

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM SİLİSYUM MAGNEZYUM DÖKÜM
ALAŞIMLARININ YAPI İNCELEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. ve Malz. Müh. Onur GÜVEN

Anabilim Dalı: METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

**Programı: ÜRETİM METALURJİSİ VE TEKNOLOJİLERİ
MÜHENDİSLİĞİ**

ARALIK 2005

**ALÜMİNYUM SİLİSYUM MAGNEZYUM DÖKÜM
ALAŞIMLARININ YAPI İNCELEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. ve Malz. Müh. Onur GÜVEN
(506021209)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Aralık 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 01 Şubat 2006**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Niyazi ERUSLU
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Mehmet KOZ
Prof Dr. Eyüp Sabri KAYALI**

ARALIK 2005

ÖNSÖZ

Çalışmamı ithaf ettiğim sevgili aileme, bu noktaya gelmemde emeği, teşviği, ilgisi ve sonsuz sevgisini her an hissettirdikleri için tüm kalbimle sevgilerimi sunarım.

Çalışmalarım için yönlendirici olan, desteği ve eşsiz bilgileri ile önemli katkılarda bulunan tez danışmanım, sevgili hocam, Sn. Prof. Dr. Niyazi ERUSLU'ya katkılarından ve yardımlarından dolayı saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalar için öncü olan, fikirleri, bilgi ve tecrübeleri ile yol gösteren, CMS Jant ve Mak. San. A.Ş. Ar-Ge Müdürü Sn. Şükrü IRMAK'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Özellikle Tibor çalışmaları olmak üzere katkısı ve yardımları için Sn. Özkan BEKİROĞLU'na teşekkür ederim. Sektörde öncü bir kuruluş olan, her zaman yeniliğe açık, politikası gelişmeyi desteklemek öncelikli olan ve çalışmalarda maddi, manevi her türlü imkan ve desteği sağlayan CMS Jant ve Makina San. A. Ş.'ne ve katkısı bulunan tüm personeline derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2005

Met. Müh. Onur GÜVEN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
1.2. Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması	2
1.3. Alüminyum Döküm Alaşımlarının Özellikleri	3
1.4. Döküm Prosesleri	4
2. ALÜMİNYUM SİLİSYUM DÖKÜM ALAŞIMLARI	5
2.1. Yaygın Alaşım Sistemleri	5
2.2. Alüminyum Silisyum Magnezyum Döküm Alaşımları	5
2.3. Al -Si - Mg Alaşımlarını Etkileyen Kritik Parametreler	7
2.4. Mikroyapı	10
2.4.1. Tane İnceltme	10
2.4.1.1. Tane Nedir?	10
2.4.1.2. Tane İnceltme Prensipleri	12
2.4.1.3. Kimyasal Tane İnceltme	13
2.5. Isıl İşlem	15
2.5.1. Çözeltiye Alma İşlemi	18
2.5.2. Su Verme İşlemi	19
2.5.3. Yaşlandırma İşlemi	21
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	25
3.1. Tane İnceltme Çalışmaları	25
3.1.1. Hammadde	26
3.1.2. Sıvı Metal Hazırlama	27
3.1.2.1. STRIKO Reverber Ocağı	28
3.1.2.2. Sıvı Metal Transferi	28
3.1.2.3. Gaz Giderme İşlemi	29
3.1.2.4. HMC 37	31
3.1.3. Numune Dökümü	32
3.1.3.1. Kalıp Hazırlama	32
3.1.3.2. Döküm	33

3.1.4. Numune Hazırlama	33
3.1.5. Çekme Testleri	34
3.2. Isıl İşlem Çalışmaları	38
3.2.1. Deneysel Tasarım	38
3.2.2. Hammadde	41
3.2.3. Sıvı Metal Hazırlama	42
3.2.4. Numune Dökümü	43
3.2.5. Isıl İşlem	44
3.2.6. Numune İşleme	45
3.2.7. Çekme Testleri	45
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	46
4.1. Deneysel Sonuçlar	46
4.1.1. Tane İnceltme Çalışmaları	46
4.1.2. Isıl İşlem Çalışmaları	50
4.2. Tartışmalar	51
4.2.1. Tane İnceltme Çalışmaları	51
4.2.2. Isıl İşlem Çalışmaları	56
4.3. Genel Sonuçlar	58
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	64

KISALTMALAR

CMS	: CMS Jant ve Makine Sanayii Anonim Şirketi
DAS	: Dendrit Kol Uzunluğu (Dendrite Arm Spacing)
67S	: A356.0 Alüminyum Alaşımı Ticari İsmi
TiB	: Titanyum – Bor Tane İnceltici Alaşım Ticari Kısaltması
K	: Kum Döküm
S	: Sabit Kalıba Döküm
Y	: Yüksek Basınçlı Döküm

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Alüminyum Döküm Alaşımlarının Sınıflandırması.....	2
Tablo 2.1. Endüstride Yaygın Olarak Kullanılan Al – Si Alaşımlarının Bileşimleri	6
Tablo 2.2. Al – Si Alaşımlarının Karakteristik Özellikleri	6
Tablo 2.3. Mekanik Özellikleri Etkileyen Parametrelerin Şematik Gösterimi	9
Tablo 2.4. Alüminyum Alaşımlarının Yaşlandırma Uygunluğu.....	16
Tablo 2.5. Alüminyum Alaşımlarında Temper Kodlaması	17
Tablo 3.1. Ti5B1 Tane İnceltici Alaşımın Kimyasal Kompozisyonu	27
Tablo 3.2. Spektrometre Analiz Çıktısı.....	27
Tablo 3.3. Insural 140 Fiziksel Özellikleri.....	29
Tablo 3.4. Deneylerde Kullanılan Alaşımın Gaz Giderme Sonrası Ölçüm Sonuçları.....	29
Tablo 3.5. Gaz Giderme Sonrası Sıvı Metalden Alınan Kimyasal Analiz Spektrometre Çıktısı.....	30
Tablo 3.6. Rotorject Gaz Giderme Cihazına Ait Teknik Veriler.....	30
Tablo 3.7. Çekme Test Cihazı Teknik Verileri.....	37
Tablo 3.8. Deneysel Tasarım Parametreleri ve İlgili Parametrelerin Seviyeleri.....	39
Tablo 3.9. Minitab Yazılımı İle Hazırlanmış Tam Faktöriyel Deneysel Tasarım Tablosu.....	40
Tablo 3.10. Taguchi Deneysel Tasarım Parametre Tablosu.....	40
Tablo 3.11. Spektrometre Analiz Çıktısı.....	42
Tablo 3.12. Deneylerde Kullanılan Alaşımın Gaz Giderme Sonrası Ölçüm Sonuçları.....	42
Tablo 3.13. % 0,20 Mg İçerikli Numunelerin Dökümü İçin Spektrometre Uygunluk Raporu.....	43
Tablo 3.14. % 0,30 Mg İçerikli Numunelerin Dökümü İçin Spektrometre Uygunluk Raporu.....	43
Tablo 3.15. % 0,40 Mg İçerikli Numunelerin Dökümü İçin Spektrometre Uygunluk Raporu.....	44
Tablo 4.1. TiB İlavesi İle Ocak Kimyasal Kompozisyon Değişimi.....	46
Tablo 4.2. TiB İlavesi İle Çekme Çubuğu Kimyasal Kompozisyon Değişimi	47
Tablo 4.3. TiB İlavesi İle Mekanik Özelliklerin Değişimi.....	47
Tablo 4.4. % Ti - % B ve Tane Büyüklüğü İndeksi Çalışma Sonuçları.....	49
Tablo 4.5. Isıl İşlem Deneysel Çalışmalarının Kısmi Sonuçları.....	51

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Al – Mg ₂ Si Faz Diyagramı.....	7
Şekil 2.2 : Al – Si Alaşım Sisteminde Yapıyı Oluşturan Temel Elementler.....	11
Şekil 2.3 : Yüzey Enerjisinin Nükleant Üzerindeki Çekirdek Geometrisine Etkisi.....	12
Şekil 2.4 : Al – Ti Sisteminde Gerçekleşen Çekirdeklenme.....	14
Şekil 2.5 : Çözeltiye Alma İşlemi.....	19
Şekil 2.6 : Çözeltiye Alma İşlemi Sonucunda Tek Faz Halindeki Katı Çözelti.....	20
Şekil 2.7 : Alaşımın Kendiliğinden Soğuması Durumunda Oluşan Heterojen Çekirdeklenme.....	20
Şekil 2.8 : Aşırı Doymuş Katı Çözelti.....	21
Şekil 2.9 : Yaşlandırma İşleminde İlk Kademe Yapı Değişimi.....	23
Şekil 2.10 : Yaşlandırma İşleminde İkinci Kademe Yapı Değişimi.....	23
Şekil 2.11 : Yaşlandırma İşleminde Son Kademe Yapı Değişimi.....	24
Şekil 3.1 : NF A 57-702 Standardına Göre Çekme Test Çubuğu Kalıbı.....	26
Şekil 3.2 : Çekme Çubuğu Ve Kalıbın Genel Görüntüsü.....	26
Şekil 3.5 : Reverber Tipi Ergitme Ocağı.....	28
Şekil 3.7 : Rotorject Gaz Giderme Cihazı Şematik Gösterimi Ve Ölçüler...	31
Şekil 3.8 : Çekme Test Çubuğu Döküm Sonrası Ölçüleri.....	34
Şekil 3.9 : Çekme Testi Numunesi Ölçüleri.....	34
Şekil 3.10 : Çekme Test Cihazı Kodlama Tanımlaması.....	35
Şekil 3.11 : Çekme Cihazı Genel Görünüşü.....	36
Şekil 3.12 : Çekme Test Cihazı Ölçüleri Ve Basma Alanı.....	36
Şekil 3.13 : Etüv Termograf Çıktısı.....	44
Şekil 4.1 : Makroyapı Değişimi.....	48
Şekil 4.2 : Makroyapı Değişimi.....	48
Şekil 4.3 : Tane Büyüklüğü İndeksi - %TiB Değişim Grafiği.....	50
Şekil 4.4 : TiB Oranı İle Akma Mukavemeti Arasındaki İlişki.....	53
Şekil 4.5 : TiB Oranı İle Uzama Yüzdesi Arasındaki İlişki.....	53
Şekil 4.6 : TiB Oranı İle DAS Arasındaki İlişki.....	54
Şekil 4.7 : TiB Oranı İle Çekme Mukavemeti Arasındaki İlişki.....	54
Şekil 4.8 : Tane Büyüklüğü İndeksinin Ti Ve B Yüzdesi İle İlişkisi.....	55
Şekil 4.9 : % 0,30 Mg Seviyesi İçin Uzama Yüzdesinin Değişimi.....	57
Şekil 4.10 : % 0,30 Mg Seviyesi İçin Akma Ve Uzama Değerlerinin Değişimi.....	58
Şekil 4.11 : Mekanik Özelliklerin % Ti ve % B Oranı ile Etkileşimi.....	59
Şekil 4.12 : % 0,30 Mg Seviyesi İçin Akma Ve Uzama Değerleri İle Yalnız Uzama Yüzdesinin Değişimi.....	60

SEMBOL LİSTESİ

α	: Faz Diyagramında gösterilen primer alaşımlandırma elementi
β	: Faz Diyagramında gösterilen sekonder alaşımlandırma elementi
θ	: Guinier – Preston Çökelti Fazı
θ'	: Guinier – Preston Çökelti Fazı 1. Ara Kademe
θ''	: Guinier – Preston Çökelti Fazı 2. Ara Kademe

ALÜMİNYUM SİLİSYUM MAGNEZYUM DÖKÜM ALAŞIMLARININ YAPI İNCELEMESİ

ÖZET

Yapılan çalışmada, döküm sektöründe yaygın bir kullanım alanına sahip olan Alüminyum – Silisyum alaşım sistemine ait A356.0 alaşımının yapısal incelemesi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu alaşım oldukça iyi sayılabilecek dayanım / hafiflik oranı sebebi ile özellikle otomotiv sanayinde kabul gören bir bileşime sahip olup, otomobilin ağırlığının azaltılması ve dolayısıyla yakıt ekonomisi ve bununla birlikte daha düşük çevre emisyon değerleri için motor, şase destek komponentleri ve jant imalatında tercih edilmektedir. Ancak, otomotiv sektöründeki hızlı değişimler ve zorlu rekabet ortamı üreticileri müşteri isteklerini karşılayabilmek için baskıya zorlamakta ve bunun için taleplere ve kaliteli şekilde cevap verebilmek adına üretim sektörünü, adaptif yöntemlere sevk etmektedir. Bu noktada ise üretilen komponentin malzemesinin karakteristiklerini iyi bir şekilde anlayıp ihtiyacı karşılamaya yönelik çalışmaların yapılması gerekliliği doğmaktadır. Bu karakteristiklere ait bilginin sağlanması sonucunda ise üretim daha hızlı ve kaliteli olacaktır. Ancak burada kalite teriminin özellikle otomotiv sektörü için daha güvenli ve dayanıklı ürünler anlamına geldiği hususu mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Dolayısıyla bir otomobil üreticisi için bahsedilen kalite tanımlamasını tamamlamak adına ürünün mekanik değerlerini iyileştirmek öncelikli vazifedir.

Yapılan çalışmada bahsedilen amaçlar çerçevesinde nihai ürünün mekanik değerlerin iyileştirilmesini sağlayan mekanizmalar incelenmiştir. Bu mekanizmalar içerisinde mekanik değerleri belirleyen en önemli özellikler olan tane inceltme ve ısıtma işlem parametreleri üzerinde durulmuştur.

Çalışma için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar birbirinden bağımsız iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda birinci aşama tane inceltici olarak kullanılan ticari TiB alaşımlarının döküm alaşımı üzerinde olan tane yapısındaki etkileri ve bu etkilerin mekanik değerlere yansıması değerlendirilmiştir. İkinci aşamada ise A356 alaşımı için uygulanan T6 tretmanındaki adımların mekanik değerlere etkisi incelenmiştir.

Tane inceltme çalışmalarında yapılan deneylerde, mekanik dayanımı belirleyen en önemli unsurun tane büyüklüğü olduğu ve bu büyüklüğü ise alaşımın kimyasal kompozisyonu içerisinde titanyumdan ziyade bor miktarındaki artışın tane büyüklüğü indeksindeki artışla doğrudan ilintili olduğu görülmektedir. Ancak, deneyler sonucunda Ti ve B seviyelerindeki artışın mekanik değerlerde düşmeye sebep olduğu gözlemlenmiştir.

İkinci aşamada yürütülen ısıt işlemler çalışmalarında ise döküm parçasının mekanik dayanımının esas anlamı ile T6 temperi ile belirlendiği ve Mg seviyesinin önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında süreç optimizasyonu ve ürün kalitesinin daha da yükseltilmesi sağlanmıştır.

STRUCTURAL INSPECTION OF ALUMINIUM SILICON MAGNESIUM CASTING ALLOYS

SUMMARY

Structural analysis of a common alloy A356.0 that belongs to the commercial Aluminum – Silicon casting alloy system has been investigated in this project. This alloy is widely chosen by automotive industry because of its excellent strength to weight ratio in the production of motors, chassis supporting components and wheels to reduce weight and therefore to minimize the fuel consumption. Rapid changes in automobile industry and tough competition among the automobile makers because of expanding demands of consumers, put pressure on the producers to have flexible manufacturing systems which could meet the expectations with perfect quality and speed. In this point of view, some special needs will arise to understand the characteristics of the material which used in the production of the components to meet these expectations. Acquiring the knowledge on the characteristics of material used in production will make the process faster to supply the demand with quality which means reliable products with improved durability within the service life for the automotive industry.

By the meaning of quality for an automobile producer, the ways of improving the mechanical properties of the final product regarding to durability and reliability, are in the scope of this project. Grain refinement and heat treatment which are the ways to improve these properties for A356.0 alloy have been researched in this project.

The experimental works for succeeding the aims in this project have been conducted with two independent steps. The effect of TiB grain refiner alloys and the grain refining mechanisms that work on the casting alloy's properties are examined in the first step of experiments. Second step of the experimental procedure consists of parameters of T6 heat treatment process to understand how they affect the mechanical properties of A356.0 alloy.

As a result for the grain refinement process in the alloy's structure, firstly the importance of grain size for the mechanical values is obtained by the experiments. Secondly, it's obtained that the size of the grains in the structure is greatly determined by the percentage of elemental boron than the percentage of titanium. But, it's also acquired with these works, that there are some restrictions for the amount of Ti and B in the alloy composition, which affect mechanical properties negatively.

In the second step of the experimental procedure it's found that the ageing stage of heat treatment process has a vital role on the structure and therefore on the mechanical properties as well as magnesium content of the alloy. Regarding to the results of experiments conducted an optimization and improvement on the processes and products of a reputable wheel producer in the market.

1. GİRİŞ

1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı

Metal dökümcülüğü tarih öncesi çağlardan bu yana oldukça ciddi bir şekilde gelişim ve değişim göstererek endüstri içerisinde kilit bir rol sahibi olmuştur. Tarih öncesi çağlardan bu yana ilk metal objeler dövme ile şekillendirilmiş olup, dökümcülüğün bir üretim prosesi olarak yer alması yaklaşık 5000 yıl öncesine dayanmaktadır. Bronz, bu anlamda dökümü en yaygın ilk metal olarak silahların, heykellerin, çan ve benzerlerinin yapımında kullanılmıştır. Önceki çağlarda olduğu gibi Avrupa ve Amerika'daki endüstriyel devrim – özellikle demir ve çelik dökümü açısından – tarihsel olarak döküm prosesinin gelişmesi ile eşzamanlıdır. Ancak, döküm endüstrisinin çarpıcı bir şekilde büyümesinin sebebi, genişleyen üretim ve taşıma sektöründeki çok farklı ve çeşitli tipteki malzemelere ihtiyaç duyulmasıdır.

Alüminyum dökümü ise ancak rafinasyon prosesi olan Hall – Herault yönteminin geliştirilmesi ile ekonomik olarak mümkün hale gelmiştir. 20. yüzyılın başlarına kadar alüminyum dökümün uygulama alanları sadece dekoratif ürünler ve mutfak gereçleri ile sınırlıydı. Fakat 2. Dünya Savaşı'ndan sonra alüminyum döküm endüstrisi dramatik bir şekilde gelişmeye başlamıştır. Bu sebeple gerekli ticari ve teknik mühendislik ihtiyaçları karşılamak üzere yeni alaşımlar ve bu ihtiyaçlara uygun döküm yöntemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Ancak, son yıllarda dünya genelinde baş gösteren enerji krizi alüminyumun dayanıklılık / hafiflik oranı sayesinde ve özellikle araçlarda, dökümü için en büyük kullanım alanını doğurmuştur.

Alüminyumun birçok metal ile alaşımı yapılabilmektedir. Çinko, magnezyum, silis, bakır, titanyum ve lityum bu metaller içerisinde düzenli olarak eklenen ve kontrol edilen başlıca alaşım elementi olarak yer almaktadırlar. Bu elementlerin bazıları yapı güçlendirme amacıyla eklenmekte olup bir kısmı ise arzu edilen intermetalik bileşiklerin oluşması için kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise ele alınan alaşım literatürde AlSi7Mg, ticari olarak A356 alaşımı olarak bilinen ve otomotiv

endüstrisinde yaygın kullanım alanı bulan Alüminyum – Silisyum – Magnezyum alaşımı olup genel döküm özelliklerinin incelenmesi ve iyileştirilmesi amacıyla yapı kontrolünün incelenmesi konu alınmaktadır.

1.2 Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması

Döküm alaşımları için spesifikasyonlar oldukça net olarak diğer alaşımlardan ayrılmış olup, sınıflandırılması ve isimlendirilmesi kimyasal kompozisyonlarına göre yapılmaktadır. Alüminyum döküm alaşımları elektrolitik alüminyuma gerekli alaşım elementlerinin eklenmesi veya daha önce imal edilip kullanılmış malzemelerin geri dönüşümü ile hazırlanabilmektedir. Günümüzde endüstride imal edilen parçaların % 50'sinin geri dönüşümlü malzemeden yapılmakta olduğu varsayılmaktadır. Alüminyum alaşımların sınıflandırılmasında uluslararası olarak kabul edilen isimlendirme U.S. Aluminium Association tarafından alaşımı belirtmek için 4 haneli rakam sisteminin kullanıldığı nümerik dizilimdir. Bu dizilime göre Tablo 1.1'de görülebileceği üzere ilk rakam grup içerisindeki ana alaşımlandırma elementini ifade etmektedir [1].

Tablo1.1: Alüminyum Döküm Alaşımlarının Ticari Sınıflandırması [1]

Sınıflandırma	Temel Alaşım Elementi
1xx.x	Alaşımlandırılmamış Alüminyum (% 99,0 veya daha yüksek safiyet)
2xx.x	Bakır
3xx.x	Silis ile Magnezyum ve/veya Bakır
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Kullanılmıyor
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay (Tin)
9xx.x	Kullanılmıyor

Sınıflandırma sisteminde 1xx.x grubunda noktanın solundaki iki rakam alaşım içerisindeki en az alüminyum içeriğini belirtmektedir. Örneğin 190.x dizilimi %99.90 saflığındaki alüminyumu ifade etmektedir. Aynı grupta noktadan sonraki hane ürün şeklini nitelendirmektedir. Bu dizilimde 0 ve 1 sırasıyla dökümler için ve külçeler içindir [1].

2xx.x'den 9xx.x grubuna kadar olan aralıkta noktanın solundaki iki rakam sadece grup içerisindeki alaşımları ayırt etmek için kullanılmakta olup özel bir anlam taşımamaktadır. Noktanın sağındaki rakam ise ürün şeklini ifade etmektedir [1].

1.3 Alüminyum Döküm Alaşımlarının Özellikleri

Alüminyum döküm alaşımları esas olarak düşük özgül ağırlıkları ile tanımlanmaktadır. Buna ek olarak düşük ergime sıcaklıkları, düşük gaz çözünürlükleri (hidrojen haricinde), mükemmel dökülebilirlik özelliği (özellikle % 11,7 civarında ötektik kompozisyonlarında), iyi işlenebilirlik ve yüzey kalitesi, iyi korozyon dayanımı ve iyi termal ve elektrik iletim katsayıları alüminyum döküm alaşımlarının genel karakteristiklerini yansıtmaktadır. Ancak katılaşma sırasındaki % 3,5 ila 8,5 arasındaki hacimsel çekme oranları alüminyum dökümlerin başlıca sıkıntıları arasında yer almaktadır. Dolayısıyla boyutsal doğruluğun sağlanabilmesi, sıcak yırtılmaların önlenmesi ve çekme porozitelerinin oluşmaması için kalıp tasarımı sırasında bu oranlar göz önünde bulundurulmalıdır. Alüminyum döküm alaşımlarının dövme alaşımlara kıyasla mekanik özellikleri çok daha iyi olduğu bilinmekle birlikte grup içerisinde yer alan alaşımlarının bazıları ısıtılma tabi tutularak daha üstün mekanik özelliklere kavuşturulabilmektedir [2].

Uygulama alanına göre döküm alaşımının seçimi temel olarak üç ana parametreye bağlıdır:

- Dökülebilirlik (castability – alaşımın akışkanlık, katılaşma özellikleri ve döküm parçasının geometrisine bağlı olan karmaşık bir özellik),
- Mekanik özellikler,
- Kullanım alanları.

