T. C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASSAS DÖKÜMDE BOYUTSAL HASSASİYETE VE YÜZEY KALİTESİNE ETKİ EDEN UNSURLAR

KEREM ALTUĞ GÜLER

DOKTORA TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. MUSTAFA ÇİĞDEM

İSTANBUL, 2012

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
Demirbaş No:...0080576

MET/249

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASSAS DÖKÜMDE BOYUTSAL HASSASİYETE VE YÜZEY KALİTESİNE ETKİ EDEN UNSURLAR

KEREM ALTUĞ GÜLER

DOKTORA TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. MUSTAFA ÇİĞDEM

İSTANBUL, 2012

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASSAS DÖKÜMDE BOYUTSAL HASSASİYETE VE YÜZEY KALİTESİNE ETKİ EDEN UNSURLAR

Kerem Altuğ GÜLER tarafından hazırlanan tez çalışması 10.02.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Fevzi YILMAZ
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi

Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU
İstanbul Ticaret Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASSAS DÖKÜMDE BOYUTSAL HASSASİYETE VE YÜZEY KALİTESİNE ETKİ EDEN UNSURLAR

Kerem Altuğ GÜLER tarafından hazırlanan tez çalışması 10.02.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Fevzi YILMAZ
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi

Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU
İstanbul Ticaret Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu çalışma, "İstanbul Sanayi Odası – Yıldız Teknik Üniversitesi Doktora/Yüksek Lisans Tezlerine Sanayi Desteği Projesi" kapsamında desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

"Dereceli Hassas Döküm Kalıplarında Segregasyon Oluşumunun İncelenmesi" başlıklı yüksek lisans çalışmam ile başlayan hassas döküm kalıpları ile ilgili çalışmalarım doktorada da devam etmiştir. Endüstriyel ve akademik önemini hiçbir zaman kaybetmeyecek olan bu geniş konuda doktora sonrasında da çalışmayı arzu etmekteyim.

Doktora tez çalışmamın her aşamasında her zaman yanımda olan ve beni destekleyen danışmanım Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bölümümüz laboratuvarlarına kazandırdıkları cihazlardan ve malzemelerden çalışmalarımda yoğun olarak kullandığım için Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU, Prof. Dr. Ahmet EKERİM, Doç. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ ve Doç. Dr. Aygül YEPREM'e teşekkürü bir borç bilirim.

Master modellerin üretiminde ve döküm çalışmalarında kullanılan bronzun temininde yardımları esirgemeyen Poly Metal Metalurji ve Döküm Sanayi Ticaret A.Ş. ve Hassas Döküm Bölümü Yöneticisi Rıdvan DOĞAN'a çok teşekkür ederim.

Gümüş döküm çalışmalarının yürütüldüğü Goldaş Kuyumculuk Sanayi İthalat İhracat A.Ş. Döküm Bölümü Yöneticisi Met. Müh Şerif AKMAN başta olmak üzere tüm dökümhane ve modelhane çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde gerçekleştirilen X-Işınları ve dilatometre analizlerinde büyük yardımlarını gördüğüm Dr. Müh. Işıl KUTBAY'a yürekten teşekkür ederim.

Tane boyutu ve gözeneklilik ölçümlerinin yapıldığı Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarına ve tüm çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmaların çoğunluğunun yürütüldüğü benim de üyesi olduğum Balkan İleri Döküm Teknolojileri Merkezine ve tüm çalışanlarına teşekkür ederim.

Son olarak tez çalışmamı burs ile destekleyen İstanbul Sanayi Odası'na (İSO) ve bu destek projesine ön ayak olan Prof. Dr. Ahmet TOPUZ'a çok teşekkür ederim.

Şubat, 2012

Kerem Altuğ GÜLER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ ix

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

ÇİZELGE LİSTESİ xiv

ÖZET xv

ABSTRACT xvii

BÖLÜM 1 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 3
1.3 Hipotez 3

BÖLÜM 2 5

HASSAS DÖKÜM YÖNTEMİ 5

2.1 Hassas Dökümün Tarihçesi 5
2.2 Hassas Döküm Yönteminin İşlem Adımları 7
2.3 Dereceli Hassas Döküm 10
2.3.1 Esnek Mum Kalıpları 13
2.3.2 Kauçuk Kalıp Yapımı 14
2.3.3 Hassas Döküm Model Mumları 15
2.3.3.1 Hassas Döküm Mumlarının Kategorizasyonu 16
2.3.3.2 Hassas Döküm Mumlarının Özellikleri ve Kalite Üzerindeki Etkileri 17
2.3.4 Mum Model Üretimi 20
2.3.5 Model Ağacı Tasarımı ve Yapımı 21
2.3.6 Mum Giderme 23
2.3.7 Kalıp Pişirme 24
2.3.7.1 Pişirme Çevrimi 24
2.3.7.2 Alçı Bağlı Kalıp Malzemesinin Pişme Davranışı 26

2.3.8 Ergitme ve Döküm 27

BÖLÜM 3 30

DERECELİ HASSAS DÖKÜM KALIP MALZEMELERİ 30

3.1 Alçı 31
3.1.1 Jips 32
3.1.2 Anhidrit 33
3.1.3 Alçıdan Yarı Hidrat Üretimi 33
3.2 Silika 37
3.2.1 Kuvars 40
3.2.2 Kristobalit 41
3.3 Fosfat Bağlı Malzemeler 41
3.4 Silika Bağlı Malzemeler 44
3.5 Yüksek Alüminalı Çimentolar 45
3.6 Molokit 49
3.7 Ergiyik Silika 50
3.8 Kolloidal Silika 51
3.9 Zirkon 52

BÖLÜM 4 55

DERECELİ HASSAS DÖKÜM KALIPLARININ ÖZELLİKLERİ VE BU ÖZELLİKLERE ETKİ EDEN UNSURLAR 55

4.1 Isıl Kararlılık 55
4.2 Gözeneklilik 56
4.3 Denkleştirici Genleşme: 56
4.4 Alçı Kalıbın Kullanımına Etki Eden Faktörler 57
4.4.1 Yarı Hidratın Etkisi 57
4.4.2 Suyun Etkisi 59
4.4.2.1 Suyun Saflığı 59
4.4.2.2 Suyun Sıcaklığı 59
4.4.2.3 Su/Toz Oranı 59
4.4.3 Islatmanın Etkisi 62
4.4.4 Karıştırmanın Etkisi 63
4.4.4.1 Karıştırma Hızı 63
4.4.4.2 Karıştırma Süresi 64
4.4.5 Kurutmanın Etkisi 66
4.5 Ergitme ve Döküm Sistemleri 68
4.5.1 Merkezkaç ve Statik Döküm Makinelerinin Karşılaştırılması 68
4.5.2 Merkezkaç Döküm 68
4.5.3 Statik Döküm 69
4.5.4 Döküm Verimliliği 69
4.5.5 Merkezkaç Döküm Makineleri 70
4.5.6 Statik Döküm Makineleri 70
4.6 Segregasyon 70
4.7 Yüzey Pürüzlülüğü 71
4.8 Boyutsal Hassasiyet 72

BÖLÜM 5 74

DENEYSEL ÇALIŞMALAR 74
5.1 Model Tasarımı ve Mum Model Üretimi 74
5.2 Kalıp Yapımı 77
5.3 Mum Giderme ve Kalıp Pişirme 80
5.4 Döküm 82
5.4.1 Vakum Destekli Döküm (V.D.) 82
5.4.2 Basınçlı Vakum Döküm (B.V.) 84
5.4.3 Mikro Döküm (M.D.) 86
5.4.4 Merkezkaç Döküm (Mz.D.) 88
5.5 Temizleme İşlemleri 89
5.6 Halka Çapı Testi (TS 3322) 91
5.7 Alçı Bağlı Kalıplar 92
5.7.1 Alçı Bağlı Kalıp Tozlarının Üretiminde Kullanılan Kontrol İlaveleri 96
5.7.2 Alçı Bağlı Kalıp Malzemesi Bileşenleri 97
5.8 Yüksek Alümina Çimentosu (YAÇ) Bağlı ve Fosfat Bağlı Kalıplar 102
5.8.1 Yüksek Alümina Çimentosu Üretimi 102
5.8.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı Kalıp Malzemeleri İçin Kontrol İlaveleri 105
5.8.3 Çift Katlı Kalıp Yapımı 105
5.8.4 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı Kalıp Malzemesi Bileşenleri 107
5.8.5 Fosfat Bağlı Kalıp Malzemeleri 108
5.9 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri 109
5.10 Boyutsal Değişim Ölçümleri 110
5.10.1 Prizlenme Genleşmesi (Boy Değişimi) Tayini (TS 3322) 111
5.10.2 Isıl Genleşme Tayini (Dilatometre Testleri) 112
5.11 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri 112
5.12 Gözeneklilik (Porozite) Testleri 112

BÖLÜM 6 113

DENEYSEL SONUÇLAR 113
6.1 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları 113
6.1.1 Alçı Bağlı Kalıplar İçin Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları 113
6.1.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı ve Fosfat Bağlı Kalıplar İçin Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları 115
6.2 Boyutsal Değişim Sonuçları 117
6.2.1 Alçı Bağlı Kalıplarda Boyutsal Değişimler 117
6.2.1.1 Alçı Bağlı Kalıpların Prizlenme Genleşmesi Ölçümleri 119
6.2.1.2 Alçı Bağlı Kalıpların Isıl Genleşme Testi Sonuçları 120
6.2.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı ve Fosfat Bağlı Kalıplarda Boyutsal Değişimler 122
6.2.2.1 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı ve Fosfat Bağlı Kalıpların Prizlenme Genleşmesi Ölçümleri 122
6.2.2.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı ve Fosfat Bağlı Kalıpların Isıl Genleşme Testi Sonuçları 123
6.3 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri 124
6.3.1 Alçı Bağlı Kalıpların Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri 124

6.3.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı ve Fosfat Bağlı Kalıpların Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri 128
6.4 Gözeneklilik (Porozite) Testi Sonuçları 129
6.4.1 Alçı Bağlı Kalıpların Gözeneklilik Testi Sonuçları 129
6.4.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı ve Fosfat Bağlı Kalıpların Gözeneklilik Testi Sonuçları 132
6.5 Yüzey Kalitesine Etki Eden Unsurlar 134
6.5.1 Parça Kalınlığının Etkisi 135
6.5.2 Agrega Boyutunun Etkisi 135
6.5.3 Su/Toz Oranının Etkisi 137
6.5.4 Alçı Miktarının Etkisi 138
6.5.5 Alçı Morfolojisinin Etkisi 140
6.5.6 Asit Banyosunda Tutma Süresi Etkisi 140
6.5.7 Modelin Ağaçtaki Yerinin Etkisi 141
6.5.8 Sıvı Metal Kalitesinin Etkisi 142
6.5.9 Döküm Tekniğinin Etkisi 143
6.5.10 Gözenek Çapının Etkisi 143
6.6 Boyutsal Hassasiyete Etki Eden Unsurlar 144
6.6.1 Prizlenme Genleşmesine Etki Eden Unsurlar 145
6.6.1.1 Bağlayıcı Cinsinin Etkisi 145
6.6.1.2 Bağlayıcı Morfolojisinin Etkisi 146
6.6.1.3 Su/Toz Oranının Etkisi 147
6.6.1.4 Alçı Bağlı Kalıplarda Alçı Miktarının Etkisi 148
6.6.1.5 Agrega Boyutunun Etkisi 150
6.6.1.6 Katkıların Etkisi 151
6.6.2 Isıl Genleşmeye Etki Eden Unsurlar 152

BÖLÜM 7 156

SONUÇ VE ÖNERİLER 156

7.1 Alçı Bağlı Kalıp Malzemeleri 157
7.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı Kalıp Malzemeleri 159
7.3 Yüzey Kalitesine Etki Eden Unsurlar 161
7.4 Boyutsal Hassasiyete Etki Eden Unsurlar 164
7.5 Genel Sonuçlar 165

KAYNAKLAR 168

ÖZGEÇMİŞ 173

SİMGE LİSTESİ

V	Batma hızı
r	Küresel partikülün yarıçapı
g	Yer çekimi ivmesi
η	Sıvının viskozitesi
ρ	Akışkanın yoğunluğu
σ	Katının yoğunluğu

KISALTMA LİSTESİ

BICTA	British Investment Casting Trade Association
MAP	Monoamonyum Fosfat
DAP	Diamonyum Fosfat
YAÇ	Yüksek Alümina Çimentosu
VD	Vakum Destekli Döküm
BV	Basınçlı Vakum Döküm
MD	Mikro Döküm
MzD	Merkezkaç Döküm
PMS	Polimelamin Sülfonat
PS	Potasyum Sülfat
KG	Köpük Gidericiler
AS	Aerosil
SE5	Böhmit Esaslı Malzeme
CA	Kalsiyummonoalüminat

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Alacahöyük bronz geyik heykeli 6
Şekil 2. 2 Hassas döküm teknikleri şeması 9
Şekil 2. 3 Dereceli hassas döküm tekniği şeması 10
Şekil 2. 4 Dereceli hassas döküm kalıbının hazırlanması 11
Şekil 2. 5 Tüm işlemleriyle dereceli hassas döküm akım şeması 12
Şekil 2. 6 Kauçuk kalıplar ve mum modeller 21
Şekil 2. 7 Mum ağacı ve derece 23
Şekil 2. 8 Alçı bağlı ticari bir kalıp malzemesinin ısıl genleşme eğrisi 26
Şekil 2. 9 Dereceli hassas döküm takı döküm ağaçları 29
Şekil 3. 1 Dereceli hassas döküm kalıbı kesiti 31
Şekil 3. 2 Alçı dönüşümleri şeması 34
Şekil 3. 3 α alçının (solda) ve β alçının (sağda) mikro yapıları 36
Şekil 3. 4 Silikanın polimorfik dönüşümleri 38
Şekil 3. 5 SiO_2'nin sıcaklık ve basınca göre kararlı ve yarı kararlı fazları 39
Şekil 3. 6 Silika mineralinin ısıl genleşmesi 40
Şekil 3. 7 CaO-Al_2O_3 faz diyagramı 47
Şekil 3. 8 Al_2O_3/CaO oranı ile refrakterlik ilişkisi 48
Şekil 3. 9 Hassas dökümde yaygın olarak kullanılan bazı refrakter malzemelerin doğrusal genleşmeleri 54
Şekil 4. 1 Alçı miktarına bağlı olarak priz zamanının değişimi 58
Şekil 4. 2 Karışımın karıştırılmasından sonra geçen zamanla akışkanlığın değişimi. 58
Şekil 4. 3 Su/toz oranına bağlı olarak sırasıyla kuru basma mukavemeti, priz zamanı, % prizlenme genleşmesi ve % su emme kapasitesinin değişimi 60
Şekil 4. 4 Karıştırma hızına bağlı olarak akışkanlık ve mukavemet değişimi 64
Şekil 4. 5 Karıştırma süresi bağlı olarak sırasıyla su emme hızı, priz başlangıç zamanı, kuru basma mukavemeti ve akışkanlığın değişimi 66
Şekil 4. 6 Su/toz oranına bağlı olarak kurutma zamanının değişimi 67
Şekil 4. 7 Nem oranına bağlı olarak su emme hızının değişimi 67
Şekil 4. 8 Nem miktarına bağlı olarak mukavemet değişimi 67
Şekil 5. 1 Tasarlanan test numuneleri a) yüzey pürüzlülüğü numunesi, ... 74
b) boyutsal ölçüm numunesi 74
Şekil 5. 2 Kauçuk kalıp presi 75
Şekil 5. 3 Mum enjeksiyon presi 75
Şekil 5. 4 Alüminyum master modeller, kauçuk kalıplar ve mum modeller 76
Şekil 5. 5 Test numunelerinin mum model ağacı 76
Şekil 5. 6 Paslanmaz çelik dökümünde kullanılan numune ve model ağacı 77
Şekil 5. 7 Deneysel çalışmalarda kullanılan çeşitli dereceler 78

Şekil 5. 8 Goldaş A.Ş. dökümhanesinde gümüş dökümü için hazırlanan bir model ağacı 78
Şekil 5. 9 Üniversite döküm laboratuvarında kullanılan vakum kabini 79
Şekil 5. 10 Goldaş A.Ş. dökümhanesinde kullanılan otomatik vakumlu karıştırıcı 80
Şekil 5. 11 Düşük sıcaklık dökümleri için pişirme rejimi 81
Şekil 5. 12 Paslanmaz çelik dökümleri için pişirme rejimi 81
Şekil 5. 13 Vakum destekli döküm şeması 82
Şekil 5. 14 Vakum destekli döküm makinesi 83
Şekil 5. 15 Lepel indüksiyon ocağı 83
Şekil 5. 16 Bronz döküm ağacı örneği 84
Şekil 5. 17 Basınçlı vakum döküm şeması 85
Şekil 5. 18 Basınçlı vakum döküm makinesi 85
Şekil 5. 19 Gümüş döküm ağacı örneği 86
Şekil 5. 20 Paslanmaz çelik mikro döküm şeması 87
Şekil 5. 21 Vakum indüksiyon mikro döküm makinesi 87
Şekil 5. 22 Paslanmaz çelik döküm ağacı örneği 88
Şekil 5. 23 Paslanmaz çelik merkezkaç döküm şeması 88
Şekil 5. 24 Merkezkaç hassas döküm makinesi 89
Şekil 5. 25 Alçı temizleme makinesi 90
Şekil 5. 26 Kesilmiş bronz, gümüş ve paslanmaz çelik test numuneleri 90
Şekil 5. 27 Akışkanlık testinde kullanılan metal halka 91
Şekil 5. 28 Karışımın halkaya doldurulması ve çapı ölçülecek bir numune 92
Şekil 5. 29 Alçı bağlı ticari kalıp (referans 1) tozunun X ışınları analizi 92
Şekil 5. 30 Alçı bağlı ticari ürünün tane boyutu dağılım grafiği 93
Şekil 5. 31 α-alçının tane boyutu dağılım grafiği 93
Şekil 5. 32 Kuvars agregaların tane boyut dağılımı 94
Şekil 5. 33 Kristobalit agreganın tane boyut dağılımı 95
Şekil 5. 34 Seydişehir alüminasının tane boyut dağılımı 102
Şekil 5. 35 Niğde kalsitinin tane boyut dağılımı 103
Şekil 5. 36 Yüksek alümina çimentosu pişirme rejimi 103
Şekil 5. 37 Yüksek alümina çimentosunun X ışınları analizi 104
Şekil 5. 38 Yüksek alümina çimentosunun tane boyut dağılımı 104
Şekil 5. 39 Ergiyik silika tane boyut dağılımı 106
Şekil 5. 40 Zirkon tane boyut dağılımı 106
Şekil 5. 41 Molokit tane boyut dağılımı 107
Şekil 5. 42 Fosfat bağlı ticari kalıp malzemesinin X ışınları analizi 108
Şekil 5. 43 Fosfat bağlı referans 1 malzemesinin tane boyut dağılımı 109
Şekil 5. 44 Basamaklı mum model, bronz ve gümüş döküm numuneler 109
Şekil 5. 45 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm işlemi 110
Şekil 5. 46 Boyutsal ölçüm numunesinin mum modeli, bronz ve gümüş dökümü ... 110
Şekil 5. 47 Prizlenme genleşmesi numunesi 111
Şekil 6. 1 Alçı bağlı kalıp malzemelerinin prizlenme genleşmeleri 119
Şekil 6. 2 Alçı bağlı referans 1'in prizlenme genleşmesi 120
Şekil 6. 3 Alçı bağlı 24 numaralı bileşimin dilatometre eğrisi 120
Şekil 6. 4 Alçı bağlı 25 numaralı bileşimin dilatometre eğrisi 121
Şekil 6. 5 Alçı bağlı referans 1'in dilatometre eğrisi 121
Şekil 6. 6 YAÇ bağlı 1 ve 3 numaralı bileşimler ile fosfat bağlı referans 1'in prizlenme genleşmeleri. 122
Şekil 6. 7 YAÇ bağlı 1 numaralı bileşimin dilatometre eğrisi 123
Şekil 6. 8 YAÇ bağlı 3 numaralı bileşimin dilatometre eğrisi 123

Şekil 6. 10 Alçı bağlı 21 numaralı bileşimin mikro yapısı 125
Şekil 6. 11 Alçı bağlı 37 numaralı bileşimin mikro yapısı 125
Şekil 6. 12 Alçı bağlı 46 numaralı bileşimin mikro yapısı 126
Şekil 6. 13 Alçı bağlı 47 numaralı bileşimin mikro yapısı 126
Şekil 6. 14 Alçı bağlı referans 1'in mikro yapısı 127
Şekil 6. 15 Alçı bağlı referans 1'in mikro yapısı 127
Şekil 6. 16 YAÇ bağlı 1 numaralı bileşimin mikro yapısı 128
Şekil 6. 17 YAÇ bağlı 3 numaralı bileşimin mikro yapısı 128
Şekil 6. 18 Fosfat bağlı referans 1'in mikro yapısı 129
Şekil 6. 19 Alçı bağlı 24 numaralı bileşimin normalize hacim – gözenek çapı histogramı 130
Şekil 6. 20 Alçı bağlı 34 numaralı bileşimin normalize hacim – gözenek çapı histogramı 131
Şekil 6. 21 Alçı bağlı refarans 1'in normalize hacim – gözenek çapı histogramı 132
Şekil 6. 22 YAÇ bağlı 3 numaralı bileşimin normalize hacim – gözenek çapı histogramı 133
Şekil 6. 23 Fosfat bağlı referans 1'in normalize hacim – gözenek çapı histogramı .. 134
Şekil 6. 24 Kristobalit (c) oranına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi 136
Şekil 6. 25 Kuvars (b) oranına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi 136
Şekil 6. 26 Kristobalit (b) oranına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi 137
Şekil 6. 27 Su/toz oranına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi ... 138
Şekil 6. 28 Alçı miktarına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimi 139
Şekil 6. 29 Asit çözeltisi banyosunda tutma süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi 141
Şekil 6. 30 Model yüksekliğine bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimi. 142
Şekil 6. 31 12 numaralı alçı bağlı bileşimin farklı su/toz oranlarında prizlenme genleşmesi 147
Şekil 6. 32 Su/toz oranına bağlı olarak dökümlerde meydana gelen boyutsal değişimler 148
Şekil 6. 33 Alçı miktarına bağlı olarak prizlenme genleşmeleri 149
Şekil 6. 34 Alçı miktarına bağlı olarak döküm parçalardaki boyutsal değişim oranı 150
Şekil 6. 35 Alçı bağlı 20 ve 21 numaralı bileşimlerin prizlenme genleşmeleri 151
Şekil 6. 36 Alçı bağlı 12 ve 13 numaralı bileşimlerin prizlenme genleşmeleri 152
Şekil 6. 37 Alçı bağlı malzemelerin prizlenme ve ısıl genleşmeleri ile son boyutsal değişimleri 154
Şekil 6. 38 Yüksek sıcaklık grubu malzemelerin prizlenme, ve ısıl genleşmeleri ile son boyutsal değişimleri 155

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 Döküm mumlarının önemli karakteristikleri.....18
Çizelge 3. 1 α-yarı hidrat ve β-yarı hidrat formların tanımlanmasında kullanılabilecek özellikler..... 36
Çizelge 3. 2 Yüksek alüminalı çimentoların bileşim aralığı ile sınıflandırılması..... 46
Çizelge 3. 3 Isıya dirençli ve refrakter kalsiyum alüminat çimentoları.....49
Çizelge 5. 1 Alçı bağlı kalıpların yapımında kullanılan toz malzemelerin tane boyutları.....93
Çizelge 5. 2 Alçı bağlı kalıp malzemesi bileşimleri.....98
Çizelge 5. 3 Kalsit ve alümina tane boyutu.....102
Çizelge 5. 4 Yüksek alümina çimentosunun tane boyutu.....104
Çizelge 5. 5 Model kaplamada kullanılan toz malzemelerin tane boyutları..... 106
Çizelge 5. 7 Yüksek alümina çimentosu bağlı kalıp malzemelerinin bileşimleri.... 108
Çizelge 5. 8 Fosfat bağlı ticari kalıp malzemesinin (referans 1) tane boyutu..... 109
Çizelge 6. 1 Master model ve mum modelin yüzey pürüzlülükleri.....113
Çizelge 6. 2 Alçı bağlı kalıplardan elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri.....114
Çizelge 6. 3 Alçı bağlı referans malzemelerin ortalama yüzey (Ra) pürüzlülük değerleri.....115
Çizelge 6. 4 Vakum destekli bronz dökümlerden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri.....116
Çizelge 6. 5 Paslanmaz çelik dökümlerden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri.....116
Çizelge 6. 6 Alçı bağlı kalıplardan elde edilen doğrusal boyut değişimleri..... 117
Çizelge 6. 7 Alçı bağlı referans malzemelerin dökümlerindeki boyutsal değişimleri.....119
Çizelge 6. 8 Vakum destekli bronz dökümlerden elde edilen boyutsal değişim değerleri.....122

ÖZET

HASSAS DÖKÜMDE BOYUTSAL HASSASİYETE VE YÜZEY KALİTESİNE ETKİ EDEN UNSURLAR

Kerem Altuğ GÜLER

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM

İlk uygulama örnekleri çok eski çağlara dayanan hassas döküm yöntemi, modern üretim teknikleri içerisinde de olukça önemli bir yere sahiptir. Hassas döküm yöntemi, işlenerek üretilmesi zor karmaşık şekilli parçaların üretiminde kullanılan veya işlenmesi zor metallerden tek kademede parça üretmek için tercih edilen özel bir döküm yöntemidir. Yöntemin hassaslığı kullanılan harcanabilen modelden gelmektedir. Modeller, düşük ergime sıcaklığına sahip ve kolay şekillendirilebilen genellikle mum veya benzeri bir plastik esaslı malzemeden üretilmektedir. Model ergitilerek kalıptan uzaklaştırıldığı için kalıplarda ayırma yüzeyi bulunmaz, kullanılan model ve kalıp malzemelerine bağlı olarak da yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyet geleneksel kum kalıba döküm yöntemlerine göre yüksektir. Hassas döküm, son veya son şekle yakın bir üretim sağladığı için döküm sonrası işlemleri en aza indirger.

Hassas döküm yönteminin kabuk ve dereceli olmak üzere iki çeşidi vardır. Kabuk hassas döküm yönteminde model ağacı çevresinde katmanlı bir seramik kabuk oluşturulur. Dereceli hassas döküm yönteminde ise kalıp, içi boş silindirik bir derece içerisinde oluşturulur. Modelin yerleştirildiği derece içerisine hazırlanan seramik çamurunun dökülmesi ile kalıp tek kademede yapılır. Dereceli hassas dökümün başlıca kullanım yerleri kuyumculuk ve ağız içi protezlerin üretimidir.

Bu çalışmada dereceli hassas kalıba döküm yöntemi ile yüksek boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesine sahip parça dökümü için alçı ve yüksek alümina çimentosu bağlı kalıp malzemesinin geliştirilmesi ve kalıplama prosedürünün tespiti hedeflenmiştir. Laboratuvar şartlarında üretilen kalıp malzemeleri ve endüstriyel olarak kullanılan ticari kalıp malzemeleri ile dökümler yapılmış ve gerçekleştirilen karakterizasyon

çalışmalarıyla çeşitli değişkenlerin yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyet üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Alçı bağlı kalıp malzemeleri özellikle kuyumculukta takı üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır ve nispeten düşük döküm sıcaklığına sahip (< 1200 °C) metal ve alaşımların dökümünde tercih edilmektedir. Laboratuvar şartlarında ticari alçı bağlı kalıp malzemeleri ile aynı özellikleri gösteren alçı bağlı kalıp malzemeleri geliştirilmiş ve döküm işlemlerinde başarıyla kullanılmıştır. Dereceli hassas döküm kalıp malzemelerinden yüksek sıcaklık (>1200 °C) dökümlerine uygun olanları çoğunlukla fosfat bağlı olanlardır. Bu malzemeler yine kuyumculukta ve ayrıca ağız içi protezlerin dökümünde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Yüksek alümina çimentosu bağlı kalıp malzemeleri fosfat bağlı kalıp malzemelerine alternatif bir türdür. Laboratuvar şartlarında yüksek alümina çimentosu üretilmiş ve bu bağlayıcı bileşen ile çeşitli kalıp malzemesi kompozisyonları geliştirilmiş ve özellikleri fosfat bağlı ticari malzemeler ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda öncelikle tez çalışmasının ana amacı olan alçı bağlı ve yüksek alümina çimentosu bağlı kalıp malzemelerinin geliştirilmesi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Dereceli hassas döküm yönteminde boyutsal hassasiyete ve yüzey kalitesine etki eden unsurlar da büyük ölçüde tespit edilerek nedenleri ve nasıllarıyla birlikte ortaya konmuştur. İleriye yönelik olarak, çalışma konusu özellikle bağlayıcı morfolojilerinin değiştirilmesi ve geliştirilmesi yönünde devam ettirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Dereceli hassas döküm, boyutsal hassasiyet, yüzey kalitesi

ABSTRACT

THE FACTORS AFFECTING THE DIMENSIONAL ACCURACY AND SURFACE QUALITY IN THE INVESTMENT CASTING PROCESS

Kerem Altug GULER

Department of Metallurgical and Material Engineering

PhD. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Mustafa CİGDEM

Investment casting is one of the important modern manufacturing technique and its prior applications are dating back to ancient times. Investment casting technique is used for fabrications of complex shaped components or hard metals and alloys which are difficult to produce with machining. The precision of the technique comes from disposable pattern. Generally patterns are made from wax or similar polymer based materials which have low melting points and can be easily shaped. Patterns are removed from moulds with melting and there is no parting line on the cast parts. Depending on the pattern and mould materials, dimensional accuracy and surface quality of the investment castings are significantly higher than conventional sand cast products. Investment casting is a net or near net shape process so it minimizes the further processes.

There are two types of investment castings process; investment shell mould casting and investment flask mould casting (block mould). In the shell mould process, pattern trees are covered with ceramic layer form a solid shell around the patterns. In the flask mould process, cylindrical hollow metal flasks are used for mould making. The flask is placed around the pattern tree and the ceramic slurry is poured into it. The main uses of the investment flask moulds are jewellery and oral prosthesis castings.

In this study, determination of moulding procedure and development of plaster bonded and high alumina cement bonded investments to produce castings with high

dimensional accuracy and surface quality were aimed. Laboratory made and commercial investments were used for casting experiments and effects of several parameters on the dimensional accuracy and surface finish were investigated by using various characterization tests.

Plaster bonded investments are used for especially jewellery castings made of relatively low melting points (< 1200 °C) metals and alloys. In the laboratory conditions plaster bonded investments were developed with similar characteristics to the commercial ones and successfully used. The investments which are appropriate to the high melting point (> 1200 °C) castings are generally phosphate bonded ones. These mould materials are also used for jewellery and dental castings for many years. High alumina cement bonded investments are an alternative to the phosphate bonded investments. High alumina cement was produced in the laboratory conditions and this bonding component is used for developing new investments and their characteristics were compared with the commercial phosphate bonded investments.

In the results of the experimental studies first, development of the plaster bonded and the high alumina cement bonded investments that is the main aim of the thesis was successfully realized. The factors affecting the surface quality and dimensional accuracy in the flask mould investment castings were largely determined. As a further work, research studies can be carried to modify and develop more suitable morphologies of the bonding components.

Key words: Investment flask casting, dimensional accuracy, surface quality

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Döküm, metallerin birincil şekillendirilmesi için iyi bilinen bir tekniktir. Hassas döküm özellikle kuyumculuk ve dişçilik sanayinde üretim için kullanılan bir işlemdir. Mikro döküm çeşitli metalleri şekillendirmeye uygun hassas döküm tabanlı bir işlemdir. Çoğunlukla milimetre boyutlarından santimetre boyutlarına kadar kıymetli metal alaşımlarından parçalar için kullanılır. Avantajları, çok yönlü olmasıdır; örneğin çok karmaşık şekillerin üretimine olanak verir ve sonrasındaki işlemeyi en aza indirerek ekonomik olarak verim sağlar. Parça boyutlarının daha da küçültülmesine yönelik pek çok araştırma yapılmıştır, böylelikle mikrometre boyutlarında küçük parçalar veya mikro boyutta yapılar taşıyan daha büyük parçalar hassas döküm ile üretilebilmektedir. Genelde çalışmalar, üretim sonrası işlem gerektirmeyen ve düşük yüzey pürüzlülüğü ile yüksek geometrik boyutsal doğruluk gösteren parçaların üretimine odaklanmıştır [1].

Dökümle parça üretimi, beş temel klasik imal usulleri içerisinde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Döküm parçaların kaliteleri, mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler, boyutsal hassasiyet ve yüzey düzgünlüğü değerleri / kriterleri ile değerlendirilmektedir. Bu yöntemin daha da yaygınlaşmasının önündeki en önemli engel yukarıda adı geçen özelliklerin yetersizliğidir. Bu özellikler üzerinde yapılacak iyileştirmeler oldukça ekonomik ve hızlı bir imalat yöntemi olan döküm prosesinin ağız içi ve vücut implantları, takı ve endüstriyel kalıplar gibi katma değeri çok yüksek hassas parçaların üretiminde kullanımını daha da yaygınlaştıracaktır.

Ülkemizdeki sanayi kolları içerisinde döküm sektörü önemli bir yer teşkil etmektedir ve bu önemini uzun bir süre daha korumaya devam edecektir. Bu nedenle özel döküm yöntemlerine yönelik proseslerin geliştirilmesi ve prosedürlerinin iyileştirilmesi ülke

ekonomisi açısından da hayati önem taşımaktadır. Ülkemizde protez, takı ve kalıp imalatında kullanılan hassas döküm tozlarının tamamı ithalat yoluyla karşılanmaktadır.

Mikro parçaların hassas dökümü, iyi bilinen bir işlem olan dişçilik dökümlerinden türetilmiştir. Kıymetli metaller için oluşturulan işlemde temel olarak fosfat esaslı kalıp malzemeleri kullanılmaktadır. Dişçilik parçalarının üretimi ile karşılaştırıldığında mikrometre boyutlarında parça üretimi özellikle toleranslar ve yüzey düzgünlüğü açısından daha yüksek hassasiyet gerektirmektedir.

Kalıp malzemesi, sert alçının (bağlayıcı) ince taneli kuvars tozu ile karıştırılmasıyla yapılır. Sonradan seramik çamuru oluşturmak için karışıma su eklenip karıştırılır. Vakum altında karıştırma hapsolmuş havanın en aza indirilmesi için avantajdır. Hazırlanan çamur, içinde mumdan yapılmış besleyici sistemli yolluğa monte edilmiş plastik model bulunan boşluğa dökülür. Alçı ile su arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu çamur sertleşir. Kurumanın ardından katı haldeki kalıp fırında ısıtılır. Bu sırada plastik model ergir ve pirolize uğrarken alçı esaslı kalıp malzemesi sinterlenir. Çoğunlukla kalıp sinterlenme sıcaklığında, vakum veya merkezkaç döküm tekniği kullanılarak ergimiş metal ile doldurulur. Birinci teknik üç adımın kombinasyonundan oluşur: İlk olarak boş kalıp vakumlanarak içindeki boşlukta kalan gaz uzaklaştırılır, ikinci adımda eriyik kalıp içine dökülür ve son adımda eriyiğe üst basınç uygulanarak çok ince boşlukları doldurması sağlanır. İkinci döküm tekniğinde kalıbın doldurulması merkez kaç kuvveti kullanılarak yapılır. Metalin katılaşmasının ardından döküm parça kalıptan çıkartılır. Dökümün ve kalıp bozmanın ardından kalıp malzemesi artıkları parçaların üzerinde kalır. Mikro boyuttaki parçalar için bunların kimyasal olarak uzaklaştırılması avantajlıdır [2].

20. yüzyılın ikinci yarısından sonra hassas döküm, kıymetli metallerden takı üretiminde en önemli fabrikasyon işlemi olarak gelişmiştir. Ayrıca ince hatlı mücevherlerin üretiminde, tekrarlı motifleri olan geniş parçalarda ve el yapımı mum modeller ile takı tasarımında da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Gümüş sanayinin kum kalıba döküme dayanan uzun bir tarihi vardır. Gümüşçüler, kuyumculardan farklı olarak hassas döküme uyum ağlaması daha yavaş olmuştur. Uzun yıllardır geleneksek gümüşçülük ve kum kalıba gümüş dökümü kaybolmuştur. Bu zaman zarfında hassas döküm yöntemi ile nispeten büyük parçaların dökümü mümkün hale gelmiş ve gümüşçüler bu parçaların üretimine dönmüşlerdir.

Kaybolan mum tekniği ile takı dökümünün tarihi, işlemin antik çağlardaki başlangıcına kadar gider. Ancak modern teknik ile kitlesel üretim 20. yüzyılda, 19. yüzyılın sonlarında ortaya çıkan dişçilik dökümlerinden geliştirilmiştir. Modern işlemin başlangıç noktası Philbrook'un 1890'larda hassas döküm kalıp çamurunu geliştirmesi ile başlamıştır. Modern hassas döküm sanayi kuruluşunu, ona ve dişçilik alanında ondan sonra gelenlere borçludur.

İlk dişçilik dökümleri kıymetli metal alaşımlarından yapılmaktaydı ve bu tekniği kuyumculuk için kullanmak küçük bir adımdı. İlk gerçek takı hassas dökümü de dişçilik teknisyenleri tarafından yapılmıştı [3].

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, dereceli hassas kalıba döküm yöntemi ile yüksek boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesine sahip parça dökümü için genleşen tip alçı bağlı kalıp malzemesi ile yüksek alümina çimentosu bağlı kalıp malzemesinin geliştirilmesi, kalıplama prosedürünün tespiti ve döküm prosedürünün oluşturulması hedeflenmiştir.

İstenilen boyutsal hassasiyetin eldesi amacıyla kalıp malzemesi prizlenme genleşmesi ve termal genleşme olmak üzere iki temel öğe baz alınarak dizayn edilmiştir. Yüzey kalitesi açısından ise ortalama partikül boyutu, partikül boyut dağılımı aralığı ve Su / Toz oranı esas alınarak seçim yapılmıştır.

1.3 Hipotez

Hassas dökümün de en hassası sayılabilecek olan dereceli hassas döküm yönteminde kalıp kavramı diğer döküm yöntemlerine göre farklılık göstermektedir. Diğer harcanabilen kalıba döküm yöntemlerinde (yaş, reçineli kum kalıp, kabuk hassas döküm gibi) kalıp, çoğunlukla dökümcünün bir araya getirdiği malzemelerden ve/veya bileşenlerden oluşmaktadır. Dereceli hassas döküm yönteminde ise kalıp malzemesi tam bir uç üründür. Dökümcü bu malzemeyi hazır olarak alır sadece belli oranda suyla karıştırarak kalıp çamurunu oluşturur ve kullanır. Bu durumda, böyle bir uç ürünün özelliklerine hakim olmak ve üretebilmek katma değeri yüksek bir ürünün üretime kazandırılabileceği anlamına gelir. Tez çalışmasının çıkış noktasını bu fikir oluşturmaktadır. Bir yandan alçı bağlı ticari kalıp malzemeleri ile rekabet edebilecek özelliklerde alçı bağlı kalıp malzemeleri geliştirilmesi, diğer yandan da yüksek alümina

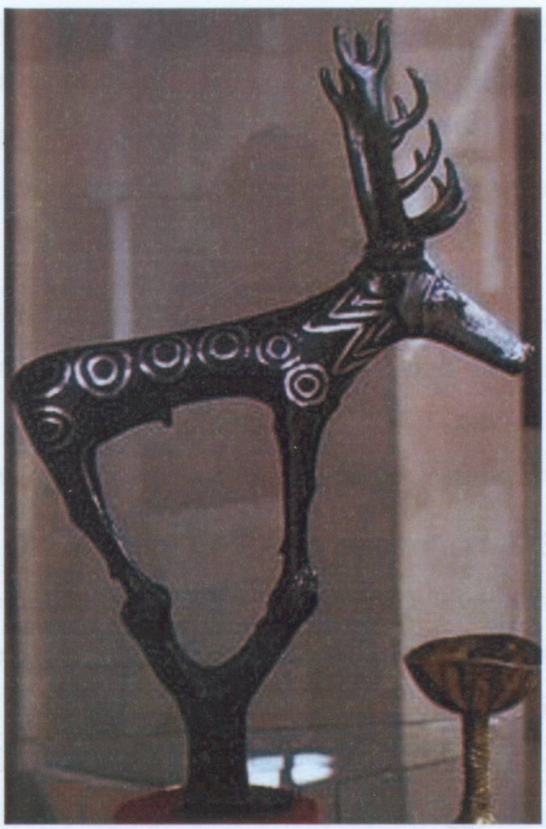
çimentosu bağlı silika ve molokit agregalı yeni nesil yüksek sıcaklık kalıp malzemelerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu malzemelerinin özelliklerinin tespiti ve ticari muadilleri ile karşılaştırılması özellikle üzerinde durulan yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyete etki eden unsurları ortaya koymaktadır.

BÖLÜM 2

HASSAS DÖKÜM YÖNTEMİ

2.1 Hassas Dökümün Tarihçesi

L.B. Hunt hassas dökümün uzun tarihiyle ilgili araştırmalar yapmıştır. Metallerin ergitilerek kalıplara dökülmesi ilk insanların uygarlaşma yolunda attıkları en önemli adımlardan biridir. MÖ 4000 yılından önce farklı bölgelerde bağımsız olarak renkli mineraller malakit ve azurit ile yapılan denemeler sonucunda bakır tasfiyesi başlamıştır. Bu metalurjideki ilk adımın kesin tarihi ve yeri bilinmemesine rağmen aynı zamanlarda Anadolu, İran, Suriye, Filistin ve Tayland'da başladığını gösteren kanıtlar bulunmuştur. Şekil 2. 1'de Ankara yakınlarındaki Alaca Höyükte bulunan ve Hitit medeniyetine ait olduğu belirlenen; daha sonraları Anadol otomobillerinin armasında da kullanılan ünlü bronz geyik heykeli görülmektedir. MÖ 2400'lü yıllara tarihlenen bu heykelin, yolluk parçalarının üzerinde bulunması heykelin hassas döküm ile döküldüğünü göstermektedir. Bu tarihi eser, Ankara Anadolu Medeniyetleri Müzesinde sergilenmektedir.



Şekil 2. 1 Alacahöyük bronz geyik heykeli [4]

Bir sonraki aşama elbette ki bakırın, taştan, bazen de kilden yapılmış açık kalıplara dökülmesi ile basit parçaların üretimi olmuştur. Bunu takiben iki parçalı kalıplar ile bütün yüzleri şekillendirilmiş parçalar üretilebilmiştir. İlk tasfiye ve ergitme işlemleri muhtemelen çömlek pişirilen fırınlarda yapılmıştır ve ilk metal işçileri bu iş için ve ayrıca potalar için çömlekçilerin yardımını almış olmalıdır. O zamanlarda yakın doğuda veya herhangi bir yerde çömlekçiler çeşitli tanrılara adak olarak sunulan doğal veya sembolik insan ya da hayvan figürleri yapmaya alışkındılar. Bu tip heykelcikler asırlar boyu çeşitli taşlara oyulmuştur; bunun yanında dini nitelikli objeler olarak veya ateşe atılıp yakılarak düşmanlardan gelecek lanetleri uzaklaştırmak amacıyla balmumundan küçük insan figürleri yapılmıştır.

MÖ 4. Bin yılın ortalarında bilinmeyen bir tarihte ve yerde muhtemelen bağımsız olarak birden fazla bölgede bir çömlekçi veya metal işçisi, büyük ihtimalle ikisi birden, parlak bir fikir ortaya çıkardılar. Balmumundan işlenmiş bir modeli kil ile kapladılar sonra bu kompozit yapıyı ısıtıp, kili sertleştirdiler; mum ergiyerek uzaklaştı ve böylece elde edilen kalıbı kullanarak mumdaki tüm detaylara sahip döküm yaptılar. Bu yenilik büyük bir coşkuyla karşılanmış olmalıydı. Önceki tekniklere göre pek çok avantajla, her

şekilde obje çok daha özenli bir şekilde üretilebiliyordu. Taşla kıyaslandığında insan kol ve bacakları, hayvan ayak ve boynuzları çok daha kolay bir şekilde işlenebiliyor ve kil ile karşılaştırıldığında elde edilen dayanıklılık çok yüksek oluyordu. Mum yabani arılardan elde edilebiliyordu ve zaten farklı amaçlar için kullanılan ticari bir üründü, arıcılık ise yine erken zamanlarda Batı Asya'da başlamıştı.

Kaybolan mum döküm tekniğinin (hassas döküm) bu başlangıcı, arkeologlar tarafından tekniğinin isminin Fransızcası olan "cire perdue" olarak adlandırılır. İlk dökümler arı bakırla yapılmış ve bunu arsenikli bakır ile kalay bronzu dökümleri izlemiştir, bunlardan kısa bir süre sonra da altın dökümleri gerçekleştirilmiştir.

Hassas dökümün bazı ilk bakır örnekleri Mezopotamya'da MÖ 3500 civarında, yazının icadından önce kullanılan, kireç taşı veya manyezite oyulan mühürlerin arkasına monte edilen hayvan figürlerinde görülmektedir. Aynı zaman dilimine ait benzer örnekler, eğilmiş dağ keçisi ve farklı hayvan figürlerindeki büyük elbise iğneleri şeklinde Elam' da (Güney Batı İran'da) bulunmuştur ve günümüzde Louvre Müzesi'nde sergilenmektedir. Bir kaç yüzyıl sonra ise yine benzer örneklere bu defa Truva'da ve çeşitli Yunan şehirlerinde rastlanmaktadır [5].

2.2 Hassas Döküm Yönteminin İşlem Adımları

Hassas döküm yönteminde, harcanabilen bir modelin etrafı, oda sıcaklığında sertleşen refrakter bir çamurla sarılarak hazırlanan bir kalıp kullanılır. Genellikle mum veya benzeri plastikten hazırlanan model daha sonra ergitilerek veya yakılarak kalıp boşluğu meydana getirilir. Bu nedenle hassas döküm yöntemine "harcanan (kaybolan) mum yöntemi" adı da verilir [6].

Hassas dökümün avantajları:

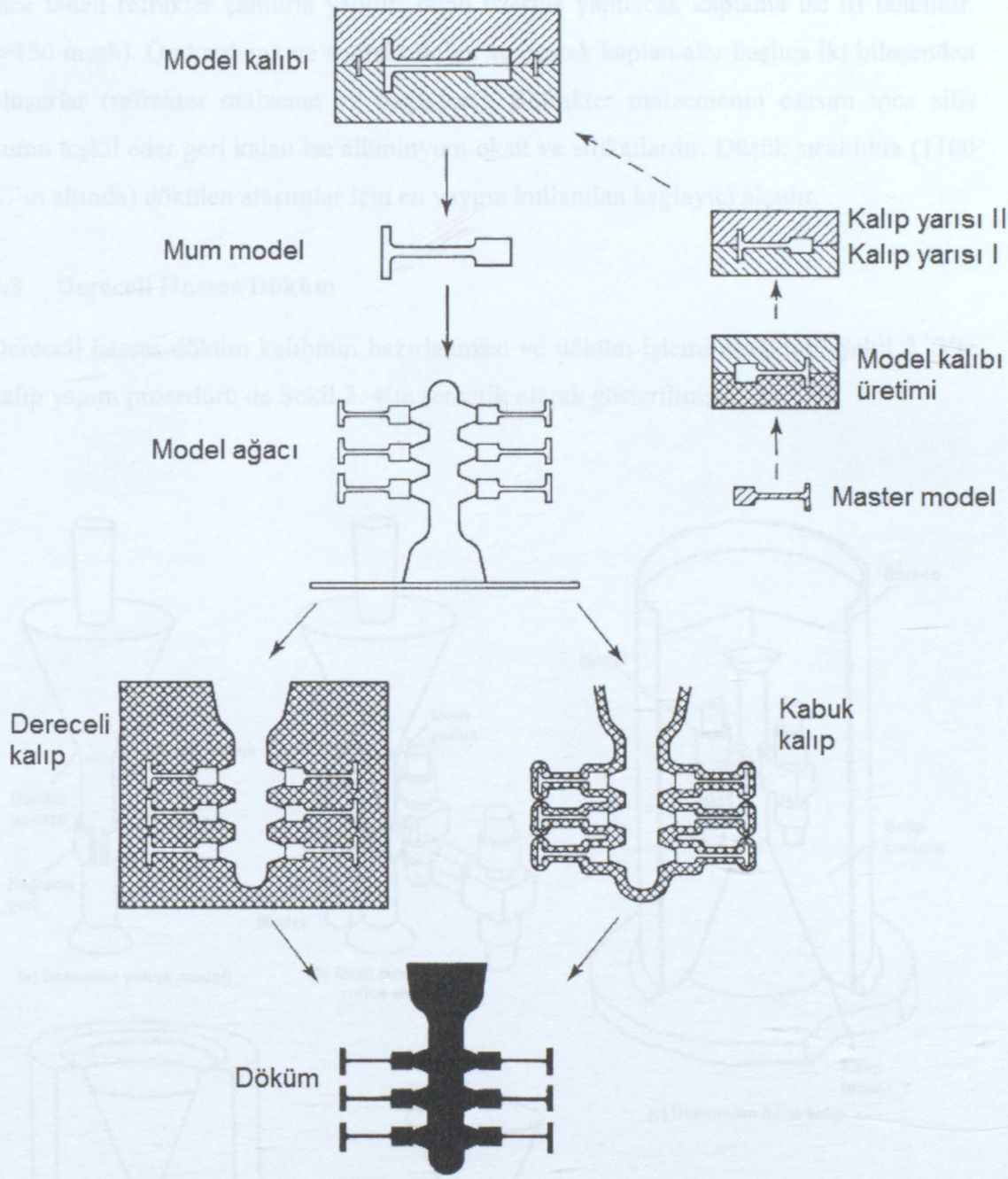
1. Geleneksel döküm yöntemleri ve makineyle işleme yolundan imali zor veya bazen imkânsız olan karmaşık şekilli parçaların kitle üretimi bu yöntemle mümkün olmaktadır.
2. Diğer döküm yöntemlerine nazaran daha yüksek boyutsal hassasiyet, daha düzgün yüzey ve ince detay kısımların daha hassas elde edilmesi imkânı verir.
3. Yöntem ergitilip dökülebilen bütün metallere uygulanabilir.

4. 25 kg ağırlığa kadar dökümler ve bazen de (nadir olarak) 400 kg'a kadar parçalar bu yöntemle üretilebilir.
5. Hassas döküm yolu ile elde edilen parçaların hemen hemen hiç ilave işlem gerektirmemesi, "kolay işlenebilir metal seçimi" faktörünü ortadan kaldırmaktadır.
6. Bu yöntem ile tane boyutu, tane yönlenmesi ve yönlenmiş katılaşma gibi metalurjik faktörler yakından kontrol edilebilmekte ve bu sayede mekanik özellikler de kontrol altında tutulabilmektedir.
7. Vakum veya koruyucu atmosfer altında dökülmesi gerekli olan metal veya alaşımlara da yöntem kolaylıkla uygulanabilmektedir.
8. Hassas döküm yönteminde tek parça kalıp kullanıldığından ayırma yüzeyi veya "mala işlem yüzeyi" yoktur. Ve parça üzerinde, diğer döküm yöntemlerinin ürünlerinde olduğu gibi bu yüzeyin izi bulunmaz [7].
9. Kalıp hazırlama açısından Şekil 2. 2'de görüldüğü gibi iki farklı hassas döküm yöntemi vardır.

Hassas kabuk kalıp yöntemi (Shell Investment-Seramik kabuklu)

Dereceli kalıp yöntemi (Solid Investment-Flask Investment-Blok kalıp yöntemi)

Bu yöntemler, hiç değilse model hazırlama tekniği açısından tamamen aynıdır. Kabuk kalıp yönteminin farklı yanı, modellerin hemen her zaman bir ön kaplama işlemine tabi tutulmasıdır. Dereceli kalıp yönteminde ise modeller ön kaplama işlemine tabi tutulabilir veya hiç ön kaplama yapılmayabilir [7].



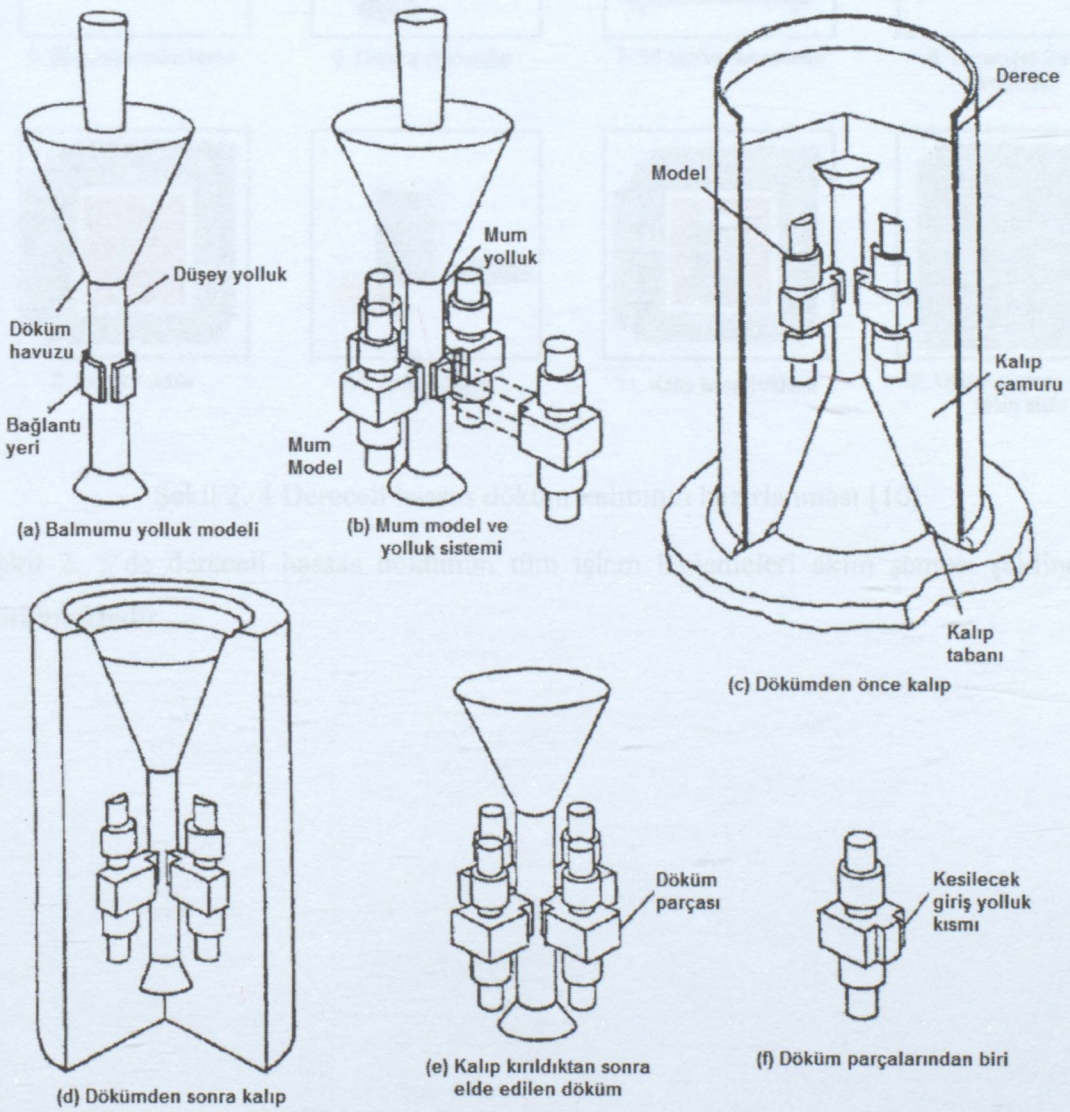
Şekil 2. 2 Hassas döküm teknikleri şeması [8]

Dereceli kalıp yöntemi, uygulamada demir esaslılar ve demir dışı alaşımlar için olmak üzere ikiye ayrılır. Demir esaslılarda ve döküm sıcaklığı yüksek olan demir dışı alaşımlar için kullanılabilen alçı, demir esaslılara uygun bağlayıcı veya refrakter malzeme olmayacaktır. Dereceli kalıp yönteminde demir dışı alaşımlar için (döküm sıcaklığı nispeten düşük olanlar) modelde ön kaplamaya ihtiyaç olmamakla beraber, demir esaslılarda ön kaplama yapmak standart uygulama haline gelmiştir. Ön kaplama

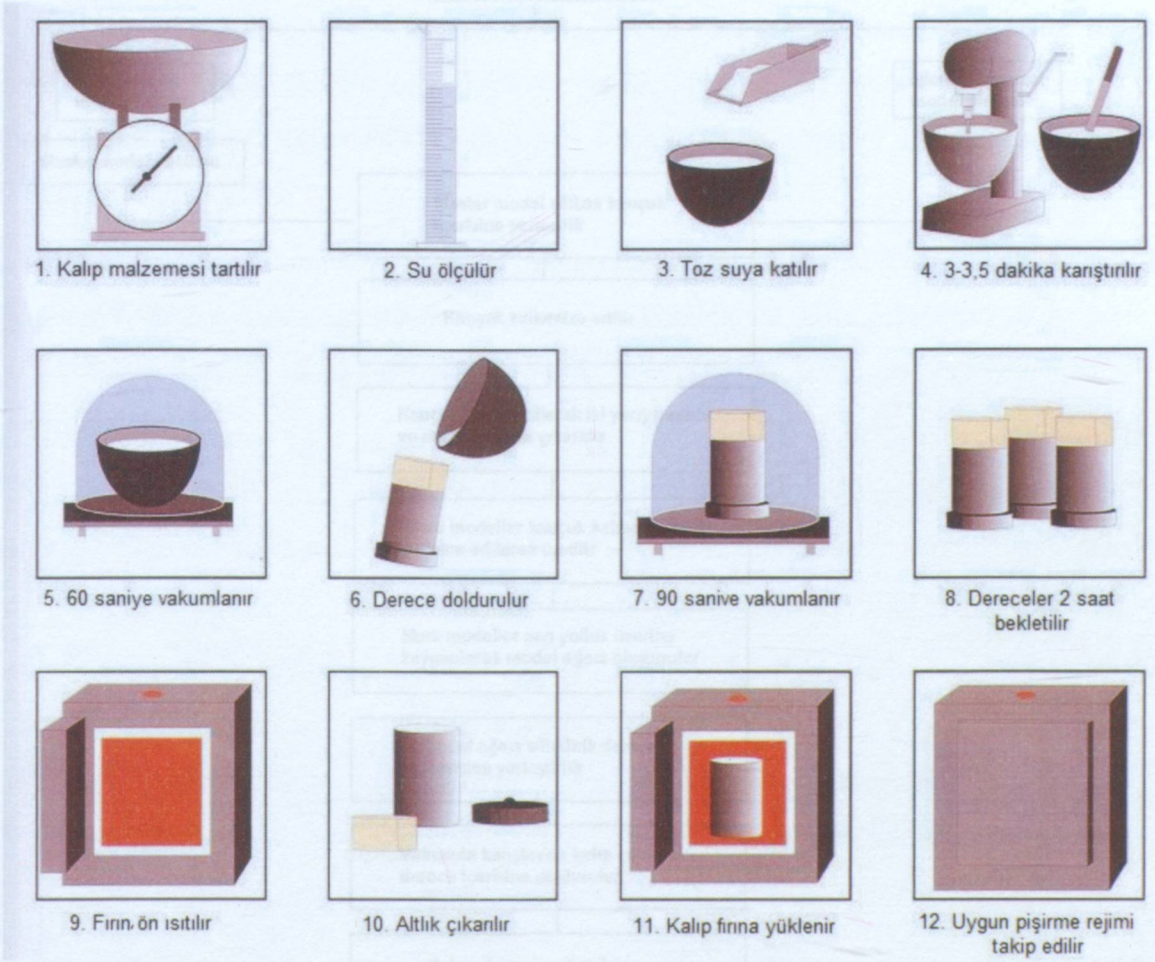
ince taneli refrakter çamurla yapılır; bunu üzerine yapılacak kaplama ise iri tanelidir. (>150 mesh). Ön kaplama ve sonraki dolgu ve destek kaplamalar başlıca iki bileşenden oluşurlar (refrakter malzeme ve bağlayıcı). Refrakter malzemenin esasını ince silis kumu teşkil eder geri kalan ise alüminyum oksit ve silikatlardır. Düşük sıcaklıkta (1100 °C'ın altında) dökülen alaşımlar için en yaygın kullanılan bağlayıcı alçıdır.

2.3 Dereceli Hassas Döküm

Dereceli hassas döküm kalıbının hazırlanması ve döküm işlemi aşağıdaki Şekil 2. 3'te kalıp yapım prosedürü de Şekil 2. 4'te şematik olarak gösterilmiştir.

