

**T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**DÜZ CAM ÜRETİMİNDE TEMPER PARAMETRELERİN
DÜZLEMSELLİĞE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖZKAN KAYA

BOLU, EYLÜL - 2019

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



DÜZ CAM ÜRETİMİNDE TEMPER PARAMETRELERİN
DÜZLEMSELLİĞE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖZKAN KAYA

BOLU, EYLÜL - 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Özkan KAYA tarafından hazırlanan “DÜZ CAM ÜRETİMİNDE TEMPER PARAMETRELERİN DÜZLEMSELLİĞE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 13.09.2019 tarihinde savunularak **Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü** Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

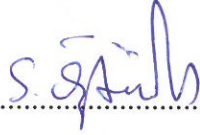
Jüri Üyeleri

Danışman
Doç. Dr. Sabri ÖZTÜRK
Abant İzzet Baysal Üniversitesi

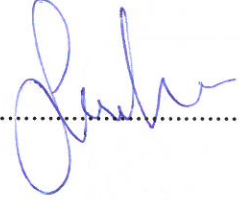
Üye
Prof. Dr. Murat PAKDİL
Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DAL
Sakarya Üniversitesi

İmza

.....


.....


.....


Prof.Dr. Ömer ÖZYURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....


Aileme ve Tüm Dostlarıma,

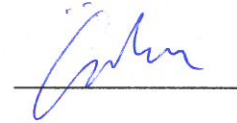
ETİK BEYAN

Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Özkan KAYA



ÖZET

**DÜZ CAM ÜRETİMİNDE TEMPER PARAMETRELERİN
DÜZLEMSELLİĞE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÖZKAN KAYA
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. SABRİ ÖZTÜRK)**

BOLU, EYLÜL - 2019

Temperli cam, sunduğu üstün özelliklerden dolayı bugün birçok uygulamada vazgeçilmez bir malzeme haline gelmiştir. Temperli camın beyaz eşya sektöründe de önemli oranda kullanımı vardır. Cam temperleme işleminde, ısıl işlemin bir sonucu olarak düz camların zorlanmalara maruz kalması ve orijinal düzlemselliğini kaybetmesi olağan bir durum olarak görülmektedir. Isıl işleme maruz kalan camlarda merdane dalgası ya da kamburluktan kaynaklanan distorsiyonların görülmesi doğaldır. Ancak düz camda meydana gelen bu şekil bozuklukları, beyaz eşya uygulamalarında belirlenen sınır değerini üstüne çıktığında hem görsel olarak hem de işlevsel olarak ürün kalitesini bozan bir faktöre dönüşmektedir. Cam temperleme işleminin doğal bir sonucu olarak ortaya çıkan düzlemsellik hatalarını tamamen ortadan kaldırmak mümkün olmasa da kontrol altına almak mümkündür. Camın düzlemselliğinin istenen seviyelerde tutulması, temper parametrelerinin değerlerinin düzgün seçilmesine bağlıdır. Bu çalışmada, temper proses parametreleri ve temperli camın düzlemselliği arasındaki ilişkinin anlaşılması hedeflenmiştir. Deneysel prosedürler beyaz eşya sektörüne yönelik temperli cam üretimi yapan bir işletmede gerçekleştirilmiştir. Farklı fırın hızı, quench fanı devri ve quench mesafesi değerleri kullanılarak gerçekleştirilen deney, bulanık mantık kullanılarak modellenmiştir. Bulanık mantık tabanlı tahmin modeli, sistemin tepkisinin anlık olarak izlenmesini ve prosesle ilgili veri tabanı oluşturulmasını mümkün kılmıştır. Verilerin analiz edilmesi sonucu en iyi düzlemsellik sonucunun, fırın hızı, quench fanı frekansı ve quench mesafesi parametre değerlerinin en yüksek limitine çıktığında elde edildiği sonucuna varılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Temperli Cam, Düzlemsellik, Bulanık Mantık, Temper Parametreleri, Kamburluk, Dalgalık

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TEMPER PARAMETERS ON FLATNESS IN FLAT GLASS PRODUCTION

MSC THESIS

ÖZKAN KAYA

**BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF
NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. SABRİ ÖZTÜRK)**

BOLU, SEPTEMBER 2019

Nowadays tempered glass has become an indispensable material used in many applications as it offers superior properties. Tempered glass has also a significant utilization in the domestic appliances sector. In glass tempering process, it is seen as a normal situation for flat glass that it is subjected to strain and lose its original flatness as a result of heat treatment. It is natural to see distortions caused by roller wave or bow in heat-treated glass. However, these deformations which occur in flat glass become a factor that deteriorates the product quality both visually and functionally when it exceeds the limit value determined in white goods applications. Even if it is not possible to completely eliminate flatness defects that are a natural consequence of the glass tempering process, it is possible to control them. Keeping the flatness of the glass at the desired levels depends on the proper selection of the values of the temper parameters. In this study, it is aimed to understand the relationship between tempering process parameters and flatness of tempered glass. Experimental procedures were performed in a company producing tempered glass for the white goods sector. The experiment using different values of furnace speed, quench fan frequency and quench distance was modeled using fuzzy logic. The fuzzy logic-based prediction model made it possible to monitor the response of the system instantly and create a process-related database. As a result of the analysis of the data, it was concluded that the best flatness result was obtained when the furnace speed, quench fan frequency and quench distance parameter values were increased to the highest limit.

KEYWORDS: Tempered Glass, Flatness, Fuzzy Logic, Tempering Parameters, Waviness, Bow

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xii
TEŞEKKÜR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ	4
3. CAMLAR	8
3.1 Camın Tarihçesi.....	8
3.2 Cam Nedir	10
3.3 Oksit Camların Kimyasal Bileşimi.....	15
3.4 Kimyasal Bileşime Göre Cam Türleri	16
3.4.1 Soda Kireç Camı	17
3.4.2 Borosilikat Camı	17
3.4.3 Kurşun Silikat Camı	18
3.4.4 Aluminosilikat Camı	18
3.4.5 % 96 Silika Camı	19
3.4.6 % 99 Silika Camı	19
3.5 Camın Özellikleri	19
3.5.1 Fiziksel Özellikler	19
3.5.2 Kimyasal Özellikler.....	21
3.5.3 Mekanik Özellikler.....	23
4. TEMPERLEME	24
4.1 Yüzey Kusurlarının Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi.....	24
4.2 Camın Mekanik Özelliklerini Geliştirme Yöntemleri	24
4.2.1 Kimyasal Güçlendirme Yöntemleri	25
4.2.2 Fiziksel Güçlendirme Yöntemleri	28
4.2.3 Fiziksel ve Kimyasal Temperlemenin Karşılaştırılması.....	28
4.3 Isıl Temperleme Prosesinin İncelenmesi	31
4.4 Beyaz Eşya Sektöründe Temperli Cam Kullanımı.....	38
5. CAM SEKTÖRÜ	40
5.1 Cam Sektörünün Özellikleri.....	40

5.2	Dünyada Cam Sektörü.....	41
5.3	Cam Sektörünün Türkiye’deki Durumu	42
6.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	43
6.1	Cam Temperleme Fırınlarının Çeşitleri ve Özellikleri.....	43
6.2	Temperleme İşleminde Kullanılan Temper Fırınının Özellikleri.....	46
6.3	Deney Numunelerinin Özellikleri ve Hazırlanış Süreci	52
6.4	Temper Fırını Proses Parametreleri.....	53
6.5	Deney Tasarımı	56
6.6	Ölçüm Metodu.....	58
6.6.1	Dalgalılık Ölçümü.....	58
6.6.2	Kamburluk Ölçümü.....	59
6.7	Elde Edilen Sayısal Sonuçlar	61
6.8	Bulanık Mantık.....	62
6.9	Bulanık Mantık Temelli Model Oluşturma.....	66
7.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	74
8.	SONUÇ VE ÖNERİLER	79
9.	KAYNAKLAR	80
10.	ÖZGEÇMİŞ	86

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. SiO ₂ Yapısının İki Boyutlu Şematik Gösterimi	12
Şekil 3.2. Kristal, Sıvı ve Camsı Hal İçin Hacim – Sıcaklık Diyagramı.....	12
Şekil 3.3. Bazı Ticari Camlar İçin Viskozitenin Sıcaklığa Göre Değişimi	15
Şekil 4.1. Kimyasal ve Isıl Temperlemedeki Gerilim Profilleri	30
Şekil 4.2. Temperleme Hattı	32
Şekil 4.3. Camda Sıcaklık - Viskozite İlişkinin Gösterimi	33
Şekil 4.4. Soğutma işleminde Cama Uygulanacak Hava Basıncının Kalınlığa Göre Değişimi.....	34
Şekil 4.5. Temperleme İşleminde Camda Meydana Gelen Sıcaklık Değişimleri	35
Şekil 4.6. Temperleme Esnasında Cam Levhada Oluşan Geçici Gerilim Dağılım Profilleri - Başlangıç Sıcaklığı	36
Şekil 4.7. Soğutma İşleminde Camdaki Sıcaklık Değişimleri	36
Şekil 4.8. Soğutma İşleminde Camdaki Gerilim Değişimleri	36
Şekil 4.9. Temperleme İşlemi Sonrası Oluşan Gerilim Dağılımı Profili	37
Şekil 4.10. Temperleme İşlemi Sonrası Oluşan Gerilimlerim Cam Levha Üzerinde Gösterimi	37
Şekil 4.11. Temperli Camda Merkezi Gerilme ve Kırık Sayısı Arasındaki İlişki	38
Şekil 4.12. Beyaz Eşya Ürünlerinde Temperli Cam Kullanımı	39
Şekil 6.1. Temper Fırınlarında Kullanılan Farklı Rezistans Uygulamaları	44
Şekil 6.2. Tipik Bir Sürekli Temper Fırını Hattı	47
Şekil 6.3. Temperleme Hattında Fırın Kısmının Genel Görünümü	47
Şekil 6.4. Fırının Giriş Kısmı	48
Şekil 6.5. Fırın Hareket Mekanizması	49
Şekil 6.6. Fan Odasının Genel Görünümü	51
Şekil 6.7. Quench Bölümünün Genel Görünümü	51
Şekil 6.8. Cooling Bölümünün Genel Görünümü	52
Şekil 6.9. Deney Prosedürlerinde Kullanılan Cam.....	53
Şekil 6.10. Dalgalılık Ölçümü İçin Kullanılan Ölçü Aleti	58
Şekil 6.11. Dalgalılık Ölçümünün Gösterimi.....	59
Şekil 6.12. Kamburluk Ölçümü İçin Kullanılan Dereceli Filler Çakısı	60
Şekil 6.13. Kamburluk Ölçümünün Gösterimi	60
Şekil 6.14. Yeşil, Siyah ve Mavi Bulanık Renk Kümeleri	63
Şekil 6.15. Bulanık Mantık Sisteminin Yapısı.....	65
Şekil 6.16. Temperli Camın Düzlemselliğini Tahmin Etmek İçin Oluşturulan Bulanık Mantık Modeli.....	67
Şekil 6.17. Fırın Hızı Üyelik Fonksiyonları.....	68
Şekil 6.18. Quench Fanı Frekansı Üyelik Fonksiyonları.....	68
Şekil 6.19. Quench Mesafesi Üyelik Fonksiyonları.....	69
Şekil 6.20. Bulanık Kuralların Programa Eklenmesinin Gösterimi	71
Şekil 6.21. Kamburluk Üyelik Fonksiyonları	71
Şekil 6.22. Dalgalılık Üyelik Fonksiyonları	72
Şekil 6.23. Temperli Camın Düzlemselliğinin Tahmini İçin Bulanık Çıkarım Sistemi	72

Şekil 7.1. Camın Kamburluğunun Fırın Hızı ve Fan Frekansına Göre Değişimi	74
Şekil 7.2. Camın Kamburluğunun Fırın Hızı ve Quench Mesafesine Göre Değişimi	75
Şekil 7.3. Camın Kamburluğunun Fan Frekansı ve Quench Mesafesine Göre Değişimi	75
Şekil 7.4. Camın Dalgallığının Fırın Hızı ve Fan Frekansına Göre Değişimi	76
Şekil 7.5. Camın Dalgallığının Fırın Hızı ve Quench Mesafesine Göre Değişimi	76
Şekil 7.6. Camın Dalgallığının Fan Frekansı ve Quench Mesafesine Göre Değişimi	77



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Camlar İçin Bazı Önemli Viskozite Değerleri	14
Çizelge 3.2. Cam Yapımında Kullanılan Oksitler	16
Çizelge 3.3. Ticari Cam Tipleri ve Bileşimleri	16
Çizelge 3.4. Çeşitli Camların Fiziksel Özellikleri	21
Çizelge 3.5. Çeşitli Camların Kimyasal Etkilere Karşı Direncinin Derecelendirilmesi	22
Çizelge 3.6. Bazı Camların Kimyasal Özelliklerine İlişkin Sayısal Değerler	22
Çizelge 3.7. Çeşitli Camların Mekanik Özellikleri	23
Çizelge 6.1. Temper Proses Parametreleri.....	54
Çizelge 6.2. Deney Süresince Sabit Tutulan Isıtma Parametreleri.....	57
Çizelge 6.3. Deney Süresince Sabit Tutulan Soğutma Parametreleri	57
Çizelge 6.4. Deneydeki Değişken Parametreler ve Değerleri.....	58
Çizelge 6.5. Deney Sonucu Elde Edilen Sayısal Veriler	61
Çizelge 6.6. Proses Parametrelerini Tanımlamak İçin Kullanılan Dilsel Değişkenler	67
Çizelge 6.7. Problemin Çözümüne Yönelik Hazırlanan Bulanık Kural Tablosu	70
Çizelge 6.8. Model Doğrulama Sonuçları	73
Çizelge 7.1. Bulanık Mantık Tabanlı Tahmin Modelinin Öngördüğü Bazı Sonuçlar	78

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

AC	: Alternatif akım
Al	: Alüminyum
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
As₂O₃	: Arsenik trioksit
BaO	: Baryum oksit
BeO	: Berilyum oksit
B₂O₃	: Bor oksit
C	: Çatlak yarı eliptik eksen
Cal	: Kalori
CaO	: Kalsiyum oksit
cm²	: Santimetrekare
cm³	: Santimetreküp
DC	: Doğru akım
E	: Young modülü
EDX	: Enerji yayımlı X ışını analizi
g	: Gram
GeO₂	: Germaniyum dioksit
H	: Hidrojen
HCl	: Hidrojen klorür
HK	: Knoop sertliği
Hz	: Hertz
H₂O	: Su
H₂SO₄	: Sülfirik asit
J	: Joule
K	: Kelvin
Kc	: Kırılma tokluğu
kg	: Kilogram
K₂O	: Potasyum oksit
Li₂O	: Lityum oksit
m³	: Metreküp
mg	: Miligram
%	: Yüzde

η	: Viskozite
$^{\circ}\text{C}$: Celcius derece
μg	: Mikrogram
MgO	: Magnezyum oksit
N	: Normal derişim
Na₂O	: Sodyum oksit
NaOH	: Sodyum hidroksit
n_D	: Kırılma indisi
nm	: Nanometre
P₂O₅	: Fosfor pentoksit
Pa	: Pascal
Sb₂O₃	: Antimon oksit
SiO₂	: Silisyum dioksit
Sn	: Kalay
sn	: Saniye
SO₂	: Kükürt dioksit
SO₃	: Kükürt trioksit
SrO	: Stronsiyum oksit
T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı
Ti	: Titanyum
TiO₂	: Titanyum dioksit
T_m	: Erime sıcaklığı
UV	: Ultraviyole
V₂O₅	: Vanadyum pentoksit
XRD	: X ışını kristalografisi
Zn	: Çinko
ZnO	: Çinko oksit
ZrO₂	: Zirkonyum dioksit
α	: Termal genleşme katsayısı
ζ	: Yüzey enerjisi
ν	: Poisson oranı
ρ	: Yoğunluk
ρ_c	: Çatlak ucu yarıçapı
Ω	: Ohm

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması sürecinde beni yönlendiren, kıymetli görüşlerinden faydalandığım, ihtiyacım olan her zaman yanımda olan, bu süreçte yapmış olduğu değerli katkılarından dolayı danışman hocam Doç. Dr. Sabri ÖZTÜRK'e, tezimin uygulama aşamasında yardımcı olan başta Özgür UÇAR olmak üzere Bolu Yorim Cam fabrikasındaki görevlilere ve yapmış olduğum çalışmanın analiz kısmında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Habibullah BİLGE'ye teşekkür ederim.

Hayatım boyunca hep yanımda olan, maddi manevi desteklerini esirgemeyen anne ve babama, çalışmamın her aşamasında bana sürekli destek olan ve bu süreçte fedakârca davranan, birlikte bir hayat geçirme planları yaptığım Fatma KARADUMAN'a çok teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Camın mukavemetini artırmak için uygulanan bir ısıl işlem olan cam temperleme prosesi, camın fırın içerisinde uniform bir sıcaklığa getirilip, ani olarak soğutulması esasına dayanır. Bu işlem sonucunda temperlenmiş camın mukavemeti, herhangi bir işleme maruz kalmayan tavlanmış camın mukavemetinin 4 - 5 katına ulaşmaktadır. Ayrıca temperleme işleminin cama kazandırdığı bir diğer özellik kırılma davranışında görülmektedir; temperli cam, tavlanmış camın aksine kırıldığında yaralanmalara yol açmayan küçük parçalara ayrılarak kırılır. Temperli cam, bu özelliğinden dolayı emniyet camı kategorisine de girmektedir. Bununla birlikte temperleme işlemi, camların termal şok dayanımı ve darbe dayanımı gibi özelliklerini geliştirmektedir. Temperleme işleminin sunduğu bu avantajlar, temperli camı başta inşaat, otomotiv ve beyaz eşya uygulamaları olmak üzere birçok alanda vazgeçilmez bir malzeme yapmıştır; temperli cam üretim sektörü birçok ana sektöre girdi sağlayan bir iş alanı haline gelmiştir.

Diğer iş kollarında da olduğu gibi ürün kalitesi, bir temperli cam üretim tesisi için çok önemli bir konudur. Müşteriler, temperli camın mukavemet, güvenli kırılma davranışı, ısıl şok dayanımı vb. işlevsel özelliklerinin kalitesinin yanında görsel, ölçüsel ve geometrik açıdan da kalite beklemektedir. Cam temperleme prosesinde en önemli nokta camda oluşturulan gerilim profili olmasına rağmen görsel açıdan kalite de giderek artan bir öneme sahiptir. Temperli cam için oluşturulan kalite standartlarında camın görsel, ölçüsel ve şekilsel yönden kalite özelliklerine yer verilmesi ve bu özelliklerin ürünün müşteriler tarafından kabul edilmesini etkileyen bir faktöre dönüşmesi bu konuyu daha da önemli bir hale getirmektedir.

Temperli düz cam üretim tesislerinde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, camda istenen düzlemsellik değerlerinin yakalanması ile alakalıdır. Temperleme işlemi sırasında camın zorlanmalara maruz kalması camın düzlemselliğini etkileyen distorsiyon olarak adlandırılan görsel şekil bozukluklarının kolayca ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Camda zorlanmalara bağlı olarak oluşan görsel şekil bozukluklarını

daha fazla detaylandırmak mümkünse de genel olarak merdane dalgaları, kamburluk ve uç kenar kıvrılması olarak üç ayrı grupta değerlendirilir.

Bahsi geçen üç grupta görsel şekil bozukluklarının ortaya çıkma sebepleri birbirinden farklıdır. Merdane dalgalarının oluşma nedeni olarak, camın fırın içerisinde fazla kalarak yumuşaması ve merdaneler arasında kendi ağırlığı ile sarkması olarak gösterilebilir. Bir diğer distorsiyon çeşidi olan kamburluk birden fazla nedenden dolayı oluşabilmektedir ki bunlar; ısıtma ve soğutma süreçlerinde sıcaklığın asimetrik olarak dağılması ya da quench kısmında basınç dengesinin sağlanamaması olarak gösterilebilir. Uç kenar kıvrılması ise merdanelerin fırın içerisinde düzgün hizalanamamasının bir sonucu olarak ortaya çıkar. Camın fırın içerisinde hareket ederken pozisyonunu kaybetmiş olan bir merdaneye çarpması sonucu camda uç kenar kıvrılması gerçekleşir.

Yukarıda ortaya çıkış nedenleri hakkında bilgi verilen üç ayrı görsel şekil bozukluğundan en kolay elimine edilebileni herhangi bir proses parametresine bağlı olmamasından ve merdanelerin düzgün hizalanması ile düzeltilebilmesinden dolayı uç kenar kıvrılmasıdır. Bu konuda daha önce yapılan çalışmalarda, merdane dalgaları ve kamburluğun tamamen ortadan kaldırılmasının mümkün olmadığını ve ancak düzgün parametre değerlerinin kullanılması ile kabul edilebilir limitler içerisinde kalmasının sağlanarak kontrol edilebileceği raporlanmıştır. Ayrıca, temperleme işleminde 3-4 mm gibi nispeten düşük kalınlığa sahip camlarda ortaya çıkan distorsiyonların kontrolünün daha zor olduğu belirtilmiştir.

Camın düzlemselliğinin kabul edilebilir limitler içerisinde olması camda oluşan iki ayrı şekil bozukluğu olan merdane dalgaları ve kamburluğun kontrol altına alınmasına bağlıdır. Temperli düz cam üretim tesislerinde bu şekil bozukluklarının düzlemselliğe olan etkilerini sayısallaştırarak değerlendirmek amacı ile düzlemsellikten sapmanın sayısal bir göstergesi olarak dalgalılık ve kamburluk ölçümlerinden yararlanılmaktadır. Burada dalgalılık ve kamburluk camın düzlemselliğini tanımlamak için kullanılan değişkenler olarak da nitelendirilebilir.

Bu çalışma, beyaz eşya sektörüne yönelik üretim yapan bir cam temperleme tesisinde nispeten ince camların temperlenmesi işleminde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri olan camda düzlemselliğin sağlanması ile ilgilidir. Tezin konusu

“Düz cam üretiminde temper parametrelerin düzlemselliğe etkisinin araştırılması” şeklindedir. Bu çalışma ile, bir full konveksiyon sürekli temper fırını kullanılarak, 4 mm kalınlığındaki soda kireç camı bileşimine sahip camların temperlendiği bir deney ortamında temper proses parametrelerinin numunelerin düzlemselliğine olan etkilerinin gözlemlenmesi ve analiz edilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada öncelikle deneyin gerçekleştirildiği fırın ve çalışma prensibi ile deneyde kullanılan camın özellikleri detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Daha sonra cam temperleme işleminin proses parametrelerinin neler olduğu ve deney için hangi parametrelerin kullanılacağından bahsedilmiştir. Ayrıca seçilen parametrelerin numunelerin temperlenmesinde hangi düzende kullanılacağı, deneyin çıktılarının ne olduğu gösterilmiştir. Camın düzlemselliğini etkileyen dalgalılık ve kamburluk değerlerinin hangi yöntemle ve nasıl ölçüleceği tarif edilmiştir. Bulanık mantık modellemesi yöntemi kullanılarak düzlemselliğin anlık olarak takip edilebildiği bir tahmin sistemi oluşturulmuş ve deney bu model yardımı ile analiz edilmiştir. Deney sonucu tespit edilen önemli noktalar, sonuçlar ve öneriler paylaşılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Camın dayanımını artırma yöntemlerinden biri olan cam temperleme işlemi bugünkü şekliyle 1930'lu yıllardan beri yaygın olarak kullanılmaktadır. Temperleme işleminin şeffaf bir malzeme olan cama kattığı üstün mukavemet, ısı dayanım, darbe dayanımı, güvenli kırılma davranışı vb. özelliklerden dolayı temperli cam birçok uygulamada vazgeçilmez bir malzeme haline gelmiştir.

Temperli cam sektörü inşaat, beyaz eşya ve otomotiv gibi sektörlere girdi sağlayan bir endüstri koluna dönüşmüştür. Bu gelişmeler, temperli cam için performans kriterlerinin ve standartların oluşmasına neden olmuştur. Günümüzde temperli camın kalitesini, standartlara göre yapılan ölçüm ve testler belirlemektedir. Günümüzde kullanılan kalite uygulamalarında ürün işlevselliğinin yanında diğer birçok kriterle değerlendirilebilmektedir.

Yukarıda bahsedilen değerlendirme kriterlerinden birisi de düz cam temperleme işleminde camın düzlemselliğinin sağlanabilmesi olmuştur. Cam temperleme işleminin yüksek sıcaklıkta yapılmasının sonucu olarak, temperli camda düzlemsellik hataları kalıtsal olarak meydana gelmektedir. Temperleme işleminde camın zorlanmalara maruz kalması sonucu ortaya çıkan bu hatalar camın şekilsel stabilitesini olduğu kadar görüntü kalitesini de olumsuz yönde etkilemektedir. Cam temperleme işleminde kaçınılmaz olarak ortaya çıkan bu hataları tam olarak yok etmek imkânsız olsa da büyük ölçüde kontrol etmek mümkündür.

Cam temperleme işleminde meydana gelen yaygın bir problem olmasına rağmen, bu konuyla alakalı literatür taraması yapıldığında, bu sorunu ele alan ve problemin çözülmesine yönelik yapılan çalışma sayısının sınırlı olduğu görülmüştür. Bu konu ile alakalı yapılan bilimsel çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Yapılan çalışmalar proses kontrolünde parametrelerin etkilerinin anlaşılmasından daha çok hataların izlenmesi, görüntülenmesi ve ölçülmesi üzerine olmuştur.

Zawada - Tomkiewicz vd. (2017a), düz camda yatay temperleme işleminde oluşan yüzey düzlemselliği sapmalarının, iki temperli cam levhanın laminasyon işleminde yüzeylerinin karşılıklı eşleşmesi üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir ki; levhaların arasında oluşan hacim kullanılan dolgu maddesi miktarını etkilemektedir.

Makalede, tam değişebilirlik ve kısmi değişebilirlik sağlayan eğleşme analizi örneği sunulmuştur. Tam değişebilirlik durumunda, düzlemsellik sapması türlerinin etkileri ve birleştirme işleminde izin verilebilen değerleri analiz edilmiştir. Kısmi değişebilirlik durumunda ise eğleşme analizi, yazarlar tarafından geliştirilen görsel ölçüm sistemine dayandırılmıştır.

Zawada - Tomkiewicz vd. (2017b), yatay bir proseste ısıl işlem altındaki float camın düzlemselliğinin bozulmasını değerlendirmek için bir görüntüleme sisteminin kullanımını önermiştir. Üretimden alınan bir levha cam için kamburluk, merdane dalgası ve uç kenar kıvrılması gibi parametreleri değerlendirme imkânı analiz edilmiştir. Termal olarak güçlendirilmiş soda kireç silikat emniyet camının düzlemsellik değerlendirmesi, içerisinde izin verilen maksimum bozulma değerlerini veren standartlar EN 12150-1 ve EN 572-2'e göre yapılmıştır. Yüzey sapsmaları için istatistiksel bir dağılım varsayımı olmadan, % 75'lik bir olasılıkla verilen üretim panelinin standartlarda tanımlanan maksimum sapma değerini aşmayacağı tespit edilmiştir ve çalışmalarda elde edilen sonuçlar, endüstriyel ortamlarda gelişmiş bir makine görüntüleme sistemi kullanma olasılığını doğrulamıştır.

Hendrickson (2003), temperli camda oluşan düzlemsellik hatalarını, insanın görsel algılamasını temel alan yansıtılmış görüntü yöntemi ile tespit eden bir optik ölçüm sistemi tanıtmıştır. Yüzeyden yansıtılan görüntü, görüntünün yüzeyden iletilmesine göre yüzey bozulmalarını daha belirgin hale getirmiştir. Bozuk cam yüzeylerin ölçümü, üzerine bir derinlik göstergesi monte edilmiş bir kirişin temperli cam tabakasının tüm uzunluğu boyunca hareket ettirilmesi ile profil taraması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Geniş bir temperli cam levha üzerinde belirlenen ve daha önce koordinat ölçüm cihazı kullanılarak ölçülen 8 ayrı bölge üzerinde tarama yapılmış ve sonuçlar diyoptriye çevrilmiştir. Birimler cinsinden iki yöntemi karşılaştırmak mümkün olmasa da, yazar aşırı deformasyon görülen bölgeleri karşılaştırmış ve iki yöntem arasında beklenmedik değişimler olmadığını fark etmiştir. Çalışmada insan algısını kullanılabilir hale getiren bu yöntemin statik ve dinamik testlerde daha gerçekçi sonuçlar vereceği ifade edilmiştir.

Redner (2003), temperli ve ısıl güçlendirilmiş cam üretiminde proses kontrolünün sağlanabilmesi amacıyla camda oluşan öngerilim seviyesini ve distorsiyonları çevrimiçi olarak ölçebilen yeni bir yöntem tanıtmıştır. Prosesin kontrol

edilmesi, normal şartlarda operatör tecrübesi, deneme yanılma yaklaşımı ve hat dışında yapılan kırılma testi gibi maliyetli ve zaman alıcı işlemlere bağlı iken geliştirilen yeni yöntemle fırının sonuna eklenen sensör, camdaki kenar geriliminin ve merdane dalgasının hat içerisinde gerçek zamanlı olarak görüntülenmesini mümkün hale getirmiştir. Sistem, optimum gerilim seviyesinin elde edilmesinde ve dolayısı ile optik bozulmaların ortadan kaldırılmasında fırın kontrolünü kolaylaştırmıştır.

Abbott ve Madocks (2001), ürün kalitesini artırmak için merdane dalgalarını optik yöntemle ölçen ve makine operatörlerine gerçek zamanlı geri beslemede bulunan bir ölçüm cihazı geliştirmişlerdir. Temper hattının çıkışına kurulan yeni ölçüm cihazı, hattan geçen her bir camın operatör müdahalesi gerektirmeden hat içinde ölçülmesine ve bütün ölçümlerin kaydedilmesine olanak vermiştir. Gerçek zamanlı geri bildirim sistemi, operatöre temper parametrelerinin ayarlanması ve fırının işletilmesi için gerekli olan bilgiyi sağladığından dolayı üretimde ürün değişim süreleri minimize edilmiştir. Bu sistemin kullanıcılarının kurulumdan sonra aylar içerisinde merdane dalgası değerlerinde % 50 – % 75 oranında azalma görüldüğü raporlanmıştır.

Bartoe (2001), çalışmasında temperleme işleminde kullanılan seramik merdanelerin camın düzlemselliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yüksek kaliteli distorsiyonsuz düz cam üretiminin, iyi bir proses kontrolünün yanında, seramik merdanelerin temperleme sıcaklığında düzgün ve geçerli olduğunu garanti eden gelişmiş fırın sistemleri, fabrika temizliği ve imalat uygulamaları gibi faktörlere de bağlı olduğu ifade edilmiştir. Camın düzlemselliğini etkileyen bu faktörler ayrı ayrı incelenmiş ve çözüm önerileri paylaşılmıştır.

Neugebauer ve Savrić (2014) temperli camda düzlemsellik ile ilgili konuların başında gelen distorsiyonların nedenleri üzerinde detaylı bir inceleme yayınlamıştır. Çalışmada ayrıca konuyla alakalı kalite standartları, izin verilen tolerans değerlerini ve bütün ölçüm yöntemleri ele alınmıştır.