Alüminyum alaşımların dökülebilirlik özellikleri akışkanlığın, sıcak yırtılma eğiliminin ve hacimsel çekme özelliklerinin değerlendirilebildiği özel numune kalıpları kullanılarak belirlenmektedir.

Mekanik özellikler ise genellikle en iyi ısıtılma işlem uygulanabilen ötektik kompozisyonları içeren alaşımlardan elde edilmektedir. Çalışmada incelenen A356.0 alaşımı da bu tür bir kompozisyon olup ısıtılma işlem parametreleri ayrıca incelenmiştir. Ayrıca döküm alaşımlarının mekanik özellikleri ergitme ve döküm pratiklerinin sıkı kontrolü, empürite seviyesinin kontrolü, tane boyutu kontrolü - inceltme, ötektik modifikasyon ile çok daha iyi karakterize edilmektedir.

Kullanım alanı olarak bakıldığında ise genel kullanım amacıyla üretilen alüminyum döküm parçalarında alaşım seçimi işlenebilirlik, korozyon direnci, sertlik ve mekanik değerler gibi karakteristiklere göre yapılmaktadır.

1.4 Döküm Prosesleri

Döküm prosesinin seçiminde genel olarak kalite gereksinimleri, teknik imkânlar ve ekonomik yaklaşımlar rol oynamaktadır. Endüstride yoğunlukla tercih edilen ana döküm prosesleri şu şekildedir:

- Kum kalıba döküm (sand castings): Büyük döküm parçaları (bir kaç tona kadar), bir taneden birkaç bin taneye kadar olan adetlerde;
- Sabit kalıba döküm (permanent die casting): gravite ve alçak basınçlı döküm, orta ebatlı döküm parçaları (100 kg'ye kadar);
- Yüksek basınçlı döküm (high pressure die castings) : küçük ebatlı parçalar (50 kg'ye kadar), yüksek üretim adetleri.

Diğer döküm prosesleri ise hassas döküm, yanıcı köpük veya mum kalıplama, plaster kalıplama, seramik kalıplama, santrifüj döküm, sıkıştırılmalı (squeeze) döküm ve yarı katı (semi - solid) döküm gibi yeni ve gelişmekte olan yöntemlerden oluşmaktadır.

2. ALÜMİNYUM SİLİSYUM DÖKÜM ALAŞIMLARI

2.1 Yaygın Alaşım Sistemleri

Alaşım lar 1. Bölüm’de belirtildiği gibi uluslararası olarak kabul edilen şekilde 7 seride tanımlanmış ve sınıflandırılmış olup yaklaşık 240 kadar kompozisyonu kapsamaktadır [1]. Kapsamın bu kadar geniş olmasının sebebi alaşımların genelde her prosese ve ihtiyaca cevap verecek şekilde bireysel olarak geliştirilmesidir. Hatta bazı alaşımlar sadece ihtiva ettikleri empüriteler veya alaşımlandırma elementlerinin az miktarları için nümerik tanımlamasının önüne harf konularak ifade edilmektedirler (örneğin 356.0 ve A356.0 gibi).

Alüminyum alaşım kompozisyonları, dökümleri ısıtılı işlemli veya ısıtılı işlemsiz olmak üzere tasarlanmışlardır. Döküm işleminden sonra herhangi bir ısıtılı işlem uygulanmayan parçalar alaşım numarasının sonuna F harfi konularak tanımlanırlar. Döküm parçaları üzerinde uygulanan ısıtılı işlem mekanik özellikleri arttırmaktadır. ısıtılı işlem tanımlamaları 0, T4, T5, T6 gibi sınıflandırılmakta olup bu işlemler ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 2.5’de anlatılmaktadır.

2.2 Alüminyum – Silisyum – Magnezyum Döküm Alaşımları

Alüminyum – Silisyum alaşımı genel olarak toplam alüminyum döküm parçalarının % 85 – 90 gibi bir oranını oluşturmaktadır [3]. En yaygın döküm alaşımları ve özellikleri Tablo 2.1 ve 2.2’de verilmiştir. Temel alaşımlandırma elementi olarak silisyum içeren alüminyum alaşımları çok iyi dökülebilirlik özellikleri, korozyon dayanımı ve kolay işleme özellikleri taşımaktadırlar. Özellikle ikili ötektik veya hipoötektik Al-Si alaşımları iyi dökülebilirlik ve korozyon dayanımı ile karakterize edilmektedirler [4].

Al – Si alaşımlarının yapılarının güçlendirilmesi az miktarda bakır, magnezyum veya nikel eklenmesi ile sağlanabilmektedir. Bu yapılar içerisinde silis iyi döküm özelliklerini sağlarken magnezyum akma ve kopma mukavemetleri üzerinde rol oynamaktadır.

Tablo 2.1: Endüstride Yaygın Olarak Kullanılan Al – Si Alaşımlarının Bileşimleri
(K: Kum Döküm, S: Sabit Kalıba Döküm, Y: Yüksek Basınçlı Döküm)

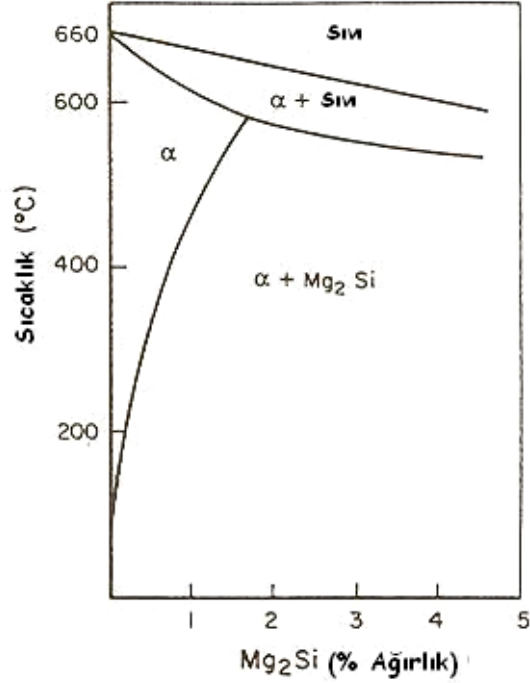
Alaşım	Elementler						
	Yöntem	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Diğer
319.0	K, S	6,0	3,5	< 0,10	<1,0	<1,0	
332.0	S	9,5	3,0	1,0	1,2	1,0	
355.0	K, S	5,0	1,25	0,5	<0,06	<0,35	
A356.0	K, S	7,0	<0,20	0,35	<0,2	<0,1	
A357.0	K, S	7,0	<0,20	0,55	<0,2	<0,1	0,05 Be
380.0	Y	8,5	3,5	<0,1	<1,3	<3,0	
383.0	Y	10,0	2,5	0,10	1,3	3,0	0,15 Sn
384.0	Y	11,0	2,0	<0,3	<1,3	<3,0	0,35 Sn
390.0	Y	17,0	4,5	0,55	<1,3	<0,1	<0,1 Mg
413.0	Y	12,0	<0,1	<0,10	<2,0		
443.0	K, S	5,25	<0,3	<0,05	<0,8	<0,5	

Yaşlandırma ile sertleştirilebilen ve magnezyum içeren Al – Si alaşımları önemli bir alaşım grubunu oluşturmaktadır. Ancak bu alaşımlar döküm parçasında çekme mukavemetine etkiyen Mg_2Si fazının oluşması sebebiyle % 0,3 civarında Mg oranı ile sınırlanmaktadır. Çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma aşamalarını içeren ısıtıl işlem prosesi Mg_2Si fazının düzenli bir şekilde alüminyum dendritleri arasında çökmesini sağlayarak bu sorunun çözülmesini sağlamaktadır [5].

Tablo 2.2: Al – Si Alaşımlarının Karakteristik Özellikleri
(Değerlendirme : 1, en iyi ; 5, en kötü)
(K: Kum Döküm, S: Sabit Kalıba Döküm, Y: Yüksek Basınçlı Döküm)

Alaşım	Döküm Yöntemi	Yırtılma Direnci	Basınç Dayanımı	Akışkanlık	Çekinti Eğilimi	Korozyon Direnci	İşlenebilirlik
319.0	K, S	2	2	2	2	3	3
332.0	S	1	2	1	2	3	4
355.0	K, S	1	1	1	1	3	3
A356.0	K, S	1	1	1	1	2	3
A357.0	K, S	1	1	1	1	2	3
380.0	Y	2	1	2	-	5	3
390.0	Y	2	2	2	-	2	4
413.0	Y	1	2	1	-	2	4
443.0	S	1	1	2	1	2	5

Al – Si – Mg alaşım sistemi şekil 2.1’deki ikili Al-Mg₂Si diyagramı ile gösterilmektedir [5]. Alüminyum silisyum – magnezyum silisid grubuna ait alaşımlar çok iyi dökülebilirlik, basıncı geçirmezlik ve korozyon direnci özelliklerine sahip olup kum veya sabit kokil kalıplara dökümde tercih edilmektedirler.



şekil 2.1: Al-Mg₂Si Faz Diyagramı

Al – Si – Mg alaşımları otomotiv sektörü ve denizcilik sektöründe özellikle deniz atmosferine maruz kalan parçaların üretiminde hafıflık / dayanım özellikleri ile oldukça kabul gören bir malzemedir. Özellikle otomotiv için önemli bir fonksiyonelliğe sahip emniyet parçası olan jant üretimi için tüm dünya genelinde kabul görmektedir.

2.3 Al – Si – Mg Alaşımlarını Etkileyen Kritik Parametreler

Üretim sektöründe ürün tasarımının önemli bir adımını teşkil eden malzeme seçimi genel olarak endüstride ürünün fonksiyonelliğine göre hafıflık (zellikle hareketli sistemlerde), mukavemet (dayanıklılık), maliyet (fıyat) ve seri üretime uygunluk (retim için çok fazla ön hazırlık gerektirmeme) kriterleri göz önünde bulundurularak yapılmaktadır.

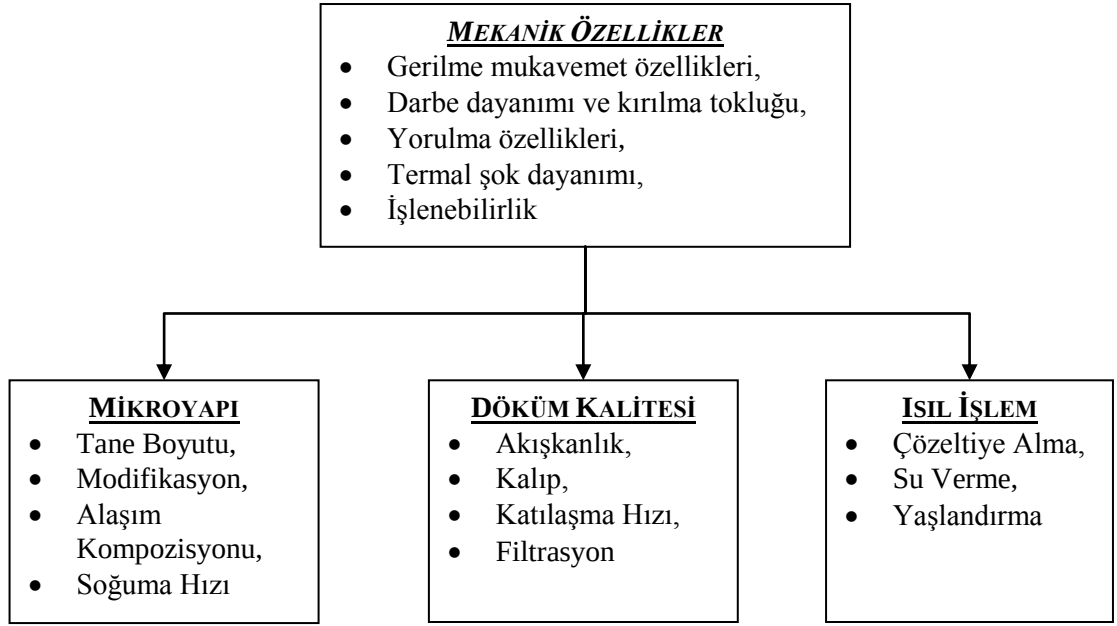
Otomotiv sektöründe ise yaklaşık 30 yıllık bir periyotta yaşanan ve gün geçtikçe kendini oldukça hissettirmeye başlayan enerji sıkıntısı ve kaynaklarının giderek tükenmesi, üreticileri; araçların verimliliği, ekonomik ve çevreci olması konusunda zorlamaktadır. Dolayısıyla otomotiv üreticileri bu amaçlara ulaşmak için öncelikle araçların hafifletilmesi konusunda ciddi uğraşlar vermekte ve bu da malzeme seçiminin önemini ortaya çıkarmaktadır.

Yukarıda belirtilen sebepler ışığında özellikle ağır çalışma koşullarına maruz kalan döküm parçalarının istenilen mekanik özellikleri sağlaması gerekirken, aynı zamanda hafif olması ihtiyacı doğmaktadır. Malzeme seçimi aşamasında üretilecek olan döküm parçasının çalışma ortamına göre belirlenen mekanik özellikleri;

- Gerilme mukavemet özellikleri,
- Darbe özellikleri ve kırılma tokluğu,
- Yorulma özellikleri,
- Termal şok dayanımı,
- İşlenebilirlik özellikleri ile tanımlanmaktadır.

Araçların hafifletilmesi amacıyla başlatılan malzeme çalışmalarında daha önce de belirtilen seçim kısıtları göz önüne getirildiğinde neredeyse bütün yollar hafiflik / dayanım oranı açısından Al – Si – Mg alaşım sistemlerine çıkmaktadır. Üretilecek olan döküm parçalarının yukarıda belirtilen mekanik özellikleri ise temel olarak alaşımın mikroyapısına, dökümün kalitesine (kusursuzluğuna) ve ısı işlem ihtiyacına göre değişmekte ve kritik özellikler bu şekilde belirlenebilmektedir. Bir döküm parçasının mekanik özelliklerini belirleyen parametreler Tablo 2.3'deki gibi özetlenebilir:

Tablo 2.3: Mekanik Özellikleri Etkileyen Parametrelerin Şematik Gösterimi



Üretilecek olan döküm parçasının mekanik özelliklerini belirleyen parametrelerden biri olan mikroyapı; alaşımın tane boyutuna, modifikasyon seviyesine, kimyasal bileşimine ve soğuma hızına göre değişmektedir. Çalışmada incelenen Al – Si – Mg sistemine ait A356.0 alaşımı için tane boyutunu ayarlamak amacıyla kullanılan TiB master alaşımı ile denemeler gerçekleştirilmiş olup, etkisi incelenmiştir.

Son ürünün kullanım performansını etkileyen önemli parametrelerden döküm kalitesi ise alaşımın akışkanlığı, kalıbın tasarımı ve malzemesine bağlı olup aynı zamanda katılaşma hızı ve filtrasyondan da etkilenmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda ise A356.0 alaşımı için tane inceltme, modifikasyon ve ısıt işlemin son üründeki nihai mekanik değerleri nasıl etkilediği ve hangi mekanizmaların ya da parametrelerin etkili olduğu irdelenmeye çalışılmıştır.

Döküm parçasının karşılamasının beklendiği mekanik değerlerin belirlenmesi ise Al – Si – Mg alaşım sisteminde parçanın ısıt işlem ihtiyacının belirlenmesini gerektirmekte olup, ticari olarak uygulanan ısıt işlem proseslerinde bulunan çözeltiye alma (solutionizing), su verme ve yaşlandırma adımlarının bahsi geçen mekanik mukavemet değerlerini ciddi olarak etkilediği bilinmektedir. Üretilecek olan döküm parçasında ısıt işlem ihtiyacı ise bu çalışmada özellikle irdelenmiş olup, parçanın gereksinim duyduğu mekanik değerlerin karşılanabilmesi adına ayrı bir deneysel prosedür izlenilmiştir.

2.4. Mikroyapı

Döküm parçaları için alaşımın mikroyapı kontrolü bir dökümhane için en önemli parametre olup, literatür çalışmalar ve pratik deneyimler ile mikroyapının bir çok faktör tarafından etkilendiği bilinmektedir. Dökümde kullanılacak alaşımın mikroyapı kontrolü ise kontrollü katılaşmanın yanı sıra temel olarak sıvı metal tretmanı ve pratikleri ile sağlanabilmektedir.

Alüminyum – Silisyum alaşım sistemlerinde mikroyapı büyük oranda kimyasal kompozisyon ve döküm prosesinin özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin, basınçlı dökümde parçanın hızlı soğutulması ince şekilli ötektik yapının oluşmasını tetiklerken, aynı zamanda dendrit kol uzunluklarının ve dolayısıyla dendritik hücrelerin daha kısa oluşmasına sebep olmakta, bununla birlikte tane boyutunun küçülmesine yardımcı olmaktadır [5]. Ancak; mikroyapının kimyasal kompozisyon ya da döküm proses özellikleri ile etkileşiminin yanı sıra öncelikli olarak tane inceltme ve modifikasyon gibi iki önemli süreç ve etkileşim mekanizmaları iyi şekilde anlaşılmalıdır.

2.4.1. Tane İnceltme

Döküm alaşımının yapısal özelliklerini belirleyen faktörlerin başında gelen tane inceltme prosesi; sıcak yırtılma eğilimi, porozitenin dağılımı ve beslemenin iyileştirilmesi açısından büyük bir önem arz etmektedir [6]. Tane inceltme işleminin uygun olarak yapılması sonucu yukarıda belirtilen özellikleri iyileştirilmiş sıvı metal ile dökümü yapılan parçada daha az yapısal döküm kusuru görülürken buna mukabil olarak çok daha iyi mekanik değerler elde edilebilecektir.

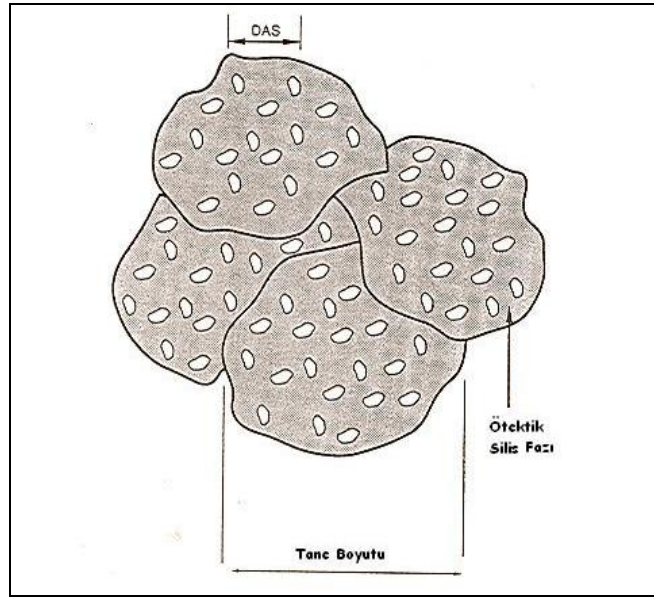
Tane inceltme işleminin alaşımın yapısında nasıl gerçekleştiğinin anlaşılabilmesi için öncelikle döküm parçasının temel yapı taşı olan çekirdek teorileri ve tane oluşumu incelenmelidir. Bu sayede tane inceltme mekanizmaları kolayca görülebilecektir.

2.4.1.1 Tane Nedir?

Bu bölümde Al – Si – Mg alaşımlarında katılaşma esnasında primer alüminyum tanelerinin boyutunun inceltilmesinin özellikleri ve yapıya olan etkisinin cevabı aranmaktadır. Tane boyutunun yapısal ve mekanik değerler üzerindeki etkisi tek fazlı metaller için uzun bir zamandan bu yana bilinmekte olup çoklu fazlarda bu ilişki net olarak bilinmemekte ve araştırılması gerekmektedir. Ancak, sektörde yaygın bilgi

ve deneyimlere göre birçok uygulamada daha ince tane yapısının iri tanelere göre tercih edilir olduğudur. Ancak Al – Si alaşımlarında bu durum esas yapısal özellikleri belirleyen ötektik silis fazı dolayısıyla özellikle modifikasyon ve tane inceltme terimlerinin birbirleriyle karıştırılmaması gerekliliğini doğurmaktadır [5].

Pratik uygulamaların kazandırdığı deneyimler ışığında Al – Si döküm alaşımlarının yapısına etki eden faktörlerin başında gelen ötektik silis morfolojisi, boyutları ve dendrit kol uzunluğu (DAS) gelmektedir. Ancak, bu faktörler incelenirken esas dikkat edilmesi gereken husus bahsi geçen etmenlerin birbirinden ayrı ele alınması gerektiğidir. Dolayısıyla söz konusu faktörler, yapıdaki etkisi az veya çok olsun, her biri birbirinden bağımsız kesinlikle bilinmelidir. Örneğin, bir döküm alaşımında ince ya da iri taneler modifiye edilmiş veyahut edilmemiş, daha geniş veya daha kısa dendrit kol uzunluklarında görülebilirler. Şekil 2.2'deki çizim bu ayrımı daha net bir şekilde özetlemektedir.



Şekil 2.2: Al – Si Alaşım Sisteminde Yapıyı Oluşturan Temel Elementler [5]

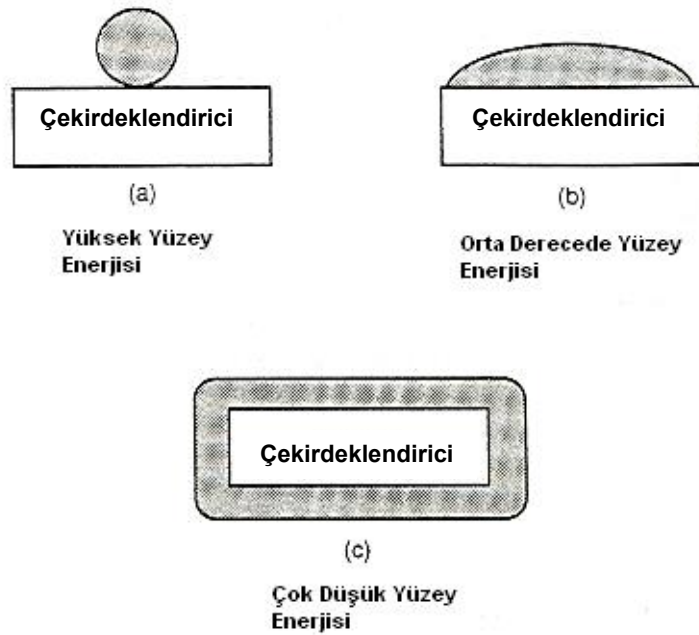
Alaşımın yapısında bulunan ve tane olarak adlandırılan yapıda aynı çekirdekten oluşan alüminyum dendritleri bulunmaktadır. Bu dendritlerin uzunluğu ise en başta katılma hızı ile belirlenmekte, katılma hızı yavaşladıkça dendritlerin uzunluğu artmaktadır. Bahsi geçen dendrit kollarının arasında ise modifiye edilebilir ötektik silis fazı yer almaktadır. [6-7]

Genel olarak alüminyum döküm alaşımlarında taneler 1 – 10 mm büyüklüğünde gözlenirken, DAS değerleri 10 – 150 μm aralığında bulunmaktadır. Ötektik silis fazı ise bu alaşım sistemlerinde uzunluğu 2 mm civarında olan plakalar veya $\text{çapı } 1 \mu\text{m}$ 'yi aşmayan küreler halinde görülebilmektedir. [7]

2.4.1.2. Tane İnceltme Prensipleri

Tane inceltme prosesini anlamak için öncelikle tane oluşumunu, dolayısıyla çekirdeklenme prensiplerini anlamak gereklidir. Bu sayede alüminyum alaşımlarında tane inceltmenin çekirdek oluşumu ve büyümesiyle doğrudan ilişkili olduğu daha iyi anlaşılabilir.

