

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ BASINÇLI
DÖKÜMÜNDE İŞLEM FAKTÖRLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Makine Mühendisi Ali Serdar VANLI

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüseyin SÖNMEZ

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|-------|
| SİMGE LİSTESİ | v |
| KISALTMA LİSTESİ | vi |
| ŞEKİL LİSTESİ | vii |
| ÇİZELGE LİSTESİ | ix |
| ÖNSÖZ | x |
| ÖZET | xi |
| ABSTRACT | xii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. MAGNEZYUM METALİ | 5 |
| 2.1 Tarihçesi | 5 |
| 2.2 Magnezyum Üretim Teknolojileri | 11 |
| 2.2.1 Ham Maddeler | 11 |
| 2.2.2 İndirgeme Metotları | 11 |
| 2.2.3 Üretim Sıcaklıkları | 13 |
| 2.2.4 Yan Ürünler | 13 |
| 2.2.5 Başlıca Üretim Yöntemleri | 13 |
| 2.3 Saf Haldeki Özellikleri | 19 |
| 2.4 Kullanım Alanları | 22 |
| 3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI | 26 |
| 3.1 Başlıca Alaşım Elementleri | 27 |
| 3.1.1 Alüminyum (Aluminium) | 27 |
| 3.1.2 Kalsiyum (Calcium) | 27 |
| 3.1.3 Lityum (Lithium) | 27 |
| 3.1.4 Mangan (Manganese) | 27 |
| 3.1.5 Nadir Topraklar (Rare Earths) | 28 |
| 3.1.6 Silisyum (Silicon) | 28 |
| 3.1.7 Gümüş (Silver) | 28 |
| 3.1.8 Toryum (Thorium) | 28 |
| 3.1.9 İttriyum (Yttrium) | 28 |
| 3.1.10 Çinko (Zinc) | 28 |
| 3.1.11 Zirkonyum (Zirconium) | 29 |
| 3.2 Üretim Amaçlı Kullanılan Elementler ve Katışkılar (Impruties) | 29 |
| 3.2.1 Berilyum (Beryllium) | 29 |
| 3.2.2 Bakır (Copper) | 29 |
| 3.2.3 Demir (Iron) | 29 |

| | | |
|---------|---|-----------|
| 3.2.4 | Nikel (Nickel) | 29 |
| 3.2.5 | Kalay (Tin) | 29 |
| 3.3 | Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması | 30 |
| 3.4 | Denge Faz Diyagramları | 32 |
| 3.4.1 | Magnezyum-Alüminyum | 32 |
| 3.4.2 | Magnezyum-Çinko | 34 |
| 3.4.3 | Magnezyum-Mangan | 34 |
| 3.4.4 | Süper Hafif Alaşımlar | 35 |
| 3.4.5 | Yüksek Performans Alaşımları | 35 |
| 3.4.6 | Magnezyum-Skandiyum | 38 |
| 3.4.7 | Magnezyum-Zirkonyum | 38 |
| 3.5 | Basınçlı Döküm Magnezyum Alaşımları | 39 |
| 3.6 | Magnezyum Alaşımları ile İmalat Yöntemleri | 43 |
| 3.6.1 | Magnezyum Alaşımlarının Döküm Yöntemleri | 44 |
| 3.6.2 | Magnezyum Alaşımlarının Talaşlı İmalatı | 48 |
| 3.6.3 | Magnezyum Alaşımları ile Plastik Şekillendirme | 49 |
| 4. | BASINÇLI DÖKÜM | 51 |
| 4.1 | Tarihçesi | 51 |
| 4.2 | Genel Tarifi | 52 |
| 4.3 | Basınçlı Dökümün Avantajları | 53 |
| 4.4 | Basınçlı Dökümün Sınırlamaları | 54 |
| 4.5 | Basınçlı Döküm Yöntemleri | 54 |
| 4.5.1 | Püskürtme Döküm | 54 |
| 4.5.2 | Pres Döküm | 54 |
| 4.6 | Basınçlı Döküm Makinaları | 55 |
| 4.6.1 | Sıcak Kamaralı Makinalar | 55 |
| 4.6.1.1 | Pistonlu Makinalar | 56 |
| 4.6.1.2 | Havalı Makinalar | 57 |
| 4.6.2 | Soğuk Kamaralı Makinalar | 57 |
| 4.6.2.1 | Yatay Soğuk Kamara Tipi Makinalar | 58 |
| 4.6.2.2 | Düşey Soğuk Kamara Tipi Makinalar | 59 |
| 4.7 | Basınçlı Dökümde Farklı Uygulamalar | 61 |
| 4.7.1 | Vakumlu Basınçlı Döküm (Vacuum Die Casting) | 61 |
| 4.7.2 | Düşük Basınçlı Döküm (Low Pressure Die Casting) | 62 |
| 4.7.3 | Sıkıştırma Döküm (Squeeze Casting) | 65 |
| 4.7.4 | Yarı Katı Metal Dökümü (Semi Solid Metal Casting) | 66 |
| 4.7.4.1 | Tikso Döküm (Thixocasting) | 68 |
| 4.7.4.2 | Reo Döküm (Rheocasting) | 69 |
| 5. | MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ BASINÇLI DÖKÜMÜ | 73 |
| 5.1 | Soğuk Kamaralı Basınçlı Döküm Prosesi | 74 |
| 5.2 | Sıcak Kamaralı Basınçlı Döküm Prosesi | 78 |
| 5.3 | Basınçlı Döküm Kalıpları | 81 |
| 5.3.1 | Sabit ve Hareketli Kalıp Yarıları | 81 |
| 5.3.2 | Kalıp Malzemeleri ve Kaplamaları | 82 |
| 5.3.3 | Yolluk Sistemi | 84 |
| 5.3.4 | Kalıpların Soğutulması/Isıtılması | 85 |
| 5.4 | Basınçlı Döküm Operasyonu | 86 |
| 5.4.1 | Ergitme ve Bekletme | 86 |
| 5.4.2 | Ergimiş Metalin Korunması | 88 |

| | | |
|-----------------|---|-----|
| 5.4.3 | Döküm Aşaması | 89 |
| 5.5 | Basınçlı Döküm Magnezyum Alaşımlarının Dizaynı | 92 |
| 5.5.1 | Cidar Kalınlığı | 93 |
| 5.5.2 | Eğim Açısı | 94 |
| 5.5.3 | Kendini Çekme Kuvvetleri | 94 |
| 5.5.4 | İtici Pimlerin Yeri ve Maçaların Kullanımı | 96 |
| 5.5.5 | Boyutsal Toleranslar ve Tekrarlanabilirlik | 97 |
| 6. | İŞLEM FAKTÖRLERİ ve ETKİLERİ | 99 |
| 6.1 | Döküm ve Kalıp Sıcaklığı | 99 |
| 6.2 | Dolum Süresi | 100 |
| 6.3 | Meme Giriş Hızı | 100 |
| 6.4 | Enjeksiyon Basıncı | 101 |
| 6.5 | İşlem Faktörlerinin Etkileri | 105 |
| 6.6 | Tavsiye Edilen Proses Parametreleri | 113 |
| 6.7 | İşlem Faktörleri ve Tasarımdan Kaynaklanan Döküm Hataları | 114 |
| 7. | SONUÇLAR ve ÖNERİLER | 117 |
| KAYNAKLAR | | 120 |
| ÖZGEÇMİŞ | | 123 |

SİMGE LİSTESİ

| | |
|----------------|------------------------------------|
| A_g | Meme giriş kesit alanı |
| A_p | Piston kesit alanı |
| A_{proj} | Parçanın toplam kesit alanı |
| F_e | Açma kuvveti |
| F_{lock} | Kapama kuvveti |
| D | Meme girişine olan uzaklık |
| D | Piston çapı |
| P | Sıvı metale uygulanan basınç |
| p_{sol} | Katılma sırasında uygulanan basınç |
| Q | Hacimsel akış debisi |
| r_{min} | Minimum radyus değeri |
| S | Meme girişine maksimum uzaklık |
| S | En yüksek katılma oranı |
| t | Cidar kalınlığı |
| t_{min} | Minimum cidar kalınlığı |
| t | Dolum süresi |
| $t_{dök}$ | Döküm sıcaklığı |
| t_{erg} | Ergime sıcaklığı |
| T | Ortalama cidar kalınlığı |
| T_d | Kalıp sıcaklığı |
| T_f | Minimum akış sıcaklığı |
| T_m | Metalin döküm sıcaklığı |
| v | Kalıp boşluğunun hacmi |
| V_g | Meme giriş hızı |
| V_p | Piston hızı |
| α | Eğim açısı |
| Δt | İlave edilen sıcaklık değeri |
| $\sigma_{0,2}$ | Akma dayanımı (%0,2 gerinme) |

KISALTIMA LİSTESİ

| | |
|-------|---|
| ABD | Amerika Birleşik Devletleri |
| AFS | American Foundry Society |
| AMC | Australian Magnesium Corporation |
| ASM | American Society of Metals |
| ASTM | American Society of Testing and Materials |
| B & P | Brooks and Perkins Corporation |
| BMW | Bayerische Motoren Werke |
| CVD | Chemical Vapor Deposition |
| DBD | Düşük Basıncılı Döküm |
| DSM | Dead Sea Magnesium Corporation |
| HB | Hardness Brinell |
| HMK | Hacim Merkezli Kübik |
| HRC | Hardness Rockwell C |
| IMA | International Magnesium Association |
| İTÜ | İstanbul Teknik Üniversitesi |
| MA | Magnesium Association |
| MEL | Magnesium Elektron Company |
| MIC | Magnesium Industry Council |
| MIT | Massachusetts Institute of Technology |
| MPI | Meridian Magnesium Products of Italy |
| MRI | Magnesium Research Institute |
| NADCA | North American Die Casting Association |
| PVD | Physical Vapor Deposition |
| SDH | Sıkı Düzen Hekzagonal |
| USMC | United States Magnesium Corporation |
| UTS | Ultimate Tensile Strength |
| VW | Volkswagen |
| YMK | Yüzey Merkezli Kübik |
| YS | Yield Strength |
| YTÜ | Yıldız Teknik Üniversitesi |

ŞEKİL LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1 Tamamına yakını magnezyum alaşımından üretilen ilk uçak Northrop XP-56..... | 6 |
| Şekil 2.2 B36 bombardıman uçağı, yaklaşık 8,6 ton magnezyum alaşımı içermektedir..... | 7 |
| Şekil 2.3 Magnezyumdan yapılmış çim-biçme makinası koruması | 8 |
| Şekil 2.4 Titan I Roketi, kullanılan toplam Mg 0,54 ton..... | 9 |
| Şekil 2.5 DSM / Rus akış prosesi | 17 |
| Şekil 2.6 Pidgeon proses akışı ve uygulama örneğı | 18 |
| Şekil 2.7 Birim hücredeki ana düzlemler ve yönleri | 19 |
| Şekil 2.8 Magnezyumun 1999 yılı pazar payları..... | 24 |
| Şekil 3.1 Mg-Al ikili alaşımının denge faz diyagramı | 33 |
| Şekil 3.2 Mg-Al sisteminin magnezyumca zengin olan bölümü..... | 33 |
| Şekil 3.3 Mg-Zn sisteminin denge faz diyagramı | 34 |
| Şekil 3.4 Mg-Mn faz diyagramı, ağı.%5 mangan içeren kısma kadar | 35 |
| Şekil 3.5 Mg-Li faz diyagramı, ağı.%15 Li içeren kısma kadar..... | 36 |
| Şekil 3.6 Mg-Nd faz diyagramı, ağı.%70 neodyum içeren bölümü | 36 |
| Şekil 3.7 Mg-Ag faz diyagramı, ağı.%70 gümüş içeren kısma kadar | 37 |
| Şekil 3.8 Mg-Y faz diyagramı, ağı.%50 itriyum içeren kısma kadar..... | 37 |
| Şekil 3.9 Mg-Sc denge faz diyagramı | 38 |
| Şekil 3.10 Mg-Zr faz diyagramı, ağı.%7 zirkonyum içeren kısma kadar..... | 39 |
| Şekil 3.11 Mg-Si denge faz diyagramı | 41 |
| Şekil 4.1 Sıcak kamara tipi pistonlu basınçlı döküm makinasının şematik gösterimi | 56 |
| Şekil 4.2 Yatay soğuk kamara tipi basınçlı döküm makinasının şematik gösterimi | 58 |
| Şekil 4.3 Yatay soğuk kamara tipi makinanın çalışma prensibi..... | 59 |
| Şekil 4.4 Yatay kalıplı düşey soğuk kamara tipi basınçlı döküm makinası | 60 |
| Şekil 4.5 Düşey kalıplı düşey soğuk kamara tipi basınçlı döküm makinası | 61 |
| Şekil 4.6 Vakumlu sıcak kamaralı basınçlı döküm makinası..... | 62 |
| Şekil 4.7 Vakumlu soğuk kamaralı basınçlı döküm makinası | 63 |
| Şekil 4.8 Düşük basınçlı (a) ve vakumlu düşük basınçlı (b) dökümün şematik gösterimi | 64 |
| Şekil 4.9 Düşük basınçlı döküm makinasının şematik gösterimi..... | 64 |
| Şekil 4.10 Sıkıştırma döküm yönteminde proseslerin şematik gösterimi | 65 |
| Şekil 4.11 Thixotropik sıcaklık ve iç yapının şematik gösterimi (1) katı (2) sıvı..... | 67 |
| Şekil 4.12 Tikso döküm yönteminin şematik gösterimi | 68 |
| Şekil 4.13 Tikso kalıplama yönteminin şematik gösterimi | 69 |
| Şekil 4.14 Reo döküm yöntemi (Rheocasting process)..... | 70 |
| Şekil 4.15 Yeni reo döküm (new-rheocasting) yönteminin şematik gösterimi | 71 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 4.16 Reo konteyner (rheo-container) yönteminin şematik gösterimi..... | 71 |
| Şekil 4.17 Farklı basınçlı döküm yöntemlerinin karşılaştırılması..... | 72 |
| Şekil 5.1 Basınçlı döküm magnezyum parçaların ABD’deki pazar payları..... | 73 |
| Şekil 5.2 Soğuk kamaralı basınçlı döküm makinası..... | 74 |
| Şekil 5.3 Vakumlu soğuk kamaralı basınçlı döküm makinası | 75 |
| Şekil 5.4 Sıkıştırma döküm yönteminin şematik gösterimi..... | 75 |
| Şekil 5.5 Soğuk kamaralı basınçlı döküm prosesinin çevrimi | 76 |
| Şekil 5.6 Basınçlı döküm makinasında gerekli kilitleme kuvvetinin hesaplanması..... | 77 |
| Şekil 5.7 Sıcak kamaralı basınçlı döküm makinası | 78 |
| Şekil 5.8 Sıcak kamaralı basınçlı döküm prosesinin çevrimi | 80 |
| Şekil 5.9 Hareketli (a) ve sabit (b) kalıp yarılarının şematik gösterimi | 81 |
| Şekil 5.10 Soğuk (a) ve sıcak (b) kamaralı basınçlı döküm makinalarının yolluk sistemleri .. | 83 |
| Şekil 5.11 Kopma uzmasının akış mesafesi ile değişimi (Alaşım AM60, kalınlık 2,5 mm) ... | 84 |
| Şekil 5.12 Tavsiye edilen minimum cidar kalınlığı (AM50/60 alaşımları için)..... | 85 |
| Şekil 5.13 Basınçlı döküm kalıplarında değişik ısı akış yolları | 86 |
| Şekil 5.14 Dozajlı fırın (dosing furnace) sisteminin şematik gösterimi | 87 |
| Şekil 5.15 VACURAL prosesinin şematik gösterimi..... | 87 |
| Şekil 5.16 Ergimiş magnezyumun koruyucu SF ₆ atmosferinde davranışı | 88 |
| Şekil 5.17 Enjeksiyon prosesinde piston hareketinin ve piston basıncının değişimi | 90 |
| Şekil 5.18 Farklı cidar kalınlıkları için tavsiye edilen dolum süreleri..... | 91 |
| Şekil 5.19 Kalıp sıcaklığının maksimum çekme dayanımına (UTS) etkisi..... | 91 |
| Şekil 5.20 Basınçlı döküm parçası için kaburga (rib) dizaynı..... | 94 |
| Şekil 5.21 Konikliğin yüzey uzunluğu ile değişimi | 95 |
| Şekil 5.22 Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde dizayn parametreleri..... | 95 |
| Şekil 5.23 Parça ile itici pim arasındaki minimum mesafe | 96 |
| Şekil 5.24 Birçok faktörün, lineer değişim toleransı üzerine etkileri..... | 98 |
| Şekil 6.1 Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde enjeksiyon profili | 101 |
| Şekil 6.2 Farklı proses parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan nomograf..... | 103 |
| Şekil 6.3 Proses parametrelerini belirlemek için kullanılan $P-Q^2$ grafiği..... | 104 |
| Şekil 6.4 Basınçlı döküm AM50 alaşımında meydana gelen poroziteler..... | 112 |
| Şekil 6.5 Gaz ve büzülme boşluklarını gösteren gri skalalı mikro yapı resmi | 113 |
| Şekil 6.6 Mg alaşımlarının basınçlı döküm hataları ile işlem parametrelerinin ilişkisi | 116 |

ÇİZELGE LİSTESİ

| | |
|---|-----|
| Çizelge 2.1 2000 – 2006 Yılları Birincil Magnezyum Üretimi..... | 10 |
| Çizelge 2.2 Hammaddeler ve özellikleri | 12 |
| Çizelge 2.3 Deniz suyu ve Ölü Deniz (Dead Sea) suyunun bileşenleri | 12 |
| Çizelge 2.4 Üretim yöntemlerinin endüstriyel bazda sınıflandırılması..... | 14 |
| Çizelge 2.5 Elektrokimyasal ve termal yöntemlerin karşılaştırılması..... | 15 |
| Çizelge 2.6 1950’den bu yana başlıca magnezyum projeleri | 16 |
| Çizelge 2.7 Saf magnezyumun (ağ.%99,9) fiziksel özellikleri | 20 |
| Çizelge 2.8 Saf magnezyumun (ağ.%99,9) mekanik özellikleri | 21 |
| Çizelge2.9 Saf magnezyum ve alüminyumun fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması | 21 |
| Çizelge 2.10 Bazı mühendislik metallerinin fiziksel özellikleri ve maliyetleri | 23 |
| Çizelge 3.1 ASTM sisteminde magnezyum alaşımlarının gösterimi | 30 |
| Çizelge 3.2 Alaşım elementleri için kabul edilen gösterim..... | 31 |
| Çizelge 3.3 Magnezyum alaşımları için menevişleme gösterimleri..... | 31 |
| Çizelge 3.4 Basınçlı döküm Mg alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri ... | 40 |
| Çizelge 3.5 Basınçlı döküm alaşımlarının genel özellikleri | 43 |
| Çizelge 3.6 Şekillendirmede kullanılan yöntemler ve özellikleri | 44 |
| Çizelge 3.7 Magnezyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri..... | 45 |
| Çizelge 3.8 Magnezyum alaşımları ile döküm yöntemlerinin mukayesesi..... | 47 |
| Çizelge 3.9 Magnezyumun talaşlı işlem parametrelerinin diğer metallerle karşılaştırılması... 48 | |
| Çizelge 5.1 Soğuk kamaralı basınçlı döküm prosesinin karakteristikleri | 77 |
| Çizelge 5.2 Sıcak kamaralı basınçlı döküm prosesinin karakteristikleri..... | 79 |
| Çizelge 5.3 Magnezyum ve Alüminyum basınçlı döküm kalıpları..... | 82 |
| Çizelge 5.4 Ergiyik magnezyumun korunması için farklı gaz karışımları..... | 89 |
| Çizelge 5.5 Yüzey alanına göre izin verilen minimum cidar kalınlığı..... | 93 |
| Çizelge 5.6 Magnezyumun basınçlı dökümünde tavsiye edilen düzlemsel toleranslar | 97 |
| Çizelge 6.1 AZ91D alaşımının döküm parametreleri ile sürünme özelliklerinin değişimi.... | 106 |
| Çizelge 6.2 Katılaştırma basıncı ve meme hızının yoğunluk üzerindeki etkisi | 109 |
| Çizelge 6.3 Basınçlı döküm magnezyum alaşımlarının ölçülen yüzey sertlikleri..... | 110 |
| Çizelge 6.4 Basınçlı döküm magnezyum alaşımlarının dayanım özellikleri | 110 |
| Çizelge 6.5 Basınçlı döküm prosesinde kullanılan işlem parametreleri..... | 111 |

ÖNSÖZ

Magnezyumun basınçlı dökümü, magnezyum endüstrisi içinde, en hızlı büyüyen ve global ölçekte en çok gelişen segment olmuştur. Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi diğer yöntemlerin sunamayacağı ekonomik avantajlar sunmaktadır. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde işlem faktörleri; parça kalitesine, mekanik özelliklere, poroziteye ve hatalı parça üretimine doğrudan etki etmektedir. İşlem faktörlerini; döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, dolum süresi, piston ve meme giriş hızları, enjeksiyon basıncı ve katılma sırasında uygulanan sıkıştırma basıncı oluşturmaktadır. Döküm prosesi esnasında yanlış seçilen işlem parametreleri, doğru tasarlanmış parçaların bile hatalı ve kötü mekanik özelliklere sahip olacak şekilde üretilmesine sebep olabilmektedir.

Bu çalışma geniş bir literatür taraması sonucunda; magnezyum metali ve alaşımlarının genel özellikleri, basınçlı döküm yöntemi ile imalatı ve magnezyumun basınçlı döküm uygulamasındaki işlem faktörleri ile bu faktörlerin parça dayanımına ve hata oluşumuna etkileri üzerine bugüne kadar yapılmış birçok deneysel ve teorik çalışma incelenerek hazırlanmıştır. Bu tez, magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü konusunda çalışan araştırmacılara ve üreticilere, rehber niteliği taşıması yönüyle önem kazanırsa, amacına ulaşmış olacaktır.

Yüksek lisans çalışmamda, her türlü olanağı sağlayarak beni her zaman destekleyen, değerli bilgilerimi benimle paylaşan ve yardımlarını esirgemeyen değerli Hocam, Sayın Prof. Dr. Hüseyin SÖNMEZ'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmam sırasında benimle bilgilerimi paylaşan ve yol gösteren değerli Hocam, Sayın Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN'a, tüm destekleri ve her zaman yanımda oldukları için Sayın Öğr. Gör. Dr. Anıl Nomak AKDOĞAN'a, Sayın Arş. Gör. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM'a, Sayın Arş. Gör. Oktay ŞAHİN'e, Sayın Arş. Gör. Binnur SAĞBAŞ'a, Sayın Arş. Gör. Tolga MERT'e, Sayın Arş. Gör. Cem ERTEK'e, Sayın Arş. Gör. Kemal NURVEREN'e ve tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunuyorum.

Benden maddi manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ve Sevgili Arkadaşım Seyhan GÜLER'e, eşsiz desteği için çok teşekkür ederim.

ÖZET

Magnezyum, tüm konstrüksiyon metalleri içinde en hafif olanıdır. Bu malzeme bir plastik kadar hafif fakat bir metal kadar da dayanıklıdır. Uygun karakteristikleri sayesinde birçok sektörde kullanılabilir bir metal olan magnezyum, özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe hafifliği dolayısıyla tercih edilmektedir. Magnezyumun basınçlı dökümü, magnezyum endüstrisi içinde, en hızlı büyüyen ve global ölçekte en çok gelişen segment olmuştur. Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi, diğer yöntemlerin sunamayacağı ekonomik avantajlar sunmaktadır. Otomasyona uygunluğu yönüyle, magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü, yüksek hacimli imalatlar için ideal bir yöntemdir

Basınçlı döküm, hassas bir yöntem olmasına rağmen, parça kalitesini ve mekanik özellikleri etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler, parça ve kalıp konstrüksiyonu ile çeşitli işlem parametreleridir. Döküm prosesi esnasında yanlış seçilen işlem parametreleri, doğru tasarlanmış parçaların bile hatalı ve kötü mekanik özelliklere sahip olacak şekilde üretilmesine sebep olabilmektedir.

İşlem faktörleri; parça kalitesine, dayanım özelliklerine ve dolayısıyla da hata oluşumuna etki eden en önemli unsurların başında gelmektedir. İşlem faktörlerinin doğru seçimi, parçanın da doğru üretimi anlamına gelmektedir. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde hataların oluşumu birbiriyle bağlantılı birçok faktörden kaynaklanmaktadır. Yanlış işlem parametreleri, hatalı parça veya kalıp dizaynı, alaşım içindeki katışkıların kötü etkileri hata faktörlerini oluşturmaktadır. İyi mekanik özelliklere sahip, düşük poroziteli ve hatasız parçalar üretmek için; yüksek enjeksiyon basınçlarında, düşük döküm sıcaklıklarında, optimum kalıp sıcaklıklarında ve optimum akış hızları ile döküm işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Magnezyum ve alaşımları, basınçlı döküm, işlem faktörleri.

ABSTRACT

Magnesium is the lightest one of the all construction metals. This material has a weight feature like as a plastic in spite of has a strength like a metal. Magnesium is a metal which can be used a lot of sectors with its suitable characteristics, especially prefers for automotive and aerospace industry because of its light weight properties. Die casting of magnesium has become the fastest growing up and the most globally developing section of the magnesium industry. Production of the magnesium alloys with die casting process has an economical benefit which can not be presented by any other product systems. Die casting of magnesium alloys is an ideal process for high capacity production conditions because of its appropriateness for automation systems.

In spite of die casting is a precision process, there are lots of factors which are effective on the product quality and mechanical properties. These factors consist of the casting and die construction and the process parameters. Defectly selection of the process parameters during the casting operation can cause castings which have wrong and bad mechanical properties even they have perfect design features.

The process parameters are the most important factors that are effective on the casting quality, strength of products and account of defect formation. The correct selection of process parameters mean to correct production of the casting. Magnesium die casting defects source from lots of factors which have relationship between each other. Wrong process parameters, fault casting and die design, bad effects of the impurities in the alloy constitute together the defect factors. For casting products which have good mechanical properties, low porosity content and flawless features; the casting process should be made under high injection pressure, with low casting temperatures, optimum flow velocity and optimum die temperatures.

Keywords: Magnesium and alloys, die casting, process parameters.

1. GİRİŞ

Tüm konstrüksiyon metalleri içinde en hafif olan metal magnezyumdur. Bu malzeme bir plastik kadar hafif fakat bir metal kadar da dayanıklıdır. Magnezyumun, çelik ve çinkodan %75, alüminyumdan ise %33 daha hafif olması, birçok sektörde yapı malzemesi olarak kullanımına olanak sağlamaktadır. Magnezyum toprakta en çok bulunan 8. elementtir, ayrıca alüminyum ve demirden sonra en çok bulunan yapı metalidir. Tuzlu su tortuları, tuz gölleri ve okyanuslardaki magnezyum potansiyelini baz alıp düşündüğümüzde ise; magnezyum büyük bir farkla doğada en çok bulunan metal haline gelmektedir.

Magnezyumun $1,74 \text{ g/cm}^3$ 'lük yoğunluğu ve $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 'lik ergime sıcaklığı, çelik ve alüminyum gibi diğer konstrüksiyon metallerine göre, dökümde ve talaşlı imalatta önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Örneğin magnezyum metali alüminyumdan iki kat daha hızlı dökülebilmekte ve işlenebilmektedir. Magnezyumun düşük yoğunluğundan kaynaklanan düşük eylemsizliği, hızlı hareket eden parçalar için bir avantajdır. Hafiflik aynı zamanda, imalat sırasında parçanın daha kolay taşınması ve bitmiş ürünün daha ucuza sevk edilmesi demektir (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Magnezyum alaşımları, $160\text{--}300 \text{ N/mm}^2$ çekme dayanımı, $80\text{--}190 \text{ N/mm}^2$ (%0,2) akma dayanımı ve %2–15 kopma uzamasına sahip alaşımlardır. Geleneksel magnezyum alaşımları, bu asrın ilk on yılında geliştirilmeye başlanmış ve 1930'lu yılların sonunda bir zirveye ulaşmıştır. İkinci zirve ise 1950'lerde görülmektedir. Son 40 yılda daha ziyade alüminyum ve çelik üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Ancak günümüzde, plastiklerin yerine magnezyum alaşımlarının kullanılması, bu malzemeyi yeniden gündeme getirmiştir (Zeytin, 1999).

Magnezyum uygun karakteristikleri sayesinde birçok sektörde kullanılabilir bir metaldir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe hafifliği dolayısıyla tercih edilmektedir. Ancak bu koşulların sağlanabilmesi kolay olmamış, alüminyuma göre daha pahalı olmasından dolayı magnezyumun kabul görmesi uzun zaman almıştır. Çin ve Avustralya'nın üretime girmesi ile birlikte düşen fiyatlar neticesinde, magnezyum da endüstride kendine yer bulmaya başlamıştır (Smith, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 2001).

Magnezyum doğada metal formunda bulunmamaktadır. Doğal metal formuna dönüştürmek için, ham maddeler (magnezit, dolomit, bisofit, karnelit, serpantin ve deniz suyu) kimyasal işlemlere tabi tutulur. Bu şekilde üretilen magnezyum genellikle birincil magnezyum olarak adlandırılır. Magnezyum metali ayrıca hurda malzemelerden geri dönüşüm yöntemiyle de elde edilir. Bu şekilde üretilen magnezyuma ise ikincil magnezyum adı verilir.

Magnezyumun ticari olarak kullanımı 20. yy'ın ortalarında büyük bir artış göstermiştir. Özellikle 1950-1960'larda otomotiv sektöründeki uygulamalar için magnezyum talebinde büyük bir artış yaşanmıştır. Bunun sebebi Volkswagen firmasının Beetle modelinin üretiminde magnezyum alaşımlarını kullanmaya başlamasıydı. 1970'lerde Volkswagen Beetle zirvedeyken, bu modelin üretiminde 20 kg civarında magnezyum kullanılıyordu. Firma 1970'de 40.000 ton, 1975'de ise 50.000 ton basınçlı döküm magnezyum parça üretmiştir. Ancak 1975'den sonra magnezyum fiyatlarının hızla artarak iki katına çıkması (3,5 \$/kg'dan 7 \$/kg'a) ve bu sırada rakibi alüminyumun fiyatının değişmemesi, magnezyumun popülerliğini kaybetmesine sebep olmuştur. Ancak magnezyum fiyatlarının 1990'lı yıllarda düşmesi (3,2 \$/kg'a) ile magnezyuma duyulan ilgi yeniden artmıştır.

Magnezyum alaşımları için çok değişik döküm yöntemleri uygulanabilmektedir. Bu yöntemler soğuk ve sıcak kamaralı basınçlı döküm, kum kalıba döküm, hassas döküm, sürekli kalıba (kokil) döküm, düşük basınçlı döküm (low pressure die casting), vakumlu döküm, yarı-katı metal döküm (semi-solid metal casting) ve sıkıştırma döküm (squeeze casting) yöntemleridir. Son yıllarda basınçlı döküm alaşımlarının kullanımı oldukça artmıştır. Özel bir parça için döküm yöntemi seçiminde; tasarım şekli, arzu edilen mekanik ve yüzeysel özellikler, üretilecek toplam parça sayısı ve alaşımların dökülebilirliği, belirleyici etkenlerdir (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Magnezyumun basınçlı dökümü, magnezyum endüstrisi içinde, en hızlı büyüyen ve global ölçekte en çok gelişen segment olmuştur. Bu gelişim, çevre dostu arabalara olan talebin artması sonucu ortaya çıkmıştır. Dünya genelindeki dökümcüler, otomobil endüstrisinin taleplerini karşılamakta sıkıntı yaşamamışlardır. Ayrıca basınçlı döküm makine imalatçıları da, daha büyük ve karmaşık makinalar üreterek sektörün gelişimine katkıda bulunmuşlardır. Sıcak hazneli döküm makinaları ile makina üreticileri, magnezyum dökümü için yeni ve hızlı bir proses yaratmışlardır. 1985 yılında basınçlı döküm sektörünün magnezyum ihtiyacı yıllık 30.000 ton iken, 1997 yılında 95.000 ton ve 1999 yılında 145.000 tona yükselmiş ve yıllık artış ortalama %12 civarında olmuştur. 2006 sonu itibariyle ise bu ihtiyaç yıllık 375.000 ton ile zirveye ulaşmıştır (International Magnesium Association Web Sitesi).

Magnezyumun basınçlı dökümü için, ticari olarak kullanılan dört adet magnezyum alaşım sistemi vardır. Bunlar magnezyum-alüminyum-çinko-mangan (**AZ**) serisi, magnezyum-alüminyum-mangan (**AM**) serisi, magnezyum-alüminyum-silisyum-mangan (**AS**) serisi ve yeni geliştirilen magnezyum-alüminyum-nadirtoprak-mangan (**AE**) serisidir (ASM Handbook Volume 2, 1996).

Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi diğer yöntemlerin sunamayacağı ekonomik avantajlar sunmaktadır. Magnezyumun basınçlı döküm yöntemiyle üretiminde, alüminyum ve çinkoya kıyasla, aynı ağırlıktaki hammadde ile daha fazla ürün elde edilmektedir. Otomasyona uygunluğu yönüyle, magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü, yüksek hacimli imalatlar için ideal bir yöntemdir. Alüminyum ve çinkoya kıyasla magnezyum alaşımlarının hacimsel özgül ısısı daha düşüktür. Bu da dökümün daha hızlı soğuması, daha yüksek çalışma hızı ve daha az kalıp aşınması demektir (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).

Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm ile imalatı; elektronik parçalardan kamyonların şanzıman kutularına kadar çok geniş bir üretim segmentinde kendini kanıtlamış bir yöntemdir. Basınçlı döküm, yüksek üretim hacimlerinde, aynı tip parçaların imalatında kullanılan, kendini tekrarlama esasına dayanan bir yöntemdir. Proses, ergimiş metalin yüksek basınç altında çelik bir kalıba enjekte edilmesi olarak tanımlanabilir. Basınçlı döküm, ergimiş magnezyumu tam ölçüde ve sorunsuz bir şekilde, mümkün olan en kısa çevrim süresinde, istenilen forma dönüştürme konusunda benzersiz bir yeteneğe sahiptir. Basınçlı döküm ile üretilen parçalar, plastik enjeksiyon yöntemine benzer bir şekilde, genellikle herhangi bir talaşlı işleme gerek duyulmadan, son şeklinde üretilmektedir (Brungs, Light Weight Design With Light Metal Castings, 1997).

Magnezyum alaşımlarından dökülen parçalar, plastik malzemelere göre daha sıkı yapılı ve boyutsal olarak daha kararlı özelliklere sahiptir. Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi, özellikle otomotiv sektörü başta olmak üzere uçak ve uzay sanayi, spor ekipmanları, elektronik parça sektörü, bilgisayar parçaları, güç ünitesi komponentleri gibi birçok alanda yaygınlaşmış durumdadır. Genel olarak bakıldığında, döküm yolu ile şekillendirilen magnezyum alaşımlarının miktarında, özellikle 1995 yılından itibaren önemli artışlar gözlenmektedir. Magnezyum dökümünde meydana gelen global büyümenin içinde bulunduğumuz yüzyılda da hızlı bir şekilde gelişme göstereceği tahmin edilmektedir (Department of Trade and Industry, Magnesium alloys and processing technologies for light weight transport applications, 2004).

Son 30-40 yıl basınçlı döküm tekniğinde büyük gelişmelere sahne olmuştur. Metal ve kalıp sıcaklıkları, basınçlar, besleme hızları gibi döküm faktörlerinin kontrolleri çok ilerlemiştir. 3-4 işçi ile çalıştırılabilen dalma silindirli basınçlı döküm makinasından, tek bir işçi gerektiren ve saatte yüzlerce döküm veren tam otomatik piston tipi çağdaş makinalara kadar çok büyük gelişmeler kaydedilmiştir (Doehler, 1974).

Basınçlı döküm, hassas bir yöntem olmasına rağmen, parça kalitesini ve mekanik özellikleri etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler, parça-kalıp konstrüksiyonu ve kalıp üretiminin doğru yapılmasıyla yakından ilişkilidir. Ancak parça kalitesini ve mekanik özellikleri etkileyen faktörlerin başında, işlem parametreleri gelmektedir. Kalıp ve parça üretiminin doğruluğu; kalıbın bölme yüzeyine, hareketli ve sabit maçaların yerine, kalıbın rijitliğine, kalıp yarılarının tam öpüşmesine ve konikliğin uygunluğuna bağlı olarak belirlenebilir. Kusursuz bir kalıp tasarlayıp imalatı gerçekleştirilse bile, döküm prosesi esnasında yanlış seçilen işlem parametreleri, doğru tasarlanmış parçaların bile hatalı ve kötü mekanik özelliklere sahip olacak şekilde üretilmesine sebep olabilmektedir. İşlem faktörlerini; döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, dolum süresi, piston ve meme giriş hızları, enjeksiyon basıncı (injection pressure) ve katılma sırasında uygulanan basınç (intensification pressure) oluşturmaktadır (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde işlem faktörleri; parça kalitesine, mekanik özelliklere, poroziteye ve hatalı parça üretimine doğrudan etki etmektedir. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde uygulanan işlem parametreleri, 10 yıl öncesine kadar, etkileyiş yönleri açısından değerlendirilmemişti. Ancak 1995'ten bu yana, seçilen işlem faktörlerinin etkileri üzerine deneysel çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Daha önceki yıllarda alüminyum alaşımlarının basınçlı dökümü için yapılan araştırmalar, magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm parametrelerini optimize etme çalışmalarına ışık tutmaktadır.

İşlem faktörleri (parametreleri) olarak incelenen unsurlar; katılma sırasında metale uygulanan basınç, meme giriş ve piston hızı (ikisi birbiri ile bağlantılıdır), kalıp sıcaklığı ve sıvı metalin ergitme veya döküm sıcaklığıdır. Bu parametrelerin yoğunluğa, mekanik özelliklere, poroziteye (gözenekliliğe), segregasyon oluşumuna ve çeşitli döküm hatalarına etkileri farklı deneysel ve teorik çalışmalar ile araştırılmıştır.

Bu çalışma hazırlanırken, magnezyum metali ve alaşımlarının genel özellikleri, magnezyumun basınçlı döküm uygulaması, magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde tasarım parametreleri ve işlem faktörleri ile bu faktörlerin parça dayanımına ve hata oluşumuna etkileri üzerine bugüne kadar yapılmış birçok deneysel ve teorik çalışma incelenmiştir. Bu tez, magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü konusunda çalışan araştırmacılara, rehber niteliği taşıması yönüyle önem kazanmaktadır.

2. MAGNEZYUM METALİ

2.1 Tarihçesi

Magnezyum elementinin tarihçesi 1755 yılında, Joseph Black isimli İskoç kimyagerin, magnezyanın (MgO) içinde, yeni bir element olan magnezyumu içerdiğini keşfetmesiyle başladı. Fakat Black, bu yeni elementi magnezyadan ayırmayı başaramadı. Magnezya daha önceden bulunmuş ve beyaz kaya (white stone) veya beyaz toprak (white earth) olarak adlandırılmıştı. Magnezya adı, ilk bulunduğu kuzey Yunanistan' daki Thesally bölgesinde Eski Romalılar tarafından verilmişti. Magnezya bu bölgeden çıkarılarak Akdeniz ve çevresindeki ülkelere dağıtılmıştı. Gerçekte, İngiliz bilim adamı ve kimyager Sir Humphrey Davy, 1808 yılında metali ilk ayırıştırın kişi olduğu için, magnezyumun kâşifi olarak kabul edilmiştir. Davy, galvanik bir pil ve bir cıva katot kullanarak magnezyum sülfatı elektroliz yöntemiyle bileşenlerine ayırmıştır (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).

Yirmi yıl sonra, Fransız Antoine Alexandre Brutun Bussy, dehidre edilmiş (kurutulmuş) magnezyum klorürü, yüksek sıcaklıklarda potasyumla eriterek metali ayırıştırılmayı başardı. Daha sonra, ünlü İngiliz bilim adamı ve Sir Humphrey' in eski asistanı Michael Faraday, magnezyum klorürü elektroliz yöntemiyle indirgeyerek, 1833 yılında saf metalik magnezyumu elde etti. Bir Alman olan Robert Wilhelm Bunsen ise, 1841'de karbon-çinko elektrik pilini geliştirdikten sonra, erimiş ve kurutulmuş magnezyum klorürden metalik magnezyumu üretmeyi başardı (1852).

Bazı Avrupa ülkelerinde küçük girişimler olmasına rağmen, magnezyum kalıcı ilgiyi sadece Almanya'da buldu. Almanya 1868 yılında, dünyadaki tek magnezyum üreticisi konumundaydı. Magnezyum; toz ve şerit halinde el fenerlerinde, piroteknik amaçlı ve de alüminyum üretiminde indirgeyici olarak kullanılıyordu. İkinci Dünya Savaşı sonlarına kadar magnezyum üretimi Avrupa, Amerika, Japonya ve Avustralya' da kurulan birçok fabrika tarafından istikrarlı bir şekilde gerçekleştiriliyordu. 1944 yılı itibariyle dünya genelinde 13 ülkedeki 41 fabrikanın üretim kapasitesi yaklaşık 410.000 ton civarındaydı. Aynı yıl bu fabrikalar toplam 210.000 ton magnezyum üretimi gerçekleştirmişti.

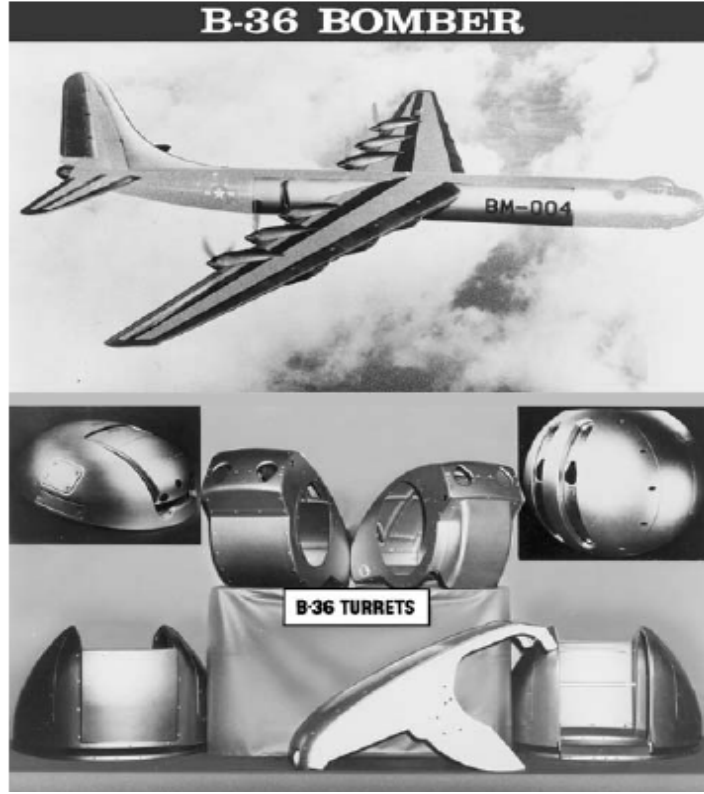
İlgi çekici şekilde 1940 yılında, tamamına yakını magnezyum alaşımından yapılmış ilk uçak olan Northrop XP-56 üretildi (Şekil 2.1). Aynı yıllarda üretilen B36 bombardıman uçağı da birçok magnezyum alaşımı parça ihtiva etmekteydi (Şekil 2.2). Savaş yılları magnezyum endüstrisi için oldukça parlak geçmekteydi. Ama sona yaklaştıkça durum tersine dönecekti.



Şekil 2.1 Tamamına yakını magnezyum alaşımından üretilen ilk uçak Northrop XP-56
(Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

Savaş sonlarına doğru, Amerika'daki Dow Şirketi yıllık 18.000 ton üretim yapan Michigan'daki Midland ana tesisini ekonomik sebeplerden dolayı kapatarak Texas Freeport fabrikasıyla üretime devam etme kararı aldı. Bununla beraber magnezyum talebindeki düşüş, 1944'de devlete ait beş fabrikanın ve Kasım 1945'de ise bütün kamu fabrikalarının kapanmasına neden oldu. 1945'de Kaiser Firması da Permanente'deki fabrikasını kapattıktan sonra, Amerika'da magnezyum üretimi yapan tek fabrika Dow's Freeport tesisleriydi (1946).

İkinci Dünya Savaşından sonra magnezyum üretimi hızlı bir şekilde düşüşe geçti. Almanya magnezyum üretimi konusunda yasaklanmıştı. Almanların magnezyum üretim fabrikalarının çoğu, Almanya (Aken) ve Avusturya'daki (Moosbienbaum) Sovyet işgal bölgesi sınırları içinde kalmıştı. Buralardaki magnezyum fabrikaları sökülerek Sovyet Rusya'ya götürüldü. Japonya'da da üretim benzer şekilde, 1946 sonlarında hammadde yokluğundan durma noktasına gelmişti (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).



Şekil 2.2 B36 bombardıman uçağı, yaklaşık 8,6 ton magnezyum alaşımı içermektedir.
(Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

Magnezyum endüstrisi, İkinci Dünya Savaşından sonra birçok ürünü geliştirmek için denemelerde bulunmasına rağmen çoğunda başarısız oldu. Magnezyum için en parlak yıllar Ferdinand Porsche tarafından tasarlanan Volkswagen Beetle otomobillerinin üretimiyle başladı. VW Beetle'da magnezyum alaşımlarından basınçlı döküm yöntemiyle üretilmiş birçok parça bulunuyordu. Karter ve şanzıman muhafaza kutusu gibi parçalar, her arabada 20 kg'lık magnezyum alaşımı kullanılmasına olanak sağladı. Volkswagen, savaş sonrası yasaklı Almanya'da magnezyum kullanım izni alan ilk firma oldu (1949). Magnezyum alaşımlarını Norveç'deki Norsk Hydro ve Texas'daki Dow firmalarından karşılamaktaydı. Volkswagen 1974 yılında, 50.000 tonluk magnezyum dökümü gerçekleştirmişti.

Savaş sırasında geliştirilen ve kullanılan birçok ürünün sivil hayata adapte edilmesi çabuk olmadı. Uçak tekerlekleri, döküm motor parçaları, nakliye otobüsleri gibi bazı kullanımlar modifiye edilse de, birçok deneme başarısızlıkla sonuçlandı ve çok sayıda fabrika kapandı. Bunun üzerine sivil hayatta magnezyum endüstrisine yardımcı olmak için, çeşitli dernekler ve birlikler kuruldu.

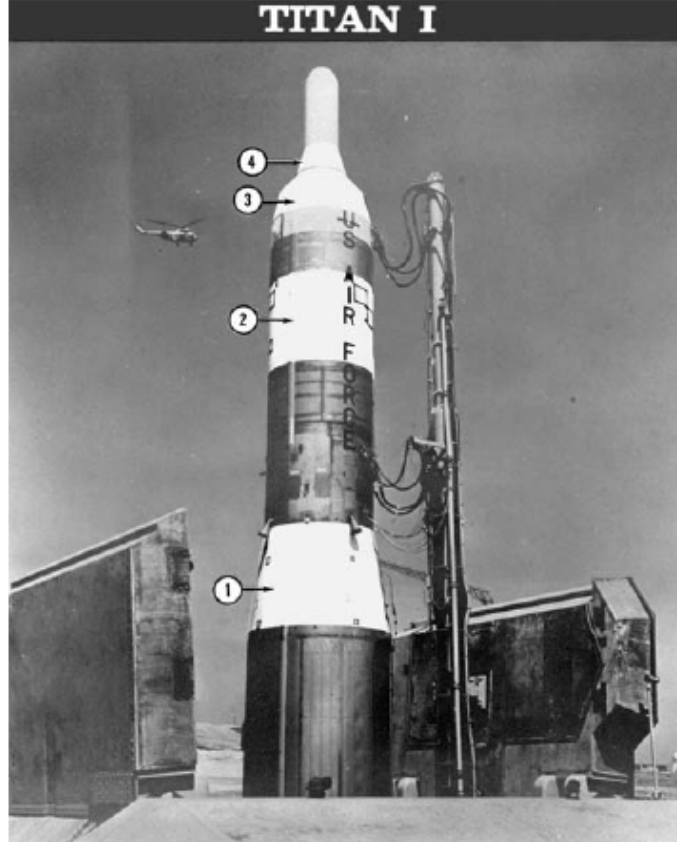
İngiltere’de The Magnesium Industry Council (MIC) ve Amerika’da The Magnesium Association (MA) yeni kullanım alanları bulmak için girişimlerde bulundu. Aşırı üretim kapasiteleri olmasına karşılık, savaş yıllarında olduğu kadar kullanım alanı bulamayan magnezyum alaşımları, magnezyum üreticilerini sıkıntıya sokmaktaydı. Ama kurulan dernekler sayesinde magnezyum çeşitli alanlarda yaygınlaşmaya başlamıştı. En başarılılarından biri sıcak sulu ısıtma sistemlerinde kullanılan ve korozyondan koruma sağlayan, ekstrüzyon ürünü magnezyum alaşımlarıydı. Bunun dışında el arabası, elektrikli testere, raf sistemleri ve koruyucu kutular (dockboards) kazanç sağlanan işlerdi (Şekil 2.3) (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).



Şekil 2.3 Magnezyumdan yapılmış çim-biçme makinası koruması
(Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

Dow firması sonunda Madison, Illionis’de dövme ürünler için bir tesis arsası satın aldı ve dünyanın en büyük ekstrüzyon presini (14.000 ton) kiraladı. Alman endüstrisi için üretilen bu pres savaş sebebiyle tamamlanamamıştı. Dow 1950’lerde, uçak ve roket endüstrisi için çok büyük miktarlarda magnezyum levha (sac) üretti. Magnezyum levhalar farklı sektörlerde de kullanım imkânı buldu. Örneğin Samsonite Bavul şirketi, imalatında derin çekilmiş saclardan faydalandı. Bavulların çerçeve kısımları ise ekstrüze edilmiş magnezyumdan imal ediliyordu. Günümüzde firma, çerçevelerde halen ekstrüzyon ürünü magnezyum alaşımları kullanmaktadır (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Magnezyum levhalar Vanguard, Jupiter, Titan 1, Polaris, Thorable Star ve Atlas Agena isimli birçok rokette kullanıldı (Şekil 2.4). Uluslararası kamyon şasisi ve gövdesi üreten Metro-Lite firması, kamyonların taban ve tavan kısımlarında, 4 mm kalınlığında magnezyum profiller kullandı. Kore Savaşının başlamasıyla, magnezyum levhalara olan talep hızla arttı. Uçak ve roketlerden sonra konteyner sistemleri de Mg alaşımlarının hafifliğinden faydalanmaya başlamıştı. Bu konudaki öncü firma ise, 1952 yılında Detroit' de kurulan Brooks and Perkins'di (B&P).



Şekil 2.4 Titan I Roketi, kullanılan toplam Mg 0,54 ton
(1: Magnezyum-Toryum HK31A levha, 2-3: HM21A levha, 4: AZ31B levha)
(Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

Magnezyumun, alüminyumu güçlendirici bir alaşım elemanı olarak kullanılması, içecek sektöründe alüminyum kullanımını çok hızlı bir şekilde artırdı. Meşrubat kutularının (teneke kutular) gövdelerinin yapıldığı 3004 alaşımı %1,2 ve kapak kısımlarının yapıldığı 5182 alaşımı %4 oranında Mg içermektedir. Ayrıca otomobil gövde sacları %1 oranında Mg içerir. Magnezyumun bu şekilde alaşım elemanı olarak kullanımı, kendisinden daha çok alüminyum endüstrisinin gelişimini sağlamıştır. Buna karşılık, çeliğin desülfirizasyonunda magnezyum toz ve granüllerin kullanılması, az da olsa magnezyum endüstrisine fayda sağladı.

Magnezyumun basınçlı dökümü, magnezyum endüstrisi içinde, en hızlı büyüyen ve global ölçekte en çok gelişen segment oldu. Bu gelişim, çevre dostu arabalara olan talebin artması sonucu ortaya çıkmıştır. Dünya genelindeki dökümcüler, otomobil endüstrisinin taleplerini karşılamakta sıkıntı yaşamadılar. Ayrıca basınçlı döküm makine imalatçıları da, daha büyük ve karmaşık makinalar üreterek sektörün gelişiminde katkıda bulundular. Sıcak hazneli döküm makinaları ile üreticiler, magnezyum dökümü için yeni ve hızlı bir proses yarattılar.

