



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**EKSTRÜZYON YÖNTEMİYLE İKİ FİGÜRLÜ KALIP
KULLANILARAK ÜRETİLMİŞ AA6060 ALÜMİNYUM
ALAŞIMLARINDA ÖN ISITMA SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN
YAŞLANDIRMA PROSESİ SONRASINDA SERTLİĞE OLAN
ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Akif DURNA

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ

AKSARAY, 2024

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 212304408 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Mehmet Akif DURNA tarafından hazırlanan “**EKSTRÜZYON YÖNTEMİYLE İKİ FİĞÜRLÜ KALIP KULLANILARAK ÜRETİLMİŞ AA6060 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA ÖN ISITMA SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN YAŞLANDIRMA PROSESİ SONRASINDA SERTLİĞE OLAN ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Prof. Dr. Fazlıye KARABÖRK

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Doç. Dr. Edip ÇETKİN

Batman Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Tez Savunma Tarihi: 24/06/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Mehmet Akif DURNA

TEŞEKKÜR

Pratiğe katkısı olacağını düşündüğüm bu çalışmada imalat esnasında görmüş olduğum zorlukların ve eksiklerin üzerine özellikle gitmek istedim. Maliyetli ve meşakkatli olsa da ortaya çıkan sonucun literatüre ve üretim sektöründe çalışma yapan şirketlere katkısı olacağını düşünüyorum.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince desteklerini, yardımlarını, hoşgörüsünü ve tecrübesini benden esirgemeyen değerli tez danışman hocama, Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ'a, en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tezimin maddi ve manevi destekçisi Konmetsan Alüminyum şirketine ve özelinde İbrahim H. ARLI'ya, imalat aşamasındaki her türlü yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Hayatımın dününde, bugününde ve yarınında zorlukların üstesinden gelmem de katkısı olan insanlara özellikle teşekkür etmek isterim. Bugünlere gelmem de pay sahibi olan babam Dursun'a, fikir hocam ve öncüm abim Muhammed'e; yaşantısıyla her daim örneğim olan abim Enes'e; hayatımın her anında desteğini esirgemeyen abim Tuncay'a; hayatım boyunca hakkını asla ödeyemeyeceğim canım ablam Fatıma'ya; birlikte büyüdüğüm, olgunlaştığım ve yaşlanacağım, hep yanımda olan sevgili eşim Hatice'ye; bu çalışma vesilesiyle büyük bir teşekkürü borç bilirim.

Ve tabi ki çocukluk arkadaşım, ilk öğretmenim, koşulsuz ve şartsız arkamda duran, yokluğunu hep hissettiğim ve hissedeceğim canım annem Melek'e sonsuz teşekkürlerle.

Mehmet Akif DURNA

AKSARAY, 2024

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK ARAŞTIRMALAR.....	3
2.1 Alüminyum Alaşımları.....	3
2.2 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımları	8
2.3 Ekstrüzyon Prosesi İçin Alüminyum Biletlerin Üretilmesi	10
2.3.1 Metal ergitme	10
2.3.2 Döküm.....	11
2.3.3 Homojenizasyon.....	12
2.4 Alüminyumun Ekstrüzyonu	13
2.4.1 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının ekstrüzyon işlem basamakları.....	16
2.4.2 Ekstrüzyon pres ve araçları	18
2.4.3 Ekstrüzyon işleminin parametreleri	20
2.4.4 Ekstrüzyonda sıcaklık	21
2.4.5 Ekstrüzyon oranı	25
2.4.6 Şekil faktörü.....	26
2.4.7 Profilin şekli.....	26
2.4.8 Ekstrüzyon prosesinde hızın etkisi.....	28
2.4.9 Ekstrüzyonla üretilmiş profillerde hatalar.....	30
2.5 Çökeltme Sertleşmesi Isıl İşlemi.....	32
2.6 Literatür Özeti	38
3. MATERYAL VE METOD.....	43
3.1 Çalışmada Kullanılan Alüminyum Alaşımı ve Özellikleri	43
3.2 Figür Adedi ve Ekstrüzyon Kalıp Detayları	44
3.3 Ekstrüzyon Oranı Kontrolü.....	45
3.4 Şekil Faktörü Kontrolü.....	46
3.5 Biyet Ön Isıtma ve Ekstrüzyon İşlemleri.....	46
3.6 Yaşlandırma Prosesi ve Sertlik Ölçümü	49
3.7 Mikroyapı Kontrolü	52
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	55
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ.....	75

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKSTRÜZYON YÖNTEMİYLE İKİ FİGÜRLÜ KALIP KULLANILARAK ÜRETİLMİŞ AA6060 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA ÖN ISITMA SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN YAŞLANDIRMA PROSESİ SONRASINDA SERTLİĞE OLAN ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Mehmet Akif DURNA

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ

ÖZET

Alüminyum alaşımları arasında ekstrüzyon imalat yönteminde yaygın kullanım alanına sahip alaşım türlerinden birisi de AA6060 serisi alaşımlardır. Alüminyum alaşımları, düşük yoğunluğa sahip olmasının yanında yüksek ısı iletkenliği, imalat kolaylığı, yüksek elektrik iletkenliği ve üstün korozyon direnci özelliklerine sahip olduğundan endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Ekstrüzyon prosesinin en kritik değişken parametreleri arasında yer alan ön ısıtma sıcaklığı, AA6060 alaşımları için görsel ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada AA6060 alaşımı kullanılarak ekstrüzyon yöntemi ile üretilen 2 figürlü köprülü bir profile ön ısıtma sıcaklık değişiminin sertliğe etkisi araştırılmıştır. Çalışma sırasında, deney numunelerine 185 °C’de 300 dk yapay yaşlandırma uygulanmış ve optik mikroskop kullanılarak mikro yapı değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda en yüksek sertlik değerleri 430,3 °C (1. figürde 59,07 HB, 2. figürde 58,71 HB) ve 440,2 °C (1. figürde 60,14 HB, 2. figürde 57,78 HB) sıcaklıklarında ölçülmüştür. Böylece bu çalışmada kullanılan kalıp figürleri için 440,2 °C sıcaklığından sonra ön ısıtma sıcaklıklarını arttırmanın pratikte bir faydasının olmadığı gösterilmiştir. Deney numunelerinin sertlikleri incelendiğinde, tüm numunelerin sertlik değerlerinin 55 HB’den büyük olduğu görülmektedir. Bu durumda işlenebilirlik değer aralığı (55-70 HB) sağlanmaktadır. Yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda AA6060 alaşımında sertliği arttırıcı yönde etki yapan Mg₂Si fazının homojen olarak dağıldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum ekstrüzyon, alüminyum alaşımları, AA6060 alaşımı, ön ısıtma sıcaklığı, figür adedi, sertlik, mikroyapı.

Haziran, 2024; 75 sayfa

M.Sc. THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF PREHEATING TEMPERATURE CHANGES ON HARDNESS AFTER THE AGEING PROCESS OF ALUMINIUM ALLOYS AA6060 PRODUCED BY EXTRUSION USING TWO-FIGURED DIE

Mehmet Akif DURNA

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. İsmail SARAÇ

ABSTRACT

Among aluminium alloys, AA6060 series alloys are one of the alloy types widely used in extrusion production. Aluminium alloys are preferred in industrial practise due to their low density, high thermal conductivity, ease of manufacturing, high electrical conductivity and superior corrosion resistance. Preheating temperature, which is among the most important variable parameters of the extrusion process, plays a role in improving the visual and mechanical properties of AA6060 alloys. In this study, the effect of preheating temperature variation on the hardness of a 2-figure hollow profile produced by extrusion method using AA6060 alloy was investigated. During the study, the samples were artificially aged at 185 °C for 300 minutes and the microstructure was assessed using an optic microscope. The highest hardness results were measured at 430,3 °C (59,07 HB for figure 1, 58,71 HB for figure 2) and 440,2 °C (60,14 HB for figure 1, 57,78 HB for figure 2). Thus, it is shown that there is practically no benefit in increasing the preheating temperatures after 440,2 °C for the die figures used in this study. When evaluating the hardness of the test samples, it was found that the hardness values of all samples were above 55 HB. Thus, the value range for machinability (55-70 HB) is provided. As a result of the microstructure investigations, it was determined that the Mg₂Si phase, which increases the hardness of AA6060 alloy, is homogeneous.

Keywords: Aluminium extrusion, aluminium alloys, AA6060 alloy, preheating temperature, figure quantity, hardness, microstructure.

June, 2024; 75 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Isıl işlem durumuna göre alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.....	4
Şekil 2.2. Ekstrüzyon öncesi ve sonrası üretim süreçleri.....	10
Şekil 2.3. Temel alüminyum ekstrüzyon işlem basamakları	17
Şekil 2.4. Ekstrüzyon pres araçları	18
Şekil 2.5. Ön ısıtma uygulanmış ekstrüzyona hazır bir biyetin transferi.....	19
Şekil 2.6. Ekstrüzyonun sınır eğrileri	21
Şekil 2.7. AlMgSi1 (AA6082) alaşımının sıcak ekstrüzyonundaki izotermeler	24
Şekil 2.8. Çalışmada kullanılan profil kesitindeki D_u 'nun gösterilmesi.....	27
Şekil 2.9. Kapalı profil.....	28
Şekil 2.10. Köprülü (açık) profil.....	28
Şekil 2.11. AA6063 alaşımında farklı biyet uzunlukları kullanılarak zımba hızının artmasıyla profil çıkış sıcaklığının değişimi	29
Şekil 2.12. Zımba pozisyonu ile ekstrüzyon basıncı arasındaki ilişki	30
Şekil 2.13. Yüzey yırtılması meydana gelen profil.....	31
Şekil 2.14. Kuyruklu yıldız kusuru	32
Şekil 2.15. Al-Mg ₂ Si faz diyagramı.....	33
Şekil 2.16. Çökeltme sertleşmesinin temel basamakları.....	34
Şekil 2.17. Yaşlandırma işleminde zaman- sıcaklık döngüsü.....	34
Şekil 2.18. a. Tek fazlı katı çözeltinin çözeltiye alma ısıl işlemi sonucu, b. Malzemenin ani soğuması ile oluşan çekirdeklenme durumu	36
Şekil 2.19. Yaşlandırma aşamalarının gösterimi	37
Şekil 2.20. Yaşlandırma işlemi ile β oluşumunun gösterimi	37
Şekil 2.21. Farklı sıcaklıklar için yaşlandırma süresinin dayanıma olan etkisi	38
Şekil 3.1. Alaşımın uygunluğunu ölçmede kullanılan spektrometre.	43
Şekil 3.2. Figür numaralandırılması.	44
Şekil 3.3. Deneyde kullanılan profilin kesiti.	45
Şekil 3.4. Ön ısıtma işlemi esnasında kullanılan biyet fırını.	48
Şekil 3.5. Deney profilinin elde edilmesinde kullanılan alüminyum ekstrüzyon pres ...	48
Şekil 3.6. Örnek profil üretimi.....	49
Şekil 3.7. Yapay yaşlandırma prosesinin yapıldığı termik fırın.	51
Şekil 3.8. Sertlik ölçümü ve mikroyapı kontrolü için kesilen numuneler.	51
Şekil 3.9. Brinell sertliği ölçüm cihazı.	52
Şekil 3.10. Metkon- Servocut M300 marka ve model testere.....	53
Şekil 3.11. Deney numunelerinin zımparalandığı zımpara makinesi.	54
Şekil 3.12. Mikroyapı kontrollerinin yapıldığı optik mikroskop.....	54
Şekil 4.1. 1. Figür için ön ısıtma sıcaklıkları ve ekstrüzyon sıcaklık değerleri.	56
Şekil 4.2. 2. Figür için ön ısıtma sıcaklıkları ve ekstrüzyon sıcaklık değerleri.....	56
Şekil 4.3. Yapay yaşlandırma işlemi sonrası numunelerin sertlik sonuçları	57
Şekil 4.4. AA6082 alaşımında biyet durumunda (a), sıcak ekstrüzyon işlemi sonrasında (b), çözeltiye alma ısıl işlemi sonrasında (c) ve yaşlandırma ısıl işlemi sonrasında mikro yapı görüntüleri.....	63
Şekil 4.5. 430,3 °C biyet ön ısıtma sıcaklığı için; 1. figürün ve 2. figürün yapay yaşlandırma sonrası mikroyapı görüntüleri.....	64
Şekil 4.6. 440,2 °C biyet ön ısıtma sıcaklığı için; 1. figürün ve 2. figürün yapay yaşlandırma sonrası mikroyapı görüntüleri.....	64
Şekil 4.7. 445,2 °C biyet ön ısıtma sıcaklığı için; 1. figürün ve 2. figürün yapay yaşlandırma sonrası mikroyapı görüntüleri.....	64

Şekil 4.8. 450,1 °C biyet ön ısıtma sıcaklığı için; 1. figürün ve 2. figürün yapay yaşlandırma sonrası mikroyapı görüntüleri.....	65
Şekil 4.9. 460,2 °C biyet ön ısıtma sıcaklığı için; 1. figürün ve 2. figürün yapay yaşlandırma sonrası mikroyapı görüntüleri.....	65
Şekil 4.10. 470,3 °C biyet ön ısıtma sıcaklığı için; 1. figürün ve 2. figürün yapay yaşlandırma sonrası mikroyapı görüntüleri.....	65



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Alüminyum dövme alaşımlarının özellikleri	5
Çizelge 2.2. Alüminyum alaşım serileri, ısıtma işlem durumu ve empürite elementler... 6	6
Çizelge 2.3. Döküm alüminyum alaşımlarının özellikleri	7
Çizelge 2.4. Temperlenme kodlamaları ve detayları	8
Çizelge 2.5. Bazı takviye elementler ve alaşıma olan katkıları	9
Çizelge 3.1. AA6060 Alüminyum alaşımı kimyasal bileşen değerlerinin karşılaştırılması	43
Çizelge 3.2. Deney sürecinde kullanılan ekstrüzyon presin teknik özellikleri	47
Çizelge 4.1. Ön ısıtma ve kalıp çıkış sıcaklıkları.....	55
Çizelge 4.2. Deney numunelerinin sertlik test sonuçları.	58



SİMGELER VE KISALTMALAR

D_u	Profilin köşe noktalarından çizilen daire
E.O.	Ekstrüzyon oranı
EN	European Norms
GP	Guiner-Preston
HB	Brinell
I_o	Biyet çapı
MPa	Megapascal
Å	Ångström
Ø	Çap ölçüsü (mm)
v_p	Zımba hızı
°C	Santigrat
°F	Fahrenhayt



1. GİRİŞ

Günümüz imalat pazarında ihtiyacı giderek artan alüminyum alaşımları, diğer metallerle kıyas edildiğinde hafifliklerinin yanı sıra sahip oldukları gelişmiş yorulma mukavemeti, şekil hafızaları ve yüksek korozyon direnci gibi üstün özellikleri sebebiyle mimari, otomotiv, enerji, makine elemanları, havacılık, denizcilik ve aydınlatma endüstrileri gibi birçok büyük endüstriyel alanda talep görmektedir. Ayrıca, şekillendirilebilir olmaları da alüminyum alaşımlarını kullanıldığı sektörde avantajlı hale getirmektedir (Aluminium Association, 1975).

Alüminyum ekstrüzyon işlemleri ile üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyen birden fazla parametre vardır. Bunlar ekstrüzyonun türü, çalışma sıcaklığı, ekstrüzyon oranı, sürtünme kuvveti, ekstrüzyon hızı ve malzemenin akma gerilmesi olarak sıralanabilir. Bu parametrelerden herhangi birisinin kusurlu olması üretilen profilin mekanik özelliklerine doğrudan etki edebilmektedir.

Mekanik özelliklere etki eden parametreler, alüminyum ekstrüzyon sektöründe üretim yapan şirketlerin mekanik özellikleri kontrol edebilmesi açısından problemler oluşturmaktadır. Özellikle sertlik değerleri malzemenin işlenebilirliği açısından önemli bir referans olmaktadır. İstenilen sertlik değerlerine ulaşamadığı durumda imalat verimi azalacak, hurda miktarı artacaktır. Hammaddenin elde edilmesi ve üretim sırasında harcanan enerji, iş gücü ve hurdaya ayrılan profil maliyetleri düşünüldüğünde % 60 oranlarına varan kayıplar oluşmaktadır.

Ekstrüzyon sıcaklığı, alüminyum alaşımlarının tane boyutunu ve dağılımını belirler. Daha yüksek ekstrüzyon sıcaklıkları genellikle daha büyük ve daha düzensiz tane boyutlarına neden olabilir. Bu durum, malzeme yapısının homojen dağılımına engel olmaktadır. Ekstrüzyon sıcaklığındaki değişim yapay yaşlandırma için gereken süreyi belirlemektedir. Yüksek ekstrüzyon sıcaklıklarında imal edilen bir ürün için düşük sıcaklıklar ve daha uzun süreler yapay yaşlandırma işlemi uygulanmalıdır. Bu etkilerin tam olarak anlaşılması için detaylı kontrol edilmesi, istenen mekanik özelliklere sahip olan malzemelerin üretilmesinde önemlidir. Bu nedenle, ekstrüzyon süreçlerinde ekstrüzyon sıcaklığının uygun aralıklarda olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir.

6xxx serisi alaşımların ekstrüzyonunda optimum sıcaklık aralığı 430-480 °C olarak tecrübe edilmiştir. Bu sıcaklık aralığı, malzemenin yeterli plastik şekil değiştirme kabiliyetini kazanmasını ve tane yapısının korunmasını sağlamaktadır. Ekstrüzyon sonrasında hızlı soğutma yapılarak yüksek sertlik değerleri elde edilmektedir. Sonuç olarak ekstrüzyon sıcaklığı, 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının mikroyapısal özellikleri ve sertliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Ekstrüzyon sıcaklığının hassas bir şekilde kontrol edilmesi ve uygun ısıt ışlem proseslerinin kullanılmasıyla istenilen sertlik değerleri ve mekanik özellikler elde edilebilir.

Yapılan bu deneysel çalışmada; kalıp elik türü, kalıp tavlama sıcaklık ve süresi, kovan sıcaklığı, ekstrüzyon hızı ve soğutma faktörleri sabit olmak şartıyla, AA6060 alaşımında farklı biyet ön ısıtma sıcaklıklarında iki figürlü bir ekstrüzyon kalıbı kullanılarak deney numuneleri üretilmiştir. Numunelerin yapay yaşlandırma ısıt ışlem prosesi (sıcaklık ve süre sabit olmak koşuluyla) sonucunda sertliğe olan etkileri araştırılmıştır. Sertlik ölçümleri Brinell sertlik ölçüm metodu kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca alışma optik mikroskop görüntüleriyle mikroyapı incelemeleriyle desteklenmiştir. Yapılan bu çalışmanın amacı, AA6060 alaşımında, iki figürlü bir kalıp kullanılarak yapılan ekstrüzyon işleminde, farklı ön ısıtma sıcaklıklarının yapay yaşlandırma sonrasında sertlik değerlerine olan etkilerini göstermektir.

2. TEORİK ARAŞTIRMALAR

2.1 Alüminyum Alaşımları

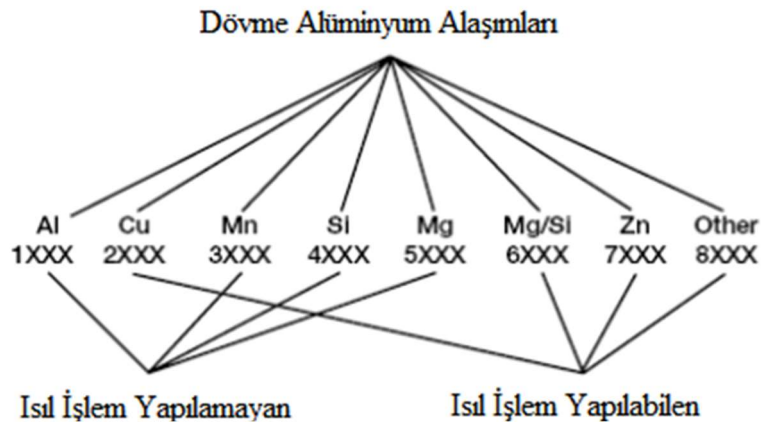
Alüminyum hafif metaller grubuna giren ve teknik alanda çok kullanılan bir metaldir. Doğada bileşikler halinde bulunur ve yerkabuğunun % 8'ini oluşturur. Özgül ağırlığı $3,8 \text{ gr/cm}^3$ 'den küçük olan elemanlar hafif metaller grubuna girer. Hafif metaller sınıfında alüminyum, magnezyum, potasyum, lityum ve berilyum bulunur. Alüminyum ise hafiflik sıralamasında magnezyum ve berilyumdan sonra gelir. Hafif metaller arasında alüminyum ve magnezyum en önemlileridir. Ayrıca alaşımlarında mukavemeti önemli miktarda artarken yoğunluğu az miktarda artar. Yüksek elektrik ve ısıl iletkenliği, korozyona dayanıklılığı, imalat kolaylığı ve diğer metaller ile yüksek çekme mukavemetine sahip alaşımlar oluşturabilmesi alüminyumun önemini gittikçe artırmaktadır. Isı ve ışığı çok iyi yansıtmakta olup, manyetik değildir (Eruslu vd., 2000).

Alüminyum, yumuşak ve hafif bir metal olup mat gümüş rengindedir. Bu renk havaya maruz kaldığında üzerinde oluşan ince oksit tabakasından ileri gelmektedir. Alüminyum, sanıldığı gibi aksine zehirli ve manyetik bir yapıya sahip değildir. İşlenme esnasında alüminyum kıvılcım çıkarmaz. Yoğunluğu, çeliğin veya bakırın yaklaşık üçte biri kadar olmasına rağmen kolaylıkla dövülebilir ve makinede işlenebilir. Saf alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 49 MPa iken alaşımlandırıldığında bu değer 700 MPa'ya kadar çıkabilmektedir (Saraç ve Durna, 2023).

Alüminyumun endüstriyel pazarda kullanımı demirden sonra gelmektedir. Saf alüminyumun, düşük mekanik özellikleri ve yumuşak bir yapısı olduğundan istenilen özellikleri elde edebilmek için silisyum, magnezyum, demir, bakır ve çinko gibi elementlerle alaşımlandırılır. Bakır, alüminyuma sertlik, mukavemet ve işlenebilirlik kolaylıkları sağlarken silisyum, ısıl dayanımı artırır ve ekstrüzyon esnasında imalatı hızlandırarak üretim verimini yükseltmektedir. Ayrıca alaşımın içinde bulunan silisyum oranı arttıkça sertlik değerleri de artmaktadır. Bu nedenle alüminyum alaşımları, kullanılan alaşım elementlerine göre sınıflandırılmaktadır. Örneğin, 6xxx serisi alüminyum alaşımlarında Mg ve Si elementleri birlikte belirleyici olurken 4xxx serisi alüminyum alaşımlarında yalnızca Si, 5xxx serisi alüminyum alaşımlarında Mg belirleyici olmaktadır.

Alüminyum alaşımları, mühendislik ve endüstri alanında geniş bir kullanım yelpazesi sunan, çeşitli elementlerle birleştirilen alüminyumdan elde edilen malzemelerdir. Saf alüminyum, düşük yoğunluğu, yüksek korozyon direnci ve mükemmel elektriksel iletkenliği ile dikkat çekerken, mekanik mukavemet açısından zayıf kalmaktadır. Bu nedenle, alüminyum alaşımları, saf alüminyuma göre çok daha üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahiptir ve bu özellikler, alüminyum alaşımlarını modern mühendislik ve endüstriyel uygulamalar için vazgeçilmez kılmaktadır (Kvande, 1999).

Alüminyum alaşımları üretim yöntemine göre dövme ve döküm olmak üzere iki ana alt gruba ayrılabilir. Plastik deformasyonla oluşturulabilen alaşımlar, metal alaşımlarından farklı mikro yapılara ve bileşimlere sahiptir. Her ana gruptaki alaşımlar iki alt gruba ayrılabilir: ısıya dayanıklı alaşımlar ve ısıya dayanıklı olmayan alaşımlar. (Kvande, 1999). Dövme alüminyum alaşımlar Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Isıl işlem durumuna göre alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Daşcılar, 2006).

Isıl işlem yapılabilen dövme alüminyum alaşımlarının başlangıç mukavemeti manganez, silisyum, demir, magnezyum veya bunların bileşimlerinin sertleştirme etkisine bağlıdır. Isıl işlem yapılamayan alüminyum alaşımlar genellikle 1xxx, 3xxx, 4xxx veya 5xxx serileri ile belirtilir.

Gerinim sertleştirme temper ısı işlemi yeterli miktarda Mg içeren alaşımlarda kararlı özelliklerin elde edilmesini sağlar (Daşcılar, 2006).

Isıl işlem yapılamayan dövme alüminyum alaşımlarının mukavemetleri bakır, magnezyum, çinko ve silisyum gibi alaşım elementlerinin ilavesi ile artırılır. Bu

elementler ya tek başlarına ya da çeşitli bileşimler halinde yapıya ilave edilirse artan sıcaklıkla birlikte alüminyum içinde kati çözünürlüğü arttırdığı gözlemlenir. Bu alaşımları belirgin bir mukavemet artışı sağlayan ısıt işlemlere maruz bırakmak mümkündür (Aluminum Association, 2017). Çizelge 2.1’de ısıt işlem yapılabilen ve yapılamayan bazı alüminyum dövme alaşımlarının mekanik özellikleri ve uygulama alanları belirtilmiştir.

Çizelge 2.1. Alüminyum dövme alaşımlarının özellikleri (Askeland, 1998).

Alaşım	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	% Uzama	Uygulama alanları
Isıt işlem uygulanamayan alaşımlar				
1100 H18	165,52	165,52	10	Korozyon direnci
3003-0	110,34	41,38	35	İçecek kutuları
3003 H18	200	186,21	7	
4043-0	144,82	68,97	22	Kaynak malzemesi
4043 H18	282,76	168,97	1	
5056-0 % 5 Mn	289,66	165,5	35	Gemi parçaları
5056 H18	413,79	344,83	15	
Isıt işlem uygulanabilen alaşımlar				
2024-0 % 4,4 Cu	186,21	75,86	20	
2024-T4	486,97	324,14	20	
4032-T6 %12 Si %1 Mg	379,31	317,24	9	
6061-0 % 1 Mg %1 Si	124,14	56,7	27	Havacılık
6061-T6	310,34	275,85	15	
7075-0 % 5,6 Zn %2,5 Mg	267,06	103,45	17	
7075-T6	572,41	503,45	11	

1xxx serisi: Saf alüminyumdan oluşur ve ekstrüzyondan sonra işlenebilirlik kabiliyeti yüksektir. Bu alaşım türü genellikle gıda ambalajı, ev eşyaları ve elektrik kabloları gibi uygulamalarda kullanılır.

