

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE CAM
ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RAMAZAN ERGİN SAĞLAM

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı-Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kadir KIRKKÖPRÜ

OCAK 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HESAPLAMALI AKIŞLANLAR DİNAMİĞİ İLE CAM
ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ramazan Ergin SAĞLAM
(503101123)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı-Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kadir KIRKKÖPRÜ

OCAK 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**MODELLING GLASS FORMING USING
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**



M.Sc. THESIS

**Ramazan Ergin SAĞLAM
(503101123)**

Department of Mechanical Engineering

Heat-Fluid Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Kadir KIRKKÖPRÜ

JANUARY 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503101123 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ramazan Ergin SAĞLAM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE CAM ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN MODELLENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Kadir KIRKKÖPRÜ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Levent Ali KAVURMACIOĞLU**.....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Oktay YILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 30 Aralık 2024
Savunma Tarihi : 20 Ocak 2025





Bana Her Zaman Destek Olan Aileme,



ÖNSÖZ

Çalışmam boyunca beni yönlendiren ve destekleyen Değerli Hocam Prof. Dr. Kadir Kırkköprü'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalıştığım LAV şirketine, bana sağladığı imkân, kaynak ve duydukları güvenden dolayı minnettarım.

Ayrıca hayatım boyunca bana destek olan ve gelişmemi sağlayan canım aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ocak 2025

Ramazan Ergin Sağlam
(Makina Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Cam ve Cam Çeşitleri	1
1.1.1 Silika esaslı Camlar.....	5
1.1.2 Soda-Kireç Camı	6
1.2 Cam Üretimi.....	8
1.2.1 Cam üretim süreci	10
1.2.1.1 Harman dairesi	13
1.2.1.2 Ergitme fırını	14
1.2.1.3 Forehearth	17
1.2.1.4 Spout ve feeder.....	18
1.2.2 Şekillendirme	19
1.2.2.1 Savurma Prosesi.....	20
1.2.2.2 Pres prosesi.....	21
1.2.2.3 Pres-üfleme prosesi	23
1.2.2.4 Üfleme-üfleme prosesi.....	26
2. CAMIN ÖZELLİKLERİ.....	27
2.1 Camın Viskozitesi	27
2.1.1 Camın sıcaklık ile değişen viskozite modellenmesi.....	31
2.1.1.1 Arrhenius model	31
2.1.1.2 Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) modeli.....	31
2.1.1.3 Avramov-Milchev (AM) Modeli	32
2.1.2 Camda önemli viskozite noktaları ve ölçüm yöntemleri.....	33
2.1.2.1 Döner masura viskozite ölçüm Yöntemi.....	36
2.1.2.2 Paralel plaka viskozite ölçüm yöntemi.....	37
2.1.2.3 Kiriş eğilmesi yöntemi ile viskozite ölçümü.....	38
2.1.3 Viskozite test sonuçları ve karşılaştırılması	40
2.2 Camın Isı Sığası	42
2.3 Camın Yoğunluğu	42
2.4 Camın Isıl İletkenliği.....	43
3. CAM ŞEKİLLENDİRMENİN MODELLENMESİ	45
3.1 Cam ve Kalıp Arasında Gerçekleşen Isı Transferi.....	46
3.2 Ansys Polyflow Yazılımında Kritik Noktalar.....	50
3.2.1 Presleme ve üfleme aşamalarında temas.....	51

3.2.2 Hız ya da kuvvet etkili kalıp tanımlama.....	52
3.2.3 Isı transferi ve temas (konjuge ısı transferi).....	53
3.3 Modellemenin Matematiksel Formülasyonu.....	56
4. BİLGİSAYAR ORTAMINDA YAPILAN DENEMELER	59
4.1 Eş Isıl Çay Tabacağı Presleme.....	59
4.1.1 Modelleme hazırlığı	61
4.1.2 Eş ısı çay tabacağı analiz sonuçları.....	62
4.2 Eş Isıl Olmayan Çay Tabacağı Presleme.....	64
4.2.1 Modelleme hazırlığı	65
4.2.2 Eş ısı olmayan çay tabacağı presleme sonuçlar	71
4.3 Karaf Eş ısı Olmayan Pres-Üfleme Analizi	74
4.3.1 Modelleme hazırlığı	75
4.3.2 Eş ısı olmayan karaf pres-üfleme sonuçları	77
4.4 Kulpsuz Sürahi Eş Isıl Olmayan Presleme Analizi.....	80
4.4.1 Modelleme hazırlığı	80
4.4.2 Eş ısı olmayan kulpsuz sürahi presleme sonuçları.....	82
4.5 Sabit Üfleme COKE Ürünü Presleme, Sarkma ve Üfleme.....	83
4.5.1 Sabit üfleme modelleme hazırlığı.....	84
4.5.2 Sabit üfleme analiz sonuçları	85
5. SONUÇLAR.....	89
KAYNAKLAR.....	93
ÖZGEÇMİŞ.....	95

KISALTMALAR

HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
H-28	: Pres-Üfleme Makinesi
IS	: Individual Section
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer
VFT	: Vogel-Fulcher-Tammann





SEMBOLLER

A	: Alan
A	: Cam çubuk kesitinin yüzey alanı
a	: Kalıp mekanizmasının hareket boyunca ivmesi
a	: Cam numunesi ortalama genleşme katsayısı
a	: Isı transfer katsayısı
a_g	: Cam numunesi ortalama genleşme katsayısı
a_s	: Destek aparatı genleşme katsayısı
D_{temas}	: Cam-kalıp arasındaki sınır tabaka kalınlığı
dh/dt	: Sıkıştırma oranı
F	: Kuvvet
F_m	: Kalıp mekanizmasına uygulanan kuvvet
F_f	: Deformasyon altında camın gösterdiği direnç kuvveti
f_n	: Normal yönündeki kuvvet
f_s	: Teğet yönündeki kuvvet
g	: Yer çekimi
h	: Cam akışkanı içerisindeki aparatın uzunluğu
h	: Cam numune kalınlığı
h	: Paralel plaklar arasındaki boşluk
I_c	: Kesit atalet momenti
k_p	: Ansys Polyflow penalty katsayısı
k_{temas}	: Sınır tabaka ısı iletkenlik katsayısı
L	: Mesnet noktaları arasındaki uzaklık
M	: Mil üzerine uygulanan tork
M	: Cam numune üzerine uygulanan ağırlık
M	: Hareketli kalıbın toplam ağırlığı
q	: Isı akısı
R	: Gaz sabiti
R_i	: Cam akışkanı içerisindeki aparatın çapı
R_o	: Kroze iç çapı
T	: K cinsinden sıcaklık değeri

t	: Zaman
T	: Ölçüm sıcaklığı
T_g	: Camın geçiş sıcaklığı
T_{g0}	: Sınır tabakada cam sıcaklığı
T_{m0}	: Sınır tabakada kalıp sıcaklığı
T_0	: VFT viskozite modeli sıcaklık katsayısı
V	: Cam numune hacmi
v	: Cam Düğüm noktası hızı
v_s	: Cam Düğüm noktası hızı
$v_{s,wall}$	: Kalıp Düğüm noktası hızı
v_{wall}	: Kalıp düğüm noktası hızı
γ	: Kesme deformasyonu
η	: Dinamik Viskozite
$\eta(T)$	: Sıcaklığa bağlı değişen dinamik viskozite
η_0	: Newton tipi viskozite
ρ	: Camın yoğunluğu
σ_∞	: Kohezyum kesme kuvveti
τ	: Kesme gerilmesi
x	: Paralel plaka yer değiştirme mesafesi
ω	: Açısal hız
$\dot{\epsilon}_{xy}$	: Kesme deformasyon hızı
ΔH_η	: Viskoz akışın aktivasyon enerjisi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Camsı silika ve soda-kireç cam kompozisyonunda oksitlerin ağırlıkça yüzdesi (%).	7
Çizelge 1.2 : Soda-kireç camını oluşturan oksitler ve hammadde kaynakları.....	7
Çizelge 1.3 : 2020 yılı Dünya cam sektörü faaliyet alanlarında üretim kapasiteleri ve yüzdeleri (Cam Sektör Raporu, 2022).	9
Çizelge 2.1 : Soda-Kireç camının viskozite referans noktaları.	34
Çizelge 2.2 : VFT modelinde kullanılan A,B ve T_0 katsayıları.	40
Çizelge 2.3 : VFT modeli kullanılarak hesaplanmış değerler.	41
Çizelge 4.1 : Cıvardaki camın kalan stroke mesafesine bağlı hızı	61
Çizelge 4.2 : Çalışma parametreleri.....	76
Çizelge 4.3 : Çalışma Parametreleri.	82



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : a) Kritalin Kuartz Yapıya sahip atom dizilimi, b) Amorf yapının atomsal dizilimi.	2
Şekil 1.2 : Cam ve Kristalin yapıları için Hacim-Sıcaklık İlişki Grafiği (Mauro ve Varshneya, 2019).	4
Şekil 1.3 : Camsı geçiş sıcaklığı T_g 'nin fark taramalı kalorimetre ile ölçülmesi.	4
Şekil 1.4 : Camsı Silikamın 2 Boyutlu ağ yapısı şematik Gösterimi (Shelby, 2005)...	5
Şekil 1.5 : Soda-Kireç camının 2 Boyutlu ağ yapısı şematik gösterimi (Shelby, 2005).	6
Şekil 1.6 : Ticari cam üretim prosesi akış şeması (Mauro ve Varshneya, 2019).....	12
Şekil 1.7 : Sofra camı üretim hattı şematik gösterimi (Martins, B. M. R., 2017).....	13
Şekil 1.8 : Cam üretim fırını ve harman dairesi şematik gösterim.	13
Şekil 1.9 : Arkadan ateşlemeli yandan beslemeli rejeneratif fırın şematik gösterimi (Horn Glass Industries).	15
Şekil 1.10 : Rejeneratif fırın kesit görünüşü ve çalışma prensibi.	16
Şekil 1.11: Forehearth 3 boyutlu model görüntüsü ve kesit hali.	18
Şekil 1.12 : Damla oluşum aşamaları (Tooley, 1974).	19
Şekil 1.13 : A) spout, B) plunger, C) tüp, D) şamot (Rath Refractories).	19
Şekil 1.14 : Savurma prosesi şematik gösterim.	21
Şekil 1.15 : Kepçe-oluk-saptırıcı şematik gösterim.....	22
Şekil 1.16 : Presleme prosesi adımları.....	22
Şekil 1.17 : H-28 pres-üfleme prosesi 1.aşama.	23
Şekil 1.18 : H-28 pres-üfleme prosesi 2.aşama.	23
Şekil 1.19 : H-28 pres-üfleme prosesi 3.aşama.	24
Şekil 1.20 : IS pres-üfleme prosesi: (a) damla yükleme, (b) parizon presleme, (c) mastörün geri çekilmesi ve ebüşör kalıbının açılması, (d) parizonun 180° döndürülerek finişör kalıbına yüklemesi, (e) sarkma, (f) üfleme, (g) sıcak kaplama ve tavlama (Kovacec, 2010).	25
Şekil 1.21 : Üfleme-üfleme prosesinin şematik gösterimi (Tooley, 1984).....	26
Şekil 2.1 : Tek boyutta kontrol hacmine uygulanan F kuvvetinin akışkan katmanlarına etkisi.	27
Şekil 2.2 : Farklı akışkan türlerine ait kesme gerilmesi ve kayma şekil değiştirme hızı grafiği (Oktay, 2007).....	28
Şekil 2.3 : Soda-kireç camının belirli sıcaklık farklı kesme kuvvetine göre viskozite ilişkisi (Simmons ve Simmons, 1989).	30
Şekil 2.4 : Soda-kireç camı için kohezyon mukavemeti ile Newton tipi viskozite ilişkisi (Simmons ve Simmons, 1989).	30
Şekil 2.5 : VFT modelinin deneysel veri ile karşılaştırması (G.W. Scherer, 1992). .	32
Şekil 2.6 : Soda-Kireç Camının sıcaklık-viskozite eğrisi ve belirli sıcaklık değerlerine karşılık gelen referans noktaları.	33
Şekil 2.7 : Cam viskozitesi ölçüm yöntemleri.....	35

Şekil 2.8 : Cam viskozitesi referans noktaları ve imalat esnasında kullanıldığı bölgeler.	36
Şekil 2.9 : Sabit kroze döner masura viskozite test ölçüm düzeneği (ASTM C965-96).	36
Şekil 2.10 : Paralel levha viskometre test düzeneği (ASTM C1351M-96).	38
Şekil 2.11 : Kiriş eğme test düzeneği	39
Şekil 2.12 : Deney sonuçları ile Batchmaker verilerinin karşılaştırılması	41
Şekil 2.13 : Sıcaklıkla değişen camın ısı sığası (Biosca, 2020).	42
Şekil 2.14 : Camın kalınlığı ve sıcaklığına bağlı olarak gösterilen efektif ısı iletkenlik (Biosca, 2020).	43
Şekil 3.1 : Isı transfer katsayısının şekillendirme sırasında zamana göre değişimi (McGraw, 1961).	47
Şekil 3.2 : Deneyde kullanılmış presleme aparatı ve ekipmanlarının görüntüsü (Pulliam,2009).	48
Şekil 3.3 : Deneysel verilerin karşılaştırılması (Pulliam, 2009).	49
Şekil 3.4 : Sanayi ölçeğinde yapılan denemede termokupulların konumları (Pulliam, 2009).	49
Şekil 3.5 : Laboratuvar ve sanayi ölçeğinde meydana gelen ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması (Pulliam, 2009).	50
Şekil 3.6 : ANSYS Polyflow evolution arayüzünde bulunan multi-ramp function grafiği.	53
Şekil 3.7 : Cam ve kalıp kesitinde oluşan sıcaklık eğrileri.	54
Şekil 3.8 : Temas arayüzünde farklı ağ yapısına sahip hacimlerin görüntüsü.	55
Şekil 4.1 : Üretilen çay tabağının teknik resmi.	60
Şekil 4.2 : Kalan kurs boyu mesafesine bağlı olarak çay tabağının kalıp içerisindeki tahmini görüntüsü.	61
Şekil 4.3 : Kalıp-mastör-damla geometrisi solda, damla hacminin ağ yapısı sağda.	62
Şekil 4.4 : Model geometrisi ve belirlenen hacim özellikleri.	63
Şekil 4.5 : Belirli zaman adımlarında ürün ve kalıpların görüntüsü.	64
Şekil 4.6 : Son zaman adımında ürün üzerindeki basınç kontürleri.	64
Şekil 4.7 : Hızlı kamera ile alınan kayıttan görüntü, mastör kalıbının en alt konumdaki hali.	66
Şekil 4.8 : Mastörün hareketini gösteren pozisyon-zaman grafiği.	67
Şekil 4.9 : Mastörün hız-zaman grafiği.	67
Şekil 4.10 : Mastörün basınç-zaman grafiği.	69
Şekil 4.11 : 1 adet ürün için mastörün hareket ve bekleme aşamasında oluşan hız-zaman grafiği.	70
Şekil 4.12 : ANSYS Polyflow Evolution arayüzünde kullanılacak hız-zaman grafiği.	70
Şekil 4.13 : ANSYS Workbench üzerinden alınan zaman bilgisi.	72
Şekil 4.14 : Belirli bir zaman adımında ürün üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları ve ağ yapısı.	72
Şekil 4.15 : Presleme istasyonundan çıktıktan sonra çay tabağının üstten çekilmiş termal görüntüsü.	72
Şekil 4.16 : Solda; 20020 çay tabağının presleme istasyonundan çıktıktan sonra kalıbın dıştan çekilmiş termal görüntüsü, sağda; ürünlerin take-out'dan ağız yakma istasyonuna giderken çekilmiş termal görüntüsü.	73
Şekil 4.17 : Karaf ürünü karşı çizimi ve pleksiglas malzemeden modeli.	76
Şekil 4.18 : Presleme sonrası parizon geometrisi ve sıcaklık dağılımı.	77
Şekil 4.19 : Üfleme sonrası ürün üzerindeki cidar ve sıcaklık dağılımı.	78

Şekil 4.20 : Karşıt çizim ve modelleme sonrası oluşan ürünü taban kalınlığı karşılaştırma.	79
Şekil 4.21 : Karşıt çizim ve modelleme sonrası gövdede oluşan cidar kalınlığı karşılaştırma.	80
Şekil 4.22 : Analizde kullanılan ekipmanlar (1-damla, 2-tampon, 3-ebüşör, 4-mastör).	81
Şekil 4.23 : Damlanın düşme anı ile şekillenme sonrası sıcaklık dağılımı.....	82
Şekil 4.24 : 3 farklı parizon formu ve ebüşör duvar açıları.	84
Şekil 4.25 : 3 farklı parizon geometrisinin preslenmesi esnasında camın gösterdiği tepki kuvveti.....	85
Şekil 4.26 : Analiz sonucunda 1 ve 2 no’lu parizon geometrisinin şişirilmesiyle ortaya çıkan cidar kalınlıkları.....	86
Şekil 4.27 : Üretim sahasında deneme sonrası 1 ve 2 no’lu parizon geometrisinin şişirilmesiyle ortaya çıkan cidar kalınlıkları.	87
Şekil 4.28 : Makine ve Analiz verilerinin karşılaştırılması.	88





HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE CAM ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN MODELLENMESİ

ÖZET

Cam üretim prosesinde yüksek miktarda enerji ve hammadde kullanılmaktadır. Enerji kaynağı olarak fosil yakıtlar başta olmak üzere ek olarak da düşük miktarda yenilenebilir kaynaklara ihtiyaç duyulmaktadır. Hem emek hem de enerji yoğun olan bu sektörde, verimliliklerin en üst noktada tutulması firmaların pazarda rekabet şansını arttırmaktadır. Günümüz dünyasında enerji kaynaklarının tükenmesi nedeniyle kullanılacak tüm girdilerden en üst seviyede faydalanmak, şirketlerin ayakta kalması açısından yararlı olacaktır. Son zamanlarda yaşanan enerji ve hammadde krizleri sebebiyle de şirketler, kaynaklarını doğru bir şekilde yönetmenin yollarını aramaktadır.

Bu çalışmanın amacı, pres ve pres-üfleme prosesleri ile sofr camı üretiminde yapılan deneme sürelerinin kısaltılması, deneme sayılarının azaltılması ve ürün gramajlarının optimize edilmesidir. Camın makine ortamında şekillendirilmesi, bilgisayar ortamında modellenerek prosesi etkileyen parametrelerin anlaşılması da hedeflenmiştir. Deneme imalatlarının modellenmesi ve çözümü, bilgisayar ortamında gerçekleştirilerek istenen kalitede ve en uygun gramajda ürün elde edilmesinin yanında, yeni ürünün seri imalata geçiş süresi mevcut duruma göre 8 hafta kısaltılabilmektedir. Ayrıca imalat hatlarındaki deneme kaynaklı duruşların ve deneme maliyetlerinin ortadan kaldırılması hedeflenmektedir. İlave olarak, yapılacak analizler ile üründe istenilen cidar kalınlığını öngörmek ve imalat sırasında meydana gelen ağızda çapak, yarım ağız, dip kayığı ve mastör-cam yapışması gibi imalat hatalarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır.

Bu proje kapsamında, imalatı yapılan bir üründe kaliteyi arttıracak ve maliyeti düşürecek cidar inceltme, ürün gramajı düşürme, uygun parizon tasarımı vb uygulamaların bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı ile önceden belirlenip gerekli çalışmaların hayata geçirilmesi hedeflenmektedir. Aynı zamanda, yeni bir ürünün üretilebilirliğinin HAD sayesinde iki veya daha fazla deneme yapılmadan anlaşılabilmesi planlanmaktadır.



MODELLING GLASS FORMING USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

SUMMARY

In the glass manufacturing process, large amounts of energy and raw materials are used. Fossil fuels are primarily used as the energy source, with additional but small amounts of renewable resources also required. In this labor and energy intensive industry, maintaining maximum efficiency increases companies' chances of competing in the market. Given the depletion of energy sources in the modern world, maximizing the use of all inputs will be beneficial for companies to stay efficient. Due to recent energy and raw material crises, companies are actively searching for ways to manage their resources effectively.

The aim of this study is to shorten the trial periods, reduce the number of trials, and optimize the product weights in the production of tableware glass using pressing and press-blowing processes. The modeling and solving of trial productions are carried out in a computer environment, ensuring the desired quality and optimal weight of the product. In addition, the transition time of a new product from prototype to mass production can be reduced by 8 weeks compared to the current process. The goal is also to eliminate trial-related stoppages on the production lines and reduce trial costs. Additionally, through the analysis, the desired wall thickness of the product will be predicted, and production defects such as split finish at the mouth, half-mouth, wedge bottom or mould-glass adhesion will be prevented.

Within the scope of this project, wall thinning, weight reduction, appropriate parison design, and similar applications that will increase quality and reduce cost in the production of a product will be pre-determined using Computational Fluid Dynamics (CFD) software, and the necessary actions will be implemented. Furthermore, it is planned that the manufacturability of a new product can be understood using CFD without the need for two or more trials.

The introduction covers the basic properties of glasses and the production methods of silica-based glasses in mass production. The manufacturing methods are used in tableware glass production introduced, and the components of the production line are listed. A literature review has been conducted for the investigation of glass properties. The most important properties of glass for modeling are; viscosity, specific heat, density, and thermal conductivity. These physical properties change with temperature and depend on the glass chemical composition and temperature. The viscosity, heat capacity, thermal conductivity, density and thermal expansion of glass are particularly important for numerical modeling. These four properties required for modeling are explained, and the values are determined in computational fluid dynamics (CFD) software. In order to determine the temperature-dependent viscosity parameter, the Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) model was chosen, and glass samples taken from the factory were sent to an international glass research institute. Viscosity values corresponding to specific temperatures were calculated using a rotational viscometer,

and a temperature-dependent viscosity graph was created using the VFT model. Viscosity test results were compared with another commercial software is used in the factory, and it was concluded that they could be used as input data for analysis.

Modeling of glass forming has developed over the years. Early works remained within the boundaries of assumptions. With supporting studies, glass forming modeling has been improving. The finite element analysis method is one of the most commonly used methods in glass forming processes. The finite element analysis method can be applied to both pressing and blowing stages. In cases with significant deformation, the use of adaptive or variable mesh structures is preferred. The most widely used commercial software in the industry are ANSYS Polyflow (Finite Element Method), Fluent (Finite Volume Method), and NOGRID (Finite Point Method). In this study, ANSYS Polyflow was chosen. While using the ANSYS Polyflow module for glass forming modeling, it is essential to define some important points. During the rapid forming process, the glass changes shape, and its temperature decreases significantly. Therefore, key factors of ANSYS Polyflow are specified.

Molds play several roles in the process and the most important role of molds are shaping the glass and extract heat from the glass. Understanding this phenomenon between the mold and the glass will increase the accuracy of the forming model. However, heat transfer between the glass and the mold is inherently a complex and difficult process to understand. Additionally, there is no exact analytical solution for it. Therefore, experimental setups or data collection from production machines are required to determine the heat transfer at the glass-mold interface. In an industrial-scale study, high-speed, removable K-type thermocouples were placed at some internal points of the mold. The heat transfer coefficient value used in this project was derived from data sets obtained from experimental results conducted at the industrial scale.

To understand the glass forming process under industrial scale and manufacturing conditions, the mass, momentum, and energy conservation differential equations must be solved by the program. For modeling purposes, glass is assumed to be incompressible flow. The studies have been solved in 2D or 3D. Some products can be assumed to be axisymmetric due to their shape, and thus, solutions can be performed in 2D. For the investigation of wall distribution in the press-blow process, 2D analyses are sufficient. However, 3D solutions will be required for modeling, products like in the pressing process, which are not axisymmetric.

After obtaining information from the literature review, products for experimentation were selected for the computer environment. Manufacturing data was recorded, and modeling was performed. The shaping steps for the pressing, press-blowing, and "individual section" IS production processes were analyzed. These processes include; isothermal teacup pressing process, non-isothermal teacup pressing process, non-isothermal decanter press-blowing process, non-isothermal IS parison pressing process, and coke glass pressing, sagging, and blowing processes. The analysis results have been examined for each process

The results of the analysis are explained in the conclusions section, and future work plans have been created. Using HAD software to predict product wall thickness without conducting tests can provide cost and time advantages to companies. In particular, work continues to investigate and improve measurement methods to make inputs more comprehensive and accurate. Some parameters were used in the study obtained as a result of the literature review. Collecting and compiling the data to be

used in the computer environment is of great importance. Furthermore, understanding this data will influence the results. To calculate the heat transfer coefficient that changes according to operating conditions in glass modeling, measurements must be made in real-time during the forming process.

Feedback from the manufacturing field is required to train the parameters used in the program. Differences may occur between the products produced in the machine environment and those modeled in the computer environment. The use of the ANSYS Polyflow module in both the pressing and press-blowing processes seems promising. It can be especially useful in steps such as improving parison design and determining the wall thickness distribution of the product. Replacing the Newtonian fluid viscosity model with a non-Newtonian fluid model in the press-blowing process, particularly in the sagging and blowing steps, will produce more accurate results for determining wall thicknesses. The effect of shear thinning under machine conditions is observed for long and heavy parisons.





1. GİRİŞ

Sofra camının şekillendirilmesinde birçok yöntem ve proses kullanılmaktadır. Günümüz şartlarında enflasyon, artan enerji ve işçilik maliyetlerinden dolayı firmalar, üretim verimliliklerini arttırmaya yönelik çalışmalar yapmaktadır. Cam üretimi esnasında kullanılan faydalı zamanın arttırılmasına yönelik çalışmalardan birtanesi de üretim makinelerinde yapılan deneme sürelerinin kısaltılmasıdır. Cam üretimi tebrübeye dayalı bir üretim metodu olmakla beraber cam şekillendirilmesinin anlaşılması için bilgisayar destekli araçlar kullanılabilir. Bu çalışmada camın şekillendirilmesi için gerekli fiziksel ve kimyasal özelliklerin anlaşılmasıyla beraber, belirlenen şekillendirme proseslerinin bilgisayar ortamında modellenmesi yapılmıştır.

1.1 Cam ve Cam Çeşitleri

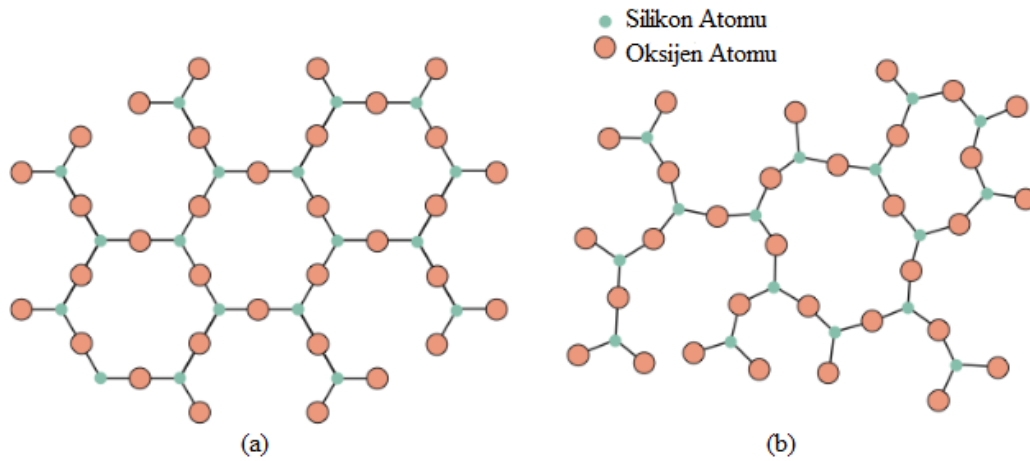
Cam kelimesinin ingilizce karşılığı olan “Glass” teriminin kökeni geç dönem latincesi *glæsum* kelimesinden gelmektedir. *Glæsum* kelimesi parlak ve şeffaf anlamındadır. Camsı malzemeleri tanımlayan başka terim olan *vitreous* kelimesinin kökeni ise, Latince *vitrum* (şeffaf) ve *amorphous* teriminin kökeni olan *amorphe* (belirli bir biçimi olmayan) kelimelerine dayanmaktadır. Şeffaflık, dayanıklılık ve parlaklık gibi özelliklere sahip olan cam, önceki medeniyetler tarafından keşfedilmiştir. Sır kaplı camsı taşlar milattan önce 12000 yıllarında Mısırlılar tarafından kullanılmıştır. Günümüzde ise cam malzemesi, birçok alanda tercih edilmektedir. Cam kap, pencere camı, aydınlatma, yalıtım, fiber kablo ve ayaklı bardak gibi sektörlerde cam malzemesi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Cam malzemesini belirlemek için parlaklık, şeffaflık, dayanıklılık ve amorf gibi tanımlamalar yeterli olmaktadır. Cam özelliklerini taşıyan malzemeleri belirtmek adına, düzenli atom yapısına sahip olmayan ve zamana bağlı camsı dönüşüm davranışı gösteren tanımı kullanılabilir. Cam malzemesi üzerinde çalışmalar ve uygulamalar devam ettikçe yeni özellikler keşfedilmektedir (Mauro ve Varshneya, 2019).

Camın dış görünüşü aslında katı maddelere benzerdir. Kristal katılara benzer fiziksel özellikleri olmasına rağmen camın ergime sıcaklığının noktası kesin değildir. Cam, dış

kuvvetlerin ve iç gerilmelerin olmadığı anlarda sıvılar gibi izotropik bir davranış gösterir. Mauro ve Varshneya göre cam, kristal olmayan atomsal dizilime sahip ve sıcaklık anında sıvı forma geçen bir malzemedir.

Sanayide üretilen camların %95'i oksit camlardan yapılmaktadır. Oksit camlarının büyük çoğunluğu ise silika bazlıdır. Camsı silika, soda-kireç, borosilikat, kurşun-silikat, aluminasilikat ve optik camlar, başlıca silika bazlı camlardır. Ticari olarak satılan cam kaynaklı ürünlerden olan mimari camlar, içecek kapları, ev tipi ampüller ve bardaklar, silika esaslı camlardır (Mauro ve Varshneya, 2019).

Silika esaslı camların sahip oldukları özelliklere göre kullanım yerleri, üretim yöntemleri ve üretim maliyetleri birbirinden farklıdır. Bu farklılıklar, cam kompozisyonları içerisindeki hammaddelerin oranları ile ilişkilidir. İnorganik cam kompozisyonu içerisinde SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , Na_2O , K_2O , MgO ve CaO gibi oksitler bulunmaktadır. Silika esaslı camı oluşturmak için kum, soda külü, felspat, dolomit ve bazı safsızlaştırıcılar kullanılmaktadır. Hammaddelerin belirli bir oranda karışması, yüksek sıcaklıkta ergime ile kimyasal tepkimelerin yardımıyla camı meydana getirir. Yapısına göre organik veya metalik cam türleri de bulunmaktadır. Metalik cam türünün kullanımı yıllar geçtikçe artmaktadır.



Şekil 1.1 : a) Kristalin Kuartz Yapıya sahip atom dizilimi, b) Amorf yapının atomsal dizilimi.

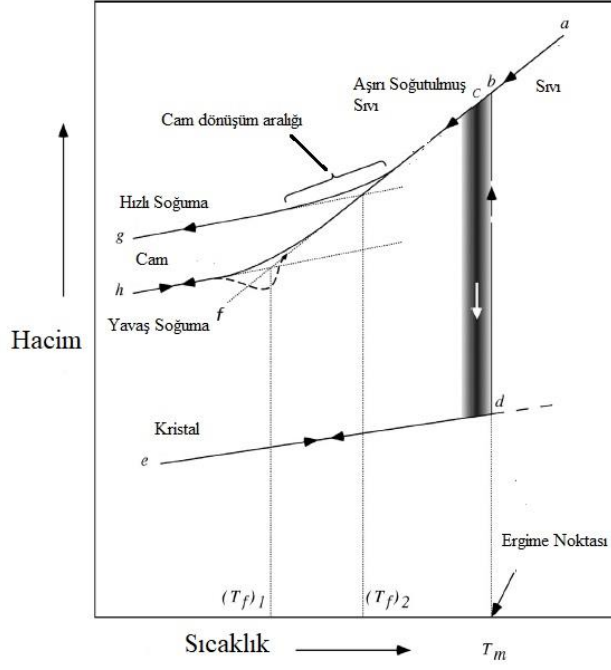
Kristalin periyodik olarak tekrarlanan Si ve O atomlarından oluşmaktadır. Fakat kuvarz camı ise amorf bir yapıya sahip olup düzensiz atom yapısına sahiptir. (Şekil 1.1) Bundan dolayı amorf yapının içinde daha çok atomsal boşluklar bulunmaktadır. Si ve O atomları birbirine kovalent bağları ile bağlıdır. Camın yapısı ne kadar saf ve

düzenli ise ergime sıcaklığı o kadar yüksek olur. Yüksek ergime sıcaklığına sahip camların bağ yapısı çok kuvvetli olduğundan ısı genleşme oranları çok düşüktür.

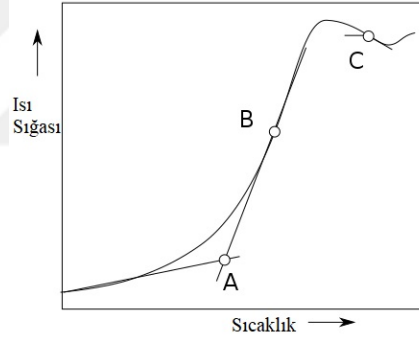
Camın dönüşüm davranışı daha iyi kavramak adına akışkanın hacim-sıcaklık ya da entalpi-sıcaklık grafiği kullanılmaktadır. Malzeme yapısı içerisindeki sıcaklık değişimlerinde entalpi ve hacim aynı yönde farklılaşmaktadır. Ergime noktası sıcaklığının üstünde küçük hacimde bir akışkanı ele alırsak, malzemeyi soğutmaya başladığımızda atomsal yapı yavaş yavaş değişmekte ve karakteristik bir noktada ergime meydana gelmektedir. Fakat cam malzemesi düşünüldüğünde kesin bir ergime noktası bulunmamaktadır.

Şekil 1.2’de bulunan grafiğe göre ergime noktasının altında belirli bir süre içerisinde soğuma prosesi devam ederse kristal yapı meydana gelmeye başlamaktadır. Kristal yapılar Şekil 1.2’de gösterilen b noktasında, katı ve sıvı denge içerisinde bulunmaktadır. Grafikte gösterilen b noktasından d noktasına ilerlediğimizde yapının hacmi ve entalpisi kısa ve hızlı bir şekilde azalmaktadır. Soğumanın devam ettiği alanda, d noktasından e noktasına geçiş meydana gelir ve tekrar hacim ile entalpi düşüşü gerçekleşir. Fakat akışkan, kristallenme meydana gelmeden soğutulursa aşırı soğutulmuş sıvı ortaya çıkar. Aşırı soğutulmuş sıvı içerisinde bulunan atomlar, soğumanın etkisiyle süresiz bir şekilde kendi içerisinde düzen oluşturur. Kristal yapının aksine hacim ve entalpide sert bir düşüş meydana gelmez. Soğuma devam ettikçe sıvının viskozitesi artar ve belirli bir sıcaklık aralığında atom devinirliği durma noktasına gelir ve dizilim değişmez.

