

## **MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ŞEKİLLENDİRİLMESİNDEKİ SON GELİŞMELER**

**İlyas KACAR<sup>1</sup>, Fahrettin ÖZTÜRK<sup>2</sup>**

<sup>12</sup>Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü  
51100 NİĞDE

ikacar@gmail.com, fahrettin@nigde.edu.tr

### **Özet**

Son yıllarda magnezyum alaşımlarının havacılık, uzay ve otomobil endüstrisinde temel malzeme olarak kullanımında önemli artışlar görülmektedir. Temel sebep ise bu alaşımların diğer metal malzemelere göre oldukça hafif olmalarıdır. Birinci ve İkinci Dünya Savaşı yıllarında magnezyum alaşımlarının kullanımı artmaya başlamış ancak magnezyumun büyük ölçekli üretimleri gerçekleştirilmediği için çok fazla ilerleme olmamıştır. Günümüzde yeni talepler bunu değiştirmeye başlamıştır. Birincil üreticilerin sayısı artmakta ve gelecekte talep arttığında, magnezyumun ekonomik olarak tercih edilebilir olabileceği düşünülmektedir. Magnezyum alaşımlarının kullanımındaki en önemli problem oda sıcaklığındaki şekillendirilebilme kabiliyetinin oldukça düşük ve maliyetinin yüksek olmasıdır. Bu çalışmada son yıllarda magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesi üzerine yapılan araştırmalar ve ortaya çıkan gelişmeler özetlenmiştir.

*Anahtar Terimler: Magnezyum, magnezyum alaşımları, şekillendirilebilme*

### **Abstract**

In recent years, there has been an increase in magnesium alloys usage in aerospace, space and automotive industry as base materials. The main reason is that these alloys are quite lighter than other metals. During World War I and II, there was an increase in magnesium alloys usage, but it did not seem much more progress due to limited production of magnesium. Today, new demand has changed previous trend. Number of magnesium producer has been increased and it is expected that these alloys can be produced more economically in the future if demands for these alloys are increased. The main problems for these alloys are their low formability at room temperature and their high cost. In this study, recent research and developments on formability of magnesium alloys are summarized.

*Key Words: Magnesium, magnesium alloys, formability,*

### **1. GİRİŞ**

Magnezyum, temel konstrüksiyon alaşımı olarak kullanılan bütün metallerin en hafifidir. Otomobil üretiminde daha yoğun olan çelik, dökme demir ve bakır esaslı alaşımlar ve hatta magnezyum esaslı alüminyum alaşımlarının yerini almasına sebep olan da bu özellikleridir. Avrupa Birliğine uyum çerçevesinde yasal sınırlamaların getirilmesinin bir sonucu olarak, araç parçalarının ağırlığını azaltma gereksinimi magnezyuma yeni bir ilgi oluşmasına sebep olmuştur. Magnezyum esaslı alaşımların daha geniş kullanımı paralel uygulamaları da gerektirmektedir. Bu uygulamalar; alaşım geliştirme, süreç geliştirme/iyileştirme ve tasarım faktörleri olarak

sınıflandırılabilir. Bu çalışmada, bunlara kısaca değinildikten sonra magnezyumun artan bazı kullanım örnekleri, şekillendirilebilirlikleri ve gelecekteki durumlarından söz edilecektir.

Geçmişte magnezyum, I. Dünya Savaşında ve nükleer endüstride yer alan uygulamalar, metal ve askeri hava araçlarında kullanılmıştır. Daha sonra da II. Dünya Savaşında kullanılmış ve sonrasında ise magnezyuma ilgi azalmıştır. Önümüzdeki 10 yıldaki gelişme hızı, her yıl için %7 oranında artış göstereceği tahmin edilmektedir [1]. Magnezyum ve magnezyum alaşımlarının avantajları aşağıdaki gibidir:

