

## EKSTRÜZYON ÖNCESİ VE SONRASI UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN AA 6063 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

*Hakan AYDIN\**  
*Merkut ŞENDENİZ\*\**  
*A. Halim DEMİRCİ\**

**Özet:** Isıl işlem uygulanabilir AA 6063 Al-alaşımı, ekstrüzyon işleminde en çok kullanılan hafif metal alaşımıdır. AA 6063 Al-alaşımına ekstrüzyon işlemi öncesinde ve sonrasında uygulanan ısıl işlemler, ekstrüzyon ürün özelliklerine önemli ölçüde etki etmektedir. Bu çalışmada, soğuk fırına şarj edilen biyetler, fırının 580 °C sıcaklığına ulaşması (8 saat) ve bu sıcaklıkta tutma süresi (2 saat) ile birlikte fırın içerisinde toplam 10 saat süreyle homojenleştirme işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Fırının farklı konumlarından alınan kodlanmış dört biyet, toplu halde bir duş sistemi altında hızla soğutulmuştur. Kodlanan biyetlerin haricinde, biyetler homojenleştirme fırından boşaltılırken çok hızlı soğumanın etkisini görebilmek için herhangi bir biyet suya atılarak ani soğutulmuş, bir başka biyet ise yavaş soğumanın etkisini görebilmek üzere de havada soğutulmuştur. Homojenleştirilen ve soğutulan biyetler, 30 ve 75 ekstrüzyon oranı (R) uygulanarak 5 mm/s ekstrüzyon hızı ile ekstrüze edilmişlerdir. 450 °C biyet sıcaklığı, 400 °C kovan sıcaklığı ve kalıp ilk sıcaklığı ise 182 °C ile 197 °C arasında tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Aynı fırın içerisinde farklı konumlarda farklı sıcaklık değerlerine ve sonrasında farklı soğuma koşullarına sahip biyetlerde farklı mekanik özellikler ve farklı ekstrüzyon özellikleri ortaya çıkmıştır. Biyetlere uygun homojenleştirme ve soğutma işlemi uygulandığında optimum mekanik özelliklerin elde edilmesinin yanında ekstrüzyon yükünde de önemli bir düşüş meydana gelmiştir. Homojenleştirme sıcaklığı olan 580 °C'ye ilk ulaşan ve en az 2 saat bekleyen biyetin her iki ekstrüzyon oranında da ekstrüzyon yükü diğer numunelere nazaran daha düşük değerlerde kalmıştır. Ayrıca, nihai ürünün çeşitli yaşlandırma sıcaklık ve sürelerindeki mekanik özellikleri belirlenerek, nihai ürün için uygun olabilecek yaşlandırma koşulları tespit edilmiştir. Uygun bir yaşlandırma (180°C-8 saat) ile sertlik 72 HB ve çekme mukavemeti ise 222 N/mm<sup>2</sup> değerlerine kadar yükseltilebilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** AA 6063 Al-alaşımı, ekstrüzyon, homojenleştirme, yaşlandırma.

### Influence of Heat Treatments Before and After Extrusion on the Mechanical Properties of AA 6063 Aluminium Alloy

**Abstract:** Heat-treatable AA 6063 Al-alloy is the most widely used light metal alloy in extrusion process. Heat treatments before and after extrusion have a significant effect on the extrusion product properties of AA 6063 Al-alloy. In this study, the billets, which were charged to a cold furnace, were homogenized in the furnace for 10 h (8 h to reach the furnace temperature of 580°C and 2 h for holding time in this temperature). Numbered four billets taken out from the different positions of the furnace were rapidly cooled in the container with all billets under a shower system. At the end of the homogenization process, a billet, except the numbered billets, was suddenly cooled in water to see the effect of very rapid cooling, another billet was also cooled in air to see the effect of slow cooling. Homogenized and cooled billets were extruded in extruder rates (R) of 30 and 75 with an extrusion speed of 5 mm/s. A billet temperature of 450°C, a tube temperature of 400°C and an initial temperature of die in between 182°C and 197°C are kept constant in all experiments. The billets in the different positions of the furnace with different temperature distribution and cooling condition exhibited the different mechanical and extrusion properties. When a suitable homogenization and cooling process were given to the billets, the optimum mechanical properties for the billets were obtained, as well as a considerable decrease in the extrusion load has occurred. The extrusion load of the billet, which reached firstly the homogenization temperature of

\* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Görükle, Bursa.

\*\* PMS Metal Profil Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş., Demirtaş Organize Sanayi Bölgesi, Bursa.

580°C and was homogenized in this temperature for at least 2 h, is lower in both extruder rates than that of the other numbered billets. In addition, the mechanical properties of the final product were determined in various ageing temperatures and times and the ageing conditions that might be suitable for the final product was revealed. The values of hardness and tensile strength can be increased up to 72 HB and 222 N/mm<sup>2</sup> respectively, with an appropriate ageing treatment (180°C-8h).

**Key Words:** AA 6063 Al-alloy, extrusion, homogenization, ageing.

## 1. GİRİŞ

Alüminyumun maliyetinin biraz yüksek olması ile birlikte diğer metallere göre önemli üstünlükleri vardır. Hafif, ve birim ağırlığa göre yüksek mukavemetli olmasının getirdiği emniyeti yanında yüzeyine çok çeşitli görünümler verilebilmesi, korozyona uğramaması, bakımının çok kolay ve ucuz olması, imalatının kısa sürede yapılabilmesi alüminyumun üstün özelliklerindedir. Alüminyum bozulma ve çözünmeye uğramayan, kararlı bir malzeme olması, ekolojik olarak da tercih edilmesine nedendir. Tekrar kullanılması ve tekrar kullanım için az enerji gerektirmesi de çevrenin korunması için önemli bir tercih nedenidir (Demirci, 2004, Aydın, 2002). Saf alüminyum mukavemet açısından çok yetersiz olduğundan endüstride alaşımlandırılarak kullanılır. En önemli alaşım elementleri ise silisyum, magnezyum ve bakırdır. Al-alaşımlarının mukavemetlerinin artırılmasında, ısıl işlemlerle mikro yapı içerisinde ikincil fazların oluşturulması esas, özellikle yaşlandırma sertleştirilmesi, başvurulan önemli bir yöntemdir (Demirci, 2003, Hatch, 1984, Ardell, 1985).

