



**T.C.  
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**FLOAT TEKNİĞİYLE CAM ÜRETİMİNDE REJENERATİF  
FIRINDAN KAYNAKLI HATALAR VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ**

**GÖKHAN YOL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DİSİPLİNLERARASI KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ  
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. ALİ GÜRSEL**

**DÜZCE, 2022**

**T.C.**  
**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**FLOAT TEKNİĞİYLE CAM ÜRETİMİNDE REJENERATİF  
FIRINDAN KAYNAKLI HATALAR VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ**

Gökhan YOL tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Ali GÜRSEL  
Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Ali GÜRSEL  
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa BOZ  
Karabük Üniversitesi

Doç. Dr. Nuri ŞEN  
Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 09/06/2022

## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

09 Haziran 2022

Gökhan YOL

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımlarından dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Ali GÜRSEL' e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Üniversite-Sanayi işbirliği kapsamında bana yüksek lisans öğrenim fırsatı sunan Düzce Üniversitesi ve Düzce Cam ve Tic. A.Ş.'ye, tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen fabrika müdürümüz Serkan TURĞUT'a, kalite bölüm sorumlusu Bayram ZENGİN'e ve her zaman bana duydukları güvenle desteklerini hissettiren Ahmet TENDÜRÜST ile Fatih AYDIN' a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili eşim başta olmak üzere değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

**09 Haziran 2022**

**Gökhan YOL**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR.....	xi
SİMGELER.....	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
1.GİRİŞ.....	1
1. CAMIN TABİATI.....	3
1.1. CAMIN TARİHÇESİ.....	3
1.2. CAMIN ENDÜSTRİDEKİ ÖNEMİ.....	3
1.3. CAMIN TANIMI VE YAPISI.....	4
1.3.1. Cam.....	4
1.3.2. Camın Yapısı.....	5
1.4. CAMIN HAMMADDELERİ.....	8
1.4.1. Silis Kumu (SiO <sub>2</sub> ).....	8
1.4.2. Soda (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ).....	8
1.4.3. Dolomit (CaCO <sub>3</sub> .MgCO <sub>3</sub> ).....	8
1.4.4. Feldspat (Na <sub>2</sub> O.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .6SiO <sub>2</sub> ).....	8
1.4.5. Kalker (CaCO <sub>3</sub> ).....	9
1.4.6. Sodyum Sülfat (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ).....	9
1.4.7. Antrasit.....	9
1.4.8. Cam Kırığı.....	9
1.5. CAMIN ÖZELLİKLERİ.....	10
1.5.1. Fiziksel Özellikleri.....	10
1.5.2. Elektriksel Özellikleri.....	11
1.5.3. Optik Özellikleri.....	11
1.5.4. Kimyasal Özellikleri.....	12
1.5.5. Mekanik Özellikleri.....	12
1.6. CAM ÇEŞİTLERİ.....	12
1.6.1. Kimyasal Bileşimi Ve Özelliğine Göre Cam Çeşitleri.....	12
1.6.1.1. Soda-Kireç Camı.....	13
1.6.1.2. Borosilikat Camlar.....	13
1.6.1.3. Kristal Camı.....	13
1.6.1.4. Kurşunlu Kristal Cam.....	13
1.6.1.5. Silis Camı (Silika kuvars camı).....	13
1.6.1.6. Su Camı (Sodyum silikat camları).....	14
1.6.2. Özel Camlar.....	14
1.6.2.1. E-Camı.....	14
1.6.2.2. Tungsten Camı.....	14
1.6.2.3. Sodyum Direnç Camı.....	14
1.6.3. Kullanım Yerlerine Göre Cam Çeşitleri.....	14
2. CAM ÜRETİMİ.....	16

<b>2.1. ANA BİLEŞENLERİN HAZIRLANMASI</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2. ERGİTME</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2.1. Fırın Tipleri</b> .....	<b>16</b>
2.2.1.1. <i>Pota Fırınları</i> .....	17
2.2.1.2. <i>Tank Fırınları</i> .....	17
2.2.1.3. <i>Rekuperatif Fırınlr</i> .....	18
2.2.1.4. <i>Rejeneratif Fırınlr</i> .....	18
2.2.1.5. <i>Oksi Yakıtlı Fırınlr</i> .....	19
2.2.1.6. <i>Tamamı Elektrikli Fırınlr</i> .....	19
<b>2.2.2. Harmanda Gelişen Kimyasal Reaksiyonlar</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3. ŞEKİLLENDİRME</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3.1. Üfleme (Şişirme) Yöntemi</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3.2. Dökme-Silindirme Yöntemi</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3.3. Çekme Yöntemi</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3.4. Fourcault Yöntemi</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.5. Libbey-Owens Yöntemi</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3.6. Pittsburg Yöntemi</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3.7. Presleme Yöntemi</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3.8. Lif Haline Getirme Yöntemi</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3.9. Köpük Haline Getirme Yöntemi</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3.10. Float (Yüzdürme) Yöntemi</b> .....	<b>24</b>
2.3.10.1. <i>Harman Bölümü</i> .....	25
2.3.10.2. <i>Rejeneratif Cam Ergitme Fırını</i> .....	25
2.3.10.3. <i>Kalay Banyosu</i> .....	32
2.3.10.4. <i>Cam Soğutma</i> .....	32
2.3.10.5. <i>Kesme Koparma</i> .....	32
2.3.10.6. <i>Otomatik İstifleme</i> .....	32
2.3.10.7. <i>Ambar</i> .....	33
2.3.10.8. <i>Sevkiyat</i> .....	33
<b>2.4. TAVLAMA</b> .....	<b>33</b>
<b>2.5. KESİM İŞLEMİ</b> .....	<b>33</b>
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1. MALZEME VE METHOD</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2. CAMDA GÖRÜLEN HATALARIN İÇERİKLERİ VE TANIMLANMASI</b> .....	<b>34</b>
<b>3.3. ERGİTME KAYNAKLI HATALAR VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>35</b>
3.3.1. <i>Ergimemiş Silika Hataları</i> .....	35
3.3.2. <i>Silika Katmanları</i> .....	39
3.3.3. <i>Habbe Hataları</i> .....	43
<b>3.4. REFRAKTER KAYNAKLI HATALAR VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ</b> ....	<b>45</b>
3.4.1. <i>Tridimit Hatası</i> .....	46
3.4.2. <i>Fırın Kemerlerinden Kaynaklı Damlama Hataları</i> .....	49
3.4.3. <i>Zirkon Hatası (AZS1)</i> .....	51
3.4.4. <i>Dendritik Zirkon Hatası (AZS2)</i> .....	53
3.4.5. <i>β Alümina / Spinel</i> .....	56
3.4.6. <i>Nefelin Müllit</i> .....	57
3.4.7. <i>Cam Yünü</i> .....	59
<b>3.5. DEVİTRİFİKASYON HATALARI VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>59</b>
3.5.1. <i>Beta Wollastonit</i> .....	59
<b>3.6. KONTAMİNASYON KAYNAKLI HATALAR VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>60</b>
3.6.1. <i>Kromit Hatası</i> .....	60
3.6.2. <i>Metalik Silis hatası</i> .....	61

3.6.3. Düşük Alüminalı Refrakter Hatası.....	63
3.6.4. Ream Hatası (Düğmeleri).....	63
4. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	65
5. KAYNAKLAR.....	69
6. EKLER.....	73
EK 1. HATA ÇÖZÜMÜ AKIŞ ŞEMASI.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	75



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

Şekil 1.1 SiO <sub>2</sub> tetrahedrası [13].....	5
Şekil 1.2 SiO <sub>2</sub> bileşiğinin iki boyutlu yapısı [13] .....	6
Şekil 1.3 Sıvı-Katı hal arasındaki ilişki ve cam dönüşümü [14,19,20] .....	7
Şekil 1.4 Viskozitenin sıcaklıkla değişimi ve karakteristik viskozite noktaları [10].....	11
Şekil 2.1 Potalı fırının şematik olarak görüntüsü [4].....	17
Şekil 2.2 Pencere camı için kullanılan havuz tipi fırının şematik görünümü [4] .....	17
Şekil 2.3 Reküperatif türdeki cam fırınlarına ilişkin şematik görünümü [24].....	18
Şekil 2.4 Rejeneratif türdeki cam fırınlarına ilişkin şematik görünümü [24].....	19
Şekil 2.5 SiO <sub>2</sub> ile Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> taneciklerinin katı hal reaksiyon modeli [10].....	20
Şekil 2.6 Sıcaklık – Ergime süresi. ....	20
Şekil 2.7 Dökme silindirleme yöntemi ile cam üretimi [27] .....	21
Şekil 2.8 Çekme yöntemi ile cam çekme [4] .....	22
Şekil 2.9 Fourcault Yöntemi ile cam üretiminin başlangıcı [27].....	22
Şekil 2.10 Libbey-Owens yöntemi ile çekme [4] .....	23
Şekil 2.11 Pittsbourg yöntemi ile çekme [27].....	23
Şekil 2.12 Presleme yöntemi ile cam üretimi [4].....	24
Şekil 2.13 Float cam hattı genel bölümleri [28] .....	25
Şekil 2.14 İçi boş bir float fırının görüntüsü [29] .....	26
Şekil 2.15 Float hattı fırın şarjörü [30] .....	26
Şekil 2.16 Fırın yakma sistemi [31].....	27
Şekil 2.17 Rejeneratif bir fırının bölümleri [32].....	27
Şekil 2.18 Rejeneratif fırın bölümleri- 2 [33] .....	29
Şekil 2.19 Yan blok soğutma üfleç (faraş) sistemi. ....	30
Şekil 2.20 Düz cam ergitme fırınında cam döngüsü [34] .....	31
Şekil 2.21 Robotun camı istiflemesi [36] .....	32
Şekil 3.1 Ergime kaynaklı silika hatasının mikroskop görüntüsü. ....	36
Şekil 3.2 Fırın harman köpük hattı. ....	36
Şekil 3.3 a) ve b) Silika kaynaklı tridimit hatalarının mikroskop görüntüleri. ....	40
Şekil 3.4 Float düz cam fırınında harman ve köpük hattı. ....	41
Şekil 3.5 Düz cam üretiminde fırın içi alev görüntüsü [39] .....	42
Şekil 3.6 Camdaki SO <sub>3</sub> içeriğinin sıcaklıkla değişimi [41] .....	43
Şekil 3.7 a) ve b) Habbe hatalarının mikroskop görüntüleri.....	44
Şekil 3.8 Cam eriyik içindeki barajın pozisyonu. ....	45
Şekil 3.9 Refrakter Bozulma Mekanizması [42] .....	46
Şekil 3.10 a) ve b) Tridimit hatalarının mikroskop görüntüleri.....	47
Şekil 3.11 Silika refrakterinin NaOH tarafından korozyona uğrama sürecini anlatan şema [41] .....	48
Şekil 3.12 B duvarını soda gazından korumak için brülör montaj noktaları. ....	49
Şekil 3.13 a) ve b) Damlama hatalarının mikroskop görüntüleri. ....	50
Şekil 3.14 a) ve b) AZS1 hatalarının mikroskop görüntüleri. ....	51
Şekil 3.15 Aşınmış bir yan blok [44].....	52
Şekil 3.16 Cam seviyesi değişimi görseli. ....	52
Şekil 3.17 a) ve b) AZS2 hatalarının mikroskop görüntüleri. ....	54
Şekil 3.18 Fırın içinde deforme olan duvarların görüntüsü [45] .....	54
Şekil 3.19 Üst yapının akıntı ile sarkıt oluşturması [42] .....	55
Şekil 3.20 Float hattı rejeneratif fırın içindeki alevler [46] .....	56

Şekil 3.21 $\beta$ Alümina / Spinel hatasının mikroskop görüntüsü. ....	57
Şekil 3.22 a) ve b) Nefelin mullit hatalarının mikroskop görüntüleri. ....	58
Şekil 3.23 Cam yünü hatasının mikroskop görüntüsü. ....	59
Şekil 3.24 Beta wollastonit hatasının mikroskop görüntüsü.....	60
Şekil 3.25 Kromit hatasının görüntüsü. ....	61
Şekil 3.26 a) ve b) Metalik silis hatalarının mikroskop görüntüleri. ....	62
Şekil 3.27 Düşük alüminalı refrakter hatasının mikroskop görüntüsü. ....	63
Şekil 3.28 Ream hatasının mikroskop görüntüsü. ....	64



## TABLO LİSTESİ

Tablo 1: Dünya cam kurulu üretim kapasitesi faaliyet alanı [5].....	4
Tablo 2: Erime sıcaklığında bazı element ve bileşiklerin viskoziteleri [10] .....	5
Tablo 3: Cam bileşiminde kullanılan bazı oksitler [14-16] .....	6
Tablo 4: Bazı cam çeşitlerini ve % bileşenlerin değerleri [22].....	12
Tablo 5: Temel cam tipleri ve kullanım alanları [23].....	15
Tablo 6 Clear cam XRF analiz sonucu .....	34
Tablo 7: Farklı kompozisyondaki iki cam numunesi [37].....	37
Tablo 8: Hammadde tane boyutları .....	38
Tablo 9: Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> – H <sub>2</sub> O faz diyagramı [38] .....	38
Tablo 10: Float fırın içinde bulunduğu bölgeye göre refrakter çeşitleri [42] .....	46
Tablo 11 : Portlara göre alev uzunlukları .....	55



## KISALTMALAR

SEM-EDS

SEM

EDS

XRF

XPS

Enerji Dağılımlı X-Işını Analizörlü Taramalı Elektron  
Mikroskobu

Taramalı Elektron Mikroskobu

Enerji Dağılımlı Çözümleyici

X-Ray Floresans Spektrometresi

X-Ray Fotoelektron Spektroskopisi



## SİMGELER

$d_{\text{kuvars}}$   
 $d_{\text{tridimit}}$   
 $d_{\text{kristobalit}}$   
Pa

Kumun öz kütlesi  
Tridimitin öz kütlesi  
Kristobalitin öz kütlesi  
Fırın basınç birimi



## ÖZET

### FLOAT TEKNİĞİYLE CAM ÜRETİMİNDE REJENERATİF FIRINDAN KAYNAKLI HATALAR VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ

Gökhan YOL

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ali GÜRSEL

Haziran 2022, 74 sayfa

Cam insan hayatının her alanında ve ekonomide önemli bir yere sahiptir. Cam üretiminde oluşan hatalar ekonomik kayba neden olmaktadır. Camda oluşan hatalar, harmanın hazırlanması, ergitilmesi, afınasyona uğraması, şekillendirilmesi ve tavlanması kademelerinin herhangi birinde meydana gelebilmektedir. Hataların üretim sırasında hangi kademede meydana geldiğini bulmak çok güçtür. Bundan dolayı hata camda oluştuğundan sonra tespit edilebilmekte ve buna göre müdahaleler yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, float tekniğiyle düz cam üretiminde yandan ateşlemeli rejeneratif fırın prosesi hakkında detaylı bilgiler verilerek, çalışma prensibi ve bu fırınlarda üretilen camlarda oluşabilen hatalar ve önleme yöntemleri tartışılacaktır.

Düz cam üretimi sırasında rejeneratif fırından kaynaklı hatalar fırın çalışma sürecindeki aksaklıklar ve hammadde kompozisyonundan kaynaklı olarak sınıflandırılabilir. Rejeneratif fırından kaynaklı hataların önüne geçilebilmek veya miktarını azaltmak için fırın sıcaklık ve operasyonel faaliyetlerin kontrol altında tutulması, fırın içi gözlemlerinin çok iyi yapılıyor olması gerekmektedir. Özellikle fırın yapısını oluşturan refrakterler termal, mekanik ve kimyasal etkileşimler sonucu deformasyona uğrayarak camda hatalara sebebiyet vermektedir. Bu süreklilik arz eden kaçınılmaz bir mekanizmadır. İyi takip edilmeli ve zamanında önlemler alınmalıdır. Bu mekanizmanın hızı fırın çalışma koşullarıyla alakalıdır.

Hammadde kaynaklı hataların en büyük sebebi kontaminasyonlar, tartım yanlışlıkları, tane boyutlarının, nem miktarının ve harman sıcaklığının istenilen seviyede olmamasından kaynaklanır. Bunların kontrol altında tutulması harman kaynaklı hataların minimum seviyede olmasını sağlar. Düz cam üretimi sırasında rejeneratif fırın ve hammadde kaynaklı tespit edilen hatalar, stereo mikroskop yardımıyla görüntülenmiş ve analiz edilmiştir. Bu hataları önlemek veya azaltmak için ne gibi tedbirler alınması

gerektiğine dair bilgiler ve öneriler detaylı olarak sunulmuştur. Bunlardan biri; Endüstri 4.0 kapsamında geliştirilen sistemlerle fırın sıcaklık, harman ve köpük hatlarının kontrollerinin otomatik olarak daha sıkı ve daha sistematik bir şekilde yapılmasıdır. Bunun sonucu daha kaliteli bir düz cam üretimi yapılabilir ve enerjiden tasarruf sağlanabilir.

**Anahtar sözcükler:** Float cam üretimi, Rejeneratif cam fırını, Cam hataları



## **ABSTRACT**

### **DEFECTS CAUSED BY REGENERATIVE FURNACE IN GLASS MANUFACTURING WITH FLOAT TECHNIQUE AND METHODS OF PREVENTION**

Gökhan YOL

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Composite Material  
Technologies

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali GÜRSEL

JUNE 2022, 74 sayfa

Glass has an important place in every aspect of human life and economy. Imperfections in glass production can also cause economic loss to the same extent. Defects in the glass may occur during the stages of preparations, melting, refinement, shaping and annealing of the batch. It is very difficult to find at which step the defects occur during production. Therefore, the defect can be detected after it occurs on the glass and interventions can be made accordingly. In this study, detailed information is given about the side-fired regenerative furnace process in the production of flat glass with the float technique, and its working principle, defects and prevention methods that may occur in the glasses produced in these furnaces will be discussed. Defects originating from the regenerative furnace during the production of flat glass can be classified as the faults in the furnace working process and the raw material composition. In order to prevent or reduce the amount of defects caused by the regenerative furnace, furnace temperature and operational activities must be kept under control, and internal furnace observations must be done very well. In particular, the refractories that make up the furnace structure are deformed as a result of thermal, mechanical and chemical interactions and cause defects in the glass. This is an inevitable mechanism that has continuity, it should be followed well and measures should be taken periodically in a timely manner. The speed of this mechanism is related to the furnace operating conditions. The biggest cause of raw material-related defect is contamination, weighing imperfections, grain sizes, moisture content and blending temperature not being at the desired level. Keeping these under control ensures that the blend-related defects are at a minimum level. Defects detected

due to regenerative furnace and raw material during flat glass production were visualized and analyzed with the help of stereo microscope. Information and suggestions about what measures should be taken to prevent or reduce these defects are presented in detail. One of these; With the systems developed within the scope of Industry 4.0, the controls of the furnace temperature, blending and foam lines are made more tightly and more systematically automatically. As a result, a higher quality flat glass can be produced and energy savings can be achieved.

**Keywords:** Float glass production, Regenerative furnace, Defects of glass.



# 1.GİRİŞ

Cam insan hayatının her alanında ve ekonomide önemli bir yere sahiptir. İnşaat ve otomotiv sektöründen bilişim ve iletişim alanlarına kadar her alanda ihtiyaç duyduğumuz, saydamlığı sayesinde asla vazgeçemeyeceğimiz bir ana malzeme türüdür. Bu sebeple cam üretimi insan hayatını olduğu kadar sanayi girdilerini ve ekonomiyi de doğrudan etkilemektedir. Cam üretiminde oluşan hatalar da aynı ölçüde ekonomik kayba neden olabilmektedir. Düz cam üretimi sırasında camda çeşitli hatalar meydana gelmektedir. Cam üretimi sırasında meydana gelen hatalar belirli ölçülerde kabul edilebilirken, hataların fazla olması ve kullanım açısından kabul edilemeyecek düzeyde olması verim kaybına neden olmaktadır.

Cam üretimi sırasında meydana gelen hataların hangi aşamada meydana geldiğini, hatayı görmeden tespit etmek pek mümkün değildir. Tespit edilen hataların bazılarının tamamen ortadan kaldırılması mümkün olabilirken, bazı hataların tamamen ortadan kaldırılması çok zordur ve sadece hata miktarlarının azaltılması sağlanabilmektedir.

Hatalar hammaddelerden harmanın hazırlanarak, ergitilmesi, afinyona uğraması ve tavlanması kademelerinin herhangi birinde meydana gelebilmektedir. Cam hatalarını genel olarak, taş, camsı hatalar, habbe ve devitrifikasyon diye dört sınıfa ayırabiliriz.

Hataların oluşmasına, yanlış harman tartımı, harmanda meydana gelen kontaminasyon, fırın sıcaklık set değerlerindeki değişimler, fırın cam seviyesindeki değişimler gibi birçok neden sebep olabilmektedir. Bundan dolayı hataları analiz ederken harman ve fırın şartları dikkatle incelenmelidir.

Taş hataları genelde harmanın fırında tam anlamıyla eriyememesinden kaynaklı hatalar olmakla birlikte, üst yapıdan meydana gelen damlamalar gibi nedenlerden de kaynaklanabilmektedir. Damar hataları, inhomejeniteden kaynaklı camsı hatalardır. Düğme hataları genellikle camın refrakterle teması sonucu camda oluşan hatalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Habbe hatası, genellikle harmanın ergimesi sırasında meydana gelen gazların, afinyon bölgesinde camdan çıkamaması sonucu camın içinde kalması sonucu oluşan hatadır. Devitrifikasyon hatalarıysa camda meydana gelen kristallenmeler sonucu oluşan hatalardır.

Bu hatalar genel olarak;

- Harmanın bloklarla temas etmesi
- Üst yapıdan meydana gelen damlamalar
- Fırında oluşan yoğun gaz ile refrakterlerin etkileşimi
- Fırın soğuk bölgelerindeki kopmalar
- Fırın cam seviyesindeki değişimler
- Harman köpük hattının kopması
- Fırın sıcaklık değişimleri
- Yanlış harman tartımları
- Refrakterlerdeki aşınmalar
- Cam kırığındaki kirlilikler

nedeniyle meydana gelmektedir. Camda görülen hataların çok büyük bir bölümü hammadde ve fırın kaynaklıdır.

Bu tez çalışmasında stereo mikroskop yardımıyla tespit edilen fırın ve hammadde kaynaklı hataların görüntülemeleri yapılarak hataların kaynaklarının ne olabileceği konusunda bilgiler verilmiştir.

Meydana gelen hataların ilk etapta azaltılması ve mümkünse bu hataların tamamen ortadan kaldırılması için ne gibi tedbirler alınabileceği görseller ve analizler yardımıyla açıklanmıştır. Ayrıca bu tez çalışmasında, float tekniğiyle yandan ateşlemeli rejeneratif fırınla düz cam üretim prosesi hakkında detaylı bilgi aktarımı sağlanmıştır.

# 1. CAMIN TABİATI

## 1.1. CAMIN TARİHÇESİ

Camın tarihiyle ilgili farklı kaynakların mevcut olmasıyla birlikte, ilk defa doğal cama M.Ö. 7500'lerde, insanların yaptığı cam ürünlerine ise M.Ö. 8000'lerde Mezopotamya bölgesinde Neolitik dönemde denk gelinmiştir [1].

Tam olarak ne zaman üretildiği bilinmese de en eski camın M.Ö. 2500 tarihinde Mısır'da bulunan cam boncukları olduğu bilinmektedir. Mezopotamya'da eski seramik boncuklar, seramik sırrı ile kaplanırdı. Seramik üzerindeki "sır" bir çeşit camdır. M.Ö. 2500'lerdeki boncuklar ise tamamen bu camdan yapılmıştır. Bu nedenle seramik üreticilerinin camı keşfettiği de düşünülür [2].

Eski Mısır'da M.Ö. 600 yıllarında bilinçli bir şekilde cam üretmek için harmanlar hazırlanmaya başlanmış ve harman reçetesine renkli cam üretimi için kobalt, bakır gibi materyaller eklenmiştir. Kil tabletlerinde bu dönemlere ait cam reçetelerine rastlanmıştır [3].