Volmer ve Weber tarafından 1925'te geliştirilen ve 1983 yılında Mondolfo tarafından revize edilen çekirdeklenme teorisine göre sıvı içerisindeki her bir tane yabancı bir partikül veya çekirdeklendirici tarafından çekirdeklenmeye başlatılırlar. Bu teori aynı zamanda heterojen çekirdeklenme teorisi olarak da bilinmektedir ve çekirdeklendirici ile çekirdek (katılaştıran malzeme) arasındaki yüzey enerjisinin süreç içerisinde en önemli etmen olduğunu söylemektedir. Teoriye göre çekirdeklendirici ve çekirdek arasında üç çeşit olasılık mevcuttur [8]. Bu olasılıklar Şekil 2.3'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Yüzey Enerjisinin Çekirdeklendirici Üzerindeki Çekirdek Geometrisine Etkisi

Teoriye göre Şekil 2.3'de (c) ile gösterilen durum çekirdeklendirici ve çekirdek arasındaki yüzey enerjisinin en az olmasından dolayı optimum olarak ifade edilmektedir. Bu sayede çekirdek çekirdeklendiriciyi tam olarak sararak entropi kanunları dolayısıyla en az enerjiyi harcayarak büyük çaplı bir film oluşturur. Bu durum ise genellikle çekirdeklendirici ve çekirdek kristal yapılarının benzerliği sayesinde yüzey enerjisinin en az olduğu durumlarda gerçekleşir [5,8].

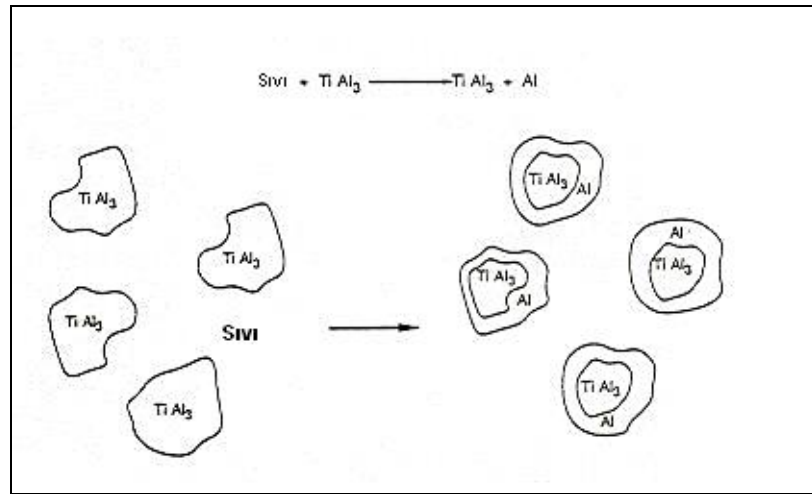
Heterojen çekirdeklenme bu şekilde basit bir şekilde özetlenecek olursa; alüminyum söz konusu olduğunda uygun bir çekirdeğin kristal latisindeki atomik düzlemler, üzerinde çekirdekleneyeceği malzemenin latisindeki atomik düzlemlerle benzer olmalıdır. Bu sebepten ötürü alüminyum ve çekirdeklendiricinin arasında belirgin bir kristalografik ilişki bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar ise bunun için en uygun bileşimin $TiAl_3$ şeklinde olduğunu göstermektedir [9].

Sıvı alüminyum döküm alaşımları genellikle yapılarında temel olarak oksitlerden oluşan bir çok yabancı partikül bulundurlar. Alaşımın ergime noktasının altında sıcaklıklarda bu tarz partiküllerin efektif birer çekirdeklendirici olmaları temel olarak kristal yapılarının ne kadar benzer oldukları ile ilişkilendirilmektedir. Örneğin alaşımın likidüs sıcaklığının hemen altında ve oldukça yakınında benzer kristal yapıdaki çekirdeklendiriciler daha iyi çekirdeklenme sağlarken, benzerliği az olan partiküller daha fazla bir soğuma oranına ihtiyaç göstereceklerdir [6,8]. Bu durum ise çil etkisi olarak adlandırılmakta ve bu sayede heterojen çekirdeklenme gerçekleşerek oldukça ince yapılı taneler katılaşma sırasında oluşacaktır. Ancak çil etkisinin seri üretim gibi şartlarda uygulamasının pratik olmaması sebebiyle yapıya çekirdeklenme ajanları ilave edilmekte ve kimyasal tane inceltme olarak adlandırılmaktadır.

2.4.1.3. Kimyasal Tane İnceltme

Kimyasal tane inceltme metodu; önceki bölümlerde bahsedildiği gibi tane inceltme işinin soğutma hızına müdahale edilemeyen, katılaşma hızının önemli olduğu durumlarda uygulanan ve döküm sektöründe yaygın bir uygulama alanı bulunan bir yöntemdir. Bu yöntem temel olarak efektif çekirdeklendirici elementlerin bulunduğu master alaşım veya flaksların sıvı haldeki alaşıma eklenmesi prensibine dayanmaktadır.

Döküm sektöründe genellikle alüminyum alaşımları için tane inceltici olarak % 0,02 – 0,15 titanyumun alaşıma eklenmesi veya tipik olarak % 0,01 – 0,03 oranında titanyum ve % 0,01 oranında bor içeren çubuk, plaka, tablet ve kapsül formundaki master alaşım ya da tuz karışımları tercih edilmektedir. Titanyumun tane inceltici olarak tek başına kullanılması kristal yapılarının benzer olması ve özellikle efektif bir çekirdeklendirici olan $TiAl_3$ fazı oluşturması sebebiyle net bir şekilde biliniyor olmasına rağmen bor ile birlikte kullanımı, borun etkisi ve özellikle borun yarattığı etkinin sebepleri üzerine tartışmalar hala sürmektedir. Şekil 2.4’de Al – Ti sisteminde gerçekleşen peritektik reaksiyon ile çekirdeklenme gösterilmektedir [9].



Şekil 2.4: Al – Ti Sisteminde Gerçekleşen Çekirdeklenme

Alüminyum döküm sektöründe genel olarak daha küçük ve fazla miktarda $TiAl_3$ fazı içeren Al – Ti master alaşımların, yapısında daha büyük ancak daha az $TiAl_3$ fazı barındıran master alaşımlara göre tane inceltmede daha başarılı olduğu yaygın olarak bilinmektedir. Ancak yine alüminyum döküm sektöründe kullanılan ve yoğun olarak kabul gören alaşımlara bakıldığında Al – Ti – B master alaşımlar olduğu görülmektedir. Pratik kullanımdaki tercihin bu yönde olmasını belirleyen en önemli sebebin inceltici olarak sadece titanyum kullanıldığı durumlarda uzun bekleme sürelerinde inceltme etkisinin kaybolduğunu işaret eden deneyimlere dayanmaktadır. Al – Ti faz diyagramı incelendiğinde tane incelticiden gelen $TiAl_3$ partiküllerinin çözüldüğü ve dolayısıyla inceltme etkisinin zamanla azaldığı açıkça gözlemlenmektedir [6,9]. Literatürde bu durum yanma kaybı (fading) olarak ifade edilmektedir.

Üretim sırasında yaşanan deneyimlere istinaden Al – Ti – B sistemindeki master alaşımların üretim şartlarının final performansı etkilediği ve her master alaşımın eşit şekilde üretilmediği oldukça çok gözlemlenmekte ve pratik uygulayıcılar tarafından iyi bir şekilde bilinmektedir. Bununla birlikte tane inceltme yeteneğinin master alaşımdaki intermetalik partiküllerin morfolojilerine bağlı olduğu düşünülmekte ve blok tipteki intermetalik fazlar içeren master alaşımlar zayıf olarak nitelenmektedir.

CMS Jant ve Mak. San. A.Ş.'de gerçekleştirilen çalışmada ise kimyasal kompozisyonları ekli tablolarda verilmiş olan iki tip master alaşım (Ti3B1 ve Ti5B1) kullanılarak tane büyüklüğü indeksi kapsamında etkileri incelenmiştir.

2.5. Isıl İşlem

Döküm parçasının mekanik ve fiziksel özelliklerinin değiştirilmesi ve iyileştirilmesi için uygulanan ısıtma işlemi prosesi temel olarak bu malzemelere uygulanan ısıtma ve soğutma işlemlerini içermektedir. Bu ısıtma ve soğutma işlemleri temel olarak tavlama, çözeltiye alma, yaşlandırma ve soğuk işlem gibi kademeleri içermekte olup, alaşımların kimyasal yapılarına ve kazandırılmak istenilen nihai özelliklere göre çeşitlilik göstermektedir.

Alüminyum alaşımlarında uygulanan işlemler genellikle yaşlandırma işlemine göre değerlendirilmekte ve sadece mekanik özellikler için değil elektriksel iletkenlik ve korozyon özelliklerini de belirleyici rol oynamaktadır. Yaşlanma işlemi ise sadece denge diyagramında solvüs eğrisi bulunan alaşımlarda ve solvüs eğrisinin sınırladığı katı eriyik bileşimlerinde meydana gelebilir [10]. Fakat birçok alüminyum alaşımında solvüs eğrisi bulunmasına rağmen bazı alaşımlarda kimyasal bileşimleri sebebi ile ısıtma işlemi sonucunda mekanik değerlerinde belirgin bir iyileşme görülemeyebilmektedir. Buna göre Bölüm 1'de sınıflandırması yapılan alüminyum alaşımlarının yaşlandırma işlemi uygulanabilirliği Tablo 2.4'de verilmiştir [11].

Tablo 2.4: Alüminyum Alaşımlarının Yaşlandırma Uygunluğu [11]

Sınıflandırma	Temel Alaşım Elementi	Yaşlandırma İşlemi
1xx.x	Alaşımlandırılmamış Alüminyum (% 99,0 veya daha yüksek safiyet)	Yaşlanmaz
2xx.x	Bakır	Yaşlanabilir
3xx.x	Silis ile Magnezyum ve/veya Bakır	Bazıları Yaşlanabilir
4xx.x	Silisyum	Yaşlandırılmaz
5xx.x	Magnezyum	Yaşlandırılmaz
6 xx.x	Kullanılmıyor	-
7 xx.x	Çinko	Yaşlanabilir
8 xx.x	Kalay (Tin)	Yaşlanabilir
9 xx.x	Kullanılmıyor	-

Döküm parçasının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için temel kural; aşırı doymuş katı fazdan yaşlanma işlemi sonucunda yapıda çok ince çökelti fazının dağılımıdır. Bu çökelti fazının oluşumu doğal olarak gerçekleşebileceği gibi yapay olarak da yapılabilir. Ancak, genellikle alüminyum alaşımlarında doğal yaşlanma ile mekanik özelliklerde çok etkili bir değişim elde edilemez. Yaşlanmanın meydana gelebilmesi için temel olarak üç kademe mevcuttur, bunlar sırasıyla; çözeltili alma, su verme ve çökeltme (yaşlandırma) işlemidir.

Alüminyum döküm alaşımlarına uygulanan ısıtma işlemi proseslerinde etken olan parametreler; çözeltili alma sıcaklığı ve süresi, su verme hızı, yaşlandırma sıcaklığı ve süresidir. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtma işlemi proseslerinin kodlaması ve açıklamaları Tablo 2.5’de verilmiştir [10].

Tablo 2.5: Alüminyum Alaşımlarında Temper Kodlaması [10]

Temper	Temper Kodu	Açıklama
	F	Mekanik veya ısıtıl işlem görmemiş (döküm, dövülmüş vb.) halde
	O	Tavllanmış ve yeniden kristalleşmiş
H		Soğuk işlem uygulanmış
	H1x	Sadece soğuk işlem uygulanmış (x, deformasyon sertleşmesini göstermektedir.)
	H2x	Soğuk işlenmiş ve kısmen tavllanmış (x, farklı sertlikleri ifade etmektedir.)
	H3x	Soğuk işlem uygulanmış ve malzeme yaşlanmaması için düşük sıcaklıkta ısıtıl işlemle stabilize edilmiş (x, stabilizasyon sonrası sertleşme işlemini ifade eder.)
	W	Çözeltiliye alınmış
T		Yaşlandırma işlemini göstermektedir
	T1	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve doğal olarak yaşlanmış
	T2	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk deformasyon uygulanmış, doğal olarak yaşlanmış
	T3	Çözeltiliye alınmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma uygulanmış
	T4	Çözeltiliye alınmış ve doğal yaşlanmış
	T5	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve yapay yaşlandırılmış
	T6	Çözeltiliye alınmış ve yapay yaşlanmış
	T7	Çözeltiliye alınmış ve stabilize edilmiş (aşırı yaşlanmış)
	T8	Çözeltiliye alınmış, soğuk işlenmiş, yapay yaşlandırılmış
	T9	Çözeltiliye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlem uygulanmış
	T10	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk işlem uygulanmış yapay yaşlanmış

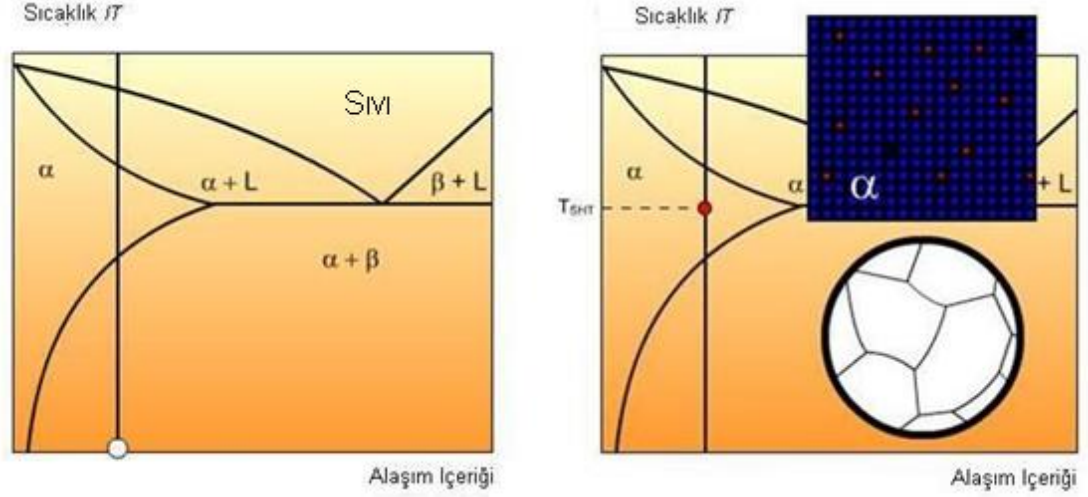
Ticari Al – Si – Mg alaşımları (6xx.x grubu); döküm parçasında arzu edilen mukavemet değerlerine ulaşmak için genellikle T6 ısıtıl işleme tabii tutulurlar. Döküm parçaları temel olarak T6 işleminde sırasıyla katı çözeltili içerisinde çökelti fazının oluşturulması için uzun müddet ötektik altı sıcaklık olan 540 °C’de (1000 F) çözeltiliye alma, ardından yüksek sıcaklıkta su verme ve sonrasında da 150 – 200 °C civarlarında yapay yaşlandırmaya alınırlar. Çözeltiliye alma sırasında magnezyum ve bir miktar silis çözünerek homojen bir katı çözeltili oluşturur. Yaşlandırma ise magnezyum ve silisin alüminyum dendritleri içerisinde Mg_2Si olarak çökmesine sebep olur.

Geçmiş yıllarda, sıvı metal tretmanında birçok önemli teknolojik gelişim yaşanmış olup, bu gelişimler içinde başlıcaları gaz giderme (degassing) tekniklerindeki iyileştirmeler, sıvı metalin filtrasyonu, tane inceltme ve ötektik silisin modifikasyonunu içermektedir. Bahsedilen sıvı metal tretmanları ısıtıl işlem sırasında meydana gelen mikroyapı değişiklikleri üzerinde önemli etkilere sahiptirler. Örneğin sıvı metalin sodyum veya stronsiyumla modifikasyonu tanelerin küreselleşmesini ve

büyüme kinetiklerini değiştirmekte olduğu bilinmektedir. Bu sayede çözeltiye alma sürelerinde ciddi bir şekilde düşüş sağlanması mümkün olabilmektedir. Bununla birlikte sıvı metal içerisine tane inceltici olarak eklenen $TiAl_3$ partikülleri Mg_2Si fazının yaşlandırma sırasında çökeltme kinetiğini geciktirebilmektedir. Araştırmalar sonucunda ortaya çıkan ve bahsi geçen bu gözlemlerin, yıllar önceden standartları belirlenmiş olan ısıtıl işlem uygulamaları üzerine etkileri gözden geçirilmeli ve mevcut dökümhane pratikleri ile entegre edilerek uygulanmalıdır. Bu çalışmada daha önce yapılan çalışmalar ışığında modern deneysel tasarım teknikleri kullanılarak söz edilen ısıtıl işlem pratiklerinin (ve kademelerinin) birbirleri ile etkileşimleri, nihai ürün üzerindeki çekme dayanımını belirleyen kritik parametrelerin belirlenmesi araştırılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmalarda çekme dayanımı ile mikroyapı arasındaki ilişki gözlemlenmeye çalışılmış olup, mikroyapıyı belirleyen ve etkileyen temel parametrelerden tane inceltme ajanları, etkileri üzerinde çalışılmıştır.

2.5.1. Çözeltiye Alma İşlemi

Çözeltiye alma işleminde çökecek fazı içeren aşırı doymuş tek fazlı bir katı çözelti elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu işlem için yaşlanabilen alaşım öncelikle solvüs eğrisinin üzerindeki sıcaklığa ısıtılır ve bu sıcaklıkta yapıda yer alan ikinci faz (Şekil 2.5, β fazı), birinci katı faz (Şekil 2.5, α fazı) içerisinde tamamen çözününceye kadar işleme tabi tutulur [11]. Yapının tümü tamamen birinci faza dönüştükten sonra ani olarak soğutulur. Çözeltiye alma sıcaklığı alaşımın ergimesine sebep olmayacak şekilde seçilmelidir. Alüminyum alaşımları için bu sıcaklık tipik olarak 465 – 565 °C arasında değişmekte olup, bu sıcaklık Şekil 2.5’de T_{SHT} ile ifade edilmektedir. T_{SHT} sıcaklığında bütün bileşenler katı çözeltide tek bir faz halindedir.

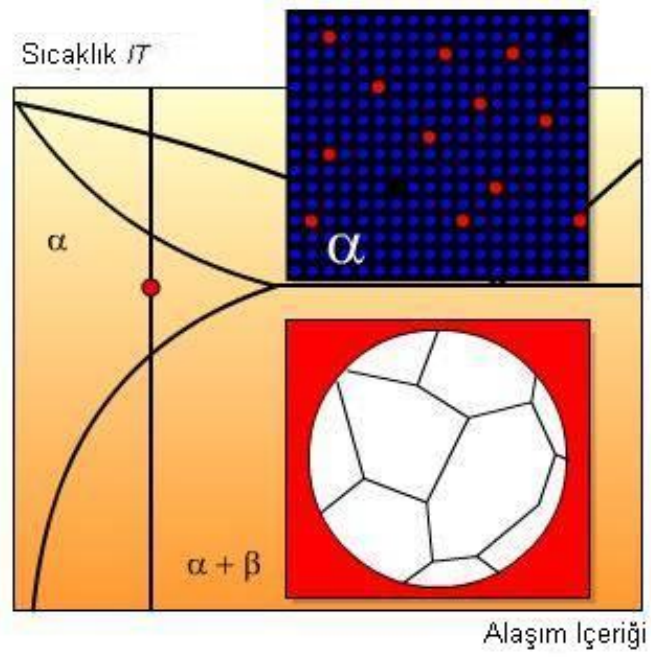


Şekil 2.5: Çözeltiyeye Alma İşlemi [11]

T_{SHT} sıcaklığı, alaşım içerisindeki çökeltilerin sayısına, boyutuna, morfolojisine ve aynı zamanda tane sınırlarının bileşimine etki ettiği bilinmektedir. Dolayısıyla bu kademe malzemenin nihai özelliklerini etkileyebilmektedir. Çözeltiyeye alma süresi ise temel olarak parçanın kesit kalınlığına göre değişkenlik göstermektedir. Bu süre ince levhalar için dakikalar ile ifade edilirken kesit kalınlığı arttıkça saatler ile belirtilmektedir. Ayrıca ısıtılma fırınının içerisindeki yük ve sıcak havanın dolaşımı da bu süre üzerinde etken bir rol oynamaktadır.

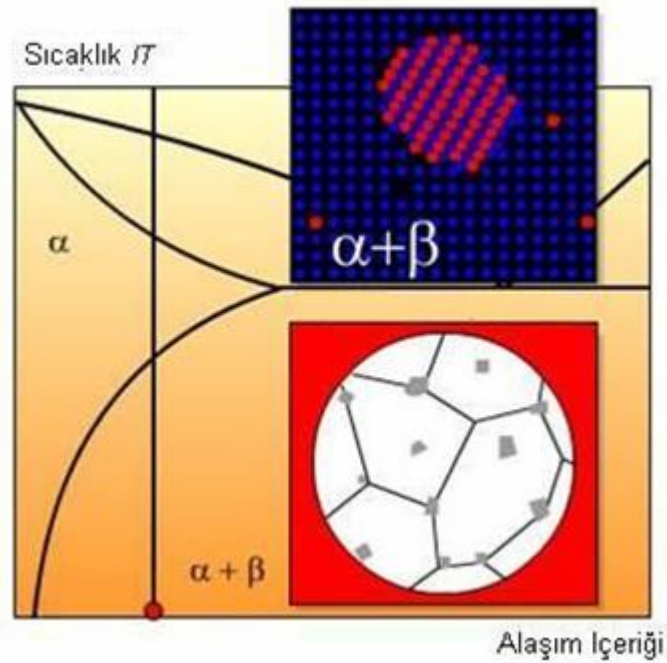
2.5.2. Su Verme İşlemi

Su verme – soğutma işleminin amacı çözeltiyeye alma işlemi sonucu tek faz haline gelen alüminyum içerisindeki alaşımlandırma elementlerinden oluşan aşırı doymuş bir çözelti oluşturmak (Şekil 2.6) ve alaşımın çözeltiyeye alma sıcaklığından hızlı bir şekilde soğutulmasıdır.



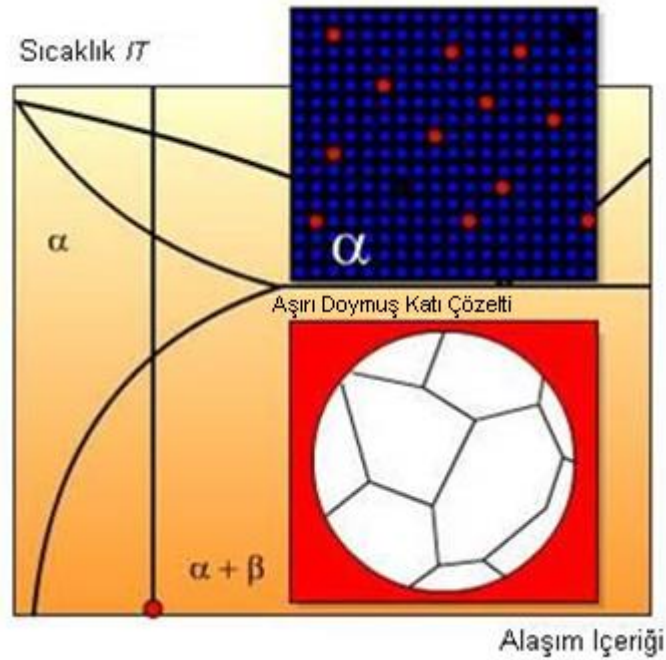
Şekil 2.6: Çözeltiye Alma İşlemi Sonucunda Tek Faz Halindeki Katı Çözelti [11]

Eğer alaşım kendiliğinden (yavaş soğuma) soğumaya bırakılırsa Beta fazı çekirdeklenerek denge halinde bir $\alpha + \beta$ fazı oluşturmak için heterojen olarak çökelir (Şekil 2.7). Ancak ani soğuma α içerisindeki ikinci fazın çökmesine imkan vermez ve aşırı doymuş α çözeltisi elde edilir. Bu hali ile α fazı kararsızdır.