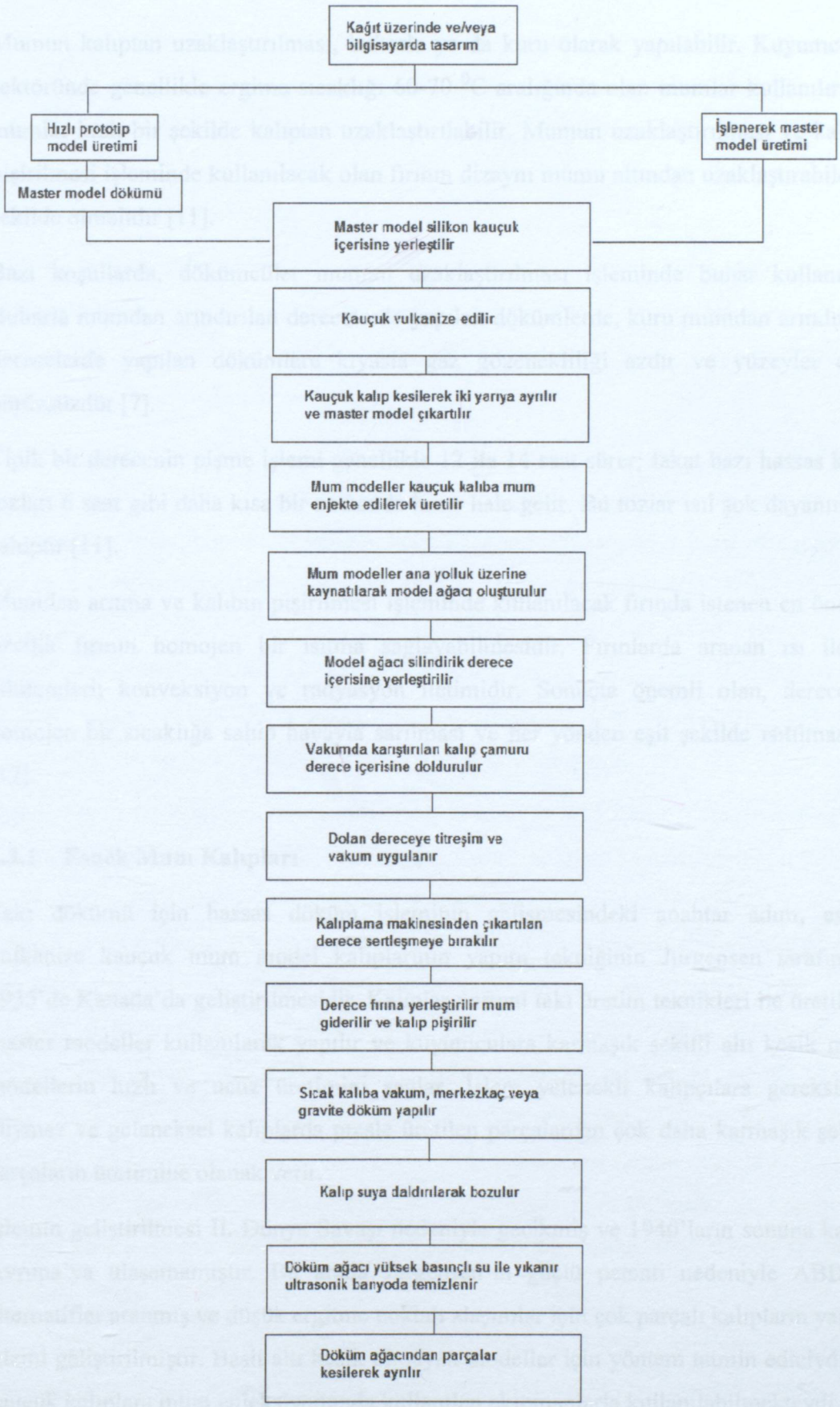


Şekil 2. 3 Dereceli hassas döküm tekniği şeması [9]



Şekil 2. 4 Dereceli hassas döküm kalıbının hazırlanması [10]

Şekil 2. 5'de dereceli hassas dökümün tüm işlem kademeleri akım şeması şeklinde görülmektedir.



Şekil 2. 5 Tüm işlemleriyle dereceli hassas döküm akım şeması

Mumun kalıptan uzaklaştırılması, buharla ya da kuru olarak yapılabilir. Kuyumculuk sektöründe genellikle ergime sıcaklığı 60-70 ^{0}C aralığında olan mumlar kullanılır. Bu mumlar hızlı bir şekilde kalıptan uzaklaştırılabilir. Mumun uzaklaştırılması ve kalıbın pişirilmesi işleminde kullanılacak olan fırının dizaynı mumu altından uzaklaştırabilecek şekilde olmalıdır [11].

Bazı koşullarda, dökümcüler mumun uzaklaştırılması işleminde buhar kullanırlar. Buharla mumdan arındırılan derecelerde yapılan dökümlerde, kuru mumdan arındırılan derecelerde yapılan dökümlere kıyasla gaz gözenekliliği azdır ve yüzeyler daha pürüzsüzdür [7].

Tipik bir derecenin pişme işlemi genellikle 12 ila 14 saat sürer; fakat bazı hassas kalıp tozları 6 saat gibi daha kısa bir zamanda hazır hale gelir. Bu tozlar ısıl şok dayanımına sahiptir [11].

Mumdan arıtma ve kalıbın pişirilmesi işleminde kullanılacak fırında istenen en önemli özellik fırının homojen bir ısıtma sağlayabilmesidir. Fırınlarda aranan ısı iletim yöntemleri; konveksiyon ve radyasyon iletimidir. Sonuçta önemli olan, derecenin homojen bir sıcaklığa sahip havayla sarılması ve her yönden eşit şekilde ısıtılmasıdır [12].

2.3.1 Esnek Mum Kalıpları

Takı dökümü için hassas döküm işleminin gelişmesindeki anahtar adım, esnek vulkanize kauçuk mum model kalıplarının yapım tekniğinin Jurgensen tarafından 1935'de Kanada'da geliştirilmesidir. Kalıplar normal takı üretim teknikleri ile üretilmiş master modeller kullanılarak yapılır ve kuyumculara karmaşık şekilli altı kesik mum modellerin hızlı ve ucuz üretimini sağlar. İşlem yetenekli kalıpçılara gereksinim duymaz ve geleneksel kalıplarda presle üretilen parçalardan çok daha karmaşık şekilli parçaların üretimine olanak verir.

İşlemin geliştirilmesi II. Dünya Savaşı nedeniyle gecikmiş ve 1940'ların sonuna kadar Avrupa'ya ulaşamamıştır. Bu arada Jurgensen'in güçlü patenti nedeniyle ABD'de alternatifler aranmış ve düşük ergitme noktalı alaşımlar için çok parçalı kalıpların yapım işlemi geliştirilmiştir. Basit altı kesik olmayan modeller için yöntem tatmin ediciydi ve kauçuk kalıplara mum enjeksiyonunda kullanılan ekipmanlarla kullanılabilmekteydi. Bu yöntem lisans ücretinden kaçınmak için üreticiler tarafından yaygın olarak

kullanılmıştır. Ne zaman ki 1950'ler civarında kauçuk kalıp kullanımı serbest hale gelmiştir, kolay ergiyen alaşımların kalıplarının kullanımından, birkaç yüksek hassasiyet gerektiren modellerde uygulanması hariç, vazgeçilmiştir [3].

2.3.2 Kauçuk Kalıp Yapımı

Yüksek kalitede ürün elde etmek için gereken bir diğer önemli işlem kauçuk kalıbın doğru tasarımıdır. Hassas dökümle üretilebilecek parçalar için neredeyse hiçbir sınır yoktur. Tek sınır, tasarımcının hayal gücü ve yaratıcılığıdır. Kalıp yapımını öğrenmek uzun süreli pratik gerektiren bir iştir.

Doğal, sentetik ve silikon kauçuklar olmak üzere pek çok tür ticari kauçuk mevcuttur. Her türün ayrı özellikleri vardır ve dökülecek parçanın şekline göre en uygunu olanı tercih edilir. Genellikle doğal kauçuk daha dayanıklı ve aşınmaya karşı dirençliyken, silikon kauçuğun dayanımı düşük ancak ince detayları kopyalama kabiliyeti daha yüksektir. İki bileşenli vulkanizasyon gerektirmeyen kauçuklar ticari olarak en son ortaya çıkan malzemelerdir. Görünüşe göre kullanımları kolaydır ancak diğer kauçuk türlerine göre aşınma dayanımları oldukça düşüktür. Her tür kauçuk dikkatlice kullanılmalıdır, üreticilerin tavsiyelerine sıkı olarak uyulmalıdır.

Kalıp yapımı öncesinde master model, yağ giderici çözelti içeren ultrasonik banyoda dikkatlice temizlenmelidir. Vulkanize kauçuk kullanıldığında kauçuk, metal bir çerçeve içerisine (tercihen dövme alüminyum) kat kat sıkıca yerleştirilir. Model, kauçuğun merkezine yerleştirilip eşit sayıda kauçuk katı konur. Vulkanizasyon presinin sıcaklık kontrollü plakaları vardır. Kullanılan kauçuk çeşidine bağlı olmakla birlikte 150-160 °C arasında basınç altında vulkanizasyon gerçekleşir. Plakalar açılarak metal çerçeve presten alınır ve kalıp tek parça olarak çıkartılır. Keskin bir bıçak veya neşterle kauçuk kalıp iki yarıya ayrılır ve master model kalıptan çıkartılır. Kauçuk kalıbın ikiye kesilmesi kalıp yapımının en çok beceri ve tecrübe gerektiren kısmıdır. Kesilen parçaların model çıkarıldıktan sonra birbirini tam olarak karşılaması ve kapanması gerekmektedir. Doğru şekilde ikiye ayrılmamış kalıplar mum enjeksiyonu sırasında sorunlara neden olacaktır [13].

Hassas dökümde işleme toleranslarını belirlemedeki en önemli faktör mum modelin boyutsal değişimidir. Model kalıbı ile mum model arasında oluşan boyutsal değişim, ısıl genleşme, daralma ve sıcak deformasyon gibi olgulardan oluşan bir fenomendir. Model

kalıbının boyutları mumun termofiziksel ve termomekanik özellikleri ile kısıtlayıcı geometrik etkenlere, kalıp çevrim süresine, kalıp sıcaklığına, enjeksiyon basıncı ve sıcaklığına göre belirlenir [14].

2.3.3 Hassas Döküm Model Mumları

Mum insanoğlunun bildiği en eski termoplastik malzemedir. Sıvı, yarı sıvı ve plastik hallerde şekillendirilebilmesinden dolayı tarihi, el sanatları ve hassas döküm sanayinin gelişmesi ile yakından bağlantılıdır. Eski çağ Çin ve Mısır sanatkârları kaybolan mum tekniğini kullanırlardı ancak kullanılan mum sadece balmumuydu. Günümüzde ise hassas döküm sanayinde bu tekniğin ismi muma benzer özellikli tüm malzemeler için kullanılmaktadır.

Modern hassas döküm model mum karışımları, doğal hidrokarbon mumu, doğal ester mumu, sentetik mum, doğal ve sentetik reçineler, organik dolgu malzemeleri ve su gibi çok sayıda karmaşık bileşikten oluşmaktadır. Bu çok çeşitli bileşikler, ergime noktası, sertlik, viskozite, genleşme/büzülme ve kürleşme oranı gibi mum bileşenlerinin yapısından ve bileşiminden etkilenen özelliklerin ve gerekliliklerin belirlenebilmesi için formüluze edilmektedir. Hidrokarbon mumu, doğal ester mum, çeşitli tiplerde sentetik mumlar ve bazı reçineler ile ilgileniyorsak, düz zincir şeklinde dizilmiş karbon atomlu bileşikler ile ilgileniyoruz demektir. Bunun yanında bazı reçineler ve dolgu malzemeleri halka şeklinde dizilmiş karbon atomlarından oluşmaktadır.

Genellikle kısa zincirler düşük ergime noktası ve düşük sertlik anlamına gelir. Zincir uzunluğunun artmasıyla sertlikle birlikte ergime ve katılaşma noktası yükselir. Zincir uzunluğu mumun viskozitesini ve çözünebilirliğini de etkiler.

Döküm mumu çok sayıda farklı zincir uzunluğuna sahip bileşiğin karışımından oluşmaktadır ve diğer maddelerden farklı fiziksel davranışlar gösterir. Mum, diğer homojen kimyasal bileşikler gibi hemen ergimez ancak ara hallere geçiş yapar.

Mumun yapısı ve bileşenleri genleşme/büzülme özelliğini etkiler. Diğer malzemeler gibi mum ısı altında genleşir, soğurken büzülür. Bir metal ile karşılaştırıldığında mumun genleşmesi nispeten yüksektir. Mumların genleşme ve büzülme oranı 20 °C ile ergime noktası arasında eş biçimli değildir; ancak sıcaklık aralığı yapının bir fonksiyonudur.

Kristalin malzeme herhangi bir katı gibi davranarak, katı halde nispeten düşük genleşme gösterirken, sıvı hale geçince birden bire keskin bir geçişle yüksek bir genleşme gösterir ve bu durum ani genleşme artışı olarak tanımlanır. Sıvı halde yine genleşme düşüktür.

Mumlarda kısa zincirli kısım düşük sıcaklıklarda bile yumuşaktır ve genleşme eğrisine kademeli bir artış verir. Yüksek molekül ağırlığına sahip kristalin kısımda ise genleşme artışı basamaklı olur ve sıvı halde genleşme artışı yine düşüktür.

Kristalin olmayan reçine ise farklı davranır, başlangıçtan sıvı hale kadar eş biçimli bir genleşme sergiler. Kristalin olmadığı için keskin bir genleşme artışı göstermez. Bundan dolayı çeşitli reçinelerin muma ilavesi kristalin yapıyı azaltır ve genleşme/büzülme kapasitesinin azalmasına yardımcı olur.

2.3.3.1 Hassas Döküm Mumlarının Kategorizasyonu

Döküm Mum Tipleri:

Model mumu

Yolluk mumu

Geri dönüşüm mumu

Suda çözünebilir mum

Diğer özel mumlar (daldırma, yamama ve yapıştırma mumları)

Model mumları üç ana tipe ayrılır:

Katkısız veya dolgusuz model mumu

Emülsiyon model mumu

Dolgulu model mumu

Katkısız veya Dolgusuz Model Mumları: Bunlar karmaşık bileşikli pek çok mum ve reçine bileşiğinin etkisi altındadır. Katkısız mumların yüzey bitimi normal olarak parlaktır ve bunlar çoğunlukla geri dönüştürülerek hem yolluk hem de model yapımında kullanılır.

Emülsiyon Model Mumları: Bu mumlar, katkısız mumlar ile aynı temel bileşiklerden oluşur ancak %7-12 arası su ile emülsiyon haline getirilirler. Yüzey bitimi oldukça düzgündür. Suyun oynadığı dolgu rolü nedeniyle bir miktar pürüzlenme ortaya çıkabilir.

Üretici talimatlarına uyulduğu takdirde emülsiyon mumlarını kullanmak oldukça basittir. Çok amaçlı olmalarından dolayı yaygın olarak kullanılırlar ve yine bu mumlar da çoğunlukla geri dönüştürülüp yolluk sistemlerinde, modellerde kullanılabilirler.

Dolgulu Model Mumları: Bu mumlarda da diğer iki kategoride olduğu gibi temel bileşikler aynıdır; ama bunlara mum içerisinde çözülemeyen yansız toz dolgu malzemeleri karıştırılır. Bu şekilde kararlılık artar, pürüzlenme ve oyuklanma azalır. Kullanılan dolgunun organik, tamamen yanabilir, kül bırakmaz olması zorunludur ve çok çeşitli dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Ayrıca yüzey bitimini etkilememesi için dolgu malzemesi ince taneli olmalı ve mum sıvı haldeyken ayrımlaşmanın (segregasyonun) en az olabilmesi için yoğunluğu muma olabildiğince yakın olmalıdır. Bunlar da yine ileri geri dönüşüm teknolojisi ile geri dönüştürülebilir ve yolluk sistemleri ile modellerde kullanılabilir.

Yolluk Mumları: Katkısız mumlar ile benzer ana malzemelerden oluşur ve yolluk sistemlerinde istenilen dayanımı vermek için karıştırılır.

Geri Dönüşüm Mumları: Geri dönüşüm işlemi mum üreticileri tarafından verilen bir hizmettir. Dökümhanelerin kullanılmış mumları alınır, karıştırılır ve özellikleri belirlenerek yeniden yapılandırılır. Malzeme, yolluk ve model yapımı için geri gönderilir. Katkısız, emülsiyon ve dolgulu mumlar bu yolla geri dönüştürülebilir.

Suda Çözünebilen Mumlar: Bunlar diğer teknikler ile üretimi zor olan iç şekilleri üretmek için tasarlanmıştır. Suda veya orta derecede asidik çözeltilerde çözünebilirler.

Diğer Özel Mumlar: Bunlar dolgusuz mum bileşikleridir, daldırma, yamama, tamir ve yapıştırma gibi işlerde kullanılırlar.

2.3.3.2 Hassas Döküm Mumlarının Özellikleri ve Kalite Üzerindeki Etkileri

Daha öncede anlatıldığı gibi hassas döküm mum malzemeleri pek çok bileşenden oluşan karmaşık bileşiklerdir. Her bileşen son özellikleri bir yönden etkilemek için katılır. Mumun bu özellikleri, dökümhanelerin düzgün döküm yapabilmesi için kritik öneme sahiptir. Döküm mumu için mum üreticisi ve dökümhane arasında bir şartname belirlenmişse malzemenin bu limitlerde üretimi, testi ve tedariki zorunludur. Döküm mumunun genel özelliklerine bakılarak kaliteyi etkileyen bir seri nokta belirlemek hem üretici hem de dökümhane açısından faydalıdır. Bu noktalar Çizelge 2. 1' de sıralanmıştır.

Bir dökümhane bir mumu kullanmaya karar verirse istikrarlı bir büzülme/pürüzlenme oranı sürdürmesi oldukça önemlidir.

Çizelge 2. 1 Döküm mumlarının önemli karakteristikleri

Büzülme ve Pürüzlenme
Katılaşma ve Ergime Noktası
Kül içeriği
Sertlik ve elastiklik
Viskozite
Yüzey bitimi
Kürleşme süresi
Oksidasyon kararlılığı
Geri dönüştürebilirlik
Diğer karakteristikler

Katılaşma ve ergime noktasının enjeksiyon sıcaklığı üzerindeki etkisi büyüktür. Döküm mumları ısıtma ve soğutmada pek çok fazdan geçerler. Katılaşma ve ergime noktaları sırasıyla yarı katı halin başlangıcını ve sonunu gösterirler. Enjeksiyon makinesinin sıcaklığı bu sıcaklıklar bilinerek belirlenmelidir.

Çoğu dökümhane yetkilileri, düşük kül içerikli mum kullanmanın, bunu sürdürmenin önemini ve külün zararlarının farkındadırlar. BICTA (British Investment Casting Trade Association) tarafından önerilen maksimum limit %0,05'tir Bununla birlikte, artığın ağırlığından çok döküm için zararlı olup olmadığı önemlidir.

Model üretiminde, kırılma, eğilme veya diğer istenmeyen durumlardan kaynaklanan hasarların azaltılabilmesi için mumun yeterli sertliğe ve elastikliğe sahip olması gerekmektedir.

Başarılı model üretimi için döküm mumunun viskozitesi kritik öneme sahiptir. Geniş ince kesitlerin üretimine ihtiyaç varsa kalıptaki ince kesitlere girebilecek düşük viskoziteli mum gerekmektedir. Ağır kesitler için ise daha az akışkan mum tercih

edilebilir. Belirli bir uygulama için mumun viskozitesi uygun değilse kalıp içerisinde akışı yanlış olacaktır. Bu durum, bu kritik özellik için kalite kontrolün önemini vurgulamaktadır.

Başarılı bir model üretimi için iyi bir yüzey bitimi önemlidir. Kötü yüzeyli bir model yine kötü yüzeyli bir döküm ile sonuçlanır. Katkısız, emülsiyon ve dolgulu olmak üzere üç ana tip model mumu farklı yüzey bitimleri verir. Genellikle katkısız mumlar daha parlakken, emülsiyon mumlar daha düzgün ve dolgulu mumlar da biraz pürüzlüdür. Kendi yönlerinden her üç tip de tatmin edicidir ve dökümhaneler bunlar arasından tercihlerini yaparlar. Çok yumuşak ve kolayca hasar gören yüzeyler ve kalın dolgu kullanımı nedeniyle pürüzlenmiş yüzeyler, kötü yüzeylere örnektir.

Dökümhaneler başarılı model üretimi için kullandıkları mumun kürleşme süresini ve farklı bileşenlerin farklı kürleşme süresi verdiğini bilmelidirler. Sıra dışı bir durum olarak dökümhaneler çok hızlı kürleşmeye ve kalıptan çıkarılmaya gereksinim duyabilirler, bunun yanında bir diğer sıra dışı durum; yavaş kürleşme bir avantaj olabilir.

Mumun kararlılığı dikkate almaya değer bir özelliktir. Burada düşünülmesi gereken terim oksidasyon direnci veya ısı ya da yaşlanmaya maruz kaldığında bazı bileşiklerinin bozulmasıdır. Bazı bileşenlerin diğerlerine göre çok daha fazla oksitlenmeye eğilimi vardır, gerektiği takdirde üreticiler antioksidan malzemeler kullanmaktadır. Mumda oksitlenme meydana geldiği takdirde özellikleri belirgin ölçüde değişir ve kullanıma elverişsiz hale gelebilir.

Mumun yeniden kullanılabilirliği hem ekolojik hem de ekonomik açıdan önemlidir. Her üç tip mum için de belirlenen özelliklerde geri dönüşüm ve yeniden kullanılabilirlik mümkünken, sıkı kalite kontrolü tavsiye edilir.

Hiç şüphe yok ki göz önüne alınabilecek başka özellikler de vardır. Örneğin bileşenlerin sağlığa zararlı olmaması gerekmektedir. Sözü edilen özellikler hassas döküm mumlarının model üretim kalitesini etkileyen en önemli genel özellikleridir. Vurgulamak gerekir ki, kalite kontrol ve ticari saygınlık yönünden dökümhaneler ve mum üreticileri bu malzemelerin gelecekte nasıl gelişeceğini belirlemeye çalışacaklardır[3].

Hassas döküm model mumunun performansı; ergime noktasına, hacimsel genleşmesine, kül içeriğine, dolgu içeriğine, oksidasyon direncine, kimyasal yansızlığına, faz ayırma eğilimine, mekanik direncine, kavitasyon eğilimine, plastikliğine, elastikliğine, sertliğine, viskozitesine, sürünme direncine, darbe dayanımına ve kaynaklanabilirliğine göre değerlendirilir [14], [15].

2.3.4 Mum Model Üretimi

Ergime aralığı dar olan mumlar hassas dökümde model üretimi için tavsiye edilir. Mum türü üretilecek parçaya bağlı olarak belirlenmelidir. Kullanılan mumların fiziksel karakteristiklerini bilmek çok önemlidir. Sertlik, yoğunluk, kül içeriği, doğrusal ve hacimsel ısıl genleşme bilgileri doğru mum seçimi yapmak için önemlidir.

Örneğin, ısıl genleşme soğuma büzülmesini değerlendirmede ve döküm parçanın gerçek boyutlarını hesaplamada kullanılabilir. Viskozite mumun kalıbı tamamen doldurabilme kabiliyeti ile ilgili bilgi verebilir ve yoğunluk dökülecek metal miktarını hassas bir şekilde hesaplamak için kullanılabilir.

Mum Enjeksiyonu: Sıcaklık, mum model üretimi için temel parametredir. Sadece mum sıcaklığı değil, pres nozul sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı da önemlidir. Endüstriyel mum presleri, mum sıcaklığı ile birlikte nozul sıcaklığını da kontrol eden ve gösteren sistemlere sahiptir ve bunların iyi kalitede model üretiminde çok etkilidir. Mum sıcaklığı çok düşük olduğunda kalıp tam olarak dolmayabilir, çok yüksek mum sıcaklığı da kabarcık oluşumuna ve fazla büzülmeye neden olabilir.

Sıcaklığın yanında bir diğer önemli parametre de basınçtır. Basınç değişimi mum modellerin ağırlığında belirgin değişimlere neden olur bu da ergitilecek metal miktarını değiştirir. Her kalıbın ve her ayrı tür mumun gerekli özel basınç düzeyi, sıcaklığı ve uygun soğuma süresi vardır. Farklı parametreler arasında en iyi uzlaşma tecrübeyle ve denemelerle bulunmaktadır. Parametrelerdeki uzlaşma model üretimi sürecinde değişim gösterebilir. Örneğin kullanıma yeni alınmış soğuk bir kalıp için başlangıçta parametreler doğru olabilir; ancak kalıp sıcaklığı zamanla artacağından iyi çalışmaya devam etmeyebilir. Bu nedenle kalıbın soğuma süresi de doğru hesaplanmalıdır. Son olarak, mum modeller toz almayacak serin bir ortamda düz bir zeminde depolanmalıdır, gelişigüzel üst üste yığılmamalıdır; çünkü bu durumun aksi, şekil ve yüzey

bozulmalarına neden olabilir [13]. Kauçuk kalıp ile mum model örnekleri Şekil 2. 6'da görülmektedir.

Şekil 2. 6 Kauçuk kalıplar ve mum modeller [16]

Enjeksiyon parametreleri mum modellerin boyutsal hassasiyetinde önemli rol oynamaktadır. Bu parametreler; enjeksiyon akış hızı, çevrim süresi, sıcaklığı, basıncı ve kalıp sıcaklığıdır. Çevrim süresi ve/veya enjeksiyon basıncı arttıkça büzülme azalır. Enjeksiyon akış hızının mum model boyutlarına etkisi azdır [17], [18].

2.3.5 Model Ağacı Tasarımı ve Yapımı

Mümkün olduğu kadar benzer şekilde, boyutta ve ağırlıkta olan modeller aynı ağaca dizilmelidir. İnce ve kalın modeller aynı model ağacına yerleştirilmemelidir. Döküm sıcaklığı ince parçaları tam doldurabilmek için yüksek tutulduğunda kalın parçalar çok iyi çıkmayacaktır.

Farklı kalınlıkta parçalar aynı ağaca beraber dizileceği zaman hafif olanlar ağacın üst kısımlarına yerleştirilmelidir, çünkü bu kısımda basınç yolluk ağzına göre daha yüksektir.

Ana yolluk ile ara yolluk arasındaki bağlantılar düzgün ve iyi doldurulmuş olmalıdır. Bağlantı noktalarında kesit daralmasından kaçınılmalıdır.

Geleneksel olarak ana yolluk ile ara yolluk arasındaki açının 45°-60° olması tavsiye edilir. Son zamanlarda ise statik vakum dökümlerde 70°-80° gibi daha geniş açılar önerilmektedir. Yapılan en son araştırmalarda en iyi sonuçların modellerin ana yolluğu

dik olarak kaynatıldığı zaman alındığı bildirilmiştir. Bu şekilde iki avantaj birden sağlanmış olur; yönlenmiş katılaşma daha fazla desteklenerek çekme boşluğu oluşumu ihtimali azalır ve kalıp boşluğundan gaz çıkışı kolaylaşır, çünkü derecenin dışına ulaşabilmek için gaz daha ince bir kalıp katmanından geçecektir. Bu şekilde hapsolmuş gazın sebep olduğu gaz boşluğu oluşumu azalır.

Kauçuk altlık model ağacı yapımı için başlangıç noktasıdır, dikkatle seçilmesi gerekir. Çoğunlukla kauçuk altlık döküm ağacının tabanındaki yolluk ağzını oluşturur.

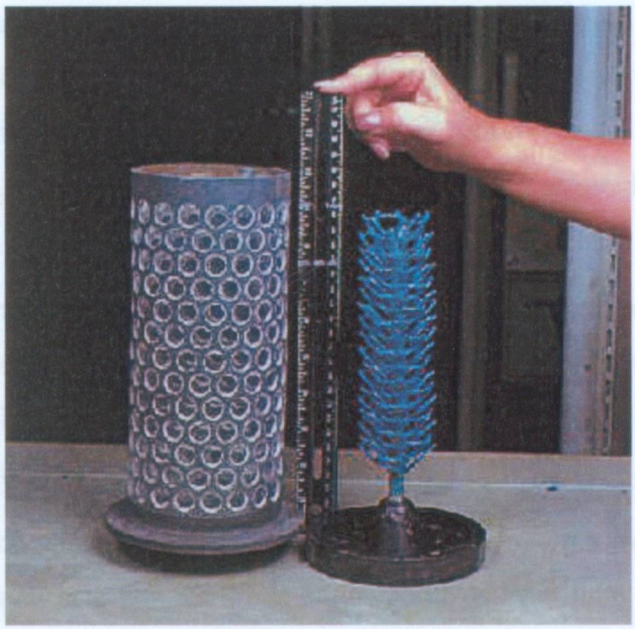
Altlığın temiz olması ve kalıp malzemesi artığının bulunması gerekir. Kullanılmış kalıp malzemesi artıkları yeni dökülecek kalıbın prizlenme süresini önemli ölçüde değiştirebilir.

Yolluk ağzı koni şeklinde olan kauçuk altlıklar, yarım küre şeklinde olanlara göre daha çok tercih edilir. Yarım küre şeklindeki yolluk ağzı basınç kaybına ve türbülansa neden olabilir. Altlığın merkezindeki ana yolluğun geçtiği kısım aşınmış olursa kalıpta o bölgede istenmeyen bir basamak oluşabilir, bu durumda da basınç kaybı ve türbülans oluşabilir. Dökümhanelerde kullanılan her altlığa bir kod numarası verilir ve ağırlığı kaydedilir.

Ana yolluk yapımında model mumlarına göre daha düşük ergime noktalı bir mum kullanılması daha uygundur. Bu şekilde mum almada ana yolluk ilk olarak erir ve model mumları erimeye başladığında kalıp içerisinde gerilme oluşumu engellenir.

Düşük açılı konik ana yolluklar standart silindirik olanlara göre tercih edilir. Koniklik daha iyi bir ısı dengesi sağlar; katılaşma ağacın tepesinden (küçük çaplı kısımdan) tabanına doğru ilerleyerek yönlenmiş katılaşma sağlanmış olur. Çekmeden dolayı oluşacak gözeneklilik tehlikesi de azaltılmış olur.

Her durumda ana yolluğun kesit alanı dikkatli bir şekilde belirlenmelidir, çünkü bu ağacın ölçülerine ve dökülecek parçaların boyutlarına ve şekline bağlıdır. Şekil 2. 7'de Kauçuk tabana yerleştirilmiş bir mum ağacı derecesi ile birlikte görülmektedir [13].



Şekil 2. 7 Mum ağacı ve derece [19]

2.3.6 Mum Giderme

Kalıp malzemesi üreticileri tarafından yürütülen son çalışmalarda önerildiği üzere, derecelerin doldurulmasının ardından 1-2 saat süre içinde prizlenme tamamen sona erdikten sonra mum alınarak kalıp, metal dökümü için boşaltılmalıdır.

Mum alma iki şekilde gerçekleştirilebilir; kuru (bu eski metottur) veya buharla. Kuru mum alma çoğunlukla pişirme fırınında, pişirme işleminin bir parçası olarak yapılmaktadır. Ayrıca esas pişirme öncesi başka bir fırında da mum alma işlemi yapılabilir. Başlangıçta buharla mum alma, yanan mumun çıkardığı dumanın neden olduğu hava kirliliğini engellemek amacıyla ekolojik nedenler doğrultusunda ortaya çıkmıştır. Sonradan buharda mum almanın dökümlerde gaz boşluğunu azaltarak daha yüksek ürün kalitesi sağladığı belirlenmiştir. Araştırmalar göstermiştir ki hassas dökümde iki tür gaz boşluğu oluşumu vardır; kalıp içinde hapsolan gazdan dolayı ve reaksiyon sonucu oluşan gazdan dolayı. Birinci tür, metal akışı sırasında oluşan türbülanstan kaynaklanır. İkinci tür gaz boşluğu ise alçı bağlı malzemelerde kalsiyum sülfatın parçalanarak kükürt dioksit gazı oluşturması ve bu gazın metal içinde kalması sonucunda oluşur. Normalde kalsiyum sülfatın parçalanması 1140 °C'da başlar; ancak silikanın ve mum artıkları gibi indirgeyici karbonun varlığında bu sıcaklık düşer.

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki kuru mum almada kalıbın iç yüzey gözenekleri mum ile dolmaktadır ve tamamen uzaklaştırılması zordur. Bu nedenle pişirme sırasında

karbon artıkları kalsiyum sülfatın parçalanmasını kolaylaştırarak kalıp dayanımının azalmasına ve döküm parçalarda gaz boşluğu oluşumuna sebebiyet verir. Karşıt olarak buharla mum almada, nem kalıp malzemesinin gözeneklerini doldurarak mum emilimini engeller. Böylece kalsiyum sülfat parçalanmasını azalır. Bu sebeple buharla mum alma bir süre tercih ve tavsiye edilmiştir

Bütün bunların yanında son çalışmalar buharla mum alma ile ilgili bazı şüpheler ortaya koymuştur. Buharla mum alma kalıp malzemesini bileşenlerinin morfolojisini modifiye ederek geçirgenliğin azalmasına neden olabilmektedir. Bu konudaki çalışmalar devam etmektedir ve bir yöntemin diğerine göre üstünlüğü belirli değildir.

Tercih edilen mum alma metodu ne olursa olsun, mum alma ve pişirme arasında kalıpların soğumasına asla izin verilmemelidir. Kalıp ısıl gerilime maruz kalabilir ve dayanımı azalır.

Mücevher taş bulunan kalıplarda buharla mum alma tavsiye edilmez. Taşlı dökümlerde kullanılan kalıp malzemeleri taşı koruyan borik asit içerir ve borik asit buharda çözünerek kalıptan uzaklaşır ve taşları koruma görevi göremez [13].

2.3.7 Kalıp Pişirme

Kalıp pişirme işlemi mumdan kalan son artıkları yakmak ve kalıba döküm esnasında gereken refrakterliği ve karakteristikleri kazandırmak amacıyla yapılan bir işlemdir. Kalıbın son karakteristikleri büyük oranda pişirme çevrimine ve seçilen ısıtma hızı ile bekleme periyotlarındaki sıcaklık homojenizasyonuna bağlıdır. Bu nedenle kalıp malzemesi üreticilerinin tavsiye ettiği pişirme çevrimine kesin olarak uyulmalıdır. Kuvars ve kristobailt arasındaki oran kalıp malzemesi türüne ve üreticilerine göre farklılık gösterir bu durumda pişirme çevrimi de değişmelidir.

2.3.7.1 Pişirme Çevrimi

Isıtma çevriminde iki kritik sıcaklık vardır. Birincisi, serbest suyun ve alçının kristal suyunun uzaklaştığı 100-120 °C arasıdır. Bu yavaş işlemde hacimce daralma meydana gelir. Bu nedenle sıcaklık yavaş yavaş arttırılmalı, çatlaklara neden olacak iç gerilim oluşumu engellenmelidir; aksi takdirde döküm parçaların uç kısımlarında kalıp çatlamasına bağlı olarak çapaklar oluşacaktır.

İkinci kritik nokta α-kristobalit - β-kristobalit dönüşümünün gerçekleştiği 250 °C civarıdır. Bu dönüşümde hacim artışı meydana gelir. Bu defa sıcaklık yeterli süre sabit tutularak dönüşümün kalıbın tamamında aynı şekilde gerçekleşmesi sağlanır.

Son olarak, alçı bağlı kalıp malzemeleri ile çalışıldığında maksimum çalışma sıcaklığı olan 750 °C'ın üzerine çıkılmamalıdır. Çünkü silikanın varlığında kalsiyum sülfatın parçalanmaya başlama sıcaklığı düşer ve sonuçta kalıp dayanımı azalır, sonuçta döküm parçaların yüzeyi kumlu bir hal alır.

Bunun yanında mumdan kalan karbon artıklarının tamamen uzaklaşmasını garanti etmek için 690 °C geçilmelidir. Genelde kabul gören en yüksek pişirme sıcaklığı 730 °C' dır.

Tipik bir pişirme çevrimi şu şekildedir: Mum almadan sonra kalıp, yavaşça bir saatte 250 °C'a ısıtılmalı ve bu sıcaklıkta iki saat tutulmadır, ardından bir saatte 450 °C' a ısıtılarak burada iki saat beklenmelidir, devamında yarım saatte 730 °C'a ısıtılıp üç saat tutulmalı ve son olarak seçilen döküm sıcaklığına inilerek dengelenmesi için en az yarım saat beklenmelidir. Kalıbın döküm sıcaklığı dökülecek parçanın ve kullanılan alaşımın bir fonksiyonu olarak seçilir. Örnek olarak verilen çevrimin süresi derece boyutlarına bağlı olarak değişmektedir. Büyük dereceler daha uzun süreler gerektirmektedir.

Bekleme sıcaklıklarında, kalıbın tamamında sıcaklığın dengelenmesine yeterli olacak süre beklenmesi çok önemlidir. Kalıp malzemesinin ısı iletiminin zayıf olduğu hiç unutulmamalıdır. Kalıpların değişik noktalarına yerleştirilen ısıl çiftler ile yapılan ölçümler göstermiştir ki sıcaklık seviyesinden bağımsız olarak kalıbın merkezinin fırın sıcaklığına ulaşması için en az yarım saat gerekmektedir. Aynı durum çevrimin soğutma kısmı için de geçerlidir. Derecelerin pişirme çevrimi sırasında oda sıcaklığına soğumasına müsaade edilmemeli ve sonra yeniden ısıtılmamalıdır. Bu durum çatlak oluşumlarına ve kalite düşüklüğüne neden olacaktır.

Fırın atmosferi, karbon artıklarının tamamen yanması için kuvvetli oksitleyici olmalıdır. Bu nedenle fırınların aşırı doldurulmasından kaçınılmalı, derecelerin çevresinde hava sirkülasyonu için yeterince boşluk bırakılmalıdır.

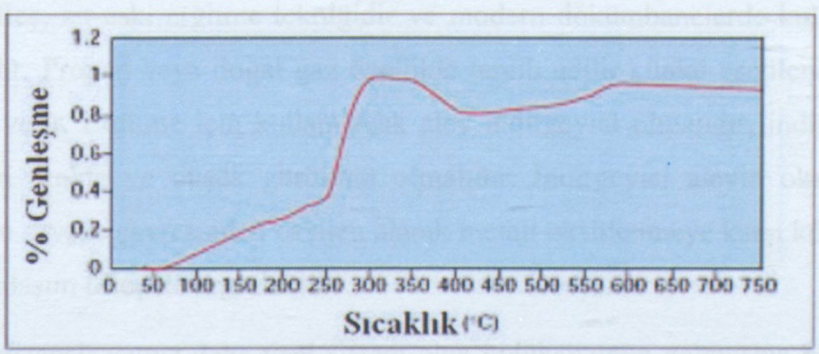
Kalıp içerisinde mücevher taşlar bulunduğu zaman pişirme çevrimi, taşları korumak için modifiye edilmelidir. En yüksek sıcaklık 630 °C'ı geçmemelidir ancak karbon artıklarının uzaklaşması için tutma süresi uzatılmalıdır [13].

2.3.7.2 Alçı Bağlı Kalıp Malzemesinin Pişme Davranışı

Mum almanın ardından derece sıcaklığı 100 °C'ın üzerine çıktığında serbest su buharlaşır ve dihidrat alçı ($CaSO_4.2H_2O$) hidrate suyunu kaybetmeye başlar. Ancak dihidrat alçının tamamen anhidrat alçıya (anhidrit) dönüşümü geniş bir sıcaklık aralığında ve karmaşık kristal kafes dönüşümleri ile gerçekleşir.

Bir dökümcünün bakış açısına göre, bu dönüşümlerin neden olduğu, özellikle 300-450 °C arasında etkili olan hacimce daralma önemlidir. Alçı kalıp malzemesi olarak tek başına kullanılsaydı kalıplar pişirme esnasında kırılacak ve döküm parçalar modellerden oldukça küçük çıkacaktı. Silika, alçının bu büzülmesini karşılamak ve kalıbın ısıl genleşmesini düzenlemek amacıyla kullanılır.

Silika çeşitli kristalin formlarda bulunur ve bunlardan iki tanesi hassas döküm kalıp malzemesi üretiminde kullanılır. Kuvars en çok bulunan silika çeşidi olup, α-β kristal dönüşümü hacim artışı ile beraber 570 °C civarında gerçekleşir. Kristobalit kalıp malzemesinin bir diğer önemli bileşenidir ve bir silika çeşididir, α-β kristal dönüşümü belirgin bir hacim artışı ile 270 °C çevresinde meydana gelir. Bu yüzden silikanın bu iki allotropik formu alçı bağlayıcının büzülme etkisini engellemek için kullanılır.



Şekil 2. 8 Alçı bağlı ticari bir kalıp malzemesinin ısıl genleşme eğrisi [13]

Şekil 2. 8'de tipik bir kalıp malzemesinin ısıl genleşme eğrisinin gösterdiği üzere, 250-300 °C arasında kristobalit genleşmeyi sağlamaktadır. Ardından 570 °C'a kadar alçının büzülmesi etkilidir. Bu sıcaklığın üzerinde ise kuvarsın dönüşümü genleşmeye katkıda bulunmaktadır.

Hassas döküm kalıpları soğuduğu zaman, geri dönüşümleri mümkün olan silika dönüşümleri geçilecek ve ilk silika genleşmesiyle eşit oranda bir büzülme meydana gelecektir. Ancak alçının büzülmesi kalıcıdır; bu nedenle soğumada silika büzülmesini karşılayacak bir alçı genleşmesi meydana gelmez. Soğuma eğrileri son döküm ölçülerini belirlemek ve derecelerin pişirmeyle döküm arasında neden çok fazla soğutulmadığını anlamak için kullanılabilir. Dökümden sonra soğuma esnasında alçı çok zayıflar ve soğuyan silikanın büzülmesinin neden olduğu bozulma buna eklenince kalıp suya daldırılarak uzaklaştırılabilir bir duruma gelir [13].

2.3.8 Ergitme ve Döküm

Her takı atölyesi hazır alaşım almayabilir, bir kısmı döküm için gereken alaşımı ergitme sırasında yapar. Genellikle saf metal (altın, gümüş) uygun bir master alaşıma katılır. Tamamen saf metalleri kullanarak işe başlamak yerine bu yöntem daha çok tercih edilir.

Ergitilecek alaşımın aynı boyda taneler şeklinde olması tercih edilmektedir. Bu sıcaklık kontrolünde avantaj sağlar. Alaşım, küçük parçacıklar halinde olduğunda ergitmesi kolay ve hızlı olur, aşırı ısınma riski engellenebilir. Çoğu işletme alaşımlamayı ön ergitme ile yapar ve metali suya dökerek taneler elde eder. Taneleştirme işlemi, ergiyik metalin uygun bir potadan, tercihen tabandan boşalan tipte bir potadan, karıştırılmakta olan suya dökülmesiyle yapılır.

Temel olarak üç ergitme tekniği vardır; üfleç, elektrik rezistanslı fırın ve indüksiyon ergitme. Üfleç, en eski ergitme tekniğidir ve modern dökümhanelerde kullanımı artık çok sınırlıdır. Propan veya doğal gaz özellikle tercih edilir çünkü asetilene göre daha temiz alev verir. Ergitme için kullanılacak alev indirgeyici olmalıdır, indirgeyici alev parlak mavi renkte ve düşük gürültülü olmalıdır. İndirgeyici alevin oksijen içeriği düşüktür, bu sayede çevresinden oksijen alarak metali oksitlenmeye karşı korur. Hemen hemen her alaşım üfleç ile ergitilebilir.

Elektrik rezistanslı ısıtma daha yeni sistem olan indüksiyonun gelmesine kadar yaygın olarak kullanılmıştır. Rezistans ile ergitme kapalı bir ortam sağlar ve atmosfer kontrolü mümkündür. Ergitme yansız (azot veya argon) ortamda veya zayıf indirgeyici ortamda gerçekleşebilir. Rezistans ile ergitmede, beyaz altın alaşımları için gereken yüksek sıcaklıkları elde etmek zordur. Her durumda ergitme işlemi yavaştır.

İndüksiyon ile ergitme en modern metottur ve neredeyse büyün yeni nesil döküm makinelerinde kullanılmaktadır. İndüksiyon ergitme çok hızlıdır ve karıştırma etkisi ile hızlı ısıl ve kimyasal homojenizasyon sağlar. İndüksiyon ısıtmanın frekansı düşürüldükçe karıştırma etkisi artar.

Ergitme hassas dökümün metalurjik içeriği en yüksek olan adımıdır. Bu nedenle bazı temel kuralları izlemek çok önemlidir.

1. Ergitmeden önce yeterli miktarda kıymetli metal alaşımı hesaplanmalıdır: Mum ağacının ağırlığının alaşımın yoğunluğu ile çarpımı ergitme için gereken minimum alaşım ağırlığını verir. Hesaplanan bu metal ağırlığı döküm ağzının tamamen dolabilmesi için bir miktar artırılır.
2. Ergitme şarjında geri dönüşüm hurdası minimum miktarda tutulmalıdır, %50 den daha fazla hurda metal kullanılmamalıdır.
3. Ergitilen hurda metal tamamen temizlenmeli, oksitler ve kalıp malzemesi artıkları bulunmamalıdır.
4. Tercihen tanecik şeklinde alaşım kullanılmalıdır. Daha önceki işlemlerden gelen hurda kullanıldığı zaman kullanmadan önce yeniden ergitilerek tanecik çekline getirilmesi tavsiye edilir.
5. Ergiyik, ergimenin ardından homojenleşmesi için karıştırılmalıdır. Modern indüksiyon ısıtma sistemlerinde karışma elektromanyetik etkileşimle gerçekleşir. Açık fırınlarda üfleç veya rezistanslı ergitmelerde karıştırma elle uygun refrakter bir çubuk ile yapılır, metalin kirlenmesinden kaçınılır.
6. Metal ergiyik halde, oksitlenmeyi ve buharlaşmayla alaşım elementi kaybını sınırlamak için mümkün olduğu kadar kısa süre tutulmalıdır.
7. Dökümden önce metal sıcaklığı alaşımın ergime sıcaklığının üzerine çıkartılmalıdır (aşırı ısıtma). Gereken üst ısı miktarı; alaşıma, parça şekline boyutuna ve döküm ekipmanına bağlıdır. Her durumda üst ısı derecesi mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır. Tabandan boşalan potalı modern döküm makinelerinde sıcaklık 50 °C, açık ağızlı devirmeli potayla doldurulan sistemlerde de 75-100 °C kadar yüksek olmalıdır [13].

Modern döküm makinelerinde sıvı metalin kalıba doldurulması otomatik olarak gerçekleşir. Ergitme ve döküm işlemi makinenin özel yazılımı ile kontrol edilir. Çoğu

statik döküm makinesinde boşaltma pota tabanından gerçekleşir, bu şekilde metalin sıcaklık kaybı en az olur. Eğer makine devrilen tipte bir potaya sahipse fazladan sıcaklık kaybı 80-100 °C 'dır. Özellikle gaz boşluğu gibi hataları minimize etmek için kalıp ve sıvı metal sıcaklığı mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır. Bu nedenle yeni bir parçanın üretimine başlamadan önce uygun sistem sıcaklığını bulmak için bir dizi test yapılmalıdır. "Sistem sıcaklığı" terimi sıvı metal ve derece sıcaklığı anlamına gelmektedir.

Sıvı metal kalıp boşluğuna dolduktan sonra katılaşma hemen başlar. Sıvı metal ile derece arasındaki sıcaklık farkı her zaman yüksektir (yaklaşık 400 °C veya daha fazla). Bu nedenle kalıba dolan metal kalıp yüzeyinden katılaşmaya başlar ve katılaşma iç bölgelere doğru devam eder. Eğer mum ağacı doğru şekilde bir araya getirilmişse, ara yolluklar doğru tasarlanmışsa ve doğru çapta ana yolluk kullanılmışsa doğrusal katılaşma sağlamış olur ve çekme boşluğu ana yollukta ve yolluk ağzında meydana gelir. Çekme ve gaz boşlukları eğer döküm parçalarda oluşuyorsa süreç parametreleri makul bir şekilde değiştirilmelidir [13]. Şekil 2. 9'da çeşitli takı döküm ağaçları görülmektedir.

Şekil 2. 9 Dereceli hassas döküm takı döküm ağaçları [20]

BÖLÜM 3

DERECELİ HASSAS DÖKÜM KALIP MALZEMELERİ

Dereceli hassas döküm kalıbı malzemeleri bağlayıcı cinsine göre birbirinden ayrılmaktadır. Bağlayıcı cinsine göre döküm sıcaklığı ile dökülebilecek metal ve alaşımlar farklılık göstermektedir. Döküm sıcaklıklarına göre kalıp malzemelerini düşük ve yüksek sıcaklık grubu malzemeler olarak ikiye ayırmak mümkündür. Düşük sıcaklık (< 1200 °C) kalıp malzemeleri alçı bağlı malzemelerdir, bağlayıcı olarak kalsiyum sülfat yarı hidrat ($CaSO_4$ ½ H_2O), agrega olarak da kuvars ve kristobalit içermektedirler. Bu malzemeler nispeten düşük ergime sıcaklığına sahip altın gümüş, bronz, pirinç, alüminyum gibi demir dışı metal ve alaşımların dökümünde kullanılmaktadır. Alçı 1200 °C'ın üzerinde parçalanmaya başladığı için daha yüksek döküm sıcaklıkları için farklı bağlayıcılar içeren kalıp malzemeleri tercih edilmektedir. Nikel-krom alaşımları, platin ve demir esaslı alaşımlar için genellikle fosfat bağlı kalıp malzemeleri kullanılmaktadır. Bu malzemelerde bağlayıcılık görevini gören magnezya fosfat çimentosudur, agrega yine kuvars ve kristobalittir. Fosfat bağlılar dışında silika bağlı ve yüksek alümina çimentosu bağlı kalıp malzemeleri de yüksek sıcaklık dökümleri için kullanılabilmektedir.

Daha önce işlem prosedürlerinde de anlatıldığı gibi dereceli hassas döküm kalıpları, kalıp malzemelerinin su ile karıştırılması ve oluşan çamurun model ağacı çevresine yerleştirilmiş metal silindirik derece içerine doldurulması ve bu çamurun sertleşmesi ile yapılmaktadır. Model ağacı içerisinde bir kalıp kesiti Şekil 3. 1' de görülmektedir.

Şekil 3. 1 Dereceli hassas döküm kalıbı kesiti [21]

3.1 Alçı

Alçının elde edilmesinde kullanılan temel hammadde alçı taşıdır. Doğada jips, anhidrit olarak rastlanılan Ca^{+2}, SO_4^{-2} iyonlarının bileşiminden oluşan ve oluşum ortamına göre içeriğinde su bulunan mineral topluluğu ve mineral farklılığına bakılmaksızın alçı taşı denilmektedir [22].

Alçı taşı değişik yerlerde değişik saflıkta yataklanmış doğal oluşumlu bir kayaçtır. Bu kayaç bünyesinde % 20 civarında kimyasal olarak bağlanmış su içerir. Bu öğütülüp ısıtıldığında bünyesindeki suyun yaklaşık ¾'ünü kaybeder ve genel adıyla kalsine alçı ya da Plaster of Paris denilen bir yapıya dönüşür. Kalsine edilmiş olan bu alçı tekrar su ile karıştırıldığında plastik veya akışkan bir kütle halini alır ve isteğe göre kalıplanabilir ya da şekillendirilir. Kalsinasyon sırasında kaybettiği kristal suyunu tekrar kazanması sebebi ile de sertliğini tekrar kazanır. Sonuçta elde edilen kalıbın seramik endüstrisinde önem kazanmasının sebebi, diğer doğal minerallerden farklı olarak kullanıcının isteğine ve şartlarına göre gözenek miktarı, absorbsiyon karakteristiği ve mukavemetin değişebilmesidir [23].

Alçı aşağıdaki özelliklerinden dolayı kalıp yapımına uygundur.

- Karmaşık şekilli ürünler üretilebilir.
- Üretilen kalıplar kimyasal ve fiziksel olarak kararlıdır.
- Her kullanım için su emme miktarı kolayca oluşturulabilir.

- Pürüzsüz ve dayanıklı yüzey kolayca oluşturulabilir.
- Fiziksel ve kimyasal özellikler homojen olarak korunur.
- Gözenekler kolloidler tarafından kolayca kapatılamaz.
- Maliyeti düşüktür [22].

3.1.1 Jips

Jips doğal olarak oluşan ve iki mol su içeren bir kalsiyum sülfat mineralidir. Genellikle kireç taşı, kum, kil, anhidrit ve organik maddeler gibi safsızlıklar içerir [22].

Jipsin genel özellikleri aşağıdaki gibidir:

Kimyasal Bileşimi : $CaSO_4 2H_2O$

Kristal Sistemi : Monoklinik

Kristal Biçimi :Çoğunlukla ince-kalın levhamsı kristalli; kısa-uzun prizmatik, iğnemsi, masif, tanesel, lifsi

Sertlik : 2 (Mohs)

Özgül Ağırlık : 2,32 g/cm^3

Renk ve Şeffaflık : Renksiz-beyaz, sarımsı, yeşilimsi, kırmızımsı; şeffaf-yarı şeffaf

Çizgi Rengi : Beyaz

Parlaklık : Camsı

Ayırıcı Özellikleri : Düşük sertliği ve dilinimi

Bulunuşu : Deniz suyundaki çözünürlüğü halit ve anhidrit mineraline göre daha zayıf olan ve buharlaşmada ilk çökelen mineraldir. Karbonatlı kayalarda piritin oksidasyonundan türeyen sülfürik asidin bulunduğu yerlerde ve bazı volkanik alanlarda da oluşabilir.

Jipsin ince toz halinde olanlarına "albatr veya albaster", saydam ve mükemmel dilimli olanlarına "selenit", lifli ve cam saydamlığında olanlarına ise "satenspar" denilir [22].

3.1.2 Anhidrit

Anhidrit susuz kalsiyum sülfattır. Kalsiyum sülfat yapısında kristal suyu bulunmayan, yoğun ve alçı taşına göre daha sert olup, jips yataklarında tabakalar halinde bulunur [24].

Anhidrit mineralinin özellikleri aşağıdaki gibidir:

Kimyasal Bileşimi : $CaSO_4$

Kristal Sistemi : Ortorombik

Kristal Biçimi : Kristalleri nadir, genelde masif, tanesel, lifsi

Sertlik : 3,5 (Mohs)

Renk ve Şeffaflık : Renksiz-beyaz, gri, mavimsi, eflatun, kırmızımsı, kahverengimsi, şeffaf

Çizgi Rengi : Beyaz

Parlaklık : Camsı

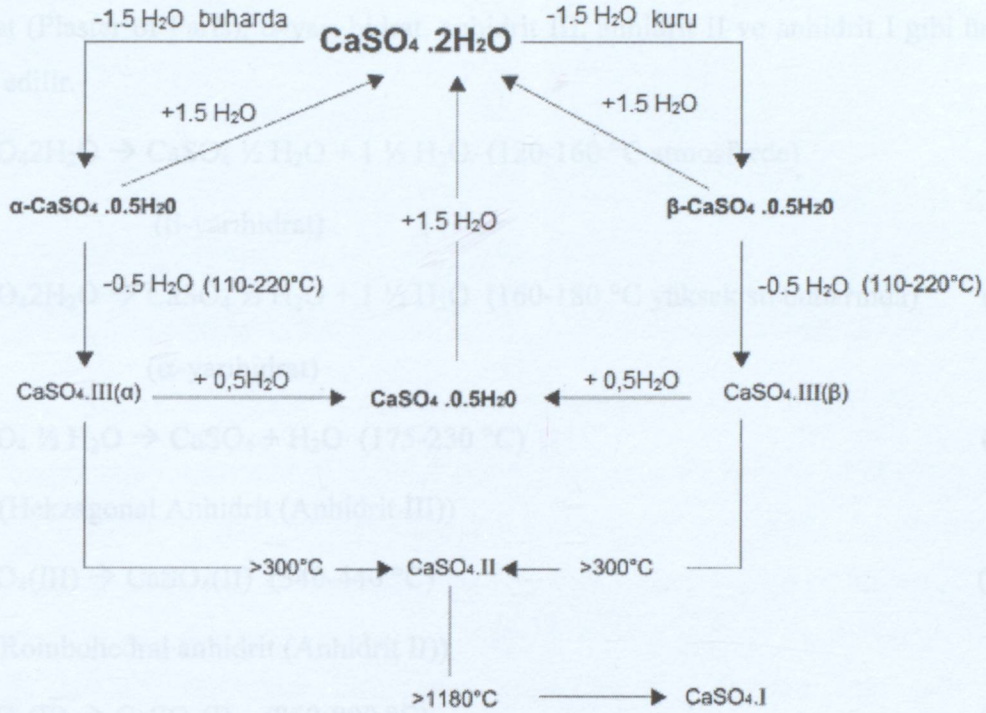
Ayırıcı Özellikleri : Birbirine dik üç yönlü dilinime sahip, jipsten daha sert, özgül ağırlığı kalsitten fazla

Bulunuşu : Jips ve halit mineralleri ile birlikte oluşan bir buharlaşma mineralidir.

Deniz suyundan direkt olarak çökelir. Jipsin dehidratasyonu ile de oluşabilir [22].

3.1.3 Alçıdan Yarı Hidrat Üretimi

Jipsin yapısında bulunan suyun kısmen uzaklaştırılması sonucu yani kalsine edilip 1,5 mol suyu uzaklaştırılmasıyla "Plaster of Paris" olarak bilinen yarı hidrat haline dönüştürülür [22]. Alçı dönüşümleri şematik olarak Şekil 3. 2'de görülmektedir.



Şekil 3. 2 Alçı dönüşümleri şeması [25]

$CaSO_4 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \frac{1}{2} H_2O + 1 \frac{1}{2} H_2O$ (120-160 °C) (3.1)

Yarı hidratın α ve β olmak üzere iki formu vardır. Yarı hidrat içerisinde bulunan α/β oranına bağlı olarak alçı kalıbı mukavemet ve su emme özelliklerinin değiştiği bilinmektedir. α-yarı hidrat; iğne yapılı kristallerden oluşur, basınç dayanımı, çekme dayanımı ve aşınma dayanımı, β-yarı hidrata göre çok daha iyidir. Ayrıca β-yarı hidrata göre daha az suya ihtiyaç duyar. β-yarı hidrat kristalleri pirinç tanelerine benzer, α-yarı hidrata göre daha fazla suya ihtiyaç gösterir, priz süresi uzun, yoğunluğu daha düşük, hidratasyon ve yüzey enerjisi daha yüksektir [22].

Yarı hidratlar su ile karıştırılarak kaybetmiş olduğu 1,5 mol kristal suyu tekrar bünyesine alarak sert ve "poroz alçı" özelliğini kazanır. Oluşan alçı kalıplar döküm çamurlarının şekillendirilmesinde kullanılır [22]. Kuru alçının porozitesi arttıkça setliği ve elastiklik modülü azalır [26], [27], [28].

$CaSO_4 \frac{1}{2} H_2O + 1 \frac{1}{2} H_2O \rightarrow CaSO_4 2H_2O$ (3.2)

(Yarıhidrat) (Alçı)

Dehidratasyon ve kalsinasyon işleminde ısıtma sıcaklıklarına ve koşullarına göre β-yarı hidrat (Plaster of Paris), α-yarı hidrat, anhidrit III, anhidrit II ve anhidrit I gibi ürünler elde edilir.

$CaSO_4 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \frac{1}{2} H_2O + 1\frac{1}{2} H_2O$ (120-160 °C atmosferde) (3.3)

(β-yarıhidrat)

$CaSO_4 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \frac{1}{2} H_2O + 1\frac{1}{2} H_2O$ (160-180 °C yüksek su buharında) (3.4)

(α-yarıhidrat)

$CaSO_4 \frac{1}{2} H_2O \rightarrow CaSO_4 + H_2O$ (175-230 °C) (3.5)

(Hekzagonal Anhidrit (Anhidrit III))

$CaSO_4(III) \rightarrow CaSO_4(II)$ (340-440 °C) (3.6)

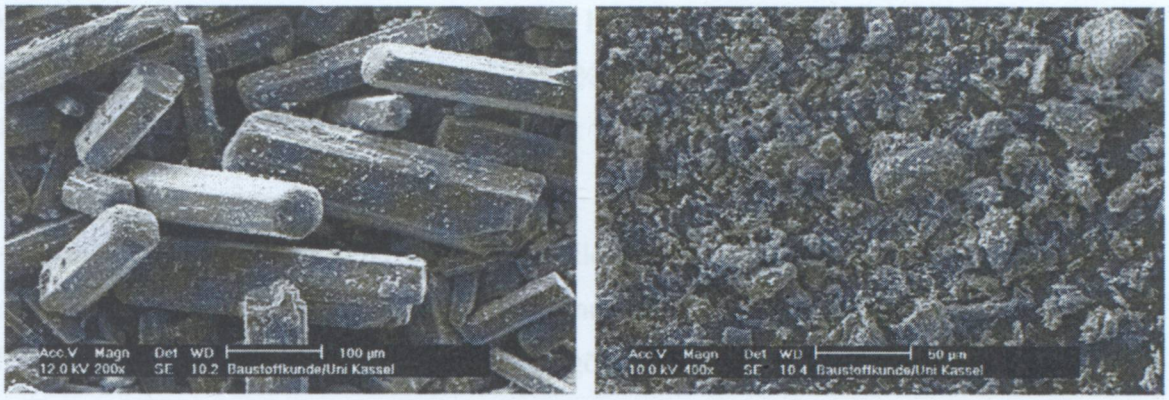
(Rombohedral anhidrit (Anhidrit II))

$CaSO_4(II) \rightarrow CaSO_4(I)$ (850-900 °C) (3.7)

(Anhidrit I)

Mikro gözenekli yarı hidrata β-yarı hidrat (β-$CaSO_4 \frac{1}{2} H_2O$) denir. β alçısı, kuru yanma sonucu, yani fırında su buharının uzaklaştırıldığı yanma şartında oluşur. Alçının normal atmosfer basıncında dehidratasyonu ile elde edilir. Mikroskop altında incelendiğinde; β-yarı hidratlarını, oldukça küçük ve belirsiz kristaller içeren, ince yassı tanecikli düzensiz partiküllerden meydana geldiği görülür [24].

Kristalize yarı hidrata α-yarı hidrat (α-$CaSO_4 \frac{1}{2} H_2O$) denir. Jips yaş yanarsa, yani otoklavda buhar basıncı altında yanarsa α tipi alçı oluşur. Mikroskop altında incelendiğinde; kompakt, iyi gelişmiş ve yoğun, çoğunlukla saydam büyük partiküllerden meydana geldiği görülür. İyi kristalleşmişlerdir. Üretim yöntemine göre, doygun buhar basıncı altında 160-180 °C'larda alçı taşının ayrışmasıyla veya 100 °C'da doygun tuz çözeltisinden elde edilen türleri vardır. α alçısının β alçısına oranla daha az su gereksinimi vardır. β-yarı hidratın karma su yüzdesi, α formundan daha yüksektir. β formunda suyu tutacak olan yarı hidrat tanecikleri, yuvarlağa daha yakın olan α-yarı hidrat taneciklerinden daha girintili çıkıntılıdır [22]. Şekil 3,3'te α ve β alçılarının tarama elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiş mikro yapıları ve Çizelge 3. 1'de de özellikleri görülmektedir.



Şekil 3. 3 α alçının (solda) ve β alçının (sağda) mikro yapıları [25]

Alçı oluşumunun arkasında yatan teori şudur: Jips minerali kalsine edildiğinde ortaya gözenekli, birbirine yapışmış taneciklerden oluşmuş bir yapı çıkar. Az miktarda su bunun üzerine eklendiğinde, su molekülleri bir film halinde tanecikler arasını ıslatır ve aradaki havanın çıkmasını ve sonrada suyla dolmasını sağlar. Su eklemeye devam edildiği takdirde tanecikler birbirinden kopar ve alçı akışkan hale gelir. Alçı karıştırıldığında jips kolloidleri çöker. Oluşum zamanı esnasında, jips kristalleri büyür ve birbirlerinin hareketlerini engelleyerek sert bir yapı oluştururlar. Fazla miktarda su eklenmesi ise yapı içerisinde gözeneklerin oluşmasını sağlar [22].

