

Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Döküm Yöntemiyle Kalıplanabilirliğinin Değerlendirilmesi

Faruk MERT, Ahmet ÖZDEMİR, Çetin KARATAŞ

ÖZET

Doğal enerji kaynaklarının ve ekolojik dengenin korunması bilinci çerçevesinde, otomotiv sektörü yakıt tüketimini azaltmayı esas alan önemli değişiklikleri uygulamaya koymuştur. Yakıt tüketimini azaltmada hafif, dayanımı yüksek ve aynı zamanda güvenilir malzeme olarak magnezyum ve alaşımları dikkat çekmektedir. Magnezyum, bir plastik kadar hafif olmasının yanında bir metal kadar da dirençlidir. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü, magnezyum endüstrisi içinde en hızlı büyüyen ve en çok gelişen alan olmuştur. Bu çalışmada, magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemi ile şekillendirilebilirliği ve basınçlı döküm ürünlerinin kalıplanabilirliği hakkında genel bir değerlendirme yapılmış ve son yıllarda yapılan ve kapsama giren çalışmalar derlenmiştir. Magnezyum ve alaşımlarının artan oranlarda üretim sektörlerinde tercih edilen ve kalıplanabilirliği kolay malzemelerden olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan otomotiv endüstrisinde magnezyum alaşımlarına dayalı ürünlerin artmasının, magnezyum alaşımlarının kalıplama yöntemlerinin geliştirilmesiyle doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Magnezyum, Basınçlı Döküm, Döküm Parametreleri

A Moldability Evaluation of Magnesium Alloys in The High Pressure Die Casting Method

ABSTRACT

In the context of awareness of conservation ecological balance and natural sources, the automotive industry has implemented significant changes based on reducing fuel consumption. Magnesium and its alloys attract attention as a lightweight, high strength and also reliable material in reducing fuel consumption. Magnesium is not only lightweight as a plastics material but also resistant as a metallic material. High pressure die casting of magnesium alloys is the fastest growing and the most developing sector in the magnesium part production industry. In this study, a general assessment that castability of magnesium alloys in the high pressure die casting and the moldability of high pressure die casting products was performed and the recent related studies was compiled. It is found that magnesium and its alloys are increasingly preferred material which has a good moldability behaviour in forming or manufacturing. On the other hand, it has been that increase products based on magnesium alloys in the automotive industry are directly related to the developing molding methods of magnesium alloys.

Key words: Magnesium, High pressure die casting, Casting parameters

1. GİRİŞ

Son yıllarda otomotiv endüstrisinde magnezyum kullanımı büyük bir ilgi görmektedir. Magnezyum alaşımlı otomotiv parçalarının artmasında araç emisyonlarının azaltılması ve yakıt verimliliğinin artırılması talepleri önemli rol oynamaktadır (1-5). CO₂ emisyonlarının büyük oranda azalmasının ve sınırlı yakıt rezervlerinin korunmasının sağlanmasıyla beraber; araçlardaki ışık, ses, güvenlik, konfor, eğlence donanımları gibi ek unsurlardan kaynaklanan ağırlık artışı sorunlarının giderilmesi noktasında magnezyum alaşımlı ürünler artan bir önem kazanmıştır (6). Daha fazla konfor için yapılan ilave donanımlar yakıt verimliliğini artırma ve çevreyi

koruma talepleriyle uyumsuzluk göstermektedir (7). Sweeder, bir araçtaki %10'luk ağırlık azalması ile aşağıdaki sonuçların ortaya çıkacağını ileri sürmüştür (8):

- Yakıt tasarrufu – 0,8 lt/100km iyileşme
- Performans iyileştirmesi – 0-100 km/h hızlanmada 0,5 s düşüş
- Emisyonların azaltılması - % 7 daha az gaz salınımı
- Güvenlik - %10 daha az kinetik enerji
- Yük taşıma kapasitesi – 140 kg'lık iyileşme
- Frenleme mesafesi – 100-0 km/h yavaşlamada 3 m azalma
- Mevcut donanımların artırılabilmesi – DVD player, araç içi eğlence sistemleri gibi

Bu çalışmada, otomotiv endüstrisinde yakıt ekonomisi ve çevreye sağladığı katkıyla önem kazanan magnezyum alaşımlarının uygulamaları ve basınçlı döküm yöntemiyle üretimi, son gelişmeler doğrultusunda gözden geçirilmiştir. Aynı zamanda magnezyum alaşımları kullanımının güncel avantajları, sınırlılıkları, teknolojik engelleri ve gelecekteki durumu hakkında bilgi verilmiştir.

Makale 27.09.2010.tarihinde gelmiş 08.12.2010 tarihinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.

F. MERT, A. ÖZDEMİR, Ç. KARATAŞ, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü 06500 Teknikokullar/ ANKARA

e-posta : farukmert@gazi.edu.tr, ahmetoz@gazi.edu.tr,

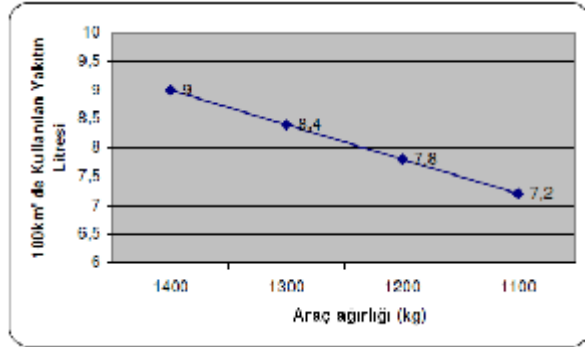
cetink@gazi.edu.tr,

Digital Object Identifier 10.2339/2010.13.3, 165-176

2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ TAŞITLARDA KULLANILMASININ ÖNEMİ

Günümüzde magnezyum alaşımlarına olan en büyük ilgi otomotiv sektöründen gelmektedir. Otomobillerde yakıt tüketiminin % 60'ı otomobil ağırlığından kaynaklandığından, ağırlığın azaltılması doğrudan yakıt tüketimini ve dolayısıyla CO₂ emisyonlarının düşürülmesini sağlamaktadır (9).

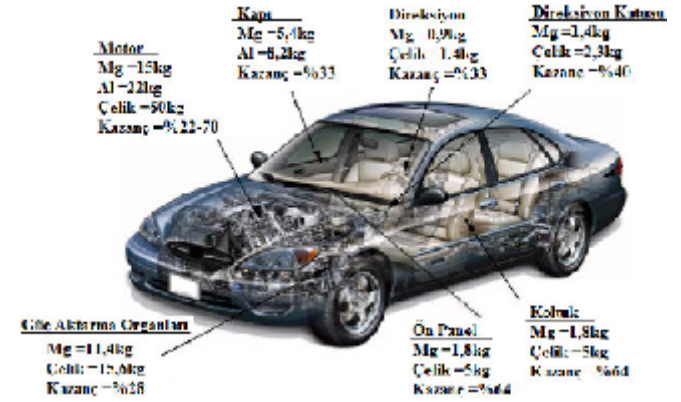
Sektörde kullanılan orta üst sınıftaki bir sedan araçta, hafif malzemelerin kullanımıyla yakıttan elde edilen tasarruf 100 km'de 0,6 litredir (Şekil 1) ve bu emisyonda da % 20'lik bir azalmaya yol açmaktadır (10).



Şekil 1. Araç ağırlığındaki azalmayla elde edilecek yakıt tasarrufu (10)

Araçların şase elemanları, iç parçalar ve kaporta elemanları gibi yapısal parçalarda magnezyum alaşımları mukavemet, süneklik, yorulma ve darbe dirençlerinin yeterli olmaları nedeniyle öncelikle tercih edilmektedirler (11,12). İlave olarak koltuk iskeleti, direksiyon ve direksiyon kolunu bileşenleri, ayna yuvaları, jantlar, süspansiyon kolları, iç konsol, bagaj kapağı, gösterge paneli, fren ve debriyaj pedalları örnek verilebilir. Diğer taraftan, motor grubu ve transmisyon elemanlarında yukarıdaki özelliklerin yanında, alüminyum alaşımlarına nazaran daha yüksek sıcaklıklarda sürtünme ve korozyon

dirençlerinden dolayı da tercih edilmektedir (13-16). Şekil 2, bir aracın değişik kısımlarında magnezyum alaşımı parçaların kullanılmasıyla elde edilen ağırlık kazançlarını göstermektedir.