Şekil 2.7: Alaşımın Kendiliğinden Soğuması Durumunda Oluşan Heterojen Çekirdeklenme

Ancak, suda soğutma difüzyon süresini kısaltır ve dengede olmayan Alfa faz yapısının efektif olarak “donmasını” sağlar. Çünkü α fazı bu durumdayken dengede olduğu hale göre daha çok çökelti içerir, dolayısıyla bu durumda katı çözelti aşırı doymuş olarak tanımlanır. (Şekil 2.8)



Şekil 2.8: Aşırı Doymuş Katı Çözelti

Su verme işleminde genellikle su kullanılmaktadır. Ancak suyun yanı sıra su verme ortamı olarak glikol – su karışımları, suda çözülebilen polimerik yağlar veya madeni yağlar da kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının ısı iletkenliğinin yüksek olması sebebiyle aynı parça ince ve kalın kısımlarda soğuma karakteristikleri farklı olduğu için deformasyonlar görülebilmektedir. Dolayısıyla bu tür deformasyonları önleyebilmek için su verme ortamı, bu ortamın sıcaklığı dikkatle seçilmeli, gerekli durumlarda ya su verme ortamı karıştırılmalı ya da parça ortam içerisinde hareket ettirilmelidir.

2.5.3. Yaşlandırma İşlemi

Aşırı doymuş katı çözelti içerisinde çözülmüş halde bulunan ikinci faz, Denklem 2.1’de gösterildiği gibi sıcaklık ve zamanın etkisi ile kararlı bir faz olarak çökler;

$$\alpha_{\text{AşırıDoymuş}} \rightarrow \alpha + \beta_{\text{Çökeltisi}} \quad (2.1)$$

Bu dönüşüm için önce β fazının çekirdeklenmesi ve sonra difüzyon ile büyümesi gereklidir. Alaşım eğer ani soğutmadan sonra oda sıcaklığında tutulursa difüzyon hızı çok yavaş olduğundan β fazı genellikle oluşmaz veya çok uzun sürede oluşur [10]. Çökelme, eğer oda sıcaklığında meydana geliyorsa yaşlanma işlemi “doğal”, eğer alaşım yayınma hızını arttırmak için oda sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa tabi tutuluyorsa “yapay” yaşlandırma olarak adlandırılır.

Çökelti fazının oluşumunun anlaşılabilmesi için 1938’de Guinier ve Preston isimli iki araştırmacı tarafından keşfedilen ve isimlerinin baş harfleri ile adlandırılan GP bölgeleri incelenmelidir. Kompleks reaksiyonlar olan alüminyum alaşımlarındaki yer alan çökelme reaksiyonları ve GP bölgeleri dönüşümleri teorik olarak Denklem 2.2’deki gibi ifade edilebilir;

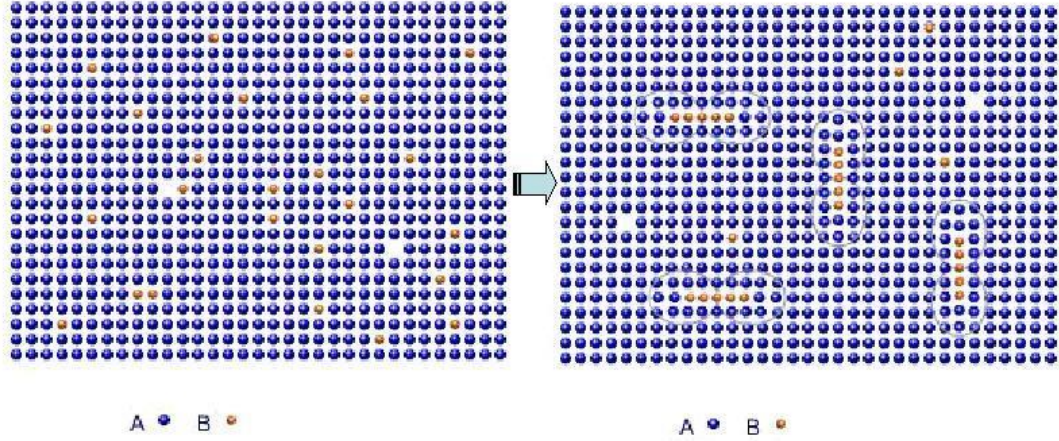
$$\alpha_{\text{AşırıDoymuş}} \rightarrow GP - 1 \rightarrow GP - 2(\theta'') \rightarrow \theta' \rightarrow \theta \quad (2.2)$$

Bu teorik dönüşüm formülüne göre yaşlanma sırasında aşırı doymuş katı çözeltiden çökelti fazının oluşum aşamaları özetlenecek olursa sırasıyla;

$$\text{Çekirdek} \rightarrow \text{Ara Çökelti} \rightarrow \text{Kararlı Çökelti}$$

şeklinde. Çökelti oluşumunun ara kademeleri temel olarak alaşımın bileşimine, su verme ve yaşlandırma koşullarına bağlıdır.

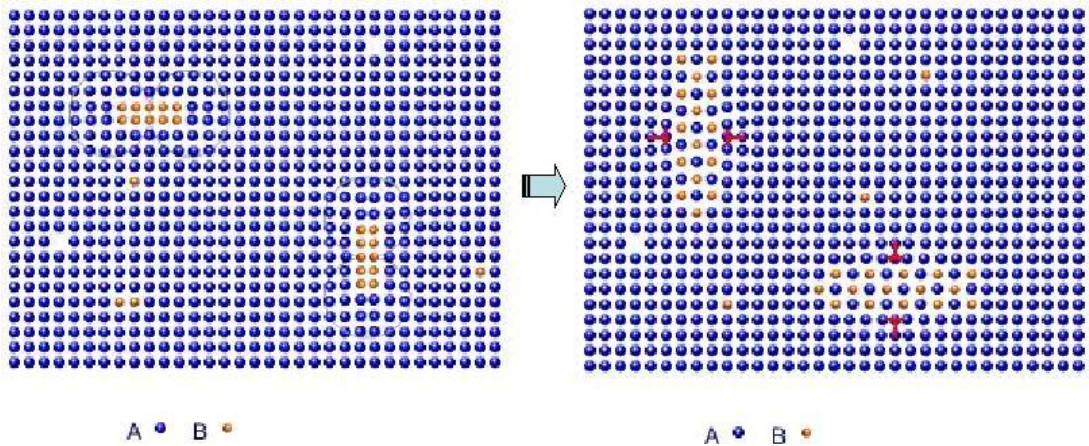
Çözelti aşaması sonucunda aşırı doymuş (tek faz) hale gelen alaşım yapısı denge yapısına yani eski formuna dönmeye çalışır. Şekil 2.9’da sol tarafta görülen yapı su verme sonucu A (Al) içerisinde aşırı doymuş B (Mg-Si) katı çözeltisi fazını temsil etmektedir [11]. Yaşlandırma işlemi sırasında gerçekleşen difüzyon sonucu B atomları, A latisi içerisindeki spesifik düzlemler üzerinde bölgesel konsantrasyonlar oluşturur (Şekil 2.9’da sağ tarafta görülen yapı). Bu bölgeler GP (Guinier – Preston) bölgeleri olarak adlandırılır. Bazı sistemlerde GP bölgeleri disk, küre veya çubuk şekilli olabilir.



Şekil 2.9: Yaşlandırma işleminde ilk kademe yapı değişimi [11]

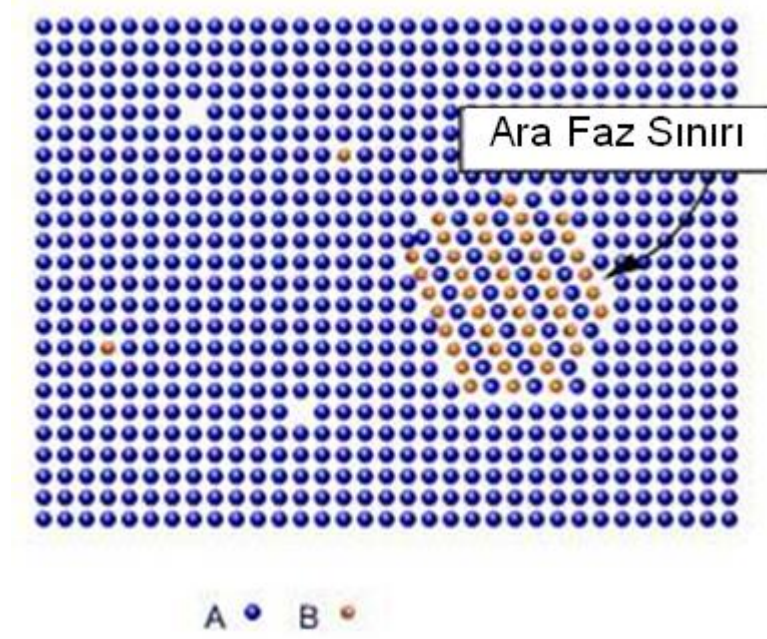
Daha sonra GP bölgeleri tutarlı bir ara faz oluşturmak için çekirdeklenme siteleri oluştururlar. Bu düzlemin etrafındaki A atomları oluşan bu ara fazın ilerlemesi – yerleşmesi için bozularak bu birleşme işleminden doğan kuvvetin etkisiyle deformasyona uğrar ve bir yapışma baskısı oluştururlar (Şekil 2.10’te sol tarafta 2. ara kademe)

Çökeltiler büyüdükçe, büyümeden kaynaklanan sıkışmanın (coherency strain) bir kısmı ara yüzdeki dislokasyon oluşumları tarafından giderilir. (Sağ Taraf – yapı: Ara Kademe 3)



Şekil 2.10: Yaşlandırma işleminde ikinci kademe yapı değişimi [11]

Yaşlandırma işleminin son kademesi denge aşamasıdır. Yeterli yaşlandırma işlemi sonucu en son aşama olarak denge fazı oluşur. Bu faz, ana matristen (A atomları) farklı bir kristal yapısına sahip olup bu faz içerisinde yapışık değildir. Böylece büyümeden kaynaklanan sıkışma elimine edilmiştir. Ancak, matris ve çökelti arasında yeni bir ara faz sınırı vardır. (Şekil 2.11)



Şekil 2.11: Yaşlandırma işleminde son kademe yapı değişimi [11]

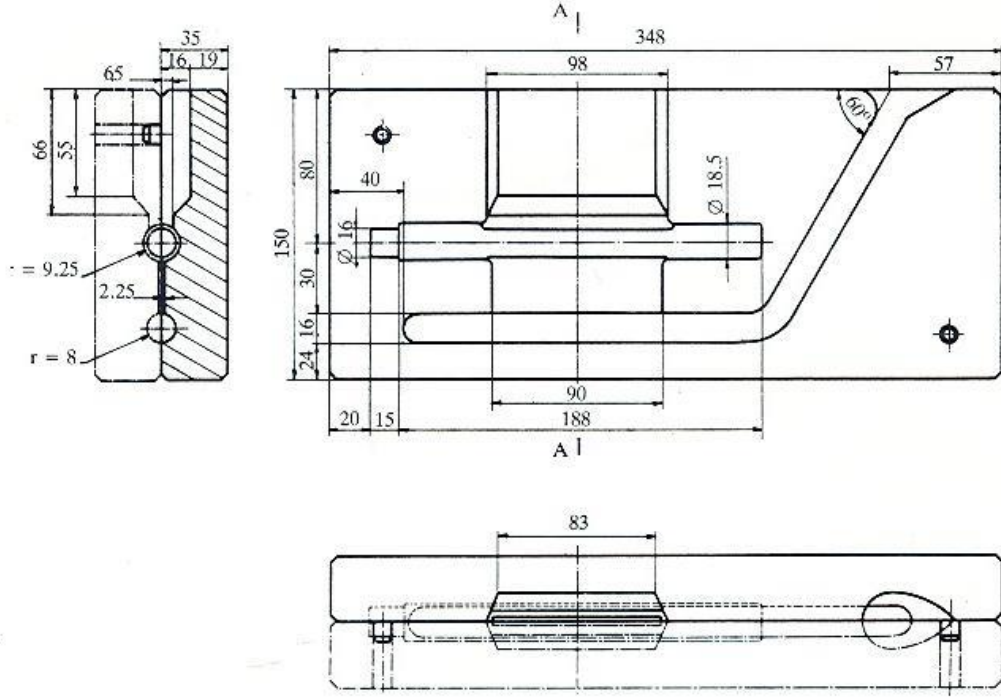
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde Al – Si – Mg döküm alaşım sisteminin nihai mekanik özelliklerini belirleyen önemli parametreler olan tane inceltme, modifikasyon ve ısıtım işlem kademeleri üzerinde yapılan çalışmalar anlatılmaktadır. Söz konusu çalışmalar çeşitli dökümhane pratikleri ve istatistiksel yöntemler kullanılarak yürütülmüş olup, deneysel tasarımlar, parametreler, sayısal değerler ve miktarlar profesyonel deneyimler ışığında belirlenerek incelenmiştir. Proje için yürütülen deneysel çalışmalarda tane inceltme, modifikasyon ve ısıtım işlemin malzemenin mekanik değerlere etkisi bireysel olarak incelenmeye çalışılmıştır.

Gerçekleştirilen bu çalışmalarda hammadde girişi, sıvı metal hazırlanması ve gaz giderme işlemleri gibi süreçler büyük oranda aynı olup, tekrarlama olmaması bakımından ilgili bölümlere ve birbirlerine refere edilerek belirtilmiştir. Aynı şekilde bu süreçler içerisinde kullanılan cihazlar, bu cihazların tabii oldukları uluslararası standartlar refere edilerek, ilgili bölümlere atıfta bulunulmuştur.

3.1. Tane İnceltme Çalışmaları

CMS Jant ve Mak. San. A.Ş.'de gerçekleştirilen çalışmada ise kimyasal kompozisyonları ekli tablolarda verilmiş olan iki tip master alaşım (Ti3B1 ve Ti5B1) kullanılarak tane büyüklüğü indeksi kapsamında etkileri incelenmiştir. Tane İnceltme çalışmaları için CMS Jant ve Mak. San. A.Ş. bünyesinde kullanılan OEM seri üretim şartnamelerinde refere edilmiş olan Fransız Standardı NF A 57-702'ye göre test çubukları tercih edilmiş olup test parçası ve kalıba dair resimler Şekil 3.1'de detayları verilmiştir.



Şekil 3.1: NF A 57-702 Standardına Göre Çekme Test Çubuğu Kalıbı (Bütün Ölçüler mm Cinsinden Verilmiştir.)



Şekil 3.2: Çekme Çubuğu ve Kalıbın Genel Görüntüsü

3.1.1. Hammadde

Deneylerde kullanılan hammadde; Norveçli Alüminyum üreticisi HYDRO firmasından tedarik edilen hazır alaşımlı % 100 orijinal A356.0 külçeleri olup, alaşımlı külçelerin seri üretimde kullanılabilirliğinin onayı için CMS’de kalite sistem rutini olan giriş kalite kontrolü için spektrometre çıktısı ise Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tane inceltme çalışmalarında kullanılan ticari olarak Ti5B1 tanımlaması ile bilinen 100 gramlık Al – Ti – B alaşımlı çubukların kimyasal kompozisyonları ise Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Ti5B1 Tane İnceltici Alaşımın Kimyasal Kompozisyonu

Element %	Ti	B	Si	Fe	V	Diğerleri	
						Herbiri	Toplam
Maksimum	5,5	1,1	0,3	0,3	0,2	0,04	0,10
Minimum	4,5	0,9	0,02	0,04	0,04		

Tablo 3.2: Spektrometre Analiz Çıktısı

Element	Si	Fe	Mg	Ti	Sr	Sb	P	B	Cu
Ortalama %	6,9546	0,1267	0,2413	0,1279	0,0412	0,0011	0,0001	0,0007	0,0005
Standart Sapma %	0,0653	0,3420	0,6637	0,4133	0,7179	20,9249	53,6518	8,2744	8,4717

Element	Mn	Zn	Cr	Zr	V	Ca	Na	Ni	Al
Ortalama %	0,0047	0,0036	0,0012	0,0015	0,0074	0,0015	0,0018	0,0042	92,4619
Standart Sapma %	2,4398	5,4599	5,4111	1,1559	0,4582	70,1033	13,4191	0,8693	0,0052

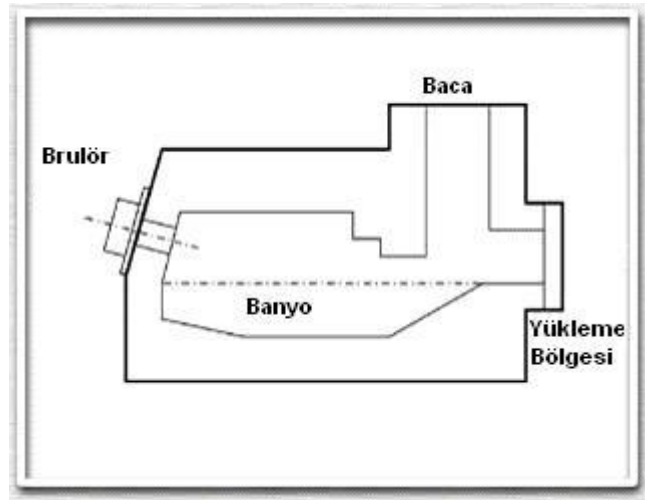
3.1.2. Sıvı Metal Hazırlama

Sıvı metal eldesi için kullanılan 2,5 ton / saat kapasiteli Alman menşeli, reverber tipi Striko devirmeli ocağında yapılmıştır. Külçeler için ergitme sıcaklığı 750 ± 30 °C olup, 500 kilogram sıvı metal 770 °C’de FOSECO Insural 140 modeli transfer potasına (Tablo 3.3) alınmıştır. Sıvı metalin transfer potasına alınmasından sonra gaz giderme işlemi için pota WBB Minerals Firmasının yapımı Rotorject modeli rotorlu gaz giderme cihazına alınmıştır. Gaz giderme cihazında 4 dakika süreyle 1 barlık basınçta % 99,95 safiyetindeki Azot gazı (N₂) ile birlikte 400 gr HMC – 37 flaks (curuf yapıcı) tozu ilavesiyle gaz giderme işlemi uygulanmıştır. İşlem sonrası yaklaşık 745 °C sıcaklığına düşen sıvı metalden gazlılık ve kimyasal analiz

numuneleri alınarak IDECO marka Termal Analiz ve Gazlılık Ölçüm cihazı ile gazlılık ölçümü ve ARL Metals Analyzer Spektrometre ile kimyasal analizi yapılmıştır (Şekil 3.6). Analiz raporlarından sonra uygunluğu onaylanan 745 °C'deki sıvı metal 700 kg kapasiteli indüksiyonlu bekletme ocağına alınmıştır.

3.1.2.1. Striko Reverber Ocağı

Sıvı metal eldesi için külçelerin ergitildiği STRIKO marka reverber ocağın yapısı Şekil 3.5'deki gibi olup banyo hacmi toplam 5 ton civarındadır. Ergitme hızı 2.5 ton/saat olan ocakta, doğalgaz ile çalışan brülörler banyo üzerinde konumlandırılmış olup yanma sonucu oluşan radyasyon ve konveksiyon ile gerekli ısı sağlanmaktadır. Şekil 3.5'de temsili yapısı görülen ocakta açığa çıkan sıcak yanma gazları ön ısıtma bölgesine açılan bir bacadan geçerek ergitmek için yüklenen alaşım külçelerine ön ısıtma sağlayarak ergitme işlemini hızlı ve ekonomik bir hale getirmektedir. Söz konusu ocak devrilebilir türde olup, sıvı metalin transfer potasına boşaltılması hidrolik sistem aracılığıyla fırının yatırılması ve bu sayede sıvı metalin eğim dolayısıyla akması yöntemi ile yapılmaktadır.



Şekil 3.5: Reverber tipi ergitme ocağı

3.1.2.2. Sıvı Metal Transferi

Sıvı metal transferi için FOSECO firmasından tedarik edilmiş INSURAL 140 harç ile hazırlanmış 500 kg kapasiteli transfer potası kullanılmıştır. Söz konusu malzeme, sıvı alüminyumun taşınması, dağıtılması ve kontrolü için tasarlanmış, asbest içermeyen yalıtım özellikli ürünler olup, arzu edildiği takdirde işlenebilir. Malzeme sıcaklık değişimine yüksek oranda dirençlidir. Alüminyum tarafından ısılatılma

özellığı çok düşüktür. Döküm esnasında mekanik sağlamlılığı ve sertlığı zarar görmesini engeller ve böylece refrakter malzemeden kaynaklanabilecek olan inklüzyon riskini azaltır. Malzemeye ait fiziksel bilgiler Tablo 3.3’de verilmiştir. [14]

Tablo 3.3: INSURAL 140 Fiziksel Özellikleri [14]

Maksimum Uygulama Sıcaklığı	1000 °C
Yoğunluk	1,4 gr/cm ³
Soğuk Kırılma Mukavemeti	4,5 MPa
Sıcak Kırılma Mukavemeti	5 MPa
Isıl Genleşme Katsayısı	3,9x10 ⁻⁶ K ⁻¹
745 °C’de Isıl İletkenliği	0,46 W/mK
Spesifik Isı Kapasitesi	1001 J/kgK

3.1.2.3. Gaz Giderme İşlemi

Gaz giderme işlemi WBB Minerals firmasına ait Rotorject modeli gaz giderme cihazında gerçekleştirilmiştir (Tablo 3.6). Cihaz flaks enjeksiyon prosesine göre özel olarak tasarlanmış olup; flaks tozu, 300 devir/dakika (rpm) hızında dönmekte olan silisyum karbürden yapılmış bir rotor silindir içerisinden azot gazı ile birlikte sıvı metal içerisine enjekte edilmektedir. Transfer potasında bulunan 500 kg sıvı metal yaklaşık 4 dakika boyunca 400 gr HMC 37 toz flaks (BKZ: Bölüm 1.2.3.1) ve %99,95 safiyetindeki azot gazı ile gaz giderme işlemine tabii tutulmuştur. Gaz giderme işlemi sonrası sıvı metal sıcaklığı 745 °C olarak ölçülmüştür (Tablo 3.4).