Çizelge 3. 1 α-yarı hidrat ve β-yarı hidrat formların tanımlanmasında kullanılabilecek özellikler [24]

Özellikler	**α-yarı hidrat**	**β-yarı hidrat**
Yoğunluk (g/cm^3)	2,757	2,637
Karma suyu (ASTM.C26) (cm^3 su/100 g yarı hidrat)	35	90
Priz süresi (dakika)	15-20	25-35
Kuru halde çekme dayanımı (kg/cm^2)	66	13
20 °C'da sudaki çözünürlük (g/100 g çözelti)	0,63	0,74
Kuru halde basma dayanımı (kg/cm^2)	560	56

Yarı hidrat su alarak yeniden hidratasyona uğrar ve birbirine girmiş (bağlanmış) kristaller halinde tekrar kristalleşerek sert bir kütle formunda donarak alçı taşı haline döner. Bu kimyasal kombinasyon için gerekli su miktarı kuru alçının % 18.6'sı

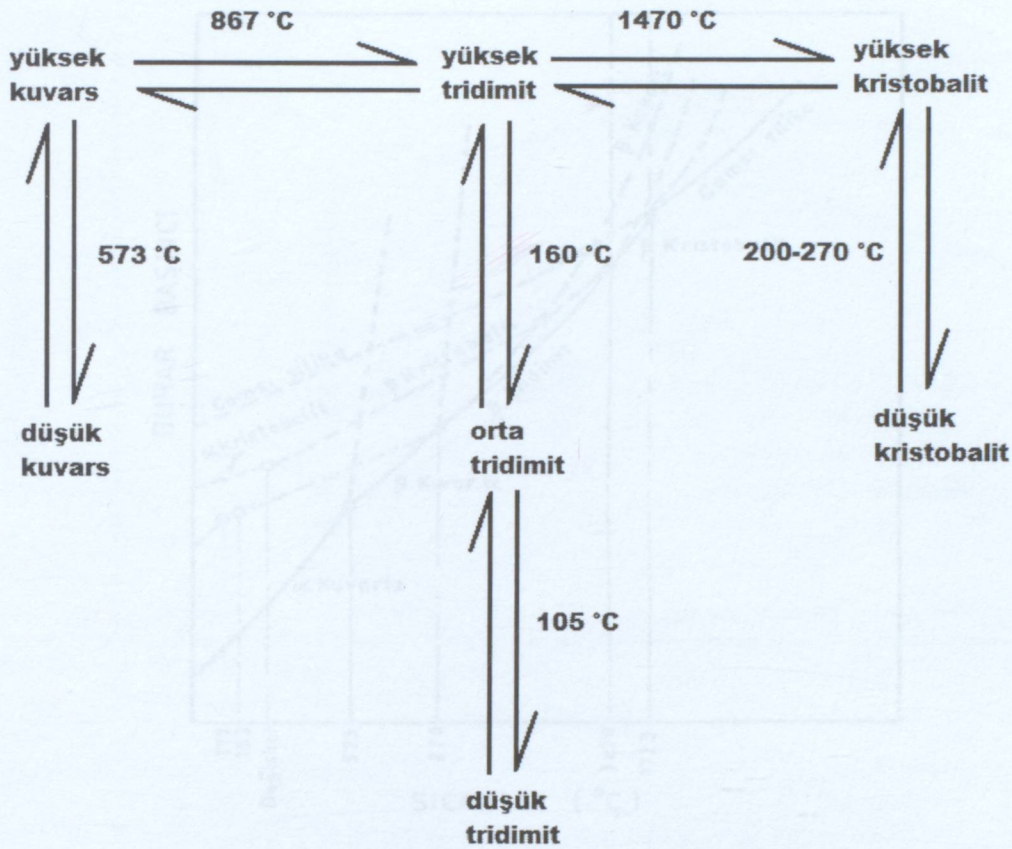
kadardır. Fakat suyun, kuru alçı kütlesinin her tarafına homojen olarak dağılması, şekillendirmeye elverişli, plastik olması için % 18,6'dan daha fazla suya gerek vardır. 100 kısım alçıyı belirli bir akıcılığa getirmek için gerekli su miktarına normal kıvam denir [22].

Alçı doğal halinde çok hızlı bir şekilde kristallenerek prizlenir. Ticari uygulamalar için prizlenme yeterli bir süreye kadar geciktirilmelidir. Tartarik asit, sitrik asit ve çeşitli fosfatlar alçının prizlenmesini geciktirici etki gösterir [30].

Alçı bağlı hassas döküm kalıbı malzemelerinin prizlenme genleşmesi, büyüyen alçı kristallerinin genişleme kuvvetleri ile iç ve dış sınırlayıcı kuvvetlerin etkisi altındadır. Büyüyen kristallerin çevresindeki su veya diğer sıvı filmleri ve yetersiz bağlayıcı oranı engelleyici iç kuvvetlerdir. Normal prizlenme şartları altında alçı kristallerinin büyümesi fazla su bulunmadığında bastırılır. Higroskobik koşullarda ise fazla suyun varlığında prizlenme sırasında alçı kristalleri büyüyebilecek boşluklar bulur ve sonuçta genleşme artar [31], [32], [33].

3.2 Silika

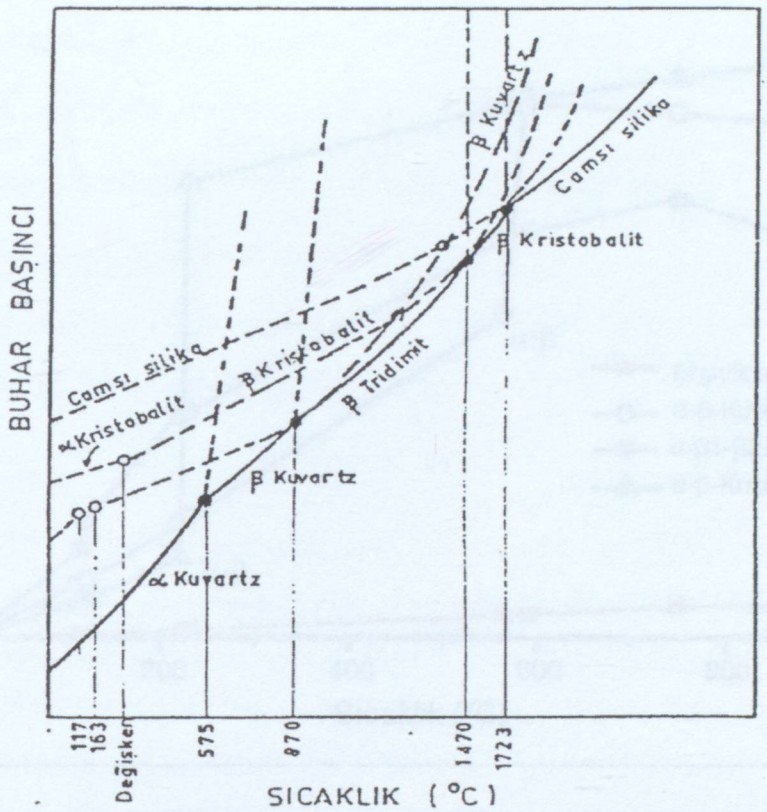
Doğada en çok bulunan oksitlerdendir. Silika; yerine geçen ve yeniden oluşan dönüşümleri olan çoklu polimorflara sahiptir. En önemlileri Şekil 3. 4'te gösterilmektedir. Yüksek kuvarsdan düşük kuvarsa dönüşüm sırasında büyük hacim değişimi olmaktadır. Bu durum soğutma sırasında yüksek kalıntı gerilimlerine ve mukavemette düşüşe neden olur. Bu problemden sakınmanın en iyi yolu süreç boyunca bütün kuvarsın kristobalite dönüşmüş olmasından emin olunmasıdır; çünkü bu yeniden oluşum dönüşümü oda sıcaklığında yarı kararlıdır. Yüksek kristobalitin düşük kristobalite dönüşümü sırasındaki hacim değişimi kuvars kadar yüksek değildir [34].



Şekil 3. 4 Silikanın polimorfik dönüşümleri [34]

Saf halde silis 1723 °C'de ergimektedir, bu özelliği silikaya yaygın refrakter malzemesi olarak kullanım imkânı tanımaktadır. Silika esaslı refrakter tuğlaların yapımında kullanılan hammaddeler iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunların ilki ganister olup, % 98'in üzerinde bünyesinde SiO_2 içeren yeryüzünde masif kayaları oluşturan yoğun kuvarsdır (çakmak taşı, kuvars kayası). Silika refrakter tuğlaların üretiminde kullanılan hammadde ise kuvars çakıl taşları ve kayalarıdır. Özellikle çakıl kayaları uygun yapıda seçilip yıkanırsa %0,5'ten az alümina ve alkali içerikleri ile SiO_2 üretiminde mükemmel bir hammadde kaynağı oluşturur [35].

Şekil 3. 5'te, silikanın sıcaklık ve basınca göre kararlı ve yarı-kararlı fazları gösterilmektedir. Ordinat ekseni SiO_2'in buhar basıncını göstermekle birlikte rakamsal değerler verilmemiştir; bunun sebebi ise SiO_2'in çok kararlı bir oksit olmasından dolayı buhar basıncının normal atmosferik basıncı yanında çok küçük kalmasıdır. Diğer bir ifadeyle silika kolay kolay bozulmamaktadır. En kararlı fazlar kesiksiz, yarı kararlı fazlar ise kesikli çizgiyle gösterilmiştir [36].

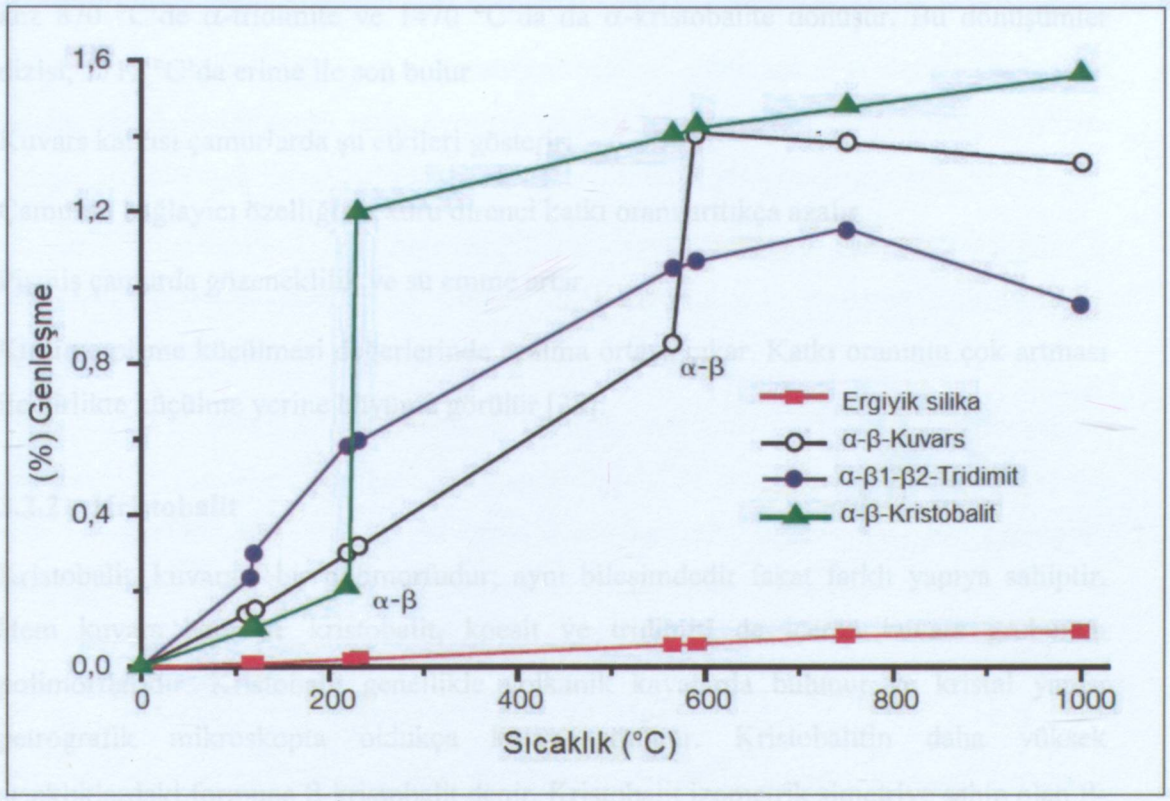


Şekil 3. 5 SiO_2'nin sıcaklık ve basınca göre kararlı ve yarı kararlı fazları [36]

Silika esaslı refrakter tuğlaların yapımında ve kullanımı sırasında şu iki önemli nokta her zaman göz önünde tutulmalıdır:

- Kuvars hammaddesinde bulunan Al_2O_3, TiO_2 ve alkalinler tarzındaki safsızlıkların miktarları,
- SiO_2'da mevcut polimorfik kristal fazların dönüşümleri.

Silika esaslı refrakterlerin ana hammaddesi olan kuvars ısıtılmasıyla beraber α-kuvars β kuvarsa döner ki bu duruma, Şekil 3. 6'da görülen 573 °C'daki ani lineer genleşme eşlik etmektedir. Bu sıcaklık değerine yaklaşıldıkça ısıtma hızının yavaşlatılmasıyla beraber % 0,92'yi bulabilecek hacimsel değişimin yaratabileceği çatlak oluşumlarının önüne geçilebilecektir. 1426 °C'ın üzerindeki sıcaklıklarda pişirme yapılan silika refrakterlerde yapıda kristobalit parçacıkları oluşurken, muhtemelen artık haldeki dönüşmemiş kuvars yapıları ile karşılaşılacaktır. Kristobalit parçacıkları tridimit ile çevrelenmiş olup, ara camsı bağ fazı ise yüksek kireç, alümina titanyum dioksit ve alkalinlerden meydana gelmiştir [35].



Şekil 3. 6 Silika mineralinin ısıl genleşmesi [37]

3.2.1 Kuvars

Yeryüzünün bilinebilen kısmının %25'ini oluşturur. Oksijenden sonra dünyada en çok rastlanan silisyumun bir bileşimidir. Kimyasal formülü SiO_2 olup, mol ağırlığı 60 g/mol'dür sertlik derecesi Mohs'a göre 7'dir. Doğada kristal olarak dağ kristali, ametist, kuarzit ve kristal kuvars kumu olarak, amorf olarak ise flinit ve sileks taşları, kizelgur şekillerinde bulunur. Kuvars kristali granit, gnays gibi ana kayaçların içinde bulunabildiği gibi, bazen de tek başına tanecik yapısında olarak damarlar şeklinde diğer mineraller ile karışmış olarak bulunur.

Doğadan ham kuvarsın çıkarılmasında, bilinen taş kırma yöntemleri uygulanır. Belli bir parça büyüklüğünde ön kırılması yapılan kuvars, beraberindeki yabancı maddelerden kurtarılmak amacı ile yıkanır ve manyetik tutuculardan geçirilir. Ancak bu işlemlerden sonra kuvars istenen tane büyüklüğünde öğütülür

Silisyum dioksitin oda sıcaklığındaki değişmez formu α-kuvarsdır. α-kuvarsın 573 °C'a kadar ısıtılması ile bu sıcaklıkta β-kuvars oluşur. Bu reaksiyon geriye dönüşlü olup, bu sırada kuvars hacimce büyüme gösterir. Isıtmanın yavaş sürdürülmesi ile β-kuvars bu

kez 870 °C'de α-tridimite ve 1470 °C'da da α-kristobalite dönüşür. Bu dönüşümler dizisi, 1713 °C'da erime ile son bulur

Kuvars katkısı çamurlarda şu etkileri gösterir:

Çamurun bağlayıcı özelliği ve kuru direnci katkı oranı arttıkça azalır.

Pişmiş çamurda gözeneklilik ve su emme artar.

Kuru ve pişme küçülmesi değerlerinde azalma ortaya çıkar. Katkı oranının çok artması ile birlikte küçülme yerine büyüme görülür [38].

3.2.2 Kristobalit

Kristobalit, kuvarsın bir polimorfudur; aynı bileşimdedir fakat farklı yapıya sahiptir. Hem kuvars hem de kristobalit, koesit ve tridimiti de içeren kuvars grubunun polimorflarıdır. Kristobalit genellikle volkanik kayalarda bulunur ve kristal yapısı petrografik mikroskopta oldukça kolay görünür. Kristobalitin daha yüksek sıcaklıklardaki formuna β-kristobalit denir. Kristobalit izometrik simetriye sahip olan β-kristobalit formunda kristalize olur ve daha sonra kristal soğutulursa α-kristobalite veya kristobalite çok kolay döner. β-kristobalitin tipik kristalleri oktahedrondur. β-kristobalit, tetragonal simetriye sahip kristobalitten daha yüksek simetriye sahiptir. Kuvars kumunun kalsinasyonundan elde edilir. Isıl genleşmesi fazladır. Hassas döküm tekniğinde kullanılan en kaliteli seramik malzemedir. Bu sebepten geniş kullanım alanına sahiptir. Kristobalitin fiziksel özellikleri; renksiz veya beyaz renktedir, kristal sistemi tetragonal, özgül ağırlığı 2,32 g/cm^3 serliği 6,5'dir (Mohs) [7].

3.3 Fosfat Bağlı Malzemeler

Bağlayıcısı magnezya fosfat çimentosu olan bu malzemeler silika, magnezyum oksit ve amonyum fosfat bileşenlerinden oluşmaktadır. Magnezyum fosfat çimentolarında magnezyum oksit (MgO) ile monoamonyum fosfat ($NH_4 \cdot H_2PO_4$ veya MAP) ya da diamonyum fosfat [$(NH_4)_2 \cdot H_2PO_4$ veya DAP] arasında bir asit-baz reaksiyonu meydana gelir. Malzeme su veya bir kolloidal silika çözeltisi ile karıştırıldığında, oksit ve fosfat arasında bir reaksiyon gerçekleşerek magnezyum amonyum fosfat oluşur [39].

$$NH_4.H_2PO_4 + MgO + 5H_2O \rightarrow Mg.NH_4.PO_4.6H_2O \quad (3.8)$$

Bu reaksiyon ürünü silikayı bağlayarak bir arada tutar ve hassas döküm kalıbının sertleşmesini sağlar. Magnezyum amonyum fosfat oluşumu, dihidrat alçının oluşumuna benzer olarak, hidratasyon reaksiyonu ve takiben kristalizasyon ile gerçekleşir. Alçıda olduğu gibi büyüyen kristallerin zorlamasıyla bir miktar genleşme meydana gelir [40].

Malzeme neme maruz kalırsa higroskopik genleşme de görülür. Nem, karıştırılmamış malzemede ters etki gösterir; bu nedenle malzeme kapları ve poşetleri kullanılmadığı zamanlar sürekli kapalı tutulmalıdır.

Karıştırmada su yerine koloidal silika çözeltisi kullanılması prizlenme genleşmesini ve dayanımı iki kat oranında arttırır. Döküm öncesi kalıp pişirmede ki kalıp genleşmesi, hem ısıl genleşmeden hem de silikanın dönüşümünden kaynaklanır. Isıl genleşme, koloidal silika kullanılan sistemlerde su ile karıştırılanlara göre daha fazladır. 300 °C civarında amonyum ve su bir reaksiyon ile ayrılır.

$$2(Mg.NH_4.PO_4.6H_2O) \rightarrow Mg_2.P_2O_7 + 2NH_3 + 13H_2O \qquad (3.9)$$

Daha yüksek sıcaklıklarda kalan fosfatın bir kısmı silika ile reaksiyona girerek karmaşık silikofosfatlar oluşturur. Bu durum, döküm sıcaklığında kalıbın dayanımında büyük bir artışa neden olur [41].

Fosfat bağının ilk kullanım alanlarından biri dişçiliktir. Kalsine çinko oksit fosforik asitle karıştırılarak diş çimentosu hazırlanmıştır. Silikat-fosforik asit bağları da çok sayıda araştırıcı tarafından araştırılmıştır. Alümina-kireç-silika camının tozları fosforik asitle karıştırılırsa sert, beyaz, yarı saydam çimento oluşur [42].

Dişçilik için geliştirilen fosfat bağlı kalıp tozları çok sayıda malzeme şekillendirme işleminde kullanılmaktadır. Dişçilik alaşımlarının hassas dökümü ile takma diş ve köprü gibi ağız içi protezleri üretilebilmektedir. Porselen malzemeler fosfat bağlı model ve kalıplar üzerinde preslenip sinterlenebilmektedir. Ayrıca fosfat bağlı malzemeler diş, çene ve yüz protezlerinin üretiminde titanyum alaşımlarının süper plastik şekillendirme kalıplarının yapımında da kullanılmaktadır [43], [44], [45], [46].

Kingeri fosfat bağı şöyle özetlenmiştir. Refrakter uygulamalarında üç büyük grup vardır.

1. Fosforik asitle silikalı malzemelerin kullanılması: Bu uygulamada fosforik asidin silikatla çözünmesi ve silika jel oluşturması beklenir. 260 °C'ın üzerindeki sıcaklıklarda silisil metafosfat, $SiO(PO_3)_2$ oluşur.

2. Metal oksitlerin fosforik asitle, sıcakta veya soğukta setleşen bağlar yapması. Al, Cr, Mg, Be, Fe, Zr gibi maddelerin oksitleri 200 °C'da fosforik asitle reaksiyona girdiği zaman bağ malzemesi oluşturur. Bu metal-fosfat bağın güçlü ve kararlı olduğu ispatlanmıştır.

3. Asit fosfatların doğrudan ilavesi veya oluşturulması [42].

Fosfat bağlı monolitik refrakterlerde bağlayıcı olarak genellikle fosforik asit veya mono alüminyum fosfat (MAP) kullanılır. Normal plastik refrakterlerde kullanılan suyun yerine bu bağlayıcılar kullanılır. Üretim ve uygulama, plastik refrakterlerde aynıdır. Fosfat bağlı plastik refrakterlerde normal plastik refrakterlere göre şu avantajlara sahiptir

- Birkaçı hariç genellikle ısı ile sertleşirler.
- Katılaştıktan sonra soğuk mukavemetleri yüksektir.
- Aşınmaya karşı dirençleri iyidir.
- Hem sıcak hem soğuk uygulamalarda iyi yapışma özelliğine sahiptir.

Kullanılan bağlayıcılar, çok az miktarda bulunan yabancı maddelerle veya kille yavaşça reaksiyona girer, bu nedenle bağlayıcı içeren plastik refrakterler, işlenebilirliğini normal plastik refrakterlerden daha hızlı kaybederler. Yaz aylarında ortam sıcaklığı yükseldiği zaman işlenebilirlik ve depolama ömrü hızla düşer.

Sıcakta sertleşen fosfat bağlı refrakterlerde sıcakta ve soğukta eğme dayanımlarını ve kimyasal olarak sertleşen fosfat bağlı refrakterlerin soğukta eğme dayanımları karşılaştırma yapıldığı zaman, sıcakta sertleşen fosfat bağlı plastik refrakterlerin soğukta eğme dayanımları, kimyasal olarak sertleşenlerden çok daha yüksektir.

Fosfat bağlı refrakterlerin yüksek dayanımlı olması, aşınma dayanımının iyi olmasını da beraberinde getirir. Fosfat bağlı refrakterler, 1300 °C'a kadar, ateş tuğlasına göre süper üstünlük sağlar. Fosfat bağlı plastik refrakterlerin yapışma özelliği, normal plastik refrakterlerden daha iyidir. Bu nedenle hasarlı refrakterleri yamamada tercihen kullanılır. Fosforik asidin ve mono alüminyum fosfatın buhar basıncı suyunkinden daha düşüktür. Bu nedenle olgunlaşma döneminde dökülebilir refrakterlerde görülen patlama çok az olur. Fosfatların konsantrasyonu fosfat bağlı refrakterlerin donma noktasını tayin eder. Bunlar kolay kolay donmaz, örneğin % 25 mono alüminyum fosfat çözeltisi 7

°C'a kadar donmaz. Fosfat bağlayıcılar suda çözündüğü için ısıtma sırasında suyla birlikte bir miktar fosfat yüzeye doğru gelir ve yüzeyde fosfat konsantrasyonu artar. Bu, bağ göçü olarak adlandırılır. Bağ göçü fazla olduğu zaman refrakter kesitinde mukavemet yüzeyden içeri doğru değişmektedir. Bu olay, pişirme sırasında kabuklanmaya yol açabilir, ısıtmanın yavaş yapılması gerekir. Rutubetin azaltılması veya jelleşmenin çabuklaşması bağ gücünü azaltır.

Fosfat bağlı plastik refrakterler, normal plastik refrakterlerle aynı ortamda pişirme küçülmesi, aynı derecede korozyon direnci gösterdiği halde, mukavemet ve aşınma direnci gibi bazı özelliklerde yerine göre üstünlük sağlar; fakat kurutulamaz katılaştırıcılar bazen soğuk sertleşmeye neden olur. MgO, katılaştırıcı olarak sık sık kullanılır. Fakat onun oluşturduğu bazı bileşikler arası bileşiklerin ergime sıcaklığı düşük olduğu için 1000 °C'ın üzerinde mukavemet azalır [47].

Fosfat bağlı hassas döküm kalıp malzemeleri, hızlı prizlenme, orta derecede yaş mukavemet ve yüksek sıcaklık mukavemeti gibi önemli özelliklere sahiptir, dişçilik uygulamalarının yanı sıra sanatsal mikro parçaların dökümünde de kullanılmaktadır. Ne var ki fosfat bağlı malzemelerin düşük prizlenme süresi, orta ve büyük ölçekli hassas dökümlerde kullanımı önünde bir engeldir. Tingzhong Li ve arkadaşları bu engeli aşmak amacıyla yeni fosfat bağlı hassas döküm kalıp malzemeleri geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada fosfat bağlı malzemelere borik asit veya sodyum tripolifosfat ilave ederek MAP ve MgO arasında gerçekleşen reaksiyonu geciktirerek priz süresini uzatabilmişlerdir [48].

3.4 Silika Bağlı Malzemeler

Bu malzemeler silika jel ile bağlanan toz kuvars veya kristobalitten oluşur. Isıtma ile silika jel silikaya dönüşür ve tamamlandığında kalıp sıkı paketlenmiş silika taneciklerinden oluşur.

Bağlayıcı çözelti genellikle etil silikat veya onun bir oligomeri ile seyreltilmiş hidroklorik asit ve endüstriyel alkolün karıştırılması ile hazırlanır. Alkol etil silikatın karışmasını ve suyun ayrışmasını kolaylaştırır. Etil silikatın yavaş hidrolizi sonucunda silisik asit çözeltisi ve yan ürün olarak da etil alkol oluşur.

$$(C_2H_5O)_4Si + 4H_2O \rightarrow Si(OH)_4 + 4C_2H_5OH \qquad (3.10)$$

Silisik asit çözeltisi alkali koşullarda kuvars veya kristobalit tozu ile karıştırılınca silika jel oluşturur. Gerekli pH toz içerisinde magnezyum oksit varlığı ile sağlanır. Hidrolize etil silikat bağlayıcı çözeltisi koyu şişelerde hazırlanır ve saklanır. Çözelti yavaş yavaş jelleşir ve üç ila dört hafta sonra viskozitesi belirgin bir şekilde artar. Bu durumda taze çözelti hazırlanması kaçınılmazdır.

Döküm sıcaklığında yeterli dayanım elde edebilmek için bağlayıcı çözelti içerisine mümkün olduğu kadar çok toz ilave edilmelidir. Bu işlem, ince tanelerin kaba tanelerin arasındaki boşlukları doldurması gibi tane boyutu gradyanı ile desteklenir. Oldukça koyu, neredeyse kuru bir karışım oluşturulur ve dayanıklı bir kalıp yapabilmek için titreşimle sıkı paketlenmesi sağlanır.

Dökümden önce kalıp pişirilmesinin erken aşamalarında az bir miktar büzülme meydana gelir. Bu durum su ve jelden alkol kaybına bağlıdır. Büzülmeyi takiben daha fazla oranda ısıl genleşme ile alçı bağlı malzemelerde olduğu gibi silika dönüşümü genleşmesi meydana gelir. Etil silikat bağlı kalıp malzemeleri, alçı ve fosfat bağlılar gibi prizlenme genleşmesi göstermez. Bu durumda doğrusal genleşme sadece ısıl genleşme ile gerçekleşir [41].

3.5 Yüksek Alüminalı Çimentolar

Yüksek alümina çimentosu (YAÇ) terimi ilk olarak I. Dünya Savaşından sonra Birleşik Krallıkta % 32-45 oranında alümina içeren çimentoları, çok daha az oranda alümina içeren Portland çimentosundan ayırmak için ortaya çıkmıştır. Daha sonraları % 50 den 90'a kadar alümina içeren çoğunlukla refrakter amaçlı çok çeşitli çimentolar geliştirilmiştir. Bunların hidrat oluşturan reaktif fazı kalsiyum alüminattır, bu nedenle genellikle kalsiyum alüminat çimentosu olarak adlandırılır. % 38- 40 oranında alümina içeren YAÇ üretimi için kullanılan ham maddeler kireç taşı (kalsit) ve boksittir. % 60-80 oranında alümina içerenler için ise boksit yerine alümina kullanılmaktadır. Üretim işlemi reverber veya döner fırınlar ile elektrik ark ocaklarında 1450 °C üzerinde yapılmaktadır [49].

Yüksek alüminalı çimentolar Portland çimentosuna göre çok daha düşük miktarda kullanılmaktadır ve daha pahalıdır. Bu malzemenin teknik önemi, erken sertleşmesi, yüksek refrakterliği, kimyasal olarak saldırgan ortamlara karşı yüksek direnci gibi özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Yüksek alümina terimi, bileşenleri kalsiyum

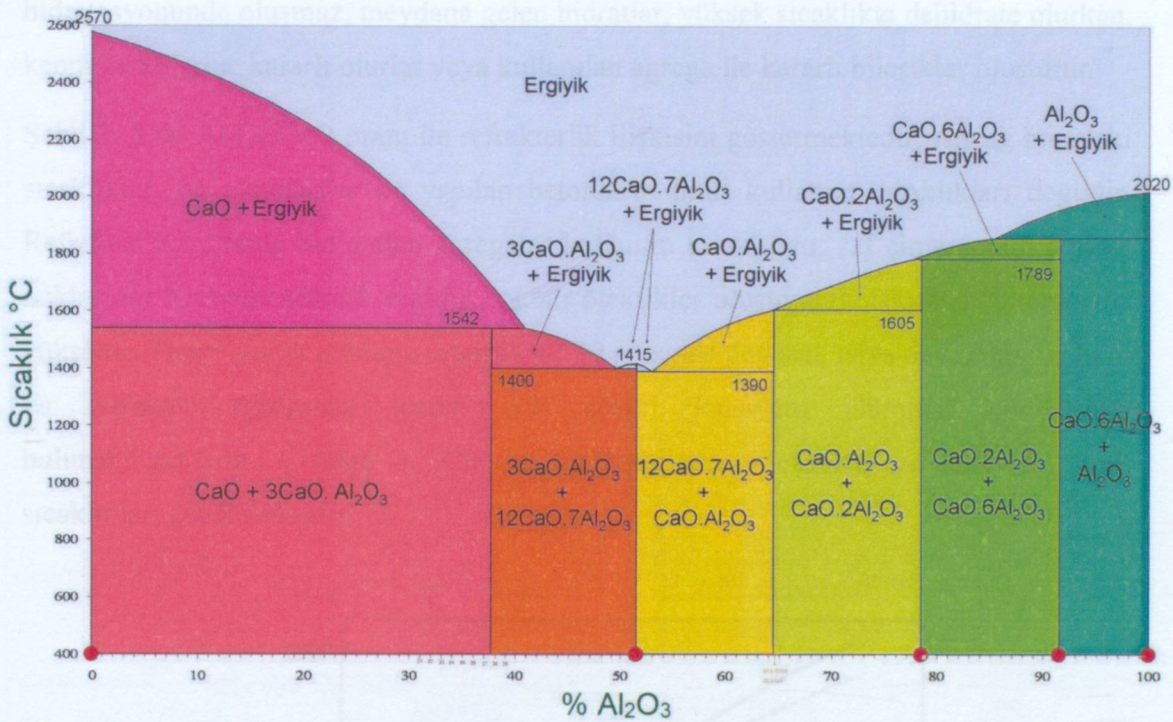
alüminatlar olan hidrolik çimentoları ifade etmektedir. Kalsiyum alümiantların hidrolik özellikleri 1850'lerden beri tanımlanmış olmasına rağmen, ticari üretime uygun ilk patent 1908 yılında Fransa'da Jules Bied tarafından alınmıştır. Günümüzde ise pek çok ülkede üretimi yapılmaktadır. Yüksek alüminalı çimento üretiminde kullanılan hammaddeler kireç taşı ve boksittir. Boksit kireç taşı ile birlikte öğütülür ve kuru karışım fırına yüklenir. Ergime oluncaya kadar yaklaşık 1600 °C' a kadar ısıtılır. Daha sonra eriyik klinker soğutulur ve çimento inceliğine kadar, az miktar alçı ilavesi yapılarak veya yapılmayarak öğütülür.

Yüksek alüminalı çimento klinkeri; bir seri kalsiyum alüminat, demir içeren bileşikler, beta-dikalsiyum silikat ve az miktarda diğer bileşenlerden oluşmaktadır. En önemli bileşenin, bu tür çimentolara çimentoluk özelliğini kazandıran mono kalsiyum alüminat ($CaO.Al_2O_3$) olduğu açıktır. Bu bileşik başlangıçta yavaş prizlenme gösterirken sonrasında çok yüksek bir hızla sertleşir. En erken sertleşmeyi gösteren yüksek alüminalı çimentolar genellikle % 5'den daha az silika içermektedir.

Yüksek alüminalı çimentoların hidratasyonu küçük kristaller ve jel oluşturur. Bunlar temelde bir seri kalsiyumalüminat hidratlardan oluşur, en önemlileri $CaO.Al_2O_3.10H_2O$'dur. Hidratlar öncelikle hekzagonal kristaller oluşturur ve bunlar eğer sıcaklık 30 °C'den yüksekse ve ortamda su bulunuyorsa daha sonra daha kararlı olan kübik şekilli $3CaO.Al_2O_3.6H_2O$'ya dönüşür. Şekil 3. 7' de $CaO\text{-}Al_2O_3$ faz diyagramı ile Çizelge 3. 2'de üretilen yüksek alüminalı çimentoların bileşim aralığı ile sınıflandırılması görülmektedir [50].

Çizelge 3. 2 Yüksek alüminalı çimentoların bileşim aralığı ile sınıflandırılması

Sınıf	**Renk**	**Al_2O_3**	**CaO**	**SiO_2**	**Fe_2O_3 + FeO**	**TiO_2**	**MgO**	**Na_2O**	**K_2O**
Standart düşük alümina	Griden siyaha	36-42	36-42	3-8	12-20	<2	~1	~0,1	~0,15
Orta alümina	Beyaz	65-75	25-35	<0,5	<0,5	<0,05	~0,1	<0,3	~0,05
Yüksek alümina	Beyaz	≥80	<20	<0,2	<0,2	<0,05	<0,1	<0,2	~0,05



Şekil 3. 7 $CaO-Al_2O_3$ faz diyagramı [51]

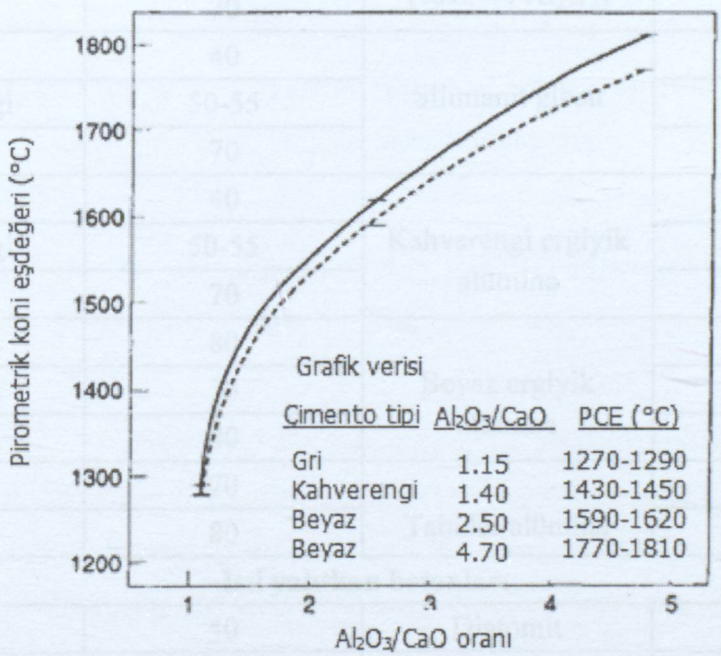
Yüksek alüminalı çimentolardan tatmin edici performans alınabilmesi için su/çimento oranı 0,40'dan daha yüksek olmamalı ve çimento miktarı 400 kg/m^3'den az olmamalıdır. Eğer bu önlemler alınmazsa betonun dayanımı sonradan büyük oranda düşer. Yarı kararlı monokalsiyum alüminat dekahidrat ($CaO.Al_2O_3.10H_2O$), daha kararlı olan trikalsiyum alüminat hekzahidrata ($3CaO.Al_2O_3.6H_2O$) dönüşür [52].

Kalsiyum alüminat çimentolarının geliştirilmesinde öncelikle ısıya dayanıklılık özelliği gözetilmemesine rağmen, günümüzde bu uygulama en önemli uygulamalardan biri olmuştur. Portland çimentosunun yüksek oranda kireç ve silika içeriği, düşük ergime noktalı ötektikler oluşturduğu için, bu malzeme yüksek sıcaklık kullanımlarına uygun değildir. Kalsiyum alüminat çimentolarının refrakterliği alümina/kireç oranın artışıyla artmaktadır.

Yüksek sıcaklık direnci kapasitesi ve yüksek-düşük sıcaklık döngüsü sertleşmiş çimento içinde hidrate kireç (portlandit $Ca(OH)_2$) olmamasına bağlıdır. 500 °C'ın üzerindeki sıcaklıklarda portland çimentosu içindeki hidrate kireç dehidrate olarak sönmemiş kirece dönüşür (CaO). Bu tersinir bir reaksiyondur, sonrasındaki soğuma ve neme maruz kalma betonu parçalayacaktır. Hidrate kireç kalsiyum alüminat çimentoların

hidratasyonunda oluşmaz, meydana gelen hidratlar, yüksek sıcaklıkta dehidrate olurken, kendi kendilerine kararlı olurlar veya kullanılan agrega ile kararlı bileşikler oluşturur.

Şekil 3. 8'de Al_2O_3/CaO oranı ile refrakterlik ilişkisini göstermektedir. Ancak buradaki sıcaklıklar, bu çimentolar ile yapılan betonların limit kullanım sıcaklıkları değildir. Refrakter betonlarda kullanılan agregalar kullanım sıcaklığını, saf çimentonun ergime noktasının üzerinde yüksek ergime noktalı ötektikler oluşturarak 100-200 °C arasında yükseltir. Ticari olarak alümina oranı % 40-80 arasında değişen, ısıya dayanıklı, izolatör ve refrakter agregaları içeren çok çeşitli kalsiyum alüminat çimentoları bulunabilmektedir. Çizelge 3. 3'te bu malzemelerin bileşenleri ve kullanım limit sıcaklıkları görülmektedir.



Şekil 3. 8 Al_2O_3/CaO oranı ile refrakterlik ilişkisi

Çizelge 3. 3 Isıya dirençli ve refrakter kalsiyum alüminat çimentoları

Çimento tipi	% Al_2O_3	Agrega tipi	Sıcaklık Limiti (°C)
Isıya dirençli betonlar			
Gri	40	Granite/Bazalt	700-800
Gri	40	Hersinit	1000
Gri	40	Alag	1100
Kahverengi	50	Olivin	1200
Yoğun refrakter betonlar			
Gri	40	Şamot, molokit (%42-44 Al_2O_3)	1300
Kahverengi	50-55		1400
Beyaz	70		1450
Gri	40	Silimanit gibsit	1350
Kahverengi	50-55		1450
Beyaz	70		1550
Gri	40	Kahverengi ergiyik alümina	1400
Kahverengi	50-55		1550
Beyaz	70		1650
Beyaz	80	Beyaz ergiyik alümina	1750
Beyaz	70		1800
Beyaz	80		1850
Beyaz	70	Tabular alümina	1900
Beyaz	80		1900
Isıl yalıtkan betonları			
Gri	40	Diatomit	900
Gri	40	Vermikülit, perlit	1000
Gri	40	Lytag , Leca	1100
Kahverengi	50	Genleşen şamot	1300
Beyaz	70	Köpük alümina	1700
Beyaz	80		1800

3.6 Molokit

Molokit özel olarak seçilmiş ve rafine edilmiş kaolinin kalsinasyonu ile üretilen bir alümino-silikattır. Seçilen kaolinin demir ve alkali içeriği düşük alümina içeriği

yüksektir. Kalsinasyon işlemi yaklaşık 60 saattir ve ürün, tünel fırının pişirme bölgesinde yirmi dört saatten daha uzun kalır. Kontrollü bir zaman sıcaklık programı molokiti 1525 °C'a kadar ısıtır bu şekilde ürünün kararlı olması sağlanır. Kalsinasyon kil minerallerini mullit kristallerine ve kuvars kristobalit gibi kristalin olmayan amorf silikaya dönüştürür.

Üretimin üç ana kademesi vardır:

- Kalsinasyona besleme için kaolin hazırlanması
- Kalsinasyon
- Kırma, eleme, öğütme

Rafine edilip karıştırılan kaolin çamuru kaolin operasyon alnından kalsinasyon ünitesine getirilir. Filtreli presleme ile kaolin çamuru plastik olarak şekillendirilir. Ekstrüze edilmiş bloklar fırın arabalarına yüklenir, fırının kurutma bölgesinde kurutulduktan sonra pişirilir. Fırından çıkartılan bloklar önce kırıcılardan geçirilir ardından bilyeli değirmende öğütülür.

Düşük ve düzenli ısıl genleşme oranı, molokite mükemmel ısıl şok direnci sağlarken yassı ve pürüzlü yüzey yapısı, difüzyon bağı oluşturan tüm sistemler için yüksek uyumluluk kazandırır.

Molokit kabuk hassas döküm kalıplarının yapımında kullanılan standart bir destek refrakter malzemedir. Köşeli taneleri ve pürüzlü yüzeyi ile molokit seramik kabuk kalıpların mekanik özellikleri üzerinde önemli bir rol oynar. Kalıp yapımında destek katlarının oluşturulmasında molokit, hem su veya alkol bazlı çamurların yapımında hem de kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır [53].

3.7 Ergiyik Silika

Ergiyik silika (fused silica) 1700-2500 °C arasındaki yüksek sıcaklıklarda kuvarsın ergitilmesi ve dönüştürülmesi ile üretilmektedir. Yüksek sıcaklık işlemi ile düzenli kristalin yapı düzensiz hale gelir ve amorf yapı oluşur. Kristalin silikalar ile karşılaştırıldığında ergimiş silika daha saftır, yoğunluğu ve doğrusal ısıl genleşme katsayısı daha düşüktür. Buna bağlı olarak da elektronik sanayinde ve yüksek sıcaklık refrakterlerinde kullanılmaktadır. Esas kullanım alanlarını, yarı iletken paketleme

bileşenleri, yüksek kaliteli elektrik yalıtkanları, epoksi reçinelerinin döküm malzemeleri, hassas döküm kalıpları, çeşitli seramikler ve silikon kauçuklardır.

Ergiyik silikanın kabuk hassas döküm kalıplarının üretiminde kullanılmasının çok sayıda sebebi vardır. Çok düşük ısıl genleşme katsayısı sayesinde ısıl şoklara karşı oldukça dayanıklıdır. Yüksek oranda ergimiş silika içeren kalıplar herhangi bir sıcaklıktaki pişirme fırınlarına rahatlıkla yüklenebilir. Ayrıca otoklavda veya fırında hızlı mum alma işlemelerinde de düşük genleşme özelliği kalıp hasarlarını engeller. Kabuk kalıpların pişirilmesi sırasında ergiyik silika kristobalite dönüşür, pişirme sıcaklığı yükseldikçe bu dönüşüm oranı da artar. Dökümün ardından kalıplar 260 °C'ın altına soğuduğunda krsitobalit yüksek-düşük dönüşümü gösterir, hacimsel daralmaya neden olan bu dönüşüm kalıbı zayıflatarak uzaklaştırılmasını kolaylaştırır. Ergiyik silikanın yoğunluğu zirkonun yarısı, alüminanın % 55'i ve alümina-silikatların % 83'ü kadardır, kullanımı kabuk ağırlığını azaltmaktadır. Ergimiş silikanın ısı kapasitesi zirkonun yarısı kadardır ve alümina veya alümina-silikatlardan da oldukça düşüktür. Kabuk boyunca sıvı metal ilerlediğinde daha az ısı kaybına neden olur, ince kesitler, döküm sıcaklığını arttırmadan başarıyla doldurulabilir. Köşeli taneleri ile ergimiş silika kalıpların geçirgenliğinin artmasını sağlar ve hassas dökümde yüksek geçirgenlik her zaman bir avantajdır. Kostik veya sıcak kostik çözeltisi gibi kimyasal kalıp uzaklaştırma teknikleri açısından da ergimiş silika, zirkon ve alümina-silikatlara göre avantajlıdır [54].

3.8 Kolloidal Silika

Hassas dökümde en yaygın kullanılan bağlayıcı malzemedir. Sodyum silikattan iyon değişimi ile sodyum iyonlarının uzaklaştırılması ile üretilmektedir. Elde edilen ürün su içerinde kolloid olarak dağılmış nerdeyse tamamen yuvarlak şekilli silika taneciklerinden oluşmaktadır. Dağılım, taneciklerin birbirini itmesini sağlayarak topaklaşmayı engelleyen iyonik yük ile kararlı hale getirilir. Kararlaştırıcı iyon çoğunlukla sodyumdur (%0,6'ya kadar) ayrıca amonyak da bu amaçla kullanılabilmektedir. Her durumda ürün alkali özelliktedir.

Kolloidal silika asidik pH ile de kararlı hale getirilebilir ancak bu şekilde pek kullanılmamaktadır. En çok kullanılan tipi sodyum ile kararlaştırılmış %30 silika içeren

ve tanecik boyutu 7-12 nm olanıdır. Malzemem %30 silika oranı ile kullanılabileceği gibi su ilavesiyle silika oranı %18'e seyreltilebilir.

Kolloidal silika mükemmel bir genel amaçlı bağlayıcıdır. En önemli dezavantajı su bazlı olmasından dolayı yavaş kurumasıdır [55].

Kolloidal Silika Üretim Prosesi

Birinci adım: İnce öğütülmüş ve ayrılmış silis kumu sodyum karbonat ile birlikte yüksek sıcaklıklı bir fırına yüklenir. İşlem sonunda sodyum silikat ve karbon dioksit gazı oluşur.

$$SiO_2 + Na_2CO_3 \rightarrow Na_2O.SiO_2 + CO_2 \quad (3.11)$$

İkinci adım: Kolloidal silika sülfürik asit kullanılarak elde edilir.

$$Na_2O.SiO_2 + H_2SO_4 \rightarrow SiO_2 + H_2O + Na_2SO_4 \quad (3.12)$$

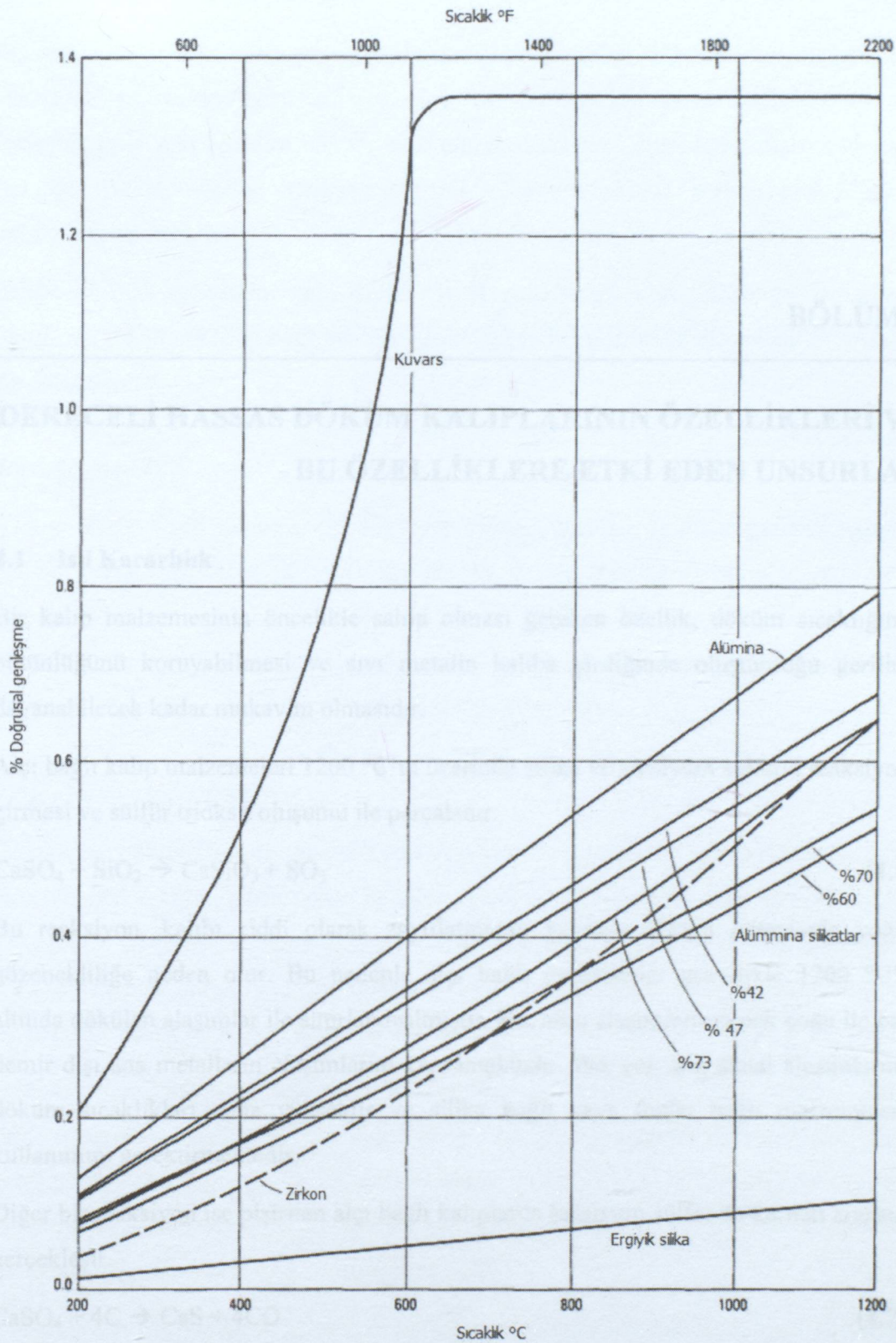
Reaksiyon sonucu, silika kollidleri içeren bir tuzlu su çözeltisi oluşur. Sodyum sülfat tuzu diafiltrasyon ile uzaklaştırılır. Rafinasyon işleminde kolloidal silika tuzlu su çözeltisi içinde asıltı haline (süspansiyon) getirilir. Bu çözeltinin tuzu giderilmelidir. Diafiltrasyon işleminde kullanılan UF membran parçacıkları engellerken tuzlu suyun geçmesini sağlar [56].

3.9 Zirkon

Zirkon (Zirkonyum-silikat $ZrSiO_4$) pek çok kullanım alanı olan zirkonyum metalinin ana mineralidir. Zirkon, siyenit, granit ve diyorit gibi volkanik kayaçlarda bulunan bir mineraldir. Ekonomik rezervleri ise ilmenit ve rutil ile birlikte sahil kumlarında toplanmıştır. Avustralya, ABD, Güney Afrika, Batı Afrika ve Hindistan sahilleri zirkonca zengindir. Avustralya ve Güney Afrika dünyadaki en önemli zirkon tedarikçisi ülkelerdir. Yüksek saflıktaki zirkon yaklaşık 2190 °C 'da erir, 1600-1800 °C arasında yumuşar ve 1750 °C 'a kadar çok düşük büzülme gösterir. Zirkon, yüksek sıcaklık uygulamaları için çok uygun karakteristik özellikler gösterir. Yüksek ergime noktasına ek olarak düşük ısıl genleşmesi ve yüksek aşınma dayanımı zirkonu mükemmel bir refrakter malzeme yapar. Zirkon, ağır mineral kumların madencilik işlemleri ile üretilir ve ilmenit ve rutil üretimin yan ürünüdür. Zirkon üretiminde kullanılan ayırma teknikleri; yüksek gerilimli elektrostatik ayırma, manyetik ayırma ve ağırlık farkı ayırmasıdır. Zirkon, çeşitli kimyasal ve fiziksel formlarda sanayide yaygın olarak

kullanılmaktadır. Üretilen zirkonun yaklaşık % 75'i kalıp kumu, rafrakter hammaddesi, zirkonyum bileşikleri ve çeşitli seramiklerin üretiminde kullanılır. Sadece % 25'i metal üretiminde veya alaşımlamada kullanılır. En basit şekliyle zirkon, maden sahasında üretildiği şekliyle kum olarak kullanılmaktadır. Refrakter ürünlerde, aşındırıcılarda, dökümhanelerde kullanılan zirkon bu şekildedir. Zirkon kumu çoğunlukla dökümhanelerde kalıp malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ergimiş metal tarafından ıslatılmaması daha iyi ve düzgün yüzey vermesini sağlar, Zirkonun büyük bir bölümü ise tüketim öncesi daha fazla işlenir. Mekanik olarak ince toza veya opaklaştırıcıya öğütülür. Bu formuyla zirkon, seramiklerde, hassas dökümde, televizyon camlarında ve refrakterlerde kullanılır. Dünyada, yüksek kalitedeki zirkonun yaklaşık % 52'si mutfak, banyo seramiklerinin, yemek takımlarının sırlarının opaklaştırılmasında kullanılır [57].

Şekil 3. 9'da hassas dökümde yaygın olarak kullanılan refrakter malzemelerin ısıl doğrusal genleşmeleri görülmektedir.



Şekil 3. 9 Hassas dökümde yaygın olarak kullanılan bazı refrakter malzemelerin doğrusal genleşmeleri [55]

BÖLÜM 4

DERECELİ HASSAS DÖKÜM KALIPLARININ ÖZELLİKLERİ VE BU ÖZELLİKLERE ETKİ EDEN UNSURLAR

4.1 Isıl Kararlılık

Bir kalıp malzemesinin öncelikle sahip olması gereken özellik, döküm sıcaklığında bütünlüğünü koruyabilmesi ve sıvı metalin kalıba girdiğinde oluşturduğu gerilime dayanabilecek kadar mukavim olmasıdır.

Alçı bağlı kalıp malzemeleri 1200 °C'ın üzerinde silika ve kalsiyum sülfatın reaksiyona girmesi ve sülfür trioksit oluşumu ile parçalanır.

$$CaSO_4 + SiO_2 \rightarrow CaSiO_3 + SO_3 \quad (4.1)$$

Bu reaksiyon, kalıbı ciddi olarak zayıflatmanın yanında döküm parçalarda yoğun gözenekliliğe neden olur. Bu nedenle alçı bağlı malzemeler genellikle 1200 °C'ın altında dökülen alaşımlar ile sınırlandırılmıştır. Bu, altın alaşımlarının pek çoğu ile bazı demir dışı ana metallerin alaşımlarını kapsamaktadır. Pek çok ana metal alaşımlarının döküm sıcaklıkları daha yüksektir ve silika bağlı veya fosfat bağlı malzemelerin kullanımını gerektirmektedir.

Diğer bir reaksiyon ise pişirilen alçı bağlı kalıplarda kalsiyum sülfat ile karbon arasında gerçekleşir.

$$CaSO_4 + 4C \rightarrow CaS + 4CO \quad (4.2)$$

Karbon, mum modelden artık olarak kalabilir ve kalıp içerisinde grafit olarak bulunabilir. Sonraki reaksiyon sülfür dioksit çıkışına neden olur.

$3CaSO_4 + CaS \rightarrow 4CaO + 4SO_2$ (4.3)

Bu reaksiyonlar 700 °C'ın üzerinde meydana gelir. Kalıp, döküme başlamadan önce reaksiyonların tamamlanmasını sağlamak ve bu reaksiyonların etkilerini en aza indirmek amacıyla bir süre döküm sıcaklığında bekletilir. Bazı kalıp malzemelerinde bulunan oksalat, alçının bozulma etkisini yüksek sıcaklıkta karbon dioksit çıkışı sağlayarak azaltır.

Fosfat ve silika bağlı kalıp malzemeleri yüksek sıcaklık gerektiren dökümler için yeterli dayanıma sahiptir. Fosfat bağlı malzemelerin dayanımı pişirmede oluşan siliko fosfatlar ile desteklenir [41].

4.2 Gözeneklilik

Alçı ve fosfat bağlı malzemeler, döküm esansında havanın ve diğer gazların kalıptan çıkabileceği kadar yeterli gözenekliliğe sahiptir. Bunun yanında silika bağlı malzemeler çok sıkı paketlendiği için geri basınç oluşumu tehlikesi söz konusudur ve bu durum kalıbın eksik dolmasına veya parçaların gözenekli çıkmasına neden olur. Bu problemler kalıp içerisinde çıkıcılar oluşturularak aşılabilmektedir [41].

4.3 Denkleştirici Genleşme:

Döküm parçaların boyutsal kesinliği, her şeyden önce kalıp malzemelerinin, dökümde meydana gelen metal büzülmesini karşılama kabiliyetine bağlıdır. Büzülmelerin ölçüsü çok farklı olabilmekle beraber, çoğu altın alaşımlarında bu oran % 1,4, Ni/Cr alaşımlarında % 2 ve Co/Cr alaşımlarında da % 2,3'tür. Kalıbın prizlenme genleşmesi ile ısıl genleşmesi bu oranın üzerinde olması tercih edilmelidir.

Denkleştirici genleşme, prizlenme genleşmesi, ısıl genleşme ve silikanın yüksek sıcaklıklardaki dönüşümünün kombinasyonlarından oluşmaktadır. Higroskopik genleşme alçı bağlı kalıp malzemelerinde ısıl genleşmeyi desteklemek için kullanılabilir. Bu ayrıca fosfat bağlı malzemeler için de olasıdır ancak pratikte bu malzemeler için nadiren uygulanmaktadır.

Tipik bir alçı bağlı kalıp malzemesinin prizlenme genleşmesi yaklaşık olarak % 0,3'tür, bu değer higroskopik genleşme ile % 1,3'e çıkartılabilir.

Isıl genleşme, kalıp malzemesinde kullanılan silikanın doğasına ve kalıbın ısıtıldığı sıcaklığa bağlıdır. Sadece kristobalit içeren kalıp malzemeleri, sadece kuvars içerenlere göre daha fazla ısıl genleşme gösterir. Büzülmeyi karşılamak için temel olarak ısıl genleşme kullanılacaksa, kristobalit içeren kalıp malzemesinin yaklaşık 700 °C'a ısıtılması gerekmektedir.

Silika bağlı malzemeler prizlenme sırasında ve pişirmenin erken aşamalarında cüzi bir miktar büzülme gösterir. Bu durum, prizlenme reaksiyonunun doğasına, sonrasında da su ve alkol kaybına bağlıdır. Devam eden ısıtma, sıkı paketlenmiş silikanın doğası gereği belirgin bir genleşmeye neden olur. En yüksek ısıl genleşme en fazla 600 °C'da % 1,6'ya ulaşmaktadır.

Fosfat bağlı malzemeler için prizlenme ve ısıl genleşme toplamı, özel kolloidal silikalı çözelti desteği ile yaklaşık % 2'yi bulmaktadır [41].

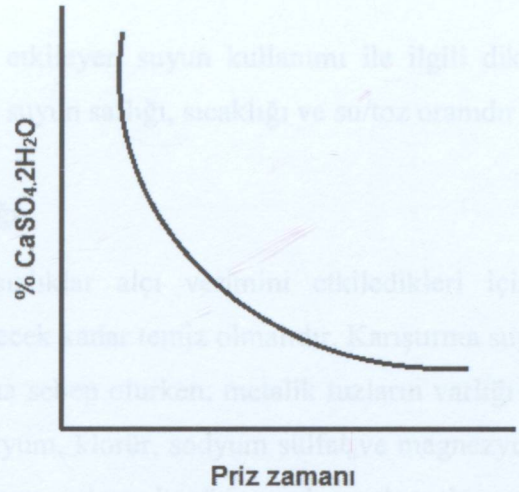
4.4 Alçı Kalıbın Kullanımına Etki Eden Faktörler

Uygun bir karışım; tozun suyun içine iyice serpilmesi sonucu tamamen ıslanması ve homojen bir karışım haline gelmesi demektir. Böyle bir karışım temel amaç olmalı ve böyle bir karışımın elde edilmesi için bütün değişkenler çok iyi kontrol altına alınmalıdır [58].

4.4.1 Yarı Hidratın Etkisi

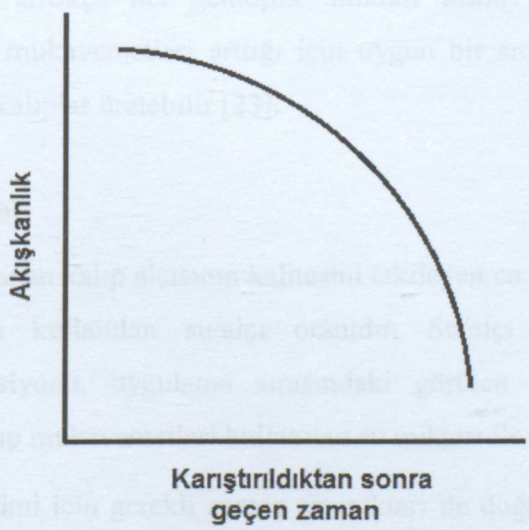
Yarı hidrat doğal olarak oluşan yüksek saflıktaki jips mineralinin kalsinasyonu sonucunda elde edilmektedir. Farklı başlangıç mineralinin kalsinasyonu, farklı yarı hidrat oluşumuna neden olabilir ve bu olay da kalıp özelliklerinde belirgin farklılıklar meydana gelmesine neden olur.

Sabit su/toz oranlarında döküm kalıplarının mukavemet değerleri artan alçı miktarı ile doğru orantı gösterir (Şekil 4. 1). Priz almış alçı parçacıklarının priz zamanlarını kısalttığı görülür. Yapılan karışımlara değişik miktarda hidrate olmuş alçı ($CaSO_4.2H_2O$) tanecikleri katıldığı zaman priz başlangıç ve bitiminin katılan $CaSO_4.2H_2O$ miktarına bağlı olarak kısaldığı görülmektedir (Şekil 4. 2).



