

75012

**CAM FIRINI YAN DUVAR REFRAKTERİNDE OLUŞAN KOROZYON VE
SICAKLIKLARIN SAYISAL OLARAK HESAPLANMASI VE DENEYSEL
DEĞERLERLE KARŞILAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Mahmut AYDIN

75012

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 4 Aralık 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Mayıs 1998

Tez Danışmanı

: Prof. Dr. F. Taner ÖZKAYNAK

Diğer Jüri Üyeleri

: Prof. Dr. Osman GENÇELİ

Prof. Dr. Mecit SİVRİOĞLU

Prof. Dr. Salim ÖZÇELEBİ

Prof. Dr. Barlas ERYÜREK

F. Taner Özkaynak
Osman Gençeli
Mecit Sivrioğlu
Salim Özçelebi
Barlas Eryürek

Mayıs 1998

Y.Ü. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU

DOĞRU KARAR

ÖNSÖZ

Bana bu tez konusunu vererek, çalışmalarımın her aşamasında büyük bir özveriyle ilgi, destek ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Taner ÖZKAYNAK 'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarım esnasında deneyimlerini benimle paylaşan Y. Doç. Dr. Şefaaddin YÜKSEL, Y. Doç. Dr. Nizami AKTÜRK ve Dr. M. Kemal ERVAN ile tez yazımı esnasında katkılarından dolayı Y.Müh. Yavuz ZÜMRÜT ve Y.Müh. Mustafa CEVİZ'e teşekkürü borç bilirim. Şişe Cam Fabrikaları A.Ş.'ye bağlı Trakya Cam Fabrikası'nda yapmış olduğum gözlem ve deneylere izin veren Fab.Müdürü Semih ÖZDURMUŞ'a ve deneyler esnasında bana her türlü yardımda bulunan Üretim Müdürü Şevket ASILKAZANCI, Proje Şefi Celil KARABIYIK ve değerli önerileri ile çalışmanın gelişmesine katkıda bulunan Düz Cam Üretim Şefi Haşim EKİCİ'ye teşekkür etmek isterim.

Ayrıca, her türlü doküman temini ve bilgilendirme açısından desteğini ve ilgisini gördüğüm Araştırma Merkezi Enerji Bölümü tüm çalışanlarına ve Araştırma Merkezi Kütüphane sorumlusu A. Semih İŞEVİ'ye teşekkür ederim.

Son olarak, çalışmalarım esnasında bana her türlü yardımlarını esirgemeyen eşim ve aileme minnet borcumu ayrıca belirtmek isterim.

Mayıs 1998

Mahmut AYDIN

İÇİNDEKİLER

DIŞ KAPAK	I
İÇ KAPAK	II
ÖNSÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
NOTASYON LİSTESİ	VIII
ŞEKİL LİSTESİ	X
TABLO LİSTESİ	XV
ÖZET	XVI
SUMMARY	XVII

BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1 Daha Önceki Çalışmalar	2
1.2 Yapılan Çalışmanın Kapsamı	6

BÖLÜM 2. CAM FIRINI DUVAR KOROZYON PROFİLLERİNİN HESAPLANMASI	8
2.1 Temel Denklemler	8
2.2 Temel İfadelerin Sıcaklıkla Değişimi	13
2.3 Cam-Refrakter Ara Yüzeyi Sıcaklığı	16
2.4 Refrakter Duvarının Korozyon Profilinin Hesaplanması	18

BÖLÜM 3. DIŞ YÜZEYİNDE HAVA SOĞUTULMASI YAPILAN CAM FIRINI REFRAKTER DUVAR BLOĞUNDAKİ SICAKLIKLARIN VE ISI KAYIPLARININ SAYISAL OLARAK HESAPLANMASI	19
3.1 Refrakter İçindeki Düzenli Olmayan Ağ Sistemi İçin Laplace Denkleminin Sonlu Farklar Metodu İle Formülasyonu	19
3.2 Düzensiz Bir Ağ Yapısına Sahip Bir Bloğun Tanımlanması ve Örnek Bir Problem Üzerinde Eş-Sıcaklık Eğrilerinin Bulunması	22
3.3 Refrakter Soğutulmasında Isı Taşınım Katsayısının Tespiti ve Blok Isı İletim Katsayısının Sıcaklıkla Değişimi	25

3.4 Dış Yüzeyinden Hava-Jeti İle Soğutulan Cam Fırını Duvar Refrakterine Ait Sıcaklık Sınırı Şartları	27
3.5 Düzensiz Bir Ağ Yapısı Bulunan Refrakter Bloğuna Ait Laplace Diferansiyel Denkleminin Çözümü	32
3.6 Hava Soğutmasıyla Refrakter Bloğundan Çekilen Isı Yükleri Ve Yıllara Göre Dağılımı	32
BÖLÜM 4 SINIR ELEMAN YÖNTEMİ (BOUNDARY ELEMENT METHOD) İLE DIŞ YÜZEYİNDEN HAVA SOĞUTMASI YAPILAN REFRAKTER BLOĞUNDAKİ SICAKLIKLARIN HESAPLANMASI	35
4.1 Poisson Tipi Problemlere Sınır Eleman Metodunun Uygulanması	35
4.2. 2-Boyutlu Laplace Denkleminin Sınır Eleman Yöntemi İle Çözümü	39
4.2.1 Bölge Sınırlarının E Tane Elemana Ayrıştırılması	41
4.2.2 Akı Hesabı (Flux Computation)	46
4.3 Dış Yüzeyinden Hava Soğutması Yapılan Refrakter Duvarındaki Sıcaklıkların Sınır Eleman Metodu Kullanılarak Çözümü	48
BÖLÜM 5 CAM FIRINLARINDA MEYDANA GELEN AŞINMANIN ZAMANLA DEĞİŞİMİNİN DENEYSEL OLARAK TESPİT EDİLMESİ VE REFRAKTER DIŞ YÜZEYİNDEKİ SICAKLIKLARIN ÖLÇÜLMESİ	51
5.1 Refrakter Aşınmasının Deneysel Olarak Ölçülmesi	51
5.2 Refrakter Yüzeyi Sıcaklığının Deneysel Olarak Ölçülmesi	53
BÖLÜM 6. CAM FIRINI YAN DUVAR REFRAKTERİNDE OLUŞAN AŞINMA PROFİLİNE AİT SAYISAL SONUÇLARIN DENEYSEL DEĞERLERLE KARŞILAŞTIRILMASI	55
6.1 Refrakter Aşınmasının Sayısal Olarak Hesaplanması	55
6.2 Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	57
6.3 Hava Soğutmasının Refrakter Aşınmasına Olan Etkisi	60

6.3.1 Fırın Yan Bloklarının Isı İzolasyonlu Olması Durumunda Refrakterde Oluşan Aşınmanın Zamanla Değişimi	62
6.3.2 Trakya Cam Fabrikasında TRII Nolu Fırında Kullanılan Bloğun Etkin Bir Hava Soğutması Yapılması Halinde Ömrünün Hesaplanması	65
6.4 Sıvı Cam Sıcaklığının Refrakter Korozyonuna Etkisi	69
6.5 Refrakterin Aşınma Ömrünün Blok Kalınlığı İle Değişimi	71
6.6 Refrakter Aşınma Ömrünün Soğutma Havası Sıcaklığı İle Değişimi	73

BÖLÜM 7 DIŞ YÜZEYİNDEN HAVA SOĞUTMASI YAPILAN REFRAKTER BLOĞUNDA OLUŞAN SICAKLIK VE ISI KAYIPLARINA AİT SONLU FARKLAR METODU SONUÇLARI	75
7.1 Fırın Yan Bloklarının Isı İzolasyonlu Olması Halinde Bloкта Oluşan Sıcaklıklara Ait Sonlu Farklar Metodu Sonuçları	76
7.2 Dış Yüzeyinde Hava Soğutması Yapılan Bloкта Oluşan Sıcaklıklara Ait Sonlu Farklar Metodu Sonuçları	80
7.3 Hava Soğutmasıyla Refrakter Bloğundan Çekilen Isı Yüklerine Ait Sayısal Sonuçlar	83
7.4 Dış Yüzeyinden Hava Soğutması Yapılan Cam Fırını Refrakter Bloğunda Ölçülen Sıcaklık Değerlerinin Sonlu Farklar Metodu Sonuçları İle Karşılaştırılması	85

BÖLÜM 8 DIŞ YÜZEYİNDEN HAVA SOĞUTMASI YAPILAN FIRININ REFRAKTER BLOĞUNDA OLUŞAN SICAKLIKLARA AİT SINIR ELEMAN METODU (BOUNDARY ELEMENT METHOD) SONUÇLARI VE BU DEĞERLERİN DENEYSEL SONUÇLARLA KARŞILAŞTIRILMASI	92
8.1 Refrakter Bloğu Sınırlarının Lineer Elemanlara Ayrıştırılması	92

8.2 Sınır Eleman Metodu (SEM) Sonuçlarının Deneysel Sıcaklık Değerleri İle Karşılaştırılması	95
8.3 Sonuçlar	98
KAYNAKLAR	102
EKLER	105
ÖZGEÇMİŞ	125



NOTASYON LİSTESİ

a	: Sabit
b	: Sabit
B	: Lüle çıkış kesitinin dar kenarı (m)
C_w	: Sıvı içindeki katının hacimsel oranı
C_α	: Ortamdaki katının hacimsel oranı
C_{wr}	: C_w değişkeninin $x = 0$ noktasındaki değeri
C_p	: Refrakter malzemesinin özgül ısısı ($J/kg^\circ C$)
D	: Difüzyon katsayısı (m^2/s)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
H	: Lüle çıkışının yüzeye dik olan mesafesi (m)
h_E	: Hava-Jeti'ne ait ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_1	: Sıvı cam ile refrakter arasındaki ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
j	: Refrakter duvarının çözünme hızı (m/s)
K_1, K_2	: Sıvı cam ve refrakterin malzeme özelliklerine ait katsayılar (m/s)
k	: Refrakter malzemesinin ısı iletim katsayısı (W/mK)
k_1	: İzolasyon malzemesinin ısı iletim katsayısı (W/mK)
k_2	: Ahşap malzemesinin ısı iletim katsayısı (W/mK)
k_{top}	: İzolasyon malzemesinin toplam ısı iletim katsayısı (W/m^2K)
k_v, k_D, k_C, k_Q	: Sabit sayılar
L	: Refrakter bloğunun boyu (m)
L_e	: Sınır eleman üzerindeki "e" inci eleman uzunluğu (m)
LL	: Refrakterde x-ekseni doğrultusundaki toplam ağ noktası sayısı
ℓ_1	: Refrakter dış yüzeyindeki izolasyon malzemesi kalınlığı (m)
ℓ_2	: Refrakter dış yüzeyindeki ahşap malzemesi kalınlığı (m)
MM	: Refrakterde y-ekseni doğrultusundaki toplam ağ noktası sayısı
N	: Refrakter içindeki toplam ağ noktası sayısı
N_1, N_2	: Global koordinatlardaki Şekil fonksiyonlarıdır.
n_x, n_y	: Sınır eleman üzerindeki x ve y yönündeki normal vektörler

$\overline{Nu}$, Pr , Re	: Havaya ait Nusselt, Prandtl ve Reynolds sayılarıdır
Q_r	: Refrakterde x_r mesafesi içinde çözünen madde hacmi (m^3)
q_i	: Refrakterin izolasyonlu olması halinde refrakterin birim kütlesinde depolanan ısı miktarı (kJ/kg)
q_o	: Belli hava üfleme hızında refrakterin birim kütlesinde depolanan ısı miktarı (kJ/kg)
$\vec{r}$	: Γ sınırı üzerindeki hareketli yer vektörü
$\vec{r}_\ell$	: Sınır elemanı üzerindeki " ℓ " noktasına ait yer vektörü
S	: Lüle hidrolik çapı (m)
Sc	: Schmidt sayısı
Sh	: Sherwood sayısı
T_A	: Dış ortam hava sıcaklığı (K)
T_R	: Refrakter bloğu sıcaklığı (K)
T_Y	: Yanma bölgesi sıcaklığı (K)
T_i	: Refrakter ile camın ara yüzeyi sıcaklığı (K)
t	: Zaman (s)
u	: Duvar boyunca oluşan toplam ısı geçiş katsayısı (W/m^2K)
v	: Havanın lüle çıkış hızı (m/s)
Y_o	: Refrakterin başlangıç kalınlığı (m)
θ	: Bloğa ait boyutsuz sıcaklık
$\theta_1, \theta_2, \theta_{1F}, \theta_{2F}$	: Sıvı cam ve refrakterin malzeme özelliklerine ait katsayılar (K)
θ_d	: İzolasyon malzemesinin boyutsuz dış yüzey sıcaklığı
θ_c	: Sıvı cam viskozitesi için karakteristik sıcaklık (K)
θ_i	: Soğutmanın olmadığı durumda refrakterde oluşan boyutsuz sıcaklık
$\Delta\theta$	: Belli hava üfleme hızında refrakterde oluşan sıcaklık farkı (K)
$\Delta\theta_i$	: Soğutmanın olmadığı durumda refrakterde oluşan sıcaklık farkı (K)
ν	: Camın kinematik viskozitesi (m^2/s)
β	: Konsantrasyon genişleme katsayısı
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	: Refrakter dış yüzeyine ait ışınlama yayma katsayıları

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Yan blokların yaygın aşınma profili	3
Şekil 1.2 30 cm kalınlığındaki yan blokların zamana karşı aşınma eğrisi	5
Şekil 1.3 Soğutma uygulandığında 30 cm kalınlığındaki yan blokların aşınma eğrisinde oluşan değişim	5
Şekil 2.1 Koordinat sistemi ve sıcaklıklar	9
Şekil 2.2 Başlangıç noktasının x_r etkin uzaklığı kadar ötelenmiş hali	11
Şekil 2.3 Cam-refrakter ara yüzeyi	12
Şekil 2.4 Y_0 kalınlığındaki bir refrakterin yüzeyindeki sıcaklıklar ve ısı taşınım katsayıları	17
Şekil 3.1 Farklı uzaklıklardaki noktalara (grid points) sahip ağ	20
Şekil 3.2 Kenarları sabit sıcaklıkta olan ve düzensiz bir ağ yapısına sahip blok	22
Şekil 3.3 Eşkenar üçgen boşluğa (cavity) sahip ve sınırları sabit sıcaklıkta olan simetrik (y eksenine göre) bir bloktaki eş sıcaklık eğrileri	23
Şekil 3.4 Simetrik olmayan ve sabit sıcaklıkta kenarlara sahip blok	24
Şekil 3.5 Kenarları sabit sıcaklıkta olan ve şekil simetrisi bulunmayan bir bloktaki eşsıcaklık eğrileri	24
Şekil 3.6 Bloğun dikdörtgen çıkış kesitine sahip lüle kullanılarak hava-jet'i ile soğutulması	25
Şekil 3.7 AZS refrakter malzemesinin (ER 1681) ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi	27
Şekil 3.8 Cam fırını yan refrakter bloğunun şekli ve sıcaklık sınır şartları	28
Şekil 3.9 A ve B noktaları arasında kalan izolasyonlu bölge	28
Şekil 3.10 Cam içerisindeki sıcaklık değişimi	29
Şekil 3.11 AZS tipi (ER 1681) refrakterin özgül ısısının sıcaklıkla olan değişimi	33
Şekil 4.1 Poisson tipi denklemin tanımlandığı bölgenin elemanları	35
Şekil 4.2 r_r ve r vektörlerinin tanımlanması	38
Şekil 4.3 Bölge sınırlarının (a) sabit ve (b) lineer elemana ayrıştırılmış hali	39

Şekil 4.4 Sınırların E tane elemana ayrıştırılması (Her biri Γ_e ile gösterilmiştir) ...	41
Şekil 4.5 Sabit eleman şekil fonksiyonu	42
Şekil 4.6 Global koordinatlarda lineer şekil fonksiyonları	43
Şekil 4.7 Elemanlar arası noktasal bağlantı	46
Şekil 4.8 Cam fırını yan bloğunun orjinal şekli ve sıcaklık sınır şartları	48
Şekil 4.9 Elemanların birleşmesi	50
Şekil 4.10 Süreksiz eleman	50
Şekil 5.1 Kalınlığı 300 mm olan refrakter bloğuna ait aşınma ölçüm noktaları	51
Şekil 5.2 Fırının yan refrakter duvarının kesiti	52
Şekil 5.3 Fırının sıvı cam yüzeyindeki farklı noktalarda meydana gelen aşınma miktarının zamanla değişimi	52
Şekil 5.4 Cam seviyesindeki kalınlığı 4 cm'ye kadar incelmış olan bloktaki sıcaklık ölçüm noktaları	53
Şekil 6.1 6 Ay sonra fırının yan refrakter duvarında oluşan aşınma profili	56
Şekil 6.2 24 Ay sonra fırının yan refrakter duvarında oluşan aşınma profili	56
Şekil 6.3 42 Ay sonra fırının yan refrakter duvarında oluşan aşınma profili	57
Şekil 6.4 84 Ay sonra fırının yan refrakter duvarında oluşan aşınma profili	57
Şekil 6.5 Sıvı cam seviyesinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen aşınma değerlerinin aylara göre değişimleri	58
Şekil 6.6 Mersin Şişe Cam Fabrikasında kullanılan refrakterde cam seviyesinde oluşan aşınmanın yıllara göre değişimi	59
Şekil 6.7 Sıvı cam içerisindeki sıcaklık dağılımı (cam yüzeyi sıcaklığı 1743 K) ...	60
Şekil 6.8 Trakya Cam Fabrikasına ait TRII nolu fırında kullanılan yan blok kesiti	60
Şekil 6.9 Sıcaklık ölçümünün yapıldığı cam seviyesi üzerindeki A noktası.	61
Şekil 6.10 Fırın yan bloklarının izolasyonu	62
Şekil 6.11 Yan bloğunun tümü ısıya karşı izolasyonlu olan refrakterde 1 ay sonra oluşan aşınma eğrisi	63
Şekil 6.12 Yan bloğunun tümü ısıya karşı izolasyonlu olan refrakterde 2 ay sonra oluşan aşınma eğrisi	63

Şekil 6.13 Yan bloğunun tümü ısıya karşı izolasyonlu olan refrakterde	
3 ay sonra oluşan aşınma eğrisi	64
Şekil 6.14 Yan bloğunun tümü ısıya karşı izolasyonlu olan refrakterde	
4.5 ay sonra oluşan aşınma eğrisi	64
Şekil 6.15 Sıvı cam içerisindeki sıcaklık dağılımı (cam yüzey sıcaklığı 1773 K)	64
Şekil 6.16 6 ay sonra refrakter yan bloğunda oluşan aşınma profili	66
Şekil 6.17 36 ay sonra refrakter yan bloğunda oluşan aşınma profili	66
Şekil 6.18 51 ay sonra refrakter yan bloğunda oluşan aşınma profili	67
Şekil 6.19 72 ay sonra refrakter yan bloğunda oluşan aşınma profili	67
Şekil 6.20 TRII nolu fırında kullanılan refrakterde sıvı cam seviyesinde	
oluşan aşınmanın zamanla değişimi ($V = 42 \text{ m/s}$, $T_F = 1773 \text{ K}$)	68
Şekil 6.21 Farklı soğutma hızlarında sıvı cam seviyesinde oluşan korozyonun	
zamanla değişimi (TRII nolu fırın, $T_F = 1773 \text{ K}$)	69
Şekil 6.22 Farklı soğutma hızlarında refrakter ömrünün sıvı cam	
sıcaklığı ile değişimi	70
Şekil 6.23 Sıvı cam içerisindeki sıcaklık profili	71
Şekil 6.24 Cam seviyesinde S kalınlığına sahip refrakter	71
Şekil 6.25 Farklı soğutma hızlarında refrakterin aşınma ömrünün	
blok kalınlığı (S) ile değişimi	72
Şekil 6.26 Farklı soğutma havası hızlarında hava sıcaklığı ile refrakter ömrü	
arasındaki değişim	73
Şekil 7.1 İzolasyonlu fırının yan blok ölçüleri ve blok üzerinde sıcaklık sınır	
şartlarının farklılık gösterdiği noktalar	76
Şekil 7.2 Isı ızalasyonlu blokta 2 ay sonra oluşan aşınma eğrisine yapılan	
lineer yaklaşım	77
Şekil 7.3 Refrakter yan bloklarının izolasyonlu olması halinde 1 ay sonra	
blokta oluşan eşsıcaklık eğrileri	78
Şekil 7.4 Refrakter yan bloklarının izolasyonlu olması halinde 2 ay sonra	
blokta oluşan eşsıcaklık eğrileri	78

Şekil 7.5 Refrakter yan bloklarının izolasyonlu olması halinde 3 ay sonra bloкта oluşan eşsıcaklık eğrileri	79
Şekil 7.6 Refrakter yan bloklarının izolasyonlu olması halinde 4.5 ay sonra bloкта oluşan eşsıcaklık eğrileri	79
Şekil 7.7 Dış yüzeyinden hava soğutmasına maruz kalan bloкта 72 ay sonra oluşan aşınma eğrisine yapılan lineer yaklaşım	80
Şekil 7.8 Dış yüzeyinden hava soğutması yapılan bloкта 6 ay sonra oluşan eşsıcaklık eğrileri	81
Şekil 7.9 Dış yüzeyinden hava soğutması yapılan bloкта 36 ay sonra oluşan eşsıcaklık eğrileri	81
Şekil 7.10 Dış yüzeyinden hava soğutması yapılan bloкта 51 ay sonra oluşan eşsıcaklık eğrileri	82
Şekil 7.11 Dış yüzeyinden hava soğutması yapılan bloкта 72 ay sonra oluşan eşsıcaklık eğrileri.....	82
Şekil 7.12 Farklı soğutma hızlarında refrakter bloğundan çekilen ısı miktarının zamanla değişimi	84
Şekil 7.13 Cam seviyesindeki kalınlığı 0.04 m'ye kadar aşınmış olan bloktaki yaklaşık korozyon profili	86
Şekil 7.14 Cam seviyesindeki kalınlığı 0.04 m olan bloktaki korozyon eğrisine uygulanan doğrusal yaklaşım	86
Şekil 7.15 Refrakter dış yüzeyindeki izolasyon kesiti ($l_1 = 0.150$ m, $l_2 = 0.01$ m)	87
Şekil 7.16 Dış yüzeyinden hava soğutması yapılan cam fırını refrakter bloğunda eşdeğer aşınma profili kullanılarak elde edilen eşsıcaklık eğrileri	89
Şekil 7.17 Sonlu farklar metodu sonuçlarının refrakter üzerinde deneysel olarak ölçülen sıcaklık sonuçları ile karşılaştırılması	90
Şekil 7.18 Refrakter üzerindeki farklı noktalarda elde edilen Sonlu Farklar Metodu ve deneysel sonuçlar arasında oluşan % hata oranlarının değişimi.....	91

Şekil 8.1 Cam seviyesindeki kalınlığı 0.04 m olan bloktaki aşınma profiline uygulanan eğrisel yaklaşım	93
Şekil 8.2 Sınır Eleman Metodu kullanılarak sıcaklık çözümü yapılacak refrakterin şekli ve sınırlarının elemanlara ayrıştırılmış hali	94
Şekil 8.3 Sınır Eleman Yöntemi sonuçlarının deneysel olarak ölçülen sıcaklık değerleri ile karşılaştırılması	95
Şekil 8.4 Sınır Eleman Metodu sonuçları ile refrakter üzerinde ölçülen sıcaklık değerleri arasında oluşan % hata değişimi	96
Şekil 8.5 Hava ile soğutma yapılan refrakter dış yüzeyindeki sıcaklık türevlerinin değişimi	97
Şekil 8.6 SEM ve SFM sayısal yöntemleri ile elde edilen sıcaklık sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.....	97

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 1. Sıvı cam ve refrakterin malzeme özellikleri [19]	16
Tablo 2. Ergimiş cam sıcaklığı (T_M) profilleri [19]	17
Tablo 3. Refrakter üzerinden ölçüm alınan noktalar ve bu noktalardaki sıcaklıklar ...	54
Tablo 4. A noktası sıcaklığının fırından çekilen cam miktarına göre değişimi	61



ÖZET

Günümüzde cam fırınlarının ilk yatırım maliyetinin yüksek olması nedeniyle fırınların kampanya ömrünün mümkün olduğunca uzun olması istenir. Bundan dolayı fırın ömrünü belirleyici faktör olan refrakter aşınmasının kontrol edilmesi, işletmeciler için firmadan önemlidir. Ayrıca fırının projelendirme aşamasında, öngörülen performansın gerçekleşmesi ve üretim akışını en az oranda etkileyecek programlı bakım ve onarımın yapılması gibi önemli hedefler fırın ömrünün doğru tahmin edilmesine bağlıdır. Piyasadaki ticari cam fırınlarında oluşan refrakter korozyonunun kontrol edilmesi için en etkili yöntem, refrakter dış yüzeyinde uygulanan etkin hava ve su soğutmasıdır.

Bu çalışmada, dış yüzeyinden hava soğutulması yapılan bir cam fırının refrakter duvar bloğundaki korozyon sıcaklık ve ısı kayıpları nümerik olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle P. Hırma'nın [19] çalışmasında ortaya koyduğu aşınmanın zamana göre değişimini veren diferansiyel denklem kullanılmıştır. Duvar boyunca oluşan toplam ısı geçiş katsayısının aşınmanın bir fonksiyonu olmasından dolayı diferansiyel denklemin çözümünde sonlu farklar yaklaşımı iteratif yöntemle beraber kullanılmıştır. Farklı hız ve sıcaklıklardaki hava ile yapılan soğutmada, sıvı cam sıcaklığının ve blok kalınlığının refrakter aşınma ömrüne olan etkisi incelenmiş ve sonuçlar grafik olarak sunulmuştur. Ayrıca hesaplanan refrakter duvarı korozyon profillerinden faydalanan blokta eşsıcaklık (isothermal) eğrileri elde edilmiştir. Bu amaçla probleme ait sıcaklık sınır şartlarının lineer olmaması nedeniyle, Laplace diferansiyel denkleminin çözümünde Sonlu Farklar (Finite Difference) ve Sınır Eleman (Boundary Element) metodları ayrı ayrı İteratif Yöntemle beraber kullanılmışlardır. Elde edilen sıcaklık değerleri kullanılarak hava soğutulmasıyla refrakter bloğundan çekilen ısı yükleri ve bunların zamanla olan değişimleri hesaplanmış ve sonuçlar grafik olarak verilmiştir. Son olarak, refrakter bloğunda sayısal olarak elde edilen korozyon ve sıcaklık değerleri fırın üzerinden deneysel olarak elde edilen verilerle karşılaştırılarak sonuçlar irdelenmiştir.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE CORROSION AND TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE SIDEWALLS REFRACTORY BLOCK OF A GLASS FURNACE

SUMMARY

Glass is a material from which many articles are manufactured it plays an important part in daily life, industry, technology, and science. Its transparence, chemical resistance, and relatively high hardness are the reasons for its unique position. However its peculiarities, such as its brittleness and relatively high weight, must be borne in mind when considering its applications.

All glasses are manufactured from carefully selected raw materials, referred to as batch, being melted in furnaces and then manufactured into the desired articles. The manufacturing processes vary widely according to the quantities of glass required. In consequence, melting capacities of individual furnaces also vary widely, covering a range from 100 kg/day for special glasses up to 800 t/day for flat glass.

There has been a steady improvement of furnace performance over the years and much of this can be attributed to improved refractories. The processes by which refractories are corroded in contact with glass are now largely understood. It has been clearly demonstrated that the solution of refractories below glass level is a diffusion controlled process, and that the disturbance of the diffusion barrier leads to the increased rates of attack, such as flux-line corrosion and upward drilling. Of course, these processes are also temperature dependent and the higher the temperature at a given point, the faster the reaction proceeds. The flow past the side walls of a tank furnace is affected by density currents, due to refractory solution and temperature, which are modified by the pull on the tank.

At the flux-line the glass is pulled up into the meniscus above the general glass level by surface tension forces and the increased rate of attack at this point is caused by the stirring action brought about by a surface tension gradient. This stirring action has been clearly demonstrated in a mathematical model of the system. In the model, driving force is taken as a function of surface tension gradient developed as a result of the solution of the refractory. The flux-line corrosion of current refractories is considerably faster at glass-melting temperature than that of below the glass level.

Accordingly, the corrosion below the glass level is not considered with a special care. However, this is not the case when the cooling is taken into account. If the wall thickness has been considerably reduced owing to the developed corrosion, the cooling may essentially diminish the temperature of the inner wall surface. But from a certain temperature downward, the corrosion at the glass level (flux-line corrosion) becomes slower than that below it, as it is the corrosion for a lower temperature, apparent from a number of experimental observations.

The most important factors governing the rate of corrosion of glass furnace sidewalls are: (1) bouyancy convection produced by changes in density resulting from the concentration gradients connected with the dissolution process; (2) throughput and circulation flows inside the furnace; (3) surface convection induced by the concentration gradient at the glass-melt interface. The surface convection brings about either flux-line corrosion or upward drilling by bubbles trapped in horizontal joints or cracks. The impact of these factor is modified by the lack of uniformity of the temperature field in the furnace, wall inhomogeniety, and outer cooling or insulation of the walls.

The problem investigated in this thesis can be studied only by means of mathematical modelling because of its complexity. Although the model presented in this thesis covers most of the above factors for the flows mentioned in (2), upward drilling and wall inhomogeneity are not included. However, the flows mentioned in (1) and (3), that is the flows induced by concentration gradients either within the melt or on its surface, are taken into account. The model thus represents the situation in which homogeneous furnace sidewalls without horizontal joints or cracks (so that no bubble can be trapped) are dissolved by a melt in which buoyancy convection connected with the corrosion process prevails over the throughput and thermally induced circulation flows.

The analysis of the Hrma [9] leads to

$$-Y_t = f_1 \left(1 + \int_0^x f_2 d\zeta\right)^{-1/4} \quad (1)$$

where Y is the wall thickness, subscript t indicates, the time derivate of Y, hence Y_t is the dissolution rate, and f_1 and f_2 are functions defined by

$$f_1 = K_1 \exp(-\theta_1/T_i + \theta_{1F}/T_F) \quad (2)$$

and

$$f_2 = K_2 \exp(-\theta_2/T_i + \theta_{2F}/T_F) \quad (3)$$

where T_i is the temperature at the melt/wall interface, T_F is the value of T_i at $x = 0$, and K_1 , K_2 , θ_1 , θ_2 are coefficients determined by the material properties of both melt and wall. Eq.(1) also involves the flux-line corrosion as a source and the dissolution rate at $x = 0$ is not, therefore, infinite but has a finite value of f_1 .

The temperature at the melt/wall interface is determined by the bulk temperature of the melt and the rate of heat transfer through the wall. For simplicity, the temperature field inside the wall is assumed to be one dimensional. Thus the temperature of the melt/wall interface is

$$T_i = T_M - (T_M - T_A) (U/h_i) \quad (4)$$

where

$$U = (h_i^{-1} + Y/k + h_E^{-1})^{-1} \quad (5)$$

Eq.(5) is the overall heat transfer coefficient, h_i and h_E are the melt/wall and wall/ambient heat transfer coefficients, T_A is the ambient temperature, and k is the heat conductivity of the wall. T_M is the melt temperature and function of the depth of the glass.

If T_M , T_A , h_i and k are given, T_i may be controlled by h_E (Fig. 1), that is by cooling or insulating the wall; in addition, T_i also depends on the wall thickness, Y . Eqs.(1) and (3) are coupled and can not be solved independently.

Eq.(1) was transformed in the finite difference form and was solved numerically using a time increments of 0.25 month. The integral in Eq.(1) evaluated by using the *trapezoidal rule*.

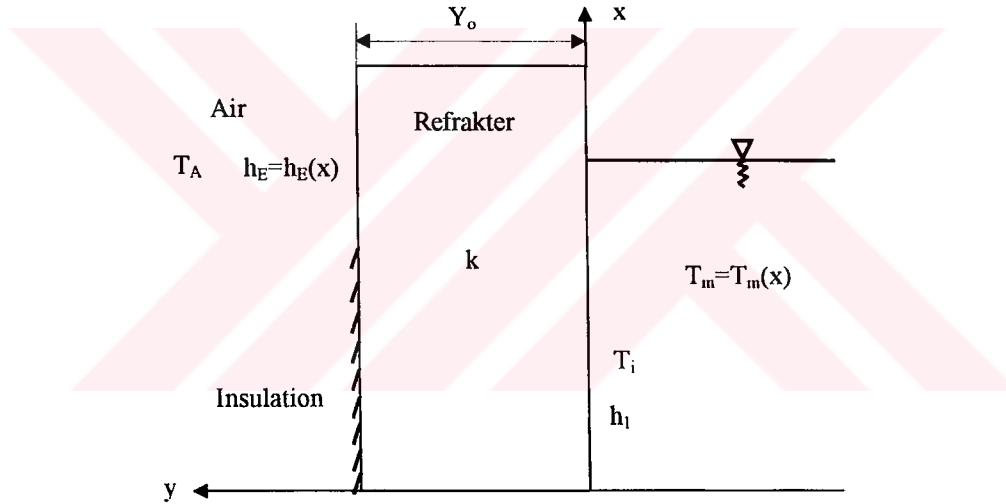


Figure 1 Refractory has a initial wall thickness of Y_o , temperature distribution T_m on the surface and heat transfer coefficient, k

In the computer program 10^{-6} % accuracy for all variables was taken. After solving Eq.(1), corrosion profiles of the refractory was found.

In order to find the steady-state temperature distribution in the refractory by using corrosion profile at time t , *Finite Difference Method* is employed with iterative method due to non-linear temperature boundary conditions. When the boundary of the region is not such that the network can be drawn to have the boundary coincide with the nodes of the mesh, the procedure must be different at points near the boundary. Consider the general case of a group of five points whose spacing is non-uniform, arranged in a unequal-armed star. Each distance is represented by OR h , where OR is the fraction of the standard spacing h that the particular distance represents (Fig. 2).

Along the line from $\theta(I-1, J)$ to $\theta(I, J)$ to $\theta(I+1, J)$, the first derivatives may be approximate as:

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{1-0} \cong \frac{\theta(I, J) - \theta(I-1, J)}{OR1 \cdot h}$$

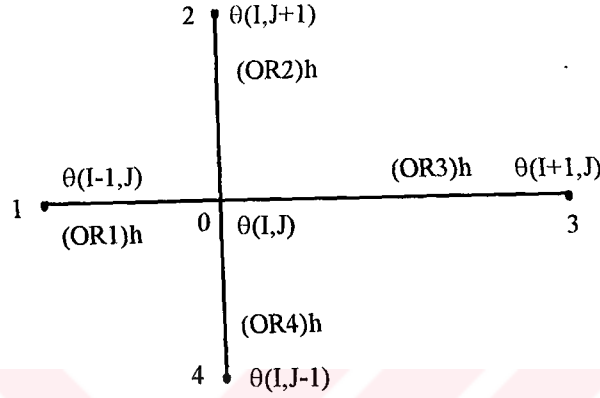


Figure 2 Non-linear mesh points

Similarly,

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{0-3} \cong \frac{\theta(I+1, J) - \theta(I, J)}{OR3 \cdot h}$$

Considering $\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial\theta}{\partial x} \right)$,

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} \cong \frac{2}{h^2} \left[\frac{\theta(I-1, J) - \theta(I, J)}{OR1(OR1 + OR3)} + \frac{\theta(I+1, J) - \theta(I, J)}{OR3(OR1 + OR3)} \right] \quad (6)$$

Similarly,

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} \cong \frac{2}{h^2} \left[\frac{\theta(I, J+1) - \theta(I, J)}{OR2(OR2 + OR4)} + \frac{\theta(I, J-1) - \theta(I, J)}{OR4(OR2 + OR4)} \right] \quad (7)$$

The expressions in Eqs.(6) and (7) have errors $O(h)$. Combining Eqs.(6) and (7) in the Laplace Eq. (8), we get:

$$\nabla^2\theta = \frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} = 0 \quad (8)$$

$$\nabla^2 \theta \cong \frac{2}{h^2} \left[\frac{\theta(I-1, J)}{OR1(OR1 + OR3)} + \frac{\theta(I, J+1)}{OR2(OR2 + OR4)} + \frac{\theta(I+1, J)}{OR3(OR1 + OR3)} \right. \\ \left. + \frac{\theta(I, J-1)}{OR4(OR2 + OR4)} - \left(\frac{1}{OR1 OR3} + \frac{1}{OR2 OR4} \right) \theta(I, J) \right] \quad (9)$$

In order to solve the Eq.(9) in the region described in Fig. 3, associated temperature boundary conditions of the problem is given in the following equations.

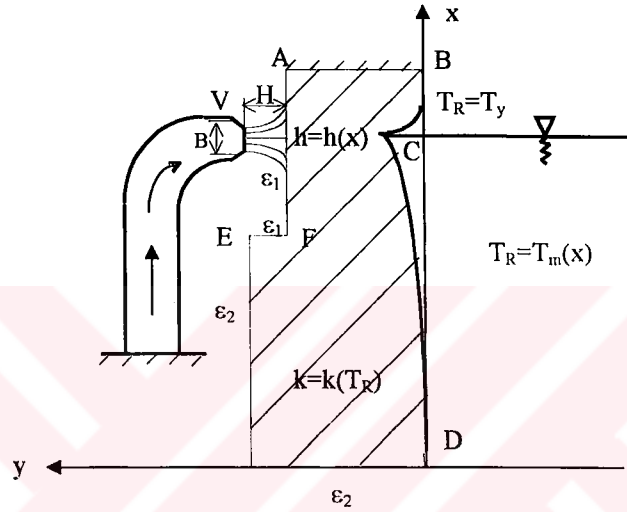


Figure 3 Cross-section area of cooled refractory wall in contact with glass

a) Due to insulation between A and B points,

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

b) The boundary condition in the combustion region between B and C points,

$$\theta = \theta_y \quad (11)$$

c) Region, between C and D points (refractory block contact with melted glass)

$$\theta = \theta_M(x) \quad (12)$$

d) The boundary condition between D and E points,

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{\sigma \epsilon_2 T_h^3}{k(\theta)} (\theta_d^4 - 1) = 0 \quad (y\text{-direction}) \quad (13)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\sigma \epsilon_2 T_h^3}{k(\theta)} (\theta_d^4 - 1) = 0 \quad (\text{x-direction}) \quad (14)$$

e) The boundary condition at the region between E and F points

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\sigma \epsilon_1 T_h^3}{k(\theta)} (\theta^4 - 1) = 0 \quad (15)$$

f) Last boundary condition, can be written between F and A points,

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{h(x)}{k(\theta)} (\theta - 1) + \frac{\sigma \epsilon_1}{k(\theta)} T_h^3 (\theta^4 - 1) = 0 \quad (16)$$

where

θ_d , dimensionless temperature at the outside of the isolation material,
 σ , Steffan-Boltzman constant ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$),
 ϵ_1 , emissivity coefficient of the refractory material,
 ϵ_2 , emissivity coefficient of the isolation material,
 T_h , ambient air temperature (K),
 h , convection coefficient of the air-jet ($\text{W/m}^2 \text{K}$)

Eq.(9) is to be solved numerically by using *Finite Difference Method* with boundary conditions given above. Due to non-linear terms in the boundary conditions, iterative method is employed in combination with *Finite Difference Method*. For this purpose, a suitable computer code is written. The code starts the iteration with an arbitrary temperature profiles and run until obtaining the accuracy value ($10^{-6} \%$) for all variables.

After that, temperature distribution obtained in the mesh points of the refractory block is utilized to see the cooling effect which is applied outside of the refractory. For this purpose, outside of the refractory is completely insulated against the heat transfer, in this case heat transfer (q_i) stored per weight is defined by Eqs.(17) and (18):

$$\sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} \Delta \theta_i(I, J) = \sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} T_h (\theta_i(I, J) - 1.0) \quad (17)$$

and

$$q_i = \frac{1}{N} \sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} \Delta \theta_i(I, J) C_p (\theta_i) \quad (18)$$

where

$\Delta\theta_i$, temperature difference in the refractory block (K),
 θ_i , dimensionless temperature in the refractory block,
 C_p , specific heat value (J/kg°C),
 N , total number of the mesh points,
 MM , total number of mesh points at the y-direction,
 LL , total number of mesh points at the x-direction,
 T_h , ambient temperature (K)

On the other hand, at the different air blowing velocity, one can obtain the stored heat transfer (q_0) per weight of the refractory [19,20].

$$\sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} \Delta\theta(I,J) = \sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} T_h (\theta(I,J) - 1.0) \quad (19)$$

and

$$q_0 = \frac{1}{N} \sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} \Delta\theta(I,J) C_p (\theta) \quad (20)$$

where

$\Delta\theta$, temperature difference appeared in the refractory block at the certain blowing air velocity (K),
 θ , dimensionless temperature appeared in the refractory block at the certain blowing air velocity

Finally, in order to obtain the heat transfer between air-jet and refractory block, it is possible to following equation:

$$\Delta q = q_i - q_0 \quad (21)$$

In order to remove the assumption and perform a better approach, at the boundary of the refractory block contacted with melted glass and compare finite difference results with different numerical method, *Boundary Element Formulation* is applied to find the steady-state temperature distribution in the refractory block. Some general principles of boundary element solution in 2-D should first be considered.

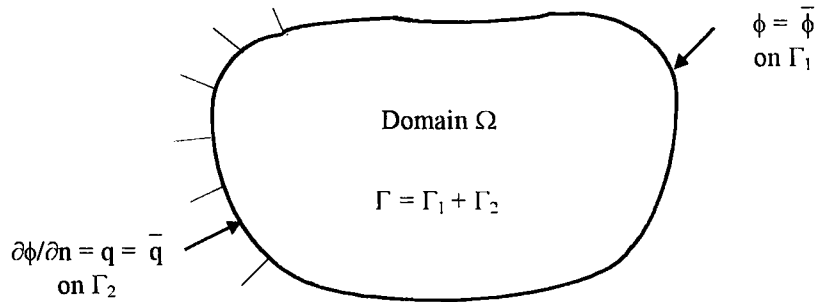


Figure 4 Nomenclature for the well-posed problem of the Laplace type

Starting

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (22)$$

having forced boundary conditions

$$\phi = \bar{\phi} \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (23)$$

and natural boundary conditions

$$q = \bar{q} = \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad \text{on } \Gamma_2 \quad (24)$$

The weighted residual statement is formed as:

$$\int_{\Omega} (\nabla^2 \hat{\phi}) \omega_{\ell} d\Omega + \int_{\Gamma_1} (\hat{\phi} - \bar{\phi}) \bar{\omega}_{\ell} d\Gamma + \int_{\Gamma_2} (\hat{q} - \bar{q}) \bar{\bar{\omega}}_{\ell} d\Gamma = 0 \quad (25)$$

After integrating by parts twice, making the identification

$$\bar{\omega}_{\ell} = \frac{\partial \omega_{\ell}}{\partial n} \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (26)$$

and

$$\bar{\bar{\omega}}_{\ell} = -\omega_{\ell} \quad \text{on } \Gamma_2 \quad (27)$$

The general statement is achieved as:

$$\int_{\Omega} (\nabla^2 \omega_{\ell}) \hat{\phi} d\Omega + \int_{\Gamma_1} \left(\hat{q} \omega_{\ell} - \bar{\phi} \frac{\partial \omega_{\ell}}{\partial n} \right) d\Gamma + \int_{\Gamma_2} \left(\bar{q} \omega_{\ell} - \hat{\phi} \frac{\partial \omega_{\ell}}{\partial n} \right) d\Gamma = 0 \quad (28)$$

At this point, for conveniency

$$\nabla^2 \omega_{\ell} = \delta(\vec{r} - \vec{r}_{\ell}) \quad (29)$$

where $\vec{r} - \vec{r}_{\ell}$ is the position vector from $\vec{r}_{\ell}$ to $\vec{r}$ in whatever space to be working.