Geçtiğimiz yıllarda, otomobil üretim prosesi komple bir değişime uğradı. Otomobil üreticileri, daha az parçayla ve dışarıdan daha çok tedarikle yapılan üretimi tercih ettiler. Bu düşünce, onları komponentleri satın almaya yöneltti. Bu durum, parçanın dökümünü birinci elden yapmadan, dizaynının yapılması gibi bir sıkıntı doğurdu. Bunu aşmak için, döküm firmaları ve otomobil üreticileri halen entegrasyon çalışmaları yapmaktadırlar.

Çizelge 2.1 2000 – 2006 Yılları Birincil Magnezyum Üretimi (1.000 Ton)
(International Magnesium Association Web Sitesi)

| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 |
|-----------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|
| ABD | 74 | 43 | 35 | 43 | 43 | 43 | 43 |
| Brezilya | 9 | 9 | 7 | 6 | 11 | 6 | 6 |
| Kanada | 55 | 6 | 86 | 50 | 55 | 54 | 50 |
| Çin | 218 | 195 | 232 | 354 | 450 | 470 | 526 |
| Fransa | 17 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| İsrail | 2 | 30 | 34 | 30 | 33 | 28 | 28 |
| Kazakistan | 10 | 10 | 10 | 14 | 14 | 20 | 20 |
| Norveç | 50 | 35 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rusya | 40 | 50 | 52 | 45 | 45 | 45 | 50 |
| Ukrayna | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| Sırbistan | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 2 | 1 |
| Toplam | 479 | 448 | 468 | 544 | 655 | 670 | 726 |
| Yıllık Değişim | | -6% | +4% | +16% | +20% | +2% | +8% |

Özet olarak, magnezyum alaşımları İkinci Dünya Savaşı sırasında askeri alanda kazandığı popülariteyi, savaştan sonraki on yıl içerisinde pek çok sivil alanda da yakalamayı başardı. Amerika, Kanada, Brezilya, İngiltere, Fransa, İtalya, Norveç, Yugoslavya (Sırbistan), Ukrayna, İsrail, Kazakistan, Hindistan ve Çin Halk Cumhuriyeti gibi ülkeler, magnezyum üretimine ve kullanımına hız kazandırdılar. Günümüzde Çin, yıllık 526.000 ton kapasiteyle, dünyanın en büyük birincil magnezyum üreticisi durumundadır (Çizelge 2.1) (International Magnesium Association (IMA) Web Sitesi).

2.2 Magnezyum Üretim Teknolojileri

Magnezyum endüstrisinin özelliklerinden biri de, çok değişik üretim proseslerinin olmasıdır. Ticari olarak yüz yıla yakın bir süredir kullanılmasına karşılık, magnezyum eldesi için on farklı üretim metodunun bulunması biraz şaşırtıcıdır. Diğer sanayilerden farklı olarak, dünya genelinde kabul görmüş belirli bir üretim yöntemi yoktur. Genel olarak **termal** ve **elektrokimyasal** olarak iki yöntem olsa da, bunlar da kendi içlerinde büyük farklılıklar göstermektedir. Çok sayıdaki üretim teknolojisi arasındaki farklar, imalat aşamasındaki temel parametrelerden kaynaklanmaktadır. Aşağıda bu farkları oluşturan başlıca parametreler verilmiştir (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).

2.2.1 Ham Maddeler

Magnezyum üretimi için esas olarak kullanılan altı adet hammadde kaynağı vardır: **magnezit**, **dolomit**, **bisofit**, **karnelit**, **serpantin** ve **deniz suyu**. Bu kaynaklar; magnezyum içerikleri, üretim metotları ve çıkarıldıkları yerler sebebiyle farklılık gösterirler. Bir kısmı derindeki yataklardan çıkarılırken, bir kısmı yerüstündeki yataklardan elde edilir. Ayrıca bazıları deniz ve tuzlu göl sularından sağlanmaktadır. Bunların dışında asbest üretiminden sağlanan artıklar da, magnezyum üretiminde ham madde kaynağı olarak kullanılmaktadır (Çizelge 2.2, 2.3).

2.2.2 İndirgeme Metotları

Magnezyum doğada her zaman iyon formunda bulunur. Bu durum, en dıştaki iki elektronun düşük iyonlaşma enerjisiyle açıklanabilir ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$). Bu aynı zamanda, magnezyumun doğada neden sadece iki değerlikli olarak bulunduğu da cevabıdır. Bu sebeple bütün üretim teknikleri, magnezyuma iki elektron transfer edecek, indirgeyen bir elemana ihtiyaç duyar. İndirgeme elemanları; uygun voltajda verilen elektrik akımı, değişik formlarda kömür, silikon esaslı malzemeler (FeSi), CaC_2 ve alüminyumdur.

Literatürde kabul görmüş iki ana üretim teknolojisi, termal ve elektrokimyasal yöntemler arasındaki farklılık temelde indirgeme elemanlarından kaynaklanmaktadır. Elektrokimyasal yöntemler doğru akımlı elektrik kaynağını kullanırlar. Akım elektroliz hücresinden geçerek, klor ve magnezyum iyonlarını deşarj eder ve gaz fazına geçirir. Termal metotlar ise indirgeme elemanlarının bulunduğu bir ortamda magnezyanın (MgO) ısıtılmasına dayanmaktadır. Belirli bir sıcaklıkta indirgeme reaksiyonu meydana gelir ve genellikle gaz formunda magnezyum metali oluşur.

Çizelge 2.2 Hammaddeler ve özellikleri
(Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

| Hammadde | Kimyasal Formülü | Ağırlık Oranı | En Çok Bulunduğu Kaynak |
|------------|--|---------------|--|
| Magnezit | MgCO ₃ | %28,8 | Brezilya, Avusturya, Kore, Çin, ABD |
| Dolomit | MgCO ₃ * CaCO ₃ | %28,8 | İngiltere, Almanya, Brezilya, Norveç, Meksika |
| Bisofit | MgCl ₂ * 6H ₂ O | %11,96 | Deniz Suyu, Tuzlu Göl Suyu, Potasyum Üretiminde Yan Ürün |
| Karnelit | MgCl ₂ * KCl * 6H ₂ O | %8,75 | Meksika, ABD, Almanya, Rusya, Çin, İran, İsrail (Ölü Deniz Suyu) |
| Serpantin | 3MgO * 2SiO ₂ * 2H ₂ O | %26,33 | İtalya, Rusya, Kanada, Asbest Üretiminde Yan Ürün |
| Deniz Suyu | Mg ²⁺ | %0,129 | Deniz Suyu, Tuzlu Göl Suyu |

Çizelge 2.3 Deniz suyu ve Ölü Deniz (Dead Sea) suyunun bileşenleri
(ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999)

| Mineral | Deniz Suyu Bileşimi | Ölü Deniz Suyu Bileşimi |
|-----------|---------------------|-------------------------|
| Magnezyum | 0,129 | 4,2 |
| Klor | 1,95 | 20,8 |
| Potasyum | 0,038 | 0,75 |
| Brom | 0,067 | 0,6 |
| Sodyum | 1,077 | 3,5 |
| Kalsiyum | 0,0412 | 1,6 |

2.2.3 Üretim Sıcaklıkları

Farklı üretim yöntemlerindeki maksimum sıcaklıklar $655^{\circ} - 1.900^{\circ} \text{ C}$ aralığında değişmektedir. Görüldüğü gibi belirli bir malzemenin üretimi için çok geniş bir sıcaklık aralığı mevcuttur. Genelde, elektrokimyasal üretim yöntemleri, termal proseslere göre daha düşük bir sıcaklık aralığı olan, $655^{\circ} - 720^{\circ} \text{ C}$ sıcaklıklarında uygulanır. Termal yöntemler de ise üretim, genellikle $900^{\circ} - 1.900^{\circ} \text{ C}$ gibi daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelir.

2.2.4 Yan Ürünler

Farklı yöntemlerde oluşan yan ürünler, aslında ham maddenin bileşimine bağlıdır. Eğer ham madde bisofit veya karnelit ise, magnezyuma ilave olarak klor ve hammaddeye bağlı bazı ürünler elde ederiz. Örneğin karnelit kullandığımız takdirde, klora ilave olarak, suni gübre üretiminde kullanılan KCl tuzu elde edilir.

Hammadde olarak klor içermeyen bir yöntem kullanılırsa, yan ürün olarak klor eldesi mümkün değildir. Ama çoğu proses dışarıdan eklenen, magnezyum klorür veya HCl gibi bir klor kaynağına ihtiyaç duyduğundan; üretim sonunda bu katışkıların geri dönüşümünü yapmak mümkün olabilmektedir.

2.2.5 Başlıca Üretim Yöntemleri

Magnezyum üretim teknolojilerini iki ana yönteme ayırmamız mümkündür: **elektrokimyasal metotlar** ve **termal indirgeme metotları**. Bu iki yöntem arasındaki farklılık, magnezyum iyonlarını metal magnezyuma dönüştüren indirgeme prosesinden kaynaklanmaktadır. Elektrokimyasal metotta indirgeme, elektrolit hücreleri besleyen elektrik akımı tarafından sağlanmaktadır. Buna karşılık termal yöntemde indirgeme, birbirine benzeyen farklı redükleyicilerle yüksek sıcaklıklarda sağlanır.

Bu yöntemler de kendi içlerinde farklılıklar göstermektedir. Elektrokimyasal yöntemde kullanılan elektrot tipi, sayısı; elektrolitik hücrenin yapısı, kullanılan hammaddeler farkları belirlerken; termal proseste ise kullanılan enerji kaynağı, redükleyicilerin karışımı ve eldesi belirleyici unsurları oluşturmaktadır. Çizelge 2.4'de, her iki yöntemle ilgili endüstriyel bazda yapılmış bir sınıflandırma verilmiştir.

Dünya genelinde enerji maliyetlerinin, personel giderlerinin, finansal kaynakların ve de çevresel kuralların benzerlik gösterdiğini düşünürsek; bu durumda magnezyum fabrikalarının kurulması daha çok, hammadde ve enerji eldesinin kolaylığına, ulaşılabilirliğe ve geleneksel

üretim teknolojilerine bağlıdır diyebiliriz. Gerçekte, magnezyum üretim fabrikalarının açılması veya kapanması yukarıda saydığımız parametrelere bağlı olmakla birlikte; yeni gelişen ülkelerdeki ucuz kaynaklardan yararlanma isteği de etkili olmaktadır.

Çizelge 2.4 Üretim yöntemlerinin endüstriyel bazda sınıflandırılması

| Elektrokimyasal Üretim Yöntemleri | Termal Üretim Yöntemleri |
|--|---------------------------------|
| DSM (Dead Sea Mg) ve Rusya Prosesi | Silikotermik Proses |
| Dow Prosesi | 1. Pidgeon Prosesi |
| MagCorp (şimdi US Mag) Prosesi | 2. Magnetherm Prosesi |
| Hydro Magnesium Prosesi | 3. Bolzano Prosesi |
| Magnola Prosesi | Alüminotermik Proses |
| AMC (Australian Mg Corporation) Prosesi | Karbotermik Proses |
| | |

Magnezyum pazarının son on yılına bir göz atacak olursak, magnezyum üretimi alanındaki en büyük değişimin Çin'de meydana geldiğini görürüz. Bu değişim, ticari magnezyum üretimindeki en basit teknoloji olan Pidgeon Prosesine dayanmaktadır. Bu yöntem 1930 ve 1940'larda geliştirilmiş ve daha sonra neredeyse tamamen ortadan kaybolmuştu. Geçtiğimiz on yıl içindeyse, bu yönteme alternatif olarak 1950 ve 1960'larda geliştirilen daha avantajlı diğer termal metotların varlığına rağmen, tekrar gelişmeye başladı. Çin'de kullanılan Pidgeon yöntemi, enerji kaynağı olarak kömürün yanmasına ihtiyaç duymaktadır. 1 ton magnezyum üretebilmek için 20-25 ton kömür gereksinimi söz konusudur.

Çin'de magnezyum üretimi için harcanan enerji miktarı, gelişmiş ülkelerde tercih edilen elektrokimyasal prosesteki ihtiyacın yaklaşık iki katıdır. Bu denli büyük miktarlarda kömürün yakılması, çok fazla miktarda SO_x gazının atmosfere atılmasına sebep olmakta ve bu da çevresel açıdan oldukça büyük zararlara neden olmaktadır.

Pidgeon Prosesindeki personel ihtiyacı, batıda kullanılan elektrokimyasal yöntemlere göre 5-6 kat daha fazladır. Bu yöntemin avantajı, yeni elektrolitik yöntemlere kıyasla 1'e 10 seviyelerinde olan ilk yatırım maliyetidir. Buna ek olarak, oldukça küçük kapasiteli (500-3.000 ton/yıl) ve basit altyapılı fabrikaların kurulması, finansal açıdan olanaklıdır.

Ektrolitik ve termal redüksiyon proseslerinin magnezyum üretimi açısından karşılaştırılması ile ilgili özet bir tablo aşağıda verilmiştir (Çizelge 2.5). Buradan açıkça görülmektedir ki, elektrokimyasal yöntemler yatırım maliyetleri açısından termal proseslere oranla oldukça pahalıdır. Ancak işletme maliyetleri kıyaslandığında, termal proseslerin çok daha maliyetli olduğu görülmekte ve termal yöntem finansal açıdan avantajlarını yitirmektedir. (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

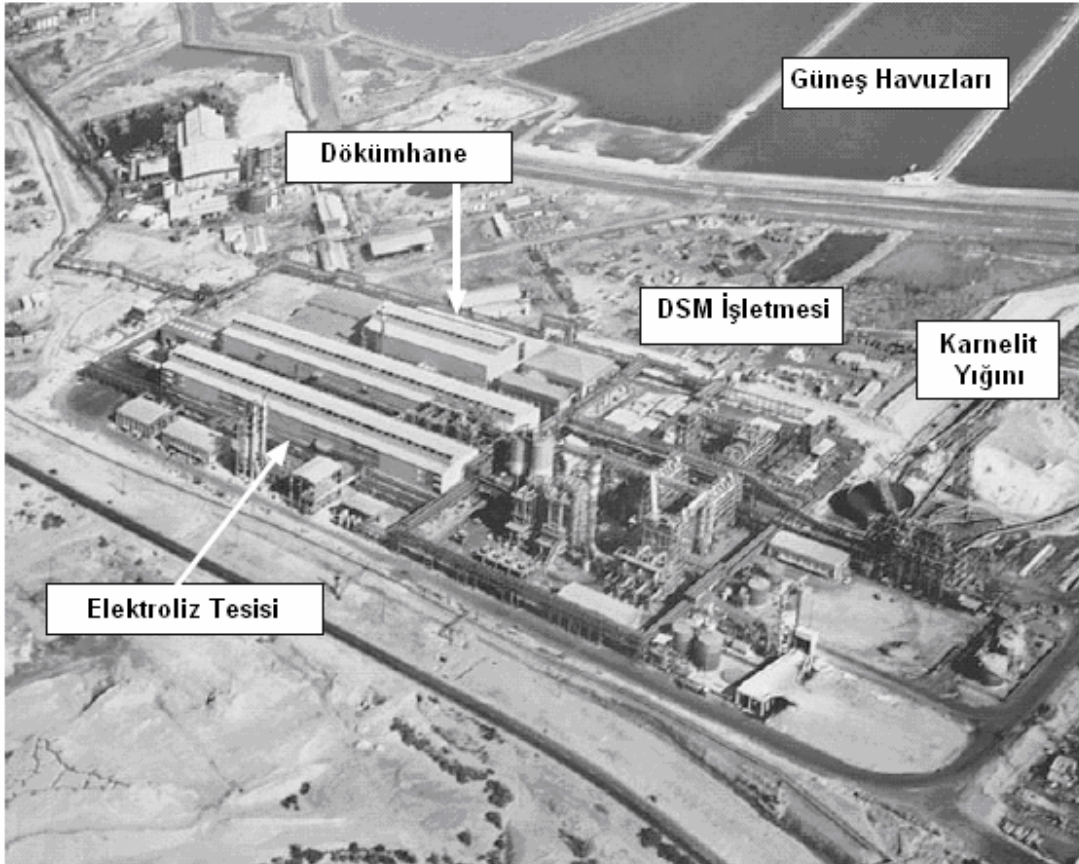
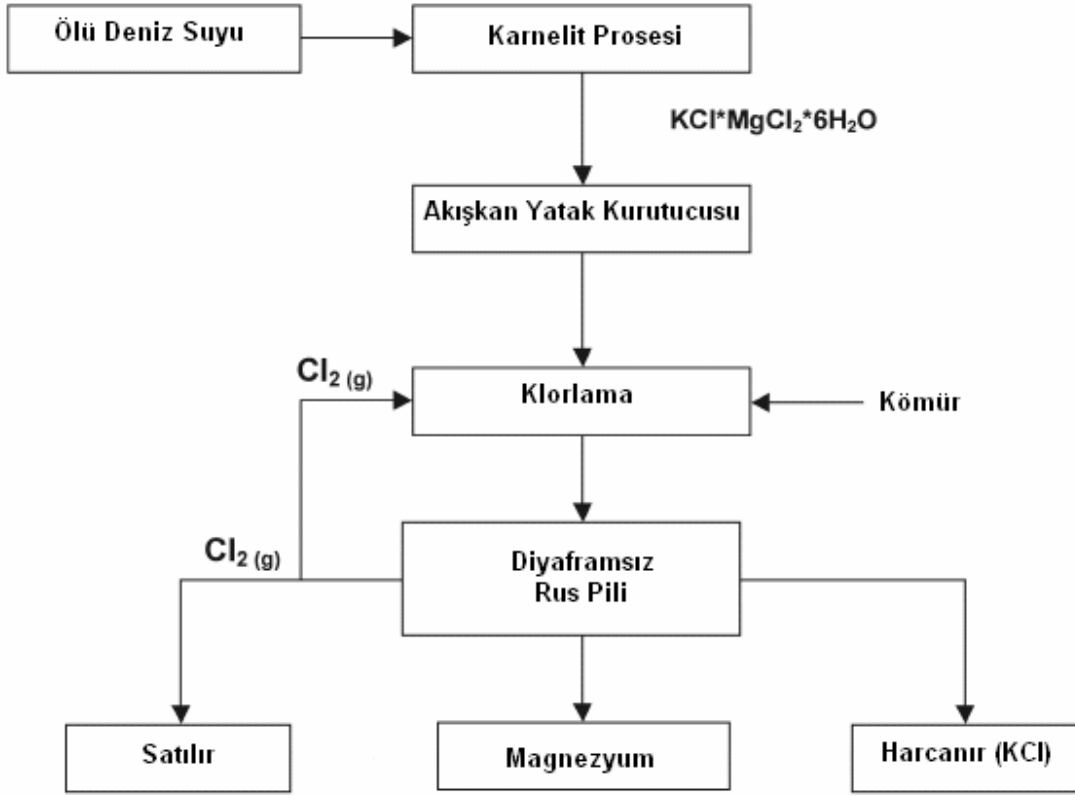
Çizelge 2.6'da ise 1950'den bu yana gerçekleştirilmiş başlıca magnezyum projeleri ve bu projeleri gerçekleştiren firmaların ilk kurulum kapasiteleri verilmiştir. Görüldüğü gibi her iki yöntemde farklı firmalar tarafından tercih edilmiş ve uygulamada kendine yer bulmuştur. Şekil 2.5'de DSM (Dead Sea Magnesium) ve Rus Prosesi olarak adlandırılan yöntemin iş akış şeması ve İsrail'deki DSM fabrikasından bir fotoğraf bulunmaktadır. Şekil 2.6'da ise Çin'de uygulanan Pidgeon Prosesinin akış şeması ve uygulamadan bir örnek verilmiştir.

Çizelge 2.5 Elektrokimyasal ve termal yöntemlerin karşılaştırılması
(Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

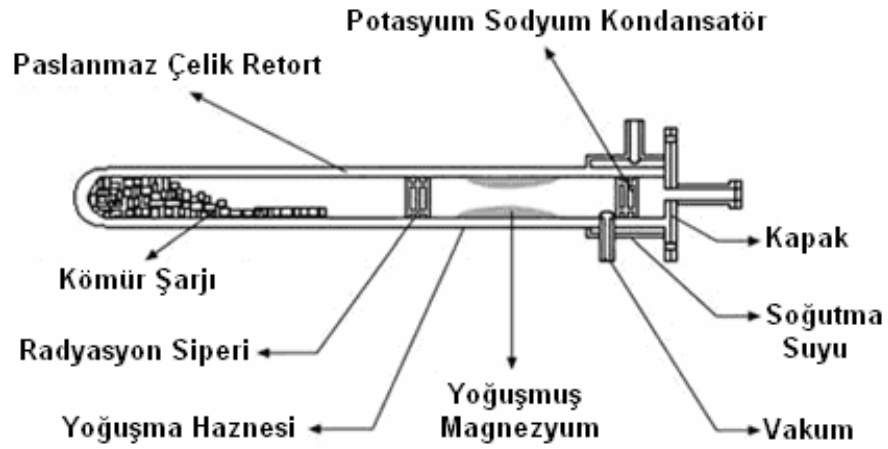
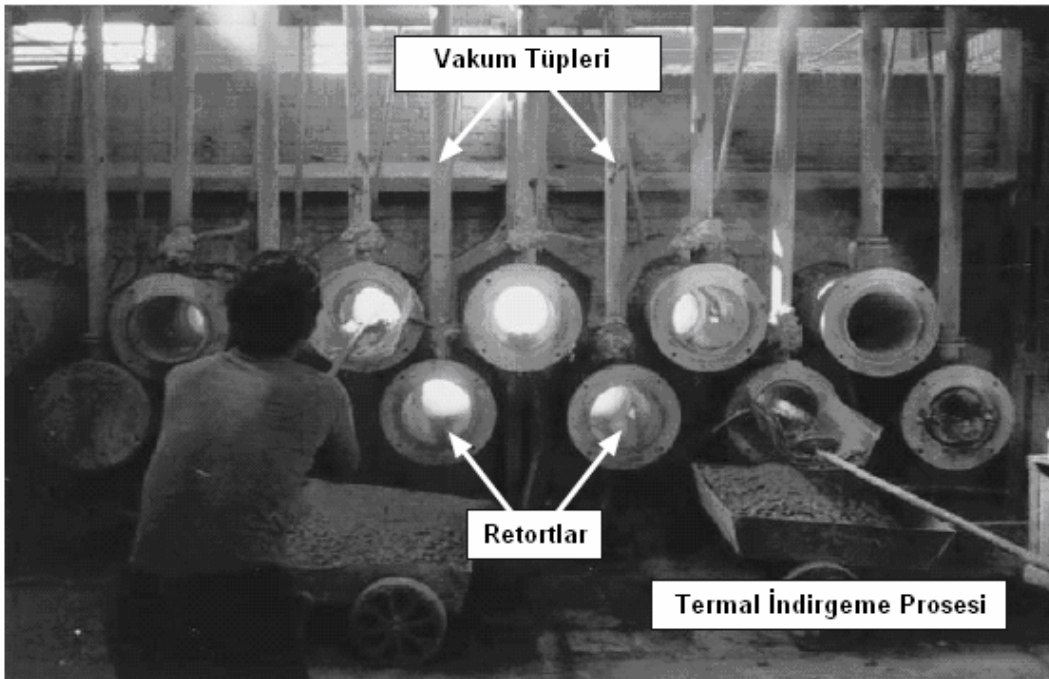
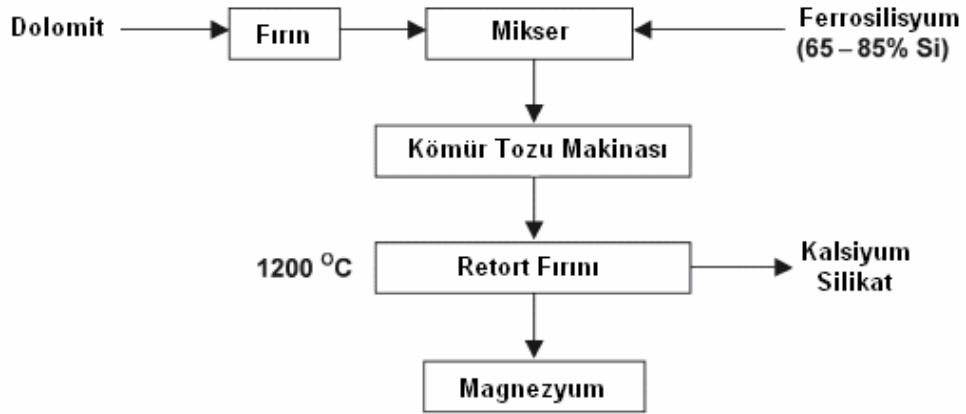
| Karşılaştırma Parametreleri | Elektrolitik Teknoloji | Termal Teknoloji |
|------------------------------------|--|---------------------------|
| Hammadde | Magnezit, Dolomit Bishofit, Karnelit Serpantin, Deniz Suyu | Dolomit Magnezit |
| Enerji Kaynakları | Hidro-güc, Gaz, Fuel-oil | Kömür, Gaz |
| Enerji Tüketimi | 18 – 28 [MWh/ton] | 45 – 80 [MWh/ton] |
| Proses Sıcaklıkları | 655° – 720° C | 900° – 1.900° C |
| İşletimsel Durum | Sürekli (Continuous) Proses | Parti (Batch) Prosesi |
| İlk Yatırım Miktarı | 10.000 – 18.000 [US\$/ton] | 2000 den fazla [US\$/ton] |
| İnsan Gücü İhtiyacı | X | 5X den fazla |

Çizelge 2.6 1950'den bu yana başlıca magnezyum projeleri (Friedrich ve Mordike, 2006)

| Yıl | Şirket | Yerleşim | Mg Kaynağı | Prosesi | Kapasite (ton) |
|------|---------------|-------------|---------------------|--------------|----------------|
| 1951 | Norsk Hydro | Norveç | Deniz Suyu | Elektrolitik | 18.000 |
| 1959 | Alabama Met. | A.B.D | Dolomit | Termal | 7.500 |
| 1960 | Furakawa | Japonya | Dolomit | Termal | 5.000 |
| 1964 | Pechiney | Fransa | Dolomit | Termal | 9.000 |
| 1964 | Ube Kosan | Japonya | Dolomit | Termal | 5.000 |
| 1965 | Kamenogorst | Kazakistan | MgCl ₂ | Elektrolitik | 40.000 |
| 1965 | MEL | İngiltere | Dolomit | Termal | 10.000 |
| 1969 | Nat. Lead | A.B.D | Tuzlu Göl Suyu | Elektrolitik | 40.000 |
| 1970 | Am Magnes | A.B.D | Tuzlu Göl Suyu | Elektrolitik | 25.000 |
| 1972 | Dow Chemistry | A.B.D | Deniz Suyu | Elektrolitik | 25.000 |
| 1975 | NoWst Alloy | A.B.D | Dolomit | Termal | 30.000 |
| 1989 | MagCan | Kanada | Magnezit | Elektrolitik | 12.500 |
| 1989 | Norsk Hydro | Kanada | Magnezit | Elektrolitik | 45.000 |
| 2001 | Noranda | Kanada | Serpantin Talaşı | Elektrolitik | 63.000 |
| 1996 | Dead Sea Mg | İsrail | Karnelit (Dead Sea) | Elektrolitik | 30.000 |
| 1997 | AusMagCorp | Avusturalya | Magnezit | Elektrolitik | 1.500 |
| 2001 | AusMagCorp | Avusturalya | Magnezit | Elektrolitik | 97.000 |
| 1987 | Minhe | Çin | Karnelit | Elektrolitik | 4.000 |
| 1990 | Çeşitli | Çin | Dolomit | Termal | 500 - 20.000 |



Şekil 2.5 DSM / Rus akış prosesii (Friedrich ve Mordike, 2006)



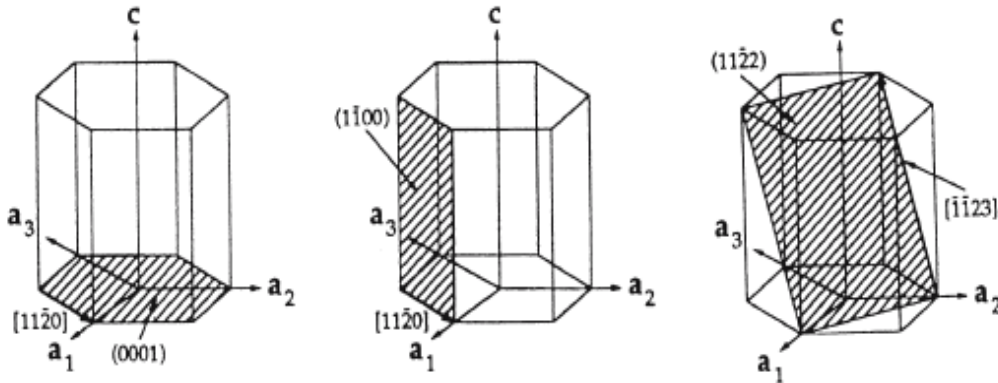
Şekil 2.6 Pidgeon proses akışı ve uygulama örneği (Friedrich ve Mordike, 2006)

2.3 Saf Haldeki Özellikleri

Magnezyum doğada metal formunda bulunmaz. Doğal metal formuna dönüştürmek için, ham maddeler (magnezit, dolomit, serpantin, asbest, tuzlu su ve deniz suyu) kimyasal işlemlere tabi tutulur. Bu şekilde üretilen magnezyum genellikle birincil magnezyum olarak adlandırılır. Magnezyum metali ayrıca hurda malzemelerden geri dönüşüm yöntemiyle elde edilir. Bu şekilde üretilen magnezyuma ise ikincil magnezyum denir.

Magnezyum, toprak alkali metalleri (2A) grubuna dâhil olan ve 3. periyotta bulunan bir elementtir. Atom numarası 12, atom ağırlığı 24,3050 g/mol olup; Mg sembolü ile gösterilir. Be (Berilyum), Ca (Kalsiyum), Sr (Stronsiyum), Ba (Baryum) ve Ra (Radyum) elementleriyle benzer elektron yapısına sahiptir. Elektron dizilimi $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ şeklindedir. En dış enerji seviyesindeki 2 elektrondan dolayı, daima 2 değerlik alır. Atom çapı 0,32 nm ve atomik hacmi $14 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 'dür. Kristal yapısı sıkı düzen hekzagonaldır (SDH). Şekil 2.7, birim hücredeki temel düzlemleri göstermektedir. Saf magnezyumun oda sıcaklığında hesaplanan kafes parametreleri; $a = 0,32092 \text{ nm}$ ve $c = 0,52105 \text{ nm}$ dir. 1,6236 olan c/a oranı, ideal değere (1,633) oldukça yakındır. Bu nedenle magnezyumun, mükemmel sıkı paket yapıya sahip bir metal olarak düşünülebilir (ASM Specialty Handbook, 1999).

Günümüzde konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılan metalik malzemeler içinde magnezyum en hafif olanıdır. Hafiflik bakımından en büyük rakibi de alüminyumdur. Magnezyum, hafifliği ve buharlaşma özellikleri bakımından plastiklere benzetilirken, bu malzeme bir metalin mekanik özelliklerine sahiptir. Saf magnezyumun fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.7 ve 2.8 de verilmiştir. En önemli rakibi alüminyum ile fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması ise Çizelge 2.9 da yapılmıştır.



Şekil 2.7 Birim hücredeki ana düzlemler ve yönleri (Friedrich ve Mordike, 2006)

Çizelge 2.7 Saf magnezyumun (ağ.%99,9) fiziksel özellikleri
(ASM Handbook Volume 2, 1996)

| Özellik | Değer |
|--|---|
| Ergime Noktası | 650°C ± 2 |
| Kaynama Noktası | 1107°C ± 10 |
| Ergime Gizli Isısı | 0,37 MJ/kg |
| Buharlaşma Gizli Isısı | 5,25 MJ/kg |
| Yanma Isısı | 25,1 MJ/kg |
| Özgül Isısı | |
| 20°C'de | 1030 J/(kg K) |
| 600°C'de | 1178 J/(kg K) |
| Elektriksel Direnci 20°C'de | 4,45 µΩ cm |
| Isıl İletkenliği 25°C'de | 155 W/(kg K) |
| Isıl Genleşme Katsayısı (Lineer) 20°C'de | 25,2 * 10 ⁻⁶ K ⁻¹ |
| Yoğunluk | |
| 20°C'de | 1,738 g/cm ³ |
| 600°C'de | 1,622 g/cm ³ |
| 650°C'de (katı) | 1,65 g/cm ³ |
| 650°C'de (sıvı) | 1,58 g/cm ³ |
| Katılaşma Sırasında Hacimsel Değişim | % 4,2 |
| Soğuma Sırasında Hacimsel Değişim (650–20°C) | % 5 |

Çizelge 2.8 Saf magnezyumun (ağ.%99,9) mekanik özellikleri
(ASM Handbook Volume 2, 1996)

| | Çekme Dayanımı | Çekmede Akma Dayanımı | Basmada Akma Dayanımı | Uzama % 50 mm | Brinell Sertliği |
|-------------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------|
| | MPa | MPa | MPa | – | 500 kp/10 mm |
| Kum döküm, Kalınlık 13 mm | 90 | 21 | 21 | 2–6 | 30 |
| Ekstrüzyon, Kalınlık 13 mm | 165–205 | 69–105 | 34–55 | 5–8 | 35 |
| Haddelenmiş levha | 180–220 | 115–140 | 105–115 | 2–10 | 45–47 |
| Tavlanmış levha | 160–195 | 90–105 | 69–83 | 3–15 | 40–41 |

Çizelge2.9 Saf magnezyum ve alüminyumun fiziksel özellikleri (Zeytin, 1999)

| Özellik (20°C) | Magnezyum | Alüminyum |
|--|--------------|-----------------|
| Atom numarası | 12 | 13 |
| Atom ağırlığı | 24,3 | 26,98 |
| Kafes tipi | SDH | YMK |
| Ergime noktası | 650 °C | 659 °C |
| Kaynama noktası | 1103 ± 8 °C | 2447 °C |
| Yoğunluk (gr/cm ³) | 1,738 | 2,699 |
| Elektrik iletkenliği (m/ΩK) | 22,2 | 37,6 |
| Termal iletkenlik (W/m.K) | 154 | 222 |
| Özgül Isı Kapasitesi (J/kg.K) | 1047 | 930 |
| Hacimsel Isı Kapasitesi (J/m ³ .K) | 1783 | 2430 |
| Ort. Isıl Gen. Kat (10 ⁻⁶ m/m.K) | 26 (0-100°C) | 23,86 (0-100°C) |
| Elastisite modülü (10 ³ N/mm ²) | 44,5 | 69,6 |

2.4 Kullanım Alanları

Tüm konstrüksiyon metalleri içinde en hafif olan metal magnezyumdur. Bu malzeme bir plastik kadar hafif fakat bir metal kadar da dayanıklıdır. Çelik ve çinkodan %75, alüminyumdan ise %33 daha hafif olması, birçok sektörde yapı malzemesi olarak kullanımına olanak sağlamaktadır. Magnezyum doğada en çok bulunan 8. elementtir, ayrıca alüminyum ve demirden sonra en çok bulunan yapı metalidir. Tuzlu su tortuları, tuz gölleri ve okyanusları baz alıp düşündüğümüzde ise magnezyum büyük bir farkla en çok bulunan metal haline gelir (Zeytin, 1999).

Yer kabuğunda bulunan minerallerin %2,5'i magnezyum içermektedir. Bununla beraber deniz suyunda % 0,13 oranında magnezyum bulunmaktadır. 1 mil küp deniz suyu 6 milyon ton magnezyum içerir ve Amerikan Araştırma Enstitüsüne göre ise dünya üzerinde 330 milyon mil küp deniz suyu bulunmaktadır. Bugünkü kullanım miktarları üzerinden hesap yapıldığında, sadece İsrail'deki Ölü Deniz'de (Dead Sea) dünyaya yaklaşık 20.000 yıl yetecek kadar magnezyum vardır. Magnezyum bol miktarda bulunan bir metal olmasına rağmen az miktarlarda üretilmektedir. Yıllık magnezyum üretimi 2006 sonu itibariyle 726.000 ton olmasına karşın alüminyum üretimi yaklaşık 33.000.000 tondur (International Magnesium Association Web Sitesi).

Magnezyum uygun karakteristikleri sayesinde birçok sektörde kullanılabilir bir metaldir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe hafifliği dolayısıyla tercih edilmektedir. Ancak bu koşulların sağlanabilmesi kolay olmamış, alüminyuma göre daha pahalı olmasından dolayı magnezyumun kabul görmesi uzun zaman almıştır. Düşen maliyetler neticesinde magnezyumda endüstride kendine yer bulmaya başlamıştır. Çizelge 2.10'da magnezyumun bazı fiziksel özelliklerinin ve maliyetinin diğer bazı mühendislik metalleriyle kıyaslaması verilmiştir (Smith, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 2001).

Magnezyumun $1,74 \text{ g/cm}^3$ 'lük yoğunluğu ve 650°C 'lik ergime sıcaklığı, çelik ve alüminyum gibi diğer konstrüksiyon metallerine göre dökümde ve talaşlı imalatta önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Örneğin magnezyum metali alüminyumdan iki kat daha hızlı dökülebilmekte ve işlenebilmektedir. Magnezyumun düşük yoğunluğundan kaynaklanan düşük eylemsizliği, hızlı hareket eden parçalar için bir avantajdır. Hafiflik aynı zamanda, imalat sırasında parçanın daha kolay taşınması ve bitmiş ürünün daha ucuza sevk edilmesi demektir (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

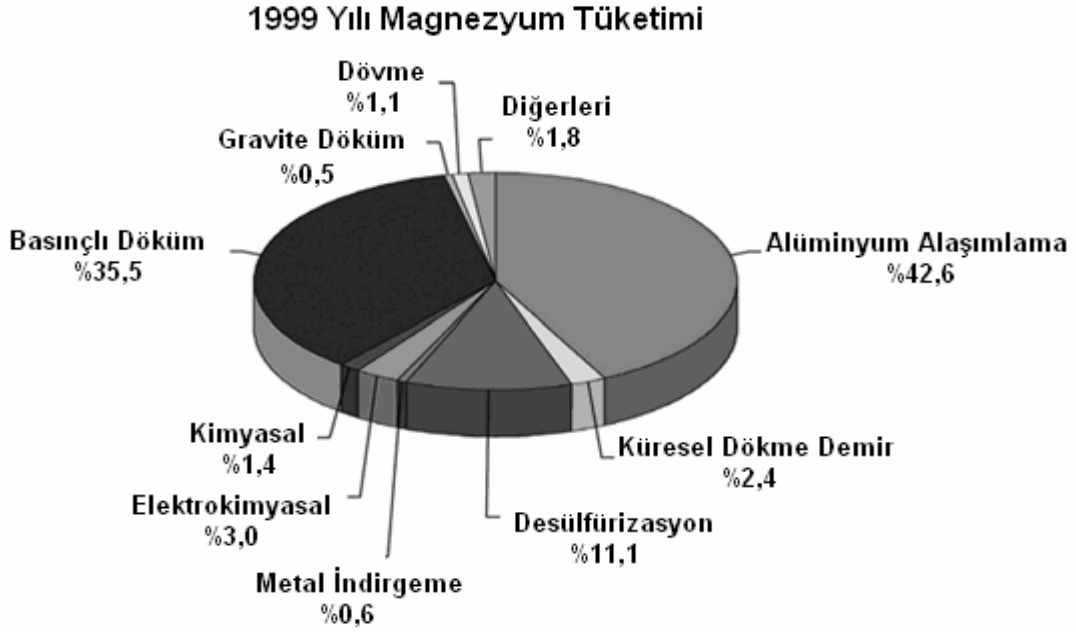
Çizelge 2.10 Bazı mühendislik metallerinin fiziksel özellikleri ve maliyetleri
(Smith, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 2001)

| Metal | Yoğunluk 20°C'de g/cm³ | Erime Noktası °C | Kristal Yapısı | Maliyet \$/kg (1994) |
|--------------|--|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Magnezyum | 1,74 | 651 | SDH | 3,37 |
| Alüminyum | 2,70 | 660 | YMK | 1,65 |
| Titanyum | 4,54 | 1675 | SDH↔HMK* | 7,70 – 10,00 |
| Nikel | 8,90 | 1453 | YMK | 3,00 |
| Demir | 7,87 | 1535 | HMK↔YMK** | 0,50 – 0,57 |
| Bakır | 8,96 | 1083 | YMK | 2,50 |

* Dönüşüm 883°C'de ** Dönüşüm 910°C'de

Endüstride magnezyum kullanımı ile ilgili olarak artan ihtiyaç Kanada ve Hindistan'da yeni tesislerin kurulmasına, Brezilya ve Japonya'da mevcut tesislerin genişletilmesine sebep olmuştur. Magnezyumun üretimi yıllara göre önemli artışlar kaydetmiştir. Bu artışlardaki en önemli etkenler magnezyumun çok hafif ve toksiditesinin az olmasıdır. Magnezyumun kullanıldığı alanlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Şekil 2.8);

- Alüminyum alaşımlandırma
- Basınçlı döküm
- Desülfirizasyon
- Küresel grafitli dökme demir
- Metal redüksiyon
- Elektro-kimyasal
- Kimyasal
- Gravite döküm
- Dövme ürünler
- Diğerleri



Şekil 2.8 Magnezyumun 1999 yılı pazar payları (Hydro Magnesium Web Sitesi)

Magnezyumun ticari olarak kullanımı 20. yy'ın ortalarında büyük bir artış gösterdi. Özellikle 1950-1960'larda otomotiv sektöründeki uygulamalar için magnezyum talebinde büyük bir artış oldu. Bunun sebebi Volkswagen firmasının Beetle modelinin üretiminde magnezyum alaşımlarını kullanmaya başlamasıydı. 1970'lerde Volkswagen Beetle zirvedeyken, bu modelin üretiminde 20 kg civarında magnezyum kullanılıyordu. Firma 1970'de 40.000 ton 1975'de ise 50.000 ton basınçlı döküm magnezyum parça üretmiştir. Ancak 1975'den sonra magnezyum fiyatlarının hızla artarak iki katına çıkması ve bu sırada rakibi alüminyumun fiyatının değişmemesi, magnezyumun popülerliğini kaybetmesine sebep oldu. Magnezyuma yeniden ilgi duyulması 1990'lı yılları bulmuştur. Şekil 2.8'den de görüldüğü gibi, üretilen magnezyumun %90'ı başlıca üç uygulama için kullanılır;

1. Alüminyum Alaşımlama: Saf alüminyumun dayanımı ve yenim direncini arttırmak için magnezyum kullanılır.
2. Basınçlı Döküm: Magnezyum değişik metallerle alaşımlandırılarak (alüminyum, çinko, mangan vb.) çok geniş bir alanda basınçlı döküm uygulamaları için kullanılır.
3. Demir-Çelik Üretiminde: Magnezyum demir ve çeliğin kükürt giderme işleminde indirgeyici olarak kullanılır. Küresel grafitli dökme demir ve titanyum gibi bazı metallerin üretiminde de kullanılmaktadır.

Basınçlı döküm pazarı, magnezyum talebinin en hızlı arttığı sektör olmuştur. 1985 yılında bu sektörün magnezyum ihtiyacı 30.000 ton iken, 1997 yılında 95.000 ton ve 1999 yılında 145.000 tona yükselmiş ve yıllık artış ortalama %12 civarında olmuştur. 2006 sonu itibariyle ise bu ihtiyaç yıllık 375.000 ton ile zirveye ulaşmıştır (International Magnesium Association Web Sitesi).

Basınçlı döküm sektöründe, magnezyum talebinin yükselmesinin sebebi, otomotiv sektöründeki magnezyum ihtiyacının artmasıdır. Bağımsız bir madencilik ve metal endüstrisi araştırma grubu olan CRU International Company'nin araştırmalarına göre 2009 yılı itibariyle birincil magnezyum üretiminin 910.000 ton olarak gerçekleşeceği ve bunun %55'inin yani 500.000 tonunun, basınçlı döküm uygulamalarında kullanılacağı tahmin edilmektedir. Bu tahminle, 1999 yılında bir otomobilde ortalama 2,7 kg magnezyum kullanılırken, 2009 yılında bu rakam ortalama 9,1 kg'a yükselecektir (Danışman, 2003).

İçlerinde Ford, General Motors, Porsche, Volkswagen, Audi, BMW ve Mercedes'in de bulunduğu başlıca otomobil üreticileri, 30'un üzerinde motorlu araç parçasının üretimini, magnezyum alaşımları kullanılarak gerçekleştirmiştir. Özellikle son yıllarda otomobil endüstrisinde magnezyum alaşımlarının kullanımının artması, birincil magnezyum üretimi sektörünü de olumlu etkilemiştir. 2006 yılı sonunda, basınçlı döküm uygulamaları, tahmin edilen değerleri aşmış ve toplam magnezyum kullanımının %55'ini kapsamıştır. Bu durum otomobil sanayindeki magnezyum talebinin hızla artmasıyla açıklanmaktadır. Önümüzdeki yıllarda, taleplerdeki artışının devam edeceği ve magnezyumun, alüminyum ve plastıklere alternatif olarak tercih edileceği tahmin edilmektedir (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).

3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

Magnezyum alaşımları, 160-300 N/mm² çekme dayanımı, 80-190 N/mm² (%0,2) akma dayanımı ve %2-15 kopma uzamasına sahip alaşımlardır. Geleneksel magnezyum alaşımları, bu asrın ilk on yılında geliştirilmeye başlanmış ve 1930'lu yılların sonunda bir zirveye ulaşmıştır. İkinci zirve ise 1950'lerde görülmektedir. Son 40 yılda daha ziyade alüminyum ve çelik üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Ancak günümüzde, plastiklerin yerine magnezyum alaşımlarının kullanılması, bu malzemeyi yeniden gündeme getirmiştir.

Magnezyum alaşımları yapısal (structural) ve yapısal olmayan (nonstructural) çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Yapısal uygulamalar; otomotiv sektörünü, endüstriyel makine sektörünü (tekstil ve matbaa), el aletlerini, ticari sektörü (bavul, bilgisayar kasası, merdiven) ve uçak-uzay (aerospace) sanayi ekipmanlarını kapsamaktadır. Magnezyum aynı zamanda yapısal olmayan uygulamalarda da hizmet vermektedir. Alaşımlama elementi olarak alüminyum, çinko, kurşun ve diğer demir-dışı metallerde kullanılır. Nikel ve bakır alaşımlarının üretiminde oksijen tutucu ve desülfirazör olarak; demir-çelik sanayinde desülfirazör olarak ve ayrıca berilyum, titanyum, zirkonyum, hafniyum ve uranyum üretiminde indirgeyici eleman olarak kullanılır (ASM Handbook Volume 2, 1996).

Magnezyumun yapısal olmayan diğer bir uygulaması da organik kimyadaki Grignard Reaksiyonudur (Halojenalkanların metal hidrürlerle indirgenmeleri). Saf magnezyum ve %30'a kadar alüminyum içeren alaşımları, ince taneli toz formunda piroteknik uygulamalarında da kullanılmaktadır. Magnezyumun elektromotor serideki relatif pozisyonu, diğer metallerin korozyondan korunmasında, magnezyumun katodik koruyucu olarak kullanılmasına olanak sağlar. Bununla beraber kuru ve şarjlı pillerin yapımında da elektromotor seri özelliğinden faydalanılır.

Gri dökme demir dökümhaneleri, magnezyum ve magnezyum içeren alaşımları dökümden hemen önce potaya katarlar. Magnezyum, grafit parçacıklarını küreselleştirerek; dökme demirin tokluğunu ve sünekliğini artırır. Ayrıca magnezyum, dağlamaya hızlı fakat kontrollü tepki vermesinden dolayı, fotoğraf banyolama sektöründe de kullanılmaktadır.

Alüminyum ve çinko katı magnezyum içinde oldukça iyi çözünürler ama çözünürlükleri düşük sıcaklıklarda azalır. Alüminyumun ağırlıkça çözünürlüğü 437°C'de %12,7 ve 93°C'de %3'tür. Çinkonun ağırlıkça çözünürlüğü ise 340°C'de %6,2 ve 204°C'de %2,8'dir. Mangan, zirkonyum ve seryum ise 482°C'de ağırlıkça %1'den daha az çözünürler. Ötektik noktada ise %4,5 toryum magnezyum içinde çözünebilir (ASM Handbook Volume 2, 1996).

Alüminyum ve çinko içeren magnezyum alaşımlarının korozyon dayanımını arttırmada, mangan oldukça etkilidir. Mangan içeren bu alaşımlar, demirin alaşımdaki içeriği ve aktivitesi kontrol altında tutulduğundan, oldukça kullanışlı ve korozyona dirençlidirler. Ayrıca alüminyum ve çinko içermeyen magnezyum-itriyum alaşımları da korozyona karşı oldukça iyi direnç gösterirler (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).

3.1 Başlıca Alaşım Elementleri

3.1.1 Alüminyum (Aluminium)

Alüminyum genellikle en çok kullanılan alaşım elementidir ve basınçlı döküm alaşımlarının temel yapısını oluşturur. Maksimum çözünürlüğü ağırlıkça %12,7 olup, %6'dan fazla alüminyum içeren alaşımlara ısıtma işlemi uygulanabilmektedir. Alüminyum dayanım özelliklerini iyileştirir, optimum dayanım ve süneklik kombinasyonu %6'luk alaşımda gözlenmiştir. Alüminyum içeren alaşımlar kolayca dökülebilmektedir. Sürünme dirençleri, $Mg_{17}Al_{12}$ fazının zayıf termal stabilitesinden dolayı oldukça sınırlıdır.

3.1.2 Kalsiyum (Calcium)

Kalsiyumla alaşımlandırma, sürünme direnci yüksek fakat ucuz alaşımların geliştirilmesiyle ortaya çıktı. Böylece $Mg_{17}Al_{12}$ fazı ile $Al_{12}Ca$ fazının yer değiştirmesi sağlandı. Diğer taraftan kalsiyum ergitmede veya sonraki işlem uygulamalarında, deoksidan olarak görev yapmaktadır. Kalsiyum, sacların haddelenme kabiliyetini iyileştirirken; ağırlıkça %0,3'ü geçmesi kaynak kabiliyetini olumsuz etkilemektedir.

3.1.3 Lityum (Lithium)

Magnezyum alaşımlarının yoğunluğunu düşüren tek alaşım elementidir. Ayrıca, oda sıcaklığında ağırlıkça %5,5 (hacimsel %17) gibi oldukça yüksek bir oranda magnezyum içinde çözünebilmektedir. Lityum ilavesi ile dayanım azalır fakat süneklik artar. Elastisite modülünde ise biraz iyileşme görülür.

3.1.4 Mangan (Manganese)

Mangan genellikle tek başına kullanılmaz fakat alüminyum gibi diğer elementlerle birlikte katılır. Bu durum $MnAl$, $MnAl_6$, $MnAl_4$ bileşiklerinin oluşmasına sebep olur. Mangan demirin çözünürlüğünü azaltarak, oldukça zararsız bileşikler oluşturur. Mg-Al ve Mg-Al-Zn

alaşımının akma dayanımını arttırır ve tuzlu su korozyon direncini iyileştirir. M1A ikili alaşımları (Mg-Mn), dövme ve ekstrüzyon yöntemlerinde kullanılır. Manganın alaşım içindeki maksimum yüzdesi ağırlıkça %1,5-2 civarındadır.

3.1.5 Nadir Topraklar (Rare Earths)

Nadir topraklar, magnezyum alaşımlarının yüksek sıcaklık dayanımını ve sürünme direncini arttırmak için kullanılırlar. Genellikle Mischmetal (Mişmetal; seryum ağırlıklı olmak üzere, lantan ve neodyum içeren, toprak alkalilerden oluşan metelsel bileşik) veya Didymium (%85 neodyum ve %15 proseodyum) olarak ilave edilirler.

3.1.6 Silisyum (Silicon)

Silisyum, ergimiş alaşımların akıcılığını arttırır. Demirle birlikte bulunduğu zaman ise korozyon direncini azaltır. Çok az alaşımda kullanılır (AS21 ve AS41).