Şekil 4. 1 Alçı miktarına bağlı olarak priz zamanının değişimi [58]

Gereğinden kısa priz zamanına sahip alçı kullanıldığında kalıba döküm sırasında akışkanlığın çok azalarak hava boşluklu, hatalı kalıp üretimine sebep olduğu; bu durumun önüne geçmek için fazla su kullanılması yolu seçildiğinde de kalıpların mukavemetinin düştüğü; gereğinden uzun priz zamanına sahip alçı ile çalışıldığında ise verimin azaldığı gözlenir [58].



Şekil 4. 2 Karışımın karıştırılmasından sonra geçen zamanla akışkanlığın değişimi [58]

4.4.2 Suyun Etkisi

Kalıp performansını etkileyen suyun kullanımı ile ilgili dikkat edilmesi gereken üç faktör vardır. Bunlar; suyun saflığı, sıcaklığı ve su/toz oranıdır [23].

4.4.2.1 Suyun Saflığı

Suyun içindeki safsızlıklar alçı verimini etkiledikleri için alçı kalıp yapımında kullanılan su, içilebilecek kadar temiz olmalıdır. Karıştırma suyunun içindeki organikler uzun donma zamanına sebep olurken, metalik tuzların varlığı donma zamanını kısaltır. Yüksek miktarda sodyum, klorür, sodyum sülfat ve magnezyum sülfat gibi çözünebilir tuzlar kalıbın kurutulması sırasında yüzeye çıkararak tuzlanmaya neden olurlar. Bunlar, yüzeye döküm çamurunun yapıştığı ya da diğer kalıp problemleri olarak görülen küçük sert noktalar yaratırlar [22].

4.4.2.2 Suyun Sıcaklığı

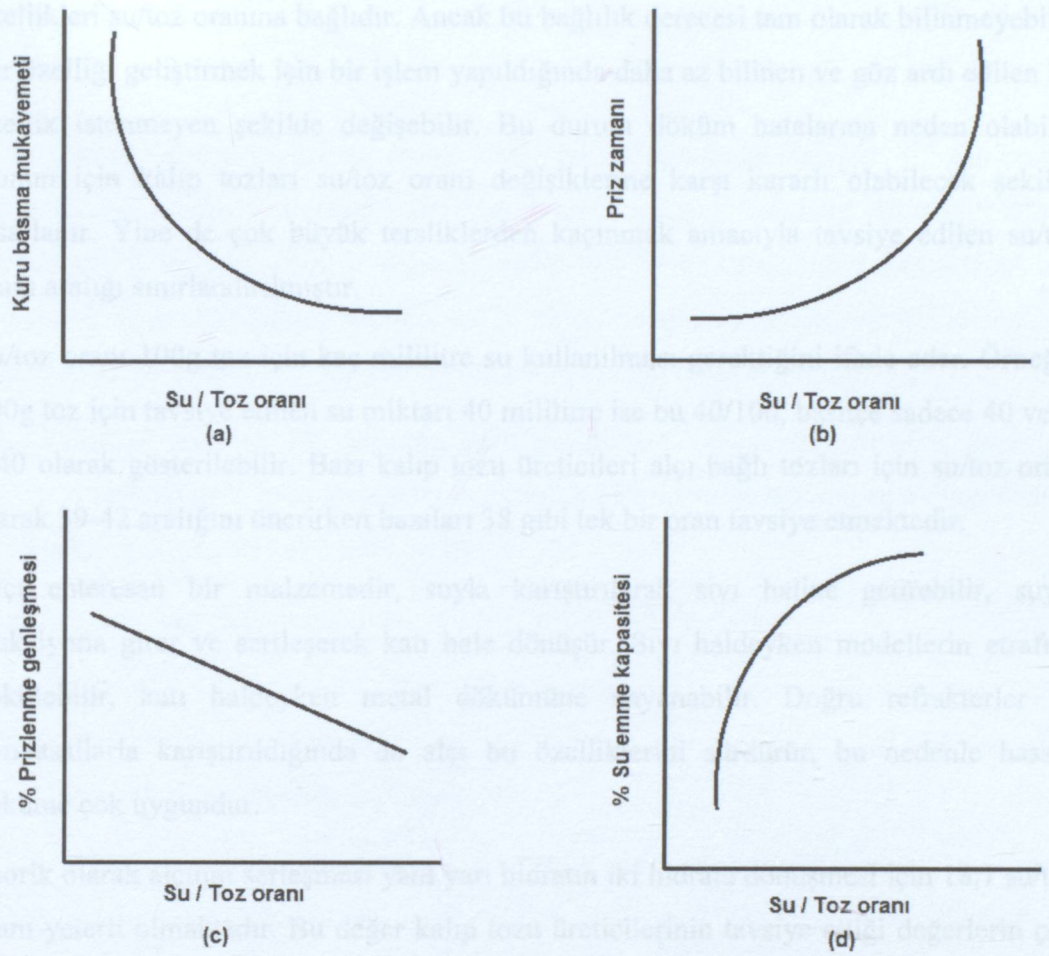
Alçı maksimum çözünürlüğe 21-35 °C arasında ulaştığı için, suyun sıcaklığındaki değişmeler donma zamanını etkiler ve karıştırma kıvamının kontrolünde zorluklara sebep olur. Sıcaklık 39 °C' a kadar arttıkça katılaşma zamanını azalmakta, bu sıcaklığın üzerinde tekrar artmaya başlamaktadır. Kullanılan suyun sıcaklığı alçının genleşmesini de etkiler. Sıcaklık arttıkça net genleşme miktarı azalır. Priz zamanı düştükçe malzemelerin basma mukavemetleri arttığı için uygun bir sıcaklıkta su kontrollü bir prizlenme ile çok iyi kalıplar üretebilir [23].

4.4.2.3 Su/Toz Oranı

Kalsine jipsten hazırlanan kalıp alçısının kalitesini etkileyen en önemli faktör, karışımın hazırlanma sırasında kullanılan su/alçı oranıdır. Su/alçı oranındaki farklılıklar mukavemeti, absorbsiyonu, uygulama sırasındaki görülen genleşmeyi ve kalıbın içyapısını etkiler. Kalıp mukavemetleri kullanılan su miktarı ile ters orantılıdır.

Priz başlangıcı ve bitimi için gerekli zaman su miktarı ile doğru orantılıdır. Prizlenme genleşmesi kullanılan su miktarı ile ters orantılıdır.

Su emme kapasitesi ve hızı kullanılan su miktarı ile doğru orantılıdır [58].



Şekil 4. 3 Su/toz oranına bağlı olarak sırasıyla kuru basma mukavemeti, priz zamanı, % prizlenme genleşmesi ve % su emme kapasitesinin değişimi [22]

Karışımda kullanılan su miktarı değiştikçe mukavemet ve absorbsiyon değişir. Kullanılan suyun belli bir miktarı kimyasal olarak kalsine alçıyı jipse çevirmekte ve geri kalan miktarı ise karışıma yeterli miktarda plastiklik ve akışkanlık vermekte kullanılır. Böylelikle kalıba sıvı gibi dökülerek plastik olarak şekillendirilmesinin gerekliliği rahatlıkla anlaşılır. Katılaşma prosesi bittiğinde karışımda bulunan fazla su kalıpta kalır ve bu su kurutma yoluyla uzaklaştırıldığında kapladığı hacmi hava tarafından doldurulur. Su miktarı değiştikçe suyun yerine geçecek hava miktarı da değişir ve alçı kalıbın toplam absorbsiyon miktarı da bununla orantılı olarak değişir. Boşluk hacmi arttıkça alçı kalıbın görünen yoğunluğu azalır [22].

Yaygın olarak bilindiği gibi kalıp malzemesinin dayanımı, çalışma süresi ve akışkanlık özellikleri su/toz oranına bağlıdır. Ancak bu bağlılık derecesi tam olarak bilinmeyebilir. Bir özelliği geliştirmek için bir işlem yapıldığında daha az bilinen ve göz ardı edilen bir özellik istenmeyen şekilde değişebilir. Bu durum döküm hatalarına neden olabilir. Bunun için kalıp tozları su/toz oranı değişiklerine karşı kararlı olabilecek şekilde tasarlanır. Yine de çok büyük tersliklerden kaçınmak amacıyla tavsiye edilen su/toz oranı aralığı sınırlandırılmıştır.

Su/toz oranı 100g toz için kaç mililitre su kullanılması gerektiğini ifade eder. Örneğin 100g toz için tavsiye edilen su miktarı 40 mililitre ise bu 40/100, basitçe sadece 40 veya 0,40 olarak gösterilebilir. Bazı kalıp tozu üreticileri alçı bağlı tozları için su/toz oranı olarak 39-42 aralığını önerirken bazıları 38 gibi tek bir oran tavsiye etmektedir.

Alçı enteresan bir malzemedir, suyla karıştırılarak sıvı haline getirebilir, suyla reaksiyona girer ve sertleşerek katı hale dönüşür. Sıvı haldeyken modellerin etrafına dökülebilir, katı haldeyken metal dökümüne dayanabilir. Doğru refrakterler ve kimyasallarla karıştırıldığında da alçı bu özelliklerini sürdürür, bu nedenle hassas döküme çok uygundur.

Teorik olarak alçının serleşmesi yani yarı hidratın iki hidrata dönüşmesi için 18,7 su/toz oranı yeterli olmaktadır. Bu değer kalıp tozu üreticilerinin tavsiye ettiği değerlerin çok çok altındadır. Bu teorik değer sadece dönüşüm reaksiyonu için geçerlidir ancak karışımın dökülebilecek kadar akışkan olması gerekir ki ilave su bu işlevi görür.

Toz için yeterli suyun miktarı, kullanılan alçı türüne, alçı ve silikanın tane boyutu dağılımına, tanecikler arası adezyona ve kimyasal kontrol ilavelerine bağlıdır. Kalıp malzemesi üreticileri kullandıkları ham maddelerin tutarlı ve istikrarlı olması konusunda büyük çaba gösterirler, bir kısım tutarsızlıkları da kimyasal ilaveler kullanarak gidermeye çalışırlar.

Üreticiler ve kullanıcılar toz ve su miktarının doğru ölçülmesi gerektiğini her zaman vurgularlar. Bunun birçok sebebi vardır. Bunlardan biri karışımın çok koyu olmaması gerektiğidir. Eğer karışım çok koyu olursa ince detaylar dolmayabilir hava kabarcıkları kaçamayabilir. Diğer bir sebep, yeterli kalıp dayanımının sağlanması gerekliliğidir. Zayıf kalıplar döküm parçada yüzey kabalaşmasına ve çapak oluşumuna neden olur. Diğer sebepler ise uygun çalışma süresi, geçirgenlik, prizlenme ve ısıl genleşme,

çapaksız, su izsiz, düzgün parça yüzeyi ve dökümden sonra kolay bozulma olarak sıralanabilir [59].

Aynı şekilde basma ve çekme mukavemeti de bu oranda azalacaktır. Çünkü verilen herhangi bir kesitteki alçı kristalleri bu oranda azalmış olacaktır. Benzer biçimde kullanılan su miktarı arttıkça kalıbın verilen bir yüzeyindeki veya kesitindeki alçı kristallerinin azalacağından alçının karşı karşıya kalacağı aktif yüzey azalacak ve böylece kalıbın çarpma ve şok direnci düşerken aşınma oranı artacaktır.

Alçı kalıptaki gözeneklilik çamurun şekillendirilmesi için gerekli emicilik özelliğini sağlar. Ancak bu oran belli bir miktarda olmalıdır. Fazla su ile hazırlanan alçının sertliği ve dayaklılığı azalır ve kalıp kolayca kırılır [22].

Alçı/su oranındaki değişiklikler sonucu:

1. Alçı/su oranındaki değişiklikler yayılma çapında değişikliklere neden olmaktadır. Yani artan alçı/su oranları ve karıştırma süreleri için yayılma çaplarının da azaldığı görülmektedir.
2. Alçı kalıpların priz başlama ve bitim sürelerinin artışı, alçı/su oranı ve karıştırma süreleri ile ters orantılıdır.
3. Doğrusal genleşme, hem alçı/su oranı hem de zamana bağlı olarak artmaktadır. Doğrusal genleşme başlangıcı kıvam ile azalmakta fakat tamamlanması değişmemektedir.
4. Alçı kalıplarda absorblanan su miktarı, alçı/su oranı ve karıştırma süresi ile ters orantılıdır.
5. Alçı kalıpların alçı/su oranının ve karıştırma süresinin artması ile dayanımı da doğru orantılı olarak artmaktadır.
6. Alçı kalıplarda alçı/su oranının artması ile maksimum su absorbsiyonu azalırken kuru dayanımı artmaktadır [60].

4.4.3 Islatmanın Etkisi

Yarı hidrat partikülleri bir hava tabakası ile sarılmıştır. Bu hava tabakası ıslatma boyunca uzaklaştırılır. Islatma işlemi alçının su içerisine serpilmesi ile yapılır.

Islatma işleminin süresi önemlidir. Islatma süresinin, kalıptaki hataların, (pinhollerin) oluşumuna etkisi azdır. Oldukça uzun ıslatma süresi donma süresini hızlandırır ve çözeltinin daha çabuk sertleşmesine yol açar. Bu olayın sebebi, çözeltideki çökelmeyi hızlandıran ince partiküllü yarı hidratın varlığıdır. Bu partiküllerin iri taneli olması istenir.

En iyi karıştırma için bütün yarı hidrat partiküllerinin su içinde tamamen dağıtılması gerekir. Islatma süresinin kısaltılması, karıştırma süresinin etkisine negatif yönde etki eder. Eğer her durum için uygulanabilirse, toz ile iyi ıslatma özellikleri su içerisinde yavaşça çökelme meydana getirecektir. Çoğunlukla ıslatma işlemi tozun dökümünden 3-4 dakika sonra tamamlanır [22].

Su içinde hızla çöken toz, yüksek miktarda olduğunda ıslatma sürecinden sonra bile partiküller ıslatılmayabilir. Karıştırma işlemi boyunca bu kuru partiküllerin dağıtılması zordur. Tersi durumda yani ıslatılması zor olan alçıda bütün partiküllerin dağıtılması zordur ve tüm partiküllerin ıslatılması için ıslatma süresinin uzatılması gerekir. Bu da kalıp üretim hızını düşürür [23].

4.4.4 Karıştırmanın Etkisi

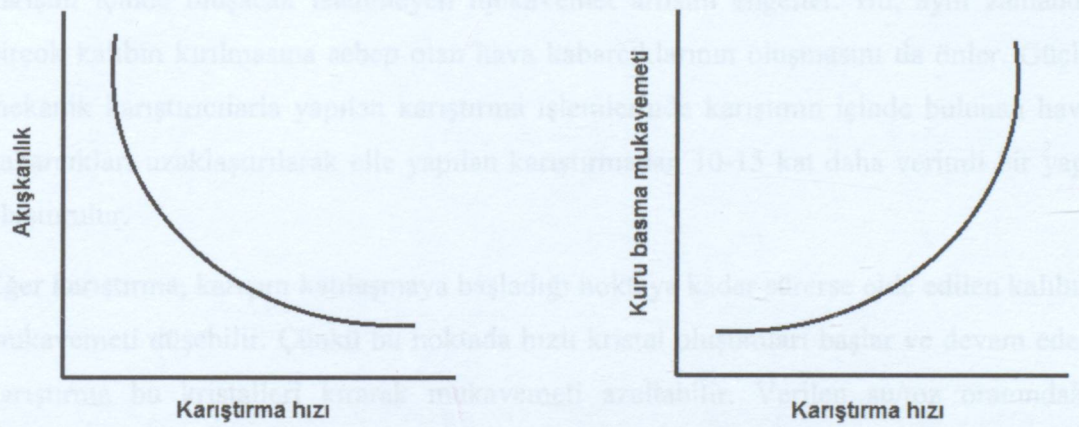
Karıştırma işlemi boyunca toz, su içinde dağıtılmalıdır. Uygun karıştırma, su içindeki yarı hidrat partiküllerini dağıtır ve çözeltide kalmış havayı uzaklaştırır. Alçı kalıpların mukavemeti, kısmi olarak karıştırma işlemi tarafından belirlenir [22].

4.4.4.1 Karıştırma Hızı

İyi bir homojen kalıp üretiminde karıştırma hızı çok önemli bir faktördür. Karıştırma miktarına ve karıştırıcının formuna en uygun karıştırma hızı seçilmelidir. Gereğinden düşük hızlarda, taneciklerin etrafındaki hava tahliye edilemeyeceği için hava kabarcığı meydana gelecek; karıştırma süresi uzatılsa bile kalıp mukavemeti ulaşılabilecek en yüksek değeri vermeyecektir. Çok hızlı karıştırmalarda ise reaksiyon hızı artacağından priz zamanları kısalacak; dolayısıyla yayılma çapı azalarak karışım koyulaşacak, döküm sırasında hava tahliye edilemeyeceği için kalıp içinde hava boşlukları kalacaktır. İyi bir karıştırma sonucu tanecikler sürekli dağılarak ince, sıkı bir kristal yapı oluşturacağından mukavemet artacaktır (Şekil 4. 4). Sıkı bir kristal yapı elde edilmesiyle su emme kapasitesi de azalacaktır.

Karıştırma zamanı sabit tutularak değişik karıştırma hızları ile yapılan laboratuvar deneylerinde hız artışının;

- Priz başlangıç zamanını kısalttığı,
- Yayılma çapını azalttığı,
- Mukavemeti artırdığı,
- Su emme kapasitesini azalttığı görülür [22].



Şekil 4. 4 Karıştırma hızına bağlı olarak akışkanlık ve mukavemet değişimi [22]

Toz/su karışımı çok iyi karıştırmalıdır. Alçının farklı bölgelerde farklı hızla emici olması kalıba döküm yapılarak elde edilen ürünün her yerinin farklı kalınlıkta olmasına sebebiyet verir. Bu da ürünün deforme olmasına ve çatlamasına neden olmaktadır [58].

4.4.4.2 Karıştırma Süresi

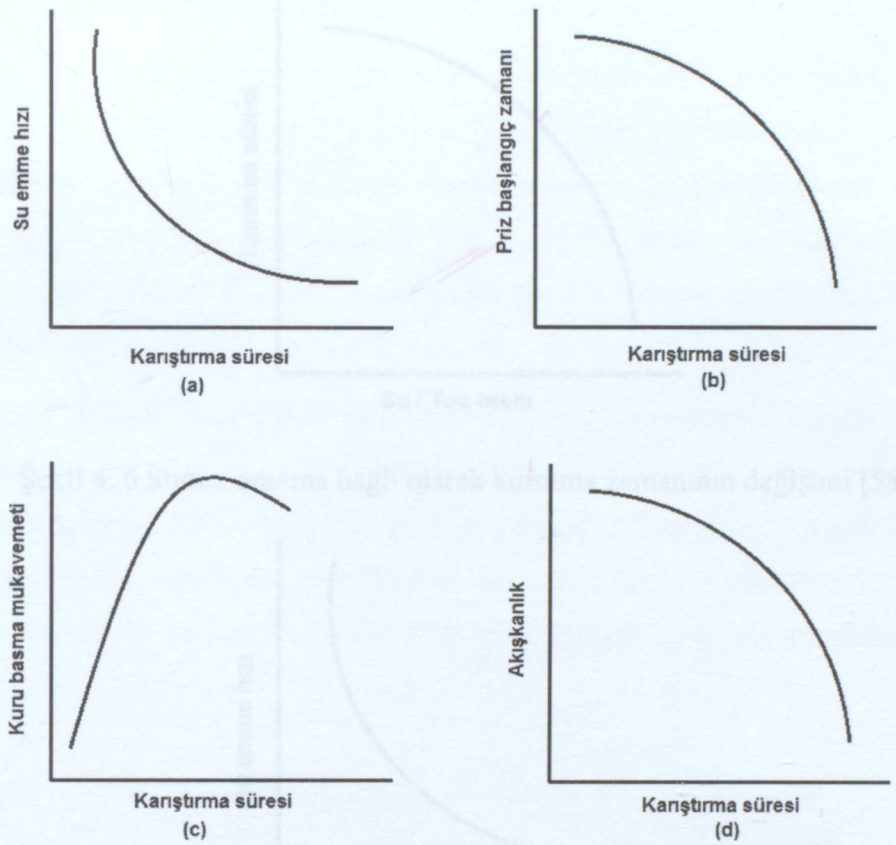
Karıştırma hızı ve süresi iç içe iki kavram olmasına rağmen, karıştırma zamanının etkisi ayrı olarak ve daha derinlemesine incelenmiştir. Bu seçime, işletmelerdeki mevcut sistemlerin yenilenmesine göre karıştırma zamanının değiştirilmesinin daha kolay olması neden olmuştur. Yapılan bazı araştırmalarda karıştırma zamanının ne kadar arttırılabileceği ve bunun harcın ve kalıpların özelliklerini nasıl etkileyeceği tespit edilmiştir [23].

- Karıştırma zamanı arttırıldığında;
- Su emme hızının azaldığı,

- Priz başlangıç zamanının kısaldığı,
- Mukavemetin artarak bir maksimuma ulaştıktan sonra priz almaya başlamış alçının karıştırılmaya devam edilmesi durumunda mukavemetin azalmaya başladığı,
- Yayılma çapının düştüğü görülür [22].

Toz, su ile karıştırıldığında, karışım sıvı gibidir. Bu karakter zamanla önce jelimsi daha sonra da sertleşerek katı hal alır. Karıştırmanın kremsi aşamaya kadar devam etmesi karıştırma homojenliğini sağlar ve karışımın sıvı durumdan katılaşmasını önleyerek karışım içinde oluşacak istenmeyen mukavemet artışını engeller. Bu, aynı zamanda birçok kalıbın kırılmasına sebep olan hava kabarcıklarının oluşmasını da önler. Güçlü mekanik karıştırıcılarla yapılan karıştırma işlemlerinde karışımın içinde bulunan hava kabarcıkları uzaklaştırılarak elle yapılan karıştırmadan 10-15 kat daha verimli bir yapı oluşturulur.

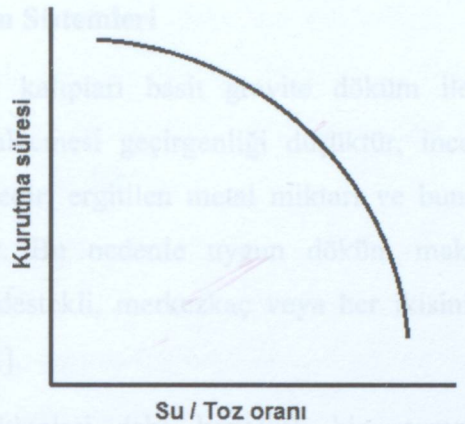
Eğer karıştırma, karışım katılaşmaya başladığı noktaya kadar sürerse elde edilen kalıbın mukavemeti düşebilir. Çünkü bu noktada hızlı kristal oluşumları başlar ve devam eden karıştırma bu kristalleri kırarak mukavemeti azaltabilir. Verilen su/toz oranındaki karışımdan elde edilebilecek olası en büyük mukavemet değeri harmanlanmış karışımdaki kristal oluşumlarının engellenmediği durumlarda söz konusudur. Aşırı tahrik durumunda kristaller tamamen kırılabilir ve kurutulduktan sonra yalnız kendisini taşımaya yetecek macuna benzer bir yapı elde edilir [22].



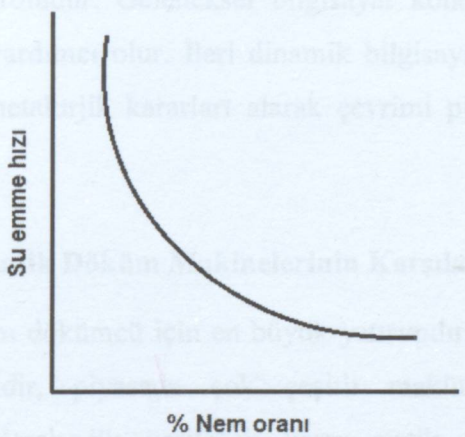
Şekil 4. 5 Karıştırma süresi bağlı olarak sırasıyla su emme hızı, priz başlangıç zamanı, kuru basma mukavemeti ve akışkanlığın değişimi [58]

4.4.5 Kurutmanın Etkisi

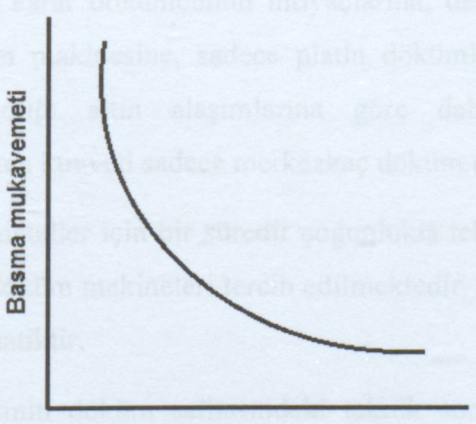
Bütün kalıplardan aynı sonuçları ve fiziksel özellikleri elde etmek için kalıplar uygun bir şekilde kurutulmalıdır. Kurutma, kalıptan fazla suyun uzaklaştırılması için yapılır. Bu da döküm çamurundan suyun etkili bir biçimde uzaklaşmasını sağlar. Yüksek sıcaklıklarda yapılan kurutma kalıbın kalsinasyonuna, düşük ısılar ise alçı kalıp veriminin azalmasına neden olur. Kurutma işlemi gereğince yapılmaz ise kalıbın yumuşaması ve işlemede yavaş çekim problemleri ile karşılaşılır. Sabit bir sıcaklıkta su/toz oranı azaldıkça kurumanın zorlaştığı görülmüştür (Şekil 4. 6). Kalıpların içerdikleri nem oranı azaldıkça su emme hızlarının ve kalıp mukavemetinin arttığı bulunmuştur (Şekil 4. 7 ve Şekil 4. 8) [22].



Şekil 4. 6 Su/toz oranına bağlı olarak kurutma zamanının değişimi [58]



Şekil 4. 7 Nem oranına bağlı olarak su emme hızının değişimi [58]



Şekil 4. 8 Nem miktarına bağlı olarak mukavemet değişimi [58]

4.5 Ergitme ve Döküm Sistemleri

Dereceli hassas döküm kalıpları basit gravite döküm ile doldurulamaz. Kalıplar çıkıcısızdır ve kalıp malzemesi geçirgenliği düşüktür, ince detayların ve kesitlerin doldurulması gerekmektedir, ergitilen metal miktarı ve buna bağlı olarak hidrostatik basınç görece düşüktür. Bu nedenle uygun döküm makineleri ile bu dökümler gerçekleştirilir. Vakum destekli, merkezkaç veya her ikisinin de uygulandığı döküm makineleri mevcuttur [61].

Yeni nesil döküm makineleri daha kapsamlı bir otomasyona sahiptir. Bunların üretiminde iki yol takip edilmiştir; birincisi geleneksel bilgisayar kontrolü, ikincisi ileri dinamik bilgisayar kontrolüdür. Geleneksel bilgisayar kontrolünde çevrimi operatör planlar, bilgisayar ona yardımcı olur. İleri dinamik bilgisayar kontrolünde ise bir tür yapay zekâ teknik ve metalurjik kararları alarak çevrimi planlar ve döküm işlemini yürütür [62].

4.5.1 Merkezkaç ve Statik Döküm Makinelerinin Karşılaştırılması

Döküm makinesinin alımı dökümcü için en büyük yatırımdır. Doğru makineyi seçmek kolay bir karar değildir, piyasada çok çeşitli makineler mevcuttur. Üretim gerekliliklerine bağlı olarak ilk verilecek karar statik veya merkezkaç döküm makinesinden hangisinin alınacağıdır. Bir sistemin diğerine tercih edilmesi için özel sebepler yoktur. Burada karar dökümcünün ihtiyaçlarına, deneyimine ve tecrübesine bağlıdır. Santrifüj döküm makinesine, sadece platin dökümlerinde gerçekten ihtiyaç vardır. Platinin akışkanlığı altın alaşımlarına göre daha düşüktür ve kalıbı doldurabilmesi için gereken kuvveti sadece merkezkaç döküm makinesi sağlayabilir.

Altın ve diğer kıymetli metaller için bir süredir çoğunlukla teknolojik gelişim seviyesi daha yüksek olan statik döküm makineleri tercih edilmektedir. Çoğu ileri model makine neredeyse tamamen otomatiktir.

Otomatik makineler işlemin döküm safhasındaki teknik sorumluluğu büyük ölçüde dökümcüden alarak üründe kalite tutarlılığı sağlar. İnsan hatası en aza indirgenmiş olur.

4.5.2 Merkezkaç Döküm

Merkezkaç dökümün iki zayıf noktası vardır; boşaltımda fazla türbülans ve yüksek sıvı metal basıncı. Bir diğer açıdan yüksek basınç kalıp doldurma formunu ve besleme

sistemini özellikle ince modellerde daha az kritik hale getirir. Yüksek türbülans hapsolan gazın neden olduğu gaz boşluğu oluşumunu arttırır. Merkezkaç dökümde delikli dereceler kullanılmaz bu nedenle kalıp tabanından emiş uygulansa bile kalıp boşluğundan gazın tahliyesi zordur.

Yüksek döküm basıncı kalıbın tam dolmasını sağlarken kalıp aşınması riskini arttırır (sıra dışı durumlarda kalıp parçalanabilir). Aşınan ufalanan kalıp parçacıkları akan metale karışarak döküm parçalarda inklüzyon oluşturur. Ayrıca bazen döküm parçaların yüzeylerinin pürüzlü olmasına neden olur.

Bunun dışında, merkezkaç dökümde sıvı metale uygulanan basınç, ağaç boyunca sabit değildir; ağacın üstünde en yüksekken yolluk ağzında en azdır. Bu nedenle yolluk ağzına yakın olan parçalarda eksik dolum, uç kısımlardaki parçalarda da yüksek basınçtan dolayı kalıpta meydana gelen çatlakların neden olduğu çapaklanma olabilir.

4.5.3 Statik Döküm

Döküm basıncı statik dökümde yer çekimi nedeniyle ağacın tüm boyunca nerdeyse aynıdır, tek fark üstten tabana kadar olan sıvı metaldeki hidrostatik basınç farkıdır. Statik makinelerde potada ve derece kabininde kontrollü atmosfer sağlamak zor değilken sadece birkaç tür merkezkaç döküm makinesinde kontrollü atmosfer imkânı vardır.

4.5.4 Döküm Verimliliği

Merkezkaç döküm makinelerinde, yüksek metal basıncı güvenle ergitilebilecek metal miktarını da sınırlar. Bu miktar 800 g'mı geçmemelidir. Derece boyu da 150 mm ile sınırlandırılmıştır. Statik makinelerde derece boyu büyük bir sınırlayıcı etmen değildir, ergitme miktarı 1,5 kg'dan derece boyu da 250 mm'den fazla olabilir. Fazla ergitme hacmi ve büyük dereceler işlem ekonomisi anlamına gelir.

Bir merkezkaç döküm makinesi ile operatörün 150-130 mm boyunda dereceler kullanarak saatte 8 dökümden fazlasını yapabilmesi oldukça güçtür. Vakum destekli (ayrıca basınç destekli de olabilir) tam otomatik son nesil bir statik döküm makinesi ile operatör 250 mm boyunda dereceler ile saatte 20 kadar döküm yapabilir.

4.5.5 Merkezkaç Döküm Makineleri

Muhtemelen merkezkaç döküm makineleri takı dökümünde en yaygın kullanılan makinelerdir. Son yıllarda motor teknolojisinde ve programlama sistemlerinde büyük ilerlemeler olmuştur ancak temel orijinal tasarım neredeyse değişmemiştir. Eski ekipmanlar ile karşılaştırıldığında en önemli yenilikler şunlardır: değişken geometrili denge kolu, derece tabanından uygulanan emiş (bazı modellerde), sıcaklık kontrol aparatı, indüksiyon ısıtma ve atmosfer kontrollü kabin (bazı modellerde).

4.5.6 Statik Döküm Makineleri

Tüm modern iyi kaliteli statik döküm makineleri kalıp doldurmada dereceye doğru emiş sağlayan vakum desteği ekipmanına sahiptir. En iyi makineler, ayrılmış pota ve derece kabinleri olanlardır. Bu şekilde süreç oldukça kısaltılabilir.

Neredeyse tüm statik döküm makineleri yansız atmosferde çalışır, çoğunlukla azot veya argon gazı kullanılır; bazı türler ise hidrojen/azot karışımı indirgeyici atmosfer kullanmaktadır. Son zamanlarda argon azota göre maliyeti yüksek olmasına rağmen daha fazla tercih edilmektedir. Makineler ayrıca, döküm sonrasında derece kabininde döküm yolluğuna etkiyerek daha iyi bir döküm ve yüzey hassasiyeti sağlayan üst basınç sistemine de sahiptir. Bazı çok yeni makinelerde sıvı metal boşaltımı da basınç altında gerçekleşir.

Birçok statik makinede sıvı metal boşaltımı potanın tabanından gerçekleşir. Bu durum ısı kaybının en aza inmesini, gerekli üst ısı derecesinin düşmesini ve ayrıca kalıp boşluğuna oksit kaçması riskinin azalmasını sağlar. Herhangi bir oksit oluşumunda bu, kalıpta en son dolan kısım olan yolluk ağzını doldurmuş olacaktır [3], [13].

4.6 Segregasyon

Dökülebilir seramiklerde segregasyon oluşumu, dökümden sertleşmeye kadar olan süre içerisinde, kullanılan malzemelerin farklı partikül boyutu ve yoğunluklarının neden olduğu farklı çökme eğilimlerinden kaynaklanır. Çökme oranı Stokes Kanunu (eşitliği) ile açıklanır.

$$V = \frac{2gr^2(\rho - \sigma)}{9\eta} \tag{4.4}$$

V batma hızı (m/s), r küresel partikülün yarıçapı (mm), g yer çekimi ivmesi (m/s^2) , η sıvının viskozitesi (cP), ρ akışkanın yoğunluğu (g/cm^3), σ katının yoğunluğudur (g/cm^3).

Dereceli hassas döküm kalıpları birçok özellikleri bakımından betonlara benzemektedir. Bu nedenle sızma ve segregasyon oluşumu davranışının anlaşılabilmesi için betonların incelenmesinde fayda vardır.

Beton döküldüğü zaman su yüzeye yükselir veya sızar. Bu durum sızma olarak adlandırılır. Bu fenomenin sebebi karışımdaki katı partiküllerin çökerken tüm suyu tutamamasıdır. Sızma, yeni dökülmüş betonun üst yüzeyinde bir su tabakasının oluşmasıdır. Bu olay, katı partiküllerin (çimento ve agrega) çökelmesi ve suyun üst tarafa doğru yükselmesi ile meydana gelir. Sızma normaldir ve çoğu zaman betonun kalitesinin azalmasına neden olmaz. Bazı durumlarda sızma plastik büzülme kırılmalarının kontrolüne yardımcı olur. Ancak aşırı miktarda sızma plastik büzülmelere ve kırılmalara yol açar [63].

Sızma oranı ve kapasitesi ilk su içeriği, beton yüksekliği ve basıncı ile artar. Özel agregalar, kimyasal katkılar, destek çimento malzemeleri ve ince öğütülmüş çimento kullanılması sızmayı azaltır. Beton boşlukları doldurur, destek sağlar ve iyi bağlanma gerçekleşirse sızma az olur ve su cepleri oluşmaz [64].

Betonlarda görülen sızma ve segregasyon benzer şekilde dereceli hassas döküm kalıplarında da görülmektedir. Meydana gelen sızma ve segregasyon, kalıpların refrakterlik özelliğini etkilemektedir. Segregasyon nedeniyle homojen bir refrakterliğe sahip olamayan kalıplar, çeşitli döküm hatalarına neden olmaktadır [65].

4.7 Yüzey Pürüzlülüğü

Basit bir yöntemle yapılan yüzey pürüzlüğü ölçümleri göstermiştir ki, döküm kalitesini etkileyen çoğu faktör yüzeye ve dökümdeki ara yüzey enerjisine duyarlıdır. Altın takıların dökümünde elde edilen yüzey bitimi çok önemlidir. Bu bağlamda sıvı metalin yüzey enerjisi ile kalıp malzemesi ve sıvı metal arasındaki ara yüzey enerjisi özel bir anlama sahiptir. Bu parametreler çoğunlukla alaşım kompozisyonuna, saflığına, sıvı metalin döküm ve ergitme atmosferi ve de kalıp malzemesiyle arasında gerçekleşen reaksiyonlara bağlıdır. Bunun yanında modellerin makro ve mikro geometrileri de döküm parçaların yüzey bitimini etkilemektedir.

Dieter Ott ve Christoph J. Raub'un yaptıkları çalışmalara göre; ara yüzey enerjisi alaşım bileşimine bağlıdır ve altın alaşımlarında çinko gibi diğer metallerin az miktar ilavesi ile oldukça düşürülebilir. Ayrıca sıvı metalin oksijene maruz kalması da ara yüzey enerjisini düşürür, kalıbı ıslatmasına neden olur ve dentirit oluşumunu engeller. Kalıp dolumu ve yüzey bitimi oldukça gelişme gösterir. Oksijensiz ortamda yapılan dökümde yüzey pürüzlülüğü artar. Benzer şekilde kalın kesitli parçalarda da yüzey pürüzlülüğü artmaktadır çünkü büzülme oranı artmakta ve dentirit oluşumu engellenememektedir.

İndirgeyici ortamlarda dökümlerin yüzeyi, sıvı metalin pota ve kalıp malzemesi ile reaksiyona girmesi sonucu kirlenebilir. Sıvı metalde sülfitlerin oluşumu yüzey altı porozitesine neden olur. Bunun haricinde yüzey altı boşluklar ve şekil bozulmaları görülebilir, döküm dokusu oluştuktan kısa bir süre sonra bölgesel olarak dentirit iskeleti arasından sıvı metal çekilmesi bu oluşumun sebebidir. Bu sıvı metal çekilmesi, büzülmeyle birlikte ara yüzeyde biriken gazın katılaşan metalin hava geçirmez katı bir kabuk oluşmamış bölgelerinde oluşturduğu basınçla meydana gelir.

Sebebi hangisi olursa olsun sonuçta döküm parçaların bazı bölgelerinde süngerimsi oluşumlar meydana gelir ve bu bölgeler kumlama sırasında deforme olur [66].

4.8 Boyutsal Hassasiyet

Şekilde hassasiyet, dökümün ana özelliklerinden birisidir. Dökümün esas amacı nihai şekilde veya nihai şekle yakın üretim ise, döküm işlemin başarısı büyük ölçüde bu kriter ile ölçülebilir. Hassasiyet kalitesi sadece boyutsal keskinliği değil genel görünüşü ve yüzey bitimini de ihtiva eder. İdeal bir döküm, boyutsal toleransları karşıladığı gibi, düzgün ve mümkün olduğunca pürüzsüz olmalıdır.

Dökümde boyutsal hassasiyeti etkileyen faktörler:

1. Model ve model kalıbının hassasiyeti.
2. Modelin şeklini alan kalıbın hassasiyeti.
3. Dökümde kalıp boşluğunun dolma derecesi ve boyutsal karalığına bağlı olarak döküm parçanın hassasiyeti.
4. Büzülme faktörü, bu soğumada meydana gelen boyutsal değişimin ön görülebilir olmasını sağlar.
5. Bitirme işlemleri

Hassasiyet bu faktörlerden bir veya daha fazlasının geliştirilmesi ile artırılabilir [8].

"Nihai şekilde" ürün, şekil itibari ile ilave bir modifikasyon gerektirmeyen, kullanıma hazır ürün anlamına gelmektedir. Bu kavram sadece başka parçalarla birleştirilecek olan parçalara uygulanır.

Çoğu plastik oyuncak nihai şekilde yapılır ancak genelde şekil kritik değildir ve bu durum konseptle ilgili olmaz. Ancak Lego gibi enjeksiyonlu kalıplamayla üretilen ve sonradan bir işlem görmeden diğer parçalara kesin olarak uyan parçalarda konsept kritiktir.

Pek çok metal parça için bazı toz şekillendirme işlemleri hariç tutulacak olursa, son toleranslara tek şekillendirme işlemi ile ulaşmak enderdir. Bu nedenle genellikle dövme ve döküm gibi şekillendirme işlemleri ile bir kısım bitirme işlemleri gerektiren "nihai şekle yakın" ürünler üretilmektedir [67].

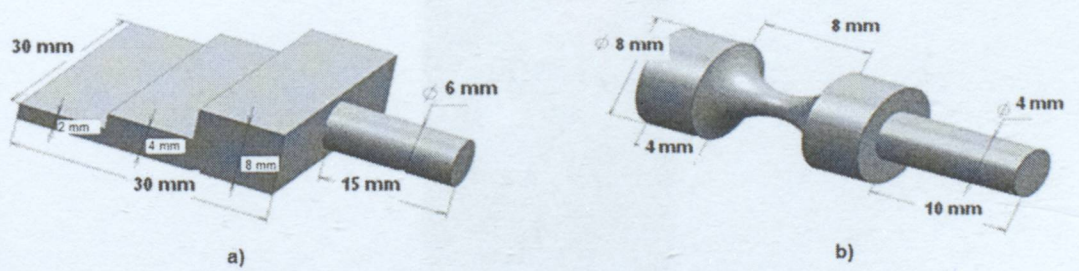
Hassas döküm işlemi her biri kendi karmaşıklığına sahip çok sayıda küçük işlemden oluşmaktadır. Hassas dökümde üç temel aşama vardır: Mum model üretimi, seramik kalıp yapımı ve metal dökümü. Bu üç aşamada da boyutsal değişimler meydana gelmektedir. Nihai parçanın doğru olabilmesi için bu boyutsal değişimler hesaba katılarak toleranslar belirlenmelidir. Hassas dökümlerden beklenen toleranslar daraldıkça, dökümcüler için ekonomiklik ve rekabetçi olma açısından döküm parçaların boyutsal doğruluğu üzerinde etkili faktörleri kontrol etmek çok önemlidir [17].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Model Tasarımı ve Mum Model Üretimi

Hassas döküm parçaların yüzey kalitesinin ve boyutsal hassasiyetinin araştırılmasının amaçlandığı bu çalışma, uygun test numunelerinin tasarımı ile başlamıştır. Literatürdeki diğer çalışmalara göre yüzey pürüzlülüğü numunesinin basamaklı olması gerektiği anlaşılmış ve üç basamaklı bir model tasarlanmıştır ve standart yoğunluk numunesi (dumbell şekilli) boyutsal ölçümler için kullanılmıştır. Numunelerin üç boyutlu çizimleri Şekil 5,1'de görülmektedir.



Şekil 5. 1 Tasarlanan test numuneleri a) yüzey pürüzlülüğü numunesi,

b) boyutsal ölçüm numunesi

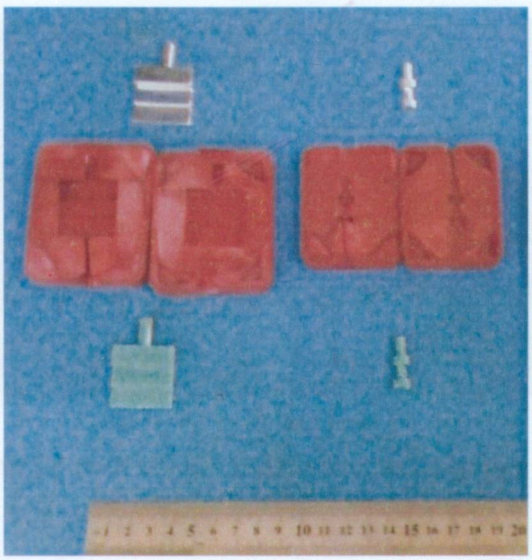
Bu numunelerin master modelleri alüminyumdan talaşlı işlenerek ürettirilmiştir ve bu master modeller kullanılarak kauçuk kalıplama presiyle (Teknik Döküm VP-03 Vulcanizer, Şekil 5. 2) mum model üretimi için kauçuk kalıplar yaptırılmıştır. Mum modeller bir mum enjektör kazanıyla (Teknik Döküm MK-500, Şekil 5. 3) 85 °C

sıcaklık ve 0,6 bar enjeksiyon basıncı ile üretilmiştir. Kuyumculuk modelleri için üretilen "Freeman Aqua Green" model mumu kullanılmıştır.

Şekil 5. 2 Kauçuk kalıp presi

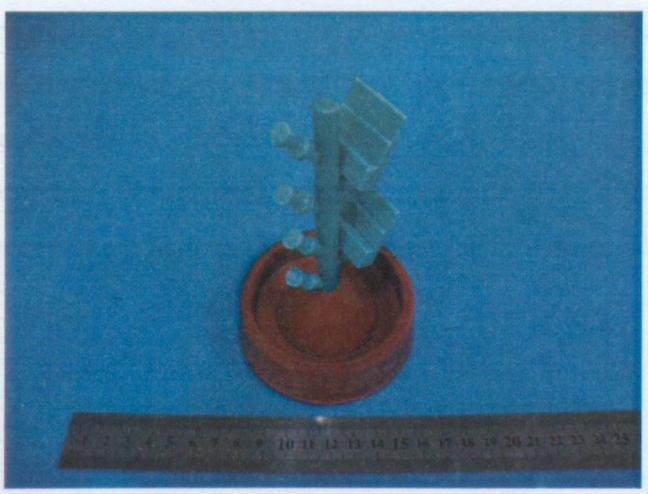
Şekil 5. 3 Mum enjeksiyon presi

Alüminyum master modeller, kauçuk kalıplar ve mum model örnekleri Şekil 5. 4'te görülmektedir.



Şekil 5. 4 Alüminyum master modeller, kauçuk kalıplar ve mum modeller

Bu modeller kauçuk bir altlığa yerleştirilen bir ana yolluğa kaynatılarak mum model ağacı oluşturulmuştur. Tasarlanan bu test numuneleri bronz ve gümüş dökümlerinde kullanılmıştır. Bronz dökümlerinde kullanılan örnek bir model ağacı Şekil 5. 5' de görülmektedir.



Şekil 5. 5 Test numunelerinin mum model ağacı

Paslanmaz çelik dökümlerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için altıgen şekilli modeller kullanılmıştır, örnek bir model ağacı Şekil 5. 6' da görülmektedir.

Şekil 5. 6 Paslanmaz çelik dökümünde kullanılan numune ve model ağacı

5.2 Kalıp Yapımı

Deneysel çalışmaların kalıp yapımı ve döküm işlemleri iki ayrı koldan sürdürülmüştür. Bronz ve paslanmaz çelik için kalıp yapımı ve döküm işlemleri üniversitemizin döküm laboratuvarında, gümüş için kalıp yapımı ve döküm işlemleri ise Goldaş A.Ş. dökümhanesinde gerçekleştirilmiştir.

Kalıplama işleminde kauçuk bir altlığa yerleştirilen mum model ağacının çevresine derece adı verilen paslanmaz çelikten üretilmiş silindirik bir çerçeve yerleştirilir. Vakum döküm işleminde delikli dereceler kullanılırken, merkezkaç dökümlerde deliksiz kapalı dereceler tercih edilir. Kalıplama öncesi delikli dereceler yapışkan bant ile sarılarak delikler kapatılır. Sertleşmenin ardından kalıplar fırına konulmadan önce bu bant çıkartılır. Deneysel çalışmalarda kullanılan çeşitli dereceler Şekil 5. 7'de görülmektedir.

Şekil 5. 7 Deneysel çalışmalarda kullanılan çeşitli dereceler

Üniversitemiz laboratuvarında kalıplama işlemlerinde 70 mm çapında, 150 mm yüksekliğinde dereceler kullanılmıştır. Goldaş A.Ş. dökümhanesinde 100 mm çapında, 210 mm yüksekliğinde dereceler kullanılarak kalıplama yapılmıştır ve test modelleri takı modeli ağaçlarına kaynatılmış ve gümüş (925 milyem, % 92,5 Ag + % 7,5 Cu) dökümler gerçekleştirilmiştir. Goldaş A.Ş.'de kalıplanan örnek bir model ağacı Şekil 5. 8'de görülmektedir. Paslanmaz çelik dökümlerinde kalıplar 45 mm çapında, 55 mm yüksekliğinde deliksiz, küçük dereceler kullanılarak yapılmıştır.

Şekil 5. 8 Goldaş A.Ş. dökümhanesinde gümüş dökümü için hazırlanan bir model ağacı

Dereceli hassas döküm kalıbı yapımında toz kalıp malzemesi belirlenen oranda su ile belli bir süre karıştırılır, bu karışım vakumlanır, dereceye doldurulur ve tekrar vakumlanır. Daha sonra titreşimsiz bir ortamda kalıp sertleşmeye bırakılır. Geliştirilen her kalıp malzemesi bileşiminin kalıp yapımından önce halka çapı testi ile akışkanlığı optimize edilir (bakınız bölüm 5. 6). Kullanılan kalıp malzemesine göre değişmekle beraber, ortalama çalışma süresi 6-7 dakikadır. Kalıp çamurunun vakumlanması kusursuz döküm imali için kesinlikle gerekmektedir. Vakum ile basınç -1 bar'a düşürülerek çamur içerisindeki havanın dışarı çıkması sağlanır. Vakum süresi tüm havanın uzaklaşması için yeteri kadar uzun, düşük basınç altında çamur içerisindeki suyun buharlaşıp kabarcık oluşturmaması ve çamurun vakum altında sertleşmemesi için yeteri kadar kısa olmalıdır.

Deneysel çalışmalarda üniversite döküm laboratuvarında uygulanan kalıplama işlemi ile Goldaş A.Ş. dökümhanesinde uygulanan kalıplama işleminin teknik olarak bazı farklılıkları vardır. Döküm laboratuvarında görece daha basit ve münferit kalıplar yapmaya yönelik teçhizat ile çalışılmıştır. Kalıp tozları su ile bir mikser kullanılarak ortalama 3 dakika süreyle karıştırılmış, hazırlanan çamur vakum kabinine yerleştirilerek (Teknik Döküm VH-1 Vibro vakum ünitesi, Şekil 5. 9) 90 saniye süreyle -1 bar'da vakumlanmış, kalıp çamuru derece içerisinde doldurulmuş ve titreşim altında tekrar 90 saniye vakumlanmıştır.

Şekil 5. 9 Üniversite döküm laboratuvarında kullanılan vakum kabini

Goldaş A.Ş. dökümhanesinde kalıp yapım işlemi seri kalıplamaya yönelik yüksek kapasiteli otomatik vakumlu karıştırıcılar ile yapılmaktadır. Bu karıştırıcılar

üniversitede uygulanan teknikten farklı olarak, çamurun vakum altında karışmasını ve derecelere doldurulmasını sağlamaktadır. Kullanılan cihaz (St Louis 2000 vacuum mixer) Şekil 5. 10' da görülmektedir.

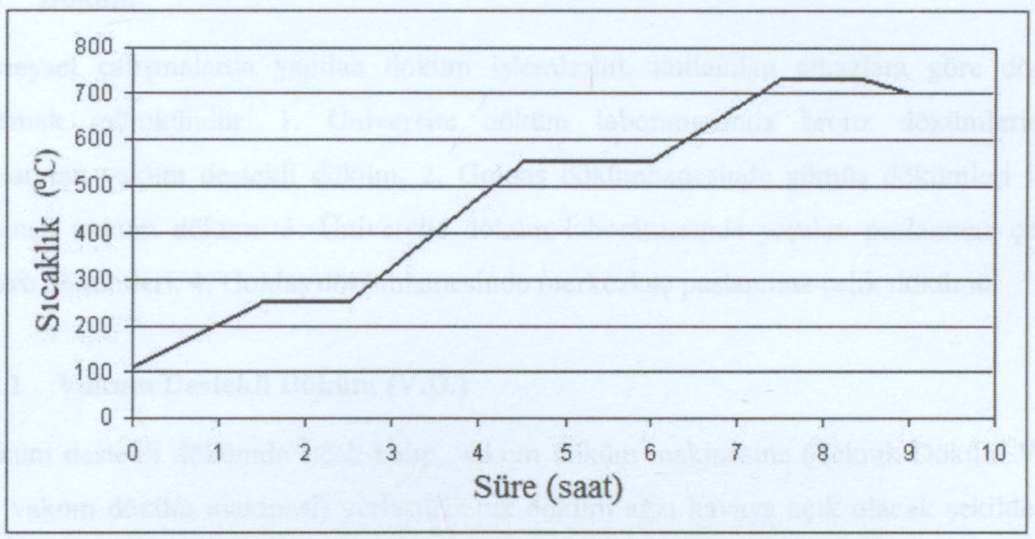
Şekil 5. 10 Goldaş A.Ş. dökümhanesinde kullanılan otomatik vakumlu karıştırıcı

Bu tip karıştırıcılarda, üstte bulunan karıştırma kabini ile altta bulunan ve içine derecelerin yerleştirildiği kabin sızdırmaz olarak birbirine bağlıdır. Her iki kabin de vakumlanmakta ve karıştırma süresi tamamlandığında karıştırma kabının alt kapağı operatör tarafından açılarak alt kısımda bulunan dereceler doldurulmaktadır. Bir seferde 100 mm çaplı beş veya altı derece doldurulabilmektedir. İşlem sürelerinin cihaza girilen veriler doğrultusunda otomatik olarak ayarlanması, karıştırmanın ve doldurmanın vakum altında yapılması havanın kalıp çamurundan tamamen uzaklaşmasını sağlamaktadır.

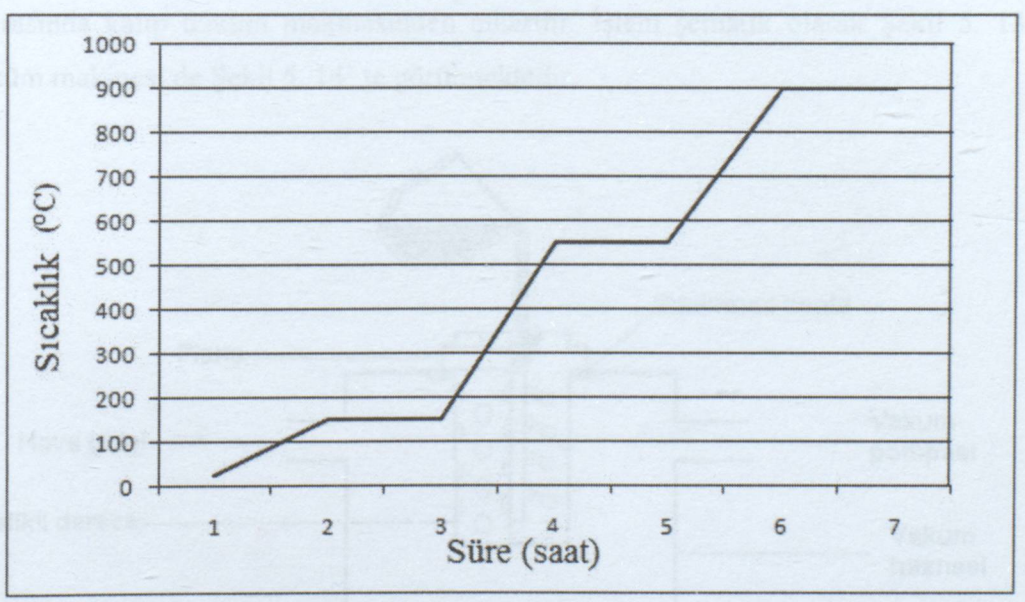
5.3 Mum Giderme ve Kalıp Pişirme

Dereceli hassas döküm kalıpları, yapıldıkları malzemelerin bileşenlerinin genleşme ve büzülme karakteristiklerine göre belirlenen rejimler takip edilerek pişirilir. Pişirmenin ardından, kalıp uygun döküm sıcaklığına getirilerek metal döküm işlemi yapılır. Kalıbın döküm sıcaklığı kalıbın büyüklüğüne, parçaların boyutlarına, dökülecek metalin türüne

ve ergime sıcaklığına, uygulanacak döküm tekniğine bağlı olarak belirlenir. Üniversite döküm laboratuvarında yapılan çalışmalarda, alçı bağlı kalıpların ve geleneksel kalay bronzu (CuSn10) gibi düşük ergime sıcaklığına sahip metallerin dökümü için pişirilen kalıpların, 110 °C da mumu indirildikten sonra, Şekil 5. 11' de görülen rejimle pişirme işlemleri yapılmıştır. Kalıp döküm sıcaklıkları 700 °C olarak tercih edilmiştir. Paslanmaz çelik dökümleri için kalıplar Şekil 5. 12' de görülen farklı bir rejim ile pişirilmiştir. 900 °C'da fırından çıkartılan kalıplara döküm yapılmıştır.



Şekil 5. 11 Düşük sıcaklık dökümleri için pişirme rejimi



Şekil 5. 12 Paslanmaz çelik dökümleri için pişirme rejimi

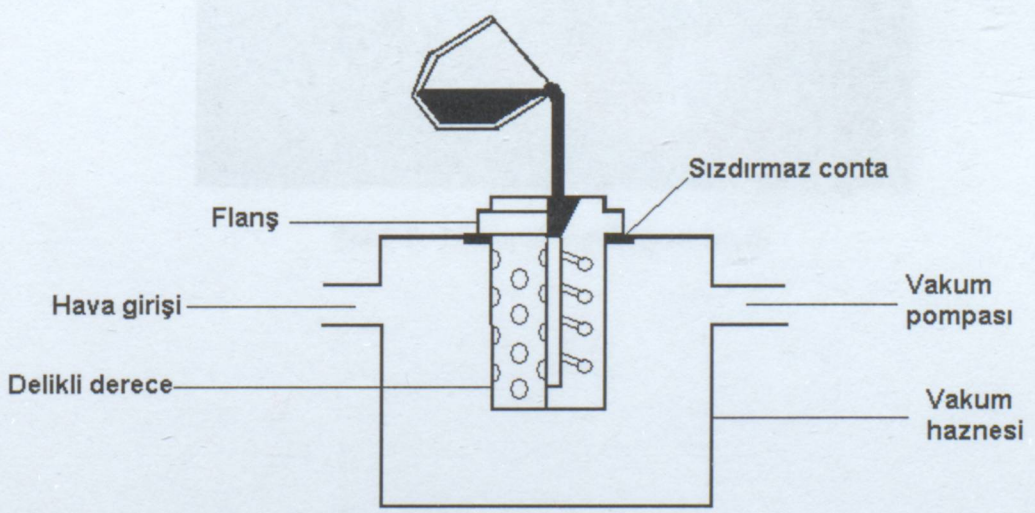
Ticari dökümhanelerde kalıp pişirme işlemi biraz daha farklıdır. Bir gün içerisinde hazırlanan tüm kalıplar, gün sonunda programlanmış fırınlara yüklenerek gece boyunca pişirilir ve ertesi sabah döküme başlanır. Kalıpların da daha büyük olduğu göz önüne alınacak olursa, yavaş ısıtma ile daha uzun süreli bir pişirme rejimi takip edilerek kalıplarda hasır oluşumundan kaçınılır. Goldaş A.Ş. dökümhanesinde yapılan tüm gümüş dökümlerinde kalıplar bu şekilde pişirilmiştir.

5.4 Döküm

Deneysel çalışmalarda yapılan döküm işlemlerini, kullanılan cihazlara göre dörde ayırmak mümkündür: 1. Üniversite döküm laboratuarında bronz dökümlerinde kullanılan vakum destekli döküm. 2. Goldaş dökümhanesinde gümüş dökümleri için basınçlı vakum döküm. 3. Üniversite döküm laboratuarında yapılan paslanmaz çelik mikro dökümleri. 4. Goldaş dökümhanesinde merkezkaç paslanmaz çelik dökümü.

5.4.1 Vakum Destekli Döküm (V.D.)

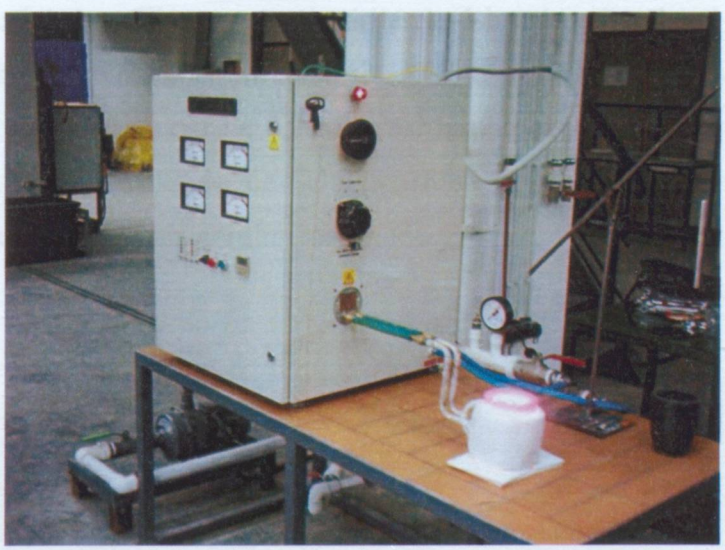
Vakum destekli dökümde sıcak kalıp, vakum döküm makinesine (Teknik Döküm VD-6V vakum döküm makinesi) yerleştirilerek döküm ağzı havaya açık olacak şekilde -1 bar'da vakumlanır. Bir fırında veya indüksiyon ocağında ergitilen metal kalıba doldurulur. Katılaşma tamamlanana kadar, vakum uygulanmaya devam edilir, sonrasında kalıp döküm makinesinden çıkarılır. İşlem şematik olarak Şekil 5. 13'te, döküm makinesi de Şekil 5. 14' te görülmektedir.



Şekil 5. 13 Vakum destekli döküm şeması

Şekil 5. 14 Vakum destekli döküm makinesi

Üniversite döküm laboratuvarında ergitme işlemleri yüksek frekanslı bir indüksiyon ocağı (Inductotherm Lepel, Şekil 5.15) kullanılarak atmosfere açık şekilde SiC pota içerinde gerçekleştirilmiştir. Bronz dökümleri yaklaşık 1150 °C'da, yapılmıştır. Bir bronz döküm ağacı örneği Şekil 5. 16'da görülmektedir.