Ekstrüzyon, silindirik şeklindeki bir döküm ingotun (biyet) kovan olarak adlandırılan bir alıcı içerisinde sıkıştırılarak bir kalıptan geçirilmesi suretiyle, kesit alanının daraltılmasını içeren bir metal şekillendirme işlemidir. Ekstrüzyon daha çok hafif metal endüstrisinde karşımıza çıkan bir imalat yöntemidir. Uçak endüstrisinin gelişimi ile önem kazanan ekstrüzyon, uçak tasarımcıları için çeşitli kesitlerde profillerin elde edilmesini sağlayan en ekonomik üretim yöntemi olmuştur. Bu yöntemin avantajları zamanla yapı ve mimari tasarımcıları tarafından da fark edilmiş ve ekstrüzyon ürünlerine olan talep hızla artmıştır. Bu yöntemle, hem ekonomik hem de istenilen özelliklerde bir ürün üretilebilmesi için yöntem değişkenleri ile ürün özellikleri arasındaki ilişkilerin iyi bilinmesi gerekir. Bunun yanı sıra, ekstrüzyon öncesinde ve sonrasında uygulanan işlemler (ısıl, mekanik, kimyasal v.b.) de ürün özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir (Bourget ve diğ., 2009, Karamış ve Halıcı, 2007, Sönmez, 1989, Tekkaya ve diğ., 2009). Alüminyum ekstrüzyonu sıcak olarak yapılır; biyetler 420-470°C'ye ısıtılır, kalıplar da 450 °C'ye ısıtılmış olmalıdır ve presten çıkan profilin sıcaklığı 500 °C'nin üzerindedir. Ekstrüzyon presinden çıkan profil hızla soğutulur, soğuk germe işlemi yapılır ve istenen boyda kesilir. Daha sonra sipariş özelliğine göre istenen özelliklere bağlı olarak çeşitli ısıl işlemlere tabi tutulurlar.

Ekstrüzyon işlemi esnasında meydana gelen yüksek orandaki plastik şekil değiştirme işi önemli derecede sıcaklık artışlarına neden olur. Sıcaklık artışı malzemenin şekil değiştirme direnci, takoz sıcaklığı ve boyu, ekstrüzyon hızı ile oranı ve takım sıcaklıkları etkiler. Ekstrüzyon sırasında meydana gelen bu sıcaklık artışı AA 2XXX, 6XXX, 7XXX serisi gibi alüminyum alaşımlarında üründe yırtılmalara sebep olduğu gibi aynı zamanda ürün yüzeyinde istenmeyen iri taneli bir yapının oluşmasına yol açar. Sıcaklık artışının kontrol edilebilmesi için ekstrüzyon öncesinde uygulanan ve malzemenin yüksek sıcaklık dayanım özelliklerini etkileyen homojenleştirme ve soğutma gibi işlemler ile ekstrüzyon yöntem değişkenlerinin optimizasyonu gerekir (Karamış ve Halıcı, 2007, Saha, 1986, Sönmez, 1989).

Yaşlandırma işlemi ile özellik iyileştirmesine fırsat veren AA 6063 Al-alaşımı ekstrüzyon imalat sanayinde en fazla kullanılan hafif metal alaşımıdır (Al-Marahleh, 2006, Saha, 1986). AA 6063 Al-alaşımı profilinin çekme dayanımı ekstrüzyon edilmiş halde en az 140 N/mm<sup>2</sup>'dir. Çekme dayanımı, profilleri hızla oda sıcaklığına soğutmadan sonra yapılan yaşlandırma ile en az 220 N/mm<sup>2</sup>'ye yükseltilebilir (<http://www.aluminyumsanayi.com/aluminyumprofilgenel.htm>, 2009, Saha, 1986, Sönmez, 1989). AA 6063 Al-alaşımına ekstrüzyon öncesinde uygulanan homojenleştirme ısıl işleminin ve sonrasındaki soğutma hızının ekstrüzyon yapılabilirlik, ürün yüzey kalitesi, eloksal işlemi ve yaşlandırma serleştirilmesi (mekanik özellikler) üzerinde çok önemli etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle, deformasyon parametreleri ve mekanik özellikler seçilen soğutma hızı ile belirlenebilir. Homojenleştirme işlemindeki amaç, dendritik yapıdaki konsantrasyon farklılıklarının giderilmesi, katılaşma sırasında oluşan kararsız fazların çözülmesi ve alaşım ekstrüzyon parametrelerini olumlu yönde etki-

leyen çökelti partiküllerinin oluşturulmasını sağlamaktır (Karamış ve Halıcı, 2007, Tekkaya ve diğ., 2009, Al-Marahlleh, 2006). Karmaşık alaşım sistemlerinde kararsız fazların yanında malzemenin sünekliliğini azaltan çözünmez kararlı fazlar da bulunur. Homojenleştirme işlemi ile bu fazların yuvarlaklaşması sağlanarak süneklilik arttırılmaya çalışılır (Mulazimoglu, 1996, Osada, 2003).