Camsı geçiş sıcaklığının belirlenmesi için farklı yöntemler kullanılmıştır. Cam dönüşüm sıcaklığındaki malzemenin viskozite değerinin aksine camın bazı özellikleri; ısı genleşme katsayısı, ısı sığası ani değişim gösterir. Ani değişimler kaydedilen bu nokta, camsı geçiş sıcaklığı olarak anlandırılmaktadır. Cam dönüşüm aralığından itibaren soğuma devam ederse viskozite büyük bir oranda artacağından dolayı atomsal yapı, katı form içinde hapsolür. Bu yapı, donmuş sıvı cam olarak adlandırılabilir.



Şekil 1.2 : Cam ve Kristalin yapıları için Hacim-Sıcaklık İlişki Grafiği (Mauro ve Varshneya, 2019).



Şekil 1.3 : Camsı geçiş sıcaklığı T_g 'nin fark taramalı kalorimetre ile ölçülmesi.

Şekil 1.3'te diferansiyel taramalı kalorimetre ile camsı geçiş sıcaklığının belirlenmesi için kullanılan grafik gösterilmiştir. Isı sığası-sıcaklık grafiği kullanılarak T_g değeri yaklaşık olarak belirlenebilir. Cam örneği belirli bir oranda soğutulup tekrar aynı oranda ısıtılmaktadır. Isı sığası değerinin aniden değiştiği değer olan A noktası, camsı geçiş sıcaklığıdır. A noktasındaki viskozite değeri 10^{12} Pa.s olarak referanslanmıştır. Bu viskozite değerinde camın içerisindeki akış neredeyse durmakta ve bundan dolayı atomların yeniden sıralanması yavaşlamaktadır. Ayrıca tavlama noktası camsı geçiş sıcaklığına çok yakındır.

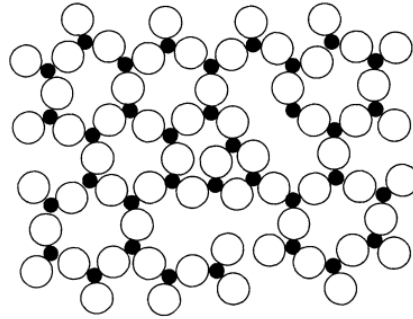
1.1.1 Silika esaslı Camlar

Camlar, organik ve inorganik olarak iki gruba ayrılmaktadır. Organik esaslı camlar polimerlerden meydana gelmektedir. İnorganik camlar ise oksitlerden oluşmaktadır. Oksit camların yapısını oluşturan temel bileşen, silikadır (SiO_2). Camın yapısını oluşturan oksitler ise üç ana grupta toplanmıştır. Bunlar sırasıyla cam yapıcı oksitler, modifiye edici oksitler ve ara yer oksitleridir. Na_2O modifiye edici oksitlere örnek olarak verilebilir. Cam yapısını oluşturan oksitler ise SiO_2 ve B_2O_3 'tür. Ara yer oksitlere örnek ise Al_2O_3 bileşiği verilebilir.

Camsı silikanın ağ yapısı Zacharisan ağ kuramı (RNT) ile açıklanabilir. Merkezinde Si^{+4} iyonu bulunan ve dört köşesinde O^{2-} iyonu bulunan 3 boyutlu bir tetrahedral yapıdır. Köşelerde bulunan O^{2-} atomları, her bir tetrahedral yapının merkezinde bulunan Si^{+4} iyonları ile paylaşılmaktadır. Paylaşılan O^{2-} iyonları, köprü yapıcı oksijen olarak adlandırılır. Sadece bulunduğu tetrahedral yapısında olan ve diğer tetrahedral ile paylaşılmayan O^{2-} iyonları ise köprü yapmayan oksijen olarak adlandırılır. A_mO_n yapısındaki camlar, aşağıdaki ağ kuramı ile açıklanabilir (Shelby, 2005).

Zacharisan ağ kuramı;

- Oksijen atomları en fazla 2 adet A atomu ile paylaşılabilir.
- Merkezi A atomu olan Oksijen iyon koordinasyon sayısı 4'ten küçük olmalıdır.
- Tetrahedraller birbirine kenar ve yüzeylerden değil köşelerden bağlı olmalıdır.
- En az 3 köşe paylaşılmalıdır.

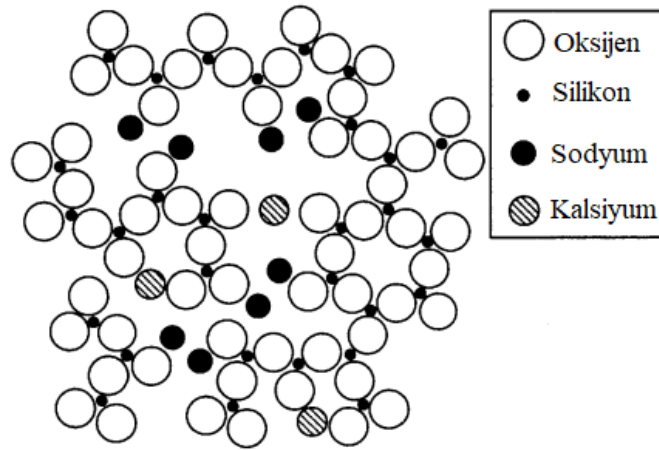


Şekil 1.4 : Camsı Silikanın 2 Boyutlu ağ yapısı şematik Gösterimi (Shelby, 2005).

Camsı silikanın ağ yapısı Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Kristalin aksine camsı silikada boşluklar düzensizdir. Küçük siyah noktalar ile gösterilen silisyum, büyük beyaz daireler ile belirtilenler ise oksijen atomlarıdır. Si-O kovalent bağları çok sayıda ve kuvvetli olduğundan ergime noktası yaklaşık 2200°C 'dir ve sıvı halde viskozite değeri

fazladır. Atomlar arasındaki bağlar sık ve güçlü olduğundan dolayı ısı genleşme katsayısı da düşüktür. Ayrıca ergime sıcaklığının fazla olmasından kaynaklı üretim maliyetleri yüksektir. Bundan dolayı ağ yapısı, modifiye edici oksitler kullanılarak camsı silikanın özellikleri değiştirilebilir.

Cam yapısında bulunan SiO_4^{4-} tetrahedralleri arasındaki düzensiz boşluklar Na, K, Ca, Mg gibi iyonlar ile doldurulabilir. İyonların eklenmesi ile cam içerisindeki Si-O bağları koparılır ve köprü yapmayan oksijen iyonlarının artmasına neden olur. Boşlukların modifiye edici iyonlar tarafından doldurulması ile bağların koparılması camın düşük sıcaklıkta ergimesini sağlar. Böylece üretim maliyeti camsı silikaya göre daha az olması beklenir. Fakat bağların koparılmasından kaynaklı ısı genleşme katsayısı camsı silikaya göre 20 kat daha fazla olmaktadır. Şekil-5'te sodyum ve kalsiyum iyonlarının soda-kireç camı ağ yapısındaki bağları gösterilmektedir. Sodyum ve kalsiyum iyonları, köprü yapıcı oksijen iyonlarının bağlarını kopararak CaO ve Na_2O bileşiklerini oluşturur. Böylece camın ergime noktası düşer ve şekillendirilmesi ile üretimi kolaylaşır.



Şekil 1.5 : Soda-Kireç camının 2 Boyutlu ağ yapısı şematik gösterimi (Shelby, 2005).

1.1.2 Soda-Kireç Camı

Soda-kireç camı, endüstride kullanılan en yaygın cam türüdür. Kimyasal dayanıklılık ve yüksek ışık geçirgenliği özelliklerine dayanarak içecek kapları, pencere camları, akkor lamba dış katmanı, soda-kireç camları ile yapılmaktadır. Fakat ısı genleşme katsayısının yüksek olmasından dolayı ısı şok dayanımı azdır ve bu özelliğinden kaynaklı soda-kireç camları belirli uygulamalarda kullanılmaktadır. Büyük ölçekli

soda-kireç camı üretimlerinde pahalı olmayan soda külü (Na_2CO_3), kalker (CaCO_3) ve kum (SiO_2) kullanılmaktadır. Düşük ergime sıcaklığı ve yüksek verimde iş çıktısına sahip soda-kireç camı, seri imalat yöntemine uygundur (Mauro ve Varshneya, 2019).

Çizelge 1.1 : Camsı silika ve soda-kireç cam kompozisyonunda oksitlerin ağırlıkça yüzdesi (%).

Oksitler	Camsı Silika	Soda-Kireç Camı
SiO_2	100	74.0
Al_2O_3	-	2.0
Na_2O	-	15.5
K_2O	-	0.6
MgO	-	3.7
CaO	-	5.4
As_2O_5	-	Eser Miktar
SO_3	-	Eser Miktar

Çizelge 1.1’de camsı silika ve soda-kireç camı içerisinde bulunan oksitlerin ağırlıkça yüzdeleri bulunmaktadır. Camsı silika %100 SiO_2 ’ten oluşmasına rağmen soda-kireç camı farklı oksit yüzdelерinden oluşmaktadır. Soda-kireç camı içerisinde bulunan oksitlerin farklı fonksiyonları bulunmaktadır. Oksitler, ağ yapısını oluşturan, cam oluşumunu kolaylaştıran (modifiye edici) ve şartlı cam yapıcılar (ara yer) olarak 3 ana grupta toplanmıştır. Oksitlerin kaynağı olarak farklı tip hammaddeler kullanılmaktadır. Hammaddeler, belirlenen oranlarda hazırlanıp yüksek sıcaklıklarda fırında ergitilerek camın oluşmasını sağlar. Çizelge 1.2’de oksitlerin hammadde kaynakları belirtilmiştir. İstenilen kalitede camın oluşması adına hammaddelerin sevki ve hazırlığı için gerekli olan prosesler sürekli kontrol altında tutulmalıdır.

Çizelge 1.2 : Soda-kireç camını oluşturan oksitler ve hammadde kaynakları.

Oksitler	Hammadde Kaynakları
SiO_2	Silis Kumu, Feldspat
Al_2O_3	Silis Kumu, Feldspat
Na_2O	Soda külü, Feldspat, Sodyum Sülfat
K_2O	Potasyum Karbonat
MgO	Dolomit
CaO	Kireç Taşı, Dolomit

- SiO_2 (Silisyum Oksit) camın ana yapıtaşıdır. Camın mekanik dayanımını, kimyasal direncini ve viskozitesini artırır. Sıcaklık farklarında oluşabilecek ısıl şoklara karşı camın direncini artırır.

- Al_2O_3 (Alumina) ara yer oksitlerinden birisidir. Ergimiş camın çalışma aralığını genişletir. Kimyasal korozyona karşı camın direncini artırır. Cam sertlik verir ve dayanıklılığı artırır. Devitrifikasyonu engeller.
- Na_2O (Sodyum Oksit) modifiye edici oksitlerden birisidir. Camın ergime sıcaklığını düşürür ve akışkanlığı artırır. Tetrehedraller arası bağları zayıflatığından dolayı camın ısı genleşme katsayısını artırır ve termal şok direncini azaltır. Camın suda çözülmesine neden olur ve engellemek için kireç hammaddesi kompozisyona eklenir.
- K_2O (Potasyum Oksit) iyon çapı büyük olduğundan kaynaklı cam içerisindeki hareketliliği azaltır ve mekanik direnci artırır.
- MgO (Magnezyum Oksit) camın hızlı bir şekilde katılaşmasını sağlar bu yüzden seri üretim imalatlarında hammadde içerisindeki MgO oranı fazladır. Cam ürününün parlaklık derecesini artırır.
- CaO (Kalsiyum oksit) camın suya karşı dayanıklılığını artırır ve ergime sıcaklığını yükseltir. Camın mekanik dayanımını yükseltir.

1.2 Cam Üretimi

Cam üretimi enerji yoğun, modern teknoloji gerektiren ve yüksek oranda finans kaynağı ya da sermaye gerektiren bir sanayi koludur. Fırınlara ömrü boyunca sürekli çalışması, şirket açısından üretim maliyetlerinde enerji payının yüksek olmasına neden olur. Enerji ve hammadde krizlerinde etkilenecek sektörlerin başında cam sanayisi gelmektedir. Diğer bir yandan fırın yenileme, makine bakımları ve kapasite arttırmaları gibi unsurlar yüksek sermaye gerektirdiğinden dolayı sektöre girişleri zorlaştırır. Cam, yenilikçi fikirlere ve geliştirmeye açık bir ürün olmakla beraber, insan yaşamında birçok farklı noktada kullanılmaktadır. Cam üretimi birçok sanayi iş koluna da girdi sağlamaktadır. Otomotiv, inşaat, beyaz eşya, gıda, içecek, meşrubat, sağlık, kozmetik, turizm, mobilya, savunma sanayi, enerji, elektrik ve elektronik gibi birbirinden farklı birçok sektöre girdi veren sanayi dallarından biri olup, ülke ekonomilerinde önemli bir yer tutmaktadır. Ayrıca sonsuz sayıda geri dönüştürülebilir olmasıyla da sürdürülebilirlik konusunda gittikçe yaygınlaşan bir malzemedir.

Türkiye’de cam sanayi sektörü, ilk olarak 1935 yılında Paşabahçe fabrikasının devreye alınmasıyla başlamıştır. Cam üretiminde gerekli hammaddelerden olan düşük demir oranına sahip silis kumu hariç diğer hammaddeler, ülkemizden temin edilebilmektedir.

Fakat yüksek kalitede cam ürünü istenen üretimlerde kullanılsilis kumu, Mısır ve Portekiz gibi ülkelerden gemi yoluyla gelmektedir. Savaş veya pandemi gibi sebeplerden dolayı lojistik ağının zayıflaması hammadde tedarik sürecini etkileyebilir. Bu yüzden üretim süreci planlı ve verimli olmalıdır. Türk Cam sanayisi, ülke içerisinde yarattığı üretim hacmiyle dünya ve Avrupa’da birçok faaliyet alanında ilk sıralarda yer almaktadır. Günümüzde ana cam üreticileri hariç, ikincil işlem yapan küçük ve orta ölçekte de yüzlerde firma bulunmaktadır. Ülkemizde ihracat kalemleri arasında olan cam, yurtdışı pazarlarında kendine üst sıralarda yer bulurken yurtiçi piyasasının tamamına yakını ülke içerisindeki üretimden karşılanmaktadır. Dünya pazarlarında Türkiye, cam ev eşyasında Avrupa’da 2’nci, Dünya’da 3’üncü sırada, Cam ambalaj üretiminde Avrupa’da ve Dünya’da 5’inci sırada, düz cam üretiminde Avrupa’da 1’inci, dünyada 5’inci sırada, soda külünde ise Avrupa’da 4’üncü, dünyada ise 8’inci sırada yer almaktadır (Cam Sektör Raporu, 2022).

Çizelge 1.3 : 2020 yılı Dünya cam sektörü faaliyet alanlarında üretim kapasiteleri ve yüzdeleri (Cam Sektör Raporu, 2022).

Üretim Türü	Kapasite (Milyon Ton)	Pay (%)
Düzcamlar	82	47
Cam Ambalaj	80	46
Cam Ev Eşyası	6	3
Cam Elyaf	6	4
Toplam	175	100

Son 10 yılda dünya cam üretimi yaklaşık olarak yıllık %4-5 oranında büyüme kaydederek 120 milyon tondan 170 milyon tona ulaşmıştır. Çizelge 1.3’te farklı faaliyet alanlarında üretim kapasiteleri ve yüzde oranları bulunmaktadır. 2021 yılı içerisinde cam üretiminin pazar büyüklüğü 176 milyar dolar olarak gerçekleşmiştir. Cam üretimi alanındaki ticaret hacminin 2021’den 2032’e kadar yıllık ortalama %5 büyüme hedefiyle 312 milyar dolara ulaşması beklenmektedir. Fakat dünya üzerinde yaşanan savaş, pandemi, işgücü ve hammadde sorunları nedeniyle cam üretiminde aksamalar meydana gelebilmektedir. Bundan dolayı kaynakların en verimli şekilde kullanılması cam sektörünün en önemli sürdürülebilirlik hedeflerinden birisidir. Belirlenen hedef doğrultusunda sektör içerisindeki firmalar, sahip oldukları kaynakları en verimli şekilde değerlendirmek adına çalışmalar yürütmektedir. Özellikle enerji

tüketimini düşürmek ve ürün kalitesini arttırmak için araştırma ve geliştirme projeleri yürütülmektedir.

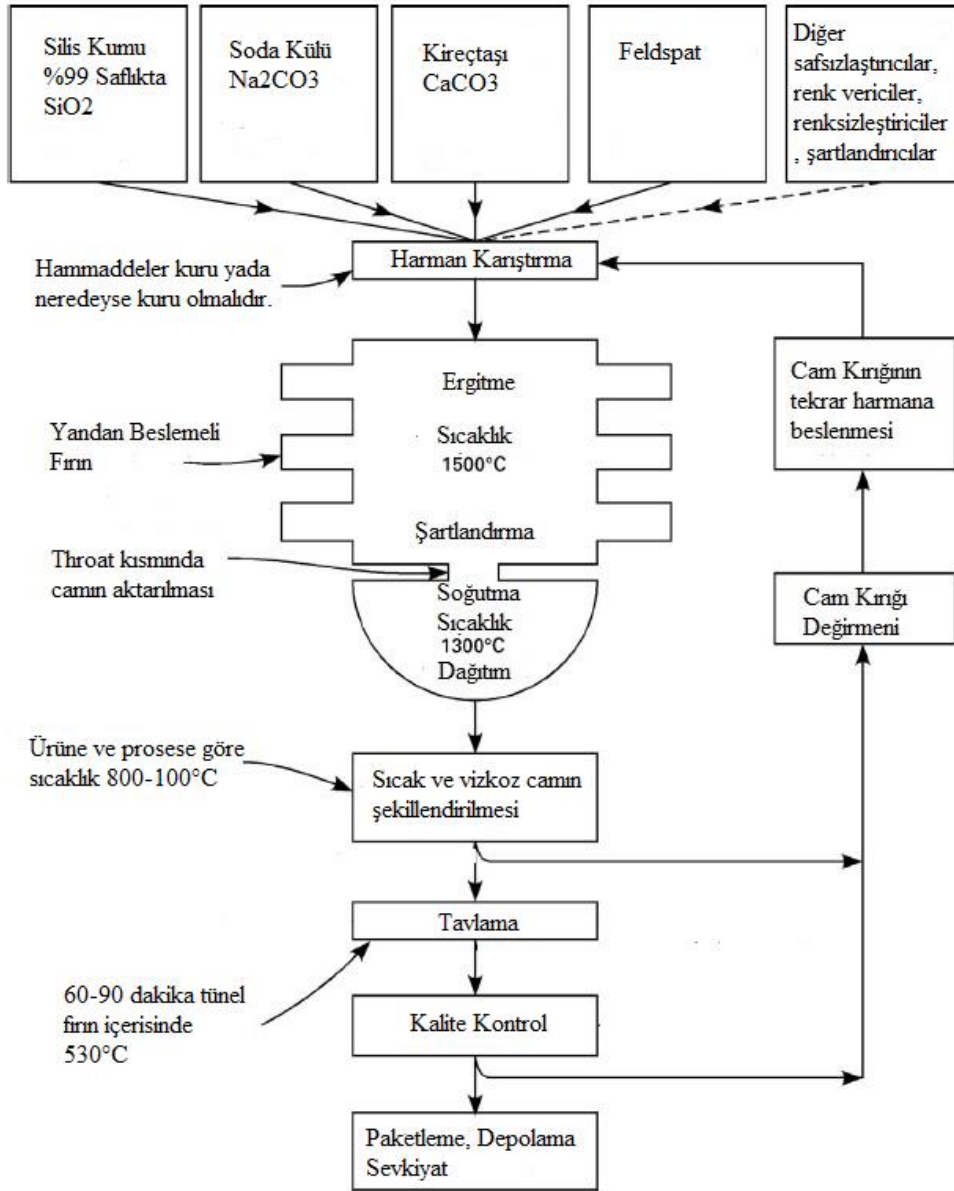
Rekabet açısından değerlendirmek gerekirse de cam üretimi yüksek randıman ile gerçekleşmelidir. Günümüz şartlarında cam üreticileri, müşteri memnuniyetini karşılamak adına çevik ve karlı olmalıdırlar. Talep edilen ürünler müşterinin beklentisini ve firmanın karlılığını karşılamalıdır. Cam sektöründe firmalar arasındaki rekabet genellikle fiyat avantajı tarafından değerlendirilmektedir. Diğer bir yandan verimlilik sağlayan, yeterli kalitede üretim yapan, siparişi müşteriye ulaştırma süresinde hızlı olan, fiyat avantajı sağlayan ve ürün çeşitliliği olan firmalar öne çıkmaktadır. Özellikle üretim alanında tecrübeli, yenilikçi ve hızlı olmak cam üreticilerine büyük avantaj sağlayacaktır. Cam üretimi sürekli kontrol altında tutulması gereken hayli karmaşık bir proses adımlarından oluşmaktadır. Üretim süresince karmaşık koşullar altında yapılan çalışmalarda tecrübe kazanmak firmalara maliyet yükü getirmektedir. Fakat elde edilen tecrübe ile cam üretimi gerçekleştiğinden kaynaklı, firmalar sahip oldukları bilgi ve tecrübeyi korumak istemektedirler. Cam üretimi süresince proses kararlılığı, şirketler tarafından istenilen en önemli özelliktir. Proses kararlılığını elde etmek, sahip olunan tecrübe ve güncel teknolojiler ile donatılmış makine parkuru ile mümkündür.

1.2.1 Cam üretim süreci

Cam üretim süreci birçok aşamadan meydana gelmektedir. Tüm prosesler harman hazırlama ve ergitme ile başlamaktadır. Cam kompozisyonu belirlendikten sonra gerekli hammaddeler harman dairesi içerisinde karıştırılarak ergitme fırınına beslenmektedir. Cam türü ve kapasitesine göre de cam fırın tipleri de değişmektedir. Harman, daha sonra ergitme fırınına doghouse kısmından beslenerek ısıнын etkisiyle ergiyerek kimyasal reaksiyonlar sonucunda ergimiş cama dönüşmektedir. Fırın içerisinde ergiyen cam, makinelerin üretim hızına bağlı olarak feeder mekanizmasının yardımıyla fırın tarafından makinelere doğru çekilmektedir. Ayrıca üretim hatlarına beslenecek camın sıcaklığı ve özellikleri istenen değerlerde olması beklenmektedir. Ergimiş cam üretim makinelerine doğru ilerlerken fırın içerisinde, çalışma havuzunda ve forehearth bölgelerinde şartlandırılmaktadır. Her bir üretim hattını besleyen forehearth sonunda bulunan feeder mekanizması, üretim tipine göre değişebilecek cam damlasının oluşmasını sağlar. Cam damlası belirli formlarda ve farklı sıcaklıklarda

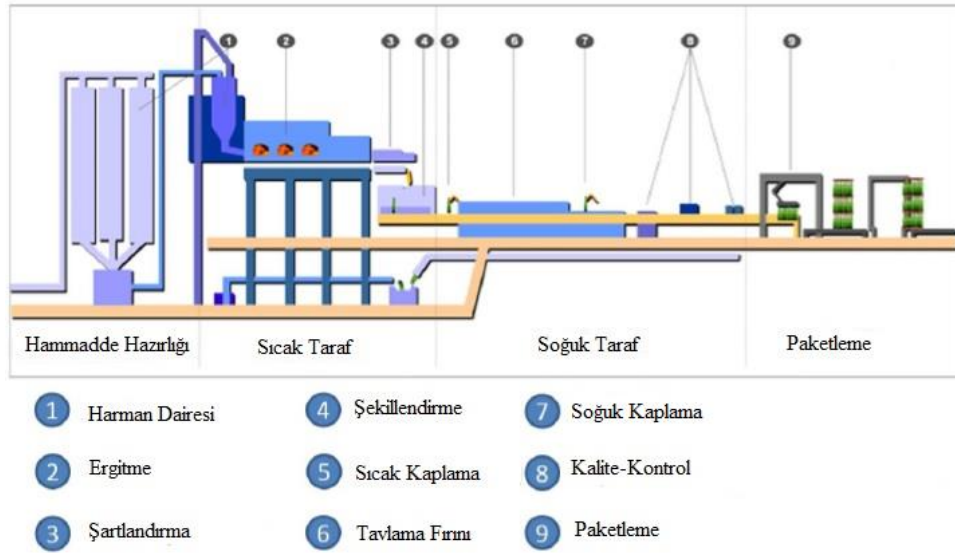
olabilir. Yüksek sıcaklığa dayanıklı özel kaplamalı makaslar yardımıyla kesilen cam damlaları, kepçe-oluk-saptırıcı olarak adlandırılan damla yollarından geçerek kalıp içerisine düşer ve ürünün imalat süreci başlamış olur.

Sofra camı ve cam kap üretim sektöründe kullanılan 4 ana şekillendirme yöntemi bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla pres, pres-üfleme, üfleme-üfleme ve savurma metotları olmakla beraber kullanılan makineler 4 ana şekillendirme prensibine göre çalışmaktadır. Üretilecek ürünün formu, gramajı, verimliliği ve maliyet vb. özellikleri hesaba katılarak en uygun proses seçilmektedir. Belirlenen ürünün kalıp tasarımları tamamlandıktan sonra denemeler gerçekleşir ve gerekli imalat bilgileri toplanır daha sonra ürün imalata hazır hale gelir. Üretim makinelerinde oluşan cam ürünler imalat sonrası tavlama fırınlarına beslenir. Tavlama fırınlarında şekillendirme ve soğuma esnasında ürün üzerinde oluşan gerilimler giderilerek imalat süreci tamamlanmış olur. Sonrasında tavlama ya da soğutma fırınından çıkan ürünler, fabrika standartlarına göre kalite ayırım sürecine girer. Kalite ayırımından geçen ürünler son olarak sevk edilmek üzere paketlenir ve depolanır.



Şekil 1.6 : Ticari cam üretim prosesi akış şeması (Mauro ve Varshneya, 2019).

Şekil 1.6’da ticari cam üretim prosesinin akış şeması bulunmaktadır. Yüksek hız ve verimlilik gerektiren sofracamı, cam ambalaj, fiber cam, düz cam ve lamba camı ürünleri belirtilen akış şeması ile üretilmektedir. Üretim hatlarında otomatik üretime uygun, yüksek verimli ve modern cam üretim makineleri kullanılmaktadır. Şekil 1.7’de sofracamı üretim prosesinde bulunan aşamalar şematik olarak hammadde hazırlığından paketleme kısmına kadar gösterilmiştir. Ürün tipine göre farklılık göstermekle beraber 9 aşamadan oluşmaktadır. Fakat özet olarak listelenirse 4 aşama ile de belirtilebilir. Bunlar harman, fırın, imalat ve kalite adımlarıdır.



Şekil 1.7 : Sofra camı üretim hattı şematik gösterimi (Martins, B. M. R., 2017).

1.2.1.1 Harman dairesi

Cam üretiminin en temel basamaklarından bir tanesi harman hazırlama işlemidir ve üretim sürecindeki en önemli unsurların başında gelmektedir. Belirlenen cam reçetesine göre harman dairesinde, hammadde depolama, harman hazırlama işlemleri ve hazırlanan harmanın fırına besleme prosesi uygulanmaktadır.



Şekil 1.8 : Cam üretim fırını ve harman dairesi şematik gösterim.

Hazırlık ve besleme aşamaları;

- Hammadde temini: Cam üretiminde kullanılacak hammaddeler depolanmaya uygun şekilde sevk edilir ve hammadelere depolama öncesi kalite-kontrol prosesi uygulanır.

- Depolama: Üretim kapasitesi ve tedarik sürecine bağlı olarak kritik stok seviyesi belirlenir ve uygun koşullarda hammaddeler depolanır. Üretimin kesintisiz devam etmesi adına depolama ve kritik stok seviyesi önemlidir.
- Reçete Hazırlama: Belirlenen cam kompozisyonuna göre hammaddelerin besleme miktarları hesaplanır. Camdan beklenen özellikler reçete ile belirlenir.
- Harman Hazırlama: Hazırlanan reçeteye bağlı olarak, belirli tane boyutundaki hammaddeler hassas tartım işleminden sonra mikserlerde toplanarak karıştırılır. Yapılan işlemler sonrasında homojen bir cam harmanı elde edilir.
- Fırına Besleme: Homojen karışımı sağlanan harman içerisine besleme öncesi belirlenen miktarlarda cam kırığı eklenerek karışım fırın silosunda depolanır. Karışımı yapılan harman, fırın silosundan doghouse bölgesine konveyör ile taşınır ve daha sonra batchcharger yardımıyla ergitme fırınına beslenir.

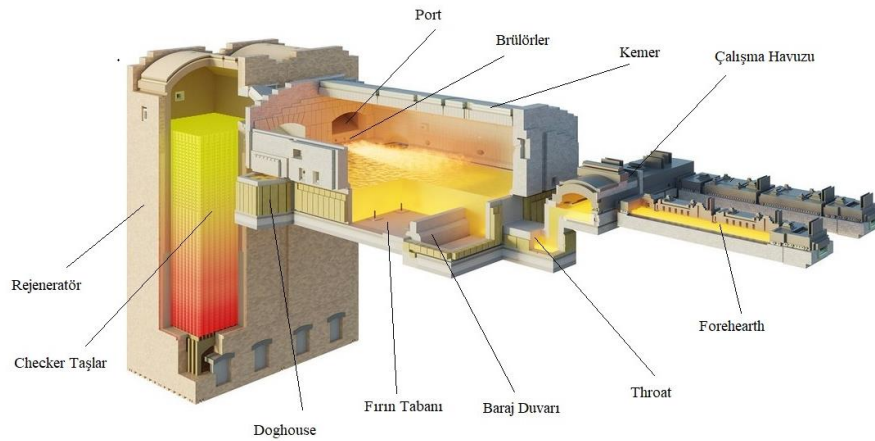
1.2.1.2 Ergitme fırını

Cam endüstrisinde kullanılan ergitme fırınları, beslenen harman ve cam kırığının yüksek sıcaklıklarda cam haline geldiği bölümdür. Cam türüne göre ergitme sıcaklıkları değişmektedir. Cam fırınları, ergitme, şartlandırma ve ısı geri kazanım olarak 3 ana bölümden oluşmaktadır. Belirtilen ana bölümler içerisinde ergitme fırını oluşturulan temel unsurlar bulunmaktadır. Bunlar;

- Ergitme Havuzu
- Üst Yapı
- Throat
- Çalışma Havuzu ve Forehearth
- Isı Değiştiriciler (Rejenarator ya da Reküparatör)

Cam sanayisinde kullanılan sürekli cam ergitme fırınları ekonomik ömürleri boyunca sürekli çalışmaktadır. Seri üretime uygun bu fırınlar ilk olarak fırın antrampaj denilen bir uygulama ile işlem sıcaklığına gelene kadar ısıtılmaktadır. Daha sonra istenilen sıcaklığına gelen fırın prosese alınır ve cam üretimi başlamış olur. Kompozisyona uygun harman, doghouse kısmından fırın içerisine beslendikten sonra ergitme havuzunda yüksek sıcaklığın etkisiyle çeşitli fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar meydana gelmeye başlar. Soda-kireç camı üretiminde enerji kaynağı olarak yaygın bir şekilde doğalgaz yakıtı kullanılmaktadır. Uygun yakıt-hava karışımının yanmasıyla

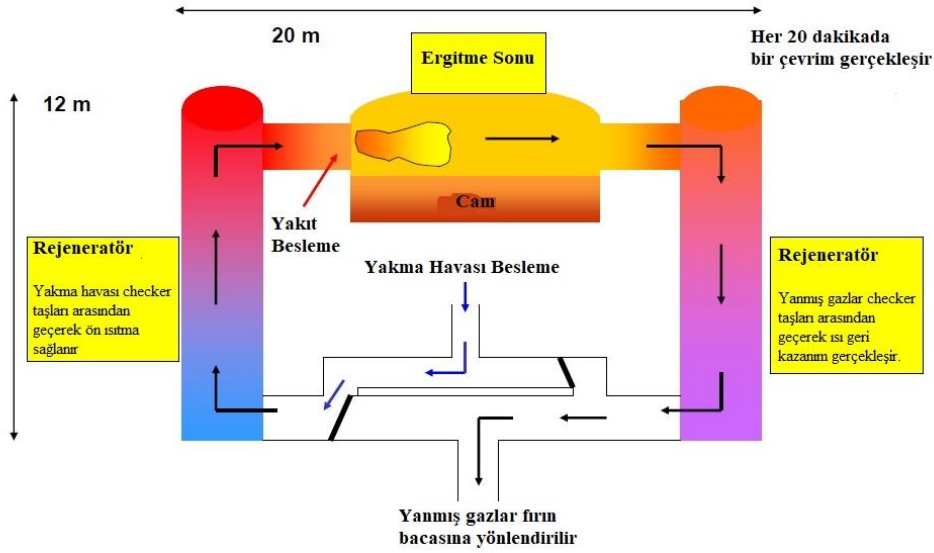
oluşan alev ergitme havuzu içerisine yönlendirilerek ergiyik cama ve harmana doğru ısı transferinin gerçekleşmesi sağlanır. Cam üretim makinelerinin kapasitelerine bağlı olarak gerçekleşen cam çekişinin yardımıyla ergitme havuzu içerisinde akış meydana gelir. Çekiş miktarının etkisi ve ergitme havuzundaki akışın yardımıyla harman, reaksiyonlar sonucunda ergiyerek cam halini alır. Harman, bu sırada dekompozisyona uğrar, oksitler halinde çözünür ve ergime gerçekleşir. Ergiyik cam hacmi ve fırın atmosferinde reaksiyonlar sonucunda su buharı ve çeşitli gazlar oluşmaktadır. Cam içerisinde bulunan hava kabarcıkları olan habbelerin camdan uzaklaştırılması için afinyasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca ergimiş camın homojen bir şekilde karışması, homojenizasyon aşamasının yardımıyla gerçekleşir. Fırın içerisinde gerekli işlem basamaklarından geçen cam, üretim makinelerinde şekillendirilmek için çok sıcak ve akışkandır. Bu yüzden çalışma havuzu ve forehearth kısımlarının yardımıyla cam, imalat yapılabilecek sıcaklığa düşürülerek feeder mekanizması yardımıyla makinelere beslenir.



Şekil 1.9 : Arkadan ateşlemeli yandan beslemeli rejeneratif fırın şematik gösterimi (Horn Glass Industries).

Cam ergitme fırınlarında yaygın olarak doğalgaz yakıtı kullanılmakla beraber gerektiğinde fuel-oil, propan ya da elektrik enerjisi vb. kaynaklar da kullanılabilir. Fabrika içerisinde tüketilen enerji miktarları ele alındığında ergitme prosesi enerji tüketimi konusunda ilk sıralarda yer almaktadır. Günümüzde karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik çalışmalar ile ergitme ve şartlandırma kısımlarında kullanılmak üzere alternatif enerji kaynakları da test edilmeye başlamıştır. Enerji maliyetlerinin tüm dünyada yükselmesi, hammadde ve enerji kaynakları tedarik zincirinin çeşitli nedenlerden dolayı aksaması, cam üreticilerini etkilemektedir.

Sürekli cam üretim fırınlarının fiziksel ömrü çeşitli unsurlara bağlı olarak 5-15 yıl arasındadır. Rekabet düzeyi yüksek olan cam üretimi sanayisinde, sürekli cam üretim fırınları durmadan çalıştırılmalıdır. Üretim kampanyaları, üretim denemeleri, planlı bakımlar ve duruşlar fabrika yönetimi tarafından çok iyi bir şekilde planlanmalıdır. Aksi takdirde zamansal fayda yüzdesi düşmekte ve ürün maliyetleri yükselmektedir.