Şekil 2. Magnezyumun taşıtlarda çelik ve alüminyuma göre sağladığı ağırlık kazancı (11)

Magnezyum ve alaşımlarının taşıtlarda kullanılması önemli kazanımlar sağlamasına rağmen bu alaşımlar henüz beklenen ilgiyi görememiştir. Çizelge 1, magnezyum alaşımları uygulamalarındaki avantajlar ve sınırlılıkları göstermektedir.

3. BASINÇLI DÖKÜM MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

Magnezyumun; çelik ve çinkoya nazaran %75, alüminyuma nazaran %33 daha hafif olması, çeşitli sektörlerde yapı malzemesi olarak tercih edilmesinin önde gelen nedenlerindedir. Magnezyum, tercih edilen özellikleri (Çizelge 2) nedeniyle dökülebilirlik ve işlenebilirlik açısından önemli kolaylıklar sağlamaktadır (17-19).

Çizelge 1. Magnezyum alaşımları uygulamalarının karakteristik profili [1]

Avantajları	Sınırlılıkları
⇒ Tüm yapı metalleri içerisinde en düşük yoğunluğa sahip olması	⇒ Geliştirilen alaşımların yetersiz olması
⇒ Yüksek özgül direnç	⇒ Oda sıcaklığında düşük süneklik ve tokluğa sahip olması
⇒ İyi dökülebilirlik kabiliyeti ve basınçlı döküme uygunluğu	⇒ Yüksek sıcaklık özelliklerinin (ısı direnç ve sürtünme direnci) sınırlı olması
⇒ Yüksek kesme hızlarında kolay işlenebilmesi	⇒ Kimyasal reaksiyon girme yatkınlığının yüksek olması
⇒ Doğada yüksek oranda bulunması	⇒ Yüksek çekme oranı
⇒ Soygazlar altında iyi kaynak edilebilirliği	⇒ Ayrıntılı geri dönüşüm konseptlerinin olmaması
⇒ Son derece gelişmiş korozyon direnci	⇒ Tutuşma ve korozyon davranışı hakkındaki bilgi eksikliği
⇒ Plastiklere kıyasla;	⇒ Üretici sayısındaki sınırlılık ve fiyatlardaki kararsız durum
▪ Daha iyi mekanik özelliklere sahip olması	
▪ Yaşlanma direnci	
▪ Daha iyi elektriksel ve termal iletkenlik	
▪ Geri dönüştürülebilirliği	

Çizelge 2. Magnezyum ile diğer metallerin fiziksel kıyaslaması [19]

Metal Adı	Yoğunluk	Erime Noktası	Kaynama Noktası	Ergime Gizil Isısı	Isıl Genleşme Katsayısı	Akma Gerilmesi	Uzama	Sertlik
	gr/cm ³	°C	°C	kJ/kg	x10 ⁻⁶	N/mm ²	%	HB
Mg	1,74	650	1110	368,640	25,5	98	5	30
Al	2,74	660	2486	398,108	23,9	88	45	23
Fe	7,86	1535	2754	272,213	11,7	265	45	67

Magnezyum için en büyük hammadde kaynağı deniz suyudur. Tahmini miktarı yaklaşık 1.3×10^{27} m³ olan yeryüzü deniz sularındaki magnezyum miktarı yaklaşık % 0.13 oranındadır. Bugünkü kullanım miktarları üzerinden hesaplandığında, sadece Ölü Deniz'de 22 bin yıl boyunca dünyaya yetecek kadar magnezyum vardır (20). Magnezyum, alüminyuma kıyasla daha iyi süneklik, ses ve darbe sönümlenme özelliklerine ve mü-

işlem ve kaynak edilebilirlik açısından uygunsuz hale getirmektedir. Basınçlı döküm, düşük viskoziteye sahip alaşımların kullanıldığı, ince cidarlı parçaların üretimi için ideal bir yöntemdir (25). Yaygın olarak kullanılan magnezyum-alüminyum esaslı döküm alaşımları, Çizelge 3'de mekanik özellikleriyle birlikte verilmiştir.

Basınçlı döküm için, ticari olarak kullanılan dört adet magnezyum alaşım serisi vardır: magnezyum-

Çizelge 3. Basınçlı döküm Mg alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri [25]

	Al	Mn	Zn	Diğer	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama	Sertlik
					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

kemmel dökülebilirlik kabiliyetine sahiptir (21,22). Magnezyumun, alüminyum ve çelikle karşılaştırıldığında yüksek maliyetli olmasına rağmen, son şekle yakın döküm parçalar üretildiğinden araçlarda kullanımı giderek artmaktadır. 2011 yılına kadar magnezyum alaşımlarının otomotiv ve elektronik endüstrisinde kullanımı %35 artması beklenmektedir (23). Otomotiv sektöründe düşük ağırlık kadar önemli olan geri dönüşebilirlik dünya hammadde ve enerji kaynaklarının korunması için malzeme seçiminde etkin bir faktör haline gelmiştir. Avrupa Komisyonu, araçlarda kullanılacak malzemelerin 2015 yılına kadar % 95 geri dönüşebilir malzemelerden üretilmesi hedefini şart koşmuştur. Magnezyum geri dönüşüm prosesleri varolan ve hurda değerine sahip bir malzemedir. Dökümden arta kalan parçalar, pres ıskartaları, ömrünü tamamlamış magnezyum parçalar ya da magnezyum talaşları aynı geri dönüşüm prosesi içinde sorunsuz olarak değerlendirilebilir. Farklı alaşım türlerinin bir arada ergitilmesi konusunda da bir olumsuzluk yoktur (24).

Magnezyum alaşımlı parçaların üretiminde kullanılan en yaygın yöntem basınçlı dökümdür. Yöntem yüksek bir üretim kapasitesine sahip olduğundan, oldukça benimsenmiştir. Bu yöntemde parçaların hızlı soğuması ile ince taneli yapı oluşması sağlanırken, gazların kaçmasını zorlaştırdığından dolayı gözenekliliğe yol açabilmektedir. Gözenek ise parçaları, mukavemet, ısıl

alüminyum-çinko-mangan (AZ), magnezyum-alüminyum-mangan (AM), magnezyum-alüminyum-silisyum-mangan (AS) ve yeni geliştirilen magnezyum-alüminyum-nadir toprak-mangan (AE) serileri (17). Bu alaşımların genel karakteristik özellikleri Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. Basınçlı döküm alaşımlarının genel özellikleri (17)

Alaşım	Genel Özellikleri
AZ91D	En yaygın kullanılan basınçlı döküm alaşımıdır. Oda sıcaklığında iyi dayanım, iyi döküm kabiliyeti, iyi atmosferik kararlılık 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.
AE42	Nispeten iyi dökülebilirliğe sahiptir. Basınçlı döküm alaşımları içinde en iyi sürünme direncine sahip alaşımlardan biridir. 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.

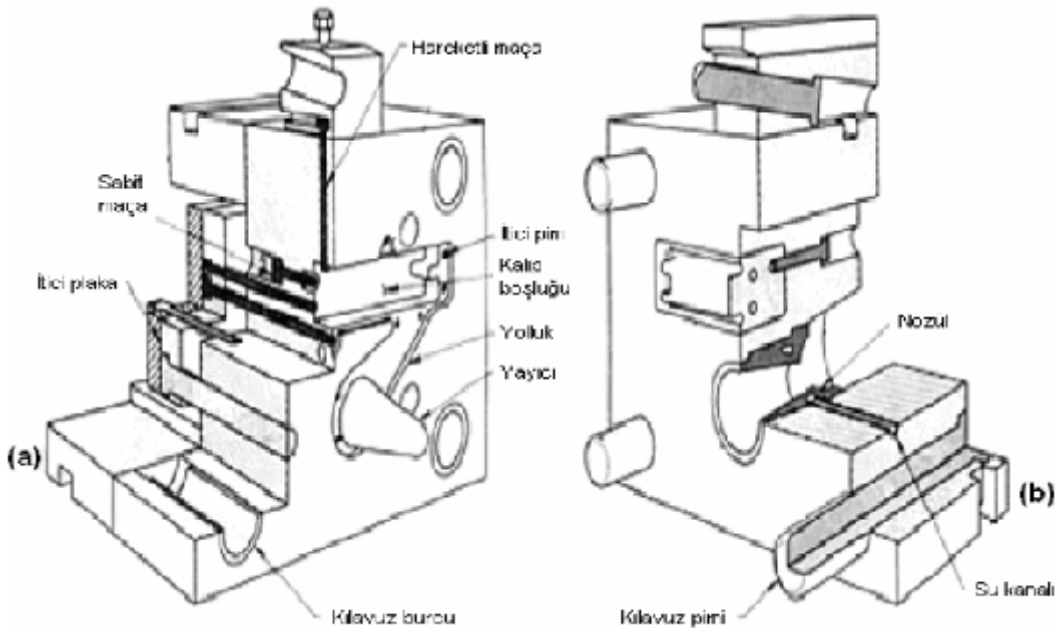
4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ BASINÇLI DÖKÜMÜ

Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemi ile üretimi; elektronik parçalardan otomobil şanzıman kapaklarına 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 kalıplama yöntemidir. 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 kadar soğutulmasını da hızlı bir şekilde sağlamaktadır. Basınçlı döküm, ergimiş magnezyumu tam ölçüde ve sorunsuz bir şekilde, mümkün olan en kısa çevrim süresinde, istenilen son şekle dönüştürme konusunda benzersiz bir yeteneğe sahiptir. Basınçlı döküm ile parçalar, plastik enjeksiyon yöntemine benzer bir şekilde, genellikle herhangi ilave talaşlı işleme gerek duyulmadan, son şeklinde üretilebilmektedir (26).

kalıpların bu kısımları termal şoklara dirençli AISI H11 (X37CrMoV51) ve AISI H13 (X40CrMoV51) gibi sıcak iş çeliklerinden yapılır. Talaşlı işlemlerden sonra kalıp çekirdeklerini oluşturan parçalar, sertleştirme ve tavlama işlemleri ile yaklaşık 44–48 HRC sertliğe erişir (18). 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 değişebilmektedir (25). Çizelge 5’de, magnezyum ile alüminyumun basınçlı dökümü için kullanılan kalıplardaki baskı sayısı net bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 5. Magnezyum ve Alüminyum basınçlı döküm kalıpları (25)

	Magnezyum	Alüminyum
Üretkenlik (baskı/saat)	75 – 400	40 – 200
Ortalama Kalıp Ömrü (baskı)	100.000 – 300.000	50.000 – 150.000



Şekil 3. Hareketli (a) ve sabit (b) kalıp yarılarının şematik gösterimi [27]

Basınçlı döküm kalıpları; takım çeliklerinden, hareketli ve sabit kısım olmak üzere iki parçadan imal edilir. Sabit kalıp yarıları, ergimiş metalin basıldığı enjeksiyon sistemi tarafındaki sabit plaka üzerine yerleştirilir. Hareketli kalıp yarıları, kalıp açıldığı zaman bitmiş döküm parçasının uzaklaştırılmasını sağlar ve makine üzerindeki hareketli plaka kısmına yerleştirilmiştir (27). Şekil 3’de sıcak kamaralı kalıp sisteminde hareketli ve sabit kalıp yarıları, üzerlerindeki temel bileşenlerle birlikte şematik olarak gösterilmektedir.

Kalıp boşluğunu oluşturan kalıp parçaları, ergimiş metalle doğrudan temas halindedir. Bundan dolayı

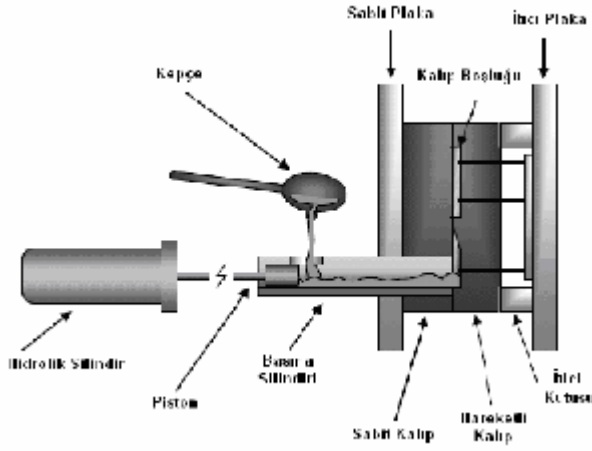
Magnezyum alaşımlarının ergitilmesi sırasındaki en önemli husus ergimiş metalin hava ile temasının kesilmesidir. Herhangi bir koruyucu önlem alınmazsa, ergimiş magnezyum, etrafındaki havada bulunan oksijen ile ekzotermik bir reaksiyona girerek alev alır. Bu reaksiyon kontrol altında tutulamayacak kadar şiddetli olabilir. Bundan dolayı, alüminyum içeren magnezyum alaşımlarının 400°C’nin üzerindeki sıcaklıklardan itibaren, henüz ergime başlamadan SF₆, BF₃ and SO₂ gibi gazlarla korunması gerekli olmaktadır (28). Ancak, bu gazların doğaya ve insan sağlığına vermiş olduğu tahribattan dolayı son yıllarda magnezyum alaşımlarının ba-

sınçlı dökümünde atmosfer kontrollü ergitme fırınlarının kullanımı yaygınlaşmıştır.

Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde genel olarak, soğuk kamaralı ve sıcak kamaralı olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır.

4.1. Soğuk Kamaralı Basınçlı Döküm Yöntemi

Soğuk kamara tipi basınçlı döküm makinelelerinde, ergimiş metal soğuk hazne silindrine döküm ağızı veya döküm deliği vasıtasıyla aktarılır. Hidrolik olarak çalışan pistonun ileriye doğru hareketiyle, döküm deliği kapanır ve kilitlenmiş kalıp içine sıvı metal yüksek basınç altında enjekte edilir (Şekil 4). Soğuk kamaralı makinelerle 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 döküm parçası ile birlikte dışarı itilir ve daha sonra parçadan kesilerek ayrılır (29).

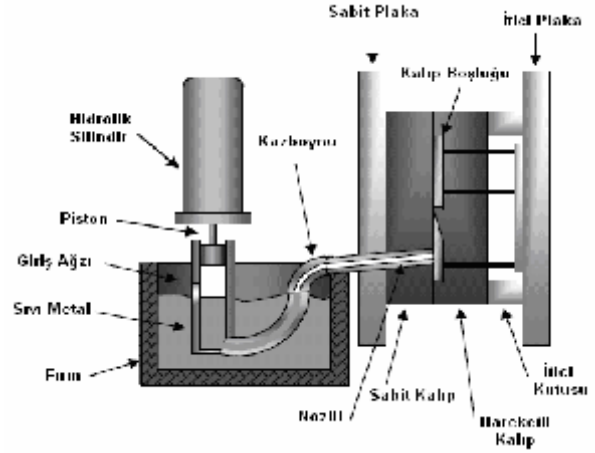


Şekil 4. Soğuk kamaralı basınçlı döküm işleminin şematik gösterimi (29)

Magnezyum alaşımlarını soğuk kamaralı basınçlı döküm makinesinde dökülebilmek için asal gazlarla hapsedilmiş dozajlama fırınları gerekmektedir. Son yıllarda iki hatta üç kamaralı dozajlama fırınları yoğun olarak kullanılmaktadır (30).

4.2. Sıcak Kamaralı Basınçlı Döküm Yöntemi

Sıcak kamaralı makinede (Şekil 5) enjeksiyon mekanizması, makineye 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 ergiyük metalin basınç altında, kaz boynu ve nozuldan (memeden) geçerek kalıbı doldurmasını sağlar. Metalin katılaşmasının ardından, piston aşağı konumdayken, kalıp yarınları açılarak bitmiş döküm parçası dışarı çıkartılır (26).



Şekil 5. Sıcak kamaralı basınçlı döküm işleminin şematik gösterimi (26)

İnce cidarlı parçaların (0,8-1,0 mm) üretilmesinde sıcak kamaralı basınçlı döküm makineleri, soğuk kamaralı basınçlı döküm makinelerine göre daha uygun ve daha ekonomik olmaktadır. Ancak sıcak kamaralı basınçlı döküm makinesinde tüm magnezyum alaşımları dökülememekte ve dökümü gerçekleştirebilen alaşımlar sınırlı kalmaktadır (31).

Magnezyum alaşımlarının, soğuk ve sıcak kamaralı basınçlı dökümüyle ilgili tipik makine ve proses karakteristikleri Çizelge 6'da verilmiştir (18).