Camın tabaka olarak üretimi için ilk adım, 1905 yılında Belçika'da Fourcault'un bir tank içinde camı devamlı çektiği sistemi bulmasıdır. Camın tabaka olarak üretimi için önemli bir buluş da, İngiltere'de Pilkington Kardeşler tarafından İkinci Dünya Savaşından sonra gerçekleştirilmiştir. Bu metotla cam ergimiş kalayın üzerine yayılarak düzenlenmiş ve sonrasında çekilmiştir. 1959 yılında gerçekleşen bu önemli buluş cam üretimi konusunda yapılan son buluş olmamıştır. Bu kapsamda çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir [4].

## 1.2. CAMIN ENDÜSTRİDEKİ ÖNEMİ

Camın hayatımızdaki yeri, gelişen teknolojilerin etkisiyle daha önemli hale gelmeye başlamıştır. Mutfak araç gereklere, teknolojik ürünlerde, uzay teknolojilerinde, ev pencere ve dış yalıtım sistemlerinde ve savunma sanayisi başta olmak üzere hayatımızın her alanında cam ürünlerine ihtiyaç duymaktayız. Gün geçtikçe artan ihtiyaçlarla birlikte cam ürünlerinin üretim miktarları her geçen yıl artmakta ve sanayide hem istihdam hem

de ülke ekonomisine ciddi katkı sağlamaktadır.

2018 yılı itibariyle son 10 yılda, dünya cam üretim kapasitesinin %4-5 birleşik büyüme ile 120 milyon tondan, yaklaşık 175 milyon ton seviyelerine ulaştığı öngörülmektedir. Bu üretimin Tablo 1’de görüleceği üzere dünya cam kurulu üretim kapasitesi faaliyet alanının %47’sinin düz cam, %46’sının cam ambalaj, %4’ünün cam elyaf ve %3’ünün cam ev eşyası ürünlerine aittir [5].

Tablo 1: Dünya cam kurulu üretim kapasitesi faaliyet alanı [5]

	<b>Kapasite ( Milyon Ton)</b>	<b>Pay %</b>
<b>Düz Cam</b>	82	47
<b>Cam Ambalaj</b>	80	46
<b>Cam Ev Eşyası</b>	6	3
<b>Cam Elyaf</b>	6	4
<b>Toplam</b>	<b>175</b>	<b>100</b>

2019 yılında global cam üretim pazarının 127,1 milyar dolar seviyelerinde gerçekleştiği raporlanmaktadır. Fiyat bazında bakıldığında pazarın %60’ını düz cam, %31’ini cam ambalaj, %5’ini cam elyaf ve %4’ünü cam ev eşyası oluşturmaktadır. 2020 yılı itibariyle gelecek 5 yılda yıllık ortalama %5-6 büyüme ile pazarın yaklaşık olarak 230 milyar dolar seviyelerine ulaşması beklenmektedir [6].

Küresel konumda üretimde Türkiye düz camda Avrupa’da 1’inci, dünyada 5’inci sırada, cam ev eşyasında Avrupa’da 2’nci, Dünya’da 3’üncü sırada, cam ambalajda Avrupa’da ve Dünya’da 5’inci sırada sıradadır [6].

### **1.3. CAMIN TANIMI VE YAPISI**

#### **1.3.1. Cam**

Cam eriyik haldeki yapısını koruyarak katılaşmış amorf bir malzemedir. Cam, sert, şeffaf, çabuk kırılan, nispeten yüksek yumuşama noktası olan, suda ve organik çözücülerde çözünmeyen, viskozitesi yüksek bir malzemedir.

Eritilen birçok bileşik ve elementin viskoziteleri hemen hemen su ile benzer sıvıları meydana getirirler. Bu tip sıvılar donma noktalarına kadar viskoziteleri artar ve hızla kristallenerek katılaşır. Ergimiş veya sıvı durumdaki cam yoğun bir viskoziteye sahiptir. Bu durumdaki cam donma sıcaklığına kadar soğutulduğunda kristallenmeleri belli bir oranda mümkün olsa da bunun oluşma hızı çok yavaştır ve hızlı bir soğutma ile

kristallenmeden soğutulabilirler. Soğutma ile meydana gelen yeni yapı, kristal yapılı malzemeler gibi belirli erime derecesine sahip değildir. Sıcaklığın düşmesiyle viskozitesi artan eriyik sonunda öyle bir noktaya ulaşır ki özellik olarak mekanik açıdan katı bir malzemeye benzer ve bu yeni malzeme cam olarak adlandırılır [7-9].

Tablo 2: Erime sıcaklığında bazı element ve bileşiklerin viskoziteleri [10]

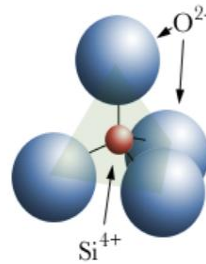
Madde	Erime Sıcaklığı (°C)	Viskozite (poise)
Su	0	0.02
LiCl	613	0.02
Na	98	0.01
Zn	420	0.03
Fe	1535	0.07
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	309	10 <sup>6</sup>
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	450	10 <sup>5</sup>
SiO <sub>2</sub>	1710	10 <sup>7</sup>

Tablo 2' de bazı maddelerin erime sıcaklıkları ve viskozite değerleri yer almaktadır.

### 1.3.2. Camın Yapısı

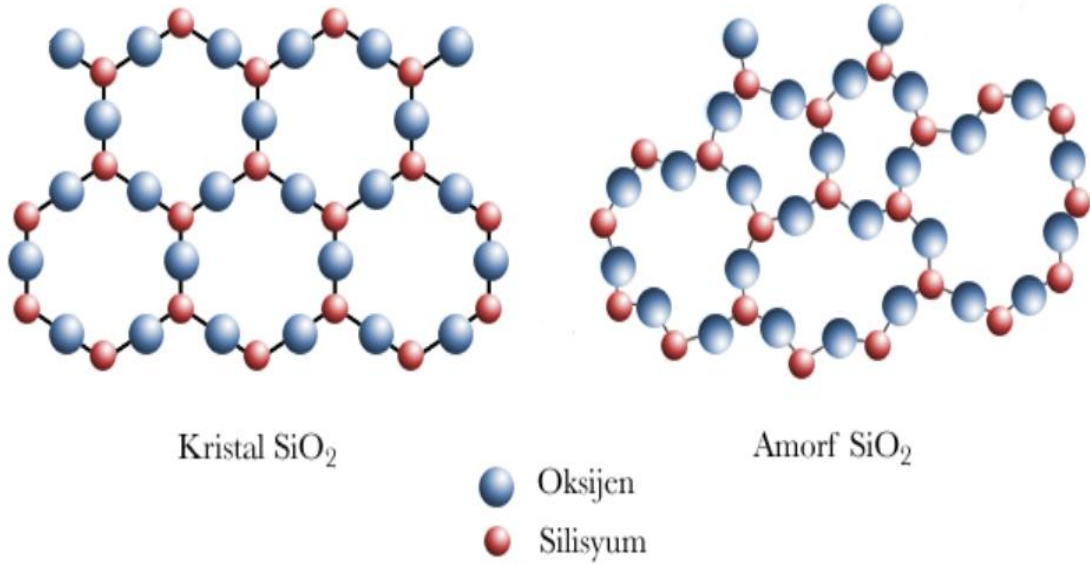
Cam kimyasal olarak, belirli oranlardaki metal oksitlerin karışması olarak tanımlanabilir. Bu metal oksitler, silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>), kalsiyum oksit (CaO), sodyum oksit (Na<sub>2</sub>O), alüminyum III-oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), kurşun oksit (PbO), magnezyum oksit (MgO), bor III-oksit (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) gibi oksitlerin bileşimleridir [11].

Camın yapısında atomlar düzensiz olarak dizilmişlerdir. Tüm camlarda birim boyutta düzen olmasına rağmen bu düzen sürekli korunmamaktadır. Silika camında Si-O atomları tetrahedra oluştururlar. Si atomu dört tane oksijen atomu ile çevrelenir. Her oksijen iki tetrahedra arasında paylaşılır. Şekil 1.1'de SiO<sub>2</sub> (silika) tetrahedrası görülmektedir [12].



Şekil 1.1 SiO<sub>2</sub> tetrahedrası [13]

Soldaki şekil kristal yapıdaki bileşiğin, sağdaki şekil ise hızlı soğutulmuş elde edilen amorf yapıdaki bileşiğin yapısını göstermektedir. Cam yapısında atomlar arası bağların bazı yön dayatmalarına tabi olması sebebiyle, amorf yapıdaki cam kristalleşmiş haline benzer, fakat simetrisi bozulmuş olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 1.2 SiO<sub>2</sub> bileşiğinin iki boyutlu yapısı [13]

Cam yapısındaki oksitlerin her biri miktarları doğrultusunda camın özelliklerini etkiler. Camın özelliklerine direkt etkisi olan bu oksitler üç grupta toplanır. Bunlar, cam yapıcılar, düzenleyiciler ve ara oksitlerdir.

Cam yapıcılar; “ağ yapıcı” olarak isimlendirilen oksitlerdir.

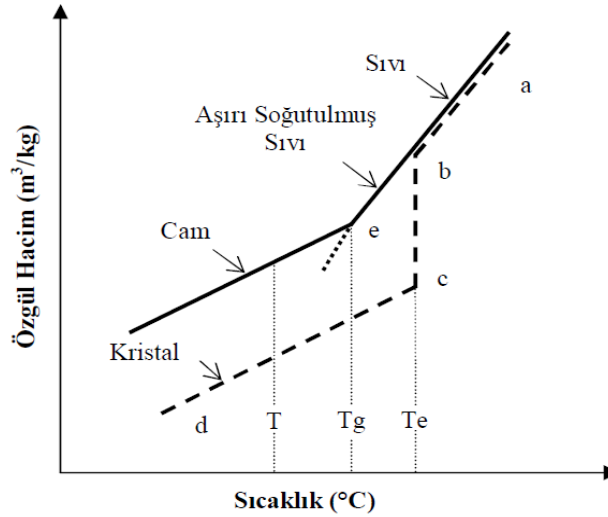
Düzenleyiciler; cam harmanında düşük sıcaklıkta reaksiyon gerçekleştiren oksitlerdir. Alkali oksitler ile toprak alkali oksitler genellikle bu gruba girerler.

Ara oksitler; soda kireç cam yapısında en çok kullanılan ara oksit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'tir.

Tablo 3: Cam bileşiminde kullanılan bazı oksitler [14-16]

Cam Yapıcılar	Aradakiler	Düzenleyiciler
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
SiO <sub>2</sub>	SbO <sub>3</sub>	Li <sub>2</sub> O
GeO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	BaO
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PbO	SrO
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BeO	Na <sub>2</sub> O
	ZnO	K <sub>2</sub> O

Bir maddeye, yeterli miktarda enerji verildiğinde sıvı hal durumuna geçmektedir. Bu sıvı soğutulduğunda ise katılaşma meydana gelmektedir. Atom dizilişi düzenli olan bir kristal malzemede, ergime noktasının altında lineer katılaşma meydana gelmektedir. Özgül hacminde ise önemli bir düşüş görülmektedir [17]. Bu tür kristal malzemelerin tersine, cam yapısının katı ve sıvı fazları arasındaki geçişi, net bir sıcaklık değerinde olmamakla birlikte bu geçiş belirli bir sıcaklık aralığında meydana gelmektedir. Camın soğutulması sırasında katılaşma gerçekleşirken kristalleşme durumu gerçekleşmemektedir [18]. Ergitilip sonrasında soğutulduğunda cam meydana getiren bir malzemenin davranışını Şekil 1.3'deki özgül hacim-sıcaklık grafiği ile açıklanmaktadır.



Şekil 1.3 Sıvı-Katı hal arasındaki ilişki ve cam dönüşümü [14,19,20]

Eğer ergimiş durumda bulunan malzeme, kristalleşme gerçekleştirmeden soğuma işlemine devam ederse, Şekil 1.3'de görüldüğü gibi hacim b-e hattı boyunca azalmaktadır. Malzemenin b ve e noktaları arasındaki hali “aşırı soğutulmuş” olarak nitelendirilmektedir [14]. Tg noktasına kadar hacim değişiminin hızlı olmasının nedeni atomların belirli düzen çerçevesinde yapılanamamalarından kaynaklıdır [17]. Tg sıcaklığında eğimin değiştiğini görülür, bu sıcaklık noktasının adı; cama geçiş sıcaklığıdır. Cam dönüşümünün bu sıcaklık noktasında olduğu kabul edilir. Bu dönüşüm bir anda gerçekleşmez ve bir cam için Tg sıcaklığı net olarak belirlenmiş bir sıcaklık değildir. Bu sebeple “cama geçiş sıcaklığı” yerine, “cama geçiş bölgesi” ifadesi de kullanılmaktadır [14].

## 1.4. CAMIN HAMMADDELERİ

Bu bölümde camı oluşturan hammaddeler hakkında bilgi verilecektir.

### 1.4.1. Silis Kumu (SiO<sub>2</sub>)

Doğada bol miktarda bulunur ve yer kabuğunun ağırlığının yaklaşık olarak %59'unu oluşturmaktadır. Bunların en yaygın olan biçimi kuvarstır. Silika en yaygın olarak kullanılan cam yapıcı oksittir. Cama mukavemet ve dayanıklılık kazandırır. 1700° C'nin üzerinde ergir. Asitlere karşı yüksek dayanım sağlar. Tane boyutu küçüldükçe erime hızlanır [21].

### 1.4.2. Soda (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)

Ergime sıcaklığı 851°C'dir. Soda kumun ergimesini kolaylaştırır. Ergimiş camın viskozitesini düşürerek akışkanlığını artırır. Camın şekillendirilmesini kolaylaştırır. Camın kimyasal ve mekanik dayanımını azaltır [21].



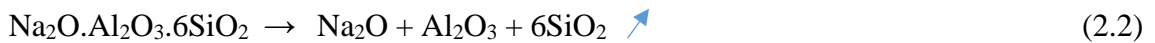
### 1.4.3. Dolomit (CaCO<sub>3</sub>.MgCO<sub>3</sub>)

Dolomit (CaCO<sub>3</sub>.MgCO<sub>3</sub>) 2500 °C 'de ergir. MgCO<sub>3</sub> 780 °C'de MgO'e, CaCO<sub>3</sub> 900°C'de CaO'e dönüşür. Harmanın ergimesini hızlandırır. Katılaşma hızını azaltır. Çalışma aralığını artırır. Cama parlaklık kazandırır. Suya karşı kimyasal dayanımı artırır. Az miktarda dolomitin ergimeyi hızlandırdığı fazla miktarda kullanımı ise ergimeyi zorlaştırdığı görülmüştür [21].



### 1.4.4. Feldspat (Na<sub>2</sub>O.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.6SiO<sub>2</sub>)

Feldspat (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) harmana alümina kaynağı olarak katılır. İçerisinde bulunan alkaliler (Na, K) camın ergime sıcaklığını düşürür. Alümina ise çarpma, bükülme ve ısıl şoklara karşı dayanıklılık sağlar. 1120-1235 °C sıcaklıkları arasında ergir. Kimyasal dayanıklılığı sağlar. Cama parlak bir görünüm verir. İçerisindeki Na<sub>2</sub>O nedeniyle, kullanılacak olan soda miktarının düşmesini sağlayacaktır [21].



#### 1.4.5. Kalker (CaCO<sub>3</sub>)

Kalker (CaCO<sub>3</sub>) 880 °C'de CaO'e dönüşür. Kireç ise 2500 °C'de ergir. Camın kimyasal dayanıklılığını artırır. Mekanik özelliği artırır. Devitrifikasyon yani kristallenme sıcaklığını yükseltir. Camın katılaşma hızını artırır. Camın yüksek sıcaklıkta viskozitesini düşürür. Kalkerin fazla olması camın sert, kırılğan olmasına ve erime güçlüklerine neden olur [21].



#### 1.4.6. Sodyum Sülfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Ergime sıcaklığı 884 °C'dir. Harmanda afinyasyonu kolaylaştırır. Harmanın erime hızına olumlu etkisi vardır. Camın renginin berraklaşmasına yardımcı olur. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'lü camlar, diğer camlara göre daha sert ve dayanıklıdır [21].



#### 1.4.7. Antrasit

Antrasit; kum, feldspat, dolomit, kalker ve (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)'den gelen demiri indirgemek için kullanılır. Redoks oluşturur [21].



#### 1.4.8. Cam Kırığı

Cam kırığı harmanının hazırlanma aşamasının son bölümünde harmana eklenir. Kolay eriyebilen cam kırığı harmanın ergimesini kolaylaştırdığı gibi harmanın ergime sıcaklığını düşürerek daha az enerji kullanılmasını sağlar. Cam kırığı bu özelliklerinden dolayı harmana fazlaca konulmak istenir [21].

Cam kırığının temiz olması çok önemlidir. Dış ortamdan cam kırığına gelen yabancı maddeleri arındırmak için yıkama işlemi yapılmalı ayrıca metal dedektörleri ile içine karışmış olan metallerin fırına girmesi engellenmelidir. Dışarıdan satın alınan cam kırıklarının boyutları büyükse istenilen boyutlara gelmesi için kırma işlemi uygulanarak fırına şarj edilmesi gerekmektedir.

## 1.5. CAMIN ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde camın özelliklerinden bahsedilecektir

### 1.5.1. Fiziksel Özellikleri

Camın fiziksel özelliklerinin başında cam oluşum evresinde çok önemli bir yere sahip olan viskozite özelliği gelmektedir. Viskozite, genel anlamıyla akışkanlarda (sıvı ve gaz) görülen iç sürtünme durumudur. Bu sürtünme durumu, akışkan içindeki moleküller arasında meydana gelmekte ve akış yönüne zıt yönlü bir kuvvet doğurmaktadır. Viskozite tanımında dikkate alınan kuvvet, bu sürtünme kuvvetidir [10].

Viskozite camın kimyasal yapısına ve üretim sırasında maruz kaldığı sıcaklık derecelerine göre değişim gösteren bir özelliktir. Ergimiş durumda bulunan camın viskozite karşılığı  $10-10^2$  poise arasındadır. Balın viskozite değeri 100 poisedir. Buradan yola çıkarak ergimiş durumdaki camın ne kadar viskoz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığında bulunan camın viskozite değerinin  $10^{22}$  poise olduğu varsayılmaktadır. Cam için bazı karakteristik noktalar mevcuttur. Bu noktalar şu şekildedir [10];

*Ergime Bölgesi:* Bu bölüm harmanın ergidiği sıcak bölgedir. Buradaki viskozite değeri  $10-10^2$  poise arasındadır.

*Damla Noktası:* Bu bölge viskozite değerinin  $10^3$  poise'ye karşılık geldiği yerdir. Fıskanın veya damlanın alındığı sıcaklık değeridir.

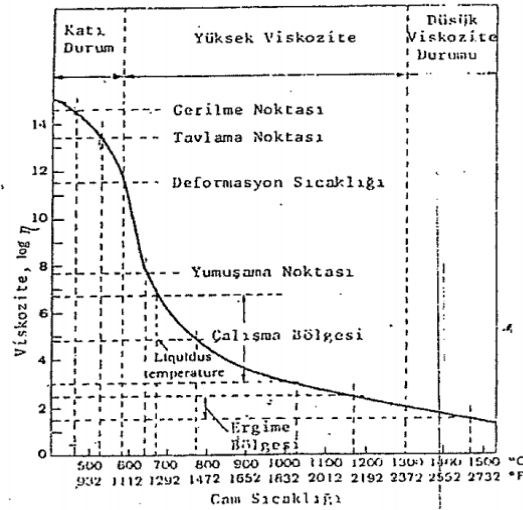
*Akma Noktası:* Viskozite değerinin  $10^5$  poise'ye karşılık geldiği sıcaklıktır. Bu sıcaklıkta cam, tek yüzeyinde akma özelliği göstermektedir. El imalatlarında şekillendirme, presleme ile bu sıcaklıkta yapılmaya devam etmektedir.

*Sinterleşme Sıcaklığı:* Cam viskozite değerinin  $10^6$  poise olduğu, cam parçacıklarının birbirine yapıştığı değerdir.

*Yumuşama Noktası:* Viskozite değerinin  $10^{7,65}$  poise'ye karşılık geldiği noktadır.

*Tavlama Noktası:* Camın viskozite değerinin  $10^{13}$  poise'ye karşılık geldiği ve camdaki gerilmelerin 15 dakika içinde giderildiği noktadır.

*Gerilme Noktası:* Viskozite değerinin  $10^{14,5}$  poise'ye karşılık geldiği ve camda bulunan gerilmelerin yaklaşık olarak 4 saatte giderildiği bir sıcaklıktır.



Şekil 1.4 Viskozitenin sıcaklıkla değişimi ve karakteristik viskozite noktaları [10]

Şekil 1.4'de sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri gösterilmiş karakteristik viskozite noktaları şekil üzerinde işaretlenmiştir. Kimyasal bileşimine göre camın özgül ağırlığı 2,2-7,2 gr/cm<sup>3</sup> olarak değişkenlik gösterir [11].

Isıl genleşme, camın en belirgin fiziksel özelliklerinden biridir. Bu özellik camın kimyasal kompozisyonuna daha doğrusu cam yapısı içinde yer alan oksitlerin çeşidine ve miktarına göre değişimler göstermektedir.

Camların termal şoka karşı dirençlerini etkileyen parametre ısıl genleşme katsayı değeridir. Bu değer küçük olması, camların dayanabilecekleri sıcaklık farkını artırmaktadır. Bundan ötürü ısıya dayanıklı olması istenen kapların üretimi, küçük genleşme katsayısı olan borosilikat benzeri camlardan yapılmaktadır [10].

Camın önemli bir diğer özelliği olan ısı iletkenlik, kimyasal yapısında yer alan soda, kurşun ve potasyum oksitli kompozisyonların karışım oranlarına göre yükselmektedir [11].

### 1.5.2. Elektriksel Özellikleri

Camlar yüksek elektrik direncine sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde sigorta parçası olarak veya izolatör olarak kullanılır [10].

### 1.5.3. Optik Özellikleri

Geçirgenlik, ışığın camın içinden geçmesidir. Otomotiv ve mimari camlarında geçirgenlik önemli bir özelliktir. Yansıma ise ışığın camın bir yüzeyine çarparak aynı

ortama tekrar dönme özelliğidir. Silikat camlarda yansıtma değeri ortalama %4'tür. Tamamen saydam olan bir camın geçirgenlik değeri %92'dir. Yansıtmadaki kayıplar özel kaplama gibi işlemlerle minimum değere indirgenebilmektedir [11].

#### 1.5.4. Kimyasal Özellikleri

Kimyasal dayanıklılık, camın katı, gaz ve sıvı haldeki maddelerle tepkimeye girmeme özelliğidir. Kimyasal işlemler yapılan işlerde ihtiyaç duyulan camlarda kimyasal dayanıklılık çok büyük önem arz etmektedir. Camların kimyasal dayanıklılık özelliğini çinko oksit, zirkonyum oksit, alüminyum oksit ve boroksit artırmaktadır [11].

#### 1.5.5. Mekanik Özellikleri

Camın mekanik özellikleri, aşınmaya karşı direnç, mekanik dayanım ve rijidliktir. Mekanik dayanım camın kırılmaya karşı gösterdiği dirençtir. Camın esnemeye karşı gösterdiği dirence ise rijidlik denir [10].

Camın mukavemet değeri  $2.7 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  'dir. Sertlik değerine göre en yumuşak camlar kurşunlu camlardır. En sert camlar ise borosilikat camlarıdır. Borosilikat camların sertlik değeri 5-7 mohs arasında değişmektedir [11].

### 1.6. CAM ÇEŞİTLERİ

#### 1.6.1. Kimyasal Bileşimi Ve Özelliğine Göre Cam Çeşitleri

Bu bölümde camlar kimyasal kompozisyonlarına göre sınıflandırılmıştır.

