alınır. Kalıp açık durumdayken içi temizlenir ve yağlanır.

Amerikan literatüründe bu yöntem “Die Casting”, Avrupa’da ise “Pressure Die Casting” olarak isimlendirilmekteydi. Son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte “High Pressure Die Casting” ismiyle anılmaya başlanmıştır.

Basınçlı dökümde kaliteyi yakalayabilmek ve aynı zamanda kalıbın kısa sürede yıpranmasını önlemek için üretilecek malzemenin alaşımı, biçimi v.b. özellikleri göz önünde bulunarak kalıbın tasarlanması gerekmektedir. Tasarımın yanı sıra kalıba uygun basınçlı döküm makinesi de belirlenmelidir. Basınçlı dökümde metalin kalıba doluş hızının çok yüksek oluşu, çok kompleks şekilli parçaların dökülebilmesine imkân sağlamaktadır. Basınçlı döküm, ağırlıkları birkaç gram ile 25 kg arasında değişen, nihai üretim şekline yakın parçaların yüksek verimli ve yüksek kapasiteli dökümüne yönelik geliştirilmiş bir metottur. Son 30-40 yılda basınçlı döküm tekniğinde büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Metal ve kalıp sıcaklıkları, basınçlar, besleme hızları gibi faktörlerin kontrollerinde çok büyük ilerlemeler gerçekleşmiştir.

Döküm tekniğiyle ilgilenen en eski bilim adamlarının arasında önemli bir yere sahip olan Reaumur (1683 - 1757) dökümhanelerde önemli çalışmalara liderlik etmiştir(Guomirig Li, 2000). Bununla birlikte 1849'da Sturges, 1852'de Barr, 1856'da Helize ve 1877'de Dusanbury tarafından el tipi döküm makinelerinin patentleri alınmıştır. Bu gelişmelerin arkasından Ottmar Mergenthhaler, Linotip makinesini geliştirerek bu alandaki önemli bir ilerleme sağlamıştır.



Şekil 1.1 Ottmar Mergenthhaler tarafından 1890 yılında geliştirilen, matbaa harflerinin tek bir parça halinde dökümünü sağlayan dizgi makinesi ( Smithsonian Institute, 2007)

80'li yılların sonuna kadar kullanımı devam etmekte olan bu makinenin çalışma prensibinden yararlanılarak ilk basınçlı döküm makinesi patenti H.H. Doehler tarafından 20. yüzyılın başlarında alınmıştır.

Linotip makinesinin geliştirilmesi ve Doehlerin patentiyle birlikte başlayan basınçlı döküm çalışmalarını, bu konudaki ilk endüstriyel uygulama niteliğinde sayılabilecek kurşun ve kalay alaşımlarından motor yataklarının dökümü takip etmektedir. Bu uygulamanın getirdikleriyle daha iyi mekanik özelliklere sahip alaşımların dökümleri üzerinde çalışmalara başlatılmıştır.

Basınçlı döküm tekniğinin ilk geliştiği yıllarda, alaşımların ergime sıcaklıkları uygulamada belirleyici bir rol oynamaktaydı. Çinko alaşımlarının, kalay kurşun alaşımlarına yakın değerlerdeki ergime sıcaklıkları basınçlı döküm uygulamalarında kullanılmalarında belirleyici bir rol oynamaktadır. 1915 yılında Doehler Pres Döküm Şirketi tarafından ticari amaçla alüminyum alaşımlarının basınçlı dökümü ile Birinci Dünya Savaşı'nda da kullanılmış olan gaz maskesi, makineli tüfek, dürbün vb... ekipmanların üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu gelişmelerin ışığında ülkemizde ve dünyada son 30-40 yılda basınçlı döküm endüstrisinde kayda değer önemli gelişmeler gerçekleşmiştir. Bununla birlikte daha iyi kalitede, daha kısa zamanda, karmaşık şekilli parçaların daha düşük maliyetler çerçevesinde üretilebilmesi için simülasyon teknolojilerine önem verilmiştir.

Bu çalışmayı yaparken, son yıllarda basınçlı döküm endüstrisinde önemli gelişme gösteren yolluk sistemleri üzerine simülasyon teknolojilerinin incelenmesi, tasarımda etkili olan parametrelerin matematiksel ve fiziksel eşitliklerle ele alınarak açıklanması ele alınmaktadır. Bununla birlikte örnek bir simülasyon uygulamasının ayrıntılı olarak incelenmesiyle bu konuda faaliyet gösteren firmalarının simülasyon teknolojilerini kullanarak sağlayacakları avantajlar gösterilmeye çalışılmıştır. Bilindiği üzere basınçlı döküm endüstrisi bugün olduğu gibi gelecekte de ürün denemelerinde sınırlamalar, zaman sınırlamaları ve özel müşteri istekleriyle karşı karşıyadır bu nedenlerden dolayı basınçlı döküm endüstrisi simülasyon teknolojilerine önemli düzeyde ihtiyaç duymaktadır. Bu noktada hazırlanmış olan tez çalışması basınçlı döküm kalıplarında yolluk sistemlerinin simülasyonu konusunda çalışan araştırmacılara ve uygulama mühendislerine rehber niteliği taşımaktadır.

### **1.1 Basınçlı Döküm Yönteminin Avantajları**

1. Metal kalıba kıyasla çok daha karmaşık şekilli parçaların dökümü mümkündür.
2. Kalıplar basınç altında doldurulduğundan, diğer döküm yöntemlerine kıyasla, daha ince cidarlı, boyutsal oranı ve hassasiyeti daha yüksek parçalar üretilebilmektedir.
3. Özellikle birden fazla göz ihtiva eden kalıplar kullanıldığında üretim hızı diğer yöntemlerden çok daha fazla olmaktadır.
4. Basınçlı döküm yönteminde, parçalar tekrar işlenmeye hemen hemen hiç ihtiyaç göstermeyecek şekilde üretildikleri için, fabrika ek ünitelerin işgal edeceği zemin ve işçilikten tasarruf edilmektedir.
5. Dökülen parça boyutlarında bir değişim olmaksızın aynı kalıptan binlerce parça üretilebilmektedir.
6. Daha ince kesitlerin dökülebilmesi, metal maliyetini azaltıcı bir husus olmaktadır.
7. Basınçlı döküm ürünleri genellikle çok az bir yüzey bitirme işlemi gerektirmektedir.
8. Bazı alaşımlar (örneğin Al esaslılar) basınçlı döküm yöntemi ile üretildiklerinde, diğer döküm yöntemlerine nazaran çok daha yüksek mekanik özellikler göstermektedir.

### **1.2 Basınçlı Döküm Yönteminde Sınırlamalar**

1. Döküm boyutları sınırlıdır, döküm ağırlığı en fazla olarak 23 kg.ı aşar ve genellikle 4 -5 kg. civarındadır.
2. Kalıp dizaynında dökülecek parçanın şekli dolayısıyla yolluklandırılması, hava tahliye kanallarının yapımı ve yerinin seçimi büyük önem taşımaktadır; zira bu faktörlere bağlı olarak kalıp içerisine hava sıkışması söz konusu olabilmektedir ve içeride kalan hava da gaz boşluklarına sebep olmaktadır
3. Komple bir basınçlı döküm makinesi (ana pres, yardımcı cihazlar ve kalıplar) oldukça pahalıdır. Bu nedenle yöntemin ekonomik bir değer ifade edebilmesi ancak çok sayıda parça üretimi ile mümkün olmaktadır.
- 4 - Birkaç istisna dışında, ergime sıcaklıkları bakır esaslı alaşımların ergime sıcaklıklarından daha yüksek olan alaşımlar basınçlı döküm yöntemi ile üretilememektedirler.

### **1.3 Basınçlı Döküm Tekniğindeki Yöntemler**

Basınçlı döküm tekniğinde, sistemlerdeki farklı özelliklerin birbirine tercih edilmesinden kaynaklanan bir çeşitlilik söz konusu olmaktadır. Bu özellikler ergimiş metalin akışı, kalıp boşluğundaki gazların uzaklaştırılması, ergimiş metal ile hidrolik sistem arasında oluşan reaksiyonlar ve enjeksiyon işlemi sırasında oluşan ısı kaybı olarak sıralanabilir. Bununla birlikte, bu sistemlerdeki mekanik dizayn, ısı kontrol ve hareket sistemleri ortak özelliklere sahiptirler. Yukarıda belirtilenlerin ışığında, basınçlı döküm tekniği püskürtme döküm yöntemi ve pres döküm yöntemi olarak iki ana kısımda incelenmektedir.

#### **1.3.1 Püskürtme Döküm**

Ergime dereceleri düşük olan kurşun, kalay ve çinko esaslı alaşımların, ergime sıcaklıklarının oldukça üzerindeki bir sıcaklıkta, yüksek bir basınçla kalıp içersine püskürtülerek kalıbın doldurulması yöntemidir. Sıvı metal hava basıncı veya piston-silindir düzeneği yardımıyla memeden kalıp boşluğuna püskürtülmektedir. Sıcak kamaralı döküm makineleriyle gerçekleştirilen bu yöntem ile daha hızlı üretim yapılmaktadır.

#### **1.3.2 Pres Döküm**

Ergime sıcaklıkları yüksek olan alüminyum, magnezyum ve bakır alaşımlarının ergitme fırınından alınarak döküm makinesinin haznesine doldurulup, bir piston vasıtasıyla kalıp boşluğunun doldurulması yöntemidir. Bu yöntemdeki döküm sıcaklıkları püskürtme döküm yöntemine göre oldukça düşük değerlerdedir. Liküdüs eğrisi civarında bir sıcaklıkta işlem gerçekleştirilmektedir(Sönmez, 2006). Soğuk kamaralı makineler ile gerçekleştirilen bu yöntem ile püskürtme yöntemine kıyasla üretim hızı daha düşük olmaktadır.

#### 1.4 Basınçlı Döküm Alaşımları

Basınçlı döküm kalıplama metoduyla genellikle alüminyum, bakır, çinko, magnezyum, kalay, kurşun ve benzeri alaşımlardan döküm kalıplama işlemi yapılmaktadır.



Şekil 1.2 Basınçlı dökümle imal edilmiş çeşitli parçalar (Esparza, 2005)

Basınçlı döküm yöntemiyle üretilen parçaların kullanım alanlarının genişliği, buralardaki fiziki ve kimyasal şartlara uyum sağlayabilecek alaşımların geliştirilmesini sağlamıştır. Bunun sonucu olarak ortaya çok değişik tipte alaşımlar çıkmıştır.

Bu yüzden tasarımcının, başlıca basınçlı döküm alaşımları hakkında bilgi sahibi olması gerekmektedir. Ayrıca tasarımcı malzeme seçiminde aşağıdaki hususları göz önünde bulundurmalıdır. Bunlar şu şekilde sıralanmaktadır:

- 1- İmalatı yapılan parçanın dayanımı, sertlik ve şekil değiştirme gibi mekanik özellikleri,
- 2- Yaşlanmanın mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkisi,
- 3- Dökülebilirlik, akışkanlık, soğuma çekmesi vb. yönlerden basınçlı döküm kalıplamaya adapte edilebilirliği,
- 4- Isı etkisiyle dayanımda meydana gelen değişiklikler,
- 5- Talaş bitirme işlemlerinde kullanılabilirliği,
- 6- Parlatma boyama kaplama vb. bitirme işlemlerinde uygunluğu,
- 7- Korozyona karşı dayanım,



- Magnezyum alaşımları, daha çok hafifliğin istendiği yerlerde kullanılmaktadırlar. Uygulama alanları; portatif yazı makinesi, büro makinelerinin muhafaza ve gövdeleri, fotoğraf makineleri, optik aletler, portatif aletler ve benzeri avadanlık parçaları magnezyum alaşımlarından yapılırlar(Tablo 1.2). Tekstil sanayindeki hareketli parçalar ile küçük taşıma ve paketleme makineleri parçaları magnezyumdan basınçlı döküm yoluyla üretilmektedir.

Çizelge 1.2 Basınçlı döküm Magnezyum alaşımları(Topbaş,1993).

Metal	Kimyasal Bileşim, %		
	ASTM A5 100	ASTM A2-91 A SAE 501	ASTM A2 91 B SAE 501 A
Alüminyum	9.0 - 11.0	8.3 - 9.7	8.3 - 9.7
Manganez, min	0.10	0.13	0.13
Çinko	0.30 max	0.4 - 1.0	0.4 - 1.0
Silisyum,max	1.00	0.50	0.50
Bakar, max	0.05	0.10	0.30
Nikel, max	0.03	0.03	0.03
Magnezyum	Kalan	Kalan	Kalan

- Basınçlı döküm yoluyla üretilen bakır alaşımlarında belli başlı özellikler; yüksek mukavemet, sağlamlık, korozyon ve aşınmaya karşı rezistansı olarak sıralanmaktadır(Tablo 1.3). Özellikle hassasiyet isteyen, şekli karışık, dayanıklı ve ekonomik olması istenen işlerde bu alaşımların basınçlı dökümleri çokça kullanılmaktadır. Örneğin otomobil dişlileri, vites dişli değiştirme çatalları, fren parçaları, ev ve mutfak eşyaları vb... dir.

Çizelge 1.3 Basınçlı döküm Bakır alaşımları(Topbaş,1993).

Metal	Kimyasal Bileşimi, %				
	Pirinç Alaşımları			Al. Bronzları	
	ASTM, Z39A	ASTM, Z391A	ASTM, Z391AA	98	99
Bakar	57.0 min	63.0-67.0	80.0-83.0	86 min	78 min
Silisyum,max	0.25	0.15-1.25	3.75-4.25	-	-
Kükürt, max	1.50	0.25	0.15	-	-
Kalay, max	1.50	0.25	0.25	-	-
Manganez, max	0.25	0.15	0.15	-	3.3
Alüminyum,max	0.25	0.15	0.15	9.0-11.0	10.0-11.5
Demir, max	0.25	0.15	0.15	0.75-1.5	3-5
Magnezyum,max	-	0.01	0.01	-	-
Diğer, max	0.50	0.50	0.25	-	0.30
Çinko	30.0 min	Kalan	Kalan	-	-
Nikel	-	-	-	-	3-3.5

### 1.4.2 Düşük Basıncılı Döküm Alaşımları

- Çinko alaşımları, basınçlı dökümle üretilen tüm ürünlerin ağırlık itibari ile yaklaşık olarak %60'ını teşkil etmektedir(Tablo 1.4). Çünkü kolay ve süratli döküm kabiliyeti nedeniyle ekonomik sonuçlar vermektedir. Düşük döküm sıcaklığı dolayısıyla bu alaşımlarda yakıt fiyatı, kalıp fiyatı ve kalıp işletme masrafları düşüktür. Mekanik özellikleri iyi, işlenebilmeleri tatminkâr ve bitirme işleri ekonomik sınırlar dahilindedir.

Çizelge 1.4 Basıncılı döküm Çinko alaşımları(Topbaş,1993).

Alaşım		Kimyasal Bileşimi %								
ASTM	SAE	Cu	Al	Mg	Fe Max	Pb Max	Cd Max	Sn Max	Zn	
AC.40.A	-	0.1 Max	3.5-4.3	0.03-0.08	0.1	0.007	0.005	0.005	Kalan	
AC.41.A	925	0.75-1.25	3.5-4.5	0.03-0.08	0.1	0.007	0.005	0.005	Kalan	
- (B)	903	0.25 Max	3.5-4.3	0.005-0.02	0.075	0.003	0.002	0.001	Kalan	
ASTM XX1 (b)	-	2.5-3.5	3.5-4.5	0.02-0.10	0.1	0.007	0.005	0.005	Kalan	

a) Alaşımda % 0.005 - 0.02 Ni var.  
b) Bu alaşımın kullanımı diğerlerine göre çok azdır

- Kalay ve alaşımlarının basınçlı dökümleri özellikle otomobil ana yataklarında kullanılmaktaydı. Fakat bu büyük ölçüde azalarak yerini daha çok korozyon mukavemeti isteyen sodalı su avadanlıklarının, süt makinelerinin, şurup pompalarının, dişçi ve tıbbi operasyon aletlerinin üretimine bırakmış durumdadır.
- Kurşun alaşımları genellikle düşük fiyat ve korozyona dayanıklı ürünlerin gerektiği; dayanım, sertlik ve diğer mekanik özelliklerin önemli olmadığı yerlerde kullanılmaktadır. Basıncılı döküm yolu ile üretilen parçalar, kuvvetli mineral asitlerine dayanıklılık isteyen, yangın söndürme aleti parçaları, batarya ve kimyasal aparatlar gibi yerlerde kullanılmaktadır.

Basıncılı döküm, talaş kaldırma işçiliğinin ve malzeme sarfiyatının az olması, üretim sayısının fazlalığı, simetrik olmayan karmaşık biçimdeki kalıplama işlemlerinin kolaylığı nedeniyle

üretimde yaygınca kullanılan bir yöntemdir. Basıncılı döküm parçasının tasarımında dikkat edilecek hususlar arasında; yüksek kaliteli parçayı verecek en ekonomik döküm alaşımını bulmaktır. Bu nedenle alaşımın seçiminde dikkat edilmesi gereken aşağıda belirtildiği gibi sıralanmaktadır.

Dayanım, sertlik gibi mekanik özellikler:

- Isıl işlemlerin özelliklere etkileri ve boyutsal kararlılık,
- Alaşımın basınçlı döküm metoduna uygunluğu, dökülebilirliği, akıcılığı,
- Düşük ve yüksek sıcaklıklardaki dayanımı,
- Cilalama, parlatılma, kaplanma, boyanma ve diğer yüzey bitirme işlemlerine uygunluğu,
- Korozyon direnci,
- Ağırlığı ve maliyeti.

### **1.5 Basıncılı Döküm Makineleri**

Basıncılı döküm makinesinin fonksiyonu, kalıbın iki parçasının tam ekseninde ve sağlam olarak tutmak, yeterli miktarda ergimiş madeni kalıba basınç altında göndermek ve kalıbın iki parçasını açıp kapatarak dökülmüş parçanın kalıptan çıkarılmasını sağlamaktadır. Kalıp, içine dökülecek parça, kalıbın çeliklerine oyulmuş, maça itici ve benzeri parçalar eklenmiş, basınçlı döküm makinesi tablalarına aynı ekseninde monte edilmiş iki çelik bloktan meydana gelmektedir.

Ergimiş metalin akışı, kalıp boşluğundan havanın çıkarılması, enjeksiyon sırasındaki ısı kaybı ve hidrolik sistem ile ergitilmiş metal arasındaki etkileşim bu sistemleri birbirinden ayırmaktadır. Sistemlerin farklı özellikleri olmasına karşın, bu kalıp dökme metodlarının benzer mekanik tasarımı, termal kontrolü ve çalışma sistemleri bulunmaktadır. Basıncılı döküm makinesi seçimi dökülecek malzemenin özelliklerine ve yapısına göre seçilmektedir. Basıncılı döküm makineleri, erimiş metali kalıp içersine basma sisteminin farklı oluşuna göre "sıcak kamaralı" ve "soğuk kamaralı" makineler olarak başlıca iki ana guruba ayrılmaktadır(Sully, 1998)

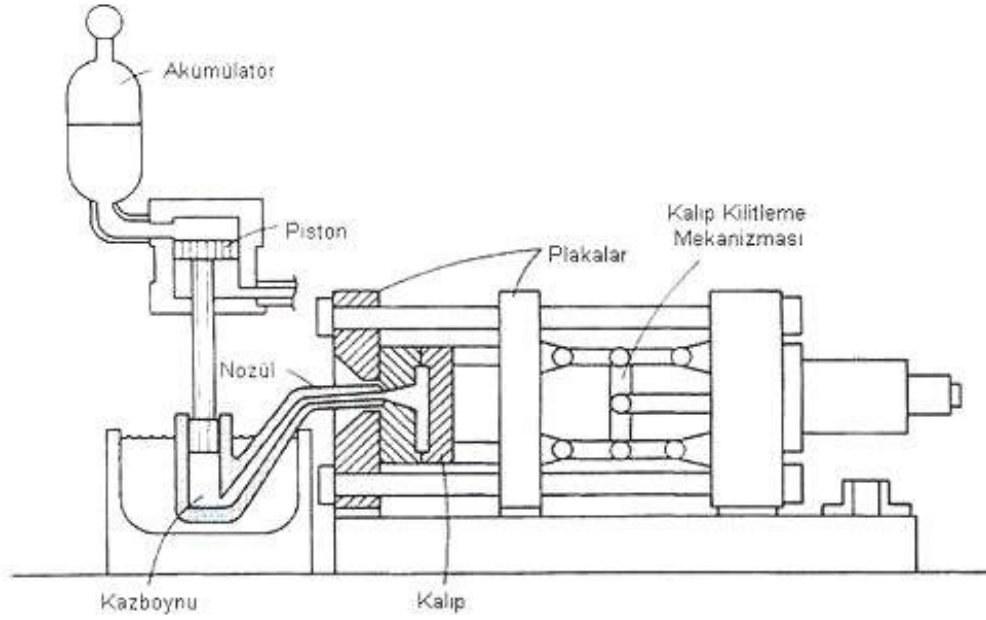
### **1.5.1 Sıcak Kamaralı Döküm Makineleri**

Şekil 1.3’de gösterilmekte olan sıcak kamaralı basınçlı döküm makinelerinde ergime sıcaklığı 327°C olan kurşun, 420°C olan çinko, 232 °C olan kalay gibi ergime sıcaklıkları düşük olan malzemelerin kalıplanmasında kullanılmaktadır. Bu yöntemle çok küçük ve hassas, hepsi aynı özelliğe sahip parçalar seri halde dökülebilmektedir. Sıcak kamaralı döküm yöntemi ile üretim sonucunda  $\pm 0,05$  mm hassasiyet elde edilmektedir. Üretim sırasında 10–80 atmosfer basınçla çalışıldığından üretilmiş parçaların üzerinden ikinci bir suretle talaş kaldırılmasına gerek duyulmamaktadır. Ergitilmiş metal ile sistem bileşenleri arasındaki kapsamlı etkileşimden sistem bileşenleri şiddetle etkilendiklerinden dolayı, erime noktaları daha yüksek olan maddeler için bu metodun dezavantajları bulunmaktadır. Sıcak kamaralı döküm yönteminde kullanılan makineler çalışma sistemlerine göre pistonlu ve havalı makineler olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar.

#### **1.5.1.1 Pistonlu Makineler**

Pistonlu makinelerde, fırın içerisine pik bir pota yerleştirilmektedir. Bu potaya monte edilen silindir ergimiş alaşımın içine gömülerek silindir içindeki piston bir levye ve eksantrik mekanizma ile yatay yönde çalıştırılmaktadır. Ergimiş metal bir delikten geçerek yer çekimi etkisiyle silindirin dolumunu gerçekleştirmektedir. Çalıştırma levyesi çekildiğinde piston kolu pim çevresinde dönerek pistonu silindir içinde hareket ettirmekte, pistonun ileri hareketi önce silindirde metal giriş deliğini kapatmakta, sonra da silindirdeki metali kalıba basmaktadır. Bu sistem ile yaklaşık olarak 20 kg/cm<sup>2</sup>'yi aşan basınçlara erişmek mümkün olabilmektedir. Ayrıca sıvı metal en kısa sürede ve en az ısı kaybı ile enjekte edilebilmektedir.

Şekil 1.3’ deki sıcak kamara işlemi erime noktaları daha düşük olan çinko, kurşun, kalay ve magnezyum gibi maddeler için kullanılmaktadır. Bu durumda çeşitli sistem bileşenleri eritilmiş metalle sürekli bir etkileşim içindedirler ve böylece enjeksiyon sırasında eritilmiş metalin türbülans, oksitlenen hava ve eritilmiş metalin soğuması gibi kötü durumlara maruz kalması azalmaktadır.

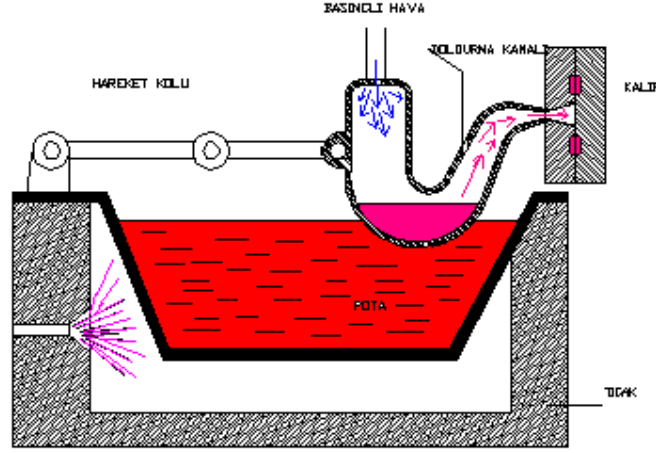


Şekil 1.3 Sıcak kamaralı döküm makinesinin ana bileşenlerinin gösterimi(Sully, 1988)

### 1.5.1.2 Havalı Makineler

Hareket kolunun yardımı ile hareket koluna bağlı bulunan kaz boynunun sıvı metal içerisine daldırılması sağlanmaktadır. Sıvı metal içerisine daldırılan kaz boynu içerisine doldurma kanalından ergitilmiş metal dolmakta daha sonra hareket kolu yardımıyla kaz boynu sıvı metali kalıba basacak şekilde kilitlenmektedir sonra sıvı metal, kaz boynundan kalıba yüksek basınçlı bir hava ile doldurulmaktadır. Bu tip makinelerde kalıba sıvı metalin doldurma işlemi yaklaşık  $35 \text{ kg/cm}^2$  basıncındaki hava ile gerçekleşmektedir. Burada depo içindeki sıvı metal ergime noktasının oldukça üstünde bir sıcaklıkta tutulmaktadır.

Şekil 1.4'te basınçlı hava ile çalışan döküm makinelerinde metal enjeksiyon sistemi için tipik bir örnek verilmektedir. Bu makine görünüş itibari ile kaz boynunu andırıldığı için kaz boynu tipide denilmektedir. Hareket kolunun yardımıyla, hareket koluna bağlı bulunan kaz boynunun sıvı metal içerisine daldırılması sağlanarak, sıvı metal içerisine daldırılan kaz boynu içerisine doldurma kanalından ergitilmiş metalin dolması sağlanmaktadır. Bununla birlikte hareket kolu yardımıyla kaz boynu sıvı metali kalıba basacak şekilde kilitlenir sonra sıvı metal, kaz boynundan kalıba yüksek basınçlı bir hava ile doldurulmaktadır. Burada depo içindeki sıvı metal ergime noktasının oldukça üstünde bir sıcaklıkta tutulmaktadır.



Şekil 1.4 Basınçlı hava ile çalışan makinenin basit görünüşü(Sully, 1988)

### 1.5.2 Soğuk Kamaralı Makineler

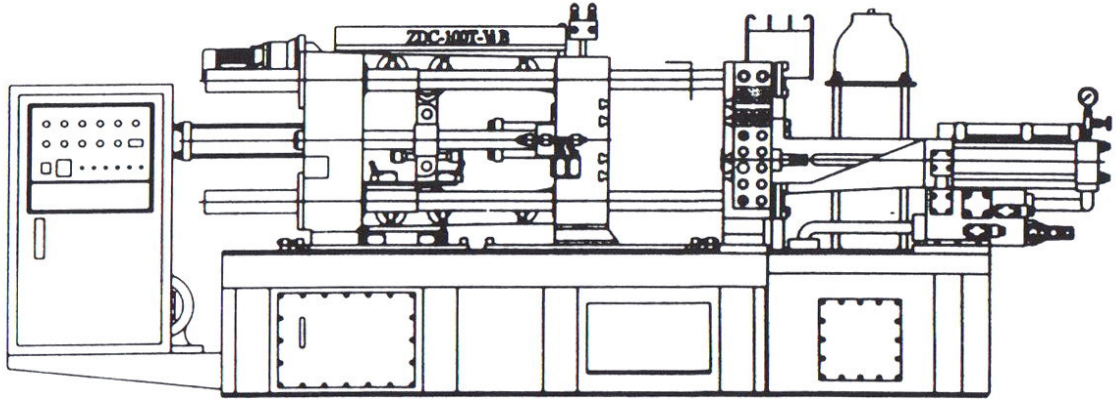
Soğuk kamaralı makinelerde ergime sıcaklığı 665 °C olan alüminyum, 649 °C olan magnezyum, 1083 °C olan bakır gibi ergime sıcaklıkları yüksek olan malzemelerin basınçlı dökümünde kullanılmaktadır.

Bu presin en büyük avantajı, eritilmiş olan metalin silindir-piston ünitesini etkilememesidir. Çünkü metal ayrı bir fırın içerisinde eritilerek kalıp içerisine basılmaktadır. Bu işlemde eritilmiş metal ve hidrolik piston devir süresi boyunca ayrıdır. Metot bağımsız olarak değerlendirilerek, yarı doldurulmuş yolluk içine dökülmekte ve kalıbın içine aktarılmaktadır. Bu işlem birkaç milisaniye sürmekte ve hidrolik pistonun eritilmiş metale temas süresi mümkün olduğu kadar kısalmaktadır. Bu, alüminyum ve bakır gibi erime noktaları daha yüksek metallerin basınçlı dökümle üretilmesine olanak sağlamaktadır. Dökme işlemine yüksek hız ilavesi dökümün şekline ve boyutuna bağlı olarak her boşluk için dakikada yaklaşık olarak 1'e 100 bölümde bir yüksek seviyede bir üretim getirmektedir[1]. Döküm işleminin yinelenebilirliği, tutarlılığı, yüzey özellikleri ve görünümü iyi bununla birlikte dayanıklılığı orta düzeyde olmaktadır(Karni, 1991).

Soğuk kamaralı döküm, yüksek bir üretim hacmi kazandığında iyi kar getiren bir proses halini almaktadır. Üretilen parçanın birim maliyeti yüksek değerlerdedir. İstenilen ürün için kalıbın üretilmesi pahalı ve uzun süreli bir iştir bunla birlikte kaliteli döküm üretmek için döküm makinesinin kurulumu zaman gerektirebilmektedir(Karni, 1991).

### 1.5.2.1 Yatay Soğuk Kamaralı Döküm Makinesi

Yatay konumlu soğuk kamaralı makinelerde enjeksiyon sistemini oluşturan silindir, piston ünitesi yatay düzleme paralel olarak yerleştirilmektedir. Silindir-piston ünitesi ısıtılmayan bu makinelerde erimiş metalin enjeksiyon sistemine olan sıcaklık etkisinden korumak amacıyla silindir ve piston içerisine soğutucu kanallar açılmıştır. Kalıplama işleminin ardından, açılan kanallar sayesinde silindir-piston ünitesi soğutulmuş özelliğinin bozulmaması sağlanmaktadır. Preste ergimiş metalin silindir içerisine aktarılışında uygulanacak ilave ve besleme sisteminin yerleşiminin zor olması, kalıplama zamanının fazlalığı, ısı kaybını önlemek için metalin ergime sıcaklığından fazla ısıtılması gibi zararlı yönleri bulunmaktadır.

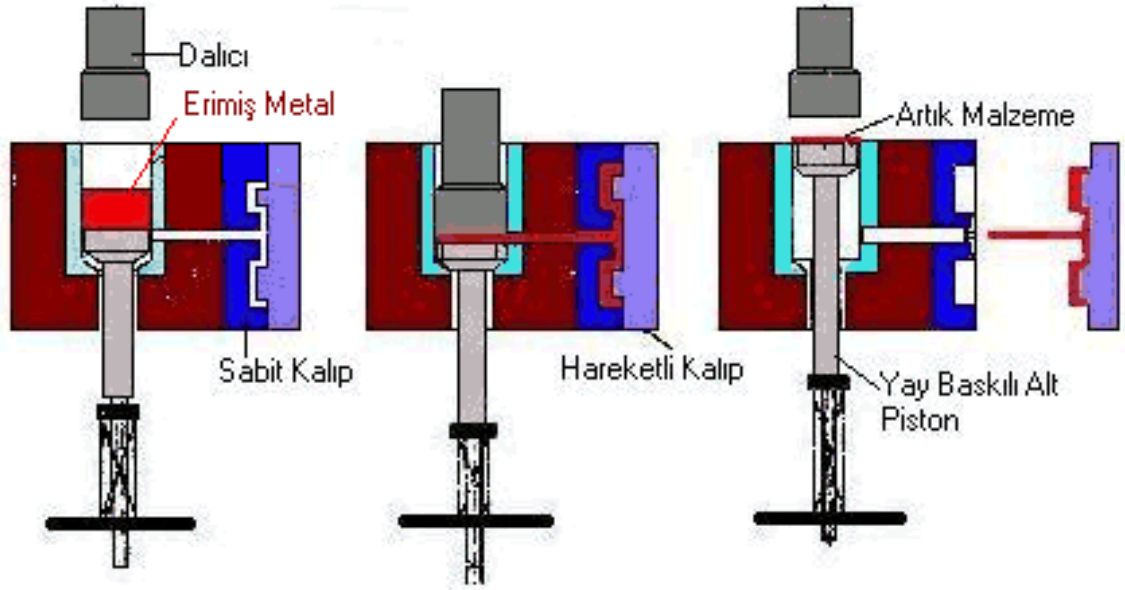


Şekil 1.5. Yatay soğuk kamaralı basınçlı döküm makinesi(Colton, 1997)

### 1.5.2.2 Düşey Soğuk Kamaralı Döküm Makinesi

Basma işlemi düşey bir kamarada yapılmaktadır. Alttaki piston ergimiş metal kamaraya dolarken, kalıp giriş deliğini kapayacak konumdadır. Metal beslendikten sonra üst piston aşağı doğru hareket ettirilerek, önce ergimiş metal iki piston arasında sıkıştırılır ve bu esnada

alt piston üst piston basıncının etkisi ile aşağı doğru hareket ederek kalıp giriş deliğini açmaktadır. Ergimiş metal bu girişten hızla kalıp boşluğuna basılır ve dökümün tamamlanması için bir süre basınç tatbik edilir. Katılaşma bittikten sonra üst ve alt piston yukarıya doğru hareket ettirilerek metal artığı dışarı atılır. Kalıp yarımı açılarak parça çıkarılır.