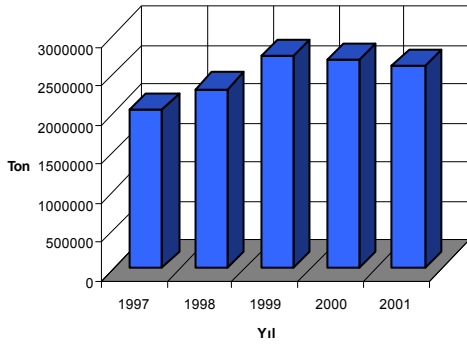
- Bütün metalik yapı elemanları içerisinde en düşük yoğunluğa sahip olanıdır.
- Yüksek özgül mukavemet
- Dökülebilirliği iyi olup, yüksek basınçlı kalıp dökümlerine uygundur
- Yüksek hızlarda tornalanabilir ve frezelenebilirlik
- Kontrollü atmosfer şartlarında iyi kaynak edilebilirlik
- Yüksek saflıkta magnezyum kullanıldığında daha yüksek korozyon direnci
- Kolay bulunabilirlik
- Polimerik malzemelerle kıyaslandığında
  - Daha iyi mekanik özellikler
  - Yaşlanmaya direnç
  - Daha iyi elektrik ve ısısal iletim
  - Geri dönüşüm

Magnezyumun dezavantajları aşağıdaki gibidir:

- Düşük elastite modülü
- Sınırlı soğuk şekillendirilebilme ve tokluk
- Sınırlı yüksek mukavemet ve yükselen sıcaklıklarda sınırlı sürünme direnci
- Katlaşmada yüksek derecede kendini çekme
- Yüksek kimyasal reaktivite
- Bazı uygulamalarda sınırlı korozyon direnci

Elastite modülü gibi bazı özelliklerin iyileştirilmesi, klasik alaşımlandırma teknikleri ile mümkün olmamaktadır. Burada fiber takviye etme yoluna gidilmektedir. Alaşım elementinin magnezyum içerisinde çözülebilirliği, mekanik özellikler ve kimyasal davranışın iyileştirme olanağını kısıtladığı için sınırlıdır. Magnezyumun kristal yapısı, doğal yapısındaki sünekliği sınırlayan hekzagonaldir. Bu açıdan kullanışlı bir faz değişimine neden olan tek alaşım lityumdur. Türkiye’de magnezit-MgCO<sub>3</sub> istihsal kapasitesinin yıllara göre değişimi Şekil 1 de ve Magnezyumun özellikleri Çizelge 1 de verilmiştir.

Geçmişteki magnezyumun büyük ölçekli uygulamalarının azlığı, günümüzdeki araştırma ve geliştirmelerin kısıtlı kalmasına sebep olmuştur. Sonuç olarak, aktif olarak kullanılabilen az miktarda optimize döküm ve dövme alaşımı vardır. Günümüz mevcut imalat yöntemleri, bu alaşımlardan örneğin düşük ergime noktalı alüminyum gibi alaşımlara adapte edilmektedir. Yeni bir üretim ve çalışma teknikleri üzerinde denemeler yapılması her ne kadar şimdiye kadar mümkün olmadıysa bile, şu anda çeşitli yeni imalat teknikleri üzerinde çalışmalara başlanmıştır. Geçmişte yapılan çalışmalardan toplanan veritabanı büyük oranda yok olmuştur. Günümüzde yeni talepler bunu değiştirmeye başlamıştır. Birincil üreticilerin sayısı artmakta ve gelecekte talep artığında, magnezyumun makul fiyatlarda bulunabileceği tahmin edilmektedir.



Şekil-1. Türkiye’de magnezit-MgCO<sub>3</sub> istihsal kapasitesi [2]

Çizelge 1. Magnezyumun fiziksel özellikleri [3]

| Fiziksel özellikler           | Mg                       |
|-------------------------------|--------------------------|
| Atom No                       | 12                       |
| Atom Kütle                    | 24,3                     |
| 20 °C deki Özgül Ağırlık      | 1,74                     |
| Ergime Noktası                | 651 °C                   |
| Kaynama Gizli Isısı           | 46,5 cal/°C              |
| 20 °C deki Isıl İletkenliği   | 0,038 cal/cm.s. °C       |
| 25 °C deki Lineer G.K.        | 26x10 <sup>-8</sup>      |
| 20 °C deki Elektrik Direnci   | 4,5.10 <sup>-6</sup>     |
| Elektrik İletkenliği (Cu=100) | 36,5 ohm.cm              |
| Elastite Modülü               | 4570 kgf/mm <sup>2</sup> |
| Kristal Yapısı                | Hegzagonal SD            |