Homojenleştirme işlemi sırasında oluşacak değişikliklere bir başlangıç oluşturduğu için döküm sonrasındaki iç yapı çok önemlidir. Döküm sırasında mikro yapıda arzu edilmeyen oluşumların yer alıp almadığının tespitinin yapılması gerekir. Bunun için döküm sonrası biyetlerin kenar ve orta kısmından numuneler alınarak incelemeler yapılmalıdır. Kaiser Aluminum&Chemical Corp. laboratuvarlarında yapılan çalışmalar, sıvı 6063 Al-alaşımı, 4 °C/dakika soğutma hızı ile katılaştırken, yedi adet fazın oluştuğunu göstermiştir. Bu fazlar; birincil alüminyum, FeAl<sub>3</sub>, AlFeSi( $\alpha$ ), AlFeSi( $\beta$ ), AlMgSiFe, Mg<sub>2</sub>Si ve silisyum'dur (Si) (Beatty, 1977, Beatty, 1981). AlMgSiFe çökeltileri, tane sınırları boyunca uzanan sürekli ince fazlar halindedirler (Couper, 2006, Mulazimoglu, 1996, Osada, 2003). Katılma hızının yükselmesi, FeAl<sub>3</sub> ve AlFeSi oluşumunu engellemekte ve diğer fazların oluşumunu hızlandırmaktadır. Böylece, hızlı soğuma ile ani katılmanın olduğu dökümlerde, AlFeSi ve Mg<sub>2</sub>Si oluşan esas intermetalik fazlardır (Beatty, 1981). Biyetlerin dış kenarlarında yapılan incelemelerde döküm-kalıp ara yüzeyine yakın bölgelerde soğuma hızının artmasına bağlı olarak çökelti morfolojisinin değişimine de dikkat çekilmelidir.

Döküm sonrası yapılacak homojenleştirme işleminde ilk aşama, alaşım içerisindeki çökeltilerin katı içerisinde çözündürülmesidir. Bu işlemin hızlı yapılabilmesi için sıcaklığın yüksek tutulması gereklidir. Öte yandan ötektik bölgelerin erimesinin de önlenmesi için kullanılacak sıcaklıklara bir üst limit getirilmelidir. (Turbaloğlu, 2008, Larouche, 1998). AA 6063 Al-alaşımının döküm sonrası homojenleştirme sıcaklığı 560-580°C'dir. Yaşlanma sertleşmesinde kontrol fazı olan Mg<sub>2</sub>Si homojenleştirme sırasında tamamen çözünür. Homojenleştirmeden sonra biyetlerin soğutulmasına bağlı olarak Mg<sub>2</sub>Si fazı ince veya kaba çökelti oluşturur. Homojenleştirmeden sonraki soğutma hızı çok yavaş ise (örneğin 1,6 °C/dak'dan daha düşükse) çok miktarda iri Mg<sub>2</sub>Si fazı çökelecektir (Karamış ve Halıcı, 2007, Barry ve Hains, 1977, Al-Marahlleh, 2006). Bu durumda, ekstrüzyon sonrası ürünün mekanik özellikleri yetersiz kalacaktır. Ayrıca, yaşlanma sonrası nihai üründe, homojenleştirilmiş biyetlerde homojenleştirilmemiş biyetlere oranla daha yüksek mukavemet değerleri elde edilir.

Bu çalışmada, AA 6063 Al-alaşımına döküm sonrası uygulanan homojenleştirme ve sonrasındaki soğutma işlemlerinin, alaşımın mekanik özellikleri ve ekstrüzyon özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, AA 6063 Al-alaşımı ekstrüzyon ürünlerinin yaşlandırma işlemi ile mekanik özelliklerindeki iyileşme derecelerini görmek üzere, AA 6063 Al-alaşımı ürünleri belirli sıcaklık ve sürelerde çeşitli yaşlandırma işlemlerine tabi tutularak nihai ürün için en uygun yaşlandırma koşulları tespit edilmeye çalışılmıştır.

## 2. MATERYAL ve YÖNTEM

DeneySEL çalışmaların yürütüldüğü AA 6063 Al-alaşımının kimyasal kompozisyonu Tablo I'de verilmiştir. En önemli alaşım elementleri Mg ve Si'dur. Alaşımında demir kontrollü safsızlık, diğer elementler ise az miktardaki safsızlıklar olarak bulunur.

**Tablo I. AA 6063 Al-Alaşımının kimyasal kompozisyonu.**

AA 6063 Al-Alaşımının Kimyasal Bileşimi (ağırlıkça %)								
Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn	Cr	Diğer Elementler	
							Herbiri	Toplam
0,10	0,35	0,45-0,90	0,10	0,20-0,60	0,10	0,10	0,05	0,15

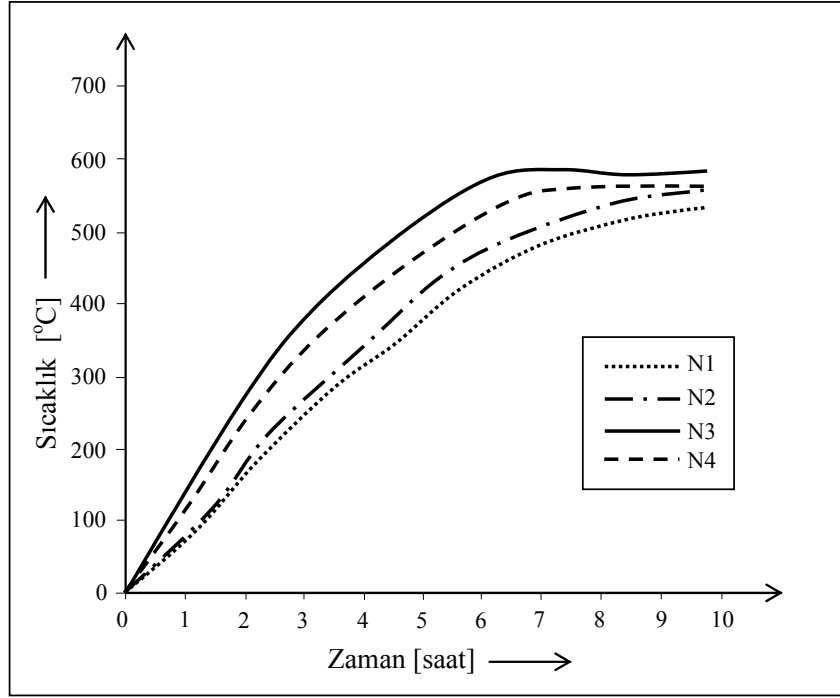
Deneylerde kullanılan AA 6063 Al-alaşımı biyetleri 580 °C sıcaklığında homojenleştirme işlemine tabi tutulmuşlardır. Bu işlem esnasında, soğuk fırına şarj yapıldığında fırının 580 °C sıcaklığa ulaşması 8 saat sürmüş, 2 saatlik tutma süresi de eklendiğinde biyetler fırında toplam 10 saat boyunca kalmıştır. Bu sürenin sonunda fırından çıkarılan biyetler, hızlı soğutma yapmak amacıyla bir duş sistemine yerleştirilmişlerdir. Biyetler, duş açıldıktan ancak 2-2,5 saat sonra tamamen soğuyabilmişler-