Şekil 1.6. Düşey soğuk kamaralı döküm makinesi ve çalışma prensibi (Doehler, 1974).

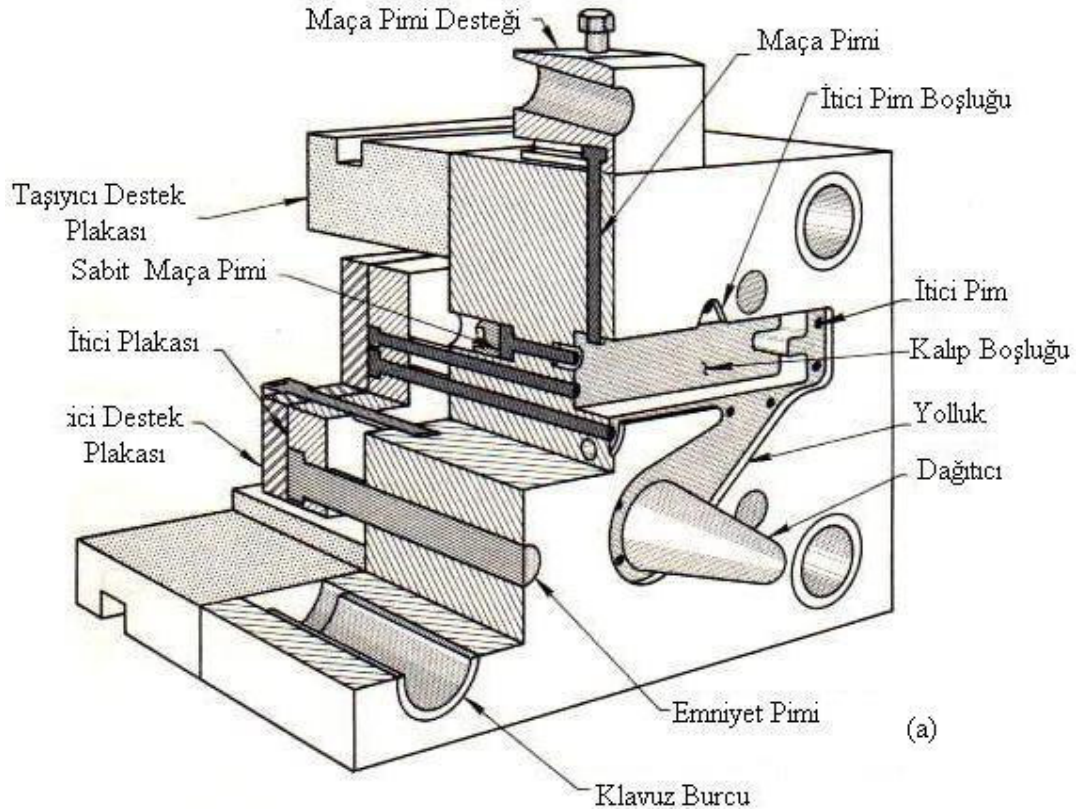
Şekil 1.6'da gösterildiği gibi bu sistemdeki makinelerin en önemli avantajı, piston hareket ettirildiğinde ergimiş metal sıkı bir kitle halinde hareket ederek dökülen parçada hava boşluklarının oluşumu da minimum olmasıdır. Düşey makineler genellikle merkezden beslemenin en iyi olduğu veya daha etkin olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Örneğin; merkez kısmının et kalınlığı fazla ve merkezden uzaklaştıkça kenarlara doğru et kalınlıkları azalan tekerlek v. b. parça dökümlerinde kullanımı avantajlıdır.

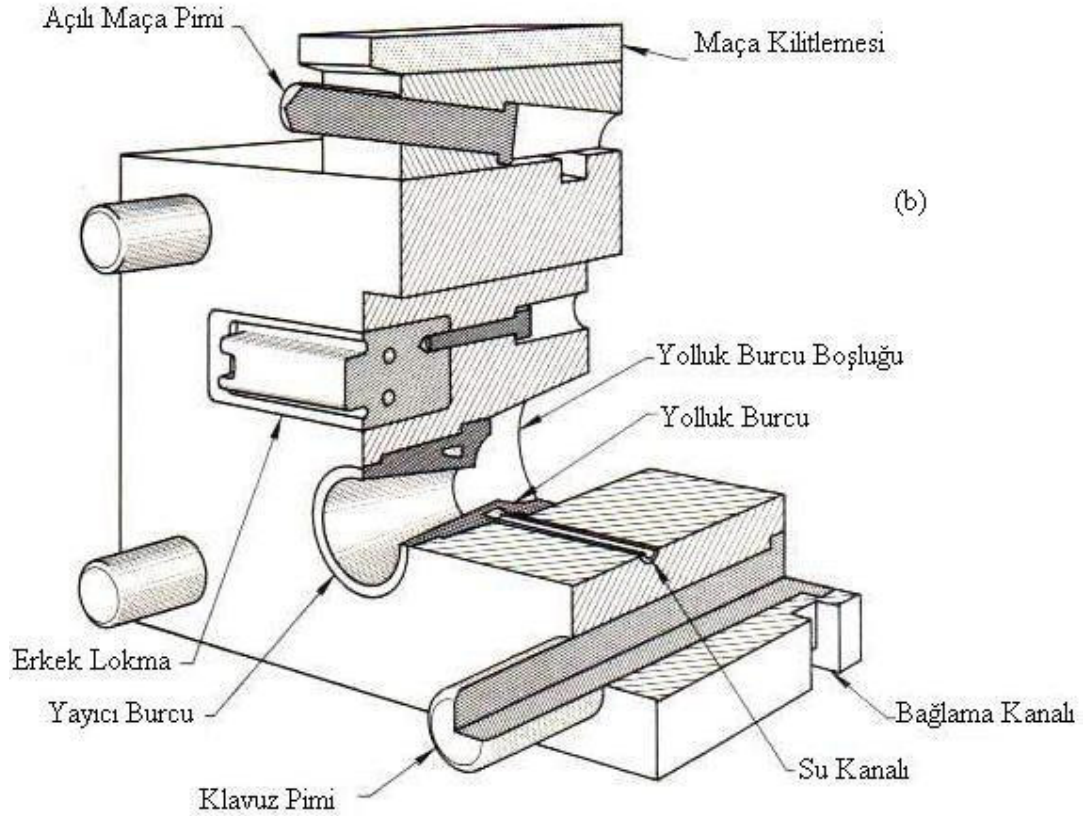
## 2. BASINÇLI DÖKÜM KALIPLARI

Basınçlı döküm kalıpları, her biri dökülecek parçanın geometrisine göre işlenmiş iki yarım kalıptan meydana gelmektedir. Makineye monte edilen bu kalıp bloklarından biri sabit (hareketsiz) kalıp yarımı, diğeri hareketli kalıp yarımı olacak şekilde düzenlenmektedir. Ergimiş metal kalıp boşluğuna, sabit kalıp yarımında bulunan besleme memesi vasıtasıyla akmaktadır. Hareketli kalıp yarımında ise dökülen parçanın şekline bağlı olacak yolluklar veya kanalları bulunmaktadır.

### 2.1 Sabit ve Hareketli Kalıp Yarıları

Basınçlı döküm kalıpları sabit ve hareketli kısım olmak üzere iki ana kısımdan meydana gelmektedir. Ergitilmiş metalin kalıp boşluğuna basıldığı enjeksiyon sistemi tarafına yerleştirilen kısım sabit kalıp yarısı olarak adlandırılmaktadır. Hareketli kalıp yarısı ise enjeksiyon makinesinin hareket sistemine bağlı olarak sistemin açılıp kapanmasıyla birlikte hareket kazanarak üretilen parçanın dışarıya çıkarılmasını sağlayan kısımdır. Şekil 2.1'de hareketli ve sabit kalıp yarılarının gösterimi ayrıntılı olarak incelenmektedir.





Şekil 2.1 Hareketli (a) ve sabit (b) kalıp yarılarının incelenmesi(ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

Sabit kalıp yarısı incelendiğinde ergimiş metali yolluklara aktarılmasını sağlayan giriş sistemi, kalıp çekirdeğinin bir kısmı, su kanalları, maça pimleri, maça kilitleri ve merkezleme milleri bulunmaktadır. Hareketli kısımda Şekil 2.1’de görüldüğü üzere ergimiş metali kalıp gözlerine taşımakta olan yolluklar, kalıp içersindeki katılaşma prosesini tamamlamış ürünü kalıp içersinden çıkarmaya yardımcı olan itici sistemleri bulunmaktadır. Bununla birlikte bu ana elemanlara yardımcı yayıcılar, itici pimleri, itici plakaları, maça yatakları, merkezleme millerinin girdiği yataklar yer almaktadır.

Üretimi gerçekleştirilecek olan parça çoğu zaman hareketli ve sabit kalıp yarılarına, parça üzerinde belirlenen ayırma çizgisi referans alınarak işlenmektedir. Belirlenen ayırma çizgisinin yeri, elde edilmek istenen parça kalitesine, estetik görüntüsüne, kalıp ömrüne ve döküm sonrası yapılacak temizle işlemlerine etki etmektedir. Bununla birlikte yanlış olarak belirlenmiş ayırma çizgisi döküm sonrası kesme-temizleme işlemlerini arttırarak üretim

maliyetlerinin artmasına, estetik ve ergonomik olarak uygun olmayan parçaların üretilmesine sebebiyet vermektedir.

## 2.2 Kalıp Malzemeleri

Kalıbın yapıldığı malzeme, basınçlı döküm tekniğinin başarısını büyük oranda etkilemektedir. Ergitilmiş metal kalıp içine basınç altında basıldığından dolayı kalıp malzemesinin yüksek darbe ve mekanik şoklara dayanıklı olması gerekmektedir. Kalay, kurşun ve çinko gibi düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımlarda ekonomik bir maliyet ile uzun kalıp ömrü sağlamak mümkün olmaktadır. Ancak yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımlar için özel kalitede ve özel koşullara uygun kalıplar hazırlanması zorunlu olmaktadır. Kalıptaki ergimiş metal ile temas halinde olan ana elamanların üretiminde H11(X37CrMoV51) ve H13(X40CrMoV51) sıcak iş çelikleri kullanılmaktadır. Talaşlı işleme yöntemiyle oluşturulan kalıp çekirdekleri ısıtma işlemi sonucunda kullanılacakları 44–48 HRC sertliğe ulaşmaktadırlar. Basınçlı döküm kalıplarında ikinci grup elamanları oluşturan ergimiş metal ile temas etmeyen kalıp elemanlarının imalatında orta karbonlu çelikler kullanılmaktadır. Aşağıdaki tablo 2.1 ve 2.2’de basınçlı döküm kalıpları ve kalıp ilâveleri için kullanılan uygun malzemeler belirtilmektedir.

Çizelge 2.1 Basınçlı döküm kalıplarının malzemeleri(Topbaş,1993)

Dökülen alaşım	50.000 parça üretimi için	250.000 parça üretimi için	1 milyon parça üretimi için
Çinko esaslı alaşımlar	P <sub>20</sub> (a) (b)	P <sub>20</sub> (a) (b)	P <sub>20</sub> (b), H <sub>13</sub> (b)
Al ve Mg esaslı alaşımlar	H <sub>11</sub> , H <sub>13</sub>	H <sub>13</sub> , H <sub>11</sub>	H <sub>13</sub> , H <sub>11</sub>
Bakır	H <sub>21</sub> , H <sub>20</sub> , H <sub>22</sub>	—	—

(a) ile belirtilmiş sıyırma plakaları, bakır alaşımlarının dökümünde kullanılacaksa aşınma direncini arttırmak için nitrülenmiş halde kullanılmalıdır. (b) ile belirtilen alaşımlar maçalar için kullanılmalıdır.

Çizelge 2.2 Basınçlı döküm kalıplarının malzemeleri(Topbaş,1993)

Dökülen alaşım		Kullanılan Malzeme
	Maça sıyırıcılar (a)	Ejektör pimleri (b)
Çinko esaslı	440B(b), H <sub>13</sub> , H <sub>12</sub> , H <sub>11</sub>	H <sub>12</sub> , Nitrülenmiş 7140 çeliği, H <sub>11</sub> , H <sub>13</sub>
Al ve Mg esaslı	H <sub>13</sub> , H <sub>11</sub> , H <sub>12</sub>	H <sub>12</sub> , Nitrülenmiş 7140, H <sub>13</sub> , H <sub>11</sub>
Bakır esaslı	H <sub>21</sub> , H <sub>20</sub> , H <sub>22</sub>	H <sub>21</sub> , H <sub>20</sub> , H <sub>22</sub>

Burada;

— H<sub>11</sub>, H<sub>12</sub>, H<sub>13</sub> =Kromlu sıcak işlem takım çelikleri gurubuna girmektedir ve % 0.35-0.40 C, % 5.00 Cr, % 1.50 Mo, % 1 Si, % 0.4 Mn % 0.40-1 V (ve H<sub>12</sub> tipi), % 1.50 W ihtiva etmektedir.

— H<sub>20</sub>, H<sub>21</sub>, H<sub>22</sub>=Wolfram sıcak işlem takım çelikleri gurubunda olup % 0,35 C, % 2-3.5Cr ve sırasıyla % 9, 9.5 ve 11.00 W ihtiva etmektedir.

— P<sub>20</sub> = Düşük karbonlu kalıp çeliği gurubundadır ve % 0.30 C, %, 0.75 Mn, % 0,8-1,2 Cr ve % 0,25-0,40 Mo, % 0,50 Si, % 0,80 Mn ihtiva etmektedir.

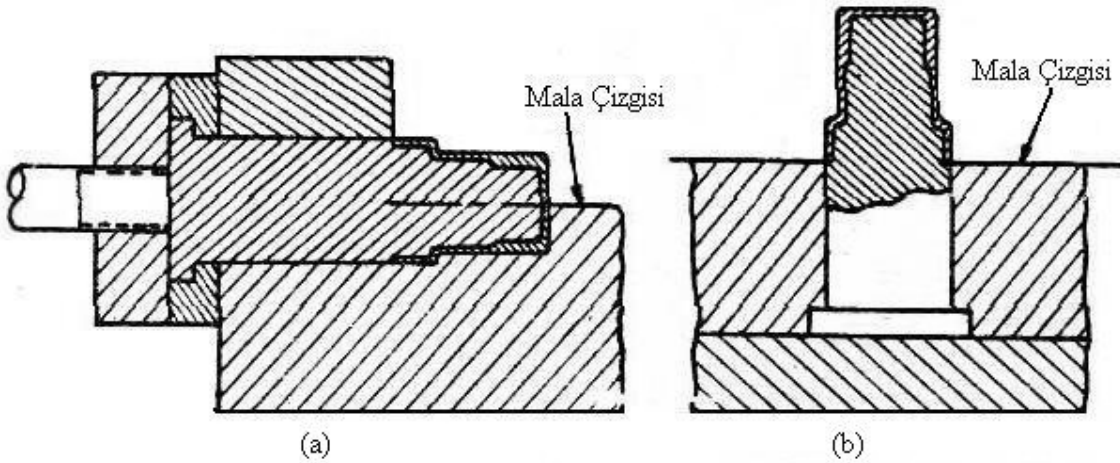
— 440B=% 0.85-0.950, % 17-19 Cr, % 1-1.30 Mo, %0.07-0.12 V içeren yüksek kromlu alaşımdır.

Basınçlı döküm kalıplarında yüksek sıcaklık, basınç gibi etmenlerden dolayı kalıpta; Isıl yorulma, çatlama-kırılma, korozyon-erozyon, çökme gibi sorunlar meydana gelebilmektedir. Bu sorunları en aza indirebilmek için kalıp çeliklerinde olması gereken başlıca özellikler:

- 1-Yapısal sağlamlık ve homojenlik,
- 2-Kolay işlenebilme özelliği,
- 3-Sıcak çalışmada ısıl arızalara karşı yüksek dayanımı,
- 4-Çalışma anında deformasyonu önleyecek yeterlikte sertlik ve mukavemet,
- 5-Çatlamları önleyecek derecede sağlamlık,
- 6-Dökülen alaşımın aşındırıcı ve silici etkisine karşı yüksek dayanımı,
- 7-Yüksek ısı iletkenliği,
- 8-Çok küçük ısıl genleşme katsayısı olmalıdır.

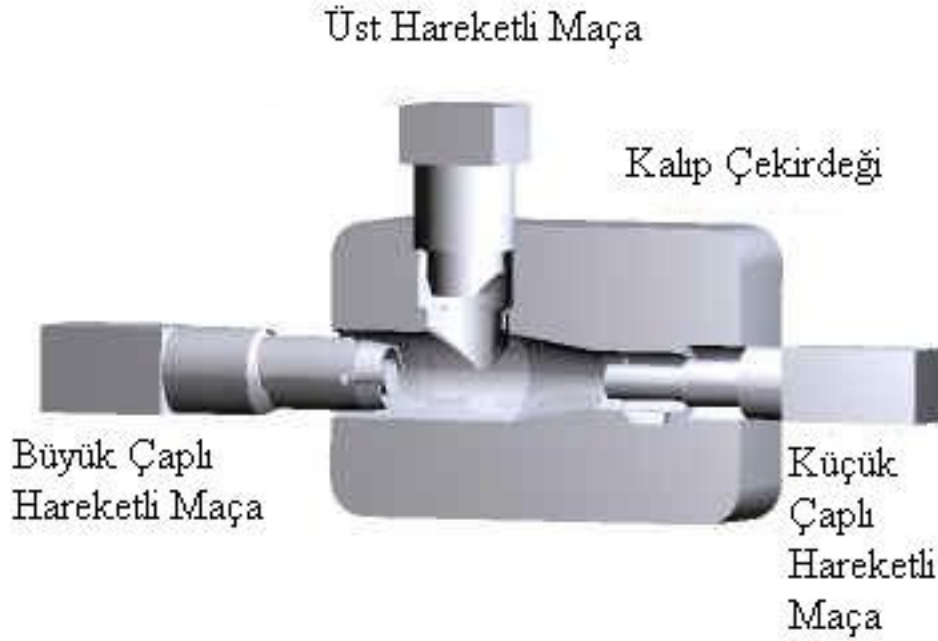
### 2.3 Maçalar

Basıncılı döküm kalıplarında, iş parçası üzerindeki delik, kanal, boşluk, oluk ve diğer iç formları oluşturmak için kullanılmaktadır. Temel olarak hareketli ve sabit olmak üzere iki ana kısımda incelenmektedirler. Bunlara örnek Şekil 2.2'de gösterildiği gibi hareketli maça (a) ve sabit maça (b) şeklindedir. Bazı maçaların amacı, parçanın cidar kalınlıklarını eşit yapmak ve metal tasarrufunu sağlamaktır.



Şekil 2.2 Maça tiplerine örnekler (Doehler, 1974)

Kalıplarda sabit ve/veya hareketli maçalar sıkça kullanılmaktadır. Eğer sabit maça kullanılmaktaysa, maçanın eksenini kalıbın açılma eksenine paralel olacak şekilde yerleştirilmek zorundadır. Hareketli maçalarsa, genellikle ayırma yüzeyine paralel olmakla birlikte bazı durumlarda ayırma yüzeyine açılı olarak da yerleştirilmektedirler. Hareketli maçaların hareketi sürgülü bir sisteme bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bunlara ek olarak tasarımı yapılan basınçlı döküm kalıbında itici pimlerin kullanılması istenmemekteyse, kalıpta bir veya birden fazla açılır-kapanır sürgülü mekanizma kullanılmaktadır.



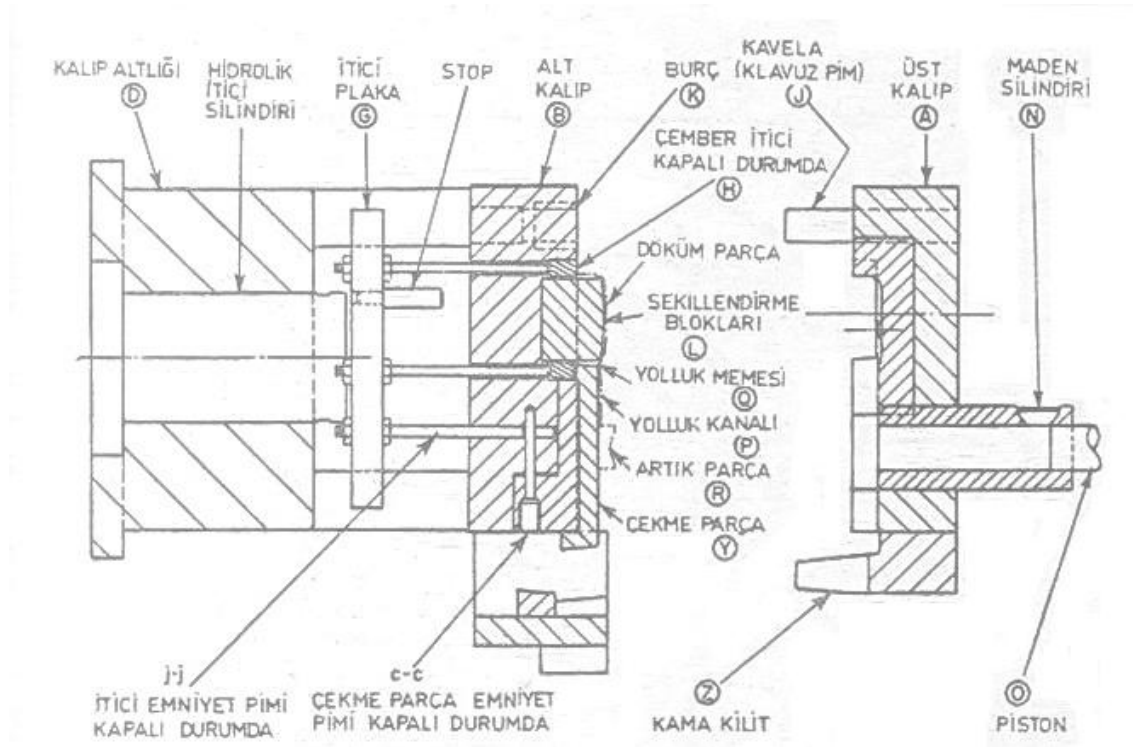
Şekil 2.3: Hareketli Maça yerleşimlerine örnek (Nadca,2007)

Yukarıdaki şekilde belirtildiği gibi kalıp boşluğuna yerleştirilen hareketli maçalar yardımıyla içi boşluklu ürünler elde etmek mümkün olmaktadır.

## 2.4 İtici

Basınçlı döküm kalıp konstrüksiyonun da en önemli öğelerden biri ergitilmiş metalin kalıp içersini doldurup katılaşmasıyla oluşan ürünün kalıp içersinden çıkarılmasıdır. Parçaların çıkarılmasında genellikle itici pimler, itici plakalar ve burçlu iticiler kullanılmaktadır (Şekil 2.4). İtici pimlerin, ölçüleri, uygulamaya göre 3 mm den 25 mm çapa kadar değişmektedir. En

çok kullanılan pim çapları 6-8 ve 10 mm dir. İtici pimlerin yüzeyleri aşınmaya karşı çok sert nitrüre edilmektedir.



Şekil 2.4 İtici pimlerin örnek konumları (Doehler, 1974)

## 2.5 Yolluk Sistemleri

Yolluk sistemi, yolluk burcundan giren ergimiş alaşımın, kalıbın içine taşıyarak kalıp boşluğunun dolmasını sağlayan özel kanallardır (Şekil 2.4). Basınçlı döküm kalıplarında yolluklar genellikle kalıbın itici kısmına doğru açılmaktadırlar. Derinlikleri 4, 5 mm den 8 mm ye kadar değişmektedir. Genişlikleri ise iş parçasının ağırlığına ve dış biçimine göre tayin edilmektedir. Basınçlı döküm kalıplarında girişlerin ölçü 1, 25 mm üzerindedir. İnce aralıklar ise 0, 625 mm civarındadır. Çok büyük parçaların meme aralığı 2, 25 mm veya daha fazla aralıkla yapılır (Şekil 2.4). İnce girişlerle iyi yüzey kalitesi elde edilmekle birlikte artık kısımların ve yüzeyin düzeltilmesi kolay olmaktadır, fakat yoğun bir döküm yapılamamaktadır. Büyük girişlerle daha yoğun ve kusursuz bir döküm yapılmaktadır. Fakat artık kısımların kırılması ve yüzeyin düzeltilmesi daha güç olmaktadır. Girişlerin büyüklüğü ve biçimi erimiş alaşımın buhar gibi püskürmeden bir akım sağlayacak şekilde olmalıdır.



Yolluk sisteminin şekli ve pozisyonu, kalıp boşluğunun doldurulması işleminde oldukça etkilidir. Kaliteli yüzeyler ve iyi mekanik özellikler elde etmek için, ergimiş metalin, meme girişinden sonraki akış mesafesinin mümkün olduğu kadar kısa tutulması gerekmektedir. Akış mesafesindeki artış, uzama değerlerindeki azalmaya sebep olmaktadır. Bu nedenle ince cidar kalınlığına sahip döküm parçalarında yapılan tasarımlarda tavsiye edilen akış mesafeleri mutlaka dikkate alınmalıdır.

Bunlarla birlikte meme ve yolluk kısmını kolay uzaklaştırmak, malzeme israfını ve çevrim süresini azaltmak için ekonomik açıdan ince yolluk sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak bu değişkenlerin tümü dikkate alınmalı ve geçmiş deneyimlerden yararlanarak optimum değerler seçilmelidir.

Tasarımda giriş yerlerindeki hızların seçilmesi önemli bir adımı oluşturmaktadır. Bu hız, ergimiş metalin yolluklara girişinde sahip olduğu değerdir. Yolluklara giriş hızını etkileyen bir ana parametre akış hızıdır. Deneylerle elde edilen sonuçlarla, akış hızının çok düşük termal değişim gösterdiği görülmektedir. Dahası kalıp içersinde ergimiş metalin dolumun tamamlanmasından önce donma riskini düşürmektedir. Genel kurallar çerçevesinde alüminyum alaşımlarında, yolluklara giriş aşamasındaki hız değerleri 30 ile 60 m/s değerlerindedir [Y.Karni, 1997].

Girişlerin derinliği akışın durumuna ve döküm sonrası son bitirme işlemlerinin başarılı olarak gerçekleştirilmesi için uygun değerler içersinde olmalıdır. Girişin minimum ölçü değeri aşağıda belirtilen denklemle elde edilebilir[Y.Karni, 1997]:

$$\rho \times G_d \times G_v^{1.74} = J \quad (2.1)$$

Yukarıda:

$$\rho = \text{Alaşımların öz ağırlığı (gr / mm}^3\text{)}$$

$$G_d = \text{Girişin derinliği (mm)}$$

$$G_v = \text{Girişin hızı (mm/sn)}$$

$J$  = Alaşım için deney sabiti ( $gr / mm^2$ )

Maksimum giriş derinliği dökülecek parçanın et kalınlığıyla ilgilidir. Çok yaygın kullanılan bir metoda göre girişin maksimum derinliği döküm kalınlığının %80' ine yakın değerlerde olmalıdır[Y.Karni, 1997].

Kalıp doldurma süresinin hesaplanması, yolluk sisteminin tasarımında önemli bir aşamayı oluşturmaktadır. Doldurma zamanı, kalıp doldurma denklemini kullanarak hesaplanmaktadır:

$$t = k \cdot ((T_1 - T_2 + P_s \cdot Z) / (T_1 - T_3)) \cdot T_c \quad (2.2)$$

$t$  = İdeal doldurma zamanı (sn)

$k$  = Deneysel sabit ( sn/ mm)

$T_1$  = Erimiş metalin kalıba girerkenki sıcaklık değeri ( $^{\circ}C$ )

$T_2$  = Minimum akış sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )

$T_3$  = Kalıp yüzeyinin sıvı metal ile temas etmeden önceki sıcaklık değeri( $^{\circ}C$ )

$P_s$  = Sürtünme katsayısı ( tipik olarak 0.3 değerinin altındadır)

$Z$  = Dönüştürme faktörü ( $^{\circ}C /\%$ )

$T_c$  = Döküm kalınlığı (mm)

## 2.6 Havalandırma ve Hava Kanalları

Basıncılı dökümde, kalıp boşluğuna ergimiş metalin girişine paralel olarak havanın dışarıya çıkmasını sağlamak, istenilen kalitede döküm parçaları elde etmek için gerekmektedir. Havalandırma kanalları kalıbın bölme yüzeyi üzerine işlenmektedir. Hava tahliye kanalları

genellikle ergimiş alaşımın havayı sıkıştıracağı yerde veya girişin karşı tarafına açılmaktadır. Bazı tahliye kanalları, kızakların etrafına hareketli maçaların ve iticilerin üzerine açılmaktadır. İçeride bulunan havanın çıkarılması daha iyi döküm özelliklerine ulaşılmasını ve dökülen parçalarda iyi kalitede ısıl işlem olanağını sağlamaktadır. Akış sisteminde sıkışan havanın tahliyesi için birkaç farklı metot kullanılabilir. Bunların en yaygın olanı ergimiş metalin dolumu öncesi bir vakum sistemi ile de tahliye edilmesidir. Porozitesiz prosesin uygulanması, içeride sıkışan havayı ergitilmiş alüminyumun oksijen ile reaksiyonu yoluyla çıkarmaktadır.

Havalandırma kanallarının döküm işlemi sonunda sıvı metal tarafından kapatılması gerekmektedir. Ergimiş metalin, havanın önüne geçme tehlikesi viskozitenin küçülmesi ve akış hızının büyümesiyle artmaktadır. Kalıp içersinde farklı cidar kalınlıklarının bulunduğu her geçişte kalıp ayırımına bir hava boşaltım kanalı yerleştirilmelidir. Bunun temel nedeni kalıp boşluğundaki gazların içeri dolan ergimiş metal tarafından dışarı itilme zorunluluğudur. Bununla birlikte havalandırma boşluklarının kesin bir netlikle hesap edilmesi çok zor olmakla birlikte Bernoulli formülü ile yaklaşık 100 m/s'lik gaz akış hızlarında hesaplamalar yapılmaktadır. Bu eşitlikler şu şekilde ifade edilmektedir.

$$V_1 = (V_F (1 + \beta.t)).P_{at} / p_G \quad (2.3)$$

Burada,

$$V_1 = \text{kalıp boşluğu içersindeki hava hacmi (cm}^3\text{)}$$

$$P_{at} = \text{Normal atmosfer basıncı (kN/cm}^2\text{)}$$

$$p_G = \text{Spesifik döküm basıncı (kN/cm}^2\text{)}$$

$$V_F = \text{Döküm sistemi ve kalıp boşluğu hacmi (cm}^3\text{)}$$

$$\beta = \text{Isıl genleşme değeri}$$

$t =$  Havanın getirildiği ortam sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )

$$V_2 = G_v \cdot O_G \cdot P_{at} / p_G \quad (2.4)$$

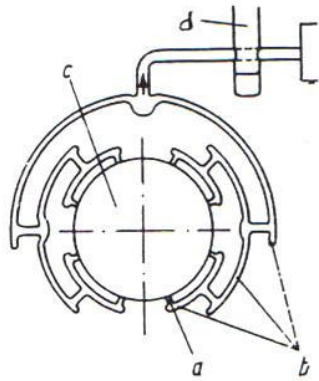
$V_2 =$  Dökümde oluşan gaz hacmi ( $mm^3$ )

$G_v =$  Birim kalıp yüzeyinde yağlama ve yanma sonucunda oluşan gaz miktarı ( $mm^3$ )

$O_G =$  Yolluk sistemi dahil döküm parçasının yüzey alanı ( $mm^2$ )

Hava tahliyesi için gerekli kesit, izin verilen akış hızı (200–400 m/s) varsayılarak hesaplanmaktadır.

Havlandırma kanallarının çoğunlukla yolluk girişi yanına yerleştirilmesi tavsiye edilmektedir. Hava tahliyesinin yetersiz kaldığı durumlarda kanalların derinleştirilmesinin yerine geniş tutulması veya ek kanallarla desteklenmesi gerekmektedir. Sadece tek bir kalıp yarısıyla çalışan ve cidar kalınlığı büyük olan parçaların havalandırılmasında havalandırma kanalları tek başına yetersiz kalmaktadır. Bu gibi durumlarda havalandırma kanallarına ek olarak yolluk girişi genişliği uzatılarak havalandırma kanallarına ek çıkma yolları oluşturulmalıdır.



Şekil 2.5 Basıncı dökümle üretilen parçadaki havalandırma kanalının gösterimi. (a) Tahliye girişi, (b) hava tahliye kanalları, (c) döküm parçası, (d) mandal, (e) vakum hattı.

(Brunhuber,1963)

Kalıptaki hava tahliyesini iyileştirmek için, kalıp içersine yerleştirilen kalıp elemanlardan da faydalanabilir. Bunlardan biri itici pimlerin çizilmesi yöntemidir. Diğer bir taraftan kalıp üzerindeki olası hataların oluşabileceği noktalara hava tahliyesi için 0.3-0.8 mm çapında delikler açılmaktadır. Belirtilen tekniklerin dışında en ideal tahliye yöntemi kalıp çekirdeğine ve boşluğuna yerleştirilen seramik ve sinter filtrelerle sağlanmaktadır. Hava tahliye kanallarının kalıp içersine yerleştirilmesi tecrübeye dayanarak gerçekleştirilmelidir. Bununla birlikte yapılacak yanlış dizayn uygulamaları döküm prosesini önemli boyutlarda zorlaştırmaktadır.