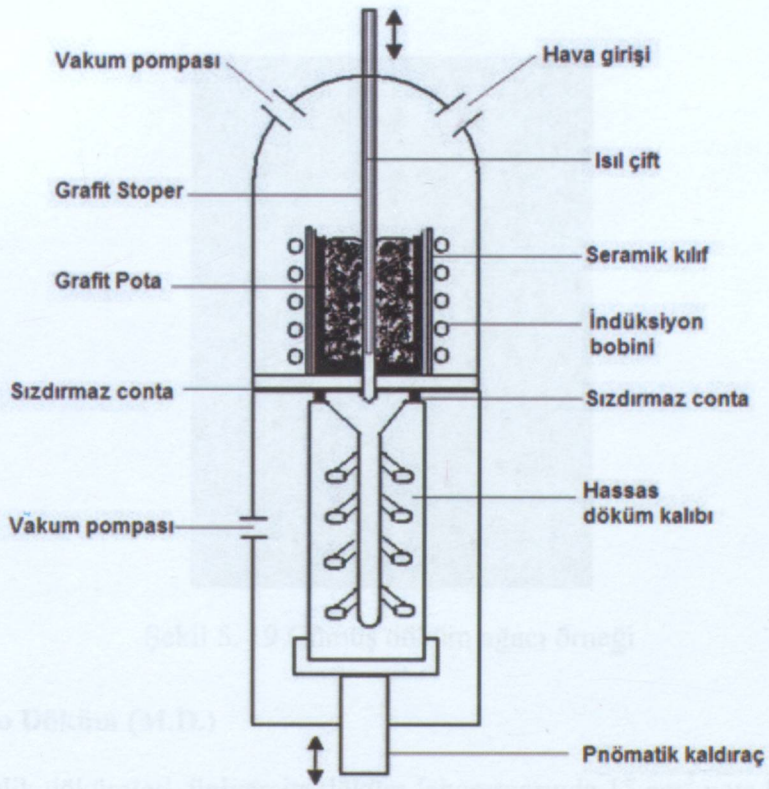


Şekil 5. 15 Lepel indüksiyon ocağı

Şekil 5. 16 Bronz döküm ağacı örneği

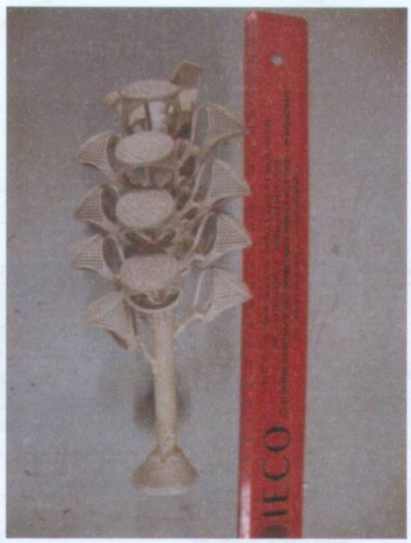
5.4.2 Basınçlı Vakum Döküm (B.V.)

Goldaş dökümhanesinde yapılan 925 milyem (sterling) gümüş dökümlerinde basınçlı vakum döküm makinesi (Yasui VPC K2S) kullanılmıştır. Bu döküm makinesinde ergitme, kalıbın üstündeki haznede grafit pota içerisinde koruyucu argon gazı altında yapılır. Tüm gümüş dökümlerinde döküm sıcaklığı 1000 °C olacak şekilde sabit tutulmuştur. Sıcak kalıp alt hazneye yerleştirilerek -1 bar da vakumlanır. Döküm işlemi, dipten boşaltmalı potanın stoperinin kaldırılması ile gerçekleştirilir, boşaltma sırasında üst hazneye otomatik gaz akışı ile 0,3 MPa üst basınç sağlanır. İşlem şematik olarak Şekil 5. 17'de, döküm makinesi de Şekil 5. 18'de görülmektedir. Örnek bir gümüş döküm ağacı da Şekil 5. 19'da görülmektedir.



Şekil 5. 17 Basınçlı vakum döküm şeması

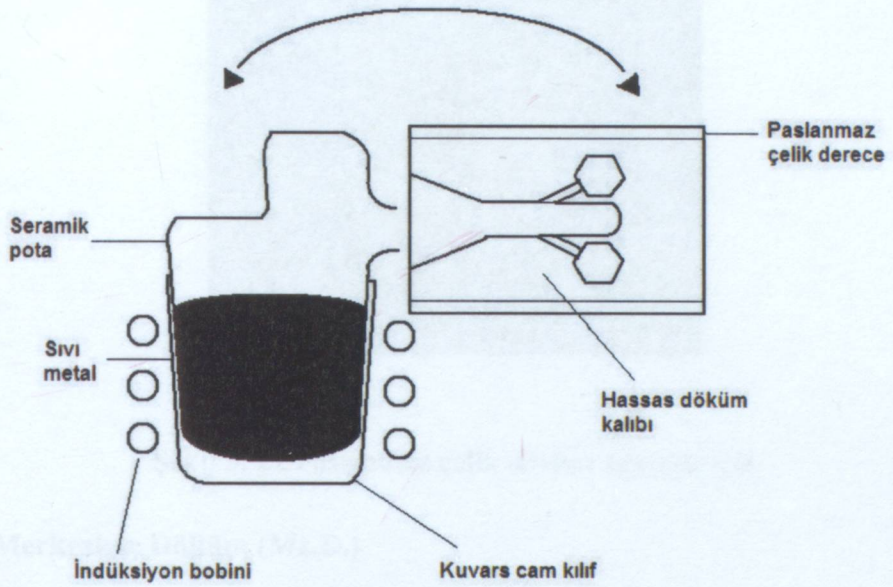
Şekil 5. 18 Basınçlı vakum döküm makinesi



Şekil 5. 19 Gümüş döküm ağacı örneği

5.4.3 Mikro Döküm (M.D.)

Paslanmaz çelik dökümleri, üniversite döküm laboratuarında 15 cm^3 pota hacmine sahip bir vakum indüksiyon mikro döküm makinesi (Indutherm MC 15) kullanılarak yapılmıştır. Döküm işlemleri 40 g kadar AISI 316 kalite paslanmaz çeliğin -1 bar vakum altında yaklaşık 1650 °C'da ergitilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Ergitme öncesinde sıcak kalıp potanın önüne yatay bir şekilde yerleştirilir. Ergitmenin ardından makine çevrilerek metal kalıba boşaltılır; bu sırada hazneye argon gazı akışı ile 0,28 bar üst basınç sağlanır. İşlem, şematik olarak Şekil 5. 20'de, döküm makinesi ve ergitme haznesi Şekil 5. 21' de ve örnek bir paslanmaz çelik döküm ağacı Şekil 5. 22'de görülmektedir. Paslanmaz çelik dökümlerinde boyut ölçüm numuneleri ergitilen miktarın yetersiz olmasından dolayı dökülememiştir.



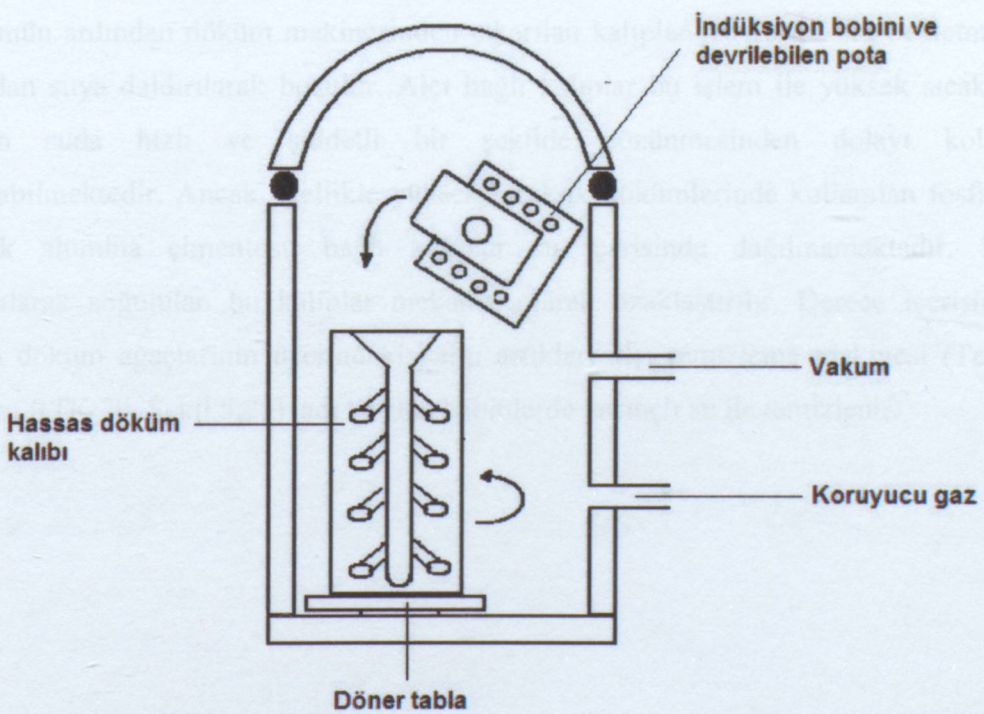
Şekil 5. 20 Paslanmaz çelik mikro döküm şeması

Şekil 5. 21 Vakum indüksiyon mikro döküm makinesi

Şekil 5. 22 Paslanmaz çelik döküm ağacı örneği

5.4.4 Merkezkaç Döküm (Mz.D.)

Mikro dökümler dışında Goldaş Dökümhanesinde bir kereye mahsus olmak üzere Schultheiss PPC marka döküm makinesi ile merkez kaç paslanmaz çelik dökümü yapılmıştır. Bu döküm işlemi şematik olarak Şekil 5. 23'te ve döküm makinesi de Şekil 5. 24'te görülmektedir.



Şekil 5. 23 Paslanmaz çelik merkezkaç döküm şeması

Şekil 5. 24 Merkezkaç hassas döküm makinesi

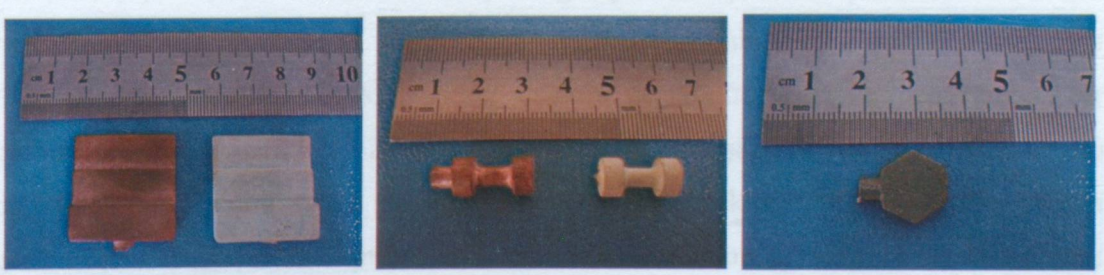
5.5 Temizleme İşlemleri

Dökümün ardından döküm makinesinden çıkarılan kalıplar, 10-15 dakika bekletmenin ardından suya daldırılarak bozulur. Alçı bağlı kalıplar bu işlem ile yüksek sıcaklıkta alçının suda hızlı ve şiddetli bir şekilde çözünmesinden dolayı kolayca bozulabilmektedir. Ancak özellikle yüksek sıcaklık dökümlerinde kullanılan fosfat ve yüksek alümina çimentosu bağlı kalıplar su içerisinde dağılmamaktadır. Suya daldırılarak soğutulan bu kalıplar mekanik olarak uzaklaştırılır. Derece içerisinden alınan döküm ağaçlarının üzerindeki kalıp artıkları alçı temizleme makinesi (Teknik Döküm RTK 70, Şekil 5.25) adı verilen kabinlerde basınçlı su ile temizlenir.

Şekil 5. 25 Alçı temizleme makinesi

Deneysel çalışmalarda, üniversite döküm laboratuvarında gerçekleştirilen bronz ve paslanmaz çelik dökümlerinde, dökümden sonra parçalar herhangi bir işleme tabi tutulmamıştır; testler, numunelerin döküldükten sonraki durumları üzerinde uygulanmıştır. Goldaş A.Ş. dökümhanesinde yapılan gümüş dökümlerinde, endüstriyel bir uygulama olarak döküm ağaçları kalıptan çıkarılıp temizlendikten sonra sıcak % 25'lik sülfürik asit (H_2SO_4) banyosu içerisinde yaklaşık 5 dakika süreyle oksit giderme işlemine tabi tutulmaktadır. Bu şekilde kalıptan tamamen siyah renkte çıkan gümüş döküm ağacı beyaz bir renk almaktadır.

Temizlemenin ardından parçalar ara yolluklarından kesilerek ana yolluktan ayrılır. Döküm ağaçlarından ayrılmış döküm numune örnekleri Şekil 5. 26' da görülmektedir.



Şekil 5. 26 Kesilmiş bronz, gümüş ve paslanmaz çelik test numuneleri

5.6 Halka Çapı Testi (TS 3322)

Deneysel çalışmalarda, ticari malzemeler dışında laboratuvarda tasarlanıp üretilen kalıp tozlarının son bileşimleri, halka çapı testi ile optimize edilmiştir. Dökülebilen kalıplar için tercih edilen akışkanlık testi çoğunlukla seramik sanayinde kullanılan halka çapı testidir. Halka çapı ölçümü genellikle çimento harcı ve beton numunelerinde uygulanan TS 3322'ye [68] göre düzenlenmiş deneysel bir yöntemdir. Bu testin prensibi, belirli hacimdeki seramik çamurunun düzgün bir yüzeyde dairesel olarak yaydırılması ve oluşan halkanın çapının ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Cam üzerine yerleştirilmiş 35 mm çapında, 60 mm boyundaki metalik bir halka içerisine 94 g seramik kalıp çamuru doldurulur. Testte kullanılan halka Şekil 5. 27'de görülmektedir.

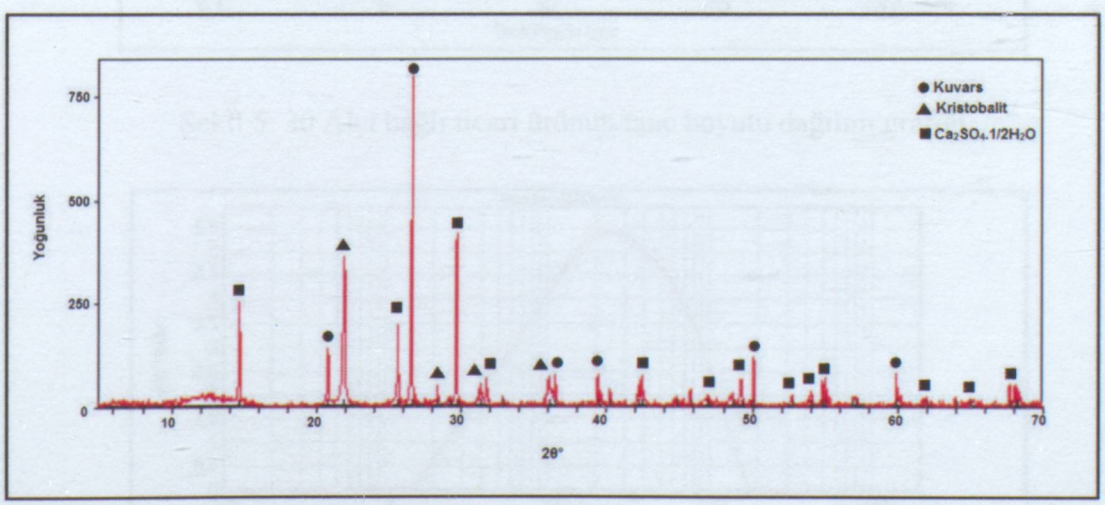
Şekil 5. 27 Akışkanlık testinde kullanılan metal halka

Kalıp çamuru su ve tozun 3 dakika süreyle mekanik karıştırıcı ile karıştırılmasıyla elde edilir. Doldurulan halka karıştırılmaya başladıktan 5 dakika sonra kaldırılır ve çamur dairesel olarak cam üzerinde yayılır. Prizlenme tamamlandığında cam ters çevrilerek halkanın çapı ölçülür. Bu test ile akışkanlığın yanında çamurun prizlenme süresi de belirlenmiş olur. Her testte 94 g çamur doldurmayı sabitleyebilmek için test tartı üzerinde gerçekleştirilir. Halkanın kalıp çamuru ile doldurulması ve ölçüm alınan bir numune örneği Şekil 5. 28'de görülmektedir. Akışkanlık doğal olarak kalıp malzemesinin bileşimine ve su içeriğine göre değişmektedir. Yapılan çalışmalarda görülmüştür ki akışkanlık optimizasyonlarında su/toz oranı 0,38 için ideal halka çapı 11,5 cm, su/toz oranı 0,40 için ise 12,7 cm olarak belirlenmiştir. Bu değerler referans olarak kabul edilen ticari kalıp malzemelerine uygulanan testler ile saptanmıştır.

Şekil 5. 28 Karışımın halkaya doldurulması ve çapı ölçülecek bir numune

5.7 Alçı Bağlı Kalıplar

Deneysel çalışmalarda alçı bağlı kalıp tozlarının bileşimsel tasarımı ticari alçı bağlı tozlar esas alınarak yapılmıştır. Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen bir ürün referans malzemesi olarak seçilmiştir. Laboratuvar şartlarında tasarlanarak üretilen alçı bağlı kalıp tozlarının performansı bu malzeme ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5. 29'da bu ticari referans malzemesinin X ışınları analizi görülmektedir. Çizelge 5. 1'de de alçı bağlı kalıp tozu üretiminde kullanılan toz malzemelerin tane boyutları verilmiştir. Karakterizasyon çalışmalarındaki X ışınları analizleri Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde (GYTE) Bruker Advance D8c X ışınları difraktometresi ile gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu ölçümleri ise Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarında Malvern Instruments Master Sizer 2000 tane boyutu ölçüm cihazı ile yapılmıştır.

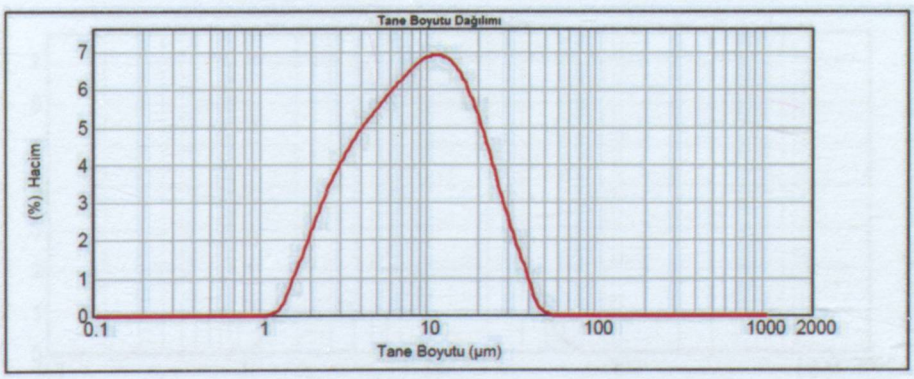


Şekil 5. 29 Alçı bağlı ticari kalıp (referans 1) tozunun X ışınları analizi

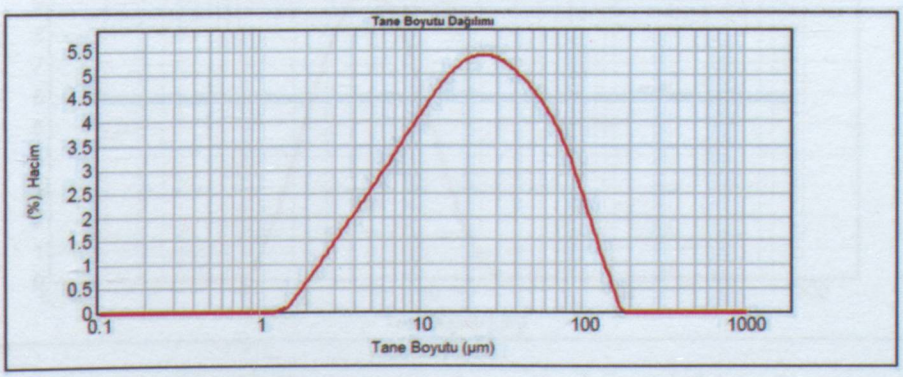
Çizelge 5. 1 Alçı bağlı kalıpların yapımında kullanılan toz malzemelerin tane boyutları

Toz Malzemeler	d(0,1) µm	d(0,5) µm	d(0,9) µm
Referans 1	2,864	8,865	23,454
α-Alçı	5,029	22,128	78,258
Kuvars (a)	4,280	17,928	50,970
Kuvars (b)	3,253	15,162	44,423
Kuvars (c)	2,777	8,295	22,499
Kuvars (d)	2,294	5,039	11,157
Kristobalit (a)	5,043	28,824	76,992
Kristobalit (b)	3,852	15,860	37,344
Kristobalit (c)	2,244	3,927	7,057

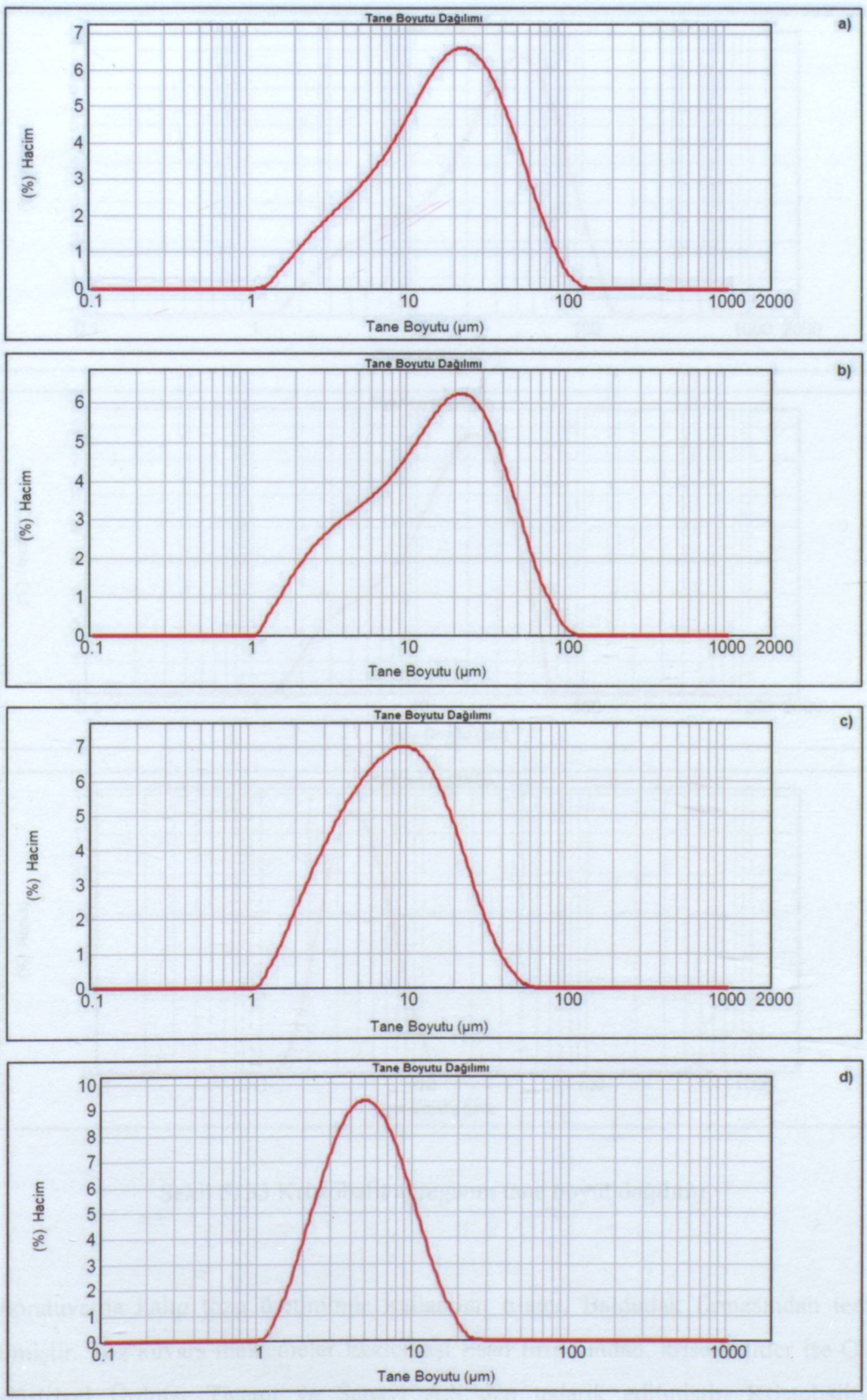
*(d(0,1) : % 10'nun altı, d(0,5): % 50'nin altı, d(0,9): % 90'nın altı)



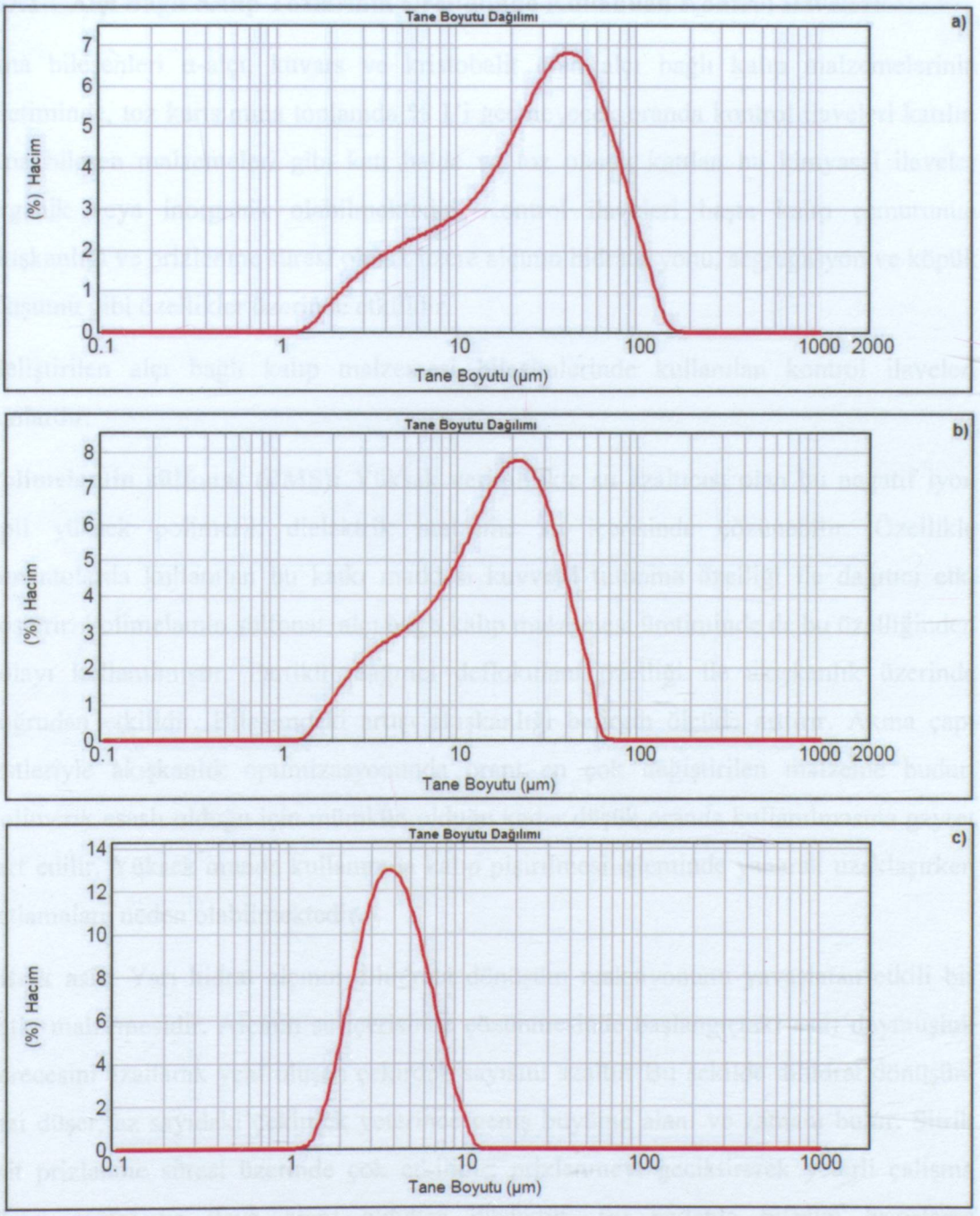
Şekil 5. 30 Alçı bağlı ticari ürünün tane boyutu dağılım grafiği



Şekil 5. 31 α-alçının tane boyutu dağılım grafiği



Şekil 5. 32 Kuvars agregaların tane boyut dağılımı



Şekil 5. 33 Kristobalit agreganın tane boyut dağılımı

Laboratuvarda kalıp tozu üretiminde kullanılan α-alçı, Baldudak firmasından temin edilmiştir. Toz kuvars malzemeler Eczıcıbaşı Esan firmasından, kristobalitler ise CHS Endüstriyel Ürünler Ticaret ve Sanayi A.Ş.'den tedarik edilmiştir. Kristobalitler, Sibelco (Belçika) firmasından ithal olarak yurda gelmektedir.

5.7.1 Alçı Bağlı Kalıp Tozlarının Üretiminde Kullanılan Kontrol İlaveleri

Ana bileşenleri α-alçı, kuvars ve kristobalit olan alçı bağlı kalıp malzemelerinin üretiminde, toz karışımına toplamda % 1'i geçmeyecek oranda kontrol ilaveleri katılır. Ana bileşen malzemeleri gibi katı halde ve toz olarak katılan bu kimyasal ilaveler organik veya inorganik olabilmektedir. Kontrol ilaveleri başta kalıp çamurunun akışkanlığı ve prizlenme süresi olmak üzere alçının hidratasyonu, segregasyon ve köpük oluşumu gibi özellikler üzerinde etkilidir.

Geliştirilen alçı bağlı kalıp malzemesi bileşimlerinde kullanılan kontrol ilaveleri şunlardır:

Polimelamin sülfonat (PMS): Yüksek verimlilikte su azaltıcısı olan bu negatif iyon tipli yüksek polimerik dielektrik malzeme su içerisinde çözünebilir. Özellikle çimentolarda kullanılan bu katkı maddesi kuvvetli tutunma özelliği ile dağıtıcı etki gösterir. Polimelamin sülfonat, alçı bağlı kalıp malzemesi üretiminde de bu özelliğinden dolayı kullanılmıştır. Partikül dağıtıcı deflokulant özelliği ile akışkanlık üzerinde doğrudan etkilidir. Bileşimdeki artışı akışkanlığı belirgin ölçüde arttırır. Akma çapı testleriyle akışkanlık optimizasyonunda oranı en çok değiştirilen malzeme budur. Polimerik esaslı olduğu için mümkün olduğu kadar düşük oranda kullanılmasına gayret sarf edilir. Yüksek oranda kullanımda kalıp pişirilmesi işleminde yanarak uzaklaşırken çatlamalara neden olabilmektedir.

Sitrik asit: Yarı hidrat alçının dihidrata dönüşüm reaksiyonunu yavaşlatan etkili bir katkı malzemesidir. Alçının su içerisinde çözünmesinde başlangıçtaki aşırı doymuşluk derecesini azaltarak yeni oluşan çekirdek sayısını azaltır. Bu şekilde dihidrat dönüşüm hızı düşer, az sayıdaki çekirdek yeterince geniş büyüme alanı ve zamanı bulur. Sitrik asit prizlenme süresi üzerinde çok etkilidir; prizlenmeyi geciktirerek yeterli çalışma süresi sağlar ve ilave oranı oldukça düşüktür. Bu nedenle bileşim hazırlama işlemlerinde tartma ve karıştırma pratikliği sağlayabilmek için seyreltilerek kullanılmıştır. %1 oranında sitrik asit kristobalit (b) ile karıştırılmış ve bu karışıma "maya" adı verilmiştir. Bileşim hazırlamalarında doğrudan sitrik asit ilave etmek yerine maya ilave edilmiştir.

Potasyum sülfat (PS): Hidrate alçının (kalsiyum sülfat dihidrat) benzer bileşiği olan potasyum sülfat çekirdekleyici görevi görür ve aynı zamanda hızlandırıcıdır. Sitrik asit gecikmeyi sağlarken mukavemeti azaltıcı etki gösterir. Hem prizlenme ve dolayısıyla

çalışma süresini hem de alçının mukavemetini denetim altına alabilmek için potasyum sülfat kullanılmaktadır.

Köpük gidericiler (KG): Alçı bağlı kalıp tozu üretiminde özellikle boya sanayinde kullanılan köpük gidericiler tercih edilmiştir. Bu ilaveler karıştırma esnasında köpük oluşumunu engelleyerek çamurun hapsettiği hava miktarını azaltmakta kalıp malzemesinin mukavemetinin ve yüzey özelliklerinin zayıflamasını engellemektedir. Köpük oluşumunun engellenmesi karıştırma, derece doldurma gibi işlem pratiklerini de iyi yönde etkilemektedir.

80S: İnorganiklerin organikler ile bağlanmasını sağlayan bir katkı maddesidir. Kalıp çamurunun mum modele tutunabilirliğini arttırmaktadır. Suyun kalıp içerisinde yükselmesini ve model yüzeyinde toplanmasını ve partikül segregasyonunu engeller.

Pav 22: Polimer esaslı bir bağlayıcıdır, pişirme sırasında kalıplarda çatlak oluşumunu engellemek ve dökümden sonra dağılabilirliği arttırmak amacıyla kullanılmaktadır.

Aerosil (AS): Nano boyutlu silikadır; parçacıklar arasında üç boyutlu bir ağ oluşturarak segregasyonu engelleyici etki göstermektedir.

SE5: Böhmit esaslı bir katkı malzemesidir, alçı bağlı kalıp malzemelerinde alçının morfolojisini değiştiren bir etki göstermektedir. Hidrate olan alçı kristallerinin l/d oranını arttırarak iğnesel şekilli büyümeyi teşvik eder.

5.7.2 Alçı Bağlı Kalıp Malzemesi Bileşenleri

Çizelge 5. 2'de tüm alçı bağlı kalıp malzemesi bileşenleri görülmektedir.

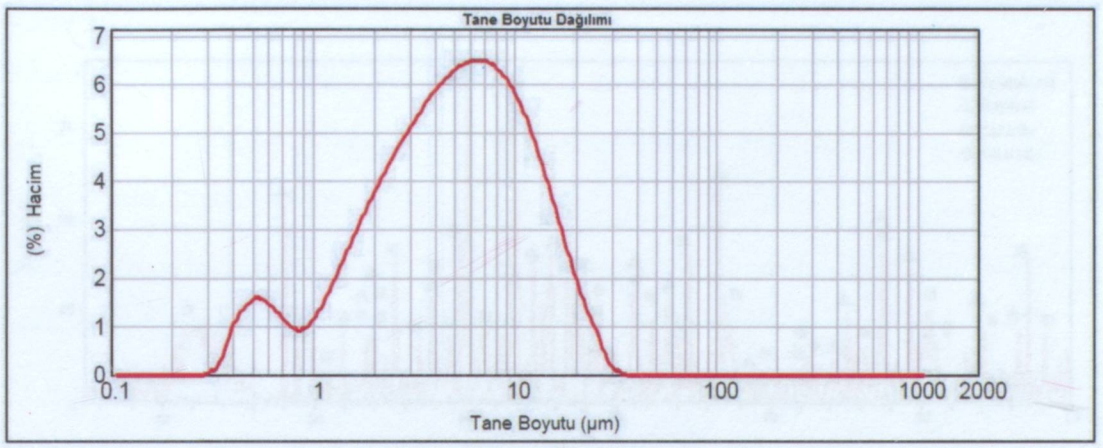
Çizelge 5. 2 Alçı bağlı kalıp malzemesi bileşimleri

Bileşim No:	PMS %	Maya %	PS %	80S %	KG %	Pav 22 %	AS %	SE5 %	a-alçı %	Kuv (a) %	Kuv (b) %	Kuv (c) %	Kuv (d) %	Krs (a) %	Krs (b) %	Krs (c) %
1	0,10	0,50	0,30						25		34			20		20
2	0,10	0,50	0,30		0,08				25		34			20		20
3	0,10	0,50	0,30		0,20				25		34			20		20
4	0,15	0,50	0,30		0,20				25		34			20		20
5	0,20	0,50	0,30		0,25				25		34			20		20
6	0,15	0,45	0,30		0,20				25		34			20		20
7	0,13	0,45	0,30		0,20				25	17	17			20		20
8	0,11	0,60	0,30		0,50				25	17	17			20		20
9	0,09	0,50	0,30		0,50				25	34				20		20
10	0,12	0,50	0,30		0,20				25		34			20		20
11	0,12	0,50	0,30		0,20		0,15		25		34			20		20
12	0,09	0,55	0,30		0,20				25		34			20		20
13	0,12	0,55	0,30	0,20	0,20				25		34			20		20

Bileşim No:	PMS %	Maya %	PS %	SOS %	KG %	Pav 22 %	AS %	SES %	α-alçı %	Kuv (a) %	Kuv (b) %	Kuv (c) %	Kuv (d) %	Krs (a) %	Krs (b) %	Krs (c) %
14	0,06	0,50	0,30	0,20	0,20				25		34			20		20
15	0,03	0,40	0,30	0,50	0,20				25		34			20		20
16	0,09	0,35	0,30	0,20	0,20				25		34				20	20
17	0,20	0,35	0,30		0,20				25		34				20	20
18	0,11	0,40	0,30	0,20	0,20				25		34				20	20
19	0,08	0,35	0,30	0,20	0,20				25		34				20	20
20	0,107	0,35	0,30	0,20	0,20				25		24		10		20	20
21	0,112	0,35	0,30	0,20	0,20				25		17		17		20	20
22	0,107	0,35	0,30	0,20	0,20				25			24	10		20	20
23	0,11	0,34	0,30	0,20	0,20				22			24	11		21	21
24	0,10	0,40	0,30	0,20	0,20				25		24		10		20	20
25	0,082	0,40	0,30	0,20	0,20	1			23		25		11		20	20
26	0,11	0,45	0,30	0,20	0,20				25		12,4	12,4	9		20	20
27	0,075	0,45	0,30	0,20	0,20		0,20		24		35				20	20
28	0,25	0,45	0,30	0,20	0,20		0,14		24		35				20	20

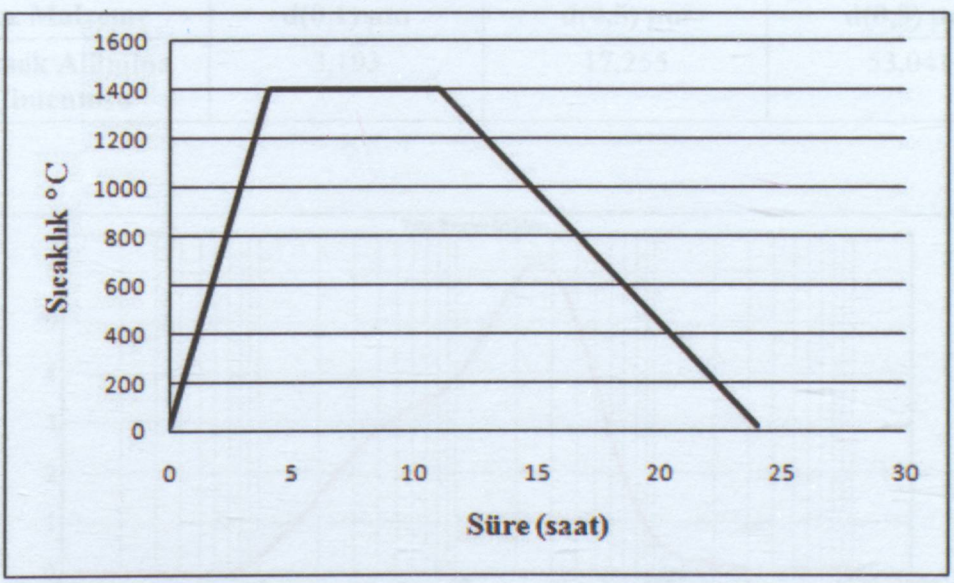
Bileşim No:	PMS %	Maya %	PS %	SOS %	KG %	Pav 22 %	AS %	SES %	α-alçı %	Kuv (a) %	Kuv (b) %	Kuv (c) %	Kuv (d) %	Krs (a) %	Krs (b) %	Krs (c) %
29	0,145	0,50	0,30	0,20	0,20				24		25		10		30	10
30	0,14	0,50	0,30	0,20	0,20				24		24		10		25	15
31	0,125	0,50	0,30	0,20	0,20				23		26		10		25	15
32	0,115	0,55	0,30	0,20	0,20				23		26		10		25	15
33	0,095	0,55	0,30	0,20	0,20	0,50			23		26		10		25	15
34	0,07	0,50	0,30	0,20	0,20	1			23		26		10		25	15
35	0,043	0,50	0,30	0,20	0,20	1			23		36				25	15
36	0,065	0,50	0,30		0,20				23		36				25	15
37	0,043	0,50	0,30	0,20	0,20				23		18		18		40	
38	0,07	0,50	0,30		0,20				23		18		18		40	
39	0,05	0,50	0,30	0,20	0,20				22		26		11		20	20
40	0,05	0,50	0,30	0,20	0,20				21		18		18		30	10
41	0,075	0,50	0,30	0,20	0,20				26		23		10		20	20
42	0,060	0,55	0,30	0,15	0,15				23		26		10	30		10
43	0,055	0,55	0,30	0,15	0,15				23		14		22	40		

Bileşim No:	PMS %	Maya %	PS %	80S %	KG %	Pav 22 %	AS %	SE5 %	α-alçı %	Kuv (a) %	Kuv (b) %	Kuv (c) %	Kuv (d) %	Krs (a) %	Krs (b) %	Krs (c) %
44	0,027	0,55	0,30	0,15	0,15				23		26		10	30		10
45	0,022	0,55	0,30	0,15	0,15				23		14		22	40		
46	0,21	0,25		0,15	0,15			1,1	23		20		16	24		14
47	0,027	0,50	0,30	0,15	0,15			1,1	23		20		16	24		14



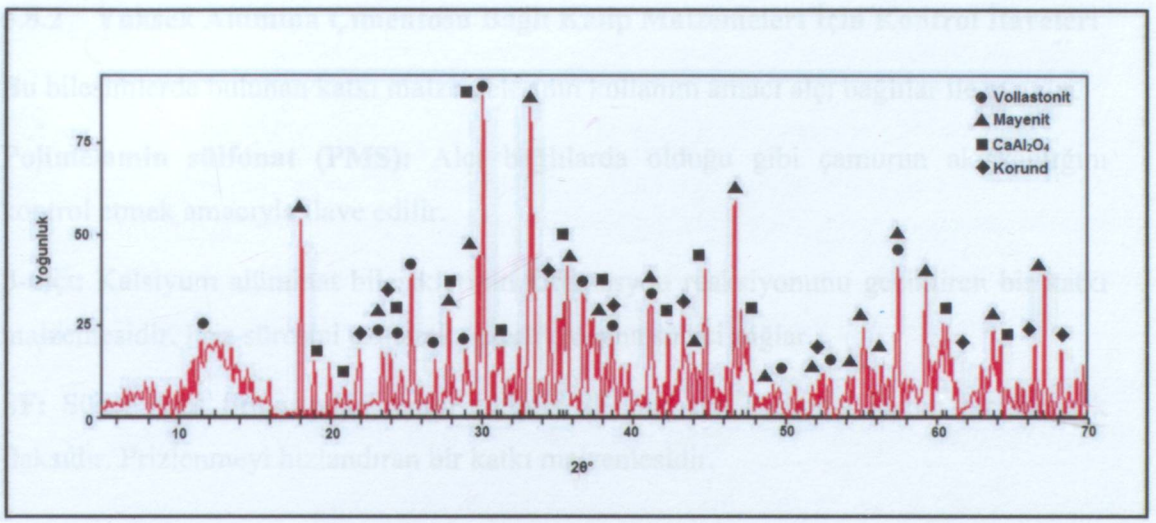
Şekil 5. 35 Niğde kalsitinin tane boyut dağılımı

Karıştırıcı değirmenden çıkartılan toz karışımı alümina potalara doldurularak elektrik dirençli bir yüksek sıcaklık fırınına yerleştirilir. Dört saatte 1400 °C'a ısıtılan fırın yedi saat bu sıcaklıkta tutulur ve ardından on iki saatte oda sıcaklığına kadar soğutulur. Bu pişirme rejimi Şekil 5. 36'daki grafikte görülmektedir.



Şekil 5. 36 Yüksek alümina çimentosu pişirme rejimi

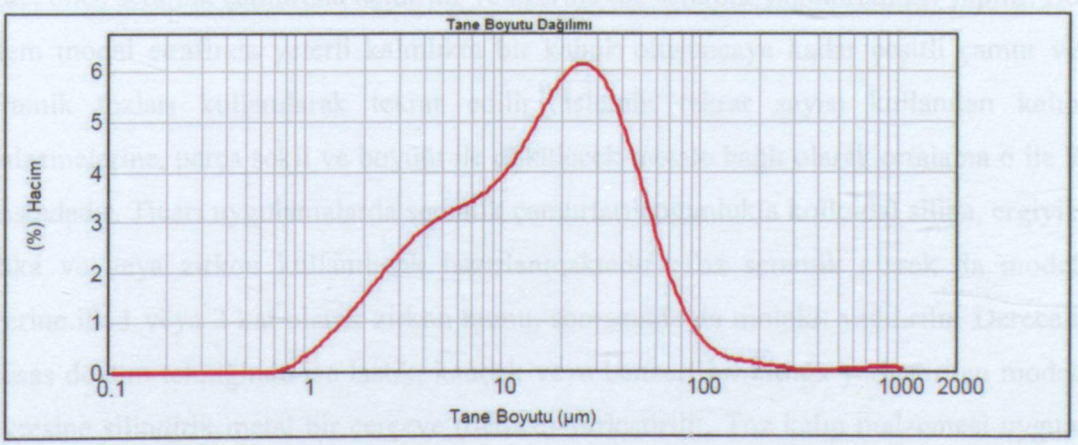
Pişirme sonucu elde edilen ürün, bilyeli değirmende alümina bilyeler kullanılarak üç saat süreyle öğütülür. Elde edilen yüksek alümina çimentosunun X ışınları analizi Şekil 5. 37'de görülmektedir. Bu malzemenin tane boyutu Çizelge 5. 4'te, tane boyut dağılımı da Şekil 5. 38'de verilmiştir.



Şekil 5. 37 Yüksek alümina çimentosunun X ışınları analizi

Çizelge 5. 4 Yüksek alümina çimentosunun tane boyutu

Toz Malzeme	d(0,1) µm	d(0,5) µm	d(0,9) µm
Yüksek Alümina Çimentosu	3,193	17,255	53,041



Şekil 5. 38 Yüksek alümina çimentosunun tane boyut dağılımı

YAÇ bağlı kalıp tozu için geliştirilen ilk bileşimler agrega olarak alçı bağlı kalıp malzemelerinde de kullanılan kuvars (a) ve (b) kullanılarak üretilmiştir. Daha sonra çift katlı kalıp uygulamaları denenmiş ve son olarak da agrega olarak molokit kullanılmıştır.

5.8.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı Kalıp Malzemeleri İçin Kontrol İlaveleri

Bu bileşimlerde bulunan katkı malzemelerinin kullanım amacı alçı bağlılar ile aynıdır.

Polimelamin sülfonat (PMS): Alçı bağlılarda olduğu gibi çamurun akışkanlığını kontrol etmek amacıyla ilave edilir.

β-alçı: Kalsiyum alüminat bileşiklerinin hidratasyon reaksiyonunu geciktiren bir katkı malzemesidir. Priz süresini uzatarak yeterli çalışma süresi sağlar.

SF: Süper Ateş firmasından temin edilmiş SF, sodyum karbonat içeren bir seramik flaksıdır. Prizlenmeyi hızlandıran bir katkı malzemesidir.

5.8.3 Çift Katlı Kalıp Yapımı

YAÇ bağlı kalıp malzemesinin özelliklerini geliştirmek ve meydana gelen çatlamaların parça boşluğuna zarar vermesini önlemek için çift katlı kalıp yapımı tasarlanmış ve denenmiştir. Çift katlı kalıp yapımı, hassas dökümün iki türü olan seramik kabuklu ve dereceli hassas döküm tekniklerinin bir nevi birleştirilerek uygulanması olarak tanımlanabilir.

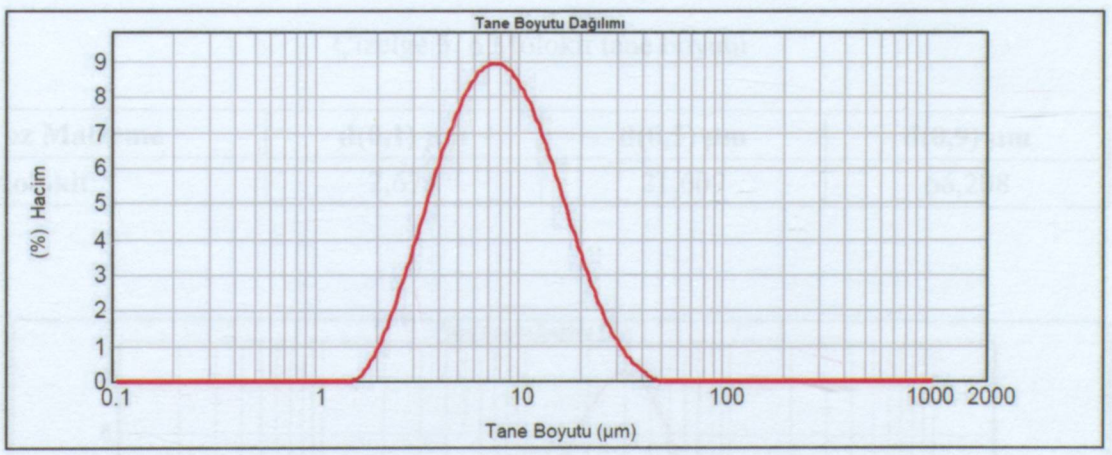
Kısaca hatırlatmak gerekirse; seramik kabuklu hassas döküm tekniğinde mum model ağacı önce seramik çamuruna daldırılır ve üzerine toz seramik yağmurlaması yapılır. Bu işlem model etrafında yeterli kalınlıkta bir kabuk oluşuncaya kadar çeşitli çamur ve seramik tozları kullanılarak tekrar edilir. İşlemin tekrar sayısı kullanılan kalıp malzemelerine, parça şekli ve boyutu ile dökülecek metale bağlı olarak ortalama 6 ile 9 arasındadır. Ticari uygulamalarda seramik çamurları çoğunlukla kolloidal silika, ergiyik silika ve veya zirkon kullanılarak hazırlanmaktadır. Toz seramik olarak da model üzerine ilk 1 veya 2 kat olarak zirkon kumu, sonrasında da molokit yağdırılır. Dereceli hassas döküm tekniğinde ise lastik, kauçuk veya benzeri bir altlığa yerleştirilen model çevresine silindirik metal bir çerçeve (derece) yerleştirilir. Toz kalıp malzemesi uygun oranda su ile karıştırılarak bir seramik çamuru oluşturulur, sonrasında bu çamur vakum ve titreşim altında derece içerisine doldurulur.

Çift katlı kalıp yapımında, modeli saran ilk seramik katmanı seramik kabuklu yönteme göre yapılmakta, ardından kaplanan model kauçuk altlığa yerleştirilerek çevresine dereceli hassas döküm yöntemi prensiplerine göre hazırlanmış seramik çamuru doldurulmaktadır. Aseton ile temizlenen mum model 60:40 oranında kolloidal silika ve

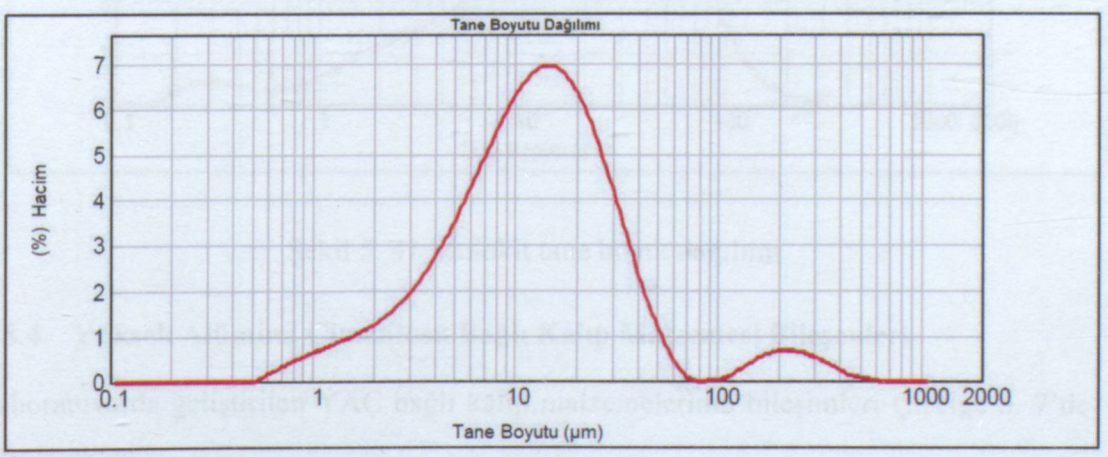
ergiyik silika ile hazırlanan seramik çamuruna daldırılıp üzerine zirkon kaplanır. Kurutulan model altlığa yerleştirilerek çevresine derece geçirilir ve çimento esaslı kalıp malzemesinden hazırlanan çamur dereceye doldurulur. Kaplamalarda kullanılan ergiyik silika ve zirkonun tane boyutları Çizelge 5. 5'te, tane boyut dağılımları da Şekil 5. 39 ve 40'ta görülmektedir.

Çizelge 5. 5 Model kaplamada kullanılan toz malzemelerin tane boyutları

Toz Malzemeler	d(0,1) µm	d(0,5) µm	d(0,9) µm
Ergiyik silika	3,455	7,818	18,254
Zirkon	3,131	12,507	36,343



Şekil 5. 39 Ergiyik silika tane boyut dağılımı



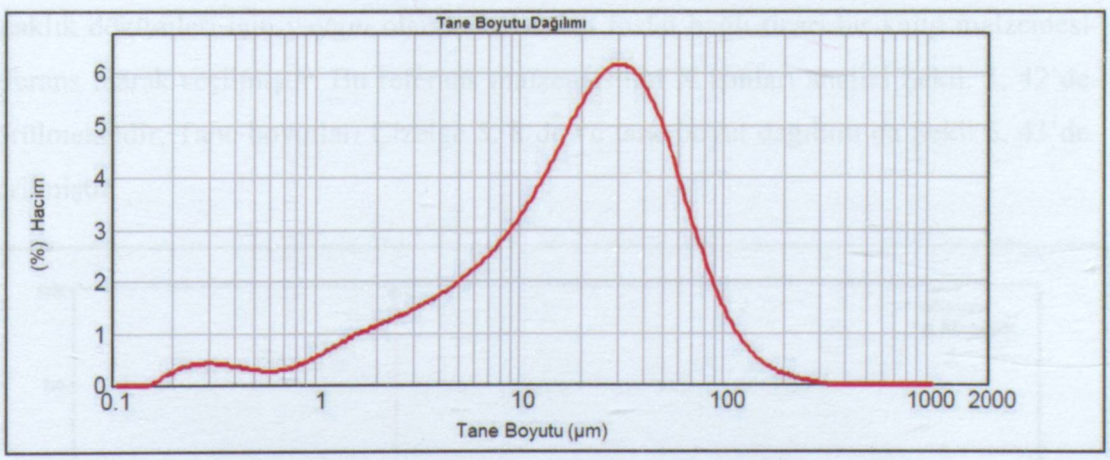
Şekil 5. 40 Zirkon tane boyut dağılımı

Modele bir ön kaplama yaparak çift katlı kalıp uygulamalarının, destek malzemesinde meydana gelen çatlakların parça boşluğuna ulaşmasını engellediği gözlenmiştir. Ancak model kaplamak kalıplama sürecini uzatmaktadır ve yöntem tek model veya seyrek dizilmiş model ağaçlarına uygundur; sık dizilmiş model ağaçlarını boşluksuz kaplamak mümkün değildir. Dereceli hassas dökümde, seri üretimlerde sık dizilmiş model ağaçlarının kullanıldığı göz önüne alınacak olursa çift katlı kalıp kesin bir çözüm değildir. Bu nedenle model kaplama yerine agreganın değiştirilmesi düşünülmüş ve kuvars yerine bir çeşit alümina silikat olan molokit agrega olarak denenmiştir.

En son geliştirilen yüksek alümina çimentolu kalıp malzemelerinde agrega olarak kullanılan molokitin tane boyutları Çizelge 5. 6' da ve tane boyut dağılımı da Şekil 5. 41' de görülmektedir.

Çizelge 5. 6 Molokit tane boyutu

Toz Malzeme	**d(0,1) µm**	**d(0,5) µm**	**d(0,9) µm**
Molokit	2,678	21,609	66,208



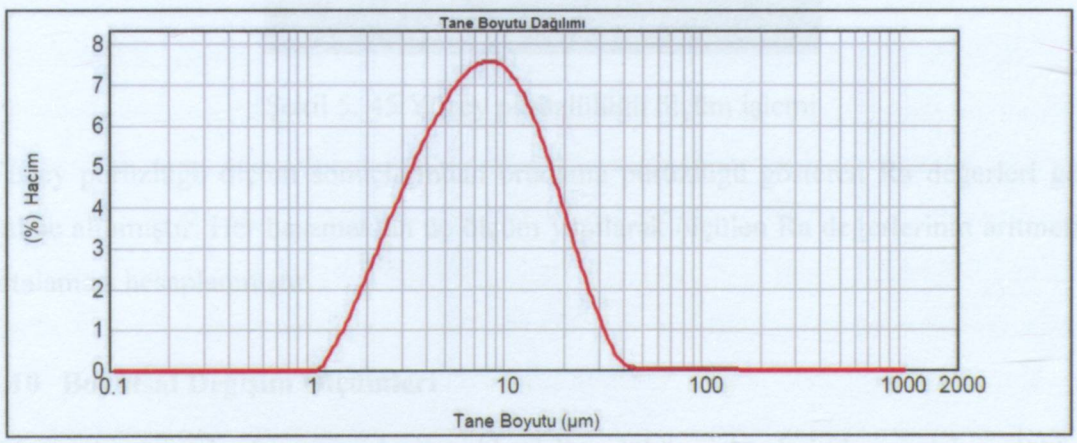
Şekil 5. 41 Molokit tane boyut dağılımı

5.8.4 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı Kalıp Malzemesi Bileşenleri

Laboratuvarda geliştirilen YAÇ bağlı kalıp malzemelerinin bileşimleri Çizelge 5. 7'de görülmektedir.

Çizelge 5. 8 Fosfat bağlı ticari kalıp malzemesinin (referans 1) tane boyutu

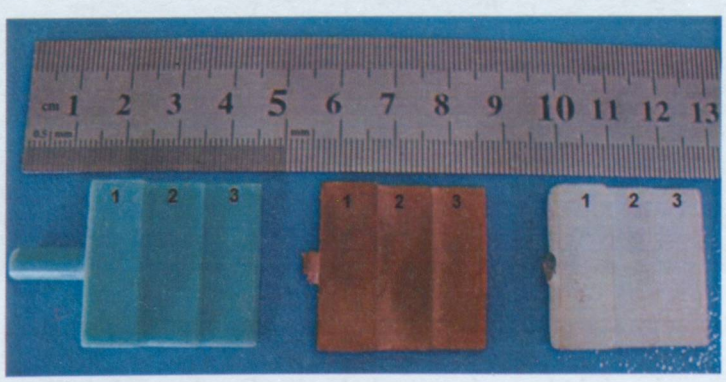
Toz Malzeme	d(0,1) µm	d(0,5) µm	d(0,9) µm
Fosfat bağlı kalıp malzemesi (referans 1)	2,732	7,512	18,939



Şekil 5. 43 Fosfat bağlı referans 1 malzemesinin tane boyut dağılımı

5.9 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri basamaklı numune üzerinden Mahr Perthometer S2 yüzey pürüzlülük cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5. 44'te görüldüğü gibi basamaklı numunenin 8 mm kalınlığındaki en üst basamağı 1, 4 mm kalınlığındaki orta basamağı 2, 2 mm kalınlığındaki en üst basamağı da 3 şeklinde numaralandırılmıştır. Şekil 5. 45'te yüzey pürüzlülüğü ölçüm işlemi görülmektedir.



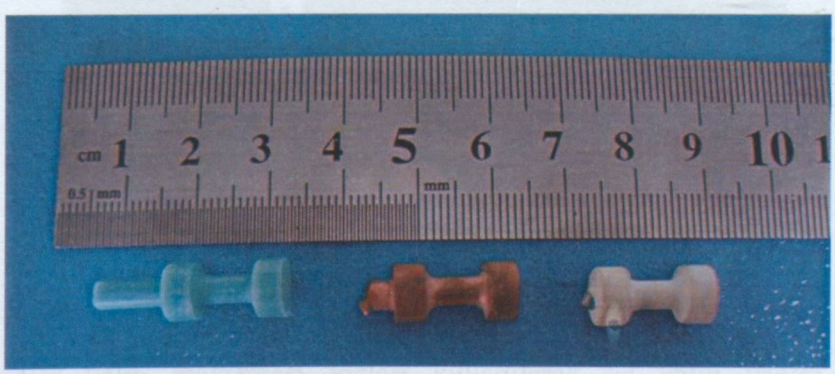
Şekil 5. 44 Basamaklı mum model, bronz ve gümüş döküm numuneler

Şekil 5. 45 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm işlemi

Yüzey pürüzlüğü ölçüm sonuçlarından ortalama pürüzlüğü gösteren Ra değerleri göz önüne alınmıştır. Her basamaktan üç ölçüm yapılarak ölçülen Ra değerlerinin aritmetik ortalaması hesaplanmıştır.

5.10 Boyutsal Değişim Ölçümleri

Deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen döküm işlemlerinde, model ve döküm parça arasındaki doğrusal boyutsal değişimlerinin tespiti amacıyla, boyutsal ölçüm numuneleri dökülmüştür. Bu numunenin mum modeli, bronz ve gümüşten dökülmüşü; Şekil 5. 46'da görülmektedir. Doğrusal boyutsal değişimler; mum ağacına kaynatılan her bir modelin ve dökümden sonra bu modelden çıkan döküm parçasının boyu dijital kumpas ile ölçülüp aradaki fark yüzde olarak hesaplanarak belirlenmiştir. Her numuneden en az üç ölçüm alınarak aritmetik ortalaması hesaplanmıştır.