Şekil 1.10 : Rejeneratif fırın kesit görünüşü ve çalışma prensibi.

Cam üretim fırınları yüksek yoğunlukta enerji tüketmektedirler. Yüksek sıcaklıklarda ergime gerçekleştiğinden dolayı atık gazlar üzerinde biriken enerji geri kazanılabilir. Rejeneratif fırınlarda yanmış gazlar, rejeneratör içerisindeki checker olarak adlandırılan taşlar arasından geçerken ısı aktarımı meydana gelmektedir. Checker tuğlaların gözenekli ve bal peteği yapısı ile atık gazların geçtiği bölgenin yüzey alanları arttırılmıştır. Her 20 dakikada bir yakma havası, bir önceki çevrimde ısınan checker tuğlaları arasından geçerek ergitme havuzuna port açıklığından bağlanır ve yakıt ile karışarak yanma gerçekleşir. Bu döngüye “enversiyon” denir. Yakma havasının bu yöntemle ısıtılması enerji verimliliğini arttırmakta ve ton cam başına kullanılacak yakıt miktarını düşürmektedir. En uygun yarı çevrim süresi, cam çekiş miktarına ve fırın üzerindeki ısı yüküne bağlıdır. Çevrim anında fırının alevsiz olma süresi yaklaşık 30-60 saniye arasında değişmektedir. Bu sürenin kısa tutulması fırının aşırı derecede soğumasını engeller.

1.2.1.3 Forehearth

Forehearth, çalışma havuzu ile üretim makineleri arasında konumlanır ve “cam besleme oluğu” olarak da adlandırılabilir. Forehearth bölümünde cam, şartlandırılarak imalata uygun sıcaklığa getirilir. Forehearth kanalının en uç bölümünde feeder mekanizması bulunmaktadır. İmalata uygun sıcaklığa ulaşan cam, bu kısımda plunger ve makas yardımıyla damla halini alır ve makinelere yüklenir. Forehearth kanallarında camda herhangi bir kimyasal homojenizasyon ve habbe çıkışı gerçekleşmemektedir. Isıl kararlılık, sıcaklık dağılımında homojenlik, cam akışında kararlılık, imalat değişimlerine hızlı cevap verme ve düşük enerji tüketimi forehearth kısmından beklenen en önemli özelliklerdir. Özellikle forehearth kısmında ilerleyen cam içerisindeki sıcaklık dağılımının homojen olması imalat parametrelerini etkilemektedir. İmalat değişimi sonrası forehearth içerisindeki homojen sıcaklık dağılımı hızlı bir şekilde sağlanmalıdır. Forehearth bölümünde bulunan ısıtma, soğutma sistemleri ile üst yapının geometrisi, bu alandaki verimliliği etkileyen unsurlardır. Camın bu alandaki sıcaklığı 1100-1200 °C arasında değişmektedir. En küçük sıcaklık farklılıklarında bile camın viskozitesi değişmekte ve oluşacak damla geometrisini olumsuz yönde etkilemektedir. Sıcaklık dağılımının kontrol altında tutulması için forehearth’ın farklı bölgelerinde 9 noktadan termokupullar yardımıyla sürekli ölçümler yapılmaktadır. Ölçümler tabana yakın alt yüzey, orta kısım ve yüzeye yakın noktalardan yapılmaktadır. Forehearth kısmında sağlayan ısıl kararlılık üretim verimliliğine de yansımaktadır. Damla gramajı ve sıcaklığının sürekli dengede olduğu bir sistemde forehearth kaynaklı imalat hataları en aza indirgenmiş olur.

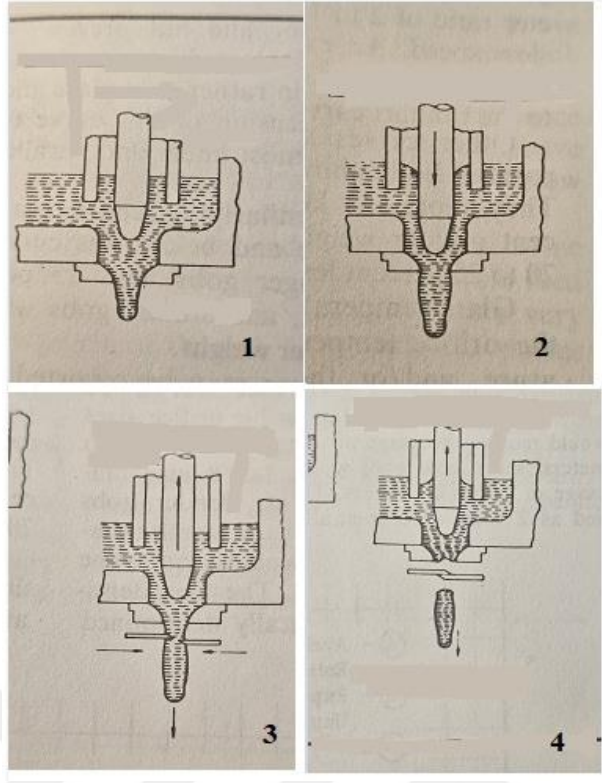
Foreharthlar; kavanoz, şise, cam ev eşyası, sofr camı, ampül ve cam elyaf gibi ürünlerin üretilmesi için kullanılmaktadır. Ayrıca camın fırın içerisindeki rengini değiştirmeden forehearth kısmından renklendirme uygulaması ile farklı renkte camların imalatı mümkün olabilmektedir. Aynı fırından aynı anda farklı renkte ürünler üretilir. Forehearthlar genellikle ısıtma, ergitme, karıştırma, soğutma ve dengeleme zonlarından oluşmaktadır. Şekil 1.11’de forehearthın 3 boyutlu modeli ve kesit görüntüsü resmedilmiştir.



Şekil 1.11: Forehearth 3 boyutlu model görüntüsü ve kesit hali.

1.2.1.4 Spout ve feeder

Cam üretimde feeder ve spout kısmı cam şekillendirmenin ilk başladığı yer olarak düşünülebilir. Spout, forehearth cam oluğunun en sonunda yer almakla beraber şartlandırılmış ve soğumuş camı tutmakla görevlidir. İleri üretim teknolojileri ile üretilen spout, yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerden oluşur. Isıl şoklara karşı dirençli, ısı yüklerine karşı dayanıklı ve özellikle korozyon direnci yüksek olmalıdır. Spout refrakteri taban kısmında dairesel açıklık bulunmakta ve bu dairesel akış deliğine şamot adı verilmektedir. Üretim tipi ve damla ağırlıklarına bağlı olarak birden fazla açıklık olabilir. Ayrıca cam akış miktarını ayarlayan tüp mekanizması, şamot merkez ekseninde bulunmaktadır. Tüp mekanizması aşağı ve yukarı hareket ederek şamot kısmından geçecek cam miktarını ayarlar. Aynı zamanda feeder mekanizmasına bağlı olarak çalışan tüp refrakteri kendi ekseninde dönerek camı homojen hale getirir ve camın sıcaklığına göre gerekli miktarda ısıtma ya da soğutma sağlanır. Cam damlasının oluşması için ek olarak plunger refrakterine ihtiyaç vardır. Plunger mekanizması tüp refrakterinin tam ortasında konumlanmış ve çevrim içerisinde sürekli aşağı-yukarı hareket ederek şamot açıklığından dışarı doğru camı yönlendirir. İmalat türüne ve cam damlasının ağırlığına göre plunger mekanizmasının hareket profili değişebilir. Plunger mekanizması hem mekanik kam hem de servo motor yardımıyla çalışmaktadır. Fakat günümüzde servo feeder mekanizması, yüksek kalitede ürün, ihtiyaca göre damla şeklinin belirlenmesi, hızlı imalat değişim süresi ve damla ağırlığındaki düşük saplamardan dolayı tercih edilmektedir. Şekil 1.13'te damla oluşum için gerekli refrakter ekipmanları, Şekil 1.12'de ise damla oluşum aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 1.12 : Damla oluşum aşamaları (Tooley, 1974).



Şekil 1.13 : A) spout, B) plunger, C) tüp, D) şamot (Rath Refractories).

1.2.2 Şekillendirme

Cam damlası makaslar yardımıyla kesildikten sonra damla yolu ekipmanları vasıtasıyla imalat makinelerine yüklenmektedir. Bu aşama itibariyle şekillendirme

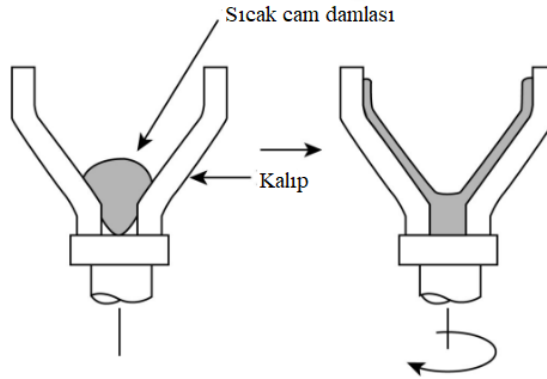
başlamış olur. Ürün geometrisi ve formu, ürün gramajı, verimlilik gibi esaslar göz önüne alınarak makine türü seçilir ve kalıp tasarımı belirlenen makineye göre yapılır. Soda-kireç camı diğer cam türlerine göre daha az maliyetli hammaddelerden oluşmaktadır. Çeşitli oksitler kullanılarak kimyasal korozyona karşı dirençli, mekanik darbelere karşı dayanıklı ve çok hızlı üretime uygun ürünler üretmek mümkündür. Soda-kireç camı üretiminde kullanılacak makinelerin yüksek devirlerde arızasız bir şekilde çalışması gerekmektedir. Sofra camı, şise ve cam kap üretiminde aşağıdaki prosesler kullanılmakta ve bu proseslere bağlı olarak farklı makine tipleri bulunmaktadır.

- Savurma
- Pres
- Pres-Üfleme
- Üfleme-Üfleme

1.2.2.1 Savurma Prosesi

Sofra camı üretiminde kullanılan savurma prosesi ile geniş ve sığ ürünler yapılabilir. Pres prosesine göre cidar kalınlığı ince ve ağzı geniş ürünler imal edilebilir. Ayrıca pres prosesinin aksine savurma makineleri, aynı ürün çeşidi için daha devirli çalışabilir. Savurma makineleri kendi ekseni etrafında dönmekte ve ihtiyaca göre belirlenmiş sayıda üretim kollarına sahiptir. Bu istasyonlar içerisinde servo motor yardımıyla kendi ekseni etrafında dönen kalıplar bulunmaktadır. Savurma prosesi merkezkaç kuvvetinin etkisiyle çalışmaktadır. Feeder tarafından kesilen damla, arada kalıp taşıyıcı kalıp ekipmanları olmadan direk olarak kalıp içerisine düşmektedir. Şamot ekseni ile kalıp ekseni aynı hizada bulunmaktadır. Ayrıca farklı geometrilerdeki ürünlerin imalatına imkân sağlamak ve düzgün bir cidar dağılımı elde etmek için huni olarak adlandırılan ön şekillendirme kalıp ekipmanı kullanılır. Damla düşmeden önce hizalama ya da kalıp içerisine düştükten sonra ön şekillendirme gerekiyorsa huni denilen mekanizma kalıp ortasına konumlanarak damlanın merkeze düşmesini sağlar. Damla, yerçekim etkisiyle huni içerisinden kalıp yüzeyine düştükten sonra şekil değiştirir. Daha sonra huni mekanizması yukarı doğru hareket ederek bir sonraki çevrimi bekler. Şekil.14'te gösterilen kalıp, kendi ekseni etrafında yaklaşık 1000-1500 rpm hızında dönerek, cam damlasının kalıp yüzeyinde ilerlemesini sağlar. Şekillendirme gerçekleşirken hem kalıp hem de ürün belirli zaman aralıklarında

soğutulur. Şekillenmiş ürün, vakum başlıkları ile kalıp içerisinden alınır ve konveyörler yardımıyla tavlama fırınına yönlendirilir.

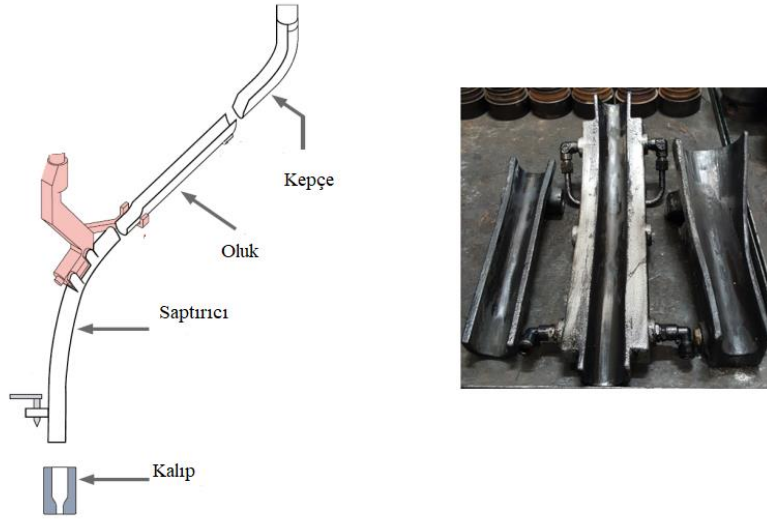


Şekil 1.14 : Savurma prosesi şematik gösterim.

1.2.2.2 Pres prosesi

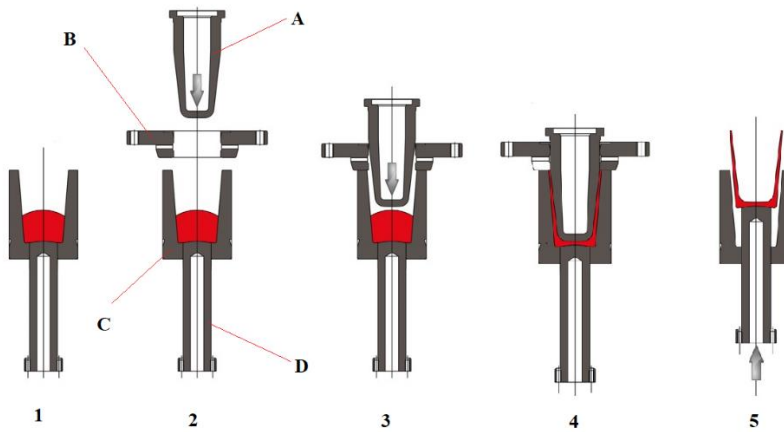
Pres prosesi, sofr camı üretiminde kullanılan şekillendirme yöntemlerinden birisidir. Su Bardağı, çay tabağı, kâse, kulplu bardak ve gravürlü ürünler, pres yöntemi ile üretilebilir. Yöntem gereği, cam damlası kesildikten sonra yerçekiminin etkisiyle şekil 1.15'te gösterilen kepçe, oluk ve saptırıcıdan geçerek kalıp içerisine düşer. İndeksli hareket eden makine tablası dönerek mastörün ve ring mekanizmasının bağlı olduğu silindir eksenine gelir. Daha sonra mastör denilen hareketli kalıp ve ring, aşağı doğru hareket ederek preslemeyi gerçekleştirir. Soğutma istasyonunda kalıplar ve şekillenen ürünler hava ve su yardımıyla soğutulur. Take-out istasyonunda ürün, vakum başlığı ya da itici şaft yardımıyla kalıptan ayrılarak ağız yakma istasyonuna beslenir. Proses gereği şekillenen ürünün ağız kısımlarında çapak ya da keskinlik bulunmaktadır. Ağız yakma istasyonunda alevler yardımıyla ürünlerin ağız kısmı yumuşatılır ve daha sonra ürünler tavlama fırınlarına beslenir.

Pres prosesinde çift parça ya da monoblok kalıplar kullanılmaktadır. Ürünlerin kalıptan deforme olmadan ayrılması için kalıp ve mastörlerde koniklik açısı kontrol edilmeli ve kalıp tasarım kısmında bu konuya dikkat edilmelidir. Pres prosesinde cam damlasının sıcaklığı ortalama 1050-1100 °C arasında değişmektedir. Yüksek sıcaklıktan dolayı kalıplar yüksek Cr-Ni alaşımlı çeliklerden imal edilmektedir. İmalat esnasında kalıplara yağlama yapılarak cam damlasının yapışması engellenir ve kalıp yüzeyleri korozyondan korunmuş olur.



Şekil 1.15 : Kepçe-oluk-saptırıcı şematik gösterim.

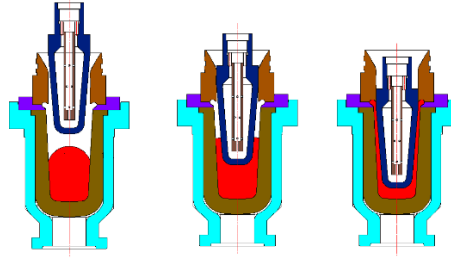
Şekil 1.16’da presleme prosesinin adımları görselleştirilmiştir. Kalıp parçaları A, B, C, D harfleri ile gösterilmiş olup, proses toplam 5 adımdan oluşmaktadır. Mastör A ile, ring B ile, kalıp C ile, müldefon ise D ile işaretlenmiştir. 1.adımda damla, kesildikten sonra damla yolları vasıtasıyla kalıp içerisine düşer. 2.adımda içerisinde damla bulunan kalıp, mastör ve ring mekanizması bağlı silindirin altında konumlanır. 3.adımda silindir aşağı doğru hareket eder. 4.adımda şekillendirme tamamlanır ve son adım olan 5.adımda müldefon yukarı hareket eder ve şekillenmiş ürünü kalıptan çıkarır. Müldefon olmayan kalıplarda ürünün kalıptan çıkartılması için vakum kullanılır.



Şekil 1.16 : Presleme prosesi adımları.

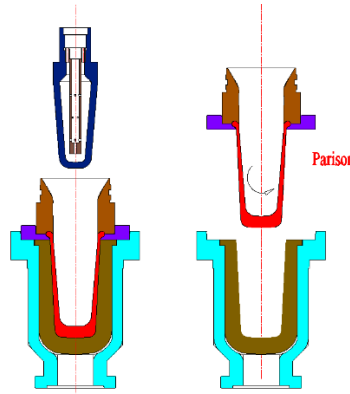
1.2.2.3 Pres-üfleme prosesi

Pres-üfleme prosesi sofracami üretiminde kullanılan en temel ve yaygın proseslerden birisidir. Pres prosesinin aksine daha karmaşık geometride ürünler imal edilebilir. Bu proses, pres ve üfleme olarak iki aşamadan gerçekleşmektedir. Damla kesildikten sonra kalıba düşer ve mastör yardımıyla ön şekillendirme gerçekleşir. Ön şekillenen cam damlası parizon olarak adlandırılmaktadır. Daha sonra parizon içerisine hava üflenerek camın son kalıp (finaşör) şeklini alması sağlanır. Pres-üfleme prosesinde şise, kavanoz, kadeh, gravürlü bardak, kuplu sürahi, çay bardağı gibi ürünler imal edilmektedir. H-28 ve IS (Individual Section) olarak adlandırılan makineler bu üretim yöntemini kullanarak şekillendirme yapar.



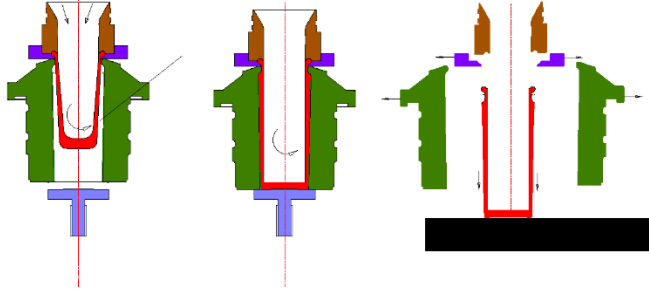
Şekil 1.17 : H-28 pres-üfleme prosesi 1. aşama.

Şekil 1.17’de H-28 pres-üfleme prosesine ait bir adım gösterilmiştir. Cam damlası makaslar yardımıyla kesildikten sonra damla yolları vasıtasıyla ebüşör içerisine düşer. Daha sonra mastör mekanizması aşağı hareket ederek presleme işlemini gerçekleştirir ve böylece parizon oluşur. Parizonun ağız kısmını oluşturan kalıp parçaları, müldebag ve ring ekipmanlarıdır. Mastör ve ebüşör kalıplarının soğutulması için basınçlı hava kullanılmaktadır.



Şekil 1.18 : H-28 pres-üfleme prosesi 2. aşama.

Şekil 1.18’de gösterilen 2.aşamada, presleme işlemini tamamlayan mastör geri çekilir ve ebüşör mekanizması aşağı hareket eder. Müldebeg ve ring mekanizması tarafından tutulan parizon kendi eksenini etrafında dönmeye başlar ve yerçekiminin etkisiyle istenilen oranda sarkması istenir.



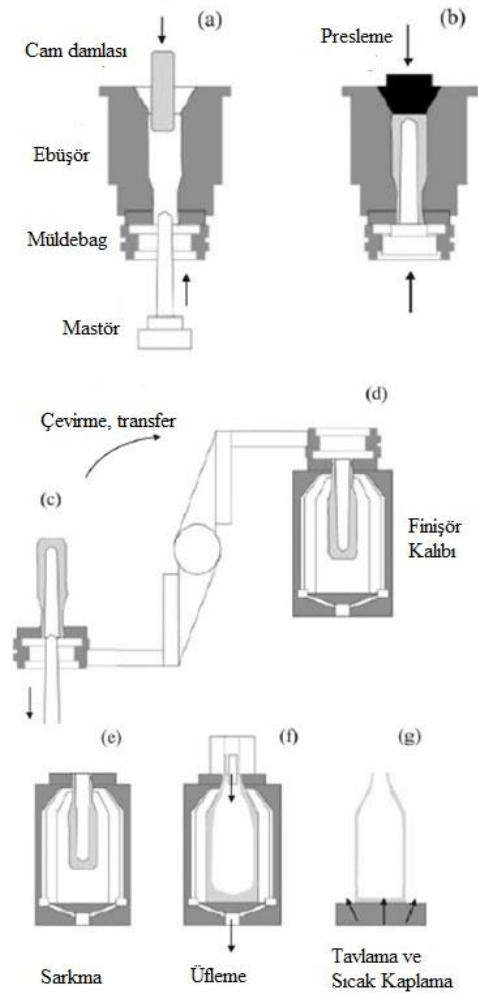
Şekil 1.19 : H-28 pres-üfleme prosesi 3.aşama.

Şekil 1.19’da gösterilen 3.aşamada, oluşan parizon kendi eksenini etrafında dönerken finişör üzerine kapanır ve parizon içerisine belirli bir basınçta hava üflenerek şişmesi sağlanır. Finişör kalıbının şeklini alan cam ürünü daha sonra konveyör üzerine bırakılır ve ağız kesme işlemi uygulanır. Cam ürününün makineler arası taşınması için ağız kısmında kape denilen fazlalık cam bulunmaktadır. Ağız kesme işleminde kape kesilir ve cam kırığı olarak tekrar harmana eklenmektedir. Son olarak ürün, tavlama fırınına yönlendirilir ve üzerinde bulunan gerilimler giderilir.

H-28 makinesinde pres-üfleme prosesinde bazı değişiklikler yapılarak veya proses eklenerek çekme-ayak ve sabit üfleme yöntemleri geliştirilmiştir. Çekme-ayak prosesinde oluşan ürünün ayak kısmı alevler yardımıyla ısıtılarak şekillendirme sıcaklığına getirilir ve daha sonra çekilir. Ürün yüzeyinde gravür istenen durumlarda ise sabit üfleme yöntemi tercih edilir. Sabit-üfleme prosesinde parizon, finişör kalıbı içerisinde dönmez ve üfleme havası yardımıyla finişör kalıbının şeklini alır.

Pres üfleme prosesinde kullanılan diğer bir yöntem de “individual section” olarak adlandırılan IS üretim metotudur. IS makinesinde şişe, kavanoz, kuplu ya da kulpsuz sürahi, parfüm şişeleri, cam damacana gibi ürünler imal edilmektedir. H-28 makinesindeki pres-üfleme yönteminin aksine presleme aşağıdan yukarıya doğru gerçekleşmekte ve “section” olarak tanımlanmış üretim kolları dönmemektedir. Üretim kolları kapasiteye göre değişmekte ve 6,8,10-12 adet olabilmektedir. Ayrıca ebüşör ve finişör kalıpları iki parçalıdır. IS makinesinde cam damlası kesildikten sonra damla dağıtıcı mekanizması yardımıyla ve belirlenen sırayla damla yollarına

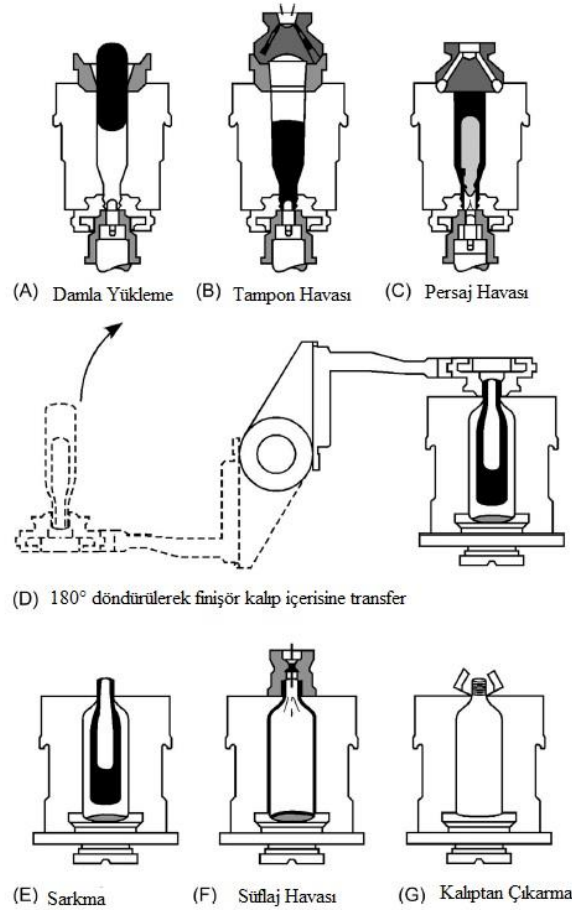
beslenmekte daha sonra üretim kollarında bulunan ebüşör kalıpları içerisine düşmektedir. Mastör, yukarı hareket ederek cam damlasını şekillendirir ve parizon halini almasını sağlar. Ebüşör kalıpları açılır ve invert mekanizması, parizonu 180° döndürerek finişör kalıp içerisine yerleştirir. Devamında süflaj başlığı finişör kalıbı üzerine yerleşir ve parizon sarktıktan sonra basınçlı hava ile camı şişirir. Ürün şekillendikten sonra take-out kolu ürünü alarak makine konveyörüne yükler. Son olarak makine konveyöründeki ürünler tavlama fırınına yüklenir. IS makinesinde ağız geniş ve yüksek hızlarda üretim yapılabilmektedir. Ek olarak cidari ince ve iç basınç ya da mekanik darbelere karşı dayanıklı şişeler de üretilebilmektedir.



Şekil 1.20 : IS pres-üfleme prosesi: (a) damla yükleme, (b) parizon presleme, (c) mastörün geri çekilmesi ve ebüşör kalıbının açılması, (d) parizonun 180° döndürülerek finişör kalıbına yüklemesi, (e) sarkma, (f) üfleme, (g) sıcak kaplama ve tavlama (Kovacec, 2010).

1.2.2.4 Üfleme-üfleme prosesi

Üfleme-üfleme prosesi, cam üretiminde kullanılan başka bir şekillendirme yöntemidir. Sabit ya da döner üretim kollarında bu üretim yöntemi kullanılabilir. Üfleme-üfleme prosesi genellikle şişe üretimi ve kade üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 1.21’de IS prosesi için üfleme-üfleme prosesi gösterilmiştir. Cam damlası ebüşör içerisine düştükten sonra tampon havası ile ilk başta ürünün ağız kısmı oluşturulur. Daha sonra persaj havası ile parizon şekillendirilir ve ebüşörler açıldıktan sonra 180° döndürülerek finişör kalıbı içerisine yüklenir. Finişör kalıbı içerisindeki parizon, yerçekiminin etkisiyle bir miktar sarktıktan sonra süflaj başlığı yardımıyla iç kısmına basınçlı hava üflenerek parizonun şişmesi sağlanır. Son olarak oluşmuş ürün maşalar vasıtasıyla alınarak makine konveyörüne yüklenir.



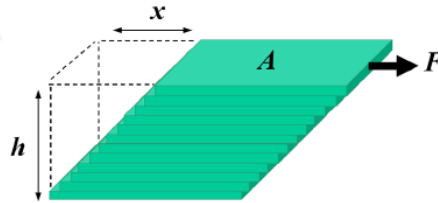
Şekil 1.21 : Üfleme-üfleme prosenin şematik gösterimi (Tooley, 1984).

2. CAMIN ÖZELLİKLERİ

Ergimiş ve şartlandırılmış cam, makinelere beslendikten sonra kısa bir zaman içerisinde ürüne dönüşmektedir. Şekil değiştirme ve soğuma esnasında, camın fiziksel ve kimyasal özellikleri birkaç saniye içerisinde değişmektedir. Camın viskozitesi, ısı ısıtması, ısı iletkenliği, yoğunluğu ve ısı genleşmesi, özellikle numerik modelleme için önem arz etmektedir. Kullanılan bu değişkenler camın kimyasal kompozisyonuna ve sıcaklığına bağlıdır. Modelleme için gerekli bu dört özellik aşağıda açıklanmıştır.

2.1 Camın Viskozitesi

Viskozite, camın sıvı hal özelliklerinden bir tanesidir. Kesme kuvveti, molekül ve atom gruplarının birbiri arasında kaymasına neden olur. Akışkanın viskozitesi akışa karşı direnç olarak da tanımlanabilmektedir.



Şekil 2.1 : Tek boyutta kontrol hacmine uygulanan F kuvvetinin akışkan katmanlarına etkisi.

$$\tau = F/A \quad (2.1)$$

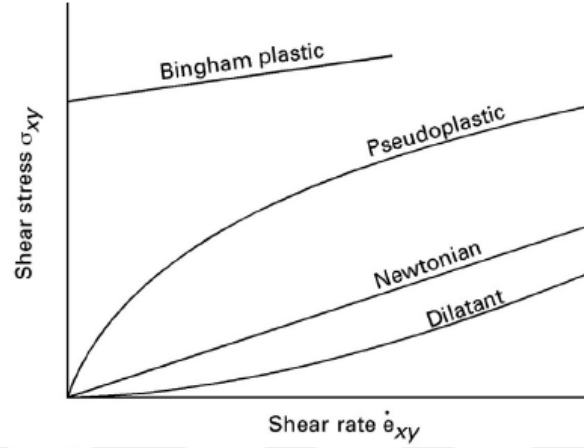
$$\eta = \tau/\dot{\gamma} \quad (2.2)$$

$$\gamma = \frac{x}{h} \quad (2.3)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (2.4)$$

Newton tipi akışkanlarda, kesme deformasyon hızı ile kesme gerilmesi arasında lineer bir ilişki vardır. Newton tip olmayan akışkanlarda ve cam gibi materyallerde bu oran değişken olup, lineer değildir. Kayma şekil değiştirme hızı arttıkça camın viskozitesi

düŖer. Bu tip akıŖkanlarda viskozite, sıcaklığa, basınca ve kayma Ŗekil deęiŖtirme hızına bağlıdır. Camın viskozitesi, basınca oranla sıcaklığa daha çok bağlıdır ve camın viskozitesi kayma Ŗekil deęiŖtirme hızı ile sıcaklığın bir fonksiyonudur. Bu alıŖmada viskozite sadece sıcaklığa bağlı olarak kabul edilmiŖ ve cam Newton tipi akıŖkan olarak varsayılmıŖtır.



Ŗekil 2.2 : Farklı akıŖkan türlerine ait kesme gerilmesi ve kayma Ŗekil deęiŖtirme hızı grafiği (Oktay, 2007).

Cam malzemesi sanki-plastik gibi davranmaktadır. Görünen viskozite, kayma gerilmesinin arttığı durumlarda azalmaktadır. Yüksek kayma Ŗekil deęiŖtirme hızlarında cam malzemesinde kayma incelmesi meydana gelir. Özellikle yüksek devire sahip üretim yöntemlerinde ve yüksek sıcaklıklarda camın viskozitesi Newton-tipi akıŖkan davranıŖından ayrılmaktadır. Kayma incelmesi, üretim sırasında camın istenilen Ŗekilde üretilmesini ve özellikle üfleme aŖmasında camın beklenen forma ulaŖmasını sağlayabilir. Ek olarak dŖk viskozite Ŗartlarında cam içerisinde iyonların hareketliliği artmaktadır ve bu yüzden faz ayrımı meydana gelmekte ve Ŗekillendirme sırasında iŖlenebilirlik problemi ortaya çıkmaktadır (Mauro, Varshneya, 2019).

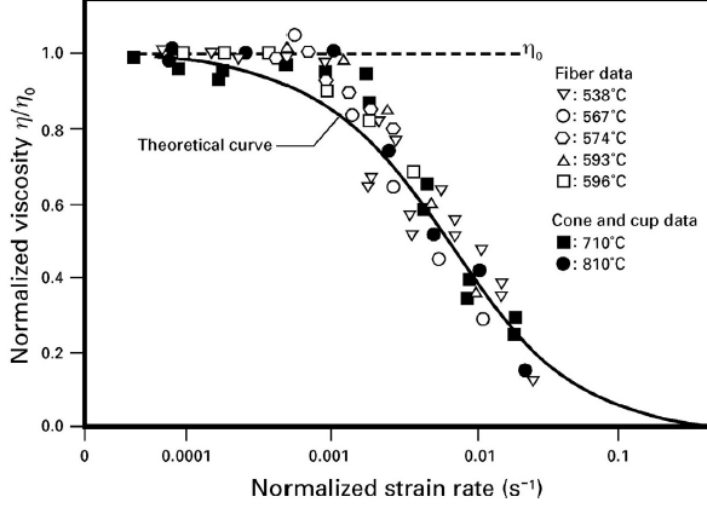
Cam malzemesinde meydana gelen kayma incelmesini araŖtırmak adına alıŖmalar yapılmıŖtır. Ŗekil 2.3'te gösterilen alıŖmada soda-kireç camı $5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ değerindeki Ŗekilde deęiŖtirme hızlarında ve 530°C sıcaklık değerinde Newton-tipi olmayan akıŖkan davranıŖı sergileyebilir. 900°C sıcaklık değerinde Newton tipi davranıŖ 40 s^{-1} Ŗekil deęiŖtirme hızına kadar görülebilir. Bu sıcaklık değerinin üstünde viskozite değeri sıcaklık ile lineer olarak deęiŖecektir. Cam damlasının sıcaklığı makinelere dŖmeden önce yaklaŖık olarak $1100 - 1200^\circ\text{C}$ arasında deęiŖmektedir. Cam damlası kalıplara dŖtkten sonra camın temas ettiği yüzeyler soğumaktadır. Pres prosesinde

cam damlasının preslenmesinden sonra ürün yüzey sıcaklığı 600 – 650 °C olacaktır. Pres-Üfleme prosesinde ise parizon preslendikten sonra yüzey sıcaklığı yaklaşık 900 °C’lerde olacaktır. Üflemeden sonra yüzey sıcaklığı 600 – 650 °C’lerde olabilir. Belirtilen sıcaklıklar dikkate alınırca modellemede viskozite değeri kayma incelmesi ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak yazılabilir. Fakat bu çalışmada camın viskozitesi Newton-tipi akışkan olarak kabul edilmiştir.