Aronen ve Karvinen (2009) cam temperleme işleminde meydana gelen deformasyonları ve düzlemsellik hatalarını matematiksel bir model oluşturarak etüt etmişlerdir. Bu çalışmada, temperli camda düzlemselliği etkileyen proses değişkenlerinin cam sıcaklığı, fırın hızı ya da salınımı, merdaneler arası mesafe şeklinde olduğu sonucuna varılmıştır. Simetrik quench işleminin camda

deformasyonlara neden olmadığı fakat asimetric quench ile camda yay şekli oluştuğu belirlenmiştir. Oluşturulan matematiksel modelin camın deformasyon davranışının genel olarak anlaşılması için kullanılabileceği fakat merdanelerden kaynaklanan zorluklar bulunduğu belirtilmiştir ki camın kenarlarındaki yer değiştirmenin merdane hareketi ile nasıl değiştiği belirsizdir. Çalışmada, malzeme özelliklerinin ve diğer parametre değerlerinin ölçülmesinin zor olmasından dolayı sonuçlar üzerinde sadece modelleme parametrelerinin etkilerinin belirlenebildiği ifade edilmiştir.

Feingold (2003), dünya çapında camda merdane dalgası bozulmalarının daha sıkı bir şekilde denetlenmesinin sonucu olarak meydana çıkan ölçüm yöntemlerini tanıtmiştir. Cam reticileri için hlihazırda mevcut olan hat dışı merdane dalgası ölçüm masterlarından, hat içi ölçümü ekonomik hale getiren PC tabanlı otomatik cihazlara bütün yöntemlerin avantajları ve dezavantajları incelenmiştir.

Bu alışma, yukarıdaki çalışmalardan farklı olarak proses kontrolü yaklaşımının uygulanabilmesi için temper parametrelerinin etkilerinin anlaşılması üzerine kurulmuştur. Temper parametrelerine karşılık gelen dalgalılık ve kamburluk değerlerinin anlık olarak tahminini mümkün hale getiren bulanık mantık modeli oluşturulmuştur. Yukarıda bahsedilen hat içi gerçek zamanlı ölçüm sistemlerinin proses kontrolünün sağlanmasında şüphesiz çok önemli rolü bulunmaktadır fakat bu sistemlerin kurulumu işletmeler için maliyetlidir. Yapılan bu çalışma ile problemin ekonomik olarak üzülmesi için veri tabanı oluşturulabilmektedir. Bu yüzden bu yöntem proses kontrolünde yüksek maliyetli ölçüm sistemlerine alternatif olarak kullanılabilir.

3. CAMLAR

3.1 Camın Tarihçesi

Cam, insanlığın ilkel zamanlarından beri günlük yaşamda kullanılan bir malzemedir. Camın insanlar tarafından kullanımının M.Ö. 75000’li yıllara denk gelen taş devrinde başlamış olabileceği düşünülmektedir ki bu da insanların cam yapımını öğrenmelerinden çok uzunca bir zaman öncedir (Le Bourhis, 2014). Eski kabileler, volkanik patlamalar, meteor çarpması ve yıldırım düşmesi gibi doğa olayları sonucu oluşan doğal camları keşfetmiş ve şekillendirmiştir. Doğal camların oluşumu silika bakımından zengin kayaların yüksek sıcaklıklarda erimesine ve hızla soğumasına dayanır (Pfaender, 1996; Rasmussen, 2012). Taş devri boyunca, insanlar obsidyen ve teklit olarak bilinen, volkanik kökenli doğal camlardan yapılmış kesici aletleri kullanmıştır (Pfaender, 1996).

Cam yapımının nerede, ne zaman ve nasıl başladığı belli değildir. (Macfarlane ve Martin, 2004). İnsan tarafından yapılan en eski camlar, M.Ö. 3500 yıllarına ait olan antik Mısır mezarlarında bulunmuştur. Ancak camı M.Ö. 5000 yıllarında Fenikeli tüccarların Suriye bölgesinde bir rastlantı sonucu keşfettiğine inanılmaktadır (Le Bourhis, 2014) Cam yapımının keşfinden sonra yapılan ilk uygulamalar pahalı ve ender bulunan değerli taşları taklit etmek ve takı vb. küçük eşyalar yapmak olmuştur. Cam vazo ve çeşitli şekillerdeki kapların yapımı ise bundan oldukça uzun süre sonra M.Ö. 1500 yıllarında başlamıştır (Aslan, 2016; Küçükpazarlı, 2006). Mısır’da Quantir Pi-Ramses sahasında yapılan kazıda ortaya çıkarılan tarihin ilk cam fabrikasının M.Ö 1250 yılına dayandığı belirlenmiştir (Rehren ve Pusch, 2005). Cam yapımına ilişkin ilk reçete Asurlulara ait taş tablettir ve M.Ö. 650 yılına dayandığı ortaya çıkmıştır (Macfarlane ve Martin, 2004). Camın, pencerelerde kullanımına dair ilk örnekler M.S. 79 yılında volkanik bir patlama sonucu yıkıma uğrayan Pompeii antik kentinde yapılan çalışmalarda açığa çıkmıştır (Persson, 1969).

Cam teknolojisinde önemli gelişme M.Ö 1. yüzyılda Suriyeli cam ustalarının cam üfleme yöntemini icat etmeleri ile meydana gelmiştir (Nascimento, 2014). Daha sonra Romalıların camı kalıp içerisinde üflemeye başlaması cam nesnelere çeşitliğinde önemli bir artış meydana getirmiştir. Üfleme yöntemi ile üretilen camın

yeniden tavlandığında farklı şekillere dönüşebildiğinin anlaşılması yeni tekniklerin de ortaya çıkmasına sebep olmuştur. M.S. 200 itibarı ile uzunlamasına kesilen şişirilmiş silindirlerin uygun bir sıcaklıkta tavlanması ile düz cam yapmak mümkün hale gelmiştir. Bu yöntem 19. yüzyıla kadar kullanılmış ve geliştirilmiştir (Le Bourhis, 2014).

Roma imparatorluğunun dağılmasından sonra cam üretimi önce Bizans'a ve daha sonra Orta Doğuda Araplar tarafından geliştirilen merkezlere yayılmıştır. Batıda ise Venedik 13. Yüzyıl itibarı ile yeniden güçlenen cam endüstrisinin merkezi haline gelmiştir (Doremus, 1994). Daha sonraki dönemlerde camcılık Bohemya, Almanya, İspanya, Fransa ve İngiltere gibi Avrupa'nın birçok farklı ülkesine ulaşmış ve yeni merkezler gelişmiştir (Eriç, 1984). İngiltere'nin, Amerika'nın keşfinden sonra oradaki kolonilerine cam yapımını öğretmesi ile camcılık Amerika'ya da taşınmıştır. Amerika'da ilk cam üretimi 1608 yılında Jamestown bölgesinde gerçekleşmiştir (Kennedy, 1997; Scharfenberger, 2004).

Önemli gelişmeler bu dönemden sonra meydana gelmiştir. Cam yapımında 15. yüzyıla kadar yakıt olarak odun kullanılmaktaydı. 1610 yılında ithal Alman/Macar fırınlarında pirinç eritmek için odun yerine kömür kullanan Henry Wright'a patent verilmiştir. Benzer şekilde bir sonraki yıl aynı fırınlarda kömürle cam yapımı için patent başvurusu yapılmış ve 1614 yılında patent Sir Robert Mansell tarafından satın alınmıştır (Spear, 2014). İngiliz bir cam yapımcısı olan George Ravenscroft 1676 yılında cam formülüne kurşun oksit ilave ederek kurşun kristalini icat etmiştir (Pfaender, 1996; Kennedy, 1997). Bu camlar yüksek kırılma indisi, kesme ve parlatma kolaylığı gibi avantajlar sunmuştur ve optik camların temeli sayılırlar (Le Bourhis, 2014). 16. yüzyılın başlarında Francis I yönetimindeki Fransa'da cam ilk defa elmasla kesilmeye başlanmıştır. Daha sonraları 1688 yılında Fransa'nın Saint Gobain fabrikasında Lucas de Nehou tarafından ana esas cam plakanın her iki tarafının aynı anda ardışık olarak taşlanması ve parlatılması olan dönen tabla icat edilmiştir. Bu gelişmenin sonucu olarak ilk parlatılmış cam imalatı gerçekleşmiştir (Silverman, 1955). Cam alanında yapılan ilk Amerikan yeniliği 1825 yılında patenti alınan cam presleme makinesi olmuştur. Presleme işleminde erimiş cam bir kalıba dökülerek istenen şekil bir piston yardımıyla verilmiştir (Kennedy, 1997). 19. yüzyılın ortalarında fırın teknolojisinde meydana gelen üç yenilik levha cam endüstrisi için

dönüm noktası olmuştur. Bu yenilikler; enerji tüketiminde daha ekonomik olan Siemens Rejenaratif fırınının 1863 yılında, tavlama süresini 8 saatten 30 dakikaya düşüren Beivis I3hr soğutma fırınının 1870 yılında ve geleneksel pota fırınlarının yerini alan, cam eritmeyi sürekli bir proses haline getiren Siemens Tank fırınının 1873 yılında icadı şeklinde olmuştur (www.pilkington.com). 1903 yılında Micheal Owens saatte 2500 şişe üreten ilk otomatik şişe üfleme makinesini icat etmiştir (Pfaender, 1996; Amin, 2013). 20. yüzyılın başlarında cam üreticileri plaka camın yeniden ısıtılması ve hızlı bir şekilde soğutulması ile temperlenebileceğini ve bu şekilde mukavemetinin 4 katına kadar çıkabileceğini keşfetmiştir (Kennedy, 1997). 1914 yılında Belçikalı Emilie Forcault camın erimiş cam havuzundan merdaneler yardımıyla şerit halinde çekilmesi esasına dayanan ilk modern levha cam prosesini geliştirmiştir (Pilkington, 1969). 1920 ve 1930 arasında bu yöntemin cam sanayisini domine etmeye başlamasıyla düz cam fiyatlarındaki düşüş yüzde 60'dan fazla olmuştur. Bu yöntem o zamana kadar üretilen camların en kalitelisini sunmuş olsa da, levhaların düzlüğü tam anlamıyla sağlanamamıştır. Ayrıca bu yöntemle yüksek kaliteli cam üretimi taşlama gibi zaman alıcı ve pahalı ek işlemler gerektiriyordu (Kennedy, 1997). 1959 yılında İngiliz Pilkington Brother Ltd. taşlama gibi ek işlemleri ortadan kaldırdığı için düz cam üretiminde bir devrim olarak kabul edilen Float prosesini tanıtmıştır. Bu yöntemde akışkan haldeki cam, erimiş metal yüzeyi üzerinde yüzdürülerek cama mükemmel yüzey özellikleri kazandırılmaktadır (Le Bourhis, 2014). Günümüzde dünyada üretilen düz camlarının yüzde % 90'ından fazlası float yöntemiyle üretilmektedir (Carter ve Norton, 2007).

3.2 Cam Nedir

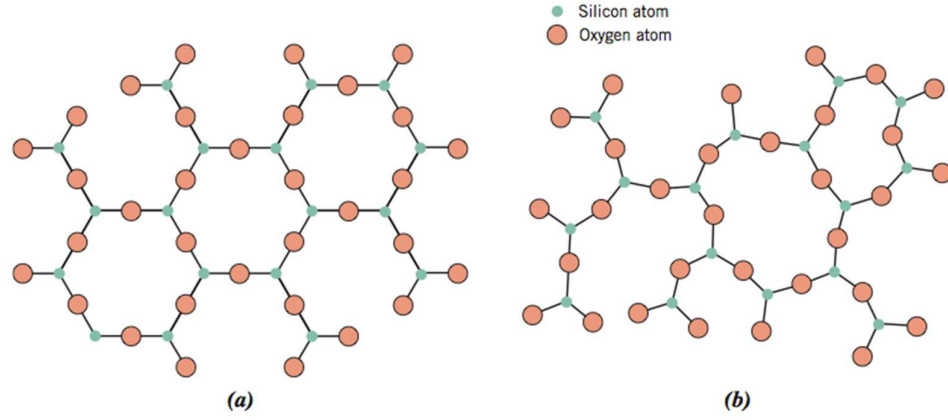
Cam terimi, kimyasal bileşimi belli olan bir malzemeyi tanımlamaktan daha ziyade maddenin fiziksel bir halini işaret etmektedir (Britton, 1981). Maddenin bu hali bilimsel araştırmalarda camsı hal olarak adlandırılmıştır. Camsı hal, ergitilmiş durumda olan malzemeye kristalleşmesi için yeterli süre verilmediğinde oluşmaktadır. Mühendislik malzemelerinden polimerler, seramikler ve metallerin camsı hale geçebildiği kabul edilir (Groover, 2010). Bu yönüyle cam, kimyasal bileşimden bağımsız olarak camsı halde olan sınırsız sayıda malzeme için ortak olan bir terimdir (Pfaender, 1996, s. 2).

Camlar mekanik sertlik, elastikiyet ve kırılabilirlik gibi katı madde özelliklerine sahip olsa da yapısal açıdan sıvılara benzer (Zanotto ve Mauro, 2017). Bu durum esasen, cam oluşumu esnasında eriyik halde bulunan camın hızlı bir şekilde soğutulması sonucu, ulaştığı yüksek viskozite değeri nedeniyle katıların sahip olduğu düzenli kristal yapıya geçmeden sıvı halin düzensiz yapısında katılaşmasından kaynaklanmaktadır (Tosun). Çünkü yüksek viskozitelerinden dolayı camların atom hareketliliği diğer birçok malzemeden daha düşüktür ve cam atomları ağır molekül hareketlerinden dolayı yayılarak üç boyutlu kristal yapı oluşturmak için yeterli süreyi bulamaz (Pfaender, 1996; Tosun).

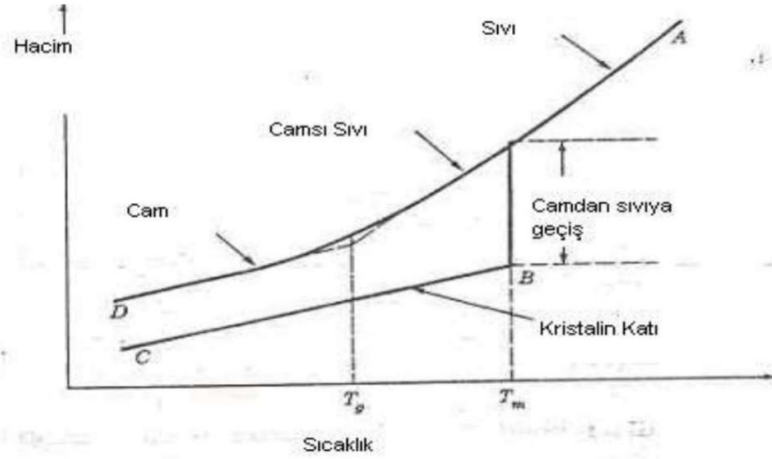
Cam ve sıvı arasındaki benzerlik, cam atomlarının kristal formdaki nizami atom düzeninden farklı olarak rastgele dağılımına dayanır (Paul, 1982). Mükemmel kristal, içerisinde atomların üç boyutta periyodik olarak sonsuz bir tekrarla yinelendiği bir yapıdır (Elliott, 1984). Cam ise amorf (kristal olmayan) yapıya sahiptir. Amorf terimi, kurallı ve periyodik bir atom düzenine sahip olmayan malzemeleri ifade eder (Askeland vd., 2010). Camın yapısında ne kristal kafes ne de kafes noktası mevcuttur (Yamane ve Asahara, 2000). Amorf malzeme yapısının, kristal yapıdan ayrıldığı temel nokta uzun mesafeli atom düzenidir (Zallen, 1983). Kristal yapıya malzemelerde kısa ve uzun mesafeli atom düzeni görülürken, XRD ve EDX çalışmaları camların uzun mesafeli periyodik düzenden yoksun olduğunu göstermiştir (McMillan, 1979; Paul, 1982).

Oksit camların yapısını açıklayan en eski ve en çok kabul gören teorilerden biri olan “Gelişigüzel Şebeke Teorisi” kısa mesafeli düzen kavramına dayanır. 1932 yılında Zachariasen XRD kullanarak amorf ve kristal malzeme yapısını karşılaştırdığı çalışmada camların mekanik özelliklerinin aynı bileşimdeki kristal malzeme ile benzer olduğunu gözlemlemiştir. Daha sonra, bu amorf malzemelerin yapısının tamamen gelişigüzel olmadığını ve kristal yapıdaki muadilleriyle benzer yapısal elemanlara sahip olduğunu, ancak amorf malzemelerin geniş bir periyodik ve simetrik ağdan yoksun olduğunu ifade etmiştir. Zachariasen, camların iyi tanımlanmış küçük yapısal birimlerin oluşturduğu üç boyutlu yayılmış bir ağdan meydana geldiğini ileri sürmüştür. Bu yapısal birimler kristal malzemelerde bulunan yapısal birimlerle aynı veya benzerdir ve rastgele bir şekilde birbirine bağlanmıştır (Zachariasen, 1932). Şekil

3.1’de aynı bileşime sahip SiO_2 ’nin kristal yapısı ve gelişigüzel şebeke yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.1. SiO_2 Yapısının İki Boyutlu Şematik Gösterimi a) Kristal yapı b) Gelişigüzel Şebeke Yapısı (Callister, 2001, s. 65)



Şekil 3.2. Kristal, Sıvı ve Camsı Hal İçin Hacim – Sıcaklık Diyagramı (Öztürk, 2006)

Camın yapısını tarif etmek için bazı çalışmalarda kristal olmayan yapı teriminin kullanıldığı ve bazılarında ise amorf yapı teriminin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Gupta 1995 yılındaki çalışmasında kristal olmayan katı, amorf katı ve cam terimleri arasındaki ayrımı yapmıştır. Buna göre kristal olmayan katı herhangi periyodik bir tekrar göstermeyen kısa mesafeli düzensiz üç boyutlu ağa sahiptir. Termodinamik açıdan incelendiğinde, kristal olmayan bir katı cam geçişi gösterebilir ya da göstermeyebilir. Cam geçişi gösteren kristal olmayan katılar camlardır, diğer yandan cam geçişi göstermeyen kristal olmayan katılar ise amorf katılardır. Bu nedenle

tüm amorf katı maddeler kristal olmayan katılardır fakat cam değildirler (Gupta, 1996).

Kristal, sıvı ve camsı hal arasındaki ilişki Şekil 3.2’de gösterildiği gibi eriyiklerin soğuması sırasındaki hacim-sıcaklık diyagramının incelenmesi ile anlaşılabilir (Benzer davranış entalpi tarafından da sergilendiği için diyagramın ordinatının entalpi olarak seçilmesi isteğe bağlı bir durumdur.) (Shelby, 2005; Paul, 1982). Bir malzeme sıvı halden soğutulduğunda iki farklı durum gözlemlenebilir. Malzeme davranışı yavaş soğutma ve hızlı soğutma durumlarına göre değişmektedir. İlk durumda malzeme düzenli bir atom yapısı oluşturacak kadar yavaş soğutulduğunda erime noktası T_m ’de kristallenme gerçekleşir. Kristallenmeye bağlı olarak malzemede sıkı paketlenme durumu olduğundan erime sıcaklığı T_m ’de malzemenin hacminde ani bir düşüş görülür. İkinci durumda ise sıvı hızlı bir şekilde soğutulur ve erime sıcaklığının altında, azalan sıcaklıkla daha viskoz hale gelen aşırı soğutulmuş bir sıvı haline ulaşır (Elliott, 1984; Mısırlı Öder, 2007). Sıcaklık düştükçe sıvının yapısı hacimde ani bir düşüş olmadan düzenlenmeye devam eder. Ancak, sıvının viskozitesi soğutma ile daha da artar. Viskozitedeki bu artış aşamalı olarak öyle yüksek hale gelir ki sıvının atomları soğutma süresinin kısa olmasından dolayı düzenli bir yapı oluşturamazlar ve buldukları pozisyonda hareketsiz kalırlar (Karmakar vd., 2016; Mısırlı Öder, 2007). Viskozite yaklaşık 10^{13} poise değerine ulaştığında camın bileşiminden tamamen bağımsız olarak gerçekleşen cam geçişi davranışı gözlemlenir. Bu viskozite değerine karşılık gelen sıcaklık cam geçiş sıcaklığı T_g olarak bilinir (Scholze, 1991). Cam geçiş sıcaklığı, grafik üzerinde aşırı soğutulmuş sıvı ve cam eğrilerinin uzantılarının kesiştiği noktaya denk gelen sıcaklıktır (Elliott, 1984). Fakat kimyasal bileşim aynı olsa bile cam geçiş sıcaklığı her zaman sabit kalmaz. Cam geçiş sıcaklığı sıvının soğutma oranına göre değişiklik gösterir. Çünkü cam geçişi viskozitenin artmasından kaynaklanmaktadır ve viskozite artışı soğutma hızına bağlı olarak değişiklik gösterir (Yamane ve Asahara, 2000). Bu yüzden cam geçiş sıcaklığını, sabit bir nokta yerine bir dönüşüm aralığı olarak tanımlamak daha doğrudur (Paul, 1982).

Cam oluşumu için en önemli faktör, sıcaklıkla birlikte ciddi derecede değişen viskozitedir. Şekillendirme, tavlama ve temperleme için sıcaklık rejimleri, erime koşulları ve kristallenmenin önlenmesi için maksimum sıcaklık viskozite tarafından

belirlenir. Ayrıca camın kalitesi karışımın homojenliğine bağlıdır ve bu da viskozite rejimi ile ilgilidir (Le Bourhis, 2014). Camlar için bazı önemli viskozite değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Sıcaklığa göre viskozite davranışı camın bileşimine göre farklılık göstermektedir. Bazı ticari camların sıcaklığa karşı viskozite değişimleri Şekil 3.3’de verilmiştir.

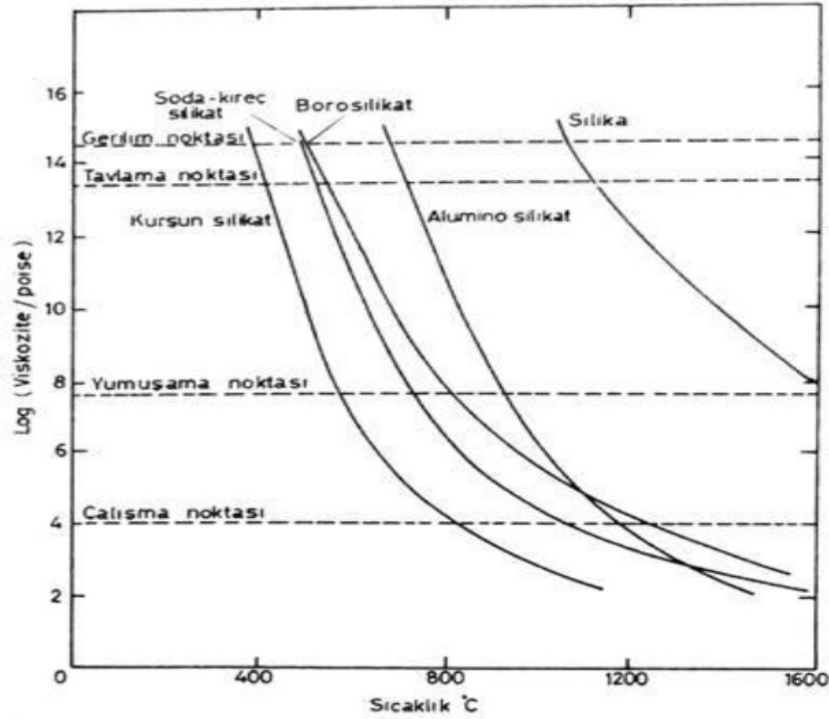
Çizelge 3.1. Camlar İçin Bazı Önemli Viskozite Değerleri (Üzümlü, 2002)

Erime Bölgesi ($\eta=10^{1.5} - 10^{2.5}$ poise)	Cam harmanının tamamen eridiği ve camın hazırlandığı sıcaklıktaki viskozite
Damla Noktası ($\eta=10^3$ poise)	Camı şekillendirmek için alınan damlanın viskozitesi
Çalışma Aralığı ($\eta=10^4 - 10^8$ poise)	Camın şekillendirilebildiği viskozite aralığı
Akma Noktası ($\eta=10^5$ poise)	Camın bir yüzeyde akmaya başladığı viskozite değeri
Sinterleme Noktası ($\eta=10^6$ poise)	Cam parçalarının birbirine yapıştığı viskozite değeri
Yumuşama Noktası ($\eta=10^{7.65}$ poise)	Çapı 0.5/1 mm olan 220 mm uzunluğundaki cam elyafın kendi ağırlığıyla 1 dakikada 1 mm uzadığı viskozite değeri
Tavlama Noktası ($\eta=10^{13.4}$ poise)	Camdaki gerilmelerin 15 dakikada giderildiği viskozite değeri
Gerilme Noktası ($\eta=10^{14.6}$ poise)	Camdaki gerilmelerin 4 saatte giderildiği viskozite değeri

Günümüzde ergitme – soğutma metodu cam üretimi için tek yöntem değildir. Kimyasal buhar biriktirme, sol – jel, reaktif püskürtme gibi yöntemlerle ergiterek oluşturulmuş camlardan ayırt edilemeyen aynı kimyasal bileşime sahip camlar üretmek mümkündür. Bu yöntemlerle ticari cam imalatı yapmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır fakat alınan sonuçlar özel uygulamalarla sınırlı kalmıştır. Günlük kullanılan ticari camlar ergitme – soğutma yöntemi ile üretilmektedir (Yamane ve Asahara, 2000; Arslan Güvel, 2011).

Camla ilgili gerekli açıklamalardan sonra cam için bilimsel bir tanım yapmak gerekirse, 1997 yılında Shelby tarafından önerilen, literatürdeki birçok tanımdan daha

kapsayıcı olan cam tanımı incelenebilir. Shelby'e göre cam, uzun menzilli periyodik atom yapısından yoksun ve cam geçiş davranışı aralığı sergileyen amorf bir katıdır ve üretim metodu ne olursa olsun cam geçişi gösteren inorganik, organik ya da metal olan herhangi bir malzeme camdır (Shelby, 2005). Bu tanım cam terimi için geniş bir çerçeve oluşturması açısından önemlidir. Prensipde herhangi bir madde sıvı halden kristalleşmeyi önleyecek kadar hızlı soğutulursa cama dönüştürülebilir. Bu yüzden birçok farklı kimyasal sistemle cam yapmak mümkündür. Ancak en önemli ticari camlar, cam yapma kabiliyeti yüksek olan oksit esaslı camlardır (Doremus, 1994; Kocabağ, 2002). Bu yüzden bu çalışmada oksit camlar dikkate alınacaktır.



Şekil 3.3. Bazı Ticari Camlar İçin Viskozitenin Sıcaklığa Göre Değişimi (Kocabağ, 2002, s. 20)

3.3 Oksit Camların Kimyasal Bileşimi

Camlar belli bir kimyasal formüle sahip değildir bu yüzden bileşimi ve özellikleri kullanılan hammaddelerin oranına göre değişiklik gösterir. Camların bileşenleri camın kullanılacağı yere ve istenen özelliklere göre belirlenir. Camın

bileşimine giren oksitler sahip oldukları karakteristik özellikler sayesinde gruplara ayrılabilirler. Birinci grupta yer alan oksitler cam yapıcılarıdır ve camın ağ yapısının oluşması için kullanımı zorunludur. Diğer gruplarda ise düzenleyici oksitler ve aradaki oksitlerdir. Düzenleyici oksitler, camın erime sıcaklığını düşürerek cam oluşumunu kolaylaştırır. Ayrıca düzenleyiciler camın viskozitesini düşürmek, işlenebilmeyi ve şekillendirmeyi sağlamak için de karışıma dâhil edilir. Aradaki oksitlerinin görevi ise camın kimyasal etkilere karşı direncini artırmak ve camlık durumunu sabitleştirmektir. Camın oluşması için bu üç ayrı kategorideki maddelerin kullanılması yeterlidir bununla beraber camı artırmak, renklendirmek, yarı saydam hale getirmek için ilave yardımcı maddeler de kullanılabilir (Kocabağ, 2002; Tosun). Cam yapımında sıklıkla kullanılan oksitler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Cam Yapımında Kullanılan Oksitler (Kocabağ, 2002, s. 24)

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

3.4 Kimyasal Bileşime Göre Cam Türleri

Çizelge 3.3. Ticari Cam Tipleri ve Bileşimleri (Doremus, 1994; Askeland vd., 2010)

Cam Türü	Yaklaşık Bileşim Oranları (% Ağırlık)							
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	PbO	Na ₂ O	K ₂ O
Soda Kireç Camı	72,6	0,8	1,7	4,6	3,6	-	15,2	-
Pyrex Borosilikat Camı	81,0	13,0	2	-	-	-	4,0	-
Soda Borosilikat Camı	68,0	24,0	1	-	-	-	7	-
Kurşun Camı	77,0	-	-	1	-	8,0	9,0	5,0
Aluminosilikat Camı	64,0	4,5	10,4	8,9	10,2	-	1,3	0,7
Silika Camı (% 96)	96,0	4,0	-	-	-	-	-	-
Silika Camı (% 99)	99,0	-	-	-	-	-	-	-

Oksit camların çok değişik türleri mevcuttur ve bu camların bileşiminde az ya da çok belirli oranda SiO₂ bulunduğu için silikat camları olarak da adlandırılır. Birçok farklı silikat camı türü olmasına rağmen, çoğunun kullanım alanı özel uygulamalarla sınırlıdır. Sıklıkla kullanılan ve ticari değeri olan cam çeşitleri ve bileşimleri Çizelge 3.3’de verilmiştir. Bu cam çeşitleri aşağıda açıklanacaktır.

3.4.1 Soda Kireç Camı

Soda kireç camları ticari camların içinde en yaygın kullanılan ve en ekonomik olanıdır (Varshneya, 1993). Cam ürünlerin % 90’ını soda kireç camları oluşturmaktadır (Tosun). Şişeler, kavanozlar, pencere camları, ampul camları ve bardaklar soda kireç camlarından yapılmaktadır (Pfaender, 1996; Varshneya, 1993). Soda kireç camlarının yaygın olarak kullanılmalarının altında yatan sebep sahip oldukları fiziksel ve kimyasal özelliklerdir. Karışımındaki soda külü (Na₂CO₃), kireçtaşı (CaCO₃) ve kum gibi pahalı olmayan bileşenler karışımın 1300 – 1500 °C’de sürekli olarak erimesine ve ürünlerin yüksek hızlarda ekonomik olarak üretilmesine imkân verir. Soda kireç camları kimyasal dayanıklılık, yüksek elektrik direnci, iyi ışık iletimi özelliklerine sahiptir. Ancak sahip oldukları yüksek termal genişleme katsayısından dolayı ısıl şoklara karşı dayanıksızdır. Bu durum birçok uygulamada kullanılmalarını engellemektedir (Varshneya, 1993).

3.4.2 Borosilikat Camı

Silika ve bor oksite az miktarda alkali ilave edilmesiyle oluşturulan bu camlar düşük ısıl genişleme katsayısına ve kimyasal etkilere karşı yüksek dirence sahiptir (Varshneya, 1993). Bu özelliklerinden dolayı laboratuvar tüpleri, ilaç şişeleri, yüksek güçlü lamba ampulleri, yemek pişirme kapları ve otomobil farları gibi ürünler borosilikat camlarından yapılmaktadır (Pfaender, 1996; Varshneya, 1993). Borosilikat camları ticari olarak soda kireç camlarına benzer şekilde elde edilebilir fakat daha yüksek sıcaklık (1300 – 1500 °C) gerektirir. Ayrıca B₂O₃’ün yüksek maliyeti borosilikat camlarını soda kireç camlarından daha pahalı yapmaktadır (Varshneya, 1993).