Eğer, basınçlı döküm kalıbında havalandırma kanalları bulunmuyorsa, hava döküm parçası tarafından tutularak parçanın boşluklu ve gözenekli bir hal almasına sebebiyet vermektedir. Şekil 2.5'te basınçlı döküm kalıbındaki havalandırma kanalları görülmektedir.

Kalıp plakalarının arasındaki hava tahliye kanallarının derinlikleri 0.05-0.12 mm, genişliği 10-20 mm olmalıdır. Hava tahliye kanalı, kalıbın kenarına doğru sığ tutulmalı, bununla birlikte ergimiş metalin aralardan sızmasını garantilemek için genişletilmelidir.

Çizelge 2.3 Farklı alaşımlarda hava tahliye kanallarının derinlikleri(Doehler, 1974)

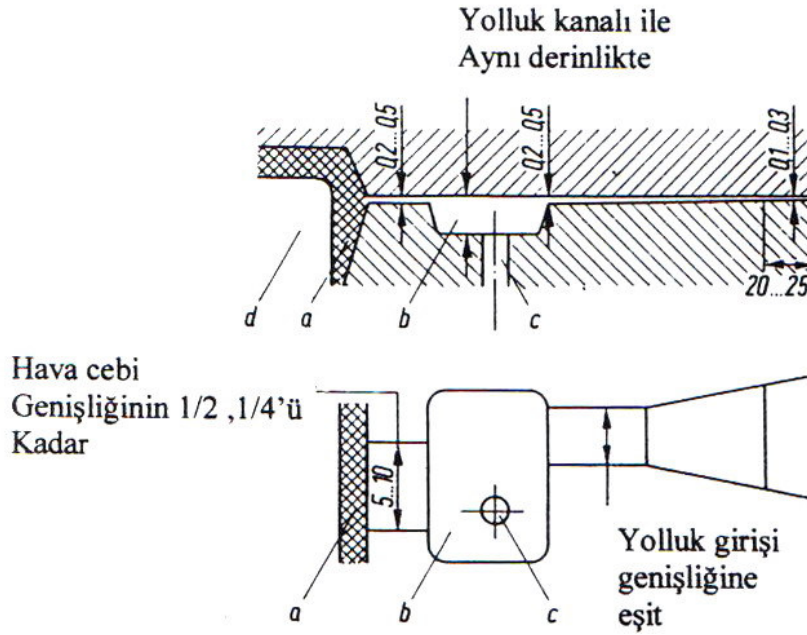
Kurşun alaşımları	0,05-0,10 mm
Al alaşımları	0,10-0,12 mm
Mg alaşımları	0,10-0,15 mm
Cu alaşımları	0,10-0,20 mm

Havalandırma kanalları 0.15 mm'den daha derin olmamalıdır(Tablo2.3). Bakır alaşımlarının basınçlı dökümünde yukarıda belirtilen değerlerin iki katı alınabilir. Belirtilen derinlik değerleri kalıp boşluğundan 20–30 mm uzaklığa kadar olan bölüm için geçerli olmaktadır. Daha uzak mesafelerde bulunan noktalar için derinlik değerleri %50 oranında arttırılmaktadır.

## 2.7 Taşırma Boşluğu

Basınçlı döküm prosesinde havalandırma amacıyla taşırma boşluklarının kullanımı döküm parçasındaki porozite değerlerinin düşürülmesi noktasında önemli rol oynamaktadır. Taşırma

boşluklarına kalıp içersine ilk olarak enjekte edilmiş sıvı metalin geçişi sağlanarak basınçlı döküm parçasının mukavemeti arttırılmaktadır. Taşırma boşluklarına genellikle kalıp boşluğunun dış tarafına çerçeve profilli parçalarda ise döküm parçası bölümünün iç tarafına yerleştirilmektedir. Taşırma boşluklarının derinliği yolluk derinliğine eşit miktarlarda olmalıdır. Genellikle bu boşluklarda döküm parçası içersinde oluşabilecek cürufklar bulunmaktadır.

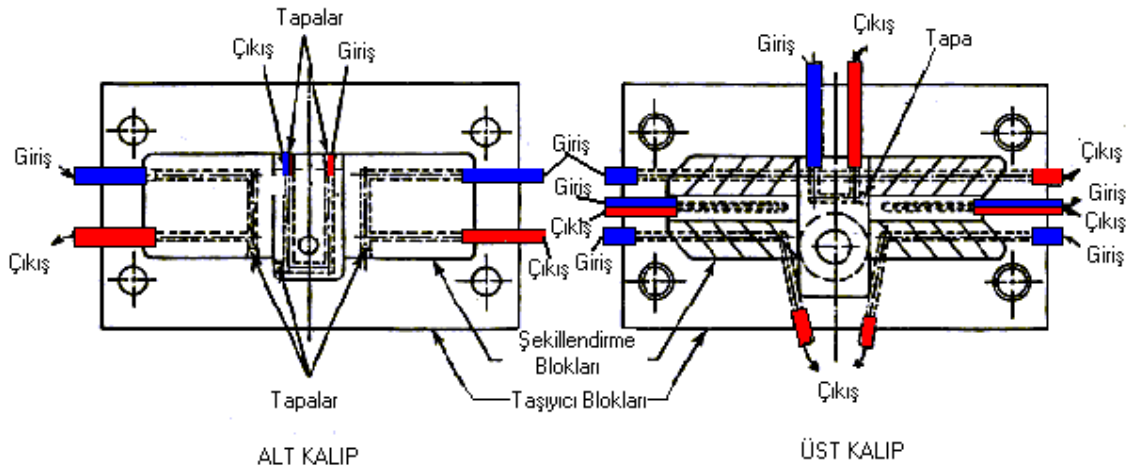


Şekil 2.6 Havalandırma boşluğu ve hava tahliye kanalı dizaynı. (a) döküm parçası, (b) havalandırma boşluğu, (c) itici pim, (d) çekirdek (Brunhuber,1963)

Havalandırma boşluğunun hacmi, döküm parçasının hacminin 1/8'i kadar olmalıdır. Kalıplarda yolluk, yolluk girişinin, döküm parçasının ve havalandırma boşluklarının kalıbın boşaltılması esnasında deforme olmamalarına ve kırılmamalarına dikkat edilmelidir. Bununla birlikte yapılacak dizaynda havalandırma boşluklarının tüm döküm boşluğu boyunca uzanıp ikinci bir döküm yolu şeklinde uzanmasından kaçınılmalıdır. Şekil 2.6'da tavsiye edilen dizayn uygulamaları görülmektedir. Yolluk girişi, hava boşaltımı ve taşırma boşluğu birbirini etkilemektedir. Bunun dışında taşırma boşluğunun kalıptan rahatça çıkarılması için altına itici pim konulabilir.

## 2.8 Kalıplarında Soğutulması

Basıncılı döküm makineleri her ne kadar belirli zaman aralığında daha önceden tespit edilen sayıda parça dökümü için ayarlanmakta ve kalıp ısınmaları göz önüne alınmakta olsa da, kalıplarda parça cidarındaki kalınlık farklarından bazı kısımlar daha yüksek sıcaklık değerlerine sahip olmaktadır. Bu kısımlar soğutucu akışkan ve/veya bakır kullanılarak istenilen sıcaklığa düşürülmektedirler. Soğutmayı gerektiren bölgelere su veya hava, kalıp bloğuna delinen delikler veya açılan kanallarla iletilmektedir. Bunların yanında kalıp çekirdeklerinde delikler açılarak buralara bakır çakılması suretiyle gerekli soğutma işlemi sağlanmaktadır.



Şekil 2.7 Basıncılı döküm kalıbına soğutma kanallarının yerleştirilmesi (Doehler,1974)

Şekil 2.7'deki gibi yerleştirilen soğutma kanallarının, genellikle kalıp yüzeyine 20 mm den yakın olmaması tavsiye edilmektedirler. Bununla beraber sakıncası olmayan hallerde kanallar, maça veya boşluk yüzeylerine 6 mm kalıncaya kadar yaklaşabilmektedir. Uygun soğutma sadece imalat kolaylığı için değil aynı zamanda iş parçasının yüzey kalitesinin iyi olmasına ve kalıp ömrünün artmasına yardımcı olmaktadır. Dökümdeki sıcaklık değerlerinin büyük oranda değişmesi şekil bozukluklarına, sıcak yırtılmalara ve çatlaklarına sebep olmaktadır. Sıcaklığın düşürülmesi soğutma hattının yerine, soğutucu sıvının akış oranına, sıcaklık ve basınç gibi faktörlere bağlı olmaktadır. Bununla birlikte kalıbın dışına olan su püskürtmeleri çoğu kez kalıp yüzeyinin sıcaklığını düşürmek için uygulanmaktadır. Artık su ve önceki dökümün diğer kalıntıları atılmaktadır. Bu adımı kalıp yüzeyi ve dökülen parça arasında yalıtkan bir tabaka oluşturan yağlayıcının uygulanması takip etmektedir.

### 3. BASINÇLI DÖKÜMDE YOLLUK SİSTEMİ

Basınçlı döküm kalıplarında, ergimiş metalin enjeksiyon memesinden çıkışından kalıp boşluğuna ulaşmaya kadar üzerinde ilerlediği özel kanallar yolluk sistemi olarak adlandırılmaktadır. Yolluk sistemi mümkün olduğunca, döküm parçası üzerinde iz bırakmayacak, ergimiş metalin kalıp boşluğunu düzenli ve iyi bir şekilde doldurmasını sağlayacak özelliklerde dizayn edilmelidir.

#### 3.1 Yolluk Sisteminin Tasarımı

Yolluk sisteminin dizaynı yüksek kaliteli döküm parçaları üretmek için önemli bir faktördür. Tasarımda parça şekli, iç kalitesi, yüzey kalitesi, mekanik özellikler, kalıp malzemesi, sıcaklık, aşınma ve metal sıcaklığının yanı sıra tahliye, akıcılık, ısı içeriği ve mikro yapı gibi faktörleri göz önünde bulundurulmaktadır(Sully, 1988).

Yapılan araştırmalar meme ve yolluk sisteminin tasarımı, giriş açısı ve diğer değişkenlerinin tespit edilmesi deneyim gerektiren bir dizayn çalışmasıdır. Bu iki önemli öge dökülecek parçanın yüzey özelliklerini ve döküm işlemi sonrasında yapılacak ikincil işlemleri doğrudan etkilemektedir.

Sully, Amerikan Döküm Enstitüsü'ne giriş ve yolluk sisteminin dizaynlarında kullanılan güçlü analitik metotlardan "nomograph" olarak adlandırılan tekniği sunmuştur. Bu tekniğe dayanarak, kaba akış dizaynı için geometrik bağıntılar saptanabilmektedir. Çevrimin süresinin seçimi, deneylere ve dizaynı yapan kişinin deneyimine bağlı olmaktadır. Mevcut olan makine kapasiteleri ve soğuk kamara döküm prosesindeki ergimiş metalle doldurulan pistonların dolum yüzdesi gibi sınırlamalar dahilinde gerekli olan debi miktarının tespit edilmesini sağlamaktadır(Sully, 1988).

Analitik yöntemlerin gelişimiyle birlikte bu konuda önemli bir referans olan  $P-Q^2$  diyagramı CSIRO, Avustralya tarafından geliştirilmiştir.  $P-Q^2$  Diyagramı, ergimiş metal üzerindeki basınçla debi arasında, debinin karesi orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Diyagram ayrıca döküm makinesinin oluşturduğu basıncın sabit olmadığını ve debiye bağlı olduğunu göstermektedir. Giriş sistemi tarafından istenilen basınç da diyagram üzerinde eşzamanlı olarak gösterilebilmektedir. CSIRO, bu diyagramın yardımıyla kalıp doldurma

modelini ve yollukları tanımlamaktadır.

Herman, giriş sisteminin analitik yöntemlerle formüllendirilmesini ve komple dizayn yönteminin tanıtımı sağlamıştır. Metodoloji, dizayn yapan kişiye, iyi kalitede dökümlerin üretimini garanti eden analitik ve deneyim merkezli yaklaşımların karışımıyla geliştirilmiş bir metodoloji sunmaktadır. Metodolojinin tanıtımının ve ana hatlarının anlaşılması daha etkili dizaynların elde edilmesini sağlamaktadır (Herman, 1988).

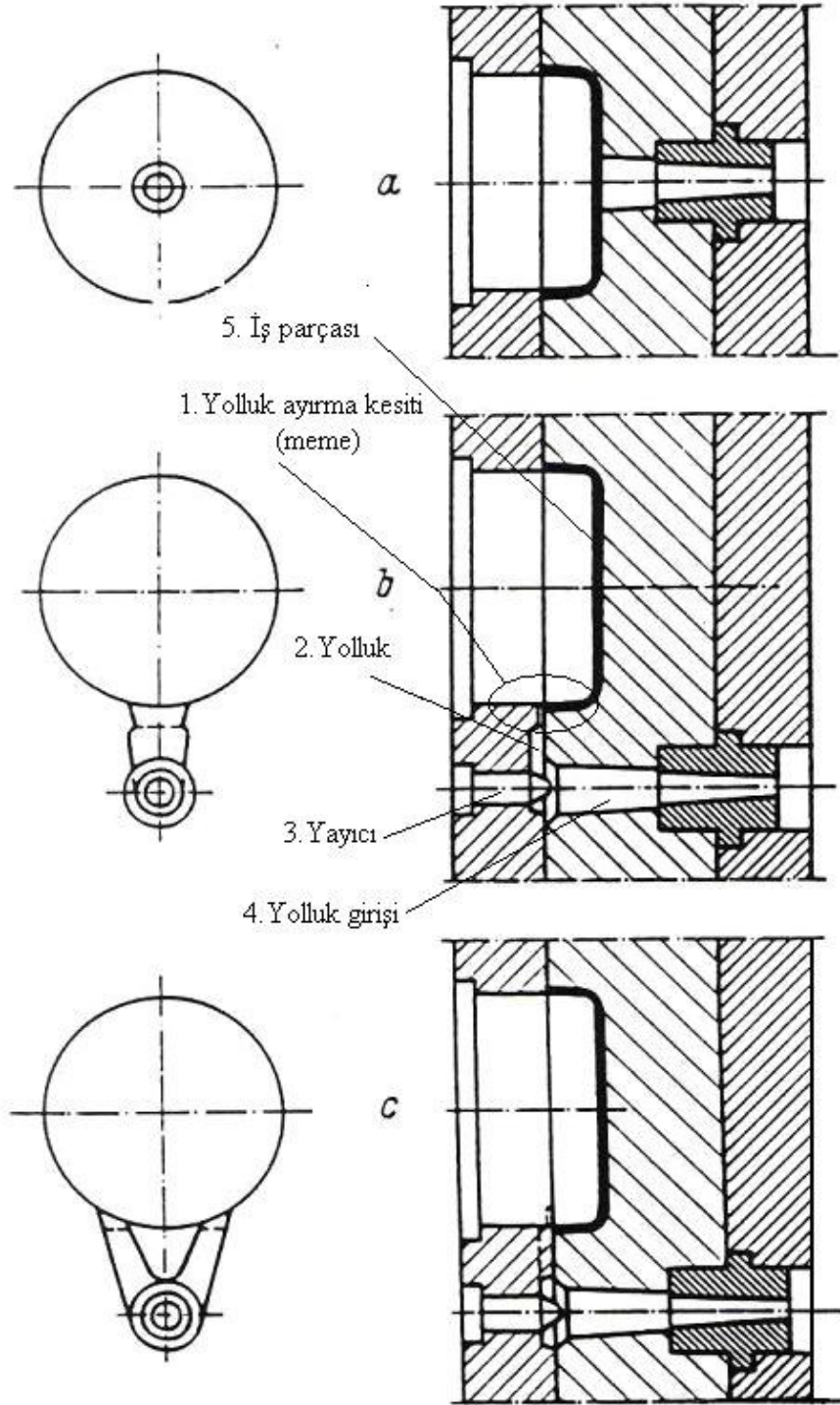
Karni, makine performans değerlerini, döküm makinesinin kapasite değerlerinin genellemesi olarak tanıtmaktadır. Karni'nin yaklaşımı yapılan dizaynların esnekliği artırmakta ve dizaynın optimizasyonunu sağlayarak döküm prosesinin kolay bir şekilde kontrolünü sağlamaktadır (Karni,1991).

### **3.2 Yolluk Sistemi ve Bölümleri**

Basıncılı döküm kalıplarında yapılan dizayna göre iki temel yolluk tipi bulunmaktadır. Bunlar:

1. Parçalı yolluklar
2. Yekpare yolluklar dır.

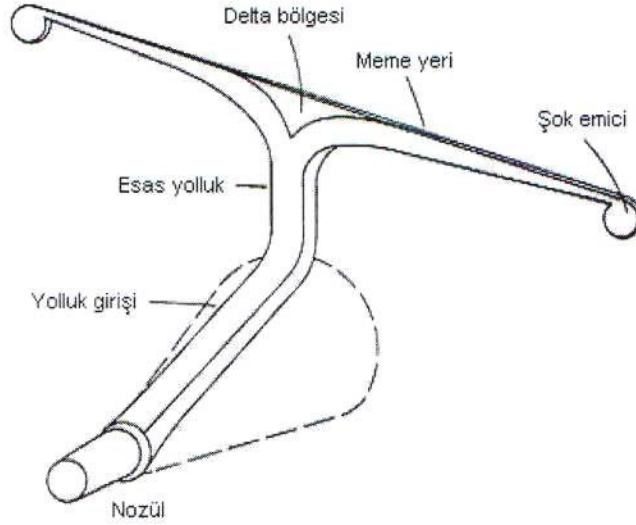
Şekil 3.1'de farklı dizayn koşullarında belirlenen tipteki makinelerde kullanılan yolluklar türleri belirtilmektedir. Parçalı tip yolluk dizaynı incelendiğinde ergimiş metalin hareketli üzerine bastırılabilir bir torpidodan veya kalıba direkt olarak monte edilmiş makine silindirinden geçerek kısa bir meme içersinde kalıp boşluğuna akıtılmaktadır. Sıcak kamaralı basıncılı döküm makinesinde makinenin torpidosu ve meme birbirine bastırılmaktadır. Dökülen alaşımın türüne göre araya gerekli olan sızdırmazlık elemanları konulmaktadır. Memede metalin geçtiği deliğin çapı torpidonun çapından daha küçük değerlerde olmalıdır. Yüksek sıcaklıklarda ergiyen alaşımlarda 10 mm çapından daha küçük meme kullanılmaktadır.



Şekil 3.1 Sıcak kamara ve dikey soğuk kamara enjeksiyon makineleri için yolluk örnekleri.  
 (a) Merkezi yolluk girişi, (b) dıştan yolluk girişi, (c) Dıştan ikili yolluk girişi(Doehler, 1974).

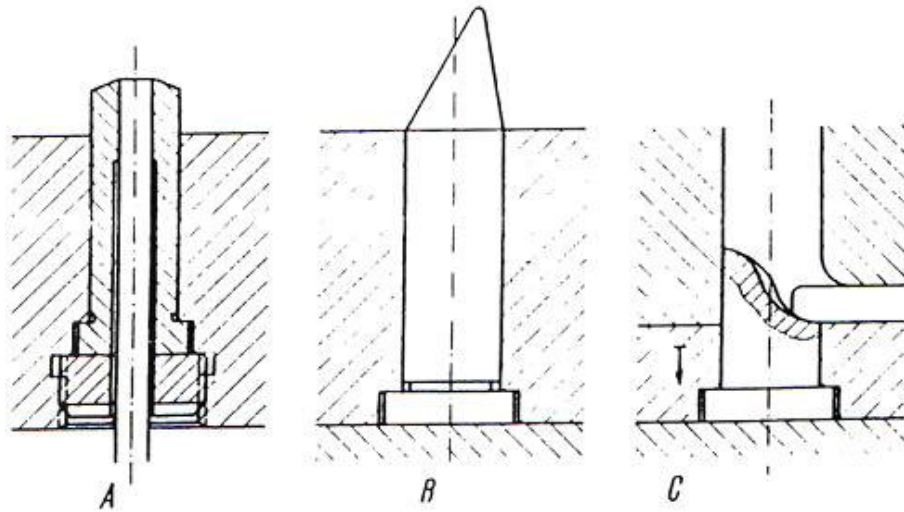
### 3.2.1 Giriş Kısmı ve Yayıcı

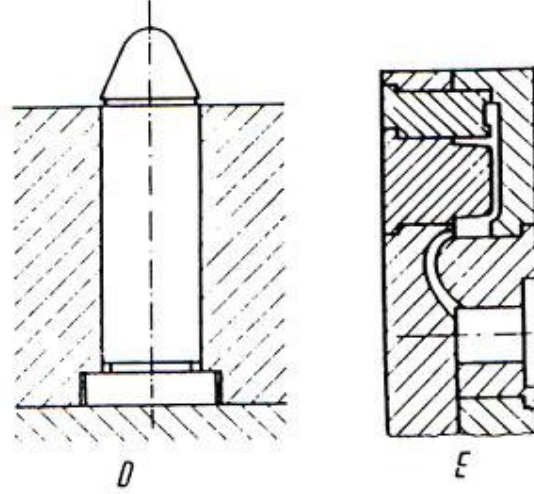
Basıncılı döküm kalıplarında ergitilmiş metalin pistonlardan kalıp boşluğuna akışının başladığı kısımdır. Bu kısım genellikle konik yapıda olmakla birlikte bu geometrik yapı, ergimiş metalin hızını arttırmaktadır.



Şekil 3.2 Yolluk sistemi içerisinde giriş ve yayıcı kısmı (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998).

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi yolluklara yeterli miktarda ergitilmiş metalin akışını sağlamak için yolluk sisteminin diğer elemanlarından daha kalın ve açılı olarak dizayn edilmiştir.





Şekil 3.3 Yolluk sistemi içerisinde yayıcı tiplerine örnekler (Brunhuber,1963)

A Sıcak kamara ve dikey soğuk kamara makinelerde ergimiş metalin eşit dağılmasını sağlayan yayıcı tipi.

B Yatay soğuk kamara makineler için yumuşak bir şekilde bir yöne akışı sağlayan yayıcı tipi.

C Belli bir yöne akışı sağlayan çekirdek.

D Döküm parçasını tutmaya yarayan tırnaklı tip yayıcı.

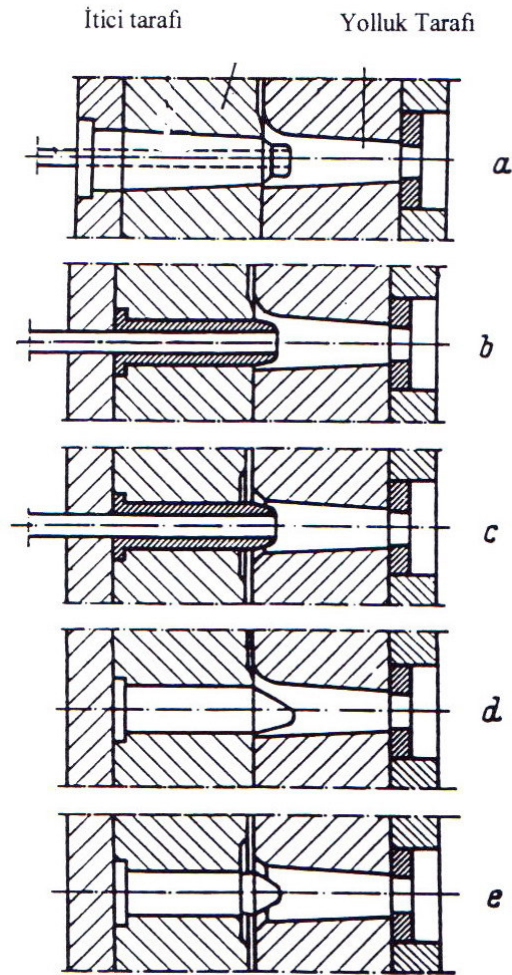
E Kalıp parçası olarak hazırlanmış yayıcı tipi.

Bununla birlikte tasarımda giriş yerlerindeki hızların seçilmesi önemli bir adımı oluşturmaktadır. Bu hız, ergimiş metalin yolluklara girişinde sahip olduğu hız değeridir. Yolluklara giriş hızı, atomize edilmiş jet akışı tarafından belirlenmektedir. Yaygın olarak kabul edilen görüş atomize jet akışı ile sıvı metalin yolluk girişinden içeriye doğru akışıdır. Bunun nedeni, deneylerle elde edilen sonuçlarla atomize jet akışının çok düşük termal değişim göstermesidir. Dahası kalıp içerisinde erimiş metalin dolumun tamamlanmasından önce donma riskini düşürmektedir. Genel kurallar çerçevesinde alüminyum alaşımlarında, yolluklara giriş aşamasındaki hız değerleri 30 ile 60 m/s değerlerindedir ( Karni, 1991). Demir alaşımlı metaller için daha yüksek hızlar gerekmektedir.

Genellikle sıcak kamaralı ve dikey soğuk kamaralı basınçlı döküm makinelerinde dağıtıcının metal giriş kesiti, meme kesitinden daha küçük ölçülerde yapılmaktadır. Bazı durumlarda

yatay soğuk kamaralı basınçlı döküm makinelerinde yayıcı ölçüleri makine ölçülerinin sağladığından daha kalın sabit plaka gerektirmektedir. Döküm makinesin açılmasıyla parçanın ve döküm artığının düşürülmesi bazı durumlarda mümkün olmamaktadır. Bu gibi durumlarda yayıcı çekirdek, yönlendirme kanalları olan sabit bir piston şeklinde hazırlanmaktadır. Aynı zamanda yayıcı çekirdek yolluğun hareketli kalıp plakası üzerinde kalmasını sağlamak içinde kullanılmaktadır (Şekil 3.3 D)

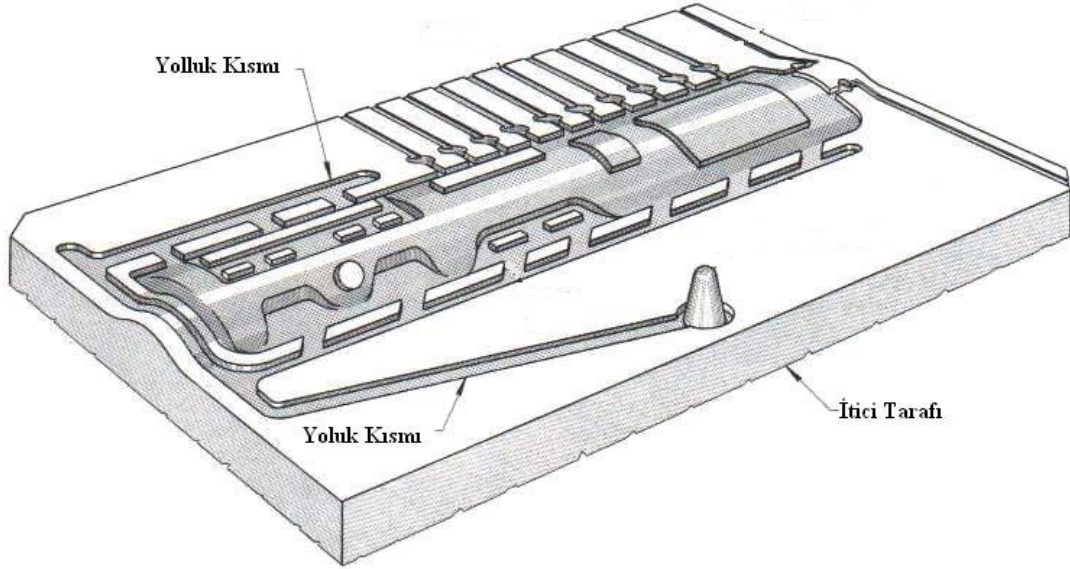
Bununla birlikte Şekil 3.4'de yayıcılara bazı örnekler verilmektedir. Yayıcılar termik olarak zorlama altında çalışan kalıp elemanlarıdır. Bu nedenle kalıp ömrü boyunca zaman zaman onarılmak veya yenisiyle değiştirilmek zorunluluğu bulunmaktadır.



Şekil 3.4 Yayıcı tipleri a. Konik geçişli, b. ve c. İtici, d tek yön yönlendirmeli, e. Konik arkadan kesmeli (Brunhuber, 1963).

### 3.2.2 Yolluk Kısmı

Ergimiş metalin yolluk sistemi içersindeki akışının planlanmasında, yolluk kısmının doğru olarak tasarlanması çok önemli rol oynamaktadır. Bu aşama dizaynın geri kalan kısmının ana yapısını oluşturmaktadır. Ergimiş metal, yolluk kısmı aracılığıyla yolluk sistemi içersinden kalıp boşluğuna akmaktadır. Akış süresince oluşabilecek kayıpları engellemek için keskin yön değişimleri tercih edilmelidir. Yolluk ve bağlantı kanalları gerektiğinden bir miktar büyük yapılmalıdır. Bu suretle ısı kayıpları ve aşırı ısı birikmesi önlenmiş olmaktadır. Daha önceden elde edilen deneyimler doğrultusunda döküm parçasının kesit alanı yolluk giriş alanından 2-3 kat mertebesinde büyük olmalıdır. Yolluk kısmının derinliği, döküm parçasının derinliği x 1.5 olarak saptanmaktadır. Akış hızı çinko alaşımlarında 15m/s, alüminyum alaşımlarında 10m/s ve magnezyum alaşımlarında 20 m/s değerinin altına düşmemelidir.

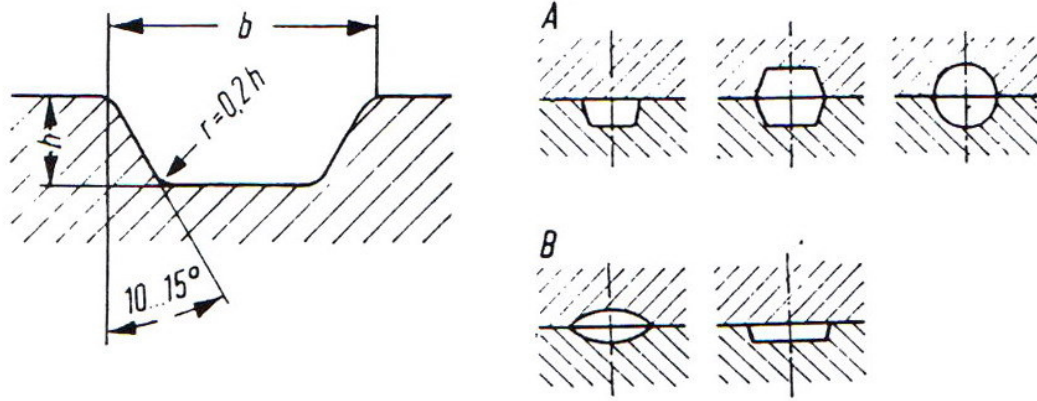


Şekil 3.5 Yolluk sistemi içersinde yolluk kısmı (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

Bu aşamada yapılabilecek hata dökülecek olan parçanın kalitesini ve ekonomik olarak maliyetini etkilemektedir. Bu konuda dikkat edilmesi gereken ana hatların açıklanması gerekirse:

1. Ergimiş metal kalıp boşluğu içersinde mümkün olabildiği kadar kısa uzunluklarda akışını gerçekleştirilmelidir.

2. Kalıp içersindeki yolluklar birbirine paralel veya ayrıık yönlere olmalıdır.
3. Eğer üründeki çekme miktarının eşit miktarlarda olması planlanıyorsa, ergimiş metalin ince et kalınlığına sahip bölgelere akışı sağlanmalı daha sonra et kalınlığı fazla olan bölgelerin doldurulması sağlanmalıdır.
4. Eğer üründeki çekme miktarı enjeksiyon makinesinin basıncından yararlanılarak ayarlanacaksa, kalıbı doldurmaya et kalınlığının fazla olduğu bölgelerden başlayıp ince bölgelere doğru ilerlenmesi tavsiye edilmektedir.
5. Ergimiş metal kalıp içersinde uzun mesafeler boyunca akmak zorunda olduğunda, yolluk içersinde akmalı daha sonrada yakın bir bölgede kalıba giriş yapmalıdır. Kesit alanı düşük bölgelerde erimiş metalin akışı sınırlandırılmalıdır.
6. Kalıp içersindeki gözler aynı anda dolmalıdır.

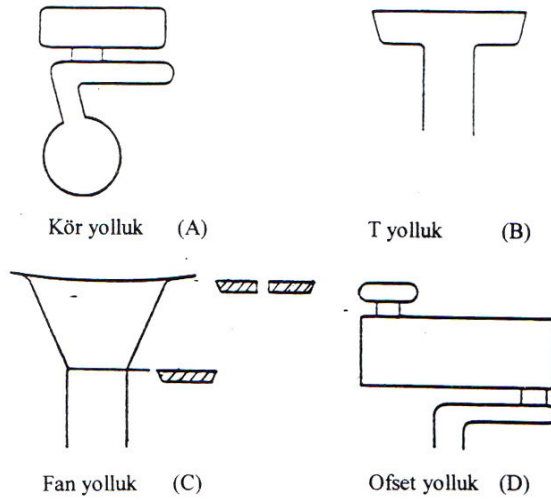


Şekil 3.6 Yolluk kanalı tipleri A elverişli, B elverişsiz (Brunhuber,1963).