Aşağıdaki denklem 2.5’te kayma şekilde değiştirme hızı ve görünen viskozite arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır.

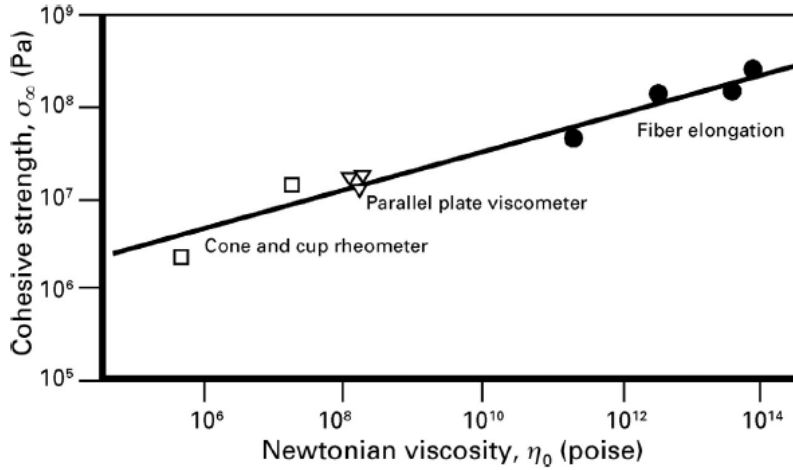
$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{1}{1 + \dot{\epsilon}_{xy} \eta_0 / \sigma_\infty} \quad (2.2)$$

Denklem 2.5’te bulunan σ_∞ değeri yüksek sıcaklıklarda camın kohezyon kesme kuvvetini belirtmektedir. Kavramsal olarak kohezyon kesme kuvveti Si-O bağları arasındaki kırılma anının mukavemetini göstermektedir. Ayrıca kohezyon kesme kuvveti, viskozite değerinin artışı ile aynı oranda artmaktadır. Brückner, 1992’e göre, sadece yüksek kayma şekil değiştirme hızlarında, viskozite doğrusal olmayan bir davranış göstermeyebilir ve aynı zamanda yüksek kesme kuvvetleri cam molekülleri üzerinde stres birikimine neden olabilir. Camın akışkan kabul edilebilir formunda kesme kuvveti kohezyon kesme mukavemetini geçerse, sıvı formda çatlaklar meydana gelebilir. Camın sıvı formunu katı formundan ayıran tek bir fiziksel özelliği yoktur. Katılarda kesme modülü yüksek olmakla beraber sıvılarda bu değer düşük ve viskozite ile açıklanmaktadır. Pres ve üfleme prosesi gibi yüksek şekillenme hızlarında, camda Newton-tipi olmayan davranış ve yüksek sıcaklıklarda çatlak problemleri gözlemlenebilir (Mauro, Varshneya, 2019).



Şekil 2.3 : Soda-kireç camının belirli sıcaklık farklı kesme kuvvetine göre viskozite ilişkisi (Simmons ve Simmons, 1989).

Uygun sıcaklıklarda cam malzemesine kesme kuvveti uygulandığında katı gibi davranabilmektedir. Akma mukavemetinin üzerinde bir kuvvet karşısında deformasyon plastik ve elastik bölgede meydana gelecektir. Eğer kesme kuvveti, kohezyon kesme mukavemetinden büyük olursa, camı akışkan kabul ettiğimiz sıcaklıklarda cam yüzeyinde çatlaklar meydana gelebilir. Aşağıdaki Şekil 2.4'te Newton tipi viskozite değerinin azaldığı durumlarda, kohezyon mukavemeti de azalmakta ve camın akışkan olarak akmasını sağlamaktadır (Mauro, Varshneya, 2019).



Şekil 2.4 : Soda-kireç camı için kohezyon mukavemeti ile Newton tipi viskozite ilişkisi (Simmons ve Simmons, 1989).

2.1.1 Camın sıcaklık ile değişen viskozite modellenmesi

Birçok viskozite modeli sıcaklık ile değişen viskoziteyi açıklamaktadır. En çok kullanılan modeller sırasıyla Arrhenius, Vogel-Fulcher-Tammann ve Avramov-Milchev (AM) denklemleridir. Bu modeller genellikle üç değişken kullanmaktadır.

2.1.1.1 Arrhenius model

Sınırlı sıcaklık aralığında kullanılabilecek Arrhenius modeli aşağıdaki denklem 2.6'da gösterilmiştir. Camsı yapının dönüşme aralığında (10^{13} Pa.s ile 10^9 Pa.s) ve yüksek sıcaklıklarda viskozite Arrhenian bir davranış göstermektedir.

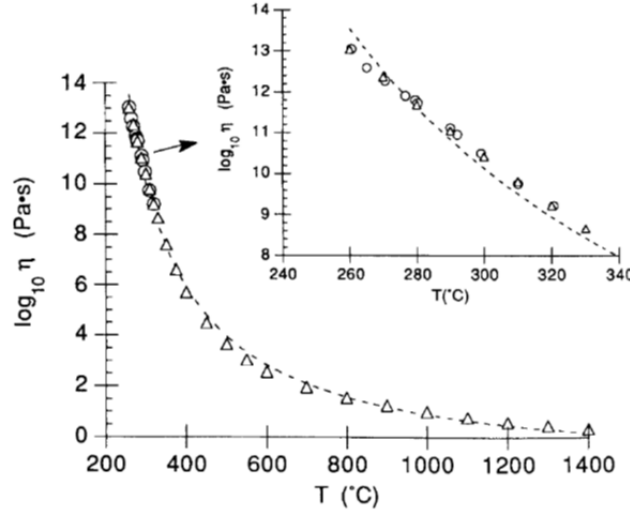
$$\eta = \eta_0 e^{\Delta H_\eta / RT} \quad (2.3)$$

Denklem 2.6'da η_0 sabit, ΔH_η viskoz akışın aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti ve T ise K cinsinden sıcaklığı simgelemektedir. Ergiyik haldeki camın aktivasyon enerjisi, camsı yapının dönüşme aralığındaki enerjiye göre daha düşüktür. Ayrıca yüksek sıcaklık ile katılaşma bölgesi arasında kalan alanda viskozite Arrhenian bir davranış göstermemektedir. Bundan dolayı denklem 2.6 kısıtlı sıcaklıklarda kullanılmaktadır.

2.1.1.2 Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) modeli

Tüm referans sıcaklık noktalarında geçerli olacak bir model geliştirilmesi için ΔH_η aktivasyon enerjisinin farklı sıcaklık değerlerinde değişen bir yapıda olması gerekmektedir. 1925'te Gordon S. Fulcher tarafından aşağıdaki denklem 2.7'deki eşitlik ortaya koyulmuştur. Üçüncü bir parametre eklenmiş olup T_0 ile gösterilmektedir. Ayrıca ΔH_η aktivasyon enerjisi yerine B parametresi kullanılmıştır. VFT eşitliği ile viskozite-sıcaklık grafiği başarılı bir şekilde oluşturulabilmektedir. VFT modeli düşük sıcaklıklarda, ΔH_η aktivasyon enerjisi sabit hale geçtiğinden dolayı sıcaklığın düşük olduğu bu bölgelerde viskozite değerlerini olduğundan fazla tahmin etmektedir.

$$\log \eta(T) = -A + \frac{B}{T - T_0} \quad (2.4)$$



Şekil 2.5 : VFT modelinin deneysel veri ile karşılaştırması (G.W. Scherer, 1992).

Şekil 2.5'te B₂O₃ cam türünün viskozite-sıcaklık grafiği gösterilmiştir. Deneysel verilerin yardımı ve VFT modeli ile viskozitenin matematiksel fonksiyonu oluşturulmuştur. Eğri uydurma, düşük sıcaklıklar haricinde başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. VFT modeli düşük sıcaklıklarda, viskozite değerini olması gereken noktadan fazla olacak şekilde hesaplamaktadır (G.W. Scherer, 1992).

2.1.1.3 Avramov-Milchev (AM) Modeli

Viskozite-sıcaklık eğrisini tanımlayan VFT modeli en başarılı ve en sık kullanılan eşitliktir. VFT eşitliği, birçok akışkana uygulanabilmektedir. Özellikle oksit camlarda iyi bir şekilde çalışmaktadır. Fakat düşük sıcaklıklarda viskozite değerini olduğundan fazla gösterdiğinden kaynaklı farklı modeller önerilmiştir. Ayrıca VFT modelinde $T = T_0$ noktasında viskozite, sonsuz değerine ulaşmaktadır. Bundan dolayı Avramov-Milchev modeli geliştirilmiştir. VFT modelinin aksine AM eşitliği ile deneysel veriler başarılı bir şekilde tekrar oluşturulabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda başarılı bir şekilde çalışmaktadır.

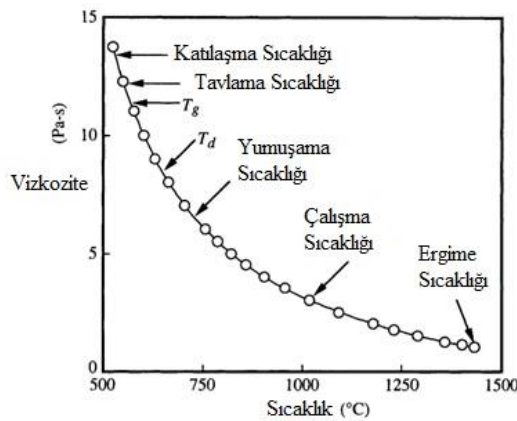
$$\log \eta = \log \eta_{\infty} + \left(\frac{\tau}{T} \right)^a \quad (2.5)$$

Denklem 2.8'de bulunan η_{∞} , τ ve a değerleri eğri uydurma parametreleridir.

2.1.2 Camda önemli viskozite noktaları ve ölçüm yöntemleri

Viskozite, cam teknolojisi için çok önemli bir değişkendir. Soda-Kireç camının şekillendirilmesinin anlaşılması için viskozite konusunun öğrenilmesi gerekmektedir. Viskozite, camın ergime koşullarını, şartlandırma davranışını, çalışma aralığını, tavlama aralığını, çalışabilecek en yüksek sıcaklığı, kristalleşme oranını belirlemektedir. Camın viskozitesi kompozisyona, sıcaklığa ve ısı geçmişi bağlıdır. Cam, yüksek sıcaklıklarda akışkan olarak davranmakta fakat soğutulduğunda katı forma geçmektedir. Soda-Kireç camının viskozitesi 1450 °C sıcaklıklarda yaklaşık 10 Pa.s büyüklüğündedir ve sıcak pekmez kıvamındadır. Karşılaştırmak gerekirse oda sıcaklığında suyun viskozitesi 0,001 Pa.s ve gliserinin viskozitesi 1 Pa.s büyüklüğündedir. Sıcaklık düştükçe camın viskozitesi 10'un katları oranında yükselmektedir. Yaklaşık 750 °C sıcaklık değerinde camın viskozitesi $10^{6,6}$ Pa.s değerinde olup, bu sıcaklık değerinde kendi ağırlığı altında şekil değiştirebilmektedir. Bu yüzden bu değer, yumuşama noktası olarak tanımlanmıştır (Mauro, Varshneya 2019).

Viskozite-sıcaklık eğrileri tanımlanırken belirli sıcaklık değerlerine karşılık gelen viskozite noktaları bulunmaktadır. Bu referans noktaları sanayi ve laboratuvar ortamında kullanılan camlar için belirlenmiş olup, cam üreticileri ve araştırmacıları tarafından kullanılmaktadır.



Şekil 2.6 : Soda-Kireç Camının sıcaklık-viskozite eğrisi ve belirli sıcaklık değerlerine karşılık gelen referans noktaları.

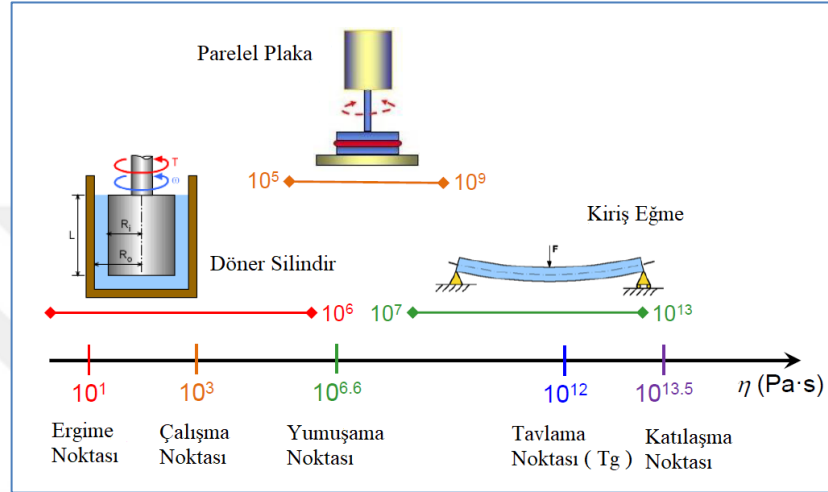
Çizelge 2.1 : Soda-Kireç camının viskozite referans noktaları.

Referans Noktaları	Yaklaşık Viskozite (Pa.s)
Ergime Noktası	10
Çalışma Noktası	10^3
Akma Noktası	10^4
Littleton Yumuşama Noktası	$10^{6.6}$
Genleşme Yumuşama Noktası	10^8-10^9
Camsı Geçiş Noktası	$10^{11.3}$
Tavlama Noktası	$10^{12} - 10^{12.4}$
Katılaşma Noktası	$10^{13.5}$

Yukarıdaki Çizelge 2.1’de camın referans viskozite değerleri gösterilmiştir. Aşağıda bu noktaların açıklamaları yer alacaktır. Şekillendirme prosesinin verimli olması açısından viskozite değeri hassas bir şekilde kontrol altında tutulmaktadır. Camın yeterli süre ve belirli koşullarda homojenize olmasını ve şartlandırılmasını sağlayan sıcaklık değerine ergime noktası denir. Bu değer yaklaşık olarak 1-10 Pa.s arasındadır. Cam ürününün şekillendirilmesi için ilk olarak viskoz bir damlaya ihtiyaç vardır. Damla belirli kuvvetler altında şekil alabilecek ve makineye yüklenirken aldığı şekli koruyabilecek sıcaklıkta olması gerekir. Ürün için gerekli olan damlanın proses hattına ulaştığı viskozite değeri 10^3 Pa.s’dir. Bu viskozite değeri, çalışma noktası olarak adlandırılmaktadır. Üretim makinelerinde işlenen damlanın belirli bir forma ulaştığı ve kendi ağırlığı altında şekil değiştirebildiği sıcaklığa ise yumuşama noktası denir. Çalışma noktası ve yumuşama noktası arasında kalan alan, camın çalışma aralığı olarak ifade edilir. Geniş çalışma aralığına sahip camlar yavaş sertleşen cam, dar çalışma aralığına sahip camlar ise hızlı sertleşen cam olarak adlandırılır. Özellikle seri üretim olmayan ve elle imalat yapılan atölyelerde istenilen ürüne ulaşmak adına yavaş sertleşen cam tercih edilmektedir. Soda-Kireç camının aksine yüksek sıcaklık çalışma aralığına sahip camlar sert cam, buna karşılık düşük çalışma aralığına sahip camlar ise yumuşak cam olarak isimlendirilir.

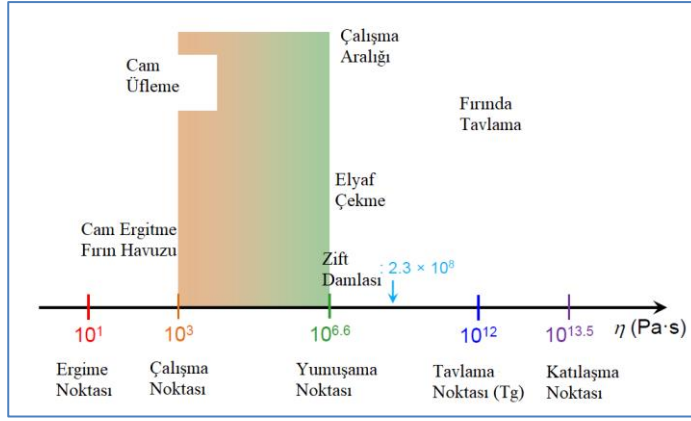
Viskozite eğrisindeki referans noktalarının belirlenmesi için belirli test yöntemleri geliştirilmiştir. Camın kompozisyonuna bağlı olarak belirtilen referans noktalarının sıcaklıkları değişmektedir. Yumuşama noktası olan $10^{6.6}$ Pa.s viskozite değerinin belirlenmesi için fiber uzama test yöntemi kullanılmaktadır. 0.7 mm çapa ve 24 cm uzunluğa sahip bir çubuk kontrollü bir şekilde ısıtılmaktadır. 1 mm/min uzama oranının yakalandığı sıcaklık değeri yumuşama noktası olarak tanımlanmaktadır. Kısa süre içerisinde kuvvetlerin yardımıyla şekillenen cam ürünü, hızlı bir şekilde soğumaya başladığından dolayı cam yüzeylerinde gerilmeler meydana gelmektedir.

Oluşan gerilmelerin alınması için tavlama işlemi uygulanır. Tavlama fırınlarında gereken referans sıcaklık değerinin bulunması için cam türüne göre tavlama noktasının bilinmesi gerekmektedir. Tavlama noktasının belirlenmesi için aynı şekilde fiber uzama testi kullanılır. Belirli bir sıcaklıktaki camın üzerindeki gerilmeler dakikalar içerisinde ortadan kayboluyorsa bu sıcaklık değeri tavlama referans noktasıdır. Fakat katılaşma noktası olarak belirtilen referans sıcaklığındaki cam ürünü üzerindeki gerilmelerin giderilmesi için saatler gerekmektedir.



Şekil 2.7 : Cam viskozitesi ölçüm yöntemleri.

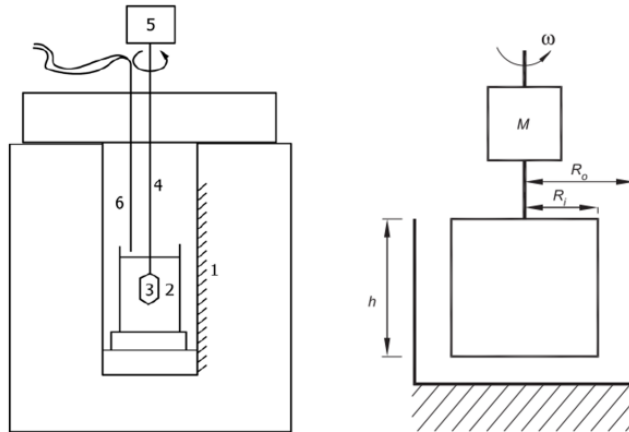
Şekil 2.7’de camdaki önemli viskozite referans noktaları ile belirli aralıklarda kullanılabilecek ölçüm yöntemleri gösterilmiştir. Ergime noktası ve yumuşama noktası arasında kalan bölgedeki viskozite ölçümü için döner silindir yöntemi kullanılmaktadır. Yumuşama noktasının biraz üstündeki bir değer ile 10^9 Pa.s değeri arasındaki bölgede paralel plaka test prosedürü uygulanır. Camın neredeyse katı formdaki viskozite değerlerini ölçmek için de kiriş eğme deneyi tercih edilir. Bu çalışmada sadece döner silindir yöntemi kullanılmıştır. Daha önceden de açıklandığı gibi döner silindir metodu ile elde edilen veriler VFT viskozite modelinde kullanılmıştır. VFT modeli ile ölçülmeyen sıcaklık değerleri de oluşturulabilir. Aşağıda viskozite ölçümü için kullanılan üç deney düzeneği açıklanacaktır.



Şekil 2.8 : Cam viskozitesi referans noktaları ve imalat esnasında kullanıldığı bölgeler.

2.1.2.1 Döner masura viskozite ölçüm Yöntemi

ASTM (American Society for Testing and Materials) C965-96 test yöntemine göre, cam yumuşama sıcaklığının üzerindeki değerlerde viskozite ölçümü döner masura ile yapılabilmektedir. Yüksek sıcaklığa dayanıklı platin krozenin içine ölçülmesi istenen cam türünün cam kırıkları belirli miktarda yerleştirilir. Daha sonra kontrollü bir şekilde camın sıcaklığı artırılır ve rejime girmesi açısından belirlenen sıcaklıkta bir süre beklenir. Bu aşamadan sonra cam ölçümü için kullanılacak mil, ergimiş camın içerisine daldırılır. Mil ile krozenin eksenleri aynı düzlem üzerinde olmalıdır. Belirli sıcaklık aralıklarında ölçümler yapılarak viskozite-sıcaklık eğrisi oluşturulur. Viskozite tork ve açısal hızın fonksiyonu olacak şekilde hesaplanmakta ve döner masura test yöntemi ile 1 ile 10^6 Pa.s değerleri arasında ölçümler yapılabilmektedir.



Şekil 2.9 : Sabit kroze döner masura viskozite test ölçüm düzeneği (ASTM C965-96).

Şekil 2.9’da aynı eksen üzerinde bulunan sabit kroze ile döner mil şematik olarak göstermiştir. Ölçümün doğruluğu açısından cam seviyesi, milin ucunda bulunan aparatın belirli bir miktar üzerinde olmalıdır.

Burada;

- 1- Isı kaynağı
- 2- Platin Kroze
- 3- Milin ucunda bulunan aparat
- 4- Mil şaftı
- 5- Viskozite Ölçer Cihaz (Tork ve açısal hız ölçülüyor.)
- 6- Termokupul

Olarak gösterilmiştir. Şekil 2.9’da bulunan görsel kullanılarak viskozitenin hesaplanması için gerekli eşitlik denklem 2.9 ile yazılabilir. Viskozite, belirlenmiş sıcaklıklarda test istasyonun geometrik ölçüleri, döner milin torku ve açısal hızının fonksiyonu olarak aşağıdaki denklemde belirtilmiştir.

$$\eta = \frac{1}{\omega} \left(\frac{M}{4\pi h} \right) \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right) \quad (2.6)$$

M : Mil üzerine uygulanan tork (N.m)

η : Dinamik Viskozite (Pa.s)

ω : Açısal Hız (rad/s)

h : Cam akışkanı içerisindeki aparatın uzunluğu (m)

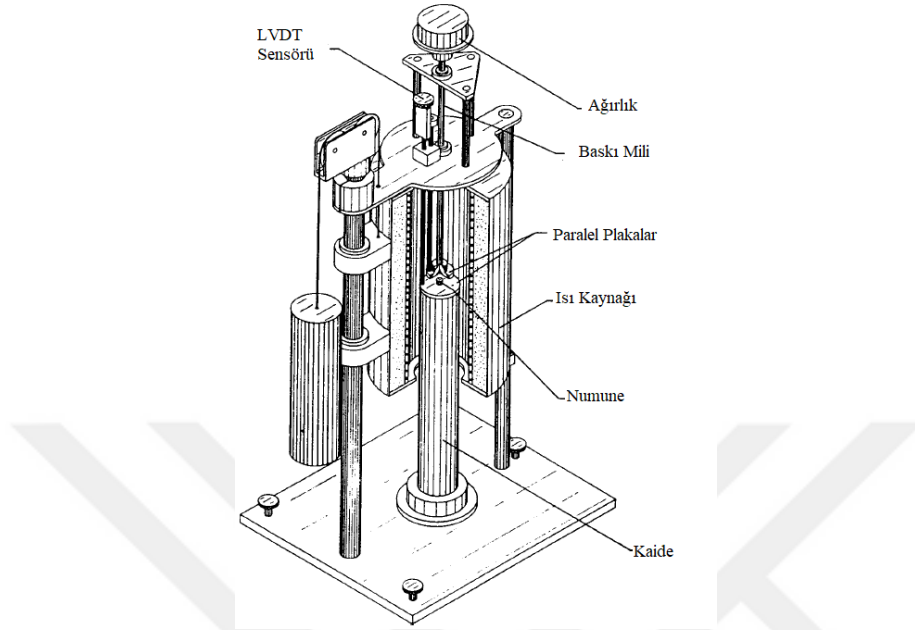
R_i : Cam akışkanı içerisindeki aparatın çapı (m)

R_o : Kroze iç çapı (m)

2.1.2.2 Paralel plaka viskozite ölçüm yöntemi

ASTM (American Society for Testing and Materials) C1351M-96 test yöntemine göre 10^4 Pa.s ile 10^8 Pa.s değerleri arasında camın viskozitesi paralel plakalar metodu ile ölçülebilmektedir. Paralel Plakalar yöntemi ile viskozite ölçümü, döner masura ve kiriş eğilmesi yöntemleri arasında kalan bölge için uygundur. Yüksek sıcaklığa dayanıklı ve camın yapışmasını engelleyecek türden malzeme ile yapılmış platin levhaların arasında kalan cam örneğinin, kontrollü ağırlık altında şekil değiştirmesi incelenmektedir. Cam örneği ısı kaynağı tarafından ısıtılarak istenilen sıcaklığa ulaşması sağlanır ve şekil değiştirme miktarı ölçülür. Şekil değiştirme miktarı LVDT sensörleri tarafından kaydedilmektedir. Viskozite değeri hesaplanırken cam

numunesinin şekil değıştirme miktarı, uygulanan kuvvetin büyüklüğü, cam numunesinin hacmi, cam numunesinin yüksekliğı, camın genleşme katsayısı ve zaman parametreleri kullanılır.



Şekil 2.10 : Paralel levha viskometre test düzeneğı (ASTM C1351M-96).

$$\eta = 2\pi \frac{Mgh^5}{30V(dh/dt)(2\pi h^3 + V)(1 + \alpha T)} \quad (2.7)$$

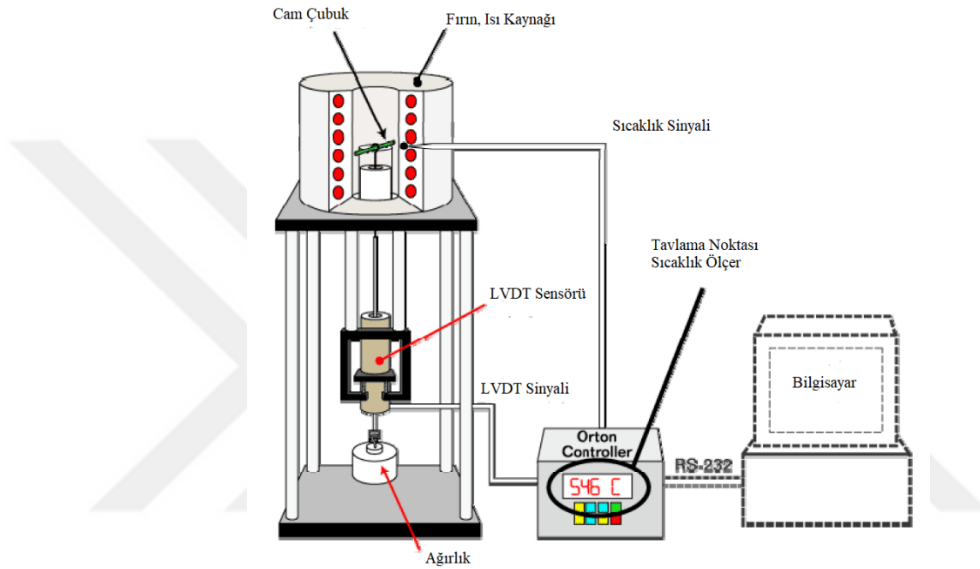
Burada;

- η : Dinamik Viskozite (Pa.s)
- M : Cam Numune üzerine uygulanan ağırlık (g)
- g : Yerçekimi, 980 cm/s²
- t : Zaman (s)
- V : Cam numune hacmi (cm³)
- h : Cam Numune kalınlığı (cm)
- dh/dt : Sıkıştırma oranı (cm/s)
- α : Cam numunesi ortalama genleşme katsayısı (m/m/°C)
- T : Ölçüm sıcaklığı (°C)

2.1.2.3 Kiriş eğilmesi yöntemi ile viskozite ölçümü

ASTM (American Society for Testing and Materials) C1350M-96 test yöntemine göre 10⁸ Pa.s ile 10¹³ Pa.s değerleri arasında camın viskozitesi kiriş eğilmesi metodu ile

ölçülebilmektedir. Kiriş eğme ölçüm yönteminde dairesel kesitte hazırlanan cam numunesi iki destek noktasına yerleştirilir ve cam tam orta noktasından kuvvet uygulanır. Sıcaklık kontrolü ısı kaynağı tarafından sağlanmaktadır. Soda-Kireç camı için ölçüm, 500 °C ile 750 °C sıcaklık aralığında gerçekleşir. Belirli sıcaklık değerlerinde uygulanan kuvvet altındaki şekil değiştirmesi incelenir ve viskozite denklem 2.11 yardımıyla hesaplanır. Cam, ölçüm yapılacak sıcaklıklarda neredeyse katı formda olduğu için ölçüm yapılmadan önce belirlenen sıcaklıkta cam numunesi bekletilir ve daha sonra cam numunesi üzerindeki gerilimlerin giderilmesi sağlanır.



Şekil 2.11 : Kiriş eğme test düzeneği.

$$\eta = \frac{gL^5}{1440I_c(dh/dt)} \left[M + \frac{\rho AL}{1.6} \right] \left[\frac{(1 + a_s T)^3}{(1 + a_g t)^4} \right] \quad (2.8)$$

- η : Dinamik Viskozite (Pa.s)
 M : Cam Numune üzerine uygulanan ağırlı (g)
 dh/dt : Sıkıştırma oranı (cm/s)
 g : Yerçekimi, 980 cm/s²
 I_c : Kesit atalet momenti, 980 cm⁴
 ρ : Camın yoğunluğu (g/cm³)
 A : Cam çubuk kesitinin yüzey alanı (cm²)
 L : Mesnet noktaları arasındaki uzaklık (cm)
 α_s ve α_g : Destek aparatı ve Cam numunesinin genleşme katsayısı (m/m/°C)
 T : Ölçüm sıcaklığı (°C)

Destek aparatı ve cam numunesinin ısı genleşme katsayıları farklı olduğundan dolayı α_s ve α_g değerlerinin eşitlikte kullanılması gerekmektedir. Neredeyse eşit olduklarında denklemdeki bu kısım ihmal edilebilir.

2.1.3 Viskozite test sonuçları ve karşılaştırılması

Cam üretim makinelerinde kullanılan camın sıcaklık ile değişen viskozitesinin ölçülmesi için 3 farklı fırından alınan numuneler, İsveç'te bulunan GLAFO'ya (Cam Araştırma Enstitüsü) gönderilerek test sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmada şekillendirme yüksek sıcaklıklarda meydana geldiğinden dolayı test verilerinin alınması için sadece döner masura viskozite ölçüm yöntemi tercih edilmiştir. Ayrıca elde edilen veriler VFT viskozite modeline yerleştirilerek daha düşük sıcaklıklardaki viskozite değerleri de tahmin edilebilmektedir. Daha önceki konu başlıklarında belirtildiği gibi VFT modeli sadece çok düşük sıcaklıklarda (300 °C–400 °C) viskozite değerini olması gerekenden fazla göstermektedir. Fakat modellemede bu sıcaklıklar kullanılmayacaktır.

Çizelge 2.2 : VFT modelinde kullanılan A,B ve T_0 katsayıları.

Numune Adı	A	B	T_0
A-29	1,82	4743,22	211,85
B-28	1,81	4746,9	208,12
C-34	1,80	4747,03	205,63

A-29, B-28 ve C-34 kodlu numunelerin viskozite değerleri, döner masura tipi viskozimetre cihazında ölçülmüştür. Ölçülen sıcaklık aralığı 1460 °C ile 880 °C değerleri arasındadır. Cam numunesinin sıcaklığı 30-40 °C arasında azaltılarak belirlenen sıcaklıklara karşılık gelen viskozite değerleri dPa.s cinsinden ölçülmüştür. Ölçülen değerler VFT modeline yerleştirilerek A,B ve T_0 katsayıları elde edilmiştir. Yukarıdaki Çizelge 2.2'de bu katsayılar gösterilmiştir. Görüldüğü üzere farklı fırınlardan alınan cam numunelerinin viskozite değerlerinde yüksek oranlarda farklılık meydana gelmemiştir.

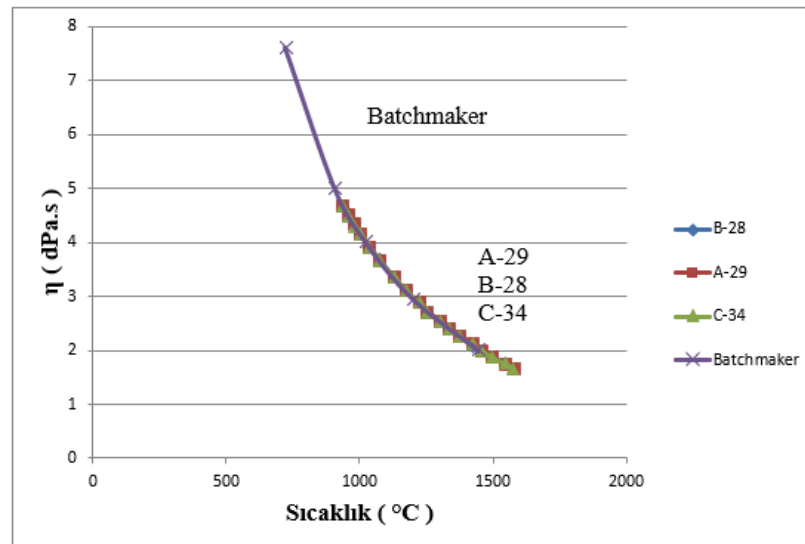
Çizelge 2.3 : VFT modeli kullanılarak hesaplanmış değerler.

	A-29	B-28	C-34
log η (dPa.s)	Sıcaklık (°C)	Sıcaklık (°C)	Sıcaklık (°C)
2	1454	1454	1455
2,5	1309	1310	1310
3,0	1195	1196	1195
3,5	1102	1103	1101
4	1025	1027	1024
4,5	960	962	959
5	905	907	904

Denklem 2.12 ve Çizelge 2.3'teki parametreler kullanılarak ergime noktasından katılaşma noktasına kadar viskozite değerleri hesaplanabilir. Analizlerde A-29 parametreleri kullanılacaktır.

$$\log \eta (dPa.s) = -A + \frac{B}{T - T_0} \quad (2.9)$$

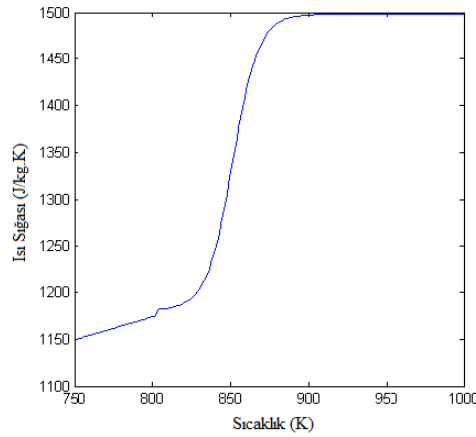
Ticari yazılım olan İlis Batchmaker programında cam kompozisyonuna göre harman miktarları ve cam özellikleri hızlı bir şekilde oluşturulabilmektedir. Girilen kompozisyon oranlarına göre camın mekanik özelliklerinin yanında referans viskozite noktalarına karşılık gelen sıcaklık değerleri de listelenebilmektedir. Şekil 2.12'de A-29, B-28 ve C-34 cam numunelerinin deney sonuçları ile İlis Batchmaker sonuçları karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere viskozite-sıcaklık eğrileri birbiri ile örtüşmektedir. Karşılaştırma dikkate alındığında fabrika içerisinde farklı kompozisyonlar kullanıldığında test sonuçlarının yerine program çıktıları analiz girdisi olarak kullanılabilir.