Çizelge 6. Soğuk ve sıcak kamaralı basınçlı döküm proseslerinin karakteristikleri (18)

Yöntem	Soğuk Kamaralı	Sıcak Kamaralı
Fırının yeri	Basınçlı döküm makinesinden ayrı	Basınçlı döküm makinesiyle bütünleşik
Kilitleme kuvveti	1 MN – 45 MN	0,2 MN – 8 MN
Parçanın toplam kesit alanı	En fazla 1,0 m ²	En fazla 0,4 m ²
Enjeksiyon sırasındaki basınç	30 – 100 MPa	15 – 40 MPa
Katılaşma sırasındaki basınç	Max. 120 MPa	Max. 25 MPa
Parçanın ağırlığı	50 g – 40 kg	<10 g – 7 kg
Parçanın cidar kalınlığı	1,5 – 30 mm	0,8 – 10 mm
Alaşımlar	Tüm Basınçlı Döküm Mg alaşımları	AZ91, AM50, AM60

5. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ BASINÇLI DÖKÜMÜ'NDE SON GELİŞMELER

Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde işleme parametreleri; parça kalitesine, mekanik özelliklere, gözenekliliğe, hatalı parça üretimine doğrudan etki etmektedir. İşlem parametreleri olarak incelenen unsurlar; katılaşma sırasında metale uygulanan basınç, meme girişi ve piston hızı, kalıp sıcaklığı ve sıvı metalin ergitme veya döküm sıcaklığıdır. Bu parametrelerin yoğunluğa, mekanik özelliklere, gözenekliliğe, segregasyon

oluşumuna ve çeşitli döküm hatalarına etkileri farklı deneysel ve teorik çalışmalar ile araştırılmıştır. Yapılan ilk çalışmalar basınçlı döküm proses parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi üzerine olmuştur. Gutman ve arkadaşları (32); AZ91D basınçlı döküm magnezyum alaşımının sürünme özelliklerine, işlem parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Özellikle 150–200°C sıcaklıklardaki çalışma koşullarında, sürünme direncinin yüksek olması oldukça önem kazanmaktadır (33). Çalışmada, yolluk giriş hızının, kalıp ve sıvı metal sıcaklıklarının; sürünme direnci ve diğer mekanik özellikler üzerinde çok önemli etkilere sahip olduğu gözlenmiştir. Basınçlı döküm parametrelerinin sürünme direncine etkisi, işlem sırasında oluşan mikro ve makro gözeneklerin büyüklüğü ile ilgili olmaktadır. Gözenek miktarının artmasıyla, sürünme direnci özelliği olumsuz etkilenmektedir (Çizelge 7). Sonuç olarak, döküm sıcaklığının artması

ile gözenek miktarının arttığı, buna bağlı olarak da sürünme dayanımı ve yoğunluk değerlerinin azaldığı ortaya koyulmuştur.

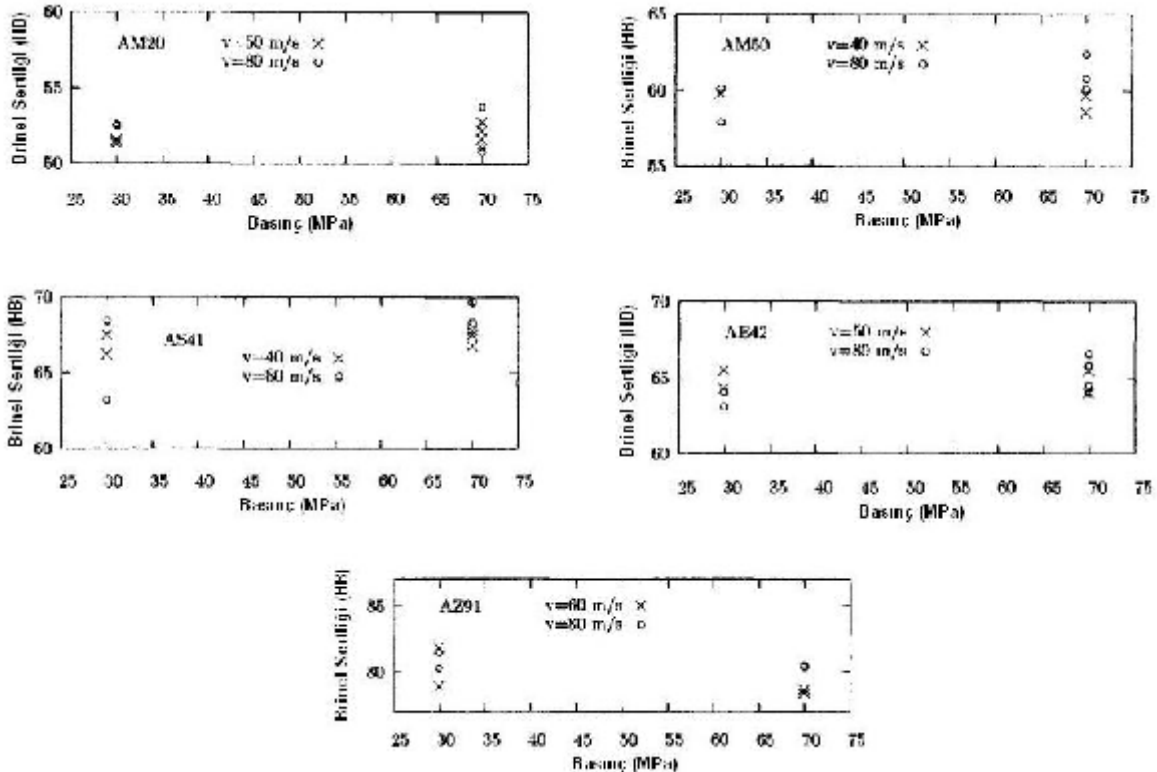
El-Mahallawy ve arkadaşları (34); AM50HP, AS41, AE42 ve AZ91HP alaşımlarına uygulanan basınç ve yolluk giriş hızını birlikte değerlendirerek deneysel çalışma yapmıştır. İşlem parametrelerinin; kalıp sıcaklığına, yoğunluğa, yüzey sertliğine, çekme dayanımına, akma dayanımına ve uzamaya etkileri değerlendirilerek aşağıdaki yol gösterici sonuçları elde etmişlerdir:

1. Parçanın ortalama yoğunluğunun, ütleme basıncının yükselmesi ile arttığı gözlenmiştir. Bu durum parça içindeki gözenek oluşumunun basınç artışıyla ters orantılı olarak azaldığını kanıtlamaktadır.

2. Yüzey sertliği ile ilgili yapılan deneyler sonucunda yüzey sertliğinin, katılaştırma basıncından

Çizelge 7. AZ91D alaşımının basınçlı döküm parametreleri ile sürünme özelliklerinin değişimi [32]

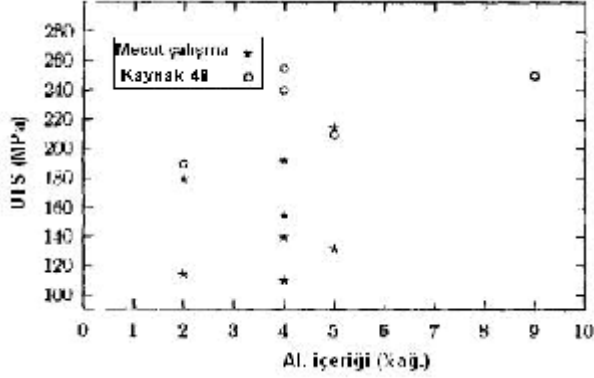
Numune	Döküm Sıcaklığı	Kalıp Sıcaklığı	Enjeksiyon Hızı	Yoğunluk	Spesifik Sürünme Gerinimi
	°C	°C	m/s	kg/m ³	ϵ (20h), %
1	740	235	33	1753	1,32
2	660	235	33	1761	1,40
3	630	235	33	1802	0,75
4	650	230	33	1775	0,72
5	650	200	33	1787	1,08
6	650	180	33	1774	0,93
7	650	230	22	1766	0,86
8	650	230	11	1754	1,04



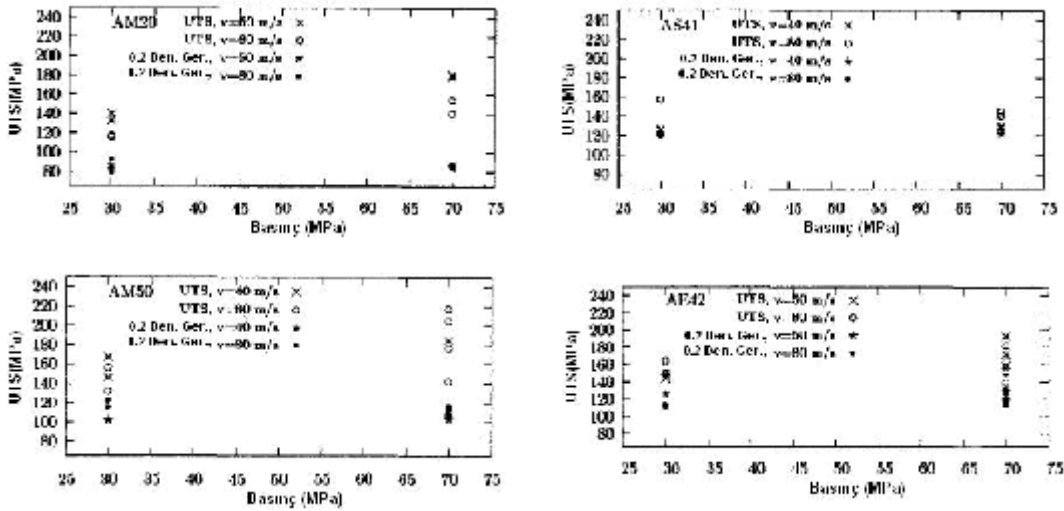
Şekil 6. Katılaştırma basıncı ve meme giriş hızının yüzey sertliği üzerindeki etkisi [34]

veya meme giriş hızındaki artış veya azalışlardan etkilenmediği anlaşılmıştır (Şekil 6).