## 1.1. Magnezyumun Doğadaki Bulunuşu

Magnezyum elementinin doğada asıl bulunış şekli, suda çözünmeyen bir cisim olan, dolomit ((Mg,Ca)CO<sub>3</sub>) ve Magnezit (MgCO<sub>3</sub>) ile suda çözünen ve kaya tuzu maden ocaklarında, kaya tuzunun üzerindeki tabakaları oluşturan MgCl<sub>2</sub> ve MgSO<sub>4</sub> ve bunların potasyum bileşikleriyle yaptıkları çifte tuzlar olan Kainit (KCl.MgSO<sub>4</sub>.3H<sub>2</sub>O), Şönit (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.MgSO<sub>4</sub>.6H<sub>2</sub>O) ve Karnalit (MgCl<sub>2</sub>.KCl.H<sub>2</sub>O)'tir. Bundan başka magnezyum karışık silikatlar şeklinde Talk'ı ve Amyant'ı oluşturmaktadır. Deniz suyunda % 0.11 kadar Mg<sup>3-</sup> iyonu mevcuttur. Sofra tuzunun nemli yerlerde ıslanması bunun içinde nem kapıcı madde olan MgCl<sub>2</sub>'ün bulunuşundan ileri gelmektedir.

Ticari olarak magnezyum üretimi yapılabilen magnezyumlu mineraller; Magnezit, Dolomit(Mg,Ca) CO<sub>3</sub>, Olivin (Mg,Fe)<sub>2</sub> SiO<sub>4</sub> ve Brusit Mg(OH)<sub>2</sub> tir. Ülkemizde KÜMAŞ-Kütahya Magnezit İşletmeleri A.Ş. bu şekilde birincil magnezyum üretimi sağlamaktadır. Bazik refrakter tuğla yapımında kullanılmak üzere ürettikleri magnezit cevherinin % 90'dan fazlasını kostik kalsine magnezit ve sinter magnezite dönüştürmektedirler. %10 oranındaki ham magnezit ise, magnezyum tuzları ve bazı ilaç yapımı ile çimento, kağıt ve şeker sanayinde kullanım alanına sahiptir. Magnezyum bileşikleri'nin kullanım alanlarını genel olarak aşağıdaki gibi sıralayabiliriz[4]:

1. Magnezyum Karbonat: İzolasyon, lastik, mürekkep, cam, seramik, boya, eczacılık ve kozmetik
2. Magnezyum Hidroksit: Eczacılık ve şeker rafinasyonu.
3. Magnezyum Klorür: Magnezyum metal üretimi, tekstil, kağıt, seramik ve çimento.
4. Magnezyum Sülfat: Eczacılık, suni gübre sanayi.

## 1.2. Havacılıkta Magnezyum

Hava aracı sistemleri yapılarının üretiminde kullanılan metallerde istenilen temel özellikler; hafiflik, dayanıklılık ve korozyona karşı dirençtir. Ayrıca bazı özel kullanım alanları için metallerin diğer özellikleri de önemlidir. Hava aracı sistemleri yapılarının üretiminde yaygınlıkla kullanılan metallere; Alüminyum, Çelik, Titanyum, Magnezyum ve Bakır dir. Özel ihtiyaçların, düşük mukavemetleri nedeniyle saf metallere karşılanması neredeyse olanaksız hale gelmiştir. Bu durumda yapısal olarak daha kullanışlı malzemeler elde etmek için alaşımlar geliştirilmiştir. Alaşımlar çoğunlukla metallere arası bileşikler halindedir. Buna karşılık bazı alaşımlar metal olmayan elementlerin de yer aldığı bileşikler şeklinde olabilmektedir. Magnezyumun havacılık sektöründeki durumu şu şekildedir:

- Mukavemet, hafif ağırlık, şok ve titreşim dirençleri
- Yanıcı olması ve kolayca korozyona uğraması bir dezavantajdır

- Buna karşılık magnezyumun ağırlığı, aynı hacimdeki alüminyumun ağırlığının üçte ikisi kadar, demirinkinin beşte biri kadardır.
- Yüzeyine herhangi bir koruyucu kaplama uygulanmamış magnezyum alaşımları korozif bir ortamda beyaz renkte kümecikler veya noktalar şeklinde korozyona uğramaktadırlar.
- Magnezyum alaşımlarının yüzeylerinde oluşan oksit-karbonat filmi korozif olmayan ortamlarda dahi yeteri derecede korozyondan korunma sağlayamamaktadır.
- Bu alaşımların korozyonu uygun koruyucu kaplama uygulandığında önemli ölçüde azaltılır.