2xxx serisi (Al-Cu alaşımları): Yüksek mukavemet özelliklerine ve üstün elektrik direncine sahiptir. Bu alaşımların önde gelen örnekleri arasında 2024 ve 2014 alaşımları bulunur. 2024 alaşımı, havacılık endüstrisinde kullanılan önemli bir

alaşımdır ve yapısal parçaların yanı sıra uçak gövdelerinin ve pervanelerin üretiminde de kullanılmaktadır.

5xxx serisi (Al-Mg alaşımları): Üstün korozyon direnci ve kaynak becerisine sahip olan alaşım türüdür. Bu alaşım türleri; denizcilik, otomotiv ve yapısal uygulamalar gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle 5083 ve 5052 alaşımları, gemi yapımı, otomobil parçaları ve su tankları gibi denizcilik uygulamalarında kullanılmaktadır.

7xxx serisi (Al-Zn-Mg alaşımları): 7xxx serisi alaşımlar, yüksek mukavemet ve sertlik özellikleriyle bilinmektedir. Bu alaşımlar, özellikle yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilir. 7075 alaşımı, havacılık endüstrisinde yapısal parçaların üretiminde sıkça kullanılır. Ancak 7075 alaşımlarının işlenebilirlik kabiliyeti düşük olduğundan ekstrüzyon süreci yavaş ve maliyetli olmaktadır.

6xxx serisi (Al-Mg-Si alaşımları): Alüminyum ekstrüzyon sektöründe en çok kullanılan alaşım türüdür. Mükemmel işlenebilirlik, yüksek mukavemet ve korozyon direnci sağlar. 6060 alaşımı, genellikle mimari ve inşaat sektörlerinde, kapı ve pencere profilleri gibi ürünlerin üretiminde tercih edilirken, 6061 alaşımı daha yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda, örneğin otomotiv ve uzay sektörlerinde kullanılır.

Neredeyse her alaşım serisinde alüminyum elementine katkı olarak diğer elementler ilave edilmektedir. Bu elementler, oranına göre o alüminyum alaşım serisinin numaralandırılmasına etki etmektedir. Ayrıca ısıtılabilirliğine göre de kendi içinde sınıflandırılmaktadır. Çizelge 2.2’de dövme alüminyum alaşım serileri, ısıtılabilirlik kabiliyetleri ve empürite elementleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Alüminyum alaşım serileri, ısıtılabilirlik durumu ve empürite elementler (Saha, 2000).

Alaşım Serileri	Isıl İşlem Durumu	Empürite Elementler
1xxx	Uygun değil	Alaşımsız
2xxx	Uygun	Bakır
3xxx	Uygun değil	Manganez
4xxx	Uygun değil	Silisyum
5xxx	Uygun değil	Magnezyum
6xxx	Uygun	Silisyum- Magnezyum

Çizelge 2.2 (devamı). Alüminyum alaşım serileri, ısıtıl işlem durumu ve empürite elementler (Saha, 2000).

7xxx	Uygun	Çinko
8xxx	Uygun	Lityum

Saf haldeki alüminyum dövme imalat yönteminde tercih edilse de 7xxx serisi alüminyum alaşımlarından sonra en çok kullanılan 6xxx serisi alüminyum alaşımlarıdır. Çünkü 6xxx serisi alüminyum alaşımları levha, sac, profil, çubuk ve plaka olarak kullanılabilir. Şekil verilebilme özelliği yüksek olduğundan ve üstün mukavemet/yoğunluk oranından dolayı imalat sektöründe tercih edilmektedir.

Alüminyum ekstrüzyon sektöründe en çok tercih edilen alaşım türleri, uygulama alanlarına, mekanik özelliklere ve maliyet faktörlerine bağlı olarak değişebilir. Ancak, genel olarak, bazı alaşım serileri endüstride daha yaygın olarak kullanılmaktadır:

Çizelge 2.3’de gösterilen ve en fazla bilinen alüminyum döküm alaşımlarının pek çoğu ötektik reaksiyona neden olan düşük ergime noktaları, iyi akıcılık ve dövülebilirlik sağlayan yeterince silisyum içerir. Akışkanlık, sıvı metalin bir kalıba doğru erken katılaşma olmadan akma yeteneğidir. Dövülebilirlik ise, alaşımdan iyi bir dökümün yapılabilmesine işaret eder (Metal Handbook, 1979).

Çizelge 2.3. Döküm alüminyum alaşımlarının özellikleri (Askeland, 1998).

Alaşım	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	% Uzama	Döküm İşlemi
295-T6	248	166	5	Kum
319-F	186	124	2	Kum
380-F	317	159	3,5	Kokil döküm
356-T6	228	166	3,5	Kum
	262	186	5	Kokil döküm
384-F	331	166	2,5	Kokil döküm
390-F	228	241	1	Pres döküm
443-F	131	55	8	Kum
	159	62	10	Kokil döküm
	228	110	9	Pres döküm
413-F	297	145	2,5	Pres döküm
518-F	310	193	7	Kum
713-T5	207	152	4	Kum
850-T5	159	76	10	Kum

2.2 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımları

Magnezyum ve Silisyum elementleri, diğer dengeleyici elementlere kıyasla daha fazla bulunan bir alüminyum alaşım tipidir. Mg ve Si'nin oluşturduğu kombinasyon, Mg_2Si fazı ile yarı ikili bir bölüm oluşturdıklarından mükemmel çökelme sertleştirme kabiliyetine sahiptir. 7xxx ve 2xxx alüminyum alaşım serileri kadar mekanik özellikleri üstün olmasa da 6xxx alüminyum alaşım serisinin şekillendirilebilme kabiliyeti diğer alaşım serilerine kıyasla daha iyidir. Kaynak yapılabilirliği, isteğe uygun işlenebilirliği, görece üstün korozyon direnci ve orta seviyede mekanik özellikleri bulunmaktadır. Dolayısıyla ekstrüzyon yöntemiyle üretilen karmaşık şekiller için genellikle endüstride tercih edilir.

Isıl işlem kabiliyetine sahip olan 6xxx serisi alaşımları, T4 temperinde şekillendirilebilir ve çökelme ısıl işlemi ile ekstrüzyon sonrasında T6 özelliklerine kadar güçlendirilebilir. T4 temper, çökelme ısıl işlemini ve büyük ölçüde kararlı duruma doğal yaşlandırma sonrasında ulaşmaktadır. T6 temper, çökelme ısıl işlemini ve yapay yaşlandırmayı ifade eder. Temperlenme kodlamaları ve açıklamaları Çizelge 2.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Temperlenme kodlamaları ve detayları (Metal Handbook, 1979).

T1	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış.
T2	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış.
T3	Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış.
T4	Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış ve doğal yaşlandırılmış.
T5	Sıcak şekillendirme işleminin ardından soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış.
T6	Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış ve yapay yaşlandırılmış.
T7	Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış ve fazla yapay yaşlandırılmış.
T8	Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış.
T9	Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş.
T10	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırma yapılmış.

Alüminyum alaşımlarına takviye edilen her bir elementin amacı bulunmaktadır. İstenilen özellikleri elde edebilmek amacıyla 6xxx serisi alüminyum alaşımlarında Si ve Mg elementlerinden sıklıkla bahsedilse de aslında alaşımın yapısında başka elementler de bulunmaktadır. Çizelge 2.5'te takviye edilen elementler ve alaşıma olan katkıları gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Bazı takviye elementler ve alaşıma olan katkıları.

Özellikler	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Zn	Ti	Cr	Ni	Li
Yoğunluk	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓
Akışkanlık	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↓	-	-	-
Sertlik	↑	↑	↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑ ↑	↑	↑	-	-
Mukavemet	↑	↑	↑	↑	↑ ↑	↑ ↑ ↑	↑ ↑	-	↑	-
Elektrik İletkenliği	↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓ ↓	↓ ↓	↓	↓ ↓ ↓	↓ ↓ ↓	↓	↓ ↓ ↓
Korozyon Direnci	-	↑	↑ ↑ ↑	↑ ↑	↓	↓	-	-	↓	-
Isıl Genleşme Katsayısı	-	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	-

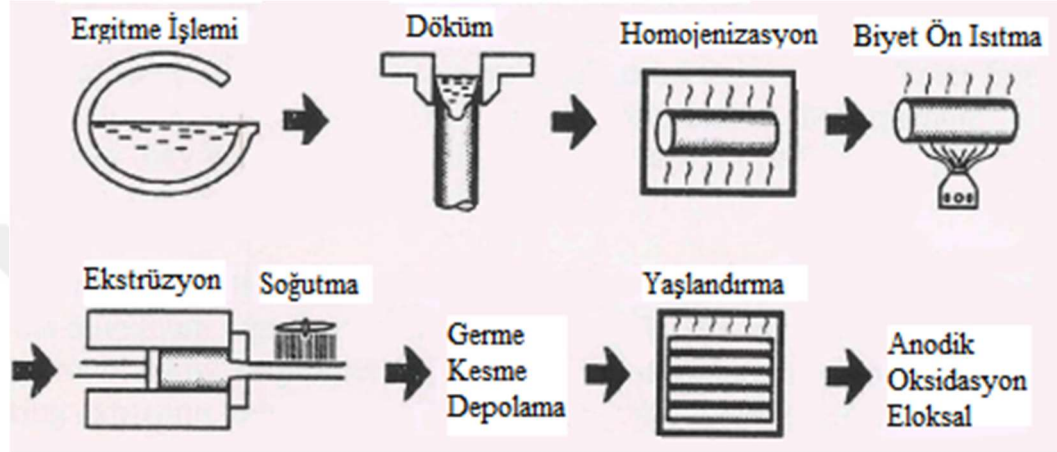
Amaç her ne kadar çökelme sertleşmesini sağlamak olsa da Çizelge 2.5'te bahsedilen elementlerden olan Si, Mg, Fe, Mn, Cu gibi elementler ekstrüzyon işleminde de büyük rol oynar. Örneğin Si ve Mg ekstrüzyon süresinin önemli ölçüde kısalmasını sağlarken Fe, Mn ve Cu ekstrüzyon işleminin uzamasına sebep olur.

6xxx serisi alaşımlar, kimyasal yapılarındaki farklılıklarından dolayı 3'e ayrılmaktadır:

1. Mukavemetin önemli olduğu uygulamalarda tercih edilen alüminyum alaşımları: Bu alaşım tipinde Si ve Mg, çökelme sertleşmesinden sonra Mg_2Si oluşturabileceğinden önemli rol oynar.
2. Ekstrüzyon işleminde verim istenmesi durumu: Bu durumda dengeli Si takviye edilir. Çünkü alaşımın kimyasal içeriğinde fazla Si olması durumunda Si akıcı özellikler gösterecektir. Bu da aslında basite indirgendığında katı-katı faz değişimi olan ekstrüzyonun doğasına aykırıdır.
3. Anodik oksidasyon yeteneği yüksek olan 6xxx serisi alüminyum alaşım türleri: Mg içeriği Si'ye oranla yüksek tutulur. Fe, Zn ve Cu gibi empürite elementlerin oransal olarak az olması halidir.

2.3 Ekstrüzyon Prosesi İçin Alüminyum Biletlerin Üretilmesi

Alüminyumun ekstrüzyonu esnasında birçok faktör son ürün özelliklerini etkilemektedir. Bu ekstrüzyon işlem şartları, alaşımın kimyası ve mikro yapı olabilir (BjØrnback vd., 2002). Şekil 2.2’de alüminyum alaşımlarının, bilet ön ısıtma, ekstrüzyon, homojenizasyon, ekstrüzyon sonrası soğuma ve yaşlandırma işlemleri belirtilmiştir.



Şekil 2.2. Ekstrüzyon öncesi ve sonrası üretim süreçleri (Bartolucci, 1995).

2.3.1 Metal ergitme

İşlem basamağında ilk aşama ergitme işlemidir. İlk olarak fırınlar, ya indirgenme hücrelerinden direk olarak sıvı alüminyumla ya da biletlerle yeniden ergitilmek üzere doldurulur. Alaşım elementleri, bilet yapımında istenilen özelliklere göre takviye edilir (Smith, 2001).

Ergitme işlemi esnasında;

- Eritme aşamasında, metal içeriğini saflaştırmak ve üniform bir erimiş metal karışımı sağlamak için fırına sürekli olarak azot verilir.
- Gaz havalandırma sistemi, metaldeki zararlı gazları ve yabancı maddeleri uzaklaştırarak metalin temizlenmesinden ve üretim sürecinde zararlı gazların etkilerinden kaynaklanan birçok sorunun önüne geçer.
- Döküm hızına bağlı olarak AlTiB, eriyiğe otomatik olarak enjekte edilerek tane yapısını inceltir, alaşıma ekstrüzyona uygun kimyasal ve fiziksel özellikler kazandırır ve anodik oksidasyon işlemlerinde yüzey kalitesini artırır.

- Kaliteyi artırmak için her kalıpta yenilenen tandem seramik filtre sayesinde istenmeyen oksitler ve yabancı maddeler erimiş sıvının içinde tutulur.
- Cürufun içerdığı sıvı alaşım parçacıklarının erimiş metale geri dönmesi için cüruf sürekli olarak kontrol edilir.

Tüm bu işlemler, eritme sırasında elde edilen alüminyum alaşımının saflık seviyesini etkiler. Bu adımlar doğru şekilde gerçekleştirilmezse ekstrüzyon işlemi esnasında:

- Daha pürüzlü bir ekstrüzyon ürün yüzeyi,
- Aşındırıcı etkiye sahip kirlilikler nedeniyle düşük kalıp ömrü ve sonuç olarak yüksek maliyet,
- Daha düşük ürün mukavemeti,
- Daha düşük ekstrüzyon hızı,
- Daha düşük eloksal kalitesi,
- Daha düşük korozyon dayanımı gibi sorunlara yol açacaktır (Yılmaz, 2002).

2.3.2 Döküm

Sıvı metal, başlangıçta yol verici bir blok tarafından kapatılan bir kalıp içerisine dökülür. Kalıp içinden geçen ve sıvı metali soğutmaya yarayan suyla beraber sürekli olarak soğutulmaktadır. Soğuma esnasında katı dış kabuk oluşur oluşmaz, yol verici blok metal seviyesi daha yüksekte devam ederken döküm hızı sabiti ile beraber azalmaktadır. Metalin dış kısmı katılaşırken, iç taraftaki merkez bölgesi hala sıvı haldedir. İngotun tümü soğumaya devam ettikçe kalıptan ingotun üzerine direkt olarak su püskürtülerek katılaşma sıcaklığının altına ulaşılır (Daşcılar, 2006).

Ergimiş metalin katılaşması esnasında, alaşım elementleri sıvı ve katı faz üzerinde yeniden dağılırlar. Katılaşma işlemlerinin büyük bir kısmında bu esnada kompozisyonda homojensizlikler ve makro boşluklar meydana gelir. Akış yönünde meydana gelen bu olay ısıtma işlemleri esnasında metal davranışlarını etkiler ve üniform olmayan mekanik özelliklerin ortaya çıkmasına sebep olduğundan dolayı dökümdeki en önemli sorundur (Katgerman ve Venneker, 2002).

DC döküm yönteminde kullanılan kalıp birkaç inç derinliğindedir ve ingotun eksensel şeklini oluşturur. Kalıbın içerisinde, döküm çukuruna doğru azalan soğutma suyu püskürtmesi metalin hızlıca soğumasını sağlar. Proses arzu edilen uzunluk elde edilene kadar devam eder ve hem dikey hem de yatay olarak uygulanabilir (Aluminum Association, 2004).

2.3.3 Homojenizasyon

Ekstrüzyon öncesi yüksek sıcaklık tavlama adımı olan homojenizasyon alüminyum ekstrüzyon teknolojisinde önemli bir adımdır. Homojenizasyon prosesinin metalürjisi çok sayıda işlemden oluştuğu için karmaşıktır. Bu prosesin ana yapısı alaşımın kimyasına bağlıdır fakat AA6xxx serisi alaşımları için en önemli reaksiyonlar Al (Fe, Mn) intermetaliklerin ve Mg, Si çözelti miktarının artarak alüminyum matris içerisindeki Mg-Si partiküllerinin çözünmesini sağlayan faz dönüşümleridir. Homojenizasyon süresince bütün alaşım elementlerinin katı çözelti içine alınmasıyla tüm alaşım elementleri yapay yaşlandırma esnasında daha ince yapıda olan β'' çökeltileri şeklinde çökerek ekstrüde edilmiş ürünlerde mukavemet artışı sağlar. Homojenizasyon ısı işlemi esnasında Mg ve Si atomlarının belirli bir kısmı β çökeltilerinin içinde yer alarak faydalı bir durum ortaya çıkar. Bu çökeltiler sıcak akma direncini azaltırlar fakat ekstrüzyon süreciyle meydana gelen deformasyon esnasında oldukça hızlı bir şekilde çözünürler (Langkruis vd., 2001).

Alüminyum alaşımlarının homojenizasyonu yüksek sıcaklıklar ve yüksek işleme süreleri içeren üretim proseslerinin tamamında pahalı bir bileşendir. Spesifik çevrimler değişmesine karşılık 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının homojenizasyon uygulamaları 530–590 °C 6–8 saat demleme sürelerinde uygulanmaktadır. Bu nedenle homojenizasyon süresi ve sıcaklığının azaltılması işlem maliyetlerinin azaltılmasında etkileyici bir yöntemdir (Claves vd., 2002).

Döküm biyetin homojenizasyon sıcaklığına normal hızlar ile ısıtılması (yaklaşık 90 °C/dk) malzemede sürekli yapısal değişimlere neden olur. Belirlenebilen Mg_2Si çökmesi yaklaşık 135 °C’de başlar ve 316 °C’ye kadar devam eder. Mg_2Si iri tanecikli yapıya dönmesi 316 °C’ye kadar devam eder. 370 ve 560 °C’de ince plakalar halinde kalır. 560 °C’de 6 saat homojenize edilmiş numunedeki tanecikler çevresinde küçük Mg_2Si bileşikleri görülebilir. 560 °C’de 6 saat, AA6101 biyetleri için tipik bir

homojenizasyon ısıtma işleminde uygulanmıştır. Sıcaklık ve homojenizasyon süresi arttıkça AlFeSi'nin küreselleşme eğilimi devam eder. Solvüs sıcaklığının üzerinde Mg_2Si , AlFeSi ile dengededir. Bu sıcaklığın altında AlFeSi ve Mg_2Si yarı kararlı intermetalik faz durumundadır. Ortalama denge 560 °C'de 6 saat homojenizasyon ile elde edilir (Dore vd., 2000; Murayama ve Hono, 2001).

Homojenizasyon işlemi sonrasında 6063 biyetlerine farklı oranlarda ısıtma uygulanması birçok özelliğini büyük ölçüde etkileyecektir. Bundan dolayı direkt ekstrüzyon ile ekstrüzyon ve sürtünme ile oluşan yükler ekstrüde edilen parçaların yüzey kalitesi, elde edilen maksimum ekstrüzyon oranı ve ayrıca ekstrüzyondan sonra uygulanan yapay yaşlandırma işleminden sonra elde edilen mekanik özellikleri etkileyen Mg_2Si çökeltilerinin boyutu ve dağılımına bağlıdır (Lang ve Castle, 1978).

2.4 Alüminyum'un Ekstrüzyonu

Alüminyum ekstrüzyonunda imalat miktarına bağlı olmak üzere sürekli bir üretim amaçlanır. İlk biyet üretilmeye başlandığı anda ikinci biyet presin yükleme arabasında hazır bekler. Bu durumdan dolayı biyetler arasında sıcaklık farkları oluşmaktadır. İlâveten biyet ile kalıp, kalıp yüzeyi ve kalıp odalarında sürtünme oluşur. Bu aşamada biyet ucu ile biyet sonuna kadar eşit olmayan akış durumu meydana gelir. Eşit olmayan akış durumları; ekstrüzyon kuvvetini oluşturan basınç değerlerinin sürekli değişmesine, zorlanması halinde yağ sıcaklığının artmasına, malzeme formu ve boyunda değişmelere ve istenmeyen ekstrüzyon hatalarına sebep olmaktadır.

Ekstrüzyon işlemi esnasında meydana gelen yüksek orandaki plastik şekil değiştirme işi önemli derecede sıcaklık artışları meydana getirir. Sıcaklık artışını malzemenin şekil değiştirme direnci, biyet sıcaklığı ve boyu, ekstrüzyon hızı ile oranı ve takım sıcaklıklarını etkiler. Ekstrüzyon sırasında meydana gelen bu sıcaklık artışı AA2xxx, 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).

Ekstrüzyon, sıcak işlem prosesleri başlığı altında sınıflandırılır. Ekstrüzyon, oda sıcaklığında yeterli plastik şekil değiştirme aralığına sahip olmayan alaşımlar için ve ekstrüzyon için gereken kuvvetleri azaltmak için yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Sıcaklık ekstrüzyonda en önemli parametrelerden biridir. Sıcaklık artırılırsa gerilim azalır; bu nedenle deformasyon daha kolay olur ancak bu esnada maksimum ekstrüzyon hızı azaltılmalıdır. Çünkü malzemenin sıcaklığı kontrol edilemeyeceğinden istenmeyen erimelere yol açabilir (Saha, 2000).

Belirli koşullar altında ekstrüzyona tabi tutulacak biyet için belirli bir kapasiteye sahip presle elde edilebilecek ekstrüzyon oranının bir üst sınırı olacaktır. Ekstrüzyon sıcaklığı, üstün özelliklere sahip bir ürün elde etmede en önemli rolü oynar ve ekstrüzyon hızı da önemli faktörlerdir. Bununla birlikte, biyetin uzunluğundaki bir artış, ekstrüzyon için gereken basıncın yükselmesine neden olur. Basıncıdaki bu artış, biyet ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünme direncinden kaynaklanır ve bu direnç biyet boyu uzadıkça artar. Normal şartlarda, biyetin maksimum uzunluğu çapının dört katıdır. Alüminyum ekstrüzyonunda, ekstrüzyon basınçları, ekstrüzyon sıcaklıkları, ekstrüzyon oranları ve ekstrüzyon hızları arasında belirli karşılıklı ilişkiler vardır:

- Biyet sıcaklığı arttıkça ekstrüzyon basıncı azalır.
- Ekstrüzyon oranı ne kadar yüksekse, ekstrüzyon basıncı da o kadar yüksek olur.
- Biyet uzunluğu arttıkça, ekstrüzyon basıncı da artar.

Uygulanması gereken yük, mevcut presin kapasitesini aştığında veya ekstrüzyon sıcaklığı alaşımın katı hâl sıcaklığını aştığında ekstrüzyon imkânsız hale gelebilir veya istenilen özelliklere sahip olmayan bir malzeme üretilebilir. Ekstrüzyon tesislerinin kurulum maliyetleri düşünüldüğünde, ekonomik ve verimli şekilde kullanılması için biyet ön ısıtma sıcaklığı, zımba hızı, kullanılacak alaşımın akma gerilmesi ve ekstrüzyon oranı hakkında bilgi sahibi olunması gerekir (Saha, 2000).

Ekstrüzyon oranının önemi, çeşitli faktörlerden kaynaklanır. İlk olarak, yüksek ekstrüzyon oranları, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirebilir. Bu durum, alaşımın yeniden kristalleşmesi ve tane yapısının incilmesiyle ilgilidir, bu da profilin mukavemetini ve sertliğini artırabilir. Ancak, bu süreç aynı zamanda yüzey kalitesini de etkiler. Çok yüksek ekstrüzyon oranları yüzeyde çatlaklar veya diğer kusurlara

neden olabilir, bu nedenle optimal bir denge sağlanması gereklidir. Yüksek ekstrüzyon oranına sahip profillerin imalatı için daha fazla enerji gerekmektedir. Çünkü malzemenin şekil değiştirmesi için daha fazla basınç uygulanması gerekmektedir. Bu durum üretim maliyetlerini artırabilir ve süreçteki verimliliği düşürebilir. Ayrıca yüksek ekstrüzyon oranları olması durumunda sürekli yüksek basınçlar uygulanacağından kalıplar daha hızlı aşınabilir. Bu durum ekstrüzyon kalıplarının ömrünü kısaltarak ek maliyetler oluşmasına neden olur. Ekstrüzyon oranı, malzemenin mikroyapısına da doğrudan etki etmektedir. İdeal bir ekstrüzyon oranı, malzemenin iç yapısının homojen olması sağlanır. Bu durum malzemenin işlenebilirliğini artırırken aynı zamanda istenmeyen kusurların oluşumunu da engeller.

Üretilen ürünün kalıp tasarımı yapılmadan ekstrüzyon oranının uygunluğu doğrulanmalıdır. Ekstrüzyon oranı ve figür adedi, profilin özelliğini ve imalat sürecini etkiler. Doğru ekstrüzyon oranı, belirli bir figür adedi için gerekli olan malzeme akışını belirlemektedir. Aynı şekilde belirli bir ekstrüzyon oranı için gerekli figür adedi, kalıbın detaylandırmalarını belirler. Kalıbın figür adedi, ekstrüzyon oranı uygunluğuna göre belirleneceği için önce ekstrüzyon kalıbının figür adedi hakkında yaklaşık tahminler yapılmalıdır. Her bir figür, profildeki belirli bir şekli oluşturmaktadır. Optimal ekstrüzyon oranı değerleri bulunana kadar figür adedi artırılmalıdır. Figür adedi, profilin şekline ve içerdiği detaylara bağlı olarak da değişmektedir. Kapalı profillerde genellikle az sayıda figür adedi kullanılırken, karmaşık (köprülü) profillerde daha fazla figür kullanılmaktadır. Figür adedi, ekstrüzyon sürecinin zorluğunu ve malzemenin üretim maliyetini, ekstrüzyon oranına bağlı olarak etkilemektedir. Ancak figür sayısının artması, daha fazla işçilik ve daha fazla ekipman gereksinimi doğurmaktadır. Ayrıca birden fazla figüre sahip ekstrüzyon kalıplarında, ekstrüzyon sıcaklıkları da farklılık göstermektedir. Profiller aynı şartlarda üretilse ve profillere aynı koşullarda ısı işlem uygulanmasına rağmen ürünlerde farklı fiziksel ve mekanik özellikler görülmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için kalıp üzerinde figürlerin konumlanmasına ve kalıbın akış tasarımına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde ekstrüzyon ürününün yapay yaşlandırma sonrası mekanik özelliklerinde istenmeyen farklılıklar gözlemlenebilmektedir.