Tablo 4: Bazı cam çeşitlerini ve % bileşenlerin değerleri [22]

Türü	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	PbO	MgO	BaO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	F <sub>2</sub>
Soda tipi ev eşyası	73	16	1	8,5		0,3	0,5	0,5	0,2		
Ambalaj	72,5	14	0,5	10		1			2		
Düz cam	72,8	14,5	0,5	7,5		3,7			1		
Kurşunlu cam	54,6	0,5	13,4		31		0,2	0,2	0,1		
Borcam-Pyrex	81	4,5						12	2,5		
Fiber cam	54,8	0,5		15,9		4,4		10	14,4		
Opal cam	61,5	8		5,3	1,9				7,8	11,5	4
Optik cam	52,5	1,5	7,8		18,5		12,6		0,1	7	

Tablo 4’de Bazı cam çeşitlerini ve % bileşenlerin değerlerini göstermektedir.

#### 1.6.1.1. Soda-Kireç Camı

Şişe camından pencere camlarına kadar en çok kullanılan camlar soda-kireç camları olarak bilinmektedir.

Bu camlar değişik oranlarda  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $MgO$  içerirler. En belirgin özellikleri ışık geçirgenliklerinin iyi olması ve porozitesiz, düzgün yüzeylere sahip olmalarıdır.

#### 1.6.1.2. Borosilikat Camlar

Halk arasında borcam diye tabir edilen borosilikat camları ısıya dayanıklı camlar olarak bilinir. Borosilikat camlar genleşme katsayısının düşük olmasından dolayı ani sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklıdır. Günümüzde farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [10].

#### 1.6.1.3. Kristal Camı

Habbelerden arındırılmış, kurşun ve potasyum oranı yüksek ve renksiz bir camdır. Yüksek kurşun ya da potasyum miktarından dolayı ışığı kırma özelliği yüksektir. Kristal cam terimi özellikle aynacılık sektöründe kullanılmaktadır. Optik nitelikleri bakımından yüksek kaliteye sahip aynalardır [11].

Kristal cam tabiri, uluslararası boyutta yalnız %24’den daha fazla kurşun oksit ( $PbO$ ) içeren camlar için kullanılmaktadır. Kristal camların kırılma indisi değeri 1,545’i geçmemektedir. Radyasyon camı ve elektronik endüstrisinde kullanılmaktadır [10].

#### 1.6.1.4. Kurşunlu Kristal Cam

Kristal yapımı için kullanılan camdır.  $PbO$ , cam kompozisyonuna kırılma indisi değerini artırıcı olarak eklenerek kristal camda ışığın renklerine ayrılmasını sağlar. Cam  $PbO$ ’ nun etkisiyle hafif mor gibi bir renk olur. Kurşunlu kristal camlar, tamamlayıcı renklerle işlenerek, en beyaz cam olma niteliği kazanırlar [1].

#### 1.6.1.5. Silis Camı (Silika kuvars camı)

Silika camı saf  $SiO_2$ ’den elde edilir. Bu cam viskozitesi çok yüksek yapıya sahiptir. Çok yüksek sıcaklıklara rağmen saydamlığını kaybetmez. Çok yüksek sıcaklıklarda ergidiği için pahalıdır. Düşük genleşme katsayısına sahiptir. Mor ötesi (UV) bölgesine kadar

ışınları çok iyi geçirirler. Bundan dolayı mikrop öldürücü özel lambaların yapımı için kullanılır [10].

#### 1.6.1.6. *Su Camı (Sodyum silikat camları)*

Camın kompozisyonuna giren potasyum veya sodyum oranına göre potas veya sodyum cam adını alırlar. Aslında su camı, yapımı sırasında eklenen kumun potas ya da soda benzeri alkalilerle yapılmış erigidir. Bu cam suya dayanıksızdır ve suda çözünmeye uğrar. Konservecilik, deterjan yapımı gibi pek çok alanda esas madde olarak kullanılır [3,11].

### 1.6.2. Özel Camlar

Bu bölümde klasik cam çeşitlerinin dışında kalan özel üretim olan camlardan bahsedilecektir.

#### 1.6.2.1. *E-Camı*

E-camları yüksek oranda  $Al_2O_3$  ve CaO ile düşük oranda soda içeriğine sahip olan camlardır. İçerdiği oksitlerin sayesinde kimyasal olarak dayanıklı aynı zamanda çabuk sertleşen bir camın ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Suya karşı çok dirençli olan bu camlar, çoğunlukla nemli ortam çalışmalarını için geliştirilen kompozit malzemelerde kullanılır [10].

#### 1.6.2.2. *Tungsten Camı*

Bu camlar ampullerde mevcut olan tungsten metalinin sabitlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Tungstenin genişlemesiyle tungsten camının uyumlu olması gerekmektedir. Camın içeriğinde bor oksit oranının fazla olması tungsten camının önemli bir özelliğidir [10].

#### 1.6.2.3. *Sodyum Direnç Camı*

Nadir rastlanılan cam yapısına sahiptir. Silis miktarı %8 olan camın kompozisyonunda bor oksit ve alüminyum miktarları çok fazladır. Bu tür camlar ticari olarak üretilen borosilikat camları arasında en yaygın olanıdır [10]. Tablo 5’de temel cam tipleri ve kullanım alanları belirtilmektedir.

### 1.6.3. Kullanım Yerlerine Göre Cam Çeşitleri

Camlar kullanım yerlerine göre özellikleri açısından farklılık gösterirler.

Tablo 5: Temel cam tipleri ve kullanım alanları [23]

Cam Tipi	Kullanım Yerleri
Soda Kireç Camı	-Cam kaplar -Düz cam -Sofra eşyaları Bazı elyaf camları Bazı elektrikli camlar (ör. Ampul camı)
Borosilikat Camı	-Isıya dayanıklı fırın kapları -Düşük çözünürlüğe sahip camlar (ör. Kimyasal madde ve ilaç saklama) -Bazı özel optik camlar -Laboratuvar kapları -Elektriksel güç kaybını azaltan camlar -Cam fiber
Kurşunlu Cam	-Yüksek kaliteli sofra eşyaları -Optik camlar -Yüksek elektriksel dirence sahip camlar -Radyasyon korunma panoları(%82PbO)

Tablo 5’de kullanım yerlerine göre cam tipleri gösterilmektedir. Görüldüğü üzere camlar insan hayatının her alanında yaygın kullanılan bir maddedir.

## 2. CAM ÜRETİMİ

Bu bölümde cam üretiminin aşamaları incelenecektir.

### 2.1. ANA BİLEŞENLERİN HAZIRLANMASI

Kaliteli bir cam üretimi için hammadde seçimi önemli kriterdir. Üretilecek cama göre hammadde kompozisyonları ve tane boyutlarının ayarlanması gerekmektedir. Hammaddelerin belirli oranlarda bir araya gelmesiyle oluşan yığına cam terminolojisinde harman adı verilmektedir [23].

Harmanı meydana getiren hammaddeler, istenilen kimyasal ve fiziksel özelliklerde ayarlanarak cam üreticisi olan firmalara teslim edilmektedir. Gerekli kontrolleri yapılan hammaddelerin, üretilecek camın özelliklerine göre belirlenen oranlarda karışımları yapılarak harman haline getirilmektedir. Hazır olan harmanın fırına sevki gerçekleştirilerek ana bileşenlerin hazırlanması aşaması tamamlanmış olur.

### 2.2. ERGİTME

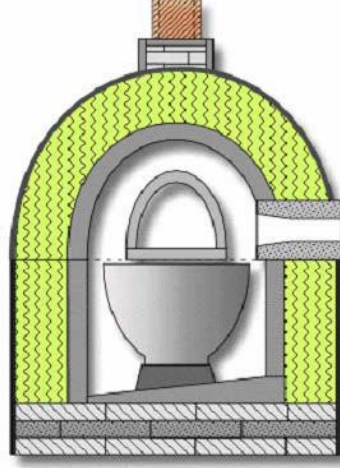
Ergitme prosesi, enerjinin en fazla tüketildiği bölümdür. Cam üretiminde, cam türüne bağlı olarak şekillendirme yöntemleri ve sonrasındaki süreçler değişiklik gösterse de, ergitme süreci aynıdır. Fırına beslenen hammadde yüksek (1400-1600°C ) sıcaklıklarda kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar sonucu ergimiş cam haline gelmektedir. Reaksiyonlar sonucu camın içinde kalan gazlar afinyasyon ile camdan arındırılır ve son olarak cam eriyiğinin homojenizasyonu sıcaklık/yoğunluk farkından kaynaklanan akışlar ile sağlanarak ve şekillendirmeye uygun sıcaklıklara getirilerek ergitme süreçleri tamamlanmaktadır [24].

#### 2.2.1. Fırın Tipleri

Cam fırınları üretilecek camın türüne, miktarına, kullanılan enerji kaynağına, camdan beklenen kaliteye ve enerji tasarruf şekilleri gibi belirli özelliklere göre sınıflandırılmaktadırlar [25].

### 2.2.1.1. Pota Fırınları

Pota fırınları küçük ölçekli ve kesikli üretimlerde tercih edilmektedirler. Bu fırınlar 350 kg ile 1 ton aralığında değişen kapasiteye sahiptirler. Potalar farklı refrakter kil çamurların elle veya alçı ile kalıplarda şekillendirilmesiyle elde edilirler. [25,26].



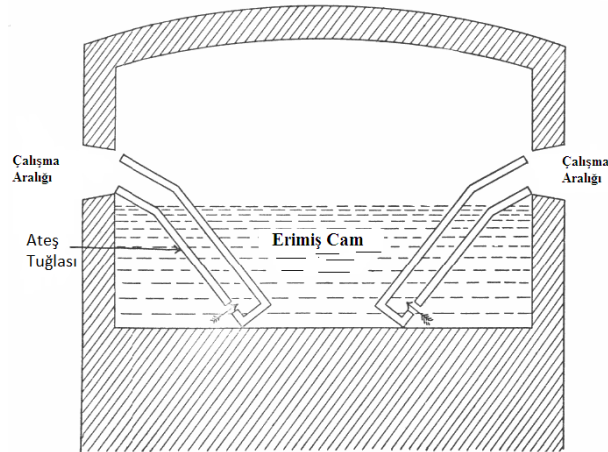
Şekil 2.1 Potalı fırının şematik olarak görüntüsü [4]

Potalı bir fırın şematik olarak Şekil 2.1’de görülmektedir.

### 2.2.1.2. Tank Fırınları

Bu fırınların pota fırınlarından farkı, camın doğrudan refrakterlerden yapılmış olan fırın tankının içerisinde ergitiliyor olmasıdır. Fırın içinde cama açık gerçekleşen yanmadan dolayı pota fırınlarına göre daha yüksek sıcaklık değerlerine çıkma imkânı vardır [23].

Fırının tabanı ve üstü sıcaklık etkilerine dayanıklı olan ateş tuğlalarından (silis, zirkon, alümina) oluşturulur [4].

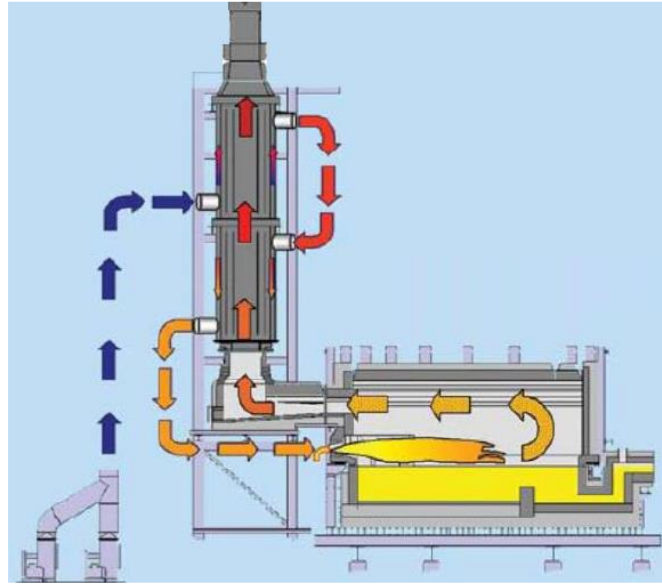


Şekil 2.2 Pencere camı için kullanılan havuz tipi fırının şematik görünümü [4]

Şekil 2.2’de pencere camı üretiminde kullanılan bir havuz fırını şematik olarak yer almaktadır.

### 2.2.1.3. Reküperatif Fırınlar

Rekuperatör, yanma sonucu oluşan gazlardaki ısıyı yakma havasına ters yönlü akım veya eş yönlü akım ile transfer eder, kanal ile fırına bağlanacak biçimde yerleştirilmektedir. Rekuperatörlerin çoğu, yüksek sıcaklığa dayanıklı krom nikel gibi çelik malzemelerden üretilir. Fırın genellikle sağ ve sol olmak üzere iki taraftan aynı zamanda yanan bir sisteme sahiptir. Genel olarak cam elyaf fırınları rekuperatif olarak tasarlanmıştır.

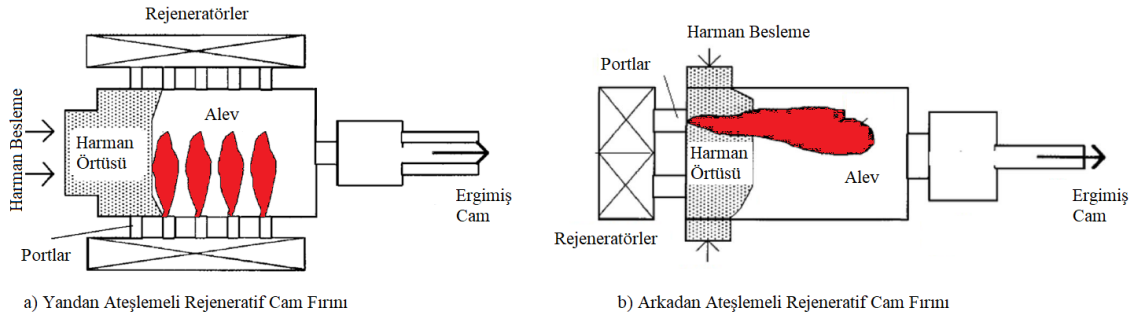


Şekil 2.3 Reküperatif türdeki cam fırınlarına ilişkin şematik görünümü [24]

Şekil 2.3’de rekuperatif cam fırınlarının şematik görünümü yer almaktadır.

### 2.2.1.4. Rejeneratif Fırınlar

Sürekli üretim olan cam fırınlarının atık gaz yardımıyla yakma havasının ısıtılarak fırının verimliliğini artıran sistemler rejeneratif uygulama olarak adlandırılır. Fırının sağ ve solunda rejeneratörler bulunmaktadır ve bunların içinde ısıyı muhafaza eden dolgu tuğlaları vardır. Rejeneratörler, baca gazlarının sahip olduğu ısıyı yakma havasına transfer ederek doğal gazın daha az kullanılmasını sağlamaktadır. Verimli rejeneratörleri olan fırınlar, ön ısıtması olmayan fırınlarla mukayese edildiğinde %70–80 civarında yakıt tasarrufu sunabilmektedir. Genel olarak cam sanayisinde, cam ambalaj, düz cam ve cam ev eşyası üretiminde rejeneratif fırınları kullanılmaktadır.



Şekil 2.4 Regeneratif türdeki cam fırınlarına ilişkin şematik görünümü [24]

Şekil 2.4’de yandan ve arkadan ateşlemeli regeneratif cam fırınları şematik olarak görülmektedir.

#### 2.2.1.5. Oksi Yakıtlı Fırınlar

Yakma havası (atmosfer havası) yerine yüksek saflıkta (>%90) oksijen kullanılan oksiyakıtlı (oxy-fuel) cam fırınları, sektörde kullanılan farklı bir fırın ergitme teknolojisidir. Bu fırın tipinde regeneratör gibi ısı geri kazanımı yapacak sistem yoktur. Fakat ön ısıtma için atık ısı ile reaktan (azot ve doğal gaz) yapıldığı çalışmalar mevcuttur. Oksi-yakıtlı fırınlar cam sanayisinde genelde özel cam türleri (borosilikat ve kristalin gibi) ve cam elyaf için tercih edilen sistemlerdir [24].

#### 2.2.1.6. Tamamı Elektrikli Fırınlar

Elektrikli fırın sistemlerinde ergitme için enerji, cam içinde konumlandırılmış elektrotlar ile iletilmektedir. Acil durumlarda ve fırın ateşlenmesi sırasında diğer (fossil) yakıtlar kullanılmaktadır. Bu tip fırınlar, cam ev eşyası, özel cam, cam yünü ve düşük üretimin olduğu parfüm şişesi üretiminde kullanılmaktadır [24].

### 2.2.2. Harmanda Gelişen Kimyasal Reaksiyonlar

Harmanın fırına şarjı ile cam halini alana kadar ki durumda gerçekleşen reaksiyonlar aşağıda belirtilmektedir.

50-100 °C serbest su uzaklaşır.

400-500°C Soda kalker ve dolomite etki eder.

600 °C Dolomit ayrışmaya başlar.

700°C Soda+Kum reaksiyonları başlar.

700°C Kalker ayrışmaya başlar.

821-850°C sodyum silikat karışımı ve sodyum kalsiyum silikat ergir.

852°C Soda ergir.

884°C Sodyum sülfat ergir.

900°C Cam kırığı ergir.

900°C ilk camın oluşumu, kumun %40'ı silikatlara dönüşüp, ergir.

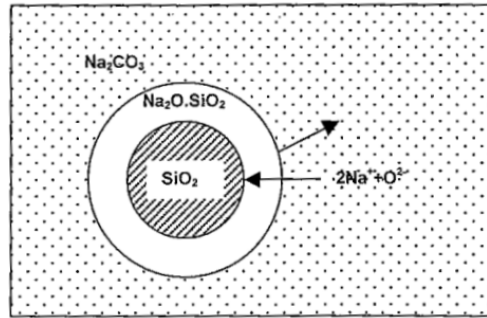
950°C Kalker en hızlı şekilde ergir.

1100°C kumun %80-85'i silikatlara dönüşür ve ergir.

1125°C Feldspat ergir.

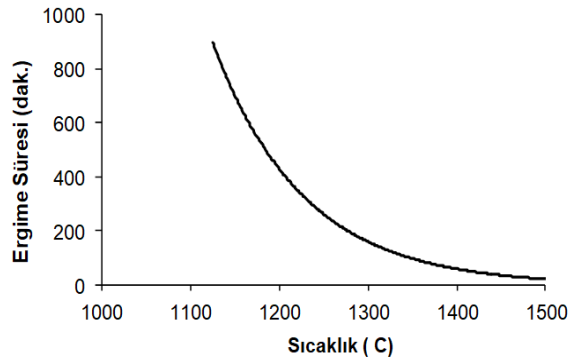
1200-1450°C arasında sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) parçalanır. Ergimemiş kumla silikatlar oluşturur. Geriye kalan ergimemiş az miktardaki kum partikülleri ergimiş camla karışarak çözünür.

1400-1450°C Harman (kum, soda, kalker) tamamen ergir.



Şekil 2.5  $\text{SiO}_2$  ile  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  taneciklerinin katı hal reaksiyon modeli [10]

$\text{SiO}_2$  ile  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  taneciklerinin katı hal reaksiyon modeli Şekil 2.5'de verilmektedir [10].



Şekil 2.6 Sıcaklık – Ergime süresi.

Harmanlamada beklendiği üzere, sıcaklık arttıkça buna bağlı olarak ergime süresinin düştüğü Şekil 2.6’da görülmektedir.

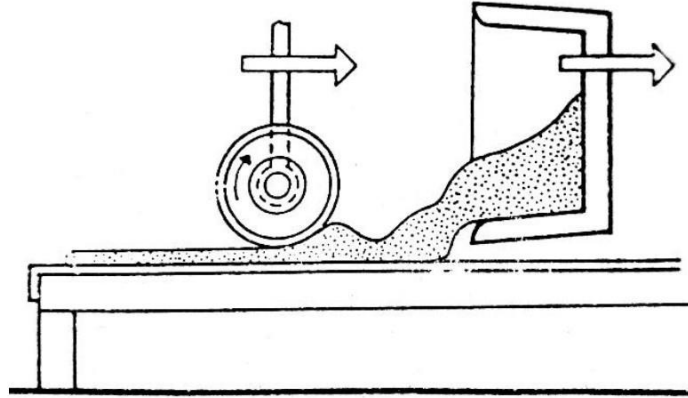
## 2.3. ŞEKİLLENDİRME

### 2.3.1. Üfleme (Şişirme) Yöntemi

Üfleme yöntemi en eski şekillendirme yöntemlerinden biridir. Metal boru ile cam fırın içinden alınan ergimiş cam iki parçaya sahip kalıp içine üflenmesi veya kalıp olmadan metal borunun ucunda olan camın ara ara döndürülmesi yöntemiyle de yapılabilir. Bu şekillendirme yöntemiyle cam eşyası yapımı mümkündür.

### 2.3.2. Dökme-Silindirme Yöntemi

Bu şekillendirme yöntemi cam hamurunun bir masaya dökülmesi sonrasında üzerinden geçirilen bir silindir yardımıyla levha şekline getirilmesidir.

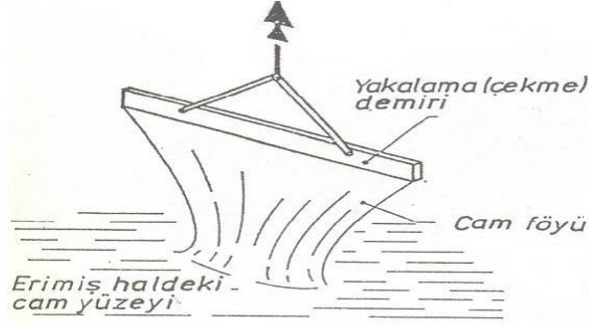


Şekil 2.7 Dökme silindirleme yöntemi ile cam üretimi [27]

Dökme için kullanılan masanın her iki ucunda var olan metal çiteler vasıtasıyla camın kalınlığı belirlenir. Bu sistemle cam yüzeylerinin her iki tarafı desenli veya düz yapılabilirken, bir tarafı düz bir tarafı desenli olarak yapılabilmektedir.

### 2.3.3. Çekme Yöntemi

Bu yöntemi, düz cam üretmek için kullanılan bir şekillendirme yöntemidir.

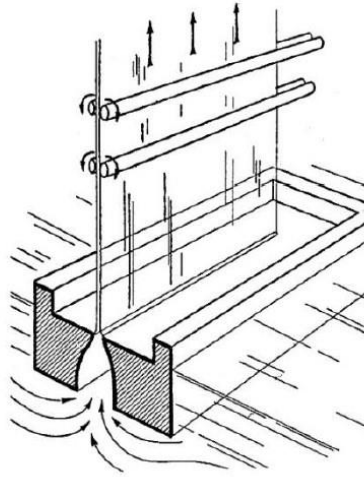


Şekil 2.8 Çekme yöntemi ile cam çekme [4]

Ergimiş durumda olan cam hamurunun, üzerine atılan bir demir lamaya aderans yolu ile yapışması ve kohezyon kuvvetine bağlı olarak bir perde gibi yukarı çekilmesi esasına dayanır [27].

#### 2.3.4. Fourcault Yöntemi

Çekme yöntemi ile düz cam üretimi yönteminin en eskisi, Belçika'da 1902 yılında bulunan fourcault tekniğidir.

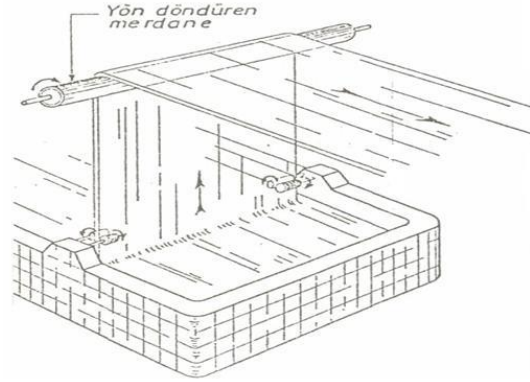


Şekil 2.9 Fourcault Yöntemi ile cam üretiminin başlangıcı [27]

Bu teknikte; çekilen cam, ortası yarık olan debi ayarlayıcısı olarak bilinen ve ergimiş cam hamuru üzerinde yüzen refrakter malzemedен yapılmış debitöz olarak isimlendirilen bir debi ayarlayıcısı ile beslenir. 2 adet merdane camın yukarı çekilmesine yardımcı olmaktadır.

### 2.3.5. Libbey-Owens Yöntemi

Bu şekillendirme tekniğinde, debi ayarlamada kullanılan debitözün kaldırılmış ve debitöz yerine merdane yöntemi kullanılmıştır.