3.4.3 Kurşun Silikat Camı

Temel bileşenleri PbO ve SiO₂ olan kurşun camları az miktarda soda ve potas içerir (Varshneya, 1993). Soda kireç camlarındaki CaO'nun yerini kurşun camlarında PbO alır. Ancak aradaki fark soda kireç camlarında CaO oranı en fazla % 15 iken, kurşun camlarında PbO oranının % 80'in üzerine çıkabilmesidir (Çekli, 2005). Karışıma PbO ilavesi camın erime sıcaklığını düşürerek cama yüksek yansıtıcılık ve dağıtıcılık özelliği kazandırmaktadır (Tosun). Optik özellikleri çok iyi olan kristal camları PbO içermektedir (Kocabağ, 2002). Kurşun camlarının diğer özellikleri yüksek elektrik direncine sahip olması, yüksek derecede parlaklığa sahip olması, kesilerek şekil vermeye uygun olmasıdır (Pfaender, 1996; Varshneya, 1993). Ayrıca kurşun camları radyasyon kırıcı özelliklere de sahiptir (Tosun). Kurşun camlarının çalışma aralığının geniş olmasından dolayı genellikle sanatsal amaçlarla dekoratif ürün yapımında kullanılırlar (Pfaender, 1996; Varshneya, 1993). Ayrıca elektriksel özelliklerinden dolayı bazı elektronik parçaların cam – metal bağlantılarında bağlantı camı olarak kullanılırlar (Kocabağ, 2002). Diğer uygulama alanı ise yüksek enerji ışınımından korunmak amacıyla floresan kılıflarında ve televizyon tüplerinde kullanılmasıdır (Tosun, 2018).

3.4.4 Aluminosilikat Camı

Bu tipteki ticari camların bileşiminde orta miktarda CaO, MgO gibi toprak alkali oksitleri ve değişen oranlarda alkali oksitleri vardır (Varshneya, 1993). Aluminosilikat camları yaklaşık % 20 oranında Al₂O₃ içerirler (Tosun). Ergitilmeleri % 99 silis camı ve % 96 silis camı hariç diğer bütün camlardan daha zordur (Kocabağ, 2002). Aluminosilikat camları, yüksek elastikiyet modülü değerlerine, kimyasal korozyona karşı yüksek dirence ve iyi ısı şok direncine sahiptir (Varshneya, 1993; Kocabağ, 2002). E-cam ve S-cam olarak adlandırılan bileşimleri fiber takviyeli plastiklerde yük taşıyıcı fiber olarak kullanılırlar (Varshneya, 1993). Ayrıca ocak üstü pişirme kapları, yanma tüpleri, yüksek sıcaklık ve yüksek basınç gösterge camları, yüksek basınçlı cıva boşaltım lambaları bu tip camlardan yapılırlar (Kocabağ, 2002).

3.4.5 % 96 Silika Camı

Bu tipteki camlar büyük oranda saf silika camına benzer özelliklere sahip olup saf silika camlarının üretimindeki birçok zorluğu bertaraf eder niteliktedir (Kocabağ, 2002). Yüksek silikat oranı camda sıcaklığa ve korozyona dayanımı artırır. Bu tür camların ısıl genleşme katsayısı normal camın 1/10'u kadardır (Tosun). % 96 silika camları UV ışınlarını geçirme özelliğine sahiptir bu özelliğinden dolayı mikrop öldürücü camlar, fotokimyasal ve güneş lambası camları bu cam türünden yapılır (Kocabağ, 2002).

3.4.6 % 99 Silika Camı

Bu cam türü saf SiO₂'nin camsı duruma getirilmesi ile oluşturulur. Silika doğada kuvars minerali olarak bulunduğu için kuvars camı olarak da adlandırılır (Kocabağ, 2002). Bu camların yüksek voltaj, frekans, ısı dayanımı ve kimyasal maddelere karşı yüksek direnci vardır (Tosun). Ayrıca mükemmel optik özelliklere ve elastik özelliklere sahiptir (Kocabağ, 2002). Ancak sunduğu birçok avantajın yanında saf silika 2000 °C'nin üzerindeki bir sıcaklıkta erimesinden dolayı üretimi çok maliyetli ve zahmetlidir (Varshneya, 1993).

3.5 Camın Özellikleri

Camın özellikleri, kimyasal yapılarına ve nasıl üretildiklerine bağlı olarak camlarda farklılık gösterir. Belirli bir uygulama için doğru cam tipinin seçilmesi her bir cam tipinin sahip olduğu farklı özelliklerin anlaşılmasını gerektirir. Camlar sahip oldukları fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler bakımından aşağıdaki başlıklar altında incelenecektir.

3.5.1 Fiziksel Özellikler

Camların en belirgin fiziksel özelliklerinden biri yoğunluktur. Camların yoğunlukları bileşiminde kullanılan maddelerin çeşidine ve oranına göre değişiklik

gösterir. Günlük yaşantıda kullanılan camların yoğunlukları $2,2 \text{ g/cm}^3$ ile $3,0 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Ancak özel uygulamalar için tasarlanmış camların yoğunlukları $8,0 \text{ g/cm}^3$ 'e kadar çıkabilmektedir (Tosun). $2,13 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip düşük kayıplı borosilikat camı ve $2,18 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip % 96 silika camı istisna olarak gösterilebilir. Camların yoğunluğunun artmasında en yüksek etkiye sahip olan cam bileşimindeki oksitler sırasıyla ZnO, BaO ve PbO'dur (Kocabağ, 2002).

Sertlik, malzemelerin aşınmaya ve delinmeye karşı direncini gösteren bir malzeme özelliğidir. Sertliğin ölçülmesi için çeşitli test yöntemleri mevcuttur fakat en basit yöntem Mohs sistemine göre mukayese yöntemidir. Bu sisteme göre daha sert malzemeler camı çizerken, sertliği daha düşük malzemeler cam tarafından çizilmektedir (Kocabağ, 2002). Mohs skalasında camın sertliği 6 ile 7 arasında değişmektedir ki bu da camın aşınmaya dirençli bir malzeme olduğunu gösterir. Günlük hayatta kullanımı olan pencere camlarının Mohs sertlik değeri ise 5,5 olup normalden biraz daha düşüktür (Tosun). Camlarda aşınma dayanımı camın bileşimindeki kullanılan oksitlere bağlıdır. SiO_2 ve B_2O_3 sertliği artırıcı etki gösterirken, Na_2O , CaO ve bilhassa PbO sertliği düşürücü etki göstermektedir (Kocabağ, 2002).

Cam için diğer önemli bir özellik de termal genişlemedir. Katı malzemelerin termal genişmesi sıcaklığın artması ile malzemenin atomlarının denge konumundan çıkarak merkezden uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır (Kocabağ, 2002). Camların termal genişmeleri metal ve plastik malzemelerinkinden daha düşüktür ve hatta bileşimlerine göre sifıra yakın termal genişme katsayısına sahip olabilirler. Titanyum silikat ve ergimiş silika camı bu camlara örnek olarak gösterilebilir (Kalpakjian ve Schmid, 2010). Camlar için termal genişme katsayısı yaklaşık sıfır ile $200 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ arasında değişir. Camın bileşimine SiO_2 , B_2O_3 , ZnO ilavesi camın termal genişmesini düşürürken, Na_2O gibi alkali oksitlerin ilavesi termal genişme katsayısını artırır. CaO ve MgO gibi diğer oksitler de camın ısı genleşmesinin artmasına neden olur fakat en çok etkiyi alkali oksitler gösterir (Kocabağ, 2002; Şendoğdular, 2019).

Camlarda kırılma indisi optik uygulamalar için belirleyici bir özelliktir ve camın yoğunluğu ile doğrudan ilgilidir (Tosun). Oksit camları için kırılma indisi 1,45 ile 2,0 arasında değişmektedir (Kocabağ, 2002). Diğer önemli bir özellik ise camların

elektrik direncidir. Camlar yüksek elektrik direnci ile tanımlanırlar. Camların elektrik direnci önemli ölçüde bileşimine bağlıdır. Bileşim kontrol altında tutulduğunda direnci $103 \Omega \cdot m$ ile $1015 \Omega \cdot m$ arasında değişen camlar elde etmek mümkündür (Kocabağ, 2002). Çizelge 3.4'de camlara ait bazı fiziksel özellikler camların bileşimine göre listelenmiştir.

Çizelge 3.4. Çeşitli Camların Fiziksel Özellikleri (Cardarelli, 2017; Harper, 2001)

Malzeme	Kütle Yoğunluğu (ρ , $kg \cdot m^{-3}$)	Knoop Sertliği (H.K.)	Ter. Gen. Kats. (0-300 °C) ($10^{-6} K^{-1}$)	Kırılma İndisi (589,3 nm'de) (n_D)	Elektrik Özdirenç $\log(\Omega \cdot m)$
Soda Kireç Camı (Corning 0080)	2470	465	9,35	1,512	12,8
Borosilikat Camı (Pyrex 7070)	2130	-	3,2	1,469	9,1
Borosilikat Camı (Pyrex 7740)	2230	418	3,25	1,474	6,6
Kurşun Silikat Camı (Schott 8095)	3010	-	9,1	1,556	11,6
Kurşun Silikat Camı (Corning 7570)	5420	-	8,4	1,86	17
Aluminosilikat Camı (Corning 1720)	2520	-	4,2	1,53	9,5
Silis Camı (% 96) (Vycor)	2180	487	0,552 – 0,75	1,458	8,1
Silis Camı (% 99) (Corning 7940)	2202	-	0,56	1.459	10,5

3.5.2 Kimyasal Özellikler

Cam besin maddelerinin ve kimyasal çözeltilerin saklanması için yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Laboratuvarlarda korozif tepkimeler genellikle cam kaplarda gerçekleştirilir. Sanayinin değişik kollarında kimyasal stabilite ve dayanım gerektiren uygulamalarda malzeme olarak cam kullanılabilir. Camın bu tarz değişik uygulamalarda kullanılması çevresi ile etkileşiminin bilinmesini zorunlu hale getirir

(Kocabağ, 2002). Camlar karakteristik olarak suya, tuz çözeltilerine, asitlere ve organik maddelere dirençlidir. Bu yönüyle camlar birçok metal ve plastikten daha üstündür. Camlar yalnızca hidröflorik asit, güçlü alkali çözeltiler ve derişik fosforik asitten önemli oranda etkilenir ki bu da yüksek sıcaklıklarda meydana gelir (Martienssen ve Warlimont, 2005). Camın su tarafından etkilenmesi ancak uzun süreli maruziyet ile mümkündür. Bileşiminde CaCO_3 olmayan camlar su karşısında kararsızdır. Bu tür camlar su camı olarak bilinir (Tosun). Bileşiminde TiO_2 ve ZrO_2 içeren camlar kimyasal dayanım yönünden üstün özelliklere sahiptir (Kocabağ, 2002). Camların sahip oldukları bazı kimyasal özellikler Çizelge 3.5 ve 3.6’da listelenmiştir.

Çizelge 3.5. Çeşitli Camların Kimyasal Etkilere Karşı Direncinin Derecelendirilmesi (McCauley, 2013, s. 290)

Malzeme	Hava	Su	Asit
Soda Kireç Camı (Corning 0080)	3	2	2
Borosilikat Camı (Pyrex 7070)	2	2	2
Borosilikat Camı (Pyrex 7740)	1	1	1
Kurşun Silikat Camı (Corning 7570)	1	1	4
Aluminosilikat Camı (Corning 1720)	1	1	3
% 96 Silis Camı (Vycor)	1	1	1
% 99 Silis Camı (Corning 7940)	1	1	1

Kimyasal dayanım dereceleri: 1 = mükemmel, 2 = iyi, 3 = orta, 4 = zayıf

Çizelge 3.6. Bazı Camların Kimyasal Özelliklerine İlişkin Sayısal Değerler (Clark ve Zoitos, 1992, s. 34,35)

Malzeme	Ağırlık Kaybı (mg/cm^2)		Na ₂ O Cinsinden Ağırlık Kaybı ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	
	95 °C, 24 Saat		90 °C, 4 Saat	
	% 5 NaOH	% 5 HCl	H ₂ O	0,02N H ₂ SO ₄
Soda Kireç Camı – I	2,0	0,02	4,0	5,0
Soda Kireç Camı – II	2,0	0,01	1,0	1,0
Kurşun Camı – I	4,0	0,02	3,0	10,0
Kurşun Camı – II	4,0	0,01	1,0	5,0
Aluminosilikat Camı – I	2,0	0,3	-	-
Aluminosilikat Camı – II	1,0	0,4	-	-
Borosilikat Camı - I	5,0	0,005	0,1	0,3
Borosilikat Camı - II	4,0	0,005	0,1	0,3
Yüksek Silis Camı - I, II	2,0	0,001	<0,01	<0,01

3.5.3 Mekanik Özellikler

Çizelge 3.7. Çeşitli Camların Mekanik Özellikleri (Le Bourhis, 2014; Cardarelli, 2017)

Malzeme	Young Modülü (E,GPa)	Poisson Oranı (ν)	Kırılma Tokluğu (Kc, MPa.m ^{-1/2})	Yüzey Enerjisi (ζ, J.m ⁻²)
Soda Kireç Camı	70 – 74	0,22 - 0,23	0,72 - 0,82	0,4 – 1
Borosilikat Camı	64 -89	0,20 - 0,22	0,75 - 0,82	0,63
Kurşun Silikat Camı	58 – 65	0,22 - 0,28	0,62 - 0,73	0,44
Aluminosilikat Camı	89 – 91	0,22 - 0,25	0,85 - 0,96	0,63
Silika Camı	73	0,16 - 0,19	0,74 - 0,81	0,65

Camlar mükemmel elastik ve gevrek davranışa sahiptir. Camlar şekil değişimine ve darbeye karşı dayanıklı değildir fakat buna karşılık oldukça yüksek basma dayanımına sahiptir. Cam gibi gevrek malzemelerin basma dayanımı, çekme dayanımından çok daha fazladır ve ikisi arasındaki fark 20 kata kadar ulaşabilir. Camların çekme dayanımları 20 – 90 MPa arasında değişirken, basma dayanımları 500 – 900 MPa arasında değişmektedir. Camların elastikiyet modülleri 55 – 90 GPa, Poisson oranları ise 0,16 – 0,28 arasındadır (Tosun; Kalpakjian ve Schmid, 2010). Çeşitli camların mekanik özellikleri Çizelge 3.7’de gösterilmiştir.

Camın dayanım özellikleri, hacimsel özelliklerden çok yüzey özellikleri tarafından belirlenir. Masif cam genellikle 140 MPa’dan az bir dayanıma sahiptir. Bunun nedeni işleme sırasında yanlış aşındırma sonucu camın yüzeyinde oluşan mikro çatlaklar ve yüzey kusurlarıdır. Bu kusurlar ideale göre camın mukavemetini 2 – 3 kat düşürmektedir. Cam, yüzey hatalarına duyarlı bir malzeme olduğundan dolayı istenmeyen çiziklerin oluşmaması için aşınmaya karşı direnç camlar için önemli bir özelliktir. (Kalpakjian ve Schmid, 2010).

4. TEMPERLEME

4.1 Yüzey Kusurlarının Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi

Mikro çatlaklar ve stres yoğunlaştırıcı olarak işlev gören kritik hatalar gevrek malzemelerin mukavemetini düşürür. Bu kusurların yapılar üzerine uygulanan kuvvetlerle etkileşimi, bu yapıların bütünlüğünü tehlikeye atan çatlak büyümelerine ya da erken kırılmalara neden olabilir. Kusurlar ve çatlaklar taşlama, işleme, taşıma, darbe yükleri ve termal gerilimlerden kaynaklanabilir (Hojjatie, 1990).

Camdaki kırılma mekanizmaları üzerine çalışmalar birkaç yüzyıldan beri yürütülmektedir. 1678'de Hooke katı cisimler için ünlü gerilim - şekil değiştirme yasasının bulunmasına yol açan deneylerinde cama da yer vermiştir. Inglis 1913'te bir cam plakadaki uzun ve dar eliptik bir delik tarafından temsil edilen kusur için çatlağın ucundaki gerilimin $2(C/\rho_c)^{1/2}$ faktörü oranında arttığını göstermiştir ki burada C çatlak uzunluğunun yarısı (elipsin yarı eksen) ve ρ_c çatlak ucundaki eğrilik yarıçapıdır. Ancak, çatlak ucunun yarıçapı (ρ_c), genellikle atomik boyutlarda olduğundan ve ölçülmesinin zor olmasından dolayı, farklı uzunluktaki çatlaklar için sabit olduğu varsayılmıştır. Griffith, uygulanan kuvvetin bilinen bir değeri için bir çatlağın boyunun yalnızca kritik çatlak boyu olarak adlandırılan ve enerji metotları ile belirlenen belirli bir değerden daha büyük olması durumunda çatlağın yayılacağını ve kırılmaya yol açacağını göstererek gevrek kırılmanın anlaşılmasına çok önemli bir teorik katkı yapmıştır. Gevrek malzemelerin mukavemeti özellikle yüzey bölgelerinde bulunan çatlakların ve kusurların sayısı ve şiddetinden önemli ölçüde etkilenir (Hojjatie, 1990).

4.2 Camın Mekanik Özelliklerini Geliştirme Yöntemleri

Camın mukavemetini artırmak için temel olarak izlenebilecek iki yol vardır. Bunlardan ilki camın üretim aşamasında hatasız üretilmesinin sağlanması veya hataların giderilmesi ve cam yüzeyini koruyucu yöntemlerin uygulanmasıdır. İkinci yol ise mevcut hataların etkisini dengelemek için cam içerisinde camın dayanımını artıracak yeni kuvvetlerin oluşturulmasıdır (Kocabağ, 2002).

İmalat aşamalarının kontrol altında tutulması, cam yüzeylerinin temizlenmesi ve hatalara sahip yüzeylerin hidroflorik asit ile çözülmesi yüzey hatalarının azaltılarak camın mukavemetinin belli bir derecede artmasına katkıda bulunur. Ancak bu işlemden sonra camın yüzeyi çok hassas hale gelir ve ilave koruyucu metotlar gerekebilir. Bu yüzden cam yüzeyini silikon ya da benzeri polimer malzemelerle kaplamak makul bir yöntemdir. Bir diğer yöntem ise camı bir oksit tabakası ile kaplamaktır. Bu yöntem camın şekillendirilmesinden hemen sonra sıcak cam yüzeyine, uygun metal tuzu çözeltilerinin püskürtülmesi ile uygulanır. Püskürtmenin tatbik edilmesinden sonra 10 ila 30 saniye içinde çözelti hidrolize olur ve cam yüzeyine kimyasal olarak bağlanan bir oksit tabakası meydana gelir. Bu yöntem için Sn, Ti, Zn, Al tuzları ve organik metal bileşikleri kullanılabilir. Yüzey hatalarının azaltılmasında uygulanan bir başka yöntem de camın şekillendirilmesinin hemen ardından camın yüzeyinin oksidasyon ile parlatılmasıdır. Ancak camın mukavemeti pratikte, yüzey kusurlarının büyümesini önleyecek ve etkilerini azaltacak özel teknikler kullanılarak artırılır (Kocabağ, 2002).

Yüzey kusurunun büyümesi ve çatlağın ilerlemesi, çatlak düzlemine dik doğrultudaki çekme gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. Gevrek malzemelerin yüzeyini tamamen hatalardan ve mikro çatlaklardan arındırmak zor olmasına karşın cam yük altında değilken yüzeyine yakın ve paralel ince bir tabaka halinde baskı gerilmeleri oluşturularak yüzeydeki gerilim yükselticilerin etkisini önemli ölçüde azaltmak mümkündür. Bu şekildeki bir cam çekme gerilimine maruz kaldığında, uygulanan gerilimin yüzey çatlağını büyütebilmesi için öncelikle yüzeydeki baskı gerilimini yenmesi gerekir. Bu şekilde güçlendirilen camların mukavemet değeri normalinin 5 katına kadar artırılabilir, ayrıca çizilmeye karşı direnci ve statik yorulma dayanımı da artar (Hojjat, 1990; Kocabağ, 2002).

Değişik yöntemlerle cam yüzeyinde baskı tabakası oluşturmak mümkündür. Bu yöntemler fiziksel ve kimyasal güçlendirme olarak ikiye ayrılabilir.

4.2.1 Kimyasal Güçlendirme Yöntemleri

Kimyasal güçlendirme tekniklerinde yüzey baskısı yüzeyin kimyasal bileşiminin değiştirilmesi ile elde edilir (Hojjat, 1990). Kimyasal güçlendirme

yöntemlerinde yer alan iki temel mekanizma camın yüzeyi ile yüzey altı bölgeleri arasındaki termal genişleme katsayısı farkının kullanılması ve iyon değişimidir (Karlsson vd., 2010). Kimyasal güçlendirme kapsamına giren işlemler düşük genişmeli camla kaplama, yüzey kristalizasyonu, alkali giderme ve iyon değişimi yöntemleri olarak sayılabilir.

Düşük genişmeli cam kaplama işleminde genişleme farkı, yüksek genişmeli camın yüzeyine daha düşük genişleme katsayısına sahip bir cam kaplanması ile elde edilir (Karlsson vd., 2010). Kompozit cam yapısı yüksek sıcaklıktan soğutulduğunda, iç kısmın dış kısma göre daha fazla büzülmesi camın yüzeyinde baskı gerilimi oluşmasına neden olur (Hojjat, 1990). Bu yöntemin getirdiği en büyük zorluk düşük genişmeli camların çalışma sıcaklığının daha yüksek olması sebebiyle cam nesnelere ortaya çıkabilecek biçim bozulmalarıdır (Kocabağ, 2002). Bu yöntemin diğer bir dezavantajı da termal genişlemedeki aşırı farklılıkların iki cam arasındaki ara yüzeyde keskin gerilme gradyanlarına sebep olarak kaplamanın yerinden ayrılma tehlikesini ortaya çıkarmasıdır (Karlsson vd., 2010).

Cam yüzeyinde düşük genişmeli bir tabaka oluşturmak için uygulanan bir diğer yöntem de cam yüzeyinde alkali giderme işlemidir. Bu yöntem camın nemli SO₂ ya da SO₃ gazları içeren bir ortamda ısıtılarak yüzeyinin alkalisizleştirilmesi esasına dayanır (Karlsson vd., 2010). Isıtma esnasında camın yüzeyinde bulunan alkali iyonları su buharındaki H⁺ iyonları yer değiştirerek camın yüzeyinde suda çözünen alkali sülfatları oluşturur. Camın su ile yıkanıp kurutulmasından sonra camın yüzeyinde genişleme katsayısı daha küçük olan bir tabaka meydana gelir (Kocabağ, 2002).

Camın yüzey tabakasının kristallendirilmesi de camda baskı gerilimi oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. Kristalleşen maddelerin termal genişmeleri genellikle cam eşleniklerinden daha düşüktür (Kocabağ, 2002). Bu teknik çoğu camda çekme gerilmelerini ve çatlaklarını ortaya çıkardığı için numuneleri zayıflatılabilir ve ayrıca yüzey opaklığına ve zayıf optik özelliklere neden olabilir. Ancak bazı lityum aluminosilikat camlarına bu şekilde bir işlem uygulanarak yaklaşık 690 MPa değerinde mukavemet elde edilebilir (Hojjat, 1990).

Camı güçlendirme tekniklerinden bir diğeri ise iyon değişimi yöntemidir. Bu yöntemin temelleri camın yüzey katmanında yer alan alkali iyonlarının dış ortamdaki başka iyonlarla yer değiştirilmesi esasına dayanır. İyon değişimi, işlemin uygulandığı sıcaklığa bağlı olarak iki Şekilde uygulanabilir (Kocabağ, 2002).

İlk işlem cam geçiş sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta camdaki nispeten daha büyük olan alkali iyonların (sodyum iyonları) erimiş tuz banyosu içerisindeki daha küçük iyonlarla (lityum iyonları) yer değiştirilmesi ile uygulanır (Zarzycki, 1991). Daha küçük iyonlara sahip yüzey bölgelerinin genellikle camın kendisinden daha düşük termal genleşme katsayısına sahip olduğu bilinir. Termal genleşme farkı mekanizmasını kullanan diğer yöntemlerde olduğu gibi, cam soğutulduğunda bu işlem de yüzeyde baskı gerilmeleri ile sonuçlanır (Kingery vd., 1976) . Bu işlem, alkali giderme yöntemine alternatif olarak kullanılabilir. Oksit iyonlarının difüzyonda yer alması gerekmediği için alkali giderme işleminden çok daha hızlı geręekleřir ve cama daha derinlemesine nüfuz eder (Karlsson vd., 2010).

İyon değişimi cam geçiş sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta yapmak için de bir yol mevcuttur. İkinci yöntem cam geçiş sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta camdaki nispeten daha küçük olan alkali iyonların (sodyum iyonları) erimiş tuz banyosu içerisindeki daha büyük iyonlarla (potasyum iyonları) yer değiştirilmesi ile uygulanır (Zarzycki, 1991). Bu işlem kimyasal temperleme ya da iyon sıkıştırma olarak da bilinir. Bu yöntemde baskı gerilmesi diğer yöntemlerden daha farklı bir biçimde oluşturulur. İşlem gerilim noktasının altında camın yapısal olarak rahatlamasının mümkün olmayacağı düşük bir sıcaklıkta uygulanır (Kocabağ, 2002). İyonların boyut farkı yüzeye yakın bölgelerin yoğunluğunu artırmasından dolayı yüzeyde sıkıştırma gerilmeleri meydana getirir. Büyük iyonlar yüzeyi genişletmeye çalışırken kimyasal olarak değişmeyen iç bölgelerin buna direnç göstermesi yüzeyi sıkıştırma durumuna sokar (Hojjatie, 1990). Camların Al_2O_3 iğeriği alkali iyonlarının difüzyon oranını artırdığı için, bu yöntemle aluminosilikat camları soda kireç camlarına göre daha fazla güçlendirilebilir (Kingery vd., 1976; Kocabağ, 2002).

Farklı kimyasal güçlendirme tekniklerinin kombinasyonu da mümkündür. Camlarda tasarlanmış gerilim profili elde etmek için iyon değişimi önce iyon çiftlerinin yer değiştirdiği, daha sonra orijinal iyonun ya da başka bir iyonun en dış yüzey tabakasına yeniden girdiği Şekilde iki aşamalı olarak uygulanabilir (Karlsson

vd., 2010). Bazı camlarda kimyasal temperlemenin etkinliğini artırmak için iyon değişimi ve yüzey kristalizasyonunu birleştirmek mümkündür. Cam geçiş sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta iyon değişiminin bir sonucu olarak ortaya çıkan yüzey kristalizasyonu yüzey tabakasının genleşme katsayısını azaltabilir. Bu durum yüzeyde daha büyük baskı gerilmesinin oluşmasına neden olur (Hojjatie, 1990).

4.2.2 Fiziksel Güçlendirme Yöntemleri

Camı fiziksel olarak güçlendirme yöntemi ısı temperlemedir; günlük dilde daha çok temperleme olarak kullanılır. Temperleme işlemi camın, cam geçiş sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılıp daha sonra hızlı bir şekilde soğutulması esasına dayanır (Karlsson vd., 2010). Camın hızla soğutulması, yüzeylerin camın iç bölgesinden daha önce soğumasına neden olur. Temperleme işleminin ilk aşamasında yüzey sertleşir ve büzülür buna karşın iç bölgeler hala yumuşaktır ve ölçülerini yüzey çekilmesine göre ayarlayabilir. Daha sonraki aşamalarda iç kısmın sıcaklığı cam geçiş sıcaklığının altına düşer ve iç kısım büzülür. Ancak yüzey sert olduğu için kendini iç bölgenin büzülmesine göre ayarlayamaz. Yüzeydeki hacim elemanlarının daralması ve genişlemesi engellendiği için yüzeylerde baskı gerilmesi oluşturulur ve eş zamanlı oluşan büyüklük olarak daha düşük olan çekme gerilimleri tarafından dengelenir. Camın öngerilimlendirilmesi, soğutma esnasında camın dönüşüm sıcaklığı aralığındaki benzersiz davranışına dayanır ki burada viskoz bir sıvının özelliklerinden elastik bir katının özelliklerine geçiş yapar (Hojjatie, 1990).

4.2.3 Fiziksel ve Kimyasal Temperlemenin Karşılaştırılması

Uygulama kolaylığı ve dolayısıyla üretim maliyetlerini düşürmesi nedeniyle en yaygın kullanılan metot ısı temperlemedir. Ancak bütün uygulamaları ısı temperleme ile yapmak mümkün değildir (Karlsson vd., 2010). Isıl temperleme için ölçü ve şekil sınırlamaları bulunmaktadır (Hojjatie, 1990).

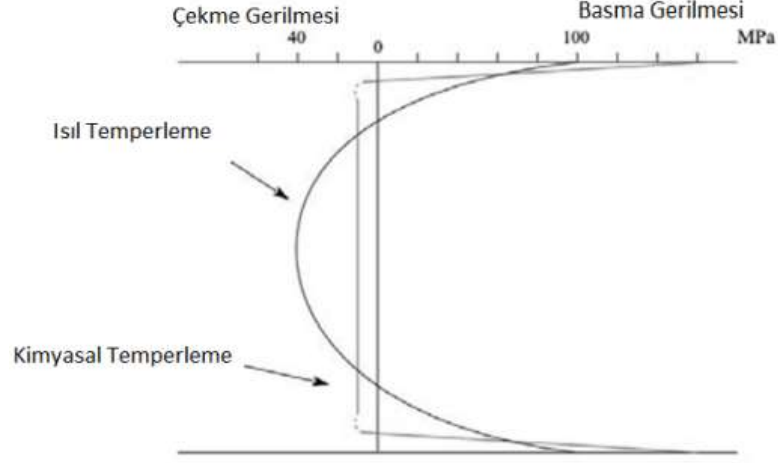
Isıl temperleme işlemi ile camlara belli dereceye kadar kavis kazandırıp temperlemek mümkün olsa da, karmaşık şekilli camlar ısı olarak güçlendirilemez. Karmaşık geometriye sahip camlar kimyasal temperleme ile güçlendirilebilir

(Uhlmann ve Kreidl, 1980; Gy, 2008). Prensip olarak, bütün yüzeyleri soğutma ortamı tarafından serbestçe erişilebilir olmayan biçime sahip cam eşyalar ısı temperleme için uygun değildir. Bu şekildeki camlar kimyasal temperleme ile güçlendirilebilir (Karlsson vd., 2010).

Ölçüsel limitler ise camın ebatları ve kalınlığı ile ilgilidir. Isıl temperleme, ebatı 200x200 mm'den daha küçük camlar için maliyetli bir işlem olduğundan uygulanabilir değildir. Bu tür camlara kimyasal temperleme uygulamak daha doğru bir yaklaşımdır (Tıkıroğlu, 2017). Ayrıca camın kalınlığı da dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur. Isıl temperlemede, işlem yapılabilecek cam kalınlığı 3 – 19 mm arasında değişirken (Tıkıroğlu, 2017), kalınlık kimyasal temperlemede 0,5 – 15 mm arasındadır (Karlsson vd., 2010). Bazı kaynaklarda 2 mm kalınlığındaki camın da ısı olarak temperlenebildiğinden söz edilmiştir (Gy, 2008; Karlsson vd., 2010). Camın kalınlığının 2 mm'nin altına düşmesi durumunda ise, ince kesitlerde gerekli sıcaklık farklılaşmasının oluşturulmasının zorluğundan dolayı ısı temperleme mümkün olmaz (Kocabağ, 2002).

Görüldüğü gibi kimyasal temperlemenin avantajlarından birisi de çok ince camların güçlendirilebilmesine olanak sağlamasıdır. Bu durum, iyon değişimi işleminin düşük sıcaklıklarda yapılmasının bir sonucu olarak ısı temperlemedeki gibi malzemede viskoz akıştan kaynaklanan bozulma riskini taşımamasından kaynaklanmaktadır (Hojjat, 1990). Isıl temperleme işleminde camın seramik merdanelerle teması ve yüksek sıcaklık, camlarda yüzeyde eğrilik, çarpılma, merdane dalgaları, batma ve leopar beneği gibi hatalar görülmesine neden olur. Kimyasal temperli camlarda ise yüzey düzgün ve optik kalite mükemmeldir (Tıkıroğlu, 2017).