Havacılık malzemesi üretiminde kullanılan malzemeler seçilirken çalışma özelliğine göre metal seçimi yapılır. Özellikle korozif ortamda çalışan parçaların üretimi esnasında korozyona daha az meyilli metal veya alaşımların kullanılması gerekmektedir.

### 1.3. Otomotiv Sektöründe Magnezyum

Otomobil üreticileri de üstün ve tercih edilebilir özelliklerinden dolayı magnezyum alaşımlı parçalar üretmeye başlamışlardır. BMW firmasının AZ91 alaşımlı motor bloğu üretmiş ve ticari olarak kullanıma başlamıştır. R6 adını verdikleri motorda, krank kutusu, kam kapağı magnezyum ve alüminyum alaşımlı magnezyumdan imal edilmiş olup, emsal motora göre 10 kg daha hafiflik sağlamaktadır [5]. Sektörde sık olarak kullanılan alaşımlar ve özellikleri Çizelge 2 de verilmiştir.

Çizelge 2. Otomotiv .sektöründe kullanılan magnezyum alaşımlarının özellikleri [6]

| ALAŞIM   | AZ91D                                      | AM50A         | AM60B         |     |
|--|--|---------------|---------------|-----|
| Alüminyum (%)  | 8,5-9,5                                    | 4,5-5,3       | 5,6-6,4       |     |
| Manganez (%)   | 0,17-0,3                                   | 0,28-0,50     | 0,26-0,50     |     |
| Çinko (Zn) (%)   | 0,45-0,9                                   | 0,20 max      | 0,20 max      |     |
| Silikon (%)  | 0,05 max                                   | 0,05max       | 0,05max       |     |
| Bakır (%)  | 0,025 max                                  | 0,008max      | 0,008max      |     |
| Nikel (%)  | 0,001 max                                  | 0,001max      | 0,001max      |     |
| Demir (%)  | 0,004 max                                  | 0,004max      | 0,004max      |     |
| Berilyum (%)   | 0,0005-0,0015                              | 0,0005-0,0015 | 0,0005-0,0015 |     |
| Diğer (%)  | 0,01max                                    | 0,01max       | 0,01max       |     |
| <b>FİZİKSEL ÖZELLİKLER</b>                             |  |               |               |     |
| Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup> )         | 1,81                                       | 1,79          | 1,78          |     |
| Termal Genleşme Sabiti µm/m <sup>o</sup> K             | 25   | 26            | 25,625        |     |
| Isıl İletkenlik (W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )   | 72   | 62            | 62            |     |
| Özgül Isı (Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )         | 1050                                       | 1050          | 1050          |     |
| Rijitlik Modülü (Kayma ve burulma 10 <sup>6</sup> psi) | 2,4  | -             | -             |     |
| Elastite Modülü (GPa)                                  | 45   | 45            | 45            |     |
| Ergime oranı (°C)                                      | 470-595                                    | 543-620       | 540-615       |     |
| Brinell Sertliği (100mm bilya, 500 kgf yük)            | 75   | 57            | 62            |     |
| Ortam Sıcaklığında                                     | <b>ÇEKME ÖZELLİKLERİ</b>                   |               |               |     |
|  | %0,2 Akma Mukavemeti (MPa)                 | 150           | 120           | 130 |
|  | Kopma Mukavemeti (MPa)                     | 230           | 220           | 220 |
|  | % Uzama                                    | 3             | 6-10          | 6-8 |
|  | <b>BASMA ÖZELLİKLERİ</b>                   |               |               |     |
|  | %0,1 Akma Mukavemeti (MPa)                 | 165           | -             | 130 |
|  | Kopma Mukavemeti (MPa)                     | 400           | -             | -   |
|  | <b>KAYMA ÖZELLİKLERİ</b>                   |               |               |     |
|  | Kayma Mukavemeti (MPa)                     | 140           | -             | -   |
|  | <b>DARBE ÖZELLİKLERİ</b>                   |               |               |     |
|  | 1/4" Çentiksiz Charpy (j)                  | 2,2           | 9,5           | 6,1 |
|  | <b>YORULMA ÖZELLİKLERİ</b>                 |               |               |     |
|  | Dönel Eğme Testi (5x10 <sup>7</sup> devir) | 70            | 70            | 70  |