Düşük sıcaklıklarda (400-440 °C) ekstrüzyon yapıldığında, ürünün tane boyutu daha küçük kalır ve daha ince taneli bir yapıyı oluşturur. Bu da sertlik değerlerinin yüksek

olmasını sağlamaktadır. Orta sıcaklıklarda (440-470 °C) ekstrüzyon yapıldığında, malzemenin tane boyutu büyümekte ve kısmi çökelmeler gözlemlenmektedir. Tane boyutunun büyümesi sonucunda sertlik değerleri azalmaktadır. Ancak bu durum uygun soğutma ve ısıtma işlem süreçleri ile minimize edilebilir. Yüksek sıcaklıklarda ekstrüzyon yapılması (470-520 °C), Mg₂Si çökeltilerinin çözülmesine ve homojen dağılımın kaybolmasına neden olabilir. Bu durum çökeltme sertleşmesi etkisinin azalmasına ve dolayısıyla sertliğin düşmesine yol açar. Hızlı soğutma uygulanmalıdır; aksi takdirde büyük tane yapıları ve dengesiz dağılıma sahip mikroyapılar oluşabilir. Ekstrüzyon sonrasında yapılan hızlı soğutma, Mg₂Si çökeltilerinin homojen dağılmasına yardımcı olur ve tane büyümelerini minimize eder. Hızlı soğutma, daha yüksek sertlik ve daha iyi mekanik özellikler elde edilmesine yardımcı olur.

Sıcak ekstrüzyon terimi, bir kap içine konulan kütüğün yüksek bir sıcaklıkta şekillendirilmiş bir açıklıktan (kalıp, delik) itildiği süreçleri tanımlamak için kullanılır. Şekillendirme işleminin bir sonucu olarak, iş parçasının başlangıçtaki kesit alanı azaltılır ve katı veya içi boş kesitli bir çubuk üretilir (Lange, 1985).

Sıcak ekstrüzyon öncelikle çubuklar, borular veya profil kesitleri gibi yarı mamul ürünler üretmek için kullanılır. Haddeme veya çubuk çekme gibi diğer işlemlere göre ana avantajı, pratik olarak ve istenilen kesit şeklinin üretilebilmesidir, yani sadece katı bölümler değil, aynı zamanda gerektiğinde farklı şekilli iç ve dış konturlara sahip içi boş kesitler de üretilebilir. (Lange, 1985)

2.4.1 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının ekstrüzyon işlem basamakları

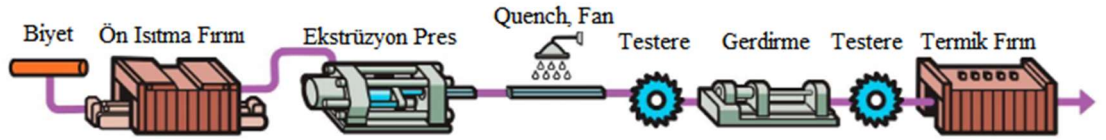
Alüminyum alaşımlarının potansiyel üstünlüğünden tam olarak yararlanmak için tüm sürecin uygun parametreleri ve şartları sağlaması gerekir. Alüminyumun ekstrüzyon işlemi esnasında birden fazla parametre nihai ürünün özelliklerini etkilemektedir. Bu ekstrüzyon işlem şartları, alaşımın spektral özellikleri ve mikro yapısından kaynaklı olabilir (Bjørnbakk vd., 2002).

Temel alüminyum alaşımları üreten endüstriyel tesislerde;

- Ekstrüzyona hazırlık amacıyla alüminyum biyeti ısıtan bir fırın,
- Alüminyum profilin kalıpta şekil almasını sağlayacak olan basıncı ve kuvveti üreten bir ekstrüzyon pres,

- Ekstrüzyon oranında belirlenen sonuca göre gerekli soğutmayı (su, hava) yapan hızlı soğutma (quench) veya fan sistemleri,
- Profilin imalat bant uzunluğuna göre maksimum uzunluktaki kesimini yapan kesim cihazları,
- Profilin seri imalatı esnasında boylamsal düzlemde oluşan şekil bozukluklarını gidermesi amacıyla yapılan gerdirme makineleri,
- İstenilen boylarda profil elde edilebilmesi için kesim yapan testere makineleri,
- Profilin şekil hafızasını ve sertliği elde ettiği termik fırın makineleri,

bulunur. Şekil 2.3'te alüminyum ekstrüzyonunda temel işlem basamakları gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Temel alüminyum ekstrüzyon işlem basamakları (URL-1).

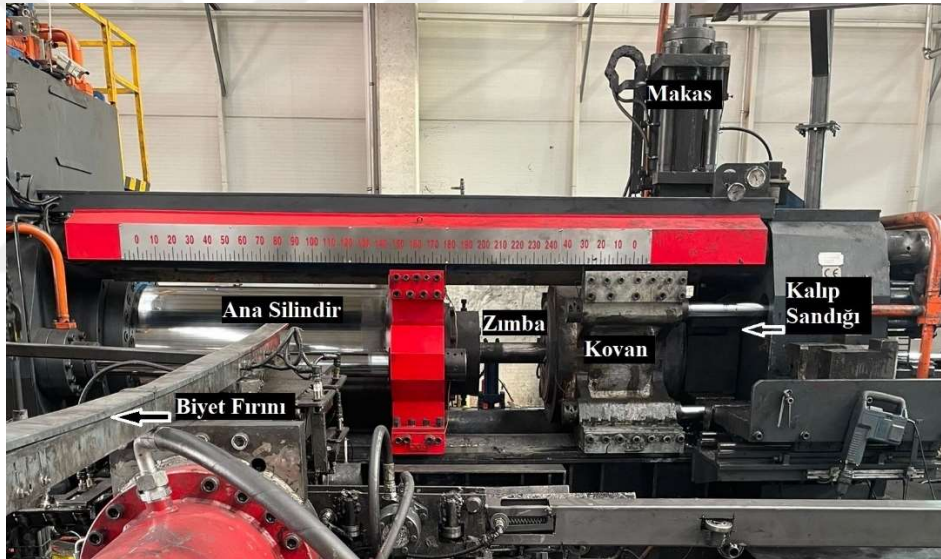
Ekstrüzyon işlemine başlamadan önce yapılacak ilk iş üretilecek profilin kesitini tasarlamaktır. Ardından kalıp tasarımı yapılır ve alaşım çeşidi belirlenir. Biyet ve kalıp takımlarının profilin imalatı için gerekli ön sıcaklık değerleri saptanır. Belirlenen sıcaklığa gelen kalıp ekstrüzyon prese yerleştirilir ve ön sıcaklık işlemi uygulanan biyet ekstrüzyon prese alınır. Bu iki işlemin mümkün olabilecek en yakın zamanda gerçekleşmesi profilin üretimi için çok önemlidir. Çünkü tavllanmış kalıp ortam sıcaklığına soğumaya başlar. Bu esnada biyetin ekstrüzyona hazır beklemesi ve kalıbın prese yerleştirilmesi gerçekleşir. Ekstrüzyon işlemi gerçekleşirken biyet hala katı haldedir. Ancak ön ısıtma işlemi de uygulandığından yumuşak bir yapıya sahiptir.

Ekstrüzyon, temelde ıstampanın (zımba) hareket etmeye başlayıp kalıba dokunduğu anda basınç oluşturmasıyla başlar. Yumuşak (katı formda) alüminyum biyet, kovanın içinde hareket edecek yön bulamaz ve kalıbın içine girmeye başlar. Basınç sayesinde biyet kalıbın içinde şekil almaya başlar; boyu gittikçe kısalır. Biyetin kalıbın içinde sürünerek hareket etmesi sayesinde kalıbın iç sıcaklığı sürekli olarak biyet sıcaklığına yakın olur. Bu sayede ekstrüzyon işlemi gerçekleşir. Ekstrüzyon pres ile senkronize çalışan puller (çekici) denilen bir makine sayesinde uzayarak giden profil ilk testereye ulaştırılır. Bu sırada profilin hava veya su ile soğutma işlemi uygulanabilir. Daha sonra

üstten bakıldığında doğrusal olmayan ve form bozukluklarına sahip olan profil gerdirme işlemine bantlar sayesinde aktarılır. Burada profilin tasarlanan şekle toleranslar dahilinde gelmesi amaçlanır. Ayrıca yüzey kalitesinin gözle kontrolü bu aşamada başlar. Profil bu aşamada hala istenilen uzunluğa sahip değildir. Gerdirme işleminden sonra son testereye profiller aktarılır. Profiller termik fırının boyutu da dikkate alınarak son kullanıcının isteğine uygun boyda kesilir ve yapay yaşlandırma işlemi için fırına aktarılmak üzere sepetlere konulur.

2.4.2 Ekstrüzyon pres ve araçları

Ekstrüzyon pres, biyetin kalıpta şekil alması için gerekli olan baskıyı uygular. Sistemdeki parametreleri anlamak için presin araçlarından detaylı bahsedilmesi gerekmektedir. Ekstrüzyon pres araçları Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Ekstrüzyon pres araçları.

Ekstrüzyon pres araçlarıyla ilgili bazı tanımlamalar aşağıda yapılmıştır.

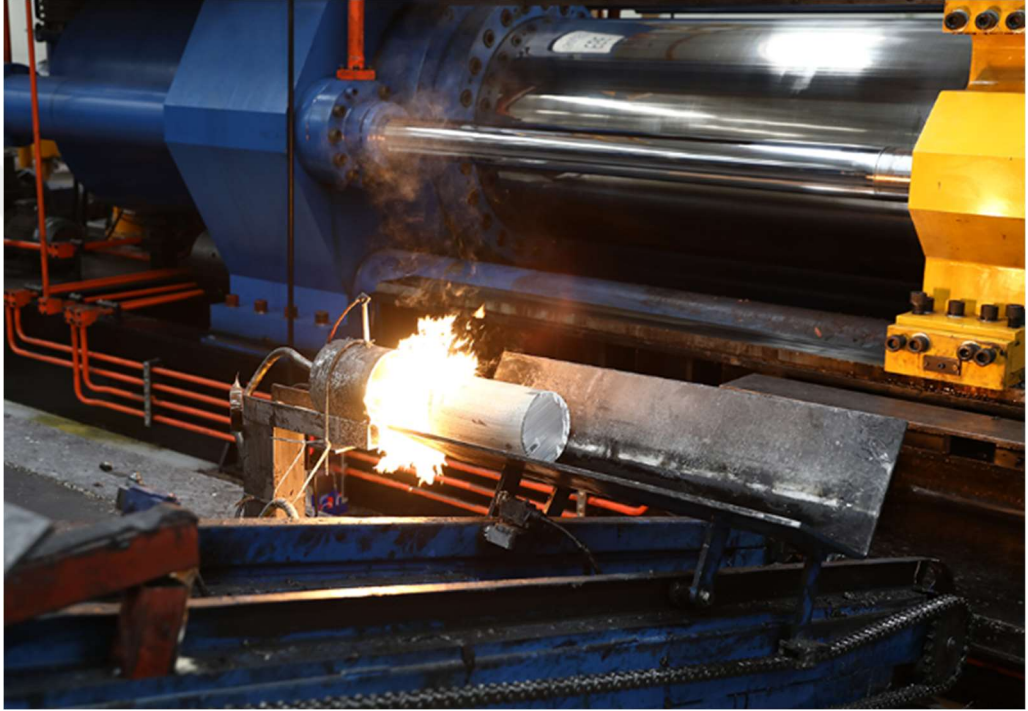
Ana Silindir: İhtiyaç duyulan basıncı ve zımbanın hareketini oluşturan içinde hidrolik yağın bulunduğu silindir.

Hidrolik Basınç: Kalıp ve biyetin temas etmesiyle kalıbın oluşturduğu basınçtır.

İstampa (zımba): Ana silindire bağlı olan biyetle ön levha (dummy block) aracılığıyla temas eden, hidrolik basıncı biyete uygulayan araçtır.

Ön Levha (Dummy block): Genellikle zimbaya bir nipel aracılığıyla bağlı, tasarımında küçük boşluklar bulundurmaktadır. Basınç sayesinde esneyerek boşlukları doldurur ve kovan içinde ekstrüzyon esnasında biyetin geriye sıvanmasını engeller.

Biyet: Ekstrüzyon presin özelliklerine bağlı olarak çapı değişen, dairesel yapıya sahip olan alüminyum kütüktür. Profilin ağırlığına ve figür adedine bağlı olarak boyu değişkenlik gösterir. Şekil 2.5'te ekstrüzyon işlemine hazır bir biyetin prese transferi görülmektedir.



Şekil 2.5. Ön ısıtma uygulanmış ekstrüzyona hazır bir biyetin transferi (URL-3).

Kovan: Ekstrüzyon presin yan kollarına bağlı olarak çalışır. Biyetin içinde hareket ettiği, sıcaklığı kontrol edilebilen, genellikle silindirik yapıya sahip pres parçasıdır. Kovan sıcaklığı ekstrüzyon işleminin ana parametrelerinden birisidir. Genellikle 400-440 °C arasında tutulur.

Kalıp Takımları: Profilin geometrisine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Profilin şeklini veren kalıp, destek, taşıyıcı, mandrel ve besleyici gibi parçaları barındırır.

Biyet Fırını: Boyları değişiklik gösteren alüminyum kütüklerin (biyet) ekstrüzyona hazır hale gelmesi için ısıtıldığı fırındır. Isıtılan biyetler kovanın boyuna bağlı olmak

şartıyla kesilir. Genellikle biyet fırınları ekstrüzyon prese doğrudan bağlantılı olmazlar. Ancak teknolojinin gelişmesiyle biyet fırınları ekstrüzyon prese doğrudan bağlantılı çalışmaktadır.

Makas: Biyet boyu ekstrüzyon işleminde giderek kısalır ve sonlarına doğru artıklar oluşturur. Biyet artıkları (oksitler bulundurduğundan) kesilerek hurdaya ayrılır. Oksit bulunması halinde profilin yüzeyinde kabarcıklar meydana gelir ve hava sıkışmasından kaynaklı yüksek desibellerde ses patlamaları oluşturur. Makasın keseceği biyet boyu ekstrüzyon işleminin devam etmesi için hayati öneme sahiptir. Küçük olması halinde oksit tam temizlenemez; biriken pislikler atılamaz ve profile aktarılır. Büyük olması halinde makas gerekli hidrolik gücü oluşturmak için zorlanır ve kalıbın içinde bir önceki biyetten kalma biyet kalıntılarını boşaltarak profillerin yeni biyetle yapacağı ekstrüzyon işlemi esnasında profillerin kaynamasını engeller.

Kalıp tavlama fırını: Kalıp ve taşıyıcı, ekstrüzyon öncesinde sıcaklık farkı oluşturmamak ve esneme sağlamak için 4-8 saat arasında 500-550 °C sıcaklığa maruz bırakılır.

Çıkış bandı: Ekstrüzyon preste imal edilen ürünlerin ilerlediği pullerin (çekici) ve testerenin de yer aldığı taşıma tablasıdır.

2.4.3 Ekstrüzyon işleminin parametreleri

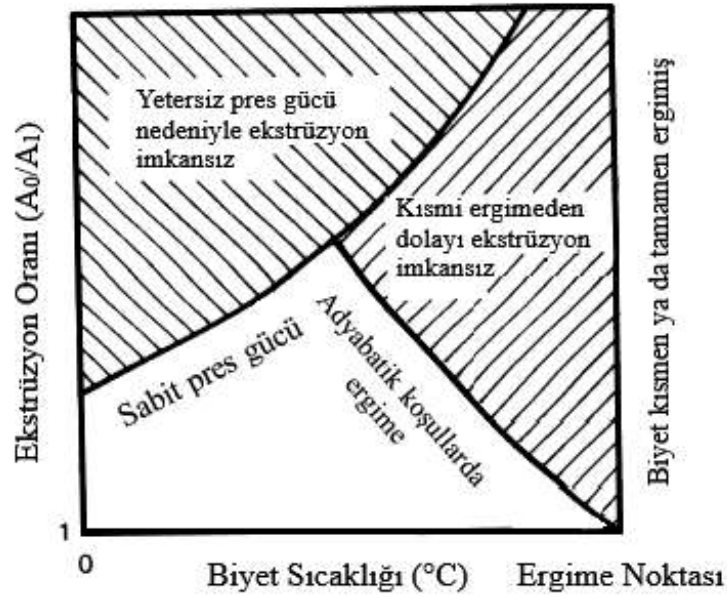
Alüminyumun ekstrüzyonu sırasında meydana gelen ısı oluşumunun sebeplerinin ve ısı transferinin yönünün bilinerek sıcaklığın kontrollü olması hem üretim kalitesi hem de kalıbın ömrünü uzatmak için çok önemlidir (Saha, 1998; Saha, 2000).

Ekstrüzyon parametreleri arasındaki ilişkiyi belirlemek, ekstrüzyon sürecinde birçok parametrenin kullanılması ve bunlar arasındaki etkileşim oldukça kompleksir. Ekstrüzyon metodu kullanılarak imal edilen profillerde arzu edilen istekleri yerine

getirebilmek için malzemenin yüksek sıcaklıkta gösterdiği karakteristikler ve proses değişkenleri arasındaki denge sağlanmalıdır (Clade ve Sheppard, 1993).

Ekstrüzyonda en önemli parametreler malzeme özellikleri ve uygun şekillendirme koşullarıdır. Sıcak ekstrüzyonun uygulanabilirliği büyük ölçüde mevcut kuvvete,

şekillendirme tesisine ve kütüğün kesit alanına bağlıdır. Sıcak ekstrüzyonda belirleyici olan sıcaklık, süreç ve ekstrüzyonun özellikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu ilişkiler, sıcak ekstrüzyonun niteliksel bir tanımını yaptığı Şekil 2.6'da açıkça gösterilmektedir. İki gölgeli alandan biri, ekstrüzyon işlemini gerçekleştirmek için yeterli kuvvetin mevcut olmasıyla, diğeri ise aşırı yüksek biyet sıcaklıklarının ekstrüde profilde kusurlara yol açmasıyla (sıcak çatlaklar, solidus çizgisine ulaşıldığında faz değişiklikleri) karakterize edilir. Bu nedenle diyagramın sadece taranmamış alanı uygundur (Lange, 1985).



Şekil 2.6. Ekstrüzyonun sınır eğrileri (Lange, 1985).

Belirli bir biyet sıcaklığında, belirli bir ekstrüzyon oranı için ekstrüzyon yükünün yetersiz olması bazen kütüğün ilk sıcaklığını veya kalıbın sıcaklığını artırarak aşılabilir. Ancak burada, deformasyon sırasında aşırı ısı artışı nedeniyle sağ sınır eğrisinin geçilmemesine dikkat edilmelidir. Büyük ekstrüzyon oranlarında biyet sıcaklığı malzemenin solidus sıcaklığına ne kadar yakın olursa, deformasyon ve sürtünmeden kaynaklanan ısıнын uzaklaştırılmasıyla o kadar fazla ilgilenmek gerekir. (Lange, 1985).

2.4.4 Ekstrüzyonda sıcaklık

Ekstrüzyon işleminde tüm pres takımlarının sıcaklığı önem arz etse de AA6060 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerini doğrudan belirleyen değişken ekstrüzyon

sıcaklığıdır. Ekstrüzyonda kritik sıcaklık, alüminyum profilin kalıbı terk ettiği anda ölçülen sıcaklıktır. Şekil değiştirme esnasında ve kalıp içi sürtünme enerjilerinin meydana getirdiği ısı enerji, kalıp çıkışındaki alüminyum profilin sıcaklığını yükseltecektir. Ekstrüzyonda sıcaklık, kalıp ömrüne ve profilin kalitesine de etki etmektedir. Profil kalitesini ele alırsak, profilin kalıbı terk ettiği andaki sıcaklık, ısı işlem sonrası mekanik özellikleri ve boyut kararlılığını etkilemektedir ancak ekstrüzyon hatalarına da yol açabilmektedir.

Mg₂Si düşük akma özelliklerine ve T6'ya göre yaşlandırıldıklarında kötü yüzey karakteristiklerine neden olmaktadır. Döküm biyetteki iri taneli Mg₂Si bileşikler 510 °C'ye ısıtıldığında daha uzun bir sürede çözünür. Heterojen yapıdaki bu düşük çözünme hızı, homojenize olmamış biyetlerden yapılan ekstrüzyon ürünlerinin daha düşük akma mukavemetine sahip olmasının nedenini açıklamaya yeterlidir. Küçük parçacıklar halinde Mg₂Si içeren biyetler, iri Mg₂Si içeren biyetlere kıyasla daha kolayca termo-mekanik işlem görürler. Yüksek akma mukavemetleri, homojenizasyon sıcaklığından hızlı soğutulup düşük sıcaklıkta ekstrüze edilen biyetler ile elde edilir. Ekstrüzyon sonrasında ani soğutma, AA6101 alaşımının çözeltiye alma ısı işlemini tamamlar. Büyük miktarda katı ergiyikte kalan Mg ve Si, alaşımın yaşlanabilme özelliklerini geliştirir. Yapay yaşlandırma sonrasında da yeterli mukavemet artışını elde etmek için 500 °C civarında olan sıcak ekstrüze edilmiş profiller yaklaşık 60 °C/h ile soğutulmalıdır (Murayama ve Hono, 2001).

Ekstrüzyon için, ekstrüde olacak parçanın seklinin karmaşıklığına, ekstrüzyon oranına, kalıp cinsine, uygun ekstrüzyon basıncına, beklenen mekanik özelliklere ve istenen yüzey düzgünlüğüne bağlı olarak yeniden ısıtma sıcaklığı seçilir. Yüksek ısıtma ve ekstrüzyon sıcaklıkları ekstrüzyon için gerekli olan basıncı azaltır. Düşük biyet sıcaklıklarının kullanımı, ekstrüzyonun başlangıcı için gerekli olan basıncı yükseltir. Ancak genellikle ekstrüzyon ürününün yüzey düzgünlüğünü artırır. Düşük ısıtma sıcaklıkları kullanıldığında ince Mg₂Si çökeltileri içeren biyetler tercih edilir. Bu tip biyetler tekrar ısıtılıp ekstrüde edildiğinde, yaşlandırılmış ekstrüzyon ürünlerinin çekme özellikleri yüksek olur ve ekstrüzyon ürünlerinin mikroyapılarında az miktarda Mg₂Si görülür. Bu karakteristik özellik yeniden ısıtma sırasında ince Mg₂Si'nin yeniden çözeltiye geçtiğini göstermektedir. Ekstrüzyonda sıcaklık, döküm biyet yapısını yeniden kristalize olmuş şekle dönüştürür. AA6101 alaşımının kolaylıkla

yeniden kristalize olmasından dolayı, ekstrüzyon ürünleri genellikle üniform ve ince tanelidir. Mg_2Si oluşumu homojenizasyon sıcaklığından soğuma hızı ile belirlenirken, belirli ekstrüzyon koşulları altında ekstrüde edilebilirlik üzerine ve bitmiş ürünlerin özelliklerine de etki edebilir. Yavaş soğutulan biyetlerin akma mukavemetlerini arttırmak için yüksek sıcaklıklarda ekstrüde edilmeleri gerekir. Hızlı soğutulmuş ürünler istenilen mukavemetlere sahip ekstrüzyon ürünleri verir (Karabay vd., 2012).

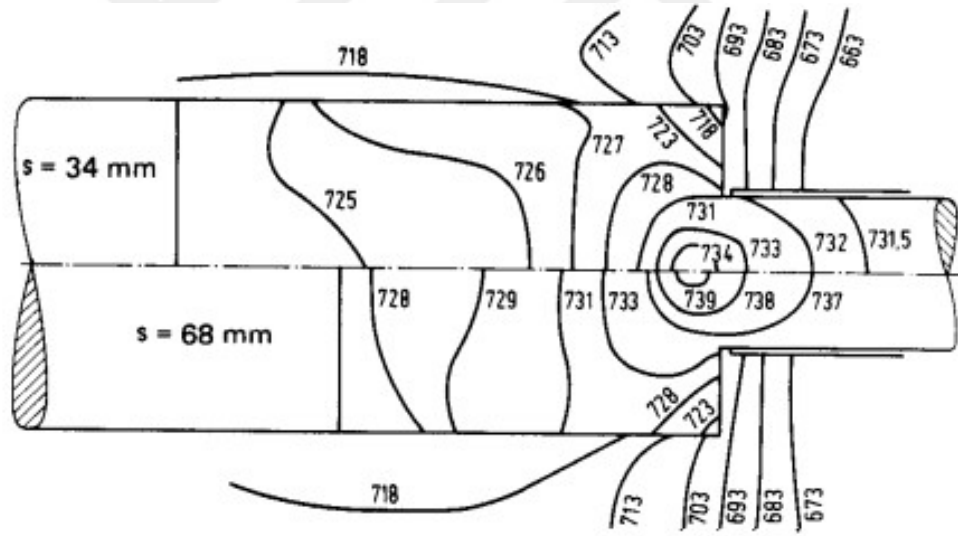
Sıcaklık değişimi malzemelerin şekillendirilebilirliği üzerinde etkilidir. Sıcaklık arttıkça malzemenin akma gerilmesi düşeceğinden dolayı yüksek sıcaklıklarda şekil değişimi kolaylaşır. Ancak çalışma sıcaklığının yükselmesi lokal olarak çeşitli şekillerde ergimeye yol açabileceğinden dolayı sıcaklığın kontrolünün doğru ve tam zamanlı olarak yapılmalı ve bununla bağlantılı olarak ekstrüzyon hızı da ayarlanmalıdır. Ekstrüzyon işlemi sırasında sıcaklık değişimine sebep olan faktörler; biyet sıcaklığı, biyet/kovan ve biyet/kalıp arayüzündeki sürtünme, kayma ve deformasyondan kaynaklanan ısı oluşumlarıdır (Bayram, 2008).