Çizelge 3.1 Alaşım çeşitleri(Doehler, 1974)

Alaşım tipi	h	b
Çinko alaşımları için	1	4
Alüminyum alaşımları için	1	3
Mg alaşımları için	1	2
Cu alaşımları için	1	5

Yolluk kısmının alanının güvenilir sınırlar dahilinde hesaplanması gerçekleştirilene kadar minimum boyutlarda çalışılması büyük önem taşımaktadır. Bu durumda yolluk sisteminin ana elamanından olan yolluk kısmının yeniden ergitilmesiyle oluşacak hammadde ve enerji kayıpları azaltılmaktadır. Bununla birlikte yolluk kısmının mevcut boyutlarının büyütülmesi küçültülmesinden daha kolay bir işlemdir. Aşağıda belirtilen Şekil 3.7’de çeşitli yolluk kısımları gösterilmektedir. Küçük boyutlu döküm parçalarının üretiminde maksimum üretim hızına ulaşabilmek için yuvarlak kesitli yolluk kanalları tercih edilmelidir. Genel olarak yolluk kanalları olabildiğince kısa olmalıdır, ancak soğuk baskıların önlenmesi için kalıbın belirli bir kısmının ısıtılması gerekmeğe göre kör bir yolluk kanalı kullanılabilir.



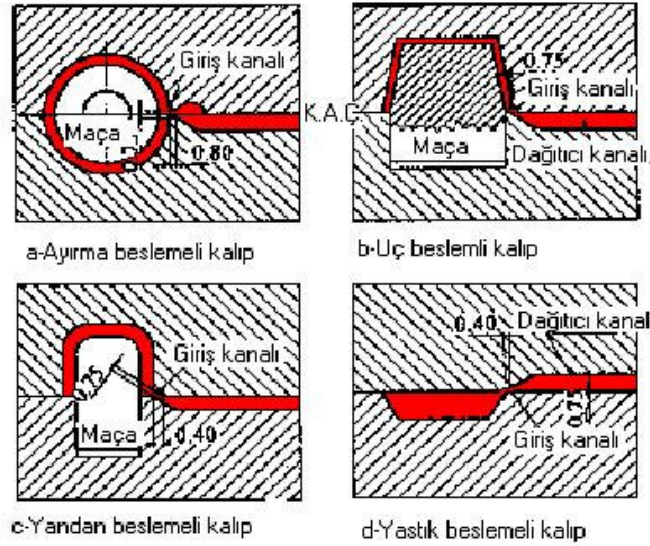
Şekil 3.7 Yolluk kanalı tipleri (A) kör yolluk kanalı, (B) T yolluk kanalı, (C) Fan yolluk kanalı, (D) Ofset yolluk kanalı (Brunhuber,1963)

T biçimli yolluk kanalında ana kanaldan gelen ergimiş metalin hızı ile kenarlara ayrılan kanallardaki ergimiş metalin hız değerleri farklıdır. Bazı durumlarda eşit hız değerlerini elde etmek amacıyla kanal kalınlıkları değiştirilmektedir. Bununla birlikte merkezde olan akışın sınırlandırılması ve bu suretle ergimiş metalin akışının kenarlara yönlendirilmesi için yolluk kanalında bir ada bırakılmaktadır. Fan tipi yolluklarda yolluk boyutlarının doğru olarak hesaplanmasıyla birlikte ergimiş metalin yolluk girişine sabit bir hızla akması sağlanmaktadır. Fan tipi yolluk kanalının tasarımında, yolluk kanalının başlangıcından yolluk girişine kadar olan dik kesitteki düzenli daralmanın sağlanması önemli bir öğedir. Çoklu yolluk kanallarının tasarımı söz konusu olduğunda, ergimiş metalin kalıp gözlerine eş zamanlı olarak akışının

sağlanması için gerekli dengelenme yapılmalıdır. Ergimiş metalin akışı direncin en az olduğu bölgeleri izlemektedir.

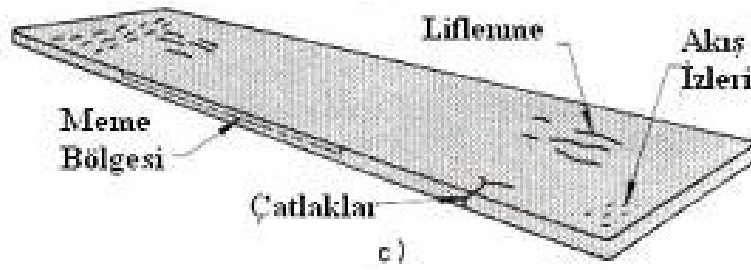
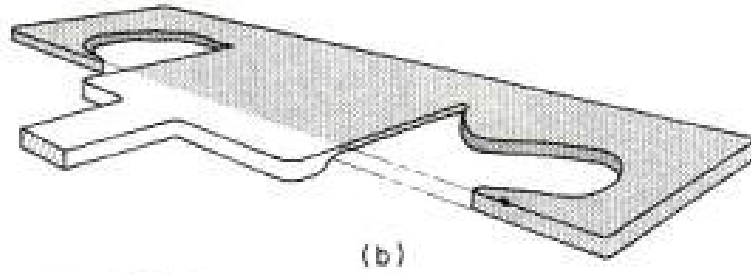
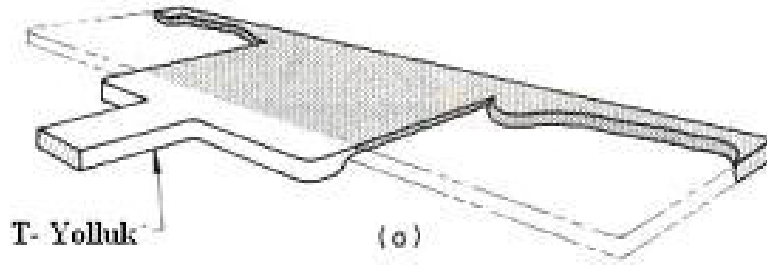
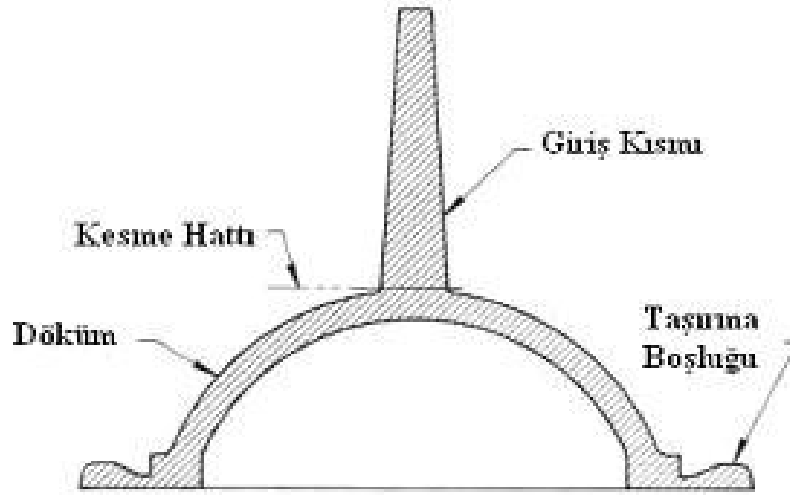
### 3.2.3 Meme Kısmı

Yolluk sistemi içerisindeki en önemli kısım olarak nitelendirebileceğimiz meme kısmının tasarımı basınçlı döküm kalıbının tasarımındaki parametreleri yakından etkilemektedir. Bilindiği gibi meme kısmı döküm parçası ile yolluk kısmı arasında ergimiş metalin kalıp çekirdeğine akışını sağlamakla yükümlü kısımdır. Yolluk meme aralığı hiçbir şekle dökülecek olan parçanın et kalınlığından daha kalın değerlerde olmamalıdır. Bununla birlikte üretilen parçanın yüzey kalitesi ve kusursuz olarak doldurulabilmesi bu parametreyle yakından ilişkilidir.



Şekil 3.8 Çeşitli meme kısımlarının gösterimi(Doehler, 1974)

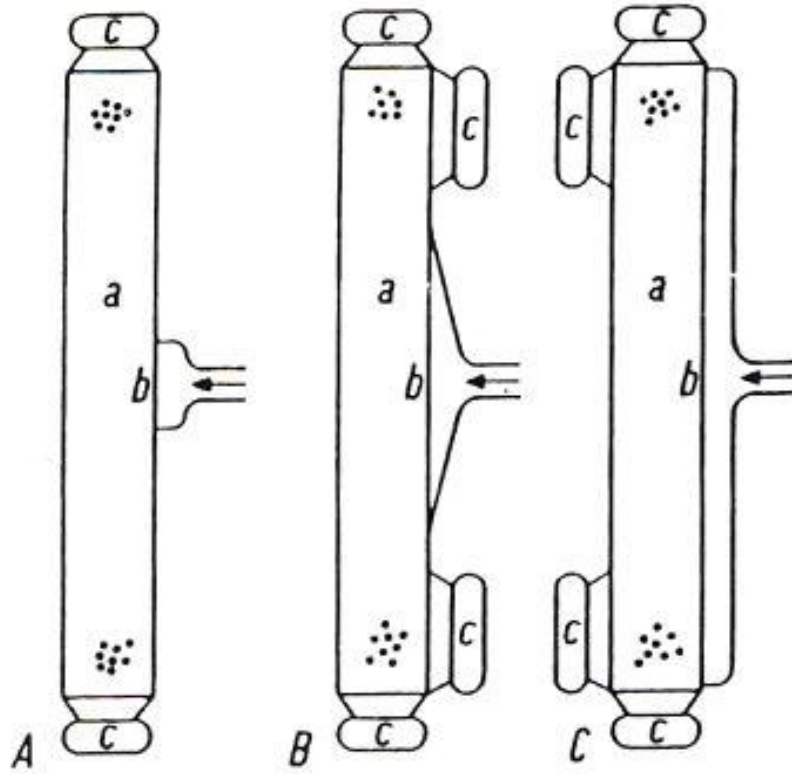
Basınçlı döküm kalıplarındaki yolluk memelerinin geniş aralıklı tiplerinde ölçüler 1.25 mm nin üzerinde değerlerdedir. İnce aralıklarsa 0.625 mm civarındadır. Çok büyük ölçekteki parçalarda meme aralıkları 2.25 ve daha fazla aralıkla yapılabilmektedir. Bununla birlikte et kalınlığı çok ince olan parçalarda tavsiye edilen değerlerden daha küçük ölçüler kullanılabilir. Şekil 3.8'de uygun meme tipleri ve boyutları belirtilmektedir. Verilen optimum değerlerin dışına çıkılmasıyla çeşitli hatalar oluşmaktadır. Bu hatalar ergimiş metalin akış izlerinin parça üzerinde oluşması, kaynak yerlerinin oluşması, yüzeyde liflenmenin meydana gelmesi ve diğer hatalar olarak özetlenmektedir.

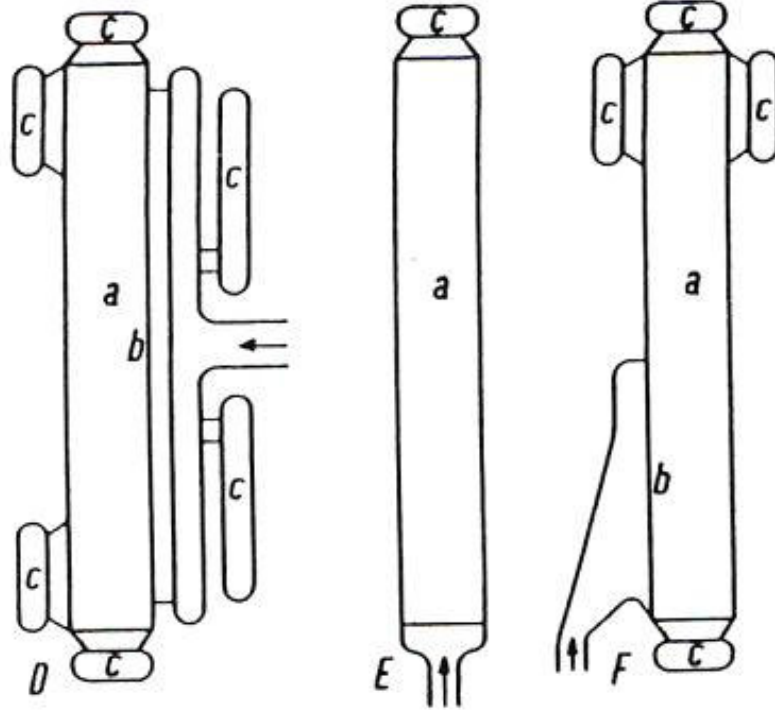


Şekil 3.9 Meme kısmının ince tutulmasının sonuçları(ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

Büyük aralıklı meme seçimin en büyük avantajı ergimiş madenin püskürtme yapmadan normal yollarla kalıp içersine dolmasıdır. Bunun doğal sonucu olarak bu tarz proseslerde düşük enjeksiyon basıncıyla çalışılmakta, kalıp sıcaklığı daha rahat kontrol edilmekte ve döküm parçaları daha mukavim olmaktadır.

Buna ek olarak, ince kesitli parçalarda malzemenin lif yapısı ikinci derece önemli kabul edilecek olursa, iyi derecede yüzey kalitesine sahip döküm parçalarının elde edilebilmesi için ince kesitli meme tercih edilmelidir. İnce kesitli meme kullanmanın dezavantajlarından bir tanesi de ergimiş metalin kalıp yüzeyine püskürtülmesi sebebiyle döküm parçasının kalıp içersine sıkı bir şekilde yapışmasıdır. Bu şekilde kalıp yüzeyine yapışan veya kaynak olan metelsel parçalar kazıma, zımparalama veya kimyasal yollarla temizlenmektedir.





Şekil 3.10 Geniş yüzeyli ince cidarlı basınçlı döküm parçalarının meme kısımları  
(Brunhuber,1963)

A İyi kalitede bir doldurma değil, yüzey kalitesinde hatalar bulunmaktadır.

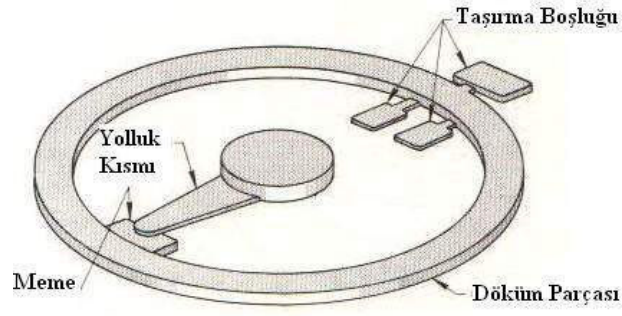
B Meme kısmının genişletilmesi ve taşıma boşluklarının desteğiyle A'ya nazaran daha iyi kalitede döküm parçası elde edilmektedir.

C Yüzey kalitesi istenilen sınırlar dahilinde olmasına rağmen döküm parçasında porozite bulunmaktadır.

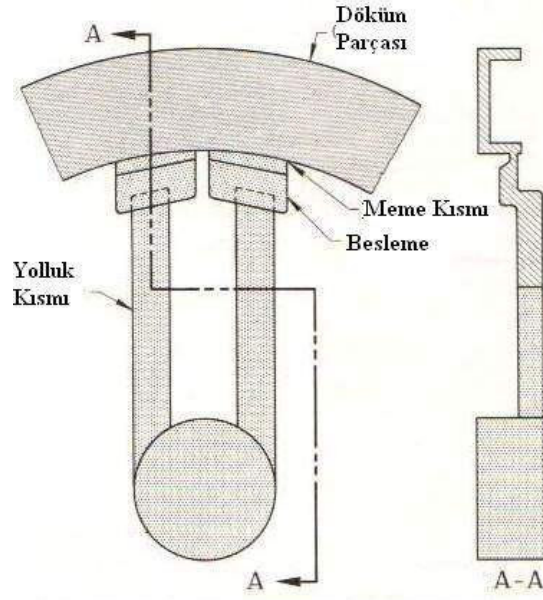
D Yolluk girişinden hava tahliyesinin iyi bir düzeyde gerçekleştirilmesiyle düşük cidar kalınlıklarında iyi kalitede basınçlı döküm parçaları elde edilebilir.

E Aşırı ısınma tehlikesi bulunduğundan yolluk girişinin çok iyi derecede soğutulması gerekmektedir.

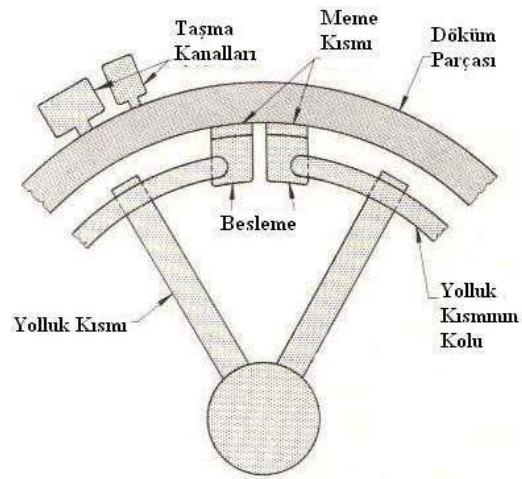
F Yolluk giriş genişliğinin daraltılmasıyla döküm kalitesi en yüksek olan ürünün elde edildiği dizayndır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.11 Meme kısmının farklı dizaynları(ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

Meme kısmının basınçlı döküm parçası için uygun özelliklerde olması, genel itibariyle tasarımcının tecrübesine bağlı olmaktadır. Tasarımcı dökülecek parçanın şekil özelliklerine uygun olan tasarımı uygulamak zorundadır. Şekil 3.11’de farklı şekillerdeki basınçlı döküm parçaları için uygulanan tasarımlar görülmektedir.

Meme kısmının derinliği akış karakteristiği, döküm sonrası budama ve son bitirme işlemlerinin başarılı olarak gerçekleştirilmesi için uygun değerler içersinde olmalıdır. Meme kısmının minimum ölçü değeri aşağıda belirtilen denklemlerle elde edilebilir(Karni, 1991):

$$\rho \times G_d \times G_v^{1.74} = J \quad (3.1)$$

yukarıda:

$$\rho = \text{Alaşımın öz ağırlığı (gr / mm}^3\text{)}$$

$$G_d = \text{Girişin derinliği (mm)}$$

$$G_v = \text{Girişin hızı (mm/sn)}$$

$$J = \text{Alaşım için deney sabiti (gr / mm}^2\text{)}$$

Maksimum meme derinliği dökülecek parçanın et kalınlığıyla ilgilidir. Çok sıklıkla kullanılan pratik bir metoda göre, memenin maksimum derinliği döküm kalınlığının %80’ ine yakın olan değerlerde olmalıdır(Karni, 1991).

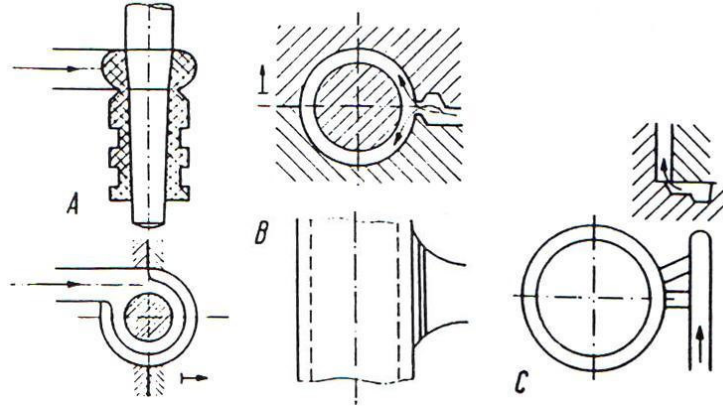
### 3.2.4 Çeşitli Yolluk Şekilleri

A Metalin teğet girişini sağlayan yaka tipi yolluk girişleri.

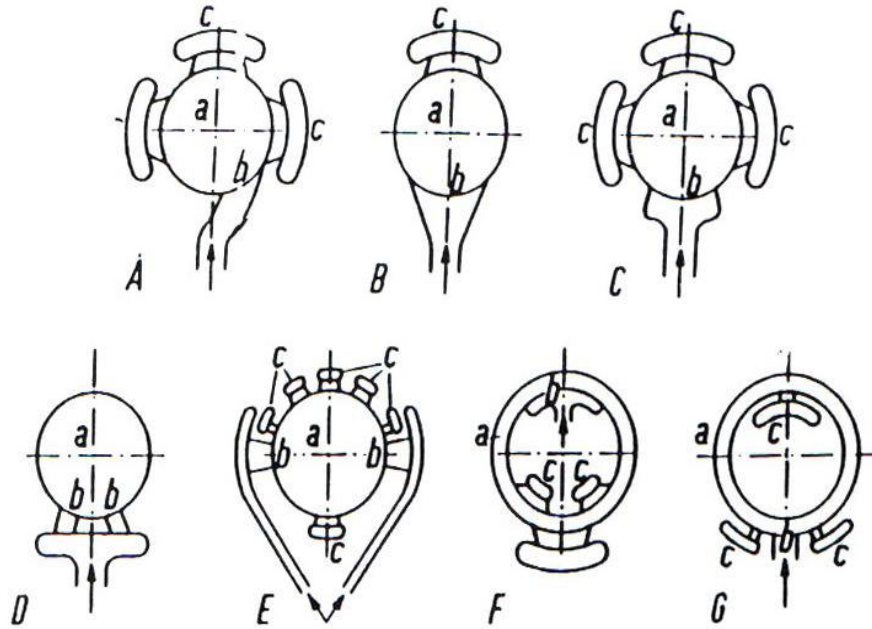
B Yandan yolluk girişi, yolluğun şekliyle çekirdeğe metalin direkt çarpmasını azaltmaktadır.

C Metali kalıptan boşluğa yönlendiren ikili yolluk girişi

Daha uzun, boru şeklindeki parçalar halka şeklinde yolluk kullanılmasıyla iyi şekilde dökülebilir(Şekil 3.12).

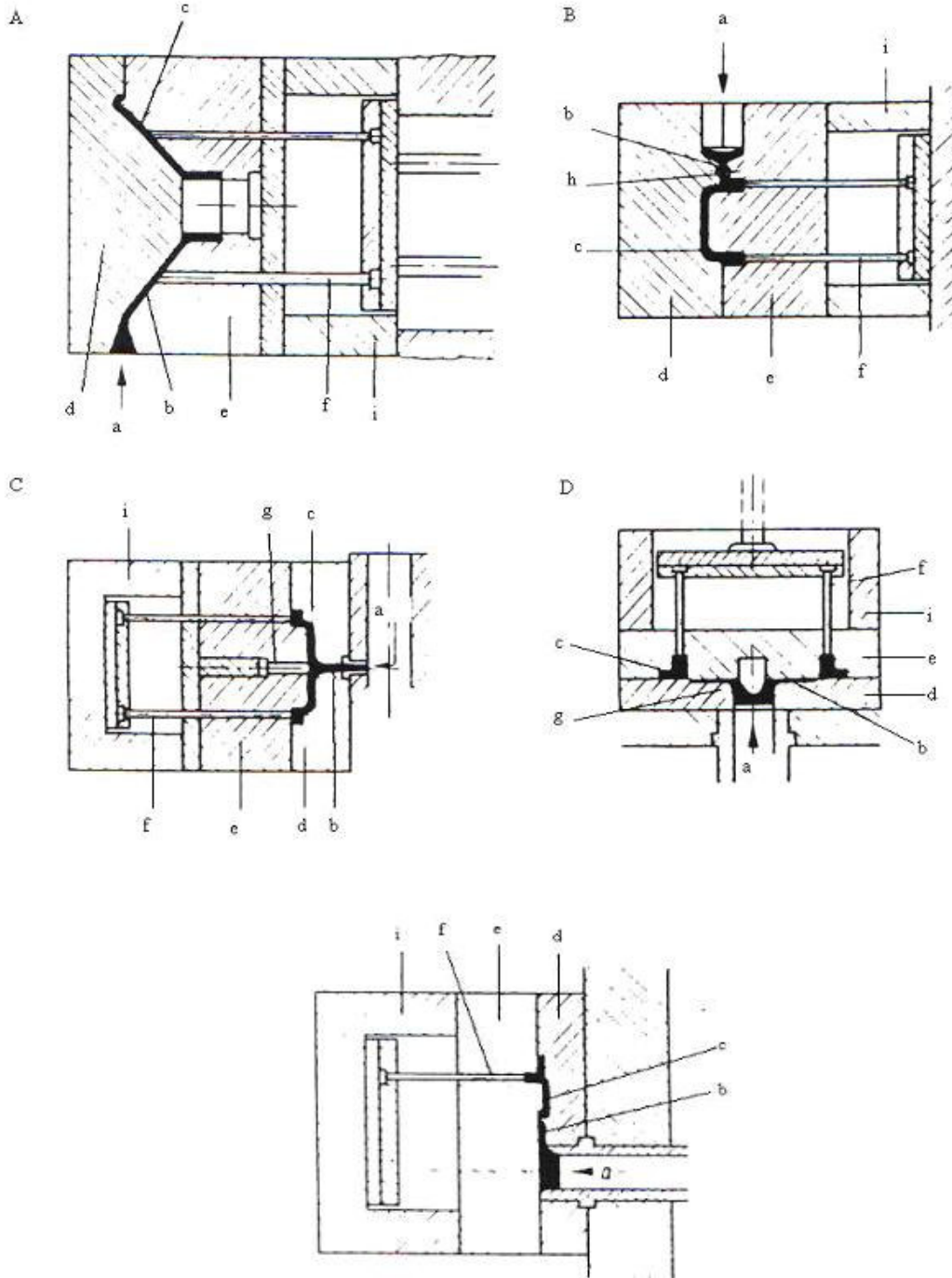


Şekil 3.12 Silindirik ve boru şekilli döküm parçaları için yolluk girişleri(ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)



Şekil 3.13 Çeşitli yolluk konumları. (a) Kalıp boşluğu, (b) yolluk girişi, (c) hava cebi(ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

Şekil 3.13’de yuvarlak, plaka şekilli parçalarda yolluk girişlerine örnek şekiller ve konumlar gösterilmiştir. Teğet yolluk girişleri (Şekil 3.13 A, B), hava tahliyesinin kapanması nedeniyle kullanılmamaktadır. Onun yerine bu şekiller simit şekilli parçalar için uygundur.



Şekil 3.14 Farklı yolluk türleri ile kullanıldıkları basınçlı döküm makineleriyle ilişkisini göstermektedir(Doehler, 1974).

A Beraberinde hava sürüklenmektedir. Kalıp dıştan içe doğru doldurulmaktadır.

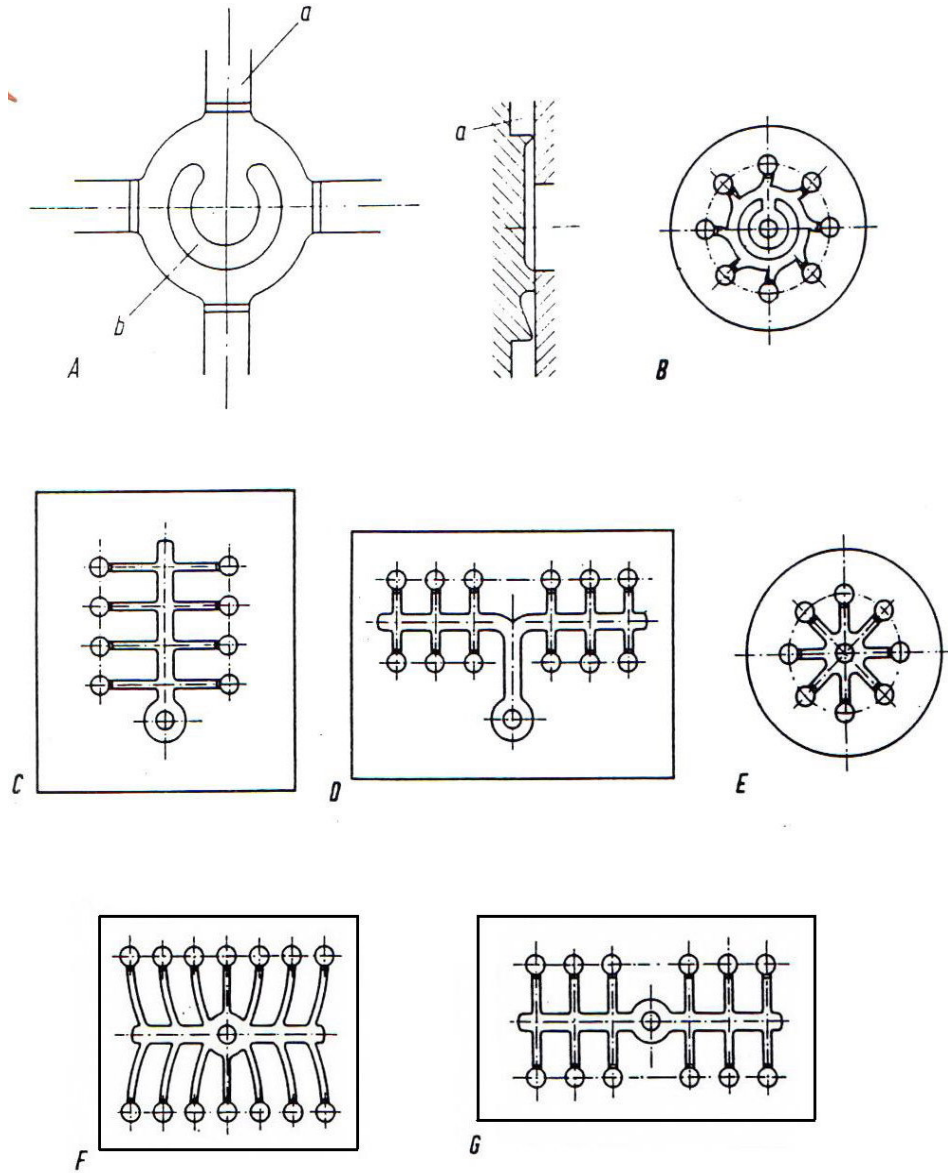
B Hava hapsedilmektedir, dolum dışarıdan içe doğru olmaktadır.

C Kalıp ortadan doldurulmaktadır. İyi kalitede döküm parçası elde edilmektedir.

D Çift yolluk girişi. İyi kalitede döküm parçası elde edilmektedir.

E Büyük yüzeyli parçalar için istenilen kalitede döküm parçaları elde edilmektedir.

F, G Simit veya plaka şeklindeki parçalar için uygundur(Şekil 3.14)



Şekil 3.15 Çok gözlü kalıplar için yolluk dizaynı. (A) yatay soğuk kamaralı basınçlı döküm makineleri için basınç odasının alt kısmında hilal şeklinde bölme bulunmaktadır. a kalıp boşluğu, b basınç odasının kapalı tarafı. B, C, D dizaynları yatay soğuk kamaralı basınçlı döküm makineleri içindir. E, F, G dizaynları sıcak kamara makineleri ve dikey soğuk kamara makineleri için uygundur(ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

A Sıcak kamaralı basınçlı döküm makinesindeki parçalı yolluk

B Dikey soğuk kamaralı basınçlı döküm makinesinde parçalı yolluk

C Dikey soğuk kamaralı basınçlı döküm makinesinde yekpare yolluk

D Dikey soğuk kamaralı basınçlı döküm makinesinde yekpare yolluk

E Yatay soğuk kamaralı basınçlı döküm makinesinde yekpare yolluk

a metal girişi, b döküm parçasındaki yolluk, c döküm parçası, d sabit kalıp plakaları, e oynar kalıp plakaları, f itici pimleri, g dağıtıcı çekirdek, h ergimiş metalin zamanından önce kalıp içersine girmesini engelleyen sürgüler, i itici plaka desteği.

Yekpare yolluğu döküm parçasının dışında Şekil 3.14 E' deki belirtildiği gibi konumlandırarak kalıp boşluğunu ergimiş metalle doldurmakta mümkündür. Ergimiş metalin kalıp boşluğuna girmeden yolluğu tamamen doldurmuş olması gerekmektedir. Tüm sıcak kamaralı ve dikey soğuk kamaralı basınçlı döküm makinelerinde yolluk yeri parça konstrüksiyonuna uygun yere rahatlıkla yerleştirilmektedir.

### 3.3 Basınçlı Döküm Kalıplarında Genel Konstrüksiyon Kuralları

- Kalıp dizaynının izin vermesi durumunda tek bir yolluk girişi yapılmalı, aksi durumlarda yolluk girişlerinden kalıp boşluğuna olan ergimiş metalin birbirine karşılıklı akışı engellenmelidir.
- Ergimiş metalin mümkün olduğu kadar serbest olarak kalıp boşluğu içersinde akışı sağlanmalıdır.
- Yüzey alanı geniş olan parçalarda yolluk girişinin kalıbın farklı kısımlarının eş zamanda doldurulmasını sağlayacak bir bölgede olması sağlanmalıdır.

- Havalandırma kanallarının ve taşıma boşluklarının yapılacak uygun dizaynla kalıp boşluğundan önce doldurulmamasına dikkat edilmelidir.
- Kalıp boşluğunun dolması yolluk kısmının tamamen dolmasından sonra başlamalıdır. Bununla birlikte yolluk girişinin ön kısmında akışın yavaşlanması önlenmektedir.
- İnce yolluk girişleri, ince cidarlı döküm parçaların basınçlı dökümünde yüksek akış hızlarında kullanılmaktadır. Kalın yolluk girişleriyse, düşük enjeksiyon hızlarında kalın cidarlı döküm parçaları için uygundur.
- Boru formunda olan döküm parçaları yuvarlak yolluk üzerinde çok noktadan doldurulabilmektedir.
- Döküm parçasında bulunan federler ergimiş metalin akışını yönlendirmek için kullanılmalıdır.
- Yolluk girişleri dizayn edilirken ergimiş metalin karşı cidara çarpmadan girişi sağlanmalıdır. Yolluk girişinin kesiti, döküm yolluğunun kesitinden büyük boyutlarda olmamalıdır, aksi takdirde içersinde hava kabarcıkları bulunan girdapların oluşumuna neden olmaktadır.
- Enjeksiyon hızı çok yüksek değerlere ayarlanmamalıdır, aksi takdirde laminar akış elde edilemez.
- Yüzey alanı geniş ince cidar kalınlığına sahip çok gözlü döküm parçalarının yolluklandırılması birden fazla yolluk girişiyle gerçekleştirilmelidir. Bu girişler kalıbın merkez kısmında ana yolluk kısmıyla birleştirilmelidir.