Şekil 2.12 : Deney sonuçları ile Batchmaker verilerinin karşılaştırılması.

2.2 Camın Isı Sığası

Camın ısı sığası, cam kompozisyonuna, sıcaklığa ve camın yapısal değişimine bağlıdır. Şekillendirme prosesinde camın kalıba düşme sıcaklığı yaklaşık 1000-1200 °C arasında değişmektedir. Modellemede gerekli sınır şartları düşünüldüğünde, camsı geçiş sıcaklığının üzerindeki sıcaklık değerlerine karşılık gelen ısı sığası değerleri kullanılabilir. Aşağıdaki Şekil 2.13'te sıcaklık ile değişen ısı sığası grafikte gösterilmiş olup camsı geçiş sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda ısı sığası sabit bir değer olarak kabul edilebilir. Modellemede ısı sığası, sabit değer olan 1500 J/kg.K olarak programa girilecektir. Eskişehir Seramik Araştırma Merkezi'ne cam damlası numuneleri gönderilerek ısı sığası testleri yaptırılmış ve 1500 J/kg.K değeri doğrulanmıştır.



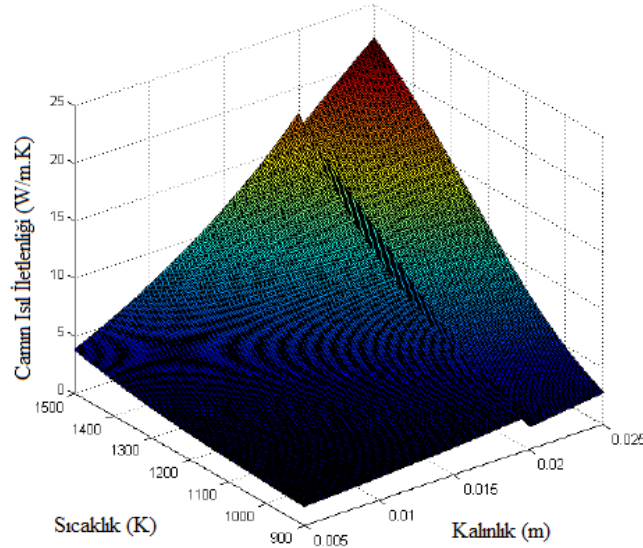
Şekil 2.13 : Sıcaklıkla değişen camın ısı sığası (Biosca, 2020).

2.3 Camın Yoğunluğu

Camın yoğunluğu, kendi içerisindeki atomsal yapı özellikleri ve sıcaklığına göre değişmektedir. Beklenildiği gibi sıcaklık artışında camın yoğunluğu azalmaktadır. Ani hacim artışı sadece camsı geçiş sıcaklığında meydana gelmektedir. Bu sıcaklığın üstündeki sıcaklıklarda hacim sabit bir oranda değişmektedir. Endüstriyel üretim sırasında camın hacminde oda sıcaklığı ve şekillendirme sıcaklığı hacimleri arasında %7'lik fark meydana gelmektedir. Kalıp tasarımı esnasında hacimde meydana gelen çekme yapı düşünülerek kalıp tasarımı ve imalat yapılmaktadır. Fakat modellemede hacimsel fark ihmal edilecektir. Analiz sırasında modelde bulunan ağ yapısı belirli zaman adımlarında program tarafından tekrar oluşturularak ani şekil değiştirmelere olanak sağlayacaktır. Yoğunluğun sabit kabul edilmesiyle hacmin korunumu sağlanmıştır. Modellemede yoğunluk, 2500 kg/m³ değeri olarak kabul edilmiştir.

2.4 Camın Isıl İletkenliği

Cam damlası kalıba düştüğünde, cam ve kalıp arasında ısı transferi meydana gelecektir. Isı transferi, camın içerisindeki sıcaklık dağılımını büyük ölçüde etkilemektedir. Cam, şekillendirme sıcaklığında akışkan olmasına rağmen kendi içerisindeki transferi taşınımın aksine iletim ve radyasyon ile meydana gelmektedir.



Şekil 2.14 : Camın kalınlığı ve sıcaklığına bağlı olarak gösterilen efektif ısı iletkenlik (Biosca, 2020).

Camın şekillendirilmesi sırasında kalıp arayüzü temas bölgesindeki 0 ile 2 saniye arasında gerçekleşen ısı transferinin %90 kısmı, iletim ile meydana gelmekte olup geriye kalan %10'luk kısım yarı saydam cisimden gelen radyasyondur. İletim ve radyasyon ile meydana gelen ısı transferinin ayrı olarak modellenmesi yerine radyasyonun etkisini de kapsayacak efektif ısı iletkenlik tanımlanmıştır. Efektif ısı iletkenlik gerçek bir malzeme özelliği olmamakla beraber camın sıcaklığına, kalınlığına ve kalıp yüzey özelliklerine göre değişmektedir. Temastan sonra iletim ile meydana gelen ısı transferi 0-2 saniye arasında daha baskın olup, 2 saniye sonrasında radyasyon ile meydana gelen ısı transferi daha baskın hale gelmektedir (Hyre, 2002). Camın şekillendirilmesi 2 saniye içerisinde meydana geldiğinden dolayı efektif ısı iletim katsayısı, 1,5-2 W/m.K arasında bir değer, modellemede parametre olarak kabul edilmiştir. Şekil 2.14'te sıcaklık ve kalınlığın fonksiyonu olarak camın efektif ısı iletkenliği gösterilmiştir.



3. CAM ŞEKİLLENDİRMENİN MODELLENMESİ

Cam şekillendirme prosesinin modellenmesi çok karmaşık bir problem olmakla beraber, çok kısa bir süre içerisinde şekillenmenin meydana gelmesi ve büyük deformasyonların oluşması modelleme adımlarını zorlaştırmaktadır. Cam şekillendirme prosesi doğası itibariyle karmaşık ve anlaşılması zor bir olaydır. Prosesin anlaşılması adına numerik ve analitik çözümler kullanılmaktadır. Proses içinde camın erişilemez olması, sıcaklıkların yüksek olması ve deneysel çalışmaların maliyetli olması, bu konuda çalışmaların yapılmasını teşvik etmektedir (Pulliam, 2009).

Cam şekillendirmenin modellenmesi yıllar içinde gelişimini sürdürmekte olup ilk yapılan çalışmalar, varsayım sınırları içerisinde kalmıştır. Birbirini destekleyen çalışmalar ile şekillendirmenin modellenmesi geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar analiz metodu, cam şekillendirme prosesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri sidir. Sonlu elemanlar analiz metodu hem presleme hem de üfleme aşamalarında kullanılabilir. Deformasyonların fazla olduğu durumlarda değişebilir ya da uyarlanabilir ağ yapısı kullanılması tercih edilmektedir. Diğer bir yöntem ise sonlu hacimler metodudur. Sonlu hacimler metodu cam şekillendirme prosesi için deformasyonların fazla olduğu anlarda daha sık ve sabit ağ yapısına ihtiyaç duyduğundan uygun olmayabilir (Pulliam, 2009). Son olarak günümüzde Finite Poinset Method'u (Sonlu Noktalar Yöntemi) cam şekillendirme çözümlerinde kullanılmaya başlamıştır. Bu yöntemin avantajlarından bazıları ise, ağ yapısına ihtiyaç duymaması nedeniyle çözüm sürelerinin daha kısa olmasıdır. Endüstride kullanılan en yaygın ticari yazılımlar sırasıyla; ANSYS Polyflow (Sonlu Elemanlar Yöntemi), Fluent (Sonlu Hacimler Yöntemi) ve NOGRID (Sonlu Noktalar Yöntemi) arayüzleridir.

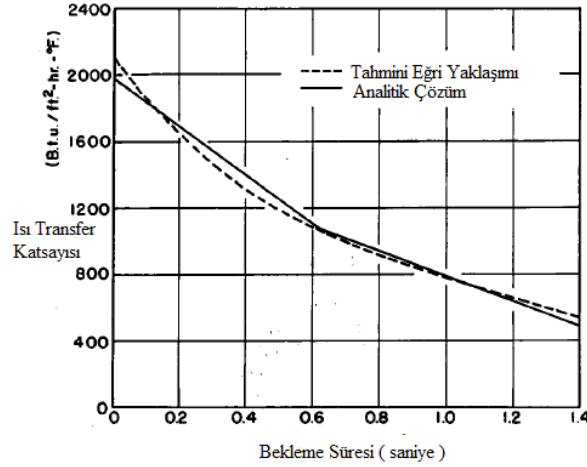
Cam özelliklerinin araştırılması adına da kayda değer birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Camın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin elde edilmesi zaman açısından uzun ve maliyet açısından yüksektir. Camın özellikleri, rengine, kompozisyona ve sıcaklığa göre değişmektedir. Modellemede kullanılacak camın en

önemli özellikleri sırasıyla; viskozite, özgül ısı, yoğunluk ve ısı iletkenliktir. Belirtilen bu fiziksel özellikler sıcaklık ile değişmektedir.

Doğru bir şekilde cam özellikleri ve sınır koşullarının tanımlanması modellemenin yaklaşım oranını artıracaktır. Cam akışının modellenmesi sırasında sıcaklığa bağlı viskozite değişkeninin doğru bir şekilde hesaplanması için akışkan kontrol hacmindeki enerji denklemleri çözülmelidir. Cam ve kalıp arayüzünde meydana gelen ısı aktarımı ile cam akışının kendi içinde modellenmesi çalışmanın ana hedefidir.

3.1 Cam ve Kalıp Arasında Gerçekleşen Isı Transferi

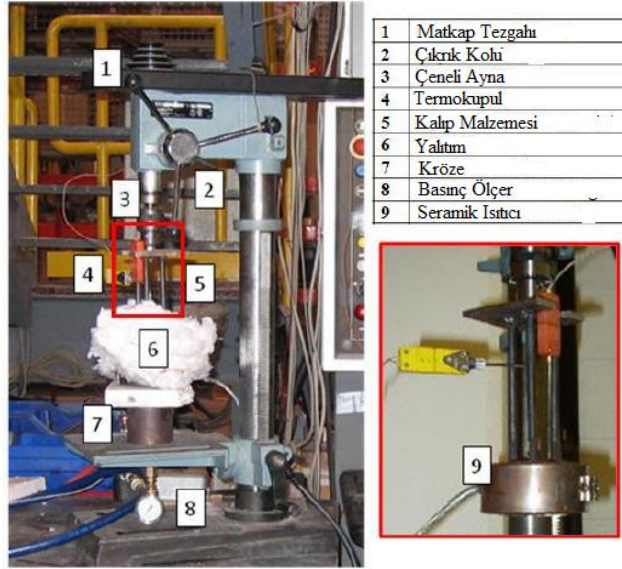
Camın makinelere beslenmesi ve şekillenmesi için cam sıcaklığının belirli bir derecenin üzerinde olması gerekmektedir. İstenilen forma kavuşması adına cam damlası, kalıplara feeder yardımıyla beslenmektedir. Kalıpların proses içinde birçok görevi bulunmakla beraber bunlardan en önemlileri camı şekillendirmek ve cam damlasından ısı çekmektir. Kalıp ve cam arasında gerçekleşen bu olayın anlaşılması modellemenin doğruluk oranını artıracaktır. Yalnız doğası itibarıyla cam ve kalıp arasında gerçekleşen ısı transferi anlaşılması zor ve karmaşık bir prosestir. Ayrıca gerçek bir analitik çözümü mevcut değildir (Pulliam, 2009). Bundan dolayı cam ve kalıp arayüzünde meydana gelen ısı transferinin ortaya çıkarılması adına deneme düzeneklerinin kurulması ya da üretim makineleri üzerinden verilerin alınması gerekmektedir. Fakat üretim makineleri üzerinden veri toplanması, maliyetli olmasının yanında üreticiler makinelerde duruş yaşanmamasını istemektedir. Bunun nedeni ise cam üretim prosesinin emek ve enerji yoğun bir sektör olmasıdır. Rekabetçi olmak için üretim maliyetlerinin sürekli kontrol altında tutulması gerekmektedir.



Şekil 3.1 : Isı transfer katsayısının şekillendirme sırasında zamana göre değişimi (McGraw, 1961).

Yukarıdaki Şekil 3.1’de gösterilen grafik, 1961 yılında yapılan deneysel bir çalışma sonucunda üretilmiştir. Cam ve kalıp arasındaki meydana gelen ısı transferinin büyük bir kısmı iletim ile gerçekleşmektedir. Radyasyon ile oluşan ısı transferi ihmal edilebilir büyüklüktedir. Cam-kalıp arayüz temasının etkinliği ısı transfer miktarını değiştirebilir. Özellikle uygun basınçta temas gerçekleştiğinde, ısı transfer katsayısı yüksek olmakla beraber kısa bir süre içerisinde bu değer hızlı bir şekilde azalmaktadır. Ayrıca camın sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı da ısı transfer değerini etkileyen parametreler arasındadır.

1961 yılındaki çalışmadan sonra kalıp ve cam arasında oluşan ısı transferinin anlaşılması için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Cam şekillendirmenin doğası gereği, çalışmalar neticesinde ortaya çıkan sonuçlar birbiri ile örtüşmemektedir. Bu yüzden ortaya çıkan verilerin sanayi ölçeğinde kullanılması uygun olmayacaktır. Fakat 2009 yılında yapılan bir çalışmada hem deneysel hem de imalat esnasında kaydedilen veriler, cam şekillendirme modellenmesinde kullanılabilir. 2009 yılındaki çalışmadan kısaca bahsetmek gerekirse hem laboratuvar hem de imalat ortamında çeşitli ekipmanlar kullanılarak kaydedilen sıcaklık değerleri ile ısı transfer akısı ve ısı transfer katsayısı zamana göre hesaplanmıştır.



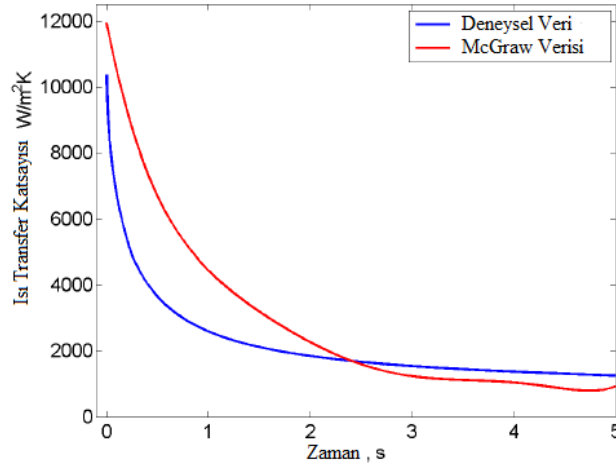
Şekil 3.2 : Deneyde kullanılmış presleme aparatı ve ekipmanlarının görüntüsü (Pulliam,2009).

Laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilen deneyde grafit kalıbı içerisinde ergitilmiş cam kalıbı, döküm demir kalıbı ile belirli bir süre birleştirilerek sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Buradaki amaç sanayi ölçeğinde yapılacak denemede gerekli olacak yöntem ve adımlarının belirlenmesidir. Test sırasında presleme basıncı, kalıbın ilk andaki sıcaklığı ve camın ilk sıcaklığı gibi değişkenlerin ısı transferini ne yönde değiştirdiği anlaşılmıştır. Isı transfer katsayısı ile ısı akısı hesaplanırken toplam seksen yedi veri seti kullanılmıştır. Deneyde yüksek hızlı kayıt alabilen ve üzerinden talaş kaldırılabilen K tipi ısı çift, kalıp yüzeyine yerleştirilmiştir. Kalıp malzemesi olarak döküm demir tercih edilmiştir ve kalıbın belirli bir sıcaklığa erişmesi için çevresi ısı üreten rezistans ile sarılmıştır. Şekil 3.2’de deneysel setin şematik gösterimi bulunmaktadır.

Deneysel yapılan çalışmada ortaya çıkan sonuçlar aşağıda maddelenmiştir (Pulliam, 2009).

- Presleme basıncının ısı akısına ve ısı transfer katsayısına etkisi olmamıştır.
- Kalıbın ilk sıcaklığının artırılması hem ısı akısını hem de ısı transfer katsayısını azaltmış, beklendiği gibi cam sıcaklığının artırılması ise her iki özelliği de yükseltmiştir.
- Şekillendirmenin modellenmesinde çokça kullanılan McGraw eğrisinden farklı olarak ısı transfer katsayısı camın kalıp ile temasından sonra daha kısa

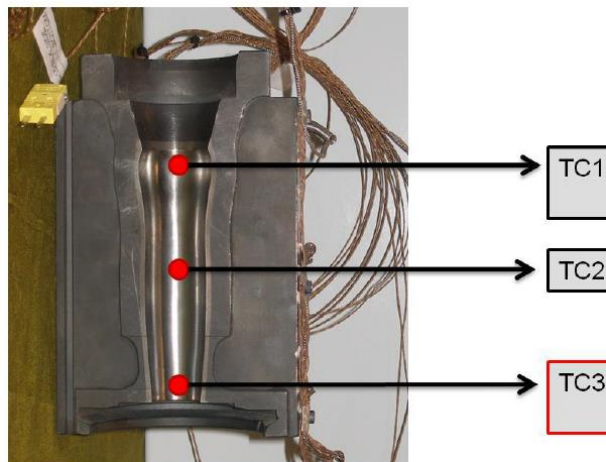
süre içerisinde azalmış olup, belirli bir süre ise ortalama değerler birbirine yakınsamıştır.



Şekil 3.3 : Deneysel verilerin karşılaştırılması (Pulliam, 2009).

Şekil 3.3'te deneysel verilen karşılaştırılması gösterilmiştir. Görüldüğü üzere ısı transfer katsayısı benzer şekilde temastan sonra hızlı bir şekilde azalmakta olup, 2 saniye sonrasında ortalama bir değere ulaşmaktadır.

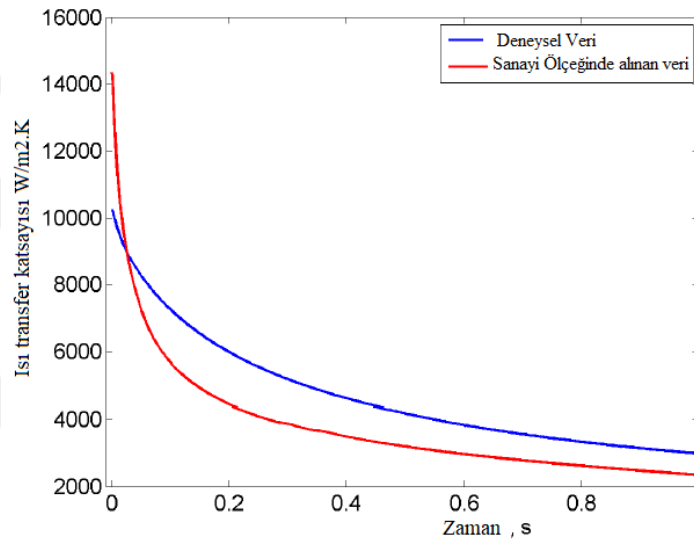
Sanayi ölçeğinde gerçekleştirilen çalışmada ise seçilen ürün kalıbının farklı iç noktalarına yüksek hızda kayıt alabilen ve üzerinden talaş kaldırılabilen K tipi ısı çiftler yerleştirilmiştir. İmalat esnasında kaydedilen veriler kullanılarak explicit sonlu farklar yöntemi ile ısı akısı ve ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır. Şekil 3.4'te kullanılan deneme kalıbı ve kullanılan termokupulların konumları belirtilmiştir (Pulliam, 2009).



Şekil 3.4 : Sanayi ölçeğinde yapılan denemede termokupulların konumları (Pulliam, 2009).

Sanayi ölçeğinde yapılan deneysel çalışmada ortaya çıkan sonuçlar aşağıda maddelenmiştir.

- Presleme basıncının ısı akısına ve ısı transfer katsayısına etkisi olmamıştır.
- Mastör kalıbının ısı transferine katkısı ihmal edilebilir.
- Radyasyonun etkisi efektif ısıl iletkenlik ile tanımlanmıştır.
- Cam ve Kalıbın sıcaklık ile değişen özellikleri, sonuçları etkileyecektir.
- Isı transfer katsayısı zamana göre değişmektedir.
- Yağlamanın, cam ve kalıp arasında oluşan film tabakasına etkisi vardır.
- Kalıbın ilk sıcaklık profili sonuçları etkilemektedir.



Şekil 3.5 : Laboratuvar ve sanayi ölçeğinde meydana gelen ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması (Pulliam, 2009).

LAV bünyesinde yapılan çalışmalarda yukarıdaki çalışmanın sonuçları kullanılmıştır. Özellikle eş ısıl olmayan iki ve üç boyutlu analizlerde, ısı transfer katsayısı zamana bağlı değişken kabul edilmiş olup Şekil 3.5'te gösterilen grafikteki veriler kabul edilmiştir.

3.2 Ansys Polyflow Yazılımında Kritik Noktalar

Cam şekillendirmenin modellenmesinde ANSYS Polyflow ticari yazılımı kullanılmıştır. Polyflow modülünü, cam şekillendirme modellenmesi için kullanırken bazı önemli noktaların tanımlanması gerekmektedir. Proses itibarıyla şekillenme çok kısa bir zaman içerisinde gerçekleşmektedir. Şekillenme esnasında cam hem şekil

değiştirmekte hem de camın sıcaklığı azalmaktadır. Bundan dolayı aşağıda dikkat edilmesi gereken noktalar belirtilmiştir.

3.2.1 Presleme ve üfleme aşamalarında temas

Polyflow modülünde cam modellenirken tercih edilen pres prosesi veya üfleme kalıplamada serbest yüzey ve temas algılama önemli bir husustur. Şekillenecek camın 2 boyut ya da 3 boyutta modeli oluşturulduktan sonra yazılıma aktarılır. Camın dış katmanları serbest yüzey olarak tanımlanmaktadır. Camın kalıp ile teması gerçekleştiğinde kalıbın hızı ve kuvvetinin etkisiyle şekillenme meydana gelir. Eğer eş ısılmayan bir model seçilirse enerji denklemleri çözülmekte ve cam ile kalıp arasında ısı aktarımı oluşmaktadır.

ANSYS Polyflow modülü belirli zaman adımlarında, akışkan ağ yapısındaki düğüm noktasının, katı hacmine girmesini engellemek adına “penalty” tekniğini kullanmakta ve temas anı “penalty” yöntemi ile kontrol altına alınmaktadır. Normal yönünde akışkan düğüm noktasının hızı kalıp noktasının hızına eşit olacak şekilde zorlanmaktadır. Yüksek k_p değerlerinde akışkanın hızı kalıbın hızına yakın olmaktadır. Aksi takdirde k_p değerinin yeteri kadar yüksek olmadığı durumlarda, akışkan katı hacmine sızmakta ve temas yüzeyleri daha az güvenilir olmaktadır. ANSYS Polyflow uygulamaların çoğunda k_p değeri 10^9 olarak girilmektedir.

$$f_n = -k_p (\mathbf{v} - \mathbf{v}_{wall}) \cdot \mathbf{n} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de belirtilen ifadeler sırasıyla f_n normal kuvvet vektörünü, k_p penalty katsayısını, $\mathbf{v}$ cam düğüm noktası hızını ve $\mathbf{v}_{wall}$ ise kalıp düğüm noktası hızını belirtmektedir. Aynı ilkeyi kullanarak tanjant yönünde cam ve kalıp arasındaki sürtünme kuvveti aşağıdaki denklem 3.2’de açıklanmıştır.

$$f_s = -F_{slip} (\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_{s,wall}) \quad (3.2)$$

Burada sırasıyla f_s teğetsel kuvvet vektörünü, F_{slip} kayma katsayısını, $\mathbf{v}_s$ cam düğüm noktası hızını ve $\mathbf{v}_{wall}$ ise kalıp düğüm noktası hızını temsil etmektedir. Kalıba ve mastöre temas eden yüzeylerde kaymama sınır şartı, slipping coefficient değerine 10^9 verilerek sağlanmıştır. Polyflow kullanıcı kılavuzunda belirtilen değer varsayılan 10^9 olarak gösterilmiştir. Slipping coefficient değeri ile penalty coefficient değeri aynı olarak girildiğinde, akışkanın kalıba temas ettiği noktalarda kaymama sınır şartı

meydana gelecektir. Bu noktalardaki cam hacminde bulunan ağ düğümleri, kalıba temas ettiğinde kaymayacak olup iç yüzeylerde akışkan hareketi olacaktır. Eğer kısmi olarak kayma istenirse 10^2 ile 10^6 arasında bir değer girilebilir. Bu değer cam uygulamasında belirlemesi adına test düzeneği kurulup sonuçların HAD yazılımına aktarılması ve çıktıların karşılaştırılması gerekmektedir. Farklı açılardaki yüzeylere damla düşürülerek kayma zamanı ile şekil değiştirme kontrol edilebilir veya gözlemlenebilir.

3.2.2 Hız ya da kuvvet etkili kalıp tanımlama

Hız ya da Kuvvetli Etkili kalıp tanımlarında, camın uyguladığı karşı kuvvetin hesaplanması arka planda değişecektir. Hız etkili kalıp tanımlaması seçildiğinde temas noktasında oluşan kuvvetin hesaplanması denklem 3.1 ve denklem 3.2'ye göre yapılmaktadır. Tam tersi durumda ise kalıbın hareketi kuvvet ile kontrol edildiğinde aşağıdaki momentum denkleminin çözülmesi gerekmektedir.

$$F_m + F_f = M \cdot a \quad (3.3)$$

F_m = Kalıp Mekanizmasına uygulanan kuvvet

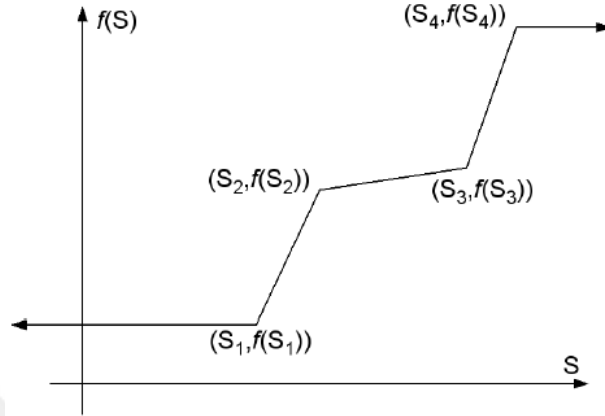
F_f = Deformasyon altında camın gösterdiği direnç kuvveti

α = Kalıp mekanizmasının süreç boyunca ivmesi

M = Hareketli kalıbın toplam ağırlığı (Üstünde hareket eden tüm nesnelerin ağırlıkları dahil)

F_m ve M değerleri kullanıcı tarafından girilmektedir. Program tarafından kalıbın hızı, momentum denklemi içerisinde bulunan α ivme değerinin hesaplanması ile bulunur. İlerleme yönünde girilen kuvvet değerinin de sıfırdan farklı olması gerekmektedir. Camın gösterdiği F_f değeri ise arka planda denklem 3.1 ve denklem 3.2 eşitliklerinin çözülmesiyle elde edilmektedir. Kalıpların hareketi, kuvvet ile kontrol edilirken, kalıbın maksimum kurs boyunun girilmesi tavsiye edilmekte ve analiz senaryosu oluşturulurken kalıbın uygun bir noktada hareketini tamamlaması adına kurs boyu doğru seçilmelidir. Kalıp, son noktaya ulaştığında ve hareketini tamamlandığında çözümler içerisindeki hesaplamalara sabit kalıp olarak devam edecektir. Kabuk tipi olmayan modellerde akışkan kontrol hacmi içerisinde deformasyonlar çok büyük olduğundan kesme kuvveti değerleri analiz süresince artacaktır. Kesme kuvvetlerinin artışı kaynaklı camın uyguladığı karşı kuvvetin, kalıbı yavaşlatması ya da

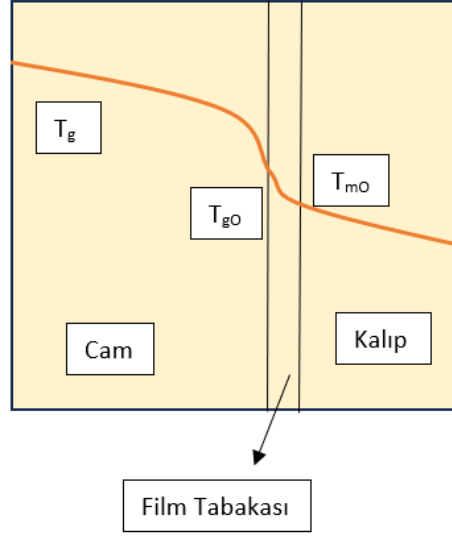
durdurması beklenmektedir. Ayrıca zaman içerisinde presleme esnasında cma yüzeyi artacağından cam tarafından oluşturulan karşı kuvvetin değeri de yükselecektir. Mastör kalıp hareketini belirli bir hız profiline göre programa aktarmak gerekirse “Multi-ramp function” özelliği kullanılmaktadır. Şekil 3.6’da gösterilen durumlarda farklı zaman aralıklarında hız fonksiyonun değişkenleri girilebilir.



Şekil 3.6 : ANSYS Polyflow evolution arayüzünde bulunan multi-ramp function grafiği.

3.2.3 Isı transferi ve temas (konjuge ısı transferi)

Eş ısıl olmayan analizlerin herhangi bir anında ve temas gerçekleştiğinde sınır koşulları temas öncesine göre farklı olacaktır. Temas anında bir bölümün (yüzey ya da çizgi) ısıl sınır koşulları etkin hale getirilebilmekte ve cam ile kalıbın temas ettiği noktada enerji denklemi aktif hale gelmektedir. Sistem sıcaklık etkili tanımlanırsa, cam ile kalıp arasında gerçekleşecek sabit ya da zamana göre değişken ısı akısı değerinin girilmesi gerekir. Fakat belirli bir yaklaşım yöntemiyle tanımlanacak ısı transfer katsayısı sayesinde temasın meydana geldiği noktalarda ısı transferi, taşınım ile tanımlanabilmektedir. ANSYS Polyflow modülünde, cam ve kalıbın birleşme anında meydana gelen ısı aktarımı aşağıdaki Şekil 3.7 ve denklem 3.4 ile açıklanmaktadır.



Şekil 3.7 : Cam ve kalıp kesitinde oluşan sıcaklık eğrileri.

$$q = \alpha (T_{go} - T_{mo}) \quad (3.4)$$

Yukarıdaki denklem 3.4'te α değeri, taşınım ısı transfer katsayısıdır. Isı transfer katsayısı olan α değerinin yüksek olması durumunda akışkan temas noktalarındaki T sıcaklık değeri T_{mold} değerine belirli bir zaman adımıyla eşit olacaktır. Aksi durumda, $\alpha = 0$ olması halinde ise kalıp yalıtılmış sınır olarak davranmaktadır. Isı transfer katsayısının yüksek olması durumlarda ise analiz çözüm süresi uzayabilir ya da daha küçük zaman adımlarına ihtiyaç duyulabilmektedir. Akışkan kontrol hacminde temas yüzeylerinden itibaren ince bir ısı sınır tabakası meydana gelecek ve ayrıca akışkan içerisinde enerji denklemlerinin çözülmesi gerekecektir. Akışkan içerisindeki sınır tabakada ise ısı aktarımı iletim ve radyasyon ile meydana gelecektir. Bu yüzden camın teorik olarak belirlenen ısı iletim katsayısı önem kazanmaktadır. Pratik olarak α değerinin bulunması için sınır tabaka ısı iletim katsayısı ile cam-kalıp temas yüzeyinde meydana gelen sınır tabaka kalınlığının bilinmesi gerekmektedir.

Fourier yasası kullanılarak film tabakasındaki ısı geçişi açıklanabilir. Bir boyutta ısı transferi denklemine göre film tabakası belirli bir kalınlığa ve ısı iletim katsayısına sahip olacaktır.

$$q = k_{temas} \frac{(T_{go} - T_{mo})}{D_{temas}} \quad (3.5)$$

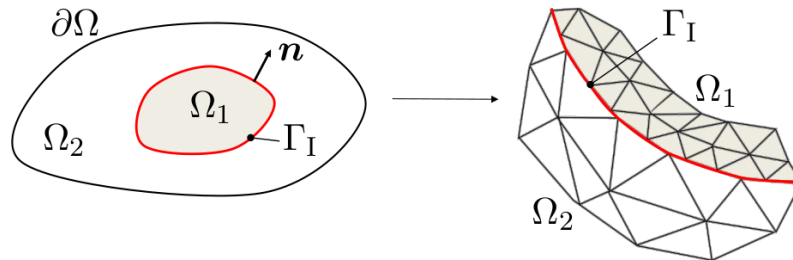
Yukarıdaki denklem 3.4 ve denklem 3.5 birleştirilse ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklem 3.6'da açıklanabilir. Isı transfer katsayısının özellikleri film tabakasının

termofiziksel özelliklerine bağlı olacaktır. Film tabakasının fiziksel özelliklerinin ölçülmesi çok zor olacağından deneysel veriler ile desteklenmiş 1-boyutlu nümerik çözümler yapılmıştır. Gerçek presleme şartlarında, deneysel veriler kaydedilerek zamana bağlı değişen ısı transfer katsayısı bulunabilir ve ANSYS Polyflow'a veri olarak girilebilir. Cam ile kalıp arasında ısı transferi başlığında açıklanan deneysel veriler modellemede kullanılacaktır.

$$\alpha = \frac{k_{temas}}{D_{temas}} \quad (3.6)$$

Burada k_{temas} parametresi kullanılan akışkanın ısı iletim katsayısıdır. D_{temas} değeri ise akışkan kesiti içerisinde bulunan sınır tabaka kalınlığıdır. Genellikle bu sınır tabaka kalınlığı akışkan kesitinden küçük olmaktadır. Isı transfer katsayısı olan α değerinin yüksek olduğu durumlarda, kalıp sıcaklığının etkilediği akışkan sınır tabaka kalınlığı belirli bir kalınlıkta olacaktır. Soda-kireç camının ısı iletim katsayısı, cam özellikleri bölümünde verilmiş ve efektif ısıl iletkenlik katsayısı olarak tanımlanacaktır.

Eş ısıl olmayan analizlerde, akışkan ve kalıp kontrol hacimlerinde meydana gelen ısı transferinin hesaplanmasında konjuge ısı transfer modeli kullanılmaktadır. Hem akışkan hem de kalıp içerisinde sıcaklık dağılımı homojen olmamaktadır. Konjuge ısı transfer modelinde kalıp ile cam arasında meydana gelen ısı transferinde taşınım-yayılm mekanizması ısı akısını kontrol etmektedir. Sıcaklık etkili model aksine daha fazla değişkenler hesaplanabilmektedir. Akışkan ve kalıp kontrol hacimlerinde bulunan ağ düğümlerinin birbirini karşılamaması durumlarında ise non-conforming sonlu elemanlar tekniği kullanılmaktadır.



Şekil 3.8 : Temas arayüzünde farklı ağ yapısına sahip hacimlerin görüntüsü.