Ekstrüzyon sırasındaki ısı transfer işlemleri bilinen yöntemlerle kesin bir şekilde açıklanamaz. Proseste gerçekleşen ısı transferleri, dikkate alınmayan faktörler ile yapılacak birçok hesaplama arasındaki uzlaşmaya dayanmaktadır; bu durum, tatmin edici bir çözümün ancak aşağıdaki faktörler dikkate alındığında bulunabileceği anlamına gelir:

- Deformasyon bölgesinde ortaya çıkan ısı.
- Biyetin kalıp içindeki hareketi sırasında sürtünmeden kaynaklanan, sınır bölgelerde ortaya çıkan ısı.
- Biyetin uzunluğu boyunca deformasyonların neden olduğu ısının homojen dağılımı.
- Kalıp ve takımlarda, sürtünmeden kaynaklanan ısının yükselmesi.
- Farklı sıcaklıklar nedeniyle kalıp (400-500 °C) ile takımları (genellikle oda sıcaklığında) arasındaki ısı değişimi.
- Ekstrüzyon esnasında biyetin hareket etmesinin neden olduğu ısı transferi.

Yukarıdaki bahsi geçen durumlar, kararsız durumun sıcaklık analizine ve ekstrüzyon esnasındaki ısı akışı çeşitlerine; biyet ve takımlarda başlangıçtaki ısı dağılımı, yapılan iş, ekstrüzyon hızı ve ekstrüzyon çıkış sıcaklığı arasındaki ilişkinin sayısal verilerine

ulaşmanın, sıcaklık artışına neden olan ısı transferini açıklamak için ihtiyaç olduğunu göstermektedir. İdeal başlangıç ve sınır koşulları altında bu problem, bir profil için ısı transfer eşitliklerinin integrasyonu ile çözülebilir. Burada komşu elemanlarla olan karşılıklı bağımlılık dikkate alınmayacaktır. Diğer taraftan sayısal hesaplama metodları, özel bir sıcak ekstrüzyon işleminin koşullarına çok daha kolay uyarlanabilirler. Pratik olarak, yaklaşık çözümler için yukarıda bahsedilen faktörlerin dikkate alınması yeterlidir. Sayısal olarak hesaplanmış sıcaklık eğrilerinin örnekleri Şekil 2.7'de görülmektedir. Bu örnekler sıcaklık dağılımı ve ıstampa hızının etkilerini açıkça göstermektedir. Daha düşük hızdaki şekillendirme işlemlerinde biyetteki ve ekstrüzyondaki sıcaklık farklılıkları, alüminyum alaşımının (burada AlMgSi (AA 6082)) iyi ısı iletkenliği nedeniyle çok çabuk eşitlenmektedir. İlave olarak, kalıp takımlarının soğutucu etkisi ekstrüzyon kesiti boyunca sıcaklık dağılımını etkilemektedir, bundan dolayı iç bölgeler yüzey bölgelerine göre daha sıcak kalmaktadır (Lange, 1985).



$d_0 = 71 \text{ mm}$; $\phi = 1,6$; $T_B = T_I = 450 \text{ }^\circ\text{C}$; $v_p = 2,5 \text{ mm/s}$; $I_0 = 152 \text{ mm}$; $\alpha = 4 \text{ kW/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$

Şekil 2.7. AlMgSi1 (AA6082) alaşımının sıcak ekstrüzyonundaki izotermaller (Lange, 1985).

Zımbanın hızının artmasıyla durum tersine döner. Hem biyetin hem de ekstrüzyonun enine kesitlerinde genellikle önemli sıcaklık farklılıkları meydana gelir. Küçük lokal deformasyon bölgelerinde, malzeme nispeten soğuk kalırken, biyet ile kalıp arasındaki arayüzde ve çıkış noktasında önemli sıcaklık artışları meydana gelir. Sıcaklık farkları,

daha yüksek zımba hızı ile daha belirgin hale gelir, yani adyabatik deformasyon koşullarına o kadar yaklaşılr (Bayram, 2008).

Alüminyum biyetlerin ön ısıtma esnasındaki sıcaklık ölçümlerinde kullanılan sistem yıllardan beri süregelen bir tekniktir. Biyetin ısıtıldığı fırının içinde belirli mesafelerde termokupllar yer almaktadır. Bu termokupllar ölçüm sıklığı kontrol edilebilir şekilde genellikle otomatik kontrolle çalışarak biyete dokunur.

Belirli bir süre soğuk veya sıcak biyete temas eder ve ölçüm işlemini tamamlar. Ancak sıcaklık sonucunun tam tespit edilebilmesi,

- Probun oksitlenmeye uğramaması,
- Biyetle temas ettiği süre,
- Termokuplun biyete olan mesafesi,
- Probun aşınmaması,
- Termokuplun biyete yaklaşma açısı,
- Termokuplun malzemesi gibi koşullara bağlıdır.

Termokupl, ölçüm yapılacak biyete tam olarak dokunmalı ve sıcaklığı algılayıp ölçüm sonucunu yansıtmaya kadar temas etmelidir. Ekstrüzyon prosesinde üretilecek hammaddeye uygun malzemeye sahip termokupllar seçilmelidir. Boyut kararlılığının sağlanabilmesi ve istenilen mekanik özelliklere ulaşılabilmesi için belirli sıklıklarla kontrollü ölçümler yapılmalıdır. Ekstrüzyon öncesinde ön ısıtma işlemi uygulanan biyetlerin sıcaklık ölçümünde iki uçlu problar kullanılmaktadır. Probların ucu, görece yumuşak olan sıcak biyetle temas ettikçe aşınmakta ve zamanla oksitlenmektedir. Bundan dolayı problar belirli periyotlarla kontrol edilmeli, kusur tespit edilirse değiştirilmelidir. Eğer problar hatalı ölçüm yaparsa istenilen sıcaklığa ulaşmamış biyet ile ekstrüzyon işlemi yapılmaktadır. Bunun sonucu olarak profilde yüzey hataları ve düşük mekanik özellikler görülmekte, imalat hızı yavaşlamaktadır.

2.4.5 Ekstrüzyon oranı

Ekstrüzyon parametreleri arasında sertliği ve ekstrüde edilebilirliği en çok belirleyen parametrelerden birisi olan ekstrüzyon oranı, biyet kesitinin preste üretimi yapılan

profilin yüzey alanına oranı olarak tanımlanabilir. Ekstrüzyon oranı Denklem 2.1’de gösterilmiştir.

$$\text{Ekstrüzyon Oranı} = \frac{\text{Biyet kesit alanı}}{\text{Figür adedi} \times \text{Ürün kesit alanı}} \quad (2.1)$$

Ekstrüzyon oranı imalatı ideal olarak 70 değerinde belirlenmiştir. Bu değerin 70’in altına inmesi ekstrüzyonu kolaylaştırırken üzerine çıkması ekstrüzyonu zorlaştırmaktadır. Kalıpların çok figürlü veya tek figürlü üretilmesinin temel nedeni uygun ekstrüzyon aralığında çalışabilmek içindir. Minimum ekstrüzyon oranı 12 olmalıdır. 12 altındaki orana sahip bir profilin imalatında biyet yapısındaki Mg₂Si kristalleri yeterli uzama değerine ulaşamayacağı için biyet şartlarında profile dönüşmektedir. Bu sebepten dolayı profilin yapay yaşlandırma sonrasında sertlik alması imkansızdır. 12 oranının altındaki profiller imalata alınmamalı, 12-20 arasında olan profiller azot (12-16) veya sulu (16-20) soğutma ile sertlik aldırılabilir ancak imalat şartlarının çok dikkatli ve kontrollü yapılması zorunludur. 20-100 arasındaki orana sahip profiller sorunsuz üretilir. 100-140 arasındaki profillerin üretim miktarları düşük, imalat problemleri fazla (ölçü ve yüzey kalitesi), kalıp ömürleri kısadır. 140 oran üzerindeki profiller çok zorunlu olmadıkça imalata alınmamalıdır.

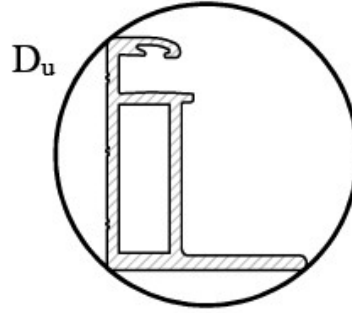
2.4.6 Şekil faktörü

Şekil faktörü, profilin kesit çevresinin profilin metre ağırlığına bölünmesiyle bulunmakta olup ekstrüzyon işleminin güçlüğünü tanımlamada kullanılmaktadır. Ayrıca ekstrüzyon işlemi sonrasında çıkan ürünün şeklini açıklamada yardımcı olmaktadır. 2- 75 değerleri arasındaki profiller sorunsuz ekstrüde edilebilir. Bu değer 75’e yaklaştıkça ekstrüzyon zorlaşmaktadır. 75 değerinin belirlenmesindeki temel dayanak pres gücünün kovan alanına bölünmesinden elde edilen değerdir. Her ekstrüzyon presin hidrolik gücü farklı olacağından bu değer, deneyde kullanılacak ekstrüzyon presin özellikleri esas alınarak hesaplanmaktadır.

2.4.7 Profilin şekli

Ekstrüde edilecek profilin şekli hem ekstrüzyon kolaylığı hem de boyut toleransları bakımından üretime doğrudan etki etmektedir. Profilin kesit alanını içine alan daire D_u büyüdükçe ekstrüzyon zorlaşır.

Dairesel şekillere sahip profiller için D_u değeri çap değeri ile eşittir. Şekil 2.8’de D_u değerinin bir örneği gösterilmiştir.

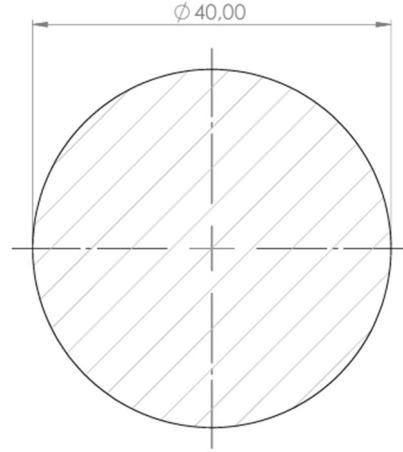


Şekil 2.8. Çalışmada kullanılan profil kesitindeki D_u ’nun gösterilmesi.

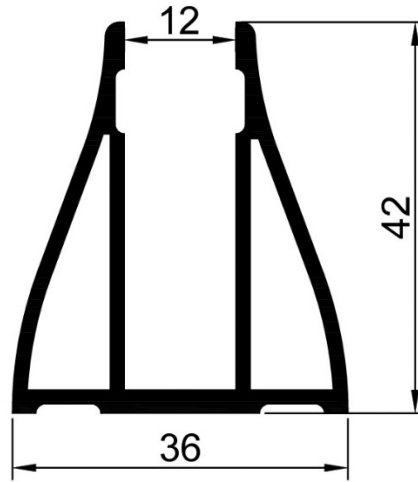
Biyet, kovan iç çeperine sürtünerek hareket eder. Sürtünme kuvveti biyet dış çeperinde hızın azalmasına, ortasında artmasına neden olmaktadır. Bu da kalıp içerisindeki diferansiyel metal akışlarını arttırmaktadır. Çok geniş yüzeylerde ve kompleks yapılı profillerde akışkanlıkların dengelenmesi güçleşmektedir. Diferansiyel metal akışı, artan ısı ve üretim hızlarında daha belirgin hale gelmektedir.

Artan kesit kalınlığı ekstrüzyonu kolaylaştırmaktadır. Et kalınlığı profilin her yerinde aynı olanların üretimi, geniş yüzeyli ve kompleks yapılı olan profillere kıyasla daha kolaydır. Kesit görünümünde farklı et kalınlıklarına sahip profillerin üretimi ise et kalınlığı çeşitliliği arttıkça zorlaşmaktadır. Simetrik şekillerin ekstrüzyonu asimetrik yapılı profillerden kolaydır. Dil, tırnak, girinti, çıkıntı, tırtık gibi şekli kompleks hale getiren yapılar arttıkça ekstrüzyon zorlaşır. Ekstrüzyon kalıbı içinde geometriyi sağlamak için alüminyumun beslemesi güçleşmektedir.

Kapalı profillerin üretimi köprülü (açık) profillerin üretiminden daha kolay olmaktadır. Kapalı ve köprülü profiller sırasıyla Şekil 2.9 ve Şekil 2.10’da gösterilmiştir. Ekstrüzyon kalıbının geometrisi küçüldükçe ekstrüzyon işlemi kolaylaşmakta ve hızlanmakta iken kalıp geometrisi büyüdükçe ekstrüzyon prosesi zorlaşmakta ve yavaşlamaktadır. Ayrıca yapısal olarak büyük kalıpların esneme problemi daha belirgin şekilde görülmektedir. Bu da seri üretimde kullanılan ekstrüzyon kalıplarının yapısında çatlamalara hatta kırılmalara neden olmakta ve profil geometrisinin sağlanmasını zorlaştırmaktadır.



Şekil 2.9. Kapalı profil.



Şekil 2.10. Köprülü (açık) profil.

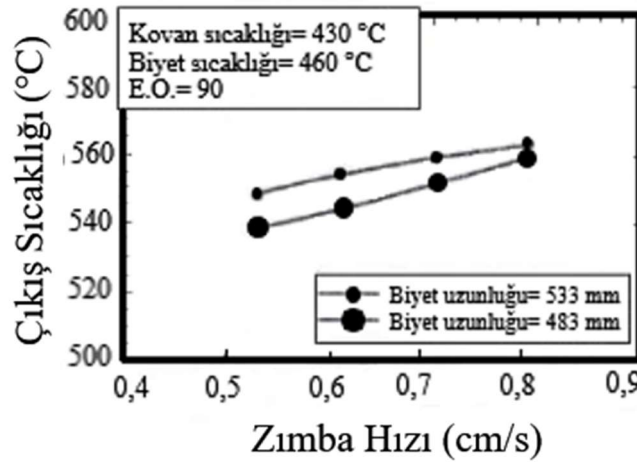
2.4.8 Ekstrüzyon prosesinde hızın etkisi

Ekstrüzyon hızı, alüminyumun şekil kazandığı sürede zımba hızının artmasıyla basıncı da yükseltir ve sıcaklığı artırır. Buna göre zımba hızı ile ısı artışı arasında doğru orantı vardır. Zımba hızının düşürülmesi durumunda sıcaklığın üniform dağıtılması daha kolay olmaktadır. Alüminyumun ısı iletkenlik değeri yüksek olduğundan ekstrüzyon hızından kaynaklı ısı artışı daha belirgin görülmektedir.

Saha (2000), AA6063 alaşım yapısına sahip bir profilin üretimi esnasında zımba hızı arttıkça çıkış sıcaklığının da artış gösterdiğini tespit etmiştir. Ayrıca biyet uzunluğu arttıkça çıkış sıcaklığı da artmıştır.

Çünkü biyet uzunluğunun artması ekstrüzyon işleminin uzamasına sebep olmaktadır.

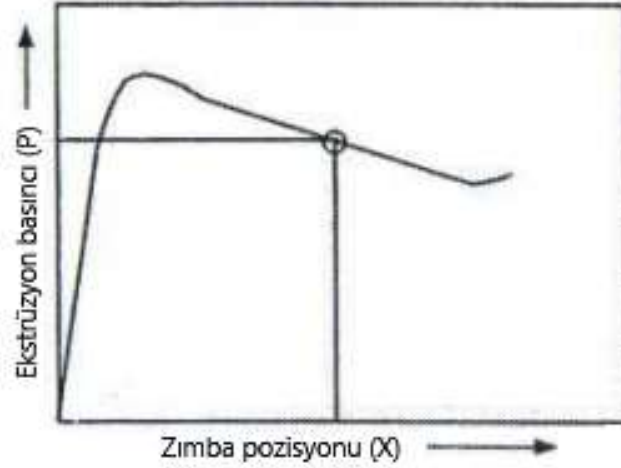
Şekil 2.11’de zımba hızı ile çıkış sıcaklığı arasındaki ilişkiyi farklı biyet uzunlukları kullanarak göstermiştir.



Şekil 2.11. AA6063 alaşımında farklı biyet uzunlukları kullanılarak zımba hızının artmasıyla profil çıkış sıcaklığının değişimi (Saha, 2000).

Ekstrüzyon esnasında hız sabit bir değerde tutulmaya çalışılsa da bu otomatik kontrol sistemlerinin çevrimi yakalayamaması nedeniyle mümkün olamamaktadır. Örneğin, 7 mm/s zımba hızı ile ekstrüzyon yapılmak istenirse; biyetin boyu azaldıkça zımba daha az basınç uygulayarak aynı hıza ulaşmaya çalışarak baskılamaya devam edecek ancak sürtünmeden kaynaklı sıcaklık artışı da düşünüldüğünde belirlenen hıza ulaşması geç olacaktır.

Saha (2000), zımba pozisyonu değişiminin ekstrüzyon basıncına olan etkisini incelemiştir. Zımba ilerlediğinde belirli bir pozisyondan sonra ekstrüzyon basıncının azaldığı Şekil 2.12’de görülmektedir.



Şekil 2.12. Zimba pozisyonu ile ekstrüzyon basıncı arasındaki ilişki (Saha, 2000).

Ekstrüzyonda hız arttırılmadan önce, şekil faktörü için biyet sıcaklığının tespit edilmesi, ekstrüzyon oranının hesaplanması ve biyet boyunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu sayede üretim verimliliği arttırılacak, profilin yüzey kalitesi kontrol edilebilecek ve fire oranları aşağı çekilecektir.

2.4.9 Ekstrüzyonla üretilmiş profillerde hatalar

Alüminyum ekstrüzyon sonrasındaki profillerde, üretimden kaynaklı kusurlar gözlenebilmektedir. Burada kusurun ihmal edilmesi, son kullanıcıda ürünün kullanılacağı yere göre alınarak hesap edilmektedir. Dekorasyon ve mimari alanlarda kullanılacak bir üründe görsel detaylar önemli iken otomotiv ve yapı sektöründe mekanik özellikler daha önemli olmaktadır.

Ekstrüzyon endüstrisi için bu tip hataların minimize edilmesi hem proses verimliliği hem de katma değerli ürünlerin üretim miktarının artması açısından önemlidir. Ekstrüzyon ürünlerindeki yüzey kusurları, dünya çapındaki tüm ekstrüzyon endüstrisi için yaygın bir sorundur. Kalıp izi, kabarcıklar ve sıcak yırtılma gibi birçok yüzey kusuru bulunur. Bu yüzey kusurlarının çoğu, kusurlar belirli bir boyutu aşmamak kaydıyla eloksal ve toz boya ile kapatılabilir. Bu nedenle, yüzey kusurlarını daha küçük bir boyutta tutmak için, imalatçılar yüzey kusurlarının anlaşılmasında nedeniyle ürünleri çoğunlukla daha yavaş bir hızda ekstrüde eder. Bu da imalat üretkenliğini doğrudan etkilemektedir (Karakaya, 2023).

Ekstrüzyon yöntemi kullanılarak üretilen ürünlerde çeşitli nedenlerden kaynaklanan hatalara rastlanabilmektedir. Ürünün kullanıldığı yere bağlı olarak ihmal edilebilir kusurlar olabildiği gibi görsel özelliklerin önemli olduğu profillerde hata olmaması gerekmektedir. Alüminyum ekstrüzyonunda meydana gelen hatalar aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

2.4.9.1 Kalıp Çizgisi Oluşumu

Ekstrüzyonun imalat yönü göz önüne alındığında profil üzerinde oluşan sıralı ve boyuna uzanan çizgilerdir. Alüminyumun içindeki impüritelerin geçiş bölgesiyle etkileşim sebebiyle oluşur. Kalıbın ön hazne ve geçiş bölgesinin, alüminyuma ilgisi az olan bir kaplama ile kaplanması sonucunda daha parlak yüzeyler elde edilebilir. Ekstrüzyon çıkış sıcaklığını düşürmek impüritelerin çökelme sıcaklığına gelmelerinin önüne geçer. Bu da daha güzel yüzey elde etmek için bir yoldur. Ancak sıcaklığın düşmesi durumunda ekstrüzyon hızı yavaşlayacağından üretim yapan şirketler en optimal hızı yakalamayı tercih ederler.

2.4.9.2 Yüzey Yırtılması

Ekstrüzyon kalıbının geçiş yüzeyinden geçen alüminyumun gerilme değerinin, ekstrüzyon sırasında akma mukavemeti değerini aşması durumudur. Şekil 2.13 detaylı incelendiğinde yırtıklar profilin kenar bölgelerinden başlayarak yana doğru genişleme yapar. Ekstrüzyon hızı artarsa yırtık genişliği artacak eğer hız azaltılırsa yırtık genişliği azalacaktır. Bileşim içinde bulunan Si element atomları, sıcaklık ve ekstrüzyon hızından kaynaklı olarak yırtılmayı tetikler. Bu nedenle 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının temel elementleri olan Mg ve Si oranı çok önemlidir. Kimyasal bileşim içinde yer alan Si elementinin fazla olması AlFeSi bileşiğini meydana getirir ve yırtılma ihtimalini minimize eder (Karakaya, 2023).



Şekil 2.13. Yüzey yırtılması meydana gelen profil (URL-4).

2.4.9.3 Kuyruklu Yıldız

Ekstrüzyonun yönünde, ürünün yüzeyinde 1-1.5 mm genişliğinde meydana gelir. Adını Şekil 2.14'te görülen şeklinden almaktadır. Kuyruklu yıldız hatasını meydana getiren parametre tam olarak tespit edilememiştir. Ancak şeklin boyutu; matrisin esnemesi, yetersiz homojenizasyon ve matrisin geçişinde yer alan oksit tabakasına bağlıdır.



Şekil 2.14. Kuyruklu yıldız kusuru (Columbus ve Fourmann, 2017).

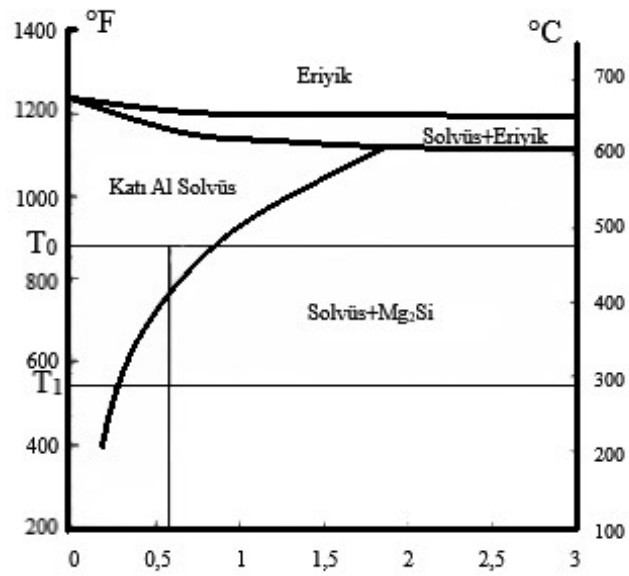
Peris (2007), AA6060 alüminyum alaşımında, kimyasal bileşimden ziyade mekanik unsurlar üzerinde durulması gerektiğini belirtmiştir. Sıcaklık etkisi incelendiğinde kuyruklu yıldız kusuru, referans alınan 555 °C değerinin altında ve üstünde meydana gelmiştir. Bu nedenle çözünmemiş alaşım elementleri ile ilişkisi olmadığı tespit edilmiştir.

2.5. Çökelme Sertleşmesi Isıl İşlemi

Çökelme sertleşmesi ısı işleme mekanik özellikleri arttırmak amacıyla alüminyum alaşımlarına yaygın olarak uygulanan bir ısı işlemdir. Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg ve Al-Zn-Mg alaşımları çökelme sertleşmesi prosesi uygulanabilir alaşımlara örnek olarak verilebilirler. Alaşımın kimyasal bileşiminde yer alan Cu, Mg ve Si gibi elementlerin Al ile oluşturulan ikili faz diyagramları incelendiğinde hepsinin Şekil 2.15'te görüleceği üzere katı çözelti bölgesi ihtiva ettiği (solvüs eğrisini bulundurması) ve bu katı çözeltilerde düşen sıcaklıkla çözünürlüklerin azaldığı görülmektedir. Alüminyum

için çökelme sertleşmesi uygulanabilir alaşım serileri 2xxx, 6xxx, 7xxx ve 9xxx serisi olarak sıralanabilir. AlMgSi alaşımlarında önce β' daha sonra β'' fazı oluşmaktadır (Shan ve Zhen, 2012).

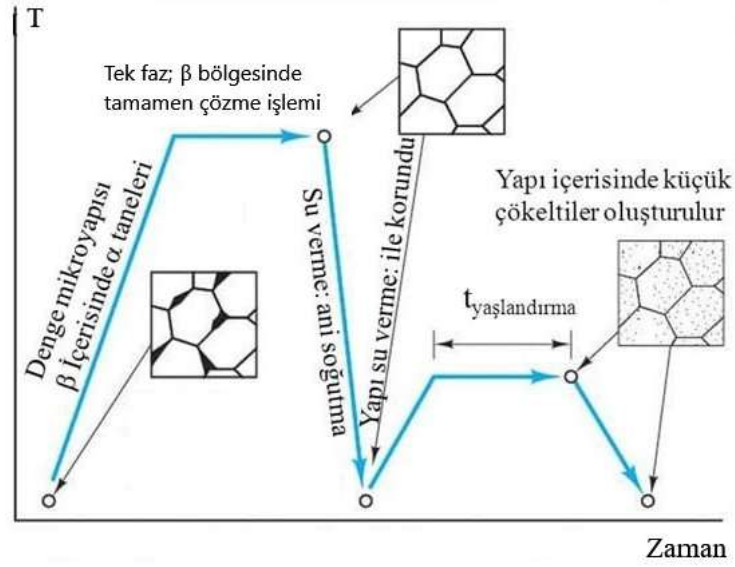
Al-Mg₂Si faz diyagramında Mg₂Si fazının maksimum çözünübilirliği 595 °C'de %1,85'dir. Oluşan magnezyum silisit miktarı mevcut olan magnezyum ve silisyum miktarına göre değişir. Çökeltilerin çözünmesi faz diyagramının katı çözelti kısmında çökelme ise katılaşma çizgisinin altında bir sıcaklıkta meydana gelir (Bartolucci, 1995).