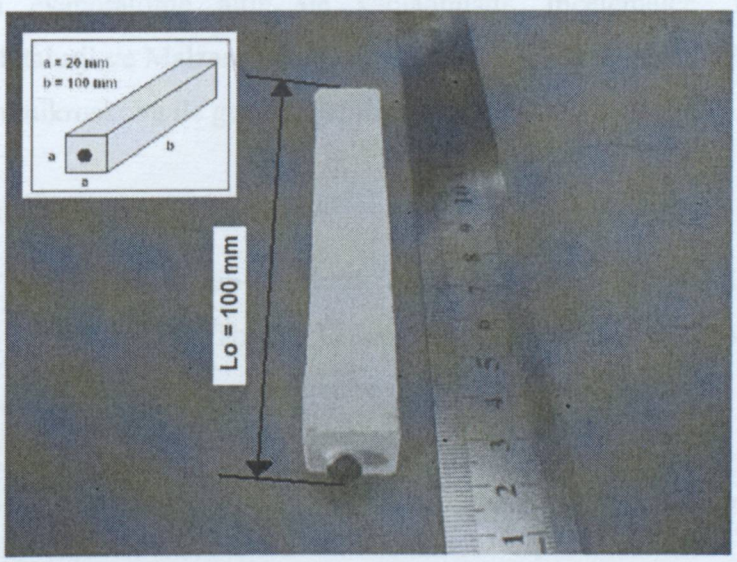
Şekil 5. 46 Boyutsal ölçüm numunesinin mum modeli, bronz ve gümüş dökümü

Laboratuvarda geliştirilen alçı bağlı kalıp malzemelerinin boyutsal hassasiyet özellikleri, sanayide hâlihazırda kullanılmakta olan ticari alçı bağlı kalıp malzemeleri ile karşılaştırılmıştır. Farklı markaların farklı ürünleri ile üniversite döküm laboratuvarında

ve Goldaş dökümhanesinde dökümler yapılmış, çıkan numuneler laboratuvarda üretilen kalıp malzemeleri ile aynı testlere tabi tutulmuştur.

5.10.1 Prizlenme Genleşmesi (Boy Değişimi) Tayini (TS 3322)

Prizlenme terimi, hidratasyon reaksiyonu gösteren inorganik bir malzemenin veya bu malzemenin bağlayıcı olarak kullanıldığı bir karışımın sertleşmesi olarak tanımlanabilir. Prizlenme genleşmesi (boy değişimi) tayini genellikle çimento harcı ve beton numunelerinde uygulanan TS 3322'ye [68] göre düzenlenmiş deneysel bir yöntemdir. Buradaki amaç, çimento harcı ve betonda ya da tez konusuyla doğrudan bir bağlantı kuracaksak eğer dökülebilen kalıp malzemelerinde, dış yükler ve sıcaklık değişimi nedenleri dışında oluşan boyutsal değişimleri belirlemektir. Ölçümde kullanılan deney numuneleri silikon kalıplara dökülerek elde edilmiştir; numuneler kare kesitli prizma şeklinde ve boyutları 20x20x100 mm'dir. Ölçüm alabilmek için numunelerin ucuna çelik ölçüm bilyeleri yerleştirilmiştir. Bir numune örneği aşağıda Şekil 5. 47'de görülmektedir.



Şekil 5. 47 Prizlenme genleşmesi numunesi

Bu numuneler kalıp malzemesi tozları kullanılarak ve kalıp yapım prosedürü değiştirilmeden uygulanarak üretilmiştir. Kalıp davranışlarının birebir belirlenebilmesi için numunelerin bileşimsel ve yapısal olarak kalıplardan farklı olmaması hedeflenmiştir. Prizlenme genleşmesi, numunelerin kalıplardan çıkartıldığı anda ve

takip eden birinci ve ikinci saatin sonunda boylarının dijital kumpas ile ölçülmesiyle belirlenmiştir.

5.10.2 Isıl Genleşme Tayini (Dilatometre Testleri)

Dilatometre testleri Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümünde Netzsch marka DIL 402 PC serili dilatometre cihazı ile yapılmıştır. Bu testler için seçilen kalıplardan 25 mm boyunda, 5-6 mm çapında numuneler çıkartılmıştır ve testler kalıp pişme davranışlarını tam olarak belirleyebilmek için 800 °C'a kadar gerçekleştirilmiştir.

5.11 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

Tarama elektron mikroskobu incelemelerinin yapıldığı numuneler de kalıp yapım teknikleri uygulanarak üretilmiştir. Silikon kalıplara dökülen numuneler sertleşmelerinin ardından 75 °C'da 5 saat kurutulmuş ve böylece serbest suyun uzaklaşması sağlanmıştır. Uygun boyutlarda küçültülen numunelerin yüzeyleri inceleme öncesi vakum evaporatörde altın ile kaplanmıştır. İncelemeler, Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde bulunan JEOL JSM 5410 tarama elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir.

5.12 Gözeneklilik (Porozite) Testleri

Kalıp yapım prosedürü takip edilerek gözeneklilik testleri için numuneler hazırlanmıştır. Testler, Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarında bulunan Quantochrome Poremaster civalı porozimetre ile gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR

6.1 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

Model tasarımı ve mum model üretimi bölümünde de belirtildiği üzere, tasarlanan modellerin önce alüminyumdan master modelleri işletilmiş, daha sonra da bu modeller kullanılarak kauçuk mum enjeksiyon kalıpları yaptırılmıştır. Basamaklı master modelin ve mum modelin her basamak için ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) Çizelge 6. 1' de görülmektedir.

Çizelge 6. 1 Master model ve mum modelin yüzey pürüzlülükleri

Numuneler	Ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra μm)		
	1. basamak	2. basamak	3. basamak
Al master model	0,160	0,107	0,092
Mum model	0,133	0,127	0,127

6.1.1 Alçı Bağlı Kalıplar İçin Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

Alçı bağlı kalıplardan elde edilen döküm numunelerden ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri, Çizelge 6. 2'de, alçı bağlı ticari malzemelerden (referanlardan) ölçülen değerler de Çizelge 6. 3'de görülmektedir.

Çizelge 6. 2 Alçı bağlı kalıplardan elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri

Bileşim No.	Su/Toz	Döküm yöntemi	Dökülen metal	1.basamak Ra (µm)	2.basamak Ra (µm)	3.basamak Ra (µm)
1	0,40	V.D.	Bronz	1,383	1,341	1,145
2	0,40	V.D.	Bronz	1,523	0,987	1,179
3	0,39	V.D.	Bronz	1,490	1,085	1,234
4	0,39	V.D. B.V.	Bronz,Gümüş	1,513- 0,832	1,276- 0,949	0,932- 0,767
5	0,39	V.D.	Bronz	1,386	1,412	1,246
6	0,40	V.D.	Bronz	1,440	1,288	1,226
7	0,39	V.D.	Bronz	1,683	1,531	1,365
8	0,38	V.D.	Bronz	1,725	1,499	1,529
9	0,38	V.D.	Bronz	1,900	1,766	1,514
10	0,38	B.V.	Gümüş	1,515	1,073	0,878
11	0,41	B.V.	Gümüş	0,949	0,915	0,964
12	0,41	B.V.	Gümüş	1,440	1,345	1,442
13	0,38	B.V.	Gümüş	1,790	1,633	1,514
14	0,42	B.V.	Gümüş	1,694	1,610	1,330
15	0,41	B.V.	Gümüş	1,789	1,569	1,197
16	0,41	B.V.	Gümüş	1,394	0,993	0,970
17	0,40	B.V.	Gümüş	1,289	0,919	0,802
18	0,39	B.V.	Gümüş	2,210	1,103	0,781
19	0,40	B.V.	Gümüş	1,827	1,684	1,367
20	0,39	B.V.	Gümüş	0,898	0,723	0,679
21	0,40	B.V.	Gümüş	0,755	0,725	0,601
22	0,40	B.V.	Gümüş	1,354	0,875	0,799
23	0,40	B.V..	Gümüş	1,458	1,829	1,112
24	0,40	B.V..	Gümüş	0,888	0,714	0,665
25	0,40	B.V.	Gümüş	1,101	1,033	0,869
26	0,40	B.V.	Gümüş	1,835	1,144	1,075
27	0,40	B.V.	Gümüş	2,017	1,727	1,505
28	0,40	B.V.	Gümüş	1,628	1,578	1,841
29	0,40	B.V.	Gümüş	1,876	1,739	2,200
30	0,395	B.V.	Gümüş	1,922	2,000	1,598
31	0,40	B.V.	Gümüş	1,517	1,341	1,358
32	0,40	B.V.	Gümüş	1,919	1,429	1,250
33	0,40	B.V.	Gümüş	2,421	1,798	1,722
34	0,40	B.V.	Gümüş	1,657	1,587	1,207

35	0,40	B.V.	Gümüş	4,363	3,805	1,932
36	0,40	B.V.	Gümüş	2,190	2,715	2,673
37	0,40	B.V.	Gümüş	3,712	3,531	3,497
38	0,40	B.V.	Gümüş	3,965	3,804	3,369
39	0,40	B.V.	Gümüş	2,090-2,165	2,030-2,058	1,717-1,928
40	0,40	B.V.	Gümüş	4,115	4,345	2,901
41	0,40	B.V.	Gümüş	3,467	2,712	1,753
42	0,395	B.V.	Gümüş	1,931	1,887	1,455
43	0,395	B.V.	Gümüş	1,874	2,208	1,244
44	0,40	B.V.	Gümüş	3,407	2,448	3,067
45	0,40	B.V.	Gümüş	3,850	3,654	3,547
46	0,39	B.V.	Gümüş	1,393	1,276	0,884
47	0,39	B.V.	Gümüş	2,083	1,613	1,512

Çizelge 6. 3 Alçı bağlı referans malzemelerin ortalama yüzey (Ra) pürüzlülük değerleri

	Metal	**Su/ Toz**	**Dök. yön.**	**1.bas. Ra (µm)**	**2.bas. Ra (µm)**	**3.bas. Ra (µm)**
Ref. 1	Bronz	0,38	V.D.	2,409	2,299	1,597
Ref. 1	Gümüş	0,40	B.V.	0,783	0,508	0,458
Ref. 2	Bronz	0,38	V.D.	2,173	2,568	2,018
Ref. 3	Gümüş	0,40	B.V.	1,016	0,946	0,865

6.1.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı ve Fosfat Bağlı Kalıplar İçin Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

YAÇ bağlı 1,2 ve 3 numaralı bileşimler ile fosfat bağlı 1 ve 2 numaralı referans malzemesi ile gerçekleştirilen vakum destekli bronz dökümlerden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 6. 4'te görülmektedir.

Çizelge 6. 4 Vakum destekli bronz dökümlerden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri

Bileşim No.	Su/Toz	1. basamak Ra (µm)	2. basamak Ra (µm)	3. basamak Ra (µm)
1	0,40	4,464	4,353	2,792
2	0,40	1,867	1,717	1,395
3	0,38	1,817	1,314	1,309
Ref 1	0,29	3,369	2,854	2,199
Ref 2	0,32	3,498	3,707	3,036

Paslanmaz çelik dökümlerinden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 6. 5'de görülmektedir.

Çizelge 6. 5 Paslanmaz çelik dökümlerden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri

Bileşim No.	Su/Toz	Döküm yöntemi	Ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)
1	0,40	Mikro döküm	3,889
2	0,40	Mikro döküm	3,786
2	0,40	Merkezkaç döküm	1,978
3	0,38	Mikro döküm	3,548
4	0,40	Mikro döküm	5,951
5	0,40	Mikro döküm	6,332
6	0,40	Mikro döküm	2,893
7	0,40	Mikro döküm	4,726
Referans 1	0,29	Mikro döküm	3,902
Referans 2	0,32	Mikro döküm	7,882

6.2 Boyutsal Değişim Sonuçları

6.2.1 Alçı Bağlı Kalıplarda Boyutsal Değişimler

Alçı bağlı kalıplara yapılan dökümlerden ölçülmüş boyutsal değişimler Çizelge 6. 6'da verilmiştir. Referans malzemelere ait boyutsal değişimler de Çizelge 6. 7'de görülmektedir.

Çizelge 6. 6 Alçı bağlı kalıplardan elde edilen doğrusal boyut değişimleri

Bileşim No.	Ortalama mum model boyu (mm)	Ortalama döküm parça boyu (mm)	Boyutsal değişim (%)
1	15,52	15,51	-0,064
2	15,53	15,51	-0,128
3	15,52	15,50	-0,128
4	15,52	15,46	-0,386
5	15,53	15,51	-0,128
6	15,43	15,41	-0,129
7	15,46	15,44	-0,129
8	15,52	15,48	-0,257
9	15,51	15,47	-0,257
10	15,48	15,45	-0,193
11	15,53	15,53	0
12	15,41	15,41	0
13	15,50	15,54	+0,258
14	15,46	15,47	+0,064
15	15,45	15,43	-0,129
16	15,57	15,59	+0,128
17	15,35	15,30	-0,325
18	15,40	15,43	+0,194
19	15,49	15,53	+0,258
20	15,39	15,45	+0,389

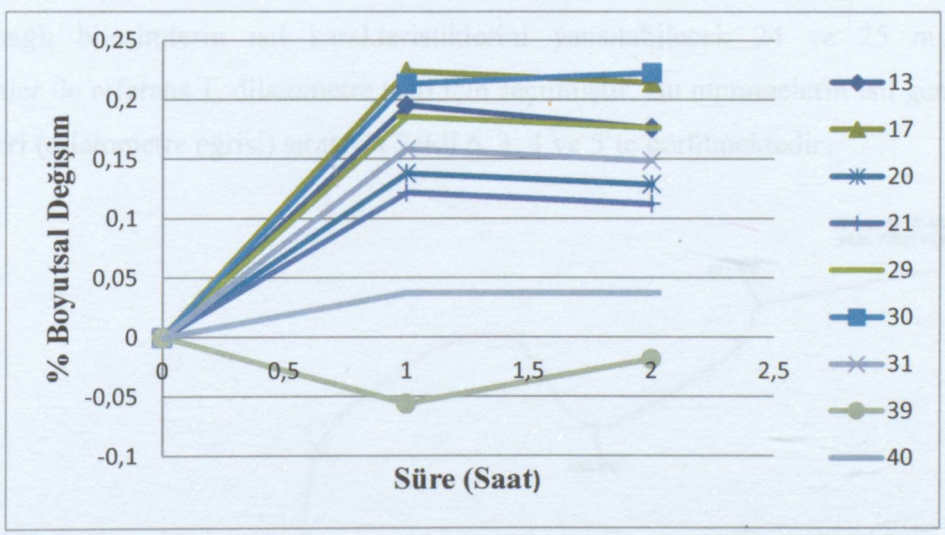
21	15,54	15,57	+0,193
22	15,55	15,58	+0,193
23	15,45	15,48	+0,194
24	15,54	15,55	+0,064
25	15,49	15,51	+0,129
26	15,55	15,55	0
27	15,51	15,51	0
28	15,52	15,52	0
29	15,54	15,54	0
30	15,42	15.42	0
31	15,43	15.44	+0,064
32	15,50	15.50	0
33	15,54	15.57	+0,193
34	15,46	15,48	+0,129
35	15,50	15,52	+0,129
36	15,40	15,40	0
37	15,42	15,40	-0,129
38	15,50	15,50	0
39	15,52	15,54	+0,128
40	15,50	15,53	+0,193
41	15,52	15,54	+0,128
42	15,45	15,43	-0,129
43	15,52	15,51	-0,064
44	15,55	15,55	0
45	15,52	15,50	-0,128
46	15,49	15,51	+0,129
47	15,43	15.44	+0,064

Çizelge 6. 7 Alçı bağlı referans malzemelerin dökümlerindeki boyutsal değişimleri

	Metal	Su/ Toz	Dök. yön.	Ort. model boyu (mm)	Ort. parça boyu (mm)	Boyut değişimi %
Ref. 1	Bronz	0,38	V.D.	15,40	15,44	+0,259
Ref. 1	Gümüş	0,40	B.V.	15,46	15,50	+0,258
Ref. 2	Bronz	0,38	V.D.	15,57	15,57	-0,192
Ref. 3	Gümüş	0,40	B.V.	15,51	15,47	-0,257

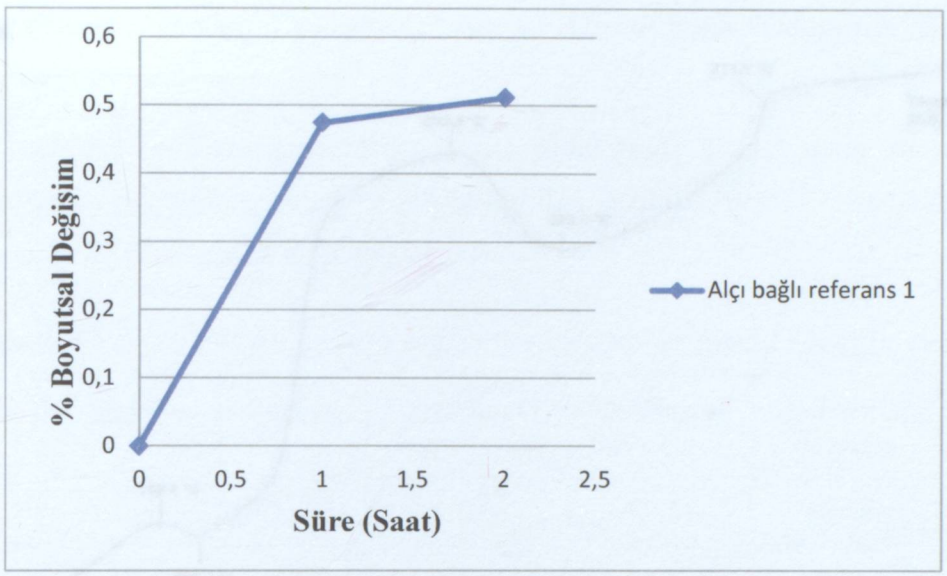
6.2.1.1 Alçı Bağlı Kalıpların Prizlenme Genleşmesi Ölçümleri

Alçı bağlı kalıp malzemesi bileşimlerinden 13, 17, 20, 21, 29, 30, 31, 39 ve 40 numaralı olanlara prizlenme genleşmesi testi uygulanmıştır; test sonuçlarından çizilen grafik Şekil 6. 1' de görülmektedir.



Şekil 6. 1 Alçı bağlı kalıp malzemelerinin prizlenme genleşmeleri

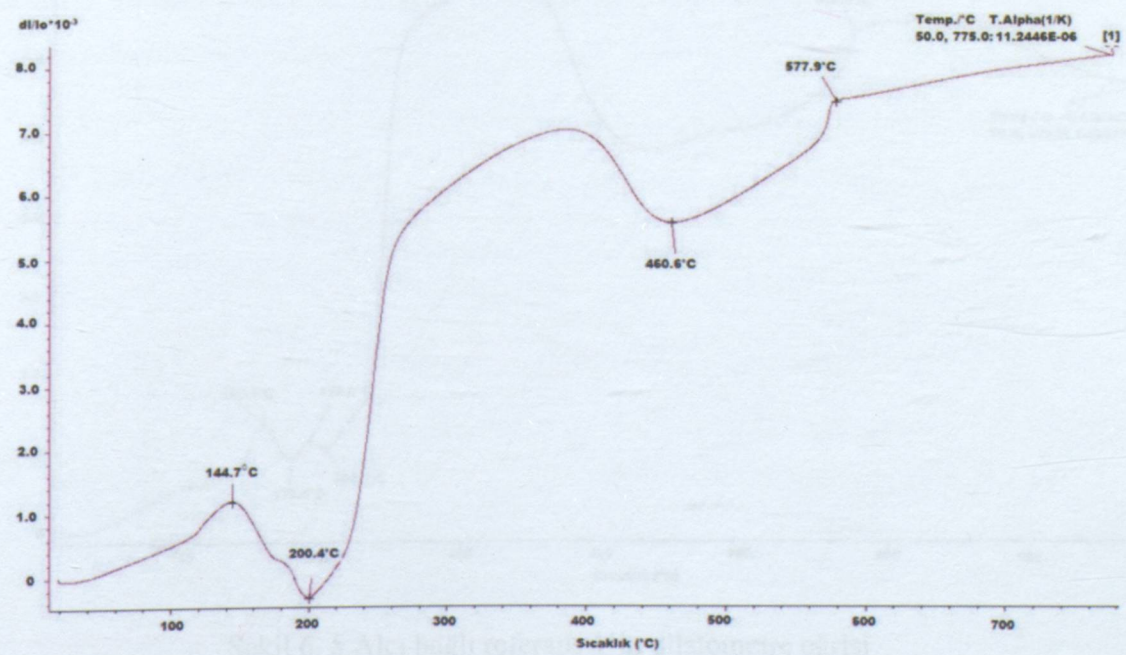
Endüstriyel kullanımda üstün özellikleri ile bilinen referans 1 olarak adlandırılan ticari alçı bağlı kalıp malzemesine uygulanan prizlenme genleşmesi testi sonucunda oluşturulan grafik Şekil 6. 2' de görülmektedir.



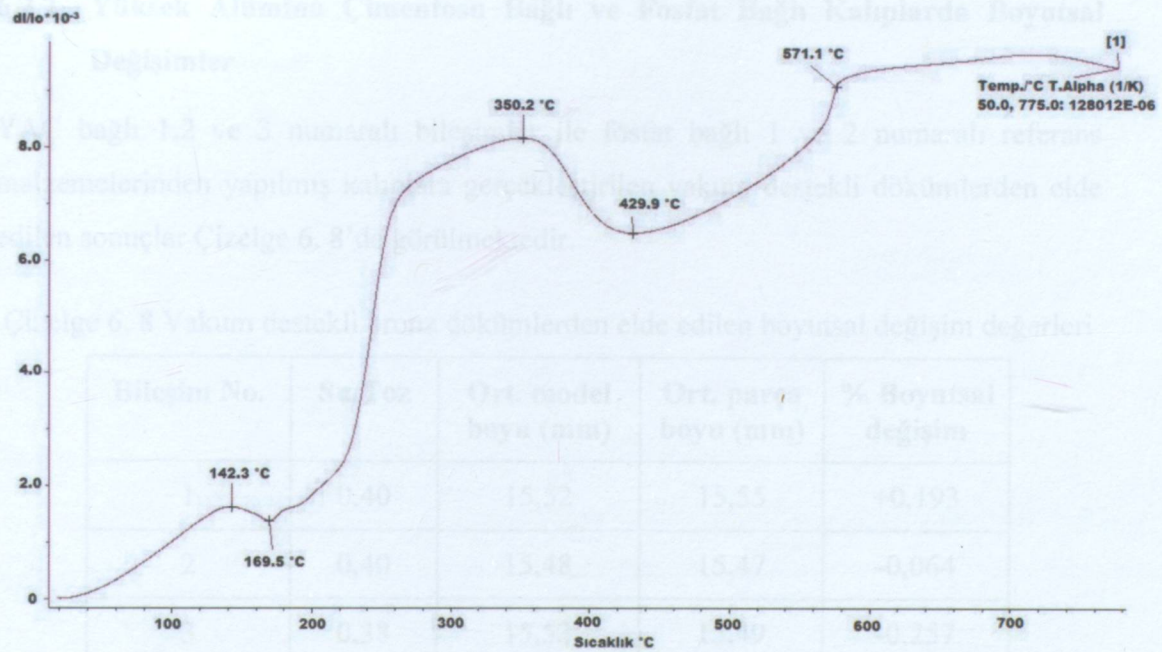
Şekil 6. 2 Alçı bağlı referans 1'in prizlenme genleşmesi

6.2.1.2 Alçı Bağlı Kalıpların Isıl Genleşme Testi Sonuçları

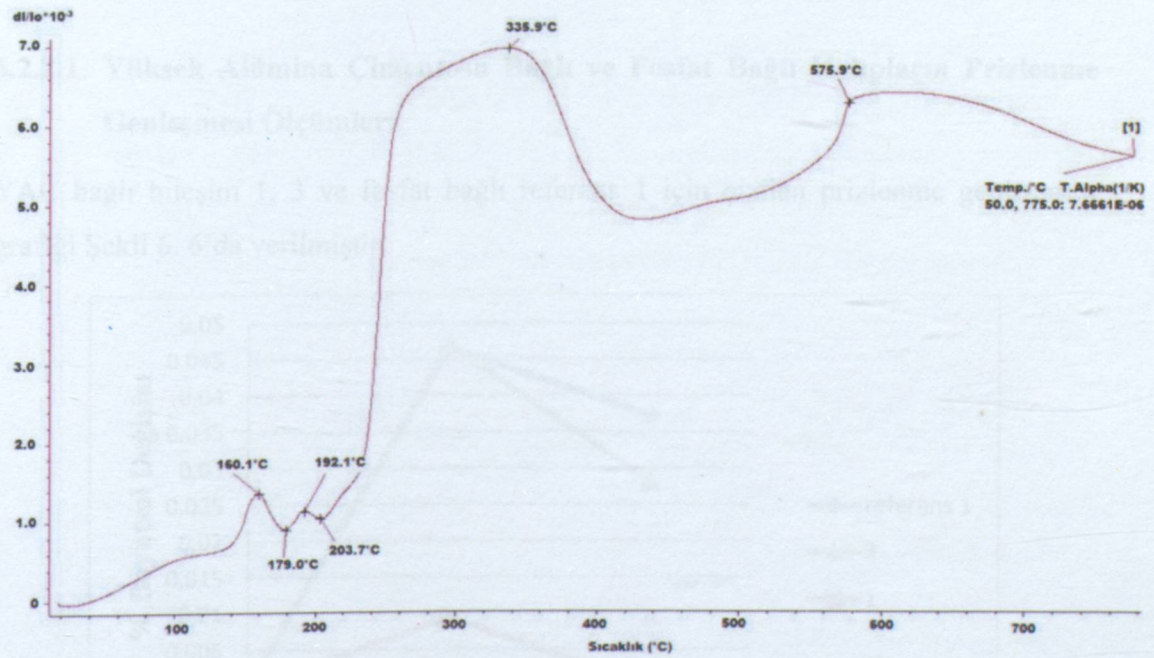
Alçı bağlı bileşimlerin ısıl karakteristiklerini yansıtabilecek 24 ve 25 numaralı bileşimler ile referans 1, dilatometre testi için seçilmiştir. Bu numunelerin ısıl genleşme profilleri (dilatometre eğrisi) sırasıyla Şekil 6. 3, 4 ve 5'te görülmektedir.



Şekil 6. 3 Alçı bağlı 24 numaralı bileşimin dilatometre eğrisi



Şekil 6. 4 Alçı bağlı 25 numaralı bileşimin dilatometre eğrisi



Şekil 6. 5 Alçı bağlı referans 1'in dilatometre eğrisi

6.2.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı ve Fosfat Bağlı Kalıplarda Boyutsal Değişimler

YAÇ bağlı 1,2 ve 3 numaralı bileşimler ile fosfat bağlı 1 ve 2 numaralı referans malzemelerinden yapılmış kalıplara gerçekleştirilen vakum destekli dökümlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 6. 8'de görülmektedir.

Çizelge 6. 8 Vakum destekli bronz dökümlerden elde edilen boyutsal değişim değerleri

Bileşim No.	Su/Toz	Ort. model boyu (mm)	Ort. parça boyu (mm)	% Boyutsal değişim
1	0,40	15,52	15,55	+0,193
2	0,40	15,48	15,47	-0,064
3	0,38	15,53	15,49	-0,257
Ref 1	0,29	15,39	15,43	+0,259
Ref 2	0,32	15,45	14,44	-0,064

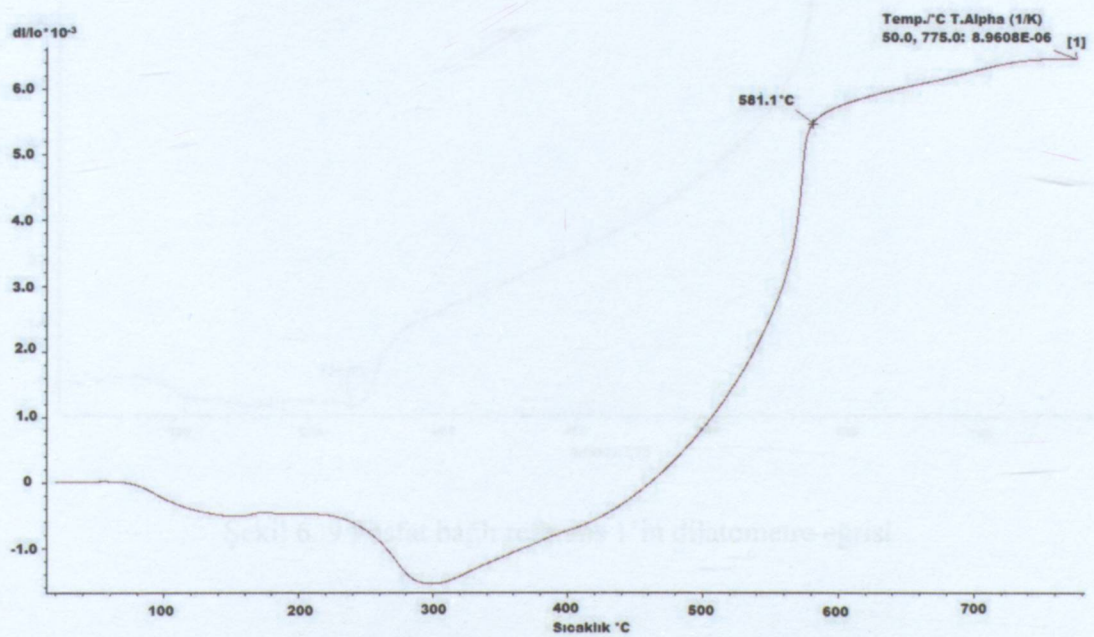
6.2.2.1 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı ve Fosfat Bağlı Kalıpların Prizlenme Genleşmesi Ölçümleri

YAÇ bağlı bileşim 1, 3 ve fosfat bağlı referans 1 için çizilen prizlenme genleşmesi grafiği Şekil 6. 6'da verilmiştir.

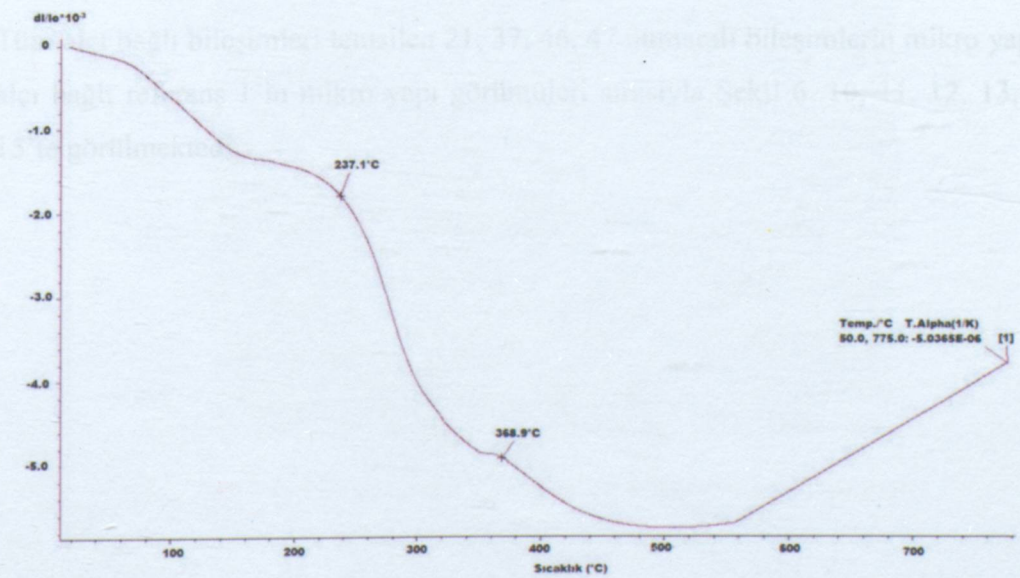
Şekil 6. 6 YAÇ bağlı 1 ve 3 numaralı bileşimler ile fosfat bağlı referans 1'in prizlenme genleşmeleri.

6.2.2.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı ve Fosfat Bağlı Kalıpların Isıl Genleşme Testi Sonuçları

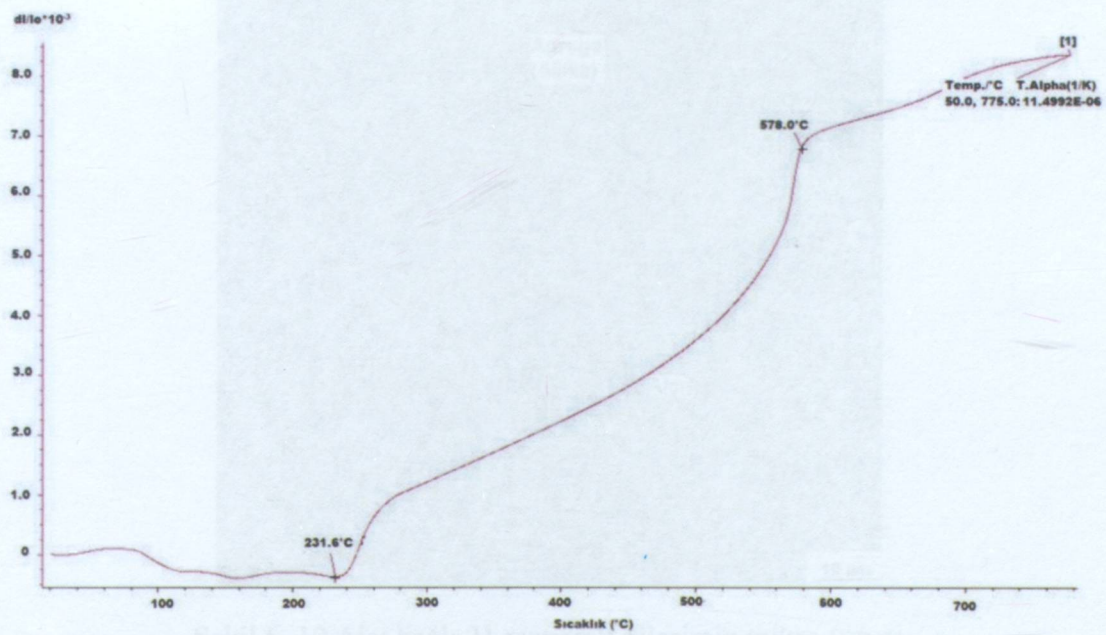
1 ve 3 numaralı YAÇ bağlı bileşimler ile fosfat bağlı referans 1'in dilatometre eğrileri sırasıyla Şekil 6. 7, 8 ve 9'da görülmektedir.



Şekil 6. 7 YAÇ bağlı 1 numaralı bileşimin dilatometre eğrisi



Şekil 6. 8 YAÇ bağlı 3 numaralı bileşimin dilatometre eğrisi

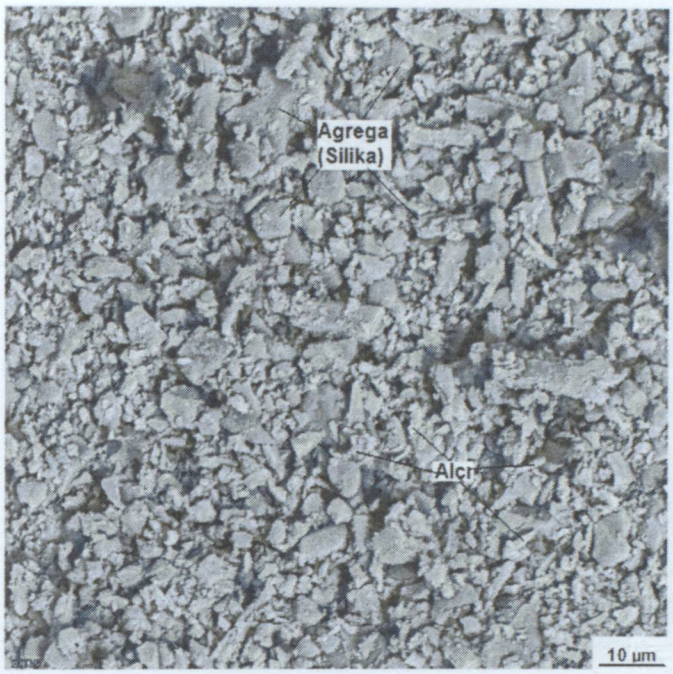


Şekil 6. 9 Fosfat bağlı referans 1'in dilatometre eğrisi

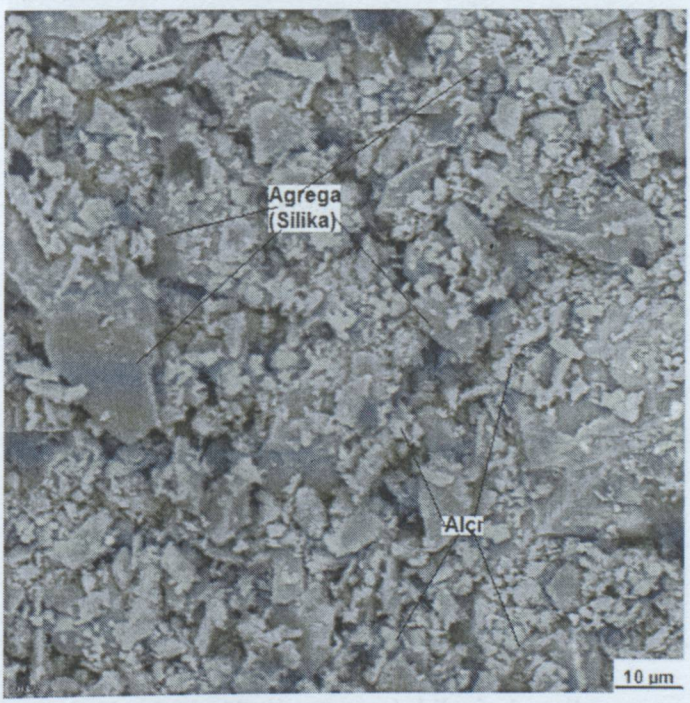
6.3 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri

6.3.1 Alçı Bağlı Kalıpların Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri

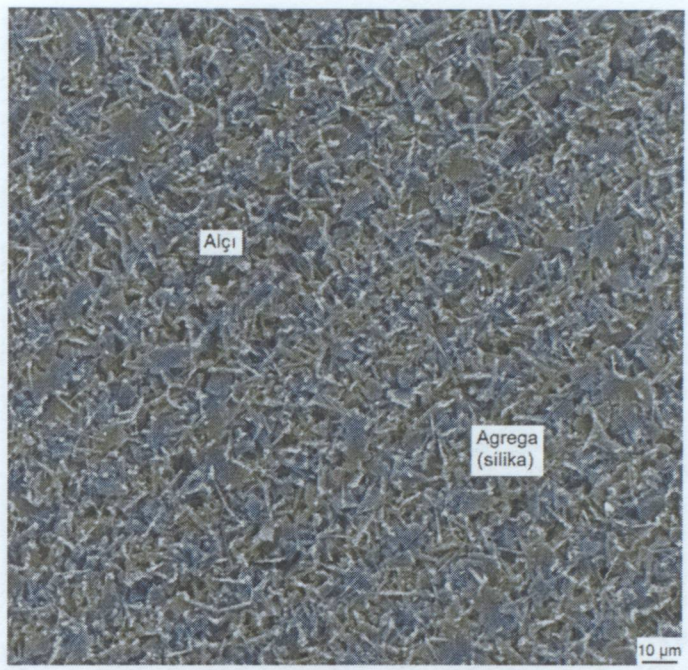
Tüm alçı bağlı bileşimleri temsilen 21, 37, 46, 47 numaralı bileşimlerin mikro yapısı ile alçı bağlı referans 1'in mikro yapı görüntüleri sırasıyla Şekil 6. 10, 11, 12, 13, 14 ve 15'te görülmektedir.



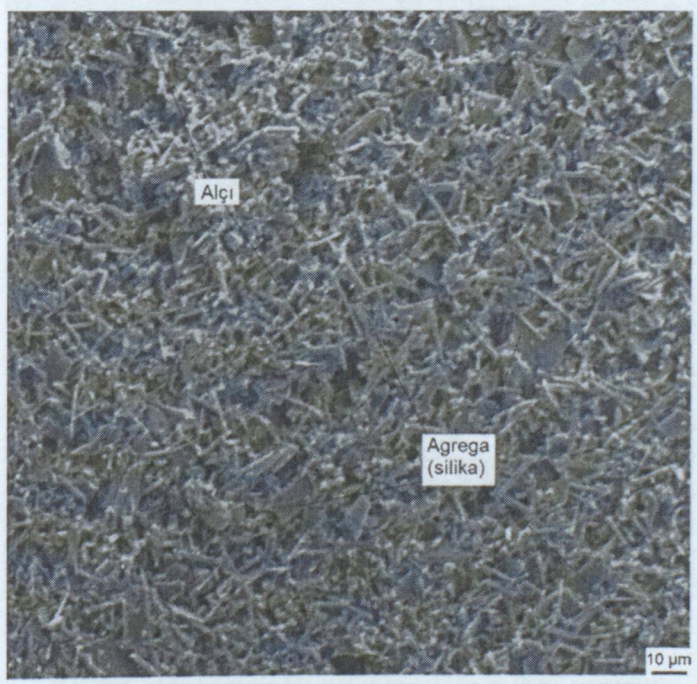
Şekil 6. 10 Alçı bağlı 21 numaralı bileşimin mikro yapısı



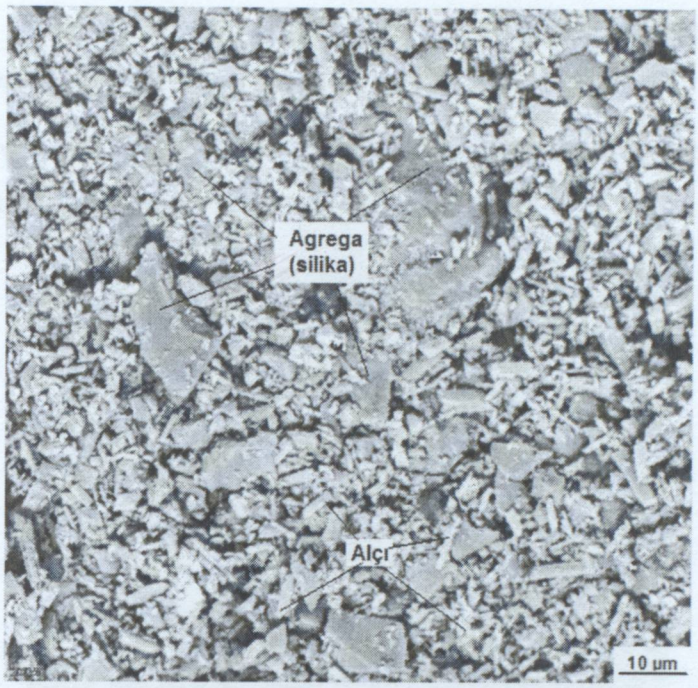
Şekil 6. 11 Alçı bağlı 37 numaralı bileşimin mikro yapısı



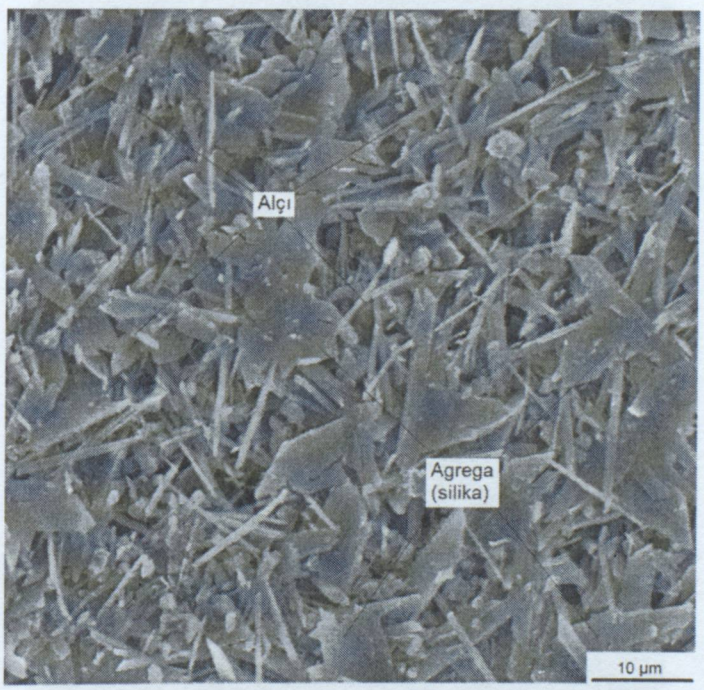
Şekil 6. 12 Alçı bağlı 46 numaralı bileşimin mikro yapısı



Şekil 6. 13 Alçı bağlı 47 numaralı bileşimin mikro yapısı



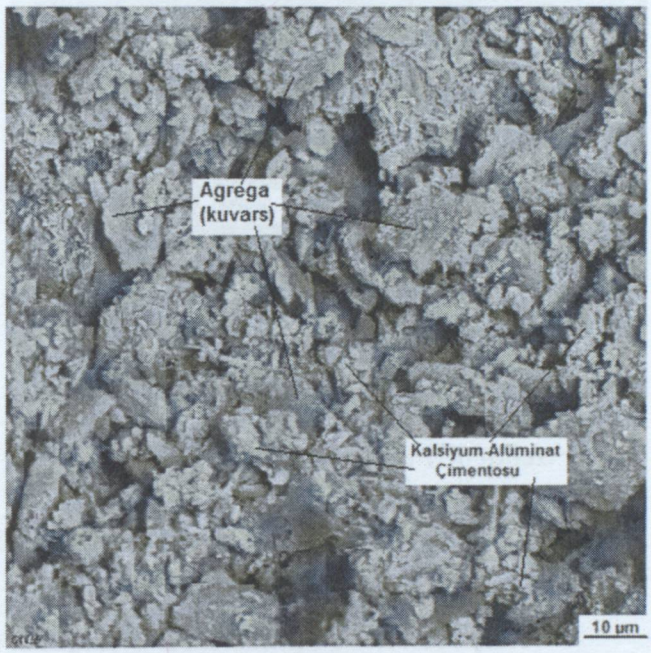
Şekil 6. 14 Alçı bağlı referans 1'in mikro yapısı



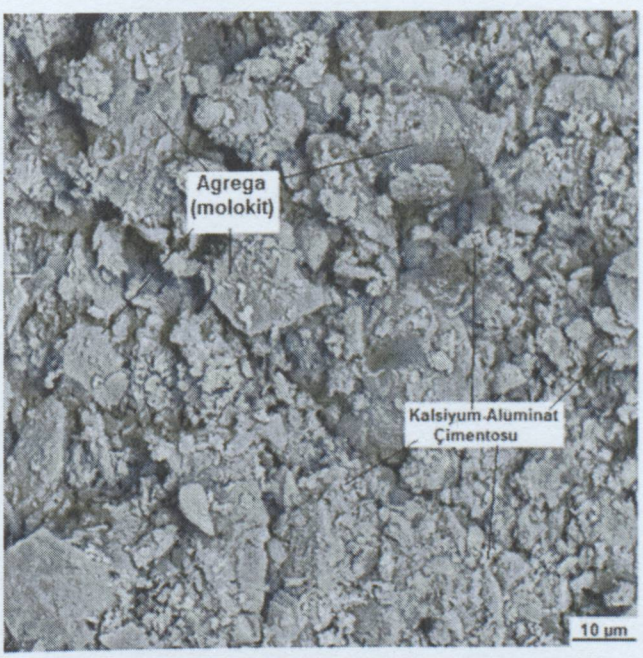
Şekil 6. 15 Alçı bağlı referans 1'in mikro yapısı

6.3.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı ve Fosfat Bağlı Kalıpların Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri

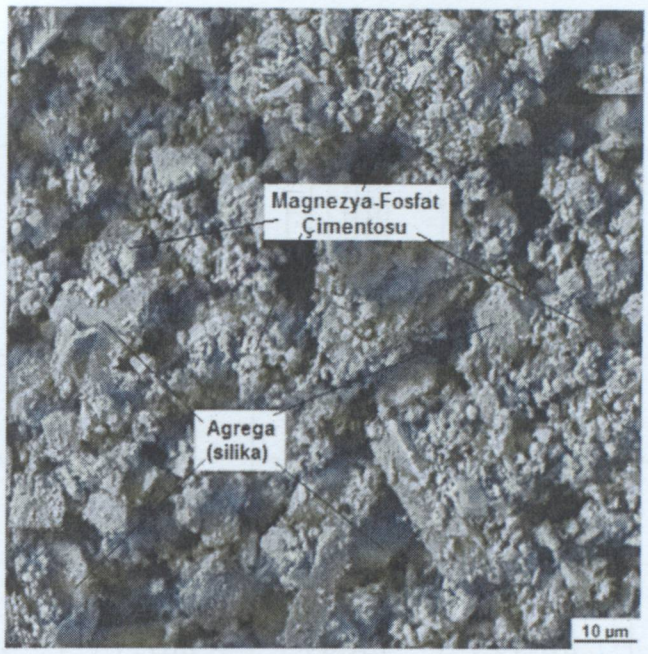
YAÇ bağlı 1 ve 3 numaralı bileşimler ile fosfat bağlı referans 1'in mikro yapı görüntüleri sırasıyla Şekil 6. 16, 17 ve 18' de verilmiştir.



Şekil 6. 16 YAÇ bağlı 1 numaralı bileşimin mikro yapısı



Şekil 6. 17 YAÇ bağlı 3 numaralı bileşimin mikro yapısı

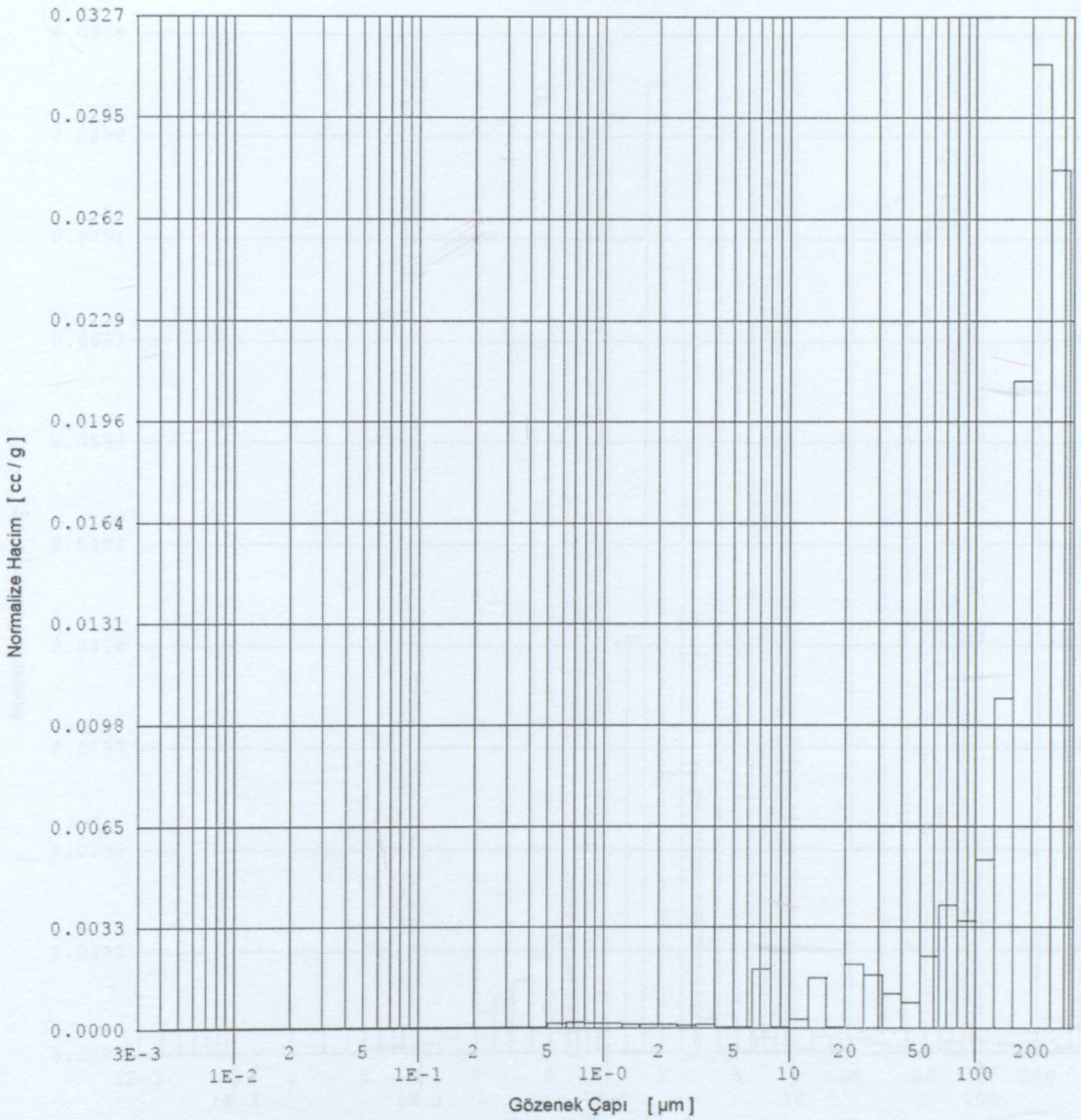


Şekil 6. 18 Fosfat bağlı referans 1'in mikro yapısı

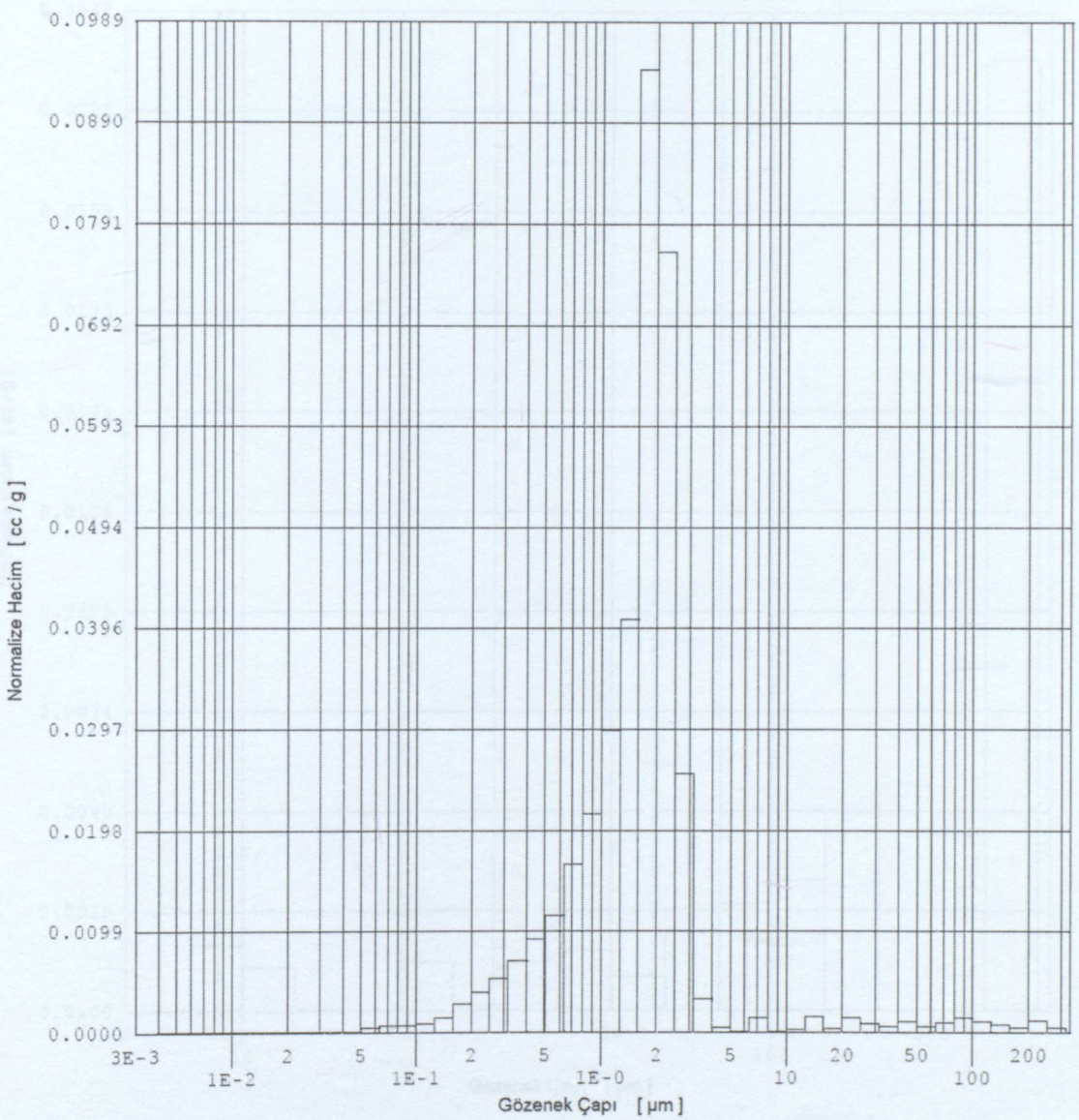
6.4 Gözeneklilik (Porozite) Testi Sonuçları

6.4.1 Alçı Bağlı Kalıpların Gözeneklilik Testi Sonuçları

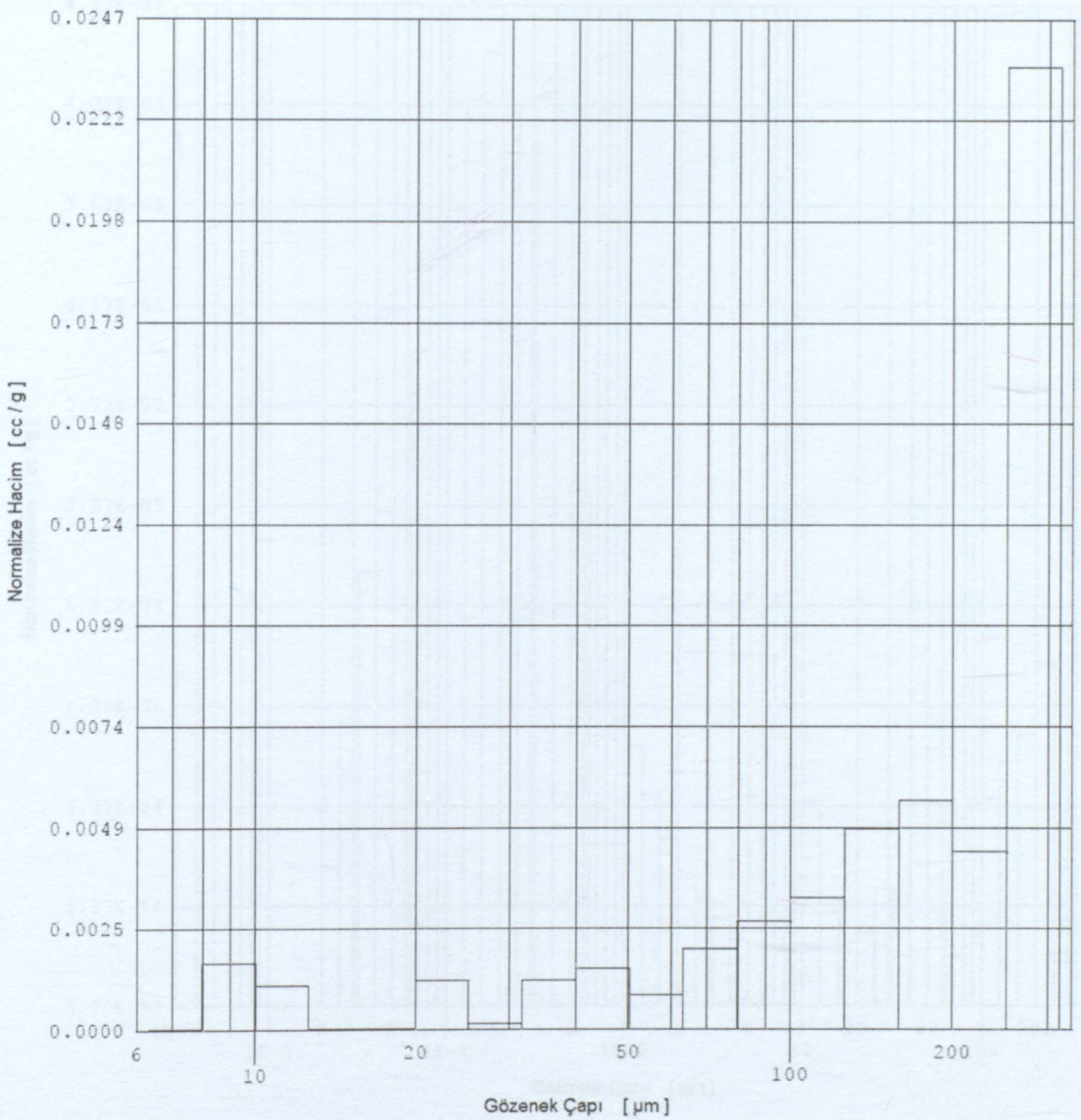
Alçı bağlı bileşimlerden 24 ve 34 numaralı bileşimler porozimetre ölçümü için seçilmiş, bu bileşimlerden hazırlanan numuneler ile referans 1 numunesine test uygulanmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen normalize hacim – gözenek çapı histogram grafikleri sırasıyla Şekil 6. 19, 20, 21'de verilmiştir.