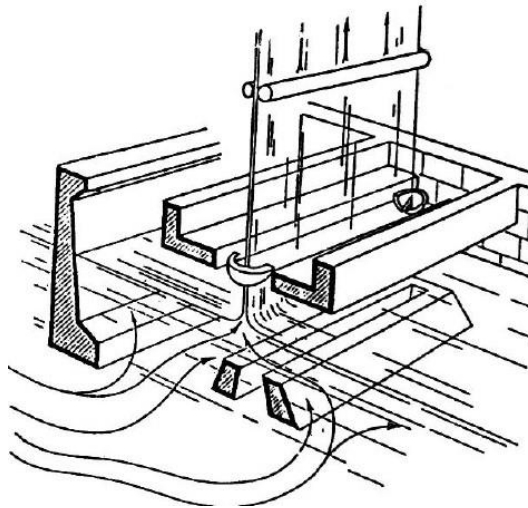


Şekil 2.10 Libbey-Owens yöntemi ile çekme [4]

Bu sistemle levha şeklindeki camın sabit tutulmasını ve 150 cm yukarıya çıkarıldıktan sonra 90° döndürülerek yatay duruma gelmesi sağlanmıştır.

### 2.3.6. Pittsburg Yöntemi

Bu şekillendirme yöntemi, Fourcault yöntemindeki gibi camın düşey olarak çekilmesi, Libbey-Owens yöntemindeki gibi debitözün kullanılması esasına dayanır. Elde edilen camın parlaklık kalitesi diğer yöntemlere göre çok daha iyi olmakla birlikte, cam üzerinde iz gibi hatalar olmamaktadır.

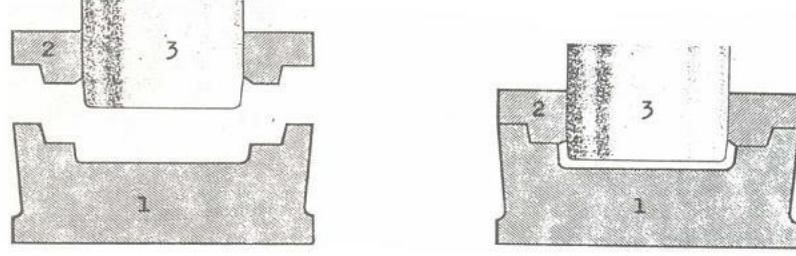


Şekil 2.11 Pittsburg yöntemi ile çekme [27]

Şekil 2.11' de pittsburg yöntemiyle cam çekimini gösteren çizim yer almaktadır.

### 2.3.7. Presleme Yöntemi

Presleme ile şekillendirme yöntemi; duvar tuğlaları, cam döşeme gibi yapı malzemelerinin üretimi için kullanılan yöntemdir.



Şekil 2.12 Presleme yöntemi ile cam üretimi [4]

Bu yöntem genellikle iki parçalı olan bir kalıp içine ergimiş cam hamurunun konulması ve sonrasında preslenerek şekillendirilmesi esasına dayanır.

### 2.3.8. Lif Haline Getirme Yöntemi

Bu yöntem, ısı yalıtımı ve ses yalıtımı için kullanılmak üzere, bilye haline getirilmiş camın refrakterden yapılmış bir teneke içinde ergitilmesi ve delikli olan bu refrakter yapıdan ergime ile akıtılan camın yüzey gerilimlerinden dolayı lif haline getirilmesi ve soğuduktan sonra silindire sarılması ile gerçekleşmektedir. Cam liflerden kullanım amacına ve yerine göre; cam yünü, cam ipeği, cam pamuğu gibi farklı özelliklerde malzemeler de elde edilebilmektedir.

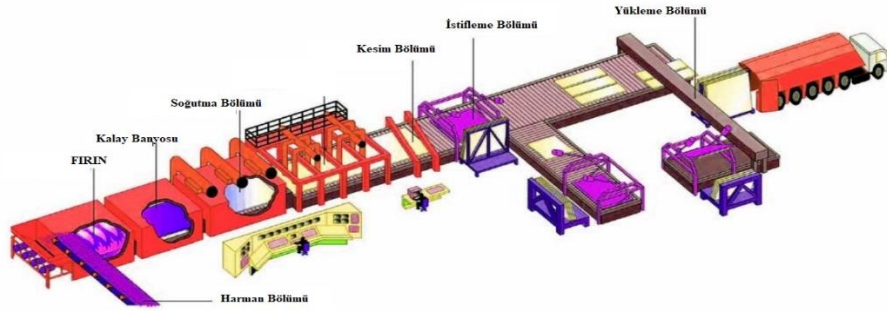
### 2.3.9. Köpük Haline Getirme Yöntemi

Köpük haline getirme yöntemi; basınç mukavemeti, yanmazlık, hafiflik, ısı tutuculuk ve boyutsal değişmezlik gibi özellikleri dolayısıyla, yapıda birçok alanda kullanılan cam köpüğünün üretimi için kullanılan bir cam biçimlendirme yöntemidir. Cam köpük haline getirilmek için saf karbon ile ısıtılarak karbonun gaz çıkarması sağlanır ve cam köpüğü oluşur [4,27].

### 2.3.10. Float (Yüzdürme) Yöntemi

Float yöntemi ilk defa düz cam üretimi için İngiltere’de uygulanmaya başlanmıştır. Bu yöntem, ergimiş cam ile ergimiş haldeki kalay arasındaki yoğunluk farkından dolayı, camın kalayın üzerinde yüzmesi esasına dayanır. Rejeneratif fırında ergitilen cam, içerisinde ergitilmiş halde kalay bulunan farklı bir havuza yatay olarak çekilir ve burada

camın kalınlık ve genişliği ayarlanır. Çekilen düz cam, sonrasında tekrar kademeli olarak soğutulur ve kesimi yapılarak sipariş boyutlarına getirilir. Bu yöntemin bulunması ile düz cam sektöründe çok daha kaliteli cam üretilme imkânı yakalanmıştır.



Şekil 2.13 Float cam hattı genel bölümleri [28]

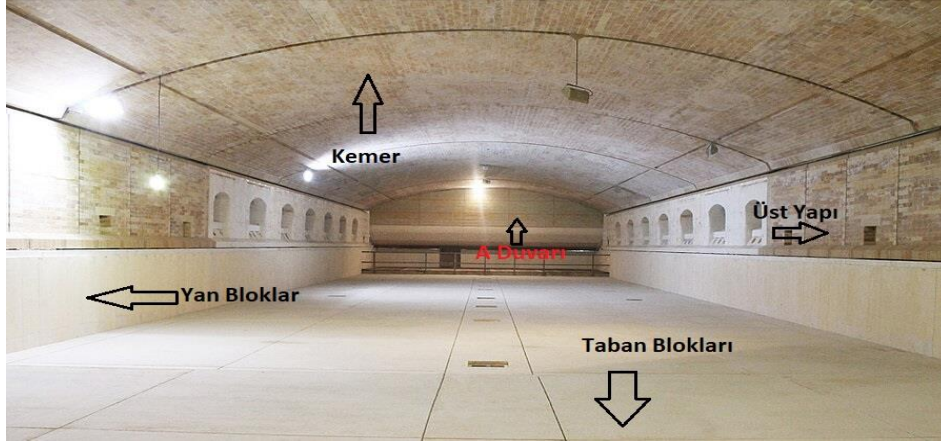
Float yöntemiyle düz cam üretiminde başlıca yer alan bölümler Şekil 2.13’de görülmektedir.

#### 2.3.10.1. Harman Bölümü

Cam oluşumu için mikserde homojen hale getirilerek hazır durumda olan harmana cam kırığı eklenerek bantlı konveyörler yardımıyla fırın bunkerlerine transferi gerçekleştirilmektedir. Bunkerde biriken harman fırın şarjörleri ile fırına sürekli beslenmektedir.

#### 2.3.10.2. Rejeneratif Cam Ergitme Fırını

Fırın altta taban blokları, kenarlarda yan bloklar, üzerinde üst yapı ve kemer, girişte ise A duvarı olarak adlandırılan duvarı olan, içi tamamen ergimiş cam ile dolu refrakterler ile örülmüş bir havuz gibidir .



Şekil 2.14 İçi boş bir float fırının görüntüsü [29]

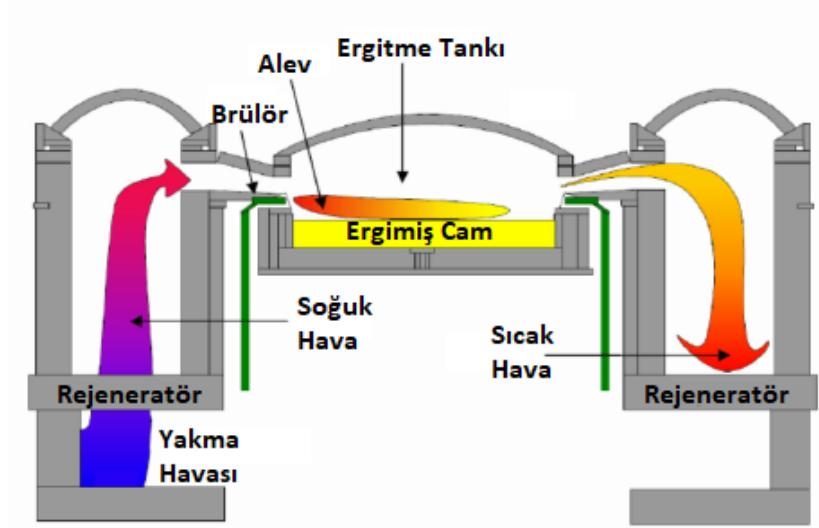
Refrakter yapıyı dışarıdan tamamen sarıp koruyan ve fırının ilk ısıtmasında refrakterlerin kontrollü bir şekilde genişmesine müsaade eden bir çelik yapı mevcuttur.



Şekil 2.15 Float hattı fırın şarjörü [30]

Harman dairesinde hazırlanıp fırın bunkerine gönderilen harman ve cam kırığı karışımı harman verici (şarjör) yardımıyla fırının içine beslenmektedir.

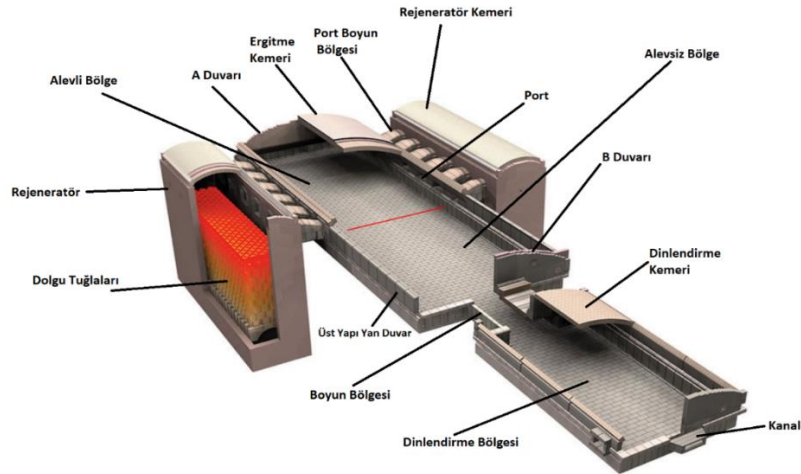
Fırına beslenen harman ve cam kırığı karışımının ergimesi için gerekli olan sıcaklık, yakma sistemi tarafından karşılanmaktadır.



Şekil 2.16 Fırın yakma sistemi [31]

Şekil 2.16' da görüldüğü üzere fırın yanlarındaki (sağda-solda) portlarda bulunan doğalgaz brülörlerinden içeri püskürtülen gaz, portların bağlı bulunduğu rejeneratörlerden gelen yakma havası ile karışmakta, oluşan alevler, fırın içi sıcaklığının 1460-1580°C aralığında olmasını sağlamaktadır.

Float prosesinde rejeneratif fırınlarının ana bölümleri; ergitme bölgesi (havuzu), boyun bölgesi, dinlendirme bölgesi, portlar ve port boyunları, rejeneratörler, gaz kanalı ve bacadır.



Şekil 2.17 Rejeneratif bir fırının bölümleri [32]

Ergitme havuzunun temel görevi, fırındaki brülörler ve yakma havası ile oluşturulan alevlerin verdiği yüksek ısı ile tank haznesi içine beslenen (fırın içinde ergimiş cam üzerine) harmanın ergitilerek (katı halden sıvı hale geçirmek) cama dönüştürülmesini ve daha sonra da içindeki gazlardan arındırılmasını sağlamaktır. Ergitme havuzunda ergimiş

cam yüzeyi üzerinde harman kümeciklerinin seyrettiği ve fırındaki brülörlerin yandığı bölgeye alevli bölge denir. Bir diğer ifadeyle alevli bölge harmanın ergiyerek cama dönüştüğü bölgedir. Ergitme havuzunda ergimiş camın içindeki gaz kabarcıklarından uzaklaştırıldığı, cam yüzeyinin ayna şeklinde bir görünüm aldığı bölgeye alevsiz bölge denir ve bu bölge boyunca fırında brülör yoktur .

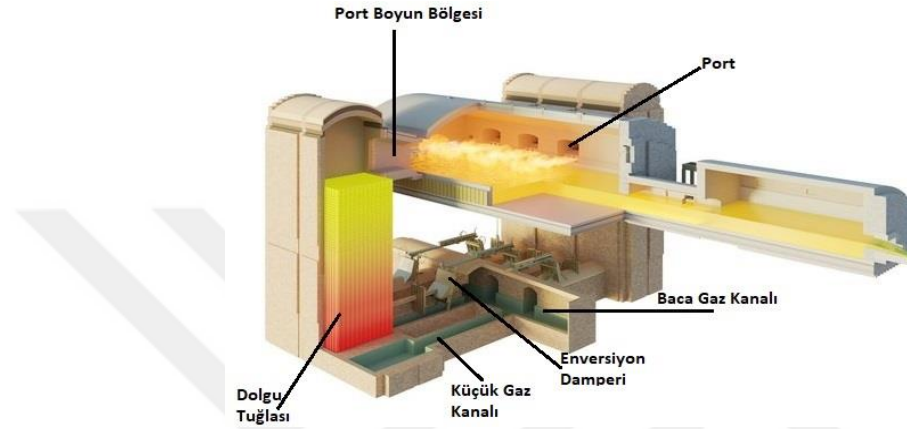
Ergitme havuzunun besleme ağız tarafı, yan blok seviyesinin üzerinde A duvarı olarak adlandırılan ve çelik bir konstrüksiyon ile askıda bulunan bir refrakter duvar ile kapatılmıştır. Ergitme havuzu çıkışında (boyun bölgesi girişi) ise yan blok seviyesinin ve boyun giriş kemerinin üzerinde oluşturulan ve B-duvarı adı verilen silika duvar ergitme havuzunun dinlendirme tarafını kapatır.

Ergitme havuzunda, üst yapı yan duvarlarıyla, A ve B duvarları tarafından çevrilmiş olan alan, kemer yatak konsollarına desteklendirilmiş ve silika refrakterlerden örülmüş bir kemer yapı ile kapatılmıştır. Böylelikle yan blok seviyesinin üstünde kapalı bir hacim (yanma hacmi) oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yanma hacmi sayesinde, fırında yanmakta olan brülörlerin (alevlerin) verdiği ısının çok büyük bir bölümü, ergimiş cam üzerinde ilerleyen harman halısına iletilmektedir. Böylece harmanın ergitilerek cama dönüştürülmesi sağlanmaktadır. Dolayısıyla bu yanma hacmi, fırında alevlerin oluştuğu ve yanma olayının gerçekleştiği bölgedir. Ergitme havuzunda ergimiş ve içindeki gazlardan arındırılmış cam, boyun bölgesi adı verilen dar bir bölgeden geçirilerek dinlendirme bölgesine alınır.

Boyun bölgesinin temel görevi ergimiş camın ergitme havuzundan dinlendirme havuzuna geçişini sağlamak ve bunu yaparken de cam eriyiğinin yüzeyinde bulunabilecek ergimemiş hammadde parçalarının, köpüğün veya yanma sonucu oluşan bazı kirliliklerin, ergitmeden, dinlendirmeye geçişini engellemektir. Boyun bölgesinde boyun soğutucular ve mikserler bulunur. Boyun soğutucuların görevi cam geçiş kesitini azaltmak ve geri dönüş akımlarını kuvvetlendirmektir. Mikserlerin görevi camdaki inhomojenite katmanlarını parçalayarak, cam yapısına homojen bir şekilde dağılmasını sağlamaktır.

Dinlendirme bölgesinin temel görevi ergimiş ve afine edilmiş, ancak banyodaki şekillendirme sıcaklığına göre yüksek olan cam sıcaklığını, belirli bir rejim dahilinde, banyo için uygun bir sıcaklığa düşürülmesini sağlamaktır. Banyo bölümü için uygun sıcaklığa gelen cam son olarak kanal bölümünden geçerek banyo bölümüne geçiş yapmış olur.

Rejeneratörlerden gelen sıcak yakma havasının, brülörden püskürtülen yakıtla iyi bir şekilde karışımı sağlandığı takdirde maksimum verimli alev oluşacaktır. Bu nedenle port boynu adı verilen refrakter yapının görevi rejeneratörlerden gelen ısınmış yakma havasının ertirme fırını içine (brülörden püskürtülen yakıt ile iyi bir karışım sağlayacak şekilde) geçişini sağlamaktır. Diğer bir görevi de, brülörün yanmadığı tarafta, fırın içinde oluşan yanma gazlarını (baca çekişinin etkisiyle) rejeneratör içine çekerek yanma ortamından uzaklaştırmaktır .



Şekil 2.18 Rejeneratif fırın bölümleri- 2 [33]

Rejeneratörler, rejeneratör odaları içinde, dolgu tuğlaları adı verilen refrakterlerin birbiri üzerine istiflenerek port seviyesine kadar bir yapı oluşturmasıyla meydana gelir. Rejeneratör sisteminin temel mantığı şöyle açıklanabilir; brülörün yanmadığı tarafta, baca çekişinin etkisiyle her bir rejeneratör odasına doğru çekilen yüksek sıcaklıktaki fırın yanma gazları, rejeneratör odalarındaki dolgu tuğlalarının arasından geçerken bünyelerindeki ısıyı, bu tuğlalara transfer ederler. Bu dolgu tuğlaları rejeneratör yanma gazlarının geçişine müsaade ettiği 20 dakika boyunca devamlı ısınırlar. Yanma yönü değiştiğinde ısınmış olan bu dolgu tuğlalarının arasından geçirilen yakma havası, ısı transferinin etkisiyle giderek ısınır ve portlardan fırın içine yaklaşık 1100°C ısınmış olarak girer. Böylece doğal gazın daha az kullanılması sağlanır. Bu özelliklerinden dolayı rejeneratörlere sahip bu fırınlara rejeneratif fırınlar denir.

Yanma yönünün değiştirilmesi her 20 dakikada bir tekrarlanarak brülörlerin sağda veya solda yanmaları, rejeneratörlerin buna bağlı olarak havaya veya gaza çalışmaları temin edilir ve bu olaya enversiyon adı verilir.

Rejeneratör odalarının her birini ana baca kanalına bağlayan küçük kanallara, küçük gaz kanalları adı verilir. Ayrıca bu küçük gaz kanalları üzerinde enversiyon damperleri

mevcuttur. Her 20 dakikada bir bu damperlerin pozisyonu değişerek yakma havası girişine veya baca gazı çıkışına müsaade etmektedir.

Küçük gaz kanallarından gelen sıcak baca gazlarını bünyesinde toplayarak bacaya yönlendirme görevi ise ana baca kanalının görevidir. Baca ise yüksekliğinin meydana getirdiği doğal çekiş etkisiyle fırında oluşan tüm yanma gazlarını rejeneratörler ve baca kanalı vasıtasıyla kendi içine çeker ve baca çıkışından atmosfere bırakır.

Fırın iç basıncının yanma koşulları ve fırın ömrü üzerinde önemli etkisi vardır ve fırın işletmeciliğinde kontrol edilmesi gereken önemli parametrelerden birisidir. Fırını yüksek basınçta işletmek yakıt tasarrufu sağlar fakat özellikle üst yapı refrakterlerinde ve tuğla derz yerlerindeki korozyon artar, bu da direk olarak fırın ömrünü etkiler. İç basınç kontrolü otomatik olarak ana baca damperi vasıtası ile yapılmaktadır. Basınç ölçümü, alevsiz bölgeden prob ve transmitter vasıtası ile sağlanmaktadır.

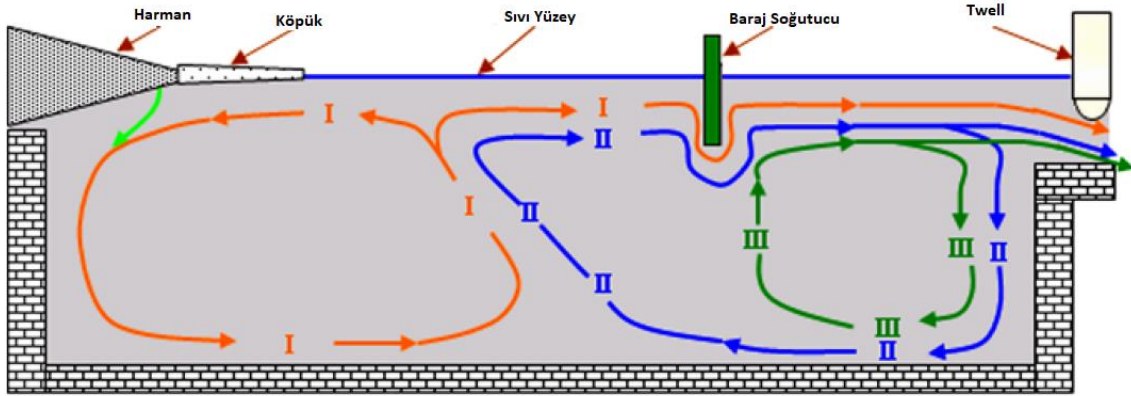
Fırın cam seviye kontrolü, pnomatik veya lazer seviye cihazı ile yapılmaktadır. Cam seviyesi kontrolünü yapan cihaz verilen hedef değere göre şarjörle senkron çalışarak cam seviyesini aynı çizgide korumaya çalışmaktadır. Cam seviyesindeki değişimlerin çok iyi kontrol edilmesi gerekir. Aksi takdirde yan blok refrakter hataları artar, ergime zorlukları ortaya çıkar ve üretim miktarlarında değişkenlikler oluşabilir.



Şekil 2.19 Yan blok soğutma üfleç (faraş) sistemi.

Fırın refrakter ve çelik yapıyı korumak amacıyla, yan bloklar cam seviyesine, kemer yatak kirişlerine, A duvarı çelik konstrüksiyonuna ve gerekli görülen tüm bölgelere, alçak ve yüksek basınç soğutma fanları ile hava soğutması uygulanmaktadır. Şekil 2.19'da yan blok soğutma üfleç sistemi yer almaktadır. Cam seviyesi hat boyunca soğutularak bu noktadaki deformasyonların minimum olması amaçlanmaktadır.

Fırın işletmesinde amaç, harmanın yan bloklara temas ettirilmeden, fırın içinde ortada muhafaza edilerek ergitilmesidir. Ancak üretim şartları gereği harman zaman zaman sağa veya sola meyilli olabilir ve hatta yan bloklara kadar gelebilmektedir. Bu durum, yan blok ömürlerini ve cam kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Sorunu önlemek için sıkı bir fırın işletmeciliği (sürekli kontrol) ve erken müdahale ile sorun çözülmeye çalışılmaktadır.



Şekil 2.20 Düz cam ergitme fırınında cam döngüsü [34]

Şekil 2.20'de fırın havuzunda meydana gelen ergimenin gerçekleşmesini sağlayan döngüler gösterilmektedir. Ergime için fırın içinde üç farklı döngü meydana gelmektedir. 1 numaralı döngü fırın başlangıcı ile sıcak nokta arasında, 2 numaralı döngü sıcak nokta ile dinlendirme bölgesinin sonu arasında, 3 numaralı döngü ise dinlendirme bölgesinin başı ile sonu arasında gerçekleşmektedir. Bu döngülerdeki hızlanmalar veya yavaşlamalar cam kalitesini etkilemektedir.