Şekil 2.15. Al-Mg₂Si faz diyagramı (Krishna, 2017).

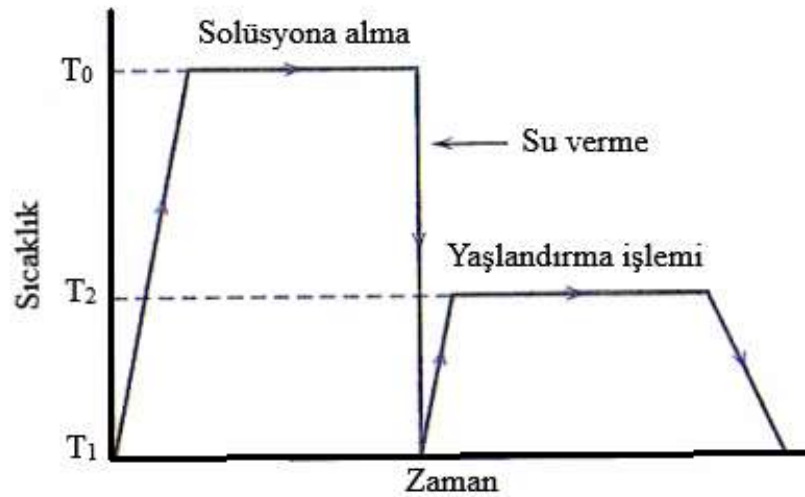
Çökelme sertleşmesi ısıtıl işlemi Şekil 2.16'da belirtildiği üzere 3 ana basamaktan oluşmaktadır: Solüsyona alma, su verme ve yaşlandırma.

Şekil 2.16 ve Şekil 2.17 birlikte incelendiğinde α ve β fazları içeren alaşım, tek fazlı bir yapı elde edilebilmesi için T₁ sıcaklığına kadar ısıtılır ve β fazı tamamen çözünene kadar bu sıcaklıkta tutulur.



Şekil 2.16. Çökelme sertleşmesinin temel basamakları (URL-5).

Alüminyum alaşımlarında çökelme sertleşmesi ısıtılmasının esas uygulanma amacı, profilin arzu edilen mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamaktır. İşlem esnasında, belirli bir sıcaklıkta genellikle iki faz içeren yapılar ani soğutmaya tabi tutulur ve tek fazlı bir yapıya sahip olması hedeflenir. Şekilde görüleceği üzere alüminyum alaşımlarına da uygulanabilen yaşlandırma işleminde zaman-sıcaklık döngüsü görülmektedir.



Şekil 2.17. Yaşlandırma işleminde zaman- sıcaklık döngüsü (Tekin, 2014).

Çökelme sertleşmesi 3 ana basamaktan oluşmaktadır. Bunlar solüsyona alma (çözeltiye alma), su verme (ani soğutma) ve son olarak yaşlandırma ısıtma işlemi aşamalarıdır (Tekin, 2014).

2.5.1 Çözeltiye alma

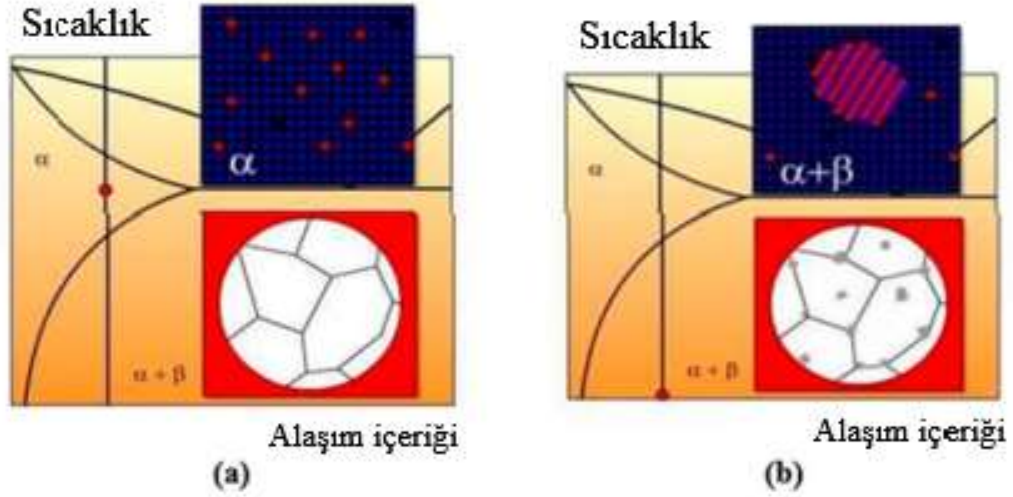
Çözeltiye alma işleminde alaşım, denge diyagramında solvüs eğrisinin birkaç derece üzerine ısıtılır ve belirli bir süre bekletilir. Burada amaç, malzemenin katı çözelti oluşturabileceği sıcaklığa kadar ısıtmaktır. Belirlenen sıcaklık ötektik sıcaklığı aşmamalıdır; aksi takdirde malzemede tane sınırı ergimesi gerçekleşir ve amaç dışı bir şekilde malzemenin mekanik özelliklerinde kayıp yaşanır. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken konulardan biri ısıtma hızı diğeri bekleme süresidir. Aşırı hızlı ısıtmada malzemede kontrolsüz ergimeler meydana gelebilir, tam tersi bir durumda yani aşırı yavaş ısıtmada ise fazlar tamamen çözünemeyebilir. Tavsiye edilen ortalama bekleme süresi her 25 mm kalınlık için 1 saattir (Tekin, 2014; Demirtaş, 2009).

2.5.2 Su verme

Temel amaç katı eriyikte oluşan malzeme yapısını hızlı bir şekilde soğutarak korumak, kafesler arası boşlukların mesafesini en azda tutmaktır. Malzemenin korozyon direnci ve mekanik özelliklerinin istenen seviyelerde olabilmesi için malzemenin aşırı doymuş α yapılarından oluşması dolayısıyla solüsyona alma işleminden sonra malzemenin hızlı bir şekilde soğutulması gerekmektedir. Soğutma işlemi soğuk su, kaynar su, polialkalin glikol, hava vb. akışkanlar ile sağlanabilmektedir (Tekin, 2014).

Malzemenin solüsyona alma işleminin ardından oluşan homojen yapı, hızlı bir şekilde soğutulularak aşırı doymuş bir katı eriyik oluşturulur. Ani bir şekilde soğutma gerçekleştirmenin amacı, katı eriyik halde oluşan yapıyı ve yüksek sıcaklıkta artan atom boşluğu miktarını korumaktır (Tekin, 2014; Darıdereli, 2010).

Malzeme aniden soğutulduğunda yapıda denge fazları oluşmasına fırsat verilmez ve denge durumuna göre yapıda atom boşluklarının fazlası bir araya gelme eğilimindedir. Yapıda oluşan bu bölgelerde çökelti fazı heterojen olarak çekirdeklenir. Şekil 2.18’de çözeltiye alma işlemi sonucunda tek faz halindeki katı çözelti ve alaşımın ani şekilde soğutulması durumunda oluşan heterojen çekirdeklenme yapısı verilmiştir (Tekin, 2014).



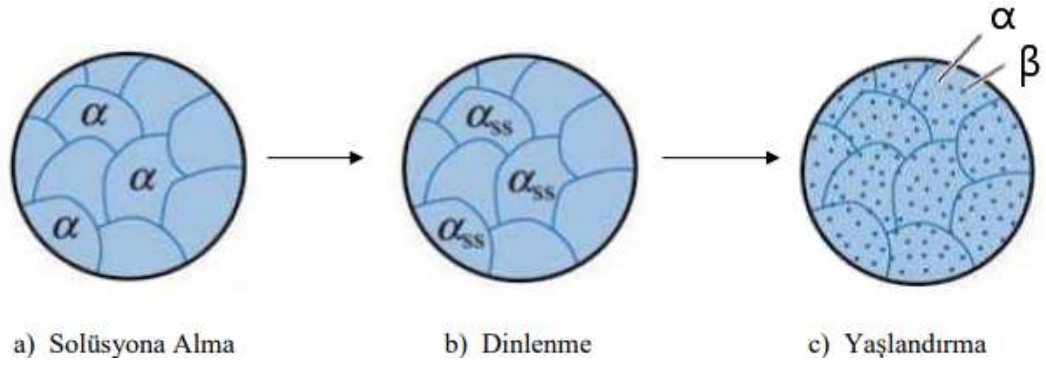
Şekil 2.18. a. Tek fazlı katı çözeltinin çözeltiye alma ısısal işlemi sonucu, b. Malzemenin ani soğuması ile oluşan çekirdeklenme durumu (Tekin, 2014).

Su verme işlemi yapılırken dikkat edilmesi gereken 2 kritik parametre bulunur. Bunlar su verme aralığı denilen alaşımın fırından çıkıp suya girene kadar geçen süre ve su verme ortamıdır. Su verme aralığı (10-20 saniye tavsiye edilir) ne kadar azaltılırsa elde edilen özellikler o kadar iyileşmiş olur (Tekin, 2014).

2.5.3 Yaşlandırma ısısal işlemi

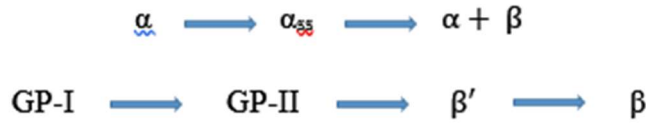
Yaşlandırma ısısal işlemi, çökelme sertleşmesi aşamalarının nihai basamağı olup alaşım üstün mekanik özelliklerini bu aşamada kazanmaktadır. Bu aşamada malzemeler solvüs sıcaklığının altında bir sıcaklıkta, çözeltiye alma işlemine göre nispeten daha uzun sürelerde tutulur (Tekin, 2014; Demirtaş, 2009).

Solüsyona alma ve dinlendirme işleminden sonra aşırı doymuş olan α tanecikleri solvüs sıcaklığının altında ısıtılarak atomların kısa mesafelerde nüfuz etmeleri sağlanır. Aşırı doymuş α tanecikleri dengede olmadığı için atomlar çekirdeklenme bölgelerine nüfuz ederler daha sonra α_{ss} çökeltileri oluşur ve büyümeler meydana gelir. Alaşımdaki ince çökeltiler, biçim değiştirme sırasında aykırı yerleşimlerin hareketini kısıtlayarak, alaşımın dayanımını artırır (Tekin, 2014). Şekil 2.19’da yaşlandırma aşamalarının gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.19. Yaşlandırma aşamalarının gösterimi (Smith, 1996).

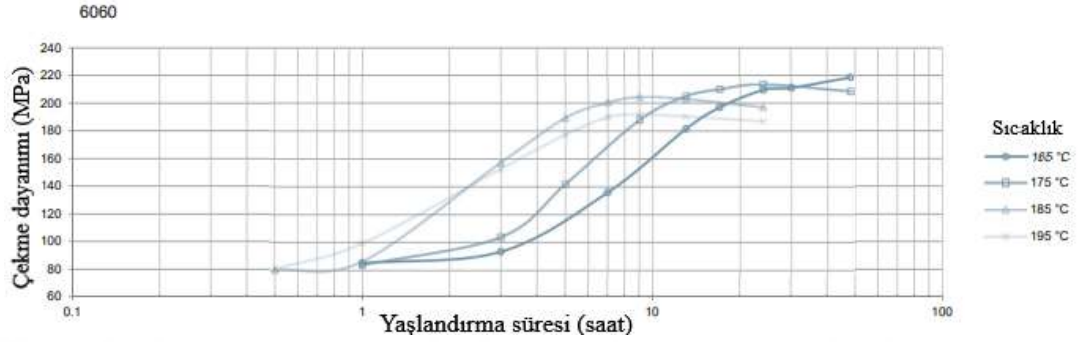
Yaşlandırma safhasında malzeme yapısındaki β oluşumu bir dizi safhadan geçerek meydana gelir. Yaşlanma başlangıcında atomlar matris düzlemlerinde yoğunlaşırlar ve çok küçük boyutlarda olan yarı uyumlu GP-I (Guiner Preston) bölgelerini oluştururlar. Aşırı doymuş katı eriyikten oluşan GP bölgeleri, matrisle uyumlu ve kararsızdır. GP bölgeleri oda sıcaklığında (tabi yaşlandırma ile) oluşturulabilirken, en yaygın uygulama 100-180 °C sıcaklık aralığında uygulanan yöntem ise yapay yaşlandırmadır. GP bölgelerindeki artışla beraber kafesteki gerilim, yaşlandırmanın başlangıcıyla sertlik artışının en tepe noktasında maksimuma ulaşmaktadır. Yaşlandırma ile yapıda oluşan çökeltilerin etkisiyle dislokasyon hareketinin zorlaşması, alaşımın dayanımını arttırmaktadır. Yaşlanma devam ettikçe daha çok atom düzleme nüfuz ederek daha kalın GP-II (β'') yapısını oluştururlar. Daha sonra GP-II çözünerek β' ve daha sonra da β yapısına dönüşürler. β yapısı dengeli ve uyumlu bir formdadır (Smith, 1996; Fakıoğlu ve Özyürek, 2014).



Şekil 2.20. Yaşlandırma işlemi ile β oluşumunun gösterimi (Smith, 1996).

Dengesiz fakat uyumlu olan GP-I, GP-II ve β' çökeltilerinin boyutu büyüdüğünde, alaşımın dayanımı yaşlandırma zamanı ile artar. Bu uyumlu çökeltiler varlıklarını korudukları sürece alaşım yaşlandırma sınırları içindedir. Dengeli fakat uyumsuz β fazı oluşmaya başladığında alaşımın dayanımı düşmeye başlar. Bu durumda alaşım aşırı yaşlandırılmış olup, yaşlanma sıcaklığı ve zamanın artırılması ile elde edilir

(Smith, 1996). GP Bölgesi, ekstrüzyon sonrası soğutulmuş AA6060 profilin yaşlandırılması esnasında oluşan ilk çökelti parçacıklarıdır. Genel olarak GP bölgeleri, Al ile belirgin bir sınırı olmayan, matrisin içinde homojen dağılmış olan ve sertleşmeye etki etmeyen atomik parçacıklardır.



Şekil 2.21. Farklı sıcaklıklar için yaşlandırma süresinin dayanıma olan etkisi (Hydro, 2019).

Şekil 2.21’de yapay yaşlandırma süresi uzadıkça çekme dayanımının belirli bir süreye kadar arttığı ancak belirli bir süreden sonra azalmaya başladığı görülmektedir. Isıl işlem reçetelerinde yapılacak değişiklikler istenilen mukavemet sonuçlarına göre belirlenmelidir. Genellikle ekstrüzyon fabrikalarında prosesi hızlandırmak için ve kısa sürede Mg_2Si çökmesi gerçekleştiğinden yüksek sıcaklıklarda ısıtıl işlem uygulanmaktadır. Ancak maksimum mukavemet değerlerine yaklaşık 50 saatte 165 °C’de ve 24 saatte 175 °C’de ulaşılmaktadır. Buna göre yapay yaşlandırma ısıl işleminde üretim hızı da göz önünde bulundurularak optimum reçeteler uygulanmalıdır.

2.6 Literatür Özeti

Alüminyum ekstrüzyon ürünlerinin ekstrüzyon şartlarına göre nasıl mekanik özellikler göstereceği ile ilgili çalışmalar ve çeşitli Al alaşımlarının mekanik özelliklerinin geliştirilmesine yönelik ısıl işlem temelli çalışmalar literatürde bulunmaktadır.

Thomas (1961), Al-Mg-Si alaşımında yaşlanma özelliğini, X- ışını difraktometre ve elektron mikroskobu kullanarak araştırmıştır. Yaşlandırma sıcaklığı yükseldikçe, iğneli fazların uzunluğunun 200 Å’dan 1000 Å’nın üzerine kadar çıktığını göstermiştir. İğneli fazların çapları ise 60 Å’da sabit kalmıştır.

Lutts (1961), 135 °C'de yapılan yapay yaşlandırmanın, iğne şeklindeki fazı iki kademedede oluşturduğunu göstermiştir. İlk fazda iğneler düzensiz bir şekilde dağılmakta ve birçok hücre boşluklarını yapı içinde barındırmaktadır. Zamanla, iğnelerin düzene girdiği ve uzunluğunun arttığı görülmüştür.

Siddiqui vd. (2000) tarafından, AA6063 alaşımı kullanılan bu çalışmada, çözeltiye alma sıcaklığı olarak 520 °C tercih edilmiştir. Sonrasında farklı yaşlandırma şartlarının (zaman ve sıcaklık) mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları en yüksek mukavemet değerlerinin 175 °C'de 8-10 saat yaşlandırma şartlarında elde edildiğini göstermiştir.

Clausen vd. (2001), AA6082 ve AA7108 alaşımı kullanarak ürettikleri deney profillerinden elde ettikleri T1 temper derecesine sahip 49 adet içi boş profil numunelerine, ekstrüzyon doğrultusuna 0°, 45° ve 90° açılarda, farklı kalınlıklara sahip 392 adet çekme testi numunelerine mekanik özelliklerini incelemek için çekme testleri uygulamışlardır. Yapılan çalışmaların sonucunda, ürünlerin mekanik özelliklerine en çok alaşımın yönünün ve ekstrüzyon doğrultusunun etkilediği sonucu bulunmuştur.

Gao vd. (2002), AA6063 alaşımını kullanılarak çeşitli yaşlandırma işlemleri uygulanmıştır. Yaşlandırma sonrasında numunelerin mukavemetini incelemiştir. 2,4 mm et kalınlığına sahip düz ekstrüzyon profiline ilk aşamada 585 °C'de 3 saat çözeltiye alma ısı işlemi uygulanmıştır. Ardından 288 saat doğal yaşlandırma, 3 saat yapay yaşlandırma ve 80 °C'de 5 saat yapay yaşlandırma olmak üzere 3 farklı ön yaşlandırma yapılmıştır. Ön yaşlandırma işleminin ardından numunelere farklı sürelerde 165 °C, 185 °C ve 205 °C sıcaklıklarında yeniden yaşlandırma uygulanmıştır. Çalışma sonucunda yüksek sıcaklıkta ikincil yaşlandırma uygulanan malzemelerin, benzer başlangıç koşullarına sahip malzemelere kıyasla daha düşük dayanımlara sahip olduğu görülmüştür. Aynı ikincil yaşlanma özelliklerine sahip malzemeler arasında doğal ön yaşlandırma süresi daha uzun olan numunelerin çekme mukavemetlerinin daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Karabay vd. (2003), AA6063 alaşımı kullanılan ekstrüzyon deney numunelerine sertlik (HB) ve çekme testleri yaparak ekstrüzyon oranının mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Yapılan analizler sonucunda, ekstrüzyon oranındaki artış ile sertliğin

ve profillerin maksimum çekme dayanımının arttığı ancak elastik şekil değişiminin azaldığı bulunmuştur.

Karabay vd. (2005), farklı ekstrüzyon oranlarının AA6101 alaşımının mekanik özelliklerine nasıl etki edeceğini incelemek için çekme testi, sertlik testi ve mikroyapı muayeneleri uygulamışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda, ekstrüzyon oranı arttıkça sertlik değerlerinde ve maksimum çekme dayanımında artış, uzama oranında azalma görülmüştür.

Özbek (2007), AA2618 alüminyum alaşımı kullanarak solüsyona alma işleminde 520-640 °C'de 14-24 saat boyunca uyguladıktan sonra yapay yaşlandırma uygulamıştır. Optik mikroskop, taramalı elektron mikroskop kullanılarak gerçekleştirilen mikroyapı çalışmaları, 530 °C'de solüsyona alma işlemi sonucunda yeniden kristalleşmenin gözlemlenmediğini, bununla birlikte solüsyona alma işlem sıcaklığı 530 °C'nin üzerinde olduğunda ve ısıtma işlem süresi arttıkça yeniden kristalleşme oluştuğunu tespit etmiştir. Solüsyona alma işlem sıcaklığının artırılması ile tanecikler ve çökeltiler irileşmiş bundan dolayı sertlik değerlerinde düşüş meydana gelmiştir.

Karabay vd. (2012), AA6101 alaşımı kullanılarak yapılan çalışmada, deney biyetlerine 560 °C'de 6 saat homojenizasyon işlemi uygulanmıştır. 510 °C'de ekstrüde edilen ve 175 °C'de T6 temper derecesinde alınan numunelerin çekme mukavemetlerinin, homojenize olmamış ve yavaş soğutulmuş olanlara kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Güven ve Delikanlı (2012), yaptıkları çalışmada AA2024 alaşımı kullanılarak hazırlanan deney numunelerine farklı çözelti sıcaklıkları uygulanmıştır. Ardından numunelere yapay yaşlandırma ısıtma işlemi uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde çözelti sıcaklığının artırılması ile mekanik ve sertlik özelliklerinde artış meydana gelmiştir. 530 °C ön ısıtma sıcaklığı ve 190 °C'de 6 saatlik yapay yaşlandırma uygulandığında en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Akyüz ve Şenaysoy (2014), AA6013 ve AA6082 alaşımlarının yapay yaşlandırma işlemi sonucunda işlenebilirliğe ve mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, iki tip alaşımdan oluşan deney numunelerine, 530 °C'de ısıtma fırınında 8 saat çözeltiye alma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra numuneler 70 °C sıcaklıktaki

sıcak suya konulmuş ve numunelere termik fırında 180 °C'de 1, 3, 6, 9, 12 ve 24 saat yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde 6 saat yaşlandırma işlemi uygulandığında en yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir.

Zhou vd. (2014), AA6101 alaşımı kullanılarak ısıtıl işlem süreçleri, yaşlandırma sıcaklığı ve çözeltiye alma sıcaklığı parametrelerinin ekstrüzyonla üretilmiş bir çarpışma kutusunun mukavemeti üzerindeki sonuçlarını incelemişlerdir. Buna göre, ideal ısıtıl işlem parametrelerinin 510 °C'de 45 dakika çözeltiye alma işlemi ve 175 °C'de 7 saat yaşlandırma olduğunu göstermiştir.

Eser vd. (2015), AA6082, AA6005 ve AA6061 alaşımları kullanılarak yapılan çalışmada, 540 °C çözeltiye alma sıcaklığı uygulanmıştır. Numunelere farklı sıcaklık ve sürelerde yapılan yaşlandırma şartlarının sonuçları araştırılmıştır. Yapay yaşlandırma sıcaklıkları 170 °C, 200 °C ve 250 °C, süreleri ise 10 dakikalık aralıklarla 10 farklı zamanda uygulanmıştır (minimum 10 dakika, maksimum 100 dakika). Yapılan çalışmalarda, üç alaşım içinde en yüksek sertlik değerine 170 °C yaşlandırma sıcaklığında ulaşılmıştır. Yapay yaşlandırma sıcaklıklarının artması sonucunda sertlik değerleri azalmış ancak deney sonucunda elden edilen maksimum sertlik değerine ulaşma zamanı kısalmıştır.

Polat vd. (2015), AA6061 alaşımı kullanarak, yapay yaşlandırma sıcaklıklarının ve sürelerinin mekanik özelliklere olan etkisini araştırmışlardır. 160 °C, 180 °C ve 200 °C sıcaklıklarında; 2.5, 5, 10, 20, 40, 60 ve 80 saat sürelerinde deney çalışmaları uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda optimum yapay yaşlandırma zaman aralığı 5-40 saat, sıcaklık değeri ise 180 °C olarak bulunmuştur.

Al-Saadi ve Tunay (2017), Al-25Zn-1Mg alaşımı kullanarak, yapay yaşlandırma ısıtıl işlem parametrelerinin, alaşımın sertliğine olan etkilerini incelemişlerdir. 20x20 mm kare geometriye sahip numunelere; 1, 3, 6, 12 ve 24 saat termik fırında bekletme sürelerinde ve 180 °C sıcaklıkta yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda en yüksek sertlik değerine 12 saat yaşlandırma süresi uygulandığında ulaşılmıştır.

Doruk vd. (2018), AA6082 alaşımının kullanıldığı çalışmada, alüminyum ekstrüzyon imalat yöntemiyle üretilmiş ezilme kutularının çarpışma performansına ısıtıl işlem

parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Deney numuneleri, 4 saat ve 600 °C’de çözeltiye alma işleminin ardından hava ile soğutulmuştur. Yaşlandırma işlemi, 160 °C sıcaklığında, 8, 10, 15, 18 ve 24 saat süreler uygulanarak yapılmıştır. En yüksek çekme ve akma dayanımı değerlerine, 24 saat yaşlandırma uygulandığında ulaşılmıştır.

Uğurlu (2022), AA6060 alüminyum alaşımı ve direkt ekstrüzyon yöntemiyle imal edilmiş profillerde, 530 °C’de çözeltiye alma ve hava ile soğutma işlemlerinin ardından farklı sürelerde ve sıcaklıklarda yaşlandırma yapılarak yaşlandırma sürecindeki sıcaklık-zaman parametrelerinin malzemenin mikroyapısına ve mekanik özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Yaşlandırma deney tasarımı; 160 °C, 180 °C ve 200 °C sıcaklıklarında 4, 6 ve 8 saat değişken parametreleri ile hazırlanmıştır. Akma ve çekme mukavemetleri incelendiğinde, profil için optimum değerlere 180 °C– 8 saat yaşlandırma uygulanan deney numunelerinde ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

Saraç ve Durna (2023), AA6060 alüminyum alaşımı tercih edilen çalışmada; ekstrüzyon yöntemiyle kapalı bir profil, 3 farklı ön ısıtma sıcaklığı uygulanarak üretilmiştir. Numuneler imal edilirken ekstrüzyon parametreleri (ekstrüzyon hızı, kovan sıcaklığı) sabit tutulmuş olup hava ile soğutma yapılmamış, doğal soğutma yapılmıştır. Sertlik sonuçları ve mikro yapı görüntüleri incelenmiştir. Buna göre, en yüksek sertlik değeri 470,1 °C ön ısıtma sıcaklığı ile üretilmiş profilde 46,7 HB olarak ölçülmüştür. Mikroyapı sonuçları incelendiğinde, ön ısıtma sıcaklığının artması sonucunda sertlik değerlerindeki artış, mikro yapıdaki β Mg₂Si çökeltilerinin artmasıyla açıklanmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, AA6060 alaşımı kullanılarak ekstrüzyon yöntemiyle imal edilmiş iki figürlü bir profilin, değişken ön ısıtma sıcaklıkları uygulandığında yapay yaşlandırma sonrasında sertlik değerlerine olan etkileri üzerine yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Çalışmada Kullanılan Alüminyum Alaşımı ve Özellikleri

Bu çalışmada AA6060 alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan alüminyum alaşımının, EN 573-3 standartlarına uygunluğunu ölçmek ve alaşımın kimyasal muhtevasını tespit edebilmek amacıyla spektrometre analizi yapılmıştır. Analiz sürecinde Şekil 3.1’de gösterilen OBLF Salinger Feld 44 GS 1000 marka-model spektrometre kullanılmıştır. Deneyde kullanılan biyet, Eti Alüminyum şirketinden temin edilmiştir.