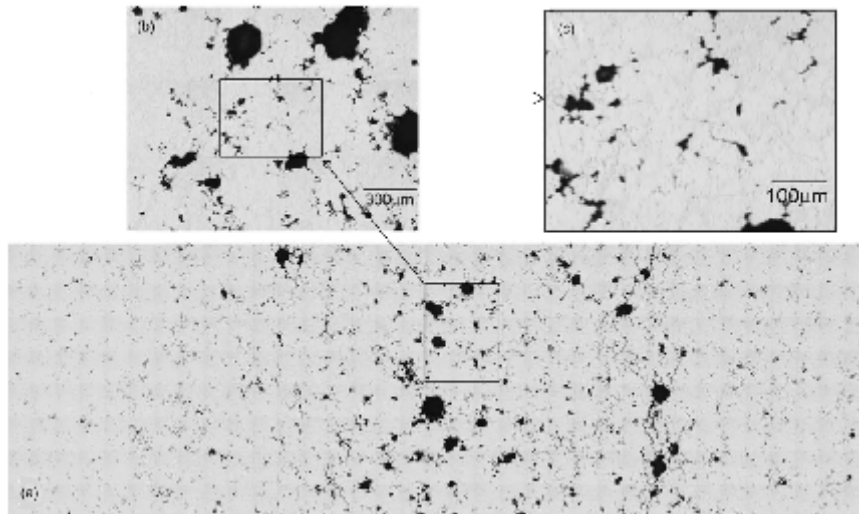
3. En büyük çekme dayanımının; basınç, yolluk giriş hızı ve alaşımın içeriğindeki alüminyum miktarındaki artış ile doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir (Şekil 7 ve Şekil 8).



Şekil 7. Alüminyum içeriğinin en büyük çekme dayanımı üzerindeki etkisi (30)



Şekil 8. Basınç ve meme giriş hızının en büyük çekme dayanımı üzerindeki etkisi [30]



Şekil 9. Basınçlı döküm AM50 alaşımında meydana gelen gözenekler [35]

Lee ve arkadaşları (35), AM50 basınçlı döküm magnezyum alaşımında, gözenek oluşumunu etkileyen meme giriş hızı, ütleme basıncı ve ergiyük sıcaklığı gibi işlem faktörlerini incelemişlerdir (Şekil 9). Toplam gözenek oluşumu, gaz gözenegi ve çekme gözenegi olarak iki şekilde oluşmaktadır (36). Oluşan bu mikro ve makro boşluklar, parçanın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Parça kalitesini ve dayanımını arttırmak için en az gözenekli yapıya sahip ürünler hedef olmalıdır (37).

Çalışma sonucunda, ütleme basıncı yapılan ve düşük meme giriş hızı ve ergiyük sıcaklığına sahip örneklerin, ütleme basıncı yapılmayan ve yüksek meme giriş hızı ve ergiyük sıcaklığına sahip örneklerle oranla oldukça az toplam gözenek içerdiği açıkça belirtilmiştir. Sonuç olarak bahsedilen ilk özelliklere sahip örneklerin daha iyi mekanik özelliklere sahip olacağı savunulmuştur. Pitsaris ve arkadaşları (38), AZ91D, AM60B ve AS21 alaşımının soğuk kamaralı basınçlı döküm prosesinde mikroyapı ve mekanik özellikleri etkileyen en önemli döküm parametreleri

olan giriş hızı (V_G), ütleme basıncı (P_U), döküm sıcaklığı (T_D) ve kalıp sıcaklığını (T_K) araştırmışlardır. Çalışmada her bir değişken için düşük-orta-yüksek olmak üzere üç farklı seviye kullanılmışlardır. Deneylede kullanılan döküm parametrelerin mekanik özelliklere etkisinin değişimi Çizelge 8’de verilmiştir.

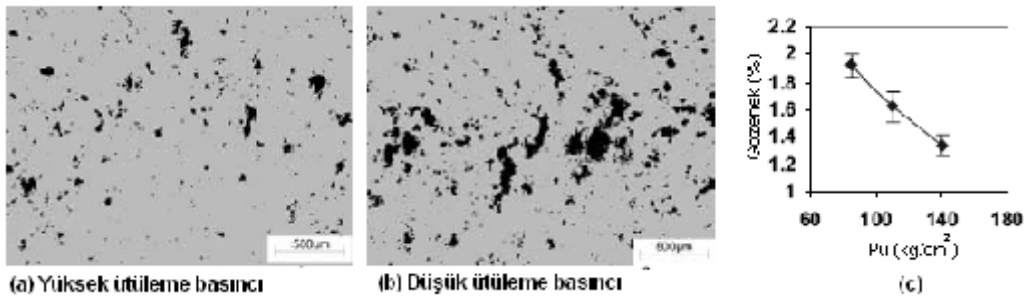
Lun Sin ve Dube (39), AZ91 alaşımlarının akıcılığına işlem parametrelerinin etkisi üzerine çalışmışlar, döküm ve kalıp sıcaklığı arttıkça akıcılığın arttığı gözlemlenmiştir. 750 °C döküm sıcaklığı ve 350 °C kalıp sıcaklığında akıcılığın en yüksek seviyede olduğu tespit edilmiştir. Ho ve arkadaşları (40), ince Cu partikülleriyle takviye edilmiş AZ91 Mg alaşımının

Çizelge 8. Döküm parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi [38]

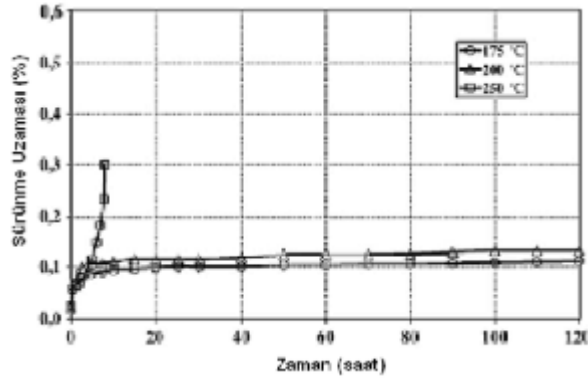
		AZ91D			AM60B			AS21		
		Akma (MPa)	Kopma (MPa)	Uzama (%)	Akma (MPa)	Kopma (MPa)	Uzama (%)	Akma (MPa)	Kopma (MPa)	Uzama (%)
Giriş hızı (V_G)	Düşük	143,03	195,05	2,21	121,51	197,09	5,60	116,32	170,78	4,07
	Orta	145,74	212,34	3,32	125,29	208,52	7,06	118,23	209,80	8,55
	Yüksek	155,22	229,82	4,96	128,68	228,09	8,94	124,29	222,74	11,74
Ütleme basıncı (P_U)	Düşük	144,92	211,14	3,67	121,55	196,29	5,63	120,32	199,86	7,39
	Orta	145,74	212,34	3,32	125,29	208,52	7,06	118,23	209,80	8,55
	Yüksek	150,39	220,71	4,32	130,33	215,02	7,30	123,86	231,58	13,15
Döküm sıcaklığı (T_D)	Düşük	142,01	195,37	2,39	119,69	212,64	7,01	114,34	190,94	6,43
	Orta	145,74	212,34	3,31	125,29	208,52	7,06	118,23	209,80	8,55
	Yüksek	158,85	240,74	5,58	131,56	251,12	13,17	122,74	221,11	10,14
Kalıp sıcaklığı (T_K)	Düşük	159,43	218,63	3,81	129,27	194,82	5,16	124,69	199,64	6,92
	Orta	145,74	212,34	3,31	125,29	208,52	7,06	118,23	209,80	8,55
	Yüksek	138,63	218,32	4,33	114,86	204,97	6,48	109,83	190,42	6,99