Fırın, farklı içerikte çeşitli refrakterlerin oluşturduğu bir yapıdır. Fırın bölümlerine göre kullanılan refrakter çeşitlerini ele alırsak; fırın cam havuzunu çevreleyen yan blok olarak adlandırılan ve fırın taban blokları elektro-döküm AZS ( $Al_2O_3-ZrO_2-SiO_2$ ) refrakterlerdir. Yan blokların üstünden başlayarak fırın kemerine kadar olan duvarlara üst yapı duvarları denilmektedir. Bu üst yapı alevli bölgede AZS, alevsiz bölgede ise silikadan yapılmıştır. A duvarı çelik bir konstrüksiyon ile askıda bulunan silika refrakterleriyle oluşturulmuştur. B,C ve D duvarları silikadır. Dinlendirme bölgesi havuzu taban tuğlaları ve yan blok tuğlaları jargal m kodlu alumina karakterli elektro - döküm refrakter malzemelerdir [35].

### 2.3.10.3. Kalay Banyosu

Fırın dinlendirme bölgesinde camın sıcaklığı 1100°C civarında ayarlanarak kanal bölgesinden spout kasası yardımıyla kalay banyosu içine dökülür. Kalay banyosunda yoğunluk farkından dolayı cam kalayın üzerinde yüzdürülerek kalınlığı ve genişliği ayarlanarak çekilir ve yaklaşık olarak 600°C’de banyo çıkışından rulolara yüklenerek soğutma hattına geçişi sağlanmaktadır. Kalay banyosunun içi, kalayın oksijenle reaksiyona girmesini önlemek için azot ve azot-hidrojen karışımıyla artı basınç oluşturularak korunmaktadır [4].

### 2.3.10.4. Cam Soğutma

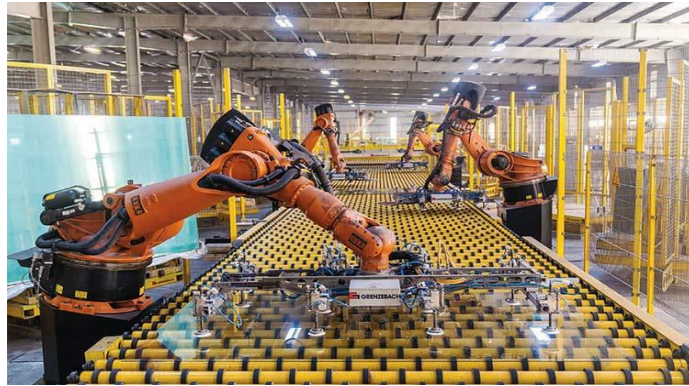
Soğutma bölümüne gelen cam kontrollü olarak katılaştırılarak, camdaki kalıcı gerilimler ayarlanır. Katılaştıran cam yaklaşık 60°C’de kesim bölümüne geçiş yapmaktadır [4].

### 2.3.10.5. Kesme Koparma

Banyo bölümünde cam kalınlığı ve genişliğini ayarlama sırasında kullanılan ekipmanlar camın kenarlarında iz bırakır. Bu iz kesim bölümünde koparılarak cam dışına atılmaktadır. Daha sonra cam şeridi siparişe göre jumbo, makina ebadı gibi belirlenen ölçülerde kesilerek istifleme için hazır hale getirilir.

### 2.3.10.6. Otomatik İstifleme

Siparişe göre kesilen ve hazır hale getirilen cam levhaları, otomatik çalışan robotların vantuzları yardımıyla alınarak cam sehpaalarına istiflenir .



Şekil 2.21 Robotun camı istiflemesi [36]

Şekil 2.21’de robotun belirlenen ölçülerde kesilmiş olan camı vantuzları yardımıyla tutarak istifleme görüntüsü yer almaktadır.

#### 2.3.10.7. *Ambar*

Cam sehpalara istiflenen camlar, özel araçlarla taşınarak mamul ambarına sevke hazır olacak şekilde konulur.

#### 2.3.10.8. *Sevkiyat*

Mamul ambardaki makine ebadı camlar normal kamyonlarla sevk edilirken jumbo boy camlar özel araçlarla sevk edilmektedir.

### **2.4. TAVLAMA**

Tavlama biçimlendirmeden sonra gelen ve zorunlu olan bir işlemdir. Fabrikasyon üretim sırasında meydana gelen bir takım iç gerilmeleri gidermek için yapılır. Düz cam üretiminde cam sıcaklığı 625°C' den 475°C' e kadar soğutularak tavlama işlemi gerçekleştirilir. Tavlama, camın altının ve üstünün kademeli bir şekilde soğutularak kalıcı gerilimlerinde kazandırılması işlemidir.

### **2.5. KESİM İŞLEMİ**

Üretim ardından istenilen boyutlara ulaşamayan camlar istenilen ebat veya şekillere getirilmek için düzeltme işlemi yapılmaktadır. Kesim türlerinden bazıları; elmas kesimi, pürmüz ısıt kesim, CNC kesimidir. Örneğin; az bilinen üfleme yöntemiyle, üretilen bardakların uç kısımları düz ve keskin olduklarından dolayı pürmüz ısıt kesimle düz bir şekle getirilir ve kesici alet kullanılmadığından dudak kısımları kesici olmamaktadır.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada float tekniğiyle düz cam üretiminde yandan ateşlemeli rejeneratif fırınlardan kaynaklı hatalar, stereo mikroskop yardımıyla tespit edilmiştir ve bu hataları önlemek veya azaltmak için ne gibi tedbirler alınması gerektiğine dair bilgiler verilmiştir.

#### 3.1. MALZEME VE METHOD

Hata analizlerinde kullanılan düz cam kimyasal kompozisyonun XRF analizi, Rigaku ZSX Primus 4 cihazı ile yapıldı. 2 x 2 cm ebatlarında kesilen numune yüzeyi zımparalandı ve bu zımparalanan yüzeyin analizi yapıldı. Yapılan düz cam analizi Tablo 6'da yer almaktadır.

Tablo 6 Clear cam XRF analiz sonucu.

Bileşik	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
%	71,693	0,629	9,1	3,761	14,376	0,022	0,092	0,048	0,255

2 x 2 cm ebatlarında kesilen cam hataların görüntülemeleri ZEISS Stemi 508 stereo mikroskop ile 40X büyütme yapılarak elde edildi. Görüntülemelerde, kullanılan mikroskopta tek ölçülendirme birimi olarak bulunan piksel ölçü birimi kullanıldı.

#### 3.2. CAMDA GÖRÜLEN HATALARIN İÇERİKLERİ VE TANIMLANMASI

Cam üretimi sırasında meydana gelen hatalar üretimin herhangi bir aşamasında oluşabilmektedir. Meydana gelen bu hataların bir kısmı alınacak önlemlerle tamamen yok edilebilirken, bir kısmı ise tamamen yok edilmese de üretimi etkilemeyecek bir seviyeye düşürülebilmektedir.

Camda oluşan hataların üretim sırasında hangi kademede meydana geldiğini bulmak çok güçtür. Hatalar hammaddelerden harmanın hazırlanarak, ergitilmesi, afinasyona uğraması ve tavlanması kademelerinin herhangi birinde meydana gelebilmektedir.

Cam hatalarını; taş, habbe, camsı hatalar ve devitrifikasyon olmak üzere dört sınıfa ayırabiliriz [11]:

1. Taş: Camda ergitme, refrakter veya kirliliklerden dolayı oluşan camın içinde katı olarak bulunan hatalardır.
2. Camsı hatalar: Damar, düğme gibi inhomojeniteden kaynaklı meydana gelen hatadır.
3. Devitrifikasyon: Cam yüzeyinde meydana gelen devitrifikasyon sonucu oluşan hatadır.
4. Habbe: Genellikle camın ergitme sonrası afinyasyonunun yetersiz olması durumunda meydana gelen hatadır.

Bu hata çeşitleri harmanın hazırlanıp ergitilmesi süreçleri sırasında meydana gelen hataları içerir. Şekillendirme, soğutma, kesme, işleme gibi süreçlerde meydana gelecek olan hatalar ayrıca değerlendirmek gerekir.

Cam hatalarını tanımlamak için birçok yöntem vardır. Bu yöntemlerden yaygın olanlarını, çıplak gözle analiz etme yöntemi, optik ve stereo mikroskop ile analiz etme yöntemi, polariskop ile analiz etme yöntemi ve diğer yöntemler ( X-ray fotoelektron spektroskopisi (XPS), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS) ve X-Ray floresans spektrometresi (XRF) ) olarak sınıflandırabiliriz [11].

### 3.3. ERGİTME KAYNAKLI HATALAR VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ

Ergime kaynaklı hatalar silika esaslı hatalardır. Silikanın üç hali vardır. Aşağıda saf SiO<sub>2</sub>'nin sıcaklıklara göre değişimi görülmektedir. Bu sıcaklık değerleri Na<sub>2</sub>O miktarıyla değişebilmektedir. Tridimit ve kristobalitin yoğunlukları kumdan ve camdan daha düşüktür. Bundan dolayı bu hatalar camın üst yüzeyinde bulunmaktadır .



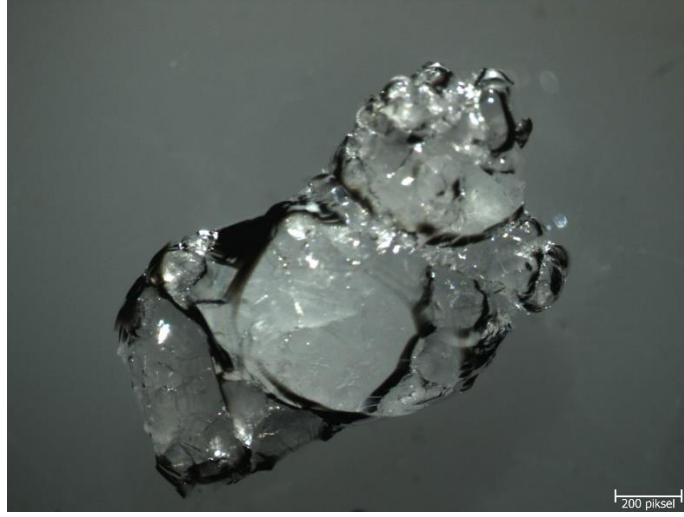
$$d_{\text{kuvars}} = 2,6 \text{ gr/cm}^3 \quad d_{\text{tridimit}} = 2,26 \text{ gr/cm}^3 \quad d_{\text{kristobalit}} = 2,32 \text{ gr/cm}^3$$

Kuvars yüksek SiO<sub>2</sub> içeren kumdur.

#### 3.3.1. Ergimemiş Silika Hataları

Bu hata silikanın fırında iyi eriyememesinden veya köpük hattında meydana gelen

kopmalar sonucu oluşur.



Şekil 3.1 Ergime kaynaklı silika hatasının mikroskop görüntüsü.

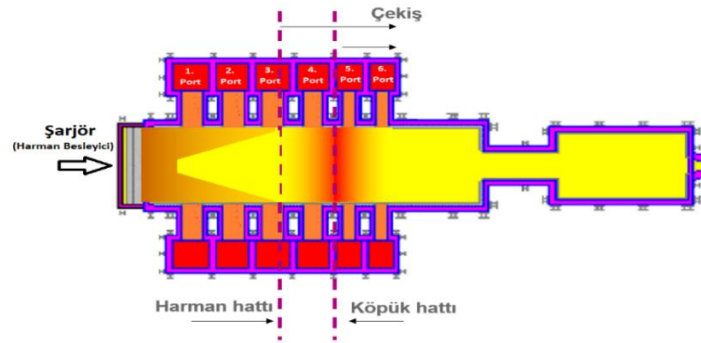
Bu görüntü x40 büyütme ile alındı.

Genel olarak taş hataları olarak tabir edilen bu hatalar, cam yüzeyinde katı halde karşımıza çıkan kalıntılardır. Şekil 3.1’de ergimeden kaynaklı silika hatalarının mikroskop görüntüsü yer almaktadır.

*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

- Sıcak bölümde silika tam anlamıyla ergimelidir.

Ergiyememiş olan silikanın ergimesine yardımcı olmak ve köpük hattında oluşabilecek kopmaları engellemek için sondan bir önceki portun gaz miktarı artırılarak ve portun sıcaklığının 5°C civarında artması sağlanarak takibi yapılır, ayrıca gerekiyorsa sıcaklık artışına kademeli bir şekilde devam edilir.



Şekil 3.2 Fırın harman köpük hattı.

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere 3. Port sonuna kadar olan bölge harman hattı, 3. Port sonu ile 5.port başlangıcı arasında olan bölge de köpük hattı olarak takip edilmesi gereken alanlardır.

- Üretilen tonaj miktarı (çekiş hızı) düşürülerek besleme hızı azaltılır ve harman köpük hattının bütünlüğü sağlanmış olur.
- Baraj soğutucuların cam içindeki derinlik miktarı artırılarak fırın içindeki Şekil 2.20 ‘de gösterilen 1 numaralı döngünün artması sonucu kuvvetlenen geri dönüş akımlarıyla ergimemiş silikanın ergiyerek sıvı cama dönüşmesi amaçlanır.
- Harman reçetesi ve tartımları gözden geçirilmelidir.

İdeal bir clear düz camın XRF analizini Tablo 6’da görmekteyiz. Günlük yapılan analizle harman reçetesinin sıkı bir şekilde takip edilmesi gerekmektedir.

Farklı kompozisyonda hammadde içeriğine sahip olan cam numunelerinin ergime dereceleri de farklılık göstermektedir.

Tablo 7: Farklı kompozisyondaki iki cam numunesi [37]

<b>Bileşik</b>	<b>Cam no: 1</b>	<b>Cam no: 2</b>
SiO <sub>2</sub>	71.5	71.6
Na <sub>2</sub> O	14.0	12.8
CaO	10.0	11.2
MgO	2.0	2.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.0	2.0
SO <sub>3</sub>	0.2	0.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.015	0.015

Tablo 7’ de farklı kompozisyona sahip iki camın ergime derecelerinin nasıl değiştiği görülmektedir. 1 no’lu cam numunesinin ergime derecesi 1450°C olarak belirlenmişken 2 no’lu cam numunesi 1456°C’de ergimektedir. 6°C’lik bir ergitme farkı ortaya çıkmaktadır [37]. Dolayısıyla hammadde tartımlarında meydana gelebilecek yanlış bir tartım, ergitme sürecini etkileyerek ergimemiş silika hatalarının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

- Düz cam üretimi için harmanda yer alan maddelerin tane boyutları belirli boyutlar aralığında olmalıdır.

Tablo 8: Hammadde tane boyutları.

Hammadde	Tane Boyut Aralığı
Kum	0,074 mm – 0.8 mm
Soda	0,106 mm – 1.0 mm
Dolomit	0,074 mm – 1.0 mm
Kalker	0,074 mm – 1.0 mm
Feldspat	0,074 mm – 0.8 mm
Sodyum Sülfat	0,074 mm – 1.0 mm
Kömür	0,106 mm - 1.0 mm

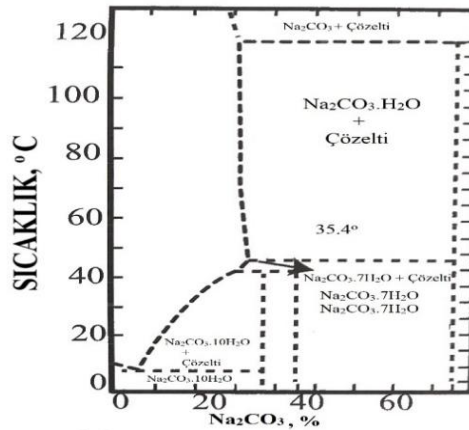
Tablo 8’de hedef tane boyutları gösterilmektedir. Kumun ergimesi zor olduğu için (1710°C) ve feldspatın ergidikten sonra dağılması zor olduğu için 1 mm’nin altında olması gereklidir. Tane boyutu küçüldükçe ergime hızlanır. Hammaddelerin homojen bir şekilde karışması, segregasyon olmaması ve tanelerin birbiriyle daha çok temas edip ergimenin kolay olması için hammadde tane boyutları birbirine yakın olmalıdır. Hammaddelerin tozmayla kaybedilmemesi, tozların fırına ve diğer ekipmanlara zarar vermemesi için 0,074 mm’nin altında asla bulunmaması gerekir.

- Harmanın hedef nem değeri %3-4,5 aralığında olmalıdır.

Nem harmanda segregasyonu engelleyerek fırının hammaddeyi ergitmesi için ciddi şekilde katkı sağlamış olur. Nem miktarının belirlenen aralığın altında olması durumlarında segregasyon meydana gelir. Bu durum fırın içinde ergime problemlerine neden olarak silika hatalarının oluşumuna sebebiyet vermektedir.

Harman neminin yanı sıra harmanın sıcaklığı da fırın ergitme şartları açısından son derece önemlidir. Harman sıcaklığının, harman karıştırıcı prosesi sonrasında 36 ° C’nin altına düşmesi istenmez.

Tablo 9: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – H<sub>2</sub>O faz diyagramı [38]



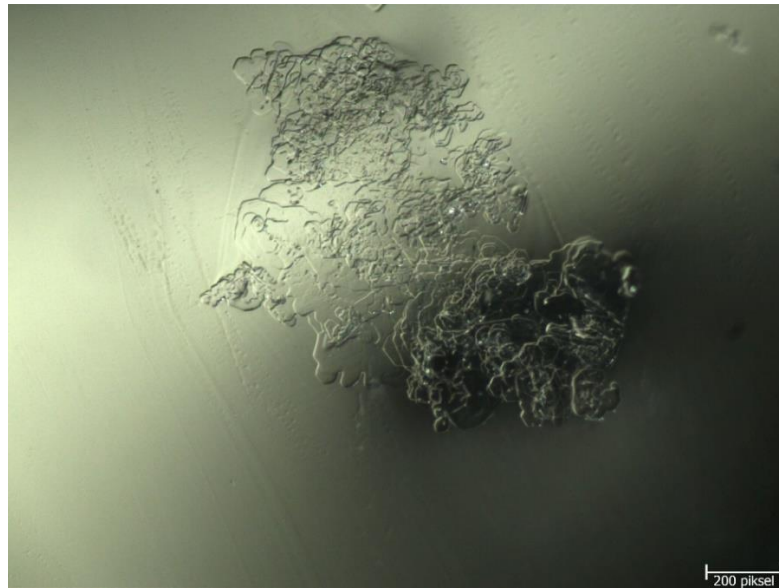
Tablo 9’ da faz diyagramında görüldüğü üzere cam harmanındaki soda ortamdaki sıcaklık ve su miktarına bağlı olarak  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  formlarına dönüşebilir [38]. Böylece  $35.4^\circ\text{C}$ ’nin altında soda, harmandaki suyu heptahidrat ve/veya dekahidrat olarak bağlayarak kuru harmanın meydana gelmesine neden olur. Kuru harman fırına beslendiğinde ergime sorunlarına neden olarak silika hatalarının oluşmasına sebebiyet vermektedir.

- Soda miktarının artırılması

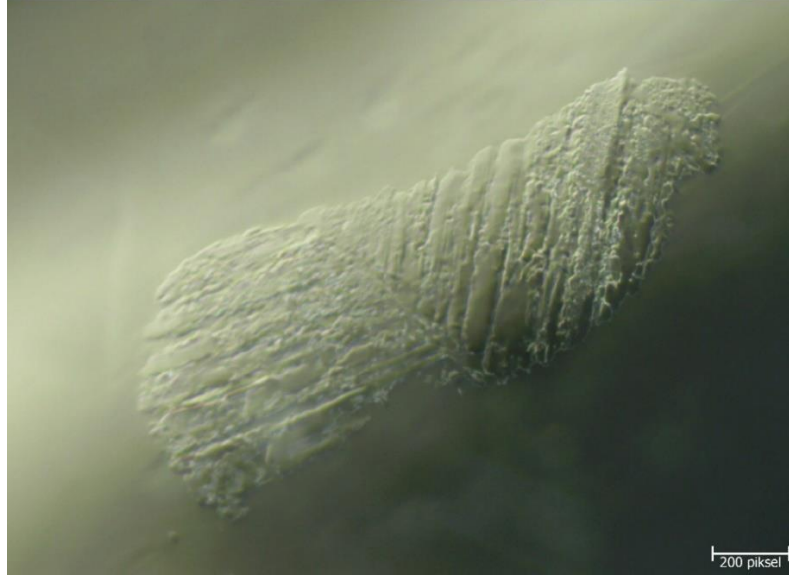
Soda miktarının kontrollü olarak artırılması silikanın ergime problemlerini azaltır ve camda görülen hata miktarının azalmasına yardımcı olur. Fakat gerekenden fazla soda beslemesi, sodanın fırın refrakterlerini aşındırma özelliğinden dolayı ve hammadde maliyeti açısından üreticiler tarafından istenmeyen bir durumdur.

### 3.3.2. Silika Katmanları

Bu hata, silika bakımından yoğun olan cam yüzeyinin devitrifikasyonudur. Boyun bölgesinde camın içinde duran baraj soğutucuları kaplayan soğuk camdaki kopmalar, fırın köşe bölgelerindeki soğuk camın kopması, tonaj değişiklikleri, fırın sıcaklık değişimleri bu hataya neden olabilir.



a)



b)

Şekil 3.3 a) ve b) Silika kaynaklı tridimit hatalarının mikroskop görüntüleri.

Bu görüntü x40 büyütme ile alındı.

Şekil 3.3'de  $\text{SiO}_2$ 'nin tam olarak ergiyememesi sonucu form değiştirerek tridimite dönüşmesi ile oluşan hatalar yer almaktadır.

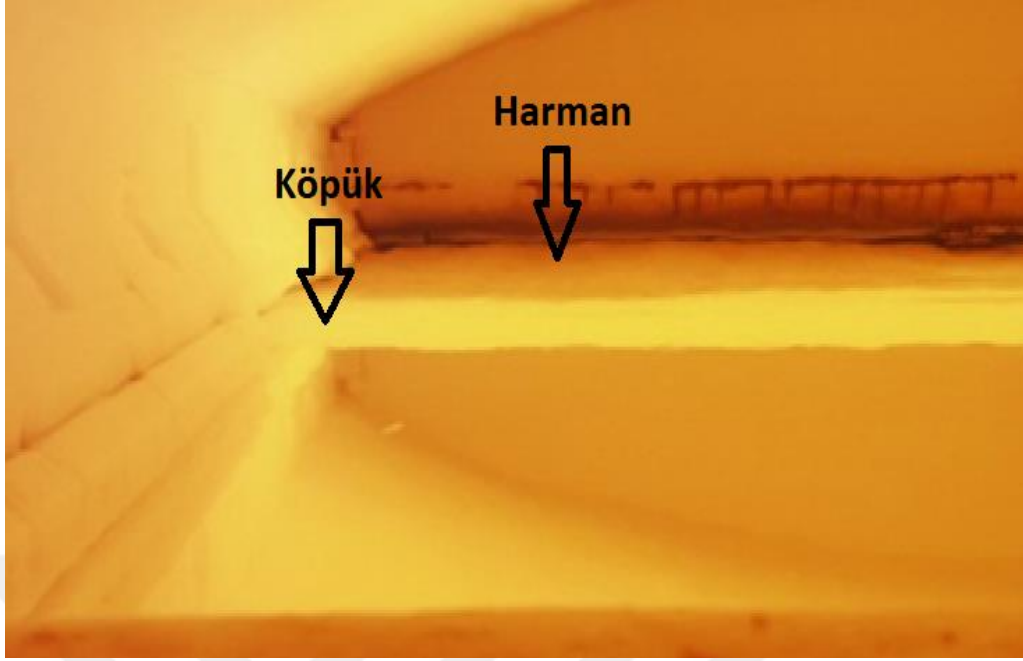
*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

- Sıcak noktanın yeterli sıcaklıkta olup olmadığı kontrol edilmelidir.

Düz cam ergitme fırınlarının sıcak noktası optik değerleri  $1565-1580^{\circ}\text{C}$  civarında olması önerilir. Fırın sönmesi, harman hattının uzaması sonucu ve harman reçetesi değişimi gibi nedenlerden dolayı fırının sıcak noktası hedef değerinin altına düşebilir. Bu tür durumlarda sıcak noktadaki porta ekstra gaz ilaveleri yapılarak sıcaklığın istenilen düzeye gelmesi sağlanır.