Konjuge ısı transferindeki temel düşünce, her zaman adımında ve kalıp temas yüzeyi boyunca oluşan sıcaklık dağılımlarının hesaplanmasıdır. Temas olmaması durumlarda ise kalıp içerisine doğru gerçekleşen ısı akısı sıfır olarak kabul edilmektedir. Temas

gerçekleştirdiği bölgelerde, akışkan yüzeyinden çıkan birim ısı akısı ile kalıp yüzeyine giren birim ısı akısı eşit olmalıdır. Ayrıca temas düğümlerinde kalıp ve akışkan sıcaklıkları zaman içerisinde eşitlenecektir.

Aradaki dengenin anlaşılması adına numerik çözümler yapılabilmektedir. Numerik çözümler için kalıp ve cam malzemesi hakkında bazı değişkenlerin bilinmesi ve girdi olarak kullanılması gerekmektedir. Bunlar;

Sıcaklığa bağlı değişen camın ve kalıbın ısı sığası (c_p)

Sıcaklığa bağlı değişen camın ve kalıbın yoğunluğu (ρ)

Sıcaklığa bağlı değişen camın ve kalıbın termal iletkenliği (k)

şeklindedir.

3.3 Modellemenin Matematiksel Formülasyonu

Endüstri ölçeği ve imalat şartları altında meydana gelen cam şekillendirme prosesinin anlaşılması için kütle, momentum ve enerji korunum diferansiyel denklemlerinin program tarafından çözülmesi gerekmektedir. Modelleme gereği cam sıkıştırılamaz akış olarak kabul edilmiştir. Yapılan çalışmalar 2 boyut ya da 3 boyutta çözülmüştür. Bazı ürünler şekli gereği eksen simetrik kabul edilebilmekte ve bu yüzden 2 boyutta çözüm yapılabilmektedir. Özellikle pres-üfleme prosesinde cidar dağılımının incelenmesi için 2 boyutlu analizler yeterlidir. Fakat pres prosesi gibi eksenel simetrik olmayan ürünlerin modellenmesi için 3 boyutlu çözümler gerekecektir. Kütle, momentum ve enerji korunum diferansiyel denklemleri silindirik koordinatlarda sıkıştırılamaz akış için yazılacaktır.

Denklem 3.7’de sıkıştırılamaz akış için silindirik koordinatlarda süreklilik denklemi gösterilmiştir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

Denklem 3.8’de sıkıştırılamaz akış için silindirik koordinatlarda momentum denklemleri gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
& \rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} \right) \\
& = \rho g_r - \frac{\partial p}{\partial r} \\
& + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_r}{r^2} \right] \\
& \rho \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{u_r u_\theta}{r} \right) \\
& = \rho g_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \\
& + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r^2} \right] \\
& \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \\
& = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right]
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Denklem 3.9’da sıkıştırılamaz akış için silindirik koordinatlarda enerji denklemi gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial T}{\partial t} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \\
& = \frac{\dot{q}_g}{c_p} + a \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{\Phi}{\rho c_p}
\end{aligned} \tag{3.9}$$



4. BİLGİSAYAR ORTAMINDA YAPILAN DENEMELER

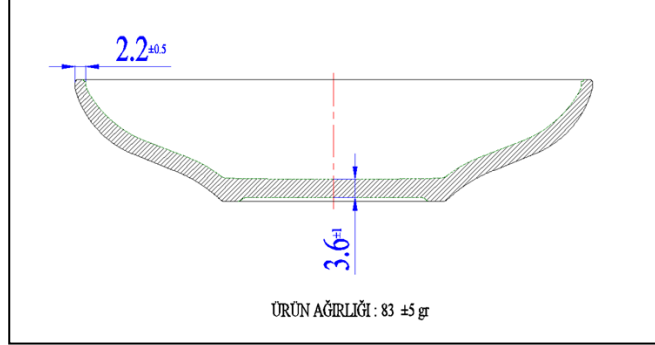
Literatür araştırması ile edinilen bilgiler ışığında bilgisayar ortamında denenecek ürünler seçilmiş, imalat verileri kaydedilmiş ve bilgisayar ortamında modelleme yapılmıştır. Presleme, pres-üfleme ve “individual section” IS cam üretim proseslerine ait şekillendirme adımları analiz edilmiştir. Bunlar sırasıyla aşağıda maddeler halinde gösterilmiştir;

- Eş ısıllı çay tabağı presleme prosesi
- Eş ısıllı olmayan çay tabağı presleme prosesi
- Eş ısıllı olmayan karaf ürünü pres-üfleme prosesi
- Eş ısıllı olmayan IS parizonu presleme prosesi
- Sabit Üfleme Coke ürünü presleme, sarkma ve üfleme prosesi

4.1 Eş Isıl Çay Tabağı Presleme

20020 kodlu çay tabağı, fabrika içerisinde bulunan hidrolik kontrollü pres makinelerinde üretilmektedir. Pres hatlarının üzerinde soğutma manifoldları, ürün take-out istasyonu, kalıp yağlama istasyonu, damla yükleme istasyonu ve presleme istasyonları olarak 5 kısım bulunmaktadır. 24 adet kalıp, döner tabla üzerine yerleştirildikten sonra makine kendi ekseninde indeksli hareket yapacak şekilde dönmektedir. İmalat sıcaklığı belirlenmiş olan cam, forehearth'dan geçtikten sonra spout bölgesine ulaşır. Burada cam istenilen imalat sıcaklığına ulaştıktan sonra, mekanik ya da elektronik feeder kontrollü tüp ve plunger yardımıyla damla halini alır. Daha sonra özel kaplamalı ve su soğutmalı makaslar vasıtasıyla kesilip damla yolundan geçerek kalıbın içerisine düşer. Damlanın düştüğü kalıplar indeks tablanın yardımıyla dönerek aşağı yukarı hareket eden mastör (Pozitif Kalıp) eksenine gelir. Hidrolik kuvvet yardımıyla aşağı hareket eden mastör camı şekillendirerek istenilen ürünün oluşmasını sağlar. Hem kalıplar hem de ürün döngüsel zaman içerisinde hava ya da su yardımıyla soğutulmaktadır. Mastör, hareketini tamamladıktan sonra belirli

bir süre sabit konumda bekleyerek, ürünün soğumasına ve hatasız son şeklini almasına destek olur. Ürün şekillendirilmesi tamamlandıktan sonra mastör bir sonraki damlayı preslemek için bir başlangıç konumuna geri döner ve indeks tabla bir sonraki damlayı beklemek üzere istasyonu değiştirir.

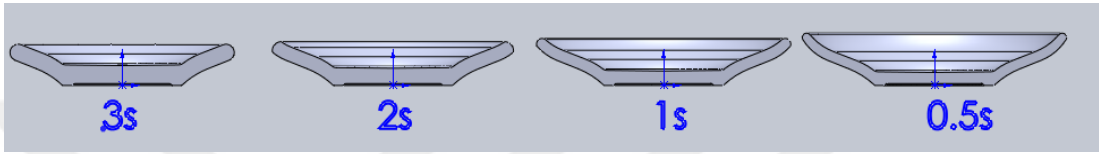


Şekil 4.1 : Üretilen çay tabağının teknik resmi.

Ürün, mastörün aşağı yönde hareketi ile oluşmaya başladığında camın cidardaki hızı ilk başta düşük olup, ileriki zaman adımlarında cidardaki hızlar anlık olarak 1~2 m/s değerlerine ulaşmaktadır. Bundan dolayı hidrolik presleme basıncının ürün parametrelerine (geometri, gramaj, yüzeydeki gravür yapısı) bağlı olarak değişmesi beklenir. Ürün ağız kısmı büyük ve gramajı yüksek olan ürünler ile ürün ağız kısmı dar ve yüksekliği fazla olan ürünlerin presleme basınçları yüksektir. Özellikle asimetrik formda olan ürünlerde yarım ağız kalite probleminin oluşma ihtimali yüksektir. Bu tür hatayı gidermek adına, mastör ile kalıp arasındaki presleme açısı, ürün cidar kalınlığı ve damlanın kalıp içindeki pozisyonu değiştirilebilir. Ağız kısmındaki camın ilerlemesi devam ederken cidarın incelmesinden kaynaklı camın soğuması devam etmektedir. Böylece cam katmanlarında kesme gerilmesi artmakta ve camın viskozitesi yükselmektedir. Kayma gerilmesi, viskozite ve kesme gerilmesinin fonksiyonu olduğundan, bu değerler camın ince olduğu bu noktalarda çok daha yüksek olması beklenir. Özellikle su bardağı gibi dar ağız çapı-uzun ürün boyu orantısına sahip olan geometrilerde, yüksek presleme kuvvetlerinde ürünlerin ağız kısımlarında presleme çatlağı gibi kalite problemleri yaşanabilmektedir.

20020 kodlu çay tabağı üretiminde hidrolik silindirin toplam kurs boyu 45 mm'dir. High Frame rate özelliğine sahip FESTO SBOC-M kamerası ile çekilen video'da mastörün hızı ortalama 150 mm/s olmaktadır. Aşağıdaki çizelge 4.1'de mastörün konumuna göre cidardaki camın yaklaşık hızları belirtilmiştir. Görselleştirme yapılırken Solidworks 2010 x64 çizim programı kullanılmıştır. Çalışma gramajı

belirlendikten sonra ürün teknik resminden oluşturulan kalıplar montaj halinden 0,5-1-2-3 mm ötelenerek ürünün kalıp içerisindeki durumu resmedilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmadaki amaç camın cidar noktasına girmeye başladıktan sonraki hızların tahmin edilmesidir. Hızların belirlenmesi bilgisayar tarafından yapılan çözüm parametrelerinin seçilmesine yardımcı olmaktadır. Modelleme için gerekli zaman adımının tahmin edilmesi için cidardaki ağ yapısı uzunluğunun y-eksenindeki hız ile bölünmesi faydalı olacaktır. Mastör kalıbı aşağı yönlü hareketini tamamladıktan sonra sabit bir konumda belirli bir süre bekleyerek ürünün tam anlamıyla şekillenmesini sağlar. Şekil 4.2’de kurs boyu mesafesine bağlı olarak ürünün formu resmedilmiştir.



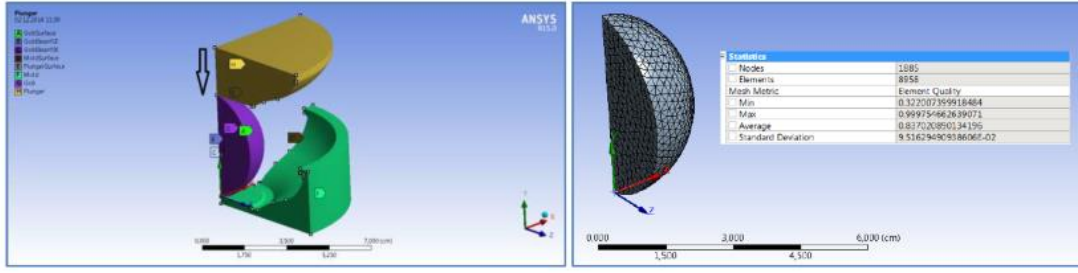
Şekil 4.2 : Kalan kurs boyu mesafesine bağlı olarak çay tabağının kalıp içerisindeki tahmini görüntüsü.

Çizelge 4.1 : Cidardaki camın kalan stroke mesafesine bağlı hızı

Kalan Strok Mesafesi (mm)	Cam-Ring arasındaki Mesafe (mm)	Yaklaşık Y-Eksenindeki Hız (mm/s)
3	9	450
2	8	600
1	7	1050
0,5	5	1500

4.1.1 Modelleme hazırlığı

Solidworks 2010 Premium x64 programında çizilen kalıp, mastör ve damla, montaj arayüzünde analize hazır hale getirilerek STEP AP210 (.step) formatında kaydedilmiştir. Böylece ANYS workbench üzerinde bulunan Design Modeler yardımıyla da gerekli düzenlemeler (Ölçek, Birim ve Yer Değiştirme) yapılabilmektedir. Kalıp (Mold) ve mastör (Plunger) katı, Damla (Gob) ise akışkan olarak tanımlanmıştır. Seçilen birim sisteminin diğer tüm programlarla uyumlu olması analiz açısından önem arz etmektedir. Bu yüzden, programa girilen parametre ekranından metric_cm/g/s sistemi seçilmiştir.



Şekil 4.3 : Kalıp-mastör-damla geometrisi solda, damla hacminin ağ yapısı sağda.

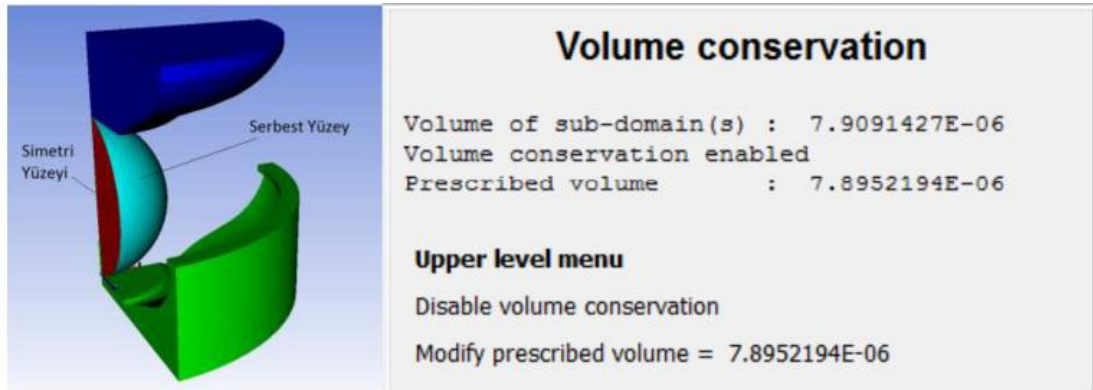
Çay tabağı ürünü eksenel simetrik olduğundan dolayı analiz süresini kısaltmak için geometrinin dörtte birlik kısmı dikkate alınmıştır. Geometri pozitif eksenler içinde çizilmiş olup, mastör kalıbı -y yönünde -4,14 cm/s hızıyla alt kalıba doğru hareket etmektedir. Damla içerisindeki tüm mesh elementleri ilk zaman adımında tetrahedron olup, 0,2 cm köşe uzunluklarına sahiptir. Damla hacminde toplam 8958 adet tetrahedron elementi bulunmaktadır. Bu çalışmada, cam damlası için en elverişli bir çalışma geometrisi oluşturulmuştur. Damla, tam merkez ekseninde olacak şekilde küresel yapıya sahip olmakla beraber mastör ve kalıba birer noktadan temas etmektedir. Yerçekimi bu analizde ihmal edilmiştir.

Camın preslenme prosesi büyük deformasyonların meydana geldiği bir uygulamadır. Özellikle bu tip uygulamalarda başlangıçtaki mesh yapısı sonraki zaman adımlarında meydana gelecek şekil değiştirmelere uygun olmayabilir. Bu yüzden ANSYS 15.0 Polyflow arayüzünde bulunan adaptive meshing yöntemi ile mesh yapısı, o zaman adımı için değiştirilebilir. Özellikle camın preslenmesi sırasında, kalıp veya mastör üzerinde bulunan küçük geometrik detayların (ağız cidarı, gravür v.b) yakalanabilmesi adına bu yöntemin kesinlikle kullanılması gerekmektedir. Çözüm esnasında adaptive meshing yöntemini hacmin belirli noktalarında kullanmak, hesaplama zamanını olumlu yönde azaltacaktır.

4.1.2 Eş ısıll çay tabağı analiz sonuçları

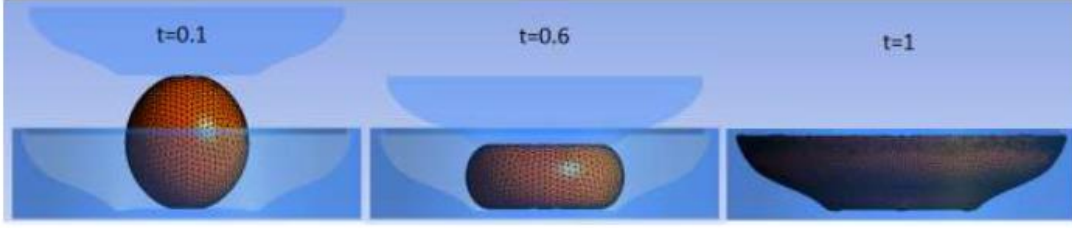
Camın özellikleri ve çalışma parametreleri programa girilerek analiz sonuçlandırılmıştır. Geometri eksenel simetrik olduğundan dolayı, XY ve YZ eksenlerinde bulunan yüzeyler simetri eksen kabul edilmiştir. Ayrıca presleme esnasında tahmini %1 ila %5 hacim kaybı adaptive mesh uygulamasından dolayı beklenmektedir. Hacim kaybını minimuma indirmek için ara yüzde bulunan “Volume Conservation” aktif hale getirilmiştir.

Şekil 4.4'te gösterilen serbest yüzey hem normal hem de teğetsel yönden gelen kuvvetlere maruz kalacaktır. Cam, yukarıdaki kalıbın aşağı doğru hareket etmesiyle kalıp yüzeylerine temas etmeye başlayacaktır. ANSYS Polyflow, her zaman adımında akışkan ağ yapısındaki düğüm noktasının katı hacmine girmesini engellemek adına penalty yöntemini kullanmakta ve temas anını kontrol altına almaktadır. Serbest yüzey üzerinde bulunan düğüm noktalarının normal yönündeki hızı kalıp düğüm noktası hızına eşit olacak şekilde zorlanmaktadır. Yüksek k_p değerlerinde akışkanın hızı kalıbın hızına yakın olmaktadır. Aksi taktirde k_p değerinin yeteri kadar yüksek olmadığı durumlarda ise akışkan katı hacmine sızmakta ve analiz sonuçları istenilen seviyede olmayacaktır. ANSYS Polyflow uygulamaların çoğunda k_p değeri 10^9 olarak alınmaktadır.



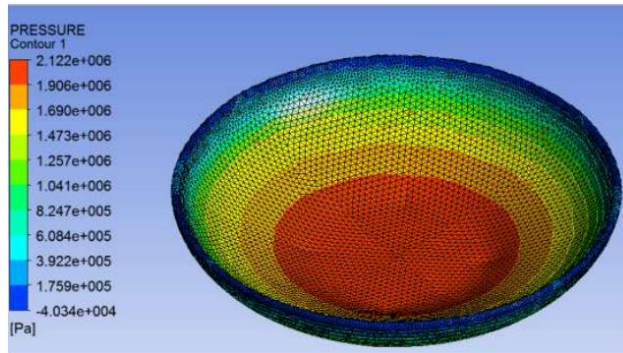
Şekil 4.4 : Model geometrisi ve belirlenen hacim özellikleri.

Bu denemede ANSYS Polyflow kullanılarak pres prosesinin temel ve önemli noktaları öğrenilmiştir. Presleme esnasında toplam geçen süre bir (1) saniyedir. Mastörün aşağı yönlü hareketiyle cam hacmi içerisindeki ağ yapısı değişmeye başlamış, düğümlerin cidardaki sıklığı formu yakalamak adına giderek artmıştır. Özellikle üç boyutlu uygulamalarda çözüm zamanı artmaktadır. Bu yüzden eksenel simetrik ürünler seçilmiştir. Ek olarak Adaptive mesh komutunun aktif hale getirilmesiyle de ağ yapısının şekil ve büyüklüğünde farklılıklar oluşmuştur. Şeklin tam oluşmasını ve çözümün sonuçlanmasını etkileyen en önemli faktörlerden birisi de “Adaptive meshing” komutudur. Bu tip çözümlerde ağ yapısının kalitesi zamanla değişebilir ya da başlangıçtaki ağ yapısı ileriki zaman adımlarına uymayabilir. Ağ yapısı belirli kriterler içerisinde değişmektedir.



Şekil 4.5 : Belirli zaman adımlarında ürün ve kalıpların görüntüsü.

Şekil 4.5’te ağ yapısının zamana göre değişimi gözlenebilmektedir. Ayrıca ürün ağız kısmında bulunan ağ yapısının normal ağ yapısından ince ve sık olması “Adaptive meshing” komutu ile sağlanabilir. Normal şartlar altında bu ürünün preslenmesi için gereken hidrolik basınç, yaklaşık olarak 40-42 bar arasında değişmektedir. Şekil 4.6’da geometri üzerinde oluşan basınç kontürleri gösterilmiştir. Preslemenin son anında hidrolik silindir, belirli bir süre sabit bir noktada beklemektedir. Aslında hidrolik silindirin kurs hareketini sınırlayan camın oluşturduğu karşı kuvvettir. Ürünün şekillendirilmesi sırasında gereken basınçtan daha az bir değer girilmesi yarım ağız kalite hatasına, daha fazla basınç değeri girilmesi ise çapak veya çatlak sorununa neden olmaktadır. Eğer analiz, eş ısıl olmayan bir şekilde koşturulursa hem analiz süresi artacak hem de ürün yüzeyinde bulunan basınç kontürlerinde farklılıklar meydana gelecektir. Eş ısıl presleme analizi High-Performance Computing (HPC) ile yaklaşık 4 saat sürmüştür. Bilgisayarın işlemcisi 6 çekirdek Intel Xeon X5650 2,66 GHz ve ram kapasitesi 48 GB’dır. Üç boyutlu analizlerde çözüm süresinin uzamaması adına ağ sayısının 500,000 adetinde tutulması tavsiye edilmektedir.



Şekil 4.6 : Son zaman adımında ürün üzerindeki basınç kontürleri.

4.2 Eş Isıl Olmayan Çay Tabağı Presleme

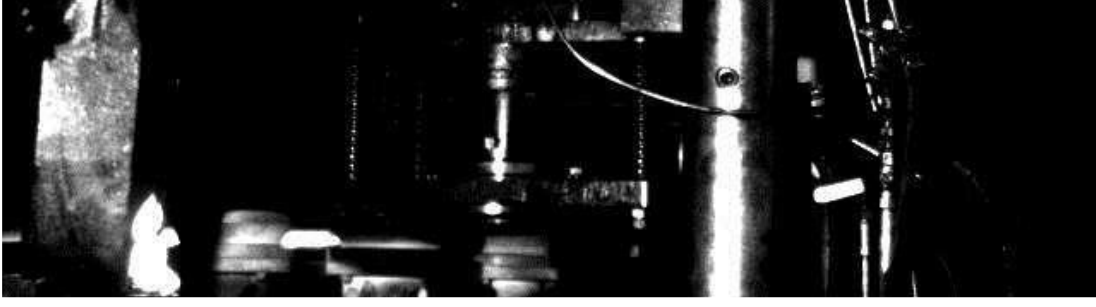
Pres hatlarında üretilebilen 20020 kodlu çay tabağı ürünü için hidrolik silindirin basınç-zaman ve konum-zaman grafikleri alınmış olup, aynı zamanda Festo SboC-M

model hızlı kamera ile hat üzerinde çekim yapılmıştır. Yüksek kare hızı kayıt özelliklerine sahip kamera ile alınan video incelendiğinde mastör, hareketini tamamladıktan sonra belirli bir süre sabit konumda kalmaktadır. Kalıplar arasında kalan cam, ring olarak adlandırılan kalıp yüzeyine doğru ilerlemektedir. Kalıp sıcaklık dağılımlarının homojen olması ve etkin bir şekilde soğutulması, camın kalıplar arasında uygun bir şekilde ilerlemesini sağlar. Mastör olarak adlandırılan üst kalıp su, alt kalıp ise hava ile soğutulmaktadır. Ayrıca imalat öncesi kalıp yüzeylerinin polisaj işleminden geçirilerek parlatılması, camın yürümesini kolaylaştırmaktadır. Kalıplar presleme ve damla yükleme istasyonu öncesi uygun bir şekilde yağlanmakta ve yağlama sonrasında cam ve kalıp arasında karbon film tabakası oluşmaktadır. Filmin kalınlığı ısı transferini etkilemekte olup, düzgün olmayan yağlama prosesinde, camın kalıplar arasında ilerlemesinde sorunlar meydana gelmektedir. Kalıp yüzeylerinde yağlanmayan ya da gravür içeren bazı bölgelerin sıcaklıkları, zaman içerisinde artabilir ve bu yüzden cam kalıba yapışabilmektedir.

Üretim devrini belirleyen parametreler sırasıyla; kalıpların malzemesi, kalıpların sıcaklığı, soğutmanın etkinliği, cam ürün formu, cam damlasının gramajı, camın kalıplara uygun bir şekilde yüklenmesi, presleme kuvvetini sağlayan silindirin hidrolik basıncı ve mekanizmaların ataletidir. Bu üründe, gramajın az olması ve ürün formunun karmaşık olmaması yüksek devirlerde çalışılabilmesine olanak sağlamaktadır.

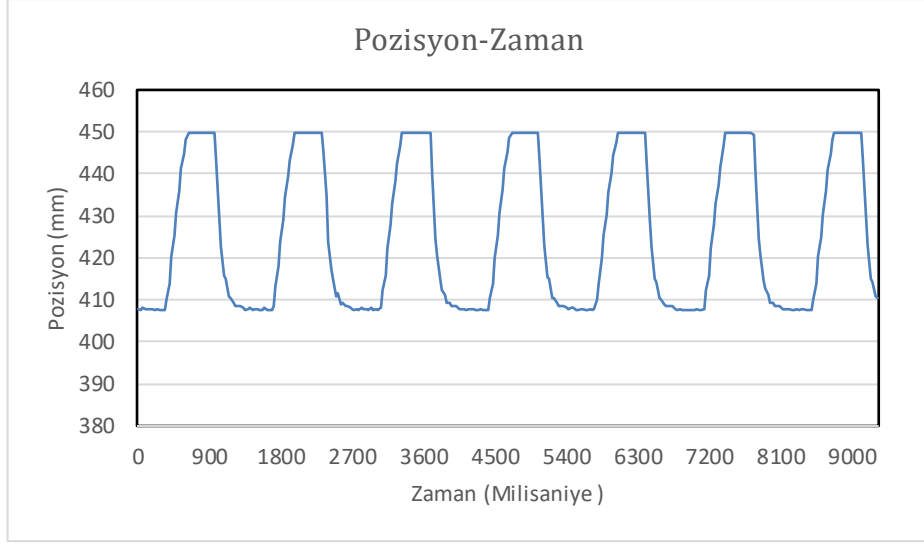
4.2.1 Modelleme hazırlığı

Mastör kalıbının hareketi, hızlı kamera ile alınan verilere göre belirlenip değerleri programa aktarılmıştır. Buradaki amaç; zamana göre değişen hızlarda hareket eden mastör hareketinin programa girdi olarak aktarılmasının öğrenilmesidir. Buna göre, ilk olarak hidrolik silindir kısa bir süre ivmelenip, daha sonra belli bir süre ortalama sabit hızla ilerledikten sonra, son olarak da presleme esnasında az da olsa yavaşlamaktadır. HAD yazılımına aktarılan veri setlerini içeren grafik ile mastörün ilk ve son pozisyonundaki görüntüleri aşağıdadır. Mastör kalıbının en üst noktadan başlayıp en alt noktaya ulaşma süresi yaklaşık olarak 0,3 saniyedir. Belirtilen süreye, mastör kalıbının yavaşlaması ile en alt noktada bekleme zamanı dahil değildir.



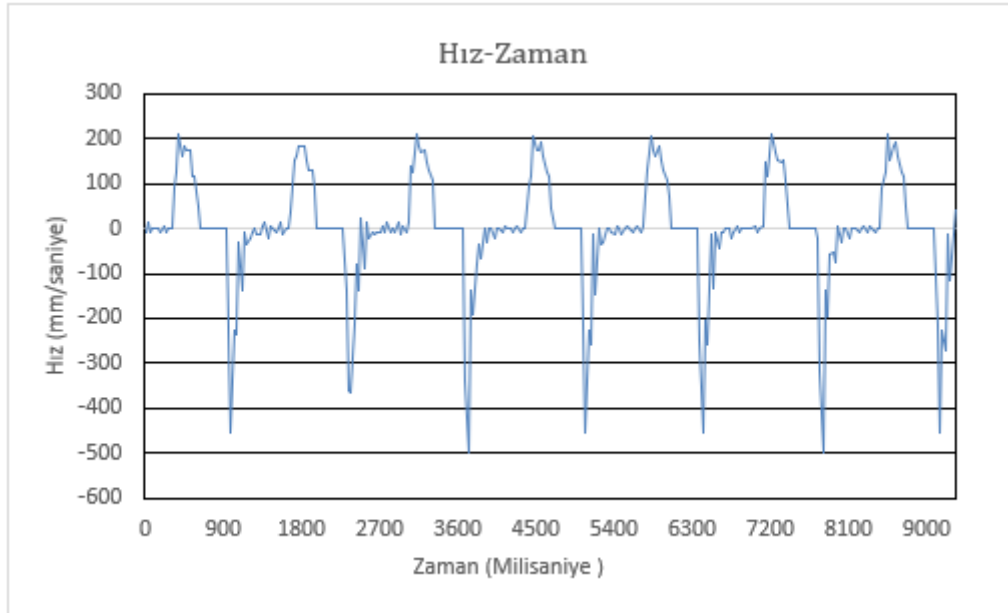
Şekil 4.7 : Hızlı kamera ile alınan kayıttan görüntü, mastör kalıbının en alt konumdaki hali.

Düşük maliyetli ve yüksek kare çekim hıza sahip Festo Sbloc-M kamerası kullanılarak saniyede 500 kare çözünürlükle alınan kayıt incelenmiştir. Aynı zamanda servo kontrollü hidrolik presin hareket verileri de kaydedilmiştir. Yapılan iki çalışmanın yardımıyla; hareketin konum-zaman, hız-zaman ve basınç-zaman verileri çıkartılmıştır. Hareketli sistemin verileri hidrolik silindir üzerinde bulunan temassız lineer cetvel yardımıyla oluşturulmuştur. Verilerin çözünürlüğü 30 milisaniye olmakla beraber veri kaydı yaklaşık 15 saniye sürmüştür. Damla düştükten sonra hareket edip presleme istasyonuna gelen kalıplar, A ve B olarak adlandırılan iki ayrı silindirin presleme eksenine konumlandırılmaktadır. Mastör ve ring mekanizmaları, A ve B silindirlerine bağlanmış olup, belirli bir basıncın etkisiyle aşağı yönlü hareketine başlamaktadır. Servo motor kontrolü ile elde edilen hidrolik basıncın beklenen fonksiyonları yerine getirmesi için basınç, yön ve akış valfleri tarafından yönlendirilmektedir. Sıkıştırılamaz akışkan, bu devre elemanları vasıtasıyla gerekli doğrusal kuvveti oluşturup silindirin hassas bir şekilde prosesi tamamlamasını sağlamaktadır.



Şekil 4.8 : Mastörün hareketini gösteren pozisyon-zaman grafiği.

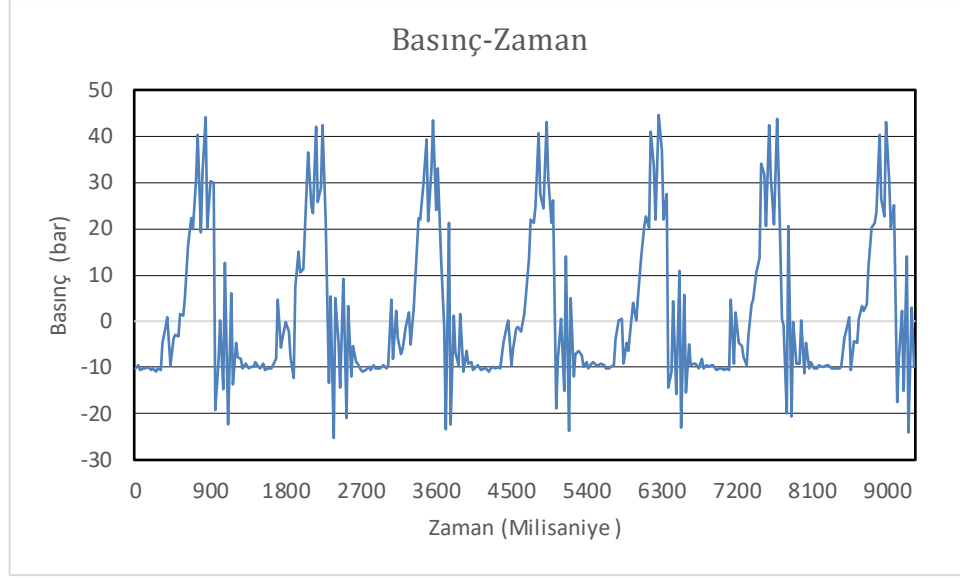
Şekil 4.8’deki grafik incelendiğinde mastör, yaklaşık olarak 40 mm hareket edip tekrar başladığı pozisyona geri dönmektedir. Daha önceden de belirtildiği üzere mastör, kurs mesafesini tamamladıktan sonra belirli bir süre aynı noktada kalmaktadır. Mastörün hareketini sınırlayan etken ise camın gösterdiği karşı tepki ve kalıp hacminin cam tarafından doldurulmasıdır. Presleme esnasında cam damlası, kalıplar arasında şekillenirken yüzey alanı genişlediğinden dolayı mekanizma hareketine karşı oluşturduğu kuvvet artmaktadır. Cam damlasının şekillenmesi esnasındaki sıcaklık değişimleri, kalıplar arasındaki cidar kalınlıkları, presleme açısı ve kalıpların soğutma performansı gibi etkenler camın gösterdiği karşı kuvveti değiştirecektir.



Şekil 4.9 : Mastörün hız-zaman grafiği.

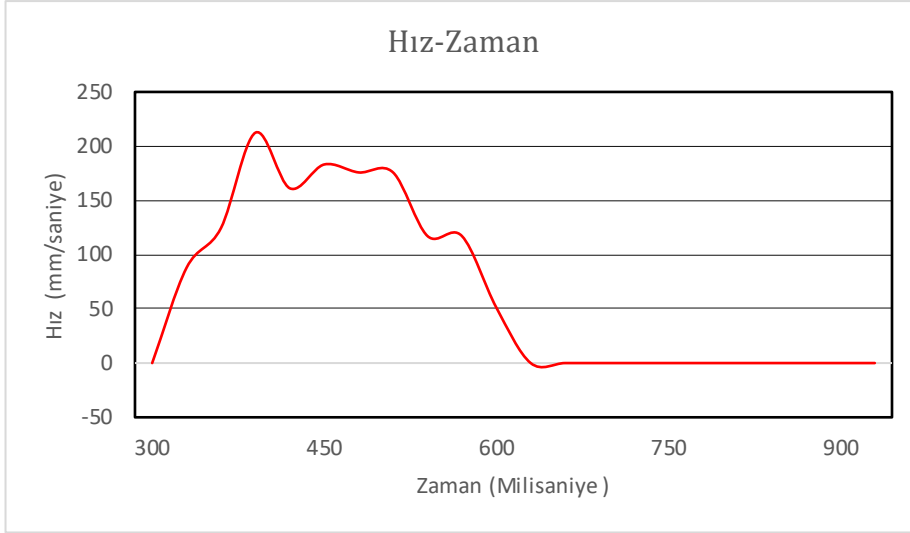
Şekil 4.9’da görüldüğü üzere konum-zaman grafiğindeki veriler kullanılarak mastör mekanizmasının hız-zaman grafiği oluşturulmuştur. Pozitif kalıp, sıfır değerinden başlayıp tepe noktasına ulaştıktan sonra eksi ivmeyle yavaşlayıp sonra belirli bir süre en alt noktada beklemektedir. Toplam proses zamanı hareket, bekleme ve geri çekilme ve tekrar ürünü bekleme olarak dört aşamadan oluşmaktadır. Hareket aşamasından bekleme aşamasına geçerken mekanizma üzerinde yayın şekillendirme prosesine olumlu katkısı bulunmaktadır. Mastör mekanizması üzerinde bulunan yayın görevlerinden bazıları ise; presleme esnasında oluşan karşı kuvvetleri sönmüleme ve camın düzgün bir şekilde şekillendirilmesidir. Şekil 4.8’de oluşturulan grafikteki veriler hidrolik silindir üzerindeki lineer cetvelden alınmıştır. Fakat, mastörün bağlı olduğu mekanizmadaki yay hareketinin ölçülmesi adına ek bir lineer cetvel ve yük hücresinin mekanizmaya bağlanması gerekmektedir. Ölçüm sırasında sadece hidrolik silindirin hareket-zaman grafiği oluşturulduğu için yayın etkisi bu analizde ihmal edilmiştir. Yapılan analizde sadece hareket aşaması ele alınmıştır. Analiz süresi 0,3 saniye olarak mastörün bir çevrimi olarak belirlenmiştir. Proses süresinin çok kısa olması analiz parametrelerinin seçilmesini de etkileyecektir.

Şekil 4.10’da gösterilen grafikte mastör mekanizmasının basınç-zaman grafiği oluşturulmuştur. Hidrolik silindirin basınç-zaman grafiğini yorumlamak için konum-zaman ve hız-zaman grafikleri birlikte kullanılmalıdır. Mastör, cama temas ettiği andan itibaren presleme aşaması başlamaktadır. Presleme basıncı bu noktadan itibaren yükseldikten sonra en tepe noktasına ulaşır ve şekillenme gerçekleşir. Presleme basıncının bekleme anında dengeli ve sürekli olması ürünün kalitesini arttırmakla beraber hata oranını azaltmaktadır. Ürün oluşumu tamamlandıktan sonra, silindir tekrar damla bekleme pozisyonuna geri döner. Özellikle gravürlü, ağzı geniş veya derin forma sahip ürünlerde presleme basıncının dengeli olması son nihai ürün kalitesini olumlu yönde değiştirir.



Şekil 4.10 : Mastörün basınç-zaman grafiği.

Bir adet ürünün preslenmesi için geçen zamanda mastörün hız-zaman grafiği Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Mastör, yaklaşık olarak 0,1 saniyede azami hızına ulaştıktan sonra 0,2 saniye içerisinde yavaşlayıp durmaktadır. Şekillenme devam ederken de mastör kalıbın içerisinde 0,3 saniye bekleme aşamasına geçmektedir. Mastör hareketini belirten bu iki aşamanın süresi yaklaşık 0,6 saniyedir. Yapılan bu analiz denemesinde mastörün hareketi hız etkili olarak girilecektir. Şekil 4.11’deki grafik ele alındığında mastörün hızlanma ve yavaşlama hareketinin tanımlanması yeterli olacaktır. İki aşamanın gerçekleşme süresi 0,3 saniye olarak tanımlanmış ve grafiğin bu bölümü basitleştirilmiştir. Mastör, pozitif ivme ile en yüksek hızına ulaştıktan sonra sabit hızla devam edip daha sonra yavaşlayacaktır ve en yüksek hızı 210 mm/saniye olarak kabul edilecektir. Mastörün hızı, hareketin başlangıç ve bitiş anında sıfır olacaktır. Aşağıdaki grafik çözümlemesinde, mastör hızının zamana göre değişim denklemleri bulunmaktadır. Belirlenen hız ve zaman değerlerine göre ANSYS Polyflow arayüzünde bulunan “Multi-ramp function” komutu kullanılabilir.



Şekil 4.11 : 1 adet ürün için mastörün hareket ve bekleme aşamasında oluşan hız-zaman grafiği.

$t_0 = 0$ sn , $t_1 = 0,01$ sn , $t_2 = 0,11$ sn , $t_3 = 0,21$ sn , $t_4 = 0,31$ sn , $t_5 = 0,6$ sn

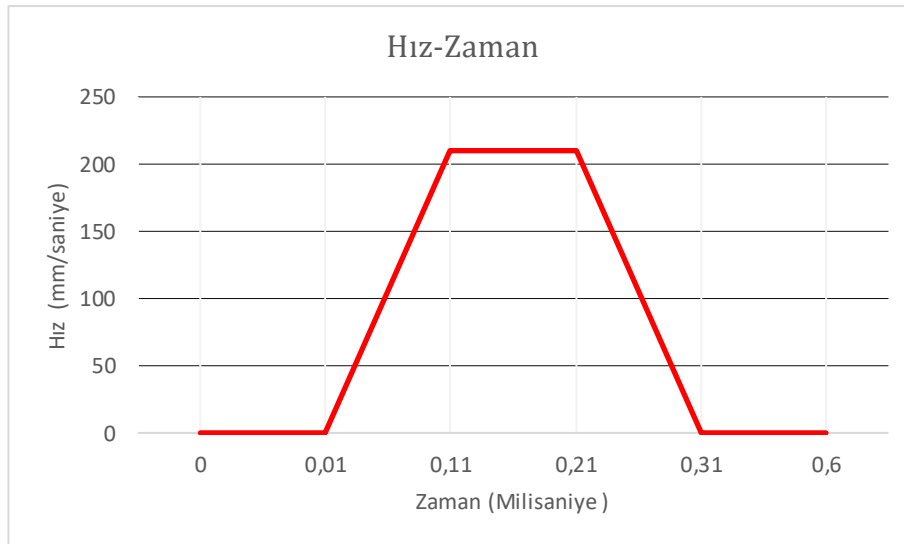
0-0,01 saniye arasında} $V_1 = 0$

0,01-0,11 saniye arasında} $V_2 = a_1 \cdot (t_2 - t_1)$

0,11-0,21 saniye arasında} $V_3 = 210$ mm/s

0,21-0,31 saniye arasında} $V_4 = a_2 \cdot (t_4 - t_3)$

0,31-0,6 saniye arasında} $V_5 = 0$



Şekil 4.12 : ANSYS Polyflow Evolution arayüzünde kullanılacak hız-zaman grafiği.

Mastörün hareket edeceği toplam kurs boyu mesafesi 42 mm'dir. Kurs boyu miktarını sağlamak adına kalıbın hız-zaman grafiği basitleştirilmiş ve Şekil 4.12'de gösterilmiştir. 0,3 saniye içerisinde mastör hareketini tamamlayacak ve daha sonra 0,3

saniye en alt noktada sabit bir şekilde bekleyecektir. Analiz sonuçlarının gerçek duruma göre yakınması adına mastörün hareket grafiği ile cam ve kalıplar arasında meydana gelen ısı transferi, girdilere dahil edilmiştir.

Camın sıcaklık ile değişen viskozitesini tanımlamak adına Fulcher Dependence sekmesi seçilmiştir. Daha önceden farklı fabrika lokasyonlarından alınan cam numunelerine yapılan test sonuçlarına dayanarak Fulcher eşitliğindeki parametreler ANSYS Polyflow'a girilmiştir. Camın preslenmesi sırasında iletim ve radyasyon ile ısı transferi gerçekleşmektedir. Fakat cam özellikleri başlığındaki ısı iletkenlik katsayısı değerleri referans alındığında ve ayrıca analizin basitleştirilmesi için cam hacminde sadece iletim ile ısı transferi etkin olacaktır.

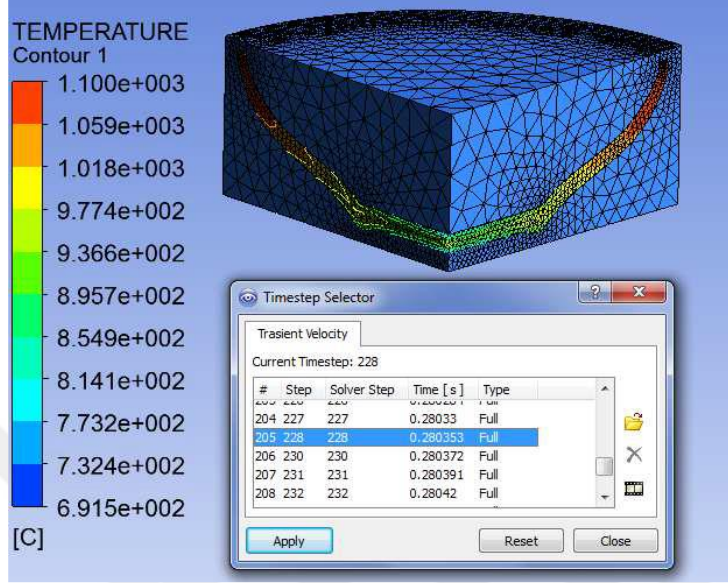
4.2.2 Eş ısı olmayan çay tabağı presleme sonuçlar

Üç boyutlu ve eş ısı olmayan bir model kurgulandığında çözüm süresi çok uzun olmakta ve Şekil 4.13'te gösterildiği gibi toplam süre 6 saati aşmaktadır. Bu süre, ürün geometrisinin karmaşıklığı, ürün cidar kalınlığı ve ağ sayısı ile değişmektedir. Analiz süresinin kısaltılması için High Performance Computing sekmesi aktif hale getirilmiştir. Bilgisayarın özellikleri; 6 çekirdekli Intel Xeon X5650 2,66 GHz işlemci ve ram kapasitesi 48 GB'dır.

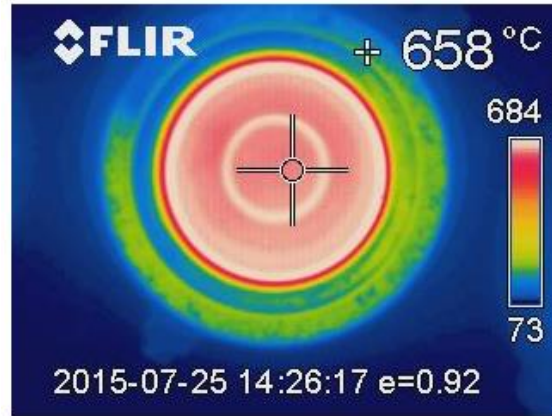
Presleme süresi önceki grafiklerde belirtildiği üzere yaklaşık 0,3 saniyedir. Daha sonra 0,3 saniye mastör sabit bir noktada beklemektedir. Isı transferinin en etkin olduğu zaman 0-1 saniye aralığıdır. Camın sıcaklığı, kalıba temas ettiği noktalarda aniden düşmekte ve sıcaklığa bağlı viskozite değeri artmaktadır. CFD-Post programı ile detaylı inceleme yapılırsa, sıcaklığın düşük olduğu bölgelerde düğüm noktaları daha az ilerlemektedir. Cam, şekillenme sırasında alt noktadan yukarıdaki ağız kısmına doğru ilerlemektedir. Ürün ağız kısmındaki cidar kesitlerinde, camın sıcaklığı daha yüksek olacaktır. Ayrıca temas süresinin fazla olduğu taban bölgesinde kalıp, cam üzerinden daha fazla ısı çekecektir. Analizde $t=0$ süresindeki ağ yapısı ile $t=0,3$ saniyedeki ağ yapısı arasında fark meydana gelmektedir. Şekil 4.14'te bulunan görselde, ağız bölgesindeki cidar kalınlığı geometri itibarıyla daha ince olduğundan dolayı ağ yapısı daha da incelerek formun oluşmasına yardım eder.

Time information :
CPU time : 21842.5 sec.
Elapsed time : 21843.0 sec.

Şekil 4.13 : ANSYS Workbench üzerinden alınan zaman bilgisi.



Şekil 4.14 : Belirli bir zaman adımında ürün üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları ve ağ yapısı.

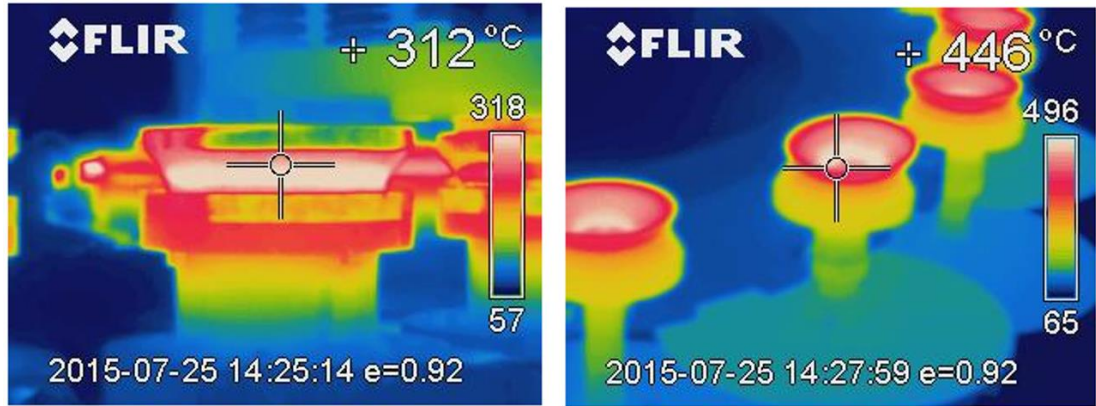


Şekil 4.15 : Presleme istasyonundan çıktıktan sonra çay tabağının üstten çekilmiş termal görüntüsü.

Presleme istasyonundan ayrılan kalıpların yaklaşık 1 metre üstünden FLIR E45 termal kamera ile görüntü alınmıştır. Kırmızı ve beyaz renk skalasındaki yerler ürün olup, presleme istasyonundan sonra soğutma istasyonuna doğru ilerleyecektir. Termal kameranın ölçüm spektrum aralığı 7,5-13 μm aralığındadır. Cam ürününün sadece yüzey sıcaklığı ölçülmüş ve ortalama 650 °C sıcaklık değeri gözlemlenmiştir. Yansımalarından gelen ışınlardan düşünülünce yayılım değeri $\varepsilon = 0,92$ seçilmiştir.

Cam düşük ısı iletkenliğe sahip olduğundan dolayı camın iç katmanı ve dış yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı meydana gelecektir. Presleme istasyonundan çıktığı anda, cam yeteri kadar soğutulmazsa tekrar ısınma fazına geçerek kendi yüzey sıcaklığını artırabilir. Bu da herhangi bir kuvvet etkisiyle camın şekil değiştirmesine sebep olacaktır. Soğutma istasyonu, ürünün camı geçiş sıcaklığına kadar soğumasını sağlayıp aktarma istasyonlarında ürün geometrisinin bozulmamasına destek olur.

Kampanya üretimi başında kalıp sıcaklığının rejime ulaşması için cam damlası, kalıp içerisinde presleme işlemi gerçekleşmeden bekletilmektedir. Ek olarak ürünler soğutma fırınına beslenmeden sadece kalıp sıcaklığını yükseltmek için presleme yapılmakta ve böylece kalıplar uygun sıcaklık aralığına ulaşmaktadır. Normal bir pres hattında ortalama kalıp sıcaklık değerleri 450-550 °C arasında değişmektedir. Düşük sıcaklıklarda preslenme sonrası ürünlerde soğuk çatlak kalite hatası oluşabilir. Aksi durumda yüksek kalıp sıcaklıkları ile hızlı devirli çalışan bir ürün eşleşirse, camın kalıba yapışma problemi ortaya çıkabilir.



Şekil 4.16 : Solda; 20020 çay tabağının presleme istasyonundan çıktıktan sonra kalıbın dıştan çekilmiş termal görüntüsü, sağda; ürünlerin take-out'dan ağız yakma istasyonuna giderken çekilmiş termal görüntüsü.

Presleme istasyonundan ayrılan kalıplar daha sonra indeksli tablanın yardımıyla soğutma istasyonuna girmektedir. Soğutma istasyonunda kalıplar yan kısımlardan, şekillenen ürün ise yukarıdan fan havası ile soğutulmaktadır. Daha sonra şekillenen ve belirli bir sıcaklığa gelen ürün kalıptan alınarak ağız yakma istasyonuna bırakılmaktadır. Mamül ve kalıp soğutma, ürün devrini belirleyen en önemli parametrelerden bazılarıdır. Kalıp soğutmanın etkin ve yeterli olması camın temas edeceği iç yüzey sıcaklığı değerini etkilemektedir. Yetersiz soğutma durumunda camın kalıba yapışma veya tutunması problemleri ortaya çıkmaktadır.

Ağız yakma istasyonuna aktarılan ürünlerin yaklaşık sıcaklığı 450 °C'dir. ANSYS Polyflow'da birleşik konjuge ısı transfer çözümlemesi yapılabilir. Böylece, kalıp ve mastörün etkin soğutma profilleri, soğutma havası kesiti ile hızının optimize edilmesi gibi konularda çalışmalar yapılabilir. Bu analizde kalıpların sıcaklığı sabit bir değer kabul edilmiştir.

4.3 Karaf Eş ısı Olmayan Pres-Üfleme Analizi

ANSYS Polyflow'da eş ısı ve eş ısı olmayan çözümler yaptıktan sonra pres-üfleme üretim prosesi denenmiştir. Programın cam şekillendirilmesi için gerekli modülleri öğrenilmiş ve önemli parametreler elde edilmiştir. Pres-üfleme prosesi iki aşamadan oluşmaktadır. Cam damlası ilk önce ebüşör kalıbında preslenir ve yarı mamül halini alır. Yarı mamül halindeki cam, endüstride parizon olarak adlandırılmaktadır. Finişör kalıbı parizon üzerine kapanır ve daha sonra parizon içerisine belirli bir basınçta hava yönlendirilir. Basınçlı havanın yardımıyla şekillenen parizon, finişör kalıbının şeklini alır. Pres-üfleme prosesi ile farklı geometri ve açılarda ürünler oluşturulabilir. Bundan dolayı sofracı üreten şirketlerin ürün portföyünde pres-üfleme ürünleri çoğunlukla bulunmaktadır. Pres prosesine göre gramaj olarak daha hafif ürünler de üretilmektedir.

Cam endüstrisinde ürünlerin üretilmesi için birçok aşama ve proses gereklidir. Tasarım sürecinden başlayan akış kalıplarının üretimi ve seri imalat ile son bulmaktadır. Tasarım aşamasından sonra ürünün seri imalat esnasında verimli çalışması ürün başına maliyeti azaltacaktır. Proses gereği pres üfleme ürünlerin seri imalat geçiş süreci deneme imalatı sürecindeki sonuçlara bağlıdır. Deneme imalatları mevcut hatlar üzerinde gerçekleştirildiğinden dolayı hat üzerinde belirli zamanda sadece deneme üretimi yapılabilmektedir. Bu yüzden deneme imalatının hızlı ve verimli olması önemlidir. Üretim denemesinin performansı kalıp tasarımı ve ürün geometrisine de bağlıdır. Kalıp tasarımı ve cam üretim prosesi doğası gereği geçmiş üretim tecrübelerine ile gerçekleştirilmektedir. Geçmiş yıllardan gelen bilgi ve birikim kaynağı deneme yapılacak ürünün kalıp ve form tasarımında kullanılmaktadır. Tecrübe edilmiş bilginin yardımıyla üretim denemesi yapılacak ürünün referans kalıpları tasarlanır ve talaşlı imalatı yapılır. Referans kalıplar, üretim imalatında başarılı olursa geri kalan kısım set halinde tamamlanır. Denemenin başarısız olduğu aksi durumlarda üretim denemesinde yaşanan problemin kaynağı tespit edilerek kalıpların dış formunda ya da soğutma

profillerinde iyileştirmeler yapılır ve deneme tekrarlanır. Kalıpların performansı dikkate alınırsa üretim denemesinin hedef verimlilik ve hedef gramaj değerlerini yakalaması beklenir. Birden fazla deneme yapılması şirketlerin toplam maliyetlerini artıracaktır. Bundan dolayı üretilmesi düşünülen ürünün en hızlı şekilde seri imalata geçmesi için en uygun kalıp tasarımını bulmak önemlidir. Ticari yazılımlar ile en uygun kalıp tasarımını bulmak ve tasarımı etkileyen parametreleri ortaya çıkarmak hedeflenmiştir.

4.3.1 Modelleme hazırlığı

Belirli bir deneme akış koduna sahip karaf baş ucu sürahisinin pres-üfleme süreçleri ANSYS Polyflow ile gerçekleştirilmiştir. Pres ve üfleme olarak iki aşamadan oluşan modellemede imalat parametreleri önceki yapılan denemeler neticesinde kaydedilmiştir. Programa girilen parametreler gerçeğe yakın bir şekilde seçilmiş olup, mastör-ebüşör ve finişör kalıp ekipmanlarına sabit bir sıcaklık değeri atanmıştır. İlk olarak tasarıma uygun belirli bir gramajda cam damlası preslenmektedir. Daha sonra oluşan geometri ve sıcaklık değerleri ikinci aşama olan üfleme analizine aktarılmıştır. İkinci aşamada ise yerçekiminin etkisiyle parizonun sarkması, kalıbın kapanması ve parizonun üfleme havası ile şişirilmesi amaçlanmıştır. Aşağıdaki analiz aşamaları maddelenmiştir.

- Ürün imalat resminin oluşturulması (Gramaj, Hacim ve geometri bilgisi)
- Ürüne uygun kalıp tasarımının yapılması
- Gramaja uygun damla çizimi ve ebüşöre yerleştirilmesi
- Presleme tarafı analizinin yapılması (Ebüşör Tarafı)
- Parizon geometrisi ve sıcaklık bilgilerinin üfleme tarafına aktarılması
- Üfleme tarafı şişirme analizinin yapılması
- Ürün teknik resmi ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.17 : Karaf ürünü karşıt çizimi ve pleksiglas malzemeden modeli.

Çizelge 4.2 : Çalışma parametreleri.

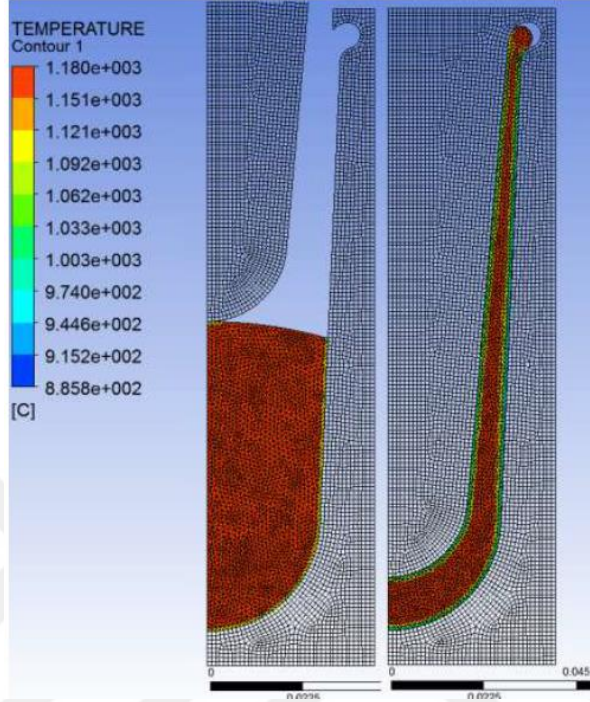
Geometri	Parametre	Değer	Birim
Mastör	Presleme Kuvveti	3000	N
	Kalıp ağırlığı	50	kg
	Başlangıç Hızı	0	m/s
	Kurs Boyu	0.0625	m
	Mastör Sıcaklığı	450	°C
Damla	Başlangıç Sıcaklığı	1180	°C
	Yoğunluk	2500	kg/m ³
	Isıl İletkenlik	1	W/m.K
	Isı Sığası	1500	J/kg.K
Ebüşör-Finişör	Ebüşör Sıcaklığı	400	°C
	Finişör Sıcaklığı	400	°C
	Üfleme Basıncı	0,2	bar
Yerçekimi		-9.81	m/s ²
Viskozite Modeli		Fulcher	

Yukarıdaki Çizelge 4.2’de camın özellikleri ve imalat için gerekli çalışma parametreleri listelenmiştir. Mastörün hareketi kuvvet etkili olarak tanımlanmış ve belirli bir kurs boyu girilmiştir. Tüm kalıpların sıcaklıkları analiz süresince sabit olarak tanımlanmıştır. Camın sıcaklık ile değişen viskozitesini modellemek için Fulcher yaklaşımı kullanılmıştır. Isı transfer katsayısı tüm kalıplar için sabit bir değer kabul edilmiştir.

Presleme yaklaşık olarak 0,17 saniye sürmüştür. Bu sürenin oluşmasına sebep olan camın viskozitesi, cidar kalınlığı ve presleme açısıdır. Mastör, kuvvet etkili tanımlanırsa presleme süresi tahmini olarak hesaplanır ve toplam analiz süresi daha yüksek bir değer olarak girilir. Böylece analizin tamamlanması sağlanır. Oluşan parizonun geometrisi ve sıcaklık verileri bir sonraki aşama için çıktı olarak kullanılacaktır. Böylece parizonun kopma bölgesini (sarkma anında incelmenin en

fazla olduğu yer) ve üflemenin verimliliğini inceleyebiliriz. Şişirme prosesinde parizonun bölgesel olarak sıcaklık dağılımları ürünün cidar kalınlığını etkilemektedir.

4.3.2 Eş ısı olmayan karaf pres-üfleme sonuçları

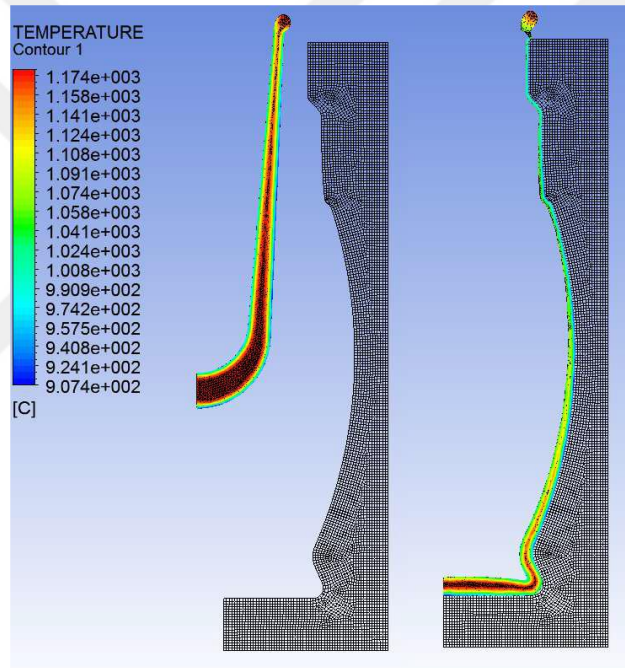


Şekil 4.18 : Presleme sonrası parizon geometrisi ve sıcaklık dağılımı.

Literatür araştırması ile elde edilen camın ısı iletkenliği, camın ısı sığası ve cam ile kalıp arasında gerçekleşen ısı transfer katsayısı sabit değer olarak programa girilmiştir. Cam yukarı doğru ilerlemeye başladığında, kape kısmı (cam ürünü makinelerden birbirine transferi için gerekiyor) ve çevresi daha fazla soğumaktadır. Ortalama parizon sıcaklığı 900-950 °C olarak ortaya çıkmıştır. Sarkmayı etkileyecek parametreler sırasıyla; kape ağız çapı, presleme sonrası sıcaklık dağılımı, kape altı cidar kalınlığı ve parizonun ağırlığıdır. Son zaman adımındaki geometri ve sıcaklık bilgileri, .csv uzantılı olarak kaydedilip üfleme prosesi için hazır hale getirilmiştir. Şekil 4.18’de presleme aşaması gösterilmiştir.

Presleme sonrası parizonun sıcaklık ve geometri verileri sarkma ve şişirme analizi için ikinci aşamaya aktarılır. Ürünün kape kısmı koordinat düzleminde sabitlenmiştir. Bu aşamada parizon yerçekiminin etkisiyle aşağı doğru belirli bir süre sarktıktan sonra kalıp, simetri eksenı yönünde kapanarak, parizonun iç yüzeyine sabit basınçta kuvvet uygulanmaktadır. Parizon geometrisi, basıncın etkisiyle şişerek finişör kalıbın çeperlerini kaplamaktadır. Sarkma bölgesi kape kısmına yakın kesitlerdir. Ürün cidar

dağılımını belirlemek için bu bölge, tasarımlarda değişken olarak kullanılmaktadır. Mastör ve ebüşör kalıbı arasındaki presleme açısı, presleme hızı ve kuvveti, kape ağız çapı, parizon sıcaklık dağılımı ve döndürme hızı gibi parametreler sarkmayı etkilemektedir. Şişirme anında parizonun iç yüzeyinde bulunan serbest yüzeye sabit değerde kuvvet uygulanır ve şişme meydana gelir. Parizon, şişme anında kendi ekseninde belirli bir hızda dönmektedir. Kendi ekseninde dönen parizon kalıp yüzeyine temas ederek dönmeye devam eder ve kalıp çizgisinin oluşmamasını sağlar. Temas anında finişör ve ürün arasında ısı transferi başlar. Şişme aşaması, yukarıdan aşağı doğru gerçekleşmektedir. Finişör kalıbı ve parizon arasındaki sürtünme kuvveti ihmal edilmiştir. Şekil 4.19'da üfleme sonrası ürün yüzeyinde cidar ve sıcaklık dağılımı belirtilmiştir.

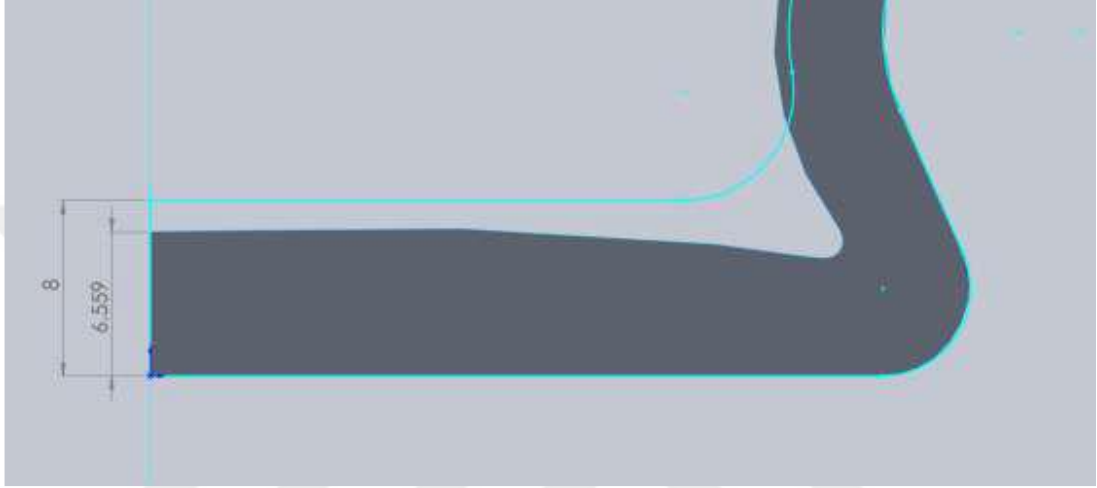


Şekil 4.19 : Üfleme sonrası ürün üzerindeki cidar ve sıcaklık dağılımı.

Normal şartlar altında kalıp yüzeyi öğütülmüş ağaç talaşı ile kaplı olup, sürekli suyla ıslatılarak nemli olması sağlanmaktadır. Finişör kalıbı ve ürün arasında buhar film tabakası oluşmaktadır. Film tabakasında meydana gelen ısı akısı hesaplanmamış olup sabit bir değer kabul edilmiştir. Cam ürününe özel kalorimetre tasarlandıktan sonra proseslerin belirli aşamalarında ölçüm yapılarak soğutmaların etkinliği de tartışılabilir.

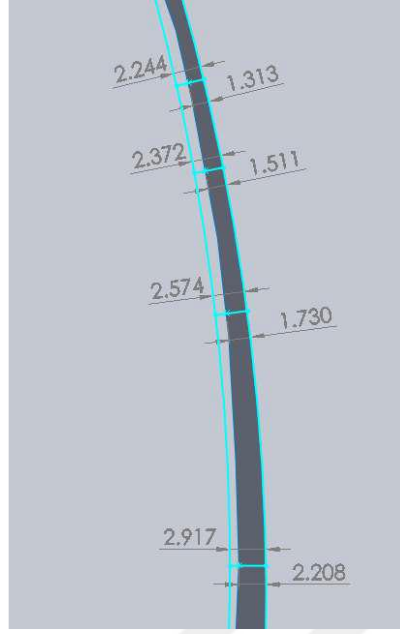
Karaf ürünü pres-üfleme makinesinde üretilebilecek en ağır ürünlerden bir tanesidir. Transfer için kullanılacak kape ağırlığı da düşünülürse pres-üfleme makinesinde kesilebilecek maksimum damla ağırlığına ulaşılabilir. Damla ağırlığı, gramaj limiti

üstünde belirlenirse cam damlasının kalıba yüklenmesi zorlaşacaktır. Bundan dolayı maksimum gramajda damla geometrisi ile analiz yapılmıştır. Şekil 4.20’de karşıt çizim ile analiz sonucunda oluşan ürünün taban kalınlıkları karşılaştırılmıştır. Açık mavi çizgiler ile belirtilen karşıt çizim, gri yüzey ile belirtilen ise analiz sonuçlarıdır. Taban kalınlığı tahmin edilen kalınlıktan daha az oluşmuştur. Sarkma boyu ile üfleme zamanı taban kalınlığını değiştirmektedir. Üfleme daha erken olursa taban kalınlığı ince, geç olursa taban kalınlığı artmaktadır.



Şekil 4.20 : Karşıt çizim ve modelleme sonrası oluşan ürünü taban kalınlığı karşılaştırma.

Şekil 4.21’de teorik çizim ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Açık mavi çizgiler teorik çizimi, gri renkli yüzey ise analiz sonucunu temsil etmektedir. Maksimum damla ağırlığında çalışılırsa cidar kalınlığının ağız kısmına doğru ince olma ihtimali göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tip büyük çaplı ve yüksek ürünlerde, ince cidarlı duvar kalınlığı risk taşımaktadır. Ürünlerin transferi sırasında ya da soğutma fırınında ince bölgelerden çatlak oluşma riski bulunmaktadır. Ayrıca paketleme esnasında ürünler en geniş noktalarından birbirine değmekte ve cidar kalınlığının ince olduğu bölgelerden kırılmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı kullanılarak pres-üfleme ürünlerinin cidar kalınlıkları önceden tahmin edilebilir ve böylece kalıp tasarım parametreleri değiştirilebilir. Yalnız, girdi olarak kullanılacak verilerin belirlenmesinde, mevcut üretilmiş ürünlerin bilgisayar ortamında modellenmesi faydalı olacaktır. Mevcut ürünlerin cidar kalınlıkları ile analiz modelleri eşleştirilerek kullanılacak veriler eğitilebilir.



Şekil 4.21 : Karşıt çizim ve modelleme sonrası gövdede oluşan cidar kalınlığı karşılaştırma.

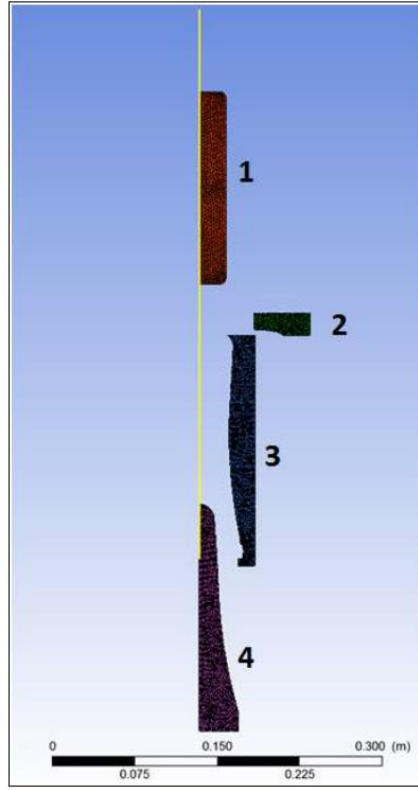
4.4 Kulpsuz Sürahi Eş Isıl Olmayan Presleme Analizi

IS üretim yöntemiyle yapılan ürünlerin başında yüksek hacim ve ağırlığa sahip sürahiler bulunmaktadır. Sürahilerin üretim hızı, damla ağırlığı ve ürün geometrisinden dolayı düşüktür. Özellikle kulplu ya da kulpsuz sürahilerin parizon tasarımı önem taşımaktadır. Sürahi gibi uzun ürünlerin parizon boyları normal ürünlere kıyasla fazladır. Bu tip parizonların preslenmesi için daha fazla kuvvete ve soğutma havasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca presleme açısı ve sarkmanın meydana geldiği “gate” denilen alanın tasarımı önem arz etmektedir.

IS prosesinde ebüşör kalıpları geleneksel pres-üfleme makinelerinin aksine çift parçadır. Ebüşör kalıplarının çift parça olmasının avantajı kullanılarak parizonun dış yüzeyleri negatif açı olarak tasarlanabilir. Böylece ürün formunda en yakın parizon geometrisi kullanılabilir.

4.4.1 Modelleme hazırlığı

Şekil 4.22’de modellemede kullanılan ekipmanlar gösterilmektedir. 1 No’lu damla kazandığı kinetik enerjiyle 4’ nolu mastörün üzerine düşmektedir. Damlanın düşmesi sırasında kazandığı hızın etkisiyle, damla 3 No’lu ebüşörün ve mastörün çeperlerine yayılarak ilk halini alır ve daha sonra 4 No’lu mastör yukarı doğru hareket ederek parizonun oluşmasını sağlar.



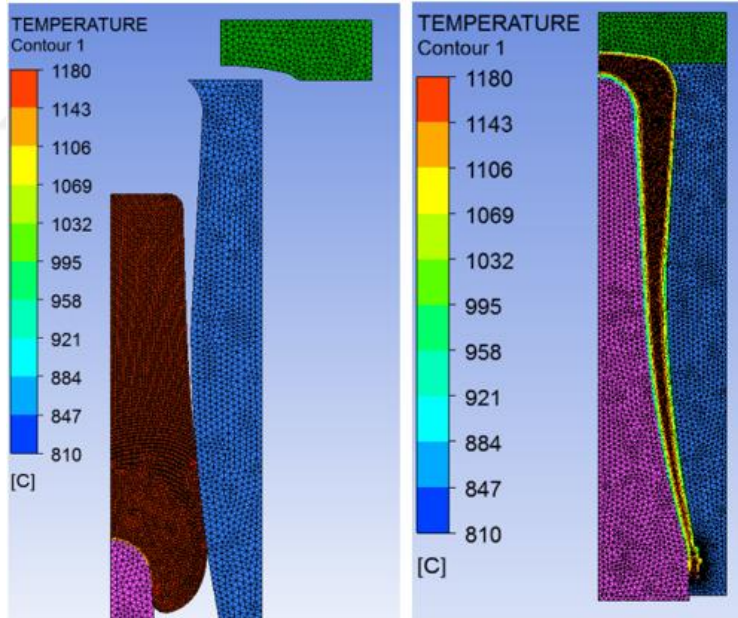
Şekil 4.22 : Analizde kullanılan ekipmanlar (1-damla, 2-tampon, 3-ebüşör, 4-mastör).

Çizelge 4.3'te camın özellikleri ile imalat için gerekli çalışma parametreleri listelenmiştir. Mastörün hareketi, kuvvet etkili olarak tanımlanmış ve belirli bir kurs boyu girilmiştir. Tüm kalıpların sıcaklıkları analiz süresince sabit olarak tanımlanmıştır. Camın sıcaklık ile değişen viskozitesini modellemek için Fulcher yaklaşımı kullanılmıştır. Isı transfer katsayısı tüm kalıplar için sabit bir değer kabul edilmiştir. Bu denemedeki amaç yerçekimi etkisiyle damla düşüşünün modellenmesi ile aşağıdan yukarıya doğru gerçekleşen mastör hareketinin incelenmesidir. Damla normal şartlar altında yaklaşık 4 metre yükseklikten damla yollarının vasıtasıyla kalıp içerisine 7-8 m/s hız ile düşmektedir. Düşme esnasında meydana gelen şekil değiştirmenin hızı ve şekillendirmenin hızı dikkate alınıp uygun bir zaman adımı seçilmiştir. IS gibi yüksek devirlerde çalışan makinelerde camın kompozisyonu ve damla sıcaklığı önemlidir. Damlanın kalıba düştüğü an ile presleme bitene kadar geçen zaman toplam 0,63 saniyedir. Camın fiziksel özelliğinden kaynaklı kayma gerilmesinin yüksek olduğu anlarda viskozite değeri değişmekte ve azalmaktadır. Viskozite değerinin azalması üretim hızını artırabilmektedir.

Çizelge 4.3 : Çalışma Parametreleri.

Geometri	Parametre	Değer	Birim
Mastör	Presleme Kuvveti	1310	N
	Kalıp ağırlığı	50	kg
	Başlangıç Hızı	0	m/s
	Kurs Boyu	0,15	m
	Mastör Sıcaklığı	500	°C
Damla	Başlangıç Sıcaklığı	1180	°C
	Yoğunluk	2500	kg/m ³
	Isıl İletkenlik	1,5	W/m.K
	Isı Sığası	1500	J/kg.K
	Ağırlık	750	gr
Ebüşör-Tampon	Ebüşör Sıcaklığı	600	°C
	Finişör Sıcaklığı	400	°C
	Tampon Sıcaklığı	400	°C
Yerçekimi		-9.81	m/s ²
Viskozite Modeli		Fulcher	

4.4.2 Eş ısı olmayan kulpsuz sürahi presleme sonuçları



Şekil 4.23 : Damlanın düşme anı ile şekillenme sonrası sıcaklık dağılımı.

Yüksek uzunluğa sahip IS ürünlerinin preslenmesi sırasında mastör hareketi, zaman içerisinde yavaşlayarak camın hacmine göre bir noktada durmaktadır. Presleme zorluğu yaşanan ürünlerde damla gramajı belirli bir noktaya kadar artırılabilir. Damla gramajının ebüşör hacmine göre fazla olduğu durumlarda ise mastör, tam kurs boyunu tamamlayamaz ve ürünün ağız kısmında çapak oluşumu meydana gelebilmektedir.

Mastörün kurs boyunu etkileyen parametreler; cam hacmi, damla sıcaklığı, soğutmaların etkinliği ve periyodik yağlamadır. Yağlama esnasında cam ve kalıp arasında karbon film tabakası oluşur ve camın yüzeye tutunması engellenir. Yağlama aynı zamanda ebüşörde meydana gelebilecek düzensiz sıcaklık dağılımlarını da engeller. Slipping coefficient değeri bu analizde yarı kayar olarak tanımlanmıştır. CFD-post arayüzünde parizonun yüzey sıcaklığı ortalama 900-950 °C ölçülmüştür.

4.5 Sabit Üfleme COKE Ürünü Presleme, Sarkma ve Üfleme

Ana şekillendirme yöntemlerinden olan pres-üfleme prosesinin alt kollarından bir tanesi sabit-üfleme yöntemidir. Parizon, ebüşörde preslendikten sonra finişör kalıpları parizon üzerine kapanır ve parizon içerisine belirli bir basınçta hava üflenir ve parizon finişör kalıbının şeklini alır. Fakat döner üfleme prosesinin aksine parizon kalıp içerisinde dönmemektedir. Sabit üfleme üretim yöntemi ile bardak yüzeyinde imalat şartlarını sağlayan geometri ve gravürler oluşturulabilir. Döner üflemenin aksine sabit üfleme kalıpları alaşımlı çelik malzemesinden yapılmaktadır. Promosyon ürünlerin üretilmesi için sabit üfleme metodu kullanılmaktadır. Firmaların logoları ya da istenilen şekiller bardağın dış tarafında belirgin olacak şekilde yüzey model yardımıyla tasarlanır. Bu tip ürünlerde karşılaşılan en önemli kalite hatalarından birisi dip kayığı ve kıştırma problemidir. Parizonun finişör kalıbı içerisine şişirilmesi ensasında dönmemesi, finişör kapanırken parizonun sarkma esnasında gravür bulunan yüzeylere çarpması, ürünün tabanında açılı yüzey meydana getirmesine yol açar. Dip kayığı olarak adlandırılan kalite hatasının başlıca sebepleri aşağıda maddelenmiştir;

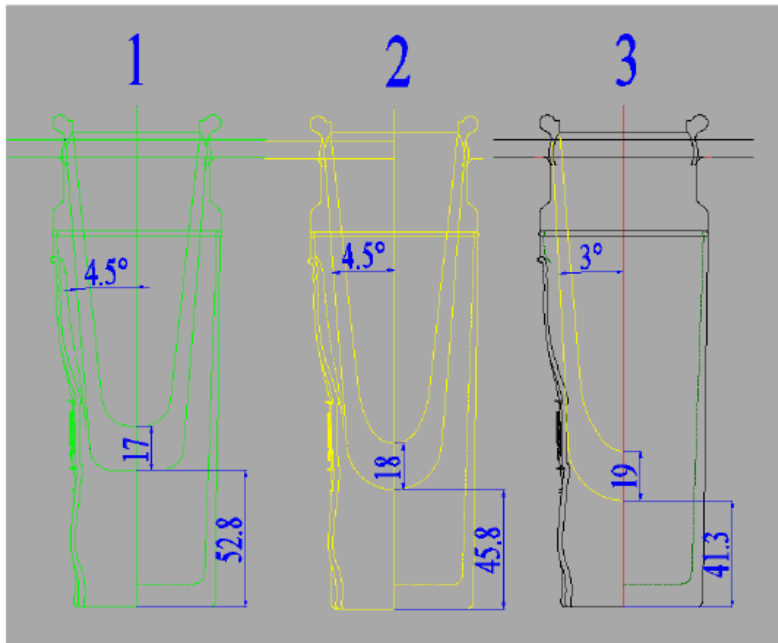
- Parizonda yetersiz sarkma (Parizon çok kısa ya da çok dar)
- Damla üzerinde düzensiz sıcaklık bölgeleri
- Ebüşör kötü yükleme
- Mastörün eksen kaçık şeklinde preslemesi (Parizon çeperleri eşit kalınlıkla değil, ince veya kalın duvar)
- Üfleme havası ayar yanlış

“Parizonda yetersiz sarkma” maddesi hariç diğer başlıklar makine ayarları ile ilgilidir. Parizonun presleme açısı, sarkma miktarı, gramajı vb. parametreler değiştirilerek dip kayığı kalite problemi ortadan kaldırılabilir.

4.5.1 Sabit üfleme modelleme hazırlığı

Ürün ağız çapı dar ve boyu uzun olan sabit üfleme ürünlerinde dip kayığı problemi daha çok meydana gelmektedir. Parizonın gereğinden fazla sarkması ve dönmesi sırasında, parizon merkez kaç kuvvetinin etkisiyle savrulmaktadır. Sabit üfleme prosesinde parizonun sarkmasına destek olmak için parizon belirli bir hızda döndürülebilir. Finişörün tam kapanması sırasında parizon dönüyorsa durdurulur ve finişör, parizon üzerine kapanır. Makinenin kendi eksenini etrafında dönmesi, parizonun dışarıya doğru savrulmasına neden olur. Savrulma belirli bir derecenin üzerindeyse, kalıp parizona çarparak daha çok savrulmasına sebep olur ve böylece dip kayığı meydana gelir. Üretilmesi düşünülen promosyon ürününde dip kayığı probleminin oluşmaması için 3 farklı parizon tasarımı düşünülmüştür. Bunlar sırasıyla;

1. Ürün taban formunu yakalayacak köşeli ve sarkma miktarı fazla parizon
2. Yuvarlak forma sahip ve sarkma miktarı az parizon
3. Presleme açısı düşük ve sarkma miktarı az parizon

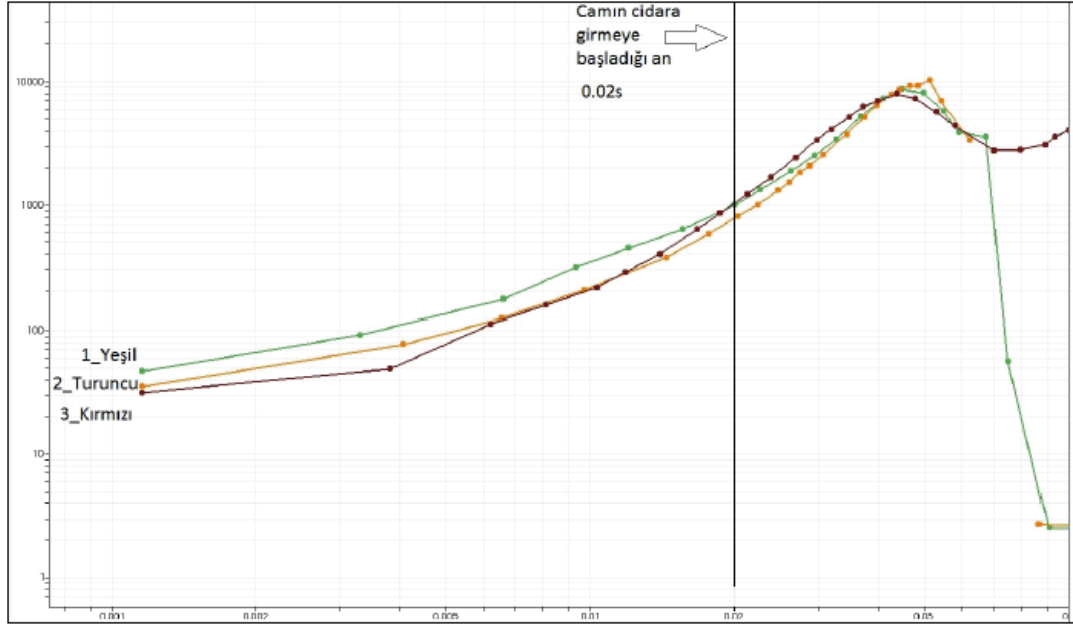


Şekil 4.24 : 3 farklı parizon formu ve ebüşör duvar açıları.

Şekil 4.24'te üç farklı parizon formu gösterilmiştir. 1 ve 2 no'lu parizonların ebüşör duvar açıları 4.5°, 3 no'lu parizonun ebüşör açısı ise 3° olarak tasarlanmıştır. Parizonun daha çok sarkıp savrulmasını engellemek için 2 ve 3 no'lu parizonun sarkma miktarları azaltılmıştır. 1 no'lu parizonun köşe kenarları 2 ve 3 no'lu parizona göre daha keskin hale getirilmiş, şişme esnasında ürün taban formunu yakalayacağı düşünülmüştür. En uygun gramajda parizon tasarımları gerçekleştirilmiştir. Deneme

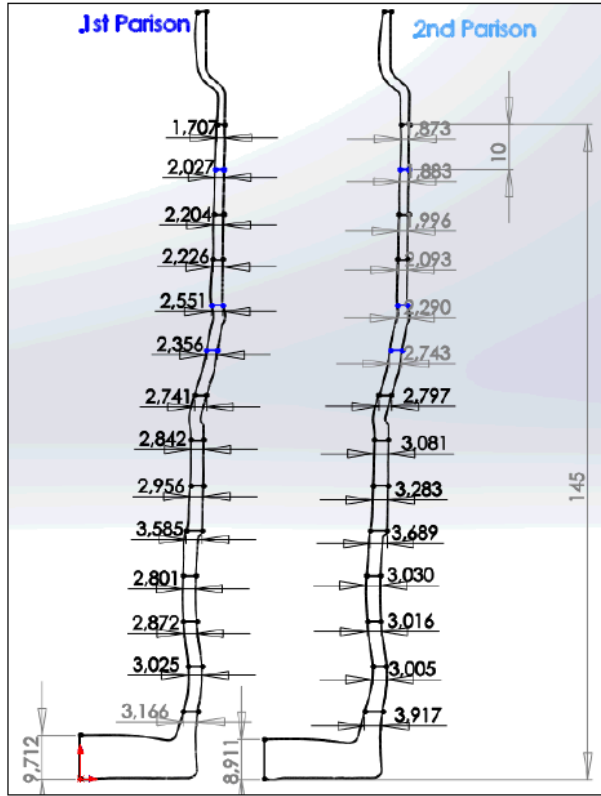
süresi ve kalıp maliyetleri hesaba katıldığında 2 farklı parizon denemesine karar verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre bir tane tasarım elenecektir.

4.5.2 Sabit üfleme analiz sonuçları



Şekil 4.25 : 3 farklı parizon geometrisinin preslenmesi esnasında camın gösterdiği tepki kuvveti.

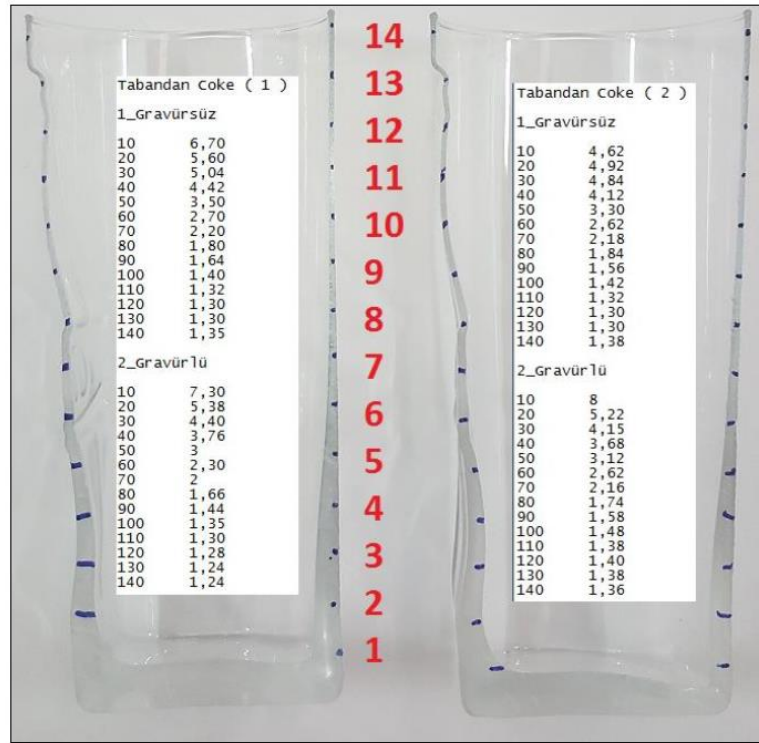
Yukarıdaki Şekil 4.25'te üç farklı parizonun preslenmesi sırasında camın gösterdiği tepki kuvveti gösterilmiştir. Cam damlası ile parizon arasına ölçüm noktası atanarak zaman adımları arasında kuvvet değerleri kaydedilmiştir. Cam, kalıplar arasında ilerlerken cidara girmeye başladığı anda 3 no'lu geometride bulunan camın karşı kuvveti 1 ve 2 no'lu geometrilerdeki değerleri geçmekte ve maksimum değere ulaşmaktadır. Bu yüzden 3 no'lu geometride bulunan kalıpların imalatının yapılmamasına karar verilmiştir. 1 ve 2 no'lu geometride bulunan kalıpların imalatı tamamlanarak deneme gerçekleştirilmiştir. Denemede ortaya çıkan bardakların cidar dağılımı ile analiz sonucunda meydana gelen duvar kalınlıkları karşılaştırılmıştır.



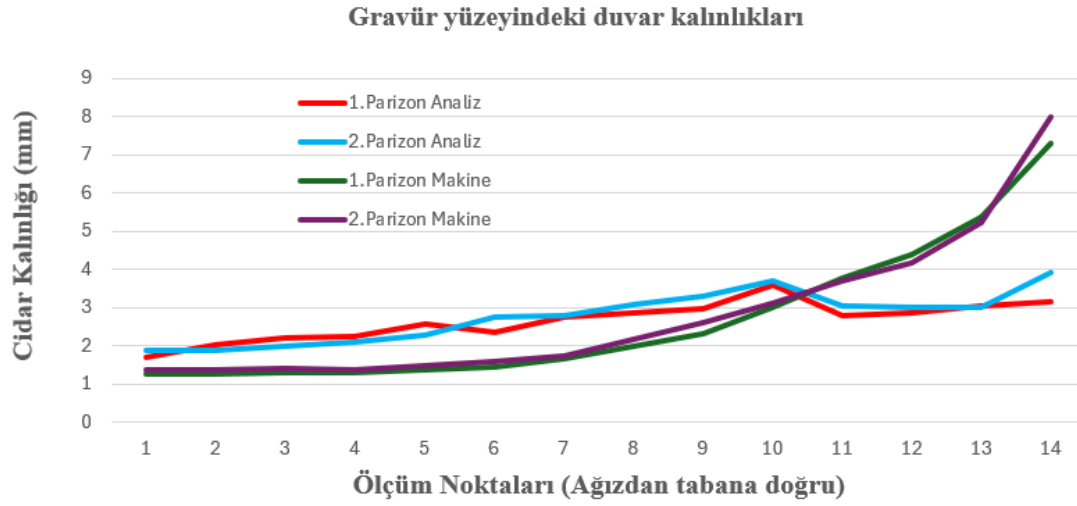
Şekil 4.26 : Analiz sonucunda 1 ve 2 no'lu parizon geometrisinin şişirilmesiyle ortaya çıkan cidar kalınlıkları.

Şekil 4.26'da 1 ve 2 no'lu parizonun şişirilmesiyle oluşan geometrilerin ürün hattı boyunca cidar kalınlıkları gösterilmiştir. Ürün formu asimetric olduğundan dolayı modellemenin 3 boyutlu olarak yapılması düşünülebilir. Fakat sadece gravür yüzeyindeki cidar kalınlıklarının öngörülmesi için 2 boyutlu çözüm gerçekleştirilmiştir. Model, gravür yüzeyinin tam orta ekseninden simetrik olup, belirtilen eksenden presleme ve üfleme analizi yapılmıştır. Birinci ve ikinci parizon geometrilerinin şişirilmesi sonucunda taban ve yan duvar kalınlıklarında bazı farklılıklar gözlemlenmiştir. Beklendiği gibi sarkma miktarının fazla olduğu 1.parizonda duvar kalınlıkları 2.parizona göre daha az ölçülmüştür. Taban kalınlıkları karşılaştırıldığında 1.parizonun taban kalınlığı 2.parizona göre daha fazla olmuştur. 1.Parizonun taban kısmının keskin ve düz olması parizonun şişirilmesi esnasında taban kalınlığının fazla oluşmasını sağlamıştır. Diğer bir yandan ise 2.parizonun taban formunun dairesel ve sivri olması parizonun şişirilmesi esnasında taban formunu yakalayacak şekilde yayılmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden 2.parizonun taban kalınlığı 1.parizona göre daha az gerçekleşmiştir.

Pres-üfleme makinesinde 1 ve 2. no'lu parizonların denemesi gerçekleştirilmiş ve alınan numuneler gravür ekseninden kesilmiştir. Daha sonra ağızdan tabana doğru 14 noktadan işaretlenerek hem gravürlü hem de gravürsüz yüzeylerden kalınlık ölçümleri cidar kumpası ile gerçekleştirilmiş ve Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Solda bulunan 1.parizonun taban kalınlığı 10mm, sağda bulunan 2.parizonun taban kalınlığı ise 9mm olarak ölçülmüştür. Analiz ve makine sonuçları karşılaştırıldığında taban kalınlıkları açısından benzer sonuçlar elde edilmiştir. Fakat duvar kalınlıkları karşılaştırıldığında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.27'de gösterilen tablolarda 6.noktadan itibaren duvar kalınlıklarında ani değişimler meydana gelmiştir. Sarkması sırasında parizonun ağız kısmına yakın yerlerden daha çok incelendiği gözlemlenmiştir. Parizon, taban kısmında bulunan müldefon kalıbına geçecek şekilde sarktıktan sonra şişirme prosesi gerçekleşmektedir. Basıncın etkisiyle finişör çeperlerine ulaşan parizon bölgelerinin sıcaklığı ve viskozitesi duvar kalınlıklarını etkilemektedir. Camın viskozitesi hem sıcaklığa hem de kayma hızına bağlıdır. Parizonun üst kısmında müldebag altında bulunan kesite uygulanan kuvvet, ağırlıktan dolayı daha fazladır. Bu yüzden kayma hızı, bu bölgelerde daha fazla gerçekleşmektedir.



Şekil 4.27 : Üretim sahasında deneme sonrası 1 ve 2 no'lu parizon geometrisinin şişirilmesiyle ortaya çıkan cidar kalınlıkları.



Şekil 4.28 : Makine ve Analiz verilerinin karşılaştırılması.

Analiz ve makine sonuçları Şekil 4.28’de karşılaştırılmıştır. Makine verilerinde 6.noktadan itibaren duvar kalınlıklarında ani artışlar meydana gelmektedir. Sarkma anında kayma incelmesinin viskozite değerlerine etkisi makine verilerinde gözlemlenmiştir. İleriye dönük cam şekillendirmenin bilgisayar ortamında modellenmesinde viskozite değerinin sıcaklık ve kayma hızının fonksiyonu olarak tanımlanması analiz sonuçlarını olumlu yönde etkileyecektir.

5. SONUÇLAR

Cam ürünlerin piyasaya sürülmesi, tasarım aşamasıyla başlayıp seri imalat ile son bulur ve tasarım ile seri imalat arasında geçen sürenin kısaltılması cam üreticilerin ana hedeflerinden bir tanesidir. Sofra camı üretim proseslerinde ürün geliştirme süreçlerinin iyileştirilmesi, istenilen kalitede ve en uygun gramajda ürün elde edilmesiyle sağlanır. Ürün geliştirme ve yeni ürün üretim süreçleri içerisinde hat üzerinde deneme üretimleri, proses itibarıyla gereklidir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ticari yazılımları, tasarım-seri imalat süreçlerine dahil edilerek hat üzerinde deneme yapmadan kalıp tasarım prosesinde gerekli eylemlerin hayata geçirilmesi hedeflenmiştir. Aynı zamanda, yeni bir ürünün üretilebilirliği, HAD yazılımları sayesinde iki veya daha fazla deneme yapmadan anlaşılması amaçlanmıştır.

Yapılan çalışmaların ışığında cam ile kalıp arasında gerçekleşen ısı transferi katsayısının belirlenmesi adına ölçüm yöntemi geliştirilebilir. Ölçüm yöntemi firma içerisinde kullanılan farklı proseslerde denenip ortalama bir değer bulunabilir. Bu doğrultuda yapılan ölçümler neticesinde analizlerin gerçeğe yaklaşma oranı artacaktır. Ayrıca sahadan alınan gerçek imalat verileri ile analiz girdisi olan parametrelerin eğitilmesi sağlanabilir. İmalat parametreleri etkileyen tüm değişkenlerinin kaydedilmesi hata payını en aza indirecektir. HAD yazılımı ile deneme yapmadan ürün cidar kalınlığını tahmin etmek, firmalara maliyet ve zaman avantajı yaratabilir. Tecrübe ile edinilmiş bilginin şirket çalışanlarına hızlı bir şekilde aktarılması adına da HAD yazılımların kullanılması faydalı olacaktır. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddelenmiştir.

- Cam sektöründe denemelerin ve üretimlerin başarıya ulaşması, çalışanların tecrübesine ve deneme-yanılma metotuna dayanmaktadır. Cam şekillendirme prosesi birçok yönden ölçümü ve anlaşılması zordur. Ölçümlerin daha kapsamlı ve net olması açısından çalışmalar ve ölçüm metotlarının araştırılması devam etmektedir. Bazı noktalarda kullanılan parametreler literatür araştırılması sonucunda elde edilmiştir.

- Bilgisayar ortamında kullanılacak verilerin toplanması ve derlenmesi büyük önem arz etmektedir. Aynı zamanda bu verilerin doğru bir şekilde yorumlanması sonuçları etkileyecektir.
- İmalat sahasından alınacak geri bildirimlerle, program içerisinde kullanılan parametrelerin eğitilmesi gerekmektedir. Bilgisayar ortamında yapılan çalışma ile makine ortamında gerçekleşen ürünler arasında farklılıklar meydana gelebilmektedir.
- Kalıp ve camın arasında gerçekleşen ısı transferi; radyasyon, iletim ve taşınım ile gerçekleşmektedir. Ek olarak camı kalıba yapışmasını önlemek amacıyla kullanılan yağ ile oluşan ince film tabakası ve cinsi de gerçekleşen ısı transfer oranını değiştirecektir. Genel olarak kalıpların çalışma sıcaklıkları belli bir sıcaklık aralığında tutulmaktadır. Bu değerlerin sabit tutulması ve ayrıca homojen olması imalatı olumlu yönde etkilemektedir. Oluşabilecek muhtemel hataların engellenmesi için kalıp soğutma sistemlerinin etkin olması gerekmektedir.
- Camın modellenmesinde kullanılan ve işletme şartlarına göre değişen ısı transfer katsayısının hesaplanması için gerçek zamanlı proses içerisinde ölçüm yapılmalıdır.
- ANSYS Polyflow modülünün pres prosesinin yanında pres üfleme prosesinde de kullanılması olumlu gözükmemektedir. Özellikle parizon tasarımının iyileştirilmesi ve ürün cidar dağılımının belirlenmesi adımlarında da kullanılabilir.
- Newton tipi akışkan viskozite modeli yerine newton tipi olmayan akışkan modelinin pres-üfleme prosesi sarkma ve şişirme adımlarında kullanılması, cidar kalınlıklarını belirlenmesinde daha doğru sonuçlar verecektir. Makine şartlarında kayma incelmesinin etkisi uzun ve ağır parizonlarda gözlemlenmektedir.
- Şekillendirme sürelerinin kısa olması üretim hızını ve kalitesini değiştirmektedir. Çok kısa sürelerde ürün şekillendiğinden dolayı mastörün cama değme hızı, presleme kuvveti ve presleme süresi önemlidir.
- Ürün yüksekliği, ürün ağız çapı ve mastör yüzeyi gibi parametreler presleme kuvvetlerini değiştirmektedir. Genellikle yüksek devirlerde çalışan ürünlerin gramajı düşük olmaktadır. Ürünlerin gramajı arttıkça, soğutma ve

şekillendirme istasyonlarında kalma süreleri artacağından dolayı üretim hızı düşük olacaktır.

- Pres prosesinde damlanın yükleme pozisyonu, son nihai ürünün kalitesini etkilemektedir. İmalata uygun olmayan damla yükleme ile yarım ağız ya da çapak gibi kalite problemleri meydana gelebilmektedir.
- IS (Individual Section) üretim prosesini etkileyen parametrelerin anlaşılması adına HAD yazılımları kullanılabilir. Özellikle kalıp soğutma profillerinin etkinliği ölçülebilir ve geliştirilebilir.
- Kalıp malzemeleri ile kalıpların yüzey pürüzlülük değerleri, presleme esnasında yaşanan zorluğun nedenlerinden biri olabilir. Kısa sürede ısınıp soğuyan kalıplar yerine homojen bir sıcaklık dağılımına sahip, soğutma kanalları etkin şekilde çalışan kalıpların imalatı kaliteyi arttıracaktır. Analizlerde kaymama sınır şartı tanımlanmış ve “slipping coefficient” değeri kaymama sınır şartını sağlayacak şekilde programa aktarılmıştır.
- Kalıp soğutmanın etkin hale getirilmesi için ölçümler yapılarak bilgisayar ortamında analiz sonuçları oluşturulabilir ve kalıp soğutmanın verimliliğini arttırmak adına tasarım değişiklikleri yapılabilir. Soğutmanın etkin hale getirilmesi, üretim kapasitesinin artmasına ve kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlayacaktır. Ürün başına düşen üretim maliyetleri de bu nedenle azalacaktır.
- Cam kompozisyonu, presleme kuvvetini, şekillenme süresini, ürünün ve kalıpların soğuma süresini büyük ölçüde değiştirmektedir. Aynı zamanda üretimde kullanılan cam ve kalıp sıcaklıklarındaki küçük değişimler, camın dinamik viskozitesini önemli ölçüde etkilemektedir.
- 3 boyutlu çözümlemelerde analiz süreleri uzamaktadır. Bilgisayar özellikleri dikkate alındığında, karmaşık geometriye sahip pres prosesi modellerinin çözümleri, belirli bir sayıda düğüm noktasından sonra birkaç günü bulmaktadır. Bu yüzden geometrilerde basitleştirme yöntemi uygulanmaktadır.



KAYNAKLAR

- ASTM (2007).** Standard Test Method for Measurement of Viscosity of Glass Between 10^4 Pa.s and 10^8 Pa.s by Viscous Compression of a Solid Right Cylinder [Metric].
- ASTM (2008).** Standard Test Method for Measurement of Viscosity of Glass Between Softening Point and Annealing Range (Approximately 10^8 Pa.s to Approximately 10^{13} Pa.s) by Beam Bending (ASTM C1350M-96).
- ASTM (2012).** Standard Practice for Measuring Viscosity of Glass Above the Softening Point (ASTM C965-96).
- Biosca Mecias, A. (2020).** Numerical and Experimental Study of Glass in the Blow and Blow Forming for the Prediction of Thickness Distributions in Glass Perfume Containers. (Doktora Tezi). Universitat Ramon Llull, Industrial Engineering, Barcelona.
- Farina, A., Mikelic A., Klar A., Siedow, N., M.M. Mattheij, R. (2011).** Mathematical Models in the Manufacturing of Glass.
- Güldalı, B. (2019).** Püskürtme Yöntemi ile Kimyasal Temperlenen Soda Kireç Silikat Camlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Hyre M. (2016).** Kişisel Görüşme. 29.11.2016, Minneapolis.
- Loch, H. & Krause, D. (2002).** Mathematical Simulation in Glass Technology.
- Martins, B. M. R. (2017).** Decision Support System in the Design, Production and Quality Control of Glass Containers. (Doktora Tezi). Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto.
- Öder, B. M. (2007).** B_2O_3 İlavesinin Lityumalüminasilikat Cam Seramiğinin Kristalleşme Davranışları ve Isıl Genleşme Özelliklerine Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pulliam, R. M. (2009).** Thermal Contact Resistance at the Glass-Mold Interface in a Container Forming Process (Yüksek Lisans Tezi). Villanova University, The Faculty of the Department of Mechanical Engineering, Villanova.
- Sanayi Genel Müdürlüğü. (2022).** Cam Sektör Raporu. Türkiye Cumhuriyeti Teknoloji ve Sanayi Bakanlığı.
- Shelby, J.E (2005).** Introduction to Glass Science and Technology (2nd edition).
- Tooley F. V. (1974).** The Handbook of Glass Manufacture Volume II.
- Varshneya, A. K. ve Mauro, J. (2019).** Fundamentals of Inorganic Glasses (3rd edition).

Yılmaz, O. (2007). Polimer Malzemelerin Ekstrüzyonunun Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ramazan Ergin Sağlam

Doğum Tarihi ve Yeri :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

YÜKSEL LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

- **Sağlam R.E., Kırkköprü, Kadir.** 2024. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Cam Şekillendirilmesinin Modellenmesi. *2.Uluslararası Üsküdar Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, (s.938-954). 29-30 Kasım, İstanbul, Türkiye.