Eq.(29) defines the Green's function for the Laplacian operator. In 2-D, this will be:

$$\omega_\ell = \frac{1}{2\pi} \ln|\vec{r} - \vec{r}_\ell| \quad (30)$$

The Green's function in unbounded space. The normal derivative of this *fundamental solution* may be computed as:

$$\frac{\partial \omega_\ell}{\partial n} = \frac{(x - x_\ell)n_x + (y - y_\ell)n_y}{2\pi|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} \quad (31)$$

with Eqs.(30) and (31) it is possible to write Eq.(28) as:

$$\tilde{\phi}(\vec{r}_\ell) + \int_{\Gamma} \left(\frac{\tilde{q}}{2\pi} \ln|\vec{r} - \vec{r}_\ell| - \frac{\tilde{\phi}}{2\pi} \frac{(x - x_\ell)n_x + (y - y_\ell)n_y}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} \right) d\Gamma = 0 \quad (32)$$

where

$$\tilde{\phi} = \begin{cases} \bar{\phi} & \text{on } \Gamma_1 \\ \hat{\phi} & \text{on } \Gamma_2 \text{ or in } \Omega \end{cases} \quad (33)$$

and

$$\tilde{q} = \begin{cases} \bar{q} & \text{on } \Gamma_2 \\ \hat{q} & \text{on } \Gamma_1 \end{cases} \quad (34)$$

If the point $\vec{r}_\ell$ is on the boundary, there is a fractional constant multiplied by $\tilde{\phi}(\vec{r}_\ell)$ in Eq.(32).

Usually Eq.(32) is written as

$$C_\ell \tilde{\phi}(\vec{r}_\ell) + \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} \left(\tilde{q} \ln|\vec{r} - \vec{r}_\ell| - \tilde{\phi} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_\ell) \cdot \vec{n}}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} \right) d\Gamma = 0 \quad (35)$$

where

$$C_\ell = \begin{cases} 1 & \text{for } \vec{r}_\ell \in \Omega, \notin \Gamma \\ 1 - \alpha / 2\pi & \text{for } \vec{r}_\ell \in \Gamma \end{cases} \quad (36)$$

Now, it is the time to discretize Eq. (35) into a system of elements on the boundary. It proceeds by breaking Γ down into distinct segments (Fig. 5), and defining an assumed functional behavior of $\hat{\phi}$ and $\hat{q}$ over each segment.

Approximation to $\hat{\phi}$ on any particular element will be denoted by $\hat{\phi}^e$. Each element's functional formulation will be:

$$\hat{\phi}^e = \sum_{m=1}^M \hat{\phi}_m^e N_m \quad (37)$$

where $\hat{\phi}^e$ is the value of $\hat{\phi}$ at node m , and N_m is the shape function associated with node m . M denotes the number of nodes in the element.

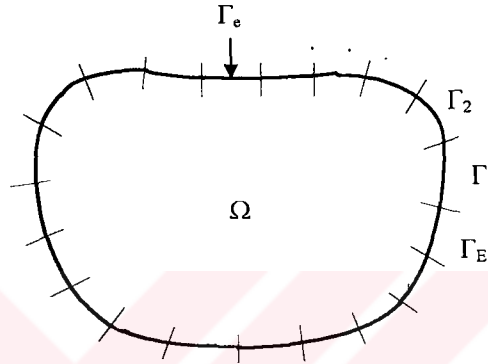


Figure 5 The discretization of the boundary into "E" elements (each denoted as Γ_e)

For the regular linear element,

$$\hat{\phi}^e = \hat{\phi}_1^e \left(1 - \frac{S}{L_e}\right) + \hat{\phi}_2^e \frac{S}{L_e} \quad (38)$$

The element nomenclature is depicted in Fig. 6.

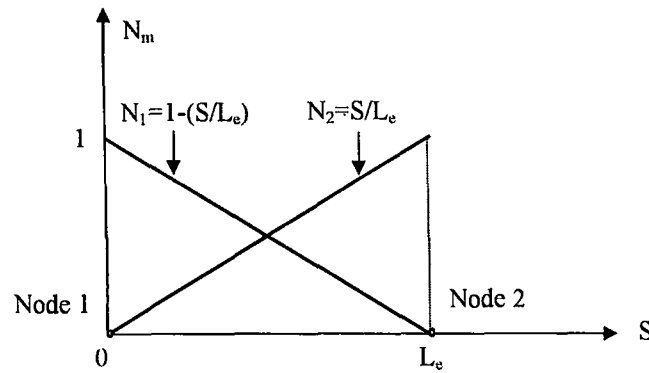


Figure 6 Linear shape functions in local coordinate "s"

$\hat{q}^e$ can be defined over an element analogously:

$$\hat{q}^e = \sum_{m=1}^M \hat{q}_m^e N_m \quad (39)$$

Now, this approximation can be applied to Eq.(35). For linear elements,

$$C_\ell \tilde{\phi}(\vec{r}_\ell) - \frac{1}{2\pi} \sum_{e=1}^E \hat{\phi}_1^e \left(\int_{\Gamma_e} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_\ell) \cdot \vec{n}}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} \left(1 - \frac{S}{L_e} \right) d\Gamma + \hat{\phi}_2^e \int_{\Gamma_e} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_\ell) \cdot \vec{n}}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} \frac{S}{L_e} d\Gamma \right) \quad (40)$$

From Eq.(40), each linear element passes contributions to each of its nodes in a manner prescribed by the shape functions. Note that node 1 of element "e" is node 2 of element "e-1", as described in Fig. 7.

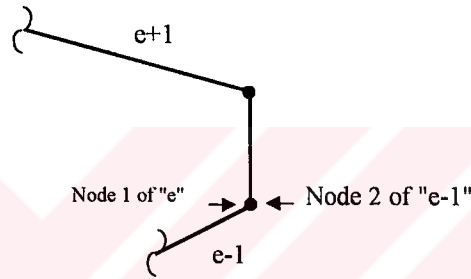


Figure 7 Illustration of nodal connectivity between elements

In order to solve Eq.(40) in the refractory block depicted in Fig. 3, corresponding temperature boundary conditions of the problem is given by Eqs.(10) through (16).

Due to non-linear terms in the boundary conditions, boundary element Eq. (40) is solved iteratively by using *Boundary Element Method*. Finally, in order to test the mathematical models, the numerical results of the corrosion profiles of the refractory block and temperature values obtained by using *Finite Difference* and *Boundary Element Methods* are compared with the experimental data taken on the glass furnace.

Both methods gave similar results confirming the correctness of the approach.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Cam, kullanım alanı oldukça yaygın bir malzeme olarak günlük yaşamda, endüstride, teknolojiye ve bilimde önemli bir rol oynamaktadır.

Saydamlık, kimyasal direnç ve sertlik gibi özellikleri, malzemeler arasında farklı bir yer tutmasının nedenlerinden bazılarıdır. Kırılabilirliği ve göreceli olarak fazla olan yoğunluğu uygulamalar esnasında akılda tutulması gereken özellikleridir.

Modern endüstriyel ülkelerde kişi başına yıllık cam tüketimi 60-80 kg olup, miktar olarak, şişe camı düz camdan daha fazla kullanılmakla beraber her ikisi de çeşitli unsurların katılmasıyla terkiibi çeşitlendirilen soda-lime camlardır. Bunlara ek olarak potas esaslı cam tabaklar, kurşunlu camlar, kimyasal ve teknik amaçlar için özel camlar, elektroteknik uygulamalar için camlar, optik camlar ve fiber optik camlar sayılabilir.

Yukarıda bahsedilen camların tümü, dikkatlice terkiibi hazırlanmış hammaddelerin fırında eritilip istenilen özelliklerin elde edilmesiyle üretilmektedir. Camın istenilen miktarına göre üretim işlemleri çok çeşitlilik göstermektedir. Fırınlara ergitme kapasiteleri özel camlar için 100 kg/gün'den düz camlar için 800 ton/gün'e kadar değişiklik göstermektedir. Cam fırınları eritilen camın cinsine ya da fırınların konstrüksiyon tipine bağlı olarak, konteyner (şişe) camı fırınları, düz cam fırınları ve özel cam fırınları şeklinde sınıflandırılabilir.

Ergitme fırınlarında ilk yatırım maliyetlerinin çok yüksek olması sebebi ile fırının etkin ömrünün mümkün olduğu kadar uzun olması istenir. Cam fırınlarında fırın ömrünü belirleyen en önemli etken, fırının yan duvarlarındaki refrakter malzemesinin zamanla aşınarak fırını kullanılamaz hale getirmesidir. Duvardaki refrakter aşınmasının zamanla olan değişimi lineer değildir ve pekçok yan faktörden etkilenir. Bundan dolayı cam fırınların ömürleri hakkında doğru bir tahminde bulunulması işletmecinin firması açısından önemlidir.

Üretim akışını en az etkileyecek ve fırına yapılacak yatırımdan maksimum kazancı sağlayacak şekilde bir program doğrultusunda bakım ve onarımının yapılması zorunludur. Bu yapılırken zaman içinde tahmini bir ömür düşünülmemişse, genellikle çok emniyetli davranılarak fırın, iş gören süresi sona ermeden devre dışı bırakılmaktadır. Bunun yanında tahmini bir ömür hesabı yapılmamış bir fırında meydana gelen ani üretim kesintileri, beraberinde çok ekonomik olmayan refrakter malzemesi seçimini gerekli kılmaktadır. Daha ekonomik bir fırın tasarımı, refrakter seçimi, fırın izolasyonu ve cam kalitesi gibi analizler ancak fırın ömrü tahmin edildikten sonra yapılabilmektedir.

Refrakter korozyonunun mekanizması ve bu korozyonun azaltılması suretiyle fırın ömrünün artırılması yönünde literatürde bir çok çalışma yapılmıştır. Genellikle çalışmalar fırın ömrünü etkileyen faktörler üzerine yoğunlaşmıştır. Bir çok çalışmada refrakter korozyonunun azaltılmasının en temel yöntemi olarak, fırın duvarının dış kısmından yapılacak olan hava-jet soğutması önerilmektedir. Bu yapılırken de fırın ısı kaybı ile fırın ömrü arasında bir denge oluşturulması gerektiği belirtilmektedir.

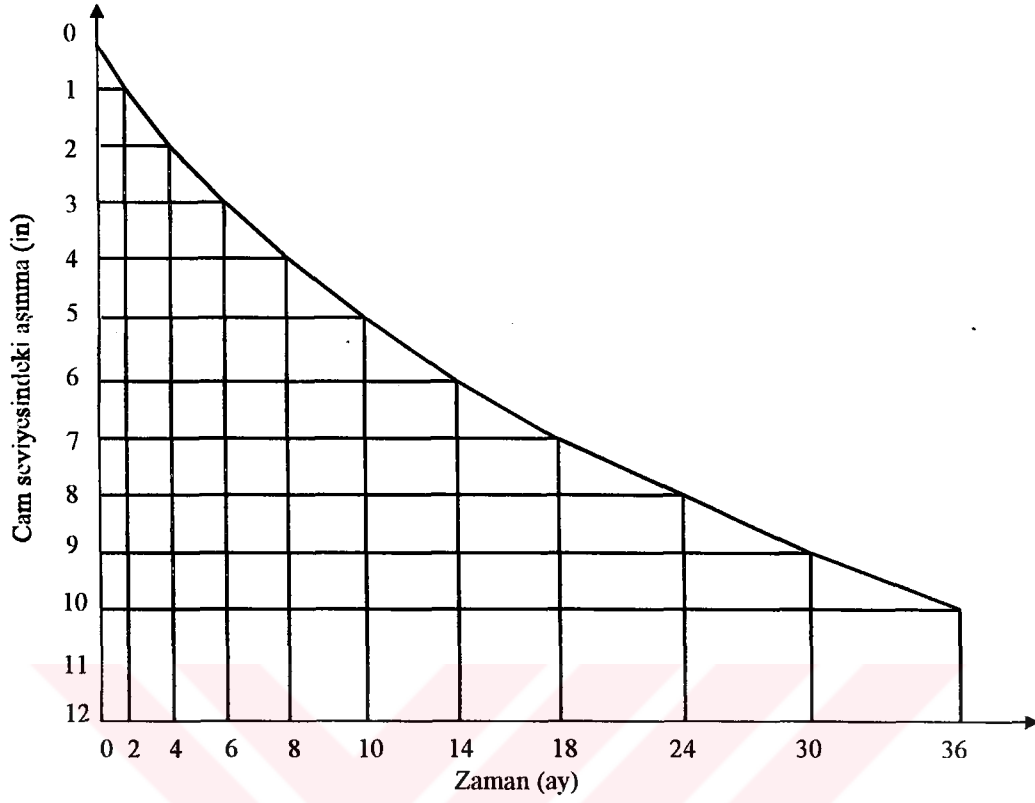
1.1 Daha Önceki Çalışmalar

Cam fırınların yan bloklarının korozyonu uzun zamandır cam endüstrisinin önemli sorunlarından biri olarak sayılmaktadır. Kampanya (fırın ömrü) sonrasında fırınların iç kısmı incelendiğinde refrakterlerde meydana gelen aşınmanın belli bir karaktere sahip olduğu görülmüştür. Genel olarak fırın yan bloklarının aldığı aşınma şekli, cam üst seviyesinde taşınım akımlarının ve yüzey gerilim dağılımı (gradient) etkisi ile maksimum olan ve tabana doğru inildikçe azalan bir eğri ile gösterilmektedir (Şekil 1.1). Bu eğrinin şekli cam yüzeyi ile tabanı arasındaki sıcaklık dağılımına, refrakterin cam sıcaklığındaki çözünme hızına, cam seviyesindeki akımlara ve sıcaklığa bağlı bir fonksiyondur [1].

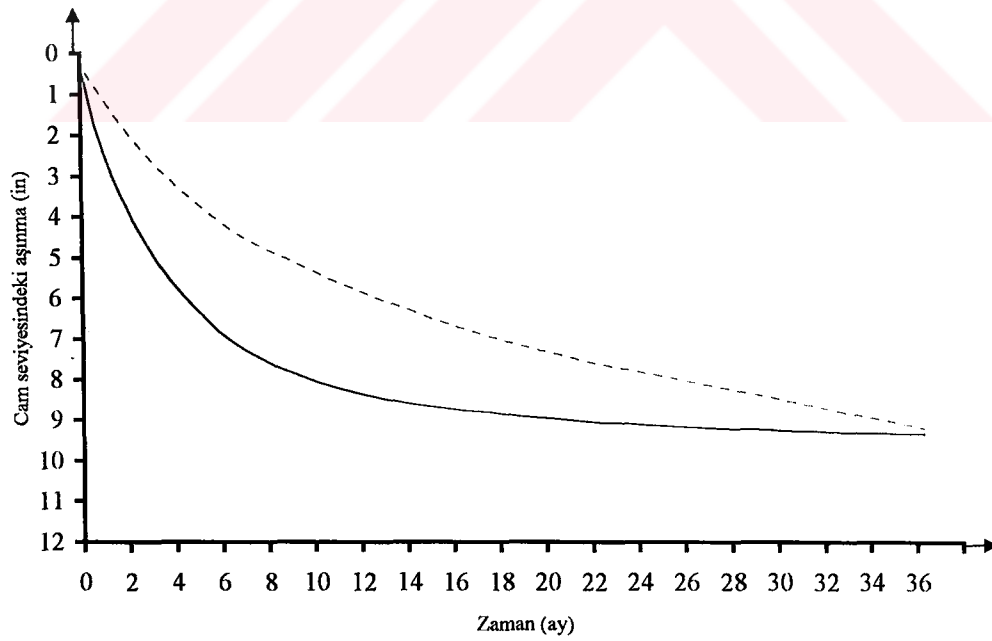
sürecin bütününün hızı, safhalardan en yavaş olanı tarafından belirlenmekte olup reaksiyon yüzeyine olan madde transferi ise (reaksiyondan sonra yüzeyden uzağa doğru) difüzyon kontrollü olmaktadır [4].

Bahsedilen bu çalışmanın yanısıra korozyon hızını etkileyen faktörlerle ilgili olarak [5,6,7]'da fırındaki, ergimiş cam içindeki taşınım akımlarının bazı bölgelerde (cam yüzeyi gibi) difüzyon tabakasını incelttiği için korozyon hızını artırdığı belirtilmiştir. Yan blokları cam seviyesinde yalayıp geçen bu akımlar, sıcaklık, refrakter çözünmesi ve fırın çekişinden kaynaklanan yoğunluk dağılımlarından etkilenmektedirler. Diğer bir çalışmada ise [8] yüzeydeki ergimiş camın, yüzey gerilim kuvveti ile camın üst seviyesindeki menisküse çekilmesi ve yüzey gerilim kuvvetinin oluşturduğu karıştırma hareketinin cam yüzeyindeki refrakter korozyonunu hızlandırması incelenmiştir. Başka bir çalışmada refrakter korozyon hızının cam viskozitesi ile olan ilişkisi deneysel olarak, $j\mu^a = \text{sabit}$ ifadesi ile verilmektedir. Buradaki değişkenler, μ :Camın dinamik viskozitesi, j :Korozyon hızı ve a :Korozyon indeksidir. Cam seviyesinin altındaki korozyon için, $a = 3/2$, cam seviyesindeki (flux-line) için ise, $a = 3.0$ olarak verilmiştir [9]. Ayrıca bir grup çalışmada [10,11,12,13,14] korozyon hızının cam sıcaklığı ile eksponansiyel olarak değiştiği rapor edilmiştir. Busby [15] ve Cooper [16] tarafından yapılan çalışmalarda cam seviyesinde meydana gelen çözünmenin yalnızca difüzyon mekanizması ile açıklanamayacağı belirtilmekte olup burada, yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisinin çok yoğun olduğundan bahsedilmektedir.

Refrakter malzemesinde oluşan korozyonun azaltılması yönünde de birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan birinde Londeree [17], cam seviyesindeki aşınmanın kampanya süresince yıllara göre değişimini vermektedir (Şekil 1.2). Bu çalışmada, ilk anlarda bloktaki aşınmanın çok hızlı olduğu fakat zamanla soğutma etkisinin önem kazandığı belirtilmektedir. Eğer kampanya başında bloklar aşırı soğutulacak olursa, artan termal akımlardan dolayı ilk anlardaki blok aşınması daha da artacaktır. Ancak, aşınma oranı zamanla daha hızlı azalacağından blok ömrü hemen hemen aynı kalacaktır. Bu durum Şekil 1.3'de görülmektedir.



Şekil 1.2 30 cm kalınlığındaki yan blokların zamana karşı aşınma eğrisi [17]



Şekil 1.3 Soğutma uygulandığında 30 cm kalınlığındaki yan blokların aşınma eğrisinde oluşan değişim

Busby [15] başka bir çalışmada, uygun bir dış yüzey izolasyonu ile ergitme döküm refrakter malzemelerinin (fused cast refractor) dış yüzey sıcaklığının 440 °C'den 110 °C'ye düşürülebileceğini ve cam seviyesindeki korozyonu azaltmak için bu noktadan soğutma yapılması gerektiğini söylemektedir. Ayrıca blok kalınlığı 100-120 mm'ye ininceye kadar etkin bir hava soğutmasının gerekli olmadığı ve düz camlarda bu kalınlığa ulaşıncaya kadar etkin bir soğutma yapılmaması halinde fırında 1-1.5 milyon kWh elektrik tasarrufu yapılabileceğini belirtmektedir.

Sandmeyer [18], Busby'nin [15] çalışmasına benzer olarak cam sıcaklığının 1530 °C olması hali için ergitme döküm refrakter malzemelerindeki aşınmayı laboratuvarla deneysel olarak ölçmüş ve 110 °C'lik bir sıcaklık gradyanı oluşuncaya kadar malzemenin büyük bir aşınma hızına sahip olduğunu görmüştür. Bu sıcaklık gradyanına karşılık gelen AZS refrakter kalınlığını 80 mm olarak belirtmiştir. Hrma [8], cam fırınlarındaki yan duvarların korozyonu için bir denklem geliştirdiği çalışmada, üniform olmayan duvar sıcaklığı dağılımının etkisinin yanısıra cam viskozitesinin, difüzyon katsayısının ve refrakterin cam içindeki çözünürlüğünün sıcaklığa olan aşırı bağımlılığının etkisini de dikkate almıştır. Ayrıca soğutmanın korozyon hızına, dolayısıyla yan duvar bloklarının ömrü üzerine olan faydasını analiz etmiştir. Bu çalışmanın temel teşkil ettiği diğer önemli bir çalışma yine Hrma [19] tarafından yapılmış olup, cam fırınının yan duvarlarındaki ısı iletimi ve korozyon hızını içeren matematiksel bir model geliştirilmiştir. Fırının kampanya boyunca ısı kayıpları, refrakterin değişik yalıtım ve soğutma şartlarında ve farklı cam sıcaklıklarında minimize edilmiştir.

1.2 Yapılan Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada, piyasada halen kullanılmakta olan ve dış yüzeyinden hava soğutması yapılan bir cam fırınının refrakter duvar bloğundaki korozyon, sıcaklık ve ısı kayıpları sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla, öncelikle Hrma [19]'nın çalışmada ortaya koyduğu bloktaki aşınmayı zamana bağlı veren diferansiyel

denklem kullanılmıştır. Bu diferansiyel denklem "Sonlu Farklar" yaklaşımının "iteratif yöntem" ile beraber kullanılmasıyla sayısal olarak çözülmüştür. Daha sonra, farklı hız ve sıcaklıklardaki hava ile yapılan soğutmada, sıvı cam sıcaklığının ve blok kalınlığının refrakter aşınma ömrüne olan etkisi incelenmiş ve değişimler grafik olarak sunulmuştur. Diğer taraftan, hesaplanan refrakter duvar korozyon profillerinden faydalanılarak bloktaki eşsıcaklık (isothermal) eğrileri elde edilmiştir. Bu amaçla, "Sonlu Farklar (Finite Difference)" ve "Sınır Eleman (Boundary Element)" metodları ayrı ayrı iteratif yöntemle beraber kullanılmış ve bloğa ait Laplace diferansiyel denklemi çözülmüştür. Elde edilen sıcaklık sonuçları kullanılarak hava soğutmasıyla refrakter bloğundan çekilen ısı yükleri ve yıllara göre dağılımları hesaplanmış ve grafik olarak verilmiştir. Son olarak, refrakter bloğundaki korozyona ve sıcaklığa ait sayısal sonuçlar fırın üzerinden alınan deneysel verilerle karşılaştırılarak bu çalışmada ortaya konan modellerin doğruluğu test edilmiştir.

BÖLÜM 2

CAM FIRINI DUVAR KOROZYON PROFİLLERİNİN HESAPLANMASI

2.1 Temel Denklemler

T_o sıcaklığında bir düşey yüzey ile T_∞ sıcaklığındaki sıvı arasında ısı geçişi Lorenz tarafından analiz edilmiş olup (Şekil 2.1), yüzey boyunca yoğunluk farkından dolayı (buoyancy convection) oluşan ve zamana bağlı olmayan ısı iletimi için aşağıdaki ifade verilmiştir [9]:

$$Nu_x = 0.411 Ra_x^{1/4} \quad (2.1)$$

Burada, Nu_x ve Ra_x sırasıyla, yerel Nusselt ve Rayleigh sayıları'dır. Daha sonra yapılan detaylı analizler sonucunda (2.1) denklemi yerine aşağıdaki denklem önerilmiştir:

$$Nu_x = F(Pr) Ra_x^{1/4} \quad (2.2)$$

Burada, F katsayısı Prandtl sayısının bir fonksiyonudur. Ayrıca camın çok yoğun viskoziteye sahip olması sebebiyle $Pr = \frac{\nu}{\alpha} \rightarrow \infty$ olmaktadır. Bu durumda $F = 0.5028$ olarak verilmektedir [20]. Isı geçişi ile kütle geçişi arasındaki benzeşimden yola çıkılarak (2.2) denkleminde Prandtl sayısı ile Schmidt sayısı ve Nusselt sayısı ile Sherwood sayısı yer değiştirilirse

$$Sc = \frac{\nu}{D} \rightarrow \infty \text{ için,}$$

$$Sh_x = 0.5028 Ra_x^{1/4} \quad (2.3)$$

denklemi yazılabilir.

Burada,

$$Sh_x = (\rho_w / \rho_\omega) (1 - C_\omega) x j / [(C_\omega - C_\infty) D] \quad (2.4)$$

ve

$$Ra_x = \beta (C_\omega - C_\infty) g x^3 / \nu D \quad (2.5)$$

olup;

ρ_w : Çözünmüş duvar yoğunluğu (kg/m^3),

ρ_ω : Ortamdaki sıvı yoğunluğu (kg/m^3),

C_ω : Sıvı içindeki katının hacimsel oranı,

C_∞ : Ortamdaki katının hacimsel oranı,

x : Giriş noktasından olan uzaklık (m),

j : Duvarın çözünme hızı (m/s),

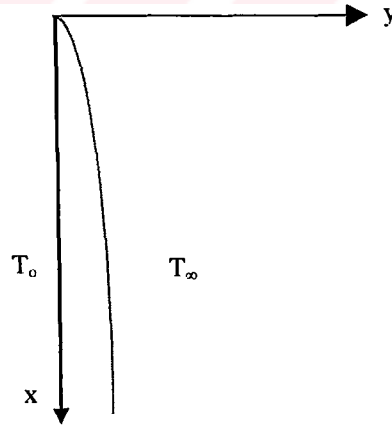
ν : Camın kinematik viskozitesi (m^2/s),

D : Difüzyon katsayısı (m^2/s),

β : Konsantrasyon genişleme katsayısı,

g : Yerçekimi ivmesi (m/s^2),

olarak tanımlanmışlardır [9].



Şekil 2.1 Koordinat sistemi ve sıcaklıklar

İlk anda ν ve D değerlerinin sıcaklığın bir fonksiyonu olmadığı ve C_ω 'nın sıcaklıktan etkilendiği kabul edilirse, Kao Domoto ve Elrod [21]'un çalışmasında yapılacak bazı değişikliklerle Sherwood sayısı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$Sh_x = A (\lambda Ra_x)^{1/4} \quad (2.6)$$

Burada, A sabit bir sayıdır ve

$$\lambda = (C_\omega - C_\infty) / \langle C_\omega - C_\infty \rangle \quad (2.7)$$

dir.

Ayrıca $\langle \rangle$ ortalama değeri göstermekte olup

$$\langle \psi \rangle = x^{-1} \int_0^x \psi dx$$

olarak verilir.

Daha genel olarak ν , D ve C_ω değişkenleri sıcaklığa bağlı alınır ve λ ifadesi tekrar düzenlenirse [9],

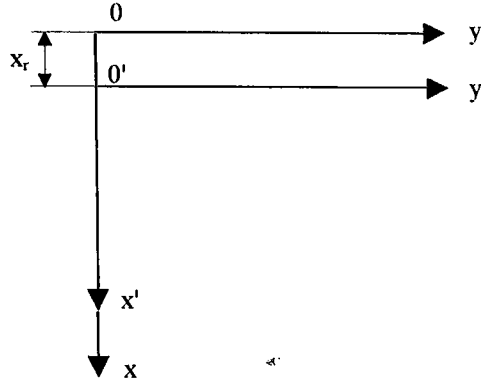
$$\lambda = (C_\omega - C) D \nu^{-1/3} / \langle (C_\omega - C) D \nu^{-1/3} \rangle \quad (2.8)$$

şeklinde yazılabilir.

x koordinatının başlangıcını rastgele seçilirse, (2.3) denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$Sh_x = 0.5028 (1 + x_r/x)^{-1/4} Ra_x^{1/4} \quad (2.9)$$

Burada x_r mesafesi Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Başlangıç noktasının x_r etkin uzaklığı kadar ötelenmiş hali

x_r mesafesi içinde birim zamanda çözünen maddenin hacmi Q_r biliniyorsa, x_r aşağıdaki gibi tanımlanabilir [9]:

$$x_r = 1.7046 Q_r^{4/3} D_r^{-1} (v_r/\beta g)^{1/3} (C_{\omega r} - C_{\infty})^{-5/3} \quad (2.10)$$

Burada $C_{\omega r}$, v_r ve D_r değerleri C_{ω} , v ve D değişkenlerinin $x = 0$ noktasındaki değerleridir. (2.8) eşitliği daha genel hale getirilirse,

$$\lambda = (C_{\omega} - C_{\infty}) D v^{-1/3} x [< (C_{\omega} - C_{\infty}) D v^{-1/3} > x + (C_{\omega r} - C_{\infty}) D_r v_r^{-1/3} x_r]^{-1} \quad (2.11)$$

olarak bulunur.

Ayrıca (2.4) ve (2.5) eşitliği (2.6)'da yerine konulursa (2.12) eşitliği elde edilir.

$$j = 0.5028 (\rho_{\omega}/\rho_w) (C_{\omega} - C_{\infty})^{5/4} (1 - C_{\omega})^{-1} D^{3/4} (\lambda \beta g/xv)^{1/4} \quad (2.12)$$

Benzer olarak (2.10) ve (2.11) eşitliklerindeki λ , x_r değerleri (2.12) dekleminde yerlerine konulurlarsa korozyon için aşağıdaki (2.13) ifadesine varılır:

$$j = 0.4400 (\rho_{\omega}/\rho_w) (C_{\omega} - C_{\infty})^{3/2} (1 - C_{\omega})^{-1} (C_{\omega r} - C_{\infty})^{1/6} D (\beta g/v Q_r)^{1/3} (1+r)^{-1/4} \quad (2.13)$$

ivmesi)'nin yerine $g \cos \alpha = g (1 + Y_x^2)^{-1/2}$ konulmalıdır. (2.13) ve (2.14) ifadeleri yeniden düzenlenerek (2.15) ifadesinde yerine konulursa, aşınma hızı aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$-Y_t = 0.4400 (\rho_w/\rho_w) (C_w - C_\infty)^{3/2} (1 - C_w)^{-1} (C_{wr} - C_\infty)^{1/6} D(\beta g / \nu Q_r)^{1/3} (1 + Y_x)^{1/3} (1 + r)^{-1/4} \quad (2.16)$$

Burada,

$$r = 0.5866 Q_r^{-4/3} (\beta g)^{1/3} (C_{wr} - C_\infty)^{2/3} (1 + Y_x)^{-1/6} \int_0^x (C_w - C_\infty) D \nu^{-1/3} dx \quad (2.17)$$

anlamındadır.

(2.16) ifadesi (2.17) ile beraber refrakterin korozyon profilinin integro-diferansiyel deklemdir. Bu denklemde $Y = Y(x, t)$ olup, ρ_w dışındaki bütün değişkenler refrakter-cam ara yüzeyi sıcaklığının fonksiyonudur.

2.2 Temel İfadelerin Sıcaklıkla Değişimi

Kinematik viskozite ν , difüzyon katsayısı D ve derişim C_w 'nin sıcaklıkla olan değişimi Arrhenius ifadesi ile verilebilir.

$$\nu = k_\nu e^{-\theta_c / T_i} \quad (2.18)$$

Burada, k_ν ve θ_c değerleri sabit olup θ_c değeri sıvı cam viskozitesi için karakteristik sıcaklık olarak isimlendirilir. T_i sıcaklığı ise refrakter-cam ara yüzey sıcaklığıdır.

Difüzyon katsayısı D için benzer olarak,

$$D = k_D e^{-\theta_c/T_i} \quad (2.19)$$

yazılabilir. Burada, k_D sabit bir sayıdır.

Aynı yaklaşım derişim ifadesi C_ω için de yapılabilir. Bu takdirde

$$C_\omega = k_C e^{-b\theta_c/T_i} \quad (2.20)$$

olarak tanımlanabilir. Bu ifadede, k_C ve b değerleri birer sabittir.

Şekil 2.2'de görülen x_r mesafesi içinde birim zamanda çözünen madde hacmi Q_r için benzer bir yaklaşımda bulunulabilir:

$$Q_r = k_Q e^{-a\theta_c/T_r} \quad (2.21)$$

Burada, k_Q ve a değerleri birer sabittir ve T_r sıcaklığı cam sıcaklığının $x = 0$ noktasındaki değeridir.

Arrhenius yaklaşımı yapılmış v , D , C_ω ve Q_r değişkenleri (2.16) ve (2.17) denklemlerinde yerine konulur ve bazı ara işlemler yapılırsa (2.22) ve (2.23) ana ifadeleri elde edilir [9].

$$-Y_t = K_1 (1+Y_x)^{1/3} (1-k_C e^{-b\theta_c/T_i})^{-1} \exp(-\theta_c(n_1|T_i-n_2|T_{ir})) (1+r)^{-1/4} \quad (2.22)$$

$$r = K_2 (1+Y_x)^{-1/6} \int_0^x \exp(-\theta_c(n_3|T_i - n_4|T_{ir})) dx \quad (2.23)$$

Burada, $x = 0$ noktasında $T_i = T_{ir}$ şeklindedir.

Ayrıca $n_1 = 2.383$, $n_2 = 0.883$, $n_3 = 2.03$ ve $n_4 = 3.53$ sabit sayılardır.

Bütün proses boyunca cam-refrakter ara yüzeyinin yaklaşık olarak dik olduğunu kabul eder ve ($Y_x = 0$) ve $C_\omega \ll 1$ olduğunu gözönüne alarak (2.22) ve (2.23) denklemlerini tekrar yazılırsa, (2.24) ifadesi elde edilir.

$$-Y_t = f_1 \left(1 + \int_0^x f_2 d\zeta\right)^{-1/4} \quad (2.24)$$

Burada,

$$f_1 = K_1 \exp(-\theta_1/T_i + \theta_{1F}/T_F) \quad (2.25)$$

ve

$$f_2 = K_2 \exp(-\theta_2/T_i + \theta_{2F}/T_F) \quad (2.26)$$

anlamındadır. Ayrıca,

$$\theta_1 = n_1 \theta_c \quad (2.27)$$

$$\theta_2 = n_3 \theta_c \quad (2.28)$$

$$\theta_{1F} = n_2 \theta_c \quad (2.29)$$

ve

$$\theta_{2F} = n_4 \theta_c \quad (2.30)$$

olarak alınmıştır.

(2.25) ve (2.26) denklemlerindeki T_i sıvı cam-refrakter ara yüzey sıcaklığıdır. T_F , $x = 0$ noktasındaki cam yüzeyi sıcaklığıdır. Ayrıca K_1 , K_2 , θ_1 , θ_2 ve θ_{1F} , θ_{2F} değerleri sıvı cam ve refrakterin malzeme özelliklerine ait katsayılardır. Alüminyum-Zirkonyum-Silica refrakter için bu değerlerin mertebeleri Tablo 1'de verilmektedir [19]. Tabloda ayrıca, T_A dış ortam hava sıcaklığını, k refraktere ait ısı iletim katsayısını ve h_1 cam-refrakter ara yüzeyin ısı taşınım katsayısını göstermektedir.

Tablo 1. Sıvı cam ve refrakterin malzeme özellikleri [19]

Sembol	Fiziksel boyut	Korozyon için sayısal değerler	
		Cam seviyesi altında	Cam seviyesinde
h_1	$Wm^{-2}K^{-1}$	815	815
k	$Wm^{-1}K^{-1}$	4.7	4.7
K_1	ms^{-1}	9.55×10^{-2}	7.60×10^6
K_2	m^{-1}	6.40×10^{-7}	0
T_A	K	300	300
θ_1	K	4.77×10^4	6.0×10^4
θ_2	K	1.77×10^4	-
θ_{1F}	K	4.06×10^4	-
θ_{2F}	K	7.06×10^4	-

2.3 Cam-Refrakter Ara Yüzeyi Sıcaklığı

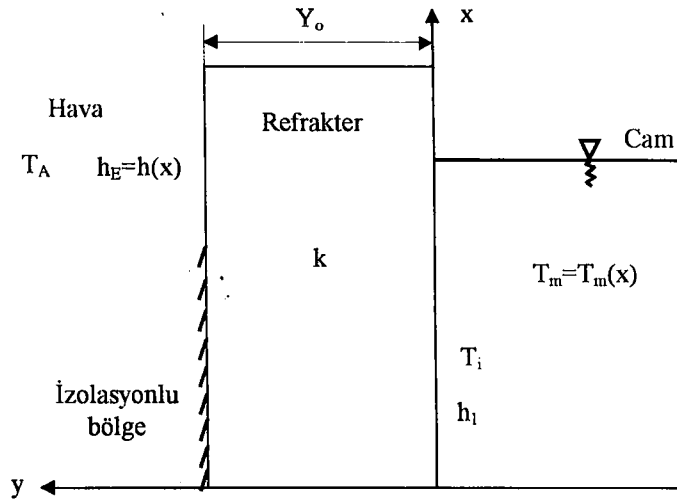
Cam-refrakter ara yüzey sıcaklığı, sıvı cam sıcaklığı T_m ve duvar boyunca olan ısı iletimi tarafından belirlenir. Duvar içindeki sıcaklık dağılımının tek boyutlu olduğu kabulü yapılırsa, bu taktirde cam-refrakter ara yüzey sıcaklığı (2.31) ifadesi ile verilir [19].

$$T_i = T_M - (T_M - T_A) (U/h_1) \quad (2.31)$$

Burada, U , duvar boyunca olan toplam ısı geçiş katsayısı olup

$$U = (h_1^{-1} + Y/k + h_E^{-1})^{-1} \quad (2.32)$$

biçiminde verilir. Bu ifadedeki h_1 ve h_E sırasıyla sıvı cam-refrakter ve refrakter-dış ortam ısı taşınım katsayıları olup h_E değeri x refrakter mesafesinin fonksiyonudur. T_M , T_A , h_1 ve refrakter sıcaklığının fonksiyonu olan k ısı iletim katsayısı biliniyorsa, T_i ara yüzey sıcaklığı, h_E ısı taşınım katsayısı ve Y refrakter kalınlığı tarafından kontrol edilir (Şekil 2.4). Burada, yukarıda verilen (2.24) ve (2.31) denklemlerinin birbirleriyle ilişkili olmasından dolayı bağımsız olarak çözülemeyeceği belirtilmelidir.



Şekil 2.4 Y_o kalınlığındaki bir refrakterin yüzeyindeki sıcaklıklar ve ısı taşınım katsayıları

Şekil 2.4'de görülen T_M , sıvı cam sıcaklığı sabit olmayıp refrakter yüzeyi boyunca değişmektedir. Bu değişim için örnek sıcaklık profilleri Tablo 2'de verilmiştir [19].

Tablo 2. Ergimiş cam sıcaklığı (T_M) profilleri [19]

Cam seviyesine olan uzaklık (m)	Ergimiş cam sıcaklıkları (K)		
	I	II	III
0	1760	1760	1760
0.15	1703	1765	1728
0.30	1680	1760	1703
0.45	1666	1750	1684
0.60	1656	1730	1671
0.75	1648	1705	1660
0.90	1641	1675	1650
1.05	1636	1655	1640
1.20	1630	1630	1630

2.4 Refrakter Duvarının Korozyon Profilinin Hesaplanması

(2.24) nolu integro-diferansiyel denklemi sonlu farklar ifadesi haline dönüştürülerek belli bir zaman adımında (Δt) ve x refrakter noktalarında sayısal olarak çözülerek refrakterde meydana gelen aşınma miktarları $Y = Y(t, x)$ fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar yapılırken öncelikle U (duvar boyunca olan toplam ısı geçiş katsayısı) tahmini değeri ile başlanarak T_i ara yüzey sıcaklığı (2.31) denkleminde hesaplanmıştır. Bu hesaplanan değer (2.24) ifadesinde yerine konularak yeni Y değeri bulunur. Bulunan Y , aranan gerçek değer olmayıp tahmini değerdir. Başlangıçtaki U değeri (2.32) ifadesinde $h_E(x)$, k ve bulunan Y değerinin yerine konulmasıyla yeniden hesaplanır. Tekrar T_i değeri (2.31) ifadesinden, Y değeri de (2.24) denkleminde bulunur. Bu iterasyona değişkenlerin belli bir hassasiyet değerine ulaşıncaya kadar devam edilir. Yapılan iterasyonda ε hassasiyet değeri değişkenler T_i , U , Y için 10^{-6} olarak seçilmiş ve refrakter ısı iletim katsayısı ara yüzey sıcaklığı T_i 'nin bir fonksiyonu olarak hesaplara katılmıştır. FORTRAN dilinde yazılmış olan bilgisayar programı Ek. A'da verilmiştir.

BÖLÜM 3

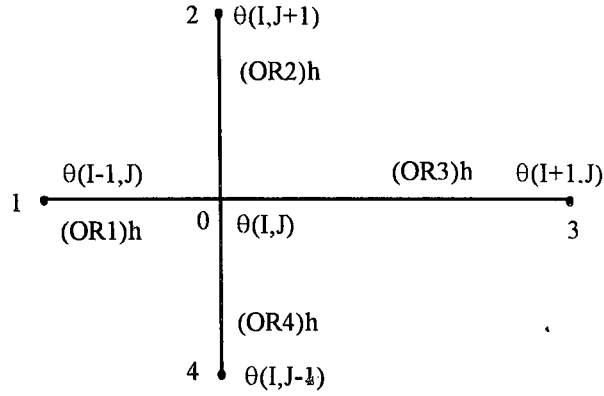
DIŞ YÜZEYİNDE HAVA SOĞUTULMASI YAPILAN CAM FIRINI REFRAKTER DUVAR BLOĞUNDAKİ SICAKLIKLARIN VE ISI KAYIPLARININ SAYISAL OLARAK HESAPLANMASI

Bir önceki bölümde, cam fırını refrakter duvarı korozyonu için zamanın ve konumun bir fonksiyonu olan diferansiyel denklem elde edilmiştir. Bu denklemin sayısal olarak çözülmesiyle refrakter duvarının sıvı camla temas yüzeyinin zamanla eğrisel bir yapı oluşturduğu ve incelendiği görülmüştür. Bu korozyonu azaltmak için refrakterin dış yüzeyinden etkin bir hava-jet soğutması yapılmakta ve bunun yanı sıra fırın ısı kaybının en küçük değere indirilmesine çalışılmaktadır.

Bu bölümde, refrakter içinde meydana gelen sıcaklık dağılımı, refrakter yüzey profilinin herhangi bir t anındaki şekli kullanılarak ve refrakter içerisindeki sıcaklık gradyanının zamana bağlı olmadığı kabulü yapılarak, sayısal olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar yapılırken sonlu farklar yöntemi lineer olmayan sıcaklık sınır şartlarından dolayı iteratif yöntemle beraber kullanılmıştır.

3.1 Refrakter İçindeki Düzenli Olmayan Ağ Sistemi İçin Laplace Denkleminin Sonlu Farklar Metodu İle Formülasyonu

Sonlu Farklar Yöntemi, formülasyonunun kolay olması ve uygulamada basit ve hızlı sonuç alınması açısından tercih edilen sayısal bir yöntemdir. Sıcaklık dağılımının hesaplanacağı refrakter duvarının cam tarafındaki yüzeyinin eğrisel olmasından dolayı düzenli olmayan ağ sistemi için Sonlu Farklar Formülasyonu yapılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Farklı uzaklıklardaki noktalara (grid points) sahip ağ

Şekil 3.1.'de OR1, OR2, OR3, OR4 katsayıları 1'den küçük oran katsayılarıdır. Burada düzgün ağ noktaları arasındaki mesafe h ile gösterilmektedir. I, J değerleri noktanın ağ sistemi içindeki satır ve sütun sayılarını göstermekte olup $\theta(I, J)$ hesaplanacak sıcaklık değişkenidir.

Zamana bağlı olmayan iki boyutlu ısı iletim denklemi yazılırsa, (3.1) ifadesi elde edilir.

$$\nabla^2 \theta = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \quad (3.1)$$

(3.1) denkleminde x, y çözümün yapılacağı bölgenin koordinatlarıdır. Burada, iki boyutlu ısı iletimi için θ , sıcaklık değişkenini göstermekte olup $\nabla^2 \theta$ ifadesi sıcaklığa ait Laplace denklemidir. Yukarıdaki kısmi türevlerin sonlu farklar eşdeğerlerini Şekil 3.1 yardımıyla elde edilir.

Önce, $\left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{1-0}$ türev ifadesi 1-0 noktaları arasında ileri farklar halinde yazılırsa,

(3.2) nolu eşitlik elde edilir.

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{I-0} \cong \frac{\theta(I, J) - \theta(I-1, J)}{OR1 \cdot h} \quad (3.2)$$

Benzer olarak

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{0-3} \cong \frac{\theta(I+1, J) - \theta(I, J)}{OR3 \cdot h} \quad (3.3)$$

yazılabilir.

Aynı ifadeleri θ değişkeninin ikinci türevleri için kullanalım. Bunun için

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial\theta}{\partial x} \right) \text{ olarak yazalım ve türev eşdeğerlerini yerlerine koyalım. Buna göre}$$

gerekli düzeltmeler yapılırsa $\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}$ ifadesi (3.4)'deki şekliyle elde edilir.