- Köpük hattı kontrol edilmelidir.

Köpük hattından meydana gelen kopmalar sonucu, tam olarak ergimeye maruz kalmadan fırından çıkan kum taneleri camda genellikle silika formlarından biri olan kristobalit hatası olarak ortaya çıkmaktadır. Fırın gözlemlerinde köpük hattında uzama veya kopma görülmesi durumunda sondan bir önceki portun sıcaklığı artırılarak kopan parçaların ergimesi ve köpük hattının bütünlüğü sağlanmaya çalışılır.



Şekil 3.4 Float düz cam fırınında harman ve köpük hattı.

Şekil 3.4'te float düz cam fırının içindeki harman ve köpük hattının görseli yer almaktadır.

- Alevlerin pozisyonu kontrol edilmelidir.

Özellikle fırın girişi yani harmanın olduğu kısımda alevlerin harman ile temas etmemesi gerekmektedir. Bu noktada alev açıları çok büyük önem arz etmektedir. Alevlerin açısı gözle ayarlanmalıdır. Alevlerin harmana değmeyecek bir biçimde harmanın hemen üstünde olması istenen durumdur. Alevin direk harmana çarpması hem tozumaya neden olarak hammadde kayıplarına neden olur hem de sodyum nitrat, sodyum sülfat gibi hammaddelerin hızla ergimesi sonucu harman hattında köpük içinde yüzen harman kümeciklerinin görünmesine sebep olur. Bu durumun olması ergime düzensizliğine neden olarak camda hatanın meydana gelmesine sebebiyet vermektedir.

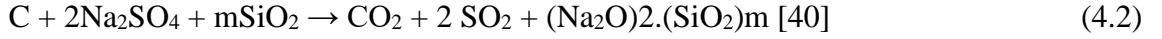


Şekil 3.5 Düz cam üretiminde fırın içi alev görüntüsü [39]

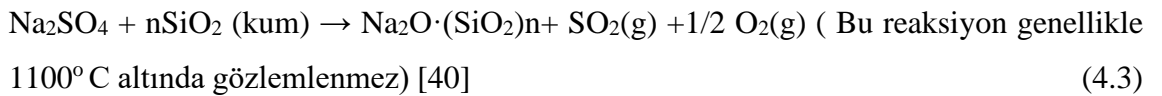
Şekil 3.5’te yandan ateşlemeli bir rejeneratif fırının yanması sırasında meydana gelen alevlerin görüntüsü yer almaktadır.

- Harman reçetesindeki antrasit ve sodyum sülfat miktarlarının harmanın ergimesindeki etkisi büyüktür. Dolayısıyla tartımları önemlidir ve kontrol edilmelidir.

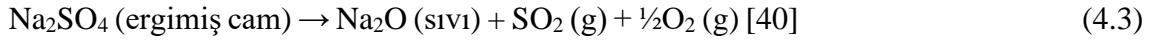
Harmandaki karbon kaynağı olan antrasitin fırında bir kısmı yanarken bir kısmı ise 700-800°C aralığında sodyum sülfatla reaksiyona girer.



Karbon ile sodyum sülfatın reaksiyonu sonucu arta kalan sodyum sülfat, kum tanecikleri ile reaksiyona girerek ergime hızını artırır. Dolayısıyla kalan sodyum sülfat miktarı çok önemlidir. Çünkü sülfat miktarının az olması durumunda silika tanelerinin ergimesi zorlaşacak ve bundan dolayı camda kristobalit, tridimit hatları meydana gelecektir. Sülfatın fazla olması silika tanelerinin bir araya gelmesini engelleyerek ergimelerine büyük katkı sağlamış olur.



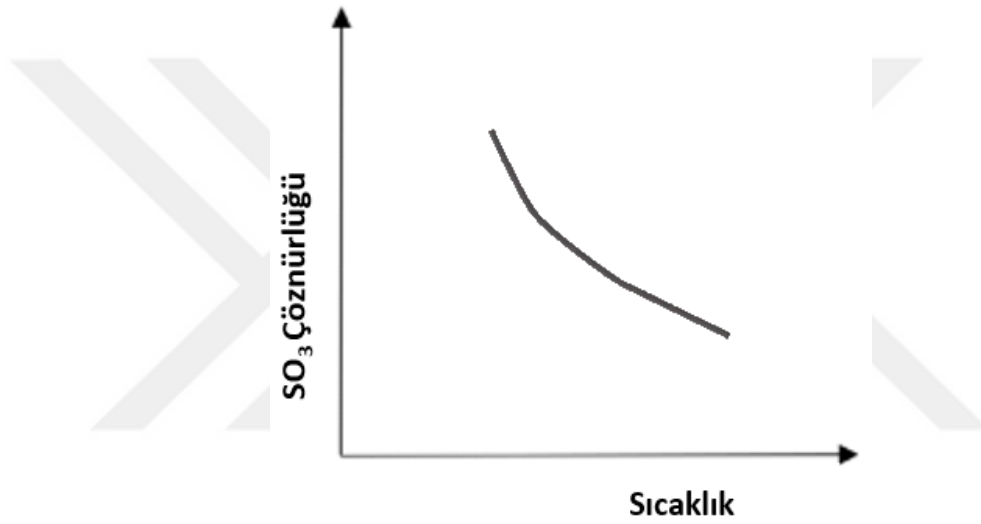
Kum ile reaksiyon sonucu kalan sülfat ise 1430-1480 °C aralığında dekompoze olur. Bunun sonunda meydana çıkan sodyum oksit ve SO<sub>2</sub> çıkışı harman hattı sonunda ergimemiş durumda olan silika parçalarının ergimesine yardımcı olur.



Bu sebeplerden ötürü sülfat miktarı çok önemlidir. Harmandaki sülfat miktarının az olması veya karbon miktarının fazla olması ergimede zorluklar yaratır. Hataların önüne geçmek adına cam XRF analizinde  $\text{SO}_3$  'ün %0,17 altında olmaması gerekmektedir.

- 1. Port sıcaklığının yüksek olup olmadığı kontrol edilir.

Sülfat miktarını etkileyen diğer etmense 1. Port sıcaklığıdır. Bu değerin 1450- 1455° C civarında takip edilmesi gerekmektedir.



Şekil 3.6 Camdaki  $\text{SO}_3$  içeriğinin sıcaklıkla değişimi [41]

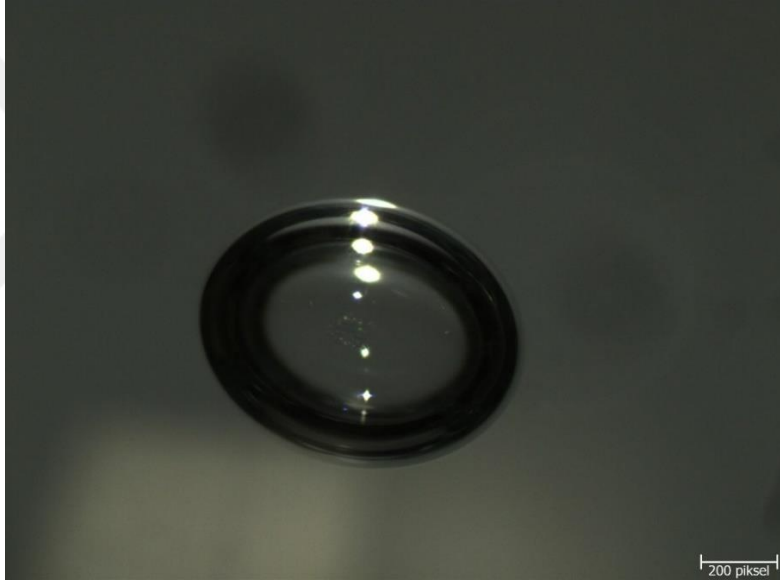
Şekil 3.6'da görüldüğü üzere sıcaklığın yükselmesi ile camdaki  $\text{SO}_3$  çözünürlüğü azalmaktadır. Dolayısıyla ergime problemlerine neden olmaktadır.

### 3.3.3. Habbe Hataları

Habbe hatası harmandan arınmış fakat afinyasyon aşamasında yetersiz kalan camda meydana gelen bir hatadır. Habbeler camın üst yüzeyinde, bünyesinde ve alt yüzeyine yakın olmak üzere farklı pozisyonlarda bulunabilirler.



a)



b)

Şekil 3.7 a) ve b) Habbe hatalarının mikroskop görüntüleri.

Bu görüntü x40 büyütme ile alındı. Genellikle 0.5 mm' den küçük habbeler, habbecik olarak nitelendirilir. 0.5 mm' den büyük olanlar ise habbe olarak adlandırılır. Fırın ergitme ve afinyon sırasında meydana gelebilirler.

*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

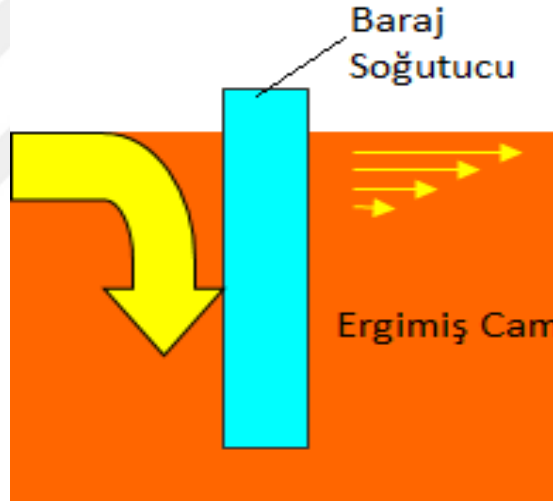
- Afinyonu kolaylaştırmak için fırın alevsiz bölgesinin sıcaklığı artırılır.

Habbenin nedeni gazların cam eriyiği içerisinde çıkamamasındandır. Bunu

kolaylaştırmak için afinasyonun gerçekleştiği bölüm olan alevsiz bölgenin mevcut çalışma sıcaklığını 5°C artırarak, habbe durumu takip edilmeli gerekiyorsa kademeli bir şekilde sıcaklık artışına devam edilmelidir. Bu bölgedeki ani sıcaklık düşüşleri de afinasyona etki edeceğinden camda habbe hatalarının görülmesine sebebiyet verebilmektedir.

- Boyun bölgesinde yer alan baraj soğutucunun cama olan batıklığı artırılır.

Boyun bölgesinde yer alan baraj soğutucunun camdaki derinliği artırılarak geri dönüş akımlarıyla habbelerin cam yüzeyine çıkması sağlanarak camın içinde hata oluşumu engellenmiş olmaktadır. İlk etapta baraj soğutucuların derinliği 50 mm artırılarak habbe yoğunluğu takip edilmeli, azalma görülüyorsa bu artış 100 mm 'ye çıkarılmalı ve takibi yapılmalıdır. Baraj soğutucunun cam içinde standart olarak olması gereken derinliği fırının kapasitesi ve dizaynına göre değişiklik göstermektedir.



Şekil 3.8 Cam eriyik içindeki barajın pozisyonu.

Şekil 3.8' de cam eriyik içinde boyun bölümünde yer alan baraj soğutucunun pozisyonu yer almaktadır. Barajın ok yönünde batırılması sonucu cam eriyik içindeki derinliği artmaktadır.

### 3.4. REFRAKTER KAYNAKLI HATALAR VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ

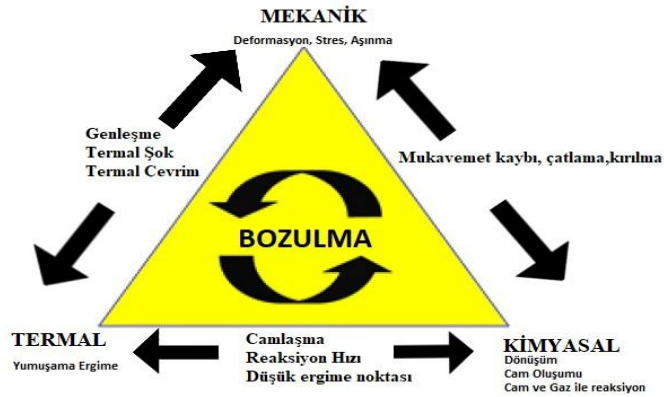
Cam fırını farklı özellikteki refrakterlerin birleşimiyle meydana gelir. Refrakter kalitesi ve çeşitlerinin seçimleri yapılırken, çalışma sıcaklıkları, kapasite ve dizayn gibi etkenlere dikkate edilir. Genel olarak düz cam float hatlarında yandan ateşlemeli rejeneratif fırın

yapımlarında tercih edilen refrakterlerin ve bu refrakterlerin kullanıldıkları yerler Tablo 10'da gösterilmektedir.

Tablo 10: Float fırın içinde bulunduğu bölgeye göre refrakter çeşitleri [42]

Refrakter Tipi	Bulunduğu Bölge
Silika	Ergitme ve dinlendirme bölgesi kemerlerinde, Alevsiz bölge ve dinlendirme bölgesi üst yapısında
Alümina	Ergitme bölgesi üst yapısında, A duvarında, Boyun bölgesi kemerinde
Müllit	Rejeneratör duvarlarında, Boyun bölgesi kemerinde
Zirkon	İzolasyon harcında
Fused cast AZS	Ergitme bölümü yan bloklarında, Ergitme bölümü üst yapısında, Ergitme bölümü taban tuğlalarında, Ergitme bölümü sakal taşında
Magnezyum	Rejeneratör duvarlarında, kemerlerinde ve dolgu tuğlalarında

Fırını oluşturan refrakterlerin her biri farklı özelliklere ve kimyasal içeriklere sahip olduğundan, her birinin deformasyonu farklılık göstermektedir. Şekil 3.9'da refrakterlerde meydana gelen bozulmayı gösteren mekanizma yer almaktadır.

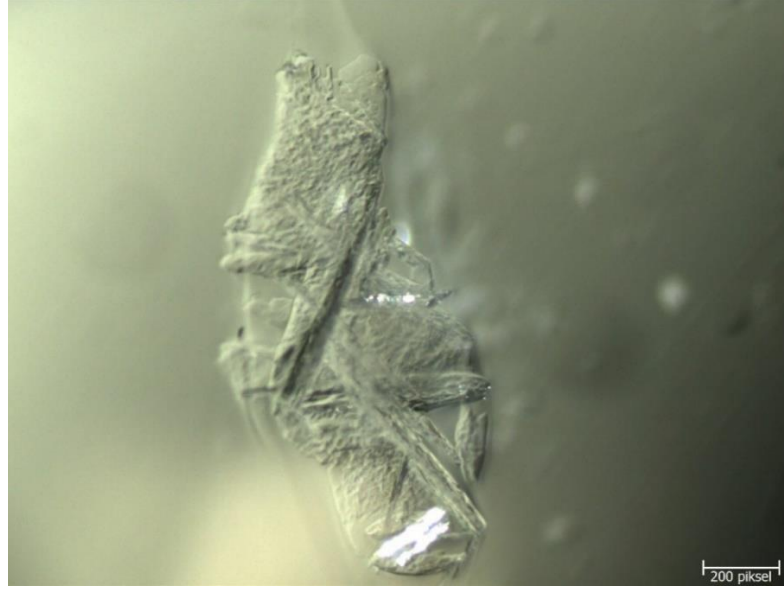


Şekil 3.9 Refrakter Bozulma Mekanizması [42]

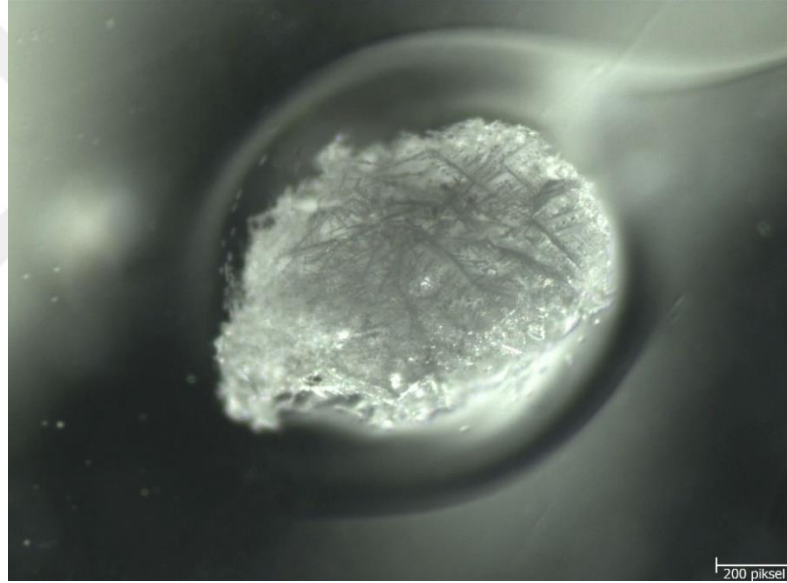
Şekilde köşelerde bulunan termal, mekanik ve kimyasal etkilerin hepsi fırında bir arada bulunmaktadır. Bunların bütünsel etkisi kendini üçgen ortasında bozulma olarak gösterir. Bu bozulmalar sonucu camda hatalar meydana gelmektedir.

### 3.4.1. Tridimit Hatası

Silikanın formlarından biri olan tridimit hatası genel olarak taş hatası olarak bilinmektedir.



a)



b)

Şekil 3.10 a) ve b) Tridimit hatalarının mikroskop görüntüleri.

Bu görüntü x40 büyütme ile alındı. Şekil 3.10’da mikroskop görüntüsü olan tridimit hatalarının öz kütlesi camdan düşük olduğu için hata camın üst yüzeyinde görülmektedir. Bu hata soda açısından zengin atık gazların soğuk olan silika refrakterleri üzerinde yoğunlaşmasıyla birlikte alevsiz bölümdeki yan duvarlardan, kemer bölgesinden ve boyun bölgesindeki duvarlardan damlayarak veya akıntı şeklinde camın içine girmesi ile meydana gelir.

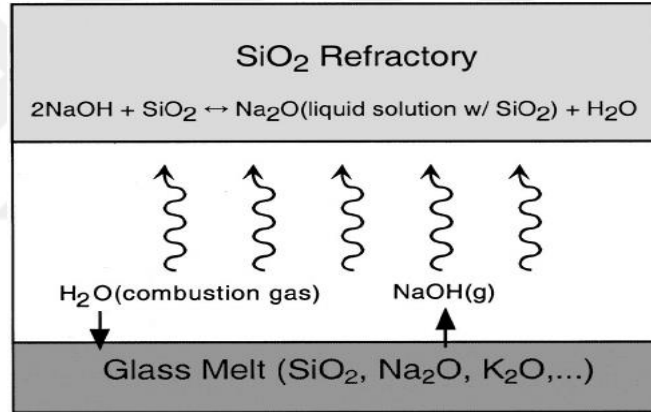
*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

- B duvarı optik sıcaklığı 1380°C civarında tutulmalıdır.

B duvarı yüksek oranda SiO<sub>2</sub> içeren silika refrakterlerinden yapılmıştır. Fırın atmosferinde oluşan NaOH gazları soğuk olan B duvarı üzerinde yoğunlaşabilir. Duvar sıcaklığı azaldıkça yoğunlaşma miktarı artmaktadır [43].



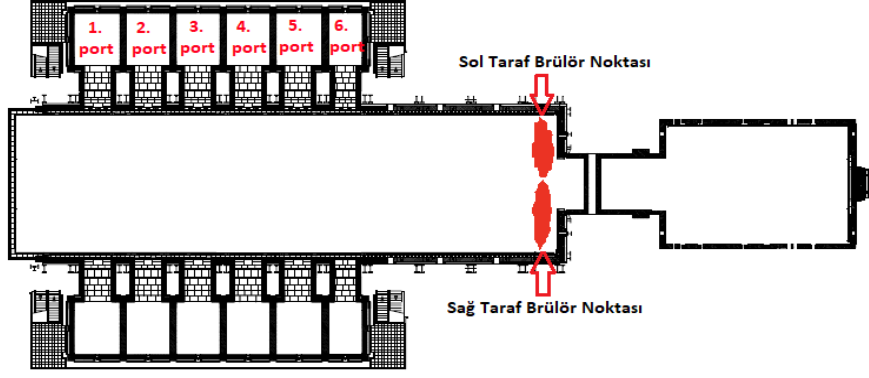
Bu yoğunlaşma sonucu poroziteli bir yapıya sahip olan silika içerikli B duvarı NaOH ile reaksiyona girmeye başlayarak duvardan akıntı şeklinde akararak camın içine girer ve hata olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sürecin anlatan reaksiyon Şekil 3.11’ de görülmektedir. Bunu engellemek için B duvarı optik sıcaklığının 1380°C civarında tutulmasına gayret edilmelidir. Oksijen kaynağı olarak hava kullanılan fırınlarda 1380°C altında NaOH buharı bu refrakteri etkilememektedir [43].



Şekil 3.11 Silika refrakterinin NaOH tarafından korozyona uğrama sürecini anlatan şema [41]

- B duvarını soda yoğunluğu yüksek bu gazdan korumak gerekir.

Bunun için fırın alevsiz bölgesinin sonuna sağ ve sol taraftan olmak üzere brülör yakılarak temiz gaz perdesi oluşturulabilir. Oluşturulacak bu gaz perdesiyle birlikte NaOH B duvarı üzerinde, fırın köşelerinde ve kemer bölgesinde yoğunlaşmayacak böylece hata oluşumu gerçekleşemeyecektir.



Şekil 3.12 B duvarını soda gazından korumak için brülör montaj noktaları.

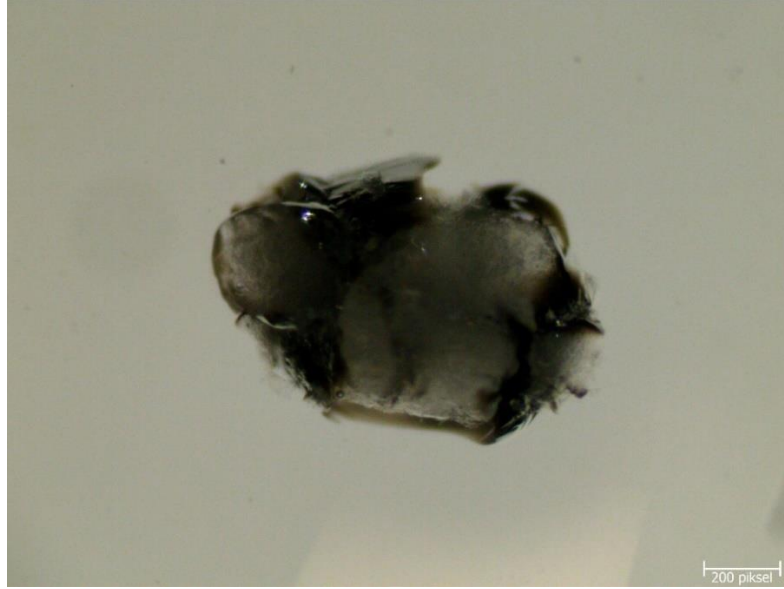
Şekil 3.12’de fırın alevsiz bölge sonu gözetleme pencerelerinin olduğu noktada yakılacak olan brülörün montajının üstten görünümü yer almaktadır.

- Dinlendirme bölgesinin basıncı ergitme bölgesinden yüksek tutulmalı.