## 2. MAGNEZYUMUN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİ

Havacılık, otomobil ve potansiyel diğer büyük ölçekli magnezyum kullanıcılarınca talep edilen özellikler, alaşım gelişimi gereksinimi ortaya çıkartmıştır. "Yüksek performanslı" havacılık

alaşımının doğrudan aktarılması sadece ekonomik açıdan değil genelde de özelliklerinin uyuşmamasından dolayı mümkün değildir. Magnezyum uygulamalarının büyük bir çoğunluğu pres döküm-basınçlı döküm alaşımı olan AZ91 tarafından karşılanmaktadır. Ancak bu alaşım, 130 °C nin üzerindeki sıcaklıklarda çoğu uygulamalar için yetersiz sürünme direncine sahiptir. Yüksek mukavemetli dövme alaşımının gelişmesinde Al içeriği her ne kadar çok daha az olsa bile alüminyum sistemi temeli oluşturmaktadır. %6 Al bulunan ikili alaşımı uygun mukavemet ve tokluk kombinasyonu sağlamaktadır. Mg-Al-X in gelişimi, süper hafif alaşımların gelişimidir. Li ilavesi mukavemeti azaltır fakat tokluğu artırır. Mg-Li alaşımları 60 °C civarında ortalamaya meyilli olsalar da yaşlanma ile sertleştirilebilmektedirler. Alaşım ilaveleri mukavemeti iyileştirmek ve aşırı yaşlanmayı geciktirmek amaçlıdır. Yüksek ivmelenme ve yavaşlamaya uğrayan otomobil yapısal parçaları, elemanları ve makine takım parçaları gibi yüksek özgül mukavemetli pek çok uygulama vardır.

Lee ve arkadaşları [7] AZ31 ve AZ61 plaka magnezyum alaşımlarının izotermal şekillendirilebilirlik özelliklerini farklı sıcaklık şartlarında araştırmışlar ve 0.5, 1.3, 1.7 ve 2 mm kalınlıklarındaki plakaları uygun şekillendirilebilmenin mümkün olduğunu göstermişlerdir.

Maki ve arkadaşları [8], oda sıcaklığında kafes yapısı nedeniyle şekillendirilebilme özelliği düşük olan AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarının ısıtma işlemi ile şekillendirilebilme özelliklerinin artırılabilmesini araştırmışlardır. 15 mm çap ve 20 mm boyundaki bu magnezyum alaşımlarının şekillendirilebilmesi için rezistans ısıtıcı kullanarak farklı enjeksiyon çaplarında ısıtma ve şekillendirme yapmışlardır.

Takahashi ve arkadaşları [9], magnezyum alaşımlarından yapılan çekme borularının eğilme ve çekme şekil değiştirme özelliklerini araştırmışlardır. Günümüzde genel olarak şekillendirmede kullanılan kalıba döküm ve enjeksiyon şekillendirme yöntemlerinin aksine magnezyumun dövülerek şekillendirilebilme özelliği üzerinde durmuşlardır. Klasik ekstrüzyon metodu ile yapılan boru imalatında çekme tekniğinin avantajlarını kullanarak yeni bir magnezyum boru tipi üretmişlerdir. Ürettikleri yeni tipin çekme mukavemetinin klasik yöntem ile üretilenden daha fazla olduğunu bulmuşlardır.

Magnezyum tokluk açısından zayıftır. Bundan dolayı çok yüksek tokluğa sahip termomekanik davranışla şekillendirilebilen pek çok alaşıma ihtiyaç vardır. Tokluk aktif pek çok kayma sistemi ile belirtilmektedir. Hegzagonal kafes yapısında olan Mg, oda sıcaklığında temel düzlemde dikey yüzey düzlemleri üzerinde ikincil olarak kayar. Bu ise düşük sıcaklıklarda tokluğu sınırlamaktadır. Magnezyumun bu davranışı alaşımlama ile giderilir ancak yapının hegzagonal kalması halinde ise bu etki sınırlıdır. Günümüzde, hacim merkezli kübik ve hegzagonal sıkı süzen fazlarının karışımından oluşabilme imkânı sağlayabilen Mg-Si, Mg-Al-Ca-(RE) ve Mg-Li-X esaslı yeni alaşımların gelişimlerine ilaveten, ince taneli malzemelerin gelişmeleri sağlanmıştır.