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} \cong \frac{2}{h^2} \left[\frac{\theta(I-1, J) - \theta(I, J)}{OR1(OR1 + OR3)} + \frac{\theta(I+1, J) - \theta(I, J)}{OR3(OR1 + OR3)} \right] \quad (3.4)$$

Benzer şekilde $\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}$ 'nin düzenlenmiş ifadesi (3.5)'de verilmiştir.

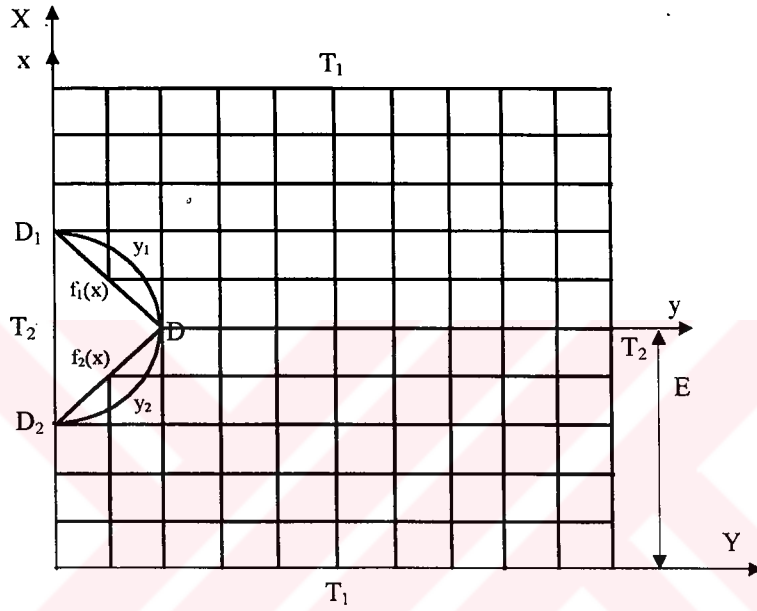
$$\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} \cong \frac{2}{h^2} \left[\frac{\theta(I, J+1) - \theta(I, J)}{OR2(OR2 + OR4)} + \frac{\theta(I, J-1) - \theta(I, J)}{OR4(OR2 + OR4)} \right] \quad (3.5)$$

(3.4) ve (3.5) nolu eşitlikleri (3.1)'de yerine koyarsak, (3.6) nolu temel denklemi elde edilir.

$$\begin{aligned} \nabla^2\theta \cong & \frac{2}{h^2} \left[\frac{\theta(I-1, J)}{OR1(OR1 + OR3)} + \frac{\theta(I, J+1)}{OR2(OR2 + OR4)} + \frac{\theta(I+1, J)}{OR3(OR1 + OR3)} \right. \\ & \left. + \frac{\theta(I, J-1)}{OR4(OR2 + OR4)} - \left(\frac{1}{OR1 \cdot OR3} + \frac{1}{OR2 \cdot OR4} \right) \theta(I, J) \right] \quad (3.6) \end{aligned}$$

3.2 Düzensiz Bir Ağ Yapısına Sahip Bir Bloğun Tanımlanması ve Örnek Bir Problem Üzerinde Eş-Sıcaklık Eğrilerinin Bulunması

Şekil 3.2'de verilen düzensiz bir ağ yapısına sahip ve kenar sıcaklıkları sabit olan bir blok içerisindeki sıcaklık dağılımı bulunmak istensin.



Şekil 3.2 Kenarları sabit sıcaklıkta olan ve düzensiz bir ağ yapısına sahip blok

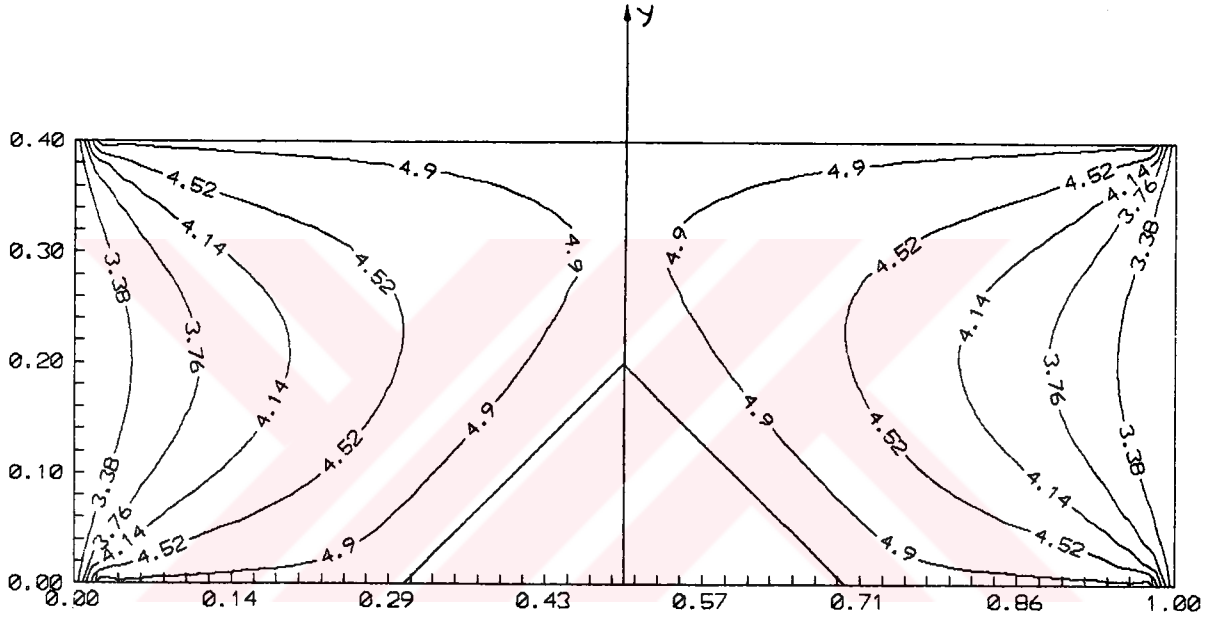
Şekil 3.2'de görülen bloğun yan kenarlarının T_2 sabit sıcaklığında, üst kenarlarının ise T_1 sabit sıcaklığında olduğu kabul edilir ve $y_1(x)$, $y_2(x)$ eğrilerine (x,y) yerel koordinatlarında $f_1(x)$, $f_2(x)$ doğruları ile yaklaşım da bulunulursa, (3.7) ve (3.8) nolu ifadeler elde edilir.

$$f_1(x) = \frac{D}{E - D_1} (x - D_1) \quad E \leq x \leq D_1 \quad (3.7)$$

$$f_2(x) = \frac{D}{E - D_2} (x - D_2) \quad E \leq x \leq D_2 \quad (3.8)$$

Burada, $f_1(x) = a_1x + b_1$ ve $f_2(x) = a_2x + b_2$ olup lineer bir fonksiyondurlar. Bu fonksiyonlarda koordinat noktaları yerlerine konularak (3.7) ve (3.8)'deki katsayılar hesaplanmıştır.

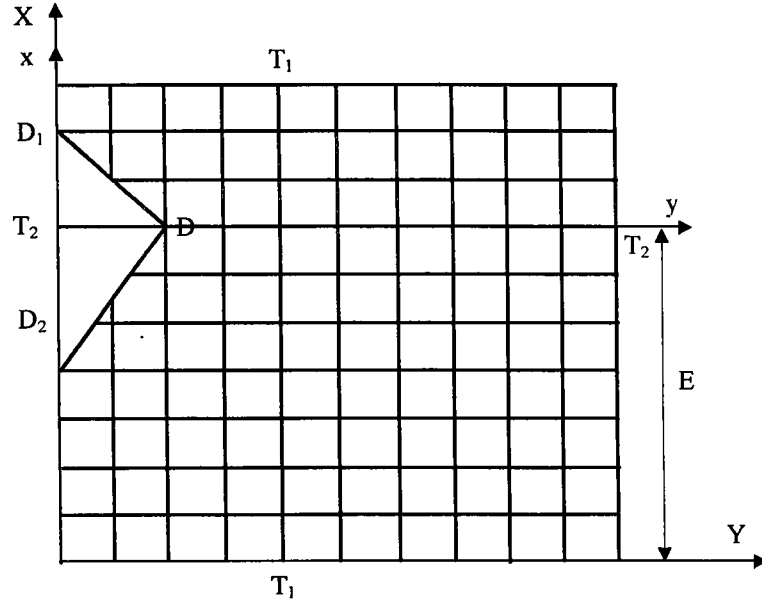
Başlangıçta Şekil 3.2'de görülen bloğa ait boşluğun (cavity) eşkenar bir üçgen olduğunu kabul edip T_1 , T_2 sıcaklıkları için sayısal bir değer kullanılsın. Bu durumda örnek blok içindeki eş sıcaklık eğrileri, $f_1(x)$ ve $f_2(x)$ sınır fonksiyonlarının da kullanılmasıyla sonlu farklar yöntemi ile hesaplanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Eşkenar üçgen boşluğa (cavity) sahip ve sınırları sabit sıcaklıkta olan simetrik (y eksenine göre) bir bloktaki eş sıcaklık eğrileri

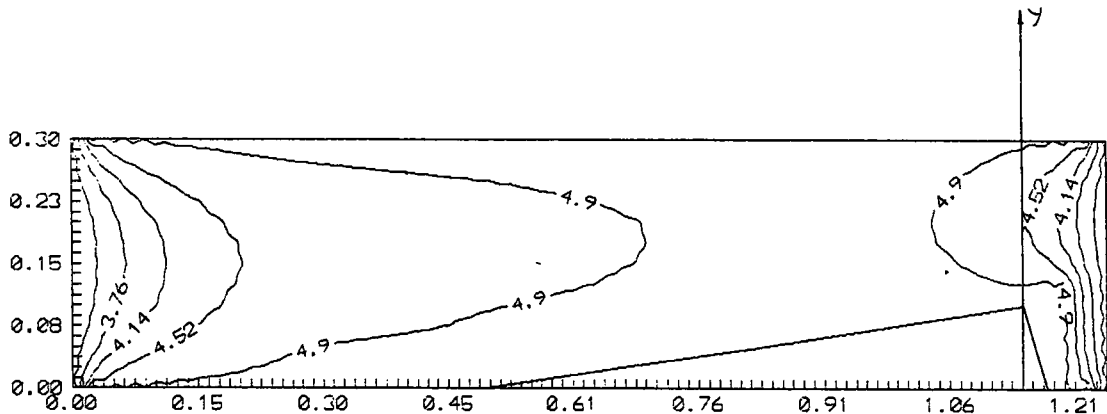
Şekil 3.3'de görülen blok şekil ve sıcaklık sınır şartları bakımından simetrik olduğundan, blok içerisindeki eş sıcaklık dağılımı y yerel eksenine göre simetriktir. Şekil 3.2'de verilen blok içinde çözüm yapılırken $T_1 = 3.0$ ve $T_2 = 5.0$ sayısal değerleri kullanılmıştır.

Refrakter şeklini orjinal probleme biraz daha yaklaştırmak için, bloğun y yerel eksenine göre simetrisini bozup sıcaklık sınır şartlarını bütün kenarlarda tekrar sabit alınsın (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Simetrik olmayan ve sabit sıcaklıkta kenarlara sahip blok

Şekil 3.4'de görülen bloğun kenarları tanımlanmışsa (D, D1, D2, E noktaları verilmişse), FORTRAN dilinde yazılmış olan program bu koordinat noktaları yardımı ile bölgeyi tanımakta ve ağ oluşturarak bölge içindeki sıcaklık dağılımını sonlu farklar yöntemi ile hesaplamaktadır. Sınırlardaki sıcaklıklar sabit alınarak yapılan çözüm Şekil 3.5'de verilmektedir (Hesaplamalarda $T_1 = 3.0$ ve $T_2 = 5.0$ sayısal değerleri kullanılmıştır).



Şekil 3.5 Kenarları sabit sıcaklıkta olan ve şekil simetrisi bulunmayan bir bloktaki eşsıcaklık eğrileri

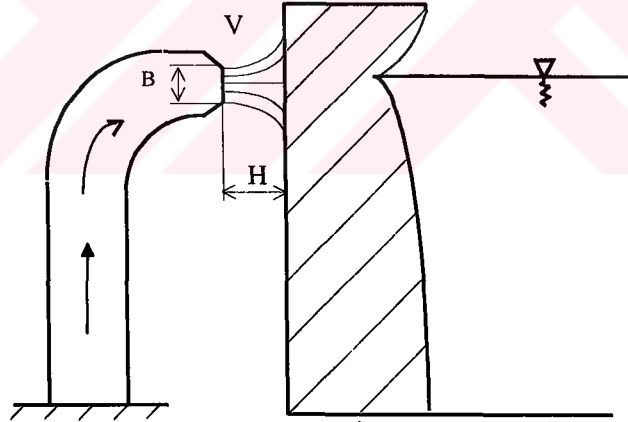
Şekil 3.5'de görüldüğü gibi y eksenine göre şekil simetrisinin bozulmasıyla bloktaki sıcaklık dağılımının simetrisi de ortadan kalkmıştır. Problemdeki sabit

sıcaklıktaki sınır şartları yerine, blok etrafında değişken ve lineer olmayan sınır şartlarının konması ve şeklin biraz daha değiştirilmesi ile cam fırını refrakter duvarının gerçeğe yakın bir modellemesi yapılmış olacaktır.

3.3 Refrakter Soğutulmasında Isı Taşınım Katsayısının Tespiti ve Blok Isı İletim Katsayısının Sıcaklıkla Değişimi

Fırının yan refrakter duvarlarının soğutulması büyük ısı kayıplarına yol açmasına rağmen aşınmanın azaltılması için kullanılan en temel yöntemdir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi bloğun dikdörtgen çıkış kesitine sahip bir lüle kullanılarak hava soğutması yapılması halinde ısı iletim katsayısı ampirik olarak literatürde verilmiştir [22].

Sıvı cam seviyesinde refrakter aşınması ve ısıl gerilmelerin daha etkili olması nedeniyle, bloğa bu doğrultuda hava soğutması uygulanmaktadır.



Şekil 3.6 Bloğun dikdörtgen çıkış kesitine sahip lüle kullanılarak hava-jet'i ile soğutulması

B: Lüle kesitinin dar kenarı (m)

H: Lüle çıkışının yüzeye dik olan mesafesi (m)

V: Havanın lüle çıkış hızı (m/s)

Şekil 3.6'da görülen hava-jeti'i soğutmasında oluşan ısı geçişinin hesaplanması için, $\bar{Nu}$ (Nusselt) boyutsuz sayısı (3.9)'da verilmiştir [22].

$$\left(\frac{\bar{Nu}}{Pr^{0.42}} \right) = \frac{1.53}{\frac{x_1}{S} + \frac{H}{S} + 1.39} Re^{m(x_1/S, H/S)} \quad (3.9)$$

Burada,

$$m = 0.695 - (x_1/S + (H/S)^{1.33} + 3.06)^{-1},$$

x_1 : Lüle merkezinden radyal doğrultudaki uzaklık,

S : Lüle hidrolik çapı ($= 2B$),

olarak tanımlanmıştır.

Ayrıca, Re ve Pr hava-jeti'ne ait Reynolds ve Prandtl boyutsuz sayılarıdır.

Bu sayıların tanımları aşağıda (3.10), (3.11) ve (3.12) nolu eşitlikleri ile verilmiştir:

$$\bar{Nu} = \frac{h S}{k} \quad (3.10)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.11)$$

$$Re = \frac{V S}{\nu} \quad (3.12)$$

(3.9) nolu denklemle verilen ampirik formülün geçerli olduğu aralıklar literatürde

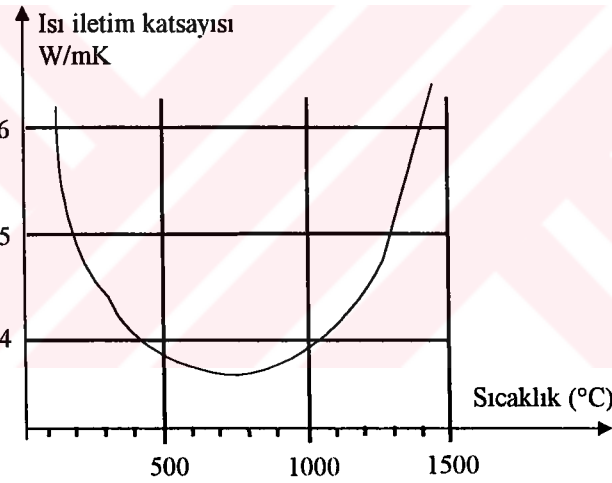
$$300 \leq Re \leq 90.000$$

$$2 \leq x_1/S \leq 25$$

$$2 \leq H/S \leq 10$$

şeklinde verilmiştir. (x_1/s) oranının sıfıra eşit olduğu noktada (3.9) nolu denklem kullanılarak elde edilen ısı taşınım katsayısı, deneysel olarak bulunan değerden % 35-45 arasında daha düşük hesaplanmaktadır [22]. Bundan dolayı durma noktasında (stagnation point) ampirik formül ile hesaplanan ısı taşınım katsayısının 1.45 katı alınarak hesaplara katılmıştır.

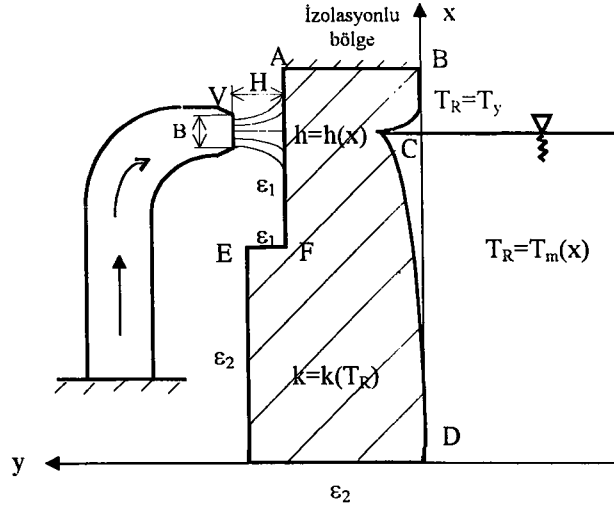
Bu çalışmada incelenen cam fırını yan duvar bloğu AZS refrakter malzemesi olup (ER 1681) ısı iletim katsayısı sıcaklığın bir fonksiyonudur. Bloкта oluşan sıcaklıklar hesaplanırken, ısı iletim katsayısının bu değişimi gözönüne alınmış ve sayısal hesaplamalarda kullanılmıştır. Bu dağılım Şekil 3.7'de verilmiştir [23].



Şekil 3.7 AZS refrakter malzemesinin (ER 1681) ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi

3.4 Dış Yüzeyinden Hava-Jeti İle Soğutulan Cam Fırını Duvar Refrakterine Ait Sıcaklık Sınırı Şartları

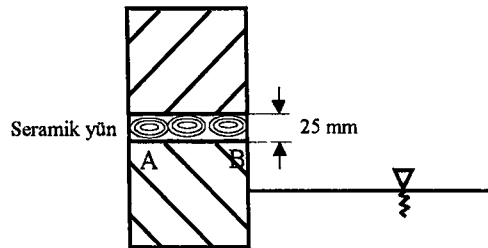
Bölüm 3.1'de verilen (3.6) denkleminin çözülebilmesi için refrakter duvarına ait sıcaklık sınır şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Şekil (3.8)'de verilen refrakter üzerinde sıcaklık sınır şartlarını tespit etmeye çalışalım. Sınır şartları cam fırını duvar refrakteri üzerindeki bölgelerde farklılıklar göstermektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Cam fırını yan refrakter bloğunun şekli ve sıcaklık sınır şartları

ϵ_1 ve ϵ_2 refrakter üzerindeki bölgelerin ısı yayma katsayıları, T_R , T_y sırasıyla refrakter ve yanma bölgesi sıcaklıklarıdır. T_m sıvı cam sıcaklığını göstermektedir.

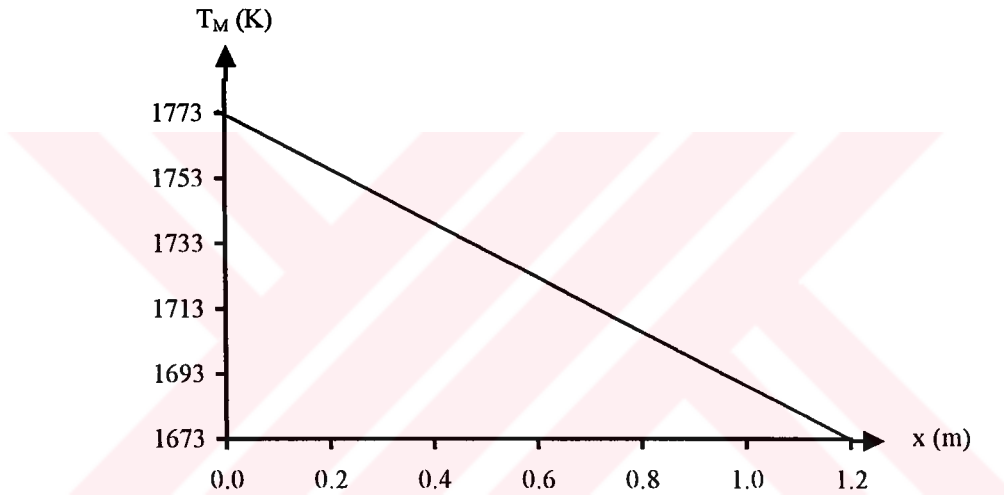
Şekil 3.8'de görüldüğü gibi refrakter yüzeyinde 3 ayrı bölgede ısınım ile ısı kaybı söz konusudur. D ve E noktaları arasında kalan bölgeler izolasyon malzemesi ile kaplı olmasına rağmen buralardan ısınım ile belli miktarda ısı kaybının olduğu fırın üzerinde gözlenmiştir. D ve E noktaları arasında bulunan bölgede oluşan ısı kayıplarını gözönüne almak için, izolasyon malzemesine ait ısı yayma katsayısı kullanılmıştır. Bunun yanında E ve F noktalarının sınırladığı bölge çıplak bir alan olup buradan da dış ortama ısınım ile ısı kaybı söz konusudur. Dışardan hava soğutmasının yapıldığı F ve A noktaları arasındaki bölgede taşınım ve ısınım ile ısı kaybı bulunmaktadır. Bu bölgedeki ısı taşınım katsayısı (h_E) x değişkeninin bir fonksiyonudur. Refrakter üzerindeki diğer bir bölge de A ve B noktaları ile sınırlıdır. Burada fırından dışarıya olan ısı kaybı seramik esaslı cam yünü kullanılmak suretiyle engellenmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 A ve B noktaları arasında kalan izolasyonlu bölge

Fırın içindeki yanma bölgesinin refrakterle temas aralığı B ve C noktaları ile sınırlı olup burada refrakter sıcaklığı maksimum değere ulaşmaktadır. Fırın içerisindeki yapı incelendiğinde burasının çok küçük bir bölge olduğu görülmüştür (50 mm).

Refrakter üzerindeki son bölge C ve D noktalarının sınırladığı sıvı cam bölgesidir. Hesaplamalarda sıvı cam ile refrakter arasındaki ısı taşınım katsayısının yüksek olmasından dolayı, refrakter yüzeyindeki sıcaklıklar sıvı cam sıcaklığına eşit alınmıştır. Bu bölgedeki sıcaklık gradyanı lineer kabul edilmiştir [24] (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Cam içerisindeki sıcaklık değişimi

Şekil 3.10'da verilen grafikte $x = 0$ noktası cam yüzeyini, $x = 1.2$ noktası ise cam tabanını göstermektedir.

Blok içinde oluşan sıcaklık dağılımının zamana bağlı olmadığını (kararlı hale geldiğini) kabul edersek, hesaplamalarda kayda değer bir hata yapmış olmayız. Kararlı hal için (3.1) nolu denklemi refrakter duvarı için yeniden yazılırsa,

$$\nabla^2 T_R = \frac{\partial^2 T_R}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_R}{\partial y^2} = 0 \quad (3.13)$$

ifadesi elde edilir. Ayrıca $\theta = \frac{T_R}{T_h}$ dönüşümü yapılırsa, (3.13) nolu denklem boyutsuzlaştırılmış olacaktır. Burada, T_h dış ortam hava sıcaklığı olup boyutsuz Laplace denklemi (3.14) nolu ifade ile verilmiştir.

$$\nabla^2 \theta = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \quad (3.14)$$

Şekil 3.8'i göz önüne alarak şekil üzerindeki bölgelerde boyutsuz sıcaklık sınır şartlarını aşağıdaki şekilde tanımlayabiliriz:

A ve B noktaları arasında x yönünde ısı kaybı olmadığından,

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x} = 0 \quad (3.15)$$

yanmanın olduğu B ve C noktaları arasındaki sınır şartı,

$$\theta = \theta_y \quad (3.16)$$

C ve D noktaları arasındaki bölgede (sıvı cam bölgesi) sınır şartı,

$$\theta = \theta_M(x) \quad (3.17)$$

D ve E noktaları arasındaki bölgede sınır şartı

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{\sigma \varepsilon_2 T_h^3}{k(\theta)} (\theta_d^4 - 1) = 0 \quad (\text{y-yönünde}) \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\sigma \varepsilon_2 T_h^3}{k(\theta)} (\theta_d^4 - 1) = 0 \quad (\text{x-yönünde}) \quad (3.19)$$

E ve F noktaları arasındaki bölgede sınır şartı,

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\sigma \varepsilon_1 T_h^3}{k(\theta)} (\theta^4 - 1) = 0 \quad (3.20)$$

F ve A noktaları arasındaki bölgede sınır şartı,

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{h(x)}{k(\theta)} (\theta - 1) + \frac{\sigma \varepsilon_1}{k(\theta)} T_h^3 (\theta^4 - 1) = 0 \quad (3.21)$$

dır.

Burada,

θ_d : İzolasyon malzemesinin dış yüzeyindeki boyutsuz sıcaklık,

σ : Steffan Boltzman sabiti ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$),

ε_1 : Refrakter malzemesinin ısı yayma katsayısı,

ε_2 : İzolasyon malzemesinin ısı yayma katsayısı,

T_h : Dış ortam hava sıcaklığı (K),

h : Hava-Jeti'ne ait ısı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2\text{K}$),

olarak bilinmektedir.

Hesaplamalar esnasında Şekil 3.10'da görülen cam içindeki sıcaklık eğrisine x 'e bağlı lineer bir yaklaşım yapılmıştır. Cam içinde boyutsuz sıcaklık değişimi (3.22) denkleminde verilmiştir.

$$\theta_M = \theta_M(x) = 0.36894 x + 5.04643 \quad (3.22)$$

Refrakter duvarında oluşan sıcaklık dağılımı hesaplanırken, yukarıda verilmiş olan cam fırını duvar refrakterine ait sıcaklık sınır şartları sonlu farklar ifadeleri halinde yazılarak, (3.14) temel denklemi ile beraber kullanılmıştır. Tekrardan (3.14) Laplace denklemini sonlu farklar ifadesi halinde düzenli olmayan ağ sistemi için yazılırsa, boyutsuz sıcaklıklar için (3.23) nolu denklemi elde edilir.

$$\nabla^2 \theta \cong \frac{2}{h^2} \left[\frac{\theta(I-1, J)}{OR1(OR1 + OR3)} + \frac{\theta(I, J+1)}{OR2(OR2 + OR4)} + \frac{\theta(I+1, J)}{OR3(OR1 + OR3)} \right. \\ \left. + \frac{\theta(I, J-1)}{OR4(OR2 + OR4)} - \left(\frac{1}{OR1 OR3} + \frac{1}{OR2 OR4} \right) \theta(I, J) \right] \quad (3.23)$$

Elde edilen (3.23) nolu denklemde refrakter duvarına ait sıcaklık sınır şartları ile beraber ele alınarak yapılacak çözüm, refrakter içindeki sıcaklık dağılımını verecektir.

3.5 Düzensiz Bir Ağ Yapısı Bulunan Refrakter Bloğuna Ait Laplace Diferansiyel Denkleminin Çözümü

Sonlu farklar yöntemi ile ayrıştırılmış olan (3.23) nolu denklemin çözümünde kullanılacak olan sıcaklık sınır şartları ısıtım ifadesi ($\sigma\theta^4$) içermesinden dolayı, blok içindeki sıcaklık dağılımı hesaplanırken iteratif yöntem kullanılmıştır. FORTRAN dilinde yazılmış olan bilgisayar programı refrakter bloğu için rastgele bir sıcaklık profili ile iterasyona başlamaktadır. Program, içine girilmiş olan ϵ hassasiyet değerine ulaşıncaya kadar sıcaklık profili değişmekte ve program iterasyona devam etmektedir. Hesaplamalarda ϵ hassasiyet değeri $\%10^{-6}$ olarak alınmıştır. Bilgisayar programı Ek. B'de verilmiştir.

3.6 Hava Soğutmasıyla Refrakter Bloğundan Çekilen Isı Yükleri Ve Yıllara Göre Dağılımı

Blok içindeki sıcaklık dağılımı sayısal olarak hesaplandıktan sonra, refrakter dış yüzeyinde yapılan hava soğutmasının etkisini bulmak için ağ noktalarında hesaplanan sıcaklık değerleri kullanılmıştır.

Öncelikle soğutmanın olmadığı durum için (blok ısıya karşı izolasyonlu) refrakter bloğunda oluşan sıcaklık dağılımı bulunmuş sonra (3.24) ve (3.25) nolu ifadeler kullanılarak birim kütle başına refrakterde depolanan ısı miktarı (q_i) hesaplanmıştır. (3.24) ve (3.25) nolu ifadeler,

$$\sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} \Delta\theta_i(I,J) = \sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} T_h(\theta_i(I,J) - 1.0) \quad (3.24)$$

ve

$$q_i = \frac{1}{N} \sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} \Delta\theta_i(I,J) C_p(\theta_i) \quad (3.25)$$

şeklindedir.

Burada,

$\Delta\theta_i$: Soğutmanın olmadığı durumda refrakterde oluşan sıcaklık farkı (K),

θ_i : Soğutmanın olmadığı durumda refrakterde oluşan boyutsuz sıcaklık değeri,

C_p : Refrakter malzemesinin özgül ısısı (J/kg°C),

N : Refrakter içindeki toplam ağ noktaları sayısı,

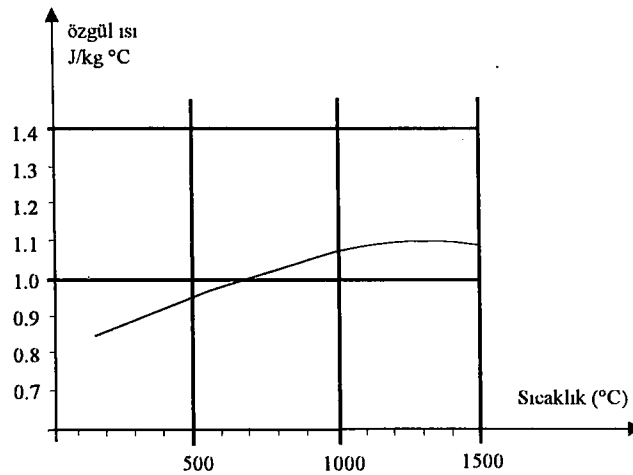
MM : Refrakterde y-ekseni doğrultusundaki toplam ağ noktası sayısı,

LL : Refrakterde x-ekseni doğrultusundaki toplam ağ noktası sayısı,

T_h : Dış ortam hava sıcaklığı (K),

olarak bilinmektedir.

Refrakterin özgül ısısı C_p 'nin refrakter sıcaklığı ile olan değişimi Şekil 3.11'de verilmiştir [23].



Şekil 3.11 AZS tipi (ER 1681) refrakterin özgül ısısının sıcaklıkla olan değişimi

Bir sonraki adımda, farklı hava üfleme hızlarında refrakterde oluşan sıcaklık gradyanları kullanılarak, (3.26) ve (3.27) nolu ifadelerin yardımıyla refrakter bloğunda birim kütle başına depolanan ısı miktarı (q_0) hesaplanmıştır. (3.26) ve (3.27) nolu denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} \Delta\theta(I,J) = \sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} T_h(\theta(I,J) - 1.0) \quad (3.26)$$

$$q_0 = \frac{1}{N} \sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} \Delta\theta(I,J) C_p(\theta) \quad (3.27)$$

Burada,

$\Delta\theta$: Belli hava üfleme hızında refrakterde oluşan sıcaklık farkı (K),

θ : Belli hava üfleme hızında refrakterde oluşan boyutsuz sıcaklık değeri, olarak bilinmektedir.

Belli bir (t) anında ve hava üfleme hızında refrakter bloğundan soğutmayla birim kütle başına çekilen ısı miktarı (3.28) nolu ifade ile verilmiştir.

$$\Delta q = q_i - q_0 \quad (3.28)$$

Burada, Δq ifadesi zamana bağlı bir fonksiyondur. Korozyon etkisi ile refrakter bloğu boyutlarının değişime uğraması, hava soğutmasıyla refrakterden birim kütle başına çekilen ısı miktarını azaltmaktadır. Blok ömrünün, uygulanan soğutma havasının hızı, sıcaklığı ve zamanla olan değişimi sonuç kısmında grafik olarak verilmiştir.

BÖLÜM 4

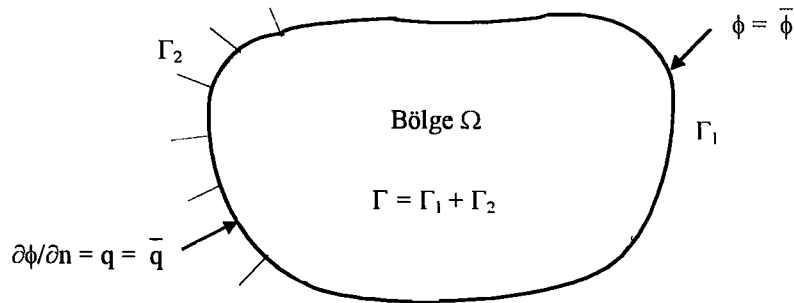
SINIR ELEMAN YÖNTEMİ (BOUNDARY ELEMENT METHOD) İLE DIŞ YÜZEYİNDEN HAVA SOĞUTMASI YAPILAN REFRAKTER BLOĞUNDAKİ SICAKLIKLARIN HESAPLANMASI

Bu bölümde dış yüzeyinden hava soğutması yapılan refrakter bloğu için Sınır Eleman Yöntemi formülasyonu yapılmış ve herhangi bir t anında refrakter bloğuna ait aşınma profilleri kullanılarak Sınır Eleman Yöntemiyle blok içindeki sıcaklıklar hesaplanmıştır. Sınırlardaki sıcaklık sınır şartları lineer olmadığından Sınır Eleman Yöntemi iteratif yöntemle beraber kullanılmıştır. Sayısal hesaplamalar yapılırken refrakterdeki sıcaklıkların kararlı (Steady-state) olduğu kabul edilmiştir.

4.1 Poisson Tipi Problemlere Sınır Eleman Metodunun Uygulanması

Şekil 4.1'de verilmiş olan genel bölgede (4.1) nolu poisson denklemi çözülmek istensin.

$$\nabla^2 \phi = f \quad (4.1)$$



Şekil 4.1 Poisson tipi denklemin tanımlandığı bölgenin elemanları

Burada, f küresel koordinatlarda verilmiş ve Ω bölgesi içinde bilinen bir fonksiyondur. Ω bölgesine ait sınır şartlarının 2 ayrı karakterde olduğunu kabul edip bölge sınırlarının bir kısmını Γ_1 ve diğer kalanını ise Γ_2 ile gösterilsin.

Sınır şartları (4.2a) ve (4.2b) nolu ifadeler ile aşağıda verilmiştir:

$$\Gamma_1 \text{ üzerinde : } \phi = \bar{\phi} \quad (4.2a)$$

$$\Gamma_2 \text{ üzerinde : } q = \bar{q} = \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (4.2b)$$

Burada,

$\bar{\phi}$: ϕ fonksiyonunun Γ_1 üzerindeki değerini,

q : Γ_1 Yüzeyinin normali doğrultusundaki ϕ fonksiyonunun türevini,

$\bar{q}$: Γ_2 yüzeyinin normali doğrultusundaki ϕ fonksiyonunun türev değerini,

göstermektedir.

Yukardaki poisson diferansiyel denklemini sınır şartlarla beraber ele alınır ve analitik çözümün olmadığı kabul edilirse, ϕ fonksiyonuna $\hat{\phi}$ yaklaşımı yapılabilir. Bu taktirde,

$$\nabla^2 \hat{\phi} - f = \varepsilon_{\Omega} \quad (4.3)$$

$$\hat{\phi} - \bar{\phi} = \varepsilon_{\Gamma_1} \quad (4.4)$$

ve

$$\hat{q} - \bar{q} = \varepsilon_{\Gamma_2} \quad (4.5)$$

ifadeleri yazılabilir.

Önce ω_{ℓ} , $\bar{\omega}_{\ell}$ ve $\bar{\bar{\omega}}_{\ell}$ ağırlık fonksiyonları kullanılarak "Ağırlıklı Kalanlar Metodu (Weighted Residual Method)" ifadesi yazılır

$$\int_{\Omega} \varepsilon_{\Omega} \omega_{\ell} d\Omega + \int_{\Gamma_1} \varepsilon_{\Gamma_1} \bar{\omega}_{\ell} d\Gamma + \int_{\Gamma_2} \varepsilon_{\Gamma_2} \bar{\bar{\omega}}_{\ell} d\Gamma = 0 \quad (4.6)$$

ve Γ_1 üzerinde $\bar{\omega}_{\ell} = \frac{\partial \omega_{\ell}}{\partial n}$, Γ_2 üzerinde $\bar{\bar{\omega}}_{\ell} = -\omega_{\ell}$ alınır, aşağıda verilen (4.7)

denklemini elde edilir:

$$\int_{\Omega} (\nabla^2 \hat{\phi}) \omega_{\ell} d\Omega - \int_{\Omega} f \omega_{\ell} d\Omega + \int_{\Gamma_1} (\hat{\phi} - \bar{\phi}) \frac{\partial \omega_{\ell}}{\partial n} d\Gamma - \int_{\Gamma_2} (\hat{q} - \bar{q}) \omega_{\ell} d\Gamma = 0 \quad (4.7)$$

(4.7) nolu integral ifadesinin kısmi integral (by parts) yöntemi kullanılarak 2 defa integrali alınıp basitleştirilirse, (4.8) nolu denklem bulunur.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} (\nabla^2 \omega_{\ell}) \hat{\phi} d\Omega - \int_{\Omega} f \omega_{\ell} d\Omega + \int_{\Gamma_1} \hat{q} \omega_{\ell} d\Gamma + \int_{\Gamma_2} \bar{q} \omega_{\ell} d\Gamma \\ & - \int_{\Gamma_2} \hat{\phi} \frac{\partial \omega_{\ell}}{\partial n} d\Gamma - \int_{\Gamma_1} \bar{\phi} \frac{\partial \omega_{\ell}}{\partial n} d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Genel olarak ele alınan problemde Laplace denklemi için bir bağıntı elde etmek istenirse ($f = 0$ alınır), (4.9) nolu ifade elde edilir:

$$\int_{\Omega} (\nabla^2 \omega_{\ell}) \hat{\phi} d\Omega + \int_{\Gamma_1} \hat{q} \omega_{\ell} d\Gamma + \int_{\Gamma_2} \bar{q} \omega_{\ell} d\Gamma - \int_{\Gamma_2} \hat{\phi} \frac{\partial \omega_{\ell}}{\partial n} d\Gamma - \int_{\Gamma_1} \bar{\phi} \frac{\partial \omega_{\ell}}{\partial n} d\Gamma = 0 \quad (4.9)$$

Yukarıda verilen denklemde ω_{ℓ} ifadesi (4.10) eşitliği ile verilmiştir.

$$\nabla^2 \omega_{\ell} = \delta(\vec{r} - \vec{r}_{\ell}) \quad (4.10)$$

Burada,

$\vec{r}$: Γ sınırı üzerindeki hareketli yer vektörü,

$\vec{r}_\ell$: Sınır elemanı üzerindeki " ℓ " noktasına ait yer vektörü,

$\vec{r} - \vec{r}_\ell$: $\vec{r}_\ell$ 'den $\vec{r}$ 'ye pozisyon vektörü (Şekil 4.2),

δ = Kroneckel delta,

anlamlandırılır.

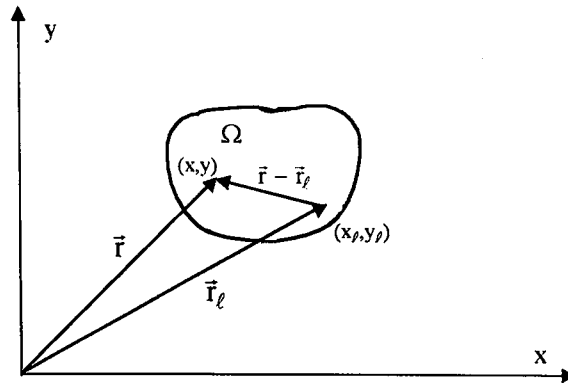
(4.10) ifadesi (4.9) denkleminde yerine konulur ara işlemler yapılırsa,

$$C_\ell \phi(\vec{r}_\ell) + \int_{\Gamma_2} (\bar{q}_\omega_\ell - \hat{\phi}) \frac{\partial \omega_\ell}{\partial n} d\Gamma + \int_{\Gamma_1} (\hat{q}_\omega_\ell - \bar{\phi}) \frac{\partial \omega_\ell}{\partial n} d\Gamma = 0 \quad (4.11)$$

(4.11) denklemi elde edilir. Burada, C_ℓ katsayısı sabit bir sayı olup,

$$C_\ell = \begin{cases} 0 & \vec{r}_\ell \notin \Omega \\ 1/2 & \vec{r}_\ell \in \Gamma \\ 1 & \vec{r}_\ell \in \Omega \text{ (}\Omega \text{ bölgesinin içinde)} \end{cases} \quad (4.12)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.



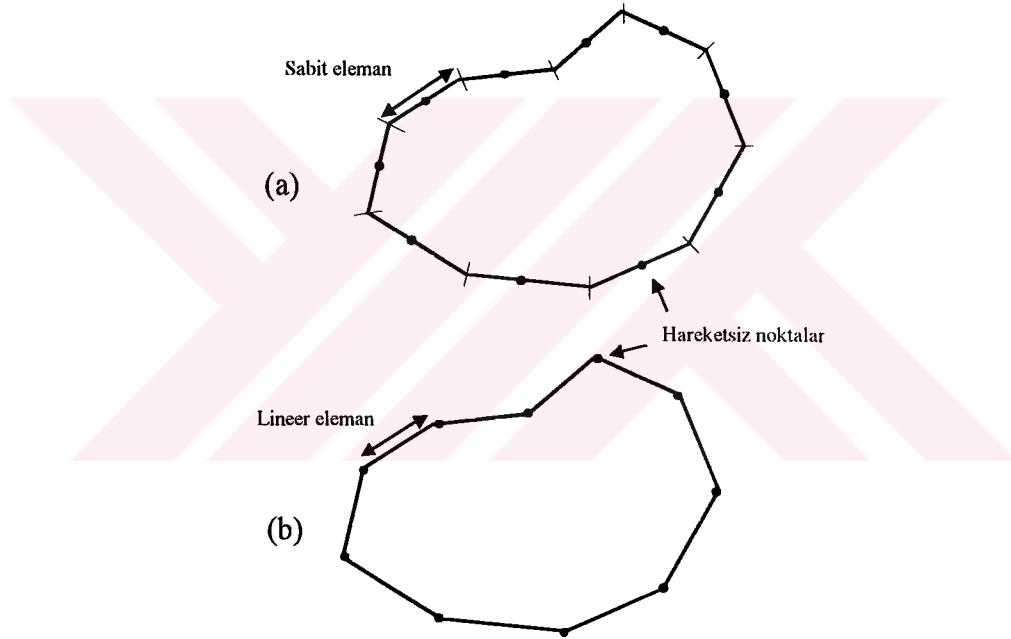
Şekil 4.2 r_ℓ ve r vektörlerinin tanımlanması

Laplace denklemi'nin çözümünde kullanılacak olan Green fonksiyonları ω_ℓ 'nin 2 ve 3 boyutlu hali için, aşağıda (4.13) ve (4.14) nolu ifadeler ile verilmiştir:

$$\text{2-boyutlu : } \omega_\ell = \frac{1}{2\pi} \ln |\vec{r} - \vec{r}_\ell| \quad (4.13)$$

$$\text{3-boyutlu : } \omega_\ell = \frac{1}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}_\ell|} \quad (4.14)$$

4.2 2-Boyutlu Laplace Denkleminin Sınır Eleman Yöntemi İle Çözümü



Şekil 4.3 Bölge sınırlarının (a) sabit ve (b) lineer elemana ayrıştırılmış hali

Daha önceki bölümde elde edilen (4.9) nolu denklem tekrar yazılır,

$$\int_{\Omega} (\nabla^2 \omega_\ell) \hat{\phi} d\Omega + \int_{\Gamma_1} \left(\hat{q} \omega_\ell - \bar{\phi} \frac{\partial \omega_\ell}{\partial n} \right) d\Gamma + \int_{\Gamma_2} \left(\bar{q} \omega_\ell - \hat{\phi} \frac{\partial \omega_\ell}{\partial n} \right) d\Gamma = 0 \quad (4.9)$$

2 boyutlu analiz için $\omega_\ell = \frac{1}{2\pi} \ln|\vec{r} - \vec{r}_\ell|$ olarak seçilir ve $\nabla^2 \omega_\ell = \delta(\vec{r} - \vec{r}_\ell)$ olduğu düşünülürse, (4.9) nolu denklemdeki $\frac{\partial \omega_\ell}{\partial n}$ türevi için (4.15) ve (4.16) nolu eşitlikler yazılabilir:

$$\frac{\partial \omega_\ell}{\partial n} = \nabla^2 \omega_\ell \cdot \vec{n} \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial \omega_\ell}{\partial n} = \left(\vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} \right) \left[\frac{1}{2\pi} \ln \sqrt{(x - x_\ell)^2 + (y - y_\ell)^2} \right] \cdot (n_x \vec{i} + n_y \vec{j}) \quad (4.16)$$

Burada,

$\vec{n}$: Sınır eleman üzerindeki noktalara ait normal vektörü,

n_x : Sınır eleman üzerindeki normal vektörün x-ekseni yönündeki bileşeni,

n_y : Sınır eleman üzerindeki normal vektörün y-ekseni yönündeki bileşeni,

$\vec{i}$: x-ekseni yönündeki birim vektörü,

$\vec{j}$: y-ekseni yönündeki birim vektörü,

göstermektedir.