3.1.7 Gümüş (Silver)

Gümüş, yaşlandırma setleştirmesi uygulamasını iyileştirir. Ayrıca toryum ve nadir toprakları içeren alaşımların (örneğin QE22 ve QH21), yüksek sıcaklık özelliklerini arttırır.

3.1.8 Toryum (Thorium)

Toryum ilavesi, alaşımların sürünme direncini 350°C'ye kadar arttırır. Düküm kabiliyetini iyileştirir. Alaşımları, kaynak edilebilir özelliktedir. Toryumun radyoaktifliğinden dolayı kullanımını yavaş yavaş terk edilmektedir.

3.1.9 İttriyum (Yttrium)

İttriyum, nadir toprak elementleriyle birlikte yüksek sıcaklık dayanımını ve sürünme direncini, 300°C sıcaklığa kadar çıkarmak için kullanılır.

3.1.10 Çinko (Zinc)

Çinko, en yaygın kullanılan alaşım elementlerinden biridir. Genellikle alüminyumla birlikte alaşımlara katılır (örneğin AZ91). Bunun dışında zirkonyum, toryum ve nadir toprak elementleriyle beraber oluşturduğu alaşımlarda mevcuttur.

3.1.11 Zirkonyum (Zirconium)

Zirkonyum tane inceltici elementtir. Çinko, nadir toprak elementleri, toryum, itriyum veya bunların karışımını içeren alaşımlarda kullanılır. Fakat alüminyum veya mangan içeren alaşımlarda, bu elementlerle kararlı bileşikler oluşturduğu için kullanılmaz. Aynı zamanda demir, silisyum, karbon, azot, oksijen ve hidrojenle de ergimiş halde kararlı bileşikler oluşturmaktadır. Sadece çözünmüş haldeki zirkonyum tane inceltici olarak etkilidir.

3.2 Üretim Amaçlı Kullanılan Elementler ve Katışkılar (Impruties)

3.2.1 Berilyum (Beryllium)

Berilyum, magnezyum alaşımları içinde çok az çözünürlüğe sahiptir. Ergimiş metal yüzeyinde oksidasyonu azaltmak için çok düşük miktarlarda (<30ppm) kullanılır. Berilyum miktarının artması, tane kabalaşmasına neden olur.

3.2.2 Bakır (Copper)

Bakır, alaşım içinde ağırlıkça %0,05'den fazla bulunursa, korozyon özelliklerini kötü etkilemektedir. Bunun yanında yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirdiğinden, sınırlı miktarda kullanılmalıdır.

3.2.3 Demir (Iron)

Korozyon direncini azalttığı için çok zararlı bir katışkıdır. İyi bir korozyon direnci için, maksimum demir miktarı ağırlıkça %0,005 olarak belirlenmiştir.

3.2.4 Nikel (Nickel)

Nikel de çok zararlı bir katışkıdır. Çok küçük miktarları bile korozyon direncini oldukça düşürür. İyi bir korozyon direnci sağlamak için, ağırlıkça %0,005'lik değer, demirde olduğu gibi, üst sınır olarak belirlenmiştir.

3.2.5 Kalay (Tin)

Küçük miktardaki kalay, alüminyumla bileşik oluşturarak sünekliği iyileştirir ve dövme sırasında oluşan çatlak eğilimini düşürür. Görüldüğü gibi, üretim sırasında istenen özellikleri sağlayan çokaz sayıda element vardır. Yeni ve daha iyi alaşımlar için araştırmalar sürmektedir (skandiyum, stronsiyum, terbiyum ve gadolinyum son günlerde incelenen elementler).

3.3 Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Genel olarak magnezyum alaşımları **döküm** ve **yoğruk** (dövük) alaşımlar olmak üzere ikiye ayrılır. Döküm alaşımlar kendi aralarında basınçlı, kum ve kalıcı kalıba döküm alaşımları olarak ayrılırken; **yoğruk** alaşımlarda sac, levha, ekstrüzyon ve dövme alaşımlar olarak alt bölümlere ayrılmaktadır. Alaşımların ve ısıl işlemlerin gösterim standartları 1948 yılında belirlenmiş olup, Çizelge 3.1’de açıklanmıştır. Sistemin çalışması ile ilgili bir örnek vermek için **AZ91E-T6** alaşımını ele alabiliriz. Gösterimdeki ilk kısım, **AZ**, alüminyum ve çinkonun iki ana alaşım elementi olduğu anlamına gelir. Gösterimdeki ikinci kısım, **91**, alüminyum ve çinkonun alaşım içindeki yuvarlatılmış yüzdelerini verir (sırasıyla %9 ve %1). Üçüncü kısım, **E**, %9 Al ve %1 Zn içeren standartlaştırılmış alaşımlar içinde, beşinci alaşım olduğunu ve yüksek korozyon direnci gösterdiğini belirtir. Dördüncü bölüm, **T6** ise, alaşımın çözelti ısıl işlemi gördüğünü ve yapay yaşlandırıldığını ifade eder (Çizelge 3.2, 3.3).

Çizelge 3.1 ASTM sisteminde magnezyum alaşımlarının, alaşım ve menevişleme gösterimlerinin standart dört bölümü (ASM Speciality Handbook, 1999)

| Birinci Kısım | İkinci Kısım | Üçüncü Kısım | Dördüncü Kısım |
|---|---|---|---|
| İki temel alaşım elementini belirtir | İki ana alaşım elementinin miktarını belirtir | Temel alaşım elementi miktarları aynı olan alaşımlar arasındaki farkı belirtir | Menevişleme koşullarını belirtir |
| Azalan yüzde miktarlarına göre düzenlenmiş iki ana alaşım elementini ifade eden, iki harften meydana gelir (eğer miktarlar eşitse alfabetik olarak sıralanır) | İki ana alaşım elementinin yuvarlatılmış yüzdelerini gösteren iki rakamdan meydana gelir ve birinci kısımdaki gösterim sırasına göre düzenlenir | ASTM standardına göre belirlenmiş bir alfabetik harften oluşur (I ve O hariç) A: Birinci Bileşim B: İkinci Bileşim C: Üçüncü Bileşim D: Yüksek Saflıkta (HP) E: Yüksek Korozyon Direnci | Bir harfi izleyen bir numaradan meydana gelir (üçüncü kısımdan tire işaretiyle ayrılmıştır) |

Çizelge 3.2 Alaşım elementleri için kabul edilen gösterim (ASM Handbook Volume 2, 1996)

| Harf | Alaşım Elementi | Harf | Alaşım Elementi |
|------|----------------------|------|-----------------|
| A | Alüminyum (Al) | M | Mangan (Mn) |
| C | Bakır (Cu) | N | Nikel (Ni) |
| E | Nadir Topraklar (RE) | Q | Gümüş (Ag) |
| F | Demir (Fe) | S | Silisyum (Si) |
| H | Toryum (Th) | T | Kalay (Sn) |
| K | Zirkonyum (Zr) | W | İtriyum (Y) |
| L | Lityum (Li) | Z | Çinko (Zn) |

Çizelge 3.3 Magnezyum alaşımları için menevişleme gösterimleri (4.kısım)
(Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

| Genel Bölümler | |
|---|--|
| F | Üretildiği gibi |
| O | Tavlanmış ve yeniden kristallenmiş (sadece yoğruk ürünler için) |
| H | Gerinme sertleştirilmesi yapılmış |
| T | F, O veya H den başka kararlı menevişler için ısıtılma işlemi görmüş |
| W | Çözelti ısıtılma işlemi uygulanmış (kararsız menevişleme) |
| Gerinme Sertleştirilmesi (H) Alt bölümleri | |
| H1 | Sadece gerinme sertleştirilmesi uygulanmış |
| H2 | Gerinme sertleştirilmesi uygulanmış ve kısmi tavlanmış |
| H3 | Gerinme sertleştirilmesi uygulanmış ve kararlaştırılmış |
| Isıtılma İşlemi (T) Alt bölümleri | |
| T1 | Soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış |
| T2 | Tavlanmış (sadece döküm ürünler için) |
| T3 | Çözelti ısıtılma işlemi uygulanmış ve soğuk işlenmiş |
| T4 | Çözelti ısıtılma işlemi uygulanmış |
| T5 | Soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmış |
| T6 | Çözelti ısıtılma işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış |
| T7 | Çözelti ısıtılma işlemi görmüş ve kararlaştırılmış |
| T8 | Çözelti ısıtılma işlemi görmüş, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış |
| T9 | Çözelti ısıtılma işlemi görmüş, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş |
| T10 | Soğutulmuş, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş |

3.4 Denge Faz Diyagramları

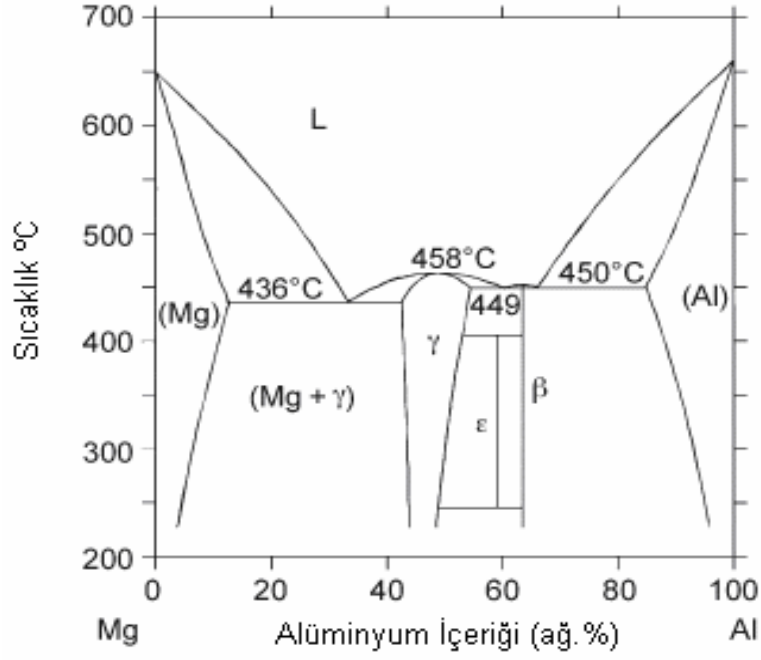
Mikro yapıyı tanımlayan bir malzeme terimi olarak **faz**, yapı veya bileşim bakımından bir diğer bölgeden farklı olan bölge demektir. Faz diyagramları malzeme sistemlerinde; değişik sıcaklık, basınç ve bileşimlerde hangi fazların bulunduğunu çizgilerle gösteren şekillerdir. Faz diyagramlarının çoğu denge koşullarına göre çizilmiştir ve mühendisler ile bilim adamları tarafından, malzeme davranışını çeşitli yönleriyle anlamak ve tahmin etmek için kullanılırlar (Smith, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 2001).

Malzemelerin özellikleri yapıya duyarlı olanlar ve yapıdan bağımsız olanlar şeklinde sınıflandırılabilir. Yapıdan bağımsız olup genellikle mikroyapıdan etkilenmeyen özellikler; yoğunluk, elektriksel özellikler, ısıl iletkenlik, özgül ısı vb'dir. Bu tip özellikler kimyasal bileşim ve atomik özellikler tarafından belirlenir. Yapıya bağlı özelliklerin tamamı, mekanik özelliklerdir.

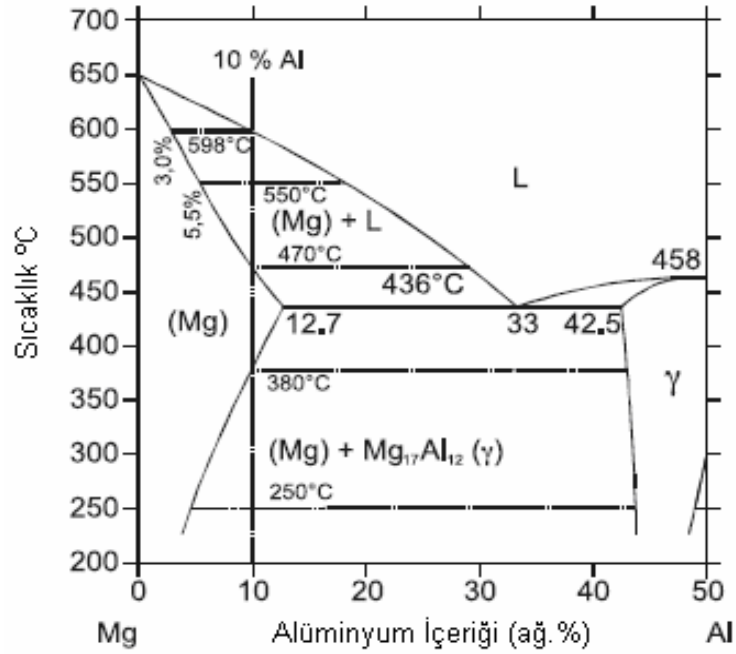
Metalurjistler bir malzemeyi sadece kimyasal bileşimiyle değil aynı zamanda fazların durumuyla tanımlarlar. İkili ve üçlü sistemler söz konusu olunca, malzemenin tanımlanması, faz diyagramlarıyla kolayca yapılabilmektedir. Faz diyagramları malzemelerin denge durumlarını göstermesine karşın; fiziksel şekil, faz dağılımları veya denge-dışı durumdaki işlemler hakkında bilgi vermez. Faz diyagramları, özellikle mikroyapıyı yorumlamak ve ısıl işlem (yaşlandırma sertleştirme veya termo-mekanik uygulamalar gibi) planlarını yapmak için çok kullanışlı araçlardır. Aşağıda magnezyum ikili alaşım sistemlerinin en önemli faz diyagramları verilmiştir (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).

3.4.1 Magnezyum-Alüminyum

Alüminyum, magnezyum için en önemli alaşım elementlerinden biridir. Birçok alaşım sistemi, ağı.%10'a kadar alüminyum içerir; örneğin AZ, AM, AE ve AS. Şekil 3.1'de Mg-Al denge faz diyagramı görülmektedir. Alüminyum, magnezyum içinde kolayca çözünen birkaç metalden sadece biridir. Alüminyum içeriği çözünebilirlik limitinin üstünde ise, kırılğan (gevrek) bir arabileşik (intermetallic) olan $Mg_{17}Al_{12}$ çökeltir. Alüminyumun çözünebilirlik limiti ötektik sıcaklıkta at.%11,5 (ağı. %12,7) iken oda sıcaklığında at.%1'e kadar düşmektedir. Bundan dolayı, özelliklerin belirlenmesinde, $Mg_{17}Al_{12}$ etkin bir rol oynamaktadır (Şekil 3.2). Mg-Al esaslı ticari alaşımlar, çinko (Zn) gibi başka alaşım elementlerini içermektedirler, örneğin AZ91, AZ81 ve AZ63.



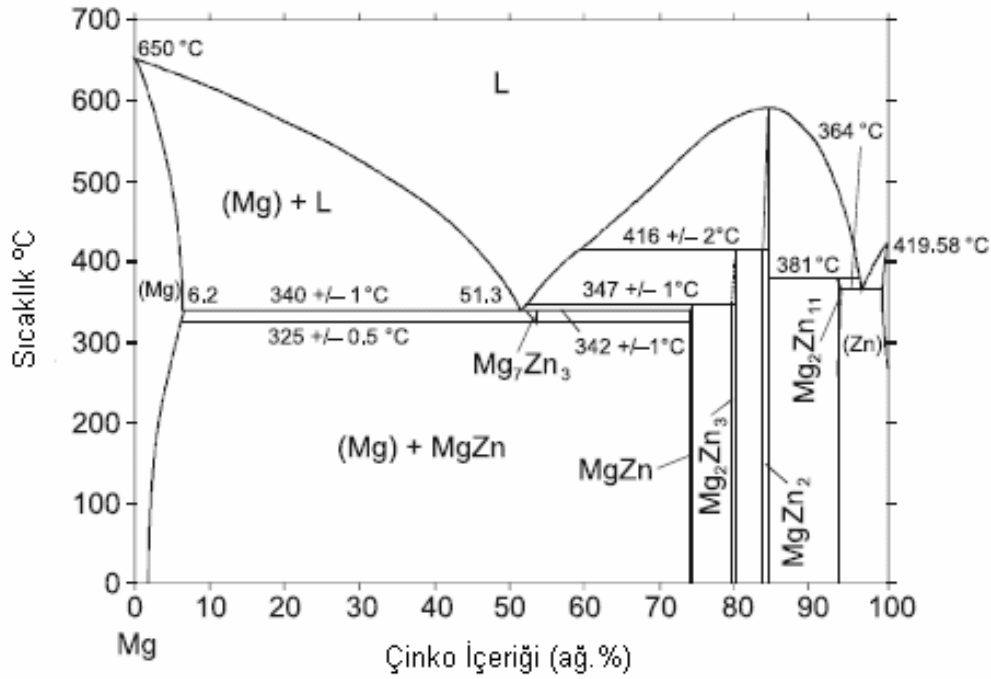
Şekil 3.1 Mg-Al ikili alaşımının denge faz diyagramı (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)



Şekil 3.2 Mg-Al sisteminin magnezyumca zengin olan bölümü (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

3.4.2 Magnezyum-Çinko

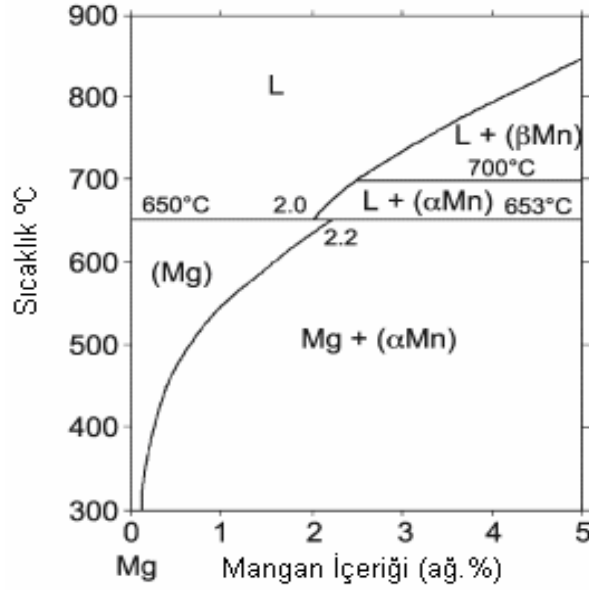
Çinko çok önemli bir alaşım elementi olmasına karşılık, nadiren ana alaşım elementi olarak hizmet verir (ZK, ZH, ZM, ZC ve ZE serisi alaşımları). İkili denge faz diyagramı (Şekil 3.3), ağı.%51,3 noktasında bir ötektik nokta göstermektedir. Çinkonun magnezyum içindeki katı çözünürlüğü, ötektik sıcaklığında (340°C) maksimum ağı.%6,2'dir.



Şekil 3.3 Mg-Zn sisteminin denge faz diyagramı
(ASM Handbook Volume 3, Alloy Phase Diagrams, 1996)

3.4.3 Magnezyum-Mangan

Mangan, birçok magnezyum alaşımı için önemli bir alaşım elementidir. Yeni yapılan çalışmalarda, yüksek performanslı sürünme alaşımlarının geliştirilmesinde, önemi daha da artmıştır. Mg-Mn faz diyagramında, 653°C'de $S_{IV} + \alpha Mn$ 'ın Mg'a dönüştüğü peritektik reaksiyon gibi, nadir karşılaşılan bir durum da vardır (Şekil 3.4). Manganın katı magnezyum içindeki çözünürlüğü, sıvı fazdakinden daha fazladır (ağı.%2,2 katı, ağı.%2,0 sıvı çözünürlüğü). Ancak sıcaklığın düşmesiyle çözünürlük de azalır ve bu durum daha fazla manganın alaşım içinde çökmesine sebep olur.



Şekil 3.4 Mg-Mn faz diyagramı, ağ. %5 mangan içeren kısma kadar (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

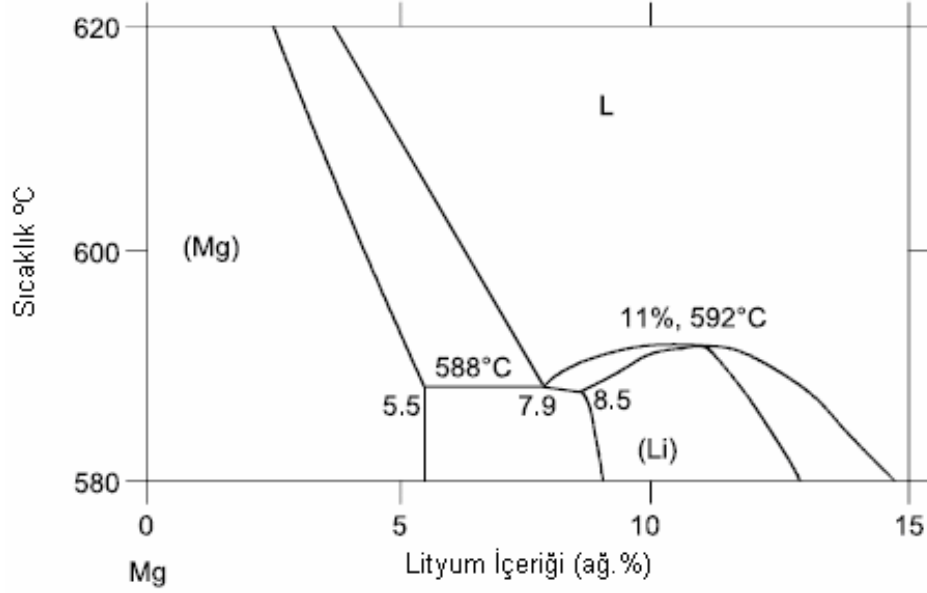
3.4.4 Süper Hafif Alaşımlar

Lityum, alaşım elementleri içerisinde, magnezyumun yoğunluğunu düşüren tek elementtir. Şekil 3.5'deki faz diyagramında, 588°C'deki ötektik sıcaklığında, lityumun magnezyum içindeki maksimum çözünürlüğü ağ. %5,5'dir. Sıcaklık azaldıkça, bu çözünürlük miktarında çok az bir azalma meydana gelir. İkinci faz olan β (HMK), oda sıcaklığında oldukça karardır ve bu da $\alpha + \beta$ veya sadece β fazlı işlenebilir alaşımların üretilmesine olanak sağlamıştır. Bu araştırma 1958 yılında USAF (Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri) tarafından yapılmıştır (Brandes ve Brook, Smithells Light Metals Handbook, 1998).

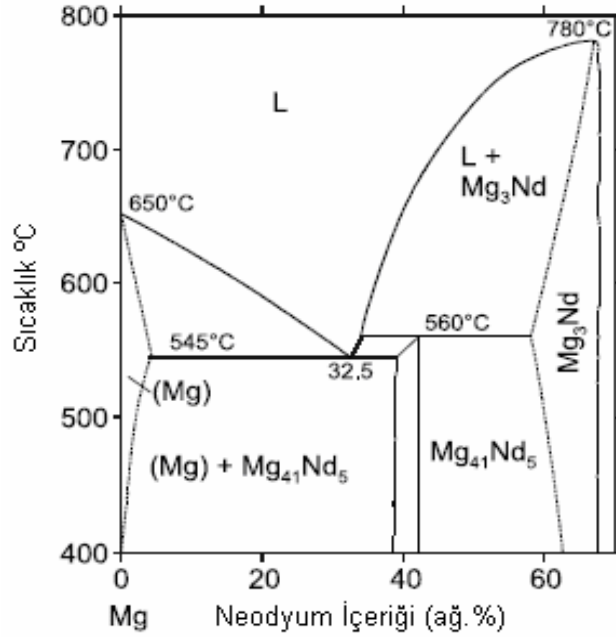
3.4.5 Yüksek Performans Alaşımları

Üstün nitelikli özellikler isteniyorsa, tamamen farklı alaşım elementleri kullanmak gerekmektedir. Nadir toprak metalleri ve benzer alaşım elementleri içeren alaşımlar; QE, WE ve HK serilerinde kullanılmaktadır. Ayrıca skandiyum içeren alaşımlar deneme safhasındadır. Şekil 3.6, Mg-Nd faz diyagramını göstermektedir. Neodyum genellikle, mişmetal-neodyum-paraseodmiyum formunda katılır. Nd katılmasının amacı, karardlı çökeltiler oluşturmaktır. Nadir toprak metalleriyle birlikte gümüş, 200°C ve üstündeki sıcaklıklara kadar iyi sürünme direnci gösteren QE serisi alaşımları üretmek için kullanılır (Şekil 3.7).

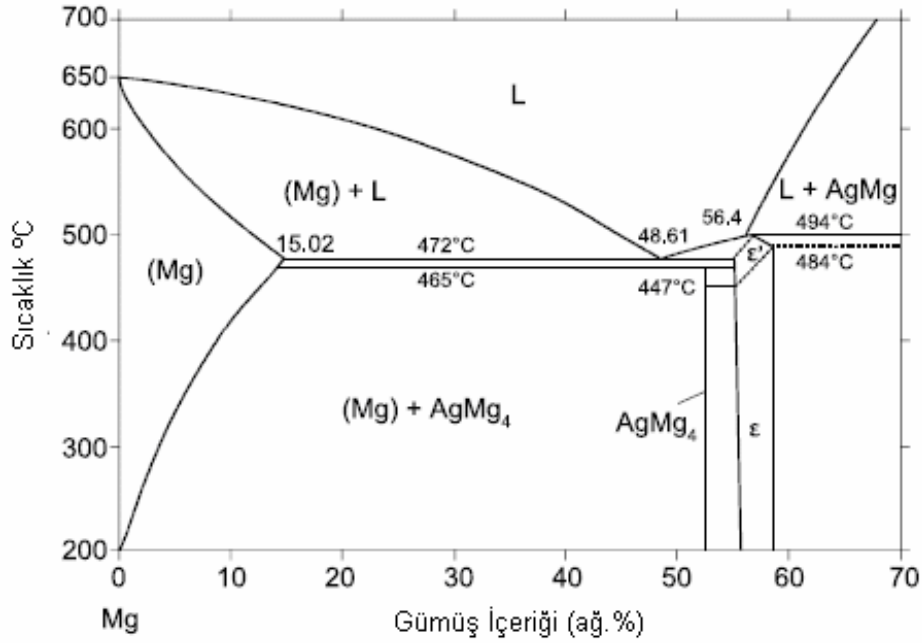
Ayrıca alternatif olarak magnezyum, itriyum ve nadir toprak metalleri ile alaşımlandırılmaktadır. Bu alaşımlandırma WE serisini oluşturmuştur. Şekil 3.8, Mg-Y faz diyagramını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, itriyumun magnezyumun içindeki çözünürlüğü diğerlerinden oldukça fazladır (ağ.%12,47).



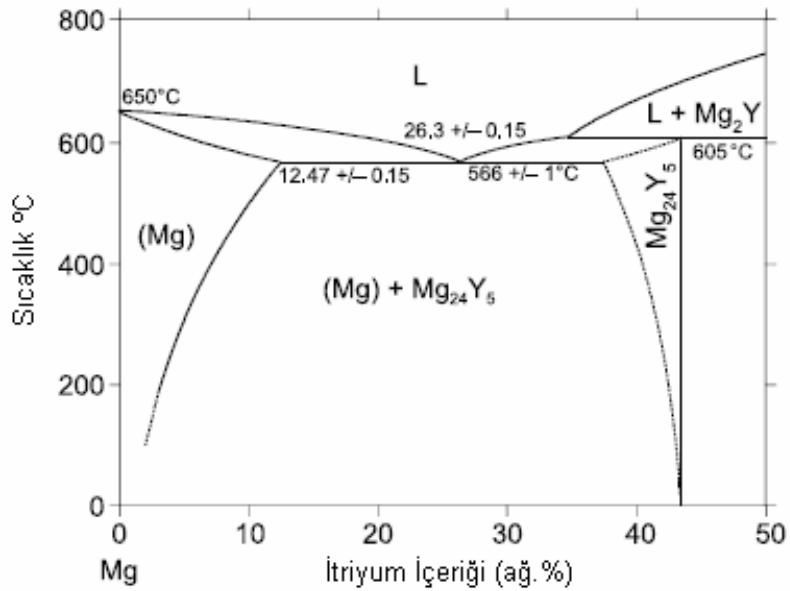
Şekil 3.5 Mg-Li faz diyagramı, ağ.%15 Li içeren kısma kadar (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)



Şekil 3.6 Mg-Nd faz diyagramı, ağ. %70 neodyum içeren bölümü (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)



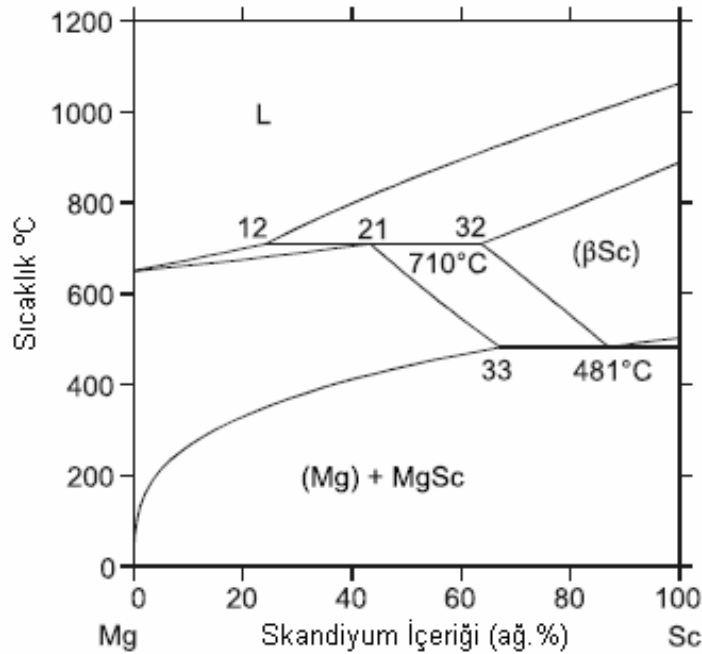
Şekil 3.7 Mg-Ag faz diyagramı, ağ.%70 gümüş içeren kısma kadar (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)



Şekil 3.8 Mg-Y faz diyagramı, ağ.%50 itriyum içeren kısma kadar (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

3.4.6 Magnezyum-Skandiyum

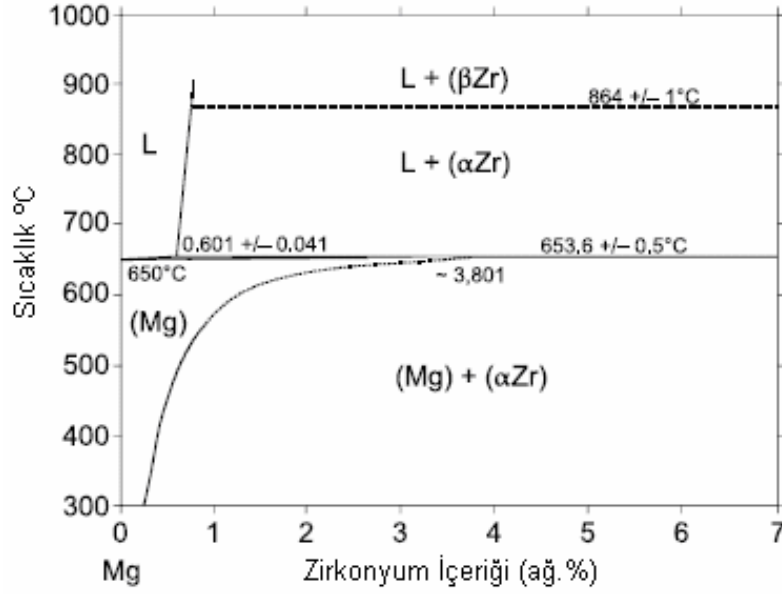
Skandiyum, son zamanlarda daha iyi sürünme özellikleri sağlayabilecek bir alaşım elementi olarak dikkate alınmaya başlanmıştır. Mg-Sc sistemi (Şekil 3.9), peritektik bir nokta ve ergime sıcaklığında güçlü bir artış göstermektedir. Diyagramın son hali, birçok deneysel ve termodinamiksel analiz sonucu ortaya çıkmıştır. Bundan önceki kabul görmüş diyagram oldukça hatalı bilgiler vermekteydi. Diyagramdan görüldüğü gibi, çözünürlük düşüşüne rağmen yaşlanma sertleşmesi olasılığı çok yavaş ve kararsız bir şekilde meydana gelmektedir. Ancak alaşıma mangan ilavesi ile bu konuda çok güçlü bir etki elde edildi.



Şekil 3.9 Mg-Sc denge faz diyagramı
(Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

3.4.7 Magnezyum-Zirkonyum

Zirkonyum, magnezyum için çok etkili bir tane inceltici olup, **alüminyum** ve **mangan** içermeyen tüm alaşımlarda kullanılabilir. Faz diyagramından da (Şekil 3.10) görüldüğü gibi, zirkonyumun magnezyum içindeki çözünürlüğü ergime sıcaklığında ağırlık %3,8 iken, oda sıcaklığında ağırlık %0,2'ye düşmektedir. Zirkonyumun çok iyi bir tane inceltici olmasının sebebi, magnezyumla hemen hemen aynı kristal yapısına ve kafes parametrelerine sahip olmasıdır. (Brandes ve Brook, Smithells Light Metals Handbook, 1998)



Şekil 3.10 Mg-Zr faz diyagramı, ağı.%7 zirkonyum içeren kısma kadar (ASM Handbook Volume 3, Alloy Phase Diagrams, 1996)

3.5 Basınçlı Döküm Magnezyum Alaşımları

Magnezyum alaşımlarının üretiminde kullanılan, en yaygın üretim yöntemi basınçlı dökümdür. Yöntem yüksek bir üretim kapasitesine sahip olduğundan, oldukça benimsenmiştir. Parçaların hızlı soğuması ince taneli yapı oluşmasını sağlarken, gazların kaçmasını zorlaştırdığından dolayı poroziteye (gözenekliliğe) sebep olabilmektedir. Porozite ise parçaları, ısıl işlem ve kaynak edilebilirlik açısından uygunsuz hale getirmektedir. Basınçlı döküm, düşük viskoziteye sahip alaşımların kullanıldığı, ince cidarlı parçaların üretimi için ideal bir yöntemdir. Tipik olarak kullanılan basınçlı döküm alaşımları, Çizelge 3.4’de mekanik özellikleriyle birlikte verilmiştir. En yaygın alaşım sistemleri, magnezyum-alüminyum esaslı olanlardır. Çizelge 3.4’de listelenen basınçlı döküm alaşımlarının tümü, alüminyumu ana alaşım elementi olarak içermektedir.

Alüminyum içeriğinin düşük olduğu durumlarda dayanım, katı çözelti sertleştirilmesi ile sağlanır. Daha yüksek alüminyum konsantrasyonlarında ise dayanım, $Mg_{17}Al_{12}$ oluşumuyla elde edilir. $Mg_{17}Al_{12}$ içeriğinin artması, sünekliliği azaltır. İşin doğrusu, ağı.%6 alüminyum içeren Mg-Al sistemi, porozite önlenemediği sürece, en iyi mekanik özelliklerin elde edildiği alaşım mekanizmasıdır. Bu alaşımlara çökelti sertleştirilmesi ve yaşlandırma uygulanabilir.

Çizelge 3.4 Basınçlı döküm Mg alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

| | Al | Mn | Zn | Diğer | Akma | Çekme | Uzama | Sertlik |
|------|-----|------|-----|--------|----------------------|----------------------|-------|---------|
| | | | | | Dayanımı | Dayanımı | | |
| | | | | | (N/mm ²) | (N/mm ²) | (%) | HB |
| AE42 | 4.0 | 0.1 | ... | 2.5 RE | 145 | 230 | 11 | 60 |
| AM20 | 2.1 | 0.1 | ... | ... | 90 | 210 | 20 | 45 |
| AM50 | 4.9 | 0.26 | ... | ... | 125 | 230 | 15 | 60 |
| AM60 | 6.0 | 0.13 | ... | ... | 130 | 240 | 13 | 65 |
| AS21 | 2.2 | 0.1 | ... | 1.0 Si | 120 | 220 | 13 | 55 |
| AS41 | 4.2 | 0.2 | ... | 1.0 Si | 140 | 240 | 15 | 60 |
| AZ91 | 9.0 | 0.13 | 0.7 | ... | 160 | 250 | 7 | 70 |

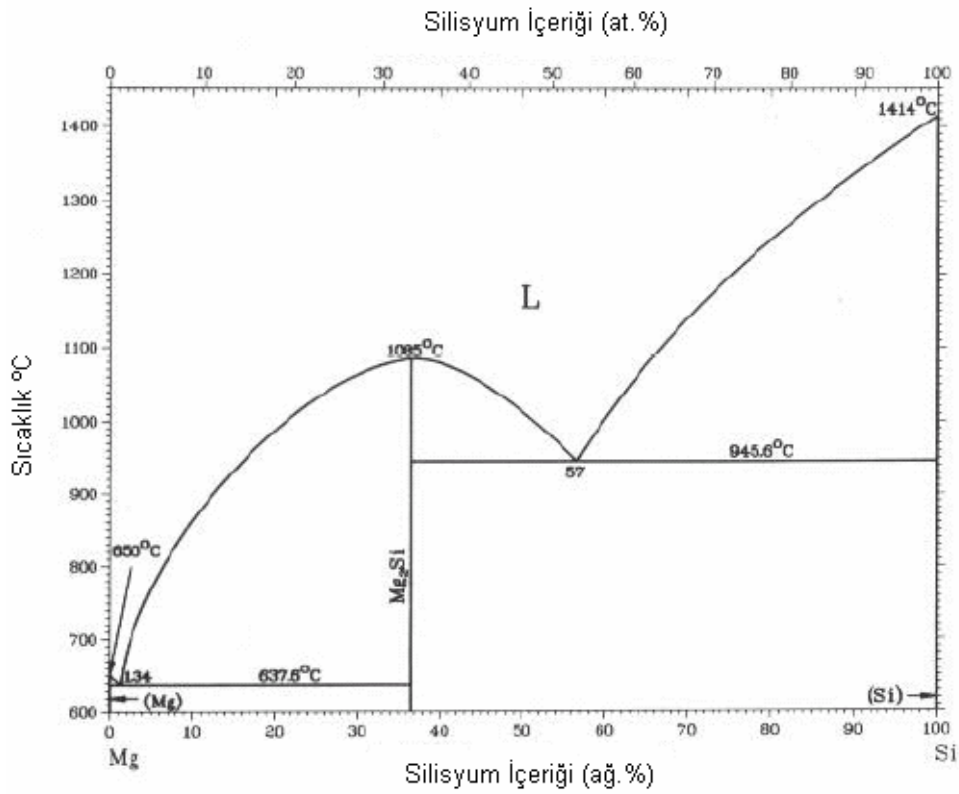
Basınçlı döküm alaşımları için her zaman bir uzlaşma sağlanmalıdır: alüminyum içeriğinin azaltılması döküm kabiliyetini azaltacak ve sadece çok basit şekilli kalıplar doldurulabilecektir. Alüminyum miktarının artması ise döküm kabiliyetini ve dayanımı arttıracak fakat sünekliği azaltacaktır. Mg₁₇Al₁₂ ara bileşiği (intermetallic), tane sınırlarında süreksiz bir formda oluşur. Mg₁₇Al₁₂ yaklaşık 460°C’de ergir ve 110-120°C’de tane sınırlarının, kayma düzlemlerine ilave olarak, birbiri üzerinde kaymalarına olanak sağlayacak şekilde yumuşamaya başlar (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Çizelge 3.4’de ayrıca, bütün alaşımların mangan içerdiği de görülmektedir. Mangan korozyon direncini arttırmasının yanı sıra, daha iyi süneklik ve kırılma tokluğu değerleri sağlar. İstenilen özellikleri elde etmek için; AM20, AM50 ve AM60’dan oluşan bir alaşım serisi mevcuttur. Özelliklerin iyileşmesi, Mg₁₇Al₁₂ ara bileşiğinin daha homojen dağılması ile elde edilir. Örneğin tane sınırlarındaki ara bileşik miktarı azaltılır.

AS serisi AS21 ve AS41 alaşımları, tane sınırlarında ince yapılı olarak oluşan ve sürünme dayanımını arttıran Mg₂Si ara bileşiğine güvenmektedir. Bu bileşik aynı zamanda, Mg₁₇Al₁₂

miktarını düşürme konusunda da etkilidir. Mg_2Si ayrıca bazı alüminyum alaşımlarını sertleştirmek için de kullanılmaktadır. Denge diyagramından da görülebileceği gibi oldukça kararlı bir yapıdır (Şekil 3.11). Mg_2Si ara bileşiğini elde edebilmek için, parça kesitinin izin verdiği oranda, hızlı soğutma yapılması gerekmektedir. AS21'in sürünme direnci, AS41'e kıyasla daha iyidir fakat buna karşılık, akıcılığı daha kötü ve dökümü daha zordur.

AZ91 alaşımı, dayanım özelliklerini arttıran alüminyum ve çinko elementlerini içerir. Çinko ilavesi, mikroporozite eğilimini azaltır. Mg-Al alaşımlarının sürünme direncini arttırmak için yapılan diğer denemeler, kalsiyum ilavesini içermektedir. Fakat kalsiyum ilavesi, sürünmedeki iyileşme ile birlikte sıcak yırtılma eğilimine sebep olmaktadır.



Şekil 3.11 Mg-Si denge faz diyagramı
(ASM Handbook Volume 3, Alloy Phase Diagrams, 1996)

Çok yakın zamanda yapılan iyileştirme çalışmaları, nadir toprak metallerinin ilavesi ile AE42 gibi alaşımların elde edilmesini sağlamıştır. Nadir toprak elementleri içeren alaşımlar sadece basınçlı döküm yöntemine uygundur. Diğer döküm yöntemlerinde daha yavaş soğuma gerçekleşeceğinden, kaba taneli Al_2RE bileşikleri oluşacaktır. RE (nadir topraklar) genellikle mişmetal formunda ilave edilirler. Magnezyum da, mişmetal içindeki bir veya birkaç nadir toprak elementi ile bileşik oluşturur ve böylece sürünme özellikleri iyileşir.

Basınçlı döküm alaşımlarının hiçbirisi zirkonyum içermemektedir. Çünkü zirkonyum, basınçlı döküm alaşımlarının hepsinde bulunan alüminyum ve mangan ile zararlı bileşikler oluşturmaktadır (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).

Özetle, basınçlı döküm için, ticari olarak kullanılan dört adet magnezyum alaşım sistemi vardır: magnezyum-alüminyum-çinko-mangan (AZ) serisi, magnezyum-alüminyum-mangan (AM) serisi, magnezyum-alüminyum-silisyum-mangan (AS) serisi ve yeni geliştirilen magnezyum-alüminyum-nadir toprak-mangan (AE) serisi. Bu alaşımlardan bazılarının genel özellikleri Çizelge 3.5’de özetlenmiştir.

AZ91D, en çok kullanılan basınçlı döküm magnezyum alaşımıdır. AZ91D, iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmasının yanında, mükemmel döküm kabiliyetine ve tuzlu su korozyon direncine sahiptir. Yüksek saflıktaki AZ91D alaşımının yüksek korozyon direnci, üç tane önemli kirleticinin (Fe, Ni, Cu), kalıntı seviyelerinin kontrol altında tutulmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek saflıktaki AZ91D alaşımı, basınçlı döküm uygulamalarında, daha az saf olan AZ91B alaşımının yerine geçmiştir. AZ91B alaşımı, hurda ve ikincil metallere kolayca üretilebildiği için halen kullanılmaktadır. Daha ucuz olan bu alternatif, korozyon direncinin çok önemli olmadığı uygulamalarda, örneğin boyanmış parçaların nonkorozyf (paslandırmayan) ortamlarda kullanılmasında tercih edilmektedir. Basınçlı döküm ürünler döküldüğü gibi kullanılabilirler (ASM Handbook Volume 2, 1996).

AZ91D alaşımının sağladığından daha fazla süneklik gerektiren uygulamalarda, yüksek saflıktaki AM60B basınçlı döküm alaşımı kullanılır. AM60B alaşımı, AZ91D alaşımına kıyasla daha iyi uzamaya ve tokluğa sahiptir. AM60B’nin çekme ve akma dayanımı, alüminyum içeriğinin oldukça azalmasına rağmen, AZ91D’deye oldukça yakındır. AM60B alaşımı; otomobil tekerleklerinin basınçlı dökümünde, bazı okçuluk ve spor ekipmanlarının üretiminde kullanılmaktadır. AZ91D alaşımı gibi, AM60B alaşımı da mükemmel tuzlu su korozyon direncine sahiptir.

Basınçlı döküm alaşımı AS41A’nın 175°C sıcaklığa kadar olan sürünme dayanımı, AZ91D ve AM60B alaşımlarına kıyasla oldukça üstündür. Aynı zamanda iyi uzama, akma ve çekme dayanımı özelliklerine sahiptir. AS41A alaşımları, hava-soğutmalı otomobil motoru karterlerinde kullanılmaktadır. AS41A’nın mükemmel tuzlu su korozyon direnci özelliği sergileyen versiyonu AS41XB adıyla tanınmaktadır. AS21 alaşımı ise AS41A alaşımından daha iyi sürünme dayanımına sahiptir. Ama buna karşılık, oda sıcaklığında çekme ve akma dayanımı daha düşüktür ve dökümü biraz daha zordur.

Çizelge 3.5 Basınçlı döküm alaşımlarının genel özellikleri (ASM Handbook Volume 2, 1996)

| Alaşım | Genel Özellikleri |
|--------|--|
| AZ91D | En çok kullanılan basınçlı döküm alaşımıdır. Oda sıcaklığında iyi dayanım, iyi döküm kabiliyeti, iyi atmosferik stabilite ve mükemmel tuzlu su korozyon direnci özelliklerine sahiptir. |
| AM60B | İyi uzama ve tokluk, mükemmel tuzlu su korozyon direnci, iyi akma ve çekme dayanımı özelliklerine sahiptir. |
| AS21X1 | Basınçlı döküm alaşımları içinde en iyi sürünme direncine sahip alaşımdır (AE alaşımlarıyla beraber). Oda sıcaklığındaki özellikleri iyi ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanışlıdır. |
| AS41XB | 175°C'ye kadar iyi sürünme direncine sahiptir. Oda sıcaklığındaki özellikleri iyi, tuzlu su korozyon direnci mükemmeldir. Yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur. |

3.6 Magnezyum Alaşımları ile İmalat Yöntemleri

Magnezyum, genellikle diğer metallerin üretildiği yöntemlerle şekillendirilebilir. İmalat yönteminin seçiminde malzemedeki beklenen optimum özellikler dikkate alınmalıdır. Bazı özel parçaların şekillendirilmesinde spesifik imalat yöntemleri tercih edilebilir. Magnezyum alaşımları için en uygun şekillendirme yöntemleri; basınçlı döküm ve ekstrüzyon yöntemleridir. Çizelge 3.6'da, magnezyum için kullanılan imalat yöntemleri ve özellikleri verilmiştir. Farklı yöntemlerde kullanılan magnezyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri ise Çizelge 3.7'de gösterilmektedir.

Genel olarak bakıldığında, döküm yolu ile şekillendirilen magnezyum alaşımlarının miktarında, özellikle 1995 yılından itibaren önemli artışlar gözlenmektedir. Magnezyum dökümünde meydana gelen global büyümenin içinde bulunduğumuz yüzyılda da hızlı bir şekilde gelişme göstereceği tahmin edilmektedir (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Çizelge 3.6 Şekillendirmede kullanılan yöntemler ve özellikleri (Zeytin, 1999)

| Ana grup | Alt grup | Özellikler |
|----------------------|-----------------------|--|
| Döküm Ürünler | Kum Kalıp | Karmaşık şekiller, düşük hacme uygun, iyi kalite, yüksek maliyet, büyük parça üretimi mümkün |
| | Kabuk Kalıp | Karmaşık şekiller, yüksek hacme uygun, iyi kalite, yüksek maliyet, büyük parça üretimi mümkün |
| | Düşük-Basınçlı Döküm | Karmaşık şekiller, yüksek kalite, orta boy parça dökümü, düşük maliyet |
| | Yüksek-Basınçlı Döküm | Nihai boyutlar, gerektiği kadar yüksek hacim, ortalama büyüklükte parçalar, orta kalite, düşük maliyet |
| | Hassas Döküm | En hassas nihai boyut, yüksek kalite, çok karmaşık şekilli parça üretimi, yüksek maliyet |
| Dövük Ürünler | Levha | Düşük özellikler, yüksek maliyet |
| | Plaka | Düşük özellikler, düşük maliyet, iyi boyut kararlılığı |
| | Ekstrüzyon | Ortalama özellikler, düşük maliyet, karmaşık şekilli parçalar |
| | Dövme | Yüksek kalite, ortalama özellik, ortalama maliyet |
| | Darbe Ekstrüzyon | İyi kalite, basit şekiller, düşük maliyet, iyi özellikler |

3.6.1 Magnezyum Alaşımlarının Döküm Yöntemleri

Magnezyum alaşımları için çok değişik döküm yöntemleri uygulanabilmektedir. Bu yöntemler soğuk ve sıcak kamaralı basınçlı döküm, kum kalıba döküm, hassas döküm, sürekli kalıba (kokil) döküm, düşük basınçlı döküm (low pressure die casting), vakumlu döküm, yarı-katı metal döküm (semisolid metal casting) ve sıkıştırma döküm (squeeze casting) yöntemleridir. Son yıllarda basınçlı döküm alaşımlarının kullanımı oldukça artmıştır. Özel bir parça için döküm yöntemi seçiminde; tasarım şekli, arzu edilen mekanik ve yüzeysel özellikler, üretilecek toplam parça sayısı ve alaşımların dökülebilirliği belirleyicidir. Dökümde kullanılacak çok fazla alaşım çeşidi bulunmasına rağmen, her alaşım her döküm yönteminde kullanıma uygun değildir (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Çizelge 3.7 Magnezyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve oda sıcaklığındaki tipik mekanik özellikleri (ASM Handbook Volume 2, 1996)

| Alaşım | Bileşim, % | | | | | | Çekme Dayanımı Mpa | Akma Dayanımı | | Uzama 50 mm % | Kesme Dayanımı Mpa | Sertlik HRB |
|--|------------|---------------|-----|-----|-----|-----------------|-----------------------|---------------|-------|---------------------|-----------------------|----------------|
| | Al | Mn | Th | Zn | Zr | Diğer | | Çekme | Basma | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| Kum ve Kalıcı (Kokil) Kalıba Döküm Alaşımları | | | | | | | | | | | | |
| AM100A-T61 | 10.0 | 0.1 | ... | ... | ... | ... | 275 | 150 | 150 | 1 | ... | 69 |
| AZ63A-T6 | 6.0 | 0.15 | ... | 3.0 | ... | ... | 275 | 130 | 130 | 5 | 145 | 73 |
| AZ81A-T4 | 7.6 | 0.13 | ... | 0.7 | ... | ... | 275 | 83 | 83 | 15 | 125 | 55 |
| AZ91C, E-T6 | 8.7 | 0.13 | ... | 0.7 | ... | ... | 275 | 145 | 145 | 6 | 145 | 66 |
| AZ92A-T6 | 9.0 | 0.10 | ... | 2.0 | ... | ... | 275 | 150 | 150 | 3 | 150 | 84 |
| EQ21A-T6 | ... | ... | ... | ... | 0.7 | 1.5Ag, 2.1Di | 235 | 195 | 195 | 2 | ... | 65-85 |
| EZ33A-T5 | ... | ... | ... | 2.7 | 0.6 | 3.3RE | 160 | 110 | 110 | 2 | 145 | 50 |
| HK31A-T6 | ... | ... | 3.3 | ... | 0.7 | ... | 220 | 105 | 105 | 8 | 145 | 55 |
| HZ32A-T5 | ... | ... | 3.3 | 2.1 | 0.7 | ... | 185 | 90 | 90 | 4 | 140 | 57 |
| K1A-F | ... | ... | ... | ... | 0.7 | ... | 180 | 55 | ... | 1 | 55 | ... |
| QE22A-T6 | ... | ... | ... | ... | 0.7 | 2.5Ag, 2.1Di | 260 | 195 | 195 | 3 | ... | 80 |
| QH21A-T6 | ... | ... | 1.0 | ... | 0.7 | 2.5Ag, 1.0Di | 275 | 205 | ... | 4 | ... | ... |
| WE43A-T6 | ... | ... | ... | ... | 0.7 | 4.0 Y, 3.4RE | 250 | 165 | ... | 2 | ... | 75-95 |
| WE54A-T6 | ... | ... | ... | ... | 0.7 | 5.2 Y, 3.0RE | 250 | 172 | 172 | 2 | ... | 75-95 |
| ZC63A-T6 | ... | 0.25- 0.75 | ... | 6.0 | ... | 2.7 Cu | 210 | 125 | ... | 4 | ... | 55-65 |
| ZE41A-T5 | ... | ... | ... | 4.2 | 0.7 | 1.2RE | 205 | 140 | 140 | 3.5 | 160 | 62 |
| ZE63A-T6 | ... | ... | ... | 5.8 | 0.7 | 2.6RE | 300 | 190 | 195 | 10 | ... | 60-85 |
| ZH62A-T5 | ... | ... | 1.8 | 5.7 | 0.7 | ... | 240 | 170 | 170 | 4 | 165 | 70 |
| ZK51A-T5 | ... | ... | ... | 4.6 | 0.7 | ... | 205 | 165 | 165 | 3.5 | 160 | 65 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----|--------|-----|-----|------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| ZK61A-T5 | ... | ... | ... | 6.0 | 0.7 | ... | 310 | 185 | 185 | ... | 170 | 68 |
| ZK61A-T6 | ... | ... | ... | 6.0 | 0.7 | ... | 310 | 195 | 195 | 10 | 180 | 70 |
| Basınçlı Döküm Alaşımaları | | | | | | | | | | | | |
| AM60A,B-F | 6.0 | 0.13 | ... | ... | ... | ... | 205 | 115 | 115 | 6 | ... | ... |
| AS21X1 | 1.7 | 0.4 | ... | ... | ... | 1.1 Si | 240 | 130 | 130 | 9 | ... | ... |
| AS41A-F | 4.3 | 0.35 | ... | ... | ... | 1.0 Si | 220 | 150 | 150 | 4 | ... | ... |
| AZ91A,B, D-F | 9.0 | 0.13 | ... | 0.7 | ... | ... | 230 | 150 | 165 | 3 | 140 | 63 |
| Ekstrüzyon Alaşımaları | | | | | | | | | | | | |
| AZ10A-F | 1.2 | 0.2 | ... | 0.4 | ... | ... | 240 | 145 | 69 | 10 | ... | ... |
| AZ21X1-F | 1.8 | 0.02 | ... | 1.2 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| AZ31 B, C-F | 3.0 | ... | ... | 1.0 | ... | ... | 260 | 200 | 97 | 15 | 130 | 49 |
| AZ61A-F | 6.5 | ... | ... | 1.0 | ... | ... | 310 | 230 | 130 | 16 | 140 | 60 |
| AZ80A-T5 | 8.5 | ... | ... | 0.5 | ... | ... | 380 | 275 | 240 | 7 | 165 | 82 |
| HM31A-F | ... | 1.2 | 3.0 | ... | ... | ... | 290 | 230 | 185 | 10 | 150 | ... |
| M1A-F | ... | 1.2 | ... | ... | ... | ... | 255 | 180 | 83 | 12 | 125 | 44 |
| ZC71-F | ... | 05-1.0 | ... | 6.5 | ... | 1.2 Cu | 360 | 340 | ... | 5 | ... | 70-80 |
| ZK21A-F | ... | ... | ... | 2.3 | 0.45 | ... | 260 | 195 | 135 | 4 | ... | ... |
| ZK40A-T5 | ... | ... | ... | 4.0 | 0.45 | ... | 276 | 255 | 140 | 4 | ... | ... |
| ZK60A-T5 | ... | ... | ... | 5.5 | 0.45 | ... | 365 | 305 | 250 | 11 | 180 | 88 |
| Sac ve Levha Alaşımaları | | | | | | | | | | | | |
| AZ31B-H24 | 3.0 | ... | ... | 1.0 | ... | ... | 290 | 220 | 180 | 15 | 160 | 73 |
| HK31A-H24 | ... | ... | 3.0 | ... | 0.6 | ... | 255 | 200 | 160 | 9 | 140 | 68 |
| HM21A-T8 | ... | 0.6 | 2.0 | ... | ... | ... | 235 | 170 | 130 | 11 | 125 | ... |
| PE | 3.3 | ... | ... | 0.7 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

RE: Nadir Toprak (Rare Earth)

Di: Didymium (%85 neodyum ve %15 proseodyumdan oluşan nadir toprak karışımı)

PE: Fotoğraf baskı levhası (Photoengraving grade)

Magnezyum alaşımlarının kum kalıba döküm yöntemiyle üretimi çok sayıda alaşıma uygulanabilmekte ve farklı boyutlarda parçalar elde edilebilmektedir. Ancak yöntem, kalıp kumu ile ergiyik magnezyum arasındaki reaksiyonlardan dolayı inhibitör kullanımını gerekli kılar. Yüksek adetlerde parça üretimi için uygunken, yüzey bitirme ve tolerans değerleri açısından çok iyi özellikler sağlanamaz.