Kohzu ve arkadaşları [10] ise magnezyum alaşımlarının pres ile şekillendirilebilmesini araştırmışlardır. AZ31 ve Al100 alaşımlarının 453 K sıcaklığında çekilebilirlik, çentik-darbe ve eğilme özelliklerini belirlemişlerdir.

Ayrıca Ogawa ve arkadaşları [11], artan sıcaklıklarda magnezyum alaşımlarının şekillendirilebilme sınırlarının hassas olarak belirlenmesini amaçladıkları çalışmalarında silindirik ZK60 alaşımını ele almışlar ve 100 den 400 °C sıcaklığa kadar aralıkta ekstrüde etmişlerdir. Numunenin 200 °C altındaki sıcaklıklarda gevrek yapıda iken 250 ve 400 °C arasında mükemmel şekillendirilebilme özelliğine sahip olduğunu göstermişlerdir.

Zhang ve Couture [12] üçlü Mg-Zn-Al(ZA) alaşımlarının özelliklerini araştırmışlardır. AZ91 alaşımının kalıba döküm yöntemi ile üretildiğinde 120 °C den sonraki artan sıcaklıklarda sürünme direncinin zayıfladığından dolayı ve mukavemet özelliklerinin azaldığını ve bütün bu nedenlerden dolayı da daha iyi sürünme direnci, daha iyi dökülebilirlik ve mukavemet

özelliklerine sahip yeni bir Mg döküm tekniği üzerinde çalışmışlardır. Bu amaçla alaşım içerisine küçük miktarlarda Ca ve Sr ilaveleri yapmışlardır.

Men ve arkadaşları [13] ise Mg–Cu–Zn–Y sistemi içerisindeki kitlesel metalik cam şekillendirilmesi üzerinde araştırma yapmışlardır. Bu amaçla  $Mg_{65}Cu_{25}Y_{10}$  içerisine Zn katılarak  $Mg_{65}Cu_{20}Zn_5Y_{10}$  üzerinde çalışma yapmışlardır. Bu alaşımdan 6 mm çapında tamamen cam olan rot üretmişlerdir.

Trojanova ve Lukac [14] magnezyum alaşımlarının basınç etkisi altında şekillendirilebilme özelliklerini ısıtma işlemi uygulayarak araştırmışlardır. Bu amaçla AZ91, AE42, AS21, QE22, ZE41,  $Mg_4Li$  ve  $Mg_8Li$  alaşımlarına 23–300 °C sıcaklık aralığında sertleştirme ve yumuşatma işlemleri uygulamışlar ve her bir aşamada farklı özellikler kaydetmişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda yumuşatma yaparak dislokasyon tırmanması ve çapraz kaymanın kontrol edilebileceğini göstermişlerdir.

Spigarelli ve arkadaşları [15] ise 120-180 °C sıcaklık aralığında Mg–Al–Si–RE (ASE210) alaşımının basma altında şekil değiştirme ve çatlak özelliklerini incelemişlerdir. Çekmeye göre basma durumunda alaşımın oldukça büyük mukavemet özelliğine sahip olduğunu bulmuşlardır.

Yoshihara ve arkadaşları [16] sonlu eleman analizi vasıtası ile magnezyum alaşımı tüplerin dönele şekillendirmelerinin iyileştirilmesi konusunda benzetim çalışmalarını 300 °C de yaparak oluşacak şekillendirmeyi modellemişlerdir. Başka bir çalışmada da [17] yerel ısıtma ve soğutma tekniği kullanarak yeni bir derin çekme usulü oluşturmuşlardır. Böylece oda sıcaklığında şekillendirmesi çok zor olan Mg alaşım plakalarının yeni metot ile şekillendirilebilme kabiliyetini artırmışlardır. Diğer bir çalışmada da [18] yine yerel ısıtma ve soğutma tekniği kullanarak, dairesel derin çekme kaplarının şekillendirilebilirliklerini incelemişler ve lokal alanlarda uygun sıcaklık dağılımının sağlanması ile şekillendirilebilirliğin artırıldığını göstermişlerdir.

Takuda ve arkadaşları [19], magnezyum esaslı AZ31 plakaların şekillendirilebilmesini sonlu eleman analizi vasıtası ile incelemişlerdir. AZ31 şekillendirme esnasında belli bir noktadan sonra herhangi bir belirti vermeden aniden kopma eğilimindedir. Analizlerinde kırılma kriterleri kullanarak başarılı bir şekilde şekillendirmeyi tahmin etmişlerdir.