(4.16) denkleminde bazı ara işlemler yapıp yeniden düzenlenirse, (4.17) ifadesi elde edilir.

$$\frac{\partial \omega_\ell}{\partial n} = \frac{(x - x_\ell)n_x + (y - y_\ell)n_y}{2\pi|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} \quad (4.17)$$

Son olarak, (4.13) ve (4.17) ifadeleri (4.9) denkleminde yerine konursa, (4.18) nolu eşitlik elde edilir:

$$C_\ell \tilde{\phi}(\vec{r}_\ell) + \int_\Gamma \left(\frac{\tilde{q}}{2\pi} \ln|\vec{r} - \vec{r}_\ell| - \frac{\tilde{\phi}}{2\pi} \frac{(x - x_\ell)n_x + (y - y_\ell)n_y}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} \right) d\Gamma = 0 \quad (4.18)$$

Burada,

$$\tilde{\phi} = \begin{cases} \bar{\phi} & \Gamma_1 \text{ üzerinde} \\ \hat{\phi} & \Gamma_2 \text{ üzerinde veya } \Omega \text{ içinde} \end{cases} \quad (4.19)$$

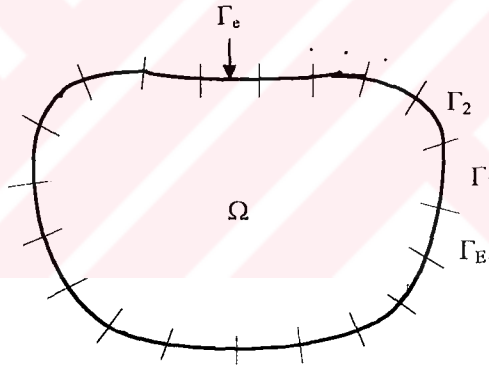
ve

$$\tilde{q} = \begin{cases} \bar{q} & \Gamma_2 \text{ üzerinde} \\ \hat{q} & \Gamma_1 \text{ üzerinde} \end{cases} \quad (4.20)$$

olarak bilinmektedir.

4.2.1 Bölge Sınırlarının E Tane Elemana Ayrıştırılması

Şekil 4.3'de görülen bölge sınırlarını toplam E elemana bölünsün.



Şekil 4.4 Sınırların E tane elemana ayrıştırılması (Her biri Γ_e ile gösterilmiştir)

Şekil 4,4'de verilmiş olan herbir eleman için aşağıdaki formülasyon yapılabilir:

$$\hat{\phi}^e = \sum_{m=1}^M \hat{\phi}_m^e N_m \quad (4.21)$$

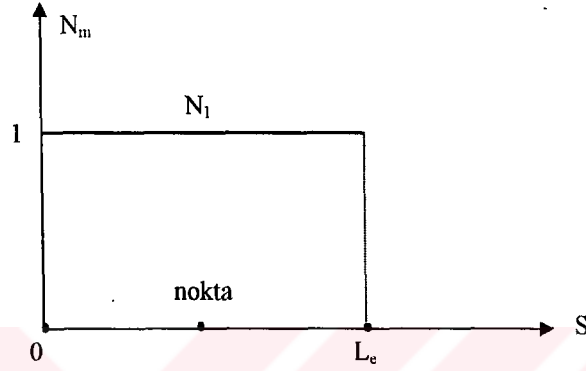
Burada,

$\hat{\phi}^e$: Herhangi bir "e" elemanındaki yaklaşım fonksiyonunu,

m : Bir eleman üzerindeki noktayı,

N_m : m'inci noktadaki şekil fonksiyonunu,
 M : Bir eleman üzerindeki toplam nokta sayısını,
göstermektedir.

Şekil 4.5'de verilen Global koordinatlarda görüldüğü gibi eleman üzerinde yalnızca sabit bir ϕ düşünülürse, nokta (node) elemanın ortasına konulmaktadır.



Şekil 4.5 Sabit eleman şekil fonksiyonu

Yukarıda verilen şekilde,

L_e : "e" 'inci eleman uzunluğu,
 S : Global koordinat değişkeni ($0 \leq S \leq L_e$),

olarak tanımlanmıştır. Sabit eleman için formülasyon yapılırsa

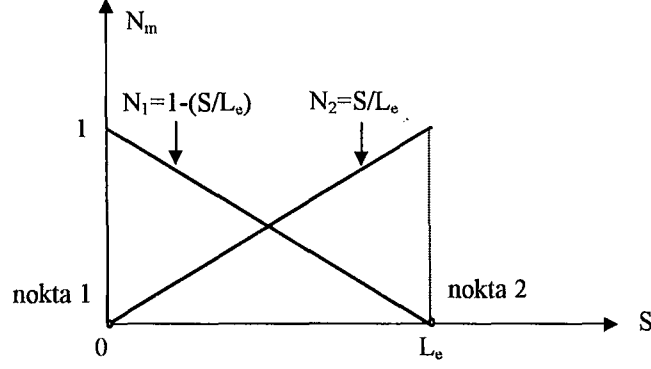
$$\hat{\phi}^e = \hat{\phi}_1^e N_1 \quad (4.22)$$

Benzer olarak,

$$\hat{q}^e = \hat{q}_1^e N_1 \quad (4.23)$$

olur.

Ayrıca, noktalar eleman üzerinde başlangıca ve sona yerleştirilerek Lineer Eleman Formülasyonu yapılabilir. Şekil 4.6 yardımıyla ϕ fonksiyonu için (4.24) nolu ifade yazılabilir.



Şekil 4.6 Global koordinatlarda lineer şekil fonksiyonları

Şekil 4.6 yardımıyla

$$\hat{\phi}^e = \hat{\phi}_1^e N_1 + \hat{\phi}_2^e N_2 \quad (4.24)$$

yazılabilir. Ayrıca

$$\hat{q}^e = \hat{q}_1^e N_1 + \hat{q}_2^e N_2 \quad (4.25)$$

dir. Diğer taraftan

$$\hat{\phi}^e = \sum_{m=1}^M \hat{\phi}_m^e N_m \quad (4.26)$$

ve

$$\hat{q}^e = \sum_{m=1}^M \hat{q}_m^e N_m \quad (4.27)$$

şeklinde gösterilebilir.

Tekrardan (4.18) nolu ifade düzenlenerek yazılırsa,

$$C_\ell \tilde{\phi}(\vec{r}_\ell) + \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} \left(\tilde{q} \ln|\vec{r} - \vec{r}_\ell| - \tilde{\phi} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_\ell) \cdot \vec{n}}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} \right) d\Gamma = 0 \quad (4.28)$$

olur.

(4.26) ve (4.27) ifadeleri (4.28) denkleminde yerine konur ve ara işlemler yapılırsa (4.29) nolu eşitlik elde edilir.

$$\begin{aligned} C_\ell \tilde{\phi}(\vec{r}_\ell) - \frac{1}{2\pi} \sum_{e=1}^E \int_{\Gamma_e} \left[\left(\sum_{m=1}^M \hat{\phi}_m^e N_m \right) \frac{(\vec{r} - \vec{r}_\ell) \cdot \vec{n}}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} \right] d\Gamma \\ + \frac{1}{2\pi} \sum_{e=1}^E \int_{\Gamma_e} \left[\left(\sum_{m=1}^M \hat{q}_m^e N_m \right) \ln|\vec{r} - \vec{r}_\ell| \right] d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (4.29)$$

Daha sonra, (4.29) ifadesinde ϕ , q fonksiyonları yerine bilinen $\bar{\phi}$, $\bar{q}$ ve bilinmeyen $\hat{\phi}$, $\hat{q}$ ifadeleri konulacağından formülasyon genel olarak yapılmıştır. Sınır noktalarında $\hat{\phi}_m^e$ ve $\hat{q}_m^e$ değerleri sabit olduğundan, (4.29) ifadesinde integral dışına çıkarlar. Bu işlem yapılırsa (4.30) nolu eşitlik elde edilir:

$$\begin{aligned} C_\ell \tilde{\phi}(\vec{r}_\ell) - \frac{1}{2\pi} \sum_{e=1}^E \sum_{m=1}^M \hat{\phi}_m^e \left(\int_{\Gamma_e} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_\ell) \cdot \vec{n}}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} N_m d\Gamma \right) \\ + \frac{1}{2\pi} \sum_{e=1}^E \sum_{m=1}^M \hat{q}_m^e \left(\int_{\Gamma_e} N_m \ln|\vec{r} - \vec{r}_\ell| d\Gamma \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.30)$$

(4.30) nolu ifadede N_m şekil fonksiyonlarının sabit ve 1'e eşit olması durumunda,

$$H_{\ell e} = \int_{\Gamma_e} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_\ell) \cdot \vec{n}}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} d\Gamma \quad (4.31)$$

ve

$$G_{\ell e} = \int_{\Gamma_e} \ln |\vec{r} - \vec{r}_\ell| d\Gamma \quad (4.32)$$

tanımları yapılabilir. Burada, $H_{\ell e}$ ve $G_{\ell e}$ kare matrislerdir.

(4.30) eşitliğinde sabit eleman yerine lineer eleman kullanıldığını kabul eder ve lineer şekil fonksiyonunu denklemden yerine konursa (4.33) nolu ifade elde edilir:

$$\begin{aligned} C_\ell \tilde{\phi}(\vec{r}_\ell) - \frac{1}{2\pi} \sum_{e=1}^E \left[\hat{\phi}_1^e \int_{\Gamma_e} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_\ell) \cdot \vec{n}}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} \left(1 - \frac{S}{L_e}\right) d\Gamma + \hat{\phi}_2^e \int_{\Gamma_e} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_\ell) \cdot \vec{n}}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} \left(\frac{S}{L_e}\right) d\Gamma \right] \\ + \frac{1}{2\pi} \sum_{e=1}^E \left[\hat{q}_1^e \int_{\Gamma_e} \left(1 - \frac{S}{L_e}\right) \ln |\vec{r} - \vec{r}_\ell| d\Gamma + \hat{q}_2^e \int_{\Gamma_e} \left(\frac{S}{L_e}\right) \ln |\vec{r} - \vec{r}_\ell| d\Gamma \right] = 0 \quad (4.33) \end{aligned}$$

(4.33) denkleminde lineer eleman kullanıldığından elemanın her iki ucunda farklı $H_{\ell e}$ ve $G_{\ell e}$ tanımları çıkmaktadır.

$H_{\ell e}$ matrisi için

$$H_{\ell e}^{(1)} = \int_{\Gamma_e} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_\ell) \cdot \vec{n}}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} \left(1 - \frac{S}{L_e}\right) d\Gamma \quad (4.34)$$

ve

$$H_{\ell e}^{(2)} = \int_{\Gamma_e} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_\ell) \cdot \vec{n}}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} \left(\frac{S}{L_e}\right) d\Gamma \quad (4.35)$$

yazılabilir. Benzer olarak $G_{\ell e}$ matrisi

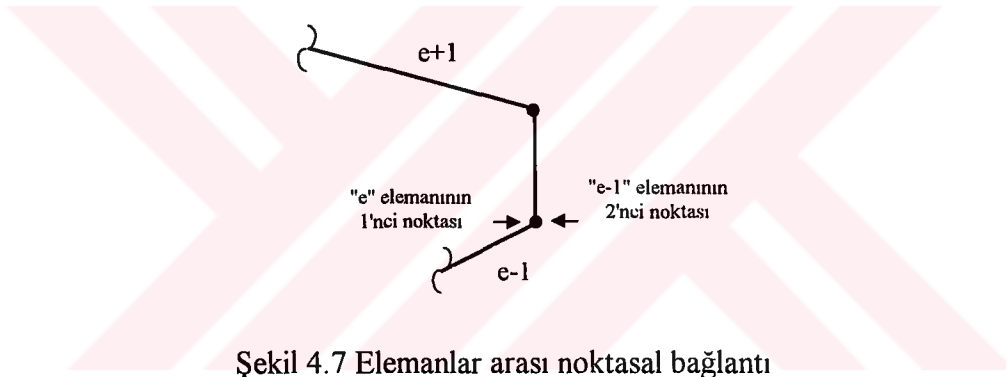
$$G_{\ell e}^{(1)} = \int_{\Gamma_e} \ln|\vec{r} - \vec{r}_\ell| \left(1 - \frac{S}{L_e}\right) d\Gamma \quad (4.36)$$

ve

$$G_{\ell e}^{(2)} = \int_{\Gamma_e} \ln|\vec{r} - \vec{r}_\ell| \left(\frac{S}{L_e}\right) d\Gamma \quad (4.37)$$

şeklinde verilebilir.

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi "e" lineer elemanının her iki ucunda farklı elemanlardan gelen ortak noktalar mevcuttur. Bundan dolayı bu ortak noktalarda her iki taraftan gelen etkilerin gözönüne alınması gerekmektedir.



Şekil 4.7 Elemanlar arası noktasal bağlantı

4.2.2 Akı Hesabı (Flux Computation)

$\frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial x}$ ve $\frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial y}$ değerleri herhangi bir $\vec{r}_\ell$ noktasında hesaplanmak istensin. Bunun

için (4.33) denkleminde $H_{\ell e}$ ve $G_{\ell e}$ tanımlarını yerine konur ve yeniden yazılırsa, (4.38) denklemi elde edilir.

$$C_\ell \tilde{\Phi}(\vec{r}_\ell) - \frac{1}{2\pi} \{H_{\ell e}\}^T \{\tilde{\Phi}\} + \frac{1}{2\pi} \{G_{\ell e}\}^T \{\tilde{q}\} = 0 \quad (4.38)$$

Elde edilen (4.38) ifadesinin x_ℓ 'ye göre türevi alınırsa,

$$C_\ell \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial x_\ell} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\partial H_{\ell e}}{\partial x_\ell} \right\}^T \{\tilde{\Phi}\} - \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\partial G_{\ell e}}{\partial x_\ell} \right\}^T \{\tilde{q}\} \quad (4.39)$$

yukarıda verilen (4.39) denklemi elde edilir. $H_{\ell e}$ ve $G_{\ell e}$ 'nin (4.31) ve (4.32) nolu ifadeleri yeniden yazılır ve türevleri alınır,

$$\frac{\partial H_{\ell e}}{\partial x_\ell} = \int_{\Gamma_e} \frac{(x - x_\ell)^2 n_x + 2(x - x_\ell)(y - y_\ell) n_y - (y - y_\ell)^2 n_x}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^4} d\Gamma \quad (4.40)$$

ve

$$\frac{\partial G_{\ell e}}{\partial x_\ell} = - \int_{\Gamma_e} \frac{(x - x_\ell)}{|\vec{r} - \vec{r}_\ell|^2} d\Gamma \quad (4.41)$$

ifadeleri elde edilir. Hesaplanan (4.40) ve (4.41) nolu eşitlikler (4.39) denkleminde yerine konulmak suretiyle $\frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial x_\ell}$ hesaplanabilir.

Benzer olarak, $\frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial y_\ell}$ türev değeri (4.38) eşitliğinden faydalanılarak yazılırsa, aşağıda verilen (4.42) nolu eşitlik elde edilir.

$$C_\ell \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial y_\ell} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\partial H_{\ell e}}{\partial y_\ell} \right\}^T \{\tilde{\Phi}\} - \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\partial G_{\ell e}}{\partial y_\ell} \right\}^T \{\tilde{q}\} \quad (4.42)$$

(4.42) nolu denklemdaki $\frac{\partial H_{\ell e}}{\partial y_\ell}$ ve $\frac{\partial G_{\ell e}}{\partial y_\ell}$ değerlerini elde etmek için (4.31) ve (4.32)

nolu ifadelerin y_ℓ 'ye göre türevi alındığında,

$$\frac{\partial H_{\ell e}}{\partial y_{\ell}} = \int_{\Gamma_e} \frac{(y - y_{\ell})^2 n_y + 2(x - x_{\ell})(y - y_{\ell}) n_x - (x - x_{\ell})^2 n_y}{|\vec{r} - \vec{r}_{\ell}|^4} d\Gamma \quad (4.43)$$

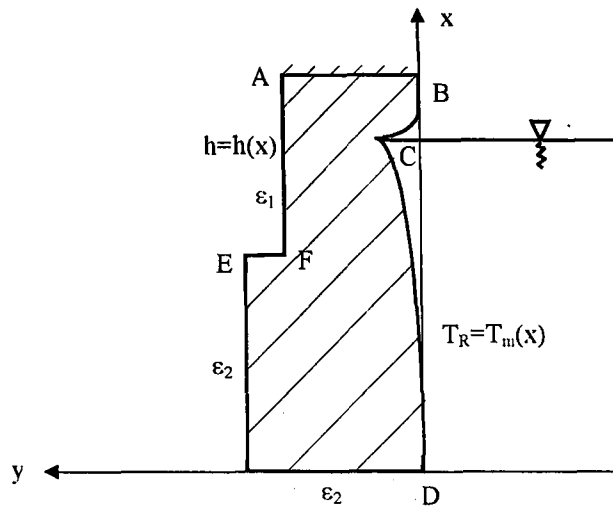
ve

$$\frac{\partial G_{\ell e}}{\partial y_{\ell}} = - \int_{\Gamma_e} \frac{(y - y_{\ell})}{|\vec{r} - \vec{r}_{\ell}|^2} d\Gamma \quad (4.44)$$

ifadeleri elde edilir. Yukarıda verilen (4.43) ve (4.44) nolu eşitliğin (4.42) denkleminde yerine konulmasıyla, $\frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial y_{\ell}}$ türevinin değeri hesaplanır [25].

4.3 Dış Yüzeyinden Hava Soğutması Yapılan Refrakter Duvarındaki Sıcaklıkların Sınır Eleman Metodu Kullanılarak Çözümü

Son hali (4.38) denkleminde verilen ifadenin çözümünde kullanılacak olan sıcaklık sınır şartları Sonlu Farklar Metodu yaklaşımının sunulduğu Bölüm 3'de verilmiştir. Refrakter duvarının camla temas halinde bulunan kısmındaki geometriye herhangi bir yaklaşım uygulamadan, refrakter bloğu içindeki sıcaklıklar Sınır Eleman Yöntemi kullanılarak hesaplanacaktır. Şekil 4.8'de refrakter bloğunun gerçek profili ve üzerinde sıcaklık sınır şartlarının farklılık gösterdiği bölgeler görülmektedir.



Şekil 4.8 Cam fırını yan bloğunun orjinal şekli ve sıcaklık sınır şartları

Şekil 4.8'den faydalanarak sınırlardaki sıcaklık şartları tekrardan yazıldığında,

A ve B arasında x yönünde ısı kaybı bulunmadığından,

$$\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x} = 0 \quad (4.45)$$

B ve C noktaları arasında yanma olduğu ve sıcaklıkların sabit kaldığı kabul edilirse,

$$\hat{\phi} = \theta_y \quad (4.46)$$

C ve D noktaları arasında sıvı-cam bulunduğu gözönüne alınırsa,

$$\hat{\phi} = \theta_M(x) \quad (4.47)$$

D ve E noktaları arasındaki bölgenin izolasyonlu olmasından dolayı,

$$\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial y} + \frac{\sigma \varepsilon_2}{k(\theta)} T_h^3 (\tilde{\phi}_d^4 - 1) = 0 \quad (\text{y-yönünde}) \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x} + \frac{\sigma \varepsilon_2}{k(\theta)} T_h^3 (\tilde{\phi}_d^4 - 1) = 0 \quad (\text{x-yönünde}) \quad (4.49)$$

E ve F noktaları arasında,

$$\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x} + \frac{\sigma \varepsilon_1}{k(\theta)} T_h^3 (\tilde{\phi}_d^4 - 1) = 0 \quad (4.50)$$

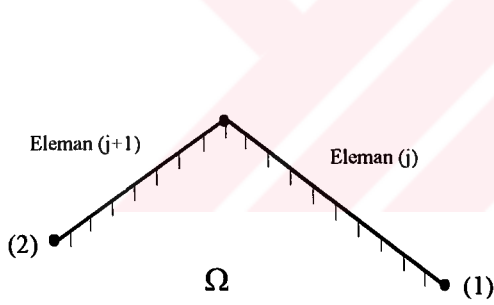
Son olarak F ve A noktaları arasındaki bölgede sınır şartı,

$$\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial y} + \frac{h(x)}{k(\theta)} (\phi - 1) + \frac{\sigma \varepsilon_1}{k(\theta)} T_h^3 (\tilde{\phi}_d^4 - 1) = 0 \quad (4.51)$$

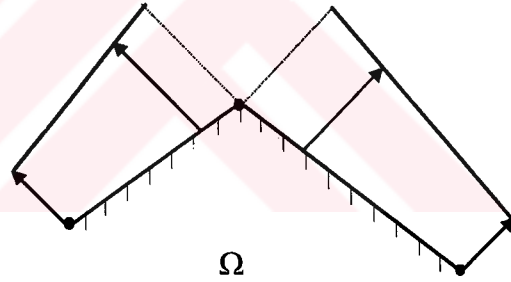
yazılabilir.

Sınır Eleman Yöntemi'nin uygulandığı bölgenin şekil olarak karmaşık olması metodun uygulanabilirliğini etkilememektedir. Bu sebeple hesaplamalarda camla temasta olan fırın iç bölgesindeki refrakterin orjinal profili bir yaklaşıma gerek duyulmadan kullanılmıştır.

Bazen refrakter köşe noktalarında (normalin doğrultusunun değiştiği noktalarda) sıcaklık sınır şartlarındaki ani değişmeden dolayı, Sınır Eleman Yöntemi ile ilgisiz sonuçlar elde edilmektedir. (Şekil 4.9). Bu durumu önlemek için bu noktalardaki sıcaklık sınır değerleri hesaplamalarında kullanılmamıştır. Köşe noktalarındaki koordinatlar biraz geriye çekilerek sıcaklık sınır değerleri buralarda programa girilmiş ve hesaplamalar sonunda elde edilen sonuçların ortalaması alınmak suretiyle refrakter köşe noktalarındaki sıcaklık değerleri bulunmuştur (Şekil 4.10) [25].



Şekil 4.9 Elemanların birleşmesi



Şekil 4.10 Süreksiz eleman

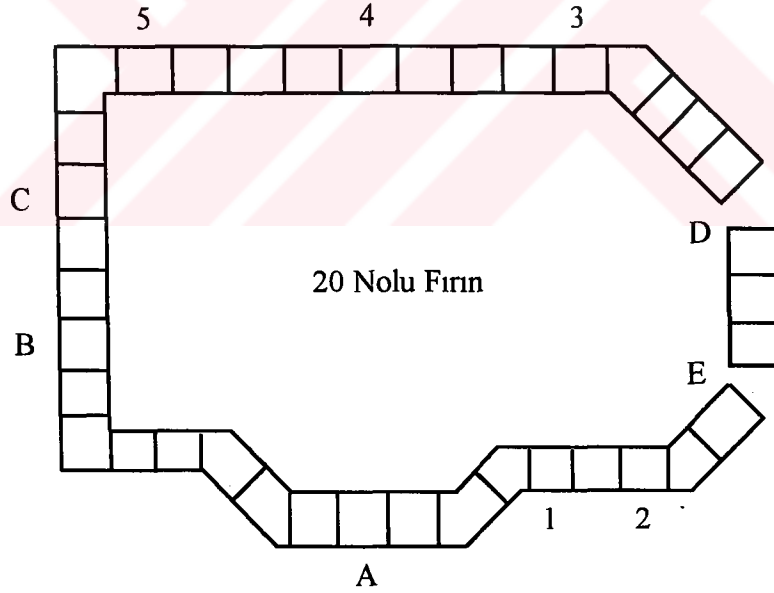
Ayrıca çözüm yapılırken, ısıtım sınır şartındaki lineer olmayan özellikten dolayı Sınır Eleman Yöntemi, iteratif yöntemle beraber kullanılmıştır. İterasyon esnasında sınırlardaki sıcaklık değerleri belli bir $\% \epsilon$ (hassasiyet) değerinin üstüne çıkıncaya kadar işleme devam edilmiştir. Hesaplarda $\% \epsilon$ değeri olarak 10^{-6} alınmış ve sınırlarda lineer eleman kullanılmıştır. Yapılan program FORTRAN dilinde olup program Ek. C'de verilmiştir.

BÖLÜM 5

CAM FIRINLARINDA MEYDANA GELEN AŞINMANIN ZAMANLA DEĞİŞİMİNİN DENEYSEL OLARAK TESPİT EDİLMESİ VE REFRAKTER DIŞ YÜZEYİNDEKİ SICAKLIKLARIN ÖLÇÜLMESİ

5.1 Refrakter Aşınmasının Deneysel Olarak Ölçülmesi

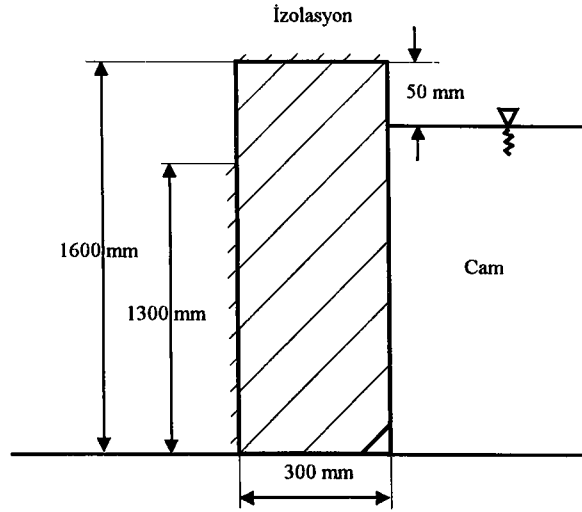
Bu bölümde, cam fırını yan refrakter duvarında deneysel olarak yapılan sıcaklık ve aşınma ölçümleri ve bu ölçümlerin ne şekilde yapıldığı, sonuçları ile beraber incelenecektir. Bu amaçla ilk olarak Mersin Şişe Cam Fabrikasında 1980-1987 kampanyaları arasında kullanılan ACS 20 nolu fırında deneysel olarak yapılan aşınma ölçümleri ele alınmıştır. ACS 20 nolu fırının detayı ve ölçüm noktaları Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 Kalınlığı 300 mm olan refrakter bloğuna ait aşınma ölçüm noktaları

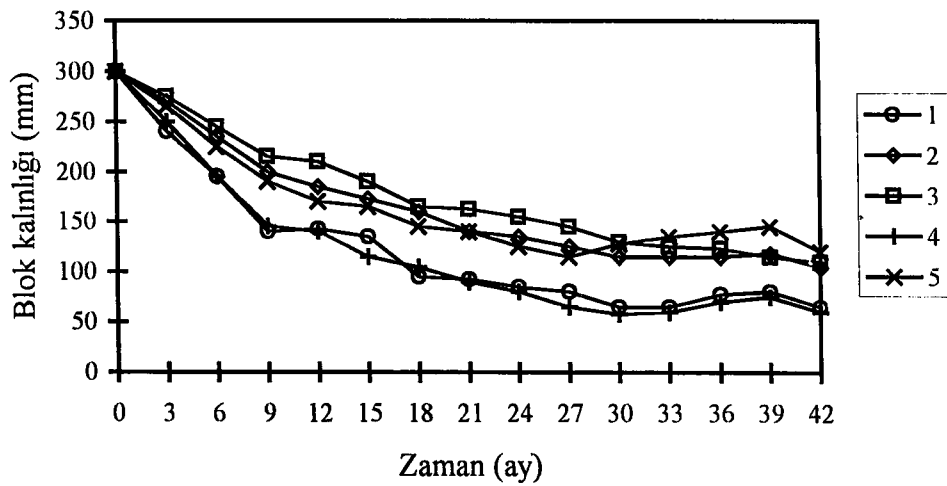
(A cam harmanı besleme ağızını, B ve C'ise yanmanın olduğu noktaları göstermektedir)

Şekil 5.1'de görülen, 20 nolu fırına ait yan duvar bloğu SEPR kataloğunda verilen AZS grubuna ait olup (ER 1681) blok kesiti ve boyutu Şekil 5.2'de verilmektedir.



Şekil 5.2 Fırının yan refrakter duvarının kesiti

İlgili fırının değişik bölgelerinde sıvı cam seviyesindeki noktaların aşınma değerleri belli zaman aralıklarında, dışarıdan çengel kanca sokulmak suretiyle ölçülmüştür. Bu noktalarda elde edilen aşınma oranı, refrakter duvarının alevle temasta olup olmamasına, sıvı cam yüzeyindeki sıcaklığa ve harekete bağlı olarak değişmektedir. Şekil 5.1'de verilen ölçüm noktalarında elde edilen aşınma değerlerinin zamanla olan değişimi grafiksel olarak Şekil 5.3'de verilmiştir.

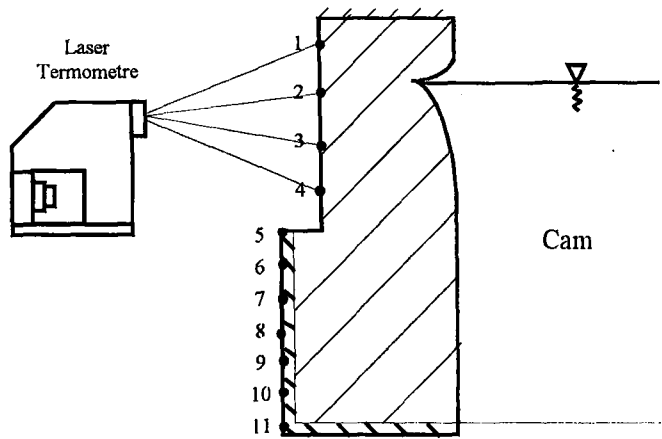


Şekil 5.3 Fırının sıvı cam yüzeyindeki farklı noktalarda meydana gelen aşınma miktarının zamanla değişimi

5.2 Refrakter Yüzeyi Sıcaklığının Deneysel Olarak Ölçülmesi

Diğer bir deneysel çalışmada Trakya Cam Fabrikasındaki TRII nolu fırında refrakter yan bloğunun dış yüzeyindeki sıcaklıklar Laser Termometresi kullanılarak ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümünde kullanılan Laser Termometresi ölçüm yapılacak yüzeyden yayılan infrared enerjisini lensleri vasıtasıyla toplamakta ve bunu infrared dedektörü üzerine göndermektedir. Alınan enerji miktarına bağlı olarak dedektör tarafından bir voltaj üretilmektedir. Bu voltaj bir mikroprosesör tarafından okunmakta ve karşılığı olan sıcaklık değeri ekrandan gösterilmektedir [26]. Bazı cisimler infrared enerjisini yayar ve yansıtırlar. Parlatılmış ve pürüzsüz yüzeylerin enerjiyi yansıtma miktarı daha fazladır. Bu faktör yüzeyin yayma katsayısı olarak isimlendirilir. Yüzeyin özelliğine göre yayma katsayısı 0.1 ile 1.0 değerleri arasındadır. Yüzeydeki sıcaklıklar ölçülürken Laser Termometresine yayma katsayısı (ϵ) tahmini bir değer olarak girilmiştir. Refrakter malzemesi için bu değer 0.95 olarak düşünülmüştür. Diğer taraftan yüzeyin bir kısmını kaplayan izolasyon malzemesi için tahmini değer 0.8 olarak alınmıştır [27].

Belli bir kalınlıktaki refrakter bloğunda sıcaklık ölçümü yapılan noktalar Şekil 5.4'de görülmektedir.



Şekil 5.4 Cam seviyesindeki kalınlığı 4 cm'ye kadar incelmış olan bloktaki sıcaklık ölçüm noktaları

Şekil 5.4'de görülen ölçüm noktalarının mesafeleri (m) ve bu noktalarda ölçülen sıcaklık değerleri Tablo 3'de verilmektedir.

Tablo 3. Refrakter üzerinden ölçüm alınan noktalar ve bu noktalardaki sıcaklıklar

Ölçüm No	Bloğun üst noktasından alınan ölçüm mesafesi (m)	Ölçülen sıcaklık değerleri (°C)
1	$x = 1.25, y = 0.18$	510
2	$x = 1.20, y = 0.18$	450
3	$x = 1.15, y = 0.18$	390
4	$x = 1.1, y = 0.18$	360
5	$x = 0.95, y = 0.25$	80
6	$x = 0.90, y = 0.25$	90
7	$x = 0.85, y = 0.25$	85
8	$x = 0.80, y = 0.25$	83
9	$x = 0.65, y = 0.25$	88
10	$x = 0.50, y = 0.25$	90
11	$x = 0.30, y = 0.25$	91

Deneysel olarak elde edilen aşınma ve sıcaklık verileri bir sonraki bölümlerde aynı refrakter için oluşturulan aşınma ve sıcaklık modellerinin sayısal yöntemlerle çözülmesi sonucunda elde edilen değerlerle karşılaştırılacaktır.

BÖLÜM 6

CAM FIRINI YAN DUVAR REFRAKTERİNDE OLUŞAN AŞINMA PROFİLİNE AİT SAYISAL SONUÇLARIN DENEYSEL DEĞERLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

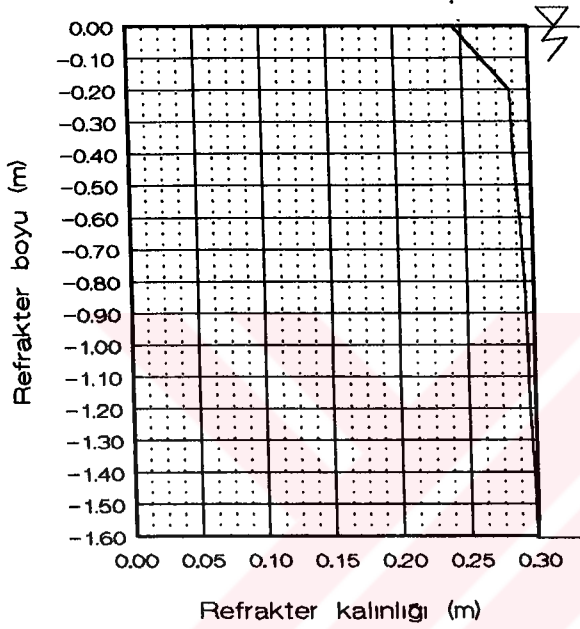
Bölüm 2'de cam fırını refrakter duvarı için (2.24) nolu diferansiyel denklem çıkarılmıştır. Ayrıca bu diferansiyel denklemin çözüm metodu aynı bölüm içerisinde 2.4 nolu kısımda bahsedilmiştir. Bölüm 2.4'de kısaca sonlu farklar ifadesi oluşturan (2.24) nolu diferansiyel denklemin x refrakter noktalarında, belli bir Δt zaman adımında ve Δx artımında (2.31) ve (2.32) nolu denklemleri ile beraber iteratif olarak çözülmesi ile cam fırınına ait korozyon profilinin elde edileceği belirtilmiştir.

Bu bölümde (2.24) nolu integro-diferansiyel denklemi belli sınır şartlarında sayısal olarak çözülecektir. Sonrasında soğutma havasının refrakter korozyonu üzerindeki etkisi hava hızı ve sıcaklığı gibi parametreler değiştirilerek incelenecektir. Ayrıca cam sıcaklığı ve refrakter kalınlığı gibi değişkenlerin refrakter ömrüne olan etkileri ele alınacaktır. Çözümlerde, (2.24) nolu diferansiyel denkleminde bulunan integral ifadesi için Trapezoidal kuralı kullanılmıştır.

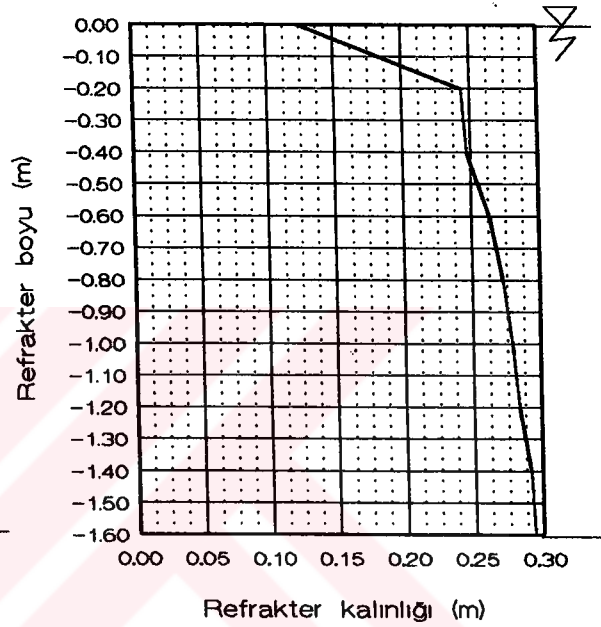
6.1 Refrakter Aşınmasının Sayısal Olarak Hesaplanması

Hesaplamalarda Şekil 5.2'deki kesitte verilmekte olan, Mersin Şişe Cam Fabrikasında 1980-1987 kampanyasında kullanılan refrakter duvarı boyutları referans alınacaktır. Hava refrakter duvarına cam seviyesinden $V = 42$ m/s hız ile üflenmekte olup, üfleme mesafesi $H = 0.008$ m ve lüle çıkış kesiti kenarı $B = 0.022$ m olarak alınabilir. Cam-refrakter ara yüzeyi ısı taşınım katsayısı $h_1 = 815$ W/m²K olarak Tablo 1'de verilmektedir. Ayrıca, refrakter ısı iletim katsayısının refrakter sıcaklığı ile değişimi Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, ikinci dereceden bir fonksiyon ile ifade edilmiştir. Bu çalışmada cam viskozitesine ait karakteristik sıcaklık değeri $\theta_c = 2.0 \times 10^4$ K alınmıştır [9]. Hesaplamalarda aksi belirtilmediği sürece dış ortam hava sıcaklığı

alınacaktır. Bütün hesaplamalarda Δt zaman aralığı 0.25 ay olarak seçilmiştir. Bölüm 3'de verilen (3.9) nolu ampirik ifadenin aynı bölümdeki (3.10), (3.11), (3.12) ifadeleri ile beraber kullanılması ile, Şekil 5.2'de verilmekte olan Mersin Şişe Cam Fabrikasına ait refrakterin aşınma profili sayısal olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de grafik olarak verilmiştir.



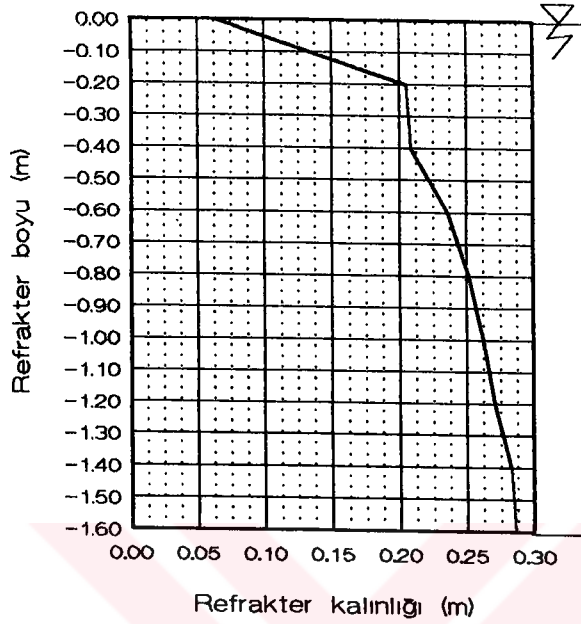
Şekil 6.1 6 Ay sonra fırının yan refrakter duvarında oluşan aşınma profili



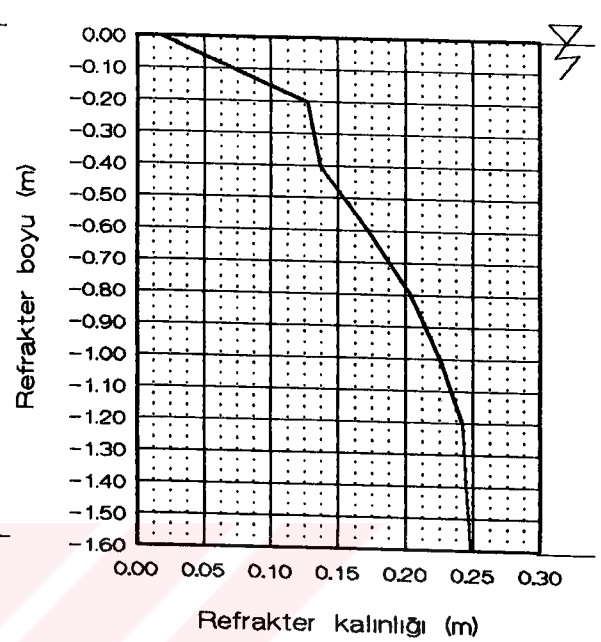
Şekil 6.2 24 Ay sonra fırının yan refrakter duvarında oluşan aşınma profili

Şekil 6.1'de görülen ve kalınlığı 0.3 m olan bloktaki izolasyonlu bölge $y = 0.3$ m ile $y = 1.6$ m arasındadır. Bloğun dış kısmında cam seviyesinden hava faraşları ile etkin bir soğutma yapılmaktadır. Hesaplamalarda ilk 6 aydaki aşınma miktarı yaklaşık olarak 0.055 m olarak bulunmuştur. Refrakterin kalınlığı 24 ay sonra aşınma ilerlemesiyle 0.125 m'ye kadar düşmektedir (Şekil 6.2). Daha sonraki aylarda blokta oluşan aşınma profilleri sırasıyla Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de verilmektedir. 42 ay sonra refrakterin maruz kaldığı aşınma Şekil 6.3' de görülmektedir. Bu süre sonunda refrakter yan bloğunun kalınlığı 0.065 m olarak hesaplanmıştır. Mersin Şişe Cam Fabrikasında 1980 - 1987 kampanyaları arasında kullanılan bloğun tamamen aşınması

için geçmesi gereken süre 84 ay olarak bilinmektedir. Yapılan bu çalışmada bloğun 84 ay sonraki kalınlığı 0.0194 m olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.4).