Kum kalıba döküm yöntemiyle sağlanamayan bazı özellikler, hassas dökümle sağlanabilir. Ancak hassas döküm yöntemi için parça başına maliyet ve ilk yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Magnezyum alaşımlarının sürekli kalıba döküm yöntemiyle üretiminde ise, kalıbın tekrar kullanılabilmesi maliyetler açısından bir avantaj gibi gözükse de, kalıpların yüksek ilk yatırım maliyetlerinin amortismanı, bir kalıptan alınabilecek parça adediyle karşılanamayabilir. Yüzey bitirme özellikleri ve boyutsal toleranslar açısından iyi sonuçlar alınmasının yanında, çok sayıda alaşım türüne uygulanabilir bir yöntemdir (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi diğer yöntemlerin sunamayacağı ekonomik avantajlar sunar. Magnezyum basınçlı döküm yöntemiyle üretildiğinde, alüminyum ve çinkoya kıyasla, aynı ağırlıktaki hammadde ile daha fazla ürün elde edilir. Otomasyona uygunluğu yönüyle, magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü, yüksek hacimli üretimler için ideal bir yöntemdir. Alüminyum ve çinkoya kıyasla magnezyum alaşımlarının hacimsel özgül ısısı daha düşüktür. Bu da dökümün daha hızlı soğuması, daha yüksek çalışma hızı ve daha az kalıp aşınması demektir.

Çizelge 3.8 Magnezyum alaşımları ile döküm yöntemlerinin mukayesesi

| Karşılaştırılan Özellikler | Basınçlı Döküm | Kum Kalıba Döküm | Hassas Döküm | Sürekli Kalıba Döküm |
|---|-----------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Uygun alaşım çeşitliliği | + | + | + | + |
| Değişken boyutlu parça üretilebilirliği | + | + | - | - |
| Yüzey bitirme özellikleri | + | - | + | + |
| Yüksek üretim hacmine uygunluk | + | + | - | - |
| Parça başına birim maliyetler | + | + | - | - |
| Hassas toleransların elde edilmesi | + | - | + | + |
| İyi mekanik özelliklerin elde edilmesi | + | + | + | + |
| Karmaşık şekilli parça üretimi | + | - | + | - |

Magnezyum alaşımlarına uygulanan farklı döküm yöntemleri, elde edilen özellikler, üretilen parça boyutları, yüksek üretim hacmine uygunluk gibi yönlerden karşılaştırıldığında; yöntemlerin üstün ve zayıf yönleri Çizelge 3.8'deki gibidir. Çizelgeden de görüldüğü gibi, magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi, diğer döküm yöntemlerine kıyasla, oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

3.6.2 Magnezyum Alaşımlarının Talaşlı İmalatı

Magnezyum işlenmesi en kolay metallere biridir. Ayrıca alaşımları da işlenebilirlik açısından çok fark göstermemektedir. Magnezyum tasarımlarda, öncelikle hafifliği nedeniyle tercih edilmesine rağmen, iyi işlenebilirliği yüksek hacimli üretimler için büyük bir avantaj teşkil eder. İşlenmesindeki güç ihtiyacı; alüminyum, nikel ya da dökme demire göre oldukça azdır (Çizelge 3.9). İşlemede, düşük kapasiteli manuel tezgâhlardan yararlanılabileceği gibi, yüksek kapasiteli otomasyon tezgâhları da kullanılabilir. Magnezyumun mükemmel işlenebilirliği, alüminyum ve titanyum gibi zor işlenen metallere göre büyük avantajlar sağlar. Magnezyum alüminyuma göre %50 oranında daha hızlı işlenebilmektedir. Bu da %50 daha az güç demektir. İyi işlenebilirliklerinden dolayı, takım ömrü uzar ve takım değiştirme zamanları artar. Magnezyumun tornalama ve matkapla delme işlemleri için ihtiyaç duyduğu bağlı kuvvet ve kesme hızları ile ilgili karşılaştırmalı bir tablo, Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9 Magnezyumun talaşlı işlem parametrelerinin diğer metallere karşılaştırılması (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999)

| Metal | Bağlı Güç | Kaba Tornalamada | Matkapla Delmede |
|----------------------|-----------|-----------------------|---|
| | | Kesme hızı (m/dak) | Kesme Hızı (m/dak) (5-10 mm arası delikler için) |
| Magnezyum | 1,0 | max 1200 | 150-500 |
| Alüminyum Alaşımları | 1,8 | 75-750 | 60-400 |
| Dökme Demir | 3,5 | 30-90 | 10-40 |
| Düşük Karbonlu Çelik | 6,3 | 40-200 | 15-30 |
| Nikel Alaşımları | 10,0 | 20-90 | 5-20 |

İşlemede kullanılacak takım seçiminde, üretim hacmi, belirleyici etkindir. Karbon çeliği takımlar çoğu uygulamada yeterli olmasına rağmen, yüksek hacimli uygulamalarda karbür uçlu takımlar tercih edilir. Magnezyum genellikle bir kesme sıvısı kullanılmadan işlenebilir. Kesme sıvılarına; derin sondaj işlemlerinde yağlama amacıyla ya da çok yüksek kesme hızlarında soğumayı sağlamak için ihtiyaç duyulabilir. Kuru işleme daha temiz ve düşük maliyetli ürünler vermektedir. Ancak kesme sıvısı kullanılırsa talaşların tutuşma ihtimali önlenmiş olur. Özellikle çok ince talaşların olduğu hassas işlemlerde, talaşların tutuşma ihtimalleri vardır. Derin delme gibi operasyonlarda kullanılan kesme sıvıları ise, soğutmanın yanı sıra, talaşın uzaklaştırılmasına da yardımcı olmaktadır (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

3.6.3 Magnezyum Alaşımları ile Plastik Şekillendirme

Magnezyumun SDH kafes yapısından dolayı, magnezyum alaşımlarına uygulanabilir soğuk deformasyon miktarı sınırlıdır. Bu nedenle çoğu magnezyum alaşımı sıcak şekillendirme ile plastik olarak deforme edilir. Yoğruk magnezyum alaşımları; haddelenmiş levha veya sac, ekstrüzyon ürünü (çubuk, boru ve şekilli) parçalar ve yapısal uygulamalar için dövme mamuller olarak üretilir.

Magnezyum alaşımları ile genelde tek işlemle nihai ürün elde edilebilir. Yüksek sıcaklıklarda tek operasyonla elde edilen parçalar sayesinde, ek tavlama işlemlerinden, ilave kalıp maliyetlerinden ve de zamandan kazanç elde edilmiş olunur. Dikkat edilmesi gereken bir nokta ise magnezyum alaşımlarının sahip olduğu yüksek ısıl genleşme katsayısıdır. Soğuk şekillendirme esnasında magnezyum parçaların alüminyum ve çelikten farklı olarak, bükme operasyonu sonrası boylarının kısaldığı görülmektedir. Bu durum, parça ekseninin gergin büküm yerine doğru hafifçe kaymasından kaynaklanır. Çok ince sac kalınlıklarında bu durum fark edilmezken, kalınlıklar arttıkça, bu durumun mutlaka göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Atalay, 2006).

Döverek şekillendirme katılaşma (solidüs) sıcaklığının yaklaşık 55°C altında yapılır. Genellikle hidrolik veya düşük hızlı mekanik presler kullanılır. Magnezyum ve alaşımlarının ekstrüzyonu ılık olarak ya da yüksek sıcaklıklarda yapılabilir. Ekstrüzyon sıcaklığı 300-450°C arasında değişmektedir. Alaşımlar hidrolik preslerde çubuk, tüp ve çeşitli profiller oluşturulmak üzere şekillendirilir. Ekstrüzyon ürünleri dökümün ekonomik olmadığı ya da sac ve plakalarla ekstrüzyon ürünlerinin birleştirilebildiği durumlarda tercih edilir. (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

Sac ve levhalar genellikle Mg-Al-Zn alaşımlarından haddelenir. AZ31B alaşımı en çok kullanılan alaşımdır ve 100°C sıcaklıktaki servis ortamlarında kullanılabilir. HK31A ve HM21A alaşımları ise 315-345°C sıcaklıklarda kullanım için uygundur. Sac ve levha ürünlerde kesit kalınlıkları konstrüksiyonun toplam ağırlığını fazla etkilemeden arttırılabilir. Böylece parçaya rijidlik kazandırılmış olur. Bu da tasarımcıya, ağırlık sorunu yaşamadan, parça üzerinde değişiklik yapma olanağı sağlamaktadır (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

4. BASINÇLI DÖKÜM

4.1 Tarihçesi

En eski metal döküm metotlarından biri ergimiş metalin yer çekimi etkisi altında kum kalıplar içine dökülmesidir. Bu metot çeşitli değişikliklerle günümüz kum dökümhanelerinde hala kullanılmaktadır. Bir süre sonra daha keskin profil ve pürüzsüz yüzey gerektiren kuyumculuk sanatı, alçı ve seramik kalıp yöntemlerini geliştirmiştir. Bu metotlar kum kalıba dökümden daha yüksek kaliteli yüzeyler vermekle beraber, kum dökümlerde olduğu gibi parçanın çıkarılması için kalıbın bozulması olumsuzluğundan kurtulamamıştır.

Çok sayıda parça dökmeye uygun, uzun ömürlü kalıp araştırmaları ihtiyaçtan doğan tabii bir gelişme olmuştur. Ortaçağ dökümcüleri tabak, bardak, sürahi ve diğer mutfak eşyalarını demir kalıplarda dökmeyi başarmışlardı. Bunu 1800'lerin oyuncak kurşun askerlerinin dökümü izlemiştir. Bunlar birbirine menteşeli, açılabilen kalıplarda yer çekimi etkisi ile dökülmüşlerdir. Aynı yıllarda içi boş şekillerin dökümü için yeni bir yöntem geliştirilmiş, bu metotla sıvı metal demir kalıba döküldükten sonra sıvı halde kalan içi kısım boşaltılarak istenilen şekiller elde edilmiştir. Bu gelişmeler yer çekimine dayanmak yerine ergimiş metali basınç altında kalıba dökerek daha kısa zamanda iyi görünüş ve kaliteli döküm üretme çabalarına ışık tutmuştur (Çiğdemoğlu, 1972).

1849'da Sturges, 1852'de Barr, 1856'da Helize, 1877'de Dusanbury ve diğerleri tarafından geliştirilen el tipi döküm makinalarının patentleri alınmıştır. Bunu Ottmar Mergenthaler'in Linotip makineyi geliştirmesi takip etti. Bu makinede, ergimiş metal içine daldırılmış silindir içine dolan sıvı metal, bir piston yardımıyla kalıp içine basılmaktaydı. 20. yüzyılın başlarında ise ilk basınçlı döküm makinesi patenti, H.H. Doehler tarafından alınmıştır. Bu makine, Mergenthaler'in Linotip makinesinin çalışma prensibine dayanmaktaydı.

Linotip makinesi ile başlayan basınçlı döküm çalışmalarından yararlanılarak, ilk endüstriyel uygulama, kurşun ve kalay alaşımlarının motor yataklarına basılması ile başlar. Bundan kısa bir süre sonra bu uygulama, metal parça üretiminde önemli bir faktör haline gelerek daha iyi mekanik özelliklere sahip alaşımların dökümlerine adapte edildi.

Çinko alaşımları, kalay-kurşun alaşımlarına yakın ergime sıcaklığına sahip olduğu için ikinci olarak denenilen alaşım ailesi oldu. 1915'te Doehler Pres Döküm Şirketi, ilk defa ticari alüminyum alaşımı parçaları meydana getirdi. Birinci Dünya Savaşında alüminyum

alaşımından gaz maskesi, makineli tüfek, dürbün gibi sistemlerin parçaları üretildi. Bugün alüminyum alaşımlarının basınçlı dökümü, metal işleme tekniklerinin en önemli yöntemlerinden biridir. Ticari metallerin içinde en önemli olanlardan biri de magnezyumdur. Magnezyumun alüminyumla olan alaşımları üzerindeki gelişmeler oldukça kayda değerdir. Bu metalin basınçlı döküm işlemleri, metalürjik gelişmelerin artmasını sağladı. Hiç şüphe yoktur ki mühendislik uygulamalarında magnezyum ve alaşımları çok geniş bir uygulama sahası bulmuştur (Doehler, 1974).

Son 30-40 yıl basınçlı döküm tekniğinde büyük gelişmelere sahne olmuştur. Metal ve kalıp sıcaklıkları, basınçlar, besleme hızları gibi döküm faktörlerinin kontrolleri çok ilerlemiştir. 3-4 işçi ile çalıştırılabilen dalma silindirli basınçlı döküm makinasından, tek bir işçi gerektiren ve saatte yüzlerce döküm veren tam otomatik piston tipi çağdaş makinalara kadar çok büyük gelişmeler kaydedilmiştir.

4.2 Genel Tanımı

Basınçlı döküm; ergimiş metale yüksek hız kazandırılarak, metalsel kalıba hızlı bir şekilde dolmasını sağlayan, hidrolik enerji kaynağına dayalı bir sistem olarak karakterize edilebilir. Kısaca, sıvı metalin basınç etkisi altında metalsel kalıba doldurulması esasına dayanan döküm yöntemidir. Metalsel kalıp; enjeksiyon sırasında oluşan gerilimi soğurur, ergimiş metalin sahip olduğu ısıyı dağıtır ve de şekillendirilmiş parçanın uzaklaştırılmasına yardımcı olarak bir sonraki çevrim için hazırlık yapılmasını sağlar. Hidrolik enerji sistemi, ergimiş metalin pozisyonunu, hızını ve ivmelenmesini kontrol ederek, akış ve güç fonksiyonlarını optimize eder ve bu sistem sayesinde, ergimiş metal kalıp boşluğunu kusursuz bir şekilde doldurur ve katılaşma gerçekleşir (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998).

Amerikan literatüründe yöntem Die Casting, Avrupa'da ise Pressure Die Casting olarak isimlendirilmekteydi. Son yıllarda gelişen diğer teknolojiler sebebiyle, kavram çatışmasını önlemek için yöntem, High Pressure Die Casting ismiyle anılmaya başlanmıştır. Basınçlı dökümde kalıp iki yarımdan oluşur ve iki kalıp yarımı kapatılıp kilitlendikten sonra sıvı metal bir basma haznesine aktarılır. Bu hazne soğuk olabileceği gibi metal sıcaklığına ısıtılmış da olabilir. Haznedeki sıvı metal bir piston veya basınçlı hava vasıtasıyla kalıba doldurulur. Kalıp içerisindeki hava (gaz), dolum esnasında kalıp yüzeylerindeki havalandırma deliklerinden atılır. Kalıp gravürü (boşluğu) tamamen dolduktan sonra parça soğuyuncaya kadar basınç uygulanır. Sonra kalıp açılır ve döküm parçası alınır. Kalıp açık durumda iken içi temizlenir, yağlanır ve önceki işlemler tekrar edilir.

Basınçlı döküm, ağırlıkları birkaç gram ile 25 kg arasından değişen, nihai üretim şekline yakın parçaların, tam otomatik, yüksek verimli ve yüksek kapasiteli üretimine yönelik çok iyi yapılandırılmış bir döküm metodudur. Günümüzde demir dışı metallere yapılmış parçalara olan talebin artışına paralel olarak basınçlı döküm makineleri gelişerek; hidrolik olarak çalışan, otomatik, elektronik kontrol sistemine sahip makineler yapılmaktadır.

Genel döküm ekipmanlarının mekanik ve hidrolik kısımlarına ait temel prensiplerden 100 senedir faydalanılıyor olunmasına rağmen, basınçlı döküm işlemi hala çok hızlı bir gelişim süreci içerisinde yer almaktadır. Döküm donanımı imalatçıları günümüzde magnezyum, alüminyum, çinko ve bakır ağırlıklı alaşımları arzulan şekle dönüştürmeye hazır tam otomatik döküm sistemleri üretmektedirler.

4.3 Basınçlı Dökümün Avantajları

- Metal kalıba (kokil) nazaran çok daha karmaşık şekilli parçaların dökümü mümkün olmaktadır.
- Kalıplar basınç altında doldurulduğundan, diğer döküm yöntemlerine göre daha ince cidarlı ve boyutsal hassasiyeti daha yüksek olan parçaların dökümü mümkündür.
- Dökülen parça boyutlarında bir değişim olmaksızın aynı kalıp ile binlerce parça imal edilebilir.
- Özellikle çok gözlü kalıplar kullanıldığında, üretim hızı diğer yöntemlerden çok daha fazladır.
- Parçalar yolluk ve çıkıcıların kesilmesi dışında hemen hiç yüzey işleme ihtiyacı göstermezler.
- Basınçlı dökümle üretilen parçaların mekanik özellikleri diğer döküm yöntemlerine göre daha yüksektir.
- Çok sayıda parça imalatı için birim parça maliyeti düşüktür. Ayrıca ince kesitlerin dökülebilmesi, malzeme maliyetini azaltır.
- Yoğunlukları farklı malzemeler aynı kalıpta dökülebilir (örneğin alüminyum alaşımları ve magnezyum alaşımları).

4.4 Basınçlı Dökümün Sınırlamaları

- Dökülebilecek parça büyüklüğü sınırlıdır. Parça ağırlıkları nadiren 23 kg'ı geçer ve genellikle 4-5 kg ağırlığa kadar olan parçalar dökülebilmektedir.
- Basınçlı döküm kalıplarının dizaynı yapılırken, dökülecek parçanın şekline göre yolluk, maça ve hava çıkış deliklerinin yapımı ve yeri çok önemlidir. İyi tasarlanmayan kalıplarda gaz boşlukları meydana gelir.
- Basınçlı döküm makinaları oldukça pahalı sistemlerdir. Bu nedenle yöntem, az sayıda parça dökümü için ekonomik değildir.
- Ergime sıcaklıkları bakır alaşımlarından daha yüksek olan (1000°C) malzemeler bu yöntemle dökülemez (Sönmez, 2006).

4.5 Basınçlı Döküm Yöntemleri

Basınçlı döküm yöntemlerindeki çeşitlilik, sistemlerin farklı özelliklerinin birbirine tercih edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu özellikler arasında sıvı metalin akışı, kalıp boşluğundaki gazların uzaklaştırılması, ergimiş metalle hidrolik sistem arasında reaksiyon oluşması, enjeksiyon sırasında oluşan ısı kaybı sayılabilir. Mekanik dizayn, ısı kontrol ve hareket sistemlerine bakıldığında ise, farklı yöntemler ortak özelliklere sahiptir. Basınçlı döküm yöntemleri, yerli literatürde **püskürtme döküm** ve **pres döküm** olarak ikiye ayrılmaktadır.

4.5.1 Püskürtme Döküm

Ergime dereceleri düşük kurşun (Pb), kalay (Sn) ve çinko (Zn) esaslı alaşımların, ergime sıcaklıklarının oldukça üzerindeki bir sıcaklıkta, yüksek bir basınçla kalıp içine püskürtülerek kalıbın doldurulması yöntemidir. Sıvı metal hava basıncıyla veya bir piston-silindir düzeneği ile memeden kalıp içine püskürtülür.

4.5.2 Pres Döküm

Ergime sıcaklıkları yüksek olan alüminyum (Al), magnezyum (Mg) ve bakır (Cu) alaşımlarının ergitme fırınından alınarak döküm makinasının haznesine doldurulup, bir piston vasıtasıyla kalıp boşluğuna basılması yöntemidir. Pres dökümde, döküm sıcaklığı ve döküm hızı püskürtme döküme göre oldukça düşüktür. Likidüs eğrisi civarında bir sıcaklıkta işlem gerçekleştirilir (Sönmez, 2006).

4.6 Basınçlı Döküm Makinaları

Basınçlı döküm makinasının temel fonksiyonu; iki kalıp yarısını tam ekseninde birbirine kilitli tutmak, yeteri kadar ergimiş metali basınç altında kalıp boşluğuna göndermek ve dökülmüş parçayı kalıptan çıkarmak için kalıbı açmaktır. Basınçlı döküm makinaları başlıca üç ana kısımdan meydana gelir;

1. Gövde; hareketli kısımları ve kalıbı taşıyan, onları en uygun pozisyonda tutarak her birinin fonksiyonunu yerine getirmesini sağlayan kısımdır.
2. Hareketli kısım; kalıbı açma ve kapama mekanizmasıdır. Bütün modern makinalarda bu açma kapama işlemi hidrolik olarak yapılmaktadır.
3. Enjeksiyon (makinanın ön kısmı); ergimiş metali yüksek hız ve basınç altında kalıp boşluğuna gönderir.

Basınçlı döküm makinaları, metal basma (enjeksiyon) sistemlerine göre **sıcak kamaralı** (hot chamber) ve **soğuk kamaralı** (cold chamber) olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımların dökümünde sıcak kamara tipi makinalar; yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımların dökümünde ise soğuk kamaralı makinalar kullanılır. Her iki tip makinanın da gövdeleri (arka kısımları) birbirine benzemekle beraber, ön kısımları yani enjeksiyon sistemleri birbirinden farklıdır (Doehler, 1974).

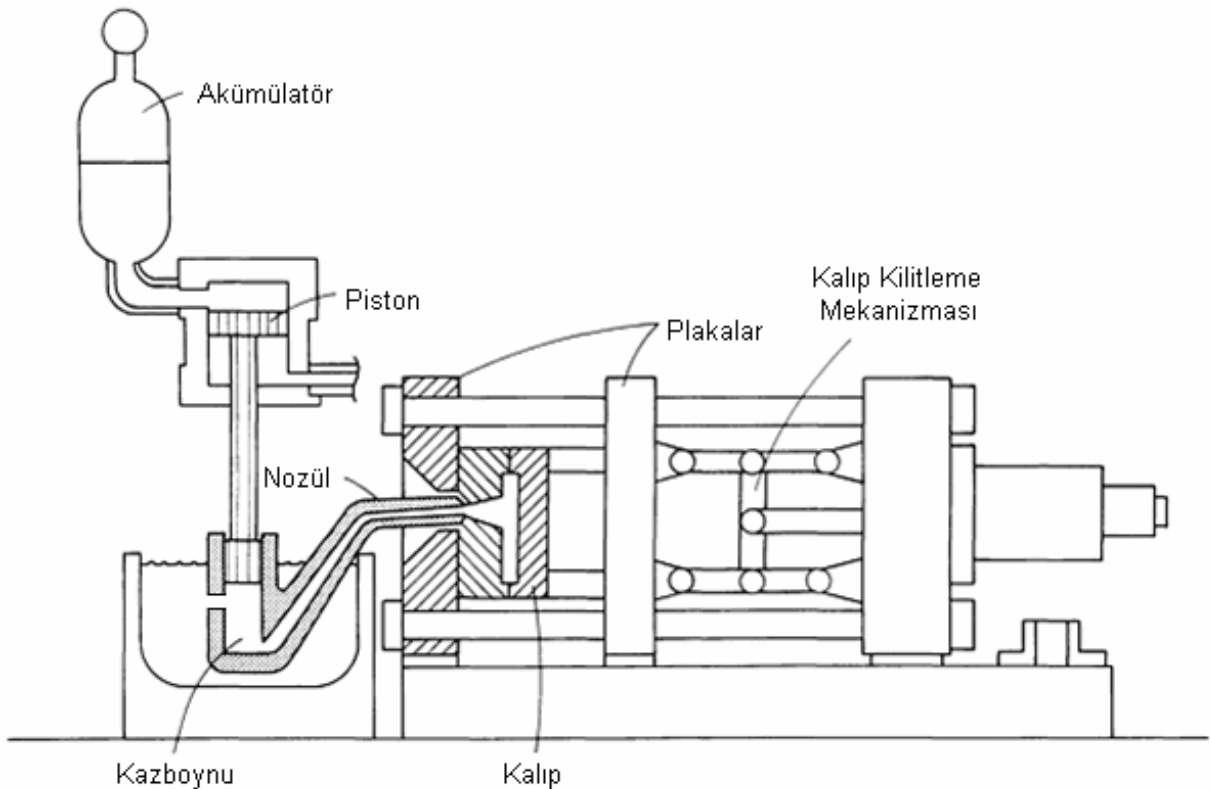
4.6.1 Sıcak Kamaralı Makinalar

Sıcak kamara tipi (dalma silindirli) makinalar özellikle çinko, kalay ve kurşun esaslı düşük ergime derecesine sahip alaşımların dökümünde kullanılırlar (son yıllarda magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde de sıcak kamaralı makinalar kullanılmaktadır). Bu tip makinaların ön kısmında, ergimiş metali döküm sıcaklığında tutan bir fırın bulunmaktadır ve enjeksiyon işlemi genellikle ergimiş metalin içine daldırılmış silindir-piston (kazboynu) düzeneği ile sağlanır. Ancak enjeksiyonun, piston yerine basınçlı hava ile sağlandığı makinalar da mevcuttur. Sıcak kamaralı makinalarda enjeksiyon aşamasında, özellikle hava ile basmada, metale önemli miktarda hava kaçması söz konusu olabilmektedir.

Sıcak kamaralı pistonlu modern bir makine, şematik olarak Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu makinalarda 20 g'dan 22 kg'a kadar çeşitli büyüklükteki parçaların üretimi mümkündür. Sıcak kamaralı makinalar, enjeksiyon sistemlerinde piston veya hava basıncı kullanılmasına göre ikiye ayrılmaktadır (Vinarcik, High Integrity Die Casting Processes, 2003).

4.6.1.1 Pistonlu Makinalar

Ticari alanda başarılı ilk basınçlı döküm makinalarından biri H.H. Doehler tarafından 1905 yılında patentlenmiş ve basınçlı döküm tekniğinin ilk yıllarında çok kullanılmıştır. Bu makina elle çalıştırılan pistonlu bir makinadır. Makinanın çalıştırılması için üç veya dört kişi gerekliydi. İki kişi yatay durumdaki kalıbı düşey duruma getirip kalıbı kilitleme görevini yerine getiriyordu. Dökülecek parçanın büyüklüğüne göre bir veya iki kişi ise enjeksiyon pistonuna bağlı manivelayı hareket ettirerek, ergimiş metalin kalıp boşluğuna basılmasını sağlıyordu. Ancak üç veya dört kişinin bir makinada çalışması gereksiz görülerek azaltılması çalışmalarına gidilmiştir. İlk gelişme metali enjekte edenlerin kaldırılarak yerine basınçlı hava kullanılması olmuştur. İkinci gelişme, metal enjeksiyon eksenini ile kalıp bağlama eksenlerinin birleştirilerek, kalıpların 90° döndürülmesini önlemekle sağlanmıştır. Günümüzde kullanılan pistonlu makinalar, ilkel makinalardan çok farklı değildir (Şekil 4.1). Temel değişiklik pnömomatik kuvvet yerine hidrolik kuvvetin kullanılması şeklinde olmuştur. Bunun yanında zamanlama aparatları, selenoidler, otomatik kontrollü valfler, röleler, limit şalterleri gibi yeniliklerle işçilik büyük oranda azaltılarak otomatikleşme sağlanmıştır (Çiğdemoğlu, 1972).



Şekil 4.1 Sıcak kamara tipi pistonlu basınçlı döküm makinasının şematik gösterimi (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

4.6.1.2 Havalı Makinalar

Alüminyum gibi ergime sıcaklığı yüksek alaşımların dökümü, dalgıç piston tipi makinalarda yapılamamaktadır. Çünkü ergimiş metalin yüksek sıcaklığı, pik veya çelik piston-silindir düzeneğine zarar vererek sistemi çalışmaz hale getirir. Bunun üzerine 1915 yılında dalma hücreli havalı makinalar geliştirilmiştir. Makinanın potasında alüminyum ergitilir ve makinaya hareketli bir manivela sistemiyle bağlanmış olan dalma hücresi potaya daldırılırdı. Ve daha sonra hava basıncı ile silindir içine dolan ergimiş metal kazboynundan geçerek kalıbı doldururdu. Hava ile basmada, enjeksiyon aşamasında metale önemli miktarda hava kaçması söz konusu olabilmektedir. Ancak enjeksiyon hızının kontrolü ile bu durum azaltılmaya çalışılmaktadır. Havalı makinalar alüminyum alaşımlarının dökümünde halen kullanılmaktadır. Fakat bu kullanım, soğuk kamaralı makinaların geliştirilmesiyle oldukça azalmış durumdadır (Doehler, 1974).

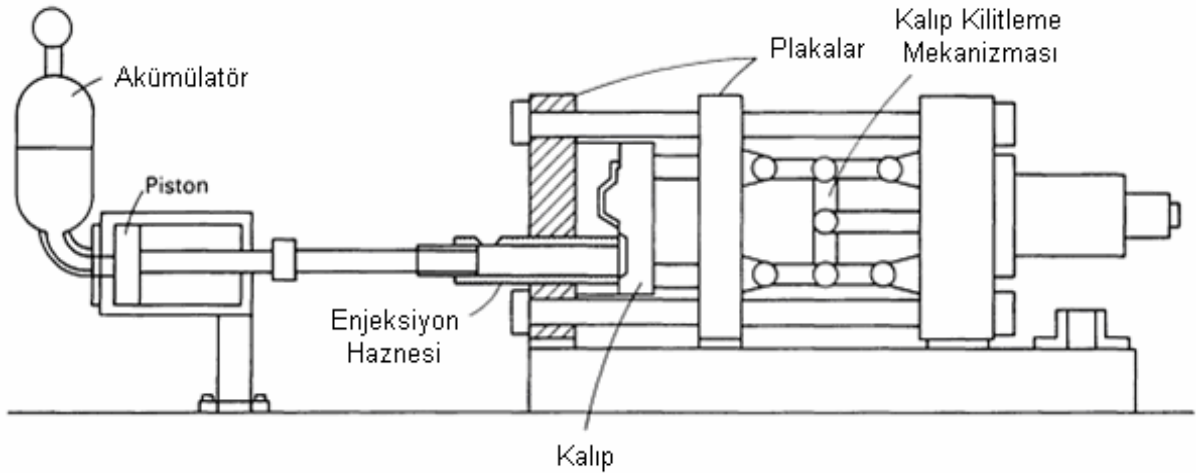
Sıcak kamaralı havalı ve pistonlu makinalarda; kazboynu ve hazne gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir veya çelikten olabilir. Gömlek malzemesi ise genellikle H13 takım çeliği veya yüksek hız çeliği, nitrürlemeye uygun alaşımlı çelik veya paslanmaz çeliktendir. Nozül (meme) malzemesi olarak H13 takım çeliği veya paslanmaz çelik, pistonlu makinaların pistonu için de alaşımlı dökme demir kullanılır.

4.6.2 Soğuk Kamaralı Makinalar

Sıcak kamaralı makinaların, ergime derecesi yüksek alaşımların dökümünde yetersiz kalması, soğuk kamaralı makinaların geliştirilmesi sürecini başlatmıştır. Bu makinalar alüminyum, magnezyum ve bakır alaşımlarının dökümünde kullanılır. Soğuk kamaralı makinalarda, ergitilmiş metalin bulunduğu pota makinadan ayrıdır. Bu tip makinalarda ergimiş metal kalıp içine hidrolik çalışan bir pistonla basılır. Ergimiş metal kalıbı birkaç defa doldurabilecek büyüklükteki bir potadan soğuk kamaraya doldurulur. Dolma işleminden hemen sonra piston çalışarak doldurma deliğini kapatır ve ergimiş metali yaklaşık 200 MPa (N/mm^2) basınç altında kalıba enjekte eder. Normal çalışmada kamaraya bir döküme yetecek miktardan fazla metal koyulur. Dökümden artan donmuş metal fazlalık, parça ile birlikte makinadan çıkarılır.

Yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımların silindir ve pistonla uzun süre temas halinde olduğu sıcak kamaralı makinalarda, hem alaşımın karakteri değişir hem de pistonla silindirin kullanım ömrü azalır. Soğuk kamaralı makinada ergimiş metal piston ve silindirle çok kısa süre temas halinde olduğu için bu sorunlar ortadan kalkmaktadır (Vinarcik, 2003).

Soğuk kamara tipi makinalar da, pistonun yerleşim pozisyonuna göre yatay ve düşey tip olarak ikiye ayrılmaktadır. Günümüzde kullanılan başlıca iki çeşit basınçlı döküm makinası vardır. Bunlardan biri sıcak hazneli dalma silindirli ve pistonlu makinadır (Şekil 4.1). Düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımların üretiminde tercih edilir. Diğeri ise yatay tip soğuk kamaralı basınçlı döküm makinasıdır (Şekil 4.2). Yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımların dökümünde kullanılmaktadır.



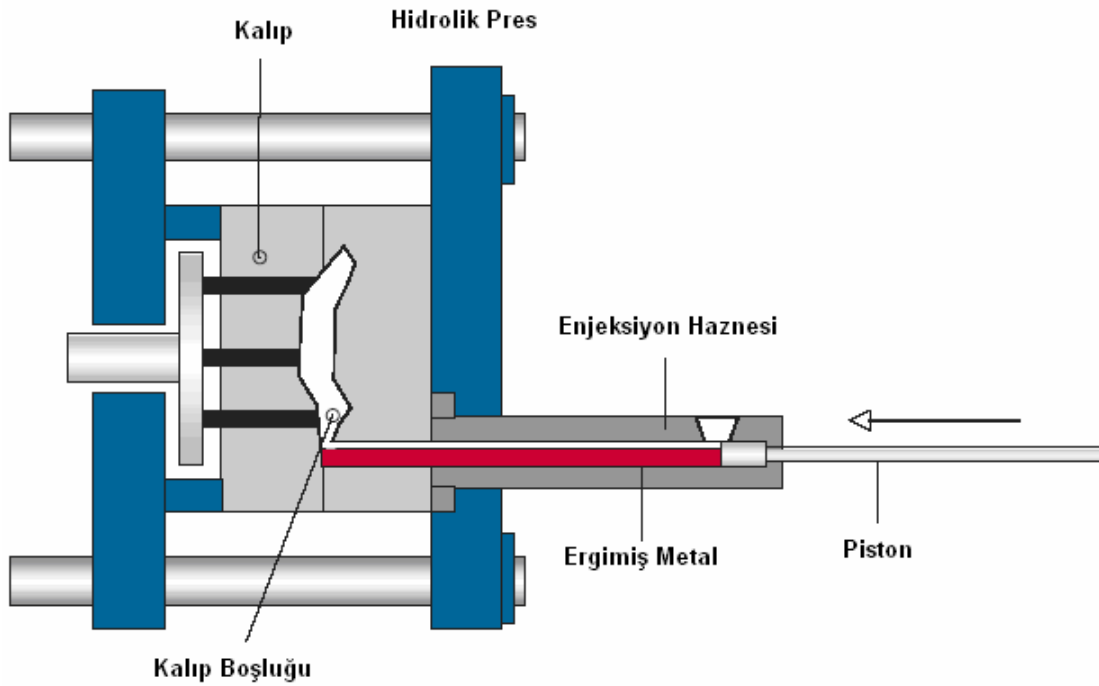
Şekil 4.2 Yatay soğuk kamara tipi basınçlı döküm makinasının şematik gösterimi (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

4.6.2.1 Yatay Soğuk Kamara Tipi Makinalar

Bu tip basınçlı döküm makinalarında metal basma haznesi ısıtılmaz. Hazne yalnızca sıvı metalin etkisiyle ısınır. Aşırı bir ısınma söz konusu olduğunda ise piston su ile soğutulur. Şekil 4.3’de yatay soğuk kamara tipi makinanın çalışma şekli verilmiştir. Hareketli kalıp yarıyı kapatılıp kalıp kilitlendikten sonra, silindir içindeki piston geri çekilmek suretiyle besleme deliği açılır ve buradan sıvı metal kamaraya boşaltılır. Piston ileri itilerek önce sıvı metal girişi kapanır ve sonra da sıvı metal kalıp boşluğuna basılır. Katılaşma tamamlandıktan sonra piston geri çekilir ve kalıp açılır. Dökülen parça hareketli kalıp yarisında kalır. Buradan ejektör (itici) pimler ile çıkarılır ve piston tekrar ilk durumuna getirilerek işlemler tekrarlanır.

Yatay soğuk kamaralı makinalar, basınçlı dökümle üretimi gerçekleştirilebilen tüm alaşımlar için kullanılabilir. Beraber genellikle alüminyum, magnezyum ve bakır alaşımları için tercih edilir. Döküm işleminde, basma sistemi ergimiş metal dışında olduğundan alaşıma demir bulaşmaz. Bu yöntemde 30-210 MPa aralığında basınçlar uygulanabilmektedir.

Makine çalıştırıldığında piston hareket ettirilmeden önce sıvı metalin kamaraya beslenmesi için gerekli zaman ayarlanmalıdır. Genellikle sıvı metalin doldurma işi tamamlanana kadar piston yavaş hareket ettirilir. Metal dolumu gerçekleştikten sonra piston hızlanır ve ergimiş metali kalıp boşluğuna enjekte eder. Optimum piston hızı alaşıma, parça büyüklüğüne ve kalıp dizaynına bağlı olarak 45-270 m/dak değerleri arasındadır. Piston malzemesi olarak berilyum-bakır alaşımı veya alaşımlı çelikler kullanılır. Kamara için ise H13 takım çeliği veya nitrürasyon çelikleri tercih edilir (Vinarcik, High Integrity Die Casting Processes, 2003).



Şekil 4.3 Yatay soğuk kamara tipi makinanın çalışma prensibi
(Vinarcik, High Integrity Die Casting Processes, 2003)

4.6.2.2 Düşey Soğuk Kamara Tipi Makinalar

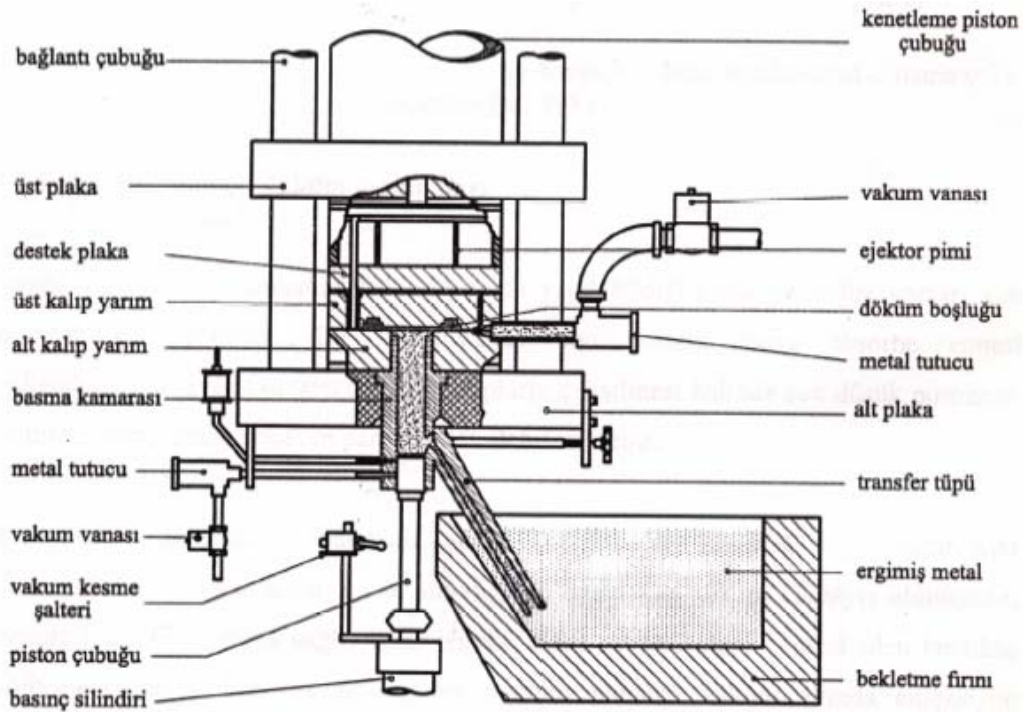
Bu makinalar da kalıbın yerleşimine göre düşey kalıplı veya yatay kalıplı olmak üzere ikiye ayrılır. Yatay kalıplı makinada ergimiş metal alt kalıptan beslenir. Hava kalıp gravüründen boşaltılıp, ergimiş metal bekletme fırınından vakumla basma haznesine alınır. Kalıp kilitleme ve basma basınçları bir akümülatör vasıtası ile kontrol edilir (Şekil 4.4).

Düşey kalıplı sistemde alttaki piston, ergimiş metal kamaraya dolarken kalıp giriş deliğini kapayacak konumdadır. Metal beslemesi yapıldıktan sonra üst piston aşağı doğru hareket ettirilerek ergimiş metal iki piston arasında sıkıştırılır. Daha sonra alt piston, üst piston

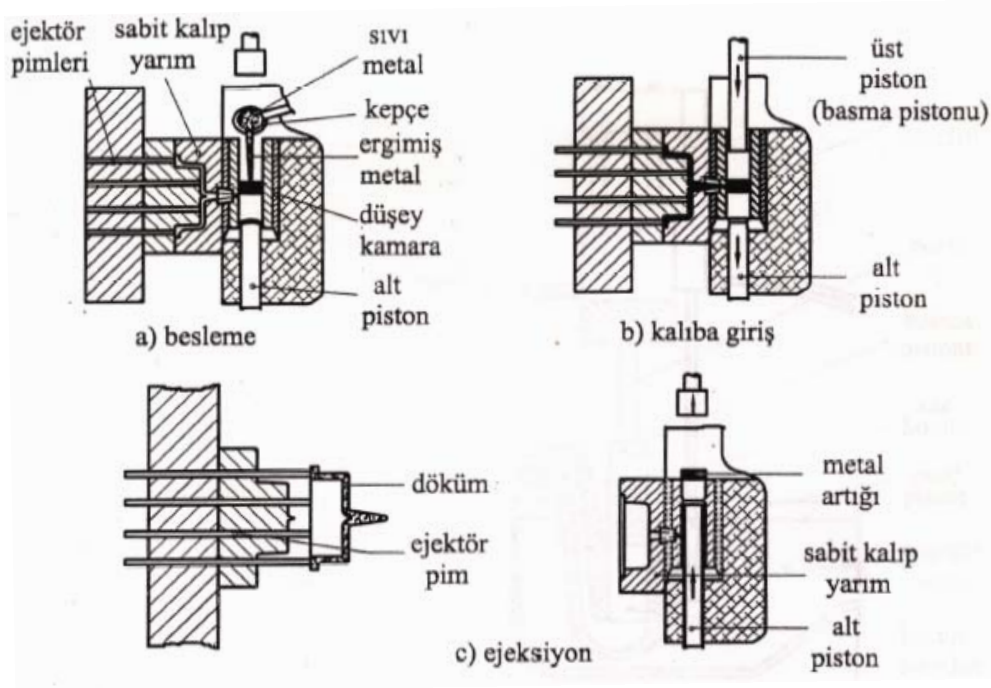
basıncının etkisiyle aşağı doğru hareket ederek kalıp giriş deliğini açar. Ergimiş metal bu girişten hızla kalıp boşluğuna basılır ve dökümün tamamlanması için belli bir süre basınç uygulanır. Katılma sonrasında üst ve alt piston yukarıya doğru hareket ettirilerek metal artığı dışarı atılır. En sonunda hareketli kalıp yarımı açılarak parça alınır (Şekil 4.5). Bu makineler çift pistonla çalıştıkları için sık bakım gerektirirler. Ancak buna karşılık, kamaranın dikey olmasından dolayı türbülans oluşumu minimumdur ve dökülen parçada boşluk görülmesi ihtimali oldukça azdır. (Er, 1999)

Genellikle yatay tip makinada üretilmeyen yüksek yoğunluklu parçaların üretiminde ve merkezden besleme yapılmasının gerektiği hallerde dikey makinelerle çalışılır. Örneğin merkez kısmının et kalınlığı fazla ve kenarlara doğru et kalınlıkları azalan tekerlek gibi parçaların dökümünde dikey makineler tercih edilir.

Günümüzde en çok kullanılan iki tip; yatay soğuk kamaralı ve pistonlu sıcak kamaralı makinelerin, arka kısımları (gövdeleri) ve kalıp açma kapama sistemleri birbirinin aynıdır. Tek fark ön kısımdaki enjeksiyon (metal basma) sistemlerindedir. Dikkatli bir konstrüksiyonla bir makinanın gövdesi aynen kullanılmak üzere enjeksiyon sistemleri değiştirilebilir makineler yapmak mümkündür (Doehler, 1974).



Şekil 4.4 Yatay kalıplı dikey soğuk kamaralı basınçlı döküm makinesi
(Er, 1999)



Şekil 4.5 Düşey kalıplı düşey soğuk kamara tipi basınçlı döküm makinası (Er, 1999)

4.7 Basınçlı Dökümde Farklı Uygulamalar

4.7.1 Vakumlu Basınçlı Döküm (Vacuum Die Casting)

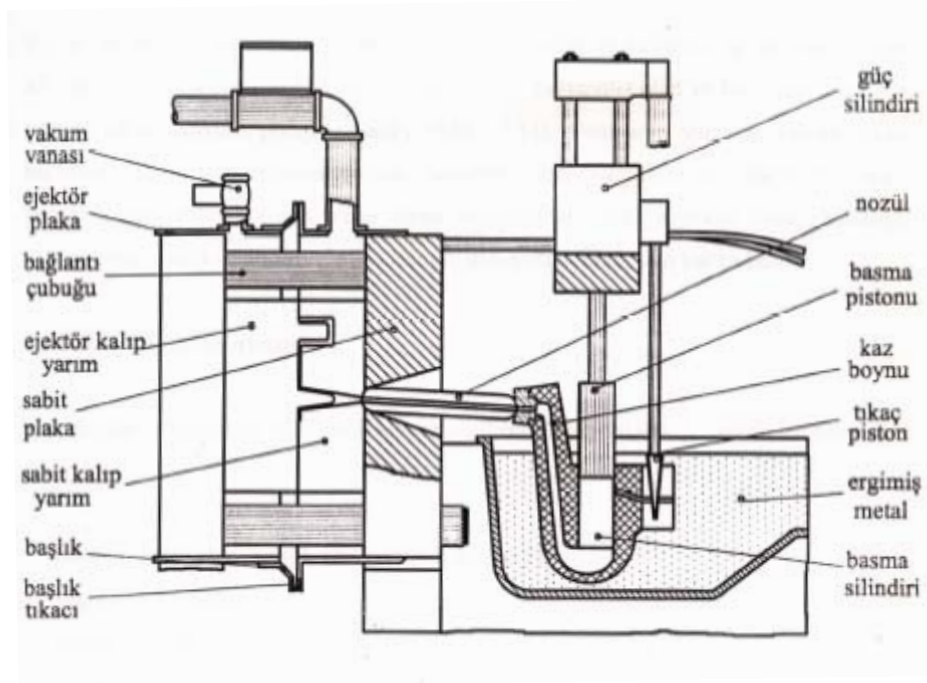
Kalıp boşluğunda veya sıvı metal yolunda sıkışmış gazların vakumla emilerek ortamdan uzaklaştırılması esasına dayanan bir teknolojidir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için, besleme ve dökümün tamamen vakum altında yapıldığı sıcak ve soğuk kamara tipi makineler geliştirilmiştir. Bu makinalarda sıvı metalin hava absorbe etmesi engellendiğinden, uygun dizayn edilmiş kalıplarla çalışılması halinde çok düşük poroziteli ve bitirme işlemi gerektirmeyen parçalar dökülebilmektedir. Vakumlu tip sıcak kamaralı makinada (Şekil 4.6) hava sızdırmazlığı sağlanmıştır. Sıvı metalin silindir içerisine alımı, nozul aracılığı ile uygulanan vakum etkisiyle olmaktadır. Sistemde basma pistonuna bağlı olarak hareket eden ve beslemeyi kontrol eden bir tıkaç piston mevcuttur. Tıkaç piston, ergimiş metalin potadan vakum altında enjeksiyon kamarasına geçişine izin vermekte, yeterli miktarda besleme yapıldıktan sonra basma pistonunun hareket etmesi ile birlikte metal giriş deliğini kapatarak aşırı metal geçişini engellemektedir. Bu durumda kalıp bölme yüzeyinden metal sızması olmayacağı için, parçada bitirme işlemi gereksinimi ortadan kalkacaktır.