dir. Homojenleştirme fırını içindeki sıcaklık dağılımının ve duş altındaki farklı soğuma hız değerlerinin homojenleştirilen biyetlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek için, homojenleştirme işlemi esnasında kodlanan 4 ayrı biyet üzerinden sürekli sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Sıcaklık ölçümleri kodlanan 4 farklı biyet üzerine bağlanan sıcaklık-ölçerler (thermo-couples) yardımıyla yapılmıştır. Her biyet için bir noktadan sıcaklık ölçümü alınmıştır. Sıcaklık-ölçerlerden gelen değerler veri toplayıcıdan okunup kayıt altına alınmıştır. Homojenleştirme fırını içerisindeki bu biyetlerin zamana bağlı olarak sıcaklıkları Şekil 1’de verilmiştir. N3 kodu ile gösterilen biyet, fırının daha sıcak tarafında yer aldığından, bekleme süresinden daha önce homojenleştirme sıcaklığına ulaşmıştır. Aynı yükseklikte yer alan fakat fırının fanları tarafında yer alan N2 kodlu biyet, homojenleştirme sıcaklığına, ancak bekleme süresinin sonunda ulaşabilmiştir. Fırının fanlar tarafında konteynerin üstünde bulunan N4 kodlu biyet, bekleme süresi başlangıcında istenen sıcaklığa ulaşmıştır. Yine fırının fanlar tarafında fakat konteynerin altında yer alan N1 kodlu biyette ise en düşük sıcaklıklar görülmüş, bekleme süresinin bitiminde bile bu biyetteki sıcaklık 545 °C’i aşamamıştır. Buradan görüldüğü gibi, fırına aynı anda alınan fakat farklı konumdaki biyetler aynı homojenleştirme koşullarına sahip değildir ve dolayısıyla biyetler farklı mekanik özellikler sergileyerek farklı ekstrüzyon özellikleri ortaya koyacaklardır. Bu yüzden, fırın içi sıcaklığın homojen bir dağılım göstermesi için gerekli tedbirlerin alınması gerekir.

Homojenleştirme fırınından çıkartılıp duş altına alınan biyetlerdeki 450°C ile 200°C arasında ölçülen soğuma hızları Tablo II’de verilmiştir. Soğuma hızları da biyetler üzerindeki sıcaklık-ölçerler yardımıyla 450°C ile 200°C arasında veri toplayıcıdan kaydedilen değerlerle belirlenmiştir. Kodlanan biyetlerin haricinde, biyetler homojenleştirme fırınından boşaltılırken çok hızlı soğumanın etkisini görebilmek için herhangi bir biyet suya atılarak ani soğutulmuş, bir başka biyet ise yavaş soğumanın mekanik özellikler üzerindeki etkisini görebilmek üzere havada soğutulmuştur (bu biyetler konteynerden gelişigüzel alınmış olup sıcaklık eğrileri ve soğuma hızları belirlenmemiştir). Suya atılan biyetin Tablo II’de gösterilen değerlerden çok daha hızlı soğumuş olacağı aşikardır. Hatta havada doğal olarak soğuyan biyetin bile Tablo II’deki değerlerden çok daha yüksek bir soğuma hızı ile soğumuş olabileceği de unutulmamalıdır. Duş altındaki biyetler topluca bir arada olduklarından, daha büyük olan toplu kütleleri nedeniyle, püskürtülen suya rağmen, havada tek başına soğuyan biyetten bile daha yavaş soğuyabilmesi bir olasıdır. Ancak, kodlanan biyetlerin tümünün soğuma hızları literatürde verilen soğuma hızlarından daha yüksektir.

Homojenleştirilen ve soğutulan biyetler, 30 ve 75 ekstrüzyon oranı (R) uygulanarak 5 mm/s ekstrüzyon hızı ile basılmıştır. Ekstrüzyon hızı, zımba ilerlemesi-zaman eğrisi yardımıyla kontrol edilmiştir. 450 °C biyet sıcaklığı, 400 °C kovan sıcaklığı ve kalıp ilk sıcaklığı ise 182 °C ile 197 °C arasında tüm deneylerde sabit tutulmuştur.

Ayrıca, AA 6063 Al-alışımı ekstrüzyon ürünlerinin yaşlandırma işlemi ile mekanik özelliklerindeki iyileşme derecelerini görmek üzere, AA 6063 Al-alışımı numuneleri belirli sıcaklık ve sürelerinde yaşlandırma işlemine tabi tutulup, optimum özellik iyileşmeleri için gerekli sıcaklık ve zaman değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 1:

Homojenleştirme fırınında farklı konumlardaki kodlanan biyetlerin ısınma eğrileri.

**Tablo II. Homojenleştirme işlemi yapılan biyetlerin 450 °C ile 200 °C arasındaki soğuma hızları.**

Biyet	Soğuma Hızı (°C/dak)
N1	10,1
N2	9,1
N3	8,2
N4	7,7

### 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Homojenleştirilen ve sonrasında belirli soğuma hızları ile soğutulan numunelerin mekanik özellikleri Tablo III'de verilmiştir. Kodlanan 4 farklı biyetten sadece N3 kodlu biyetin mekanik özelliklerinin diğerlerinden farklı olduğu, geriye kalan 3 biyetin ise birbirine yakın mekanik özellikler sergilediği görülmektedir. Tüm biyetlerin mekanik özellikleri standartlarda öngörülen minimum değerlerin üzerindedir. Ulaşılan mekanik özellikler, biyetlerde mevcut soğuma hızlarıyla arzu edilen ince Mg<sub>2</sub>Si faz dağılımının elde edilebildiğine işaret etmektedir. Ayrıca, bir miktar Mg ve Si atomlarının katı eriyik içerisinde hapsedilmiş olması da söz konusu olabilir. Ekstrüzyon ürünüde istenen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için biyetlerin iç yapısında homojenleştirme sonrası uygulanacak soğutma hızı ile ekstrüzyon sırasında kolayca çözünebilecek ve pres çıkışında tamamıyla katı eriyiğe geçebilecek büyüklükte Mg<sub>2</sub>Si fazlarının mevcut olması gerekmektedir.