Şekil 6.3 42 Ay sonra fırının yan refrakter duvarında oluşan aşınma profili



Şekil 6.4 84 Ay sonra fırının yan refrakter duvarında oluşan aşınma profili

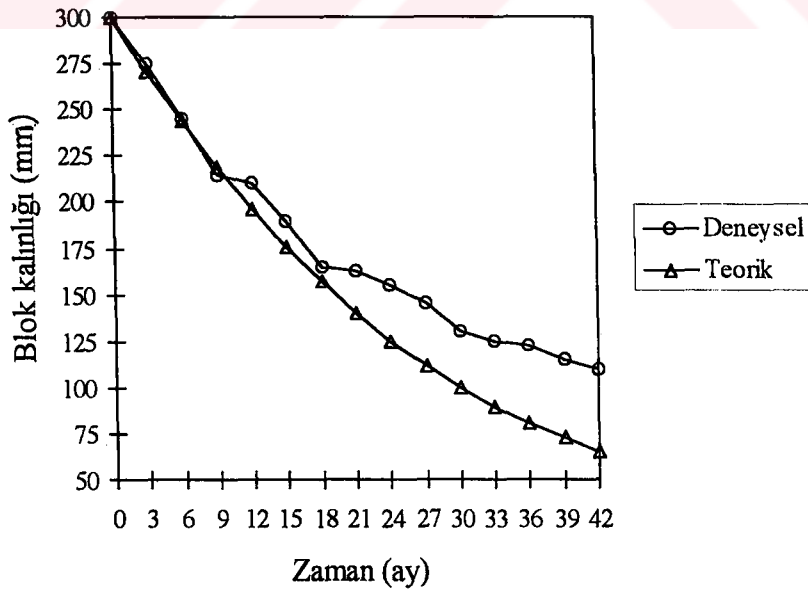
Yukarıda grafik olarak sunulan sayısal çözümler ile kampanyanın belli bir döneminde Mersin Şişe Cam Fabrikasında cam seviyesinde elde edilen deneysel aşınma değerleri karşılaştırılacaktır.

6.2 Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Bölüm 5'de Şekil 5.1 ile verilen ve üzerinde çeşitli korozyon ölçüm noktaları bulunan ACS 20 nolu fırına cam maddesi harmanı A kanalından verilmektedir. Fırın içerisinde belli süre aralıklarla değişecek şekilde B ve C portlarında alevli yanma oluşturulmaktadır. Bu esnada hammadde ısınmakta ve ergimektedir. Ergiyen hammadde harmanı fırın içerisinde bir S şekli çizerek fırın boyunca ilerlemekte ve 4 noktası civarında tamamen ergimiş hale gelmektedir. Bir kanal vasıtası ile (D ve E ağızlarından) ergimiş haldeki sıvı cam, fırının dışına alınmaktadır. Fırın içerisindeki diğer bölgelerle karşılaştırılırsa, sıvı cam çıkış noktası civarında (D ve E civarı),

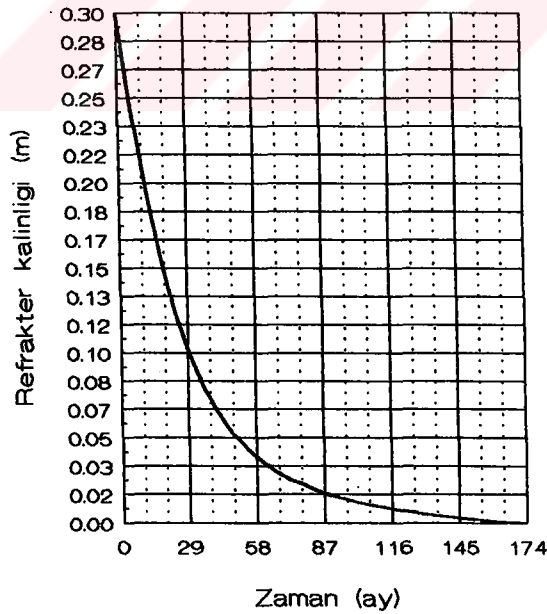
yüzeydeki cam harmanı sıcaklığı daha yüksektir. Bundan dolayı bu bölge etrafında yüzeydeki cam hareketi hızları düşük olduğundan sıcaklık faktörünün korozyon üzerinde daha etkin olduğu söylenebilir. Cam hammaddesi harmanının girişi olan A besleme ağzı civarında harman hareketi daha yüksek ve cam yüzey sıcaklığı düşüktür. Benzer olarak, burada refrakter korozyonu üzerinde etkili olan faktörün, yüzeydeki camın hareketi olduğu söylenebilir. Refrakter korozyonunun sayısal modellemesi yapılırken cam yüzeyi hareketinin etkisi göz önüne alınmamıştır. Sayısal çalışmalar ile deneysel sonuçları karşılaştırmak için cam yüzeyi hareketinin daha az etkin olduğu ve sıcaklık faktörünün daha belirleyici olduğu noktalar en uygun yerlerdir.

Bu çalışmada elde edilen sayısal sonuçlar fırın üzerindeki korozyon ölçüm noktalarından 4 noktası ile karşılaştırılacaktır. Bu noktanın yüzey sıcaklığı fırından çekilen sıvı cam miktarına bağlı olarak yıl boyunca sürekli değişmektedir. Bu değer için ortalama 1743 K alınmıştır. Şekil 6.5'de, yapılan sayısal modelleme sonuçları ile 4 noktasındaki sıvı cam seviyesinde deneysel olarak ölçülen blok aşınması sonuçları grafik olarak karşılaştırılmaktadır. Şekil 6.5'de görüldüğü gibi iki eğrinin de eğimleri aynı yöne olup aralarında bir uyum söz konusudur.

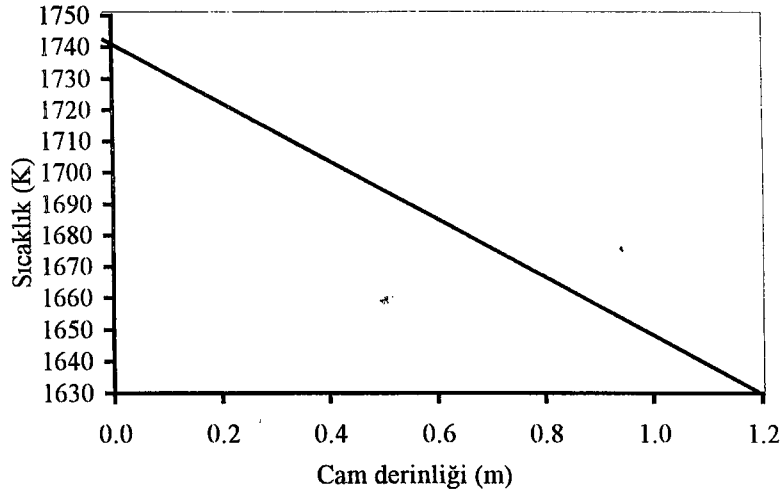


Şekil 6.5 Sıvı cam seviyesinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen aşınma değerlerinin aylara göre değişimleri

Refrakter korozyon ölçümü esnasında yapılan deneysel hatalar, fırın içerisinde oluşan reaksiyonun tipi (yükseltgen veya indirgen olması), sıvı cam içerisindeki sirkülasyon hareketleri, refrakter duvarının homojen olmayan yapısının etkisi, termal gerilmeler ve refrakter birleştirme noktalarında oluşan ekstra aşınma değerleri (upward drilling) deneysel ve teorik çalışmalar arasındaki farklılığın ana kaynağıdır. Teorik hesaplamalar sonucunda, refrakterin toplam ömrü gerçek ömrünün çok üstünde bulunmuştur (bu değer 174 aydır). Aslında bu sonuç beklenen bir durumdur. Şekil 6.6'da görüldüğü gibi refrakter belli bir kalınlığın altında soğutmanın etkisi ile çok uzun süre iş görmektedir. Bu refrakter kalınlığı yaklaşık olarak 1×10^{-2} m'dir. Fakat şu bilinmelidir ki yukarıda bahsedilen etkilerden dolayı kalınlık belli bir değerin altına inince refrakter içinde çok yüksek ısıl gerilmeler oluşmakta ve çatlaklar meydana gelmektedir. Bundan dolayı refrakter, teorik hesaplamalar sonucu bulunan değerden çok önce kullanılmaz hale gelmektedir. Sayısal hesaplamalarda kullanılan sıvı cam sıcaklık profili Şekil 6.7'de verilmiştir.



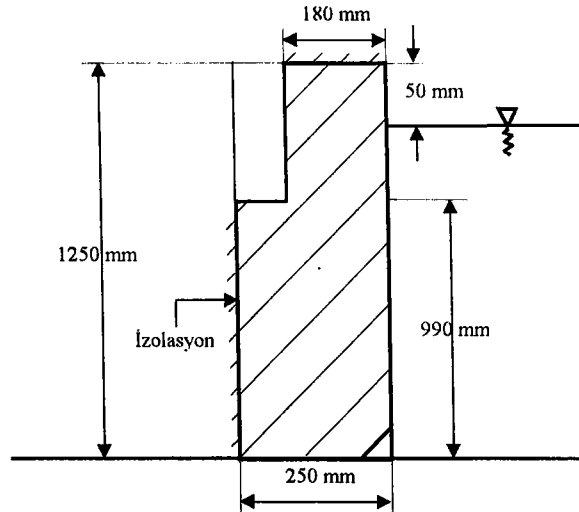
Şekil 6.6 Mersin Şişe Cam Fabrikasında kullanılan refrakterde cam seviyesinde oluşan aşınmanın yıllara göre değişimi



Şekil 6.7 Sıvı cam içerisindeki sıcaklık dağılımı (cam yüzeyi sıcaklığı 1743 K)

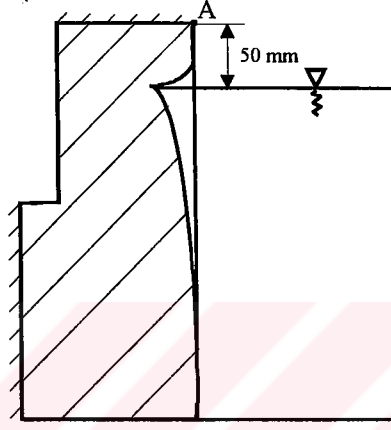
6.3 Hava Soğutmasının Refrakter Aşınmasına Olan Etkisi

Bu kısımda, Şekil 6.8'de verilen Trakya Cam Fabrikasına ait TRII nolu fırında kullanılan ER 1681 nolu refrakterde oluşan aşınmanın belli hava soğutma hızlarındaki davranışı ele alınacaktır.



Şekil 6.8 Trakya Cam Fabrikasına ait TRII nolu fırında kullanılan yan blok kesiti

Boyutları Şekil 6.8'de verilen refrakter yan duvar bloğu, fırının PORT 4 ve POTR 5 diye isimlendirilen kısımlarıdır. Refrakterdeki aşınmanın en yoğun olduğu sıvı cam seviyesinde, çekilen cam miktarına göre yıl boyunca değişen bir sıcaklık mevcuttur. Cam seviyesi üzerindeki refrakter yüzeyinden (Şekil 6.9) ölçülen ve fırından çekilen cam miktarına göre değişen sıcaklıklar Tablo 4'de verilmektedir.



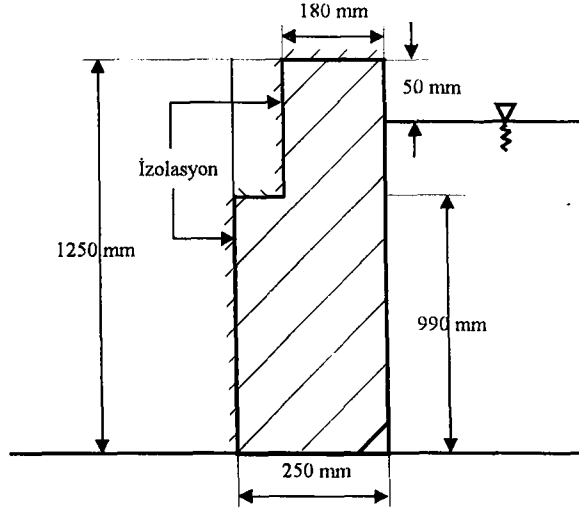
Şekil 6.9 Sıcaklık ölçümünün yapıldığı cam seviyesi üzerindeki A noktası

Tablo 4'de görüldüğü gibi A noktasının sıcaklığında yaklaşık %2'lik bir artış, yüksek oranlarda camın fırından çekilmesine imkan sağlamaktadır. Fakat, sıcaklıktaki bu küçük orandaki artışlar istenmeyen bir durum olarak beraberinde refrakter aşınmasında eksponansiyel bir artışı getirmektedir. Refrakter korozyonun sıcaklığa bağlı değişimi detaylı olarak daha sonraki bölümlerde ele alınacaktır. Bu ön bilgilendirmeden sonra soğutmanın fırın ömrü üzerindeki öneminin daha iyi anlaşılması için öncelikle fırın dış duvarlarının ısıya karşı izolasyonlu olması durumunda oluşan aşınma incelenecektir.

Tablo 4. A noktası sıcaklığının fırından çekilen cam miktarına göre değişimi

Brüt Çekiş (ton/gün)	500	550	600	650	700	725	750
PORT 4 (°C)	1545-50	1555-60	1555-60	1560-65	1560-65	1565-70	1570-75
PORT 5 (°C)	1545-50	1555-60	1555-60	1560-65	1560-65	1565-70	1570-75

6.3.1 Fırın Yan Bloklarının Isı İzolasyonlu Olması Durumunda Refrakterde Oluşan Aşınmanın Zamanla Değişimi



Şekil 6.10 Fırın yan bloklarının izolasyonu

Trakya Cam Fabrikasında kullanılan fırın yan bloklarının ısıya karşı izolasyonlu hali Şekil 6.10'da görülmektedir. Dışarıdan refrakter duvarına bir soğutmanın yapılmaması refrakterin aşınma hızında önemli bir artışa sebep olmaktadır. Dolayısıyla fırın çok kısa bir sürede kullanılmaz hale gelmektedir. Yapılan sayısal modelleme sonucunda hesaplanan refrakter aşınmasının aylara göre değişimi Şekil 6.11, Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'de grafik olarak verilmektedir.

Bilgisayar programında kullanılan teknik data aşağıda verilmektedir:

Refrakter tipi : ER 1681

Refrakter kalınlığı (S) =180 mm ve 250 mm kademeli (Şekil 6.10),

Refrakter boyu (L) =1250 mm,

Sıvı cam seviyesi sıcaklığı (T_F) =1773 K (yıllık ortalama alındı).

Diğer veriler;

$$\theta_C = 2 \times 10^4 \text{ K}$$

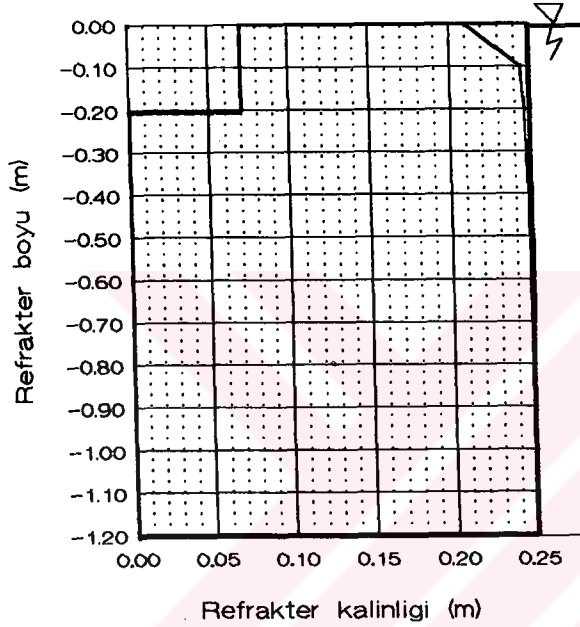
$$T_A = 323 \text{ K}$$

$$H = 0.08 \text{ m}$$

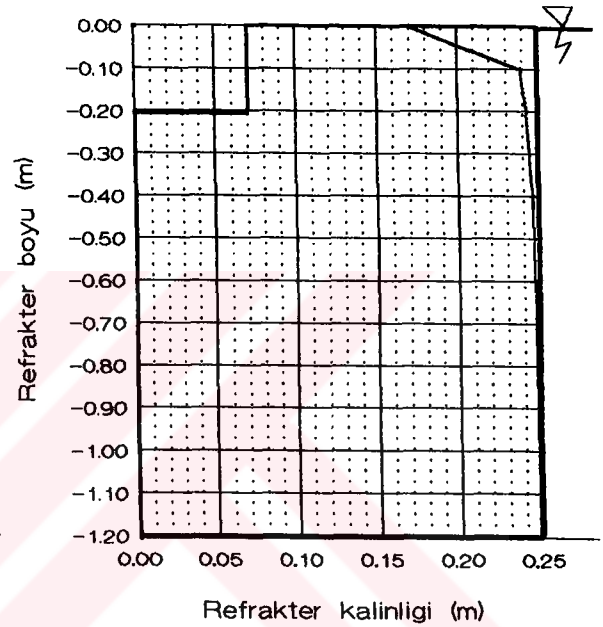
$$h_1 = 815 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$B = 0.022 \text{ m}$$

Hesaplamalarda bütün değişkenler için hassasiyet değeri $\%10^{-6}$ olarak alınmıştır.

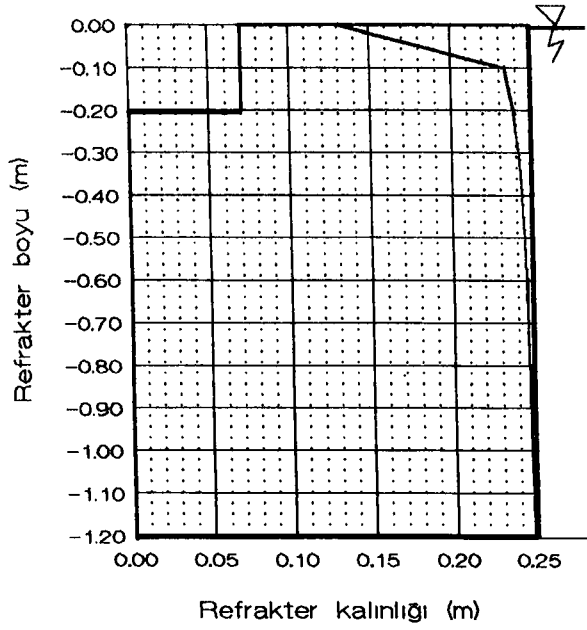


Şekil 6.11 Yan bloğunun tümü ısıya karşı izolasyonlu olan refrakterde 1 ay sonra oluşan aşınma eğrisi

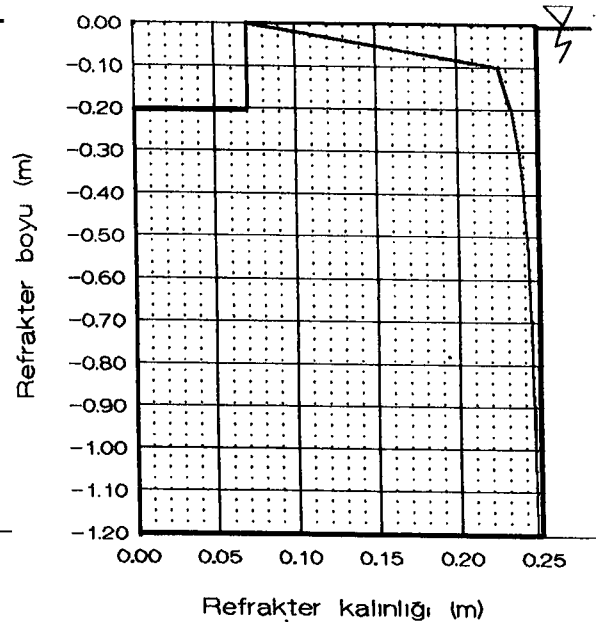


Şekil 6.12 Yan bloğunun tümü ısıya karşı izolasyonlu olan refrakterde 2 ay sonra oluşan aşınma eğrisi

Şekil 6.11'de görüldüğü gibi ilk 1 ay içerisinde cam seviyesindeki refrakter kalınlığı 0.18 m başlangıç değerinden 0.14 m değerine düşmektedir. 2'nci ay sonunda, refrakter aşınma ilerlemesi ile toplam kalınlığının yaklaşık yarısını yitirmektedir (Şekil 6.12). Aşınma oranı diğer aylarda çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu durum Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'de görülmektedir. Refrakter yaklaşık olarak 4.5 ay sonra kullanılmaz hale gelmektedir.

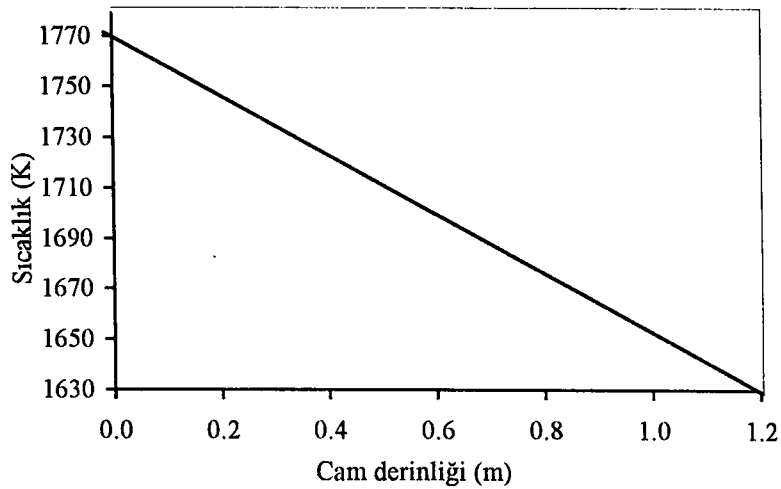


Şekil 6.13 Yan bloğunun tümü ısıya karşı izolasyonlu olan refrakterde 3 ay sonra oluşan aşınma eğrisi



Şekil 6.14 Yan bloğunun tümü ısıya karşı izolasyonlu olan refrakterde 4.5 ay sonra oluşan aşınma eğrisi

Ayrıca Trakya Cam Fabrikasında TRII nolu fırında bulunan sıvı camın içerisindeki sıcaklık gradyanı Şekil 6.15'de verilmektedir.

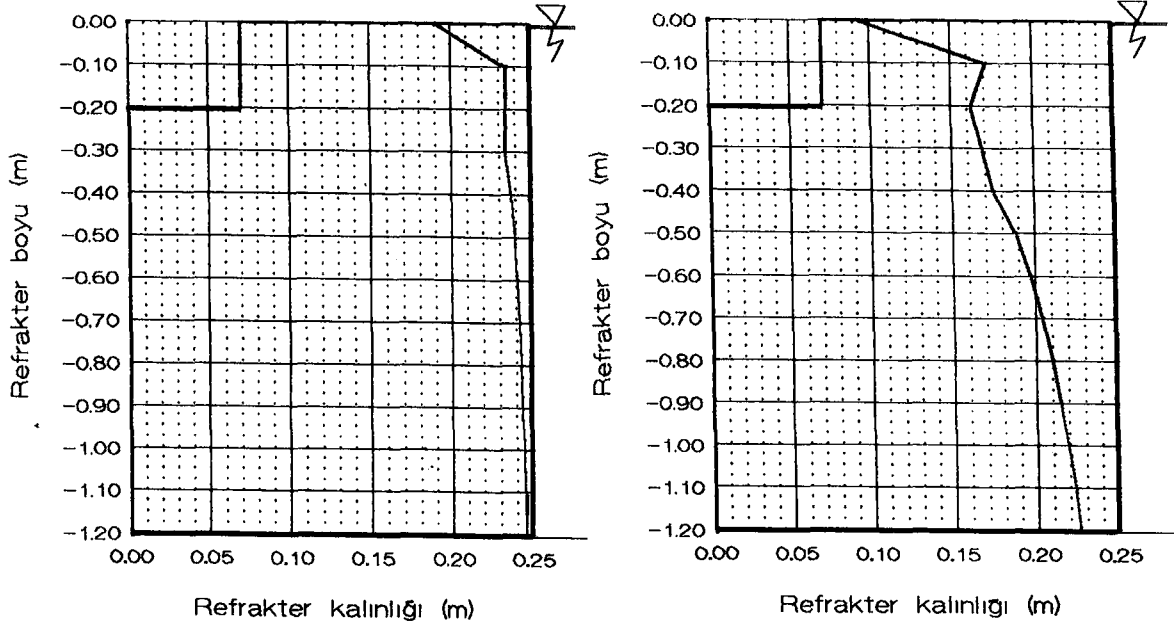


Şekil 6.15 Sıvı cam içerisindeki sıcaklık dağılımı (cam yüzey sıcaklığı 1773 K)

6.3.2 Trakya Cam Fabrikasında TRII Nolu Fırında Kullanılan Bloğun Etkin Bir Hava Soğutması Yapılması Halinde Ömrünün Hesaplanması

Bölüm 6.3'deki Şekil 6.8'de, Trakya Cam Fabrikasına ait TRII nolu fırında kullanılan bloğun (ER 1681) boyutları verilmektedir. Ayrıca aynı bölüm içerisinde Şekil 6.9'da, cam seviyesi üzerindeki sıcaklık ölçüm noktası görülmektedir. Bu noktadaki sıcaklığın fırından çekilen cam miktarına göre değişimi Tablo 4'de verilmektedir. Sıvı cam yüzeyindeki sıcaklığın tahmin edilmesinde Tablo 4'de verilen değerlerden faydalanılmaktadır. Trakya Cam Fabrikasında yılın %80'i gibi önemli bir zamanında 700 ton/gün brüt çekiş ile çalışılmaktadır. Tablo 4'de görüldüğü gibi bu çekiş değerindeki A noktası sıcaklığı PORT 4 ve PORT 5 için yaklaşık olarak 1560 °C ile 1565 °C arasındadır. Sıvı cam yüzeyinin köpük ile kaplı olması nedeniyle burada doğrudan bir ölçüm yapılması imkanı bulunmamaktadır. Bundan dolayı sıvı cam yüzeyinin biraz üzerindeki refraktere ait A noktası değerlerinden faydalanılarak, cam seviyesindeki sıcaklık için tahmini bir değer kullanılmıştır. Yetkililer, sıvı cam seviyesi sıcaklığının yaklaşık olarak 1773 K (1500 °C) alınabileceğini belirtmişlerdir.

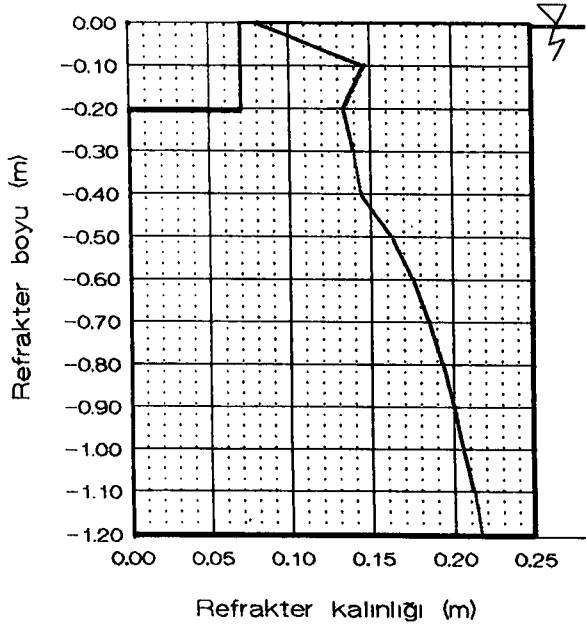
Bilgisayar programı çalıştırılırken, Bölüm 6.3.1'de verilen teknik dataya ek olarak hava üfleme hızı $V = 42$ m/s olarak kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar Şekil 6.16, Şekil 6.17, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da grafik olarak sunulmaktadır. Refrakter bloğu $y = -0.2$ m ile $y = -1.2$ m arasında ısıya karşı izolasyonludur. $y = 0.0$ m ile $y = -0.2$ m arasında refrakter kalınlığı 0.18 m olup, $y = -0.2$ ile $y = -1.2$ arasında bu değer 0.25 m'dir.



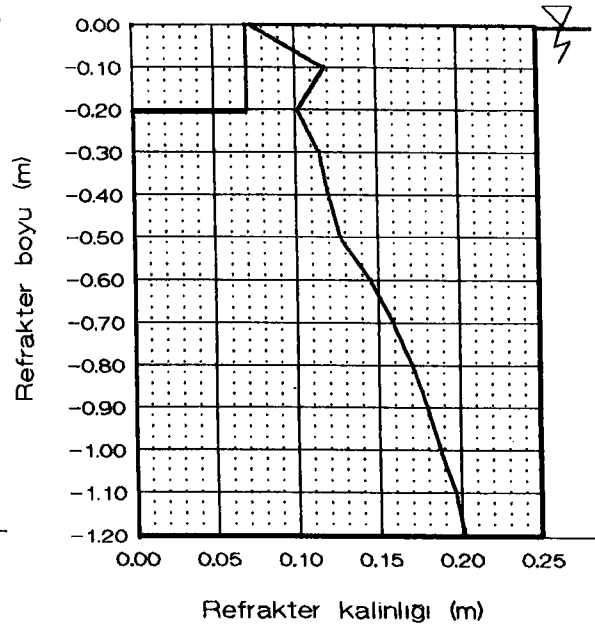
Şekil 6.16 6 ay sonra refrakter yan bloğunda oluşan aşınma profili

Şekil 6.17 36 ay sonra refrakter yan bloğunda oluşan aşınma profili

Bölüm 6.3.1'deki Şekil 6.14'de görüldüğü gibi, soğutmanın yapılmaması halinde refrakter ömrü 4.5 ay gibi çok kısa bir süre bulunmuştu. Refrakterde cam seviyesi doğrultusunda 42 m/s'lik etkin bir hava soğutması yapılması durumunda, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'de görüldüğü gibi aşınma hızı makul değerlere inmiştir. Şekil 6.16'da, ilk 6 aydaki aşınma sonucunda refrakter kalınlığının 0.12 m olduğu görülmektedir. Diğer bir sonuç da 36 ay için Şekil 6.17'de verilmektedir. Refrakter kalınlığı bu süre içerisinde 0.022 m'ye kadar azalmıştır. İlerleyen aylarda aşınma profilinin değişimi Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da verilmektedir. Şekil 6.18'de 51 ay sonra refrakterde oluşan aşınma görülmektedir. Bu süre sonunda bloğun kalınlığı 0.011 m olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.19'da 72 ay sonra bloğun kalan kalınlığının 0.0033 m'ye kadar düştüğü görülmektedir. Sayısal hesaplamalar sonucunda 87 ay sonra refrakterin kullanılmaz hale geldiği bulunmuştur. Trakya Cam Fabrikasında TRII nolu fırına ait olan bu refrakter 1990-1997 kampanyaları arasında kullanılmış olup gerçek ömrü 78 aydır. Şekil 6.20'de görüldüğü gibi refrakter, çok uzun süre düşük refrakter kalınlığında soğutma tesiri ile iş görmektedir. Dolayısıyla yüksek oranlarda ısıl gerilmelere ve şekil değişimlerine maruz kalmaktadır. Bölüm 6.2'de bahsedildiği gibi teorik ömrün büyük çıkması beklenen bir durumdur.



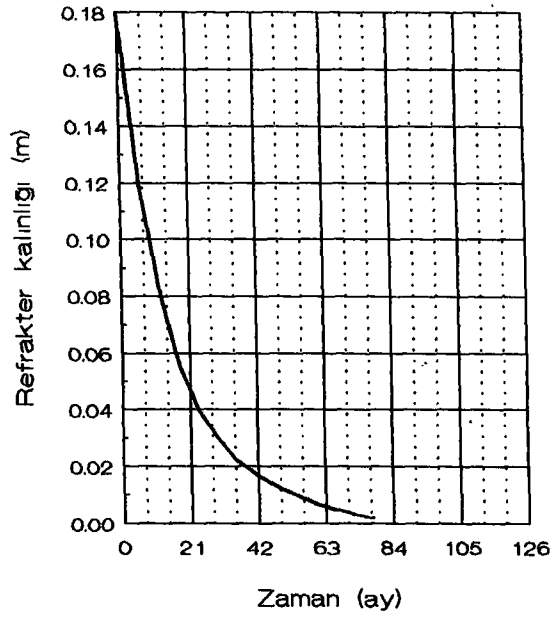
Şekil 6.18 51 ay sonra refrakter yan bloğunda oluşan aşınma profili



Şekil 6.19 72 ay sonra refrakter yan bloğunda oluşan aşınma profili

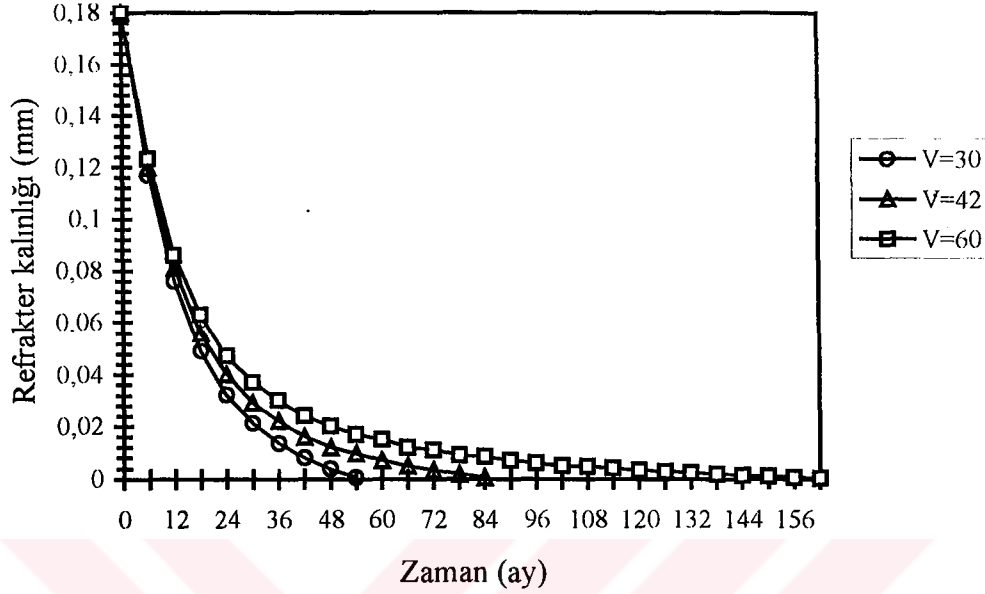
Yapılan sayısal çözümlerin ortaya koyduğu diğer bir gerçek, refrakterde hava soğutması yapılmasına rağmen ilk anlardaki aşınma hızı mertebesinin ilerleyen aylara nazaran çok yüksek olmasıdır. Bunun nedeni, refrakter makul bir kalınlığa ininceye kadar soğutma tesirinin sıvı cam tarafından tam olarak hissedilmemesidir. Daha sonraki aylarda, refrakterin belli bir kalınlık değerinden sonra aşınma oranı hızla azalmaya başlamaktadır. Bu durum Şekil 6.20'de izlenebilmektedir. Refrakter kalınlığının 0.04 m civarında, aşınma eğrisi eğimi hızla azalmaya başlamaktadır. Daha önceleri yapılan çalışmalarda bir çok araştırmacı bu özellikten bahsetmektedir. Bu araştırmacılardan Busby [15], Landeree [17], ve Sandmeyer [18], refrakter aşınmasının kampanya başlangıcında çok hızlı olduğunu fakat belli bir refrakter kalınlığından sonra bu aşınma hızının azaldığını belirtmekte (Şekil 1.2) ve kampanya başlangıcında etkin bir soğutmanın gerekli olmadığını söylemektedirler.

Sayısal hesaplamalarda blokta ani sınır şartı ve boyut (kalınlık) değişiminin olduğu noktada ($y = -0.2$ m) uyumsuz sonuçlar elde edilmiştir. Bunun sebebi, burasının tekil bir nokta (singular point) konumu göstermesidir. Fakat bu durum grafik eğiminin genel karakterini etkilememiş ve beklenildiği gibi cam seviyesinden tabana doğru azalan bir aşınma profili elde edilmiştir.



Şekil 6.20 TRII nolu fırında kullanılan refrakterde sıvı cam seviyesinde oluşan aşınmanın zamanla değişimi ($V = 42 \text{ m/s}$, $T_F = 1773 \text{ K}$)

Şekil 6.8'de verilen ve Trakya Cam Fabrikasında TRII nolu fırında kullanılan refrakter yan bloğunda farklı soğutma hızlarında, sıvı cam seviyesinde oluşan korozyonun zamanla değişimi Şekil 6.21'de verilmektedir. Şekil 6.21'de görüldüğü gibi hava soğutması yapılan refrakterin ömrü hava üfleme hızının artmasıyla artmaktadır. Yapılan hesaplamalarda 30 m/s 'lik hava üfleme hızında refrakterin aşınma ömrü 54 ay olarak bulunmuştur. Bu hava üfleme hızında korozyon eğrisinin eğimi diğer hava üfleme hızlarındakilerle karşılaştırılırsa daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 6.21'de görüldüğü gibi belli bir refrakter kalınlığına kadar hava hızı büyüklüğünün etkisinin olmadığı fakat refrakter kalınlığının 0.08 m civarındaki değerinden sonra hava hızı büyüklüğünün tesirli hale geldiği görülmektedir. Bu refrakter kalınlığından sonra soğutma havası hızının büyüklüğüne göre korozyon eğrisinin eğimi belirlenmektedir. Göze çarpan diğer bir özellik de 42 m/s ve 60 m/s 'lik hava üfleme hızlarında refrakterde cam seviyesinde oluşan aşınma davranışlarının birbirine benzemesidir. Korozyonun etkisiyle refrakter bloğu incelidikçe değişik hava üfleme hızlarındaki aşınma profillerinin eğimleri birbirine paralel kalmaktadır. Şekil 6.21'de görüldüğü gibi, 60 m/s 'lik hava üfleme hızında ve refrakterin daha düşük kalınlıklarında, aşınmaya karşı gösterilen mukavemet yüksek olup, uzun zaman aralığında bu direnç devam etmektedir.

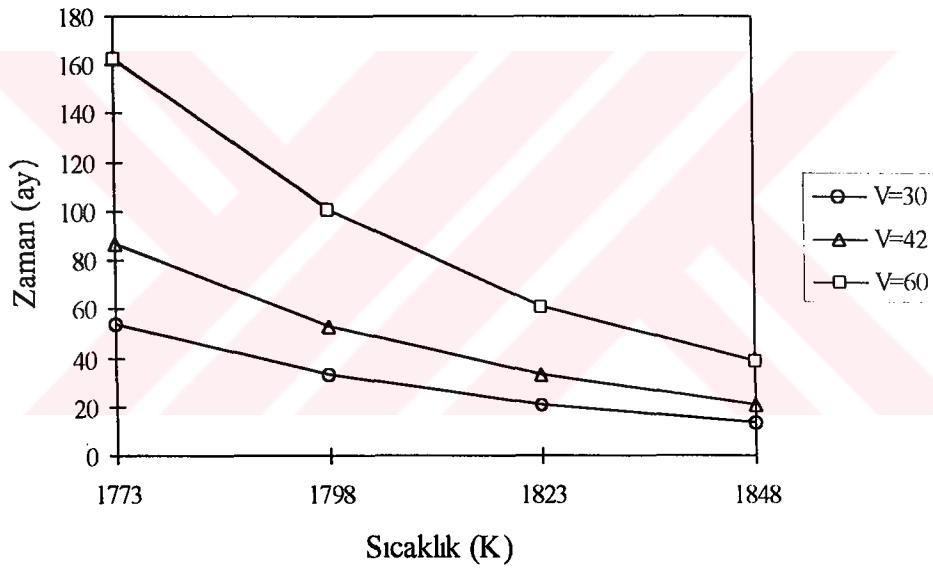


Şekil 6.21 Farklı soğutma hızlarında sıvı cam seviyesinde oluşan korozyonun zamanla değişimi (TRII nolu fırın, $T_F = 1773$ K)

6.4 Sıvı Cam Sıcaklığının Refrakter Korozyonuna Etkisi

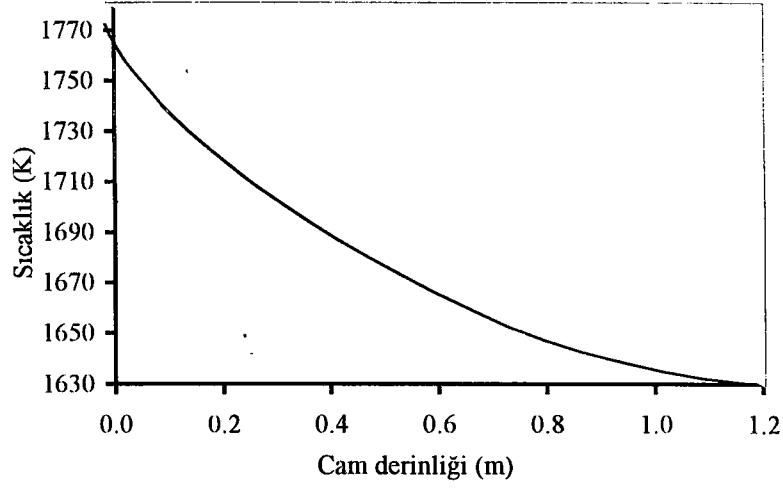
Bölüm 6.3'de fırından çekilecek cam miktarını arttırmak için fırın içerisindeki sıcaklığın artırılması yoluna gidildiği ve bunun, beraberinde refrakter bloğundaki aşınmayı artırdığı belirtilmiştir. Bu kısımda refrakter aşınmasının sıcaklıkla olan değişimi farklı hava soğutma hızlarında daha detaylı olarak ele alınacaktır. Fortran dilinde yazılmış olan programın farklı soğutma hızlarında ($V = 30, 42, 60$ m/s) ve Bölüm 6.3.1'de verilen teknik datayla beraber kullanılması ile Şekil 6.8'de verilen örnek blok (Trakya Cam Fabrikası TRII nolu fırına ait) ömrünün sıcaklıkla değişimi hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 6.22'de grafik olarak verilmiştir. Burada görüldüğü gibi, farklı soğutma hızlarında refrakter ömrü sıcaklığın artmasıyla eksponansiyel olarak azalmaktadır. Diğer bir deyişle korozyon hızı, cam sıcaklığı ile eksponansiyel olarak artmaktadır. Bulunan bu sonuçlar konu ile ilgili literatürde yapılan bir çok çalışma ile uyumluluk göstermektedir [10, 11, 12, 13, 14].

Şekil 6.22'de görüldüğü gibi $V = 30$ m/s'lik hava üfleme hızı ile soğutma yapılan refrakterde, cam seviyesi sıcaklığının 1773 K (1500 °C) olması halinde refrakter bloğu ömrü 54 ay olup cam seviyesi sıcaklığının 75 °C artmasıyla (1848 K) refrakter ömrü hızla azalarak 13.5 aya kadar düşmüştür. Benzer olarak aynı orandaki sıcaklık artışı karşısında 42 m/s'lik hava üfleme hızında refrakter ömrü 87 aydan 21 aya kadar azalma göstermiştir. Diğer yandan 60 m/s'lik hava üfleme hızında refrakterin aşınma ömrü 162 ay iken, cam seviyesi sıcaklığının 75 °C artmasıyla bu ömür (diğer hava üfleme hızlarında olduğu gibi) eksponansiyel bir azalma göstererek 39 aya kadar düşmüştür.



Şekil 6.22 Farklı soğutma hızlarında refrakter ömrünün sıvı cam sıcaklığı ile değişimi

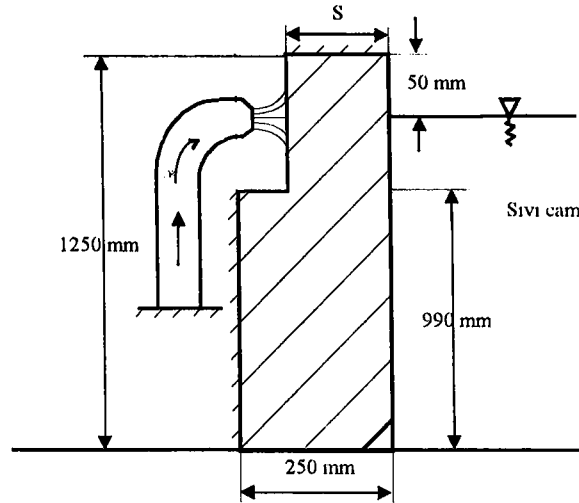
Sayısal hesaplamalarda kullanılan sıvı cam sıcaklık profili Şekil 6.23'de verilmektedir. Şekil 6.22'de, sıcaklık ekseninde bulunan değerler, sıvı cam seviyesindeki sıcaklık değerlerini göstermektedir.