### **3.4 Yolluk Sisteminin Boyutlarının Makine Kapasitesiyle Dengelenmesi ( $P-Q^2$ Diyagramı)**

Yolluk dizaynında, kalıbın dizaynında kullanılan parametrelerin optimum değerleriyle döküm işleminde kullanılacak makine kapasitesinin eşleştirilmesi önemli bir unsurdur. Bunun için kullanılan başlıca araç  $P-Q^2$  diyagramıdır.

$P-Q^2$  Diyagramı döküm prosesinin tasarımında kullanılan önemli bir araçtır. Bu grafiğin temelini oluşturan fikirler, kendisinden iki yıl önce tanıtılan  $P-V^2$  diyagramında bulunsa da

(Zabel, 1980) ilk defa CSIRO tarafından 1977 yılında Avustralya'da geliştirilmiştir.

$P - Q^2$  Diyagramının kuramsal temeli, sürekli yoğunluk, sabit sıkıştırılmaz akış için enerji tasarrufunun ifadesidir(White, 1986). Bu temel, kalıp içersine doğru akan akışkanın enerjisinin, aynı akışkanın dışarı iletimindeki enerjisine ve enerji kayıplarına eşit olması gerektiğini belirtmekte ve şu şekilde ifade edilmektedir:

$$E_i = E_o + H_t \quad (3.2)$$

Burada:

$E_i$  : sıvının içeri iletim kanalındaki enerjisi (J)

$E_o$  : sıvının dışarı iletim kanalındaki enerjisi (J)

$H_t$  : toplam enerji kaybı (J) dır.

Denklem (3.2) hız, basınç ve sıvı metal özellikleri gibi ölçülebilen, genellikle kalıpta mevcut olan parametrelerin kullanıldığı bir bağıntı geliştirilerek denklem aşağıdaki şekli almaktadır (White, 1986):

$$\frac{P_i}{\rho} + \frac{1}{2} v_i^2 = \frac{P_o}{\rho} + \frac{1}{2} v_o^2 + H_t \quad (3.3)$$

Burada:

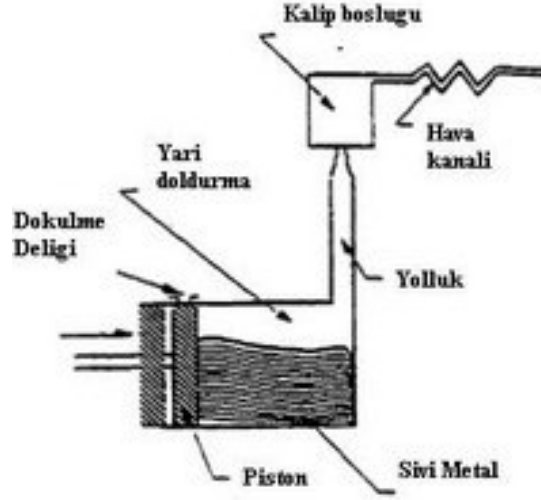
$P_i$  : içeri iletim kanalındaki basınç ( $N/mm^2$ ),

$P_o$  : dışarı iletim kanalındaki basınç ( $N/mm^2$ ),

$v_i$  : içeri iletim kanalındaki hız (mm/sn),

$v_o$  : dışarı iletim kanalındaki hız(mm/sn),

$\rho$  : yoğunluk ( $gr / mm^3$ ),



Şekil 3.16 Pistonun doldurulması, yolluk, kalıp boşluğu girişi ve Bar-Meir sonrasında havalandırma boşluklarının şemayla gösterimi (Bar-Meir, 1997)

Şekil 3.16 döküm işleminde ergitilmiş metal ile pistonun doldurularak sıvı metalin yolluklar vasıtasıyla kalıp çekirdeğine basılması sürecinde akış sisteminin elemanları gösterilmektedir.

Ergimiş metal pistonların doldurulmasıyla yolluklardan kalıp boşluğu girişine kadar yol alırken oluşan enerji kayıpları, başlıca sürtünme, geometri değişimleri ve girişteki tazyikli akış sebebiyle olmaktadır.

Ergimiş metalin homojen özelliklerde olmamasından dolayı, pistonların doldurulması, yolluklar ve kanal giriş sistemi boyunca aynı oranda ve doğrultuda yol almamaktadırlar. Bu durum türbülansa, çarpışmalara ve akışta girdaplara sebep olmaktadır. Bunların oluşumuna döküm işleminde ergitilmiş metali aktarmada kullanılan yüksek hızlar ve yüzey pürüzlülüğü, kanal hacmindeki ani değişimler ve keskin kısımlar etki etmektedir.

Kalıp boşluğundaki basıncın sıfır olduğu farz edildiğinde ve akış sisteminin farklı öğelerinin etkileri düşünüldüğünde denklem (3,3) şöyle ifade edilmektedir:

$$P = C_t v_g^2 \quad (3.4)$$

$P$  : piston yüzeyindeki basınç ( $N/mm^2$ ),

$v_g$  : sıvı metalin boşluk girişindeki hızı ( $mm/sn^2$ ),

$C_t$  : karma akış katsayısı(composite discharge coefficient)dır.

Denklem 3.4 kalıp girişi olarak da düşünülen akış noktasındaki istenilen sıvı metal hızına ulaşmak için gerekli olan piston yüzeyindeki basıncı hesaplamak için kullanılır.

Döküm makinesinin aktarım hızını ölçerek  $C_t$  katsayısı hesaplanabilmektedir. Kalıp dökme uygulaması karma akış katsayı değerinin ve  $P-Q^2$  ye da  $P-V^2$  grafiklerinin oluşturulmasında çoğu kez döküm makinesinin özellikleri yerine makine performansının ölçüm sonuçları kullanılmaktadır(Herman, 1988). Diğer bir deyişle,  $C_t$  katsayı sadece döküm makinesinin özelliklerine değil yolluk, giriş ve hava tahliye sistemi gibi kalıp dökme işleminin diğer öğelerine de bağlı olmaktadır. Denklem (3.4) hem soğuk hem de sıcak kamaralı döküm tekniklerine uygulamaktadır.

Akış oranı ve basınç arasındaki ilişki, ( $v_g$ ) girişindeki hız, akış debisi ( $Q$ ) ve giriş alanının ( $A_g$ ) olarak ifade edilirse şu denklem elde edilmektedir:

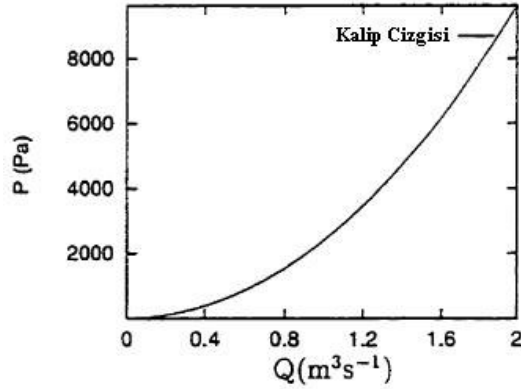
$$v_g = Q / A_g \quad (3.5)$$

Sonrasında denklem (3.5)'ü (3.4)'te yerine koymakla elde edilen:

$$P = \frac{C_t}{A_g^2} Q^2 \quad (3.6)$$

Bu, piston yüzeyindeki basınçla akış oranı arasında kuadratik bir bağımlılık olduğunu göstermektedir. Yani debi arttığında basınçta( $P$ ) artmaktadır. Bu bağımlılık genelde hidrolik

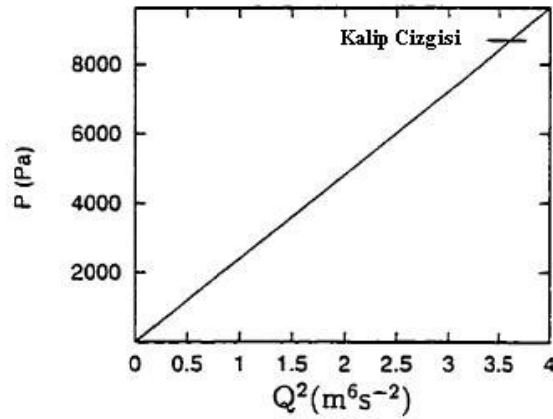
basıncı artırarak elde edilmektedir. Bu durum şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.17 Çeşitli akış oranları için kalıp çizgisini gösteren  $P-Q$  diyagramı. Akış oranı eksenine  $Q$ 'da doğrusal ölçek kullanılarak oluşturulmaktadır(Herman, 1988)

Döküm işleminde kullanılan yüksek enjeksiyon hızları türbülanslı akış durumunu göstermektedir. Giriş hızının genelde 30 ile 60 m/s arası değiştiği düşünüldüğünde, yüksekliği 2mm olan ve kinematik viskozite değeri  $10^{-6}$ , 700 °C de A1380 alaşımının tamamen türbülanslı akışta, Reynolds sayısı  $30 \times 10^3$  ile  $120 \times 10^3$  arasında değer almaktadır.

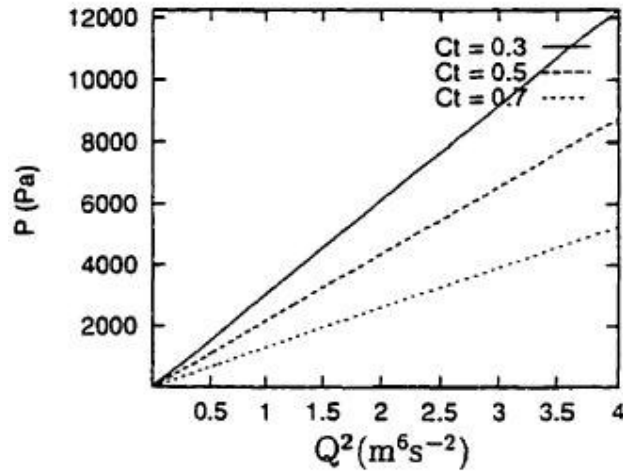
Kalıbın hızlı bir şekilde doldurması prosesinde 2 ve 4 m/s arasındaki piston hızlarını dikkate alan bir benzer analiz 150 ve 300 mm arasındaki piston çapları için  $3.75 \times 10^5$ ' den  $1.0 \times 10^6$  a kadar sıralanan Reynolds sayısının değerlerini vermektedir. Bu analiz akış durumunun tamamen türbülanslı olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.18 Çeşitli akış oranları için kalıp çizgisini gösteren  $P - Q^2$  grafiği. Akış oranı eksenini  $Q^2$  de doğrusal ölçek kullanılarak oluşturulmuştur (Bar-Meir, 1997)

Basitleştirmek için, akış oranının ( $Q$ ) alanına karşı piston yüzeyindeki basınç ( $P$ ), doğrusal ölçek yerine kuadratik bir akış oranı ölçeği kullanılarak pozitif bir eğimle düz bir çizgi olarak gösterilmektedir.

Genel olarak karma akış katsayısı kalıp dökme işleminin verimliliğinin ölçümü olarak düşünülmemekte fakat özellikle yolluk giriş sisteminin verimliliğinin ölçüsüdür.



Şekil 3.19 Akış katsayısının ( $C$ ) kalıp çizgisi üzerindeki etkisini gösteren  $P - Q^2$  diyagramı. Giriş alanı  $A_g = 0.0151 m^2$  (Bar-Meir, 1997)

Şekil 3.19'da akış katsayısının enjeksiyon sistemi tarafından sağlanması gereken basınca olan etkisini göstermektedir. Akış katsayı değerindeki bir ilerleme mevcut akış oranını oldukça artırmakta veya sabit bir akış oranı için akış sisteminden alınması gereken basıncı azaltmaktadır. Bu, döküm kalitesi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir.

Akış katsayısı çoğunlukla uygulama esnasında düşünülmektedir. Genelde  $C_c \approx 0.5 - 0.6$  çinko (Herman, 1988) için ve  $C_c \approx 0.5$  alüminyum (Karni, 1991) içindir.

## 4. YOLLUK SİSTEMLERİNİN SİMÜLASYONU

### 4.1 Giriş

Simülasyon, teorik veya gerçek fiziksel bir sisteme ait neden sonuç ilişkilerinin, bir bilgisayar modeline yansıtılmasıyla, değişik koşullar altında gerçek sisteme ait davranışların bilgisayar modelinde izlenmesini sağlayan bir modelleme tekniğidir. Simülasyon şu amaçlar doğrultusunda yapılmaktadır:

- Tasarım veya imalat öncesi yapılan simülasyon,
- Verilen tasarım veya imalat kararların gidişatlarını ve sonuçlarını tahmin etmekte,
- Tasarım veya imalatta ortaya çıkabilecek problemlerin nedenlerini belirlemede,
- İmalat için yatırım yapmadan önce problem alanlarını belirlemede,
- Yapılabilecek alternatif değişikliklerin etkilerini ortaya çıkarmada,
- Bütün sistem değişkenlerinin bulunmasını sağlamada,
- Tasarım veya imalat ortamındaki fikirleri değerlendirmede ve verimsizlikleri belirlemede,
- Tasarımdaki veya imalattaki planlarınızın bütünlüğünü ve fizibilitesini test etmede kullanılmaktadır.

Basınçlı döküm simülasyonu, sistem dizaynı ve analizinde hızla popüler olan bir araçtır. Simülasyon programları, mühendis ve teknisyenlere dizayn ve üretimle ilgili zamanında ve zekice kararlar vermeleri için yardımcı olmaktadır. Simülasyon programları tek başına problemleri çözemez fakat problemi açıkça tanımlamakta ve sayısal olarak alternatif çözümleri değerlendirmektedir. Koşul analizi yapabilen bir araç olan simülasyon programları önerilen herhangi bir çözüm için sayısal ölçüm ve analiz yapabilmektedir ve kısa zamanda en iyi alternatif çözümü bulmaya yardımcı olmaktadır. Yeni bir dizayn üretimi yapılmadan ürünler test edilmeden önce bilgisayarda sistemi modellenerek, üretim sonucunda oluşabilecek hataların önceden görülmesine yardımcı olmaktadır. Üretilecek ürünün devreye alınmasında, iyi ürün elde etmek için aylar süren çalışmalar simülasyon yazılımlarıyla günlere

hatta saatlere sıkıştırılmış olmaktadır.

Simülasyon programları yardımıyla çok fazla sayıda ve çok fazla özellikli değişkeni tek bir modelde toplayabilme özelliği, bugünkü kompleks ürünlerin dizaynı ve imalatı için vazgeçilmez bir araç olmaktadır.

Bugün basınçlı dökümde giriş ve yolluk sistemlerinin dizaynında ve analiz çalışmalarında kullanılan simülasyon yazılımları bulunmaktadır. Bunlardan Moldflow Avustralya Pty.'den, "METALFLOW" yazılımı kalıp doldurma işlemi ve yolluk sistemlerinin dizaynını ve analizini sağlamaktadır. Kalıp doldurma işlemini, tasarımcının döküm için gereken doldurma metodunu seçiminden sonra, girişten kalıp boşluğunun içine doğru metal akışını şematik olarak tanımlayarak üniform doldurma analizi sistem tarafından gerçekleştirmektedir. Ayrıca, ergimiş metalin akış uzunluğu ve havalandırma durumu analiz edilmektedir. Yapılan analiz sonucunda makine ayarlarıyla dizayn metodolojisi karşılaştırılarak, simülasyon sonunda kalıbın dolmayan kısımları veya parçada oluşabilecek hatalı kısımlar üzerinde çözüm yolları aranmaktadır.

"Ergimiş Metalin Akışı", "Besleme Sistemi Dizaynı" ve "Yolluk Dizaynı" isimli simülasyon modülleri Amerikan Döküm Enstitü'sü tarafından geliştirilerek sanayide yaygınca kullanılan birçok simülasyon yazılımlarına entegre edilmiştir(Bar-Meir, 1997)

"Ergimiş Metalin Akışı" modülü, piston boyutunun, hidrolik basıncın, enjeksiyon hızının ve girişteki boyutlandırmanın kalıp doldurma işlemine olan etkisini analiz etmektedir. Bu modül ile sağlanan bilgiye dayanarak "Yolluk Dizaynı" modülü kullanılabilir.

"Yolluk Dizaynı", ergitilmiş metalin debi miktarının bilinmesiyle yolluk sisteminin asıl boyutunu hesaplamak için kullanılmaktadır.

Sonuç olarak "Besleme Sistemi Dizaynı" modülde besleme sisteminin hesaplanması için uygulanmaktadır. Yapılan hesaplama, kalıbı doldurmak için gerekli koşulların karşılanacağını ve bu noktadaki performans değerlerinin tahmin edilmesini garanti etmektedir.

Bilgisayar destekli döküm(CIDC) işlemi katı modelleme tekniklerine dayanmaktadır(Karni,1998). CIDC işlemiyle farklı yazılım gereçleri bir dizayn ortamında birleştirmektedir, geometriyi yeniden tanımlamaktan kaçınmakta ve dizayn prosesinin

planlanmasında kullanılmaktadır. Bu yazılımlar malzeme, proses, ürün ve mühendislik analizleri kapsamaktadır. Basınçlı döküm işlemindeki kalıp doldurma analizi, ergimiş metalin akışı ve soğutma sırasındaki ısı transferini sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simüle etmektedir. Akış karakteristiği ve proses değişkenleri, deneyime dayanarak kullanıcı tarafından seçilmektedir. Bu seçim havalandırma sisteminin işlem üzerindeki etkisini göz önüne almamaktadır.

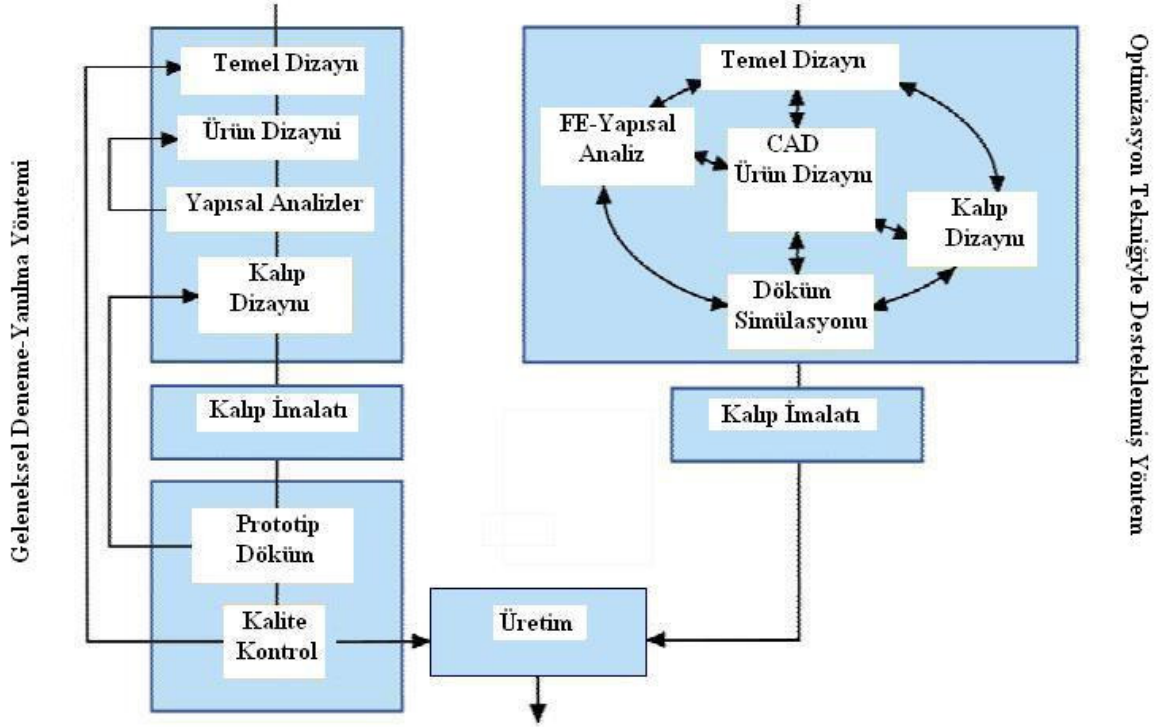
Rao (N-Rao, 1989) yolluk sistemini dizayn etmek için bir yazılım paketi geliştirmiştir. Geliştirilen yazılımda giriş hızını ve dolun süresini belirlemek için “binary” araştırma metodunu kullanmıştır. Bununla birlikte geliştirilen yazılım farklı giriş ve yolluk çeşitlerine fırsat vermektedir.

“METALFLOW” yazılımının güncelleştirilmesi R.Lang (Lang, 1996) tarafından yapılarak yazılımda “Castflow” ve “Casttherm” olmak üzere iki modül tanıtılmaktadır. “Castflow” ergimiş metalin akış analizi için yolluk geometrisine ve takım yollarının oluşturulabilmesi için kullanılabilen üç boyutlu tel kafes yapıya olanak sağlayan kalıp doldurma modeline dayalı bir sistemdir. “Casttherm” kalıp doldurma işleminde termal analizini gerçekleştirmektedir. Bununla birlikte kalıp doldurma simülasyonundan elde edilen değerler, kalıbın termal analizi ve döküm prosesindeki enerji analizleri için kullanılmaktadırlar.

Bu çalışma, döküm prosesinin anlaşılmasında, modellenmesinde ve analizinde güncel ilerlemelere dayanan giriş ve yolluk dizayn metodolojisindeki gelişmeleri kapsamakta ve bu konuda yapılacak çalışmalara rehber niteliğindedir.

## **4.2 Yolluk Sisteminin Optimizasyonu**

Dökümle üretilen parçalardaki karmaşıklık ve karmaşık fonksiyonların artışıyla birlikte basınçlı döküm işleminde bilgisayar destekli optimizasyon tekniklerinin kullanımı artmıştır. Kalıp dizaynının gerçekleştirilmesinde ve ön üretim işlemlerinde, optimizasyon yapılması zorunlu olmuştur. Bununla birlikte yolluk sistemindeki değişkenlerin döküm simülasyonu içerisinde doğru bir şekilde tanımlanmasıyla nümerik optimizasyonda doğru sonuçlar elde edilmektedir. Yeni nesil optimizasyon araçları simülasyon prosesiyle birleştirilerek optimizasyon tekniğinin deneme yanılma yöntemi temelinde kullanılmasının önüne geçilmiştir.



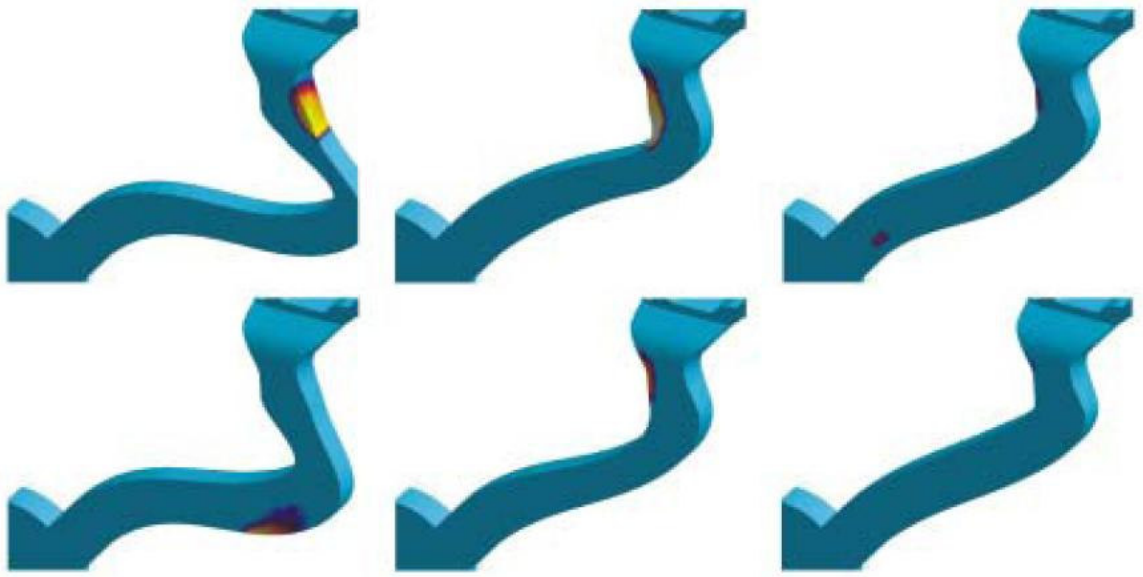
Şekil 4.1 Geleneksel Deneme-Yanılma Yöntemi ile Optimizasyon Tekniğiyle Desteklenmiş Yöntemin karşılaştırılması(Lang, 1996)

Basınçlı döküm kalıplarının tasarımında yolluk sisteminin dizaynı üretilen döküm parçası üzerinde çok önemli rol oynamaktadır. Döküm parçaları üzerindeki çoğu üretim hataları yolluk dizaynının yanlış veya yetersiz yapılmasından kaynaklanmaktadır. Hatalı yolluk dizaynından kaynaklanan hataları sıralamak istersek:

- Türbülanslı akıştan kaynaklanan porozite ve parça içerisinde oluşan hava kabarcıkları,
- Ergimiş metalin kalıbı uygun zamanda dolduramamasından dolayı ana yollukta oluşan donmalar,
- Ergimiş materyalin yığılmasıyla oluşan baskıdan kaynaklanan çekme porozitesi dir.

Çoğu zaman tasarımcılar tarafından yolluk tasarımına gereken önem verilmemektedir. Basınçlı döküm prosesinin gelişen yeni teknolojilerle birlikte daha kompleks hale gelmesine rağmen, yolluk sistemlerinin dizaynları geleneksel çerçevede basit bir seviyede tutulmaktadır. Bu şekilde basit yaklaşımlarla oluşturulmuş yolluk sistemlerinde çoğu zaman

ergitilmiş metalin yolluk geometrisi içersindeki akış karakteristiği göz önüne alınmamaktadır. Basınçlı döküm kalıplarında yolluk sistemlerinin optimizasyonu çoğunlukla parametreler üzerinde yapılan muhtemel kabullerle başlamaktadır. Bunun yanında yapılan kabullerin uygulamaya yönelik olması optimizasyon sonuçlarındaki kararlılığı yakından etkilemektedir.



Şekil 4.2 Yolluk sistemindeki çeşitli dizayn varyasyonlarının optimizasyonu(Procast, 2003)

Şekil 4.2’de seçilen altı uygulama üzerinde yapılan optimizasyon sonucunda, son dizaynda elde edilen başarılı sonuç görülmektedir. Yapılan optimizasyonun amacı yolluk sistemi içersindeki hava boşluklarından kaçınarak ideal yolluk dizaynını elde etmektir. Bu çalışmada döküm makinesinin pistonlarının basmaya hazır pozisyonu ve meme kısmındaki açı sabitlenmiş sınır koşullarını oluşturmaktadır. Sabitlenen bu değişkenlerin arasındaki diğer parametreler optimizasyona açık, gereken değişikliklerin yapılacağı sistem bileşenleridir.

Yapılan optimizasyonlarla giriş ve yolluk sistemlerinde özelleştirmeler yapılarak bunun sonucunda herhangi bir duruma özel sistem parametrelerinin tespiti yapılmaktadır.

Bununla birlikte belirtilen uygulamada modelleme şu şekilde yapılmaktadır.

Dizayn değişkenleri:

$ZL \equiv$ Yolluğun derinliği (mm)

$CX \equiv$ Meme kısmındaki aı

Sabitler:

$i \in I \equiv$  varsayım yoluyla kabul edilen eleman/ yolluk kısmının birimi

$j \in J \equiv$  varsayım yoluyla kabul edilen eleman/ meme kısmının birimi

Parametreler:

$ZL_l \equiv$ Yolluk kısmının derinliğinin alt limiti (mm)

$ZL_u \equiv$  Yolluk kısmının derinliğinin üst limiti (mm)

$CX_l \equiv$  Meme kısmındaki aının alt limiti

$CX_u \equiv$  Meme kısmındaki aının üst limiti

Yardımcı Değişkenler:

$tc_i \equiv$  i elementin yolluktaki birim doldurma zamanı;  $i \in I$  (sn)

$te_j \equiv$  j elementin meme kısmındaki birim doldurma zamanı;  $j \in J$  (sn)

$Vx_j \equiv$  meme kısmındaki j elementinde x yönündeki ergimiş metalin hızı;  $j \in J$  (mm/sn)

$Vy_j \equiv$  meme kısmındaki j elementinde y yönündeki ergimiş metalin hızı;  $j \in J$  (mm/sn)

$Vz_j \equiv$  meme kısmındaki j elementinde z yönündeki ergimiş metalin hızı;  $j \in J$  (mm/sn)

$V_j \equiv$  ergimiş metalin amaçlanan hız değerini belirten element;  $j \in J$  (mm/sn)

Formülasyon şu şekildedir:

$$\text{Minimize } V_j(ZL, CX) = \sqrt{Vx_j^2 + Vy_j^2 + Vz_j^2} \quad (4.1)$$

$$tc_i \leq te_j \quad i \in I, j \in J \quad (4.2)$$

$$ZL_l \leq ZL \leq ZL_u \quad (4.3)$$

$$CX_l \leq CX \leq CX_u \quad (4.4)$$

(4.2) ile belirtilen sınırlamada yolluk kısmının elementinin dolum zamanının meme kısmın dolum elementinin dolum zamanını geçmemesi gerektiği tanımlanmaktadır. Sınırlamalarda yolluk kısmının meme kısmından daha önce doldurulduğu kabul edilmektedir. Hava kabarcıklarının oluşumunun önüne geçilerek yüksek kalitede üretim sağlanmaktadır. (4.3) ve (4.4) ile belirtilen sınırlamalar dizayn değişkenleri için fiziksel limitlerdir.

Bununla birlikte bilgisayar destekli optimizasyon proseslerinin yaygınlaşması bu alanda hizmet veren mühendis ve teknisyenlerin işlerini bırakması anlamına gelmemektedir. Bu uygulamalarda sağlanacak başarı prosesin yönetimini gerçekleştiren teknik elemanın konuyla ilgili hâkimiyetiyle yakından ilgilidir. Bugünün bilgisayar teknolojisiyle basit bir yolluk sisteminin optimizasyonu 10–15 dakikada, karmaşık bir modelde birkaç saat içerisinde hesaplanabilmektedir, bu nedenden dolayı basınçlı dökümdeki optimizasyon uygulamaları gelecekte olacak gelişmeleri takip etmektedir.

### 4.3 Döküm Simülasyonunda Temel Esaslar

Bu bölümde, akışkanlar mekaniğiyle kalıp içersindeki sıvı metal akışını çözümlenmekte kullanılan FEM ( sonlu elemanlar yöntemi) çözümlerinin altında yatan fiziksel ve matematiksel eşitlikler incelenecektir. Bu denklemler detaylı olarak çıkarılmaları yerine kısa ve öz olarak açıklanmaktadır. Bu bölümde döküm prosesinde kullanılan akış denklemleri, serbest yüzey denklemi, damlacık denklemi ( droplet equation) ve bunların simülasyon yazılımı altında birleştirilmesi incelenmektedir.

#### 4.3.1 Korunum Denklemleri

Akışkan denklemleri üç tane korunum yasasından elde edilmişlerdir: kütle korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu.

#### 4.3.1.1 Kütlenin Korunumu

Bu yasa, kütlenin yoktan var edilemediği gibi yok ta edilemeyeceği belirtilmektedir. Bu, matematiksel olarak birden fazla şekilde ifade edilmektedir. Verilen  $D$  bölgesinde,  $D$ 'nin içerdiği  $\Omega$ ,  $D$  nin alt bölgesidir, ie.,  $\Omega \subset D$ . Bununla birlikte  $\partial\Omega$ 'nin  $\Omega$  bölgesinin sınırı olması kabul edilsin ve  $\vec{n}$  normalin dışında bir noktayı belirsin. ( $\Omega$  uzayda zamanla değişmeyen sabit bir nokta dır). Euler düzleminde  $(\vec{x}, t)$ , bu hacimdeki kütlenin değişim değeri şu şekilde ifade edilebilir:

$\Omega$ : 3 boyutlu A bölgesinde bir nokta

$\vec{n}$ : normal vektörü

$$\frac{d}{dt}m(\vec{x}, t) = \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho(\vec{x}, t) dV = \int_{\Omega} \frac{\partial \rho}{\partial t}(\vec{x}, t) dV \quad (4.5)$$

Verilen hız alanı  $\vec{u}(\vec{x}, t)$ ,  $(\rho \vec{u} \cdot \vec{n})$  kütlenin değişim miktarının sınır değerlerini geçmesi sağlanırsa, kütlenin korunumu:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \rho}{\partial t}(\vec{x}, t) dV = - \int_{\partial\Omega} (\rho \vec{u} \cdot \vec{n}) dA = \int_{\Omega} \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) dV \quad (4.6)$$

Eğer birinci ve ikinci eşitliği birleştirirsek, şunu elde ederiz:

$$\int_{\Omega} \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} - \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) \right\} dV = 0 \quad (4.7)$$

Bu eşitlikten anlaşılacağı gibi  $\Omega$  hacmindeki kütlenin değişimi rasgele seçilen  $\Omega \subseteq D$  de sınır dışına akan kütle miktarıyla aynı değerdedir.