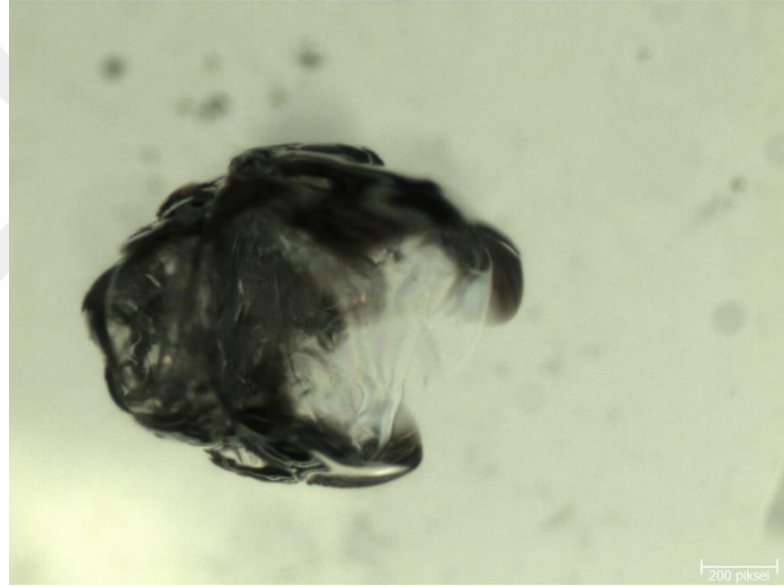
Dinlendirme bölgesi basıncı, ergitme bölgesi basıncından yüksek tutularak, gazların boyun bölgesine ve dinlendirme bölgesine girmesini engellenir. Dolayısıyla yukarıda belirtilen noktalarda problem yoksa hata boyun bölgesi ve dinlendirme bölgesindeki akıntı ve damlamalardan gelebilir. Bu durumda dinlendirme bölgesinin basıncının ergitme bölgesinin basıncından fazla olup olmadığı transmitterlerden kontrol edilmelidir. Fazlaysa yeterli gelmiyor olabilir. Dinlendirme bölgesi basıncı artırılarak hata seyri takip edilmelidir.

### 3.4.2. Fırın Kemerlerinden Kaynaklı Damlama Hataları

Fırın kemer birleşim noktalarında zaman içinde meydana gelen deformasyonlar sonucu açık boşluklar oluşur ve soda buharı bu bölgelerde yoğunlaşır. Bu durum silisin saldırıya uğramasıyla birlikte büyük delikler (fare delikleri) oluşturabilir.



a)



b)

Şekil 3.13 a) ve b) Damlama hatalarının mikroskop görüntüleri.

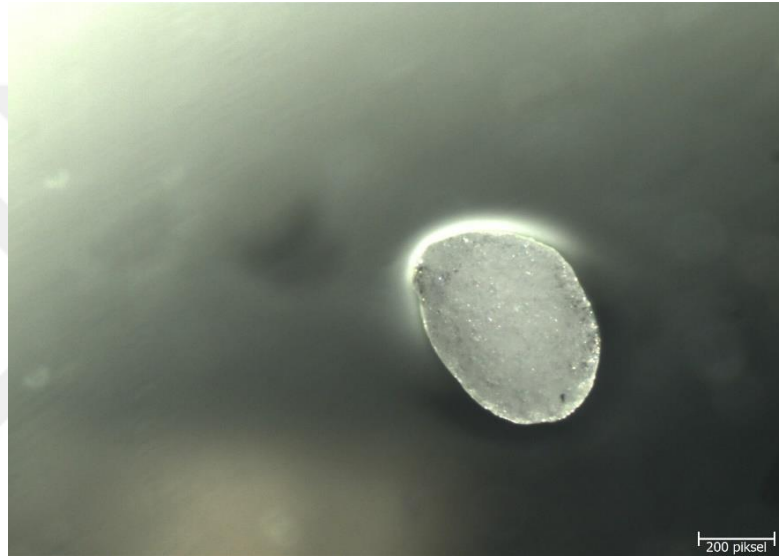
Bu görüntü x40 büyütme ile alındı. Şekil 3.13' de yer alan hatalar sodanın refraktöre saldırması sonucu eriyen silikanın damlayarak, tridimit ve kristobalit gibi farklı formlarda camın içine girmesiyle görülür.

*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

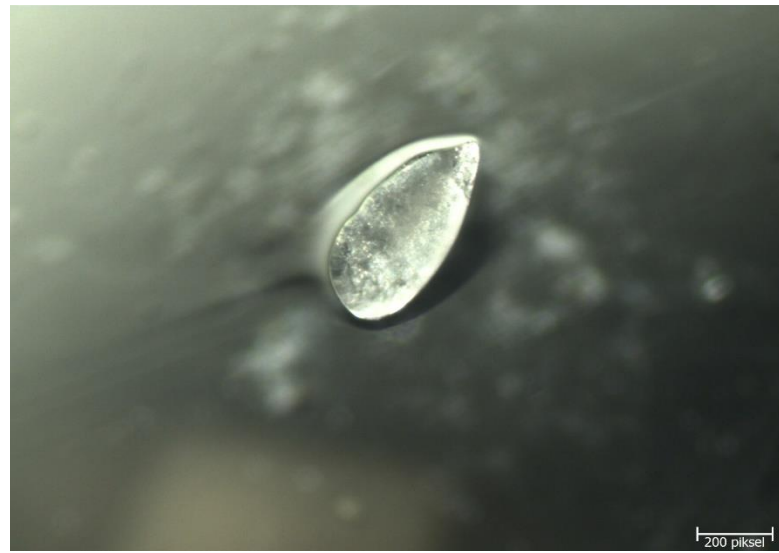
- Yüksek sıcaklık sonucu kemerlerde meydana gelen aşınmaları ve damlamaları engellemek için problemlili olan kemerlerin sıcaklıkları kademeli olarak düşürülerek hata seyri takip edilmelidir.
- Hata yoğunluğu çok ciddiye kemer bölgesinde izolasyonlar mevcutsa bunlar kaldırılarak hataların durumu takip edilmelidir.

### 3.4.3. Zirkon Hatası (AZS1)

Cama temas eden AZS içerikli asker bloklarının (yan bloklar) genellikle cam seviyesindeki dalgalanmalar sonucu camda görülen hatadır.



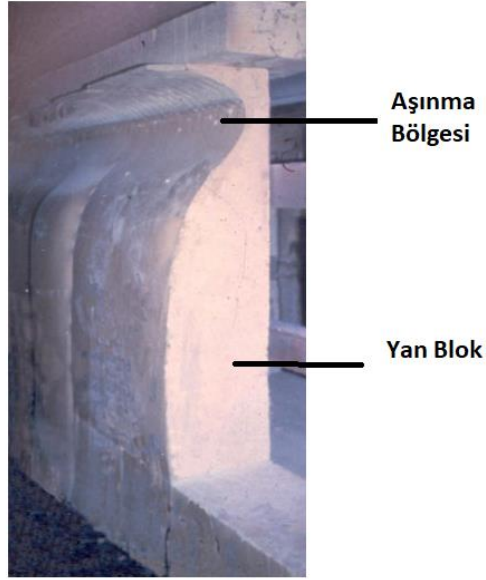
a)



b)

Şekil 3.14 a) ve b) AZS1 hatalarının mikroskop görüntüleri.

Bu görüntü x40 büyütme ile alındı. Şekil 3.14’ de görülen hatalar, genellikle yan blokların harmanla teması ve seviye dalgalanması sonucu alevli bölgede meydana gelir ve bu hata zirkon içeriğine sahip olduğundan camın içinde çözünmesi çok yavaştır. Dolayısıyla camda hata olarak karşımıza çıkmaktadır. AZS 1 hatası olarak bilinmektedir.

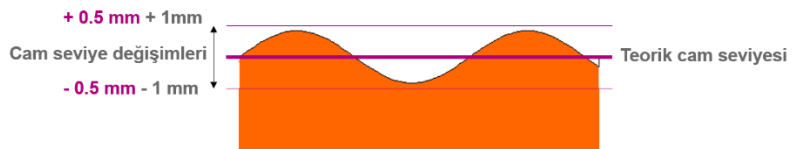


Şekil 3.15 Aşınmış bir yan blok [44]

*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

- Cam seviyesi kontrol edilmelidir.

Cam seviyesi, cam seviye ölçer ile otomatik olarak ölçülür ve şarjörün hızının bu değere göre çalışması ile seviyede en fazla +1 ve -1 mm farklılık olacak şekilde ayarlanır. Seviye bu çalışma aralığı dışına çıkarak düşüş gösterirse veyahut çıkış gösterirse meydana gelecek dalgalanma sonucu yan bloktaki aşınmalar ile hatalar meydana gelir. Cam seviyesinde oluşacak dalgalanmalara hızlı bir şekilde manuel olarak müdahale edilmeli ve sert dalgalanmaların önüne geçilmelidir.



Şekil 3.16 Cam seviyesi değişimi görseli.

- Çekiş miktarlarındaki değişimler incelenmelidir.

Üretilen tonaj miktarı artırılacaksa bu kademeli olarak yapılmalı. Fırın kapasitesine göre değişmekle birlikte günde 10 ton artış yaparak günlük üretim miktarını artırmak iyi olacaktır. Hızlı artışlar çekiş hızlanacağı için yan bloklarda oluşacak sürtünmeler ile hataların oluşmasına zemin hazırlayacaktır.

- Cam sıcaklığı kontrol edilmelidir.

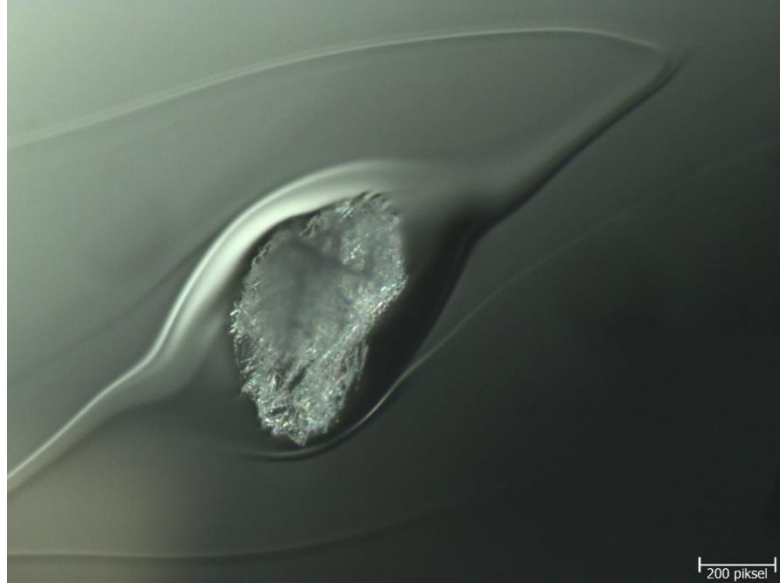
Cam sıcaklığının artması ile yan bloklarda aşınma hızı artar ve hataların oluşumuna neden olur. Cam sıcaklığı sabit kalması, hammadde kimyasallarının ve fırın içi sıcaklıklarının stabil olmasıyla mümkün olur.

#### **3.4.4. Dendritik Zirkon Hatası (AZS2)**

Soda gazlarının ve alevlerin etkisiyle cam seviyesinin üstündeki AZS içerikli yan duvarların deforme olarak akması sonucu oluşan AZS2 olarak tabir edilen damar hatalardır.



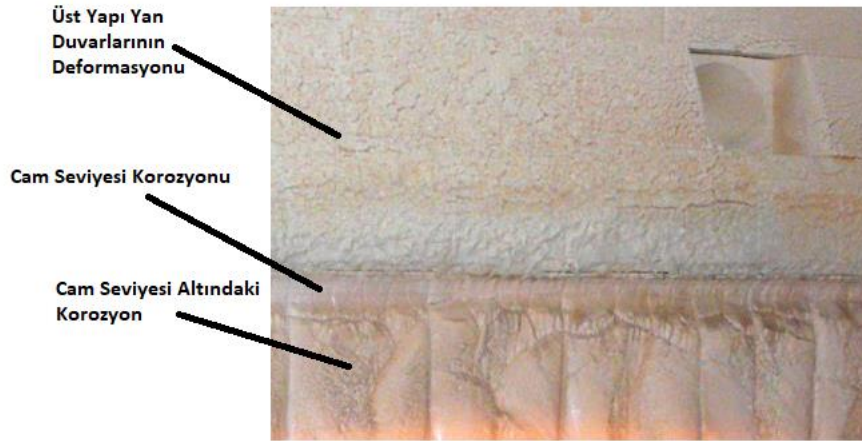
a)



b)

Şekil 3.17 a) ve b) AZS2 hatalarının mikroskop görüntüleri.

Bu görüntü x40 büyütme ile alındı. Şekil 3.17’de yer alan AZS2 hatalarının temel etkeni olan zirkonun cam içinde çözünmesi çok yavaş olduğu için hatalar alevli bölgede meydana gelmesine rağmen çözünemez ve camda hata olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.18 Fırın içinde deforme olan duvarların görüntüsü [45]

Şekil 3.18’de deformasyona uğramış fırın içi üst yapı yan blok, cam seviyesi ve cam seviyesi altındaki bölgeler görülmektedir.

Sarkıtlar



Şekil 3.19 Üst yapının akıntı ile sarkıt oluşurması [42]

*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

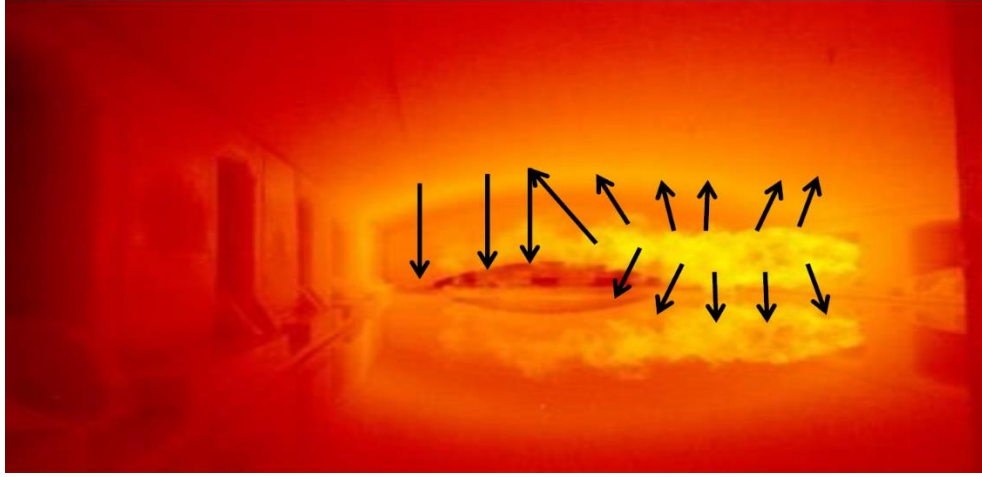
- Alev boylarının kontrol edilmesi gerekiyor.

Fırın alev boyları, refrakter aşınmaları için önem arz etmektedir. Alev boyunun fazla olması karşı duvarın fazla ısınmasına neden olur ve duvarda oluşan deformasyonlar ile meydana gelen akıntılar sonucu camda hata meydana gelebilmektedir. 6 portlu bir yandan ateşlemeli rejeneratif fırın için örnek olması gereken alev boyları Tablo 11’de yer almaktadır.

Tablo 11 : Portlara göre alev uzunlukları.

Portlar	Alev Uzunlukları ( Fırın Enine Göre)
1.Port	8-9 / 11 metre
2.Port	8-9 / 11 metre
3.Port	8-9 / 11 metre
4.Port	7-8 / 11 metre
5.Port	6-7 / 11 metre
6.Port	5-6 / 11 metre

Aynı zamanda alevlerin kemerlere de temas etmemesi gerekmektedir. Örnek bir fırın içi alev görüntüsü Şekil 3.20’de yer almaktadır.



Şekil 3.20 Float hattı rejeneratif fırın içindeki alevler [46]

Şekil 3.20’de float fırın içindeki alevlerin pozisyonu gösterilmektedir.

- Seviye dalgalanmasının önüne geçilmelidir.

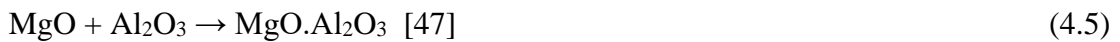
Cam seviyesindeki dalgalanmalar sonucu camda AZS hataları meydana gelir. Cam seviyesinin +1 mm ve -1 mm hassasiyette takip edilmesi hataların önüne geçilecektir. Şekil 3.16’da cam seviyesindeki dalgalanma mekanizması görülmektedir.

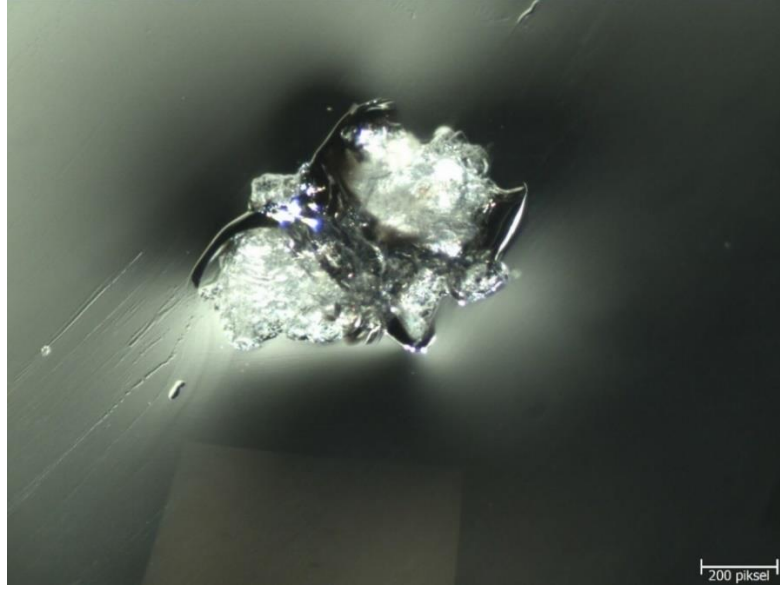
- Azs1 hatasının tekrar cam kırığı olarak fırına girmesi engellenmelidir.

AZS1 hatalarının cam kırıklarıyla birlikte tekrar fırına beslenmesi, sıcaklık etkisiyle form değiştirmesi sonucu AZS2 hatalarına dönüşüm sağlamış olur. AZS1 hatasının yoğun geldiği dönemlerdeki cam kırıkları ayrı stoklanarak hurdaya ayrılması ve fırına tekrar beslenmemesi gerekmektedir.

#### 3.4.5. $\beta$ Alümina / Spinel

Bu hata yüksek alümina içeren taş hatasıdır. Fırın dinlendirme bölgesi üst yapının yan duvarları yaklaşık %95  $Al_2O_3$  içeren refrakterlerden yapılır. Bu yapının korozyona uğraması ile birlikte camda alümina hataları görülebilir. Bir başka nedense harman karışımında kullanılan dolomitten ( $CaCO_3.MgCO_3$ ) taşınan magnezyumun, alümina refrakterlerle reaksiyonu, spinel kapaçlarının ( $MgO.Al_2O_3$ ) oluşumuna yol açar.





Şekil 3.21  $\beta$  Alümina / Spinel hatasının mikroskop görüntüsü.

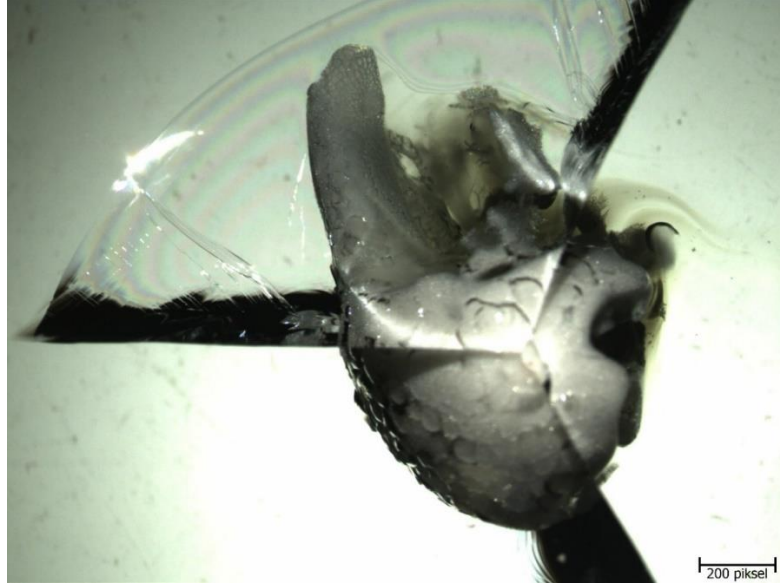
Bu görüntü x40 büyütme ile alındı.  $\beta$  Alümina / Spinel hatasının mikroskop vasıtasıyla alınan görüntüsü Şekil 3.21’ de verilmiştir.

*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

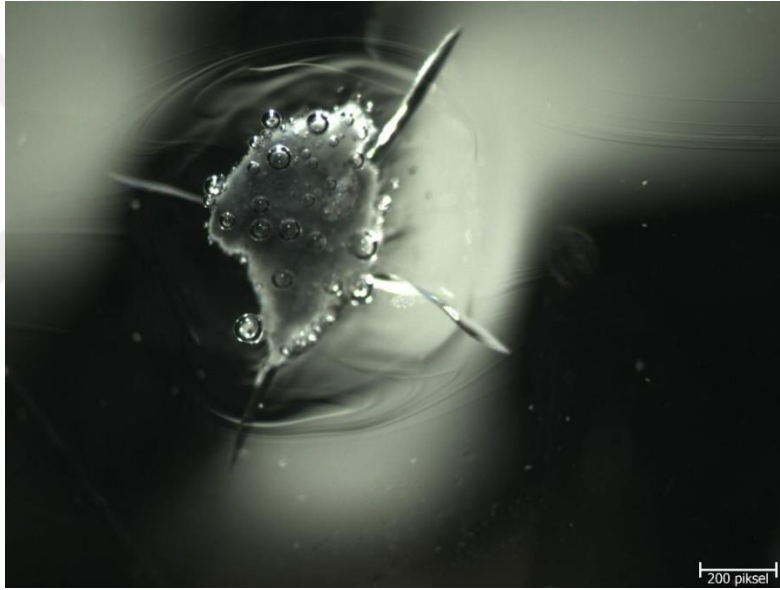
- Dolamitin tane parça büyüklükleri kontrol edilmelidir. Tablo 8’de dolamit tane büyüklüklerinin olması gereken aralık verilmiştir.

#### **3.4.6. Nefelin Müllit**

Bu hatanın şamot tuğlası parçalarının fırın içine girmesi ve camla temas etmesi, fırın tamirinde kil içeren harç kullanımı veya harmana kil karışması sonucunda oluştuğu bilinmektedir.



a)



Şekil 3.22 a) ve b) Nefelin mullit hatalarının mikroskop görüntüleri.

Bu görüntü x40 büyütme ile alındı.Şekil 3.22 ' de nefelin mullit hatalarının mikroskoptan alınan görüntüsü verilmiştir.

*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

- Fırın tamirinde kullanılan harçların kil içermemesi gerekir.
- Harmandaki hammaddelerde kil kontaminasyonu olup olmadığı kontrol edilmelidir.

### 3.4.7. Cam Yünü

Bu hata, fırının bazı noktalarında refrakter açıklıklarında cam yünü veya fiber board levha kullanımını sonucu buradan kopan parçaların cama karışması ile oluşur. Şekil 3.23'de cam yünü hatası mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.23 Cam yünü hatasının mikroskop görüntüsü.

*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

- Cam yünü ve board levhaların nasıl kullanılması gerektiği konusunda personele eğitim verilmeli.

## 3.5. DEVİTRİFİKASYON HATALARI VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ

### 3.5.1. Beta Wollastonit

Genellikle fırının durgun soğuk köşelerindeki camın kristalleşmesi ile oluşan bir hatadır. Genellikle renkli cam üretimine geçiş sırasında cam sıcaklıklarında meydana gelen değişimlerden dolayı oluşmaktadır.



Şekil 3.24 Beta wollastonit hatasının mikroskop görüntüsü.

Bu görüntü x40 büyütme ile alındı. Şekil 3.24’de beta wollastonit hatasının mikroskop görüntüsü verilmiştir.

*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

- Fırın dinlendirme bölgesi çıkış taban sıcaklığı  $> 1000^{\circ}\text{C}$  olacak şekilde ayarlanmalıdır. Dinlendirme bölgesi sıcaklığı ve baraj batıklığı pozisyonu ile bu koşullar sağlanabilmektedir.
- Renk geçişleriyle meydana gelen devitrifikasyonların fırına tekrar dönmesini sağlamak için fırın boyu bölgesindeki baraj soğutucuların cama olan batıklık miktarı azaltılmalı.

### **3.6. KONTAMİNASYON KAYNAKLI HATALAR VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ**

#### **3.6.1. Kromit Hatası**

Bu hata genellikle kumdan gelmektedir fakat tüm hammaddeler (cam kırığı dahil) tekrar kontrol edilmelidir.