Şekil 6. 19 Alçı bağlı 24 numaralı bileşimin normalize hacim – gözenek çapı histogramı



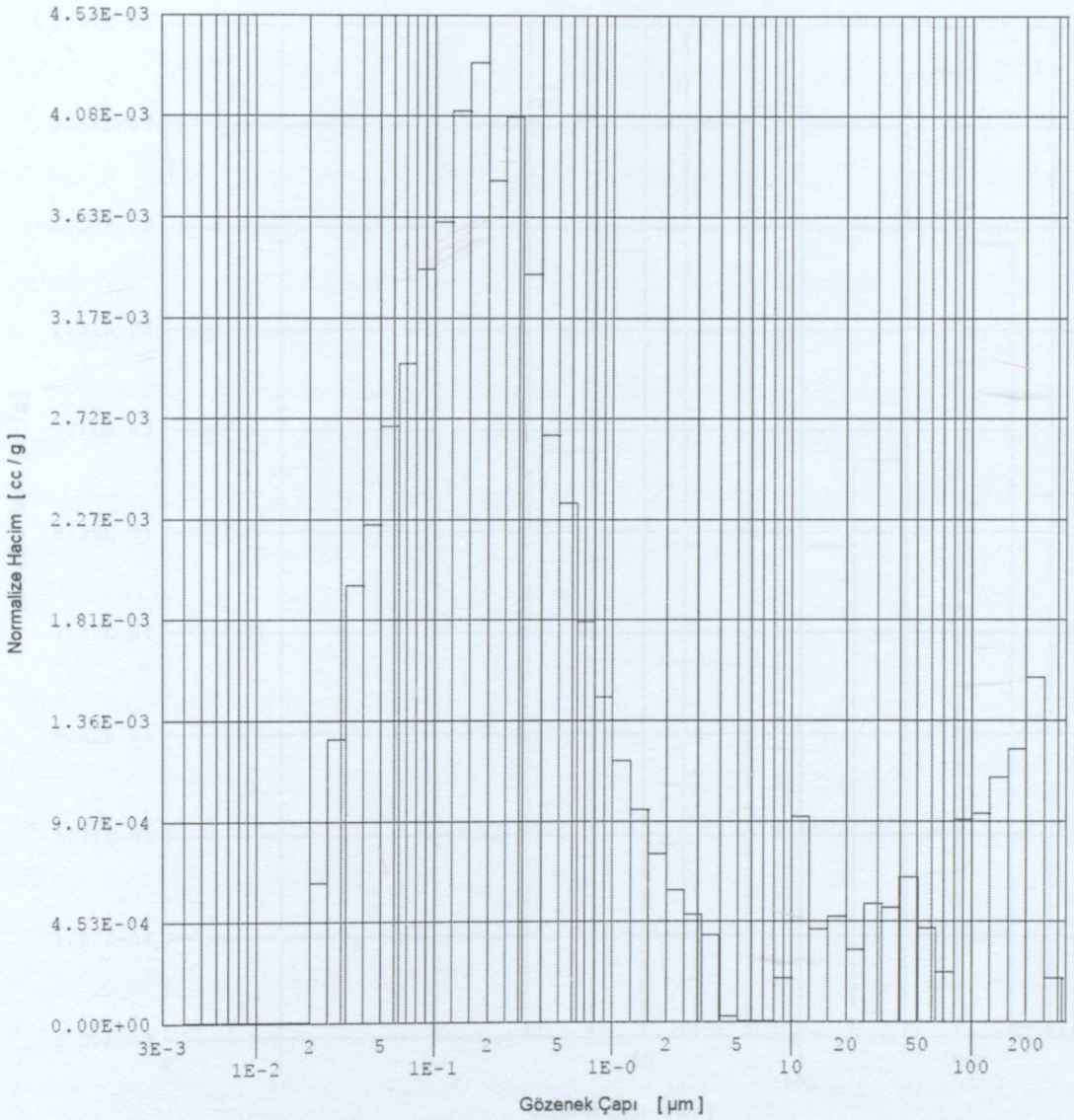
Şekil 6. 20 Alçı bağlı 34 numaralı bileşimin normalize hacim – gözenek çapı histogramı



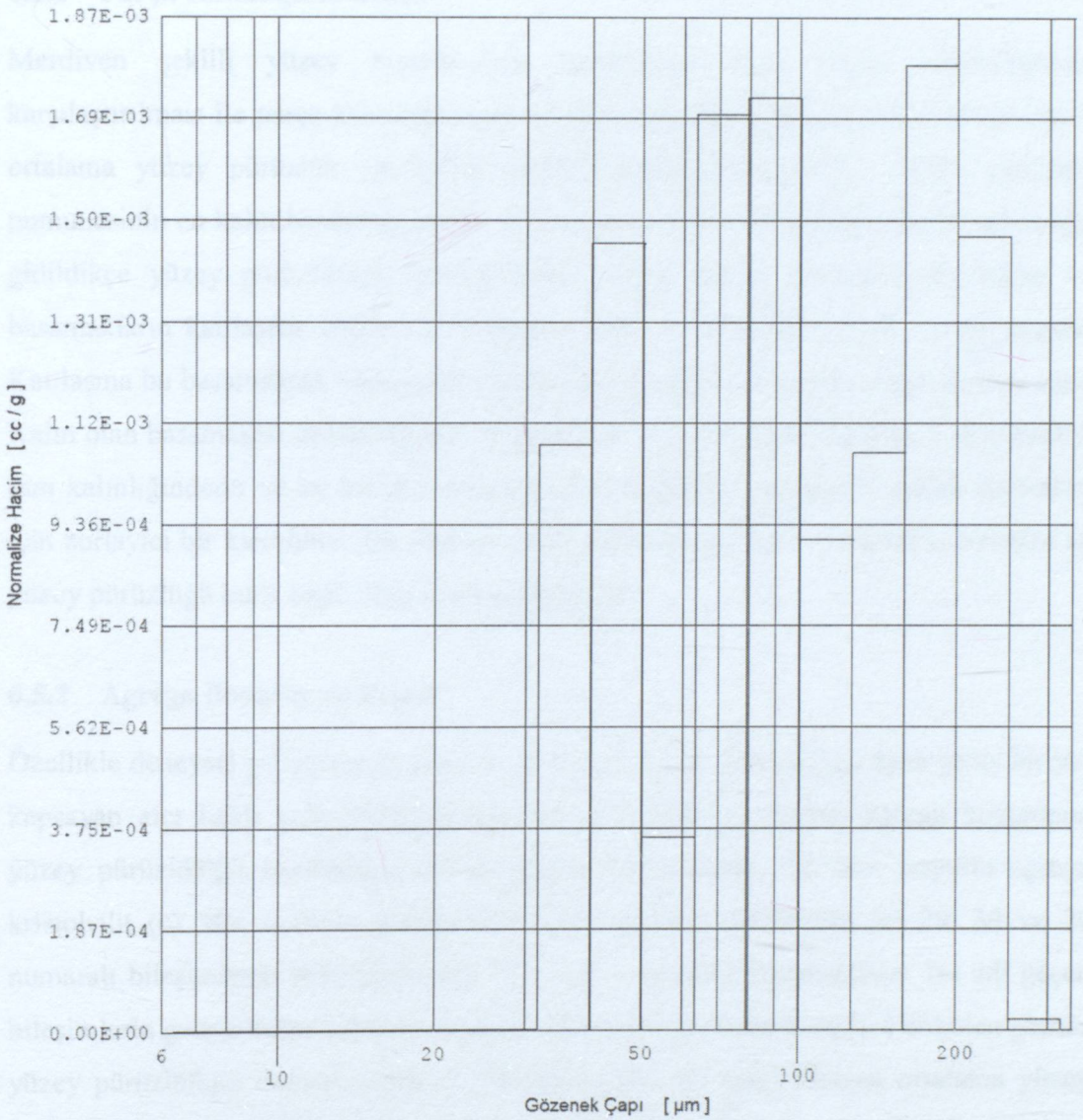
Şekil 6. 21 Alçı bağlı refarans 1'in normalize hacim – gözenek çapı histogramı

6.4.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı ve Fosfat Bağlı Kalıpların Gözeneklilik Testi Sonuçları

Porozite testi için YAÇ bağlı bileşimlerden son geliştirilen ve agregası molokit olan bileşim, 3 numaralı bileşim seçilmiş; bununla beraber referans 1 numunesine de porozite testi uygulanmıştır. YAÇ bağlı 3 numaralı bileşim ile fosfat bağlı referans 1'in normalize hacim – gözenek çapı histogram grafikleri sırasıyla Şekil 6. 22 ve 23'te görülmektedir.



Şekil 6. 22 YAÇ bağlı 3 numaralı bileşimin normalize hacim – gözenek çapı histogramı



Şekil 6. 23 Fosfat bağlı referans 1'in normalize hacim – gözenek çapı histogramı

6.5 Yüzey Kalitesine Etki Eden Unsurlar

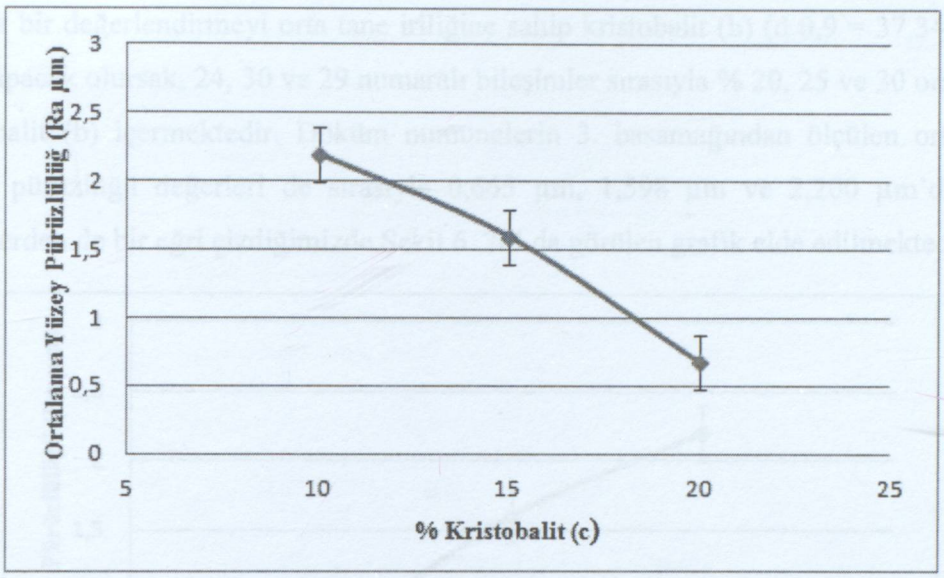
Farklı özelliklere sahip çok sayıda dereceli hassas döküm kalıp malzemesi ile yürütülen deneysel çalışmalarda döküm parçaların yüzey kalitesine etki eden unsurlar büyük oranda belirlenmiştir. Bunlar; parça kalınlığı, agrega boyutu, su/toz oranı, alçı oranı, alçı morfolojisi etkisi, asit banyosunda tutma süresi, modelin ağaçtaki yeri, sıvı metal kalitesi, döküm tekniği ve gözenek çapı olarak sıralanabilir.

6.5.1 Parça Kalınlığının Etkisi

Merdiven şekilli yüzey numunesinin basamaklar arası yüzey pürüzlüğünün karşılaştırılması ile parça kalınlığının yüzey kalitesine etkisi belirlenebilir. Bileşimlerin ortalama yüzey pürüzlük çizelgeleri incelendiğinde genel eğilim olarak pürüzlük numunesinin en kalın basamağı olan 1. basamaktan en ince basamağı olan 3. basamağa gidildikçe yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Bunun sebebi yönlenmiş katılaşma ve basamakların katılaşma süreleri arasındaki farktır. 3. basamak uçtadır ve en incedir. Katılaşma bu basamaktan başlayarak arkasındaki iki kalın basamağa doğru devam eder. Kalın olan basamaklar önündeki ince basamaklara besleyici görevi görür. 1. Basamak 8 mm kalınlığındadır ve bu kalınlık dereceli hassas döküm kalıplarının yolluk sistemleri için zorlayıcı bir kalınlıktır. Bu nedenle en fazla çekme en kalın basamakta olmakta ve yüzey pürüzlüğü buna bağlı olarak yükselmektedir.

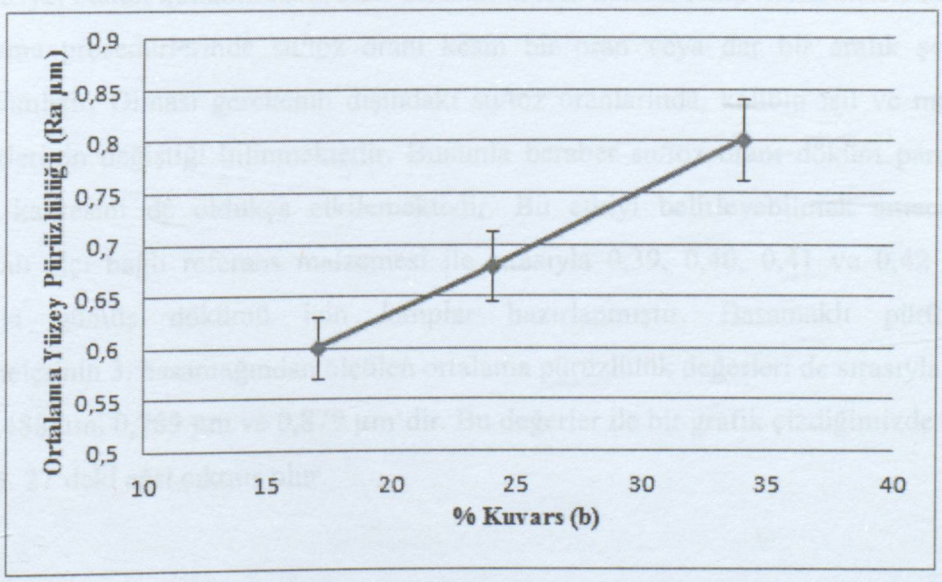
6.5.2 Agrega Boyutunun Etkisi

Özellikle deneysel çalışmalarda bileşim ve döküm sayısı bakımından daha geniş bir yer kapsayan alçı bağlı kalıp malzemelerinden elde edilen sonuçlar, agrega boyutunun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. En ince boyutlu agrega kristobalit (c) 'dir, d (0,9) tane boyutu 7,057 μm'dir. Kristoablit (c) 29, 30 ve 20 numaralı bileşimlerde sırasıyla % 10, 15 ve 20 oranında bulunmaktadır. Bu adı geçen bileşimlerin geriye kalan içerikleri hemen hemen aynıdır ve bu kalıplara dökülen gümüş yüzey pürüzlülüğü numunelerinin 3. basamağından (en ince) ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri de sırasıyla 2,200 μm, 1,598 μm ve 0,679 μm'dir. Kristobalit (c) oranı ile ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerini bir grafiğe aktarırsak karşımıza Şekil 6. 24'te görülen eğri çıkar.



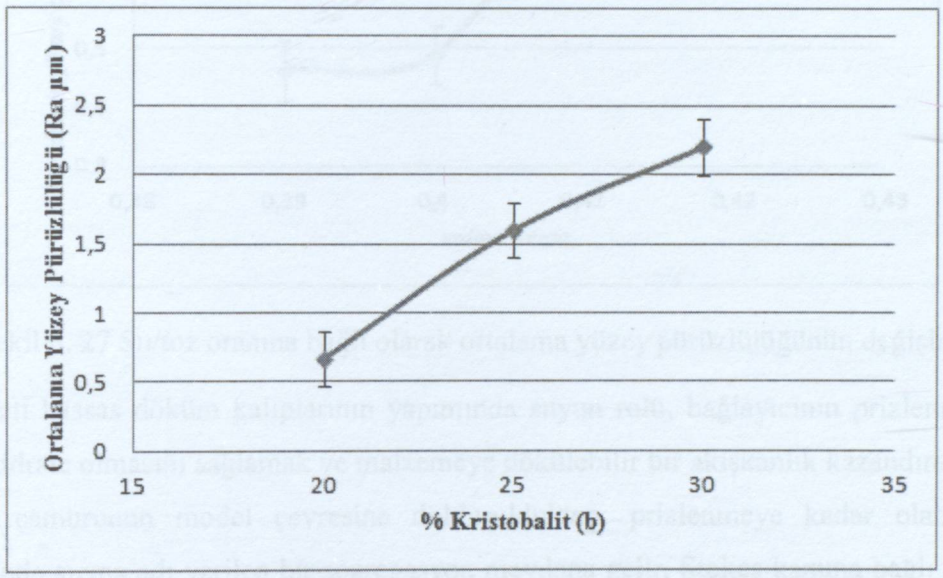
Şekil 6. 24 Kristobalit (c) oranına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi

Alçı bağlı bileşimlerin hazırlanmasında en çok kullanılan agregalardan olan Kuvars (b) en iri taneli ikinci kuvars türüdür ve d (0,9) tane boyutu 44,423 µm'dir. Kuvars (b) 21, 20 ve 17 numaralı bileşimlerde sırasıyla % 17, 24 ve 34 oranında bulunmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü numunelerinin 3. basamaklarından ölçülen ortalama pürüzlülük değerleri de sırasıyla 0,601 µm, 0,679 µm ve 0,802 µm'dir. Bu değerlerden oluşturulan grafik Şekil 6. 25' te görülmektedir.



Şekil 6. 25 Kuvars (b) oranına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi

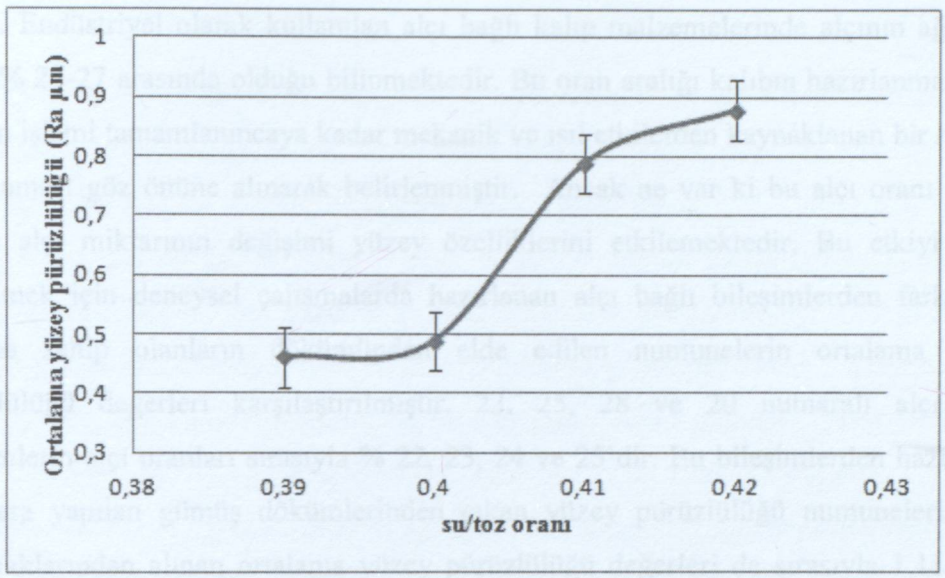
Benzer bir değerlendirmeyi orta tane iriliğine sahip kristobalit (b) (d 0,9 = 37,344 µm) için yapacak olursak, 24, 30 ve 29 numaralı bileşimler sırasıyla % 20, 25 ve 30 oranında kristobalit (b) içermektedir. Döküm numunelerin 3. basamağından ölçülen ortalama yüzey pürüzlüğü değerleri de sırasıyla 0,665 µm, 1,598 µm ve 2,200 µm'dir. Bu değerlerden de bir eğri çizdiğimizde Şekil 6. 26' da görülen grafik elde edilmektedir.



Şekil 6. 26 Kristobalit (b) oranına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi

6.5.3 Su/Toz Oranının Etkisi

Endüstriyel olarak kullanılmakta olan dereceli hassas döküm kalıp malzemeleri ile kalıp hazırlama prosedürlerinde su/toz oranı kesin bir oran veya dar bir aralık şeklinde belirlenmiştir. Olması gerekenin dışındaki su/toz oranlarında, kalıbın ısıl ve mekanik özelliklerinin değiştiği bilinmektedir. Bununla beraber su/toz oranı döküm parçaların yüzey kalitesini de oldukça etkilemektedir. Bu etkiyi belirleyebilmek amacıyla 1 numaralı alçı bağlı referans malzemesi ile sırasıyla 0,39, 0,40, 0,41 ve 0,42 su/toz oranıyla gümüş dökümü için kalıplar hazırlanmıştır. Basamaklı pürüzlülük numunelerinin 3. basamağından ölçülen ortalama pürüzlülük değerleri de sırasıyla 0,461 µm, 0,488 µm, 0,789 µm ve 0,879 µm'dir. Bu değerler ile bir grafik çizdiğimizde ortaya Şekil 6. 27'deki eğri çıkmış olur.



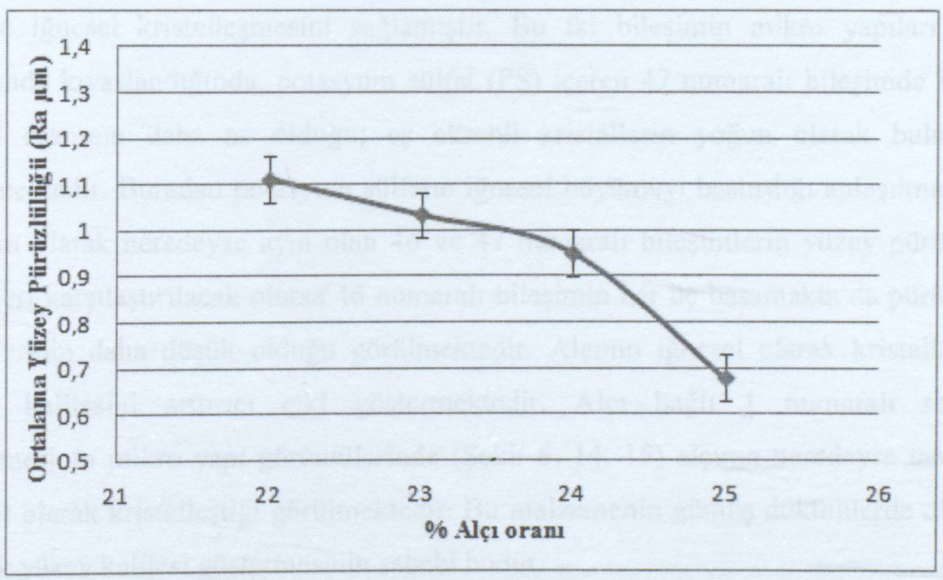
Şekil 6. 27 Su/toz oranına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi

Dereceli hassas döküm kalıplarının yapımında suyun rolü, bağlayıcının prizlenmesini yani hidrate olmasını sağlamak ve malzemeye dökülebilir bir akışkanlık kazandırmaktır. Kalıp çamurunun model çevresine doldurulduktan, prizlenmeye kadar olan süre içerisinde sızma adı verilen bir segregasyon meydana gelir. Stokes kanuna bağlı olarak katı partiküller çöktükçe su yukarı çıkma eğilimi gösterir. Aynı durum beton harçları için de söz konusudur ve hidrolik açıdan hassas döküm kalıp malzemeleri inşaat harçları ile oldukça birbirine benzemektedir. Kalıp içerisinde yükselen su, model ile katı kalıp arasında bir film oluşturur ve yüzey kalitesini etkilemiş olur. Olması gerekenden fazla kullanılan su, kalıbı aşırı akışkan hale getirir ve bu su prizlenmede de kullanılmadığından model yüzeyinde birikir. Bu birikme doğrudan döküm parçaya da yansır ve kuyumcuların su izi adını verdikleri izler meydana gelir. Yapılan deneysel çalışmada 0,40 su/toz oranın üzerine çıkılması ile yüzey pürüzlülüğü belirgin olarak yükselmiştir bu durum karışımda fazla su olduğunu göstermektedir. Bu, malzeme için 0,40 su/toz oranı yüzey kalitesi açısından aşılmaması gereken bir sınırdır.

6.5.4 Alçı Miktarının Etkisi

Bağlayıcı olarak görev yapan alçı, agregayı bir arada tutarak kalıbın yapısal bütünlüğünü sağlamış olur. Kalıp tozu bileşimindeki alçı yarı hidrat ($CaSO_4.1/2H_2O$) formundadır. Kalıp tozunun suyla karıştırılması ile yarı hidrat alçı su içerisinde çözünür ve daha sonra dihidrat formunda ($CaSO_4.2H_2O$) kristalize olur. Agrega taneleri arasındaki boşluklara çökelip çevresini sararak tanelerin birbirlerine bağlanmalarını

sağlar. Endüstriyel olarak kullanılan alçı bağlı kalıp malzemelerinde alçının ağırlıkça oranı % 22-27 arasında olduğu bilinmektedir. Bu oran aralığı kalıbın hazırlanmasından döküm işlemi tamamlanıncaya kadar mekanik ve ısıl etkilerden kaynaklanan bir hasarın oluşmaması göz önüne alınarak belirlenmiştir. Ancak ne var ki bu alçı oranı aralığı içinde alçı miktarının değişimi yüzey özelliklerini etkilemektedir. Bu etkiyi tespit edebilmek için deneysel çalışmalarda hazırlanan alçı bağlı bileşimlerden farklı alçı oranına sahip olanların dökümünden elde edilen numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri karşılaştırılmıştır. 23, 25, 28 ve 20 numaralı alçı bağlı bileşimlerin alçı oranları sırasıyla % 22, 23, 24 ve 25'dir. Bu bileşimlerden hazırlanan kalıplara yapılan gümüş dökümlerinden çıkan yüzey pürüzlülüğü numunelerinin 3. basamaklarından alınan ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri de sırasıyla 1,112 µm, 1,033 µm, 0,951 µm ve 0,679 µm'dir. Bu veriler ile bir grafik çizdiğimizde karşımıza Şekil 6. 28' de görülen eğri çıkar.



Şekil 6. 28 Alçı miktarına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimi

Kalıp malzemesi bileşimindeki alçı oranının artışının doğal sonucu olarak prizlenme ile çökelen dihidrat alçı miktarı da artmış olur. Agrega tanecikleri çevresine ve ara boşluklara daha fazla alçı çökelerek gözenekliliği ve dolayısıyla yüzey pürüzlülüğünü bir noktaya kadar azaltır. Unutulmamalıdır ki gerçekleştirilen döküm işlemi basınçlı vakum dökümdür. Vakum destekli doldurmanın sağlıklı uygulanabilmesi için kalıbın belirli bir gözenek oranına sahip olması gerekmektedir. Artan alçı miktarı gözenek oranını azalttığından, belli bir değerden sonra vakum desteği zayıflayabilir.

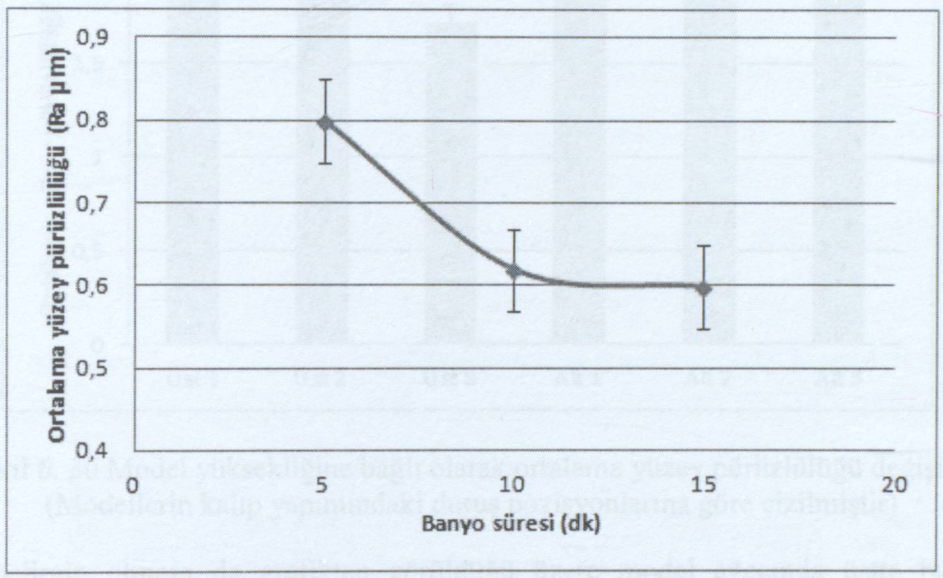
6.5.5 Alçı Morfolojisinin Etkisi

Alçı bağlı 46 ve 47 numaralı bileşimler alçı morfolojisinin nasıl değişebileceğini ve bunun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla tasarlanmış ve denemiştir. Bu her iki bileşim de diğerlerinden farklı olarak % 1,1 oranında SE5, 47 numaralı bileşim de 46'dan farklı olarak % 0,3 potasyum sülfat (PS) içermektedir. Laboratuvarda üretilen alçı bağlı kalıp malzemelerinde kullanılan alçı, ticari ürünlerin içerdiği gibi belirgin şekilde iğnesel bir kristalleşme göstermemektedir. Şekil 6. 12 ve 13'te görülen SEM görüntülerinde bu fark barizdir. Katkı maddesi olarak kullanılan SE5 iğnesel büyümeyi teşvik etmektedir. Hemen hemen tüm bileşimlerde kullanılan potasyum sülfat (PS) priz süresini dengeleyen, alçı kristalleri için çekirdekleme görevi gören bir katkı maddesidir. Şekil 6. 10, 11, 12 ve 13 'da sırasıyla 21, 37, 46 ve 47 numaralı bileşimlere ait mikro yapılar görünmektedir. 21 ve 37 numaralı bileşimlerde alçı kristalleri eş eksenlidir, SE5 katkısı 46 ve 47 numaralı bileşimlerde alçının belirgin şekilde iğnesel kristalleşmesini sağlamıştır. Bu iki bileşimin mikro yapıları kendi aralarında kıyaslandığında, potasyum sülfat (PS) içeren 47 numaralı bileşimde iğnesel kristal oranının daha az olduğu; eş eksenli kristallerin yoğun olarak bulunduğu görülmektedir. Buradan potasyum sülfatın iğnesel büyümeyi bastırdığı anlaşılmaktadır. Bileşim olarak neredeyse aynı olan 46 ve 47 numaralı bileşimlerin yüzey pürüzlülük değerleri karşılaştırılacak olursa 46 numaralı bileşimin her üç basamakta da pürüzlülük değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Alçının iğnesel olarak kristalleşmesi yüzey kalitesini arttırıcı etki göstermektedir. Alçı bağlı 1 numaralı referans malzemesinin mikro yapı görüntülerinde (Şekil 6. 14, 15) alçının neredeyse tamamen iğnesel olarak kristalleştiği görülmektedir. Bu malzemenin gümüş dökümlerde oldukça yüksek yüzey kalitesi göstermesinin sebebi budur.

6.5.6 Asit Banyosunda Tutma Süresi Etkisi

Endüstriyel uygulamalarda dereceli hassas döküm kalıbından çıkan gümüş döküm ağaçları, sıcak bir asit çözeltisi banyosuna alınarak oksit temizleme işlemine tabi tutulur. Bu işlemin süresi ortalama 5 dakikadır ve kalıptan siyah olarak çıkan döküm ağaçları bu işlem sonucunda beyaz renge dönüşür. Deneysel çalışmaların bir bölümünün yürütüldüğü Goldaş A.Ş. dökümhanesinde tüm dökümlere bu işlem % 25 sülfürik asit (H_2SO_4) çözelti banyosu ile uygulanmıştır. Temizleme banyosunun aşındırıcılığının yüzey kalitesi üzerinde belirli bir etkisi olduğu kuşkusuzdur. Bu etkiyi belirlemek için

alçı bağlı bileşimlerden 22 numaralı bileşime dökülen numune seçilerek sırasıyla 5, 10 ve 15 dakika süreyle aynı banyoda tutulmuş ve yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür, Numunenin 3. basamağından ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri sırasıyla 0,799 µm, 0,619 µm ve 0,598 µm'dir. Bu veriler ile çizilen eğri Şekil 6. 29'da görülmektedir.



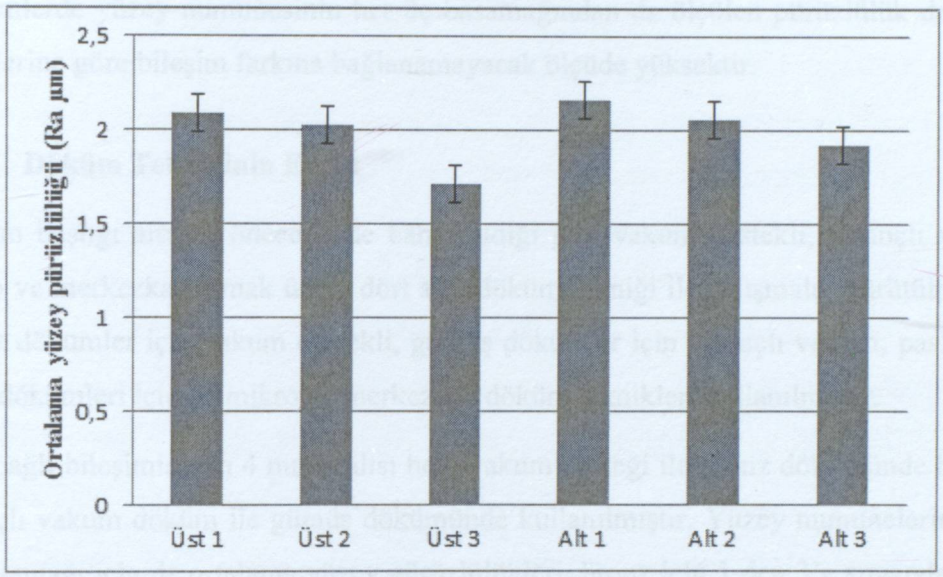
Şekil 6. 29 Asit çözeltisi banyosunda tutma süresinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Asit çözeltisi banyosu dökümden gelen yüzeydeki oksitleri çözdükten sonra döküm parçanın yüzeyini kimyasal olarak dağlamaya devam etmektedir. Banyoda tutma süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü giderek azalmaktadır.

6.5.7 Modelin Ağaçtaki Yerinin Etkisi

Dereceli hassas döküm kalıplarının prizlenme süresi boyunca meydana gelebilecek segregasyon, kalıbın farklı bölgelerinde farklı boyutta partiküllerin toplanmasına ve model temas bölgelerindeki su/toz oranının yüksekliğe bağlı olarak değişmesine neden olur. Stokes kanununa bağlı olarak kalıbın üst bölgelerinde su oranı artarken iri boyutlu partiküller de kalıbın altına doğru çökecektir. Bu durumda model ağacında farklı yükseklikte olan döküm parçaların yüzey pürüzlüğü de birbirinden farklı olabilir. Böyle bir durumun olup olmadığını saptayabilmek amacıyla, 41 numaralı alçı bağlı bileşimden yapılan kalıpta model ağacının üstüne ve altına birer adet yüzey pürüzlüğü numunesi kaynatılarak döküm yapılmıştır. İki modelin uç noktaları arasında 150 mm'lik bir yükseklik farkı oluşturulmuştur. Bu iki yüzey numunesinin her üç basamağından da

ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ile çizilen histogram Şekil 6. 30'da görülmektedir.



Şekil 6. 30 Model yüksekliğine bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimi (Modellerin kalıp yapımındaki duruş pozisyonlarına göre çizilmiştir)

Çok belirgin olmasa da grafikten görüldüğü üzere model ağacında üstte bulunan numunenin her basamaktaki ortalama yüzey pürüzlüğünün, altta bulunandan daha düşük olduğudur. Bunun sebebi büyük oranda prizlenme sırasında meydana gelen segregasyondur. Ancak bu durumu destekleyen bir neden daha vardır. Kalıp yapım işleminde üstte olan model döküm sırasında altta kalır çünkü döküm anında kalıp terstir ve sıvı metal kalıba tabanından doldurulur. Bu durumda alt bölgelerdeki hidrostatik basınç üst bölgelerden daha yüksek olacaktır ve bu basınç farkı yüzey özelliklerini değiştirecektir. Grafikte görülen durumu tam tersine çevirmek de gayet basittir. Karışım gereğinden fazla suyla hazırlanırsa sızmadan dolayı üst bölgelerde meydana gelecek aşırı su birikmesi, üst parçanın yüzey pürüzlülüğünü arttıracaktır.

6.5.8 Sıvı Metal Kalitesinin Etkisi

Hiç şüphesiz ki model, kalıp ve döküm işlemi değişkenleri kadar dökülen metalin durumu, içeriği ve temizliği de yüzey kalitesini yakından ilgilendirir. Deneysel çalışmalarda Goldaş A.Ş. dökümhanesinde yapılan gümüş dökümlerinde çoğunlukla primer ve rafine edilmiş gümüş kullanılmıştır. Alçı bağlı bileşimlerden 35, 40, 44 ve 45 numaralı bileşimlerin dökümlerinde ise hiçbir bitirme ve rafinasyon işlemine tabi tutulmamış iç hurda olarak nitelendirilen yolluk ve takı parçaları ergitilmiştir. Bu

dökümlerdeki şarj malzemesinin yüksek oksit içeriği yüzey kalitesini kötü yönde etkilemiştir. Yüzey pürüzlülüğü çizelgesinden (Çizelge 6. 2) görüleceği üzere adı geçen bileşimlerde yüzey numunesinin her üç basamağından da ölçülen pürüzlülük değerleri diğerlerine göre bileşim farkına bağlanamayacak ölçüde yüksektir.

6.5.9 Döküm Tekniğinin Etkisi

Döküm başlığı altında önceden de bahsedildiği gibi vakum destekli, basınçlı vakum, mikro ve merkezkaç olmak üzere dört ayrı döküm tekniği ile çalışmalar yürütülmüştür. Bronz dökümler için vakum destekli, gümüş dökümler için basınçlı vakum, paslanmaz çelik dökümleri için de mikro ve merkezkaç döküm teknikleri kullanılmıştır.

Alçı bağlı bileşimlerden 4 numaralısı hem vakum desteği ile bronz dökümünde hem de basınçlı vakum döküm ile gümüş dökümünde kullanılmıştır. Yüzey numunelerinin her üç basamağı için de ortalama yüzey pürüzlülükleri, bronz için 1 den 3'e sırasıyla 1,513 µm, 1,276 µm, 0,932 µm ve gümüş için de 1 den 3'e sırasıyla 0,832 µm, 0,949 µm, 0,767 µm'dir. Her ne kadar metal türleri farklı olsa da vakum desteğine ilave olarak uygulanan üst basıncın yüzey kalitesini arttırdığı söylenebilir.

Paslanmaz çelik dökümlerinde uygulanan mikro döküm işleminde ergitme vakum altında gerçekleştirilir; pota kalıba devrilerek doldurulur ve bu sırada üst basınç uygulanır. Merkezkaç dökümde ise vakum altında ergitilen metal, potanın devrilmesiyle ortalama 500 d/d hızla dönmekte olan kalıba üstten doldurulur. YAÇ bağlı bileşiklerden 2 numaralısı ile bu her iki döküm uygulaması da gerçekleştirilmiştir. Mikro ve merkezkaç dökümden elde edilen numunelerden ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri sırasıyla 3,786 µm ve 1,978 µm'dir. Aynı bileşim için bu yüksek oranda değişim tamamen döküm tekniği farkına bağlıdır. Merkezkaç dökümün oluşturduğu yüksek doldurma basıncı yüzey kalitesinin artmasını sağlamıştır.

6.5.10 Gözenek Çapının Etkisi

Dereceli hassas döküm kalıplarının gözenek karakteristiklerini belirlemek ve gözenek boyutunun yüzey özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla cıva porozimetresi testleri gerçekleştirilmiştir. Alçı bağlı bileşimlerden 24 ve 34 numaralı bileşim ile 1 numaralı referans numunesine porozite testi uygulanmıştır. Bu testlerden elde edilen normalize hacim-gözenek çapı histogramları sırasıyla Şekil 6. 19, 20 ve 21'de görülmektedir. 24

numaralı bileşimde gözenek çapı 0,5 µm – 200 µm arasında değişmektedir yoğunluk 100 µm civarındadır. Benzer şekilde 34 numaralı bileşimde de gözenek çapı 0,5 µm – 200 µm arasında değişmektedir ancak bu bileşimde gözenek yoğunluğu 1-2 µm çapta yoğunlaşmaktadır. Laboratuvarda geliştirilen bileşimlerin aksine, 1 numaralı referans numunesinin gözenekleri oldukça geniştir, 10 µm – 250 µm arasında değişmektedir ve yoğunluk 200 µm ve üzerindedir. Bu üç kalıp malzemesi ile gerçekleştirilen basınçlı vakum dökümlerden alınan yüzey numunelerinin 3. basamaklarından ölçülen ortalama pürüzlülük değerleri sırasıyla 0,809 µm, 1,207 µm ve 0,458 µm'dir. Geniş gözenekli kalıpların kaba yüzey vermesi düşünülebilir. Ancak burada uygulanan döküm işlemi vakum desteklidir ve geniş gözenekler vakum ile sıvı metal doldurmada daha avantajlı olmaktadır. Bu nedenle, 1 numaralı referansın sağladığı yüzey pürüzlülük değeri bileşim 24'ten, onunki de bileşim 34'ten daha düşüktür.

Yüksek sıcaklık kalıp malzemeleri grubundan porozite testleri, YAÇ bağlı 3 numaralı bileşim ile fosfat bağlı 1 numaralı referans malzemesine uygulanmıştır. Bu numunelere ait normalize hacim – gözenek çapı histogramları Şekil 6. 22 ve 23'te verilmiştir. YAÇ bağlı 3 numaralı bileşimin gözenek çapları 0,02 µm – 200 µm gibi oldukça geniş bir aralıkta değişmektedir ve yoğunluk 0,1 µm – 0,2 µm arasında yükselmektedir. Fosfat bağlı referans 1'in gözenek çapı 30 µm – 250 µm arasında değişiklik gösterir ve yoğunluk 50 µm – 200 µm arasında yüksektir. Bu kalıp malzemeleri ile gerçekleştirilen paslanmaz çelik mikro dökümlerden elde edilen parçalardan ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri sırasıyla 3,548 µm ve 3,902 µm'dir. Alçı bağlı kalıpların dökümünün aksine mikro dökümlerde vakum desteği yoktur. Kalıplar gravite ve bir miktar üst basınç ile doldurulmaktadır. Buna bağlı olarak da gözenek çapı daha dar olan YAÇ bağlı 3 numaralı bileşim, fosfat bağlı 1 numaralı bileşime göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü vermiştir. Tane boyutları arasındaki fark göz önüne alınacak olursa, fosfat referans 1 ile YAÇ bağlı 3 numaralı bileşimin agregası olan molokitin d (0,9) değerleri sırasıyla 18,939 µm ve 66,208 µm'dir. Aradaki bu büyük farka rağmen gözenek boyutu farkından dolayı YAÇ bağlı 3 numaralı bileşim nispeten daha iyi yüzey vermiştir.

6.6 Boyutsal Hassasiyete Etki Eden Unsurlar

Dereceli hassas dökümde parçaların nihai boyutları kalıbın prizlenme ve ısıl genleşmesi ile dökülen metalin toplam büzülmesine bağlıdır. Kalıbın prizlenme ve ısıl genleşme toplamı metalin büzülmesinden fazlaysa döküm parça modelinden daha büyük

olacaktır, tersi durumda da daha küçük olacaktır. Bu durumda kalıp malzemesi tasarımında boyutsal hassasiyet üzerinde çalışırken prizlenme genleşmesini ve ısıl genleşmeyi etkileyen unsurları ayrı ayrı göz önüne almak gerekmektedir.

6.6.1 Prizlenme Genleşmesine Etki Eden Unsurlar

Prizlenme, kalıp çamurunun sertleşmesi, prizlenme genleşmesi de kalıp çamurunun ilk sertleşmesinden bağlayıcı hidratasyonu tamamlanıncaya kadar meydana gelen boyutsal artış olarak tanımlanabilir. Bağlayıcı bileşenler karışımdaki su ile reaksiyona girerek hidrate olur; bu işlem devam ederken hidrat kristalleri büyüme gösterir ve sonuçta yapının boyutlarını değiştirir. Buradan da anlaşıldığı üzere prizlenme genleşmesi bağlayıcı bileşen ile doğrudan bağlantılıdır ve prizlenme genleşmesine etki eden unsurlar bağlayıcı cinsi, bağlayıcı kristal morfolojisi, su/toz oranı ve katkıların etkisi olarak sıralayabiliriz.

Deneysel çalışmalarda prizlenme genleşmeleri, numuneler sertleştiklerinde ve sonrasında birinci ve ikinci saatin sonunda doğrusal boyut ölçümleri ile belirlenmiştir. Test süresinin iki saat ile sınırlı tutulmasının sebebi endüstriyel ürünlerin hidratasyonunun bu süre içerisinde tamamlanması ve dökümhanelerde en fazla iki saat beklemenin ardından kalıpların pişirme işleminin başlatılmasıdır.

6.6.1.1 Bağlayıcı Cinsinin Etkisi

Tez kapsamında hem düşük sıcaklık hem de yüksek sıcaklık malzemeleriyle çalışmalar birlikte yürütüldüğü için alçı, fosfat ve YAÇ olmak üzere üç farklı bağlayıcı ile çalışma imkânı doğmuştur. Farklı bağlayıcılı bileşimlerin prizlenme genleşmeleri ölçülebilmiştir. Düşük döküm sıcaklığına yönelik geliştirilen ve kullanılan alçı bağlı kalıp malzemelerinden çeşitli bileşimlere ait prizlenme genleşmesi eğrileri Şekil 6. 1'de görülmektedir. Bu grafikten, laboratuvarda geliştirilen alçı bağlı kalıp malzemelerinin ortalama prizlenme genleşmesinin yaklaşık % 0,12 söylenebilir. 1 numaralı alçı bağlı referans ise Şekil 6. 2'de görüldüğü üzere % 0,50'nin üzerinde bir prizlenme genleşmesi göstermiştir. Yüksek döküm sıcaklığına yönelik olan YAÇ bağlı 1 ve 3 numaralı bileşimler ile fosfat bağlı referans 1'in prizlenme genleşmesi test eğrileri Şekil 6. 6'daki grafikte verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere yüksek sıcaklık grubu malzemeler en fazla % 0,045 oranında bir prizlenme genleşmesi göstermiştir. Prizlenme genleşmeleri

arasındaki bu farkın sebeplerini belirleyebilmek için bağlayıcı kristal morfolojilerini incelemekte fayda vardır.

6.6.1.2 Bağlayıcı Morfolojisinin Etkisi

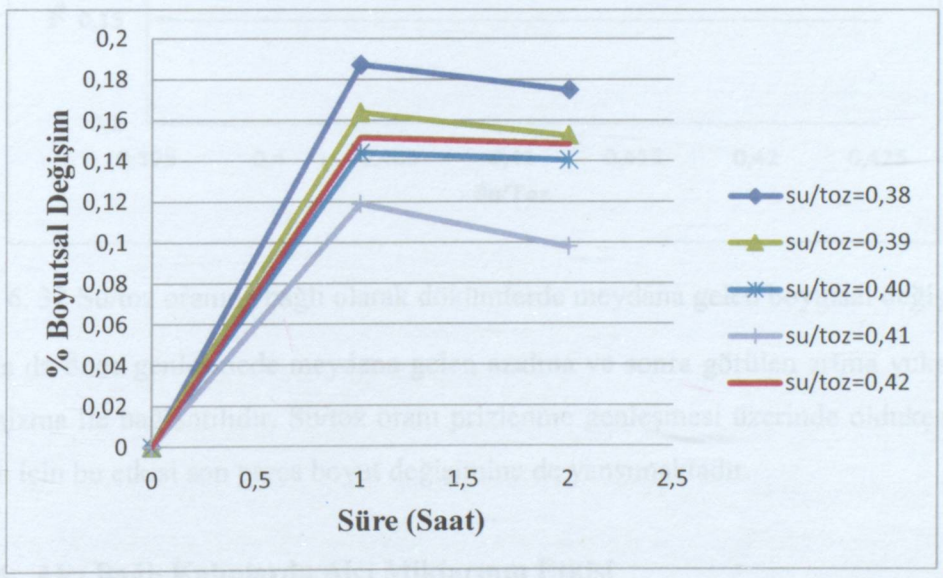
Karakterizasyon çalışmaları içerisinde tarama elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri, malzemelerin temel bileşenlerini görüntülemek, karşılaştırmak ve özellikle bağlayıcı morfolojisini belirlemek için yapılmıştır. Şekil 6.10, 11, 12, 13, 14 ve 15'te sırasıyla alçı bağlı bileşimler 21, 37, 46, 47 ve referans 1'e ait SEM mikro yapı görüntüleri görünmektedir. Şekil 6. 16, 17 ve 18'de de sırasıyla YAÇ bağlı 1, 3 ve fosfat bağlı referans1 'in mikro yapıları verilmiştir. Tüm mikro yapıların genel incelmesinde göze çarpan iki bileşen bağlayıcı ile agregadır ve bunlar görüntüler üzerinde tanımlanmıştır. Bağlayıcı morfolojisi açısından incelendiğin de alçı bağlılar ile YAÇ ve fosfat bağlılar arasında temel farklılıklar görünmektedir. Kalsiyum alüminat çimentosu ve magnezya fosfat çimentosu alçı kristallerine göre daha ince boyutludur ve ayrıca agregalar arası boşluklardan daha yüksek oranda agrega taneciklerinin üzerine tutunmuş ve çökelmiş durumdadır. Hidratasyon ile alçı diğer bağlayıcılara göre kristallerini daha fazla büyütebilmiştir ve bu kristaller agrega taneciklerinin üzerinden daha çok aralarındaki boşluklara yerleşmiştir. Alçı bağlı malzemelerin prizlenme genleşmelerinin nispeten daha yüksek olmasının arkasındaki itici güç, bu morfolojik farklılıktır.

Morfolojik açıdan, alçı kalıp malzemelerini kendi içinde de karşılaştırmak gerekmektedir. Çünkü alçı bağlı referans 1 ile laboratuvarda üretilen alçı bağlı malzemeler arasında oldukça yüksek prizlenme genleşmesi farkı vardır. Su/toz oranı 0,40 olduğunda referans 1 % 0,51 genleşme gösterirken alçı bağlılardan 30 numaralı bileşim % 0,22 genleşme göstermiştir. Aradaki bu fark, hidrate olmuş alçı kristallerinin şekilsel farklılığına bağlıdır. 21 ve 37 numaralı bileşimlere ait mikro yapı görüntülerinde alçı kristalleri çoğunlukla eş eksenli olarak görülmektedir, referans 1'e ait mikro yapı görüntüsünde ise alçı kristalleri bir ayrıt yönüne uzamış, çubuksu şekilde görülmektedir. Alçı kristallerinin belli bir yönde daha fazla büyüyerek ince uzun formda kristaller oluşturması prizlenme genleşmesini arttırıcı bir etki gösterebilmektedir. Ayrıca bu durum, tanecikler arasında geniş gözeneklerin de oluşmasının sebebidir ve porozimetre testlerinde bu durum ortaya çıkmıştır.

Çubuksu formda kristaller α-alçının karakteristik özelliğidir. Bu durumda referans 1'in içeriğindeki alçının tam α-alçı olduğu, laboratuvarda üretilen malzemelerin alçısının ise karışık olduğu ve katkı olarak kullanılan potasyum sülfatın (PS) iğnesel büyümeyi bastırdığı ve eş eksenli büyümeyi teşvik ettiği söylenebilir.

6.6.1.3 Su/Toz Oranının Etkisi

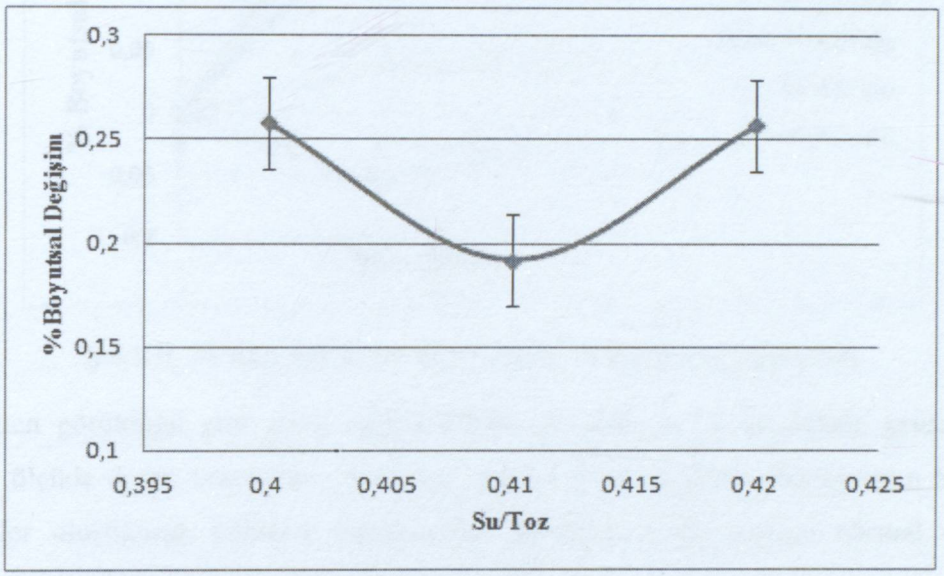
Su/Toz oranının prizlenme genleşmesi üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi amacıyla alçı bağlı 12 numaralı bileşimden sırasıyla su/toz oranı 0,38, 0,39, 0,40, 0,41 ve 0,42 olacak şekilde numuneler dökülerek prizlenme genleşmeleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlardan çizilen grafik Şekil 6. 31' de görülmektedir.



Şekil 6. 31 12 numaralı alçı bağlı bileşimin farklı su/toz oranlarında prizlenme genleşmesi

Dereceli hassas döküm kalıplarının akışkanlığını sağlayan serbest su, alçı kristallerinin büyüme mekanizması üzerinde de etkilidir. Prizlenme sırasında büyümekte olan alçı kristallerinin çevresini saran su filminin yüzey enerjisi, kristallerin büyümesini engelleyici ve dolayısıyla prizlenme genleşmesini azaltıcı bir etki göstermektedir. Su/toz oranında 0,38'den 0,41'e kadar olan artışta bu durum görülmektedir. Su/toz oranı 0,42 olduğunda bu defa prizlenme genleşmesinin arttığı görülmüştür. Fazla miktarda su higroskobik koşullarda prizlenme sağlamıştır, alçı kristalleri büyüyebilecekleri geniş boşluklar bulmuştur.

Su/toz oranının nihai parça boyutlarındaki etkisini araştırmak amacıyla alçı bağlı referans 1 ile 0,40, 0,41 ve 0,42 su/toz oranında kalıplar hazırlanmış ve bu kalıplara gümüş dökümleri yapılarak boyutsal değişimler ölçülmüştür. Bu veriler ile çizilen grafik Şekil 6. 32'de görülmektedir.



Şekil 6. 32 Su/toz oranına bağlı olarak dökümlerde meydana gelen boyutsal değişimler

Burada da önce genleşmede meydana gelen azalma ve sonra görülen artma yukarıdaki mekanizma ile bağlantılıdır. Su/toz oranı prizlenme genleşmesi üzerinde oldukça etkili olduğu için bu etkisi son parça boyut değişimine de yansımaktadır.

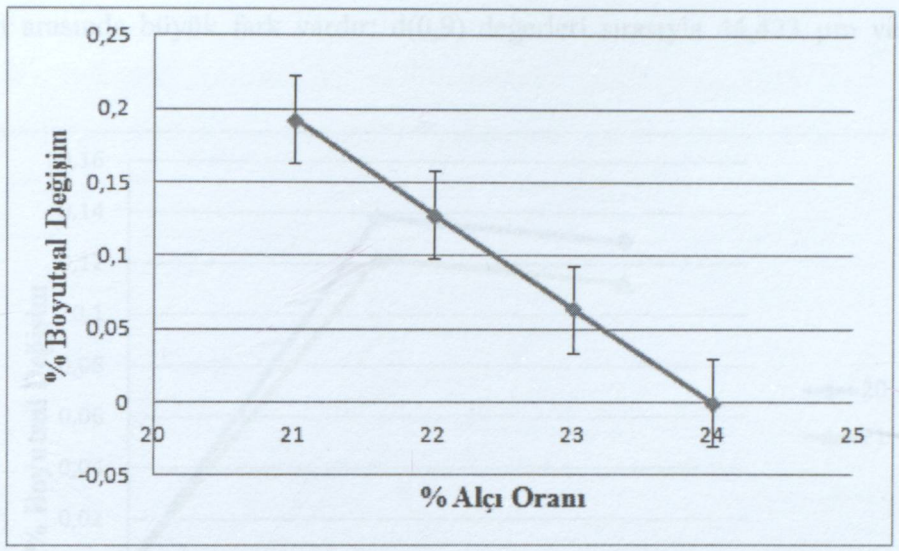
6.6.1.4 Alçı Bağlı Kalıplarda Alçı Miktarının Etkisi

Alçı miktarının prizlenme genleşmesi üzerindeki etkisinin belirlenmesi için prizlenme genleşmesi testi uygulanmış alçı bağlı 17, 30, 31, 39 ve 40 numaralı bileşimlerin genleşme eğrileri ile yeni bir grafik oluşturulmuştur ve bu grafik Şekil 6. 33'te görülmektedir. Adı geçen bileşimler sırasıyla % 25, 24, 23, 22 ve 21 oranında alçı içermektedir.

Şekil 6. 33 Alçı miktarına bağlı olarak prizlenme genleşmeleri

Grafikten görüldüğü gibi genel eğilim olarak alçı miktarı ile prizlenme genleşmesi büyük ölçüde doğru orantılıdır. Prizlenme genleşmesini sağlayan bağlayıcının hidrate kristaller oluşturarak bunların büyümesidir, bağlayıcı oranı artıkça normal olarak prizlenme genleşmesinin de artması beklenmelidir.

Boyutsal değişimler üzerinde bağlayıcıların kilit rol oynadığı belirlendikten sonra alçı bağlı malzemelerde değişen alçı oranın nihai parçaların boyutsal değişiminde nasıl bir rol oynadığı araştırılmıştır. Alçı bağlı malzemelerin bileşim ve boyutsal değişim çizelgeleri incelenmiştir. Seçilen 40, 39, 31, ve 30, numaralı bileşimler sırasıyla % 21, 22, 23 ve 24, oranında alçı içermektedir ve yine sırasıyla bronz dökümlerdeki boyutsal değişimleri % 0,193, 0,128, 0,064, ve 0'dır. Bu veriler yardımıyla çizilen eğri Şekil 6. 34'te görülmektedir.



Şekil 6. 34 Alçı miktarına bağlı olarak döküm parçalardaki boyutsal değişim oranı

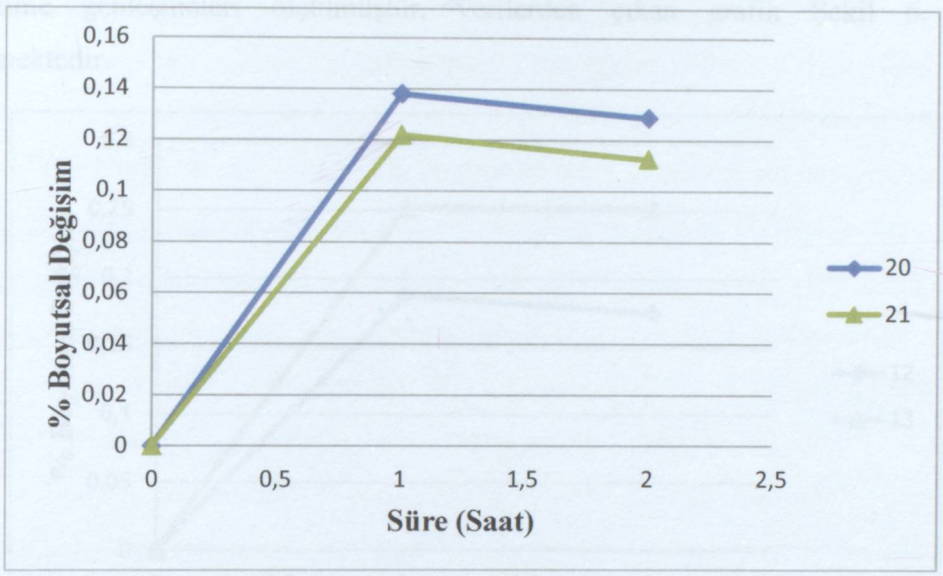
Düşük alçı oranlarında prizlenme genleşmesi de düşük olmasına rağmen nihai boyutsal değişimler de durum böyle görünmemektedir. % 21 oranında alçı içeren 40 numaralı bileşim % 0,037 oranında prizlenme genleşmesi ve % 0,193 nihai genleşme göstermiştir. Buna karşın % 0,22 prizlenme genleşmesi gösteren % 24 oranında alçı bulunduran 30 numaralı bileşim % 0 oranında nihai genleşme göstermiştir. Bir çelişki gibi görünen bu durumun sebebi ısıl genleşmedir. Isınan kalıpta hidrate alçı değişime uğrayarak, kristal suyunu kaybederek daralır, silika agrega ise genleşme gösterir. Düşük alçı oranlarındaki yüksek nihai genleşme, artan silika oranına bağlı olarak ısıl genleşmenin yükselmesine bağlıdır. % 21'den % 24'e kadar artan alçı oranında nihai genleşme düşmüştür. Buna karşın, yüksek oranda prizlenme genleşmesi gösteren kalıplarda alçı oranının artması, prizlenme genleşmesini teşvik ederek nihai genleşmeyi arttırabilir.

Isıl genleşmenin boyutsal değişimlere etkisi bölümünde, bu konu üzerinde daha detaylı olarak durulacaktır.

6.6.1.5 Agrega Boyutunun Etkisi

Prizlenme genleşmesi testi uygulanan alçı bağlı bileşimlerden 20 ve 21 numaralı bileşimin kompozisyonları incelendiğinde 20 numaranın % 24 Kuvars (b), % 10 Kuvars (d), 21 numaranın da % 17 Kuvars (b), %17 Kuvars (d) içerdiği, geri kalan bileşen oranlarının aynı olduğu görülmektedir. Şekil 6. 35'te görülen grafik bu iki bileşimin prizlenme genleşmesi değerlerinden oluşturulmuştur. Kuvars (b) ve (d)'nin tane

boyutları arasında büyük fark vardır; d(0,9) değerleri sırasıyla 44,423 µm ve 11,157 µm'dir.



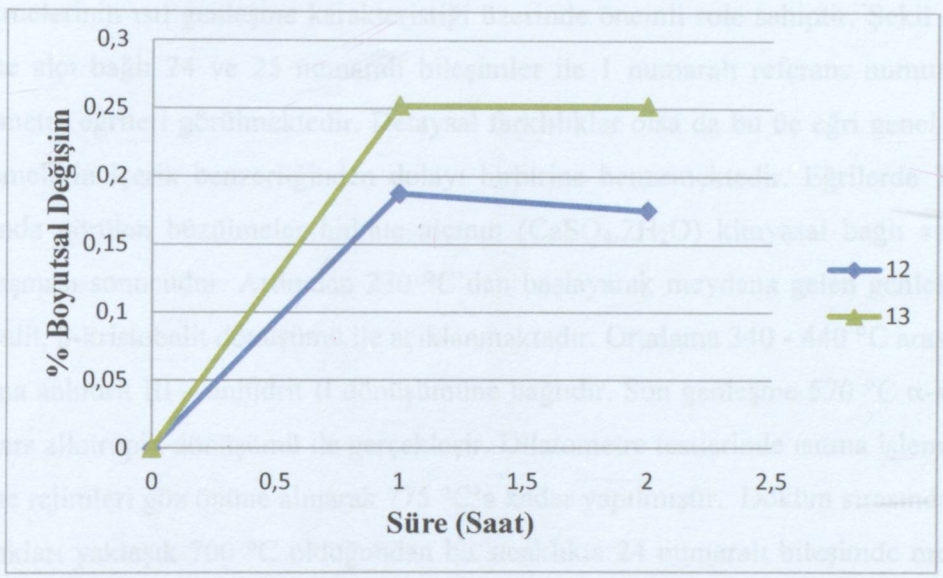
Şekil 6. 35 Alçı bağlı 20 ve 21 numaralı bileşimlerin prizlenme genleşmeleri

21 numaralı bileşimin 20 numaralıya göre prizlenme genleşmesi bir miktar daha düşüktür. Artan ince boyutlu agrega oranının yapıdaki gözenek boyutlarını küçültmesinden dolayı prizlenme genleşmesi sırasında alçı kristallerinin büyümesini baskıladığı düşünülmektedir. Son döküm parçaların boyutsal genleşmelerine göz atıldığında 20 numaralı bileşimin % 0,389, 21 numaralı bileşimin de % 0,193 oranında genleşme gösterdiği görülmektedir. Bu fark da prizlenme genleşmeleri arasındaki farkla tutarlıdır.