Hamana ve arkadaşları [20] Al içerisinde ağırlıkça %12 oranında bulunan Mg alaşımlarında geçiş fazının çözümü ve şekillendirme üzerinde plastik deformasyonun etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında soğuk haddeleme ve soğuk şekil değiştirme usulleri kullanmışlardır. Haddeleme ve şekillendirme hızlarının parçacık çekirdeklenmesi üzerinde etkili olduğunu göstermişlerdir.

Chen ve Huang [21] AL31 alaşımı plakalarının şekillendirilebilmelerini araştırmışlar Oda sıcaklığında zayıf olan şekillendirilebilme özelliklerinin iyileştirilebilmesi amaçlı olarak yeni bir kalıba döküm usulü tasarladıklarını belirtmişlerdir.

Lai ve arkadaşları [22] ise Mg–Al–Ti/MgO alaşımlarının  $TiO_2$  indirgenmesi vasıtası ile şekillendirilebilirliklerini araştırmışlardır. 400 °C gerçekleştirdikleri deneysel çalışmaları neticesinde indirgeme vasıtası ile  $MgAl_2O_4$  formu elde etmişlerdir.

Gennari ve Castro [23],  $Mg_2Co$  ve MgCo bileşiklerinin varlığı ve kararlılığı konularında araştırma yapmışlar, çalışmalarında farklı bir dehidrasyon, Mg ve Co in Ar gazı altında ısıtma işlemi ile mekanik alaşımlandırılması ve bunların sonucunda Mg ve Co in katı hal reaksiyonları metodu kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda ise MgCo in kararlı olduğunu ve  $Mg_2Co$ 'a göre daha kolay şekillendirilebilir özellikte olduğunu sonucunu bulmuşlardır.

Tegenkamp ve arkadaşları [24] ise daha çok yüzey kaplama konularını incelemişler ve yaptıkları çalışmalarında gümüş üzerine magnezyum alaşımı oluşturulması ve şekillendirilmesini konu almışlardır. 300 °K sıcaklığı üzerinde düzgün sıralanmış Mg tabakaları elde ederken daha alt sıcaklıklarda ise düzgün olmayan tabakaların oluştuğunu göstermişlerdir.

Iwanaga ve arkadaşları [25] oda sıcaklığında ve üzerindeki sıcaklıkta AZ31 magnezyum alaşımındaki şekillendirilebilmenin iyileştirilebilmesi konusunda çalışma yapmışlardır. Mg-Kütlece%1Al-Kütlece%1Zn plakalarının oda sıcaklığından 175 °C sıcaklığına kadar erichsen sabitinde büyük oranda iyileşme ve beraberinde de iyi derin çekme özelliği getirdiğini bulmuşlardır.

### 3. SONUÇLAR

Otomotiv ve havacılık sanayinin en çok ilgilendiği alaşımlardan olan Mg ve alaşımlarında oda sıcaklığında şekillendirilebilme işleminin önemli bir sorun olduğu açıktır. Bu yüzden de bu alanda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları kesintisiz olarak devam etmektedir. Ülkemiz zengin Mg cevherlerine sahip olmasına rağmen, üretim olarak dünya ülkelerinin oldukça gerisindedir. Stratejik öneme sahip bu alaşımlar konusunda ülkemizin araştırma ve geliştirmeye hız vermesi gerektiği ve bu alanda yapılan çalışmaların milli bir politika haline getirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