Sonuçlar incelendiğinde giriş hızının (V_G) artmasıyla her üç alaşımdaki gerilme ve uzama değerlerinin arttığı gözlenmektedir. Bu durum yüksek giriş hızına sahip dökümlerde daha ince birincil α -Mg taneciklerinin yapı içinde yer alması, daha küçük ve daha genişçe yayılmış gözenekliliğe neden olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca yüksek ütleme basıncı (P_U), hem döküm gözenegini, hem de büyük gözenek boşluklarının sayısını azaltmaktadır (Şekil 10). Özellikle AS21 alaşımı için yüksek ütleme basıncında uzama miktarının arttığı ortaya çıkmıştır. Döküm sıcaklığı parametresinin incelenen parametreler içerisinde en güçlü etkiye sahip olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda yalnızca gözenek miktarı azalmamakta, aynı zamanda yapının tamamı ve mikro yapısal ölçekte mekanik özelliklerin belirgin şekilde iyileştiği gözlenmektedir. Son olarak kalıp sıcaklığı (T_K) parametresinin gözenek ve kopma noktasına önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

mekanik özellikleri üzerine çalışmışlardır. Cu takviyeli AZ91 alaşımının sertliği, akma dayanımı, çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin SiC takviyeli AZ91 alaşımından çok daha iyi olduğunu, ancak sünekliliğinin daha düşük olduğunu rapor etmişlerdir. Rzychon ve arkadaşları (41); sıcak kamaralı döküm yöntemi ile hazırlanan AE44 alaşımlarının mikro yapısı, mikro yapısal kararlılığı ve 175 °C, 200 °C ve 250 °C’deki sürünme özelliklerini incelemiştir. Sonuçlar döküm AE44 alaşımının α -Mg, $Al_{11}RE_3$, Al_2RE ve $Al_{2.12}RE_{0.88}$ fazlarını içerdiğini göstermiştir. 175 °C’de yarı kararlı $Al_{2.12}RE_{0.88}$ fazı, denge Al_2RE fazına geçişe uğrarken, $Al_{11}RE_3$ fazı termal olarak kararlı durumda kalmıştır. İncelenen alaşımın 175 °C’de ve 200 °C’de iyi sürünme özellikleri gösterdiği ortaya çıkarılmıştır (Şekil 11). AE44 magnezyum alaşımının yüksek sürünme direncinin, 175 °C’de termal olarak kararlı olan $Al_{11}RE_3$ fazındaki interdendritik alanların varlığına ve α -Mg katı çözümlenmesindeki en fazla çözülebilen alüminyum içeriğine dayandığına atfedilmiştir



Şekil 10. Yüksek (a) ve düşük (b) ütleme basıncında ortaya çıkan mikro yapı ve ütleme basıncına göre gözenek miktarındaki değişim(c).



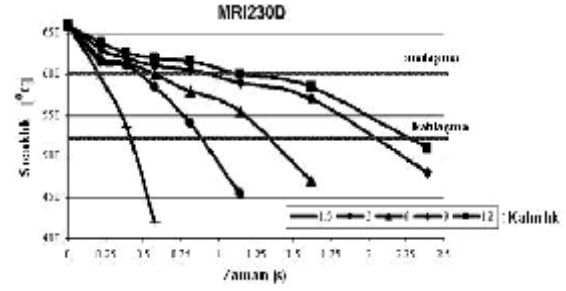
Şekil 11. Basınçlı döküm AE44 alaşımının sürünme eğrileri (41)

Jen ve arkadaşları (42); temassız lazer ultrasonik tekniği kullanarak dendritik, rozet ve globular şekildeki AZ91D magnezyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklardaki ultrasonik hız ve sönümlenme ölçümlerini yapmışlardır. Globular mikro yapıdaki ultrasonik hız ve dendritik mikro yapıdaki ultrasonik sönümlenmenin bu üç mikro yapı içerisinde en yüksek değerlere sahip olduklarını bulmuşlardır. Diğer taraftan mekanik özellikleri iyileştirme için yapılan çalışmalara paralel olarak yeni alaşımlar geliştirme konusunda etkili araştırmalar yapılmıştır. Aghion ve arkadaşları (43); yüksek sıcaklık uygulamalarındaki sınırlılıkları aşmak için geleneksel basınçlı döküm alaşımlarından olan özellikleri iyileştirilmiş MRI 230D alaşımlarını incelemişlerdir. AZ91D alaşımı ile MRI 230D alaşımının kalıplama karakteristikleri, master uzunluğu 200 mm ve genişliği 12 mm olan beş ayrı kalınlıktaki (1,5-3-6-9-12 mm) dikdörtgen kesitli çekme numuneleri üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen numunelerdeki ölçülen fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8. MRI 230D ve AZ91D alaşımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri (43)

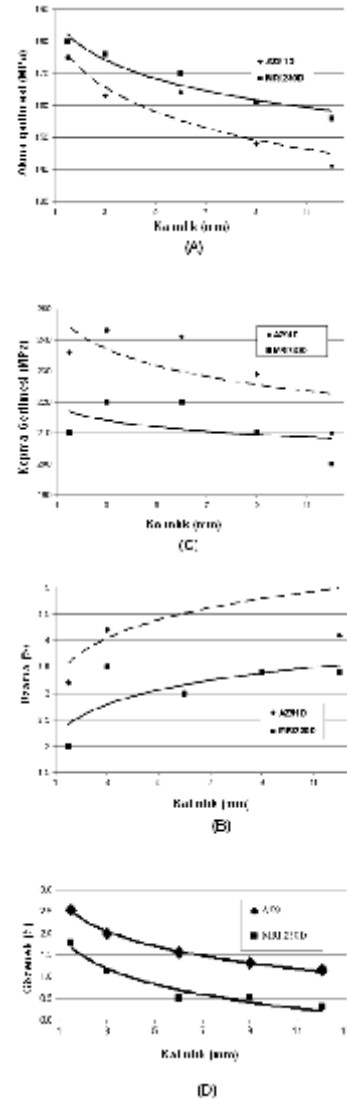
Özellik	MRI 230D	AZ91D
Yoğunluk (20 °C'de gr/cm ³)	1,8	1,81
Isıl Genleşme Katsayısı (µm/mK)	25,1	26,0
Isıl İletkenlik (20 °C'de W/Km)	77	51
Katılma Denge Aralığı (°C)	522-603	434-598
Kopma Gerilmesi (20 °C'de MPa)	235	260
Kopma Gerilmesi (150 °C'de MPa)	205	160
Akma Gerilmesi (20 °C'de MPa)	180	160
Akma Gerilmesi (150 °C'de MPa)	150	105
Uzama (20 °C'de %)	5	6
Uzama (150 °C'de %)	110	100

Çalışma sonuçları, MRI 230D basınçlı döküm numunelerinin, kalınlıklarındaki farklılıkların katılma hızı karakteristiklerini de etkilediğini göstermiştir (Şekil 12).



Şekil 12. MRI230D alaşımında farklı kalınlıklardaki soğuma eğrisi (43)

Kalınlıktan numunelerde oluşan yavaşlayan soğuma hızı % uzamayı artırırken, tanecik boyutunda artmaya ve akma-kopma dayanımlarında azalmaya yol açmıştır. Gözenek açısından, ince numunelerin gaz gözenekliğine eğiliminin yüksek olduğu, kalın numunelerde ise çekme gözenekliğine eğiliminin yüksek olduğu değerlendirilmiştir (Şekil 13).



Şekil 12. MRI 230D ve AZ91D alaşımlarının kalınlıkla değişen (a) akma dayanımı, (b) kopma dayanımı, (c) % uzama ve (d) gözenek değişimi (43)

Fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi ve yeni alaşımlar geliştirme çalışmalarının yanında, mevcut magnezyum basınçlı döküm prosesinin geliştirilmesi ve bunun ürün mekanik özelliklerine etkisi de araştırılmıştır. Du ve Zhang(44); yarı katı basınçlı döküm yöntemi ile hazırlanan AZ91D magnezyum alaşımının mikro yapısal ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çekme testine tabi tutulan numunelerde kopma öncesindeki en yüksek kopma gerilimi ve uzamayı elde etmeyi başarmışlardır. Elde edilen numuneler ile farklı yöntemler ile elde edilen önceki çalışmalar arasındaki mekanik özelliklerin kıyaslanması Çizelge 8’de verilmiştir.