Şekil 3.1. Alaşımın uygunluğunu ölçmede kullanılan spektrometre.

Çalışmada kullanılan AA6060 alaşımının spektrometre analizi sonunda EN 573-3 standartlarına uygun olduğu doğrulanmıştır. EN 573-3 standardında referans alınan kimyasal bileşenler ve ölçülen spektrometre analizi değerleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. AA6060 Alüminyum alaşımı kimyasal bileşen değerlerinin karşılaştırılması.

Element	EN 573-3 standardı referans değerleri (%)	Spektrometrede ölçülen bileşim oranları (%)
Demir (Fe)	0,1-0,3	0,278
Manganez (Mn)	<0,1	0,055
Magnezyum (Mg)	0,35-0,6	0,373
Silisyum (Si)	0,3-0,6	0,369

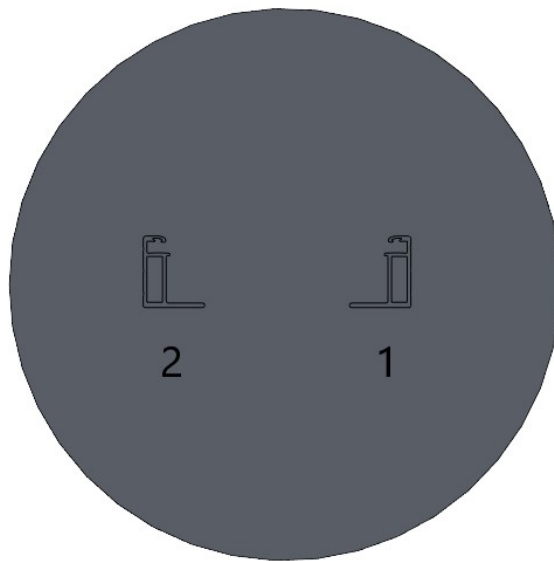
Çizelge 3.2 (Devamı). AA6060 Alüminyum alaşımı kimyasal bileşen değerlerinin karşılaştırılması.

Bakır (Cu)	<0,1	0,025
Çinko (Zn)	<0,15	0,052
Titanyum (Ti)	<0,1	0,016
Krom (Cr)	<0,05	0,013
Alüminyum (Al)	97,9-99,3	98,819
Diğer	<0,15	0,014

3.2 Figür Adedi ve Ekstrüzyon Kalıp Detayları

Deney çalışmasında kullanılan ekstrüzyon profilinin şekli yarı kapalı yarı köprülü olarak seçilmiştir. Çünkü kapalı geometrinin olduğu kısımlarda sürtünme, kalıp geçişinden dolayı daha hızlı gerçekleşirken açık kısımlarda sürtünme daha yavaş olacaktır. Böylece profil geometrisinde farklı sıcaklık dalgalanmaları görülecektir. Deney çalışmasında sıcaklığın sertliğe olan etkileri araştırılacağından profil şekli ve figür adedi seçimine dikkat edilmiştir.

Ekstrüzyon kalıplarının figür numaralandırılması ekstrüzyon yönüne göre belirlenmektedir. Şekil 3.2’de ekstrüzyon yönüne göre figür numaralandırılması gösterilmiştir. Karışıklık olmaması adına numaralandırılma yapılırken profilin çıktığı yönde ekstrüzyon prese bakılmakta ve sağdan başlanarak numaralandırılma yapılmaktadır.



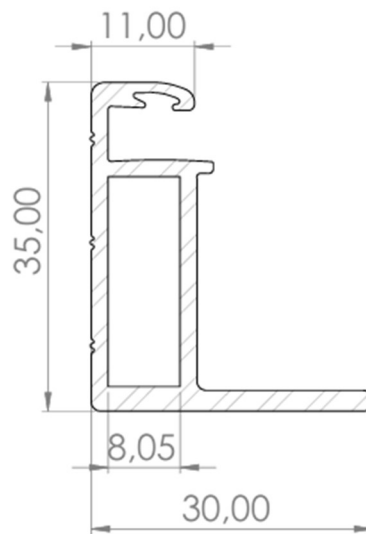
Şekil 3.2. Figür numaralandırılması.

3.3 Ekstrüzyon Oranı Kontrolü

Ekstrüzyon oranı, kovan kesit alanının üretimi yapılacak profilin kesit alanına bölünmesiyle bulunmaktadır (Saraç ve Durna, 2023). Kovan kesit alanını bulmak için gerekli parametre olan kovan çapı Çizelge 3.2’de belirtildiği gibi ekstrüzyon prese ait bir değişkendir ve 158 mm’dir. Deney aşamasında karmaşık şekil faktörüne sahip iki figürlü açık kalıp profili kullanılmıştır (Şekil 3.3). Buna göre kovan kesit alanının profil kesit alanına bölünmesiyle Ekstrüzyon Oranı (EO), 51,924 olarak Denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır. D_k (mm), kovan çapıdır. Profil kesit alanı 188,8 mm² olarak hesaplanmıştır. Figür adedi 2 olarak alınmıştır.

$$EO = \frac{\frac{\pi D_k^2}{4}}{\text{Profil Kesit Alanı} \times \text{Figür Adedi}} \quad (3.1)$$

Hesaplanan ekstrüzyon oranı değeri göz önüne alındığında ekstrüzyon oranının prese uygun değer aralığında olduğunu göstermektedir. Ekstrüzyon oranı başlığı altında açıklandığı üzere bu değer 20-100 aralığını sağladığından herhangi bir soğutma işlemi uygulanmamıştır. Yüksek biyet ön ısıtma sıcaklıklarında ve yüksek ekstrüzyon hızlarında üretim yapıldığında, hava ile soğutma yapılması gerekmektedir. Ancak ekstrüzyon sırasında soğutma yapıldığında ince et kalınlığına sahip profillerde boyuna dalgalanmalar görülebilmektedir.



Şekil 3.3. Deneyde kullanılan profilin kesiti.

Deney çalışmasında kullanılan profillerin ekstrüzyonunda, figür sayısının farklı olmasından kaynaklanan sertlik değerlerindeki değişim, sadece ekstrüzyon oranını etkilemeyecektir. Birden fazla figür adedine sahip olan ekstrüzyon kalıplarında, figürlerin şeklini oluşturan “geçiş” unsuru farklı uzunluklarda ve geometrilerde tasarlanabilir. Bu nedenle geçiş boyu arttıkça alüminyum daha uzun sürelerde son şeklini alacak ve sürtünmeden kaynaklı sıcaklık artışı yükselecektir. Daha kısa geçiş uzunluğuna sahip figürde, alüminyum daha hızlı şekil alacak ve sürtünmeden kaynaklanan sıcaklık artışı daha az olacaktır. Aynı zamanda birden fazla figürün olması alüminyum ekstrüzyon fabrikalarında bir problem olarak görülmektedir. Çünkü ilk biyetin ekstrüzyonu sırasında figürler eş zamanlı olarak kalıptan çıkmamaktadır. Bu durum bazı şartlarda tolere edilebilse de figürler arasında ekstrüzyon sıcaklıklarının ve mekanik özelliklerinin farklı olmasına neden olmaktadır.

3.4 Şekil Faktörü Kontrolü

Şekil faktörü, profilin kesit çevresinin, profilin metre ağırlığına bölünmesiyle bulunan değerdir. Şekil 3.3’te belirtilen, deneysel çalışmada kullanılan profilin kesit çevresi 155,4 mm, birim ağırlığı 0,51 kg/m’dir. Buna göre şekil faktörü Denklem (3.2) kullanılarak 30,47 olarak bulunmuştur. Bu değer, deneyde kullanılan ekstrüzyon presin özellikleri göz önüne alındığında 2-75 ideal şekil faktörü aralığına uygundur. Deney profilleri, sorunsuz olarak üretilebilir. Bu değer 6400 kg/cm² olan preslerde maksimum 75 olarak belirlenmiştir.

$$\text{Şekil Faktörü} = \frac{\text{Profilin kesit çevresi}}{\text{Profilin ağırlığı}} \quad (3.2)$$

3.5 Biyet Ön Isıtma ve Ekstrüzyon İşlemleri

AA6060 biyetlere ön ısıtma yapılmasının amacı, yapı içindeki Mg₂Si bileşiğinin tam olarak çözünmesidir (Rendings, 1997). Yüksek sıcaklıklara çıkıldığında biyet yapısında bulunan Mg₂Si çökeltileri çözünür ve malzeme birkaç dakika içerisinde hızlı soğutma yapılarak aşırı doymuş çözelti elde edilir. Ekstrüzyon prosesinde, matriste elde edilen Mg₂Si partikülleri yaşlandırmadan sonra elde edilen mukavemeti etkiler (Langkruis vd., 2001).

Buna göre çalışmada kullanılacak AA6060 hammaddesinin biyet fırınında ön ısıtma süreci tamamlanmıştır. Biyetlerin transfer arabası aracılığıyla Çizelge 3.2’de özellikleri belirtilen alüminyum ekstrüzyon presinde 7 mm/s sabit zımba hızıyla ve 410 °C kovan sıcaklığı şartlarında profil haline getirilerek üretilmesi sağlanmıştır. DeneySEL çalışmanın yapıldığı tesiste bulunan, alüminyum ekstrüzyon üretim prosesinde yer alan biyet ön ısıtma hattı ve ekstrüzyon presi sırasıyla Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’te gösterilmiştir.

Ekstrüzyon presin teknik özelliklerinden olan kovan (konteyner) çapı, maksimum kalıp çapı ve uygun olan biyet çapı değişkenlik gösterirse deney sonuçları da farklılık gösterecektir. Çünkü kovan çapı ve uygun biyet çapı ekstrüzyon oranını etki ederken, maksimum kalıp çapı sürtünmelerden kaynaklı ısınmalardan dolayı doğal ve yapay yaşlandırma sonrası profil sertliğini etkiler. Ekstrüzyon oranı (E.O.) daha detaylı bahsedilmiş olup kısaca; imalat hızını ve soğutma işlemini belirler. Ayrıca E.O. yapay yaşlandırma sonrasında sertlik özellikleri ile ilgili belirleyici olduğundan tezin deney sonucu açısından büyük önem arz etmektedir. Diğer teknik detaylar ayrıca kıyas yapılabilmesi için belirtilmiştir.

Uygulamada soğutma çok hızlı olursa, alüminyum profillerin gerilmelerden kaynaklanan deformasyon nedeniyle bozulduğu gözlemlenmiştir. Tersine soğutma çok yavaş olursa, profillerin sertliğinde yapılan ölçümler sonucunda azalmalar tespit edilmiştir (Saraç ve Durna, 2023). Bu tez çalışmasında imalat sırasında doğrudan alüminyum biyet ön ısıtma sıcaklığının etkileri araştırıldığından herhangi bir hızlı soğutma işlemi (su verme veya hava soğutma) uygulanmamıştır.

Çizelge 3.3. Deney sürecinde kullanılan ekstrüzyon presin teknik özellikleri.

Biyet çapı (mm)	152
Biyet uzunluk aralığı (mm)	300-880
Kovan iç çapı (mm)	158
Kovan uzunluğu (mm)	900
Ekstrüzyon oranı (mm/s)	1,2-18
Tavsiye edilen ekstrüzyon oranı	12-72
Maksimum kalıp çapı (mm)	Ø300
Toplam güç (MPa)	278



Şekil 3.4. Ön ısıtma işlemi esnasında kullanılan biyet fırını.



Şekil 3.5. Deney profilinin elde edilmesinde kullanılan alüminyum ekstrüzyon pres.



Şekil 3.6. Örnek profil üretimi.

Deney çalışmasında Şekil 3.4'te bulunan fırın kullanılarak 6 farklı ön ısıtma sıcaklığında biyet ısıtılmış, Şekil 3.5'te bulunan ekstrüzyon prese transfer edilmiş ve Şekil 3.6'daki örnekte gösterildiği gibi imal edilmiştir. Ön ısıtma sıcaklıkları; 430,3 °C, 440,2 °C, 445,2 °C, 450,1 °C, 460,2 °C, 470,3 °C olarak seçilmiştir.

3.6 Yaşlandırma Prosesi ve Sertlik Ölçümü

Alüminyum deney numunelerinin mekanik özelliklerini arttırmak amacıyla çökeltme sertleşmesi ısıtma işlemi uygulanmıştır. Şekil 2.15 incelendiğinde Mg_2Si fazının maksimum çözünebilirliği 595 °C'de %1,85'dir. AA6060 alaşımının 640 °C'de ergimeye başladığı göz önüne alındığında bu sıcaklık kritik önem taşımaktadır. Bu nedenle ekstrüzyon tesislerinde 500 °C'nin üzerinde ön ısıtma işlemlerinden kaçınılır. Sürtünmelerden kaynaklanan ısı kazançları biyet sıcaklıklarını daha da yükselteceğinden çözeltilme sıcaklıkları daha düşük değerlerde tercih edilmiştir. Buna göre Mg_2Si fazının çözünebilirliği sıcaklık azaldıkça azalmaktadır.. Al- Mg_2Si faz diyagramı incelendiğinde, tez çalışmasının en yüksek çözeltilme sıcaklığı olan 470,3 °C referans alınırsa maksimum çözünebilirlik yaklaşık % 0,9'dur. Bu nedenle mekanik özelliklerde en iyi değerler elde edilemeyecektir. Ani soğutma işlemi mekanik özellikleri etkileyen bir parametre olduğundan bu tez çalışmasında uygulanmamıştır.

Numuneler oda sıcaklığında doğal soğumaya tabi tutulmuştur. Bu aşama da amaç, denge fazlarının oluşmasına fırsat vermeden soğutma yapmak.

Yapay yaşlandırma ısıtıl işleminde AA6060 alaşımının en iyi mekanik özellikleri elde etmesi amaçlanmaktadır. Deney numunelerinin solvüs eğrisi altındaki sıcaklıkta belirli bir süre tutulması sağlanmıştır. Aşırı doymuş taneciklerin büyümesi hedeflenmiş; dislokasyon hareketinin engellenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Kanoko vd. (2005); Gao vd. (2002), tarafından yapılan çalışmalar ve Şekil 2.21’de yer alan veriler referans alınmıştır. AA6060 alaşımının yapay yaşlandırma süre-sıcaklık bağıntısı Şekil 2.21’de detaylı şekilde incelendiğinde maksimum sertlik değerlerine 165 °C’de 50 saatte ulaşılmaktadır. Bu süre seri üretim yapan ekstrüzyon firmaları için oldukça uzun ve maliyetli olmaktadır. Arzu edilen mekanik özelliklerin sağlanabilmesi şartıyla daha kısa süren ısıtıl işlem reçeteleri uygulanmaktadır. Diğer yandan kısa yaşlandırma süreleri görece daha yüksek sıcaklıklar gerektirdiğinden enerji ve maliyet dengesi de göz önüne alınmaktadır. Bu nedenle ekstrüzyon firmaları, birbirini takip eden yapay yaşlandırma işlemleri yapmaktadırlar. Bu sayede termik fırın ısı kaybetmeyecek ve malzeme belirlenen sıcaklığı daha kısa sürede ulaşacaktır.

Bu bilgiler ışığında; ekstrüzyon preste imal edilen deney profillerine Şekil 3.7’de gösterilen termik fırında 185 °C’de 300 dk yapay yaşlandırma ısıtıl işlem reçetesi uygulanmıştır.



Şekil 3.7. Yapay yaşlandırma prosesinin yapıldığı termik fırın.

Yapay yaşlandırma sonrası, numuneler ortam sıcaklığına kadar soğutulup sertlik ölçümü amacıyla 30 mm uzunluğunda kesilmiştir. Sertlik ve mikroyapı ölçümü için kesilen numuneler Şekil 3.8’de belirtilmiştir. Sertlik ölçümlerinin yapılması için Şekil 3.9’da gösterilen BMS-3000 OPBC Brinell sertlik ölçüm cihazı tercih edilmiştir.



Şekil 3.8. Sertlik ölçümü ve mikroyapı kontrolü için kesilen numuneler.



Şekil 3.9. Brinell sertliği ölçüm cihazı.

3.7 Mikroyapı Kontrolü

Yapay yaşlandırılan AA6060 alaşım numuneleri, mikroyapısal incelemelerinin yapılması için Şekil 3.10’da gösterilen Metkon- Servocut M300 marka ve model testere ile yaklaşık 30 mm uzunluğunda kesilmiştir.



Şekil 3.10. Metkon- Servocut M300 marka ve model testere.

Çodur (2022), yaşlandırma uygulanmış numunelerin T6 temper kondisyonunda mikroyapı görüntülemelerini gerçekleştirmiştir. Test numuneleri 200, 400, 600, 800, 1200, 1500 ve 2500 meshlik su zımparaları ile parlatılmıştır. Sonra numuneler 1 μm ve 3 μm keçe ile parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Ardından numuneler 95 ml distile su, 2,5 ml HNO_3 , 1,5 ml HCL ve 1 ml Keller HF çözeltisinde 5 ile 15 saniye tutularak dağlanmıştır. Numuneler, metanol ve su kullanılarak kimyasaldan arındırılmıştır.

Yıldırım (2010), deney numunelerine parlatma cihazlarında sırasıyla 80, 150, 240, 320, 400, 600, 800 numaralı zımparalama yapılmış, parlatma çuhasında alümina ve distile su kullanılarak kabaca parlatma uygulanmıştır. Son parlatma işlemi 0,25 μm tane boyutuna sahip elmas sprej ile gerçekleştirilmiştir. Parlatılmış numuneler su ve %0,5 HF oluşan kimyasal çözelti ile dağlanmıştır.

Yapılan bu çalışmalar doğrultusunda; profil numuneleri Şekil 3.11’de gösterilen Metkon-Forcipol 2V marka-model makine ile sırasıyla 400, 600, 800 ve 1200 numaralı zımpara kağıtları kullanılarak zımparalanmıştır. Daha sonra parlatma işlemi 1 μm elmas solüsyonu ile gerçekleşmiştir.

Dağlama yapılması için 97,5 ml saf su, 2,5 ml H_2SO_4 kullanılarak oluşturulan kimyasal çözeltide numuneler 5-10 saniye süreyle dağlanmıştır.



Şekil 3.11. Deney numunelerinin zımparalandığı zımpara makinesi.

Dağlanan profil numunelerinin mikroyapı fotoğrafları, Şekil 3.12’de gösterilen NİKON marka Eclipse MA100 model optik mikroskopla elde edilmiştir. Tüm numunelerin farklı bölgelerinden 1/100 lensler kullanılarak görüntüler alınmış ve bu görüntülerin bütün mikro yapıyı temsil edebilir noktalarda olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 3.12. Mikroyapı kontrollerinin yapıldığı optik mikroskop.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

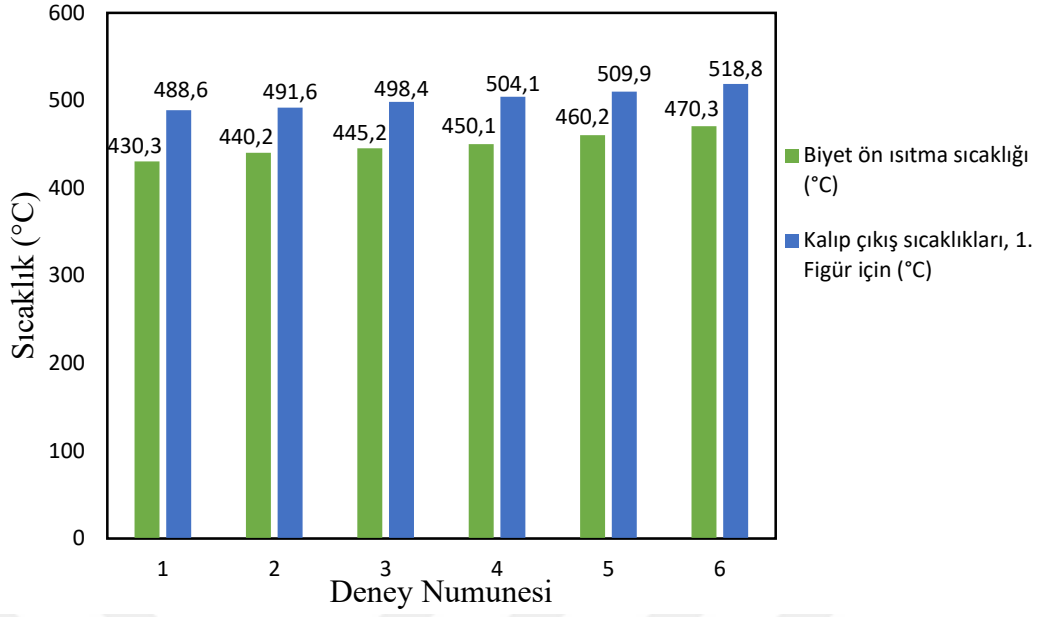
Çizelge 4.1’de tez çalışmasında kullanılan alüminyum ingot biyetlerin ekstrüzyon öncesi ısıtma sıcaklıkları ve bu ön ısıtma sıcaklıkları uygulandığında figürlerde oluşan ekstrüzyon sıcaklıkları gösterilmiştir. Sıcaklık ölçümleri, Fluke 51 marka-model termometre ve K tipi termokupl kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, ön ısıtma fırınından biyet çıktığı ve profillerin kalıbı terk ettiği sırada yapılmıştır. Ön ısıtma fırınının sıcaklık kontrol sistemi, belirli süre aralıklarında (termokupl uçlarının biyete sürekli temas etmesinden dolayı) ve tolerans değerlerinde ($\pm 0,5$ °C) ölçüm yaptığından virgülden sonraki kısımlar tam değer olarak elde edilememiştir.

Çizelge 4.1. Ön ısıtma ve kalıp çıkış sıcaklıkları.

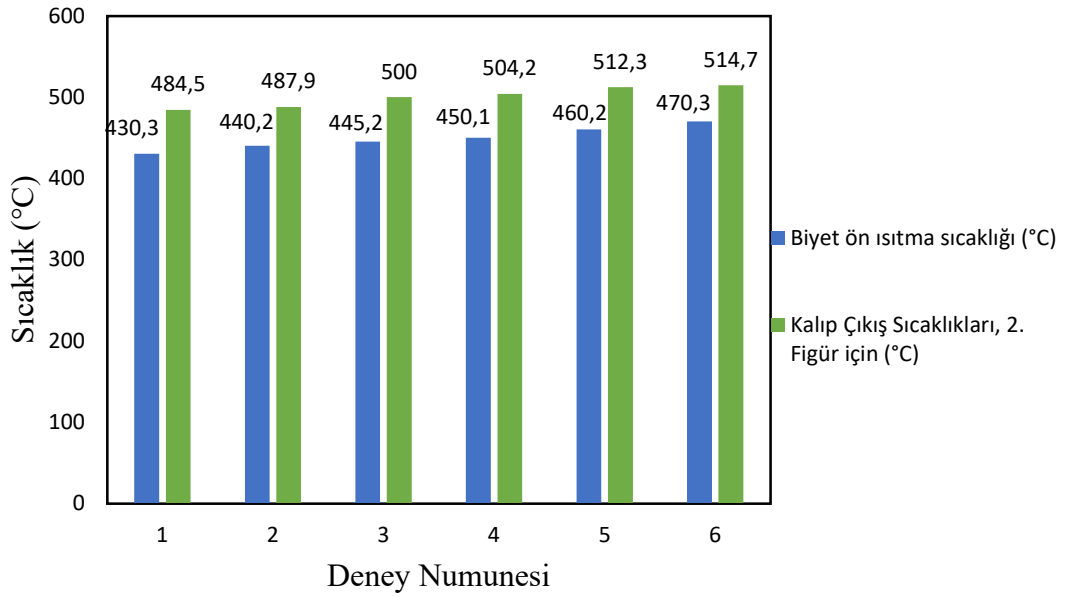
Deney numunesi	Ön Isıtma Sıcaklıkları (°C)	Kalıp Çıkış Sıcaklıkları, 1. Figür için (°C)	Kalıp Çıkış Sıcaklıkları, 2. Figür için (°C)
1	430,3	488,6	484,5
2	440,2	491,6	487,9
3	445,2	498,4	500
4	450,1	504,1	504,2
5	460,2	509,9	512,3
6	470,3	518,8	514,7

Deneyde kullanılan profilin kesiti simetrik olmadığından sıcaklık artışı beklenenden fazla olmuştur. Profil geometrisinde köşeli yapılar bulunduğundan, ısı da köşelerde yoğunlaşmıştır. Buna göre şeklin asimetrik olması ve köşeli hatlara sahip olması sıcaklıkta önemli artışlar oluşturmuştur. Ekstrüzyon hızı otomatik kontrol sayesinde sabit tutulduğundan profildeki sıcaklık artışına herhangi bir etkisi olmamıştır.