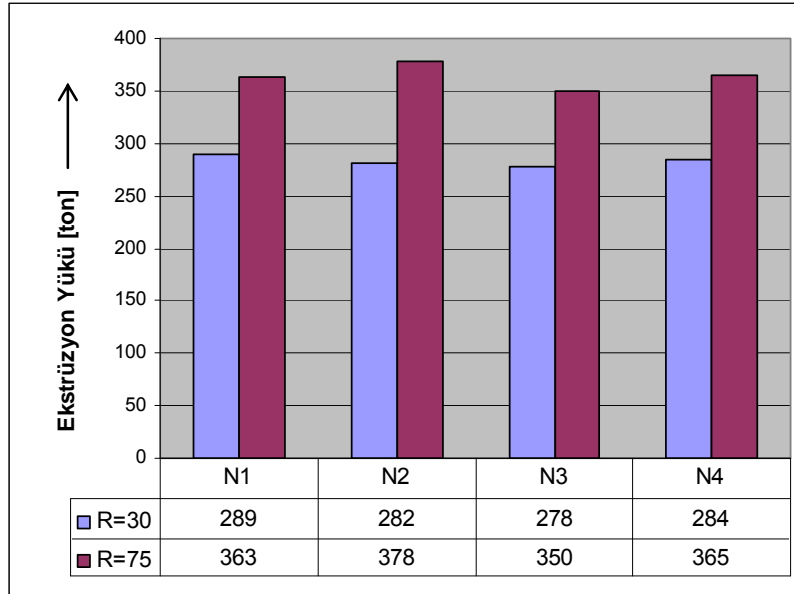
Dikkate alınacak bir diğer hususta değişik konteynerlerdeki biyetlerin farklı soğuma hızları ile soğumalarıdır. Özellikle, duşların önünde ilk sırada yer alan konteynerlerdeki biyetler oldukça hızlı soğumuşlardır. Homojenleştirme fırını içerisinde de 45 °C sıcaklığa kadar değişen sıcaklık farklılıkları söz konusu olmuştur. Bu sıcaklık farkı, Mg ve Si atomlarının katı eriyiğe alınması yönünden önemli bir problem yaratmamaktadır. Ancak, homojenleştirme sırasında AlFeSi çökeltilerinin şekil, dağılım ve morfolojilerinde yer alacak değişikliğin ekstrüzyon işlemini önemli derecede etkileyeceği literatürde belirtilmektedir (Couper, 2006, Osada, 2003, Mulazimoglu ve diğ., 1996).

**Tablo III. Biyetlerin homojenleştirme koşullarına bağlı olarak mekanik özellikleri.**

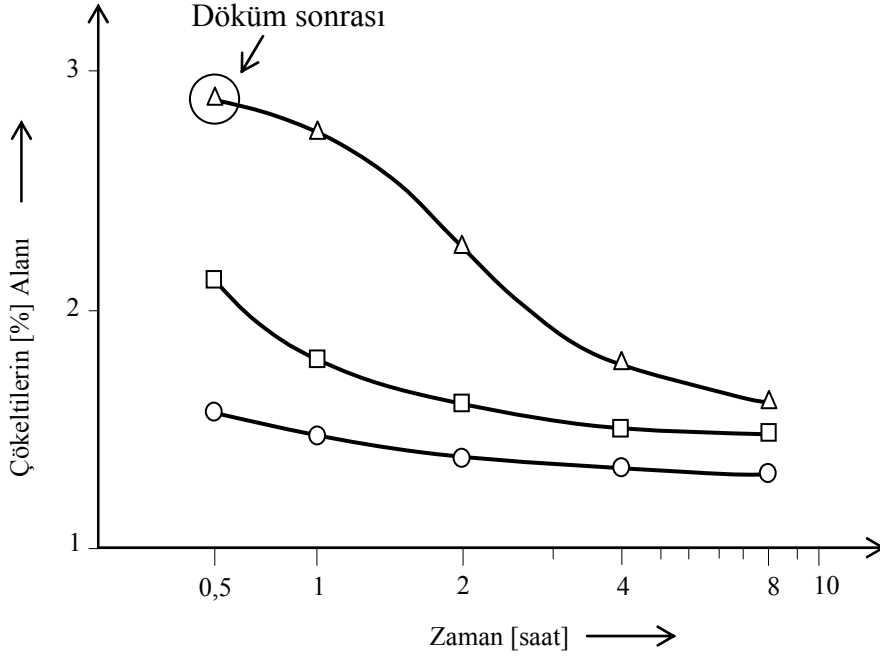
Biyet	Sertlik [HB]	Akma Dayanımı [N/mm <sup>2</sup> ]	Kopma Dayanımı [N/mm <sup>2</sup> ]	Uzama [%]
N1	47	65	164	26
N2	48	69	169	26
N3	54	82	187	31
N4	47	63	156	28
Havada Soğutulan	47	67	160	27
Suda Soğutulan	54	80	184	27
Standart Minimum Değerler	-	59	147	12

Homojenleştirilen ve sonrasında belirli soğuma hızları ile soğutulan N-kodlu numunelerin, 30 ve 75 ekstrüzyon oranlarındaki (R) ekstrüzyon yükleri Şekil 2’de verilmiştir. Homojenleştirme sıcaklığı olan 580 °C’ye ulaşım en az 2 saat bekleyen N3 kodlu biyetin her iki ekstrüzyon oranında da ekstrüzyon yükü diğer numunelere göre daha düşük değerlerde kalmıştır. Özellikle bu durum R=75 iken daha belirgindir. N3 numunesi, çözünmenin en etkin olduğu ve bu suretle soğuma esnasında daha ince çökelti partiküllerinin elde edilebildiği numunedir. Dolayısıyla, yüksek ekstrüzyon sıcaklığında söz konusu mekanik özellikleri yükselten ince çökelti partikülleri kolaylıkla katı eriyik içerisine alınarak ekstrüzyon esnasındaki yükün azalmasına sebebiyet vermektedir.