Şekil 6.23 Sıvı cam içerisindeki sıcaklık profili

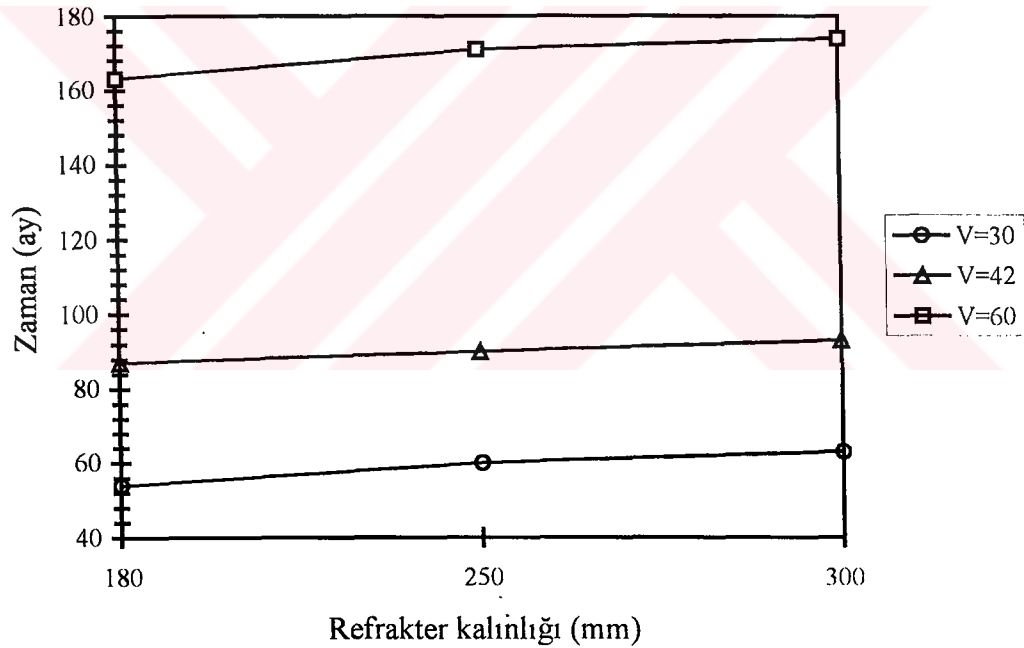
6.5 Refrakterin Aşınma Ömrünün Blok Kalınlığı İle Değişimi

Bu kısımda, blok kalınlığının refrakter ömrüne olan etkisi farklı soğutma hızlarında incelenecektir. Şekil 6.24'de görülen ve cam seviyesinde S kalınlığına sahip refrakter bloğunun (ER 1681) farklı soğutma yüklerindeki ömrü blok kalınlığı değiştirilerek sayısal olarak incelenecektir.



Şekil 6.24 Cam seviyesinde S kalınlığına sahip refrakter

Şekil 6.24'de verilen bloğun sıvı cam seviyesindeki sıcaklığı 1773 K alınmıştır. Yapılan sayısal hesaplamalar sonucunda aşınma değerinin maksimum olduğu cam seviyesinde blok kalınlığının artmasıyla, refrakter ömründeki artışın fazla olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni refrakterde yapılan soğutmanın belli bir refrakter kalınlığından sonra cam tarafından hissedilmesi ve bu değere kadar refrakterin hızla aşınmaya devam etmesidir. Değişik hava üfleme hızlarında ve refrakter kalınlıklarında yapılan hesaplamalar, soğutmanın etkili olduğu refrakter kalınlığının yaklaşık olarak aynı büyüklükte kaldığını göstermiştir (Şekil 6.21). Bu durumla ilgili detaylı bilgi Bölüm 6.3.2'de verilmiştir. Farklı S kalınlık değerlerindeki sayısal sonuçlar grafik olarak Şekil 6.25'de verilmiştir.



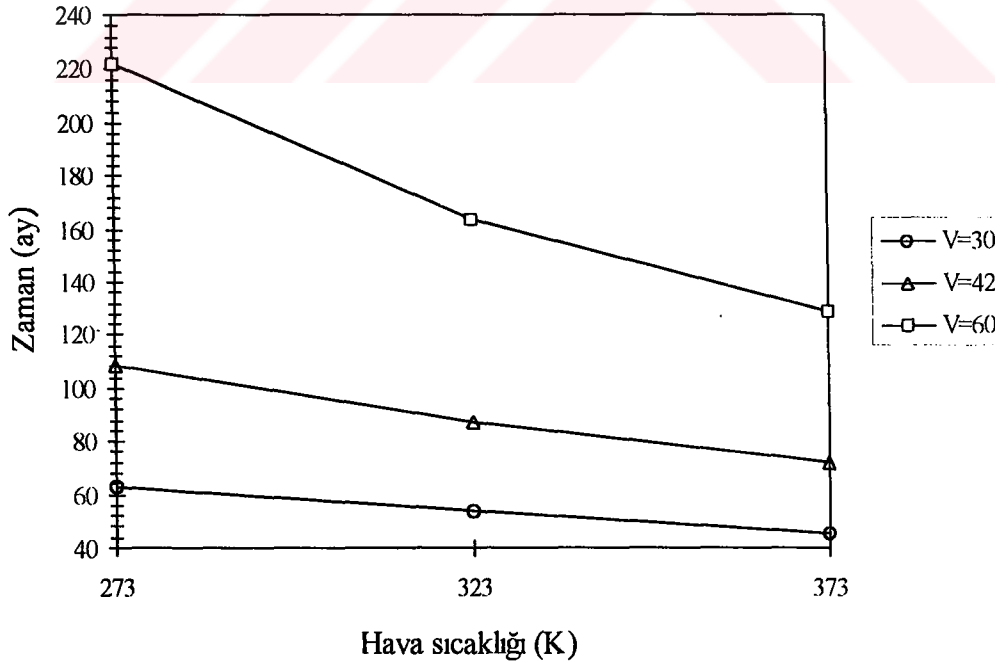
Şekil 6.25 Farklı soğutma hızlarında refrakterin aşınma ömrünün blok kalınlığı (S) ile değişimi

Şekil 6.25'de refrakter kalınlığı ile refrakterin aşınma ömrü (refrakterin tamamen aşınması durumunda geçen süre) arasındaki değişim, 30, 42, 60 m/s'lik soğutma hızları için (S = 180, 250, 300 mm değerlerinde) verilmiştir. V = 42 m/s'lik hava hızı ile soğutulan refrakter blok kalınlığının 180 mm'den 300 mm'ye

çıkarılmasıyla refrakter ömrü 87 aydan 93 aya çıkmıştır. Aynı blok kalınlıkları için $V=30$ m/s'lik hava soğutma hızında bloktaki aşınma ömü 54 aydan 63 aya artış göstermiştir. Benzer olarak 60 m/s'lik hava soğutma hızında blok aşınma ömrü 163 aydan 174 aya çıkmıştır. Bütün hava üfleme hızlarında blok aşınma ömründe (blok kalınlığının 180 mm'den 300 mm'ye çıkarılmasıyla) elde edilen artış miktarı %10 civarındadır. Diğer taraftan fırın ömründe bu orandaki artış, beraberinde çok yüklü bir ilk yatırım maliyeti getirmektedir.

6.6 Refrakter Aşınma Ömrünün Soğutma Havası Sıcaklığı İle Değişimi

Bu kısımda son olarak soğutma havası sıcaklığının refrakter ömrüne olan tesiri incelenecektir. Bu amaçla Şekil 6.24'de verilen blok için, kalınlığın (S) 180 mm, cam seviyesi sıcaklığının 1773 K olduğu ve diğer boyutların ve şartların aynı kaldığı kabul edilmiştir. Farklı soğutma havası hızlarında, refrakter ömrünün soğutma havası sıcaklığı ile değişimi Şekil 6.26'da verilmiştir. Şekil 6.26'da soğutma havası sıcaklığı ile refrakter ömrü değişiminin lineer'e yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 6.26 Farklı soğutma havası hızlarında hava sıcaklığı ile refrakter ömrü arasındaki değişim

Şekil 6.26 incelenirse, $V = 42$ m/s'lik hava üfleme hızında hava sıcaklığının 273 K (0 °C) olması durumunda refrakter ömrü 108 ay iken bu sıcaklığın 100 °C artmasıyla (373 K) bu ömür 72 aya düşmüştür. Benzer olarak, aynı orandaki hava sıcaklığı artışına karşılık refrakter ömrü $V = 30$ m/s'lik bir hava üfleme hızında 63 aydan 45 aya , $V = 60$ m/s'lik hava üfleme hızında 162 aydan 129 aya azalmıştır.



BÖLÜM 7

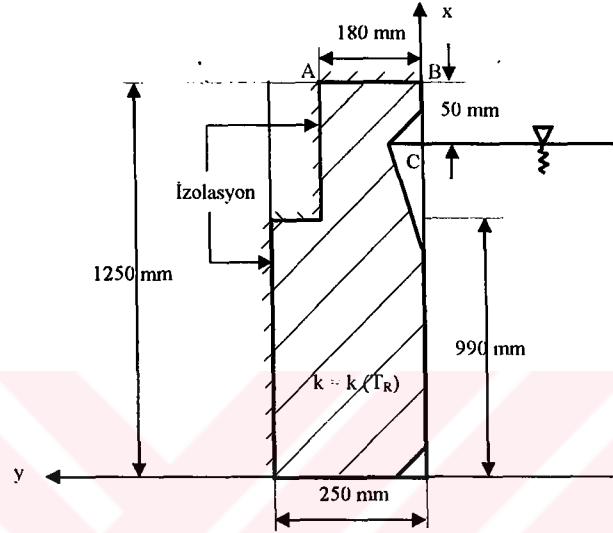
DIŞ YÜZEYİNDEN HAVA SOĞUTMASI YAPILAN REFRAKTER BLOĞUNDA OLUŞAN SICAKLIK VE ISI KAYIPLARINA AİT SONLU FARKLAR METODU SONUÇLARI

Bölüm 3'de düzenli olmayan ağ sistemi için sonlu farklar formülasyonu yapılmıştır. Aynı bölümün 3.2 nolu kısmında, Laplace denklemi için elde edilen (3.6) nolu sonlu farklar ifadesi düzensiz bir ağ yapısına sahip ve kenarları sabit sıcaklıkta olan örnek bir blok için çözülmüştür. Bloкта şekil simetrisinin bulunup bulunmaması durumları için elde edilen sıcaklık sonuçları eşsıcaklık (isotherm) eğrileri halinde Şekil 3.3 ve Şekil 3.5'de verilmiştir. Bölüm 3.4'de verilen ve dış yüzeyinden hava jeti ile soğutma yapılan refrakterin sıcaklık sınır şartları Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Aynı bölüm içindeki (3.23) nolu ifade Laplace denkleminin sonlu farklar formülasyonu olup bölüm 5'de bu denklemin çözümünden bahsedilmiştir. Burada, (3.18), (3.19), (3.20) ve (3.21) nolu sınır şartlarının lineer olmaması nedeniyle iteratif yöntemin kullanılması önerilmiştir.

Bu bölümde Trakya Cam Fabrikasında kullanılan fırın yan bloklarının farklı zaman ve sınır şartlarında elde edilen aşınma profillerinden faydalanılarak blok içindeki sıcaklıklar hesaplanacaktır. Refrakter yan bloklarının ısıya karşı tamamen yalıtılmış olması ve cam seviyesinden etkin bir soğutma yapılması halinde blok içindeki sıcaklıklar ayrı ayrı elde edilecektir. Bölüm 3.6'da verilen (3.25) ve (3.27) nolu ifadelerden yararlanılarak hava soğutması sonucunda refrakterden birim kütle başına çekilen ısı miktarı (Δq), (3.28) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanacaktır. Bir sonraki adımda, Δq 'nın refrakter ömrü boyunca değişimi, farklı soğutma hızlarında incelenecektir. Son olarak, cam seviyesinde belli bir kalınlığa kadar aşınmış olan refrakterin dış yüzeyinden ölçülen sıcaklık değerleri, hesaplanan sonlu farklar metodu sonuçları ile karşılaştırılacak ve sonuçlar grafik olarak incelenecektir.

7.1 Fırın Yan Bloklarının Isı İzolasyonu Olması Halinde Bloкта Oluşan Sıcaklıklara Ait Sonlu Farklar Metodu Sonuçları

Şekil 7.1'de verilen izolasyonlu durum için blokta oluşan sıcaklık dağılımı bulunmak istensin.



Şekil 7.1 İzolasyonlu fırının yan blok ölçüleri ve blok üzerinde sıcaklık sınır şartlarının farklılık gösterdiği noktalar

Bölüm 3.4'de verilen (3.23) nolu ifade, blok üzerindeki sınır şartları ile beraber yazılırsa;

$$\begin{aligned} V^2 \theta \cong \frac{2}{h^2} & \left[\frac{\theta(I-1, J)}{OR1(OR1 + OR3)} + \frac{\theta(I, J+1)}{OR2(OR2 + OR4)} + \frac{\theta(I+1, J)}{OR3(OR1 + OR3)} \right. \\ & \left. + \frac{\theta(I, J-1)}{OR4(OR2 + OR4)} - \left(\frac{1}{OR1 OR3} + \frac{1}{OR2 OR4} \right) \theta(I, J) \right] \quad (3.23) \end{aligned}$$

A ve B noktaları arasında x yönünde ısı kaybı bulunmadığından,

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (7.1)$$

B ve C noktaları arasındaki yanma bölgesinde sıcaklık sınır şartı,

$$\theta = \theta_y \quad (7.2)$$

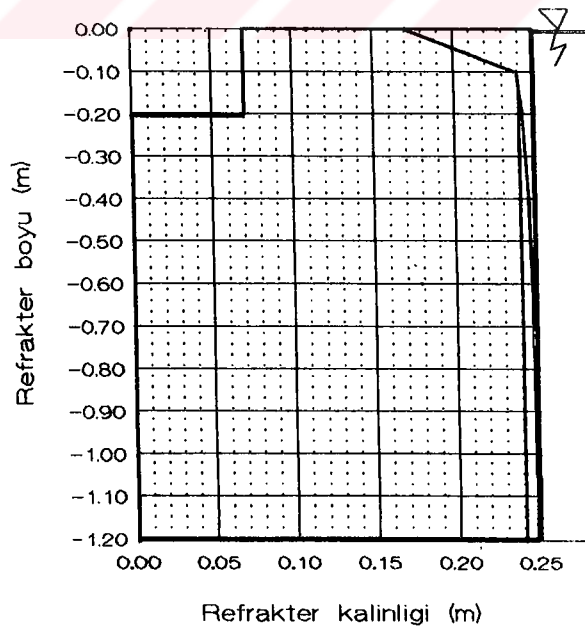
C ve D noktaları arasındaki sıvı cam bölgesinde sınır şartı,

$$\theta = \theta_M(\bar{x}) \quad (7.3)$$

D ve A noktaları arasında y yönünde ısı kaybı olmadığından,

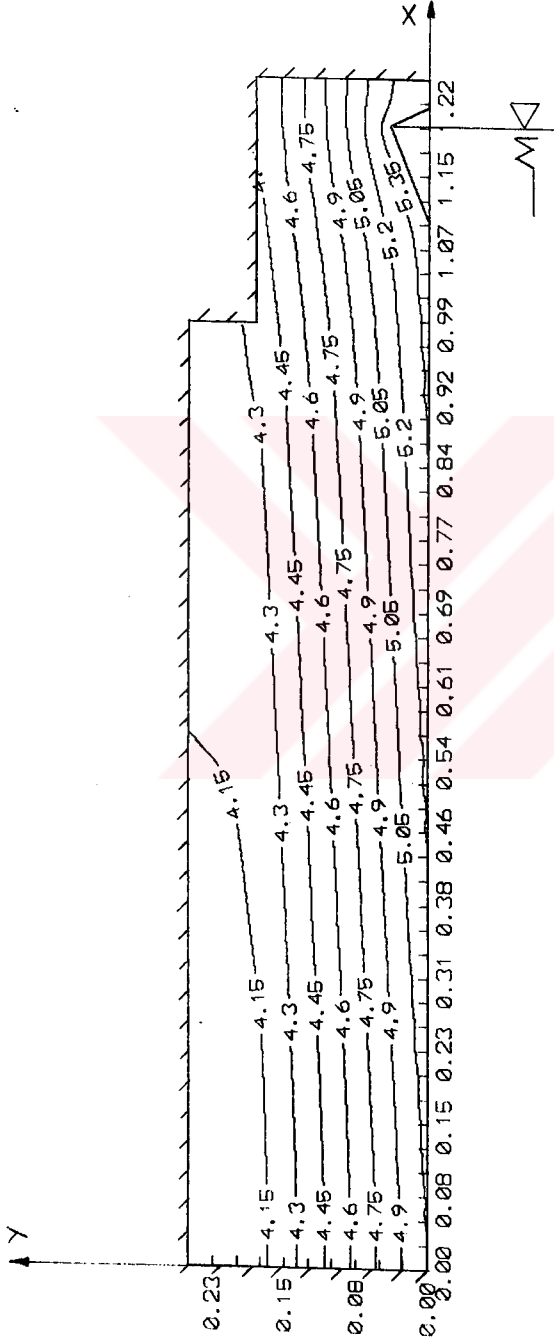
$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad (7.4)$$

olarak alınabilir. Hesaplamalarda refrakter bloğunun ısı iletim katsayısı refrakter sıcaklığının bir fonksiyonu olarak alınmıştır (Şekil 3.7). Sonlu farklar metodu çözümleri esnasında, Bölüm 6.3.1'de verilen aşınma eğrileri (Şekil 6.11, Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14) yerine eşdeğer profiller kullanılmıştır (Örnek Şekil 7.2).

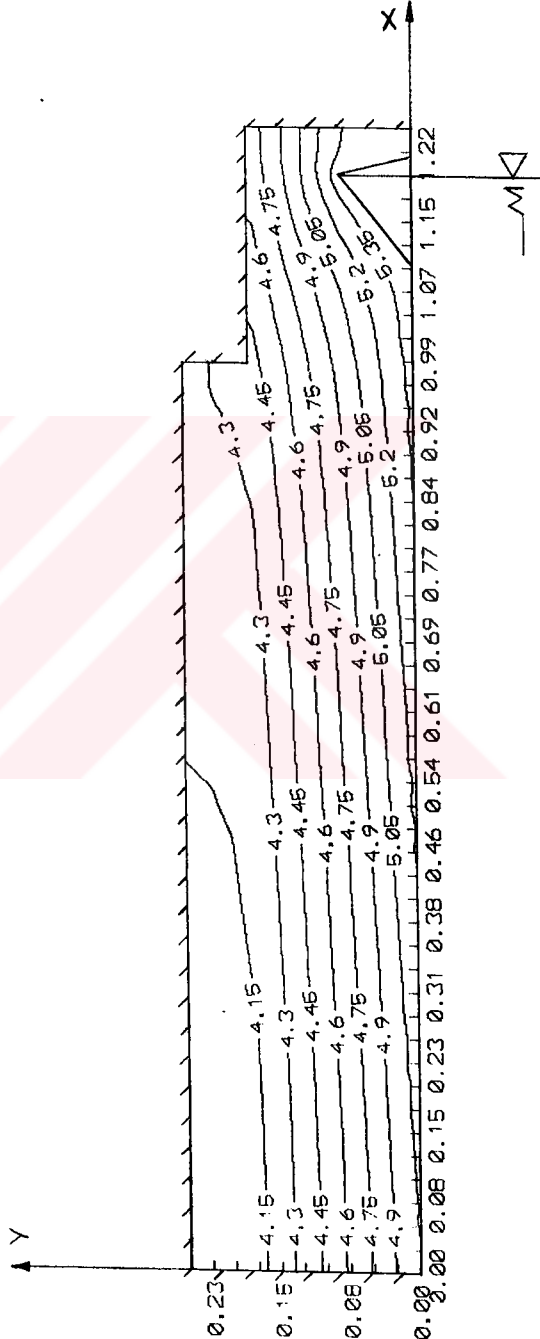


Şekil 7.2 Isı ızalasyonlu blokta 2 ay sonra oluşan aşınma eğrisine yapılan lineer yaklaşım

(3.23) nolu diferansiyel denklemin (7.1), (7.2), (7.3) ve (7.4) nolu sınır şartları ile beraber çözülmesiyle izole haldeki cam fırını yan bloklarında oluşan sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar Şekil 7.3, Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da eşsıcaklık eğrileri olarak verilmiştir.

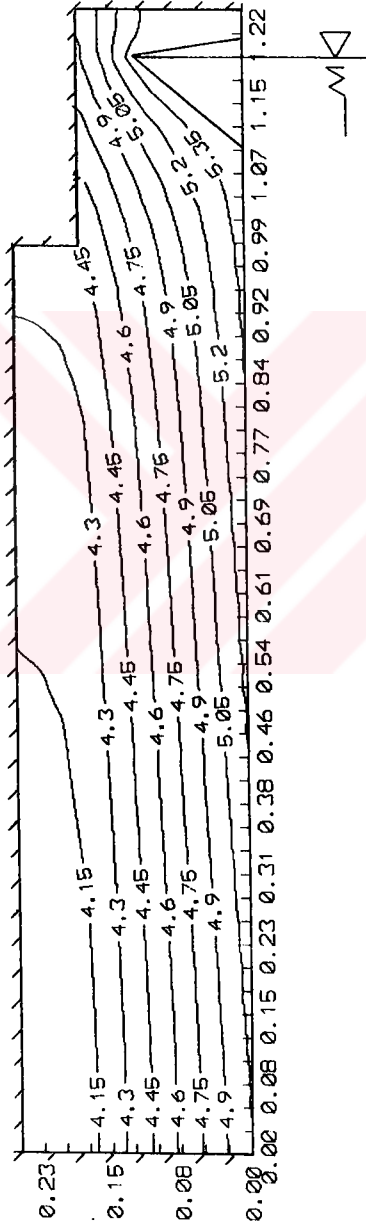


Şekil 7.3 Refrakter yan bloklarının izolasyonlu olması halinde 1 ay sonra blokta oluşan eşsıcaklık eğrileri



Şekil 7.4 Refrakter yan bloklarının izolasyonlu olması halinde 2 ay sonra blokta oluşan eşsıcaklık eğrileri

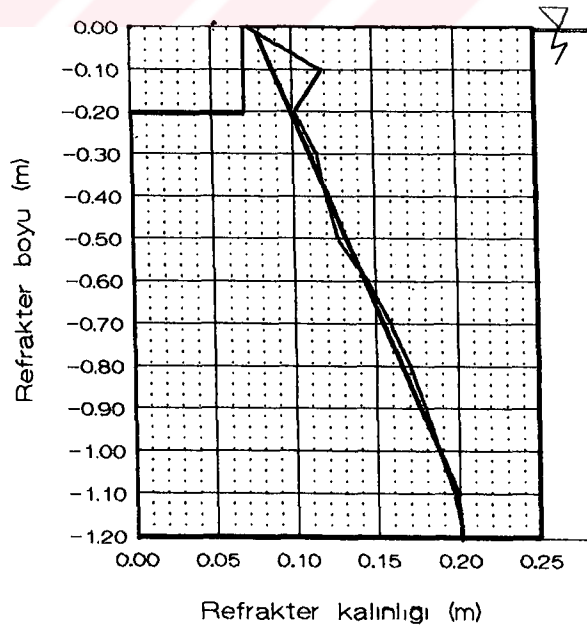
Şekil 7.3, Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da görüldüğü gibi blok sınırlarının izole olması sebebiyle eşsıcaklık eğrileri kenarlara dik olarak gelmekte ve izole sınır şartını buralarda sağlamaktadır. Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'de cam seviyesinde oluşan maximum korozyonun bu civardaki sıcaklıkların artmasına yol açtığı görülmektedir. Aynı durum Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da (3 ve 4,5 aylar için) daha açık olarak izlenmektedir. Şekil 7.6'da, ayrıca blok tamamen kullanılmaz hale gelmeden önce cam seviyesindeki sıcaklıkların en yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir.



7.2 Dış Yüzeyinde Hava Soğutması Yapılan Bloкта Oluşan Sıcaklıklara Ait Sonlu Farklar Metodu Sonuçları

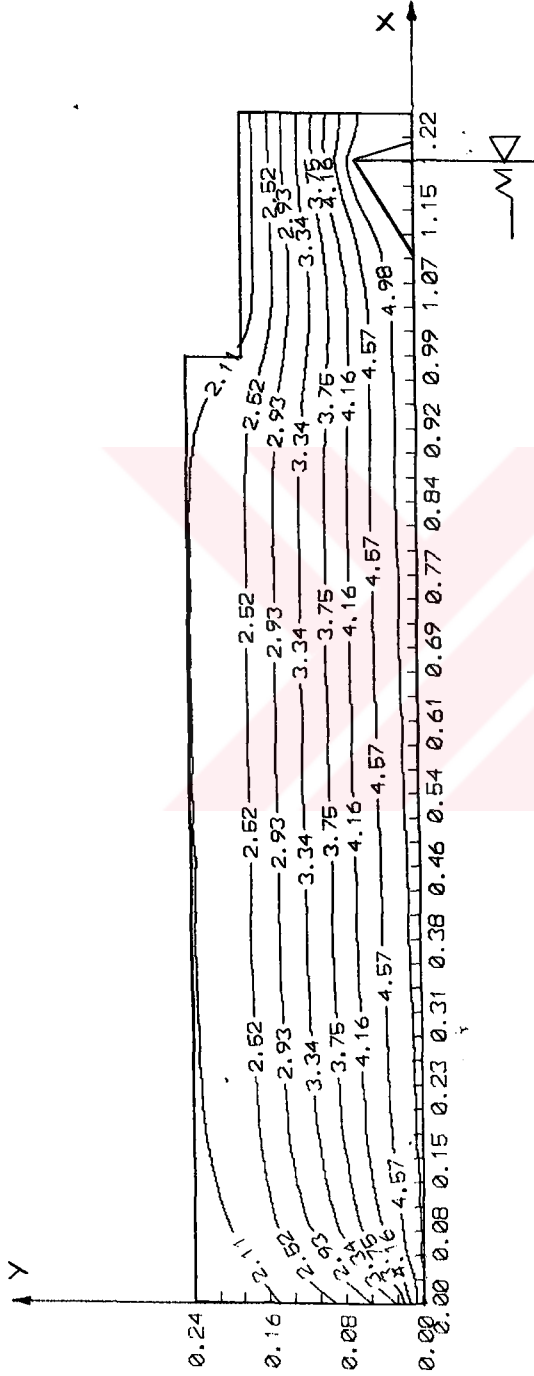
Bölüm 3.4'de Şekil 3.8 ile verilen ve dış yüzeyinde 42 m/s 'lik hava-jeti hızı ile soğutma yapılan cam fırını yan refrakter duvarındaki sıcaklık dağılımını bulmak için, (3.23) nolu temel denklemi, (3.15), (3.16), (3.17), (3.18), (3.19), (3.20) ve (3.21) nolu sınır şartları ile beraber Şekil 7.1'de verilen blok boyutları kullanılarak çözülmüştür. Bu amaçla Fortran programlama dilinde yazılmış olan bilgisayar programı rastgele bir sıcaklık profili ile iterasyona başlamakta ve bütün sıcaklık değişkenleri belli bir hassasiyet değerine ulaşıncaya kadar işleme devam etmektedir. Bilgisayar programında sıcaklık değişkenlerinin hassasiyeti için 10^{-6} değeri kullanılmıştır.

Bölüm 6.3.2'de verilen zamana bağlı aşınma profilleri Şekil 6.16, Şekil 6.17, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'un kullanılmasıyla sırasıyla 6, 36, 51 ve 72'inci aylarda blok içinde oluşan sıcaklık dağılımları hesaplanmıştır. Sonlu farklar yaklaşımı yapılırken yukarıda bahsedilen aşınma profillerinin yerine, doğrusal (lineer) yaklaşımda bulunulmuş eşdeğer profiller kullanılmıştır (Şekil 7.7).

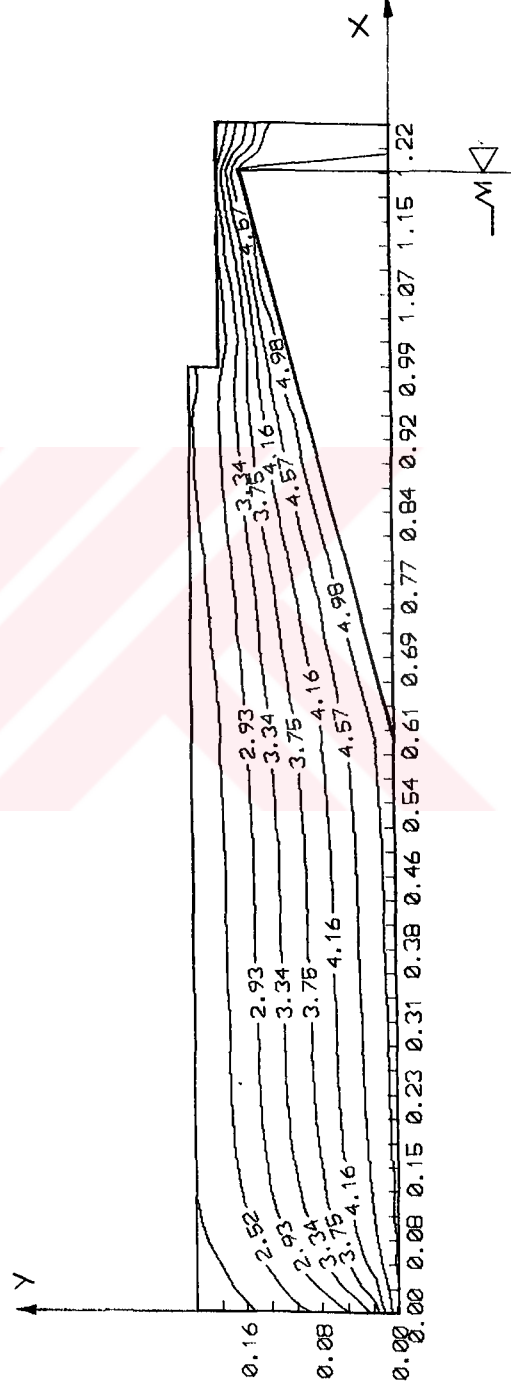


Şekil 7.7 Dış yüzeyinden hava soğutmasına maruz kalan blokta 72 ay sonra oluşan aşınma eğrisine yapılan lineer yaklaşım.

Dış yüzeyinden hava soğutmasına maruz kalan blokta 6, 36, 51 ve 72'inci aylara karşılık gelen sonlu farklar sıcaklık sonuçları, eşsıcaklık eğrileri halinde Şekil 7.8, Şekil 7.9, Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'de verilmektedir.



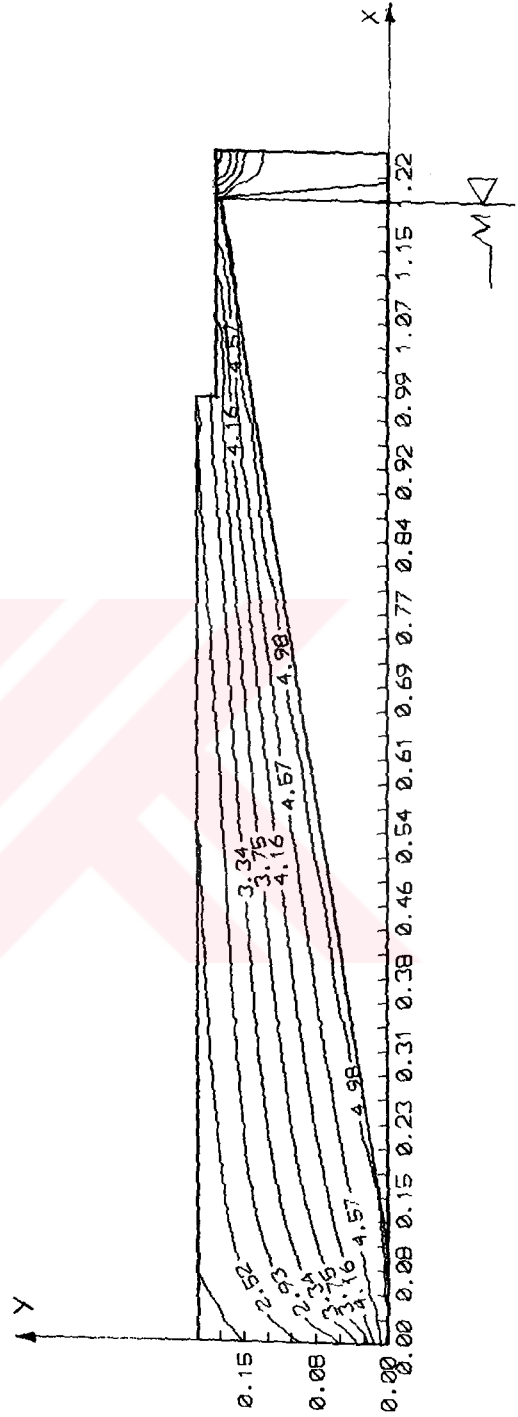
Şekil 7.8 Dış yüzeyinden hava soğutması yapılan blokta 6 ay sonra oluşan eşsıcaklık eğrileri



Şekil 7.9 Dış yüzeyinden hava soğutması yapılan blokta 36 ay sonra oluşan eşsıcaklık eğrileri



Şekil 7.10 Dış yüzeyinden hava soğutması yapılan blokta 51 ay sonra oluşan eşsıcaklık eğrileri



Şekil 7.11 Dış yüzeyinden hava soğutması yapılan blokta 72 ay sonra oluşan eşsıcaklık eğrileri

Şekil 7.8, Şekil 7.9, Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'de x'in 1.25 m olduğu refrakter üst bölgesinin izolasyonlu olmasından dolayı, eşsıcaklık eğrileri yüzeye dik olarak

gelmektedir. Şekillerdeki eşsıcaklık eğrilerinin diğer ortak özelliği, sıvı cam seviyesinde ısıtım ve taşınım, kenarlarda ise yalnızca ısıtım ile ısı kaybı olduğundan, buralarda yüzeye bükülerek gelmeleridir. Şekil 7.8'de, cam seviyesindeki sıcaklıklar blokta oluşan aşınma miktarının nisbeten küçük olmasından dolayı minimum değerlerdedir. Hava soğutmasının uygulandığı yüzeyde zamanla aşınma ilerlemesinden dolayı sıcaklıklar hızla artmaktadır (Şekil 7.9) 51 ve 72'inci aylarda blok içinde oluşan eşsıcaklık dağılımı, sırasıyla Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'de verilmektedir. Şekil 7.10'da $x = 1.2$ m ve $y = 0.18$ m olduğu cam seviyesinde aşınmadan dolayı refrakter kalınlığı 0.011 m'ye kadar incelmış ve refrakter yüzeyindeki boyutsuz sıcaklık değeri $\theta = 3.23$ ($\cong 770$ °C) olarak hesaplanmıştır. Şekil 7.11'de görüldüğü gibi, blok içindeki sıcaklıklar x eksen yönünde hızla artmaktadır. $x = 1.2$ m noktasında, refrakter kalınlığı 0.0035 m'ye kadar azaldığından, burada çok yüksek sıcaklık gradyanı oluşmaktadır.

7.3 Hava Soğutmasıyla Refrakter Bloğundan Çekilen Isı Yüklerine Ait Sayısal Sonuçlar

Daha önceki kısımlarda refrakter bloğundaki sıcaklıklar, bloğun izolasyonlu ve hava-jeti ile soğutması durumları için ayrı ayrı sayısal olarak hesaplanmıştır. Hava soğutmasının etkisini görmek için, ağ noktalarında elde edilen sıcaklık değerleri (3.25) ve (3.27) nolu ifadelerin hesaplanmasında kullanılacaktır. (3.25) ve (3.27) nolu eşitlikleri yazılırsa ;

$$q_i = \frac{1}{N} \sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} \Delta\theta_i(I, J) C_p(\theta_i) \quad (3.25)$$

ve

$$q_o = \frac{1}{N} \sum_{I=1}^{MM} \sum_{J=1}^{LL} \Delta\theta(I, J) C_p(\theta) \quad (3.27)$$

şeklindedir.

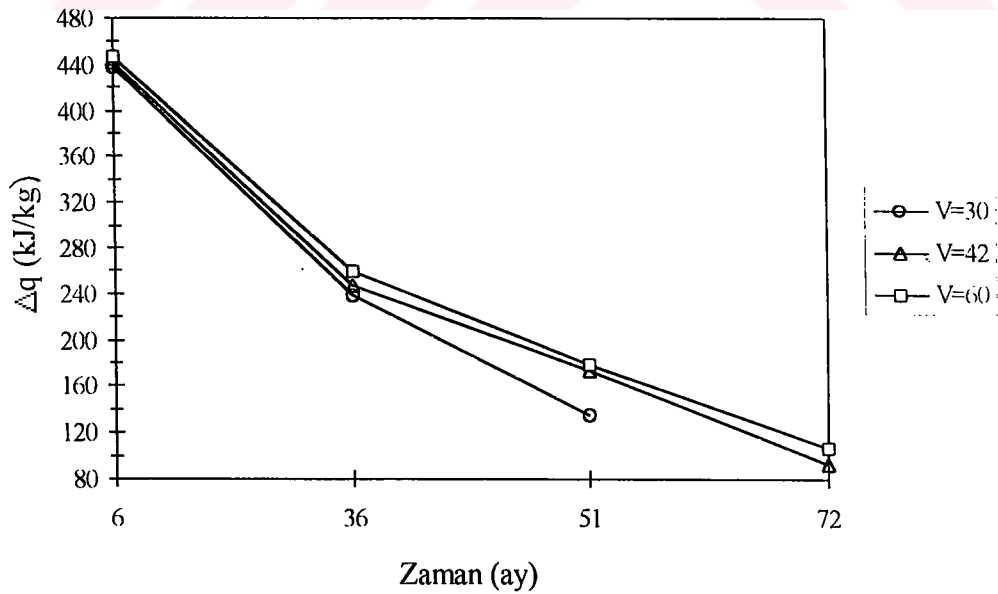
Burada, q_i ve q_o sırasıyla refrakter bloğunun izolasyonlu olması ve hava soğutması yapılması durumlarında birim kütle başına refrakterde depolanan ısı miktarlarını göstermektedir. Refrakter bloğundan belli bir zaman ve hava soğutma hızında birim kütle başına çekilen ısı miktarı (Δq), (3.28) nolu ifadenin yardımıyla hesaplanacaktır.

$$\Delta q = q_i - q_o \quad (3.28)$$

Refrakter bloğunda depolanan ısı miktarının Sonlu Farklar Metodu ile hesaplanmasında, refrakter malzemesinin özgül ısı C_p (J/kgK), refrakter sıcaklığının θ ($^{\circ}\text{C}$) bir fonksiyonu olarak alınmıştır (Şekil 3.11). Bu çalışmada, C_p 'nin refrakter sıcaklığı ile olan değişimi, lineer kabul edilmiştir. C_p 'nin bu değişimi (7.5) nolu eşitlikle verilmiştir.

$$C_p(\theta) = 0.856881 + 0.000165138 \theta \quad (7.5)$$

Farklı soğutma havası hızlarında (30 m/s, 42 m/s ve 60 m/s) refrakter bloğundan birim kütle başına çekilen ısı miktarı (Δq) değerlerinin zamanla değişimi grafik olarak Şekil 7.12'de verilmiştir.



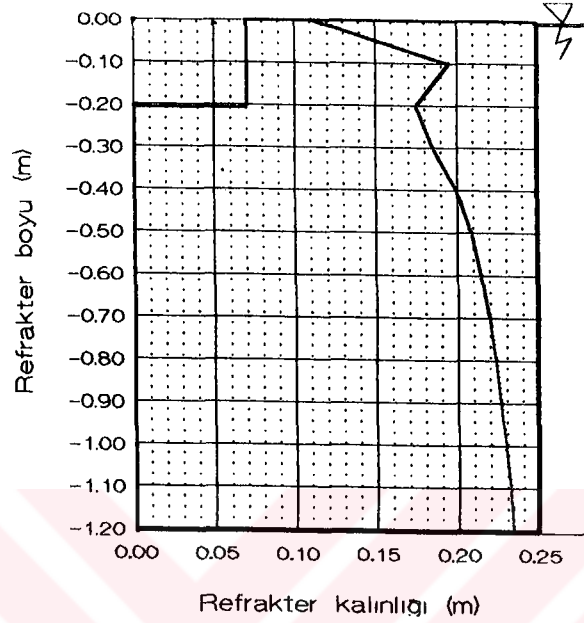
Şekil 7.12 Farklı soğutma hızlarında refrakter bloğundan çekilen ısı miktarının zamanla değişimi

Şekil 7.12'de görüldüğü gibi bütün hızlarda refrakterden çekilen ısı miktarı zamanla eksponansiyel olarak azalmaktadır. Refrakterde ilerleyen aşınma sonucunda, refrakter hacminde azalma meydana gelmekte ve sıvı cam sıcaklığı refrakter bloğunda önemli sıcaklık artışına yol açmaktadır. Bu durum bütün hava üfleme hızlarında refrakterden çekilen ısı Δq (kJ/kg) oranının zamanla hızlı bir şekilde azalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca cam seviyesinde yapılan soğutma refrakterin boyun (üst) kısmında sıcaklıkların düşmesini ve Δq oranının bir miktar artmasını sağlamıştır. İlk 6 ayda 30 m/s, 42 m/s, 60 m/s'lik hava üfleme hızlarında refrakterden çekilen ısı miktarları sırasıyla 438.45 kJ/kg, 441.92 kJ/kg ve 445.94 kJ/kg gibi birbirine çok yakın değerler olarak bulunmuştur. Bu durum 51 ay boyunca 42 m/s ve 60 m/s'lik hava üfleme hızlarında devam etmiştir. Fakat bu süre zarfında, 30 m/s hava üfleme hızında hesaplanan Δq oranında bir düşme görülmüştür. Yapılan sayısal hesaplamalar sonucunda 51'inci ayda 30 m/s, 42 m/s ve 60 m/s hava üfleme hızlarında refrakterden çekilen ısı miktarları sırasıyla 134.65 kJ/kg, 172.31 kJ/kg ve 178.85 kJ/kg olarak bulunmuştur. Refrakterin 72'inci aya kadar olan süredeki Δq eğrisi incelendiğinde, 42 m/s ve 60 m/s'lik hava soğutma hızlarında çok yakın değerlerin elde edildiği görülmüştür. 72'inci ayda 42 m/s ve 60 m/s hava üfleme hızlarında Δq oranları sırasıyla 92.71 kJ/kg ve 107.04 kJ/kg olarak hesaplanmıştır.

7.4 Dış Yüzeyinden Hava Soğutması Yapılan Cam Fırını Refrakter Bloğunda Ölçülen Sıcaklık Değerlerinin Sonlu Farklar Metodu Sonuçları İle Karşılaştırılması

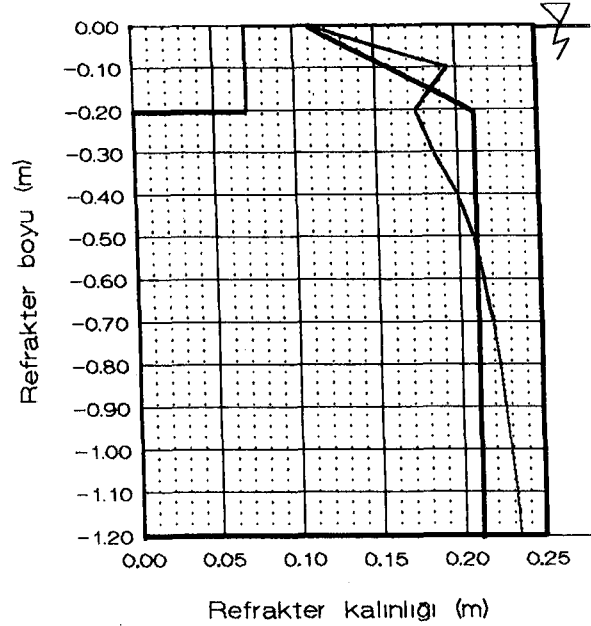
Bu bölümde dış yüzeyinde 42 m/s'lik hava üfleme hızıyla soğutma yapılan blokta sayısal olarak hesaplanan sıcaklık sonuçları aynı bloğun yüzeyinden deneysel olarak elde edilen değerler ile karşılaştırılacaktır. Cam seviyesindeki kalınlığı 0.04 m'ye kadar incelmış olan bloktaki sıcaklık ölçüm noktaları, Bölüm 5.2'de verilmiştir. Laser Termometresi kullanılarak yapılan ölçümlerde elde edilen sıcaklık değerleri Tablo 3'de sunulmuştur. Şekil 5.4'de görülen bloğun cam seviyesindeki aşınma değeri, bloğun üst noktasından

($x = 1.25$ m, $y = 0.18$ m) bir tel kanca sokulmak suretiyle ölçülmüştür. Yapılan ölçümlere karşılık gelen aşınma profili Şekil 7.13'de verilmiştir (sayısal hesaplamalarda $V = 42$ m/s hava üfleme hızında 24 ay sonra blokta oluşan aşınma profili kullanıldı).