Isıl temperli camlarda temperleme işleminden sonra kesme, delik delme, kenar işleme, kanal açma vb. işlemler yapılamazken, kimyasal temperli camlarda mukavemeti bir miktar azaltsa da bu işlemler mümkündür (Karlsson vd., 2010; Tıkıroğlu, 2017). Kimyasal yolla güçlendirilmiş cam kesildiğinde kesimin yaklaşık 20 mm bölgesi içerisinde iyon değişimi yöntemi ile ilave edilen mukavemetini kaybeder, benzer şekilde kimyasal temperli camın yüzeyi derin bir şekilde çizildiğinde de çizilen alan ilave edilen mukavemetini kaybeder (https://en.wikipedia.org/wiki/Chemically_strengthened_glass).



Şekil 4.1. Kimyasal ve Isıl Temperlemedeki Gerilim Profilleri (Karlsson vd., 2010)

Doremus 'un aktardığına göre cam, ısı temperleme ile 6, yüzey kristalizasyonu ile 17, iyon değişimi ile 10, yüzey kristalizasyonu ve iyon değişiminin birlikte uygulanması ile 22 kata kadar güçlendirilebilir (Hojjat, 1990). Camın maksimum basma dayanımı ısı temperleme ile 400 MPa, kimyasal temperleme ile 1000 MPa değerlerine ulaşabilir (Karlsson vd., 2010). Görüldüğü gibi burada da kimyasal temperlemenin üstünlüğü söz konusudur. Şekil 4.1'de kimyasal ve ısı temperleme neticesinde camda oluşan gerilim profilleri görülebilir. Gerilim profili ısı temperli camda parabol şeklindeyken, kimyasal temperli camda biraz daha düz ve daha dik şekildedir (Karlsson vd., 2010). Gerilim dağılımının, kimyasal temperli camda ısı temperli cama göre yüzeyde daha büyük basma gerilmesine ve merkez ekseninde ise daha küçük çekme gerilmesine neden olduğu şekilde görülebilir. Bununla birlikte, basma tabakasının kalınlığı ısı temperli camda daha fazladır (Earp, 2016).

Temperleme işleminde oluşturulan gerilim profilinin camların kırılma davranışı üzerinde de belirleyici bir özelliği vardır. Isı temperli camda makroskopik kırılma paterni, cam eşyadaki artık gerilmelerden büyük oranda etkilenir. Isı temperli cam, kırıldığında zar benzeri küçük kübik parçalara ayrılmasıyla bilinir. Parçalanma, hem dış gerilmelerin hem de artık gerilmelerin etkilerinin birleşiminden dolayı, malzeme içinde depolanan elastik şekil değiştirme enerjisinin doğrudan sonucudur (Earp, 2016). Parçaların büyüklüğü ile depolanan enerji miktarı arasında ters orantılı bir ilişki vardır (Pourmoghaddam vd., 2018). Isı olarak temperlenmiş cam, hançer benzeri kırılma parçalarına sahip tavllanmış camın aksine keskin ve tehlikeli olmayan

parçalara ayrıldığından dolayı emniyet camı olarak da adlandırılır. Kimyasal temperli cam ise kırılma durumunda, oldukça keskin ve dolayısı ile tehlike potansiyeli taşıyan parçalara ayrılır (Karlsson vd., 2010). Kırılma davranışı tavlanmış caminkine benzer, fakat kimyasal temperli camda bir kırılma meydana getirebilmek için uygulanacak kuvvetin daha büyük olmasından dolayı malzeme yüklendiğinde yüksek seviyede elastik şekil değiştirme enerjisi depolanır. Bu yüzden tavlanmış caminkinden daha yoğun bir kırılma paterni gözlemlenir. Diğer bir fark ani kırılma durumu incelendiğinde gözlemlenir. Isıl temperli camda oluşan gerilim profili ani kırılmayı tetikleyecek şekilde olduğundan ani kırılma görülebilir. Diğer yandan, kimyasal temperli camda iç bölgedeki çekme gerilmeleri eşik değerini geçmediği için ani kırılma görülmez (Earp, 2016).

Isıl temperleme işlemi, kimyasal temperleme işlemine göre çok daha kısa sürelerde gerçekleştirilir; ısıl temperleme işlemi dakikalar alırken, kimyasal temperleme işlemi saatler alır (Karlsson vd., 2010). Bu yüzden kimyasal temperleme daha maliyetli bir işlemdir. Kimyasal temperleme işlemi yüksek maliyetinden dolayı sadece yüksek değerli uygulamalarda kullanılabilir (Gy, 2008). Ayrıca, ısıl temperleme bütün camlar için uygulanabilirken, kimyasal temperleme işleminin uygulanacağı cam bileşimleri sınırlıdır (Karlsson vd., 2010). Kimyasal temperlemenin birçok üstünlüğüne rağmen, ekonomik üstünlüğünden dolayı en çok tercih edilen yöntem ısıl temperleme işlemidir.

4.3 Isıl Temperleme Prosesinin İncelenmesi

Cam temperleme düşüncesinin ortaya çıkışı 17. yüzyılda Prens Rubert'in erimiş cam damlalarını suya daldırması sonucu elde ettiği izlenime dayanır. Erimiş damlanın dış kısmı iç kısımdan daha önce soğuduğu için iç kısım çekme gerilimi altındayken yüzeyde büyük baskı gerilmeleri meydana gelir (Hojjatie, 1990). Gözyaşını andıran uzun ve ince bir kuyruğa sahip bu damlaların bombeli tarafı bir çekiçle ve hatta bir mermiyle uygulanacak darbelere direnç gösterirken, kuyruk kısmının alacağı en ufak darbe damlanın tamamen paramparça olmasına neden olur (https://tr.wikipedia.org/wiki/Prens_Rupert_Damlas%C4%B1). Cam temperleme ile ilgili ilk patent, 1874 yılında François la Bastie'nin geliştirdiği, neredeyse erimiş bir

haldeki camın ısıtılmış yağ ya da gres banyosu içerisinde soğutulması ile uygulanan yöntemdir. 1877'de Friedrich Siemens, camı soğuk kalıp içerisinde presleyerek Bastie'ninkinden daha mukavim temperli cam üretilebilen farklı bir proses geliştirmiştir (https://en.wikipedia.org/wiki/Tempered_glass). 1920'den önce yapılan camdaki termal gerilimlerin kontrolüne yönelik çalışmaların çoğu, cam ürünlerdeki artık gerilmelerin yavaş soğutma mekanizmasıyla giderildiği tavlama işlemi ile ilgilidir. 1920 yılında Fransa'da düz camı çarpan hava jetleri ile soğutma yönteminin icat edilmesiyle 1930'lu yılların başlarından itibaren temperli cam, otomotiv endüstrisi başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Hojjatie, 1990). Temperli cam, yüksek mukavemete sahip olmasının yanında kırıldığında tehlike potansiyeli taşımayan parçalara ayrılarak yaralanma riski oluşturmaz. Bu yüzden temperli cam günümüzde birçok uygulamada güvenlik camı olarak kullanılmaktadır.

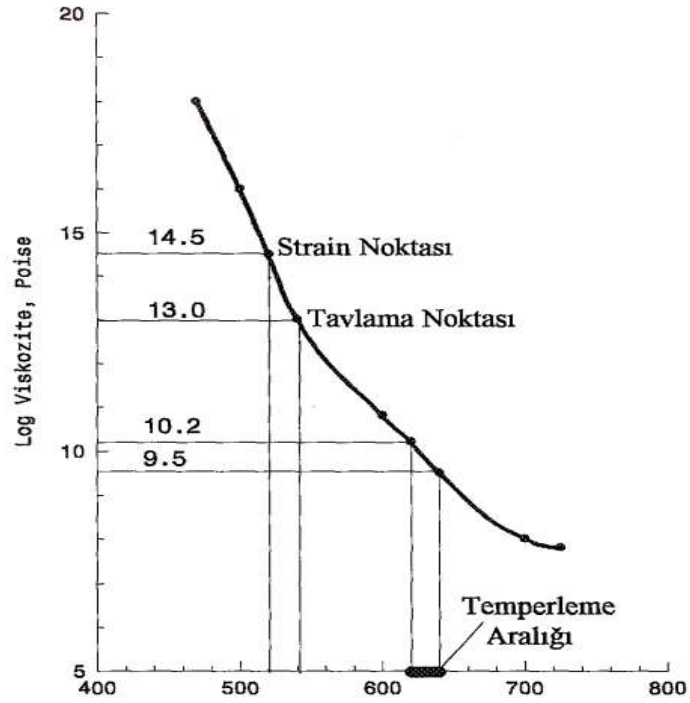
Temperleme teriminin ısıtma işlemle camı güçlendirme teknolojisini ifade etme biçimi olarak kabul edilmesi maalesef bir talihsizliktir. Terimin kullanımı, çeliklerin ısıtılması ve soğutulması ile yapılan temperleme işlemine yüzeysel bir benzerliği nedeniyle ortaya çıkmıştır. Ancak, söz konusu mekanizma ve oluşan etkiler iki işlemde birbirinden oldukça farklıdır (Uhlmann ve Kreidl, 1980). İki işlem için malzemelerin kritik sıcaklığa çıkarılmasından sonra hızlı bir şekilde soğutulmasının dışında başka bir benzerlik bulunmaz (Uhlmann ve Kreidl, 1980).



Şekil 4.2. Temperleme Hattı a) Yükleme Tablası b) Isıtma Fırını c) Soğutma Bölümü d) İndirme Tablası (Rantala, 2015)

Temperleme işlemi, düz camın belli bir dereceye kadar ısıtılması ve daha sonra da genellikle hava üfleyerek hızla soğutulması esasına dayanır (Kocabağ, 2002). Şekil 4.2'de klasik bir temperleme hattının şekilsel gösterimi yapılmıştır. Temperleme işleminde öncelikle cam, iç gerilmelerin oldukça hızlı bir şekilde giderilmesi için yeterince akışkan olduğu fakat ciddi şekilde deformasyona uğramadan işlenebilmesi

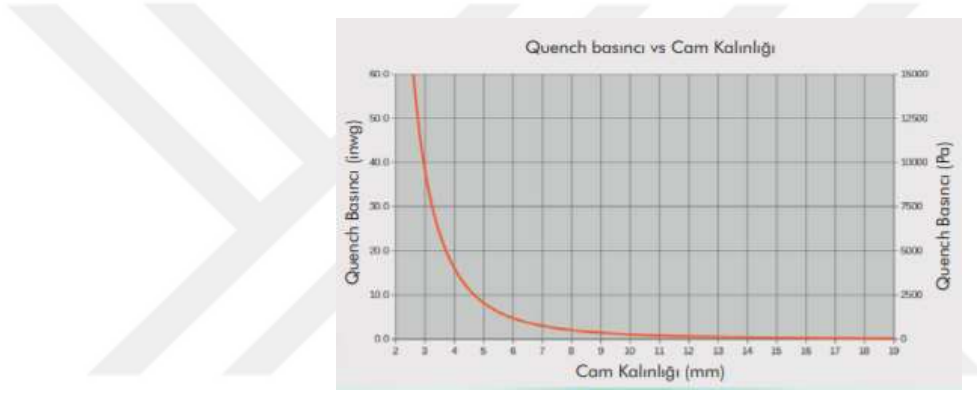
için de yeterince sert olduğu uniform bir sıcaklığa kadar ısıtılır (Uhlmann ve Kreidl, 1980). Şekil 4.3’de camda sıcaklık-viskozite ilişkisi gösterilmiştir. Camdaki herhangi bir gerilme, şekil değiştirme (strain) noktasında 4 saatte giderilirken, tavlama noktasında 15 dakikada giderilmektedir (Üzümlü, 2002). Gerilmelerin, saniyeler içerisinde ortadan kaldırılacağı temperleme aralığının alt ve üst sıcaklık limitleri 620 – 640 °C olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, cam kesitinde hâlâ bir sıcaklık gradyanı mevcut olsa da temperleme aralığı içerisinde ısıtılan cam gerilmelerden büyük ölçüde arındırılır (Yalçın, 1998). Üst sıcaklık sınırından sonra camda oluşturulacak baskı gerilmesinde herhangi bir artış meydana gelmez, alt sıcaklık sınırında ise herhangi bir baskı geriliminin oluşması söz konusu değildir (Kocabağ, 2002).



Şekil 4.3. Camda Sıcaklık - Viskozite İlişkisinin Gösterimi (Yalçın, 1998)

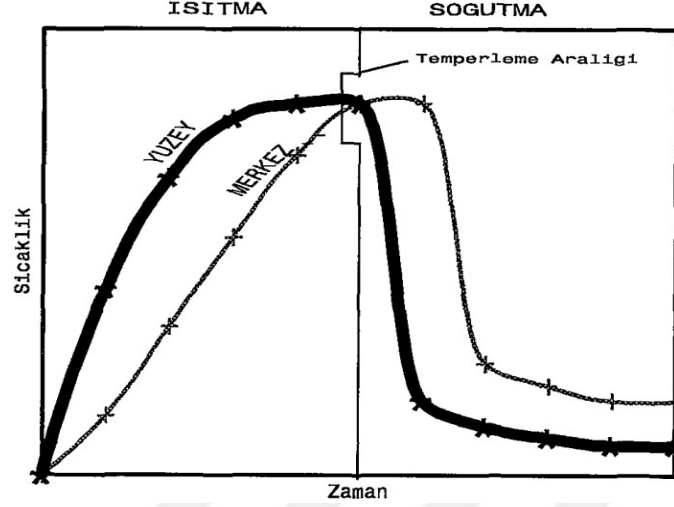
Temperleme prosesinde ısıtma işlemi, temel ısı transfer mekanizması ışıınım olan radyan fırınlarda ya da ana ısı transfer mekanizması taşınım olan konveksiyon fırınlarında gerçekleştirilebilir. Camı ısıtma işlemi geleneksel olarak basınçlı hava aspiratörleri ile desteklenen radyan fırınlarda gerçekleştirilir. Fırın içerisinde cam, ısıyı üç farklı yolla emer. Bunlar; elektrikli ısıtıcıdan camın yüzeyine kızılötesi ışıınım, seramik merdanelerden camın alt yüzeyine temas yoluyla iletim ve fırın içerisinde dolaşan hava kütlelerinin camın alt ve üst yüzeylerine zorla temas ettirilmesi ile taşınım

şeklinde meydana gelen ısı transferleridir. Radyan fırınlarda camın kalınlığının her 1 mm'si için ısıtma süresi yaklaşık 40 saniye olarak alınır. Isı kaynağı ve camın arasındaki sıcaklık farkı yüksek olduğundan başlangıçta ısı transferi hızlı gerçekleşir. Isı kaynağı ve cam arasındaki sıcaklık farkı azaldıkça ısı transfer katsayısı düşer. Konveksiyon fırınlarında ise ısıtma daha kısa sürede gerçekleşir. Isıtma süresi radyan fırına göre yaklaşık % 30 daha düşüktür. Konveksiyon fırınlarının avantajı, emisivite değerleri 0,03'e kadar düşen yumuşak kaplamalı low – e camların temperlenmesini mümkün kılmasıdır. Bu tür camlar, ısınmaya karşı direnç gösteren kaplamalı yüzeyine yoğun bir şekilde sıcak hava üflenmesi ile ısıtılabilir (Ungan, 2015).



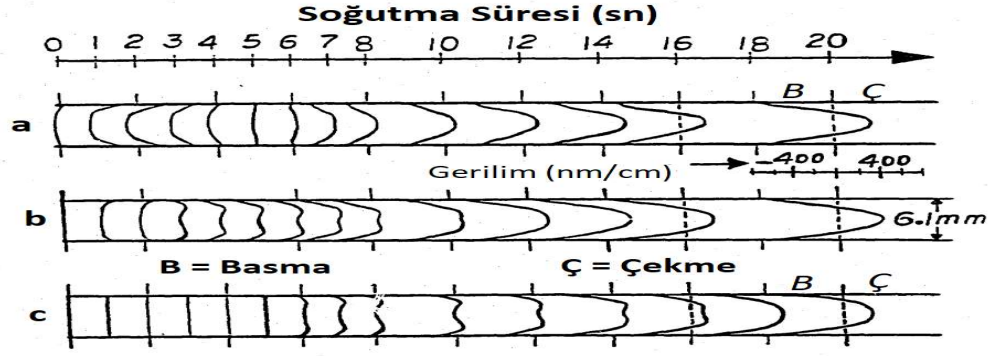
Şekil 4.4. Soğutma işleminde Cama Uygulanacak Hava Basıncının Kalınlığa Göre Değişimi (Ungan, 2015)

Temperleme prosesinde soğutma işlemi, fırında 620 – 640 °C aralığına ısıtılan camın yüzeylerine üfleme bölümünde nozullar tarafından hava püskürtülmesi ile gerçekleştirilir. Soğutma işleminin temel ısı transfer mekanizması cebri taşınımdır. Temperleme işleminde oluşturulan artık gerilmeler, soğutma sırasında cam yüzeyleri ile orta eksen arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır. İnce camlarda camın yüzeyleri arasındaki mesafe kısa olduğundan, camda sıcaklık farklılaşması meydana getirmek için kalın camlara göre daha yüksek ısı transfer hızı gerekir. Gerekli olan ısı transfer katsayısı kalınlıkla ters orantılıdır. Cam kalınlığı arttıkça soğutma işlemini gerçekleştirmek için gerekli ısı transfer katsayısı düşer. Camın kalınlığı ve uygulanması gereken hava basıncı ilişkisi Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Soğutma işleminde ısı transfer katsayısını üzerinde etkisi olan değişkenler nozul düzeni, tipi, büyüklüğü ve hava basıncıdır (Yalçın, 1998). Temperleme işleminde camda oluşan sıcaklık değişimleri Şekil 4.5'de gösterilmiştir.

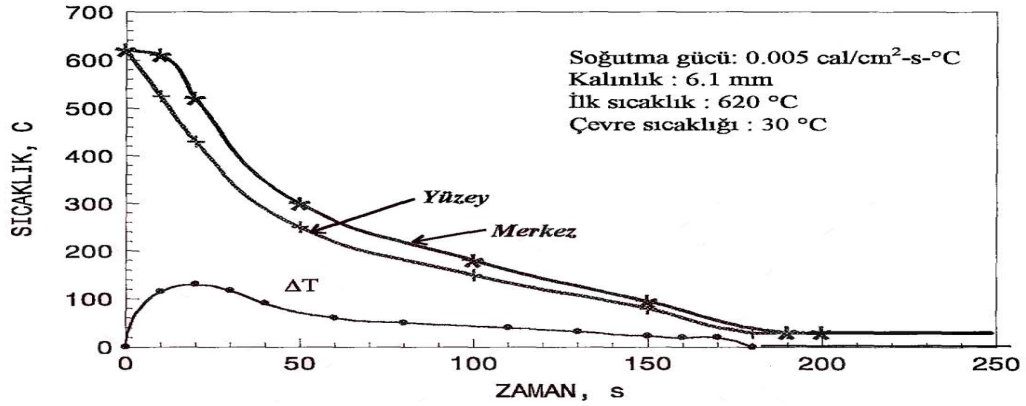


Şekil 4.5. Temperleme İşleminde Camda Meydana Gelen Sıcaklık Değişimleri (Yalçın, 1998)

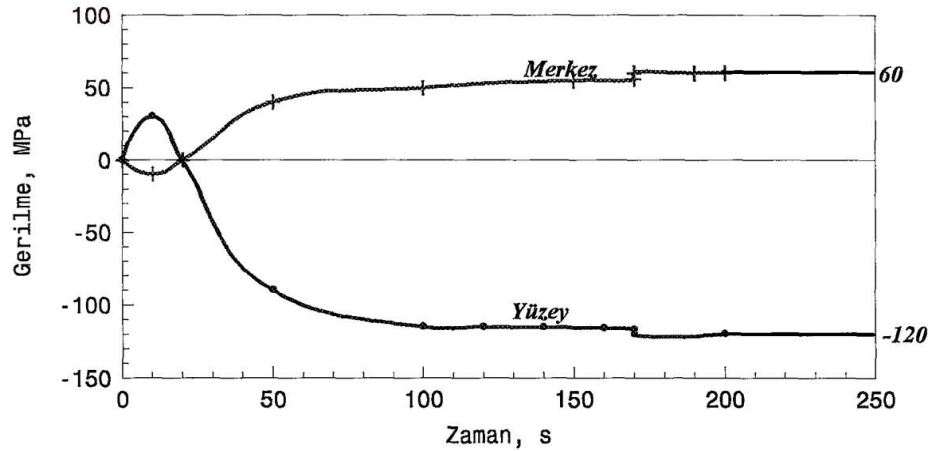
Cam temperlemenin soğutma aşamasında camın yüzeyleri merkez eksenden daha hızlı soğuyarak cam kesitinde parabolik bir sıcaklık gradyanı oluşturur. Camın ısıl genişleme özelliğinden dolayı oluşan sıcaklık gradyanı, camın yüzeylerinde büzölmeye neden olacak basma geriliminin ortaya çıkmasına neden olur. Bu aşamada cam, hala gerilme noktasının üzerindeki bir sıcaklıkta olduğu için viskoelastik bir davranış gösterir ve ortaya çıkan gerilmeler kontrol altında tutulabilir. Soğutma işleminin başlamasından belli bir süre sonra camın yüzeyleri gerilme noktasına ulaşır ve sertleşir. Temperleme işleminin bu aşamasında camın iç kısmının sıcaklığı gerilme noktasının üzerinde olduğundan viskoz bir sıvı gibi davranır. Camın iç kısmı soğudukça büzölmeye çalışır fakat daha önce katılaştıran camın yüzey tabakaları tarafından engellenir. Camın iç kısmı hala akışkan olduğu için ölçülerini oluşan bu duruma göre adapte edebilir. Daha sonra camın iç kısmı da zamanla gerilme noktasına ulaşır ve büzölür. Cam gerilme noktasının altında elastik bir katı gibi davranır. Bu aşamadan sonra cam daha fazla soğutulduğunda camın iç kısmının büzölmesi yüzeyde artık basma gerilmelerinin oluşmasıyla sonuçlanır. Eş zamanlı olarak camın iç kısmında da dengeleyici çekme gerilmeleri oluşur. Cam oda sıcaklığına getirildiğinde ise sıcaklık gradyanı tamamen artık gerilmelere dönüştürülmüş olur (Yalçın, 1998; Hojjatie, 1990). Soğutma sürecinde gözlemlenen değişimler Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Temperleme Esnasında Cam Levhada Oluşan Geçici Gerilim Dağılım Profilleri - Başlangıç Sıcaklığı a) 616 °C b) 648 °C c) 738 °C (Hojjatie, 1990)



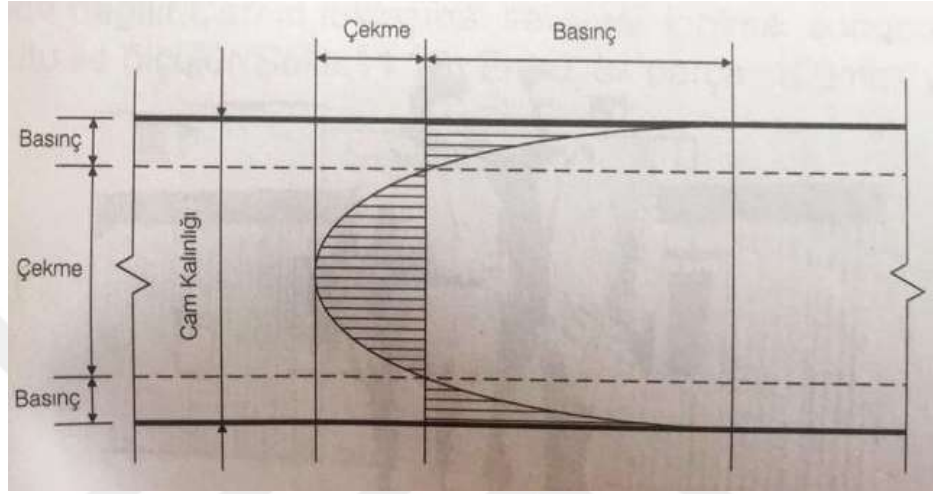
Şekil 4.7. Soğutma İşleminde Camdaki Sıcaklık Değişimleri (Yalçın, 1998)



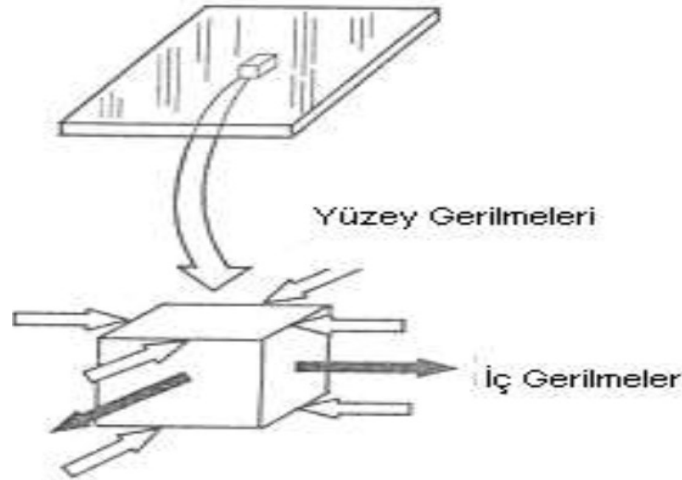
Şekil 4.8. Soğutma İşleminde Camdaki Gerilim Değişimleri (Yalçın, 1998)

Temperleme işleminden sonra camda oluşan gerilim dağılımı Şekil 4.9'daki gibi parabolik bir şekle sahiptir. Camın kalınlığının yaklaşık olarak % 25'inden

itibaren görülen basma gerilimi, camın orta kısmında oluşan çekme gerilimlerinin takribi olarak 2 katıdır. Camın kesiti boyunca çekme ve basma gerilimleri arasında bir denge hali söz konusudur (Yalçın, 1998). Şekil 4.10'da camda oluşan gerilmelerin üç boyutlu gösterimi yapılmıştır.



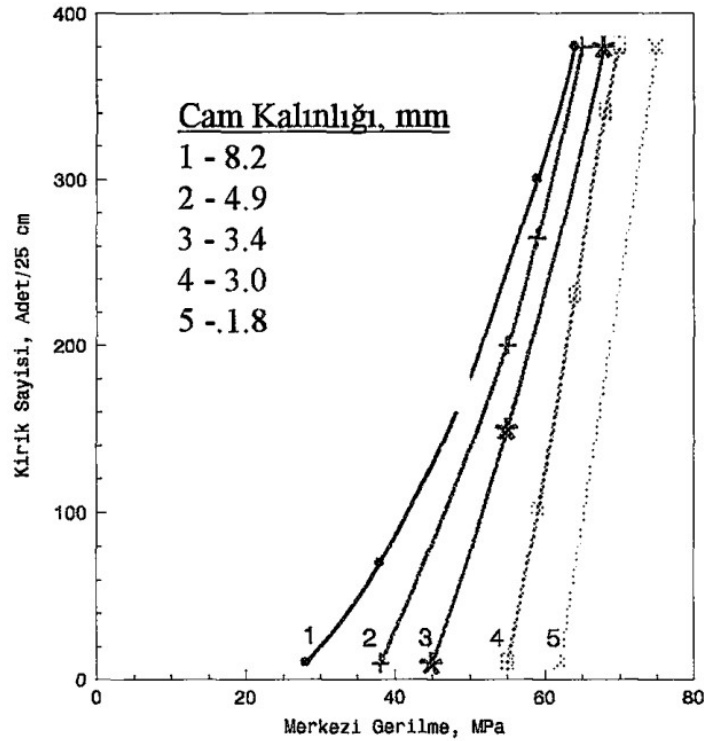
Şekil 4.9. Temperleme İşlemi Sonrası Oluşan Gerilim Dağılımı Profili (Kocabağ, 2002)



Şekil 4.10. Temperleme İşlemi Sonrası Oluşan Gerilmelerin Cam Levha Üzerinde Gösterimi (Öztürk, 2006)

Temperli cam, kırıldığında yaralama potansiyeli olmayan, keskin olmayan zar şeklindeki küçük parçalara ayrılmasıyla bilinir. Bu özelliğinden dolayı temperli cam, emniyet camı olarak da adlandırılmaktadır. Bu durum esasen camın bünyesinde depolanan elastik şekil değiştirme enerjisinden kaynaklanmaktadır ve temperleme

sonrası oluşturulan gerilim dağılımı ile çok yakından alakalıdır. Temperli camda elastik şekil değiştirme enerjisi, camdaki artık gerilmeler ve kırılma anında uygulanan kuvvetin etkilerinin birleşmesi ile açığa çıkar. Bu yüzden, merkez düzlemde oluşturulan çekme gerilimi ile kırılan parça büyüklükleri arasında bir ilişki vardır. Merkez düzlemde oluşturulan çekme gerilimi büyüklük olarak arttığında, kırılmada görülen parça sayısı da artmaktadır. Bu ilişki Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Temperli Camda Merkezi Gerilme ve Kırık Sayısı Arasındaki İlişki (Yalçın, 1998)

4.4 Beyaz Eşya Sektöründe Temperli Cam Kullanımı

Sağlıklı, hijyenik ve çevre dostu saydam bir malzeme olan cam, bu özelliklerinden dolayı ana işlevi besinlerin sağlıklı bir şekilde hazırlanması ve korunması olan beyaz eşya ürünlerinin vazgeçilmez bir parçası olmuştur. İşlevsel kaplamaları ile ısı yalıtımı sağlayan camlar, günümüzde önemli değerlendirme kriterleri arasına giren küresel ısınma ve enerji verimliliği konularında beyaz eşya sektöründe önemli avantajlar sunmaktadır. Sahip oldukları üstün mekanik ve termal özelliklerinden, yüksek darbe ve termal şok dayanımlarından ve kırıldıklarında küçük

ve keskin olmayan parçalara ayrılmalarından dolayı beyaz eşya sektöründe tercih edilen temperli camlardır (<http://www.sisecamduzcam.com/tr/faaliyet-alanlarimiz/beyaz-esya-camlari/urunler/buzdolabi-camlari>). Camlar ayrıca, fonksiyonel kullanımının yanında ürünlere estetik özellik kazandırmasından dolayı beyaz eşya sektöründe dekoratif amaçlarla da kullanılırlar (www.l-i.com.ua/en/products/tempered-glass/glass-for-household-appliances). Cam üreticileri, temperli camlar üzerinde talebe göre delik açma, kenar işleme ve serigrafik baskı vb. işlemleri yapabilmektedir ki bu da ciddi manada tasarım serbestliğinin ortaya çıkmasına katkıda bulunur.

Temperli camın, beyaz eşya sektöründe başta pişirici, soğutucu, dondurucu cihazlar olmak üzere ürünler üzerinde çok çeşitli kullanımı vardır. Temperli camın beyaz eşya sektöründe genel olarak kullanıldığı yerler, kullanıcı kontrol panelleri, fırın kapakları, ocaklı fırınların üst kısmı, ocak yüzeyleri, buzdolabı sebzeliği ve rafı, derin dondurucu ve düz çamaşır makinesi kapakları şeklindedir. Dekoratif özelliklerinden dolayı beyaz eşya ürünlerinde temperli camın, özele indirildiğinde çok farklı şekillerde uygulamalarının olduğu gözlemlenebilir. Beyaz eşya uygulamalarında temperli cam kullanımı Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Beyaz Eşya Ürünlerinde Temperli Cam Kullanımı

5. CAM SEKTÖRÜ

5.1 Cam Sektörünün Özellikleri

Cam sektörü, inşaat, otomotiv, meşrubat, gıda, beyaz eşya, mobilya, eczacılık, elektrik – elektronik gibi birçok sektöre girdi veren önemli bir üretim alanıdır (Güvenbaş, 2014). Cam ürünlerin imalatının, hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda eritilmesini gerektirdiğinden dolayı cam endüstrisi enerjiye dayalı bir üretim alanıdır. Cam sektörünün en önemli maliyet kalemlerinden birini enerji maliyetleri oluşturur. Cam fırınlarını ısıtmak zahmetli ve maliyetli bir işlem olduğundan fırınlar sürekli olarak sıcak tutulmak zorundadır. Yüksek enerji maliyetleri, cam sektöründe kesintisiz üretim yapmayı mecburi kılmaktadır (Kirman, 1995).