Tablo 3.4: Deneylerde Kullanılan Alaşımın Gaz Giderme Sonrası Ölçüm Sonuçları

Gaz Giderme Süresi (Dakika)	Havadaki Yoğunluk (gr/cm ³)	Vakumdaki Yoğunluk (gr/cm ³)	DI (Yoğunluk İndeksi)	Sıcaklık (°C)
4	2,649	2,549	3,8	770
4	2,659	2,607	2,0	758
4	2,667	2,632	1,3	745

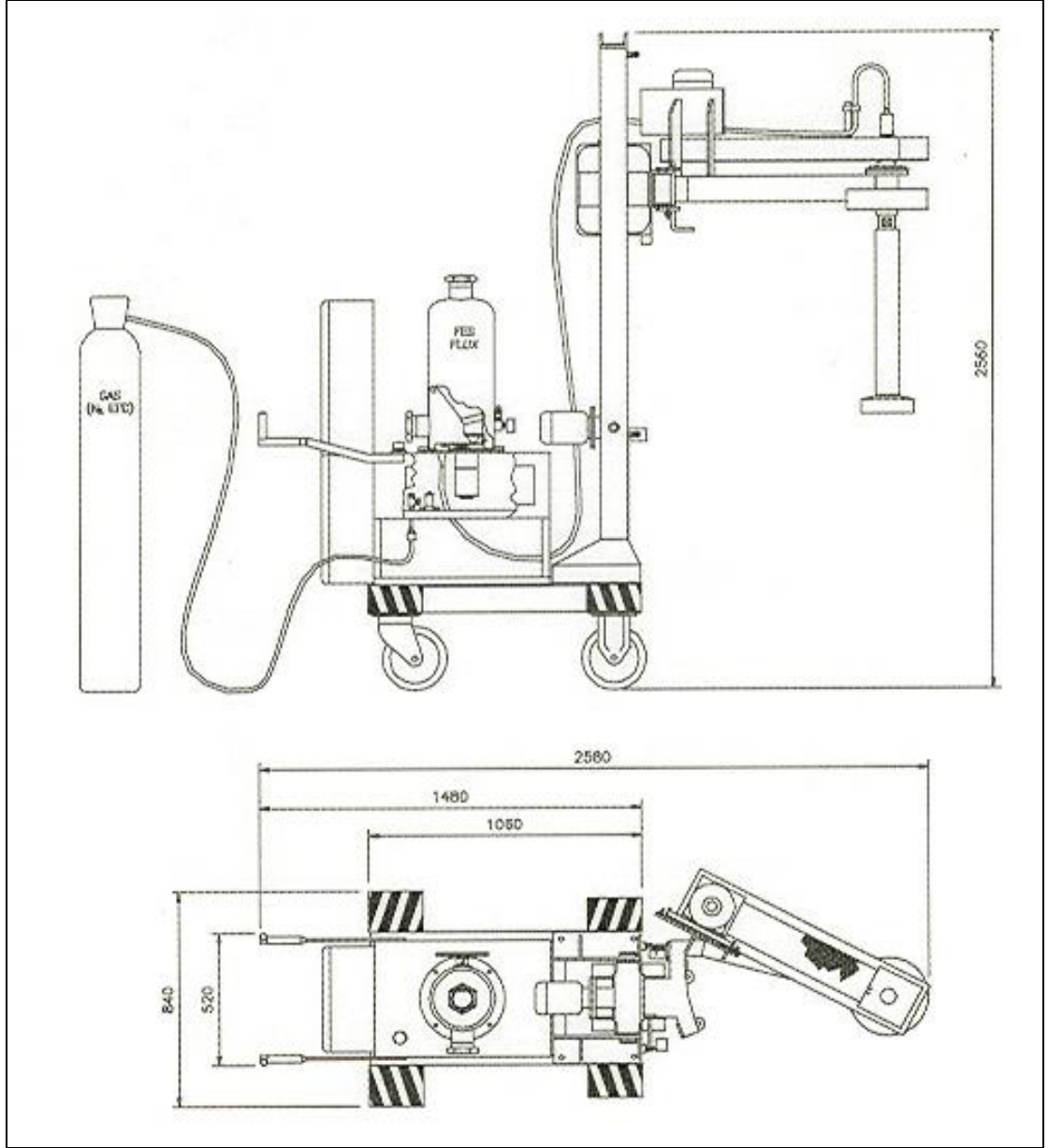
Tablo 3.5: Deneylerde Kullanılan Alaşımın Gaz Giderme Sonrası Ölçüm Sonuçları

Element	Si	Fe	Mg	Ti	Sr	Sb	P	B	Cu
Ortalama %	7,2974	0,1183	0,2178	0,1170	0,0093	0,0001	0,0003	0,0003	0,0012
Standart Sapma %	1,2977	2,1233	2,1549	1,8811	4,1784	51,3095	84,5810	2,3373	6,6403

Element	Mn	Zn	Cr	Zr	V	Ca	Na	Ni	Al
Ortalama %	0,007	0,0036	0,0011	0,0011	0,0056	0,0006	0,0047	0,0029	92,1973
Standart Sapma %	1,6466	7,1406	9,3216	1,3324	1,7065	73,6338	86,9443	2,0083	0,1092

Tablo 3.6: WBB Minerals Yapımı Rotorject Gaz Giderme Cihazına Ait Teknik Veriler [12]

WBB Minerals Rotorject Teknik Verileri	
Voltaj	240 / 110 V
Güç Gereksinimi	13 A
Frekans	50 Hz
Opsiyonel Frekans	60 Hz
Besleme Voltajı Harici Kontrol Voltajı	110 V
Kontrol Sistemi	Otomatik
Azot Gaz Operasyonu	Otomatik
Azot Gazı Besleme Basıncı	2 - 4 Bar (maks.)
Azot Gazı Çalışma Basıncı	0,3 - 1,5 Bar
Azot Gazı Çıkış Basıncı	0,3 - 1,5 bar
Azot Gazı Besleme Kontrolü	Alarmlı Seviye Kontrol
Azot Gazı Besleme Süresi (İşlem Esnasında)	0 - 30 Dakika (Zamanlayıcı İle Kontrol)
Azot Gazı Besleme Süresi (İşlem Öncesi)	0 - 215 Saniye
Azot Gazı Enjeksiyon Oranı	Değişken
Flaks Besleme Oranı	0 - 250 gr / dakika
Rotor Hızı	0 - 600 rpm
Makine Ağırlığı	400 kg
Rotor Mil Uzunluğu	900 mm
Rotor Yerden Yüksekliği (Maks.)	1360 mm
Rotor Yerden Yüksekliği (Min.)	460 mm
Rotor İlerleme Hızı	48 mm / saniye
Maksimum Yükseklik	2560 mm
Standart Rotor Şaft Uzunlukları	697 - 1062 mm



Şekil 3.7: Rotorject Gaz Giderme Cihazı Şematik Gösterimi Ve Ölçüler [12]

3.1.2.4. HMC 37

HMC 37, alüminyum alaşımlarında kullanılan beyaz toz flaks olup, sodyuma toleransı bulunmayan diğer alaşımlardan ziyade bütün alüminyum alaşımları ile kullanılabilen temizleyici ve gaz giderici flakstır. HMC 37, taşıyıcı gaz olarak azotun kullanıldığı Flaks Enjeksiyon Prosesine göre uygun ve özel olarak geliştirilmiştir [13]. Bu proses ile sıvı metal ve flaks partiküllerinin optimum şekilde temasını sağlamaktadır. Bu sayede flaksın oldukça verimli kullanımı sağlanırken metal temizliği daha iyi sağlanmaktadır.

HMC 37 küçük potalardan büyük reverber tipi ergitme ocaklarına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Flaksın toz yapıda olması sayesinde serbest akma ve sıvı metal içinde dağılma özelliğine sahiptir. Sıvı metal içerisine enjekte edilen flaks metalin içinde bulunan oksitlerin ve empürütelerin ayrışmasını ve içerde hapsolmuş gazların uzaklaşmasını sağlar.

Sıvı metal ve flaksın teması sırasında oluşan reaksiyonlar neticesinde kuru bir cüruf tabakası oluşarak sıvı metal yüzeyinde askıda kalır ve bu sayede cürufun kuru olması sebebiyle yüzeyden kolayca sıyrılarak alınabilir ve metal kaybının minimum olmasına yardımcı olur. Ayrıca bu flaks ile fırın duvarlarına yapışmış olan cüruf kolayca çözülebilmekte ve bu sayede temizleme işi kolaylaştırılarak, tamir işlemleri daha basitleştirilebilmektedir.

Kullanım yöntemi temel olarak aşağı belirtilen temellere dayanmaktadır:

1. Enjekte edilecek flaks miktarı genel olarak toplam sıvı metal ağırlığının % 0,2'si oranında olmalıdır. Ancak bu miktar sıvı metaldeki kontaminasyon derecesine göre arttırılabilir.
2. Flaksın ilavesi sıvı metal 640 – 720 °C sıcaklık aralığında iken bir Flaks Feeder veya Rotorject ile yapılmalıdır.
3. Uygulamadan sonra yüzeyde oluşan cüruf tabakası sıyrılarak metalden ayrılır.

3.1.3. Numune Dökümü

3.1.3.1. Kalıp Hazırlama

Sıvı metal hazırlama işlemleri esnasında yürütülen kalıp hazırlama çalışmalarında ise, normal prosedür olan kalıp yüzeyinin temizlenmesi, kalıbın kaplama için ısıtılması, kalıp yüzeyinin sıvı metal akışkanlığını iyileştirmek ve yapışmayı önlemek için kaplanması ve kalıbın tekrar ısıtılarak döküme hazır hale getirilmesi adımları izlenmiştir. Bu aşamalardan sırasıyla yüzey temizleme 200- 300 µ tane büyüklüğündeki ticari standartlarda cam tozunun 5 dakika süre ile yüzeylere 6 barlık basınçla püskürtülmesi ile sağlanmıştır. Yüzey temizleme işleminin ardından kaplama için numune kalıbı LPG kullanılarak direkt alevle 300 °C'ye ısıtılmış, sıcaklık her 5 dakikada bir RAYTEK marka Lazer Sıcaklık Ölçüm Tabancası (Emissivite = $\epsilon = 0,95$) ile ölçülmüş ve akabinde 10 Bomé konsantrasyonunda 300 gr DYCOTE 34 yüzey kaplaması olarak sprey boya tabancası ile tüm kalıp iç yüzeyine

kalınlığı $200 \pm 20 \mu\text{m}$ olacak şekilde uygulanmıştır. Söz konusu yüzey tretmanı DYCOTE 34'ün $200 \pm 20 \mu\text{m}$ kalınlığında kaplama sonrası ısı iletim katsayısı $725 - 750 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir [14]. Kaplama işleminin ardından kalıbın birbirlerine bakan iç yüzeylerinde (öpüşme yüzeyleri) bulunan ve tam olarak birleşmeyi engelleyebilecek artık kaplama kalıntıları tel fırça yardımıyla temizlenmiştir. Bu işlemin ardından kalıp kapatılarak döküme hazır hale gelmesi için tekrar LPG alevi ile doğrudan 500°C 'ye ısıtılmıştır.

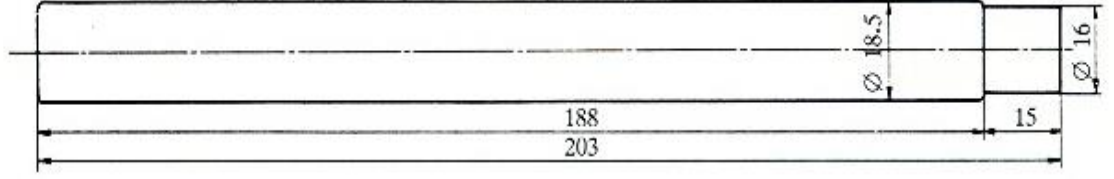
3.1.3.2. Döküm

Sıvı metal ve kalıp hazırlama işlemlerinin ardından döküm safhasına geçilmiş olup, numune kalıbının yolluk ve besleme dizaynından da anlaşılacağı üzere gravite döküm yöntemi prensibine göre bir kepçe yardımı ile sıvı metal kalıp içerisine doğrudan boşaltılmıştır. Kalıbın doldurulması için yaklaşık 1,2 kg sıvı metal kapasiteli ST 37 standardında çelik kepçe kullanılmış olup kalıba benzer şekilde yapışmayı önlemek adına DYCOTE 34 ile kaplanmıştır.

500°C sıcaklığına ısıtılan kalıp; sıcaklığı 400°C 'ye düştükten sonra $730 \pm 15^\circ\text{C}$ aralığındaki sıvı metal sıcaklığında döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Metal sıcaklığı her parça dökümü öncesi Heraeus Electro-Nite marka el pirometresi ile, kalıp sıcaklığı ise RAYTEK marka lazer pirometre ile ölçülmüştür. Bütün numune dökümleri esnasında kalıp sıcaklığı $400 \pm 30^\circ\text{C}$ aralığında tutulmuştur. Katılaşma işlemi için ayrıca bir soğutma uygulaması yapılmamış olup parçanın kalıp içerisinde kendiliğinden katılaşması sağlanmıştır. Dökümü tamamlanan her parça normal şebeke suyu ile dolu kapta su verilerek soğutulmuştur. Soğutma işleminin ardından markalanan parçalar işlenmek üzere torna atölyesine aktarılmıştır.

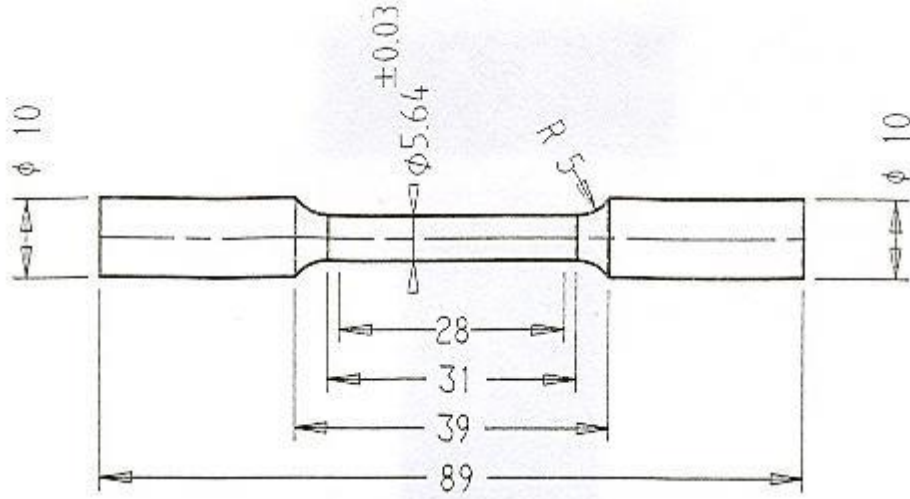
3.1.4. Numune Hazırlama

Dökümü tamamlanan parçalar besleyici ve yollukları kesildikten Şekil 3.8'da ölçüleri verilen parçalar halinde hazırlanmıştır. Deneylerin tekrarlamalı yapılması sebebiyle Şekil 3.8'daki parçalar iki eşit parça halinde ortadan kesilerek, markalanmış ve çekme testi için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.8: Çekme Test Çubuğu Döküm Sonrası Ölçüleri

Isıl işlemi tamamlanan numuneler tornada 5,64 mm çapında işlenerek çekme testi için hazır hale getirilmişlerdir. Numunelerin işleme ölçüleri CMS jant A.Ş.'de kullanılan OEM şartnameleri doğrultusunda belirlenmiş olup çekme test çubuğunun teknik resmi Şekil 3.9'da verilmiştir.

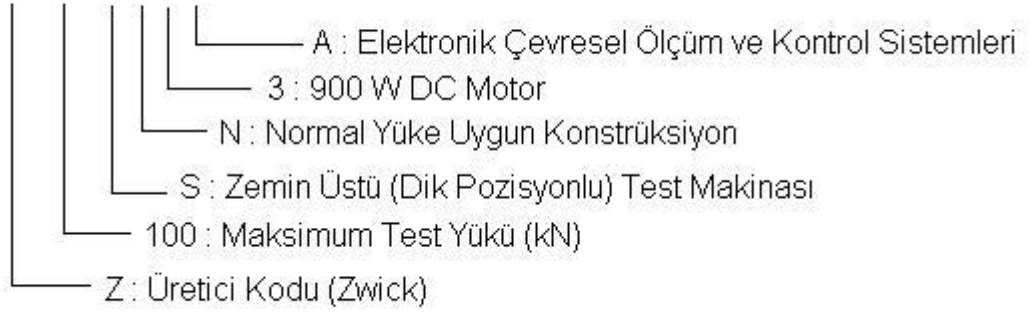


Şekil 3.9: Çekme Testi Numunesi Ölçüleri (Tüm ölçüler mm cinsindendir.)

3.1.5. Çekme Testleri

Yapılan deneylerin malzemeye etkisinin sonuçlarını görmek için CMS Jant ve Mak. San. A.Ş.'ye ait "Zwick Z100/SN3A" modeli çekme testi cihazı kullanılmıştır. Tüm numunelerin çekme testleri EN ISO 10002-1 Çekme Testi Standart'ına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu malzeme test cihazı teknik ve ticari literatürde 100 kN maksimum test yükü kapasiteli zemin üstü çekme testi cihazı olarak tanımlanmaktadır [15]. Cihaz çekme testi için özel olarak tasarlanmış olup demir esaslı ve demir dışı metaller, sert ve takviyeli plastikler, tahta ve benzer malzemelerin testleri için uygundur. Makineye ait tanımlama (model adı) bütün karakteristikleri içermektedir (Şekil 3.10).

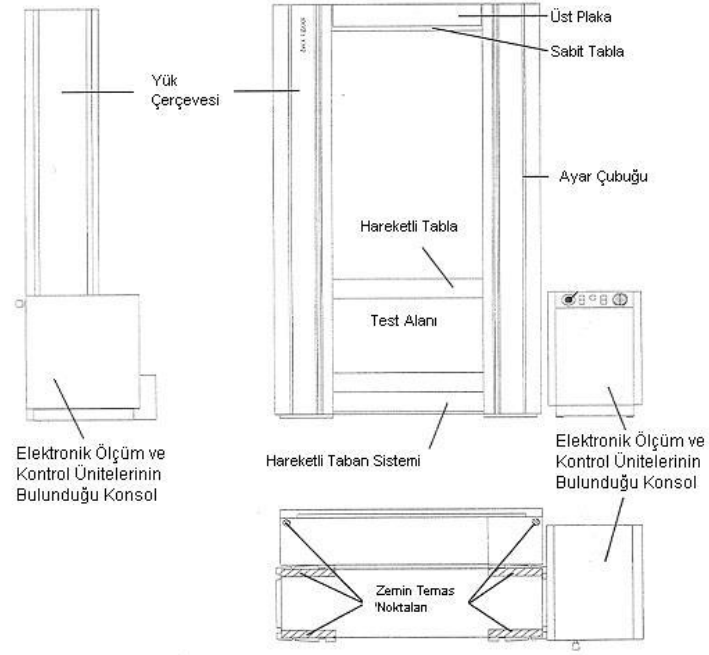
Z100/SN3A



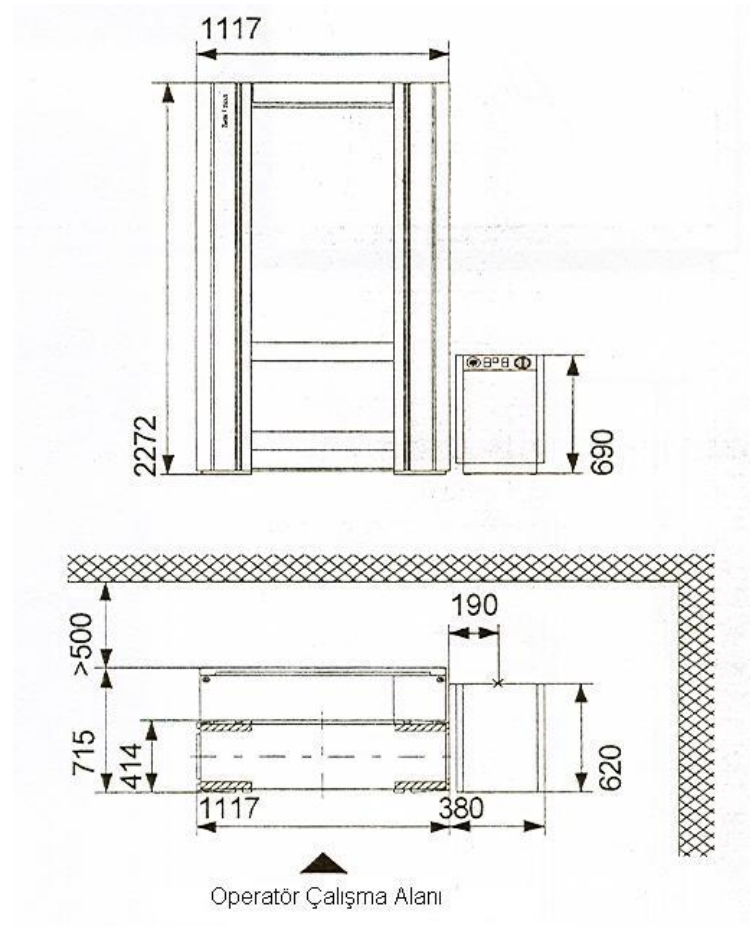
Şekil 3.10: Çekme Test Cihazı Kodlama Tanımlaması

Söz konusu test cihazı aşağıda belirtilen uluslararası teknik spesifikasyonlar ve standartlar kapsamında onaylanmıştır;

- EN 10002-1 : Metalik Malzemeler – Çekme Deneyi : Ortam Sıcaklığında Deney Metodu (TS 138 – Türk Standartları Enstitüsü)
- DIN 51233 : Malzeme test cihazları,
- VBG 5 : Güç ile çalışan mekanizmalar,
- DIN 20066 : Akışkan teknolojisi (Hortumlar),
- DIN 24346 : Akışkan teknolojisi (Hidrolik Sistemler),
- DIN 51519 : Yağlayıcılar (ISO Viskozite Deklerasyonu),
- DIN 51524 : Basınç sıvıları; hidrolik yağlar,
- CHV 12 : Basınçlı kaplara ait düzenlemeler,
- DIN 2353 : Kaynaksız kompresyon aparatları.



Şekil 3.11: Çekme Cihazı Genel Görünüşü



Şekil 3.12: Çekme Test Cihazı Ölçüleri ve Basma Alanı

Tablo 3.7: Çekme Test Cihazı Teknik Verileri**Teknik Veriler**

Tip / Model

Z100/SN3A

Yükleme Bölgesi

Çekme / Basma İçin Maksimum Test Yüğü	100 kN
Yükseklik	2272 mm
Genişlik	1117 mm
Derinlik	715 mm
Elektronik Konsol Genişliğı	380 mm
Duvar Mesafesi	>500 mm

Ağırlık

Elektronik Konsol İle Birlikte	1080 kg
Aksesuarsız	1000 kg
Tipik Aksesuarları İle Birlikte	1250 kg

Alan İhtiyacı

Salt Temas Alanı	307 cm ²
Yükleme Bölgesi Temel Alanı	4537 cm ²
Spesifik Zemin Yüğü:	
Aksesuarlara bağılı olarak	4,1 kg/cm ²
% 50 Güvenlik Payı İle	6,2 kg/cm ²

Zemin Yüğü

Aksesuarlara bağılı olarak	0,28 kg/cm ²
% 50 Güvenlik Payı İle	0,42 kg/cm ²

Test Alanı Genişliğı	630 mm
Alt Test Alanı Yüksekliğı (Ayarlanabilir Tabla İle)	1812 mm
Üst Test Alanı Yüksekliğı (Ayarlanabilir Tabla İle)	1757 mm
Ortam Sıcaklığı	10 - 35 °C
Nem	% 20 - 90
Gürültü Seviyesi	58 dB (A)

Hareketli Sistem

Tabla Hareket Hızı	0,001 - 200 mm/dak
Hız Set Değeri Doğruluğı	% 1
Hareketli Sistemin İlerleme Çözünürlüğü	0,0083 µm
Pozisyon belirleme, tekrarlanabilirlik doğruluğı	± 2 µm

Elektronik Ölçüm Ve Kontrol

Güç Ölçümü: (Yük Hücreğine Bağılı Olarak)	0/0 ile 5/1 seviyesinde
Analog Kanal Çözünürlüğü	maks. 1250000 hane
İç Kayıt Hızı	400 Hz
Bilgisayara Test Verisi Aktarım Oranı	50 Hz
Çıkış Arayüzü	RS485

3.2. Isıl İşlem Çalışmaları

Isıl işlem parametrelerinin döküm parçaları üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için CMS Jant ve Mak. San. A.Ş. bünyesinde kullanılan OEM seri üretim şartnamelerinde refere edilmiş olan Fransız Standardı NF A 57-702'ye göre test çubukları tercih edilmiş olup test parçası ve kalıba dair resimler Şekil 3.1 ve 3.2'de detayları ile verilmiştir.