Şekil 3.25 Kromit hatasının görüntüsü.

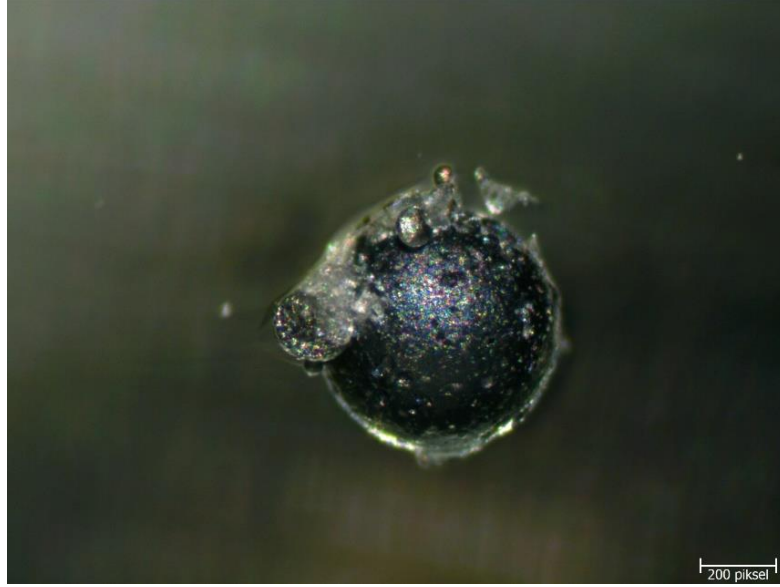
Bu görüntü x40 büyütme ile alındı. Şekil 3.25’de Kromit hatası görüntüsü verilmiştir.

*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

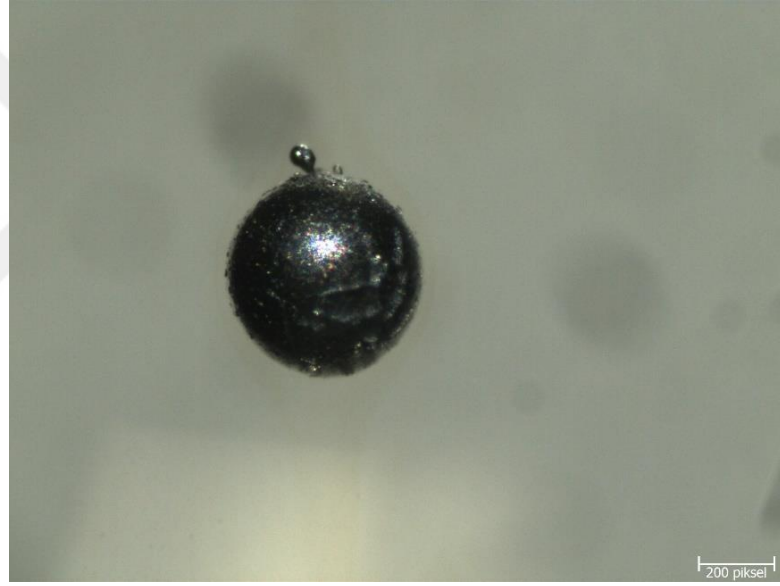
- Hammadde kontrolleri yapılmalıdır.
- Kromit hatalarının olduğu cam kırığı geri dönüşümü engellenerek, hatalı cam kırıkları farklı bir alana alınarak hurdaya çıkarılmalıdır.
- Hammadde sevkiyatı yapan araçların yükleme öncesi dorse temizlikleri kontrol edilmelidir.

### **3.6.2. Metalik Silis hatası**

Cam kırığından veya harmandan gelen metalik alüminyum şiddetli indirgen şartlar sağlayarak  $\text{SiO}_2$ 'yi indirger ve camda metalik silis hatası olarak ortaya çıkar.



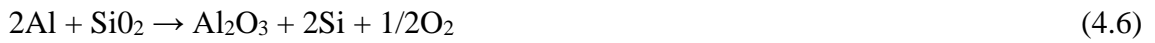
a)



b)

Şekil 3.26 a) ve b) Metalik silis hatalarının mikroskop görüntüleri.

Bu görüntü x40 büyütme ile alındı. Şekil 3.26’da metalik silis hatalarının mikroskop görüntüsü verilmiştir.



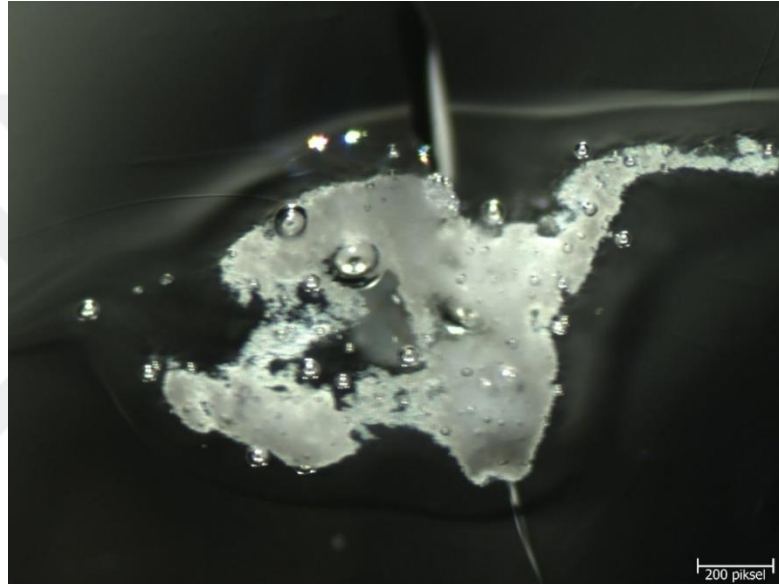
Yukarıdaki reaksiyondan da görüleceği üzere bazı metal kontaminasyonlar söz konusu olduğunda silisin indirgenmesi sonucu habbe de meydana gelmektedir.

*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

- Cam kırığı içindeki metal parçalarını ayıran mıknatısların kontrol edilmesi gerekirse yenilenmesi gerekmektedir.
- Harmanı oluşturan hammaddeler kontrol edilmelidir. Hammadde sevkiyatını yapan tırların sevkiyat öncesi araç dorselerini yıkamaları sağlanmalıdır.

### 3.6.3. Düşük Alüminalı Refrakter Hatası

Genellikle cam kırığı ve hammadde kontaminasyonundan kaynaklanır. Camın temas ettiği refrakterlerde sızdırmazlık için kullanılan harç malzemesinin yanlış seçimi de bu hatanın oluşumuna neden olabilir.



Şekil 3.27 Düşük alüminalı refrakter hatasının mikroskop görüntüsü.

Bu görüntü x40 büyütme ile alındı. Şekil 3.27’de düşük alüminalı refrakter hatasının mikroskop görüntüsü verilmiştir.

*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

- Cam kırığı ve harmanın kontrolleri yapılmalı.
- Fırında sızdırmazlık için kullanılan harçlar kontrol edilerek fırın içine düşmesi engellenmeli

### 3.6.4. Ream Hatası (Düğmeleri)

Harmana veya cam kırığına zirkonlu veya alüminyumlu malzemelerin kontaminasyonu sonucu veya fırın yan duvarlarından dökülen parçalardan dolayı bu düğme damar hataları

oluşmaktadır.



Şekil 3.28 Ream hatasının mikroskop görüntüsü.

Bu görüntü x40 büyütme ile alındı. Şekil 3.28’de ream hatasının mikroskop görüntüsü verilmiştir.

*Bu hatayı önlemek veya azaltmak için yapılması gerekenler:*

- Hammadde ve cam kırığının kontrolleri yapılarak kontaminasyon engellenmelidir.
- Yan duvardan gelecek olan hataları engellemek için alev boyları ve cam seviyesi kontrol edilmelidir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Düz cam float hattında yandan ateşlemeli rejeneratif fırınlardan dolayı camda oluşan hataların stereo mikroskop ile görüntülemeleri yapılmıştır. Elde edilen görüntülere ve analizlere göre hataların tanımlamaları yapılarak harman veya refrakter kökenli olup olmadığı tespit edilmiş ve hatalara nelerin sebep olabileceği hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Düz cam float hatlarında camda görülen hataların büyük bir kısmı fırın ve harman kaynaklı hatalardır. Bu hataları tamamen yok etmek çoğu zaman imkansızdır bu durumda hata miktarını azaltmak verimliliğin artmasını sağlayacaktır. Bundan dolayı camda görülen hatanın doğru tespiti ve buna göre alınacak önlemlerle hataları minimum seviyeye indirmek için öneriler sunulmuştur.

Camda fırın kaynaklı görülen ergimemiş harman hatalarının oluşumunu engellemek veya meydana gelen hataları azaltmak için yapılması gerekenler;

- Fırın içi sıcaklıkların stabil ve set değerlerinde olup olmadığı kontrol edilmeli,
- Harman ve köpük hatlarında kopmaların olup olmadığı fırın içi gözlemleriyle kontrol edilmeli,
- Alevlerin harman örtüsüne direk çarpmadığından emin olunmalı ve bunun için alev açıları gözle kontrol edilmeli,
- Harman reçetesi ve harman tartımları kontrol edilmeli, harman neminin %3-4,5 aralığında olduğu kontrol edilmeli,
- Hata miktarını azaltmak için baraj derinliği artırılmalı,
- Harman sıcaklığının, harman karıştırıcı prosesi sonrasında 36°C'nin altında olmamasına dikkat edilmeli,
- Hammadde tane büyüklükleri istenilen aralıkta olmalıdır.

Fırında refrakterlerden kaynaklı hataların oluşumunu engellemek veya meydana gelen

hataları azaltmak için yapılması gerekenler;

- Cam seviyesinin çalışma aralığı +1mm ve -1mm aralığında olmalı ve cam seviyesindeki dalgalanmaların önüne geçilmeli,
- B duvarı NaOH gazlarının saldırısından engellenmek için alevsiz bölge çalışma sıcaklığı 1380°C'nin üstünde tutulmalı ve gerekiyorsa alevsiz bölge sağ ve sol köşelerine brülör yerleştirilerek gazın duvara temas etmesi engellenmeli,
- Fırın içindeki alevlerin karşı duvara temas edip etmediği kontrol edilerek alev açıları gözden geçirilmeli,
- Fırın sıcaklıklarının artarak hedef değerlerin üzerine çıkmaması gerekir. Bunun için kumdaki Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarındaki değişimler ve hızlı tonaj düşüşlerine dikkat edilmeli gaz müdahalelerinin zamanında olmasına özen gösterilmeli,
- Fırın basıncında ani yükselmelerin meydana gelmesi engellenmeli,
- Fırın bakımlarında kullanılan harçların, fırın içine düşerek cama karışmasının önüne geçmek için ustalara bu konuda kalite eğitimleri verilerek durumun öneminden bahsedilmeli,
- Camda refrakter kökenli AZS gibi hataların yoğun olduğu üretim süreçlerindeki cam kırıkları fırına tekrar beslenmemeli ve farklı alanda stoklanarak hurdaya çıkarılmalıdır.

Fırında devitrifikasyon kaynaklı hataların oluşumunu engellemek veya meydana gelen hataları azaltmak için yapılması gerekenler;

- Fırın dinlendirme bölgesi çıkış taban sıcaklığı > 1000°C olacak şekilde ayarlanmalıdır. Dinlendirme bölgesi sıcaklığı ve baraj batıklığı pozisyonu ile bu koşullar sağlanabilmektedir.
- Renk geçişleriyle meydana gelen devitrifikasyonların fırına tekrar dönmesini sağlamak için fırın boyun bölgesindeki baraj soğutucuların cama olan batıklık miktarı azaltılmalıdır.

Fırında habbe hataların oluşumunu engellemek veya meydana gelen hataları azaltmak için yapılması gerekenler;

- Fırın alevsiz bölge sıcaklığının sabit bir şekilde tutulmasına özen gösterilmelidir. Alevsiz bölge sıcaklığında değişim olmamasına rağmen habbe hatası geliyorsa sıcaklık kademeli olarak 5°C artırılarak hataların seyri takip edilmelidir.
- Camdaki baraj soğutucu derinliği, çalışma aralığı mevcutsa 50mm daha artırılarak hataların seyri takip edilmelidir.

Fırında harman/cam kırığı kontaminasyonundan kaynaklı hataların oluşumunu engellemek veya meydana gelen hataları azaltmak için yapılması gerekenler;

- Cam kırığına metal ve türevlerinin karışması engellenmeli ve cam kırığı yıkanarak metal detektörlerden geçirildikten sonra hammaddelerle karıştırılmalıdır.
- Hammadde sevkiyatını yapan tırların sevkiyat öncesi araç dorselerinin temiz olması sağlanmalıdır.

Düz cam üretiminde, üretim bandının kesintisiz olarak devam ettiği göz önünde bulundurarak, fırın kaynaklı hataların önüne geçilebilmek veya miktarını minimum seviyeye düşürmek için fırın sıcaklık ve operasyonel faaliyetlerinin kontrol altında tutulması ve fırın içi gözlemlerinin tüm vardiyalarda çok iyi yapılıyor olması gerekmektedir. Özellikle fırın yapısını oluşturan refrakterler termal, mekanik ve kimyasal etkileşimler sonucu deformasyona uğrayarak camda hatalara sebebiyet vermektedir. Bu üretim sürecinde kaçınılmaz bir mekanizmadır. Bu mekanizmanın hızı ve cama vereceği hata miktarı, çalışma sıcaklıklarına, cam seviyesindeki dalgalanmalara ve alevlerin duvarlara teması veya yakınlığına göre değişkenlik göstermektedir.

Hammadde kaynaklı hatalarında en büyük sebebi kontaminasyonlar, tartım yanlışlıkları, tane boyutlarının, nem miktarının ve harman sıcaklığının istenilen seviyede olmaması şeklinde sıralanabilir. Tüm bu parametreler kontrol altında tutulursa, harman kaynaklı hatalar minimum seviyeye düşürülür.

Teknolojinin gelişimiyle birlikte, değişen ve gelişen fırın tasarımlarıyla gün geçtikçe daha

kaliteli cam üretimleri yapmak mümkün olacaktır. Özellikle endüstri 4.0 kapsamında termal kamera sistemleriyle fırın içinde sıcaklık, harman ve köpük hatlarının kontrolleri otomatik olarak daha sıkı ve daha sistematik bir şekilde yapılması sonucu daha kaliteli düz cam üretimi ve enerjiden tasarruf sağlanabilir. Float düz cam üretim tesislerinde camdaki hataların minimum seviyeye düşürülmesi ülke ekonomisi açısından çok büyük kazanç olacaktır.



## 5. KAYNAKLAR

- [1] Dođan, N., (1996). “Sodalı Camların Elektromanyetik Radyasyon Karşıındaki Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [2] Cam şişe ambalaj, “*Camın Tarihiçesi*”, <https://www.camsiseambalaj.com/cam-hakkinda/camin-tarihcesi/>, erişim tarihi: 21.04.2022.
- [3] Ustaer, C., (1995). “Cam Bilimi’ne Giriş”, 1. Baskı, I.Cilt, s. 6, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, İstanbul Üniversitesi ,İstanbul, Türkiye.
- [4] Kantur, U., (2009). “Kurşun Geçirmez Cam Üretim Sürecinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya Üniversitesi, Edirne, Türkiye.
- [5] Şişe Cam, “*Cam Sektörü Raporu*”, <https://doc.sisecam.com.tr/camsektoruraporu/html5forpc.html>, erişim tarihi: 21.04.2022.
- [6] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, “*Cam Sektörü Raporu*”, <https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/plan-program/CamSektorRaporu2020.pdf>, erişim tarihi: 21.04.2022.
- [7] Vogel, W., (1985). “Chemistry of Glass”, The American Ceramic Society, Amerika.
- [8] Volf, M.B., (1990). “Technical approach to glass, Glass Science and Technology”, C.10, Elsevier Science Publishing Company, New York, Amerika.
- [9] Kaçar U., (2008). “Otomotiv Camlarının Temperlenmesi ve Şekillendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü,Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye.
- [10] Güvel, A. Ş. B., (2011). “Refrakter Kaynaklı Cam Hatalarının Fırın İçerisindeki Oluşum Yerlerinin Tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [11] Çakır, İ., (2003). “Enerji Dağılımlı X-Işını Analizörlü Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS) İle Sıkça Karşılaşılan Katı Adli Delillerin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Adli Tıp Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [12] Taşdelen, M. E., (2016). “Cam Teknolojisi Ders Notları”, Mühendislik Fakültesi

Malzeme Bilimi Ve Mühendisliği , Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye.

[13] Mühendishane, “ *Amorf Yapıdaki Seramikler*”, <https://muhendishane.org/kutuphane/temel-malzeme-bilgisi/amorf-yapidaki-seramikler/>, erişim tarihi: 21.04.2022.

[14] Kocabağ, D., (2002). “Cam Kimyası, Özellikleri, Uygulaması “, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1-50, 210-248.

[15] Ahmetoğlu, M., (2006). “Camların kimyasal yapıları ve kimyasal bileşimlerine göre daldırma yöntemiyle matlaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.

[16] Kılış, G., (2006). “Değişik bileşimli camların hazırlanması, fiziksel ve optik özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Osman Gazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.

[17] MEGEP, (2008). “Seramik ve Cam Teknolojisi, Camın Kimyasal Yapısı”, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, Ankara, Türkiye.

[18] Haldimann, M., (2006). “Fracture strength of structural glass elements-analytical and numerical modelling, testing and design”, Doktora Tezi, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), Lausanne, İsviçre.

[19] Sümer, G., (2007). “Cam Teknolojisi”, Çağrı Ofset, Eskişehir, 30-82, 155-160.

[20] Öztürk, M., (2006). “Temperli otomobil camlarında mekanik özelliklerin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

[21] Düzce Cam, (2012). Kalite Kontrol Bölümü Eğitim Notları, Düzce, 16-22.

[22] Persson, H. R.,(1983). “Glass Technology Manufacturing and Properties”, Cheongmoon Publishing, Seoul.

[23] Neşet, C., (2008). “Cam Fırınlarına Yönelik Zirkonya Müllit Esaslı Dökülebilir Refrakter Betonlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

[24] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, “*Sektörel Uygulama Kılavuzu Cam Üretimi*”, [https://webdosya.csb.gov.tr/db/sanayihavarehberi/icerikler/06\\_cam-uret-m--20200103075113.pdf](https://webdosya.csb.gov.tr/db/sanayihavarehberi/icerikler/06_cam-uret-m--20200103075113.pdf), erişim tarihi: 21.04.2022.

- [25] Kocabağ, D., (2000). “Cam Fırınları, Malzemeler, Teknolojiler, Prosesler”, ETAM, Eskişehir, Türkiye.
- [26] Şan, İ., (1998). “Cam Sanayi Sektör Araştırması”, T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı, Sanayi Araştırma ve Geliştirme Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- [27] Şöyle ki, “*Cam Nasıl Üretilir? Şekillendirme-Renkendirme İşlemleri*”  
<https://soyleki.com/cam-nasil-uretilir-sekillendirme-renklendirme-islemleri/>, erişim tarihi: 27.04.2022.
- [28] Vitrum, “*Düzcam- Üretim süreci*”, <https://vitrumlife.it/wp-content/uploads/vetro-piano-fasi.jpg>, erişim 27.04.2022.
- [29] Fives Group, “*Float Glass Line*”  
[https://webasset.fivesgroup.com/\\_Never\\_Delete\\_/0/2/csm\\_Prium-Float-interior\\_55d744dde9.jpg](https://webasset.fivesgroup.com/_Never_Delete_/0/2/csm_Prium-Float-interior_55d744dde9.jpg) , erişim tarihi: 27.04.2022.
- [30] Glass International, “*Vitro to construct \$120 million float glass furnace at Garcia*”,  
<https://www.glass-international.com/news/vitro-to-construct-120-million-float-glass-furnace-at-garcia> , erişim tarihi: 27.04.2022.
- [31] Pokorný, P., Gerža, P., (2011). “The Visualization of the Thermal Flow in a Glass Furnace”, Proceedings of the 15th WSEAS international conference on Computers.
- [32] Tecoglass, “*Regenerative Furnaces - Side Port*”,  
<http://www.tecoglas.com/regenerative-furnaces---side-port-cross-fired>, erişim tarihi: 27.04.2022.
- [33] Hornglass, “*Float Glass Furnaces*”, <https://www.hornglass.com/products/melting-furnaces-and-equipment/float-glass-furnaces> , erişim tarihi: 27.04.2022.
- [34] Feng, Z. J., Li, D. C., Qin, G. Q., Liu, S. M., (2008). “Study of the Float Glass Melting Process: Combining Fluid Dynamics Simulation and Glass Homogeneity Inspection “, J. Am. Ceram. Soc., 91 3229–34.
- [35] Düzce Cam, (2012). Sıcak Bölüm Eğitim Notları, Düzce, 80.
- [36] Gulf today, “*Dubai Investments’ glass business enjoys 45 per cent market share*”  
<https://www.gulftoday.ae/business/2019/10/27/dubai-investments-glass-business---enjoys-45-per-cent-market-share> erişim tarihi: 28.04.2022.
- [37] Buscella, A., (2008). “Glass Defects Caused by Raw Metarial Contamination”, Glass Machinery Plants and Accessories. Issue:1, ss. 72-76.

- [38] Lehman R. L. and Manring, W.H., (1981). “Glass Batch Wetting with Water”, *Batching in the Glass Industry*, ss. 76-80.
- [39] Siebdruck Partner, “*Was Ist Glas?*”, <https://www.siebdruck-partner.de/werkstoff/glas-keramik/werkstoff-glas/glas-als-werkstoff.html> erişim tarihi: 10.05.2022.
- [40] Hubert, M., (2015). “Melting and Fining processes in industrial glass furnaces”, CelSian Glass & Solar Company ,Eindhoven, Hollanda.
- [41] Aydın, E. (2012). “Cam Üretiminde Sorunlu Alanlar”, Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları, İstanbul.
- [42] İzmirlioğlu, B., Yılmaz Ş., (2015). “Glass Melting Furnace Refractories And Refractory Related Defects” , *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 50, 4, 404-410.
- [43] Allendorf, M. D., Spear, K., E., (2001). “Thermodynamic Analysis of Silica Refractory Corrosion in Glass-Melting Furnaces”, *Journal of The Electrochemical Society*, 148 (2) B59-B67.
- [44] Gaubil, M., Schaller, S., Thibault, M.–Drouin, J., M., Cabodi I., (2020). “How Numerical Simulation Can Help To Analyse Soldier Block Corrosion And Glass Furnace Lifetime”, *Glass International Webinar*.
- [45] Canaguier, J., (2016). “How To Reduce Glass Defects Generated By Fused – Cast Azs”, 16th Conference on the Electric Glass Melting ,Czech Glass Society.
- [46] Hubert, M., (2015). “Basics of industrial glass melting furnaces” , CelSian Glass & Solar, Eindhoven, Hollanda.
- [47] Watson, E. B., & Price, J. D. (2002). “Kinetics of the reaction  $MgO + Al_2O_3 \rightarrow MgAl_2O_4$  and Al-Mg interdiffusion in spinel at 1200 to 2000°C and 1.0 to 4.0 GPa”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(12), 2123–2138.



## **6. EKLER**

### **EK 1. Hata Çözümü Akış Şeması**

Hatalara müdahale şekillerini gösteren akış şeması aşağıdaki gibidir. Bu çalışmada ele alınan hatalara akış şeması ile aynı tablo üzerinde görülmektedir.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Gökhan YOL

Doğum Tarihi ve Yeri :

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta :

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Kompozit Malzeme Tek.	Düzce Üniversitesi	2022
Lisans	Metalurji ve Malzeme Müh.	Sakarya Üniversitesi	2012
Lise	Fen Bilimleri	Atacan Şanlı YDA Lisesi	2007

### YAYINLAR

YOL G., GÜRSEL A., (2021). BALİSTİK VE DİNAMİK YÜKLERE DİRENÇLİ PMAS VE MAS-GC CAMLAR, 3. Uluslararası Türk Dünyası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi 22-24 Ekim 2021, ss . 520-529