Cam endüstrisinde önemli konulardan birisi de hammaddedir. Camın hammaddeleri yüksek birim ağırlığa sahip kum, yüksek maliyetli soda, tabiatta az miktarda olan dolomit ve feldspat gibi malzemelerdir. Cam sektöründe, bu maddeler için aranan kalite ve saflık özelliklerinin yanı sıra sürekli olarak tedarik edilebilmesi de önemli bir değerlendirme kriteridir. Cam üretimi, belirlenen teknik şartlara uygun hammadde tedarikinde meydana gelebilecek binde birler oranında bir değişime duyarlıdır (Kirman, 1995).

Cam sanayisinde önem arz eden bir diğer konu ise işgücünün etkin kullanılmasıdır. Cam sektöründe işin yavaşlaması veya grev gibi nedenlerden dolayı işin durması tahrip edici sonuçlar doğurmaktadır. Ayrıca rekabetin yoğun bir şekilde yaşandığı cam sektöründe kapasitenin etkin kullanılabilmesi için nitelikli eleman çalıştırılması önem arz eder (Kirman, 1995)

Cam sektörünün rekabetçi bir yapıya sahip olmasından dolayı, cam sanayisindeki işletmeler sürekli yatırım yapmaya ihtiyaç duymaktadır. Sektördeki yeniliklerle birlikte, rekabet avantajını kaybeden makine ve ekipmanların çoğu zaman kullanım ömrünü tamamlamadan yeni teknolojiler ile yer değiştirilmesi ya da modernize edilmesi zorunlu hale gelir. Bahsi geçen değişiklikler yüksek sermaye gerektirdiğinden dolayı cam sektörü sürekli yatırıma ve sermayeye dayalı bir üretim alanıdır (Kirman, 1995).

Cam sektöründe ilk yatırım maliyetleri yüksek ve kar marjları düşüktür. Üretimde ağırlığı olan ürünler için başabaş noktası yüzde 75 gibi yüksek bir seviyededir. Başabaş noktası, işletmelerin mali durumunu tehlikeye sokmadan çalışabilecekleri en düşük verimi ya da satış oranını ifade eder. İşletmelerin karlılığı, üretimde kesinti olmamasının yanı sıra tam kapasite kullanımına da bağlıdır. Bu yüzden diğer sektörlerin aksine, cam sektöründe arz talepten önce gerçekleşir. Sektördeki konumunu korumak isteyen işletmeler, piyasadaki boşluğu doldurmak isteyen rakipleri ile talebi aşan bir arz gerçekleştirerek rekabet etmek zorundadır. İzlenen bu politika bazı dönemlerde talep fazlası ürünlerin stok maliyetlerinden dolayı, marjinal maliyetinin altındaki fiyatlarla dış pazarlara satılması sonucunu doğurur (Kirman, 1995).

Cam sektörü dünyada, pazarı az sayıda üreticinin elinde bulundurduğu oligopol bir yapıya sahiptir. Sektörün yapısal zorluklarından sektöre giriş çıkışlar çok azdır. Global pazarda, toplam talebin % 80'inden fazlası dünya çapında yaklaşık 10 işletme tarafından karşılanır. Ülke pazarlarında ise tekelleri bir yapı görülür. Bu yüzden sektörde rekabet kavramı, uluslararası olarak değerlendirilmektedir ve hükümetlerin belirlediği dış ticaret politikaları rekabet gücünün tesis edilmesinde büyük öneme sahiptir. Cam endüstrisinde, uzak bölgelere teslimatın ekonomik olmadığı bazı ürünler için küreselleşme eğilimi söz konusudur. Bu durum rekabet şartlarını sağlayabilmek için yurtdışı yatırımlarını zorunlu kılar (Kirman, 1995).

5.2 Dünyada Cam Sektörü

Dünyada cam üretim sektörü, cam ambalaj, düz cam, cam ev eşyası, cam lifi ve özel camlar olmak üzere 5 farklı alt kategoriye ayrılmıştır. Bu ürünlerin dünya cam üretimi içerisindeki payları; cam ambalaj % 45, düz cam % 37, cam ev eşyası % 4, cam lifi % 3 ve özel camlar % 10 şeklindedir (Ankara Sanayi Odası, 2013). Cam sektörünün ulaştığı tahmin edilen yıllık üretim hacmi 180 milyon ton dolaylarındadır. Cam sektörü yıllık ortalama % 2 – 4 bandında bir büyüme oranına sahiptir. Sektörün ulaştığı ekonomik değer 130 - 140 milyar dolar civarındadır (Sarsın Kaya, 2015).

Dünya cam üretiminin % 34'ü Asya, % 30'u Avrupa, % 29'u Amerika ve % 7'si diğer bölgelerde yapılmaktadır (Ankara Sanayi Odası, 2013). Dünya üzerindeki

25 büyük cam üreticisinden 7'si ABD'de, 5'i Japonya'da, 4'ü Fransa'da, 3'ü İngiltere'de ve birer tanesi Almanya, İsveç, Belçika, İtalya, Endonezya ve Türkiye'de yer almaktadır (Güvenbaş, 2014). Avrupa birliği ülkelerinin dünya cam pazarındaki payı % 30 civarındadır. 2012 yılı verilerine göre Avrupa birliği ülkelerinin cam üretiminin % 65'ini cam ambalaj, % 27'sini düz cam, % 3'ünü cam ev eşyası, % 2'sini cam elyaf ve % 3'ünü özel camlar oluşturur (T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2014).

5.3 Cam Sektörünün Türkiye'deki Durumu

Türk cam sanayisi, Türkiye'nin cam üretiminde kullanılan kum, soda, dolomit, kuvarz gibi maddeler yönünden zengin olmasından dolayı % 98 oranında yerli hammadde kullanımına sahiptir. Türkiye'de cam sektörünün üretim kapasitesi yılda 3,5 milyon tondur (T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2014). Türk cam sektörünün ulaştığı ekonomik değer 2,3 milyar dolardır. Türk cam sektörünün dünya üretimindeki payı % 1,6, Avrupa üretimindeki payı ise % 5 dolaylarındadır. Yaklaşık 20 bin çalışan istihdam eden Türk cam sanayisinin, Türkiye ekonomisi içerisindeki payı % 0,3'tür (Güvenbaş, 2014). Cam ürünlerin yurtiçi pazardaki payları; % 50 düz cam, % 32 cam ambalaj, % 16 cam ev eşyası, % 2 cam elyaf şeklindedir (T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2014).

Yurtiçi talebin % 90'ı Şişecam tarafından karşılanmaktadır. Şişecam 150 ülkeye ihracat yapan bir şirkettir. Şişecam'ın üretim kapasitesi yurtdışı yatırımları ile beraber 4,7 milyon tona yakındır (T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2014). Şişecam'ın Türkiye dışında, Bosna Hersek, Bulgaristan, Mısır, Almanya, Gürcistan, Macaristan, Hindistan, İtalya, Romanya, Rusya Federasyonu, Slovakya ve Ukrayna'da devam eden değişik üretim aktiviteleri bulunmaktadır (Wintour, 2015). Şişecam, düz cam üretiminde Avrupa'da 4'üncü, dünyada 7'inci, cam ev eşyası üretiminde Avrupa'da 2'nci, dünyada 3'üncü, cam ambalaj üretiminde Avrupa'da 4'üncü, dünyada 5'inci konumdadır. Kimyasal üretiminde Şişecam, soda üretiminde Avrupa'da 4'üncü, dünyada 10'uncu, krom bileşikleri üretiminde ise dünyada ilk sıradadır (Güvenbaş, 2014).

6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1 Cam Temperleme Fırınlarının Çeşitleri ve Özellikleri

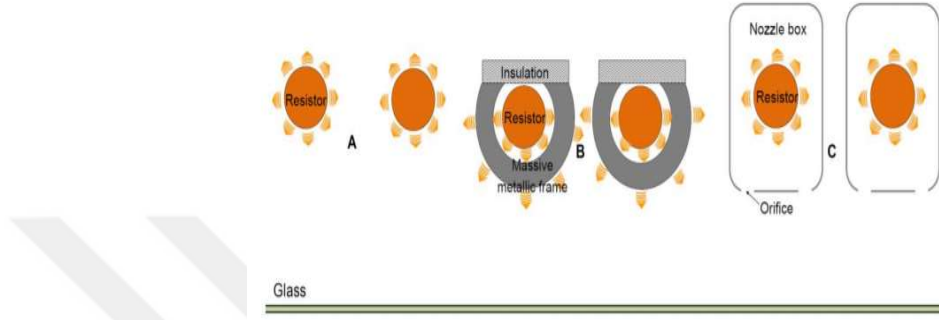
Bu bölümde deneysel prosedürlerin gerçekleştirildiği temperleme fırının özelliklerinden ve çalışma prensibinden bahsedilecektir. Öncesinde temperleme işleminin yapılabildiği değişik fırın çeşitlerine ve aralarındaki farklara genel olarak değinmek faydalı olacaktır. Günümüzde kullanılan temper fırınları, camın fırın içerisindeki doğrultusu, camın hareket şekli, ısıtma enerjisi, üst rezistansların durumu, temel ısıtma mekanizması, konveksiyon sisteminin durumu ve ısıtma bölmelerinin durumu gibi çeşitli faktörlere göre değişik sınıflandırmalara tabi tutulabilir (Rantala, 2015).

Temperleme işlemi yatay ve dikey olarak gerçekleştirilebilir. Yatay temperlemenin icat edilmesinden daha önceki dönemlerde, camlar asılı vaziyette dikey olarak temperlenmekteydi. Dikey temperleme işlemi hâlâ, her iki yüzeyi baskılı ya da kaplamalı camların veya düz olmayan camların temperlenmesinde avantajlar sunmaktadır. Yatay temperleme işlemi ise camların, genellikle seramikten yapılan dönen merdaneler üzerinde hareket ettirilmesi ile gerçekleştirilir (Rantala, 2015).

Camların hareket şekline göre temper fırınları, sürekli ve salınımlı olmak üzere ikiye ayrılır. Sürekli fırınlarda cam levhalar, fırın uzunluğu boyunca sürekli bir akış içerisinde hareket ederler. Camın ısınması için yeterince zamana sahip olması amacıyla sürekli fırınlar en az 20 m olmak üzere oldukça büyük uzunluğa sahiptir. Sürekli fırınlar, yüklü miktardaki siparişlerin karşılanması için büyük avantaj sunmaktadır fakat parti halindeki siparişler için kullanışlı değildir. Cam üreticilerinin hızla değişen üretimlerini gerçekleştirebilmeleri amacı ile 1970'li yılların ortalarında salınımlı fırınlar icat edilmiştir. Salınımlı fırınlar, camın merdaneler üzerinde ileri ve geri hareket etmesi ile ısınma süresini tamamladıkları fırınlar olarak bilinirler. Bu tip fırınlar cam üreticileri arasında çok popüler olmuştur. Günümüzde en çok tercih edilen temper fırınları yatay ve salınımlı tipte olanlardır (Rantala, 2015).

Kullanılan yakıt türüne göre temper fırınları iki şekilde olabilir; doğal gaz yanmalı ve elektrik rezistanslı. Kontrolünün kolaylığı, sıcaklık ayarlarının doğru

yapılabilmesi, fabrikada egzoz gazı çıkışına neden olmaması ve yapılan yatırımların daha rekabetçi olması gibi nedenler elektriği temper fırınlarında tercih edilen enerji biçimine dönüştürmüştür. Gazla çalışan temper fırını oranı % 5'in altındadır (Rantala, 2015).



Şekil 6.1. Temper Fırınlarında Kullanılan Farklı Rezistans Uygulamaları (Rantala, 2015, s. 19)

Temper fırınlarında, üst ısıtma rezistanslarının açık bobinli (A tipi), metal kovan tarafından çevrelenmiş kapalı bobinli (B tipi), sirkülasyonlu hava konveksiyon sistemi içerisinde açık bobinli (C tipi) olmak üzere üç farklı kullanımı vardır. Temper fırınlarında kullanılan değişik rezistans uygulamaları Şekil 6.1'de gösterilmiştir. B tipi rezistanslar, elektrik rezistans gücünün cama yayılan güçten daha fazla olduğu durumlarda ısıtma çevriminin sonunda ısıyı metal kovanda depolamak ve daha sonra depolanan ısıyı çevrim başında yeniden cama yaymak için kullanılır. Bu yöntem, fırınlarda elektrik doruk gücünü düşürmek için uygulanır zira yüksek elektrik doruk gücü birçok problemi de beraberinde getirir. Elektrik doruk gücünün yüksekliği, haddinden fazla trafo ve uzun kablolama ihtiyacı ortaya çıkardığından ilave maliyetlere neden olmaktadır. Elektrik akımının rezistanslara iletimini kontrol etmek için röle kullanılan eski teknolojilerde bu yöntem ısıtma döngüsü sırasında açma/kapama anahtarı kullanımı miktarını azalttığı için rölelerin ömrünü uzatmıştır. Modern kontrol teknolojisinde ise kullanım ömrü açık/kapalı anahtarlardan bağımsız yarı iletken siviçler kullanılmaktadır. Rezistansların temper fırınlarında kullanımının diğer bir şekli de açık bobinli ısıtmadır. En son kontrol teknolojisine sahip A tipi rezistanslar, dengeli bir fırın operasyonu sağlar ve kontrol eylemlerine metal kovandaki rezistanslardan daha hızlı tepki verir. Alt ısıtma rezistansları genellikle, kırık camlara karşı korunması için ince metalik bir muhafaza ya da ağla

çevrelenmiş açık bobinlerdir. Daha önceden ısıtılmış bobinler, ısıyı doğrudan cama veya merdanelere yayar. Aynı zamanda ısıyı havaya da transfer ederler fakat çok etkili değildir. Temper fırını uygulamalarından bir diğeri de, sirkülasyonlu hava konveksiyon sistemlerinde açık bobin rezistansların hava kanallarına ya da nozul kutularına yerleştirilmesidir. Özellikle hava kanallarına yerleştirilen rezistanslar, esas olarak önce ısıyı havaya aktarır, daha sonra ısı havadan cama aktarılır. C-tipi rezistansın yüzeyindeki hava hızı artırılabilir ve rezistansların tüm uzunluğu boyunca eşit olarak paylaşılabilir. Bu durum, hava jetlerinden cama ısı transferini yoğunlaştırır, dengeler ve rezistans sıcaklığını azaltır ki bu da daha uzun ömür sağlar. Günümüzde piyasadaki yeni fırınlarda A ve C tipi rezistanslar kullanılmaktadır. Uzun süredir yaygın olarak kullanılan B tipi rezistanslar yeni fırınlarda son birkaç yıldır kullanılmamaktadır, fakat bu tür fırınlar dünya genelinde hala yaygındır (Rantala, 2015).

Cam temperleme fırınları, ısıtmada kullanılan temel ısı transfer mekanizmasına göre ikiye ayrılır. Bunlar radyasyon veya konveksiyon ile ısı iletimi şeklindedir. Konveksiyonlu fırınlar da, kullanılan konveksiyon şekline göre sürekli akış konveksiyonlu ve sirkülasyonlu hava konveksiyonlu olmak üzere kendi içinde ikiye ayrılır. En basit temperleme fırınlarında camın ısıtılması, rezistanslar ve cam arasındaki termal radyasyon değişimine dayanır ve radyasyona ek olarak doğal konveksiyon ve merdanelerden cama temas ile ısı transferi gerçekleşir. 1980'li yılların sonunda piyasaya low-e camların girmesi, temper fırınlarında cebri konveksiyon kullanımını gerekli hale getirmiştir. Low-e kaplamalı cam yüzeyleri, rezistanslardan yayılan ısıyı % 90 oranında geri yansıtır. Camı fırın içerisinde düz tutmak için camın kaplamalı tarafının cebri konveksiyonla ısıtılması yoğunlaştırılabilir. Cebri konveksiyon genellikle, cam yüzeyine çarpan hava jetleri ile gerçekleştirilir. Günümüzde cebri konveksiyon saydam cam için bile ısı transferini yoğunlaştırmak için radyasyonla birlikte kullanılmaktadır. Bir radyasyon – konveksiyon fırınında, radyasyon açık bir şekilde ana ısı transfer mekanizmasıdır. Tipik bir radyasyon – konveksiyon fırınında konveksiyon, fırının dışındaki bir hava kompresöründen gelen basınçlı havanın borulardaki deliklerden cam yüzeye doğru üflenmesi ile gerçekleştirilir. Bu şekilde gerçekleştirilen konveksiyon sürekli akış hava konveksiyonudur, çünkü fırına üflenene aynı miktarda hava fırından dışarı üflenir (Rantala, 2015).

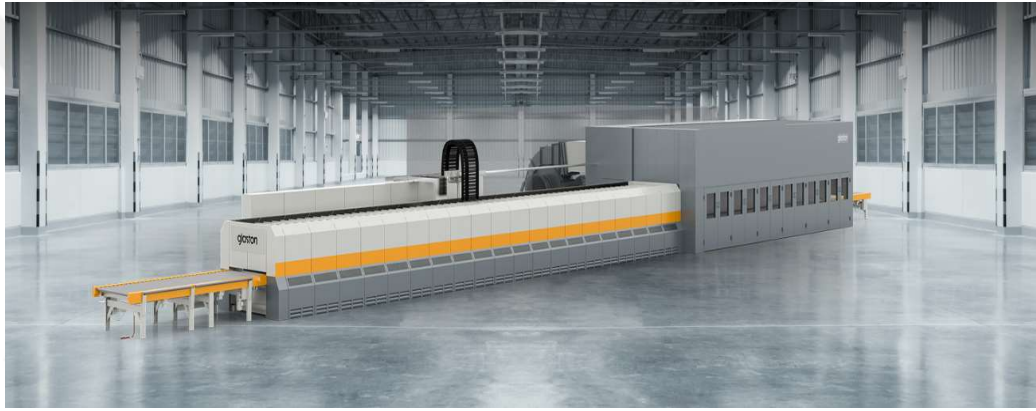
Yüksek konveksiyonlu bir fırında amaç camı radyasyon yerine mümkün olduğunca sıcak hava konveksiyonu ile ısıtmaktır. Tipik bir yüksek konveksiyonlu fırında fanlar, nozullardan camın yüzeyine doğru sıcak hava üfler ve ısı girişi, hava kanallarına ya da nozul kutularına yerleştirilen hava ısıtma rezistanslarından sağlanır. Bu tür konveksiyon, sirkülasyonlu hava konveksiyonu olarak adlandırılır; aynı hava akımı fırında da devir daim ettirilir. Özellikle low-e kaplamalı camları ısıtırken, konveksiyon ısı transfer oranı camların üst kısmında alt kısmına göre çok daha yüksek olmalıdır. Sirkülasyonlu hava konveksiyonu, genel anlamda sürekli akış hava konveksiyondan daha güçlüdür. Diğer yandan, sirkülasyonlu hava konveksiyon sistemi, sürekli akış hava konveksiyon sisteminden daha maliyetlidir. Bu gerçek göz önünde bulundurularak camın üst yüzeyinde sirkülasyonlu hava konveksiyonu, alt yüzeyinde ise sürekli akış hava konveksiyonunun kullanıldığı hibrit konveksiyon fırınları geliştirilmiştir. Böyle bir çözüm oldukça idealdir çünkü alt konveksiyon, genellikle düşük konveksiyon hızı ile başarılı olunan ısıtmanın ilk aşamalarında camları düz tutmak için iyi bir araçtır (Rantala, 2015).

Temper fırınları, ısıtma işleminin gerçekleştirildiği ısıtma odası sayısına göre tek aşamalı fırınlar ve çift aşamalı fırınlar olarak sınıflandırılabilir. Yüksek konveksiyonlu bir ön ısıtma fırınının bir radyasyon-konveksiyon fırınına eklendiği konsept, 1980'li yıllardan beri piyasadadır. İlk olarak cam, yüksek konveksiyonlu bir ısıtma odasında 400 - 500 °C dereceye kadar ısıtılır. Ardından ısıtmanın geri kalanının yapıldığı ikinci bir ısıtma odasına taşınır. İki odacıklı bir sistemde, ısıtmanın başlangıcında camın maruz kaldığı ısı şoku azaltılabilir, bu da ısıtmanın ilk aşamalarında camı düz tutmaya yardımcı olur. Bu tarz bir fırının üretim kapasitesi, tek odacıklı bir fırınkine kıyasla 1,5 - 1,7 kat daha fazladır. Bazı nadir durumlarda üç fırın bir araya getirilir ve cam, kalınlığına bağlı olarak sürekli veya salınımlı bir akışta temperlenebilir (Rantala, 2015).

6.2 Temperleme İşleminde Kullanılan Temper Fırınının Özellikleri

Deney prosedürleri, Tamglass marka, sürekli bir yatay fırında gerçekleştirilmiştir. Temper fırını, elektrik rezistanslı ve sürekli akış hava konveksiyonuna sahip bir fırındır. Soğutma iki aşamada gerçekleştirilir. Temperleme

hattının genişliği 1,2 m, uzunluğu 18 m şeklindedir. Sürekli temper fırınları, üretim proseslerinin bir hat üzerinde seri olarak, sıra ile gerçekleştirildiği sistemin bir parçasıdır. Hat üzerinde ürün akışı, robotik kollar ve konveyörler tarafından sağlanmaktadır. Temper fırını, önceki operasyonlarını tamamlanmış camların bir konveyör üzerinde hareket ettirilmesi ile beslenir ve sürekli bir ürün akışı söz konusudur. Tipik bir sürekli temper fırını Şekil 6.2'deki gibidir. Temel olarak, ısıtma işleminin gerçekleştiği fırından ve soğutma odasından oluşur. Deneysel prosedürlerin gerçekleştirildiği temper fırınına ait görseller Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Tipik Bir Sürekli Temper Fırını Hattı



Şekil 6.3. Temperleme Hattında Fırın Kısımının Genel Görünümü

Temperleme hattının fırın kısmı, 12 ayrı bölmeden oluşmaktadır. Isıtma, elektrik enerjisi kullanan rezistanslarla sağlanır. Isı iletiminin daha etkin yapılabilmesi

için rezistanslara ilave olarak fırında hava konveksiyon sistemi de mevcuttur. Fırının her bir bölümü için ayrı sıcaklık ayarı yapılarak ısıtma profili kontrol edilebilmektedir. Camın fırına girdiği ilk bölmede sıcaklık nispeten düşük olup, diğer bölmelerde kademeli olarak artırılmaktadır. Camların ani soğutma bölümüne girmesinden hemen önceki fırının son bölmelerinde, sıcaklık isteğe göre bir miktar düşürülebilmektedir. Bu durum tamamen istenen sıcaklık profili ile alakalı bir durumdur. Isıtma işleminde, baştan sona kadar artan sıcaklık değerlerini ayarlamak da mümkündür. Fırın bölmelerinin içindeki sıcaklık değişimleri, fırın içerisine yerleştirilen termokupllar aracılığı ile gözlemlenebilmektedir. Sıcaklığın ayarlanan değerin altına düşmesi durumunda termokupllar, plc modülüne sinyal göndererek rezistansların yeniden tetiklenmesini sağlar. Bu şekilde, fırın içerisinde sıcaklıklar kontrol altına alınmış olur.



Şekil 6.4. Fırının Giriş Kısmı

Konveksiyon için kullanılacak hava, fabrikanın basınçlı hava tesisatından sağlanır. 90 KW gücünde kompresör kullanılarak elde edilen 7 bar basınca sahip hava, tesisat üzerinde ikiye ayrılarak fırının üst ve alt kısımlarına dağıtılır. Fırının üst kısmında hava, önce kanallara daha sonra hava hortumları vasıtası ile nozullara taşınır. Hava kanalları ve hortumlar arasında yer alan oransal kontrol valfleri, fırın bölmelerinde bölgesel olarak hava akış kontrolü yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu eylem, valflerde yer alan klapelerin açıklığının oransal olarak ayarlanabilmesinden dolayı havanın geçeceği kesitin daraltması ya da genişletilmesi yolu ile gerçekleştirilir.

Fırının alt kısmında ise hava, yüzeyinde 1,1 mm çapında delikler bulunan üç ayrı boru grubuna dağıtılır ve havanın geçişi esnasında bu deliklerden fırının içine yayılır. Fırının içine yayılan havanın, merdaneler üzerinde ilerleyen camın alt ve üst yüzeylerine temas etmesi ısı transferinin etkinliğini artırır. Fırın sürekli akış hava konveksiyonuna sahip olduğu için verilen havaya eşit miktarda hava dışarı atılır. Havayı deşarj etmek için fırında 6 adet çıkış bacası mevcuttur.

Rezistansların fırın içerisinde yerleşimi fırının alt ve üst kısımlarında birbirinden farklıdır. Rezistanslar, sıcak hava konveksiyonunun sağlanması için fırının üst kısmında hava kanallarının içerisine konumlandırılmıştır. Bu şekilde, ısı önce havaya iletilerek ısı transferi yoğunlaştırılır. Fırının alt kısmında ise rezistanslar, konveksiyon borularının altına, fırın tabanına konumlandırılmıştır. Fırının alt kısmında rezistanslar açık bobin şeklindedir. Fırın içerisinde rezistansların sayısı ve bölmeler içerisindeki yoğunluğu fırının ilk bölmelerinde fazladır. Fırının çıkışına gittikçe rezistansların sayısı ve yoğunluğu giderek azalır. Low-e camların temperlenmesinde kaplamalı yüzeyin üste getirilmesinden dolayı, camın üst yüzeyinde yoğun bir ısı transferi istenirken alt yüzeyinde ısı transferinin dengeli bir şekilde gerçekleşmesi istenir. Bu yüzden, temper fırınında low-e camlar da kolaylıkla temperlenebilmektedir.



Şekil 6.5. Fırın Hareket Mekanizması

Fırının üzerinde durulması gereken bir diğer önemli noktası da camların fırın içerisinde ilerlemesini sağlayan hareket mekanizmasıdır. Camlar, fırın içerisinde yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik merdaneler üzerinde hareket etmektedir. Hareket,

bir AC motoruna bağlı uzun bir mil üzerindeki kayış kasnak mekanizmaları ile sağlanmaktadır. Elektrik motorunun dönme hareketinin, merdanelerin bağlı olduğu kasnaklara aktarılması ile merdanelerde dönme hareketi elde edilebilmektedir. Hız kontrolü motor sürücüsü ile sağlanır. Temperleme işleminde ani soğutmanın gerçekleştiği kısımda camların ilerleme hızı daha fazladır. Temperleme hattının quench ve cooling bölümünde camların ilerleme hızı, camların fırına giriş hızının yaklaşık 4 katıdır. Camların fırında ilerlemesi, belli bir noktaya kadar sabit hızlı bir hareketle daha sonra quench bölümünün hızına yetişmesi amacıyla hızlanan bir hareketle gerçekleştirilir. Bu şekilde bir hareket profili, çapları sabit olan merdanelere bağlı kasnakların açısal hızları değiştirilerek elde edilir. Kasnakların açısal hızlarının artması, çapları sabit olan merdanelerin yüzeyindeki çizgisel hızı artırmakta ve camların fırın içerisindeki hareketini hızlandırmaktadır. Merdane hızı ile hareketini kayış yardımıyla motora bağlı bir milden alan kasnağın çapı arasında ters orantılı bir ilişki söz konusudur. Kasnak apı düştükçe, merdane hızı artmaktadır. Fırında sabit hız bölgesinde kasnak çapları aynıdır, hızda artma gözlenen bölgede ise kasnak çapları giderek düşmektedir.

Fırında temperleme sıcaklığına getirilen camlar, ısı kaybının önüne geçmek için merdaneler üzerinde mümkün olduğunca kısa bir sürede quench bölümüne getirilir. Soğutma odasındaki merdanelerin hareketi, bir enkoder yardımıyla fırının çıkışındaki merdane hızlarından referans alan başka bir AC motoru tarafından sağlanır. Soğutma odasında merdanelerin hızı, camların fırından çıkış hızına eşittir; yani camların fırına giriş hızının yaklaşık olarak 3,5 - 4 katıdır.

Cam temperleme hattının ana bölümlerinden diğerisi soğutma odasıdır. Soğutma iki aşamalı olarak gerçekleştirilmektedir. Soğutma odası, camların yoğun bir şekilde ani soğutmaya tabi tutulduğu quench bölümünden ve ardından oda sıcaklığına getirildiği cooling bölümünden oluşur. Bu iki işlem, farklı bir odada tutulan soğutma odasına hava kanalları ile bağlı olan devir kontrollü iki ayrı fanla gerçekleştirilir. Quench bölümü için kullanılan fan 315 kW, cooling bölümü için kullanılan fan 135 kW gücüne sahiptir. Her iki fan motorunun da maksimum çalışma devri 1500 rpm'dir. Quench ve cooling bölümlerinde, hava panolarından soğutma için verilen hava basıncı fanların çalışma devirlerinin değiştirilmesi ile kontrol edilmektedir. Motor devri arttıkça hava basıncı da artmaktadır. Bir AC motoru olan fan motorunun çalışma devri,

motor sürücüsünün frekansı değiştirilerek kontrol edilmektedir. Motor frekansı ve çalışma devri arasında doğrusal bir ilişki söz konusudur. Fan odasının genel görünümü Şekil 6.6'daki gibidir.



Şekil 6.6. Fan Odasının Genel Görünümü



Şekil 6.7. Quench Bölümünün Genel Görünümü

Quench bölümü, fırından çıkan camların ani ve yoğun bir soğutma işlemine tabi tutularak şoklandığı kısımdır. Quench bölümünde soğutma, fan yardımıyla dış ortamdan alınan havanın alt ve üst hava panolarında yer alan nozullardan camın yüzeylerine üflenmesi ile sağlanır. Fandan gelen hava tek bir kanaldan quench bölgesine gelir ve daha sonra alt ve üst quench nozullarına paylaşılır. Hava kanalı ile alt ve üst nozullara giden havanın geçtiği borular arasında yer alan klape, alt ve üst nozul gruplarına giden hava debilerinin oransal olarak ayarlanmasına imkân verir. Bu

klape bir DC motor tarafından kontrol edilir. Ayrıca, quench işleminde alt ve üst nozulların camın yüzeylerine göre mesafeleri parametrik olarak ayarlanabilmektedir bu da soğutmanın şiddetinin kontrol edilmesine olanak sağlar.



Şekil 6.8. Cooling Bölümünün Genel Görünümü

Soğutma işleminin ikinci aşaması, quench bölümünde camın ani olarak soğutulmasından sonra oda sıcaklığına getirilmesidir. Bu işlem cooling bölümünde gerçekleşir. Soğutma, fandan gelen havanın alt ve üst nozul kutularına aktarılarak cam yüzeylerine üflenmesi ile gerçekleşir. Cooling bölümü quenche benzer bir mantıkla çalışır fakat arada farklar vardır. Cooling bölümünde hava, alt ve üst nozul kutularına eşit olarak paylaşılır ve hava sabit bir mesafeden üflenir.

Deney prosedürlerinin gerçekleştirileceği temper fırını incelendiğinde prosesteki değişkenlerin fırın kısmında fırın hızı, her bir fırın bölmesi için sıcaklık, konveksiyon için kullanılacak alt ve üst hava oranı, quench kısmında quench fan motoru çalışma devri, alt/üst quench hava oranı, quench mesafesi ve cooling kısmında ise cooling fan motoru çalışma devri olduğu görülmüştür.