3.2.1. Deneysel Tasarım

Çalışma için yapılacak deneylerin belirlenmesinde öncelikle ortaya T6 tretmanında bulunan adımlar ve mevcut parametreler belirlenmiş olup, buna göre;

- Çözeltiye alma sıcaklığı,
- Çözeltiye alma süresi,
- Çözeltiye alma sonrası su verme safhasından önce bekleme süresi,
- Su verme ortamı sıcaklığı,
- Su verme süresi,
- Su verme sonrası, yaşlandırma öncesi bekleme süresi
- Yaşlandırma sıcaklığı,
- Yaşlandırma süresi

parametreleri deneysel tasarımda göz önüne alınmış olup, literatür verileri ve dökümhane pratiğinden gelen tecrübelerle istinaden alaşım içerisindeki magnezyum seviyesi de mekanik dayanıma etkinin görülebilmesi için göz önünde bulundurulmuştur.

Deneyler için etkisi incelenilmek istenen parametrelerin çokluğundan dolayı aynı oranda (faktöriyel olarak) artan deney sayısının fazlalığından dolayı endüstride oldukça yaygın kullanım alanı bulan “Taguchi Deneysel Tasarım” (Taguchi DOE) tekniği kullanılmış olup, deney tablosunun detaylandırılmasında Minitab R14 yazılımı tercih edilmiş ve tablo tam anlamıyla oluşturulmuştur. Buna göre, yukarıda belirtilen toplam 9 parametre için üç farklı seviye belirlenmiş olup Tablo 3.6'deki dizilim hazırlanmıştır;

Tablo 3.8: Deneysel Tasarım Parametreleri Ve İlgili Parametrelerin Seviyeleri

Parametre		Seviye		
		1	2	3
1	Magnezyum Yüzdesi (% Mg)	0,20	0,30	0,40
2	Solüsyona Alma Sıcaklığı (T_{sol}), °C	525	535	545
3	Solüsyona Alma Süresi (t_{sol}), saat	4	6	8
4	Su Verme Öncesi Bekleme Süresi (t_{wait}), sn	20	30	40
5	Su Verme Suyu Sıcaklığı (T_{water}), °C	40	60	80
6	Su Verme Süresi (t_{quench}), dakika	5	10	15
7	Yaşlandırma Öncesi Bekleme Süresi (t_{wait2}), saat	0,5	12	24
8	Yaşlandırma Sıcaklığı (T_{ageing}), °C	140	160	180
9	Yaşlandırma Süresi (t_{ageing}), saat	2	4	6

Tablo 3.8’deki parametre ve seviyelere bakılarak mühendislik anlayışta klasik bir yöntem olan her seferinde bir faktörün değiştirilip diğerlerinin sabit tutulması mantığına dayanan deneme yanılma metodu parametre çokluğundan dolayı bir çok deneyin gerçekleştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Ancak 1990’lı yıllarda Dr. Taguchi tarafından geliştirilen matematiksel istatistik metodu ile bu parametrelerin farklı seviyelerini bir matematiksel formül yardımıyla düzenlenerek, o seviyeleri temsil edecek en uygun deney şartlarının bir araya getirilmesini sağlamaktadır. Bu sebeple yapılan çalışmada da deneylerin hızlı ve parametre seviyelerini en iyi temsil edecek şekilde düzenlenebilmesi için bu metoda başvurulmuştur. Söz konusu 9 parametrenin üç seviyeli diziliminin Minitab yazılımına yerleştirilmesi ile oluşturulan tabloda toplam 27 adet deney ile bu parametrelerin birbirleriyle etkileşimleri ve nihai ürün üzerindeki etki ağırlıkları tespit edilebilir hale getirilmiştir. Buna göre yazılım yüklemesi sonucunda Tablo 3.9’daki gibi bir dizilim elde edilmiştir.

Tablo 3.9: Minitab Yazılımı İle Hazırlanmış Tam Faktöriyel Deneysel Tasarım Tablosu

Taguchi Deneysel Tasarım Tablosu										
Deney No	% Mg	T _{sol}	t _{sol}	t _{bekleme}	T _{su}	C _{su}	t _{su verme}	t _{bekleme2}	T _{aging}	t _{aging}
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3

Tablo 3.10: Taguchi Deneysel Tasarım Parametre Tablosu

Taguchi Deneysel Tasarım Tablosu										
Deney Kodu	Deney No	% Mg	T _{sol} (°C)	t _{sol} (sa)	t _{wait} (sn)	T _{water} (°C)	t _{quench} (dk)	t _{wait 2} (sa)	T _{aging} (°C)	t _{aging} (sa)
A	1	0,2	525	4	20	40	5	0,5	140	2
	2		525	4	20	60	10	12	160	4
	3		525	4	20	80	15	24	180	6
	4		535	6	30	40	5	0,5	160	4
	5		535	6	30	60	10	12	180	6
	6		535	6	30	80	15	24	140	2
	7		545	8	40	40	5	0,5	180	6
	8		545	8	40	60	10	12	140	2
	9		545	8	40	80	15	24	160	4
B	10	0,3	525	6	40	40	10	24	140	4
	11		525	6	40	60	15	0,5	160	6
	12		525	6	40	80	5	12	180	2
	13		535	8	20	40	10	24	160	6
	14		535	8	20	60	15	0,5	180	2
	15		535	8	20	80	5	12	140	4
	16		545	4	30	40	10	24	180	2
	17		545	4	30	60	15	0,5	140	4
	18		545	4	30	80	5	12	160	6
C	19	0,4	525	8	30	40	15	12	140	6
	20		525	8	30	60	5	24	180	2
	21		525	8	30	80	10	0,5	180	4
	22		535	4	40	40	15	12	160	2
	23		535	4	40	60	5	24	180	4
	24		535	4	40	80	10	0,5	140	6
	25		545	6	20	40	15	12	180	4
	26		545	6	20	60	5	24	140	6
	27		545	6	20	80	10	0,5	160	2

Oluşturulan bu tabloda parametre seviyelerini gösteren değerler Tablo 3.9’da yerine yerleştirildiğinde Tablo 3.10’deki nihai tasarım şeması ve her bir deney için spesifik ve birbirlerinden farklı deney şartları elde edilmiştir. Örneğin bu tablodaki 5. deneyde numunelerin şartları sırasıyla;

- % 0,20 Magnezyum içeren A356.0 alaşımdan dökülmüş deney numunesi
- 535 °C’de 6 saat çözeltiye alma safhası
- Çözeltiye alma işleminden çıktıktan sonra 30 saniye ortam sıcaklığında bekletilmesi,
- Bu bekleme süresi sonunda 60 °C’de 10 dakika boyunca su verilmesi,
- Su verme işleminden sonra 12 saat bekletilerek, 180 °C’de 6 saat boyunca yapay yaşlandırma işlemine tabii tutulması olarak belirlenmiştir.

Deneylerin doğrulaması için yazılımda deney sayısı 2 olarak belirlenmiş ve her şart için deneyler iki defa yapılmıştır. Bunun sonucunda toplam 54 deney yapılmıştır. Deneysel tasarım safhası tamamlandıktan ve deney şartları net olarak ortaya konulduktan sonra test parçalarının dökümüne başlanmıştır. Her deney setinde veri dağılımının daha iyi görülebilmesi için Şekil 3.1’de kalıp ebatları ve döküm hali ölçüleri belirtilmiş olan 5 adet numune dökülmüş olup, toplamda 135 adet numune dökümü yapılmıştır. Deneylerin iki defa yapılması sebebiyle dökülen bu parçalar eşit iki parçaya bölünerek 270 adet ısıtılma hazır işlenmemiş (döküm hali) test çubuğu oluşturulmuştur.

Test parçalarının dökümü belirlenen Magnezyum seviyelerine göre sırasıyla ve tek seferde yapılmıştır.

3.2.2. Hammadde

Deneylerde kullanılan hammadde; HYDRO firmasından tedarik edilen hazır alaşımlı % 100 orjinal A356.0 külçeleri olup alaşımlı külçelerin seri üretimde kullanılabilirliğinin onayı için CMS’de kalite sistem rutini olan giriş kalite kontrolü için spektrometre çıktısı ise Tablo 3.11’de verilmiştir.

Tablo 3.11: Spektrometre Analiz Çıktısı

Element	Si	Fe	Mg	Ti	Sr	Sb	P	B	Cu
Ortalama %	7,2281	0,1257	0,2302	0,1335	0,0392	-	-	0,0007	0,0003
Standart Sapma %	1,0752	1,5737	1,5044	1,3247	0,8189	-	-	1,5606	1,8981

Element	Mn	Zn	Cr	Zr	V	Ca	Na	Ni	Al
Ortalama %	0,0065	0,0029	0,0011	0,0010	0,0060	0,0012	0,0011	0,0039	92,2014
Standart Sapma %	1,6680	6,2501	12,1097	1,2679	3,7711	2,1504	0,4053	0,3035	0,0877

3.2.3. Sıvı Metal Hazırlama

Sıvı metal eldesi için Bölüm 3.1.2. Sıvı Metal Hazırlama kısmında detayları verilmiş olan kademeler rutin prosedür çerçevesinde hazırlıklar ve işlemler yapılmıştır. 500 kilogram sıvı metal 770 °C’de transfer potasına alınmasından sonra gaz giderme işlemi 4 dakika süreyle 1 barlık basınçta % 99,95 safiyetindeki Azot gazı (N₂) ile birlikte 400 gr HMC – 37 flux (curuf yapıcı) tozu ilavesiyle gaz giderme işlemi uygulanmıştır. İşlem sonrası yaklaşık 735 °C sıcaklığına düşen sıvı metalden gazlılık ve kimyasal analiz numuneleri incelenmiştir (Tablo 3.12). Analiz sonucunda uygunluğu onaylanan 730 °C’deki sıvı metal bekletme ocağına alınmıştır.

Tablo 3.12: Deneylerde Kullanılan Alaşımın Gaz Giderme Sonrası Ölçüm Sonuçları

Gaz Giderme Süresi (Dakika)	Havadaki Yoğunluk (gr/cm ³)	Vakumdaki Yoğunluk (gr/cm ³)	DI (Yoğunluk İndeksi)	Sıcaklık (°C)
4	2,658	2,585	2,7	770
4	2,662	2,592	2,6	757
4	2,667	2,631	1,3	736

Gaz giderme işlemi sonrası bekletme ocağına alınan sıvı metalden alınan kıyasla analiz sonucuna (Tablo 3.13) göre deneysel tasarımın önemli parametrelerinden olan Mg yüzdesi 0,20 civarında olduğundan dolayı numune dökümü yapılmaya başlanılmıştır.

Tablo 3.13: Deneysel Tasarımın % 0,20 Mg İçerikli Numunelerin Dökümü İçin Spektrometre Uygunluk Raporu

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni
Ortalama %	7,2073	0,1212	0,0019	0,0034	0,2030	0,0008	0,1054	0,0008	0,0037

Element	Pb	Sn	Na	Ca	Sr	Sb	Al
Ortalama %	0,0004	-	0,0002	0,0007	0,0259	0,00235	92,3170

3.2.4. Numune Dökümü

Numune parçaların üretimi için daha önce Bölüm 3.1.3’de belirtilen kalıp hazırlama ve döküm yöntem ve prosedürleri aynen takip edilerek toplam 161 adet çekme çubuğu dökümü yapılmıştır. Buna göre; Bölüm 3.2.3, Tablo 3.13’de kimyasal analiz raporu verilen toplam olarak 56 adet %0,20 Mg içerikli çekme testi numunesi dökümü yapıldıktan sonra ergiyik içerisine saf Mg eklenerek kimyasal analiz uygunluk onayı (Tablo 3.14) alındıktan sonra % 0,30 Mg içerikli numunelerin dökümü gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.14: Deneysel Tasarımın % 0,30 Mg İçerikli Numunelerin Dökümü İçin Spektrometre Uygunluk Raporu

Element	Si	Fe	Mg	Ti	Sr	Sb	P	B	Cu
Ortalama %	7,2041	0,1164	0,3149	0,1115	0,0094	0,0016	-	0,012	0,0003

Element	Mn	Zn	Cr	Zr	V	Ca	Na	Ni	Al
Ortalama %	0,0023	0,0027	0,0011	0,0009	0,0047	-	0,0001	0,003	92,2109

Alaşımdaki magnezyum içeriği % 0,30 olan deneysel tasarım kademesine ait numunelerin dökümü toplam 55 adet olduktan sonra, sıvı metalden kimyasal analiz numunesi alınarak Mg seviyesi kontrol edilmiştir. Analiz sonucuna göre sıvı metal içerisine saf Mg eklenerek içeriğin % 0,40 olması sağlanmış (Tablo 3.15) ve deneysel tasarımın üçüncü fazını oluşturan numunelerin dökümü yapılmıştır.

Tablo 3.15: Deneysel Tasarımın % 0,40 Mg İçerikli Numunelerin Dökümü İçin Spektrometre Uygunluk Raporu

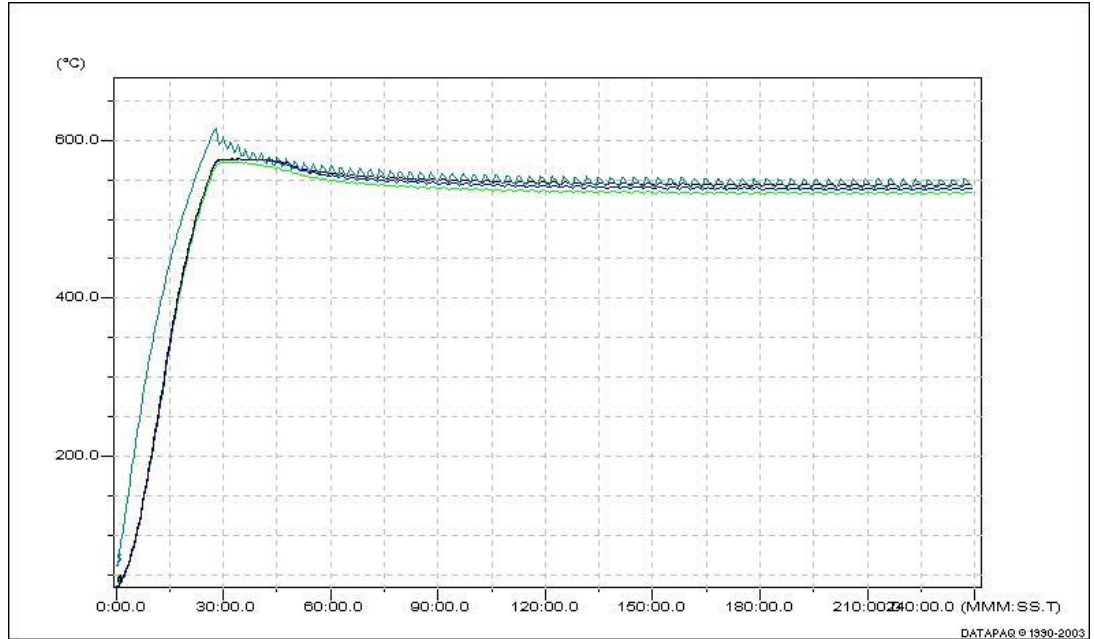
Element	Si	Fe	Mg	Ti	Sr	Sb	P	B	Cu
Ortalama %	7,4882	0,1245	0,4021	0,1069	0,0085	0,0006	0,0002	0,0004	0,0014

Element	Mn	Zn	Cr	Zr	V	Ca	Na	Ni	Al
Ortalama %	0,0077	0,0049	0,0014	0,0012	0,0057	0,0002	0,0004	0,0034	91,8268

Toplam 50 adet numune dökümü yapıldıktan sonra % 0,40 Mg içerikli test çubukları da tamamlanarak deneysel çalışmaların döküm safhası tamamlanmıştır.

3.2.5. Isıl İşlem

Dökümü tamamlanan parçalar besleyici ve yollukları kesildikten Şekil 3.8’de ölçüleri verilen parçalar halinde hazırlanmıştır. Deneylerin tekrarlamalı yapılması sebebiyle Şekil 3.8’deki parçalar iki eşit parça halinde ortadan kesilerek, markalanmış ve ısıtma işlemine hazır yarı mamül haline getirilmiştir.



Şekil 3.13: Etüv Termograf Çıktısı

Isıl işlem deneylerine geçilmeden önce kullanılan kül ocağının set değeri ve gerçek sıcaklık değerlerinin doğrulanması için rejim firesi olan aynı ölçülerdeki çubukların ön, orta ve arka bölgesine NiCr - Cr termokupl teli bağlanarak DATAPAQ marka termograf ile 4 saat süre ile 540 °C’de ölçüm yapılmıştır. Doğrulama işlemine ait Şekil 3.13’deki termograf grafiğine göre 540 °C’ye set edilmiş ocağın boş iken atmosfer sıcaklığının 600 °C civarına ulaştığı görülmektedir. Ancak, parçaların şarjı ile birlikte set sıcaklığına geldiği ve geri kalan süre boyunca parçaların ve atmosfer sıcaklığının set sıcaklığı ± 5 °C seviyesinde seyrettiği görülmüş, böylece ocak ve set panelindeki değer doğrulanmıştır. Doğrulamanın ardından deneylere başlanmıştır.

3.2.6. Numune İşleme

Isıl işlemi tamamlanan numuneler Bölüm 3.1.5.’de belirtilen ve detaylı teknik ölçüleri verilen 5,64 mm çapında olacak şekilde torna tezgâhında işlenmiş ve çekme testi için hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.9).

3.2.7. Çekme Testleri

Çekme testleri Bölüm 3.1.6.’da detayları belirtilen CMS Jant ve Mak. San. A.Ş.’ye ait Zwick marka çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

4.1. Deneysel Sonuçlar

Çalışmanın bu safhasında deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler verilmiştir. Bu veriler tane inceltme çalışmaları için kimyasal analiz, makrografik inceleme ve mekanik değerleri kapsamakta olup, ısıtıl işlem çalışmaları için çekme testleri sonucu elde edilen mekanik değerler kısmi olarak verilmiştir.

4.1.1. Tane İnceltme Çalışmaları

Çalışmalar sırasında dökülen çekme test çubukları ile eş zamanlı alınan ocak (sıvı metal) kimyasal analizleri ve çekme testlerinden sonra çekme çubukları üzerinden alınan kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1 : TiB İlavesi İle Ocak Kimyasal Kompozisyon Değişimi

OCAK NUMUNELERİ KİMYASAL ANALİZLERİ							
PARÇA SIRA NO	%Si	%Fe	%Mg	%Ti	%B	%Sr	İLAVE Ti-B ADEDİ
1	7,2890	0,0924	0,3280	0,0971	0,0002	0,0406	0
2	7,1004	0,0924	0,3501	0,1000	0,0006	0,0391	3
3	7,1690	0,0924	0,3092	0,1033	0,0007	0,0388	6
4	7,0952	0,0917	0,2902	0,1063	0,0009	0,0379	9
5	7,1139	0,1034	0,2809	0,1166	0,0026	0,0379	12
6	7,0463	0,0946	0,3097	0,1300	0,0043	0,0364	17
7	7,0133	0,0948	0,3063	0,1473	0,0058	0,0347	27
8	7,0773	0,0974	0,3179	0,1917	0,0142	0,0356	37

Tablo 4.2 : TiB İlavesi İle Çekme Çubuğu Kimyasal Kompozisyon Değişimi

ÇEKME ÇUBUKLARI KİMYASAL ANALİZLERİ

PARÇA SIRA NO	%Si	%Fe	%Mg	%Ti	%B	%Sr	İLAVE Ti-B ADEDİ
1	6,5135	0,7820	0,3143	0,1004	0,0002	0,0458	0
2	6,8931	0,0952	0,3408	0,0985	0,0003	0,0362	3
3	7,0415	0,0912	0,3030	0,1012	0,0007	0,0406	6
4	6,9873	0,0921	0,2904	0,1057	0,0007	0,0328	9
5	6,9858	0,0943	0,3246	0,1103	0,0014	0,0333	12
6	6,6225	0,1001	0,2853	0,1286	0,0037	0,0320	17
7	6,6672	0,0919	0,3045	0,1498	0,0058	0,0293	27
8	6,6331	0,0926	0,2934	0,1983	0,0158	0,0368	37

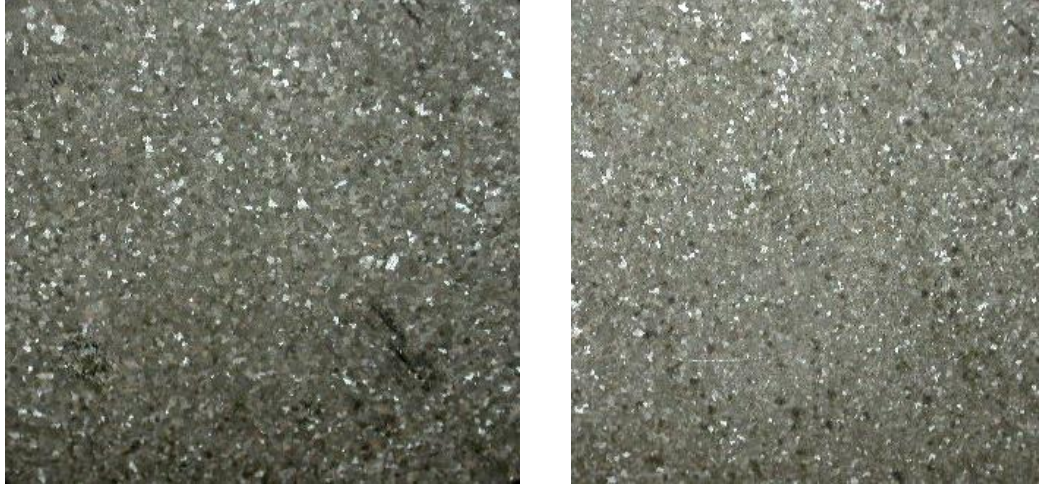
DAS ölçümü için dökülen mikroyapı numuneleri üzerinden analiz için her bir tanesinin üç farklı bölgesinden dendrit uzunluğu ölçümü yapılmıştır. Buna göre, bir numune için DAS değeri olarak bu üç bölgedeki dendrit uzunluğunun ortalama değeri (mean value) ve temel olarak da bunların ortalaması analizler için temel alınmıştır. Dökümü yapılan çekme çubuklarının testler sonucunda elde edilen mekanik değerleri ve mikroyapı numunelerinin DAS ölçüm sonuçlarının ortalamaları Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3 : TiB İlavesi İle Mekanik Özelliklerin Değişimi