Soğuk kamara tipi vakumlu basınçlı döküm makinasında ise, sızdırmazlığı sağlanmış baskı silindirinin üst kısmına, vakum borusu aracılığı ile bağlanmış olan ve bir selenoid valf ile kontrol edilen vakum pompası vardır (Şekil 4.7). Pompanın yarattığı vakum etkisi, bekletme fırınından besleme borusu vasıtasıyla baskı silindirine sıvı metal alınmasını sağlar. Yeterli miktarda sıvı metal alımı sağlandıktan sonra selenoid vana yardımıyla vakum kesilir; baskı silindiri içindeki ergiyik metal itici piston tarafından kalıba basılır.

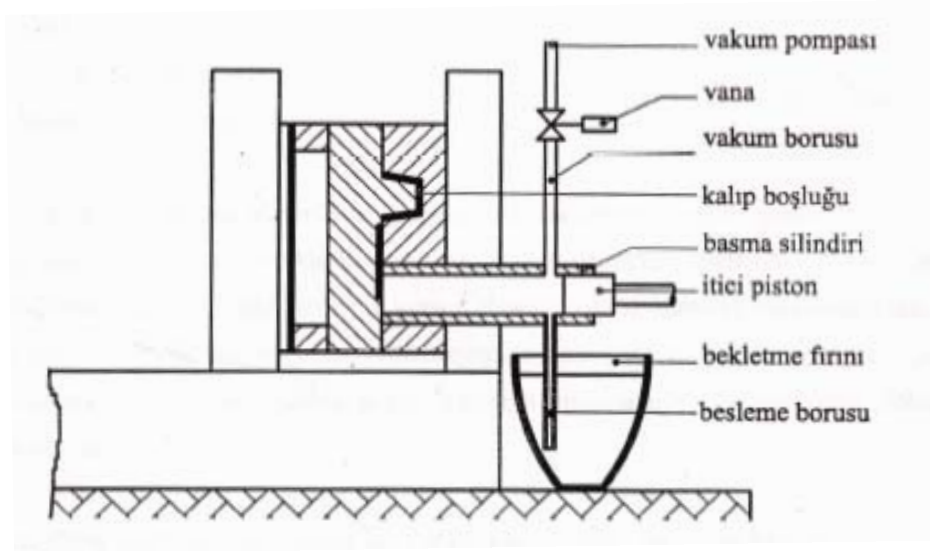
4.7.2 Düşük Basınçlı Döküm (Low Pressure Die Casting)

Sistem ilk kez 1910 yılında A.L.J. Queneau tarafından alüminyum ve magnezyum bronz dökümünde kullanılmak üzere düşünülmüştür. 1937’de düşük basınçlı döküme uygun olan inert gaz atmosferli ergitme ocakları yapılmaya başlanmıştır. Yöntem İkinci Dünya Savaşına kadar çok az kullanılmıştır. Savaşın başlarında ise İngiltere’de Bristol-Hercules uçaklarının hava soğutmalı motorlarının, silindir kafalarının dökümünde kullanılmıştır.

Daha sonraki yıllarda Avusturya, Almanya ve ABD’deki üreticiler yöntemi kullanmaya başlamıştır. Sistem 60’lı ve 70’li yıllarda Avrupa ülkelerinde ve Japonya’da oldukça geniş uygulama imkânı bulmuştur (Vinarcik, 2003).



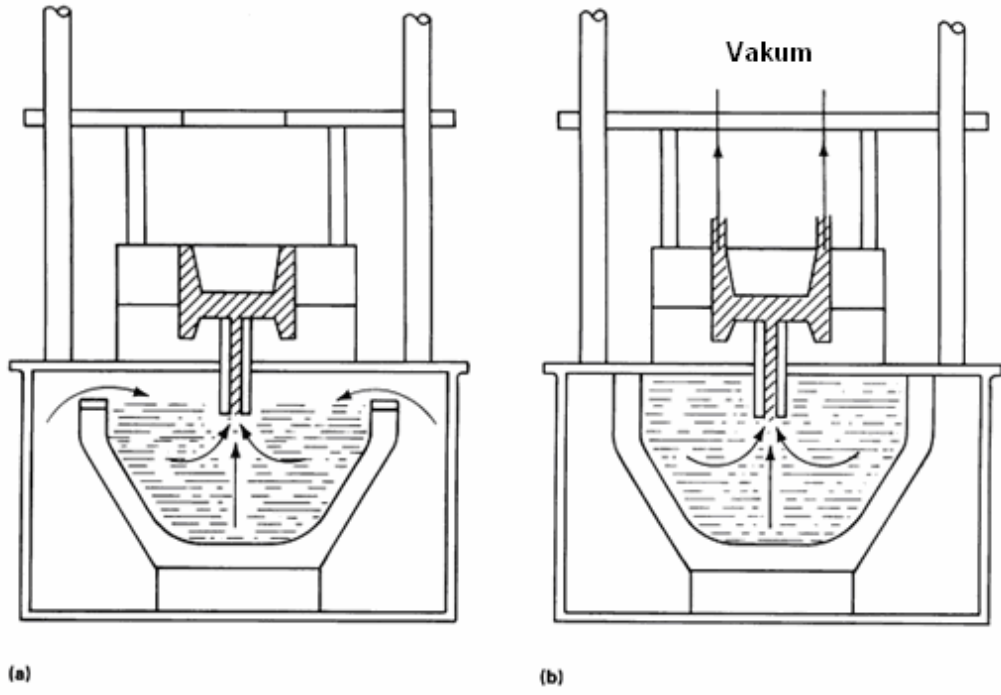
Şekil 4.6 Vakumlu sıcak kamaralı basınçlı döküm makinası
(Er, 1999)



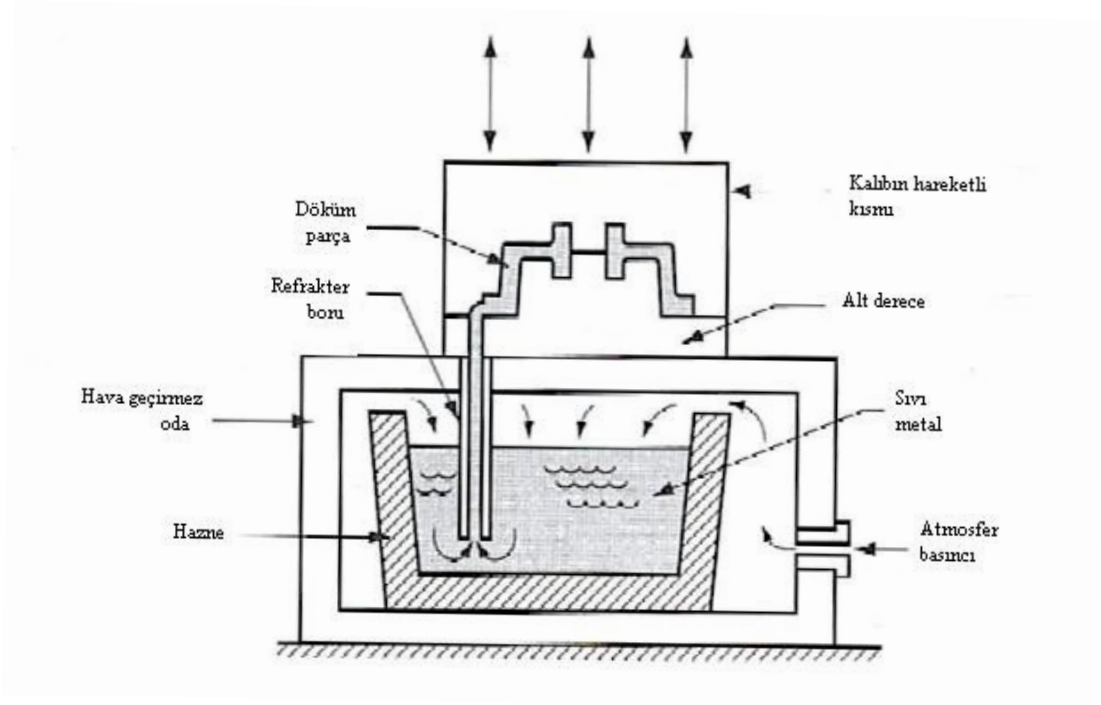
Şekil 4.7 Vakumlu soğuk kamaralı basınçlı döküm makinası
(Er, 1999)

Düşük basınçlı dökümün (DBD) esası, ergimiş metalin hava, azot veya argon gazı basıncı (10-120 kPa) ile bir yolluk borusu vasıtasıyla kalıp boşluğuna boşaltılmasıdır. Yöntem vakum altında veya vakum olmaksızın uygulanabilmektedir (Şekil 4.8). Kalıp genellikle metaldir, nadiren kum kalıba döküm de yapılmaktadır. Sistem demir dışı alaşımlara uygundur ve en çok alüminyum kullanılmaktadır. Yöntem, yıllık üretim adedi 5.000 civarında olan ve ağırlığı 5 kg'ın üzerindeki parçalar için ekonomiktir. Kalıp ömrü ise dökümü yapılan alaşıma göre değişmekle beraber ortalama 40.000–60.000 arasında parça dökümü aynı kalıpla yapılabilir.

İşlem kendine özgü bir makine ile yapılır. İşlemden önce basınç üç kademe artırılır. İlk aşamada pota içerisindeki ergiyik metal üzerine uygulanan bir ön basınç ile sıvı metal kalıp ağzına kadar yükseltilir. Daha sonra sıvı metalin, türbülanssız bir şekilde ve kalıptaki havanın kalıbı terk etmesine izin verecek bir hızda, kalıba doluşunu sağlayacak ikinci basınç kademesine geçilir. Son olarak parçadaki gaz ve çekme boşluklarını azaltmak için üçüncü kademe olan sıkıştırma basıncı uygulanır. Parçanın katılaşması tamamlanıncaya kadar bu basınç değerinde beklenir. Katılaşmayı hızlandırmak için kalıp su ile soğutulur. Daha sonra üst kısımdaki hareketli plaka yukarı doğru çekilerek parça dışarı alınır (Şekil 4.9) (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998).



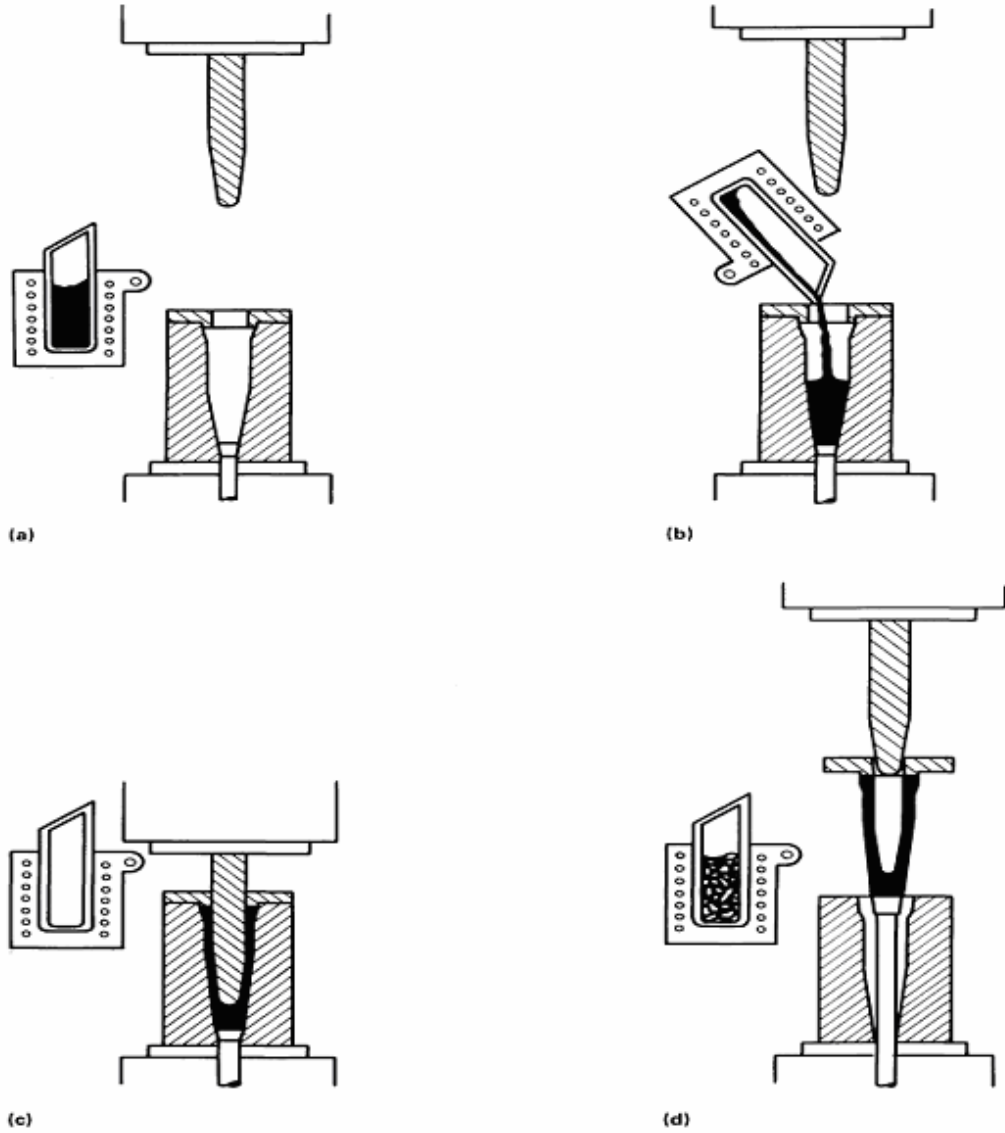
Şekil 4.8 Düşük basınçlı (a) ve vakumlu düşük basınçlı (b) döküm sistemlerinin şematik gösterimi (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)



Şekil 4.9 Düşük basınçlı döküm makinasının şematik gösterimi (İTÜ İmalat Mühendisliği Web Sitesi)

4.7.3 Sıkıştırma Döküm (Squeeze Casting)

Sıkıştırma döküm, dövme (forging) yönteminin sağladığı üstün mekanik özellikler ile dökümün kompleks şekillendirme kabiliyetlerini birleştirme amacı ile geliştirilmiş bir imalat yöntemidir. Yöntem ilk olarak 1930 yılında Sovyetler Birliği'nde Plyatskii tarafından ortaya atılmış, konuya ilişkin ilk bilimsel makale Welter tarafından yayınlanmıştır. Yöntemin ABD'de ilk ticari uygulaması 1974 yılında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.10 Sıkıştırma döküm yönteminde proseslerin şematik gösterimi (a) metalin ergitilmesi kalıbın ısıtılması ve yağlanması (b) ergimiş metalin kalıp boşluğuna dökülmesi (c) kalıbın kapanması ve basınç altında sıvı metalin katılaşması (d) döküm parçasının çıkarılması, kalıbın temizlenmesi ve ergitilecek metalin şarj edilmesi (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

Bu üretim yöntemi basitçe, miktarı önceden belirlenmiş sıvı metalin dışı kalıba (alt kalıba) doldurulması ve sıvı metal üzerine erkek kalıp veya piston vasıtasıyla basınç uygulanarak, basınç altında katılaştırılması olarak tanımlanabilir (Şekil 4.10). Sıkıştırma döküm tekniği ile çok sayıda demir esaslı ve demir dışı alaşım; gözeneksiz, sıkı yapılı ve oldukça düzgün yüzeyli olarak; yolluk ve besleyici sistemine gerek duyulmaksızın seri bir şekilde düşük maliyetle üretilebilmektedir (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998).

İşlemede parça kalitesi ve kalıp ömrü açısından döküm sıcaklığı oldukça önemlidir. Döküm sıcaklığı, alaşıma ve parça geometrisine bağlı olarak dökülecek metalin ergime sıcaklığının 6-55°C üzerinde bir değerde seçilir. Kalıp sıcaklığı da önemli bir faktördür. Yüksek sıcaklıklarda sıvı metalin kalıba yapışması ihtimali ortaya çıkar. Düşük sıcaklıklarda ise erken katılama meydana gelebilir. Alüminyum ve magnezyum alaşımları için genellikle kalıp sıcaklığı 200-250°C arasında seçilir. Demir esaslı alaşımlar için bu değer maksimum 400°C olarak belirlenmiştir. Erkek kalıbın sıcaklığı belirtilen değerlerin 15-30°C altındadır. Kalıp sıcaklığının arzu edilen değerlerin üzerine çıkmaması için, kalıpların yağ veya su ile soğutulması gerekir.

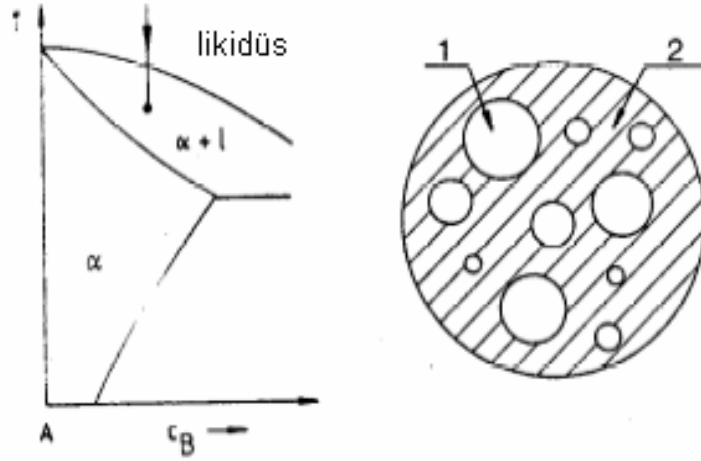
Yöntemde uygulanan basınç miktarı, dövme ile şekillendirmeye göre oldukça düşüktür. Basınç değeri parça geometrisine ve dökülecek alaşıma bağlı olarak 30–110 MPa arasında değişmektedir. Bu değer nadiren 140 MPa'a kadar çıkabilir ancak genel uygulamalar için 70 MPa uygun bir basınç değeridir. Basıncın yüksek tutulması mekanik özellikleri artırırken kalıp ömrünü azaltır. Parçanın basınç altında tutulma süresi, dökümün şekline ve ısı transferi şartlarına bağlıdır. Önerilen basınç süresi, kesit kalınlığının her mm'si için 1 saniyedir. Darbe hızı erkek kalıbın zararlı etki yapmasını önleyecek şekilde ayarlanmalıdır. Çapak oluşumuna ve erken katılaşmaya neden olmayacak uygun darbe hızı 0,5 m/sn olarak belirlenmiştir.

4.7.4 Yarı Katı Metal Dökümü (Semi Solid Metal Casting)

Konuya ilişkin ilk çalışmalar 1971 yılında M.I.T (Massachusetts Institute of Technology) katılama laboratuvarlarında yapılmıştır. Yapılan ilk deneylerde A380 alüminyum alaşımının yarı katı fazda (thixotropik durumda) basınçlı döküme elverişliliği araştırılmıştır. Araştırmaların sonucunda %40 oranında katılaşmış durumda bile basınçlı dökümün gerçekleştirilebileceği saptanmıştır (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998).

Thixotropik durum, yumuşak ve kısmi katılaşmış bir durumdur. Alaşım sıvı halden soğutulur ve likidüs-solidüs sıcaklıkları arasında bir sıcaklıkta tutularak bir karıştırma hareketi uygulanırsa, normal dentritik büyüme durdurulur ve küresel, farklı dentrit parçacıkları oluşur.

Şekil 4.11’de thixotropik durum şematik olarak gösterilmiştir. Thixotropik yöntemlerle üretilmiş bir alaşımda iyi mekanik özelliklerin yanında düşük porozite (gözenek) miktarı ve düşük korozyon hızı elde edilir. (Zeytin, 1999)



Şekil 4.11 Thixotropik sıcaklık ve iç yapının şematik gösterimi (1) katı (2) sıvı
(Zeytin, 1999)

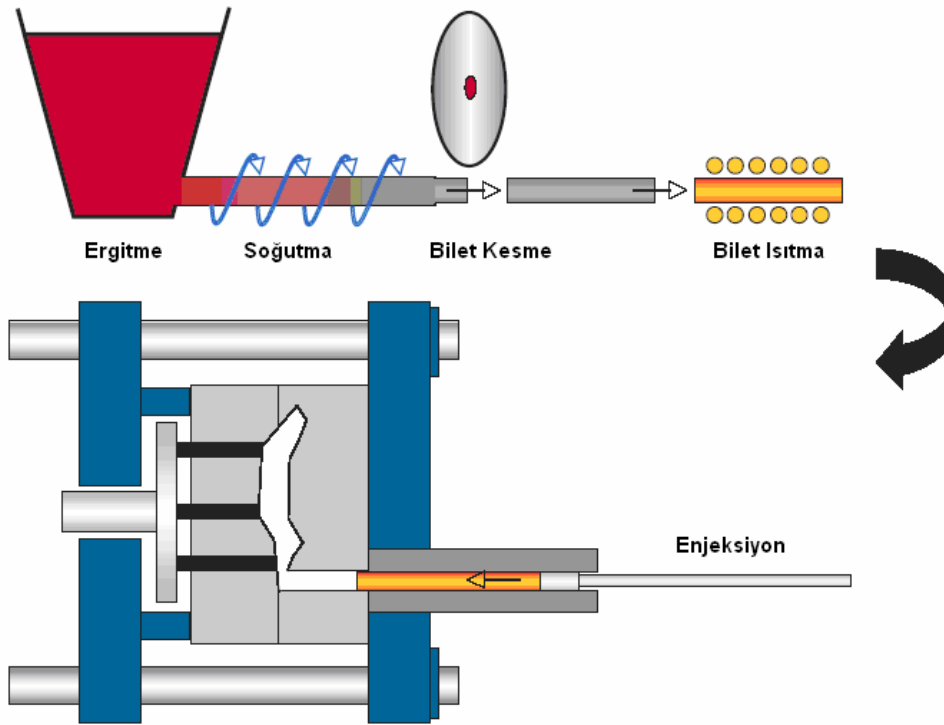
Katı-sıvı aralığındaki ikili fazın doğrudan basınçlı döküm makinasına beslenmesine **rheocasting** (reo döküm), bir ön şekillendirmeden sonra katı-sıvı aralığına tekrar ısıtılarak dökülmesine ise **thixocasting** (tikso döküm) isimleri verilmektedir. Yöntemlerin her ikisi genel olarak **semi-solid metal casting** (yarı-katı metal dökümü) ismiyle anılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarla alüminyum, magnezyum ve bakır alaşımlarının rheocasting ve thixocasting yöntemleriyle dökümü sorunsuz bir şekilde yapılabilmektedir (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998).

Yöntemlerin en büyük avantajı düşük ısı ihtiyacıdır. Bu sayede kalıp problemleri azalır, kalıp aşınması yavaşlar ve kalıp ömrü uzar. Düşük ısıyla çalışılmasından dolayı kalıpta ve basma silindirinde termal şoklar meydana gelmez. Ayrıca soğuma daha çabuk gerçekleşeceğinden çevrim süresi ve harcanacak enerji azalır. Geleneksel büyük fırınlarla çalışma gereksinimi ortadan kalkar. Yarı katı fazda dökümün önemli bir avantajı da, alaşımın kalıba kısmen katılaşmış olarak girmesidir. Bu durumda alaşım daha viskoz olduğu için kalıp boşluğuna turbülanssız girer; bu da porozite oluşumunu azaltır. Bunun yanında kısmen katılaşmış metal, soğuma sırasında daha az kendini çekme gösterir. Döküm yüzeyi ve boyutsal hassasiyet daha iyidir (Vinarcik, High Integrity Die Casting Processes, 2003).

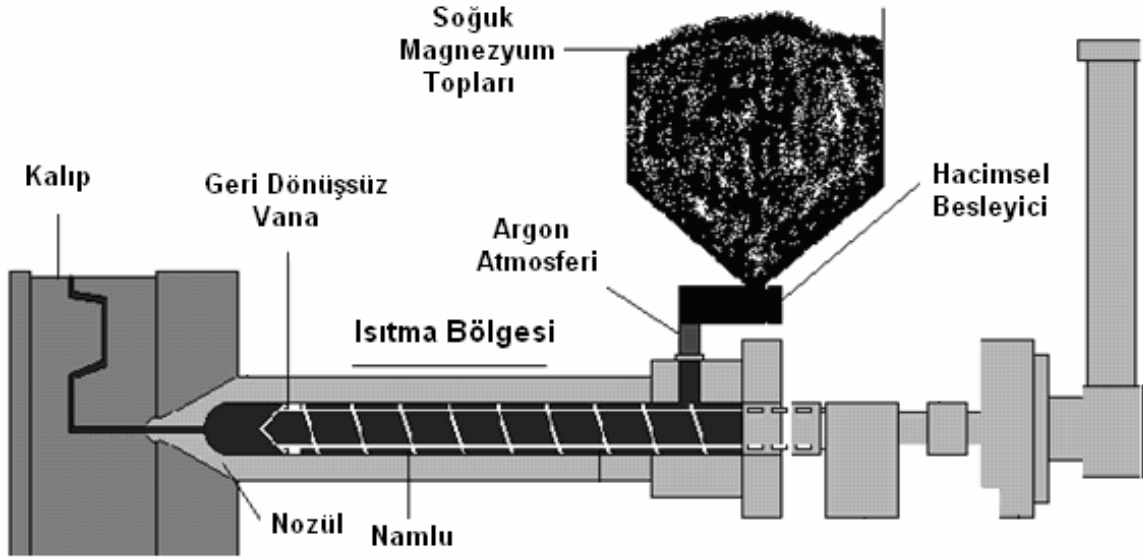
4.7.4.1 Tikso Döküm (Thixocasting)

Bu yöntem parça bütünlüğü ve performansını iyileştirmesine karşın, yüksek maliyeti ve esnek olmayışı nedeniyle çok kullanılmamaktadır. Proses adımları; metalin ergitilmesinin ardından soğutulması, biletler halinde kesilmesi ve ardından kesilen biletlerin yeniden ısıtılarak basınçlı dökümle şekillendirilmesinden oluşur (Şekil 4.12). Malzeme yarı katı halde enjekte olduğundan, katılaşma sırasında kendini çekme miktarı azaltılmış olur (Vinarcik, 2003).

Tikso döküm yönteminin en önemli özelliği, dökümdeki kaba ve dentritik içyapı oluşumunun, ergiyik metale uygulanan karıştırma işlemiyle ortadan kalkması ve onun yerine daha ince taneli, dövme ürünlere benzer bir içyapı elde edilmesidir. Ergiyik metale bir ön işlem gibi uygulanan bu karıştırma işlemi, yüksek maliyetinden dolayı yöntemin yaygınlaşmasını önleyen en büyük engeldir. Ayrıca kalıba basılarak şekillendirilecek malzemenin, sürekli aynı kalitede üretilebilir olması gereklidir. Bu da yöntemin kullanımını sınırlayan diğer bir dezavantajdır. Tikso döküm yöntemi, yüksek basınç altında yapıldığından ince kesitli parçaların da rahatlıkla dökülmesine olanak sağlar. Ayrıca ürünün düşük gaz içeriği sayesinde kaynaklanabilirliği iyileşir. Bu anlamda yöntem, yüksek basınçlı ve alçak basınçlı döküm yöntemlerinin özelliklerini bir arada barındıran, üstün bir döküm yöntemidir.



Şekil 4.12 Tikso döküm yönteminin şematik gösterimi (Department of Trade and Industry, Magnesium alloys and processing technologies for light weight transport applications, 2004)

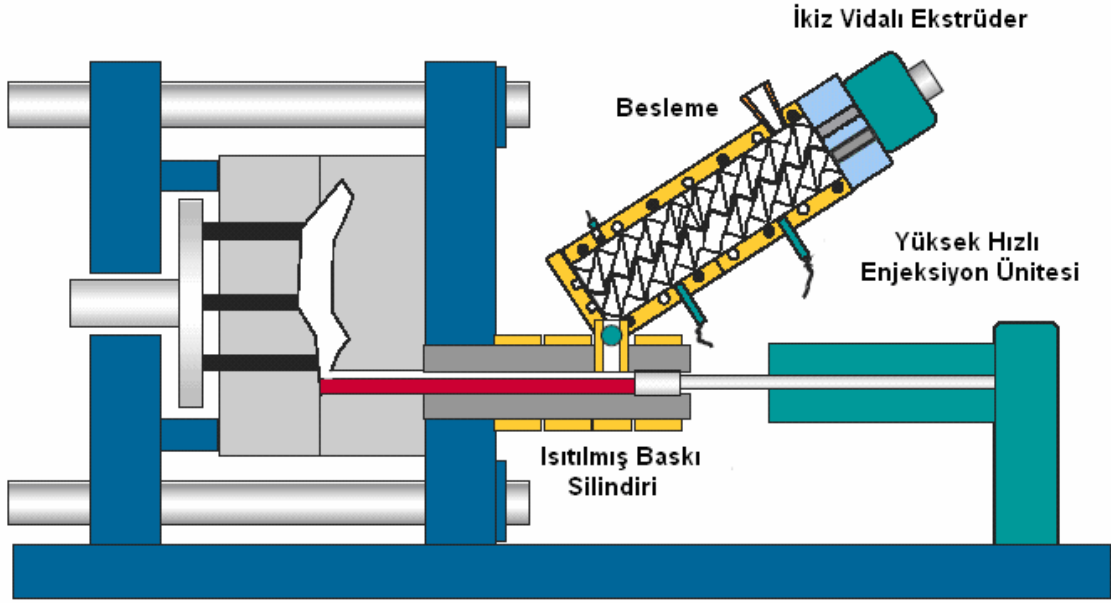


Şekil 4.13 Tikso kalıplama yönteminin şematik gösterimi
(Vinarcik, High Integrity Die Casting Processes 2003)

Yakın zamanda geliştirilen bir diğer yöntem ise thixomolding (tikso kalıplama) prosesidir (Şekil 4.13). Plastik enjeksiyon yöntemine benzer şekilde çalışan sistemde; kesme, ayırma gibi operasyonlardan çıkan ıskartalar ile metal talaşları, basit vidalı enjeksiyon kalıp makinasına beslenerek sıvı-katı bölgeye ısıtılır. Ardından vida mekanizması sayesinde kalıba enjekte edilerek parça üretimi gerçekleştirilir. Tikso kalıplama oldukça esnek bir yöntem olup, sıvı-katı malzeme oranının değiştirilmesiyle oldukça farklı içyapılar elde edilebilmektedir (Vinarcik, High Integrity Die Casting Processes 2003).

4.7.4.2 Reo Döküm (Rheocasting)

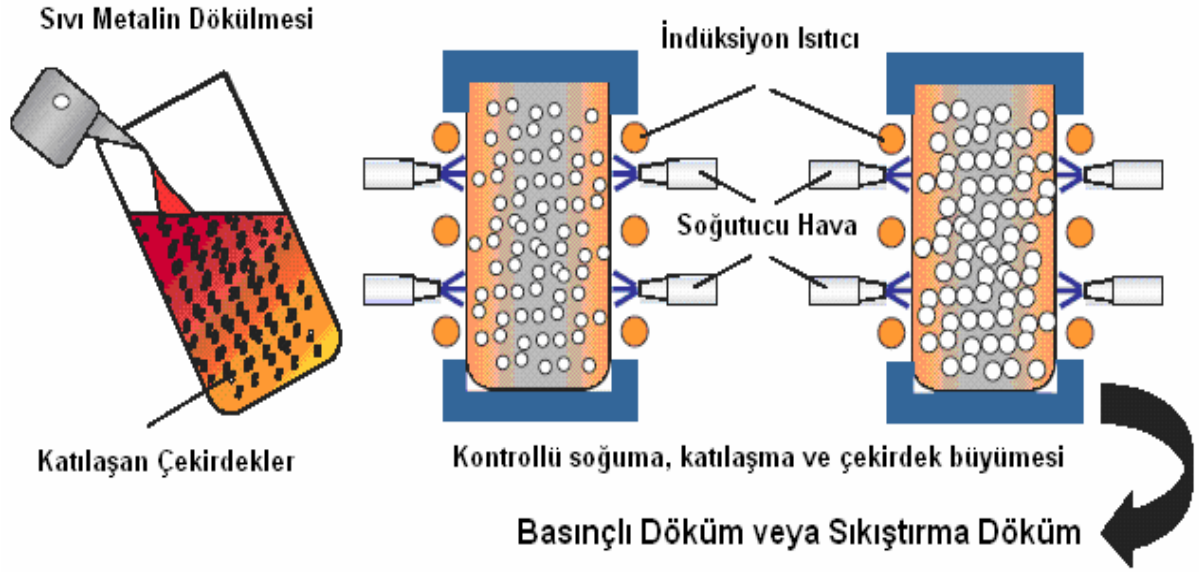
Son yıllarda tikso döküm yönteminin ekonomik ve teknik zorluklarının önüne geçebilmek için reo döküm (rheocasting veya rheo-diecasting) yöntemi araştırma ve geliştirme çalışmalarında popüler hale gelmiştir. Reo döküm sistemi, ikiz vidalı bir ekstrüzyon ünitesinden ve soğuk hazneli basınçlı döküm makinasından oluşur. İkiz vidalı ünite sayesinde ergiyik malzeme, yoğun türbülanslı ortamda ve yüksek kesme kuvvetleri altında, yüksek kalitede yarı katı malzeme haline getirilir (Şekil 4.14). Bu yöntemde işlem başlangıcında ergiyik malzemenin kullanılması, tikso döküm yöntemindeki gibi standart kalitede bilet üretimini ortadan kaldırır (Fan, Development of the rheo-diecasting process for magnesium alloys, 2005).



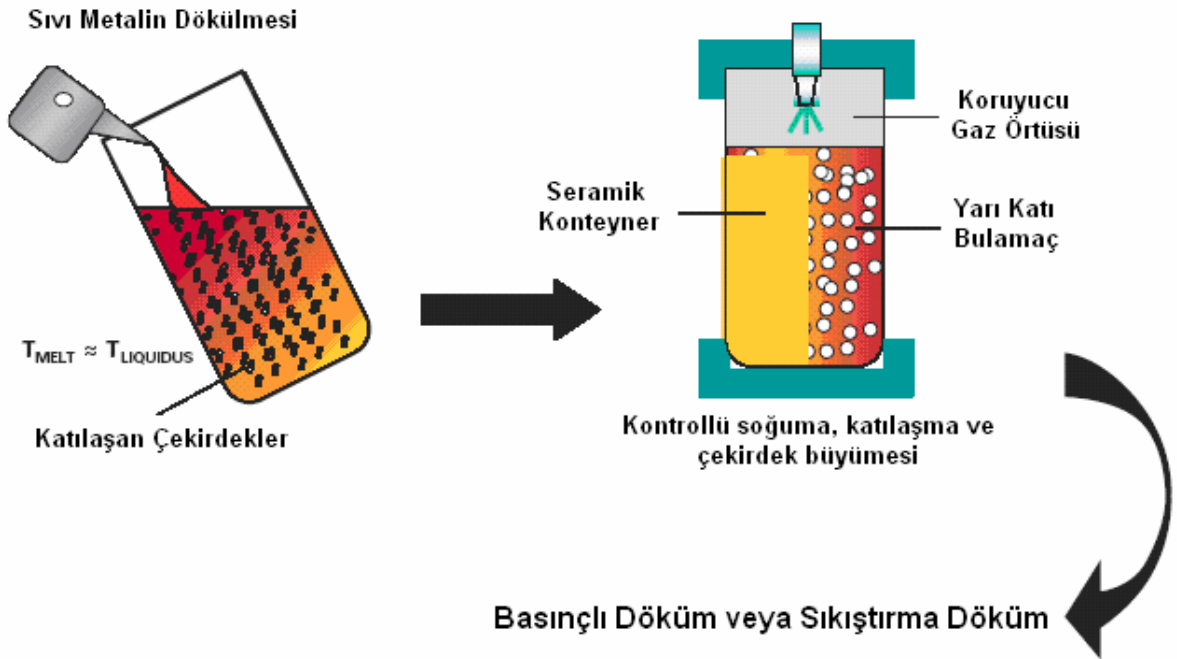
Şekil 4.14 Reo döküm yöntemi (Rheocasting process)
(Fan, Development of the rheo-diecasting process for magnesium alloys, 2005)

Avrupa’da yeni geliştirilen ve reo döküm yönteminin özel bir şekli olan new-rheocasting (yeni reo döküm) yöntemi, Şekil 4.15’de şematik olarak gösterilmiştir. Yöntemde, süper ısıtıcılarla (super-heater) ergiyik hale getirilen metal, çelik bir potaya, yarı katı bölgeye kontrollü soğutma amacıyla dökülür. Daha sonra, indüksiyon fırınında kısa süreli bir ısıtmaya tabi tutulan yarı katı metal, basınçlı döküm veya sıkıştırma döküm prosesi ile istenilen son şeklini alır. Halen geliştirme aşamasında olan yöntem, metalin beslenmesi bakımından tikso döküm yöntemine göre daha düşük maliyete sahip olmasına karşılık, proses parametrelerinin çok hassas bir şekilde kontrolünü gerektirmektedir.

Reo döküm yönteminin diğer bir özel şekli olan rheo-container (reo konteyner) yöntemi ise, ergiyik metalin koruyucu atmosfer altında seramik bir potaya dökülmesi ve kontrollü soğutma işlemiyle yarı katı malzemenin elde edilmesi şeklindedir. Ergimiş metal, yüksek soğuma oranlarını önlemek için, likidüs sıcaklığına çok yakın bir sıcaklıkta seramik potaya dökülür. Yine yarı katı bölgedeyken, basınçlı döküm veya sıkıştırma döküm prosesiyle istenilen son şeklini alır (Şekil 4.16). Tikso döküm yöntemindeki gibi sürekli bilet üretimi ve bunların yeniden ısıtılması söz konusu değildir (DTI, Magnesium alloys and processing technologies for light weight transport applications, 2004).

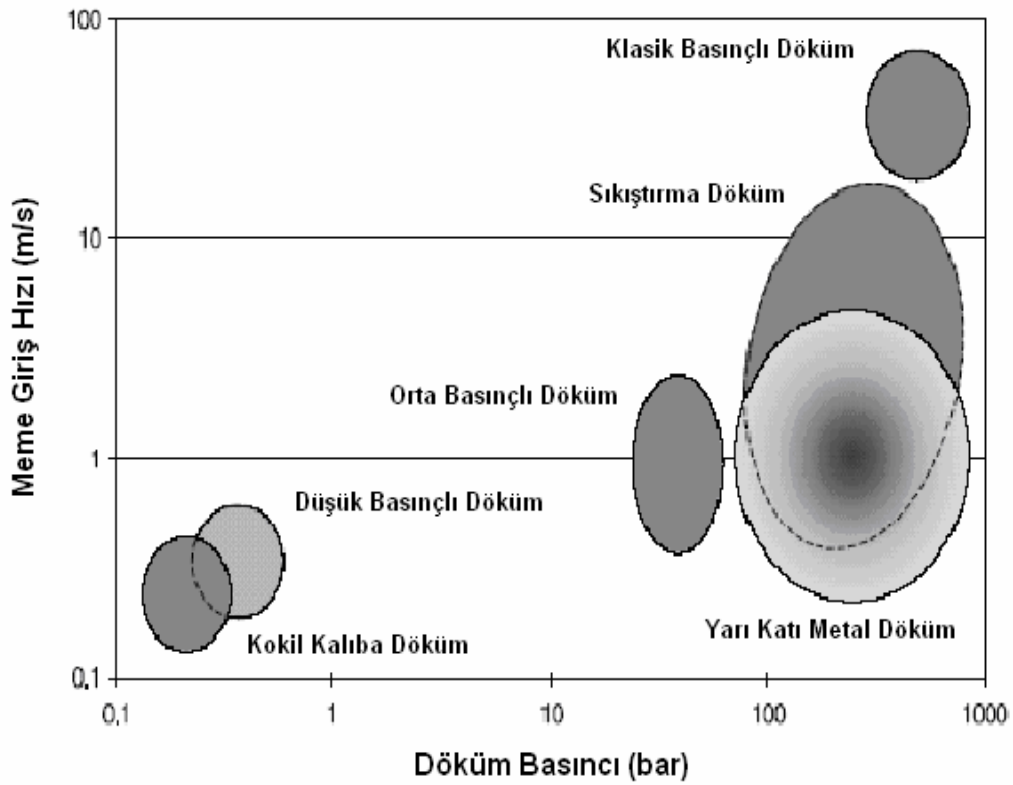


Şekil 4.15 Yeni reo döküm (new-rheocasting) yönteminin şematik gösterimi (DTI, Magnesium alloys and processing technologies for light weight transport applications, 2004)



Şekil 4.16 Reo konteyner (rheo-container) yönteminin şematik gösterimi (DTI, Magnesium alloys and processing technologies for light weight transport applications, 2004)

Şekil 4.17’de, bu kısma kadar anlatılan farklı basınçlı döküm yöntemlerinin, işlem faktörleri arasındaki ilişkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Görüldüğü gibi en yüksek enjeksiyon hızı klasik basınçlı döküm yönteminde elde edilirken, buna karşılık en yüksek basınç ihtiyacı da bu yöntemde ortaya çıkmaktadır. Klasik basınçlı döküm yöntemi hızlı çevrim süresine sahip fakat yüksek enerji gerektiren bir prosestir. Yeni geliştirilen yarı katı metal işleme yöntemleri, yakın bir gelecekte, geleneksel basınçlı döküm yöntemleri ile rekabet edebilecek duruma gelecektir (Vinarcik, High Integrity Die Casting Processes, 2003).

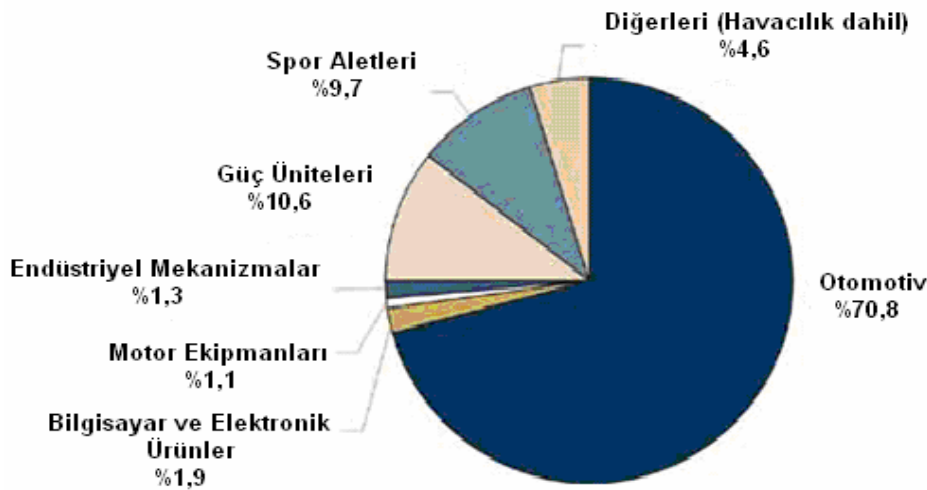


Şekil 4.17 Farklı basınçlı döküm yöntemlerinin, döküm basınçları ve meme hızlarının karşılaştırılması (Vinarcik, High Integrity Die Casting Processes, 2003)

5. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ BASINÇLI DÖKÜMÜ

Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm (high pressure die casting) ile imalatı; elektronik parçalardan kamyonların şanzıman kutularına kadar çok geniş bir üretim hacminde kendini kanıtlamış bir yöntemdir. Basınçlı döküm, yüksek üretim hacimlerinde, aynı tip parçaların imalatında kullanılan, kendini tekrarlama esasına dayanan bir yöntemdir. Proses, ergimiş metalin yüksek basınç altında çelik bir kalıba enjekte edilmesi olarak tanımlanabilir. Basınçlı döküm yönteminde, ergimiş metalin yüksek sıcaklık ve basınç altında enjekte edilmesi için kullanılan kalıp, aynı zamanda parçanın kalıptan çıkacak katılığa (sertliğe) kadar soğutulmasını da, hızlı bir şekilde sağlamaktadır. Basınçlı döküm, ergimiş magnezyumu tam ölçüde ve sorunsuz bir şekilde, mümkün olan en kısa çevrim süresinde, istenilen forma dönüştürme konusunda benzersiz bir yeteneğe sahiptir. Basınçlı döküm ile parçalar, plastik enjeksiyon yöntemine benzer bir şekilde, genellikle herhangi bir talaşlı işleme gerek duyulmadan, son şeklinde üretilmektedir.

Magnezyum alaşımlarından dökülen parçalar, plastik malzemelere göre daha sıkı yapılı ve boyutsal olarak daha kararlı özelliklere sahiptir. Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi, özellikle otomotiv sektörü başta olmak üzere uçak ve uzay sanayi, spor ekipmanları, elektronik parça sektörü, bilgisayar parçaları, güç ünitesi komponentleri gibi birçok alanda yaygınlaşmış durumdadır. 2004 sonu itibariyle, basınçlı döküm magnezyum parçalarının ABD'deki pazar payları Şekil 5.1'de verilmiştir.

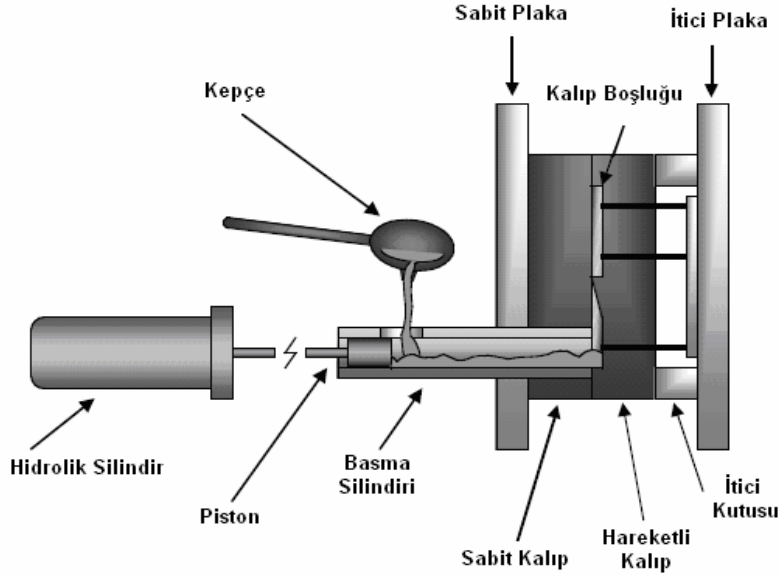


Şekil 5.1 Basınçlı döküm magnezyum parçaların 2004 sonu itibariyle ABD'deki pazar payları (American Foundry Society (AFS) Web Sitesi)

Tasarımcı açısından basınçlı döküm ürünler için yapılan üretim planındaki esneklik ve özgürlük, diğer bütün metal işleme yöntemlerine göre daha fazladır. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde genel olarak, sıcak kamaralı ve soğuk kamaralı olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).

5.1 Soğuk Kamaralı Basınçlı Döküm Prosesi

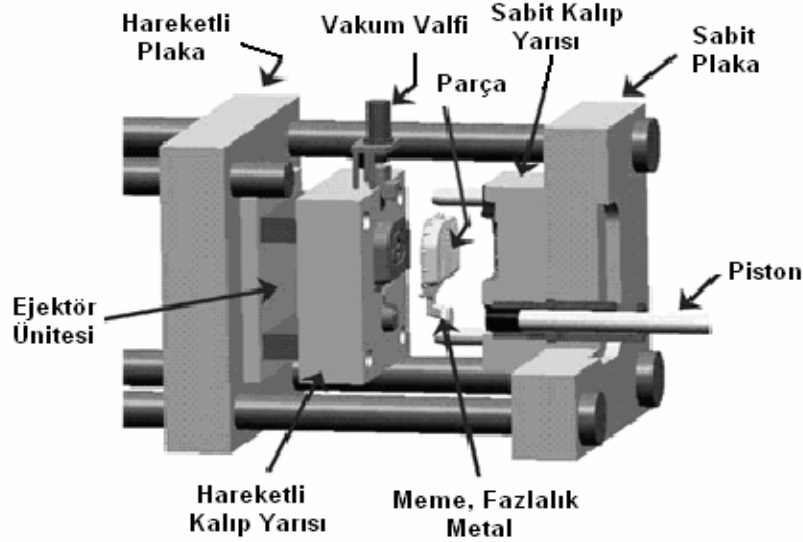
Soğuk kamara tipi basınçlı döküm makinalarında, ergimiş metal soğuk hazne silindrine döküm ağzı veya döküm deliği vasıtasıyla aktarılır. Hidrolik olarak çalışan pistonun ileriye doğru hareketiyle, döküm deliği (ağzı) kapanır ve kilitlenmiş kalıp içine sıvı metal yüksek basınç altında enjekte edilir (Şekil 5.2). Enjeksiyon sırasında uygulanan basınç 30–100 MPa arasında değişmektedir. Soğuk kamaralı makinalarla döküm yaparken, kalıp boşluğunu doldurması gerekenden daha fazla ergimiş metal, silindir içerisine aktarılır. Bu fazlalık sıvı metal, kalıp boşluğundaki alaşımı, katılaşma süresince yeterli miktarda basınç altında tutmaya yardımcı olur. Fazlalık metal (artık metal) döküm parçası ile birlikte dışarı itilir ve daha sonra parçadan ayrılır. Soğuk kamaralı makinalar için proses çevrimi şematik olarak Şekil 5.5’de verilmiştir (Vinarcik, High Integrity Die Casting Processes, 2003).



Şekil 5.2 Soğuk kamaralı basınçlı döküm makinası (Vinarcik, 2003)

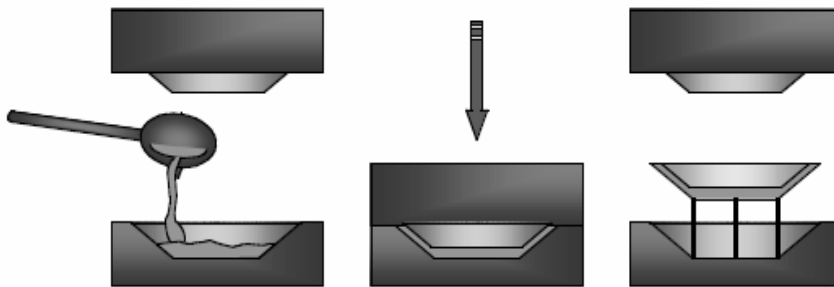
Vakumlu basınçlı döküm (vacuum die casting) prosesi, geleneksel yöntemin modifiye edilmiş halidir. Bu yöntemde, kalıp boşluğundaki hava, alaşım enjekte edilmeden önce boşaltılır (Şekil 5.3). Vakumlu basınçlı döküm yöntemi, gereken basıncın azalması ve enjeksiyon hızının yükseltilebilmesi sayesinde, parçaların hızlı dolum (quick fill) adı verilen şekilde

üretilmelerine olanak sağlar. Geleneksel basınçlı döküm kalıpları ile vakum etkisi, kalıp içinde yaklaşık 35 kPa negatif basınç ile sağlanmaktadır. Özel olarak hazırlanmış iç kısmı sızdırmaz (contalı) kalıplarla çalışılırsa, istenilen vakum etkisi, kalıp içindeki 10 kPa'dan az olan negatif basınç ile elde edilmektedir. Bu yöntem, geniş yüzeyli ve ince kesitli parçaların, derin kanatçıkların ve de dar ve kör boşlukların hatasız dökümlerine olanak sağlar.