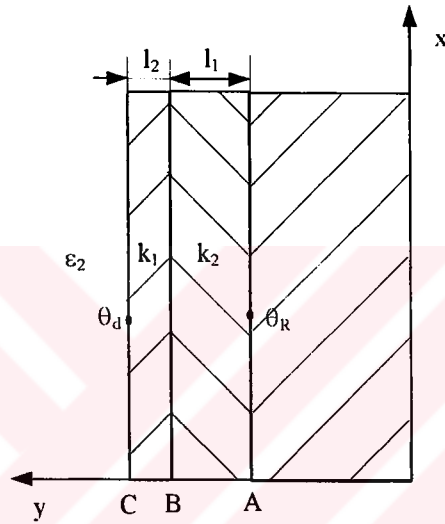
Şekil 7.13 Cam seviyesindeki kalınlığı 0.04 m'ye kadar aşınmış olan blokta yaklaşık korozyon profili

Sonlu farklar çözümü yapılırken, Şekil 7.13'de görülen blokta aşınma profili yerine, Şekil 7.14'de verilen eşdeğer korozyon profili kullanılmıştır.



Şekil 7.14 Cam seviyesindeki kalınlığı 0.04 m olan blokta korozyon eğrisine uygulanan doğrusal yaklaşım

Sonlu farklar formülasyonu yapılırken, Şekil 7.14'de verilen refrakter bloğunun izolasyonlu bölgesinden ışınlama ile olan ısı kaybı gözönüne alınmış ve bu etki sınır şartlarında formüle edilmiştir. Şekil 7.15'de refrakterin dış yüzeyindeki izolasyon boyutları verilmektedir. A ve B noktaları arasında bulunan bölge cam yünü ile kaplanmıştır. Ayrıca cam yününün dış kısmındaki B ve C noktaları arasında ahşap (tahta) kullanılmıştır.



Şekil 7.15 Refrakter dış yüzeyindeki izolasyon kesiti ($l_1 = 0.150$ m, $l_2 = 0.01$ m)

A ve C noktaları arasındaki toplam ısı iletim katsayısı (7.6) nolu ifade ile verilmiştir.

$$\frac{1}{k_{\text{top}}} = \frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2} \quad (7.6)$$

Bu noktalar arasındaki birim yüzeyden ısı iletimi dış yüzeyden ışınlama ile atılan ısı miktarına eşitlenerek toplanırsa, (7.7) nolu eşitlik elde edilir:

$$\sigma \epsilon_2 T_h^3 (\theta_d^4 - 1) + k_{\text{top}} (\theta_d - \theta_R) = 0 \quad (7.7)$$

Burada,

θ_d : Boyutsuz ahşap dış yüzey sıcaklığı,

θ_R : Boyutsuz refrakter yüzey sıcaklığı,

olarak verilmektedir.

(7.7) nolu denklemden θ_d ifadesi çekilerek yeniden düzenlenirse θ_d için (7.8) nolu ifade elde edilir:

$$\theta_d = \theta_R + \frac{1}{k_{top}} \sigma \epsilon_2 T_h^3 (1 - \theta_d^4) \quad (7.8)$$

Bölüm 3.4'de verilen (3.18) nolu sınır şartında θ_d sıcaklık değeri yerine konulur ve iterasyon tekniği kullanılırsa, refrakter bloğu içindeki sıcaklık değerleri ile dış yüzeydeki θ_d sıcaklık değerleri birlikte hesaplanır.

Öncelikle başlangıç değeri olarak rastgele θ_R ve θ_d değerleri ile iterasyona başlanır. θ_d başlangıç sıcaklıkları (7.8) nolu denklemde yerine konularak yeni θ_d değerleri hesaplanır. Bulunan bu değerler (3.18) nolu sınır şartında yerine konulursa yeni θ_R sıcaklıkları elde edilir. Yeni θ_R değerleri, bir sonraki adımda θ_d 'lerin hesaplanmasında yeniden kullanılır. θ_d ve θ_R sıcaklık sonuçlarına her iterasyon başlangıcında normalleştirme işlemi (under-relaxation) yapılmakta ve iterasyona devam edilmektedir. Refrakter içindeki θ_R ve izolasyon malzemesinin dış kısmındaki θ_d değerleri belli bir hassasiyet değerine ulaşınca iterasyona son verilmektedir. Ek. B'da verilmiş ve Fortran programlama dilinde yazılmış olan bilgisayar programı, kendi içinde verilen başlangıç sıcaklık değerleri ile yaklaşık 22760 iterasyon yaparak, % 10^{-6} hassasiyetle sıcaklık değişkenlerini hesaplamaktadır. Sonlu Farklar Metodu hesaplamaları esnasında Δx ve Δy artırımları birbirine eşit alınmıştır ($\Delta x = \Delta y = 0.01$).

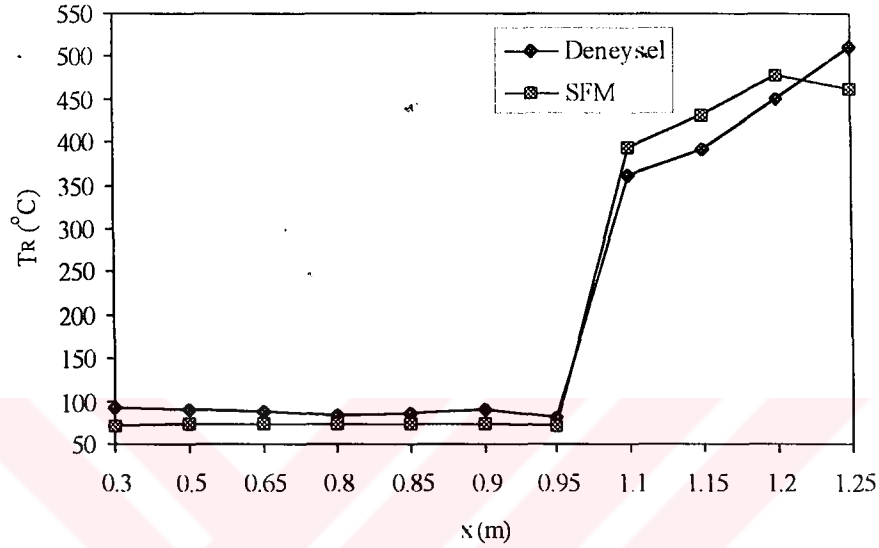
Sonlu Farklar Metodunun kullanılmasıyla Şekil 7.14'deki refrakter bloğunda hesaplanan sıcaklık dağılımı, eşsıcaklık eğrileri halinde Şekil 7.16'da verilmiştir.



Şekil 7.16 Dış yüzeyinden hava soğutması yapılan cam fırını refrakter bloğunda eşdeğer aşınma profili kullanılarak elde edilen eşsıcaklık eğrileri

Şekil 7.16'da görülen Sonlu Farklar Metodu sonuçlarının, Bölüm 5.2'de verilen deneysel sıcaklık değerleri (Tablo 3) ile karşılaştırılması Şekil 7.17'de grafik olarak verilmiştir.

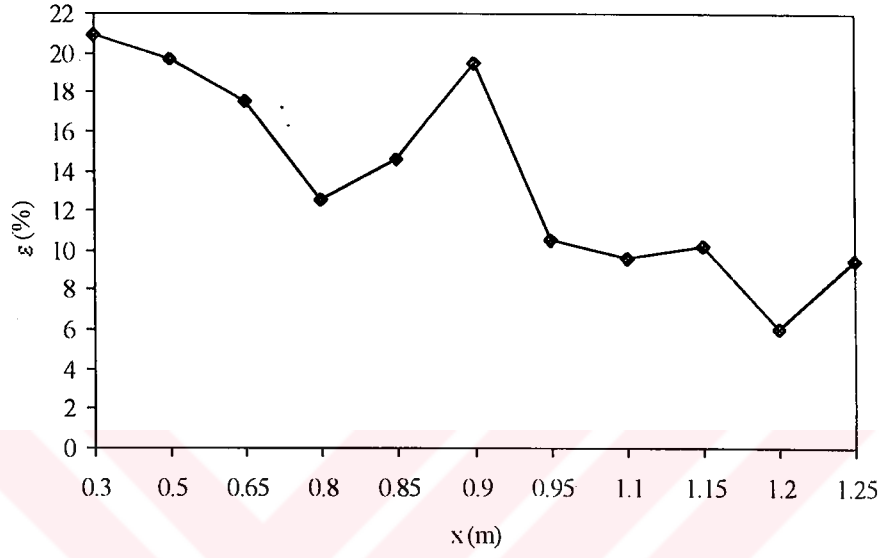
Şekil 7.17'de görüldüğü gibi Sonlu Farklar Metodu (SFM) kullanılarak hesaplanan sonuçlarla belli refrakter noktalarında deneysel olarak ölçülen değerler aynı yönde eğime sahiptir.



Şekil 7.17 Sonlu farklar metodu sonuçlarının refrakter üzerinde deneysel olarak ölçülen sıcaklık sonuçları ile karşılaştırılması

Yapılan matematiksel modellemede, refrakterde $x = 0.99$ m ile $x = 1.25$ m arasında hava soğutmasına ek olarak uygulanan su soğutması, problemin çözümüne getireceği karmaşık durum sebebiyle gözönüne alınmamıştır. Su soğutmasının ihmal edilmesinden dolayı $x = 0.99$ m ile $x = 1.25$ m arasında bulunan bölgede Sonlu Farklar Metodu ile elde edilen sıcaklık sonuçları daha yüksek bulunmuştur. Matematik modelde yer almayan refrakter malzemesi içindeki süreksizlikler; bağlantı noktalarındaki aşınmalar (upward drilling); 3 boyutlu olan sıvı cam hareketleri; refrakter dışındaki izolasyon malzemesinin konstrüksiyonundaki hatalar; belli bir refrakter kalınlığından sonra refrakterin ısı iletim katsayısı özelliğinin değişmesi; aşınan refrakter parçalarının refrakter yüzeyinden tamamen uzaklaştırılamaması ve ısıya karşı ek bir yalıtım görevi görmesi hata kaynaklarından bazılarıdır. $x = 1.2$ m'de (sıvı cam seviyesinde) refrakter aşınmasının tam olarak bilinmesi bu nokta civarındaki % hatayı azaltmıştır (Şekil 7.18).

Şekil 7.18'de refrakter üzerindeki ölçüm noktalarında, deneysel ve sayısal olarak elde edilen sonuçlar arasında oluşan % hata oranları verilmektedir:



Şekil 7.18 Refrakter üzerindeki farklı noktalarda elde edilen Sonlu Farklar Metodu ve deneysel sonuçlar arasında oluşan % hata oranlarının değişimi

BÖLÜM 8

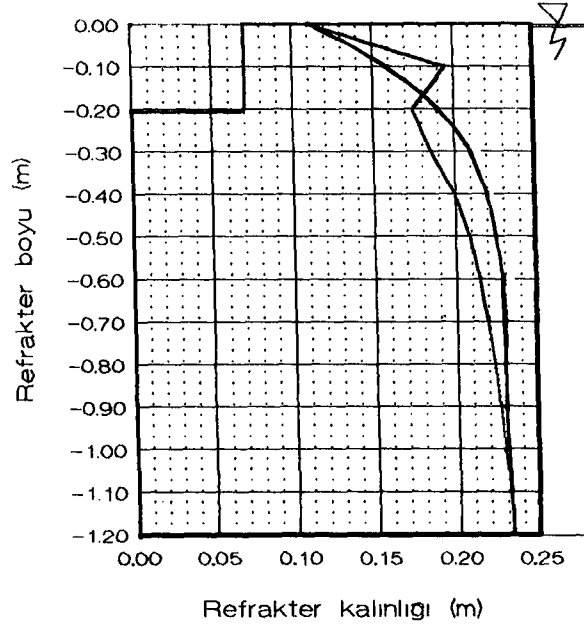
DIŞ YÜZEYİNDEN HAVA SOĞUTMASI YAPILAN FIRININ REFRAKTER BLOĞUNDA OLUŞAN SICAKLIKLARA AİT SINIR ELEMAN METODU (BOUNDARY ELEMENT METHOD) SONUÇLARI VE BU DEĞERLERİN DENEYSEL SONUÇLARLA KARŞILAŞTIRILMASI

Bölüm 4.2'de 2 boyutlu Laplace denklemine ait Sınır Eleman Metodu formülasyonu yapılmış ve elde edilen denklemin son halı (4.38) nolu ifade ile Bölüm 4.3'de verilmiştir. Aynı bölüm içinde (4.38) nolu denklemin çözümünde kullanılacak olan sıcaklık sınır şartları yeniden ele alınmıştır. Ayrıca bölüm 4.3'de Sınır Eleman Yönteminin uygulandığı bölgede yüzey normali yönünün ani değiştiği köşe noktalarında çıkabilecek hataların azaltılması için kullanılabilecek bir yöntem ele alınmıştır. Işınım sınır şartından dolayı Sınır Eleman Metodunun kullanılması iteratif yöntemle beraber aynı kısım içinde ayrıca önerilmiştir.

Bu bölümde dış yüzeyinden 42 m/s'lik hava hızıyla soğutma yapılan refrakter duvarındaki sıcaklıklar, refrakter duvarının aşınma profiline eğrisel bir yaklaşım yapılarak Sınır Eleman Yöntemi ile hesaplanacaktır. Sonra, sayısal olarak hesaplanmış sıcaklık sonuçları, refrakter yüzeyinden deneysel olarak elde edilmiş değerlerle karşılaştırılacaktır.

8.1 Refrakter Bloğu Sınırlarının Lineer Elemanlara Ayrıştırılması

Bölüm 7'de (7.4) nolu kısımda cam seviyesindeki kalınlığı 0.04 m'ye kadar incelmış olan blokta kullanılan yaklaşık aşınma profili Şekil 7.13'de verilmiştir. Sınır Eleman Metodu ile çözüm yapılacak bloğun korozyon profili Şekil 7.13'e eğrisel yaklaşım yapılarak elde edilmiştir. Pratikteki refrakter aşınmasını daha iyi bir yaklaşımla temsil eden bu profil, Şekil 8.1'de verilmektedir.



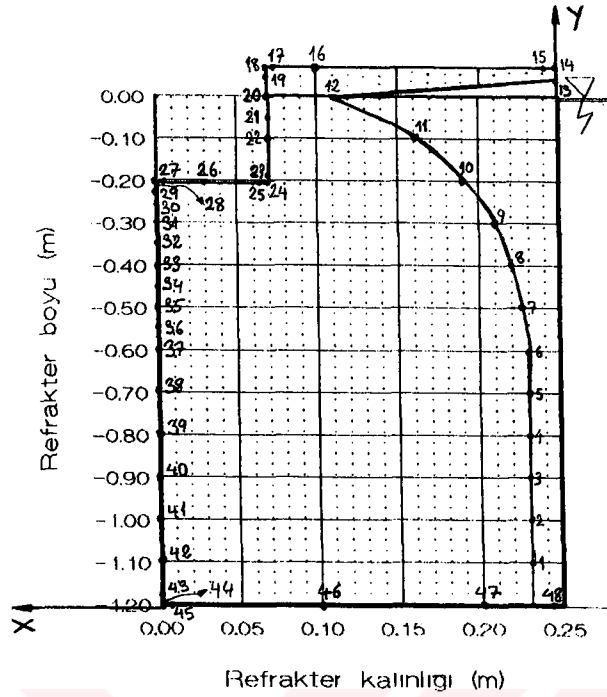
Şekil 8.1 Cam seviyesindeki kalınlığı 0.04 m olan bloktaki aşınma profiline uygulanan eğrisel yaklaşım

Bölüm 4.2'deki (4.33) nolu ifade aşağıda tekrar verilmiştir:

$$C_{\ell} \tilde{\phi}(\bar{r}_{\ell}) - \frac{1}{2\pi} \sum_{e=1}^E \left[\hat{\phi}_1^e \int_{\Gamma_e} \frac{(\bar{r} - \bar{r}_{\ell}) \cdot \bar{n}}{|\bar{r} - \bar{r}_{\ell}|^2} \left(1 - \frac{S}{L_e} \right) d\Gamma + \hat{\phi}_2^e \int_{\Gamma_e} \frac{(\bar{r} - \bar{r}_{\ell}) \cdot \bar{n}}{|\bar{r} - \bar{r}_{\ell}|^2} \frac{S}{L_e} d\Gamma \right] \\ + \frac{1}{2\pi} \sum_{e=1}^E \left[\hat{q}_1^e \int_{\Gamma_e} \left(1 - \frac{S}{L_e} \right) \ln|\bar{r} - \bar{r}_{\ell}| d\Gamma + \hat{q}_2^e \int_{\Gamma_e} \frac{S}{L_e} \ln|\bar{r} - \bar{r}_{\ell}| d\Gamma \right] = 0 \quad (4.33)$$

(4.33) nolu ifadenin çözümünde kullanılacak olan sıcaklık ($\hat{\phi}$) ve ısı akısı (heat flux) ($\hat{q}$) değerlerinin verildiği noktalar Şekil 8.1'de görülmektedir. Şekil 8.1'deki refrakter bloğunda 48 noktada sınır şartı verilmiştir.

Şekil 8.2'de görülen refrakter bloğunun izolasyonlu bölgesinde sayısal çözüm yapılırken Bölüm 7'de verilmiş olan (7.6), (7.7) ve (7.8) nolu ifadeler kullanılmıştır.



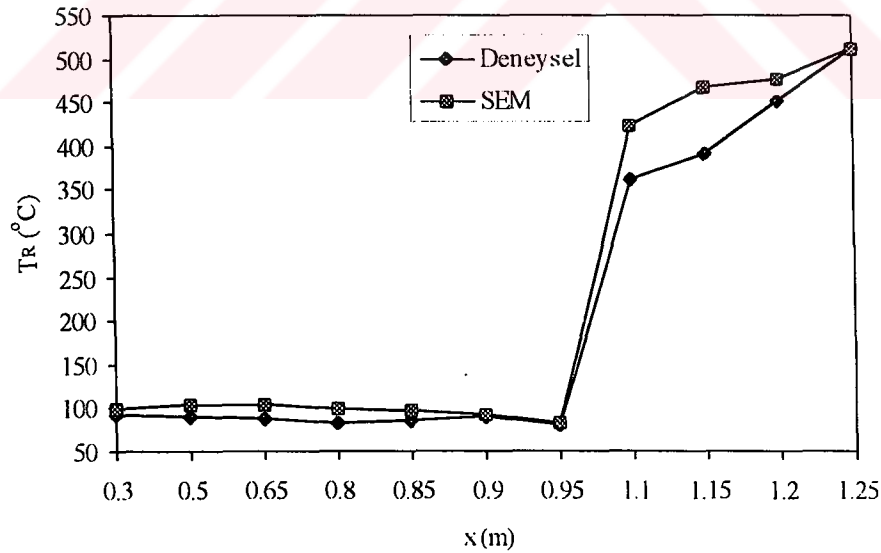
Şekil 8.2 Sınır Eleman Metodu kullanılarak sıcaklık çözümü yapılacak refrakterin şekli ve sınırlarının elemanlara ayrıştırılmış hali

Şekil 8.2'de görülen refrakter sınırlarında 18'inci ve 48'inci noktalar (nodes) arasında radyasyon ile ısı kaybı olduğundan, buradaki sonuçlar iteratif metod kullanılarak bulunmuştur. Bilgisayar programı, iterasyon işlemine başlamadan önce data file'dan sınırlarda bilinen sıcaklık ve ısı akısı değerini koordinatları ile beraber okumaktadır. İterasyona 18 ve 48 nolu noktalar arasındaki her noktaya başlangıç olarak rastgele ısı akısı değeri atanarak başlanmaktadır. Bu atanan değerlerin isabetli (makul) olup olmaması iterasyon sürecini etkilemekte ve programın sonuca varmasına (convergence) veya sonuçlanmamasına (divergence) yol açmaktadır. Data file'da sıcaklık değerleri 1 ile, ısı akısı değerleri 2 ile tanımlanmıştır. Ayrıca hesaplamalarda 18, 24, 28 ve 44 nolu köşe noktaları yakın noktadaki değerlerin ortalamaları alınmak suretiyle hesaplanmıştır. 28 nolu noktadan 48 nolu noktaya kadar olan bölgenin dış yüzeyi izolasyon malzemesi ile kaplı olduğundan burada, 2 ayrı değişken için ayrı ayrı iterasyon yapılmıştır. Hesaplamalarda refrakter dış yüzeyinde bulunan izolasyon malzemesinin ısı akısı ve sıcaklığı beraber kontrol edilmiştir. Refrakterde yapılan iterasyonlarda sınırlardaki ısı akısı değişkeninin hassasiyeti referans olarak alınmıştır.

Bütün hesaplamalarda değişken ısı akısı değerleri için hassasiyet, % 10^{-6} olarak alınmıştır. Her iterasyon başlangıcında ısı akısı değişkenlerine belli bir normalleştirme (under relaxation) işlemi yapılmıştır. Ek. C'de verilmiş olan Fortran programlama dilinde yazılmış bilgisayar programı data file'da verilen başlangıç değerleri için yaklaşık 195 iterasyon yaparak yukarıda belirtilen hassasiyetle sonuçları hesaplamaktadır. Programa ait data file "BEM2R.DAT", Ek. C'de verilmiştir.

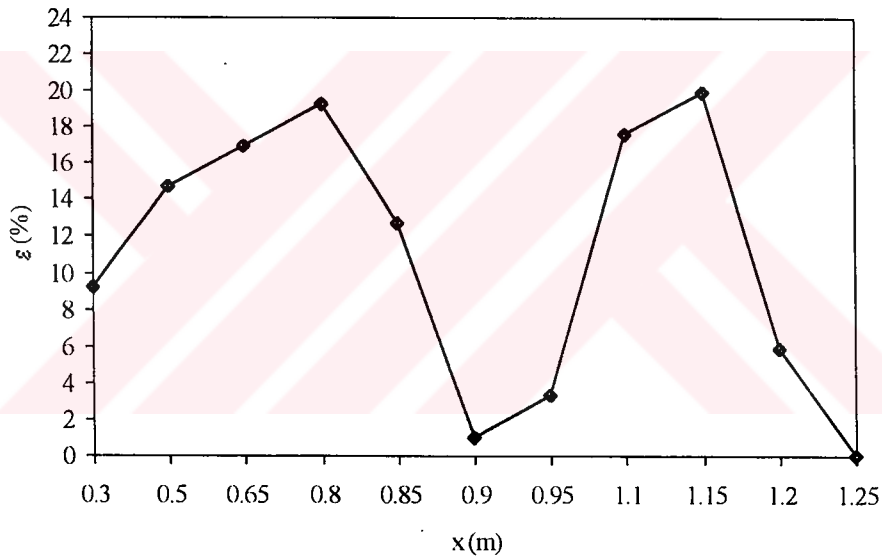
8.2 Sınır Eleman Metodu (SEM) Sonuçlarının Deneysel Sıcaklık Değerleri İle Karşılaştırılması

Bölüm 4.2.1.'de verilen (4.33) nolu denklemin Şekil 8.2'de görülen bölge sınırlarındaki değerler (bu değerler sıcaklık ve ısı akısı değerleri olup data file'da verilmiştir) kullanılarak, yapılan çözümde elde edilen sıcaklık sonuçlarının refrakterde deneysel olarak ölçülen sıcaklıklar ile karşılaştırılması, Şekil 8.3'de grafik olarak verilmiştir. Ayrıca refrakter üzerindeki ölçüm noktalarında oluşan % hata miktarları Şekil 8.4'de sunulmuştur.



Şekil 8.3 Sınır Eleman Yöntemi sonuçlarının deneysel olarak ölçülen sıcaklık değerleri ile karşılaştırılması

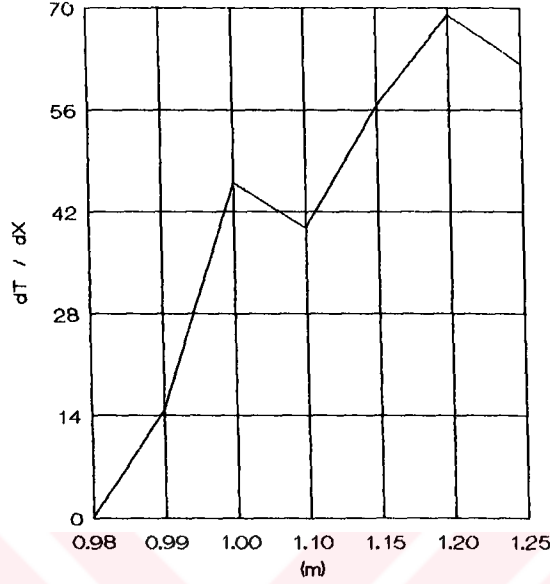
Şekil 8.3 incelenirse, Sınır Eleman Yöntemi kullanılarak yapılan çözüm sonuçları ile ölçüm noktalarında elde edilen deneysel sonuçların eğimlerinin aynı yönde olduğu ve aralarında bir uyum bulunduğu görülmektedir. Şekil 8.4'deki grafikte ise refrakter üzerindeki noktalarda hata oranlarının önemli derecede değiştiği görülmektedir. $x = 0.0$ ile $x = 0.99$ m'ler arasında refrakter yüzeyi sıcaklıklarının düşük olmasından dolayı ölçümlerde yapılacak küçük hatalar, izolasyon malzemesine ait değerlerdeki oynamalar ve cam yünü konstrüksiyonundaki farklılıklar beraberinde önemli hata artışlarını getirmiştir. Diğer ölçüm noktalarında ($x = 0.99$ m ile $x = 1.25$ m arasında) SEM kullanılarak yapılan çözümlerde sıcaklık değerleri deneysel olarak ölçülen değerlerden daha yüksek bulunmuştur. Bu durumun nedeni Bölüm 7.4'de detaylı olarak ele alınmıştır.



Şekil 8.4 Sınır Eleman Metodu sonuçları ile refrakter üzerinde ölçülen sıcaklık değerleri arasında oluşan % hata değişimi

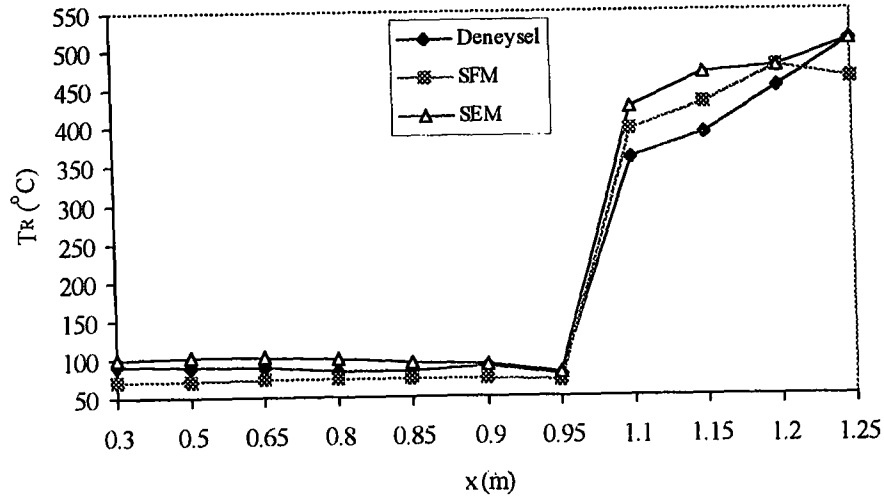
SEM ile yapılan çözümlerde refrakter dış yüzeyinde oluşan sıcaklık türevleri $\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)$, Şekil 8.2'de verilen sınır noktalarında hesaplanmıştır. Isı akısı hattı (heat flux line) olarak tanımlanan aşınmanın en yüksek olduğu sıvı cam seviyesinde, sıcaklık değişimi $\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)$ değerinin maksimum olduğu görülmüştür (Şekil 8.5). Dolayısıyla

refrakterden bu hat boyunca dışarıya atılan ısı akısı değerin maksimum olduğu gerçeği SEM çözümleri sonucunda sayısal olarak da elde edilmiştir.



Şekil 8.5 Hava ile soğutma yapılan refrakter dış yüzeyindeki sıcaklık türevlerinin değişimi

Son olarak, SEM ve SFM ile yapılan sayısal çözümlerden elde edilen sıcaklık sonuçlarının refrakter yüzeyinden deneysel olarak ölçülen sıcaklık değerleri ile beraber karşılaştırılması, grafik olarak Şekil 8.6'da verilmiştir.



Şekil 8.6 SEM ve SFM sayısal yöntemleri ile elde edilen sıcaklık sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

8.3 Sonuçlar

Bu çalışmada, cam fırınlarındaki refrakter duvar bloğunda oluşan aşınma, sıcaklık dağılımı ve ısı kayıpları sayısal olarak incelenmiş ve sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Daha önce yapılan bir çok çalışmada cam fırınlarındaki refrakter duvarında oluşan korozyon, teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bunlardan Hrma [8]'nin yaptığı teorik analizde refrakter aşınması için elde ettiği integro-diferansiyel denklem bu çalışmada kullanılmıştır. Bu diferansiyel denklem halen piyasada kullanılmakta olan cam fırınının blok duvarları boyutları ve sıcaklık sınır şartları yardımıyla yine Hrma [19]'nin çalışmasında ortaya koyduğu yaklaşım metodu da kullanılarak iteratif olarak çözülmüştür. Daha sonra, soğutma havası hızı ve sıcaklığı, fırın içindeki sıvı cam sıcaklığı ve refrakter kalınlığı değiştirilerek bu parametrelerin fırın ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen değişimler grafik olarak sonuç kısmında verilmiş ve yorumlanmıştır. Diğer taraftan, hesaplanan refrakter duvar korozyon profillerinden faydalanılarak bloktaki eşsıcaklık eğrileri elde edilmiştir. Bu amaçla, Sonlu Farklar ve Sınır Eleman Metodları ayrı ayrı iteratif yöntemle beraber kullanılarak bloğa ait Laplace denklemi çözülmüştür. Elde edilen sıcaklık sonuçlarından faydalanılarak, hava soğutmasıyla refrakter bloğundan çekilen ısı yüklerinin yıllara göre dağılımları hesaplanmış ve grafik olarak sunulmuştur. Hesaplanan sıcaklık ve korozyon değerleri fırın üzerinde deneysel olarak ölçülmüş verilerle grafik olarak karşılaştırılıp sonuçlar irdelenmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda uygulanan modeller ile deneysel sonuçlar arasında büyük oranda bir uyum olduğu görülmüş, ortaya çıkan farklılıkların sebepleri ayrıca değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- a) Cam fırını refrakter duvarına ait aşınmanın zamana ve konuma göre değişimini gösteren diferansiyel denklem Mersin şişe Cam Fabrikasına ait 1980-1987 kampanyasında kullanılan ACS 20 nolu fırın refrakter duvar boyutları ve sıcaklık sınır şartları kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Cam seviyesinde deneysel olarak

ölçülen aşınma değerleri ile karşılaştırma yapıldığı zaman refrakterin teorik (sayısal) olarak hesaplanan süreden çok önce kullanılamaz hale geldiği görülmüştür. Bunun sebebi; yapılan modellemede fırın içerisindeki reaksiyon tipinin (yükseltgen veya indirgen olması), refrakter içindeki cam hareketlerinin 3 boyutlu olmasının, refrakter içerisindeki ısıl gerilmelerden dolayı oluşan çatlakların, refrakterin homojen olmayan yapısının ve refrakter birleşme noktalarında meydana gelen ekstra aşınmanın (upward drilling) ve benzeri diğer etkilerin gözönüne alınmamış olmasıdır. Yapılan teorik ve deneysel çalışmaların karşılaştırılmasıyla pratik refrakter ömrünün, refrakter bloğunun 1×10^{-2} m'ye kadar aşınması için geçen süreye karşılık geldiği görülmüştür.

b) Hava ile yapılan soğutmanın refrakter ömrü üzerindeki etkisini görmek için refrakter yan bloklarının komple ısıya karşı izolasyonlu olduğu kabul edilmiş ve yapılan sayısal hesaplamalarda refrakter ömrünün logaritmik olarak azaldığı görülmüştür. Trakya Cam Fabrikasındaki TRII nolu fırın verilerinin kullanılmasıyla, bu fırına ait refrakterde soğutmanın yapılmaması durumunda ömrünün 4.5 ay gibi çok kısa bir süre olacağı hesaplanmıştır. Diğer taraftan sayısal hesaplamalar, 42 m/s'lik bir hava soğutma hızında aynı refrakterin ömrünün 87 ay olduğunu göstermiştir.

c) Farklı soğutma hızlarında ($V = 30, 42, 60$ m/s) yapılan analizlerde refrakterin aşınma sonucunda belli bir kalınlık değerine (1×10^{-2} m) ininceye kadar soğutma tesirinin sıvı cam tarafında hissedilmediği görülmüştür. Belli bir kalınlık değerinden sonra aşınma oranının hızla azaldığı nümerik çalışmalarda gözlenmiştir. Bu durumun literatürde yapılan çalışmalarda da bir çok araştırmacı tarafından beyan edilmiştir [15,17,18].

d) Farklı soğutma hızlarında sayısal olarak yapılan çalışmalarda refrakter ömrünün sıvı cam sıcaklığının artışıyla eksponansiyel olarak azaldığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuç konuyla ilgili olarak literatürde yapılan bir çok çalışmayla uyumluluk göstermektedir [10,11,12,13,14].

- e) Refrakter blok kalınlığının refrakter ömrüne olan etkisi farklı soğutma hızlarında incelenmiş ve blok kalınlığının artmasıyla refrakter ömründeki artışın fazla olmadığı görülmüştür.
- f) Farklı soğutma havası hızlarında yapılan sayısal hesaplamalarda, soğutma havası sıcaklığı ile refrakter ömrü arasındaki değişimin lineere yakın olduğu bulunmuştur.
- g) Refrakter içerisindeki sıcaklık dağılımının sayısal olarak çözülmesiyle elde edilen sonuçlar kullanılarak ve soğutmayla refrakter bloğundan (birim kütle başına) çekilen ısı miktarının zamanla eksponansiyel olarak azaldığı görülmüştür.
- h) Sonlu Farklar ve Sınır Eleman Metodu kullanılarak hesaplanan sonuçların kendi aralarında uyumlu olduğu görülmüştür. Diğer taraftan SFM ve SEM metodu ile elde edilen sayısal sonuçlar refrakter yüzeyinde deneysel olarak alınan sıcaklık sonuçları ile karşılaştırılmış ve sıvı cam seviyesinde yapılan su soğutma etkisinin hesaba katılmamasının bu civardaki hata oranını artırdığı görülmüştür.
- j) Sonlu Farklar Metodu ile Sınır Eleman Metotları karşılaştırıldığında aynı problem verileri için Sınır Eleman Metodunun çok daha az iterasyonla (22760'a karşılık 195 iterasyon) sonuca vardığı görülmüştür. Ayrıca refrakter sınırlarının karmaşıklığı Sınır Eleman Metodunun uygulanabilirliğini etkilemezken, Sonlu Farklar Metodu ile yapılan çözümlerde refrakter sınırlarına lineer yaklaşım uygulanmıştır.
- k) Sınır Eleman Metodu kullanılarak yapılan sayısal analizde cam seviyesinde (heat flux'da) maksimum oranda ısı geçişinin olduğu gerçeği sayısal olarak da elde edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda, yukarıda bahsedilen ve bu çalışmada gözönüne alınmayan birçok etki incelenebilir. Aşınma analizi yapılarak elde edilen integro-diferansiyel denklem cam tarafından refrakter boyunca dışarıya olan ısı iletiminin tek boyutlu olduğu kabulü ile elde edilmiştir. Daha detaylı bir çalışmada, 2 veya 3 boyutlu

ısı iletimi kabulü altında bu denklem geliştirilebilir. Önemli bir hususda, refraktere ait aktivasyon enerjisinin tam olarak bilinmemesidir. Bundan dolayı literatürde verilen yaklaşık değerlerin kullanılması sonuçlar üzerine belli oranda hata getirmiştir. Refrakter malzemesinin kimyasal reaksiyonları incelenerek aktivasyon enerjisinin tam olarak hesaplanması sonraki çalışmalarda sonuçlara hassasiyet getirecektir. Ayrıca cam fırını içerisindeki reaksiyonların tam olarak analiz edilerek belirlenmeside önemli faydalar sağlayacaktır.

Son olarak, refrakterde yapılacak diğer sayısal çalışmalarda su soğutmasında gözönüne alınması daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmasını sağlayacaktır. Bunun için öncelikle su soğutma boruları ve refrakter soğutmasında kullanılan hava-jetinin türbülans modellemesi yapılarak refrakterin dış kısmındaki bölgede ısı geçişi değişkenleri ve sıcaklıklar hesaplanabilir. Bu değerler kullanılarak su borularının refrakter ile temasta olan ortak noktalarında iletim ile olan ısı geçişi taşınım ile borudan çekilen ısıya eşitlenerek refrakter içerisindeki sıcaklık dağılımı hesaplanabilir. Ayrı iki bölge için kullanılan bu tür iterasyonla (süper iterasyon) değişkenlerin yeterli hassasiyet de hesaplanması mümkündür. Fakat su soğutmasının hesaba katılması ile probleme ait denklemler ve bilgisayar programının çok daha karmaşık hale geleceği aşîkardır.

KAYNAKLAR

- [1] GOULD, C.E., Solution of Refractory Blocks in Tank Wall of Glass Melting Surface, Society of Glass Technology, Vol. 33, pp. 5-18, 1949.
- [2] OHNANA, H., Present Status of Refractories for The Glass Industry, Taikabutsu Overseas, Vol. 1(1), pp. 80, 1981.
- [3] COOPER, A.R., Dissolution Kinetics in Glass Making, VI International Congress on Glass, pp. 217-229, Washington DC, 1962.
- [4] MCGEE, T.D., A Simplistic Introduction to The Problems of Refractory Corrosion, Ceramic and Science Proceedings Nov/Dec, pp. 1053-62, Iowa, 1981.
- [5] BUSBY, T.S. and ECCLES, J., A Study of Single Crystals of Corundum in Molten Glass, J. Glass Technology, Vol. 5, pp. 115-23, 1964.
- [6] BUSBY, T.S. and BARKER, J., Simulative Studies of Upward Drilling, J. The American Ceramic Society, Vol. 49(8), pp. 441-6, 1966.
- [7] COOPER, A.R. and KINGREY, W.D., Dissolution in Ceranic Systems: 1, Molecular Diffusion, Natural Convection and Forced Convection Studies of Sapphire Dissolution in Calcium Aluminum Silicate, J. The American Ceramic Society, Vol. 47(1), pp. 37-43, 1964.
- [8] HRMA, P., Dissolution of A Solid Body Governed by Surface Free Convection, Chemical Engineering Science, Vol. 25, pp. 1679-1688, 1970.
- [9] HRMA, P., Corrosion of Glass Furnace Sidewalls and Heat Losses, Silikaty, Vol. 24, pp. 97-110, 1980.
- [10] BLAU, H.H. and SMITH, C.D., Refractory Problems in Glass Manufacture, Bull. The American Ceramic Society, Vol. 29(1), pp. 6-9, 1950.
- [11] DAUDANS, J., Interface Temperature and Furnace Life, Journal of Verres et Refractories, Vol. 25(6), pp. 242-45, 1971.
- [12] DAUDANS, J., Influence of Cooling Fusion-Cast Refractories on The Temperature of The Inner Face and Resistance to Corrosion of The Block, Glastechnische Berichte, Vol. 45(10), pp. 433-38, 1972.

13
13000

- [13] BEGLEY, E.R., Critical Phenomena in The Use of Refractories in Contact with Glass, Glass, Vol. 55(7), pp. 335-40, 1978.
- [14] DAY, F. and AMBROSINE, J.P., Corrosion Resistance of Pure Alumina as A Glass Refractory, J. The American Ceramic Society, Vol. 34(5), pp. 160-164, 1951.
- [15] BUSBY, T.S., Progress of Glass Making Refractories, Glass Technology, Vol. 20(4), pp. 117-131, 1979.
- [16] COOPER, A.R., Kinetics of Refractory Corrosion, Ceram. Engineering and Science Proceedings, Vol. 2(11-12), pp. 1063-1089, 1981.
- [17] LONDEREE, J.W., Heat and Refractory Performance in Glass Tanks, The Glass Industry, Vol. 46(8), pp. 454-456, 1965.
- [18] SANDMEYER, K.H., American Ceramic Society Meeting, October 1966.
- [19] HRMA, P., BLAZEK, J. and PELETOVA, V., An Analysis of The Cooling of Glass Furnace Sidewalls, Glass Technology, Vol. 22(5), pp. 215-221, 1981.
- [20] KUIKEN, H.K., Boundary Layer Conditions in Free Convection, Journal of Engineering Mathematics, Vol. 2(1), pp. 95-105, 1968.
- [21] KAO, T.T., DOMOT, G.A., ELROD, H.G., Free Convection Along A Nonisothermal Vertical Flat Plate, J. Heat Transfer, Transactions of The ASME, Series C, Paper No. 75, pp. 72-78, Feb. 1977.
- [22] SCHLUNDER, E.U., KROTZCH, P. and HENNECKE, F.W., Gesetzmäßigkeiten der Wärme-und Stoffübertragung Bei der Prallströmung AUS Rund-und Schlitzdüsen, Chem. Ing.-Tech., Vol. 42, pp. 333, 1970.
- [23] Fused-Cast Products Catalogue of Sepr Firm, 1990.
- [24] GRANGER, K.C. and GARDON, R., Interaction of Radiation and Conduction in Glass, J. The American Ceramic Society, Vol. 52(10), pp. 548-553, 1969.

- [25] BREBBIA, C.A., CONNOR, J.J., Boundary Elements Fundamentals, Computational Mechanics Publications, 1987.
- [26] User Manuel for Laser Thermometer, Raytek Inc., 1992.
- [27] INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Second Edition, John Wiley and Sons Inc., 1985.