6.3 Deney Numunelerinin Özellikleri ve Hazırlanış Süreci

Deney prosedürlerinde, 4 mm kalınlığa sahip, köşelerinde 2mm x 45°'lik pah bulunan, 460 mm x 590 mm ebatlarında, soda kireç camı bileşimine sahip fırın ön

kapak camı kullanılmıştır. Cam, temperleme işleminden önce kesme, rodajlama, baskı ve kurutma gibi bir dizi işlemden geçmektedir. Temperleme işleminde, fırında ısıtılan cam, quench bölümünde ani soğutma işlemine tabi tutulur. Temper hattından çıkan camların kalite kontrolü seri üretim şartlarında belirli aralıklarla seçilen numuneler üzerinde gerçekleştirilir. Kalite kontrol işlemleri, sekürit (parçacık sayısı) testi, kamburluk ve dalgalılık ölçümleri yapılarak gerçekleştirilir.

Beyaz eşya sektöründe temperli camlardan beklenen özellikler, beyaz eşya sektöründe ana sanayi konumunda bulunan müşteriler tarafından belirlenmektedir. Genel kabul görmüş değerler parçacık sayısı için 80 – 240 (25 cm²'de), dalgalılık için en fazla 1 mm ve kamburluk için en fazla 1 mm şeklindedir. Yapılan deneyde, camın düzlemselliğini ifade etmek için kullanılan değişkenler olan dalgalılık ve kamburluk üzerinde durulmuştur. Deney prosedürlerinde kullanılan cam Şekil 6.9'daki gibidir.



Şekil 6.9. Deney Prosedürlerinde Kullanılan Cam

6.4 Temper Fırını Proses Parametreleri

Bu çalışmada, temper proses parametrelerinin camdaki dalgalılık ve düzlemselliğe olan etkileri incelenecektir bu yüzden öncelikle temperleme işleminde

prosesi kontrol etmek için kullanılan parametreler üzerinde durulmalıdır. Deneysel prosedürlerin gerçekleşeceği temper hattının, ısıtma ve soğutma kısımları olarak ikiye ayrılması konunun anlaşılmasını kolaylaştıracaktır. Cam temperleme işleminin bütün proses parametreleri Çizelge 6.1'deki gibidir. Tabloda gösterilen parametrelerin her birinin görevi aşağıda açıklanacaktır.

Çizelge 6.1. Temper Proses Parametreleri

Cam Temperleme İşlemi Proses Parametreleri	
Isıtma Parametreleri	Soğutma Parametreleri
Fırın Hızı (mm/sn)	Quench Fanı Frekansı (Hz)
Fırın Sıcaklığı (°C)	Quench Mesafesi (mm)
Alt Hava Oranı (%)	Alt/Üst Quench Hava Ayarı (mm)
Üst Hava Oranı (%)	Cooling Fanı Frekansı (Hz)

Hatırlanacağı üzere, deney prosedürlerinin gerçekleştirildiği temperleme hattının, ısıtma işlemlerinin gerçekleştiği fırından ve soğutma işlemlerinin gerçekleştiği quench ve cooling bölümlerinden oluştuğundan bahsedilmişti. Ayrıca, sürekli temper hattı kullanıldığından dolayı camların daimi akış içerisinde yeterli sıcaklığa gelebilmesi için fırın kısmının, ilk 8'i hava konveksiyonu ile desteklenen 12 ayrı bölmeden oluştuğuna değinilmişti. Bu hatırlatmalardan sonra, ısıtma parametrelerini açıklamaya başlayabiliriz.

Fırın hızı, camların fırının giriş kısmında seramik merdaneler üzerinde ilerleme hareketini kontrol eden bir parametredir. Merdaneler hareketini, kayış – kasnak ya da zincir – dişli mekanizması yardımı ile bir AC elektrik motoruna bağlı uzun bir milden alır. Fırının giriş kısımlarında sabit olan hız, mile bağlı kasnak çaplarının giderek düşmesi ile artan hız profiline dönüşür. Quench bölümünün hızı, fırının giriş kısmındaki hızın 3,5 - 4 katıdır. Quench bölümündeki merdane hareketi her ne kadar başka bir AC motoru tarafından sağlansa da quench hızı, fırının giriş bölümündeki hızı referans alan bir enkoder tarafından otomatik olarak belirlenmektedir. Sonuç olarak, fırının hızını kontrol etmek için tek bir giriş değeri yeterlidir ki; o değer de fırının giriş kısmının hareketini sağlayan AC motorun çalışma devridir.

Fırın sıcaklığı, her bir fırın bölmesi için ayrı ayrı girilen bir parametredir. Cam temperleme işleminde oluşturulan gerilim profili seçilen fırın sıcaklığı değerine göre değişmektedir. Fırın bölmeleri için ayarlanan sıcaklıklar termokuplarla denetlenmektedir ve sıcaklık düşüşlerinde rezistanslar tekrar devreye girmektedir. Deneyin gerçekleştirileceği temper fırınında 12 ayrı bölme olduğu için 12 adet sıcaklık giriş değeri vardır.

Deney prosedürlerinde kullanılan fırın, konveksiyonlu bir fırın olduğundan dolayı fırın bölmelerine verilecek alt ve üst hava miktarları da prosesi etkileyen birer parametre değeridir. Bir kompresör yardımı ile sağlanan hava önce fırının alt ve üst kısımlarına ayrı ayrı dağıtılır ve daha sonra hava fırının üst kısmında valfler yardımı ile alt kısmında ise üzerinde üfleme delikleri olan borularla sisteme dâhil edilir. Fırında, hava konveksiyonu sadece ilk 8 fırın bölmesinde mevcuttur. Fırın bölmelerine giren alt ve üst hava miktarları her bir bölme için ayarlanabilir olduğundan, üst hava miktarı için 8 adet, alt hava miktarı için 8 adet giriş değeri bulunmaktadır.

Daha önce de belirtildiği gibi, kullanılacak temper hattında soğutma iki aşamalı olarak gerçekleştirilmektedir. Quench olarak adlandırılan ilk bölümde cam ani soğutmaya tabi tutulmaktadır ve daha sonra da cooling olarak adlandırılan ikinci bölümde cam oda sıcaklığına soğutulmaktadır. Quench ve cooling bölümlerinde soğutma, ayrı bir odada tutulan iki ayrı fanın sağlanan hava ile gerçekleşmektedir. Hava, quench ve cooling bölgelerine hava kanalları yardımı ile iletilmektedir. Soğutma için kullanılacak havanın basıncı çıkış değeri olarak ölçülemediğinden dolayı basınç, fanları hareket ettiren motorların çalışma devri ile orantılı olarak değişmektedir. Quench bölümünde tüm havanın alt ve üst hava panolarına hangi miktarda dağıtılacağını belirleyen klape bulunmaktadır. Ayrıca quench bölgesinde, alt hava panosu sabitken üst hava panosunun cama olan mesafesi değişebilmektedir. Cooling bölgesinde ise durum daha farklıdır; hava alt ve üst panolara eşit olarak dağıtılır ve panoların cama göre mesafeleri sabittir. Bu bilgilerden sonra soğutma ile ilgili proses parametrelerine göz atabiliriz.

Quench bölgesinde cama üflenen havanın çıkış basınçları ölçülemediğinden dolayı basınç, quenche hava sağlayan fanı çalıştıran AC motorunun devrine göre belirlenmektedir. Motorun çalışma devrindeki değişim ise, motor sürücüsünün

frekansının değiştirilmesi ile gerçekleştirilir. Bu yüzden cama üflenen havanın basıncını etkileyen giriş değeri fan motorunun frekansıdır.

Quench bölgesinde alt/üst hava oranı, tüm havanın hangi oranda paylaştırılacağını belirleyen parametre değeridir. Fandan tek bir kanaldan gelen havanın alt ve üst nozul gruplarına dağıtılacağı yerde bulunan klapeyin hareketi ile ayarlanır. Alt/st hava oranı klapeyi hareket ettiren lineer motorun pozisyonuna göre belirlenmektedir.

Quench kısmında üst bölmenin cama göre mesafesi ayarlanabilir olduğundan quench mesafesi de prosesi etkileyen bir parametredir.

Cooling kısmında ise tek değişken fan motorunun devridir. Quench kısmında olduğu gibi cooling kısmında da üflenen havanın basıncı cooling kısmına hava sağlayan fanın motorunun devriyle değiştirilmektedir. Cooling kısmında basıncı etkileyen parametre cooling fan motorunun frekansıdır.

6.5 Deney Tasarımı

Bu çalışmada, beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir temperli cam üretim tesisinde, cam temperleme işlemi esnasında uygulanan parametre değerlerinin temperleme işlemi sonrasında camın düzlemselliğine olan etkileri incelenecektir.

Camın düzlemselliğini etkileyen cam hataları iki Şekilde görülmektedir ki bunlar dalgalılık ve kamburluk Şeklinde adlandırılmaktadır. Dalgalılık, camın fırın içerisinde yumuşama sıcaklığının üzerine çıkmasının bir sonucu olarak merdane izlerinin yumuşamış olan camda oluşturduğu Şekilsel bozukluğu sayısal olarak ifade etmek için kullanılan bir terimdir. Kamburluk ise, ısıtmada camın alt ve üst yüzeylerinin eşit sıcaklıkta olmaması, soğutma esnasında alt ve üst yüzeyler arasında basınç dengesi kurulamaması ya da eşit sıcaklığa soğutulamaması gibi nedenlerden dolayı ortaya çıkan camın konveks ya da konkav bir hale dönüştüğü Şekilsel bozukluğu sayısal olarak ifade etmeye yarayan terimdir.

Daha önce yapılan çalışmalarda, bu hataları tamamen ortadan kaldırmak mümkün olmasa da doğru parametre seçimi ile bu sorunların büyük oranda önüne

geçilebildiği ve kabul edilebilir seviyelere getirilebildiği rapor edilmiştir. Bu yüzden bu çalışmada, seçilen parametre değerlerinin camın düzlemselliğini yakından ilgilendiren dalgalılık ve kamburluğu nasıl etkilediği incelenecektir.

Yapılan deneydeki değişkenler ısıtma parametrelerinden fırın hızı, soğutma parametrelerinden quench fanı motor frekansı ve quench mesafesi olarak belirlenmiştir. Bu parametreler dışında kalan parametreler bir değere sabitlenerek kontrollü bir deney ortamı oluşturulmuştur.

Sabit tutulan ısıtma parametreleri; fırın sıcaklığı, fırın alt hava oranı ve fırın üst hava oranı şeklindedir. Fırın sıcaklığı, her bir fırın bölmesi için ayrı ayrı ayarlandığından dolayı 12 adet fırın bölmesine 12 ayrı sıcaklık değeri girilir. Hava konveksiyonu sadece ilk 8 fırın bölümünde mevcut olduğundan dolayı alt ve üst hava oranı değeri 8 adet fırın bölmesi için yapılır. Sabit tutulan ısıtma parametreleri ve değerleri Çizelge 6.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. Deney Süresince Sabit Tutulan Isıtma Parametreleri

Sabit Tutulan Isıtma Parametreleri												
Fırın Bölmesi Numarası	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12
Fırın Sıcaklığı (°C)	635	635	640	645	655	660	665	665	660	650	645	640
Üst Hava Oranı (%)	20	20	20	20	20	20	20	20	-	-	-	-
Alt Hava Oranı (%)	50	50	50	50	50	50	50	50	-	-	-	-

Çizelge 6.3. Deney Süresince Sabit Tutulan Soğutma Parametreleri

Sabit Tutulan Soğutma Parametreleri	
Alt/Üst Quench Hava Oranı (mm)	20
Cooling Fanı Devri (Hz)	14

Sabit tutulan soğutma parametreleri; quench alt/üst hava oranı ve cooling fanı motor frekansı şeklindedir. Bu parametreler ve değerleri Çizelge 6.3’den görülebilir.

Değişken olarak belirlenen parametre değerleri, yaygın olarak kullanılan temper parametrelerinden seçilmiştir. Her bir parametre değerinden 3’er adet seçilmiştir. Diğer parametreler sabit olmak kaydı ile bu üç parametrenin birbirileri ile

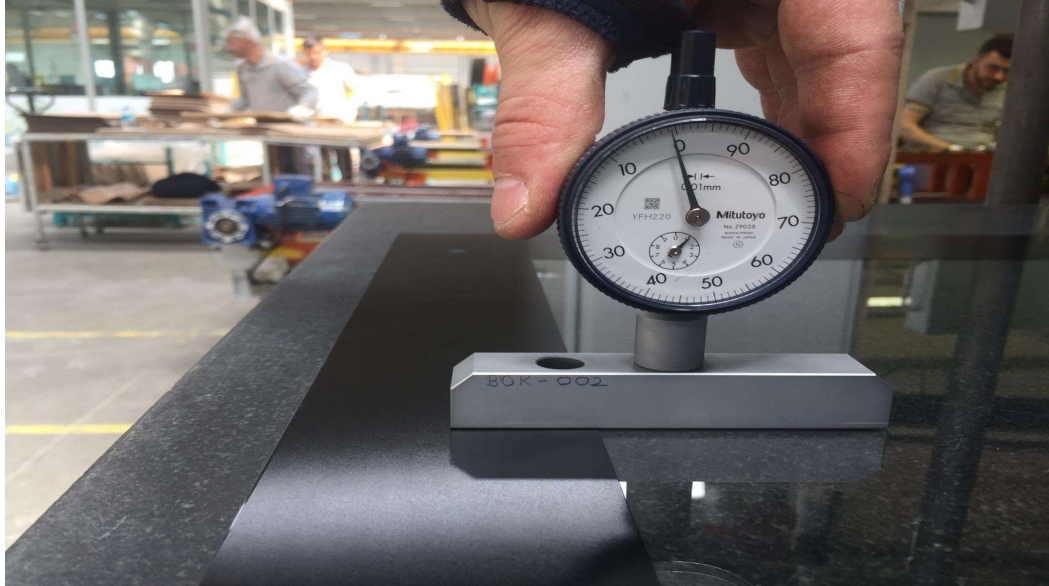
kombinasyonu deney aşamasında gerekli olan numune sayısını göstermektedir. 3 ayrı parametrenin birbirinden farklı 3 değeri için bu deneyde 27 adet numune üzerinde çalışma yapılacaktır. Deneyde kullanılacak değişken parametreler ve değerleri Çizelge 6.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.4. Deneydeki Değişken Parametreler ve Değerleri

Fırın Hızı (mm/sn)	Quench Fanı Frekansı (Hz)	Quench Mesafesi (mm)
105	30	5
106	35	5,5
107	40	6

6.6 Ölçüm Metodu

6.6.1 Dalgahlık Ölçümü



Şekil 6.10. Dalgahlık Ölçümü İçin Kullanılan Ölçü Aleti

Dalgahlık ölçümleri, üzerinde saatli bir komperatör bulunan 0,01 mm hassasiyete sahip ölçü aleti ile yapılmıştır. Ölçüm için kullanılan cihazda iki farklı gösterge bulunmaktadır. Bunlardan ilki her bir bölmesi 0,01 mm’e denk gelen aralıkları gösterir ve diğeri her bir aralığında tur sayısını gösterir. Ölçüm için kullanılacak ölçü aleti Şekil 6.10’daki gibidir.

Ölçüm, ölçme düzeneğinin camın karşılıklı iki kenarı arasında fırından çıkış yönüne paralel yönde hareket ettirilmesi ile gerçekleştirilir. Bu işlem, düzlemsel bir zemine sahip olan kalite kontrol masasında yapılır. Düzeneğin hareketi boyunca göstergesindeki değişim dikkatli bir şekilde izlenir ve göstergenin ulaştığı en yüksek değer numunenin dalgalılık değeri olarak kabul edilir. Dalgalılık ölçümü Şekil 6.11’de görüldüğü gibi gerçekleştirilir.



Şekil 6.11. Dalgalılık Ölçümünün Gösterimi

6.6.2 Kamburluk Ölçümü

Temperli camda kamburluk ölçümü hassasiyeti 0,05 mm olan dereceli filler çakısı ile yapılmaktadır. Kullanılan filler çakısı sabit bir ölçüde değildir. Uçtan başlayarak giderek kalınlaşan bir şekle sahiptir. Bu özelliği ile değişen değerlere sahip olan kamburluğun ölçülmesinde kolaylık sağlamaktadır. Filler çakısının üzerindeki herhangi bir noktada kalınlığın hangi değere sahip olduğunun anlaşılması için filler çakısı eşit aralıklara bölünmüştür ve bir aralığı 0,05 mm kalınlık değişimine denk gelmektedir. Dereceli filler çakısı Şekil 6.12’de görüldüğü gibidir.



Şekil 6.12. Kamburluk Ölçümü İçin Kullanılan Dereceli Filler Çakısı



Şekil 6.13. Kamburluk Ölçümünün Gösterimi

Kamburluk ölçümü, düzlemsel bir zemine sahip olan kalite kontrol masasında yapılır. Öncelikle temper işleminden çıkan cama gözle kontrol işlemi uygulanır. Kamburluk olduğu düşünülen kenarlar dereceli filler çakısı ile kenar uzunlukları boyunca kontrol edilirler. Kalite kontrol masasının düz zemini ile cam arasında meydana gelen en büyük boşluk kamburluk değeri olarak kabul edilir. Kamburluk ölçümü Şekil 6.13'deki gibi yapılmaktadır.

6.7 Elde Edilen Sayısal Sonuçlar

Çizelge 6.5. Deney Sonucu Elde Edilen Sayısal Veriler

Deney Sonuçları					
Deney No	Fırın Hızı (mm/sn)	Quench Fanı Frekansı (Hz)	Quench Mesafesi (mm)	Kamburluk (mm)	Dalgalılık (mm)
1	105	30	5	0,95	0,89
2	105	30	5,5	0,9	0,86
3	105	30	6	0,85	0,83
4	105	35	5	0,9	0,81
5	105	35	5,5	0,85	0,79
6	105	35	6	0,8	0,76
7	105	40	5	0,85	0,74
8	105	40	5,5	0,8	0,72
9	105	40	6	0,75	0,69
10	106	30	5	0,7	0,62
11	106	30	5,5	0,65	0,59
12	106	30	6	0,7	0,57
13	106	35	5	0,65	0,54
14	106	35	5,5	0,6	0,51
15	106	35	6	0,55	0,49
16	106	40	5	0,6	0,46
17	106	40	5,5	0,55	0,43
18	106	40	6	0,5	0,41
19	107	30	5	0,45	0,33
20	107	30	5,5	0,4	0,3
21	107	30	6	0,45	0,28
22	107	35	5	0,4	0,24
23	107	35	5,5	0,35	0,21
24	107	35	6	0,35	0,19
25	107	40	5	0,35	0,17
26	107	40	5,5	0,3	0,13
27	107	40	6	0,25	0,1

Yapılan deney sonucu elde edilen sayısal veriler tablodaki gibidir. Numaralandırılan numunelerin hangi parametre değerleri kullanılarak temperlendiğini ve bu proses parametrelerine karşılık gelen dalgalılık ve kamburluk değerleri izelge 6.5’de görülebilir.

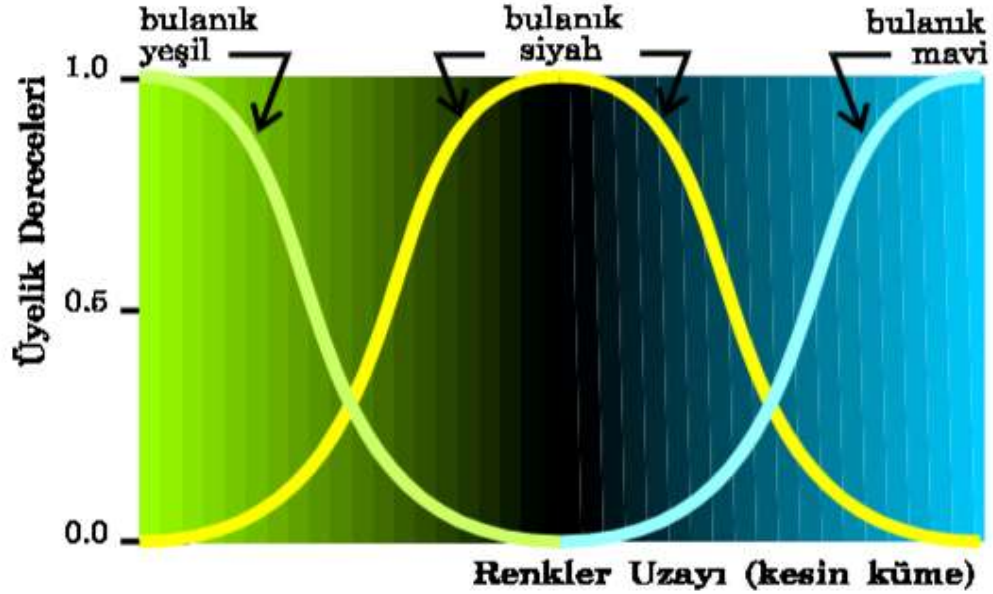
6.8 Bulanık Mantık

Bulanık mantık, klasik Aristo mantığına karşı geliştirilen ve günlük hayatta kullanılan değişkenlere üyelik dereceleri atayarak, olayların hangi oranlarda gerçekleştiğini belirleyen çoklu mantık sistemidir (<http://www.bulanikmantik.com/#section2>). Bulanık mantık kavramı ilk kez, California Berkeley Üniversitesinde görevli Lotfy A. Zadeh'in 1965 yılında yayınladığı " Fuzzy Sets " isimli makale ile ortaya çıkmıştır (Salıncı ve Rafiği, 2017). Ortaya atılan bu yeni teoriye başlangıçta birçok bilim adamı karşı çıksa da Japon araştırmacıların bu teoriye ilgileri bu alanın çok hızlı bir şekilde gelişmesine yardımcı olmuştur (Özek ve Sinecen, 2004)

Bulanık küme ve alt kümeler, bulanık mantığın temelini oluşturur. Klasik mantığa göre bir varlığın bir kümenin elemanı olması ya da olmaması kesin bir şekilde ifade edilir; varlık kümenin elemanıdır ya da değildir. Varlığın, küme ile olan üyelik ilişkisinin sayısal olarak gösterimi kümenin elemanı olduğunda "1", kümenin elemanı olmadığına ise "0" şeklindedir. Bulanık mantıkta ise varlıkların kümeye aitliği bir kesinlik belirtmez, kümeye üyelik derecelendirilebilmektedir. Varlıkların kümelerle olan üyelik ilişkisi sayısal olarak 0 ve 1 aralığında herhangi bir değer ile gösterilebilir. Bulanık mantıkta üyelik ilişkileri üyelik fonksiyonu ile ifade edilir ve $M(x)$ biçiminde ifade edilir (<http://www.bulanikmantik.com/#section2>).

Bulanık mantık ve üyelik fonksiyonlarının daha iyi anlaşılabilmesi için aşağıdaki örneğe göz atmak faydalı olacaktır. Renkler uzayında tanımlı yeşil, siyah ve mavi Şekil 6.14'te görüldüğü gibi değişik tonlara sahiptir ve dikkat edilirse bir rengin bitip diğerinin başladığı nokta kesin bir şekilde fark edilememektedir. Üç renk bölgesinde de kesin sabit bir renk tonu yoktur. Soldan sağa doğru gidildikçe yeşilin renk tonu koyulaşmakta ve şeklin ortasında siyaha dönmektedir. Şeklin ortasından sağa doğru ilerleme devam ettiğinde siyahın renk tonu açılmakta ve maviye dönmektedir. Bu yüzden bu üç renk bölgesini yeşil, siyah ve mavi olmak üzere birer bulanık küme ile temsil edilmesi uygun olacaktır. Şekil 6.14'in sol tarafında yeşilden siyaha dönen bölgede sağa doğru gidildikçe bu bölgenin yeşil bulanık kümeye ait olma derecesi azalırken, siyah bulanık kümeye ait olma derecesi artmaktadır. Şeklin sağ tarafında ise sağa doğru gidilirken bölgenin siyah bulanık kümeye ait olma derecesi

azalmakta ve mavi bulanık kümeye ait olma derecesi artmaktadır. Yeşil ve siyah tonlarının olduğu şeklin sol tarafındaki bölgenin mavi bulanık kümeye üyeliği bulunmamaktadır ve benzer şekilde mavi ve siyah tonlarının olduğu şeklin sağ tarafındaki bölgenin yeşil bulanık kümeye üyeliği bulunmamaktadır (Altaş, 1999).



Şekil 6.14. Yeşil, Siyah ve Mavi Bulanık Renk Kümeleri (Altaş, 1999)

Günlük hayatta kullanılan birçok terim bulanık bir yapıya sahiptir. Bunlar bir şeyi tanımlarken ya da açıklarken kullandığımız çok, az, biraz, fazla, çok az, çok fazla soğuk, ılık, sıcak gibi kesinlik taşımayan belirsizlik ifade eden sözel terimlerdir. Kesinlik içermeyen dilsel değişkenler insan beyninin karar verme sürecinde de etkilidir. İnsan beyni, bu dilsel değişkenleri kullanarak çıkarım yapmaktadır. Bulanık mantıkta da tıpkı insan düşünce sisteminde olduğu gibi anlamsız gibi görünen dilsel değişkenler kurallar aracılığı ile anlamlı sayısal sonuçlara dönüşmektedir ve bu yüzden bulanık mantık, klasik mantık sistemine göre daha başarılı sonuçlar vermektedir.

Bulanık mantık kullanımının birçok avantajı bulunmaktadır. Bulanık mantığın sunduğu en büyük avantaj şüphesiz ki karmaşık bir sistemi insanların kendi belirledikleri dilsel değişkenlerle açıklayabilme imkânıdır. Ayrıca bulanık mantık, gerçek dünyadaki problemleri çözebilmek için gerekli sayısal verilerin eksik olduğu durumlarda tıpkı bir insan gibi muhakeme ederek eldeki verilerle gayet makul sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte bulanık mantık, matematiksel modeli zor elde edilen,

doğrusal olmayan, karmaşık sistemlerin tanımlanmasında, kontrolünde ve tahmininde önemli derecede kolaylık sağlamaktadır. Klasik ve modern denetim teorilerinin uygulanması zor olan sistemlerin kontrolünde bulanık mantık ekonomik bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Bulanık mantık, klasik mantığı da kapsadığından dolayı klasik mantığın kullanıldığı her yerde bulanık mantığın uygulanabilir olması ise ayrı bir avantajdır.

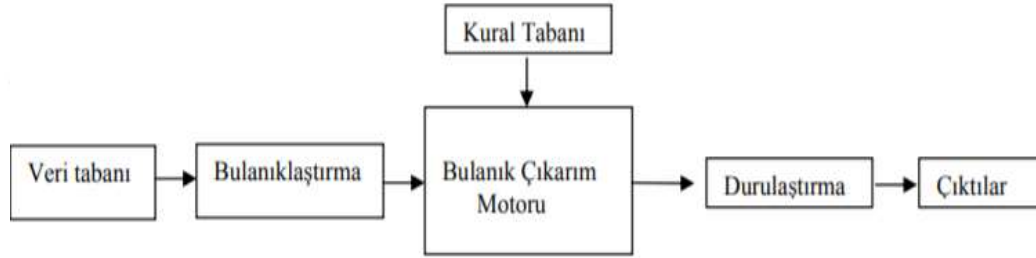
Sunduğu avantajlardan dolayı bulanık mantık kendisine birçok uygulamada yer bulmuştur. Bulanık mantığın nerelerde kullanıldığını anlamak için bulanık mantık uygulamalarının tarihsel sürecini incelemek faydalı olacaktır. 1964 yılında Zadeh'in bulanık teoriyi ortaya atmasından sonra bilim dünyasından birçok itiraz gelmiştir. Bazı bilim adamları bulanık teori ile çözülebilen her problemin olasılık teorisi ile daha iyi çözülebileceğini savunmuşlardır. Bulanık mantık için destekleyici pratik bir uygulamanın olmaması bulanık mantık teorisinin savunulmasını güçleştirmiştir. Tüm bunlardan dolayı bulanık mantık dünyaca ünlü bilimsel kuruluşlar tarafından değerli bulunmamıştır.

1970'li yılların başında bulanık teorisinin devamını sağlayan bilimsel çalışmalar ve uygulamalar yapılmıştır. Zadeh, 1973 yılında bulanık kontrolün temelini oluşturan bir başka makale yayınlamıştır. Bu yıllarda, bulanık teori ile ilgili meydana gelen en çarpıcı gelişme bulanık mantık denetleyicisinin gerçek bir sistemde kullanılmış olmasıdır. Mamdani ve Assilian, tasarladıkları bulanık denetleyiciyi buhar kazanının denetiminde kullanmışlar ve çalışmanın sonucunu bilimsel bir makale ile duyurmuşlardır. 1978 yılında Holmblad ve Ostergaard çimento üretiminde kullanılan değirmeni kendi tasarladıkları bulanık mantık denetleyicisi ile kontrol etmişlerdir. O dönemde gerçekleştirilen bu uygulamalar, matematiksel modeli bilinmeyen karmaşık süreçlerin kontrolünde bulanık mantığın çok kullanışlı olduğunu göstermiştir.

1980'li yıllarda bulanık mantık, teorik olarak hızlı bir gelişme göstermese de büyük sistemlerin kontrolünde uygulanabilir hale gelmiştir ve özellikle Japon mühendislerin ilgisi sayesinde süreç denetiminde bulanık mantık kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Japonya'nın ilk bulanık mantık denetim uygulaması 1980 yılında Sugeno tarafından gerçekleştirilmiştir. Sugeno daha sonra 1983 yılında kendi kendine park eden bir araba robotun kontrolünü bulanık mantık kullanarak gerçekleştirmiştir. Hitachi firmasından Yasunobu ve Miyomoto, 1987 yılında

tamamladıkları Sendai metrosu projesinde, trenlerin otomatik kontrolü için bulanık mantık kullanarak dünyanın en gelişmiş metro kontrol sistemini geliştirmişlerdir. Yamachi Securities firması geliştirdiği bulanık mantık denetimi ile 1988 yılında borsada kara pazar olarak adlandırılan krizi, 18 gün önceden tahmin etmiştir. Bu sistemin kullanıldığı portföydeki hisse senetlerinin değeri, Japon borsası ortalamasından % 20 - % 40 daha fazla olmuştur.

Bulanık mantık, 1990'lı yıllardan itibaren fotoğraf makinesinden uzay mekiğine kadar birçok mühendislik uygulamasında kullanılmıştır. Bulanık mantık uygulamalarında özellikle beyaz eşya, otomotiv ve elektronik aletler ilk sıralarda yer almışlardır. Bulanık mantık, günümüzde istisnasız her alanda uygulanabilen ve çok geniş çaplı kullanıma sahip kullanışlı bir yöntem dönüşmüştür. Günümüzde Matlab vb. mühendislik programlarında bulanık mantık için araç kutularının yer alması ve bulanık mantık işlemlerinin bu algoritmalar sayesinde daha kolay bir şekilde yapılması bulanık mantık kullanımını daha da yaygınlaştırmıştır.



Şekil 6.15. Bulanık Mantık Sisteminin Yapısı (Demir vd., 2004)

Bulanık mantık sisteminin temel elemanları ve işleyiş mekanizması Şekil 6.15.'teki gibidir. Bulanık mantık sistemini gerçek hayat problemlerine uygulamak için gerekli elemanlar; veri tabanı, bulanıklaştırma birimi, kural tabanı, bulanık çıkarım motoru, durulaştırma birimi ve çıktılar şeklindedir. Bu birimlerin temel görevi aşağıda açıklanacaktır.

Genel veri tabanı: çözülmek istenen problemle alakalı bütün giriş değişkenlerini ve bu değişkenlerle ilişkili bütün verileri kapsar; verilerin içeriği nicel ya da nitel olabilir. Bulanık mantık sisteminin düzgün bir şekilde çalışması öncelikle bu birimin sağlıklı bir şekilde işlemesiyle sağlanır.