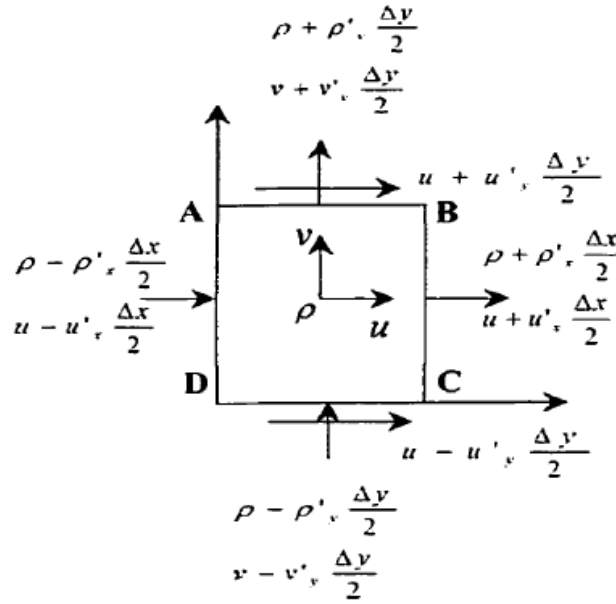
### 4.3.1.2 Momentumun Korunumu

Newton'un ikinci kanununun kartezyen koordinatlarda küçük bir kontrol hacmine uygulanmasıyla, Şekil 4.3'de verildiği gibi:

CV üzerindeki  $\sum F_x = x$  yönünde dışarı doğru akan akışkanın momentumu CV- den

x yönünde içeriye doğru akan akışkanın momentumu CV+ ya

x yönünde toplam momentum CV in içine birikmektedir.



Şekil 4.3 Kartezyen koordinatlardaki kontrol hacmi(White, 1986)

Burada:

$\rho'_x, \rho'_y$ : öz ağırlığın x ve y koordinatlarında birinci türevidir.

$u, v$ : parçacıkların x ve y yönlerindeki hızlarıdır(m/sn).

BC yüzüne olan sıvı akışının kütlesi aşağıda belirtildiği gibi dir :

$$\left[ \left( \rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] \times \left[ \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) (\Delta y \times 1) \right] \quad (4.8)$$

Benzer şekilde, AB, AD ve CD yüzeylerini geçen sıvı akışı da yazılmaktadır.

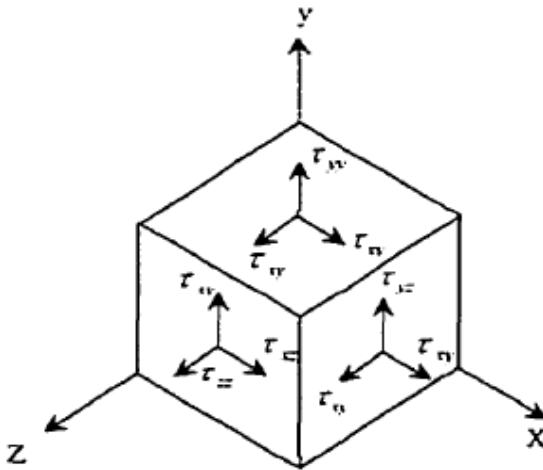
$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + u \left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right] \quad (4.9)$$

Süreklilik denkleminde,  $\left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right] = 0$  olmaktadır. Eşitliğin sağ tarafı:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.10)$$

Yapılan kontrolle, x yönünde üç boyutlu akış için benzer bir denklem yazabiliriz.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \rho \frac{Du}{Dt} \quad (4.11)$$



Şekil 4.4 Diferansiyel hacimde oluşan gerilim(White, 1986)

Katı cisimler mekaniğinden kesme gerilmesi, şekil 4.4'de aşağıda belirtilen ilişkileri içermektedir.

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}; \quad \tau_{zy} = \tau_{yz};$$

Bu nedenle x yönündeki momentum eşitliği şu şekilde yazılmaktadır;

$$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \rho \frac{Du}{Dt} \quad (4.12)$$

Bilinmeyenlerin sayısal olarak fazlalığından dolayı, gerilim ve yer değiştirme ilişkisine göre Newton'un akış kanunu ( x yönünde) şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\tau_{xy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4.13)$$

$$\tau_{xz} = \mu \left( \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (4.14)$$

$$\tau_{xz} = -P + 2\mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \lambda \nabla \cdot \vec{V} \quad (4.15)$$

Burada  $\lambda$  kinematik viskozite,  $\mu$  dinamik viskozite değeri olup, P ise basıncı temsil etmektedir. Bunların (4.12) eşitliğinde yerlerine konulmasıyla Navier-Stokes denkleminin standart şekli elde edilmektedir:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \nabla \cdot \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu (\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z})) \quad (4.16)$$

Eğer akışın sıkıştırılmaz,  $\mu$  viskozitesinin akış bölgesinde her yerde sabit olduğu ve akışın düzgün olduğu kabul edilirse, denklem şu şekilde yazılabilir:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4.17)$$

$g_x$  x yönündeki yerçekimi ivmesidir. Benzer denklemler, Navier-Stokes denkleminin y ve z doğrultularında yazılabilir.

#### 4.3.1.3 Enerjinin Korunumu

Kinetik enerji, t anında diferansiyel hacimde  $E_k$  olursa, iç enerjisi  $E_i$ , parçacıkların içine olan ısı akışının oranı  $\dot{Q}$  olarak tanımlanmıştır ve bu iş  $\dot{W}$  kuvvetiyle gerçekleştirilmektedir. Bu durumda enerjinin korunumu, şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\frac{D}{Dt} (E_i + E_k) = \dot{Q} - \dot{W} \quad (4.18)$$

Enerji denkleminin daha detaylı incelenmesi termodinamik prensiplerle yapılmaktadır. Enerji denkleminin döküm tekniğinde damlacık(droplet) üzerine uygulanması daha sonra incelenecektir.

#### 4.3.2 Akış Denklemleri

Zamana bağımlı Non-Linear sistemler için:

$$\dot{\bar{u}} - \nu \Delta \bar{u} + (\nabla \bar{u}) \bar{u} + \nabla(\rho^{-1} p) = \rho^{-1} \vec{f} \text{ in } \Omega \quad (4.19)$$

$$\nabla(\bar{u}) = 0, \Omega \text{ de.} \quad (4.20)$$

$$\bar{u} = \vec{g}, \Gamma_D \text{ üzerinde.} \quad (4.21)$$

$$\text{Her ikisi : } (-\rho^{-1} p I + \nu \nabla \bar{u}) \vec{n} = \vec{h}, \Gamma_N \text{ üzerinde.} \quad (4.22)$$

$$\text{Ya da: } (-\rho^{-1} p I + 2\nu \Lambda \bar{u}) \vec{n} = \vec{h}, \Gamma_N \text{ üzerinde.} \quad (4.23)$$

$$\vec{u} = \vec{u}_0 \text{ at } t = 0 \quad (4.24)$$

$\vec{u}$  = Akışkanın hızı(mm/sn)

$\rho$  = Akışkanın öz ağırlığı ( $N/mm^3$ )

$\nu = \mu / \rho$  Kinetik viskozite ( $mm/sn^2$ )

$\Delta$  = Laplace 'daki koordinat yönü

$\Omega$  =  $R^3$  veya  $R^2$ 'nin sınırı

$\Gamma$  =  $\Omega$  'nin sınırı

$\Gamma_D \cup \Gamma_N = \Gamma$ ,  $\Gamma_D \cap \Gamma_N = \emptyset$  (boş küme)

$\vec{g}$  = Dirichlet datası (  $\Gamma_D$  üzerinde tanımlanmış bir vektör, genellikle 0, fakat değişken sınır koşullarına sahip olabilir)

$\vec{h}$  = Neumann datası ( $\Gamma_N$  üzerinde tanımlanmış bir vektör)

$I$  = 3x3 tanımlanmış bir matris

$\vec{n}$  =  $\Gamma$  ye doğru normalden dışarıya doğru çıkan vektör.

$\nabla \vec{u}$  = 3x3 matris

$\Lambda \vec{u} = (\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) / 2$

Termal-transport problemini ele alırsak, sıcaklık denklemi:

$$\dot{T} - \alpha \Delta T + \vec{u} \cdot \nabla T = s \quad (4.25)$$

$$T = T_0 \quad t = 0 \text{ de, } T = \bar{T} \quad \partial_1 \Omega \text{ de,}$$

$$\alpha \nabla T \cdot \vec{n} = z, \quad \partial_2 \Omega \text{ üzerinde,}$$

$$T = \text{sıcaklık (}^\circ\text{C)}$$

$$\alpha = \text{termal yayılma katsayısı}$$

$$s = \text{kaynak terimi}$$

$\bar{T}$  ve  $z$ ,  $\partial_1 \Omega$  ve  $\partial_2 \Omega$  üzerinde verilen sıcaklığın zamana göre türevi alınarak elde edilmiş fonksiyonlardır.

Burada problemin parametrelerinde bazı kısıtlamalar bulunmaktadır:

1. İlk hız  $\nabla(\vec{u}_0) = 0$  koşulunu  $\Omega$  nin üzerinde karşılamak zorunda ve  $\Gamma_D$  üzerinde  $\vec{n} \cdot \vec{u}_0 = \vec{n} \cdot \vec{g}$  olmalıdır. Genellikle  $\Gamma_D$  üzerinde  $\vec{u}_0 = \vec{g}$  olmasını umarız, ilk hız aynı sınır koşullarında çözümde gösterildiği gibi olmaktadır. Not:  $\vec{g}$  zamana bağlı olmaktadır.

2.  $\Gamma_D = \Gamma$  eşitliğinde, Dirichlet datası  $\vec{g} : \int_{\Gamma} \vec{n} \cdot \vec{g} = 0$  koşulunu sağlamak zorundadır.

### 4.3.3 Serbest Yüzey Denklemi

Kalıp doldurma analizinde, araştırmacılar sıvı metal ile havanın sınır bölgelerinde oluşan fiziksel olaylara yoğunlaşmışlardır. Bu sınır genellikle serbest yüzey olarak adlandırılmaktadır. Eğer akışkan hareket içersindeyse, serbest yüzey termodinamik ve mekanik olarak dengede değildir. Bununla birlikte, yüzeydeki momentumun naklini ve yüzeydeki denge farkı gereğinden fazla büyük olmadığı koşullarda değişimi inceleyebilmekteyiz. Bu sonuç, hızın ve momentumun serbest yüzeyi üniform bir şekilde geçmeye meylettiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, ısının ve momentumun taşınımıyla elde edilirler.

#### 4.3.4 Yüzey Gerilimi

Akış sistemi şematik olarak Şekil 4.5'te görülmektedir. Bu akış sisteminde küçük bir hacim  $\Omega$  ile belirtilmiştir ve  $\Gamma$  ise bu birim hacmin sınıridır.  $\Omega$  ve  $\Gamma$  uzayda sabitlenmiş değerlerdir. Serbest yüzey  $\Pi$  ile belirtilmiştir. İkinci şekilde gösterildiği gibi iki ayrı akışkanın serbest yüzeyi geçmesiyle,  $\bar{u}$  hızı zaman içinde sürekli bir değerdedir.  $\bar{u}_g = \bar{u}_l$ , burada  $\bar{u}_g$  gazın hızı  $\bar{u}_l$ . Serbest yüzeyin her iki tarafında da gerilim oluşmaktadır. Bunların ilişkisi, takip eden sırada yüzeyi geçen momentumun değişimiyle incelenmektedir.

$$\bar{\sigma}_l \cdot \bar{n} - \bar{\sigma}_g \cdot \bar{n} = \tau \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.26)$$



Şekil 4.5 Serbest yüzey ve serbest yüzeydeki gerilmeler(White, 1986).

Burada  $\tau$  yüzey gerilim katsayısı,  $R_1$  ve  $R_2$  eğriliğin temel radyüsleri. Verilen denklemden ve gerilmelerin yönlerinden yararlanılarak yüzey geriliminin iki zıt yöne doğru olan gerilmeler vasıtasıyla dengede tutulduğu söylenebilir. Yüzey gerilmeleri dökümde kesit alanı dar olan bölgelerde çok önemlidir. Yeteri derecede büyük kesit alanlarında güvenli bir şekilde ihmal edilebilir.

#### 4.3.5 Damlacık Denklemleri

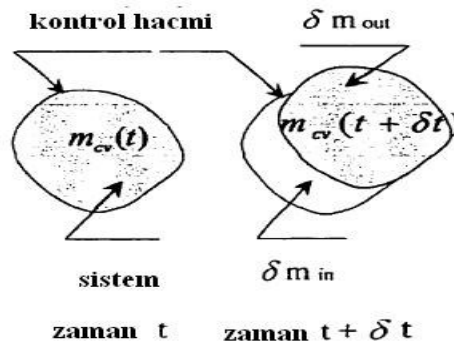
Bu bölümde, akışkanlar mekaniğinin ana denklemleri tek bir partikül için veya tek bir birim damlacık için incelenecektir. Bu denklemler, akışın yayılımını sayısal olarak modellemek için gerekli eşitliklerdir. Bu çıkarımlar bundan sonra açıklanacak olan “Renolds Transport Teorem” ine yapılan uygulamalarla ortaya çıkan denklemlerdir.

#### 4.3.5.1 Reynolds Transport Teoremi

“Renolds Transport Teorem” i, “Lagrangian” ve “Eulerian” yaklaşımı arasında bağlantı sağlayarak akışkanın termal ve dinamik durumu üzerinde ilgilenmektedir. Eğer  $B$  nin bir akışkanın alanı olduğu ve  $\beta$  'nin bu bölgede yoğunluğu temsil ettiği kabul edilirse, net kütle süreklilik denklemlerinde, takip eden den hacim:

$$\dot{B} = \int_S \rho \beta \vec{\omega}_i \cdot \vec{n}_i dS \quad (4.27)$$

Uzayda rasgele seçilmiş kontrol hacminin içersine akışkanın geçişi Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Kontrol hacmi, uzaya doğru hareket edebilir, dönebilir ve boyutu değişebilir.



Şekil 4.6 Sistem, kontrol hacmine doğru birbirini izleyen iki zamanda hareket etmekte(White, 1986)

Şuan kontrol hacminin içine hareket eden birim kütleyle ilgilenilmektedir( sistem olarak tanımlanan).  $t$  zamanında, sistemin sınırı kontrol yüzeyi olmaktadır. Bu zamanda, sistemin kütlesi sistemin kontrol hacmi olmaktadır.  $t + \delta t$  zamanında, sistemin bir parçası kontrol hacminin dışına hareket etmektedir. Sistemi terk eden kütle  $\delta m_{out}$ , o esnada sisteme giren kütle  $\delta m_{in}$ .

$B$  alanın miktarı, sistemi terk eden kütle(sistem) miktarıyla  $\delta B_{out}$  ve giren miktar  $\delta B_{in}$  'le ilişkili olmaktadır. Aşağıda yapılan tanımlamayla  $B$  alanındaki değişim şu şekilde elde edilmektedir:

$$\frac{dB_{sys}}{dt} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{B_{sys}(t + \delta t) - B_{sys}(t)}{\delta t} \quad (4.28)$$

$t$  zamanında sistemdeki  $B$  'nin miktarı,  $B$  'nin kontrol hacmindeki  $t$  zamanındaki miktarına eşittir:

$$B_{sys}(t) = B_{cv}(t) \quad (4.29)$$

$t + \delta t$  zamanında:

$$B_{sys}(t + \delta t) = \delta B_{out} + B_{cv}(t + \delta t) - \delta B_{in} \quad (4.30)$$

$t$  zamanında  $B_{sys}$  ifadesi için ve  $t + \delta t$  (4.28) numaralı denklem içinde tekrardan düzenlenirse:

$$\frac{dB_{sys}}{dt} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left[ \frac{B_{cv}(t + \delta t) - B_{cv}(t)}{\delta t} + \frac{\delta B_{out}}{\delta t} - \frac{\delta B_{in}}{\delta t} \right] \quad (4.31)$$

İlk iki terimden basit olarak  $B$  'nin kontrol hacmindeki değişim oranı :

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \left[ \frac{B_{cv}(t + \delta t) - B_{cv}(t)}{\delta t} \right] = \frac{dB_{cv}}{dt} \quad (4.32)$$

Kontrol hacmindeki  $B$  'nin miktarı  $\beta$  yoğunluğuyla kontrol hacminin üstündeki yoğunluğun integrasyonu ile elde edilmektedir.

Böylece,

$$\frac{dB_{cv}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{cv} \rho \beta dV \quad (4.33)$$

Diğer iki terimin ifadesiyle kontrol yüzeyini geçen net akışkan miktarı:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \left[ \frac{\delta B_{out}}{\delta t} - \frac{\delta B_{in}}{\delta t} \right] = \int_{cs} \rho \beta \bar{\omega}_i \bar{n}_i dS \quad (4.34)$$

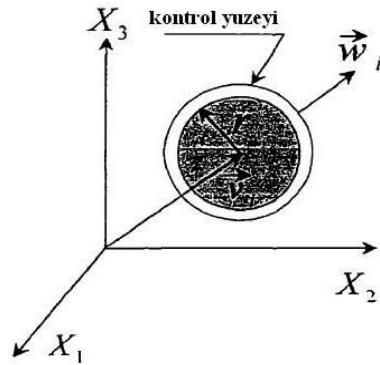
Sonuç olarak, “Reynolds Transport Teorem” i:

$$\frac{dB_{sys}}{dt} = \frac{d}{dV} \int_{cv} \rho \beta dV + \int_{cs} \rho \beta \bar{\omega}_i \bar{n}_i dS \quad (4.35)$$

Buradaki  $\bar{\omega}_i$ , akışkanın kontrol yüzeyi doğrultusundaki hızı,  $\bar{n}_i$  kontrol yüzeyinin normal vektörüdür.

#### 4.3.5.2 Tek Partikül Denklemi

“Reynold Transport Teorem”i akışkanın dağılım(yayılm) evrelerinin tanımlanmasında kullanılacaktır. Özel olarak damlacık veya partikül için kütle korunumu, momentumun ve enerjinin korunumu denklemlerin tanımlanmasıyla başlamaktadır. “Lagrangian” gözüyle bakıldığında, hareket eden birim kütleye uygulanıldığı görülmekte ve uzaysal boyuttaki değişen koşulları tanımlamamaktadırlar. Şekil 4.5 te,  $\vec{v}_i$ , partikülün atalet yönlerine göre hızı ve  $r$ , partikülün radyüsüdür. Partikülün küresel olduğu, fakat dönmediği kabul edilmektedir. Kontrol yüzeyi, partikülün sınır tabakasıyla aynı yüzeydedir. Partikülün yüzey özelliklerinden lokal akışkan özelliklerine, sınır bölgesinde geçişler olmaktadır.  $\omega_i$  hızı kontrol yüzeyinin içersine doğru kontrol yüzeyi yönündedir.



Şekil 4.5: Partikülü çevreleyen hareket eden kontrol yüzeyi(White, 1986).

#### 4.3.5.3 Kütlenin Korunumu

Kütlenin korunum kanununa “Reynolds Transport Teorem”i uygulanırsa:

$$\frac{d}{dt} \int_{cv} \rho_d dV + \int_{cs} \rho_s \bar{\omega}_i \bar{n}_i dS = 0 \quad (4.36)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $\rho_d$ , partikülün öz ağırlığı,  $\rho_s$ , kontrol yüzeyindeki akışkanın öz ağırlığı. Öz ağırlığın hacim üzerine integrali partikül için anlık partikül kütleini vermektedir,  $m$ . Aynı zamanda  $\omega_i$  ve  $\rho$  'nin kontrol yüzeyi üzerinde üniform olduğu farz edilirse, süreklilik denklemi şu şekilde yazılmaktadır:

$$\frac{dm}{dt} = -\rho_s \omega S_d \quad (4.37)$$

Yukarıdaki denklemde  $\omega$ , akış hız vektörünün büyüklüğü,  $\omega_i n_i$ . Eğer partikül buharlaşıyorsa,  $\omega$  pozitif değerdedir ve partikülün kütlesi zaman içerisinde azalmaktadır.  $S_d$  partikülün yüzey alanıdır.

#### 4.3.5.4 Lineer Momentumun Korunumu

Newton' un ikinci kanunundan:

$$\bar{F}_i = \frac{d(M\bar{U}_i)}{dt} \quad (4.38)$$

Bu kısımda, ana değişken  $\bar{U}_i$  dir. “Reynolds Transport Teorem”inin uygulanması, momentumun değişme oranını şu şekilde ifade etmektedir:

$$\bar{F}_i = \frac{d}{dt} \int_{cv} \rho_d \bar{U}_i dV + \int_{cs} \rho_s \bar{U}_{i,s} \bar{n}_j \bar{\omega}_j dS \quad (4.39)$$

yukarıda:  $\vec{U}_{i,s}$  iç referans düzlemine göre kontrol yüzeyindeki akışın hızıdır. Bu eşitlik,  $i$  yönü için vektörel bir denklemdir. Bir damlacığın ( a drophlet) dönmesine göre, partikülün içersindeki hız değeri:

$$\vec{U}_i = \vec{v}_i + \varepsilon_{ijk} \vec{\omega}_j \xi_k \quad (4.40)$$

Yukarıdaki denklemde  $\varepsilon_{ijk}$  değişken tensör,  $v_i$  iç referans düzlemine göre partikül çekirdek kütlelerinin hızı,  $\vec{\omega}_j$  partikülün dönme vektörü ve  $\xi_k$  çekirdekten olan uzaklıktır.  $v_i$  ve  $\omega_i$  partikülün iç kısmının üzerinde sabittirler. Kontrol hacmindeki momentumun integrali şu şekilde yazılmaktadır:

$$\frac{d}{dt} \int_{cv} \rho_d \vec{U}_i dV = \frac{d}{dt} (\vec{v}_i m) + \frac{d}{dt} \varepsilon_{ijk} \vec{\omega}_j \xi_k \int_{cv} \xi_k \rho_d dV \quad (4.41)$$

Kütle merkezinin tanımlanmasıyla birlikte, eşitliğin sağ tarafındaki ikinci kısım sıfıra eşittir, bu şekilde denklem aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\frac{d}{dt} \int_{cv} \rho_d \vec{U}_i dV = \frac{d}{dt} (\vec{v}_i m) = \vec{v}_i \frac{dm}{dt} + m \frac{d\vec{v}_i}{dt} \quad (4.42)$$

Eğer partikül buharlaşır yada yoğunlaşır, sonrasında partikül kütle merkezine göre yüzeyinin hızı  $\dot{r} \vec{n}_i + \varepsilon_{ijk} \vec{\omega}_j r_k$  olmaktadır,  $\dot{r}$  yüzeyin regresyon oranıdır. Böylece kontrol hacmini geçen akışkanın iç referans düzlemindeki hızı:

$$\vec{U}_{i,s} = \vec{v}_i + \varepsilon_{ijk} \vec{\omega}_j r_k + (\dot{r} + \omega) \vec{n}_i = \vec{v}_i + \varepsilon_{ijk} \vec{\omega}_j r_k + \omega \vec{n}_i \quad (4.43)$$

Yukarıda, rahat bir şekilde işlem yapabilmek için, regresyon işleminin oranı ve  $(\dot{r} + \omega) \vec{n}_i$  akışkan hızı  $\omega \vec{n}_i$  ile yer değiştirmiştir. Yapılan bu işlemlerden sonra kontrol yüzeyindeki net akışkanın net momentumu:

$$\int_{cs} \rho_s \vec{U}_{i,s} \vec{n}_j \vec{\omega}_j dS = \int_{cs} \rho_s (\vec{v}_i + \varepsilon_{ijk} \vec{\omega}_j r_k + \omega \vec{n}_i) \vec{n}_j \vec{\omega}_j dS \quad (4.44)$$

Buradaki  $\vec{v}_i$  yüzey konumunun bir fonksiyonu değildir. Süreklilik denkleminin kullanılmasıyla :

$$\vec{v}_i \int_{cs} \rho_s \bar{n}_j \bar{\omega}_j dS = -\vec{v}_i \frac{dm}{dt} \quad (4.45)$$

Yapılan işlemlerden sonra, partikül için momentum eşitliği:

$$\vec{F}_i = m \frac{d\vec{v}_i}{dt} + \int_{cs} \rho_s \omega' \bar{n}_i \bar{\omega}_j \bar{n}_j dS + \epsilon_{ijk} \bar{\omega}_j \int_{cs} \rho_s r_k \bar{n}_j \bar{\omega}_j dS \quad (4.46)$$

#### 4.3.5.5 Enerjinin Korunumu

Termodinamiğin birinci kanunda belirtildiği gibi:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (4.47)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $\dot{Q}$  ve  $\dot{W}$ , birim zamanda kontrol hacmindeki değişim oranıdır.  $E$  aşağıda belirtildiği gibi ifade edilen toplam enerjidir.

$$E = M.e + S.\delta \quad (4.48)$$

Yukarıda belirtilen eşitlikte  $e$  iç enerjii ve kinetik enerjii temsil etmektedir.  $\delta$  yüzey gerilimini göstermektedir. Verilen enerji denkleminde Reynolds transport teoremini uygulanırsa :

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{d}{dt} \left[ \int_{cv} \rho_d e dV + \int_{cs} \rho_s e_s \bar{\omega}_j \bar{n}_j dS \right] + \frac{d}{dt} (S.\delta) \quad (4.49)$$

Partikülün dönmediği bununla birlikte kendi içerisinde bir hareketinin olmadığı kabul edilerek damlacığın iç hızı  $\vec{v}_i$  olarak kabul edilmektedir. Kontrol hacmindeki enerjideki değişim oranı ( eşitliğin sağ tarafındaki birince ve üçüncü kısım) :

$$\frac{d}{dt} \int_{cv} \rho_d e dV + \frac{d}{dt} (S \cdot \delta) = \frac{d}{dt} \int_{cv} \rho_d \left( i + \frac{\vec{v}_i \cdot \vec{v}_i}{2} \right) dV + \delta \frac{dS}{dt} \quad (4.50)$$

$$= \frac{d}{dt} \left( m \frac{\vec{v}_i \cdot \vec{v}_i}{2} \right) + \frac{d}{dt} (m \vec{i}) + \frac{2\delta}{r} \dot{r} S$$

Burada  $\vec{i}$  yüzey geriliminin sabit olarak kabul edilmesiyle partikülün ortalama iç enerjisidir. Sonrasında, (4.49) numaralı denklemin ikinci terimini değerlendirilmektedir, akışın enerji denklemi:

$$e_s = i_s + \frac{\vec{U}_{i,s} \cdot \vec{U}_{i,s}}{2} \quad (4.51)$$

Burada  $\vec{i}_s$ , yüzeydeki spesifik iç enerji,  $\vec{U}_{i,s}$  iç referans düzlemine göre iç hız değerini oluşturmaktadır. Bu hız şu şekilde belirtilmektedir:

$$\vec{U}_{i,s} = \vec{v}_i + \vec{\omega}_i + \dot{r} \vec{n}_i = \vec{v}_i + \vec{\omega}_i \quad \text{burada} \quad \vec{\omega}_i = (\omega + \dot{r}) \vec{n}_i \quad (4.52)$$

$\vec{U}_{i,s}$  ve  $e_s$  akışın enerji denkleminde yerlerine konulmakta ve denklem yeniden düzenlenmesiyle (yüzeyin üzerindeki akışkan kütlelerinin zamana göre integralinin  $-(dm/dt)$  olduğu daha önce belirtilmişti) :

$$\int_{cs} \rho_s e_s \vec{\omega}_j \vec{n}_j dS = - \left( \frac{\vec{v}^2}{2} + \frac{\omega'^2}{2} \right) \frac{dm}{dt} + \vec{v}_i \int_{cs} \rho_s \omega' \omega \vec{n}_i dS + \int_{cs} i_s \rho_s \vec{n}_j \vec{\omega}_j dS \quad (4.53)$$

(4.50) ve (4.53) denklemlerinin birleştirilmesiyle kontrol hacminde,  $t$  zamanında, sistemdeki enerjinin değişim oranı:

$$\frac{dE}{dt} = m \vec{v}_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} - \frac{(\omega')^2}{2} \left( \frac{dm}{dt} \right) + \frac{d}{dt} (m \vec{i}) + \vec{v}_i \int_{cs} \rho_s \omega' \omega \vec{n}_i dS + \int_{cs} \rho_s i_s \vec{\omega}_j \vec{n}_j dS + \frac{2\delta}{r} \dot{r} S \quad (4.54)$$

#### 4.3.5.6 Partiküle Olan Isı Transferi

Bu olayda partiküller arasında iki yolla ısı transferi gerçekleşmektedir: radyasyon ve iletim (conduction). Eğer partikülün gri renkte olduğunu kabul edersek, partiküldeki net radyoaktif ısı transferi:

$$\dot{Q}_r = 4\pi r^2 (\alpha_1 J - \varepsilon \sigma_1 T_d^4) \quad (4.55)$$

yukarıdaki eşitlikte  $\alpha_1$  iletim,  $\varepsilon$  taşınım,  $J$  radyasyon,  $\sigma_1$  Stephan-Boltzmann sabitidir.

Net ısı iletimiyle olan ısı transferi (ısı akış vektörünün integraliyle elde edilmektedir).

$$\dot{Q}_c = -\int_{cs} \vec{q}_{i,c} \cdot \vec{n}_i dS \quad (4.56)$$

$\dot{Q}_c$  pozitif değerlerdeyken sıcaklık partikülün içersine doğru olmaktadır.

#### 4.3.5.7 Partiküllerin Çevresindeki İş Miktarı

İş sistemi çevreleyen iç ve dış kuvvetlerin vasıtasıyla ortaya çıkmaktadır. Burada sadece yerçekimi gücü iç kuvvet olarak kabul edilmektedir. Yerçekimi kuvvetinden kaynaklanan iş miktarı şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\dot{W}_b = -\vec{F}_{i,b} \cdot \vec{v}_i \quad (4.57)$$

Küçük bir alana ( $dS$ ) basıncından kaynaklanan iş miktarı basınç kuvvetinin element üzerindeki davranışının noktasal ürünüdür ve elementi geçen hızıdır. Toplam kontrol yüzeyine integralinin alınmasıyla kontrol yüzeyinin üzerindeki iş miktarı elde edilmektedir. Sistemin çevresi tarafından yapılan iş miktarını şu şekilde elde edebiliriz:

$$\dot{W}_p = \int_{cs} (\vec{v}_i + \vec{\omega}_i) p_s \vec{n}_i dS \quad (4.58)$$

Benzer olarak, sistemdeki kesme kuvveti tarafından yapılan iş miktarı şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\dot{W}_s = \int_{cs} (\vec{v}_i + \vec{\omega}_i) \tau_{ji} \vec{n}_j dS \quad (4.59)$$

İş miktarına, basınçtan ve kesme kuvvetinden oluşan kuvvetlerin birbirine eklenmesiyle ( $\vec{v}_i =$  sabit):

$$\int_{cs} (\vec{v}_i + \vec{\omega}_i) (p_s \vec{n}_i - \tau_{ji} \vec{n}_j) dS = \vec{v}_i \int_{cs} (p_s \vec{n}_i - \tau_{ji} \vec{n}_j) dS + \int_{cs} p_s \vec{n}_i dS + \int_{cs} \omega_i \tau_{ji} \vec{n}_j dS \quad (4.60)$$

Eşitliğin sağ tarafındaki ilk integral damlacığın üzerindeki yüzey kuvveti,  $\vec{F}_s$ .

İkinci integralin yeniden düzenlenmesiyle :

$$\int_{cs} p_s \vec{n}_i dS = \int_{cs} p_s (\vec{\omega}_i + \dot{r} \vec{n}_i) dS = \int_{cs} \rho_s \frac{p_s}{\rho_s} \vec{\omega}_i \vec{n}_i dS + \int_{cs} \dot{r} p_s dS \quad (4.61)$$

Üçüncü integral sıfıra eşittir, çünkü  $\vec{\omega}_i$  yüzeyin normali olan bir vektör ve  $\tau_{ji} \vec{n}_j$  partikülün yüzeyine teğet olan bir düzlemde bulunmaktadır. İlişkili olan bütün eşitliklerin enerji denkleminde yerlerine konulması ve uygun bir şekilde düzenlenmesiyle:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} (m \vec{i}) + \vec{v}_i \left( m \frac{d\vec{v}_i}{dt} + \int_{cs} \rho_s \dot{\omega} \vec{\omega}_i dS - \vec{F}_{i,b} - \vec{F}_{i,s} \right) - \frac{(\dot{\omega})^2}{2} \frac{dm}{dt} + \frac{2\delta}{r} \dot{r} S + \int_{cs} \left( i_s + \frac{p_s}{\rho_s} \right) \rho_s \vec{\omega}_i \vec{n}_i dS \\ & = \dot{Q}_r - \dot{Q}_c - \int_{cs} \dot{r} p_s dS \end{aligned} \quad (4.62)$$

(4.50) numaralı eşitliğin gösterdiği gibi, partikülün dönmediği farz edilmektedir, denklemin sol kısmındaki ikinci terim olan  $\vec{v}_i$  nin değeri sıfırdır. Aynı zamanda regresyon oranının yüzey üzerinde düzenli olduğu farz edilmektedir ve  $\vec{p}_s + 2\sigma/r$ 'nin kombinasyonu damlacığın içerisindeki basınçtır,  $p_d$ . Böylelikle denklem şu duruma indirgenir:

$$m \frac{d\bar{i}}{dt} + \bar{i} \frac{dm}{dt} - \frac{\omega^2}{2} \frac{dm}{dt} + \int_{cs} h_s \rho_s \bar{\omega}_i \bar{n}_i dS = \dot{Q}_r + \dot{Q}_c - \dot{r} \rho_d \frac{P_d}{\rho_d} S \quad (4.63)$$

Burada  $h_s = i_s + \frac{P_d}{\rho_d}$  kontrol yüzeyini geçen akışkanın entalpisidir.