EK A

REFRAKTER DUVARININ KOROZYON PROFİLİNİN HESAPLANMASINDA KULLANILAN BİLGİSAYAR PROGRAMI

```
C CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC C C
C          CORRY.FOR C
C BU PROGRAM KAREKTERISTIK SICAKLIK HE=HE(X).K(T) C
C VE T=T(X) DEGERLERINE BAGLI OLARAK BLOKTAĞI ASINMA PROFILINI, C
C SONLU FARKLAR YAKLASIMINI ITERATIF METODLA BERABER C
C KULLANARAK HESAPLANMAKTADIR C
C C
C HAVA UFLEME HIZI(V)=42.0 M/S, REFRAKTER BOYU(L)=1250MM C
C REFRAKTER BASLANGIC KALINLIGI(Y0)=180 MM C
C C
C CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC C
C IMPLICIT REAL*(A-H,O-Z) C
C   DIMENSION Y(19),TINT(19),T(19),U1(19),U(19),EPS1(19),YY(19) C
C   *.EPS2(19),TINT2(19),HE(19),CK(19) C
C OPEN(I,FILE='G42S773.OUT',STATUS='NEW') C
C RELAKSASYON KATSAYISI C
C REL.=0.95 C
C KAREKTERISTIK SICAKLIK (2.00E+4) ALINDI C
C KLL=-13 C
C REFRakter MALZEMESININ ISI ILETİM KATSAYISININ C
C SICA KLİGA BAĞIMLILİK CARPANLARI C
C AK:=6.10257 C
C BK:=-1.97921 C
C CC=0.425612 C
C DTT ZAMANDAKI ARTIRIMI C
C GOSTERMEKTEDİR C
C DT=0.0 C
C DTT=0.25 C
C H1 SIVI CAM İLE REFRAKTER ARASINDAKI C
C TAŞINIM KATSAYISIDIR C
C H1=815. C
C TETC=2.0E+4 C
C CMM=4./3. C
C TET20=CMM*TETC C
C TET2F0=TET20 C
C REFRakter ASINMASI HESABINDA KULLANILAN C
C (%) HASSASIYET DEĞERİ C
C HAS=0.0001 C
C REFRakter ASINMAYA BASLAMADAN ONCEKI C
C KALINLIGI (Y0) C
C Y0=0.18 C
C Y1=0.25
```

```

C
  TJ0=0.0
  TF=1773.0
  DO 343 I=1,KLL
    CK(I)=5.5
343 CONTINUE
  CL=1.2
C
C  REFRAKTERIN DIS YUZEYİNDEKİ ISI TAŞINIM
C  KATSAYILARI
C
  HE(1)=165.0
  HE(2)=103.0
  HE(3)=1.0E-5
  HE(4)=1.0E-5
  HE(5)=1.0E-5
  HE(6)=1.0E-5
  HE(7)=1.0E-5
  HE(8)=1.0E-5
  HE(9)=1.0E-5
  HE(10)=1.0E-5
  HE(11)=1.0E-5
  HE(12)=1.0E-5
  HE(13)=1.0E-5

C
C  DIS ORTAM HAVA SICAKLIĞI
C
  TA=323.0

  IT=0
C
C  DUVAR BOYUNCA OLAN TOPLAM
C  ISI GEÇİŞ KATSAYISI (U)
C
  DO 10 I=1,KLL
    Y(I)=Y0
    IF(I.GT.2) Y(I)=Y1
    YY(I)=Y0
    IF(I.GT.2) Y(I)=Y1
    TINT(I)=Y0
    IF(I.GT.2) TINT(I)=Y1
    T(I)=0.0
    U(I)=0.0
    U1(I)=0.0
10 CONTINUE
C
  A=0.0
  N=40
  DO 47 LJ=1,19000
    DO 17 LL=1,KLL
      TINT2(LL)=0.0
      U(LL)=10.0
17 YY(LJ)=TINT(LL)
      DT=LJ*DTT
      PRINT*,'DT=',DT
111 IT=IT+1
      IF(IT.EQ.1) GO TO 13
      DO 76 KT=1,KLL
        Y(KT)=(1.0-REL)*TINT(KT)+(REL)*Y(KT)
        U(KT)=(1.0-REL)*U1(KT)+(REL)*U(KT)
76 CONTINUE
13 DO 75 KK=1,KLL
      B=(KK-1.0)*0.1
C
C  REFRAKTER VE SIVI CAM'A AIT MALZEME ÖZELLİKLERİ
C
  TET1=((1.0+SN)*2.0E+4)*2.383
  TET1F=((1.0+SN)*2.0E+4)*0.883
  TET2=((1.0+SN)*2.0E+4)*2.03
  TET2F=((1.0+SN)*2.0E+4)*3.53
  SK1=2.47536E+5

```

```

SK2=6.4E-7
IF(KK.EQ.1) TET1=((1.0+SN)*2.0E+4)*3.0
IF(KK.EQ.1) TET1F=0.0
IF(KK.EQ.1) TET2=0.0
IF(KK.EQ.1) TET2F=0.0
IF(KK.EQ.1) SK1=1.97E+13
IF(KK.EQ.1) SK2=0.0
C
IF(KK.EQ.1) TJ0=-SK1*EXP(-TET1/TF)
SO=T(KK)/310.0
CK(KK)=AK+BK*SO+CC*(SO**2)
CALL TRAP(A,B,Y,N,KK,H1,SK1,SK2,CK,TF,HE,TET1,TET2,TET1F,
*TET2F,TA,EST)
CALL F1(B,Y,KK,H1,SK1,SK2,CK,TF,HE,TET1,TET2,TET1F,
*TET2F,TA,F111)
CALL TTM(B,TM)
T(KK)=TM-((TM-TA)*(U(KK)/H1))
TINT1=(1.0+EST)**(-0.25)
IF(KK.GT.1) GO TO 888
IF(KK.EQ.1) TINT(KK)=-TJ0*DTT*EXP((-TET1/T(KK))+(TET1/TF))+YY(KK)
GO TO 775
888 IF(LJ.EQ.1.0E+6) CALL TRAP0(A,B,Y,N,KK,H1,CK,TF,HE,TET20,
*TET2F0,TA,EST0)
IF(LJ.EQ.1.0E+6) TINT(KK)=-TJ0*DTT*EST0+YY(KK)
IF(LJ.EQ.1.0E+6) GO TO 775
TINT2(KK)=-(F111*TINT1)
TINT(KK)=DTT*TINT2(KK)+YY(KK)
775 U1(KK)=((1/H1)+(TINT(KK)/CK(KK))+(1/HE(KK)))**(-1.)
75 CONTINUE
DO 50 JJ=1,KLL
EPS1(JJ)=ABS((U(JJ)-U1(JJ))/U1(JJ))
EPS2(JJ)=ABS((Y(JJ)-TINT(JJ))/TINT(JJ))
IF(EPS1(JJ).GT.HAS) GO TO 99
IF(EPS2(JJ).GT.HAS) GO TO 99
50 CONTINUE
MD=LJ/6
LD=MD*6
IF(LD.NE.LJ) GO TO 47
WRITE(1,*)'DT=,DT'
DO 80 LK=1,KLL
IF(Y(LK).LE.0.0) Y(LK)=Y0
PRINT*,Y=,Y(LK)
WRITE(1,237) Y(LK)
80 CONTINUE
237 FORMAT(1X,F9.6)
WRITE(1,*)
GO TO 47
99 GO TO 111
47 CONTINUE
STOP
END
C
SUBROUTINE TRAP(A,B,Y,N,KK,H1,SK1,SK2,CK,TF,HE,TET1,TET2,TET1F,
*TET2F,TA,E)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION Y(19),TM(19),TINT(19),T(19),U1(19),U(19),HE(19),CK(19)
H=(B-A)/N
CALL F2(A,Y,KK,H1,SK1,SK2,CK,TF,HE,TET1,TET2,TET1F,
*TET2F,TA,F2A)
CALL F2(B,Y,KK,H1,SK1,SK2,CK,TF,HE,TET1,TET2,TET1F,
*TET2F,TA,F2B)
E=(F2A+F2B)/2.0
IF(N.GT.1) THEN
X=A
DO 1 I=1,N-1
X=X+H
CALL F2(X,Y,KK,H1,SK1,SK2,CK,TF,HE,TET1,TET2,TET1F,
*TET2F,TA,F2X)
E=E+F2X
1 CONTINUE
END IF
E=(E*H)

```

```

RETURN
END

```

```

C
SUBROUTINE F2(X,Y,KK,H1,SK1,SK2,CK,TF,HE,TET1,TET2,TET1F,
*TET2F,TA,F22)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION Y(19),TINT(19),T(19),U1(19),U(19),HE(19),CK(19)
U(KK)=((1./H1)+(Y(KK)/CK(KK))+(1./HE(KK)))*(-1.)
CALL TTM(X,TM)
T(KK)=TM-((TM-TA)*(U(KK)/H1))
F22=SK2*EXP((-TET2/T(KK))+(TET2F/TF))
RETURN
END

```

```

C
SUBROUTINE TTM(X,STM)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
STM=1773.0-512.189*X+2415.44*(X**2)-9129.03*(X**3)+19037.1*(X**4)-
#17858.6*(X**5)-1448.71*(X**6)+17471.0*(X**7)-13478.4*(X**8)+
#3374.12*(X**9)
RETURN
END

```

```

C
SUBROUTINE F1(X,Y,KK,H1,SK1,SK2,CK,TF,HE,TET1,TET2,TET1F,
*TET2F,TA,F111)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION Y(19),TINT(19),T(19),U1(19),U(19),HE(19),CK(19)
U(KK)=((1./H1)+(Y(KK)/CK(KK))+(1./HE(KK)))*(-1.)
CALL TTM(X,TM)
T(KK)=TM-((TM-TA)*(U(KK)/H1))
F111=SK1*EXP((-TET1/T(KK))+(TET1F/TF))
RETURN
END

```

```

C
SUBROUTINE TRAP0(A,B,Y,N,KK,H1,CK,TF,HE,TET20,TET2F0,TA,E0)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION Y(19),TM(19),T(19),U(19),HE(19),CK(19)
H=(B-A)/N
CALL F20(A,Y,KK,H1,CK,TF,HE,TET20,TET2F0,TA,F2A0)
CALL F20(B,Y,KK,H1,CK,TF,HE,TET20,TET2F0,TA,F2B0)
E0=(F2A0+F2B0)/2.0
IF(N.GT.1) THEN
X=A
DO 11 I=1,N-1
X=X+H
CALL F20(X,Y,KK,H1,CK,TF,HE,TET20,TET2F0,TA,F2X0)
E0=E0+F2X0
11 CONTINUE
END IF
E0=E0*H
CALL F20(B,Y,KK,H1,CK,TF,HE,TET20,TET2F0,TA,F2B0)
E0=F2B0*((1.0+(1.0/B)*E0)**(-0.25))
RETURN
END

```

```

C
SUBROUTINE F20(X,Y,KK,H1,CK,TF,HE,TET20,TET2F0,TA,F220)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION Y(19),T(19),U(19),HE(19),CK(19)
U(KK)=((1./H1)+(Y(KK)/CK(KK))+(1./HE(KK)))*(-1.)
CALL TTM(X,TM)
T(KK)=TM-((TM-TA)*(U(KK)/H1))
F220=EXP((-TET20/T(KK))+(TET2F0/TF))
RETURN
END

```



```

CFF=CF
C
C CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C  IZOLASYONLU NOKTA SAYISI C
  IZ=26
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

C  REFRAKTER UZERINDE TANIMLANMIS
C  KOORDINATLAR
C
  D2=1.0
C
  E=1.2
C
  D=0.14
C
  D1=1.22
  H1=0.0
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C  IZOLASYONUN BITTIGI NOKTA C
  KLL=99
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
  H=0.01

C  RELAKSASYON KATSAYISI
  V=0.95
C
  KK=0.0
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C  REFRAKTER MALZEMESI ISI ILETIM KATSAYISININ C
C  SICAKLIGA BAGIMLILIK CARPANLARI C
  A=6.10257
  B=-1.97921
  C=0.425612
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C  REFRAKTER KALINLIGI
  LL=(0.24/H)+1
C
C  HAVA JETININ UFLENDIGI KISIMDAKI
C  REFRAKTER KALINLIGI
C
  LL1=(0.18/H)+1
C
  PRINT*,LL=',LL
  PRINT*,LL=',KALINLIK=',LL*H,LL
C
C  REFRAKTER BOYU
  MM=(1.25/H)+1
C
  PRINT*,MM=',MM
  PRINT*,MM=',UZUNLUK=',MM*H,MM
  PRINT*,LL=',LL
  PRINT*,MM=',MM
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C  DIS HAVA SICAKLIGI (K) C
  TH=323
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
  DO 71 I=1,LL
    IF(I.GT.LL1) MM=KLL
  DO 71 J=1,MM
    Y(I)=(I-1.)*H
    X(J)=(J-1.)*H
  71 CONTINUE
C
  MM=(1.25/H)+1
  DO 12 I=1,LL
    IF(I.GT.LL1) MM=KLL
  DO 12 J=1,MM
    T(I,J)=2.0
    TET(I,J)=2.0
    TD(I,J)=1.

```

```

TED(I,J)=1.
TET(1,J)=0.36894*X(J)+5.04643
IF(TET(1,J).GE.5.48916) TET(1,J)=5.48916
TOR1(I,J)=1.0
TOR2(I,J)=1.0
TOR3(I,J)=1.0
TOR4(I,J)=1.0
OR1(I,J)=1.0
OR2(I,J)=1.0
OR3(I,J)=1.0
OR4(I,J)=1.0
12 CONTINUE
C
MM=(1.25/H)+1
WRITE(6,43)
43 FORMAT(7X,'Y',12X,'X',8X,'TEMPERATURE',5X,'EPS',/)
DO 88 I=2,LL
IF(I.GT.LL1) MM=KLL
DO 88 J=2,MM
XX2(J)=((E-D2)*Y(I)/D)+D2
XX1(J)=((E-D1)*Y(I)/D)+D1
YY2(I)=(X(J)-D2)*D/(E-D2)
IF(X(J).GT.E) YY2(I)=0.0
IF(X(J).LT.D2) YY2(I)=0.0
IF(Y(I).GT.D) GO TO 55
C
YY1(I)=(X(J)-D1)*D/(E-D1)
IF(X(J).GT.D1) YY1(I)=0.0
IF(X(J).LT.E) YY1(I)=0.0
C
IF((Y(I)-YY2(I)).LE.0.001) GO TO 37
IF((Y(I)-YY1(I)).LE.0.001) GO TO 37
IF(X(J).GE.D2.AND.X(J).LE.E) GO TO 65
IF(X(J).GT.E) GO TO 67
GO TO 88
65 IF(X(J).LT.XX2(J)) TOR1(I,J)=ABS((Y(I)-YY2(I))/H)
IF(X(J).LT.XX1(J)) TOR2(I,J)=ABS((XX2(J)-X(J))/H)
IF(TOR1(I,J).LT.1.0) OR1(I,J)=TOR1(I,J)
IF(TOR1(I,J).LT.1.0) TET(I-1,J)=0.36894*X(J)+5.04643
IF(TET(I-1,J).GE.5.48916) TET(I-1,J)=5.48916
IF(TOR2(I,J).LT.1.0) OR2(I,J)=TOR2(I,J)
IF(TOR2(I,J).LT.1.0) TET(I,J+1)=0.36894*X(J)+5.04643
IF(TET(I,J+1).GE.5.48916) TET(I,J+1)=5.48916
GO TO 88
C
67 IF(X(J).GT.XX1(J)) TOR4(I,J)=ABS((X(J)-XX1(J))/H)
IF(X(J).GT.XX2(J)) TOR1(I,J)=ABS((Y(I)-YY1(I))/H)
IF(TOR1(I,J).LT.1.0) OR1(I,J)=TOR1(I,J)
IF(TOR1(I,J).LT.1.0) TET(I-1,J)=0.36894*X(J)+5.04643
IF(TET(I-1,J).GE.5.48916) TET(I-1,J)=5.48916
IF(TOR4(I,J).LT.1.0) OR4(I,J)=TOR4(I,J)
IF(TOR4(I,J).LT.1.0) TET(I,J-1)=0.36894*X(J)+5.04643
IF(TET(I,J-1).GE.5.48916) TET(I,J-1)=5.48916
GO TO 88
55 TOR1(I,J)=(Y(I)-YY2(I))/H
IF(TOR1(I,J).LT.1.0) OR1(I,J)=TOR1(I,J)
IF(TOR1(I,J).LT.1.0) TET(I-1,J)=0.36894*X(J)+5.04643
IF(TET(I-1,J).GE.5.48916) TET(I-1,J)=5.48916
GO TO 88
37 TET(I,J)=0.36894*X(J)+5.04643
IF(TET(I,J).GE.5.48916) TET(I,J)=5.48916
88 CONTINUE
C
C ITERASYON SAYISI KK
C
90 KK=KK+1
PRINT*,'KK=',KK
SSS=0.0
VHH=0.0
MM=(1.25/H)+1
DO 13 I=1,LL
IF(I.GT.LL1) MM=KLL

```

C
C SICAKLIK LARA RELAKSASYON ISLEMININ UYGULANMASI
C

```
DO 13 J=1,MM
T(I,J)=(1-V)*TET(I,J)+V*T(I,J)
13 TD(I,J)=(1-V)*TED(I,J)+V*TD(I,J)
MM=(1.25/H)+1
DO 80 I 2,LL
IF(I.GT.1.LL) MM=KLL
DO 80 J=2,MM-1
TT=1.0
IF(OR1(I,J).GT.TT) OR1(I,J)=1.0
IF(OR2(I,J).GT.TT) OR2(I,J)=1.0
IF(OR3(I,J).GT.TT) OR3(I,J)=1.0
IF(OR3(I,J).GT.TT) OR4(I,J)=1.0
XX2(J)=((E-D2)*Y(I)/D)+D2
XX1(J)=((E-D1)*Y(I)/D)+D1
U(I,J)=1.0/(OR1(I,J)*OR3(I,J))
UU(I,J)=1.0/(OR2(I,J)*OR4(I,J))
UUU(I,J)=U(I,J)+UU(I,J)
U1(I,J)=OR1(I,J)*(OR1(I,J)+OR3(I,J))
U2(I,J)=OR2(I,J)*(OR2(I,J)+OR4(I,J))
U3(I,J)=OR3(I,J)*(OR1(I,J)+OR3(I,J))
U4(I,J)=OR4(I,J)*(OR2(I,J)+OR4(I,J))
UUUU(I,J)=1.0/UUU(I,J)
```

C
IF(I.EQ.LL1) GO TO 35
IF(I.GT.LL1) GO TO 1111

C
TK=A+B*T(I,J)+C*(T(I,J)**2)
IF(T(I,J).GE.5) TK=5.5
IF(T(I,J).LT.0.6) TK=5.0
TET(I,J)=(UUUU(I,J))*
&((T(I-1,J)/U1(I,J))+(T(I,J+1)/U2(I,J))+(T(I+1,J)/U3(I,J))
&+(T(I,J-1)/U4(I,J)))
IF(OR1(I,J).LT.1.0) TET(I-1,J)=0.36894*X(J)+5.04643
IF(TET(I-1,J).GE.5.48916) TET(I-1,J)=5.48916
IF(OR2(I,J).LT.1.0) TET(I,J+1)=0.36894*X(J)+5.04643
IF(TET(I,J+1).GE.5.48916) TET(I,J+1)=5.48916
IF(OR4(I,J).LT.1.0) TET(I,J-1)=0.36894*X(J)+5.04643
IF(TET(I,J-1).GE.5.48916) TET(I,J-1)=5.48916
IF(Y(I).LE.D) GO TO 111
GO TO 50
111 IF(X(J).GE.D2.AND.X(J).LE.E) GO TO 32
IF(X(J).GT.E.AND.X(J).LE.D1) GO TO 33
GO TO 50
32 IF(X(J).GE.XX2(J)) TET(I,J)=0.36894*X(J)+5.04643
IF(TET(I,J).GE.5.48916) TET(I,J)=5.48916
GO TO 50
33 IF(XX1(J).GE.X(J)) TET(I,J)=0.36894*X(J)+5.04643
IF(TET(I,J).GE.5.48916) TET(I,J)=5.48916

C
50 IF(J.EQ.2) TET(I,J-1)=TET(I,J)
&+(H/TK*SIG*EPI*(TH**3))*(1.-T(I,J-1)**4)
IF(J.EQ.MM-1) TET(I,J+1)=TET(I,J)
GO TO 80
35 TJJ=ABS(MM-(J+6))*H
LLL=MM-(J+6)
SSS=TJJ/SD
IF(SSS.LE.3.5.AND.SSS.GT.1.0) TJJ=3.5*SD
IF(SSS.GE.25.0) TJJ=25.0*SD
IF(J.GT.MM-IZ.AND.J.LT.MM-6) CALL NUSSELT(TJJ,VHH)
IF(J.GE.MM-6) CALL NUSSELT(TJJ,VHH)
IF(SSS.LE.1.2) TJJ=3.5*SD
IF(SSS.LE.1.2) CALL NUSSELT(TJJ,VHH)
IF(SSS.LE.1.2) VHH=1.30*VHH
IF(LLLEQ.0) TJJ=3.5*SD
IF(LLLEQ.0) CALL NUSSELT(TJJ,VHH)
IF(LLLEQ.0) VHH=1.60*VHH
TK=A+B*T(I,J)+C*(T(I,J)**2)
IF(T(I,J).GE.5.0) TK=5.5
IF(T(I,J).LT.0.6) TK=5.0

```

C
BT=T(I,J)+(H/TK)*(SIG*EP*(TH**3)+VHH-VHH*T(I,J)
&-SIG*EP*(TH**3)*(T(I,J)**4))
C
TET(I,J)=(UUUU(I,J)*((T(I-1,J)/U1(I,J))+(T(I,J+1)/U2(I,J))
&+(BT/U3(I,J))+(T(I,J-1)/U4(I,J)))
C
IF(J.EQ.MM-1) TET(I,J+1)=TET(I,J)
C
IF(J.EQ.2) TET(I,J-1)=TET(I,J)
&+(H*SIG*EP1*(TH**3)/TK)*(1.-T(I,J-1)**4)
GO TO 80
1111 IF(I.EQ.LL) GO TO 1112
TET(I,J)=(UUUU(I,J)*((T(I-1,J)/U1(I,J))+(T(I,J+1)/U2(I,J))
&+(T(I+1,J)/U3(I,J))+(T(I,J-1)/U4(I,J)))
C
C
IF(J.EQ.MM-1) TET(I,J+1)=TET(I,J)
&+(H*SIG*EP1*(TH**3)/TK)*(1.-T(I,J+1)**4)
C
IF(J.EQ.2) TET(I,J-1)=TET(I,J)
&+(H*SIG*EP1*(TH**3)/TK)*(1.-T(I,J-1)**4)
GO TO 80
C
1112 TED(I,J-1)=T(I,J-1)+SIG*EP1*(TH**3)*CFF*(1.0-TD(I,J-1)**4)
TET(I,J)=TET(I-1,J)
&+(H*SIG*EP1*(TH**3)/TK)*(1.-T(I,J-1)**4)

IF(J.LE.99) TET(I,J)=TET(I-1,J)
&+(H*SIG*EP1*(TH**3)/TK)*(1.-TED(I,J-1)**4)
C PRINT*,TED(I,J),TED(I,J),I,J
C PRINT*,TET(I,J),TET(I,J),I,J
C
IF(J.EQ.MM-1) TET(I,J+1)=TET(I,J)
C
IF(J.EQ.2) TET(I,J-1)=TET(I,J)
&+(H*SIG*EP1*(TH**3)/TK)*(1.-T(I,J-1)**4)
C
80 CONTINUE
MM=(1.25/H)+1
DO 11 II=2,LL
IF(II.GT.1.LL) MM=KLL
DO 11 JJ=2,MM
EPS(II,JJ)=ABS((TET(II,JJ)-T(II,JJ))/TET(II,JJ))
EPS1(II,JJ)=ABS((TD(II,JJ)-TED(II,JJ))/TED(II,JJ))
IF(EPS(II,JJ).GE.HAS) GO TO 19
11 CONTINUE
GO TO 77
19 GO TO 90
77 MM=(1.25/H)+1
DO 23 M=1,LL
IF(M.GT.LL1) MM=KLL
DO 23 L=1,MM
23 WRITE(6,99) X(L),Y(M),TET(M,L),TED(M,L)
99 FORMAT(2X,F10.5,2X,F10.5,2X,F10.5,2X,F10.5)
C
C
C
C C C C C C C C C C
C C REFRAKTERDE DEPOLANAN C
C C C
C C ISI MIKATARININ HESABI C
C C C
C C C C C C C C C C C C C C C C
C
C
C
MM=(1.25/H)+1
LSAY=0.0
TTOP=0.0
C
DO 250 I=1,LL

```

```

IF(I.GT.LL1) MM=KLL
DO 250 J=1,MM
C
C   REFRAKTER ÖZGÜL ISISININ SICAKLIĞA BAĞIMLILIĞI
CP=0.856881+0.000165138*(TH*TET(I,J)-273)
C
TOP(I,J)=CP*((TH*TET(I,J)-273)-(TH-273))
LSAY=LSAY+1
TTOP=TTOP+TOP(I,J)
250 CONTINUE
QI=(1.0/LSAY)*TTOP
WRITE(6,789) QI
789 FORMAT(2X,F20.9)
C
C
PRINT*, '
PRINT*, 'LSAY=', LSAY
STOP
END
C
SUBROUTINE NUSSELT(TJJ,VHH)
R=TJJ
C   HAVANIN 323 K DEKİ ISI İLETİM KATSAYISI
TKH=28.0E-3
C   HAVANIN 323 K DEKİ PRANDTL SAYISI
PR=0.72
C
B=0.022
C
SD=2.0*B
C
C   NOZZLE'İN REFRAKTER DUVARINA OLAN
C   MESAFESİ Z(M)
C
Z=0.08

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   HAVA UFLAME HIZI (M/S)      C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
V=42.0
C   HAVANIN 323 K DEKİ VIZKOSİTE DEĞERİ
VI=18.0E-6
C
C   REYNOLDS SAYISI
C
RE=(V*SD)/VI
SM=0.695-((R/SD)+(Z/SD)**1.33+3.06)**(-1.0)
VNU=PR**0.42*(1.53/((R/SD)+(Z/SD)+1.39))*(RE**SM)
VHH=TKH*VNU/SD
RETURN
END

```

EK C

SINIR ELEMANLAR METODU İLE REFRAKTER İÇİNDEKİ SICAKLIK DAĞILIMINI HESAPLAYAN BİLGİSAYAR PROGRAMI VE DATA FİLE

```
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC CC
C      BEM2.FOR                                                                C
C                                                                              C
C      BU PROGRAM ITERASYON YONTEMI İLE BOUNDARY ELEMENT METHOD'UNU'        C
C                                                                              C
C      BIRLIKTE KULLANARAK EGRİSEL YUZEYE SAHIP                             C
C                                                                              C
C      REFRAKTER MALZEMESİNDEKİ                                             C
C                                                                              C
C      SICAKLIKLARI HESAPLAMAKTADIR.                                         C
C                                                                              C
C                                                                              C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC CC
common/one/nn,ne,l,x(200),y(200),u(200),d(200),le(200),led(200)
common/two/icon(200,2),kode(200),q(200),alpha(200),td(200)
common/thr/poei(4),fdep(4)
common/five/xy(200),a(200,200),he(50)
common/q/qe(200)
integer icon
real le,lj
c
c      OPEN(UNIT=5,FILE='BEM2R.DAT',STATUS='OLD')
c      OPEN(UNIT=6,FILE='BEM2R.OUT',STATUS='OLD')
c
c      REFRAKTER YUZEYİNE AIT ISI YAYMA KATSAYISI
c
c      eps=0.95
c
c      İZOLASYON MALZEMESİNE AIT ISI YAYMA KATSAYISI
c
c      eps1=0.80
c
c      RELAKSASYON KATSAYISI
c      v=0.95
c
c      tss=0.0
c
c      REFRAKTER MALZEMESİNİN ISI İLETİM KATSAYISININ
c      SICAKLIKLA OLAN DEĞİŞİMİNE AIT KATSAYILAR
c
c      aa=6.10257
c      bb=-1.97921
c      cc=0.425612
c
c      STEFFAN-BOLTZMAN SABİTİ
c
c      sig=0.0000000496
c
c      DIS ORTAM HAVA SICAKLIĞI ( K )
c
c      th=323.0
c
c      HASSASİYET DEĞERİ
c
c      has=0.00001
c
c      İZOLASYON MALZEMESİ KALINLIKLARI
c
c      sc=0.15
c      st=0.01
```

```

c
c  IZOLASYON MALZEMESİ ISI İLETİM KATSAYILARI
c
    ck=0.045
    ct=0.19
c
c  IZOLASYON MALZEMESİ TOPLAM İLETİM KATSAYISI
c  ctf=(sc/ck)+(st/ct)
c
c
    do 372 jj=29.48
    td(jj)=1.0
    * ted(jj)=1.0
372  continue

c
c  REFRAKTER ÜZERİNDEKİ NOKTALARDA HAVA JETİNE
c  ALT ISI TAŞINIM KATSAYISI
c
c
    he(18)=134.0
    he(19)=134.0
    he(20)=165.0
    he(21)=134.0
    he(22)=103.0
    he(23)=102.5
    he(24)=102.5
c
c  ITERASYON BAŞLANGICINDA ISI AKISI
c  DEĞERLERİNE ATANAN DEĞERLER
c
c
    qe(18)=0.0
    qe(19)=0.0
    qe(20)=0.0
    qe(21)=0.0
    qe(22)=0.0
    qe(23)=0.0
    qe(24)=0.0
c
    call input2
c
777  tss=tss+1.0
    print*,ehs=.ehs,kk
    if(tss.gt.1000) go to 190
    call allaf2
    call assem2
    call rhsvec
    do 5 i=1,nn
    xy(i)=xy(i)+d(i)
5  continue
    call solver
    do 76 i=1,nn
    kk=kode(i)
    if(kk.eq.0.or.kk.eq.2) then
    u(i)=xy(i)
    else
    q(i)=xy(i)
    end if
76  continue
    print*,iter=',tss
c
    do 123 ll=18.48
    qe(ll)=q(ll)
123  continue
c
    do 314 jj=18.28
    tk=aa+bb*u(jj)+cc*(u(jj)**2)
    if(u(jj).ge.5.0) tk=5.5
    if(u(jj).lt.0.6) tk=5.0
    q(jj)=(sig)*(eps/tk)*(th**3)*(1.0-u(jj)**4)
    & +(he(jj)/tk)*(1.0-u(jj))

```

```

      q(jj)=(1.-v)*q(jj)+v*qe(jj)
314 continue
c
      do 315 jj=29,44
      td(jj)=(1.-v)*ted(jj)+v*td(jj)
      tk=aa+hb*u(jj)+cc*(u(jj)**2)
      if(u(jj).ge.5.0) tk=5.5
      if(u(jj).lt.0.6) tk=5.0
      ted(jj)=u(jj)+sig*eps1*(th**3)*cff*(1.0-td(jj)**4)
      q(jj)=(sig)*(eps1/tk)*(th**3)*(1.0-td(jj)**4)
      q(jj)=(1.-v)*q(jj)+v*qe(jj)
315 continue
c
      do 316 jj=45,48
      tk=aa+hb*u(jj)+cc*(u(jj)**2)
      if(u(jj).ge.5.0) tk=5.5
      if(u(jj).lt.0.6) tk=5.0
      q(jj)=(sig)*(eps1/tk)*(th**3)*(1.0-u(jj)**4)
      q(jj)=(1.-v)*q(jj)+v*qe(jj)
316 continue
c
c
c   REFRakter UZERINDEKI KOSE NOKTALARDAKI SICAKLIK DEGERLERI
c   YAKIN NOKTALARDAKI SICAKLIK DEGERLERININ ORTALAMASI ALINARAK
c   HESAPLANMAKTADIR
c
      u(18)=(u(19)+u(17))/2.
      u(24)=(u(25)+u(23))/2.
      u(28)=(u(29)+u(27))/2.
      u(44)=(u(43)+u(45))/2.
      if(tss.eq.1.0) go to 313
c
      do 124 kk=18,48
      ehs=abs((q(kk)-qe(kk))/q(kk))
      if(ehs.gt.HAS) go to 313
124 continue
      go to 190
313 do 191 ll=29,44
      print*,ted=,ted(ll),ll
191 continue
      go to 777
190 continue
      call interm
c
      write(6,734)
734 format(2X,'TED',2X,'JJ')
      do 891 ii=29,44
      write(6,975) ted(ii),ii
891 continue
975 format(2x,f10.6,2x,i3)
c
      call output
      stop
      end
c
c
c   subroutine input2
      common/one/nn,ne,l,x(200),y(200),u(200),d(200),le(200)
      common/two/icon(200,2),kode(200),q(200),alpha(200)
      common/thr/poei(4),fdep(4)
      common/five/xy(200),a(200,200),he(50)
      common//ni
      common/cell/nci,mkj(200,3),ww(7),cp(7,3),da(200),const,np1
      integer icon
      real le,lj,z
      ni=4
      read(5,1234) nn,ne,l
1234 format(3i4)
      do 1007 i=1,nn
      icon(i,1)=i
      icon(i,2)=i+1
1007 continue

```

```

      icon(nn,2)=1
      do 1008 i= nn+1,nn+1
        kode(i)=0
1008      continue
        do 2 i=1,nn+1
          read(5,3) x(i),y(i)
          3      format(2f13.6)
          2      continue
          do 4 i=1,nn
            read(5,5) kode(i),val
            5      format(i3,f11.5)
            u(i)=0.0
            if (kode(i).eq.1) u(i)=val
            q(i)=0.0
            if (kode(i).eq.2) q(i)=val
          4      continue
          write(6,8) nn
          8      format('No. of boundary nodes = ',i3/)
          write(6,9) ne
          9      format('No. of boundary elements = ',i3/)
          write(6,10) l
          10      format('No. of internal nodes = ',i3/)
          write(6,11)
          11      format(' Data for boundary nodes:.....')
          write(6,12)
          12      format(' Node X      Y      Type U      Q ')
          write(6,1012) (i,x(i),y(i),kode(i),u(i),q(i),i=1,nn)
1012      format(i3,2x,2f10.6,i3,f8.3,2x,f8.3)
          write(6,1187)
1187      format('Coordinates of internal nodes:.....')
          write(6,1288)
1288      format(' Node X      Y ')
          write(6,1112) (i,x(i),y(i),i=nn+1,nn+1)
1112      format(i3,2f10.6)
          write(6,6)
          6      format('Element data:.....')
          write(6,7)
          7      format(' No Node 1 Node 2      Length')
          do 31 k=1,ne
            le(k)=sqrt((x(icon(k,2))-x(icon(k,1)))**2+
            1      (y(icon(k,2))-y(icon(k,1)))**2)
            write(6,48) k,icon(k,1),icon(k,2),le(k)
          48      format(3i6,f16.6)
          31      continue
          return
          end
c
c
c      block data
      common/thr/poei(4),fdep(4)
      data poei/0.86113131,-0.86113131,0.31998104,-0.31998104/
      data fdep/0.34785485,0.34785485,0.65214515,0.65214515/
      end
c
c
c
c
c      subroutine alfaf2
      common/one/nn,ne,l,x(200),y(200),u(200),d(200),le(200)
      common/two/icon(200,2),kode(200),q(200),alpha(200)
      common/thr/poei(4),fdep(4)
      common/five/b(200),f(200,200),he(50)
      integer icon
      real le,lj
      nh=nn
      nn=nn+1
      do 5 i=1,nn
        xi=x(i)
        yi=y(i)
c
        b(i)=0.0

```

```

do 2 j=1,nn
  xj=x(i)
  yj=y(i)
  r=sqrt((xi-xj)**2+(yi-yj)**2)
  f(i,j)=1+r
2   continue
5   continue

call solver
do 3 i=1,nn
  alpha(i)=h(i)
  h(i)=0.
  do 3 j=1,nn
    f(i,j)=0.
3   continue
nn=nh
return
end

c
c
c
c

subroutine assem2
common/one/nn,ne,l,x(200),y(200),u(200),d(200),le(200)
common/two/icon(200,2),kode(200),q(200),alpha(200)
common/thr/poei(4),fdep(4)
common/five/xy(200),a(200,200),he(50)
common/q/qe(200)
common//ni
common/drm/hh(200,200),gg(200,400)
integer icon
real le,lj
pi=3.131592654
do 1 j1=1,nn+1
  xi=x(j1)
  yi=y(j1)
  xy(j1)=0.
  do 21 j=1,nn
    hh(j1,j)=0.
21   a(j1,j)=0.
    cc=0.
    do 2 j2=1,ne
      lj=le(j2)
      n1=icon(j2,1)
      n2=icon(j2,2)
      x1=x(n1)
      x2=x(n2)
      y1=y(n1)
      y2=y(n2)
      h1=0
      h2=0
      g1=0
      g2=0
      if((j1.eq.n1).and.(j1.eq.n2)) goto 4
      do 3 j3=1,ni
        e=poei(j3)
        w=fdep(j3)
        xx=x1+(1.+e)*(x2-x1)/2.
        yy=y1+(1.+e)*(y2-y1)/2.
        r=sqrt((xi-xx)**2+(yi-yy)**2)
        pp=((xi-xx)*(y1-y2)+(yi-yy)*(x2-x1))/(r*r*4.*pi)*w
        h1=h1+(1.-e)*pp/2.0
        h2=h2+(1.+e)*pp/2.0
        pp=alog(1./r)/(4.*pi)*lj*w
        g1=g1+(1.-e)*pp/2.0
        g2=g2+(1.+e)*pp/2.0
3       continue
      cc=cc-h1-h2
4     continue
      ge=lj*(3./2.-alog(lj))/(4.*pi)
      if(n1.eq.j1) g1=ge
      if(n2.eq.j1) g2=ge
      hh(j1,n1)=hh(j1,n1)+h1

```

```

hh(j1,n2)=hh(j1,n2)+h2
gg(j1,2*j2-1)=g1
gg(j1,2*j2)=g2
kk=kode(n1)
if(kk.eq.0.or.kk.eq.2) then
xy(j1)=xy(j1)+q(n1)*g1
a(j1,n1)=a(j1,n1)+h1
else
xy(j1)=xy(j1)-u(n1)*h1
a(j1,n1)=a(j1,n1)-g1
end if
kk=kode(n2)
if(kk.eq.0.or.kk.eq.2) then
xy(j1)=xy(j1)+q(n2)*g2
a(j1,n2)=a(j1,n2)+h2
else
xy(j1)=xy(j1)-u(n2)*h2
a(j1,n2)=a(j1,n2)-g2
end if
2 continue
hh(j1,j1)=cc
kk=kode(j1)
if(kk.eq.0.or.kk.eq.2) then
a(j1,j1)=cc
else
xy(j1)=xy(j1)-u(j1)*cc
endif
1 continue
return
end
c
c
c
c
c
subroutine rhsvec
common/one/nn,ne,l,x(200),y(200),u(200),d(200),le(200),he(50)
common/two/icon(200,2),kode(200),q(200),alpha(200)
common/thr/poei(4),fdep(4)
common/drm/hh(200,51),gg(200,400)
common/q/qe(200)
dimension uh(200),qh(200)
integer icon
real le,lek
do 1 i=1,nn+1
1 d(i)=0.
do 59 k=1,2*ne
59 qh(k)=0.
do 60 k=1,ne
n1=icon(k,1)
n2=icon(k,2)
x1=x(n1)
x2=x(n2)
y1=y(n1)
y2=y(n2)
lek=le(k)
k1=2*k-1
k2=2*k
do 50 j=1,nn+1
alphaj=alpha(j)
xp=x(j)
yp=y(j)
r1=sqrt((x1-xp)**2+(y1-yp)**2)
r2=sqrt((x2-xp)**2+(y2-yp)**2)
qh1=(0.5+r1/3.)*((x1-xp)*(y1-y2)+(y1-yp)*(x2-x1))/lek
qh2=(0.5+r2/3.)*((x2-xp)*(y1-y2)+(y2-yp)*(x2-x1))/lek
qh(k1)=qh(k1)+qh1*alphaj
qh(k2)=qh(k2)+qh2*alphaj
50 continue
60 continue
do 70 i=1,nn+1
do 80 k=1,2*ne
d(i)=d(i)-gg(i,k)*qh(k)

```

```

80 continue
70 continue
do 159 k = 1,nn
159 uh(k)=0.
do 160 k = 1,nn
  xk=x(k)
  yk=y(k)
do 150 j = 1,nn+1
  alphaj=alpha(j)
  xj=x(j)
  yj=y(j)
  r=sqrt((xk-xj)**2+(yk-yj)**2)
  uh1=(r**3)/9.+(r**2)/4.
  uh(k)=uh(k)+uh1*alphaj
150 continue
160 continue
do 170 i=1,nn+1
do 180 k=1,nn
  d(i)=d(i)+hh(i,k)*uh(k)
180 continue
170 continue
do 1160 i=nn+1,nn+1
  xi=x(i)
  yi=y(i)
do 1150 j=1,nn+1
  alphaj=alpha(j)
  xp=x(j)
  yp=y(j)
  r=sqrt((xi-xp)**2+(yi-yp)**2)
  uh1=(r**3)/9.+(r**2)/4.
  d(i)=d(i)+uh1*alphaj
1150 continue
1160 continue
  return
end
c
c
c
c
c
subroutine solver
common/one/nn,ne,l,x(200),y(200),u(200),d(200),le(200)
common/two/icon(200,2),kode(200),q(200),alpha(200)
common/thr/poi(4),fdep(4)
common/five/xy(200),a(200,200),he(50)
common/q/qe(200)
integer icon
real le,lj
do 1 m=1,nn-1
  am=1.0/a(m,m)
do 21 j=m+1,nn
  cd= a(m,j)
21  a(m,j)=cd*am
do 2 n=m+1,nn
  alm= a(n,m)
do 3 kk=m+1,nn
3  a(n,kk)= a(n,kk)-a(m,kk)*alm
2  continue
1  continue
do 10 m=1,nn-1
  am=1.0/a(m,m)
  xy(m)=xy(m)*am
do 20 n=m+1,nn
  alm=a(n,m)
  xy(n)=xy(n)-xy(m)*alm
20  continue
10  continue
  xy(nn)= xy(nn)/a(nn,nn)
  ni=nn
300  ni=ni-1
  if(ni.ne.0) then
do 6 j=ni+1,nn
  xy(ni)=xy(ni)-a(ni,j)*xy(j)

```

```

6  continue
   goto 300
   end if
   return
   end
c
c
c
c
subroutine interm
common/one/nn,ne,l,x(200),y(200),u(200),d(200),le(200)
common/two/icon(200,2),kode(200),q(200),alpha(200),he(50)
common/thr/poei(4),fdep(4)
common//ni
common/drm/hh(200,200),gg(200,400)
common/q/qe(200)
integer icon
real le,lj
do 1 i=nn+1,nn+1
  u(i)=0.
  do 2 k=1,nn-1
    u(i)=u(i)+(gg(i,2*k)+gg(i,2*k+1))*q(k+1)
2  continue
  u(i)=u(i)+(gg(i,1)+gg(i,2*ne))*q(1)
  do 3 k=1,nn
    u(i)=u(i)-hh(i,k)*u(k)
3  continue
  u(i)=u(i)+d(i)
1  continue
  return
  end
c
c
c
c
subroutine output
common/one/nn,ne,l,x(200),y(200),u(200),d(200),le(200)
common/two/icon(200,2),kode(200),q(200),alpha(200),he(50)
common/thr/poei(4),fdep(4)
common//ni
common/q/qe(200)
real le
write(6,1010)
1010 format('//Boundary results:.....')
write(6,1020)
1020 format(' Node      Function      Derivative')
write(6,101)(j1,u(j1),q(j1),j1=1,nn)
101 format(1x,i4,2x,2f15.7)
write(6,1018)
1018 format('// Results at interior nodes:.....')
write(6,1028)
1028 format(' Node      Function ')
write(6,102)(j,u(j),j=nn+1,nn+1)
102 format(i5,f15.7)
write(6,500) (y(i),x(i),u(i),i=1,nn)
500 format(2x,f10.6,2x,f10.6,2x,f8.3)
write(6,501) (y(i),x(i),u(i),i=nn+1,nn+1)
501 format(2x,f10.6,2x,f10.6,2x,f8.3)
return
end

```

BEM2R.DAT

```

48 48 3
0.02 0.1
0.02 0.2
0.02 0.3
0.02 0.4
0.02 0.5
0.02 0.6
0.03 0.7
0.03 0.8
0.04 0.9
0.06 1.0
0.09 1.1
0.14 1.2
0.0 1.22
0.0 1.25
0.001 1.25
0.150 1.25
0.179 1.25
0.180 1.25
0.180 1.249
0.180 1.20
0.180 1.15
0.180 1.10
0.180 1.00
0.180 0.99
0.181 0.99
0.220 0.99
0.249 0.99
0.250 0.99
0.250 0.98
0.250 0.95
0.250 0.90
0.250 0.85
0.250 0.80
0.250 0.75
0.250 0.70
0.250 0.65
0.250 0.60
0.250 0.50
0.250 0.40
0.250 0.30
0.250 0.20
0.250 0.10
0.250 0.01
0.250 0.00
0.249 0.00
0.150 0.00
0.05 0.00
0.001 0.00
0.17 1.20
0.17 1.00
0.14 0.80
1 5.0833
1 5.1202
1 5.1571
1 5.1940
1 5.2309
1 5.2678
1 5.3047
1 5.3416
1 5.3784
1 5.4154
1 5.4523
1 5.4891
1 5.4891
1 5.4891
2 0.
2 0.
2 0.

```


ÖZGEÇMİŞ

Mahmut AYDIN 1964 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini aynı yerde bitirdi. Mehmet Beyazıt Lisesi'nde lise öğrenimini tamamladı. 1987 yılında İ.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümünde mezun oldu. 1987 yılında SİSMAT A.Ş. isimli firmada bir süre tasarım mühendisi olarak çalıştı. 1987 yılında O.D.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümün'de master eğitimine başladı. Master eğitimine devam ederken 1988-1990 yılları arasında TZDK'da satın alma Mühendisi olarak çalıştı. 1991 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Ana Bilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 1991 yılı Eylül ayında Master çalışmasını tamamlamış ve aynı yıl içerisinde İ.T.Ü. Makina Fakültesi Enerji Programında Doktora çalışmasına başlamıştır. Halen Araştırma Görevlisi olarak çalışmakta olan Mahmut AYDIN İngilizce bilmektedir.

T.C. TÜRKİYE KÜLTÜR VE TURİZM BAKANLIĞI
DOKÜMANTASYON MERKEZİ