Bulanıklaştırma birimi: Veri tabanı biriminden gelen dataların çıkarım motorunda işlenebilmesi için dönüşüm işlemine tabi tutulduğu birimdir. Çıkarım motoru kesin

verilerin bulanık verilere çevrilmesi ile çalışır bu yüzden giriş üyelik fonksiyonları bu birimde çalıştırılır.

Bulanık kural tabanı: Eğer (If) – o halde (then) şeklindeki temsil edilen şartlar ile and (ve) ya da or (veya) bağlaçlarının birlikte kullanılması ile oluşturulan kurallardan oluşur. Her bir kural bulanıklaştırılmış giriş verisi ile bulanıklaştırılmış çıkış verisi arasında anlamlı bir ilişki kurulmasını sağlar. Kural sayısı sistemin karmaşıklığı ile doğru orantılı olarak değişir.

Bulanık çıkarım motoru: Karar verme, bilgi işleme süreçlerinin yönetildiği birimdir. Çıkarım motoru bulanıklaştırma biriminden gelen giriş verisini, bulanık kural tabanından aldığı bilgiye göre işleyerek uygun çıkış verisinin hesaplanmasını sağlar. Çıkarım motorunun çıkış verisi de giriş verisi gibi kesin değil bulanık haldedir. Çıkarım motorunun Mamdani ve Sugeno olmak üzere kullandığı iki çeşit çıkarım yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler kısmi olarak birbirinden farklı sonuçlar verir. Literatürde tercih edilen yöntem Mamdani çıkarım metodudur.

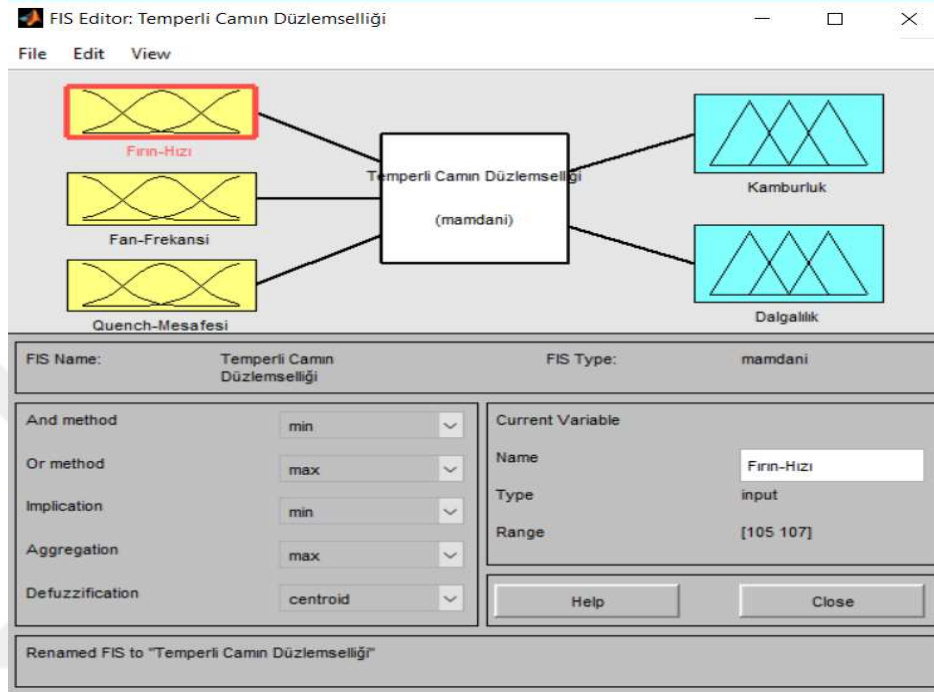
Durulaştırma birimi: Çıkarım motorunun bulanık çıkış verilerinin problemin giriş verilerinin ölçeğine uygun olarak [0,1] aralığındaki kesin verilere çevrildiği birimdir. Durulaştırma biriminde bilimsel literatürde en çok kullanılan yöntem centroid (alan merkezi) metodudur.

Çıkış: Durulaştırma biriminde kesin verilere çevrilen bütün çıktı değerleridir. Bulanık sistemin, probleme getirdiği çözümü ifade eder.

6.9 Bulanık Mantık Temelli Model Oluşturma

Temper parametrelerinin düz camın düzlemselliğe etkilerinin bulanık mantık kullanılarak analiz edilebilmesi için gerekli olan bir bulanık mantık modeli oluşturulmasıdır. Bu çalışmada problem, “Matlab” paket programının “Fuzzy Logic” araç kutusu kullanılarak modellenmiştir. Problemin matematiksel bir modelini oluşturmadan bulanık mantık modellemesi ile giriş değerlerine karşılık gelen deneylerden elde edilen sonuç değerlerinin benzetimi yapılmıştır. Deney tasarımının fırın hızı, quench fanı frekansı ve quench mesafesi parametrelerine ait üçer adet değerle yapıldığından bahsedilmiştir. Sistem, her biri ayrı bir giriş parametresini temsil

etmek üzere 3 farklı giriş ve 2 farklı çıkıştan oluşmaktadır. Çıkış parametreleri deneysel yöntemden elde edilen kamburluk ve dalgalılıktır. Temperli camın düzlemselliğini tahmin etmek için oluşturulan model Şekil 6.16'daki gibidir.

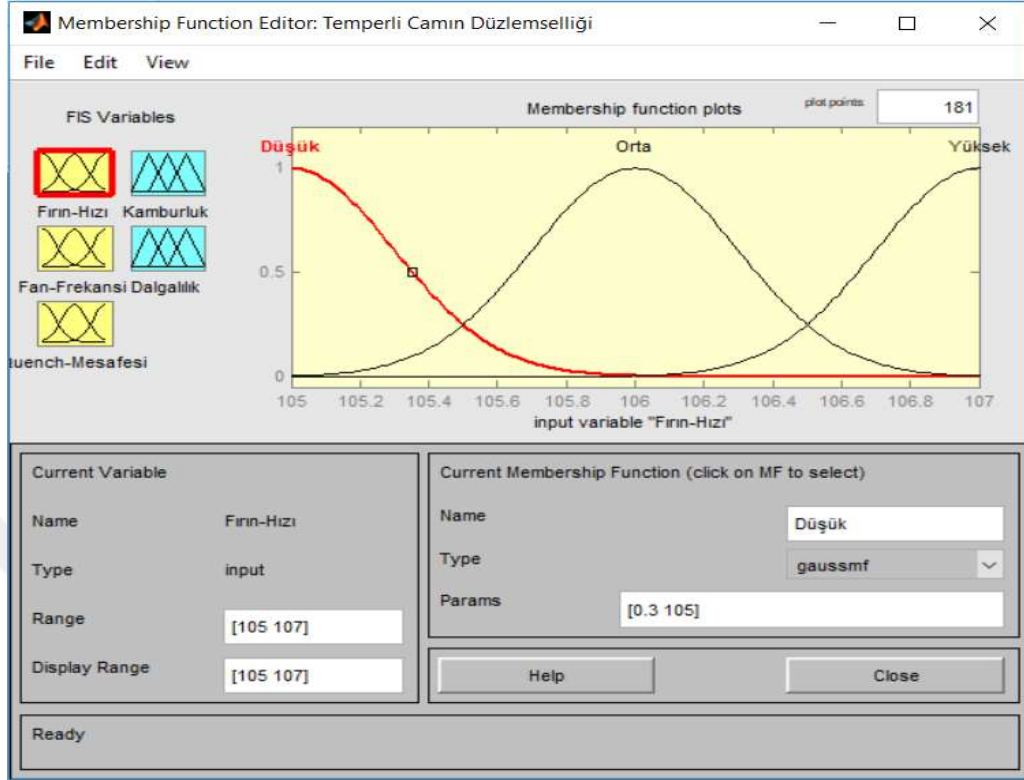


Şekil 6.16. Temperli Camın Düzlemselliğini Tahmin Etmek İçin Oluşturulan Bulanık Mantık Modeli

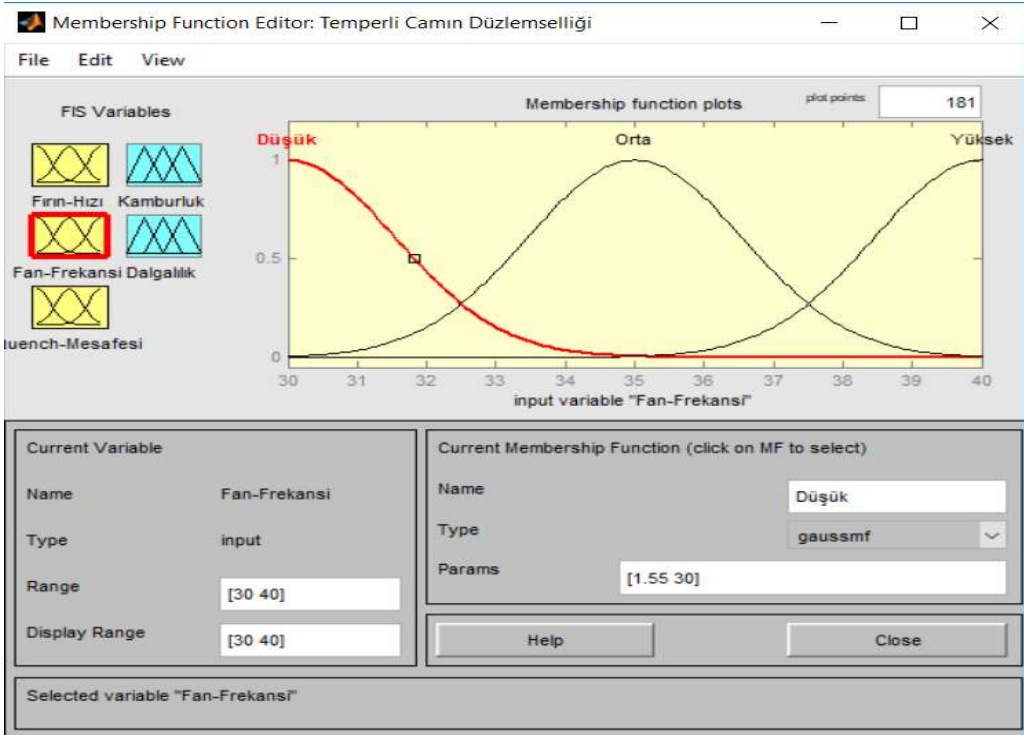
Çizelge 6.6. Proses Parametrelerini Tanımlamak İçin Kullanılan Dilsel Değişkenler

Dilsel Değişkenler	Fırın Hızı (mm/sn)	Quench Fanı Devri (Hz)	Quench Mesafesi (mm)
Düşük	105	30	5
Orta	106	35	5,5
Yüksek	107	40	6

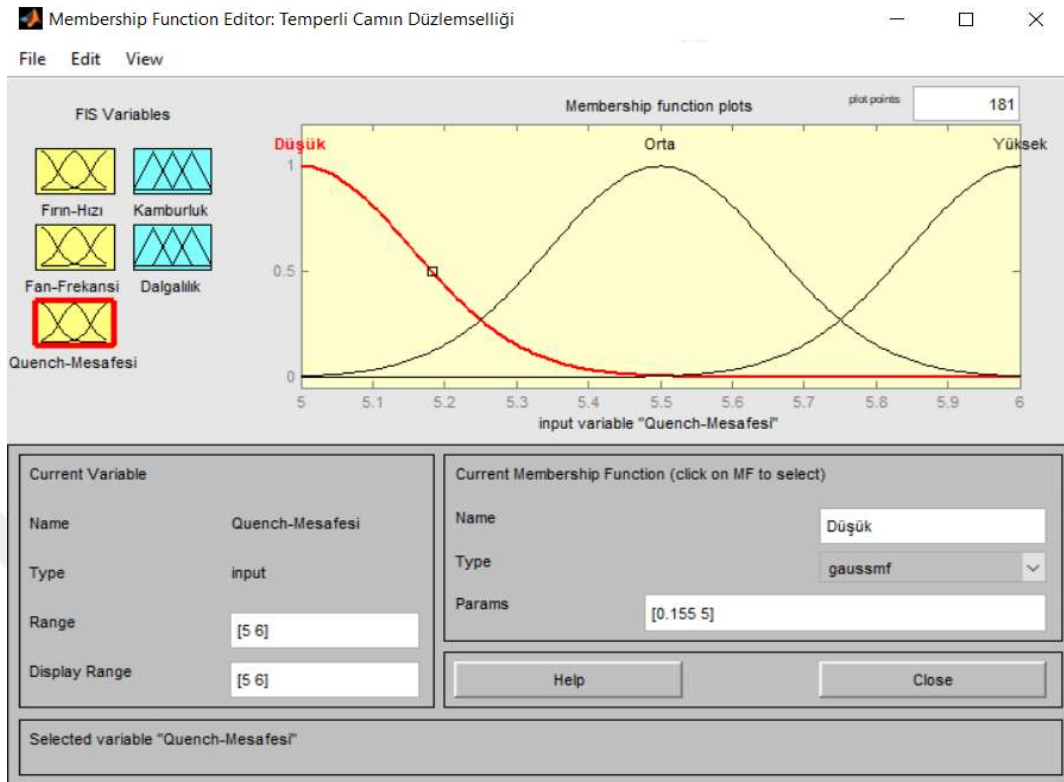
Deney prosedürlerinde her bir parametre değeri için üç farklı giriş değeri seçilmişti. Her bir parametre için seçilen giriş değerleri bulanık mantık sistemine uygun olması için dilsel değişkenlerle tanımlanarak üç farklı seviyeye ayrılmıştır. Parametre değerleri için belirlenen dilsel değişkenler Çizelge 6.6'daki gibidir. Parametre değerleri için belirlenen dilsel değişkenlerin her biri bir seviyeyi temsil etmek üzere parametre değerleri için üyelik fonksiyonları oluşturulmuştur. Üyelik fonksiyonları için gauss tipi üyelik fonksiyonları seçilmiştir. Her bir parametre için oluşturulan üyelik fonksiyonları Şekil 6.17, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da gösterilmiştir.



Şekil 6.17. Fırın Hızı Üyelik Fonksiyonları



Şekil 6.18. Quench Fanı Frekansı Üyelik Fonksiyonları



Şekil 6.19. Quench Mesafesi Üyelik Fonksiyonları

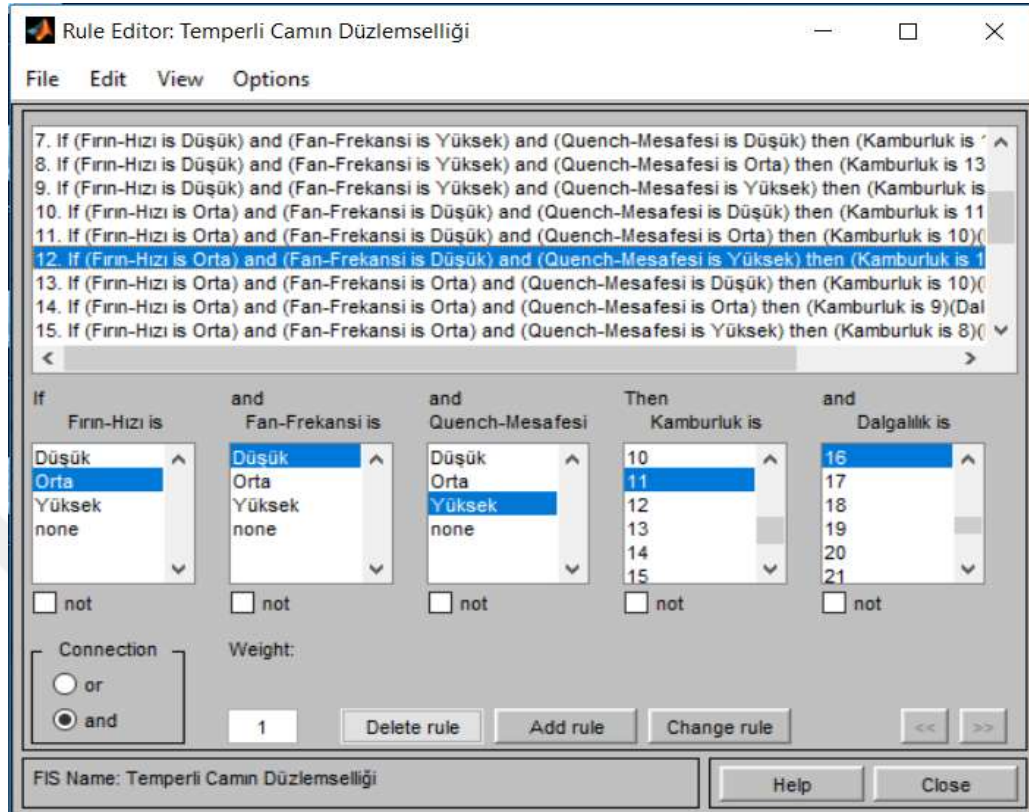
Çıkış parametreleri için üyelik fonksiyonları, deneyde kullanılan giriş verilerine karşılık gelen çıkış verilerini tutturmak amacı ile deneme yanılma yöntemi ile oluşturulmuştur. Öncelikle üyelik fonksiyonları, birbirinden farklı her çıkış verisi değerine bir adet denk gelecek şekilde rastgele yerleştirilmiştir. Daha sonra kural tabanı oluşturulmuş ve her bir deney numarası için sonuçlar tek tek girilmiş ve üyelik fonksiyonları deneme yanılma yapılarak deneyin çıktıları ile uyumlu hale getirilmiştir. Kamburluk çıktısı için birbirinden farklı 15 üyelik fonksiyonu, dalgalılık için birbirinden farklı 27 üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Fonksiyonların numaralandırılması, ilk fonksiyonun en düşük çıkış değerine karşılık geldiği şekilde yapılmıştır. Fonksiyon numaraları ile birlikte karşılık geldiği sayısal değer de artmaktadır. Deneyin benzetimini yapmak için oluşturulan kural tablosu Çizelge 6.7'deki gibidir. Kuralların program içerisine hangi mantıkla ilave edildiğini göstermek için örnek olarak ilk satırın kuralının yazılması gerekirse:

1) Eğer fırın hızı düşük, quench fan devri düşük ve quench mesafesi düşük olursa o halde kamburluk fonksiyon numarası 15 ve dalgalılık fonksiyon numarası 27'dir şeklinde yazılır.

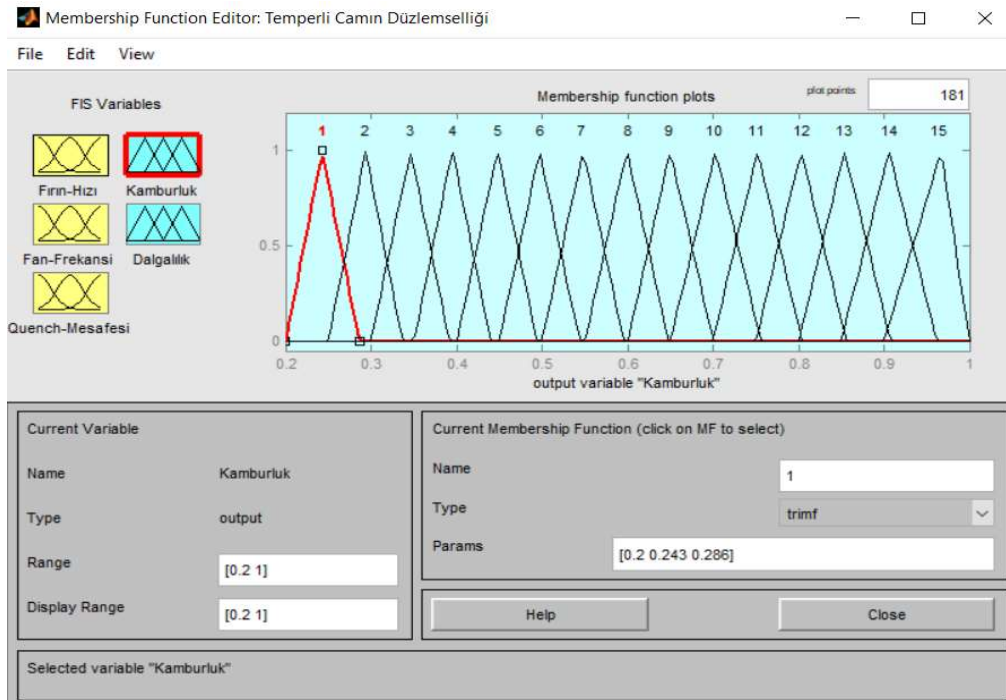
Çizelge 6.7. Problemin Çözümüne Yönelik Hazırlanan Bulanık Kural Tablosu

Bulanık Kural Tablosu					
Deney Numarası	Fırın Hızı	Quench Fan Devri	Quench Mesafesi	Kamburluk Fonksiyon No	Dalgalılık Fonksiyon No
1	Düşük	Düşük	Düşük	15	27
2	Düşük	Düşük	Orta	14	26
3	Düşük	Düşük	Yüksek	13	25
4	Düşük	Orta	Düşük	14	24
5	Düşük	Orta	Orta	13	23
6	Düşük	Orta	Yüksek	12	22
7	Düşük	Yüksek	Düşük	13	21
8	Düşük	Yüksek	Orta	12	20
9	Düşük	Yüksek	Yüksek	11	19
10	Orta	Düşük	Düşük	10	18
11	Orta	Düşük	Orta	9	17
12	Orta	Düşük	Yüksek	10	16
13	Orta	Orta	Düşük	9	15
14	Orta	Orta	Orta	8	14
15	Orta	Orta	Yüksek	7	13
16	Orta	Yüksek	Düşük	8	12
17	Orta	Yüksek	Orta	7	11
18	Orta	Yüksek	Yüksek	6	10
19	Yüksek	Düşük	Düşük	5	9
20	Yüksek	Düşük	Orta	4	8
21	Yüksek	Düşük	Yüksek	5	7
22	Yüksek	Orta	Düşük	4	6
23	Yüksek	Orta	Orta	3	5
24	Yüksek	Orta	Yüksek	3	4
25	Yüksek	Yüksek	Düşük	3	3
26	Yüksek	Yüksek	Orta	2	2
27	Yüksek	Yüksek	Yüksek	1	1

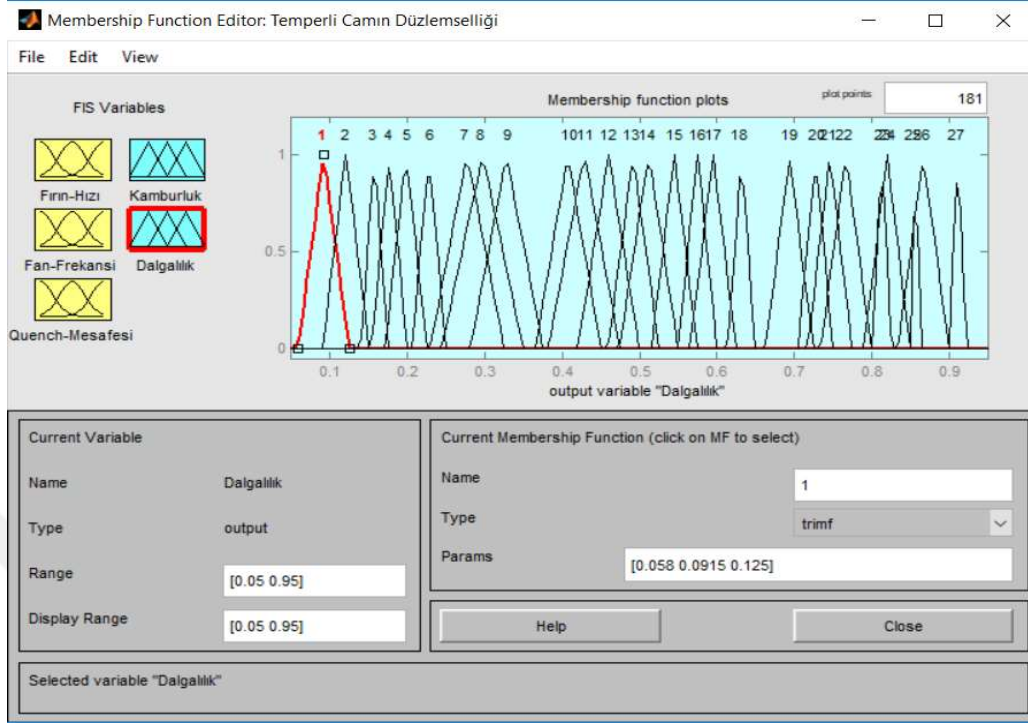
Bulanık kurallar programa Şekil 6.20'deki gibi eklenmiştir. Kural sayısı arttıkça modelin hassasiyeti artmaktadır. Ayrıca deneme yanılma yöntemi ile kamburluk ve dalgalılık için oluşturulan üyelik fonksiyonları Şekil 6.21 ve 6.22'de gösterilmiştir. Kamburluk ve dalgalılık için üyelik fonksiyonları, Şekil 6.23'deki komutlar kullanılarak deneydeki giriş çıkış verileri elde edilene kadar değiştirilmiş ve en son halini almıştır. Modeli doğrulamak için deneyin bütün giriş verileri tek tek girilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.8'de gösterilmiştir.



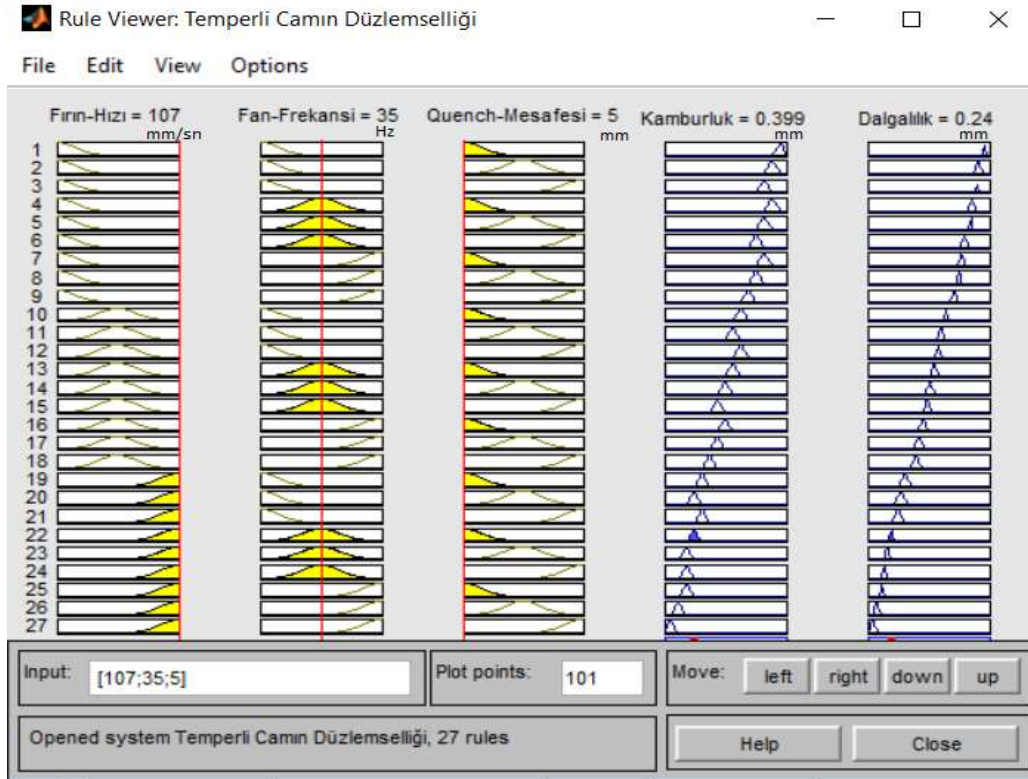
Şekil 6.20. Bulanık Kuralların Programa Eklenmesinin Gösterimi



Şekil 6.21. Kamburluk Üyelik Fonksiyonları



Şekil 6.22. Dalgalık Üyelik Fonksiyonları



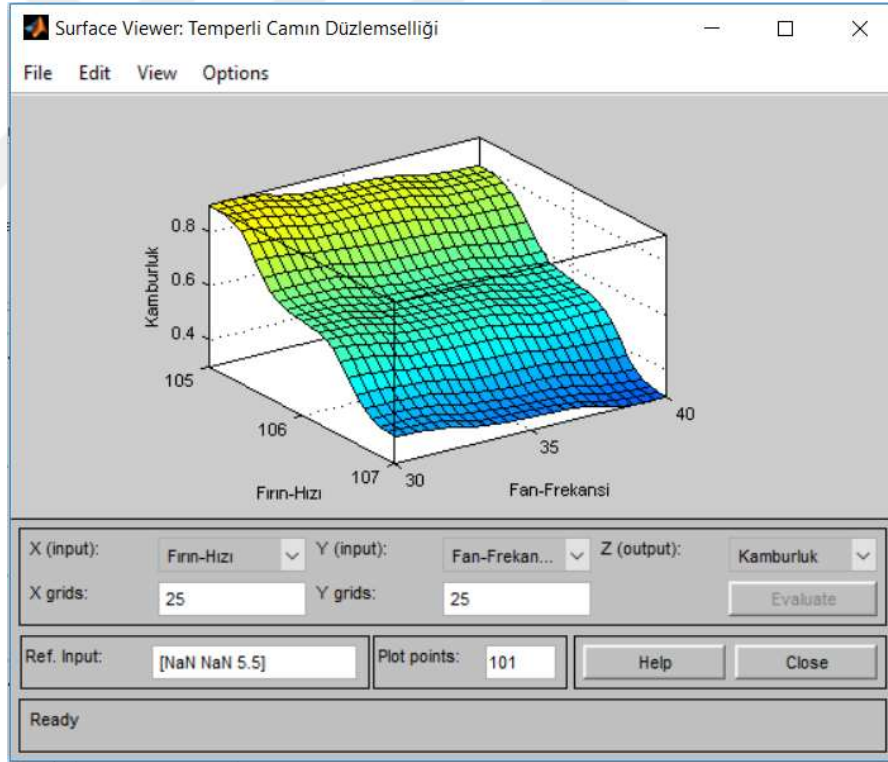
Şekil 6.23. Temperli Camın Düzlemselliğinin Tahmini İçin Bulanık Çıkarım Sistemi