$\dot{r} \rho_d S$  çarpanı, damlacığın kütesinin zamana göre değişim miktarı  $\frac{dm}{dt}$ 'yi göstermektedir.

Ayrıca akışkanın hızının oluşturduğu kinetik enerji farkı iki ayrı evrede entalpiyle karşılaştırıldığında çok küçük değerlerdedir. Bu kabullerin doğrultusunda yapılan sadeleştirmeler neticesinde partikülün enerjisini veren denklem şu şekilde olmaktadır:

$$m \frac{d\bar{i}}{dt} = \dot{Q}_r + \dot{Q}_c - \frac{dm}{dt} (\bar{h}_s - \bar{h}_d) \quad (4.64)$$

burada  $\bar{h}_d = \bar{i} + \frac{P_d}{\rho_d}$  dir.

### 4.3.6 Ortalama Hacimde Damlacık Denklemleri

Uygulamada, damlacıkların karışımıyla uğraşma zorunluluğu bulunmaktadır. Bu karışım içerisindeki her bir noktanın akış özelliklerini çözümlenmek uygulamada yeri olmayan bir yaklaşımdır. Akış içerisinde ortalama özelliklerin göz önüne alınma zorunluluğu bulunmaktadır. Bununla birlikte mevcut hacimden göz önüne alınan noktalara göre yorum yapmak ve çözüme gitmek gerekmektedir. Aşağıda, geleneksel yaklaşımla ele alınmış sürekli durumlar için korunum kanunları ortalama özelliklere göre incelenecektir.

#### 4.3.6.1 Hacim Ortalaması

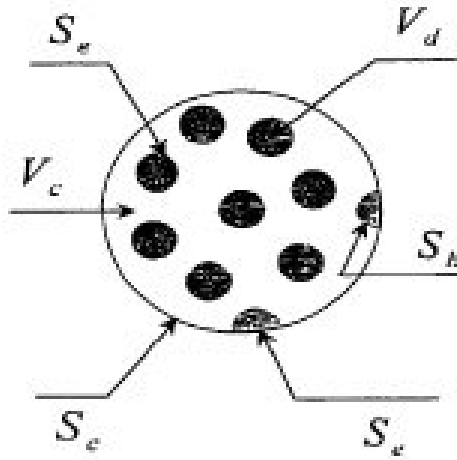
Küresel bir hacim (CV), bu akışkan karışımının çevresi ve partiküller Şekil 4.6'da gösterildiği gibi göz önüne alınmaktadır. Ortalama hacim  $V$ , sürekli olarak sistemin içerisinde bulunan hacim ( $V_c$ ) ve içeride yayılmakta olan hacmin ( $V_d$ ) toplamına eşittir. Bu küresel hacmin merkezine ortalama özellikler elde edilmektedir. Sürekli akışın olduğu evrede bazı özellikleri

belirtmek için  $B$  kullanılırsa, aşağıda belirtilen iki çeşit ortalama değer dikkate alınmaktadır.

Sürekli akışın olduğu evrede kontrol yüzeyinin alanı:  $S_c$  ( $mm^2$ ),

Kontrol hacminin yüzey alanı:  $S$  ( $mm^2$ ),

Böylece,  $S = S_c + S_s$  ve  $S_d = S_b + S_e$  olmaktadır.



Şekil 4.6 Yüzeylerin tanımlanması(White, 1986).

Gradyanın ortalama hacmi, ortalama hacmin gradyanına ek olarak sürekli akışın ve yayılımın olduğu ara bölgede  $B$  integralini de içermektedir.

$$\frac{\partial \bar{B}}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{B}}{\partial x_i} + \frac{1}{V} \int_{S_d} B n_i dS \quad (4.65)$$

Zamana bağlı ortalama hacim:

$$\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} + \frac{1}{V} \int_{S_d} B v_i dS \quad (4.66)$$

Bu denklemler korunum yasalarında ortalama hacmin elde edilmesi için kullanılacaktır, diğer uygulamalara dahil edilmemektedirler.

#### 4.3.7 Döküm Analizinde Kullanılan Birleştirilmiş Diferansiyel Denklemler

Döküm analizi, erime ve katılaşma süreçlerinin fiziksel olarak değişimleri doğrultusunda serbest yüzey, akış alanı ve termal alan diferansiyel denklemlerinin karşılıklı olarak birleştirilmesiyle oluşturulan kompleks ve nonlinear bir prosestir. Birleştirilmiş denklemler iki farklı kategoride sınıflandırılabilirler:

1) Basıncılı döküm simülasyonunda, problemler çok aşamalı, çok bileşenli sistemlerden oluşmaktadır. Bu aşamalar ve bileşenler birbirini etkilemektedirler ve güçlü bir şekilde birleştirilmişlerdir.

2) Birleşme durum değişkenlerinin seviyesinde,  $\vec{u}$ ,  $p$ ,  $t$ ,  $\rho$ , ve sistemdeki denklemlerdedir. Durum değişkenlerinin birleşme seviyesinde birbirleriyle olan ilişkisi çoğunlukla yapılan kabullerle basitleştirilmiş ve Navier-Stokes denklemi, enerji denklemi, serbest yüzey denklemi vb...gibi fiziksel olarak anlamlı denklemler altında gruplandırılmıştır. Eğer bu denklemler üzerinde dikkatli olarak fiziksel deneyler yapılırsa, bu denklemler arasında zayıf olan denklem ikilisi bulunabilir ve bunun sonucunda bu denklemler arasında ayırım yapılabilir

Fiziksel problemin doğası ve matematiksel formülasyonu, birleştirilmiş denklemlerin problemin çözümüne katkıda bulunmasına veya bulunmamasına karar vermektedir. Örnek vermek gerekirse, eğer ısı akışı sabit durumda ise sadece enerji denklemi termal akışı yönetmektedir, akışkanlar mekaniğinde enerji denklemi ve Navier-Stokes denklemi arasında bir uyum gerekmemektedir. Bu bağlamda, enerji ve Navier-Stokes denklemi arasındaki birleştirme işlemi bozularak enerji denkleminde, sabit hız alanı kullanılarak çözüme ulaşılmaktadır. Simülasyon çözümlerinde en gerçekçi problem çözümü, birleştirilmiş denklemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle birleştirme işlemi çok kritiktir.

Değişik koşullar altında çok geniş boyutlu, döküm kalıbı tasarımcılarının karşısına çıkan problemler tarzındaki durumları analiz etmek için, modellerin ve araçların spesifik analiz koşullarını birebir yansıtması gerekmektedir. Nümerik örnekler bazı birleştirilmiş sitemlerin varlığını kanıtlamaktadır(Dai, 1994).

#### 4.4 Nümerik Simülasyonda Temel Esaslar

Ara yüzeyde oluşan akışı simüle etmek için iki ana yöntem bulunmaktadır: “capturing” ve “tracking”. “Capturing” metodunda, veritabanı hesaplanan tüm bölgede tanımlanmaktadır. Bu bölgelerdeki herhangi bir süreksizlik, ara yüzeydeki hız miktarının artmasına neden olmaktadır. Bu metodun dezavantajı, tanımlanan alan üzerindeki değişimle birlikte çok sayıda hata oluşturmaktadır. Genellikle sayısal değişimler olmaktadır, bunun sonucunda ara yüzeyde ortaya çıkan süreksizlikler çabukça kaybolmaktadır.

“Interface tracking” diğer bir “Capturing” metodudur. “Interface tracking”, ara yüzeyi ek hesaplamalı elementler kullanarak tanımlamaktadır. Bu, mevcut ön koordinatlarının(front tracking) özelleştirilmesiyle birlikte doğrudan yada dolaylı olarak hacimsel sürtünmenin her bir kontrol hacminde(volume tracking) kullanılmasıyla başarılabilmektedir. Burada, önemli bir süreç teşkil eden üç önemli “front tracking” teknik bulunmaktadır: “Front tracking”, “Level set method” ve “Volume-of-fluid” (VOF). Aynı zamanda, VOF metodu kabul edilebilir değerler dahilinde hassasiyeti uygun ve görelî olarak kullanımı kolay olduğundan geniş kullanım alanına sahiptir.

“Interface tracking” metodu genel olarak aşağıda takip eden denklemi çözümlenmektedir:

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (u\rho) = 0 \quad (4.67)$$

Burada  $u$  hız,  $\rho$  ise yoğunluktur.

Sıkıştırılmaz akış için  $\nabla u = 0$  dır. Bunun üzerine denklem (4.67) değiştirilirse,

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot u = 0 \quad (4.68)$$

elde edilmektedir.

##### 4.4.1 Front Tracking

“Front tracking” metodunun ara yüzeyi direkt olarak Lagrangian’in işaretlerini kullanarak tanımlamaktadır. İşaretler ön tarafın formuna bağlantılıdır, bunun manası sabit konumda olan “Eulerian” ağ yapısının içersine hareket etmektedir. Ara yüzey deforme olur veya hareket ederse ara yüzün noktaları eklenir, silinir ve yeniden bağlanır(Herman, 1988). Açık ve net bir yapıda olan ara yüzler bilgileri ağ noktalarının üzerinde düzgün bir dağıtım fonksiyonu kullanarak dağıtmaktadır. Bunun sonucunda bölge kararlılığı, düzgünlüğü ve sayısal

yayılmının düşmesini sağlamak için sonlu bir kalınlığa sahip olmaktadır. Buna karşın, “front tracking” metodu iki boyutlu rasgele seçilmiş topolojilerde başarılı sonuçlar vermektedir ve üç boyutlu problemlerde uygulaması zordur.

#### 4.4.2 “Level Set” Metodu

“Level Set” metodu on yıl önce Osher ve Sethian tarafından ortaya konulmuştur. O zamandan bugüne bu yöntemle çokça uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Döküm prosesi bu alandaki popüler uygulamalardandır, bunun asıl nedeni matematiksel formüllendirmesinin sayısal analizde büyük kolaylık sağlamasıdır.

“Level Set” metodunda ara yüzey, tanımlanan bazı fonksiyonların seviyesini göstermektedir,  $\phi$ , tanımlandığı gibi  $\phi(x, t = 0) = \pm d$ , buradaki  $d$ ,  $x$ 'ten ara yüze olan mesafedir. Eğer  $d$  ara yüzün dışında ise, işareti pozitif olmak zorundadır, negatif ise içeride olmak zorundadır.  $\phi = 0$  olduğu durumlarda, sıfır seviyesi ara yüzeye birleşmektedir. Hareket eden ara yüzey için dinamik eşitlik şu şekilde yazılmaktadır:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + F|\nabla \phi| = 0 \quad (4.69)$$

Burada  $F$  normal doğrultusunun dışına doğru ara yüzeyin hızıdır. Ara yüzeyde oluşan akış için,  $F$  eğrisel olarak bağımlı hız, akışın hızı normalden ara yüzeye doğru olmaktadır,  $\vec{n}$  ara yüzey normalidir.

$$\vec{n} = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (4.70)$$

“Level Set” yaklaşımının güçlü olduğu iki nokta bulunmaktadır. Bunlardan birincisi “Level Set” yaklaşımıyla  $\phi$  fonksiyonun serbest yüzey hesaplamalarında çok önemli olan, ara yüzeyin normal ve eğriliği çok kolay bir şekilde hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımın ikinci avantajı, ön kısmın yüzey özellikleri ani bir şekilde değiştiğinde hesaplama için özel prosedürlere ihtiyaç olmamasıdır. Her bir zaman aralığında,  $\phi$  fonksiyonun değeri güncellenmektedir ve  $\phi$  her yeni anda ara yüzeydeki bölgelerde, sıfır değerinde olmaktadır.

“Level Set”  $\phi$  fonksiyonunun değerinin korunması, kütle korunumu manasına gelmemektedir. Bu metodun test edilmesiyle, büyük miktarda kütle kaybının olduğu tespit edilmiştir.

#### 4.4.3 Volume-Of-Fluid Yaklaşımı

Volume-Of-Fluid (VOF) yaklaşımı, serbest yüzeydeki akışı modellemek için yaygın olarak kullanılan metotlardandır. Nispi olarak uygulanması kolay, genel itibariyle güçlü bir yöntemdir. Bütün VOF metotları, akışkanın küçük bir miktarından birim hacim alınmasıyla ara yüzün üzerinde başlamaktadır. Alınan hacim miktarı,  $vof$ , çoğunlukla bir birim hücrelik akışkanın hacminin tüm birim hücrelerin hacmine oranlanması olarak tanımlanmıştır. Bundan dolayı, birim hücrede akışkan olmadığı zaman  $vof = 0$ , birim hücre akışkanla dolu olduğu zaman  $vof = 1$  ve karışmış birim hücre sıvı/hava ara yüzü içeriyorsa  $0 < vof < 1$  dir. Böylece, ara yüzün gerçek geometrik değerlerini kullanmak yerine, birim hacim ara yüzden direk olmayan yoldan süreklilik denklemlerinde kullanılmaktadır.

Sıkıştırılamaz akış için, kütle korunumu hacmin korunumuna eşittir, bu nedenle oluşan herhangi bir akışın ara yüzeyde meydana getirdiği hareket  $vof$  un korunumuyla çözümlenmektedir. Sonuç olarak, sonlu hacimler metodunun korunumu, hacim sınırlandırılmasıyla sağlanmaktadır ve sayısal hataların düzeltilmesi için, hesaplamalarda her bir akışkan için kütle ve hacmin korunumu sağlanmış olunur.

Hemen hemen aynı, küçük hacimlerdeki ara yüzde birbirinden çok farklı olmayan topolojilerin sonuçları, ara yüzeyin kesin konumu elde edilen zamandan biraz farklı değerlerdedir. “Piecewise Polynomial Curve” her bir hücredeki ara yüzey topolojilerini tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. “Polynomial” lerin dizimi kullanılan metoda ve denklemin mertebesine bağlıdır. Çevreleyen birimlerdeki hacmin miktarı “Polynomial” in katsayısını belirlemede kullanılmaktadır. “Piecewise” eğrisiyle temsil edilen birim hacim VOF’la kesin bir uyum içinde olmak zorundadır. Bu “Piecewise” ara yüzeyinin yapılan yaklaşımlarla son yerinin ayarlanmasıyla tamamlanmaktadır.

Ara yüzeyin süreksizliğini sağlamak amacıyla, hacimsel akış geometrik olarak geride kalan akışın karakteristiğinin izlenmesiyle elde edilmektedir ve belli bir zaman aralığında yüzeye aktarılan akışkan miktarına da karar verilmektedir( eğrinin altında kalan alan). Hacim miktarları güncellenerek yeni zaman aralığı için süreklilik denklemi kullanılarak çözümlenmektedir (Ousterhout, 1994).

Price ve Rowe VOF formülasyonun doğal olarak kütle korunumu konusunda tartışmakta ve normalden ön kısma doğru olan sayısal yayılımı elemine etmektedirler. İlk olarak ortaya konulan VOF algoritmalarından biri ara yüzeyin yatay ve dikey doğrularla basitleştirildiğini

göstermektedir ve elde edilen alan, birim hücredeki akışkanın hacmine eşit değerlerdedir(Simple line interface calculation or SLIC )(P. Mathews ve G. Krett, 1990). Young'in geliştirek ortaya koyduğu ileri seviye VOF metodu PLIC ( Piecewise Linear Interface Calculation) olarak bilinmektedir. PLIC eğimli "piecewise" doğrusundan yeniden oluşturulmuş ara yüzeye uygulanmaktadır. Kabul edilen ara yüz geometrisi, ara yüz yapısı ve akışkanın hacminin hesaplanması VOF metodundaki ana unsurlardandır. SLIC ve PLIC metotları, takip eden sıraya göre şu şekilde açıklanmaktadır.

#### 4.4.3.1 SLIC

"Simple line interface calculation" (SLIC) iki boyutlu yatay veya dikey doğruları ara yüzeyi göstermek için kullanılmaktadır. İki komşu hücredeki akışkanın varlığı (koordinat eksenleri taşınmıştır) sadece bu doğrunun dış normaline karar vermektedir. Adımların ve gereken taşımaların esas olarak yapılması tek bir boyutta olmaktadır. "Strang" in ayırma yöntemiyle, çok boyutlu problemleri tek boyutlu bir grup olarak ele almak doğrudur. Akışkanın değişik bir doğrultuya taşınmasıyla birlikte doğrunun yönlendirilmesi çeşitli şekillerde olmaktadır.

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.965	0.716	0.215	0.0	0.0
1.0	1.0	0.825	0.215	0.0
1.0	1.0	1.0	0.716	0.0
1.0	1.0	1.0	0.965	0.0

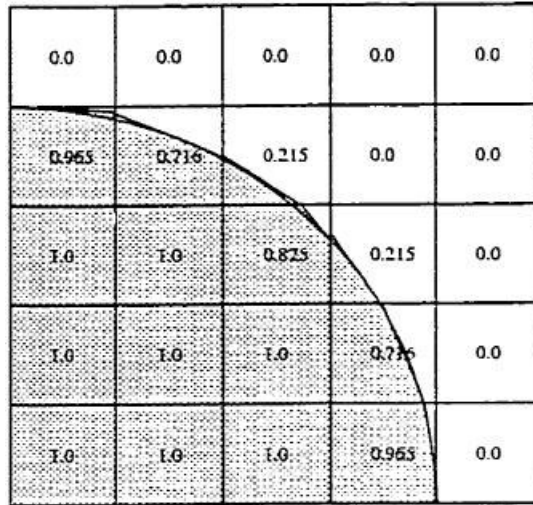
Şekil 4.7 Ara yüzeyin SLIC yaklaşımıyla yeniden oluşturulması(Price, 1998)

Gerekenden fazla yapılan basitleştirmeler, malzemede fiziksel olmayan dönüşümlere neden olmaktadır. "SLIC" metodu, fiziksel olarak manası olmayan sayısal sonuçlar ortaya koymaktadır. Bunun anlamı malzeme parçaları fiziksel olmayan şekilde ara yüzden dışarıya atılmaya ve akışkanın ana yapısından ayrılmaya meyletmektedir. "SLIC" metodu, dezavantajlarının yanında hala yaygın olarak kullanılan ve uygulaması kolay bir yöntemdir.

#### 4.4.3.2 PLIC

Young, *vof* yaklaşımını yaygın olarak referans alınan PLIC ( piecewise linear interface calculation) yöntemiyle geliştirmiştir. PLIC eğimli “piecewise” doğrusundan yeniden oluşturulmuş ara yüzeye uygulanmaktadır. PLIC’in hassasiyeti tamamıyla doğrunun eğiminin hesaplanmasında kullanılan metoda bağlıdır.

“SLIC” metodundan farklı olarak, “piecewise” yaklaşımı koordinat doğrultularındaki doğruları hizalamamaktadır. Diğer bir deyişle, “PLIC” yaklaşımı çok boyutludur ve operatör ayırma yaptığı zaman ilişkisiz bir şekilde ağ yapısına doğru bir taşınma gerçekleşmektedir. Aynı zamanda yeniden yapılandırma adımları her bir yön için yeniden tekrarlanmalıdır.



Şekil 4.8: Ara yüzeyin PLIC yaklaşımıyla yeniden oluşturulması(Price, 1998)

Şekil 4.7 ve şekil 4.8’de, yapılan geometrik kabullerin ara yüzün yeniden yapılandırılmasını çok önemli rol yaptığını söylemek mümkündür. “Piecewise” in lineer olarak yeniden yapılandırılması çok daha hassas ara yüzeylerin tanımlanmasına imkan vermektedir. PLIC metodu ara yüzeydeki seçilen birim elemanlar büyük ölçekte olduklarında çözüm işleminde çok güçlüdür.

Fakat birim elemanlar küçük ve yüksek kalitede seçilecek olursa, sonuçları iyi düzeyde tutmak zorlaşmaktadır. Bunun anlamı, PLIC metodu düzgün, yüksek derecede eğriselliğe sahip bölgelerde uygun sonuçlar vermektedir. Birçok simülasyon uygulamasında kullanılan PLIC metodu Young’un ortaya koyduğu sınırlar çerçevesindedir.

Sayısal yüzey geriliminin gösterimi için yapılan kabuller yeniden oluşturma işleminin

doğasında bulunmaktadır. Eğer var olan ağ yapısı yeniden düzenlenir ya da polinomial yapının diziliş sırası ikinci dizilimden üçüncü dizilime doğru artış gösterirse yüksek derecede eğriselliğe sahip bölgelerdeki sayısal yüzey gerilimi azalma göstermektedir. Fakat PPIC (piecewise parabolik interface calculator) işlem zamanı açısından PLIC e göre daha pahalı bir tekniktir(Price, 1998).

## 5. BİLGİSAYAR DESTEKLİ SİMÜLASYON UYGULAMASININ İNCELENMESİ

### 5.1 Giriş

Spot lambaları, genellikle polis ve itfaiye araçlarının ön bölümüne monte edilerek araç önündeki canlı veya cansız objelerin tanımlanmasında kullanılan lambalarıdır(Şekil 5.1). Bununla birlikte spot lambalarının kullanımı yolcu tipi askeri ve özel araçlarda kullanılmaktadır. Spot lambaları dikey ve yatay konumda kullanıma imkan verecek şekilde araçların ön barlarına monte edilmektedir. Montajlı düzenekte yer alan şaft ve eğik dişliler spot lambasının hareketini sağlamaktadır.



Şekil 5.1 Aracın ön kısmına monte edilmiş spot lambası.

Spot lambaları fonksiyonel açıdan, mukavemet ve görünüm açısından:

- Montajlı düzenek içerisindeki şaft ve eğik dişliler spot lambasının dönme hareketini sağlayacak şekilde dizayn edilmelidir.
- Montajlı parçalar, dış ortamdaki rüzgar ve korozyon etkisine uygun dayanımda olmalıdır.
- Spot lambası gerekli mekanik hareketleri, elektriksel fonksiyonları sağlamalı ve çok farklı sıcaklık ve hava koşullarında görünümünü korumalıdır.

Montajlı düzenek, araçların içinde ve dışında olmak üzere iki adet dirsek şeklinde parçadan oluşmaktadır(Şekil 5.2). Fonksiyonel açıdan bu parçaların nem, kir ve toz gibi zararlı etkilerin elektriksel ve dişli sistemine nüfuz etmesini önlemelidir. Bununla birlikte dış destek şaftı elektriksel devre içerisinde topraklama görevi görmektedir. Parçalar üzerindeki yüzeyler

düzgün, reflektör krom kaplamalı, ezilmeye, korozyona ve aşınmaya mukavim yapıda olmalıdır.



Şekil 5.2 Montajlı parçalar içerisinde dirsek kısımları.

Araçların dış kısmında kalan dirsek, parçası içerdeki kısmına göre daha yüksek performans gerektiren ortam koşullarına maruz kalmaktadır. Bu kısımda bulunan dirsek, spot lambasının tüm ağırlığını taşımakta ve dişli sistemini korumaktadır. Dış kısımdaki dirsek parçasının, destek şaftına ve spot lambasına montajı; düzgün hareket kabiliyetini, kuvvet aktarımını sağlayabilmek, elektriksel topraklamayı ve nemden korumayı sağlayabilmek için hassas bir şekilde gerçekleştirilmelidir.



Şekil 5.3 Dirsek parçasının çeşitli yönlerden resimleri

Simülasyonu yapılacak dirsek parçası 100 mm uzunluğunda, 37.5 mm yüksekliğindedir. Parça üzerindeki en büyük çap 30mm, en küçük çap 20 mm ve 168 gr ağırlığındadır(Şekil5.3). Bununla birlikte dirsek parçasında üç adet ufak delik, iç kısmında

feder, vida deliği ve iç kısmındaki silindirik yapıyı kuvvetlendirmek için yardımcı federler bulunmaktadır. Yüzeyde oluşabilecek hatalar ve iç kısımda meydana gelebilecek porozite parçadaki mukavemeti, rijitliği ve dış yüzeyde yapılacak kaplamanın özelliklerini düşüreceği için istenmemektedir. Parçadaki montaj kısımlarında +/-0.03 mm ve +/-0.05 mm ise parça genelinde kabul edilmiş genel toleranslardır.

## **5.2 Basınçlı Döküm Prosesi**

Dirsek parçasının 50 ton'luk sıcak kamara basınçlı döküm makinesiyle 10000 adet üretilmesi ön görülmüştür. Bu tarz bir parçanın basınçlı döküm tekniğiyle üretilmesinin şu gibi avantajları olmaktadır:

- Bu teknikle çok sayıda ve hassas toleranslar dahilinde parçalar imal edilerek bu parçalarda diğer üretim metotlarından kaynaklanabilecek ölçüsel hataların sebep olabileceği sızdırmazlık ve elektriksel kaçak etkilerinin bertaraf edilmesi.
- Yüzey kalitesinin iyi olması nedeniyle parlatma işleminin daha az olması ve bununla birlikte üretim zamanının ve maliyetlerin düşmesi.
- Hurda miktarının azaltılmasıyla, verimlilik ve malzemedен yapılan tasarruf artmaktadır.
- Bu teknikle parçadan beklenen kompleks geometrik özellikler, hassas toleranslar, yüzey kalitesindeki uygunluk ve düşük üretim maliyetleri sağlanmaktadır.

### **5.2.1 Metal Alaşımının Seçimi**

Üretilcek parçanın performans özelliklerine uygun işlenebilirliğinin sağlanması için, daha uygun metal alaşımlarının seçilmesi gerekmektedir. Bu noktada Zamak#3, Zamak#5 ve Zinc ZA-8 önerilen alaşımlar arasındadır. Bu alaşımların mekanik özellikleri aşağıda belirtildiği gibidir(Tablo 5.1).

Çizelge 5.1 Zamak#3, Zamak#5 ve Zinc ZA-8 alaşımlarının mekanik özellikleri (NADCA, 2004)

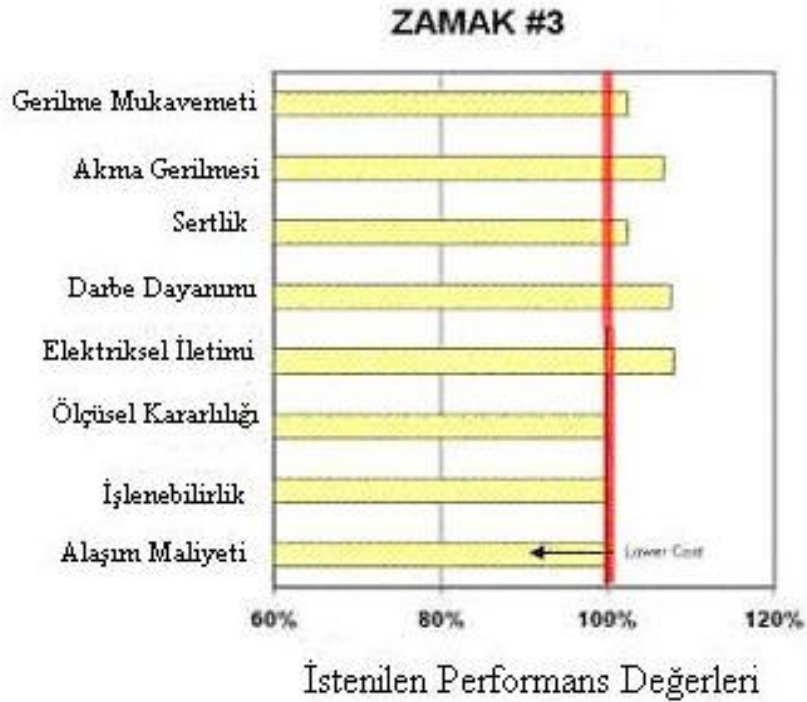
	<b>ZAMAK #3</b>	<b>ZAMAK #5</b>	<b>Zinc ZA-8</b>	
<b><i>Alaşım Özellikleri</i></b>	<b>Hedef</b>	<b>Zamak #3</b>	<b>Zamak #5</b>	<b>Zinc ZA-8</b>
<b><i>Gerilme Mukavemeti (Nmm)</i></b>	<b>&gt;26</b>	27	31	35
<b><i>Akma Gerilmesi (Nmm)</i></b>	<b>&gt;19</b>	21	25	26- 28
<b><i>Sertlik (BHN)</i></b>	<b>&gt;80</b>	82	91	100-106
<b><i>Darbe Dayanımı (kg)</i></b>	<b>&gt;5</b>	6	6.5	3-4,5
<b><i>Elektriksel İletimi (mikro ohm cm)</i></b>	<b>&gt;63.5</b>	68.5	66	70.3
<b><i>Ölçüsel Kararlılığı ( 1= Üst, 5= Alt)</i></b>	<b>1</b>	1	1	2
<b><i>İşlenebilirliği ( 1= Üst, 5= Alt)</i></b>	<b>1</b>	1	1	2
<b><i>Alaşım Maliyeti ( \$ / kg)</i></b>	<b>En Uygun Değer</b>	\$1.186	\$1.206	\$1.226

Zamak #3 basınçlı dökümde yaygın olarak kullanılan çinko alaşımları arasındadır. Diğer çinko alaşımlarına nazaran uygun fiyattadır. Zamak #3; %4 Alüminyum ve %0.035 Magnezyum içermektedir. Zamak #3 basınçlı döküm parçasından beklenen darbe dayanımı, elektriksel iletkenlik, ölçüsel kararlılık ve üretilebilirlik özelliklerini tamamıyla sağlamaktadır(Tablo 5.3).

Çizelge 5.2 Zamak#3, Zamak#5 ve Zinc ZA-8 alaşımlarının kimyasal özellikleri (NADCA, 2004)

Alaşım	Zamak 3	Zamak 5	ZA-8
Al	3.9-4.3	3.9-4.3	8-8.3
Mg	.02-.05	.01-.02	.015-.030
Cu	.10	.75-1.25	.8-1.3
Fe	.075	.050	.075
Ni	-	.005-.020	-
Cd	.003	.002	.003
Si	.003	.003	.003>
Mn	-	-	-
Pb	.004	.002	.004
Zn	Denge	Denge	Denge

Çizelge 5.3 Zamak#3'ten beklenen performans özellikleri(NADCA, 2004)



Çizelge 5.4 Zamak#5'ten beklenen performans özellikleri(NADCA, 2004)



Zamak#5, Zamak#3'ten daha fazla bakır içerdiğinden daha iyi mekanik özelliklere sahiptir(Tablo 5.2). Zamak#5; %4 Alüminyum, %0.055 Magnezyum ve %1 Bakır içermektedir. Performans özelliklerine bakıldığında Zamak#5 döküm parçası için gerekli tüm değerleri karşılamaktadır. Fakat, Zamak#5'in birim fiyatı Zamak#3'ün birim fiyatından daha yüksek değerlerdedir. Bu nedenlerden dolayı Zamak#3 ün tercih edilmesi doğru olacaktır.

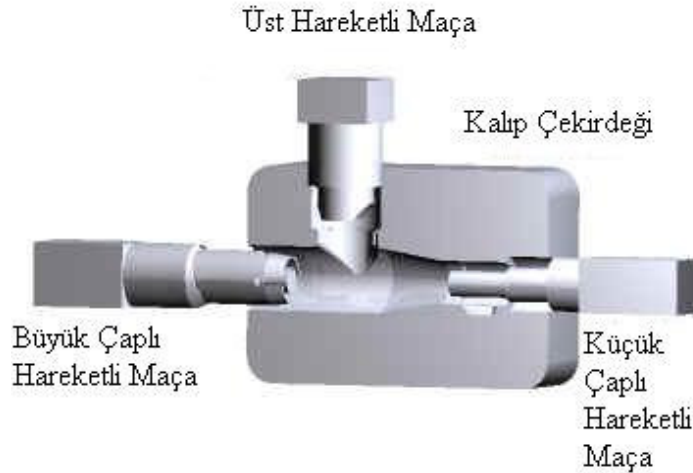
Çizelge 5.5 ZA-8'ten beklenen performans özellikleri(NADCA, 2004)



Çinko alaşımı ZA-8, diğer alaşımlarından çok daha fazla Alüminyum içermektedir. ZA-8 %8.4 Alüminyum, %0.025 Magnezyum ve %1 Bakır içermektedir. ZA-8 alaşımının gerilme mukavemeti, akma gerilmesi, sertliği ve elektriksel iletkenliği beklenen değerleri karşılamaktadır. Fakat, ZA-8'in darbe dayanımı, ölçüsel kararlılığı ve işlenebilirliği beklenen değerleri sağlamaktadır. Bu sebeple basınçlı döküm parçasında ZA-8'in seçimi uygun değildir.

### 5.2.2 Kalıptaki Maçaların Dizaynı

Döküm parçasının iç kısımdaki profiller veya delikler genellikle hareketli maçalar tarafından oluşturulmaktadır. Kalıbın kapalı durumdayken ergimiş metal kalıp içersine dolmakta ve hareketli maçaların çevrim sonunda açılmasıyla dizaynda tanımlanmış boşluklar ve diğer iç özellikler oluşturulmaktadır(Şekil 5.4). Ergimiş metalin kalıp içersinde katılaşması tamamlandıktan sonra, hareketli maçalar geri çekilerek döküm parçasının kalıptan çıkması sağlanmaktadır. Dirsek parçasının iç kısmında bulunan profiller ve delikler üç adet hareketli maça tarafından çıkartılmaktadır. Hareketli maçalar, döküm sonrası işleme maliyetleri azaltabilmek için hassas toleranslar dahilinde imal edilen iyi derecede yüzey kalitesine sahip kalıp elemanlarıdır.