Çizelge 8. Farklı yöntemlerle elde edilmiş AZ91D alaşımının mekanik özellikleri (44)

Yöntem	Kopma Gerilmesi (MPa)	Akma Gerilmesi (Mpa)	Uzama (%)
Basınçlı Döküm	212–230	140–159	3,0–5,6
Tikso döküm	223	134	3,6
Tikso kalıplama	150-241	-	3–5
Reo-konteyner yöntemi	217	156	2,3
Yarı-katı döküm	230–248	140–145	5,1–6,5

Proses parametrelerini inceleyen önceki araştırmacılar, magnezyum basınçlı dökümünde etkili olan basınç, sıcaklık ve hız parametrelerini ortaya koymuşlardır. Buradan hareketle basınçlı dökümde kaliteyi etkileyen basınç faktörü konusunda Tong ve arkadaşları (45); ince cidarlara sahip bir cep telefonu iskeleti üreten basınçlı döküm kalıbına, basınç sensörleri yerleştirerek, dolmuş ve katılaşma esnasında kalıp içi basınç değişimini ölçmüştür. Uygun olan kalıp basıncını sağlayarak, her baskıda en iyi ve aynı kalitede ürünlerin elde edilmesinin yöntemini deneysel olarak ortaya koymuştur. Koren ve arkadaşları (46) ise, AZ91 ve AM50 alaşımlarının mekanik özelliklerini incelenmesinde doğrudan döküm ve külçe döküm olmak üzere iki farklı yarı-katı döküm yöntemi kullanmışlardır. Çalışmada yapılan viskozite testlerinde, yarı-katı sıcaklığı, AZ91 alaşımları için 575-595 °C ve AM50 alaşımları için 614-620 °C bulunmuştur. AZ91 alaşımları 585 °C döküm sıcaklığında en yüksek yoğunluk ve en iyi mekanik özellikler gösterirken, AM50 alaşımları yarı-katı sıcaklıkta nispeten daha zayıf özellikler göstermiştir. İki farklı döküm yönteminin yoğunluğa ve standart mekanik özelliklere önemli bir etkisinin olmadığı savunulmuştur.

6. SONUÇLAR

Günümüz araçlarında artan düşük emisyon, konfor donanımlarından kaynaklanan ağırlığın azaltılması ve daha iyi yakıt ekonomisi talepleri magnezyumun kullanımının yaygınlaşmasının arkasında yatan itici güçlerdir. Yakıt ekonomisinin sağlanması, CO₂ emisyonlarının ve araç ağırlığının azaltılması ile çevreye olan duyarlılık, magnezyum alaşımlarının odak haline gelmesinin başlıca nedenlerinden biridir. Otomotiv endüstrisinde magnezyum alaşımları kullanarak yakıt tüketimini ve CO₂ emisyonlarını düşürmek etkili bir seçenektir. Magnezyum alaşımlarındaki ve işleme yöntemlerindeki gelişmeler, bu alaşımın daha hafif, çevre dostu,

güvenli ve ucuz araçlar üretiminin yapılmasını mümkün kılacaktır. Magnezyum alaşımlarının potansiyel kullanımındaki artış, alüminyum ve çelik için yapılan şekil verme proseslerinin magnezyuma da uygulanabilirliğine önemli derecede bağlıdır. Otomotiv endüstrisinde magnezyum alaşımları ile ilgili genel uygulamalar döküm ürünler olmuştur. Dövme alaşımları, magnezyumun kristal yapısının sıkı düzen heksagonal olması ve uygun alaşımlara uygulanabilmesi nedeniyle sınırlı bir şekilde kullanılabilir. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı niteliğe ulaştırılan magnezyum alaşımları motor bloklarında ve güç aktarma organlarında magnezyumun kullanımını artıracaktır. Son yıllarda geliştirilen Mg-Al-Sr alaşımları mükemmel mekanik özellikler, iyi korozyon direnci ve olağanüstü dökülebilirlik yeteneğine sahiptir. Sr katkılı magnezyum alaşımları diğer alaşımlardan daha iyi sürünme direnci göstermektedir. 2007 yılında BMW için geliştirilen sınıfının en hafif 3,0 litrelik benzinli altı silindireli motoru, Mg-Al-Sr alaşımlarının yüksek sıcaklık uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilmesinin en iyi örneğidir (47). Bu sonuçla motor ağırlığında %25 azalma sağlanırken, yakıt tüketiminde ve performansta iyileşmelerin olduğu görülmüştür. Magnezyum alaşımları mekanik montaj ve kaynak ile birleştirilebilir. Alternatif malzemeler yerine magnezyum alaşımlarının kullanılmasıyla, otomotiv parçalarında %22-%70 ağırlık kazancı sağlanabilmektedir. Magnezyum alaşımlarından üretilmiş bu parçalar iyi direnç/ağırlık oranına, sünekliğe ve enerji sönümlenme özelliklerine sahiptir.

Magnezyum alaşımları özgül dayanım ve özgül rijitlik değerleri açısından alternatif olduğu diğer malzemelerle mukayese edildiğinde tercih edilebilir özelliklere sahiptir. Basınçlı döküm, sürekli kalıp döküm, kum döküm, ekstrüzyon ve dövme gibi çeşitli üretim yöntemleriyle karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi kolaylaşmıştır. Bu özelliklerinden dolayı magnezyum alaşımlarının otomotiv alanında hafif malzeme olarak kullanılma potansiyeli yükselmiştir. Bu amaçla geliştirilen malzemeler içinde ön plana çıkan magnezyum ve alaşımlarının, gelecekte otomotiv endüstrisinde kullanımı daha da kaçınılmaz hale gelecektir. 2005 Berlin Dünya Magnezyum Konferansı verilerine göre 2010 yılında orta sınıf sedan araçlarda ortalama 24 kg magnezyum kullanılacağı öngörülmüştür. Bu sebeple parça üretiminde, kısa dönemde halen elde edilebilen magnezyum alaşımlarını ve döküm yöntemlerini geliştirmek, orta vadede yarı-katı döküm ve sıkıştırma döküm gibi özel döküm yöntemlerini geliştirmek, uzun vadede ise yeni alaşımlar ve yeni yöntemlerle dövme alaşım teknolojilerini geliştirmek hedeflenmektedir. Bu sayede kısa dönemde motor, şanzıman ve iç bileşenler; daha sonraları da sac metal ve ekstrüzyon bileşenlerinin hafifletilmesi ve iyileştirilmesi yaygınlaşacaktır.

Magnezyum alaşımları kullanılmasının dezavantajları ise ergimiş durumda yüksek reaktif özelliğinin olması, galvanik korozyon direnci, yangın tehlikesinin olması ve düşük yorulma ve sürünme özelliğidir. Halen magnezyum işleme ve şekillendirme, alaşım geliştirme, mekanik özellikler ile yüzey ve korozyon özelliklerinin

iyileştirilmesi konularında önemli araştırmaların yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Geliştirilecek üretim ve uygulama yöntemlerinin, magnezyumun otomotivde kullanılan diğer alternatif malzemelere göre ekonomik olması için maliyet esaslı olması önceliklidir.

Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü ile ilgili yapılan önceki çalışmalar derlendiğinde aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir;

- I. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde yüksek ergime sıcaklıkları, ergimiş metalin kalıp içerisinde fazla türbülanslı akmasına sebebiyet verdiği için, gözenek oluşumuna birincil etken olarak neden olmaktadır.
- II. Dökümü esnasında uygulanan ütüleme basıncı gözenek oluşumunu azaltarak, üretilen ürünlerin yüzey ve dayanım özelliklerini iyileştirmektedir.
- III. Yüksek piston hızlarının neden olduğu yüksek meme giriş hızları, ergimiş metalin kalıp çukuru içerisinde türbülanslı akmasına sebep olduğundan gözenekliliğe yol açtığı ve dolayısıyla ürün mekanik özelliklerini azalttığı görülmektedir.
- IV. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde kalıp sıcaklığı önemli bir faktör olmakla birlikte mekanik özellikler ve gözenek oluşumu üzerinde çok büyük bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

Bu çalışmada magnezyum ve alaşımlarının basınçlı dökümü hakkında genel bir bilgi ve son yıllarda yapılan araştırmalar derlenmiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda temel odak noktaları aşağıdaki gibi özetlenebilir (49-53):

- Alaşım geliştirme
- Hızlı katılma
- Üretim teknolojisi
- Kompozitler
- Korozyon ve önlenmesi
- Geri dönüşüm