MEKANİK ÖZELLİKLER

PARÇA SIRA NO	Sertlik (Brinell 5/250)	E-Modülü	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Kopma Mukavemeti (N/mm ²)	% Uzama	DAS	İLAVE Ti-B ADEDİ
1	54,5	70974	81,76	181,83	11,74	27,96	0
2	49,7	79116	80,73	183,12	11,88	32,20	3
3	50,4	78712	78,71	174,64	11,22	32,82	6
4	50,6	70187	78,09	170,63	10,90	31,54	9
5	51,4	76187	77,15	174,45	11,32	28,60	12
6	50,3	75741	76,54	171,66	10,34	27,38	17
7	51,3	68959	79,04	178,73	11,08	22,77	27
8	51,2	75068	78,21	174,89	8,82	28,35	37

Makroyapı incelemesi için dökülen numunelerde ise parlatılıp dağlandıktan sonraki görüntüleri Şekil 4.1 ve 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Makrografik Yapı, Sağda: 1 No'lu Numune , Solda : 3 No'lu Numune

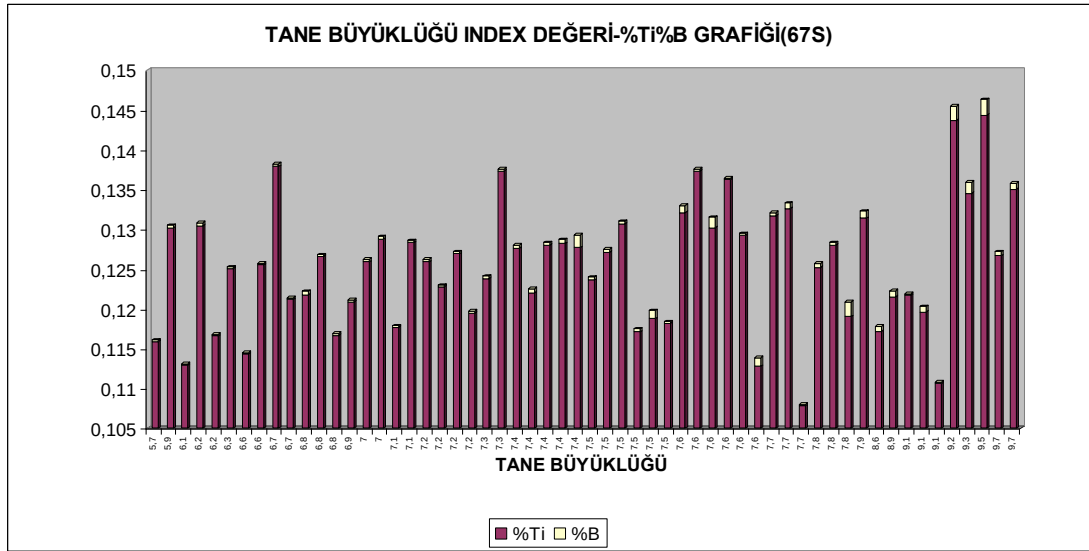


Şekil 4.2 : Makrografik Yapı, Sağda: 6 No'lu Numune , Solda : 8 No'lu Numune

Bu çalışmanın ardından, alaşım içerisindeki Ti ve B miktarının tane büyüklüğü üzerine etkisinin incelenebilmesi için %TiB ve tane büyüklüğü indeksi karşılaştırması yapılmıştır. Makrografik olarak belirli bir alan içerisindeki tane miktarının belirlendiği tane büyüklüğü indeksi firmaya ait IDECO marka termal analiz cihazında gerçekleştirilmiş olup seri üretim şartları dâhilinde faktörler değiştirilmeden toplam 58 sıvı metal şarjı üzerinden alınan veriler incelenmiştir. Buna göre söz konusu veriler Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 : % Ti - % B ve Tane Büyüklüğü İndeksi Çalışma Sonuçları

TANE BÜYÜKLÜĞÜ İNDEKSİ	%Ti	%B
5,7	0,1159	0,0002
5,9	0,1302	0,0003
6,1	0,1129	0,0002
6,2	0,1304	0,0004
6,2	0,1166	0,0002
6,3	0,1251	0,0002
6,6	0,1143	0,0002
6,6	0,1255	0,0002
6,7	0,1379	0,0003
6,7	0,1212	0,0002
6,8	0,1218	0,0004
6,8	0,1266	0,0002
6,8	0,1167	0,0002
6,9	0,1209	0,0002
7	0,1259	0,0003
7	0,1288	0,0003
7,1	0,1177	0,0002
7,1	0,1283	0,0003
7,2	0,1259	0,0003
7,2	0,1228	0,0002
7,2	0,1269	0,0003
7,2	0,1195	0,0002
7,3	0,1238	0,0003
7,3	0,1373	0,0003
7,4	0,128	0,0003
7,4	0,1282	0,0005
7,4	0,1277	0,0016
7,5	0,1236	0,0004
7,5	0,1271	0,0004
7,5	0,1182	0,0002
7,6	0,1321	0,0009
7,6	0,1373	0,0003
7,6	0,1302	0,0013
7,7	0,1317	0,0004
7,7	0,1326	0,0007
7,7	0,1078	0,0002
7,8	0,1252	0,0005
7,8	0,128	0,0003
7,8	0,119	0,0019
7,9	0,1314	0,0009
8,6	0,1172	0,0006
8,9	0,1215	0,0008
9,1	0,1217	0,0002
9,1	0,1106	0,0002
9,2	0,1437	0,0018
9,3	0,1345	0,0014
9,5	0,1443	0,002
9,7	0,1267	0,0005



Şekil 4.3 : Tane Büyüklüğü İndeksi - %TiB Değişim Grafliği

4.1.2. Isıl İşlem Çalışmaları

Isıl işlem çalışmaları sonucunda temelde 27 farklı deneyden ve birbirine benzemeyen parametrelerden oluşan iki tekrarlı deneysel tasarım ile toplamda 54 ısıl işlem denemesi gerçekleştirilmiş ve bu denemelere ait numunelerin çekme testleri sonucunda elde edilen mekanik değerler sırasıyla % 0,20 – 0,30 – 0,40 Mg içeriği için kısmi olarak Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5 : Isıl İşlem Deneysel Çalışmalarının Kısmi Sonuçları

% Mg	1. Deneme			2. Deneme		
	Akma Rp 0.2 N/mm ²	Kopma Rm N/mm ²	Uzama A %	Akma Rp 0.2 N/mm ²	Kopma Rm N/mm ²	Uzama A %
0,20	142,70	218,67	9,88	195,58	252,67	6,67
	182,40	251,84	9,90	166,67	229,84	7,10
	189,87	255,31	10,53	180,83	237,29	8,60
	183,34	253,71	11,58	194,11	253,90	8,47
	210,69	270,80	11,55	208,08	267,01	7,96
	182,02	242,31	9,58	202,35	264,47	8,00
	212,98	273,55	13,38	198,72	249,06	6,61
	199,45	257,06	11,12	198,46	253,25	7,92
0,30	100,31	202,77	13,34	112,95	223,29	14,53
	112,85	220,88	19,39	90,40	196,52	19,81
	119,54	220,22	11,25	118,83	231,55	21,56
	119,26	233,05	19,69	110,92	222,13	20,06
	202,41	260,13	4,78	175,53	267,04	14,00
	175,83	264,24	13,43	151,57	248,68	18,34
	218,06	240,64	1,26	175,57	273,58	18,76
	218,10	244,94	1,19	181,14	272,97	12,30
0,40	124,14	232,64	14,34	143,22	251,04	13,71
	140,83	253,26	16,53	144,19	254,32	15,24
	135,65	249,86	15,60	107,28	209,84	12,28
	145,08	257,15	16,85	143,12	252,29	12,99
	156,63	271,22	13,29	160,39	274,02	13,09
	135,14	249,30	15,41	142,67	250,51	12,83
	163,26	280,73	15,82	156,89	274,38	16,95
	161,30	273,73	11,28	162,68	280,46	16,17

4.2. Tartışmalar

4.2.1. Tane İnceltme Çalışmaları

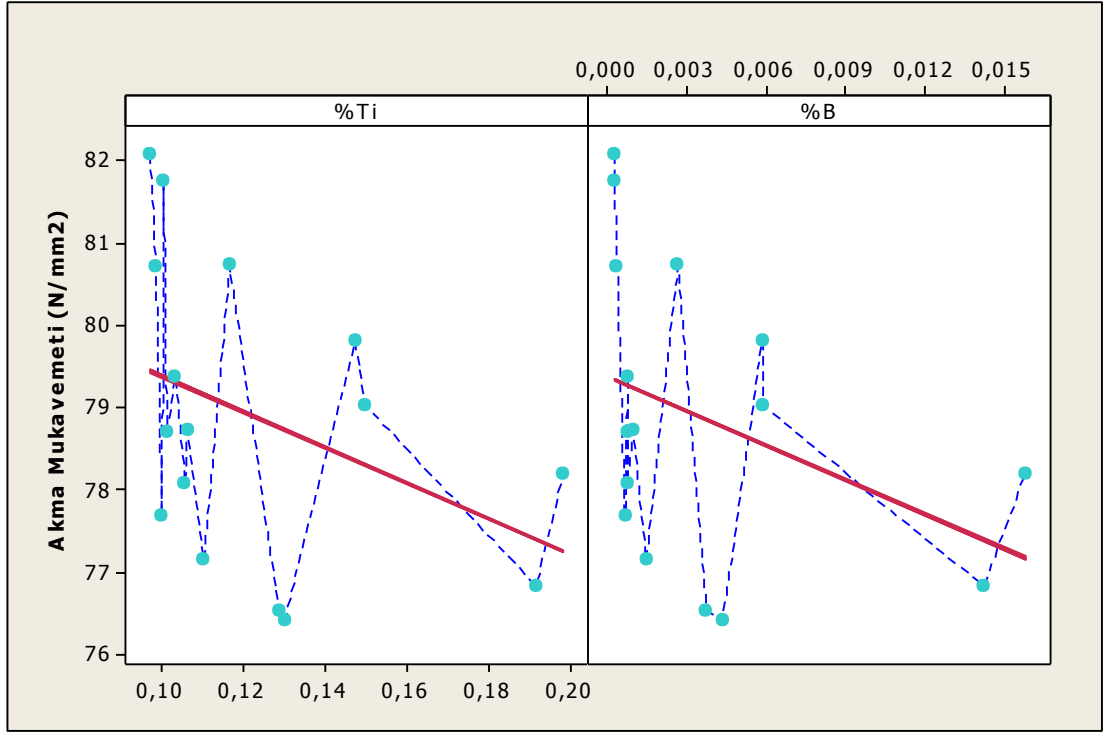
Alüminyum döküm alaşımlarında kimyasal tane inceltmenin verimliliği ve mekanik değerlere etkisi üzerine yapılan deneysel çalışmalarda esas olarak baz alınan veriler ile kimyasal tane inceltici (TiB) ajanların ne oranda sıvı metale eklenmesi gerektiği ve kompozisyon içerisindeki elementel miktarın tane büyüklüğü ile mekanik değerleri hangi oranda etkilediği incelenmeye çalışılmıştır. Bu amaçlar için öncelikle tane incelticilerin etkilerinin değerlendirilebilmesi makroyapı numunelerinin gözden geçirilmesi gerekmektedir.

Çalışmaya ait 3 no'lu bölümdeki Sonuçlar kısmında Şekil 4.1 ve 4.2'deki makroyapı görüntüleri bu konuda oldukça net sonuçlar vermektedir. Buna göre; alaşıma hiçbir ilavenin yapılmamış olduğu başlangıç durumunda iri bir yapıda olan taneler, tane incelticilerin ilavesi ile hızlı bir şekilde incelmeye başlamışlardır. Aynı şekilde ilave

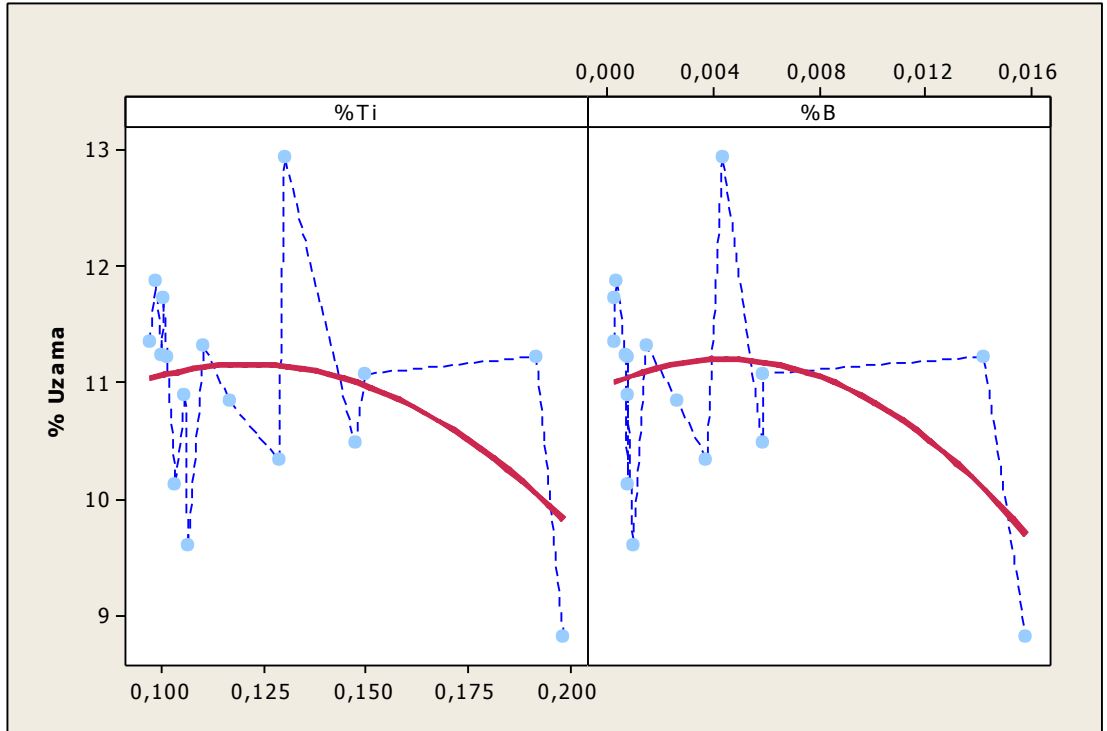
miktarının arttırılması ile birlikte tanelerin daha da incelendiği dolayısıyla tane büyüklüğünün tane inceltici miktarı ile doğrudan ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Ancak deneysel çalışmalar sırasında arka arkaya alınan çok sayıdaki makroyapı numunesi incelendiğinde 6 no'lu parçadan sonra daha fazla bir inceltme gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu veriler ışığında makroyapı numuneleri üzerindeki gözlemlere dayanılarak tane inceltmenin TiB alaşımlı ajan ilavesi ile doğrudan ilişkili olduğu, ilave miktarının arttıkça tane boyutunun küçüldüğü fakat bu ilave miktarının bir limiti olduğu ve bu limit aşıldıktan sonra inceltme işleminin efektif ve ekonomik olmadığı sonucuna varılmıştır.

Kimyasal tane inceltme prosesinin mekanizmasının ve mekanik değerlere etkilerinin incelenmesi için dökümü yapılan çekme çubuklarının akma mukavemeti ve uzama yüzdesi değerlendirildiğinde Tablo 4.3'e göre parçanın akma mukavemetinin 6. parçaya kadar her ilave seviyesinde düştüğü ancak 6. parçadan sonra akma değerinin tüm denemelere ait ortalama değere tekrar geldiği görülmektedir. Şekil 4.4'deki grafik incelendiğinde durum net olarak gözlemlenmekte olup, yine bir limitin söz konusu olduğu ancak genel anlamda tane inceltici ilavesi, dolayısıyla Ti ve B oranlarının akma mukavemeti ile ters orantılı olduğu düşünülmektedir. Aynı şekilde Şekil 4.5 ve Şekil 4.7'ye göre uzama yüzdesinin ve Çekme Mukavemetinin de kompozisyondaki Ti ve B oranları ile akma mukavemetine göre daha az oranda olmakla birlikte ters orantılı olduğu gözlemlenmektedir.

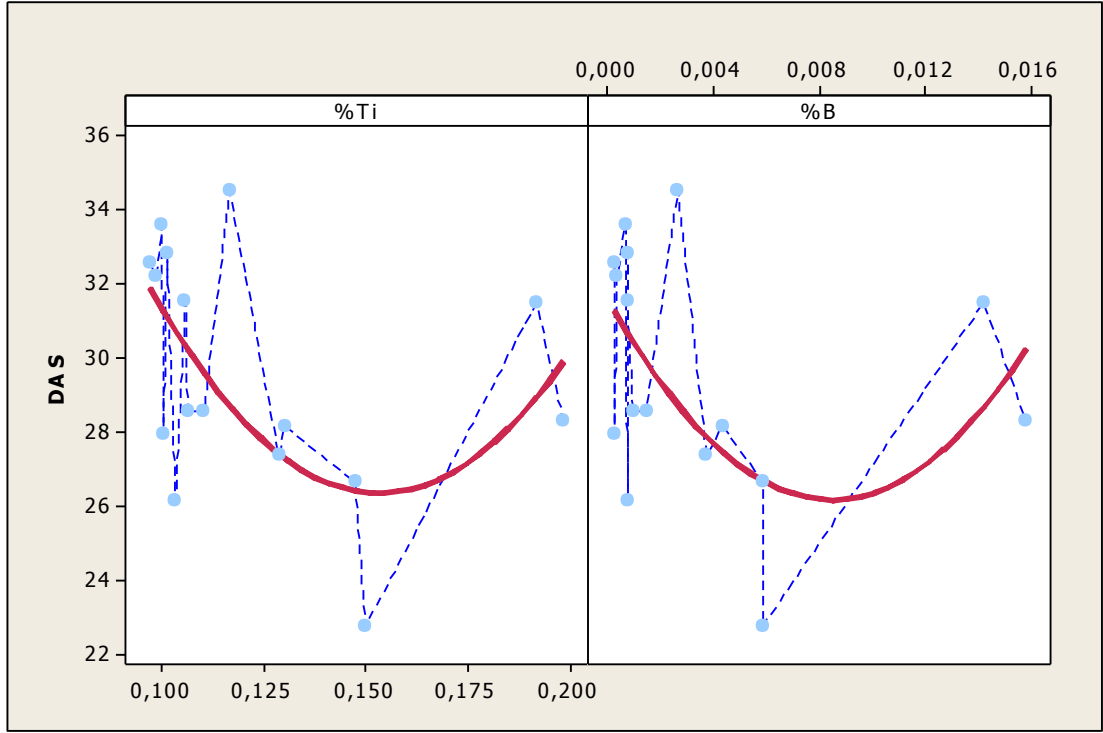
Çalışmada çekme test çubukları ile beraber dökülen makroyapı numunelerinin DAS analiz sonuçları ise Şekil 4.6'da bulunan grafiğe göre incelendiğinde ise dendrit kol uzunlukları ortalamalarının 3 no'lu parçaya kadar artış gösterip, 3 no'lu parçadan sonra bu değerlerin de uzama yüzdesindeki ilişkiye benzer bir fonksiyonla Ti ve B miktarı ile ters orantılı olduğu tespit edilmiştir.



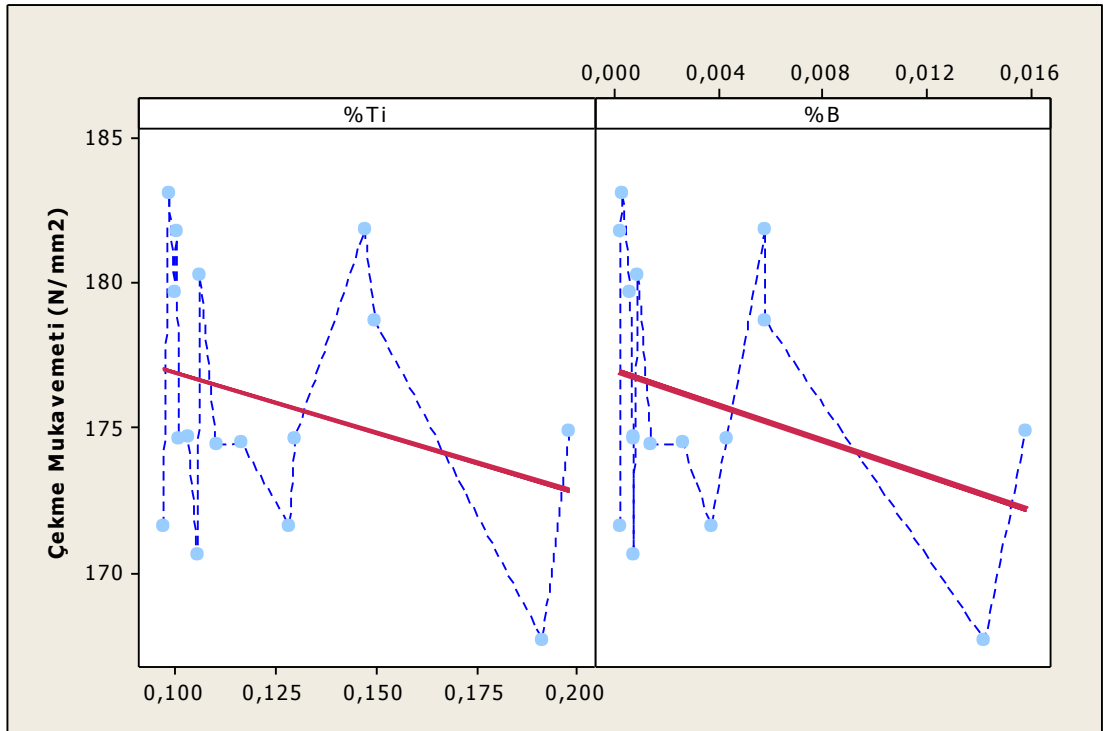
Şekil 4.4 : TiB Oranı İle Akma Mukavemeti Arasındaki İlişki



Şekil 4.5 : TiB Oranı İle Uzama Yüzdesi Arasındaki İlişki

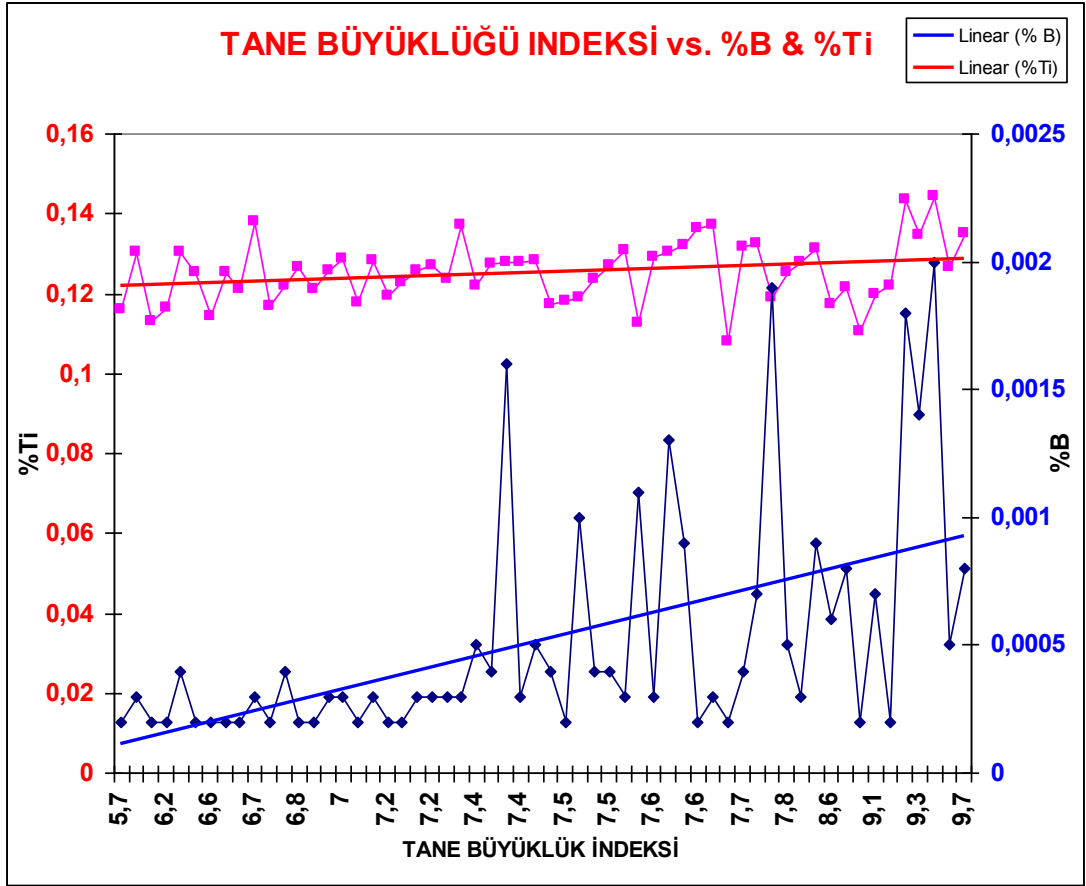


Şekil 4.6 : TiB Oranı İle DAS (μm) Arasındaki İlişki



Şekil 4.7 : TiB Oranı İle Çekme Mukavemeti Arasındaki İlişki

Daha önce belirtilen makroyapıdaki tane boyutunu belirleyen söz konusu limitin tespiti için bu testlerin ardından seri üretimde koşullarında döküm için kullanılan toplam 58 adet sıvı metal şarjından alınan kimyasal analiz numuneleri ile kompozisyon içerisindeki titanyum ve bor miktarının tane büyüklüğünü ne oranda etkilediği incelenmiştir. Şekil 4.7’de bu etkinin daha iyi anlaşılabilmesi için alınan veriler ışığında oluşturulan grafik incelendiğinde alaşımın kimyasal kompozisyonu içerisinde bor miktarındaki artışın tane büyüklüğü indeksindeki artışla doğrudan ilintili olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bor miktarı arttığı müddetçe tane büyüklüğü indeksi artacak ve bunun sonucunda birim alandaki tane büyüklüğü azalarak, aynı alan içerisindeki tane sayısı artacaktır.