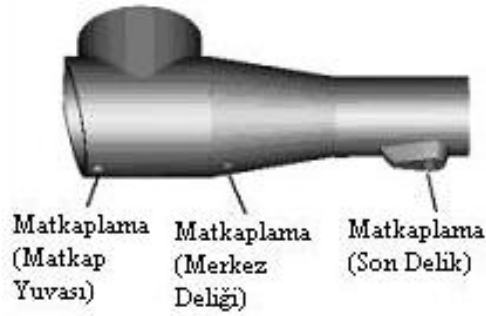
Şekil 5.4 Hareketli maçalar

Dirsek parçasının alt kısmı incelendiğinde iki adet vida deliğiyle bir adet matkap yuvası görülmektedir(Şekil 5.5). Bu kısımların kalıptan çıkartılması için iki temel çözüm bulunmaktadır.



Şekil 5.5 Dirsek parçasındaki delikler.

Bu farklı üretim metotlarının seçiminde maliyetlerin etkisi bulunmaktadır. Örneğin ek bir işleme yapılarak bu formların verilmesi ek bir üretim gideri oluşturacağı gibi, kalıp içerisinde maça yardımıyla çıkartılmasının kalıp maliyetlerini arttırıcı etkisi bulunmaktadır. Bu noktada farklı üretim metotları aşağıda belirtildiği gibi incelenmektedir.



Şekil 5.6 Dirsek parçasındaki talaşlı işleme bölgeleri.

Dirsek parçasının alt kısmında bulunan deliklerin talaşlı işlemeyle oluşturulması yüksek adetteki parça miktarı göz önüne alındığında ekonomik olmamaktadır(Şekil 5.7). Bununla birlikte talaşlı işleme yöntemiyle bu deliklerin hassas toleranslarının verilmesi büyük bir risk oluşturmaktadır buda hurda miktarını arttırma riski taşımaktadır. Dirsek parçasında bulunan deliklerin kalıp içersine yerleştirilecek olan maça yardımıyla çıkartılacak olmasının, ilk yatırım maliyetinin yanında her bir parçaya düşen maliyeti ekonomik sınırlar dahilindedir.



Şekil 5.7 Delikler için dizayn edilmiş maça bloğu.

Maça kullanımı hassas delik toleranslarının elde edilmesinde ve deliklerin pozisyonlarındaki hassasiyet açısından talaşlı işleme göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Her bir maçaya, aşınmayı azaltmak ve yağlamayı sağlamak amacıyla “Solvanite” kaplaması yapılmıştır.

### 5.2.3 Yolluk Sisteminin ve Taşıma Boşluklarının Tasarımı

Kalıp boşluğuna basılan ergimiş metalin akış karakteristiği, basınçlı döküm kalıplarının dizaynında temel faktörler arasındadır. Ergimiş metalin akışı hızlı, üniform, keskin yön değişimlerinden uzak, türbülanssız ve hava kabarcıkları içermemelidir. Kalıp boşluğunun ergimiş metal ile beslenmesini sağlayan yolluk ve meme kısmının dizaynı, kalıp tasarımında anahtar unsurlardandır(Şekil 5.8).

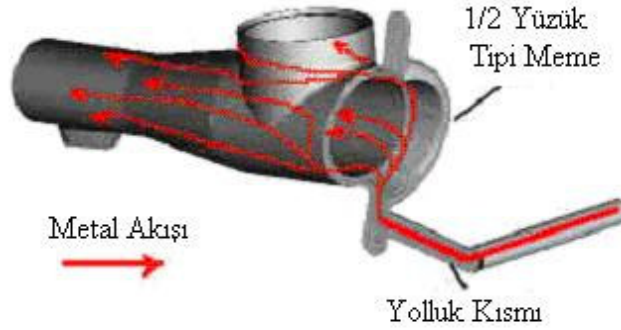


Şekil 5.8 Örnek parçada meme ve yolluk kısımları.

İyi dizayn edilmiş meme kısımları, ergimiş metalin kalıp içersine hızlı bir şekilde girmesini ve kalıp boşluğunda düzgün bir şekilde türbülansız olarak ilerlemesini sağlamaktadır. Bununla birlikte memelerin dizaynı döküm parçasının yüzey kalitesini yakından etkilemektedir. Özellikle meme kısımlarının dökülmüş parçadan kopartılması esnasındaki yüzey bozukluklarını önlemek amacıyla, meme kısımları daha az görülen kısımlara yerleştirilmelidir.

Bu geometrideki bir parça için temel olarak iki tip yolluk sistemi tasarlanabilmektedir. Bunlar şu şekilde açıklanabilir:

Birinci seçenekte, meme kısmı dirsek parçasının kütlece en yoğun olduğu kısımda, yarım yüzük formunda oluşturularak kalıp içersine ergimiş metalin basılması gerçekleştirilmektedir(Şekil 5.9).

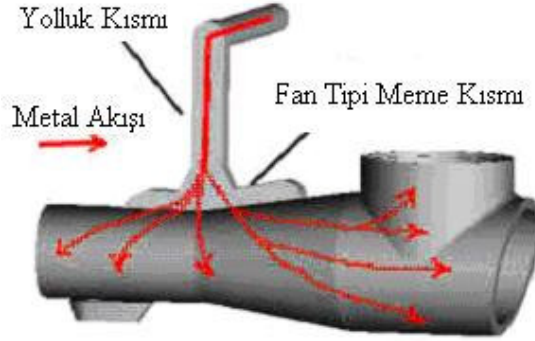


Şekil 5.9 yüzük tipi meme ve yolluk kısmı.

Sıvı metalin, parçanın kütlece yoğun olduğu kısımdan başlamasından dolayı ergimiş metalin kalıp boşluğu içersindeki akışı dolun işleminin sonuna kadar kesintisiz olarak devam etmektedir. Bununla birlikte meme kısmının enjeksiyon sonrası kopartılması sonucunda, bu bölümün parçada fazla göze çarpmamasından dolayı ürün üzerinde düzgün ve kaliteli yüzeyler oluşturmaktadır.

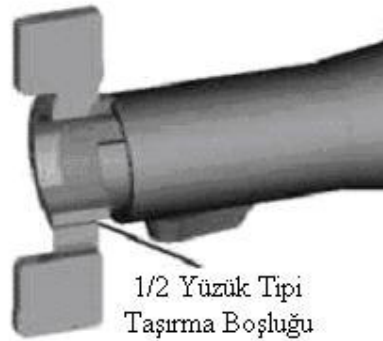
İkinci seçenekte, meme kısmı parçanın üst kısmında orta bölgeye fan formunda yerleştirilmektedir(Şekil 5.10). Yapılan dizaynda kalıp boşluğuna basılan ergimiş metal akışı iki ana yöne ayrılmaktadır. Bu durum kalıp boşluğu içersinde türbülansa sebebiyet vermekte, türbülansın olası sonuçları olan porozite ve kalıp boşluğunun tam olarak doldurulamaması

gibi durumlar oluşmaktadır. Bununla birlikte, meme kısmının döküm sonrası parçadan ayrılmasıyla göze hoş gelmeyen izler oluşmakta ve bu durum döküm sonrası yüzey işlemlerini arttırarak maliyetleri yükseltmektedir.



Şekil 5.10 Fan tipi meme ve yolluk kısmı

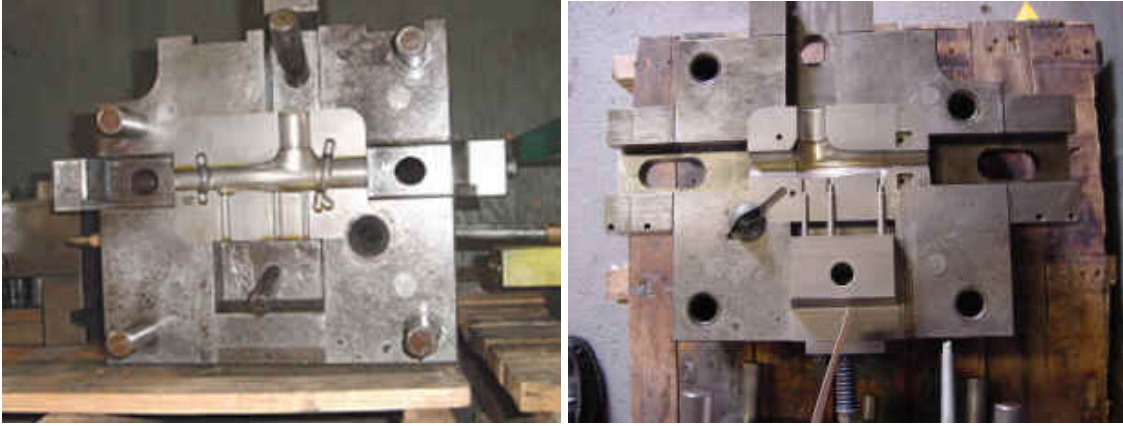
Taşıma boşlukları kalıp boşluğuna akan ergimiş metalin kalıp içerisinde rahatça akışına imkan vermekte, kalıp boşluğu içerisindeki hava kaparcıklarının tahliyesini sağlamaktadır(Şekil 5.10). Dirsek parçasında, taşıma boşlukları meme kısmına zıt yönde akışın sonlandığı kısımlara yerleştirilmektedir. Bu bölgeler fazla göze çarpmadığından, parlatma ve kaplama maliyetlerini artmamaktadır.



Şekil 5.10 Yüzük Tipi Taşıma Boşluğu.

#### 5.2.4 Kalıp Malzemesinin Seçimi

Basınçlı döküm kalıpları sabit ve hareketli olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Kalıp yüzeyindeki çinko birikimi düşük değerlerde olduğundan H13 takım çeliği, kalıp yarıları ve maçalar için kullanılmaktadır.

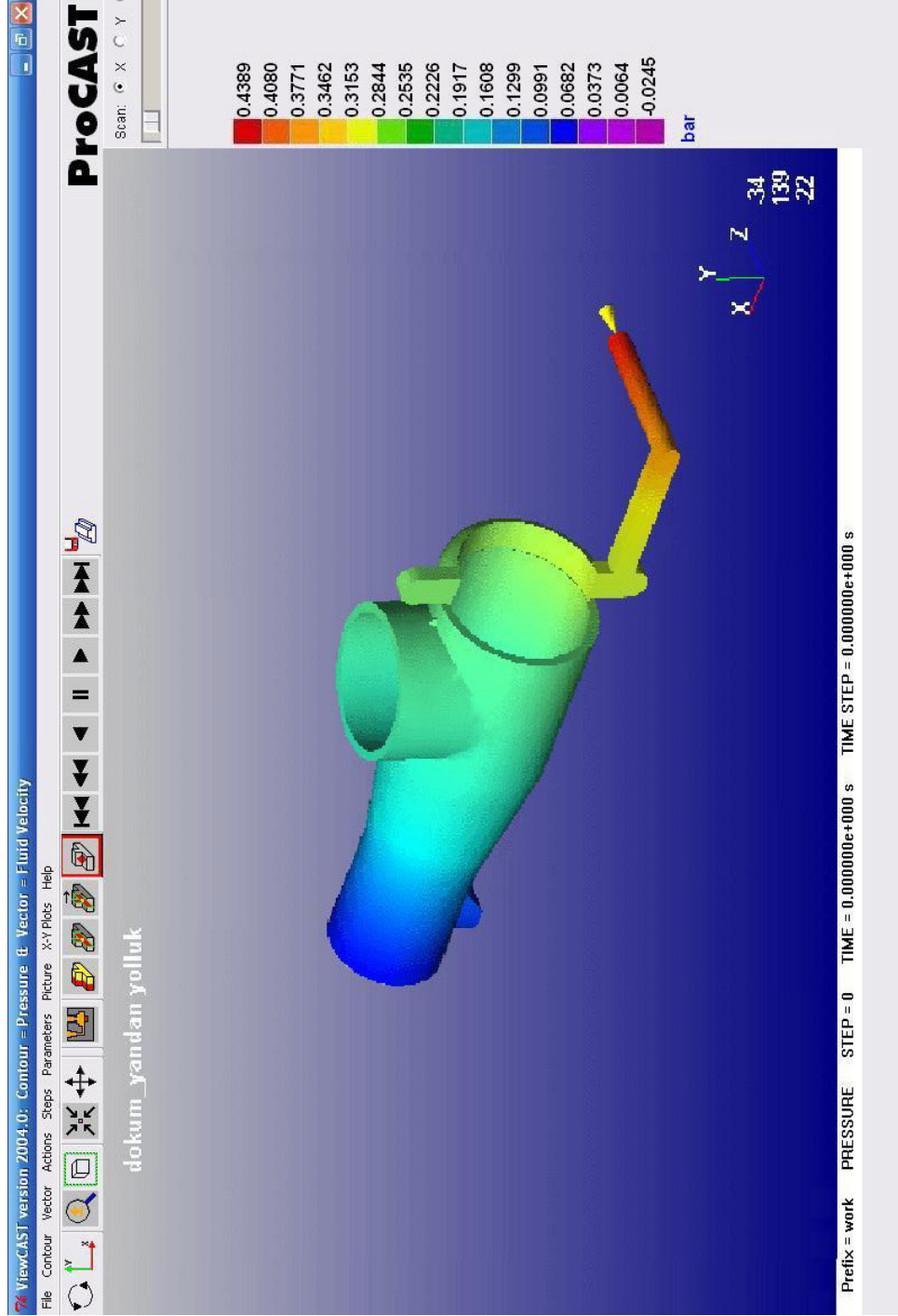


Şekil 5.11 Sabit ve Hareketli kalıp yarıları.

Her iki kalıp yarısının yüzeyleri önceden belirtilen gereksinimler dahilinde işlenmiş ve parlatılmıştır. Parçadaki yüzey kalitesinin istenilen değerlere ulaşması için kalıba krom kaplama yapılarak son şekli verilmiştir. Sıcak kamaralı basınçlı döküm makinesiyle döküm işlemi gerçekleştirilmektedir. Ergimiş metal  $420\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta makineden çıkmakta ve makinenin potası 100 kg a yakın ergimiş metali tutmaktadır. Döküm işlemiyle 25000 parça üretilmekte ve bir saatte 235 parça dökülmektedir.

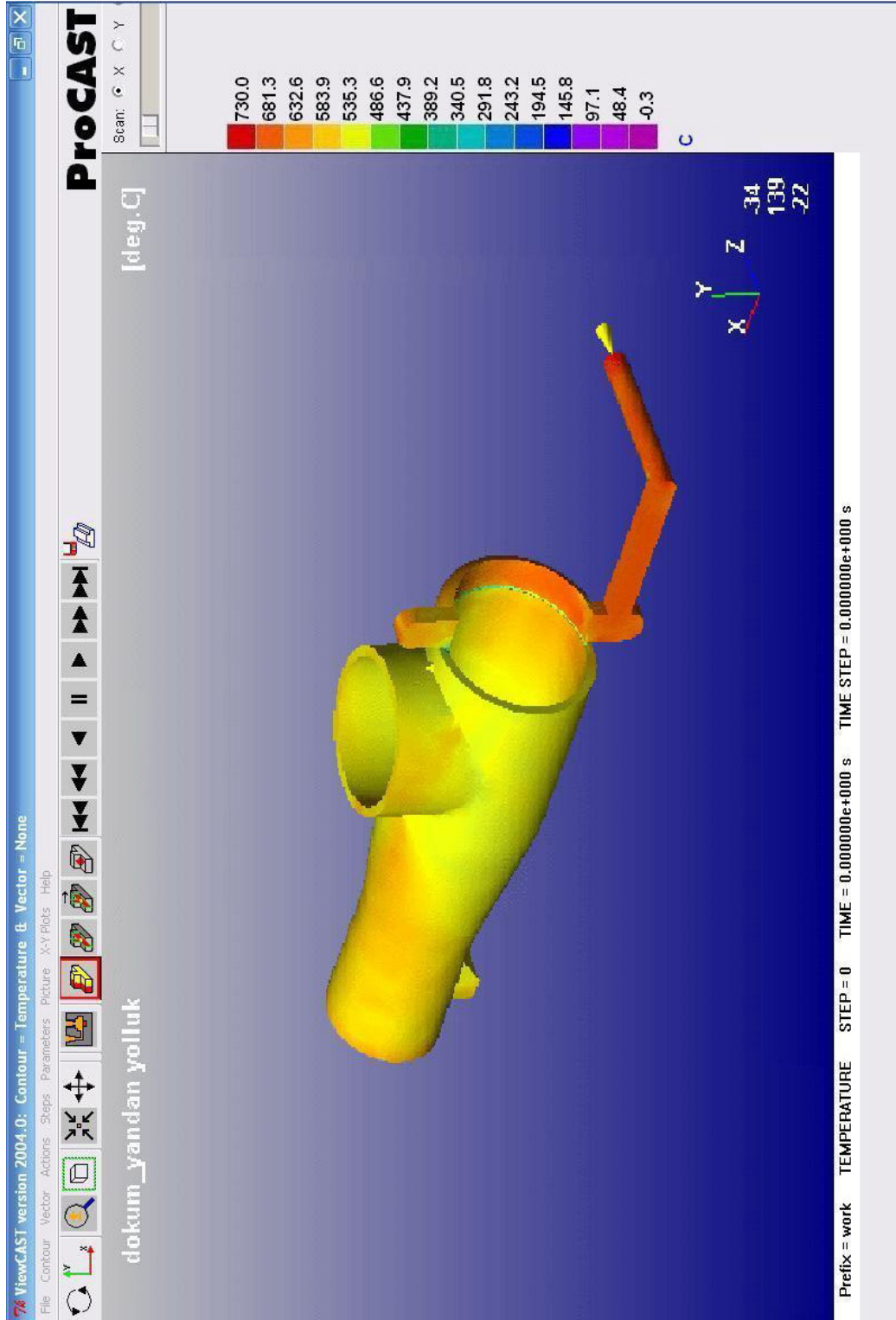
### 5.3 Simülasyon işlemi ve Sonuçları

#### 5.3.1 Basınç Dağılımı



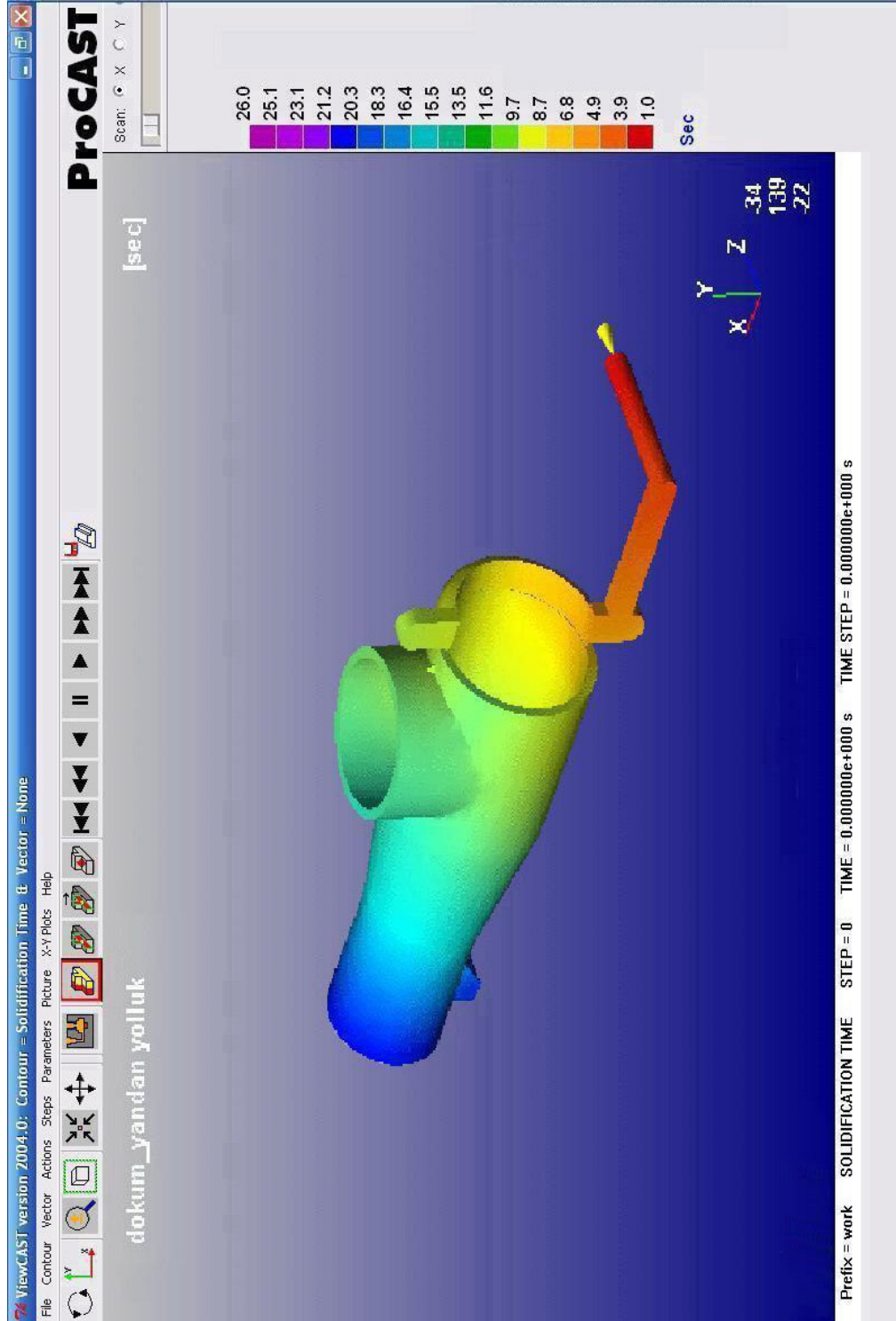
Şekil 5.12 Döküm işlemi esnasında parça üzerindeki basınç dağılımı

### 5.3.2 Sıcaklık Dağılımı



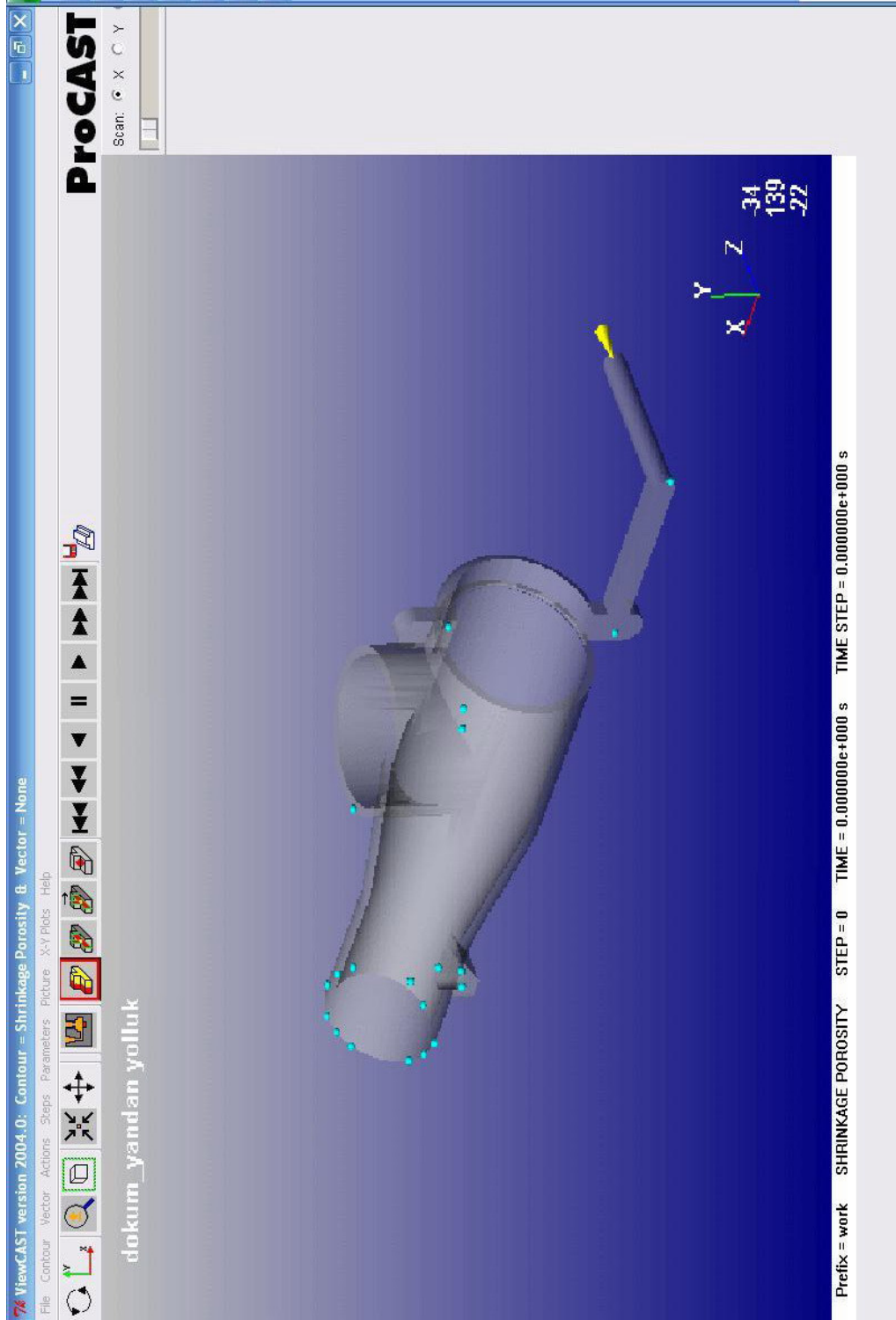
Şekil 5.13 Döküm işlemi esnasında parça üzerindeki sıcaklık dağılımı

### 5.3.3 Kalıbın Doldurulma Zamanı



Şekil 5.14 Döküm işleminde kalıp doldurma zamanının gösterimi

## 5.3.4 Porozite Kontrolü



Şekil 5.15 Döküm sonrası oluşan hava kabarcıkları

Nümerik kalıp doldurma ve katılaşma simülasyonu PROCAST sonlu elemanlar programıyla gerçekleştirilmiştir. Kalıbın doldurulmasında SOLA-VOF algoritmaları (C.W Hirt ve B.D Nichols, 1981) serbest yüzeyle kullanılmasıyla birlikte Navier-Stokes denkleminin çözümü elde edilmiştir. Katılaşma evresindeki entalpi metoduyla, ısı geçişi denklemi çözülerek elde edilir(Rappaz, 1989).

Kabul edilen hidrodinamik ve termal sınır koşulları daha önceden benzer koşullar altında çinko üzerinde yapılan deneylerden elde edilmiştir. Kalıp doldurma esnasında simüle edilen piston basıncı 100 bar'ı aşmamaktadır.

### **Katılaşma**

Kalıp içersinde akan sıvı metalin sıcaklık simülasyonunda, sıvı metal kritik sıcaklığın altında kalmaktadır, bu nedenle muhtemel bir donma oluşmamaktadır.

### **Yapışma**

Çinko alaşımlarının dökümünde, kalıptan parçayı ayırmaya yarayan ayırıcıyla kalıbın dışı yıkandığında, yapışma gözlenmemektedir. Lokal hız, uygun kontak zamanı için fazlasıyla yeterli miktardadır. Yapışma ihtimali umulmamaktadır.

### **Hava Tahliyesi**

Kalıp üzerindeki doldurma bölgesinin karşı istikametinde taşma kanalları ilave edilmiştir.

### **Çekme Gözenekleşmesi**

Parça üzerindeki gözenek oluşumu ağırlıklı olarak uç bölgelerdedir. Yapılan katılaşma simülasyonu göstermiştir ki çekme gözenekleşmesi bu kısımlarda önemsiz değerlerde oluşmaktadır.

### **Ölü noktalar**

Ölü noktaların oluşma nedeni, taşma kanalının değişik pozisyonlarda konumlandırılmasıdır. İlkinde parça bu bölgede doldurulduğunda sıvı metal taşma kanallarının içersine akmaya devam etmektedir. Aynı zamanda silindirdeki sıvı metalin akışının oluşturduğu etki ölü nokta oluşturmaktadır. Nümerik olarak izi takip edilebilen toz oksit zerrecikleri bu bölgede kalırlar ve taşma kanallarına taşmamazlar. Bu noktaların oluşumu parça kalitesini kötüleştirir.

## 6. SONUÇLAR

Basınçlı döküm kalıpları gün geçtikçe karmaşıklaşmaktadır. Bu nedenle, kalıp dizaynı yapılırken çok sayıda faktörün ve olayın bilinmesi bununla birlikte dikkate alınması gerekmektedir. Bu durum ise kalıp dizaynlarını zorlaştırmakta ve hatalara neden olabilmektedir. Bütün bu nedenlerden dolayı kalıbın sıvı metal ile doldurulmasının ve katılaştırmanın nümerik simülasyonu, dizayn mühendisleri için yüksek derecede önem kazanmıştır. Bu simülasyon araçlarının kullanılması kalıptaki hataların tanımlanmasında ve kalıp optimizasyonunda çok önemli yer tutmaktadır.

Basınçlı döküm yöntemiyle imal edilen parçaların yüksek kalitede üretilebilmesi, yapılacak olan kalıp dizaynıyla yakından ilişkilidir. Nümerik simülasyon uygulamalarından yüksek derecede verim elde edebilmek için döküm ve yolluk sistemi dizaynlarının konstrüksiyon mühendisleri tarafından gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Uygulamalarda gösterilebileceği gibi dökümde oluşabilecek bir çok hata kalıp imalatı gerçekleştirilmeden tespit edilebilmektedir. Simülasyon uygulamalarından, döküm denemeleri ve ürün üzerinde yapılan tahribatlı deneylerden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Bu bağlamda yapılan bu çalışmada, basınçlı döküm tekniğindeki giriş sistemi, yolluk sistemleri ve genel akış sistemleri incelenerek bunlara etki eden temel parametreler matematiksel ve fiziksel eşitliklerle açıklanmıştır. Bununla birlikte basınçlı döküm kalıplarında giriş ve yollukların simülasyonunda kullanılan yaklaşımlar karşılaştırılmalı olarak ele alınarak mevcut teoriler üzerindeki incelemeler gerçekleştirilmiş ve örnek bir simülasyon uygulaması ele alınmıştır. Yapılan bu simülasyon uygulamasıyla:

- Simülasyonla çok sayıda ve hassas toleranslar dahilinde parçalar imal edilerek bu parçalarda kaynaklanabilecek ölçüsel hataların sebep olumsuz etkilerin bertaraf edilmesi.
- Hurda miktarının azaltılmasıyla, verimlilik ve malzemenin yapılan tasarruf artmaktadır.
- Yapılan simülasyonla, parçadan beklenen kompleks geometrik özellikler, hassas toleranslar, yüzey kalitesindeki uygunluk ve düşük üretim maliyetleri sağlanmaktadır.
- Simülasyon sonuçlarına uygun olarak yapılan üretimlerde zaman kaybı azalmakta ve buna bağlı olarak üretim hızı artmaktadır.

**KAYNAKLAR**

D. Zabel. The P-Q2 Diagram: Part II. The Pressure Available Line. Die Casting Engineer, pages 44-47, November-December 1980.

Doehler, H.H., Çeviren Bayvas, M.Ş.(1974), Basıncılı Döküm, Erkek Teknik Yüksek Okulu Matbaası, Ankara

E. Herman. Gating Die Casting Dies. North American Die Casting Association, Illinois, Ci.S.,S: 1988.

F. M. White. Fluid Mechanics. McGraw-Hill' Inc.. New York' L-.S.A. second edition, 1986

J. K. Ousterhout. Tcl and the Tk Toolkit. Professional Computing. Addison-Wesley! 1994.

G. R. Price and G. T. Reader. -1 Piecewise Parabolic Interface Calculation For Volume Tracking. Computational Fluid Dynamics. 1-01.3:71-78: 1998.

G. Bar-Meir, E. E. R. et al. Air Venting in Pressure Die Casting. ASME Journal of Fluid Engineering, 119:4: June 1997.

L. J. D. Sully. Method Handbook, volume 15 Casting, chapter Molding and Casting Processes. pages 286-296. ASME International. Ohio, 9th edition, 1988.

Mehmet Naci Dai, Automating the Analysis of Complex Physical System – The Virtual Foundry, Ph.D thesis, Carleton University, 1994.

P. N- Rao, T. R.. et al. Computer-Aided Design of Gating Systems for Die Casting Dies. In 15th International Die Casting Congress and Exposition pages paper G-T89-064, St. Louis. October 1989. North American Die Casting Association.

P. Mathews and G. Krett. The Application of New Die Casting Technology. In Transactions, First South Pacific Die Casting Congress. Pages paper 80-34, Melbourne, Australia, 1990.

R. Lang. Castflow and Casttherm Presentation. Cutting Edge Technology Forum on Flow Modeling Thermal Simulation. November 1996.

Topbaş, M. Ali., Isıl İşlemler, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1993

Y. Karni. Selection of Process Variable for Die Casting. PhD thesis. The Ohio State University, 1991.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	05.06.1982	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1993-1999	Florya Tevfik Ercan Lisesi
Lisans	1999-2003	İstanbul Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2003-2007	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Bölümü, İmal Usulleri Ana Bilim Dalı

**Çalıştığı kurumlar**

2000-2003	Hipak A.Ş.-Proje Stajeri
2003-2005	Onur Kalip San.-Üretim Mühendisi
2005-2007	AB Spring Inc.-Pazarlama Sorumlusu