Çizelge 6.8. Model Doğrulama Sonuçları

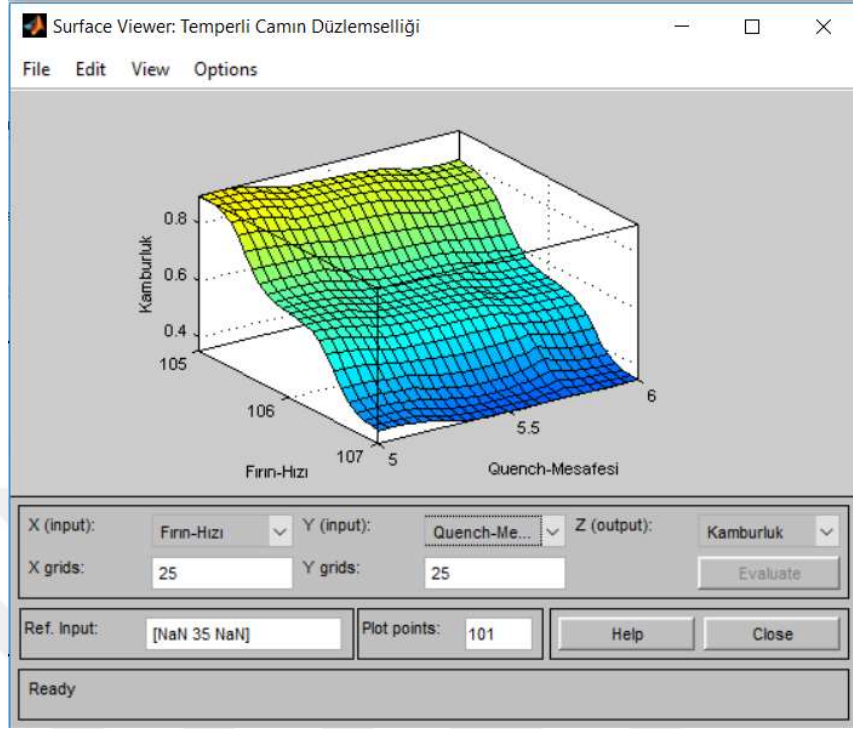
Deney Parametreleri				Kamburluk			Dalgalık		
Den. No	Fırın Hızı (mm/sn)	Fan Devri (Hz)	Quench Mesafesi (mm)	Ölçülen (mm)	Fuzzy Logic (mm)	Fark (mm)	Ölçülen (mm)	Fuzzy Logic (mm)	Fark (mm)
1	105	30	5	0,95	0,95	0	0,89	0,89	0
2	105	30	5,5	0,9	0,9	0	0,86	0,86	0
3	105	30	6	0,85	0,85	0	0,83	0,83	0
4	105	35	5	0,9	0,9	0	0,81	0,81	0
5	105	35	5,5	0,85	0,849	0,001	0,79	0,79	0
6	105	35	6	0,8	0,8	0	0,76	0,76	0
7	105	40	5	0,85	0,851	0,001	0,74	0,74	0
8	105	40	5,5	0,8	0,8	0	0,72	0,72	0
9	105	40	6	0,75	0,75	0	0,69	0,69	0
10	106	30	5	0,7	0,7	0	0,62	0,62	0
11	106	30	5,5	0,65	0,65	0	0,59	0,59	0
12	106	30	6	0,7	0,699	0,001	0,57	0,57	0
13	106	35	5	0,65	0,649	0,001	0,54	0,54	0
14	106	35	5,5	0,6	0,599	0,001	0,51	0,51	0
15	106	35	6	0,55	0,551	0,001	0,49	0,49	0
16	106	40	5	0,6	0,6	0	0,46	0,46	0
17	106	40	5,5	0,55	0,55	0	0,43	0,43	0
18	106	40	6	0,5	0,5	0	0,41	0,41	0
19	107	30	5	0,45	0,45	0	0,33	0,33	0
20	107	30	5,5	0,4	0,4	0	0,3	0,3	0
21	107	30	6	0,45	0,45	0	0,28	0,28	0
22	107	35	5	0,4	0,399	0,001	0,24	0,24	0
23	107	35	5,5	0,35	0,352	0,002	0,21	0,21	0
24	107	35	6	0,35	0,352	0,002	0,19	0,19	0
25	107	40	5	0,35	0,35	0	0,17	0,17	0
26	107	40	5,5	0,3	0,3	0	0,13	0,13	0
27	107	40	6	0,25	0,249	0,001	0,1	0,1	0

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

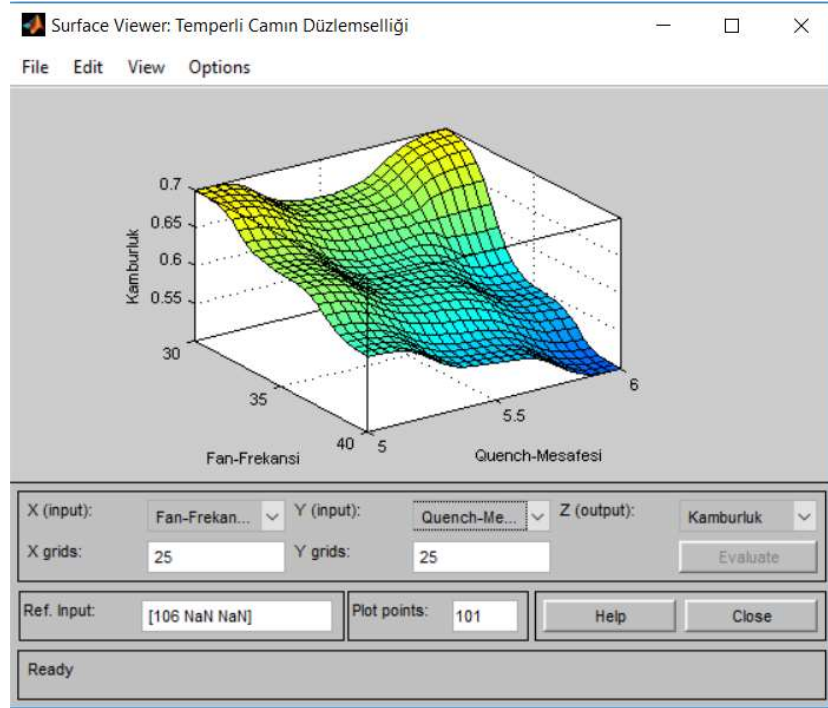
Beyaz eşya sektörüne yönelik gerçekleştirilen temperli düz cam üretiminde temper proses parametrelerinin camın düzlemselliğine etkilerinin incelendiği bu çalışmada camın düzlemselliğinin anlık olarak tahmin edildiği bir bulanık mantık sistemi tasarlanmıştır. Bu çalışmanın amacı, fırın hızı, quench fanı devri ve quench mesafesi değişkenlerine bağlı olarak camın düzlemselliğini tanımlamakta kullanılan iki ayrı değişken olan kamburluk ve dalgalılığın izlenmesi ve tahminini sağlayan bir bulanık mantık sisteminin uygulanmasıdır. Oluşturulan model ve deneyin uyumluluğu Çizelge 6.8’de kontrol edilmiş ve doğrulanmıştır. Giriş değişkenleri ve çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiyi gösteren üç boyutlu yüzey modelleri Şekil 7.1, Şekil 7.2, Şekil 7.3, Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6’da verilmiştir.



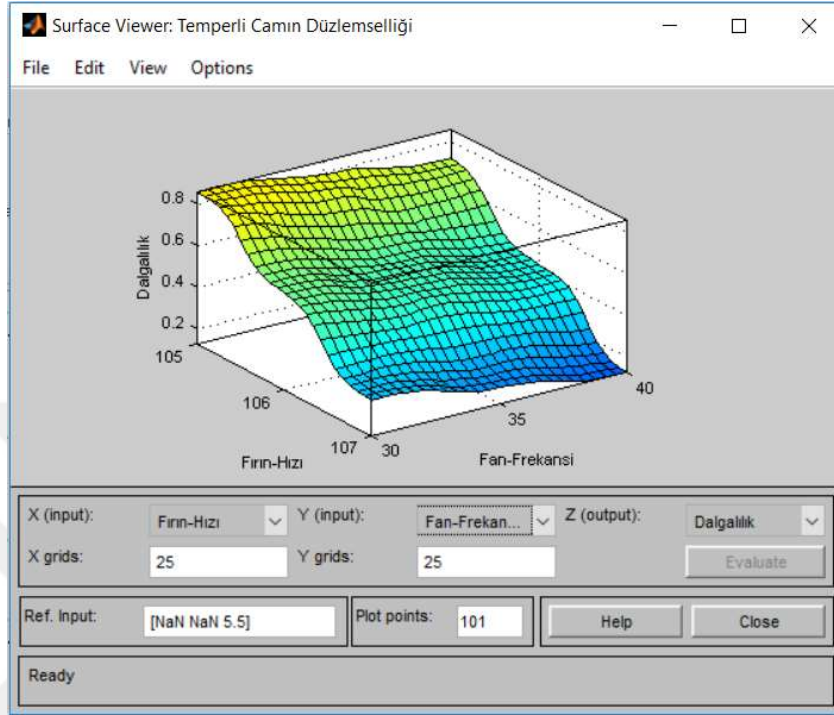
Şekil 7.1. Camın Kamburluğunun Fırın Hızı ve Fan Frekansına Göre Değişimi



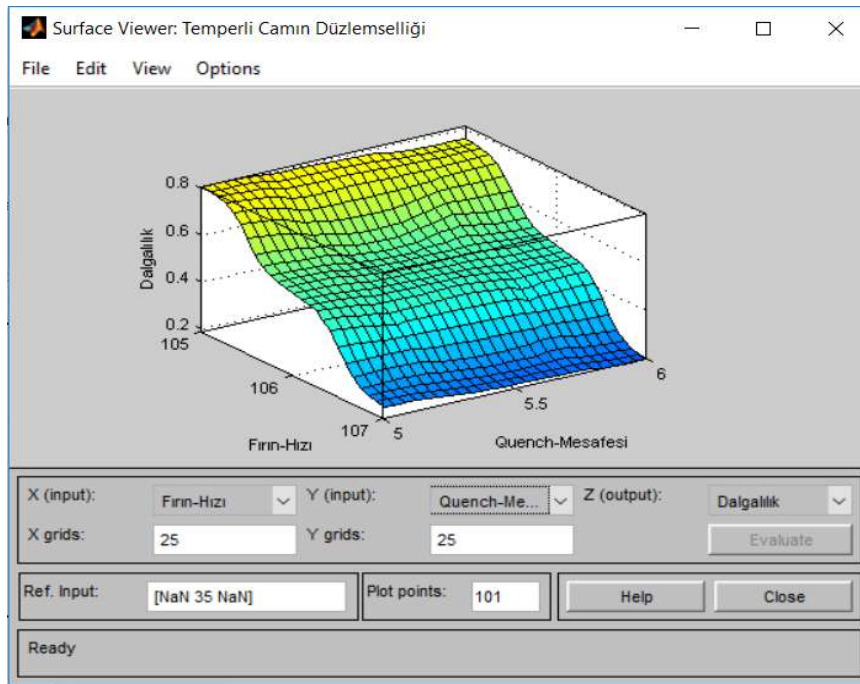
Şekil 7.2. Camın Kamburluğunun Fırın Hızı ve Quench Mesafesine Göre Değişimi



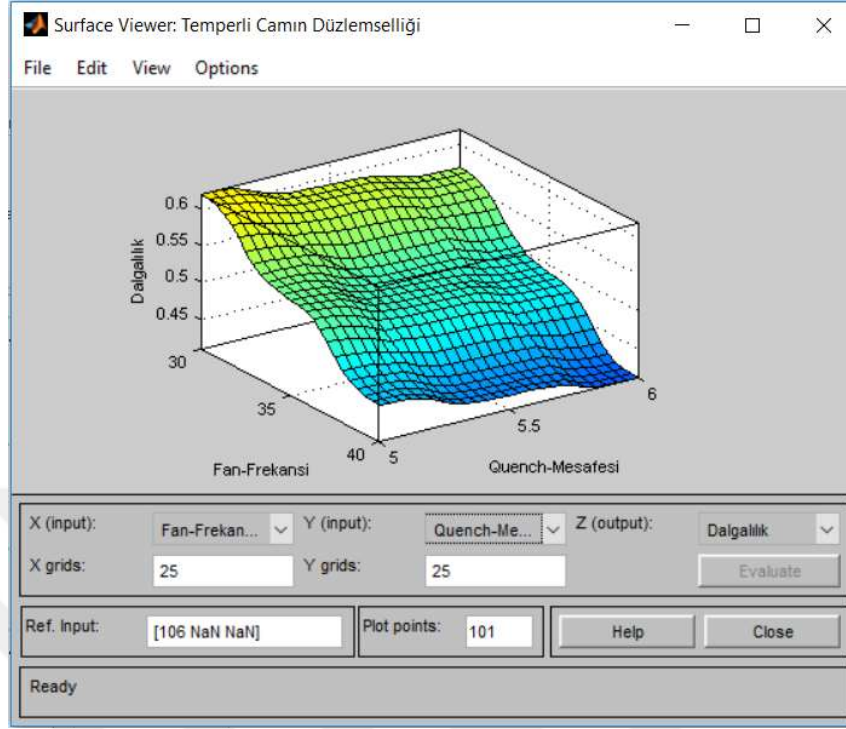
Şekil 7.3. Camın Kamburluğunun Fan Frekansı ve Quench Mesafesine Göre Değişimi



Şekil 7.4. Camın Dalgalılığının Fırın Hızı ve Fan Frekansına Göre Değişimi



Şekil 7.5. Camın Dalgalılığının Fırın Hızı ve Quench Mesafesine Göre Değişimi



Şekil 7.6. Camın Dalgallılığının Fan Frekansı ve Quench Mesafesine Göre Değişimi

Şekil 7.1, Şekil 7.2 ve Şekil 7.3 incelendiğinde arada bazı istisnalar olmak üzere fırın hızı, quench fanı frekansı ve quench mesafesi değerlerinin artması ile camın kamburluğunun değerinin sayısal olarak düştüğü görülmüştür. Camın kamburluğu üzerinde en çok değişime sebep olan ve dolayısı ile kamburluğu etkileyen en önemli parametrenin fırın hızı olduğu açık bir şekilde görülebilmektedir.

En iyi cam kamburluğu değeri, fırın hızı 107 mm/sn, quench fanı frekansı 40 Hz ve quench mesafesi 6 mm iken elde edilmiştir. Cam kamburluğunun en yüksek değerinde olduğu parametre değerleri ise fırın hızı 105 mm/sn, quench fanı frekansı 30 Hz ve quench mesafesi 5 mm şeklindedir.

Temper parametrelerinin camın dalgallılığı üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesi için Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6 incelenmiştir. Genel olarak fırın hızı, quench fanı frekansı ve quench mesafesinin artışı ile camın dalgallılığının sayısal değerinin azaldığı gözlenmiştir. Kamburlukta olduğu gibi camın dalgallılığını etkileyen en önemli parametrenin fırın hızı olduğu belirlenmiştir.

Camın dalgalılığının en düşük değere sahip olduğu parametre değerleri fırın hızı 107 mm/sn, quench fanı frekansı 40 Hz ve quench mesafesi 6 mm şeklindedir. En yüksek dalgalılık değeri, fırın hızı 105 mm/sn, quench fanı frekansı 30 Hz ve quench mesafesi 5 mm şeklindedir.

Görüldüğü gibi giriş parametrelerinin dalgalılık ve kamburluk üzerinde meydana getirdiği değişim miktarları her ne kadar birbirinden farklı olsa da giriş parametreleri bu iki çıkış değişkeni üzerinde benzer özellikler göstermektedir. Her iki çıkış değişkeni için de en iyi sonuçlar deney için seçilen değerlerden en yüksekleri kullanıldığında elde edilmektedir. Dalgalılık ve kamburluk beraber değerlendirildiğinde deneyde kullanılan verilerle yakalanan temperli cam için en iyi düzlemsellik değeri fırın hızı 107 mm/sn, quench fanı frekansı 40 Hz ve quench mesafesi 6 mm olduğunda elde edilmektedir.

Oluşturulan bulanık mantık tabanlı modelin sunduğu en büyük avantaj, deneyde kullanılmayan veriler için de uygun sonuçlar üretmesidir. Deneyin yapıldığı her bir parametrenin değer aralığında olmak üzere ondalıklı sayılar da dâhil olmak üzere girilen bütün üçlü giriş kombinasyonu değerine karşılık gelen sonuç değerleri açık bir şekilde mevcuttur. Çizelge 7.1’de deneyde parametre değeri olarak kullanılmamış ara değerlere karşılık gelen kamburluk ve dalgalılık tahminleri temsili olarak gösterilmiştir. Tahmin sistemi, deneyde kullanılan parametrelerin değer aralığında camın düzlemselliğinin giriş değişkenlerine göre değişiminin anlık olarak izlenmesini ve prosesle ilgili veri tabanı oluşturulmasını mümkün kılar.

Çizelge 7.1. Bulanık Mantık Tabanlı Tahmin Modelinin Öngördüğü Bazı Sonuçlar

Fırın Hızı (mm/sn)	Quench Fanı Frekansı (Hz)	Quench Mesafesi (mm)	Kamburluk (mm)	Dalgalılık (mm)
105,5	32,5	5,25	0,776	0,686
105,5	32,5	5,75	0,73	0,674
105,5	37,5	5,25	0,731	0,595
105,5	37,5	5,75	0,68	0,592
106,5	32,5	5,25	0,528	0,41
106,5	32,5	5,75	0,529	0,385
106,5	37,5	5,25	0,476	0,34
106,5	37,5	5,75	0,424	0,311

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Beyaz eşya sektörü için imal edilen temperli düz camların düzlemselliğine etki eden temper parametrelerinin etkilerinin incelendiği bu çalışmada, öncelikle camla ilgili genel kavramlara yer verilmiş, camın tarihsel gelişim süreci, oksit camların yapısı ve kimyasal bileşimine göre türleri açıklanmış ve ayrıca camlara ait bazı özellikler incelenmiştir. Daha sonra temperleme konusunun daha iyi anlaşılabilmesi için camları güçlendirme yöntemlerine değinilmiş ve temperleme olarak bilinen ısı güçlendirme tekniği detaylı bir şekilde incelenmiş ve günümüzde kullanılan cam temperleme sistemleri hakkında bilgi verilmiştir.

Bu çalışmanın amacı ısı bir işlem olan temperli düz cam üretiminde karşılaşılan düzlemsellik hatalarının parametre seçimi ile nasıl değiştiğinin analizini yapmaktır. 4 mm kalınlığında standart beyaz eşya camının temper işleminde girişi yapılan temper proses parametrelerine verdiği tepkileri ölçmek üzere bir deney tasarımı yapılmıştır. Problemin çözümüne yönelik hazırlanan deney düzeneğinin ve alt sistemlerinin genel çalışma prensibi anlatılmış ve deneyde temper parametrelerinin nasıl kullanılacağı açıklanmıştır. Deneyi yapılan numunelerin ölçüm yöntemlerinin gösterimi yapılmış ve açıklanmıştır.

Gerçek hayat şartlarında elde edilen deneyin bulanık mantık modellemesi ile simüle edilmesine karar verilmiştir. Bulanık mantık, matematiksel modeli oluşturulamayan ya da oluşturulmasının zor olduğu sistemlerde başarılı sonuçlar verdiği için dolayı deneyin modellemesi yapılmış ve modelin deneyle uyumu doğrulanmıştır. Doğrulama işleminden sonra Matlab Fuzzy Logic araç kutusu kullanılarak oluşturulan yüzey modellerinden faydalanılmış ve en iyi cam düzlemselliğinin seçilen parametre değerlerinden en yüksek olanların kullanılması ile elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bulanık mantık modelinin, deneyi yapılmamış veriler için ayrıca bir tahmin sistemi olarak kullanılabilir olması ileride yapılacak çalışmaların daha geniş bir aralıkta yapılması durumunda giriş verilerine karşılık gelen sistem tepkisini önceden tahmin etmek mümkün hale gelebilir. Bu durum üretimde uygun ürün kalitesinin yakalanması için deneme yanılmayı azaltacağından dolayı işletme ekonomisi üzerinde olumlu etkileri olacaktır.

9. KAYNAKLAR

- Abbott M ve Madocks J (2001) “Roller Wave Distortion – Definition, Causes and a Novel Approach to Accurate, On-line Measurement”, Glass Processing Days Proceedings: 226-230.
- Altaş İH (1999) “Bulanık Mantık: Bulanıklık Kavramı”, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, (62): 80 - 85.
- Amin AE (2013) Fluid Jet Polishing of Glass Materials, MSc Thesis, Blekinge Institute of Technology School of Engineering, Karlskrona, Sweden.
- Ankara Sanayi Odası (2013) Cam ve Cam Ürünleri Sektörü, <http://www.aso.org.tr/wp-content/uploads/2017/09/12.pdf> , 18 Mart 2019.
- Aronen A ve Karvinen R (2009) “Explanation for Edge Bending of Glass in Tempering Furnace”, Proceedings of Glass Performance Days: 575-579.
- Askeland DR, Fulay PP ve Bhattacharya DK (2010) Essentials of Materials Science and Engineering, Second Edition, Cengage Learning, Stamford.
- Aslan T (2016) “Anadolu Coğrafyasında Bronz Çağ’dan Osmanlı’ya Farklı Kültür ve Medeniyetlere Ait Cam Üretimlerin Gelişimi Üzerine Bir İnceleme”, Uluslararası Disiplinlerarası ve Kültürlerarası Sanat, 1(1): 1-19.
- Bartoe RD (2001) “The Dynamics of Ceramic Rollers And Operating and Maintenance Practices to Produce Quality Tempered Glass”, Glass Processing Days Proceedings: 250-254.
- Britton MG (1981) “Glass as an Engineering Material. I. The Nature of Glass”, Physics in Technology, 12(5): 187 - 195.
- Callister WD (2001) Fundamentals of Materials Science and Engineering, Fifth Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Cardarelli F (2017) Materials Handbook: A Concise Desktop Reference, Third Edition, Springer, London.
- Carter CB ve Norton MG (2007) Ceramic Materials: Science and Engineering, Springer-Verlag, New York.
- Clark DE ve Zotos BK (1992) Corrosion of Glass, Ceramics and Ceramic Superconductors: Principles, Testing, Characterization and Applications, Noyes Publications, New Jersey.
- Çekli C (2005) Sodyum-Potasyum Mikası ve Florapatit İçeren İşlenebilir Cam Seramiklerin Kristalizasyon Davranışları, İşlenebilirlik Özellikleri ve

Biyoaktivite Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Demir F, Gencoğlu M ve Güler K (2004) “Çelik Tel Takviyeli Betonların Gerilme-Şekil Değişirme Davranışı İçin Bulanık Mantık Yaklaşımı”, Türkiye İnşaat Mühendisliği 17. Teknik Kongre ve Sergisi, 15 – 17 Nisan 2004, İstanbul.

Doremus RH (1994) Glass Science, Second Edition, John Wiley & Sons, New York.

Earp RW (2016) The Effect of Thermal Tempering Processes on the Sharpness and Injury Potential of Pint Glasses, Ph.D Thesis, University of Leicester Department of Engineering, Leicester.

Elliott SR (1984) Physics of Amorphous Materials, Longman, New York.

Eriç M (1984) “Yüzyıllar Boyu Cam Sanatı”, Sanat Çevresi, (70): 54-57.

Feingold JM (2003) “Old Zebra Boards Give Way to New Roller-Wave Gauges”, Glass Magazine: 1-5.

Groover MP (2010) Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Danvers, MA.

Gupta PK (1996) “Non-crystalline Solids: Glasses and Amorphous Solids”, Journal of Non-Crystalline Solids, 195(1-2): 158-164.

Güvenbaş İÖ (2014) Dünya ve Türkiye Cam Sanayi Sektörüne Genel Bakış, <http://www.ozgemguvenbas.com.tr/dunya-ve-turkiye-cam-sanayi-sektorune-genel-bakis> , 19 Mart 2019.

Gy R (2008) “Ion Exchange for Glass Strengthening”, Materials Science and Engineering B, 149(2): 159 - 165.

Harper CA (2001) Handbook of Ceramics, Glasses and Diamonds, McGraw – Hill, New York.

Hendrickson GL (2003) “A New Approach to Measuring Distortion in Tempered Glass”, Glass Processing Days Proceedings: 119-120.

Hojjat B (1990) Thermal Tempering of Layered Ceramic Structures, Ph.D. Thesis, University of Florida, Florida.

Kalpajian S ve Schmid SR (2010) Manufacturing Engineering and Technology, Sixth Edition, Pearson Education, Singapore.

Karlsson S, Johnson B ve Stålhandske C (2010) “The Technology of Chemical Glass Strengthening”, Glass Technology: European Journal of Glass Science and Technology A, 51(2): 41 - 54.

- Karmakar B, Rademann K ve Stepanov AL (2016) Glass Nanocomposites Synthesis, Properties and Applications, Elsevier BV, Amsterdam.
- Kennedy R (1997) “The History and Future of the Flat Glass Industry”, Glass Processing Days Preceedings: 28-36.
- Kingery WD, Bowen HK ve Uhlmann DR (1976) Introduction to Ceramics, Second Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Kirman H (1995) Cam Sanayiinin Türk Ekonomisindeki Yeri, Uzmanlık Tezi, İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü Sektör Programları Daire Başkanlığı, Ankara.
- Kocabağ D (2002) Cam Kimyası, Özellikleri, Uygulaması, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Küçükpazarlı N (2006) Konya Arkeoloji Müzesi'nde Bulunan Roma Çağı Cam Eserleri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya.
- LandX, Bulanık Mantık Nedir, <http://www.bulanikmantik.com/#section2> 5 Temmuz 2019
- Le Bourhis E (2014) Glass Mechanics and Technology, Second Edition, Wiley – VCH, Weinheim.
- Leasing Invest Ltd., Glass for Household Appliances, www.l-i.com.ua/en/products/tempered-glass/glass-for-household-appliances, 15 Mart 2019.
- Macfarlane A ve Martin G (2004) “A World of Glass”, Science, 305(5689): 1407-1408.
- Martienssen W ve Warlimont H (2005) Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data, Springer-Verlag, Berlin.
- McCauley RA (2013) Corrosion of Ceramic Materials, Third Edition, CRC Press, New York.
- McMillan PW (1979) Glass - Ceramics (Non-Metallic Solids Volume 1), Second Edition, Academic Press, London.
- Mısırlı Öder B (2007) B2O3 İlavesinin Lityumalüminasilikat Cam Seramiğinin Kristalleşme Davranışları ve Isıl Genleşme Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Nascimento ML (2014) “Brief History of the Flat Glass Patent - Sixty Years of the Float Process”, World Patent Information, 38: 50-56.

- Neugebauer J ve Savrić M (2014) “Causes of Distortion”, Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference Proceedings, 6 - 7 February 2014, Lausanne, Switzerland.
- Özek A ve Sinecen M (2004) “Klima Sistem Kontrolünün Bulanık Mantık ile Modellenmesi”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(3): 353 - 358.
- Öztürk M (2006) Temperli Otomobil Camlarında Mekanik Özelliklerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Paul A (1982) Chemistry of Glasses, Chapman and Hall, London.
- Persson R (1969) Flat Glass Technology, Butterworths, London.
- Pfaender HG (1996) Schott Guide to Glass, Chapman & Hall, Londra.
- Pilkington Company, Pilkington Company History, www.pilkington.com , 6 Ocak 2019.
- Pilkington LA (1969) “Review Lecture: The Float Glass Process”, Proceedings of the Royal Society London A., 314 (1516): 1-25.
- Pourmoghaddam N, Kraus MA, Schneider J ve Siebert G (2018) “Relationship Between Strain Energy and Fracture Pattern Morphology of Thermally Tempered Glass for the Prediction of the 2D Macro-scale Fragmentation of Glass”, Glass Structures & Engineering, 4(2): 257 - 275.
- Rantala M (2015) Heat Transfer Phenomena in Float Glass Heat Treatment Processes, Ph.D Thesis (Publication 1355), Tampere University of Technology, Tampere, Finland.
- Rasmussen SC (2012) How Glass Changed the World: The History and Chemistry of Glass from Antiquity to the 13th Century, Springer, New York.
- Redner AS (2003) “On-Line Measurement of Stresses and Optical Distortion for QC of Tempered Glass”, Glass Processing Days Proceedings: 388-390.
- Rehren T ve Pusch EB (2005) “Late Bronze Age Glass Production at Qantir-Piramesses, Egypt”, Science, 308(5729): 1756-1758.
- Salımaslı A ve Rafighi M (2017) “Titreşim ve Kesme Kuvveti Esaslı Takım Aşınmasının Bulanık Mantıkla İzlenmesi ve Tahmini”, Politeknik Dergisi, 20(1): 111 - 120.
- Sarsın Kaya, D. (2015), Cam Sektörü, https://ekonomi.isbank.com.tr/Content/Management/Documents/sr03_camsektoru.pdf, 19 Mart 2019.

- Scharfenberger GP (2004) “Recent Evidence for Broad Window Glass in Seventeenth and Eighteenth-Century America”, *Historical Archaeology*, 38(4): 59-72.
- Scholze H (1991) *Glass Nature, Structure, and Properties*, Springer, New York.
- Shelby JE (2005) *Introduction to Glass Science and Technology*, Second Edition, The Royal Society of Chemistry, New York.
- Silverman A (1955) “Glass Evolution: A Factor in Science”, *Journal of Chemical Education*: 149-153.
- Spear B (2014) “Coal - Parent of the Industrial Revolution in Great Britain: The Early Patent History”, *World Patent Information* (39), 85-88.
- Şendoğdular L, *Cam Teknolojisi*, <https://avesis.erciyes.edu.tr/resume/downloadfile/lsendogdular?key=c3076351-97fd-4e38-b41f-aa779215ce24> , 8 Şubat 2019.
- Şişecam, *Beyaz Eşya Camları*, <http://www.sisecamduzcam.com/tr/faaliyet-alanlarimiz/beyaz-esya-camlari/urunler/buzdolabi-camlari> , 15 Mart 2019.
- T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2014), *Cam Sektörü Raporu (2014/1)*, <https://sgm.sanayi.gov.tr/DokumanGetHandler.ashx?dokumanId=975ea48f-fdc2-446c-9051-5142448e891f>, 15 Ocak 2018.
- Tıkıroğlu M (2017) *Kimyasal Temperleme*, <https://camisleme.blogspot.com/p/blog-page.html> , 20 Şubat 2019.
- Tosun K, *Camlar*, http://kisi.deu.edu.tr/kamile.tosun/13._Camlar.pdf , 5 Aralık 2018.
- Uhlmann DR ve Kreidl NJ (1980) *Elasticity and Strength in Glasses (Glass Science and Technology Volume 5)*, Academic Press, New York.
- Ungan Ş (2015) *Temper El Kitabı*, <http://www.yorsancam.com/wp-content/uploads/2015/01/temper.pdf> 2 Mart 2019.
- Üzümlü İG (2002) *Yüksek Fırın Curuflarından Renkli Cam, Cam-seramik Üretimi Ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Varshneya AK (1993) *Fundamentals of Inorganic Glasses*, Academic Press, New York.
- Wikipedia, *Chemically Strengthened Glass*, https://en.wikipedia.org/wiki/Chemically_strengthened_glass , 21 Şubat 2019.
- Wikipedia, *Prens Rupert Damlası*, https://tr.wikipedia.org/wiki/Prens_Rupert_Damlas%C4%B1 , 25 Şubat 2019.
- Wikipedia, *Tempered Glass*, https://en.wikipedia.org/wiki/Tempered_glass , 25 Şubat 2019.

- Wintour N (2015) The Glass Industry: Recent Trends and Changes in Working Conditions and Employment Relations, https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---sector/documents/publication/wcms_442086.pdf, 20 Mart 2019
- Yalçın E (1998) Endüstriyel Camların Üretiminde Isıtma ve Soğutma İşlemlerinin Etüdü, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Yamane M ve Asahara Y (2000) Glasses for Photonics, Cambridge University Press, Cambridge.
- Zachariassen WH (1932) “The Atomic Arrangement in Glass”, Journal of the American Chemical Society, 54(10): 3841-3851.
- Zallen R (1983) The Physics of Amorphous Solids, John Wiley & Sons, New York.
- Zanotto ED ve Mauro JC (2017) “The Glassy State of Matter: Its Definition and Ultimate Fate”, Journal of Non-Crystalline Solids, 471: 490-495.
- Zarzycki J (1991) Glasses and Amorphous Materials (Materials Science and Technology : a Comprehensive Treatment, Vol 9), Wiley – VCH, New York, Weinheim.
- Zawada-Tomkiewicz A ve Tomkiewicz D (2017a) “Influence of Flatness Distortion of Free-form Surface in a Fitting Process”, Mechanik.
- Zawada-Tomkiewicz A ve Tomkiewicz D ve Wilk L (2017b) “Measurements of Surface Flatness Distortions Using Machine Vision Inspection System” Mechanik.

10. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : **Özkan KAYA**

Doğum Yeri ve Tarihi : **Bolu, 21.06.1989**

Lisans Üniversite : **Gaziantep Üniversitesi**

Elektronik posta : **ozkan.kaya@outlook.com.tr**

İletişim Adresi : **Çıkınlar Mahallesi, Merkez - Bolu**