7. KAYNAKLAR

1. Kainer, K.U., Buch, F.V., 2003, The Current State of Technology and Potential for further Development of Magnesium Applications, Magnesium-Alloys and Technologies Conference, Germany, pp.1-22.
2. Külekçi, M.K., 2007, Magnesium and Its Alloys Applications in Automotive Industry, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 39/9-10, pp. 851-865
3. Easton, M., Beer, A., Barnett, M., Davies, C., Dunlop, G., Durand, Y., Blacket, S., Hilditch, T. and Beggs, P., 2008, Magnesium Alloy Applications in Automotive Structures, Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Vol. 60, pp. 57-62
4. Froes, F.H., Eliezer, D., Aghion, E., 1998, The Science, Technology and Applications of Magnesium, Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Vol.5, pp. 30-34.
5. Alan, A.L., 2002, Magnesium: Current and Potential Automotive Applications, Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Vol. 54, pp. 42-48.
6. Friedrich, et al., 2000, The Second Age of Magnesium, Dead Sea Magnesium Conference, pp. 9.
7. Aghion, E., Bronfin, B., Eliezer, D., 2001, The Role of The Magnesium Industry in Protecting Environment, Journal of Material Processing Technology, Vol.117, pp.381-385.
8. Sweeder, T., 2000, Demand for Lightweight Technology, Magnesium Expo, Michigan-USA
9. Atalay, O., 2006, Magnezyum ve Alaşımlarının Konstrüksiyon Malzemesi Olarak Otomotivde Kullanımı, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
10. Kalmbach, R., 2005, Magnesium Opportunities in The Automotive Industry, The 62nd Annual World Magnesium Conference, Berlin, Germany, May 22-24.
11. Koç, E., 2008, "Alaşım Elementlerinin Magnezyum Döküm Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi", Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
12. Das, S., 2003, Magnesium for Automotive Applications: Primary Production Cost Assesment, Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Vol. 55, pp. 22-26.
13. Blawert, C., Hort, N., Kainer, K.U., 2004, Automotive Applications of Magnesium and Its Alloys, Trans. Indian Inst. Met. Vol. 57: 397-408
14. Friedrich, H., Schumann, S., 2001, Research for a New Age of Magnesium in The Automotive Industry, Journal of Materials Processing Technology, 117: 276-281.
15. Mordike, B.L., Ebert, T., 2001, Magnesium Properties-Applications-Potential, Materials Science&Engineering A, 302: 37-45.
16. Edgar, R.L., 2000, Global Overview on Demand and Applications for Magnesium Alloys, Magnesium Alloys and their Applications"Conference, Germany, pp.3-8
17. ASM Handbook Volume 2, 1996, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, ASM International Handbook Committee, United States of America.
18. ASM Specialty Handbook (1999), Magnesium and Magnesium Alloys, ASM International Handbook Committee, United States of America.
19. Watarai, H., 2006, Trend of Research and Development for Magnesium Alloys - Reducing the Weight of Structural Materials in Motor Vehicles, Science and Technology Trends pp. 84-97.
20. Vanlı, A.S., 2006, Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Dökümünde İşlem Faktörlerinin Araştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
21. Aune, T. K., Westengen, H., Albright, D., 2000, High Performance Die Castings - Utilizing Magnesium's Properties, Magnesium Alloys and their Applications Conference, Germany, pp. 540-547.

22. Davies, G., 2003, *Materials for Consideration and Use in Automotive Body Structures*, Elsevier, G. London, pp 91, 158, 159
23. Plano, S., 2002, *Sustainable Production: The Role of Nanotechnologies*, NanaoTechnology'02 Conference, Denmark.
24. Scharf, C., Blawert, C., Ditze, A., 2004, *Application of Remelted Post Consumer Scrap for Structural Magnesium Parts*, Proceedings of the 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications, Germany, pp.980-987.
25. Friedrich, H.E. ve Mordike, B.L., 2006, *Magnesium Technology (Metallurgy, Design Data, Applications)*, Springer, Berlin.
26. Brungs, D., 1997, *Light Weight Design with Light Metal Castings*, Materials & Design, Vol:18, pp.285-291.
27. ASM Handbook Volume 15 ,1998, *Casting*, ASM International Handbook Committee, United States of America.
28. Schubert, W., Gjestland, H., 2000, *Use of SO₂ as Protection Gas in Magnesium Die Casting*, Magnesium Alloys and Their Applications Conference, Germany, pp. 761-766.
29. Vinarcik, E.J., 2003, *High Integrity Die Casting Processes*, John Wiley & Sons, New York.
30. Fink, R., 2003, *Die-Casting Magnesium*, Magnesium-Alloys and Technologies Conference, Germany, pp.23-44.
31. Siedersleben, M., 2003, *Vacuum Die-Casting of Magnesium Parts with High Pressure*, Magnesium-Alloys and Technologies Conference, Germany, pp. 45-55.
32. 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 and Engineering, 234-236: 880-883.
33. Jain, C.C., 2007, *Creep and Corrosion Properties of Extruded Magnesium Alloy Containing Rare Earth*, Material Transactions, Vol:48, pp.265-272.
34. 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.
35. 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.
36. Weiler, J.P., Wood, J.T, Klassen, R.J, Maire, E., Berkmortel, R., Wang, G., 2005, *Relationship Between Internal Porosity and Fracture Strength of Die-cast Magnesium AM60B Alloy*, Materials Science and Engineering, A 395:315-322.
37. Danışman, E., 2003, "Basınçlı Döküm Yöntemi ile Magnezyum Alaşımından Otomobil Parçaları Üretimi", Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
38. Pitsaris, C., Abbott, T., Davies, C.H.J., Savage, G., 2003, *Influence of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Die Castings*, Magnesium-Alloys and Technologies Conference, Germany, pp.694-699.
39. Sin, S.L., Dube, D., 2004, *Influence of Process Parameters on Fluidity of Investment Cast AZ91D Magnesium Alloy*, Materials Science and Engineering, 386: 34-42
40. Ho, K.F., Gupta, M., Srivatsan, T.S., 2004, *The Mechanical Behavior of Magnesium Alloy AZ91 Reinforced With Fine Copper Particulates*, Materials Science and Engineering, 369: 302-308.
41. Rzychon, T., Kielbus, A., Cwajna, J., Mizera, J., 2009, *Microstructural Stability and Creep Properties of Die Casting Mg-4Al-4RE Magnesium Alloy*, Materials Characterization, 60:1107-1113.
42. Jen, C.K., Moisan, J.K., Zheng, C.Q., Loong, C.A., Kruger, S.E., Sheata, M.T., Essadiqi, E., 2004, *In-line Ultrasonic Monitoring of Semi-solid Magnesium Die Casting Process*, Ultrasonics, 41:777-784.
43. Aghion, E., Moscovitch, N., Arnon, A., 2009, *Mechanical Properties of Die-cast Magnesium Alloy MRI 230D*, Journal of Materials Engineering and Performance, 18:912-916.
44. Du, X., Zhang, E., 2007, *Microstructure and Mechanical Behaviour of Semi-solid Die-casting AZ91D Magnesium Alloy*, Materials Letters, 61:2333-2337.
45. Tong, K.K.S., Hu, B.H., Niu, X.P., Pinwill, I., 2002, *Cavity Pressure Measurements and Process Monitoring for Magnesium Die Casting of a Thin-wall Hand-phone Component to Improve Quality*, Journal of Materials Processing Technology, 127:238-241
46. Koren, Z., Rosenson, H., Gutman, E.M., Unigovski, Y.B., Eliezer, A., 2002, *Development of Semisolid Casting for AZ91 and AM50, Magnesium Alloys*, Journal of Light Metals, 2:81-87
47. Beals, S.R., Tissington, C., Zhang, X., Kainer, K., Petrillo, J., Verbrugge, M., Pekguleryuz, M., 2008, *Magnesium Global Development: Outcomes From the TMS 2007 Annual Meeting*, Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Vol. 59, pp. 39-42.
48. Aune, T., Westengen, H., 1992, *Mechanical Properties of Pressure Die Cast Mg-Alloys*, Magnesium Alloys and Their Applications, DGM Informations, Germany, pp. 221-228.
49. Westengen, H., Gjestland, H., 2006, *Advancements in High Pressure Die Casting of Magnesium*, Proceedings of the 7th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications, Germany, pp. 175-189.
50. Kainer, K., Dieringa, H., Bohlen, J., Hort, N., Letzig, D., 2007, *Advances in Manufacturing Processes for Magnesium Alloys*, Magnesium Technology 2007, Florida, pp. 3-8.
51. Cole, G., 2007, *Summary of "Magnesium Vision 2020: A North American Automotive Strategic Vision for Magnesium"*, Magnesium Technology 2007, Florida, pp. 35-40.
52. Gibson, M., Easton, M., Tyagi, V., Murray, M., Dunlop, G., 2008, *Further Improvements in HPDC Mg Alloys for Powertrain Applications*, Magnesium Technology 2008, USA, pp. 227-232.
53. Patzer, G., 2010, *The Magnesium Industry Today: A Global Perspective*, Magnesium Technology 2010, USA, pp. 85-90.