Uygun homojenleştirme ve sonrasında uygun soğutma koşullarına sahip N3 kodlu biyette, döküm yapıdaki çökeltilerde bulunan Mg hızla çözünmüştür. Biyetlerdeki en düşük sıcaklık olan 545 °C’de dahi 30 dak. süre sonunda bu çökeltilerdeki Mg ve Si tamamen çözünüp katı eriyiğe alınır ve yapı içindeki kararlı dağılımlarını kolaylıkla sağlayabilirler. AlFeSi fazlarının  $\beta \rightarrow \alpha$  dönüşümleri ise daha yavaş seyreden bir olaydır. Homojenleştirme sıcaklığı ve süresi ile birlikte dönüşüm artmaktadır. Homojenleştirme işlemi 560 °C ve 590 °C’de yapılan numunelerdeki AlFeSi çökeltilerinin alan yüzdesinin, homojenleştirme sıcaklığı ve süresi ile değişimi Şekil 3’de gösterilmiştir. 560 °C için iki ayrı eğri verilmiştir. Numunelerden bir grubu 560 °C’a ani olarak ısıtılmış iken diğer grup ise 8 saatte lineer bir hızla ısıtılmıştır. İki eğri arasındaki bu fark, 8 saatlik ısınma süresi içinde büyük bir oranda çözünmenin gerçekleştiğidir. Çökeltilerdeki Mg’un da bu ısınma süresi içinde çözündüğü tahmin edilmektedir (Beatty 1977).

**Şekil 2:**

*Homojenleştirme koşullarının ekstrüzyon oranına bağlı olarak ekstrüzyon yüküne etkisi.*



Şekil 3:

*AlFeSi çökeltisi miktarının homojenleştirme sıcaklığı ve süresi ile değişimi (Beatty, 1977).*

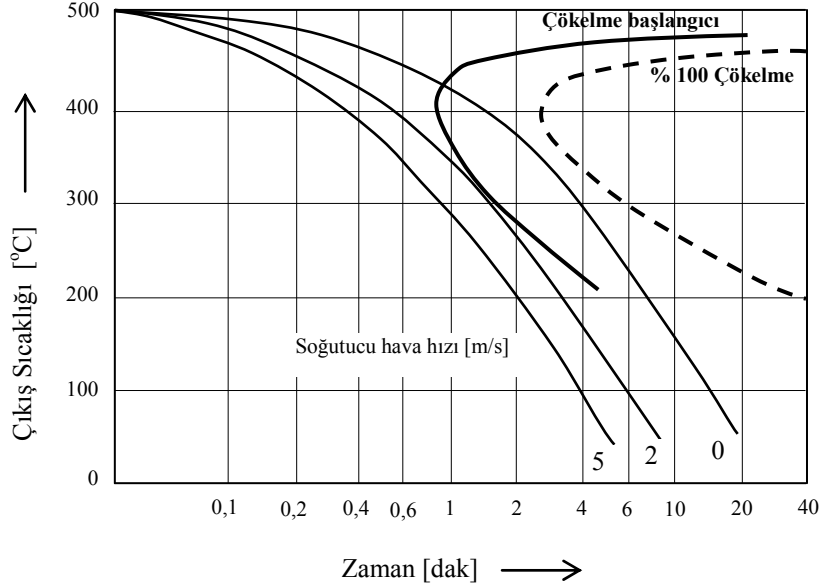
Δ 560 °C'a ani olarak ısıtılan numuneler (sonrasında bekleme süresi).

□ 560 °C'a 8 saatte lineer ısıtılan numuneler (sonrasında bekleme süresi).

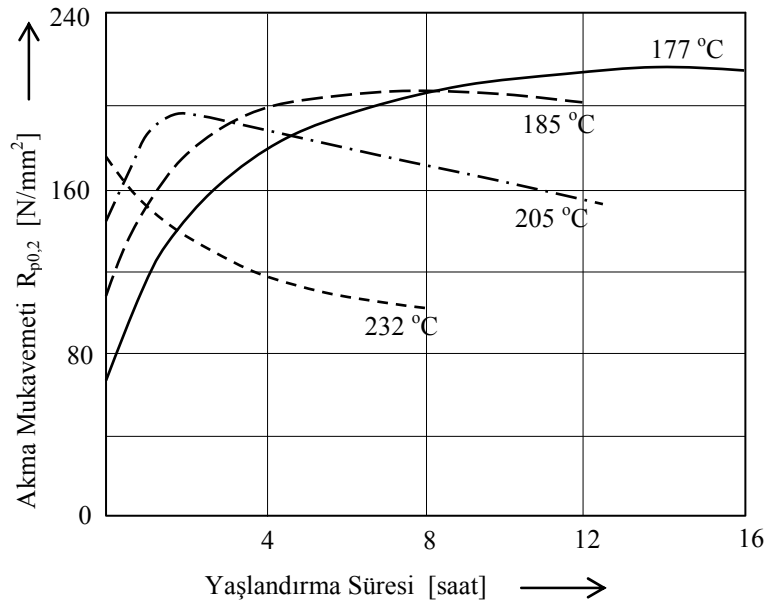
O 590 °C'a 8 saatte lineer ısıtılan numuneler (sonrasında bekleme süresi).