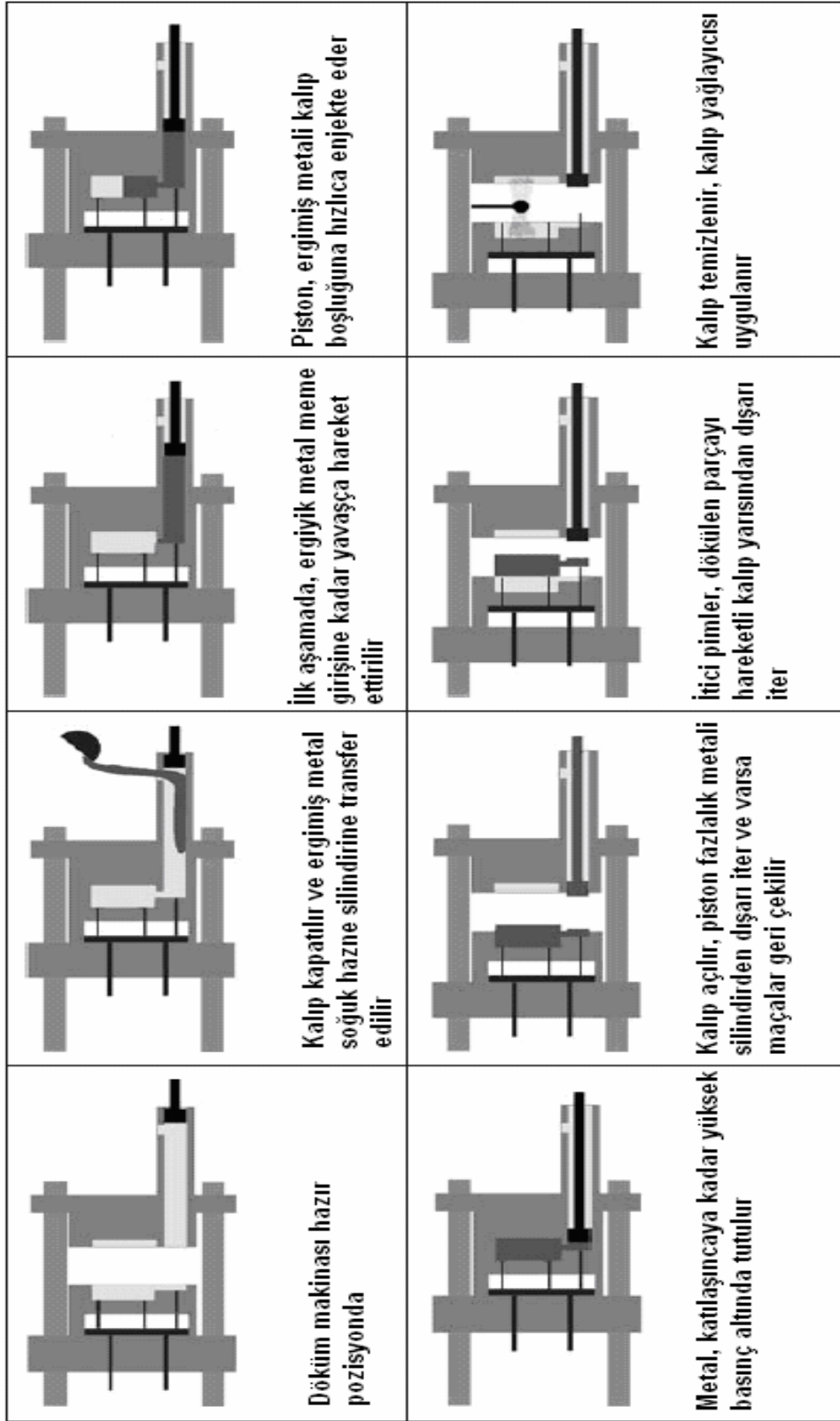


Şekil 5.3 Vakumlu soğuk kamaralı basınçlı döküm makinası
(Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

Sıkıştırma döküm (squeeze casting) yöntemi (Şekil 5.4), basınçlı döküm sektöründe son zamanlarda ilgi gören bir prosestir. Yöntem ergimiş metalin türbülanssız ve gaz kalıntıları olmaksızın, yüksek hidrolik basınç altında şekillendirilmesi esasına dayanmaktadır. Sonuç olarak ısı işlem görmeye uygun, kalın kesitli ve düşük poroziteli parçalar üretilir. Üretim maliyetleri geleneksel basınçlı dökümden oldukça fazladır. Sıkıştırma döküm ile üretilmiş parçalar, kokil kalıba döküm yöntemine alternatif olmaktadır. Ayrıca yüksek mukavemetli dökme demir uygulamalarında tercih edilen bir yöntemdir (Vinarcik, 2003).



Şekil 5.4 Sıkıştırma döküm yönteminin şematik gösterimi (Vinarcik, 2003)

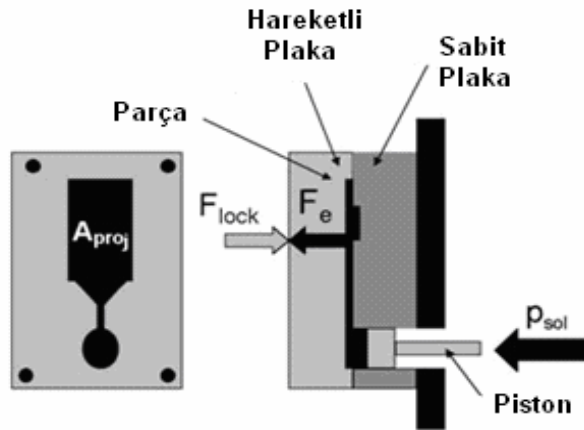


Şekil 5.5 Soğuk kamaralı basınçlı döküm prosesinin çevrimi (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

Basıncı döküm makinasının boyutlarını belirlerken, dökülen parçanın yolluk ve meme kesitlerini de içeren toplam kesit alanı (A_{proj}) ile katılma sırasında uygulanan maksimum basınç (p_{sol}) dikkate alınır (Şekil 5.6). Gerekli olan kilitleme kuvveti (F_{lock}) Eşitlik 5.1 ve 5.2 yardımıyla hesaplanabilir. Magnezyum alaşımlarının soğuk kamaralı basınçlı dökümüyle ilgili makine ve proses özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

$$F_e = A_{proj} \times p_{sol} \quad (5.1)$$

$$F_{lock} = 1,1 \dots 1,25 \times F_e \quad (5.2)$$



Şekil 5.6 Basıncı döküm makinasında gerekli kilitleme kuvvetinin hesaplanması

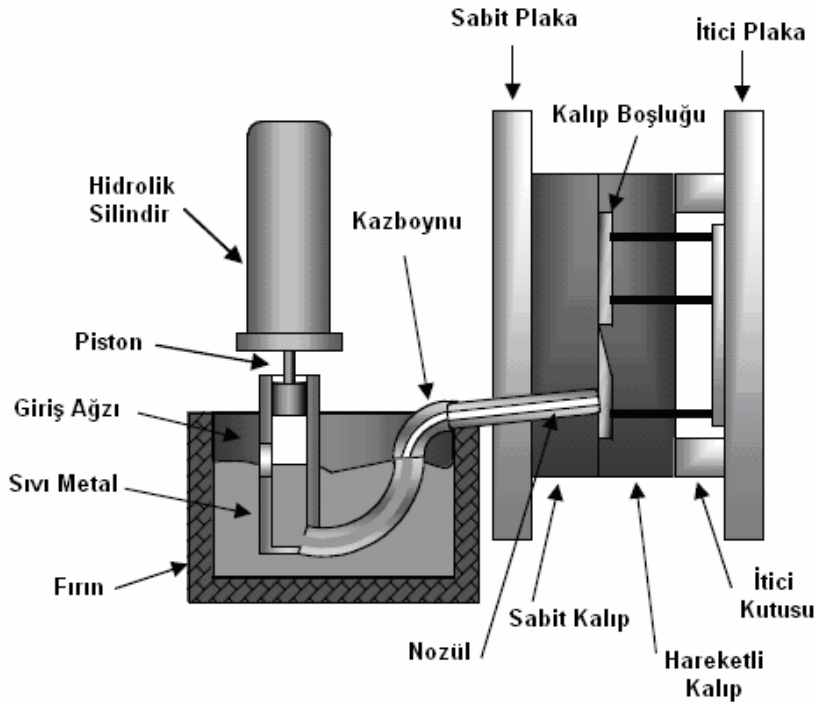
Çizelge 5.1 Soğuk kamaralı basınçlı döküm prosesinin karakteristikleri (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999)

| | |
|--|----------------------------------|
| Fırının yeri | Basıncı döküm makinasından ayrı |
| Kilitleme kuvveti (F_{lock}) | 1 MN – 45 MN |
| Plaka Ölçüleri | max. 1750 x 1750 mm ² |
| Parçanın toplam kesit alanı (A_{proj}) | max. 1,0 m ² |
| Enjeksiyon sırasındaki basınç | 30 – 100 MPa |
| Katılma sırasındaki basınç (p_{sol}) | max. 120 MPa |
| Parçanın ağırlığı | 50 g – 40 kg |
| Parçanın cidar kalınlığı | 1,5 – 30 mm |
| Alaşımlar | Tüm Basıncı Döküm Mg alaşımları |

5.2 Sıcak Kamaralı Basınçlı Döküm Prosesi

Sıcak kamaralı makinada (Şekil 5.7) enjeksiyon mekanizması, makinaya bağlı bir fırın içerisine daldırılmış durumdadır. Pistonun yükselmesi ile birlikte, ergimiş metalin silindire dolmasına izin verecek şekilde bir kapı açılır. Piston aşağıya doğru hareket edince, sıvı metalin silindire aktığı ağız kapanır. Daha sonra piston ergiyik metale baskı yaparak, kazboynu ve nozülden (memeden) geçerek kalıbı doldurmasını sağlar. Metalin katılaşmasının ardından, piston aşağı konumdayken, kalıp yarıları açılarak bitmiş döküm parçası dışarı çıkartılır. Sıcak kamaralı proses için tipik bir çevrim, Şekil 5.8’de gösterilmiştir.

Sıcak kamaralı makinaların operasyon hızları oldukça yüksektir. Çevrim süreleri; ağırlığı 10 g’dan az olan parçalar için 1 s’nin altındayken, 1 kg ve üzerindeki ağırlığa sahip parçalar için 30 s civarında gerçekleşmektedir. Kalıpların dolumu oldukça hızlıdır (normal şartlarda 5-50 ms) ve ergimiş metale uygulanan enjeksiyon basıncı 15 ile 40 MPa arasında değişmektedir. Bununla beraber modern teknoloji, bu değerlerin çok hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak sağlamakta ve böylelikle ince ayrıntılı, dar toleranslı ve yüksek mukavemetli döküm parçaları üretilmektedir (Vinarcik, High Integrity Die Casting Processes, 2003).

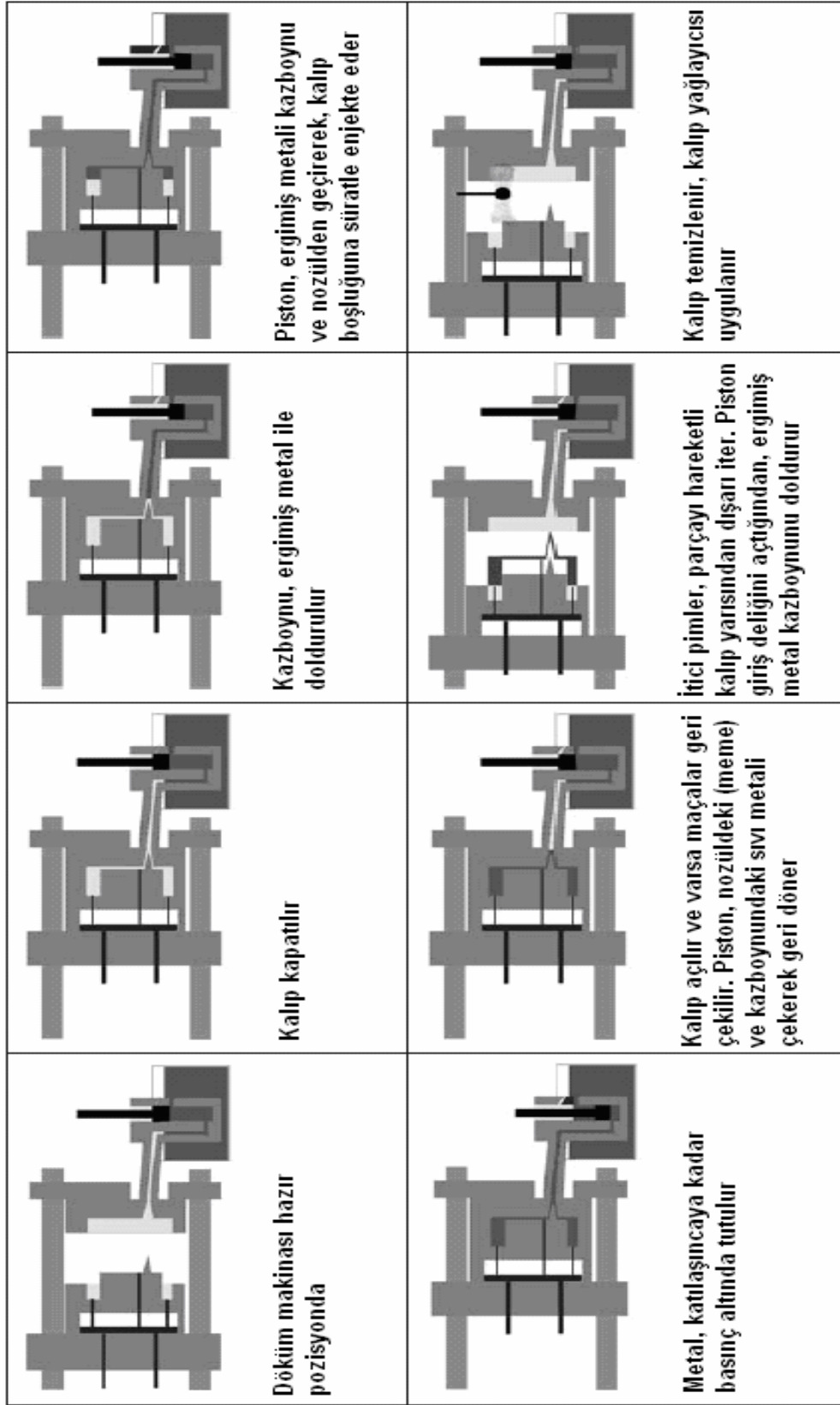


Şekil 5.7 Sıcak kamaralı basınçlı döküm makinası (Vinarcik, 2003)

Sıcak kamaralı makinanın operasyonu, soğuk kamaralı makinaya göre daha hızlıdır. Bunun sebebi; sıcak kamaralı makinada, katılma sırasında ekstra sıkıştırma (dosing operation veya intensification) operasyonunun olmayışı (parça, katılma süresince belirli bir basınç altında tutulur ancak bu basınç soğuk kamaralı yöntemde olduğu gibi çok yüksek değerlerde olmayıp daha düşük değerlerdedir) ve yolluktaki katılma süresinin daha kısa oluşudur. Böylelikle daha hızlı çalışma imkânı sağlanmaktadır. Özellikle kilitleme kuvveti 5 MN'a kadar olan küçük makinalar için işlem süreleri çok kısadır. Çevrim süresi, parçanın maksimum cidar kalınlığına (wall thickness) bağlı olarak değişmektedir. Soğuk kamaralı yöntemde kullanılan alaşımlardan farklı olarak, sıcak kamaralı makinalarda kullanılan alaşımlar, düşük ergime sıcaklığına sahip olanlar ile sınırlanmıştır. Bu yöntemde en çok kullanılanı da AZ91D alaşımıdır. Soğuk kamaralı makinalar ise, piston-silindir düzenekleri ergimiş metal içine daldırılmadığından ve sıvı metalle çok daha kısa süreyle temas halinde olduğundan, yüksek ergime sıcaklığına sahip magnezyum alaşımlarıyla kullanılmaları sorun yaratmamaktadır. Basınçlı döküm makinaları genellikle hidrolik enerji ile çalışırlar. Ama özellikle küçük boyutlardaki sıcak kamaralı makinalar için elektrik enerjisi alternatif olarak kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımlarının, sıcak kamaralı basınçlı dökümüyle ilgili tipik makine ve proses karakteristikleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Sıcak kamaralı basınçlı döküm prosesinin karakteristikleri (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999)

| | |
|--|---|
| Fırının yeri | Basınçlı döküm makinası ile bütünleşik Basma sistemi ergimiş metalin içinde |
| Kilitleme kuvveti (F_{lock}) | 0,2 MN – 8 MN |
| Plaka Ölçüleri | max. 1400 x 1400 mm ² |
| Parçanın toplam kesit alanı (A_{proj}) | max. 0,4 m ² |
| Enjeksiyon sırasındaki basınç | 15 – 40 MPa |
| Katılma sırasındaki basınç (p_{sol}) | max. 25 MPa |
| Parçanın ağırlığı | <10 g – 7 kg |
| Parçanın cidar kalınlığı | 0,8 – 10 mm |
| Alaşımlar | AZ91, AM50, AM60 |



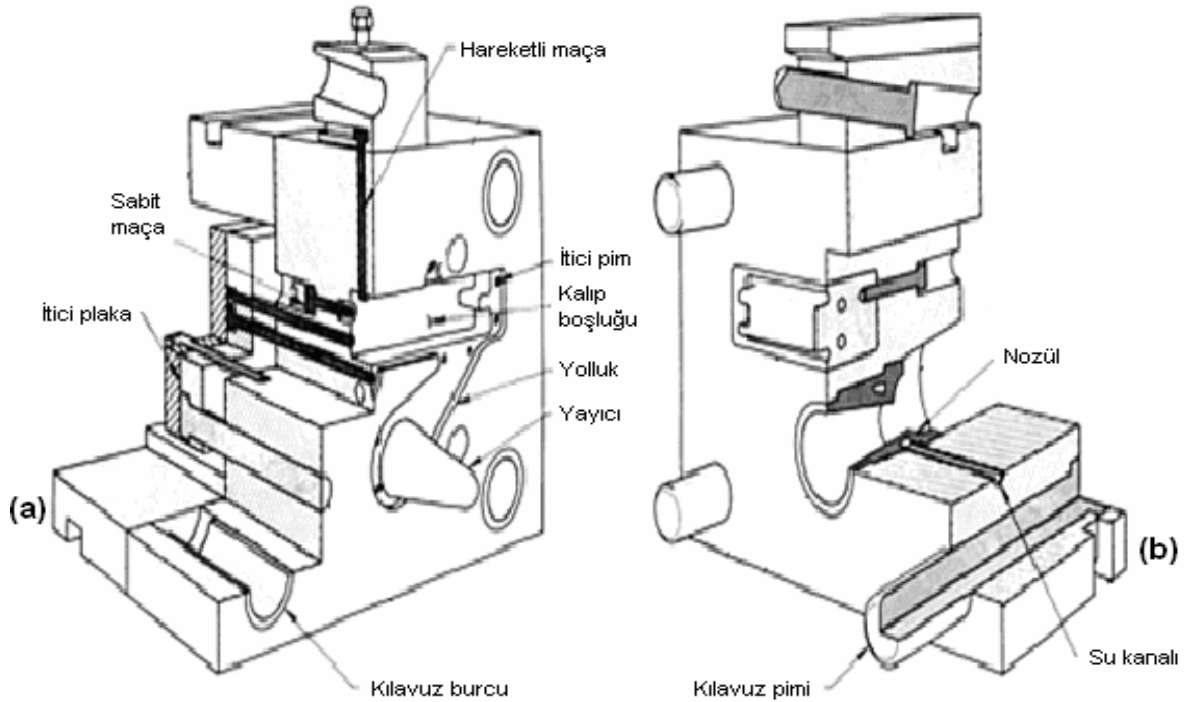
Şekil 5.8 Sıcak kamaralı basınçlı döküm prosesinin çevrimi (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

5.3 Basınçlı Döküm Kalıpları

5.3.1 Sabit ve Hareketli Kalıp Yarıları

Basınçlı döküm kalıpları takım çeliklerinden, hareketli ve sabit kısım olmak üzere iki parçadan imal edilir. Sabit kalıp yarısı, ergimiş metalin basıldığı enjeksiyon sistemi tarafındaki sabit plaka üzerine yerleştirilir. Hareketli kalıp yarısı, kalıp açıldığı zaman bitmiş döküm parçasının uzaklaştırılmasını sağlar ve makine üzerindeki hareketli plaka kısmına yerleştirilmiştir. Şekil 5.9'da hareketli ve sabit kalıp yarıları, üzerlerindeki temel bileşenlerle birlikte şematik olarak gösterilmektedir (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998).

Hareketli kısım genellikle, ergimiş metali kalıp gravürüne (veya gravürlerine) yönlendiren yolluk (runner) ve memeleri (gate) içerir. Hareketli kalıp yarısı aynı zamanda, döküm parçasının kalıptan dışarı çıkarılmasını sağlayan bir ejektör (itici) kutusunu da barındırır. Parçanın dışarı çıkarılması (ejection), itici plakanın (ejector plate) itici pimlere (ejector pin) teması ile pimlerin parçayı itmesi sayesinde gerçekleşir. Bu işlem genellikle makinanın açılma stroğunda (zamanında) meydana gelir. Ejektör (itici) pimlerinin yeri ve çıkarma esnasında uygulanan kuvvet; parçaya zarar vermeyecek ve deforme etmeyecek şekilde çok dikkatli seçilmelidir.



Şekil 5.9 Hareketli (a) ve sabit (b) kalıp yarılarının şematik gösterimi (sıcak kamaralı makina) (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

Basınçlı dökümde bölme yüzeyinin yeri; kalıp ömrüne, parça kalitesine, parçaların estetik görüntüsüne, tamlığına, mekanik özelliklerine, boyutsal durumlarına ve kesme-temizleme (trimming) işlemlerinin kolay veya zor yapılmasına etki eder. Çok düzgün yüzeyler isteniyor fakat kalıp yarılarının birleşim yerlerinde küçük kabartılar veya dalgalanmalar meydana geliyorsa, kalıp yarılarının yerleşim şekli veya bölme yüzeyinin yeri değiştirilmelidir. Bununla beraber yanlış seçilmiş bölme yüzeyi (parting line) yeri, dökümden sonra daha karmaşık ve daha pahalı kesme-temizleme-çapak alma operasyonlarının yapılmasına sebep olacaktır (Vinarcik, 2003; Sönmez, 2006).

Kalıplarda sabit ve/veya hareketli maçalar sıkça kullanılır. Eğer sabit maça kullanılıyorsa, maçanın eksen kalıbın açılma eksenine paralel olmak zorundadır. Hareketli maçalar ise genellikle bölme yüzeyine paralel olacak şekilde bazen de bölme yüzeyine açılı olarak yerleştirilirler. Hareketli maçalar genellikle sürgülü bir sisteme bağlı olarak hareket eder. Eğer basınçlı döküm kalıbının tasarımında itici pimler kullanılmak istenmiyorsa, kalıp bir veya daha fazla açılır-kapanır sürgülü kısımdan yapılabilir (ASM Handbook Volume 15, 1998).

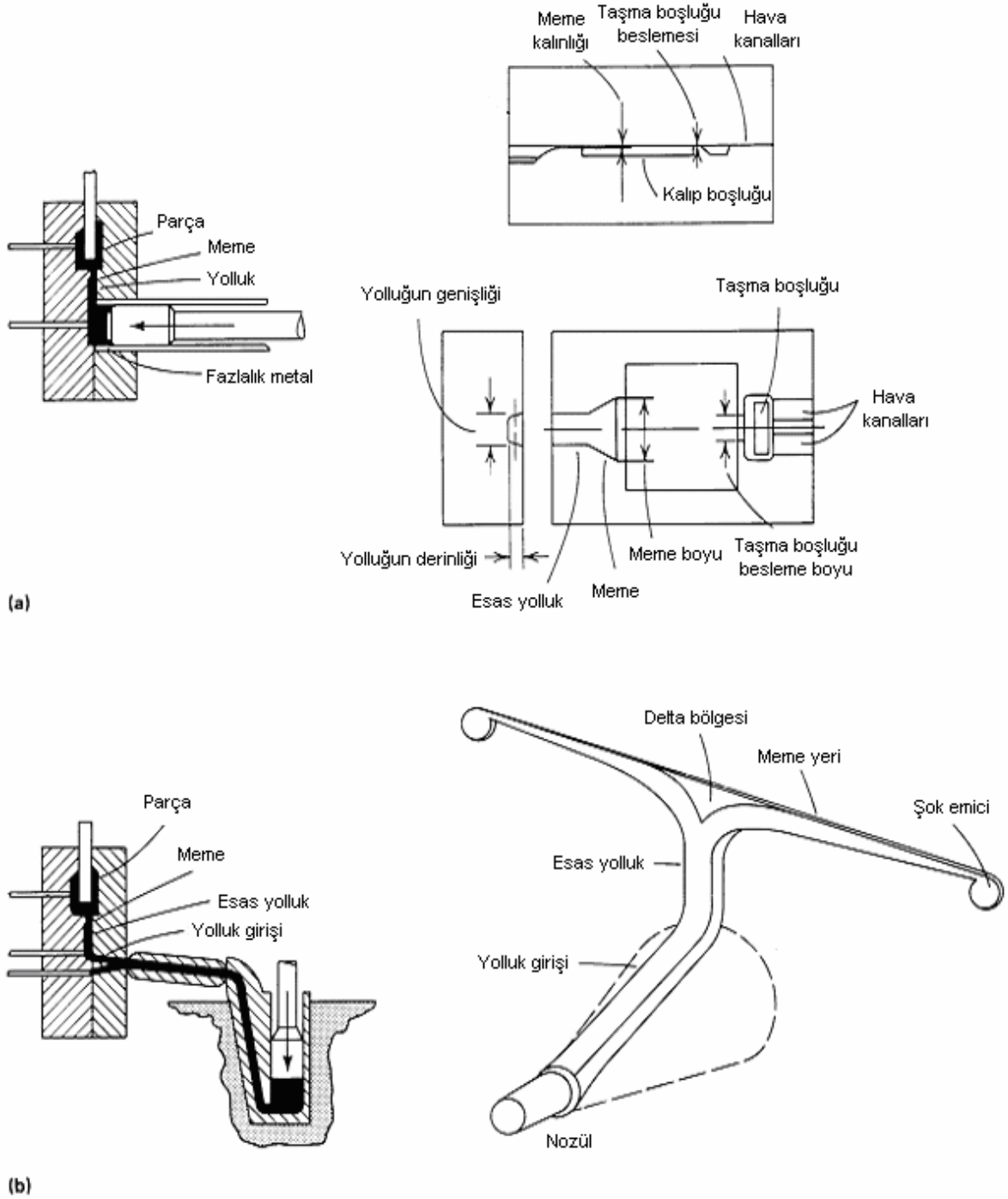
5.3.2 Kalıp Malzemeleri ve Kaplamaları

Kalıp boşluğunu oluşturan kalıp parçaları, ergimiş metalle doğrudan temas halindedir. Bundan dolayı kalıpların bu kısımları termal şoklara dirençli H11 (X37CrMoV51) ve H13 (X40CrMoV51) gibi sıcak iş çeliklerinden yapılır. Talaşlı işlemlerden sonra kalıp gravürünü oluşturan parçalar, sertleştirme ve tavlama işlemleri ile yaklaşık 44–48 HRC sertliğe sahip olurlar. Basınçlı döküm kalıplarının ergimiş metalle direkt temas etmeyen bileşenlerinin yapımında ise genellikle orta karbonlu çelikler kullanılır. Magnezyum basınçlı döküm kalıplarının kullanım ömrü, döküm parçasının geometrisine ve istenilen yüzey özelliklerine göre 100.000 ile 300.000 baskı arasında değişmektedir. Bu oran, alüminyumun basınçlı dökümü için kullanılan kalıplardaki baskı sayısının yaklaşık iki katıdır (Çizelge 5.3) (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Çizelge 5.3 Magnezyum ve Alüminyum basınçlı döküm kalıpları
(Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

| | Magnezyum | Alüminyum |
|-----------------------------|-------------------|------------------|
| Üretkenlik [baskı/saat] | 75 – 400 | 40 – 200 |
| Ortalama Kalıp Ömrü [baskı] | 100.000 – 300.000 | 50.000 – 150.000 |

Ergimiş metalle sürekli temas halinde olan ve yüksek hızlı ergiyik akışıyla aşınmaya uğrayan kalıp iç yüzeyleri, özel ısıl işlemler veya PVD/CVD (Physical Vapor Deposition/Chemical Vapor Deposition) gibi ince-sert kaplama yöntemleriyle korunabilir. Kalıp yüzeyinin işlemeden ve kaplamadan sonra maksimum 0,38 µm pürüzlülüğe sahip olması tavsiye edilir. Böylece kalıbın kullanım ömrü arttırılır.



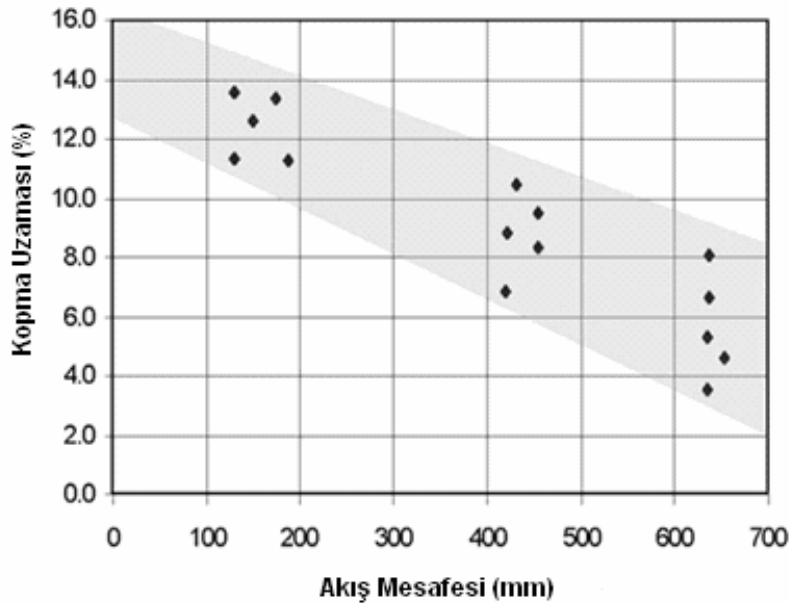
Şekil 5.10 Soğuk (a) ve sıcak (b) kamaralı basınçlı döküm makinalarının yolluk sistemleri (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

5.3.3 Yolluk Sistemi

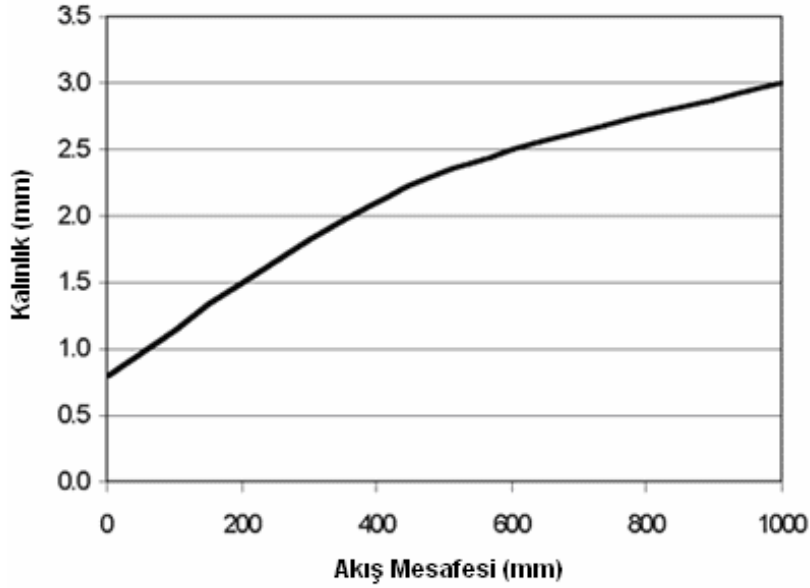
Yolluk sisteminin şekli ve pozisyonu, kalıp boşluğunun dolun davranışı üzerinde oldukça etkilidir (Şekil 5.10). Kaliteli yüzeyler ve iyi mekanik özellikler elde etmek için, ergimiş metalin, meme (gate) girişinden sonraki akış mesafesi oldukça kısa tutulmalıdır. Şekil 5.11’de kopma uzamasının, gravür içindeki akış mesafesinin uzunluğuna bağlı olarak değişimini gösteren bir grafik verilmiştir. Burada malzeme olarak AM60 alaşımı kullanılmış ve parçanın cidar kalınlığı 2,5 mm olarak seçilmiştir. Görüldüğü gibi, akış mesafesindeki artış, uzama değerlerinde azalmaya sebep olmaktadır. Bunun anlamı, özellikle ince cidarlı döküm parçaları ile çalışılırken, Şekil 5.12’de tavsiye edilen akış mesafeleri mutlaka dikkate alınmalıdır.

Esas yolluk kısmının (runner) ve komple yolluk sisteminin (yolluk girişi, yayıcı, esas yolluk ve meme girişi) dizaynı yapılırken farklı gereksinimler ile karşılaşılabilir. Bunlardan biri, katılan parçanın kendini çekmesinin düzgün bir şekilde beslenmesidir. Bu gereksinim, esas yolluk (runner) ve yolluk sisteminin, parçadan daha sonra katılması için, oldukça büyük kesit alanına sahip olmasına sebep olmaktadır (Friedrich ve Mordike, 2006).

Ekonomik durum göz önüne alındığında ise; meme ve yolluk kısmını kolay uzaklaştırmak, malzeme israfını ve çevrim süresini azaltmak için, oldukça ince yolluk sistemleri ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Döküm parçasının şekline ve kalite gereksinimlerine bağlı olarak uygun bir orta yol, deneyimlerden de faydalanılarak seçilmelidir.



Şekil 5.11 Kopma uzamasının akış mesafesi ile değişimi (Alaşım AM60, kalınlık 2,5 mm) (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)



Şekil 5.12 Tavsiye edilen minimum cidar kalınlığı (AM50/60 alaşımları için)
(Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

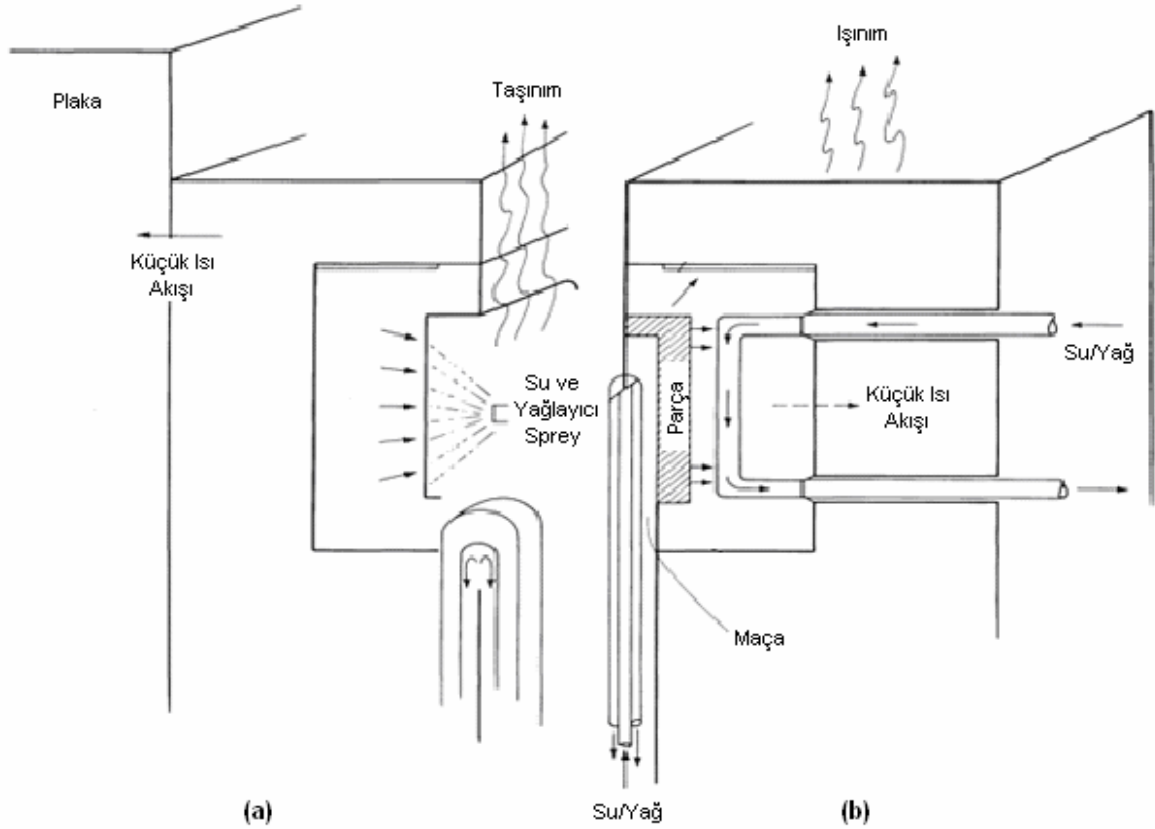
5.3.4 Kalıpların Soğutulması/Isıtılması

Basıncılı döküm yöntemi, döngüsel (çevrimsel) bir prosestir. Güvenilir bir operasyon için, kalıbın kararlı bir sıcaklık dağılımına ulaşması ve her baskıda yaklaşık olarak bu sıcaklık değerinde kalması oldukça önemlidir.

Tipik alüminyum-silisyum alaşımlarıyla kıyaslandığında, magnezyum alaşımları daha düşük bir ısı içeriğe (heat content) sahiptir. Bu durum katılma süresini kısaltarak üretim hızını artırmaktadır. Fakat diğer yandan, ergimiş metalin düşük ısı içeriği, kalıbın ısı dengesinin çok daha hassas olmasına sebep olur. Enjeksiyondan hemen önce, tavsiye edilen gravür yüzey sıcaklığı 200–300 °C arasındadır. Uygulamada kabul görmüş en yaygın sıcaklık aralığı ise $250 \pm 14^\circ\text{C}$ arasında değişmektedir. İnce cidarlı parçaların üretiminde; ışıınım, taşınım, iletim ve buharlaşma sebebiyle kaybolan ısı enerjisi, ergimiş metal tarafından sağlanan ısı enerjisinden daha fazla olabilmektedir (Şekil 5.13). Bu durumda kalıbın dışarıdan ısıtılması (external heating) oldukça önem kazanmaktadır (ASM Specialty Handbook, 1999).

Kalıbın harici olarak ısıtılması genellikle, yağ ile çalışan ısıtma/soğutma üniteleri ile sağlanır. Isıtma/Soğutma kanalları her iki kalıp yarısında da mevcut olup, önceden ısıtılmış veya soğutulmuş bir akışkan (coolant) bu kanallardan geçer. Böylesi üniteler, soğutma amaçlı

kullanılabileceği gibi kalıbın ısıtılması için de kullanılabilir. Ancak bazı özel durumlar hariç (max 300°C), soğutucu/ısıtıcı akışkan sıcaklığı 240°C ile sınırlanmış durumdadır. Bu yüzden özellikle ince cidarlı basınçlı döküm magnezyum parçaların üretiminde, alternatif olarak elektrik enerjisiyle çalışan ısıtıcı fişeklerin kullanımı, her geçen gün yaygınlaşmaktadır (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).



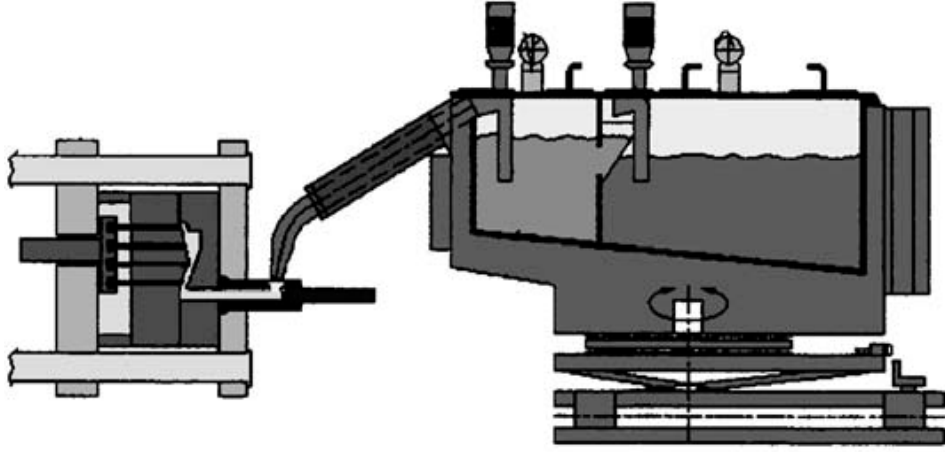
Şekil 5.13 Basınçlı döküm kalıplarında değişik ısı akış yolları (heat flow paths)
 (a) Kalıp açık durumdayken (b) Baskıdan sonra kalıp kapalıyken
 (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

5.4 Basınçlı Döküm Operasyonu

5.4.1 Ergitme ve Bekletme

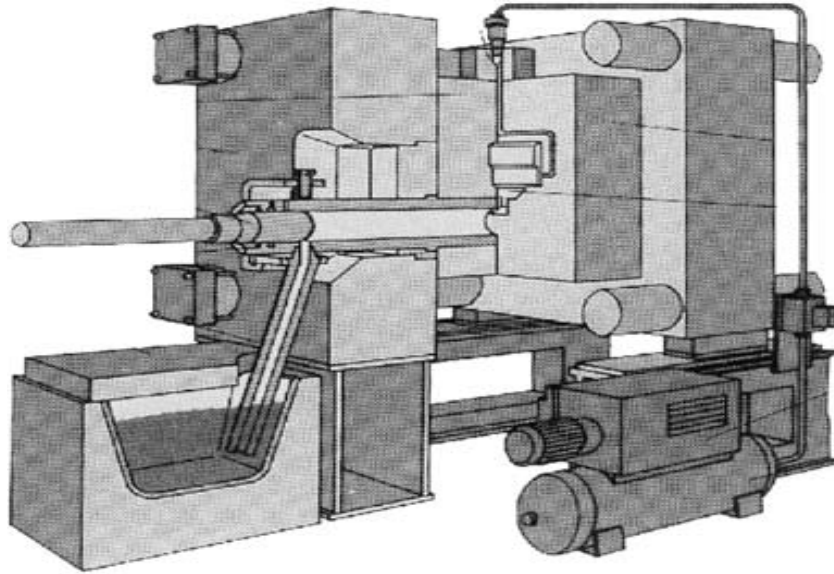
Magnezyumun basınçlı dökümünde, ergitme ve bekletme, koruyucu toz kullanılmadan (fluxless) gerçekleştirilen proseslerdir. Magnezyum ingotların ergimiş metal içine şarjı sırasında, ergimiş metaldeki sıcaklık düşüşü segregasyonlara neden olmaktadır. Bunu önlemek için, magnezyumun ergitilmesi ve bekletilmesi ayrı fırınlarda veya en azından aynı fırında farklı haznelerde yapılmalıdır. Ergitme ve bekletmenin farklı fırınlarda yapılması durumunda, ergiyik metalin ergitme fırınından bekletme fırınına transferi sırasında havayla

teması önlenmelidir. Bununla birlikte ergimiş metalin transferinde çok kullanılan robotlar yerine, gaz basıncı veya pompa gücüyle çalışan kapalı bekletme cihazları her geçen gün daha da popüler olmaktadır (Şekil 5.14). Atmosfere kapalı olarak çalışan bu sisteme, **dozajlı fırın** (dosing furnace) adı verilmektedir (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).



Şekil 5.14 Dozajlı fırın (dosing furnace) sisteminin şematik gösterimi (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

Ergimiş metalin enjeksiyon haznesine transferi için geliştirilmiş en son sistem ise VACURAL prosesidir (Şekil 5.15). Bu yöntemde ergimiş metal, kalıp boşluğuna uygulanan bir negatif basınç (vakum) etkisiyle enjeksiyon bölmesine emilmekte ve sonra basma işlemi gerçekleştirilmektedir (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).

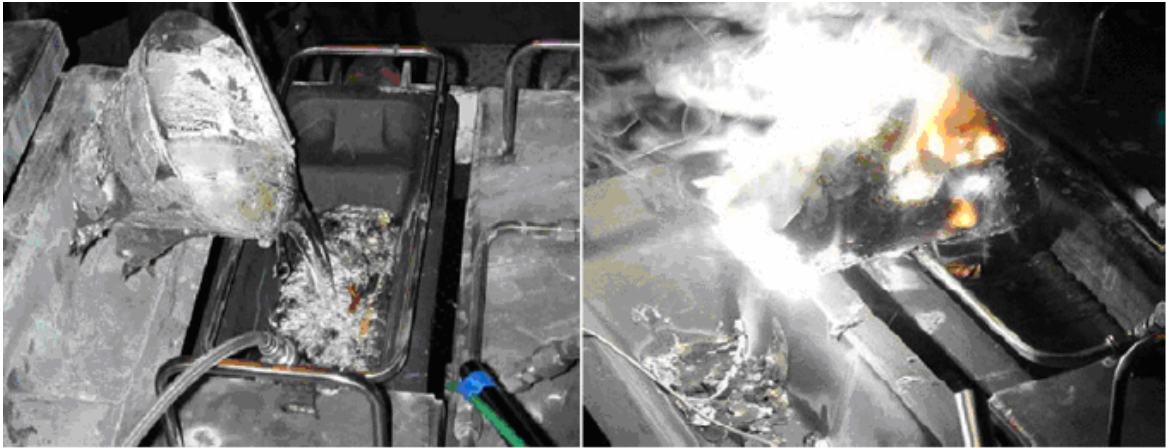


Şekil 5.15 VACURAL prosesinin şematik gösterimi (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

5.4.2 Ergimiş Metalin Korunması

Magnezyum alaşımlarının ergitilmesi sırasında herhangi bir koruyucu önlem alınmazsa, ergimiş magnezyum, etrafındaki havada bulunan oksijenle ekzotermik bir reaksiyona girer. Bu reaksiyon kontrol altında tutulamayacak kadar şiddetli olabilir (Şekil 5.16). Ayrıca, ötektik faz olan $Mg_{17}Al_{12}$, $430^{\circ}C$ 'de oksidasyona uğramaya başlar. Bundan dolayı, alüminyum içeren magnezyum alaşımlarının $400^{\circ}C$ 'nin üzerindeki sıcaklıklardan itibaren, henüz ergime başlamadan korunması gerekli olabilmektedir.

Ergiyik magnezyum, koruyucu tozla (flux) veya koruyucu gazla (fluxless) olmak üzere iki şekilde korunabilmektedir. Ancak sıvı metalin koruyucu tozla korunması, korozyon direncini düşüren bazı kalıntıların parça içinde kalmasına neden olduğundan, son zamanlarda basınçlı döküm prosesi için yapılan uygulamalarda tercih edilmemektedir. Koruyucu toz olarak $MgCl_2$, KCl , $NaCl$, $CaCl_2$, $BaCl_2$ tuzlarından oluşan bir karışım kullanılırdı. Daha sonraki gelişmelerle BaF_2 , MgF_2 , CaF_2 ve MgO gibi katkılarda bu karışıma eklenmiş ve korozyon direncini düşüren etkiler ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Ancak 1970'li yıllarda geliştirilen koruyucu gaz atmosferleri, gün geçtikçe daha çok tercih edilmektedir. Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yönteminde kullanılan, en etkili koruyucu gaz karışımları Çizelge 5.4'de listelenmiştir (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).



Şekil 5.16 Ergimiş magnezyumun koruyucu SF_6 atmosferinde (solda) ve korumasız atmosferde (sağda) davranışı (Hydro Magnesium Web Sitesi)

Bu çizelgedekilere alternatif olarak $SO_2-CO_2-N_2$ karışımı koruyucu gaz olarak kullanılabilir. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde, kum kalıba döküm yönteminin aksine, ergimiş metal bekletme fırınlarında iken, genellikle $700^{\circ}C$ 'nin altındaki sıcaklıklarda tutulabilmektedir. Bu sıcaklık değerinde, koruyucu gaz karışımlarına eklenen SF_6 ve SO_2

gazları, çevreye zararsız Argon-CO₂-N₂ gibi bazı koruyucu gaz karışımlarıyla yer değiştirebilir. Üstelik geliştirme aşamasında olan yeni alaşımlara çok az miktarlarda berilyum ilavesi ile koruyucu atmosfer olmadan döküm yapmak mümkün olabilecektir.

Çizelge 5.4 Ergiyik magnezyumun korunması için farklı gaz karışımları
(International Magnesium Association Web Sitesi)

| Ergitme Sıcaklığı | Tavsiye Edilen Koruyucu Gaz | Operasyon Şartları | | Koruma |
|-------------------|--|-----------------------|---------------------|----------|
| | | Ergitmede Sirkülasyon | Eritken Katışkıları | |
| [°C] | [hacimsel %] | | | |
| 650–705 | Hava + 0,04%SF ₆ | Hayır | Hayır | Mükemmel |
| 650–705 | Hava + 0,2%SF ₆ | Evet | Hayır | Mükemmel |
| 650–705 | 75%hava + 25%CO ₂ + 0,2%SF ₆ | Evet | Evet | Mükemmel |
| 705–760 | 50%hava + 50%CO ₂ + 0,3%SF ₆ | Evet | Hayır | Mükemmel |

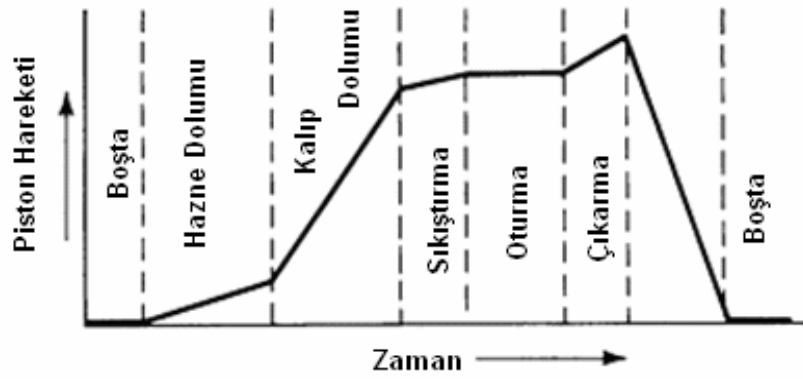
5.4.3 Döküm Aşaması

Magnezyum alaşımlarının soğuk kamaralı basınçlı döküm prosesi, alüminyum alaşımları için uygulanan prosese oldukça benzemektedir. Ergimiş metal enjeksiyon silindirene alındıktan sonra, pistonun yavaş hareketiyle birlikte memeye kadar iletilir. Buradaki piston hızı, alüminyum alaşımlarının basınçlı dökümüyle karşılaştırıldığında, magnezyumun düşük ısı kapasitesinden (low heat capacity) dolayı meydana gelen ısı kaybını azaltmak için, biraz daha hızlı seçilmektedir. Şekil 5.17’de piston hareketinin (stroğu) ve metale uyguladığı basıncın zamanla değişimi, işlem adımlarına göre grafiksel olarak verilmiştir.

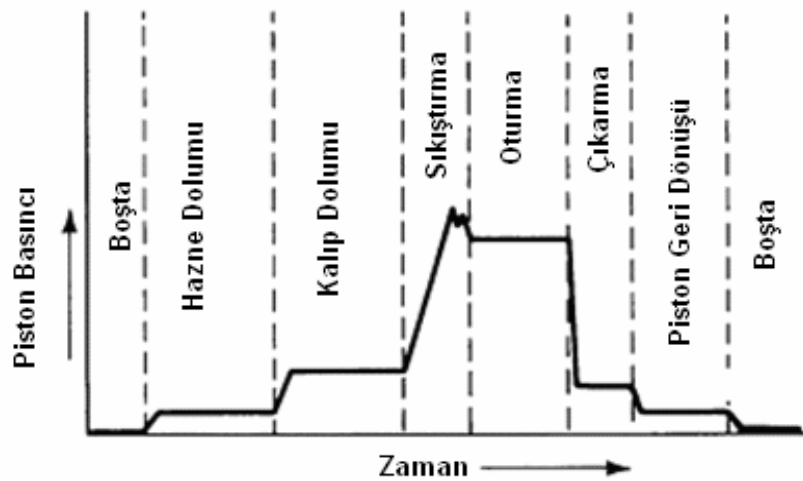
Prosesin enjeksiyon aşamasında, kalıp boşluğundaki hava 8-25 kPa’lık negatif basınç uygulanarak boşaltılabilmektedir. Kalıp boşluğunda, dolumdan hemen önce kalan/sıkışan havanın boşaltılması, ergiyik metalin akış direncini önemli ölçüde azaltmakta ve dolunun hatasız bir şekilde gerçekleşmesine yardımcı olmaktadır. Özellikle ince cidarlı magnezyum parçaların dökümünde, yüksek ergiyik akış hızlarıyla (high melt velocities) çalışılıyorsa, vakum uygulanması gerekli bir durum olmaktadır. Vakumlu basınçlı döküm, havadan kaynaklanan hataları ve kalıntıları azaltmanın yanı sıra; döküm parçası tasarımcılarını sınırlayan uzunluk/kalınlık oranlarının da büyümesini sağlamaktadır.

Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde, kalıp boşluğunun dolum süresi (filling time) çok önemli bir faktördür. Cidar kalınlığına, alaşımın cinsine, akış mesafesine ve kalıp sıcaklığına bağlı olarak 10-100 ms arasında değişebilmektedir (Brungs, Light Weight Design With Light Metal Castings, 1997).

Ergiyik metalin memedeki hızı 30-50 m/s arasında değişmektedir. İnce cidarlı döküm parçalar için meme hızı, nadiren de olsa 100 m/s'ye kadar yükselebilmektedir. Memedeki hızın 70 m/s geçmesi durumunda kalıptaki aşınmanın önemli oranda artması, ergiyik hızını seçerken göz önüne alınması gereken bir durumdur. Özellikle ince cidarlı parçaların üretiminde, kısa dolum süreleri (yüksek enjeksiyon hızları) ve yüksek kalıp sıcaklıkları parçanın dayanımını ve sünekliğini önemli oranda iyileştirmektedir (Şekil 5.18 ve 5.19).

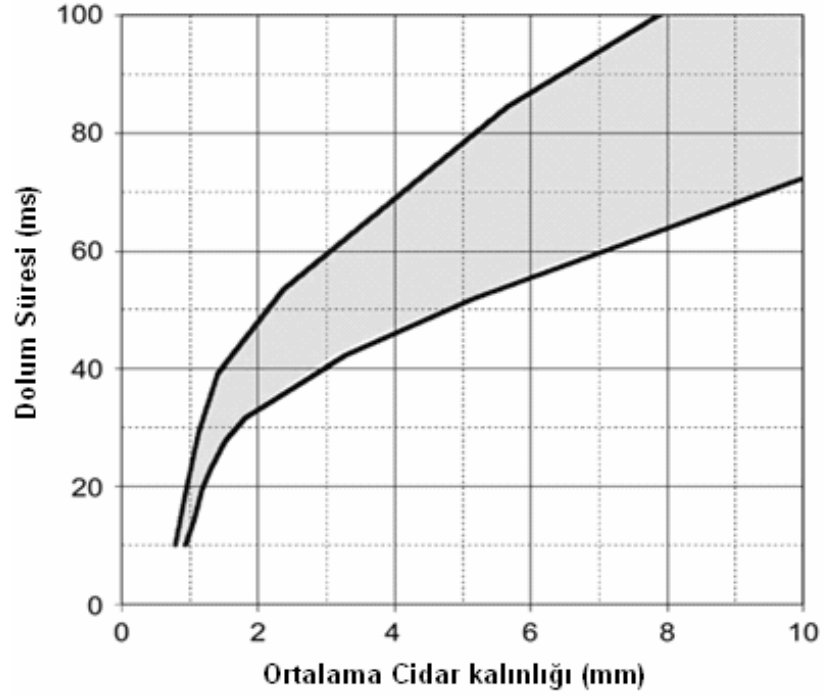


(a)

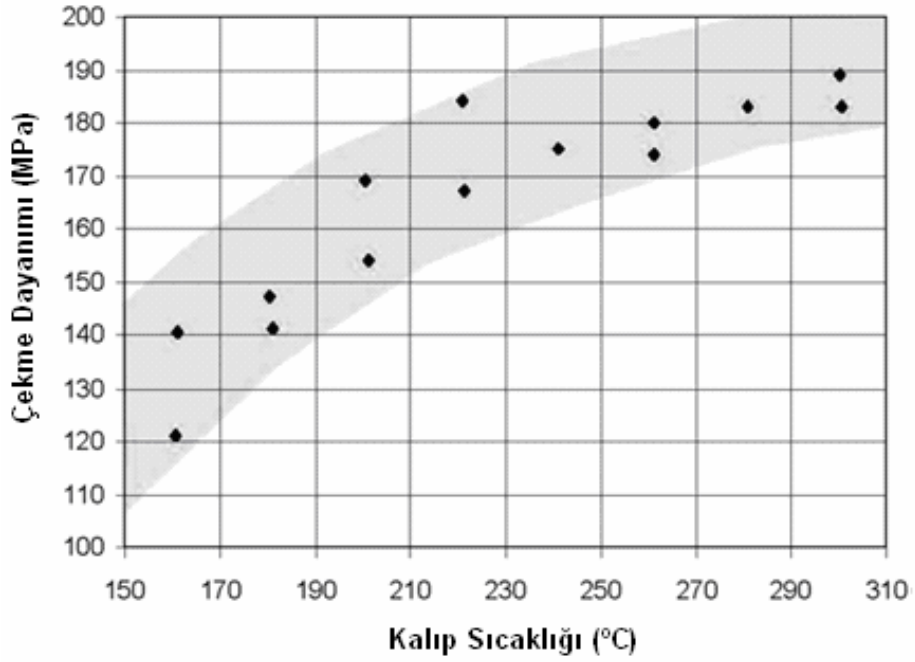


(b)

Şekil 5.17 Enjeksiyon prosesinde farklı basamaklarda, piston hareketinin (a) ve piston basıncının (b) zamanla değişimi (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)



Şekil 5.18 Farklı cidar kalınlıkları için tavsiye edilen dolun süreleri (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)



Şekil 5.19 Kalıp sıcaklığının maksimum çekme dayanımına (UTS) etkisi (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

Katılma prosesi sırasında, sıvı metal üzerine 40-100 MPa arasında bir basınç uygulanması önerilir. Uygulanan bu basınç, olası gaz boşluklarını sıkıştırarak uzaklaştırmanın yanı sıra, katılma sırasında meydana gelen kendini çekmeyi beslemeye yardımcı olur. Özellikle cidar (duvar) kalınlığı 5 mm'nin üzerindeki döküm parçalarında, uygulanan basıncın artırılması ile daha iyi mekanik özellikler elde edilmektedir.

Magnezyum döküm parçaların kalıp yüzeylerine yapışmasını önlemek için, kalıp yağlayıcılarının kullanılması önerilmektedir. Bu yağlayıcılar genellikle su esaslı olup, 1:10 ile 1:100 oranlarında yağlayıcı içermektedir (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).

Magnezyum alaşımlarının düşük ısıl içeriğinden (low heat content) dolayı, yağlayıcıların soğutma etkisi sağlaması amacıyla kullanımına gerek duyulmamaktadır. Özellikle, ince cidarlı parçaların üretiminde, buharlaşma sebebiyle meydana gelen ısı kaybını engellenmek amacıyla, su esaslı yağlayıcıların kullanımı oldukça düşük seviyelerde tutulmaktadır.

Yağlayıcı uygulama tekniklerindeki yeni gelişmeler sayesinde, suyun kullanımı tamamen ortadan kaldırılabilir. Son yöntemler ile yağlayıcılar, kalıp yüzeyine katı toz halinde kaplanabilmekte veya yağlayıcı buhar haline süblimleşerek yüzeyde biriktirebilmektedir. Böylece, su esaslı yağlayıcıların buharlaşması sebebiyle meydana gelen ısı kayıpları önlenebilmektedir (Department of Trade and Industry, Magnesium alloys and processing technologies for light weight transport applications, 2004).

5.5 Basınçlı Döküm Magnezyum Alaşımlarının Dizaynı

Parça tasarımcıları genellikle, basınçlı dökümle üretilmeyen parçaları basınçlı dökümle üretilebilir hale getirmeye çalışırlar. Çünkü parça basınçlı dökümle üretilecek şekilde yeniden dizayn edilirse, parçanın birleştirilecek komponent sayısı (sökülebilir veya sökülemez birleştirme) azalacak ve paketleme boyutları ufalacaktır. Basınçlı döküm üretimi için gereken yüksek kurulum maliyetleri; ikincil operasyonların azaltılması ve yüksek tamlıkta (doğrulukta) üretim sayesinde kendini kısa sürede kompanse edecektir.

Basınçlı döküm yönteminde parçaların dizaynı, uygun metal akışını sağlayarak, kaliteli yüzeyler verecek şekilde konfigüre edilmelidir. Basınçlı döküm kalıbının yüzey kalitesi, üretilecek parçanın yüzey kalitesini belirleyen anahtar bir unsurdur. Kalıp yüzeylerinin hazırlanmasında ve bakımında harcanacak fazladan zaman ve para, diğer yüksek kapasiteli (high-volume) üretim yöntemlerinin hiçbirinden elde edilemeyecek kadar kaliteli yüzeylere

sahip parçaların üretimini sağlar. Kalıp yüzeyinin kalitesi dışında; bölme yüzeyinin, meme girişlerinin, taşma ceplerinin (boşluklarının), itici pimlerin (dekoratif yüzeylere değmeden) uygun bir şekilde konumlandırılmasına oldukça dikkat edilmelidir. Aşağıda, magnezyum döküm parçalar için temel dizayn prensipleri kısaca açıklanmıştır (Brungs, Light Weight Design With Light Metal Castings, 1997).

5.5.1 Cidar Kalınlığı

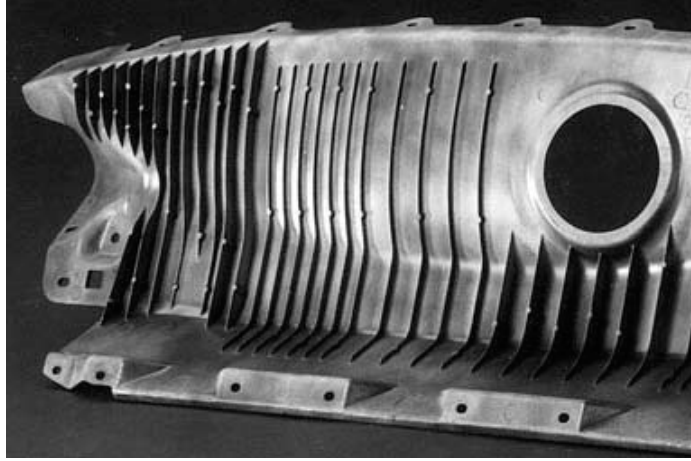
Basınçlı dökümü kolayca yapılabilecek ve uygun dayanım-rijitlik özelliklerini sağlayabilecek en ince kesitli bölgeler tayin edilir. Bunu sağlamak için gerekirse kaburga (rib) adını verdiğimiz yapısal güçlendirici elemanlar kullanarak, maksimum dayanım-minimum ağırlık oranı elde edilmelidir (Şekil 5.20). Basınçlı döküm parçaların cidar (duvar) kalınlıkları alaşıma, parçanın şekline, boyutuna ve fonksiyonuna bağlı olarak genellikle 1–5 mm arasında değişmektedir (Brungs, Light Weight Design With Light Metal Castings, 1997).

Küçük boyutlardaki özel döküm parçaları için cidar kalınlığı minimum 0,50 mm'ye kadar düşürülebilmektedir. Cidar kalınlığı tayin edilirken genel bir kural şöyledir ; cidar kalınlığı (t , mm) en az, kesiti belirlenecek olan yüzeyin meme girişinden uzaklığının (D , mm), 100'e biri kadar olabilir ($t = D/100$). Cidar kalınlığının minimum değeri için daha hassas bir formül ise Eşitlik 5.3'de verilmiştir. Burada t_{min} (mm), minimum cidar kalınlığı olup; S (mm) ise kalınlığı belirlenen yüzeyin, meme girişinden olan maksimum uzaklığıdır. Ayrıca kesit kalınlıkları olabildiğince üniform tutulmalıdır. Kesit kalınlığının değişimi mecburi ise, geçiş kademeli olarak yapılmalı, böylece gerilim yoğunlaşması önlenmelidir. İzin verilebilir minimum cidar kalınlığı (mm) ayrıca, parçanın yüzey alanı (m^2) ile yakından ilişkilidir (Çizelge 5.5). Ayrıca, parçadaki yüzeylerin birleşme yerlerine uygulanacak radyus değerleri de cidar kalınlıkları ile yakından ilişkilidir. Seçilebilecek en küçük radyus değeri, minimum cidar kalınlığı kadar olabilir ($r_{min} = t_{min}$) (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998).

$$t_{min} = 0,8 + (0,004 \dots 0,005) S \quad (5.3)$$

Çizelge 5.5 Yüzey alanına göre izin verilen minimum cidar kalınlığı
(ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999)

| Minimum cidar kalınlığı | Cidar kalınlığı belirlenecek olan yüzeyin alanı |
|-------------------------|---|
| mm | m^2 |
| 1,78 – 2,51 | $\leq 0,052$ |
| $\geq 2,51$ | $>0,052$ |



Şekil 5.20 Basınçlı döküm parçası için kaburga (rib) dizaynı
(Brungs, Light Weight Design With Light Metal Castings, 1997)

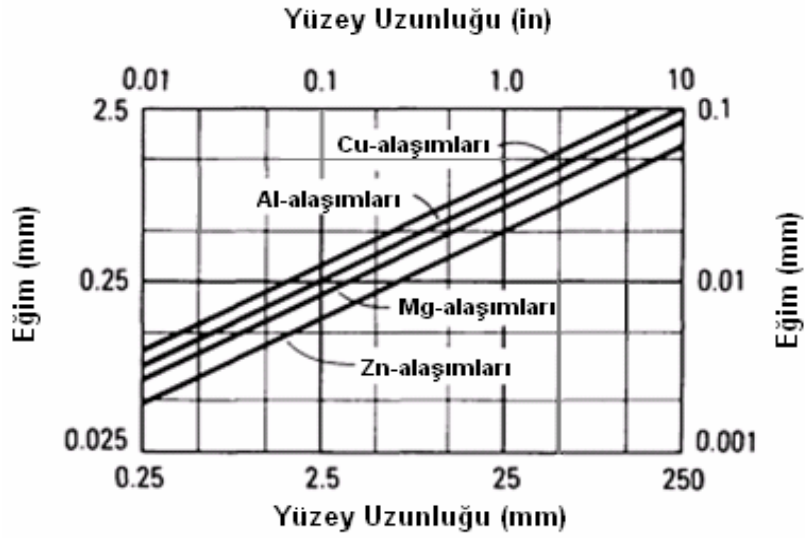
5.5.2 Eğim Açısı

Basınçlı döküm parçaların birçok yüzeyi, kalıbın bölme kesitine (parting line) diktir. Parçaların kalıptan rahat çıkabilmeleri için bölme kesitine dik bu yüzeylere belirli koniklik verilerek, parçanın kalıptan rahat bir şekilde çıkması sağlanır. Eğim açılarının genellikle 2° – 5° arasında seçilmesi tavsiye edilir. Ancak her nasılsa, magnezyum parçalar için kullanılan eğim açısı aralığı uygulamada 1° – 3° arasında değişmektedir. Bununla beraber 0° eğim açılı parçalar görmek de mümkündür. Ancak bölme yüzeyine dik olan köşelerde ve birleşme yerlerinde, eğim açısı normal değerinden 1,5 kat daha büyük alınmalıdır.

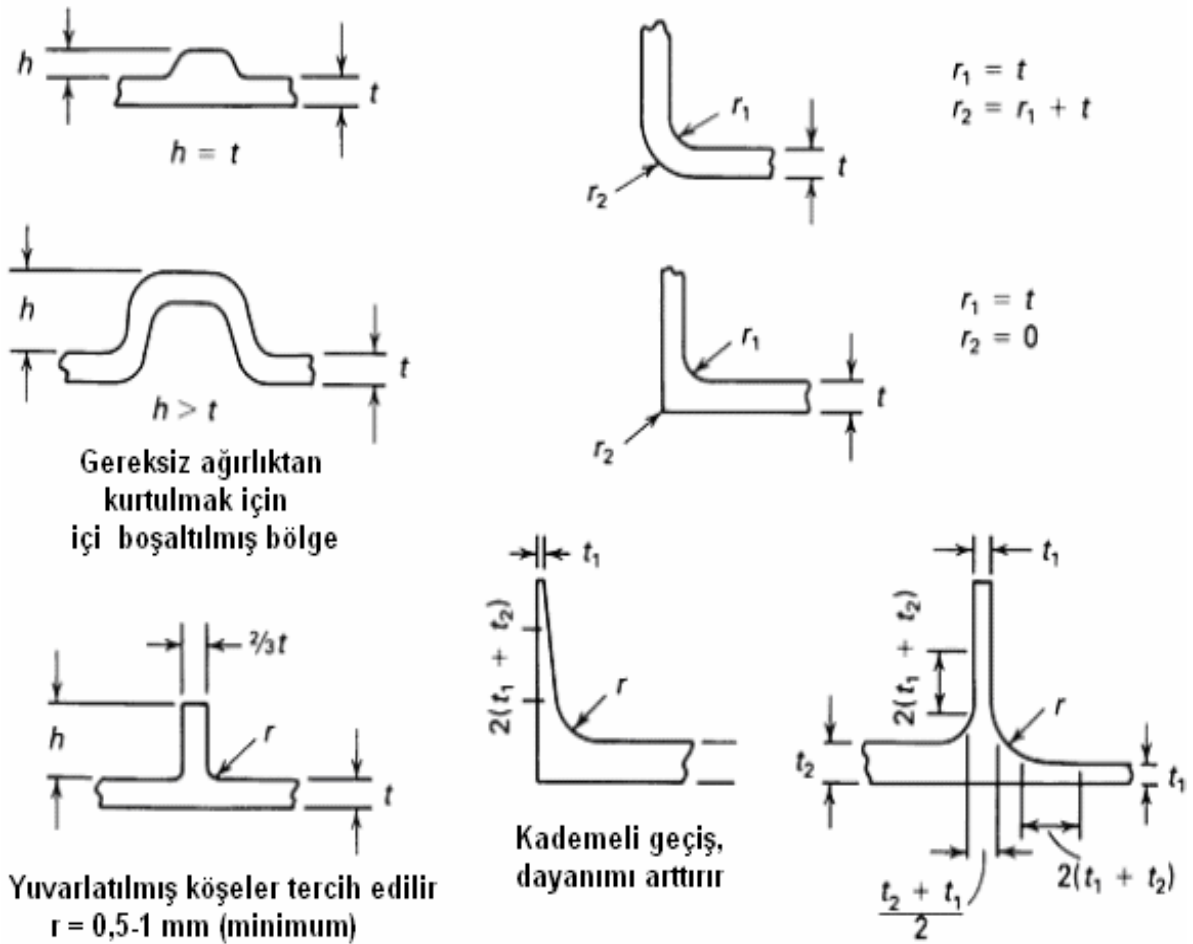
Eğim açısının 0° alınabilmesi, magnezyumun termal büzülme (thermal-shrinkage) karakteristiğinden kaynaklanmakta ve bu da magnezyumun alüminyum karşısındaki rekabet şansını arttırmaktadır. Şekil 5.21’de, koniklik verilecek olan yüzey uzunluğuna karşılık gelen eğimin uzunluğu, farklı malzemeler için verilmiştir. Eğim açısı (α), grafiğin eğimi ($\tan\alpha$) alınarak bulunabilir (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

5.5.3 Kendini Çekme Kuvvetleri

Kendini çekmeden kaynaklanan kuvvetler (shrinkage forces), iç gerilmelere sebep olmakta ve parçanın dayanımı açısından, oluşan bu çekme gerilmeleri oldukça önem kazanmaktadır. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde, gerilmeleri azaltmaya yardımcı olmak için kullanılan bazı dizayn parametreleri Şekil 5.22’de verilmiştir.



Şekil 5.21 Konikliğin yüzey uzunluğu ile değişimi (ASM Handbook Volume 15, 1998)



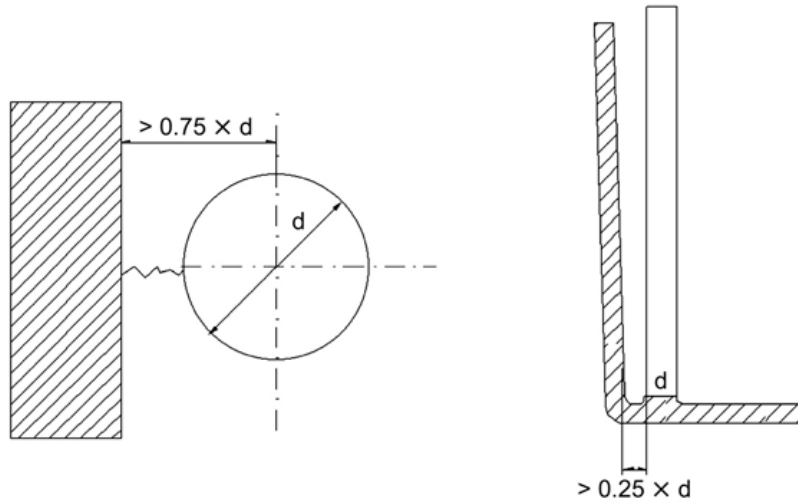
Şekil 5.22 Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde, gerilmeleri azaltmaya yardımcı olan dizayn parametreleri (ASM Specialty Handbook, 1999)

Bunların yanı sıra, gerilmeli korozyon kırılması (stress-corrosion cracking) riski taşıdığı belirlenen, %0,15–2,5 oranlarında alüminyum ihtiva eden magnezyum alaşımları için, maruz kalacakları gerilme değerleri çok hassas bir şekilde hesaplanmalı ve limit değerler kesinlikle aşılmamalıdır.

5.5.4 İtici Pimlerin Yeri ve Maçaların Kullanımı

Basıncılı döküm parçaların dizaynında, itici pimlerin yeri mutlaka düşünülmelidir. İtici pimler (ejector pins), döküm parçası katılaştıktan sonra, parçayı iterek kalıbın dışına çıkartırlar. Her bir itici pim, döküm parçasının yüzeyinde, az da olsa bir iz mutlaka bırakır. Bu sebeple itici izlerinin yeri, parçanın görünümünü ve fonksiyonunu olumsuz etkilemeyecek şekilde belirlenir. İtici pimlerin yerini belirlerken göz önüne alınması gereken bir diğer unsur da, sıvı metal soğurken oluşan kendini çekmenin meydana geldiği yer ve büyüklüğüdür. Kalıp çeliğinde oluşabilecek yorulma kırılmasını engellemek için, itici pimlerin parçanın duvarına olan minimum uzaklığı, itici pim çapının 0,75 katı olmalıdır (Şekil 5.23).

Çok küçük maçalardan her zaman sakınmak gerekir. Maçanın kullanılması için genellikle delik çapının 2 mm'den büyük olması tavsiye edilir. Küçük maçalar kolaylıkla eğilmekte ve kırılabilmektedir. Bu yüzden sık sık yenileriyle değiştirilmeleri gerekmektedir. 2 mm'den küçük deliklerin matkapla veya farklı bir talaşlı işleme açılmaları, genellikle maçaların değiştirme masrafından daha ucuza gelmektedir.



Şekil 5.23 Parça ile itici pim arasındaki minimum mesafe (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006)

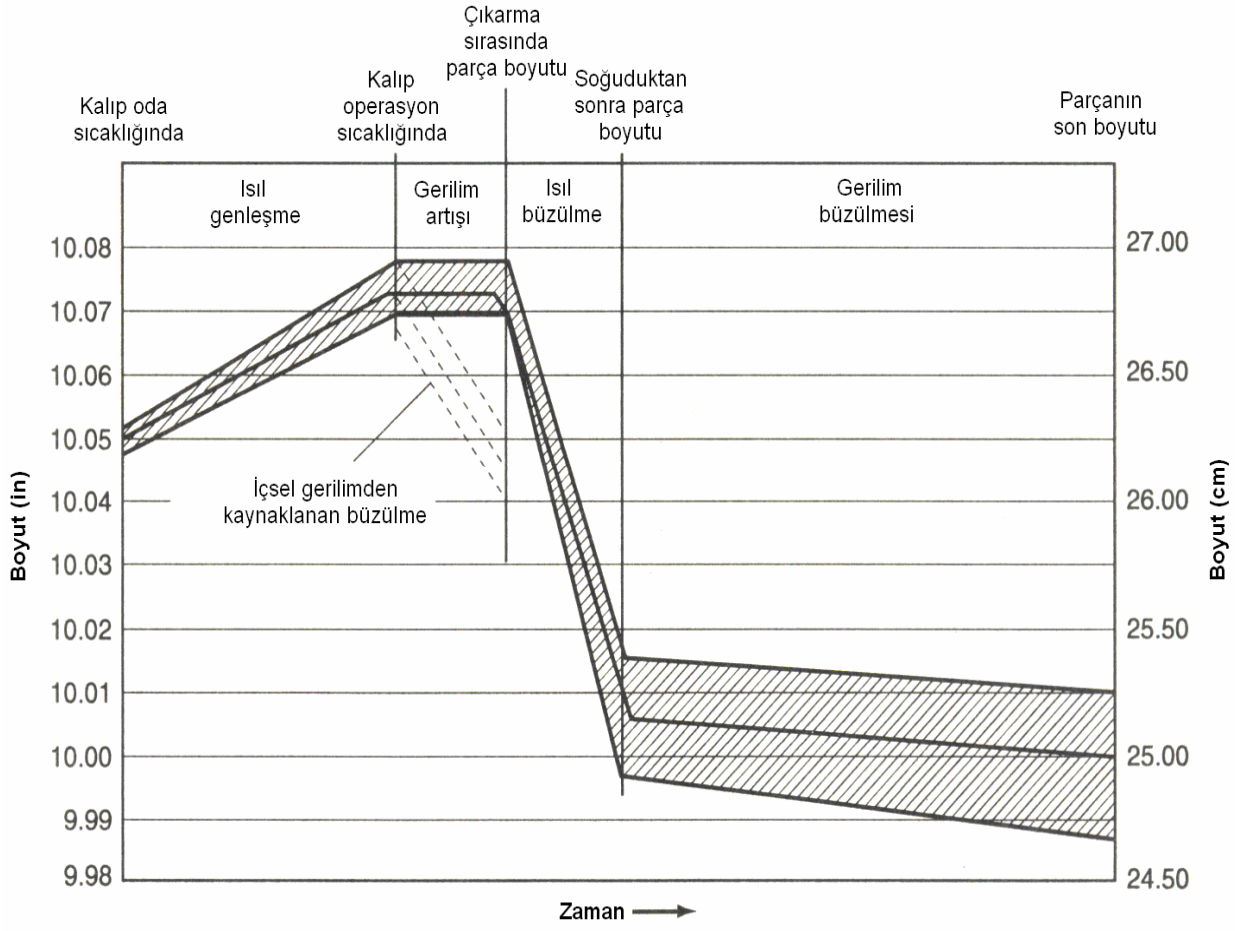
5.5.5 Boyutsal Toleranslar ve Tekrarlanabilirlik

Basınçlı döküm, hassas bir yöntem olmasına rağmen, parçanın nihai boyut özelliklerini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler lineer (doğrusal) boyut varyasyonları (değişimleri) olarak sınıflandırılmaktadır. Döküm parçasının boyutsal özellikleri, kalıp konstrüksiyonunun ve üretiminin doğru yapılmasıyla yakından ilişkilidir. Kalıp üretiminin doğruluğu; kalıbın bölme yüzeyine, hareketli ve sabit maçaların yerine, kalıbın rijitliğine, kalıp yarılarının tam öpüşmesine ve konikliğin uygunluğuna bağlı olarak belirlenebilir. Kusursuz bir kalıp tasarlayıp imalatı gerçekleştirilse bile, lineer boyut değişimleri, parçanın son boyutunu değiştirebilmektedir. Parçanın boyutunda meydana gelen bu değişiklikler; kalıp sıcaklığındaki dalgalanmalardan, döküm sıcaklığından, kalıptan çıkarma (ejection) sıcaklığından, soğuma hızından, parçada kalan artık gerilmelerden ve kalıp yapısının doğruluğundan kaynaklanmaktadır. Bu faktörlerin her birinin relatif (bağıl) etkisi Şekil 5.24’de verilmiştir (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Yukarıda saydığımız bütün faktörler, prosesin dikkatli bir şekilde tasarlanması ve kontrol altında tutulması ile azaltılabilir. Böylece boyutsal olarak birbirine çok yakın özellikte parçaların üretimi gerçekleştirilebilir. Basınçlı döküm magnezyum alaşımlarının normal proses uygulamaları için, düzlemsel toleransları NADCA (North American Die Casting Association) tarafından belirlenmiş olup Çizelge 5.6’da verilmiştir. Örneğin 1000 mm uzunluğunda bir parça, normal şartlarda $\pm 1,2$ mm tolerans ile dökülebilmektedir. Bu tolerans değerleri kalıbın kusursuz dizaynı ve üretimi söz konusu olduğunda sadece lineer değişkenler göz önüne alınarak belirlenmiştir. Eğer kalıptan kaynaklanan bir kusur varsa, tolerans değerleri bu durumu kompanse edecek şekilde arttırılmalıdır.

Çizelge 5.6 Magnezyumun basınçlı dökümünde tavsiye edilen düzlemsel toleranslar (North American Die Casting Association Web Sitesi)

| Düzlemsel uzunluk (mm) | İlave edilecek tolerans miktarı | |
|---------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| | Kritik uygulama | Kritik olmayan uygulama |
| < 25 | $\pm 0,10$ mm | $\pm 0,25$ mm |
| 25 – 300 | $\pm 0,0015$ mm/mm | $\pm 0,002$ mm/mm |
| > 300 | $\pm 0,001$ mm/mm | $\pm 0,001$ mm/mm |



Şekil 5.24 Birçok faktörün, lineer değişim toleransı üzerine etkileri
(25 cm boyutlarında tasarlanmış bir basınçlı döküm magnezyum alaşımı için)
(ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999)

6. İŞLEM FAKTÖRLERİ ve ETKİLERİ

Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde, parça kalitesini ve mekanik özellikleri etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerin bir kısmı parça ve kalıp dizaynına bağlıdır. Ancak parça kalitesini ve mekanik özellikleri etkileyen faktörlerin başında, işlem parametreleri gelmektedir. Döküm prosesi esnasında yanlış seçilen parametreler, doğru tasarlanmış parçaların bile hatalı ve kötü mekanik özelliklere sahip olacak şekilde üretilmesine sebep olmaktadır. İşlem faktörlerini; döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, dolum süresi, piston ve meme giriş hızları, enjeksiyon basıncı (injection pressure) ve katılaşma sırasında uygulanan basınç (intensification pressure) oluşturmaktadır.

6.1 Döküm ve Kalıp Sıcaklığı

Döküm sıcaklığı alaşımın cinsine ve döküm prosesine göre değişmektedir. Örneğin AZ91 alaşımı için döküm sıcaklığı 650–680 °C arasında değişebilmektedir. AZ91 alaşımının 595°C’de ergidiği göz önüne alınırsa, döküm sıcaklığının ergime sıcaklığından 55–85°C fazla olduğu söylenebilir. Döküm sıcaklığı, alaşımın alüminyum içeriği ile de ilişkilidir. Alaşımın alüminyum içeriği azaldıkça, döküm sıcaklığında bir miktar artış gözlenmektedir. Örneğin AS41 alaşımının ergime sıcaklığı 620°C ve döküm sıcaklığı da 660–695°C aralığındadır. Genel bir kural olarak, magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde döküm sıcaklığı ($t_{dök}$), ergime sıcaklığından (t_{erg}), Δt (30–90°C) kadar yukarıda seçilir (Eşitlik 6.1).

$$t_{dök} = t_{erg} + \Delta t \quad (\Delta t = 30-90^{\circ}\text{C}) \quad (6.1)$$

Basınçlı döküm, çevrimsel bir proses (cyclic process) olduğundan, her baskıda aynı sonuca ulaşmak için, kalıbın homojen bir sıcaklık dağılımına sahip olması istenir. Basınçlı döküm kalıplarının çoğunu ısıtmak veya soğutmak için, akışkan olarak yağ kullanılır. Yağın akacağı kanallar, hareketli ve sabit kalıp yarılarının her ikisinde de mevcuttur.

Kabul görmüş kalıp sıcaklıkları 200–300 °C arasında değişmekle beraber, $250 \pm 14^{\circ}\text{C}$ aralığı tavsiye edilmektedir. Daha önceden alüminyum dökümü ile uğraşan üreticilere, kalıp sıcaklığını magnezyum döküm prosesi için uygun olan sıcaklık seviyesinde tutmak, başlangıçta zor gelebilmektedir. Ancak uygun olmayan kalıp sıcaklıkları ile çalışıldığı takdirde; sıcak yırtılma ve aşırı kendini çekme gibi döküm hataları meydana gelebilmektedir. Bu hataları önlemek için, kalıp sıcaklıklarının, optimum değerlere yakın ve stabil bir sıcaklık dağılımına sahip olması gerekmektedir (ASM Specialty Handbook, 1999).

6.2 Dolum Süresi

Yolluk sisteminin tasarımında ve döküm sıcaklığının belirlenmesinde anahtar faktör, kalıp boşluğunun dolması için gerekli dolum süresidir (filling time). Dolum süresi hata oluşumuyla da yakından ilişkili olup, hataların azaltılması, hesaplanan dolum sürelerinin doğruluğuna bağlıdır. Dolum sürelerini hesaplamak için NADCA (North American Die Casting Association) tarafından geliştirilmiş eşitlikten faydalanılmaktadır (Eşitlik 6.2).

$$t = 0,0346 [(T_m - T_f + 2,5 S) / (T_f - T_d)] T \quad (6.2)$$

Eşitlikte t (s), saniye cinsinden başarılı bir döküm için gerekli dolum süresini belirtmektedir. T_m (°C), ergimiş metalin döküm sıcaklığını; T_f (°C), minimum akış sıcaklığını; S (%), beslemeyi engellemeden oluşabilecek en yüksek katılaşma oranını; T_d (°C), kalıp sıcaklığını ve T (mm), ortalama cidar kalınlığını göstermektedir. (NADCA Web Sitesi)

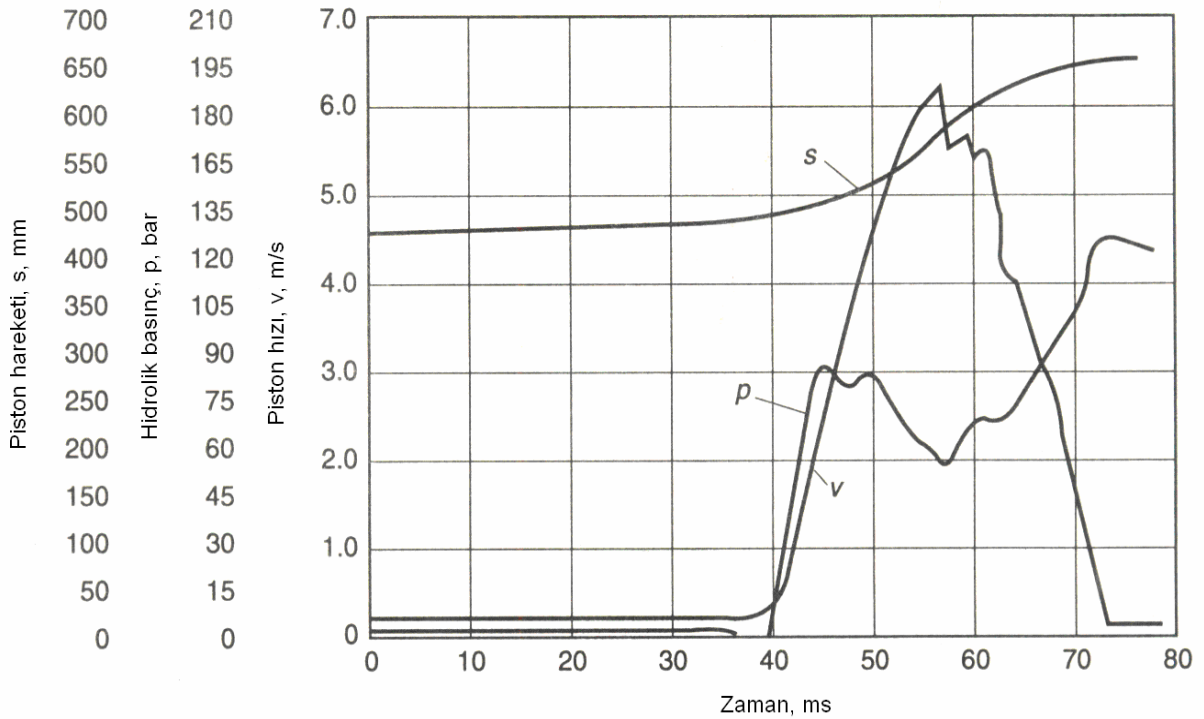
Denklemin kullanımı ile ilgili bir örnek verirsek; AM60 alaşımından ortalama cidar kalınlığı 2 mm (S) olan bir parçanın uygun dolum süresini hesaplayalım. Öncelikle bir döküm sıcaklığı belirlememiz gerekmektedir. Ergime sıcaklığı 615°C olan AM60 alaşımı için döküm sıcaklığı literatürde, 650–695 °C aralığındadır. Eşitlik 6.1’i kullanarak döküm sıcaklığı 670°C (T_m) olarak belirlenir. Kalıp sıcaklığı da tecrübelerden faydalanılarak 250°C (T_d) olarak seçilir. En düşük akış sıcaklığı 610°C (T_f) ve maksimum katılaşma oranı %30 olarak düşünülürse; Eşitlik 6.2’den faydalanılarak, kalıp boşluğunun dolum süresi (t) 0,026 s veya 26 ms olarak hesaplanır.

Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde, kalıp boşluğunun dolum süresi (filling time) çok önemli bir faktördür. Uygulamada hesaplanan değer; cidar kalınlığına, alaşımın cinsine, akış mesafesine ve kalıp sıcaklığına bağlı olarak 10–100 ms arasında olması önerilmektedir. Dolum süresine bağlı olarak piston hızı (meme hızı), uygulanacak basınç ve piston hareketi belirlenebilmektedir. Bunun için kullanılan bir enjeksiyon profili Şekil 6.1’de verilmiştir.

6.3 Meme Giriş Hızı

Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde, meme giriş hızı, uygulanan yöntemle göre değişmektedir. En yaygın kullanılan hız değerleri 30–50 m/s aralığındadır. İnce cidarlı döküm parçalar için meme hızı, nadiren de olsa 100 m/s’ye kadar yükselebilmektedir. Ayrıca 4–5 mm’den daha kalın parçaların dökümünde, meme hızı 30 m/s’nin altında tutulabilmektedir. Memedeki hızın 70 m/s’yi geçmesi durumunda kalıptaki aşınmanın önemli oranda artması,

ergiyik hızını seçerken göz önüne alınması gereken bir durumdur. Genel kural, meme hızının döküm kalitesini bozmayacak şekilde, olabildiğince azaltılması şeklindedir (minimum 30 m/s tavsiye edilir). Meme hızını belirlerken dikkate alınan anahtar faktör, kalıbın dolum süresidir. Şekil 6.1’de, modern bir döküm makinasının bilgisayarlı kontrol ünitesi tarafından belirlenmiş, dolum süresine bağlı olarak meme hızını (piston hızını) veren bir enjeksiyon profili, grafik olarak görülmektedir. Meme hızlarının 100 m/s’ye ulaşmasına karşılık, piston hızları 10 m/s değerini genellikle geçmemektedir. Bunun nedeni, memede daralan kesit sebebiyle, sabit debili akışta sıvı metalin hızının artması olarak açıklanabilir. Meme hızı (gate velocity) ve piston hızları (plunger velocity) arasındaki ilişki, Şekil 6.2’deki nomograf (sayısal bağlantıları gösteren çizelge) incelendiğinde daha rahat anlaşılacaktır.



Şekil 6.1 Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde enjeksiyon profili (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999)

6.4 Enjeksiyon Basıncı

Soğuk kamara tipi basınçlı döküm makinalarında, enjeksiyon sırasında uygulanan basınç 30-100 MPa arasında değişmektedir. Kalıp boşluğu dolduktan sonra, ekstra sıkıştırma için, katılaşma sırasında uygulanan basınç (dosing operation veya intensification) ise maksimum 120 MPa’dır. Sıcak kamaralı makinada ise ergimiş metale uygulanan enjeksiyon basıncı 15 ile 40 MPa arasında değişmektedir. Sıcak kamaralı makinada, katılaşma sırasında, soğuk

kamaralı yöntemde olduğu gibi tam anlamıyla ekstra sıkıştırma operasyonu mevcut değildir. Parça, katılaşma süresince belirli bir basınç (maksimum 25 MPa) altında tutulur, ancak bu basınç soğuk kamaralı yöntemde olduğu gibi çok yüksek değerlerde olmayıp, çok daha düşük değerlerdedir (Friedrich ve Mordike, Magnesium Technology, 2006).

Modern basınçlı döküm makinaları, enjeksiyon profilini ayrıntılı bir şekilde ayarlayan kontrol cihazlarıyla donatılmıştır. Bu cihazlar, her bir enjeksiyon çevrimi için gerekli verileri bilgisayar ortamına kaydederek, istenildiğinde bu verileri kullanıcıya gösterme kabiliyetine sahiptir. Bütün bir basma (enjeksiyon) çevriminde en çok gereken iki parametre; basınç ve hızdaki değişimlerdir. Bu yüzden çoğu sistem, bu iki değişkeni anahtar parametre olarak, üretim kontrolünü sağlama amacıyla kayıt altında tutmaktadır. Şekil 6.1’de bununla ilgili bir enjeksiyon profilinin grafiği görülmektedir (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

Enjeksiyon profilleri, kalıp dolum prosesi ile ilgili ayrıntılı çalışmalar yapılacağı zaman çok faydalı olmaktadır. Bununla birlikte, kalıbın laminar akışlı olacak şekilde dolması için gereken parametrelerin belirlenmesi, metale uygulanan basınç ve metalin hacimsel akış debisi ile yakından ilişkilidir. Bununla ilgili bir nomograf, Şekil 6.2’de verilmiştir. Nomografin kullanılabilmesi için, aşağıdaki kuralların takip edilmesi gerekmektedir:

1. Öncelikle cidar kalınlığına (T , mm) ve alaşıma göre uygun dolum süresinin (t , s) hesaplanması gerekmektedir (Eşitlik 6.2). Daha sonra kalıp gravürüne girecek toplam metal hacmi, kalıp boşluğunun hacmi hesaplanarak belirlenir (v , m³). Hacimsel akış debisi (Q , m³/s), Eşitlik 6.3 kullanılarak bulunur.

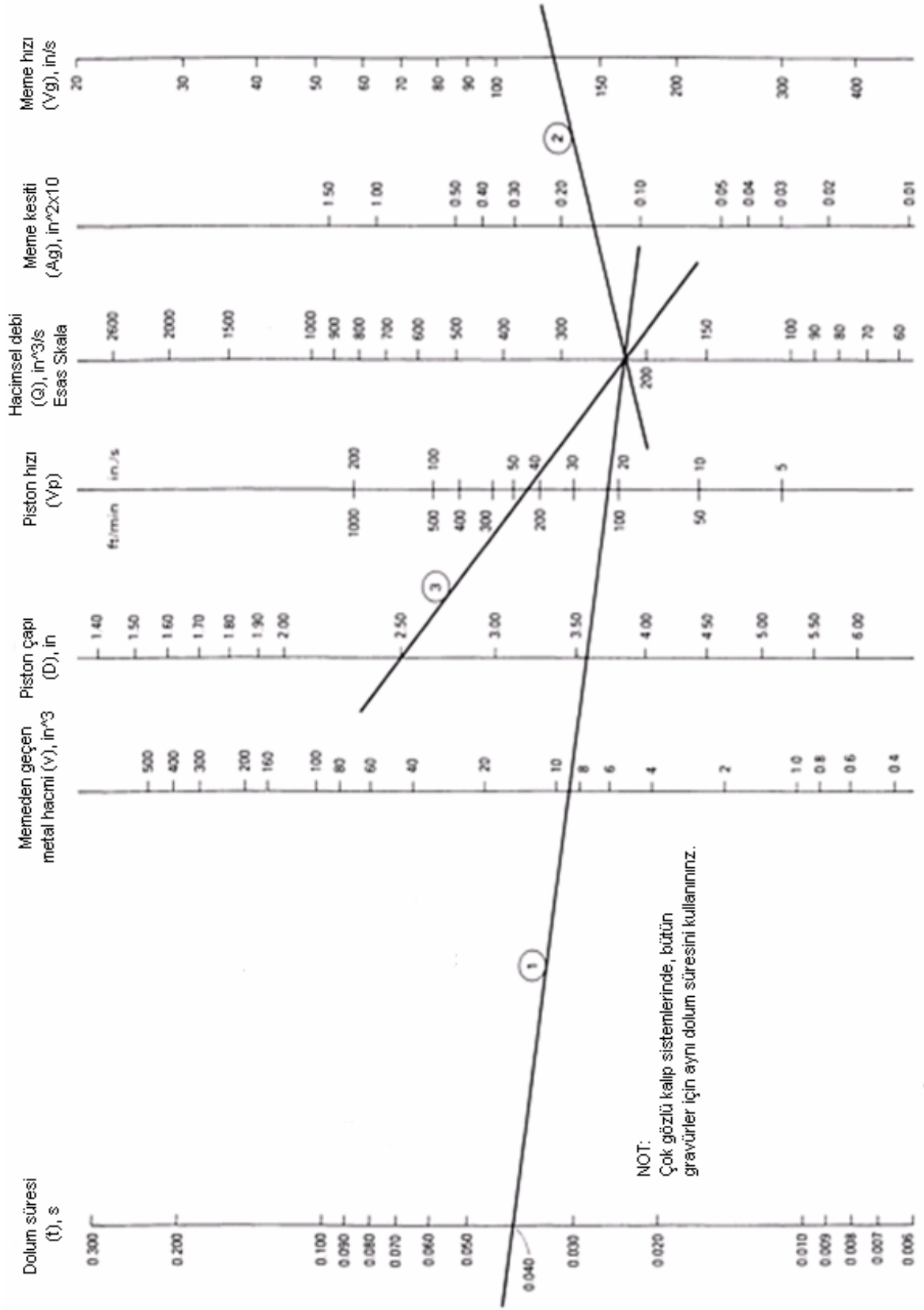
$$Q = v / t \quad (6.3)$$

2. Daha sonra, debinin akış boyunca sabitliği ilkesinden faydalanılarak, seçilen meme giriş hızına (V_g , m/s) göre, meme giriş kesiti (A_g , m²) hesaplanır. Bunun için Eşitlik 6.4’den faydalanılır. Hacimsel debi (Q) ve giriş hızı (V_g) bilindiğinden, meme giriş kesiti (A_g) kolaylıkla bulunacaktır.

$$Q = A_g \times V_g \quad (6.4)$$

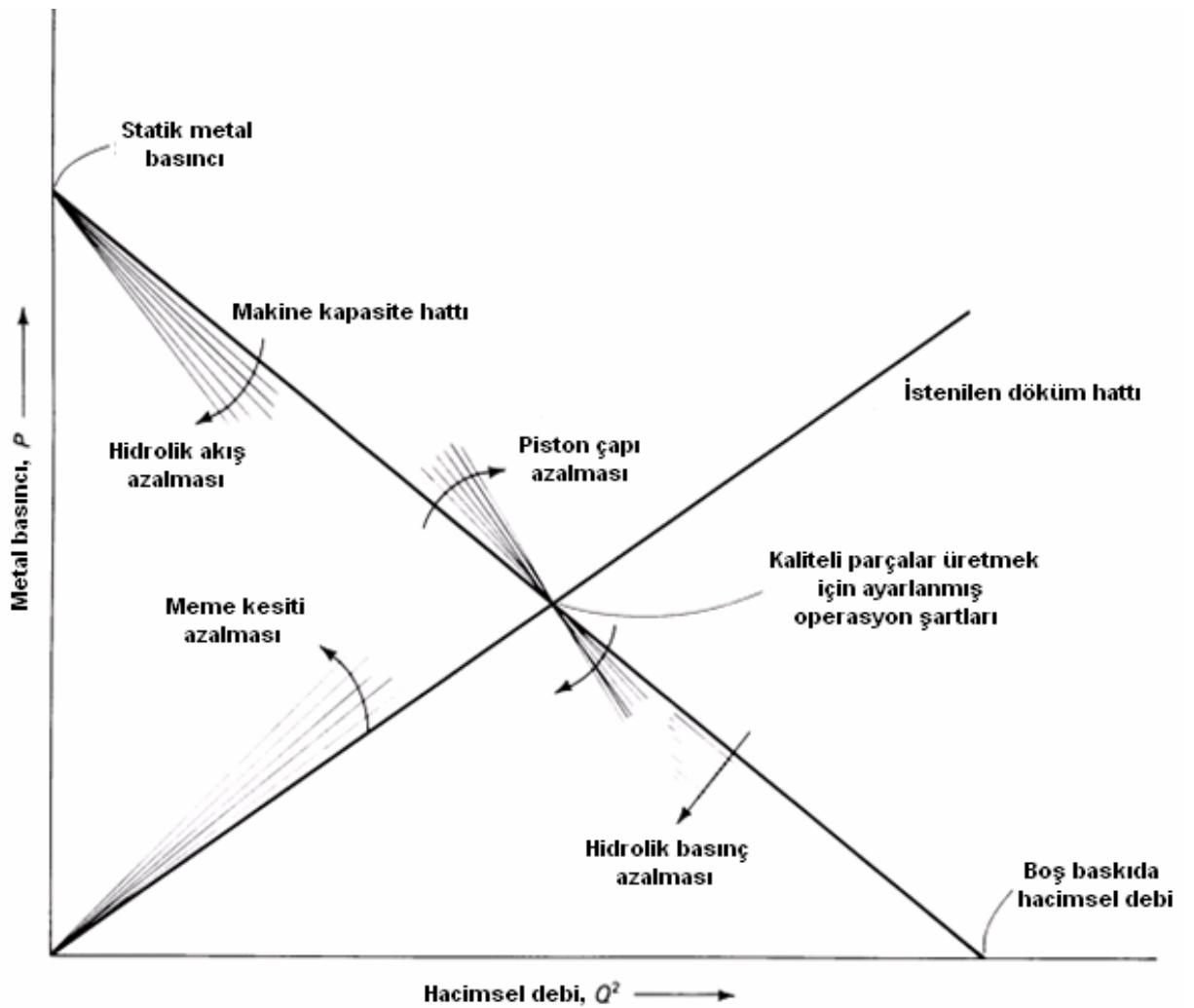
3. Son olarak, seçilen piston çapı (D , m) ve hacimsel debi (Q , m³/s) bilindiğinden, piston hızı (V_p , m/s), debi sabitliğinden (Eşitlik 6.5) hesaplanabilecektir.

$$Q = A_p \times V_p = (\pi \times D^2 \times V_p) / 4 \quad (6.5)$$



Şekil 6.2 Farklı proses parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan nomograf (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

Nomografta verilen birimler inç (inch) cinsinden olup, 1 in = 2,54 cm = 0,0254 m dönüşümü yapılarak, grafiğin metrik sistemde rahatlıkla kullanımı mümkündür. Yapılan hesaplamalar sonucu belirlenen akış debisi ve piston hızının ardından, uygun enjeksiyon basıncının seçilmesi gerekmektedir. Bunun için de hazırlanmış olan birçok grafik mevcuttur. Şekil 6.3'de metale uygulanan basıncın (P), debinin karesi (Q^2) ile değişimini gösteren bir grafik verilmiştir. $P-Q^2$ diyagramı, meme giriş alanı, hidrolik basınç ve piston çapı üzerinde yapılan ayarlamalar ile optimize edilerek, en uygun şartlarda dökümün yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 6.3 Proses parametrelerini belirlemek için kullanılan metal basıncı-debi ($P-Q^2$) grafiği (ASM Handbook Volume 15, Casting, 1998)

Nomografin kullanımıyla ilgili basit bir örnek verecek olursak, 0,1 in kalınlığında ve 0,04 s (40 ms) dolun süresine sahip bir parça için aşağıdaki işlem adımlarını takip edebiliriz:

1. $T = 0,1$ in (2,5 mm) için $t = 0,04$ s olduğu bilinmektedir. Gravür hacmi $v = 9,2$ in³ olduğuna göre, Eşitlik 6.3 kullanılarak hacimsel akış debisi $Q = 230$ in³/s olarak hesaplanır.
2. Meme giriş kesitini (A_g), meme giriş hızını $V_g = 125$ in/s (3,3 m/s) kabul ederek, Eşitlik 6.4'ü kullanarak $1,8$ in² olarak hesaplarız.
3. Son olarak uygun piston çapını $D = 2,5$ in olarak seçersek, Eşitlik 6.5 yardımıyla piston hızını $V_p = 47$ in/s (1,2 m/s) olarak hesaplarız. Bulduğumuz değerler ile Şekil 6.3'dekine benzer diyagramlar yardımıyla, gerekli optimizasyonları yaparak uygun basınç ve debi parametrelerini belirleyebiliriz.