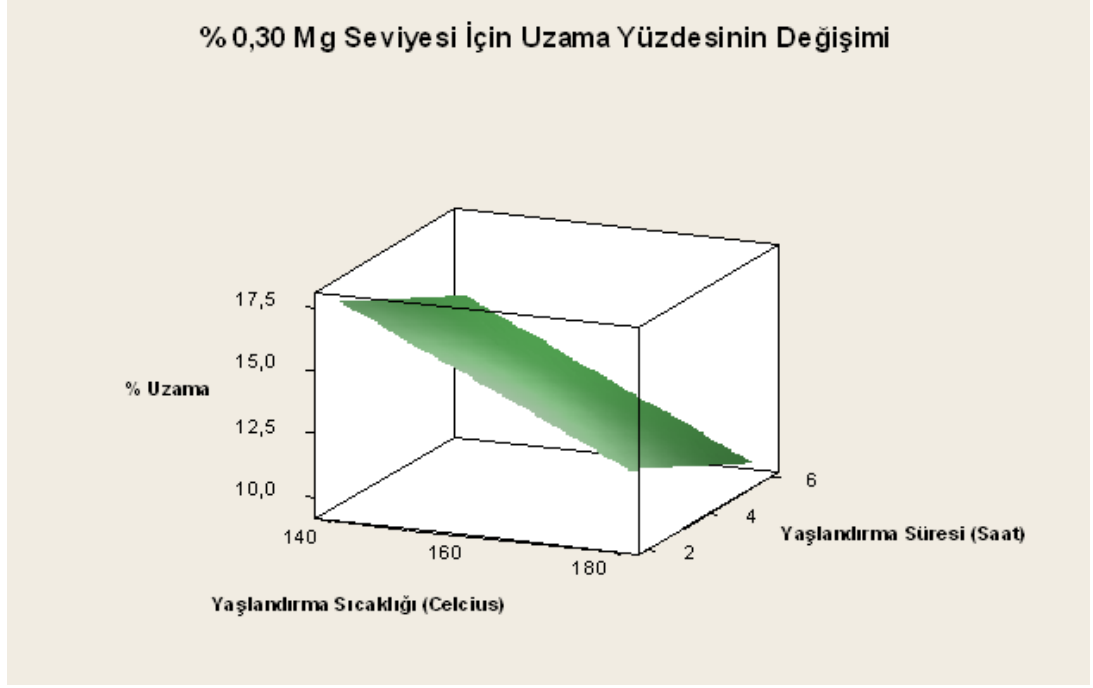
Şekil 4.8 : Tane Büyüklüğü İndeksinin Ti ve B Yüzdesi ile İlişkisi

4.2.2. Isıl İşlem Çalışmaları

Üretim kalitesinin artırılması ve müşteri isteklerinin karşılanabilmesi için CMS Jant ve Mak. San. A.Ş. bünyesinde mevcut bulunan T6 ısıtım işlem prosesine ait parametrelerinin mekanik değerlere etkisinin incelenmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu ihtiyaçların karşılanabilmesi adına gerçekleştirilen deneysel çalışmada; Tablo 4.5’de bir kısmı verilen değerlere göre temel kıstas olan akma mukavemeti ve uzama yüzdesinin en iyi olduğu değerlerin tüm deneyler içerisinde öncelikle alaşım kompozisyonunun hangi magnezyum içeriğinde elde edildiği incelenmiştir.

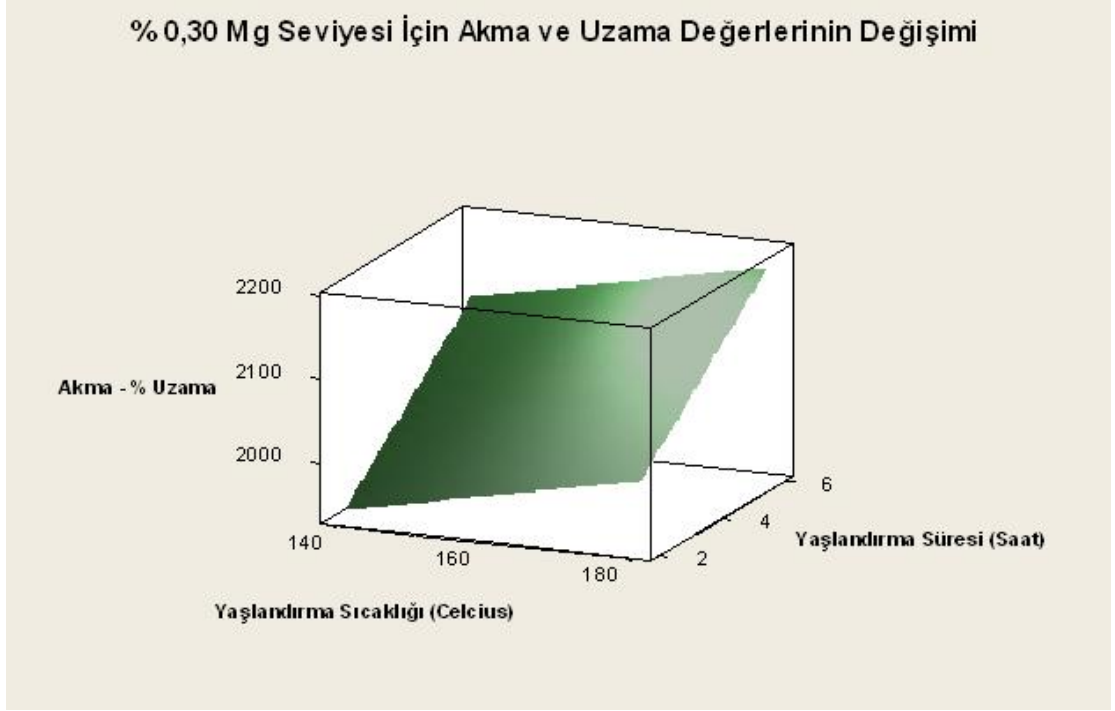
Çalışma sonucunda dökümü gerçekleştirilen tüm test numunelerine ait çekme testi verileri Minitab programına girilmiş ve deneysel tasarım parametreleri ile birleştirilerek akma mukavemeti ve uzama yüzdesini hangi parametrelerin etkilediği tespit edilmiştir. Buna göre istatistik ilişkiler ışığında program vasıtasıyla akma ve uzama değerlerinin öncelikle Mg yüzdesi, daha sonra yapay yaşlandırma işleminin sıcaklığının ve süresinin etkilediği belirlenmiştir.

Çekme testi sonuçları üzerinden değerlendirme yapıldığında en iyi uzama yüzdesi ve akma mukavemeti değerlerinin % 0,30 Mg içerikli alaşım kompozisyonu ile elde edildiği çalışma sonunda tespit edilmiştir. Buna göre % 0,30 Mg içeriği için uzama yüzdesi değerlerinin yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile olan ilişkisinin tam olarak anlaşılması için Minitab programı yardımı ile “Surface Plot” grafiği oluşturulmuştur. Şekil 4.9’da verilen bu grafik ile elde edilen yüzey çizgileri sonucunda deneysel parametreler içerisinde en düşük sıcaklık değerinde en az süre ile yaşlandırma işlemi sonucunda en yüksek uzama değerinin elde edilebileceği görülmüştür. Aynı zamanda söz konusu grafik tekrar incelendiğinde sıcaklıktaki değişimin, süredeki değişime oranla uzama değerleri üzerinde daha baskın bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiş, deneysel tasarım parametreleri içerisinde en yüksek sıcaklık ve en uzun sürede uzamanın minimuma düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9 : % 0,30 Mg Seviyesi İçin Uzama Yüzdesinin Değişimi

Uzama değerlerine etkisi belirlenen parametreler tespit edildikten sonra sadece uzama değerlerinin veya akma mukavemeti değerlerinin müşteri spesifikasyonlarını karşılayamayacağı bilindiğinden dolayı, her iki değer ortak olarak etkilendiği parametrelerin belirlenebilmesi için Minitab programı ile aynı prosedür izlenerek akma ve uzama değerlerinin birlikte seçildiği yüzey eğrileri oluşturulmuş ve şartlar incelenmiştir. Şekil 4.10'da verilen bu grafiğe göre % 0,30 Mg seviyesinde yapay yaşlandırma aşaması için deneysel parametrelerin en yüksek olduğu süre ve sıcaklıkta uzama ve akma değerlerinin en iyi seviyede olduğu tespit edilmiştir. Buna göre; yaşlandırma süresindeki değişikliğin, sıcaklıktaki değişikliğe göre söz konusu iki değer üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır.



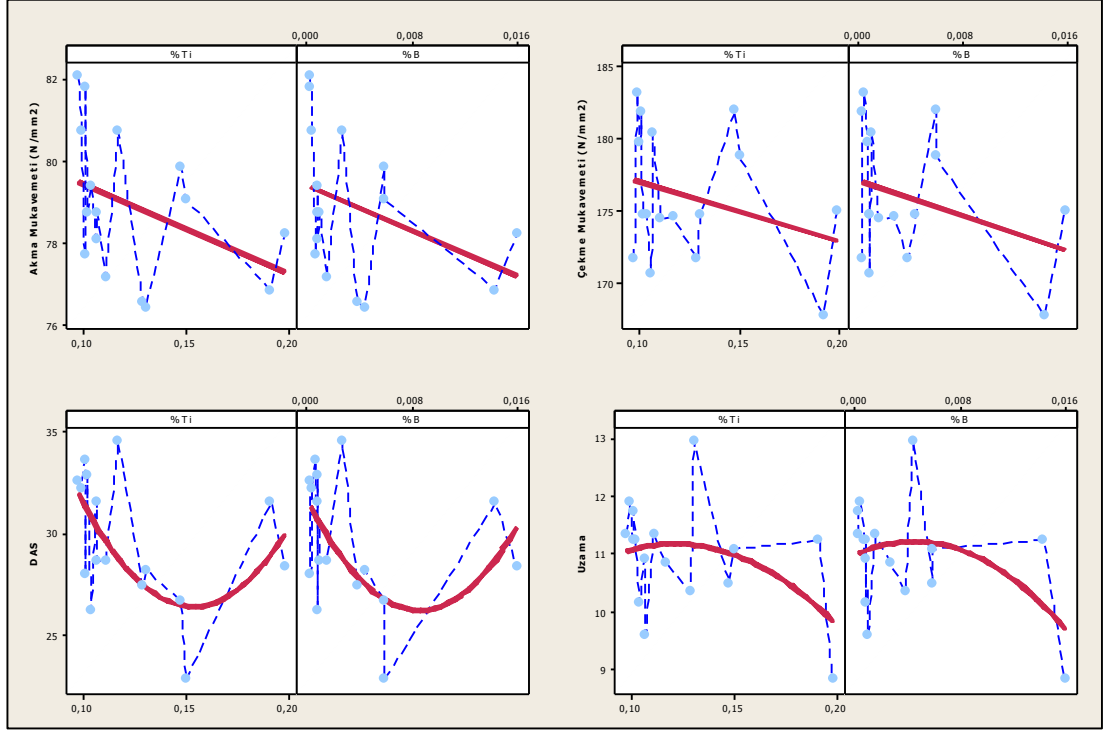
Şekil 4.10 : % 0,30 Mg Seviyesi İçin Akma ve Uzama Değerlerinin Değişimi

4.3. Genel Sonuçlar

Temel olarak birbirinden bağımsız adımlar halinde yürütülen ve Alüminyum Silisyum – Magnezyum alaşımlarında döküm sonrası ve ısıl işlem sonrası yapı değişikliklerini ve mekanik özelliklerini belirleyen kritik parametrelerin irdelenmesine ve etkilerinin değerlendirilmesine çalışmıştır. Buna göre öncelikle tane inceltme çalışması olmak üzere sektörde yaygın olarak kullanılan TiB aşılama alaşımının işleme mekanizması değerlendirilmiştir. Ardından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile Titanyum ve Bor elementlerinin ağırlık yüzdesi olarak mekanik özellikler ile ters bir ilişki içerisinde olduğu ve Şekil 4.11'd1 görüldüğü üzere miktarın artması ile Akma ve Çekme mukavemetlerinde bir azalmaya sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir.

Ancak, Titanyum ve Bor elementlerinin alaşım içerisindeki oranının çekme testlerinde uzama yüzdesi ve DAS ölçütleri açısından biraz daha farklı bir karakter sergilediği gözlemlenmiştir. Buna göre; DAS ölçütleri % 0,15 Ti ve %0,008 B oranlarında başlangıç durumuna göre ciddi bir düşüş göstermekte ancak oranların artması ile yükselişe geçen bir eğilim göstermektedir. Fakat bu noktadan sonra TiB aşılama alaşımının sıvı metale ilavesi ekonomik olarak bir anlam taşımamaktadır.

Çekme testleri sonucunda uzama yüzdeleri ise TiB ilavesinin söz konusu orana kadar ortalama anlamda etkilenmediği ancak bu noktadan itibaren artan Ti ve B oranlarının ciddi bir azalmaya neden olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.11 : Mekanik Özelliklerin % Ti ve % B Oranı ile Etkileşimi

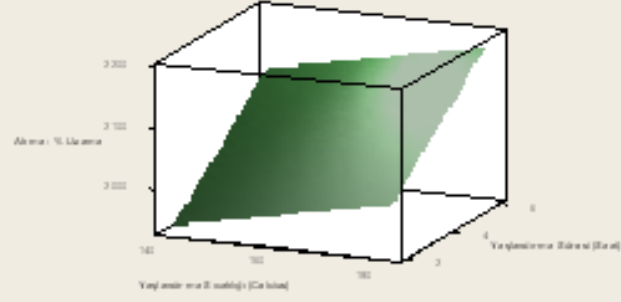
Çalışmanın ikinci basamağında yürütülen ısıtıl işlem parametre incelemesinde ise işlem sonrasında malzemenin nihai mekanik özellikleri üzerinde etken olabilecek faktörlerin etkileri incelenmeye çalışılmıştır. Söz konusu faktörler şu şekilde belirlenmiştir;

- Alaşım içerisindeki Magnezyum oranı
- Çözeltiye alma sıcaklığı,
- Çözeltiye alma süresi,
- Çözeltiye alma sonrası su verme safhasından önce bekleme süresi,
- Su verme ortamı sıcaklığı,
- Su verme süresi,
- Su verme sonrası, yaşlandırma öncesi bekleme süresi
- Yaşlandırma sıcaklığı,
- Yaşlandırma süresi.

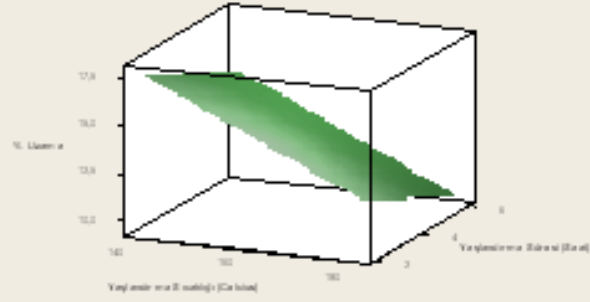
Belirlenen bu faktörlerin farklı seviyeleri ile deney tasarım sistematığı kullanılarak çalışmalar gerçekleştirilmiş olup, özellikle Çekme, Akma Mukavemetleri ile Uzama yüzdesinin ne şekilde etkilendiği irdelenmiştir. Buna göre; uzama yüzdesinin yaşlandırma sıcaklığına göre değişim gösterdiği, akma mukavemetinin Magnezyum oranı ve yaşlandırma sıcaklığı ile doğrudan etkileşimde olduğu, çekme mukavemetinin ise bunlara ek olarak yaşlandırma sıcaklığından da etkilendiği tespit edilmiştir.

Elde edilen bu bulgular ışığında toplanan verilerin Minitab yazılımı ile istatistiksel incelemesi yapılmış olup % 0,3 Mg oranının mekanik değerler anlamında daha iyi bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Bu tespitin ardından % 0,3 Mg değeri için grafiksel analiz yapılarak elde edilen bulgular karşılaştırılmıştır (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10). Ancak, bu çalışmanın başlangıç noktasını oluşturan döküm parçasına ait uzama değerinin müşteri spesifikasyonlarını tam olarak karşılayabilmesi için söz konusu iki grafik üst üste konulduğunda (Şekil 4.12) birbirleri ile zıt bir durum sergileyen yüzey eğrileri gözlemlenmiştir. Dolayısıyla müşteri isteği olan uzama yüzdesi sağlanmaya çalışılırken döküm parçasının servis ömrü ve mekanik dayanımını etkilemeyecek parametrelerin seçiminin yapılması ihtiyacı doğmaktadır. Buna göre Şekil 4.12'deki grafikler incelendiğinde bahsi geçen kazanımları sağlamak adına ısıtılma işlem fırınlarında proses parametreleri belirlenmiş, laboratuvar ölçeğinde belirlenen bu parametreler için seri üretim koşullarında denemeler yapılarak tasarımın doğrulanması sağlanmış ve ısıtılma işlemi optimize edilmiştir.

% 0,30 Mg Seviyesi İçin Akma ve Uzama Değerlerinin Değişimi



% 0,30 Mg Seviyesi İçin Uzama Yüzdesinin Değişimi



Şekil 4.12 : % 0,30 Mg Seviyesi İçin Akma ve Uzama Değerleri ile Yalnız Uzama Yüzdesinin Değişimi

KAYNAKLAR

- [1] **The Aluminium Association**, 1988. *Aluminium Statistical Review*.
- [2] **Polmear, I.J.**, 1981. *Light Metals*, E. Arnold Publishers, London.
- [3] **Palazzo, F.**, 1988. *The Economics of Aluminium, Third Ed.*, p. 353, Roskill Information Services Ltd. London.
- [4] **Gruzleski, J.E. and Closset, B.M.**, 1990. *The Treatment of Liquid Aluminium – Silicon Alloys*, American Foundrymen's Society.
- [5] **Shivukmar, S., Ricci, S., Steenhoff, B. and Sigworth, G.**, 1989. An Experimental Study To Optimize The Heat Treatment of A356 Alloy, *93rd AFS Casting Congressi*, AFS, Texas, 07-11 Mayıs, s. 13-14.
- [6] **Kashyap, K.T. and Chandrashekar, T.**, 2001. Effects and Mechanisms of Grain Refinement in Aluminium Alloys, *Bull. Mater. Sci., Indian Academy of Sciences Bangalore*, **24/4**, 345-353.
- [7] **Radhakrishna, K., Seshan, S. and Seshadri, M.R.**, 1980. Dendrite Arm Spacing in Aluminium Alloy Casting, *AFS Transactions*, **88**, 695-702.
- [8] **Mondolfo, L.F.**, 1983. Grain Refinement in the Castings of Non-Ferrous Alloys, *Grain Refinement in Castings and Welds*, Metallurgical Society of AIME, 3-50.
- [9] **Guzowski, M.M., Sigworth G.K. and Senter, D.A.**, 1987. The Role of Boron in The Grain Refinement of Aluminium with Titanium, *Metal. Transactions*, **18A**, 603-19.
- [10] **Geçkinli, E.**, 2002. Alüminyum ve Alaşımlarının Isıl İşlemi, 2. *Isıl İşlem Sempozyumu*, İstanbul, TÜRKİYE, Şubat 07-08.
- [11] **Askeland, D.R.**, 1990. The Science and Engineering of Materials, 2. Edition, Chapman&Hall s. 423.

[11] **European Aluminium Association And The University Of Liverpool Partnership Program,**
<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/>

[12] **WBB Minerals LTD.,** 2001. *Rotorject Standart Mobile Flux Injector Operating Manual,* Cheshire, England.

[13] **Ferrometal LTD.,** 2004. *HMC 37 Aluminium Flux Technical Data Sheet,* GSA Mühendislik Temsilcilik Danışmanlık Ltd. Şti. Ankara.

[14] **Foseco Australia LTD.,** 2004. *Technical Data Sheet,* Foseco Döküm Sanayii ve Ticaret Limited Şti. İstanbul.

[15] **Zwick GmbH & Co.,** 2002. *Z100/SN3A Materials Testing Machine (Serial Number : 156285) Instruction Manual,* Germany, 2 - 30.

ÖZGEÇMİŞ

01.02.1980 tarihinde Sivas’da doğdu. 1997 yılında Manisa Lisesi’nden, 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Üretim Metalurjisi Programında yüksek lisans eğitimine başladı. CMS Jant ve Makina San. A.Ş.’de 2003 – 2005 yıllarında Dökümhane Müh. olarak çalıştı.