AA 6063 Al-alaşımında ekstrüzyon sonrası mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için bazı durumlarda yaşlandırma ısıl işlemine de ihtiyaç duyulmaktadır. AA 6063 Al-alaşımının ekstrüzyonunda doğrudan doğruya pres çıkışında ürünün tam dayanıma ulaştırılabilmesi de mümkündür. Ancak, ekstrüzyon işlemi esnasında biyetin homojenleştirme koşullarına ve sonrasındaki soğutma hızına bağlı olarak pres çıkışında ürünün tamamıyla katı eriyiğe ( $\alpha$ ) ulaşmış olması gerekir (sertleştirici  $Mg_2Si$  çökelti fazlarının çözünmesi). Bu yüzden, homojenleştirme koşulları ve sonrasındaki soğutma hızı ekstrüzyon işleminde son derece önemlidir ve nihai ürünün, ek ısıl işlemlere ihtiyaç duyulmadan kullanıma sunulabilmesine imkan tanır. Ayrıca, biyet sıcaklığı ve basma hızı, ürünün çıkış sıcaklığının çözünme sıcaklığında olmasını sağlayacak şekilde seçilmesi gerekir. Uygulamada genellikle biyet sıcaklığı 450-480°C arasındadır. Profil çıkış hızı ise profil kesitinin karmaşıklığına bağlı olarak 35-80 m/dak arasında değişir. En yüksek ekstrüzyon hızına ulaşabilmek için, biyet sıcaklığının mümkün olduğu kadar düşük tutulması gerekir. Zira, yüksek hızlarda profil çıkış sıcaklığı daha yüksek değerlere çıkacaktır. Çökelmeyi de en düşük seviyede tutabilmek için biyetlerin işlem sıcaklığına hızla ısıtılması gerekir. Biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı koordine edilerek ekstrüzyon sırasında şekil değiştirme bölgesindeki sıcaklığın çözünme sıcaklığının üzerinde ( $\sim 520^\circ C$ ) olması sağlanır. Böylece homojenleştirmeden ve sonrasındaki soğutmadan ileri gelen ince  $Mg_2Si$  çökeltileri tekrar çözünürler. Ancak, uygun yapılamayan homojenleştirme işlemi ve sonrasındaki soğutma prosesi sonucunda istenmeyen kaba çökelti kalabilir. Bu husus, nihai ürünün mekanik özelliklerini kötü yönde etkiler. Nihai ürüne ekstrüzyon çıkışında da soğutma işlemi uygulanabilir. Ancak, bu alaşım için kritik soğutma hızı çıkan profilin suda soğutulmasını gerektirecek kadar yüksek değildir. Bu nedenle, profilin fanlarla hava akımı sağlanarak soğutulmasında fayda vardır ve böylece profilin çarpılması da önlenmiş olur. Çıkış tablasında hava konveksiyonu ile 520-540°C sıcaklığından 200 °C sıcaklığa soğutma, müteakip yaşlanma sertleşmesi için yeterli olabilmektedir. Pres çıkışında soğutulan profilin iç yapısındaki  $Mg_2Si$  fazının çökeltme eğiliminin yüksek olduğu sıcaklık aralığı 425°C ile 270°C arasındadır. Dolayısıyla, soğutmanın bu aralıkta özellikle hızlı yapılması gerekir. Tam sertleşme için ortalama 70 °C/dak'lık bir

soğutma hızı yeterlidir. Şekil 4’de verilen zaman-sıcaklık-çökeltme diyagramı söz konusu alaşım için çeşitli soğuma hızlarındaki çökeltme durumunu özetlemektedir. Ekstrüzyon sonrası profilin dayanımı, ince çökelti halinde artan  $Mg_2Si$  miktarı ile artar, ancak uzama oranı düşer. Yaşlandırma sıcaklığı ve süresinin, dayanımın düşmemesi açısından çok iyi ayarlanması ve kontrol edilmesi gerekir. AA 6063 Al-alaşımının çeşitli sıcaklıklardaki yaşlandırma süresine bağlı olarak akma dayanımının ( $R_{p0,2}$ ) değişimi Şekil 5’de görülmektedir.



Şekil 4:  
AA 6063 Al-alaşımının zaman-sıcaklık-çökeltme diyagramı (Altıntaş, 1984).



Şekil 5:  
AA 6063 Al-alaşımının yaşlandırma sıcaklığı ve süresine bağlı olarak akma dayanımının ( $R_{p0,2}$ ) değişimi (Altıntaş 1984).



**Tablo IV. AA 6063 Al-alaşımının yaşlandırma deney sonuçları.**

Numune	Yaşlandırma Sıcaklığı ve Süresi	Sertlik [HB]	Çekme Mukavemeti [N/mm <sup>2</sup> ]
1	180 °C 6 saat	71	217,2
2	180 °C 8 saat	72	222,3
3	200 °C 6 saat	63	197,3
4	200 °C 8 saat	64	198,2

Not: Tüm numuneler için katı eriyiğe alma sıcaklığı ve süresi eşit alınmıştır.

Tablo IV’de verilen yaşlandırılan numunelerin mekanik özellikleri ile, havada soğutulan numunenin (Tablo III) karşılaştırıldığında yaşlandırma ile meydana gelen iyileşme çok belirgin şekilde ortaya konmaktadır. 1 ve 2 no’lu numunelerin sertlik değerlerinde havada soğutulan numuneye göre yaklaşık %50’nin üzerinde bir iyileşme meydana gelmiştir. 180°C-8 saat yaşlandırma koşulunda AA 6063 Al-alaşımın sertliği 72 HB, çekme mukavemeti ise 222 N/mm<sup>2</sup> değerlerine kadar yükseltilebilmektedir. Özellikle sıcaklığın yaşlandırma işlemi üzerindeki etkisi Tablo IV’den açık bir şekilde görülmektedir. 200 °C’de yapılan yaşlandırma işlemlerinde numunelerin aşırı yaşlanma bölgesine girdiği ve bu yüzden de sertliklerinin ve mukavemetlerinin düştüğü söylenebilir. Bu sebepten dolayı, bu tür alaşımlarda optimum mekanik özelliklerin eldesi için yaşlandırma sıcaklığı ve süresinin çok iyi seçilmesi gerekir. Ancak, yaşlandırma işlemi öncesi doğru sıcaklıkta katı eriyiğe alma işlemi ve uygun soğutmanın önemini de vurgulamak gerekir. Zira, biyetlerin homojenleştirme ve soğutma işlemlerindeki dikkate alınması gereken hususlarında, bu temel esas yatmaktadır.