Deney numunelerinin ön ısıtma ve ekstrüzyon sıcaklıkları (kalıp çıkış sıcaklıkları); 1. figür numarası için Şekil 4.1’de, 2. figür için Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

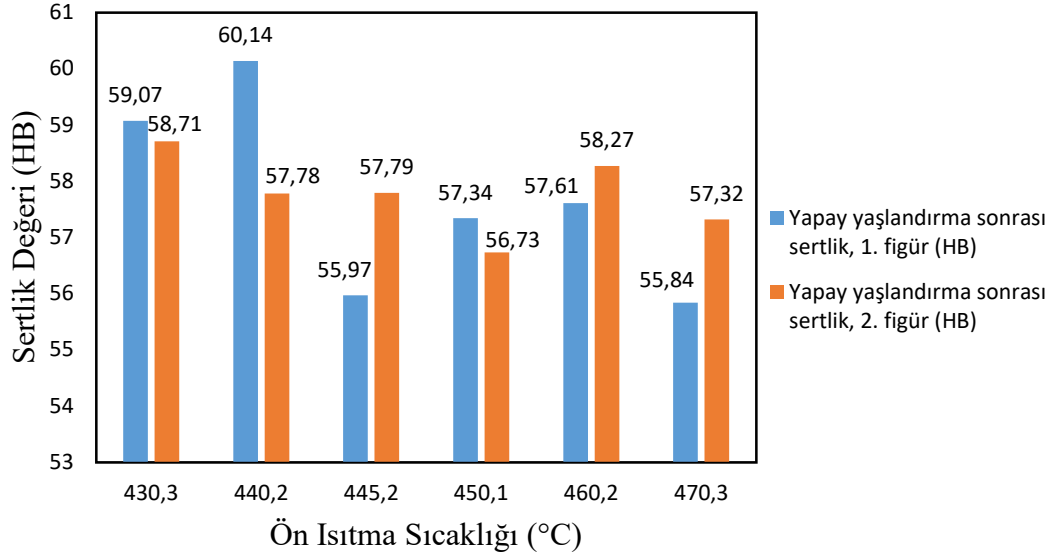


Şekil 4.1. 1. Figür için ön ısıtma sıcaklıkları ve ekstrüzyon sıcaklık değerleri.



Şekil 4.2. 2. Figür için ön ısıtma sıcaklıkları ve ekstrüzyon sıcaklık değerleri.

Deney aşamasında kullanılan AA6060 alüminyum alaşımının tipik sertlik değeri tempersiz halinde TS EN 755-2 standardına göre 25 (± 2) HB'dir. Buna göre Şekil 4.3. incelendiğinde sertlik değerlerinde ortalama 31 HB fark görülmektedir.



Şekil 4.3. Yapay yaşlandırma işlemi sonrası numunelerin sertlik sonuçları.

Çizelge 4.1’de bulunan sıcaklık değerlerinden ve Şekil 4.1, Şekil 4.2’de verilen grafiklerde görüldüğü gibi ekstrüzyon prosesi sonrasında sıcaklıklar, kalıp içi sürtünmelerden ve kaynama odasındaki alüminyum kütlesinden dolayı artmaktadır. Profilin kalıbı terk ettiği andaki sıcaklığının farklı olması, profilde farklı mekanik özellikler oluşmasına neden olmaktadır. Deney numuneleri, kalıp çıkışında ulaşabileceği en üst sıcaklık değerlerine ulaşmaktadır. Alüminyum ekstrüzyon işleminde ekstrüzyon sıcaklığı ile ön ısıtma sıcaklığı arasında doğrudan bir ilişki vardır. Artan ön ısıtma sıcaklığı ile ekstrüzyon sıcaklığı yüksek değerlere çıkmıştır. Ayrıca ön ısıtma sıcaklık değerlerindeki artıştan dolayı profilin şeklini aldığı geçiş kısmında şekil değiştirme işindeki hızda artış meydana gelmiştir. Hız sabit tutulsa da otomatik kontroldeki ekstrüzyon döngüsü istenilen hızı yakalamakta zorlanmıştır. Hızın dalgalanmasından kaynaklanan bu durum çıkış sıcaklığının da artmasına sebep olmaktadır. Ancak deneysel çalışmada, ön ısıtma sıcaklık değerlerinin arttırılmasına rağmen kalıp çıkış sıcaklıklarının sabit oranda artmadığı görülmüştür.

Bu sıcaklık sonuçları incelendiğinde aynı ön ısıtma sıcaklığı sahip biyet ile üretilen numunelerin figürleri arasında sıcaklık farkları mevcuttur. Bu durumu etkileyen birden fazla neden olabilir. Profil kalıbının kaynama odalarında hacimlerin aynı olmaması, zımbanın kalıpla eş eksende olmaması ve ekstrüzyon kalıbında profilin şeklini aldığı yer olan geçiş unsurunun iki figürde de aynı ölçüde olmaması gibi sebeplerden dolayı figürler arasında orantısız bir sıcaklık farkı meydana gelebilir. Sürekli ekstrüzyon

mekanizması göz önüne alındığında biyetin bitiminde zımbanın geri çekilmesinden kaynaklı kalıp yuvası (sandığı) yer değiştirmektedir. Birden fazla biyet ile üretim yapıldığında ~2 mm (yer ölçümü sensörlerinin aralıklarından kaynaklı) eksen kaymalarına yol açabilmektedir. Bu nedenle biyet, kalıp ön haznesine eşit şekilde dağılamayabilir ve figürlerin kaynama odalarında sıcaklık farkları oluşmuş olabilir.

Ekstrüzyon sonrasında profiller yapay yaşlandırma fırınına transfer edilmiştir. Yapay yaşlandırma ısıtma işleminin ardından numuneler uygun ölçülerde kesilmiş olup sertlik değerleri, Brinell (HB) sertliği cinsinden ölçülmüştür. Çizelge 4.2’de deney numunelerinin (1. ve 2. figür) yapay yaşlandırma (çökelme sertleşmesi) ısıtma işlemi sonrasında sertlik değerleri gösterilmiştir. Figür numaralandırılması Şekil 4.3’te belirtilmiştir.

Çizelge 4.2. Deney numunelerinin sertlik test sonuçları.

Deney sırası	Biyet ön ısıtma sıcaklığı (°C)	Yapay yaşlandırma sonrası sertlik, 1. figür (HB)	Yapay yaşlandırma sonrası sertlik, 2. figür (HB)
1	430,3	59,07	58,71
2	440,2	60,14	57,78
3	445,2	55,97	57,79
4	450,1	57,34	56,73
5	460,2	57,61	58,27
6	470,3	55,84	57,32

Deneysel çalışma sonrasında Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilen sonuçlara göre;

430,3 °C ön ısıtma sıcaklığı kullanılarak imal edilen numunelerin ekstrüzyon sıcaklıkları (kalıp çıkış sıcaklıkları); 1. figürde 488,6 °C, 2. figürde 484,6 °C olarak ölçülmüştür. Sertlik değerleri 1. figürde 59,07 HB, 2. figürde 58,71 HB ölçülmüş olup figürler arasındaki sertlik farkı 0,36 HB olarak bulunmuştur.

440,2 °C ön ısıtma sıcaklığı kullanılarak imal edilen numunelerin ekstrüzyon sıcaklıkları; 1. figürde 491,6 °C, 2. figürde 487,9 °C olarak ölçülmüştür. Sertlik değerleri 1. figürde 60,14 HB, 2. figürde 57,78 HB ölçülmüş olup figürler arasındaki sertlik farkı 2,36 HB olarak bulunmuştur.

445,2 °C ön ısıtma sıcaklığı kullanılarak imal edilen numunelerin ekstrüzyon sıcaklıkları; 1. figürde 498,4 °C, 2. figürde 500 °C olarak ölçülmüştür. Sertlik değerleri 1. figürde 55,97 HB, 2. figürde 57,79 HB ölçülmüş olup figürler arasındaki sertlik farkı 1,82 HB olarak bulunmuştur.

450,1 °C ön ısıtma sıcaklığı kullanılarak imal edilen numunelerin ekstrüzyon sıcaklıkları; 1. figürde 504,1 °C, 2. figürde 504,2 °C olarak ölçülmüştür. Sertlik değerleri 1. figürde 57,34 HB, 2. figürde 56,73 HB ölçülmüş olup figürler arasındaki sertlik farkı 0,61 HB olarak bulunmuştur.

460,2 °C ön ısıtma sıcaklığı kullanılarak imal edilen numunelerin ekstrüzyon sıcaklıkları; 1. figürde 509,9 °C, 2. figürde 512,3 °C olarak ölçülmüştür. Sertlik değerleri 1. figürde 57,61 HB, 2. figürde 58,27 HB ölçülmüş olup figürler arasındaki sertlik farkı 0,66 HB olarak bulunmuştur.

470,3 °C ön ısıtma sıcaklığı kullanılarak imal edilen numunelerin ekstrüzyon sıcaklıkları; 1. figürde 518,8 °C, 2. figürde 517,7 °C olarak ölçülmüştür. Sertlik değerleri 1. figürde 55,84 HB, 2. figürde 57,32 HB ölçülmüş olup figürler arasındaki sertlik farkı 2,36 HB olarak bulunmuştur.

Yapay yaşlandırma işlemi ardından ölçülen sertlik değerleri, ön ısıtma sıcaklıkları ve ekstrüzyon sıcaklıkları incelendiğinde;

En yüksek sertlik değeri 1. figür için, 60,14 HB ile 440,2 °C ön ısıtma sıcaklığında ve 491,6 °C ekstrüzyon sıcaklıklarında üretilmiştir. Aynı sıcaklıkta ön ısıtma yapılmasına rağmen 2. figürde 57,78 HB değeri 487,9 °C ekstrüzyon sıcaklığında elde edilmiştir. Deney sırasında ekstrüzyonun değişken parametreleri sabit tutulsa da figür adedinin tek olmamasından dolayı sertlik sonuçları farklılık göstermiştir. 430,3 °C, 450,1 °C ve 460,2 °C biyet ön ısıtma sıcaklıklarında üretilen numunelerin sertlik sonuçlarında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Ancak 440,2 °C, 445,2 ve 470,3 °C ön ısıtma sıcaklıklarında imal edilen numunelerin figürleri arasında neredeyse 2 HB fark oluşmuştur. Buna göre, ekstrüzyon sıcaklıkları arasında belirgin fark olmayan deney numunelerinin sertlik sonuçlarında yakın değerler elde edilmiştir.

AA6060 alaşımları sadece profil olarak değil aynı zamanda talaşlı imalattan sonra aksesuar olarak da kullanılmaktadır. Ancak aksesuar profillerinin işlenebilirlik özelliği, sertlik sonuçlarına bağlıdır. Alüminyum ekstrüzyon firmalarında bir profilin işlenme özelliği için belirli alt ve üst limitler belirlenmiştir. Sertlik değerinin 55 HB'den küçük olması durumunda alüminyum parçanın işlenmesi sırasında yolunmalar görülmekte, yüzey kalitesi eloksal sonrasında bozulmakta ve işlem görme süresi uzamaktadır. Sertliğin 55-70 HB'den büyük olması durumunda talaşlı imalat süresi kısalmakta ve daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilmektedir.

Nowotnik ve Sieniawski (2005), AA6005 ve AA6082 alüminyum alaşımlarında, çözeltiye alma işleminde sıcaklığın sertliğe olan etkisini araştırmışlardır. AA6082 alaşımı kullanılan deneyde çözeltiye alma sıcaklığının (515-565 °C aralığında) artmasının sertliği belirgin bir şekilde arttırdığını, AA6005 alaşımı kullanılarak yapılan çalışmada ise çözeltiye alma ısı işlem sıcaklığının (520-570 °C aralığında) sertlik üzerinde büyük bir etkisi olmadığı belirtilmiştir. Aşırı doymuş katı çözelti içinde yer alan çözünmüş Mg ve Si elementlerinin oranının sertliği etkilediği belirtilmiştir. AA6005 alaşımında Mg ve Si içeriği, AA6082 alaşımıyla kıyas edildiğinde daha az oranda olduğu için sıcaklığın artması katı çözelti içerisinde Mg_2Si miktarını arttırmamıştır. AA6082 alaşımında Mg ve Si miktarının AA6005 alaşımına kıyasla daha fazla olması, katı çözelti içerisinde sıcaklığın artmasıyla çözünen Mg_2Si oranını arttırmıştır. Sonuç olarak çözünmüş Mg ve Si oranı alaşım yapısında sertliği arttırıcı etki yapan Mg_2Si fazının oranını etkilediği için yaşlandırma ısı işleminden sonra çökelme sertleşmesi için önemli bir etkidir.

Al- Mg_2Si faz diyagramında Mg_2Si fazının maksimum çözünebilirliği, deney numuneleri arasında en düşük ekstrüzyon sıcaklığı olan 484,5 °C'de % 0,85'dir. Mg_2Si çökeltilerinin çözünmesi, faz diyagramının katı Al solvüs kısmında; çökelme ise katılaşma çizgisinin altında bir sıcaklıkta oluşmuştur. Buna göre deney numuneleri iki fazlı bir yapıdan tek fazlı yapıya sahip olmuştur.

Şekil 4.3 ve Çizelge 4.2'de verilen 1. ve 2. figürlerin ön ısıtma sıcaklığına bağlı olarak sertlik değerleri incelendiğinde, 1. figürde maksimum sertlik değerine 440,2 °C ön ısıtma sıcaklığında, 2. figür için maksimum sertlik değerine 430,3 °C ön ısıtma sıcaklığında ulaşıldığı görülmektedir. Bu durumda maksimum Mg_2Si çökeltilisinin olduğu ekstrüzyon sıcaklığı, 1. figür için 491,6 °C ve 2. figür için 484,5 °C'dir.

Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan iki figürlü kalıp için, 440,2 °C değerinden sonra ön ısıtma sıcaklığını arttırmanın sertliği arttırıcı yönde bir etkisi olmamıştır. Ön ısıtma sıcaklığının 1. ve 2. figürler için sertliğe etkisi incelendiğinde, 1. figürdeki dalgalanmanın daha fazla olduğu görülmektedir. Her iki figür için sertlik değerlerinin birbirine en yakın olduğu ön ısıtma sıcaklığı ise 430,3 °C'dir.

AA6xxx serisi alaşımların sertliği, matriste homojen ve ince bir şekilde dağılmış ikinci fazın (Mg_2Si) çökeltilmesiyle önemli ölçüde artırılabilir. Mg_2Si fazının çökmesi oldukça kompleks olan bir sıralamaya göre gerçekleşir. Buna göre, Al-Mg-Si alaşımlarının literatürde genel olarak kabul edilen çökme sırası aşağıda verilmiştir. (Kanoko vd., 2002; Gupta vd., 2001):

Aşırı doymuş katı çözelti $\rightarrow$ atomik kümeler $\rightarrow$ GP bölgeleri $\rightarrow \beta''(Mg_2Si) \rightarrow \beta'(Mg_2Si) \rightarrow \beta$ (kararlı Mg_2Si)

Katı eriyik içerisinde çözünen Mg ve Si atomlarının toplanması, ilk aşamada literatürde Guiner-Preston (GP) bölgesi olarak isimlendirilen yerlerde meydana gelir. Bu bölgeler, daha sonra çökelmelerin oluşacağı yerler hakkında bilgi verir. Mg_2Si 'nin çökmesi boyuta göre üç farklı şekilde meydana gelmektedir:

β'' Mg_2Si : Mg_2Si 'nin en küçük boyutta çökelmiş formudur. Mekanik özelliklere katkısı en fazla olan fazdır.

β' Mg_2Si : Orta boyuttaki çökme formudur.

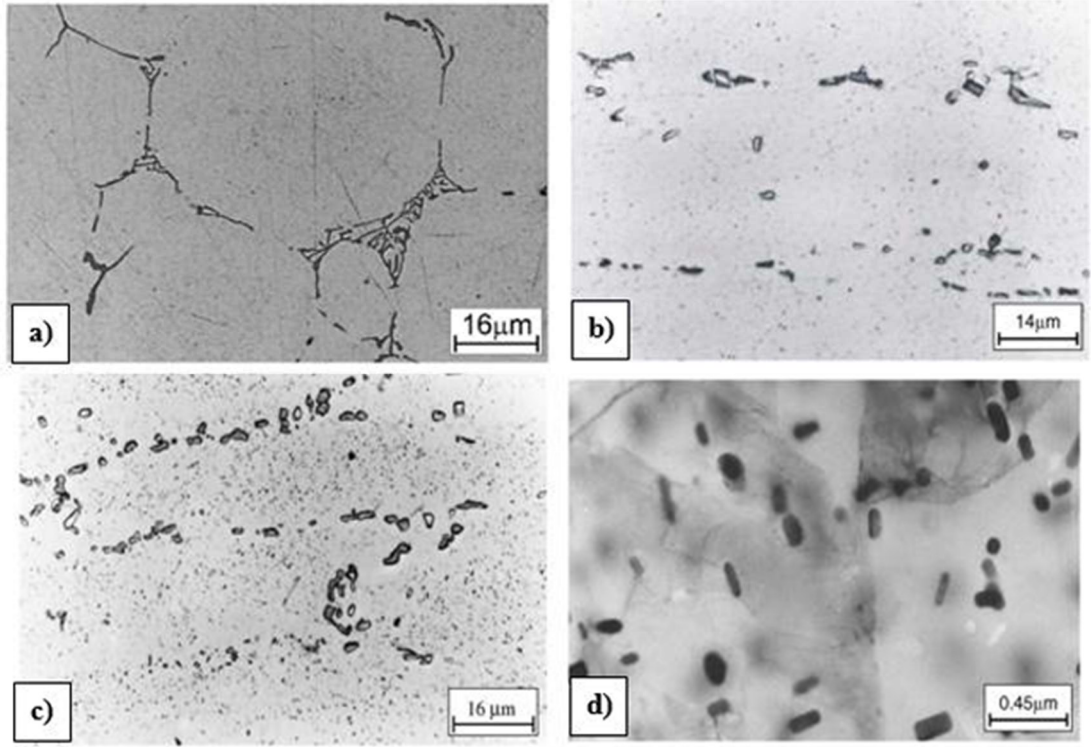
β Mg_2Si : Mg_2Si 'nin en büyük boyuttaki çökelmiş formudur. Mekanik özellikleri olumsuz etkiler (Kanoko vd., 2002; Gupta vd., 2001).

6xxx alüminyum alaşımlarında, Mg ve Si esas alaşım elementleri olup, Fe kontrolü gereken bir empüritedir. Cr, Zn gibi diğer elementler daha minör empüritelerdir. Alüminyum içindeki Mg ve Si, Mg_2Si bileşimini oluştururlar. Mg_2Si bileşiği, ağırlıkça % 63,4 magnezyum, % 36,5 Si' den oluşur (Ağırlık oranı: 1,73 / 1). Mg_2Si bileşiminin, 6063 alaşımı içindeki katı çözünürlüğü, 274 °C'de % 0,71 ila 552 °C'de % 1,42 arasında değişir. Nominal bileşime sahip 6063 alaşımında, % 1 Mg_2Si bulunur ki, 500 °C'de alüminyum içinde çözünür. Bu orandan yüksek miktardaki Mg_2Si , fazla miktardaki magnezyuma bağlı olarak, çözünme özelliğini düşürür. Mg_2Si oluşturacak

miktardan fazla miktardaki silisyum ve normal seviyedeki demir, Mg_2Si 'nin çözünürlüğünü az miktarda düşürürler (URL-2).

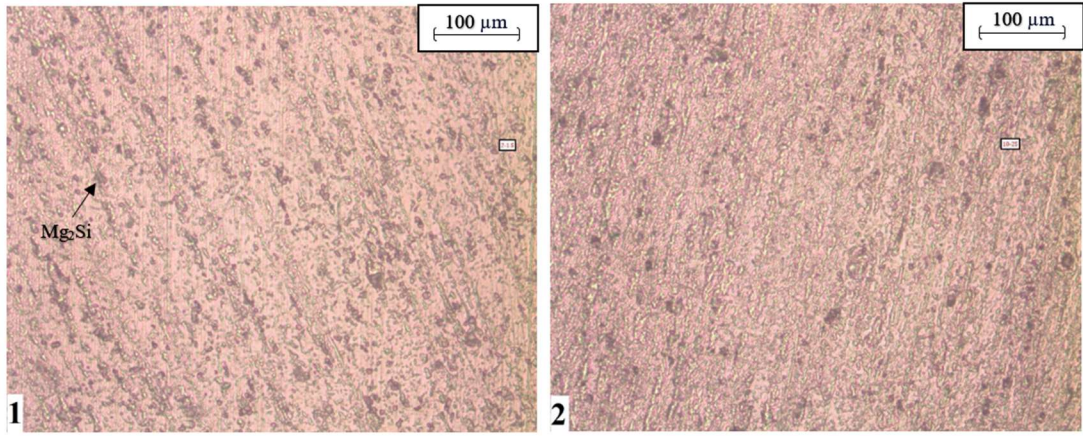
Alaşım, solvüs eğrisinin altındaki bir sıcaklığa düştüğünde, Mg_2Si çökelir. Çökelen partiküllerin miktar ve büyüklüğü zaman ve sıcaklığa bağlıdır. Üst sıcaklık derecelerinden yavaş soğuma yapılır ise, büyük partiküller çökelir. Solvüs sıcaklığının yukarısından oda sıcaklığına ani soğutma, magnezyum ve silisyumun çözelti içinde kalmasına ve aşırı doymuş bir katı çözelti oluşmasına neden olur. Bu aşırı doymuş katı çözelti, 204 °C'nin altındaki bir sıcaklığa çıkarılıp belli süre tutulursa, mikroskopik ölçülerdeki Mg_2Si partikülleri çökelir ve "çökelme sertleşmesi" (precipitation hardening) etkisi ile malzeme sertleşir. AA6063 alaşımının endüstrideki önemi, bu özelliğinden kaynaklanır. Mg_2Si 'nin alüminyum içindeki çözünürlüğü, uygulanan sıcaklık sahasında alaşımın bileşimi ve ısıtma/soğutma işleminin hızına bağlı olarak değişir. Mg_2Si 'nin solvüs sıcaklığı üzerinde yeniden çözünürlüğü geciktiği gibi, solvüs altındaki çözünmesi de gecikebilir (URL-2).

Şekil 4.4'de AA6082 serisi bir alaşımın biyet formundaki (a), ekstrüzyon işlemi sonrasındaki (b), çözeltiye alma işlemi sonrasındaki (c) ve yaşlandırma prosesi sonrasında (d) oluşan mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.4a'da, Al katı çözeltisinin interdentritik boşluklarında fazların çökeltileri (tane sınırlarındaki koyu kısımlar) görülmektedir. Ekstrüzyon prosesinde, biyetlerin sıcak işlenmesi sırasında, intermetalik faz parçacıkları, bant yapısının oluşumuna izin veren, plastik deformasyon yönüne paralel konumlarda düzenlenir. Sonuç olarak daha büyük parçacıkların boyutunda azalma meydana gelebilir (Şekil 4.4b). Şekil 4.4c'de çözeltiye alma işlemi ve hava ile soğutma prosesi sonrasında içyapıdaki çok ince dağılmış β - Mg_2Si çökeltileri görülmektedir. Şekil 4.4d'de, yapay yaşlandırma işlemi sonrasındaki mikro yapı görülmektedir. Şekil 4.4d'de, çökelen ve sertliği arttıran koyu renkli β Mg_2Si fazının yapı içerisinde dağılımı açık bir şekilde görülmektedir (Saraç ve Durna, 2023).

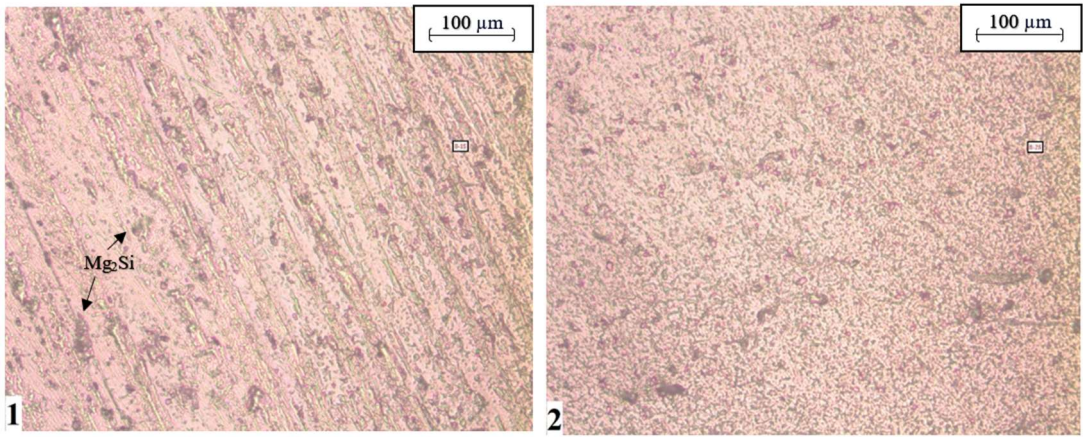


Şekil 4.4. AA6082 alaşımında biyet durumunda (a), sıcak ekstrüzyon işlemi sonrasında (b), çözeltiye alma ısıl işlemi sonrasında (c) ve yaşlandırma ısıl işlemi sonrasında mikro yapı görüntüleri (Kanoko vd., 2002).

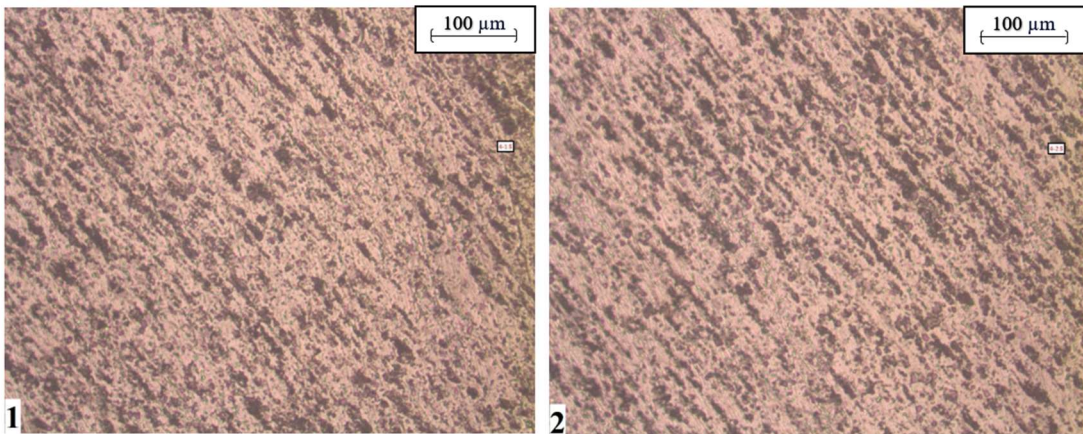
Şekil 4.5 ve Şekil 4.10 arasında, farklı ön ısıtma sıcaklığı uygulanarak üretilen ve 185 °C’de 300 dk. yapay yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir. Numunelerin mikro yapı görüntüleri incelendiğinde matris yapı içerisinde homojen olarak çökelmiş olan Mg_2Si fazları (koyu renkli) belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu durum, ekstrüzyon prosesi sırasında oluşan sıcaklıkların etkisiyle, biyet içerisindeki Mg_2Si bileşiğinin çözünerek Mg ve Si atomlarının katı çözelti içerisinde yer aldığını göstermek deneysel çalışmada kullanılan yapay yaşlandırma prosesinin uygun olduğunu göstermektedir.