### 4. KAYNAKÇA

- [1] MORDIKE B.L., EBERT T., "Magnesium Properties — Applications — Potential", Materials Science and Engineering App, Vol: 37–45, p: 302, 2001.
- [2] Türkiye İstatistik Yıllığı, TC Başbakanlık Devlet İstatistik Enstitüsü, ISSN 0082-691-X, 2004
- [3] Benedyk J.J., "Magnesium Challenges Aluminum Dominance as the light metal of choice in Automotive Markets", Light Metal Age- The International Magazine of Light Metal Industry, October 2004
- [4] KÜMAŞ-Kütahya Manyezit İşletmeleri A.Ş., Sinter Manyezit İşletmesi, <http://www.kumasref.com/urunler16.htm>
- [5] WN M, "BMW 3-Series", 1997-2005, <http://www.autozine.org/html/BMW/3er.html#R6>
- [6] Magnesium Elektron, "Magnesium in Automotive- ELEKTRON - Diecasting Alloys", <http://www.magnesium-elektron.com/data/downloads/DS475Diecastingalloys.pdf>
- [7] LEEA S., CHENA Y. H., WANGB J.Y., "Isothermal sheet formability of magnesium alloy AZ31 and AZ61", Journal of Materials Processing Technology, Vol:19–24, p:124, 2002
- [8] MAKI S, HARADA Y., MAKINO H., "Mushy State Forming of Magnesium Alloy Making Use of Resistance Heating ", Material Science Forums, Vols: 419-422, p:387-592, 2003
- [9] TAKAHASHI H., OISHI Y., WAKAMATSU K., KAWABW N., "Tensile Properties and bending formability of Drawn Magnesium Alloy Pipes", Material Science Forums, Vols: 419-422, p:345-348, 2003
- [10] KOHZU M., YOSHIDA F., HIGASHI K., "Evaluation of Press Formability in Magnesium Alloys", Materials Science Forum, Vol: 4/9-422, pp:321-326, 2003
- [11] OGAWA N., SHIOMI M., OSAKADA K., "Forming limit of magnesium alloy at elevated temperatures for precision forging", International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol: 42, pp: 607–614, 2002
- [12] ZHANG Z., COUTURE A., "An Investigation of The Properties of Mg-Zn-Al Alloys", Scripta Materialia, Vol. 39, No. 1, pp. 45–53, 1998
- [13] MEN H., Hu Z. Q., Xu J., "Bulk metallic glass formation in the Mg-Cu-Zn-Y system", Scripta Materialia Vol:46, p : 699–703, 2002
- [14] TROJANOVA Z., LUKAC P., "Compressive Deformation Behavior of Magnesium Alloys", Journal of Materials Processing Technology Vol : 162–163, p: 416–421, 2005

- [15] SPIGARELLI S., CICCARELLI D., EVANGELISTA E., "Compressive deformation of an Mg-Al-Si-RE alloy between 120 and 180 °C", *Materials Letters* Vol : 58, p: 460–464, 2004
- [16] YOSHIHARA S., MAC DONALD B., HASEGAWA T., KAWAHARA M., YAMAMOTO H., "Design Improvement of Spin Forming of Magnesium Alloy Tubes Using Finite Element", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol:153–154, p: 816–820, 2004
- [17] YOSHIHARA S., YAMAMOTO H., MANABE K., NISHIMURA H., "Formability Enhancement in Magnesium Alloy Deep Drawing by Local Heating and Cooling Technique", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol: 143–144, p: 612–615, 2003
- [18] YOSHIHARA S., NISHIMURA H., YAMAMOTO H., MANABE K., "Formability enhancement in magnesium alloy stamping using a local heating and cooling technique: circular cup deep drawing process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol: 142, p:609–613, 2003
- [19] TAKUDA H., YOSHII T., HATTA N., "Finite-Element Analysis of The Formability of A Magnesium-Based Alloy AZ31 Sheet", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol : 89–90,135–140, 1999
- [20] HAMANA D., BOUCHEAR M., DERAFA A., "Effect of Plastic Deformation on The Formation and Dissolution of Transition Phases in Al-12 wt.% Mg Alloy", *Materials Chemistry and Physics*, Vol : 57, p: 99–110, 1998
- [21] CHEN F. K., HUANG T. B., "Formability of Stamping Magnesium-Alloy AZ31 Sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol:142, p: 643–647, 2003
- [22] LAI M.O., LU L., CHUNG B.Y., "Formation of Mg-Al-Ti/MgO Composite via Reduction of TiO<sub>2</sub>", *Composite Structures*, Vol: 57, p: 183–187, 2002
- [23] GENNARI F.C., CASTRO F.J., "Formation, Composition and Stability of Mg-Co Compounds", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol: 396, p: 182–192, 2005
- [24] TEGENKAMP C., MICHAÏLOV M., WOLLSCHLAGER J., PFNUR H., "Growth and Surface Alloy Formation of Mg on Ag 100", *Applied Surface Science*, Vol: 151, p: 40–48, 1999
- [25] IWANAGA K., TASHIRO H., OKAMOTO H., SHIMIZU K., "Improvement of Formability From Room Temperature to Warm Temperature in Az-31 Magnesium Alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol: 155–156, p:1313–1316, 2004