#### 4. SONUÇLAR

1. Fırına aynı anda şarj edilen farklı konumdaki biyetler aynı homojenleştirme koşullarına sahip olamamışlardır ve dolayısıyla biyetler farklı mekanik özellikler sergileyerek farklı ekstrüzyon özellikleri ortaya koymuşlardır. Bu yüzden, biyetlerin aynı homojenleştirme koşullarına sahip olabilmesi ve fırın içi sıcaklığın her bölgede homojen bir dağılım göstermesi için gerekli tedbirlerin alınması şarttır.
2. Beklenen mekanik özellikler ve istenen ekstrüzyon özellikleri için, homojenleştirme sonrası uygulanacak soğutma işleminde de uygun soğutma ortamının oluşturulabilmesi ve tüm biyetlere aynı soğutma işleminin uygulanabilmesi gerekmektedir.
3. Biyetlere uygun homojenleştirme ve soğutma işlemi uygulandığı takdirde en iyi mekanik özelliklerin elde edilmesinin yanında aynı zamanda ekstrüzyon yükünde de düşüş meydana gelmektedir.
4. Biyetler uygun homojenleştirme işlemine tabi tutulduğunda ve aynı zamanda biyetlere uygun ekstrüzyon parametreleri uygulandığında yaşlandırma işlemine ihtiyaç duyulmadan da pres çıkışında uygun soğutma ile ekstrüzyon ürünlerinde istenen mukavemet değerleri elde edilebilmektedir.
5. AA 6063 Al-alaşımı ekstrüzyon ürünlerinde yapılacak uygun bir yaşlandırma (180 °C-8 saat) ile sertlik 72 HB, çekme mukavemeti ise 222 N/mm<sup>2</sup> değerlerine kadar yükseltilebilmektedir.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Al-Marahleh, G. (2006) Effect of heat treatment parameters on distribution and volume fraction of Mg<sub>2</sub>Si in the structural Al 6063 alloy, *Metal Science and Heat Treatment*, 48 (5-6), 205-209.
2. Altıntaş, S. (1984) AlMgSi<sub>0,5</sub> ekstrüzyonu ve mekanik özelliklere etki eden parametreler, *Boğaziçi Üniversitesi Araştırma Raporu*.
3. Ardell, A. J. (1985) Precipitation hardening, *Metallurgical Transactions*, 2131-2165.
4. Aydın, H. (2002) İntermetalik faz aşılama yöntemiyle Al-Cu-Mg alaşımında aşınma dayanımının iyileştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, U.Ü. Fen Bilimleri Enst., Bursa.

5. Barry, W. G. and Hains, R. W. (1977) Current and new AA 6060 series extrusion alloys, *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Aluminium Extrusion Technology Seminar*, Atlanta, 6-10.
6. Beatty, E. C. (1977) How billet structure effect extrusion performance of 6061 alloy, *Kaiser Aluminum&Chemical Corp. Araştırma Raporu*.
7. Beatty, E. C. (1981) How the properties and microstructure of 6063 alloy extrusions depend upon fabrication practice, *Kaiser Aluminum&Chemical Corp. Araştırma Raporu*.
8. Bourget, J.-P., Fafard, M., Shakeri, H.R. ve Côté, T. (2009) Optimization of heat treatment in cold-drawn 6063 aluminium tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (11), 5035-5041.
9. Couper, M.J., Rinderer, B. ve Yao, J. (2006) Characterisation of AlFeSi intermetallics in 6000 series aluminium alloy extrusions, *Materials Science Forum*, 519-521, 303-308.
10. Demirci, A. H. (2003) *Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi*, Alfa, İstanbul.
11. Demirci, A. H. (2004) *Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi*, Alfa, İstanbul.
12. Hatch, J. E. (1984) *Aluminium*, ASM, Ohio.
13. <http://www.aluminyumsanayi.com/aluminyumprofilgenel.htm>, Erişim Tarihi: 25.07.2009. Konu: Alüminyum ekstrüzyon profil özellikleri.
14. Karamış, M.B. ve Halıcı, İ. (2007) The Effect of homogenization and recrystallization heat treatments on low-grade deformation properties of AA 6063 aluminium alloy, *Materials Letters*, 61, 944-948.
15. Larouche, A., Caron, Y. ve Kocafe, K. (1998) Impact of water extraction and casting conditions on ingot thermal response during D.C. casting, *Light Metals*, 1059-1064.
16. Mulazimoglu, M.H., Zaluska, A., Gruzleski, J.E. ve Paray, F. (1996) Electron microscope study of Al-Fe-Si intermetallics in 6201 aluminum alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27 (4), 929-936.
17. Osada, Y. (2003) EPMA mapping of small particles of  $\alpha$ -AlFeSi and  $\beta$ -AlFeSi in AA6063 alloy billets, *Journal of Materials Science Letters*, 22 (20), 1385-1387.
18. Saha, P. K. (1986) *Aluminium Extrusion Technology*, McGraw-Hill Inc.
19. Sönmez, H. (1989) *Metal Ekstrüzyonu*, İstanbul.
20. Tekkaya, A.E., Schikorra, M., Becker, D., Biermann, D., Hammer, N. ve Pantke, K. (2009) Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips, *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (7), 3343-3350.
21. Turbalıoğlu, K. (2008) AA 6063 Alüminyum alaşımının düşey sürekli döküm yönteminde üretim parametrelerinin geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük.

Makale 16.04.2007 tarihinde alınmış, 02.11.2009 tarihinde düzeltilmiş, 05.11.2009 tarihinde kabul edilmiştir. İletişim Yazarı: H. Aydın (hakanay@uludag.edu.tr).