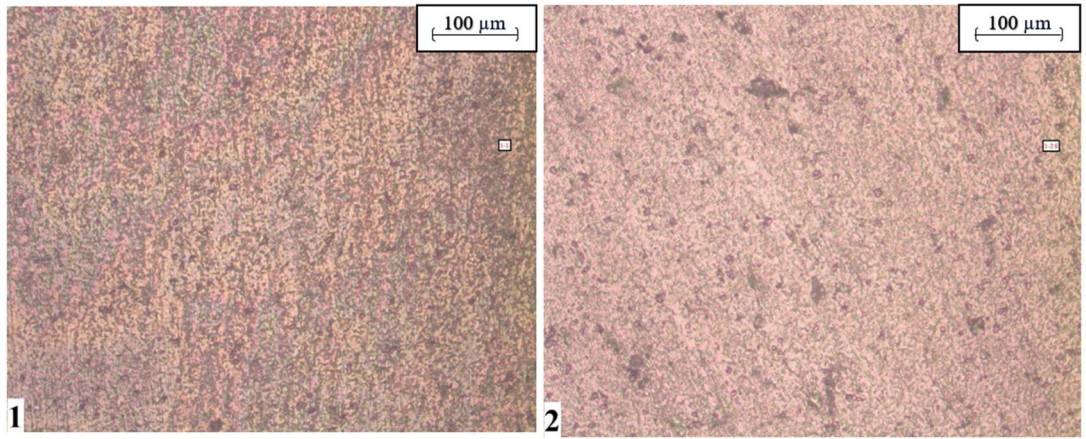
Şekil 4.5. 430,3 °C biyet ön ısıtma sıcaklığı için; 1. figürün ve 2. figürün yapay yaşlandırma sonrası mikroyapı görüntüleri.



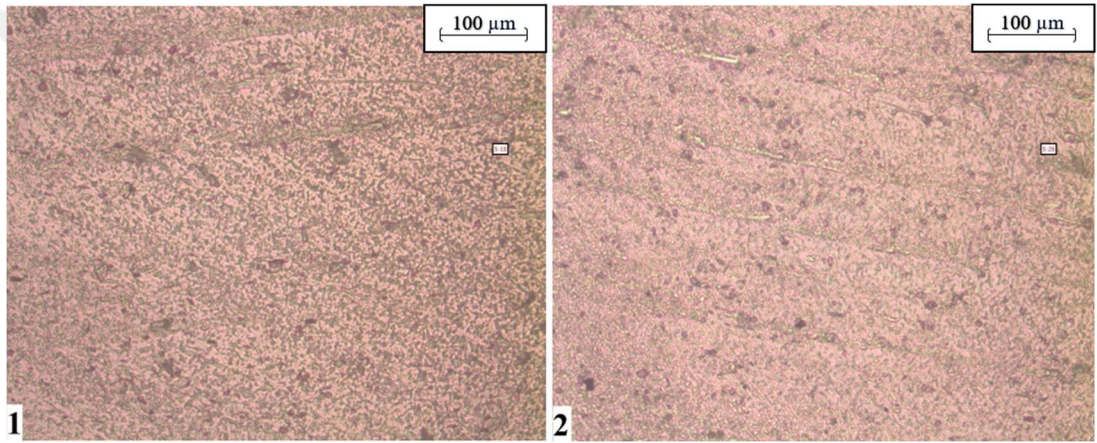
Şekil 4.6. 440,2 °C biyet ön ısıtma sıcaklığı için; 1. figürün ve 2. figürün yapay yaşlandırma sonrası mikroyapı görüntüleri.



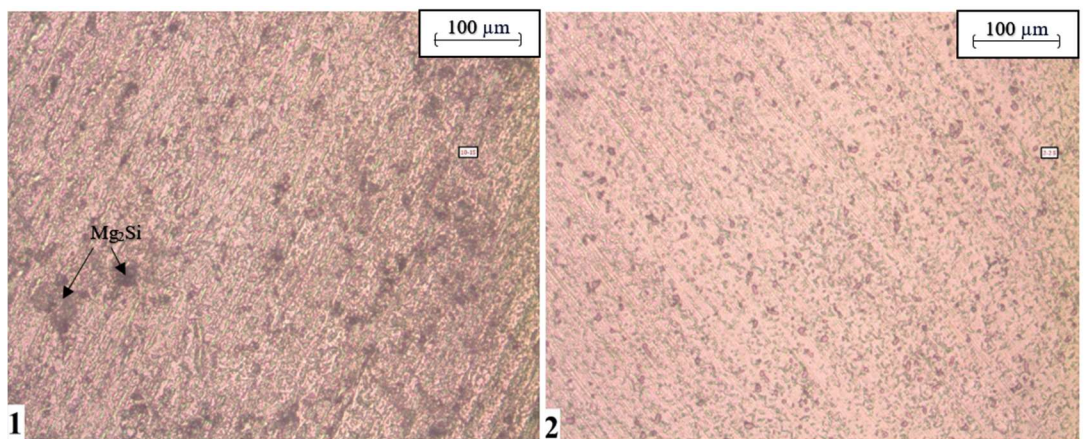
Şekil 4.7. 445,2 °C biyet ön ısıtma sıcaklığı için; 1. figürün ve 2. figürün yapay yaşlandırma sonrası mikroyapı görüntüleri.



Şekil 4.8. 450,1 °C biyet ön ısıtma sıcaklığı için; 1. figürün ve 2. figürün yapay yaşlandırma sonrası mikroyapı görüntüleri.



Şekil 4.9. 460,2 °C biyet ön ısıtma sıcaklığı için; 1. figürün ve 2. figürün yapay yaşlandırma sonrası mikroyapı görüntüleri.



Şekil 4.10. 470,3 °C biyet ön ısıtma sıcaklığı için; 1. figürün ve 2. figürün yapay yaşlandırma sonrası mikroyapı görüntüleri.

Çeşitli ön ısıtma sıcaklıklarında üretilen ve 185 °C’de 300 dk yapay yaşlandırılan numunelere mikro yapı görüntüleri incelendiğinde, çökelme sertleşmesi sonrası oluşan Mg_2Si fazının oluştuğu görülmektedir. En yüksek ve en düşük sertlik değerlerinin elde edildiği sırasıyla 440,2 °C (2. deney numunesi) ve 470,3 °C (6. deney numunesi) ön ısıtma sıcaklıklarında üretilen numunelerin 1. figürleri incelendiğinde; β Mg_2Si fazının 2. deney numunesinde homojen bir dağılım ve iğne şeklinde küçük tane yapıları bulunmakta iken 6. deney numunesinde iri boyutlarda homojen dağılıma sahip taneler görülmektedir. Numunelerin sertlik değerleri arasındaki 4,3 HB fark, Mg_2Si fazının şekline, boyutuna ve dağılımına bağlıdır.

Şekil 4.5 ve Şekil 4.10. arasındaki şekiller incelendiğinde, ekstrüzyon öncesi biyet formunda Şekil 4a’da gösterilen forma benzer yapıda olduğu düşünülen çökelti yapıları yapay yaşlandırma sonrasında nispeten homojen dağılımla ekstrüzyon yönünde uzanan Mg_2Si çökeltilerine dönüşmüştür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında AA6060 alüminyum alaşımı kullanılarak, farklı biyet ön ısıtma sıcaklıkları ile ekstrüzyon işlemi gerçekleştirilmiş ve deney numuneleri üretilmiştir. Deney numunelerinin üretimi sırasında 2 figürlü, yarı kapalı, yarı köprülü geometride ekstrüzyon kalıbı tercih edilmiştir. Profilin E.O. değeri 51,924 ve şekil faktörü değeri 30,47 olarak hesaplanmıştır. Ekstrüzyon prosesi sonrasında numuneler kesilip, numunelere termik fırında 185 °C’de 300 dk yapay yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. Yaşlandırılan numunelerin sertlikleri Brinell ölçüm metodu ile ölçülmüştür. Daha sonra numunelere parlatma ve dağlama işlemleri uygulanmıştır. Optik mikroskop kullanılarak numunelerin mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir.

Figürlerin mikroyapı görüntüleri, sertlik sonuçları, ön ısıtma sıcaklıkları ve ekstrüzyon sıcaklıkları birlikte incelendiğinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Ön ısıtma sıcaklığının arttırılması sonucunda ekstrüzyon sıcaklıkları beklendiği gibi artmıştır. Ancak ekstrüzyon sıcaklıklarında ön ısıtma sıcaklıklarındaki artış oranına paralel bir artış gözlemlenmemiştir. Ön ısıtma sıcaklığı;

430,3 °C’den 440,2 °C’ye arttırıldığında; ekstrüzyon sıcaklıkları 1. figür için 3 °C artarken 2. figür için 3,4 °C,

440,2 °C’den 445,2 °C’ye arttırıldığında; ekstrüzyon sıcaklıkları 1. figür için 6,8 °C artarken 2. figür için 12,1 °C,

445,2 °C’den 450,1 °C’ye arttırıldığında; ekstrüzyon sıcaklıkları 1. figür için 5,7 °C artarken 2. figür için 4,2 °C,

450,1 °C’den 460,2 °C’ye arttırıldığında; ekstrüzyon sıcaklıkları 1. figür için 5,8 °C artarken 2. figür için 8,1 °C,

460,2 °C’den 470,3 °C’ye arttırıldığında; ekstrüzyon sıcaklıkları 1. figür için 8,9 °C artarken 2. figür için 2,4 °C artmıştır.

Bu çalışmada kullanılan iki figürlü kalıp için aynı ön ısıtma sıcaklığı uygulandığı durum için farklı figür sıcaklıkları ölçülmüştür. Buna bağlı olarak, yapay yaşlandırma işlemi sonunda figürler arasında sertlik değerlerinde farklılıklar gözlemlenmiştir.

Ancak sertlik değerlerindeki değişim oldukça düşük oranlarda hesaplanmıştır. Deney numunelerine;

430,3 °C ön ısıtma uygulandığında, 1. ve 2. figürde sertlikler sırasıyla 59,07 HB ve 58,71 HB olarak ölçölmüştür. Buna göre figürler arasında % 0,61 oranında fark oluşmuştur.

440,2 °C ön ısıtma uygulandığında, 1. ve 2. figürde sertlikler sırasıyla 60,14 HB ve 57,78 HB olarak ölçölmüştür. Buna göre figürler arasında % 4,08 oranında fark oluşmuştur.

445,2 °C ön ısıtma uygulandığında, 1. ve 2. figürde sertlikler sırasıyla 55,97 HB ve 57,79 HB olarak ölçölmüştür. Buna göre figürler arasında % 3,25 oranında fark oluşmuştur.

450,1 °C ön ısıtma uygulandığında, 1. ve 2. figürde sertlikler sırasıyla 57,34 HB ve 56,73 HB olarak ölçölmüştür. Buna göre figürler arasında % 1,07 oranında fark oluşmuştur.

460,2 °C ön ısıtma uygulandığında, 1. ve 2. figürde sertlikler sırasıyla 57,61 HB ve 58,27 HB olarak ölçölmüştür. Buna göre figürler arasında % 1,15 oranında fark oluşmuştur.

470,3 °C ön ısıtma uygulandığında, 1. ve 2. figürde sertlikler sırasıyla 55,84 HB ve 57,32 HB olarak ölçölmüştür. Buna göre figürler arasında % 2,65 oranında fark oluşmuştur.

En yüksek sertlik değerleri 430,3 °C (1. figürde 59,07 HB, 2. figürde 58,71 HB) ve 440,2 °C (1. figürde 60,14 HB, 2. figürde 57,78 HB) sıcaklıklarında ölçölmüştür. Bu durumda bu çalışmada kullanılan kalıp figürleri için 440,2 °C sıcaklığından sonra ön ısıtma sıcaklıklarını arttırmanın pratikte bir faydasının olmadığı gösterilmiştir. Ayrıca ısıtma için harcanan enerji ve maliyet ilişkisi göz önüne alındığında, sertlik sonuçlarında belirgin bir artış olmadığından 440,2 °C sıcaklığından sonra ön ısıtma yapılmaması üretim maliyetini azaltacak ve enerji israfını önleyecektir.

Deney numunelerinin sertlikleri incelendiğinde, tüm numunelerin sertlik değerlerinin 55 HB'den büyük olduğu görülmektedir. Bu durumda işlenebilirlik değer aralığı (55-70 HB) sağlanmaktadır.

Yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda AA6060 alaşımında sertliği artırıcı yönde etki yapan Mg_2Si fazının homojen olarak dağıldığı görülmüştür.

Bundan sonraki çalışmalarda, farklı yapay yaşlandırma sıcaklıkları ve sürelerinde, daha fazla figür adedine sahip kalıplar tercih edilerek sertlik sonuçları araştırılabilir.



KAYNAKLAR

- Akyüz, B., Şenaysoy, S., 2014. Alüminyum alaşımlarında yaşlandırma işleminin mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerindeki etkisi,” Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 1, no. 1, 1-8.
- Al-Saadi, H.I.A., Tunay, R.F., 2017. Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, vol. 5, no. 3, 525-532.
- Aluminum Standards and Data, 2017. The Aluminum Association, Virginia.
- Askeland, D. R., 1998. The Science and Engineering of Materials, 4th Edition, Cengage Learning, Stanford, USA.
- Bartolucci, S., 1995. Effect of Thermal Cycles on Microstructure and Extrudability Of AA6xxx Alloys, Materials Science and Engineering Department Rensselaer Polytechnic Institute, vol. 62-06 (B), 127-144.
- Bayram, H., 2008. Ekstrüzyon yönteminde sıcaklık, ekstrüzyon hızı ve sürtünme parametrelerinin profil kalitesine etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Birol, Y., 2012. Effect of cooling rate on precipitation during homogenization cooling in an excess silicon AlMgSi alloy, Materials Characterization, Volume 73, Pages 37-42, Materials Institute, Marmara Research Centre, Kocaeli.
- Clade, M. P., Sheppard, T., 1993. Extrusion limit diagrams containing structural and topological information for AA 6063 aluminium alloy, Materials Science and Technology, 9:4, 313-318.
- Clausen, A. H., Tryland, T., Remseth, S., 2001. An investigation of material properties and geometrical dimensions of aluminium extrusions, Materials & Design, vol. 22, no. 4, 267-275.
- Claves, S. R., Elias, D. L., Misiolek, W.Z., 2002. Analyses of the Intermetallics Phase Transformation Occuring During Homogenization of 6xxx Aluminum Alloys, Materials Science Forum, 667-674.
- Çodur, Y., 2022. Yaşlandırma Uygulanmış 6063-T6 Alüminyum Alaşımının Frezeleme İşleminde Kesme Parametrelerinin Form Hatalarına ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- Daşcılar, B., 2006. Farklı Ekstrüzyon Hızlarında Ekstrüze Edilmiş AA6063 Alüminyum Alaşımlarının Yüzey ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

- Demirtaş, H., 2009. 6061 Alüminyum Alaşımlarında Ara Verilerek Yapılan Yaşlandırma İşleminin Malzeme Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 3-14.
- Dore, X., Combeau, H., Rappaz, M., 2000, Modelling of Microsegregation in Ternary Alloys, Application to the Solidification of Al-Mg-Si, *Acta mater.*48, 3951-3962.
- Doruk, E., Yılmazoğlu, G., Zeki, A., Başer, T., Durgun, İ., 2018. Yaşlandırma Parametrelerinin Farklı Geometrilere Sahip Alüminyum Ekstrüzyon Ezilme Kutularında Darbe Performansına Etkileri, *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, vol. 14, no. 1, 17-22.
- Durna M. A., Saraç İ., 2022. “AA6060 Alüminyum Alaşımı Kullanılarak Ekstrüzyon Yöntemiyle Üretilmiş Bir Profilde Farklı Hammadde Sıcaklıklarının Doğal ve Yapay Yaşlandırma Sonrası Sertliğe Etkilerinin DeneySEL Olarak Araştırılması”, IV. Uluslararası Türk Dünyası Fen Bilimleri ve Mühendislik Kongresi, ss. 1134-1141.
- Eruslu, N., Altımoğlu, A., Taptık, Y., 1990. Alaşımlar Ders Notları, İ.T.Ü Kimya-Metalurji Fakültesi, ss. 86-97.
- Eser, A., Gökçil, E., Akdı, S., Birol, Y., 2015. Alüminyum işlem alaşımlarının T6 ısıtılmasında yaşlandırma sıcaklık ve sürelerinin incelenmesi, 7. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul. vol.26, 4188-4196.
- Fakioglu, A., Özyürek, D., 2014. Effects of Re-aging on the fatigue properties of aluminium alloy AA7075, *Materials Testing*, 56:7-8, 575-582.
- Gao, R.Q., Stiller, K., Hansen, V., Oskarsson, A., Danoix, F., 2002. Influence of aging conditions on the microstructure and tensile strength of aluminium alloy 6063, In *Materials Science Forum*, vol. 396, 1211-1216.
- Gupta, A. K., Lloyd, D. J., Court, S. A., 2001. Precipitation hardening processes in an Al-0.4% Mg-1.3% Si 0.25% Fe aluminum alloy, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 301, no. 2, 140-146.
- Güven, Ş., Delikanlı, Y., 2012. “AA2024 Alüminyum Alaşımında Çökelme Sertleşmesinin Mekanik Özelliklere Etkisi,” *Teknik Bilimler Dergisi*, vol. 2, no. 2, 13-20.
- Hydro Innovation & Technology, 2019. Technical datasheet- Extruded products Alloy EN AW-6060 [AlMgSi], no: 2, Finspång, Sweden.
- Kanoko, T., Yoshida, Y., Yukawa, N., Ishikawa, T., Sano, H., 2002. Study of metal flow in extruded billet, In *Proc 53rd Japanese Joint Conference for the Technology of Plasticity*, 439-440.

- Karabay, S., Yilmaz, M., Zeren, M., 2005. Investigation of extrusion ratio effect on mechanical behaviour of extruded alloy AA-6101 from the billets homogenised-rapid quenched and as-cast conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 160, no. 2, 138-147.
- Karabay, S., Zeren, M., Yilmaz, M., 2003. Investigation extrusion ratio effect on mechanical behaviour of extruded alloy AA-6063, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 135, no. 1, 101-108.
- Karakaya İ., 2023. “Alüminyum Ekstrüzyonunda Kaynaşma Kalitesi ve İç Uzama Probleminin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- 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.
- Kayalı, E. S., 1991. *Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları*, 2. Baskı, İTÜ Yayınları, İstanbul.
- Kvande, H., 1999. Environmental Improvements in Aluminum Production Technology, *Light Metal Age*, vol. 76 (1), 44-53.
- Lang, G., Castle, A. F., 1978. Effect of rate of cooling after homogenization on direct-extrusion parameters of 6063 (Al-Mg-Si) billets, *Metals Technology*, vol. 5B (1), 434-438.
- Lange K., 1985. *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill Book Company, Pennsylvania.
- Langkruis, J.V., Kool, W.H., Sellars, C.M., Winden, M.R., Zwaag, S. Van der, 2001. The Effect of β , β' and β'' Precipitates in A Homogenised AA6063 Alloys on the Hot Deformability and the Peak Hardness, *Materials Science and Engineering*, vol. 299, 105-115.
- Lutts, A., 1961. Precipitation in Al-Mg-Ge and Al-Mg-Si, *Acta Met.* Vol.9, pp. 577-586.
- Martinova, Z., Damgaliev, D., Hirsh M., 2002. The Effect Of Room Temperature Pre-Ageing On Tensile And Electrical Properties Of Thermomechanically Treated Al-Mg-Si Alloy, *Journal of Mining and Metallurgy, University of Chemical Technology and Metallurgy*, 38 (1-2) B, 61-73.
- Mrówka-Nowotnik, G., Sieniawski, J., 2005. Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 162, 367-372.
- Murayama M., Hono K., 2001. Atom probe studies on the early stages of precipitation in Al-Mg-Si alloys, *Materials Science and Engineering: A* vol. 250 (1), 127-132.

- Özbek, I., 2007. A Study on The Re-solution Heat Treatment of AA 2618 Aluminum Alloy. *Materials Characterization*, 58(3), 312-317.
- Peris, R., 2007. Effects of extrusion conditions on "Die Pick-Up" formed during extrusion of aluminium alloy AA6060, M.Sc. Thesis, AUT University, Auckland.
- Polat, A., Avsar, M., Öztürk, F., 2015. Effects of the artificial-aging temperature and time on the mechanical properties and springback behaviour of AA6061, *Materials and Technology*, vol. 49, no. 4, 487-493.
- Rendings, K.H., 1997. "Aluminium Structures Used in Aerospace Status and Prospects," *Materials Science Forum*, vol. 242, 11-24.
- Saha, P. K., 1998. *Thermodynamics and Tribology in Aluminum Extrusion*, Wear, Vol. 218, pp. 179-190.
- Saha, P. K., 2000. *Aluminium Extrusion Technology*, The Material International Society, ASM International, Ohio, USA.
- Sancakdar, V., Erdoğan, B., 2002. Eloksoal Kalitesini Etkileyen Ekstrüzyon Parametreleri, Seydişehir 2. Alüminyum Sempozyumu, vol. 14 (11), 1363-1404.
- Saraç İ., Durna M. A., 2023. "Ekstrüzyon Yöntemiyle Üretilmiş AA6060 Profilde Ön Isıtma Sıcaklığının Sertliğe Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması", *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, C. 6, s 1, ss. 219-231.
- Shan, D., Zhen, L., 2012. Aging behavior and microstructure evolution in the processing of aluminum alloys, In *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*, Pages 267-297.
- Siddiqui, R.A., Abdullah, H.A., Al-Belushi, K.R., 2000. Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminium alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 102, no. 1-3, 234-240.
- Smith, F., W., 1996. *Principles of Materials Science and Engineering*, McGraw-Hill Inc., USA.
- Smith, W. F., 2001. *Material Science& Engineering Ders Kitabı*, University of Central Florida.
- Sönmez, H., 1989. *Metal Ekstrüzyonu*, Eğitim Yayınları, İstanbul.
- Tekin, R. 2014. AA 6082 alüminyum alaşımlarının oksidasyonu ve mekaniksel özelliklerin incelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Thomas, G., 1961. The ageing characteristics of aluminium alloys: Electron-Transmission Studies of Al-Mg-Si Alloys, *J. Inst.Met.*90, 1961-1962, pp. 57-63.

- Uğurlu, U. R., 2022. Farklı Isıl İşlemler Uygulanmış 6xxx Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin DeneySEL ve Teorik Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- Usta, M., 2001. The Influence Of Thermal Treatment On The Cast Structure Of 6xxx Aluminum Alloys, An Abstract of a Thesis Submitted to the Graduate, Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York.
- Venneker B.C.H., Katgerman L., 2002. Modelling Issues In Macroseggregation Predictions In Direct Chill Castings, Journal of Light Metals 2, 149-159.
- Yıldırım, S., 2010. Alüminyum Alaşımlarının Mikroyapı, Mekanik Özellikler ve Aşınma Direncine Yaşlanmanın Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zeren, M., Karabay, S., 2012. A Study On The Possible Use AA-6101 Alloys As A Material To Manufacture AAAC Aluminum, Kocaeli Journal of Science and Engineering, vol. 59 (2), 97-105.
- Zhou, J., Wang, G., Li, Y., Wan, X. M., 2014. Influence of heat treatment parameters on mechanical properties and crashworthiness of aluminum crash box, Advanced Materials Research, vol. 14, no. 14, 194-199.
- URL-1 <<https://aec.org/aluminum-extrusion-process>>, Erişim Tarihi: 18.05.2024.
- URL-2 <<https://www.angelfire.com/al/aluminum/6063metalurji.htm>>, Erişim Tarihi: 03.03.2024.
- URL-3 <https://www.konmetsan.com/uretim_tesisi>, Erişim Tarihi: 13.04.2024.
- URL-4 < <https://www.chalcoaluminum.com/tr/blog/aluminum-plate-defects/>>, Erişim Tarihi: 21.05.2024.
- URL-5 <<https://malzemebilimi.net/yaslandirma-sertlestirmesi.html>>, Erişim Tarihi: 25.05.2024.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Mehmet Akif DURNA

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Necmettin Erbakan Üniversitesi, Makine Mühendisliği
Bölümü, 2015-2020.

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı,
2021-2024.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

Mesleki Deneyim

1. Arz Mühendislik/ Tasarım Sorumlusu, Konya.
2. Konmetsan Alüminyum/ Tasarım ve Ekstrüzyon Sorumlusu, Konya.
3. G. Hidromas/ Yurt Dışı Satış Sonrası Hizmetler Sorumlusu, Konya.
4. T.C. Dışişleri Bakanlığı, Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK)/ Akreditasyon Uzman Yardımcısı, Ankara.
5. Konya Büyükşehir Belediyesi- KOSKİ Genel Müdürlüğü/ Makine (Kontrol) Mühendisi, Konya.

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. Saraç İ., Durna M. A., 2023. Ekstrüzyon Yöntemiyle Üretilmiş AA6060 Profilde Ön Isıtma Sıcaklığının Sertliğe Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması, Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, C. 6, s 1, ss. 219-231.

Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. Durna M. A., Saraç İ., 2022. “AA6060 Alüminyum Alaşımı Kullanılarak Ekstrüzyon Yöntemiyle Üretilmiş Bir Profilde Farklı Hammadde Sıcaklıklarının Doğal ve Yapay Yaşlandırma Sonrası Sertliğe Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması”, IV. Uluslararası Türk Dünyası Fen Bilimleri ve Mühendislik Kongresi, ss. 1134-1141.