6.5 İşlem Faktörlerinin Etkileri

Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde işlem faktörleri; parça kalitesine, mekanik özelliklere, poroziteye, hatalı parça üretimine doğrudan etki etmektedir. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde uygulanan işlem parametreleri, 10 yıl öncesine kadar, etkilemiş yönleri açısından değerlendirilmemişti. Ancak 1995'ten bu yana, seçilen işlem faktörlerinin etkileri üzerine deneysel çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Daha önceki yıllarda alüminyum alaşımlarının basınçlı dökümü için yapılan araştırmalar, magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm parametrelerini optimize etme çalışmalarına ışık tutmaktadır.

İşlem faktörleri (parametreleri) olarak incelenen unsurlar; katılma sırasında metale uygulanan basınç, meme giriş ve piston hızı (ikisi birbiri ile bağlantılıdır), kalıp sıcaklığı ve sıvı metalin ergitme veya döküm sıcaklığıdır. Bu parametrelerin yoğunluğa, mekanik özelliklere, poroziteye (gözenekliliğe), segregasyon oluşumuna ve çeşitli döküm hatalarına etkileri farklı deneysel ve teorik çalışmalar ile araştırılmıştır. Bu bölümde, işlem faktörleri ve etkileri üzerine bugüne kadar yapılmış bazı çalışmalar özetlenerek, optimum parametrelerin neler olduğu anlatılmaya çalışılacaktır.

1997 yılında Gutman, Unigovski, Levkovich, Koren, Aghion ve Dangur tarafından yapılan çalışmada; AZ91D basınçlı döküm magnezyum alaşımının sürünme özelliklerine, işlem parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Özellikle 150–200°C sıcaklıklardaki servis koşullarında, sürünme direncinin yüksek olması oldukça önem kazanmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda, metal enjeksiyon hızının, kalıp ve sıvı metal sıcaklıklarının; sürünme

direnci (creep resistance) ve diğer mekanik özellikler üzerinde çok önemli etkilere sahip olduğu gözlenmiştir. Basınçlı döküm parametrelerinin sürünme direncine etkisi, işlem sırasında oluşan mikro ve makro porozitelerin büyüklüğü ile ilgilidir. Porozite miktarının artmasıyla, sürünme direnci özelliği kötü etkilenmektedir. Gutman ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki işlem parametreleri ve bulunan sonuçlar Çizelge 6.1’de verilmiştir. Numuneler 0,4 MN kapama kuvvetine sahip soğuk kamaralı bir makinada hazırlanmıştır. Döküm sıcaklığı 630–740°C, kalıp sıcaklığı 180–235°C ve enjeksiyon hızı ise 11–33 m/s değerleri arasında değiştirilerek 8 farklı numune elde edilmiştir.

Çizelge 6.1 AZ91D alaşımının basınçlı döküm parametreleri ile sürünme özelliklerinin değişimi (Gutman ve arkadaşları, 1997)

| Numune | Döküm Sıcaklığı | Kalıp Sıcaklığı | Enjeksiyon Hızı | Yoğunluk | Spesifik Sürünme Gerinimi |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------------|
| | °C | °C | m/s | kg/m ³ | $\epsilon_c(20h)$, % |
| 1 | 740 | 235 | 33 | 1753 | 1,32 |
| 2 | 660 | 235 | 33 | 1761 | 1,40 |
| 3 | 630 | 235 | 33 | 1802 | 0,75 |
| 4 | 650 | 230 | 33 | 1775 | 0,72 |
| 5 | 650 | 200 | 33 | 1787 | 1,08 |
| 6 | 650 | 180 | 33 | 1774 | 0,93 |
| 7 | 650 | 230 | 22 | 1766 | 0,86 |
| 8 | 650 | 230 | 11 | 1754 | 1,04 |

Basınçlı döküm alaşımı AZ91D için, 50MPa gerilim altında uygulanan sürünme deneyi sonucu, sürünme geriniminin döküm sıcaklığının yükselmesi ile arttığı gözlenmiştir. Döküm sıcaklığının 630°, 660° ve 740°C olduğu durumlarda, sürünme gerinimi 0,75–1,40–1,32 değerlerini almaktadır. Bu durum, döküm sıcaklığının yükselmesi ile alaşım içinde gaz çözünürlüğünün artması sebebiyle daha fazla porozite oluşumu ve buna bağlı olarak sürünme direncinin düşmesinden kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı, mümkün olan en düşük sıcaklıkta döküm işleminin yapılması tavsiye edilmektedir. Çizelge 6.1’de görüldüğü gibi, kalıp sıcaklığının 200°C olduğu noktada, sürünme gerinimi ekstremum bir değere ulaşmaktadır. En az uzama ise 230°C’lik kalıp sıcaklığında meydana gelmektedir. 200°C kalıp sıcaklığı, kritik bir nokta olup, bu sıcaklık değerinden yukarıdaki sıcaklıklarda döküm yapılması tavsiye

edilmektedir. Enjeksiyon hızındaki artış, sürünme gerinimi değerinde lineer bir düşüşe neden olmaktadır. 11 m/s'lik meme hızında 1,04 olan yüzde sürünme uzaması, 33m/s meme giriş hızında ise 0,72 değerini almaktadır. Enjeksiyon hızının artışı, sürünme direncini olumlu yönde etkilemektedir.

Alaşımın yoğunluğunun döküm parametreleriyle değişimini incelersek, döküm sıcaklığının artması ile yoğunluğun azaldığını görürüz. Yoğunluğun azalması, parça içindeki porozite miktarının arttığını ve buna bağlı olarak sürünme direncinin azalacağını gösteren bir faktördür. Döküm sıcaklığının artması ile sıvı metal içindeki hidrojen çözünürlüğü artmaktadır. Örneğin sıcaklığın 650°C'den 725°C'ye çıkarılması ile hidrojen çözünürlüğü 2 kat (30,7den 60,1 ppm'e) oranında artmaktadır. Ancak katılaşma sonunda AZ91D alaşımı içindeki maksimum hidrojen çözünürlüğü 24 ppm olduğu için, fazla olan hidrojen miktarı, parça içinde gaz kalıntısı olarak bulunmakta ve yoğunluk ile birlikte, sürünme özelliklerini de düşürmektedir. Ayrıca enjeksiyon hızındaki artış ile yoğunluğun doğru orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. Enjeksiyon hızının 11 m/s'den 33 m/s'ye artması ile yoğunluk, 1754 kg/m³'ten 1775 kg/m³ değerine yükselmiştir. Kalıp sıcaklığındaki değişimin ise, yoğunluk üzerinde çok etkili olmadığı söylenebilir.

Sonuç olarak, döküm sıcaklığının artması ile porozite miktarının arttığını, buna bağlı olarak da sürünme dayanımı ve yoğunluk değerlerinin azaldığını söyleyebiliriz. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde, çok karmaşık olmayan parçalar için döküm sıcaklığı, likidüs sıcaklığının 30–40°C üzerinde seçilmelidir. Parçanın karmaşıklığı arttıkça, döküm sıcaklığı likidüs sıcaklığının 90°C üzerindeki değerlere kadar çıkabilmektedir. Ancak bu durum sürünme dayanımını olumsuz yönde etkileyecektir. Ayrıca meme giriş hızı değerleri de 30 m/s'nin altında seçilmemelidir. Çok yavaş meme hızlarında, kendini çekme boşluklarından kaynaklanan porozite oluşumu artarken; 50 m/s'nin üzerindeki hızlarda ise kalıp içinde kaçamayan (sıkışan) gazlardan dolayı porozite oluşumu oldukça artmaktadır. Hız seçiminde kalıbın aşınması ve optimum dolum süreleri de dikkate alınmalıdır. Meme giriş hızlarının genellikle 30–50 m/s arasında seçilmesi uygundur.

Kalıp sıcaklığı sürünme direnci üzerinde etkili bir parametre olup, AZ91D alaşımı için 230°C ve üzerindeki sıcaklıklar tavsiye edilmektedir. Düşük kalıp sıcaklıkları kendini çekme miktarını arttırmakta ve bu da porozite oluşum miktarını yükseltmektedir. 230°C tavsiye edilen sıcaklık değeri, literatürde kabul görmüş aralık olan 250±14°C değerine oldukça yakındır (Gutman ve arkadaşları, 1997; ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).

1998 yılında El-Mahallawy, Taha, Pokora ve Klein tarafından yapılan bir çalışmada, metale uygulanan basınç ve meme giriş hızı birlikte değerlendirilerek deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada AM20HP, AM50HP, AS41, AE42 ve AZ91HP basınçlı döküm magnezyum alaşımları iki farklı basınç ve hız parametresi kullanılarak test edilmiştir. Katılaşma sırasında uygulanan basınç 30 ve 70 MPa, meme giriş hızı ise 40 ve 80 m/s (piston hızı ise 2 ve 4 m/s, yani piston kesit alanı ve meme kesit alanı arasındaki oran 20/1'dir) olarak seçilmiştir. İşlem faktörlerindeki değişikliklerin; kalıp sıcaklığına, yoğunluğa, yüzey sertliğine, çekme dayanımına (UTS), akma dayanımına (YS) ve uzamaya (sünekliğe) etkileri değerlendirilerek şu sonuçlara varılmıştır;

1. Katılaştırma basıncının (solidification pressure veya intensification pressure) 30 MPa'dan 70 MPa'a ve meme hızının (gate velocity) 40 m/s'den 80m/s'ye çıkarılması; kalıp sıcaklığı ve kalıptaki sıcaklık dağılımı üzerinde önemli bir etki yapmamıştır.
2. Parçanın ortalama yoğunluğunun, katılaştırma basıncının yükselmesi ile arttığı gözlenmiştir. Bu durum parça içindeki porozite oluşumunun basınç artışıyla ters orantılı olarak azaldığını göstermektedir. Buna karşılık meme giriş hızındaki artışın, yoğunluk üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olmadığı ortaya çıkmıştır (Çizelge 6.2). Ancak, genel olarak en iyi yoğunluk değerlerinin, düşük hızda ve yüksek basınçta gözlendiğini söyleyebiliriz. Bununla beraber, bütün numunelerde, memeden en uzak olan bölgede, kaçamayan (sıkışan) gazlar sebebiyle yoğunluk, en düşük değerlere ulaşmaktadır.
3. Yüzey sertliği ile ilgili yapılan deneyler sonucunda yüzey sertliğinin, katılaştırma basıncından veya meme giriş hızındaki artış veya azalışlardan etkilenmediği anlaşılmıştır. Ancak, alaşım içerisindeki alüminyum içeriğinin artmasıyla, yüzey sertliğinin de arttığı gözlenmiştir. Ölçülen Brinell Sertlik (HB) değerleri, Çizelge 6.3'de verilmiştir.
4. Maksimum çekme dayanımının (UTS); basınç, hız ve alaşımın içeriğindeki alüminyum miktarındaki artış ile doğru orantılı olarak arttığı gözlenmiştir (Çizelge 6.4). Katılaştırma basıncı ve alüminyum içeriğinin, çekme dayanımının artması üzerindeki etkisinin, meme hızından kaynaklanandan çok daha belirgin olduğu görülmüştür. %0,2 akma dayanımı (YS) ve süneklik üzerinde ise, basınç ve hız değişimlerinin önemli bir etkisine rastlanmamıştır. Çekme dayanımının artması, oluşan porozite miktarının basınç artışıyla azalması şeklinde açıklanabilir.

Çizelge 6.2 Katılaştırma basıncı ve meme hızının yoğunluk üzerindeki etkisi
(El-Mahallawy ve arkadaşları, 1998)

| Alaşım | Hız (m/s) | Basınc (MPa) | Ergitme Sıcaklığı (°C) | Ortalama Yoğunluk (g/cm³) |
|---------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|---|
| AM20HP | 50 | 30 | 710 | 1,687 |
| | 80 | 30 | 690 | 1,692 |
| | 50 | 70 | 690 | 1,727 |
| | 50 | 70 | 710 | 1,718 |
| | 80 | 70 | 690 | 1,723 |
| | 80 | 70 | 710 | 1,717 |
| AM50HP | 40 | 30 | 690 | 1,709 |
| | 80 | 30 | 690 | 1,715 |
| | 40 | 70 | 690 | 1,733 |
| | 80 | 70 | 690 | 1,738 |
| | 80 | 70 | 690 | 1,745 |
| AS41 | 40 | 30 | 695 | 1,723 |
| | 80 | 30 | 695 | 1,726 |
| | 40 | 70 | 695 | 1,730 |
| | 80 | 70 | 695 | 1,741 |
| AE42 | 50 | 30 | 695 | 1,733 |
| | 80 | 30 | 695 | 1,751 |
| | 50 | 70 | 695 | 1,773 |
| | 80 | 70 | 695 | 1,772 |
| | 80 | 70 | 695 | 1,771 |
| AZ91 | 60 | 30 | 680 | 1,780 |
| | 80 | 30 | 680 | 1,783 |
| | 60 | 70 | 680 | 1,760 |
| | 80 | 70 | 680 | 1,768 |

Çizelge 6.3 Basınçlı döküm magnezyum alaşımlarının ölçülen yüzey sertlikleri
(El-Mahallawy ve arkadaşları, 1998)

| Alaşım | Ölçülen Sertlik (HB) |
|--------|-------------------------------|
| | (2,5 mm top ve 625 N yükleme) |
| AM20HP | 50–55 |
| AM50HP | 60–65 |
| AE42 | 62 |
| AS41 | 63–69 |
| AZ91HP | 79–82 |

Çizelge 6.4 Basınçlı döküm magnezyum alaşımlarının dayanım özellikleri
(El-Mahallawy ve arkadaşları, 1998)

| Alaşım | Çekme Dayanımı | Akma Dayanımı | Uzama |
|--------|----------------|----------------------|---------|
| | UTS (MPa) | $\sigma_{0,2}$ (MPa) | (%) |
| AM20HP | 115–180 | 80–92 | 3–8 |
| AM50HP | 132–215 | 102–122 | 0–5 |
| AE42 | 140–192 | 110–130 | 0,6–3,6 |
| AS41 | 110–155 | 120–125 | 0,6 |
| AZ91 | – | – | – |

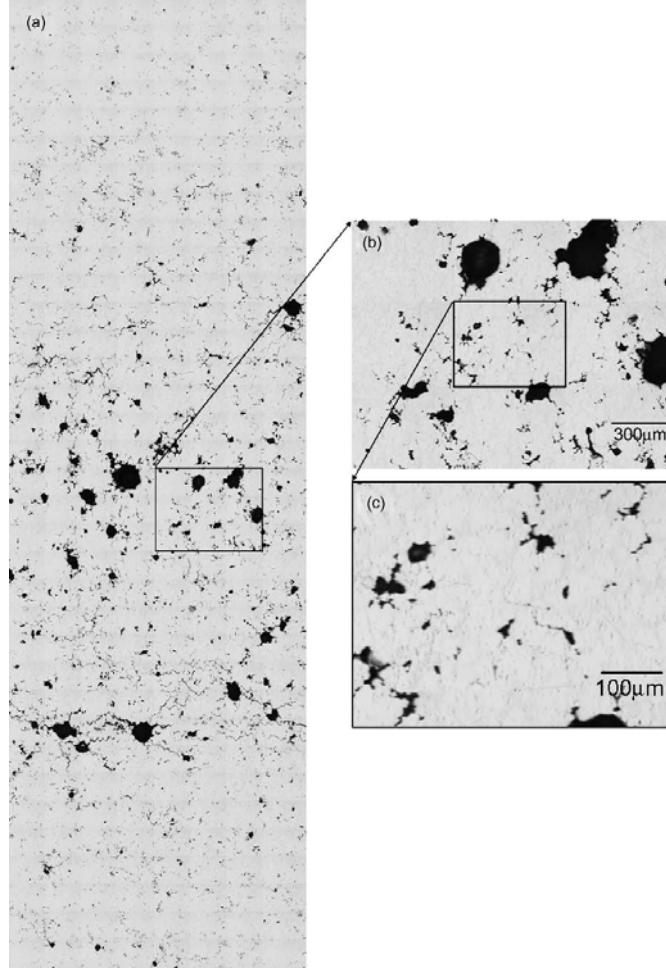
2006 yılında Lee, Gokhale, Patel ve Evans tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, AM50 basınçlı döküm magnezyum alaşımında, porozite oluşumunu etkileyen işlem faktörleri incelenmiştir (Şekil 6.4). Toplam porozite oluşumu, gaz porozitesi ve büzülme (kendini çekme) porozitesi olarak iki şekilde karşımıza çıkmaktadır. Şekil 6.5’de toplam porozite ile birlikte gaz ve büzülme (kendini çekme) boşlukları ayrı ayrı görülmektedir. Oluşan bu mikro ve makro boşluklar, parçanın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Parça kalitesini ve dayanımını arttırmak için minimum poroziteli içyapıya sahip ürünler istenilmektedir. Porozite oluşumu ve miktarı konusunda işlem faktörlerinden; meme giriş hızı, katılaştırma (sıkıştırma) basıncı ve ergitme sıcaklığı çok önemli etkiye sahiptir. Deneysel

çalışma sırasında meme giriş hızları 35–55 m/s ve ergitme sıcaklıkları da 682–704°C olmak üzere iki farklı değerde incelemeler yapılmıştır. Lee ve arkadaşlarının yaptığı deneysel çalışma sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir (Basınçlı döküm prosesinde kullanılan işlem parametreleri Çizelge 6.5’de görülmektedir):

1. Katılaşma sırasında sıkıştırma basıncı uygulanması ile toplam porozite miktarında önemli derecede düşüş sağlanmıştır. En büyük azalma gaz porozitesi miktarında olmakla birlikte, büzülme boşluklarında da fark edilir bir azalma gözlenmiştir. Ayrıca sıkıştırma basıncı ile porozite yoğunluğunun azaldığı ve 100µm çapından büyük gaz boşluklarının oluşumunun, yaklaşık olarak tamamen engellendiği gözlenmiştir.
2. Meme giriş hızının azaltılması ile toplam porozite miktarında bir azalma meydana gelmiştir. Ağırlıklı olarak da gaz porozitelerinin azaldığı gözlenmiştir. Büzülme boşluklarının miktarında ise küçük bir düşüş olduğu söylenebilir. Meme giriş hızının artması, kalıp boşluğundaki gazların kaçmasını zorlaştırdığından, düşük meme hızlarının kullanımı tavsiye edilmektedir. Ama burada dikkat edilecek husus, kalıbın katılaşma başlamadan tam olarak dolmasını sağlayacak meme giriş hızı değerinin altına düşülmemesi gerektiğidir. Aksi durumda, kendini çekmeden kaynaklanan porozite oluşumunda artış olmaktadır. Tavsiye edilen hız değerleri min.30 m/s ile max.50 m/s aralığıdır.
3. Ergitme sıcaklığının düşürülmesi ile toplam porozite miktarı azaltılmış ve en çok gaz boşluklarının ergitme sıcaklığından etkilendiği gözlenmiştir. Özellikle 30µm çapından büyük boşlukların oluşumu, sıcaklığın düşürülmesi ile oldukça azalmıştır. Ergitme sıcaklığının yükseltilmesi ile sıvı metalin gaz absorpsiyonu artmaktadır.

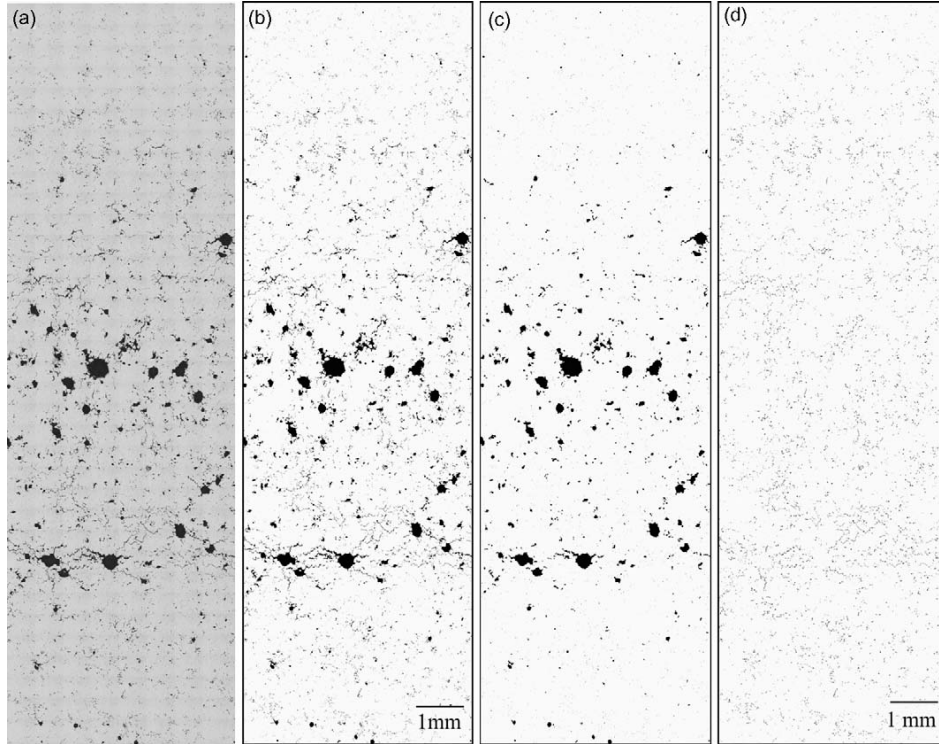
Çizelge 6.5 Basınçlı döküm prosesinde kullanılan işlem parametreleri
(Lee ve arkadaşları, 2006)

| Numune | Meme Giriş Hızı (m/s) | Sıkıştırma Basıncı (Intensification) | Ergitme Sıcaklığı (°C) |
|--------|--------------------------|---|---------------------------|
| A | 55 | Açık | 704 |
| B | 55 | Kapalı | 704 |
| C | 35 | Kapalı | 704 |
| D | 55 | Kapalı | 682 |
| E | 35 | Açık | 682 |



Şekil 6.4 Basıncılı döküm AM50 alaşımında meydana gelen poroziteler
(Lee ve arkadaşları, 2006)

Deney sonuçlarına bakıldığında, mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde porozite oluşumunun minimuma indirilmesi gereği göz önüne alınarak, mümkün olan en düşük ergitme sıcaklığının seçilmesi uygundur. Ayrıca, meme giriş hızının mümkün olan en düşük değerlerde seçilmesi, porozite oluşumunu azaltacaktır. Burada dikkat edilecek nokta, hızın 30m/s'nin altına düştüğü durumlarda, sürünme direncinde ve yoğunlukta bir azalma olacaktır. Bu yüzden 30–35 m/s'lik meme giriş hızları optimum sonucu vermektedir. Katılaşma sırasında sıkıştırma basıncının uygulanması da porozite miktarını azaltmakta ve mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemektedir. Bu durumda mümkün olan en düşük sıcaklıkta, en yüksek katılaşma basıncı ile, optimum hızlarda döküm yapılması; düşük poroziteli ve dayanım özellikleri tatmin edici parçaların üretimine olanak sağlamaktadır (Gutman ve arkadaşları, 1997; Lee ve arkadaşları, 2006).



Şekil 6.5 (a) Gaz ve büzülme boşluklarını gösteren gri skalalı mikro yapı resmi (b) Gaz ve büzülme boşluklarının siyah-beyaz görünümü (c) Sadece gaz boşluklarını (gas porosity) içeren görüntü (d) Sadece büzülme boşluklarını (shrinkage porosity) içeren görüntü (Lee ve arkadaşları, 2006)

6.6 Tavsiye Edilen Proses Parametreleri

İşlem faktörleri; parça kalitesine, dayanım özelliklerine ve dolayısıyla hata oluşumuna etki eden en önemli unsurların başında gelmektedir. İşlem faktörlerinin doğru seçimi, parçanın da doğru üretimi anlamına gelmektedir. Aşağıda, hatasız üretim yapmak için, işlem faktörlerinin seçiminde dikkat edilecek hususlar sıralanmıştır;

1. Enjeksiyon ve sıkıştırma basıncı değerleri mümkün olduğunca yükseltilmelidir. Basıncın yükseltilmesi, parça içindeki porozite miktarını azaltmakta ve yoğunluğun artmasını sağlamaktadır. Düşük poroziteli ve yüksek yoğunluktaki parçaların mekanik özellikleri daha iyidir. Magnezyum alaşımlarının soğuk kamaralı basınçlı dökümünde uygulanan basınç aralığı, 30–100 MPa'dır. Bu aralık içinde, hidrolik sistemin durumu göz önüne alınarak en yüksek değerlerde döküm gerçekleştirilmelidir. Sıkıştırma basıncı için de en yüksek değer 120 MPa'ı geçmemelidir. Sıcak kamaralı yöntemde ise daha düşük basınç değerlerinde çalışılmaktadır. Yine mümkün olan en yüksek

değer seçilmek şartıyla, 15–40 MPa basınç aralığı uygundur. Sıcak kamaralı yöntemde ise uygulanan maksimum sıkıştırma basıncı 25 MPa'dır.

2. Ergitme sıcaklığı dolayısıyla döküm sıcaklığı, mümkün olabildiğince düşük tutulmalıdır. Sıvı metalin sıcaklığı yükseldikçe, metal içindeki gaz çözünürlüğü oranı artmaktadır. Ergitme sırasında metal içinde çözünen bu gazlar (özellikle hidrojen gazı), katılaşma prosesinde düşen çözünme oranına paralel olarak parça dışına çıkamamakta, bu da gaz porozitesi oluşumuna sebep olmaktadır. Kabul görmüş döküm aralığı likidüs eğrisinin 30–90 °C üzeridir. Parça çok karmaşık değilse, döküm sıcaklığı ergime sıcaklığının 30–40°C üzerinde seçilebilmektedir. Kalıp sıcaklıkları ise kendini çekme ve ani soğuma oluşumuna etki etmektedir. Düşük kalıp sıcaklıkları farklı katılaşma katmanlarının oluşumuna, kendini çekme miktarının artmasına ve sıcak yırtılmalara sebep olmaktadır. Kalıp sıcaklıkları için 250±14°C optimum aralık olarak kabul görmektedir.
3. Meme giriş hızı, katılaşma olmadan kalıbı dolduracak en düşük değerde seçilmelidir. Giriş hızları için 30–50 m/s aralığı tavsiye edilmektedir. Çok ince kesitli parçalarda meme giriş hızı değerleri nadiren de olsa 100 m/s'ye kadar çıkabilmektedir. Kalınlığı 5 mm'den fazla olan parçalarda ise 30 m/s değerinin altına inilebilmektedir. Hızın 30 m/s'nin altına düşmesi kendini çekmeden (büzülmeden) kaynaklanan porozite miktarının artmasına; 50 m/s'nin üzerindeki hız değerleri ise, kalıp boşluğundan kaçamayan (sıkışan) gazlardan dolayı gaz porozitesi miktarının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca yüksek hızlarda kalıbın aşınması artmakta, türbülanslı akımdan dolayı parça yüzeyinde dalga ve girdap izleri oluşmaktadır. Meme giriş hızı ve piston hızı arasında, süreklilik denkleminin (akış debisinin sabitliği ilkesi) kaynaklanan bir ilişki vardır. Eşitlik 6.6 incelendiğinde, bu ilişki daha iyi anlaşılacaktır.

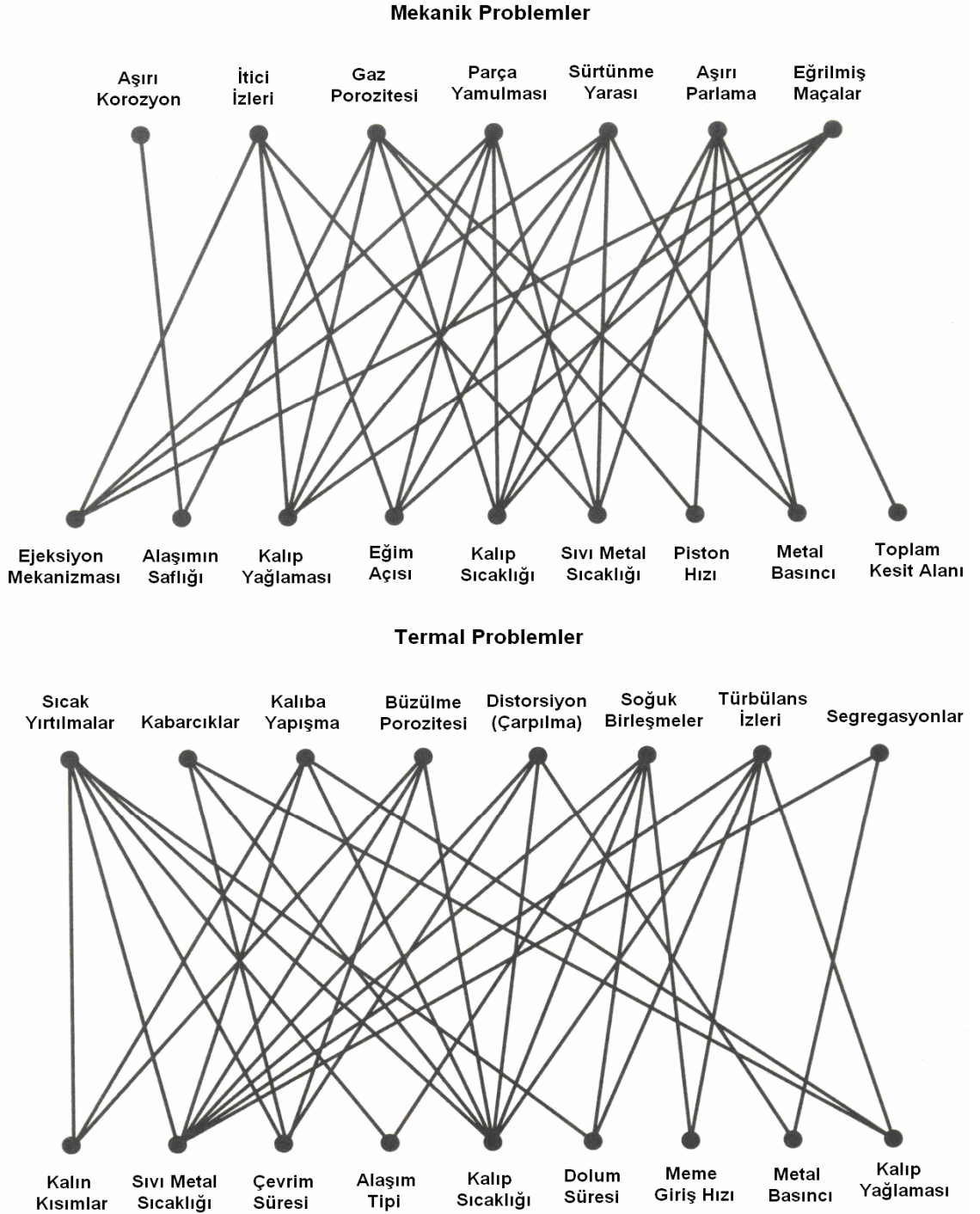
$$Q = A_p \times V_p = A_g \times V_g \quad (6.6)$$

6.7 İşlem Faktörleri ve Tasarımdan Kaynaklanan Döküm Hataları

Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde en çok karşılaşılan hatalar; eksik dolun, soğuk birleşme, gaz porozitesi ve kendini çekme boşluklarıdır. Hataların oluşumu birbiriyle bağlantılı birçok faktörden kaynaklanmaktadır. Yanlış işlem parametreleri, hatalı parça veya kalıp dizaynı, alaşım içindeki katışkılarının kötü etkileri; hata faktörlerini oluşturmaktadır. Aşağıda oluşan hatalar ve oluşum sebepleri kısaca anlatılmıştır.

1. **Yetersiz Dolum** veya kalıp boşluğunun tam olarak dolmaması; düşük enjeksiyon hızından, kalıbın soğuk olmasından, ergimiş metal sıcaklığının düşük olmasından, kirli alaşımdan (aşırı oksit içeriyorsa), kalıp yağlayıcıların aşırı uygulanmasından, havalandırmanın yetersiz olmasından veya soğuk kamaralı proseste hazneye eksik sıvı metal koyulmasından kaynaklanabilir.
2. **Soğuk Birleşme** veya soğuk akış (cold flow); sıvı metalin kısmen katılaşmış bir bölgeyle karşılaştığı zaman meydana gelir. Genellikle, ergimiş metalin veya kalıbın düşük sıcaklığa sahip olmasından veya düşük enjeksiyon hızından kaynaklanır. Havalandırma deliklerinin toplam alanının, meme kesit alanının yarısı olacak şekilde artırılması, soğuk birleşme oluşumunu oldukça azaltmaktadır.
3. **Gaz Boşlukları (Gas Porosity)**; hava veya gazların kalıp boşluğuna sıkışması veya ergiyik içinde çözünen hidrojenin ayrışması sonucu meydana gelmektedir. Bu hatanın oluşumu; yolluk, meme, basma, havalandırma ve yağlama sistemlerinin optimum şekilde ayarlanması ile minimum seviyelere çekilebilir.
4. **Büzülme (Kendini çekme) Boşlukları (Shrinkage Porosity)**; metal beslemesinin kendini çekmeyi telafi edemediği yerlerde sıcak benekler olarak karşımıza çıkabilmektedir. Düşük enjeksiyon ve katılaştırma basınçları ile çalışıldığında ve meme giriş hızının gerekenden yavaş olduğu durumlarda daha çok görülmektedir.
5. **Akış veya Girdap İzleri**; parçanın yüzeyinde oluşan bu izler, dolum esnasındaki türbülans, sıçramalardan veya aşırı kalıp yağlayıcılarının kullanımından kaynaklanabilmektedir. Meme hızının yüksek değerlerde seçilmesi, hata oluşumunu arttırmaktadır.
6. **Sıcak Yırtılmalar**; sıvı metalin kısmen katılaştığı durumlarda karşımıza çıkar. Kalıp içindeki gerilmeleri arttıracak sınırlamalar, keskin köşeler, parçanın kalıptan geç çıkarılması sıcak yırtılma eğilimini arttıran durumlardır.
7. **Yamulma (Deformation), Burkulma (Distortion) ve Kırılmalar**; parçanın kalıptan dışarı çıkartılması esnasında, büzülme gerilmeleri (shrinkage stresses) sebebiyle oluşmaktadır. Parça ve kalıbın dizaynı yapılırken, artık gerilmelerin dikkate alınması ve dökümden sonra ısı işlem uygulanması ile deformasyon ve distorsiyon hatalarının oluşumu azaltılabilir.

Genelde, birçok sebebin etkileşimi ile belirli bir hata oluşumu meydana gelmektedir. Bu faktörlerin her biri sistematik bir şekilde analiz edilmeli ve hata oluşumu bundan sonra değerlendirilmelidir. Çeşitli hata türleri ve bunların oluşumunda proses parametrelerinin etkileri üzerine, çok sayıda sistematik analiz çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri Şekil 6.6'da verilmiştir (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999).



Şekil 6.6 Mg alaşımlarının basınçlı döküm hataları ile işlem parametrelerinin ilişkisi (ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, 1999)

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Magnezyum, uygun karakteristikleri sayesinde birçok sektörde kullanılabilir bir metaldir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe hafifliği dolayısıyla tercih edilmektedir. Ancak bu koşulların sağlanabilmesi kolay olmamış, alüminyuma göre daha pahalı olmasından dolayı magnezyumun kabul görmesi uzun zaman almıştır. Çin ve Avustralya'nın üretime girmesi ile birlikte düşen fiyatlar neticesinde, magnezyum da endüstride kendine yer bulmaya başlamıştır. Magnezyumun basınçlı dökümü, magnezyum endüstrisi içinde, en hızlı büyüyen ve global ölçekte en çok gelişen segment olmuştur. Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi diğer yöntemlerin sunamayacağı ekonomik avantajlar sunmaktadır. Otomasyona uygunluğu yönüyle, magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü, yüksek hacimli imalatlar için ideal bir yöntemdir (Friedrich ve Mordike, 2006; International Magnesium Association Web Sitesi).

Basınçlı döküm, hassas bir yöntem olmasına rağmen, parça kalitesini ve mekanik özellikleri etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler, parça ve kalıp konstrüksiyonu ile üretiminin doğru yapılmasıyla yakından ilişkilidir. Ancak parça kalitesini ve mekanik özellikleri etkileyen faktörlerin başında, işlem parametreleri gelmektedir. Kusursuz bir kalıp tasarlayıp imalatı gerçekleştirilse bile, döküm prosesi esnasında yanlış seçilen işlem parametreleri, doğru tasarlanmış parçaların bile hatalı ve kötü mekanik özelliklere sahip olacak şekilde üretilmesine sebep olmaktadır (ASM Specialty Handbook, 1999).

Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde işlem faktörleri; parça kalitesine, mekanik özelliklere, poroziteye ve hatalı parça üretimine doğrudan etki etmektedir. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde uygulanan işlem parametreleri, 10 yıl öncesine kadar, etkileyiş yönleri açısından değerlendirilmemişti. Ancak 1995'ten bu yana, seçilen işlem faktörlerinin etkileri üzerine deneysel ve teorik çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Daha önceki yıllarda alüminyum alaşımlarının basınçlı dökümü için yapılan araştırmalar, magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm parametrelerini optimize etme çalışmalarına ışık tutmaktadır. İşlem faktörleri (parametreleri) olarak incelenen unsurlar; enjeksiyon basıncı ve katılaşma sırasında metale uygulanan basınç, meme ve piston hızı, kalıp sıcaklığı ve sıvı metalin ergitme veya döküm sıcaklığıdır. Bu faktörlerin tavsiye edilen optimum değerleri ile parça özelliklerine ve hata oluşumlarına etkileri aşağıda özetlenmiştir;

1. Soğuk kamara tipi basınçlı döküm makinalarında, enjeksiyon sırasında uygulanan basınç 30–100 MPa arasında değişmektedir. Kalıp boşluğu dolduktan sonra, ekstra sıkıştırma için, katılaşma sırasında uygulanan basınç ise maksimum 120 MPa'dır.

Uygulanan bu basınç, olası gaz boşluklarını sıkıştırarak uzaklaştırmanın yanı sıra, katılaşma sırasında meydana gelen kendini çekmeyi beslemeye de yardımcı olur. Özellikle cidar kalınlığı 5 mm'nin üzerindeki döküm parçalarında, uygulanan basıncın artırılması ile daha iyi mekanik özellikler elde edilmektedir. Sıcak kamaralı makinalarda ise ergimiş metale uygulanan enjeksiyon basıncı 15 ile 40 MPa arasında değişmektedir. Sıcak kamaralı makinada, katılaşma sırasında, soğuk kamaralı yöntemde olduğu gibi tam anlamıyla ekstra sıkıştırma operasyonu mevcut değildir. Parça, katılaşma süresince belirli bir basınç (max 25 MPa) altında tutulur, ancak bu basınç soğuk kamaralı yöntemde olduğu gibi çok yüksek değerlerde olmayıp, çok daha düşük değerlerdedir. Enjeksiyon ve sıkıştırma (katılaşma) basıncı değerleri iki yöntemde de mümkün olduğunca yükseltilmelidir. Düşük basınç değerleriyle çalışılması durumunda, parçada oluşan mikro ve makro porozite miktarı artmakta ve dayanım özellikleri olumsuz etkilenmektedir. Basıncın yükseltilmesi, parça içindeki porozite miktarını azaltmakta ve yoğunluğun artmasını sağlamaktadır. Düşük poroziteli ve yüksek yoğunluktaki parçaların mekanik özellikleri daha iyidir. Ancak basıncın yükseltilmesi kalıp ömrünü azaltan bir faktördür. Bu durum göz önüne alınarak optimum basınç değerleri tecrübelerden de faydalanılarak belirlenmelidir.

2. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde, meme giriş hızı, uygulanan yöntemle göre değişmektedir. En yaygın kullanılan hız değerleri 30–50 m/s aralığındadır. İnce cidarlı döküm parçalar için meme hızı, nadiren de olsa 100 m/s'ye kadar yükselebilmektedir. Ayrıca 4–5 mm'den daha kalın parçaların dökümünde, meme hızı 30 m/s'nin altında tutulabilmektedir. Memedeki hızın 70 m/s'yi geçmesi durumunda kalıptaki aşınmanın önemli oranda artması ve türbülanslı akımdan dolayı parça yüzeyinde dalga ve girdap izlerinin oluşması, ergiyik hızını seçerken göz önüne alınması gereken unsurlardır. Meme hızını belirlerken dikkate alınan anahtar faktör ise, kalıbın dolun süresidir. Kalıbın dolun süresi için tavsiye edilen aralık 10–100 ms'dir. Genel kural, meme hızının döküm kalitesini bozmayacak şekilde, olduğunca azaltılması şeklindedir. Ancak hızın 30 m/s'nin altına düşmesi kendini çekmeden kaynaklanan porozite miktarının artmasına; 50 m/s'nin üzerindeki hız değerleri ise, kalıp boşluğundaki kaçamayan (sıkışan) gazlardan dolayı gaz porozitesi miktarının artmasına neden olmaktadır. Artan porozite ile yoğunluk değerleri düşmekte ve dayanım özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir. Meme hızı belirlenirken, kalıbın dolun süresi de dikkate alınarak karar verilmelidir.

3. Döküm sıcaklığı alaşımın cinsine ve döküm prosesine göre değişmektedir. Genel bir kural olarak, magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde döküm sıcaklığı, ergime sıcaklığından (likidüs eğrisinden), 30–90°C kadar yukarıda seçilmektedir. Ergitme sıcaklığı dolayısıyla döküm sıcaklığı, mümkün olabildiğince düşük tutulmalıdır. Sıvı metalin sıcaklığı yükseldikçe, metal içindeki gaz çözünürlüğü oranı artmaktadır. Ergitme sırasında metal içinde çözünen bu gazlar (özellikle hidrojen gazı), katılaşma esnasında düşen çözünme oranına paralel olarak parça dışına çıkamamakta, bu da gaz porozitesi oluşumuna sebep olmaktadır. Parça çok karmaşık şekilli değilse, döküm sıcaklığı ergime sıcaklığının 30–40°C üzerinde seçilmelidir. Kalıp sıcaklıkları ise kendini çekme ve ani soğuma oluşumlarına etki etmektedir. Düşük kalıp sıcaklıkları farklı katılaşma katmanlarının oluşumuna, kendini çekme ve kendini çekmeden kaynaklanan porozite miktarının artmasına ve sıcak yırtılmalara sebep olmaktadır. Bu hataları önlemek için, kalıp sıcaklıklarının, optimum değerlere yakın ve stabil bir sıcaklık dağılımına sahip olması gerekmektedir. Kalıp sıcaklıkları için 250±14°C optimum aralık olarak kabul görmektedir (Brungs, 1997; Gutman ve arkadaşları, 1997; El-Mahallawy ve arkadaşları, 1998; ASM Specialty Handbook, 1999; Department of Trade and Industry, 2004; Friedrich ve Mordike, 2006; Lee ve arkadaşları, 2006; NADCA Web Sitesi; IMA Web Sitesi).

İşlem faktörleri; parça kalitesine, dayanım özelliklerine ve dolayısıyla da hata oluşumuna etki eden unsurların başında gelmektedir. İşlem faktörlerinin doğru seçimi, parçanın da doğru üretimi anlamına gelmektedir. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde en çok karşılaşılan hatalar; eksik dolum, soğuk birleşme, gaz porozitesi ve kendini çekme boşluklarıdır. Hataların oluşumu birbiriyle bağlantılı birçok faktörden kaynaklanmaktadır. Yanlış işlem parametreleri, hatalı parça veya kalıp dizaynı, alaşım içindeki katışkılarının kötü etkileri hata faktörlerini oluşturmaktadır. Bu hata faktörlerinin başında da işlem parametreleri gelmektedir. Bu faktörlerin her biri sistematik bir şekilde analiz edilmeli ve hata oluşumu bundan sonra değerlendirilmelidir.

Bu çalışma, magnezyum metali ve alaşımlarının genel özellikleri, basınçlı döküm yöntemi ile imalatı ve magnezyumun basınçlı döküm uygulamasındaki işlem faktörleri ile bu faktörlerin parça dayanımına ve hata oluşumuna etkileri üzerine bugüne kadar yapılmış birçok deneysel ve teorik çalışma incelenerek hazırlanmıştır. Bu tez, magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü konusunda çalışan araştırmacılara, rehber niteliği taşıması yönüyle önem kazanırsa, amacına ulaşmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- Aghion, E., Moscovitch, N. ve Arnon, A. (2007), "The Correlation Between Wall Thickness and Properties of HPDC Magnesium Alloys", *Materials Science & Engineering*, A447: 341-346.
- Allsop, D.F. ve Kennedy, D. (1983), *Pressure Die Casting Part II (The Technology of the Casting and the Die)*, Pergamon Press, Oxford.
- ASM Handbook Volume 2 (1996), *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, ASM International Handbook Committee, United States of America.
- ASM Handbook Volume 3 (1996), *Alloy Phase Diagrams*, ASM International Handbook Committee, United States of America.
- ASM Handbook Volume 15 (1998), *Casting*, ASM International Handbook Committee, United States of America.
- ASM Specialty Handbook (1999), *Magnesium and Magnesium Alloys*, ASM International Handbook Committee, United States of America.
- Atalay, O. (2006), "Magnezyum ve Alaşımlarının Konstrüksiyon Malzemesi Olarak Otomotivde Kullanımı", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Bar-Meir, G. (2000), *Fundamentals of Die Casting Design*, Dr. Bar-Meir, Minneapolis.
- Brandes, E.A. ve Brook, G.B. (1998), *Smithells Light Metals Handbook*, Butterworth - Heinemann, Oxford.
- Brungs, D. (1997), "Light Weight Design with Light Metal Castings (Technical Report)", *Materials & Design*, 18: 285-291.
- Campbell, J. (2003), *Castings (The New Metallurgy of Cast Metals)*, Elsevier Butterworth - Heinemann, Oxford.
- Clegg, A.J. (1991), *Precision Casting Processes*, Pergamon Press, Oxford.
- Çiğdemoğlu M. (1972), *Basınçlı Döküm Cilt I*, Makina Mühendisleri Odası Yayın No 77, Ankara.
- Danışman, E. (2003), "Basınçlı Döküm Yöntemi ile Magnezyum Alaşımlarından Otomobil Parçaları Üretimi", Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Department of Trade and Industry (2004), "Magnesium Alloys and Processing Technologies for Light Weight Transport Applications", *Global Watch Mission Report*, United Kingdom.
- Dobrzanski, L.A., Tanski, T., Cizek, L. ve Brytan, Z. (2007), "Structure and Properties of Magnesium Cast Alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, baskıda.
- Doehler, H.H., Çeviren Bayvas, M.Ş. (1974), *Basınçlı Döküm*, Erkek Teknik Yüksek Okulu Matbaası, Ankara.
- Du, X. ve Zhang, E. (2007), "Microstructure and Mechanical Behaviour of Semi-Solid Die-Casting AZ91D Magnesium Alloy", *Materials Letters*, 61: 2333-2337.

- El-Mahallawy, N.A., Taha, M.A., Pokora, E. ve Klein, F. (1998), "On the Influence of Process Variables on the Thermal Conditions and Properties of High Pressure Die-Cast Magnesium Alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 73: 125-138.
- Er, M. (1999), "Pres Dökümde Yeni Bir Presleme Tekniğinin Geliştirilmesi ve Deneylerinin Yapılması", Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Fan, Z. (2005), "Development of the Rheo-Diecasting Process for Magnesium Alloys", *Materials Science & Engineering*, A413-414: 72-78.
- Fidaner, S., Çelik, S., Doğmuş, H., Süzen, C. ve Duran, A.D. (1981), Genel Dökümcülük Bilgisi, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul.
- Friedrich, H.E. ve Mordike, B.L. (2006), *Magnesium Technology (Metallurgy, Design Data, Applications)*, Springer, Berlin.
- Gutman, E.M., Unigovski, Y., Levkovich, M., Koren, Z., Aghion, E. ve Dangur, M. (1997), "Influence of Technological Parameters of Permanent Mold Casting and Die Casting on Creep and Strength of Mg Alloy AZ91D", *Materials Science & Engineering*, A234-236: 880-883.
- Hu, H., Yu, A., Li, N. ve Allison J.E. (2003), "Potential Magnesium Alloys for High Temperature Die Cast Automotive Applications: A Review", *Materials and Manufacturing Processes*, 18-5: 687-717.
- Kaye, A. ve Street, A. (1982), *Die Casting Metallurgy*, Butterworth Scientific, London.
- Lee, G.S., Patel, G.L. ve Gokhale, A.M. (2005), "Characterization of the Effects of Process Parameters on Macroseggregation in a High-Pressure Die-Cast Magnesium Alloy", *Materials Characterization*, 55: 219-224.
- Lee, S.G., Gokhale, A.M., Patel, G.L. ve Evans, M. (2006), "Effect of Process Parameters on Porosity Distributions in High-Pressure Die-Cast AM50 Mg-Alloy", *Materials Science & Engineering*, A427: 99-111.
- Moreno, I.P., Nandy, T.K., Jones, J.W., Allison, J.E. ve Pollock, T.M. (2001), "Microstructural Characterization of a Die-Cast Magnesium-Rare Earth Alloy", *Scripta Materialia*, 45: 1423-1429.
- Smith, E.H. (2000), *Mechanical Engineer's Reference Book*, Butterworth - Heinemann, Oxford.
- Smith, W.F., Çeviren Kınıkoğlu, N.G. (2001), *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Literatür Yayıncılık*, İstanbul.
- Sönmez, H. (2006), *Basınçlı Döküm Ders Notları (yayımlanmamış)*, Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Upton, B. (1982), *Pressure Die Casting Part I (Metals, Machines, Furnaces)*, Pergamon Press, Oxford.
- Vinarcik, E.J. (2003), *High Integrity Die Casting Processes*, John Wiley & Sons, New York.
- Zeytin, H.K. (1999), "Magnezyum Alaşımları: Otomotiv Endüstrisinde Uygulaması ve Geleceği", Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli.

İNTERNET KAYNAKLARI

American Foundry Society Web Sitesi, <http://www.afsinc.org/>

Hydro Magnesium Web Sitesi, <http://www.hydro.com/magnesium/en/>

International Magnesium Associaton Web Sitesi, <http://www.intlmag.org>

İTÜ İmalat Mühendisliği Web Sitesi, <http://www.mkn.itu.edu.tr/bolumler/imalat/baglanti.htm>

Korea Magnesium Technology Web Sitesi, <http://www.kmt.or.kr/english.htm>

Magnesium Elektron Web Sitesi, <http://www.magnesium-elektron.com/>

Magnesium Online Resource Web sitesi, <http://www.magnesium.com/w3/>

Meridian Magnesium Web Sitesi, <http://www.meridian-mag.com/>

North American Die Casting Association Web Sitesi, <http://www.diecasting.org/industry.htm>

Pacific Northwest National Laboratory Magnesium Web Sitesi, <http://magnesium.pnl.gov/>

Rauch Fertigungstechnik Web Sitesi, <http://www.rauch-ft.com/index.php?id=8&L=6>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 21.04.1982

Doğum yeri İstanbul

Lise 1996-2000 Pertevniyal Lisesi

Lisans 2001-2005 Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2005-Devam ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2005-2006 Hisar Mühendislik Taah. Tic. Ltd. Şti.

2006-Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi