

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CAM ERGİTME FIRINLARINDA OKSİJENLİ YANMA
İLE TERMAL VE AKIŞ MODELLEMESİ**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Hasan Burak ÖZLER
(506981128)**

104122 104122

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Haziran 2001**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ö.Serdar ÖZGEN

Diğer Jüri Üyeleri : Doç.Dr. Onuralp YÜCEL (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2001

ÖNSÖZ

Yüksek lisans Eğitimim de danışmanlığımı kabul edip, bana bu tez konusunu veren ve çalışmamın her aşamasında büyük bir özveriyle ilgi, destek ve yardımlarını esirgemeyen Saygıdeğer Hocam Sayın Prof. Dr. Ö. Serdar ÖZGEN'e sonsuz şükranlarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam esnasında deneyimlerini benimle paylaşarak, çalışmamın her safhasında benden ilgi ve yardımını esirgemeyen Sayın Dr. Suat YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı hazırlarken, gerekli duyduğum yardımları benden esirgemeyerek, özveri ile bana destek olan Türkiye Şişe Cam Fabrikaları Modelleme grubundan Araştırma Müh. Sayın Lale ÖNSEL'e ve Araştırma Müh. Sayın Zeynep ELTUTAR 'a, Araştırma bölümünden Araştırma Müh. Sayın Metin OĞUZ'a ve Araştırma Müh. Sayın Hüseyin UZUN ile bütün bu imkanların oluşumunda katkıda bulunmuş Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları ve çalışanlarına sonsuz şükranlarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım esnasında gerekli özveriyi göstererek çalışmalarına destek veren Araştırma görevlisi Sayın Yük. Müh. Cengiz HAMZAÇEBİ ve Araştırma görevlisi Sayın Yük. Müh. Tahsin BOYRAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak Çalışmalarımın her aşamasında benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ve her türlü çalışmamda özveri ile yardımcı olan Saygıdeğer annem, babam ve halam ile bu çalışmamı gerçekleştirdiğim esnada varlığı ile beni yücelten lakin yokluğu ile üzen Saygıdeğer ve Sevgili Büyük Halam Aynur ÖZLER'e sonsuz şükranlarımı ve teşekkürlerimi sunarım....

Haziran 2001

Hasan Burak ÖZLER

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	2
2. CAM ÜRETİMİNDE OKSİJENLİ YANMA	3
2.1. Oksijen katkılı yanma teknolojisinin tarihçesi	3
2.2. Oksijen-yakıt yanma teknolojisinin ortaya çıkmasına ve gelişmesine etki eden faktörler	4
2.2.1. Çevresel etkiler	5
2.2.2. Enerjiye dayalı etkiler	7
2.2.3. Üretim ve dizayna dayalı etkiler	8
2.3. Oksijen-yakıt teknolojisinin kullanıldığı alanlar	9
3. YANMA TEKNOLOJİSİ , OKSİJEN ÜRETİMİ VE FIRIN DİZAYNI	10
3.1. Hava ile yakma sistemleri	11
3.2. Saf oksijen ile yanma prosesi	13
3.3. Oksijen üretimi yöntemleri	14
3.3.1. Likit oksijen üretim tekniği	16
3.3.2. Atmosfer basıncı ile üretim	17
3.3.3. Vakum altında adsorblama	18
3.3.4. Geliştirilmiş cryogenic oksijen üretim tekniği	19
3.3.5. Hava ayırma ünitesi	20
3.4. Fırın tasarımı	21
3.5. Refrakter seçimi	23
3.6. Oksijen-yakıt kullanan fırınlarda modellemenin geometrik şartları	29
4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ANSYS SONLU ELEMANLAR YAZILIMI	
4.1. Sonlu elemanlar yöntemine giriş	32
4.2. Isı iletimi problemleri ve SEY'e uyarlanması	33
4.2.1. Isı iletimi eşitliklerinin SEY ile çözümünde sınıflandırma	36
4.2.1.1. Zamana bağlı olmayan durum	37
4.2.1.2. Zamana bağlı olan durum	38
4.3. Sıvı akışkanlığı ile cfd problemleri ve SEY'e uyarlanması	39
4.4. Ansys sonlu elemanlar yazılımı	42

5. TİPİK BİR DÜZ CAM FIRINI REFRAKTER ASTARINDAKİ ISI GEÇİŞ HAREKETİNİN, ANSYS YARDIMI İLE MODELLENMESİ	44
5.1. Cam fırını refrakter yapılarındaki ısı geçişinin modellenmesi	44
5.1.1. Isısal modellemede kullanılan veriler	45
5.1.2. Refrakter astarların sonlu elemanlar modelleri	51
5.1.3. Isı analizinin sonuçları	53
6. TİPİK BİR CAM FIRINI ERGİTME HAVUZUNDAKİ ERGİMİŞ CAMIN YATAY KESİTTE AKIŞININ AKIŞKANLAR MODELİ VE ANALİZİ	59
6.1. Kullanılan veriler	60
6.2. Geometrik model	61
6.3. Akış Modeli Sonuçları	62
7. MODELLEME ÇALIŞMASI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	65
KAYNAKLAR	67
EK A	70
EK B	76
EK C (Disket içinde)	
ÖZGEÇMİŞ	81

KISALTMALAR

SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
CFD	: Bilgisayar destekli akışkanlar dinamiği
AZS	: Alüminyum, zirkonya, silisyum
BFC	: Uygun yapı koordinasyonu



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Cam endüstrisinde oksijen-yakıt sisteminin günümüzde ki değerlendirme kriterleri	5
Tablo 3.1. Havanın içinde yer alan gazların yoğunlukları ve yoğunlaşma (kaynama) noktaları.	16
Tablo 3.2. Üst yapı refrakterlerin tipik kimyasal ve mineralojik bileşim oranları	5
Tablo 3.3. Oksi-yakıt ve hava-yakıt yanmalı soda kireç camı fırınlarının sıcak nokta bölgesinde ölçülmüş tipik yanma gazı bileşenleri	26
Tablo 5.1. 1. bölge refrakterlerin kimyasal bileşim %'leri	46
Tablo 5.2. 2. bölge refrakterlerin kimyasal bileşim %'leri	48
Tablo 5.3. 3. bölge refrakterlerin kimyasal bileşim %'leri	50
Tablo 5.4. 4. bölge refrakterlerin kimyasal bileşim %'leri	51
Tablo 6.1. Cam ergitme havuzunda sıcaklığın sıvı camın yüzeyinden havuz tabanına doğru ve sıvı cam yüzeyinde soldan sağa doğru sıcaklığın mesafeye bağlı değişimi	61

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Yakıtın hava ve oksijen ile kullanımı esnasında atmosfere verilen NO _x atık miktarları.	5
Şekil 2.2 : Doğal gazın hava ve oksijen ile kullanımı esnasında atmosfere verilen NO _x atık miktarları.	6
Şekil 2.3 : Yakıtın hava ve oksijen ile kullanımı esnasında atmosfere verilen Partikül atıkların miktarları.	6
Şekil 2.4 : Doğal gazın Hava ve Oksijen ile kullanımı esnasında atmosfere verilen Partikül atıkların miktarları.	7
Şekil 2.5 : Alev sıcaklığının oksijen oranı ile değişimi.	8
Şekil 3.1 : Saf oksijen kullanan bir cam fırınının alev görüntüsü	13
Şekil 3.2 : Ergitme bekinden çıkan alev görüntüsü	13
Şekil 3.3 : Sıvı oksijen üretim tesisi akış çizelgesi.	17
Şekil 3.4 : Atmosfer basıncı ile oksijen üretim tesisi akış çizelgesi	18
Şekil 3.5 : Vakum altında adsorblama sistemi akış diyagramı.	19
Şekil 3.6 : Geliştirilmiş cryogenic oksijen üretim tesisi.	20
Şekil 3.7 : Yandan ateşlemeli bir oksi-yakıt fırınındaki bek yerleşimi	21
Şekil 3.8 : Beklerin konumlandırılması ile ilgili parametreler	22
Şekil 3.9 : Tipik bir oksi-yakıt beki tasarımı	22
Şekil 3.10 : Oksi-yakıt cam fırını atmosferindeki alkali gaz dağılımı.	24
Şekil 3.11 : Fırın kemer modeli	29
Şekil 3.12 : Uygun yapı koordinasyonu modeli	30
Şekil 3.13 : Modellenmiş bir alevin yandan görünüşü	30
Şekil 3.14 : Modellenmiş bir alevin üstten görünüşü	31
Şekil 4.1 : İki boyutlu gerilme-şekil değiştirme durumu	32
Şekil 4.2 : Üç boyutlu bir katı yapıda ısı iletimi	34
Şekil 4.3 : SEY'e göre model hazırlama ve hesaplama işlem akış şeması	43
Şekil 5.1 : Plain 55	44
Şekil 5.2 : Plain 77	44
Şekil 5.3 : Cam fırınında refrakter blok bölgeleri	46
Şekil 5.4 : 1.bölge refrakter bloğun geometrik şekli	46
Şekil 5.5 : 1. bölge refrakterlerinin ısıl iletkenlik eğrileri	47
Şekil 5.6 : 2. bölge refrakter bloğun geometrik şekli	47
Şekil 5.7 : 2. bölge üst yapı yan duvar refrakterlerin sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik eğrileri	48
Şekil 5.8 : 3. bölge refrakter bloğun geometrik şekli	49
Şekil 5.9 : 3. bölge refrakterlerinin ısıl iletkenlik eğrileri	49
Şekil 5.10 : 4. bölge refrakter bloğun geometrik şekli	50
Şekil 5.11 : 4. bölge refrakterlerinin ısıl iletkenlik eğrileri	51
Şekil 5.12 : 1.bölge refrakter astarın sonlu elemanlar modeli	52
Şekil 5.13 : 2.bölge refrakter astarın sonlu elemanlar modeli	52
Şekil 5.14 : 3.bölge refrakter astarın sonlu elemanlar modeli	52
Şekil 5.15 : 4.bölge refrakter bloğun sonlu elemanlar modeli	53

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 5.16 : 1. bölgeye ait ısı analizi [sıcaklık değerleri ($^{\circ}\text{K}$)] sonuçları	53
Şekil 5.17 : 1. bölge refrakter astar duvarındaki soğuma eğrileri	54
Şekil 5.18 : 2. bölgeye ait ısı analizi [sıcaklık değerleri ($^{\circ}\text{K}$)] sonuçları	54
Şekil 5.19 : 2.bölge ergitme bölümü üst yan duvarındaki soğuma eğrileri	55
Şekil 5.20 : 3. bölgeye ait ısı analizi [sıcaklık değerleri ($^{\circ}\text{K}$)] sonuçları	55
Şekil 5.21 : 3.bölge refrakter astar duvarındaki soğuma eğrileri	57
Şekil 5.22 : 4. bölgeye ait ısı analizi [sıcaklık değerleri ($^{\circ}\text{K}$)] sonuçları	58
Şekil 5.23 : 4.bölge refrakter astar duvarındaki soğuma eğrileri	58
Şekil 6.1 : Fluid 141	59
Şekil 6.2 : Sıvı cam ve ergitme havuzunun geometrik modeli	62
Şekil 6.3 : Sıvı cam hacminin sonlu elemanlara ayrılmış SE-modeli	62
Şekil 6.4 : Ergimiş camın akış hızları	63
Şekil 6.5 : Ergimiş camın vektörel akış hızları	63
Şekil 6.6 : Sıvı cam içinde ısı dağılımı veren model ve sıcaklık değerleri ($^{\circ}\text{K}$)	64



SEMBOL LİSTESİ

D	: Duvar cephesinden uzaklık
H	: Bek cephesinden uzaklık
θ	: Bekin eğim açısı
α, β	: Faz ismi
V_y, U_x	: Sınır eleman üzerindeki x, y yönündeki doğrultu vektörü
f	: Yük vektörü
K	: Rijitlik matrisi
a	: Düğüm noktası
q_x, q_y, q_z	: x, y, z doğrultularında ısı akım yoğunlukları
θ	: Malzeme sıcaklığı
k_x, k_y, k_z	: x, y, z doğrultularında ısı iletim katsayıları
q^B	: Birim hacime düşen ısı miktarı
θ_e	: Dış ortam sıcaklığı
K_n	: Malzemenin ısı iletim katsayısı
n	: Yüzey normaline paralel yöndeki katsayı
q_s	: Birim yüzeydeki ısı akımı
h	: sıcaklığa bağlı konveksiyon katsayısı
θ_r	: Dış radyasyon kaynağından sisteme ulaşan sıcaklık
k	: Katsayı
m	: Eleman sıralama indeksi
$t+\Delta t \theta$	: Düğüm noktası sıcaklığı
H, B	: Eleman sıcaklık interpolasyon matrisleri
H^s	: yüzey sıcaklık interpolasyon matrisi
K^k	: Isı iletim matrisi
K^c	: Konveksiyon matrisi
$t+\Delta t \theta_e$	: Isı iletim vektörü
C	: Isı kapasitesi matrisi
f	: Sürtünme katsayısı
ρ	: Yoğunluk
v_m	: Akış Hızı
L	: Sıvının bulunduğu boru veya kabın uzunluğu
τ_w	: Kesme kuvveti
Re	: Reynolds sayısı
ν	: Kinematik viskozite
μ	: Viskozite
u, v, w	: x, y, z doğrultularındaki akış hızları
$R_{dış}$	: Dış yarı çap
$R_{iç}$	: İç yarı çap
v_x, v_y	: x, y doğrultusundaki hızlar
v_{sum}	: Bileşke hız
T	: Sıcaklık

CAM ERGİTME FIRINLARINDA OKSİJENLİ YANMA İLE TERMAL VE AKIŞ MODELLEMESİ

ÖZET

Cam üretiminde kullanılan teknolojilerden biri olan oksijenli yanma sistemleri 1980'li yıllarda ilk olarak gündeme gelmiş, 1990'lı yıllarda da tamamı ile saf oksijen kullanan beklerden kurulu fırınların yapılması ile de gelişimini hızlandırmıştır. Temel itibariyle geleneksel hava yakıt yanmalı fırınlarda çevreye verilen emisyon oranlarının yüksekliği, kayıp ısı miktarındaki fazlalık ve bu kayıpların geri kazanılması için yapılan fırının maliyetinin % 60'nı tutan geri dönüşüm sistemlerinin hepsine birden çözüm oluşturabilecek olan oksijenli yakıt teknolojisi. Gelişimini tamamlamamış olan bu teknolojinin fırın içi reaksiyonlardan dolayı cam fırını refrakter astarlarında çözülme sorunları yaratması ve günümüzde ki oksijen maliyetleri, bu teknolojinin karşısındaki en önemli sorunlardan bir kaçıdır. Bu konu hakkında yapılan çalışmalar her geçen gün sistemin sorunlarının çözümünde bir adım ileriye gitmekte ve her geçen gün dünyadaki mevcut oksijenli yakıt fırınların sayısının artmasını sağlamaktadır. Oksijenli yakıt fırınlarının çözümünde diğer cam fırınlarında olduğu gibi bugün gelişen bilgisayar donanımları ve yazılımları sayesinde çeşitli teknikler kullanılmaktadır. SEY (sonlu elemanlar yöntemi) tabanlı olan bu yazılımlar sayesinde fırın içinde meydana gelen ısı hareketleri, alev kontrolü, sıvı cam hareketleri ile refrakter yapılarda oluşabilecek hatalar bilgisayar ortamında görülebilmekte ve bunlara karşı çözümler geliştirilebilmektedir.

Bugün gerek oksijenli yakıt fırınlarda gerekse geleneksel hava-yakıt yanmalı fırınlardaki ortak sorunlardan biride fırın içersinde ergitme bölümü havuzundaki, sıvı camla temas refrakter astarında meydana gelen aşınma durumudur. Bu durum daha önceden bilindiği gibi sıvı cam içindeki akış hareketi ve refrakter astardaki ısı dağılımı ile ilişkilidir. Bundan dolayı fırın içersindeki refrakter yapıların ve eriyik cam içersindeki akış hareketleri bir SEY yazılımı olan ANSYS tarafından seçilen tipik bir cam fırını verilerinden faydalanılarak, bilgisayar ortamında simüle edilmiştir. Bu sayede fırın içersindeki refrakter yapılarda meydana gelen ısı dağılımları ve buna bağlı soğuma eğrileri ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmanın ardından yine ansys yardımıyla sonlu elemanlar tekniği kullanılarak, sıvı cam içersindeki akış hareketi CFD (bilgisayar destekli akışkan modellemesi) tekniği kullanılarak simüle edilmiş ve bu çözüm sayesinde sıvı camın akış hızları ve bu akışın vektörel olarak ergitme havuzu içersindeki hareket doğrultuları görülmüştür. Bu sonuca ek olarak yapılan analiz sonucunda, sıvı cam içersindeki ısı dağılımı da elde edilerek, bu sonuçlar irdelenmiştir.

IN THE GLASS MELTING FURNACES, OXYGEN COMBUSTION, THERMAL AND FLUID MODEL

SUMMARY

Oxygen-fuel combustion is a technological breakthrough in the core process of the glass industry. Even if the first industrial experiences already occurred in the early 80's. In the early 90's, it increased velocities of its improving with using pure oxygen burner in glass furnace. Traditional air-fuel furnace emissions, recovery system cost and lost heat levels are more than levels in oxy-fuel furnace so it has a advantage to air-fuel furnace. The most important problems of oxy-fuel combustion which don't complete its development, are oxygen cost and corrosion refractories because of furnace conditions. However this technology continues to develop and increase its number in the world. Because of scientific study and industrial experiences

In the first section of this study, oxygen-combustion technology, its problems and solution of these problems is introduced.

In the second section of this study, Finite Element method have been introduced. It is a powerful tool for the numerical solution of a wide range of engineering problems. Applications range from deformation and stress analysis to field analysis of heat flux, fluid flow and flow problems. ANSYS is one of fine element softwares. Some problems which about thermal distribution, flame control and wear refractories, are able to simulation on a computer. This section includes thermal and CFD (computational fluid dynamics) models about refractories and solution glass. These solutions includes thermal distribution on the refractories wall in a typical glass melting furnace and a CFD model. Some results, which about distribution of velocities and velocities direction in the glass solution, have been able to get in these study.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Gelişen dünyamızda teknoloji her geçen gün bir adım daha ilerlemektedir. Bu gelişim süreci hızını hiç yitirmeden bilgiye sahip olup bu bilgiyi gelecek kuşaklara aktarma amacıyla çalışmalarını yürütmektedir. Teknolojiyi bu amaçlar doğrultusunda kullanan endüstri dallarından biride cam üretim sektörüdür. Cam üretim sektörü, bu amaçlar doğrultusunda öncelikle bilgiye ulaşmayı ve daha sonrada bu bilgiyi en iyi ve en verimli şekilde kullanımını sağlayacak çalışmaları yapmakta ve her geçen gün bunu bir adım daha ileriye taşımaktadır. Bu gelişmeler ışığında, karşılaşılabilecek yeni uygulamalar ve yeni çözüm teknikleri geliştirilmekte ve bunlar denendikten sonrada uygulamaya geçilmektedir. Bu durumu ortaya koyan sebep camın önemidir.

Cam bugün dünyada en önemli ihtiyaç malzemelerinin başında gelmektedir. Günlük hayatımızın neredeyse her alanında kullanılan camın, üretimi esnasında karşımıza bir çok sorun çıkmakta ve bu durum karşısında sorunları ortadan kaldıracak çalışmalar yapılmaktadır. Son yıllarda çevresel duyarlılığın artması ve enerji maliyetlerinin önemli birer parametre olması yeni üretim yöntemlerinin gelişmesinde rol oynamaktadır. Bunun yanında hızla ilerleyen bilgisayar teknolojisi de bu konuda yapılabilecek çalışmalara yardımcı olmakla beraber, araştırma ve geliştirme çalışmalarının etkinliğini arttırıcı bir nitelik teşkil etmektedir.

Cam üretim tesisinde en önemli bölüm cam fırınlarıdır. Yapılan yatırımlarda en fazla para harcanan ve tesis içersinde enerjiyi en yoğun kullanan bölüm olması bunda etkili olmaktadır. Cam üretimi sırasında fırın içersinde sıcaklığın oldukça yüksek seyretmesi ve buna bağlı olarak ısının fırın içersinde muhafazası ile fırın ömrünü belirleyen, fırını oluşturan malzemelerin tayini bu sektörün en önemli araştırma konularını oluşturur. Bu konuda yapılan çalışmalar cam üretimi esnasında fırında gerçekleşen yanma sonucu açığa çıkan ısının verimine yönelik çalışmalardan biride yeni yakma yöntemleri geliştirmektir. Bu çalışmalar esnasında fırında üretilen ısının kaybını engelleyici ve açığa çıkan ısının büyük oranlarda camın ergitilmesi amacıyla

kullanımını sağlamak için yapılan çalışmalar sonucunda oksijenli yanma tekniği ortaya çıkarılmış ve yanmayı sağlayan birincil malzeme olan oksijenin hava içerisindeki miktarını artırıcı çözümler geliştirilmesini sağlamıştır. 1960'lı yıllarda başlayan bu uygulama şekli 1980'li yıllara kadar gelişimini sürdürerek. Bu tarihten sonra oluşan çevresel duyarlılığın ve üretime dayalı etkilerin çerçevesinde saf oksijenin, fırına yakma havası olarak verilmesine kadar gelmiştir.

Bu çalışmalara paralel olarak gelişen bir diğer konu ise; gelişen bilgisayar teknolojisi ve yazılımları sayesinde matematiksel çözüm tekniklerinden olan SEY'in (sonlu elemanlar yöntemi) oluşan problemlerin çözümünde kullanılabilmesidir. Bu sayede fırın içi ve dışı ortamlar bilgisayar ortamında simule edilerek karşılaşılabilecek problemler önceden belirlenebilir ve bunlara karşı çözümler geliştirilebilir.

Bu çalışmalar sayesinde gerek fırın ömrünü artırıcı gerekse oluşabilecek enerji kayıplarını engelleyici imkanların ortaya çıkması cam üretiminin daha sağlıklı bir hal almasını sağlayacaktır.

1. 1 Çalışmanın amacı

Yapılan bu tez ile amacımız gelişen cam üretim teknolojisi içinde son yıllarda önemli bir yer tutan ve hakkında oldukça fazla çalışmanın yapıldığı oksijenli yanma teknolojisinin daha iyi tanınabilmesi amacıyla bir araştırma çalışması yapmaktır. Bu sayede mevcut uygulanan tekniklerin verimliliği de gözler önüne serilerek günümüze uygunluğunun kıyaslanabilir bilinmesi sağlanarak bu yanma teknolojisinin ortaya çıkış kriterleri, artıları ve eksilerinin ortaya konulmasına çalışılmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında ise; tipik bir cam fırını ergitme bölümündeki refrakter yapıların ve ergitme havuzu içerisindeki sıvı camın termal ve akış hareketinin, sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS programı ile modellenmesi amaçlanmıştır. Bu sayede refrakter astarlardaki ısı dağılımı modellenmiş ve bundan sonra özellikle fırın içerisinde sıvı cam seviyesinde meydana gelen ve refrakter yapıdaki aşınmaya büyük oranlarda etki ettiği bilinmek de olan sıvı cam içindeki akış hareketleri ile ısı dağılımı simule edilmeye çalışılmıştır.

2. CAM ÜRETİMİNDE OKSİJENLİ YANMA

2.1 Oksijen katkılı yanma teknolojisinin tarihçesi

İnsanın yazılı tarihinden daha eski bir malzeme olmasına rağmen, yaklaşık yüz, yüz elli yıl öncesine kadar cam tamamı ile küçük potalarda ergitiliyordu. 1867 yılında Siemens tarafından ilk Rejeneratif tank fırınının geliştirilmesi cam teknolojisinin gelişmesinde çok önemli bir başlangıç teşkil etmiştir. 19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarından itibaren fırın tasarımında, kullanılan refrakter malzemelerde ve özellikle yakıt ve yanma teknolojilerinin gelişiminde çok önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. [1]

1960'lı yıllara gelindiğinde yakma sistemlerinde kullanılan havanın içeriğinde bazı değişiklikler olmuştur. Bu değişim, var olan oksijenin daha etkin bir şekilde kullanılmasına olanak veren, oksijen ile zenginleştirme işleminin uygulanmaya başlanmasıdır. Bu başlangıç 1990'lı yılların başında tamamıyla yanma havası olarak saf oksijenin kullanılmasına değin, port altı oksijen üfleme ve oksijen-yakıt takviyeli yanma tekniklerini kullanarak günümüze kadar gelişimini sürdürmüştür.

Bu yanma teknolojisinin gelişimindeki başlangıç olarak kabul ettiğimiz ve 1960'lı yıllarda uygulanmaya başlanan “oksijen ile zenginleştirme” işleminde amaç; fırına verilen yakma havasına oksijen ilavesi yaparak yakıtın daha verimli bir şekilde yanmasını sağlamaktır. Bu proses oksijen içeriği açısından yanma havasını zenginleştirerek alev sıcaklığının artmasını sağlar. [2]

İkinci adım olan “port altı oksijen üfleme” tekniği yakıtın verimsiz kullanımı sonucu ortaya çıkmıştır. Bu teknikte amaç yanma esnasında alev içinde yanmamış yakıt zerreciklerinin brülörün altında verilen oksijenle temasa geçerek yanmalarını sağlamaktır. Bu sayede alev altında kalması nedeniyle de sıcaklık artışı meydana gelerek harmanın yüzeyindeki ısının artmasını sağlanmıştır. Tabi ki uygulamada elde edilen faydalar sadece bunun ile sınırlı değildir. Bu sayede fırına daha fazla ham madde beslenmesi sağlanmış ve aynı zaman da bu ısı artışının alevin altında

kalmasından ötürde, çatı ve alev üstündeki refrakterlerin artan ısıdan olumsuz etkilenmelerinin önüne geçilmiştir. [2]

Üçüncü adım “oksijen-yakıt takviyeli” yanmadır. 1980’li yılların ortalarında uygulanmaya başlanan bu teknikte kullanılan mevcut hava-yakıt karışımına destek olarak fırına oksijen yakıt üfleyicileri konulmaktadır. Bu proses sayesinde verim de bir artış ve yüksek ışımaya sahip bir alev elde edilmektedir. Bu durumda ısı harman yüzeyinden daha derinlere ilerlemekte, ergitme hızı artmakta ve cam eriyiği üzerinde ki ısının daha düzenli bir şekilde dağılması sağlanmaktadır. [2]

1990’lı yıllara geldiğimizde mevcut gelişimlere bir yenisi eklenmiştir: Hava yerine tamamı ile oksijenli yanma yöntemine geçiş. Bu konudaki çalışmalar 1980’li yılların sonlarında başlamasına rağmen konuyla ilgili ilk bilimsel makaleler 1990’lı yılların başında yayınlanmıştır. Bu uygulama oksijen kullanımının en etkin yöntemidir. Bu sistemde havada %72 oranında mevcut bulunan azot (N_2) gazının fazladan ortamdan ısı çekmesini engellenerek bu ısının ortamda kalması sağlanmış ve ayrıca azot ve kükürt emisyonlarının sistemden dışarı verilmesi engellenmiştir. [2]

Tüm gelişmeler son 40 ila 50 yılın ürünüdür. 1960’lı yıllarda başlayan bu atılım günümüze kadar endüstrinin daha verimli çalışmasını ve kullanılan sistemlerin etkin ve oldukça hızlı bir şekilde gelişmesine imkan vermiştir. Bütün bu gelişim, geçmişten bugüne ulaşılırken yapılan çalışmaları özetlemektedir. Bugün ise mevcut şartlar gereği artık oksijen-yakıt yanma teknolojisi hızla uygulanmaya başlanmakta ve gün geçtikçe de uygulama alanlarının sayısını arttırmaktadır. [2]

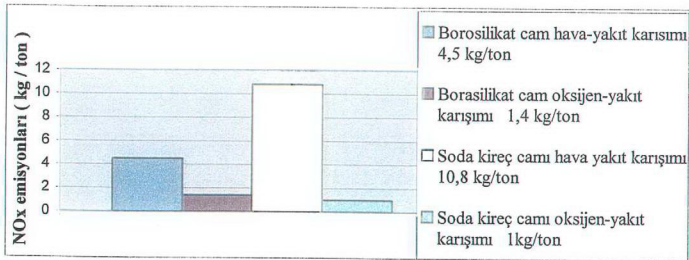
2.2 Oksijen-yakıt yanma teknolojisinin ortaya çıkmasına ve gelişmesine etki eden faktörler

Saf oksijen ile yakma sistemi ortaya konuluncaya dek belirli bir değişim süreci yaşamıştır. Bu dönem içerisinde yapılan çalışmalar ve uygulamaların ortaya koyduğu verilerin ışığında en verimli uygulama olarak ön görülen oksijen-yakıt karışımı yanma şeklini almıştır. Bu durumun ortaya çıkmasını sağlayan, hatta zorunlu kılan etkili parametreler vardır. Bu parametreler sırası ile;

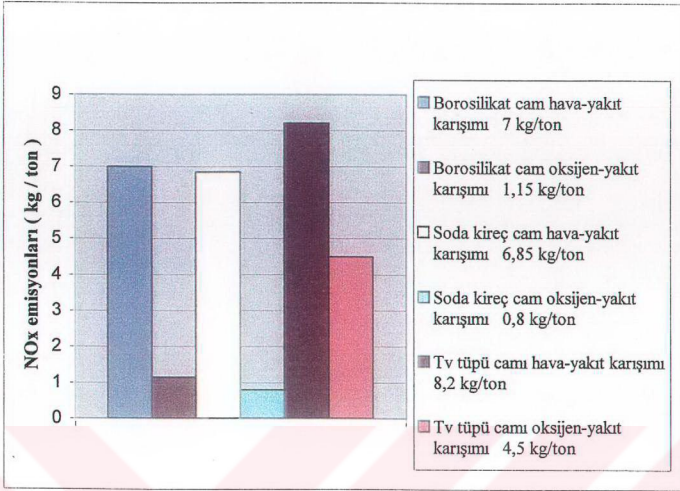
- A) Çevre,
- B) Enerji,
- C) Üretim ve Dizayn. [3]

2.2.1 Çevresel etkiler

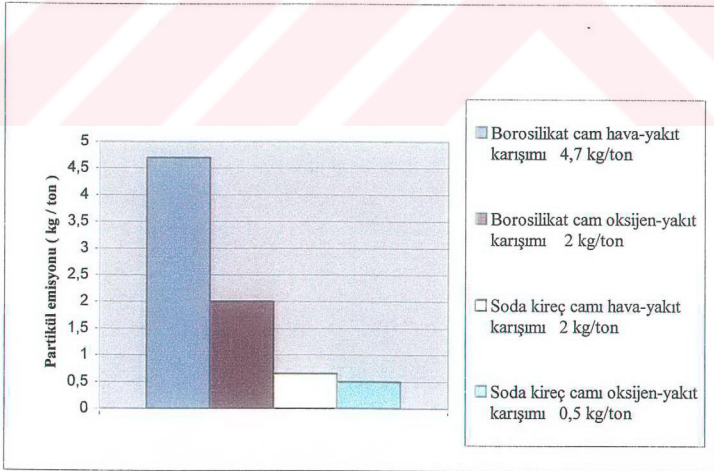
Bu teknolojinin bilimsel çalışmalarının ilk başladığı yer olan Amerika Birleşik Devletlerinde 1990 yılında federal temiz hava yasaları denetleme ve düzenleme kurulu tarafından belirlenen hava kalitesine dair kurallar ve bu kuralların içinde yer alan fabrikaların atmosfere verdikleri atık gaz emisyonlarının miktarlarına dair kısıtlamalar bu konuda çalışan bilim adamlarını atmosfere verilen atık gazlar ile ilgili yeni arayışlara itmiştir. Bu kararın Avrupa ve diğer kıta ülkelerinde alınan çevresel kararların izlemesi de bu arayışlara yeni endüstriyel kurumların katılmasını sağlamıştır. Bu kararın altında yatan nedenlere sırası ile bakacak olursak; Endüstri kurumlarının üretim sırasında kullandıkları yakma havasından ve üretim içi reaksiyonların ara ürünlerinden kaynaklanan NO_x , SO_x , HF, HCl ve CO atık gazlarının çevreye verilmesi dolayısıyla zararlı etkililerin ortaya çıkması bu kararların alınmasında etkili olmuştur. Fakat bu durumun getirebileceği üretim kısıtlamaları, ek masraflar ve hatta endüstri branşlarını kapatmaya kadar götürebilecek olması endüstrinin geleceği açısından önemli bir etken olmasını sağlamıştır. Aşağıdaki tablolarda cam endüstrisinin üretim esnasında oluşan ve çevreye verilen atık gazların oranları verilmektedir. [3]



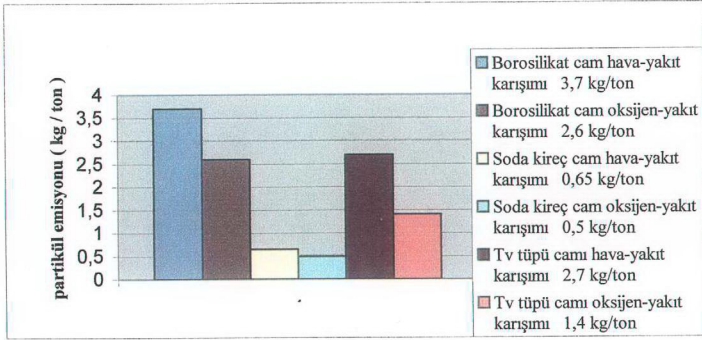
Şekil 2.1: Yakıtın hava ve oksijen ile kullanımı esnasında atmosfere verilen NO_x atık miktarları. [4]



Şekil 2.2: Doğal gazın hava ve oksijen ile kullanımı esnasında atmosfere verilen NO_x atık miktarları. [4]



Şekil 2.3: Yakıtın hava ve oksijen ile kullanımı esnasında atmosfere verilen Partikül atıkların miktarları. [4]

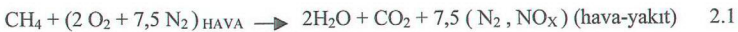


Şekil 2.4: Doğal gazın Hava ve Oksijen ile kullanımı esnasında atmosfere verilen Partikül atıkların miktarları. [4]

Şekillerde görüldüğü üzere iki kullanım arasındaki farklar çevreyi bu teknolojinin oluşumunda önemli bir kriter haline getirmiştir.

2.2.2 Enerjiye dayalı etkiler

Enerji endüstri içerisinde oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Maliyetleri etkileyen bir kriter olduğundan, oluşabilecek kayıplar göz ardı edilemeyecek unsurlardır. Yakıtın yanmasını sağlamak için hava kullanılmaktadır. Hava içinde % 78.1 oranında azot (N_2), % 20.9 oranında oksijen (O_2), % 0.93 oranında argon (Ar_2), % 0.03 karbon di oksit (CO_2), % 0.00011 oranında kripton (Kr_2), ve az miktarda toplamı % 0.03989 oranında olan neon (Ne_2) ve ksenon (Xe_2) bulunmaktadır. Bu oranlar kuru hava için geçerlidir. Normal olarak hava içinde % 2 ile 3 oranında su buharı da bulunmaktadır. Bu yüzdeler içinde azot miktarı oran olarak oldukça önemli bir durum teşkil eder. Yanma esnasında yanmayı sağlamak için oksijen kullanılmaktadır. Azot ise yakma esnasında kullanılmamasına rağmen sistem içinde yer aldığından ısı çeker ve bu durumda kayıp ısı olarak karışımıza çıkar. Bu durum aşağıdaki 2.1 ve 2.2 no'lu reaksiyonlarda verilmiştir. [4]



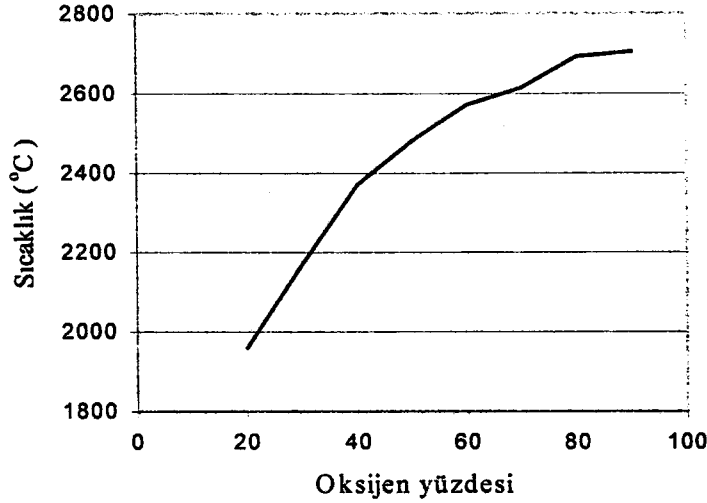
Yukarıdaki reaksiyonlardan da görülebileceği gibi sistemde yanma olayı azot tarafından da gerçekleştirilerek sistemden ısı çekilmektedir. Bu durumu engellemek için reküperatör ve rejeneratör (Ek A'da detaylı bir biçimde bahsedilmektedir) diye isimlendirilen ısı eşanjörü sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler yapılan fırın yatırımların toplamının % 60'ını teşkil eder ve sistemden kayıp olarak adlandırılan ve çıkan ısının geri kazanılması için kullanılırlar. Enerjinin önemi göz önüne alındığında oluşan bu durum içinde bu kaçakları barındırmayan yeni bir sistemin geliştirilmesi için önemli bir kriter teşkil etmiştir. [4]

2.2.3 Üretime ve Dizayna dayalı etkiler

Bu alanda ortaya konulabilecek en büyük etki üretim kapasitesidir. 2.2.2 bölümünde bahsedildiği gibi; ısı kayıplarından dolayı sağlanamayan verimli kullanım üretime yansımaktadır. Alev sıcaklığında ve alev hızında oluşan düşüşler sistemin ergitme hızını etkilemekte bu da beslenen harman miktarıyla beraber günlük çekiş miktarını düşürmektedir. Sisteme verilen oksijen miktarındaki artış , alev sıcaklığı ve alev hızını arttırmakta , bu durumda ergitme hızına yansiyarak beslenen harman miktarını ve günlük çekilen ürün miktarının artmasını sağlamaktadır. Oksijenin alev sıcaklığına ve alev hızına yaptığı etkiler şekil 2.5'de görülmektedir. [4]

Mevcut sistemlerde ısıya bağlı geri kazanımı mümkün kılabilmek için ek sistemler geliştirilmiştir. Muhakkak ki bu durum mevcut kullanılan fabrika içi alanda artışa sebebiyet vermekle beraber artı bir yatırım maliyeti getirmektedir. İşletmelere buna engel olabilmenin tek yolu mevcut sistemi daha güvenilir kılmak ve bulunan geri kazanım sistemlerine duyulan ihtiyacı ortadan kaldırmakla mümkün olacaktır.

Bu durum oksijen-yakıt sistemlerde kaçak oranının ortadan kaldırılması sayesinde mümkün olabilmektedir. Isı geri kazanım sistemlerinin devre dışı bırakılabilmesi sayesinde fırın hacmini arttırmaya imkan doğacak olması, dizaynı, bu teknolojinin ilerlemesine katkıda bulunan bir kriter olarak ortaya koymaktadır.



Şekil 2.5: Alev sıcaklığının oksijen oranı ile değişimi. [5]

2.3 Oksijen-yakıt teknolojisinin kullanıldığı alanlar

Bu sistemin kullanıldığı endüstri branşları arasında iki dal en önemli yeri tutmaktadır. Günümüzde metal sanayisinde ve cam sanayiinde kullanılan bu teknik her geçen gün kendine yeni uygulama alanları oluşturmakta ve bu sistemle kurulmuş fırın sayısında artış elde edilmektedir.

Metal üretim sanayiinde kullanılan bu teknik sayesinde verim artırılmakta ve de gereksiz ısı kaçaklarına engel olunabilmektedir ayrıca sisteme saf oksijen girdiği zaman , sistemdeki karbon içerikli yakıt tam anlamıyla yakılabilmektedir (2.2 no'lu reaksiyon). Ortaya çıkan atık gazlarda da önemli oranlarda bir azalma olmakta ve bu sayede gerek çevreye daha az zarar verilmekte, gerekse sistemde ortaya çıkabilecek sorunlar (örneğin : bacalarda oluşan tıkanmalar v.b.) ortadan kaldırılabilmektedir.

Diğer kullanıldığı endüstri alanı ise, bu teze konu olan cam sanayidir. Son yıllarda cam sanayiinde ki önemli gelişmelerden biri oksiyakıt yanma teknolojisidir. 1998 verileri ile dünyada oksijen-yakıt sistemini kullanan yaklaşık 500 adet fırın vardır. Bu fırınların 50 tanesi Amerika Birleşik Devletlerinde bulunmaktadır. Uygulama bulunduğu en önemli cam çeşitleri firit camı üretimi ve tv tüpü camı üretimidir. Bu uygulama alanları içine düz cam üretimi ilk başlarda alınması çeşitli nedenlerden ötürü mümkün görünmeyen bir istek olsada daha sonra geçen 2 yıl içinde bir düz cam fırını Amerika Birleşik Devletlerinde üretime başlamıştır. Bu teknik her ne

kadar kullanım ve ilk yatırım bakımından uygun bir yöntem olsada çeşitli sorunları da içinde barındırmaktadır. Mevcut haliyle en büyük engel bugüne kadar maliyeti sıfır olan havayı kullanan cam üreticileri için oksijen bir maliyet teşkil etmektedir. Bu maliyet her ne kadar oksijen üreticilerinin geliştirdikleri yeni teknikler sayesinde aşağıya çekilmiş olsa da yine de bu bir maliyettir. Bu durum üreticiler tarafından halen kullanılan havaya göre her zaman bir dezavantaj olarak kalmaya mecbur olacaktır. Tabi ki oluşan sorunlar sadece maliyet sorunları değildir. Fırın içinde kullanılan refrakterlerin, fırın içinde oluşan korozyif ortam sebebiyle bozunmalar sergilemesi ve bunun da gerek harman kalitesini, gereksede fırın ömrünü etkileyen bir unsur olarak karşımıza gelmesi bir diğer dezavantajı oluşturmaktadır. Bu durum değerlendirilmesinde dikkate alınan unsurlara dair kriterler Tablo 2.1’de görülmektedir. Fakat günümüzde kullanılan bu teknoloji her geçen gün yapılan çalışmalar neticesinde bu sorunlarını gidermekte ve kendisini daha ileriye taşıyacak yeni görüşler ve uygulamalarla güçlenmektedir. [5]

Tablo 2.1: Cam endüstrisinde oksijen-yakıt sisteminin günümüzde ki değerlendirme kriterleri [5]

Sektör	Dönüşüm sayısı	En önemli motive edici unsur	2. en önemli motive edici unsur	Karşı faktörler
Cam elyafı	9	Partikül	Sermaye azaltma	Oksijen maliyeti
Şişe	7	NO _x	Partikül	Oksijen maliyeti
Aydınlatma/ Züccaciye / TV	12	Partikül	Sermaye azaltma	Oksijen maliyeti
Float	3	Üretim esnekliği	Sermaye azaltma	Risk,oksijen maliyeti,cam kalitesi
Frit	14	Yakıt tasarrufu	Üretim artışı	Oksijen maliyeti
Sodyum silikat	0	Mevcut değil	Mevcut değil	Üretimde geniş esneklik ihtiyacı
Özel	6	Yakıt tasarrufu	Üretim artışı	Oksijen maliyeti

3. YANMA TEKNOLOJİSİ , OKSİJEN ÜRETİMİ VE FIRIN DİZAYNI

3.1 Hava ile yakma sistemleri

Cam fırınlarında kullanılan yakma sistemleri çeşitlilik arz etmektedir. Hava ile yakma sistemi bunlar içinde en çok kullanılanıdır. Bu sistemde temel amaç yakma bekleri içinde yakıt ile doğal olarak elde edilen ve içeriğinde % 78.1 oranında azot (N_2) , % 20.9 oranında oksijen (O_2) bulunduran hava bir araya gelerek yanma işlemini meydana getirmektedir. Yanma mekanizması yakıt türüne bağlı olarak çeşitlilik arz eder. Yanma iki adımda gerçekleşmektedir birinci adımda yakıt içerisinde bulunan hidrokarbonlar yanarak ortaya yanma ürünleri olan CO (karbon monoksit) ve OH (hidroksit) açığa çıkarır. İkinci adımda ise yanma işlemi tamamlanarak daha düşük sıcaklıktaki ısı NO_x gerçekleşen tepkimenin (formül 2 ve formül 3) türüne bağlı olarak açığa çıkar. [6]



Oksijen molekülleri ilk önce karbon tarafından tüketilen oksijen atomuna dönüşür. Sıcaklık $1538 ^\circ C$ ye yükseldiği zaman oksijen atomları azot moleküllerini atomlarına ayırmak için yeterli enerjiye ulaşırlar. Bu sayede NO oluşur ve $816 ^\circ C$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda daha fazla oksijenle reaksiyona girerek NO oluşturan nitrojen atomu serbest kalır. $816 ^\circ C$ 'nin altındaki sıcaklıklarda bu zincirleme reaksiyon serbest radikallerin üretilmemesinden kaynaklanan sonuç neticesinde son bulur. Hava-yakıt yanmalı sistemlerde ısı NO_x , fırın sıcaklığının ve oksijen konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Bu nedenle eğer oksijen konsantrasyonu

hava miktarında ki azalma nedeniyle düşer ise bir çok oksijen atomu yanma havası içindeki nitrojen ile reaksiyon oluşturmak için müsait duruma geçer (3.1 no'lu reaksiyon) ve daha az ısı olan NO_x (3.2 no'lu reaksiyon) oluşur. Eğer ısı 1538 °C 'nin altına düşerse oksijen atomları nitrojen ile reaksiyona girmek için daha az enerji içerir duruma geçerler (3.2 no'lu reaksiyon). Bütün bu olanları ortadan kaldırmak ve de sistemi daha verimli kullanmak için yapılması gereken yanma havası içerisindeki nitrojeni devre dışı bırakmaktır. Bu sayede nitrojenin sistemden çektiği ısı ortadan kaldırılarak daha verimli bir yanmanın gerçekleştirilmesi sağlanır. Bu ancak sisteme yanma havası olarak saf oksijen verilmesi ile mümkün olabilmektedir. Daha önce 2.2.2 bölümünde geçen reaksiyon 2.1' de ortaya konan durum sistemdeki nitrojenin yanma sonucunda sistemde yer alan oksijeni nasıl kullandığını gördük. Ayrıca reaksiyon 2.2 deki durumda ise saf oksijenin sistemde kullanılması durumunda nasıl bu kaybı ortadan kaldırdığı da görülmektedir. [6]

3.2 Saf oksijen ile yanma prosesi

Yanma için saf oksijen kullanımı yıllarca önce başlamıştır. İlk tecrübeler sistemi oksijen-yakıt bek ilavesi yaparak daha verimli hale getirme çabalarından müteşekkilen daha sonra sistem bütününe oksijen-yakıt bekleri ile oluşturulması işlemine gidilmiştir. Bu yanma prosesi esnasında kullanılan yakıt malzemelerinden biri olan doğal gaz bileşiminde % 80-90 metan geri kalan % 20-10'luk kısmı ise etan, propan, karbon dioksit, nitrojen ve diğer gaz türevlerini içermektedir. Tipik bir hava-gaz yanma sisteminde havanın hacimsel oranı gazın 10/1 kadardır ve yanma ürünleri karbon dioksit, karbon monooksit, su buharı, nitrojen ve NO_x. Bu durum oksijen-yakıt yanmada 2.1/1'dir. Bu hacimsel fark sayesinde sistemde kayıp ısı miktarında azalma olmaktadır. Oksijen sisteminde meydana gelen yanma reaksiyonu 2.2 no'lu reaksiyonda da görüldüğü üzere sistemde bulunan oksijenin saflığına bağlı olarak ortaya çıkan ve tam yanma olayı gerçekleşmesi ile sistemde yanma sonucu açığa çıkan ısıнын bütünüyle harmanın ergitilmesi için kullanılmasını sağlar. [6]



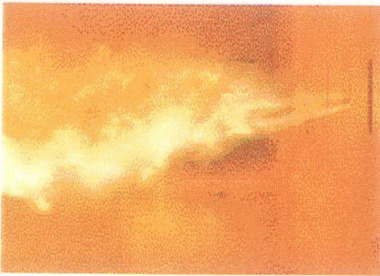
Oksijenin saflığı kullanılan oksijen üretim tekniklerine bağlı olarak farklılık arz etmektedir. Bu durum oksijen sıvı buharlaştırarak elde edilen bir sistemden karşılanıyorsa % 99.999 saflıktadır. Oksijen basınçlı adsorbsiyon tekniği ile üretilen

sistemden karşılanırsa bu saflık % 90-93 saflıkta elde edilebilmektedir. Bu saflığın yanma olayına etkisi sistemde ortaya çıkan ısının kullanımı açısından önemli bir durum arz eder. Saflıkta meydana gelebilecek azalma yanma sonucu ortaya çıkan ısının bir kısmının fırına verilen yakma havası içerisinde oksijen haricinde bulunan safsızlığın ısıtılmasında kullanılacak olması, sistemin veriminde azalmaya sebebiyet vermektedir. Bunun sonucu olarak sisteme verilen oksijen % 99.999 saflıkta olması sistemin verimi açısından da oldukça önemlidir. [6]

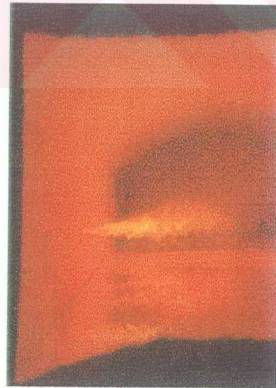
Yakma havası olarak saf oksijenin kullanılması sistemi 3 farklı açıdan etkilemektedir. Bunlar sırasıyla alev karakteristiği, beklerin sayısı, yeri ve bacanın yeri ile ölçüsüdür.

a) Alev karakteristiği:

- Harmanın üstünü kaplayacak bir şekildedir.
- Alev çıkışları birbirlerine karşı değildir.
- Cama doğru verilen radyasyon ile ısı yayılması ve aydınlatma etkisi oldukça yüksektir.
- Alev sıcaklığını, yığına iletimi ve buharlaşmayı düşürebilmek için daha düşük hızdadır.[6]



Şekil 3.1: Saf oksijen kullanan bir cam fırınının alev görüntüsü [7]



Şekil 3.2: Ergitme bölümü bekinden çıkan alevin görüntüsü [7]

b) Beklerin sayısı ve yeri :

Yanma teknolojisi yanma yeri, cam altı sıcaklık tespiti ve beklerin yeri ile sayısını belirlerken CFD (bilgisayar destekli akışkanlar dinamiği) modeli kullanılmaktadır. Ergitme karakteristiği ile uygun alevin verilmesi ve aynı zamanda arzu edilen sıcaklığı sağlayabilmek için her bir bekin yanma oranına dikkatlice karar verilmelidir. Ayrıca beklerin yerleşimi belirlenirken fırın çatısında, cam yüzeyinde ve yığın ile alev ara yüzeyinde sıcak noktalar homojen ısı dağılımı ve ısınma için engellenmelidir. [6]

c) Baca yeri ve ölçüsü :

Beklerde olduğu gibi bacaların yeri ve ölçüsü belirlenirken dikkatlice dizayn edilmeli ve bu durum CFD modeli tarafından da test edilmelidir. Fırın gazlarının yeterli konuşlanma zamanı, atık gazların akış hızı ve fırın basıncının uygun bir şekilde belirlenebilmesi için bu yardım sürdürülmelidir. Yanlış yapılan bir hazırlık ve yerleşim atık gaz bölgesi etrafında kolayca buharlaşabilen türlerin aşırı doymuş bir seviyeye gelmesine sebebiyet verebilir. Bu durumda o bölgedeki refrakter malzemede aşırı aşınmaya yol açabilir. [6]

Bunlara ek olarak oksijen kullanımı ayarlanabilir alev karakteristiği , alev çevrim oranı, çoklu yakıt yeteneği, düşük bakım, düşük ses, düşük partikül atık miktarı düşük NO_x ve düşük maliyet imkanları sağlamaktadır. [8]

3.3 Oksijen üretimi yöntemleri

Bu teknolojiye belirleyici kriterlerin başında oksijen üretimi gelmektedir. Oksi-yakıt yanmanın kullanımının gelişmesi oksijen üretimindeki gelişmeyle paralellik arz etmektedir. Bunun sebebi olarak oksijen üretim teknolojisindeki gelişmelerin oksijen maliyetini etkileyecek gelişmelere sebebiyet verecek olmasını söyleyebiliriz. [9]

Temel olarak oksijen üretiminin bugün kimyasal açıdan iki yolu vardır.Bunlar sırası ile;

- Sudan (H_2O) oksijen üretimi,
- Havadan oksijen üretimi.

Oksijen atom numarası 8 ve atom ağırlığı 16 olan doğada gaz olarak bulunan bir element ve aynı zamanda yoğunluğu 1,105 olan renksiz ve kokusuz bir gazdır. Sıvılaştırılması güçtür (1877’de Çailletet ve Pictet tarafından sıvılaştırılmıştır.), çünkü atmosfer basıncında -183°C ’de kaynama ve -218°C ’de de ergime sıcaklığına sahiptir. Sıvı haldeyken mavi renktedir ve paramagnetik özellikler gösterir. Suda az (0°C ’de, litrede 40 cm^3) çözünür. [9]

Oksijen bütün elementler içinde flüordan sonra elektro negatifliği en yüksek olan elementtir. Hemen hemen bütün basit elementler ile birleşir. Oksijen ile birleşmeler genellikle ısı açığa çıktığı için “Yanma “ denir. Bu yanma şartlara göre hızlı veya yavaş olabilir. Halojen ve Azot dışında bütün A metaller özellikle hidrojen, kükürt, fosfor ve karbon oksijen içinde ve havada yanabilir. Bu yanmalarda oksijen sayesinde su (H_2O), kükürt dioksit (SO_2), fosfor pentaoksit (P_2O_5) ve karbon dioksit (CO_2) gibi yanma sıcaklığında çok kararlı olan bileşikler meydana gelir. Sanayide oksijen, azot ile birlikte sıvı ayrımsal damıtılması ile hazırlanır. Azot henüz gaz halindeyken oksijen sıvı halde elde edilir. Oksijen aynı zamanda sudan bir hidroksit çözeltisinin elektrolizi ile üretilir; hidrojen katotta açığa çıkarken oksijen anotta toplanır. 120 atmosfer basınç altında, çelik tüplerde, gaz halinde saklanır. [9]

Oksi-yakıt teknolojisinde kullanılan bu üretim yöntemleri içerisinde ana üretim amacı oksijen elde etmek olan teknolojiler kullanılmaktadır. Suden elektroliz ile oksijen üretiminde ana ürün oksijen değil hidrojendir. Cam endüstrisinde kullanılabilecek nitelikte oksijen üretim teknikleri sırası ile:

- Likit oksijen üretimi,
- Atmosfer basıncı ile üretim,
- Vakum altında adsorblama tekniği ile üretim,
- Geliştirilmiş cryogenic tekniği ile üretim,
- Hava ayırma sistemi ile üretimidir.

Bu üretim teknikleri, günlük üretim miktarlarına bağlı olarak sanayi tarafından tercih edilmektedir. [9]

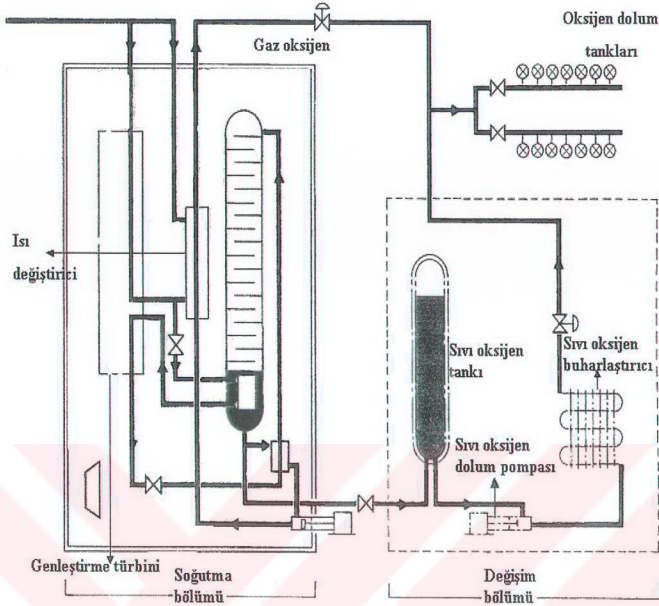
3.3.1 Likit oksijen üretim tekniği

Likit oksijen hava ayırma ünitesi içinde damıtma tekniği ile üretilmektedir. Bu teknik yüz yılın sonlarına doğru geliştirilmiştir ve hava içinde yer alan değerli gazlar havadan ayrılmaktadır. Bu ayırıştırma işlemi yapılırken önemli kriter; hava içinde yer alan ve elde edilmek istenilen gazların farklı yoğunlaşma sıcaklıklarının olmasıdır. Hava ayırma sistemi içine çekilen hava burada tanklar içinde gazların yoğunlaşma sıcaklıklarına kadar soğutulmaktadır. Bu aşırı soğutma işlemine verilen ad “cryogenic”dir. Bu işlem ile elde edilen gazların yoğunlukları ve yoğunlaşma sıcaklıkları aşağıdaki tabloda ve üretim akış şemasıda şekil3.3’de verilmektedir. [9]

Tablo 3.1: Havanın içinde yer alan gazların yoğunlukları ve yoğunlaşma (kaynama) noktaları. [45]

Gazlar	Yoğunluk (gr / cm ³)	Yoğunlaşma sıcaklığı (°C)
Azot (N ₂)	0,97	- 195
Oksijen (O ₂)	1,105	- 183
Argon (Ar ₂)	1,38	- 187
Karbon di oksit (CO ₂)	1,52	(36 atm. basınç) 0
Neon (Ne ₂)	0,7	- 246
Kripton (Kr ₂)	2,81	- 152
Ksenon (Xe ₂)	4,5	- 109

Tablodaki yoğunlaşma sıcaklıklarına sırası ile soğutulan hava içerisindeki gazlar sıvı halde sistemden çekilerek tanklara taşınır. Burada elde edilen gazlardan biri olan oksijen, tüketicinin ihtiyacına uygun bir şekilde gaz veya sıvı olarak tüketiciye ulaştırılır. [9]



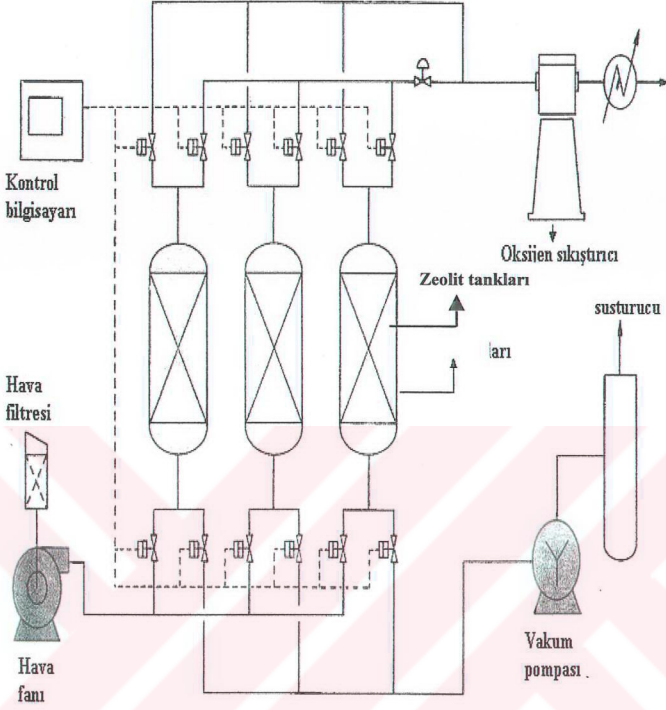
Şekil 3.3: Sıvı oksijen üretim tesisi akış çizelgesi. [10]

3.3.2 Atmosfer basıncı ile üretim

Bu teknik diğer üretim teknikleri içerisinde en ucuz ilk yatırım maliyetine ve en düşük bakım gereksinimine sahiptir. Bu teknik sayesinde günde 20 ton oksijen üretilmektedir. [9]

Bu üretim tekniğinde “Zeolit” diye isimlendirilen bir adsorbent kullanılmaktadır. Zeolit silisyum ile alüminanın çeşitli oranlarda karışımlarından elde edilen bir bileşik malzemedir. [9]

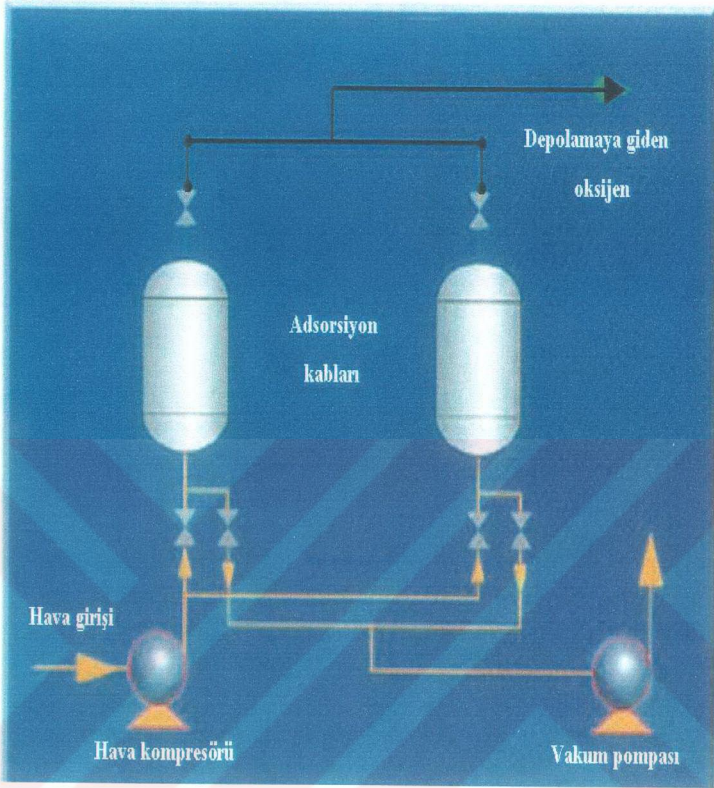
Bu sistemde hava hızlı bir şekilde zeolit içerisinden geçirilir bu şekilde zeolit molekülleri azotu tutarak havanın içerisinden çekerler. Sistemde kullanılan zeolit geçirilen havanın ters verilmesi ile içinde tuttuğu azotu atmosfere salar. Bu şekilde zeolit tekrar kullanıma hazır hale gelir. Güvenlik ve verim nedeniyle bu üretim 1 ile 1,4 bar basınç aralığında yapılmaktadır. Şekil 3.4’de bir basınç ile üretim tesisinin örneği görülmektedir. [10]



Şekil 3.4: Atmosfer basıncı ile oksijen üretim tesisi akış çizelgesi. [11]

3.3.3 Vakum altında adsorblama

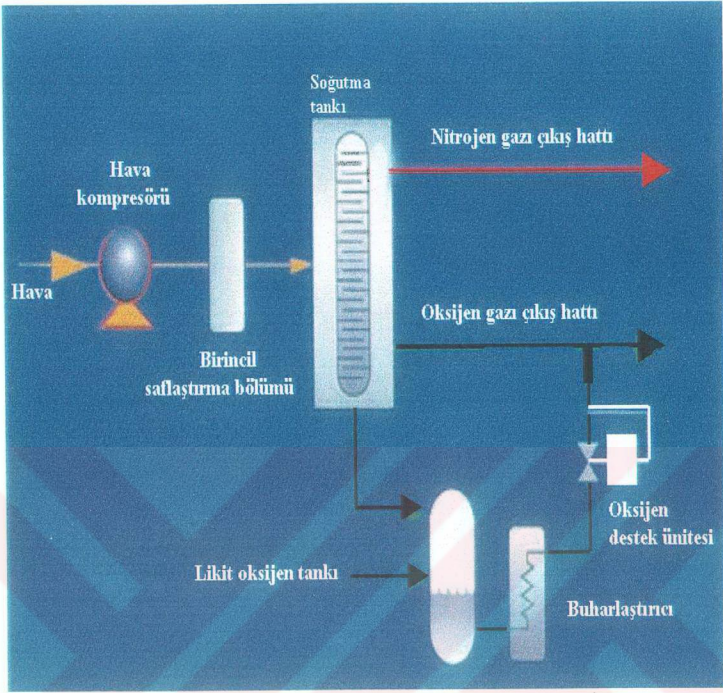
Bu sistem günlük 20 tonun altındaki ihtiyaç oranlarından, 100 tonun üzerindeki ihtiyaçlara kadar karşılayabilecek yapıya sahip sistemlerdir. Vakum tekniği ile üretimde basınç ile üretim tekniğinde olduğu gibi zeolit adsorbent kullanılmaktadır. Zeolit sayesinde azot, karbon dioksit ve su, sıkıştırılmış hava akışı içinden çekilmektedir. Şekil 3.5’de görülen vakum altında adsorblama sisteminde vakum ve ayırma sistemi bütünleştirilerek eleme işleminin daha verimli olması sağlanmıştır. Diğer sistemlere göre kurulumu daha kolaydır. Kurulumu için oldukça az yere ihtiyaç duymaktadır. Bu sistem ile orta boy firmaların oksijen ihtiyacı yeterli bir şekilde karşılanabilmektedir. [9]



Şekil 3.5: Vakum altında adsorblama sistemi akış diyagramı. [12]

3.3.4 Geliştirilmiş cryogenic oksijen üretim tekniği

Bu üretim tekniği ile günde 70 ile 200 ton arası yüksek saflıkta oksijen üretilmektedir. Bu sistemde nemi alınmış havadan oksijen gazı üretmek için gelişmiş cryogenic teknoloji kullanılmaktadır. Cryogenic sistemde havadan içerdiği gazları ayırmak için ; birinci olarak hava sıkıştırılır. İkinci adımda saflaştırma amacıyla damıtma işlemi yapılır. Son adımda sistemden damıtılan gazlar birbirinden ayrılarak depolanır. Bu teknoloji sayesinde % 90 ile % 98 saflıkta oksijen üretilmektedir. Üretim kapasitesi bakımından orta boyutlu bir oksi-yakıt fırının oksijen ihtiyacını karşılayabilecek miktarda üretim yapılabilir. [9]



Şekil 3.6: Geliştirilmiş cryogenic oksijen üretim tesisi. [12]

3.3.5 Hava ayırma ünitesi

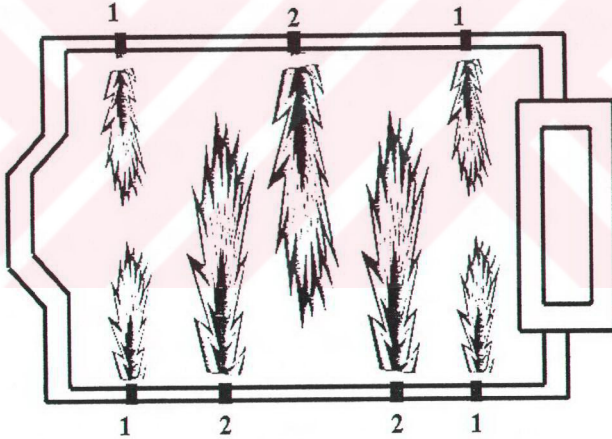
Yüksek kapasitede cam üretimi yapan fabrikaların günde 200 ton'dan fazla oksijene ihtiyaç duymaktadır. Bu sistemde geleneksel anlamda cryogenic sistem kullanılmaktadır. Bu sistemin farkı üretim bakımından diğer üretim tekniklerine göre daha büyük bir üretim kapasitesine sahip olmasıdır. Bu tesisler genellikle cam üreticilerinin yoğun olduğu bölgelere kurulmaktadır. Bu sayede fabrikalara boru hatları vasıtasıyla oksijen iletimi yapılabilmektedir.

Bu uygulama fabrikalara oksijeni gaz halinde aktarmaya imkan tanıdığından ve aynı zamanda gazı taşıma amacıyla sıvılaştırılmasına gerek olmadığından maliyet açısından da uygun bir üretim ve tüketim metodudur. [9]

3.4 Fırın tasarımı

Fırın tasarımı konusunda önemli olan 4 belirleyici özellik vardır. Bunlar: fırının fiziksel boyutları, fırın yapımında kullanılacak refrakterlerin seçimi, beklerin ve atık gazlarının konumlarıdır. Fırının boyutlarında beklenen üretim kapasitesi yanında yine çeşitli faktörlere bağlıdır. Kullanılacak beklerin büyüklüğü ve tipi, fırın yapımı için ayrılan alan ve malzeme. Örneğin; eğer mevcut fiziksel alan sınırlıysa daha yüksek kaliteli refrakter kullanılarak daha dar bir fırın yapılabilir. [1]

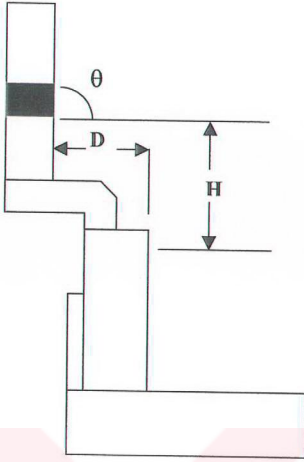
Beklerin tasarımı; Cam-harman yüzeyi ile yanma ürünlerinin etkileşimini ve ısı transferini etkileyen; Oluşan alevin parlaklığı, şekli, momentumu, harman örtüsü veya cam yüzeyine yakınlığı yönünden önemlidir. Fırın arkadan veya yandan ateşlemeli olabilir. Yandan ateşlemeli fırınlarda bekler karşılıklı veya çapraz olabilir.[6]



Şekil 3.7 : Yandan ateşlemeli bir oksijen-yakıt fırınındaki bek yerleşimi.

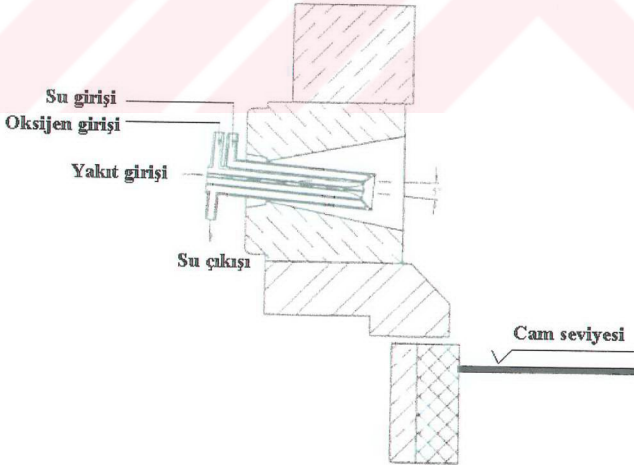
- 1 no'lu bekler yuvarlak alevli karşılıklı,
- 2 no'lu bekler düz alevli çapraz.[6]

Beklerin konumlandırılması ile ilgili diğer önemli etkiler, şematik olarak şekil 3.8'de gösterilmiştir. Beklerin cam seviyesinden yüksekliği (H) 40-50 cm. , yan duvar cephesinden uzaklığı (D) ise 30 cm.ye kadar olabilir. [1]



Şekil 3.8: Beklerin konumlandırılması ile ilgili parametreler. [1]

Beklerde önemli olan bir diğer unsurda bekin yapısıdır. Ayrıca şekil 3.9'da görüldüğü gibi bekin cam yüzeyine karşı duruş açısı da ısınmın cam yüzeyine iletiminde oldukça önemlidir. Bu şekilde bekin cam yüzeyine bakış açısı 5° dir. [13]



Şekil 3.9: Tipik bir oksi-yakıt beki tasarımı. [13]

Pratikte yaygın olarak iki tip oksijen-yakıt beki kullanılmaktadır. bunlar konik veya silindirik şeklinde olabileceği gibi balık kuyruğu diye tabir edilen yassı şekilde de olabilmektedir. Bek seçiminde: alev uzunluğu, kısalabilme oranı, kullanım kolaylığı ve arzu edilen alev biçimini sağlayabilme gibi kontrol kriterleri önemlidir. Oksijen-yakıt bir TV camı fırınında mevcut tüp tipi beklerin, kademeli yanma sağlayarak korum oluşumunu arttırmak sureti ile alevin parlaklığını geliştiren ve düşük momentumlu alev sağlayan, yayvan alevli beklerle değiştirilmesi ile fırın performansında çok önemli gelişmeler sağlanabilmektedir. [1]

Bekler kadar bek bloğunun seçiminde de itina gereklidir. Blok malzemesinin öncelikle iletilecek camın türüne, çalışma sıcaklığına ve kullanılacak yakıtın cinsine uygun olması gerekir. Fuel-oil kullanıldığı zaman bek bloğu olarak genellikle dengelenmiş zirkonya kullanılır. Yakıtın doğal gaz olması durumunda ise bağlı AZS veya iletme döküm Mullit kullanılmaktadır. [1]

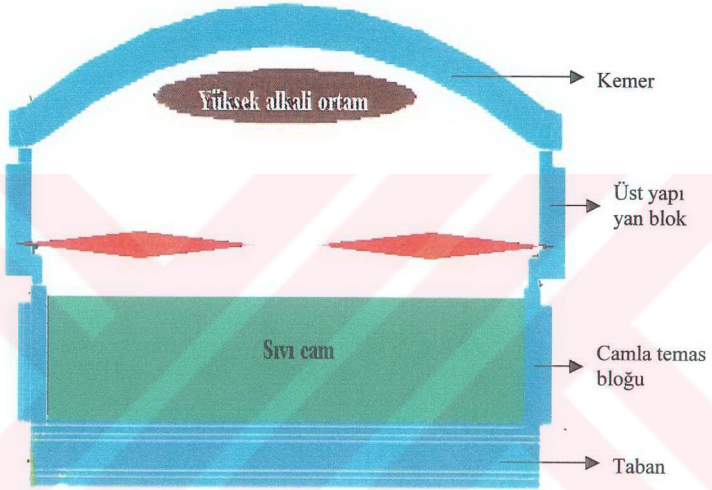
Atık gaz çıkışlarının konumu, bir maliyet unsuru olduğu kadar, fırın basıncının kontrolü içinde önemlidir. Ayrıca, ekzost sistemi içine harmandan fiziksel taşımayı da etkiler. Arkadan tek bir gaz çıkışı, minimum maliyetle iyi bir basınç kontrolü sağlarken, besleme hücresinin fırının yan cephesinde olma zorunluluğu vardır. Gaz çıkışlarının yanlarda olması durumunda ise, fırının arkadan beslenmesi mümkünken, fırın yanları arasında basınç dengesizliği söz konusu olabilir maliyeti de daha yüksektir. [1]

3.5 Refrakter seçimi

Refrakter seçiminde en önemli olan kriterler; Fırının büyüklüğü, tipi, iletilecek cam ile kullanılan yakıtın türüdür. Oksijen – yakıt yanmalı fırın teknolojisinde kullanılan refrakterlerin hava – yakıt karışımını kullanan fırınlardaki refrakterler ile kemer kısmında kalan refrakterler haricinde çok büyük farkları yoktur. Kemer kısmında kullanılan refrakterlerde fırın atmosferinde oluşan Şekil 3.10’da görüldüğü gibi aşırı alkali ortamdaki ötürü hava-yakıt yanmalı fırınlara göre farklı refrakterler kullanılmaktadır. [14]

Geleneksel soda-kireç camı üretim fırınlarının üst yapısında genellikle silika esaslı refrakterler kullanılmaktadır. Endüstri tarafından özel camlar diye isimlendirilen,

cam türlerinin (E camı, sodyum silikat, kurşunlu cam vb.) üretimini sağlayan fırınlarda ise ergitme döküm AZS, ergitme Mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ve zirkonyum silikat (ZrSiO_4) gibi diğer üst yapı refrakterleri kullanılmaktadır. Silika, korozyondan dolayı, üst yapı refrakteri olarak her zaman kullanılmamaktadır. Oksi-yakıt yanmanın pratiği ve yapılan araştırmalar, oksi-yakıt yanmalı fırınlarda silika çatıların çok daha hızlı aşındığını göstermektedir. [15]



Şekil 3.10: Oksi-yakıt cam fırını atmosferindeki alkali gaz dağılımı.

Silikanın ve bazı üst yapı refrakterlerin kimyasal ve mineralojik bileşimleri Tablo 3.2 de verilmektedir. [15]

Yanma boyunca Tablo 3.2’de verilen kimyasal ve mineralojik özellikler ile fiziksel hal, değişikliğe uğrayabilir. Bu durum özellikle sıcak kenarlarda (yanma odası) meydana gelmektedir. SiO_2 ’nin kristal yapısı, refrakter tuğlanın sıcaklığına ve alkalilerin durumuna bağlı olarak, kristobalite ve tridimite dönüşür. $1000 - 1470\text{ }^\circ\text{C}$ aralığında tiridimit kararlı bir faz yapısına sahiptir. $1470\text{ }^\circ\text{C}$ ’nin üzerinde tiridimit kristobalite dönüşür. Bu dönüşümler yanma boyunca refrakter tuğlanın derinliği içinde sıcak yüzeyden soğuk yüzeye doğru bir gelişim arz edecektir. [15]

Tablo 3.2: Üst yapı refrakterlerin tipik kimyasal ve mineralojik bileşim oranları. [15]

Refrakter türleri Kimyasal bileşim (%)	Silika	Ergitme döküm AZS	Zirkon	Ergitme Mullit
SiO ₂	96	16 / 13	33-34	20-25
Al ₂ O ₃	0,5	50 / 45		70-75
ZrO ₂		33 / 40	64-66	
CaO	2,5-3			
Na ₂ O+K ₂ O	0,1-0,2	1		
Diğer (Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ , MgO)	0,2-0,8	0,2	< 2	< 1
Mineralojik bileşim (%)				
	45 Kristobalit	32-40 Badeleyit	95 Zirkon	94 Mullit
	50 Tridimit	47-42 Korundum	< 5 Camsı faz	3 Korundum
	< 3 Camsı faz	21-17 Camsı faz		

Tablo 3.3'de görüldüğü gibi alkali ve su buharının oksijen-yakıt fırınlarında var olması ve geleneksel hava-yakıt yanmalı fırınlara göre çok daha zengin olması sistemdeki refrakterleri etkileyen başlıca unsurdur. Benzer bir durum alkali bora silikat, cam yünü, ve kurşunlu cam ergitilen fırınlarda HBO ve PbO buharları ve diğer uçucu bileşenlerin konsantrasyonları için de söz konusudur. [15]

Tablo 3.3: Oksi-yakıt ve hava-yakıt yanmalı soda kireç camı fırınlarının sıcak nokta bölgesinde ölçülmüş tipik yanma gazı bileşenleri. [1]

Bileşen	Oksi-yakıt fırın (% Hacim)	Hava-yakıt (% Hacim)
N ₂	13	68
H ₂ O	52 - 56	18
O ₂	2 - 4	2
CO ₂	31	12
NaOH	200 - 220 ppm.	60 ppm.

Yüksek alkali konsantrasyonu, silika kemer ile tepkimeye girerek çeşitli alkali silikat camı fazların oluşması ile silika tuğlaların korozyonunu hızlandırır. Ortamdaki su buharı ise camı fazların viskozitesini düşürerek alkalilerin etkisini artırır. Ayrıca, kemerden akan alkali silikatların etkisi ile yan duvarlardaki aşınmanın da hızlanması mümkündür. Oksi-yakıt fırınlarında, fırın atmosferindeki yüksek su buharı oranının, aynı zamanda tanktaki camında viskozitesini düşürerek; camın özelliklerini de etkilemesi olasıdır.[15]

Yoğun alkali konsantrasyonu sonucu silika yapıda iki temel etki söz konusudur; İlk olarak sıcak tuğla yüzeyindeki korozyonunun artması ve ikinci olarak da alkali buharlarının yapı içine sızıp yoğunlaşması ile “fare deliği” oluşumu. Sıcak yüzey korozyonu sıcaklığa ve bilhassa alkali konsantrasyonuna bağlıdır. Bu nedenle oksi yakıt fırınlarında silika tuğlaların kullanımının, tankın boğaz tarafı ve ekzost çıkışının ön tarafı gibi alkali konsantrasyonunun nispeten düşük olduğu kısımlarla sınırlı tutulması daha uygun olabilir. Silika çatının sıcak yüzey korozyonunu azaltmanın bir diğer yoluda çatıya yakın kısımlarda alkali konsantrasyonunun düşürülmesidir. Bu konuda beklerin ve çatının sıvı cam yüzeyi ile olan mesafesi önemli parametrelerdir.[16]

Sıcak yüzey korozyonu sonucu çatıdan akan alkalice zengin silika, göğüs duvarlarındaki AZS malzemeleri etkileyerek, cam da taş oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle çatıdan akan silikanın göğüs duvarlarına ulaşmasının önlenmesinde yarar vardır. Bunun için “Damlama Pervazı” kullanılmaktadır.Yalnız bu durumda, kemer destek yastığı ile damlama pervazı arasındaki bölgeden göğüs duvarlarına silika akması olmaması için bu bölgede silika tuğla kullanılmamaktadır. Bunun yerine tampon olarak poroziteli, ısı şok dayanımı yüksek zirkon malzeme (örneğin: zirkon 20) kullanılabilir.[1]

Alkali etkisi ile çatıda oluşabilecek diğer hasar “fare deliği” oluşumudur. Bu, zengin alkali buharlarının, silika çatının sıcaklığının buharların yoğunlaşma sıcaklığının altında olduğu bölgelere sızıp yoğunlaşması sonucu oluşur. Bu yoğunlaşmalar silika için çok koroziftir. Bunu önlemek için silika tuğlaların soğuk yüzey sıcaklıklarının hiçbir zaman buharların yoğunlaşma sıcaklığının altına düşmemesi gerekir. Bu nedenle silika çatının ve çevresindeki ısı iletkenliği yüksek malzemelerden yapılmış kısımların iyi izole edilmeleri şarttır. Ayrıca çatı soğuk silika yüzeyinin sıcaklığı

yoğunlaşma sıcaklığının altına düşmeyecek ve buharlar izolasyon tuğlalarına işlemeyecek şekilde tasarlanmış olmalıdır. Bu konuda aşağıdaki hususların göz önünde bulundurulmasında yarar vardır. [1]

- Daha büyük kemer tuğlaları ile ek yerlerinin sayısının azaltılması.
- Tuğlaların boyutsal toleranslarının sıkı kontrol edilmesi (maksimum sapma 1 mm.).
- Kemer örülümünün tuğlalara iyi yapışan, plastisitesi yüksek silika harçlar ile yapılması.
- Zararlı buharların izolasyon ateş tuğlasına ulaşmasını önlemek için, bunlardan önce iyi bir sızdırmazlık malzemesi uygulaması. Bu amaçla zirkon esaslı bir harç kullanıla bilinir. Bu sızdırmazlık yanında silika ile alüminalı ateş tuğlası arasında bir tampon işlevi de görür.

İzolasyon için izolasyon ateş tuğlası, silika izolasyon tuğlasından daha etkindir. Örneğin : 457,2 mm.lik bir silika kemerde 152,4 mm.lik silika izolasyon yerine 152,4 mm.lik izolasyon ateş tuğlası kullanılması ısı kaybında % 40 dan daha fazla bir azalma sağlar. Yalnız önemli bir husus; silika malzemenin alüminalı malzeme ile yanyana gelmemesi, gelse bile ara yüzey sıcaklığının hiçbir zaman silika-alümina tepkime sıcaklığına ulaşmaması gereğine dikkat edilmesidir. [1]

Oksi-yakıt fırınlarında silika çatı uygulaması ile ilgili araştırmalar sınırlı da olsa , bu fırınlarda çatı malzemesi olarak silika yerine, camsı faz içeriği düşük ergitme döküm AZS veya alümina (α - β ve β), bilhassa β alümina malzemelerin kullanılmasının daha uygun olabileceğini göstermektedir. [17]

Soda kireç camı fırınlarında, gerek camda ergitme-döküm AZS malzemelerden camsı fazın kusulmasından kaynaklanabilecek kalite sorunlarını, gerekse baca gazları ile taşınabilecek harmanın alümina malzemeleri olumsuz etkilemesini önlemek için, fırının arka kısmında ergitme-döküm AZS malzemelerin ön bölümlerinde ise alümina malzemelerin kullanılması uygun olabilir. Ergitme-döküm malzemelerin kullanımı ile ilgili en önemli sorun maliyetlerinin çok yüksek olmasıdır. Aynı malzemelerin bağlı tiplerinin (örneğin; ergitme AZS, mullit ve alümina), ergitme döküm malzemeler kadar olmasa da, kemer malzemesi olarak silikadan daha uygun olabilecekleri tespit edilmiştir. [16]

Oksi-yakıt fırınlarında çatı malzemesi olarak silika ve alternatif malzemeler üzerine yaptıkları araştırma sonucu alkali ve silikaca zengin fırın atmosferinin silika ve AZS malzemeleri olumsuz etkilediğini α - β alumina refrakterlerde ise sadece sıcak yüzeyin α aluminaya dönüşmesine neden olduğunu tespit etmişlerdir. [17]

Her ne kadar normal ve oksi-yakıt fırınlar arasında fırın atmosferi ve çalışma koşulları yönünden yukarıda işaret edilen farklar varsada özellikle oksi-yakıt soda-kireç cam fırını kemerlerde, kemer yapımında gerekli itina gösterilmek koşulu ile silika tuğlaların kullanılmasında bir sorun olmayacağını belirtmektedir. Bu konuda en önemli hususun yapının sızdırmazlığı olduğunu vurgulayarak, silika tuğlaların soğuk yüzey sıcaklığının hiçbir zaman korozif buharların yoğunlaşma sıcaklığının (örneğin; Na_2SO_4 için $788 - 954$ °C) altına düşmemesi ve buharların izolasyon tabakasına ulaşmaması koşuluna işaret etmektedir. Bunun için, silika kemer tuğlası ile izolasyon tabakası arasına bir sızdırmazlık tabakası uygulanması gerektiğini vurgulayarak, bu amaçla zirkon veya silika monolitik malzemelerin kullanılabileceğini belirtmektedir. Silika malzeme silika tuğlaya daha iyi bağlanacağı için tercih edilmelidir. Silika için, bu sızdırmazlık tabakasının en az 7,62 cm. olması gerektiğine işaret ettikten sonra iyi bir sızdırmazlık tabakasının şu hususları sağlaması gerektiği belirtilmektedir[1]:

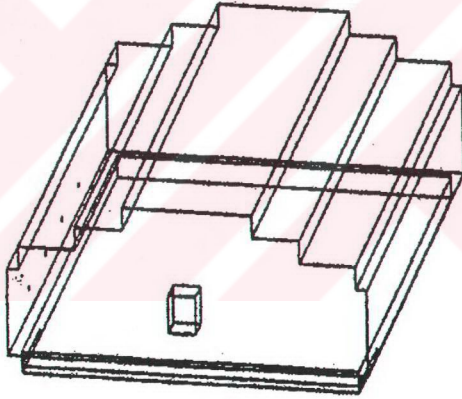
- Sızdırmazlık malzemesi, hem kemer hem de yalıtım malzemesi ile uyumlu olmalıdır, hiç biri ile tepkimeye girmemelidir.
- Kemere bağlanmalı ve ara yüzeyde herhangi bir ayrılmaya müsaade etmemelidir.
- Kemerin kısmen tamamı ile bozulması gibi durumlarda sıcak yüzey işleri görebilmelidir.
- Genleşme ve ek yerleri ve kemer destek yastıkları dahil bütün kemer üzerinde tek parça bir tabaka oluşturmalıdır.

3.6 Oksijen-yakıt kullanan fırınlarda modellemenin geometrik şartları

Cam fırınlarının matematiksel modelleme tekniği oksi-yakıt teknolojisinin gelişmesinde önemli katkılarda bulunmuştur. Bu sayede bir çok fırın tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu teknoloji için kullanılan teknik CFD (bilgisayar destekli akışkan dinamiği çözümü) modelleme çeşididir. Bu modelleme tekniğinde

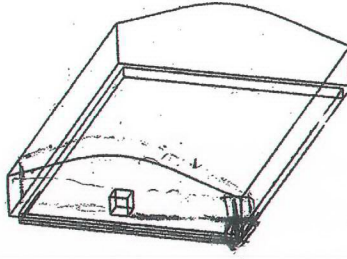
kullanılan programlar arasından ANSYS, FLUENT, ATHENA, NASTRAN gibi programları birer örnek olarak verebiliriz. Bu programlar sayesinde cam ergitme fırını yanma boşluğunda gaz akışı, yanma ve ısı modelleme yapılabilmektedir.

Bu yanma boşluğunda meydana gelen olayların karmaşıklığından dolayı matematiksel modelleme uygulanmaktadır. Fırın atmosferinde gerçekleşen etkilerin modellenmesi ve buna ek olarak yanma reaksiyonları ile kimyasal reaksiyonlar sayesinde modelin geliştirilerek çözüm adımlarına geçilebilmesi kolaylaşmaktadır. Bu tarz uygulamalar yıllar süren çalışmalar mertebesinde geliştirilmiştir. Elde edilen bu tecrübeler sayesinde bir çok geometrik model simule edilebilmiştir. Bir oksî-yakıt cam fırını için geliştirilmiş bir kemer dizaynı Şekil 3.11’de görülebilmektedir. [18]



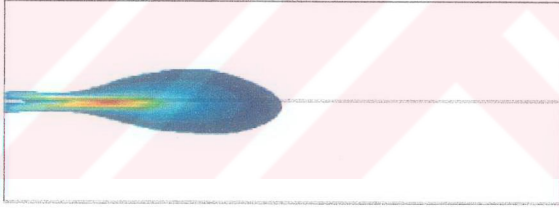
Şekil 3.11: Fırın kemer modeli. [18]

Bu modelde geometrik bir yaklaşım ortaya konularak bilgisayarda, uygulama esnasında karşılaşılabilecek problemlere karşın çözümler geliştirilip bunlardan hangisinin en uygun olduğuna karar verilebilmektedir. Şekil 3.12’de görülen ise bir BFC (uygun yapı koordinasyonu) modelidir. Burada ortaya konulan modelden elde edilen sonuçlar sayesinde kemer şekli en uygun hale getirile bilinmiştir. [18]

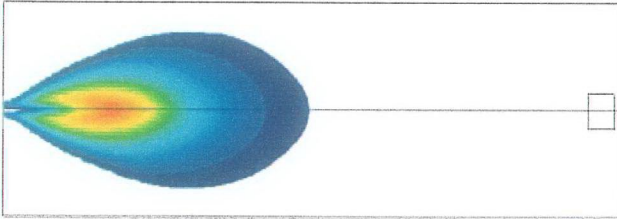


Şekil 3.12: Uygun yapı koordinasyonu modeli. [18]

Bunlar haricinde cam fırınları için hazırlanan modeller sayesinde daha öncede anlatıldığı gibi fırın içinde alevin (Şekil 3.13 ve 3.14) ve onun verdiği ısının modellenmeside mümkündür. Bu sayede en düzgün yanma şekli belirlenebilmekte ve ayrıca alevin miktarı ile şekline de karar verilebilmektedir. Yapılan bu çalışmalar sayesinde fırına verilen yakıt miktarından tasarruf sağlanması bu çalışmaların ne denli yararlı olduğunu da kanıtlar niteliktedir.



Şekil 3.13: Modellenmiş bir alevin yandan görünüşü. [19]



Şekil 3.14 : Modellenmiş bir alevin üstten görünüşü. [19]

Bu çalışmalar haricinde fırın içerisinde meydana gelen hasarların yani fırın içi ortam neticesinde refrakter yüzeylerde meydana gelen aşınma davranışları ve bunlara etki eden unsurların (ısı yayılımı, sıvı camın akış hareketi v.b.) modellenmesi fırın teknolojisinin ve özellikle refrakter teknolojinin ilerlemesine oldukça büyük katkılar yapmaktadır. Bu sayede fırın ömürlerinde artışlar sağlanabilmektedir. Bu modellerle bir örnek verecek olursak: gerek oksit-yakıt fırınlarında gerekse diğer geleneksel yanmalı fırınlarında ortak sorun sıvı cam seviyesinde fırın refrakter astarında meydana gelen aşınma durumudur. Bu duruma etki eden en önemli parametre sıvı cam içinde meydana gelen sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan konveksiyon akımları ile fırın içerisindeki ısı iletimi sonucu meydana çıkan iç gerilmelerdir. Bu durumun modellenmesi sayesinde fırınlarında bu durumu yaratan ana sebepler bilgisayar ortamında görülerek bunlara karşı alınabilecek önlemlerde burada denenebilmektedir. Bu sayede fırın dizaynları iyileştirilebilmekte ve daha uzun ömürlü olabilmektedir. [18]

Sonuç olarak cam endüstrisinde yapılan modelleme çalışmaları sektörü ve dolayısıyla da cam üretimini ilerilere taşımaktadır. Bu yararla beraber, cam kalitesinde artışlar ve hiç denenmemiş normalde gerçekleştirilmesi çok büyük masraflar yaratabilecek yeni fırın dizaynları da bu ortamda denenerek bu endüstrinin gelişimi hızlandırılmaktadır. [18]

Bundan sonraki bölümlerde, bu tarz çalışmalara örnek teşkil edebilecek bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, sonlu elemanlar yazılımı olan ansys kullanılarak tipik bir cam ergitme fırınının refrakter astarlarındaki termal dağılımlar ile eriyik cam konveksiyon akımları ortaya konulmaya çalışılmıştır.

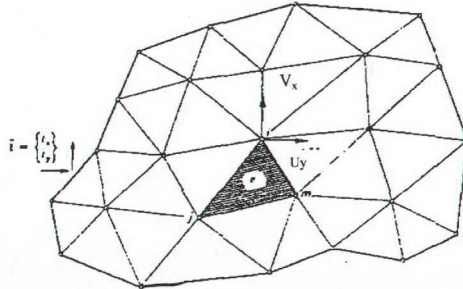
4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ANSYS SONLU ELEMANLAR YAZILIMI

4.1 Sonlu elemanlar yöntemine giriş

Günümüzde gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde mühendislikte karşılaşılan problemlere bir çözüm üretmek amacıyla kullanılan Sonlu Elemanlar Yönteminin (SEY) uygulama alanlarında artış olmuştur. Bu sayede daha gelişmiş çözümler yapabilme olanakları gündeme gelmiştir.[20-21]

Bir Sonlu Elemanlar hesaplaması sırasında, genel olarak aşağıdaki işlem akışı takip edilmektedir:

- 1) İlk olarak analizi yapılacak olan katı modelin geometrik özelliklerinin tanımlanması, sınır şartlarının belirlenmesi ve katı modelin Sonlu Elemanlara bölünmesi gerekmektedir,
- 2) Elemanlar, her elemanın sınırında bulunan düğümlerle (node) birbirlerine zincirleme şeklinde ve sonlu sayıda olacak şekilde bağlantılı olmalıdırlar. Şekil 4-1'de bu durum, şematik olarak görülmektedir. Buradaki Düğüm Noktalarının Yer değiştirmesi (nodal displacements), hesaplamaların bilinmeyen değişkenlerin! oluşturmaktadır ve problemin cinsine göre; sıcaklık, basınç gibi fiziksel büyüklükleri ifade etmektedir. [21]



Şekil 4.1: İki boyutlu gerilme-şekil değiştirme durumu. [21]

- 3) Dügüm noktalarının yer değiştirmesine bağımlı olarak, elemanların yer değiştirmesini ifade edebilecek bir fonksiyon seçilmelidir. Buna, şekil Fonksiyonu (form function) ve ya İnterpolasyon Fonksiyonu (interpolation function) adı verilmektedir.
- 4) Toplam potansiyel enerjinin minimizasyonu baz alınarak, her eleman için rijitlik matrisi, hesap yoluyla belirlenmektedir. Modeli oluşturan malzeme ya da malzemelerin fiziksel özelliklerine uygun olarak seçilecek malzeme özellik ve davranışlarının belirlenmesiyle (örneğin; lineer-elastik, elasto-plastik v.b.) beraber her bir elemanın gerilme-şekil değiştirme bağıntısı tanımlanmaktadır.
- 5) Problemin durumuna ve özelliklerine uygun eleman tipi (2-boyutlu ve ya 3-boyutlu, kabuk, plaka v.b.) seçilmelidir.
- 6) Belirlenen bu veriler ışığında, aşağıda basite indirgenmiş olarak verilen denklem sistemi kullanılarak, hesaplamalar gerçekleştirilmektedir:

$$\{f\}=[K]\{a\} \quad 4.1$$

- 7) Burada; $[K]$, Rijitlik Matrisi, $\{a\}$, Dügüm Noktası Bilinmeyenleri (yer değiştirme, sıcaklık vb.), ve $\{f\}$ ise, Yük Vektörünü ifade etmektedir.
- 8) Gerilme ve şekil değiştirme gibi ikincil sonuçlar hesaplatılarak, işleme devam edilmektedir.
- 9) Elde edilen sonuçlar, grafik ortamda sergilenmekte ve doğruluğu, sebep-sonuç ilişkisine dayandırılarak, sınanmaktadır. [21]

Buraya kadar anlatılanlar oldukça öz olarak işlem adımlarını tanımlamaktadır. Sonraki bölümlerde, bu işlem adımları, daha geniş olarak açıklanmaya çalışılacaktır. Bu kapsamda; malzemede ısı iletimi, sıvının bir kab veya boru içersindeki davranışları ve bunların SEY açısından değerlendirilmesi konuları ele alınmaktadır.

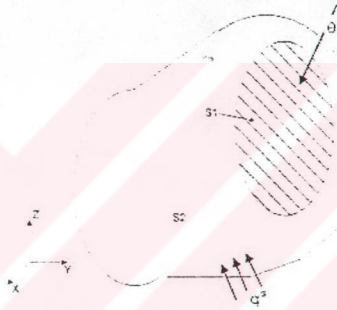
4.2 Isı iletimi problemleri ve SEY'e uyarlanması

Isı iletimi ve kapsamı İçine giren problemlerin fiziksel sonuçları bakımından birbirine çok benzeyen sıvı iletimi problemleri de dahil, SEY ile çözümü, son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Metalurji endüstrisinde de yüksek sıcaklık prosesleri ve bu proseslere dahil olan sistemlerin termal davranışlarının SEY ile

analizi çalışmaları ve uygulamalarından, verimli sonuçlar elde edilmektedir. Özellikle refrakter malzeme seçimi, kullanımı ve termal, termo-mekanik davranışlarının İncelenebilmesi, önemli tecrübelerin kazanılmasını sağlamıştır. [20]

SEY İle ısı iletkenliği problemlerinin çözümü için konuya, ısı iletkenliğini belirleyen bazı diferansiyel ve bilinmeyen denklemlerin neler olduğunu incelemekle başlamak yerinde olacaktır. [20]

Şekil 4.2'de gösterilen üç boyutlu herhangi bir yapının ısı iletimi hesabı için, Fourier Kuralı'na uygun bir malzeme seçilmiştir. Buna göre;



Şekil 4.2: Üç boyutlu bir katı yapıda ısı iletimi. [20]

$$q_x = -k_x (\partial\theta / \partial x)$$

$$q_y = -k_y (\partial\theta / \partial y)$$

$$q_z = -k_z (\partial\theta / \partial z)$$

4.2

q_x , q_y , q_z herhangi bir yüzeyde taşınmakta olan ısı akımlarıdır, yani Isı Akım Yoğunluğudur. θ , malzemenin sıcaklığıdır. k_x , k_y , k_z ise x, y, z temel eksenlerinin ısı iletim katsayılarıdır. Yapıdaki ısı akımının tanımına göre, birim hacim için üretilmiş ısı miktarı :

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial\theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial\theta}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial\theta}{\partial z}) = -q^B \quad 4.3$$

q^B , birim hacime düşen ısı miktarıdır. [20]

Sınır şartı olarak malzemenin yüzeyinde mevcut koşulların belirlenmesi ve tanımlanması gereklidir. [20]

$$\theta|_{s_1} = \theta_e \quad 4.4$$

$$k_n \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right) = q_s \quad 4.5$$

Burada θ_e , dış ortam sıcaklığıdır. Malzeme üzerindeki sıcaklık, çevre sıcaklığı ile aynıdır. Bu, oda sıcaklığı olabildiği gibi, daha yüksek veya düşük sıcaklıklar da olabilir. k_n , malzemenin ısı iletim katsayısıdır. n , yüzey normaline paralel yöndeki katsayıdır. q_s , yapının birim yüzeyine düşen ısı akımı değeridir. Görüldüğü gibi, ısı iletim özelliği dışında, malzemeye yönelik bilgilere gereksinim duyulmamış olması, önemli bir kolaylık sağlamaktadır. Eğer harekete başlamış bir ısı akımı içinde, ısı iletimi hesaplanacaksa, bu durumda eşitlik 4.2'deki ortalama konvektif ısı iletimini ifade eden terim dikkate alınmalıdır. Bu terim, simetrik olmayan sabit bir matrisi tanımlamaktadır. Sayısal çözüm sırasında meydana gelebilecek kararsız durumlardan kaçınmak için, özellikle ısı iletimine olabildiğince dikkat edilmelidir. [20]

Isı iletiminin, gerilme-şekil değiştirme durumundan ayrı tutularak hesaplanması, yapısal bir çok malzeme için geçerli olabilse de, tümü için geçerli olamamaktadır. Örneğin; metallerin şekil değiştirme hesaplamaları, buna iyi bir örnek oluşturmaktadır. Zira metallerdeki faz dönüşümleri ve sadece termal davranışları değil, aynı zamanda mekanik davranışları da içermekte, böylece termo-mekanik etkiler söz konusu olmakta ve malzemenin mekanik özelliklerinin de dikkate alınması gereği doğmaktadır. Bundan sonraki bölümde, sıcaklığa bağlı malzeme parametreleri ve özelliklerinin dikkate alındığı durum incelenmeye çalışılacaktır. [21]

Isı iletimi hesaplamalarında, bir takım farklı sınır şartları bulunmaktadır. Bunlar;

1. Sıcaklıkla ilgili sınır şartları: Eşitlik 4.4'de S_1 olarak tanımlanmış belirli bir yüzey ya da noktalardaki sıcaklıklar örnek olarak tanımlanabilir.

2. Isı iletim şartları: Belirli bir yüzey ya da noktalarda mevcut ısı akımı şeklinde ifade edilebilir. Eşitlik 4.5'de durum, matematiksel olarak verilmektedir.
3. Konveksiyon sınır şartları: Eşitlik 4.5'de, konvektif şartlara uygun olarak yeniden düzenlenecek olursa:

$$q^s = h(\theta_c - \theta^s) \quad 4.6$$

elde edilir. Burada h , sıcaklığa bağımlı konveksiyon katsayısıdır.

4. Radyasyon sınır şartları: Aynı şekilde Eşitlik 4.5'de bu defa radyasyon şartlarına göre yeniden düzenlenir.

$$q^s = k(\theta_r - \theta^s) \quad 4.7$$

θ_r , dış radyasyon kaynaklarından sisteme ulaşan sıcaklıklardır, k , bir katsayıdır ve şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$k = h_r [(\theta_r^2 + (\theta^s)^2)(\theta_r + \theta^s)] \quad 4.8$$

h_r , değişken bir katsayıdır ve absorbe olan malzemelerin ve radyasyonun yarattığı emisyon ihtiyacını dikkate alan Stefan-Boltzmann sabitleri tarafından belirlenmektedir.

Sıcaklıkla ilgili olarak bu sınır şartlarının yanı sıra, zamana bağlı değişiklikler ve sıcaklığın başlangıçtaki etkileri, hesaplamalarda göz önüne alınması gereken şartlar içinde sayılmalıdır. [20]

4.2.1 Isı iletimi eşitliklerinin SEY ile çözümünde sınıflandırma

Isı iletiminde kullanılan SEY çözümü gerilme hesaplamasında kullanılan çözümle bir çok benzer nokta içermektedir. Hesaplamalarda basitten karmaşığa doğru bir yol izlenmektedir. Bu nedenle ilk olarak, zamana bağlı olmayan (zamanın fonksiyona bir değişken olarak girmedığı durum) hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Bu çözüm, zamana bağlı çözüme göre daha az karmaşık olduğundan daha basittir. Bu sayede

SEY ile çözüm süreci, gruplandırılarak idealize edilmektedir. Gerilme hesaplamalarında, m. eleman için ve “t +Δt” zamanı içinde olay şu şekilde formüle edilmektedir:

$$\begin{aligned} {}^{t+\Delta t}\theta^{(m)} &= H^{(m)} \cdot {}^t\theta \\ {}^{t+\Delta t}\theta^s(m) &= H^s(m) \cdot {}^t\theta \\ {}^{t+\Delta t}\theta^{(m)} &= B^m \cdot {}^t\theta \end{aligned} \quad 4.9$$

m, eleman sıralamasını temsil eden indekstir, ${}^{t+\Delta t}\theta$, t+Δt zamanı içindeki, düğüm noktası sıcaklıkları vektörüdür. [21]

$${}^{t+\Delta t}\theta^T = [{}^{t+\Delta t}\theta_1 + {}^{t+\Delta t}\theta_2 + + {}^{t+\Delta t}\theta_n] \quad 4.10$$

$H^{(m)}$ ve $B^{(m)}$ matrisleri, elemanın sıcaklığı ya da daha açık bir ifadeyle eleman sıcaklığı için interpolasyon matrisleri ve $H^s(m)$ matrisi, yüzey sıcaklığını belirten interpolasyon matrisidir. 4.9 eşitliğinin t+Δt zamanındaki eleman sıcaklığı ve eleman-sıcaklık gradyanının hesaplanmasına ihtiyacı vardır. Bu interpolasyon matrisleri, herhangi bir zaman için sıcaklık durumunun ve sıcaklık gradyanlarının hesaplanmasında da kullanılabilirler. [21]

4.2.1.1 Zamana bağlı olmayan durum

Eşitlik 4.9'un lineer ısı iletimi hesaplamalarında ve SEY çözümünde kullanılabilmesi için aşağıdaki bazı bağıntıların sağlanması gerekmektedir, bu bağıntılarda kullanılan ifadelerden K^k ve K^c , sırasıyla ısı taşınım ve konveksiyon matrisleri olup, şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$(K^k + K^c) {}^{t+\Delta t}\theta = {}^{t+\Delta t}Q + {}^{t+\Delta t}Q^c \quad 4.11$$

burada; ${}^{t+\Delta t}Q$, t+Δt zamanı içinde iki uç arasında taşınmış ısı miktarı ve ${}^{t+\Delta t}Q^c$, t+Δt zamanı içinde iki uç arasında taşınmış konvektif ısı miktarını ifade etmektedir.[21]

$$K^k = \sum_m \int_{V^{(m)}} B^{(m)} k^{(m)} \cdot B^{(m)} \cdot dV^{(m)} \quad 4.12$$

$$K^c = \sum_m \int_{S^c} h^{(m)T} \cdot H^{S(m)T} \cdot H^{S(m)} \cdot dS^{(m)} \quad 4.13$$

$${}^{t+\Delta t}\theta_B = {}^{t+\Delta t}Q_B + {}^{t+\Delta t}Q_S + {}^{t+\Delta t}Q_C \quad 4.14$$

taşınmış düğüm noktası ısı vektörü ve ${}^{t+\Delta t}Q_C$, konsantre olmuş, taşınmış düğüm noktası ısı iletimini temsil eden vektördür. Bağıntı içindeki diğer terimler;

$${}^{t+\Delta t}Q_B = \sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} \cdot {}^{t+\Delta t}q^{B(m)} \cdot dV^{(m)} \quad 4.15$$

$${}^{t+\Delta t}Q_S = \sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} \cdot {}^{t+\Delta t}q^{B(m)} \cdot dV^{(m)} \quad 4.16$$

şeklinde tanımlanmakta olup, $t + \Delta t$ zamanı içinde birim hacimde ve birim yüzeyde taşınmış ısı akımı olarak ifade edilmektedir. [21]

4.2.1.2 Zamana bağlı olan durum

Daha önce kısmen belirtilmiş olduğu gibi, zamana bağlı ısı iletimi hesaplamasında, ısıyı depolama etkisinin, üretilmiş olan ısının bir bölümü olarak, hesaplamaların içine dahil edilmesi gereklidir. Bunun için Euler Denklemi kullanılarak, zamana bağlı olmayan durumu belirleyen eşitliklerin yardımıyla, direkt olarak ısı akımı için gereken denge şartları sağlanabilmektedir. Bu denge örneğin m. eleman için;

$$\theta^m(x, y, z) = H^m(x, y, z) \cdot \theta_{(t)} \quad 4.17$$

$${}^{t+\Delta t}Q_B = \sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} \cdot ({}^{t+\Delta t}Q^{B(m)} - {}^{t+\Delta t}Q^{C(m)} \cdot H^{(m)T+\Delta t}\theta) \cdot dV^{(m)} \quad 4.18$$

şeklinde dir. Burada ${}^{t+\Delta t}q^{B(m)}$ malzeme içinde depolanmış ısıyı tam olarak içerebilmektedir. Zamana bağlı şartlar altında bunu sağlamak ve ısı akım dengesini oluşturabilmek için, lineer hesaplamalar yapılırken sonlu eleman eşitlikleri aşağıdaki

şekilde oluşturulur:

$$C^{t+\Delta t}\theta + (K^k + K^c)^{t+\Delta t}\theta = {}^{t+\Delta t}Q + {}^{t+\Delta t}Q_e \quad 4.19$$

ve lineer olmayan hesaplamalar için ısı depolama etkilerinin lineerleştirilmesine başvurulmadan;

$${}^{t+\Delta t}C^{(i)} \cdot {}^{t+\Delta t}\theta^{(i)} + ({}^tK^k + {}^tK^c + {}^tK^r) \Delta\theta^{(i)} = {}^{t+\Delta t}Q + {}^{t+\Delta t}Q^c(i-1) + {}^{t+\Delta t}Q^r(i-1) + {}^{t+\Delta t}Q^k(i-1) \quad 4.20$$

$$C = \sum_m \int_v H^{(m)T} \cdot C^{(m)} \cdot H^{(m)} dV^{(m)} \quad 4.21$$

$${}^{t+\Delta t}C = \sum_m \int_{v(m)} H^{(m)T} \cdot {}^{t+\Delta t}C^{(m)(i)} \cdot H^{(m)} \cdot dV^{(m)} \quad 4.22$$

gerçekleştirilmektedir. C ve ${}^{t+\Delta t}C^{(i)}$, ısı kapasitesi matrisleridir. [21]

Bütün bu karmaşık gibi gözüken eşitlikler ve hesaplamalar, günümüzde bilgisayar teknolojisindeki gelişimler ve bu gelişme sayesinde ortaya çıkan yazılımlar sayesinde daha kolay uygulanabilir olmuşlardır. Burada verilen ısı denklemleri de, bizim yerimize, bu gelişmiş SEY tabanlı programlar tarafından çözülmektedir.[21]

4.3 Sıvı akışkanlığı ile CFD problemleri ve SEY'e uyarlanması

Sonlu elemanlar yönteminde akış problemleri ısı iletim problemlerinin çözümüne benzer şekillerde çözülebilmektedir. Isı iletimi problemlerinde olduğu gibi akış problemlerinde de Helm Holtz denklemleri kullanılmaktadır. [22]

İçinde bir sıvı bulunduran bir kab veya boruda bu sıvının hareketi sonucu meydana gelen akış hareketini tanımlarken bazı formüller kullanılmaktadır.bu akışın etkisi sonucu meydana gelen basıncı aşağıdaki şekilde formülize edebiliriz. [22]

$$\Delta p = 2 f \rho v_m^2 \frac{L}{D_h} \quad 4.23$$

Bu denklemde “ f “ sürtünme katsayısını, “p” yoğunluğu, “ v_m ” akış hızı, “ L “ borunun veya sıvının bulunduğu kabın uzunluğu, D_h = 4 . alan / hidrolik çap dir. Sonlu elemanlar metodunda sıvının içinde akışı ortaya koyduğu kabın veya borunun sürtünme katsayısı için yatay kesiti ele alındığı zaman sıvı akışı z doğrultusunda olmasına rağmen güç kuvvetleri x ve y doğrultusunda ele alınmaktadır. Buradan

$$0 = \rho A - [\rho + (d_p \Delta z / d_z)] A - \tau_w P \Delta z \quad 4.24$$

veya

$$- d_p / d_z = 4 \tau_w / D_h \quad 4.25$$

denklemleri çıkarılabilmektedir. Burada “τ_w “ duvarlardaki kesme kuvvetidir. Sürtünme faktörü f = (ρ v_m² / 2) olarak tanımlanmaktadır. Reynolds sayısı R_e=v_mD_h/ ν eşitliği ile belirtilmektedir. Burada kullanılan ν kinematik viskozitedir ve ν = μ / ρ ile ifade edilmektedir. Buradan kesin viskozite değeri olan μ çıkarılır ve

$$- d_p / d_z = 2 \mu v_m f R_e / D_h^2 \quad 4.26$$

denkleminde yerine konulur. Bu momentum eşitliğine aşağıdaki eşitlik sayesinde ulaşılmaktadır.[22]

$$\mu [(\partial^2 w / \partial x^2) + (\partial^2 w / \partial y^2)] - (dp / dz) = 0 \quad 4.27$$

Bu denklemde verilen w = w (x , y) vektörü olup z doğrultusundaki akışın hızını temsil etmektedir. Bu denklemden

$$X = x / D_h , Y = y / D_h , W = w / 2 v_m f R_e \quad 4.28$$

Eşitlikleri çıkarılır. Bu eşitliklerden de 4.29’da ki denkleme ulaşılır. [22]

$$(\partial^2 W / \partial X^2) + (\partial^2 W / \partial Y^2) + 1 = 0 \quad 4.29$$

burada içinde sıvıyı barındıran boru veya kabdaki akışın duvarla temas ettiği bölgelerde sınır koşulu olarak doğaldır ki akış hızı sıfırdır ($W = 0$ olma şartında). Eşitlik 4.29 ve $W = 0$ olma şartı denklemlerinin çözümleri sonlu elemanlar yönteminde ısı iletimi çözümleri ile aynı adımlardan oluşmaktadır. [22]

$$W = (\int_A W dA) / (\int_A dA) \quad 4.30$$

İntegral $\int_A W dA$ kolaylıkla elemanların şekil fonksiyonu olarak geliştirilebilir.[22]

$$\begin{aligned} \partial u / \partial t + \partial u^2 / \partial x + \partial uv / \partial y + \partial uw / \partial z = & - - - \partial p / \partial x + gx + v (\partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2 \\ & + \partial^2 u / \partial z^2), \\ \partial v / \partial t + \partial v^2 / \partial y + \partial vu / \partial x + \partial vw / \partial z = & - - - \partial p / \partial y + gy + v (\partial^2 v / \partial x^2 + \partial^2 v / \partial y^2 \\ & + \partial^2 v / \partial z^2), \\ \partial w / \partial t + \partial w^2 / \partial z + \partial wu / \partial x + \partial wv / \partial y = & - - - \partial p / \partial z + gz + v (\partial^2 w / \partial x^2 + \partial^2 w / \partial y^2 \\ & + \partial^2 w / \partial z^2), \end{aligned} \quad 4.31$$

4.31'lu navier stokes denkleminde ise akış ve basınç oranı hesaplanabilmektedir. Bu denklemde x,y,z doğrultuları, u,v, w hızları, p basıncı, g yer çekimini, v ise akışın kinematik viskozitesini temsil etmektedir.

Yukarıda açıklanan fiziksel temellere dayalı olarak, malzemenin çalışma koşulları içinde ortaya çıkan problemlerin çözümü, oldukça karmaşık, uzun ve sayıca hayli yüksek matematik problemlerin çözümüne ihtiyaç göstermektedir. Günümüzde gelişen bilgisayar donanımları, bu hesaplamaların çözümü için geçen süreyi çok aza indirmekte, karmaşık formülasyonların içindeki matematiksel binlerce hesaplamayı, kısa sürelerde çözüme ulaştırmaktadır. Mühendislik hesaplamalarını gerçekleştirebilmek için gelişmiş donanımın yanı sıra, gelişmiş yazılımlarda gerekmektedir. Bugün bu düzeyde gelişmiş çeşitli yazılımlar bulunmaktadır. Bilgi destekli mühendislik yazılımları (CAE-Comp.aided eng.) olarak da adlandırılan bu yazılımlarda dünyada yaygın kullanım bulanlardan biriside ANSYS'dir. Bölüm 4.4'te ansys yazılımı tanıtılmaya çalışılmıştır.

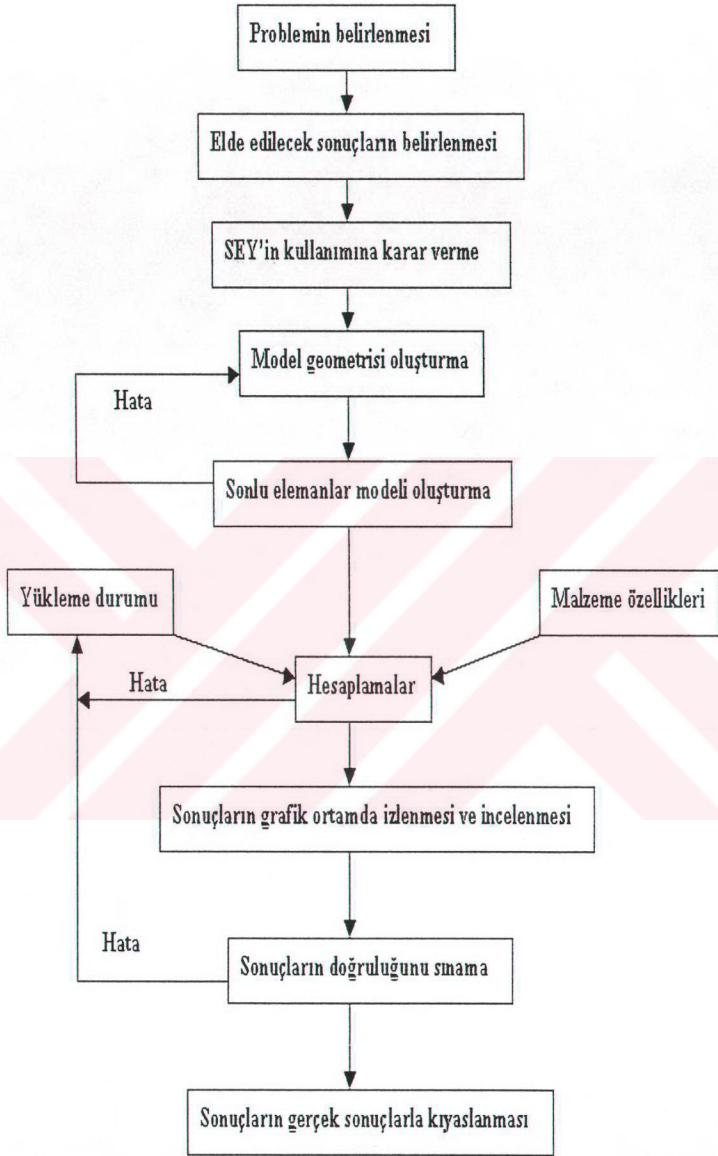
4.4 ANSYS sonlu elemanlar yazılımı

Bölüm 4.1 ve 4.2’de anlatıldığı gibi sonlu elemanlar yöntemi ile ısı iletimi ve akış problemlerinin çözümüne ilişkin günümüzde gelişmiş donanım desteğinde, çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. Ansys bu yazılımlardan birisidir. Günümüzün mühendislik problemlerinin bilgisayar ortamında çözümüne ilişkin geliştirilen ansysin amacı; sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla problemlerini bilgisayar ortamına taşımak ve burada model, malzeme ve çalışma mühendislik sınır koşulları tanımlanarak istenilen çözümleri, bilgisayar ortamında yapabilmektir. ansys yardımı ile çözülebilen mühendislik problemlerinden bazıları şunlardır;

- Yapısal problemler (Ansys Structurel),
- Isısal problemler (Ansys Termal),
- Akış problemleri (Ansys Fluid ve Ansys Flotran CFD),
- Elektriksel problemler (Ansys Electrical),
- Magnetik problemler (Ansys Magnetic nodal ve edge),
- Bağlantılı problemler (Coupled)

[23]

Diğer benzer bütün programlarda olduğu gibi Ansys’de bir mühendislik problemin çözülebilmesi için uyulması gereken işlem adımları vardır. Bu işlem adımları sırası ile Şekil 4.3’de bir akış tablosu halinde verilmektedir.



Şekil 4.3: SEY'e göre model hazırlama ve hesaplama işlem akış şeması.[21]

5. TİPİK BİR DÜZ CAM FIRINI REFRAKTER ASTARINDAKİ ISI GEÇİŞ HAREKETİNİN, ANSYS YARDIMI İLE MODELLENMESİ

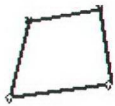
Bir cam fırını ısıtma havuzu içerisinde cam harmanının ısıtılması sırasında fırın yan refrakter duvar bloğunda bir aşınma meydana gelmektedir. Fırın yan duvar refrakterinde meydana gelen bu aşınma genel itibarıyla gerek geleneksel hava – yakıt yanmalı fırınlarda gerekse oksijen – yakıt yanmalı fırınlarda görülmektedir. Bu aşınmaya: büyük oranda fırın havuzu içinde ısıtılan sıvı camın akış etkisinin ve buna ilave olarak ortamdaki yüksek sıcaklığın birlikte neden olduğu bilinmektedir. Bu bölümde yapılan çalışma ile tipik bir cam fırınının refrakter astar duvarlarındaki ısı geçişi (heat transfer) simüle edilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmada kullanılan malzeme özellikleri ve yükleme sınır şartları Türkiye Şişe Cam Fabrikalarındaki cam fırınlarından daha önceden yapılmış ölçümlerden elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

5.1 Cam fırını refrakter yapılarındaki ısı geçişinin modellenmesi

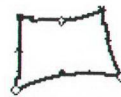
Cam fırının ısı yayılımının modellenmesi esnasında yapılan çalışmalar sırasıyla;

1. Ön işlemler (Pre Processing)

- Çözüme uygun analiz modüle belirlenir. Bu çalışmada ısı analiz modülü seçilmiştir.
- Eleman tipi belirleme: kullanılan eleman tipi, eğrisel olmayan 4 düğüm noktalı Şekil 5.1’de görülen tipte “plain 55” ve 8 düğüm noktalı eğrisel modeller için ise şekil 5.2’de görülen “plain 77” tipi elemanlar 2 boyutlu dörtgen elemanlar seçilir.



Şekil 5.1: Plain 55 [23]



Şekil 5.2: Plain 77 [23]

- Geometrik modelin oluşturulması: cam fırını ergitme havuzu bölümünde yer alan refrakter yapıların 2 boyutlu geometrik şekilleri) belirlenmiştir.
- SE modelinin oluşturulması: geometrik modelin oluşturulmasından sonra “Mesh generation” (elemanlarına ayırma) işlemi ile sonlu elemanlar modeli oluşturulur.
- Fırın yan duvar ve taban refrakterlerinin ısı iletim özellikleri tanımlanır.

2. Çözüm (Solution)

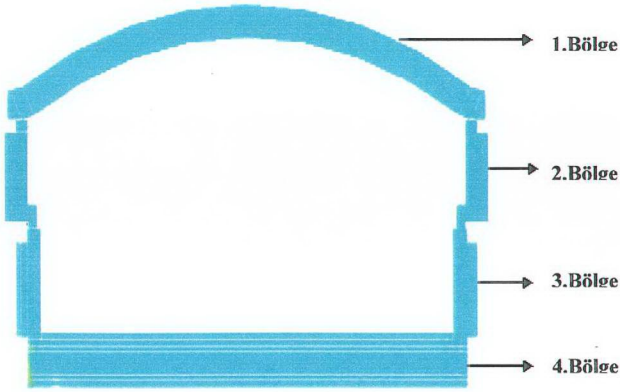
- Fırın refrakter yapılarının çalışma sınır koşulları: cam fırını refrakter astar duvarının iç ve dış yüzeyindeki sıcaklıklar girilir.

3. Sonuçların değerlendirilmesi (Post Processing)

- Refrakter astarlarda sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru oluşan ısı dağılım sonuçları alınmıştır.

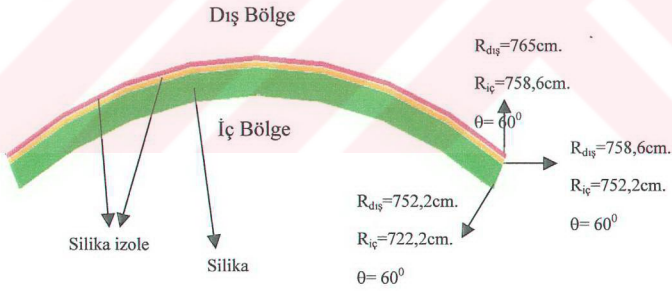
5.1.1 Isısal modellemede kullanılan veriler

Modelleme sırasında kullanılan veriler; Düz cam fırını refrakter yapılar içersinde kullanılan refrakter malzemeler ile fırın çalışma koşullarını yansıtan yükleme şartlarından oluşmaktadır. Refrakter yapıları oluşturan, refrakter türleri Ek B’de ayrıntılı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 5.3 de tipik bir düz cam fırının 2 boyutlu enine kesiti ve refrakter yapıların dizaynı verilmektedir. Burada, konunun daha iyi anlaşılabilmesinin sağlanması amacıyla fırın 4 bölgeye ayrılmıştır. Her bir bölge için verilen sıcaklık değerleri ve diğer veriler Ek C içerisinde yer alan dosyalarda bulunmaktadır. Aynı zamanda bölgelerdeki refrakterlere ait olan kimyasal bileşimlerde Tablo 5.1, Tablo 5.2, Tablo 5.3 ve Tablo 5.4 ‘de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 5.3: Cam fırınında refrakter blok bölgeleri.

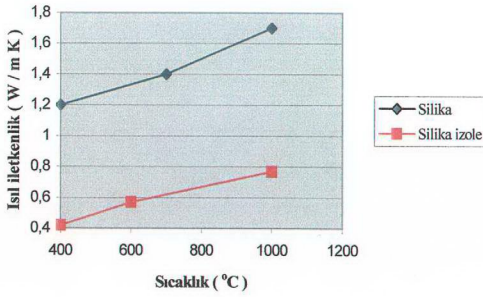
1.Bölge: ergitme havuzu üst kemeri;



Şekil 5.4: 1. bölge refrakter bloğun geometrik şekli.

Tablo 5.1: 1. bölge refrakterlerin kimyasal bileşim %'leri.[24]

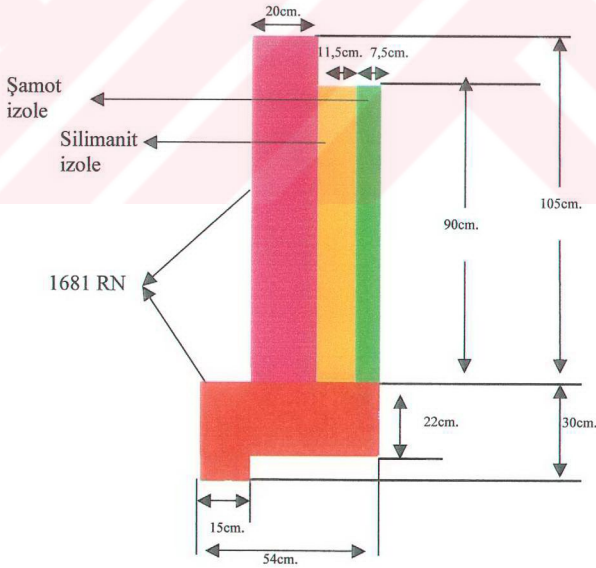
Refrakter	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
Silika	96	0,3	0,2	-
Silika izole	93	1,4	-	3,9



Şekil 5.5: 1. bölge refrakterlerinin ısı iletkenlik eğrileri.[24]

Geometrik modelimizin 1. bölgesine ait ısı analizi için kullanılan ısı iletkenlik değerleri Şekil 5.5’de görülmektedir. Isı analizi için programa, bu bölge refrakterlerinden en içteki silika ile en dıştaki silika izole refrakter yüzeylerine yüzey sıcaklık değerleri girilmiştir.

2.Bölge: üst yapı yan duvar;



Şekil 5.6: 2. bölge refrakter bloğun geometrik şekli.

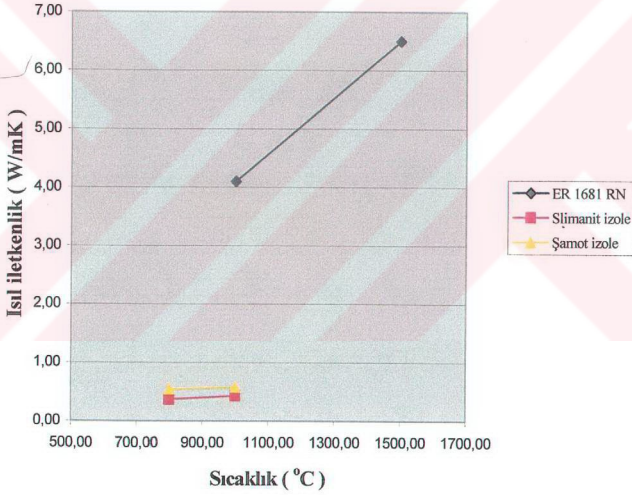
Tablo 5.2: 2. bölge refrakterlerin kimyasal bileşim %'leri. [24]

Tablo 5.2.A

Refrakter	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O+K ₂ O	Ti O ₂
Şamot izole	0,5-1	30-40	0,8-3,6	0,4-1,4	1,3-3,5	0,3-1,4

Tablo 5.2.B

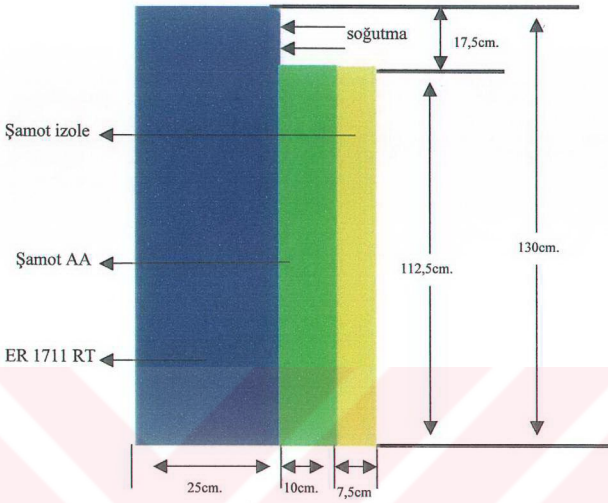
Refrakter	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	Na ₂ O	CaO,Fe ₂ O ₃ , Ti O ₂
1681 RN	15	50,9	32,5	1,3	0,3
Silimanit izole	54,5	36,5			3,9



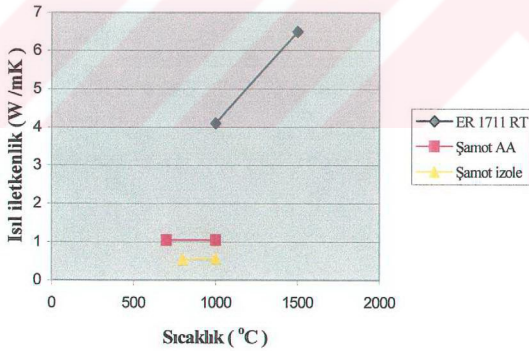
Şekil 5.7: 2.bölge üst yapı yan duvar refrakterlerin sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik eğrileri. [24]

Geometrik modelimizin 2. bölgesine ait ısı analizi için kullanılan ısı iletkenlik değerleri Şekil 5.7’de görülmektedir. Isı analizi sırasında bu bölge refrakterlerinin geometrik şekli göz önünde bulundurularak yüzey sıcaklıkları 1. bölgede olduğu gibi programa yüklenmiştir.

3.Bölge: Camla temas



Şekil 5.8: 3. bölge refrakter bloğun geometrik şekli.



Şekil 5.9: 3. bölge refrakterlerinin ısı iletkenlik eğrileri. [24]

Geometrik modelimizin 3. bölgesine ait ısı analizi için kullanılan ısı iletkenlik değerleri Şekil 5.9'da görülmektedir. Tablo 5.3.A'da görülen refrakter Şekil 5.8'de ok işaretleri ile görülen bölgeden 30 °C'lik hava ile soğutulmaktadır. Bu durumda dikkate alınarak refrakter bloğun iç ve dış yüzeylerine sıcaklık değerleri girilmiştir.

Tablo 5.3: 3. bölge refrakterlerin kimyasal bileşim %'leri. [25]

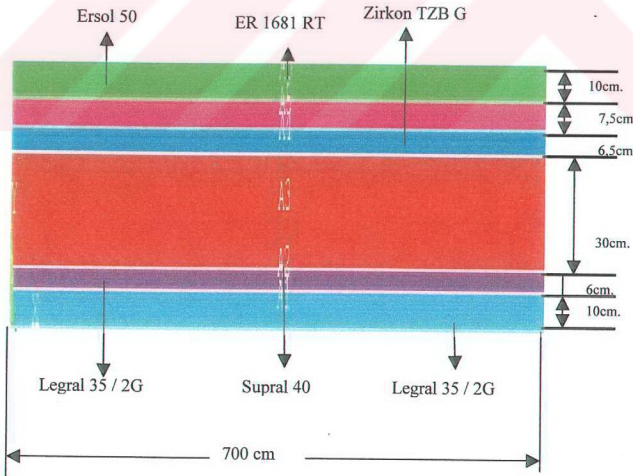
Tablo 5.3.A

Refrakter	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	Na ₂ O	CaO, Fe ₂ O ₃ , Ti O ₂
1711	12	46,7	40	1	0,3

Tablo 5.3.B

Refrakter	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	Ti O ₂
Şamot AA	0,4		>42	<2,5	0,3	<1,0	1,7
Şamot izole	0,6	60,3	34	2,1	0,5	1,4	1,1

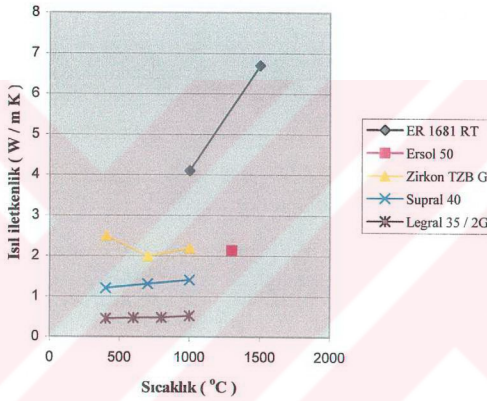
4.bölgede refrakterler [taban refrakterleri (refrakter dizilimi içten dışa doğru)];



Şekil 5.10: 4. bölge refrakter bloğun geometrik şekli.

Tablo 5.4: 4. bölge refrakterlerin kimyasal bileşim %'leri. [25]

Refrakter	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO, Fe ₂ O ₃ , Ti O ₂
ER1681RT	15	50,9	32,5	1,3		0,3 Karışımı
Ersol 50	20	48	30			2 Karışımı
ZirkonTZBG	31,5	0,6	67		0,2	
Supral 40	54	41			1,9	
Legral35/2G	54	36,5			3,5	0,4 CaO

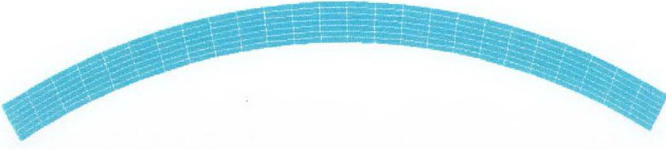


Şekil 5.11 : 4. bölge refrakterlerinin ısı iletkenlik eğrileri. [25]

Geometrik modelimizin 4. bölgesine ait ısı analizi için kullanılan ısı iletkenlik değerleri Şekil 5.11'de görülmektedir. Isı analizi sırasında bu bölge refrakterlerinin yüzey sıcaklıkları tabanın iç ve dış yüzeyi boyunca sıcaklık değişimi dikkate alınarak 1. bölgede olduğu gibi programa yüklenmiştir.

5.1.2 Refrakter astarların sonlu elemanlar modelleri

Fırının ergitme bölümünü oluşturan refrakter blokların geometrik şekilleri (Şekil 5.4, Şekil 5.6, Şekil 5.8, Şekil 5.10) modellenmiştir. Bundan sonra bilgisayar ortamında bu modeller "Mesh Tool" yardımıyla sonlu elemanlarına bölünerek sonlu elemanlar modelleri (Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15) oluşturulmuştur.



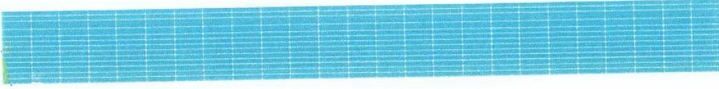
Şekil 5.12: 1.bölge refrakter astarın sonlu elemanlar modeli.



Şekil 5.13: 2.bölge refrakter astarın sonlu elemanlar modeli.



Şekil 5.14: 3.bölge refrakter astarın sonlu elemanlar modeli.



Şekil 5.15: 4.bölge refrakter bloğun sonlu elemanlar modeli.

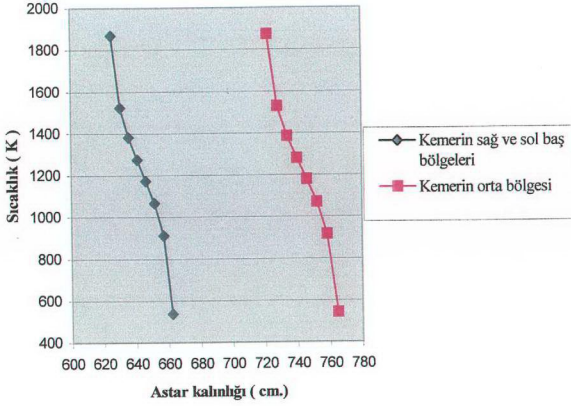
Sonlu elemanlar modelleri oluşturulmasından sonraki aşamada malzeme özellikleri ve yükleme durumunu yansıtan sınır sıcaklık değerleri (verilen program disketi içinde belirtilmekte), programa veri olarak yüklenmiş ve hesaplamaya geçilmiştir.

5.1.3 Isı analizinin sonuçları

Modeller ayrı ayrı ısı analizine tabi tutulmuş ve çözüm gerçekleştirildikten sonra elde edilen sonuçlar Şekil 5.16, Şekil 5.18, Şekil 5.20 ve Şekil 5.22’de verilmiştir. Bu sonuçlara dayanılarak fırın içi sıcak yüzeylerinden soğuyan dış yüzeylere doğru yüksekliğe bağlı soğuma eğrileri Şekil 5.17, Şekil 5.19, Şekil 5.21 ve Şekil 5.23’de görülmektedir.

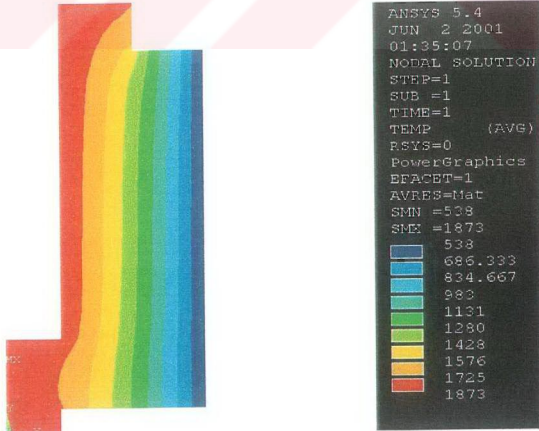


Şekil 5.16: 1. bölgeye ait ısı analizi [sıcaklık değerleri (K)] sonuçları.

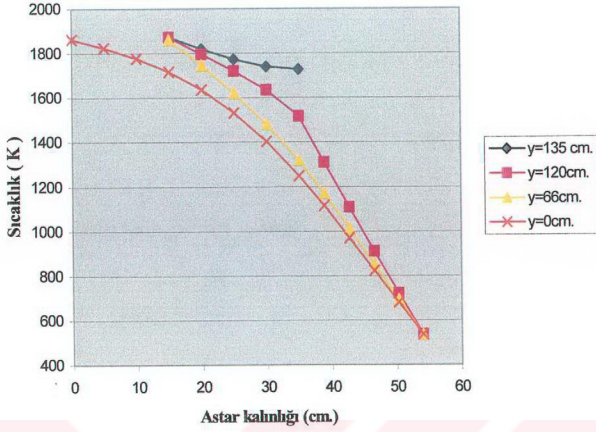


Şekil 5.17: 1. bölge refrakter astar duvarındaki soğuma eğrileri.

1. bölgede homojene yakın bir ısı değişimi görülmektedir. Buna bağlı olarak Şekil 5.17'de görülen soğuma eğrilerinde de bu durum kendini ortaya koymaktadır. Bunda etken neden olarak programa yüklenen iç yüzey sıcaklıkları arasında (köşeler ve orta bölge arasında) ~50 K'lik bir farkın olması söylenebilir. Yapılan bu çözüm sırasında 175 eleman kullanılmıştır.

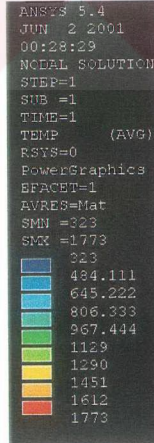


Şekil 5.18: 2. bölgeye ait ısı analizi [sıcaklık değerleri (K)] sonuçları.

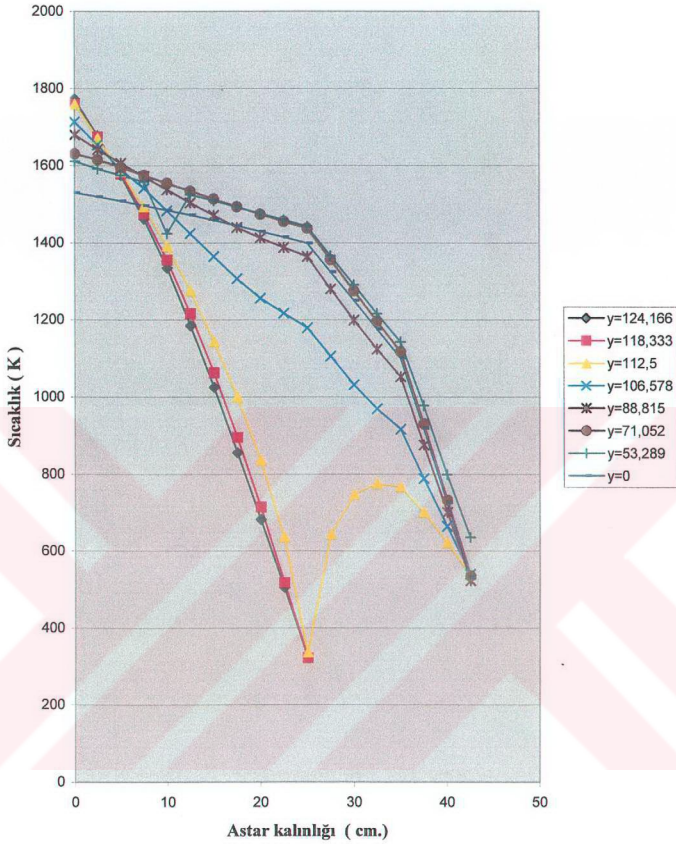


Şekil 5.19: 2.bölge ertitme bölümü üst yan duvarındaki soğuma eğrileri.

2.bölge refrakter bloğun ısı analizi sonucunda (Şekil 5.18) yapının geometrisinden kaynaklanan bir dalgalanma olduğu görülmektedir. Bu çözüm için yapı 177 elemana ayrılmıştır. Yapının Şekil 5.19'da görülen soğuma eğrisi y doğrultusunda farklı yüksekliklerden x kesiti boyunca alınmış sıcaklık değerleri sonucu elde edilmiştir.



Şekil 5.20: 3. bölgeye ait ısı analizi [sıcaklık değerleri (K)] sonuçları.



Şekil 5.21: 3.bölge refrakter astar duvarındaki soğuma eğrileri.

3. bölgeye ait soğuma eğrilerinden $y = 112,5$ cm yükseklikteki x kesitinden alınan sıcaklık değerlerinden elde edilen soğuma eğrisinde bu bölgede yapılan ve Şekil 5.8'de ok işaretleri ile gösterilen soğutmanın etkisi açıkça görülmektedir. Bu soğutmanın refrakter yapının sıvı cam ile temas eden yüzeylerine doğrudan büyük bir etkisi olmamakla beraber yapı içerisinde dış yüzeye gidildikçe sıcaklığın düşmesinde etkili olduğu gözlenmiştir. Bu bölgenin çözümü esnasında geometrik yapı 353 elemana ayrılmıştır.

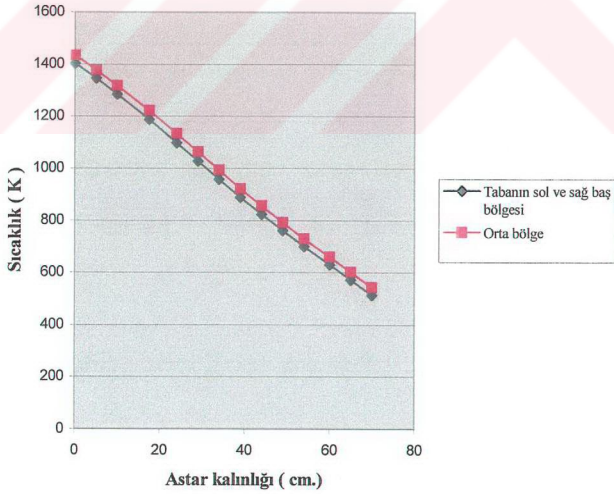


```

ANSYS 5.4
JUN  2 2001
01:14:56
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB  =1
TIME=1
TEMP      (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
SMN  =513
SMX  =1433
513
615.222
717.444
819.667
921.889
1024
1126
1229
1331
1433

```

Şekil 5.22: 4. bölgeye ait ısı analizi [sıcaklık değerleri (K)] sonuçları.



Şekil 5.23: 4.bölge refrakter astar duvarındaki soğuma eğrileri.

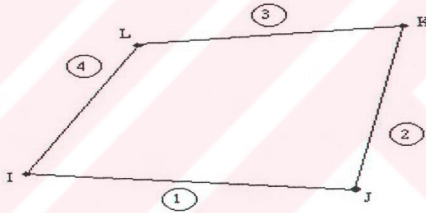
4. bölgede homojene yakın bir ısı değişimi görülmektedir. Buna bağlı olarak Şekil 5.23'de görülen soğuma eğrilerinde de bu durum kendini ortaya koymaktadır. Bu duruma gerekçe olarak yüzey sıcaklıkları arasındaki farkın çok fazla olmamasını verebiliriz. Bu çözüm yapılırken yapı 325 elemana ayrılmıştır.

6. TİPİK BİR CAM FIRINI ERGİTME HAVUZUNDAKİ ERGİMİŞ CAMIN YATAY KESİTTE AKIŞININ AKIŞKANLAR MODELİ VE ANALİZİ

Cam fırını ertitme havuzu içinde bulunan ergimiş sıvı camın havuz içerisinde yaptığı akış hareketinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayar ortamında simule etmek için bir dizi çalışma yapılmıştır. Bunlar sırası ile ;

1. Ön işlemler (Pre processing)

- Analiz tipi belirleme: çözüme uygun analiz tipi belirlenir. Bu çalışmada CFD (bilgisayar destekli akış) analiz belirlenmiştir.
- Eleman tipi belirleme:kullanılan eleman tipi, 4 düğüm noktalı Şekil 6.1’de görülen tipte “Fluid 141” programdan seçilir.



Şekil 6.1: Fluid 141 [23]

- Geometrik modelin oluşturulması:düz cam fırını ertitme havuzu bölümünün yatay kesiti oluşturulur.
- SE modelinin oluşturulması: geometrik modelin oluşturulmasından sonra elemanlara ayrılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulur.
- Malzeme özelliklerinin belirlenmesi: sıvı cam eriyimin minimum ve maksimum sıcaklıkları, sıcaklığa bağlı sıvı camın ısı iletim katsayıları, sıcaklığa bağlı viskozite değerleri, yoğunluğu, özel ısı ve sıvı camın refrakter duvar ile temas halinde bulunduğu yüzeylerdeki sıvı akış hızları gibi fiziksel özellikler tanımlanmıştır.

2. Çözüm (solution)

- Sıvı cam ile refrakterin temas halinde bulunduğu yüzeydeki konvektif film katsayıları (ön modelleme sonucunda bu verilere ulaşılmaktadır.) ve sıvı camın refrakter duvar ile temas halinde bulunduğu yüzeylerdeki sıcaklık değerleri (K) ile sıvı camın taban sıcaklıkları ile yüzey sıcaklıkları olan sınır şartları girilir.
- Çözüm için hesaplamaya yönelik ayarlar gerçekleştirilir.

3. Sonuçların değerlendirilmesi (Post Processing)

- Fırın ertitme havuzu içinde bulunan sıvı camın havuz içindeki bölgelerdeki akış hızları elde edilir.
- Sıvı cam içindeki ısı dağılımı elde edilir.

6.1 Kullanılan veriler

Sıvı camın temasta bulunduğu refrakter yüzeyinde sıvı camın hızları olarak girilen veriler x ve y doğrultusunda v_x ve v_y olarak aşağıdaki şekilde belirtilen çizgiler boyunca değerler girilmiştir. Bu veriler dikey kenarlarda $V_x = 0$ cm./ s, yatay kenarlarda $V_y = 0$ cm./ s olarak girilmiştir.

Sıvı camın diğer sıcaklığa bağlı verilerinde aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

Isıl iletkenliğin sıcaklığa bağlı denklemi (W / cm- K) :

$$5,566 - (0,0087 \cdot T) + (0,36 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) \quad 6.1$$

Viskozitenin sıcaklığa bağlı denklemi (gr./ cm-s) :

$$-1,58 + (0,4332 \cdot 10^4 T) + (0,248 \cdot 10^3 \cdot T^2) \quad 6.2$$

Özel ısı (J / gr.- K) : 1300

Yoğunluk (gr. / cm³) : $0,235 \cdot 10^{-2} \cdot 1400^0 \text{ C 'de}$

Cam ertitme havuzu içerisinde sıvı camın, refrakter yüzey ile temas halinde bulunduğu bölgede mesafeye bağlı sıcaklıklar Tablo 6.1'de verilmiştir. [26]

Tablo 6.1: Cam ergitme havuzunda sıcaklığın sıvı camın yüzeyinden havuz tabanına doğru ve sıvı cam yüzeyinde soldan sağa doğru sıcaklığın mesafeye bağlı değişimi.[26]

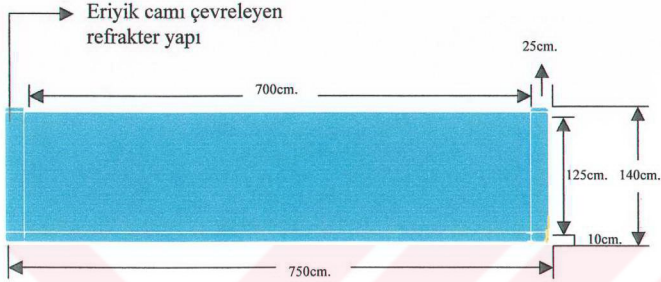
Sıvı camın refrakter ile temasta olduğu bölgenin sıvı cam yüzeyinden tabana doğru mesafe (cm.)	Sıcaklık (K)	Sıvı camın yüzeydeki mesafesi (cm.) [soldan sağa doğru]	Sıcaklık (K)
0	1773	0	1773
5	1760	28	1779
10	1713	56	1785
15	1713	84	1791
20	1713	112	1797
25	1680	140	1803
30	1680	168	1809
35	1680	196	1812
40	1656	224	1818
45	1656	252	1823
50	1656	280	1823
55	1638	308	1823
60	1638	336	1823
65	1638	364	1823
70	1631	392	1823
75	1631	420	1823
80	1631	448	1823
85	1611	476	1818
90	1611	504	1812
95	1611	532	1809
100	1593	560	1803
105	1593	588	1797
110	1593	616	1791
115	1583	644	1785
120	1583	672	1779
125	1573	700	1773

Yukarıda sırasıyla verilen veriler girilerek model üzerinde gerekli yüklemeler yapılmıştır.

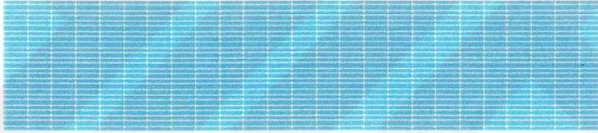
6.2 Geometrik model

Modelleme amacıyla yaratılan geometrik ortamda yalnızca fırın ergitme havuzunun yatay kesiti ele alınmıştır. Burada kullanılan ölçüler fırın ölçülerinden alınarak verilmiştir. Yaratılan şeklin iki kademesi olup; birinci bölümde sıvı camın içinde

bulunduğu ergitme havuzu bölümü çizilmiştir. İkinci olarak sıvı camın hacminin şekli çizilmiştir. Çözüm sadece sıvı camın şekli üzerinde yüklemeler yapılarak hazırlanmıştır. Aşağıdaki Şekil 6.2’de sıvı camın ve ergitme havuzunun geometrik şekli görülmektedir.



Şekil 6.2: Sıvı cam ve ergitme havuzunun geometrik modeli.



Şekil 6.3: Sıvı cam hacminin sonlu elemanlara ayrılmış SE-modeli.

Geometrik şekilden sonra yalnızca sıvı cam hacmi elemanlara ayrılarak Şekil 6.3’de görülen sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Bu çözüm için yapı 625 elemana ayrılmıştır.

6.3 Akış Modeli Sonuçları

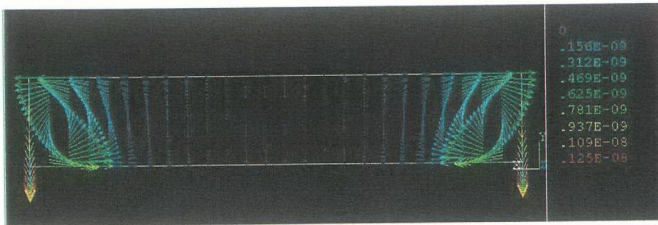
Yapılan model çalışması ve bölüm 6.1’deki verilerin yüklenmesi neticesinde ulaşılan çözümde aşağıdaki şekillerde görülen ergimiş camın akış hızları (V_{SUM}), sıvı cam içindeki sıcaklık dağılımı ve sıvı camdaki akışın vektörel hız görüntüleri ve değerleri alınmıştır. Elde edilen bu değerleri veren model şekilleri, Şekil 6.4-6.6’da görülmektedir. Şekil 6,4’de ergimiş camın içindeki akışların akış hızı dağılımları,

Şekil 6.5’de ise bunların vektörel dağılımları verilmektedir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi, eriğik camla temas yüzeyine sahip 3.bölge refrakter yapısı yakınlarında sıvı cam akış hızının $\sim 0,128 \text{ e}^{-8} \text{ cm/sn.}$ ’lik maksimum hızlara ulaştığı gözlenmektedir.

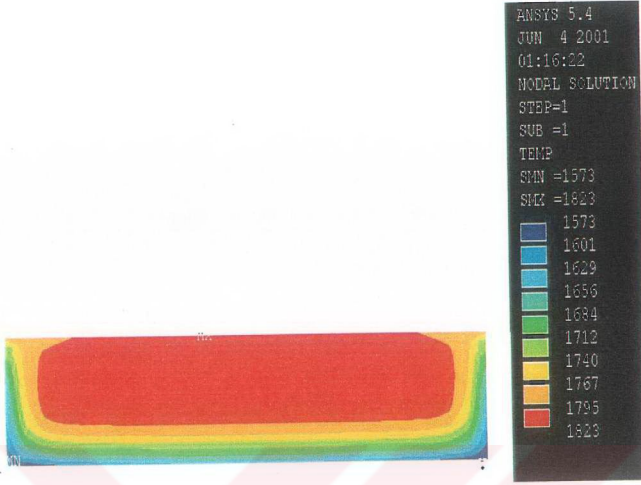
Aynı çözümün bir başka sonucu olarak Şekil 6,6’da eriğik sıvı cam içerisindeki ısı dağılımları verilmektedir. Sınır koşullarına bağlı, doğal bir sonuç olarak ergimiş camın orta üst bölgeleri maksimum sıcaklıklara sahip olduğu görülmektedir.



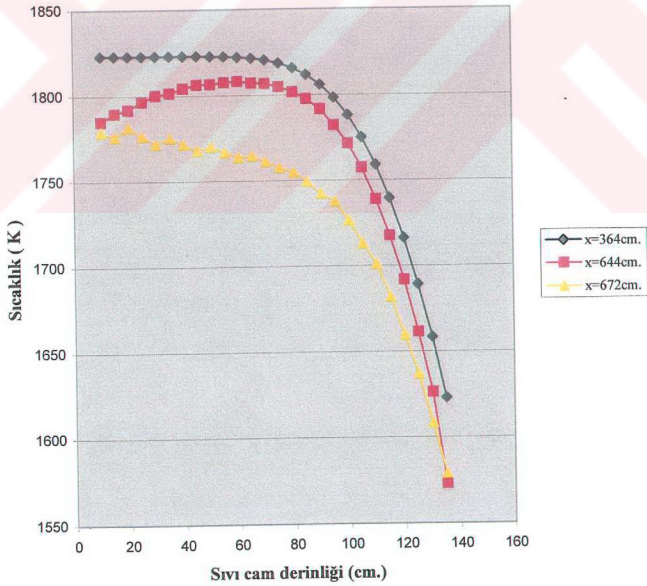
Şekil 6.4: Ergimiş camın akış hızları (V_{SUM})



Şekil 6.5: Ergimiş camın vektörel akış hızları (V_{SUM})



Şekil 6.6: Sıvı cam içinde ısı dağılımı veren model ve sıcaklık değerleri (K).



Şekil 6.7: Sıvı camın 3 farklı bölgesinde ki soğuma eğrileri

7. MODELLEME ÇALIŞMASI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tipik bir cam fırını refrakter yapılarına ait ısı analizi sonuçlarına göre; bu bölgelerdeki yapılar üzerinde ısı dağılımları elde edilmiştir. Bu ısı dağılımlarından çarpıcı olan en çok aşınmaya maruz kaldığı bölge olarak bilinen sıvı camın temasda bulunduğu yan duvar (3. bölge) refrakter bloklardır. Zira bu bölgenin sıvı cam akışına bağlı olarak mekanik erozyona maruz kaldığı bilinmektedir. Bu probleme yol açan ergimiş sıvı cam akıntılarının akış yönlerinin, akış yoğunluğunun ve akış hızlarının bilinmesi önem kazanmaktadır.

Yapılan ilk çalışmada model ile ilgili olarak eriyik cam ile refrakter yapı arasındaki film katsayıları tespit edilerek, daha sonra konvektif sıcaklık sınır şartını yansıtan CFD analizinde veri olarak kullanmıştık. Daha sonra yapılan çalışma ile sıvı camın ergitilmesi sırasında, eriyik cam içerisinde yaşanan akış simule edilerek aşınma olduğu bilinen refraktere ait bölgelerde bu akış yoğunluğunun yüksekliği ve vektörel olarak refrakter yapıya yönelişi görülmüştür. Çalışma sonucunda elde edilen akış hızları gerçek bir fırındaki hızlara göre oldukça yavaş kalmıştır. Zira modelimiz iki boyutlu ve enine kesit alınarak tasarım gerçekleştirilmiş ve konuya ilişkin yöntemsel bir bakış kazandırılmak istenmiştir. Bahsi geçen akış hareketi zaman içinde gelişmiş anlık bir çözüm olduğu düşünülürse ve bu çözüm zamana bağlı bir şekilde geliştirilirse. O zaman ergimiş cam içerisindeki hareketin, daha gerçeğe yakın sonuçlara ulaşılmasında katkı sağlayacağı kuşkusuzdur.

Isı geçiş modellerinde en önemli sonuç dıştan soğutmanın uygulandığı 3. bölge refrakter yapıda elde edilmiştir. Burada soğutmanın etkisi sonucu soğuma eğrilerinde bir dalgalanma gerçekleşiyor olması ve bu durumun her ne kadar bu boyutlarda refrakter yapı için direk cam seviyesindeki ısı etkisine karşı çok azaltıcı bir tepkisi görünmese de yine de yapı içerisinde dalgalanma yaratarak sıcaklık değerlerinde bir düşme meydana getirmektedir. Diğer sonuçlardan ise fırın üst yan (2. bölge) yapıdaki sıcaklık dağılımı göze çarpmaktadır. Bu bölgede bir dalgalanma vardır bunu yapının geometrisinden kaynaklanması mümkün olabilir. 1. ve 4. bölgelerde ise homojene yakın bir sıcaklık dağılımı göze çarpmaktadır.

Bahsedilmesi gereken bir diğ er husus ise; fırın refrakter yapılarında ısı ge işı sonucu ortaya termal gerilmelerin çıkabilecek olması, ve bundan kaynaklanan porozite yüzey alanında bir artış olabilme ihtimali bu çalışmanın devamında d ş n lebi ecek konulardır. Ayrıca porozite yüzey alanındaki artışın refraktere temas eden sıvı cam akışlarının erozyon etkisini arttırıcı bir nitelikte olup olmadığına dair bir çalışmanın, bu mekanizmanın (aşınma bölgesi) daha iyi anlaşılmasına imkan vereceği tahmin edilmektedir.

Bu  alışma ile ilgili bütün program çözümleri ve log file dosyaları Ek C’de (disket içinde) verilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kocabağ, D.**, 2000. Cam fırınları, Malzemeler, Teknolojiler, Prosesler Matbaası, Eskişehir.
- [2] **Damsel, M.**, 1995. Oxygen Firing in Glass Melters, Combustion Tec.Inc.(CTI), Orlando. Florida
- [3] **Gridley, M.**, 1997. Philosophy, Design and Performance of Oxy-Fuel Furnaces, Ceramic Engineering Science Proc., **18**, 1-13.
- [4] **Bodelin, P., Samaniego, J.M., Simon, J.F., Philippe, L. and Zucchelli, P.**, 1999, International Glass Journal, **102**, 102-110.
- [5] **Kocabağ, D.** 1996, Oksi-Yakıt Yanma ve Cam Sanayinde Uygulanması, Mühendis ve Makine **431**, 27-30.
- [6] **Prince, B., Slavejkov E., A.G.**, 1994, Clean Firing of Glass Furnaces Through the Use of Oxygen, Ceramic Engineering Science Proc., **15**, [2], 159-174.
- [7] **Air Products Inc.**, 2001, Glass industry, [http://www.airproducts.com/oxy-fuel/Glass Industry.htm](http://www.airproducts.com/oxy-fuel/Glass%20Industry.htm)
- [8] **Patel, K.**, 1995, Gas-Oxygen Combustion Systems for Glass Furnaces, Ceramic Industry, **6**, 41-44.
- [9] **Flaherty, J.**, 1998, A Guide to Oxygen Supply Technology, Glass, **1**, 12.
- [10] **Japan Oxygen Co.,Ltd.**, 1990, Nippon Sanso K.K. Products Catalogue, JO Series Oxygen Generators, Kawasaki
- [11] **Japan Oxygen Co.,Ltd.**, 1990, Nippon Sanso K.K. Products Catalogue, Fully Automatic Oxygen Generator, Kawasaki
- [12] **Universal Industrial Gases Inc.**, 2001, Compair, <http://www.uigi.com/compair.html>

- [13] **Aydın, K., Akıncı, A.**, 1993, Application Of Oxy-Fuel Firing to an E-Glass Furnace, *Glass Technology*, **34**, 256-258.
- [14] **Winder, S.M., Mackintosh, J.R.**, 1997, Testing Oxyfuel Furnace Crown Materials , *Glasteknisk Tidskrift*, **52**, 14-22.
- [15] **Faber, A.J., Verheijen, O.S.**, 1997, Refractory Corrosion Under Oxy-Fuel Firing Conditions, *Ceramic Eng. Sci. Proc.*, **18**, 109-119.
- [16] **Kotacska, L.H., Cooper, T.J.**, 1997 Testing of Superstructure Refractories in a Gas-Oxy Atmosphere Against High Alkali Glasses, *Ceramic Eng. Sci. Proc.*, **18**, 137-145.
- [17] **Duvierre, G., Zanolli, A., Roux, Y.B. and Nelson M.**, 1997, Selection of Optimum Refractories for the Superstructure of Oxy-Fuel Glass Melting Furnaces, *Ceramic Eng. Sci. Proc.*, **18**, 147-163.
- [18] **Jurcik, B., Schnepfer, J. And C.**, 1996, Geometric Considerations for Modelling Oxy-Fuel Glass Tank, *Glass Industry* **4**, 28-30.
- [19] **Fujisaki, W., Hashimoto, T., Nakamura, T.**, 1999. Study State Combustion Test Results and CFD Simulation for Scale Up, Energy and Environmental technology Laboratory Annual Technical Report Diggest Tokyo, Japan.
- [20] **Bathe, K.J.**, 1986, Finite Elemente Methoden, Springer Verlag, Berlin, Deutschland.
- [21] **Yılmaz,S.**, 1998, SEY ile çelik potası Refrakter astarının incelenmesi ve geliştirilmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] **Chandrupatla, T.R., Belegundu A.D.**, 1991, İntroduction to Finite Elements in Engineering
Press, New Jersey
- [23] **Swenson Analysis Inc.**, 1997 ANSYS Release 5.4 Users Manual Book
Press, Houston.
- [24] **Sepr Group**, 2000, Refractory Products Catalouge for Glass Furnaces, Cedex, France.
- [25] **Didier**, 1999, Refractory Materials Catalouge for the Glass Industry,.

[26] **Önsel Lale**, 2001. Kişisel görüşme.



EK A

A.1 Rejeneratörler

Rejeneratörler; içleri yüksek yoğunluklu yüksek ısı kapasitesi ve iletkenliğine sahip, sıcaklık değişimlerine dayanıklı özel tuğlalarla örülü (çekerler), benzer özellikli tuğlalardan yapılmış geniş odalardır. Her rejenaratif fırında dönüşümlü olarak çalışan iki adet rejenaratör vardır. [1]

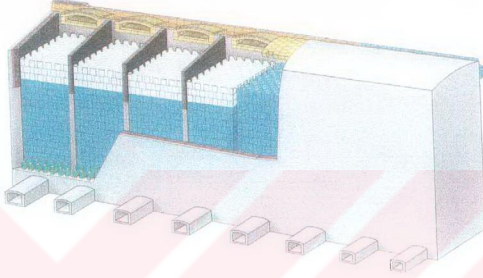
Çevrimin bir yarısında rejenaratörlerden biri içinden sıcak yanma gazları geçirilerek çekerler ısıtılır. İkinci yarısında ise, yanma havası geçirilerek havanın çekerler tarafından ısıtılması sağlanır. Her 20-30 dakikada bir rejeneratörler arasında yanma gazlarının ve havanın yönü değiştirilerek işlem dönüşümlü olarak sağlanır. [1]

Rejeneratif fırınlar şekil A.1 deki gibi yandan (çapraz) veya şekil A.2 deki gibi arkadan ateşlemeli olabilirler. Rejenaratörlerin ise düşey, yatay, tek ve çok kademeli olarak yapılmaları mümkündür. Yapısal güçlüklerinden dolayı çok geçişli rejenaratör sistemleri daha çok arkadan ateşlemeli fırınlarda uygulanır, çünkü bu fırınlarda, normal olarak bütün ekzost gazları tek bir porttan çıkar. Bu, doğru atık gaz, yakma havası ve yakıt dağılımının sağlanmasını kolaylaştırır. [1]

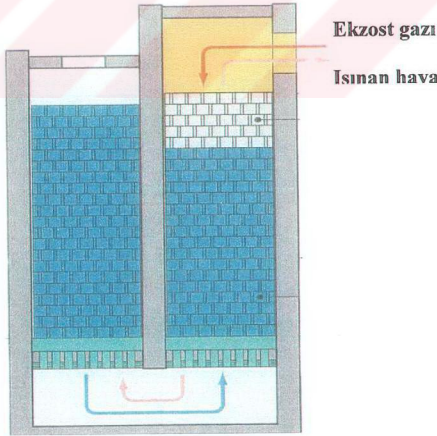
Dönüşümlü çalışmayı sağlamak için, rejenaratörlere ilave olarak rejenaratif fırınlar, ayrıca iki takım bek ve dönüşümü sağlayan bir valf sistemine sahiptir. Genellikle rejenaratörler fırından daha fazla yer işgal eder .rejenaratörler içinde sıcaklık alttan üste doğru artar. Gelişmiş rejeneratör sistemleri ile yakma havasını 1300 °C'ye kadar ısıtmak mümkündür. Bu sayede yakıtın kalori değerinin % 85 varan bir oranı yararlı enerjiye dönüştürülebilir. [1]

Yüksek sıcaklıkta, camın bileşiminden ve yakıttan kaynaklanan alkali, sulfat, vanadyum vb., kimyasal maddeler ve baca gazları ile harmandan taşınabilecek katı partiküller nedeni ile rejeneratörlerin farklı kısımları, farklı etkilere maruz kalır. Kimyasal etkiler sonucu rejenaratör çekerlerinin bozulması söz konusu olabileceği

gibi, belli ısı bölgelerinde yoğunlaşma ve tozların çökelme olasılığı nedeni ile rejeneratörler cam fırının en kritik kısımlarından birini oluşturur. Ve tasarımları ve kullanılacak refrakterlerin seçimi özel itina ister. Rejeneratörlerin tıkanması etkinliğini azaltarak yakıt tüketimini artırdığı gibi, fırının çalıştırılmasındada sorunlara neden olur. Tıkanma durumunda, tıkanan kısımların termal yöntemlerle ergiterek açılması mümkünse de üretimin durdurularak rejeneratörlerin tamiri yada kısmen veya tamamen yenilenmesi zorunlu hale gelebilir.



Şekil A.1: Yandan yakmalı cam fırınlarında kullanılan rejeneratörün önden görünüşü.[24]



Şekil A.2: Arkadan ateşlemeli bir cam fırınında kullanılan rejeneratör sistemlerin yatay kesiti.[24]

Yıllar içinde rejeneratörlerin yapımında belli başlı üç tip refrakter malzeme kullanıla gelmiştir: Silika, Alüminasilikat (% 45-80 Al_2O_3) ve bazik (krom-magnezya, magnezya-krom ve magnezya). Son yıllarda bilhassa Cr^{6+} iyonunun çevre sağlığı üzerindeki olumsuz etkisi nedeni ile, krom içeren refrakterlerin kullanımdan çekilmesi sonucu ergitme döküm AZS (bu refrakterlerle ilgili bilgiler Ek A da yer almaktadır.) malzemelerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. [1]

Rejeneratör çekerlerinden arzu edilen temel beklenti; yüksek ısı değişimi etkinliği ve çalışma sırasında tıkanıp veya çökmeyecek yeterli bir dengeliliktir. Ayrıca örüm kolaylığıda önemli bir kriterdir.çekerlerin farklı şekilli tuğlalardan farklı biçimlerde düzenlenmeleri mümkündür. [1]

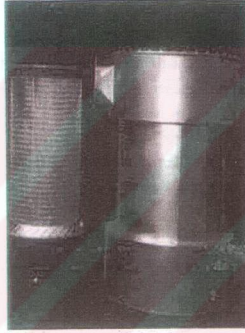
A.2 Reküperatörler

Reküperatörler, yakma havası veya bazı durumlarda gaz yakıtın içinden geçirilerek ısıtıldığı, tüplü veya çift cidarlı ısı dönüştürücüleridir. Hava veya gaz, reküperatör tüplerinden veya boşluğundan yanma gazları ile aynı yönde veya ters yönde geçirilebilir. Yapımlarında metal, seramik veya her iki malzeme birlikte kullanılabilir. [1]

Maliyetleri rejeneratörlere göre çok daha ucuz olup sürekli çalıştırıldıkları için fırın içinde sıcaklık dağılımı daha düzenli ve dengelidir. Kimyasal etkileşim her zaman söz konusu olabilir. Gaz akıntıları arasında sızdırmazlık yönünden metalik yapılar daha uygun iken, daha yüksek ısıtma sıcaklığı açısından refrakter seramik yapılar daha avantajlıdır. [1]

Refrakter seramik reküperatörler, genellikle tüp şeklinde olup yakma havası reküperatör içindeki özel borulardan geçirilerek ısıtılır.bu nispeten kısa borular arasındaki bağlantı sağlam kaldığı ve borular kimyasal etkilerle aşınmadığı sürece seramik reküperatörler iyi sonuç verir. Yalnız, yakma havasının atık gazlar içine sızıp sızmadığı sürekli izlenmelidir. Ekzost gazları ısı değişim borularının içinde veya dışında olabilirse de, tıkanma olasılığundan dolayı boruların içinden yakma havasının geçirilmesinde fayda vardır. Eğer seramik reküperatörlerde düşük kalorili gaz yakıtların ısıtılması söz konusu ise sızıntı bilhassa tehlikelidir. [1]

Metalik reküperatörlerin esas olarak iki değişik şekli söz konusudur. Birincisi şekil A.3'de görüldüğü gibi iç içe iki tüpten oluşur. Ekzost gazları içteki tüpün içinden geçerken, yakma havası iki tüp cidarı arasındaki boşluktan geçerek ısınır. Isı transferi, özel, ısıya dayanıklı çelikten yapılmış iç tüp cidarı üzerinden gerçekleşir. Hava ve atık gazın sıcaklığının metalin çalışma sıcaklığını aşmayacak şekilde kontrol edilmesi gerekir. Havanın geçiş yönü yanma gazları ile aynı (paralel) veya ters olabilir. Bazı durumlarda, metalin aşınma riskini azaltmak ve daha etkin ısı transferi sağlamak için, biri ters diğeri paralel akıntılı iki reküperatör seri halde, çift kademeli olarak kullanılabilir. [1]

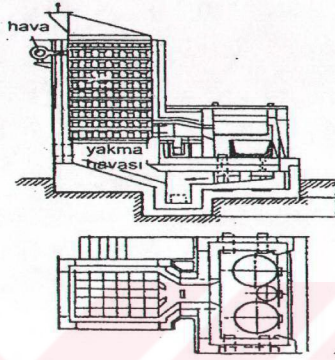


Şekil A.3: Çift cidarlı metalik reküperatör. Soldaki tüp sağdakinin içindedir. [1]

İkinci tip metalik reküperatörler, tüplü reküperatörlerdir. Bu durumda yakma havası, çapı sıcak gaz akıntısının çapından daha büyük ve içi refrakter astarlarla kaplı silindirik bir odanın içinden geçen tüpler içinden geçer. Tüpler reküperatörün alt ve üstündeki kutu kanalları birbirine bağlar. Yanma havası kutu kanalları ve bunları birleştiren tüpler yolu ile reküperatöre girer ve çıkar. Isı, yanma gazlarından ısıtım yolu ile tüp dizimine ve refrakter astarlara yayılır.ve refrakter astarlardan tekrar tüpler üzerine ısıyarak tüplerin içinden geçen havayı ısıtır. Atık gaz giriş sıcaklığı 900-1700 °C, hava sıcaklığı ise 600-800 °C olabilir. [1]

Reküperatörlerin tasarımında,farklı parçaların termal genleşmelerinin uyumu çok önemlidir. Dar kesitlerden kaynaklanan aşırı basınç kayıpları yüksek fan basıncı

gerektirir. Gerek reküperatörün gerekse sıcak hava kanallarının ısı izolasyonu çok önemlidir, yoksa reküperatörle bekler arasındaki mesafeye bağlı olarak önemli ısı kayıpları söz konusu olabilir. [1]



Şekil A.4: Reküperatörlü bir fırının şematik gösterimi

Reküperatörlerin ömürleri rejeneratörlere göre çok daha uzun ve tıkanma sonucu verimin düşme olasılığı çok daha azdır.buna rağmen gerek fırın ve reküperatör dahil fırın sisteminin tasarımının uygun yapılmaması, gerekse cam harmanı bileşimi, fırına beslenmesi ve fırın operasyonlarındaki uygunsuzluklar nedeni ile, fırından gerçekleşen taşınma sonucu reküperatörün ısı transfer tüpleri ve yüzeyleri üzerinde bir toz tabakası oluşabilir ve bu reküperatörün verimini düşürebilir. [1]

Isı değişim yüzeyleri oluşturan malzemelerin seçimi yanında, yakıtın türü ve kalitesi, harman kompozisyonu, besleme hücresinin konumu ve besleme şekli, fırın ve beklerin tasarımı, hava ön ısıtma sıcaklığı,fırının çalışma koşulları ve kontrol sistemi reküperatör ömrünü etkileyen önemli parametrelerdir. Her reküperatörün tasarlandığı çalışma noktası etrafında belli bir esnekliği vardır.tasarım noktasından uzaklaştıkça etkinliği düşer. Şekil A.4'de bir reküperatörlü fırının şematik görüntüsünü görebilirsiniz. En etkin yakıt ekonomisini sağlamak için tasarım noktası fırının maksimum çalışma noktası değil, normal çalışma bölgesi olmalıdır. [1]

Reküperatörlerin olumsuz yönü, rejeneratörlere göre yakma havası ısıtma sıcaklığının daha düşük olmasıdır. En fazla 800 °C. Buna rağmen reküperatörlerin

enerji ekonomisi yönünden bu olumsuzluğu, fırında daha az NO_x oluşumuna neden olarak NO_x emisyonu kontrolü yönünden yarar sağlar. [1]

Rekuperasyon prensibinin diğer bir uygulaması bilhassa küçük cam fırınlarda ve benzer yüksek ısı sistemlerinde kullanılabilecek rekuperatif beklerdir. Bu beklerin kendi ekzost portları olup, yanma gazları bek gövdesi içinden çıkarken ters akım altında yanma havasını ısıtır. [1]

Bu özellikleri ile rekuperatörler fırın içersinde atık gazlarla çıkan ısıнын geri kazanılması için kullanılan ideal sistemler olma özelliğini sağlamaktadırlar.

EK B

B-1 CAM FIRINI REFRAKTERLERİ

Cam fırınları fırının farklı bölgelerinde oluşması beklenen fiziksel ve kimyasal çalışma koşullarına göre seçilen, farklı özellikte refrakter malzemelerden oluşmuş kompozit yapılardır. Fırın yapımında kullanılan refrakterlerin seçimi; ertitilecek camın türüne, fırının tipine, büyüklüğüne çekilecek camın miktarına ve fırından beklenen ömre bağlıdır. Kullanılacak yakıtın türü ve bileşimi de önemlidir. Gerek fırın ömrü gerekse camın kalitesi yönünden en önemli refrakterler, fırında camla ve ertitme ortamı ile temas halindeki refrakterlerdir.

Cam sanayiinde kullanılan refrakterleri, nitelikleri ve fonksiyonları yönünden aşağıdaki şekilde gruplandırabiliriz. [1]

1. Ergitme döküm (Fused cast) refrakterler.
2. Bazık refrakterler
3. Silika refrakterler
4. Krom oksit refrakterler
5. Zirkon, zirkonya refrakterler
6. Ateş tuğlası ve yüksek alüminalı refrakterler
7. Harçlar, döküm ve tamir malzemeleri
8. İzolasyon refrakterleri

B.1.1 Ergitme - döküm refrakterleri

Bu malzemeler uygun hammaddelerin elektrik fırınlarında ertitilerek, uygun kalıplara dökülüp, şekillendirilmesi ile üretilirler. Kalıp malzemesinin seçimi çok önemlidir, çünkü sıcaklık, AZS malzemelerde 1800 C, yüksek alüminalı malzemelerde 2000 C ve magnezya-krom malzemelerde 2500 C ye kadar çıkabilir. Ergitme döküm AZS malzemeler bağlayıcı döküm kumu kalıplarda üretilirken alümina ve diğer yüksek sıcaklık kompozisyonları için grafit kalıplar kullanılır. Çünkü 2000 C üzerindeki sıcaklıklarda kum hemen ertir. Pahalı grafit kalıpların

oksitletmesini önlemek için dökümden sonra bloklar hemen kalıplardan çıkarılarak tavlama ortamına gömülür. Tavlama işlemi, bloğun büyüklüğüne göre birkaç hafta sürebilir. Tavlama işlemi biten blokların, yüzeyleri temizlenerek, gerekiyorsa elmas testerelerle kesilmek sureti ile, yapıdaki yerlerine göre, ek yerlerinde açıklık bırakmıyacak şekilde uygun dizimleri sağlanır ve uygulama sırasında karışmamaları içinde numaralanırlar. [1]

Ergitme döküm malzemeler, cam fırınlarında, genellikle cam havuzunda camla temas malzemesi olarak ve fırın üst yapısında kullanılırlar. Fırının ömrü açısından kritik bir öneme sahip, ek yerlerinin sayısını azaltmak için büyük bloklar halinde üretilirler.

Döküm sırasında soğumadan kaynaklanan büzülme nedeni ile blok içindeki döküm ucunda bir boşluk oluşur. Bu boşluğun ve blok içindeki konumunun kontrol edilmemesi durumunda, camın korozyon etkisi sonucu aşınmanın bu boşluğa ulaşması ciddi sorunlara neden olabilir. Bu durumu engelleyici tedbirler alınmalıdır. Boşluğun konumuna ve büyüklüğüne göre, cam fırınlarında kullanılmak üzere aşağıdaki ergitme blok tipleri mevcuttur. [1]

1. Normal döküm (RN): Döküm boşluğu döküm noktasının altında.
2. Eğik döküm (Tilt Shast) (RO): Boşluk bloğun tabanına doğru.
3. Güçlendirilmiş döküm (Reinforced casting) (RR-RPP): Boşluk küçültülmüş olup, bloğun tabanında.
4. Tam doldurulmuş (Total filling) (RT): Boşluğun bulunduğu kısım kesilmiş olup, boşluksuzdur.
5. Geliştirilmiş döküm (İmproved filling) (RA): Bloğun şeklinden dolayı tam doldurma prosesinin uygulanmadığı durumlarda uygulanan bir yöntem olup blokta boşluk yoktur.
6. Üst yapı elemanları için döküm (SI): İzole edilecek üst yapı elemanlarının dökümü için üretim yöntemi.
7. Haç şekilli döküm (Cruciform casting) (RX): Özel haç şekilli çeker elemanlarının dökümü için özel proses, parça boşluksuz, porosite bünye içine dağılmış.

B.1.1.1 AZS (Alümina-Zirkonya-Silika) ergitme-döküm refrakterler

Cam fırınlarında özellikle cam havuzlarında en yaygın biçimde kullanılan ergitme döküm malzemeler; Bileşimleri alümina (Al_2O_3), zirkonya (ZrO_2) ve silika

(SiO₂)’dan oluşmaktadırlar. Minerolojik olarak AZS malzemelerin yapısı korondum (Al₂O₃), badalit (ZrO₂) ve camsı fazdan oluşmaktadır. [1]

B.1.1.2 Yüksek Alüminalı ergitme-döküm refrakterler

Bu malzemeler camsı faz içermeyen veya çok az içeren tamamı ile kristalen malzemelerdir. Kristalen yapı olarak alümina refrakterlerin α , $\alpha - \beta$ ve β olmak üzere üç hali bulunmaktadır. $\alpha - \beta$ alümina malzemeler çalışma bölümünde cam temas bloğu olarak (örneğin: yan duvarlar, döşeme, besleme kanalları, float camı kanalı ve ağızı) yaygın olarak kullanılmaktadırlar. [1]

B.1.2 Zirkon, Zirkonya refrakter malzemler:

Refrakter olarak iki zirkonyum minerali oldukça önemlidir; zirkonya veya badalit (ZrO₂) ve zirkon, zirkonyum silikat (ZrSiO₄). Bunlardan zirkon % 65 ZrO₂ ve % 33 SiO₂ içerir ve zirkonyanın aksine çalışma sıcaklığı 1800 °C’nin altındaki sıcaklıklarla sınırlıdır, çünkü bu sıcaklıkta ZrO₂ + SiO₂’ye bozunur. Bileşime bağlı olarak bozunma daha düşük sıcaklıklarda da başlayabilmektedir. 1000 °C lineer genleşmesi % 0,45 olup, müllit ve özellikle zirkonya’dan daha düşüktür. termal iletkenliği zirkonyaya göre daha yüksektir. Ve elastisiteyi yetersiz olmasına rağmen zirkon tuğlaların termal şok dayanımları oldukça iyidir. [1]

Zirkon tuğlalar, cam fırınlarında üst yapıda ve fırın tabanında emniyet tabakası olarak kullanılmaktadırlar. Üst yapıda, özellikle bekler bölgesinde silikaca zengin akıntıları emerek bunları etkisiz hale getirebilirler. Zirkonyum silikat ve ergitilmiş silikadan yapılan tuğlalar termal şoka karşı dayanıklı olup, bilhassa sıcak tamir işlerinde kullanılmaktadırlar. [1]

B.1.3 Silika refrakterler:

silika tuğlalar esas olarak silisyum dioksit veya daha güncel ifadesi ile silikadan üretilirler. Esas ham maddesi yüksek saflıklı kuarstur. Üretimde bağlayıcı olarak % 2 civarında kireç kullanılır. Kuarsın kimyasal bileşimi ve saflığı çok önemlidir. Özellikle alümina ve alkali içeriğinin çok düşük olması gerekir, çünkü bunlar tuğlaların kullanım sıcaklığını büyük oranda düşürmektedir.

Silikanın ergime sıcaklığı 1723 °C olup, silika tuğlalar 1450-1500 °C sıcaklıklarda, birkaç hafta süre ile pişirilirler.

Silika tuğlalar, cam fırınlarında daha çok fırın üst yapısında ve kemerde kullanılırlar. Fırındaki yerleri aktif buharların, tozların ve yüksek sıcaklığın hakim olduğu kısımlardır. Yüksek refrakterlik özelliği, mekanik dayanımı ve ergime noktasına yakın sıcaklıklara kadar bütünlüğünü koruyabilme özellikleri yanında fırın üst yapısında ve kemerinde kullanılmasının en büyük avantajı, bileşimin camın esas yapısı olan silika ile aynı olması nedeni ile, refrakterden cam içine düşecek bir parçanın camda kalite sorununa neden olmamasıdır. [1]

B.1.4 Alümina Silikat refrakterler

Bileşimi esas olarak Al_2O_3 ve SiO_2 'den oluşan tuğlalar. Al_2O_3 içeriğine bağlı olarak refrakterlikleri artmaktadır. [1]

B.1.4.1 Ateş tuğlaları

Refrakter ateş tuğlası için en çok kullanılan killeri ; flint, yarı flint, plastik, yarı plastik ve kaolen killeri. Tek başına kilin kurutulması ve pişirimi sırasında önemli boyut küçülmeleri söz konusudur. Ve saf plastik kilden büyük şekilli parçaların üretilmesi mümkün değildir. Bu nedenle genel olarak yüksek ve süper kullanım ateş tuğlaları için çeşitli killerin karışımı kullanılır. Küçülmeyi azaltmak ve uygun boyut ve şekilde refrakter tuğla üretebilmek için kil, önceden pişirilerek hacmi sabitlenmiş ateş kili (şamot) ile karıştırılmak sureti ile daha yavan hale getirilir. Flint kili ve yüksek kalite kaolen refrakterliği arttırırken, kalsine edilmiş ateş kili kuruma ve pişme küçülmelerinin kontrolünü sağlar. Plastik killeri ise şekillendirmeyi kolaylaştırır. Üretilen tuğlanın niteliği ve kalitesine göre kullanılacak killerin özelliklerinin ve oranlarının kontrolü şarttır. [1]

Tuğlalar preslenerek şekillendirilirler ve içerdikleri hammaddeye bağlı olarak 1250-1500 °C'de pişirilirler. Yüksek sıcaklıkta pişirilmelerinden kaynaklanan yapıdaki mullit oluşumu refrakterlik özelliği kazanmalarını sağlamaktadır.

Ateş tuğlaları fırın tabanında izolasyon ve taşıyıcı tabakaların inşasında ve fırın üst yapısında izolasyon malzemesi olarak kullanılırlar. [1]

B.1.4.2 Yüksek Alüminalı refrakterler

bileşimi normal kil bileşimi ile oluşturulamayan, Al_2O_3 içeriği % 47 veya üstünde olan malzemeler yüksek alüminalı olarak tanımlanmaktadır.

ASTM standartlarına göre, yüksek alüminalı refrakterler, Al_2O_3 içeriklerine göre: % 50, % 60, % 70 ve % 80 alüminalı olarak gruplandırılmışlardır. Bunlardan başka bazı özel olarak tanımlanmış yüksek alüminalı refrakter malzemelerde mevcuttur:

- Müllit tuğla : esas olarak müllit ($3 Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2$) mineral fazından oluşur ve ağırlık olarak % 71,8 Al_2O_3 ve % 28,2 SiO_2 içermektedirler.
- Kimyasal olarak bağlı tuğla: Genellikle fosfat bağlı, % 75-85 bileşim aralığında malzemelerdir.
- Alümina-Krom tuğla: saflığı yüksek, yüksek alüminalı malzemeler ve krom oksit (Cr_2O_3)'ten üretilirler.

Silika-alümina sisteminde alümina miktarı arttıkça refrakterlik özelliğinde artış olmaktadır. Yüksek alüminalı refrakterlerin üretiminde kuru presleme yöntemi kullanılmaktadır. Pişirme sıcaklığı doğal hammaddelerden üretimde $1550\text{ }^{\circ}C$, sentetik malzemelerden üretimde $1700\text{ }^{\circ}C$ ye kadar çıkılabilmektedir. [1]

B.1.5 İzolasyon refrakterleri

Farklı bileşim ve özelliklerde izolasyon refrakterleri mevcuttur. Bunlardan bazılarının yalıtım özellikleri kullanılan ham maddenin doğal niteliklerinden kaynaklanırken diğerleride poroz yapı uygulanan üretim prosesi ile sağlanır. İçerisinde değişen oranlarda Al_2O_3 ve SiO_2 içermektedirler. [1]

B.1.6 Refrakter harçlar

Cam sanayiinde dökülerek şekil verilebilen refrakter malzemelerin kullanımı, oldukça yaygındır. Bu malzemeler kimyasal bileşim olarak; ateş tuğlası, müllit, yüksek alüminalı tuğla, silika, magnezya, magnezya-krom, krom-alümina, krom, zirkon, AZS vb. uygulamada mevcut her türlü refrakter tuğla ile birlikte kullanılabilinecek monolitik refrakterler mevcuttur. Genellikle her tip kendi tipinden refrakterler ile kullanılmaktadır. Harçlar kuru veya ıslak olabilirler. Hava ile, ısı ile, kimyasal veya ekzotermik tepkimelerle sertleşen tipleri mevcuttur. Isı ile

sertleşenlerin uygun seramik bağı oluşturabilmeleri için belirli bir sıcaklığın üzerine ısıtılmaları gereklidir. [1]

Uygulama şekli ve amacı yönünden; harç şeklinde olanlar, dövülerek sıkıştırma ile uygulananlar, plastikler,dökülerek şekillendirilenler, tamir malzemeleri ve tabanca ile uygulananlar şeklinde sınıflandırılabilirler. [1]

Uygulama yerleri ise fırın tabanında emniyet tabakası olarak kullanılan harçlar taban döşeme plakaları ve varsa emniyet plakaları altına en son istenen kalınlığın, % 50 fazlası kalınlıkta serilerek dövülmek sureti ile sıkıştırılırlar. Sıkıştırma sonrası kalınlığı genellikle 30-50 mm. arasındadır. Silika kemerin inşası ve tamiri için zirkon harçlar veya ergimiş silika esashı harçlar kullanılmaktadır. [1]