6.6.1.6 Katkıların Etkisi

Kontrol ilavesi olarak kullanılan katkıların bazıları boyutsal genleşmeyi arttırıcı yönde etki gösterebilmektedir. Deneysel çalışmalarda çeşitli katkı malzemeleri kullanılmıştır. Bunları içerisinde özellikle 80S isimli katkının, alçı bağlı kalıp malzemelerinde boyutsal genleşmeyi oldukça artırdığı belirlenmiştir. Alçı bağlı bileşimlerin boyutsal değişim çizelgesi incelendiğinde 80S içeren ve içermeyen bileşimler arasında büyük fark olduğu gözlemlenebilir. 80S içermeyen bileşimler çoğunlukla negatif nihai boyutsal değişim göstermiştir yani prizlenme ve ısıl genleşme toplamları metal büzülmesinin altında kalmıştır.

Alçı bağlı bileşimlerden 12 ve 13 numaralı bileşimler arasındaki tek fark, 13 numaranın %0,20 oranında 80S içermesidir. Bu bileşimlerin su/toz oranı 0,38 olacak şekilde prizlenme genleşmeleri ölçülmüştür, verilerden çıkan grafik Şekil 6. 36'da görülmektedir.



Şekil 6. 36 Alçı bağlı 12 ve 13 numaralı bileşimlerin prizlenme genleşmeleri

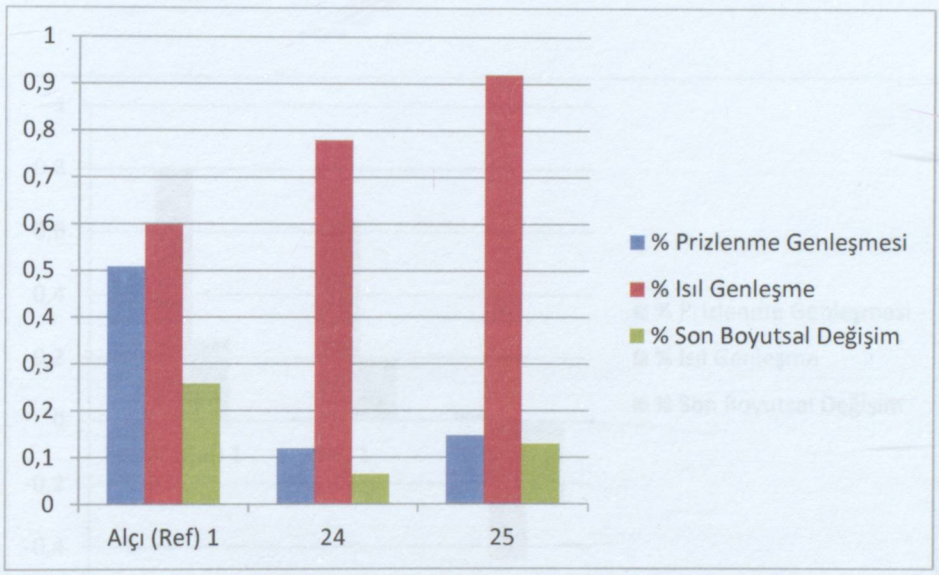
80S katkısı, aynı bileşimdeki malzemelerde prizlenme genleşmesini arttırıcı etki göstermektedir. Buna bağlı olarak da 80S içeren bileşimlerin, içermeyenlere göre nihai genleşmeleri belirgin oranda yüksek olmaktadır. Su tutucu özelliği ile 80S, alçı kristallerinin daha fazla büyüyebilmesine olanak sağlamaktadır.

6.6.2 Isıl Genleşmeye Etki Eden Unsurlar

Dereceli hassas döküm işlemi sıcak kalıba yapılan bir döküm işlemidir ve kalıplar belirli bir rejime uygun olarak kademeli bir şekilde pişirilir. Yükselen sıcaklıkla birlikte meydana gelen boyutsal değişimler kalıp malzemesinin bağlayıcı ve agrega bileşenlerine, bunların cinsine, geçirdikleri dönüşümlere ve oranlarına bağlıdır. Deneysel çalışmalarda kullanılan kalıp malzemelerinin ısıl genleşme davranışlarını belirlemek amacıyla dilatometre testleri gerçekleştirilmiştir. Düşük sıcaklık malzemeleri olan alçı bağlı kalıp malzemeleri ile yüksek sıcaklık grubu YAÇ ve fosfat bağlı malzemeler ayrı ayrı değerlendirmeye alınmıştır.

Şekil 5. 29'da alçı bağlı 1 numaralı referans malzemesinin X-ışınları difraktometresi görünmektedir. Referans ticari malzeme bağlayıcı olarak alçı, agrega olarak da kuvars ve kristobalit içermektedir. Laboratuvarda hazırlanan alçı bağlı kalıp malzemelerinin de temel bileşimi bu şekilde tasarlanmıştır. Bu temel bileşim, alçı bağlı kalıp malzemelerinin ısıl genleşme karakteristiği üzerinde önemli role sahiptir. Şekil 6. 3, 4 ve 5'te alçı bağlı 24 ve 25 numaralı bileşimler ile 1 numaralı referans numunesinin dilatometre eğrileri görülmektedir. Detaysal farklılıklar olsa da bu üç eğri genel olarak malzemelerin içerik benzerliğinden dolayı birbirine benzemektedir. Eğrilerde 200 °C civarında görülen büzülmeler hidrate alçının ($CaSO_4.2H_2O$) kimyasal bağlı suyunun uzaklaşması sonucudur. Ardından 230 °C'dan başlayarak meydana gelen genleşme α-kritobalit, β-kristobalit dönüşümü ile açıklanmaktadır. Ortalama 340 - 440 °C arasındaki daralma anhidrit III – anhidrit II dönüşümüne bağlıdır. Son genleşme 570 °C α-kuvars, β-kuvars allotropik dönüşümü ile gerçekleşir. Dilatometre testlerinde ısıtma işlemi kalıp pişirme rejimleri göz önüne alınarak 775 °C'a kadar yapılmıştır. Döküm sırasında kalıp sıcaklıkları yaklaşık 700 °C olduğundan bu sıcaklıkta 24 numaralı bileşimde meydana gelen genleşme % 0,78, 25 numaralı bileşimde % 0,92 ve 1 numaralı referansta % 0,60'dır. Dilatometre testleri için seçilen bileşimlerden 24 numaralı olanı % 25, 25 numaralı olanı da % 23 alçı içermektedir. Kalıp pişerken alçı büzülmeye çalışırken silika genleşemeye çalışır ve bu büzülmeyi dengeler. Düşük alçı içeriğindeki yüksek ısıl genleşme silika oranının fazla olmasına bağlıdır. 1 numaralı alçı bağlı referans malzemesinin ısıl genleşmesi laboratuvarda üretilen bileşimlerden daha düşük çıkmıştır. Buradan referans malzemenin alçı oranının diğerlerinden daha yüksek olduğu düşünülebilir. Bu malzemenin yüksek prizlenme genleşmesi göstermesi ve düşük yüzey pürüzlüğü vermesinin sebebi bu olabilir. Alçı bağlı kalıp malzemeleri ile yürütülen çalışmalarda çok sayıda bileşim ile çalışılmıştır, bunların bir kısmının kompozisyonu birbirine oldukça yakındır. Isıl genleşme testleri için seçilen 24 ve 25 numaralı bileşimlere prizlenme genleşmesi testi uygulanmamıştır, ancak prizlenme genleşmesi testi uygulanan bileşimlerden 20 numaralı olanı içerik olarak 24'e, 31 numaralı olanı da 25'e oldukça yakındır. 20 ve 31 numaralı bileşimlerin gösterdiği prizlenme genleşmelerini büyük olasılıkla sırasıyla 24 ve 25 numaralı bileşimlerin de göstermesi gerekmektedir. Grafik ve tablolardan gerekli veriler toplanarak alçı bağlı malzemeler için prizlenme, ısıl genleşme ile son boyutsal değişimi gösteren bir histogram grafik oluşturulmuştur ve Şekil 6. 37'de görülmektedir. 1 numaralı referans malzemesi düşük

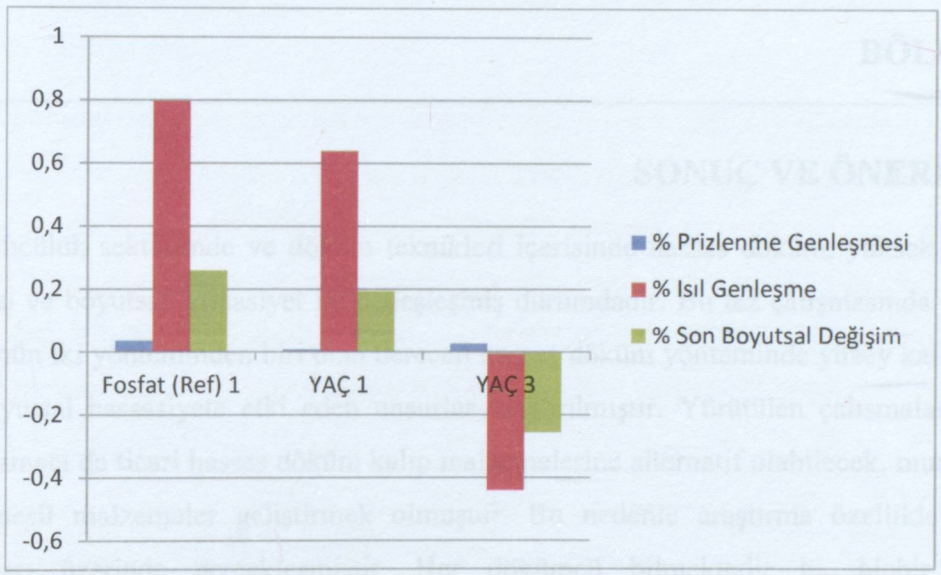
ısıl genleşmesini yüksek prizlenme genleşmesi ile karşılar ve gümüş dökümde % 0,258 son boyutsal değişim gösterir. Laboratuvarda üretilen kalıp malzemelerini temsil eden 24 ve 25 numaralı bileşimler ise yüksek ısıl genleşme göstermelerine rağmen prizlenme genleşmeleri düşük olduğu için son boyutsal değişimde referans 1 kadar genleşme gösterememiştir.



Şekil 6. 37 Alçı bağlı malzemelerin prizlenme ve ısıl genleşmeleri ile son boyutsal değişimleri

Yüksek sıcaklık grubu kalıp malzemeleri olan YAÇ bağlı ve referans fosfat bağlı kalıp malzemeleri oldukça düşük prizlenme genleşmesi göstermiştir ve bu malzemelerde son boyutsal değişim üzerinde etkili olan ısıl genleşmedir. YAÇ bağlı bileşimlerden 1 ve 3 numara ile fosfat bağlı 1 numaralı referans malzeme numunelerine dilatometre testi uygulanmıştır ve dilatometre eğrileri Şekil 6. 7, 8 ve 9'da görülmektedir. Şekil 5. 42' de görülen fosfat bağlı 1 numaralı referans malzemenin X-ışınları difraksiyonuna göre bu malzeme agrega olarak kuvars ve kristobalit içermektedir, dilatometre eğrisi de bu içeriği desteklemektedir. Fosfat bağlı referans 1, 700 °C'da % 0,80 ısıl genleşme göstermiştir. YAÇ bağlı 1 numaralı bileşimin dilatometre eğrisi, fosfat bağlı referans 1'in eğrisine oldukça benzemektedir. Buradan yola çıkarak, YAÇ bağlı malzemelerde de fosfat bağlı malzemelerdeki gibi ısıl boyutsal değişimlerin agreganın kontrolünde olduğu görülmektedir. YAÇ bağlı 1 numaralı bileşim agrega olarak kuvars içermektedir ve 700 °C'da % 0,64 ısıl genleşme göstermiştir. YAÇ bağlı 3 numaralı bileşimin agregası molokittir, bu bileşimde sıcaklık artışıyla büzülme meydana gelmiştir. 500 °C'a kadar yaklaşık % 0,6 oranında bir büzülme meydana gelmiş daha sonra malzeme

genleşme göstererek 700 °C'a, büzülme oranı % 0,44'e kadar gerilemiştir. Yüksek refrakterliği ve yüksek yüzey kalitesi yönünden tercih edilen molokit boyutsal hassasiyet açısından zayıf kalmıştır. Fosfat bağlı referans 1 ile YAÇ bağlı 1 ve 3 numaralı bileşimlerin prizlenme ve ısıl genleşme ile son boyutsal değişimlerini gösteren histogram grafik Şekil 6. 38' de görülmektedir.



Şekil 6. 38 Yüksek sıcaklık grubu malzemelerin prizlenme, ve ısıl genleşmeleri ile son boyutsal değişimleri

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Dökümcülük sektöründe ve döküm teknikleri içerisinde hassas döküm, yüksek yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyet ile özdeşleşmiş durumdadır. Bu tez çalışmasında hassas dökümün iki yönteminden biri olan dereceli hassas döküm yönteminde yüzey kalitesine ve boyutsal hassasiyete etki eden unsurlar araştırılmıştır. Yürütülen çalışmaların bir diğer amacı da ticari hassas döküm kalıp malzemelerine alternatif olabilecek, muadil ve yeni nesil malzemeler geliştirmek olmuştur. Bu nedenle araştırma özellikle kalıp unsurları üzerinde gerçekleşmiştir. Her dökümcü bilmektedir ki, hiçbir kalıp modelinden, hiçbir döküm parça da kalıbından daha iyi değildir. Şüphesiz ki bu zincirde ara halka olan kalıp, döküm kalitesi üzerinde en etkili olanıdır. Tek adımda nihai şekilli parça üretiminin yapıldığı hassas dökümde, kalıbın döküm kalitesi üzerindeki etkisi çok daha baskındır.

Dereceli hassas döküm yöntemi ile yapılan dökümle en ince şekillendirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle yöntem, büyük fabrikalarda değil, küçük kuyumcu dökümhanelerinde ve diş protez laboratuvarlarında uygulanmaktadır. Hitap ettiği sektörler, geleneksel döküm sektörlerinin oldukça dışında kaldığı için, dökümcülük denildiğinde dereceli hassas döküm yöntemi pek akla gelmez.

Endüstriyel olarak uygulanan pek çok döküm yönteminde olduğu gibi dereceli hassas döküm yönteminde de harcanabilir tek kullanımlık kalıplar kullanılmaktadır. Döküm işleminin ardından parçalanarak uzaklaştırılan kalıp malzemesinin, kalıplama işleminde yeniden kullanılması için geri dönüştürülmesi söz konusu değildir. Harcanabilen ve geri dönüştürülemeyen kalıp malzemeleri döküm maliyetlerinde her zaman en yüksek girdilerden birini oluşturmaktadır. Ülkemiz, dereceli hassas döküm yöntemi ile üretimin

en çok yapıldığı kuyumculuk alanında dünya çapında bir üretici durumundadır ve çoğu kritik malzemede olduğu gibi kalıp malzemelerinde de dışarıya bağımlı durumdadır. Kalıp malzemelerinde dünya piyasasına, ikisi İngiliz, ikisi de Amerikan olmak üzere dört büyük firma hâkimdir. Uzun yıllardır bu firmalar, farklı ihtiyaç ve kullanımlara yönelik çok çeşitli kalıp malzemeleri geliştirmekte, üretmekte ve piyasaya sürmektedir. Geniş ürün yelpazeleri ile her biri önemli bir marka olmayı başarmıştır. Deneysel çalışmalarda referans olarak adlandırılan ticari kalıp malzemeleri bu firmaların ürünleri arasından seçilmiştir.

Dökülen metal ve alaşımların döküm sıcaklıklarına ve buna bağlı olarak kullanılan kalıp malzemelerine göre dereceli hassas döküm yönteminde, düşük ve yüksek sıcaklık dökümleri olmak üzere doğal bir ayrım vardır. Bu doğal ayrıma deneysel çalışmalarda da uyulmuş, düşük sıcaklık dökümleri için alçı bağlı malzemeler, yüksek sıcaklık dökümleri için de YAÇ bağlı malzemeler ile çalışılmıştır. Tartışmaya da bu ayrıma uyarak devam etmek ve sonrasında yüzey kalitesine ve boyutsal hassasiyete etki eden unsurlara değinmek faydalı olacaktır.

7.1 Alçı Bağlı Kalıp Malzemeleri

Alçı bol bulunan, kolay üretilen ucuz bir malzemedir. Bunlar ve diğer birçok üstün özelliği sayesinde alçı, başta inşaat sektörü olmak üzere pek çok alanda vazgeçilmez bir malzeme olmuştur. Alçı bağlı kalıp malzemeleri, altın ve gümüş alaşımları gibi nispeten düşük ergime sıcaklığına sahip kıymetli metallerden takı üretiminde en çok kullanılan dereceli hassas döküm kalıp malzemeleridir. Döküm sıcaklığı 1200 °C'a kadar olan dökümlerde kalıp malzemeleri için kullanılabilecek en iyi bağlayıcı alçıdır ve bu açıdan alternatifsizdir. Diğer bağlayıcılı malzemeler de elbette düşük döküm sıcaklıkları için kullanılabilir. Ancak bunların hiçbiri, alçı kadar kullanım kolaylığı ve esnekliği sağlamaz ve alçı kadar ekonomik olamaz. Deneysel çalışmalar tasarlanırken bu durum göz önüne alınmıştır. Bileşim olarak alçı bağlı ticari kalıp malzemelerine benzeyen kalıp malzemeleri geliştirilerek dökümlerin yüzey ve boyut özelliklerini etkileyen unsurlar bu malzemeler kullanılarak araştırılmıştır. Laboratuvarda üretilen alçı bağlı kalıp malzemelerinin ham madde teminleri, geliştirilmiş mevcut malzemelerle rekabet edebilmeleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Ekonomik olarak alternatiflerinin gerisinde kalan bir malzeme geliştirmenin mühendislik açısından bir öneme sahip olmadığı aşikârdır. Agrega olarak kullanılan kristaobalit ve bazı kontrol ilaveleri hariç

diğer tüm malzemeler yerli üretici ve tedarikçilerden karşılanmıştır. Yurt içinde kristobalit üretimi yapılmadığından bu malzemeyi ithal olarak kullanmak zorunlu olmuştur.

Deneysel çalışmalar iki koldan yürütülmüştür; ancak alçı bağlı kalıp malzemelerinin buradaki payı daha büyüktür. Çok sayıda bileşim üzerinde çalışılmış ve bunların kırk yedi tanesi ile döküm deneyleri de yapılmış ve elde edilen sonuçlar tez içerisinde yer almıştır. Akışkanlık ve priz süresinin optimize edilmesi deneysel çalışmalarda en çok vakit alan ön işlemlerdir. Değişen agrega ve bağlayıcı oranına göre veya kullanılan farklı katkılara göre akışkanlık ve priz süresi değişim göstermektedir. Bu değişkenleri çalışılabilir sınırlar içerisinde tutmak için her bileşim için optimizasyon yapılmıştır. PMS oranı değiştirilerek akışkanlık; maya (sitrik asit) oranı değiştirilerek de priz süresi optimize edilmiştir.

Kalıp malzemesi geliştirmek çalışma içerisinde büyük bir yer tutmasına rağmen asıl araştırma bundan sonra başlamaktadır. Döküm yapmadan döküm kalitesi üzerinde yorum yapmaya imkân yoktur. Dökümlerin yüzey bitimlerini ve boyutsal değişimlerini araştırmak için tasarlanan özel numunelerin farklı alaşımlar ile dökümleri yapılmıştır. Bu dökümler üzerinden, geliştirilen kalıp malzemelerinin performansları ve döküm kalitesini etkileyen unsurlar araştırılmıştır. Deneysel sonuçlara bakılarak söylenebilir ki referans olarak kabul edilen ticari kalıp malzemeleri ile benzer içeriğe sahip ve dökümler üzerinde benzer özellikler sergileyen alçı bağlı kalıp malzemeleri geliştirilebilmiştir. Gerek üniversite döküm laboratuvarında gerekse Goldaş A.Ş. dökümhanesinde bu kalıp malzemeleri ile çok sayıda tam, eksiksiz, sorunsuz dökümler başarıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda alçı bağlı kalıp malzemesi bileşimlerinin geliştirilmesinde özellikle agrega boyutu ve oranlarının değişimi üzerinde durulmuştur.

Alçı morfolojisinin değiştirilmesi yönünde çalışmalar tez çalışmasının son kısmında başlatılmıştır ve bu konudaki çalışmanın oldukça genişletilebileceği fark edilmiştir. Öncelikle alçı morfolojisinin değişim ve dönüşüm mekanizmaları üzerinde yürütülecek bir çalışma ile farklı alçı bağlı kalıp malzemesi bileşenleri geliştirilebilir. Bu tez çalışması ile kalıp malzemesi geliştirilmesi sona ermeyecek ve çalışma bu yönde devam edecektir.

7.2 Yüksek Alümina Çimentosu Bağlı Kalıp Malzemeleri

Dereceli hassas dökümde yüksek sıcaklık dökümleri söz konusu olduğunda alçı bağlı kalıp malzemelerinin yerini fosfat bağlı kalıp malzemeleri alır, bu malzemeler de alçı bağlılar gibi silika esaslı agregalar içermektedir. Fosfat bağlı kalıp malzemelerinin kullanımı alçı bağlılar kadar kolay değildir. Prizlenme süreleri oldukça değişkendir ve akışkanları düşüktür. Dökümden sonra alçı gibi su içerisinde çözünmezler; dolayısıyla dağılabilirliği zayıf malzemelerdir. Deneysel çalışmalar tasarlanırken yüksek sıcaklık dökümleri için, içerik olarak fosfat bağlı ticari ürünlere benzeyen malzemeler yerine onlara alternatif olabilecek farklı içerikli malzemelerin geliştirilmesine karar verilmiştir. YAÇ bağlı kalıp malzemeleri bu şekilde ortaya çıkmıştır. YAÇ, çoğunlukla refrakter sanayinde kullanılan özel bir çimento türüdür, ticari olarak dereceli hassas döküm kalıbı malzemelerinde kullanıldığı bilinmektedir. Bu çimentoların Portland çimentosuna göre çok daha kısa sürede prizlenmesi ve yüksek ısıl dirence sahip olması yüksek sıcaklık döküm kalıpları için iyi bir bağlayıcı olabileceği düşünülmüştür. YAÇ'nu hazır temin etmek yerine laboratuvar şartlarında üretmenin, hem çimentonun özelliklerini kontrol etmede daha avantajlı olacağı hem de geliştirilen kalıp malzemesinin ekonomikliğini arttıracağı tespit edilmiştir. YAÇ üretimi için yerli malzemeler tercih edilmiş, ham madde olarak Niğde kalsiti (Niğkal) ve Seydişehir alüminası kullanılmıştır. Farklı sıcaklık, bileşim ve sürelerde YAÇ üretimi yapılmış, kalıp yapımına en uygun çimentonun % 50,5 alümina, % 49,5 kalsit karışımı ile 1400 °C'de yedi saat sürede üretildiği belirlenmiştir. Şekil 5. 55'de görülen YAÇ'nun X-ışınları difraktometresine göre çimento, vollastonit ($CaSiO_3$), mayenit ($Ca_{12}Al_{14}O_{33}$), kalsiyum monoalüminat ($CaAl_2O_4$) ve korund (Al_2O_3) içermektedir. Vollastonit, kalsit ve alümina içerisinde empürite olarak bulunan silikanın reaksiyonu ile oluştuğu düşünülmektedir. Mayenit, kalsiyum alüminat çimentoları içerisinde bulunan kimyasal formülü $12CaO.7Al_2O_3$ olan ve çimentoların kimyasal gösteriminde $C_{12}A_7$ olarak gösterilen bir bileşiktir. Kalsiyum alüminat gibi su ile çok hızlı tepkime vererek aşağıdaki reaksiyonda görüldüğü gibi hidrate olur [69], [70].

$$C_{12}A_7 + 51H \rightarrow 6(C_2AH_8) + AH_3 \qquad (7.1)$$

Kalsiyum monoalüminat ($CaAl_2O_4$), Al_2O_3 – CaO ikili sisteminde yer alan ve ergime noktası yaklaşık 1600 °C olan bir bileşiktir. Çimentoların kimyasal gösterimine göre

formülü CA'dır. Yüksek alümina çimentolarının hidrolik olarak sertleşmesinde etkili olan temel bileşiktir.

Kalsiyum monoalüminat geleneksel yöntemlerle 1300 °C'ın altında üretildiğinde CaO, $CaAl_4O_7$ ve $Ca_{12}Al_{14}O_{33}$ gibi emprüteler içerir. Başarılı bir üretim için çoklu öğütme ve yüksek sıcaklıkta pişirme (>1550 °C) gerekmektedir. [71], [72], [73], [74].

Kalsiyum monoalüminatın muhtemel hidratasyon reaksiyonları şu şekilde gerçekleşmektedir [48]:

$CA + 10H \rightarrow CAH_{10}$ (7.2)

$2CA + 11H \rightarrow C_2AH_8 + AH_3$ (7.3)

$3CA + 12H \rightarrow C_3AH_6 + 2AH_3$ (7.4)

$2CAH_{10} \rightarrow C_2AH_8 + AH_3 + 9H$ (7.5)

$3C_2AH_8 \rightarrow 2C_3AH_6 + AH_3 + 9H$ (7.6)

Mayenit ve mono kalsiyumalüminat, üretilen YAÇ'nun hidratasyon reaksiyonu göstererek prizlenmeyi sağlayan bileşikleridir. Bu bileşikler aşağıda görülen bir dizi reaksiyon sonucu oluşmaktadır [70].

$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ (7.7)

$Al_2O_3 + CaO \rightarrow CaAl_2O_4$ (7.8)

$7CaAl_2O_4 + 5CaO \rightarrow Ca_{12}Al_{14}O_{33}$ (7.9)

$7Al_2O_3 + 12CaO \rightarrow Ca_{12}Al_{14}O_{33}$ (7.10)

$17Al_2O_3 + Ca_{12}Al_{14}O_{33} \rightarrow 12CaAl_4O_7$ (7.11)

$5CaAl_4O_7 + Ca_{12}Al_{14}O_{33} \rightarrow 17CaAl_2O_4$ (7.12)

$Ca_{12}Al_{14}O_{33} + 5Al_2O_3 \rightarrow 12CaAl_2O_4$ (7.13)

Laboratuvarda üretilen YAÇ içerisindeki korund, reaksiyona girmeyen alümina kaynaklıdır.

YAÇ kullanılarak hazırlanan ilk kalıp malzemesi bileşimine agrega olarak kuvars katılmıştır. Bu kalıplarda, paslanmaz çelik mikro dökümlerde çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir. Kalıp pişerken meydana gelen bu genleşme çatlaklarının kalıp boşluğuna ulaşmasını engellemek için modellere ön kaplama yapılarak çift katlı kalıp uygulaması

denenmiştir. Bu yöntem başarılı olsa da modelin bir seramik çamuru ve tozuyla kaplanması işlem süresini uzatmış ve bu işlemin sık dizilmiş model ağaçları için uygun olmadığı görülmüştür. Tek adımda yapılan ve çatlamayan bir bileşim geliştirmek amacıyla agrega olarak kuvars yerine molokit kullanılmıştır. Bu sayede çatlamayan, referans ve önceki bileşimlere göre daha iyi yüzey veren kalıplar üretilebilmiştir. Ancak ne var ki molokit içeren kalıp, artan sıcaklıkla büzülme gösterdiği için boyutsal hassasiyet açısından bu bileşim zayıf kalmıştır. Kuvars içeren ilk bileşim yeterli genleşme gösterse de nispeten kaba yüzey vermekte ve çatlak riski oluşturmaktadır. Bağlayıcı olarak kullanılan YAÇ laboratuvarda üretildiğinden miktarı, kısıtlı olmuştur; bu nedenle çalışmalardaki bileşim sayısı sınırlı tutulmak zorunda kalınmıştır.

Deneysel sonuçlar göstermektedir ki YAÇ bağlı kalıp malzemeleri yüzey kalitesi bakımından, fosfat bağlı referans malzemelere göre daha üstündür; boyutsal hassasiyet bakımındansa bunların gerisinde kalmıştır. Bu açıdan YAÇ bağlı kalıp malzemelerinin geliştirilmesi sürdürülmelidir. Agrega olarak molokit içeren kalıp malzemelerinin ısıl genleşme göstermediği göz önüne alınarak prizlenme genleşmesini teşvik edecek bileşimlerin geliştirilmesi yönünde bu çalışma sürdürülebilir. Bu tür malzemelerin dökümde kullanılmasına karar verildiğinde model toleranslarının değiştirilmesi gerekebilir.

7.3 Yüzey Kalitesine Etki Eden Unsurlar

Döküm gibi fiziksel hal değişimine dayanan bir üretim işleminde, tahmin edileceği üzere, özellikler üzerinde etkili olan çok sayıda unsur vardır. Bir de bu işlem dereceli hassas döküm gibi parametre sayısı fazla bir işlemse, bu sayı daha da artmaktadır. Deneysel çalışmalar kalıp malzemeleri üzerine yoğunlaştığı ve yeni kalıp malzemeleri geliştirildiği için daha çok kalıp kaynaklı unsurlar araştırılmıştır. Deneysel sonuçlarda yüzey kalitesine etki eden unsurlar parça kalınlığı, agrega boyutu, su/toz oranı, alçı oranı, alçı morfolojisi asit banyosunda tutma süresi, modelin ağaçtaki yeri, sıvı metal kalitesi, döküm tekniği ve gözenek çapı olarak belirlenmiştir. Bu unsurlardan bazıları önceden bilinen ve tahmin edilen unsurlarken bazıları deneysel çalışmalar yürütülürken fark edilmiştir. Kalıp değişkenleri dışındaki unsurları da belirleyebilmek için öncelikle farklı kalınlıkları temsil eden basamaklı yüzey pürüzlülüğü numunesi tasarlanmıştır, farklı döküm teknikleri ile farklı alaşımlar dökülmüştür.

Basamaklı yüzey numunesinin kalınlığı azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün de azalma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Yönlenmiş katılaşma prensibine göre geç katılaşan kalın kesitli bölgeler, çekmenin en yoğun olduğu bölgelerdir. Buradan, çekme artışının yüzey kalitesini kötü yönde etkilediği ortaya çıkmaktadır.

Tahmin edildiği gibi kalıp malzemelerinin içerdiği agreganın tane boyutu yüzey kalitesini yakından etkilemektedir. Tane boyutu artıkça yüzey kabalaşmaktadır. Agrega boyutu inceltilerek çok yüksek yüzey kaliteli dökümler elde etmek teorik olarak mümkün gözükse de kalıp malzemeleri her şeyden önce dökülebilir olmalıdır. Parçacık boyutu ve dağılımı dökülebilirlik üzerinde etkili olan en önemli faktördür. Çok ince taneli malzemeler için yeterli akışkanlığı sağlamak her zaman mümkün olmayabilir. Su oranını ve veya dağıtıcı ilave (PMS) oranını arttırmak buna çözüm olmaz. Su oranını artırmak priz süresini uzatarak segregasyona neden olacaktır. Dağıtıcı ilaveler de çoğunlukla organik esaslıdır ve kompozisyondaki oranının artması kalıbın pişerken çatlamasına neden olmaktadır.

Dereceli hassas döküm kalıplarının su/toz oranı belli sınırlar içerisinde kalmaktadır. Ticari kalıp malzemeleri, çalışma ortamlarında meydana gelebilecek farklı ve yanlış su ölçümlerini tolere edebilecek şekilde sınırlı bir su/toz oran aralığına göre tasarlanır. Alçı bağlı malzemeler için bu aralık 0,38-0,42, fosfat bağlı olanlar için de çoğunlukla 0,28-0,32'dir. Su/toz oranının gerekenden düşük olduğu durumlarda viskozite yükselir, vakum altında kalıplamada karışım içerisindeki hava giderilemez, model ağacı üzerinde kalan hava boşlukları kuyumcuların güverse adını verdiği döküm hatalarına neden olur. Yüksek su/toz oranı her şeyden önce kalıbın mekanik dayanımını azalttığı için dökümcüler tarafından kaçınılması gereken bir durumdur. Akışkanlığı olması gerekenden yüksek kalıplarda, ince kesitli bölgelerde pişme esnasında çatlamalar ve bunun sonucunda döküm parçalarda çapak adı verilen hatalar oluşur. Yüksek su/toz oranının yüzey kalitesini azaltıcı etkisi de mevcuttur. Model yüzeylerinde meydana gelen su filmi, döküm parçalara da yansımakta ve su izi olarak adlandırılan döküm hataları oluşmaktadır.

Alçı bağlı kalıp malzemelerinde alçı oranının belli bir seviyeye kadar artması yüzey kalitesini arttırıcı etki göstermektedir. Alçı, dökümcülükte ve mimarlıkta düzgün yüzey vermesi ile bilinen bir malzemedir. Hasar görmeden pişebilseydi dereceli hassas döküm kalıpları tamamen alçıdan yapılırdı. Ne var ki alçı oranın çok artması gözenekliliği

azalttığından ve kalıp malzemesinin ısıl genleşmesini baskıladığından bu oran belli bir sınırın üzerine çıkartılamaz.

Yapılan çalışmalar alçı morfolojisinin yüzey kalitesini etkilediği ve alçının iğnesel çubuksu formda kristalleştiği yapılarda, eş eksenli kristalleşmeye göre yüzey kalitesinin arttığı tespit edilmiştir. Katkı maddeleri ile alçı morfolojisinin değiştirilebileceği görülmüştür.

Döküm ağaçlarının asit banyosunda oksit giderme ve temizleme işlemine tabi tutulması rutin olarak uygulanan bir işlem kademesidir. Deneysel çalışmalarda dökümler sürdürülürken temizleme banyosunun yüzey özellikleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Döküm ağaçları sürekli aynı konsantrasyondaki (% 25 H_2SO_4) asit çözeltisinde temizlendiği için banyoda tutma süresi değiştirilerek yüzey pürüzlülüğünün ne yönde değiştiği araştırılmış ve oksit tabakasının giderilmesiyle beraber banyonun aşındırıcı etkisinin parça yüzeyini kimyasal olarak işlediği ve pürüzlülüğü azalttığı görülmüştür.

Üniversite döküm laboratuvarında gerçekleştirilen bronz dökümlerinde 70 mm çapında 150 mm yüksekliğinde dereceler kullanılmıştır, model ağacı yüksekliği 110-120 mm arasında tutulmuştur. Model ağacına aralarındaki yükseklik farkı 50 mm olan alt alta iki yüzey pürüzlülüğü numunesi kaynatılmıştır. Döküm parçaların yüzey pürüzlülükleri arasında belirgin bir fark olmadığı gözlenmiştir. Goldaş A.Ş. dökümhanesinde yürütülen dökümlerde 100 mm çapında ve 210 mm yüksekliğinde dereceler ile çalışılmıştır; model ağaçları da 180 mm yükseklikte yapılmıştır. Laboratuvarda kullanılanlara göre daha yüksek model ağacı ve dereceler, modeller arasındaki yükseklik farkının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini belirlemede işe yaramıştır. Döküm deneylerinden birinde model ağacının en altına ve en üstüne aralarındaki yükseklik farkı yaklaşık 150 mm olan birer yüzey pürüzlüğü numunesi modeli kaynatılmıştır. Döküm sonucunda üstte bulunan numunenin yüzey pürüzlüğünün altta bulunana göre bir miktar daha iyi olduğu görülmüştür. Buradan anlaşılmaktadır ki model ağacı üzerindeki yükseklik farkı yeterli olduğunda aynı parçaların yüzey özellikleri birbirinden farklı olabilmektedir. Bunun iki geçerli sebebi vardır; birincisi kalıbın dökülmesinden prizlenmeye kadar geçen sürede meydana gelen segregasyon ikincisi de döküm sırasında kalıbın alt ve üst bölgesi arasında oluşan hidrostatik basınç farkıdır.

Sıvı metal kalitesinin etkisi, ergitilen metalin temizliğinin yüzey kalitesine etkisini yansıtmaktadır. Ergitilen metalin durumu, yüzey pürüzlülüğü üzerinde kalıp değişkenlerinden bağımsız önemli bir etkendir. En iyi kalıp malzemeleri ile en doğru koşullarda kalıplar yapılsa bile dökülen metalin oksit içeriği ve safsızlığı yüksekse kalıbın etkileri döküm parçalar üzerinde azalmakta ve yüzey kalitesi düşük olmaktadır.

Dereceli hassas döküm yöntemi ile gravite döküm ile doldurulamayacak kadar ince kesitli ve ayrıntılı karmaşık şekilli parçalar dökülmektedir. Bu nedenle döküm işlemeleri özel teçhizatlar gerektirmektedir. Kütlesel üretimlerde en yaygın olarak vakum destekli ve basınçlı vakumlu döküm makineleri kullanılmaktadır, merkezkaç döküm makineleri de bazı uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu döküm makinelerinin ortak ve temel prensibi, döküm basıncını arttırmaktır. Deneysel çalışmalar göstermiştir ki döküm basıncı ile yüzey kalitesi arasında doğru bir orantı vardır.

Harcanabilir her kalıp gibi dereceli hassas döküm kalıpları da geçirgenliğe sahip kalıplardır. Gözenek yapısı yüzey kalitesi üzerinde, döküm tekniğine bağlı olarak, oldukça etkilidir. Kalıpların gözenek yapısı temel olarak; bağlayıcı miktarına, cinsine, morfolojisine, su/toz oranına ve agregaların boyutsal dağılımına bağlıdır. Kalıba vakum desteğinin uygulandığı dökümlerde iri gözenekler yüzey kalitesinin artmasını sağlarken, vakum desteği uygulanmayan dökümlerde iri gözenekler yüzeyin kabalaşmasına neden olmuştur.

7.4 Boyutsal Hassasiyete Etki Eden Unsurlar

Dereceli hassas döküm kalıp malzemesi üreticileri, dökümcülerin üretimlerinde yüksek boyutsal hassasiyete ulaşabilmesi için dökülen metalin büzülmesini karşılayan genleşen tip kalıp malzemeleri tasarlayıp üretmektedir. Yüksek boyutsal hassasiyet ihtiyacını karşılayacak bir kalıp mutlaka genleşmelidir. Kalıplar üzerinde iki genleşme mekanizması etkilidir. Bunlar; prizlenme genleşmesi ve ısıl genleşme mekanizmalarıdır. Bunların toplam genleşme üzerindeki oranları ve etkinlikleri kalıp malzemesi türüne göre değişmektedir.

Prizlenme genleşme miktarını belirleyen temel faktör, bağlayıcı cinsidir. Kalıp malzemesinin suyla karıştırılması sonucu bağlayıcı bileşen hidrate olarak kristalleşir ve prizlenme süresince kristallerini büyütür. Bu durum belirli bir genleşme sağlar. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki alçı bağlı kalıp malzemeleri için bu oran, fosfat bağlı

ve YAÇ bağlı kalıp malzemelerine göre oldukça yüksektir. Bu fark da bağlayıcı morfolojisine dayanmaktadır. Alçı kristallerinin yerleşimi ve şekli, genleşmeyi arttırıcı yöndedir. Bağlayıcı miktarı ve agrega tane boyut dağılımı genleşme üzerinde etkili parametrelerdir. Kullanılan çeşitli katkılar da prizlenme genleşmesini arttırıcı etki göstermektedir; 80S isimli katkı bu işi başarıyla gerçekleştirmiştir. Alçı morfolojisinin SE5 gibi katkılarla iğnesele dönüştürülmesi ve prizlenmesi, genleşmesini arttırıcı etki gösterebilir. Prizlenme genleşmesi çalışmaları alçı morfolojisinin değiştirildiği çalışmalarda da uygulanabilir.

Prizlenme genleşmesinde bağlayıcının rolü ön plandayken, ısıl genleşmede agreganın rolü ön plana çıkmaktadır. Hem alçı bağlı hem de fosfat bağlı kalıp malzemelerinde tercih edilen silika esaslı kuvars ve kristobalit, pişme sırasında geçirdikleri allotropik dönüşümler ile ısıl genleşmeyi desteklerler ve bağlayıcıdan kaynaklanan büzülmeleri karşılar. Özellikle alçı, artan sıcaklığa bağlı olarak geçirdiği anhidrit dönüşümleri ile büzülme gösterir ve alçı oranı arttıkça kalıbın ısıl genleşmesi azalır. Fosfat bağlı kalıp malzemelerinde genleşmeyi asıl sağlayan ısıl genleşmedir. Bağlayıcı bileşen belirgin bir büzülme göstermezken silika agrega genleşmeyi sağlar. YAÇ bağlı kalıp malzemelerinde ise agrega olarak kuvars kullanıldığında toplam genleşmeyi yeterli oranda arttıracak kadar bir ısıl genleşme sağlanır. Agrega olarak molokit tercih edildiğinde ise ısıl büzülme meydana gelmektedir ve son boyutsal değişim negatif olmaktadır. Buna karşın molokit, düşük çatlama riski ile güvenli kalıp yapımına olanak sağlamaktadır.

7.5 Genel Sonuçlar

1. Laboratuvar şartlarında, düşük sıcaklık metal ve alaşımları için alçı bağlı, yüksek sıcaklık metal ve alaşımları için de yüksek alümina çimentosu bağlı dereceli hassas döküm kalıp malzemeleri üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir.
2. Yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyet açısından alçı bağlı kalıp malzemeleri içerisinde 20 ve 21 numaralı bileşimler en iyi sonuçları vermiştir. Yüksek alümina çimentosu bağı kalıp malzemelerinden 1 numaralı bileşim boyutsal hassasiyet açısından, 3 numaralı bileşim ise yüzey kalitesi açısından en iyi sonuçları vermiştir.

3. Döküm çalışmaları, büyük oranda takı üretimi yapan Goldaş A.Ş. dökümhanesinde gerçekleştirilerek, geliştirilen kalıp malzemelerinin endüstriyel şartlarda denenmesi bu tez çalışması için büyük fayda sağlamıştır.
4. Çok sayıda bileşim, farklı alaşımlar ve farklı döküm teknikleri ve cihazlarıyla çalışmak, deneysel çalışmaları ve sonuçları zenginleştirmiştir.
5. Tez çalışması kapsamında kalıp malzemesi üretimi amaçlandığı için deneysel faaliyetlerde kalıp bileşimi geliştirilmesi büyük yer tutmuştur.
6. Dereceli hassas dökümde yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyete etki eden unsurlar araştırılırken özellikle kalıp unsurları üzerinde durulmuştur.
7. Ticari kalıp malzemeleri referans olarak kullanılmış, geliştirilen kalıp malzemelerinin tüm karakteristikleri bunlarla karşılaştırılmıştır.
8. Alçı bağlı kalıp malzemelerinin geliştirilmesine daha fazla ağırlık verilmiştir. Bunun nedenlerinden birincisi bu malzemeler ile ilgili daha uzun süredir çalışılıyor olması, ikincisi bu malzemelerin endüstride kullanımının daha yaygın olmasıdır. Yüksek alümina çimentosunun laboratuvarda kısıtlı miktarlarda üretilebilmesi, bu bağlayıcı ile geliştirilen bileşimlerin sayısını sınırlamıştır.
9. Günümüz fiyatlarına göre, birinci sınıf ticari alçı bağlı kalıp malzemelerinin ortalama satış fiyatı laboratuvarda geliştirilen alçı bağlı kalıp malzemelerinin ortalama üretim maliyetinin 2,5 katı kadardır. Birinci sınıf fosfat bağlı ticari kalıp malzemeleri ile laboratuvarda üretilen yüksek alümina çimentosu bağlı kalıp malzemeleri arasındaki aynı oran ise yaklaşık 8 kattır. Bu yüksek ekonomik fayda nedeniyle geliştirmeler devam etmelidir.
10. Dereceli hassas döküm kalıp malzemelerinin en önemli bileşeninin bağlayıcı olduğu, bağlayıcı cinsinin, oranın ve morfolojisini hem yüzey kalitesi hem de boyutsal hassasiyet üzerinde oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir.
11. Kontrol ilavelerinin kalıp malzemelerinin özellikleri üzerinde yoğun olarak etkili olduğu belirlenmiştir. Doğru katkılar ile bağlayıcı morfolojisi değiştirilebilmektedir. Böhmit esaslı bir katkı olan SE5, alçı kristallerinin eş eksenli değil iğnesel olarak çökelebilmesini sağlamıştır. Alçı bağlı kalıp malzemelerinin gelişimi alçı morfolojisinin değiştirilmesi üzerinde sürdürülebilir.

KAYNAKLAR

[1] Baumeister, G., Rath, S. ve Hauselt, J., (2006). "Microcasting of Al Bronze and Gold Base Alloy Improved by Plaster-Bonded Investment", Microsystems Technology, 12: 773-777.

[2] Rath, S., Baumeister, G. ve Hauselt, J., (2006). "Investments for Casting Micro Parts with Base Alloys" Microsystems Technology, 12: 258-266.

[3] Beeley, P.R. ve Smart, R.F., (1995). Investment Casting, The University Press, Cambridge.

[4] Kibelenin Günlüğü, Bronz Geyik Heykeli Alacahöyük, http://kibeleningunlugu.blogspot.com/2008/10/ anadolu-medeniyetleri-anatolian.html, 05 Ağustos 2011.

[5] Hunt, L.B., (1980). "The Long History of Lost Wax Casting", Gold Bulletin, 13: 63-79.

[6] Clegg, A.J., (1991). Precision Casting Processes, Pergamon Pres, Oxford.

[7] Yaman, B., (2002). Demir Dışı Alaşımların Dereceli Hassas Dökümünde Kullanılan Kalıp Malzemeleri, Yükseklisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[8] Beeley, P., (2001), Foundry Technology, Second Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford.

[9] Çavuşoğlu, E.N., (1992). Döküm Teknolojisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, İstanbul.

[10] Kerr Laboratuarı, Dereceli Hassas Döküm Kalıbı Hazırlama İşlemleri, www.kerrlab.com, 2 Mart 2011.

[11] Horton, P.J., (2000). "Investment Powders and Casting", Gold Technology, 28:12-17.

[12] Faccenda, V. ve Ingo, G.M., (2000). "Advances in Investment and Burnout Furnace Design", Gold Technology, 31: 22-28.

[13] Faccenda, V., (2003). Handbook on Investment Casting, World Gold Council, London.

[14] Sabau, A.S. ve Viswanathan, S., (2003), "Material Properties for Predicting Wax Pattern Dimensions in Investment Casting", Materials Science & Engineering A, A362: 125-134.

[15] Brum, F.J.B., Amico, S.C., Vedana, I. ve Jr.Spim, J.A., (2009), "Microwave Dewaxing Applied to The Investment Casting Process", Journal of Materials Processing Technology, 209: 3166-3171.

[16] Kauçuk Kalıplar ve Mum Modeller, www.jewelry-model.com, 15 Mart 2011.

[17] Bonilla, W., Masood, S.H. ve Iovenitti, P., (2001). "An Investigation of Wax Patterns for Accuracy Improvement in Investment Cast Parts", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 18: 348-356.

[18] Horacek, M., (1997). "Accuracy of Castings Manufactured by Lost Wax Process". Proceedings of the 23rd British Investment Casting Trade Association Conference, 8-10 June 1997, Cambridge, UK, 2:1-20.

[19] Mum ağacı ve derece, www.ganoskin.com, 22 Mayıs 2005.

[20] Dereceli hassas döküm takı döküm ağaçları, http://www.schultheiss-gmbh.de/products.html, 24 Mayıs 2011.

[21] Dereceli hassas döküm kalıbı kesiti, www.ransom-randolph.com, 15 Kasım 2010.

[22] Ünlüer, Ö., (2001). Alçı Kalıplar ve Alçı Kalıplarda Mikro Yapı Dizaynı, Yüksek Lisans Dönem Projesi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

[23] Kaya, D., (2000). Anhidrit ve Kalsiyum Karbonatın Döküm Alçısına Etkisi, Bitirme Tezi, Anadolu Üniversitesi Seramik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.

[24] Subaşı, R., (1999). Alçı Kalıp Yapımında Kullanılan Yarı Hidratların Karakterizasyonu, Bitirme Tezi, Anadolu Üniversitesi, Seramik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.

[25] Singh, N.B. ve Middendof, B., (2007). "Calcium Sulphate Hemidyrate Hydration Leading to Gypsum Crystallization", Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 53: 57-77.

[26] Meille, S., Saadaoui, M., Reynaud, P. Ve Fantozzi, G., (2003). "Mechanism of Crack Propagation in Dry Plaster", Journal of the Europe Ceramic Society. 23: 3105-3112.

[27] Soroka, I. ve Sereda, P., (1968). "Interrelation of Hardness, Modulus of Elasticity and Porosity in Various Gypsum Systems", Journal of American Ceramic Society, 51: 337-340.

[28] Dalui, S., Roychowdhury, M. ve Phani, K.K, (1996). "Ultrasonic Evaluation of Gypsum Plasters", Journal of Materials Science, 31: 1261-1263.

[29] Singh, M. ve Garg, M., (1997). "Retarding Action of Various Chemicals on Setting and Hardening Characteristics of Gypsum Plaster at Different pH, Cement and Concrete Research, 29(6): 947-950.

[30] Lodovici, E., Meria, J.B.C., Eloy, L., Filho, R. ve Ballester, R.Y., (2005). "Expansion of High Flow Mixtures of Gypsum-Bonded Investments in Contact with Absorbent Liners", Dental Materials", 21: 573-579.

[31] Morey, E.F., (1992). "Dimensional Accuracy of Small Gold Alloy Castings. Part 3, Gypsum-Bonded Investment Expansion", Australian Dental Journal, 37: 43-54.

[32] Santos, J.F. ve Ballester, R.Y., (1984). "Delayed Hygroscopic Expansion of Gypsum Products", Journal of Prosthetic Dentistry, 37: 366-370.

[33] McAloon, J. ve Mori, T., (1993). "Study of Gypsum-Bonded Casting Investments. Part 2., Australian Dental Journal, 38: 306-308.

[34] Barsoum, M.W., (1997). Fundamentals of Ceramics, McGrowHill Companies, Singapore.

[35] Sammer, A.R., Parmelee, D., Lamngefold, C.F. ve Stark, R.A., (1989). Refractories Manuel, AFS Inc., Des Plaines, Illinois.

[36] Eriç, H., (1985). "Faz Diyagramları ve Refrakterler", Seramik Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, 15-19 Nisan 1985, Ankara.

[37] Stone, R.L., (1947). Phase Diagrams for Ceramists, American Ceramic Society, Columbus, Ohio.

[38] Arcasoy, A., (1983). Seramik Teknolojisi, Marmara Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Yayınları, İstanbul.

[39] Soudee, E. ve Pera, J., (2000). "Mechanism of Setting Reaction in Magnesia-Phosphate Cements", Cement and Concrete Research, 30: 315-321.

[40] Lloyd, C.H., Yearn, C.A., Cowper, G.A., Blavier, J. ve Vanderdonckt, M., (2004). "Measurement of Setting Expansion of Phosphate-Bonded Investment Materials: Part I – Development of The Casting-Ring Test, Journal Oral Rehabilition, 31: 695-702.

[41] McCabe, J.F. ve Walls, A.W.G., (2008). "Applied Dental Materials", Ninth Edition, Blackwell Publishing, Singapore.

[42] Yaman C., (1996). "Fosfat Bağlı Alümina Refrakterler", Metal Dünyası, 44: 62-68.

[43] Juszczyk, A.S., Radford, D.R. ve Curtis, R.V., (2007). "Deformation of Phosphate-Bonded Investment Materials at Elevated Temperatures", Dental Materials, 23: 579-585.

[44] Juszczyk, A.S., Radford, D.R. ve Curtis, R.V., (2000). "The Influence of Handling Technique on The Strength of Phosphate-Bonded Investments", Dental Materials, 16: 26-32.

[45] O'Brien, W.J.,(1997). Dental Materials and Their Selection, Second Edition, Quintessence Publishing Co Inc., London.

[46] Soo, S., Palmer, R. ve Curtis, R.V., (2001). "Measurement of The Setting and Thermal Expansion of Dental Investments Used for Superplastic Forming of Dental Implant Superstructures", Dental Materials, 17: 247-252.

[47] Yaman C., (1998). "Refrakter Malzemeler için Kimyasal Bağlayıcılar", Metal Dünyası, 59: 38-39.

[48] Li, T., Luo, J., Wu, S. Ve Wan, L., (2009). "A new Phosphate-Bonded Investment Material for Rapid Ceramic Molding of Medium-Size Castings", Advanced Materials Research, 79-82: 1715-1718.

[49] Hewlett, P.C., (2004). Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Fourth Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford.

[50] Popovics, S., (1992). Concrete Materials Properties, Specifications and Testing, Second Edition, Noyes Publication, New Jersey.

[51] Kalsiyum-Alüminat Faz Diyagramı, http://en.wikipedia.org/wiki/File:CaAluminatesPhaseDiagram.JPG, 12 Nisan 2011.

[52] Ramachandran, V.S., (1995). Concrete Admixtures Handbook Properties, Science and Technology, Second Edition, Noyes Publication, New Jersey.

[53] Molokit, http://www.imerys-molochite.com/molochite.htm, 10 Ocak 2011.

[54] Ergiyik Silika, http://www.mincoitc.com/FAQSilica.htm, 10 Ocak 2011.

[55] Stefanescu, D.M., (1998). ASM Handbook Volume 15 Casting, ASM International, Ohio.

[56] Kolloidal Silika, http://www.vsep.com/pdf/ColloidalSilica.pdf, 15 Ocak 2011.

[57] Zirkon, http://www.mineralszone.com/minerals/zircon-allied-mineral.html, 15 Ocak 2011.

[58] Işıtman, O. ve Işıkçı, C. (1985). "Alçı Kalıp Problemlerinin Çözümü ve Maksimum Verimlilikte Kalıp Üretimi", Seramik Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı II, 15-19 Nisan, Ankara, 289-306.

[59] Carter, R., (2000). "Effects of Changing The Water-to-Powder Ratio on Jewellery Investments", Proceedings of 14th Santa Fe Symposium, 21-24 May 2000, Albuquerque, 31-47.

[60] Mahir, H., (1996). "Alçı/Su Oranının Alçı Kalıp ve Dökümüne Olan Etkilerinin Araştırılması, III Seramik Kongresi Bildiriler Kitabı, Cilt I, 22-25 Ekim 1996, Ankara, 107-115.

[61] Gainsbury, P.E., (1979). "Jewellery Investment Casting Machines", Gold Bulletin, 12(1): 1-7.

[62] Faccenda, V., (1996). "Advances in Investment Casting Machine Technology", Gold Technology, 20: 3-9.

[63] Topçu, İ.B., ve Elgün, V.B., (2004). "Influence of Concrete Properties on Bleeding and Evaporation", Cement and Concrete Research, 34: 275-281.

[64] Ravindarajah, R., (2003). "Bleeding of Fresh Concrete Containing Cement Supplementary Materials", 9th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 16-18 December 2003, Bali, Indonesia.

[65] Güler, K.A., (2005). Dereceli Hassas Döküm Kalıplarında Segregasyon Oluşumunun İncelenmesi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Istanbul.

[66] Ott, D. ve Raub, C.J., (1985). Investment Casting of Gold Jewellery", Gold Bulletin, 18(2): 58-68.

[67] Campbell, J., (2000). "The Concept of Net Shape for Castings", Materials Design, 21: (373-380).

[68] TSE TS3322, (1979). Çimento Harcı ve Beton Numunelerinin Boy Değişimi Tayini, TSE, Ankara.

[69] Adolfsson, D., (2011). Cementitious Properties of Steelmaking Slags, Doktora Tezi, Lulea University of Technology, Department of Chemical Engineering and Geosciences Division of Minerals and Metallurgical Engineering, Lulea, İsveç.

[70] Bensted, J. ve Barnes, P., (2002). Structure and Performance of Cements, Second Edition, E & FN Spon, London & New York.

[71] Mercury, J.M.R., Aza, A.H.D. ve Pena, P., (2005). "Synthesis of $CaAl_2O_4$ From Powders: Particle Size Effect", Journal of The European Ceramic Society, 25: 3269-3279.

[72] Hallstedt, B., (1990). "Assessment of The $CaO-Al_2O_3$ system", Journal of American Ceramic Society, 73: 15-23.

[73] Scian, A.N, Porto Lopez, J.M. ve Pereira, E., (1987), "High Alumina Cements. Study of $CaO.Al_2O_4$ Formation Stoichiometric Mechanism", Cement and Concrete Research, 17: 198-204.

[74] Singh, V.K., Ali, M. ve Mandal, U.K., (1990)., "Formation Kinetics of Calcium Aluminates", Journal of American Ceramic Society, 73(4): 872-876.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Kerem Altuğ GÜLER

Doğum Tarihi ve Yeri : 11/07/1981/Keşan

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : keremaltug@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Metalurji ve Malzeme Müh.	Y.T.Ü.	2005
Lisans	Metalurji ve Malzeme Müh.	Y.T.Ü.	2003
Lise	Fen Bilimleri	Keşan Anadolu Lisesi	1999

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2005	Y.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. K.A. Guler, M. Cigdem, Surface quality and dimensional accuracy of gypsum bonded investment flask casting moulds, MP Materials Testing-Materials and Components Technology and Application, Issue 9, Vol. 53, pp. 551-555, (2011)

2. K.A. Guler, Z. Taslicukur, G. Ozer, Production of open cell aluminium metal foam with lost foam technique, MP Materials Testing-Materials and Components Technology and Application, Issue 5, Vol. 53, pp. 295-297, (2011)

3. K. A. Guler, A. Kisasoz, A. Karaaslan, A novel method for Al/SiC composite fabrication: Lost foam casting, International Journal of Materials Research, Issue 3, Vol. 102, pp. 304-308, (2011)

4. A. Kısasoz, K.A. Guler, A. Karaaslan, Fabrication and characterization of SiC preforms for metal matrix composites, MP Materials Testing-Materials and Components Technology and Application, , Issue 1, Vol. 53, pp. 634-637, (2011)

5. G. Ozer, K.A. Guler, Z. Taslicukur, Cellular aluminum foam metal production with space holder particles, MP Materials Testing-Materials and Components Technology and Application, Issue 52, Vol. 6, pp. 379-382, (2010)

Bildiri

1. K.A. Güler, M. Ciğdem, Vakum Destekli Dereceli Hassas Dökümde Alçı Bağlı Kalıp Malzemelerinin Döküm Kalitesi, 4. Döküm ve Çevre Sempozyumu İstanbul, (2011)

2. K.A.Güler, A. Üster, M. Ciğdem, Açık Hücreli Hücresel Metal Üretimi İçin Yeni Bir Yaklaşım Olarak Dolu Kalıba Döküm Tekniğinin Uygulanması, 4. Döküm ve Çevre Sempozyumu İstanbul, (2011)

3. K.A. Guler, M. Cigdem, Casting quality of gypsum bonded block investment casting moulds, 14th International Conference On Advances In Material & Processing Technologies Istanbul / Turkey, (2011)

4. K.A. Guler, M. Cigdem, The effect of different bonded investment powders on surface quality and dimensional accuracy of investment castings, 8th International PhD Foundry Conference, Brno, Czech Republic, (2011)

5. A. Kisasoz, K.A. Guler, A. Karaaslan, Production of Al2O3-Al composites using vacuum assisted block mould investment casting, 8th International PhD Foundry Conference, Brno, Czech Republic, (2011)

6. G. Ozer, A. Kisasoz, K.A. Guler, A. Karaaslan, Aluminum matrix composite fabrication by infiltration of SiC preforms using squeeze casting technique, 8th International PhD Foundry Conference, Brno, Czech Republic, (2011)

7. A. Kisasoz, K.A. Guler, A. Karaslan, Lost Foam Casting Technique Applications for Al/SiC Composite Production, 69th World Foundry Congress, Hangzhou China, (2010)

8. K.A. Güler, G. Ozer, Z. Taslicukur, A Novel Pattern Material for Investment Casting: Foam Wax, 69th World Foundry Congress, Hangzhou China, (2010)

9. I. Kutbay, K.A. Güler, M. Çiğdem, Çimento Bağlayıcılı Genleşebilen Dereceli Hassas Döküm Kalıbı Tozu Üretimi, 3. Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu, İstanbul, (2010)

10. K.A. Guler, E. Gin, O. Şen, M. Çiğdem, Besleyici Gömleklerin Üretimi İçin Çevreye Duyarlı Yeni Bir Yöntem, 3. Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu, İstanbul, (2010)

11. K.A. Güler, Z. Taslicukur, G. Ozer, Expanded Polystyrene (EPS) Pattern Application in Investment Casting and Chemical Removing, 11th Conference and Exhibition of the European Ceramic Society, ECERS, Krakow, Poland, (2009)

12. C. Balaban, Ö Şen, G. Özer, K.A. Güler, A380 Alaşımın Soğuma Eğrisinde ve Akışkanlığında Tane İnceltmenin Etkisi, 13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, (2006)

13. Z. Taşlıçukur, C. Balaban, G. Özer, K.A. Güler, N. Kuşkonmaz, M. Çiğdem, Seramik ve Kum Kalıp Prosesleriyle Üretilen Ayakkabı Çekicinin Özelliklerinin Karşılaştırılması, 12. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, (2005)

14. K.A. Güler, M. Çiğdem, Dökülebilir Kalıplarda Segregasyon, 12. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, (2005)

Proje

1. Sıkıştırmalı döküm yöntemi ile Al matrisli hibrid kompozit üretimi ve karakterizasyonu. (BAPK, 07/2007-07/2010)

2. Renkli Metalografi Yöntemi ile Alüminyum, Bakır ve Çelik Numunelerde Farklı Fazların Belirlenmesi (BAPK, 05/2009-

05/2010)

3. Atık Mermer Tozlarının Geri Dönüşümü ve Doğal Silikatlar Katkısı ile Yapı Malzemesi Üretimi (BAPK, 05/2009-05/2010)

4. Çelik Malzemelerin Laser Kesim Parametrelerinin Optimizasyonu (BAPK, 03/2009-03/2010)

5. Termal Yöntemlerle Magnezyum Üretim Teknolojisinin Geliştirilmesi (BAPK, 06/2010-06/2012)

6. Development of a New Moulding Technique for Titanium Alloys Castings, for Automotive and Biomechanical Applications, Uiversidade do Minho Portugal (ERASMUS, 03/2006/-08/2006)

ÖDÜLLERİ

1. Tübitak Uluslararası Bilimsel Yayınları Teşvik Ödülü, 2011

2. Tübitak Uluslararası Bilimsel Yayınları Teşvik Ödülü, 2010

3. Yıldız Teknik Üniv. Rektörlüğü Teşekkür Belgesi, 2010

4. Yıldız Teknik Üniv. Rektörlüğü Teşekkür Belgesi ve Plaketi 2011